

コンクリート専門委員会報告

REPORT OF THE TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE

F-56

各種低発熱セメントを用いたコンクリートの

海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究

材齡 10 年最終報告

A Study on Reinforcement Corrosion of Concrete

Made Using Various Low Heat Cements in Marine Environments

A Report after 10 Years

平成 22 年 3 月

(Mar. 2010)

社団法人 セメント協会

JAPAN CEMENT ASSOCIATION

要旨

各種低発熱セメント、すなわち、ポルトランドセメント系として中庸熱（MC）、低熱（LC）、比較用として普通（NC：比較用）の各ポルトランドセメント、また、混合セメント系の低発熱セメントとして上記各ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末をそれぞれ 50% 混合した NC ベースの高炉セメント（NBB）、MC ベースの高炉セメント（MBB）、LC ベースの高炉セメント（LBB）、また、NC にフライアッシュⅡ種を 30% 混合したセメント（FC）、同じく、NC にフライアッシュⅢ種を 30% 混合したセメント（FCN）、また NC に石灰石微粉末を 30% 混合したセメント（LP）、また NC に高炉スラグ微粉末およびフライアッシュⅡ種をそれぞれ 50%、25% 混合した三成分系セメント（NBF）、以上の合計 10 種類を用いたコンクリートについて、海洋構造物への適用性を検討するための長期暴露実験を 1998 年から 10 年間実施した。

コンクリートの配合条件は、目標スランプ $8 \pm 1.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5 \pm 0.5\%$ とし、ポルトランドセメント系については水セメント比 40、50、60% の 3 配合、混合セメント系については水結合材比 50% の 1 配合とし、暴露条件は、感潮条件（山形県酒田市、神奈川県横須賀市久里浜）、海浜条件（同久里浜）、屋外（東京都北区）の 4 条件とした。なお暴露前の養生期間は 28 日とし、一部の条件では 91 日とした場合も加えている。

検討項目は、コンクリートに配置した鉄筋発錆状況とコンクリートの強度特性、中性化深さ、塩化物の浸透、水和生成物や細孔構造等の鉄筋の腐食抵抗性に影響を及ぼす各種性質とした。また、鉄筋の腐食抵抗性の評価等について電気化学的な手法により検討を行った。

その結果、鉄筋の発錆は、感潮暴露の暴露条件だけに明確に認められた。セメント種類では、ポルトランドセメント系および LP に比べて混合セメント系の方が腐食抵抗性が高かった。

ポルトランドセメント系では、水セメント比が小さくなる程、また、前養生期間が長くなる程鉄筋の腐食抵抗性は向上した。なお、供試体の外観観察では、ひび割れ等の変状はほとんど認められなかった。

コンクリートの各種性状において、圧縮強度発現性は、暴露条件により傾向が異なり、感潮暴露では LP を除く混合セメント系の方が優れ、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、ポルトランドセメント系の方が優れた。LP はいずれの環境も強度発現性が劣り、石灰石微粉末による効果は得られなかった。

静弾性係数は、感潮暴露の方が気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）より大きくなった。また、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）した高炉スラグセメント系の場合、暴露開始時より静弾性係数が低下した。

中性化深さは、東京屋外部 > 久里浜海浜部 > 久里浜感潮部および酒田感潮部の順になり、感潮暴露ではほとんど中性化が認められなかった。セメント種類では、ポルトランドセメント系より混合セメント系の方が中性化深さは大きく、特に混合材の置換率が高い NBF で顕著になった。

塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、感潮部 > 久里浜海浜部の順になり、久里浜海浜部では塩化物イオンがほとんど浸透していなかった。

また、セメント種類では、ポルトランドセメント系 ≈ LP > フライアッシュセメント系 > 高炉スラグセメント系 > NBF の順になった。ただし、ポルトランドセメント系では水セメント比を小さくすることで塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなつた。

細孔量は、暴露開始時に比べ、感潮暴露では同等以下、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では同等以上となつた。すなわち、水分の供給が多い感潮暴露では細孔構造が緻密化し、気中暴露ではポーラスになつた。セメント種類では、暴露条件に関わらず、LP > ポルトランドセメント系 > LP を除く混合セメント系の順になつた。

独立行政法人 港湾空港技術研究所

審 良 善 和
(山 路 徹 2008年3月退任)
(濱 田 秀 則 2006年3月退任)
(福 手 勤 1998年10月退任)

低発熱鉄筋腐食ワーキンググループ

リーダー 三菱マテリアル株式会社

石 中 正 人

サブリーダー 太平洋セメント株式会社

三 谷 裕 二

委 員 住友大阪セメント株式会社
新日鐵高炉セメント株式会社
電気化学工業株式会社
株式会社トクヤマ
宇部興産株式会社
事務局 社団法人セメント協会

森 川 卓 子
大 塚 勇 介
上 村 豊
重 永 裕 二
桐 山 宏 和
村 田 芳 樹
島 崎 泰
泉 尾 英 文
(以上 敬称略、順不同)

目 次

1. 緒 言.....	1
2. 研究の概要.....	2
3. 実験の概要.....	5
3.1 使用材料.....	5
3.1.1 セメント.....	5
3.1.2 骨材.....	6
3.1.3 水.....	7
3.1.4 混和剤.....	7
3.1.5 鉄筋.....	7
3.2 供試体の形状および配筋.....	8
3.3 コンクリートの配合、練混ぜ、フレッシュコンクリートの性状および供試体の作製.....	8
3.4 養生および暴露条件.....	9
3.5 各暴露条件における気象・環境状況.....	12
3.6 試験手順および試料の採取位置.....	14
4. 試験方法.....	19
4.1 コンクリートに関する試験方法.....	19
4.1.1 外観観察.....	19
4.1.2 圧縮強度および静弾性係数.....	19
4.1.3 中性化深さ.....	19
4.1.4 塩化物イオン濃度.....	19
4.1.5 X線回折.....	20
4.1.6 細孔量.....	20
4.1.7 ビックアーズ硬さ.....	20
4.1.8 SEM/EDSによる元素マッピング.....	21
4.1.9 蛍光エポキシ樹脂真空含浸法によるコンクリートの表層ひび割れの可視化.....	21
4.2 鉄筋の発錆に関する試験方法.....	22
4.2.1 外観観察.....	22
4.2.2 発錆面積率.....	23
4.2.3 質量減少率.....	23
4.2.4 孔食深さ.....	24
4.2.5 自然電位および分極抵抗.....	25
5. コンクリートに関する試験結果.....	27
5.1 外観観察.....	27
5.2 圧縮強度.....	28
5.3 静弾性係数.....	33
5.4 中性化深さ.....	39
5.5 塩化物イオン濃度.....	44
5.5.1 塩化物イオン濃度の分布.....	44
5.5.2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度.....	44
5.6 X線回折.....	51

5.6.1 カルサイト	52
5.6.2 ポルトランダイト	56
5.6.3 フリーデル氏塩	60
5.7 細孔量	64
5.8 表層部劣化の評価	78
5.8.1 ビックカース硬さ	78
5.8.2 SEM/EDS による各種イオン分布	80
6. コンクリートの性状に及ぼす各種影響	83
6.1 圧縮強度	83
6.1.1 静弾性係数との関係	83
6.1.2 総細孔量との関係	84
6.1.3 水和生成物との関係	85
6.2 静弾性係数	87
6.2.1 総細孔量との関係	87
6.3 中性化深さ	88
6.3.1 圧縮強度との関係	88
6.3.2 総細孔量との関係	89
6.3.3 水和生成物との関係	90
6.4 塩化物イオン濃度	93
6.4.1 圧縮強度との関係	93
6.4.2 総細孔量との関係	94
6.4.3 水和生成物との関係	95
7. 鉄筋の発錆に関する試験結果	97
7.1 外観観察	97
7.2 電気化学的方法	98
7.3 発錆面積率	107
7.4 質量減少率	112
7.5 孔食深さ	116
8. 鉄筋の腐食の性状に及ぼす各種影響	120
8.1 発錆面積率および質量減少率と自然電位の関係	120
8.2 発錆面積率および質量減少率と分極抵抗の関係	120
8.3 発錆面積率および質量減少率と不動態グレード（分極曲線）との関係	122
8.4 腐食量および最大孔食深さと発錆面積率との関係	123
9. 鉄筋の腐食性評価	125
9.1 腐食発生限界塩化物イオン濃度	125
9.2 腐食速度	126
9.3 塩害の劣化過程の試算	129
10. 結　言	132
参考文献	136
資料編	138

要旨

各種低発熱セメント、すなわち、ポルトランドセメント系として中庸熱（MC）、低熱（LC）、比較用として普通（NC：比較用）の各ポルトランドセメント、また、混合セメント系の低発熱セメントとして上記各ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末をそれぞれ 50% 混合した NC ベースの高炉セメント（NBB）、MC ベースの高炉セメント（MBB）、LC ベースの高炉セメント（LBB）、また、NC にフライアッシュⅡ種を 30% 混合したセメント（FC）、同じく、NC にフライアッシュⅢ種を 30% 混合したセメント（FCN）、また NC に石灰石微粉末を 30% 混合したセメント（LP）、また NC に高炉スラグ微粉末およびフライアッシュⅡ種をそれぞれ 50%、25% 混合した三成分系セメント（NBF）、以上の合計 10 種類を用いたコンクリートについて、海洋構造物への適用性を検討するための長期暴露実験を 1998 年から 10 年間実施した。

コンクリートの配合条件は、目標スランプ $8 \pm 1.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5 \pm 0.5\%$ とし、ポルトランドセメント系については水セメント比 40、50、60% の 3 配合、混合セメント系については水結合材比 50% の 1 配合とし、暴露条件は、感潮条件（山形県酒田市、神奈川県横須賀市久里浜）、海浜条件（同久里浜）、屋外（東京都北区）の 4 条件とした。なお暴露前の養生期間は 28 日とし、一部の条件では 91 日とした場合も加えている。

検討項目は、コンクリートに配置した鉄筋発錆状況とコンクリートの強度特性、中性化深さ、塩化物の浸透、水和生成物や細孔構造等の鉄筋の腐食抵抗性に影響を及ぼす各種性質とした。また、鉄筋の腐食抵抗性の評価等について電気化学的な手法により検討を行った。

その結果、鉄筋の発錆は、感潮暴露の暴露条件だけに明確に認められた。セメント種類では、ポルトランドセメント系および LP に比べて混合セメント系の方が腐食抵抗性が高かった。

ポルトランドセメント系では、水セメント比が小さくなる程、また、前養生期間が長くなる程鉄筋の腐食抵抗性は向上した。なお、供試体の外観観察では、ひび割れ等の変状はほとんど認められなかった。

コンクリートの各種性状において、圧縮強度発現性は、暴露条件により傾向が異なり、感潮暴露では LP を除く混合セメント系の方が優れ、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、ポルトランドセメント系の方が優れた。LP はいずれの環境も強度発現性が劣り、石灰石微粉末による効果は得られなかった。

静弾性係数は、感潮暴露の方が気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）より大きくなった。また、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）した高炉スラグセメント系の場合、暴露開始時より静弾性係数が低下した。

中性化深さは、東京屋外部 > 久里浜海浜部 > 久里浜感潮部および酒田感潮部の順になり、感潮暴露ではほとんど中性化が認められなかった。セメント種類では、ポルトランドセメント系より混合セメント系の方が中性化深さは大きく、特に混合材の置換率が高い NBF で顕著になった。

塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、感潮部 > 久里浜海浜部の順になり、久里浜海浜部では塩化物イオンがほとんど浸透していなかった。

また、セメント種類では、ポルトランドセメント系 ≈ LP > フライアッシュセメント系 > 高炉スラグセメント系 > NBF の順になった。ただし、ポルトランドセメント系では水セメント比を小さくすることで塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなつた。

細孔量は、暴露開始時に比べ、感潮暴露では同等以下、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では同等以上となつた。すなわち、水分の供給が多い感潮暴露では細孔構造が緻密化し、気中暴露ではポーラスになつた。セメント種類では、暴露条件に関わらず、LP > ポルトランドセメント系 > LP を除く混合セメント系の順になつた。

粉末 X 線回折において、フリーデル氏塩は感潮部で生成が認められ、LP を除く混合セメント系よりポルトランドセメント系および LP の方が相対強度が高かった。また、フリーデル氏塩は、LP を除く混合セメント系では深さ 5~15mm の部分だけ、ポルトランドセメント系では深さ 5~15mm の部分および深さ 50mm 以上の部分で生成が認められた。これは、塩化物イオンの濃度分布と傾向が一致した。ポルトランドセメント系におけるフリーデル氏塩の相対強度は、NC>MC>LC の順になり、C₃A が多いセメントほど高くなった。

前養生期間を 28 日から 91 日に長くした場合、LC またはフライアッシュセメント系の感潮暴露での圧縮強度発現性、および高炉スラグセメント系やフライアッシュセメント系の中性化に対する抵抗性が向上した。

各種性状の関係については、全てのセメントにおいて、圧縮強度と中性化深さや総細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数に相関関係が認められた。またポルトランドセメント系では、中性化深さと総細孔量や圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数にも相関関係が認められた。さらにポルトランドセメント系では感潮部のみに圧縮強度と総細孔量にも相関関係が認められた。

電気化学的方法において、材齢 10 年における自然電位の測定結果から、ASTM 法により求めた腐食判定と実際の鉄筋の腐食状況は概ね一致した。しかし、自然電位は、夏期に卑化し、冬期に貴化する傾向が認められることから、これを考慮した測定手法の確立や他の非破壊検査方法との併用等により実用可能と判断される。

分極抵抗法では、分極抵抗から求めた鉄筋の腐食速度と実際の鉄筋の腐食状況には明確な傾向が認められなかった。ただし、定期的に測定した分極抵抗から推定した腐食量は、実際の鉄筋の腐食量よりも大きくなる傾向にあるが、両者には相関関係が認められた。このため、1 回の試験ではなく、定期的にモニタリングすることで分極抵抗は実用可能と判断される。

コンクリート抵抗は、NBF>フライアッシュセメント系>高炉スラグセメント系>ポルトランドセメント系=LP の順になった。一般的に、コンクリート抵抗が大きいほど、腐食反応は生じにくいため、これらの傾向は鉄筋の腐食抵抗性と一致する。

以上の結果、感潮暴露では、鉄筋の腐食抵抗性は、高炉スラグセメント系、フライアッシュセメント系および NBF が優れていた。この理由として、これらのセメントを使用したコンクリートは、圧縮強度発現性に優れ、硬化体組織が緻密であるため、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が小さいことやコンクリート抵抗が大きいことなどが影響していると考えられる。

なお、ポルトランドセメント系では、水セメント比を小さくし、細孔構造を緻密にすることで鉄筋の腐食抵抗性が改善すると判断される。

一方、気中暴露では、ポルトランドセメント系は混合セメント系に比べ、圧縮強度発現性や中性化に対する抵抗性が大きくなることが明らかとなった。

また、電気化学的手法である自然電位および分極抵抗法は、鉄筋の腐食診断に適用可能と判断された。

本研究で得られた成果については、海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物への各種低発熱セメントや混合材の適用性を検討する際の有用な資料として活用できるものと考える。

序

本研究は、社団法人 セメント協会と独立行政法人 港湾空港技術研究所との共同研究として 1998 年度に開始したもので、各種の低発熱セメントを使用した鉄筋コンクリートの海洋構造物への適用性を検討したものである。

ここに、最終材齢である材齢 10 年の試験結果が判明したので報告する。

2010 年 3 月

社団法人 セメント協会 コンクリート専門委員会

委員長	三菱マテリアル株式会社	中山 英明	
	太平洋セメント株式会社	(横山 良	2009 年 9 月交替)
	"	(楠木 隆	2008 年 6 月交替)
	宇部興産株式会社	(松永 篤	2001 年 5 月交替)
	太平洋セメント株式会社	(小野 義徳	1999 年 4 月交替)
委 員	住友大阪セメント株式会社	草野 昌夫	
		(岡本 英明	2005 年 11 月交替)
		(小林 哲夫	2004 年 10 月交替)
		(長岡 誠一	2001 年 5 月交替)
	新日鐵高炉セメント株式会社	植木 康知	
		(伊代田 岳史	2009 年 3 月交替)
		(兼安 真司	2007 年 9 月交替)
		(堀 健治	2003 年 8 月交替)
		(前田 悅孝	2002 年 8 月交替)
		(檀 康弘	1999 年 2 月交替)
	電気化学工業株式会社	川原 正秀	
		(玉木 俊之	2003 年 4 月交替)
	株式会社トクヤマ	加藤 弘義	
		(土井 宏行	2008 年 3 月交替)
		(牛山 宏隆	1998 年 7 月交替)
	宇部興産株式会社	大和 功一郎	
		(大西 利勝	2008 年 4 月交替)
	三菱マテリアル株式会社	(高尾 昇	2006 年 4 月交替)
		(鳴瀬 浩康	2000 年 4 月交替)
	太平洋セメント株式会社	石川 雄康	
		(城国省二	2001 年 3 月交替)
事務局	社団法人セメント協会	村田 芳樹	
		島崎 泰	
		泉尾 英文	
		(野田 潤一	2006 年 4 月交替)
		(佐々木 健一	2004 年 3 月交替)
		(富田 嘉雄	2003 年 4 月交替)
		(宇賀神 尊信	2000 年 4 月交替)
		(岩下直義	2000 年 4 月交替)

(以上 敬称略、順不同)

独立行政法人 港湾空港技術研究所

審 良 善 和
(山 路 徹 2008年3月退任)
(濱 田 秀 則 2006年3月退任)
(福 手 勤 1998年10月退任)

低発熱鉄筋腐食ワーキンググループ

リーダー 三菱マテリアル株式会社

石 中 正 人

サブリーダー 太平洋セメント株式会社

三 谷 裕 二

委 員 住友大阪セメント株式会社
新日鐵高炉セメント株式会社
電気化学工業株式会社
株式会社トクヤマ
宇部興産株式会社
事務局 社団法人セメント協会

森 川 卓 子
大 塚 勇 介
上 村 豊
重 永 裕 二
桐 山 宏 和
村 田 芳 樹
島 崎 泰
泉 尾 英 文
(以上 敬称略、順不同)

1. 緒言

近年、LNG 地下タンクや長大橋など、コンクリートを使用した多種多様な大型構造物が建設されている。こうした大型構造物は、マスコンクリートとなり、セメントの水和熱による温度ひびわれの発生が懸念されるため、その抑制対策の一つとして、水和熱を低減した各種低発熱セメントが使用されている。

低発熱セメントは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混合材をポルトランドセメントの一部に置換した二成分または多成分の低発熱型の混合セメントと低エーライト、高ビーライトおよび低間隙相のクリンカー化合物から構成される低発熱型のポルトランドセメントの2種類に大別される。

前者の混合セメントは、ダムや橋梁等の土木分野の構造物に広く使用されている。例えば、本州四国連絡橋の下部工や LNG 地下タンクの側壁や底板などに、高炉スラグとフライアッシュを混合し、温度上昇量を大幅に低減した三成分系セメントが使用されている。

一方、後者の低発熱型のポルトランドセメントは、発熱特性だけでなく、流動性や強度発現性にも優れるため、土木分野全般のほか建築分野にも適用され、その使用実績が増加している。しかし、昨今、地球規模で環境負荷低減が求められており、今後、産業副産物を使用した低発熱型の混合系セメントに対する需要は増加することが予想される。

他方、社会的にコンクリートの耐久性に関する意識が高まる中、土木学会コンクリート標準示方書では、仕様型規定から性能照査型規定へと移行された。これにより、コンクリートの耐久性についても、供用期間中に所定の性能を満足するかどうかを照査することが規準化された。耐久性の照査において、使用するコンクリートの耐久性に関するデータが必要となるが、低発熱セメントを使用したコンクリートについては十分整備されていない。

そこで、本研究は、各種低発熱セメントを用いたコンクリートの鉄筋腐食に対する抵抗性を把握することを目的として、各種低発熱セメントを用いたコンクリートを海洋環境下に暴露し、材齢5年および10年において、各種実験・検討を行った。

実験は、コンクリートの中性化や塩化物イオンの浸透など、鉄筋腐食に直接影響を及ぼす要因の検討だけではなく、水和生成物および細孔構造の変化やコンクリートの表面性状等についての調査も実施した。また、鉄筋腐食に関しては電気化学的手法による検討も実施した。これらの成果をここに報告する。

なお、これらの取組みは 1998 年度から社団法人 セメント協会と独立行政法人 港湾空港技術研究所との共同研究として開始したものである。

2. 研究の概要

本研究は各種低発熱セメントを用いたコンクリートを海洋環境下に10年間暴露し、セメントの種類がコンクリートの諸物性やコンクリート中の鉄筋の発錆に及ぼす影響を把握すること目的とした。すなわち、試験条件として暴露地、暴露条件、セメントの種類、暴露前養生期間、コンクリートの水セメント比等を取り上げ、これらの要因がコンクリートの圧縮強度、中性化、塩化物イオン濃度、鉄筋の発錆（発錆面積率、質量減少率、孔食深さ）等に及ぼす影響について検討したものである。試験条件を以下に示す。

[試験条件]

- (1) 暴露条件… 4種類：暴露条件を表-2.1、暴露位置のマップを図-2.1に示す。
- (2) セメントの種類… 10種類：セメントの種類を表-2.2に示す。
- (3) 暴露前養生期間… 2種類：湿布養生28日、湿布養生91日
(温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 80%以上の室内)
- (4) 水セメント比… 3種類：40%、50%、60%（ポルトランドセメントのみ）

表-2.1 暴露条件

暴露条件	所在地	供試体の設置場所
酒田感潮	山形県酒田市大字宮海 酒田北港	港内海中設置の架台上
久里浜感潮	神奈川県横須賀市長瀬3-1-1	海水循環水槽内(干満差 1.5m)
久里浜海滨	独立行政法人 港湾空港技術研究所	上記水槽横(海岸線からの距離 約 10m)
東京屋外	東京都北区豊島4-17-33 社団法人 セメント協会 研究所	研究所建屋屋上



図-2.1 暴露位置のマップ

表-2.2 セメントの種類

系	記号	セメントの種類	ベースセメントと混合材の質量割合
ポルトランドセメント	NC	普通ポルトランドセメント	—
	MC	中庸熱ポルトランドセメント	—
	LC	低熱ポルトランドセメント	—
混合セメント	二成分	NBB 高炉スラグ微粉末混合セメント (NCベース)	普通ポルトランドセメント 50% 高炉スラグ微粉末 50%
		MBB 高炉スラグ微粉末混合セメント (MCベース)	中庸熱ポルトランドセメント 50% 高炉スラグ微粉末 50%
		LBB 高炉スラグ微粉末混合セメント (LCベース)	低熱ポルトランドセメント 50% 高炉スラグ微粉末 50%
		FC フライアッシュII種混合セメント (NCベース)	普通ポルトランドセメント 70% フライアッシュII種 30%
		FCN フライアッシュIII種混合セメント (NCベース)	普通ポルトランドセメント 70% フライアッシュIII種 30%
		LP 石灰石微粉末混合セメント (NCベース)	普通ポルトランドセメント 70% 石灰石微粉末 30%
	三成分	NBF フライアッシュ混合高炉セメント (NCベース)	普通ポルトランドセメント 25% フライアッシュII種 25% 高炉スラグ微粉末 50%

本研究において実施した試験項目をコンクリートに関する試験、鉄筋の発錆に関する試験に大別し、整理したものを見ると表-2.3 に示す。

表-2.3 試験項目

区分	試験項目	暴露材齢			
		暴露開始 ～約3年	約2年 ～約3年	5年	10年
コンクリートに関する試験	目視による外観観察			○	○
	強度特性 ^{※1}	圧縮強度		○	○
		静弾性係数		○	○
	中性化深さ			○	○
	塩化物	塩化物イオン浸透深さ		○	○
		塩化物イオン濃度		○	○
		不溶残分 ^{※2}			○
	X線回折			○	○
	細孔量			○	○
	ピッカーズ硬さ ^{※3}				○
	SEM/EDSによる元素マッピング ^{※3}				○
	表層ひび割れの可視化 ^{※3}				○
鉄筋の発錆に関する試験	目視による外観観察			○	○
	発錆量	発錆面積率		○	○
		質量減少率		○	○
	孔食深さ			○	○
	電気化学的方法 ^{※3}	自然電位	○	○	○
		コンクリート抵抗		○	○
		分極抵抗		○	○

※1 比較用に標準養生した供試体の圧縮強度および静弾性係数を材齢28日、91日、1年、5年および10年で測定した。

※2 塩化物イオン濃度の試験結果に対する骨材量の補正を行うために実施した。

※3 久里浜感潮部に暴露した供試体のみで実施した。

試験項目と試験条件を表-2.4 に示す。本研究は、水結合材比 50%、前養生期間 28 日を基本条件とした。水セメント比の影響を調べるために前養生期間 28 日においてポルトランドセメント系 (NC、MC、LC) では水セメント比 40%、60% の条件を加えた。また、前養生期間の影響を調べるために久里浜感潮部と東京屋外部の暴露条件で、ポルトランドセメント系 2 種 (NC、LC)、混合セメント系 4 種 (NBB、LBB、FC、NBF) に限り前養生期間 91 日を加えた。前養生期間 28 日の水結合材比 50% かつ久里浜感潮部の暴露条件では電気化学的方法による試験を行い、さらに、材齢 10 年ではビッカーズ硬さと SEM/EDS による元素マッピングの試験を行った。

なお、以降、図表中では、適宜図-2.2 に示す、セメント種類－水結合材比－前養生期間を表した記号で試験条件を略記する。

表-2.4 試験項目と試験条件

試験項目	試験条件				
	供試体寸法	セメントの種類	水結合材比	前養生	暴露条件
①強度特性 ・圧縮強度 ・静弾性係数	$\phi 10 \times 20\text{cm}$ (3 本)	NC,MC,LC	40,50,60%	28 日	酒田感潮 久里浜感潮 久里浜海浜 東京屋外
		NBB,MBB,LBB FC,FCN,LP,NBF	50%		
②目視による外観観察 ③中性化深さ ④塩化物量 ⑤X 線回折 ⑥細孔量 ⑦目視による外観観察 ⑧鉄筋の発錆量 ・発錆面積 ・質量減少率 ⑨孔食深さ	$\phi 15 \times 30\text{cm}$ (2 本)	NC,LC NBB,LBB FC,NBF	50%	91 日	久里浜感潮 東京屋外
⑩ビッカーズ硬さ ⑪SEM/EDS による元素 マッピング ⑫表層ひび割れの 可視化 ⑬電気化学的方法 ・自然電位 ・コンクリート抵抗 ・分極抵抗	$\phi 15 \times 30\text{cm}$ (2 本)	NC,MC,LC NBB,MBB,LBB FC,FCN,LP,NBF	50%	28 日	久里浜感潮

Ⓐ：コンクリートに関する試験、Ⓑ：鉄筋の発錆に関する試験



図-2.2 試験条件を表す記号

3. 実験の概要

3.1 使用材料

3.1.1 セメント

セメントは、前述の表-2.2に示す通り、ポルトランドセメント系としては、市販のNC、MC、LCを使用した。二成分系としては、ベースのポルトランドセメント（NC、MC、LC）に高炉スラグ微粉末(記号BFS)を内割で50%混合したもの、NCにフライアッシュⅡ種（記号FAⅡ）およびⅢ種相当品（成形時点では非JIS灰、記号FAⅢ）または石灰石微粉末（記号LS）を内割で30%混合したものを使用した。三成分系セメントとしては、ベースのNCに高炉スラグ微粉末(記号BFS)を内割で50%、フライアッシュⅡ種相当品(記号FAⅡ)を内割で25%混合したものを使用した。

ポルトランドセメントの化学成分を表-3.1.1.1、MCとLCの鉱物組成を表-3.1.1.2、ポルトランドセメントの物理的性質を表-3.1.1.3に示す。混合材の化学成分を表-3.1.1.4、混合材の物理的性質を表-3.1.1.5に示す。

表-3.1.1.1 ポルトランドセメントの化学成分

セメントの種類	化学成分 (%)											
	ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Na ₂ Oeq*
NC	2.0	0.1	20.8	5.0	2.8	65.1	1.1	2.0	0.30	0.45	0.004	0.60
MC	0.6	0.1	23.4	3.9	4.2	63.5	1.4	1.9	0.20	0.48	0.004	0.52
LC	0.7	0.1	26.6	2.6	2.5	63.8	0.6	2.2	0.13	0.39	0.003	0.39

*Na₂Oeq=Na₂O+0.658×K₂O

表-3.1.1.2 セメントの鉱物組成

セメントの種類	鉱物組成 (%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
MC	43	34	3	13
LC	30	54	3	8

表-3.1.1.3 ポルトランドセメントの物理的性質

セメントの種類	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	凝結			安定性	圧縮強さ(N/mm ²)				水和熱(J/g)	
			水量(%)	始発(h-m)	終結(h-m)		3日	7日	28日	91日	7日	28日
NC	3.16	3400	27.9	2-25	3-35	良	29.4	45.0	61.6	—	—	—
MC	3.22	3430	27.6	3-17	4-27	良	21.7	32.0	53.7	—	281	329
LC	3.22	3500	28.2	2-20	3-50	良	16.0	23.8	50.4	77.7	218	274

表-3.1.1.4 混合材の化学成分

混合材の種類	化学成分 (%)												
	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Na ₂ Oeq*	S	湿分
BFS	1.7	32.6	13.6	0.3	41.9	6.4	2.0	0.24	0.39	0.003	0.50	0.8	—
FAⅡ	1.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
FAⅢ	5.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LS	—	0.19	—	—	55.5	0.32	—	—	—	—	—	—	0.05

*Na₂Oeq=Na₂O+0.658×K₂O

表-3.1.1.5 混合材の物理的性質

混合材の種類	塩基度	メチレンブルー吸着量(mg/g)	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)
BFS	1.85	—	2.89	4170
FA II	—	0.40	2.39	3930
FA III	—	—	2.13	—
LS	—	—	2.70	—

3.1.2 骨材

骨材の粒度を表-3.1.2.1、粗骨材の粒度曲線を図-3.1.2.1、細骨材の粒度曲線を図-3.1.2.2 および骨材の物理的性質を表-3.1.2.2 に示す。

表-3.1.2.1 骨材の粒度

骨材の種類	ふるいを通過するものの質量百分率(%)								粗粒率
	ふるい目(mm)	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
粗骨材（碎石） 東京都青梅市産	100	44	1	—	—	—	—	—	6.55
細骨材（陸砂） 静岡県菊川市産	—	—	100	89	58	36	21	8	2.88

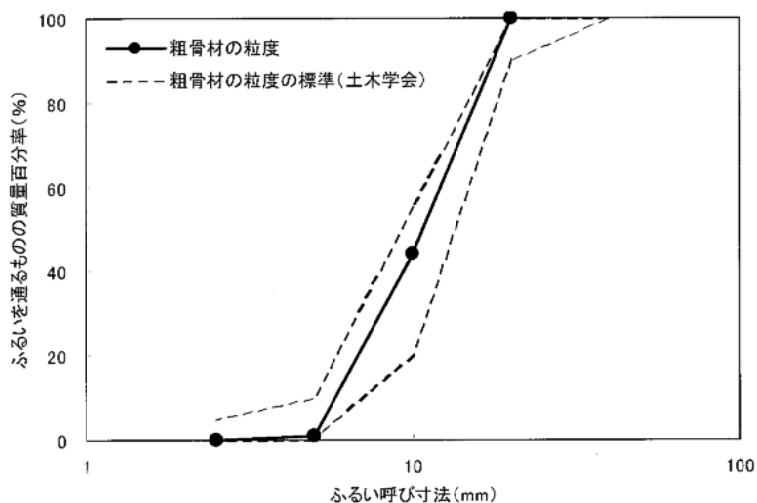


図-3.1.2.1 粗骨材の粒度曲線

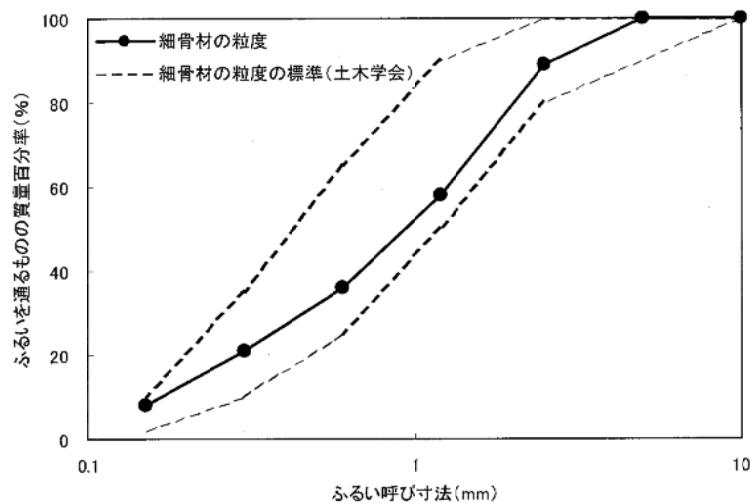


図-3.1.2.2 細骨材の粒度曲線

表-3.1.2.2 骨材の物理的性質

骨材の種類		表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積 質量 (kg/l)	実積率 (%)	微粒分量 (%)	粘土塊 (%)
粗骨材	碎石	2.65	2.64	0.47	1.57	59.7	0.1	0.0
細骨材	陸砂	2.60	2.56	1.74	1.73	67.6	1.0	0.0

骨材の種類		安定性試験 損失質量(%)	密度 1.95 の 液体に浮く もの(%)	すりへり 減量(%)	有機不純物	塩化物 含有量 (%)	軟石量 (%)	破碎値 (%)
粗骨材	碎石	3.0	0.0	12.5	—	—	0.0	9.5
細骨材	陸砂	2.1	0.0	—	淡い	0.000	—	—

3.1.3 水

コンクリートの練混ぜ水は水道水を使用した。

3.1.4 混和剤

混和剤は、AE 減水剤標準形（BASF ポゾリス社製、ポゾリス No.70）および AE 剤（同社製、マイクロエア 303A）を使用した。

3.1.5 鉄筋

鉄筋は、φ9mm の黒皮付き丸鋼(SR235)を使用した。鉄筋の機械的性質を表-3.1.5.1 に示す。

表-3.1.5.1 鉄筋の機械的性質

直徑 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	曲げ
9	341	476	34.1	良

3.2 供試体の形状および配筋

発鉄試験用供試体は、図-3.2.1 に示すように、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の円柱供試体とし、鉄筋をかぶり 5cm および 7cm の 2箇所に配置した。なお、鉄筋は成形前の発鉄を防ぐために防鉄油中に保存し、成形直前に鉄筋表面の油類や汚れ等を取除くため、アセトンを用いて処理した。

また、久里浜感潮部暴露用の供試体の中で、水結合材比 50%、前養生期間 28 日の 10 年材齢用供試体の一部については、供試体中に埋め込んだ鉄筋の自然電位および分極抵抗を計測するためのリード線を各々の鉄筋に接続した。

圧縮強度および静弾性係数試験用供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体とした。なお、本試験以外のコンクリートに関する試験は全て上記の発鉄試験用供試体より試料を採取して実施した。

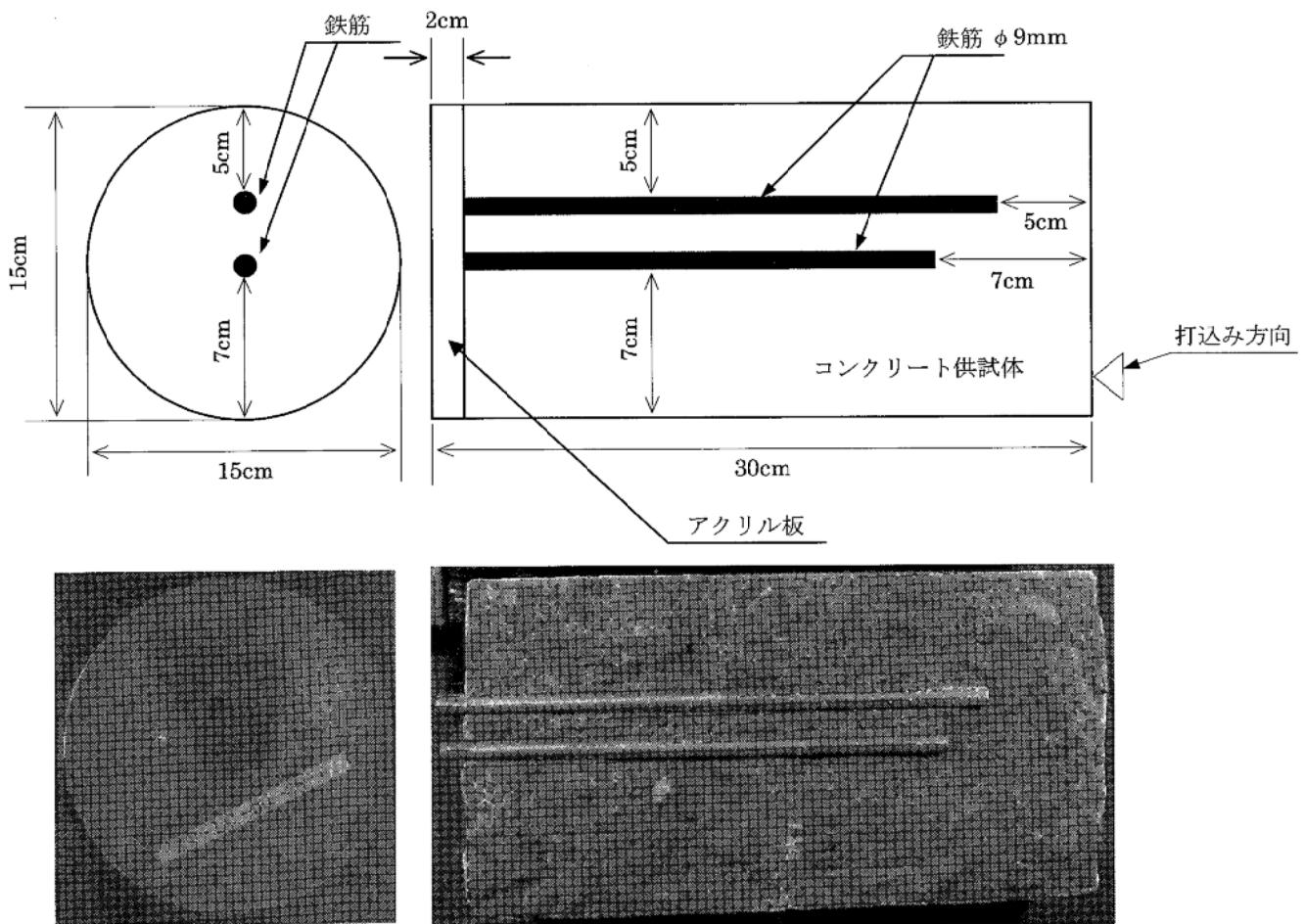


図-3.2.1 鉄筋の配筋状態

3.3 コンクリートの配合、練混ぜ、フレッシュコンクリートの性状および供試体の作製

コンクリートの配合条件は、ポルトランドセメント系で水セメント比 40%、50%、60%とし、混合セメント系で水結合材比を 50% とした。いずれのセメントも目標スランプを $8 \pm 1.5\text{cm}$ 、目標空気量を $4.5 \pm 0.5\%$ とした。コンクリートの練混ぜは、容量 100 リットルの強制練りパン型ミキサを用いた。

コンクリートの示方配合およびフレッシュコンクリートの性状を表-3.3.1 に示す。

水結合材比 50% での目標スランプを得るための単位水量は、FCN (162kg/m^3) > NC、NBB (160kg/m^3) > LP (158kg/m^3) > MC、LC、MBB、LBB (155kg/m^3) > FC、NBF (150kg/m^3) となり、セメントの種類によって単位水量が異なった。

供試体の作製は、JIS A 1138「試験室におけるコンクリートの作り方」に準じて行った。なお、前述の表-2.4 のとおり発鏡試験用の供試体は、1材齢につき2本を1組とし、圧縮強度用の供試体は1材齢につき3本を1組とした。

表-3.3.1 コンクリートの示方配合およびフレッシュコンクリートの性状

セメント の種類	水結合 材比 (%)	細骨材 率(%)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (ml/m ³)	AE 剤 (ml/m ³)	練上り 温度 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材					
NC	40	41	163	408	707	1036	1020	27	23.8	6.5	4.0
	50	43	160	320	776	1048	800	14	23.0	7.5	4.3
	60	45	160	267	831	1036	668	11	23.0	6.5	4.4
MC	40	41	160	400	715	1049	1000	24	22.8	8.0	4.8
	50	43	155	310	787	1063	775	19	21.9	7.0	4.5
	60	45	155	258	842	1049	645	15	22.0	6.5	4.5
LC	40	41	160	400	715	1049	1000	24	23.0	8.5	4.5
	50	43	155	310	787	1063	775	25	23.0	8.0	5.0
	60	45	155	258	842	1049	645	15	22.2	6.5	4.1
NBB	50	43	160	320	770	1040	800	22	23.0	8.5	4.8
MBB	50	43	155	310	781	1055	775	25	22.5	7.5	4.8
LBB	50	43	155	310	781	1055	775	31	23.0	8.5	4.9
FC	50	43	150	300	783	1058	750	54	22.5	9.5	5.0
FCN	50	43	162	324	755	1020	810	107	23.0	6.5	4.4
LP	50	43	158	316	773	1045	790	28	23.0	7.5	4.6
NBF	50	43	150	300	780	1054	750	60	23.0	6.5	4.3

3.4 養生および暴露条件

暴露用に作製した発鏡試験用および圧縮強度および静弾性係数試験用供試体は、成形翌日に脱型を行い、直ちに温度 20±3°C、湿度 80%以上の室内において湿布養生を行った。養生期間は 28 日および 91 日の 2 種類とし、養生終了後 1 週間以内に各暴露条件に暴露した。なお、養生が終了してから暴露までの数日間は、供試体を温度 20°C、湿度 80%以上の室内で気中養生を行った。また、前述の表-2.3※1 の比較用の供試体は、成形翌日に脱型を行い、所定の材齢まで標準養生を行った。

暴露条件は、前述の表-2.1 に示すように山形県酒田市の酒田北港に沈めた架台上の感潮部（干満部）を酒田感潮、神奈川県横須賀市の独立行政法人 港湾空港技術研究所構内に設置された海水循環水槽の感潮部（干満部）を久里浜感潮、海岸線から約 10m 離れた海水循環水槽の隣接地を久里浜海浜、東京都北区セメント協会 研究所の建屋屋上を東京屋外として、合計 4 種類の条件で実施した。各暴露条件の暴露場所および供試体設置状況を写真-3.4.1～写真-3.4.8 に示す。

なお、久里浜感潮に暴露した供試体は、図-3.4.1 に示すように L.W.L+0.75m（供試体中央部）の位置に 1 日に 2 回の頻度で人工的に干満を再現した水槽に暴露させた。従って、海水浸漬 6 時間と乾燥 6 時間の乾湿を繰返す環境である。また、酒田感潮に暴露した供試体は、写真-3.4.1 および写真-3.4.2 からわかるように、潮の干満を直接に受ける環境下であるため、季節や天候等の条件で海水浸漬と乾燥の時間が異なるが、乾湿を繰返す環境である。

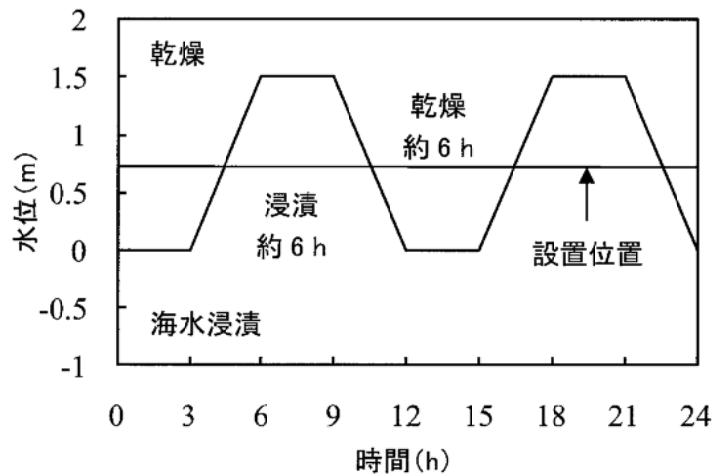


図-3.4.1 海水循環水槽の1日の乾湿サイクル（久里浜感潮）

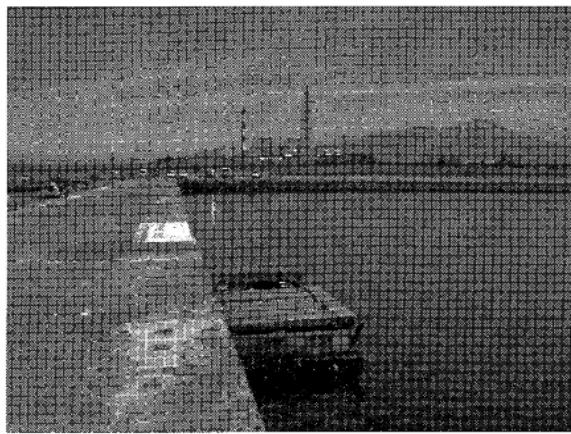


写真-3.4.1 酒田感潮の暴露場所状況

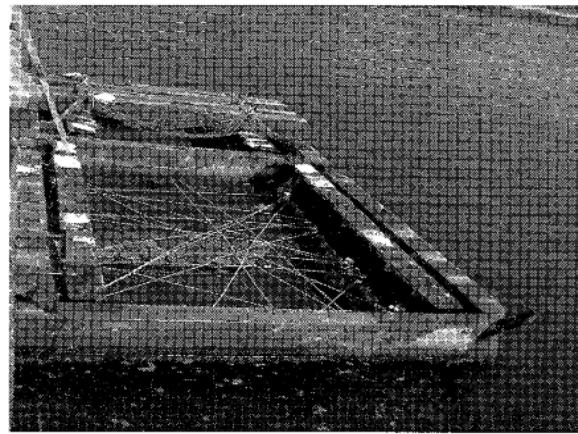


写真-3.4.2 酒田感潮の暴露供試体設置状況

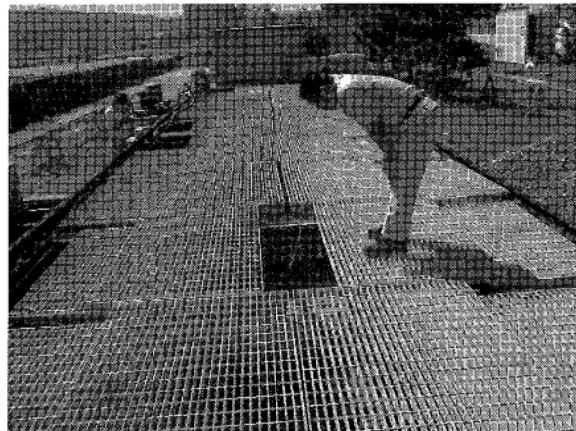


写真-3.4.3 久里浜感潮の暴露場所状況

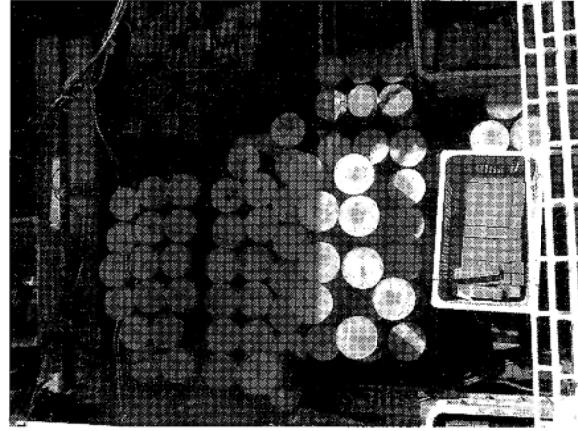


写真-3.4.4 久里浜感潮の暴露供試体設置状況

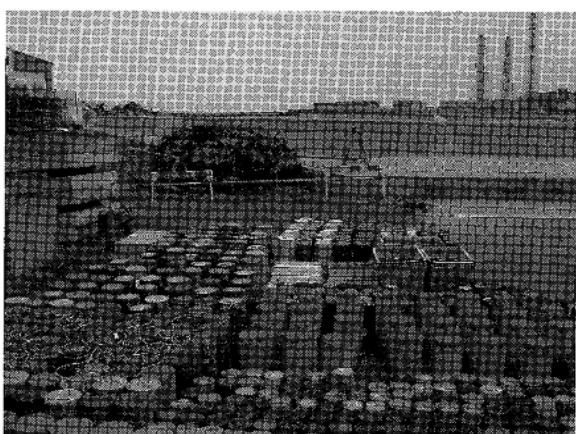


写真-3.4.5 久里浜海浜の暴露場所状況



写真-3.4.6 久里浜海浜の暴露供試体設置状況

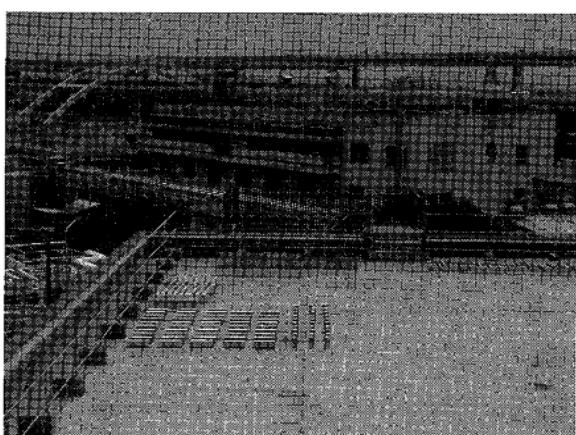


写真-3.4.7 東京屋外の暴露場所状況

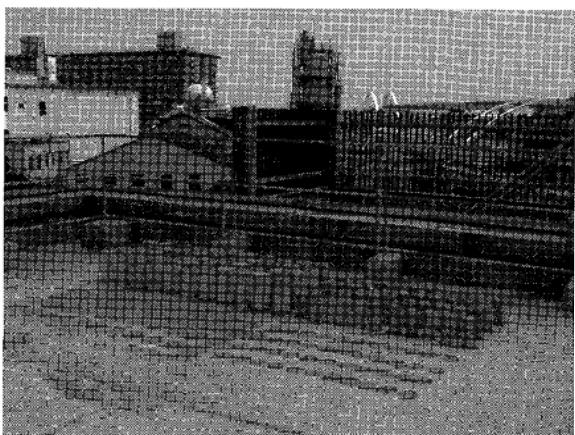


写真-3.4.8 東京屋外の暴露供試体設置状況

3.5 各暴露条件における気象・環境状況

暴露地の環境は、コンクリートの長期的な性状に影響を大きく及ぼすため、暴露した各地の環境条件を調査した。調査項目、方法および調査対象暴露地を表-3.5.1に示す。

調査項目は、気温、湿度および降水量、また、一部の暴露地で海水の温度・塩化物濃度および飛来塩化物量とした。

表-3.5.1 調査項目、方法および調査対象暴露地

調査項目	方法	暴露地		
		酒田	久里浜	東京
気温	気象庁気象統計情報	○	○	○
湿度・降水量	気象庁気象統計情報	○	○	○
海水の温度	港湾空港技術研究所調査	—	○	—
海水の溶存酸素濃度	港湾空港技術研究所調査（溶存酸素測定電極）	—	○	—
海水の塩化物濃度	港湾空港技術研究所調査（塩化物測定電極）	—	○	—
飛来塩化物	港湾空港技術研究所調査（ガーゼ法）	—	○	—

○：調査実施

(1) 気温

暴露期間中の年平均気温を図-3.5.1、月平均気温を図-3.5.2に示す。

暴露期間中の年平均気温は大きな変動がなく推移した。月平均気温は久里浜と東京が同等で約16°C、酒田がそれより3°C程度低く約13°Cであった。

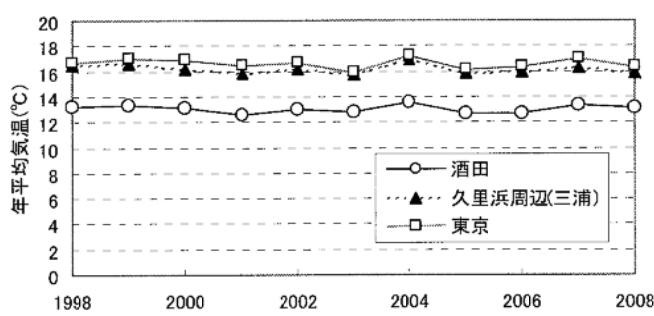


図-3.5.1 暴露期間中の年平均気温

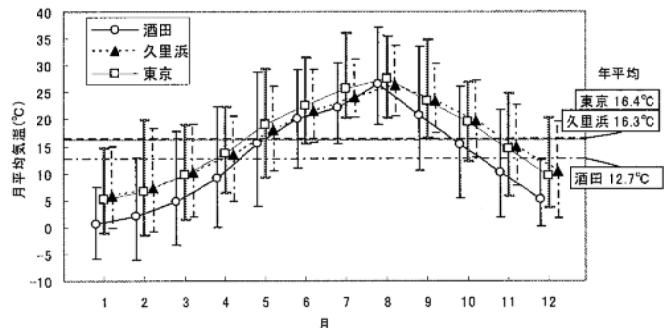


図-3.5.2 暴露期間中の月平均気温

(2) 湿度と降水量

暴露期間中の月平均および最小の相対湿度を図-3.5.3、月平均降水量を図-3.5.4に示す。

月平均の相対湿度は久里浜が平均 79.4%に対して東京が平均 60.4%と低かった。月平均降水量は久里浜が平均 141mm に対して東京が 145mm と同等であった。これらより、久里浜に比べて東京の方が比較的乾燥し易い環境であることがわかる。

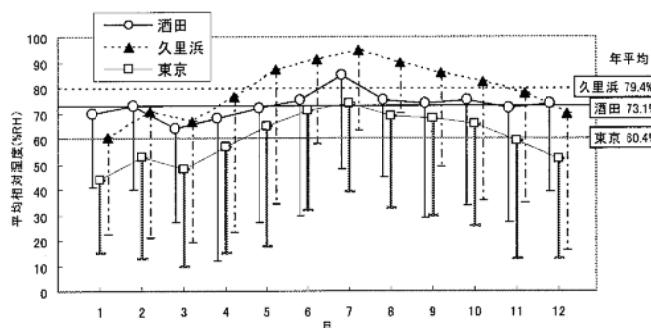


図-3.5.3 暴露期間中の月平均および月最小の相対湿度

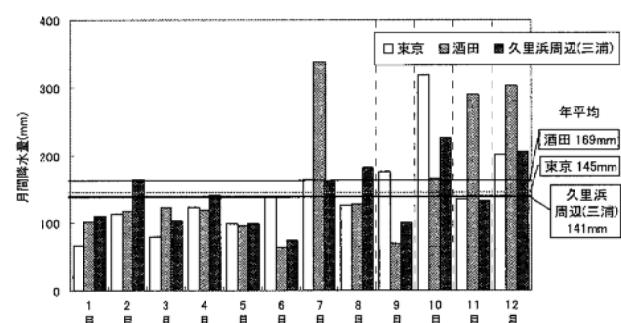


図-3.5.4 暜露期間中の月平均降水量

(3) 久里浜における海水の温度、塩化物濃度、飛来塩化物量

久里浜における暴露期間中の海水温と気温および温度と海水中の溶存酸素濃度を図-3.5.5、海水の塩化物イオン量を図-3.5.6、飛来塩分量を図-3.5.7に示す。

夏季において海水温は気温より低く、冬季は気温よりも高い傾向にあり、海水温の方が温度の変動が少ない。よって気中環境の方が温度変化の影響を受けやすいと推測される。

また、日最小と日最大の範囲は、気温に比べて小さく、気中環境下か水中環境下に暴露されているかで温度環境が若干異なる。

海水の塩化物イオン量は約1.4%から約1.8%の間で推移し、年平均で1.67%であった。久里浜海浜部への飛来塩分量は、年平均で、 $0.167\text{mgNaCl/d/100cm}^2$ であった。

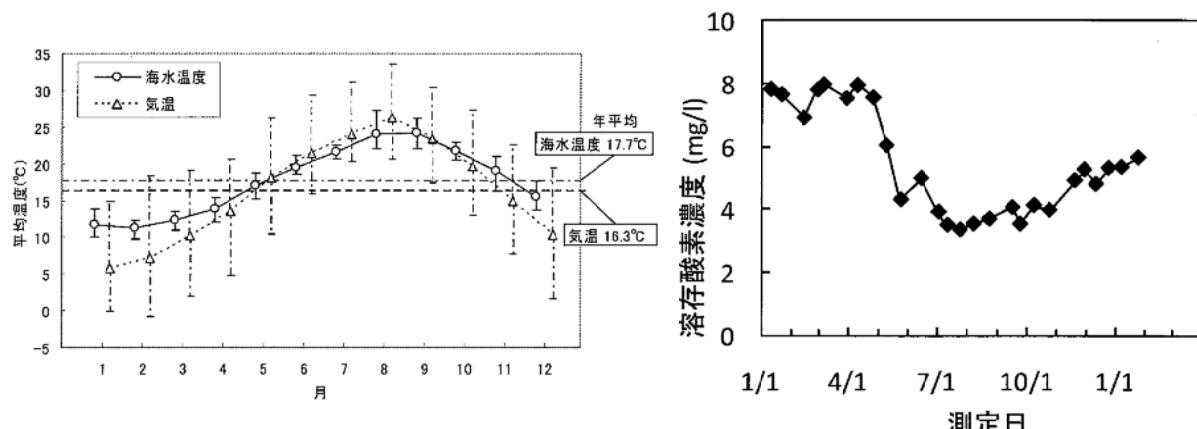


図-3.5.5 暴露期間中の海水温と気温および温度と海水中の溶存酸素濃度（久里浜）

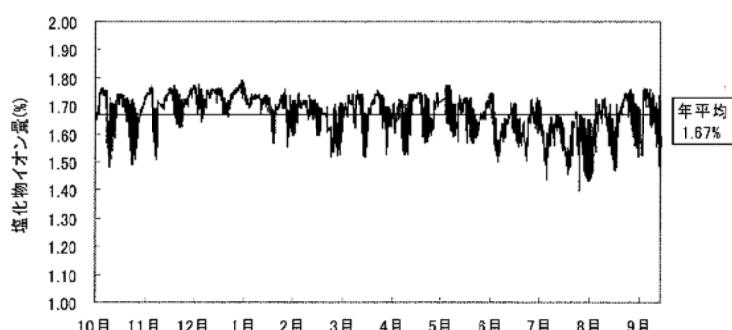


図-3.5.6 海水の塩化物イオン量（久里浜）

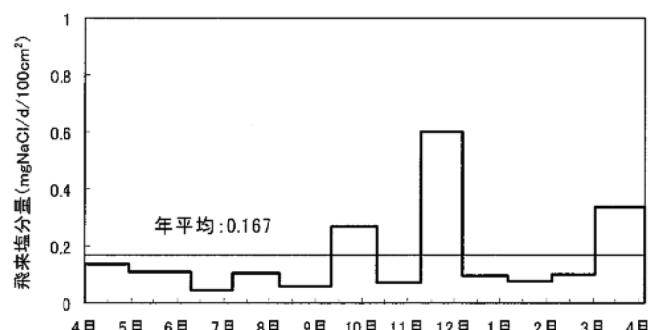


図-3.5.7 暴露期間中の飛来塩化物量（久里浜）

3.6 試験手順および試料の採取位置

材齢 5 年および 10 年に暴露地から引き上げた供試体は、写真-3.6.1 のように試験当日まで密閉状態で保存し、発錆試験用供試体 ($\phi 15 \times 30\text{cm}$) については図-3.6.1 に示す手順で実施した。

発錆試験用供試体 ($\phi 15 \times 30\text{cm}$) は、鉄筋が露出する方向に割裂し、写真-3.6.2 のようにすぐに鉄筋をはり出し、鉄筋については発錆に関する各種試験、コンクリートについては中性化深さ、塩化物イオン濃度、X線回折、細孔量等の各種試験もしくは試料の採取を行った。ただし、一部（久里浜感潮部の水結合材比 50% の発錆試験用）の供試体については、鉄筋固定用エポキシ樹脂製端板を取り除き、鉄筋の端部を露出させて自然電位の測定を材齢 2~3 年まで継続的に、また、材齢 5 年および 10 年に行った。

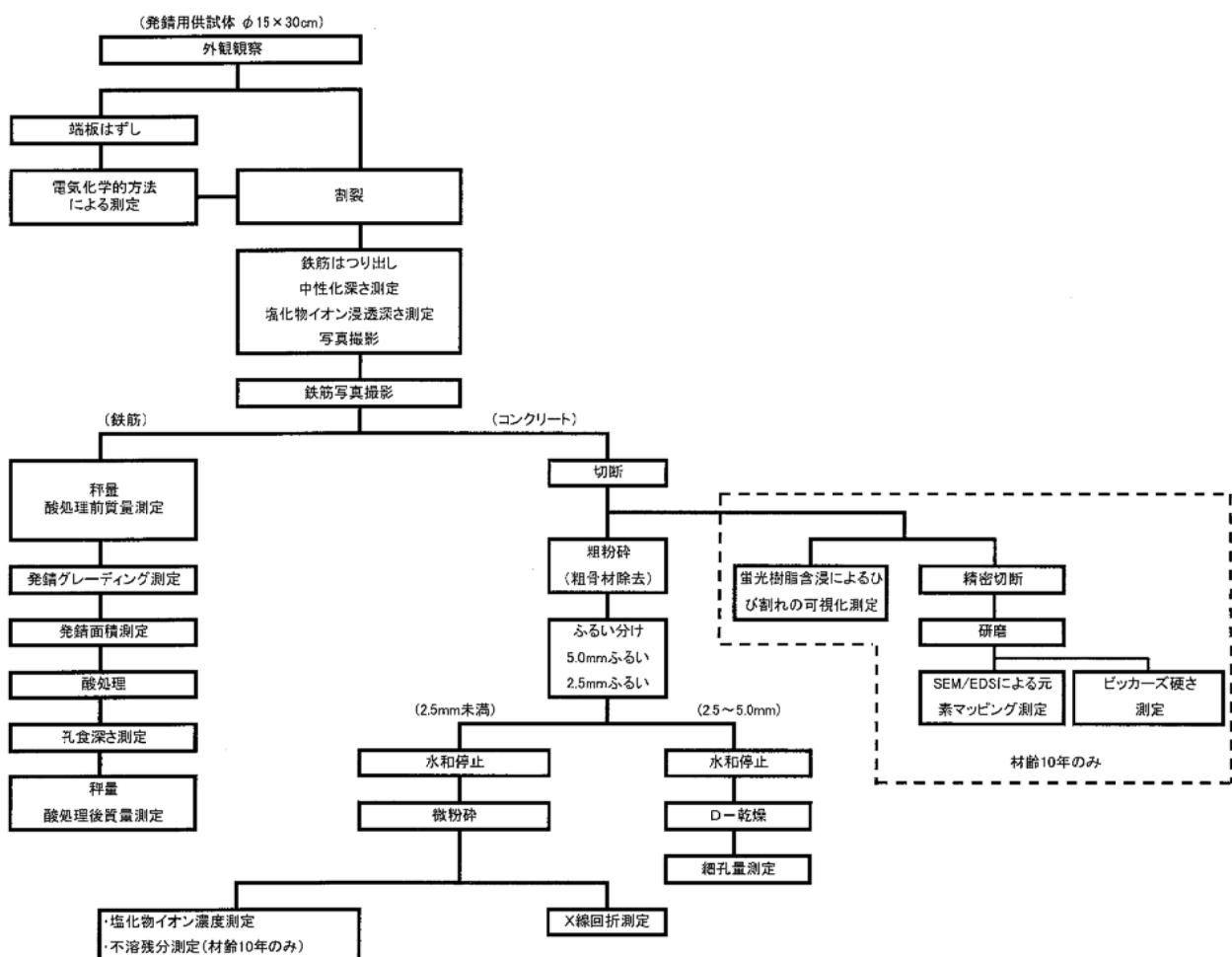


図-3.6.1 試験手順

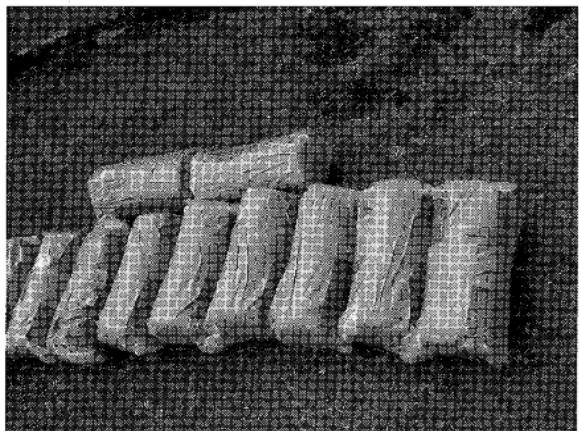


写真-3.6.1 供試体の梱包状況

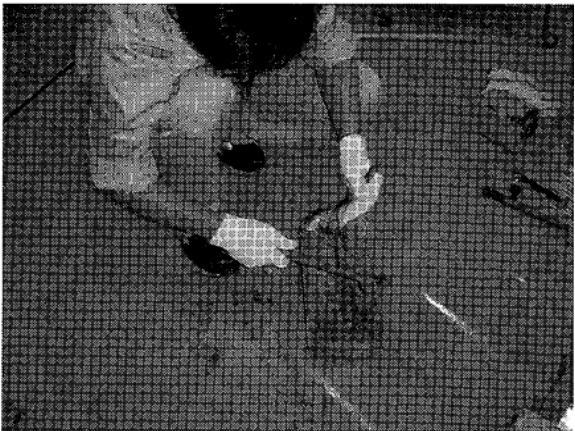


写真-3.6.2 鉄筋のはつり出し状況

細孔量、塩化物イオン濃度および X 線回折試験の試料の切り出し位置を図-3.6.2、同試験の試料の切り出し部分の深さ方向の切断位置を図-3.6.3 に示す。

材齢 5 年では割裂面に対して中心部 50mm（網掛部）から試料を採取し、材齢 10 年では円柱供試体の表面が曲率であることによる深さ方向への影響を軽減するために中心部 25mm（網掛部）とした。

材齢 5 年では割裂した供試体から試料（網掛部）を採取し、材齢 10 年では半割の供試体の 2 つを合算して試料（網掛部）とした。深さ方向に対しては、それぞれ 5~15mm、20~30mm、35~45mm および 50mm 以上の試料とした。

各試料中心部の供試体表面からの位置は、10mm、25mm、40mm および 55mm とした。切断後の試料は粗碎して粗骨材を除去した後に 5mm および 2.5mm ふるいを用いてふるい分けた。2.5~5mm の粗粒は細孔量測定用試料としてアセトンで水和を停止し、24 時間、D-乾燥を行った。また、2.5mm 未満の細粒は塩化物量および X 線回折測定用試料としてアセトンで水和を停止した後に、振動式微粉碎機により 150 μm ふるいを全通するように粉碎した。

なお、材齢 10 年では 2.5mm 未満の細粒に対して不溶残分試験を実施し、その試験結果から塩化物イオン濃度を補正した。

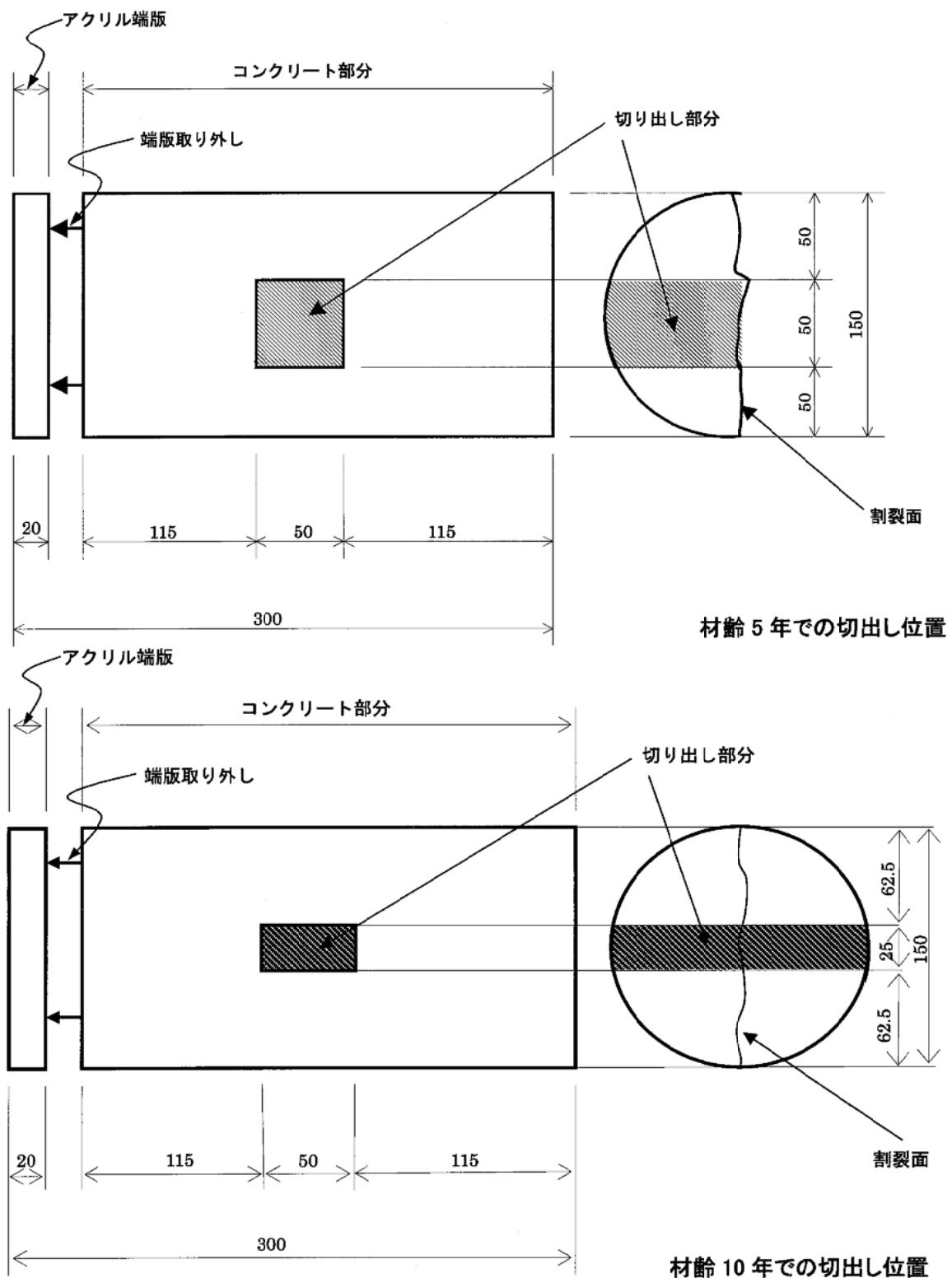


図-3.6.2 細孔量、塩化物イオン濃度およびX線回折試験の試料の切出し位置(mm)

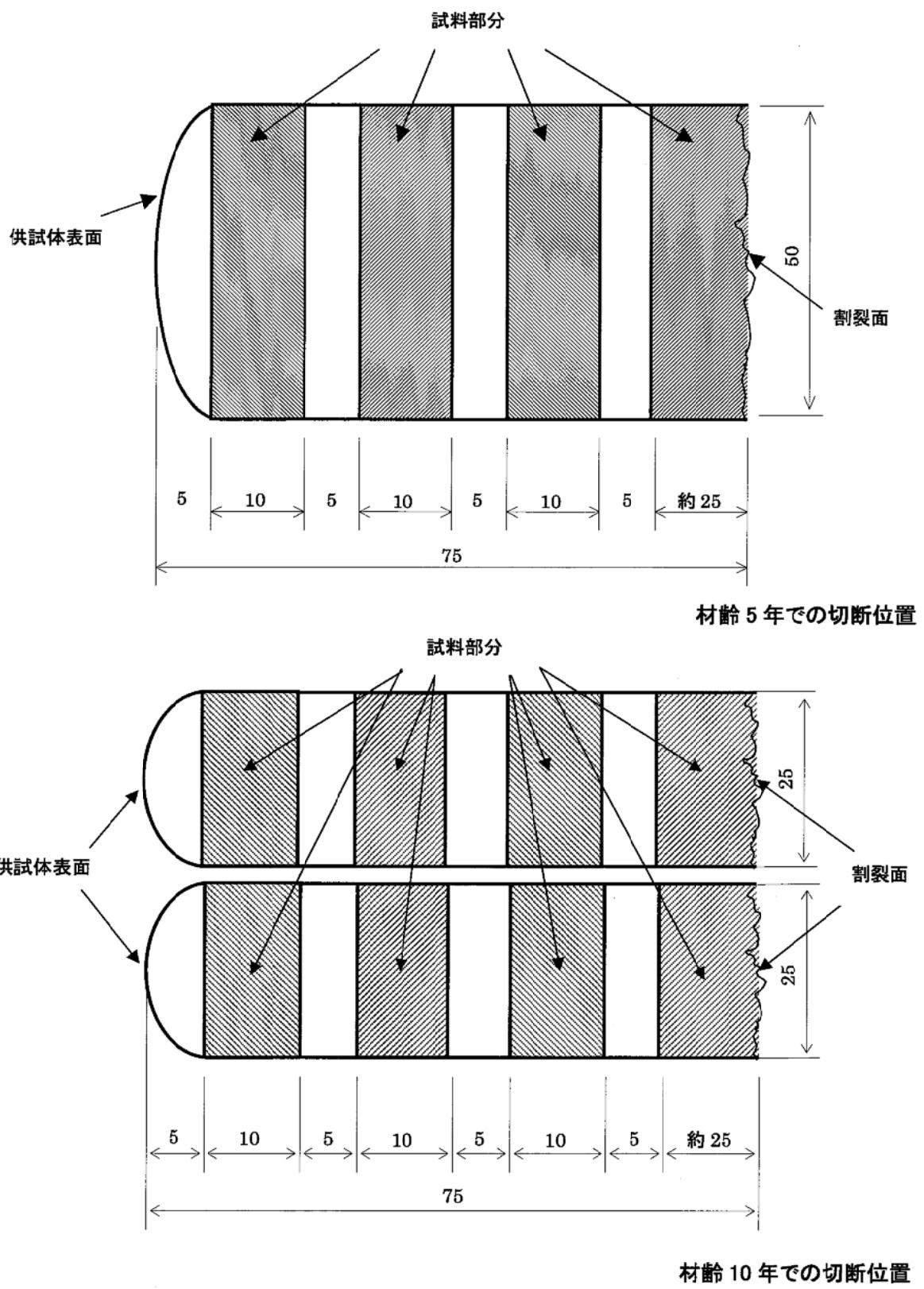


図-3.6.3 細孔量、塩化物イオン濃度およびX線回折試験の試料の
切り出し部分の深さ方向の切断位置(mm)

コンクリートの表層部の劣化を評価するため、材齢 10 年にて久里浜感潮部の供試体についてビッカーズ硬さ試験および SEM/EDS による元素マッピング試験を行った。これらの試験の試料の切り出し位置を図-3.6.4 に示す。

ビッカーズ硬さ試験については、図-3.6.4 で切り出した試験片を鏡面研磨し、測定に供した。

SEM/EDS による元素マッピング試験については、図-3.6.4 に示すように幅 25mm×長さ 20mm の試料を表層部より切り出して試料とした。また測定に際し前処理として、エポキシ樹脂に包埋後、精密切断機により測定面を切り出し、切り出した測定面を小型研磨機で研磨、測定面が十分に平滑となったことを顕微鏡で確認後に炭素蒸着を行った。

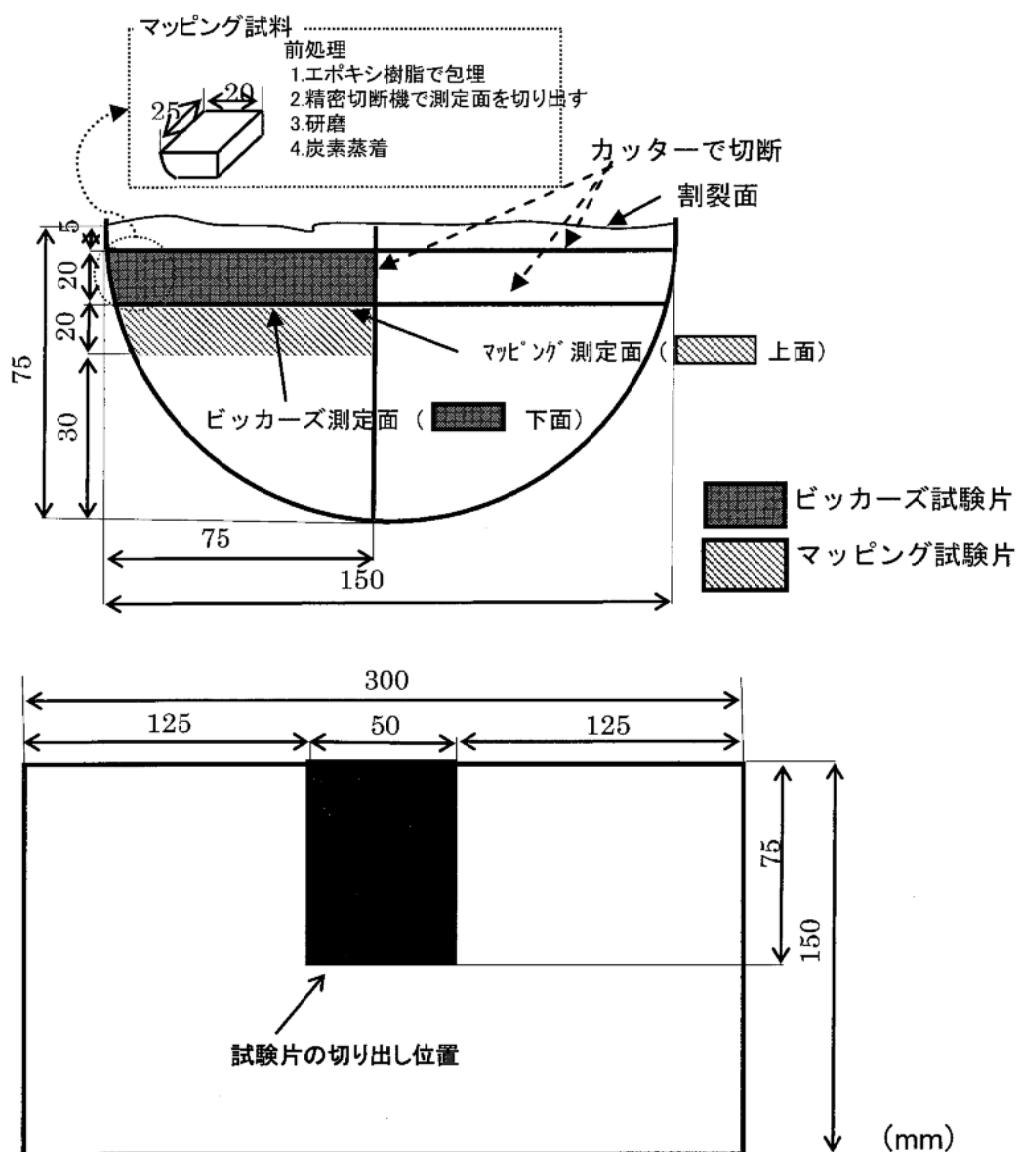


図-3.6.4 ビッカーズ硬さおよびマッピング試験の試料の切り出し位置

4. 試験方法

4.1 コンクリートに関する試験方法

4.1.1 外観観察

コンクリート表面を目視により外観観察し、鉄筋腐食によるひび割れ等の異常の有無を観察した。

4.1.2 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、静弾性係数試験は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて行った。供試体寸法は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ とした。

4.1.3 中性化深さ

中性化深さの測定は JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じて行った。

測定の範囲は、上下両端面からの中性化の影響を避けるため、供試体のアクリル樹脂製端板側(底面)から 7cm、逆側のコンクリート打設面(上面)から 5cm を除いた中心部 18cm とし、図-4.1.3.1 に示す 10ヶ所の中性化深さを測定した。

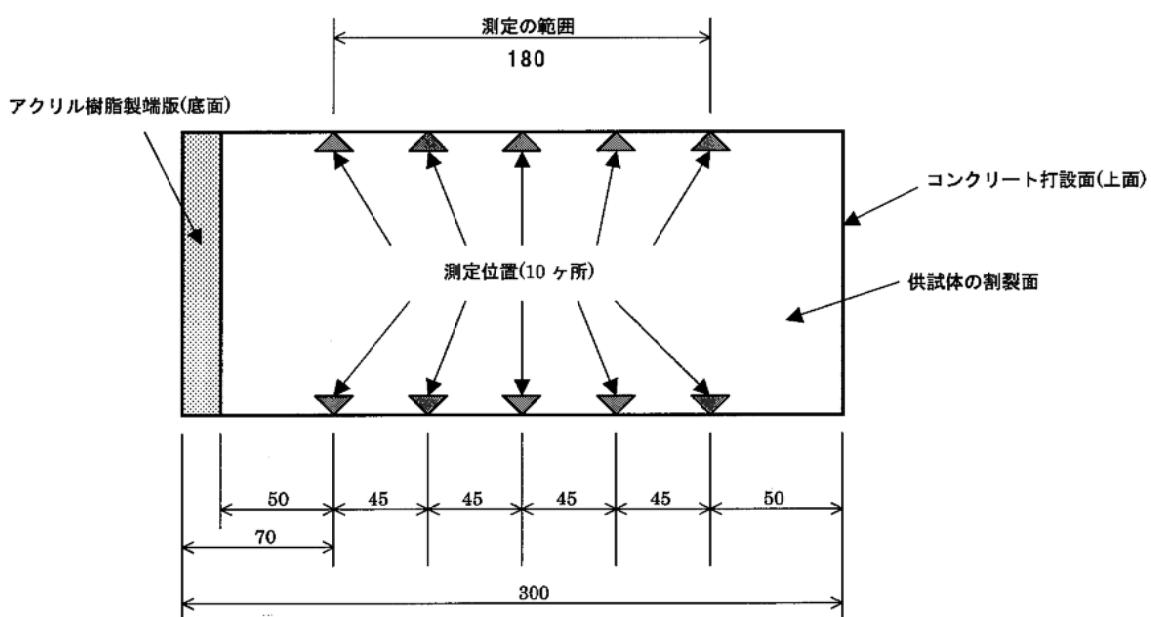


図-4.1.3.1 中性化深さの測定位置(mm)

4.1.4 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度の測定は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」の電位差滴定法に準じて行った。なお、深さ毎の測定位置は、表面からの深さが 5~15mm、20~30mm、35~45mm、および 50mm 以上の 3 点もしくは 4 点とした。

なお、材齢 10 年の供試体では、骨材量の影響を補正するため、不溶残分試験をコンクリート技術シリーズ 55¹⁾ に準じて実施し、塩化物イオン濃度を算出した。

4.1.5 X線回折

図-3.6.3 に示すコンクリートの表面から深さ 5~15mm の部分および深さ 50mm 以上の部分の 2ヶ所について粉末 X 線回折試験を実施した。

なお、測定用試料(150μm ふるい全通試料)には、予め 1000°Cで強熱した ZnO を内部標準物質として外割で 8%(質量%)添加し、均一に混合した後、表-4.1.5.1 に示す条件で粉末X線回折試験(定時法)を行った。表-4.1.5.2 に今回着目した結晶を示す。

表-4.1.5.1 粉末X線回折試験の条件

対陰極	Cu	発散スリット (°)	1/2
管電圧 (kV)	40	発光スリット (°)	0.15
管電流 (mA)	100	ステップ角度 (°)	0.02
フィルター	グラファイトモノクロメーター	計数時間 (sec)	0.4

表-4.1.5.2 ピーク強度を測定した各結晶相の回折角度 (2θ)

エトリンガイト ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)	9.1	ポルトランダイト ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	18.0
モノサルフェート水和物 ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)	9.9	カルサイト (CaCO_3)	29.4
フリーデル氏塩 ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)	11.2	酸化亜鉛 (ZnO)	31.8

4.1.6 細孔量

図-3.6.3 に示すコンクリートの表面から深さ 5~15mm の部分および深さ 50mm 以上の部分の細孔量を調べた。3.6 に述べた方法により調製した試料を約 3g を用い、水銀圧入式ポロシメーターにより、半径 7.5~7500nm の範囲の細孔径分布および総細孔量を測定した。

4.1.7 ビッカーズ硬さ

ビッカーズ硬度計を写真-4.1.7.1 に示す。くぼみの対角線の長さをビッカーズ硬さ試験機に付属している顕微鏡で計測し、下記の式-4.1.7.1 で算出した。

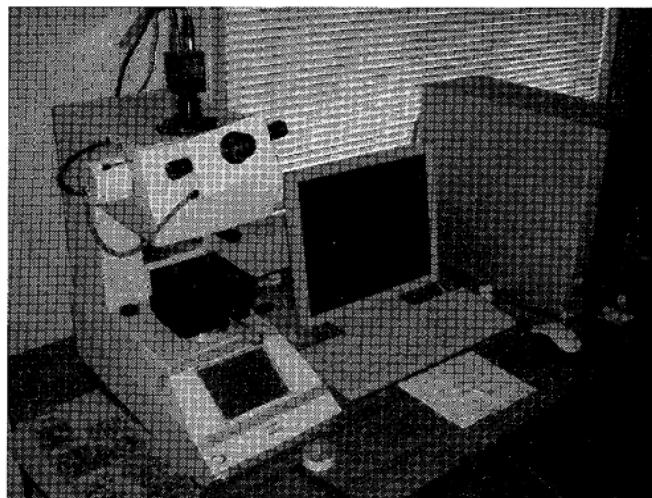


写真-4.1.7.1 ビッカーズ硬度計

$$HV = k \frac{2F}{d^2} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{式-4.1.7.1}$$

$\left. \begin{array}{l} HV : ビッカース硬さ、k : 定数 (1/g=1/9.806) 、F : 試験力 (N) 、d : くぼみの 2 方向の対角線長さの平均 (mm) 、\alpha : 圧子の対面角 (136^\circ) \end{array} \right]$

4.1.8 SEM/EDS による元素マッピング

エネルギー分散型 X 線分光分析装置 (SEM/EDS) を写真-4.1.8.1 に示す。エネルギー分散型 X 線分光器 (日立製走査型電子顕微鏡 S-3400N および EDAX 製エネルギー分散型 X 線分光器 (EDS)) を用いて、計測、解析を実施した。

測定面は、幅約 2mm、深さ約 2.5mm とし、1 試料あたり、深さ方向に対してコンクリートの表面（暴露面）～約 2.5mm および約 2.5～5.0mm の二つの測定面を下記の測定条件で測定した。

【測定条件】

加圧電圧 : 15kV、倍率 : 50 倍、Matrix (画素数) : 128×100、測定元素 : Cl,Mg,Ca,S,Na,K

電子ビームを照射した状態でステージを移動させ、128×100 の画素数に対して測定元素毎に X 線をカウントし、スケールを合わせたマッピング画像として測定面における各元素の分布状態を確認した。

また、深さ方向に対して各元素の濃度変化を確認するため、元素毎に得られたカウント数を図示した。ただし、測定点が骨材部の場合、濃度変化の傾向が大きく異なるので、骨材部のカウント数は削除し、セメントペースト部を抽出してカウントした。

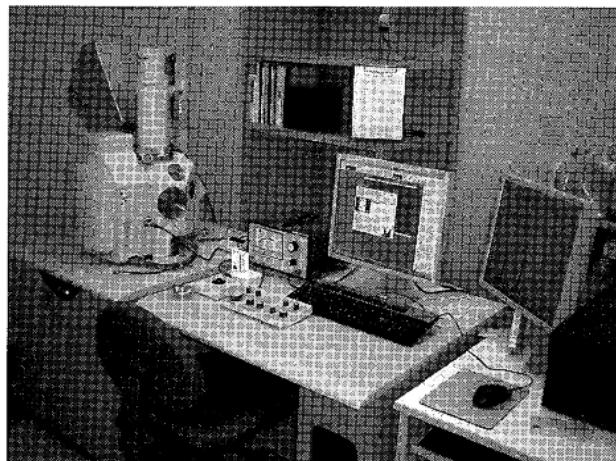


写真-4.1.8.1 エネルギー分散型 X 線分光分析装置 (SEM/EDS)

4.1.9 蛍光エポキシ樹脂真空含浸法によるコンクリートの表層ひび割れの可視化

蛍光エポキシ樹脂真空含浸法によるコンクリートの表層ひび割れの測定方法^{2) 3)}を図-4.1.9.1 に示す。

供試体の中央付近より厚さ約 3cm の試料を採取し、試料を真空チャンバーに設置する。この際、容器の底面と供試体の間に隙間をつくり、樹脂が十分にいきわたるようにする。

チャンバー内を減圧、減圧後に蛍光剤を混入させた超低粘度形エポキシ樹脂を充填させ、充填させたエポキシ樹脂の脱気を十分に行った後、真空ポンプを停止させチャンバー内を大気圧に戻す。エポキシ樹脂が十分に硬化したら、樹脂の浸透面から 1cm 付近で供試体を切断し観察面とする。観察面に紫外線を照射させ、蛍光剤の発光によりひび割れの状況を観察した。

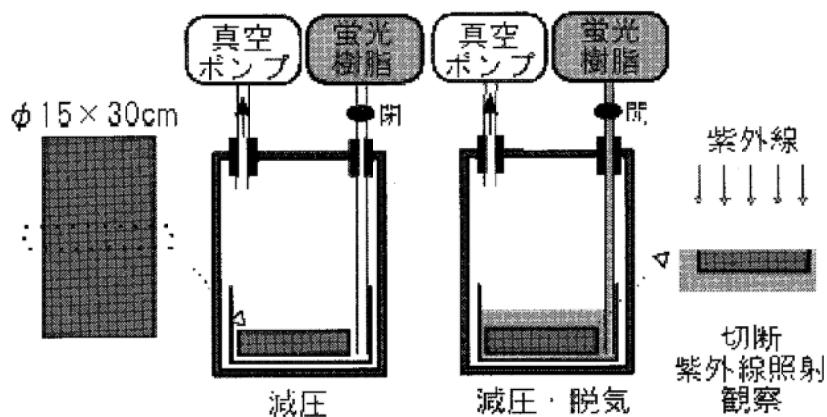


図-4.1.9.1 蛍光エポキシ樹脂真空含浸法によるコンクリートの表層ひび割れの測定方法

4.2 鉄筋の発錆に関する試験方法

4.2.1 外観観察

供試体を割裂して鉄筋を露出させた状態で、鉄筋の発錆位置および発錆状態の確認を行った。また、発錆部近傍のコンクリート部分のひび割れ等の異常の有無を目視により外観観察した。その際に既往の文献⁴⁾を参考にして、表-4.2.1に示すグレードを設定して鉄筋腐食の程度を分類した。(今回のI⁺は既往の文献⁴⁾のIに相当する。)

表-4.2.1 鉄筋腐食のグレード

グレード	鉄筋の腐食状況
I	腐食なし
I ⁺	腐食していても均一な薄い緻密なさび層(黒または茶色単色)が密着している場合。
II	部分的には斑点状のさびが見られる。さび層は黒・茶・赤茶色などの複数の色が混ざっている。
III	鉄筋が広範囲に軽度の凸凹状に腐食している。黒・黄・緑・赤茶・茶色など複数の色の混在を呈するさび層で覆われている。断面欠損は明確には認められない。
IV	鉄筋全体が凸凹状・溝状・剥離状に腐食しており、明らかに断面の欠損も認められる。

4.2.2 発錆面積率

鉄筋の発錆面積率の測定は、写真-4.2.2.1 のように透明な粘着テープを鉄筋に巻き付け、油性インクで発錆部分をトレースし、発錆部分と非発錆部分とを区別した後、写真-4.2.2.2 のように展開図を作成後、この図から画像解析して鉄筋の発錆表面積を測定し、式-4.2.2.1 より、鉄筋の発錆面積率を算出した。

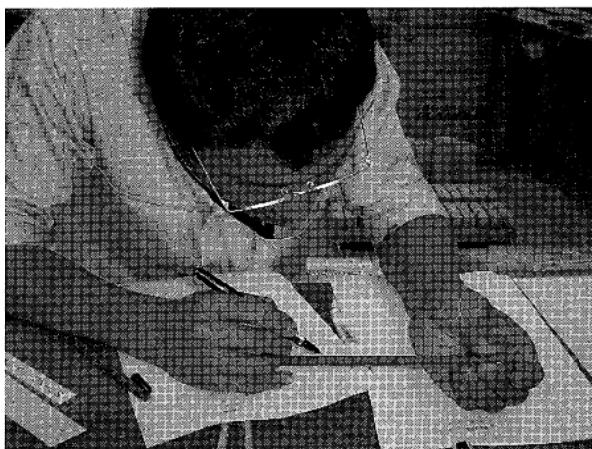


写真-4.2.2.1 発錆部分のトレース状況

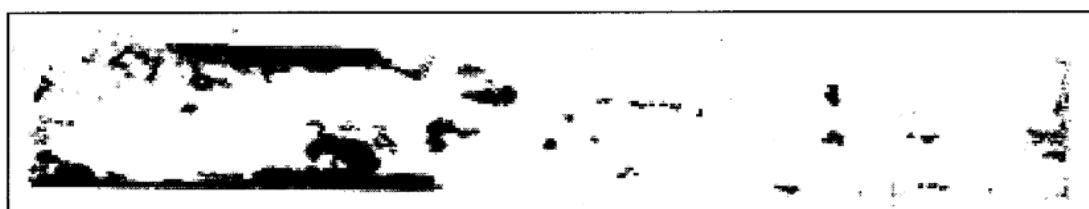


写真-4.2.2.2 発錆部分と非発錆部分の展開図の一例

$$\text{鉄筋の発錆面積率 } (\%) = \frac{\text{発錆表面積}}{\text{鉄筋表面積}} \times 100 \quad \text{式-4.2.2.1}$$

4.2.3 質量減少率

鉄筋の質量減少率の測定方法は本委員会の既往の報告書⁵⁾に準じた。すなわち、コンクリート供試体からはつり出した鉄筋は、表面に付着したモルタルを除去した後、10%(質量%)のクエン酸2アンモニウム溶液に、インヒビターとして2-メルカプトベンゾチアゾールを150ppm 添加し、液温を約35°Cとした溶液中に約24時間浸せきした。浸せき中の酸処理状況を写真-4.2.3.1に示す。

浸せき液から取出した鉄筋は、錆および黒皮を除去し、質量(除錆(酸処理)後鉄筋質量)を測定し、式-4.2.3.1により、鉄筋の質量減少率を算出した。なお、鉄筋の黒皮の質量は、黒皮の付いた発錆の認められない鉄筋(長・短鉄筋各12本)を溶液に浸せきし、浸せき後に黒皮を除去して浸せき前後の質量差より、浸せきロット毎に求めた。

$$\text{鉄筋の質量減少率 } (\%) = \frac{\text{酸処理前鉄筋質量} - (\text{酸処理後鉄筋質量} + \text{黒皮質量})}{\text{酸処理前鉄筋質量}} \times 100$$

式-4.2.3.1

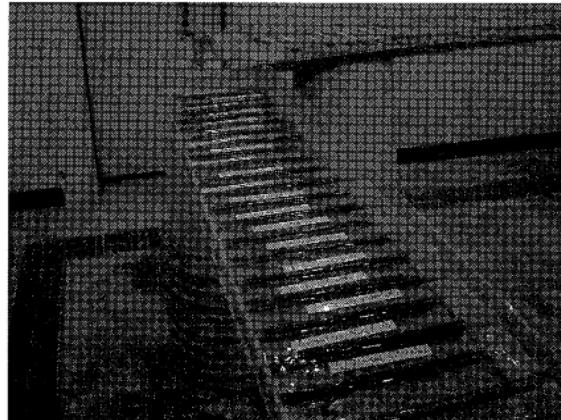


写真-4.2.3.1 酸処理の状況

4.2.4 孔食深さ

鉄筋の孔食深さの測定は、4.2.3 の鉄筋の質量減少率を測定した直後に写真-4.2.4.1 に示すマイクロメータ（最小単位：0.01mm）のスピンドルの先端に針を装着した装置を用いて行い、各鉄筋の最大孔食深さを求めた。孔食深さが大きい鉄筋の一例を写真-4.2.4.2 に示す。

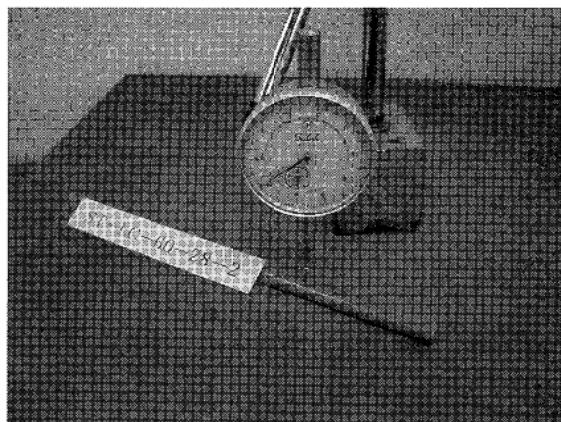


写真-4.2.4.1 孔食深さ測定装置

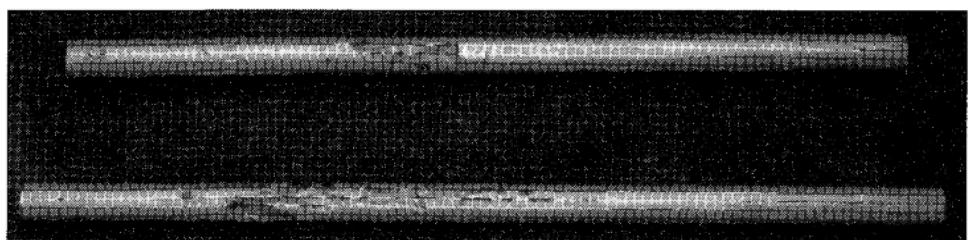


写真-4.2.4.2 孔食深さが大きい鉄筋の一例

4.2.5 自然電位および分極抵抗

電気化学的方法によりコンクリート中の鉄筋の自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗を測定した。自然電位については、海水循環水槽において暴露開始後から約3年間にわたって連続的にモニタリングを実施した。この際の供試体の状況を写真-4.2.5.1に、計測システム概略を図-4.2.5.1に示す。この際用いた照合電極は海水一銀塩化銀電極である。

また、分極抵抗およびコンクリート抵抗については、暴露開始約2年後から約3年後までの1年間において、2週間に1回程度の頻度で、また、材齢5年および10年において試験体を水槽から取り出し、定期的にモニタリングを行った。この際の測定状況を写真-4.2.5.2および図-4.2.5.2に示す。なお、分極抵抗およびコンクリート抵抗の測定時には自然電位の計測も行っている。照合電極は海水一銀塩化銀電極を用いた。分極抵抗およびコンクリート抵抗測定は交流インピーダンス法により行った。これは高低2種類(10Hz・20mHz)の周波数の交流電圧を10mVの電圧で印加し、その際の応答電流を測定するものである⁶⁾。付加した交流電圧と測定された応答電流からインピーダンスが求まり、コンクリート抵抗および分極抵抗が求められる⁷⁾。また、分極抵抗を以下の式-4.2.5.1にあてはめることで鉄筋の腐食速度(I_{corr})が求められる。

$$I_{corr} = K \cdot (I/R_{ct}) \quad \text{式-4.2.5.1}$$

ここで、
 I_{corr} : 腐食速度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
 R_{ct} : 分極抵抗($\text{k}\Omega$)
K : 定数(0.026(V)を用いた。)

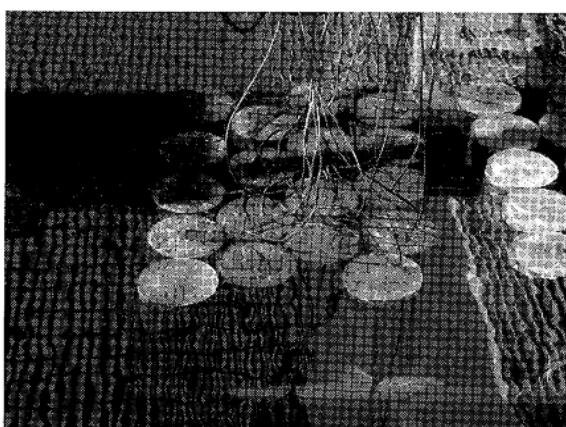


写真-4.2.5.1 自然電位計測用試験体

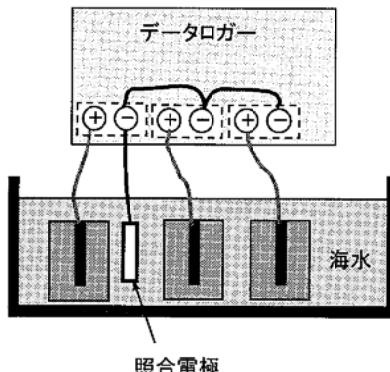


図-4.2.5.1 自然電位測定方法

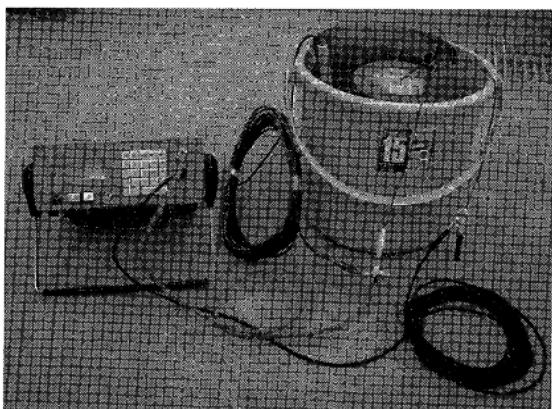


写真-4.2.5.2 分極抵抗およびコンクリート抵抗測定状況

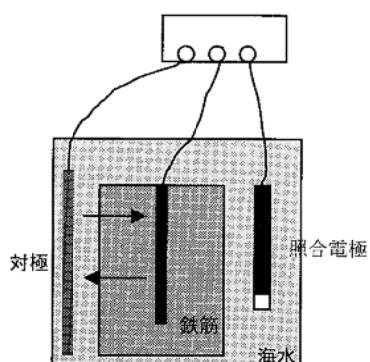


図-4.2.5.2 分極抵抗およびコンクリート抵抗測定方法

材齢 10 年ではコンクリート中鉄筋の分極曲線も測定した。分極曲線は、写真-4.2.5.3 に示す装置 (Automatic Polarization System HZ-3000) を用い、電位を自然電位から掃引速度 1mV/sec で最大+600mV まで変化させた。照合電極は飽和銀塩化銀電極を用いた。



写真-4.2.5.3 分極測定装置

5. コンクリートに関する試験結果

5.1 外観観察

各暴露地の供試体外観を写真-5.1.1～写真-5.1.4に示す。

供試体の外観観察を行った結果、材齢5年では、ひび割れ等は認められなかった。一方、材齢10年では、久里浜感潮部に暴露した前養生期間28日、W/C60%のMCを用いた供試体のみでひび割れが確認された。

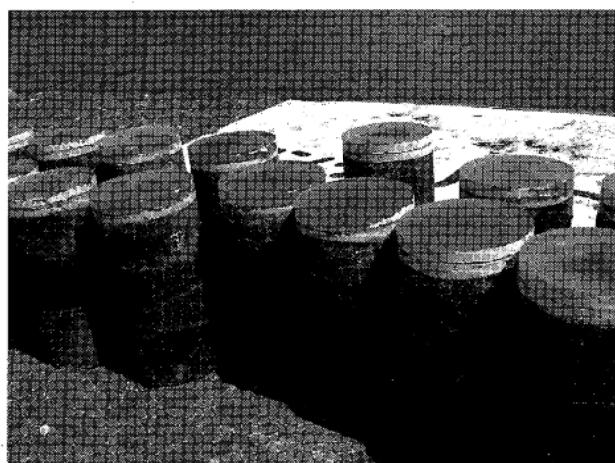


写真-5.1.1 酒田感潮の供試体の外観



写真-5.1.2 久里浜感潮の供試体の外観

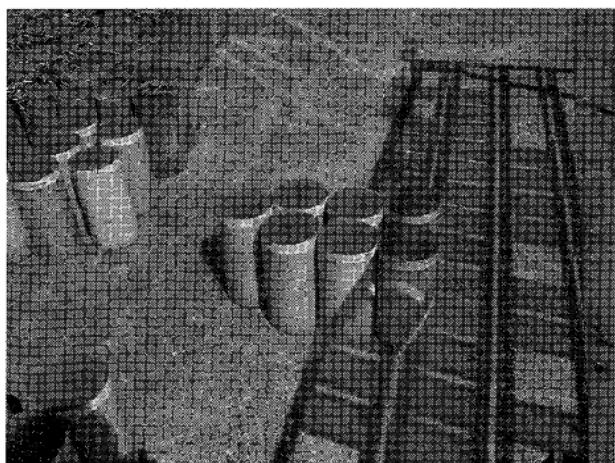


写真-5.1.3 久里浜海浜の供試体の外観



写真-5.1.4 東京屋外の供試体の外観

5.2 圧縮強度

(1) 暴露条件による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日における材齡と圧縮強度の関係を図-5.2.1 に示す。

