

コンクリート専門委員会報告

REPORT OF THE TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE

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

A Study on Reinforcement Corrosion of Concrete

Made Using Various Low Heat cements in Marine Environments

A Report after 5 Years

平成 18 年 3 月

(Mar. 2006)

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セメント微粉末をそれぞれ 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、スランプ 8cm、空気量 4.5%、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、混合系については水セメント比 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、一部の条件ではこれを 91 日とした場合も加えている。

暴露期間は 10 年を予定しているが、今般、各条件下で 5 年間暴露したコンクリート供試体に対して、外観観察、強度特性の変化、中性化の進行、塩化物イオンの浸透、水和生成物や細孔構造の変化、鉄筋発錆状況等についての検討を行った。

供試体の外観観察では、各セメントともに、どの暴露条件下においてもひび割れ等の異常は認められなかった。また高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合したセメントでは、ポルトランドセメントに比べて感潮条件下での強度発現が良好であるが、海浜や屋外条件下での強度発現は小さく、混合セメントにおいては暴露期間中の水分供給や乾燥が長期強度の発現に大きく影響していることが認められた。また石灰石微粉末を混合したセメントは、実質の水セメント比が大きくなるため他のセメントよりも強度が小さいが、乾燥の影響を受ける海浜や屋外条件では、他の混合セメントとの強度差は小さくなった。

中性化の進行については、感潮条件下ではほとんど中性化は認められなかった。海浜および屋外条件下では中性化が認められたが、海浜に比べて屋外の方が中性化は大きかった。高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合したセメントでは、ベースのポルトランドセメントに比べて中性化が大きく、両者を混合した三成分系の混合セメントではさらに中性化が大きくなった。石灰石微粉末を混合した場合の中性化深さはフライアッシュを混合した場合と同程度であった。

塩化物イオン浸透性については、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合したセメントでは、ポルトランドセメントに比べて塩化物イオンの浸透が小さく、これら混合材の塩分浸透抑制効果が認められた。両者を混合した三成分系の混合セメントではさらに塩分浸透抑制効果が大きい結果となった。石灰石微粉末を混合した場合の塩化物イオン浸透深さはポルトランドセメントと同程度で、高炉スラグ微粉末やフライアッシュのような塩分浸透抑制効果は認められなかった。

X 線回折の結果については、ポルトランドセメントに比べて混合セメントではポルトランドイトが少なく、特に三成分系セメントでその傾向が顕著であった。またポルトランドセメントでは供試体中心部と表面部でフリーデル氏塩が認められたのに対して、混合セメントでは表面部にのみフリーデル氏塩が認められた場合が多く、塩化物イオンの浸透が抑制されていることがうかがえた。

細孔量については、暴露前に比べて、感潮条件下では同程度か減少傾向にあり、一方海浜や屋外条件では若干増加する傾向にあった。混合セメントでは概してベースのポルトランドセメントに比べて細孔量がやや少ない傾向にあったが、フライアッシュを混合したセメントでは海浜や屋外で逆の傾向も見られ、混合材の種類で結果がやや異なった。石灰石微粉末を混合した場合は細

孔量が大きくなった。

鉄筋の発錆については、ポルトランドセメントおよび石灰石微粉末混合の場合に認められたが、いずれの供試体もまだ鉄筋発錆の程度は少ない。一部を除いて、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、またその両者を混合したセメントでは鉄筋の発錆が見られず、塩化物イオン浸透性に対応する結果となっていた。なお、鉄筋位置の塩化物イオン量が 2kg/m^3 程度を超えた付近から鉄筋の発錆が認められる傾向が見られた。

鉄筋の自然電位については、NC に対して MC、LC ではやや卑の傾向にあり、石灰石微粉末を混合した場合もやや卑の傾向となった。高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、またその両者を混合したセメントでは NC と同程度か若干貴の傾向になった。またコンクリートの抵抗については、三成分系セメントが最も大きく、以下フライアッシュ混合、高炉スラグ微粉末混合、各ポルトランドセメント、石灰石微粉末混合の順となり、腐食速度についてはコンクリート抵抗の場合と逆の傾向を示し、石灰石微粉末混合が最も大きく、以下各ポルトランドセメント、他の混合セメントの順であった。