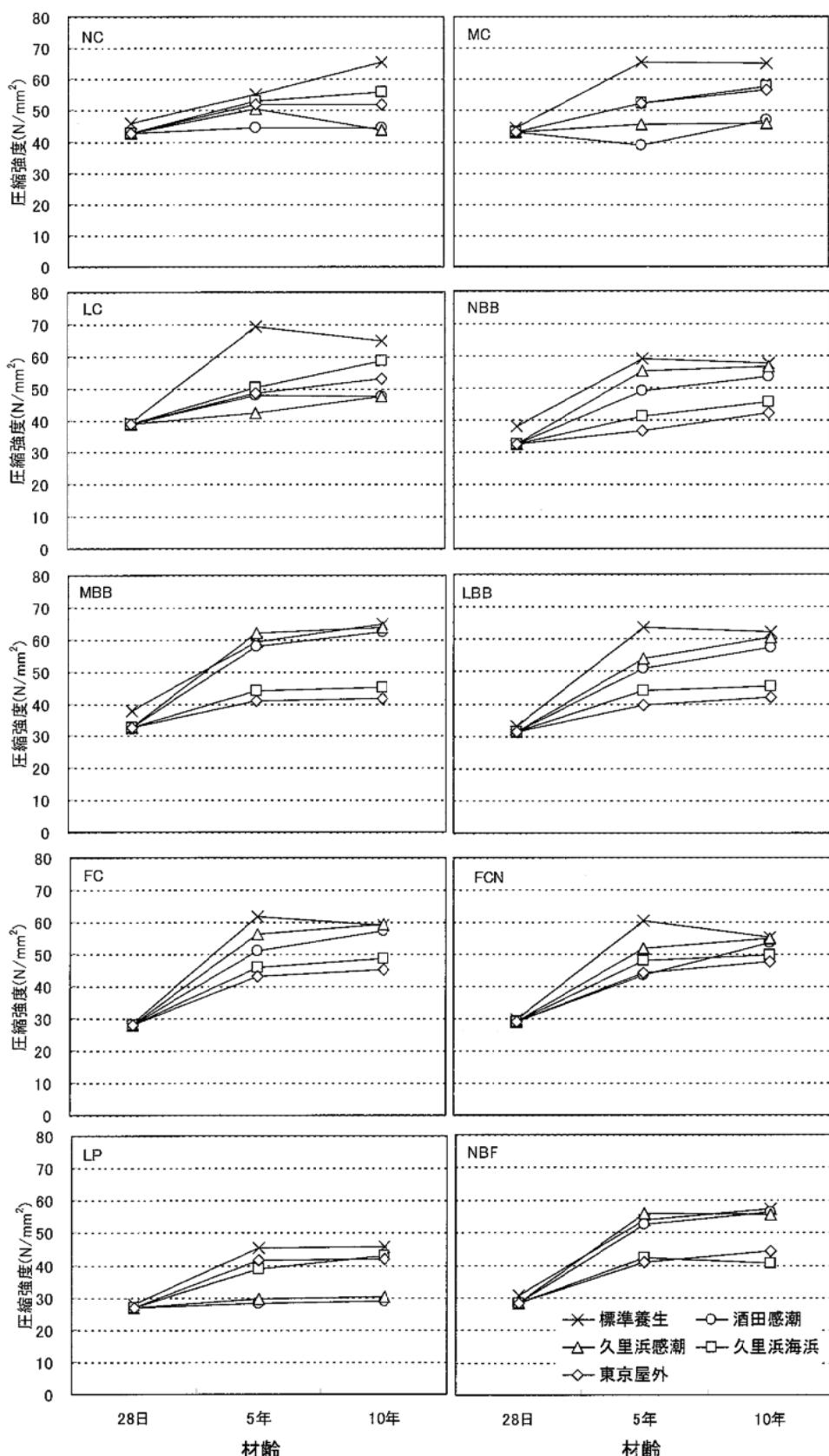


図-5.2.1 材齡と圧縮強度の関係（水結合材比 50%、前養生期間 28 日）

ポルトランドセメント系および石灰石微粉末を混合した LP の圧縮強度は、標準養生>久里浜海浜部=東京屋外部>久里浜感潮部=酒田感潮部の順になった。一方、LP を除く混合セメント系は、感潮暴露が標準養生とほぼ同等、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）が標準養生および感潮暴露より低い傾向となり、暴露条件が強度発現性に及ぼす影響はセメント種類により異なった。

(2) セメントの種類による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類と圧縮強度の関係を図-5.2.2 に示す。

暴露開始時（20℃封かん養生 28 日）の圧縮強度は、ポルトランドセメント系>高炉スラグセメント系>高炉スラグセメント系以外の混合セメント系の順になった。ポルトランドセメント系では、NC と MC は同等で、LC が若干低くなった。高炉スラグセメント系におけるベースのポルトランドセメントの種類およびフライアッシュ系セメントにおけるフライアッシュの種類が強度発現性に及ぼす影響は小さかった。

酒田感潮部および久里浜感潮部の場合、材齢 5 年の圧縮強度は、MBB>NBB=LBB=FC=NBF>FCN=ポルトランドセメント系>LP の順になった。

感潮暴露にてポルトランドセメント系の長期強度が LP を除く混合セメント系より低くなった要因としては、海水による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶脱やエトリンガイトの生成などの強度低下を及ぼす作用が水分供給による水和促進の作用より卓越したためと考えられる。一方、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混合セメント系は、海水に対する化学抵抗性に優れており、水分供給による長期的な強度増進作用（潜在水硬性やポゾラン反応）が卓越した可能性がある。

混合セメント系の長期における強度発現性は、高炉スラグセメント系では MBB、フライアッシュセメント系では FA II 種を混合した FC が良好であり、ベースセメントやフライアッシュの種類による差異が認められた。石灰石微粉末を混合した LP の圧縮強度は、NC の 7~8 割程度であり、長期材齢における石灰石微粉末の強度増進効果は小さいと判断された。

気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の場合、いずれのセメントも材齢 5 年で 10N/mm^2 程度強度が増加し、セメント種類の違いによる強度の大小関係は暴露開始時とほぼ同様の傾向であった。ただし、フライアッシュセメント系の方が高炉スラグセメント系より強度増加量が大きかった。

材齢 10 年の圧縮強度は、感潮暴露の場合、MBB>LBB=FC>NBB=FCN>NBF>LC>MC>NC>LP の順になった。

気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の場合、圧縮強度はポルトランドセメント系>フライアッシュセメント系>高炉スラグセメント系=NBF=LP の順になり、材齢 5 年と同様の傾向であった。なお、いずれのセメントも暴露開始時より低下したものはなかった。

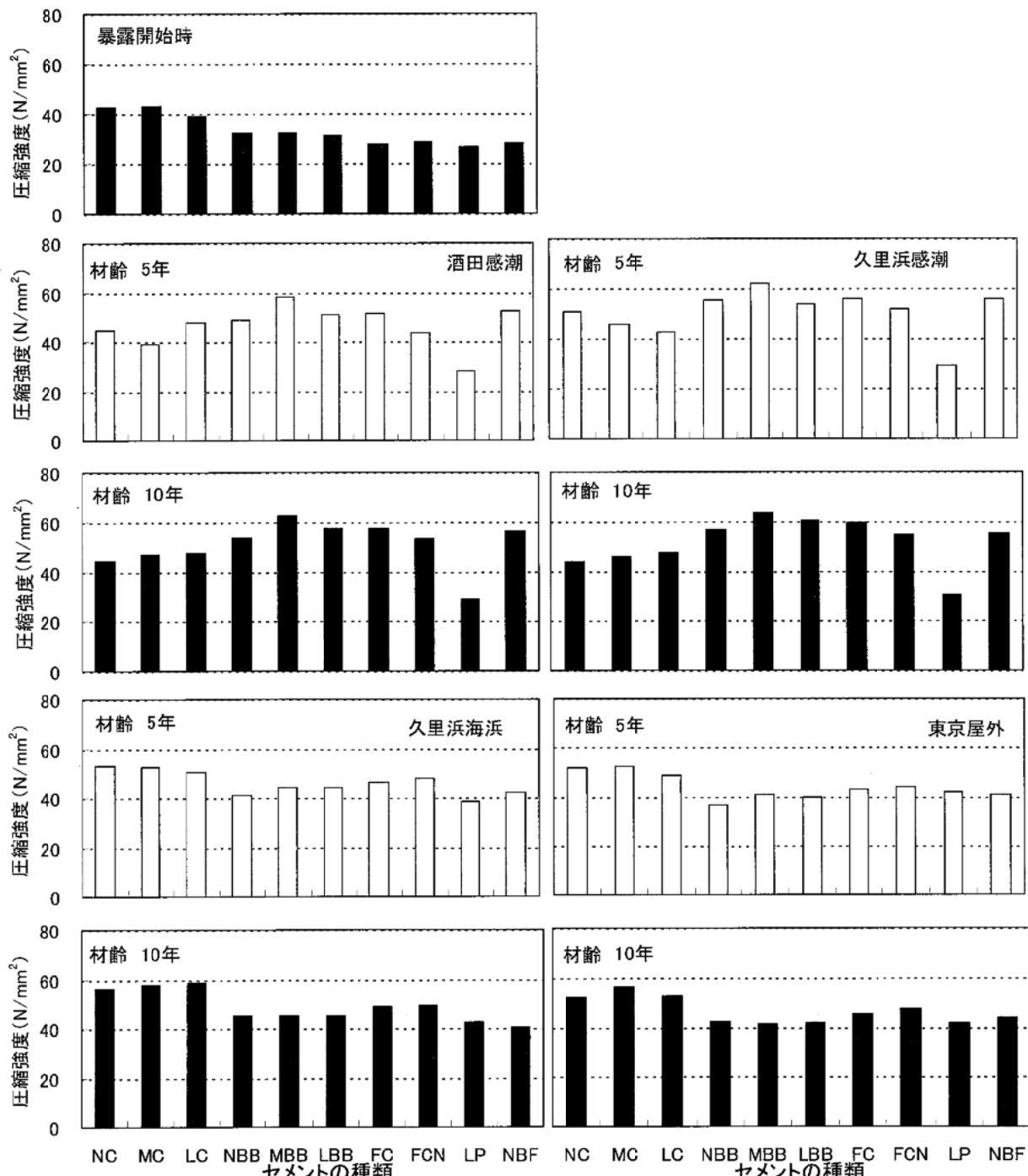


図-5.2.2 セメントの種類と圧縮強度の関係（水結合材比 50%、前養生期間 28 日）

(3) セメント水比による比較

前養生期間 28 日におけるポルトランドセメント系のセメント水比と圧縮強度の関係を図-5.2.3 に示す。

いずれのセメント種類および暴露条件においてもセメント水比 (C/W) が大きくなるにつれて強度が概ね増加する傾向が見られた。ただし、MC および LC の低熱系ポルトランドセメントでは、C/W=2.0 (W/C=50%) の場合の圧縮強度が C/W=1.67 (W/C=60%) の場合に比べ同等以下になるケースがあった。

セメント水比 (C/W) と強度の関係式の傾きは標準養生が最も大きく、感潮暴露が気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）より大きかった。

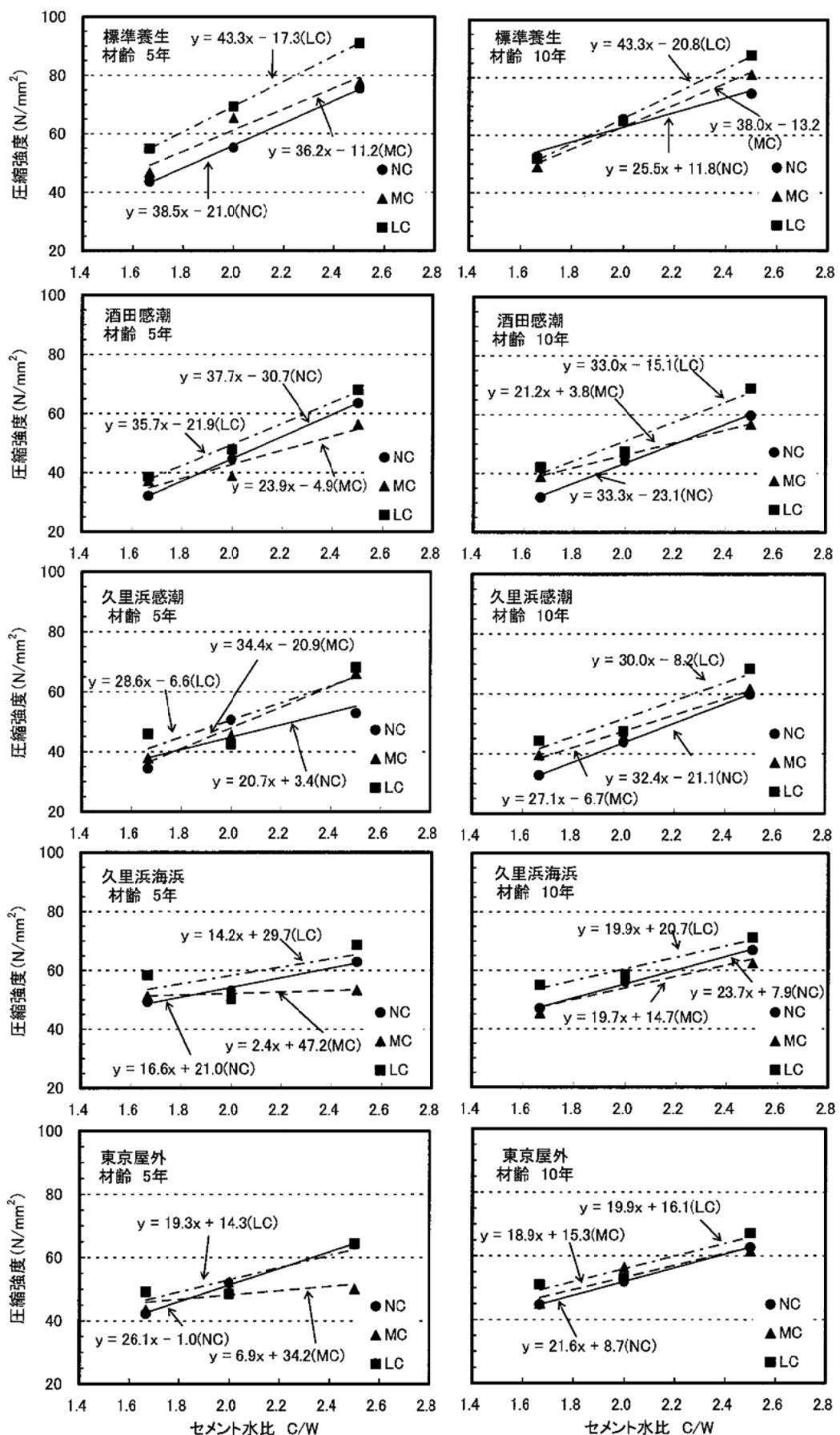


図-5.2.3 ポルトランドセメント系のセメント水比と圧縮強度の関係（前養生期間 28 日）

(4) 暴露前養生期間による比較

水結合材比 50%における前養生期間 28 日と 91 日の圧縮強度を図-5.2.4 に示す。

久里浜感潮部の場合、NBB を除くセメントにおいて、前養生期間 91 日の方が前養生期間 28 日より強度が高くなる傾向が見られた。一方、東京屋外の場合、NC および LC では、前養生期間 91 日の方が前養生期間 28 日より高い傾向があるが、混合セメント系では前養生期間 28 日と 91 日で大差はなかった。すなわち、ポルトランドセメント系では、前養生期間を長くすることにより、その後の暴露条件下における長期の強度増進効果があり、その効果は感潮暴露の方が屋外暴露の場合より顕著であった。また、屋外暴露下において、ポルトランドセメント系の方が混合セメント系よりも前養生期間を伸ばすことによる強度増進効果が大きかった。

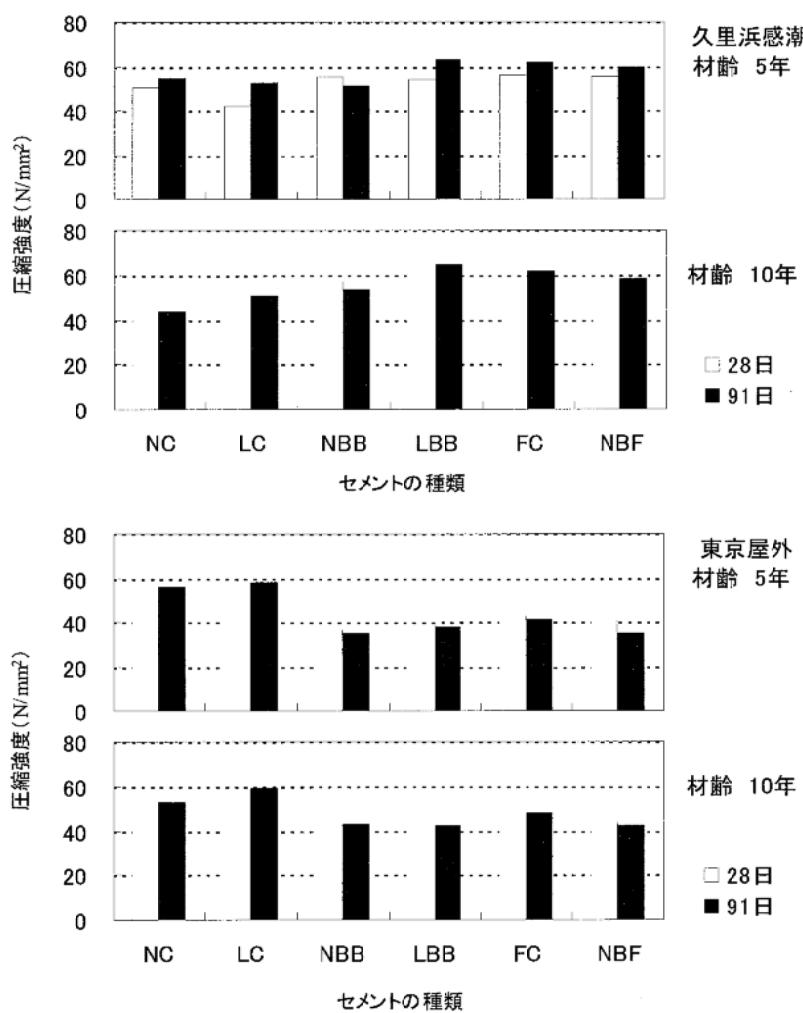


図-5.2.4 前養生期間 28 日と 91 日の圧縮強度（水結合材比 50%）

5.3 静弾性係数

(1) 暴露条件による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日における材齢と静弾性係数の関係を図-5.3.1 に示す。

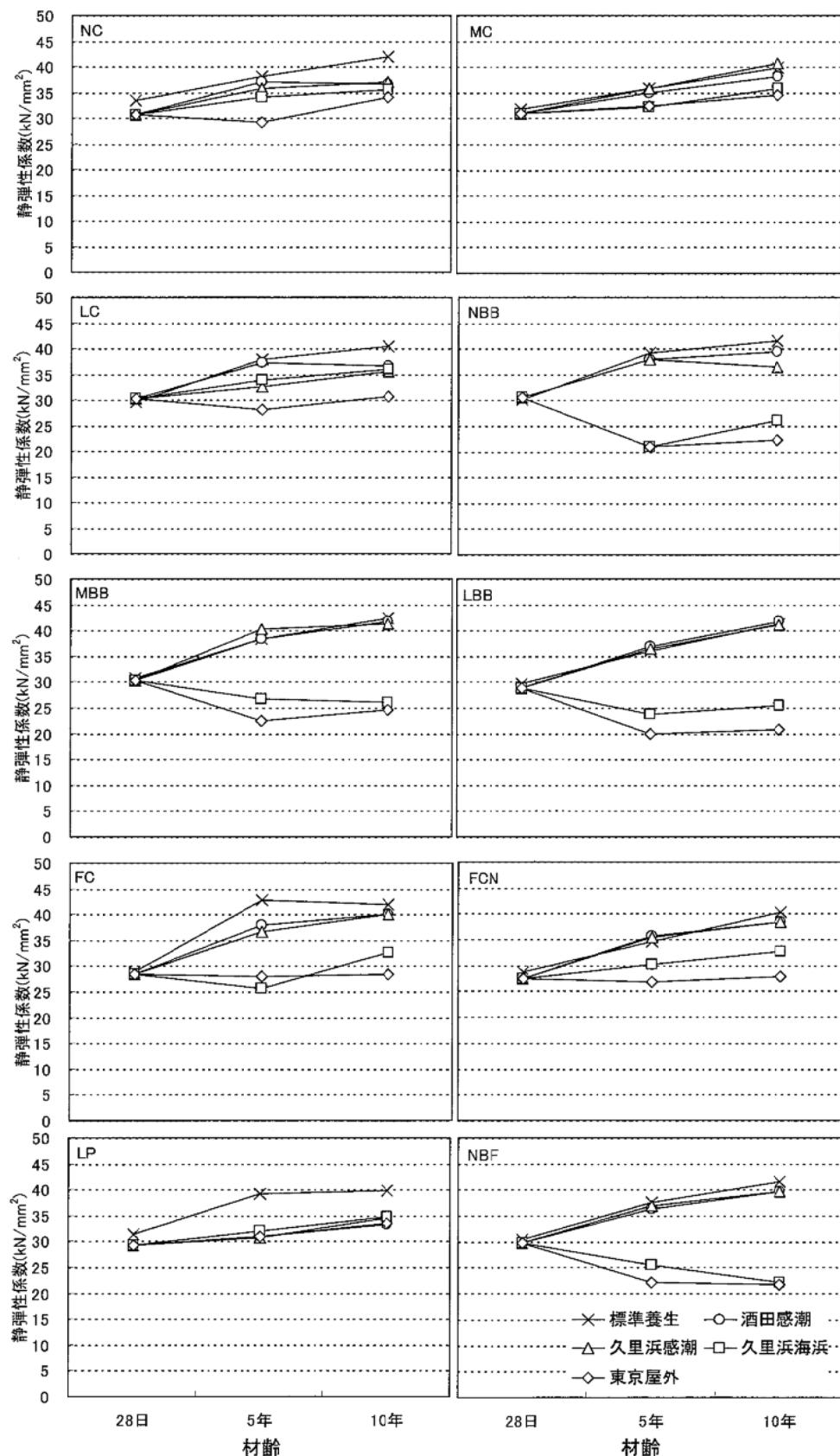


図-5.3.1 材齢と静弾性係数の関係（水結合材比 50%、前養生期間 28 日）

静弾性係数は、標準養生>酒田感潮部=久里浜感潮部>久里浜海浜部>東京屋外部の順になつた。

いずれのセメントにおいても、標準養生および感潮暴露での静弾性係数は、材齢の経過とともに増加した。一方、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）での静弾性係数は、ポルトランドセメント系、LP、FC および FCN の場合、材齢の経過とともに増加したが、NBB、MBB、LBB および NBF の高炉スラグ微粉末を混合したセメントの場合、材齢の経過とともに低下した。

(2) セメントの種類による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類と静弾性係数の関係を図-5.3.2 に示す。

感潮暴露の場合、LP を除く混合セメント系の方がポルトランドセメント系より若干高くなつた。一方、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の場合、ポルトランドセメント系の方が混合セメント系より大きかった。また、混合セメント系において、LP およびフライアッシュセメント系に比べ、高炉スラグセメント系の静弾性係数は低く、暴露開始時より低下した。

これらの静弾性係数の傾向は、概ね圧縮強度と一致するが、高炉スラグセメント系の圧縮強度は、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）において、他の混合セメント系と同等であり、高炉スラグセメント系の静弾性係数が低下した原因については明確でない。なお、既往の研究において、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを使用したコンクリートでは、気中養生した場合、同一圧縮強度に対する静弾性係数が湿潤養生したものより 10~30%程度小さくなること⁸⁾、および屋外暴露下の静弾性係数が材齢 5、10 年にかけて低下する傾向が認められたこと⁹⁾が報告されており、本実験の結果もそれらと概ね同様の傾向であった。

ポルトランドセメント系におけるセメント種類、高炉スラグセメント系におけるベースのポルトランドセメントの種類およびフライアッシュセメント系におけるフライアッシュの種類が静弾性係数に及ぼす影響は明確でなかった。

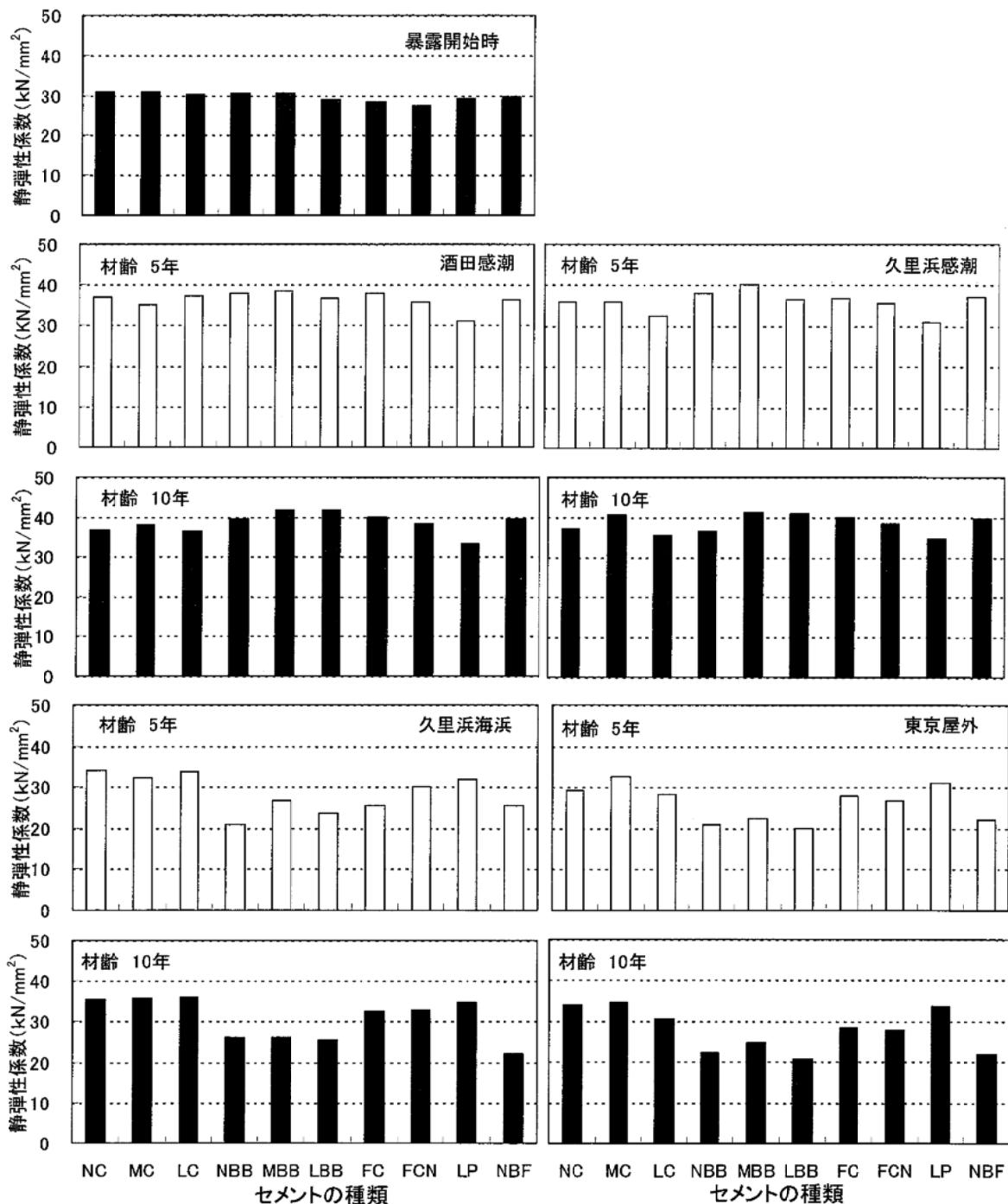


図-5.3.2 セメントの種類と静弾性係数の関係（水結合材比 50%、前養生期間 28 日）

上述のとおり、高炉スラグセメント系の場合、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の静弾性係数が暴露開始時より低下していた。この傾向は、圧縮強度では認められなかったことから、原因調査の一環として、4.1.9 の蛍光エポキシ樹脂真空含浸法による試験により、コンクリートの表層ひび割れについて観察した。観察した供試体は、各条件下で暴露された材齢 10 年の NC および NBB である。これらの結果を写真-5.3.1 および写真-5.3.2 に示す。

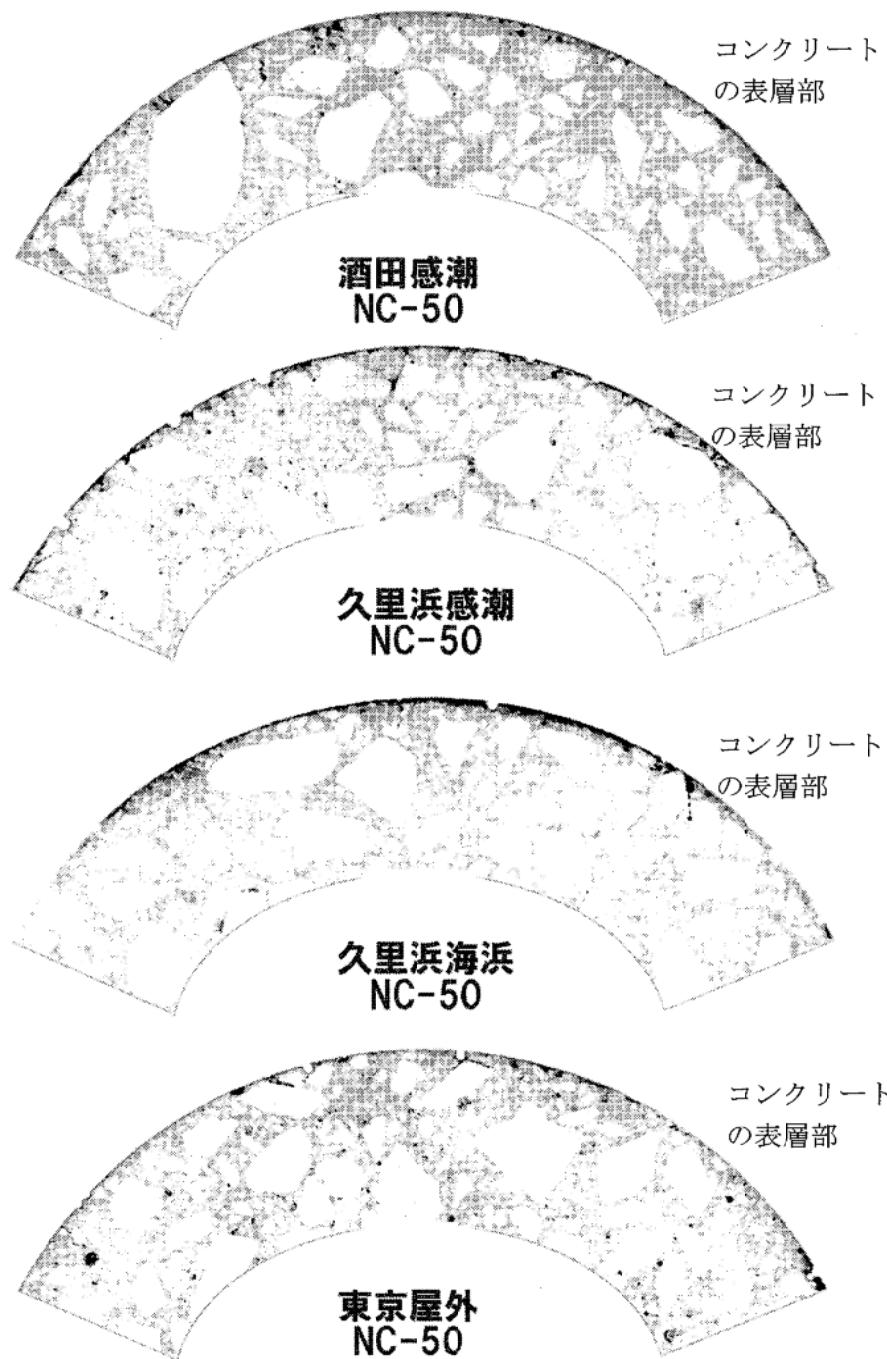


写真-5.3.1 NC の表層ひび割れ状況（水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齢 10 年）

表層ひび割れが両者に認められるが、ひび割れの進展深さは、NC に比べ NBB の方が大きい。特に、静弾性係数の低下が認められた NBB の気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、骨材の輪郭が明確になるほどにひび割れが進展している。

これらの結果より、気中暴露下における高炉スラグセメント系の静弾性係数が、暴露期間中に低下した一因として、表層部分のひび割れ進展の影響が大きいことが考えられる。すなわち、静弾性係数は載荷時の供試体表層部の変形値より算出されるため、表層部分にひび割れが進展していれば同一荷重下における変形値が大きくなり、結果的に静弾性係数が小さくなる。ただし、表層ひび割れが発生した原因については明確でない。

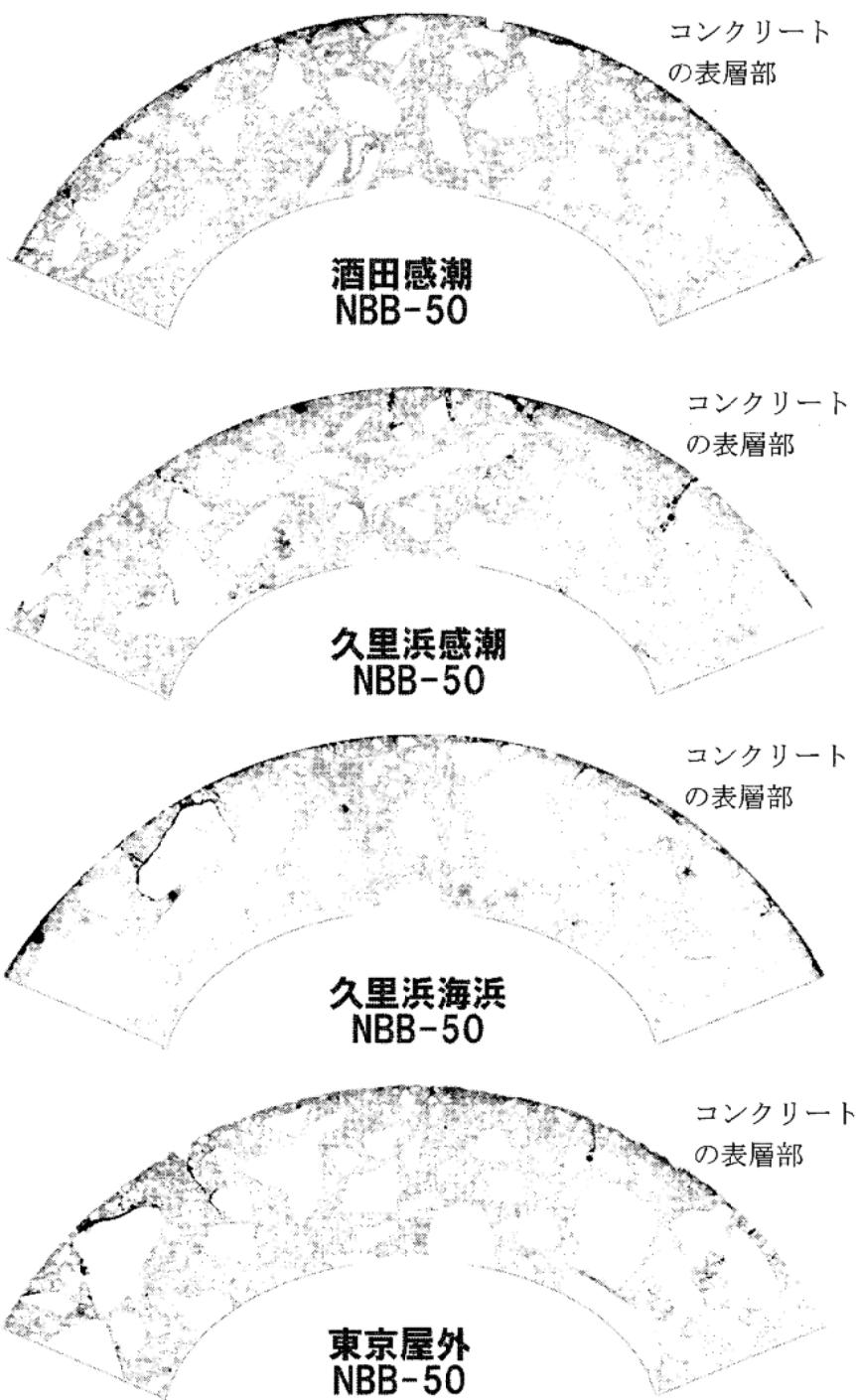


写真-5.3.2 NBB の表層ひび割れ状況（水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齡 10 年）

(3) 暴露前養生期間による比較

水結合材比 50%における前養生期間 28 日と 91 日の静弾性係数を図-5.3.3 に示す。

久里浜感潮部における静弾性係数はいずれのセメントを用いた場合においても前養生期間による顕著な差は認められなかった。一方、東京屋外部では、NBB、FC だけ前養生期間 91 日の静弾性係数が前養生期間 28 日より若干大きくなる傾向が認められたが、その他のセメントでは顕著な差が認められなかった。

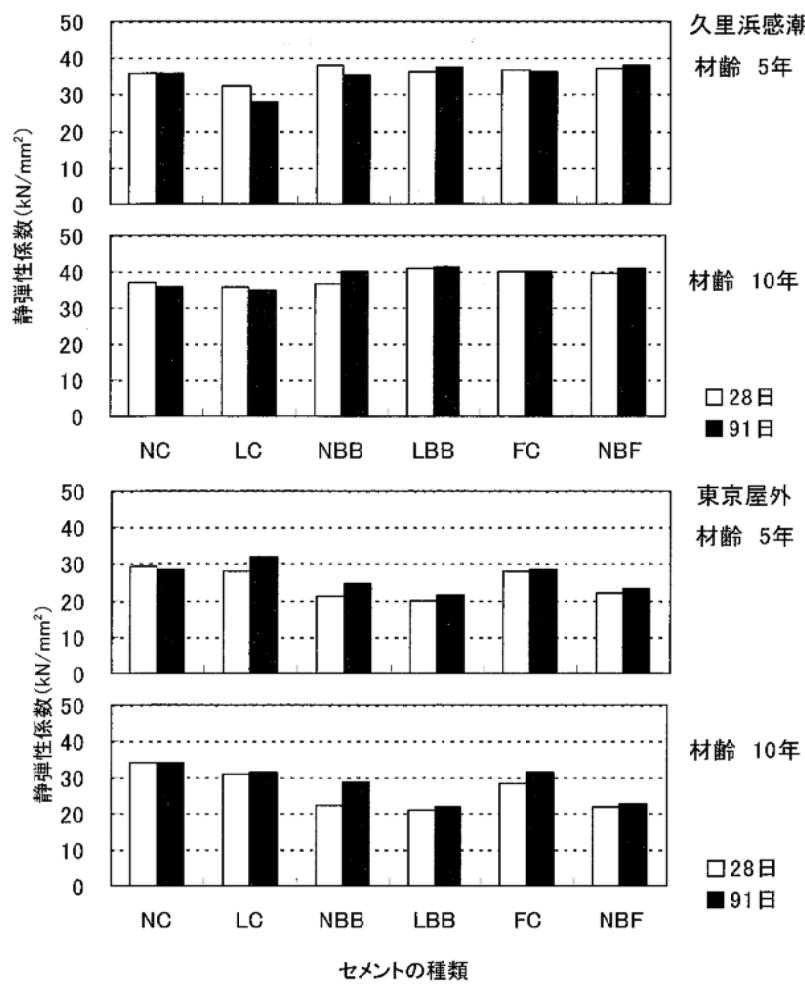


図-5.3.3 前養生期間 28 日と 91 日の静弾性係数（水結合材比 50%）

5.4 中性化深さ

(1) 暴露条件による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日における材齢と中性化深さの関係を図-5.4.1 に示す。

中性化深さは、いずれのセメントについても、東京屋外部 > 久里浜海浜部 > 酒田感潮部 = 久里浜感潮部の順になった。感潮暴露では、海水中に浸漬されるため、ほとんど中性化は認められなかった。

東京屋外部の方が久里浜海浜部より中性化深さが大きくなつた理由としては、「3.5 各暴露条件による気象・環境状況」の図-3.5.3 より、東京の年平均相対湿度が約 60%に対して久里浜の年平均相対湿度が約 79%であり、東京屋外部の方が乾燥していること、久里浜海浜部では水分を含んだ飛来塩化物が供試体表面部へ付着することで炭酸ガスの侵入が抑制されたこと等によると考えられる。

全般に、材齢の平方根と中性化深さの関係は比例関係を示したが、東京屋外部において高炉スラグセメント系では、材齢 5 年から 10 年にかけての中性化深さの増加量が、材齢 5 年までの増加量に比べ大幅に大きくなつた。

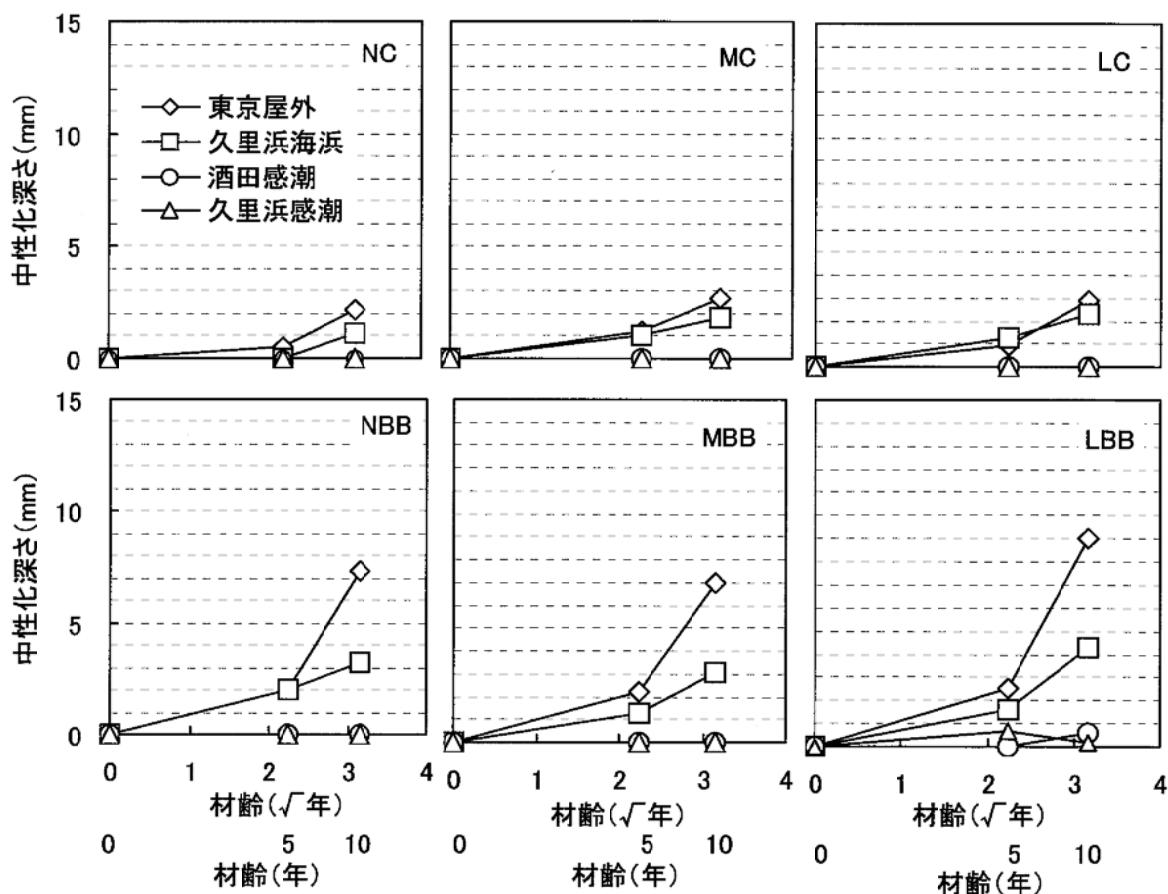


図-5.4.1 材齢と中性化深さの関係（水結合材比 50%、前養生期間 28 日）（1/2）

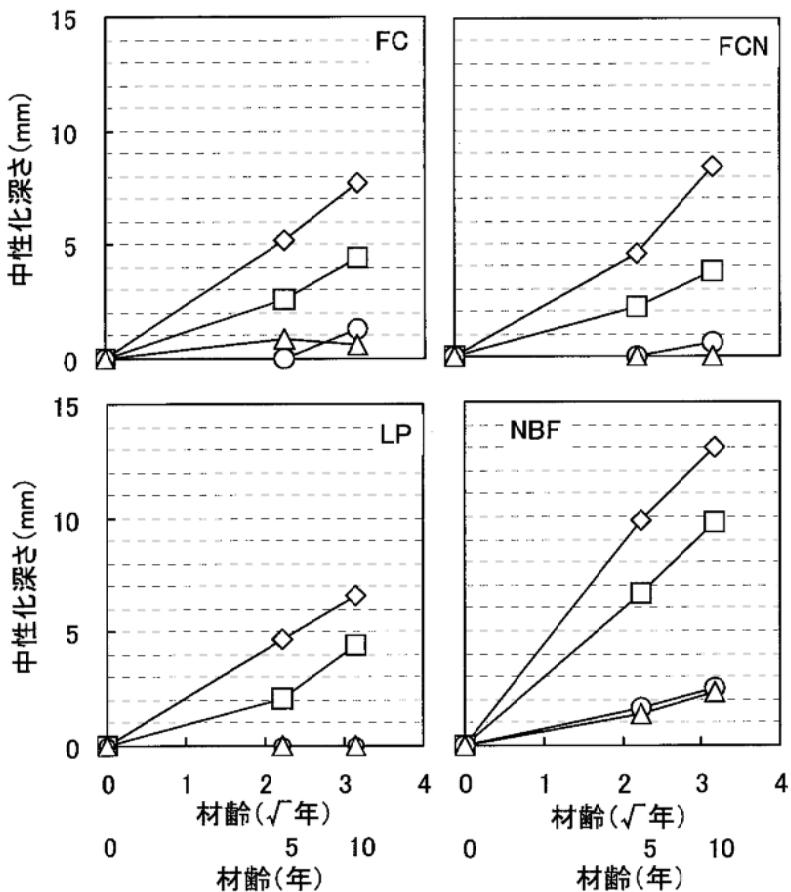


図-5.4.1 材齢と中性化深さの関係（水結合材比 50%、前養生期間 28 日）（2/2）

(2) セメントの種類による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類と中性化深さの関係を図-5.4.2 に示す。

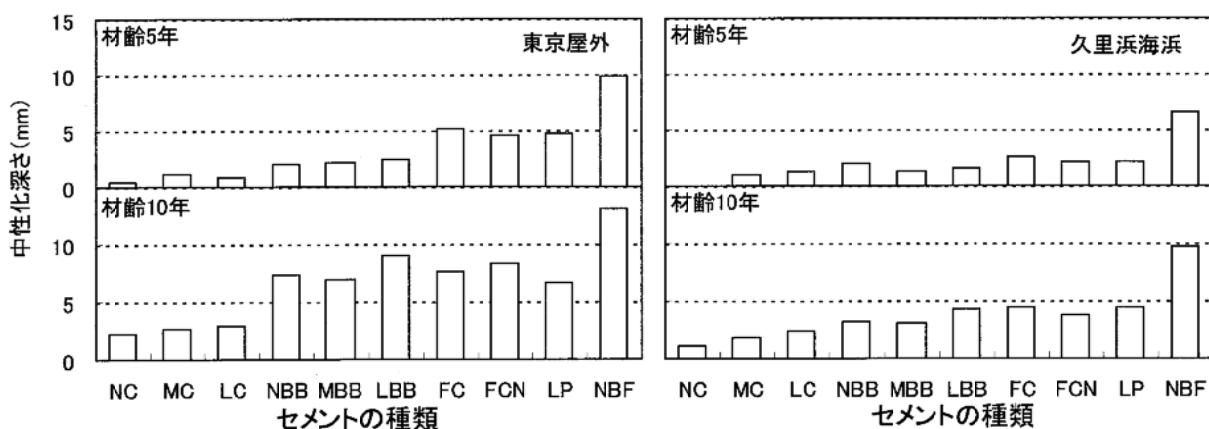


図-5.4.2 セメントの種類と中性化深さの関係（水結合材比 50%、前養生期間 28 日）

ポルトランドセメント系で比較した場合、中性化深さは、NC が最も小さくなったものの、その差は 1mm 程度であり、セメント種類間で大差がないと判断される。ポルトランドセメント系と混合セメント系を比較した場合、混合セメント系の方が中性化深さは大きくなかった。この理由としては、ポルトランドセメント量の減少により水酸化カルシウムの生成量が減少したことや高

炉スラグやフライアッシュの水和反応により水酸化カルシウムが消費されたこと等によるものと考えられる。

混合セメント系で比較すると、いずれの暴露条件でも、材齢 5 年では、NBF > フライアッシュセメント系 ≈ LP > 高炉スラグセメント系の順になったが、材齢 10 年では、NBF > フライアッシュセメント系 ≈ LP ≈ 高炉スラグセメント系となり、材齢の経過により、中性化に対する抵抗性がセメント間で異なった。

高炉スラグセメント系とフライアッシュセメント系を比較すると、高炉スラグセメント系の置換率は 50% でフライアッシュセメント系の置換率 30% よりも大きいにも関わらず、材齢 5 年では高炉スラグセメント系の中性化深さはフライアッシュセメント系よりも小さくなつた。これは、高炉スラグの潜在水硬性がフライアッシュのポゾラン反応よりも早く^{10) 11)}、組織の緻密化が進んだためと考えられる。

また、高炉スラグセメント系においてベースのポルトランドセメントの種類で比較すると、中性化深さは LBB が若干大きくなったものの、その差は 2mm 以下であり、大差がないと判断される。

石灰石微粉末を混合した LP の場合、中性化深さは高炉スラグセメント系やフライアッシュセメント系と同等であった。この理由としては、LP は、高炉スラグセメント系やフライアッシュセメント系に比べ、暴露開始時の圧縮強度が低いが水酸化カルシウムを消費しないために両者の影響が相殺されてほぼ同等になったと考えられる。

NBF を使用した場合、混和材の置換率が最も大きいため、中性化深さが最も大きくなつたと考えられる。

(3) 水セメント比による比較

前養生期間 28 日におけるポルトランドセメント系の水セメント比と中性化深さの関係を図-5.4.3 に示す。

材齢およびセメントの種類によらず、水セメント比と中性化深さには相関が認められ、水セメント比が大きくなるほど、中性化深さが大きくなる傾向にあつた。

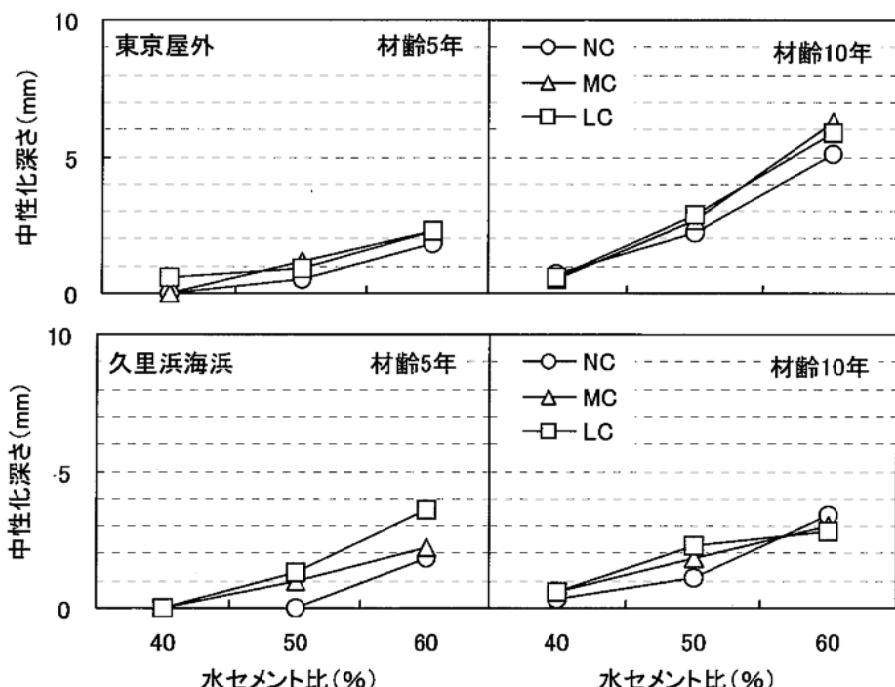


図-5.4.3 ポルトランドセメント系の水セメント比と中性化深さの関係（前養生期間 28 日）

前養生期間 28 日における有効水結合材比と中性化速度係数の関係を図-5.4.4 に示す。

同図には土木学会 2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]¹²⁾の解説に示された中性化速度係数の予測式より求めた結果も併せて記載した。示方書解説に示された中性化速度係数の予測式(以下、土木学会式)を式-5.4.1 に示す。

$$\alpha = -3.57 + 9.0W/B \quad \text{式-5.4.1}$$

ここに、 α : 中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$)

W/B : 有効水結合材比 = $W/(C_p + k \cdot A_d)$

W : 単位体積あたりの水の質量

B : 単位体積あたりの有効水結合材の質量

C_p : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

A_d : 単位体積あたりの混和材の質量

k : 混和材の種類により定まる定数

(フライアッシュの場合は $k=0$ 、高炉スラグ微粉末の場合は $k=0.7$ 、

石灰石微粉末の場合は、フライアッシュと同様に $k=0$ とした。)

有効水結合材比は、式-5.4.1 における有効水結合材比の数式から求め、中性化速度係数は、材齢 5 年と材齢 10 年の中性化深さから直線回帰して求めた。

暴露条件ごとに比較すると、東京屋外では土木学会式に比較的近い値を示し、久里浜海浜部ではそれより小さい結果となった。また、いずれの暴露条件においても有効水結合材比と中性化深さは、良好な比例関係を示した。暴露条件によって中性化速度係数に差が生じた理由としては、前述の通り乾燥の程度等が影響したものと考えられる。

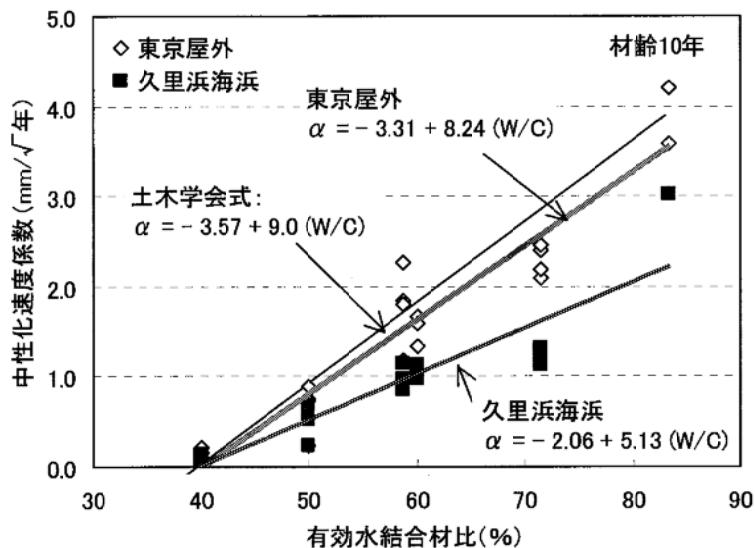


図-5.4.4 有効水結合材比と中性化速度係数の関係（前養生期間 28 日）

前養生期間 28 日における材齢 5 年と材齢 10 年の中性化速度係数の関係を図-5.4.5 に示す。

材齢 5 年に比べて、材齢 10 年の中性化速度係数が若干大きくなる傾向にあった。

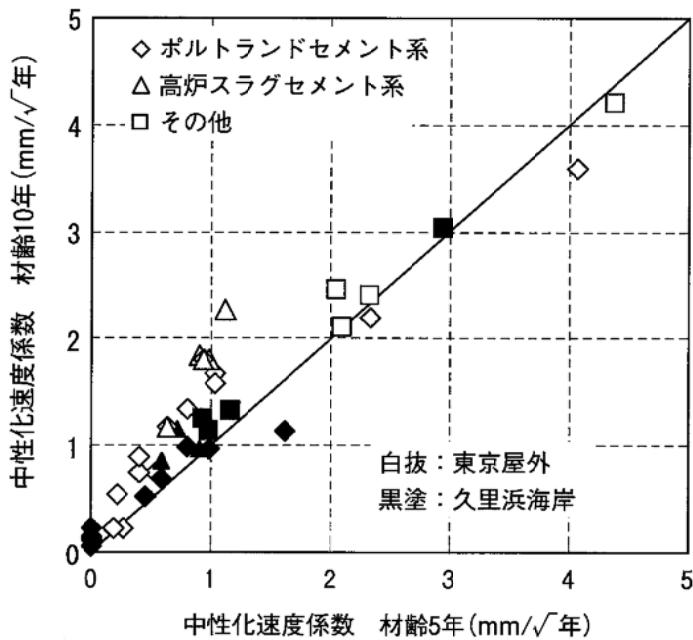


図-5.4.5 材齢 5 年と材齢 10 年の中性化速度係数の関係（前養生期間 28 日）

(4)暴露前養生期間による比較

水結合材比 50%における前養生期間 28 日と 91 日の中性化深さを図-5.4.6 に示す。

前養生期間を 91 日とした場合の中性化深さは、前養生期間 28 日の場合と比べ、材齢 5 年では大差がなかったが、材齢 10 年では小さくなる傾向を示した。ただし、久里浜感潮部では、ほとんど中性化が進行していないため、明確な傾向は認められなかった。材齢 5 年で中性化深さに差が生じなかた理由は明確でないが、前養生期間を 91 日にすることで資料編 1 の「1.1 圧縮強度および静弾性係数試験の測定結果」に示すように暴露開始時の圧縮強度が 10N/mm^2 程度大きくなつたことから組織が緻密になつたことが影響していると考えられる。

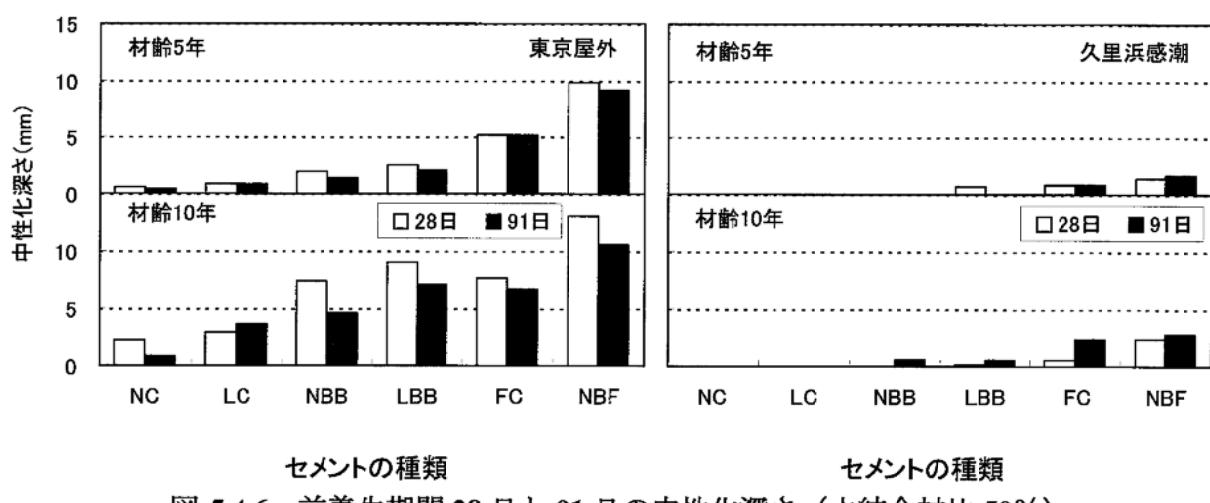


図-5.4.6 前養生期間 28 日と 91 日の中性化深さ（水結合材比 50%）

5.5 塩化物イオン濃度

5.5.1 塩化物イオン濃度の分布

塩化物イオン濃度の分布は、「4.試験方法」の4.1.4により、各試料毎に深さ方向に対して塩化物イオン濃度を測定した。この測定結果の一例として久里浜感潮部におけるNCおよびNBBの塩化物イオン濃度の分布を図-5.5.1.1に示す。

なお、これらの詳細は資料編1.3の「塩化物イオン濃度の測定結果および塩化物イオンの見掛けの拡散係数、表面塩化物イオン濃度」に示す。資料編1.3からもわかるように、ポルトランドセメント系および石灰石微粉末を混合したLPは深さ方向に対してなだらかな勾配で、LPを除く混合セメント系は急な勾配である。深さ方向に対してはLPを除く混合セメント系の方が塩化物イオン濃度が小さい結果であった。

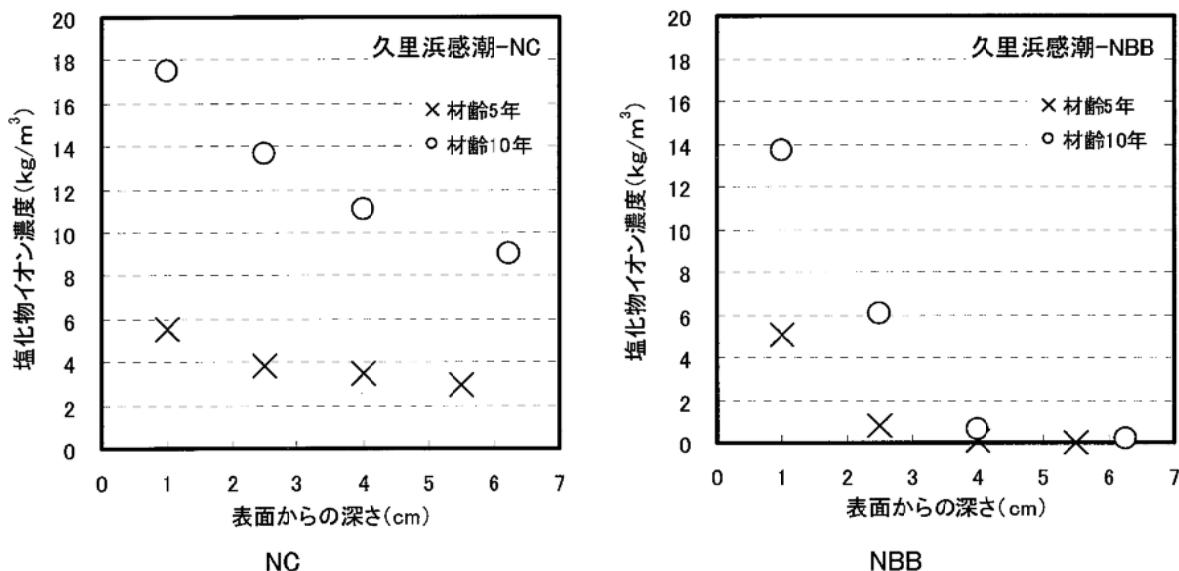


図-5.5.1.1 塩化物イオン濃度の分布の一例
(久里浜感潮部、水結合材比50%、前養生期間28日)

5.5.2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度

5.5.1の塩化物イオン濃度の分布から塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を算出した。塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度は、Fickの拡散方程式を円柱座標系に変換して算出した¹³⁾。なお、算出に際しては、コンクリートに換算した塩化物イオン濃度と式-5.5.2.1を用いた計算結果から最小二乗法を用いて、式-5.5.2.2に示す誤差が最小となるような塩化物イオンの見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度の組み合わせを算出した。

円柱座標系に変換したFickの拡散方程式の解

$$C = C_0 + 2(C_{ini} - C_0) \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{S_n J_1(S_n)} \right) J_0 \left(S_n \frac{r}{R} \right) \exp \left(- \left(\frac{S_n}{R} \right)^2 D_c t \right) \quad \text{式-5.5.2.1}$$

C : 塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C₀ : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C_{ini} : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m³) ※ゼロと設定した。

r : 半径方向中心からの距離 (cm)

R : 供試体半径 (cm)

D_c : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/年)

t : 時間 (年)

$$J_n : \text{第1種ベッセル関数} \quad S_n : J_0(S) = 0 \text{ の解} \quad J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{n+2k}$$

$$\text{error} = \sum_{k=1}^n (C_{\text{measured}} - C_{\text{calculated}})^2 \quad \text{式-5.5.2.2}$$

この算出結果の一例として図-5.5.1.1 と同様、久里浜感潮部における塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の回帰曲線を図-5.5.2.1 に示す。

なお、これらの詳細は資料編 1.3 の「塩化物イオン濃度の測定結果および塩化物イオンの見掛けの拡散係数、表面塩化物イオン濃度」および資料編 1.4 の「塩化物イオン濃度と回帰曲線」に示す。

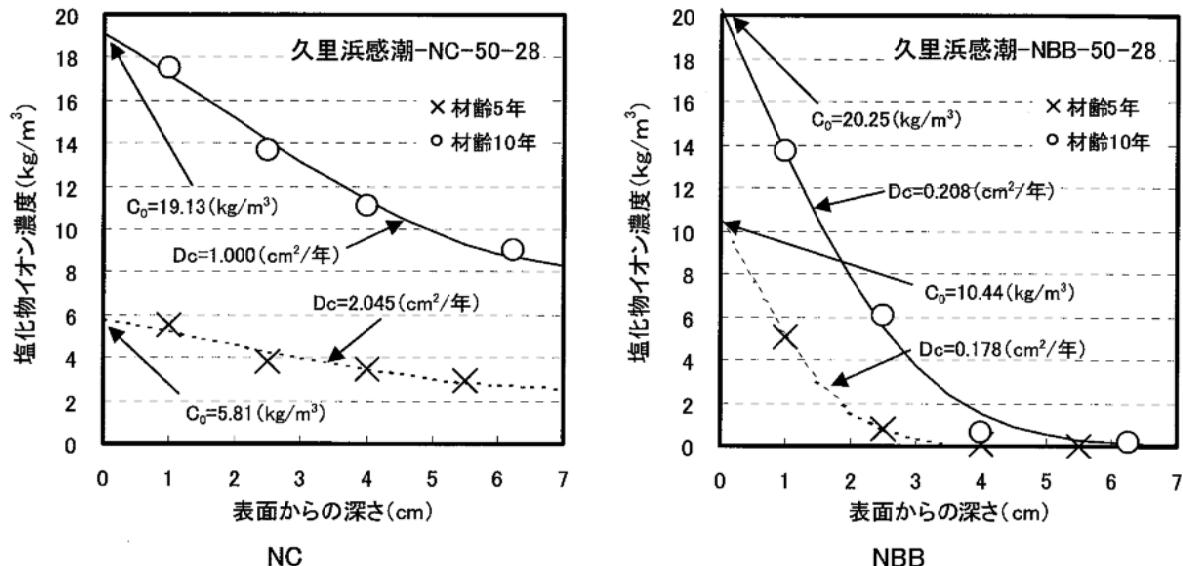


図-5.5.2.1 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の回帰曲線の一例（久里浜感潮部、水結合材比 50%、前養生期間 28 日）

(1) 暴露条件による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日における材齢 5 年と 10 年の表面塩化物イオン濃度の比較を図-5.5.2.2、塩化物イオンの見掛けの拡散係数の比較を図-5.5.2.3 に示す。

表面塩化物イオン濃度は、いずれの暴露条件においても全てのセメントで材齢 5 年に比べて材齢 10 年の方が大きくなつた。

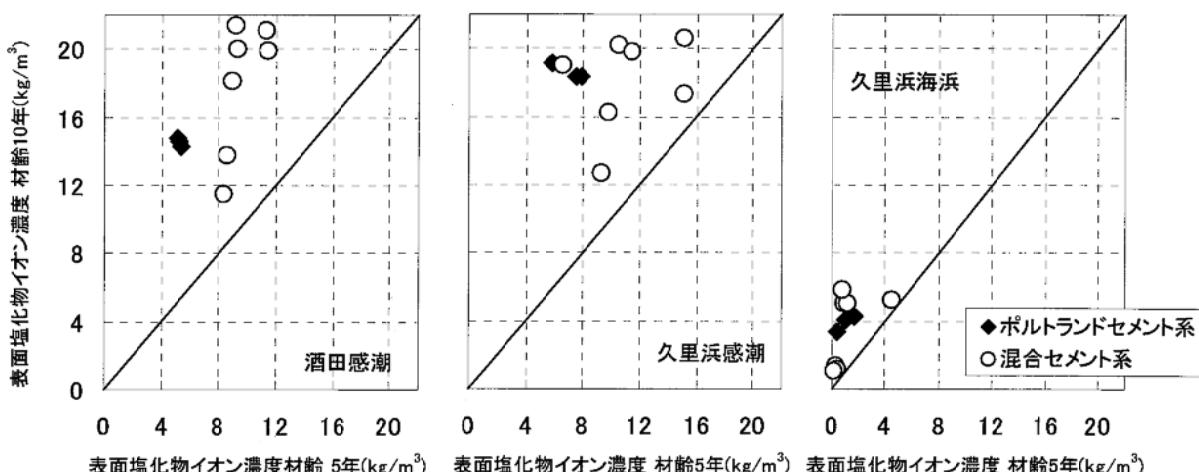


図-5.5.2.2 材齢 5 年と 10 年の表面塩化物イオン濃度の比較
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日)

塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、感潮暴露にて、いずれのセメントにおいても材齢 5 年と 10 年の間には概ね正の相関が見られ、ポルトランドセメント系の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は材齢 5 年に比べて材齢 10 年の方が小さくなる傾向が認められた。一方、混合セメント系では 5 年および 10 年材齢においても塩化物イオンの見掛けの拡散係数が小さく明確な関係は見られなかった。また、久里浜海浜部では、いずれのセメントにおいても 5 年および 10 年材齢の塩化物イオンの見掛けの拡散係数が小さく、明確な関係が認められなかった。

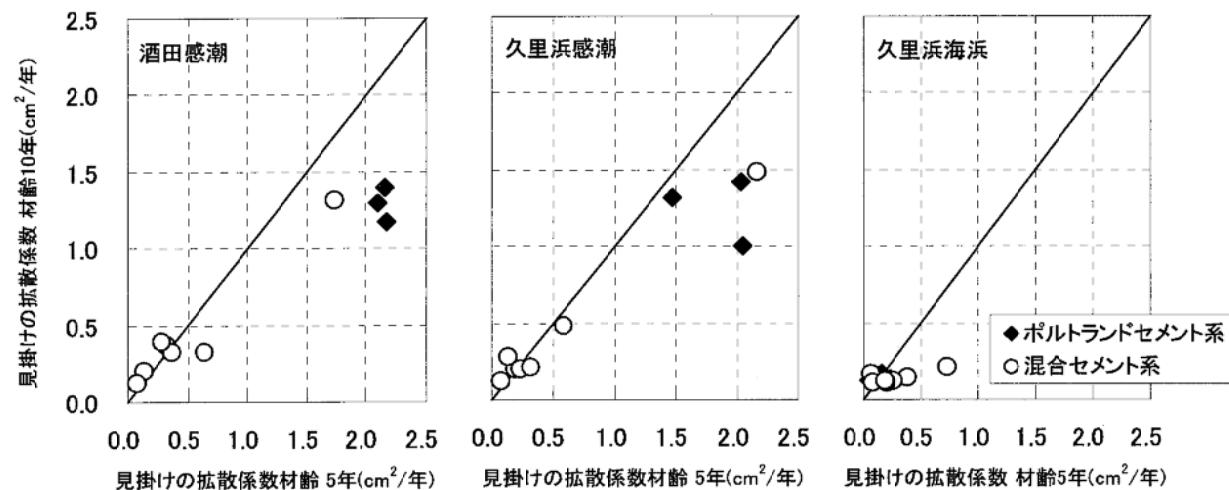


図-5.5.2.3 材齢 5 年と 10 年の塩化物イオンの見掛けの拡散係数の比較
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日)

感潮暴露を対象に水結合材比 50%、前養生期間 28 日における材齢 5 年と 10 年の表面塩化物イオン濃度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の比較を図-5.5.2.4 に示す。

感潮暴露は、ともに材齢 5 年と材齢 10 年では塩化物イオンの見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度の関係の傾向が異なり、明確な関係が認められなかった。すなわち、材齢が 5 年から 10 年にかけて、混合セメント系の場合、塩化物イオンの見掛けの拡散係数に大きな変化はないが表面塩化物イオン濃度は大きくなつた。一方、ポルトランドセメント系の場合、塩化物イオンの見掛けの拡散係数の低下とともに表面塩化物イオン濃度が増加する傾向が確認された。

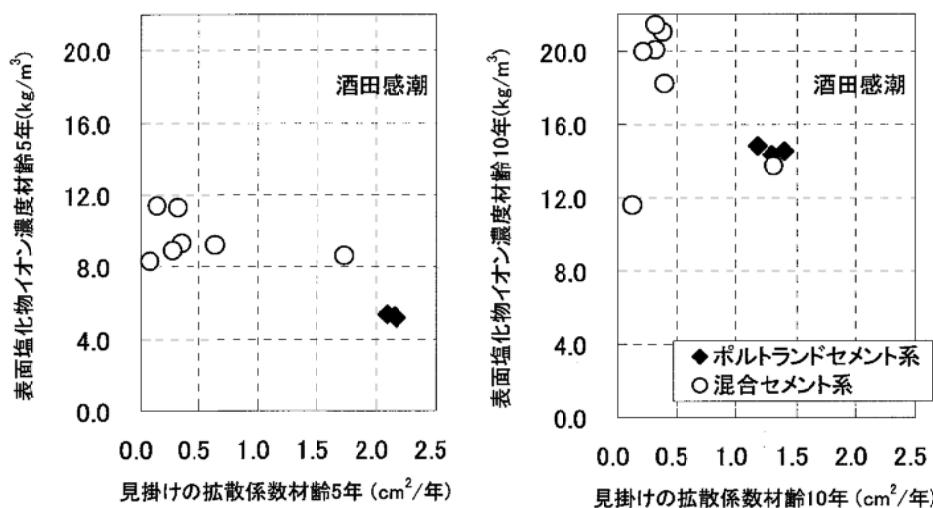


図-5.5.2.4 塩化物イオンの見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度の比較
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齢 5 年および 10 年) (1/2)

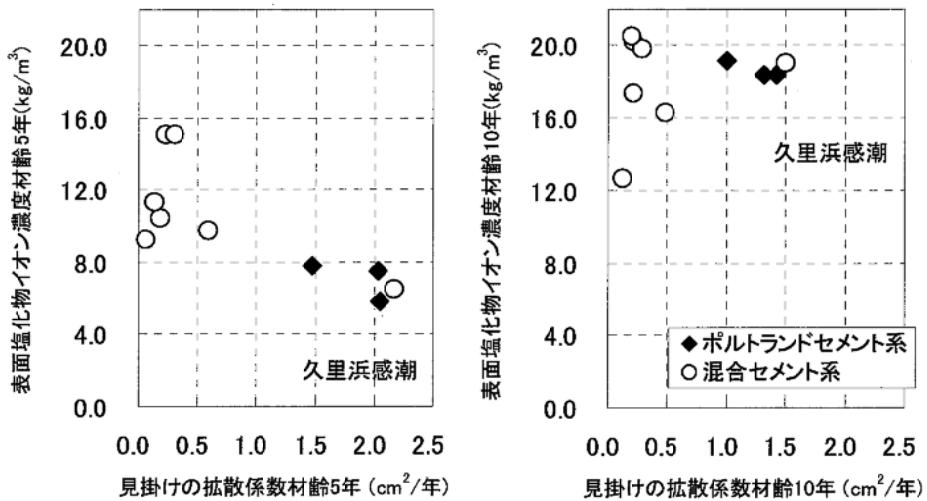


図-5.5.2.4 塩化物イオンの見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度の比較
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齢 5 年および 10 年) (2/2)

感潮暴露を暴露条件として、水結合材比 50%、前養生期間 28 日における表面塩化物イオンと塩化物イオンの見掛けの拡散係数の比較を図-5.5.2.5、引上げ直後の供試体の外観を写真-5.5.2 に示す。

材齢 5 年および 10 年において、酒田感潮部と久里浜感潮部の塩化物イオンの見掛けの拡散係数はほぼ同等であるが、表面塩化物イオン濃度は酒田感潮部に比べて久里浜感潮部の方が大きな値を示す傾向がある。この理由として写真-5.5.2.1 のようにコンクリート表面への海生生物の付着の違い¹⁴⁾や「3.5 各暴露条件による気象・環境状況」の図-3.5.1 による気温や海水の温度の気象条件などが関係していると考えられる。

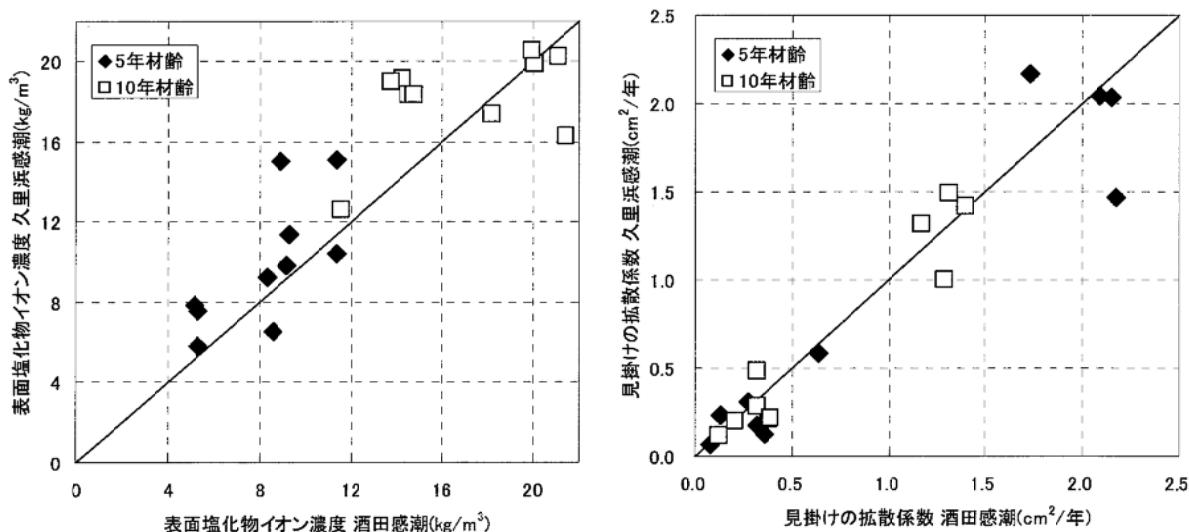


図-5.5.2.5 酒田感潮部および久里浜感潮部の塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の比較 (水結合材比 50%、前養生期間 28 日)

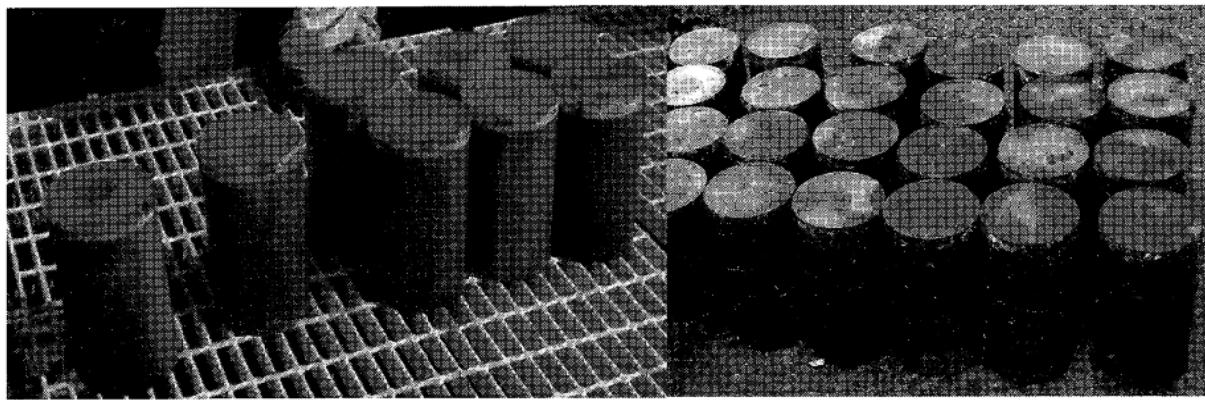


写真-5.5.2.1 引上げ直後の供試体の外観（左写真：久里浜感潮部、右写真：酒田感潮部）

(2) セメントの種類による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日における感潮暴露での材齢 10 年のセメントの種類と塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の関係を図-5.5.2.6 に示す。

なお、図中には土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕¹²⁾の解説に示されている予測式から算出した「普通ポルトランドセメントを使用する場合」および「高炉セメントやシリカフュームを使用する場合」の塩化物イオンの見掛けの拡散係数および過去の類似の構造物の実績や実測データによらない場合に求めてもよいとされる飛沫帶における表面塩化物イオン濃度 (13kg/m^3) を併記する。

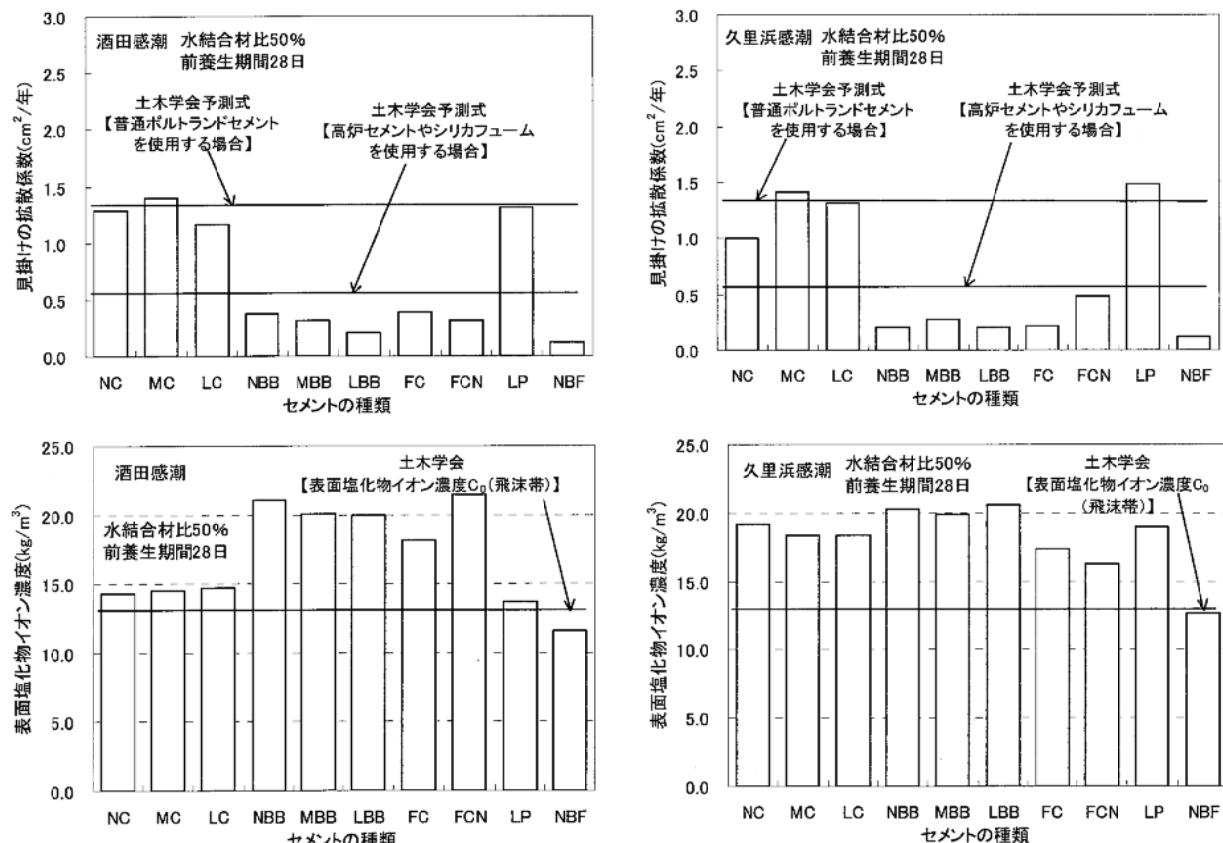


図-5.5.2.6 セメントの種類と塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の関係（材齢 10 年、水結合材比 50%、前養生期間 28 日）

ポルトランドセメント系の場合、セメント種類の違いが塩化物イオンの見掛けの拡散係数に及ぼす影響は小さく、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は同程度であった。高炉スラグセメント系やフライアッシュセメント系の場合、ポルトランドセメント系に比べて塩化物イオンの見掛けの拡散係数は著しく小さくなってしまい、塩化物の浸透に対する抑制効果が認められ、特に NBF では顕著であった。

高炉スラグ微粉末を用いた場合、ポルトランドセメントの種類、すなわち、NBB、MBB、LBB では塩化物の浸透に大きな違いは認められなかった。フライアッシュを用いた場合、フライアッシュⅡ種 (FC) とⅢ種 (FCN) とでは塩化物の浸透に大きな差は認められなかった。

石灰石微粉末を混合した LP を用いた場合、高炉スラグ微粉末やフライアッシュのような浸透抑制効果は認められなかった。

また、感潮暴露での比較ではあるが、ポルトランドセメント系の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は示方書解説中の予測式に比べてほぼ同程度、一方、高炉スラグセメント系は予測式に比べて小さい傾向を示した。表面塩化物イオン濃度については示方書で示されている飛沫帯と今回の感潮暴露による違いはあるが、材齢 10 年暴露した表面塩化物イオン濃度は示方書の 13kg/m^3 と同等以上であり、特に NBF を除く高炉スラグセメント系およびフライアッシュセメント系で顕著に大きかった。

(3) 水セメント比による比較

前養生期間 28 日における材齢 10 年のポルトランドセメント系の水セメント比と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係を図-5.5.2.7 に示す。

いずれの暴露条件においても水セメント比が小さくなるほど塩化物イオンの見掛けの拡散係数も小さくなる傾向が認められたが、セメントの種類による影響は判然としなかった。気中暴露（久里浜海浜部）では塩化物の浸透がわずかであり、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は感潮暴露に比べると小さいが、水セメント比 40 および 50% に比べると水セメント比 60% では若干大きくなる傾向が見られた。

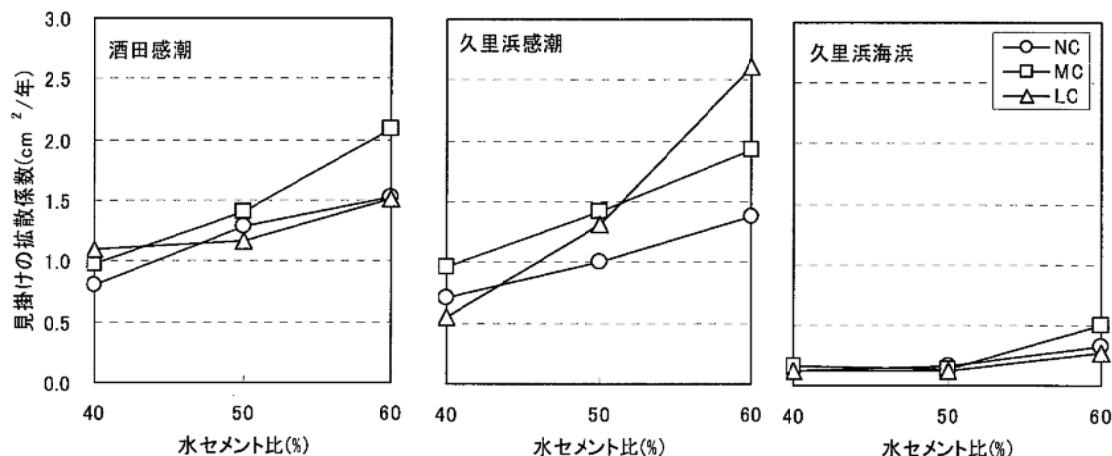


図-5.5.2.7 ポルトランドセメント系の水セメント比と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係（材齢 10 年、前養生期間 28 日）

(4) 暴露前養生期間による比較

水結合材比 50%における前養生期間 28 日と 91 日の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を図-5.5.2.8 に示す。

前養生期間 28 日と 91 日の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を比較すると、セメント種類によ

らず同程度であり、前養生期間 28 日と 91 日では塩化物イオンの見掛けの拡散係数への影響は認められなかった。

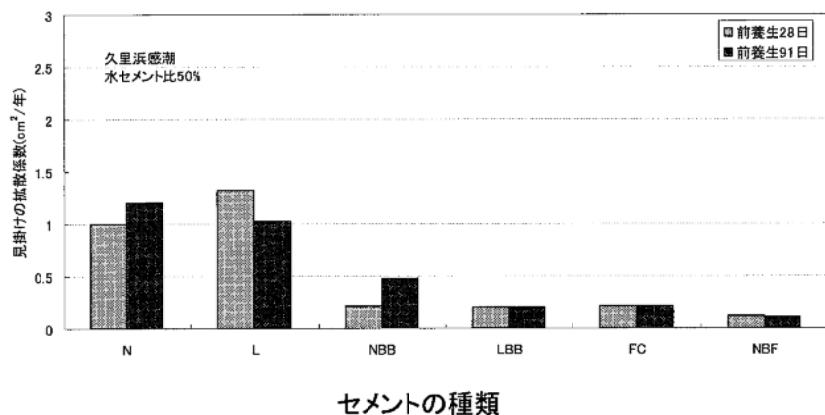


図-5.5.2.8 前養生期間 28 日と 91 日の塩化物イオンの見掛けの拡散係数
(水結合材比 50%)

5.6 X線回折

セメントの水和により生成したポルトランダイト（水酸化カルシウム）、エトリンガイト、モノサルフェートなどは、海水の浸入を受けることにより海水中に含まれる塩化物イオン、硫酸イオン、マグネシウムイオンなどと反応して、フリーデル氏塩やエトリンガイト、せっこう、ブルーサイト（水酸化マグネシウム）などを二次的に生ずる。こうした各鉱物の生成量や炭酸化により生じたカルサイト（炭酸カルシウム）の生成量を調べることによって、コンクリートが受けた影響を評価することが可能である。

一例として粉末X線回折図と強度比測定ピーク位置を図-5.6.1に示す。暴露開始時および材齢5年および10年におけるポルトランダイト（水酸化カルシウム）、カルサイト（炭酸カルシウム）、エトリンガイト、モノサルフェート、フリーデル氏塩各相の生成量を内部標準物質（ZnO）に対するピーク強度比を図-5.6.1から求めた。

なお、これらの詳細は資料編1.5の「X線回折試験の測定結果」に示す。資料編1.5の「X線回折試験の測定結果」からわかるように、エトリンガイトおよびモルサルフェートの相対強度はその他のポルトランダイト（水酸化カルシウム）、カルサイト（炭酸カルシウム）、フリーデル氏塩の相対強度に比べてかなり低いものが多かったため、本項ではポルトランダイト（水酸化カルシウム）、カルサイト（炭酸カルシウム）、フリーデル氏塩を対象に整理した。

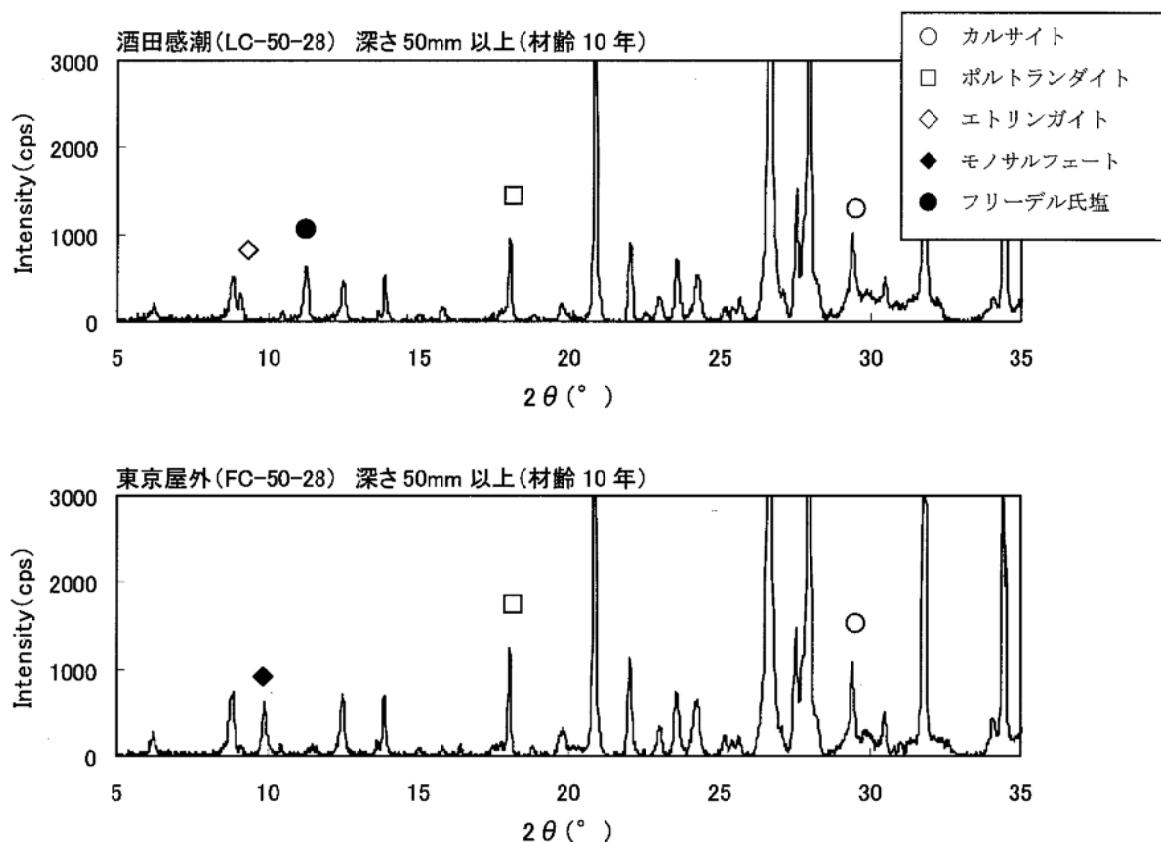


図-5.6.1 粉末X線回折図と強度比測定ピーク位置

5.6.1 カルサイト

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類とカルサイトの相対強度の関係を図-5.6.1.1、前養生期間 28 日と 91 日のカルサイトの相対強度を図-5.6.1.2、ポルトランドセメント系の水セメント比とカルサイトの相対強度を図-5.6.1.3 に示す。

暴露開始時におけるカルサイト（炭酸カルシウム）の相対強度は、石灰石微粉末を添加した LP が他のセメントに比べ高くなつたが、LP を除くその他のセメントはほぼ同等であった。

暴露後のカルサイトの相対強度は、酒田感潮部を除くと、東京屋外部>久里浜海浜部>久里浜感潮部の順であり、中性化深さの傾向と一致した。ただし、酒田感潮部の場合、カルサイトの相対強度が高くなつた理由は明確でない。なお、LP は石灰石微粉末を混合しているためにいずれの暴露条件においてもカルサイト（炭酸カルシウム）の相対強度が見かけ上高いため、LP を除外して暴露条件毎に考察すると以下の通りである。

(1) 感潮暴露

混合セメント系のカルサイト量は、ポルトランドセメント系に比べて同等以上であった。カルサイト（炭酸カルシウム）はポルトランダイト（水酸化カルシウム）やその他水和生成物が炭酸化することで生じるが、感潮暴露では中性化がほとんど生じていないことや深さ 5~15mm の部分と深さ 50mm 以上の部分で大きな差がみられなかつたことなどから、ポルトランドセメント系ではカルサイト（炭酸カルシウム）が一部溶脱したために混合セメント系のカルサイト（炭酸カルシウム）がポルトランドセメント系と同等以上になつた可能性がある。

また、前養生期間 91 日に比べて前養生期間 28 日の方が相対強度が低かつた。ポルトランドセメント系において水セメント比と相対強度には明確な関係が認められなかつた。

(2) 気中暴露

①久里浜海浜部

材齢 10 年の深さ 5~15mm の部分では混合セメント系の方がポルトランドセメント系より相対強度が高くなつたが、その他の材齢および試料の採取位置では明確な関係が得られなかつた。

ポルトランドセメント系における水セメント比との関係は明確でなかつた。深さ 5~15mm の部分と深さ 50mm 以上の部分の相対強度は、材齢 5 年では大差がなかつたが、材齢 10 年では深さ 5~15mm の部分の方が多くなる傾向が認められた。これは中性化の進行によるものと考えられる。

②東京屋外部

混合セメント系の方がポルトランドセメント系より相対強度が高くなる傾向を示した。また、ポルトランドセメント系では材齢 5 年で深さ 5~15mm の部分と深さ 50mm 以上の部分で大差がなかつたが、材齢 10 年で深さ 5~15mm の部分の方が多くなつた。混合セメント系では、材齢にかかわらず深さ 5~15mm の部分の方が高くなつた。

いずれのセメントも深さ 5~15mm の部分の相対強度は材齢の経過とともに高くなつた。前養生期間を 91 日にした場合も同様の傾向を示しており、前養生期間 28 日とほぼ同等であった。ポルトランドセメント系において、水セメント比とカルサイト（炭酸カルシウム）の相対強度の関係は深さ 5~15mm の部分では相関関係にあり、水セメント比が高いほど生成量は多くなつた。

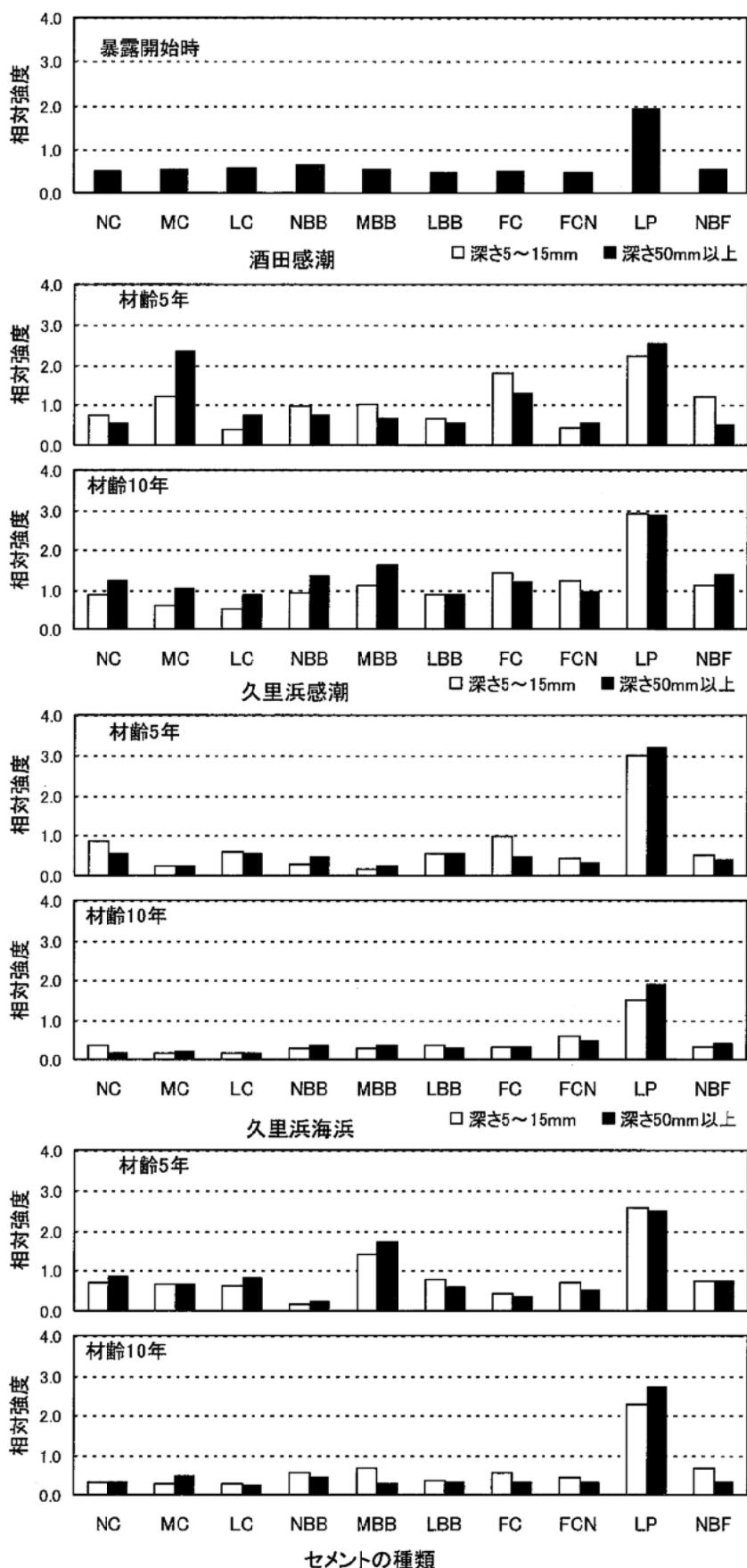


図-5.6.1.1 セメントの種類とカルサイトの相対強度の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日) (1/2)

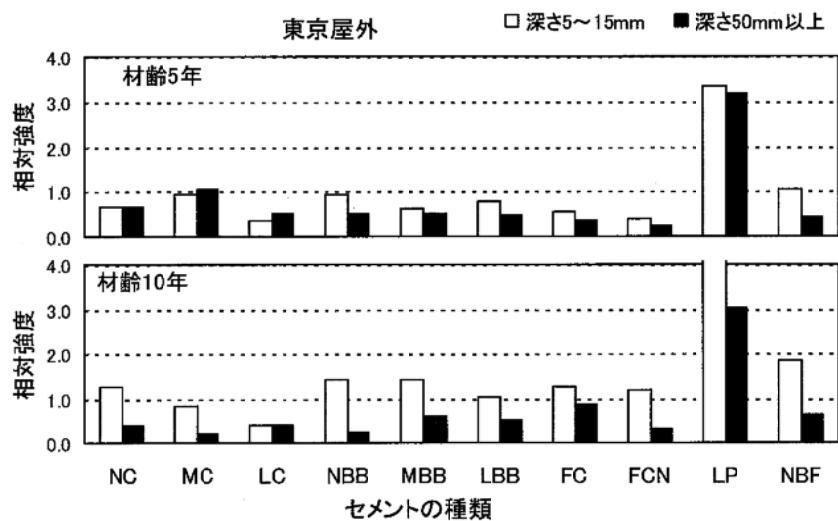


図-5.6.1.1 セメントの種類とカルサイトの相対強度の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日) (2/2)

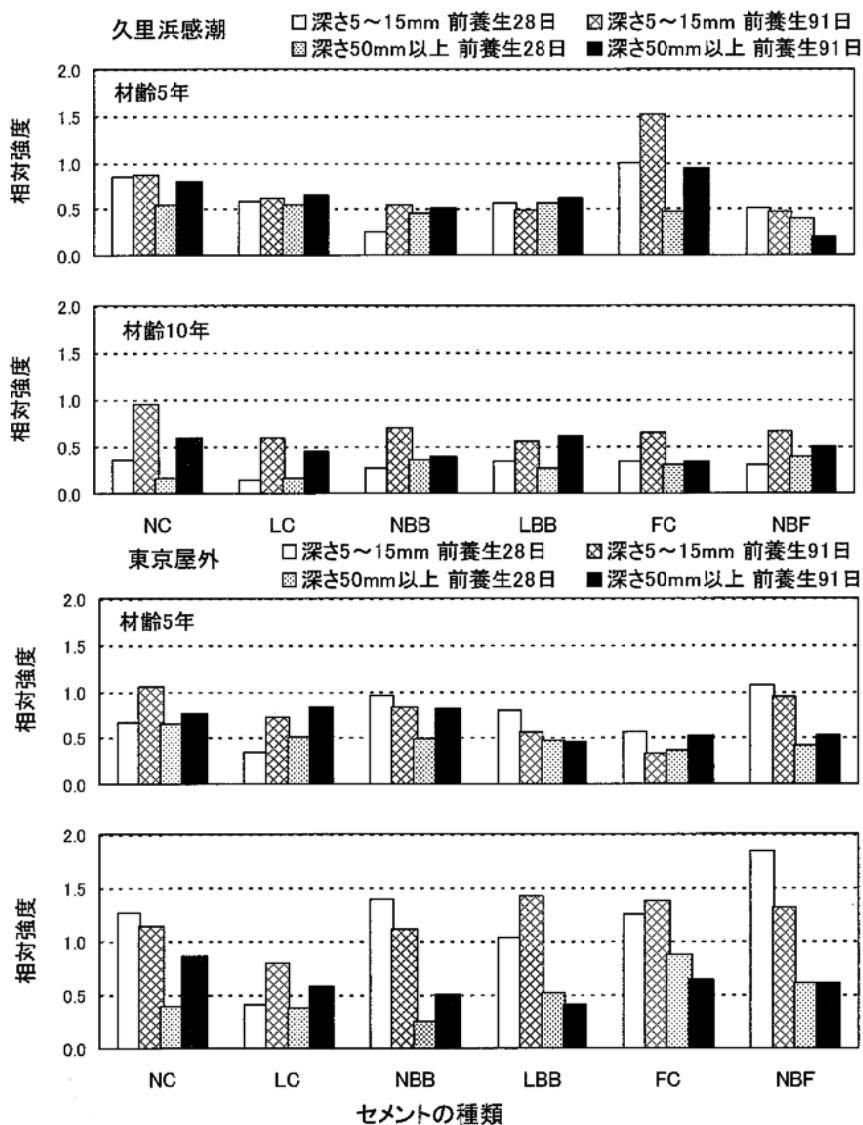


図-5.6.1.2 前養生期間 28 日と 91 日のカルサイトの相対強度 (水結合材比 50%)

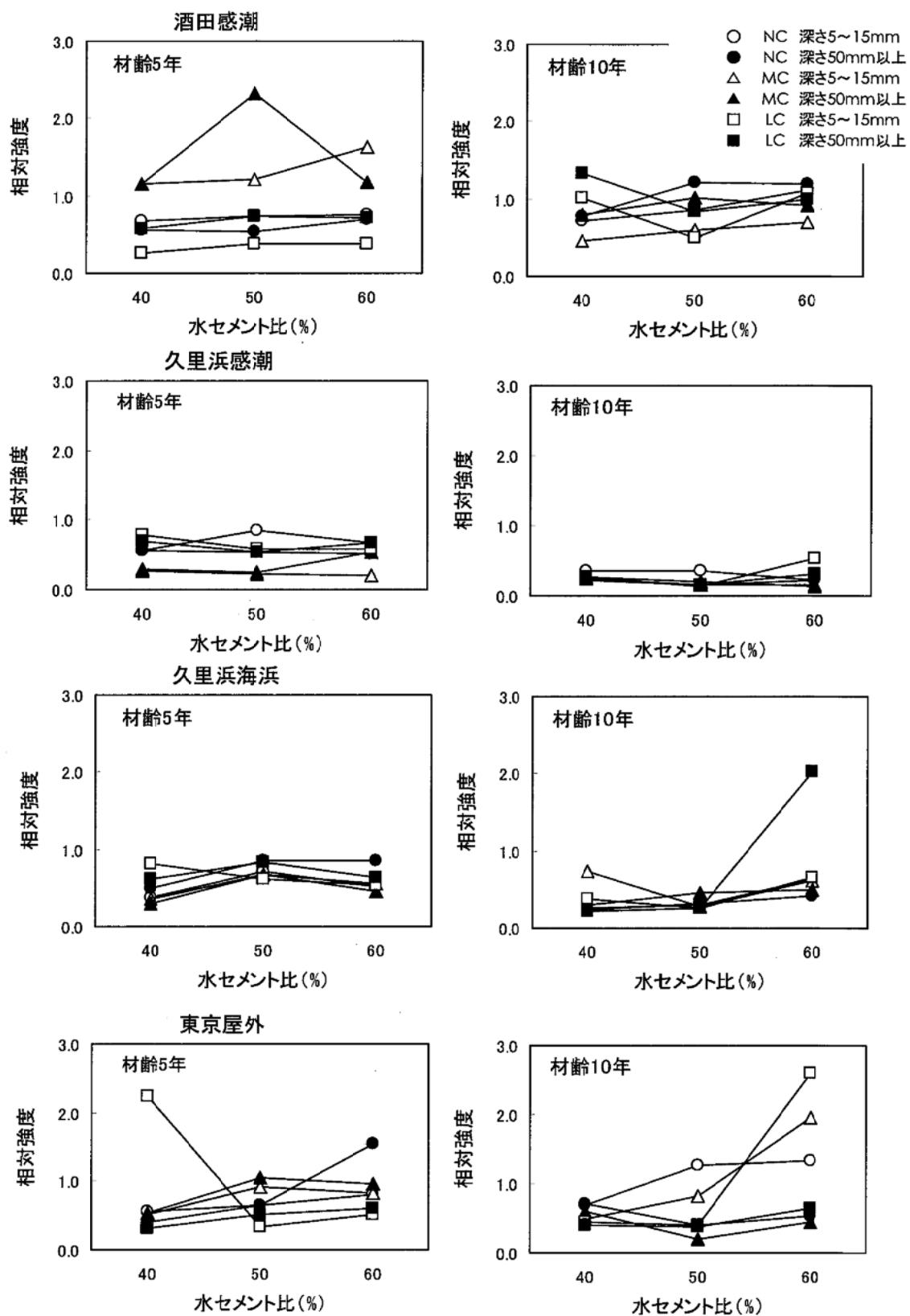


図-5.6.1.3 ポルトランドセメント系の水セメント比とカルサイトの相対強度
(前養生期間 28 日)

5.6.2 ポルトランダイト

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類とポルトランダイトの相対強度の関係を図-5.6.2.1、前養生期間 28 日と 91 日のポルトランダイトの相対強度を図-5.6.2.2、ポルトランドセメント系の水セメント比とポルトランダイトの相対強度を図-5.6.2.3 に示す。

暴露開始時のポルトランダイト（水酸化カルシウム）の相対強度は、ポルトランドセメント系 \approx LP > フライアッシュセメント系 > 高炉スラグセメント系 \approx NBF の順であった。ポルトランダイト（水酸化カルシウム）は、セメントの水和により生成されて高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混合材の水和反応により消費されるため、混合材の置換率が多いものほど低かった。

また、エーライト (C_3S) とビーライト (C_2S) では、 C_3S の方が生成量が多いため、普通ポルトランドセメントの方が低熱ポルトランドセメント系より相対強度が高かった。

暴露条件におけるポルトランダイト（水酸化カルシウム）の相対強度は、ポルトランドセメント系では明確な傾向が認められなかつたが、混合セメント系では、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の方が感潮暴露より高かつた。これは、水の供給が少ない気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、混和材の水和反応が鈍化したためと考えられる。暴露条件毎に考察すると以下の通りである。

(1) 感潮暴露

ポルトランドセメント系の方が混合セメント系より高く、混合セメントでは、生成が全く認められないものもあつた。これは、海水の浸入により混和材の水和反応の進行によると考えられ、総じて、ポルトランダイト（水酸化カルシウム）の相対強度は深さ 50mm 以上の部分より水の供給が多い深さ 5~15mm の部分の方が低かつた。ポルトランドセメント系では、W/C が小さいほど相対強度が高くなる傾向になり、水セメント比が 50% および 60% で極僅かもしくは全く認められないものがあつた。感潮暴露では中性化がほとんど進行していないため、海水中のマグネシウムイオンや硫酸イオン等との化学作用により消費された可能性がある。この傾向は、感潮暴露したポルトランドセメント系の圧縮強度発現性が鈍化したことと符合する。

酒田感潮部と久里浜感潮部で比較した場合、材齢 5 年では明確な傾向が認められなかつたが、材齢 10 年では、酒田感潮部の方が久里浜感潮部より相対強度が高かつた。この原因については明確でない。また、前養生期間 28 日と 91 日を比較した場合、両者に大差はなかつた。

(2) 気中暴露

①久里浜海浜部

感潮暴露と同様、混合セメント系よりポルトランドセメント系の方が相対強度が高かつた。ポルトランドセメント系では、セメント種類、水セメント比および試料の採取位置と相対強度の関係がそれほど明確にならなかつた。これは、水分の供給が少ないため、安定的に水和反応が進行しなかつたためと考えられる。混合セメント系では、ポルトランダイト（水酸化カルシウム）の生成量は、深さ 50mm 以上の部分より深さ 5~15mm の部分の方が高く、また、深さ 5~15mm の部分では材齢の経過とともに相対強度が低くなつた。すなわち、混合セメント系の場合、久里浜海浜部では、混和材の反応は、深さ 5~15mm の部分と深さ 50mm 以上の部分で反応の程度に差があると考えられる。これは、気中暴露における混合セメント系の強度発現性が低くなつた一因と考えられる。

②東京屋外部

概ね久里浜海浜部と同様の傾向となつたが、材齢 5 年では深さ 5~15mm の部分と深さ 50mm 以上の部分はほぼ同等であったが、材齢 10 年では深さ 5~15mm の部分の方が相対強度が低くなり、混和材の水和反応および中性化の影響と考えられる。前養生期間 28 日と 91 日の相対強度はほぼ同等であった。また、ポルトランドセメント系において、水セメント比とポルトランダイト（水酸化カルシウム）の相対強度の関係は、概ね相関関係にあり、水セメント比が高いほどポルトランダイト（水酸化カルシウム）は低くなつた。

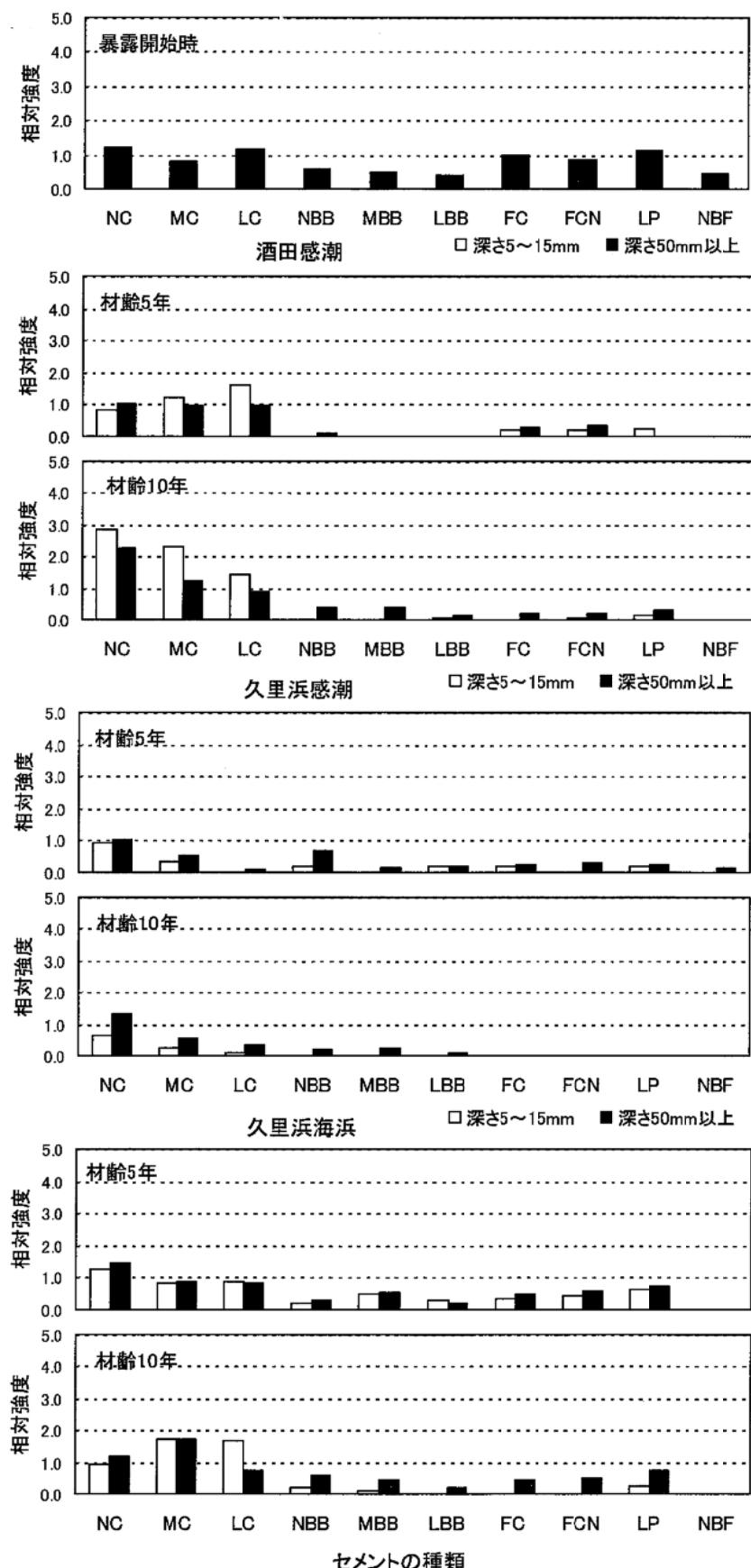


図-5.6.2.1 セメントの種類とポルトランダイトの相対強度の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日) (1/2)

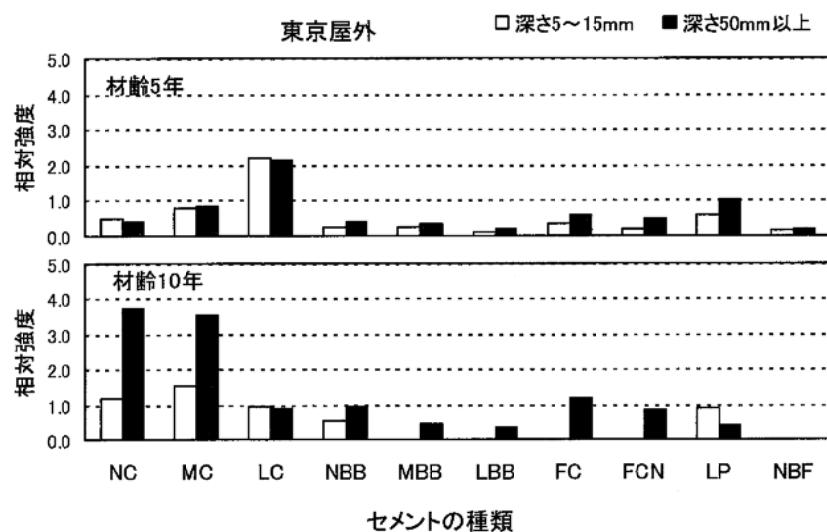


図-5.6.2.1 セメントの種類とポルトランダイトの相対強度の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日) (2/2)

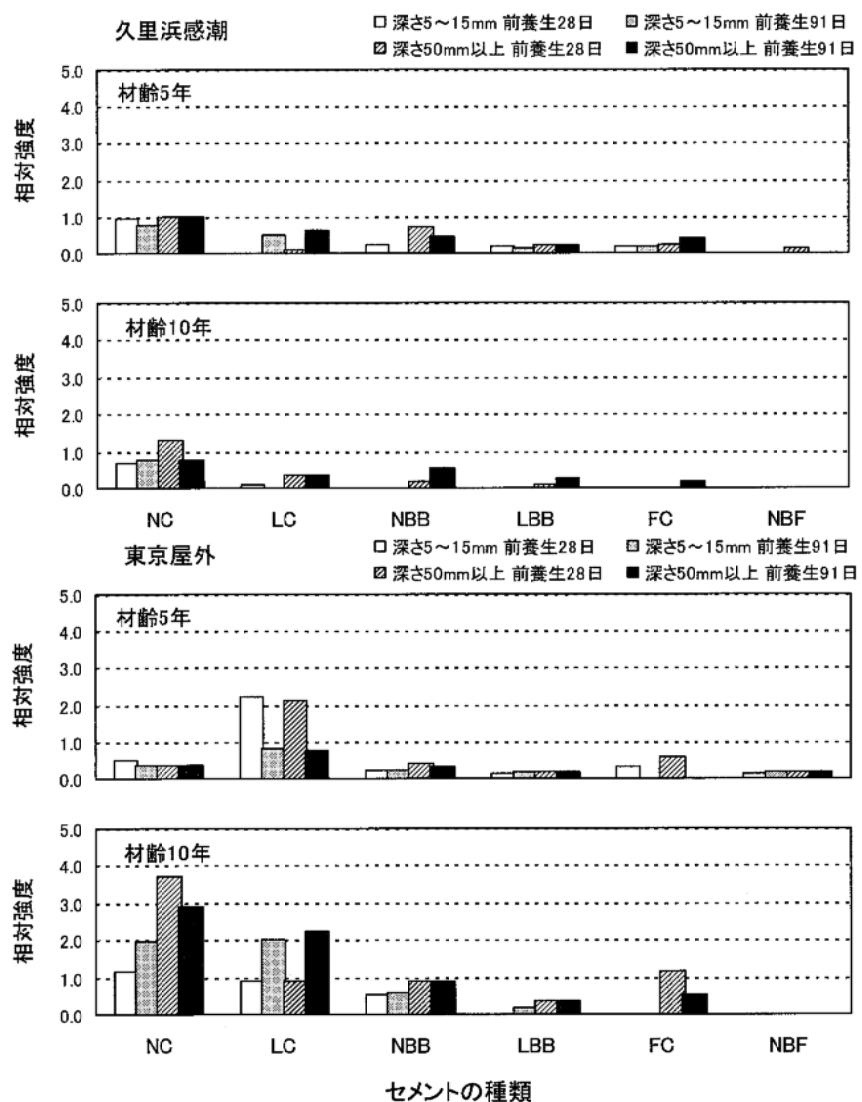


図-5.6.2.2 前養生期間 28 日と 91 日のポルトランダイトの相対強度 (水結合材比 50%)

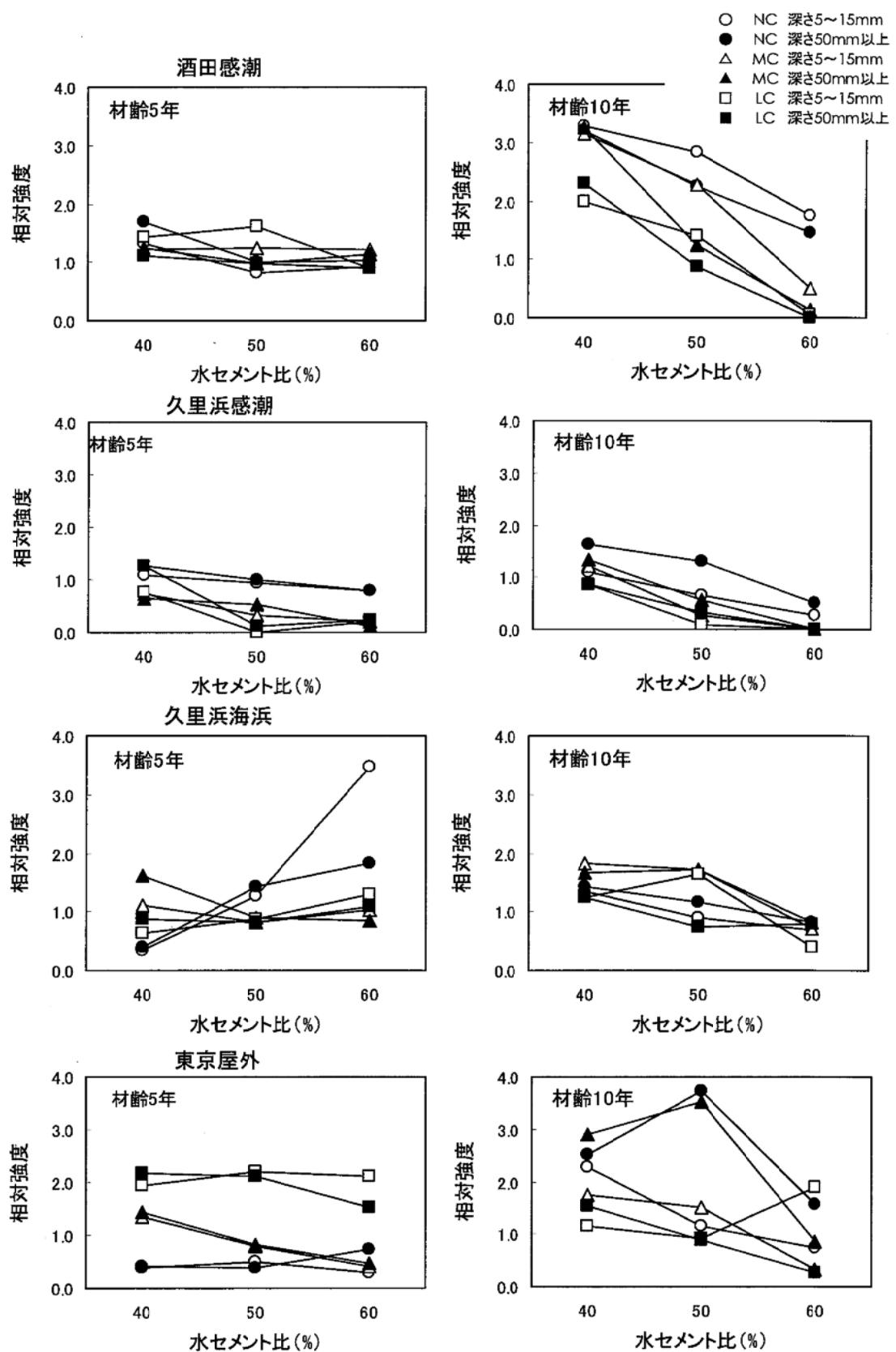


図-5.6.2.3 ポルトランドセメント系の水セメント比とポルトランダイトの相対強度
(前養生期間 28 日)

5.6.3 フリーデル氏塩

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類とフリーデル氏塩の相対強度の関係を図-5.6.3.1、前養生期間 28 日と 91 日のフリーデル氏塩の相対強度を図-5.6.3.2、ポルトランドセメント系の水セメント比とフリーデル氏塩の相対強度を図-5.6.3.3 に示す。

暴露後の相対強度は感潮部 > 久里浜海浜部 > 東京屋外部の順となった。フリーデル氏塩は、暴露条件の影響を大きく受けており、十分な塩化物イオンの供給がある感潮暴露では明らかに相対強度が高い結果となった。一方、気中暴露では東京屋外部では殆ど認められず、塩化物の飛来の影響を受ける久里浜海浜部でも、量は少ないものの材齢 10 年の深さ 5~15mm の部分で認められた。感潮暴露での結果を考察すると以下の通りである。

(1) 感潮暴露

深さ 5~15mm の部分では、ほとんどのセメントで認められ、ポルトランドセメント系の方が混合セメント系より相対強度が高かった。一方、深さ 50mm 以上の部分では、ポルトランドセメント系ではほとんどの配合で認められたものの、混合セメント系ではほとんど認められなかつた。この傾向は塩化物イオン濃度と一致する。

ポルトランドセメント系において、フリーデル氏塩の相対強度は NC>MC>LC の順であり、C₃A が多いセメントほど多くなった。また、水セメント比との関係では、水セメント比が大きいほどフリーデル氏塩の相対強度は高くなつた。なお、前養生期間 28 日と 91 日の関係は明確でなかつた。

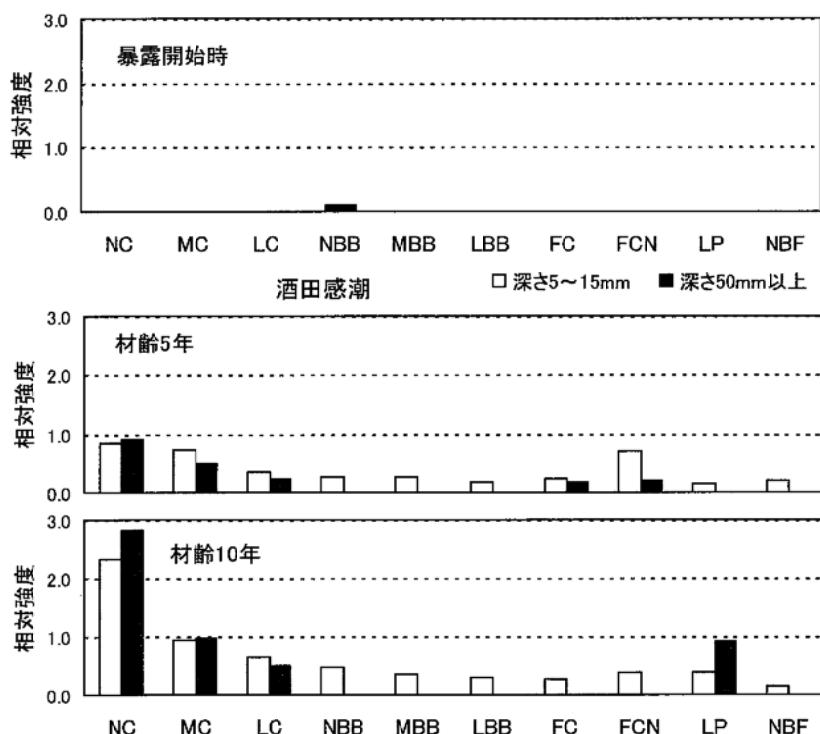


図-5.6.3.1 セメントの種類とフリーデル氏塩の相対強度の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日) (1/2)

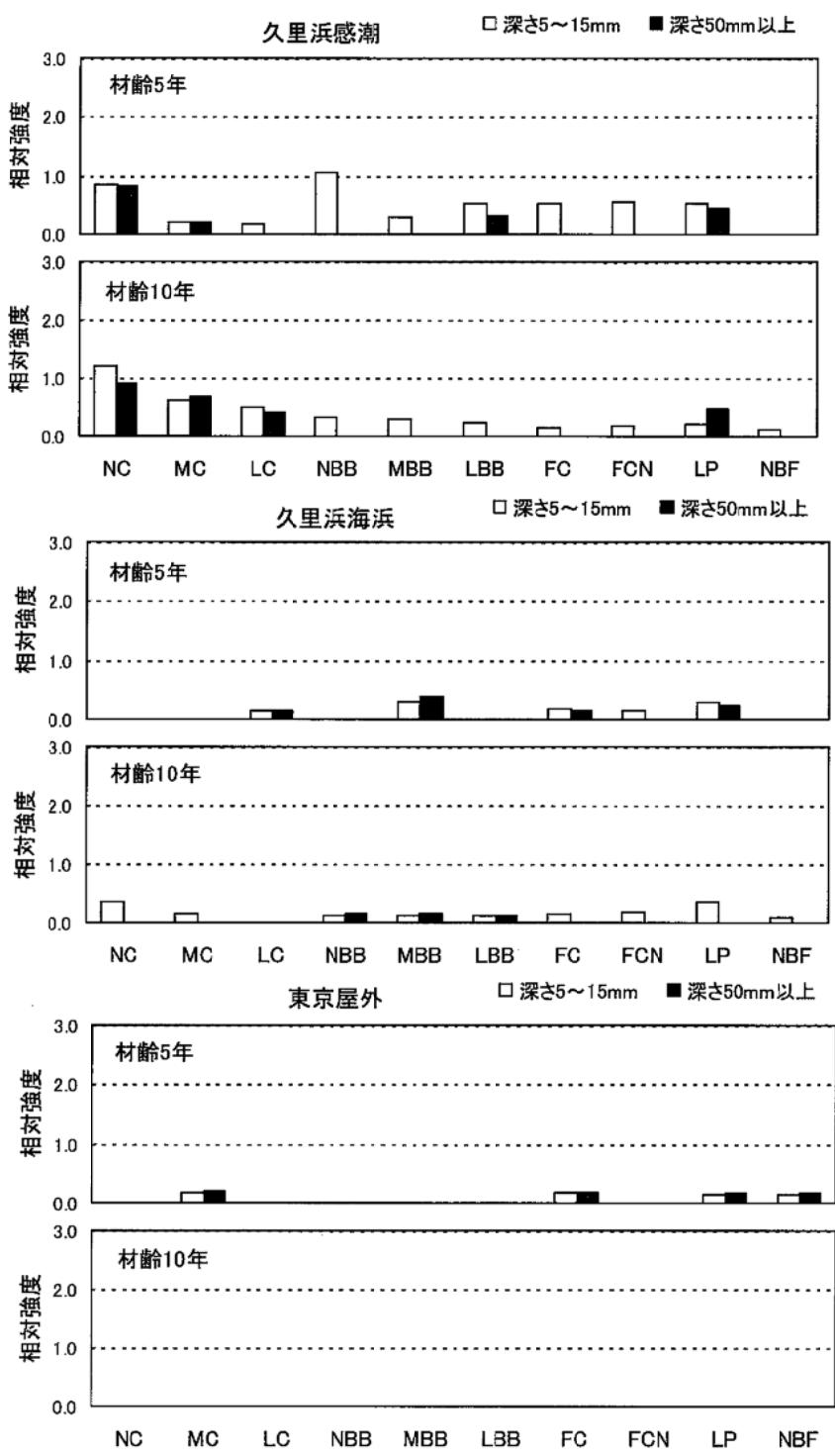


図-5.6.3.1 セメントの種類とフリーデル氏塩の相対強度の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日) (2/2)

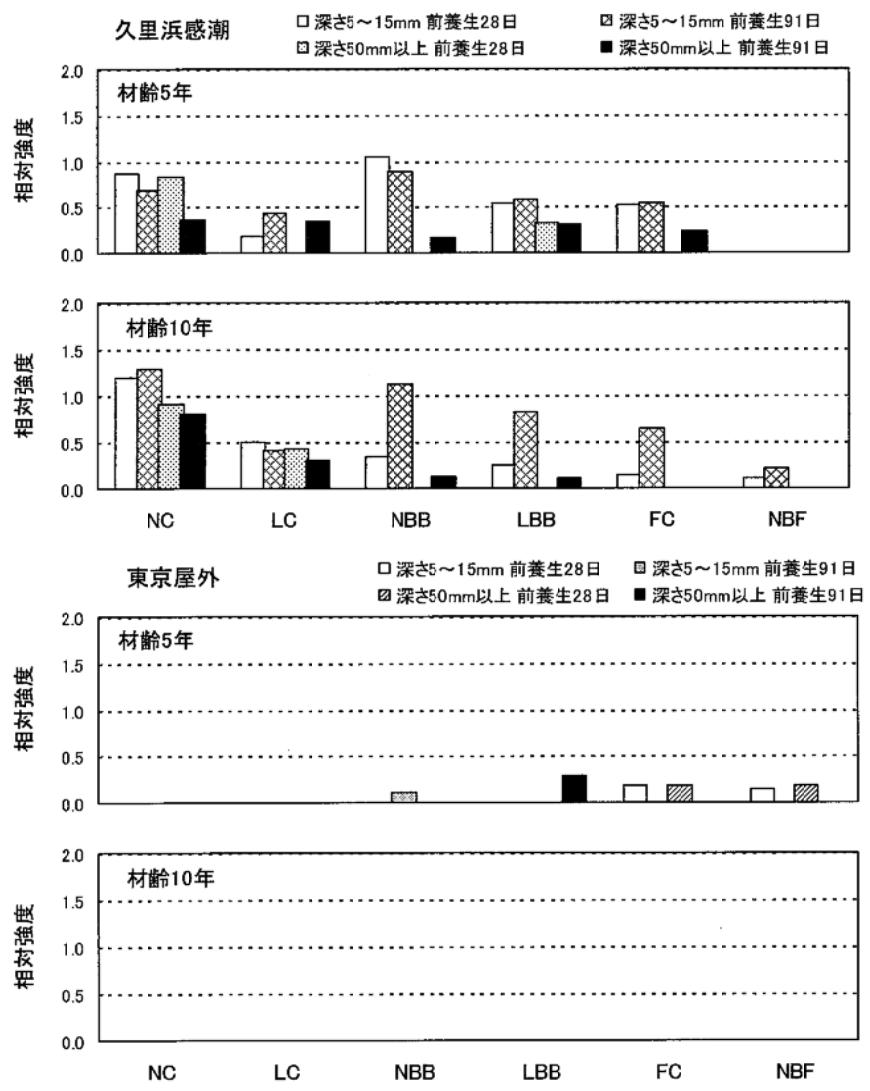


図-5.6.3.2 前養生期間 28 日と 91 日のフリーデル氏塩の相対強度（水結合材比 50%）

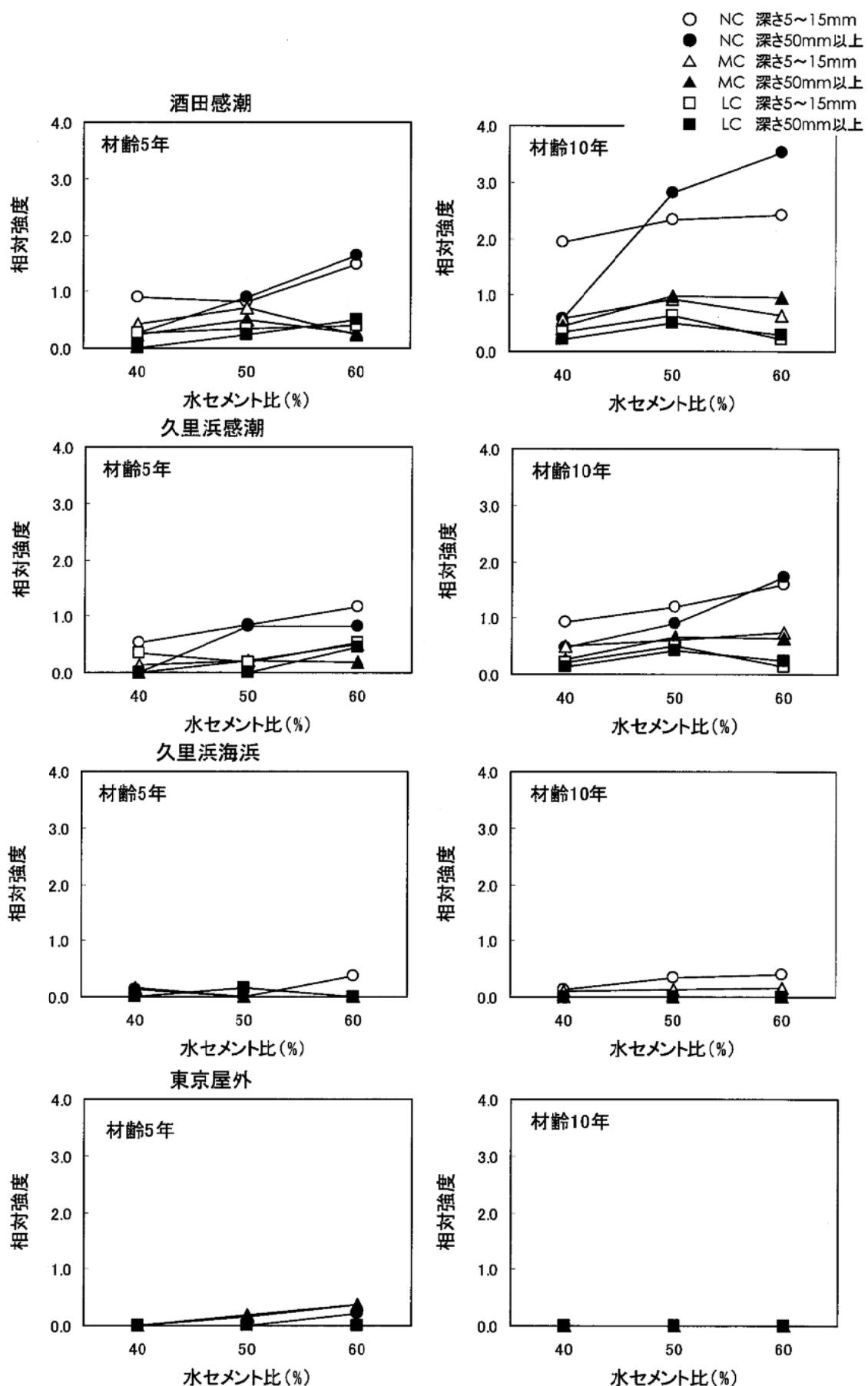


図-5.6.3.3 ポルトランドセメント系の水セメント比とフリーデル氏塩の相対強度
(前養生期間 28 日)

5.7 細孔量

(1) 暴露条件による比較

水結合材比 50%における暴露開始時と材齡 5 年および 10 年の総細孔量の関係を図-5.7.1 および図-5.7.2 に示す。なお、図-5.7.1 は気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の結果を、図-5.7.2 は感潮暴露の結果を示す。

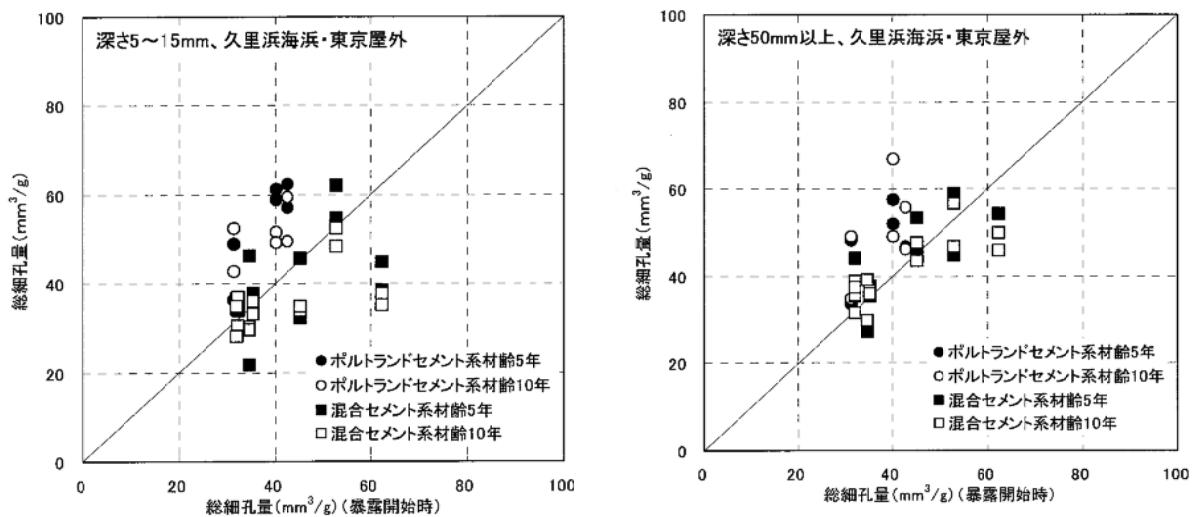


図-5.7.1 暴露開始時と材齡 5 年および 10 年の総細孔量の関係
(水結合材比 50%、久里浜海浜部および東京屋外部)

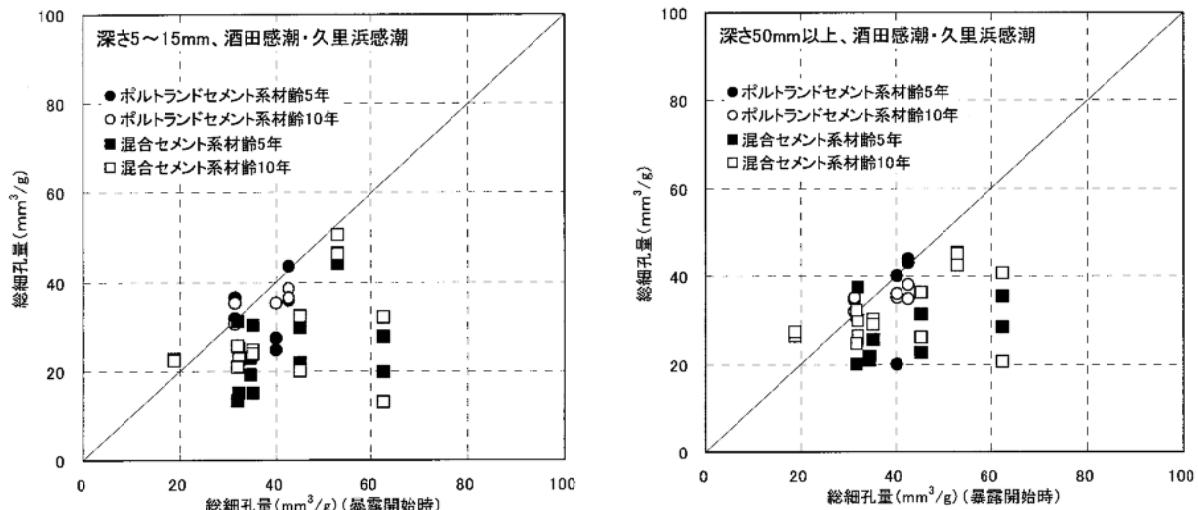


図-5.7.2 暴露開始時と材齡 5 年および 10 年の総細孔量の関係
(水結合材比 50%、酒田感潮部および久里浜感潮部)

気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、深さ 5~15mm の部分および深さ 50mm 以上の部分はともに、ポルトランドセメント系が暴露開始時に比べて材齡 5 年、10 年ともに総細孔量が増加している。一方、混合セメント系は明確な傾向が認められなかった。

感潮暴露では、深さ 5~15mm の部分、50mm 以上の部分とともに、ポルトランドセメント系、混合セメント系とともに暴露開始時に比べて材齡 5 年、10 年ともに総細孔量が減少していることがわかる。また、ポルトランドセメント系に比べて混合セメント系の方が総細孔量の減少が大きく、緻密化している傾向が認められた。

水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齡 5 年および 10 年における暴露条件毎の総細孔量の比較を図-5.7.3～図-5.7.6 に示す。

気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）および感潮暴露において、深さ 5～15mm の部分および深さ 50mm 以上の部分の総細孔量を比べると、両者に明確な違いは認められなかった。

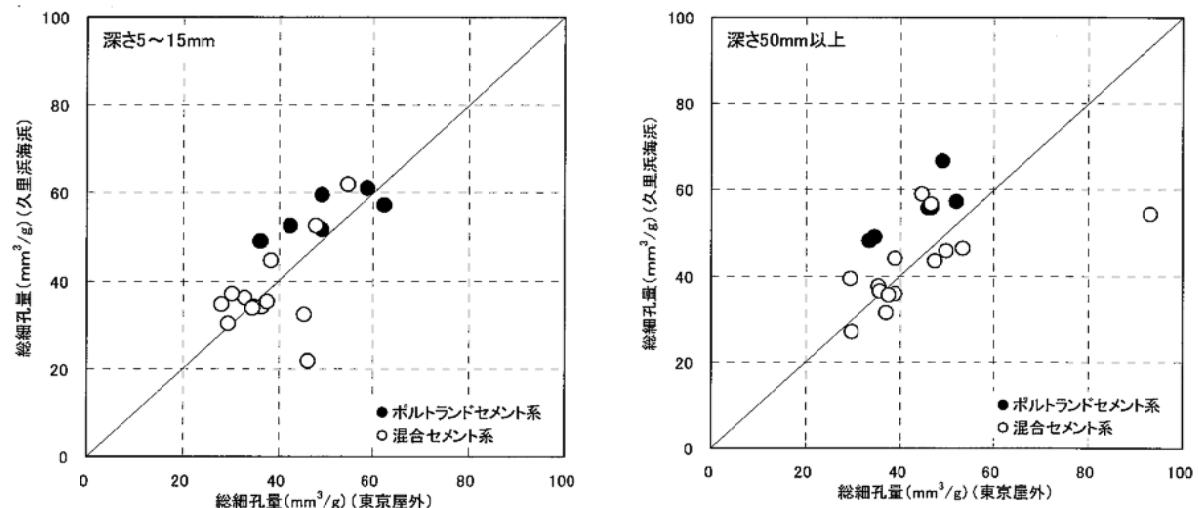


図-5.7.3 東京屋外部と久里浜海浜部の総細孔量の比較
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齡 5 年および 10 年)

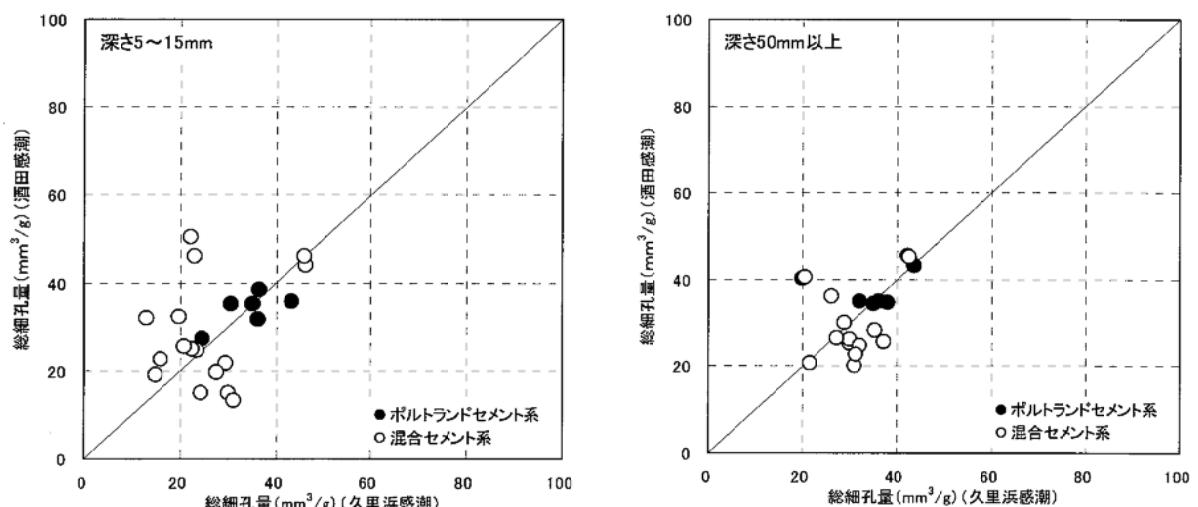


図-5.7.4 久里浜感潮部と酒田感潮部の総細孔量の比較
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齡 5 年および 10 年)

久里浜感潮部と久里浜海浜部および東京屋外部において、深さ 5～15mm の部分および深さ 50mm 以上の部分の総細孔量を比べると、セメント種類に関わらず、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の方が総細孔量が多くなった。これは、水分の供給の多少による水和反応の進行度合いが影響していると考えられる。

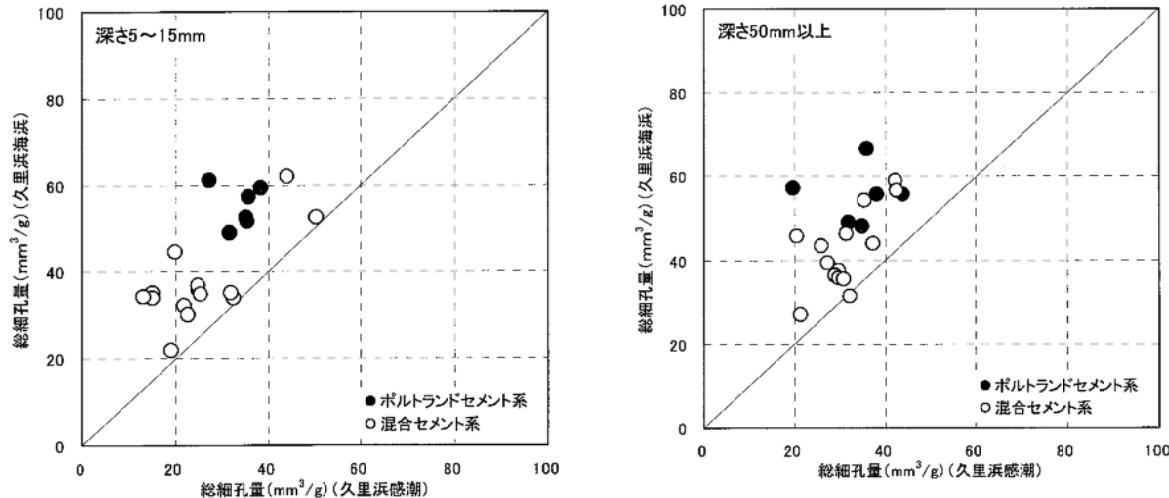


図-5.7.5 久里浜感潮部と久里浜海浜部の総細孔量の比較
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齢 5 年および 10 年)

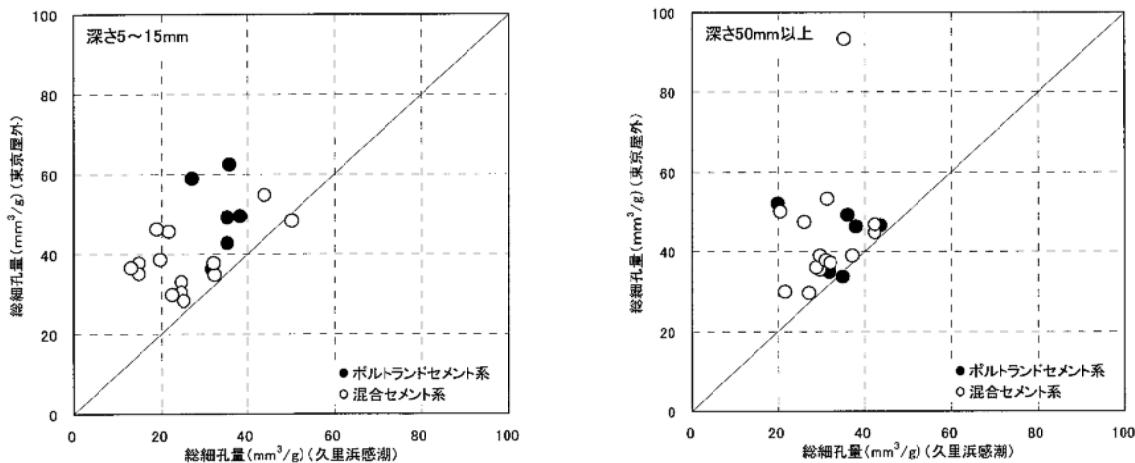


図-5.7.6 久里浜感潮部と東京屋外部の総細孔量の比較
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齢 5 年および 10 年)

また、細孔径分布の経年変化（詳細は資料編 1.8 を参照）は、総じて、材齢 5 年よりも材齢 10 年の方が、細孔径が大きい方へシフトする傾向が見受けられた。その傾向を示す特徴的な一例として水結合材比 50%、前養生期間 28 日における MC の細孔径分布の経時変化を図-5.7.7 に示す。

気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では細孔量のピークが細孔半径 10nm から 100nm 前後へ移動し、暴露開始時や感潮暴露に比べて細孔構造がポーラスになる傾向が認められた。資料編からもわかるように、他のセメントに対しても大小はあるもののこのような傾向が確認された。なお、図中の TPV は総細孔量の略称である。

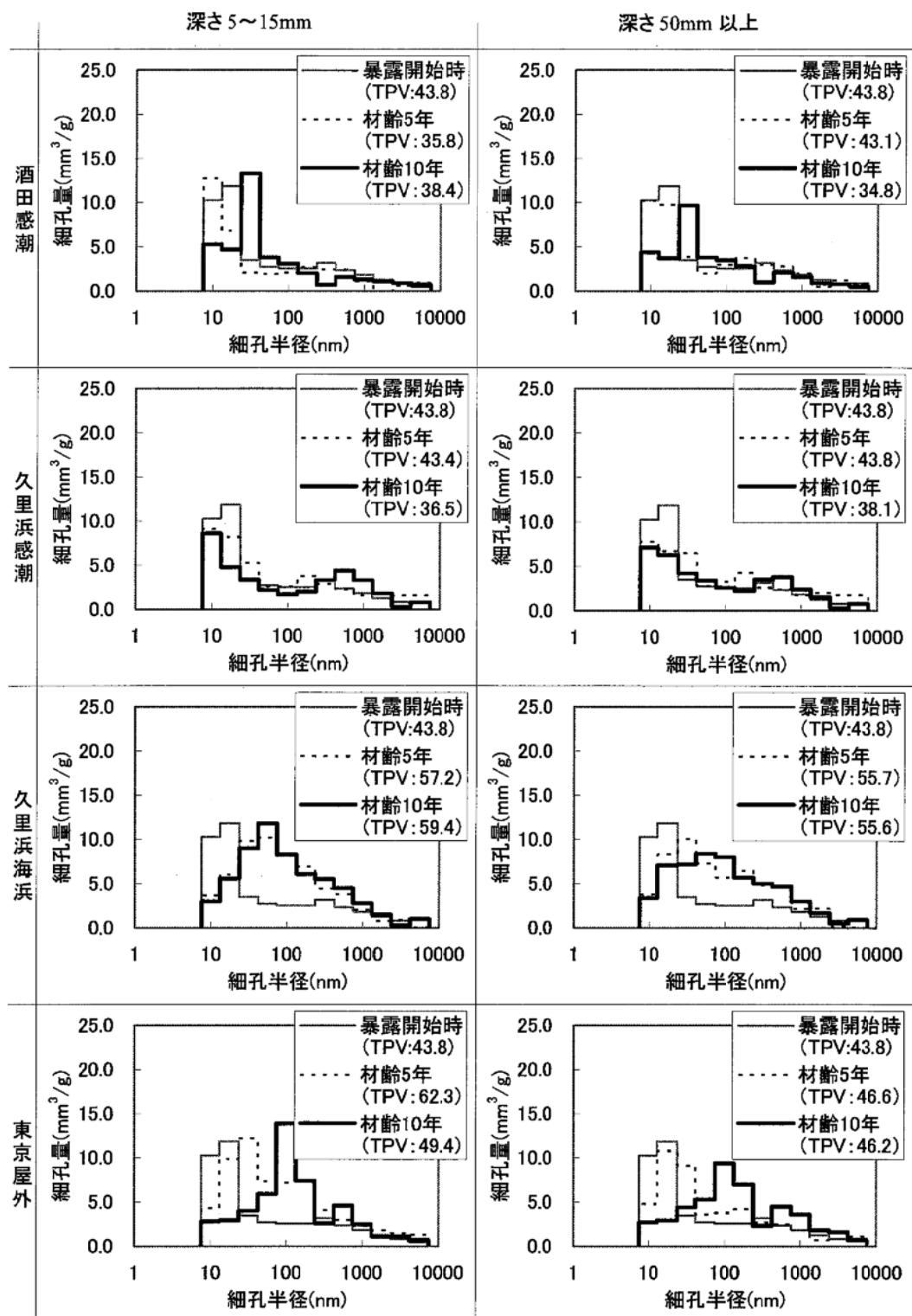


図-5.7.7 MC の細孔径分布の経時変化
(水セメント比 50%、前養生期間 28 日)

(2) セメントの種類による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類と総細孔量の関係を図-5.7.8 に示す。

暴露開始時の総細孔量は、フライアッシュセメント系=LP>MC=LC>NC=高炉スラグセメント系=NBF の順であった。一般に、高炉スラグセメント系は NC に比べ、組織が緻密になる

ことが知られているが、本結果では暴露するまでの養生を封かん養生 28 日としたために暴露開始時の総細孔量は両者に大差がなかった。材齢 28 日において、MC、LC およびフライアッシュセメント系では、十分に水和反応が進行していないことや LP では石灰石微粉末はほとんど反応せず、また、セメントの水和反応に及ぼす影響も小さいことから MC、LC、フライアッシュセメント系および LP の総細孔量が多くなったと考えられる。

その後、材齢 5 年および 10 年間暴露した場合、総細孔量は、いずれの暴露条件も高炉スラグセメント系および NBF の総細孔量が最も小さかったが、高炉スラグセメント系において、ベースのポルトランドセメントの種類による総細孔量の差異は明確でなかった。

フライアッシュセメント系は、高炉スラグセメント系と比べ、感潮暴露では同等であったが、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では多くなり、NC とほぼ同等であった。ポルトランドセメント系では、感潮暴露ではセメント種類間で大差がなかったが、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、MC、LC の方が NC より総細孔量が多くなった。また、石灰石微粉末を混合した LP の総細孔量は、感潮暴露では最も大きくなつたが、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）ではポルトランドセメント系とほぼ同等であった。

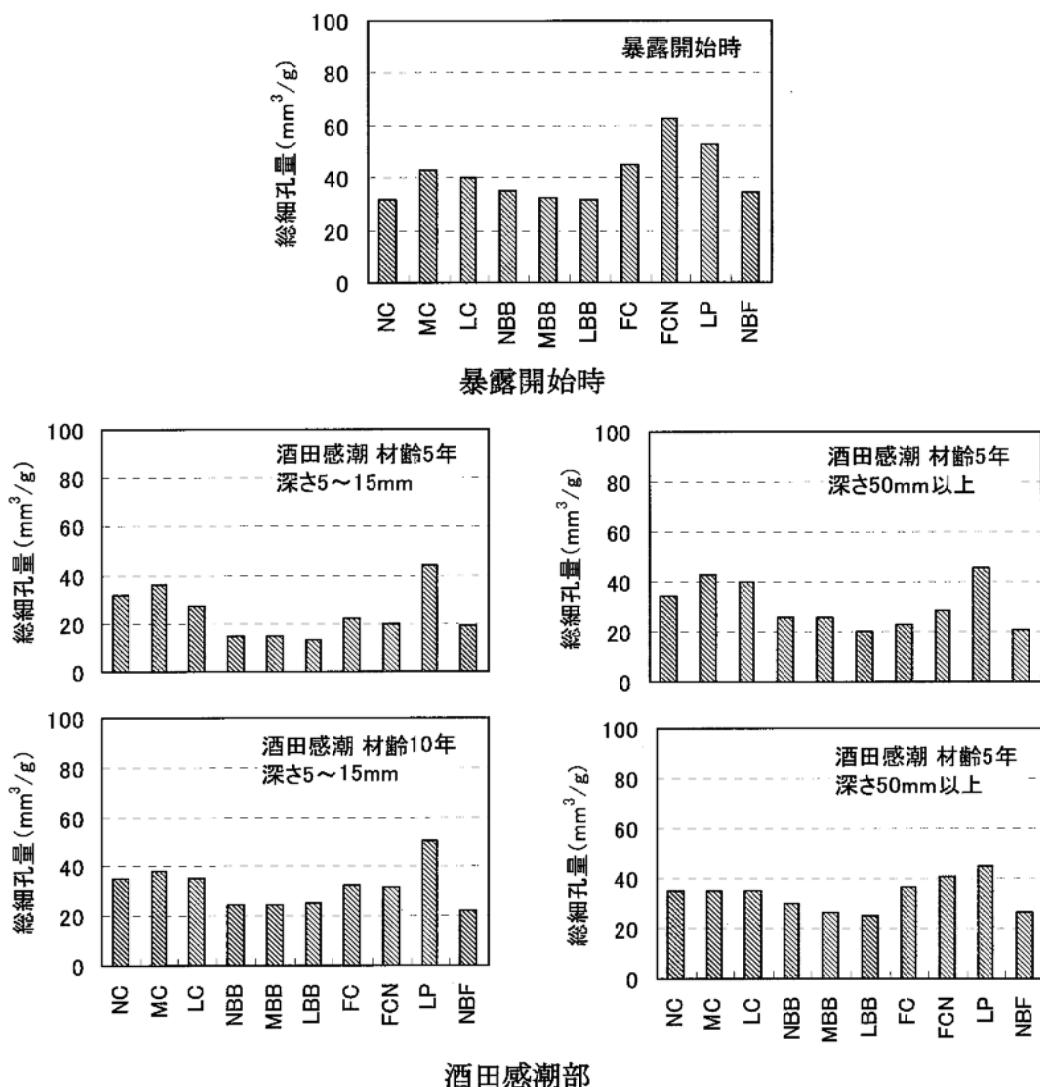


図-5.7.8 セメントの種類と総細孔量の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日) (1/3)

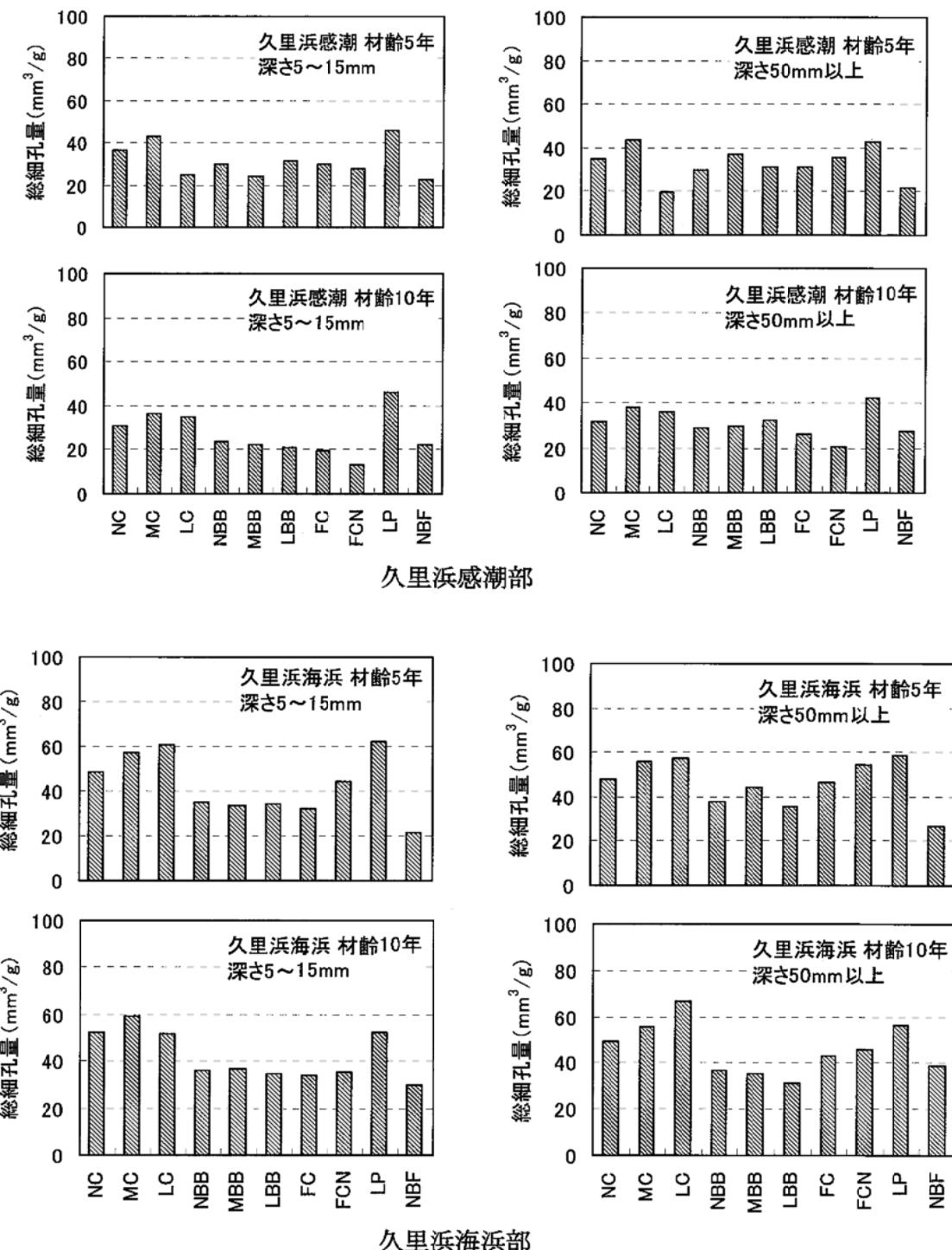


図-5.7.8 セメントの種類と総細孔量の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日) (2/3)

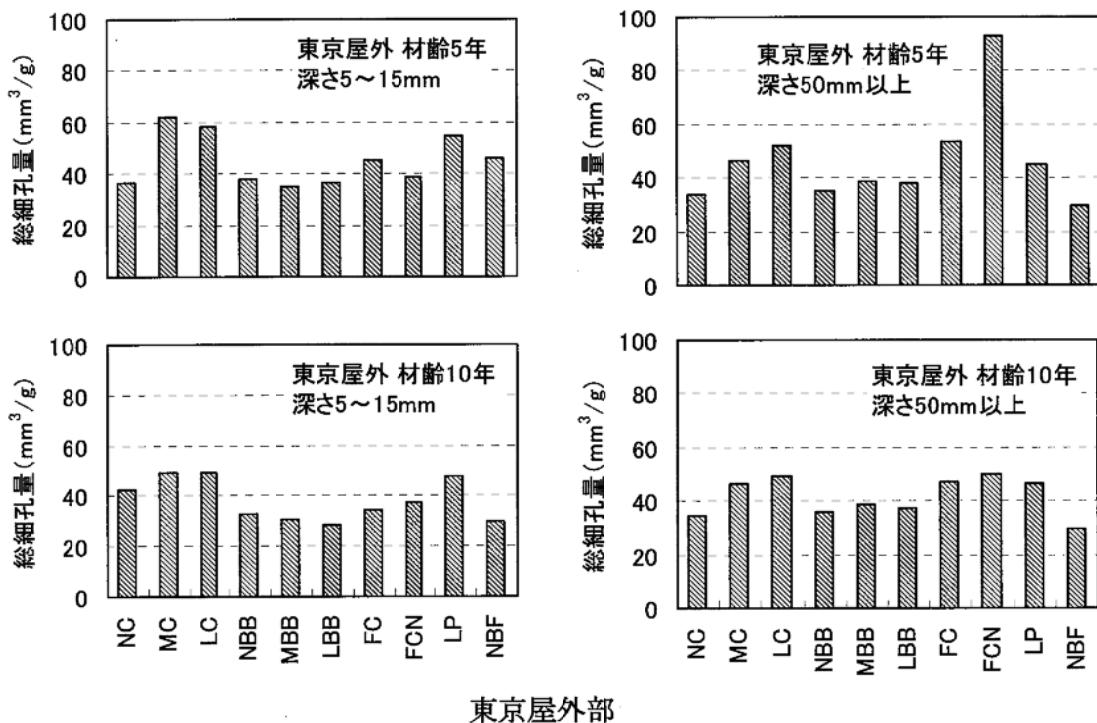


図-5.7.8 セメントの種類と総細孔量の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日) (3/3)

ポルトランドセメント系における暴露開始時および暴露後の細孔径分布の一例を図-5.7.9 および図-5.7.10 に示す。

材齢 5 年および 10 年の細孔径分布は、ポルトランドセメント系の場合、感潮暴露の場合、暴露開始時に比べ、細孔量のピークが 10nm から 30nm にシフトした程度であり、大きな変化はなかった。

一方、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の場合、細孔量のピークが 10nm 程度から 100nm 程度にシフトし、ポーラスな構造となった。

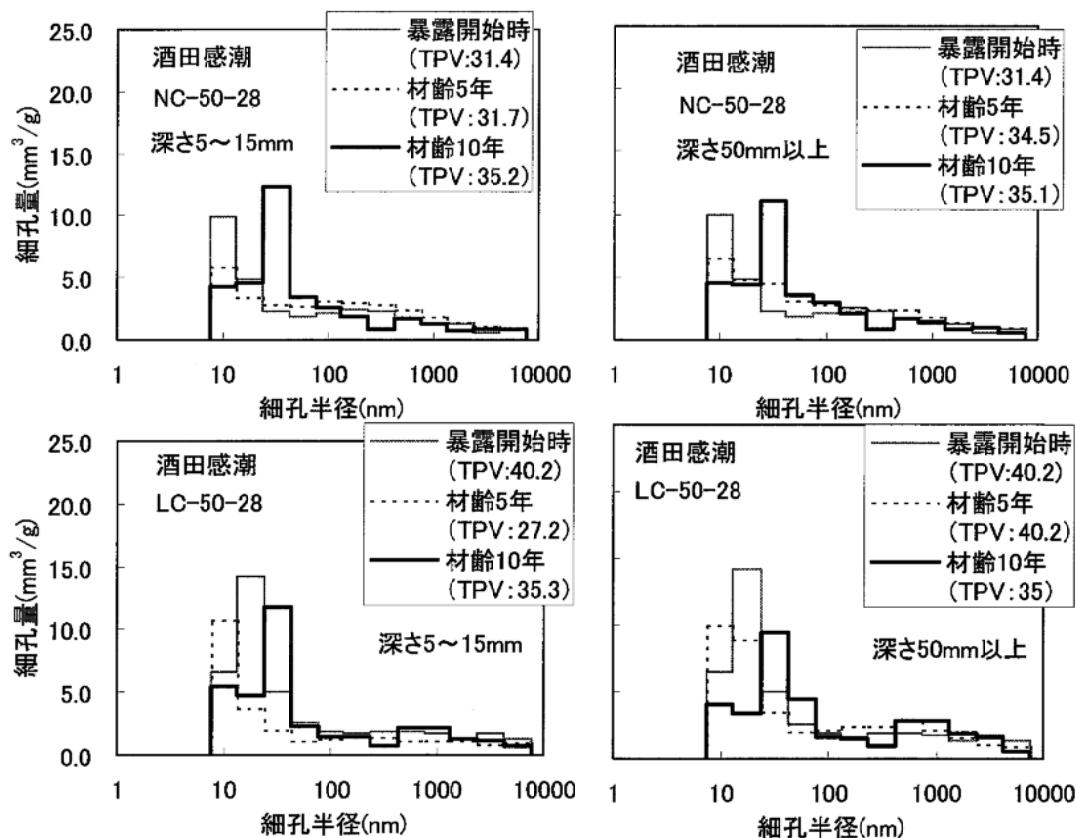


図-5.7.9 暴露開始時および暴露後の細孔径分布
(酒田感潮部、ポルトランドセメント系、水セメント比 50%、前養生期間 28 日)

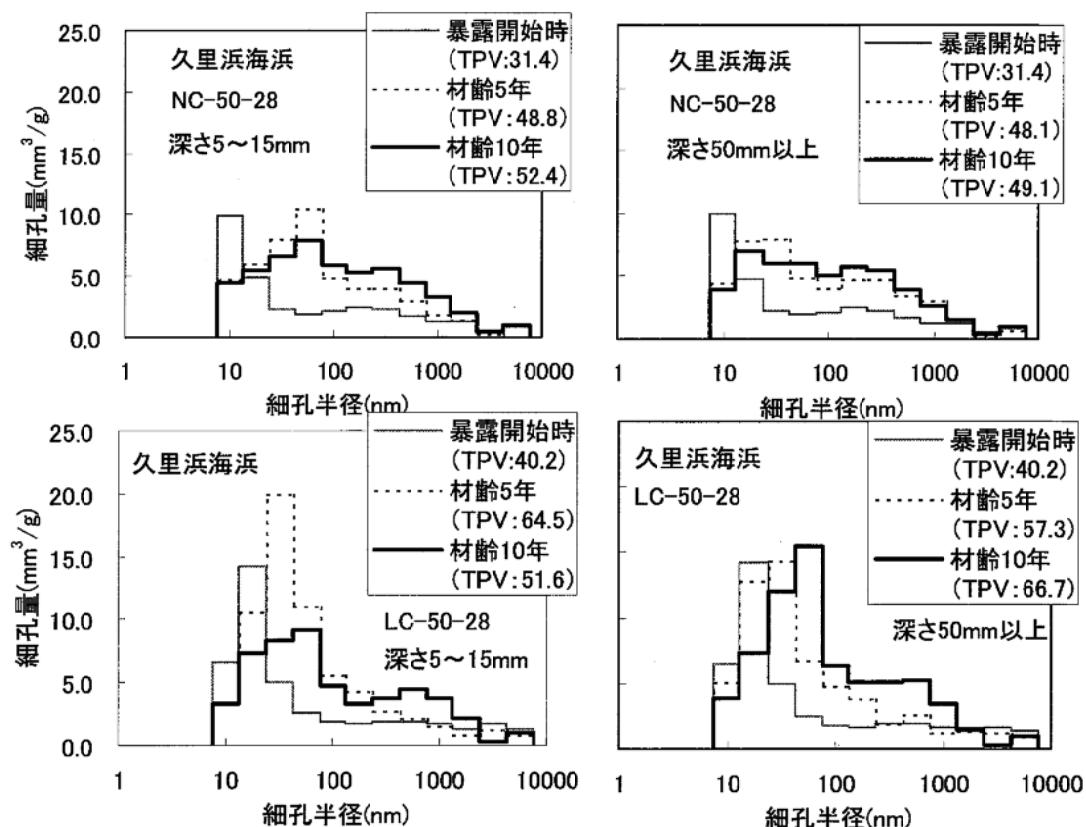


図-5.7.10 暴露開始時および暴露後の細孔径分布
(久里浜海浜部、ポルトランドセメント系、水セメント比 50%、前養生期間 28 日)

混合セメント系における暴露開始時および暴露後の細孔径分布の一例を図-5.7.11に示す。

石灰石微粉末を混合した LP を除く混合セメント系の細孔径分布は、暴露開始時に比べ、いずれの暴露条件も 10~50nm 程度の細孔が減少した。暴露開始時に見られた FCN の粗大な細孔は、材齢の経過とともに小さな径へとシフトした。LP の細孔径分布は、ポルトランドセメント系と同様の傾向を示した。

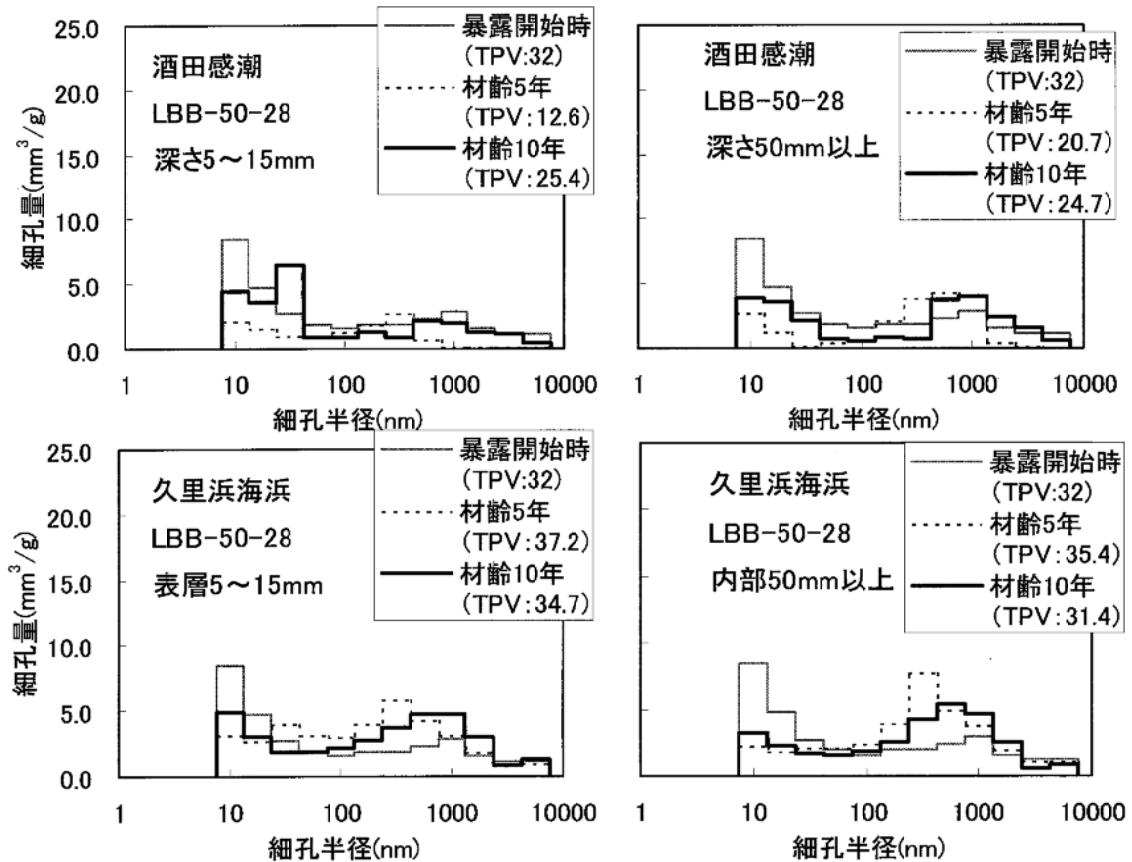


図-5.7.11 暴露開始時および暴露後の細孔径分布

(LBB、水結合材比 50%、前養生期間 28 日)

深さ 5~15mm の部分と深さ 50mm 以上の部分の総細孔量の関係を図-5.7.12 に示す。

材齢 5 年および 10 年の深さ 5~15mm の部分と深さ 50mm 以上の部分の総細孔量の関係は、ポルトランドセメント系の場合、感潮暴露ではほぼ同等であるが、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では深さ 5~15mm の部分の方が総細孔量は多かった。混合セメント系の場合、いずれの環境も深さ 50mm 以上の部分の方が総細孔量は多かった。これらの傾向について、ポルトランドセメント系の場合、理由は明確でないが、混合セメント系の場合、感潮暴露では海水により供試体の表面近傍の水和が促進されたことおよび気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、炭酸化により組織が緻密になった可能性が考えられる。

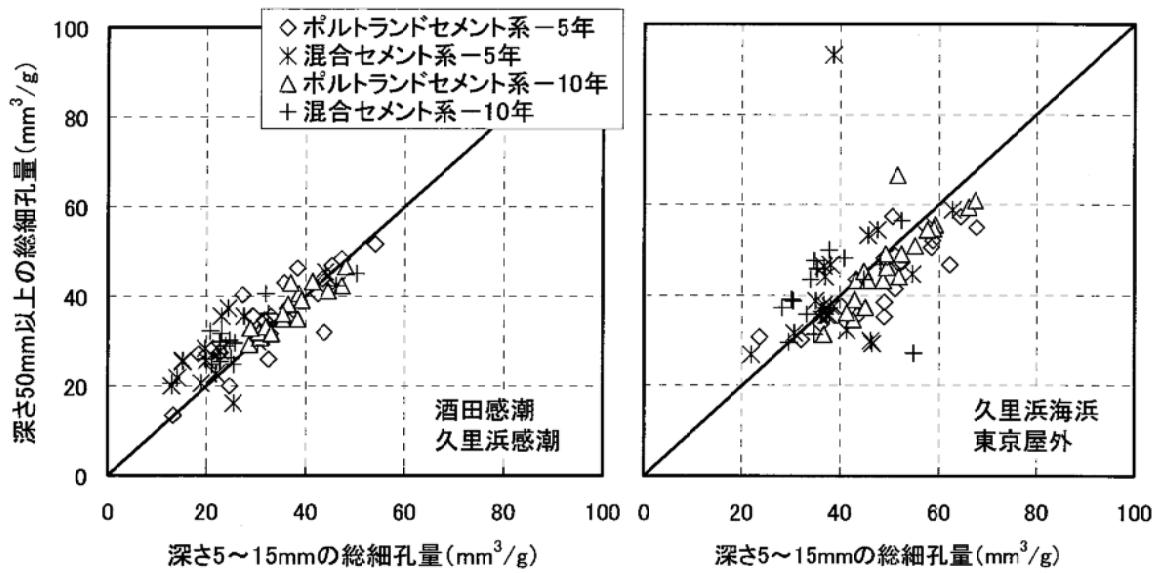


図-5.7.12 深さ 5～15mm と深さ 50mm 以上の部分の総細孔量の関係

(3) 水セメント比による比較

前養生期間 28 日におけるポルトランドセメント系の水セメント比と総細孔量の関係を図-5.7.13 に示す。

暴露条件および材齢に関わらず、水セメント比が大きいほど総細孔量は大きくなる傾向を示した。ただし、材齢 10 年では、水セメント比による総細孔量の差は小さくなった。

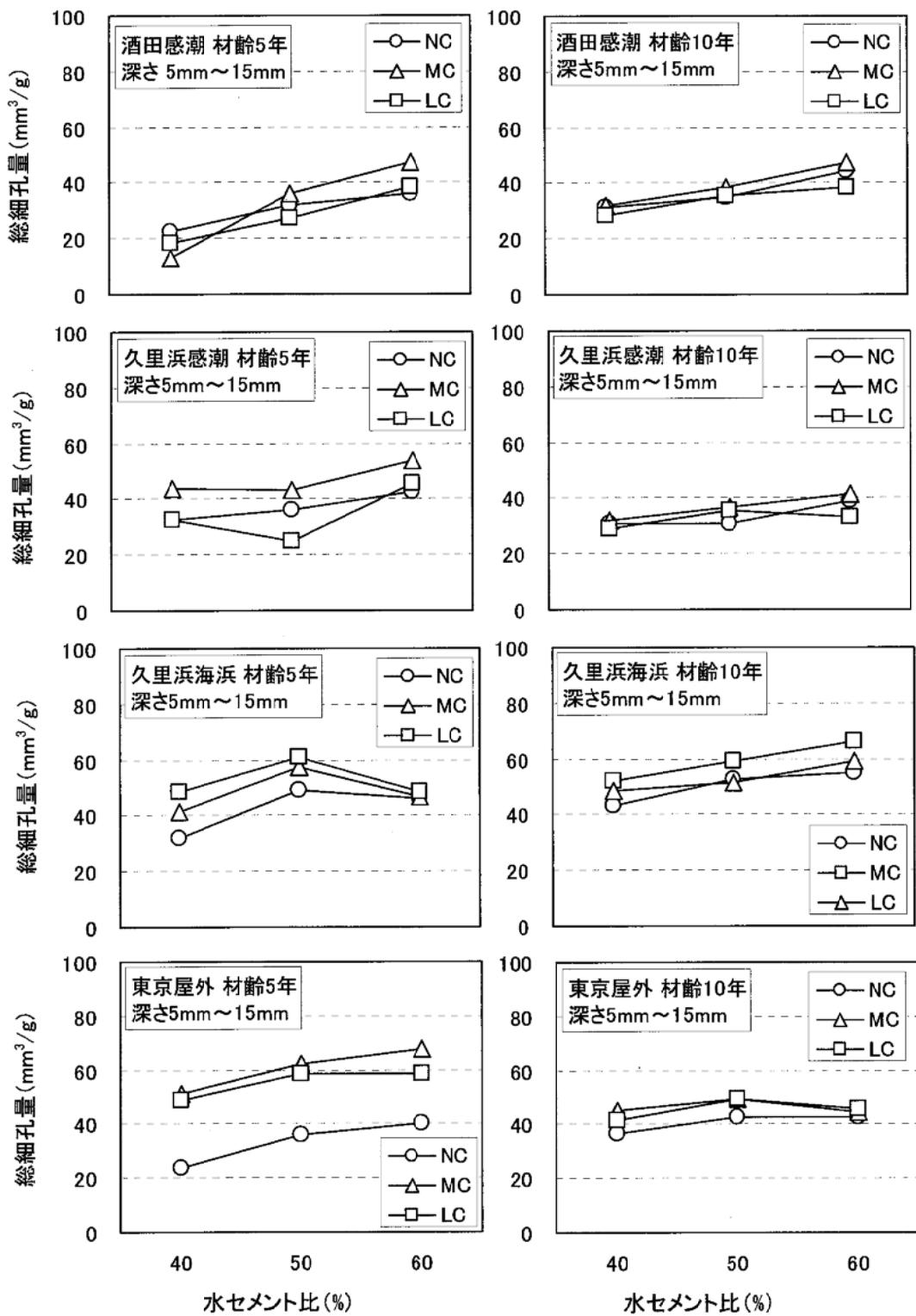


図-5.7.13 ポルトランドセメント系の水セメント比と総細孔量の関係
(前養生期間 28 日) (1/2)

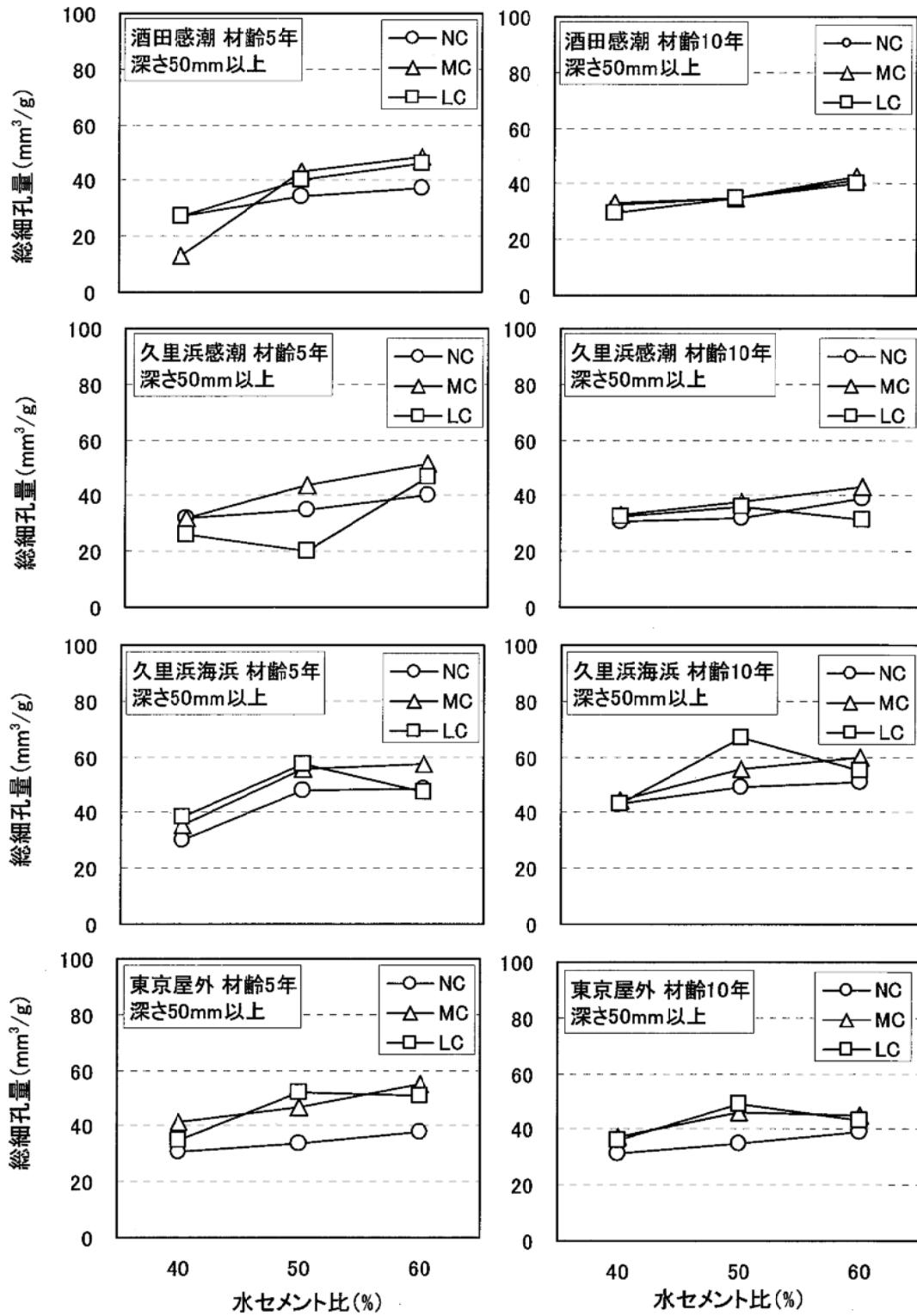


図-5.7.13 ポルトランドセメント系の水セメント比と総細孔量の関係
(前養生期間 28 日) (2/2)

水セメント比別の細孔径分布の一例を図-5.7.14 に示す。
いずれの暴露条件においても、水セメント比が小さくなるに従い、細孔量の減少や微細な径へのシフトなど組織が緻密化した傾向が認められた。

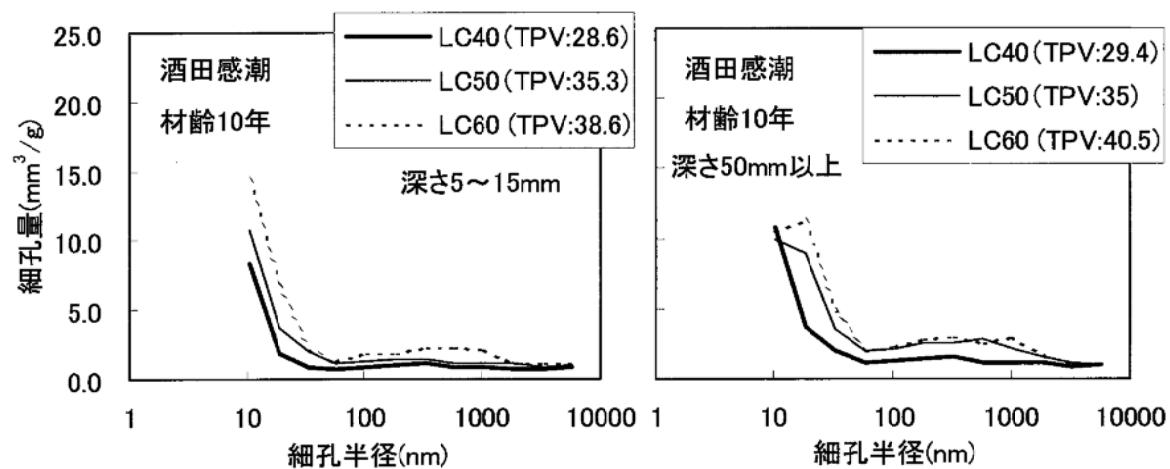


図-5.7.14 水セメント比別の細孔径分布 (LC、酒田感潮部、前養生 28 日)

(4)暴露前養生期間による比較

暴露開始時における前養生期間別の細孔径分布の一例を図-5.7.15 に、水結合材比 50%における前養生期間 28 日と 91 日の総細孔量の比較を図-5.7.16 に示す。なお、その他の細孔径分布は資料編に示す。

NC および LBB 以外のセメントでは、材齢 91 日まで養生することにより、暴露開始時の総細孔量が減少した。また、材齢 91 日における細孔径分布は、材齢 28 日と比べ、NC および NBB の場合変化がなく、LC、FC、LBB および MBF は 10nm-50nm の細孔が減少し、さらに LBB は 100-1000nm の細孔が増加した。養生期間を長くしたことによる組織の緻密化は、セメントにより傾向が異なった。これは、強度発現の遅い LC や混合セメント系では、養生期間を長くしたことにより、組織が緻密化したためと考えられる。

久里浜感潮部における前養生期間 28 日と 91 日の総細孔量は、LC を除き材齢 5 年では暴露開始時と同様の傾向を示したが、材齢 10 年では、ポルトランドセメント系では前養生期間 91 日の方が 28 日より多く、混合セメント系ではほぼ同等となった。ポルトランドセメント系において前養生期間 28 日の総細孔量が 91 日より減少した理由は明確でないが、海水の作用により、エトリンガイトが多量に生成し空隙を充填している可能性がある。一方、混合セメント系においては水和反応が進行したことにより、前養生期間による細孔量の差が小さくなったと考えられる。

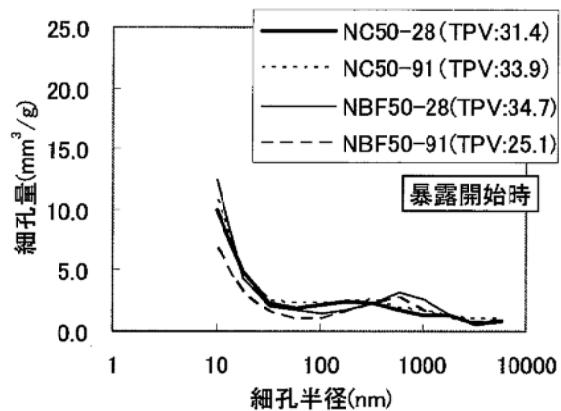


図-5.7.15 暴露開始時の前養生期間別の細孔径分布 (NC、NBF、水結合材比 50%)

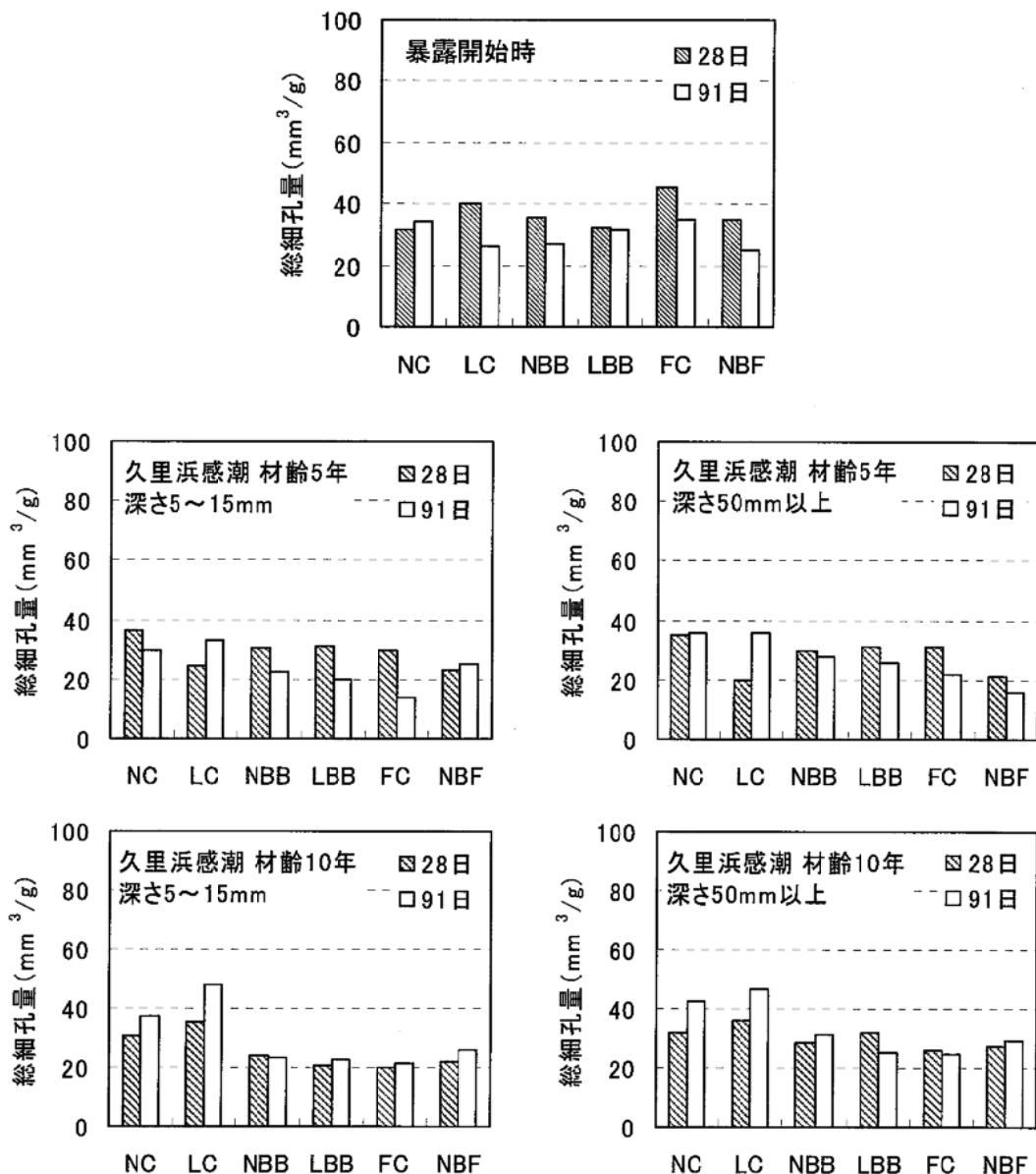


図-5.7.16 前養生期間 28 日と 91 日の総細孔量の比較 (水結合材比 50%)

5.8 表層部劣化の評価

今回、暴露したコンクリートは、材齢 10 年に亘り、雨水や乾燥の繰り返し、海水によるキャビテーション磨耗や化学的作用を受けている。これらによってコンクリートの表層部分は、中性化や溶脱などの影響により脆弱化している可能性がある。

そこで、本項では、材齢 10 年における久里浜感潮部に暴露したコンクリートについて、コンクリート表面から約 15mm の範囲でのビッカーズ硬さおよび約 5mm の範囲での SEM/EDS によるマッピングの測定を行った。

5.8.1 ビッカース硬さ

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるビッカース硬さの測定結果を図-5.8.1.1 に示す。なお、図中の×は測定点を示し、実線は 10 個の移動平均を示した。コンクリート表層部～2mm および 2mm～15mm までのビッカーズ硬さの平均値を図-5.8.1.2 に示す。

いずれの測定結果も非常にばらつきの大きな分布であるが、コンクリートの極表層部分のビッカーズ硬さは、コンクリート内部の硬さと同程度もしくはそれ以上の値を示した。

図-5.8.1.2 からも図-5.8.1.1 と同様に表層部分のビッカース硬さが高いことが分かる。平均硬さをセメントの種類で比較すると、ポルトランドセメント系のコンクリートのビッカース硬さが高く、混合セメント系のコンクリートはそれと比べて若干低い値を示すことが分かる。また、混合セメント系においても、高炉スラグセメント系の方がフライアッシュセメント系に比べ若干高くなる傾向を示している。

NC と NBF を比べるとビッカース硬さに 10 度の差があり、混合セメント系は、ポルトランドセメント系に比べ柔らかい性状であると考えられる。これについてはセメント硬化体の構造の違いが影響しているものと推察される。

これらより、セメントの種類間でビッカース硬さの差はあるものの、久里浜感潮部に材齢 10 年まで暴露したコンクリートの表層部分の劣化は生じていないと推察される。

また、表層部分のビッカーズ硬さが高くなった要因としては、データおよび分析が不十分のため、今後の検討課題としたい。いずれにしても、ポルトランドセメント系、混合セメント系とともに、海水による劣化は 10 年程度であれば生じないと考えられる。

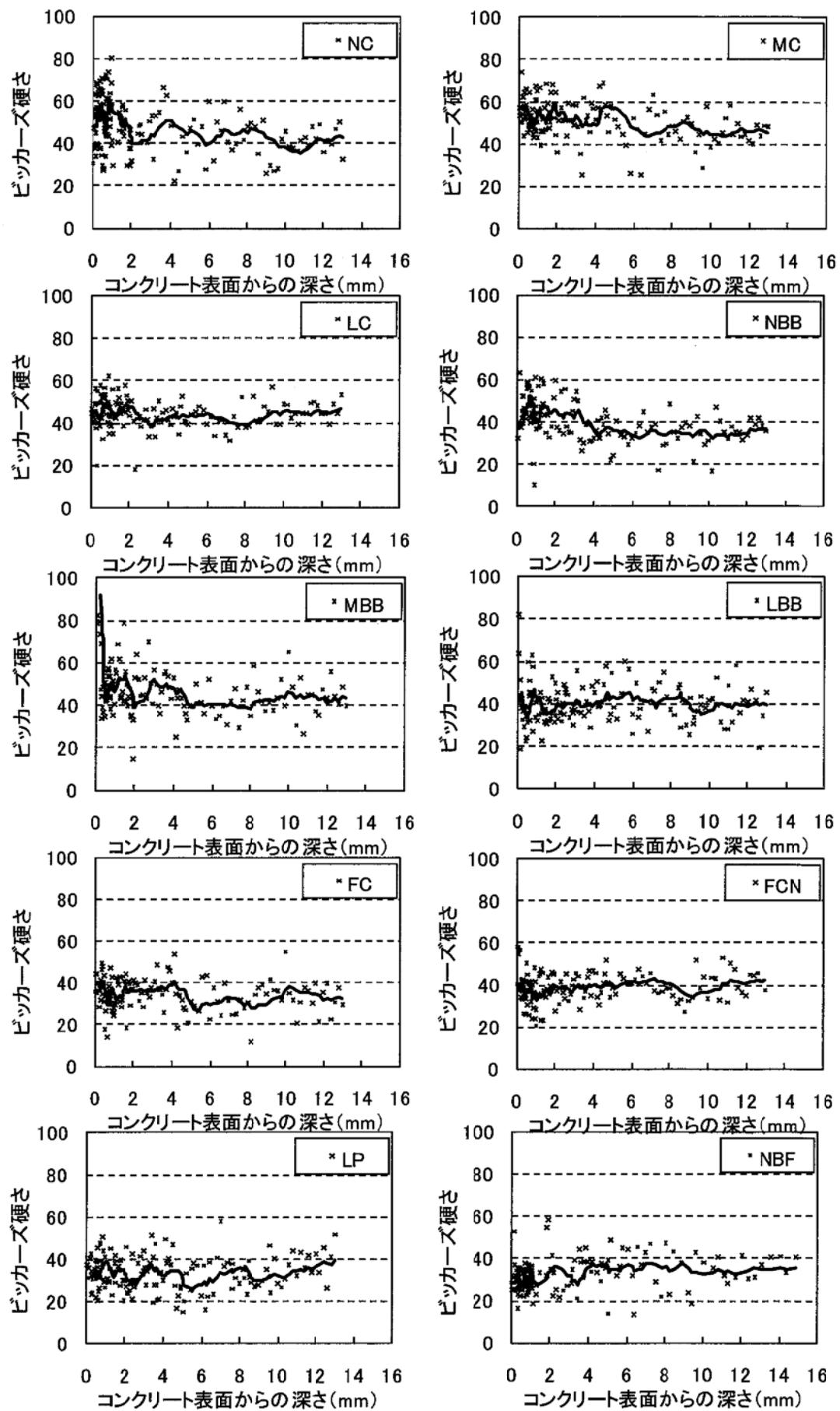


図-5.8.1.1 ビッカース硬さ（水結合材比 50%、久里浜感潮部、前養生期間 28 日、材齢 10 年）

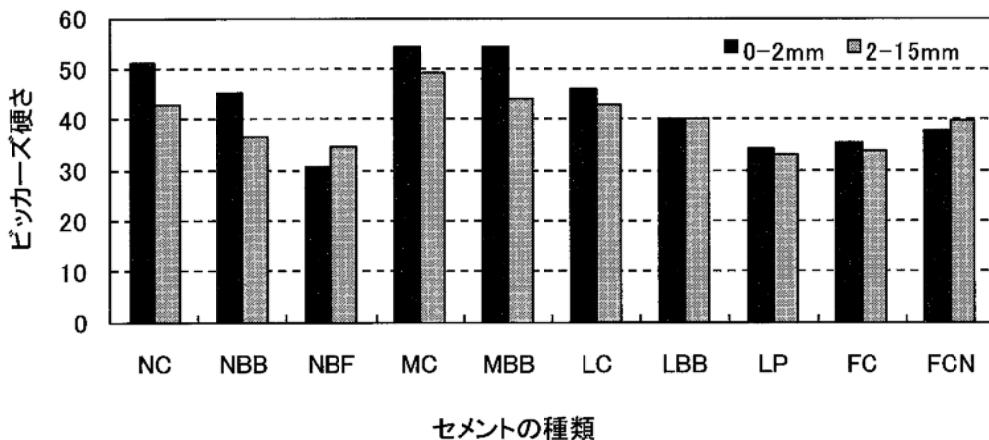


図-5.8.1.2 ビッカース硬さの平均値（久里浜感潮部、前養生期間 28 日、材齢 10 年）

5.8.2 SEM/EDS による各種イオン分布

コンクリート表層部の各種イオン分布を測定した。いずれのセメントも同様の傾向であったため、ここでは混合セメント系の LBB のコンクリート表層部の各種イオン分布を図-5.8.2.1 に示す。なお、図中にプロットした値は分析結果からコンクリート表面から 0.2mm 毎に骨材部分を除去した値を平均したものである。

これらの詳細は資料編 4 の「SEM/EDS による元素マッピング測定結果」に各元素の面分布図とともに示す。

LBB の場合、Ca（カルシウム）分布は、約 3.5mm 位置まで Ca イオンの溶出に伴うと考えられる濃度の低下が認められた。また、Cl（塩素）および S（硫黄）の分布に関しても、約 3.5mm 位置で最大の濃度を示し、イオンが濃縮されている傾向が伺えた。これは、溶脱に伴い Cl および S の固定化能が失われたことによるものと推察される。

一方、アルカリ金属である Na（ナトリウム）および K（カリウム）の分布は、コンクリート表層部で若干濃度が低下し、その境界は K が Ca と同程度で、Na がコンクリート表層部に近い 1.5～2.0mm の位置となった。また、Mg（マグネシウム）の分布は、コンクリート表層部から 1mm 位置で濃縮現象を起こしていた結果となった。

このような傾向は、資料編 4 の「SEM/EDS による元素マッピング測定結果」からも分かるように、いずれのセメントも元素分布によって表層部が劣化の傾向にあることが伺えるが、5.8.1 のビッカース硬さでは劣化が生じていない傾向であった。すなわち、今回の元素分布による劣化の傾向は、表面の硬さに影響を及ぼすほどではないと推察される。

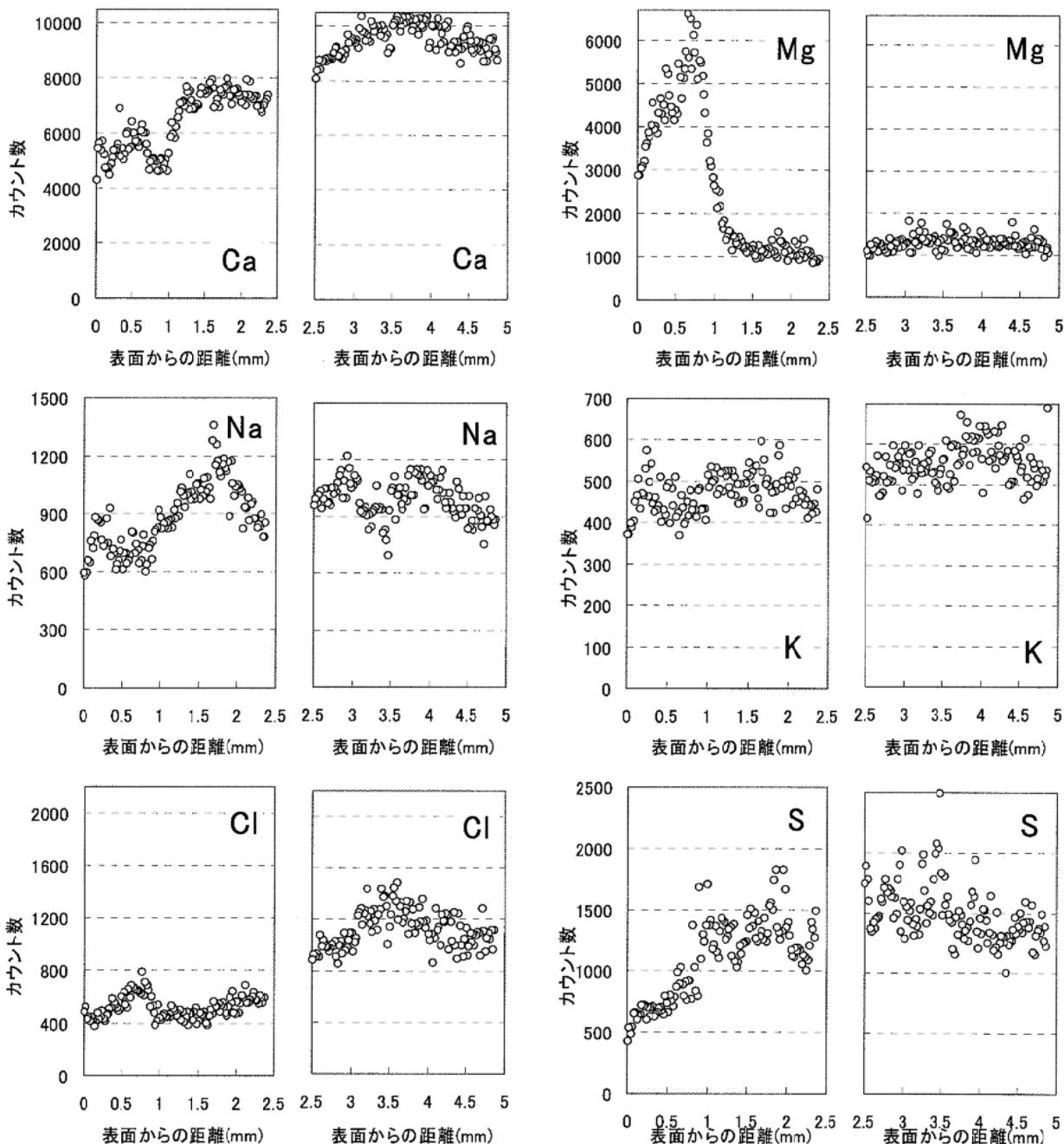


図-5.8.2.1 LBB の表層部の各種イオン分布
(久里浜感潮部、前養生期間 28 日、材齢 10 年)

ここでは、Cl (塩素) および Mg (マグネシウム) のそれぞれのイオン分布をもとに最大濃度を示した位置までの深さを濃縮位置と仮定して考察する。

セメントの種類と Cl (塩素) の濃縮位置までの深さの関係を図-5.8.2.2 に示す。

ポルトランドセメント系の濃縮深さは、1~2mm 程度とほぼ同程度の値を示したが、混合セメント系のコンクリートにおいては、セメントの種類の違いによって大きく異なる結果となり、混和材の種類による明確な相関は得られなかった。

コンクリート表層部の海水による劣化に関しては、山路らは Mg の浸透と関連があるとしている¹⁵⁾。そこで、セメントの種類と Mg (マグネシウム) の濃縮位置までの深さの関係を図-

5.8.2.3 に示す。

最大が LBB の 1.5mm 程度といずれのコンクリートも非常に小さな値であった。前述したビッカース硬さの結果でもコンクリート表層部における硬さの低下は確認されなかつたが、これは、いずれのセメントも感潮暴露での海水による劣化は非常に遅いためであると予想される。

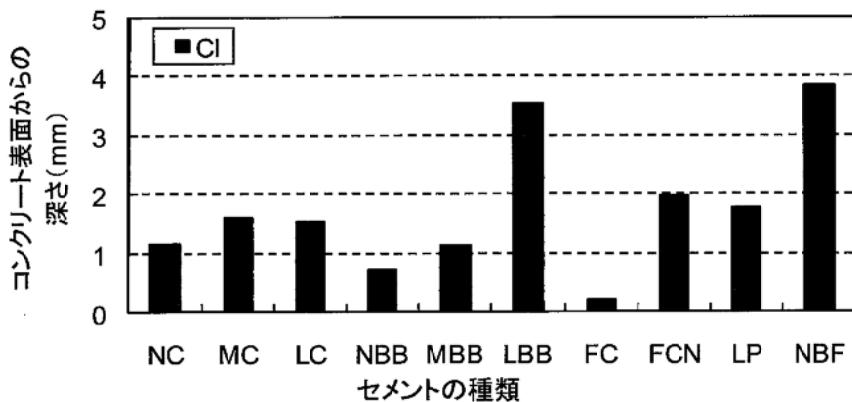


図-5.8.2.2 セメントの種類と Cl (塩素) の濃縮位置までの深さの関係
(久里浜感潮部、前養生期間 28 日)