以上の検討により、暴露 5 年の中間試験結果として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合した二成分系、また両者を混合した三成分系の混合セメントでは、中性化が速い一方で塩化物イオンの浸透はポルトランドセメントに比べて少なく、海洋環境下での鉄筋腐食抑制の面では有利な傾向にあること、石灰石微粉末を混合したセメントでは高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合した場合のような鉄筋腐食抑制に対する効果は認められないこと、これらのことは電気化学的検討からも裏付けられることなど、セメント種類毎のおおよその傾向が判明した。なお暴露前の養生期間の影響については、感潮条件の場合に 28 日に比べて 91 日の方が暴露後の強度がやや大きい結果となり、また細孔量がやや減少するなどの傾向が見られたが、中性化や塩化物イオン浸透性についてはその影響は認められなかった。また鉄筋腐食に及ぼす影響については、今後の結果を待つ必要があるものと考えられる。

中間材齢である暴露期間 5 年では中性化の進行や鉄筋腐食の程度もまだ少なく、最終的な結論は最終材齢である暴露期間 10 年の結果を待つ必要がある。ただし今回得られた結果については、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和材の適用性を検討する際の有用な技術資料として活用出来るものと考えられる。

ABSTRACT

Concretes made using 10 types of cements were subjected to long-term exposure tests to investigate their applicability to marine structures. The cements are classified into two categories: portland cements and blended low-heat cements. The former includes normal portland cement for reference (NC); moderate-heat portland cement (MC); and low-heat portland cement (LC). The latter includes NC-based blast-furnace slag cement (NBB), MC-based blast-furnace slag cement (MBB), LC-based blast-furnace slag cement (LBB), which were made by blending ground granulated blast-furnace (GGBF) slag with NC, MC, and LC, respectively, at a ratio of 50%; Fly ash cement made by blending Type II fly ash with NC at a ratio of 30% (FC); fly ash cement made by blending Type III fly ash with NC at a ratio of 30% (FCN); cement made by blending limestone powder with NC at a ratio of 30% (LP); and ternary system cement made by blending GGBF slag and Type II fly ash with NC at ratios of 50% and 25%, respectively (NBF).

These concretes were proportioned to lead to a slump of 8 cm and air content of 4.5%, with W/Cs of 40%, 50%, and 60% for portland cements and 50% for blended cements, and exposed to four outdoor environments: tidal areas in Sakata, Yamagata Pref., and Kurihama, Kanagawa Pref., a coastal area in Kurihama, and an inland area in Kita Ward, Tokyo. The curing periods before exposure were 28 days for all cases and additionally 91 days for some of the cases.

After exposure for 5 years in the process of the ongoing 10-year test program, concrete specimens were examined in regard to various items including appearance, strength properties, carbonation, chloride ion penetration, hydration products and pore structures, and reinforcement corrosion.

Appearance observation of specimens revealed no defects including cracking for any cement type or any exposure conditions. Also, the strength gains of concrete made using cements blended with GGBF slag or fly ash were large under tidal conditions, being larger than those of concretes made using portland cements, but not so large under coastal and inland conditions, suggesting that water supply and drying during exposure can strongly affect the long-term strength gains of concrete made using blended cement. The strength of concrete made using LP was lower than those of other concretes due to its high actual water-cement ratio. However, their differences became smaller in the coastal and inland environments subjected to the effect of drying.

Carbonation was scarcely observed under tidal conditions but found in specimens at the coastal and inland exposure sites, with the carbonation depth being greater in inland specimens than in coastal specimens. Cements blended with GGBF slag or fly ash led to larger depths of carbonation than portland cements, and NBF led to an even larger depth of carbonation. The carbonation depth of concrete made using LP was similar to those of concretes containing cements blended with fly ash.

As for chloride ion permeability, cements blended with GGBF slag or fly ash led to smaller depths of chloride ion penetration than portland cements, proving the chloride penetration-inhibiting effect of these additions. Such an effect was even greater with NBF. The depth of chloride ion penetration in concrete made using LP was similar to those in concretes with portland cements, showing no appreciable effect of inhibiting chloride penetration.