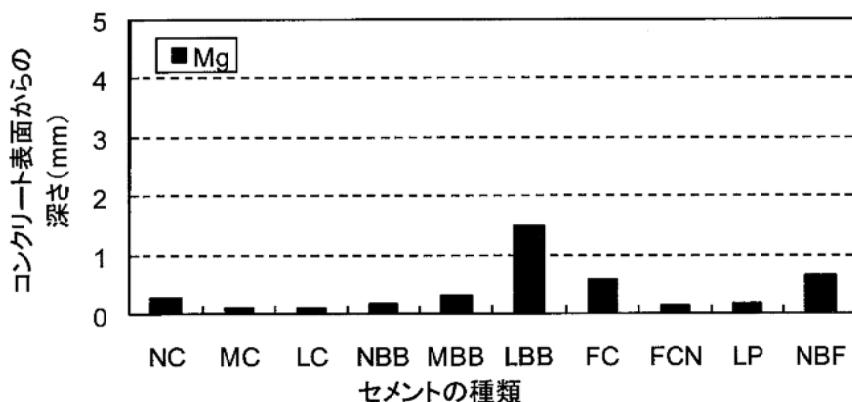


図-5.8.2.3 セメントの種類と Mg (マグネシウム) の濃縮位置までの深さの関係
(久里浜感潮部、前養生期間 28 日)

6. コンクリートの性状に及ぼす各種影響

6.1 圧縮強度

6.1.1 静弾性係数との関係

養生条件別の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6.1.1.1 に示す。同図には土木学会コンクリート標準示方書「設計編」¹²⁾に記載されている数値を併記する。

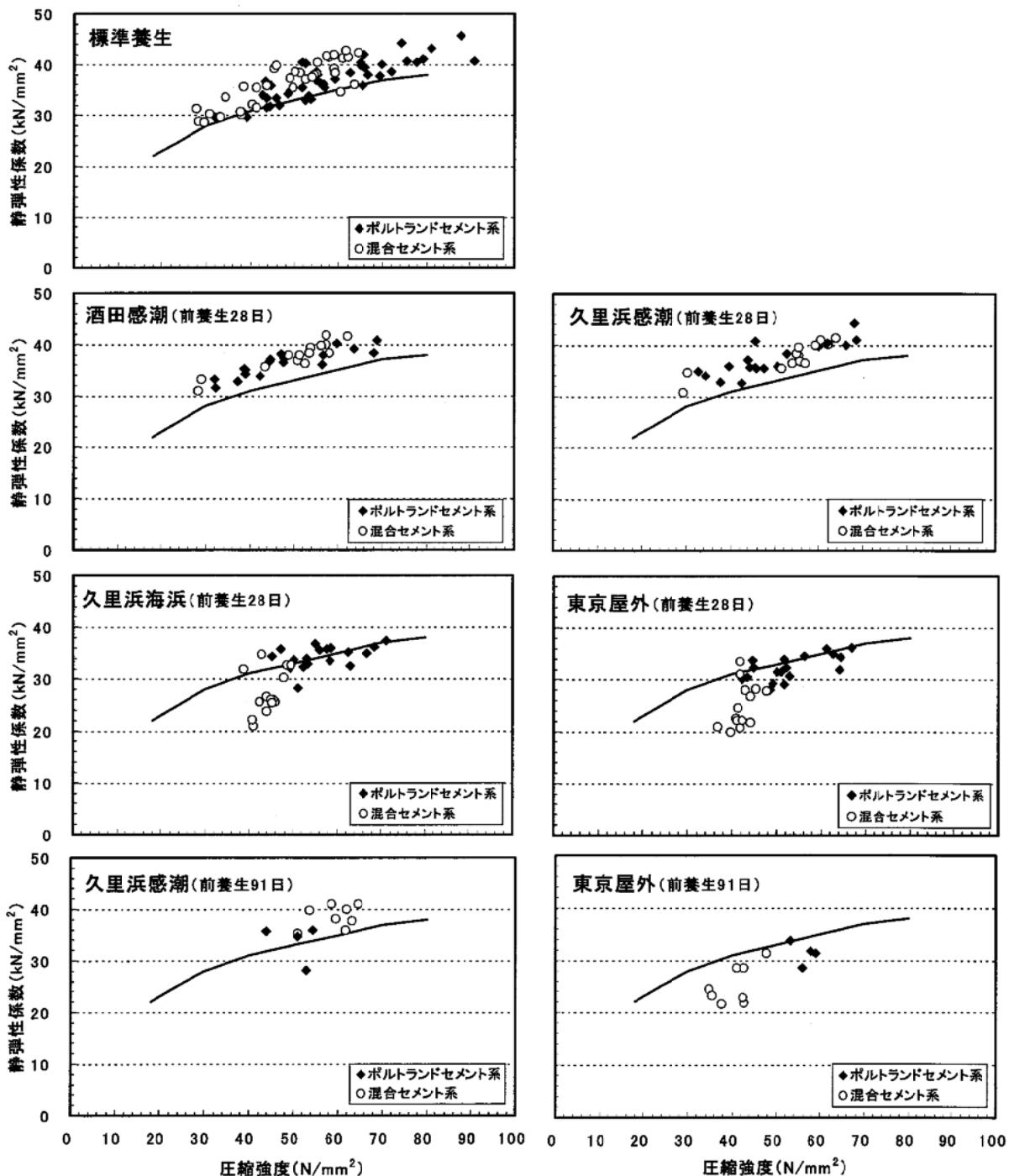


図-6.1.1.1 養生条件別の圧縮強度と静弾性係数の関係

感潮暴露における前養生期間 28 日の圧縮強度と静弾性係数の関係は、標準養生の場合と概ね同等であり、静弾性係数はセメント種類に拘わらず、圧縮強度でほぼ一義的に表すことができた。また、本実験の静弾性係数は、示方書に提示されている同一強度に対する値より若干大きい傾向であった。

一方、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の場合、ポルトランドセメント系および石灰石微粉末を混合した LP の静弾性係数は、示方書に提示された圧縮強度との関係とほぼ同等であるが、高炉スラグセメント系およびフライアッシュセメント系では、「5.3 静弾性係数」で述べたように長期材齢における静弾性係数の低下があったため、同一圧縮強度における静弾性係数が小さくなり、仕方書の関係曲線との乖離が認められた。

なお、久里浜感潮部および東京屋外部について前養生期間 28 日と 91 日の結果を比較すると、両者に大差はなかった。

6.1.2 総細孔量との関係

総細孔量と圧縮強度の関係を図-6.1.2.1～図-6.1.2.3 に示す。なお、総細孔量は、供試体表面からの深さ 5～15mm の部分と 50mm 以上の部分の試料の平均値を用いた。

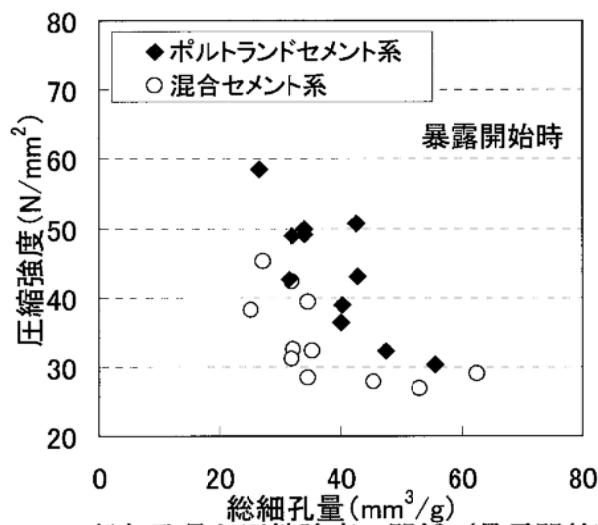


図-6.1.2.1 総細孔量と圧縮強度の関係（暴露開始時）

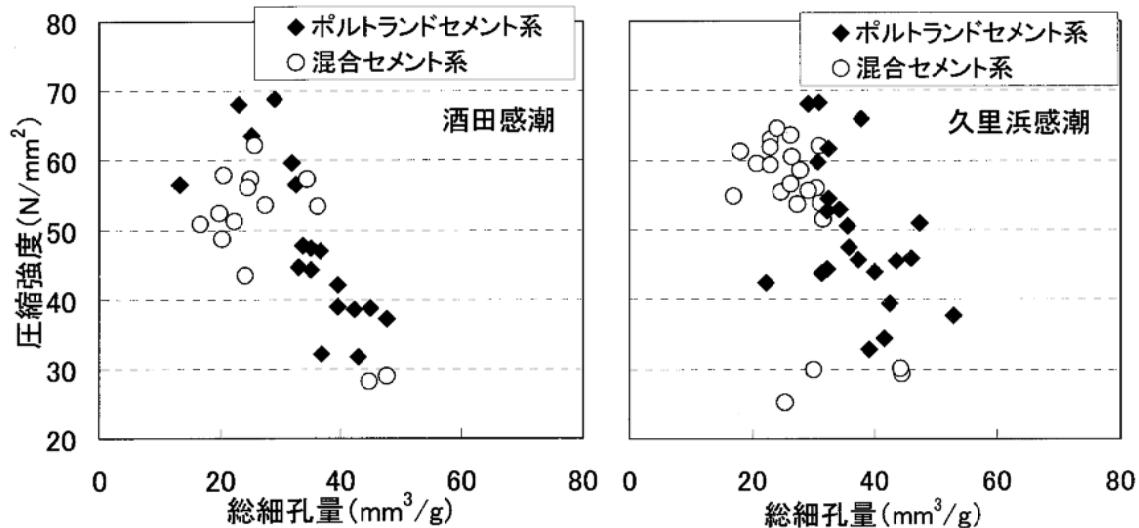


図-6.1.2.2 総細孔量と圧縮強度の関係（酒田感潮部および久里浜感潮部）

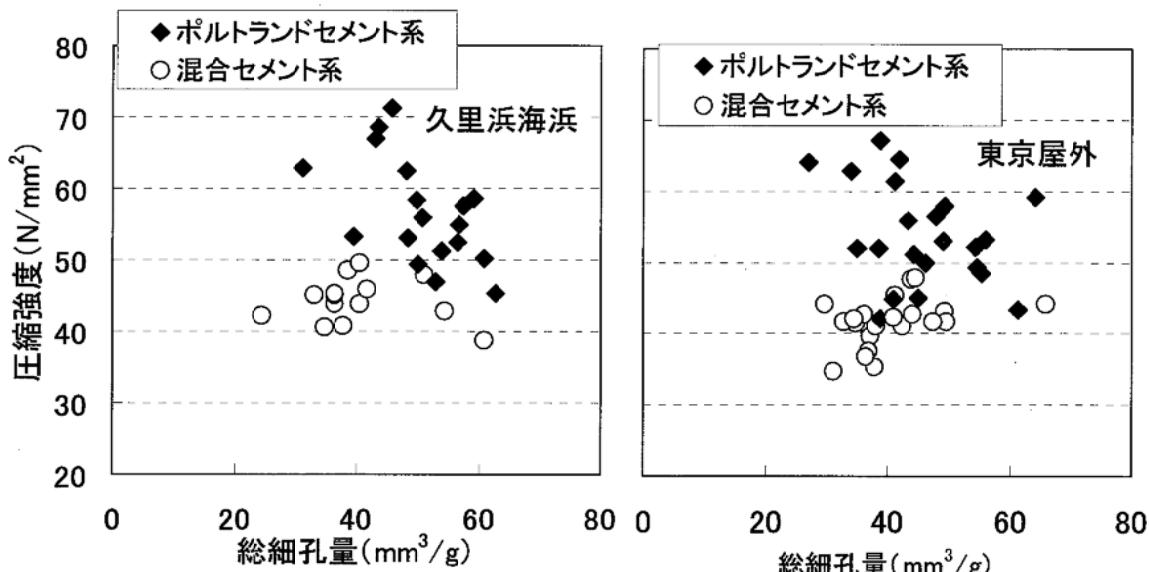


図-6.1.2.3 総細孔量と圧縮強度の関係（久里浜海浜部および東京屋外部）

暴露開始時における圧縮強度と総細孔量には、ポルトランドセメント系および混合セメント系において相関がそれぞれ認められ、総細孔量が多くなるにつれ圧縮強度は低下する傾向が認められた。同一総細孔量における圧縮強度は混合セメント系よりポルトランドセメント系の方が高くなつた。

暴露条件下における圧縮強度と総細孔量には、感潮暴露の場合、セメント種類に関係なく相関関係が認められ、総細孔量が多くなるにつれ圧縮強度は低下する傾向が認められた。一方、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の場合、ポルトランドセメント系では相関関係が認められたが、混合セメント系では明確な傾向が認められなかつた。この理由としては、水の供給が少ない環境では、特に混和材の水和反応が安定して進行しないため、粗大な空隙が残存し、圧縮強度と総細孔量の関係が明確にならなかつたと考えられる。

一般的に、細孔量と圧縮強度は相関関係にあることが知られており、本結果においても、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）で混合セメント系を使用した場合を除き、同様の傾向を示した。

6.1.3 水和生成物との関係

ポルトランダイトの相対強度と圧縮強度の関係を図-6.1.3.1～図-6.1.3.3 に示す。

いずれの暴露条件においても、ポルトランダイト（水酸化カルシウム）の同一相対強度に対し圧縮強度が広く分布しており、ポルトランダイト（水酸化カルシウム）の相対強度と圧縮強度には明確な関係が認められなかつた。

気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、ポルトランダイト量が少ないものは圧縮強度も低い傾向が僅かに読み取れる。この理由として、ポルトランダイトの減少は炭酸化によるところが大きく、ポルトランダイト量が少ない、すなわち、中性化が進んでいる程、圧縮強度が低くなる傾向であった。

一方、感潮暴露では、混合セメント系の場合は水和進行による消費が、ポルトランドセメント系の場合は海水成分との様々な反応による消費がそれぞれポルトランダイト量の低下原因と考えられることから、圧縮強度との関係は不明瞭なものとなつてゐる。

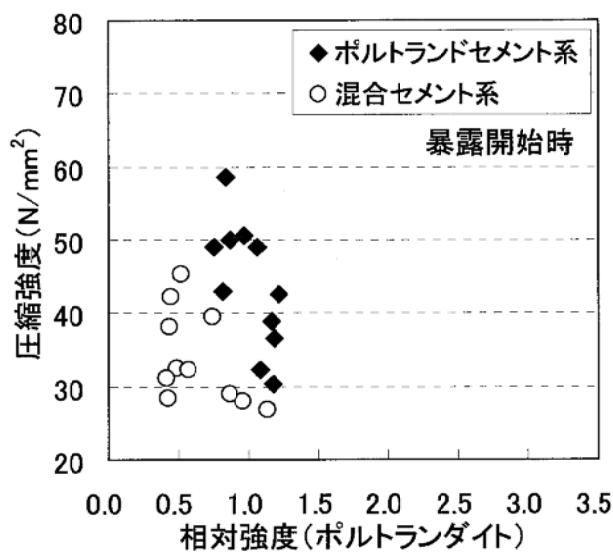


図-6.1.3.1 ポルトランダイトの相対強度と圧縮強度の関係（暴露開始時）

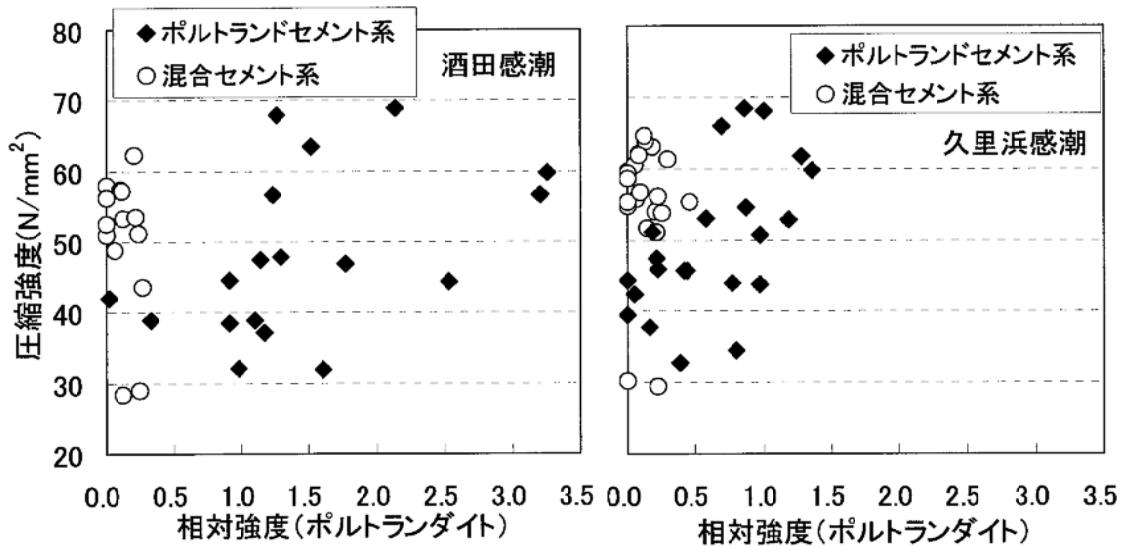


図-6.1.3.2 ポルトランダイトの相対強度と圧縮強度の関係
(酒田感潮部および久里浜感潮部)

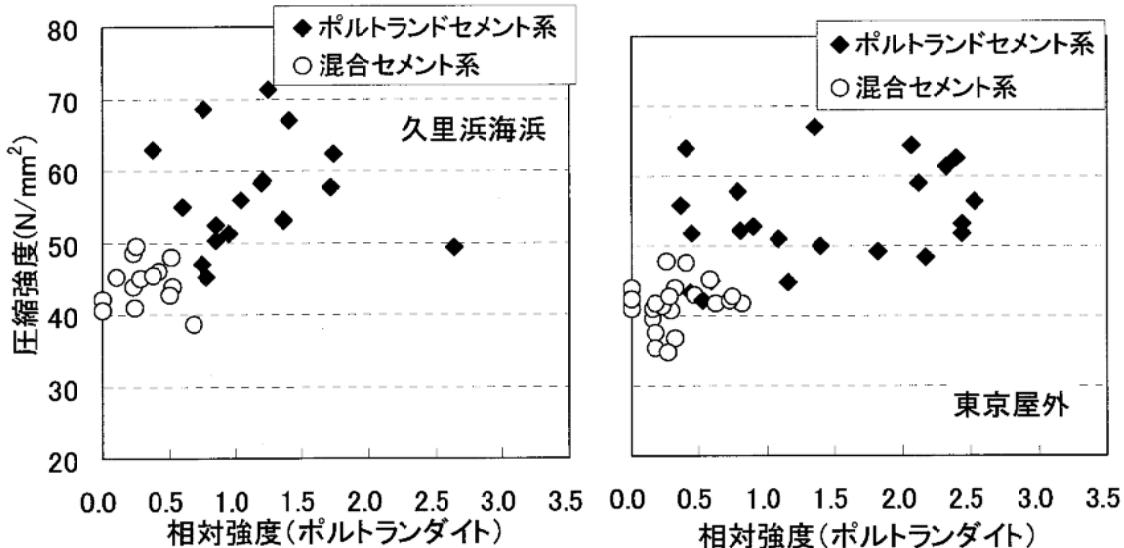


図-6.1.3.3 ポルトランダイトの相対強度と圧縮強度の関係
(久里浜海浜部および東京屋外部)

6.2 静弾性係数

6.2.1 総細孔量との関係

総細孔量と静弾性係数の関係を図-6.2.1.1～図-6.2.1.3 に示す。なお、総細孔量は、供試体表面からの深さ 5～15mm と 50mm 以上の試料の平均値を用いた。

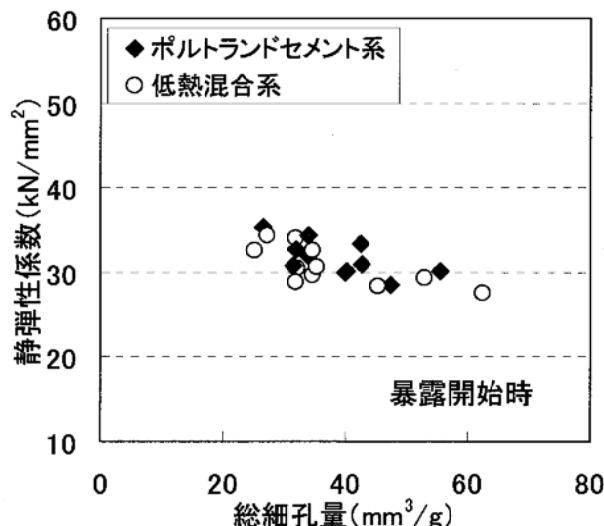


図-6.2.1.1 総細孔量と静弾性係数の関係（暴露開始時）

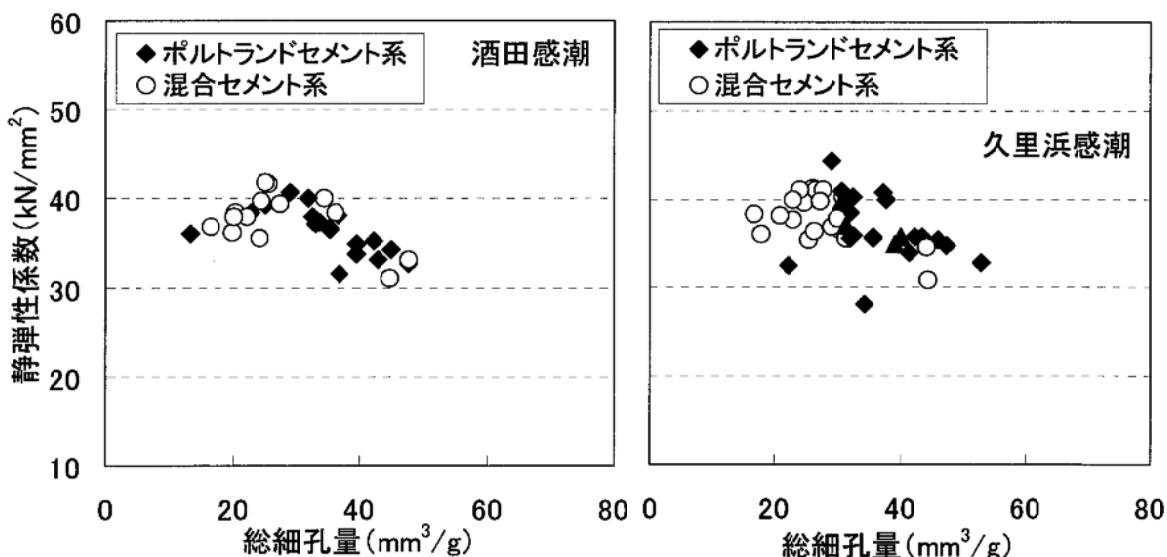


図-6.2.1.2 総細孔量と静弾性係数の関係（酒田感潮部および久里浜感潮部）

暴露開始時の総細孔量と静弾性係数にはセメント種類に関係なく相関が認められ、総細孔量が増加するにつれ静弾性係数が低下する傾向が認められた。

暴露条件下における総細孔量と静弾性係数には、感潮暴露の場合、セメント種類に関係なく相関関係が概ね認められたが、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の場合、両者に明確な関係が認められず、混合セメント系では総細孔量が多くなるにつれ、逆に静弾性係数が大きくなつた。

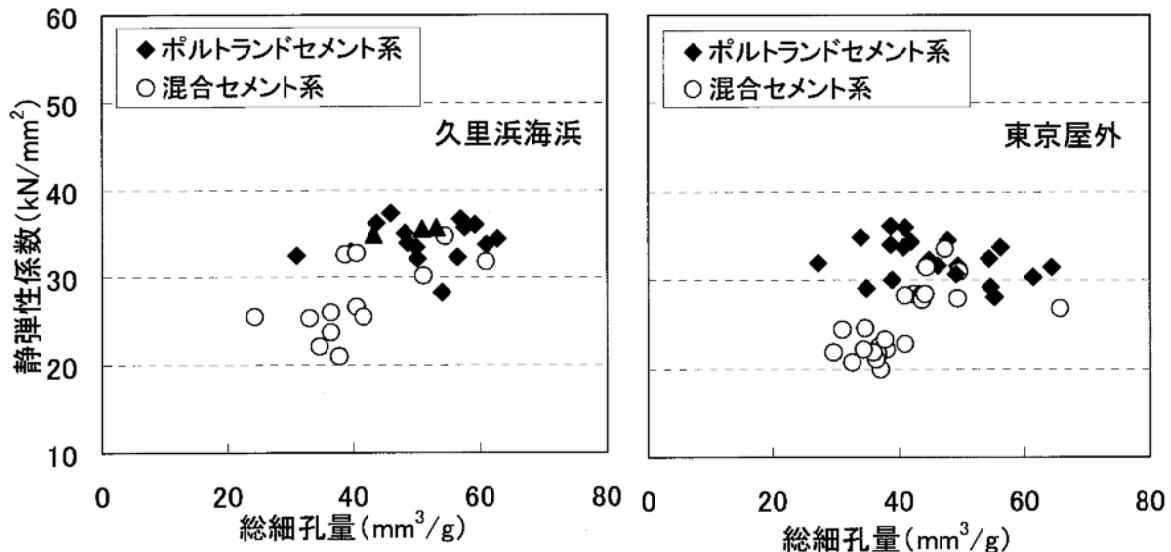


図-6.2.1.3 総細孔量と静弾性係数の関係（久里浜海浜部および東京屋外部）

6.3 中性化深さ

6.3.1 圧縮強度との関係

暴露開始時の圧縮強度と中性化深さの関係を図-6.3.1.1 および図-6.3.1.2 に示す。

圧縮強度と中性化深さには、相関関係が認められ、圧縮強度が高くなるにつれ、中性化深さが小さくなつた。これは、圧縮強度が高いものほど、硬化体組織が緻密になるためと考えられる。

ポルランドセメント系は混合セメント系に比べて圧縮強度と中性化深さの相関性が高くなつた。これは、混合セメント系の場合、混和材の種類や混和量が異なることが影響していると考えられる。

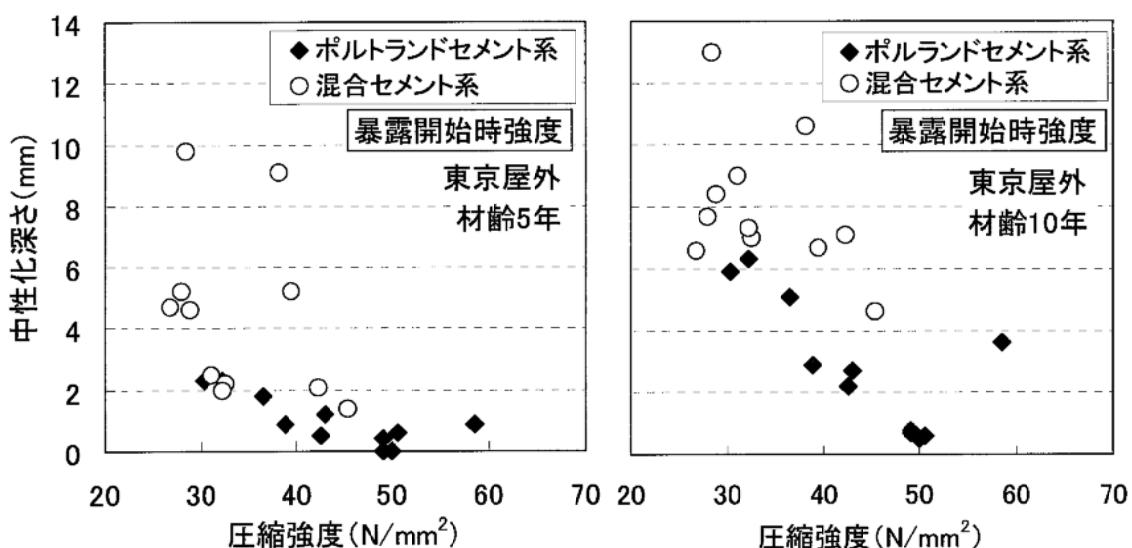


図-6.3.1.1 圧縮強度と中性化深さの関係（久里浜海浜部、材齢 5 年および 10 年）

暴露条件で比較すると、材齢 10 年では久里浜海浜部に比べて東京屋外部の方が同一強度に対する中性化深さが大きくなる傾向であった。また、久里浜海浜部では、暴露開始時の圧縮強度が 50N/mm^2 程度以上であれば、材齢 10 年が経過してもほとんど中性化していなかつた。このように暴露条件で中性化の傾向が異なる結果となつた。

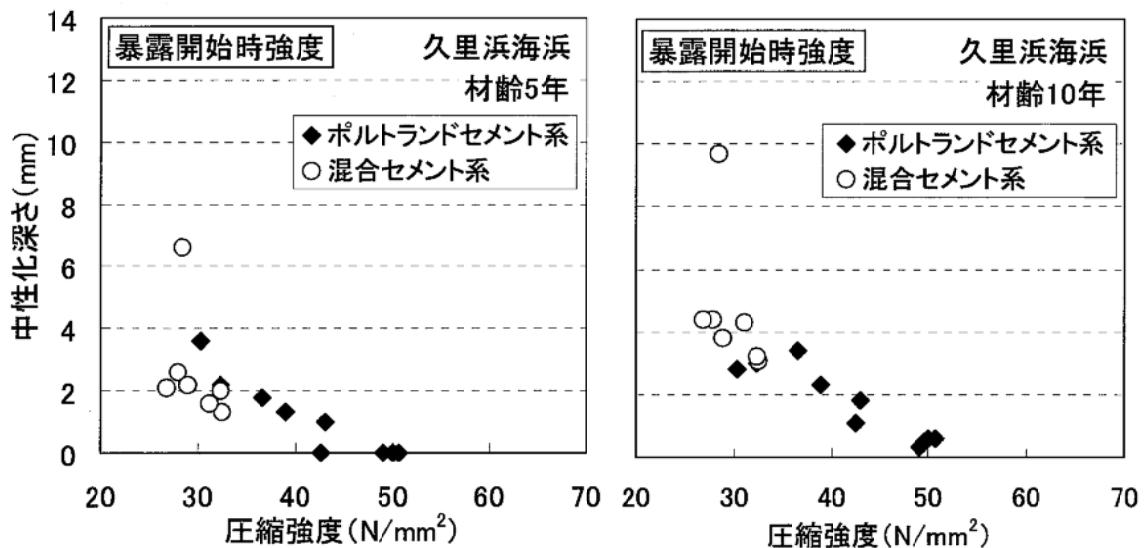


図-6.3.1.2 圧縮強度と中性化深さの関係（東京屋外部、材齢 5 年および 10 年）

6.3.2 総細孔量との関係

暴露開始時の総細孔量と中性化深さの関係を図-6.3.2.1 および図-6.3.2.2 に、所定の材齢の総細孔量と中性化深さの関係を図-6.3.2.3 に示す。なお、総細孔量は、供試体表面からの深さ 5～15mm の部分の結果を用いた。

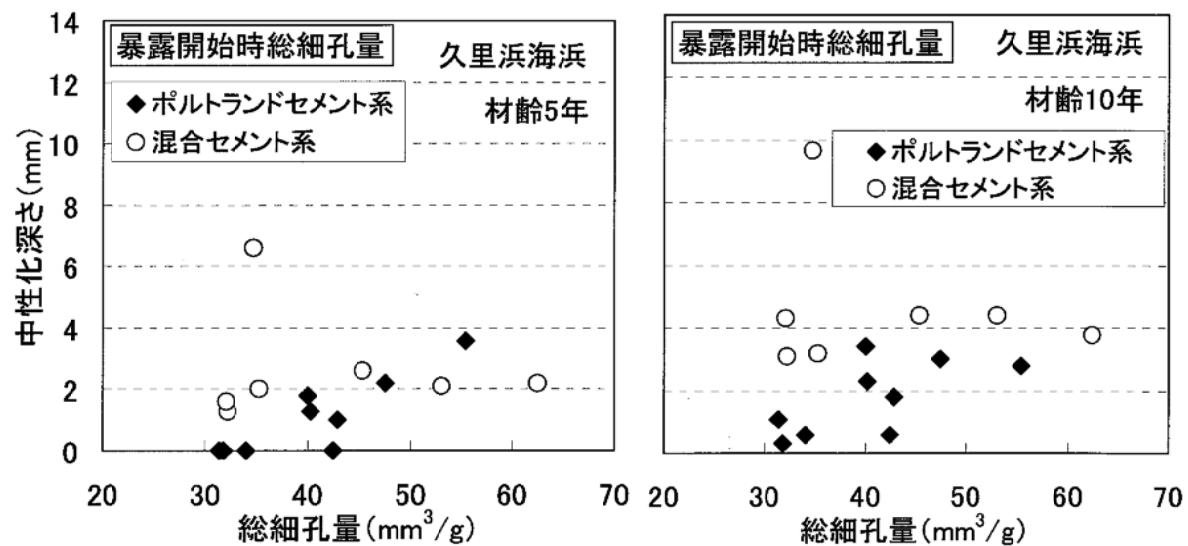


図-6.3.2.1 暴露開始時の総細孔量と中性化深さの関係
(久里浜海浜部、材齢 5 年および 10 年)

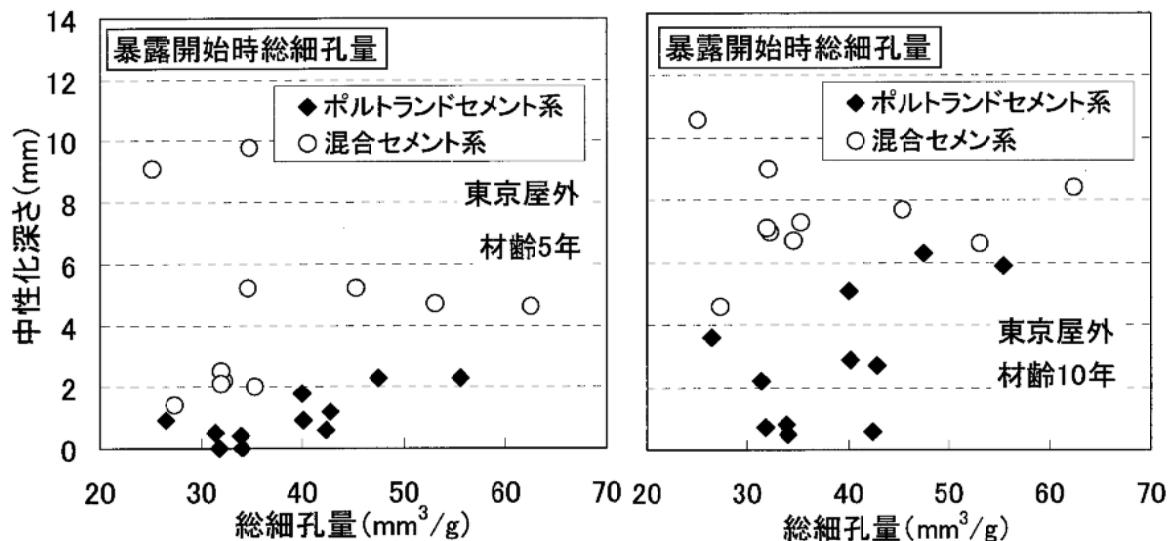


図-6.3.2.2 暴露開始時の総細孔量と中性化深さの関係
(東京屋外部、材齢 5 年および 10 年)

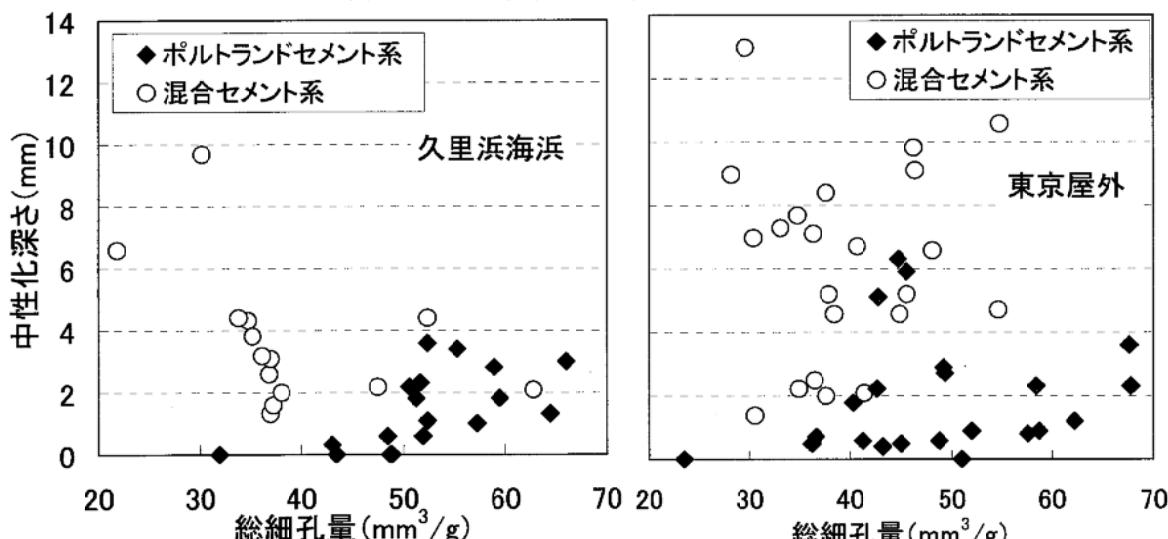


図-6.3.2.3 所定材齢の総細孔量と中性化深さの関係 (東京屋外部、材齢 5 年および 10 年)

暴露開始時の総細孔量と中性化深さには、混合セメント系に比べるとポルトランドセメント系の方が相関が認められ、総細孔量が多くなるにつれ中性化深さが大きくなる傾向が伺えた。

一方、混合セメント系では、両者に明確な関係が認められなかった。これは、中性化深さには硬化体組織の緻密度だけでなく、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量等も影響しているためと考えられる。所定の材齢における総細孔量と中性化深さには、明確な関係が認められなかった。なお、既往の研究では、中性化により細孔構造が変化する¹⁶⁾ことが報告されているが、空隙量の増減に関する見解は一致しなかった。

6.3.3 水和生成物との関係

(1) ポルトランダイト (水酸化カルシウム)

X 線回折によるポルトランダイトの相対強度と中性化深さの関係を図-6.3.3.1 に示す。

いずれの環境およびセメント種類においても、ポルトランダイト (水酸化カルシウム) と中性化深さには明確な関係が認められなかった。ただし、ポルトランダイト (水酸化カルシウム) が同定されなかったものは、中性化深さが比較的大きかった。

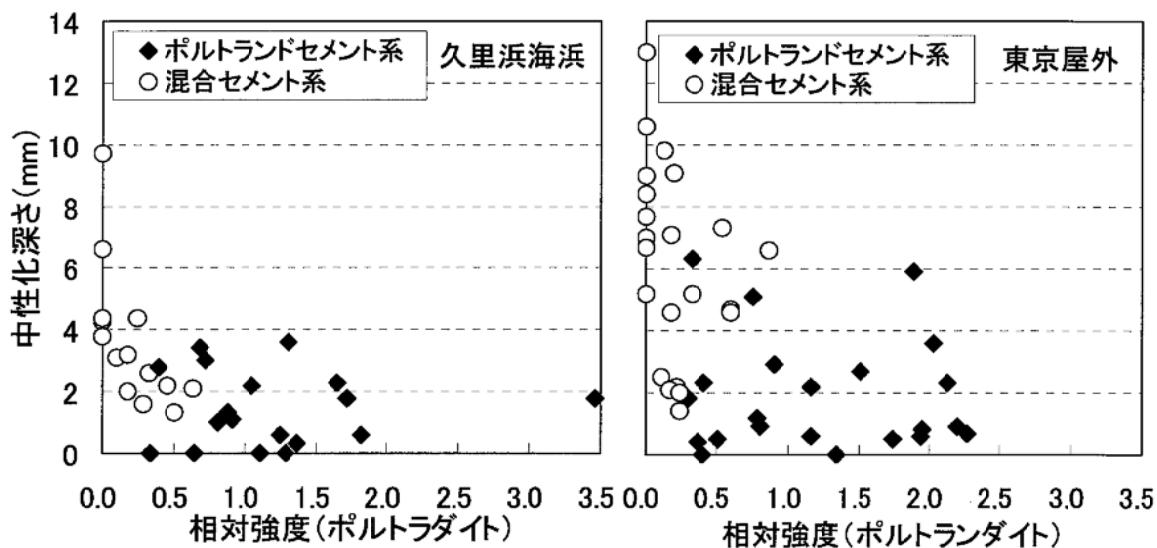


図-6.3.3.1 ポルトランダイトの相対強度と中性化深さの関係
(久里浜海浜部および東京屋外部、材齢5年および10年)

(2)カルサイト（炭酸カルシウム）

X線回折によるカルサイトの相対強度と中性化深さの関係を図-6.3.3.2に示す。いずれの環境およびセメント種類においても、ポルトランダイト（水酸化カルシウム）と同様にカルサイト（炭酸カルシウム）と中性化深さには明確な関係が認められなかった。

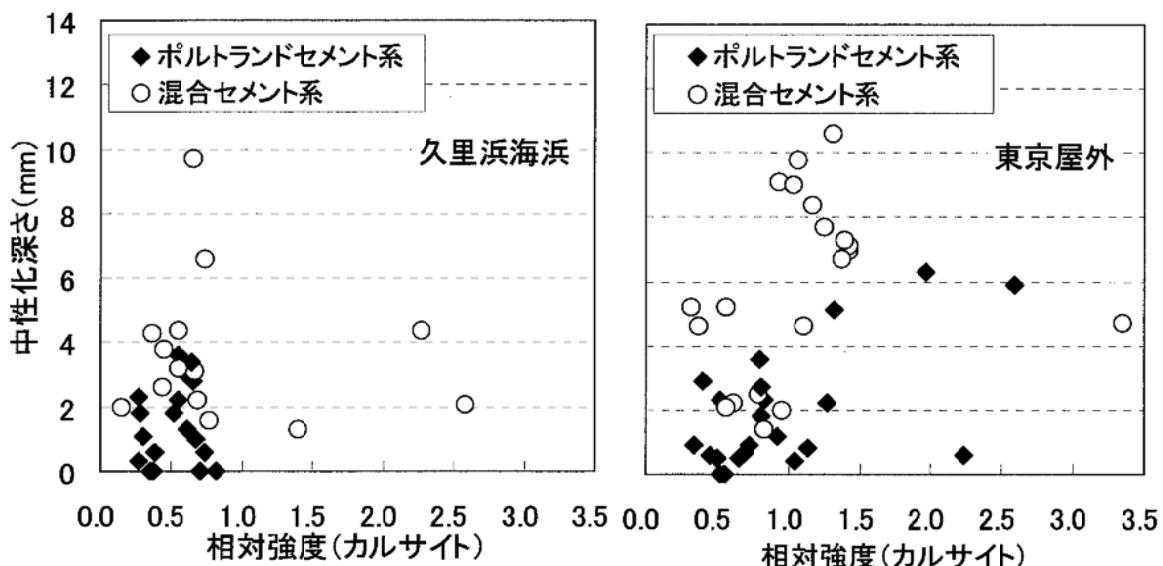


図-6.3.3.2 カルサイトの相対強度と中性化深さの関係
(久里浜海浜部および東京屋外部、材齢5年および10年)

(3)ポルトランダイト（水酸化カルシウム）とカルサイト（炭酸カルシウム）

深さ5~15mmの部分におけるポルトランダイトとカルサイトの相対強度の比率（カルサイトとポルトランダイトの和に占めるカルサイトの割合）と中性化深さの関係を図-6.3.3.3に示す。

感潮暴露では、カルサイトの割合が90%程度を超えるものにのみ中性化が認められた。気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、カルサイトの割合が10%程度でも中性化が認められるものもあり、中性化深さが大きくなるにつれカルサイトの占める割合は高くなつた。

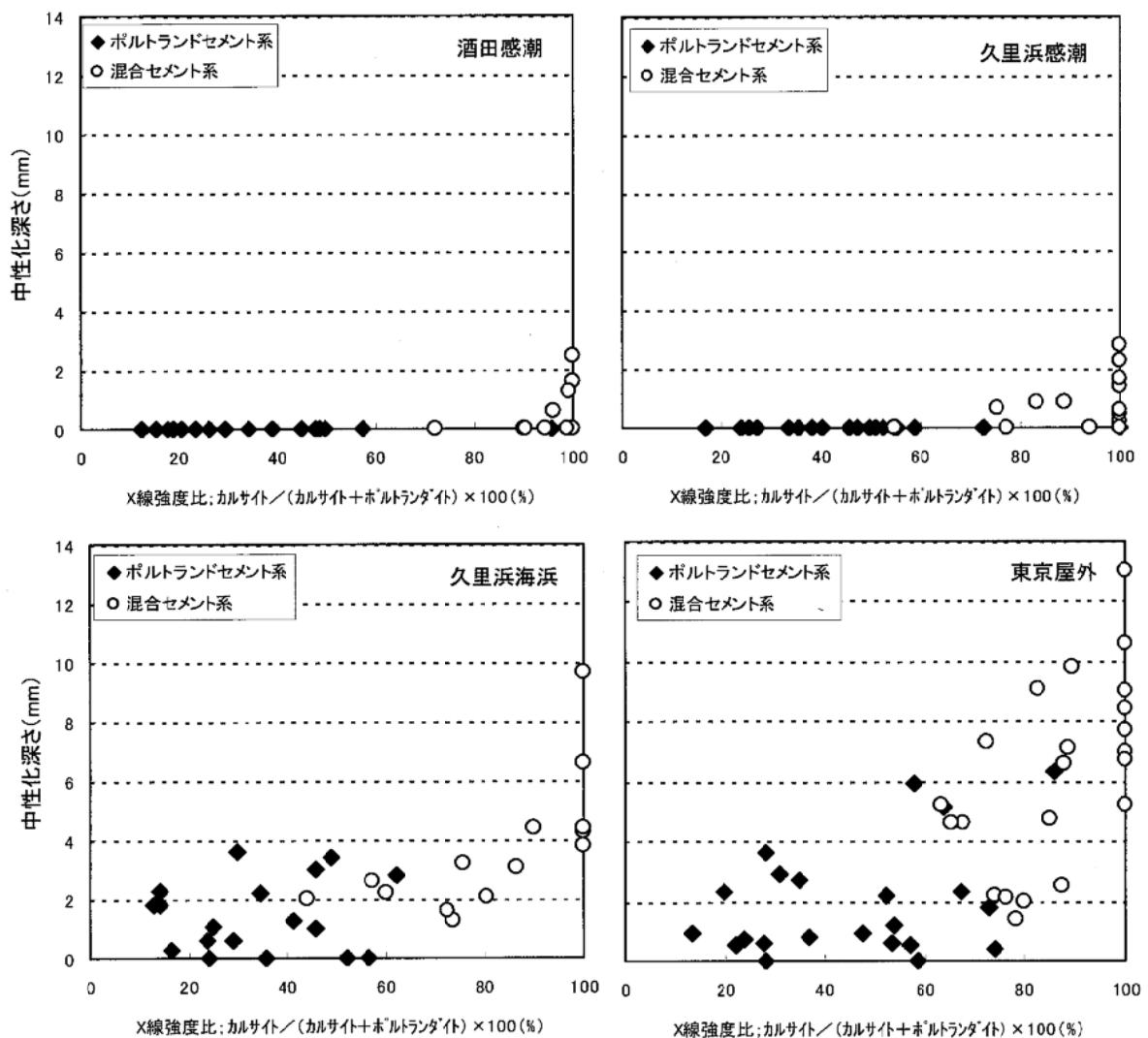


図-6.3.3.3 深さ 5~15mm の部分における相対強度比（カルサイト／（カルサイト+ポルトランドセメント））×100 と中性化深さの関係
(材齢 5 年および 10 年)

6.4 塩化物イオン濃度

6.4.1 圧縮強度との関係

暴露開始時の圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係を図-6.4.1.1 および図-6.4.1.2 に、所定の材齢における圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係を図-6.4.1.3 に示す。

圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数には、ポルトランドセメント系の場合、相関関係が認められ、圧縮強度が高いものほど塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなつた。

一方、混合セメント系の場合、圧縮強度の大小にかかわらず塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さく、ほぼ一定であった。これは、ポルトランドセメント系では、その種類による塩化物の固定化性能に大差がなく、塩化物イオンの見掛けの拡散係数はセメントの化学組成や水セメント比の大小等による硬化体組織の緻密さが大きく影響しているのに対し、混合セメント系では、混和材の固定化性能が大きく影響しているためと考えられる。同一圧縮強度における塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、ポルトランドセメント系に比べて混合セメント系の方が小さくなつた。

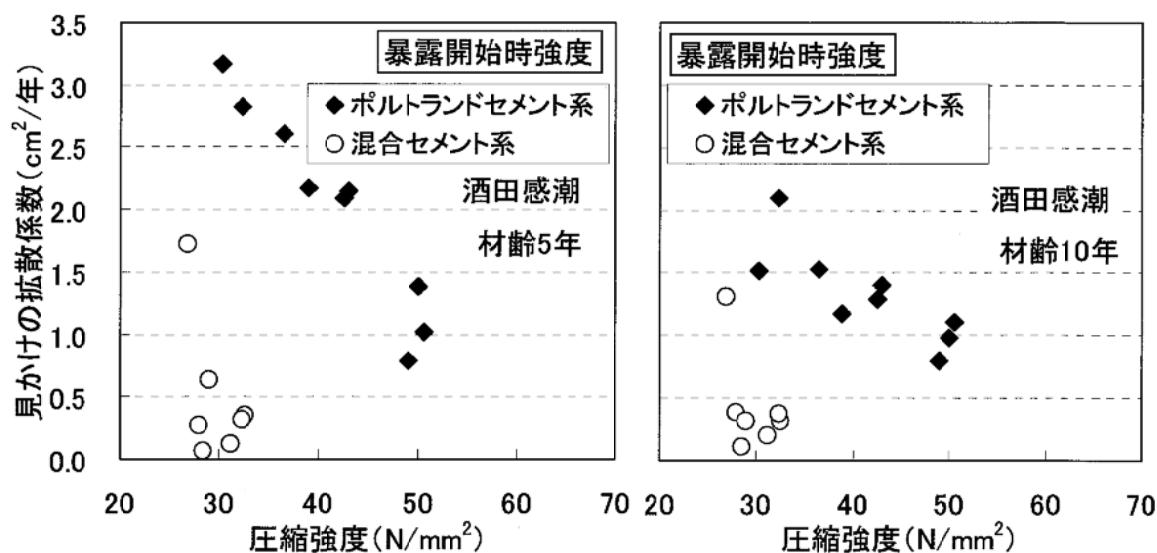


図-6.4.1.1 暴露開始時の圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(酒田感潮部、材齢 5 年および 10 年)

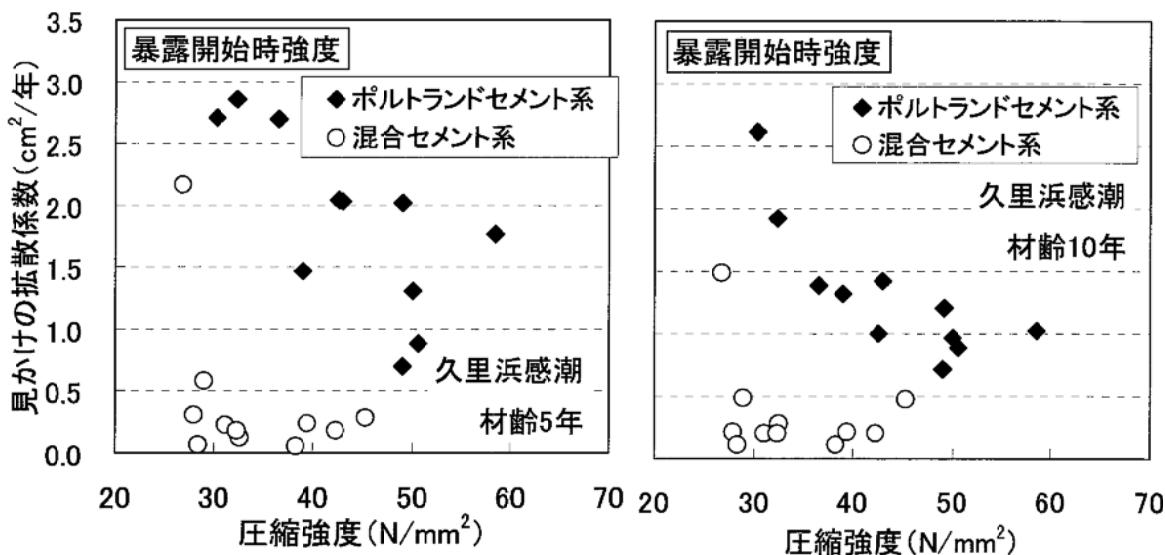


図-6.4.1.2 暴露開始時の圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(久里浜感潮部、材齢 5 年および 10 年)

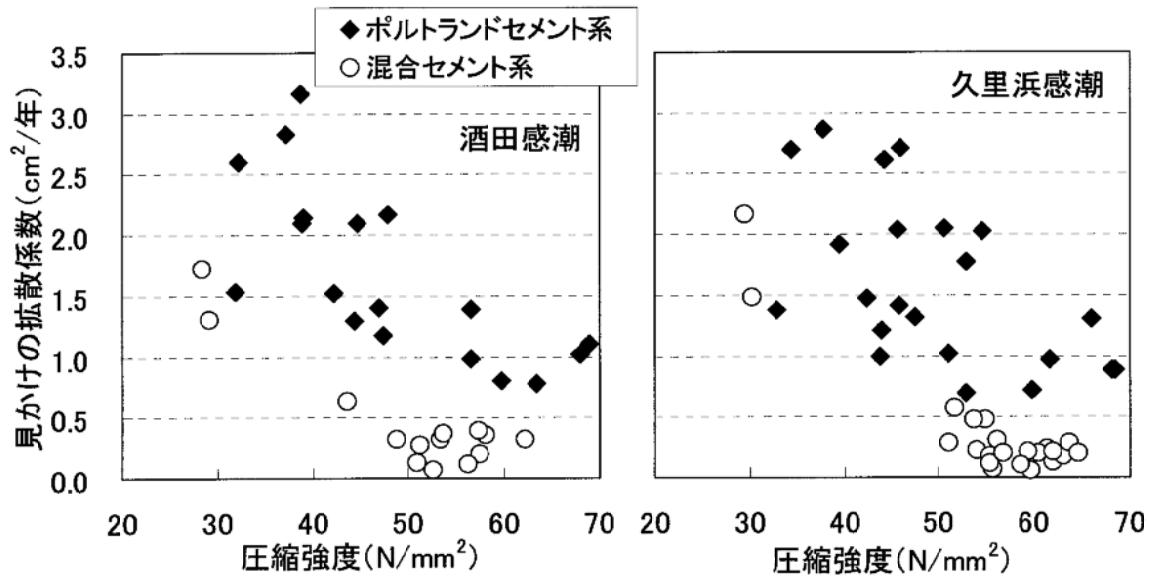


図-6.4.1.3 所定の材齢の圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(酒田感潮部および久里浜感潮部)

6.4.2 総細孔量との関係

暴露開始時の総細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係を図-6.4.2.1 および図-6.4.2.2、所定の材齢の総細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係を図-6.4.2.3 に示す。なお、総細孔量は、供試体表面から深さ 5~15mm と 50mm 以上の試料の平均値を用いた。

いずれの暴露条件でも、総細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数には、ポルトランドセメント系および混合セメント系において相関関係がそれぞれ認められ、総細孔量が多くなるにつれ塩化物イオンの見掛けの拡散係数は大きくなる傾向が認められた。特に、所定の材齢での総細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数では、セメント種類に関係なく、相関関係が認められ、細孔構造は、塩化物の浸透性との関連性が高いと判断された。

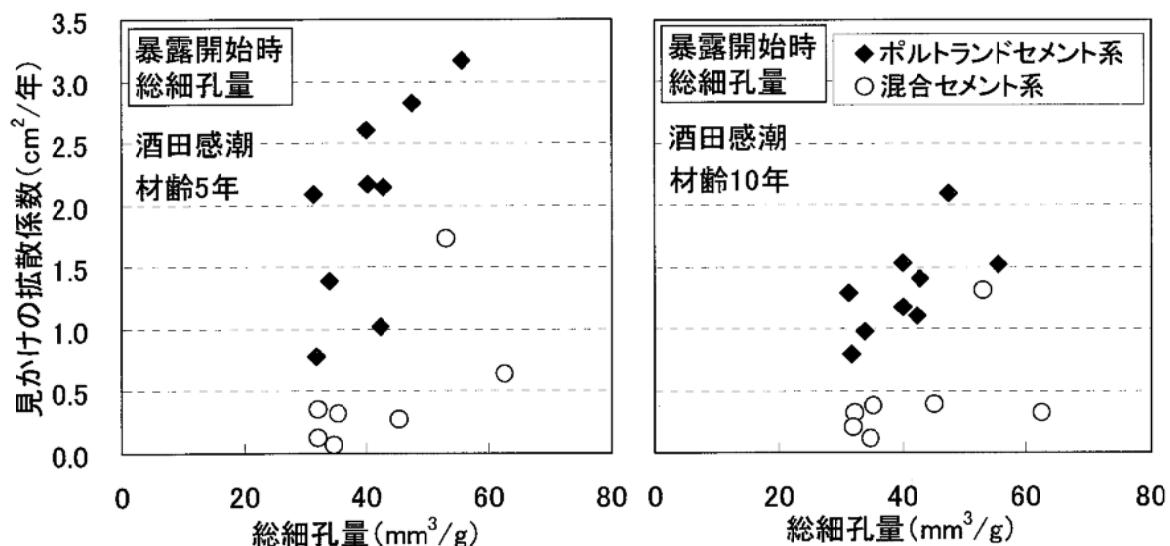


図-6.4.2.1 暴露開始時の総細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(酒田感潮部、材齢 5 年および 10 年)

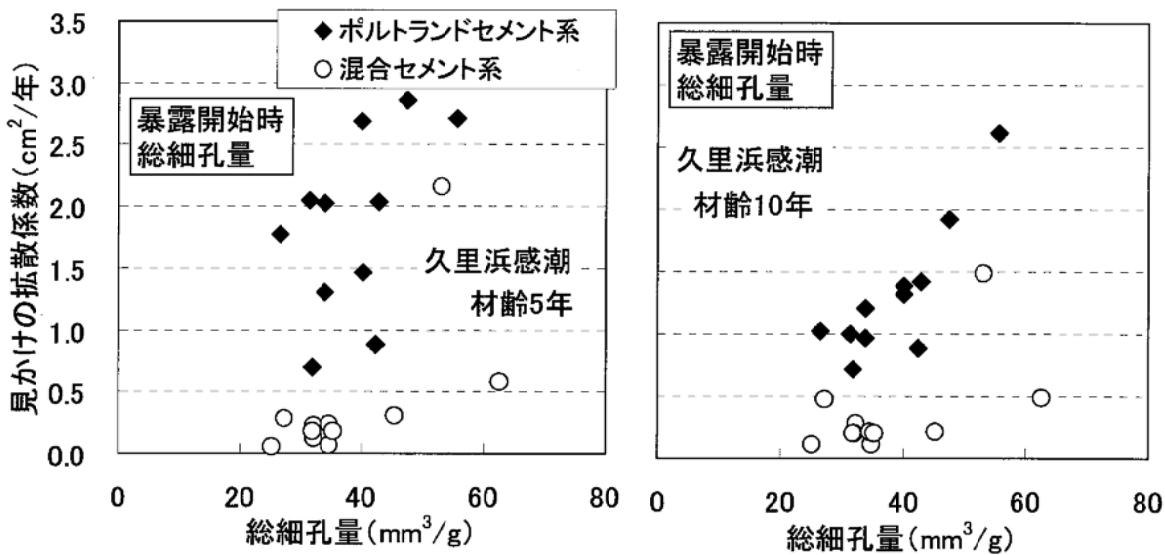


図-6.4.2.2 暴露開始時の総細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(久里浜感潮部、材齢5年および10年)

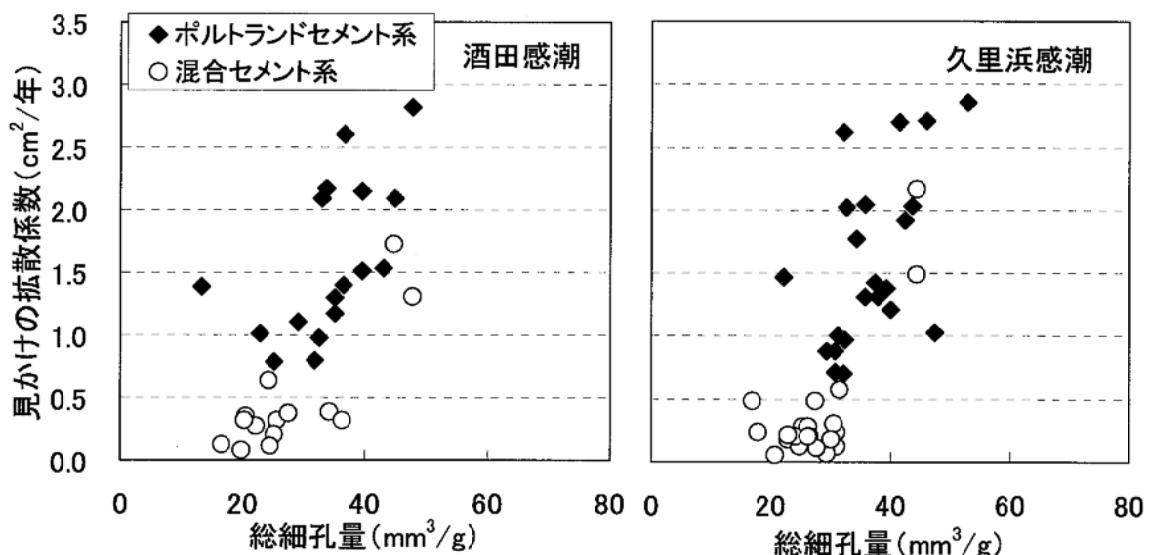


図-6.4.2.3 所定の材齢の総細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(酒田感潮部および久里浜感潮部)

6.4.3 水和生成物との関係

フリーデル氏塩は、海水中の塩化物とセメントの水和物との反応によって生成されるため、水セメント比および前養生期間の条件の違いを含む全ての測定結果を用い、「5.5 塩化物イオン濃度」とフリーデル氏塩の相対強度の関係を検討した。

材齢10年におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度とフリーデル氏塩の相対強度の関係を図-6.4.3.1に示す。

コンクリート中の塩化物イオン濃度が増加すると、フリーデル氏塩の相対強度も高くなる傾向であった。ポルトランドセメント系と混合セメント系を比較すると、同程度の塩化物イオン濃度に対するフリーデル氏塩の相対強度は混合セメント系の方が若干低い傾向がみられる。このことから、混合セメント系では、フリーデル氏塩以外の鉱物に固定されているかもしくは吸着されて

いる塩化物イオン濃度がポルトランドセメント系よりも多くなっている可能性が考えられる。

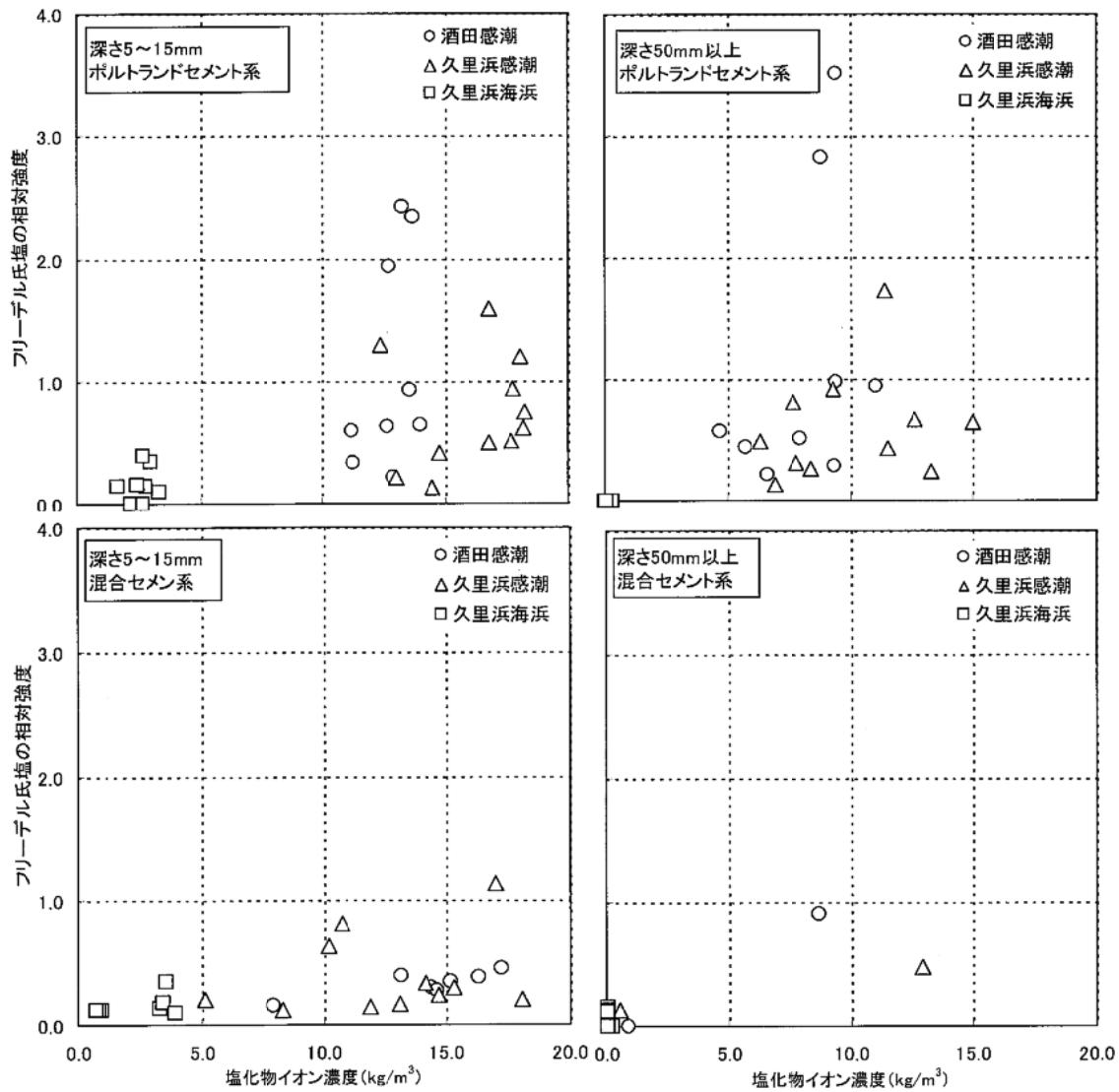


図-6.4.3.1 材齢 10 年におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度とフリーデル氏塩の相対強度の関係（酒田感潮部および久里浜感潮部、久里浜海浜部）

7. 鉄筋の発錆に関する試験結果

7.1 外観観察

鉄筋の外観観察の結果、材齢 5 年では、いずれの供試体も発錆が少なく、「4.2 鉄筋の発錆に関する試験方法」の表-4.2.1 に示す鉄筋の腐食グレードは、最大でも I⁺までであり、試験条件の違いによる発錆の傾向はあまり明瞭でなかったのに対し、材齢 10 年では、鉄筋の腐食グレード II 以上が認められた。

感潮暴露である酒田感潮部および久里浜感潮部、材齢 10 年における鉄筋のグレードとセメントの種類および水セメント比の関係を図-7.1.1、暴露条件毎に水結合材比 50%、前養生期間 28 日における鉄筋の腐食グレードとセメントの種類の関係を図-7.1.2 に示す。なお、両図中の腐食グレードは、2 本のコンクリート供試体に配置した鉄筋の内、腐食が最も進んでいた鉄筋の測定結果である。

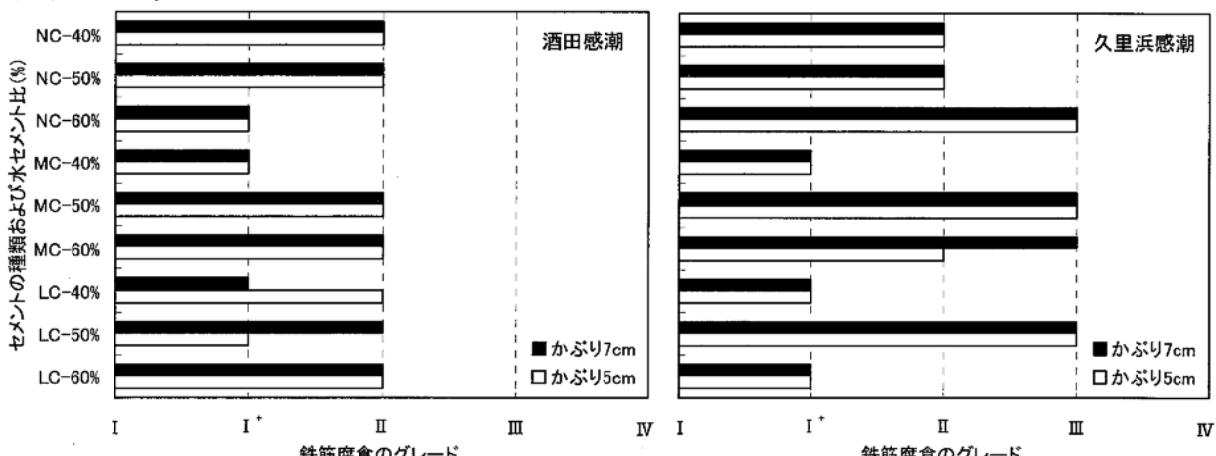


図-7.1.1 鉄筋の腐食グレードとセメントの種類および水セメント比の関係

(久里浜感潮部および酒田感潮部、前養生期間 28 日、材齢 10 年)

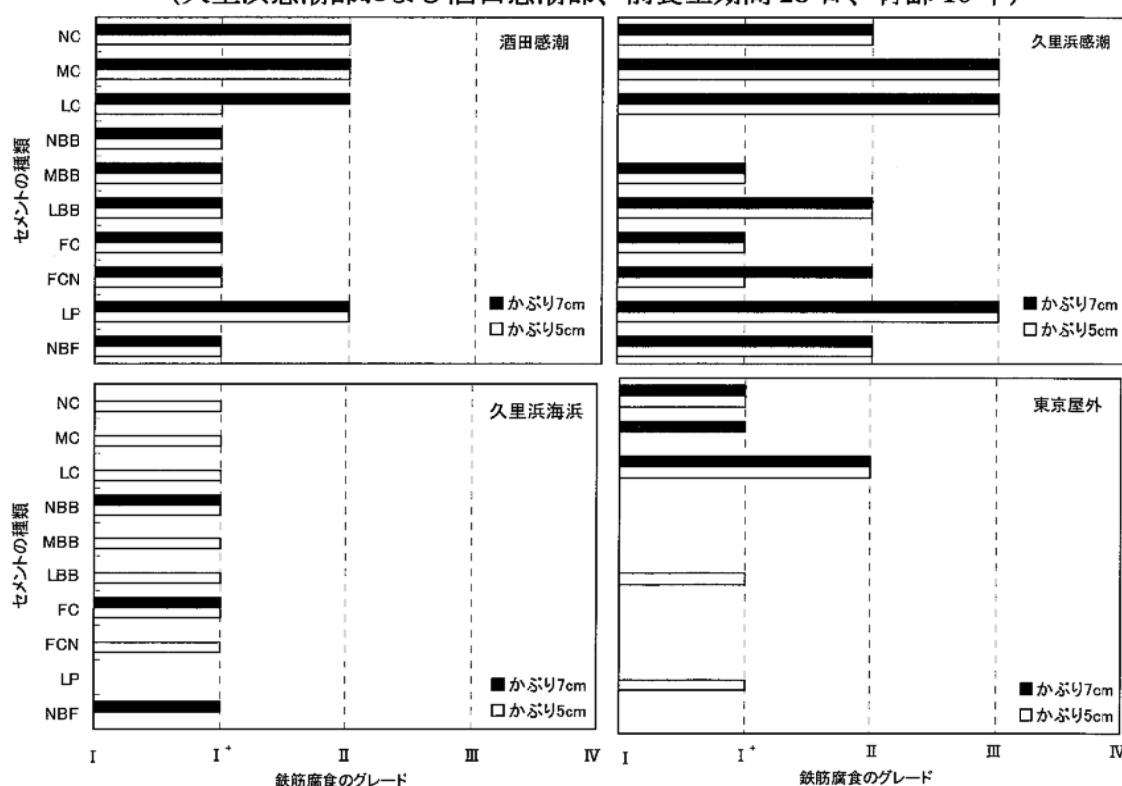


図-7.1.2 鉄筋の腐食グレードとセメントの種類の関係

(水結合材比 50%、前養生期間 28 日、材齢 10 年)

感潮暴露した高水セメント比の供試体では腐食グレードⅡ以上のものが目立つに対し、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）に暴露された腐食の進行は、それほど顕著ではなかったことがわかる。

なお、図-7.1.2 では東京屋外部の LC はグレードⅡと判断しているが、もう一つの供試体の判定はグレードⅠであったので過大に判定している可能性がある。

なお、これらの詳細は資料編 2 の「鉄筋の発錆に関する試験結果」に示す。

7.2 電気化学的方法

(1) 自然電位

鉄筋の自然電位による腐食判定を表-7.2.1、鉄筋の自然電位の経時変化を図-7.2.1 に示す。

いずれの供試体も暴露開始から半年後あたりから全体的に卑化する傾向を示した。また、セメントの種類に関係なく、鉄筋の自然電位は夏季に卑化し、冬期に貴化する傾向が認められた。年間の電位の変動幅は、100～200mV と非常に大きなものである。なお、この結果によると、表-7.2.1 に示す ASTM C 876 による腐食判定では、いずれの供試体も「90%以上の確立で腐食あり」と判定される。

鉄筋の自然電位の卑化の原因としては、「3.5 各暴露条件による気象・環境状況」の図-3.5.5 より、海水温度は夏季に上昇し、海水温度の上昇に伴い溶存酸素量は減少する。また、コンクリート抵抗は温度の上昇と共に減少する¹⁸⁾。コンクリート抵抗が減少すると測定される自然電位の値は卑となるため、コンクリート抵抗が環境温度（海水温度）により変化し、その影響を受けて、自然電位の値も変化したものと考えられる。

海中のように溶存酸素量が少ない場所では、自然電位は卑となる傾向を示す。今回の暴露条件は干溝帯であるが、1 日に 6 時間程度、供試体は没水した状況となる。また、暴露場所は日陰に位置しているため比較的湿潤な環境になり、鉄筋表面への酸素供給量は常に少ない環境下にあると考えられる。外部の海水における溶存酸素量が減少する夏季では、酸素供給量はさらに減少すると考えられる。

このように鉄筋表面が貧酸素環境となることで、自然電位の値が比較的に卑な値を示し、さらに夏場でより卑な傾向を示したと考えられる。なお、計測に用いられる照合電極自体も温度の影響を受けるが、その影響は 1°Cにつき約 1mV 程度であり¹⁹⁾、この影響は小さいと考えられる。

表-7.2.1 鉄筋の自然電位による腐食判定¹⁷⁾

鉄筋腐食の可能性	電位 E (mV vs. CSE)	電位 E (mV vs. Ag/AgCl)	電位 E (mV vs. 海水 Ag/AgCl)
90%以上腐食なし	-200 < E	-81 < E	-135 < E
不確定	-350 < E ≤ -200	-231 < E ≤ -81	-285 < E ≤ -135
90%以上腐食あり	E ≤ -350	E ≤ -231	E ≤ -285

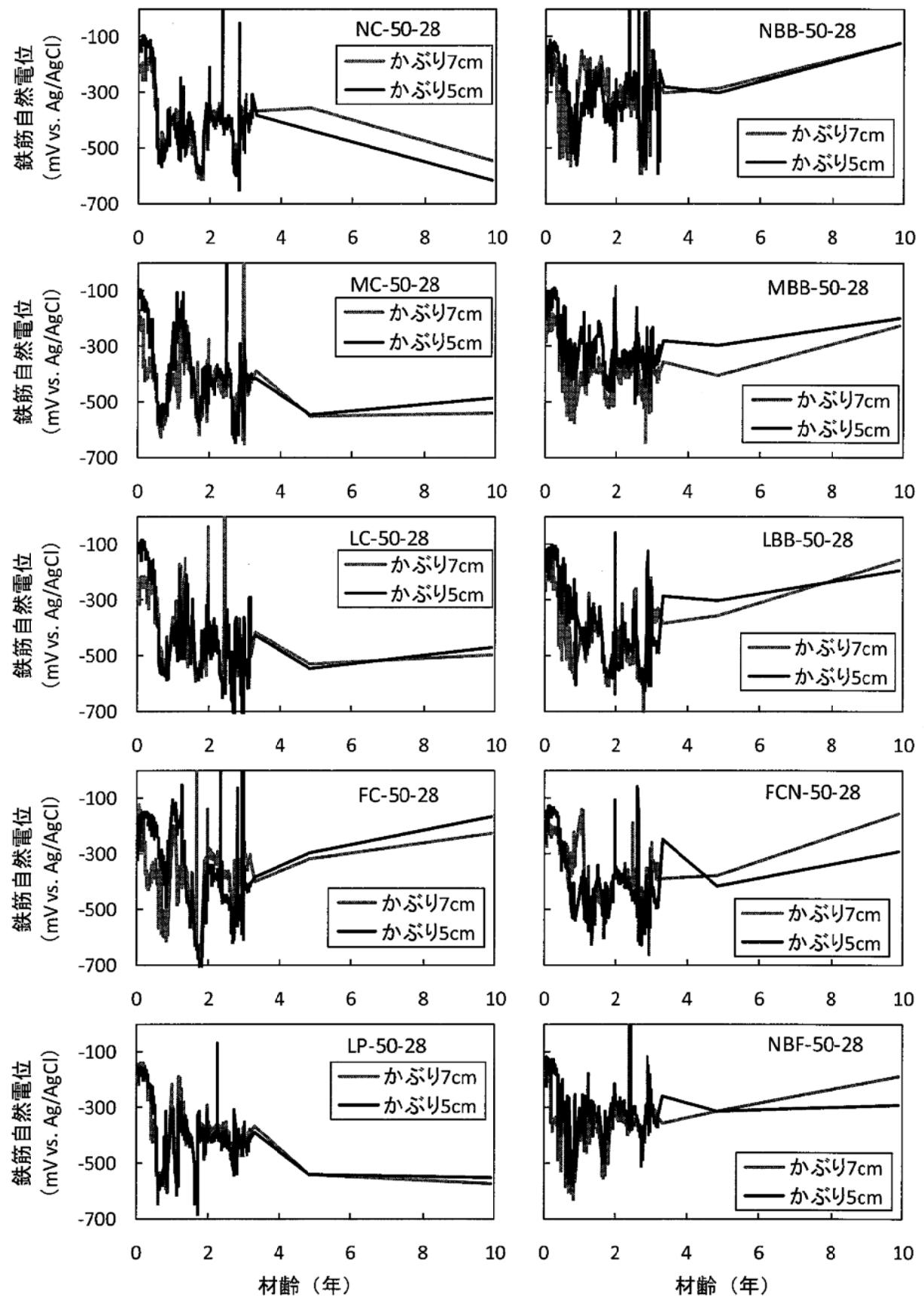


図-7.2.1 鉄筋の自然電位の経時変化

(2) 分極抵抗

交流インピーダンス法によって測定した、かぶり 5cm の鉄筋の腐食速度の経時変化を図-7.2.3、かぶり 7cm の鉄筋の腐食速度の経時変化を図-7.2.4 に示す。また、CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）から報告されている腐食速度の判定基準を表-7.2.2 に示す。図-7.2.3 および図-7.2.4 には点線で表-7.2.2 の範囲を示す。なお、図中の凡例に示す数字は供試体番号を示す。

表-7.2.2 CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）による腐食速度の判定基準²⁰⁾

腐食速度 $I_{corr} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	腐食速度の判定
0.1～0.2 未満	不動態状態（腐食なし）
0.2 以上 0.5 以下	低～中程度の腐食速度
0.5 以上 1 以下	中～高程度の腐食速度
1 以上	激しい、高い腐食速度

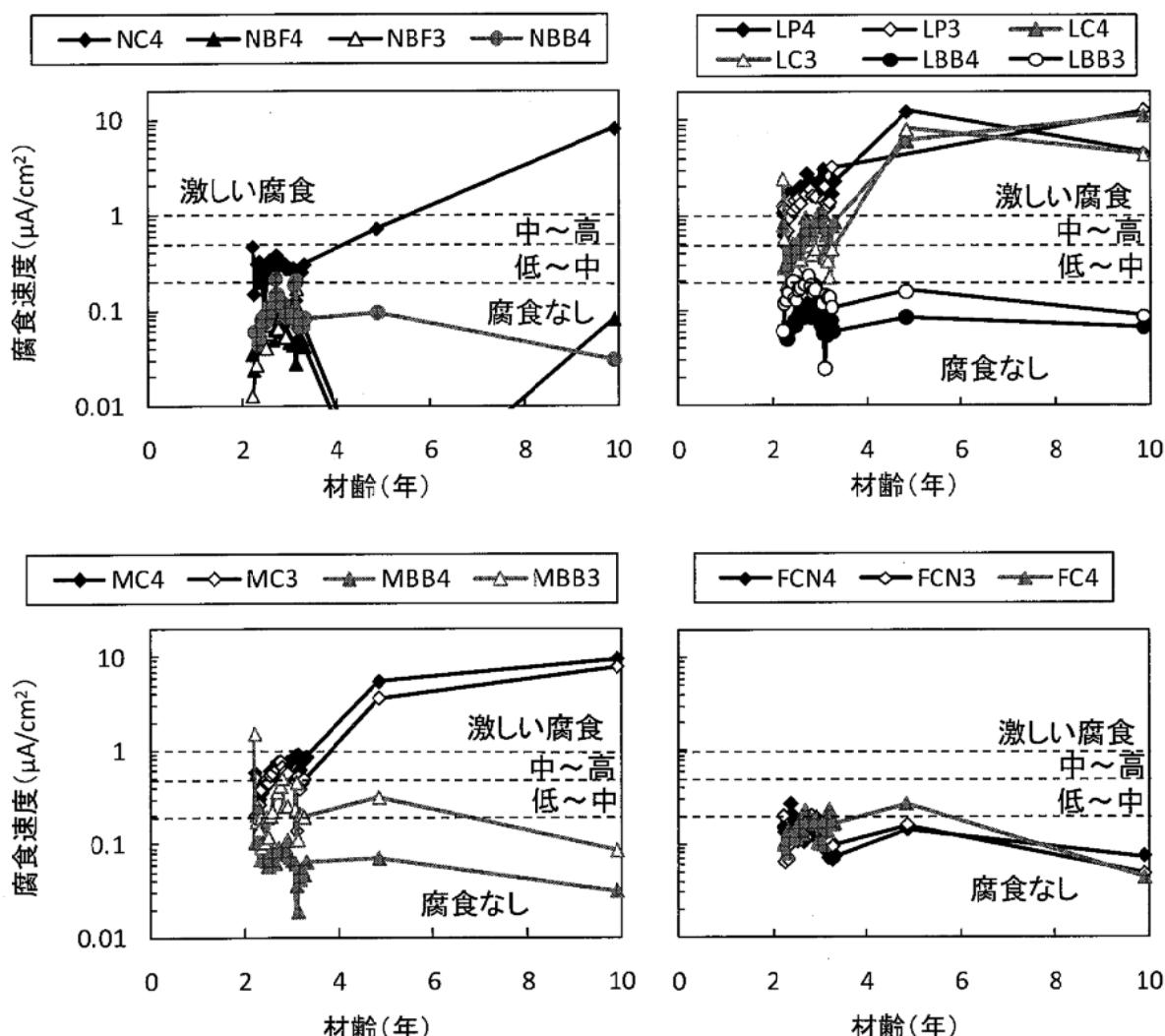


図-7.2.3 鉄筋の腐食速度の経時変化（かぶり 5cm）

ポルトランドセメント系および石灰石微粉末を混合した LP の腐食速度は、暴露開始約 2 年から速く、いずれの場合も暴露期間 10 年では、「激しい、高い腐食速度」と判定された。

一方、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合させた二成分および三成分系のセメント (NBB、MBB、LBB、FC、FCN および NBF) は、材齢 10 年においても、「不動態状態（腐食なし）」と判定される範囲を推移しており、ポルトランドセメント系に比べ鉄筋の腐食に対する抵抗性が高いことが分かる。

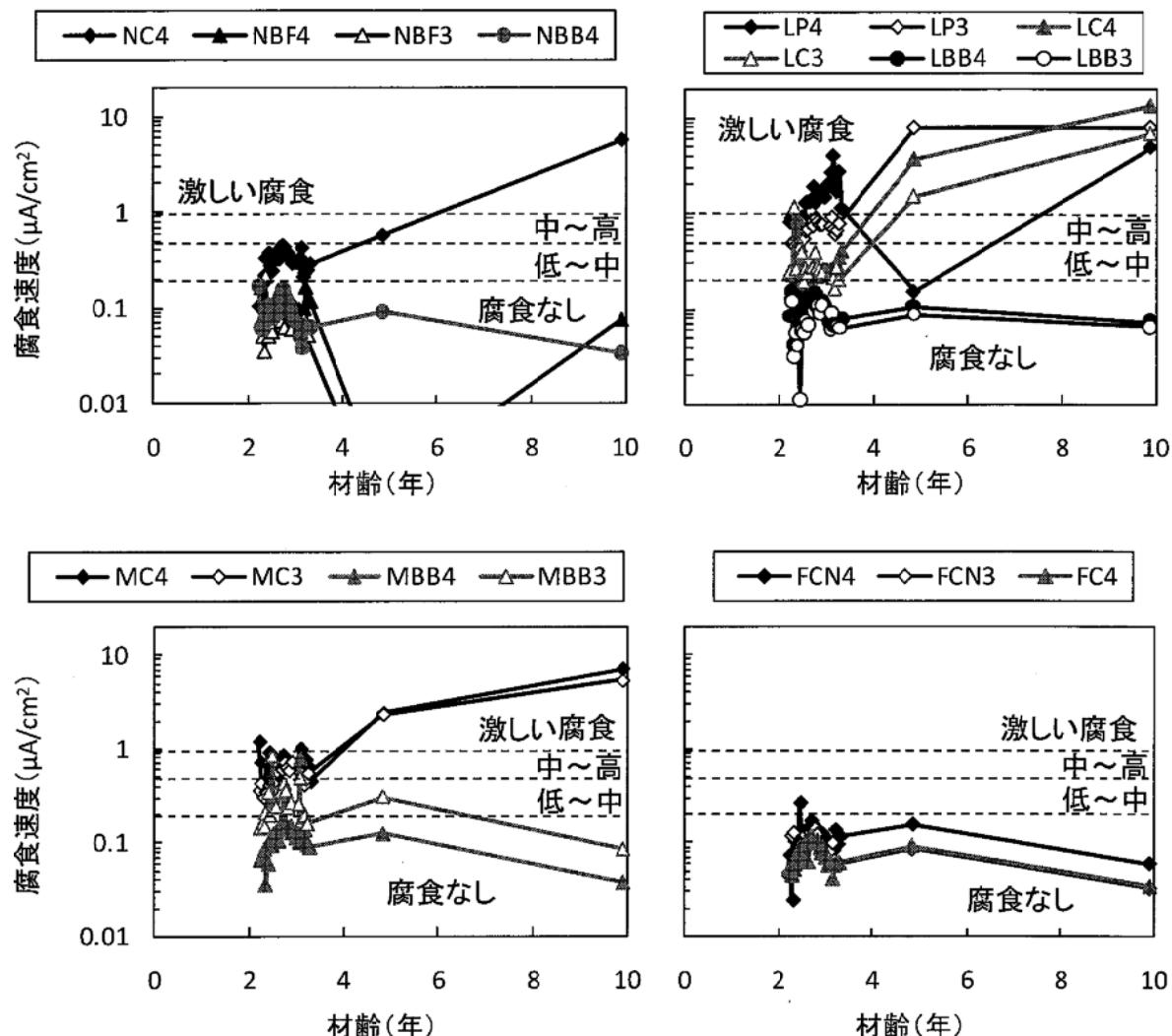
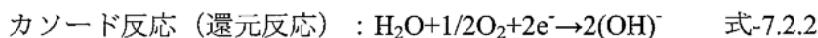
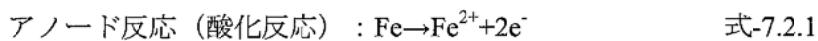


図-7.2.4 鉄筋の腐食速度の経時変化（かぶり 7cm）

セメントの種類と腐食量の関係を図-7.2.5 に示す。なお、図-7.2.5 の腐食量は定期的に測定された分極抵抗値から算出した。

鋼材の腐食は電気化学的反応であり、式-7.2.1 および式-7.2.2 の反応が同時に起こることによって腐食は進行する。



腐食電流密度は、腐食反応によって生じる電流量を表す指標である。腐食電流密度 (A/cm^2) から腐食速度 ($mg/cm^2/s$) への変換は、実験によって測定された電流が全て式-7.2.1 に示す反応によると仮定すると、ファラデーの第2法則から式-7.2.3 を用いて算出できる。

$$V = m I_{corr} / z F \quad \text{式-7.2.3}$$

ここに、 V : 鉄の腐食速度 ($mg/cm^2/s$) 、 m : 鉄の原子量 (=55.8g) 、 I_{corr} : 腐食電流密度 (A/cm^2) 、 z : 鉄のイオン価数 (=2) 、 F : ファラデー定数 (=96500As : クーロン) である。この関係式を用いて、それぞれの鉄筋の腐食速度を算出し、腐食開始からの期間を乗じることで、腐食量 (mg/cm^2) を算出した。

暴露開始 3 年以降の測定結果は 5 年、10 年のみと非常に少ないので、経年的な腐食速度の変化や季節的な変化など十分でなく大凡の推定結果となるが、ポルトランドセメント系および石灰石微粉末を混合した LP の腐食量がその他の混合セメント系に比べ明らかに大きいことが分かる。

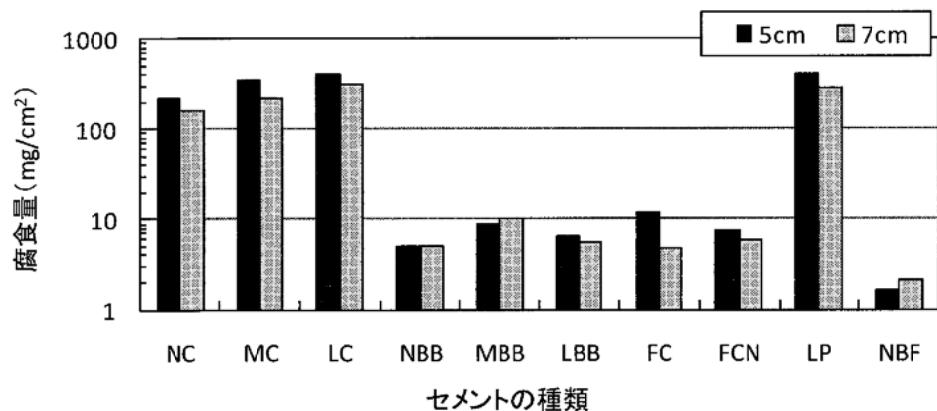


図-7.2.5 セメントの種類と腐食量の関係

(3) コンクリート抵抗

見掛けのコンクリート抵抗の経時変化を図-7.2.6、セメントの種類と見掛けのコンクリート抵抗の関係を図-7.2.7に示す。なお、図-7.2.7のコンクリート抵抗は図-7.2.6の平均値とした。

コンクリート抵抗は、使用したセメントの系によって区分される傾向を示した。すなわち、ポルトランドセメント系が平均 $0.3\text{k}\Omega$ 程度と小さく、次いで高炉スラグセメント系が $0.7\text{k}\Omega$ 程度、フライアッシュセメント系が $1.2\text{k}\Omega$ 程度、三成分系が $2.7\text{k}\Omega$ 程度と混入する混和材の種類によって大きくなる傾向にある。この理由は、ベースセメントとしてのポルトランドセメントの混入量が少ないとやポゾラン反応などによって消失する水酸化カルシウム等の鉱物量が変化したために、電解質となる細孔溶液が、それぞれのセメントの系によって区別化されたためであると考えられる。また、暴露開始約2年からの測定結果から、いずれのコンクリートにおいても自然電位と同様、季節の影響を受け夏季に小さくなる傾向が見られた。

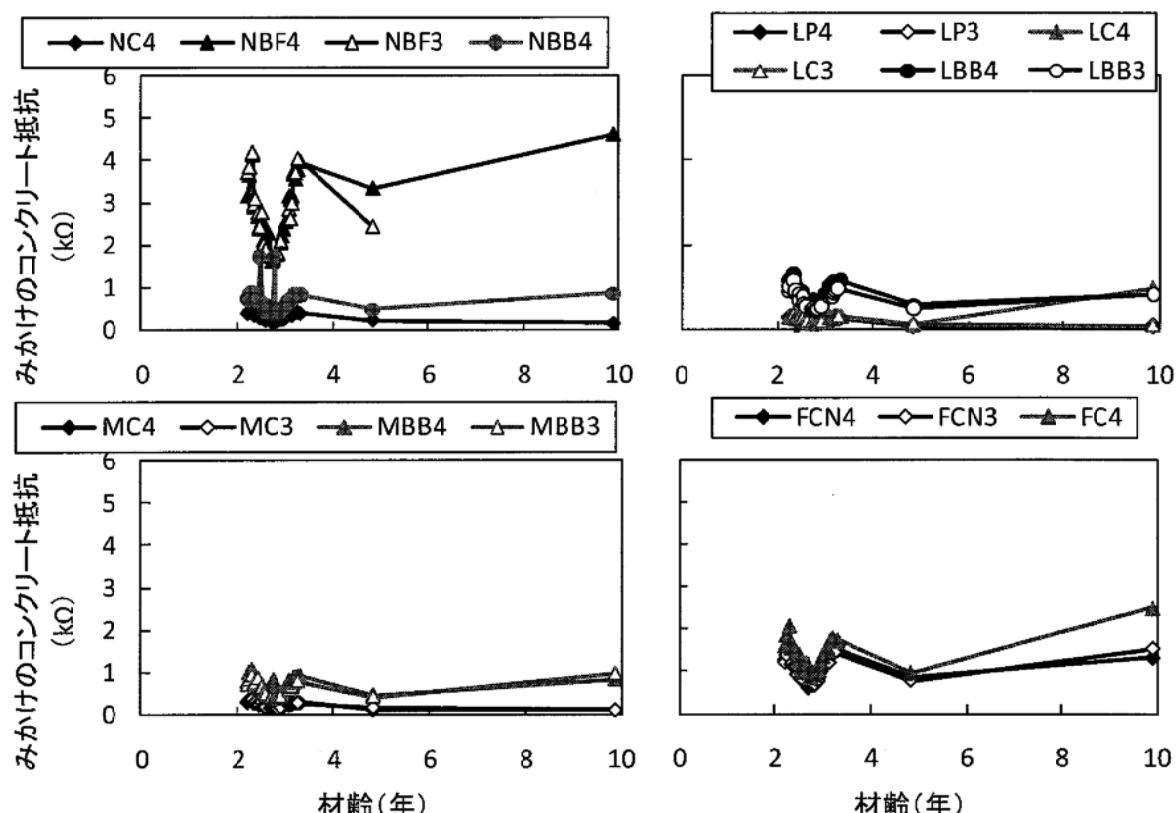


図-7.2.6 見掛けのコンクリート抵抗の経時変化（かぶり 5cm ）

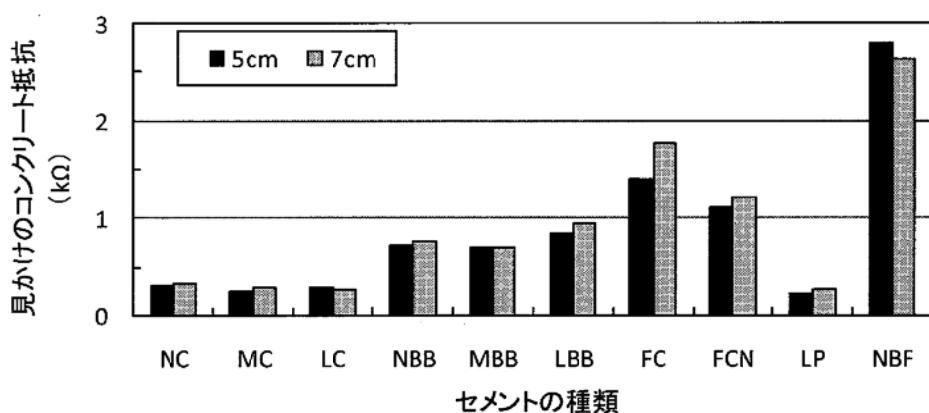


図-7.2.7 セメントの種類と見掛けのコンクリート抵抗

(4) 鉄筋の分極曲線

不動態グレードの判定方法を表-7.2.3、材齢 10 年における分極曲線を図-7.2.8、セメントの種類と不動態グレードの関係を図-7.2.9 に示す。これらはアノード分極曲線を測定し、コンクリート中の鉄筋の不動態の状態を判定した。なお、測定は、電位を自然電位から掃引速度 1mV/sec で変化させた。

ポルトランドセメント系は、いずれの場合も不動態がない状態であることが分かる。一方、混合セメント系は、不動態グレードが 3~4 程度で、不動態被膜の破壊が生じ始めたころであると推察される。

のことから、混合セメント系はポルトランド系に比べ鉄筋の腐食に対する抵抗性が高いと考えられる。ただし、不動態の破壊は、鉄筋表面の塩化物イオン濃度に大きく影響するため、コンクリート中への塩化物イオンの浸透性の影響が大きいと思われる。

表-7.2.3 不動態グレードの判定方法²¹⁾

グレード	電流密度の範囲 (En+0.2V < E < +0.6V (vs. SCE))	不動態の状態
0	電流密度が一度でも $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越えるもの	全く不動態がない
1	電流密度が $10\sim100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの	不完全であるが、若干は不動態がある
2	電流密度が一度でも $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越え、かつ、グレイド 1 または 3 に含まれないもの	
3	電流密度が $1\sim10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの	
4	電流密度が一度でも $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越え、かつ、グレイド 1、2 および 3 に含まれないもの	
5	電流密度が $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越えないもの	非常に良好な不動態がある

備考：文献 21) では「グレード」を「グレイド」と標記。両者は同義。

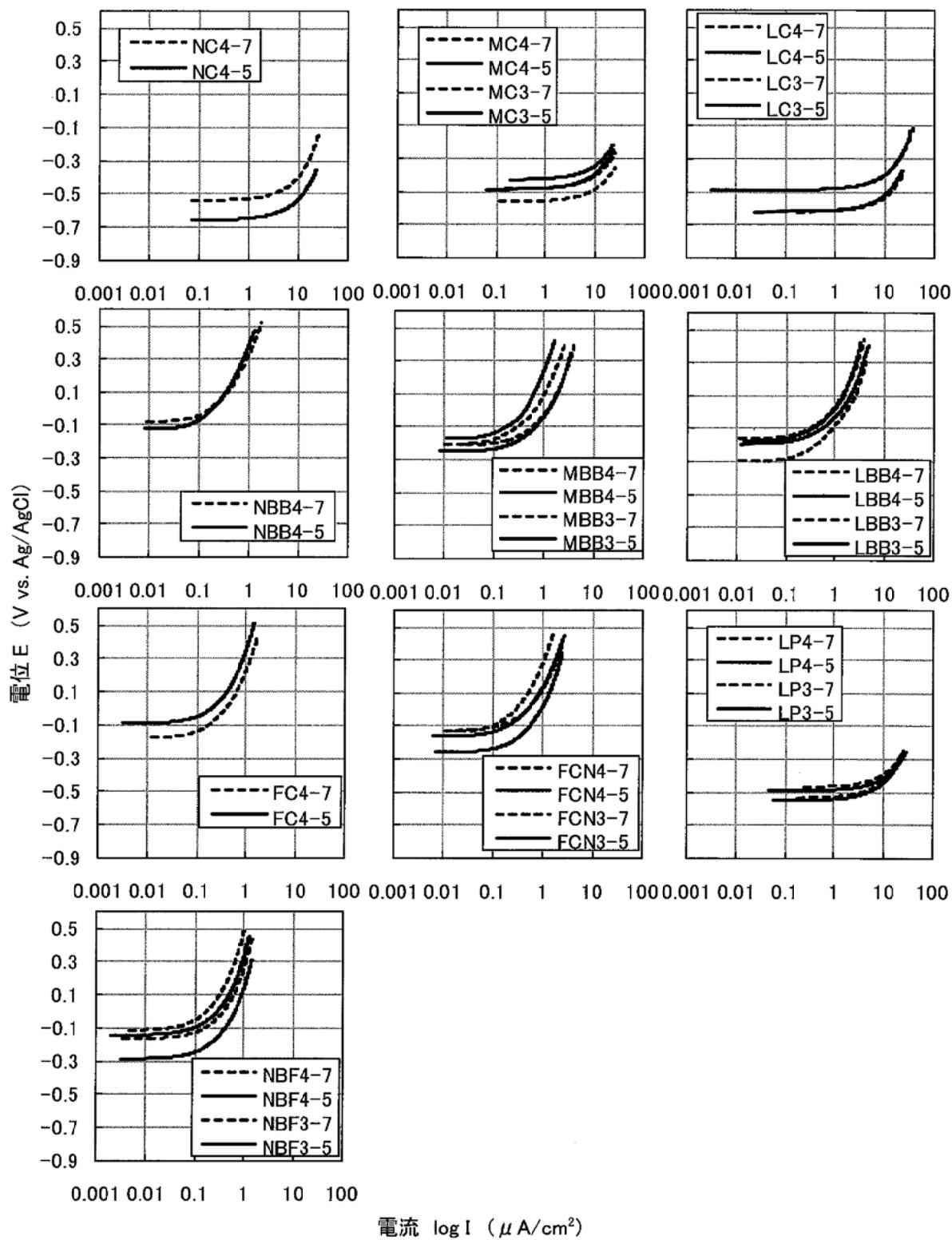


図-7.2.8 分極曲線（材齢 10 年）

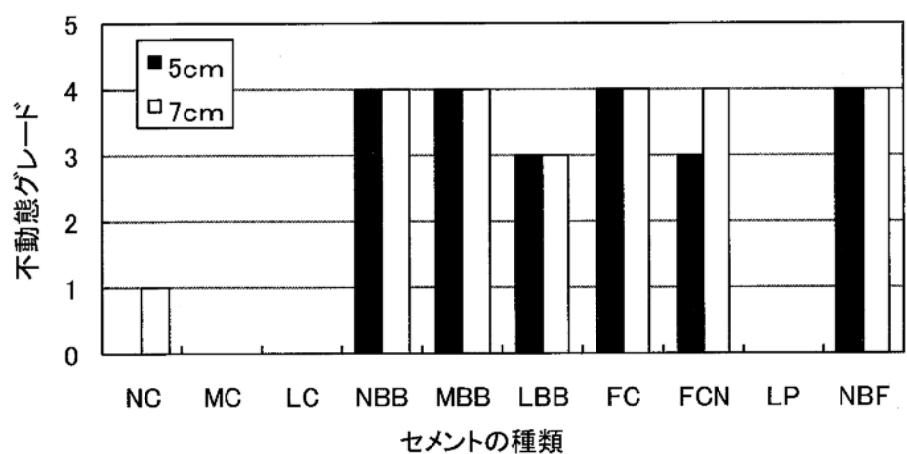


図-7.2.9 セメントの種類と不動態グレードの関係

7.3 発錆面積率

(1) セメントの種類による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類と鉄筋の発錆面積率の関係を図-7.3.1 に示す。なお、鉄筋の発錆面積率は鉄筋のかぶり厚さ毎に 2 本（2 本のコンクリート供試体より各 1 本）の鉄筋の平均値である。

気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の供試体は感潮暴露に比べて鉄筋の発錆が少なく、特に東京屋外部では鉄筋の発錆面積は非常に小さかった。これは材齢 5 年と同様の傾向であった。感潮暴露については、試験結果から酒田感潮部より久里浜感潮部の方が厳しかったものと推定される。

セメントの種類では、ポルトランドセメント系および石灰石微粉末を混合した LP に比べて混合セメント系（NBB、MBB、LBB、FC、FCN、NBF）の方が鉄筋の発錆面積率は小さく、混合材による鉄筋の発錆抑制効果が認められた。

(2) 水セメント比による比較

前養生期間 28 日におけるポルトランドセメント系の水セメント比と鉄筋の発錆面積率の関係を暴露条件毎に図-7.3.2～7.3.5 に示す。

いずれのセメントも、水セメント比が大きくなると鉄筋の発錆が顕著になり、鉄筋の発錆面積が大きくなる傾向が認められた。

(3) 暴露前養生期間による比較

水結合材比 50%における前養生期間 28 日と 91 日の鉄筋の発錆面積率を暴露条件毎に図-7.3.6 および図-7.3.7 に示す。

東京屋外部は、前養生期間 28 日および 91 日ともに鉄筋の発錆面積率が非常に小さく、明確な差は確認できなかった。

久里浜感潮部は、かぶり 5cm において、LC および混合セメント系の LBB、FC および NBF では、前養生期間 28 日に比べ 91 日の鉄筋の発錆面積率が小さくなる傾向を示した。一方で NC に関しては、前養生期間 91 日の鉄筋の発錆面積率が大きくなつた。これは、かぶり 7cm の結果も同様な傾向となつた。

このことから、LC ベースのコンクリートやフライアッシュを使用したコンクリートに関しては、養生期間が鉄筋腐食に影響すると考えられ、施工後の養生の重要性が伺える結果となつた。また、前養生期間 91 日の結果から、LC ベースおよびフライアッシュセメント系を使用したコンクリートの場合、NC ベースのコンクリートと比べ同等またはそれ以下の鉄筋の発錆面積率となつていることから、十分な養生を行うことで鉄筋の腐食に対して高耐久なコンクリートになると考えられる。

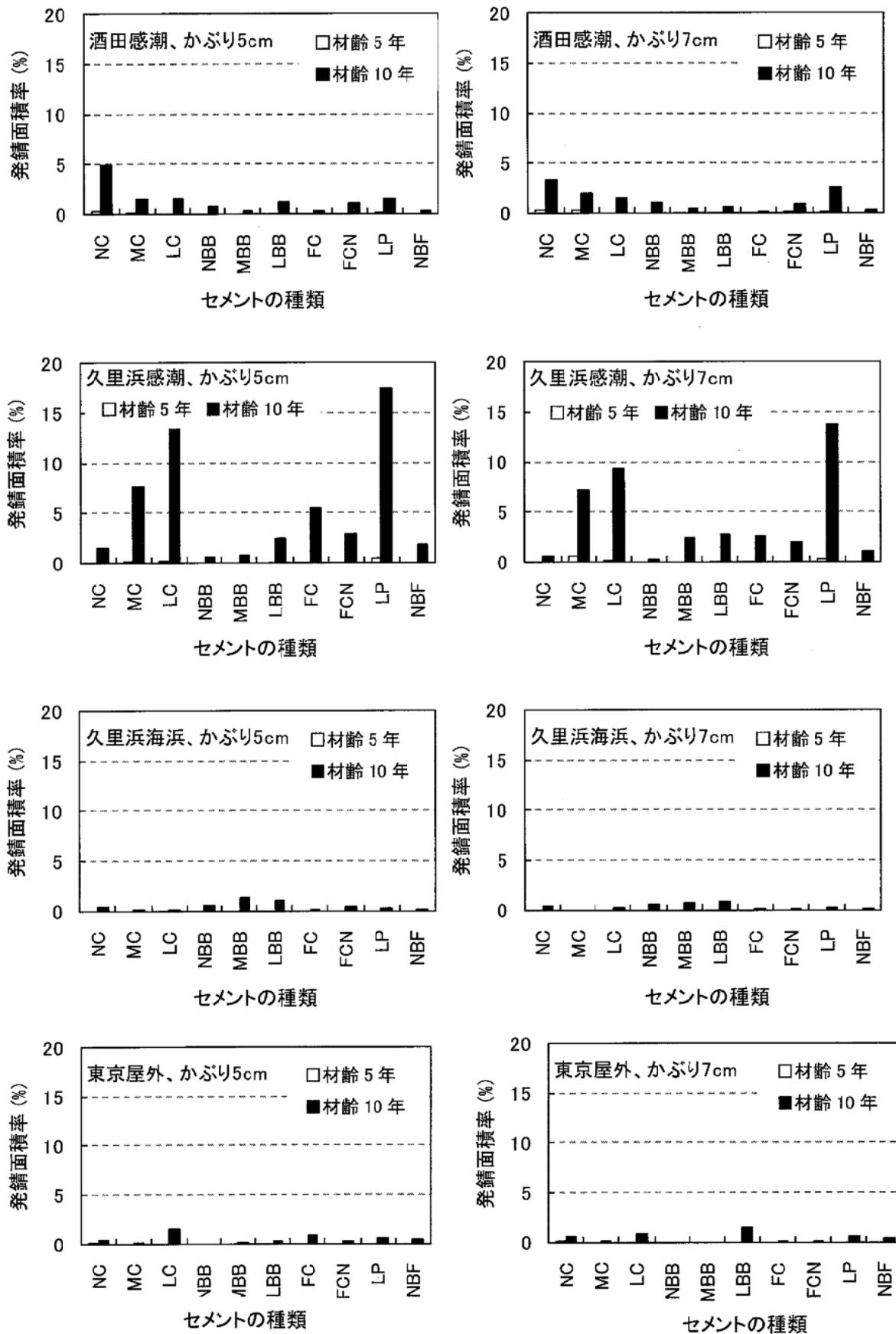


図-7.3.1 セメントの種類と鉄筋の発鉄面積率の関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日)

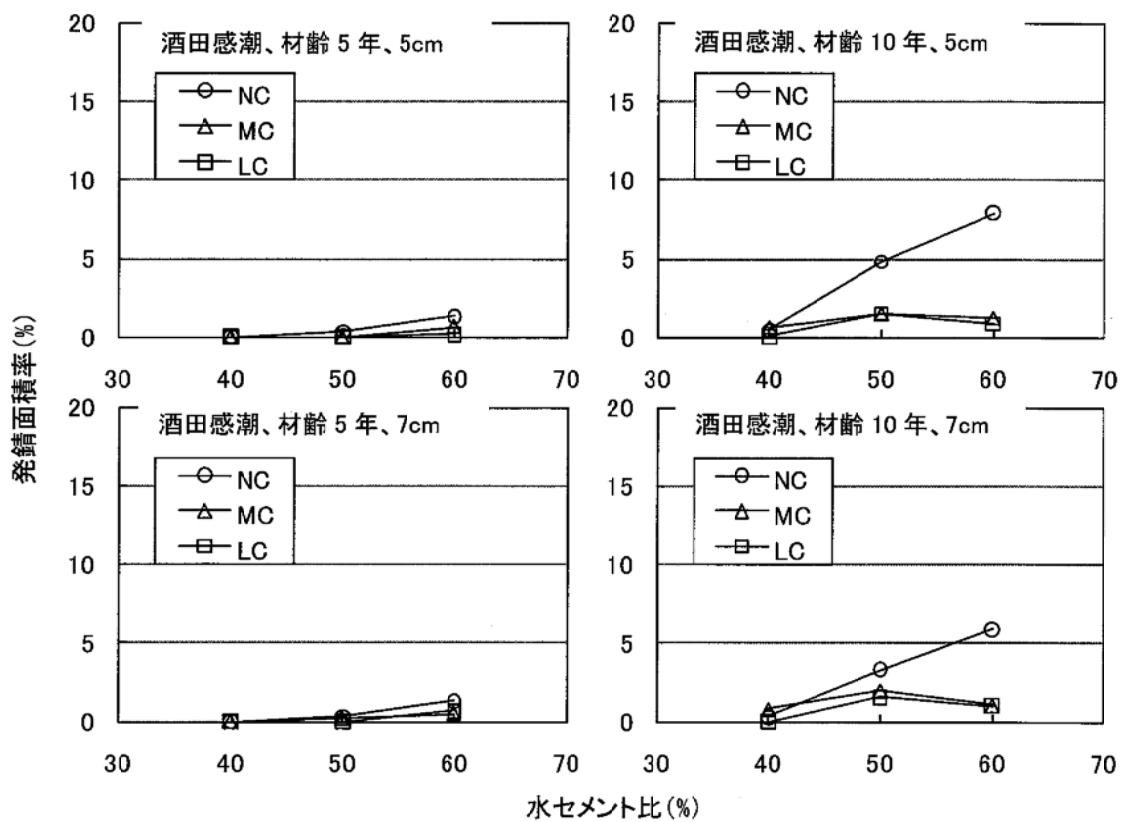


図-7.3.2 ポルトランドセメント系の水セメント比と
発錆面積率の関係（前養生期間 28 日、酒田感潮）

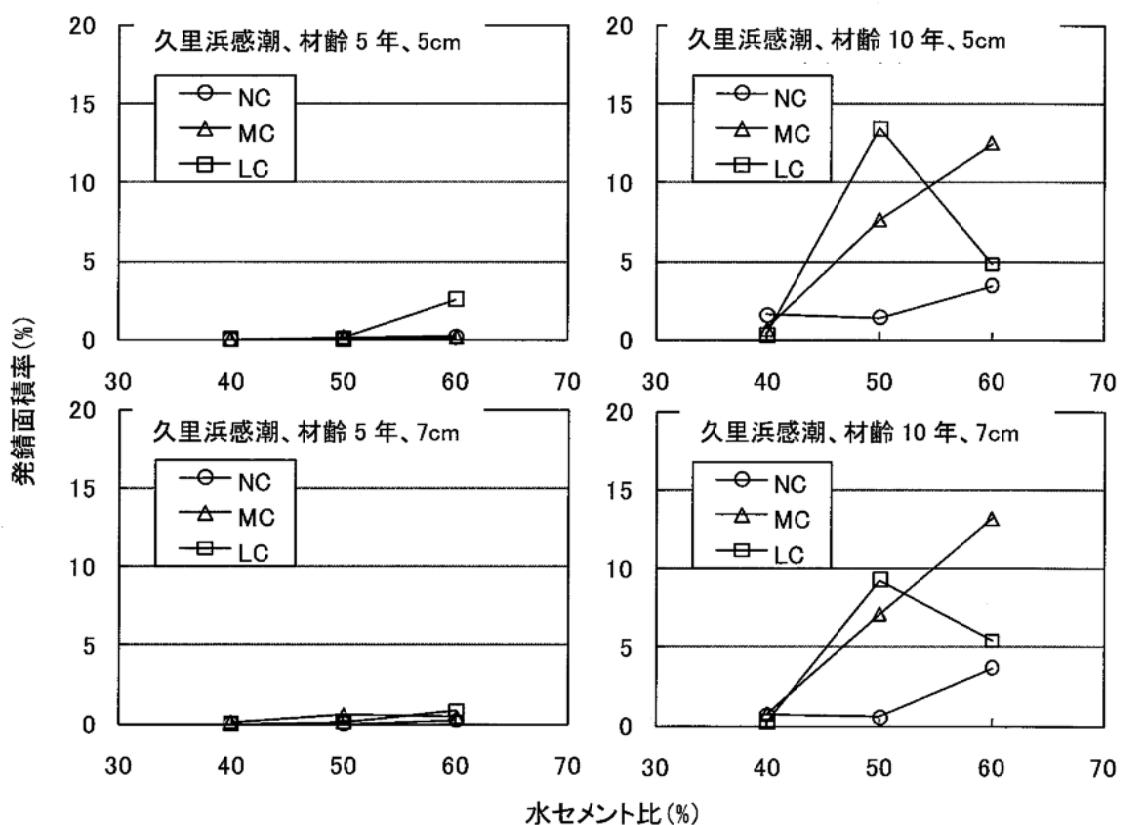


図-7.3.3 ポルトランドセメント系の水セメント比と
発錆面積率の関係（前養生期間 28 日、久里浜感潮）

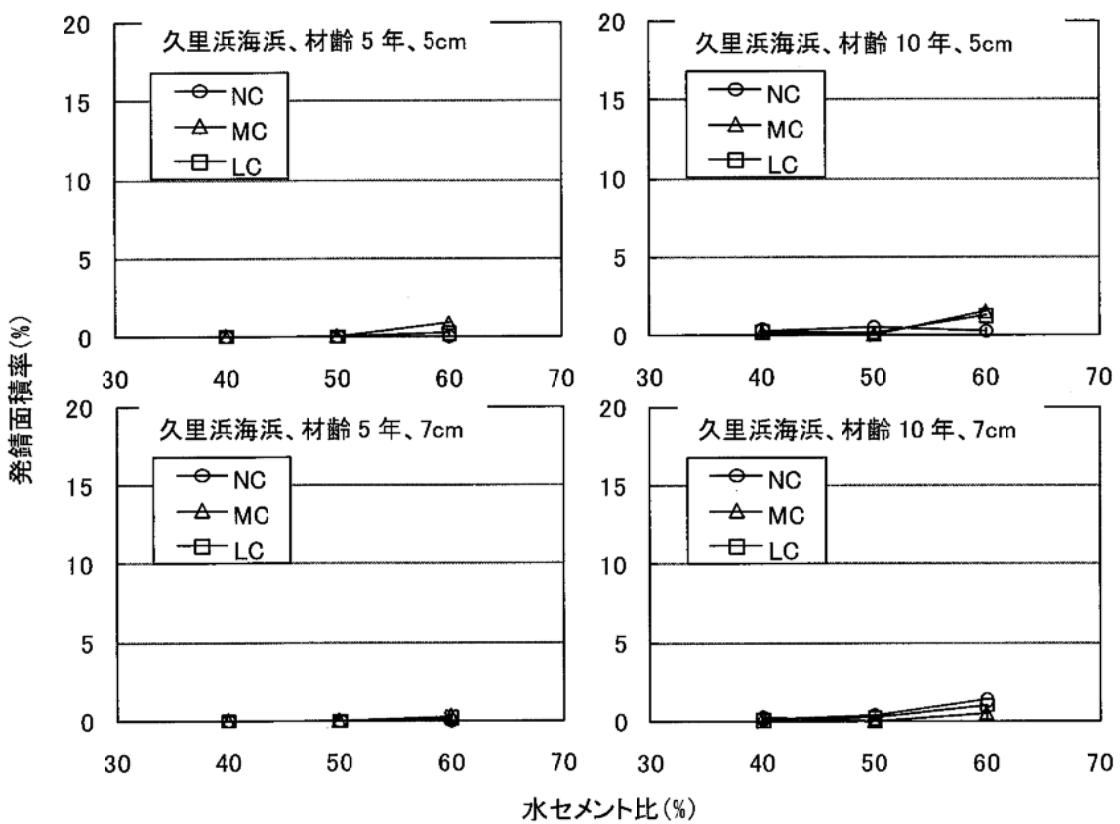


図-7.3.4 ポルトランドセメント系の水セメント比と
発錆面積率の関係（前養生期間 28 日、久里浜海浜）

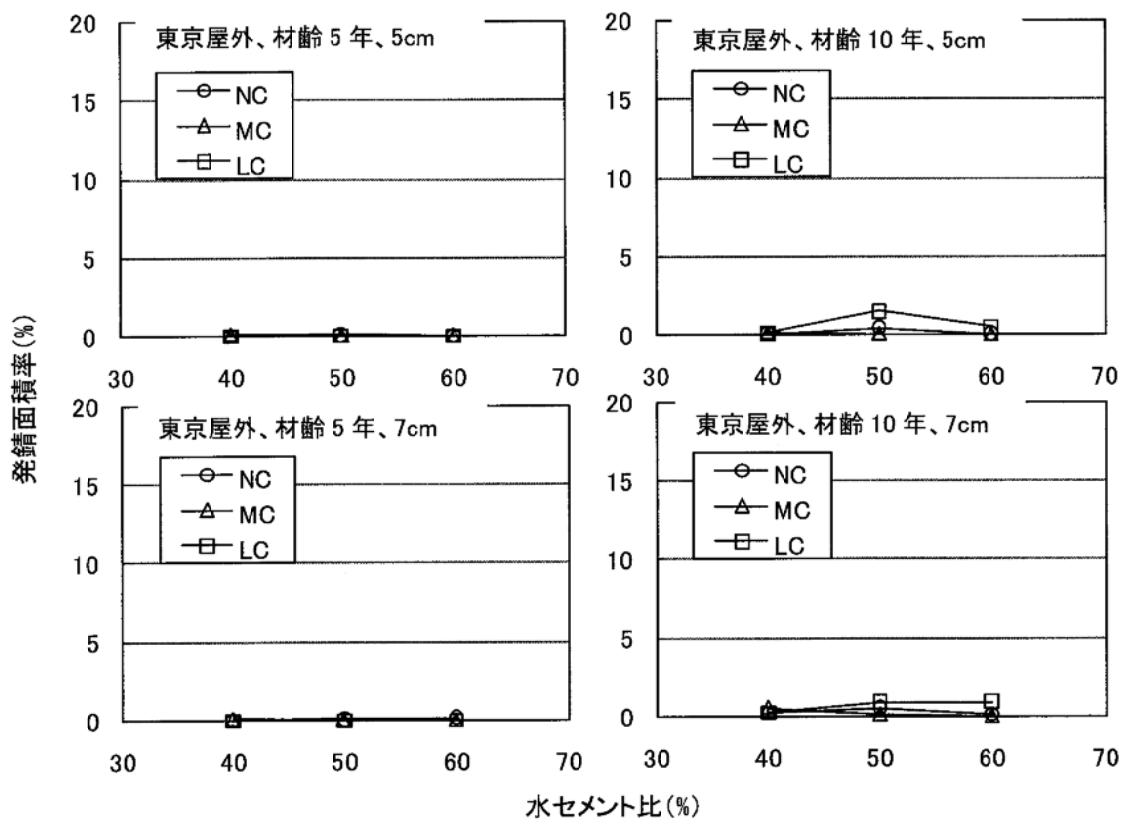


図-7.3.5 ポルトランドセメント系の水セメント比と
発錆面積率の関係（前養生期間 28 日、東京屋外）

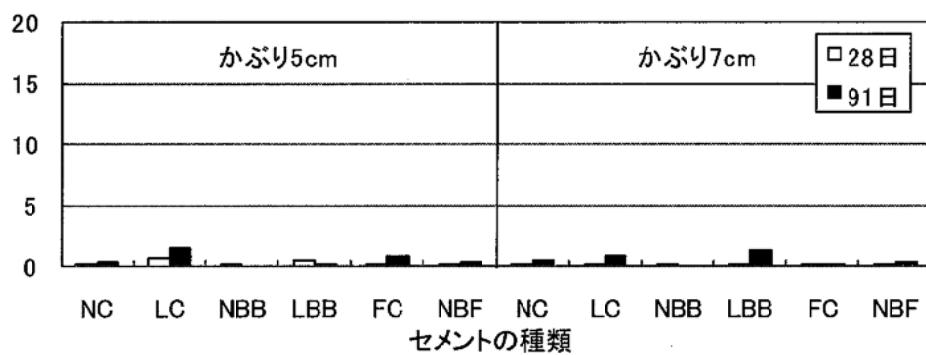


図-7.3.6 前養生期間 28 日と 91 日の鉄筋の発錆面積率
(水結合材比 50%、東京屋外部、材齢 10 年)

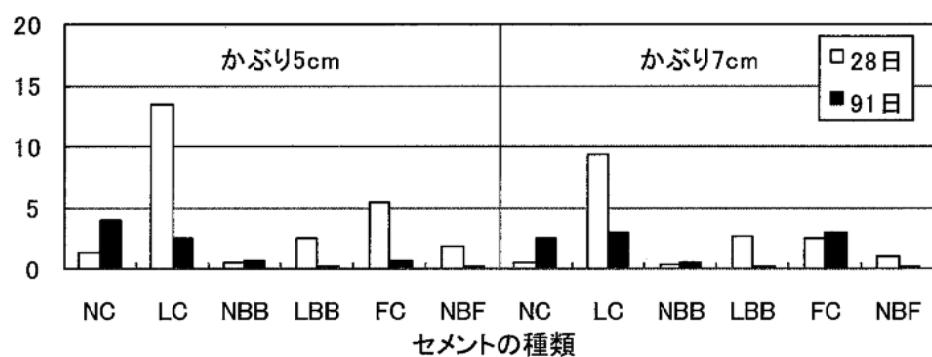


図-7.3.7 前養生期間 28 日と 91 日の鉄筋の発錆面積率
(水結合材比 50%、久里浜感潮部、材齢 10 年)

7.4 質量減少率

(1) セメントの種類による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類と鉄筋の質量減少率の関係を図-7.4.1 に示す。なお、鉄筋の質量減少率は、鉄筋の発錆面積率と同様に鉄筋のかぶり厚さ毎に 2 本（2 本のコンクリート供試体より各 1 本）の鉄筋の平均値である。

いずれの暴露条件においても、鉄筋の腐食が進行し、暴露期間 10 年の方が鉄筋の質量減少率が大きくなっていることが分かる。セメントの種類による鉄筋の質量減少率の違いに関しては、感潮暴露において、ポルトランドセメント系および石灰石微粉末を混合した LP の質量減少率が高くなったのに対し、その他混合セメント系の質量減少率は低くなつた。この結果は、塩化物イオンの浸透性が大きく影響していると考えられるが、同一時期の腐食の程度を考えると、混合セメント系は鉄筋の腐食に対する抵抗性が高いと考えることができる。なお、かぶりの違いによる影響は、明確な差が認められず、判然としない。

一方、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の場合、いずれのセメントにおいても、同程度の鉄筋の質量減少率となつた。鉄筋の質量減少率の値が非常に小さいため、十分な評価はできないが、ポルトランドセメント系および混合セメント系のいずれの場合も、中性化または中性化および塩害の複合とともに、暴露期間 10 年における性能は同程度であると思われる。

(2) 水セメント比による比較

前養生期間が 28 日におけるポルトランドセメント系の水セメント比と鉄筋の質量減少率の関係を暴露条件毎に図-7.4.2～7.4.5 に示す。

いずれのセメントも、鉄筋の発錆面積率と同様に水セメント比が大きくなると鉄筋の発錆が顕著になり、鉄筋の質量減少率が大きくなる傾向が認められた。

(3) 暴露前養生期間による比較

水結合材比 50%における前養生期間 28 日と 91 日の鉄筋の質量減少率の比較を暴露条件毎に図-7.4.6 および図-7.4.7 に示す。

東京屋外部は、鉄筋の発錆面積率と同様、前養生期間 28 日および 91 日ともに鉄筋の質量減少率が非常に小さく、明確な差は確認できなかつた。

久里浜感潮部は、かぶり 5cm およびかぶり 7cm ともに、ポルトランドセメント系の NC および LC において、前養生期間の延長に伴う質量減少率の減少が認められた。一方で、混合セメント系である NBB、LBB、FC および NBF に関しては、明確な差が認められなかつた。これは、非常に小さな質量減少率であったためであると考えられる。

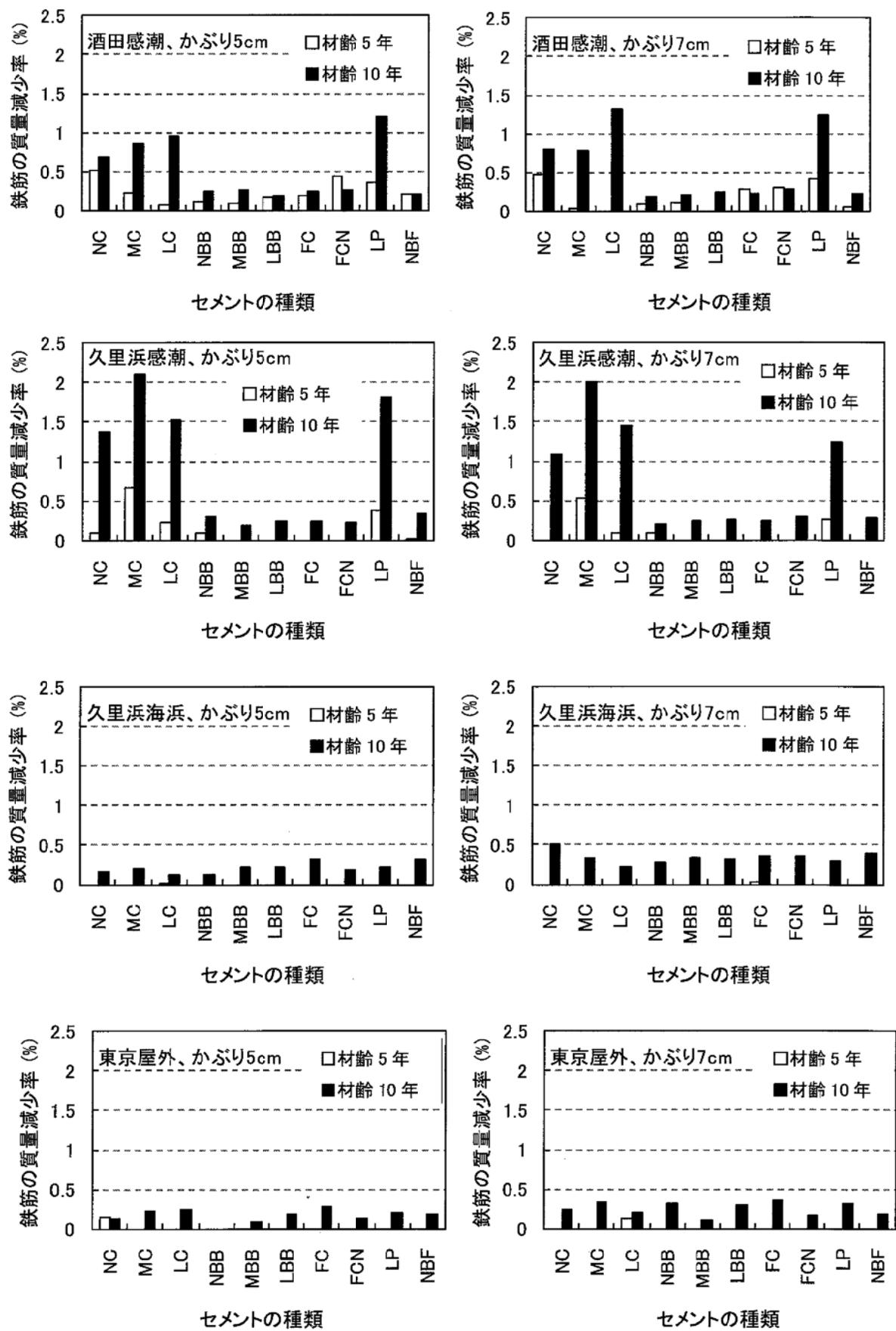


図-7.4.1 セメントの種類と鉄筋の質量減少率の関係

(水結合材比 50%、前養生期間 28 日)

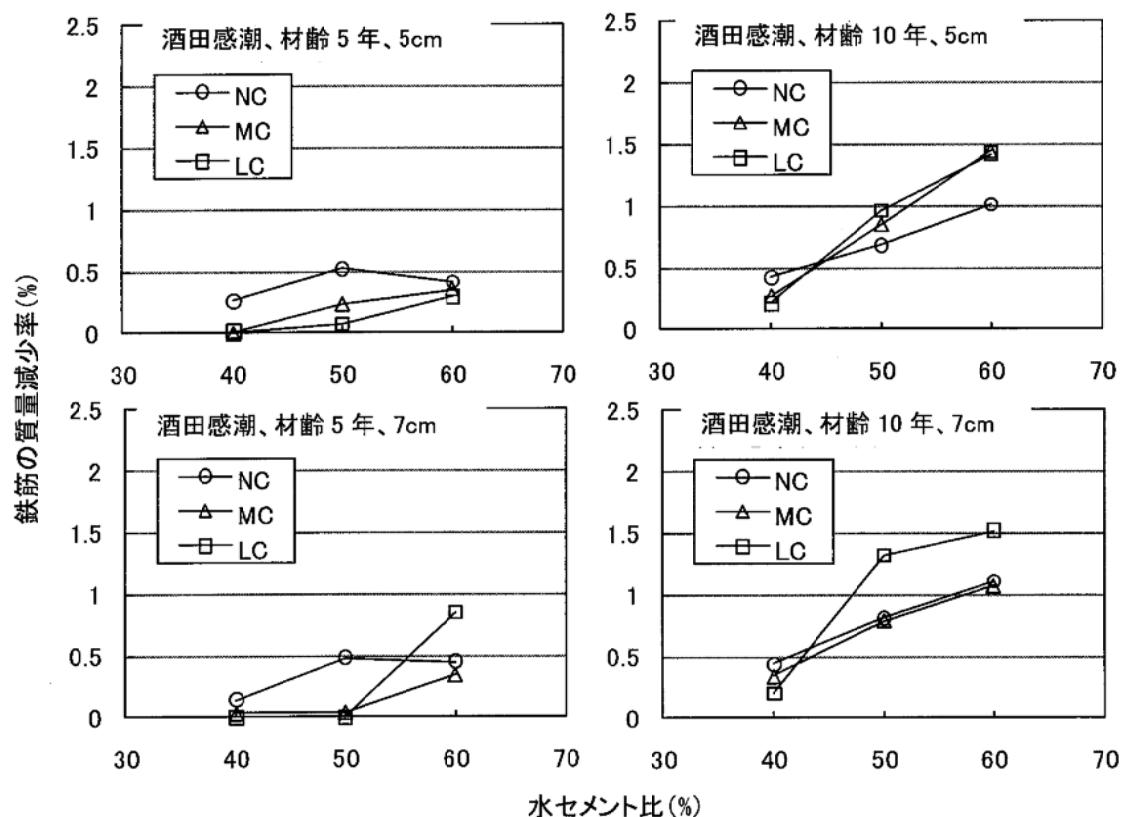


図-7.4.2 ポルトランドセメント系の水セメント比と
鉄筋の質量減少率の関係（前養生期間 28 日, 酒田感潮）

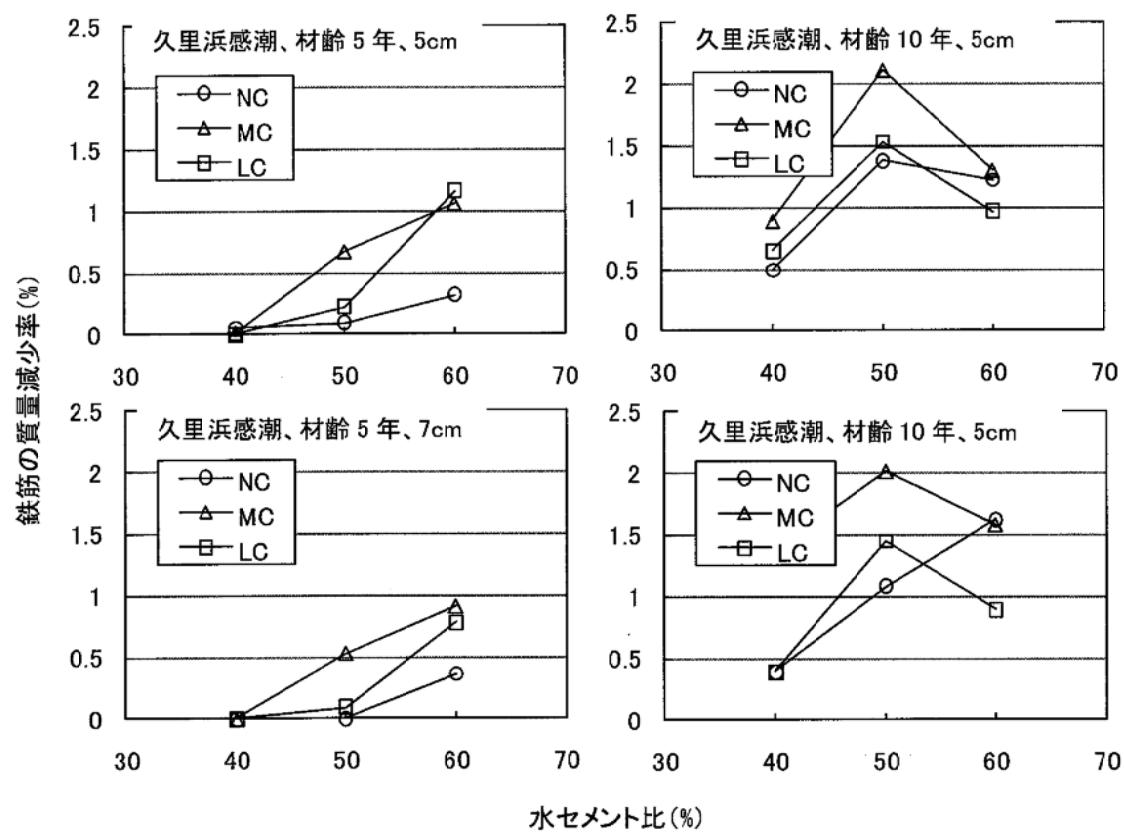


図-7.4.3 ポルトランドセメント系の水セメント比と
鉄筋の質量減少率の関係（前養生期間 28 日, 久里浜感潮）

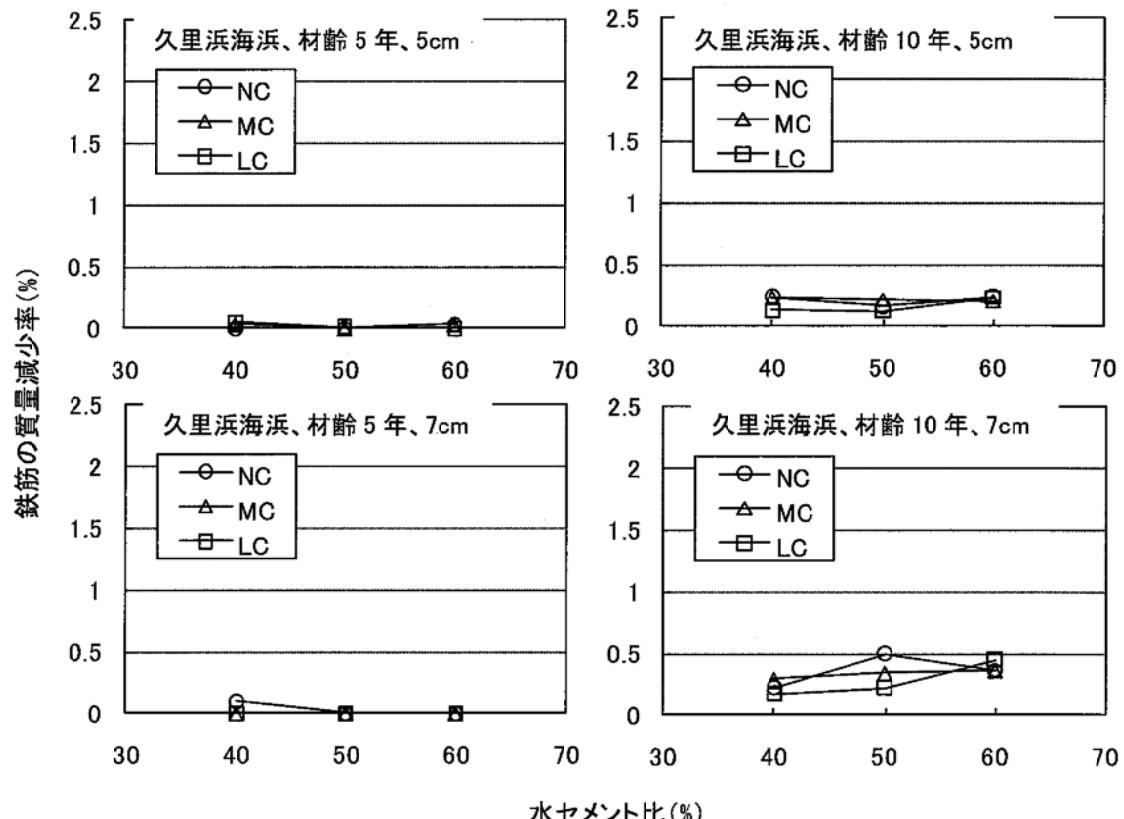


図-7.4.4 ポルトランドセメント系の水セメント比と
鉄筋の質量減少率関係（前養生期間 28 日、久里浜海浜）

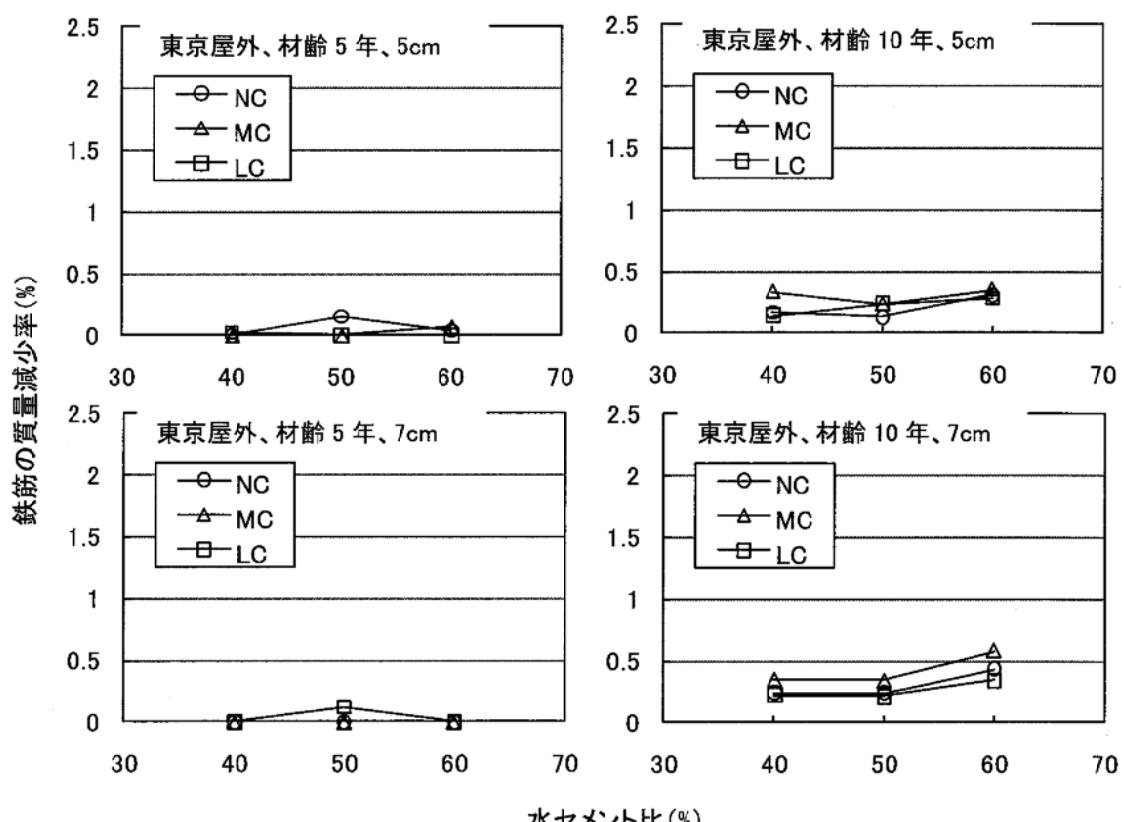


図-7.4.5 ポルトランドセメント系の水セメント比と
鉄筋の質量減少率の関係（前養生期間 28 日、東京屋外）

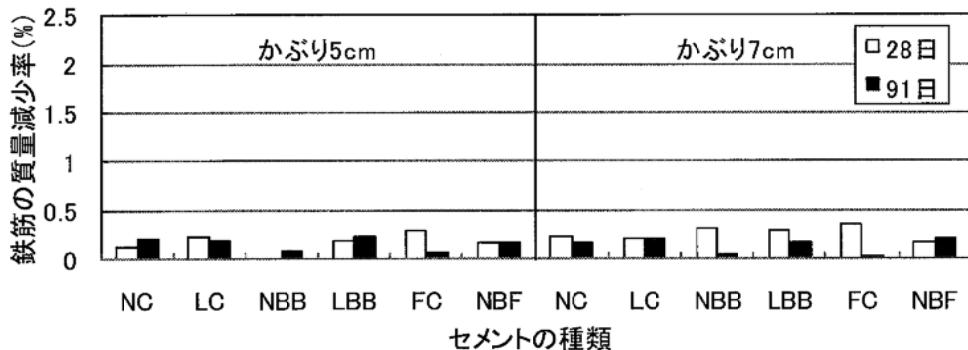


図-7.4.6 前養生期間 28 日と 91 日の鉄筋の質量減少率の比較
(水結合材比 50%、東京屋外、材齢 10 年)

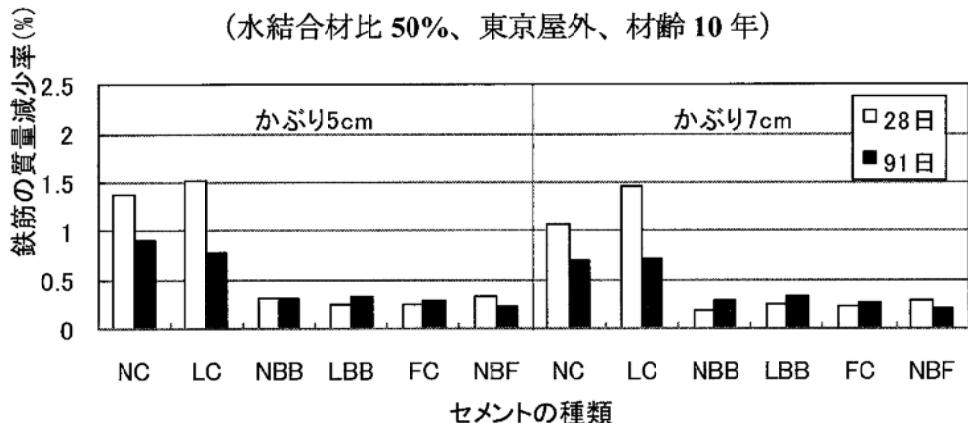


図-7.4.7 前養生期間 28 日と 91 日の鉄筋の質量減少率の比較
(水結合材比 50%、久里浜感潮、材齢 10 年)

7.5 孔食深さ

孔食とは一般に円形の食孔を生じさせる錆の形態をいい、塩化物イオンの存在下で鉄筋の深さ方向に腐食が進行するものである。以下の鉄筋の最大孔食深さは、かぶり 5cm の鉄筋 2 本の最大値で示した。

(1) セメントの種類による比較

水結合材比 50%、前養生期間 28 日におけるセメントの種類と鉄筋の最大孔食深さの関係を図-7.5.1 に示す。

(2) 水セメント比による比較

前養生期間 28 日におけるポルトランドセメント系の水セメント比と鉄筋の最大孔食深さの関係を図-7.5.2 に示す。

(3) 暴露前養生期間による比較

水結合材比 50%における前養生期間 28 日と 91 日の最大孔食深さの比較を図-7.5.3 および図-7.5.4 示す。

暴露条件、セメントの種類および水セメント比による傾向は、鉄筋の発錆面積率や質量減少率などと同様である。

感潮暴露における材齢 10 年の最大孔食深さは、ポルトランドセメント系で 1.5mm～2.5mm 程度、石灰石微粉末を混合した LP を除く混合セメント系で 0.5mm 以下となった。また、材齢 5 年では孔食が認められなかった気中暴露（久里浜海浜および東京屋外）の条件ならびに前養生期間 91 日の場合についても、材齢 10 年で僅かに孔食が認められるようになった。

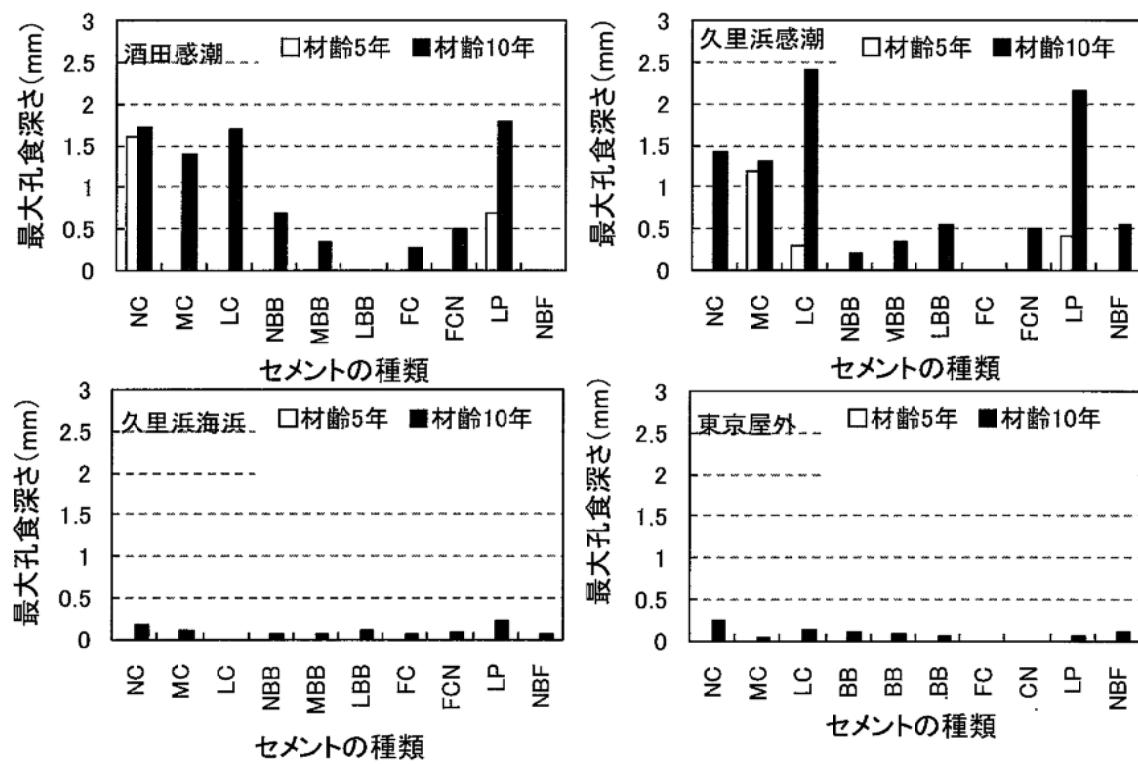


図-7.5.1 セメントの種類と鉄筋の最大孔食深さの関係
(水結合材比 50%、前養生期間 28 日、かぶり 5cm)

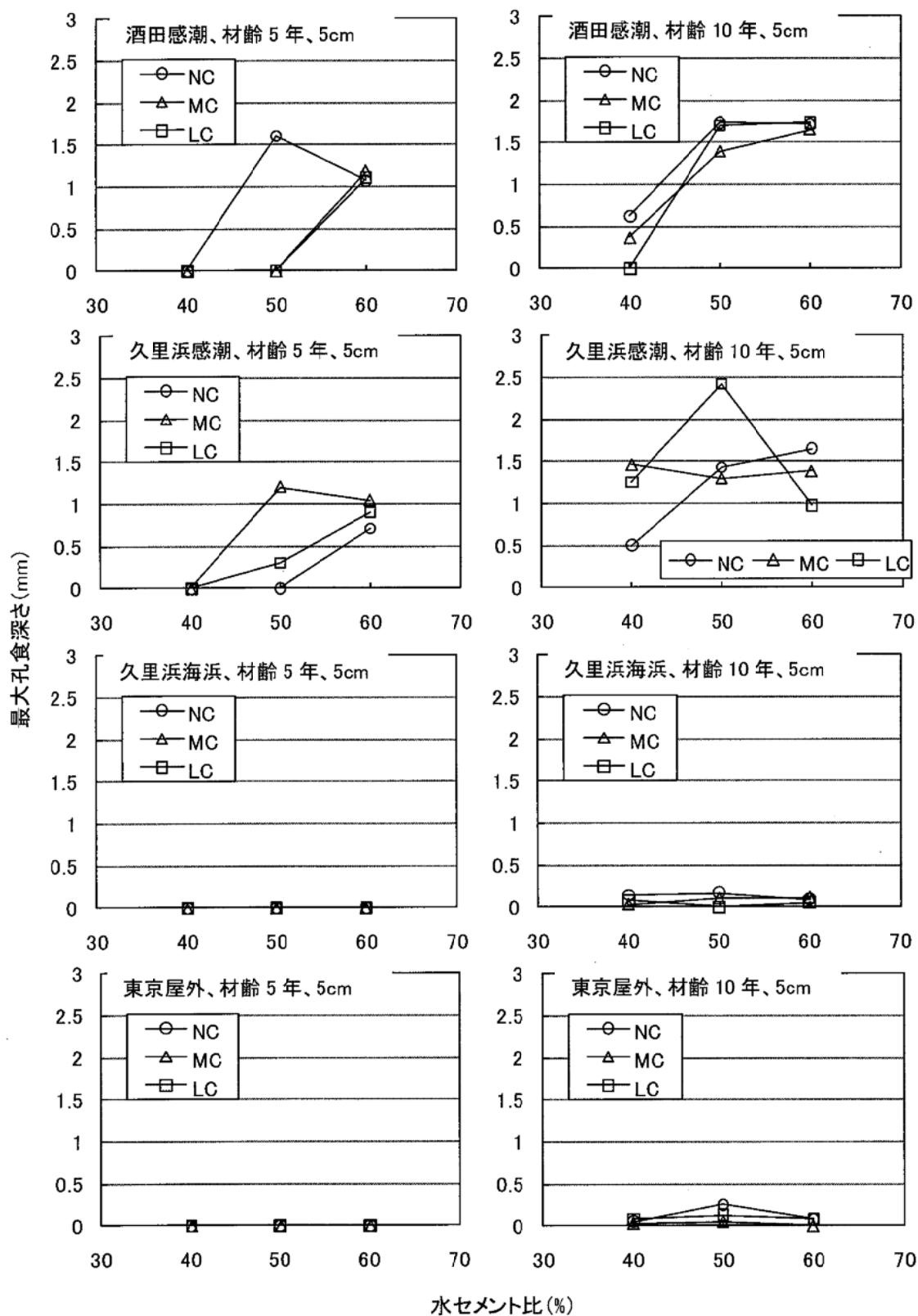


図-7.5.2 ポルトランドセメント系の水セメント比と最大孔食深さの関係
(前養生期間 28 日, かぶり 5cm)

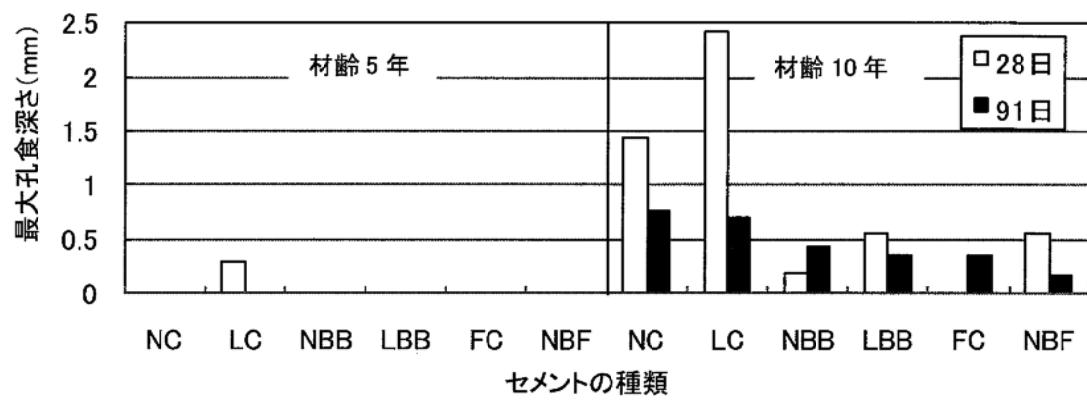


図-7.5.3 前養生期間 28 日と 91 日の鉄筋の最大孔食深さの比較
(水結合材比 50%、久里浜感潮)

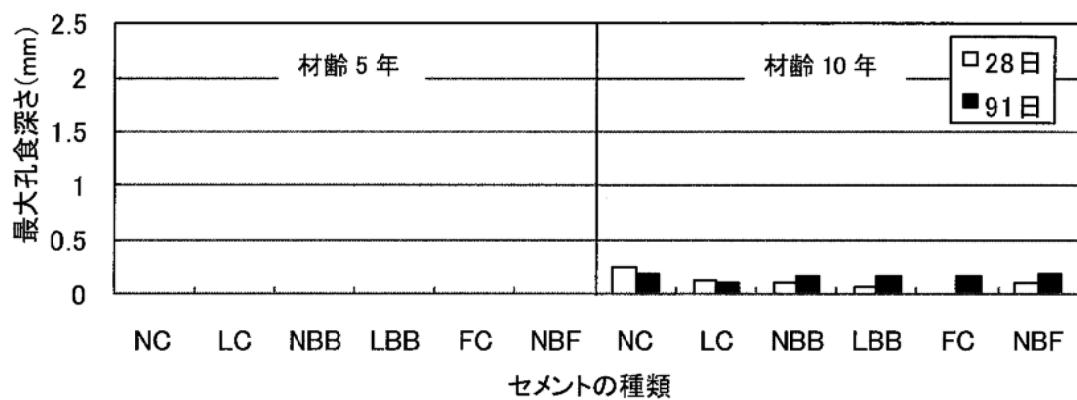


図-7.5.4 前養生期間 28 日と 91 日の鉄筋の最大孔食深さの比較
(水結合材比 50%、東京屋外)

8. 鉄筋の腐食の性状に及ぼす各種影響

8.1 発錆面積率および質量減少率と自然電位の関係

久里浜感潮部における自然電位と鉄筋の発錆面積率および質量減少率の関係を図-8.1.1 に示す。なお、図-8.1.1 には、実線で 7.2 の表-7.2.1 による ASTM C 876 の腐食判定も示す。

材齢 5 年の自然電位の結果では、自然電位は全体的に卑な値を示しているものの、大きな腐食は認められなかった。しかし、材齢 10 年の結果では、電位が -231mV (vs. Ag/AgCl) より卑な場合に大きな腐食が認められ、不確定領域である -81~ -231mV (vs. Ag/AgCl) の範囲においては、若干の腐食が認められる程度であった。このことから、今回のような比較的湿潤な環境においても、自然電位測定による鉄筋腐食診断は腐食の有無を判定するのに有効であると考えられる。ただし、比較的湿潤時間が長い感潮暴露であったため、酸素の供給量が少なく、材齢 5 年の結果のように自然電位が卑化する傾向もあり、卑値が測定された場合などは、その他の非破壊検査方法などを併用し腐食判定するなど、十分に注意する必要があると考えられる。

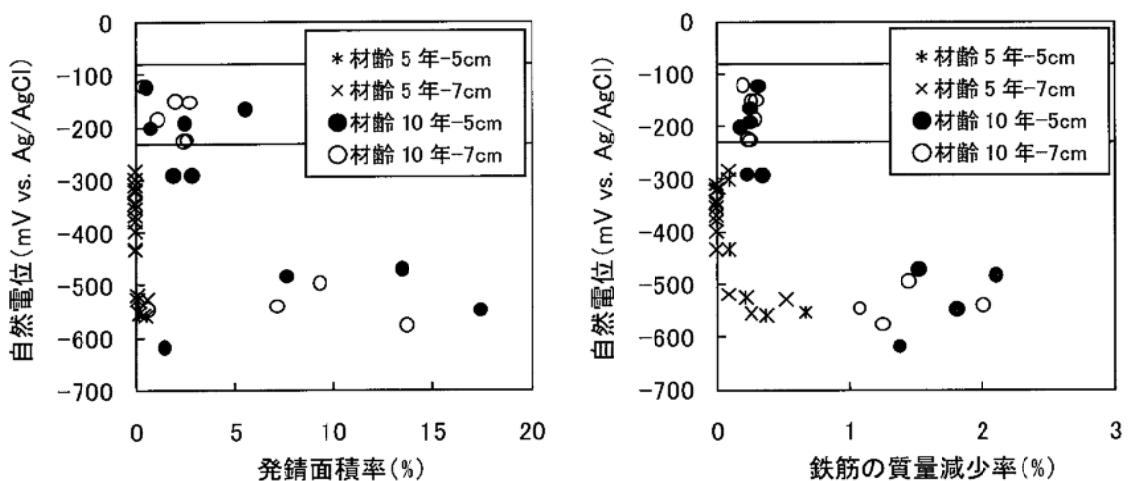
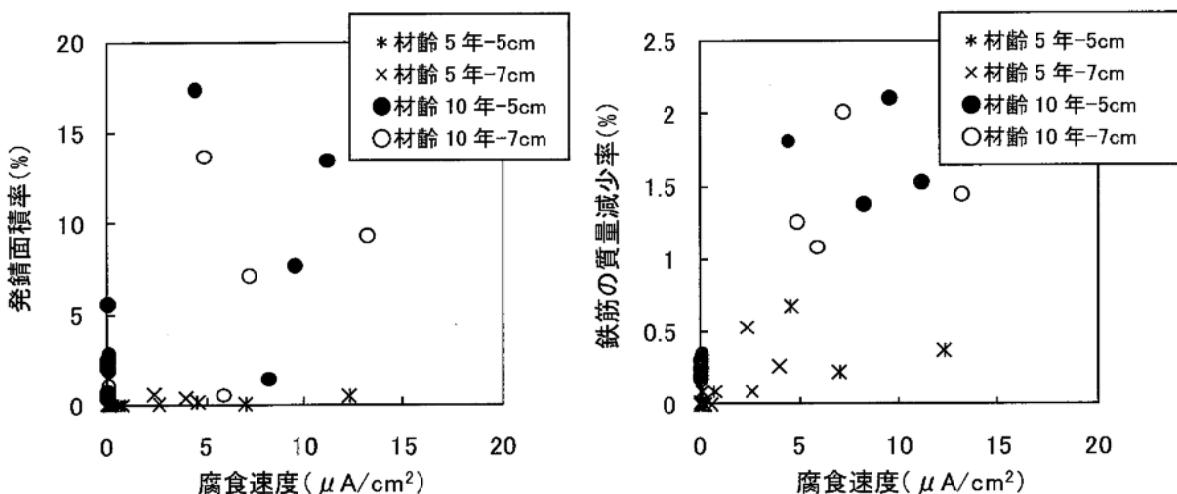


図-8.1.1 自然電位と鉄筋の発錆面積率および質量減少率の関係（久里浜感潮部）

8.2 発錆面積率および質量減少率と分極抵抗の関係

久里浜感潮部における分極抵抗値から推定した腐食速度と鉄筋の発錆面積率および質量減少率の関係を図-8.2.1 に示す。



鉄筋の発錆面積率および質量減少率とともに腐食速度と良好な相関は得られなかった。特に材齢5年の結果では、腐食速度が $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超える「激しい腐食」と判定される場合においても腐食面積率は非常に小さく十分に判定できていなかった。

久里浜感潮部、前養生期間28日の供試体における鉄筋の推定腐食量と発錆面積率の関係を図-8.2.2に、推定腐食量と実測した腐食量の関係を図-8.2.3に示す。

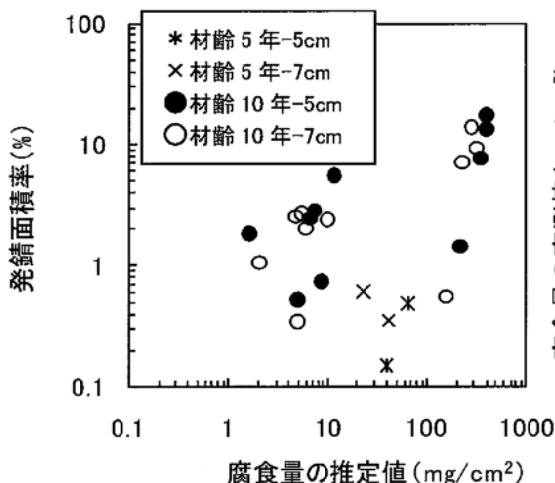


図-8.2.2 鉄筋の推定腐食量と発錆面積率の関係
(久里浜感潮、前養生期間28日)

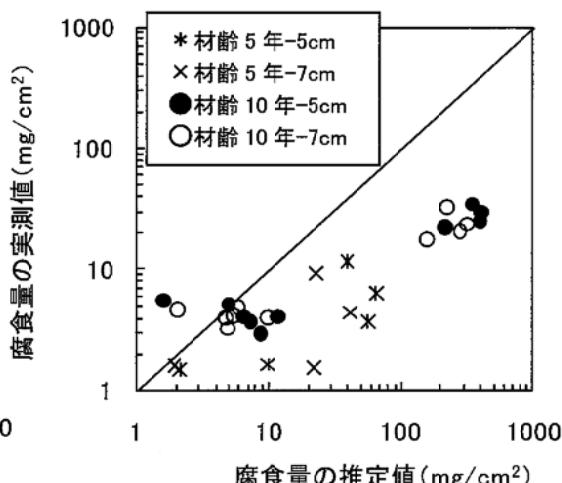


図-8.2.3 鉄筋の推定腐食量と実測した腐食量の関係
(久里浜感潮、前養生期間28日)

ここで、推定腐食量は、経時的に測定された分極抵抗から求めた腐食速度の結果をもとに時間積分を行い算出した。ここで、すべての電流は式-8.2.1に示す鋼材のアノード(酸化)反応によると仮定し、式-8.2.2に示すファラデーの第2法則を用いて算出した。



$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot F} \quad \text{式-8.2.2}$$

ここに、 m : 質量(鋼材の腐食量)(g)、 M : 原子量(鉄の場合、55.8 g/mol)、 I : 電流(鋼材の腐食電流)(A)、 t : 時間(s)、 z : イオン価数(鉄のイオン価数=2)、 F : ファラデー一定数= 9.65×10^4 (C/mol)

定期的に診断した結果からの推定腐食量と実測した腐食量の関係は、ある程度の相関が得られていると考えられるが、推定腐食量は、実測した腐食量よりも大きくなる傾向にある。これに関しては、今後の課題であるが、15年間海中に暴露させた場合に対して、同じ方法で腐食速度を測定した結果¹⁵⁾においても、腐食速度が $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超えていたにも関わらず、腐食は軽微あるいはほとんど生じていない場合もあった。この結果を踏まえると、鉄筋周囲に供給される酸素量が少ない環境においては、分極抵抗から計算される腐食速度は、実際の状況よりも大きな値を示すものと推測される。

ただし、多少ばらつきはあるが、ある程度の相関が得られていることから、厳しい環境下に暴露される構造物等に関しては、経時的に腐食速度を測定することは、ひび割れ発生までの鉄筋腐食の診断が行えるモニタリング手法として有効であると考えられる。

8.3 発錆面積率および質量減少率と不動態グレード（分極曲線）との関係

久里浜感潮部、前養生期間 28 日における不動態グレードと鉄筋の発錆面積率および質量減少率の関係を図-8.3.1 示す。

鉄筋の発錆面積率との関係ではあまり良い相関が得られていないが、鉄筋の質量減少率との関係では、不動態グレードが小さくなるにつれ、鉄筋の質量減少率が大きくなる傾向を示した。この結果から、コンクリート中の鉄筋の顕著な腐食は不動態グレード 3 よりも不動態の状態が悪くなつた段階で開始すると予想される。

久里浜感潮部、前養生期間 28 日における鉄筋の不動態グレードと鉄筋位置の塩化物イオン濃度の関係を図-8.3.2 に示す。

塩化物イオン濃度が多くなるに従つて、不動態グレードが下がる傾向にある。このことから、塩化物イオン濃度が高くなるに従い、徐々に鉄筋表面の不動態被膜は破壊されていくものと考えられる。今回の結果からは、全く不動態がない状態と考えられる不動態グレード 0 は、鉄筋近傍の塩化物イオン濃度が約 10kg/m^3 以上と非常に高濃度の塩化物イオン存在下で生じると考えられる。なお、腐食発生限界塩化物イオン濃度として考えられている 1.2kg/m^3 ¹²⁾ および 2.0kg/m^3 ²²⁾ の塩化物イオン濃度は、不動態グレード 3~4 程度であった。

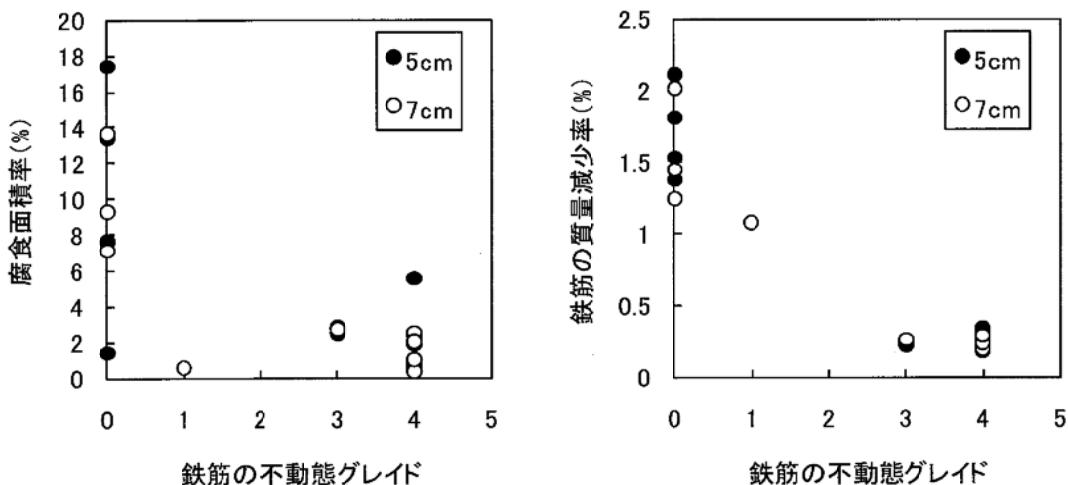


図-8.3.1 不動態グレードと鉄筋の発錆面積率および質量減少率の関係
(久里浜感潮部、前養生期間 28 日)

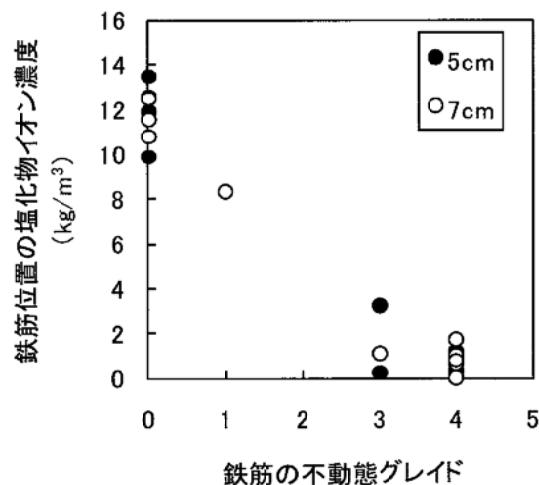


図-8.3.2 不動態グレードと鉄筋位置の塩化物イオン濃度の関係
(久里浜感潮部、前養生期間 28 日)

8.4 腐食量および最大孔食深さと発錆面積率との関係

酒田感潮部、久里浜感潮部および久里浜海浜部における鉄筋の腐食量と発錆面積率の関係を図-8.4.1示す。

ポルトランドセメント系および混合セメント系とともに発錆面積率が大きくなるとともに腐食量も増加していることが分かる。このことから、コンクリート中の鉄筋は、腐食量の増加とともに、徐々に腐食の範囲も大きくなると考えられる。

鉄筋の最大孔食深さと発錆面積率の関係を図-8.4.2に示す。

全体的に鉄筋の発錆面積率の増加とともに最大孔食深さも大きくなる傾向にあるが、特に初期の段階において最大孔食深さが大きくなる傾向にある。ポルトランドセメント系で1~1.5mm、混合セメント系で0.5mm程度の孔食が腐食初期段階で生じ、その後徐々に孔食が進むようである。

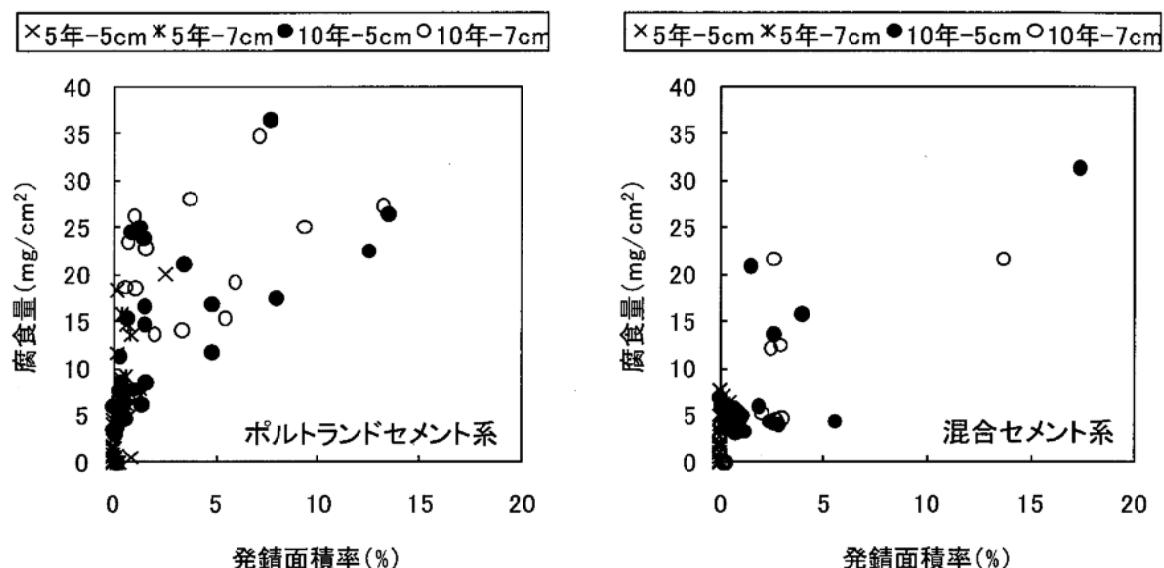


図-8.4.1 鉄筋の腐食量と発錆面積率の関係
(酒田・久里浜感潮部および久里浜海浜部、前養生期間 28 および 91 日)

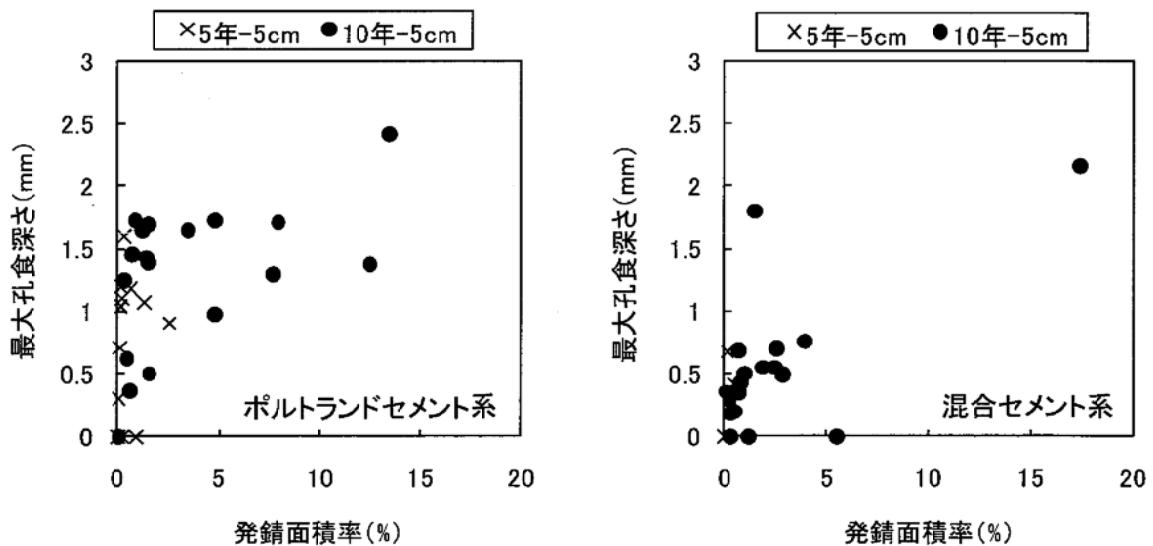


図-8.4.2 鉄筋の最大孔食深さと発錆面積率の関係
(酒田・久里浜感潮部および久里浜海浜部、前養生期間 28 および 91 日)

材齢 10 年でのコンクリートの外観観察の結果、久里浜感潮部の前養生期間 28 日、W/C60% の MC を用いた供試体以外の供試体の腐食によるひび割れは確認されていない。

腐食ひび割れ発生限界腐食量は、これまでに様々な検討が行われ、かぶりや鉄筋径などをパラメータとして算定するモデルや簡略式が提案されている^{23)、24)}。土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕²⁵⁾においては、中性化による鉄筋腐食の進行が対象ではあるが、ひび割れ発生限界腐食量を 10mg/cm^2 とする参考値が紹介されている。

今回の結果においては参考値である 10mg/cm^2 を超える場合も目視による腐食ひび割れの発生は認められていない。文献 24)では、文献 23)を単純化した式-8.4.1 が示されている。

$$W_{cr} \doteq 10(c/d) \quad \text{式-8.4.1}$$

W_{cr} : ひび割れ発生限界腐食量 (mg/cm^2) 、 c : かぶり (cm) 、 d : 鉄筋径 (cm)

酒田感潮部、久里浜感潮部および久里浜海浜部における、かぶり/鉄筋径 (c/d) とひび割れ発生限界腐食量の関係を図-8.4.3 に示す。

いずれの供試体も式-8.4.1 で推定されるひび割れ発生限界腐食量を超えるものはなかった。ただし、ここで求めた鉄筋腐食量は、コンクリート中鉄筋の全表面積当たりの値であり、測定方法によって腐食量は大きく異なることが予想される。

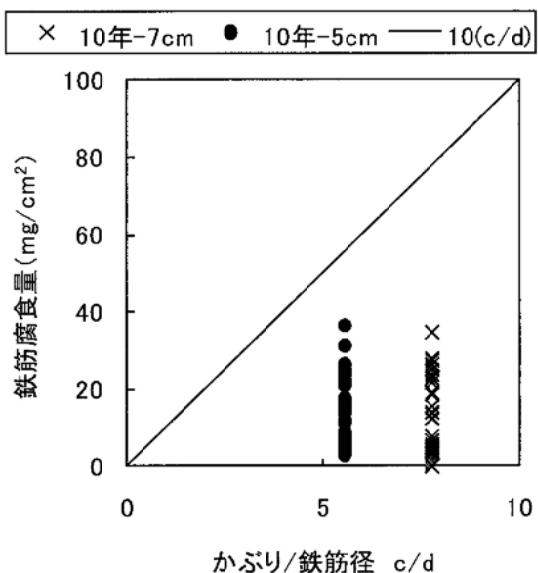


図-8.4.3 かぶり/鉄筋径とひび割れ発生限界腐食量の関係
(酒田、久里浜感潮部および久里浜海浜部、前養生期間 28、91 日)

9. 鉄筋の腐食性評価

9.1 腐食発生限界塩化物イオン濃度

土木学会標準示方書には、鋼材位置における塩化物イオンの鉄筋腐食発生限界濃度がコンクリート単位容積あたりの量として、実環境の暴露の場合 $1.2\sim2.4\text{kg}/\text{m}^3$ 程度と示されている¹²⁾。この腐食の発生や進行は、鉄筋コンクリートの設置環境によって大きく異なると考えられる。本試験結果においては、感潮暴露した鉄筋コンクリートの腐食について調査したもので、材齢 5 年時に鉄筋近傍の塩化物イオン濃度が $2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度を超えた付近から発錆面積が始まっていることを既に報告した²⁶⁾。

ポルトランドセメント系における鉄筋位置の塩化物イオン濃度と鉄筋の発錆面積率および腐食量の関係を図-9.1.1、混合セメント系における同関係を図-9.1.2 に示す。ここで、鉄筋位置の塩化物イオン濃度は、コンクリート中の塩化物イオン濃度調査で得られた分布をもとに算出した塩化物イオンの見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度からかぶり位置の塩化物イオン濃度を算出した結果である。

材齢 10 年の結果を踏まえると、ポルトランドセメント系の場合、鉄筋の発錆面積率および腐食量との関係から、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が $2\sim3\text{kg}/\text{m}^3$ 程度から急激に腐食が進行すると考えることができる。また、かぶり 5cm および 7cm の違いによる影響は小さい。

混合セメント系の場合、鉄筋の発錆面積率の結果から、塩化物イオン濃度 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 程度で腐食の発生がみられる。これは、コンクリート細孔溶液中の OH イオン濃度が影響し、ポルトランドセメント系よりも混合セメント系のコンクリートの方が腐食感受性が高いと考えることができる。しかしながら、混合セメント系の腐食量は塩化物イオン濃度が $4\text{kg}/\text{m}^3$ 程度までほぼ一定となり、腐食が急激に大きくなることはなかった。今回の結果からは、鉄筋の腐食による劣化が進行するような顕著な腐食の進行は、ポルトランドセメント系と同程度かそれ以上の塩化物イオン濃度である $3\sim4\text{kg}/\text{m}^3$ 程度からと思われる。

これは、感潮暴露のように海水への浸漬率が高い場合、コンクリートの含水率が高いため、コンクリート内部に拡散する酸素量は非常に少なくなると予想される。特に、混合セメント系の場合、コンクリートがより緻密化するため、酸素の侵入を防ぎ腐食があまり進行しなかったためであると考えられる。これは、図-8.4.2 からも混合セメント系の最大孔食深さがポルトランドセメント系に比べ小さいことからも考察できる。

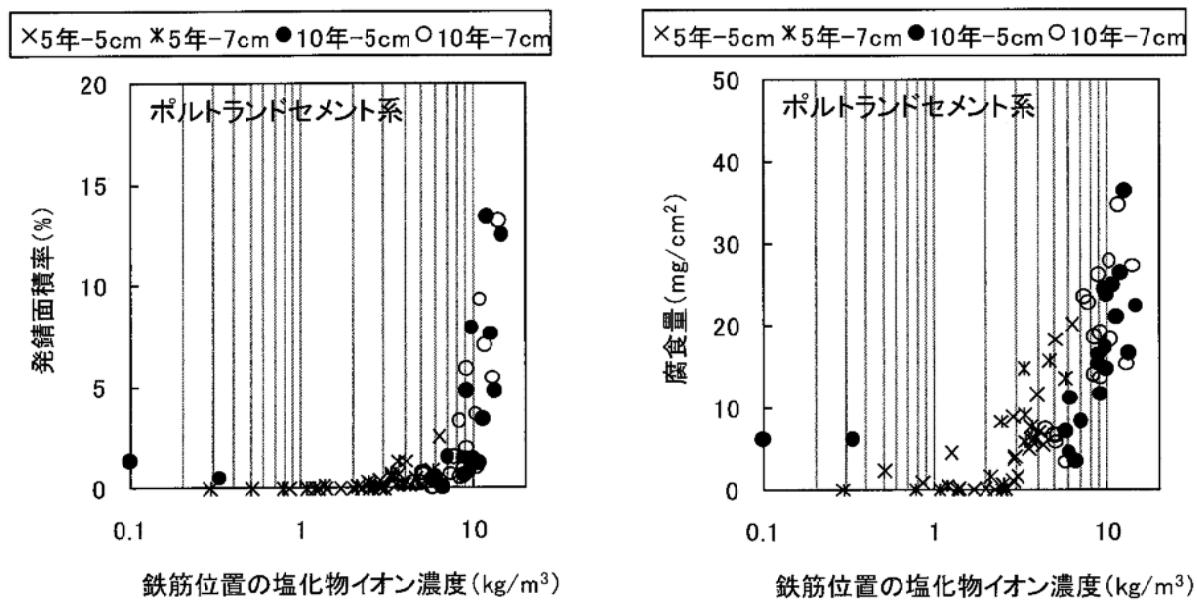


図-9.1.1 鉄筋位置の塩化物イオン濃度と鉄筋の発錆面積率および腐食量の関係
(酒田、久里浜感潮および久里浜海浜、ポルトランドセメント、前養生期間 28、91 日)

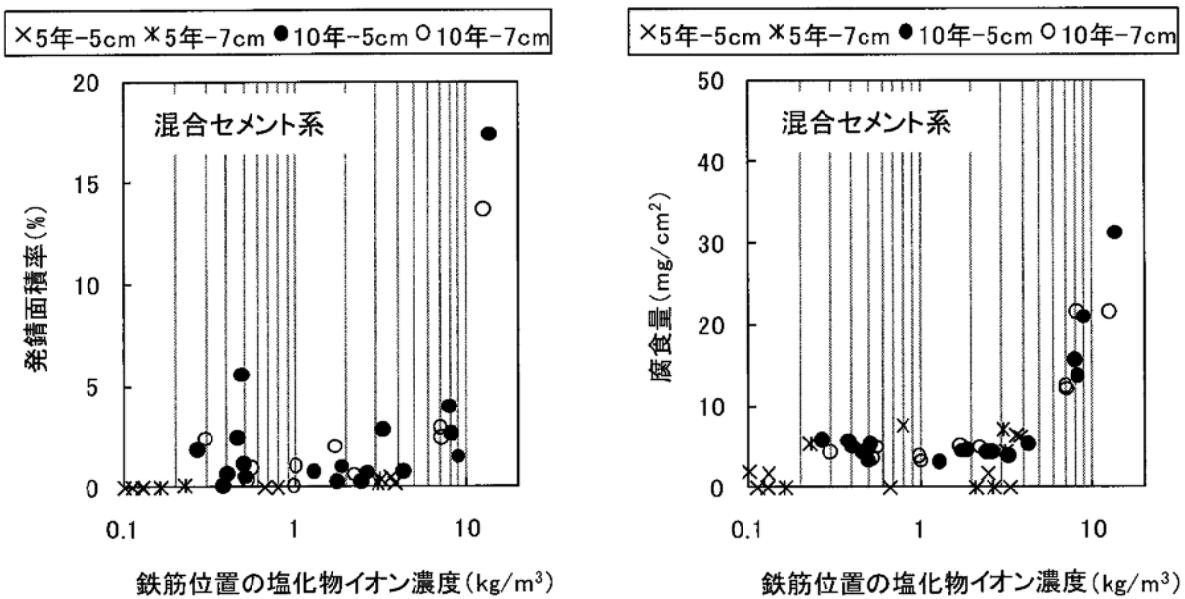


図-9.1.2 鉄筋位置の塩化物イオン濃度と鉄筋の発錆面積率および腐食量の関係
(酒田、久里浜感潮および久里浜海浜、混合セメント、前養生期間 28、91 日)

9.2 腐食速度

腐食が顕著であった酒田感潮部および久里浜感潮部におけるセメントの種類と腐食速度の関係を図-9.2.1に示す。

鉄筋の腐食発生塩化物イオン濃度や腐食発生時期が十分に分からぬいため、材齢5年および材齢10年の結果をもとに、腐食速度は一定であると仮定して腐食速度を算出した。算出方法を式-9.2.1に示す。

$$I_{corr} = \frac{m_{10} - m_5}{t}$$

式-9.2.1

ここに、 I_{corr} ：鉄筋の腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)、 m_{10} ：材齢 10 年の鉄筋の腐食減少量(mg/cm^2)、 m_5 ：材齢 5 年の鉄筋の腐食減少量(mg/cm^2)、 t ：期間=5 y

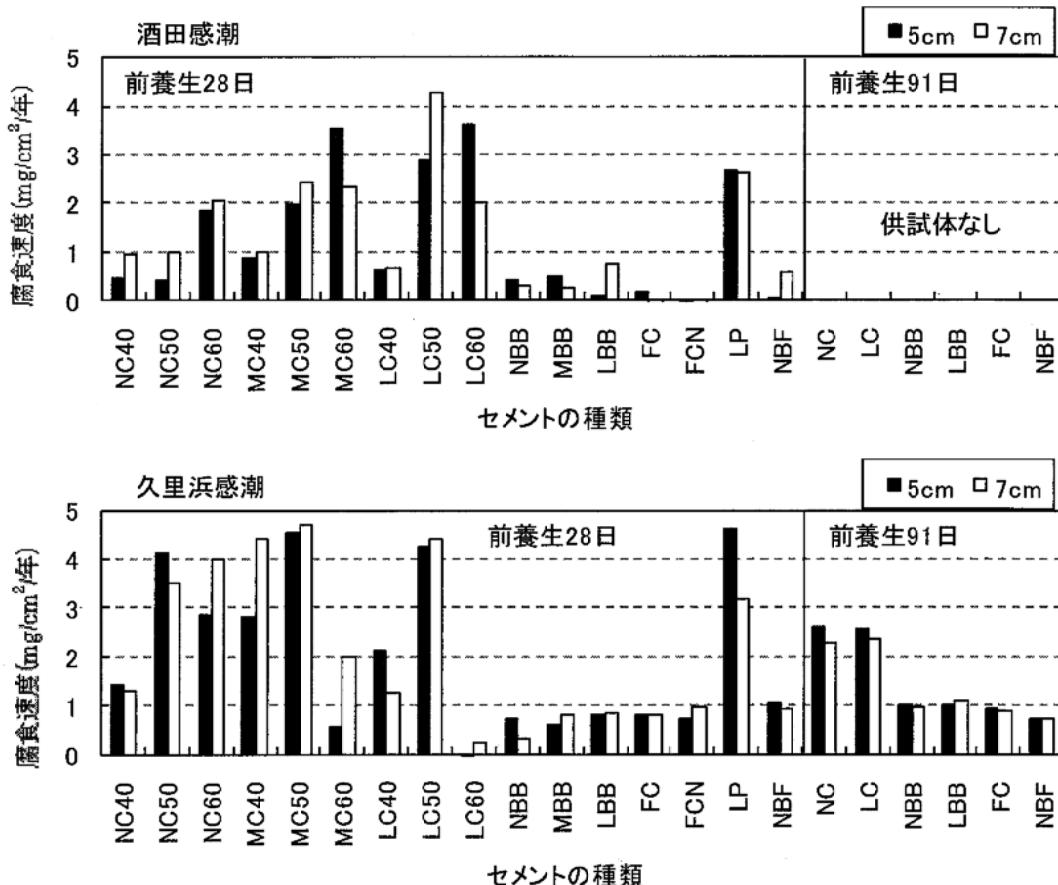


図-9.2.1 セメントの種類と腐食速度の関係（酒田感潮部、久里浜感潮部）

感潮暴露である酒田感潮部および久里浜感潮部とともに、明らかにポルトランドセメント系の方が腐食速度は速く、久里浜感潮部の場合、腐食速度は $3\sim 5 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ 程度となった。一方、石灰石微粉末を混合した LP を除く混合セメント系の腐食速度は、久里浜感潮部で $1\text{ mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ 程度となり、ポルトランドセメント系の腐食速度の $1/3\sim 1/5$ に低下していることが分かる。これは、塩害進展期の期間延長につながるため、構造物の長寿命化に混合セメント系は寄与できると考えられる。

また、水セメント比と腐食速度の関係は、酒田感潮部の結果から水セメント比が大きくなるにつれて腐食速度も速くなる傾向にある。また、前養生期間が長くなると、ポルトランドセメント系の腐食速度は遅くなる傾向にあるが、混合セメント系の腐食速度は同程度となった。これは、酸素の拡散等が影響していると考えられる。

感潮暴露である酒田感潮部および久里浜感潮部における総細孔量と腐食速度の関係を図-9.2.2、塩化物イオンの見掛けの拡散係数と腐食速度の関係を図-9.2.3 に示す。

ばらつきは大きいが、総細孔量および塩化物イオンの見掛けの拡散係数が大きくなるとともに腐食速度も速くなる傾向を示している。総細孔量および塩化物イオンの見掛けの拡散係数とともに酸素拡散との関係を整理する必要があるが、いずれにしても、緻密なコンクリートの方が腐食速度は遅くなる傾向にある。

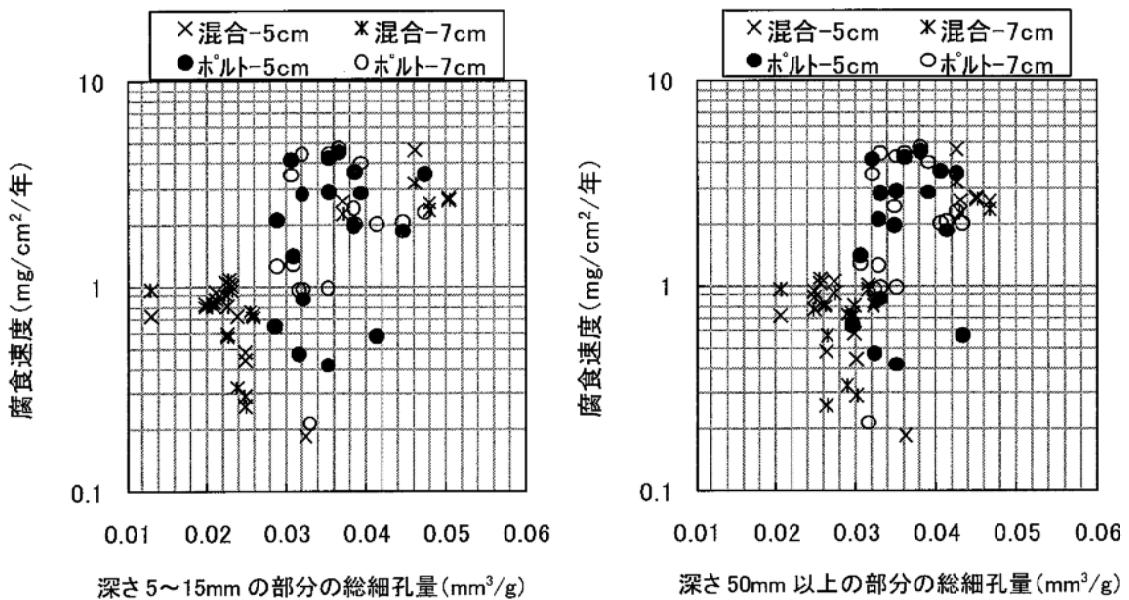


図-9.2.2 総細孔量と腐食速度の関係
(酒田感潮部および久里浜感潮部、前養生期間 28、91 日)

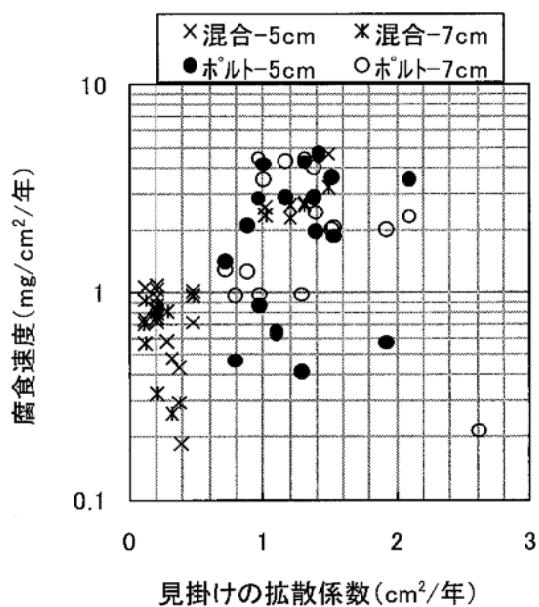


図-9.2.3 塩化物イオンの見掛けの拡散係数と腐食速度の関係
(酒田感潮部および久里浜感潮部、前養生期間 28、91 日)

コンクリート抵抗と腐食速度の関係を図-9.2.4 に示す。ここで、鉄筋の腐食反応が拡散律速する場合は、アノード（陽極：発錆箇所）から発生した電流は電解液（コンクリート）を流れカソード（陰極）に流入すると考えられるが、このとき、陰極電位 E_c と陽極電位 E_a の間の電位差およびコンクリート中を流れる電流 I にはオームの法則が成り立ち、これらの関係は式-9.2.2 で表わされる²⁷⁾。

$$E_c - E_a = I \cdot (R_a + R_b + R_c) \quad \text{式-9.2.2}$$

ここに、 E_c は陰極電位 (V) 、 E_a は陽極電位 (V) 、 I は電流量 (腐食速度) (A) 、 R_a は陽極近傍の電流経路内の電気抵抗 (Ω) 、 R_b は陽極と陰極から離れた電流経路内の電気抵抗 (Ω) 、 R_c は陰極近傍の電流経路内の電気抵抗 (Ω)

この関係式から、塩害によるマクロセル腐食を考えるときには、陽極-陰極間の距離も腐食速度の要因と考えることができ、また、カソード面積は腐食速度に大きく影響する。

ばらつきはあるが腐食速度とコンクリート抵抗の関係は反比例の関係にあることが分かる。今後より詳細に検討することで、セメントの種類や配合などが異なった場合の腐食速度をより精度よく予測することができると考えられる。

以上の結果のばらつきに関しては、それぞれのコンクリート供試体において鉄筋表面の塩化物イオン濃度や細孔溶液中のイオン濃度などが異なるため、鉄筋表面の不動態の状態が異なることが要因であると考えられる。

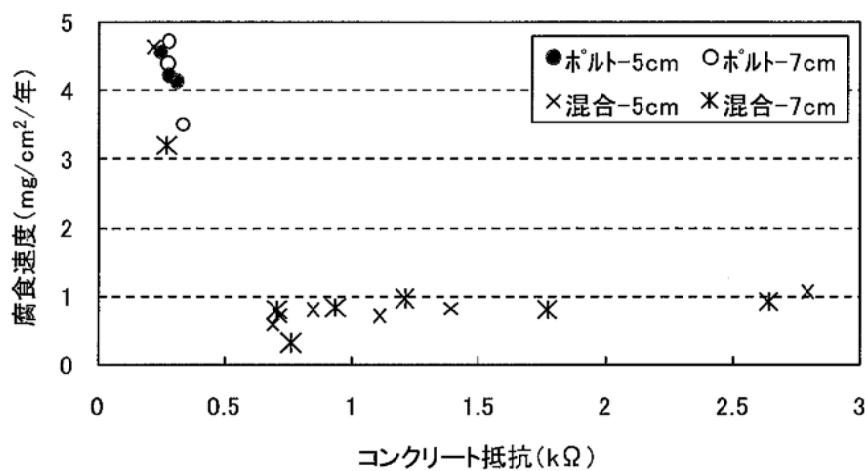


図-9.2.4 コンクリート抵抗と腐食速度の関係

9.3 塩害の劣化過程の試算

これまでの調査結果をもとに、それぞれのセメントを用いたコンクリートの腐食開始および腐食速度を推定し、ひび割れ発生までの期間を試算した。

各種の設定条件を表-9.3.1 に示す。ここで、暴露条件は久里浜感潮部とし、かぶりは文献 22)に示される特に厳しい環境下でのかぶりの標準値である 70mm を用いた。鉄筋径は 32mm とし、ひび割れ発生限界腐食量は、文献 24)に示されている式-9.3.1 を用いた。

$$W_{cr} \doteq 10(c/d) \quad \text{式-9.3.1}$$

ここで、 W_{cr} : ひび割れ発生限界腐食量 (mg/cm^2) 、 c : かぶり (cm) 、 d : 鉄筋径 (cm) である。従って、いずれのコンクリートもひび割れ発生限界腐食量は、 $21.9\text{mg}/\text{cm}^2$ とした。

コンクリートの設定条件を表-9.3.2 に示す。ポルトランドセメント系のコンクリートについては水結合材比 40%および 50%の 2 種類、混合セメント系のコンクリートは水結合材比 50%の場合について検討した。

塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度は、それぞれ暴露期間 10 年の

試験結果をもとに設定した。

腐食発生限界塩化物イオン濃度に関しては、「9.1 鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度」に示したように、ポルトランドセメント系のコンクリートの場合、今回の結果からおよそ $3 \sim 4 \text{ kg/m}^3$ 程度であると予想されたため、その下限値である 3 kg/m^3 と設定した。混合セメント系のコンクリートの場合、塩化物イオン濃度の低い場合においても腐食の発生および減量が認められていたことから、実験結果から値を設定することが非常に難しいと考え、土木学会コンクリート標準示方書に示されている 1.2 kg/m^3 を用いた。腐食速度に関しては、図-9.2.1 の結果を用いた。なお、試算では腐食速度は経過時間および腐食量に係わらず一定とした。

塩害の劣化過程の推定結果を図-9.3.1 に示す。ポルトランドセメント系のコンクリートで水セメント比が 40% の場合は、20~35 年程度でひび割れが発生すると試算された。また、水セメント比 50% の場合は、15 年程度で腐食ひび割れ発生となる。

一方、LP を除く混合セメント系の場合、腐食発生までの時期および腐食開始からひび割れ発生までの時期ともにポルトランドセメント系よりも長くなり、塩害による鉄筋腐食に対する抵抗性が高いことが分かる。高炉スラグセメント系および FC は、ほぼ同程度の耐久性が得られ、ひび割れ発生までの時期はおよそ 60 年程度と試算された。なお、FCN は、これらに比べ耐久性が若干劣るようである。また、NBF は、非常に高い耐久性が得られる試算結果となった。

ただし、今回の試算では、ポルトランドセメント系のコンクリートの腐食速度に比べ、混合セメント系のコンクリートの腐食速度は非常に小さく、腐食速度が時間とともに変化する場合には、これよりも早期にひび割れが発生する可能性もあり、腐食速度の定量化は今後の課題である。いずれにしても、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材をコンクリート用材料として使用することで、本試算結果より海洋環境下での鉄筋腐食に対する抵抗性を向上させることができると考えられる。

表-9.3.1 各種の設定条件

暴露条件	久里浜感潮部
かぶり	7 cm
鉄筋径	32 mm
ひび割れ発生限界腐食量	21.9 mg/cm^2

表-9.3.2 コンクリートの設定条件

セメントの種類	水結合材比 (%)	表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3)	見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	腐食発生限界塩化物イオン濃度 (kg/m^3)	腐食速度 ($\text{mg/cm}^2/\text{年}$)
NC	40	19.6	0.72	3.0	1.4
	50	19.1	1.00	3.0	4.1
MC	40	17.6	1.00	3.0	2.8
	50	18.3	1.42	3.0	4.6
LC	40	15.5	0.55	3.0	2.1
	50	18.3	1.31	3.0	4.2
NBB	50	20.2	0.21	1.2	0.7
MBB	50	19.9	0.28	1.2	0.6
LBB	50	20.6	0.20	1.2	0.8
FC	50	17.3	0.21	1.2	0.8
FCN	50	16.3	0.48	1.2	0.7
LP	50	19.0	1.49	1.2	4.6
NBF	50	12.6	0.12	1.2	1.1

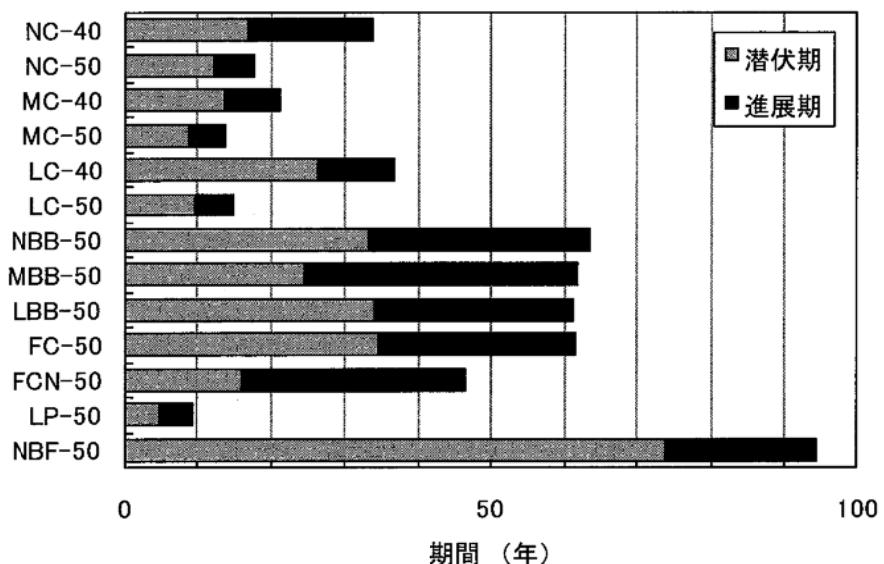


図-9.3.1 塩害の劣化過程の推定結果（久里浜感潮部）

10. 結言

本研究では低発熱型を中心に合計 10 種類のセメント、すなわちポルトランドセメント系として普通（NC：比較用）、中庸熱（MC）、低熱（LC）の各ポルトランドセメント、また混合系低発熱セメントとして上記各ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末をそれぞれ 50% 混合した NC ベースの高炉セメント（NBB）、MC ベースの高炉セメント（MBB）、LC ベースの高炉セメント（LBB）、また NC にフライアッシュⅡ種を 30% 混合したセメント（FC）、同じく NC にフライアッシュⅢ種を 30% 混合したセメント（FCN）、また NC に石灰石微粉末を 30% 混合したセメント（LP）、また NC に高炉スラグ微粉末およびフライアッシュⅡ種をそれぞれ 50%、25% 混合した三成分系セメント（NBF）のセメントを用いたコンクリートについて、海洋構造物への適用性を検討するための長期暴露実験を 1998 年から実施した。

コンクリートの配合条件は、目標スランプ 8±1.5cm、目標空気量 4.5±0.5%、ポルトランドセメント系については水セメント比 40、50、60% の 3 配合、混合セメントについては水結合材比 50% の 1 配合とし、暴露条件は、感潮条件（山形県酒田市、神奈川県横須賀市久里浜）、海浜条件（同久里浜）、屋外（東京都北区）の 4 条件とした。なお暴露前の養生期間は 28 日としたが、一部の条件では 91 日とした場合も加えている。

今般、各条件下で 10 年間暴露したコンクリートに配置した鉄筋発錆状況とコンクリートの強度特性、中性化深さ、塩化物イオンの浸透、水和生成物や細孔構造等の鉄筋の腐食抵抗性に影響を及ぼす各種性質や電気化学的な手法による鉄筋の腐食抵抗性（発錆状況）の評価について検討を行った。

本研究で得られた知見は以下の通りである。

[コンクリートの外観観察]

材齢 5 年では、供試体にひび割れ等の変状は認められなかったが、材齢 10 年では、久里浜感潮部の水セメント比 60%、前養生期間 28 日の MC を用いた供試体にのみ、ひび割れが認められた。

[圧縮強度]

- (1) 暴露条件により、材齢 10 年の圧縮強度は、ポルトランドセメント系および LP では、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の方が高く、LP を除く混合セメント系では感潮暴露の方が高かった。暴露条件の違いによる圧縮強度の差は、ポルトランドセメント系より混合セメント系の方が大きかった。
- (2) いずれのセメントも材齢 5 年から 10 年にかけて圧縮強度はほとんど増加しなかった。
- (3) 暴露開始時の圧縮強度は、ポルトランドセメント系 > 高炉スラグセメント系 > NBF ≈ LP ≈ フライアッシュ系セメントの順になった。なお、ポルトランドセメント系のセメント種類、高炉スラグセメント系のベースセメントの種類およびフライアッシュ系セメントのフライアッシュの種類が強度発現性に及ぼす影響は小さかった。
- (4) 感潮暴露した圧縮強度は、MBB > LBB ≈ FC > NBB ≈ FCN > NBF > LC > MC > NC > LP の順となり、LP を除く混合セメント系の方がポルトランドセメント系より高くなった。また、混合セメント系の強度発現性は、高炉スラグセメント系の方がフライアッシュセメント系より高く、高炉スラグセメント系の場合、ベースセメントが低熱系の方が高くなかった。さらに、フライアッシュセメント系の場合、フライアッシュⅡ種の方が高かった。
- (5) 気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）した圧縮強度は、いずれも増加量がほぼ同等で、ポルトランドセメント系 > フライアッシュ系セメント > NBF ≈ LP ≈ 高炉スラグセ

メント系の順になった。

- (6) ポルトランドセメント系において、いずれの環境下においても水セメント比の低下により圧縮強度は増加した。
- (7) 前養生期間を 28 日から 91 日に長くすることで、感潮暴露では LC およびフライッシュセメント系は強度発現性が向上した。しかし、気中暴露（東京屋外部）では前養生期間が強度発現性に及ぼす影響は認められなかった。

[静弾性係数]

- (1) 暴露条件によって異なり、静弾性係数は標準養生および感潮暴露の方が気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）より高くなった。
- (2) 暴露開始時の圧縮強度と静弾性係数の関係は、セメント種類にかかわらず良好な相関関係があり、土木学会式と一致した。
- (3) 感潮暴露した静弾性係数は、いずれのセメントも暴露開始時より高くなった。
- (4) 気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）した静弾性係数は、暴露開始時と比べ、ポルトランドセメント系および LP の場合ほぼ同等であったが、混合セメント系の場合低下した。この傾向は、高炉スラグセメント系および NBF で顕著であった。
- (5) 前養生期間を長くしても、静弾性係数はほぼ同等であった。

[中性化]

- (1) 暴露条件によって異なり、暴露材齢 10 年の中性化深さは、東京屋外部 > 久里浜海浜部 > 酒田感潮部 ≈ 久里浜感潮部の順になり、感潮暴露ではほとんど中性化が認められなかった。
- (2) 混合セメント系は、ポルトランドセメント系に比べ中性化深さが大きくなかった。また、ポルトランドセメントの種類が中性化深さに及ぼす影響は小さかった。
- (3) 混合セメント系では、中性化深さは NBF が最も大きく、2 成分系では混和材種類にかかわらずほぼ同等であった。また、高炉スラグセメント系において、ベースセメントの種類、フライアッシュセメント系において、フライアッシュの種類が中性化深さに及ぼす影響は小さかった。
- (4) 材齢 10 年において、高炉スラグセメント系およびフライアッシュセメント系は、前養生期間を長くすることで、中性化に対する抵抗性が向上した。

[塩化物イオンの見掛けの拡散係数]

- (1) 暴露条件において、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は感潮部 > 久里浜海浜部の順になった。また、感潮暴露である酒田感潮部と久里浜感潮部の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は同等であった。
- (2) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、ポルトランドセメント系 ≈ LP > 高炉スラグセメント系 ≈ フライアッシュセメント系 > NBF の順であった。また、ポルトランドセメントの種類、高炉スラグセメント系のベースのポルトランドセメントの種類およびフライアッシュセメント系のフライアッシュの種類が塩化物イオンの見掛けの拡散係数に及ぼす影響は小さかった。
- (3) ポルトランドセメント系において、水セメント比を低くすることにより塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなった。
- (4) 前養生期間を長くしても、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は同等であった。

[細孔量]

- (1) 暴露条件において、暴露材齡 10 年の総細孔量は、暴露開始時と比べ、感潮暴露では同等以下、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）で同等以上となった。久里浜海浜部および東京屋外部では、暴露開始時や感潮暴露に比べポーラスな細孔構造となった。
- (2) 総細孔量は、高炉スラグセメント系、フライアッシュセメント系および NBF の混合セメント系が最も少なく、次いでポルトランドセメント系となり、LP が最も多かった。感潮暴露では、ポルトランドセメント系の総細孔量はセメント種類間で差はなかったが、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では、総細孔量は LC のほうが NC よりも多くなった。また、高炉スラグセメント系において、ベースセメントの種類およびフライアッシュセメント系において、フライアッシュの種類が総細孔量に及ぼす影響は小さかった。
- (3) 養生期間を長くすることで、暴露開始時の総細孔量は減少する傾向が認められたが、暴露材齡 10 年では、養生期間と総細孔量に明確な傾向が認められなかった。

[粉末 X 線回折]

- (1) フリーデル氏塩は、感潮暴露で多く、LP を除く混合セメント系よりポルトランドセメント系および LP の方が顕著であった。また、フリーデル氏塩は、LP を除く混合セメント系では深さ 5~15mm の部分だけ、ポルトランドセメント系では深さ 5~15mm の部分および深さ 50mm 以上の部分で認められた。ポルトランドセメント系におけるフリーデル氏塩は、NC>MC>LC の順となり、C₃A が多いセメントほど多くなった。
- (2) カルサイト（炭酸カルシウム）は、東京屋外部の深さ 5~15mm の部分に比較的多く認められ、中性化の傾向と一致した。
- (3) ポルトランダイト（水酸化カルシウム）は、ポルトランドセメント系ではいずれのセメント種類にも認められ、水セメント比が小さいほど顕著であった。一方、混合セメント系では、ポルトランダイト（水酸化カルシウム）が僅かで、感潮暴露では全く生成が認められないものもあった。

[コンクリートの各種性状に及ぼす影響]

- (1) 総細孔量と圧縮強度には、暴露開始時および感潮暴露した場合に相関関係が認められ、総細孔量が多くなるにつれ圧縮強度は低下する傾向を示した。ただし、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の混合セメント系の場合、総細孔量と圧縮強度に明確な傾向は認められなかった。
- (2) 圧縮強度と中性化には、相関関係が認められ、圧縮強度が高くなるにつれ中性化深さは小さくなる傾向を示した。
- (3) 総細孔量と中性化には、ポルトランドセメント系の場合に相関関係が認められ、総細孔量が多くなるにつれ、中性化深さは大きくなつた。しかし、混合セメント系の場合には明確な関係は認められなかった。
- (4) 圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数には、ポルトランドセメント系の場合相関関係が認められ、圧縮強度が高くなるにつれ塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなつた。混合セメント系の場合明確な関係は認められなかった。
- (5) 総細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数には、相関関係が認められ、総細孔量が多くなるにつれ塩化物イオンの見掛けの拡散係数は大きくなつた。

[鉄筋の外観観察]

材齢 5 年ではほとんど鉄筋の発錆は認められなかったが、材齢 10 年では、鉄筋の発錆が認められた。鉄筋の発錆は、ポルトランドセメント系で水セメント比が高い場合顕著であった。

[鉄筋の腐食状況] (発錆面積率、質量減少率、孔食深さ)

- (1) 鉄筋の腐食は、久里浜感潮部>酒田感潮部>久里浜海浜部>東京屋外部の順になった。ただし、気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）では鉄筋の腐食はほとんど認められなかった。
- (2) 鉄筋の腐食は総じて、ポルトランドセメント系および LP が大きく、その他の混合セメント系は小さかった。
- (3) ポルトランドセメント系において、水セメント比が大きくなるにつれ、鉄筋の腐食は大きくなる傾向が認められた。
- (4) ポルトランドセメント系において、前養生期間を長くすると鉄筋の腐食が小さくなる傾向が認められた。
- (5) 鉄筋の発錆面積率と腐食量および孔食深さは相関関係にあり、発錆面積率が大きくなるにつれ、腐食量および孔食深さは大きくなつた。
- (6) 鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は、ポルトランドセメント系の場合 $2\sim3\text{kg}/\text{m}^3$ 程度であった。一方、混合セメント系の場合 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 程度であったが、塩化物量が $3\sim4\text{kg}/\text{m}^3$ 程度までは、鉄筋の腐食の進行が認められないことから、腐食の進行は $3\sim4\text{kg}/\text{m}^3$ 程度と考えられる。
- (7) 鉄筋の腐食速度を推定すると、NBF、高炉スラグセメント系およびフライアッシュセメント系のほうが遅く、ポルトランドセメント系および LP の約 $1/3$ から $1/5$ の速度であった。
- (8) コンクリートにひび割れが発生するまでの期間を推定試算した結果、水結合材比が 50% の場合、ひび割れが発生する期間は、NBF>高炉スラグセメント系=FC>FCN>ポルトランドセメント系=LP の順になった。また、ポルトランドセメント系の場合、水セメント比を低減することによってひび割れが発生する期間は長くなった。

[電気化学的測定方法]

- (1) 自然電位は、夏期に卑化し、冬期に貴化する傾向が認められた。また、自然電位の測定結果から ASTM 法により求めた腐食判定と実際の鉄筋の腐食状況との関係は、材齢 5 年では明確な傾向が認められなかつたが、材齢 10 年では概ね一致した。
- (2) 分極抵抗から求めた鉄筋の腐食速度と実際の鉄筋の腐食状況には明確な傾向が認められなかつた。ただし、分極抵抗から推定した腐食量と実際の鉄筋の腐食量の関係は、推定値の方が大きくなるものの、相関関係が認められた。
- (3) 鉄筋の分極曲線から推定した不動態グレードと鉄筋の質量減少率には相関関係が認められ、不動態グレードが小さくなるにつれ、鉄筋の質量減少率は大きくなる傾向を示した。
- (4) コンクリート抵抗は、NBF>フライアッシュセメント系>高炉スラグセメント系>ポルトランドセメント系=LP の順となつた。また、コンクリート抵抗は、いずれのセメントも夏期に低下する傾向が認められた。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 55 「コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向」の実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案）（JSCE-G573-2003）（付属書 コンクリート中の全塩化物イオン濃度の測定結果の含有割合に及ぼす骨材量の影響の補正方法）
- 2) ナノテクノロジー時代の含浸技術の基礎と応用,株式会社テクノシステム
- 3) 蛍光エポキシ樹脂真空含浸法によるコンクリートの劣化現象の可視化,セメント・コンクリート No.752,Oct.2009,p.42
- 4) 岸谷孝一西澤紀昭他編,大即信明,樋野紀元,片脇清士,小林明夫,友澤史紀,舛田佳寛,宮川豊章著：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(II),技報堂出版,p.116,1991年4月
- 5) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-49,海砂の塩化物イオン含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究,p.12,1999年3月
- 6) 横田優：交流インピーダンス法に基づくコンクリート中の鉄筋腐食評価に関する研究,徳島大学博士論文,1995.3
- 7) 藤嶋昭,相澤益男,井上徹：電気化学測定法（上）,技報堂出版,pp.209-222,1984
- 8) 鳥居和之,川村満紀,藤井剛：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの強度発現性,セメント・コンクリート論文集,No.43,pp.144-149,1989
- 9) 市川勝俊,大澤勉,中村秀三,綱取秀夫：屋外曝露または室内養生を 10 年間行なったコンクリートの炭酸化と強度,セメント・コンクリート論文集,No.53,pp.198-204,1999
- 10) 佐伯ら：混和材を用いたモルタルの中性化速度,セメント・コンクリート論文集,No.47,1993
- 11) 小早川ら：水比、混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.21,No.2,1999
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書,設計編,2007年3月
- 13) 審良善和,濱田秀則,大即信明,Tarek.U.M.：円柱供試体側面から浸透した塩化物イオンの拡散係数の算出方法について, コンクリート工学年次論文集,Vol.27,No.1,2005
- 14) 濱田秀則,岩波光保,丸屋剛,横田弘：海生生物付着による海洋構造物の耐久性向上について, コンクリート工学年次論文集,Vol.24,No.1,2002
- 15) 山路徹,Tarek Uddin Mohammed,青山敏幸,濱田秀則：海洋コンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境およびセメント種類の影響,コンクリート工学年次講演集,Vol.23,No.2,pp.577-582,2001.7
- 16) 日本コンクリート工学協会：炭酸化研究委員会, pp.24-p.28,1993
- 17) ASTM C 876 : Standard Test Method for Half-cell Potential of Uncoated Reinforcing in Concrete,1991
- 18) 川俣幸治,堺孝司,石川光男：積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の電気防食法に関する研究,土木学会論文集 No.557/V-34,pp.65-75,1997.2
- 19) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書,p.194,2001.3
- 20) CEB Bulletin No.243 : Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures affected by Reinforcement Corrosion, 1998
- 21) 大即信明：コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究,港湾技術研究所報告,第 24 卷,第 3 号,pp.194-196,1985
- 22) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社) 日本港湾協会,p.490,2007
- 23) Yokozeki, K., Motohashi, K., Okada, K. and Tsutsumi, T. : A rational model to predict the service life of RC structures in marine environment, forth CANMET/ACI international Conference on Durability of Concrete, SP 170-40, pp.777-798, 1997.