In regard to the results of X-ray diffractometry, the amount of portlandite in concretes made using blended cements was smaller than that in concretes made using portland cements, and this tendency was particularly evident with NBF. Also, Friedel's salt was recognized in the central and surface areas of portland cement concrete specimens, whereas it was observed only in the surface areas of blended cement concrete specimens, suggesting the additions' effect of inhibiting chloride ion penetration.

The pore volume after exposure tended to be similar to or smaller than that before exposure under tidal conditions, whereas it tended to increase after exposure under coastal and inland conditions. The pore volume with blended cements generally tended to be lower than with portland cements but was higher with fly ash under coastal and inland conditions. The results thus varied depending on the type of addition. LP led to large pore volumes.

Reinforcement corrosion was observed in concretes with portland cements and LP but the degree of corrosion was low in all cases. No corrosion was observed in concretes containing GGBF slag and/or fly ash with a few exceptions. This agrees with the results of chloride ion permeability. Reinforcement corrosion tended to be recognized when the chloride ion content at the depth of reinforcement exceeded approximately 2 kg/m^3 .

The half-cell potential of specimens with MC and LC tended to be more negative than that with NC. That of specimens with LP also tended to be slightly more negative. The potentials with GGBF slag and/or fly ash tended to be similar to or slightly less negative than that with NC. The electrical resistance of concretes was highest with NBF, followed by blends of fly ash, blends of GGBF slag, portland cements, and LP in this order. The rate of corrosion was accordingly in reverse order, being highest with LP, followed by portland cements, and other blended cements.

As a result of the above-mentioned interim tests after five years of exposure, the tendencies of each cement type were clarified, such as binary and ternary systems of cements containing GGBF slag and fly ash leading to lower chloride ion penetration than portland cements, being more advantageous for inhibiting reinforcement corrosion in marine environments, though with higher rates of carbonation; and cement containing limestone powder showing little effect of inhibiting reinforcement corrosion like those containing GGBF slag and fly ash. These tendencies were also proven by electrochemical analysis. The curing period before exposure slightly affected the strength development under tidal conditions and pore volume, but no effect was recognized on the carbonation depth, chloride ion penetration, and diffusion coefficient. The later phase of the ongoing tests must be awaited before ascertaining its effect on reinforcement corrosion.

After five years, in the middle of the exposure test period, the degrees of carbonation and reinforcement corrosion have still been low. Though it will require another five-year exposure period to obtain the final conclusion, the present results can serve as useful technical data for investigating the applicability of various low-heat cements and additions to reinforced concrete structures in marine environments.

序

本研究は、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、各種の暴露条件下で検討したものである。

ここに、中間材齢である材齢 5 年の試験結果が判明したので報告する。

2006 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	太平洋セメント株式会社	栩 木 隆	
	株式会社宇部三菱セメント研究所	(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	兼 安 真 司	
		(堀 健 治	2003 年 8 月交替)
		(前 田 悦 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	土 井 宏 行	
		(牛 山 宏 隆	1998 年 7 月交替)
	株式会社宇部三菱セメント研究所	大 西 利 勝	
	株式会社宇部三菱セメント研究所	高 尾 昇	
		(中 山 英 明	2001 年 10 月交替)
		(鳴 瀬 浩 康	2000 年 4 月交替)
	太平洋セメント株式会社	(城 国 省 二	2001 年 3 月交替)
	社団法人セメント協会	村 田 芳 樹	
		野 田 潤 一	
		(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

濱 田 秀 則
(福 手 勤
山 路 徹

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 住友大阪セメント株式会社

小 林 哲 夫

委 員 新日鐵高炉セメント株式会社

兼 安 真 司

電気化学工業株式会社

金 森 伸 治

株式会社トクヤマ

重 永 裕 二

株式会社宇部三菱セメント研究所

藤 野 守

株式会社宇部三菱セメント研究所

松 嶋 信 行

太平洋セメント株式会社

富 田 治

社団法人セメント協会

村 田 芳 樹

野 田 潤 一
(佐々木 健 一

2004 年 3 月 交替)