- 24) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向,コンクリート技術シリーズ 40,2000.
- 25) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕,p.104,2001.
- 26) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-52,各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢 5 年報告,p78,2006 年 3 月
- 27) A. J. Bard and L. R. Faulkner : Electrochemical Method, John Wiley & Sons, pp.32-34, 1980

資料編

1.コンクリートに関する試験結果

1.1 圧縮強度および静弾性係数試験の測定結果

1.2 中性化深さ試験の測定結果および中性化速度係数

1.3 塩化物イオン濃度の測定結果および塩化物イオンの見掛けの拡散係数、表面塩化物イオン濃度

1.4 塩化物イオン濃度と回帰曲線

1.5 X線回折試験の測定結果

1.6 セメント種類ごとのX線回折相対強度比較

1.7 細孔量試験の測定結果

1.8 細孔径分布図

2.鉄筋の発錆に関する試験結果

3.塩化物イオンの浸透深さ

4.SEM/EDSによる元素マッピング測定結果

4.1 Cl

4.2 Ca

4.3 Mg

4.4 S

4.5 Na

4.6 K

1.コンクリートに関する試験結果

1.1 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

資料表-1.1.1 暴露養生下における圧縮強度

セメント種類	水結合材比(%)	前養生(日)	圧縮強度 (N/mm ²)								
			曝露開始時	酒田感潮		久里浜感潮		久里浜海浜		東京屋外	
				5年	10年	5年	10年	5年	10年	5年	10年
NC	40	28	49.0	63.5	59.7	52.8	59.8	62.9	66.9	64.1	62.7
	50		42.6	44.6	44.3	50.6	43.8	53.1	56.0	51.9	51.9
	60		36.5	32.1	31.8	34.4	32.8	49.3	47.0	42.2	44.7
MC	40	28	50.0	56.3	56.6	66.0	61.7	53.3	62.4	50.0	61.4
	50		43.0	38.9	46.9	45.6	45.7	52.4	57.6	52.2	56.4
	60		32.3	37.2	38.8	37.8	39.5	51.2	45.3	43.4	45.0
LC	40	28	50.6	68.0	68.9	68.1	68.4	68.6	71.2	64.4	67.1
	50		38.9	47.8	47.4	42.4	47.4	50.3	58.6	48.5	52.9
	60		30.3	38.6	42.1	45.9	44.3	58.3	55.0	49.2	51.1
NBB	50	91	32.3	48.8	53.6	55.3	56.7	40.9	45.4	36.7	42.2
MBB	50		32.5	58.0	62.2	62.0	63.7	43.9	45.0	40.9	41.4
LBB	50		31.1	50.9	57.4	53.9	60.5	43.9	45.2	39.6	41.8
FC	50	28	27.9	51.2	57.3	56.1	59.3	46.0	48.6	43.1	45.3
FCN	50		28.9	43.5	53.4	51.6	54.8	47.9	49.5	44.1	47.7
LP	50		26.8	28.3	29.0	29.4	30.2	38.7	42.8	41.7	41.8
NBF	50	91	28.4	52.5	56.2	55.7	55.4	42.2	40.6	41.0	44.1
NC	50		49.1	-	-	54.5	43.9	-	-	55.8	53.2
LC	50		58.5	-	-	52.9	51.0	-	-	57.9	59.1
NBB	50	91	45.3	-	-	51.0	53.7	-	-	34.8	42.8
LBB	50		42.3	-	-	63.1	64.6	-	-	37.6	42.7
FC	50		39.4	-	-	61.7	61.9	-	-	41.1	47.8
NBF	50		38.2	-	-	59.6	58.6	-	-	35.4	42.4

資料表-1.1.2 暴露養生下における静弾性係数

セメント種類	水結合材比(%)	前養生(日)	静弾性係数 (kN/mm ²)								
			曝露開始時	酒田感潮		久里浜感潮		久里浜海浜		東京屋外	
				5年	10年	5年	10年	5年	10年	5年	10年
NC	40	28	32.8	39.2	40.1	38.4	39.7	32.5	35.0	31.9	34.9
	50		30.7	37.1	36.7	35.8	37.1	34.0	35.5	29.1	34.0
	60		30.0	31.6	33.2	34.0	34.9	32.1	35.7	30.1	33.7
MC	40	28	31.9	36.1	38.0	39.9	40.3	33.0	35.1	31.6	35.9
	50		30.9	35.0	38.1	35.7	40.7	32.3	35.7	32.4	34.5
	60		28.5	32.7	34.2	32.8	35.8	28.3	34.4	30.4	32.3
LC	40	28	33.3	38.4	40.7	44.3	40.9	36.2	37.3	34.4	36.1
	50		30.2	37.3	36.5	32.5	35.5	33.8	36.0	28.1	30.7
	60		30.2	35.3	33.8	35.4	35.6	33.5	36.7	29.3	31.5
NBB	50	91	30.6	38.0	39.4	37.9	36.4	21.0	26.0	21.0	22.2
MBB	50		30.4	38.4	41.7	40.2	41.3	26.7	26.0	22.5	24.6
LBB	50		28.8	36.8	41.8	36.4	41.0	23.7	25.4	20.0	20.8
FC	50	28	28.3	38.0	40.0	36.6	40.0	25.6	32.7	28.0	28.3
FCN	50		27.5	35.6	38.4	35.5	38.3	30.2	32.8	26.8	27.8
LP	50		29.3	31.0	33.2	30.8	34.6	31.9	34.8	31.0	33.5
NBF	50	91	29.7	36.2	39.7	36.9	39.6	25.6	22.2	22.1	21.8
NC	50		34.4	-	-	35.9	35.8	-	-	28.5	33.7
LC	50		35.3	-	-	28.2	34.7	-	-	31.7	31.4
NBB	50	91	34.3	-	-	35.4	39.8	-	-	24.4	28.5
LBB	50		34.0	-	-	37.7	41.1	-	-	21.7	21.8
FC	50		32.6	-	-	36.0	40.0	-	-	28.5	31.4
NBF	50		32.6	-	-	38.1	41.0	-	-	23.3	22.8

資料表-1.1.3 標準養生下における圧縮強度および静弾性係数

セメント種類	水結合材比(%)	圧縮強度 (N/mm ²)					静弾性係数 (kN/mm ²)				
		材齢					材齢				
		28日	91日	1年	5年	10年	28日	91日	1年	5年	10年
NC	40	52.4	56.7	66.0	75.5	74.4	32.9	36.0	39.5	40.7	44.2
	50	45.7	51.7	54.9	55.2	65.6	33.4	35.4	38.5	38.0	42.0
	60	38.1	42.7	43.4	43.6	52.6	30.7	34.0	36.8	31.5	40.3
MC	40	53.8	66.7	69.7	77.6	81.0	33.2	37.9	40.0	40.4	43.1
	50	44.3	56.8	59.2	65.4	65.0	31.8	35.5	37.1	35.8	39.8
	60	32.6	43.7	44.7	46.6	48.9	29.7	33.3	35.8	32.0	34.8
LC	40	53.2	71.9	79.2	91.0	87.7	33.8	38.5	41.1	40.7	45.6
	50	39.2	55.9	62.5	69.3	64.9	29.6	36.4	38.3	37.8	40.4
	60	31.8	48.4	54.1	54.9	51.8	29.7	34.3	37.9	37.0	40.5
NBB	50	37.8	49.7	54.9	59.1	57.7	30.0	35.4	38.1	39.2	41.5
MBB	50	37.7	52.6	60.8	59.2	64.6	30.7	37.2	41.2	38.3	42.4
LBB	50	33.1	43.7	54.5	63.6	62.2	29.7	35.8	38.0	36.1	41.4
FC	50	28.2	40.2	51.3	61.7	58.9	28.8	32.1	38.4	42.7	41.9
FCN	50	29.6	41.3	49.0	60.4	55.1	28.6	31.6	37.3	34.6	40.4
LP	50	27.7	34.2	38.3	45.4	45.8	31.3	33.7	35.7	39.3	39.8
NBF	50	30.7	41.2	50.1	53.9	57.2	30.3	35.5	38.6	37.6	41.6

1.2 中性化深さ試験の測定結果および中性化速度係数

資料表-1.2.1 中性化深さ試験の測定結果

(mm)

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢5年				材齢10年			
			酒田感潮	久里浜感潮	久里浜海浜	東京屋外	酒田感潮	久里浜感潮	久里浜海浜	東京屋外
NC	40	28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7
	50		0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	1.1	2.2
	60		0.0	0.0	1.8	1.8	0.0	0.0	3.4	5.1
MC	40	91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5
	50		0.0	0.0	1.0	1.2	0.0	0.0	1.8	2.7
	60		0.0	0.0	2.2	2.3	0.0	0.0	3.0	6.3
LC	40	28	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.6	0.6
	50		0.0	0.0	1.3	0.9	0.0	0.0	2.3	2.9
	60		0.0	0.0	3.6	2.3	0.0	0.0	2.8	5.9
NBB	50		0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	3.2	7.3
MBB	50		0.0	0.0	1.3	2.2	0.0	0.0	3.1	7.0
LBB	50		0.0	0.7	1.6	2.5	0.6	0.2	4.3	9.0
FC	50		0.0	0.9	2.6	5.2	1.3	0.6	4.4	7.7
FCN	50		0.0	0.0	2.2	4.6	0.6	0.0	3.8	8.4
LP	50		0.0	0.0	2.1	4.7	0.0	0.0	4.4	6.6
NBF	50		1.6	1.4	6.6	9.8	2.5	2.3	9.7	13.0
NC	50		-	0.0	-	0.4	-	0.0	-	0.8
LC	50		-	0.0	-	0.9	-	0.0	-	3.6
NBB	50		-	0.0	-	1.4	-	0.5	-	4.6
LBB	50		-	0.0	-	2.1	-	0.6	-	7.1
FC	50		-	0.9	-	5.2	-	2.3	-	6.7
NBF	50		-	1.7	-	9.1	-	2.8	-	10.6

資料表-1.2.2 中性化速度係数

セメントの種類	水結合材比(%)	有効水結合材比(%)	前養生(日)	土木学会式による中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)	中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)			
					酒田感潮	久里浜感潮	久里浜海浜	東京屋外
NC	40	40	28	0.03	0.00	0.00	0.06	0.15
	50	50		0.93	0.00	0.00	0.23	0.54
	60	60		1.83	0.00	0.00	0.99	1.34
MC	40	40	91	0.03	0.00	0.00	0.13	0.11
	50	50		0.93	0.00	0.00	0.53	0.75
	60	60		1.83	0.00	0.00	0.96	1.67
LC	40	40	28	0.03	0.00	0.00	0.13	0.22
	50	50		0.93	0.00	0.00	0.68	0.75
	60	60		1.83	0.00	0.00	1.13	1.59
NBB	50	59		1.72	0.00	0.00	0.97	1.84
MBB	50	59		1.72	0.00	0.00	0.85	1.80
LBB	50	59		1.72	0.13	0.15	1.15	2.27
FC	50	71		2.86	0.27	0.26	1.32	2.40
FCN	50	71		2.86	0.13	0.00	1.13	2.46
LP	50	71		2.86	0.00	0.00	1.24	2.09
NBF	50	83		3.93	0.77	0.69	3.03	4.20
NC	50	50		0.93	-	0.00	-	0.23
LC	50	50		0.93	-	0.00	-	0.89
NBB	50	59		1.72	-	0.11	-	1.18
LBB	50	59		1.72	-	0.13	-	1.81
FC	50	71		2.86	-	0.62	-	2.19
NBF	50	83		3.93	-	0.84	-	3.59

注：土木学会式は、14日間水中養生後に屋外暴露した供試体による試験結果※)に基づいている。

※ 土木学会:フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期的研究(最終報告)、コンクリートライブラリー、No.64、pp.37-39、1988年

1.3 塩化物イオン濃度の測定結果および見掛けの拡散係数、表面塩化物イオン濃度

資料表-1.3.1 塩化物イオン濃度（酒田感潮）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	コンクリート換算の塩化物イオン濃度(kg/m ³)							
			材齢 5 年				材齢 10 年			
			5~15 mm	20~30 mm	35~45 mm	50~ mm	5~15 mm	20~30 mm	35~45 mm	50~ mm
NC	40	28	7.44	3.66	2.65	—	12.57	8.86	7.45	4.64
	50		4.82	4.03	3.13	2.63	13.48	11.09	9.89	8.64
	60		5.82	5.04	4.50	3.71	12.97	10.72	10.53	9.23
MC	40	28	4.53	2.93	1.30	2.08	11.04	8.19	6.62	5.63
	50		4.87	3.92	3.14	2.73	13.32	12.56	10.33	9.25
	60		5.15	4.25	3.99	3.49	12.25	12.12	10.10	10.87
LC	40	28	5.11	3.58	2.21	0.66	11.10	8.56	6.80	6.52
	50		4.61	3.98	3.19	2.54	13.76	11.27	10.01	7.83
	60		4.84	3.8	3.61	3.60	12.13	11.36	10.43	8.69
NBB	50	28	7.00	2.4	0.13	—	16.27	11.03	3.85	0.19
MBB			5.96	2.22	0.30	—	14.37	8.68	3.31	0.13
LBB			4.64	0.39	0.04	—	13.51	5.61	1.03	0.83
FC			5.22	1.48	0.06	—	13.58	9.95	3.61	0.19
FCN			6.78	3.96	1.30	—	15.20	9.74	3.18	0.22
LP			7.81	5.51	4.86	3.22	12.44	11.44	9.71	8.16
NBF			2.19	0.04	0.01	—	7.35	0.38	0.17	0.13

資料表-1.3.2 塩化物イオン濃度（久里浜感潮 1/2）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	コンクリート換算の塩化物イオン濃度(kg/m ³)							
			材齢 5 年				材齢 10 年			
			5~15 mm	20~30 mm	35~45 mm	50~ mm	5~15 mm	20~30 mm	35~45 mm	50~ mm
NC	40	28	6.07	3.41	1.57	—	17.31	11.50	8.79	6.20
	50		5.54	3.86	3.45	2.91	17.54	13.65	11.10	9.02
	60		6.37	4.77	4.29	4.33	16.17	13.15	11.65	10.96
MC	40	28	5.34	3.84	2.63	1.50	16.36	12.32	9.63	8.18
	50		7.11	5.28	4.12	3.89	17.58	14.75	13.08	12.26
	60		6.84	6.20	5.25	4.82	17.47	15.81	14.97	14.33
LC	40	28	10.75	6.12	3.72	1.57	12.67	9.16	5.19	6.74
	50		7.31	4.31	3.28	2.92	17.12	14.60	12.97	11.13
	60		9.46	7.40	5.63	6.83	13.99	14.09	13.70	12.74
NBB	50	28	5.10	0.78	0.10	—	13.67	6.03	0.59	0.15
MBB			6.39	2.07	0.03	—	14.78	7.90	1.94	0.16
LBB			8.31	1.88	0.15	—	13.96	5.76	0.47	0.16
FC			9.21	2.91	0.37	—	11.48	5.67	0.36	0.16
FCN			6.90	4.54	0.53	—	12.44	10.23	5.29	0.26
LP			6.27	4.59	3.89	3.57	17.53	16.53	14.39	12.51
NBF			2.19	0.02	0.02	—	8.01	0.54	0.06	0.13

資料表-1.3.2 塩化物イオン濃度（久里浜感潮 2/2）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	コンクリート換算の塩化物イオン濃度(kg/m ³)							
			材齢5年				材齢10年			
			5~15mm	20~30mm	35~45mm	50~mm	5~15mm	20~30mm	35~45mm	50~mm
NC	50	91	4.38	3.50	2.70	2.34	12.00	10.30	8.49	7.45
LC			6.61	4.95	3.78	3.02	14.35	11.13	9.31	7.56
NBB			7.41	2.18	0.15	—	16.50	12.83	6.92	0.56
LBB			5.36	0.87	0.05	—	10.39	4.87	0.02	0.00
FC			4.20	0.97	0.09	—	9.83	5.02	0.00	0.00
NBF			1.18	0.06	0.04	—	4.92	0.00	0.00	0.00

資料表-1.3.3 塩化物イオン濃度（久里浜海浜）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	コンクリート換算の塩化物イオン濃度(kg/m ³)								
			材齢5年				材齢10年				
			5~15mm	20~30mm	35~45mm	50~mm	5~15mm	20~30mm	35~45mm	50~mm	
NC	40	28	0.09	0.03	0.03	—	1.61	0.05	0.03	0.04	
			0.44	0.05	0.04	—	2.89	0.61	0.14	0.03	
			0.54	0.11	0.04	—	2.58	1.57	0.54	0.18	
MC	50		0.28	0.05	0.08	—	3.24	0.68	0.05	0.03	
			0.89	0.18	0.08	—	2.71	0.39	0.04	0.02	
			0.48	0.16	0.08	—	2.35	1.64	0.95	0.30	
LC	60		0.28	0.05	0.03	—	2.31	0.05	0.04	0.04	
			0.08	0.00	0.00	—	2.15	0.13	0.04	0.03	
			0.26	0.04	0.03	—	2.57	1.28	0.41	0.08	
NBB	50	28	0.18	0.05	0.04	—	0.96	0.16	0.05	0.05	
MBB			0.07	0.00	0.00	—	0.82	0.19	0.04	0.05	
LBB			0.06	0.01	0.01	—	0.71	0.05	0.04	0.04	
FC			0.44	0.07	0.04	—	3.23	0.15	0.06	0.13	
FCN			1.23	0.02	0.02	—	3.32	0.17	0.05	0.10	
LP			0.86	0.41	0.29	—	3.44	1.41	0.41	0.21	
NBF			0.36	0.05	0.05	—	3.75	0.18	0.11	0.05	

資料表-1.3.4 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度
(酒田感潮)

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢5年			
			見掛けの拡散係数(cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度(kg/m ³)	鉄筋位置付近の推定塩化物イオン濃度(kg/m ³)	
					かぶり5cm	かぶり7cm
NC	40	28	0.785	9.25	1.261	0.512
	50		2.093	5.32	2.869	2.451
	60		2.603	6.29	4.056	3.669
MC	40	28	1.388	4.90	1.686	1.196
	50		2.149	5.27	2.91	2.507
	60		2.823	5.38	3.673	3.376
LC	40	28	1.017	6.39	1.396	0.773
	50		2.170	5.13	2.857	2.469
	60		3.164	4.84	3.551	3.326
NBB	50	28	0.318	11.34	0.101	0.004
MBB			0.355	9.31	0.131	0.009
LBB			0.129	11.37	0.000	0.001
FC			0.272	8.9	0.038	0.001
FCN			0.637	9.19	0.792	0.23
LP			1.729	8.6	3.836	3.054
NBF			0.074	8.32	0.000	0.002

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢10年			
			見掛けの拡散係数(cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度(kg/m ³)	鉄筋位置付近の推定塩化物イオン濃度(kg/m ³)	
					かぶり5cm	かぶり7cm
NC	40	28	0.798	14.09	5.748	4.408
	50		1.290	14.27	9.139	8.251
	60		1.529	13.45	9.664	9.005
MC	40	28	0.977	11.87	5.999	5.010
	50		1.400	14.54	9.874	9.063
	60		2.094	12.70	10.697	10.348
LC	40	28	1.101	11.73	6.615	5.740
	50		1.171	14.77	8.773	7.742
	60		1.517	13.25	9.474	8.817
NBB	50	28	0.377	21.07	2.644	1.014
MBB			0.321	20.05	1.760	0.519
LBB			0.207	19.95	0.497	0.052
FC			0.390	18.17	2.444	0.985
FCN			0.321	21.45	1.883	0.555
LP			1.312	13.75	8.916	8.079
NBF			0.119	11.55	0.023	0.000

資料表-1.3.5 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度
(久里浜感潮 1/2)

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢5年			
			見掛けの拡散係数(cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度(kg/m ³)	鉄筋位置付近の推定塩化物イオン濃度(kg/m ³)	
					かぶり5cm	かぶり7cm
NC	40	28	0.701	7.96	0.854	0.293
	50		2.045	5.81	3.067	2.601
	60		2.693	6.42	4.243	3.865
MC	40	28	1.306	6.28	1.994	1.359
	50		2.032	7.54	3.956	3.349
	60		2.862	7.32	5.044	4.648
LC	40	28	0.884	13.21	2.262	1.074
	50		1.469	7.82	2.891	2.121
	60		2.706	9.51	6.306	5.750
NBB	50	28	0.178	10.44	0.003	0.001
MBB			0.129	11.37	0.073	0.003
LBB			0.232	15.10	0.027	0.001
FC			0.306	15.07	0.113	0.004
FCN			0.581	9.80	0.672	0.164
LP			2.166	6.56	3.647	3.150
NBF			0.067	9.25	0.000	0.002
NC	50	91	2.025	4.79	2.505	2.118
LC			1.768	7.29	3.33	2.676
NBB			0.282	12.49	0.064	0.002
LBB			0.185	10.78	0.004	0.001
FC			0.236	7.58	0.015	0.000
NBF			0.058	5.84	0.000	0.001

資料表-1.3.5 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度
(久里浜感潮 2/2)

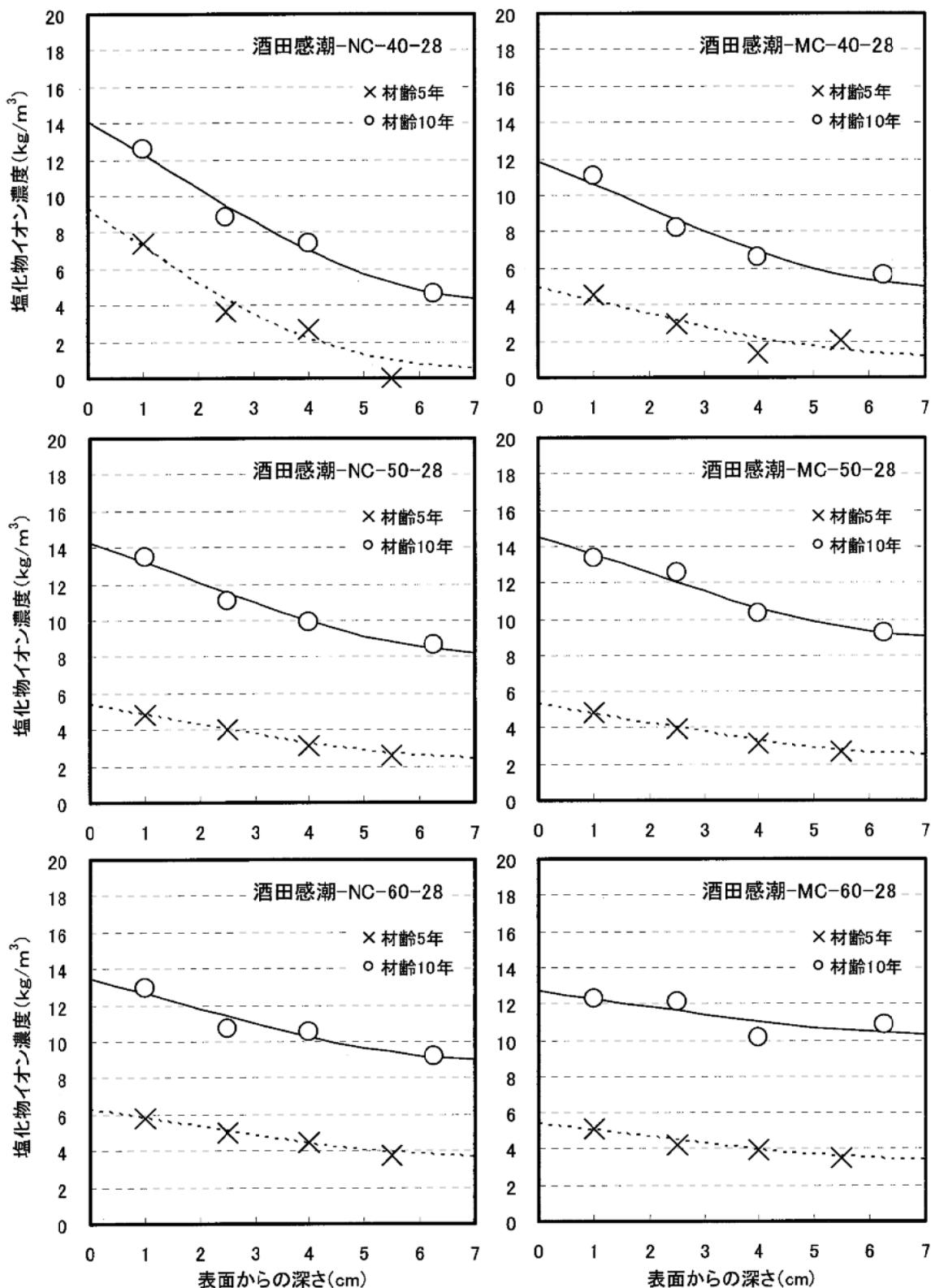
セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢 10 年			
			見掛けの拡散係数(cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度(kg/m ³)	鉄筋位置付近の推定塩化物イオン濃度(kg/m ³)	
					かぶり5cm	かぶり7cm
NC	40	28	0.716	19.65	7.035	5.085
	50		1.000	19.13	9.888	8.326
	60		1.382	16.67	11.216	10.269
MC	40	28	0.968	17.57	8.801	7.326
	50		1.420	18.35	12.576	11.572
	60		1.922	17.95	14.575	13.986
LC	40	28	0.550	15.51	6.106	4.907
	50		1.314	18.35	11.913	10.798
	60		2.615	14.55	13.205	12.971
NBB	50	28	0.208	20.25	0.513	0.055
MBB			0.284	19.87	1.285	0.298
LBB			0.201	20.57	0.462	0.045
FC			0.214	17.35	0.484	0.056
FCN			0.483	16.27	3.260	1.711
LP			1.492	19.03	13.468	12.500
NBF			0.119	12.65	0.025	0.000
NC	50	91	1.207	13.05	7.942	7.061
LC			1.022	15.65	8.254	7.001
NBB			0.482	21.17	4.227	2.214
LBB			0.205	15.56	0.375	0.038
FC			0.212	14.85	0.401	0.045
NBF			0.111	7.65	0.010	0.000

資料表-1.3.6 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度
(久里浜海浜)

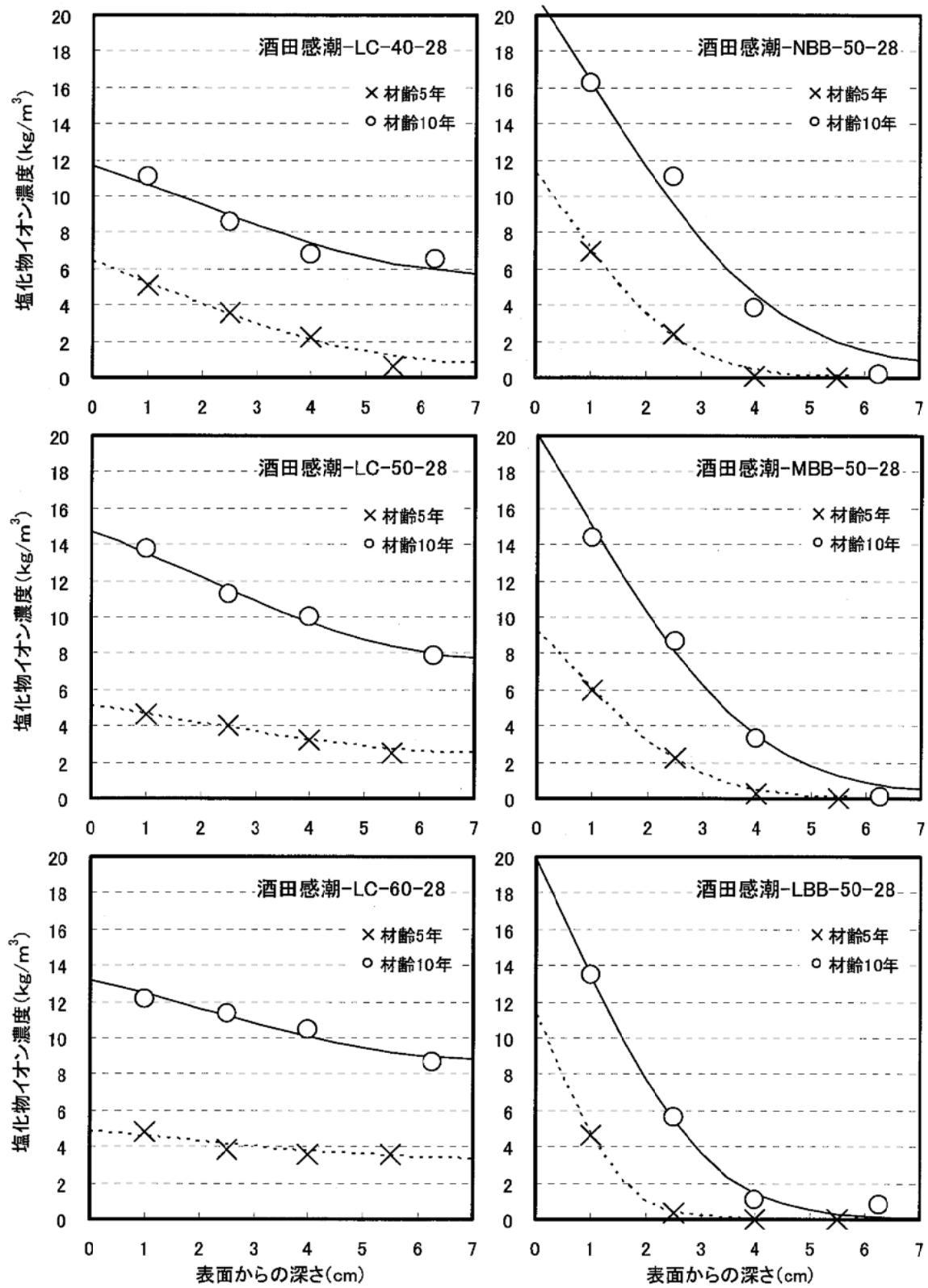
セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢 5 年			
			見掛けの拡散係数(cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度(kg/m ³)	鉄筋位置付近の推定塩化物イオン濃度(kg/m ³)	
					かぶり5cm	かぶり7cm
NC	40	28	0.446	0.13	0.004	0.001
	50		0.156	0.96	0.000	0.000
	60		0.230	0.98	0.002	0.000
MC	40	28	0.276	0.47	0.002	0.000
	50		0.223	1.64	0.002	0.000
	60		0.392	0.71	0.015	0.001
LC	40	28	0.211	0.53	0.001	0.000
	50		0.052	0.43	0.000	0.000
	60		0.180	0.54	0.000	0.000
NBB	50	28	0.375	0.26	0.005	0.000
MBB			0.061	0.35	0.000	0.000
LBB			0.262	0.11	0.000	0.000
FC			0.197	0.86	0.001	0.000
FCN			0.078	4.45	0.000	0.001
LP			0.734	1.09	0.129	0.048
NBF			0.181	0.72	0.000	0.000

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢 10 年			
			見掛けの拡散係数(cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度(kg/m ³)	鉄筋位置付近の推定塩化物イオン濃度(kg/m ³)	
					かぶり5cm	かぶり7cm
NC	40	28	0.117	2.47	0.004	0.000
	50		0.166	4.07	0.044	0.002
	60		0.329	3.55	0.330	0.102
MC	40	28	0.164	4.47	0.046	0.002
	50		0.134	4.25	0.017	0.000
	60		0.492	2.96	0.611	0.327
LC	40	28	0.115	3.55	0.006	0.000
	50		0.121	3.35	0.007	0.000
	60		0.272	3.56	0.205	0.043
NBB	50	28	0.152	1.37	0.010	0.000
MBB			0.165	1.17	0.012	0.001
LBB			0.125	1.09	0.003	0.000
FC			0.116	5.05	0.009	0.000
FCN			0.116	5.25	0.009	0.000
LP			0.217	5.05	0.147	0.018
NBF			0.120	5.85	0.012	0.000

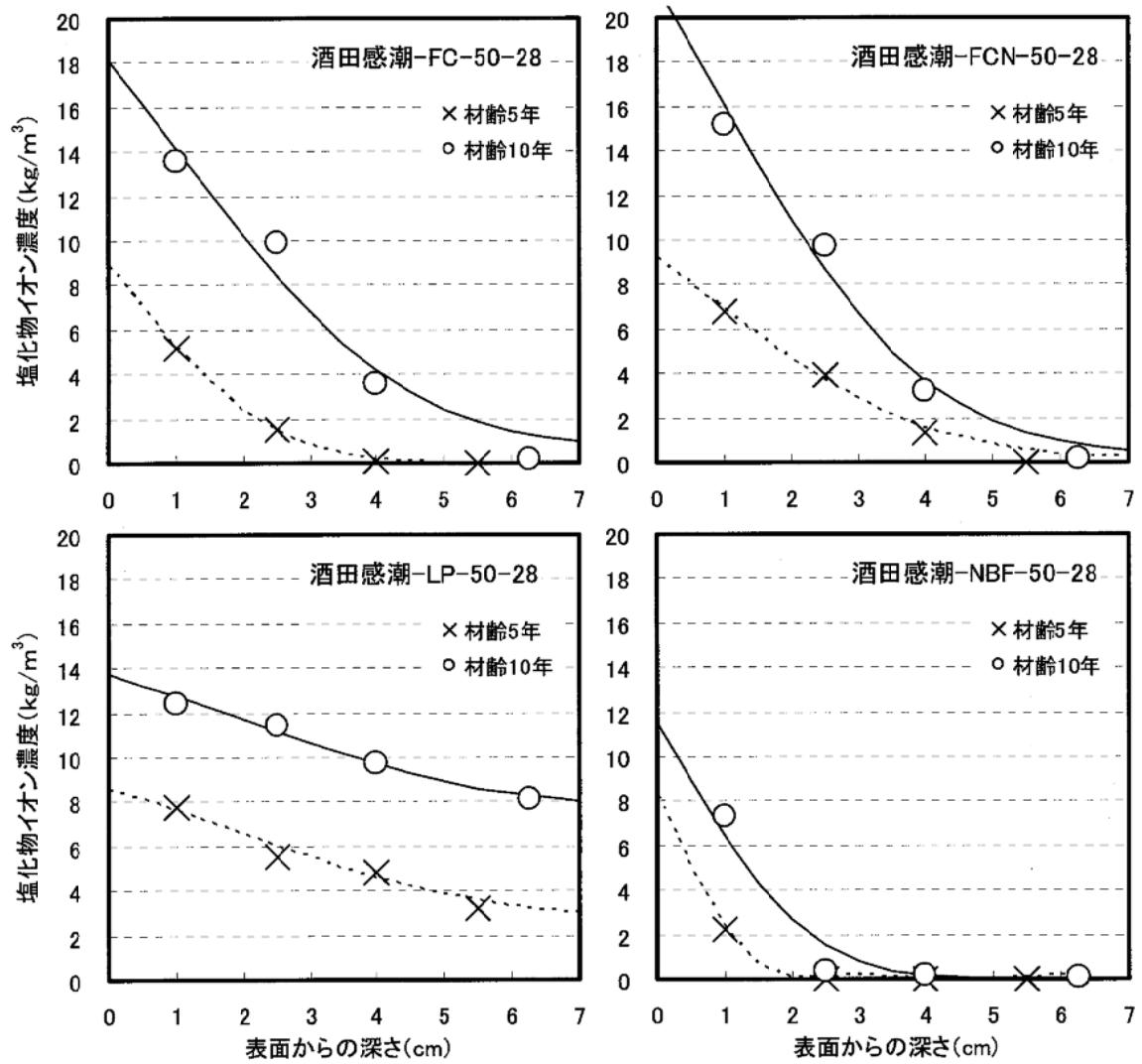
1.4 塩化物イオン濃度と回帰曲線

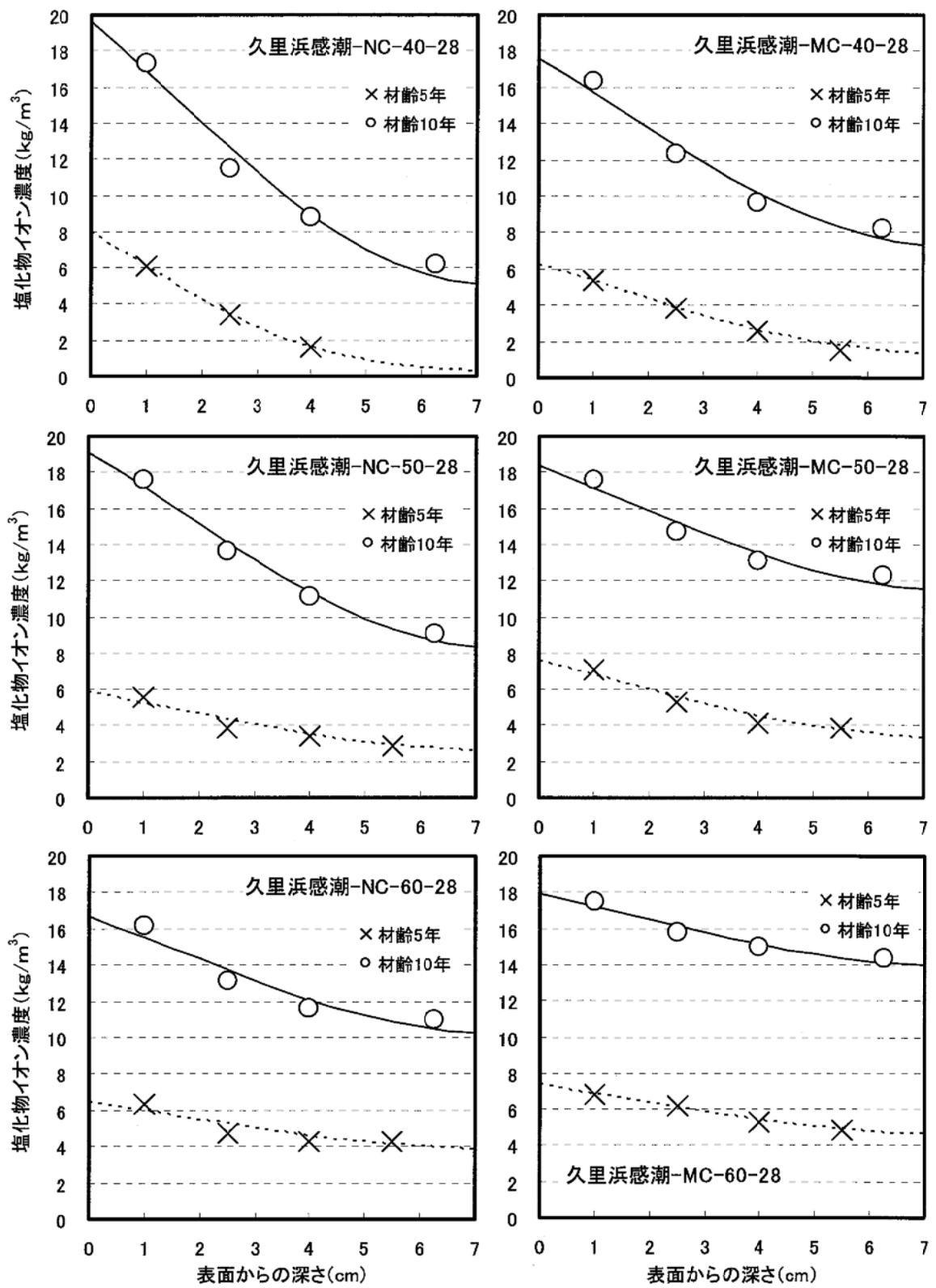


資料図-1.4.1 材齢 5 年および 10 年における塩化物イオン濃度と回帰曲線
(酒田感潮 1/3)

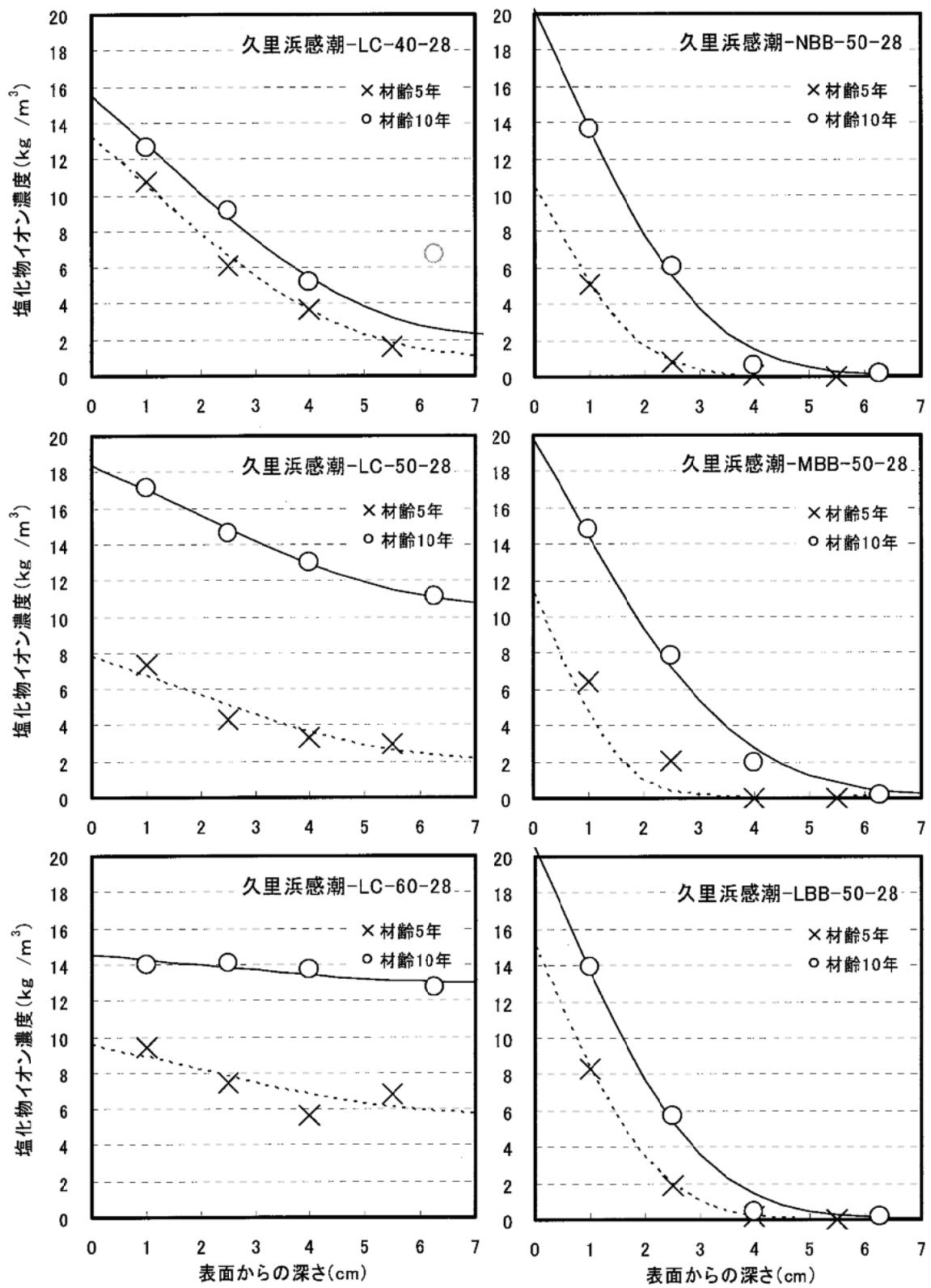


資料図-1.4.1 材齢 5 年および 10 年における塩化物イオン濃度と回帰曲線
(酒田感潮 2/3)

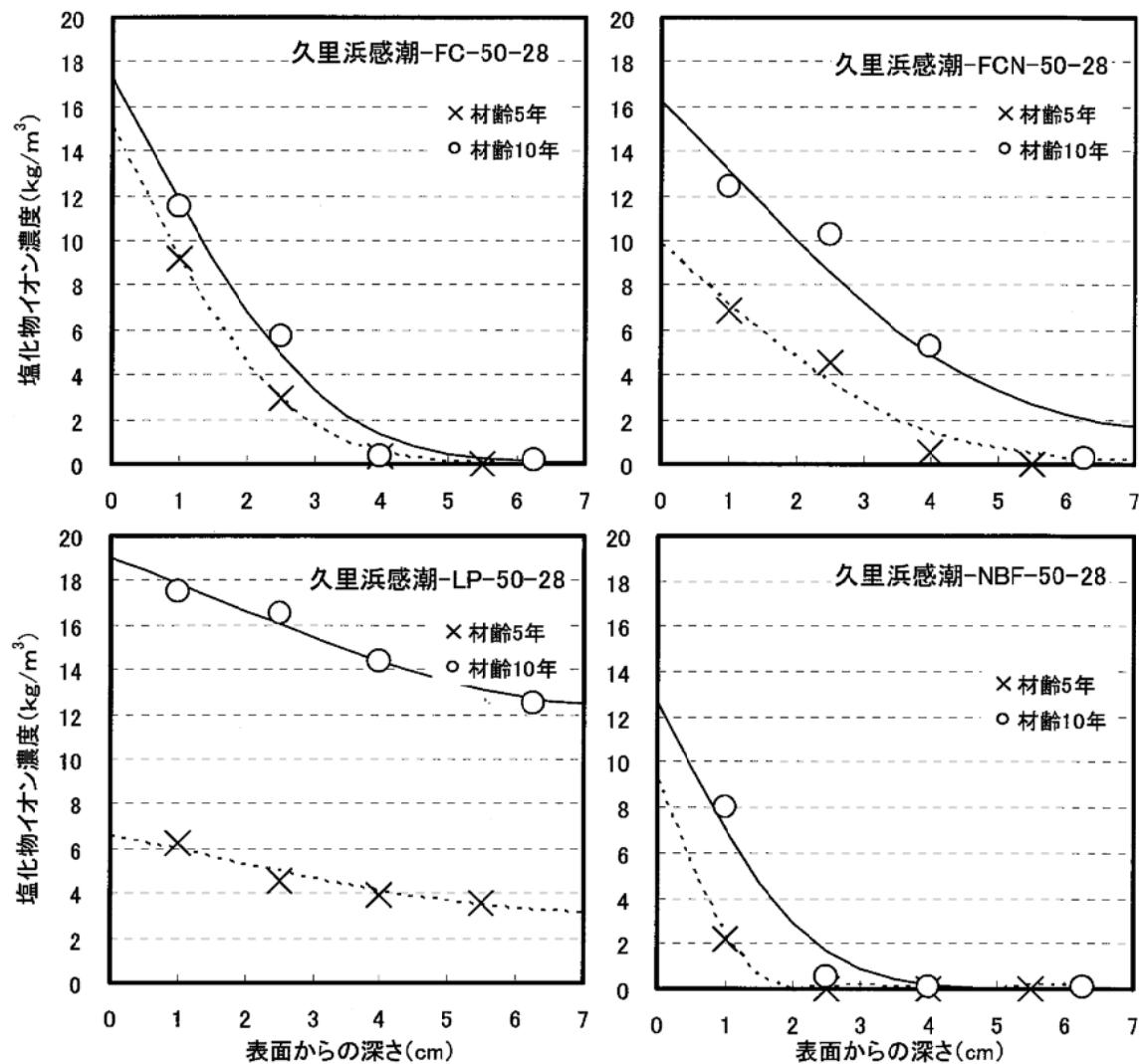




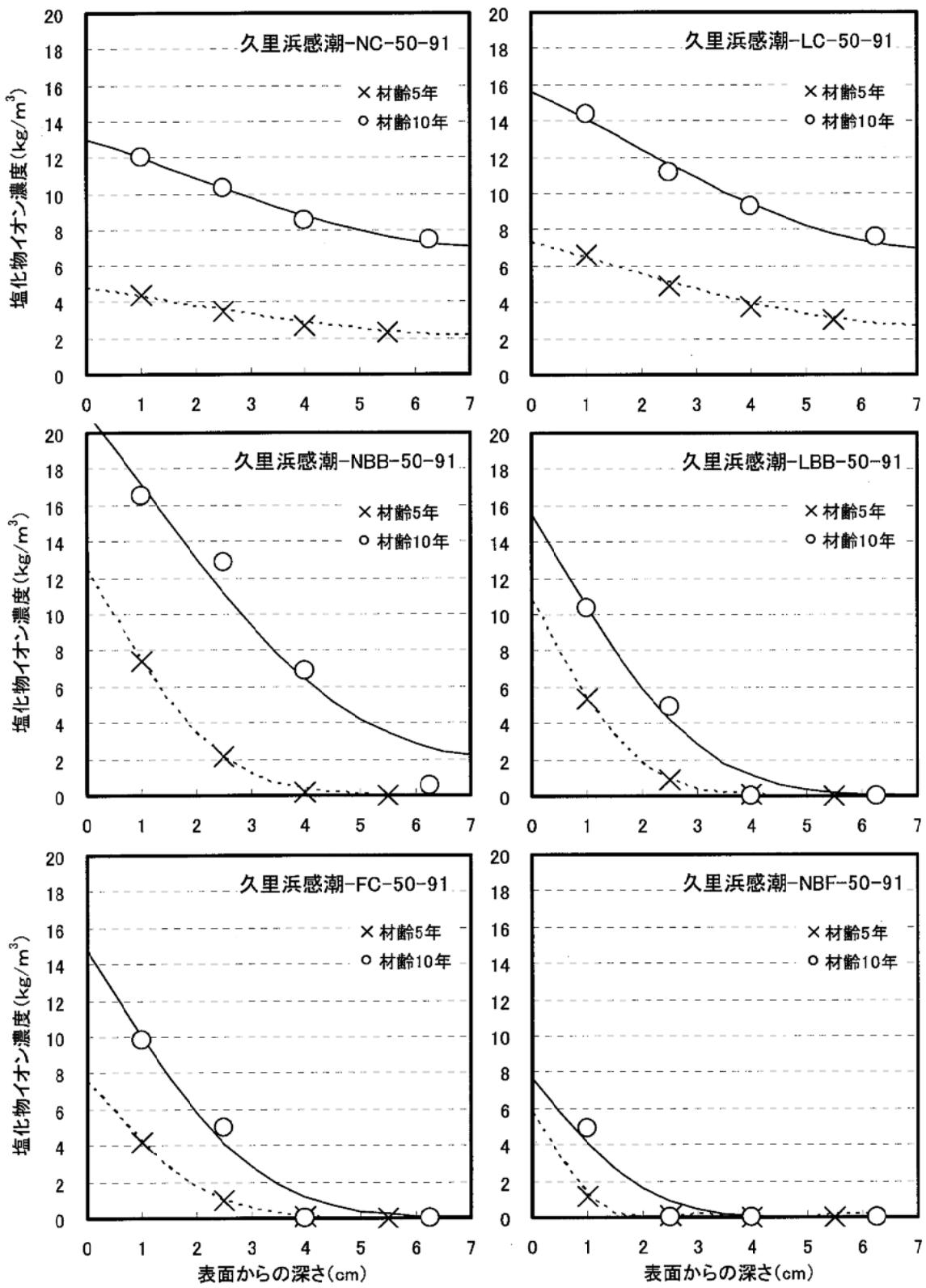
資料図-1.4.2 材齢5年および10年における塩化物イオン濃度と回帰曲線
(久里浜感潮 1/4)



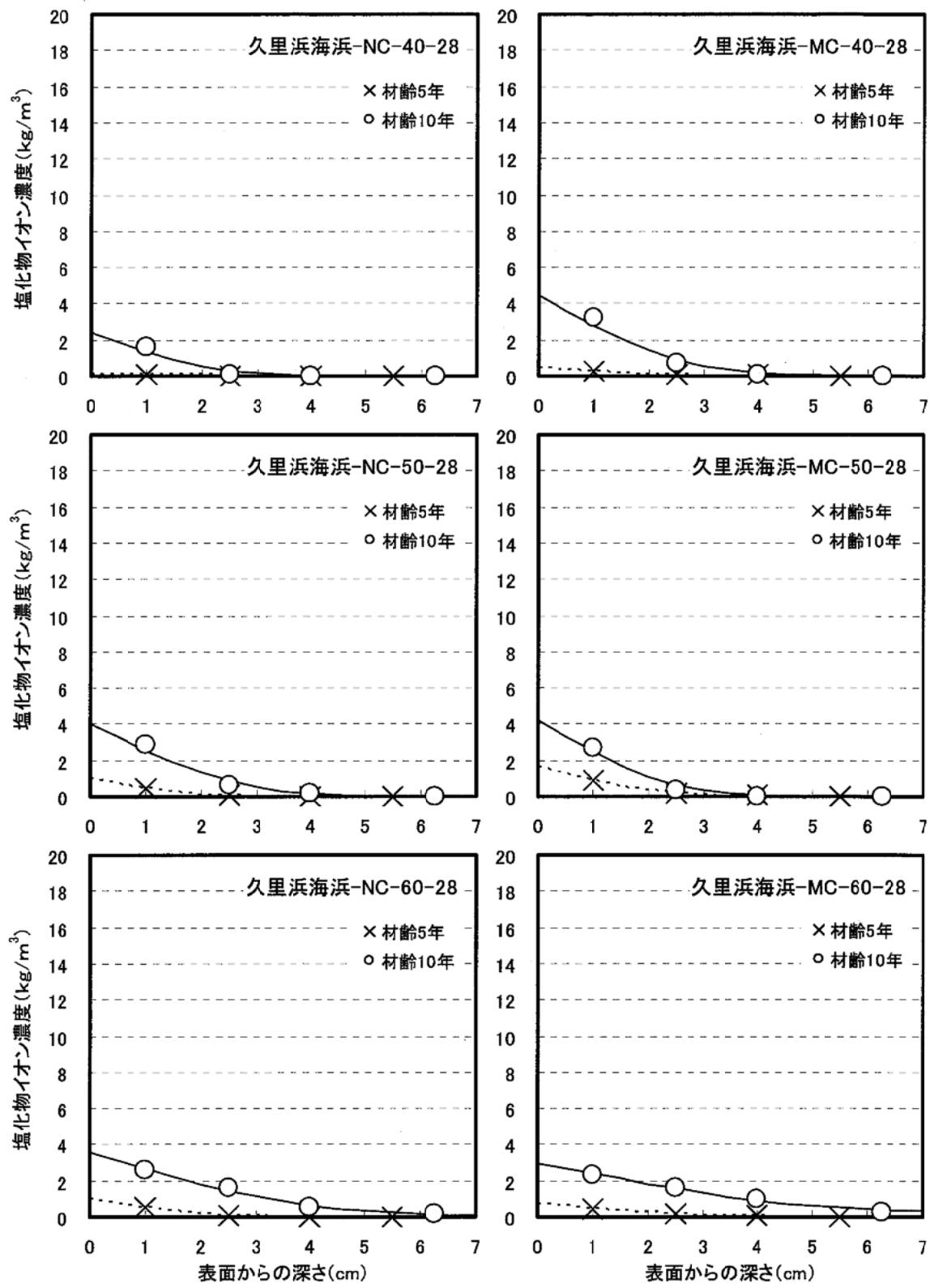
資料図-1.4.2 材齢 5 年および 10 年における塩化物イオン濃度と回帰曲線
(久里浜感潮 2/4)



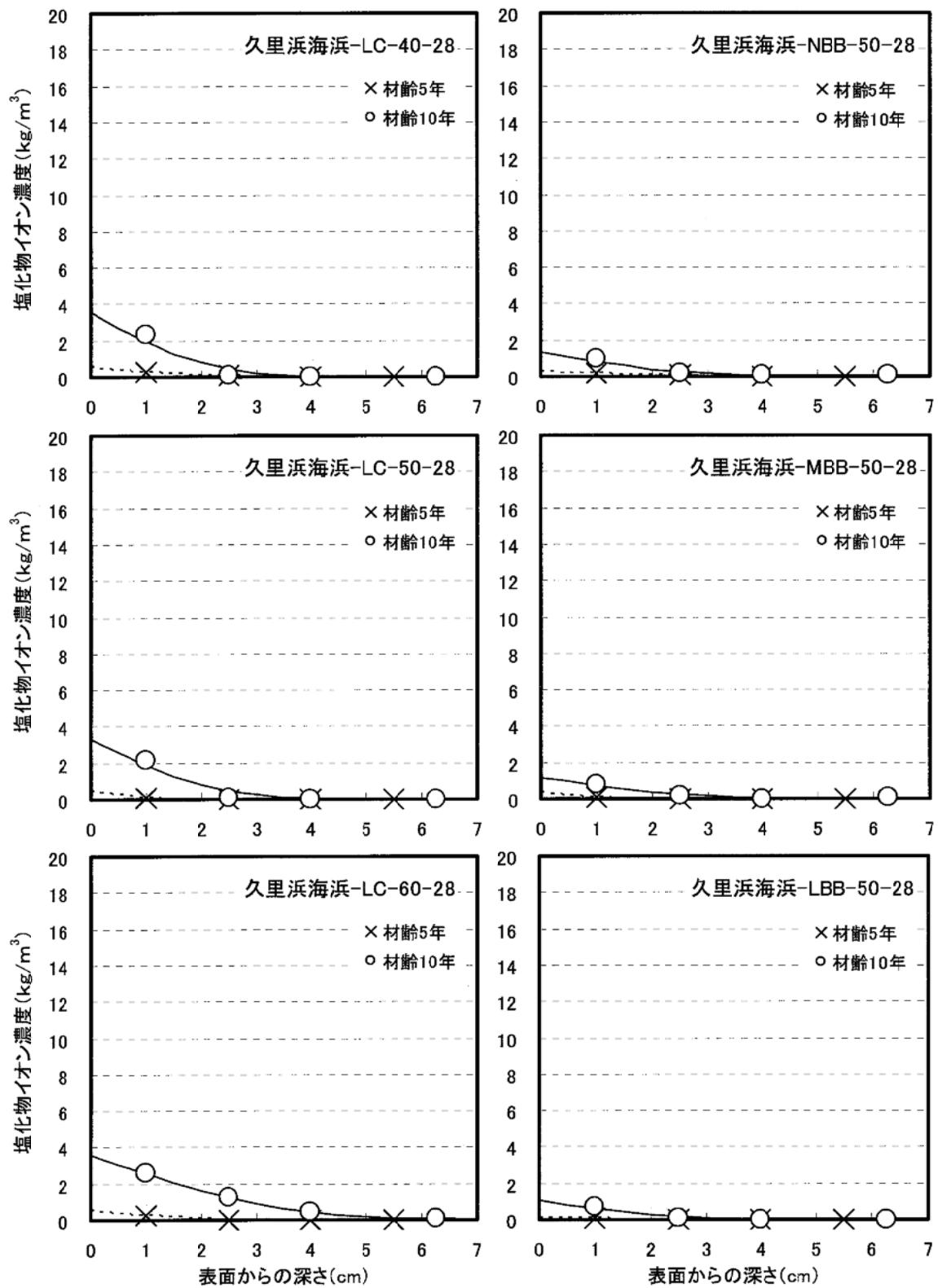
資料図-1.4.2 材齢 5 年および 10 年における塩化物イオン濃度と回帰曲線
(久里浜感潮 3/4)



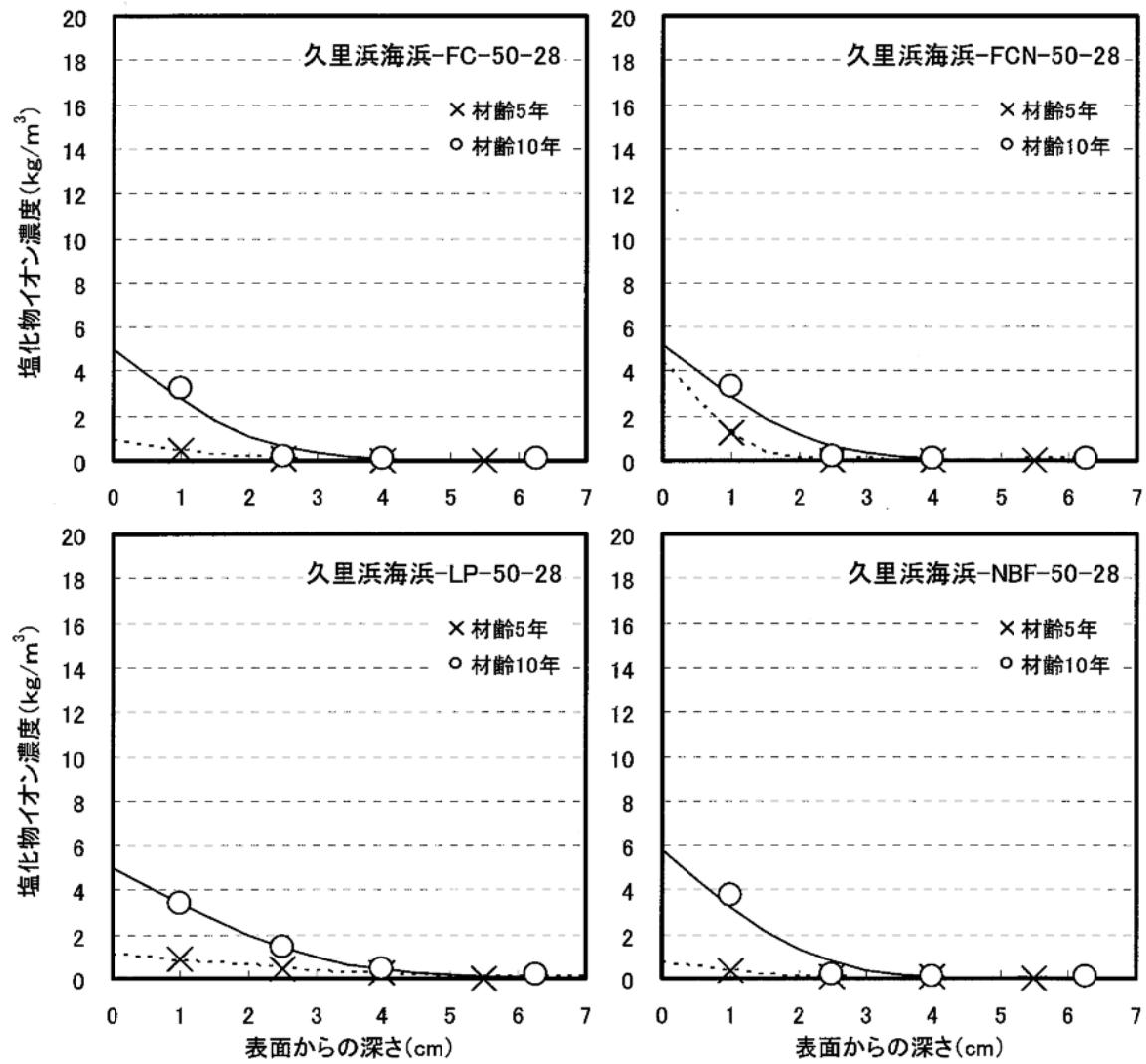
資料図-1.4.2 材齢5年および10年における塩化物イオン濃度と回帰曲線
(久里浜感潮 4/4)



資料図-1.4.3 材齢 5 年および 10 年における塩化物イオン濃度と回帰曲線
(久里浜海浜 1/3)



資料図-1.4.3 材齢5年および10年における塩化物イオン濃度と回帰曲線
(久里浜海浜 2/3)



資料図-1.4.3 材齢 5 年および 10 年における塩化物イオン濃度と回帰曲線
(久里浜海浜 3/3)

1.5 X線回折試験の測定結果

セメントの水和反応により生成した結晶の相対強度はセメントペーストベースに換算を行なつた。また、回折強度はピーク高さを用いた。

<計算例>

$$\text{標準物質 (ZnO) の回折強度 (cps)} = 1139$$

$$\text{各結晶相の回折強度 (cps)} = 501 \quad (\text{例: ポルトランダイト})$$

$$\begin{aligned} \text{換算前の相対強度} &= \frac{\text{各結晶相の回折強度 (cps)}}{\text{標準物質の回折強度 (cps)}} \\ &= \frac{501}{1139} \\ &= 0.440 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{セメントペーストの相対強度} &= \frac{\text{換算前の相対強度}}{1 - \text{細骨材量(%)}/100} \\ &= \frac{0.440}{1 - 0.6513} \\ &= 1.262 \end{aligned}$$

資料表-1.5.1 X線回折試験結果（暴露開始前）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	各結晶相の相対強度				
			エトリンガイト	モノサルファート	フリーデル氏塩	ポルトランドサイト	カルサイト
NC	40	28	*	*	*	0.759	0.541
	50		0.161	*	*	1.217	0.502
	60		0.140	*	*	1.183	0.624
MC	40	28	*	*	*	0.869	0.522
	50		*	*	*	0.819	0.542
	60		*	*	*	1.083	0.396
LC	40	50	0.136	*	*	0.972	0.317
	50		*	*	*	1.162	0.557
	60		*	*	*	1.173	0.583
NBB		50	0.131	0.142	0.101	0.574	0.630
MBB			*	*	*	0.495	0.535
LBB			*	0.117	*	0.420	0.470
FC			0.119	*	*	0.960	0.499
FCN			*	*	*	0.870	0.449
LP			0.100	*	*	1.137	1.924
NBF			0.110	*	*	0.430	0.535
NC			*	*	*	1.069	0.526
LC			0.149	*	*	0.837	0.920
NBB			*	0.155	*	0.524	0.552
LBB		91	*	*	*	0.450	0.549
FC			*	0.139	0.107	0.750	0.582
NBF			0.148	*	*	0.440	0.538

* : ピークとして認められなかつたことを示す（相対強度が 0.1 未満）

資料表-1.5.2 X線回折試験結果（酒田感潮）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢5年									
			表面からの深さ：5~15mm					表面からの深さ：50mm以上				
			エトリ ンガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト	エトリ ンガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト
NC	40	28	0.306	0.123	0.902	1.324	0.685	0.273	0.121	0.273	1.702	0.557
	50		0.340	0.162	0.832	0.812	0.738	0.327	0.149	0.901	0.997	0.531
	60		0.265	0.189	1.490	0.923	0.749	0.324	0.159	1.640	1.038	0.693
MC	40	28	0.362	0.230	0.433	1.221	1.144	0.349	0.219	0.251	1.237	1.150
	50		0.412	0.313	0.725	1.232	1.216	0.412	0.267	0.504	0.970	2.323
	60		0.422	0.261	0.246	1.207	1.623	0.398	0.289	0.264	1.131	1.182
LC	40	28	0.230	*	0.269	1.421	0.251	0.257	*	*	1.100	0.581
	50		*	*	0.348	1.612	0.372	0.243	*	0.243	0.968	0.744
	60		*	*	0.404	0.903	0.371	0.258	*	0.511	0.900	0.714
NBB	50	28	0.104	*	0.260	*	0.964	*	*	*	0.115	0.753
MBB			0.107	*	0.268	*	0.992	*	*	*	*	0.678
LBB			*	*	0.166	*	0.670	*	*	*	*	0.534
FC			0.126	0.126	0.233	0.197	1.773	0.137	0.151	0.167	0.271	1.293
FCN			0.227	0.140	0.707	0.173	0.446	0.216	0.194	0.217	0.352	0.531
LP			*	*	0.145	0.242	2.229	*	*	*	*	2.529
NBF			0.175	*	0.202	*	1.194	0.180	*	*	*	0.505
セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢10年									
			表面からの深さ：5~15mm					表面からの深さ：50mm以上				
			エトリ ンガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト	エトリ ンガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト
NC	40	28	0.199	*	1.932	3.289	0.707	0.383	*	0.574	3.218	0.771
	50		0.213	*	2.336	2.829	0.848	0.392	*	2.821	2.241	1.213
	60		0.183	*	2.422	1.753	1.104	0.269	*	3.514	1.466	1.190
MC	40	28	0.198	*	0.593	3.150	0.454	0.269	*	0.438	3.267	0.788
	50		0.208	*	0.930	2.289	0.587	0.246	*	0.973	1.241	1.022
	60		0.135	*	0.625	0.514	0.689	0.135	*	0.941	0.136	0.909
LC	40	28	0.193	*	0.334	1.975	1.019	0.358	*	0.220	2.299	1.327
	50		0.228	*	0.643	1.408	0.496	0.233	*	0.511	0.875	0.843
	60		*	*	0.212	0.049	1.067	*	*	0.285	*	0.986
NBB	50	28	*	*	0.457	0.010	0.886	*	*	*	0.407	1.314
MBB			*	*	0.342	0.015	1.116	*	*	*	0.401	1.612
LBB			*	*	0.295	0.036	0.848	*	*	*	0.161	0.857
FC			*	*	0.279	0.012	1.429	*	*	*	0.217	1.170
FCN			*	*	0.386	0.049	1.211	*	*	*	0.190	0.941
LP			*	*	0.389	0.171	2.896	*	*	0.907	0.318	2.851
NBF			*	*	0.153	*	1.096	*	*	*	*	1.375

*: ピークとして認められなかったことを示す（相対強度が0.1未満）

資料表-1.5.3 X線回折試験結果（久里浜感潮 1/2）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢 5 年									
			表面からの深さ : 5~15mm					表面からの深さ : 50mm 以上				
			エトリンガイ ト	モノサルフェ ート	フリーデル氏 塩	ポルトランダ イト	カルサ イト	エトリンガイ ト	モノサルフェ ート	フリーデル氏 塩	ポルトランダ イト	
NC	40	28	*	*	0.532	1.098	0.553	*	*	*	1.273	0.550
			*	*	0.856	0.942	0.840	*	*	0.830	1.010	0.545
			*	*	1.156	0.799	0.676	0.106	*	0.832	0.799	0.525
MC	40	28	*	*	0.125	0.731	0.271	*	*	*	0.654	0.287
			*	*	0.202	0.337	0.226	*	*	0.210	0.544	0.237
			*	*	0.492	0.198	0.195	*	*	0.176	0.125	0.529
LC	50	28	0.387	*	0.342	0.752	0.774	0.364	*	*	1.253	0.683
			0.164	*	0.175	*	0.571		*	*	0.105	0.547
			0.365	*	0.517	0.219	0.578	0.395	*	0.456	0.228	0.669
NBB	50	91	0.143	*	1.049	0.211	0.255	*	0.310	*	0.701	0.458
MBB			*	*	0.284	*	0.169	*	*	*	0.169	0.231
LBB			0.322	*	0.536	0.185	0.563	0.295	*	0.322	0.217	0.563
FC			0.301	*	0.521	0.200	0.986	*	*	*	0.247	0.466
FCN			*	*	0.554	*	0.408	*	*	*	0.291	0.321
LP			*	*	0.526	0.184	3.000	*	*	0.447	0.263	3.184
NBF			*	*	*	*	0.511	0.137	*	*	0.128	0.404
NC	91	91	*	*	0.681	0.785	0.864	*	*	0.366	0.969	0.785
LC			0.350	*	0.431	0.512	0.620	0.350	*	0.350	0.647	0.647
NBB			0.107	*	0.878	*	0.545	*	0.245	0.159	0.432	0.510
LBB			0.295	0.169	0.574	0.145	0.491	0.196	0.177	0.308	0.228	0.619
FC			0.332	0.247	0.532	0.192	1.518	0.266	0.301	0.227	0.387	0.942
NBF			*	*	*	*	0.464	*	*	*	*	0.191

* : ピークとして認められなかったことを示す（相対強度が 0.1 未満）

資料表-1.5.3 X線回折試験結果（久里浜感潮 2/2）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢 10 年									
			表面からの深さ : 5~15mm					表面からの深さ : 50mm 以上				
			エトリンガイ ト	モノサルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト	エトリンガイ ト	モノサルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト
NC	40	28	0.147	*	0.936	1.085	0.366	0.189	*	0.482	1.632	0.227
	50		0.109	*	1.203	0.648	0.355	0.144	*	0.914	1.300	0.167
	60		0.129	*	1.586	0.255	0.227	0.128	*	1.732	0.511	0.233
MC	40	50	0.129	*	0.500	1.215	0.246	0.166	*	0.262	1.346	0.264
	50		0.115	*	0.621	0.266	0.163	0.178	*	0.670	0.558	0.192
	60		*	*	0.747	*	0.160	0.162	*	0.640	*	0.131
LC	40	91	0.130	*	0.217	0.872	0.275	0.175	*	0.129	0.854	0.245
	50		0.116	*	0.507	0.100	0.144	0.150	*	0.425	0.335	0.166
	60		*	*	0.131	*	0.543	*	*	0.236	*	0.315
NBB	50	91	*	*	0.335	*	0.274	*	*	*	0.181	0.359
MBB			*	*	0.297	*	0.257	*	*	*	0.256	0.370
LBB			*	*	0.243	*	0.343	0.075	*	*	0.105	0.275
FC			*	*	0.140	*	0.332	0.100	*	*	*	0.297
FCN			*	*	0.168	*	0.591	*	*	*	*	0.465
LP			*	*	0.201	*	1.477	*	*	0.475	*	1.890
NBF			0.105	*	0.116	*	0.297	*	*	*	*	0.395
NC			0.146	*	1.294	0.773	0.951	0.189	*	0.805	0.771	0.582
LC			0.142	*	0.418	*	0.593	0.155	*	0.306	0.362	0.447
NBB			0.214	*	1.129	*	0.689	*	*	0.134	0.513	0.385
LBB			0.191	*	0.815	*	0.553	0.102	*	0.114	0.250	0.613
FC			0.168	*	0.637	*	0.650	*	*	*	0.168	0.334
NBF			0.196	*	0.209	*	0.662	*	*	*	*	0.496

* : ピークとして認められなかったことを示す（相対強度が 0.1 未満）

資料表-1.5.4 X線回折試験結果（久里浜海浜）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢5年									
			表面からの深さ：5~15mm					表面からの深さ：50mm以上				
			エトリンガイ ト	モノサル フェート	フリー デル氏塩	ポルトラ ンダイト	カルサイ ト	エトリン ガイ ト	モノサル フェート	フリー デル氏塩	ポルトラ ンダイト	カルサイ ト
NC	40	28	*	*	*	0.340	0.369	*	*	0.145	0.407	0.490
	50		0.105	*	*	1.283	0.707	*	*	*	1.440	0.864
	60		0.257	*	0.372	3.463	0.513	0.245	*	*	1.826	0.861
	40		0.198	0.196	0.153	1.105	0.349	0.182	0.139	0.125	1.620	0.294
	50		*	*	*	0.809	0.674	*	*	*	0.889	0.674
	60		*	*	*	1.046	0.547	*	*	*	0.839	0.456
	40		*	*	*	0.638	0.820	*	*	*	0.866	0.615
	50		0.186	0.167	0.151	0.879	0.612	0.229	0.181	0.159	0.819	0.833
	60		0.112	*	*	1.304	0.544	*	*	*	1.082	0.626
NBB	50	50	*	*	*	0.180	0.141	*	*	*	0.297	0.229
MBB			0.362	0.319	0.292	0.504	1.397	0.445	0.383	0.367	0.534	1.716
LBB			0.241	0.129		0.290	0.767	0.198	0.247	*	0.180	0.587
FC			0.230	0.195	0.173	0.329	0.438	0.211	0.222	0.148	0.501	0.334
FCN			*	*	0.156	0.459	0.684	*	0.168	*	0.577	0.515
LP			0.342	*	0.289	0.632	2.579	*	*	0.237	0.737	2.500
NBF			*	*	*	*	0.738	*	*	*	*	0.738
セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢10年									
			表面からの深さ：5~15mm					表面からの深さ：50mm以上				
			エトリンガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト	エトリン ガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト
			0.115	*	0.138	1.360	0.267	*	*	*	1.442	0.231
			0.114	*	0.339	0.910	0.298	0.126	*	*	1.158	0.315
			0.145	*	0.394	0.678	0.643	0.107	*	*	0.812	0.423
			0.167	*	0.097	1.816	0.730	0.119	*	*	1.657	0.296
			0.214	*	0.145	1.722	0.279	0.161	*	*	1.710	0.466
			0.283	*	0.158	0.725	0.607	0.273	*	*	0.822	0.488
			0.174	*	*	1.249	0.385	0.144	*	*	1.253	0.219
			0.218	*	*	1.648	0.265	0.122	*	*	0.753	0.252
			0.172	*	*	0.400	0.650	0.148	*	*	0.790	2.017
			0.101	*	0.116	0.177	0.550	0.113	*	0.156	0.568	0.413
			0.116	*	0.114	0.102	0.657	*	*	0.133	0.460	0.277
			0.131	*	0.117	*	0.360	*	*	0.118	0.205	0.315
			*	*	0.133	*	0.551	*	*	*	0.453	0.306
			*	*	0.184	*	0.444	*	*	*	0.501	0.327
			0.110	*	0.347	0.250	2.270	*	*	*	0.747	2.723
			0.108	*	0.100	*	0.651	*	*	*	*	0.306

*: ピークとして認められなかったことを示す（相対強度が0.1未満）

資料表-1.5.5 X線回折試験結果（東京屋外 1/2）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢5年									
			表面からの深さ：5~15mm					表面からの深さ：50mm以上				
			エトリ ンガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト	エトリ ンガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリー デル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト
NC	40	28	*	*	*	0.396	0.557	*	*	*	0.405	0.400
	50		*	*	*	0.503	0.660	*	*	*	0.380	0.652
	60		*	*	*	0.301	0.808	0.165	*	0.224	0.746	1.534
MC	40	50	0.296	*	*	1.344	0.524	0.319	*	*	1.435	0.547
	50		0.245	0.173	0.164	0.787	0.919	0.259	0.197	0.194	0.825	1.059
	60		0.219	0.170	0.377	0.404	0.824	0.234	0.164	0.383	0.456	0.964
LC	40	91	0.298	*	*	1.936	2.232	0.244	*	*	2.189	0.312
	50		0.256	*	*	2.199	0.337	0.208	*	*	2.129	0.504
	60		0.271	*	*	2.125	0.517	0.277	*	*	1.517	0.614
NBB	50	91	*	0.263	*	0.240	0.951	*	0.203	*	0.404	0.495
MBB			*	0.158	*	0.220	0.617	*	*	*	0.357	0.493
LBB			*	*	*	0.113	0.791	0.134	0.166	*	0.193	0.477
FC			0.214	0.214	0.181	0.326	0.562	0.230	0.263	0.173	0.605	0.356
FCN			*	0.102	*	0.179	0.372	*	0.120	*	0.467	0.242
LP			0.295	0.134	0.134	0.600	3.345	0.237	0.145	0.161	1.024	3.195
NBF	50	91	0.210	0.137	0.142	0.126	1.063	0.352	0.161	0.178	0.178	0.413
NC			*	*	*	0.366	1.047	*	*	*	0.366	0.759
LC			*	*	*	0.809	0.728	*	*	*	0.755	0.836
NBB			*	0.104	0.104	0.234	0.833	*	0.130	*	0.313	0.807
LBB			0.322	*	*	0.174	0.563	0.322	*	0.295	0.169	0.456
FC			*	*	*	*	0.318	*	*	*		0.523
NBF			0.301	*	*	0.194	0.929	0.301	*	*	0.167	0.519

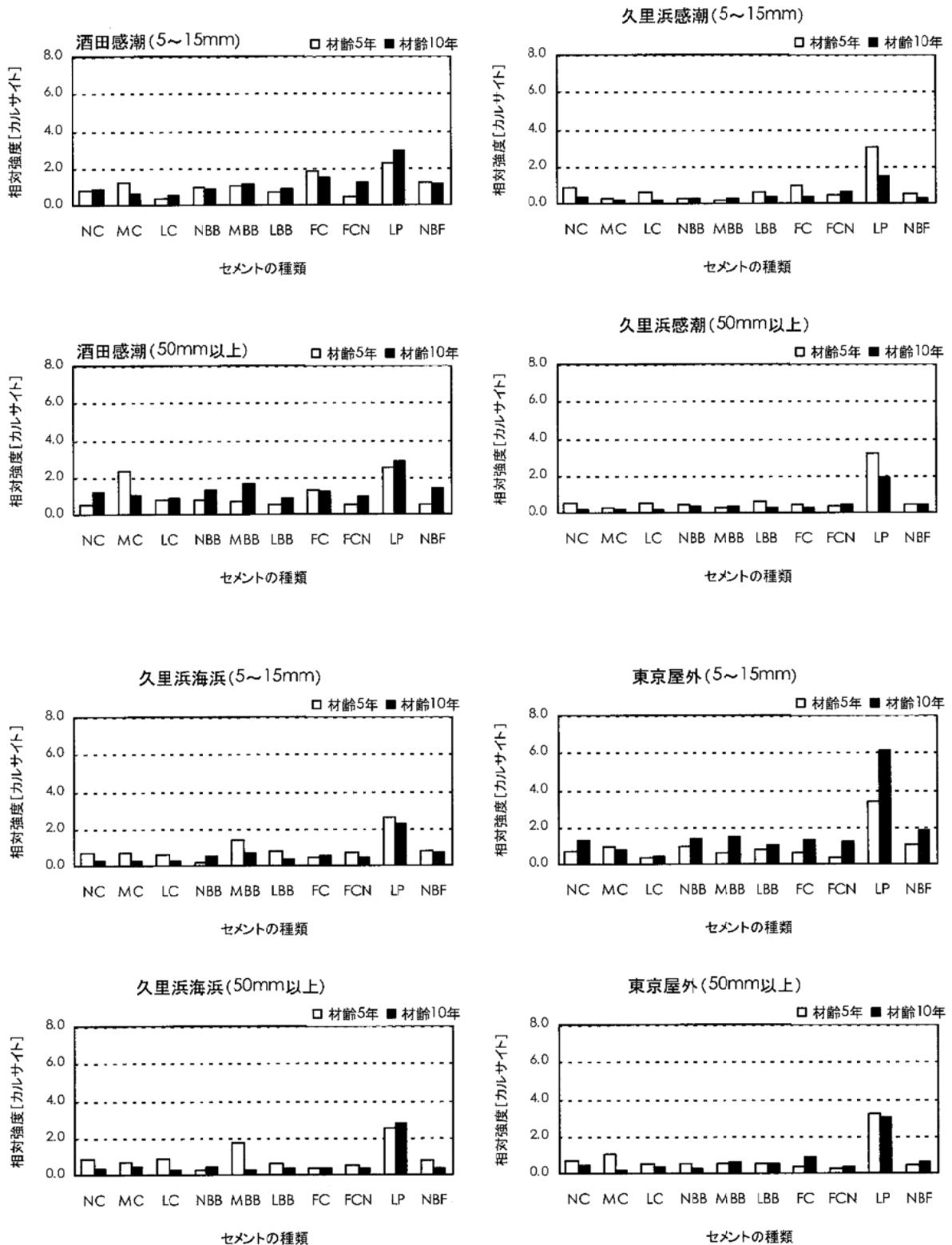
* : ピークとして認められなかったことを示す（相対強度が0.1未満）

資料表-1.5.5 X線回折試験結果（東京屋外 2/2）

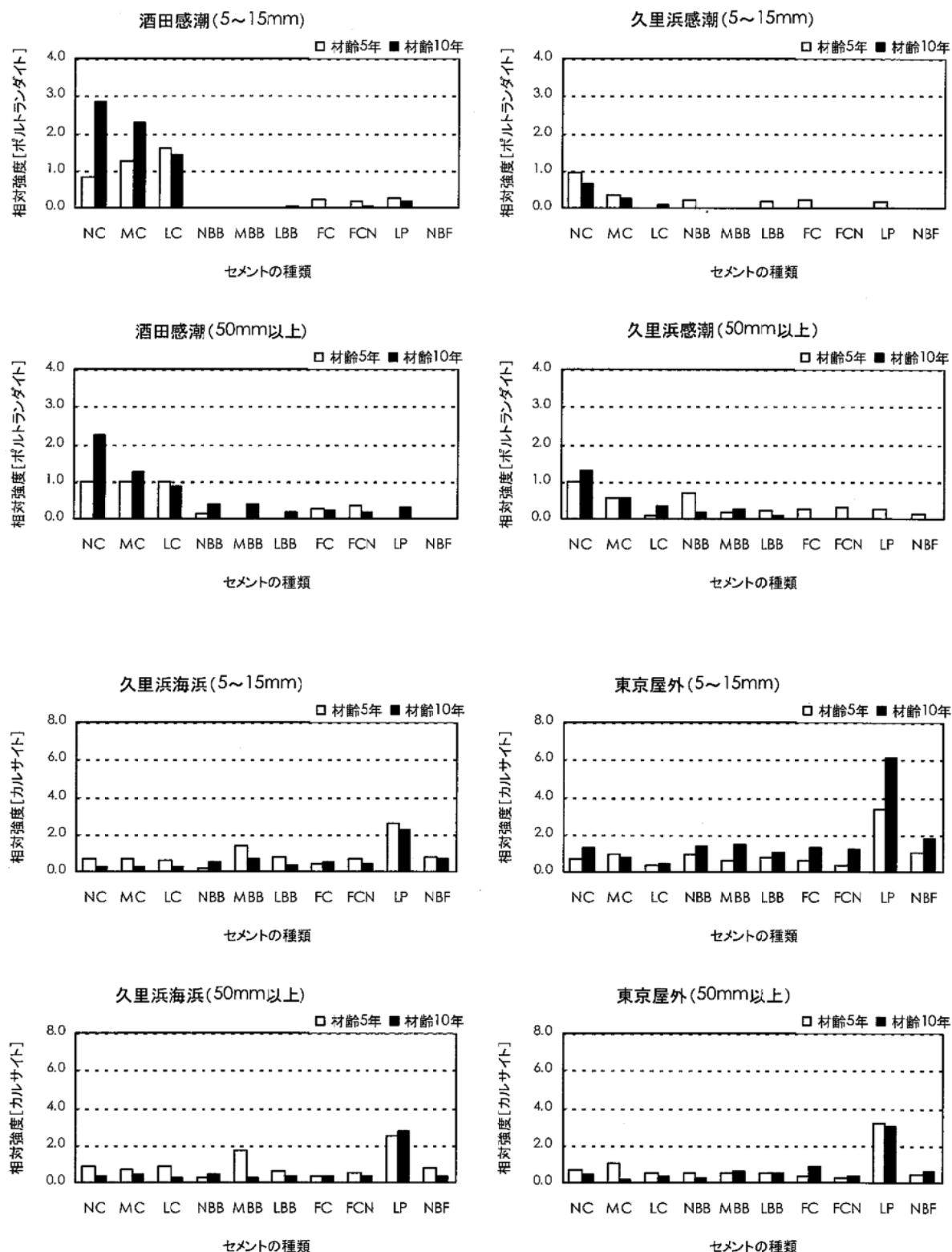
セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢 10 年									
			表面からの深さ : 5~15mm					表面からの深さ : 50mm 以上				
			エトリ ンガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリ ーデル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト	エトリ ンガイ ト	モノサ ルフェ ート	フリ ーデル氏 塩	ポルト ランダ イト	カルサ イト
NC	40	28	0.118	*	*	2.268	0.699	0.150	*	*	2.521	0.714
	50		0.107	*	*	1.160	1.267	0.193	*	*	3.722	0.389
	60		0.129	*	*	0.753	1.325	0.138	*	*	1.556	0.533
MC	40	50	*	*	*	1.739	0.499	0.134	*	*	2.901	0.590
	50		0.126	*	*	1.515	0.812	0.107	0.118	*	3.539	0.193
	60		*	*	*	0.329	1.962	*	0.044	*	0.851	0.447
LC	40	60	*	*	*	1.165	0.448	0.133	*	*	1.547	0.395
	50		0.103	*	*	0.907	0.401	*	*	*	0.891	0.383
	60		0.514	*	*	1.894	2.593	*	*	*	0.280	0.639
NBB		91	0.112	0.377	*	0.534	1.395	*	0.630	*	0.910	0.250
MBB			*	*	*	*	1.422	0.119	*	*	0.454	0.577
LBB			0.120	*	*	*	1.035	0.151	0.272	*	0.349	0.519
FC			*	*	*	*	1.253	0.104	0.437	*	1.157	0.872
FCN			*	*	*	*	1.167	*	0.151	*	0.812	0.328
LP			0.315	*	*	0.862	6.114	*	*	*	0.374	3.002
NBF			*	*	*	*	1.841	0.101	*	*	*	0.617
NC			0.293	*	*	1.954	1.135	0.231	*	*	2.922	0.864
LC			0.230	*	*	2.024	0.795	0.174	*	*	2.213	0.581
NBB			*	0.398	*	0.593	1.109	*	0.650	*	0.891	0.500
LBB			0.198	0.231	*	0.183	1.421	0.114	0.469	*	0.369	0.400
FC			0.105	0.211	*	*	1.372	*	0.246	*	0.523	0.641
NBF			0.123	*	*	*	1.311	*	0.215	*	*	0.612

* : ピークとして認められなかったことを示す（相対強度が 0.1 未満）

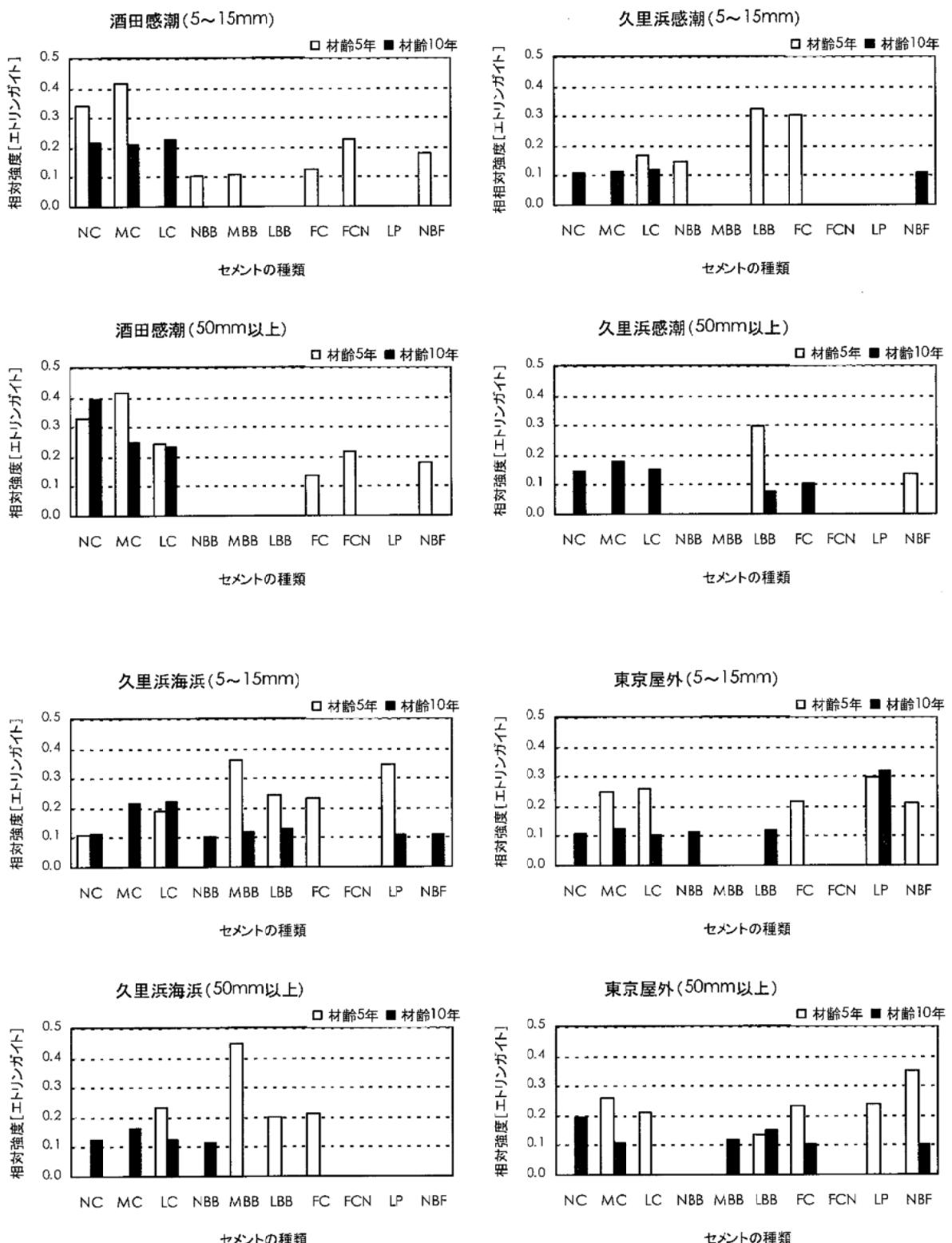
1.6 セメント種類ごとのX線回折相対強度比較



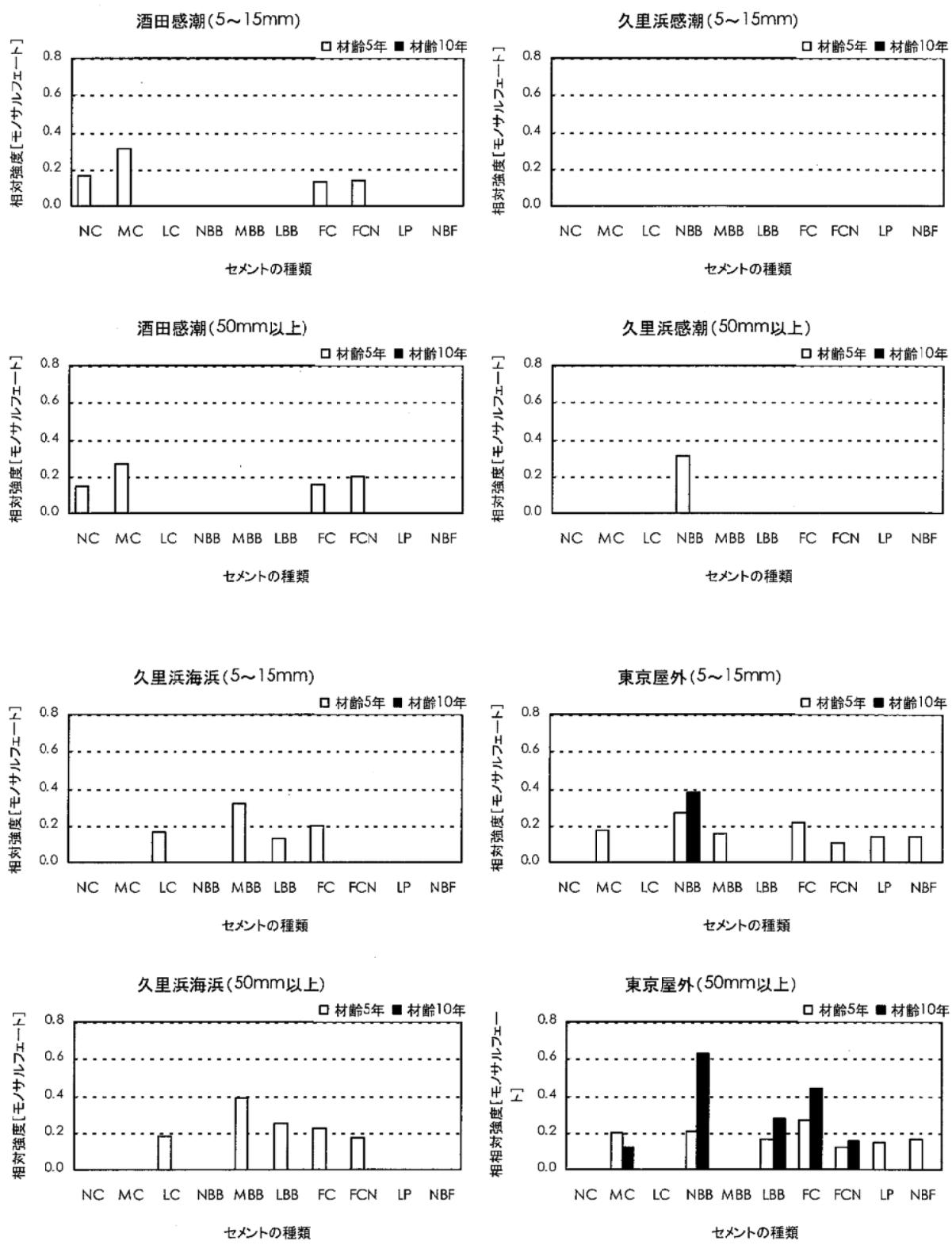
資料図-1.6.1 セメント種類ごとのX線回折相対強度比較
(カルサイト, 水結合材比 50%・前養生 28 日)



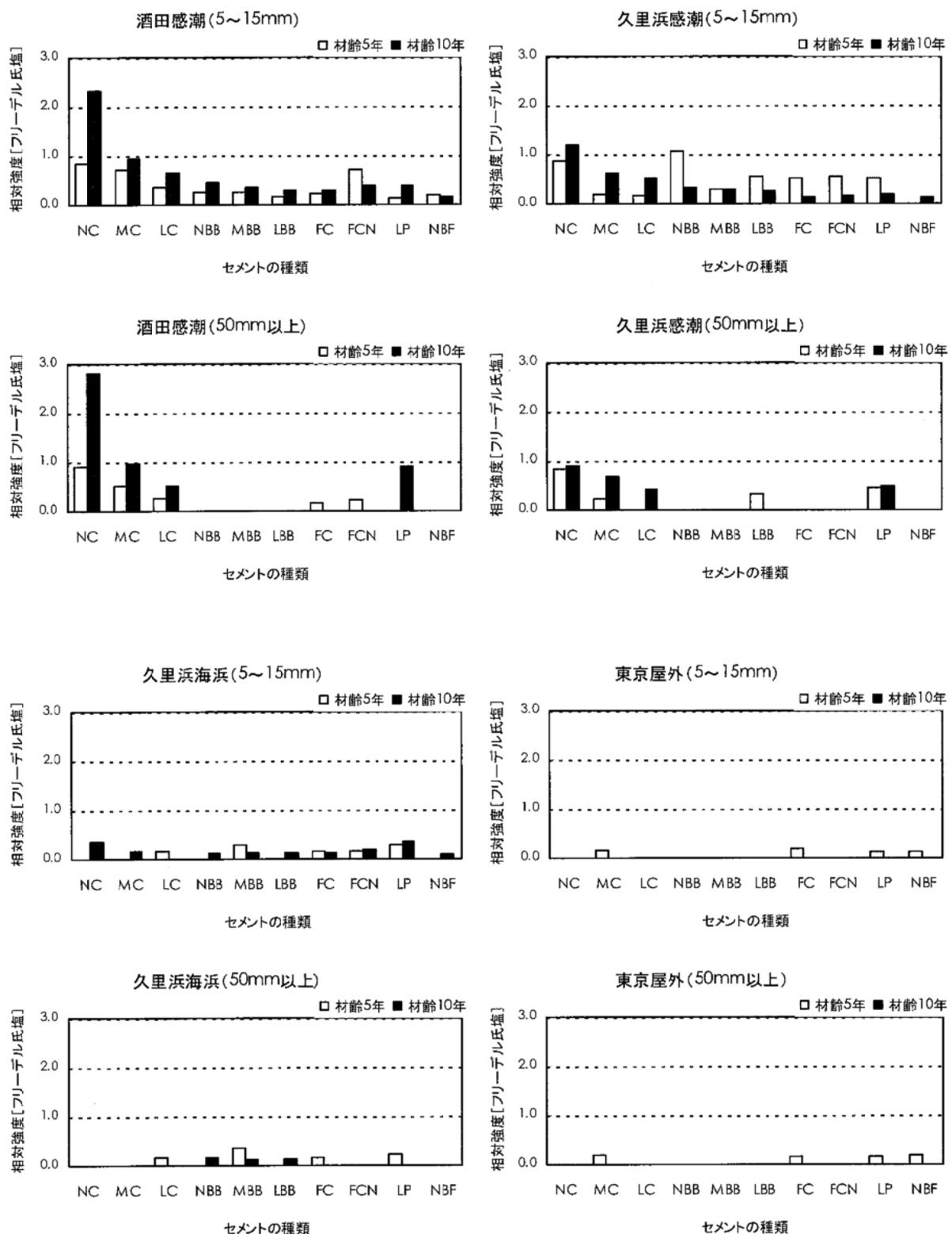
資料図-1.6.2 セメント種類ごとのX線回折相対強度比較
(ポルトランドай, 水結合材比50%・前養生28日)



資料図-1.6.3 セメント種類ごとのX線回折相対強度比較
(エトリンガイト, 水結合材比50%・前養生28日)



資料図-1.6.4 セメント種類ごとのX線回折相対強度比較
(モノサルフェート, 水結合材比50%・前養生28日)



資料図-1.6.5 セメント種類ごとのX線回折相対強度比較
(フリーデル氏塩, 水結合材比50%・前養生28日)

1.7 細孔量試験の測定結果

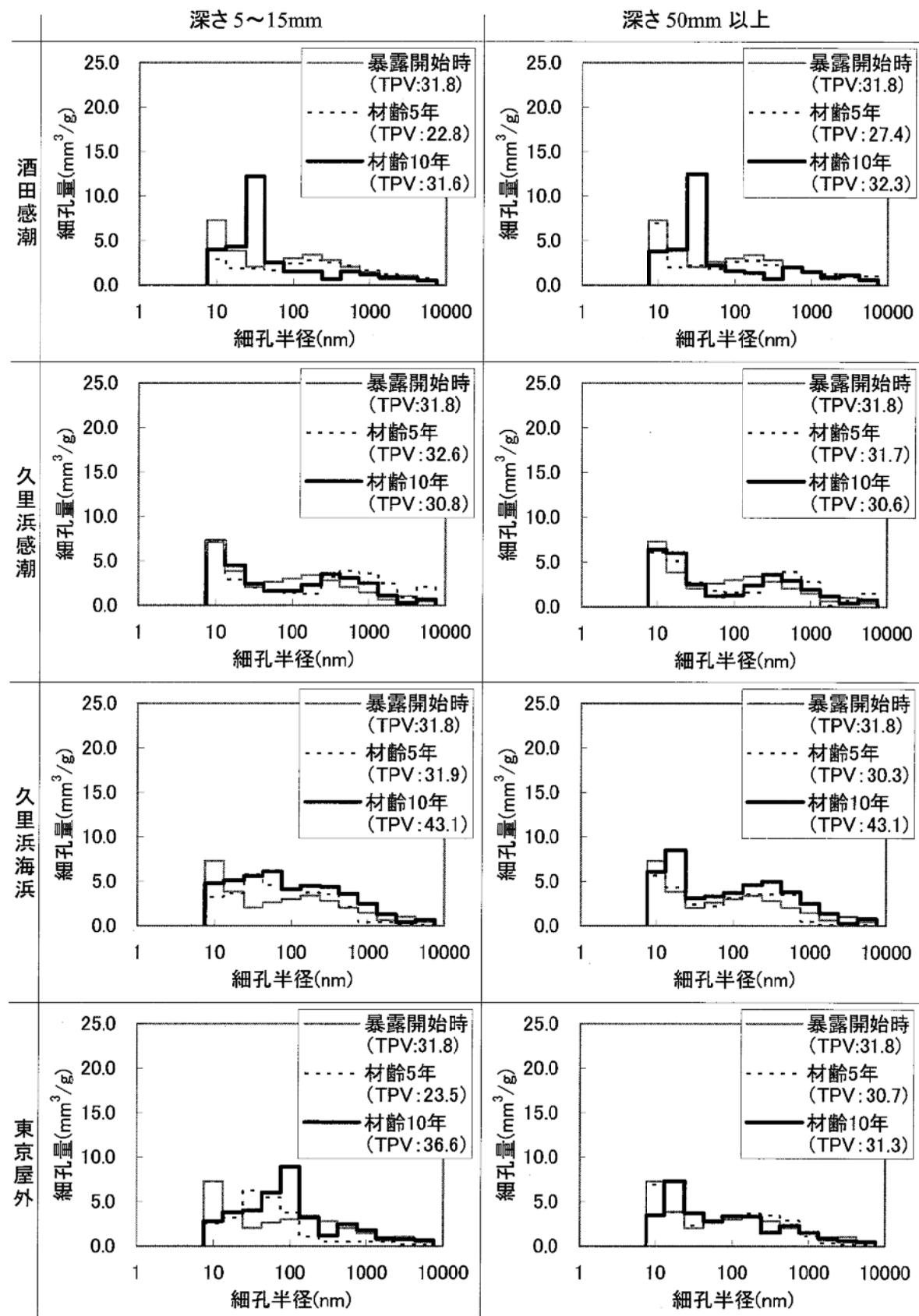
資料表-1.7.1 細孔量測定結果（材齢5年の総細孔量）

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	暴露開始時	細孔量(mm^3/g)							
				材齢5年							
				酒田感潮		久里浜感潮		久里浜海浜		東京屋外	
NC	40	28	5~15mm	50mm以上	5~15mm	50mm以上	5~15mm	50mm以上	5~15mm	50mm以上	
	50		31.8	22.7	27.5	32.6	31.7	31.9	30.3	23.5	30.7
	60		31.4	31.8	34.5	36.3	35.0	48.9	48.0	36.2	33.6
	40		40.0	36.1	37.4	42.5	40.5	51.2	48.8	40.2	37.6
	MC		34.0	13.2	13.3	43.8	31.9	43.6	35.8	51.3	41.6
	50		42.8	35.8	43.1	43.4	43.8	57.1	55.6	62.3	46.6
	60		47.5	47.2	48.3	54.1	51.7	50.5	57.3	67.8	55.0
	40		42.4	18.5	27.2	32.6	26.3	48.9	38.5	48.8	35.1
	50		40.2	27.2	40.2	24.6	19.9	64.5	57.3	58.7	52.0
	60		55.5	38.4	46.3	45.6	47.2	52.4	47.3	58.5	50.7
NBB	50		35.3	15.0	25.4	30.2	29.8	38.0	37.5	37.6	35.4
MBB	50		32.2	15.0	25.8	24.4	37.3	37.0	44.1	34.9	38.9
LBB	50		32.0	13.1	20.0	31.4	31.1	37.2	35.4	36.5	37.8
FC	50	91	45.3	21.8	22.6	29.9	31.5	36.8	46.5	45.7	53.3
FCN	50		62.5	19.8	28.6	27.6	35.4	47.5	54.3	38.4	93.2
LP	50		53.1	44.1	45.4	46.1	42.5	63.1	59.5	54.7	44.7
NBF	50		34.7	19.0	20.7	22.9	21.5	21.7	26.9	46.3	29.9
NC	50		33.9	—	—	29.7	35.5	—	—	43.1	43.5
LC	50		26.5	—	—	33.2	35.8	—	—	52.0	46.8
NBB	50		27.3	—	—	22.8	27.9	—	—	30.6	31.8
LBB	50		31.9	—	—	20.2	25.9	—	—	41.7	32.7
FC	50		34.6	—	—	14.0	21.9	—	—	37.9	46.7
NBF	50		25.1	—	—	25.3	16.2	—	—	46.8	29.7

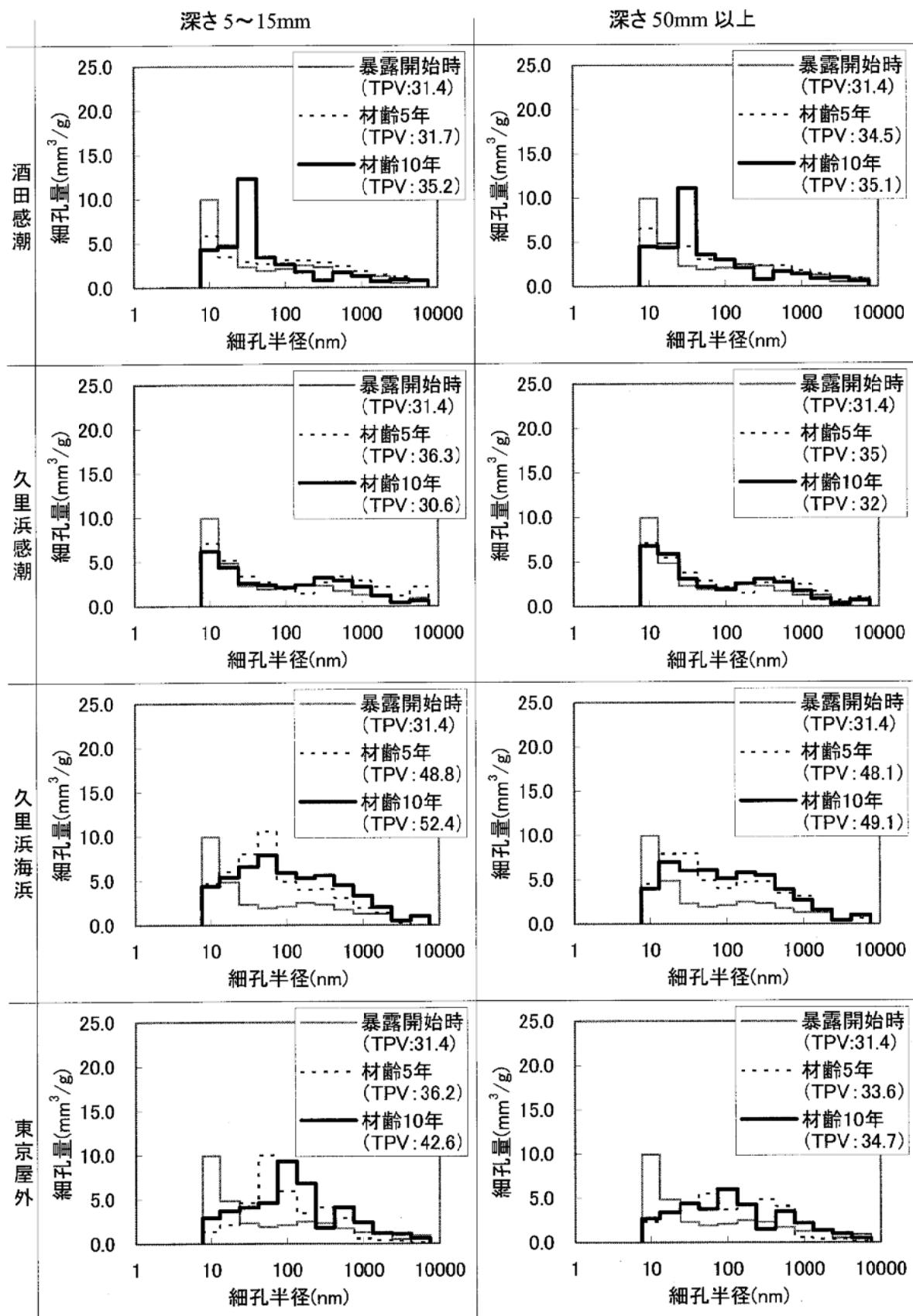
資料表-1.7.2 細孔量測定結果（材齡 10 年の総細孔量）

セメント の種類	水結 合材 比 (%)	前養 生 (日)	細孔量 (mm ³ /g)								
			暴露 開始 時	材齡 10 年							
				酒田感潮		久里浜感潮		久里浜海浜		東京屋外	
NC	40	28	31.8	31.6	32.3	30.8	30.6	43.1	43.1	36.6	31.3
	50		31.4	35.2	35.1	30.6	32.0	52.4	49.1	42.6	34.7
	60		40.0	44.6	41.3	39.3	39.1	55.3	50.8	42.8	39.0
MC	40		34.0	32.1	33.0	31.9	33.0	52.0	44.2	45.0	37.2
	50		42.8	38.4	34.8	36.5	38.1	59.4	55.6	49.4	46.2
	60		47.5	47.3	42.5	41.4	43.4	66.0	59.5	44.7	45.2
LC	40		42.4	28.6	29.4	28.8	32.8	48.5	43.2	41.2	36.2
	50		40.2	35.3	35.0	35.3	36.1	51.6	66.7	49.2	49.1
	60		55.5	38.6	40.5	32.9	31.5	58.9	54.8	45.5	43.1
NBB	50	91	35.3	24.7	30.1	23.7	28.9	36.1	36.5	33.0	35.9
MBB	50		32.2	24.8	26.3	22.6	29.8	36.9	35.7	30.4	38.9
LBB	50		32.0	25.4	24.7	20.8	32.2	34.7	31.4	28.2	37.2
FC	50		45.3	32.4	36.2	19.8	26.1	33.8	43.4	34.7	47.5
FCN	50		62.5	32.0	40.5	13.0	20.6	35.2	45.8	37.6	49.9
LP	50		53.1	50.4	45.1	46.1	42.5	52.4	56.5	48.1	46.7
NBF	50	91	34.7	22.6	26.4	22.2	27.3	30.1	39.2	29.6	29.6
NC	50		33.9	—	—	37.1	43.0	—	—	57.7	54.5
LC	50		26.5	—	—	48.0	46.7	—	—	67.6	60.9
NBB	50		27.3	—	—	23.1	31.5	—	—	44.8	43.5
LBB	50		31.9	—	—	22.7	25.5	—	—	36.3	35.9
FC	50		34.6	—	—	21.1	24.8	—	—	40.7	48.3
NBF	50		25.1	—	—	25.8	29.6	—	—	54.8	27.3

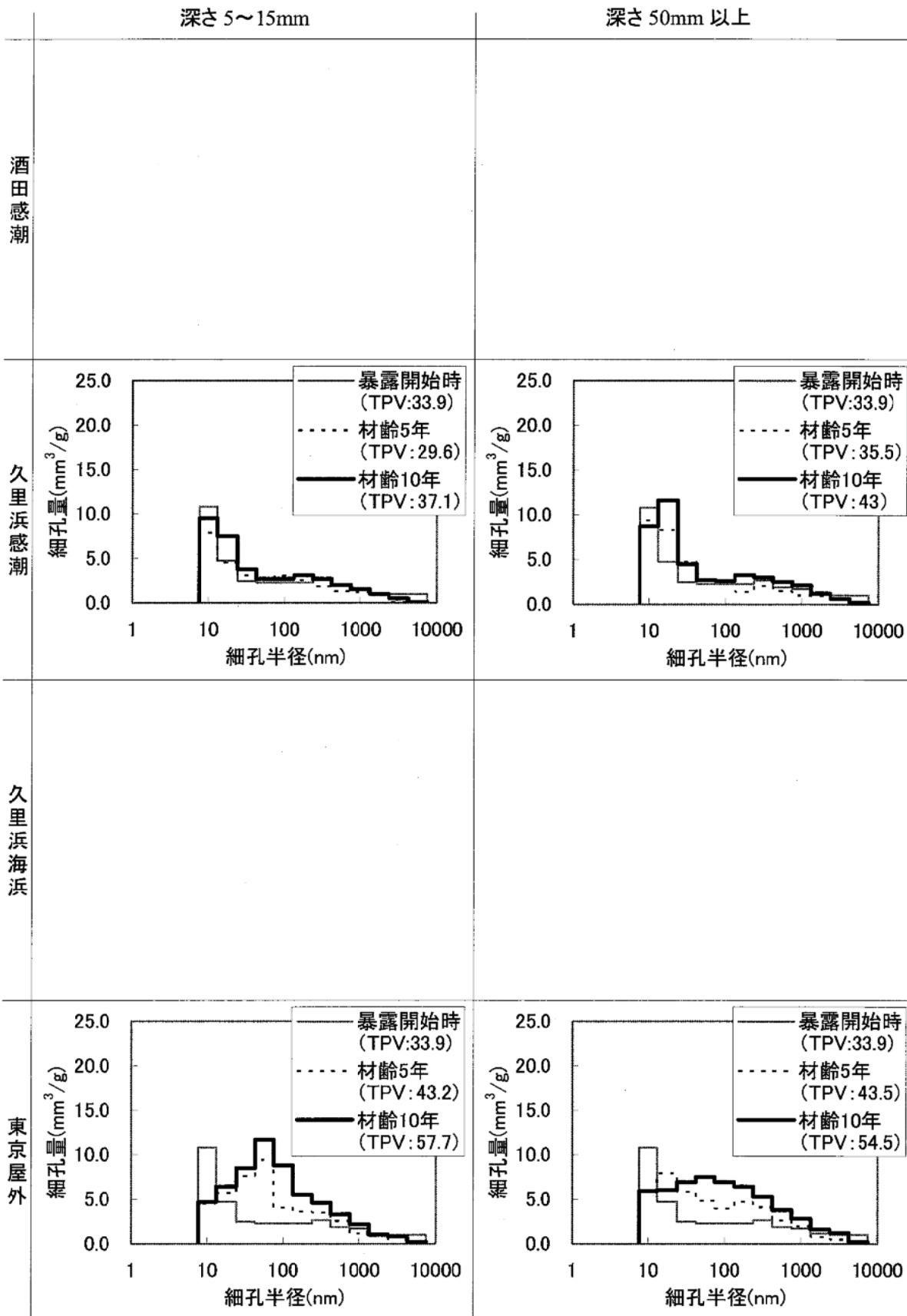
1.8 細孔径分布図



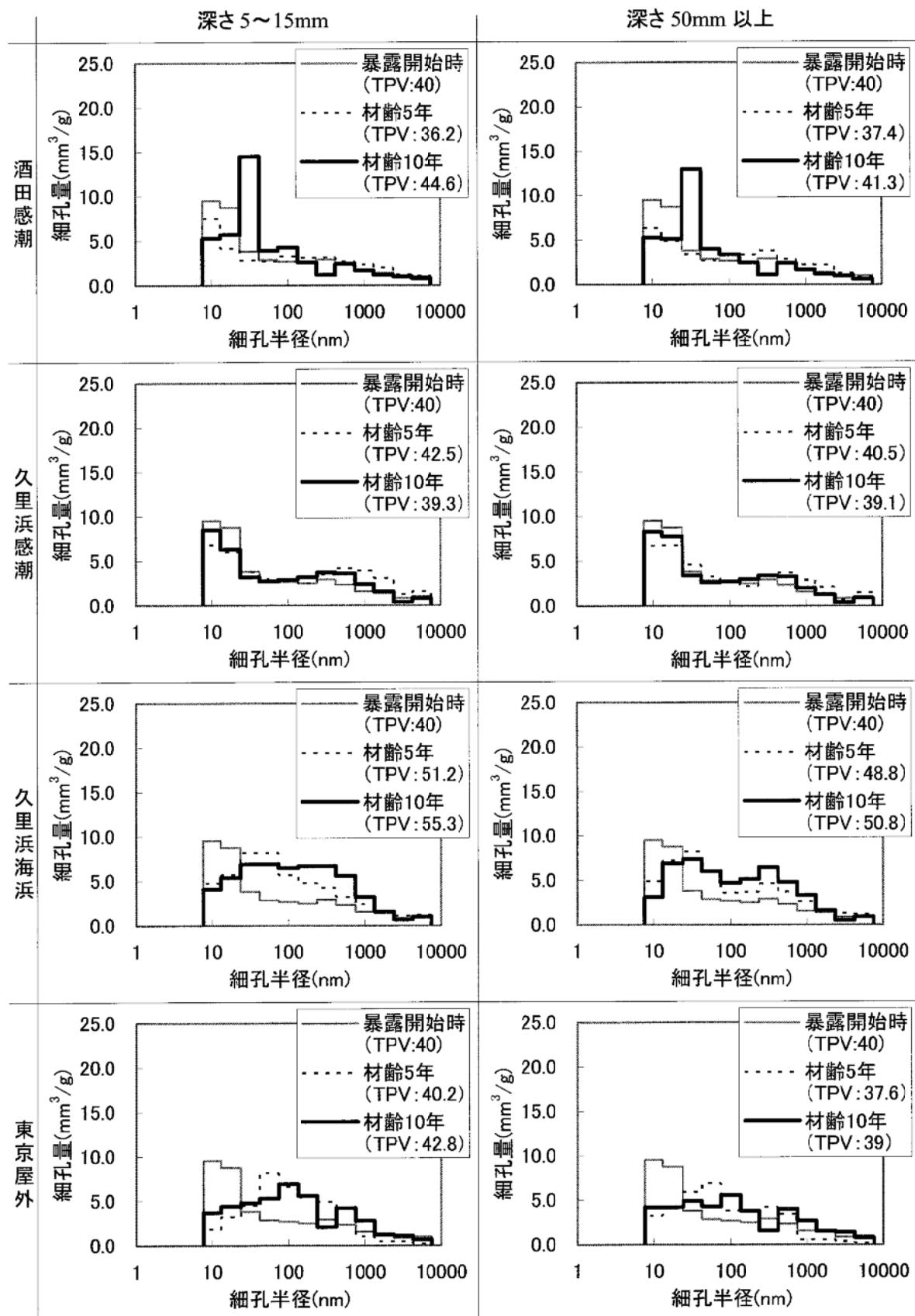
資料図-1.8.1 普通ポルトランドセメント(NC)、W/C=40%、前養生 28 日



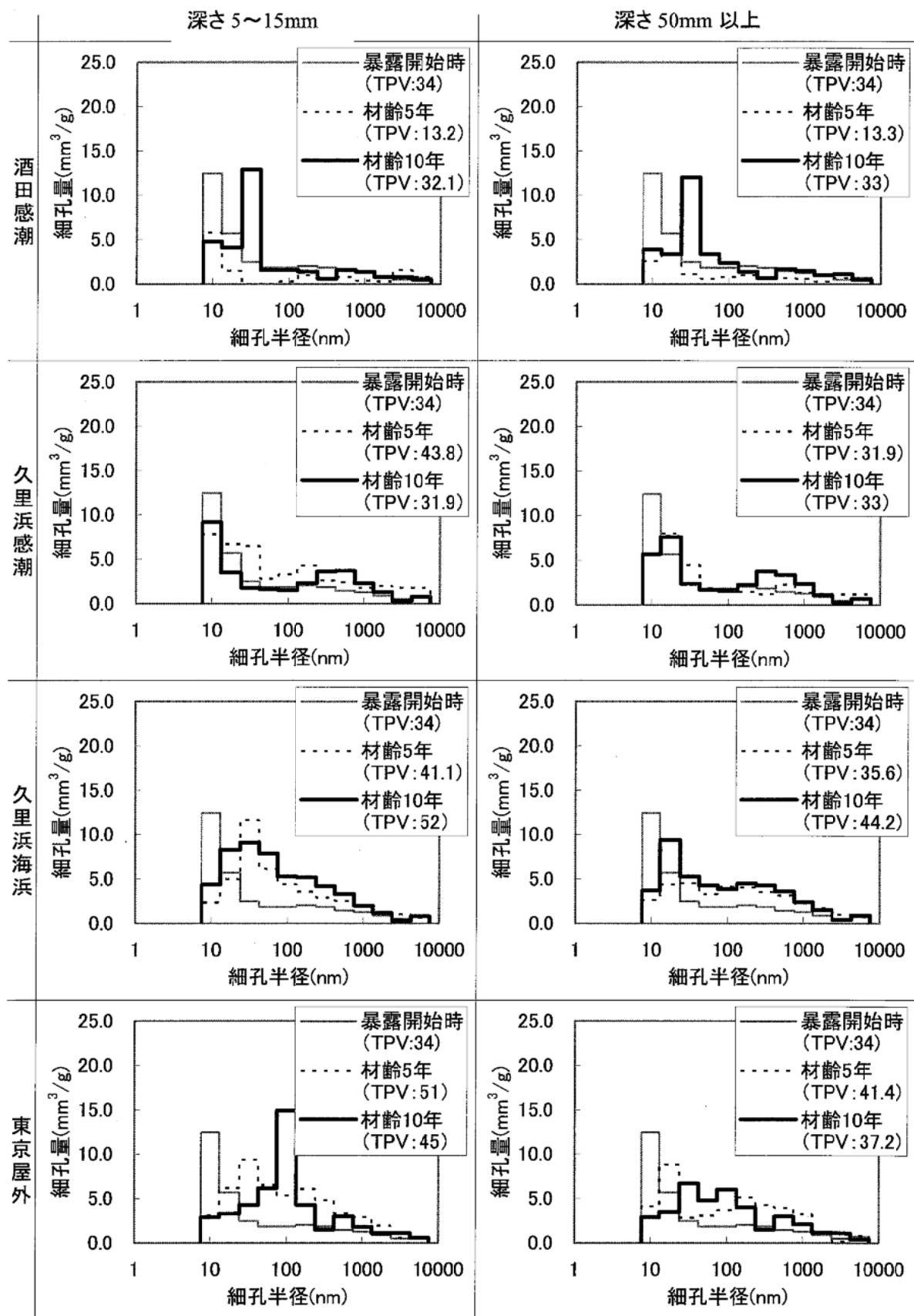
資料図-1.8.2 普通ポルトランドセメント(NC)、W/C=50%、前養生 28 日



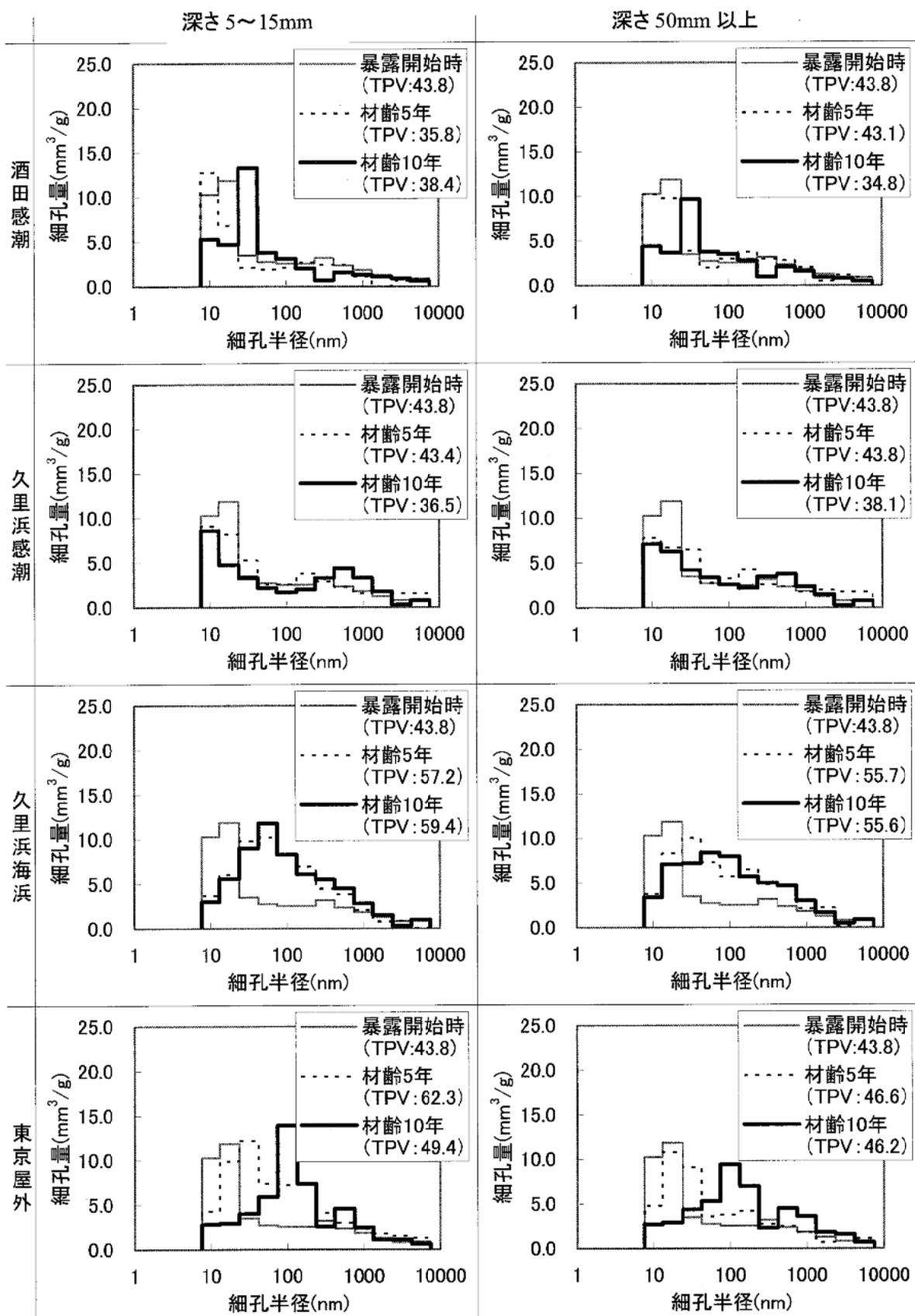
資料図-1.8.3 普通ポルトランドセメント(NC)、W/C=50%、前養生 91 日



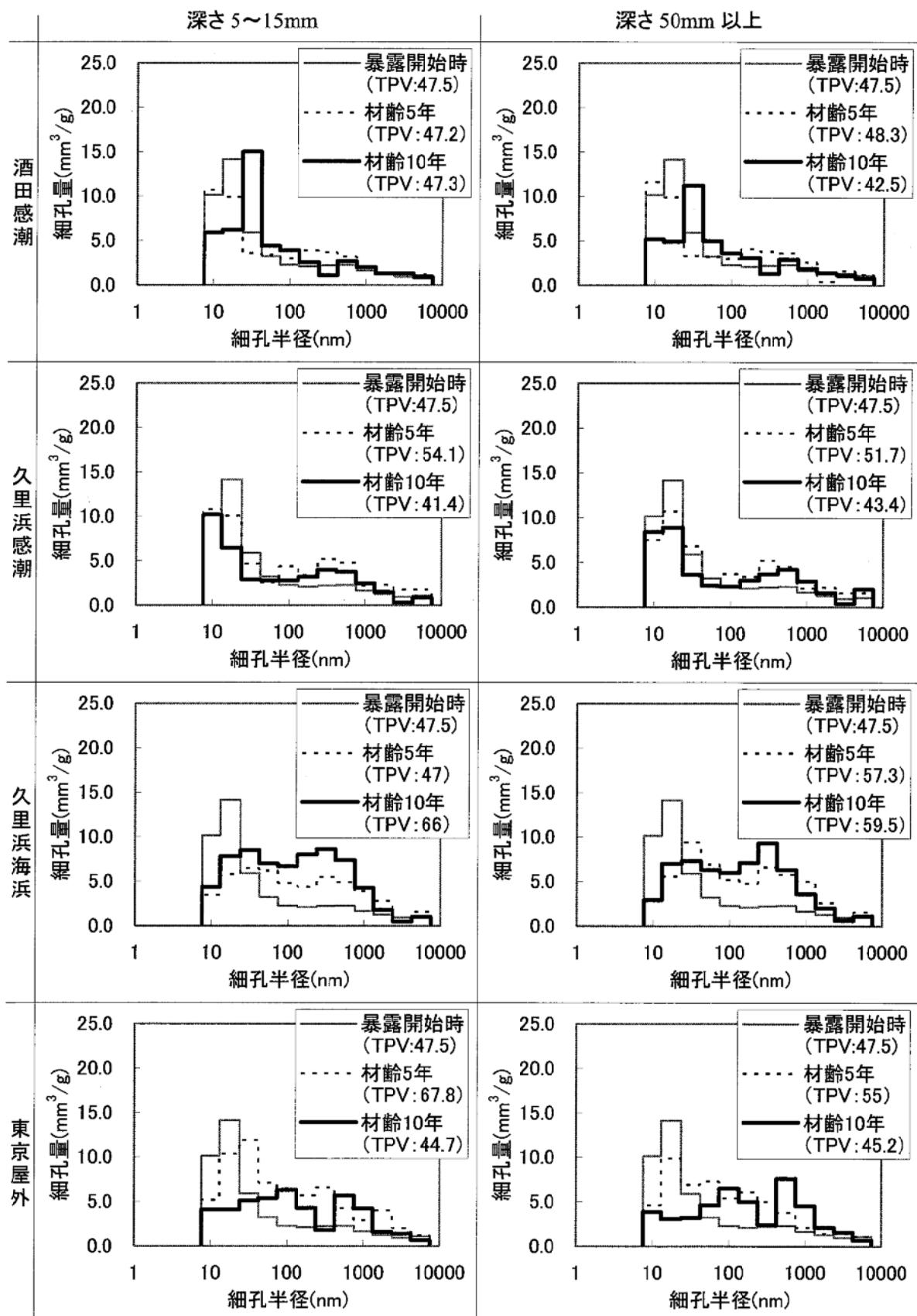
資料図-1.8.4 普通ポルトランドセメント(NC)、W/C=60%、前養生 28 日



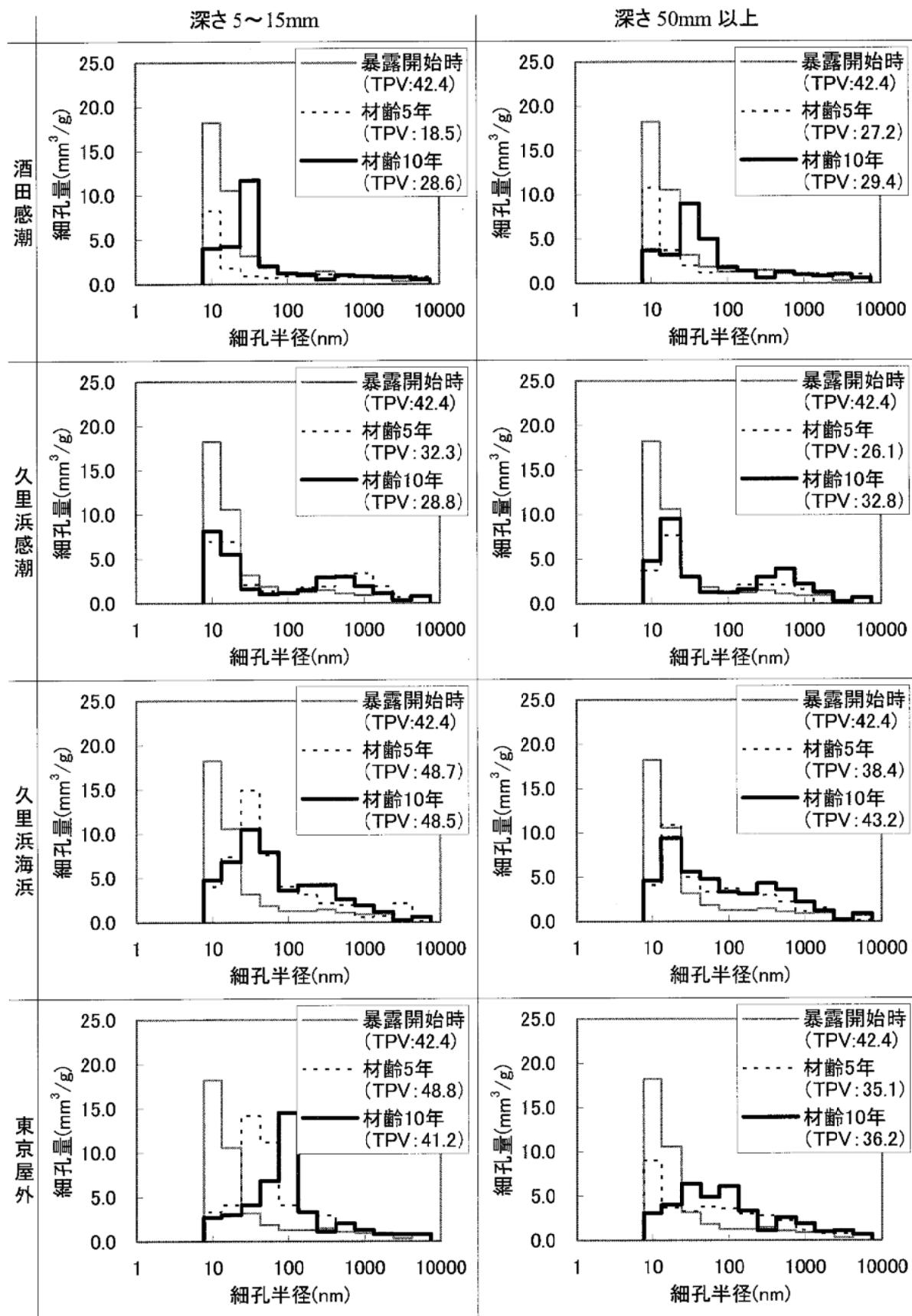
資料図-1.8.5 中庸熟ポルトランドセメント(MC)、W/C=40%、前養生 28 日



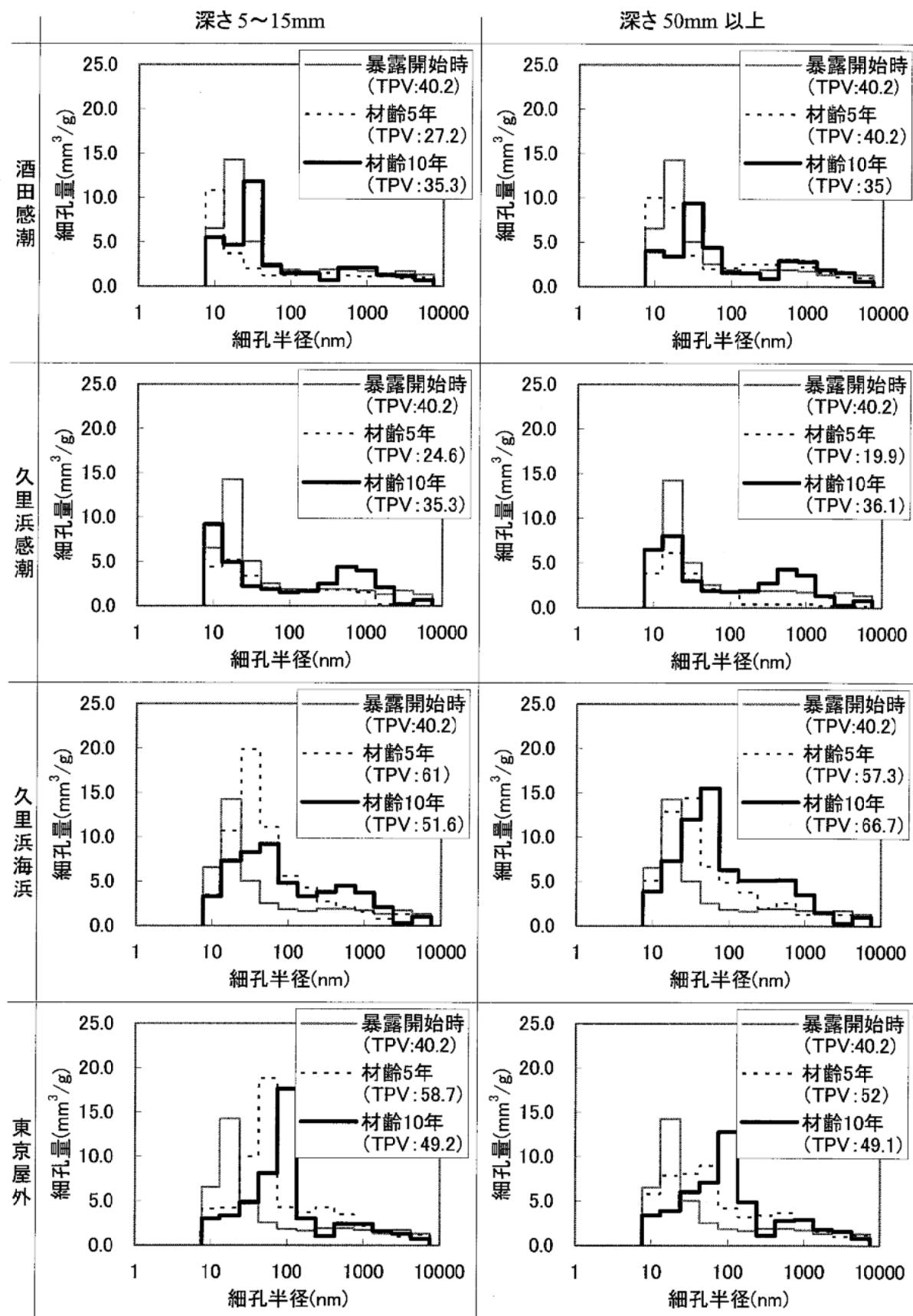
資料図-1.8.6 中庸熱ポルトランドセメント(MC)、W/C=50%、前養生 28 日



資料図-1.8.7 中庸熟ポルトランドセメント(MC)、W/C=60%、前養生 28 日



資料図-1.8.8 低熱ポルトランドセメント(LC)、W/C=40%、前養生 28 日



酒田感潮

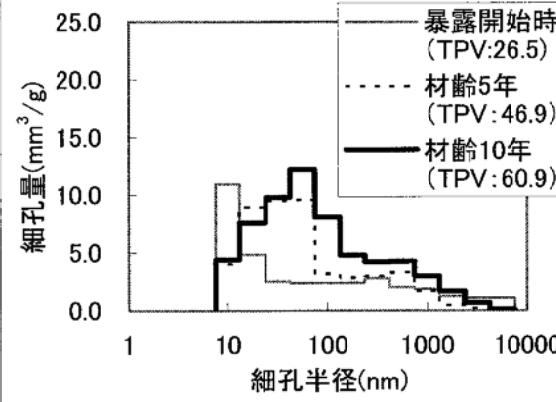
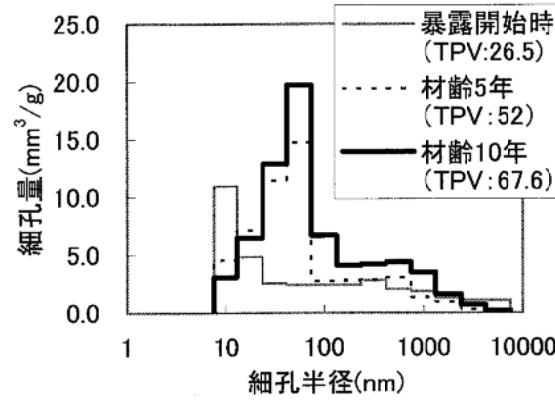
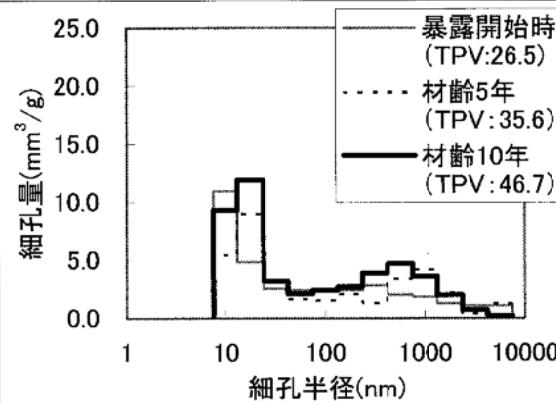
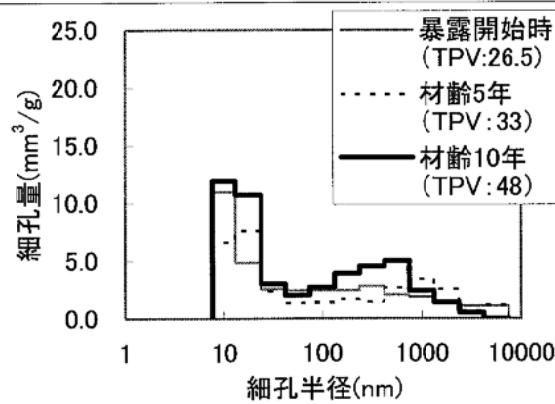
久里浜感潮

久里浜海浜

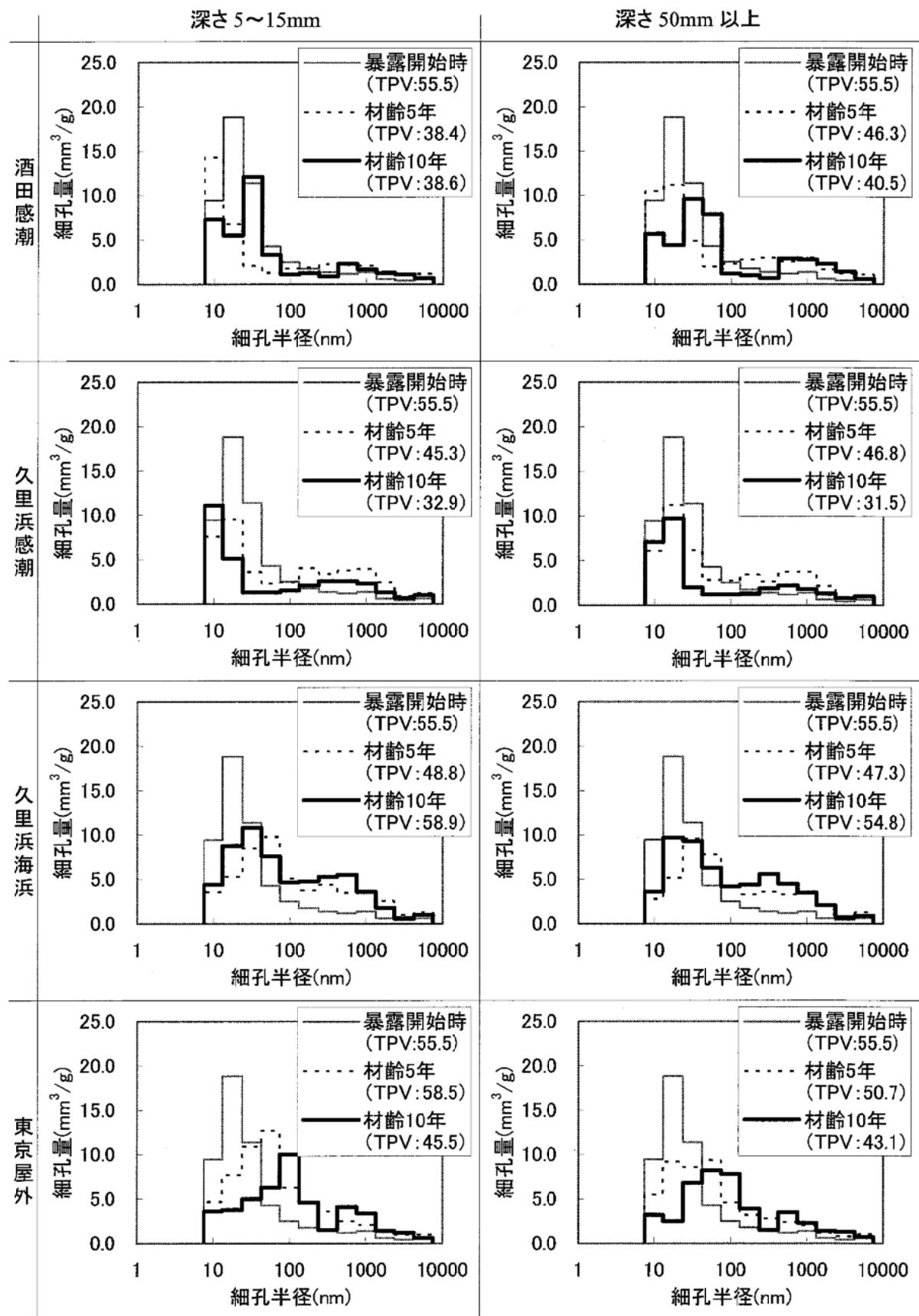
東京屋外

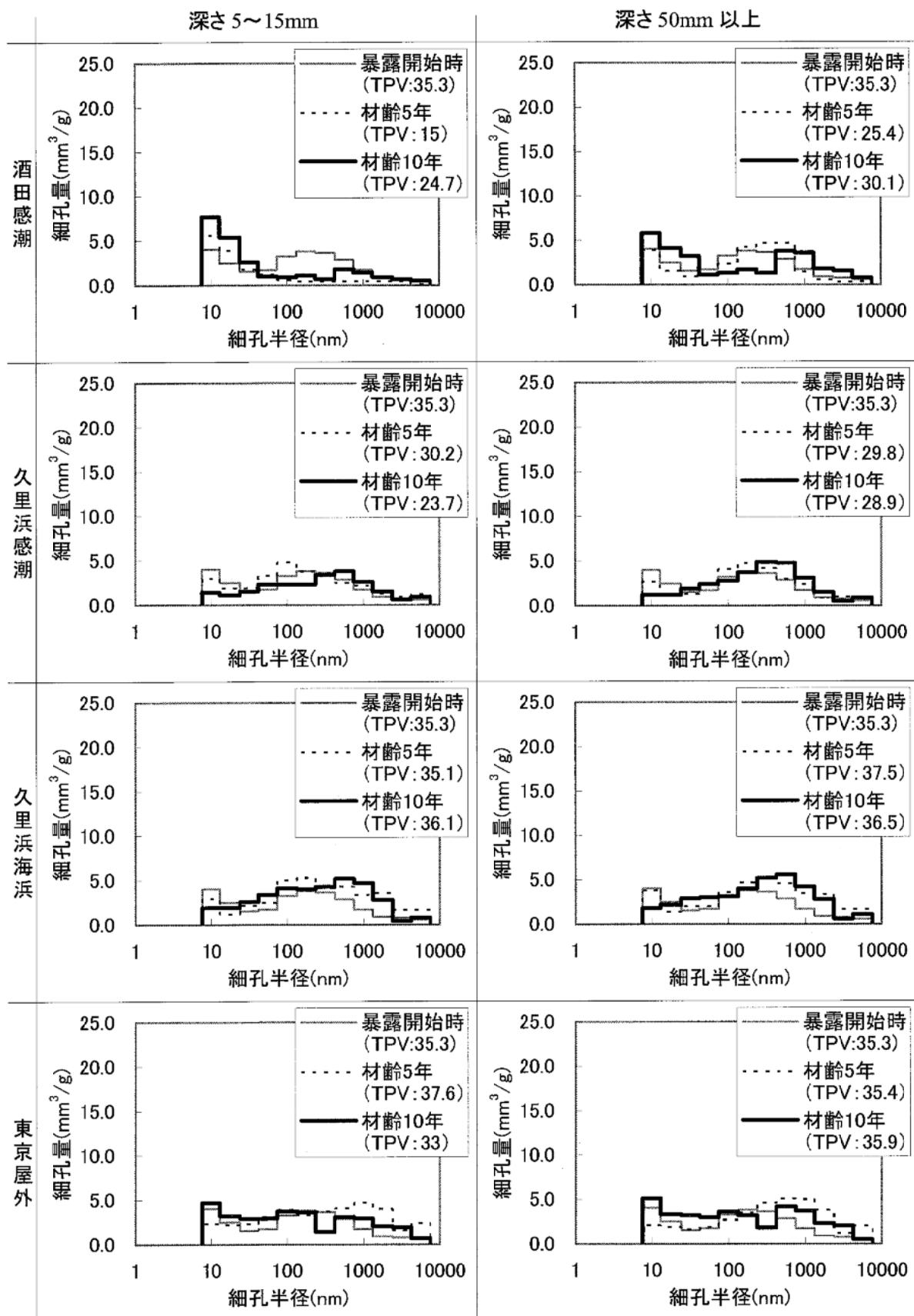
深さ 5~15mm

深さ 50mm 以上



資料図-1.8.10 低熱ポルトランドセメント(LC)、W/C=50%、前養生 91 日





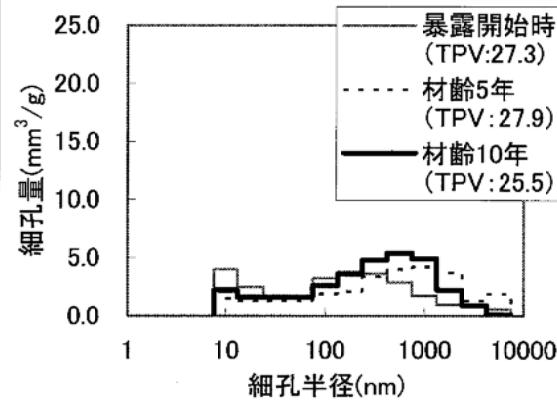
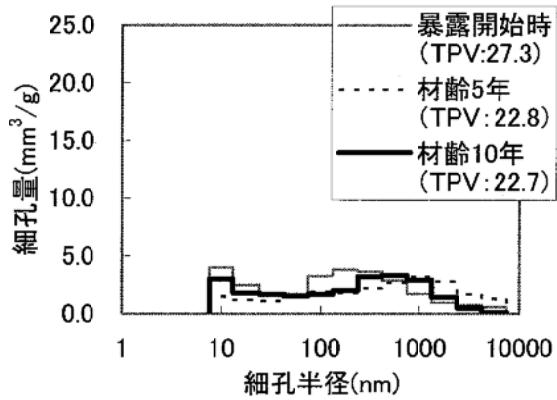
資料図-1.8.12 高炉スラグ微粉末混合セメント(NC ベース)(NBB)、W/C=50%、前養生 28 日

酒田感潮

深さ 5~15mm

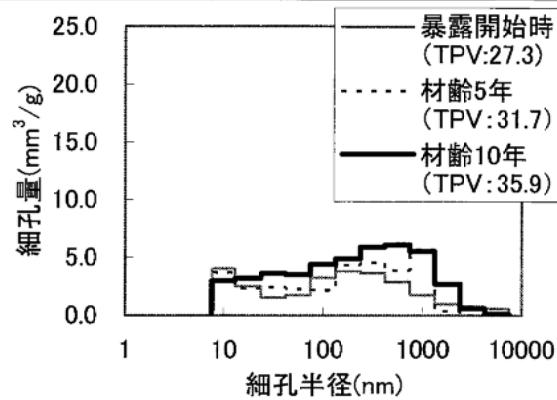
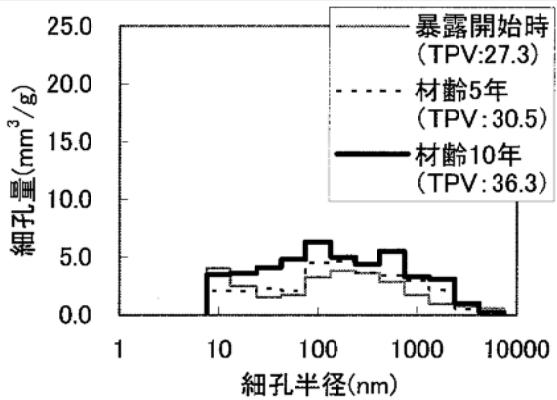
深さ 50mm 以上

久里浜感潮

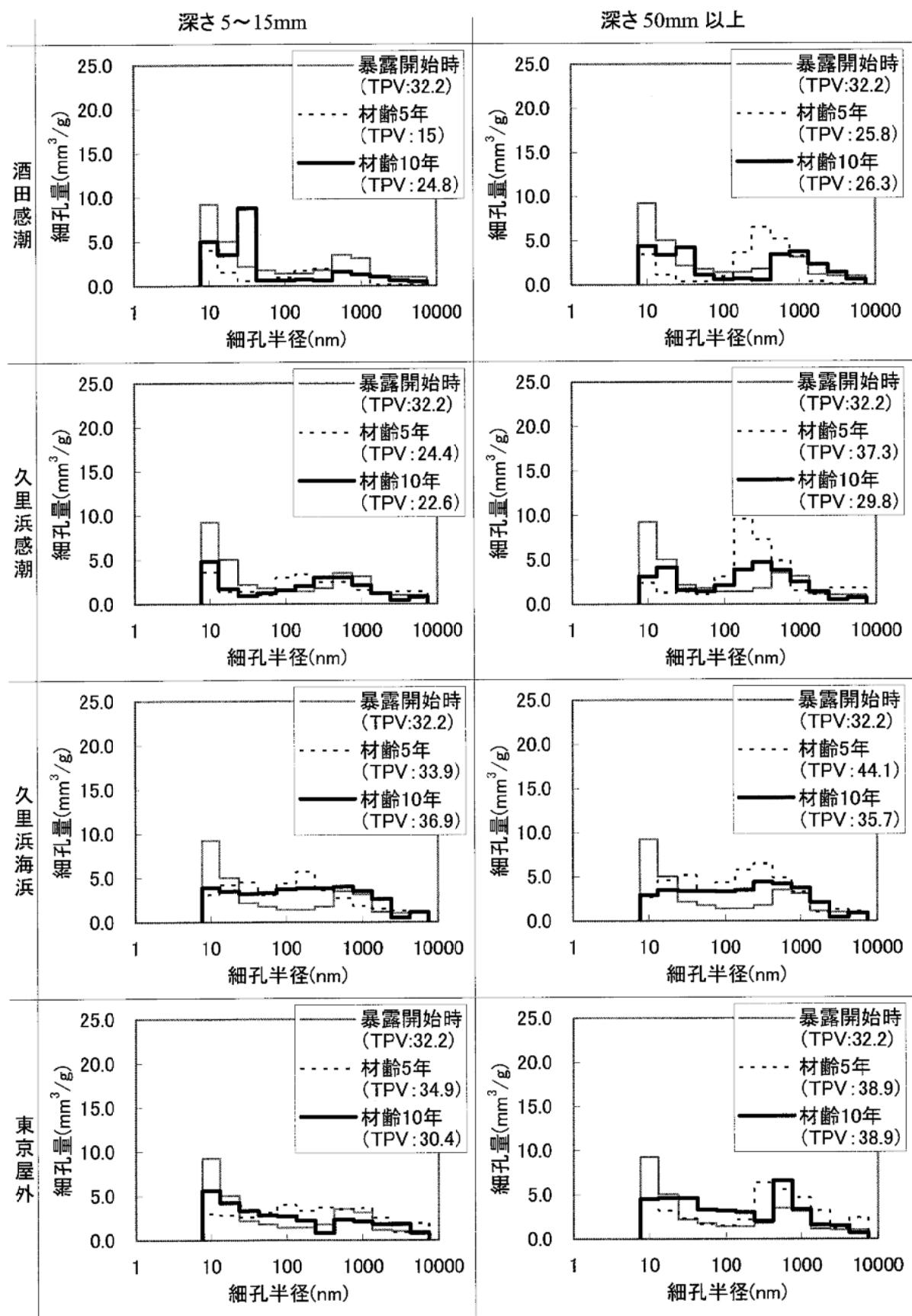


久里浜海浜

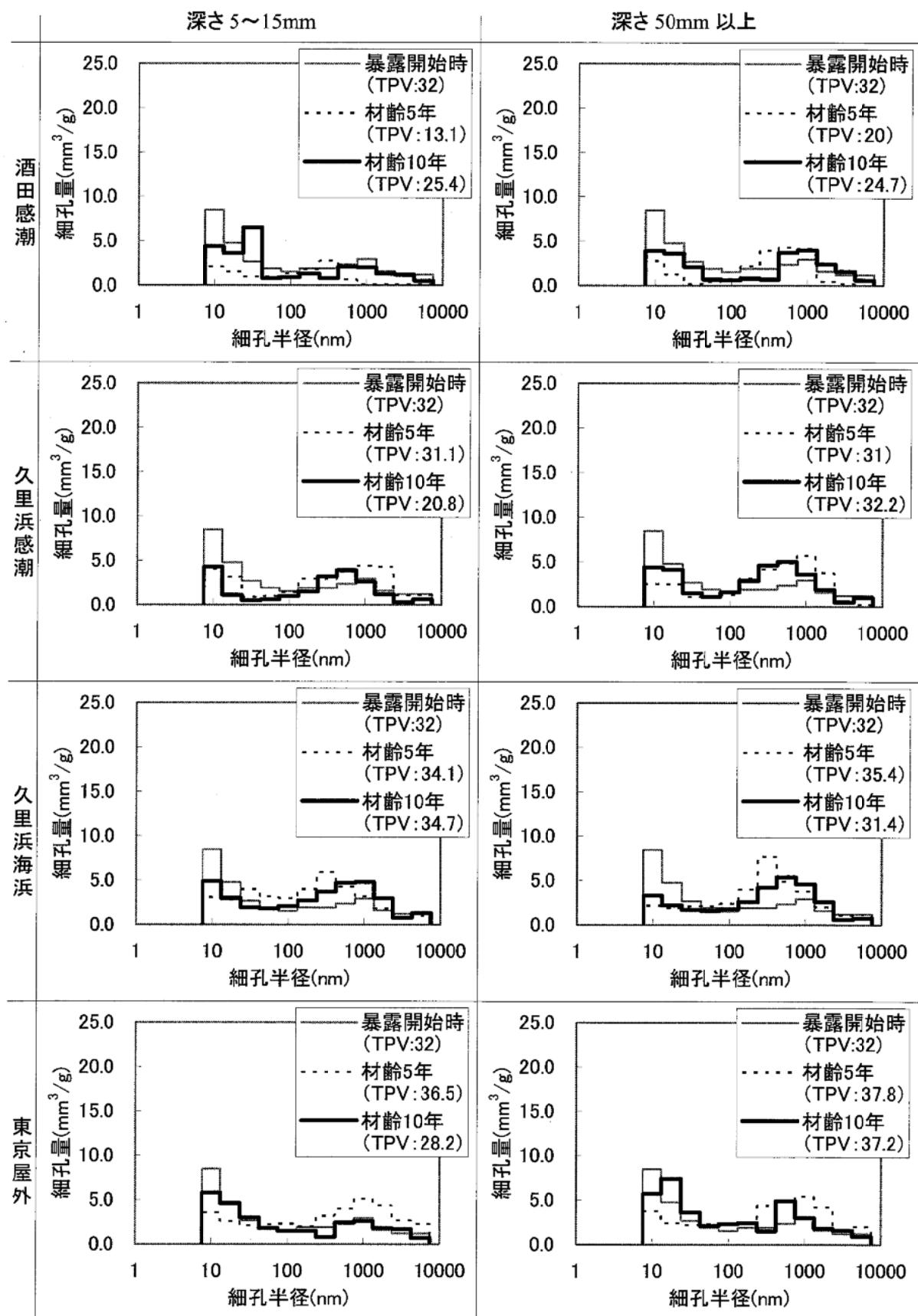
東京屋外



資料図-1.8.13 高炉スラグ微粉末混合セメント(NC ベース)(NBB)、W/C=50%、前養生 91 日



資料図-1.8.14 高炉スラグ微粉末混合セメント(MC ベース)(MBB)、W/C=50%、前養生 28 日



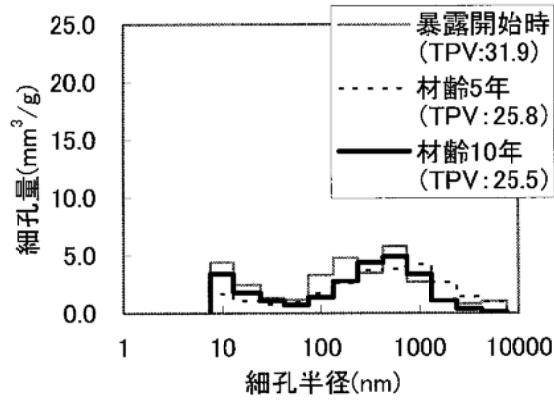
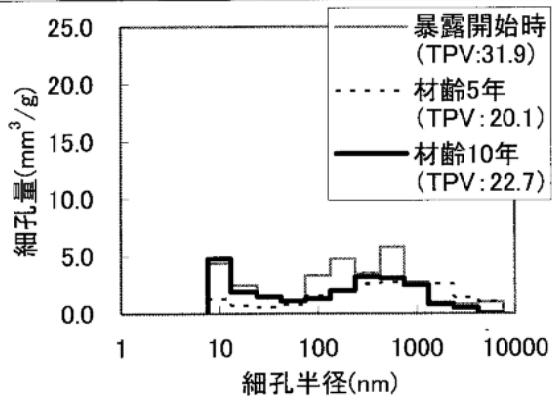
資料図-1.8.15 高炉スラグ微粉末混合セメント(LCベース)(LBB)、W/C=50%、前養生 28 日

酒田感潮

深さ 5~15mm

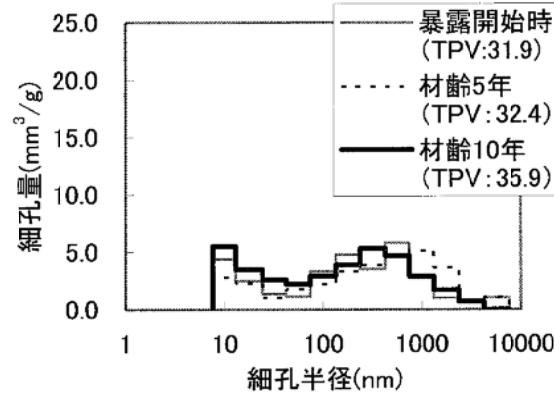
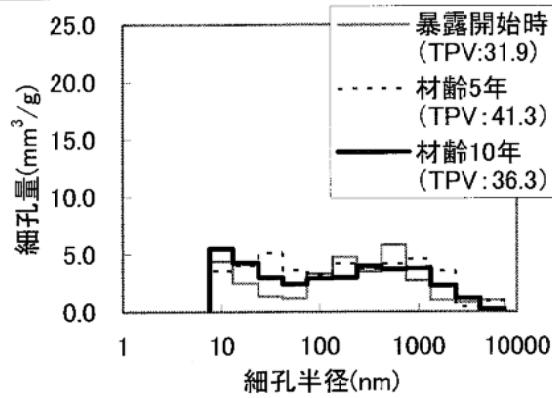
深さ 50mm 以上

久里浜感潮

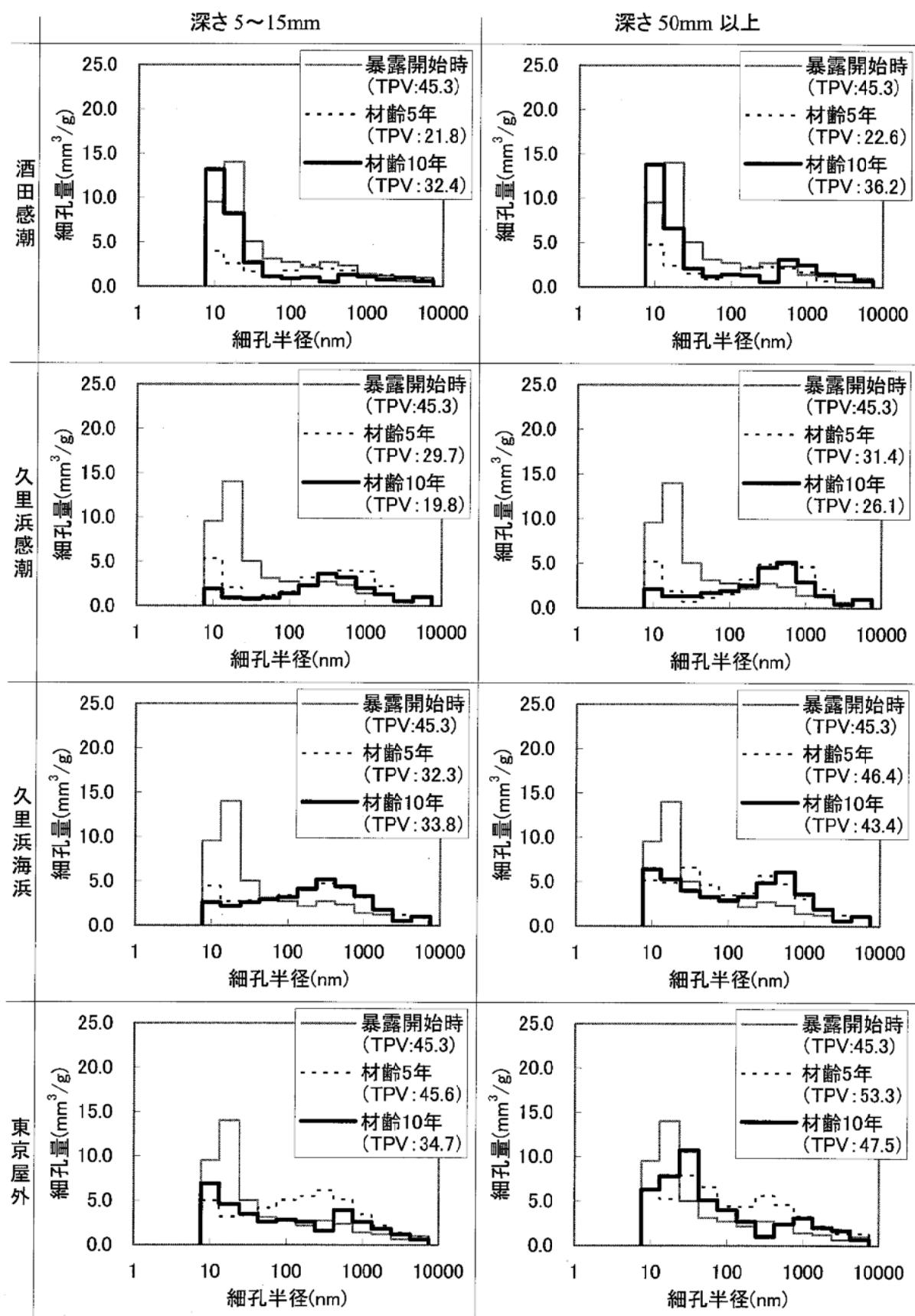


久里浜海滨

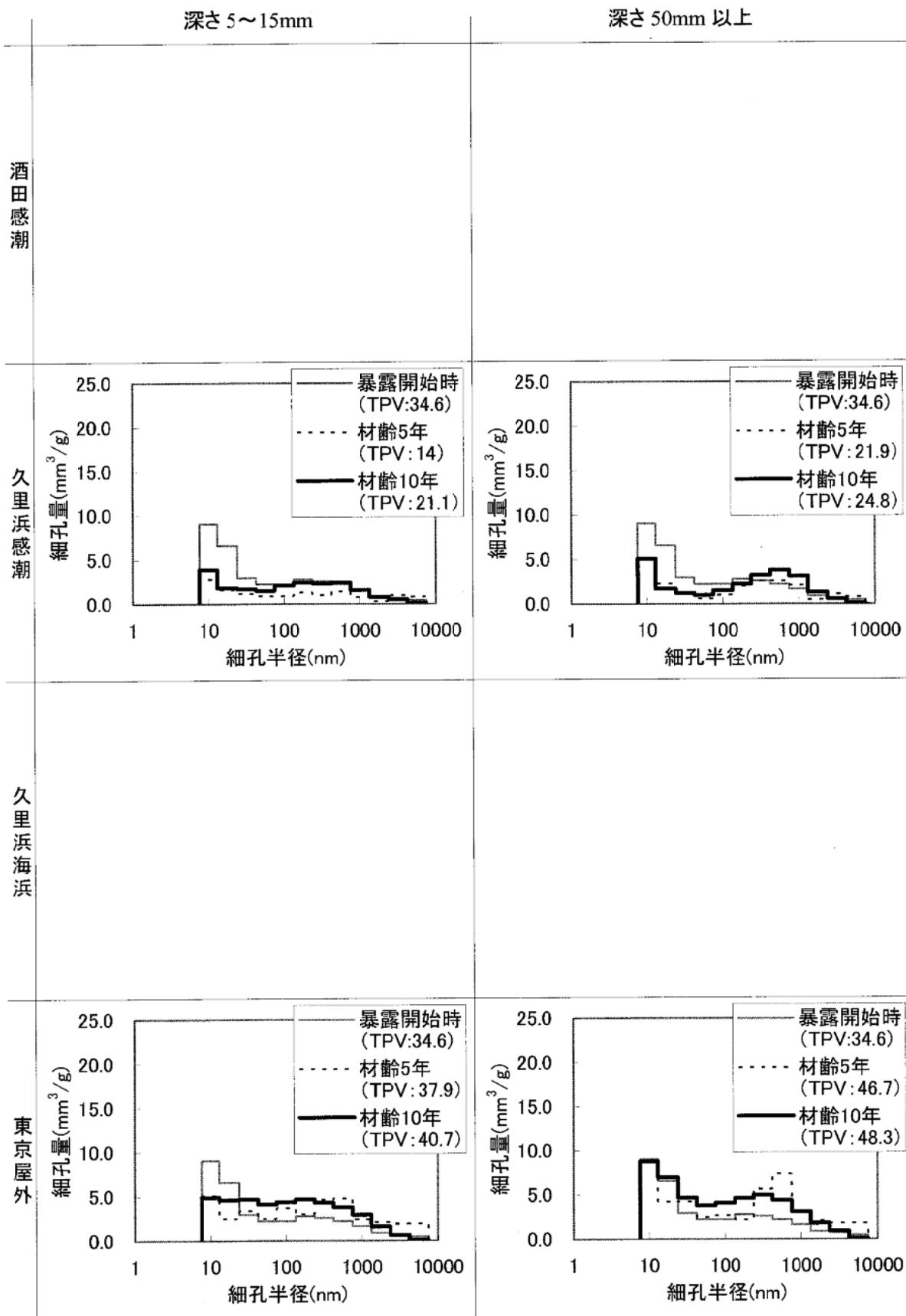
東京屋外



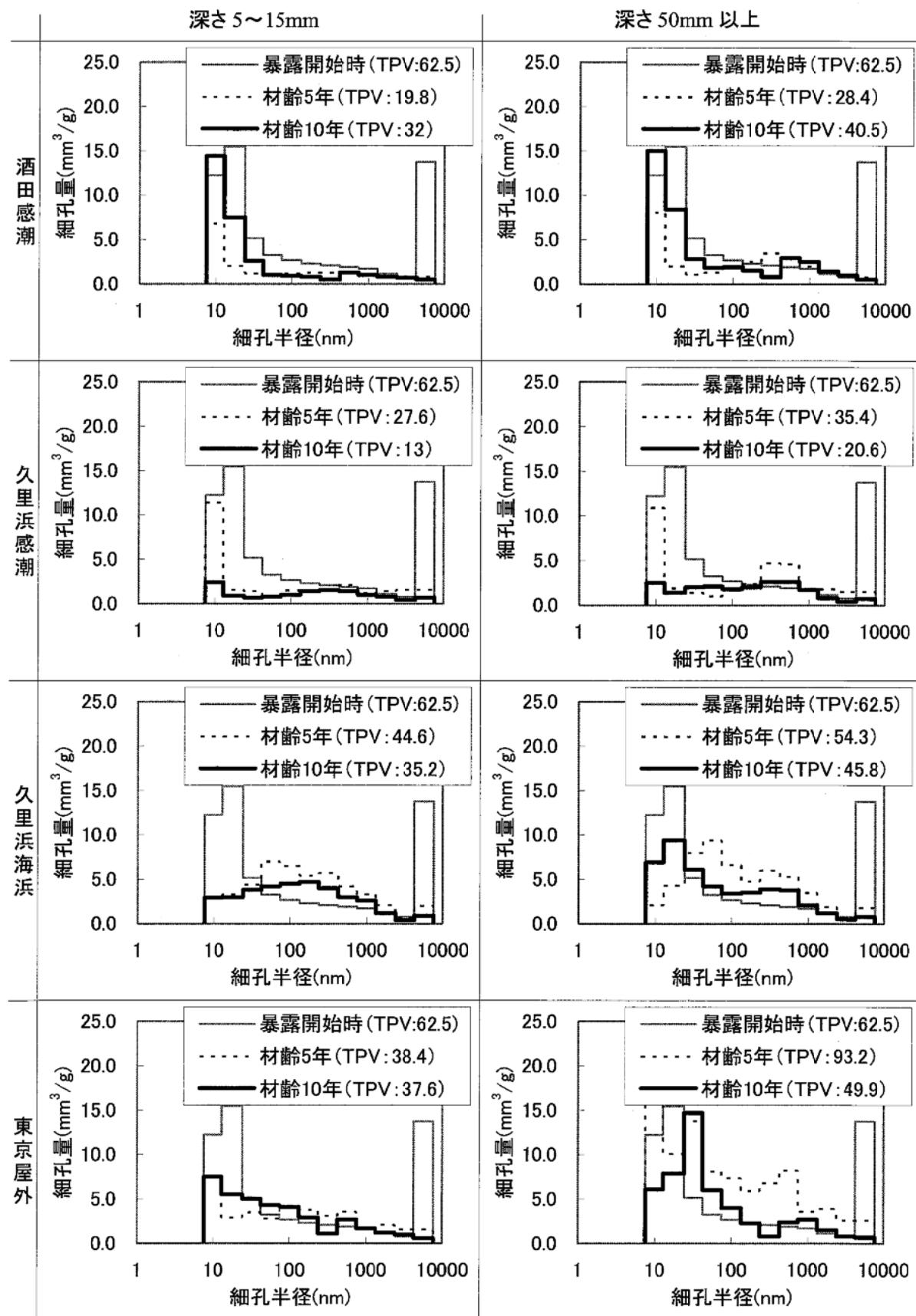
資料図-1.8.16 高炉スラグ微粉末混合セメント(LCベース)(LBB)、W/C=50%、前養生91日



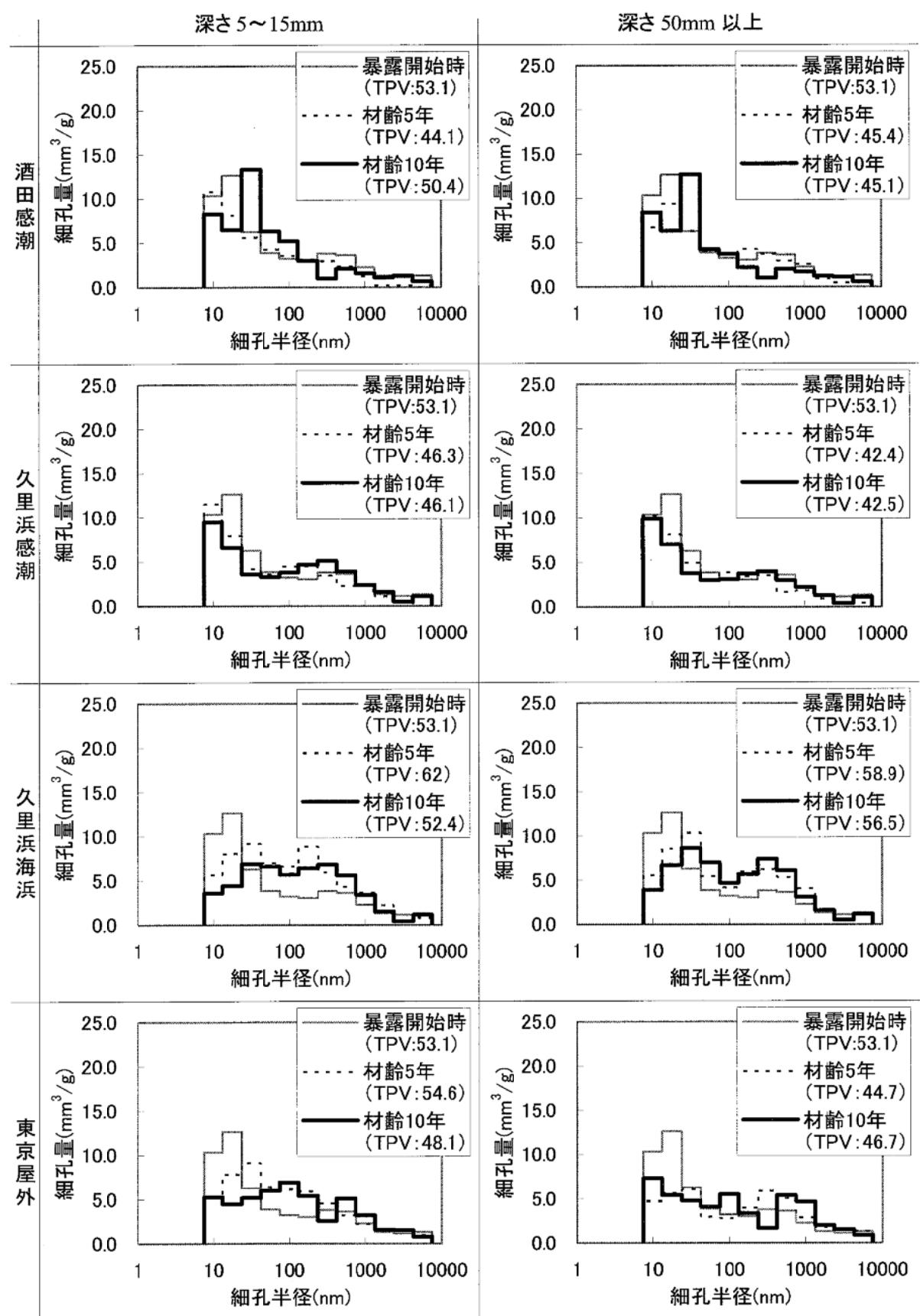
資料図-1.8.17 フライアッシュII種混合セメント(FC)、W/C=50%、前養生28日



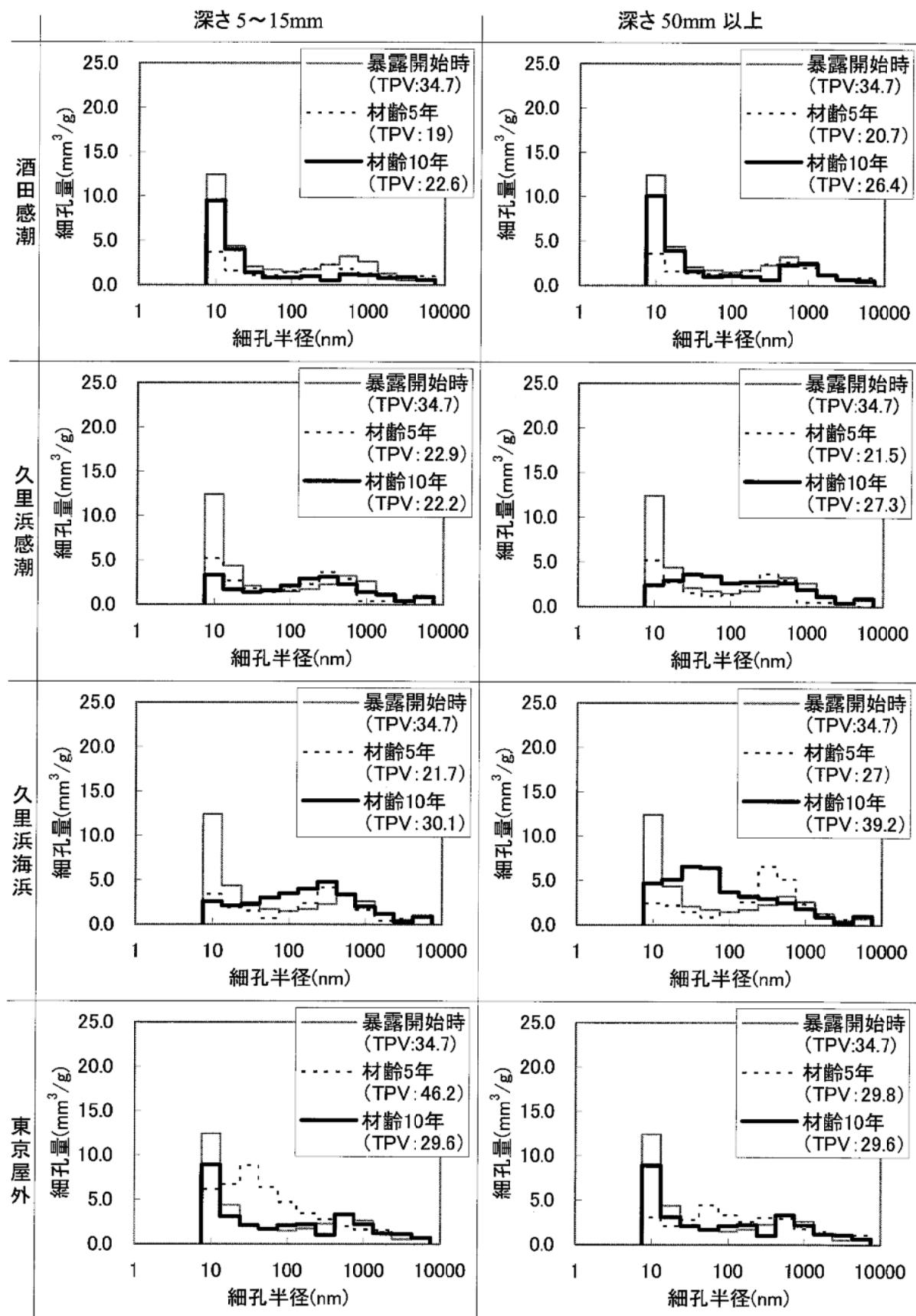
資料図-1.8.18 フライアッシュII種混合セメント(FC)、W/C=50%、前養生91日



資料図-1.8.19 フライアッシュⅢ種混合セメント(FCN)、W/C=50%、前養生 28 日



資料図-1.8.20 石灰石微粉末混合セメント(LP)、W/C=50%、前養生 28 日



資料図-1.8.21 フライアッシュ混合高炉セメント(NBF)、W/C=50%、前養生 28 日

酒田感潮

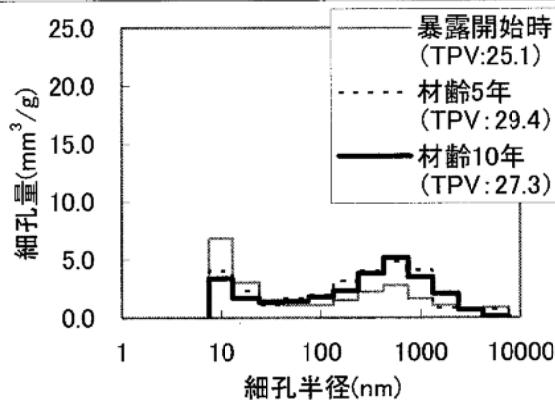
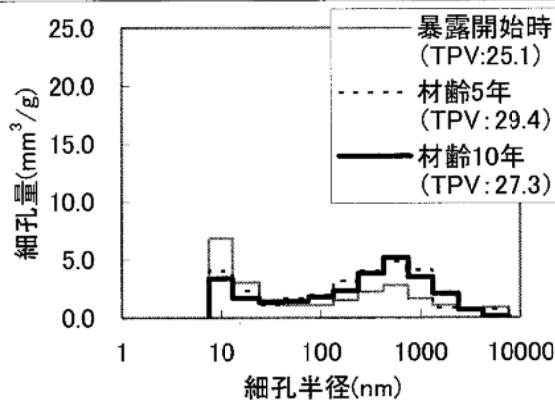
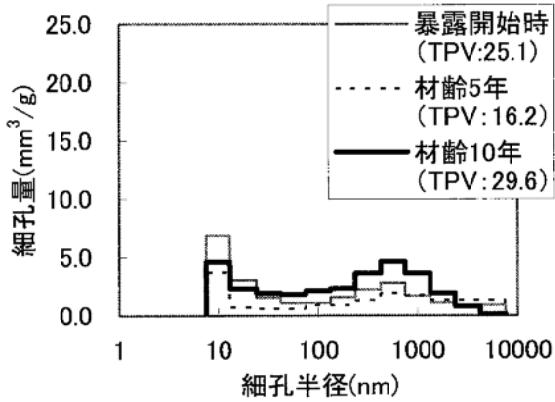
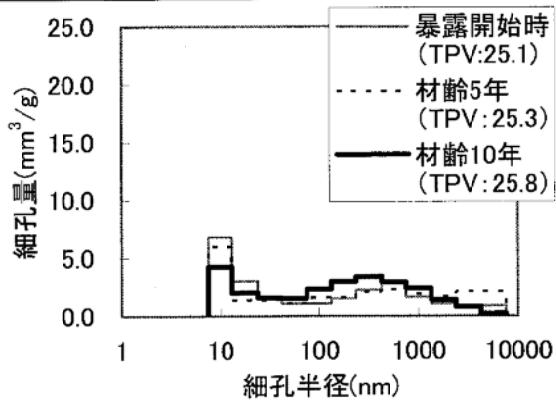
久里浜感潮

久里浜海浜

東京屋外

深さ 5~15mm

深さ 50mm 以上



資料図-1.8.22 フライアッシュ混合高炉セメント(NBF)、W/C=50%、前養生 91 日

2. 鉄筋の発錆に関する試験結果

資料表-2.1 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 酒田感潮 1/2)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果					
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	40	28	5	116.14	0.26	0.22	0.26	0.20	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.03	0.34	0.29			0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	106.56	0.14	0.14	0.14		0.00	0.00	0.00	—	I	
				106.02	0.15	0.15			0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.71	0.48	0.41	0.52	0.50	33.8	0.48	0.34	1.01	I	
				115.19	0.71	0.62			13.7	0.19		—	I	
	50		7	105.67	0.42	0.40	0.48		29.1	0.45	0.33	1.60	I	
				106.22	0.59	0.56			14.2	0.22		—	I	
			5	114.85	0.56	0.49	0.41	0.43	26.1	0.37	1.32	1.07	I	
				115.09	0.38	0.33			160.9	2.28		0.71	I	
			7	105.58	0.55	0.52	0.45		54.6	0.84	1.30	0.73	I	
				105.87	0.40	0.38			114.5	1.76		0.68	I	
MC	40	28	5	115.70	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.16	0.01	0.01			0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	106.19	0.00	0.00	0.03		0.00	0.00	0.00	—	I	
				105.40	0.07	0.07			0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.33	0.31	0.27	0.23	0.14	2.0	0.03	0.01	—	I	
				115.03	0.22	0.19			0.00	0.00		—	I	
	50		7	105.51	0.00	0.00	0.04		26.7	0.41	0.21	—	I	
				105.83	0.09	0.09			0.0			—	I	
			5	115.80	0.60	0.52	0.35	0.34	81.5	1.15	0.67	1.18	I	
				115.60	0.20	0.17			12.7	0.18		0.60	I	
			7	105.39	0.61	0.58	0.34		66.5	1.02	0.52	0.74	I	
				105.70	0.09	0.09			1.6	0.02		0.45	I	
LC	40	28	5	115.47	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.47	0.03	0.03			0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	105.82	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	—	I	
				105.86	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.46	0.17	0.15	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	—	I	
	50			115.29	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	105.33	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00	0.00	—	I	
				105.55	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.47	0.06	0.05	0.29	0.57	13.3	0.19	0.18	1.10	I	
				115.39	0.62	0.54			12.8	0.18		1.06	I	
	60		7	107.08	1.33	1.25	0.85		57.7	0.89	0.69	0.99	I	
				105.87	0.48	0.46			31.7	0.49		0.65	I	

資料表-2.1 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 酒田感潮 2/2)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果					
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NBB	50	28	5	114.94	0.26	0.23	0.11	0.10	0.00	0.00	0.00	—	I	
				114.93	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	106.09	0.20	0.19	0.09		0.00	0.00		—	I	
				106.71	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
	50		5	115.20	0.24	0.21	0.10	0.11	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.50	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	106.88	0.26	0.24	0.12		0.00	0.00		—	I	
				106.06	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
LBB	50		5	115.45	0.19	0.16	0.16	0.08	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.70	0.18	0.15			0.00	0.00		—	I	
			7	106.30	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00		—	I	
				106.88	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
FC	50		5	116.31	0.18	0.15	0.19	0.24	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.64	0.25	0.22			0.00	0.00		—	I	
			7	106.84	0.30	0.28	0.29		0.00	0.00		—	I	
				106.36	0.31	0.30			0.00	0.00		—	I	
FCN	50		5	116.02	0.36	0.31	0.44	0.37	0.00	0.00	0.03	—	I	
				115.72	0.65	0.56			0.00	0.00		—	I	
			7	105.61	0.18	0.17	0.31		0.00	0.00		—	I	
				105.70	0.47	0.45			6.7	0.10		—	I	
LP	50		5	115.87	0.31	0.27	0.36	0.39	21.0	0.30	0.16	0.62	I	
				114.93	0.52	0.45			0.00	0.00		0.24	I	
			7	106.03	0.26	0.25	0.41		22.6	0.35		0.54	I	
				106.86	0.61	0.57			0.00	0.00		0.68	I	
NBF	50		5	115.06	0.09	0.08	0.20	0.13	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.67	0.37	0.32			0.00	0.00		—	I	
			7	106.40	0.02	0.02	0.06		0.00	0.00		—	I	
				106.41	0.10	0.10			0.00	0.00		—	I	

資料表-2.2 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢 10 年 酒田感潮 1/2)

供試体の条件			鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果								
セメントの種類	水セメント比 (%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	長さ(mm)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	40	28	5	106.86	0.54	0.51	0.42	0.43	221.57	24.22	0.39	0.46	0.38	0.58	I ⁺	
				107.06	0.35	0.33			223.07	33.73	0.53			0.37	II	
			7	98.59	0.51	0.52	0.44	0.43	203.64	11.59	0.20	0.30	4.08	0.62	I ⁺	
				97.20	0.36	0.37			201.80	22.40	0.39			0.00	II	
			5	106.43	0.51	0.48	0.68	0.74	220.52	265.29	4.25	4.82	6.93	1.41	I ⁺	
				107.96	0.94	0.87			224.92	342.56	5.39			1.73	II	
	50		7	96.02	0.46	0.48	0.81	0.74	201.13	160.53	2.82	3.33	4.08	0.57	I ⁺	
				92.25	1.05	1.14			193.75	209.85	3.83			0.32	II	
			5	105.87	1.40	1.32	1.01	1.06	220.04	910.93	14.64	7.93	6.93	1.50	I	
				106.70	0.74	0.69			223.45	76.70	1.21			1.58	I ⁺	
			7	96.86	1.43	1.47	1.11	1.06	202.74	614.35	10.72	5.92	4.08	1.71	I ⁺	
				97.63	0.73	0.75			204.04	64.12	1.11			1.52	I ⁺	
MC	40		5	107.59	0.33	0.30	0.27	0.30	223.71	36.45	0.58	0.60	0.70	0.00	I ⁺	
				106.64	0.26	0.224			222.15	39.05	0.62			0.00	I ⁺	
			7	98.18	0.37	0.37	0.34	0.82	205.49	82.03	1.41	0.79	1.76	0.37	I ⁺	
				98.47	0.29	0.30			205.63	9.91	0.17			0.00	I ⁺	
			5	105.60	0.80	0.76	0.85	1.26	221.12	26.84	0.43	1.51	1.15	0.89	I ⁺	
				108.41	1.02	0.94			225.90	165.28	2.59			1.39	II	
	50		7	97.35	0.69	0.71	0.79	1.26	202.19	52.82	0.92	2.01	1.15	0.67	I ⁺	
				99.14	0.87	0.87			206.38	180.41	3.09			1.06	II	
			5	108.09	2.02	1.87	1.45	1.47	225.52	20.38	0.32	1.24	0.95	1.00	II	
				105.87	1.09	1.03			219.84	134.54	2.16			1.48	II	
			7	97.53	1.34	1.38	1.07	1.47	203.63	37.11	0.64	1.05	0.95	1.65	II	
				95.18	0.72	0.76			198.88	81.55	1.45			0.66	II	
LC	40		5	106.97	0.21	0.20	0.21	0.20	222.31	7.53	0.12	0.06	0.04	0.00	I	
				105.93	0.23	0.22			221.21	0.00	0.00			0.00	II	
			7	97.52	0.16	0.17	0.20	0.20	203.30	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	I ⁺	
				97.96	0.23	0.23			204.20	1.20	0.02			0.00	I ⁺	
			5	105.67	1.06	1.01	0.96	1.14	221.17	167.28	2.67	1.51	1.54	1.70	I ⁺	
				106.03	0.97	0.92			220.27	21.99	0.35			1.05	I ⁺	
	50		7	97.57	1.40	1.44	1.32	1.14	203.88	63.60	1.10	1.56	1.54	1.38	I ⁺	
				99.45	1.20	1.21			205.68	117.68	2.02			1.27	II	
			5	107.83	1.41	1.30	1.42	1.47	225.07	59.64	0.94	0.87	0.95	1.10	I	
				107.58	1.66	1.54			224.86	51.12	0.80			1.73	II	
			7	96.08	1.40	1.45	1.52	1.47	201.96	76.56	1.34	1.03	0.95	1.40	I	
				97.55	1.55	1.59			203.85	41.33	0.72			1.05	II	

資料表-2.2 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢 10 年 酒田感潮 2/2)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果							
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	長さ(mm)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NBB	50	28	5	107.57	0.31	0.29	0.25	0.22	223.24	25.51	0.40	0.71	0.87	0.28	I ⁺	
				105.58	0.24	0.22			218.98	63.20	1.02			0.51	I ⁺	
			7	97.83	0.33	0.34	0.19		204.70	49.37	0.85			0.69	I ⁺	
				95.33	0.04	0.04			198.77	68.12	1.21	1.03		0.32	I ⁺	
	50		5	106.31	0.24	0.22	0.26	0.23	221.77	30.98	0.49	0.26	0.31	0.00	I ⁺	
				106.11	0.31	0.29			220.76	1.52	0.02			0.00	I ⁺	
			7	96.65	0.26	0.27	0.21		201.22	38.23	0.67	0.36		0.00	I ⁺	
				96.19	0.14	0.15			200.97	3.12	0.05			0.33	I ⁺	
LBB	50	28	5	106.02	0.19	0.18	0.19	0.22	220.76	119.83	1.92	1.19	0.86	0.00	I ⁺	
				107.76	0.23	0.21			223.57	28.96	0.46			0.00	I ⁺	
			7	97.45	0.20	0.21	0.24		203.29	58.06	1.01	0.53		0.00	I ⁺	
				98.23	0.27	0.27			204.54	2.78	0.05			0.00	I ⁺	
	50		5	104.84	0.25	0.24	0.25	0.24	219.11	2.47	0.04	0.27	0.19	0.00	I ⁺	
				106.50	0.29	0.27			221.13	31.39	0.50			0.00	I ⁺	
			7	96.80	0.29	0.30	0.23		201.24	2.36	0.04	0.10		0.28	I ⁺	
				96.43	0.15	0.16			201.76	8.93	0.16			0.00	I ⁺	
FC	50	28	5	107.02	0.41	0.39	0.27	0.28	222.65	120.32	1.91	1.00	0.98	0.00	I ⁺	
				105.97	0.17	0.16			219.86	4.80	0.08			0.00	I ⁺	
			7	97.00	0.37	0.38	0.29		202.24	107.90	1.89	0.96		0.50	I ⁺	
				97.30	0.20	0.21			202.85	1.79	0.03			0.00	I ⁺	
	50		5	107.27	1.93	1.80	1.21	1.23	224.64	160.43	2.53	1.49	2.05	1.72	II	
				106.28	0.66	0.62			222.59	27.92	0.44			1.80	II	
			7	97.73	1.59	1.63	1.25		204.34	175.32	3.03	2.61		1.70	II	
				98.08	0.85	0.86			204.72	125.96	2.18			1.28	II	
NBF	50	28	5	104.93	0.23	0.22	0.21	0.22	218.59	0.00	0.00	0.31	0.31	0.00	I ⁺	
				102.61	0.21	0.21			213.69	37.11	0.61			0.00	I ⁺	
			7	95.84	0.25	0.26	0.23		199.78	0.00	0.00	0.31		0.00	I ⁺	
				92.76	0.20	0.21			192.73	34.03	0.62			0.00	I ⁺	

資料表-2.3 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 久里浜感潮 1/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少試験結果					鉄筋の発錆試験結果							
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード		
NC	40	28	5	115.02	0.00	0.00	0.05	0.03	0.0	0.0	0.00	0.00	—	I		
				115.83	0.12	0.10			0.0	0.0	0.00		—	I		
	50		7	105.27	0.00	0.00	0.00	0.05	0.0	0.0	0.00	0.00	—	I		
				105.79	0.00	0.00			0.0	0.0	0.00		—	I		
	60		5	116.32	0.17	0.15	0.09	0.34	0.0	0.0	0.00	0.00	—	I		
				115.57	0.05	0.04			0.0	0.0	0.00		—	I		
			7	106.69	0.00	0.00	0.00		0.0	0.0	0.00	0.00	—	I		
				106.10	0.00	0.00			0.0	0.0	0.00		—	I		
	MC		5	114.94	0.32	0.28	0.32	0.34	18.0	0.25	0.13	0.18	0.71	I ⁺		
				115.48	0.42	0.36			0.0	0.0	0.00		0.35	I ⁺		
			7	106.06	0.32	0.31	0.36		30.2	0.46	0.23	0.18	0.43	I ⁺		
				106.08	0.44	0.42			0.0	0.0	0.00		0.31	I ⁺		
			40	116.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.06	—	I		
				115.77	0.00	0.00			0.0	0.0	0.00		—	I		
			50	105.84	0.01	0.01	0.00		16.1	0.25	0.12	0.38	—	I ⁺		
				105.95	0.00	0.00			0.0	0.0	0.00		—	I		
			60	115.70	0.46	0.40	0.67	0.60	21.5	0.30	0.15	0.38	0.43	I ⁺		
				115.61	1.08	0.93			0.0	0.0	0.00		1.08	I ⁺		
				106.71	0.45	0.43	0.53		79.7	1.23	0.61	0.31	0.77	I ⁺		
				105.32	0.67	0.64			0.0	0.0	0.00		1.20	I ⁺		
LC	40	28	5	115.25	1.03	0.89	1.06	0.98	24.1	0.34	0.17	0.31	0.75	I ⁺		
				115.48	1.41	1.22			0.0	0.0	0.00		1.04	I ⁺		
			7	105.24	0.89	0.85	0.91		57.2	0.88	0.44	0.31	0.61	I ⁺		
				105.76	1.02	0.97			0.0	0.0	0.00		0.85	I ⁺		
	50		5	115.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	—	I		
				116.94	0.01	0.01			0.0	0.0	0.00		—	I		
			7	105.56	0.00	0.00	0.00		0.0	0.0	0.00	0.08	—	I		
				106.27	0.01	0.01			0.0	0.0	0.00		—	I		
	60		5	115.43	0.39	0.34	0.22	0.15	11.0	0.16	0.08	0.08	0.12	I ⁺		
				114.99	0.11	0.10			0.0	0.0	0.00		—	I		
			7	106.07	0.19	0.18	0.09		9.0	0.14	0.07	0.08	0.30	I ⁺		
				105.97	0.00	0.00			0.0	0.0	0.00		—	I		
			5	115.74	1.21	1.05	1.16	0.97	76.5	1.08	2.55	1.70	0.90	I ⁺		
				115.67	1.48	1.28			283.3	4.01	—		0.27	I ⁺		
			7	106.11	1.12	1.06	0.78		107.8	1.66	0.85		0.70	I ⁺		
				105.64	0.53	0.51			3.3	0.05	—		0.10	I ⁺		

資料表-2.3 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 久里浜感潮 2/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	鍛質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NBB	50	28	5	115.63	0.19	0.16	0.09	0.09	0.0	0.0	0.00	0.00	—	I	
				115.15	0.01	0.01			0.0	0.0			—	I	
			7	106.51	0.20	0.19	0.09		0.0	0.0	0.00		—	I	
				107.06	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I	
	50		5	115.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	—	I	
				115.06	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I	
			7	105.64	0.00	0.00	0.00		0.0	0.0	0.00		—	I	
				105.38	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I	
LBB	50		5	115.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.04	0.01	0.01			0.00	0.00			—	I	
			7	106.09	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
				106.98	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	
	50		5	115.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.02	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	
			7	105.90	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
				106.95	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	
FCN	50	28	5	114.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.24	0.01	0.01			0.00	0.00			—	I	
			7	106.63	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
				106.27	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	
	50		5	116.46	0.34	0.29	0.37	0.31	54.4	0.77	0.48	0.42	0.27	I ⁺	
				115.24	0.51	0.44			13.9	0.20			—	I ⁺	
			7	106.39	0.33	0.31	0.26		29.7	0.46	0.35		0.42	I ⁺	
				106.89	0.21	0.20			15.4	0.24			—	I ⁺	
NBF	50		5	115.96	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.36	0.03	0.03			0.00	0.00			—	I	
			7	105.59	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
				106.47	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	

資料表-2.3 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 久里浜感潮 3/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	50	91	5	119.40	0.14	0.12	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				118.46	0.10	0.08	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
			7	108.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				108.45	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
			5	119.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				118.59	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
			7	108.71	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
				108.66	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
	NBB		5	118.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				119.29	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
			7	108.51	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
				108.28	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
LBB	50		5	118.48	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				118.33	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
			7	108.29	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
				108.72	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
FC	50		5	117.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				119.28	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
			7	108.91	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
				108.65	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
NBF	50		5	117.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				118.49	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
			7	108.95	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
				109.20	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	

資料表-2.4 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢 10 年 久里浜感潮 1/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	鉄質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	40	28	5	108.16	0.57	0.53	0.49	0.44	187.496	2.94	1.57	1.15	0.38	I ⁺	
				106.91	0.47	0.44			12.588	0.20			0.00	II	
			7	98.18	0.45	0.45	0.39		71.544	1.24	0.73		0.50	I ⁺	
				97.28	0.32	0.33			12.342	0.22			0.00	II	
	50		5	106.61	1.47	1.38	1.38	1.23	89.723	1.43	1.43	0.99	0.00	-	
									31.386	0.55	0.55		1.43	II	
	60		7	97.04	1.05	1.08	1.08	1.42	81.470	1.44	3.69	3.57	0.00	-	
			5	105.45	1.39	1.31	1.22		130.963	2.10	3.45		0.92	I ⁺	
				106.93	1.20	1.13			307.905	4.80			1.08	III	
			7	95.60	1.02	1.07	1.62		340.705	5.94			0.83	I ⁺	
MC	40	28	5	108.94	0.77	0.70	0.89	1.12	32.317	0.51	0.69	0.70	0.55	I ⁺	
				109.05	1.16	1.07			55.336	0.86			1.46	I	
			7	98.98	1.73	1.75	1.36		40.54	0.70	0.71		0.48	I ⁺	
				99.47	0.97	0.98			41.41	0.71			0.74	I	
	50		5	107.96	2.20	2.04	2.11	2.05	736.70	11.67	7.65	7.39	1.07	III	
				107.79	2.35	2.18			228.71	3.63			0.90	II	
	60		7	96.74	1.93	1.99	2.01	1.44	651.98	11.41	7.12	6.95	1.30	III	
				97.17	1.98	2.03			162.40	2.82			1.10	III	
			5	102.89	1.36	1.32	1.30		32.32	0.51	0.69		0.95	II	
				105.59	1.37	1.28			55.34	0.86			1.38	II	
LC	40	28	7	92.26	1.40	1.52	1.58	0.52	1311.39	23.76	13.20	0.30	1.26	III	
				96.88	1.59	1.64			151.10	2.64			1.14	III	
			5	106.16	1.06	1.00	0.65		35.92	0.58	0.32		1.25	I ⁺	
				109.60	0.34	0.31			3.76	0.06			0.20	I ⁺	
	50		7	97.75	0.45	0.46	0.39	1.49	18.60	0.32	0.27	11.38	0.37	I ⁺	
				98.84	0.32	0.32			13.01	0.22			0.39	I ⁺	
	60		5	105.28	1.41	1.34	1.53	0.93	235.13	3.77	13.44	5.13	1.41	III	
				107.95	1.86	1.73			1466.42	23.11			1.06	III	
			7	97.17	1.36	1.39	1.45		332.11	5.79	9.32		1.21	III	
				96.50	1.45	1.50			740.70	12.84			2.42	III	