(以上 敬称略、順不同)

目 次

1. 緒 言	1
2. 研究の概要	2
2.1 試験条件	2
2.1.1 暴露条件	2
2.1.2 セメントの種類	2
2.1.3 水セメント比	2
2.1.4 前養生	2
2.2 試験項目	3
3. 試験方法	4
3.1 使用材料	4
3.1.1 セメント	4
3.1.2 骨材	5
3.1.3 水	5
3.1.4 混和剤	5
3.1.5 鉄筋	5
3.2 供試体の形状および配筋	6
3.3 コンクリートの配合、練混ぜおよび供試体の作製	6
3.4 養生および暴露条件	7
3.5 試験手順	9
3.6 コンクリートに関する試験方法	11
3.6.1 外観観察	11
3.6.2 圧縮強度および静弾性係数	11
3.6.3 中性化	11
3.6.4 塩化物イオン浸透深さおよび塩化物イオン濃度	11
3.6.5 X線回折	12
3.6.6 細孔量	12
3.7 鉄筋の発錆に関する試験方法	13
3.7.1 鉄筋の発錆状態の確認	13
3.7.2 鉄筋の発錆面積率	13
3.7.3 鉄筋の質量減少率	13
3.7.4 鉄筋の孔食深さ	14
3.7.5 鉄筋の自然電位および分極抵抗	15
4. 試験結果および考察	16
4.1 コンクリートに関する試験結果および考察	16
4.1.1 供試体の外観観察	16
4.1.2 圧縮強度および静弾性係数	17
4.1.3 中性化深さ	23
4.1.4 塩化物イオン浸透深さおよび塩化物イオン濃度	29
4.1.5 X線回折	52
4.1.6 細孔量	64

4.2 鉄筋の発錆に関する試験結果および考察	73
4.2.1 鉄筋の発錆状態	73
4.2.2 鉄筋の発錆面積率	73
4.2.3 鉄筋の質量減少率	78
4.2.4 鉄筋の孔食深さ	85
4.2.5 鉄筋の自然電位および分極抵抗	86
5. 結 言	97
参考文献	101
資料編	102

1. 緒言

近年、本四連絡橋などの長大橋の下部工、LNG 地下タンクなどの側壁および底版、原子力発電所のベースマットなどをはじめとするコンクリート構造物の大型化に伴い、マスコンクリートとして検討を行わなければならない構造物が増加している。

1980 年代以降では、大型土木構造物の施工に中庸熱ポルトランドセメントや高炉セメント B 種にフライアッシュを混合したセメントなどが使用されるようになり、またそれ以降では、一層の水和熱の低減を図った各種低発熱型のセメントが開発、使用されている。

低発熱セメントは高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混合材を多量に使用した混合系低発熱セメントと、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。また混合系低発熱セメントは、ベースのポルトランドセメントに添加する混合材が 1 種類である場合の二成分系と、2 種類である場合の三成分系とがある。

これら低発熱セメントを用いたコンクリートの熱特性、力学特性、耐久性については多くの研究が行われている。しかし、低発熱セメントを鉄筋コンクリート構造物に用いる場合には、単に強度発現や発熱に関する検討のみならず、鉄筋腐食に対する抵抗性についても検討の必要があるが、これらに関する研究事例は少ない。

本研究は、各種低発熱セメントを用いた鉄筋コンクリートの海洋構造物への適用性を、長期暴露試験による鉄筋腐食に対する抵抗性から検討することを目的に、1998 年度にセメント協会と独立行政法人 港湾空港技術研究所（旧 運輸省 港湾技術研究所）との共同研究として開始した。なお本研究では、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およぼす要因の検討だけではなく、長期間の暴露によるコンクリートの強度特性の変化、水和生成物や細孔構造の変化についての検討も行い、各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋構造物への適用性に関して、総合的な検討を行えるように計画した。暴露試験は 2008 年度までの 10 年間を予定しているが、2003 年度はその中間である 5 年材齢で各種試験を実施したのでここに報告する。