資料表-2.4 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢10年 久里浜感潮 2/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	鉄質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NBB	50	28	5	107.50	0.34	0.31	0.31	0.26	32.83	0.52	0.52	0.43	0.00	I	
			7	98.20	0.20	0.20	0.20		19.68	0.34	0.34		0.20	I	
			5	104.33	0.19	0.18	0.18	0.21	33.57	0.55	0.74	1.57	0.00	I+	
			7	107.85	0.20	0.18	0.18		58.89	0.93	0.74		0.00	I+	
			7	93.89	0.25	0.26	0.25		169.91	3.06	2.40		0.00	I+	
			5	106.39	0.33	0.31	0.25	0.25	186.31	2.98	2.45	2.58	0.35	I+	
			7	106.29	0.21	0.20	0.25		120.06	1.91	2.45		0.54	I+	
			5	97.14	0.17	0.17	0.26		160.44	2.79	2.70		0.00	II	
			7	97.41	0.33	0.34	0.26		149.47	2.61	2.70		0.55	I+	
			5	104.71	0.26	0.25	0.25	0.25	341.72	5.54	5.54	4.04	0.00	-	
FCN	50		7	94.39	0.23	0.24	0.24		141.81	2.54	2.54		0.00	I+	
			5	105.77	0.26	0.25	0.23	0.26	181.91	2.92	2.83	2.42	0.32	I+	
			7	107.65	0.22	0.20	0.23		172.97	2.74	2.83		0.48	I+	
			5	96.86	0.28	0.29	0.30		93.86	1.64	2.01		0.36	II	
			7	97.11	0.30	0.30	0.30		136.29	2.38	2.01		0.00	I+	
			5	103.80	2.02	1.95	1.81	1.53	794.04	12.80	17.38	15.54	1.91	III	
			7	101.77	1.71	1.68	1.81		1334.92	21.96	17.38		2.00	III	
			5	94.80	1.10	1.16	1.25		512.48	9.17	13.69		2.16	III	
			7	92.71	1.25	1.34	1.25		1004.07	18.21	13.69		1.99	III	
			5	107.27	0.44	0.41	0.34	0.31	150.40	2.38	1.86	1.46	0.45	II	
NBF	50		7	105.80	0.28	0.27	0.34		83.53	1.34	1.86		0.00	II	
			5	97.35	0.31	0.32	0.29		35.59	0.62	1.06		0.55	II	
			7	97.51	0.24	0.25	0.29		85.60	1.50	1.06		0.00	II	

資料表-2.4 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢 10 年 久里浜感潮 3/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果					
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	50	91	5	109.58	1.09	1.30	0.91	0.80	173.37	2.71	3.96	3.21	0.71 I ⁺	
				109.37	1.02	0.52			332.70	5.20			0.76 I ⁺	
			7	100.01	0.92	0.91	0.70	0.76	95.52	1.63	2.45		0.36 I ⁺	
				100.06	0.92	0.49			190.71	3.26			0.47 I ⁺	
	50		5	110.92	1.05	0.62	0.79	0.76	153.49	2.37	2.58	2.76	0.19 I	
				110.15	1.07	0.97			180.56	2.79			0.70 I	
			7	100.41	0.93	0.61	0.72	0.30	194.67	3.30	2.94		0.53 I	
				101.07	0.94	0.83			152.19	2.57			0.49 I	
NBB	50		5	112.09	1.03	0.28	0.31	0.30	93.58	1.43	0.77	0.69	0.00 I	
				111.00	1.02	0.34			6.43	0.10			0.00 I	
			7	101.58	0.94	0.30	0.29	0.33	65.88	1.11	0.60		0.43 I	
				101.89	0.94	0.29			4.86	0.08			0.05 I	
LBB	50		5	111.98	1.03	0.33	0.33	0.33	6.05	0.09	0.05	0.18	0.00 I	
				111.05	1.02	0.32			0.00	0.00			0.36 I	
			7	101.91	0.94	0.31	0.33	0.28	31.15	0.52	0.30		0.36 I	
				100.50	0.93	0.36			4.66	0.08			0.29 I	
FC	50		5	110.50	1.00	0.25	0.29	0.28	47.17	0.73	0.67	1.82	0.03 I ⁺	
				110.58	1.01	0.34			39.12	0.60			0.36 I ⁺	
			7	99.51	0.91	0.29	0.27	0.22	122.77	2.10	2.96		0.00 I ⁺	
				99.85	0.92	0.25			225.37	3.82			0.35 I ⁺	
NBF	50		5	109.44	0.99	0.24	0.23	0.22	14.81	0.23	0.28	0.16	0.18 I ⁺	
				109.00	0.98	0.22			20.37	0.32			0.07 I ⁺	
			7	99.25	0.91	0.23	0.22	0.04	2.76	0.05			0.00 I ⁺	
				101.92	0.94	0.21			1.64	0.03			0.00 I ⁺	

資料表-2.5 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 久里浜海浜 1/2)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	鍛質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	40	28	5	116.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.52	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	106.81	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
	50		5	115.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.99	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	106.64	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I	
	60		5	115.34	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.53	0.08	0.07	0.03		0.00	0.00			—	I	
			7	106.11	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.41	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			5	115.66	0.07	0.06	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.96	0.00	0.00	0.03		0.00	0.00			—	I	
			7	106.56	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.53	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
MC	40	28	5	115.09	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.03	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.05	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	105.94	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I	
	50		5	116.23	0.08	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.42	0.01	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I ⁺	
			7	105.83	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.24	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I ⁺	
	60		5	115.26	0.13	0.11	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.42	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.22	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	107.09	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			5	115.47	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.81	0.03	0.02	0.01		0.00	0.00			—	I	
			7	105.80	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.88	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
LC	40	28	5	115.27	0.01	0.01	0.00	0.00	32.2	0.46	0.23	0.20	—	I ⁺	
			5	115.25	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	105.78	0.01	0.01	0.00		21.9	0.34	0.17	0.20	—	I ⁺	
	50		7	105.95	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	105.95	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I ⁺	

資料表-2.5 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 久里浜海浜 2/2)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果					
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	鍛質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード
NBB	50	28	5	116.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.72	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	106.82	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				106.39	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
	50		5	115.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.02	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	106.04	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				106.38	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
LBB	50		5	115.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.58	0.01	0.01			0.00	0.00		—	I	
			7	106.03	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				106.36	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
FC	50		5	115.90	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.78	0.01	0.01			0.00	0.00		—	I	
			7	105.85	0.06	0.06	0.03		0.00	0.00		—	I	
				106.28	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
FCN	50		5	116.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.23	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	105.94	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				105.99	0.01	0.01			0.00	0.00		—	I	
LP	50		5	115.89	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.80	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	106.14	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				106.59	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
NBF	50		5	115.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.22	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	107.22	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				105.80	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	

資料表-2.6 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢10年 久里浜海浜 1/2)

供試体の条件			鉄筋の質量減少量試験結果						鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	鉄錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	40	28	5	107.90	0.31	0.29	0.24	0.23	15.75	0.25	0.32	0.25	0.11	I	
				107.54	0.20	0.19			23.94	0.38			0.14	II	
			7	99.37	0.23	0.24		0.33	20.73	0.36	0.18	0.42	0.09	I	
				98.25	0.21	0.21			0.00	0.00			0.00	I	
	50		5	108.41	0.18	0.17	0.16	0.33	44.88	0.70	0.46	0.42	0.00	I+	
				108.71	0.16	0.14			13.48	0.21			0.00	I	
			7	98.92	0.44	0.44		0.30	21.88	0.38	0.38	0.81	0.00	I	
				99.46	0.55	0.56			21.92	0.38			0.17	I	
	60		5	108.58	0.27	0.25	0.24	0.30	19.77	0.31	0.27	0.81	0.05	I+	
				108.84	0.26	0.23			14.29	0.22			0.09	I+	
			7	99.10	0.31	0.31		0.26	5.72	0.10	1.34	0.25	0.00	I	
				98.30	0.40	0.41			148.77	2.57			0.02	I+	
MC	40		5	107.43	0.18	0.17	0.23	0.28	6.43	0.10	0.19	0.25	0.00	I	
				109.01	0.32	0.30			17.91	0.28			0.00	I	
			7	96.63	0.28	0.29		0.28	7.29	0.13	0.30	0.02	0.03	I	
				99.37	0.29	0.30			26.55	0.46			0.00	I	
	50		5	108.28	0.20	0.19	0.21	0.28	0.00	0.00	0.04	0.02	0.10	I	
				108.58	0.26	0.24			4.75	0.07			0.00	I+	
			7	97.26	0.27	0.28		0.28	0.00	0.00	0.00	1.03	0.07	I	
				99.81	0.41	0.41			0.00	0.00			0.07	I	
	60		5	107.62	0.15	0.14	0.20	0.28	49.28	0.77	1.53	1.03	0.07	I	
				108.83	0.29	0.26			145.99	2.28			0.11	I+	
			7	98.82	0.37	0.38		0.15	8.89	0.15	0.52	0.17	0.10	I	
				99.59	0.34	0.34			52.08	0.89			0.01	I	
LC	40		5	108.41	0.14	0.13	0.13	0.17	15.33	0.24	0.23	0.17	0.00	I	
				108.15	0.13	0.12			13.35	0.21			0.00	I+	
			7	99.85	0.17	0.17		0.17	6.57	0.11	0.10	0.18	0.08	I	
				99.67	0.17	0.17			5.11	0.09			0.05	I+	
	50		5	109.23	0.12	0.11	0.12	0.34	15.89	0.25	0.16	0.18	0.00	I+	
				108.41	0.13	0.12			4.56	0.07			0.00	I	
			7	99.43	0.24	0.24		0.34	15.07	0.26	0.19	1.12	0.00	I	
				99.40	0.20	0.20			6.62	0.11			0.00	I	
60	40		5	108.63	0.13	0.12	0.23	0.34	68.01	1.06	1.24	1.12	0.04	I+	
				108.45	0.37	0.34			91.09	1.42			0.00	I	
	50		7	99.28	0.33	0.34		0.34	78.27	1.34	1.00	0.04	0.05	I	
				99.57	0.55	0.55			38.30	0.66			0.04	I	

資料表-2.6 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢 10 年 久里浜海浜 2/2)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比 (%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NBB	50	28	5	108.27	0.17	0.16	0.13	0.20	55.43	0.87	0.60	0.61	0.00	I ⁺	
				106.70	0.10	0.10			20.17	0.32			0.00	I ⁺	
			7	99.03	0.31	0.31	0.27	0.27	61.56	1.06	0.61		0.05	I	
				97.30	0.22	0.23			8.89	0.16			0.00	I ⁺	
	50		5	108.25	0.15	0.14	0.22	0.27	17.26	0.27	1.38	1.02	0.00	I	
				108.82	0.32	0.29			159.28	2.48			0.00	I ⁺	
			7	98.64	0.40	0.41	0.33		25.11	0.43	0.65		0.07	I	
				100.02	0.25	0.25			50.70	0.86			0.00	I	
LBB	50		5	108.24	0.27	0.25	0.22	0.26	121.64	1.90	1.00	0.96	0.11	I	
				109.53	0.20	0.18			6.10	0.10			0.00	I ⁺	
			7	98.93	0.41	0.41	0.31		105.90	1.82	0.91		0.09	I	
				99.01	0.21	0.21			0.00	0.00			0.05	I	
FC	50		5	105.48	0.43	0.41	0.31	0.34	6.33		0.10	0.10	0.00	I ⁺	
				107.99	0.24	0.22			6.39	0.10			0.00	I ⁺	
			7	97.63	0.40	0.41	0.36		71.49		0.09		0.05	I ⁺	
				97.84	0.31	0.32			5.06	0.09			0.00	I	
FCN	50		5	107.60	0.22	0.21	0.19	0.28	11.22	0.18	0.32	0.22	0.00	I ⁺	
				109.11	0.19	0.18			29.40	0.46			0.04	I ⁺	
			7	99.40	0.39	0.40	0.36		4.03	0.07	0.11		0.00	I	
				99.53	0.32	0.32			8.93	0.15			0.09	I	
LP	50		5	108.66	0.22	0.20	0.22	0.26	12.42	0.19	0.24	0.25	0.21	I	
				109.08	0.25	0.23			18.27	0.28			0.07	I	
			7	99.67	0.28	0.28	0.30		16.09	0.27	0.25		0.04	I	
				99.18	0.33	0.33			13.66	0.23			0.00	I	
NBF	50		5	109.07	0.33	0.30	0.32	0.36	1.65	0.03	0.08	0.05	0.04	I	
				107.48	0.35	0.33			8.27	0.13			0.00	I	
			7	97.97	0.35	0.36	0.40		0.02	1.24	0.01		0.00	I ⁺	
				97.15	0.42	0.44			0.00	0.00			0.06	I	

資料表-2.7 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 東京屋外 1/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	40	28	5	115.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.57	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	107.06	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.08	—	I	
			7	105.41	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
	50		5	115.90	0.01	0.01	0.15	0.08	11.3	0.16	0.08	0.09	—	I+	
			5	116.35	0.35	0.30	0.15		0.00	0.00			—	I	
			7	107.21	0.00	0.00	0.00		12.2	0.19	0.09	0.09	—	I+	
			7	105.91	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I	
	60		5	115.77	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.08	—	I	
			5	115.41	0.09	0.08	0.04		0.00	0.00			—	I	
			7	105.74	0.00	0.00	0.00		19.7	0.30	0.15	0.08	—	I+	
			7	105.77	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I+	
MC	40	28	5	115.46	0.00	0.00	0.00	0.00	4.6	0.06	0.09	0.08	—	I	
			5	116.09	0.01	0.01	0.00		8.3	0.12			—	I	
			7	105.62	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.07	0.08	—	I	
			7	105.42	0.01	0.01	0.00		9.1	0.14			—	I	
	50		5	115.32	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.45	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.78	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	106.10	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I	
	60		5	115.90	0.15	0.13	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.59	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	105.88	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	105.43	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I	
LC	40	28	5	115.06	0.00		0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.53	0.04	0.04	0.02		0.00	0.00			—	I	
			7	105.44	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	105.66	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
	50		5	115.04	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.93	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	106.14	0.00	0.00	0.12		0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	106.55	0.25	0.23	0.12		0.00	0.00			—	I	
	60		5	115.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	115.46	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I	
			7	105.68	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	106.05	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00			—	I	

資料表-2.7 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 東京屋外 2/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果					
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	鉄質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード
NBB	50	28	5	115.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.88	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	105.51	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				105.41	0.01	0.01			0.00	0.00		—	I	
	50		5	115.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.05	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	106.26	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				106.75	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
LBB	50		5	116.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.80	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	105.84	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				105.43	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
FC	50	28	5	115.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.02	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	106.85	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				107.09	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
FCN	50	28	5	115.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.01	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	105.87	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				106.70	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
LP	50	28	5	115.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				115.52	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	105.98	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				106.04	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
NBF	50	28	5	115.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
				116.10	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	
			7	106.50	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
				106.20	0.00	0.00			0.00	0.00		—	I	

資料表-2.7 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢5年 東京屋外 3/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果					
セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード
NC	50	91	5	117.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	117.93	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I	
			7	108.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	108.61	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
	50		5	118.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	118.14	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
			7	108.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	108.27	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
NBB	50		5	118.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	118.44	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
			7	108.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	108.59	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
LBB	50		5	117.83	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	118.82	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
			7	108.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	108.12	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
FC	50		5	118.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	118.58	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
			7	108.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	108.69	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
NBF	50		5	119.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			5	118.74	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I
			7	109.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			7	108.13	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I

資料表-2.8 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢 10 年 東京屋外 1/3)

供試体の条件			鉄筋の質量減少量試験結果						鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比 (%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	鉄錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	40	28	5	107.26	0.16	0.15	0.17	0.20	4.47	0.07	0.04	0.14	0.00	I	
				107.96	0.21	0.19			0.00	0.00			0.05	I	
			7	98.20	0.21	0.19	0.24	0.20	27.801	0.48	0.24		0.00	I	
				97.84	0.11	0.12			0.000	0.00			0.00	I	
	50		5	105.42	0.05	0.05	0.13	0.19	34.50	0.56	0.43	0.50	0.14	I ⁺	
				108.41	0.23	0.21			19.26	0.30			0.00	I	
			7	96.21	0.16	0.16	0.24		51.159	0.90	0.56		0.00	I ⁺	
				98.05	0.31	0.32			11.924	0.21			0.25	I	
	60		5	107.54	0.24	0.23	0.31	0.37	5.32	0.08	0.04	0.08	0.08	I	
				109.23	0.44	0.40			0.00	0.00			0.00	I	
			7	98.44	0.29	0.29	0.43		4.963	0.09	0.11		0.00	I	
				99.26	0.57	0.57			7.769	0.13			0.00	I ⁺	
MC	40	28	5	108.81	0.26	0.24	0.33	0.34	6.59	0.10	0.12	0.34	0.00	I ⁺	
				109.17	0.46	0.42			8.66	0.13			0.03	I	
			7	96.90	0.19	0.19	0.35		55.49	0.97	0.56		0.00	II	
				97.44	0.50	0.51			8.87	0.15			0.00	I	
	50		5	108.60	0.30	0.28	0.23	0.28	3.84	0.06	0.05	0.08	0.00	I	
				105.49	0.19	0.18			2.11	0.03			0.00	I	
			7	98.45	0.41	0.41	0.34		10.53	0.18	0.10		0.05	I ⁺	
				98.26	0.26	0.26			1.26	0.02			0.00	I	
	60		5	107.40	0.56	0.53	0.35	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	I	
				108.39	0.18	0.17			0.00	0.00			0.00	I	
			7	98.29	1.03	1.05	0.58		0.00	0.00	0.00		0.00	I	
				98.36	0.12	0.12			0.00	0.00			0.00	I	
LC	40	28	5	108.87	0.05	0.04	0.14	0.18	0.00	0.00	0.09	0.18	0.08	I	
				109.14	0.26	0.24			11.65	0.18			0.00	I	
			7	99.58	0.03	0.03	0.22		0.00	0.00	0.26		0.00	I	
				98.80	0.41	0.42			29.84	0.51			0.00	I ⁺	
	50		5	107.36	0.37	0.35	0.24	0.22	186.28	2.95	1.48	1.21	0.00	II	
				109.09	0.13	0.12			0.91	0.01			0.06	I ⁺	
			7	98.33	0.22	0.22	0.21		107.04	1.86	0.93		0.13	II	
				99.28	0.19	0.20			0.00	0.00			0.00	I	
	60		5	108.74	0.24	0.22	0.28	0.31	22.16	0.35	0.46	0.69	0.03	I	
				107.79	0.37	0.34			36.49	0.57			0.08	I	
			7	98.79	0.41	0.42	0.34		41.26	0.71	0.92		0.08	I	
				98.93	0.27	0.27			65.72	1.13			0.06	I	

資料表-2.8 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢 10 年 東京屋外 2/3)

供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比 (%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	錆質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NBB	50	28	5	107.79	0.20	0.18	-0.01	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 I		
				107.89	-0.22	-0.21			0.00	0.00			0.00 I		
			7	97.53	0.30	0.31	0.32		0.00	0.00	0.00	0.01	0.01 I		
				97.94	0.32	0.33			0.00	0.00			0.11 I		
			5	107.65	0.06	0.06	0.09	0.10	0.00	0.00	0.01	0.01	0.09 I		
				107.26	0.14	0.13			1.47	0.02			0.00 I		
	50		7	99.21	0.01	0.01	0.10		0.00	0.00	0.00	0.01	0.00 I		
				97.93	0.19	0.20			0.00	0.00			0.00 I		
	LBB		5	108.12	0.21	0.20	0.19	0.25	6.11	0.10	0.27	0.86	0.05 I		
				107.58	0.19	0.18			27.87	0.44			0.05 I ⁺		
			7	98.44	0.34	0.34	0.30		4.17	0.07	1.44	0.86	0.07 I		
				98.41	0.26	0.26			162.05	2.80			0.02 I		
FC	50	28	5	108.27	0.36	0.34	0.29	0.32	76.46	1.20	0.95	0.55	0.00 I		
				109.95	0.27	0.25			44.24	0.69			0.00 I		
	50		7	98.59	0.36	0.37	0.35		11.41	0.20	0.15	0.55	0.00 I		
				98.52	0.33	0.33			5.62	0.10			0.00 I		
FCN	50	28	5	107.14	0.17	0.16	0.12	0.14	40.27	0.64	0.32	0.24	0.00 I		
				107.04	0.09	0.08			0.00	0.00			0.00 I		
	50		7	96.91	0.20	0.20	0.17		0.00	0.00	0.15	0.24	0.00 I		
				97.20	0.12	0.13			17.41	0.30			0.00 I		
LP	50	28	5	108.53	0.23	0.21	0.21	0.27	57.93	0.91	0.60	0.60	0.00 I ⁺		
				109.96	0.22	0.20			18.06	0.28			0.07 I		
	50		7	98.15	0.30	0.31	0.32		61.07	1.05	0.60	0.60	0.00 I		
				98.44	0.34	0.34			8.19	0.14			0.00 I		
NBF	50	28	5	107.41	0.17	0.16	0.18	0.18	54.88	0.86	0.43	0.39	0.10 I		
				108.82	0.22	0.20			0.00	0.00			0.06 I		
	50		7	99.07	0.20	0.20	0.18		39.55	0.68	0.35	0.39	0.10 I		
				98.04	0.16	0.17			1.39	0.02			0.06 I		

資料表-2.8 鉄筋の発錆に関する試験結果(材齢 10 年 東京屋外 3/3)

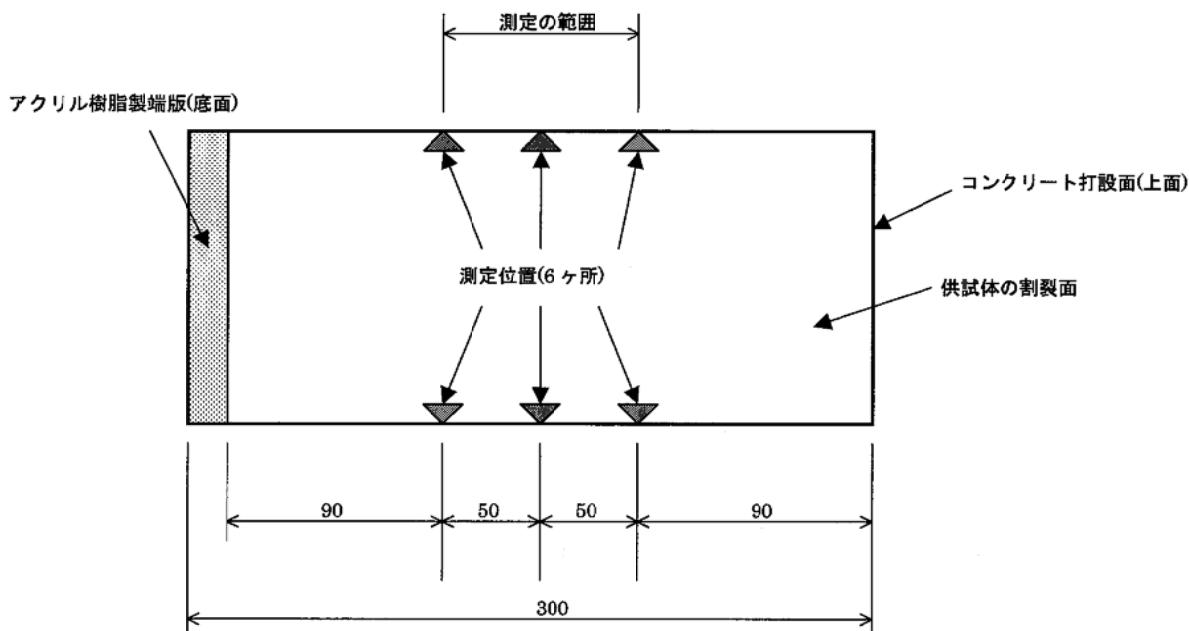
供試体の条件				鉄筋の質量減少量試験結果					鉄筋の発錆試験結果						
セメントの種類	水セメント比 (%)	前養生(日)	かぶり(cm)	腐食前鉄筋質量(g)	鍛質量(g)	1本当たりの質量減少率(%)	かぶり別平均質量減少率(%)	平均質量減少率(%)	発錆面積(mm ²)	1本当たりの発錆面積率(%)	かぶり別平均発錆面積率(%)	平均発錆面積率(%)	孔食深さ(mm)	腐食グレード	
NC	50	91	5	111.41	0.23	0.21	0.22	0.19	6.85	0.11	0.11	0.13	0.05	I	
				111.13	0.26	0.23			6.85	0.11	0.15		0.19	I+	
			7	102.07	0.22	0.21	0.17	0.20	0.00	0.00	0.53	0.00	I		
				100.93	0.12	0.12			17.19	0.29		0.15	0.04	I	
	LC		5	109.52	0.24	0.22	0.19	0.06	0.00	0.00	0.79	0.17	0.00	I	
				110.96	0.18	0.16			101.26	1.57	0.26		0.09	I+	
			7	100.26	0.20	0.20	0.21	0.20	0.00	0.00	0.53	0.11	I		
				100.22	0.22	0.22			29.92	0.51		0.09	I		
			5	111.35	0.12	0.11	0.08	0.10	21.63	0.33	0.24	0.17	0.17	I	
				110.74	0.05	0.05			9.83	0.15	0.09		I		
NBB	50		7	101.19	-0.01	-0.01	0.04	0.20	0.00	0.00	0.10	0.17	0.00	I	
				101.80	0.10	0.10			11.75	0.20	0.00		I		
			5	111.40	0.34	0.31	0.23	0.10	63.10	0.97	0.51	0.40	0.10	I	
				112.80	0.17	0.15			2.84	0.04	0.18		I		
			7	101.08	0.24	0.24	0.17	0.20	32.36	0.55	0.28	0.10	0.08	I	
				101.04	0.11	0.11			0.00	0.00	0.11		I		
	LBB		5	109.68	0.11	0.10	0.06	0.10	13.88	0.22	0.11	0.10	0.00	I	
				110.12	0.02	0.02			0.00	0.00	0.17		I		
			7	100.08	0.17	0.17	0.14	0.19	10.09	0.17	0.09	0.08	0.00	I	
				100.18	0.10	0.10			0.00	0.00	0.07		I		
			5	111.85	0.27	0.24	0.18	0.19	7.01	0.11	0.06	0.08	0.20	I	
				112.68	0.13	0.11			0.00	0.00	0.00		I		
NBF	50		7	102.45	0.25	0.24	0.21	0.19	1.24	0.02	0.09	0.08	0.18	I	
				101.73	0.17	0.17			9.14	0.15	0.10		I+		

3. 塩化物イオンの浸透深さ

本研究では、材齢 5 年および 10 年において塩化物イオンの浸透深さを測定した。その結果を以下に示す。

試験方法 :

塩化物イオン浸透深さの測定は、JIS A 1171 「ポリマーセメントモルタルの試験方法」の塩化物イオン浸透深さ試験に準じて行った。測定は供試体を割裂して二分割し、その断面に 0.1% フルオレセインナトリウム水溶液および 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧して、蛍光を発する部分を塩化物イオン浸透域とし、測定範囲は、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 円柱供試体の割裂面に対して、資料図-3.1 に示す位置を 5cm 刻みにて 3ヶ所づつ計 6ヶ所測定し、測定値の平均を塩化物イオン浸透深さとした。



資料図-3.1 塩化物イオンの浸透深さの測定位置(mm)

塩化物イオンの浸透深さの測定結果を資料表-3.1、セメントの種類と塩化物イオンの浸透深さの関係を資料図-3.2 に示す。

資料表-3.1 塩化物イオンの浸透深さの測定結果 (1/2) (mm)

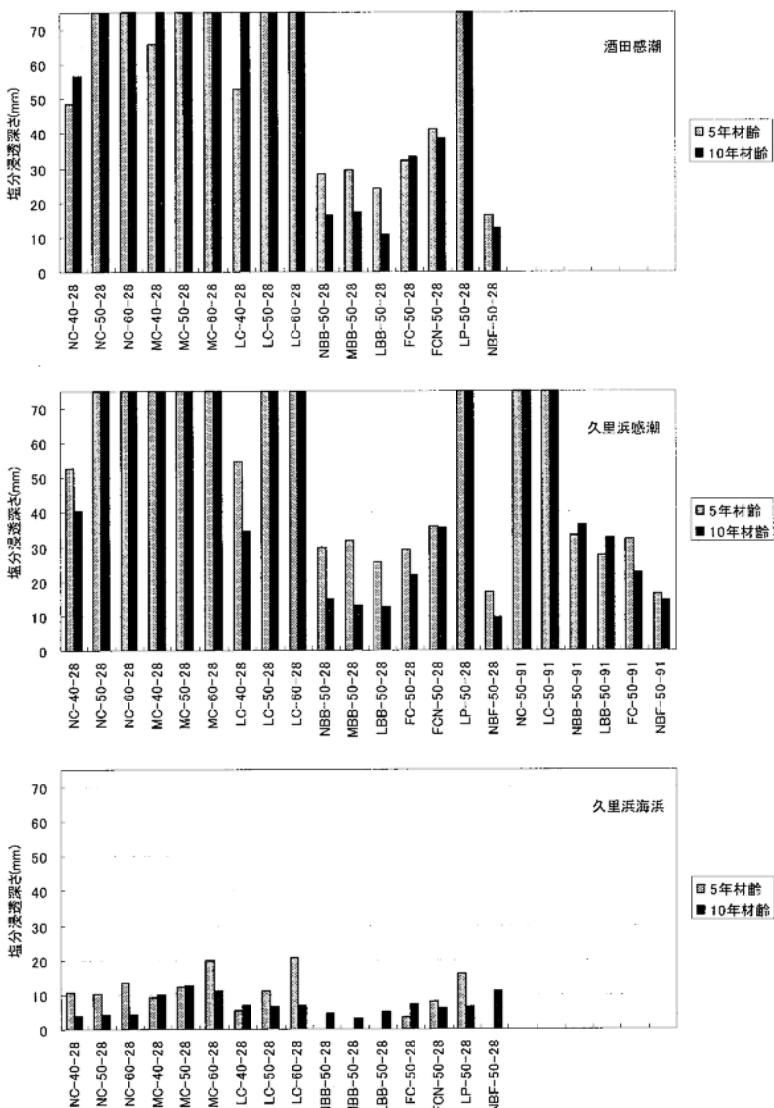
セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢 5 年			材齢 10 年		
			酒田 感潮	久里浜 感潮	久里浜 海浜	酒田 感潮	久里浜 感潮	久里浜 海浜
NC	40	28	48.7	52.7	10.6	56.5	40.6	4.0
	50		>75.0	>75.0	10.5	>75.0	>75.0	4.4
	60		>75.0	>75.0	13.4	>75.0	>75.0	4.3
MC	40	28	65.9	>75.0	9.2	>75.0	>75.0	9.8
	50		>75.0	>75.0	12.1	>75.0	>75.0	12.5
	60		>75.0	>75.0	19.9	>75.0	>75.0	11.1
LC	40	28	52.9	54.6	5.2	>75.0	34.5	6.8
	50		>75.0	>75.0	11.2	>75.0	>75.0	6.4
	60		>75.0	>75.0	20.8	>75.0	>75.0	6.8
NBB	50	28	28.5	29.8	0.0	16.6	15.1	4.6
MBB	50		29.6	31.8	0.0	17.4	12.9	3.0
LBB	50	28	24.0	25.6	0.0	10.9	12.8	5.1
FC	50		32.3	29.1	3.4	33.1	21.8	7.2
FCN	50	28	41.2	36.1	8.0	38.7	35.6	6.2
LP	50		>75.0	>75.0	16.2	>75.0	>75.0	6.4
NBF	50		16.3	17.0	0.0	12.5	9.6	11.0

資料表-3.1 塩化物イオンの浸透深さの測定結果 (2/2) (mm)

セメントの種類	水結合材比(%)	前養生(日)	材齢 5 年			材齢 10 年		
			酒田感潮	久里浜感潮	久里浜海浜	酒田感潮	久里浜感潮	久里浜海浜
NC	50	91	—	>75.0	—	—	>75.0	—
LC	50		—	>75.0	—	—	>75.0	—
NBB	50		—	33.3	—	—	—	—
LBB	50		—	27.5	—	—	—	—
FC	50		—	32.0	—	—	—	—
NBF	50		—	16.3	—	—	—	—

材齢 5 年に比べて材齢 10 年の塩分浸透深さが小さくなっている試験体が多く、長期材齢の塩分浸透深さを測定出来ていない可能性が高い。

しかしながら、セメントの種類と塩化物イオン浸透深さの関係は、鉄筋の発錆に関する試験の傾向と一致し、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用した場合に塩化物イオン浸透深さは小さくなり、特に両者を用いた三成分系の NBF では塩分浸透抑制効果が顕著に認められた。なお、前養生期間の違いが塩化物イオン浸透深さに与える影響は認められなかった。



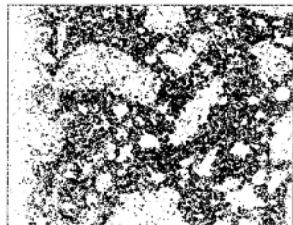
資料図-3.2 セメントの種類と塩化物イオンの浸透深さの関係

4. SEM/EDS による元素マッピング測定結果

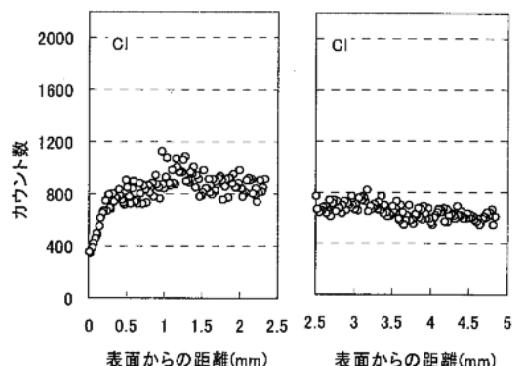
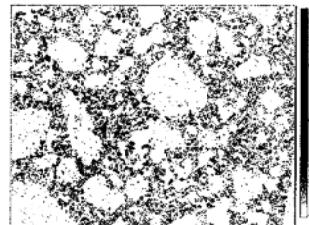
4.1 C 1

NC-50-Cl

表層から 0~2.5mm

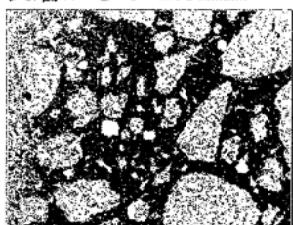


2.5~5.0mm

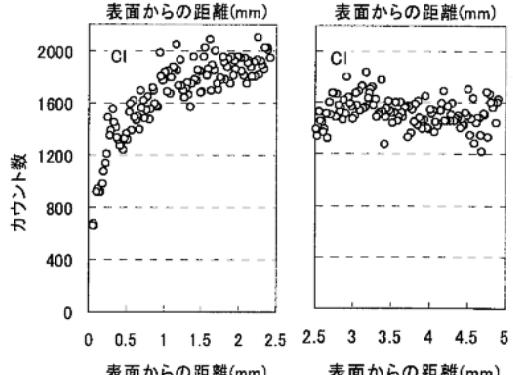


MC-50-Cl

表層から 0~2.5mm

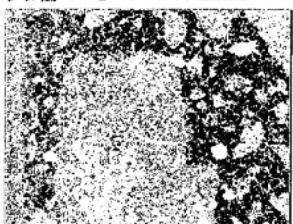


2.5~5.0mm

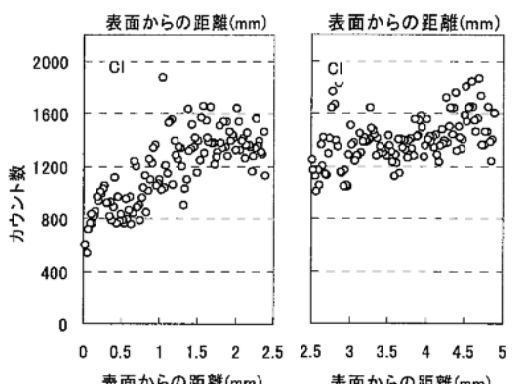


LC-50-Cl

表層から 0~2.5mm

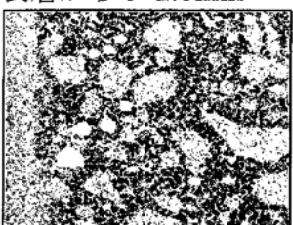


2.5~5.0mm

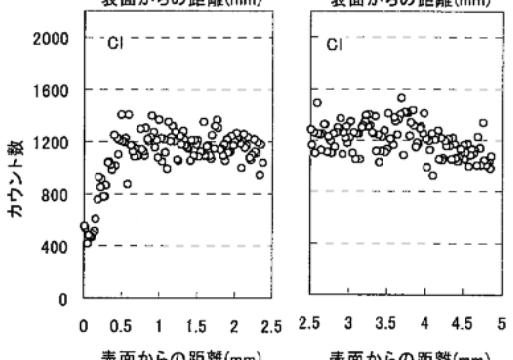
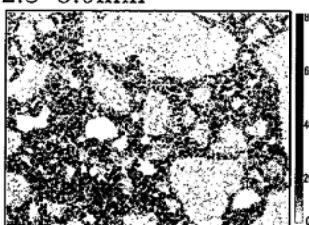


NBB-50-Cl

表層から 0~2.5mm



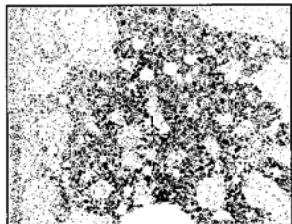
2.5~5.0mm



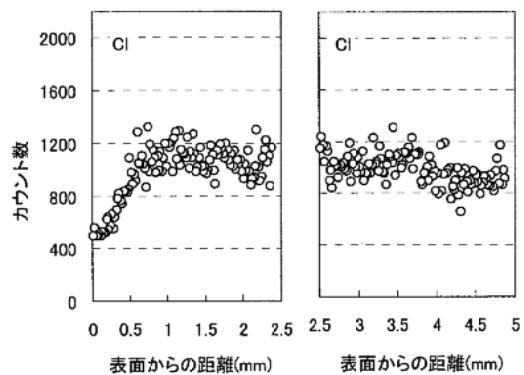
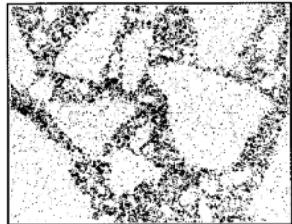
資料図-4.1 Cl (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (1/3)

MBB-50-Cl

表層から 0~2.5mm

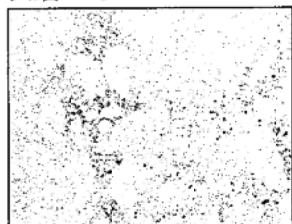


2.5~5.0mm

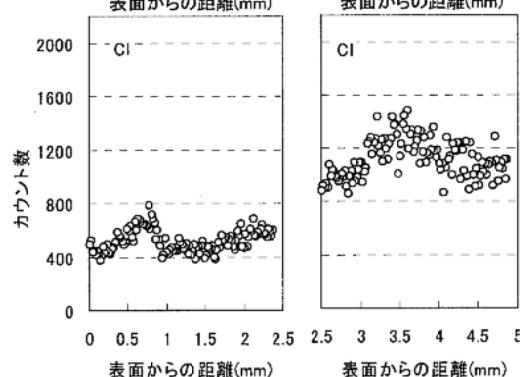
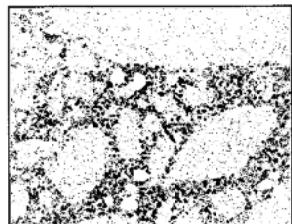


LBB-50-Cl

表層から 0~2.5mm

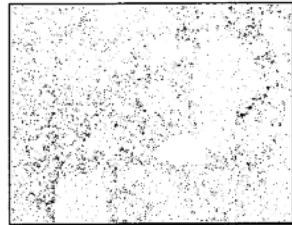


2.5~5.0mm

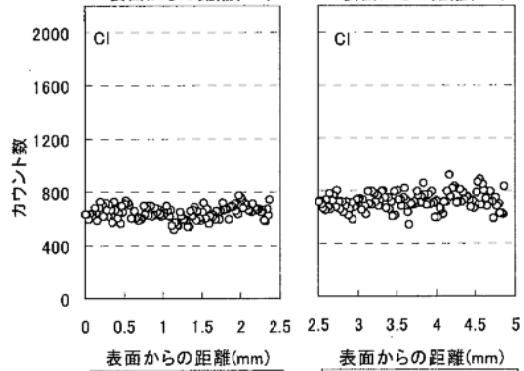
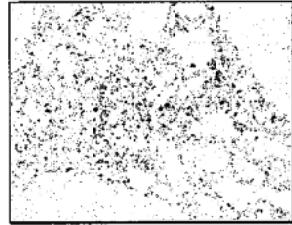


FC-50-Cl

表層から 0~2.5mm

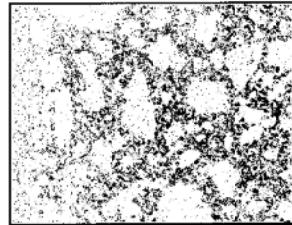


2.5~5.0mm

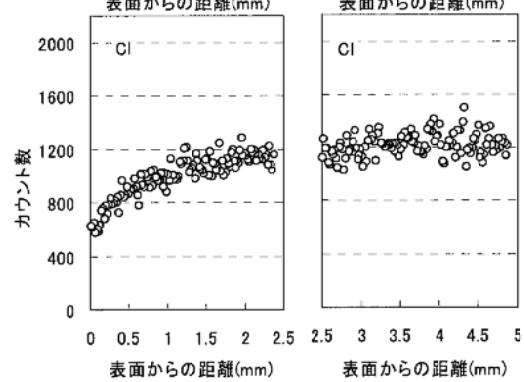
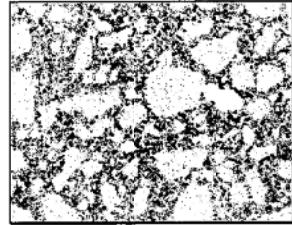


FCN-50-Cl

表層から 0~2.5mm



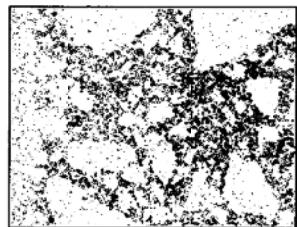
2.5~5.0mm



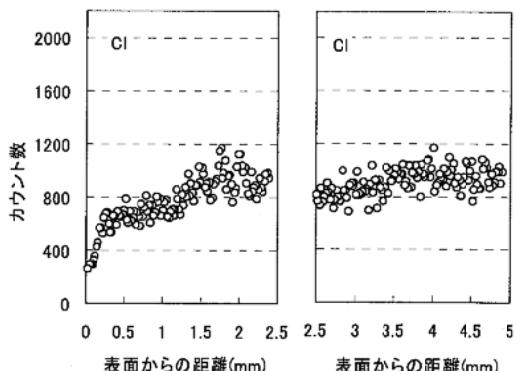
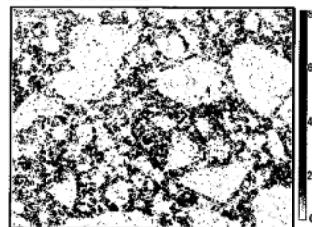
資料図-4.1 Cl (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (2/3)

LP-50-Cl

表層から 0~2.5mm

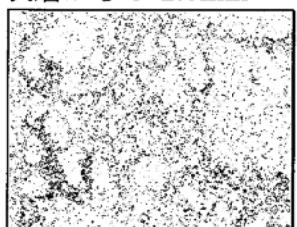


2.5~5.0mm

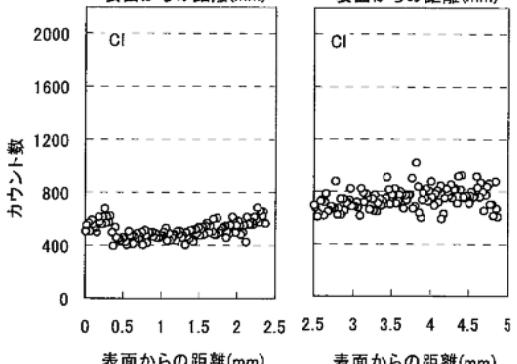
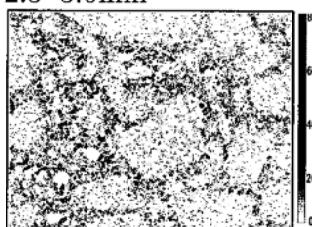


NBF-50-Cl

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm



資料図-4.1 Cl (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (3/3)

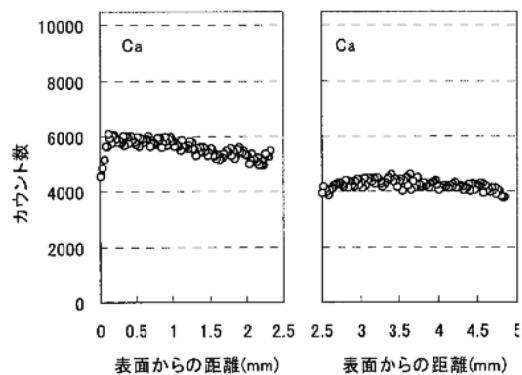
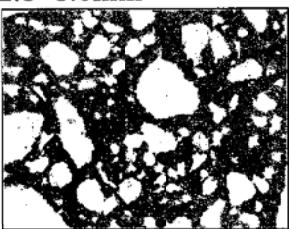
4.2 Ca

NC-50-Ca

表層から 0~2.5mm

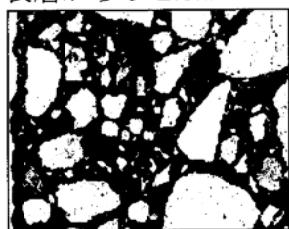


2.5~5.0mm

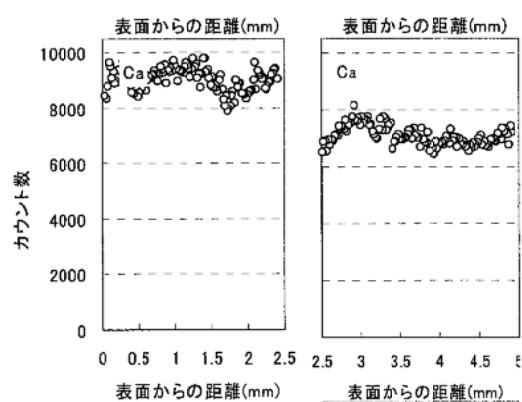
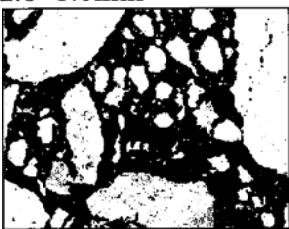


MC-50-Ca

表層から 0~2.5mm

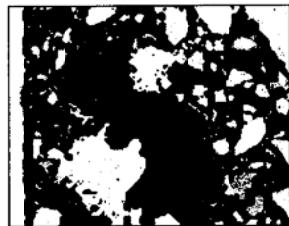


2.5~5.0mm

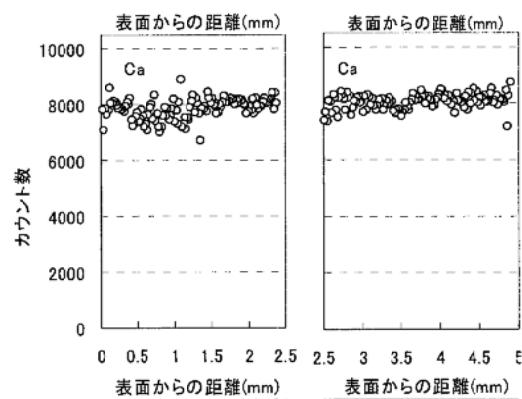
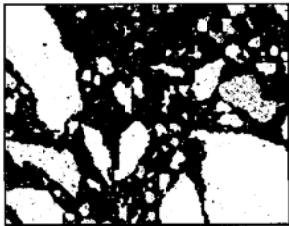


LC-50-Ca

表層から 0~2.5mm

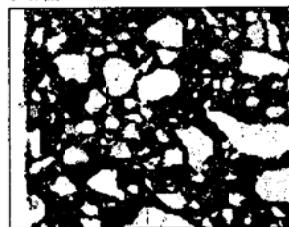


2.5~5.0mm

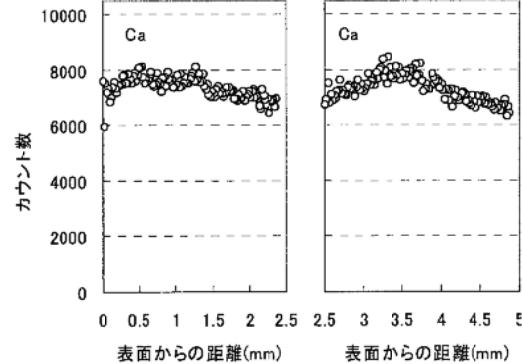
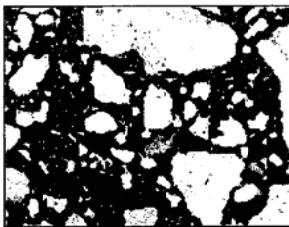


NBB-50-Ca

表層から 0~2.5mm



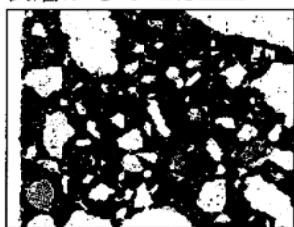
2.5~5.0mm



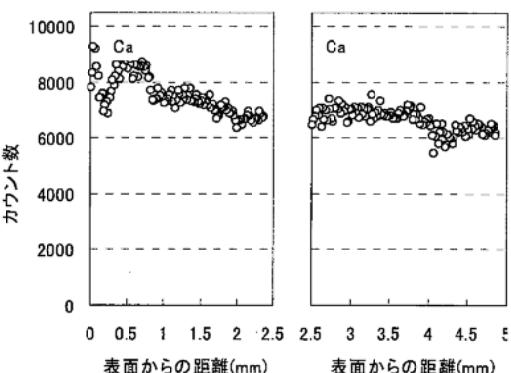
資料図-4.2 Ca (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (1/3)

MBB-50-Ca

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm

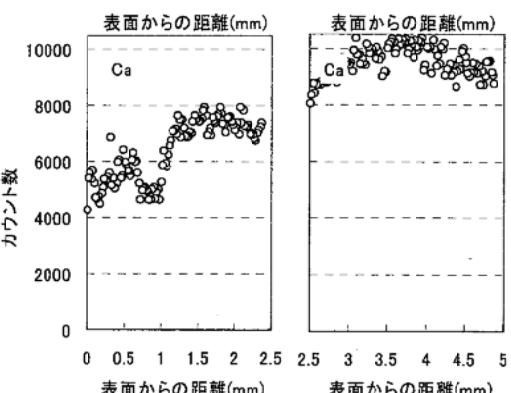


LBB-50-Ca

表層から 0~2.5mm

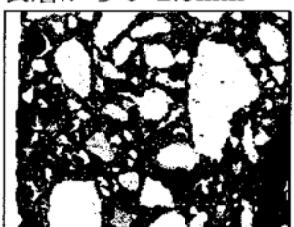


2.5~5.0mm

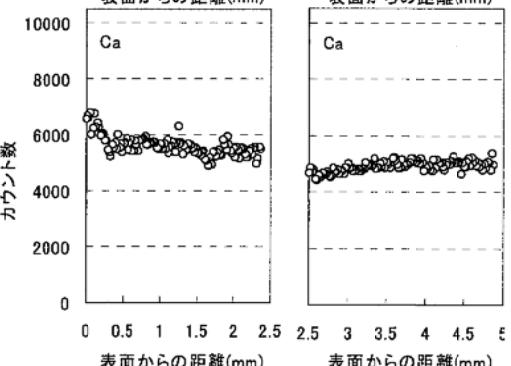


FC-50-Ca

表層から 0~2.5mm

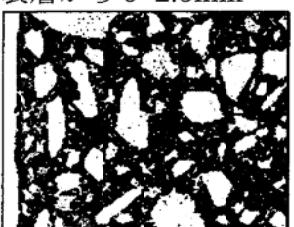


2.5~5.0mm

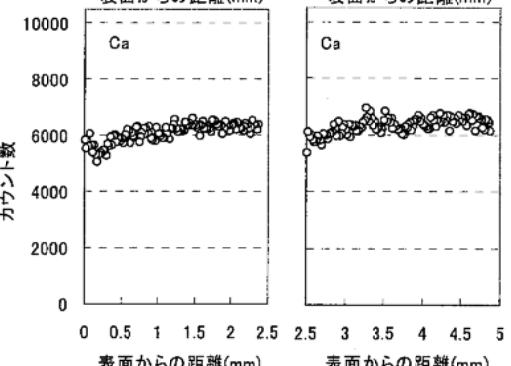


FCN-50-Ca

表層から 0~2.5mm



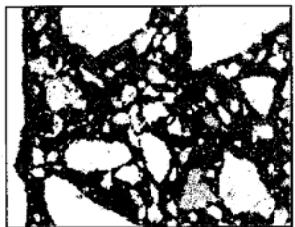
2.5~5.0mm



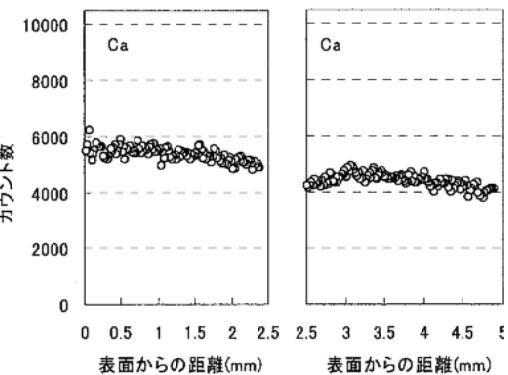
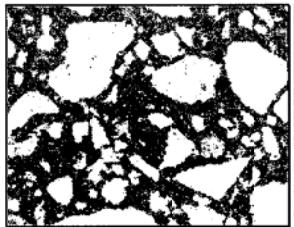
資料図-4.2 Ca (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (2/3)

LP-50-Ca

表層から 0~2.5mm

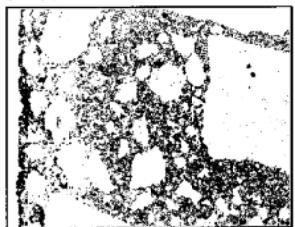


2.5~5.0mm

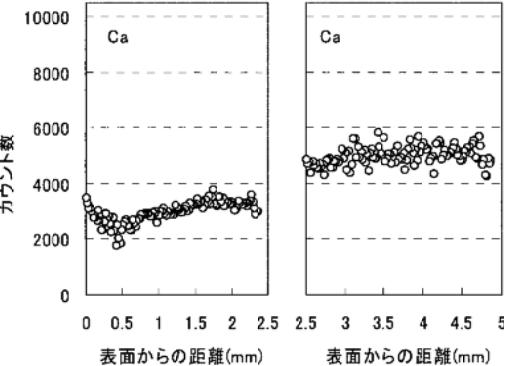
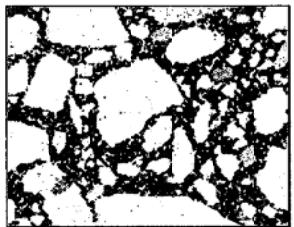


NBF-50-Ca

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm

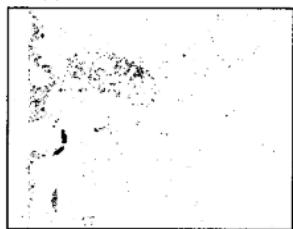


資料図-4.2 Ca (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (3/3)

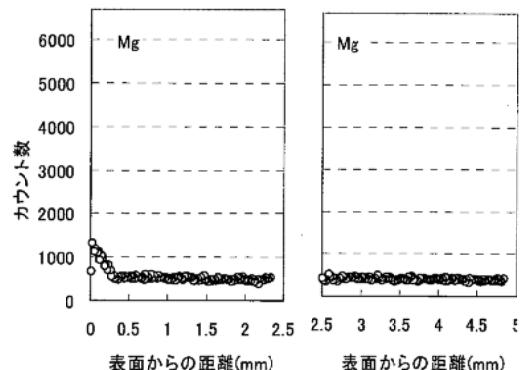
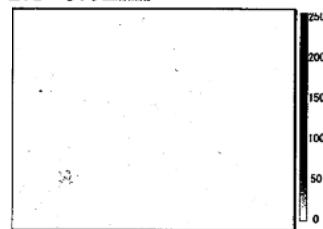
4.3 Mg

NC-50-Mg

表層から 0~2.5mm

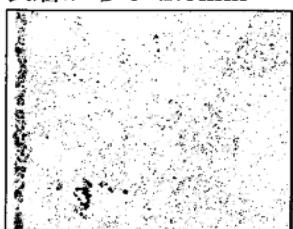


2.5~5.0mm

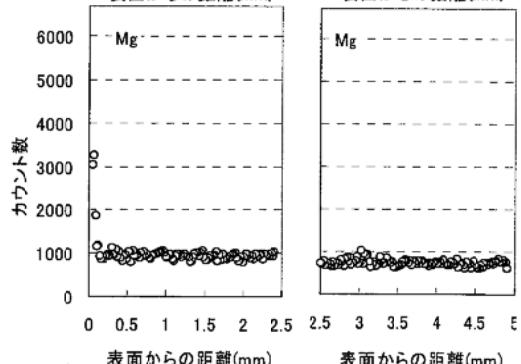
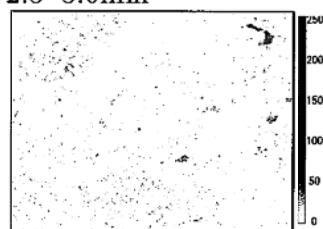


MC-50-Mg

表層から 0~2.5mm

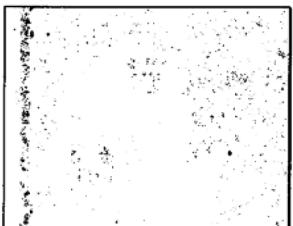


2.5~5.0mm

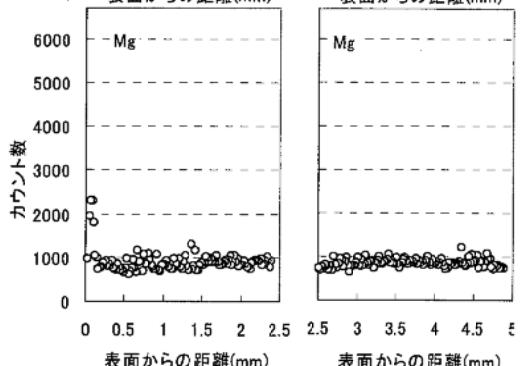
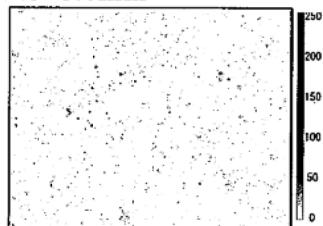


LC-50-Mg

表層から 0~2.5mm

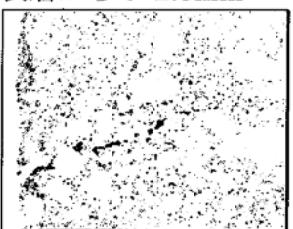


2.5~5.0mm

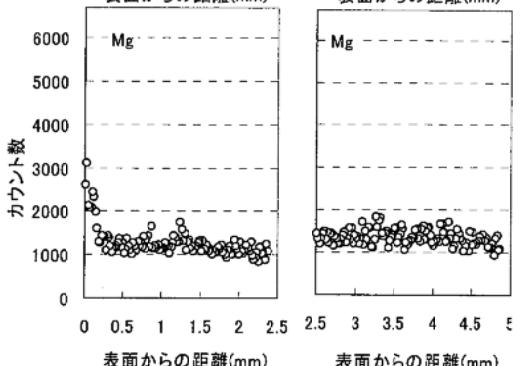


NBB-50-Mg

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm



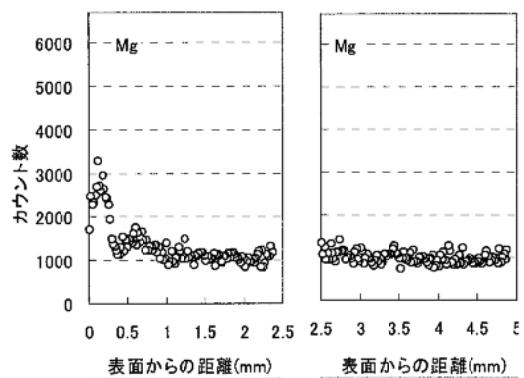
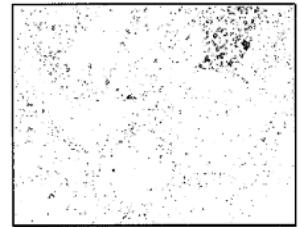
資料図-4.3 Mg (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (1/3)

MBB-50-Mg

表層から 0~2.5mm

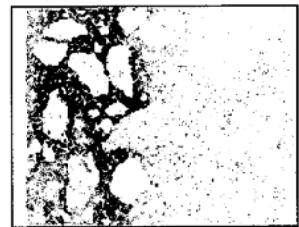


2.5~5.0mm

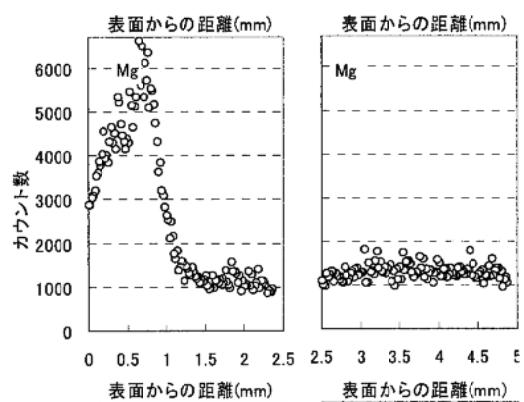
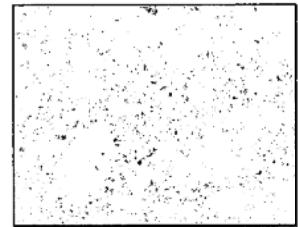


LBB-50-Mg

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm

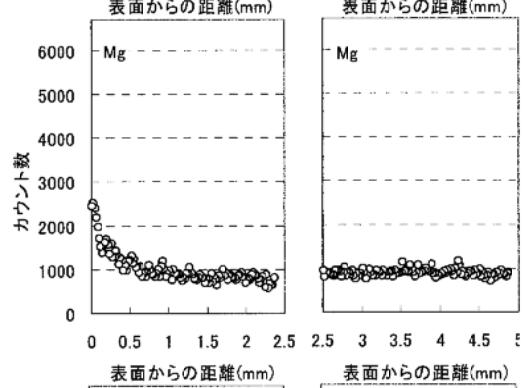
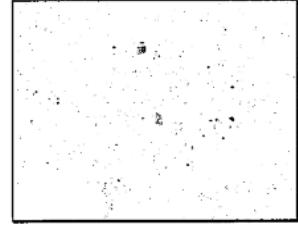


FC-50-Mg

表層から 0~2.5mm

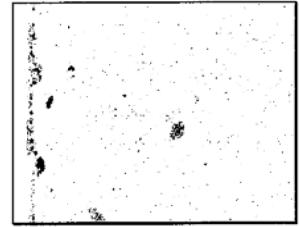


2.5~5.0mm

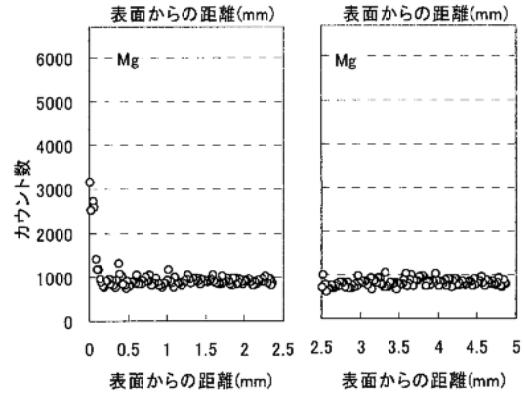
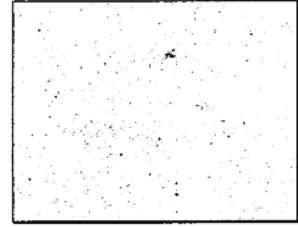


FCN-50-Mg

表層から 0~2.5mm



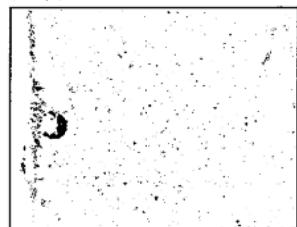
2.5~5.0mm



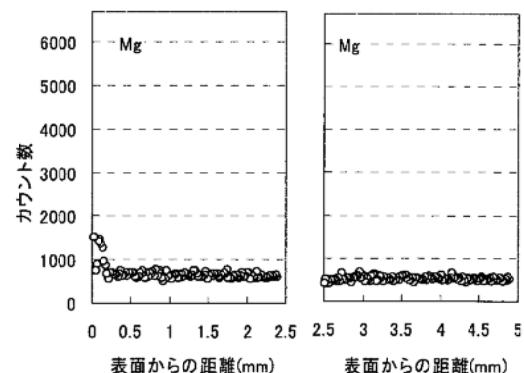
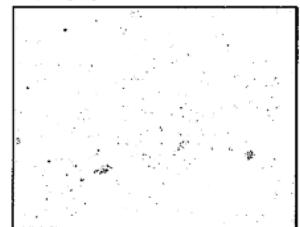
資料図-4.3 Mg (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (2/3)

LP-50-Mg

表層から 0~2.5mm

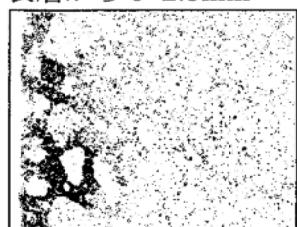


2.5~5.0mm

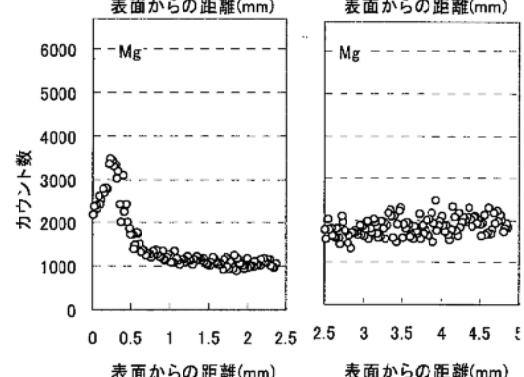
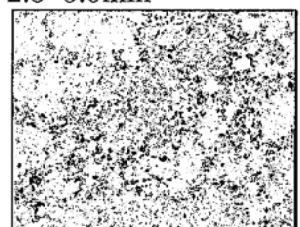


NBF-50-Mg

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm

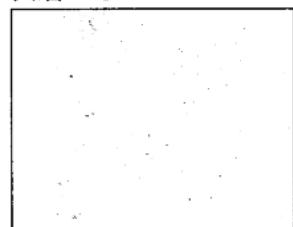


資料図-4.3 Mg (材齡 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (3/3)

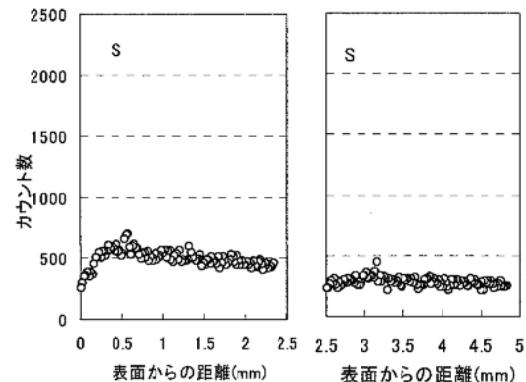
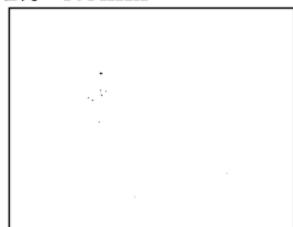
4.4 S

NC-50-S

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm

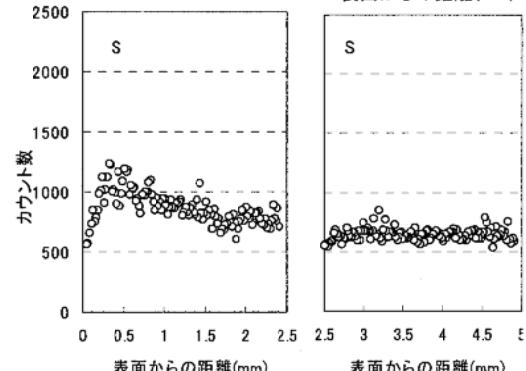
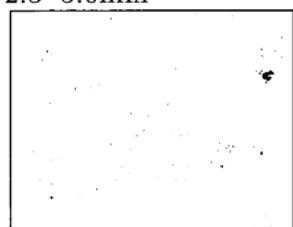


MC-50-S

表層から 0~2.5mm

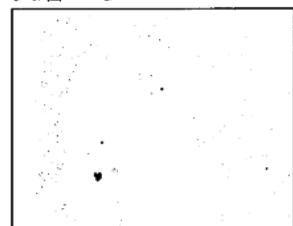


2.5~5.0mm

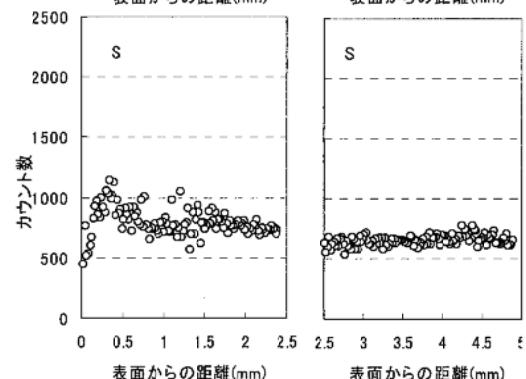
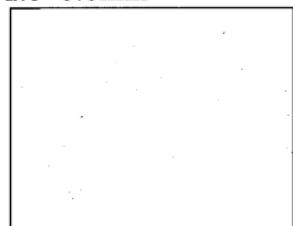


LC-50-S

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm

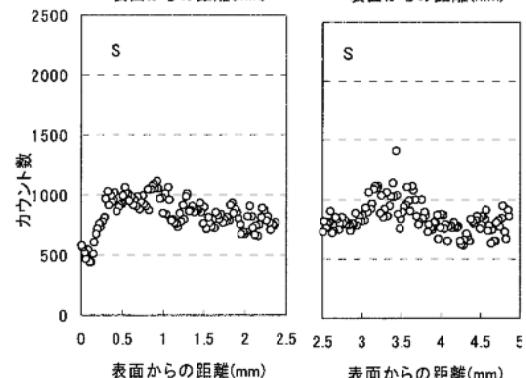


NBB-50-S

表層から 0~2.5mm



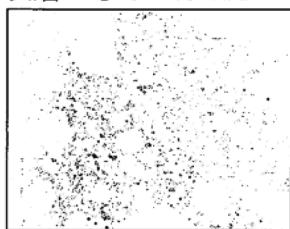
2.5~5.0mm



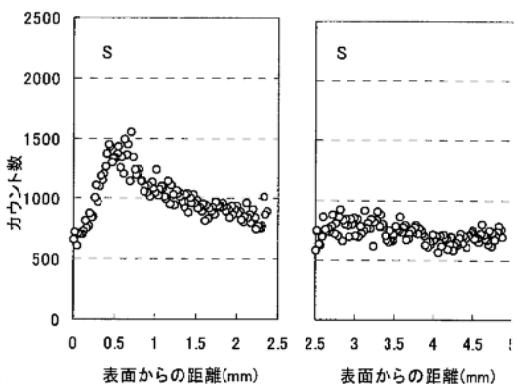
資料図-4.4 S (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (1/3)

MBB-50-S

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm

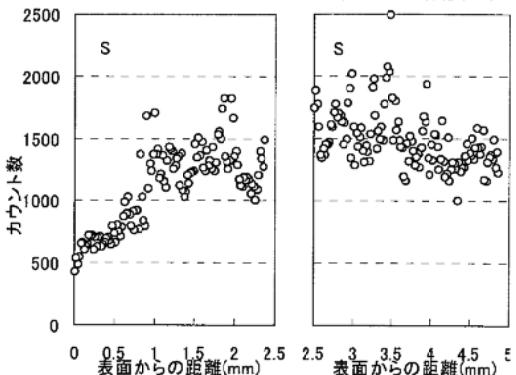
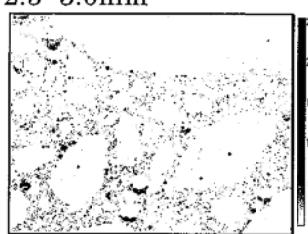


LBB-50-S

表層から 0~2.5mm

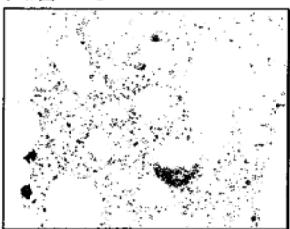


2.5~5.0mm

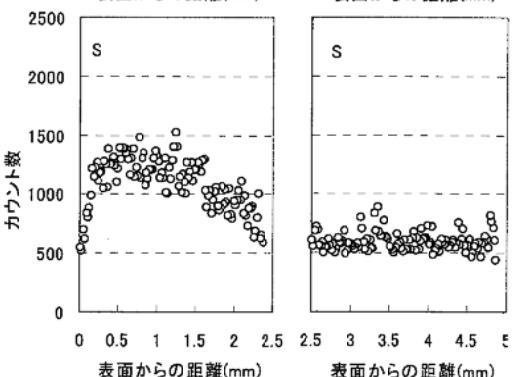


FC-50-S

表層から 0~2.5mm

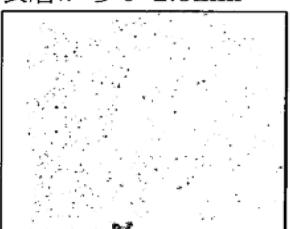


2.5~5.0mm

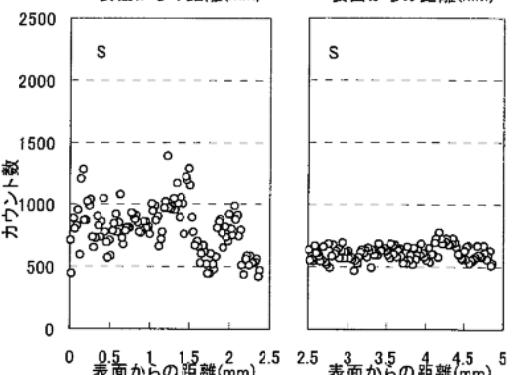
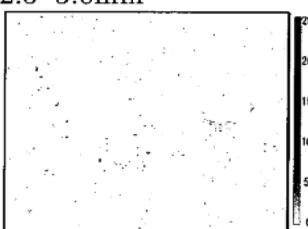


FCN-50-S

表層から 0~2.5mm



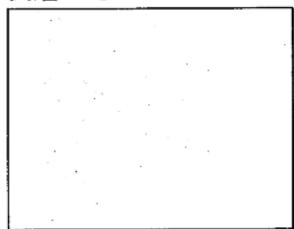
2.5~5.0mm



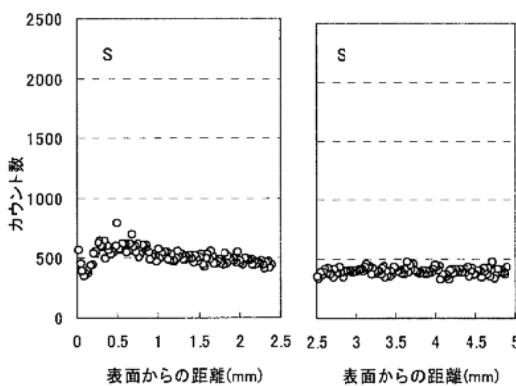
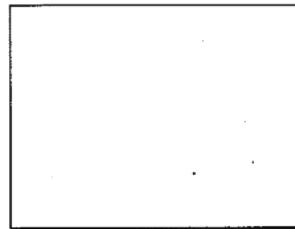
資料図-4.4 S (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (2/3)

LP-50-S

表層から 0~2.5mm

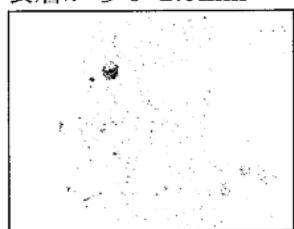


2.5~5.0mm

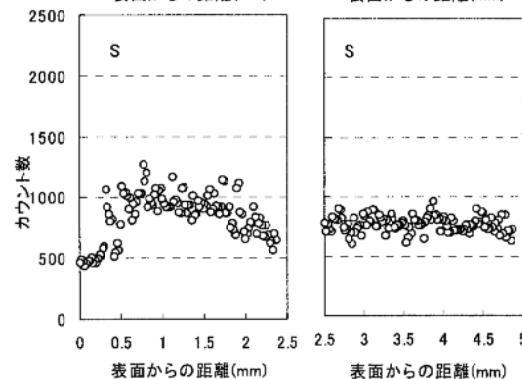
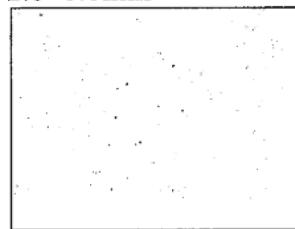


NBF-50-S

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm

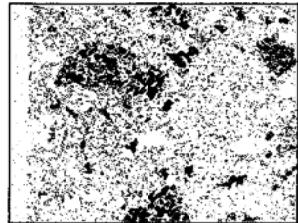


資料図-4.4 S (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (3/3)

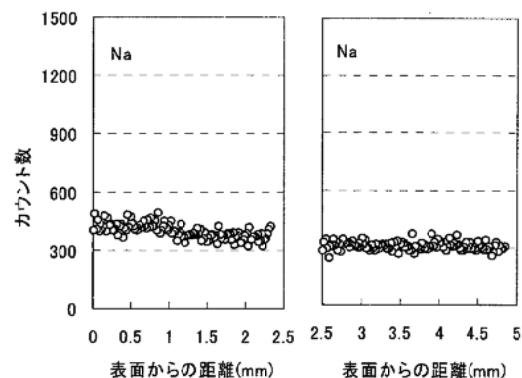
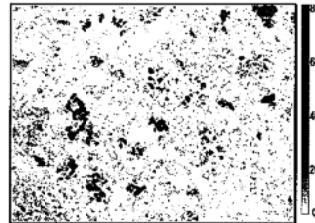
4.5 Na

NC-50-Na

表層から 0~2.5mm

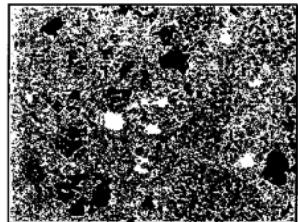


2.5~5.0mm

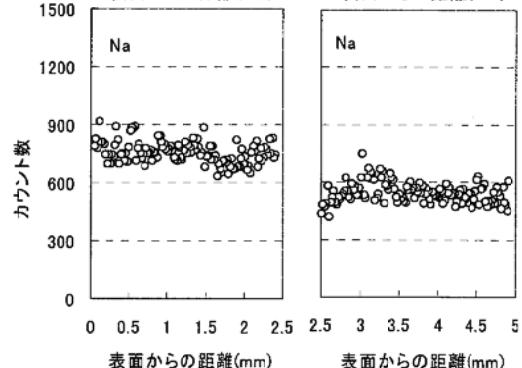
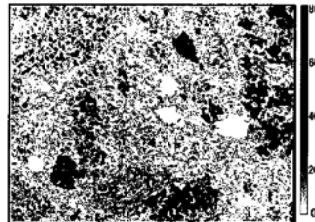


MC-50-Na

表層から 0~2.5mm

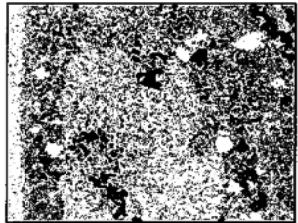


2.5~5.0mm

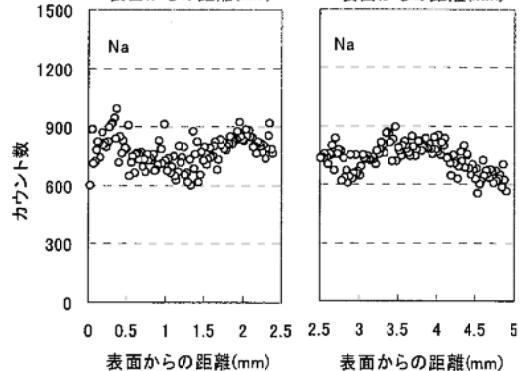
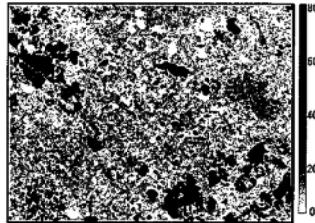


LC-50-Na

表層から 0~2.5mm

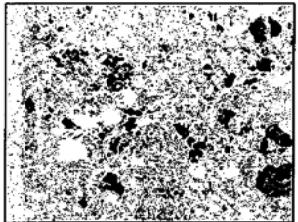


2.5~5.0mm

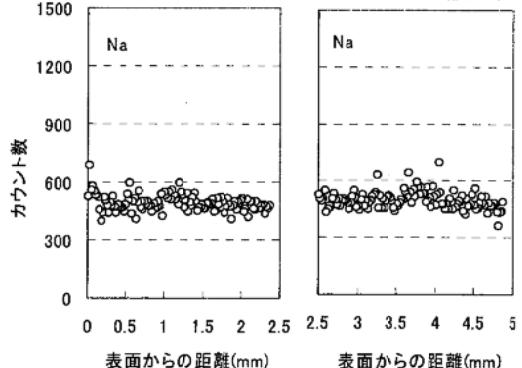
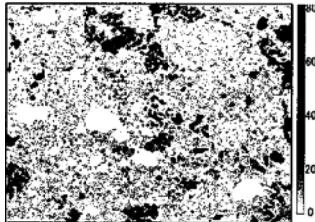


NBB-50-Na

表層から 0~2.5mm



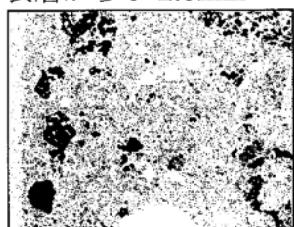
2.5~5.0mm



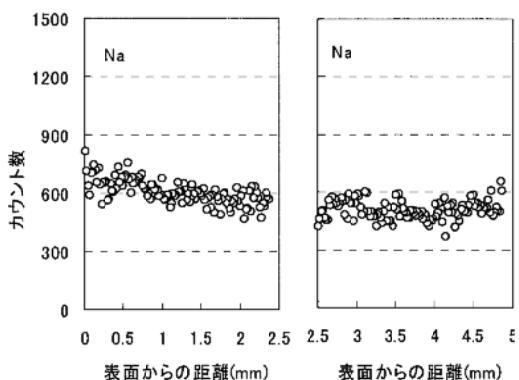
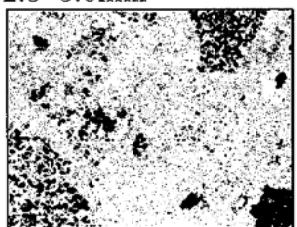
資料図-4.5 Na (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (1/3)

MBB-50-Na

表層から 0~2.5mm

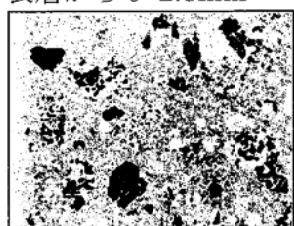


2.5~5.0mm

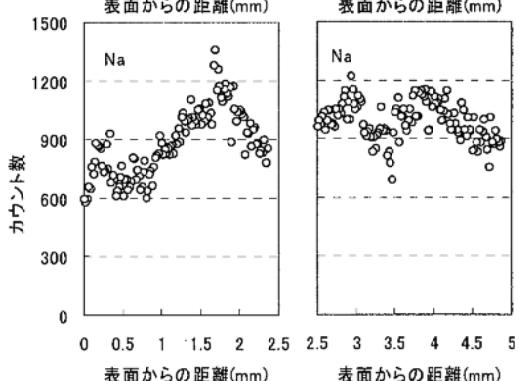
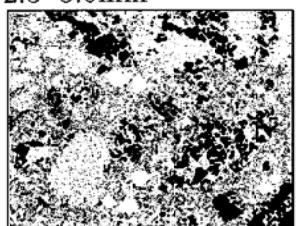


LBB-50-Na

表層から 0~2.5mm

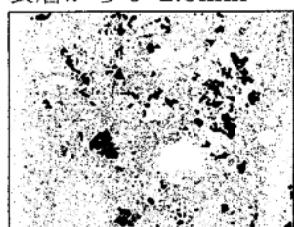


2.5~5.0mm

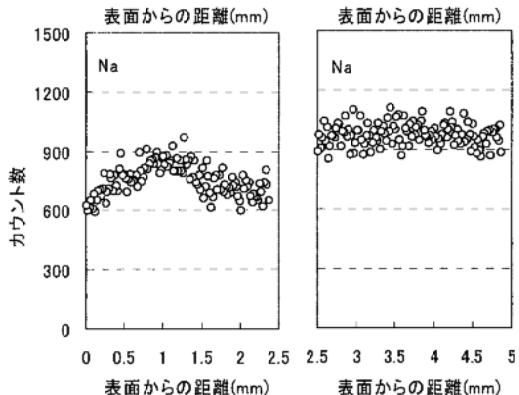
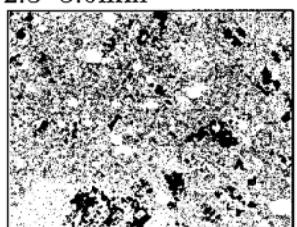


FC-50-Na

表層から 0~2.5mm

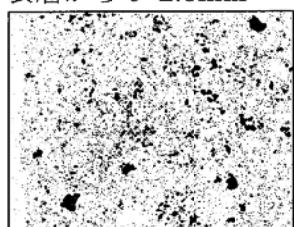


2.5~5.0mm

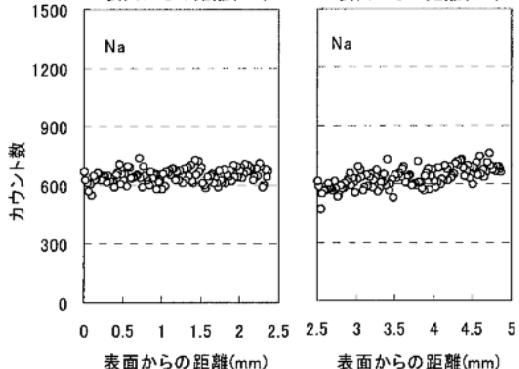
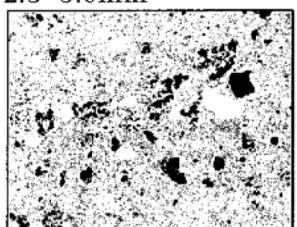


FCN-50-Na

表層から 0~2.5mm



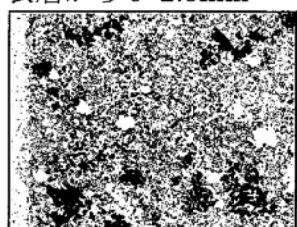
2.5~5.0mm



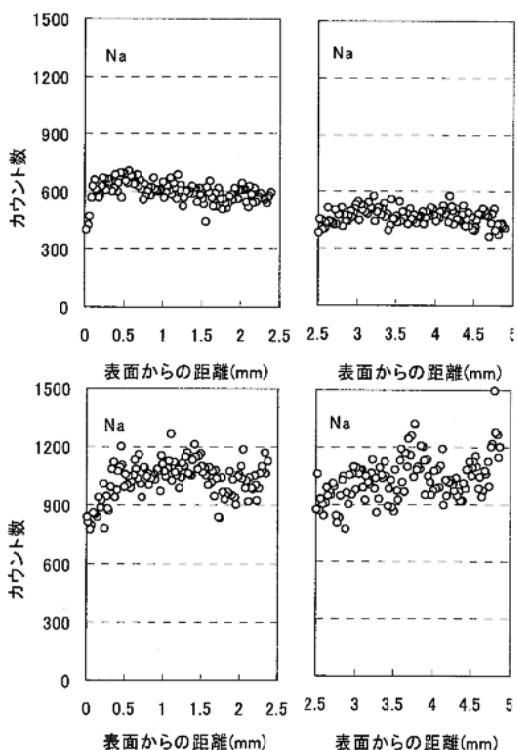
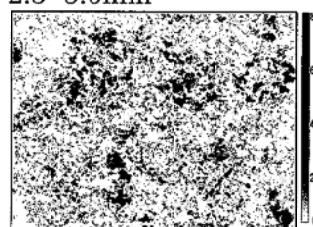
資料図-4.5 Na (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (2/3)

LP-50-Na

表層から 0~2.5mm

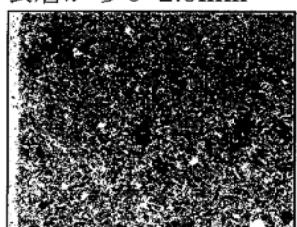


2.5~5.0mm

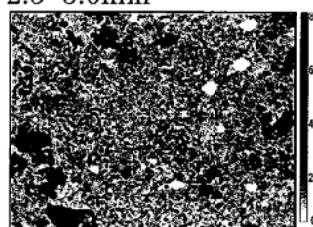


NBF-50-Na

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm

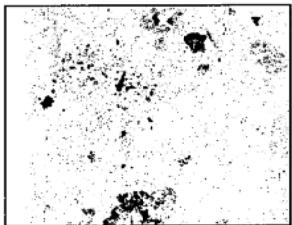


資料図-4.5 Na (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (3/3)

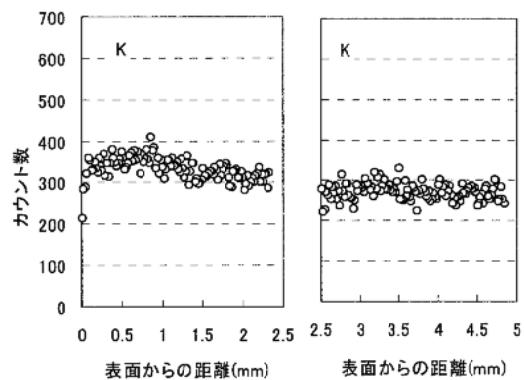
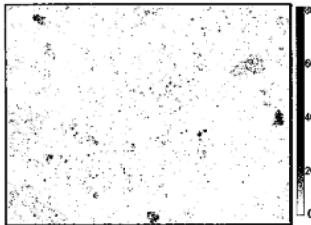
4.6 K

NC-50-K

表層から 0~2.5mm

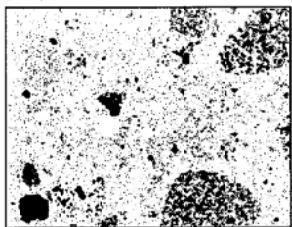


2.5~5.0mm

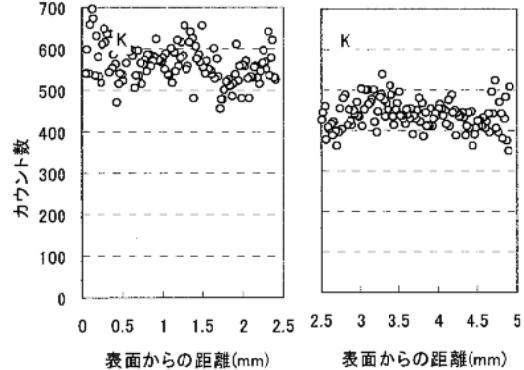
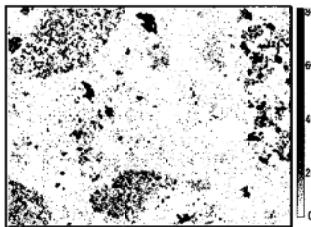


MC-50-K

表層から 0~2.5mm

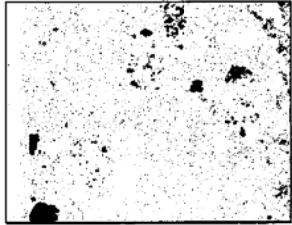


2.5~5.0mm

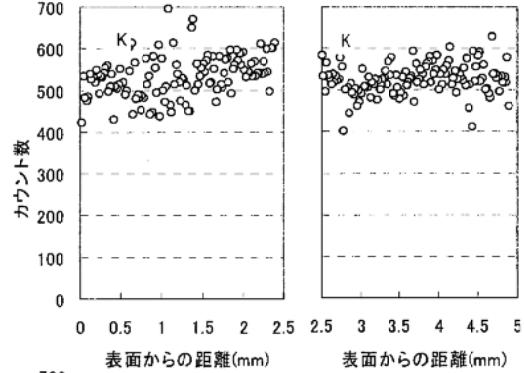
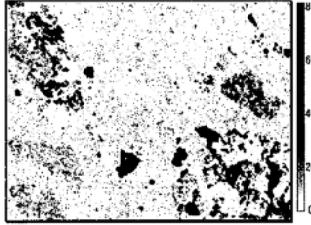


LC-50-K

表層から 0~2.5mm

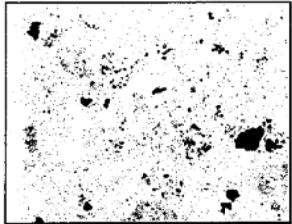


2.5~5.0mm

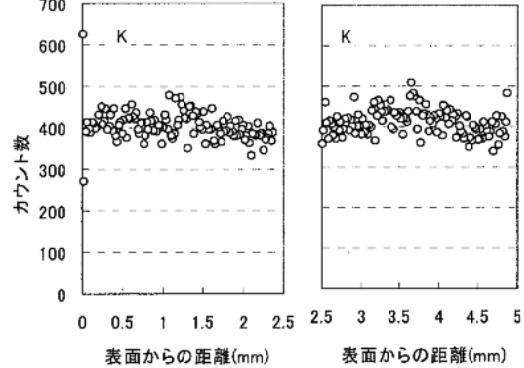
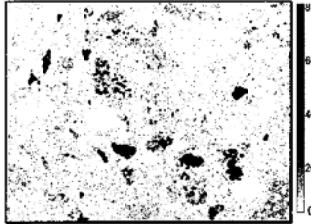


NBB-50-K

表層から 0~2.5mm



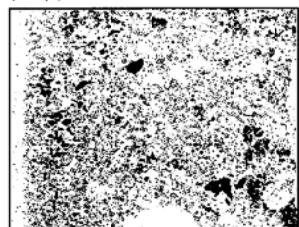
2.5~5.0mm



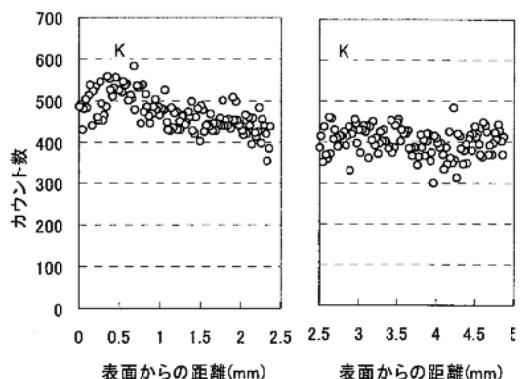
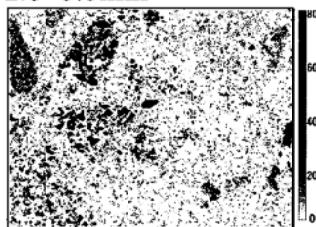
資料図-4.6 K (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (1/3)

MBB-50-K

表層から 0~2.5mm

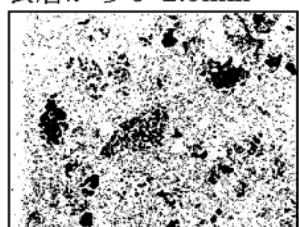


2.5~5.0mm

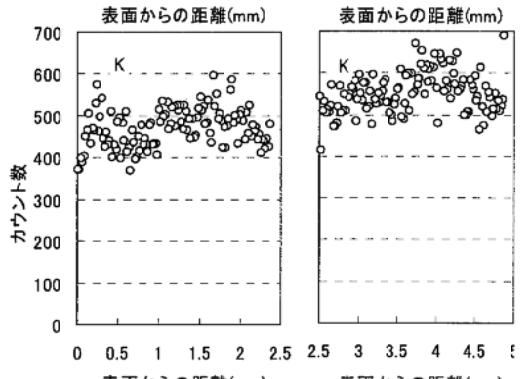
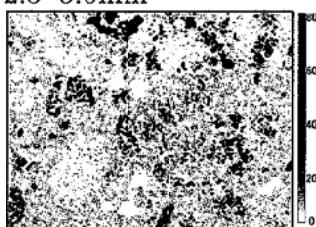


LBB-50-K

表層から 0~2.5mm

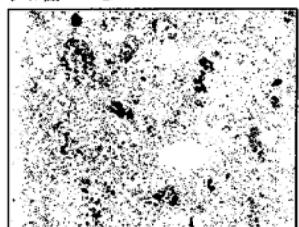


2.5~5.0mm

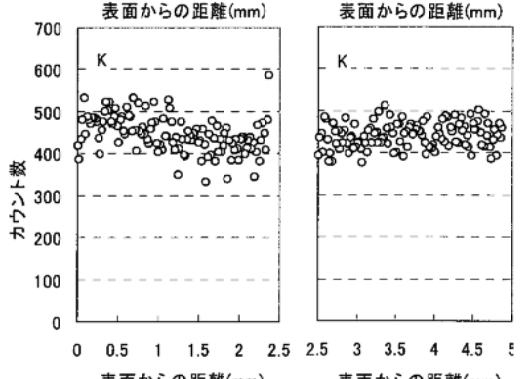
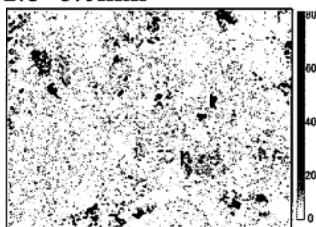


FC-50-K

表層から 0~2.5mm

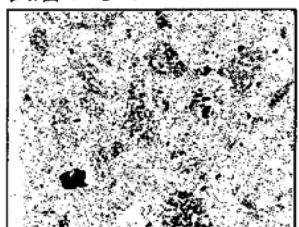


2.5~5.0mm

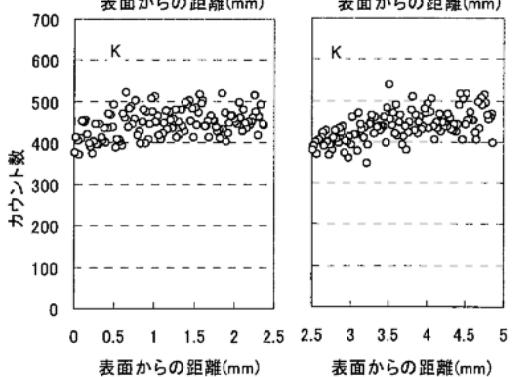
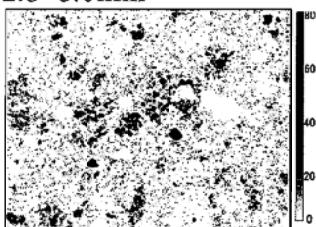


FCN-50-K

表層から 0~2.5mm



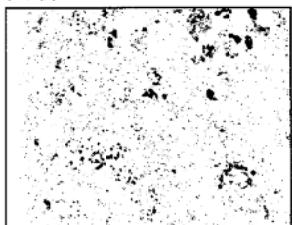
2.5~5.0mm



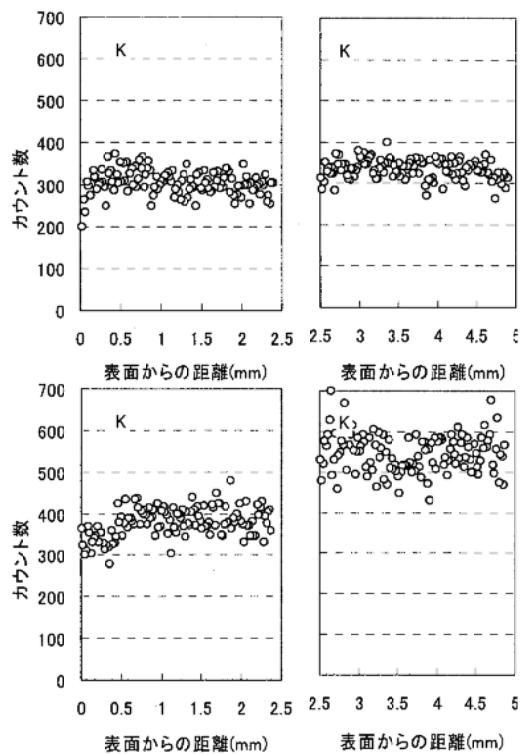
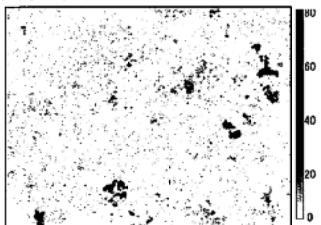
資料図-4.6 K (材齢 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (2/3)

LP-50-K

表層から 0~2.5mm

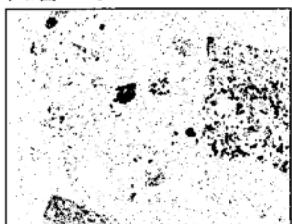


2.5~5.0mm

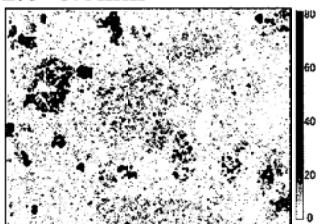


NBF-50-K

表層から 0~2.5mm



2.5~5.0mm



資料図-4.6 K (材齡 10 年、W/C=50%、前養生 28 日) (3/3)

関係報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-1	昭和28年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係に関する報告(I)
F-2	昭和29年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強さの関係に関する報告(II)
F-3	昭和30年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度の関係に関する報告(III)
F-4	昭和31年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強さとの関係に関する報告
F-5	昭和32年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度および引張強さ係数との関係に関する報告
F-6	昭和33年5月	最近のポルトランドセメントを用いた舗装用コンクリートを対象とするA-Eコンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強度との関係に関する報告
F-7	昭和34年5月	各種セメントを用いた舗装用A-Eコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その2 早強および中庸熟ポルトランドセメント)
F-8	昭和35年4月	各種セメントを用いた舗装用A-Eコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その3 高炉セメント)
F-9	昭和36年4月	各種セメントを用いた舗装用A-Eコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その4 シリカセメントおよびフライアッシュセメント)
F-10	昭和36年4月	コンクリート強度におよぼす細骨材の影響に関する共同試験報告
F-11	昭和36年4月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告
F-12	昭和37年5月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その2)
F-13	昭和38年3月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その3)
F-14	昭和39年6月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その1)
F-15	昭和40年8月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その2)
F-16	昭和41年9月	スランプの相違をも含めたコンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係に関する報告
F-17	昭和42年4月	各種のセメントを用いたコンクリートの長期強度に関する共同試験報告
F-18	昭和42年9月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告
F-19	昭和43年5月	富配合かた練りコンクリートのセメント水比と圧縮強度および引張強度との関係に関する報告
F-20	昭和43年10月	砕石を用いた舗装用コンクリートの圧縮強度および曲げ強度に関する報告
F-21	昭和44年9月	砕石を用いた軟練りコンクリートの配合および強度に関する報告
F-22	昭和45年9月	舗装用コンクリートの曲げ強度および引張強度に関する共同試験報告
F-23	昭和46年3月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告(その2)
F-24	昭和47年9月	コンクリートの強度試験方法に関する共同試験報告(その1) I 圧縮強度試験におけるキャッピング材料およびキャッピング方法 II 引張強度試験における支承材の有無および支承材の材質 III 曲げ強度試験における供試体の寸法および載荷方法
F-25	昭和48年10月	レボーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-26	昭和 50 年 9 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(II) 1.回収水使用コンクリートの性質に及ぼす温度の影響 2.減水剤を用いたコンクリートに及ぼす回収水の影響 3.スラッジの経過日数がコンクリートの性質に及ぼす影響 4.回収水とスラッジの品質調査
F-27	昭和 50 年 9 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(III) 回収水使用コンクリートの性質に及ぼすスラッジ組成の影響 (付)F-25 における中性化試験の中間報告
F-28	昭和 51 年 12 月	細骨材の品質調査報告
F-29	昭和 52 年 10 月	粗骨材の品質調査報告
F-30	昭和 52 年 9 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する促進試験報告
F-25 追加報告	昭和 53 年 4 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験 コンクリートの中性化試験結果
F-31	昭和 54 年 6 月	粗骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-32	昭和 56 年 3 月	細骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-33	昭和 56 年 3 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 —材齢 5 年中間報告(その 1)—
F-34	昭和 57 年 5 月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その 1) —普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた場合—
F-35	昭和 57 年 7 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 —材齢 5 年中間報告(その 2)—
F-36	昭和 58 年 2 月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その 2) —高炉セメント B 種およびフライアッシュセメント B 種を用いた場合—
F-37	昭和 59 年 3 月	コア供試体の圧縮強度におよぼす各種試験要因の影響
F-38	昭和 60 年 7 月	初期の乾燥がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-39	昭和 61 年 6 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 —材齢 10 年中間報告(その 1)—
F-40	昭和 62 年 8 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 —材齢 10 年中間報告(その 2)—
F-41	昭和 63 年 4 月	コンクリートによる高炉スラグ微粉末の混合率に関する研究
F-42	昭和 63 年 1 月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その 1) —40℃湿空条件における試験結果—
F-43	1989 年 8 月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その 2) —屋外暴露および 20℃海水反復浸漬条件における試験結果—
F-44	1989 年 9 月	コンクリートによるアルカリ・シリカ反応の防止に関する研究
F-45	1991 年 6 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 —材齢 15 年中間報告—
F-46	1992 年 10 月	石灰石骨材コンクリートに関する研究
F-47	1994 年 3 月	石灰石骨材のアルカリ炭酸塩岩反応に関する調査・研究

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-48	1998年4月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 材齢20年最終報告
F-49	1999年3月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 —セメントの種類、養生条件および海洋暴露条件の影響(材齢10年試験)－
F-50	1999年3月	コンクリートの断熱温度上昇試験方法に関する研究
F-51	2002年3月	各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上界
F-52	2006年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢5年報告
F-53	2006年3月	蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響
F-54	2008年3月	寒冷地に暴露したAEコンクリートの耐凍害性 - 材齢20年報告-
F-55	2008年3月	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究
F-56	2010年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢10年最終報告

ISBN978-4-88175-105-3 C3358

コンクリート専門委員会報告 F56

定価：本体2,000+税

平成 22 年 3 月 25 日 印刷 社団法人 セメント協会
平成 22 年 3 月 30 日 発行 東京都中央区八丁堀 4-5-4
ダヴィンチ桜橋 7 階 702 号
電話 03(3523)2701(代)
発行所 社団法人 セメント協会研究所
東京都北区豊島 4 丁目 17 番 33 号
電話 03(3914)2691(代)
印刷所 有限会社 イー・エム・ピー
東京都千代田区三崎町二丁目 14 番地 6 号 T.M 水道橋ビル 2F
電話 03(3265)6050

JCA