2. 研究の概要

2.1 試験条件

2.1.1 暴露条件

暴露条件は表-2.1 に示す酒田感潮、久里浜感潮、久里浜海浜、東京屋外の 4 条件とした。

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 久里浜海浜	神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所	海水循環水槽内(干満差 1.5m) 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

2.1.2 セメントの種類

セメントの種類は以下の表-2.2 に示す 10 種類とした。これ以降、セメントの種類は表-2.2 に示す記号で標記するものとする。

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	—
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	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	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	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	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%

2.1.3 水セメント比

水セメント比は 50%とした。なお、ポルトランドセメント系で、かつ前養生 28 日の水準については、40%および 60%を追加した。

2.1.4 前養生

コンクリート供試体の暴露前養生は、温度 20℃の室内で湿布養生 28 日と湿布養生 91 日の 2 水準を実施した。なお、圧縮強度試験および静弾性係数試験についてのみ標準水中養生も実施した。

2.2 試験項目

コンクリートに関する試験項目は、圧縮強度、静弾性係数、中性化深さ、塩分量(塩化物イオン浸透深さ、塩化物イオン濃度) X 線回折、および細孔径分布とした。鉄筋の発錆に関する試験項目は、発錆状態の観察、発錆量(発錆面積率および鉄筋の質量減少率)、孔食深さ、電気化学的検討(自然電位、コンクリート抵抗および分極抵抗)とした。試験項目と試験条件とを表-2.3 にまとめて示す。

すなわち本研究においては、水セメント比 50%、前養生期間 28 日を基本条件とし、水セメント比の影響を調べるためにポルトランドセメント (NC、MC、LC) において 40%、60%の条件を加えた。またポルトランドセメント 2 種、混合セメント 4 種、暴露条件として久里浜感潮と東京屋外とを選定して、前養生期間を 91 日と長くした場合の影響を調べることとした。久里浜感潮では自然電位と分極抵抗の測定を行った。なお以降図表中では、適宜図-2.1 に示すような記号で試験条件を略記するものとする。

表-2.3 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	水セメント比	前養生	暴露条件	材齢	
強度特性※ 圧縮強度 静弾性係数	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	5 年 10 年	φ 10×20cm (3 本)
中性化深さ 塩分量 X 線回折 細孔径分布	NBB,MBB,LBB FC,FCN,LP,NBF	50%				φ 15×30cm (2 本)
発錆の検討 発錆面積 鉄筋の質量減少率 孔食深さ	NC,LC NBB,LBB FC,NBF	50%	91 日	久里浜感潮 東京屋外		
自然電位 コンクリート抵抗 分極抵抗	NC,MC,LC NBB,MBB,LBB FC,FCN,LP,NBF	50%	28 日	久里浜感潮		

※比較用に標準養生供試体で圧縮強度および静弾性係数の測定を行い、材齢は 28 日、91 日、1 年および 5 年とした。

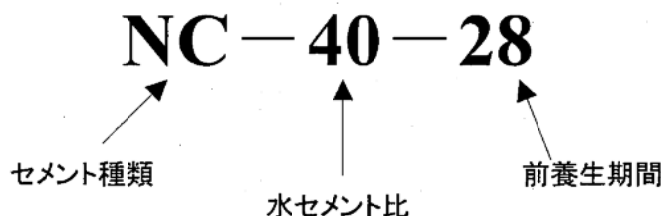


図-2.1 試験条件を表す記号

3. 試験方法

3.1 使用材料

3.1.1 セメント

セメントは、前記の表-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、二成分系セメントおよび三成分系セメントとしては、ベースのポルトランドセメント(NC、MC、LC)に混合材として高炉スラグ微粉末(記号 SL)、フライアッシュⅡ種(記号 FAⅡ)、フライアッシュⅢ種相当品(成型時点では非 JIS 灰、記号 FAⅢ)、石灰石微粉末(記号 CC)を使用した。これらのセメントの化学成分、鉱物組成および物理的性質を、表-3.1.1.1、表-3.1.1.2 および表-3.1.1.3 に、混合材の化学成分、化学的性質および物理的性質を表-3.1.1.4 および表-3.1.1.5 示す。

表-3.1.1.1 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 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 使用混合材の化学成分

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
SL	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	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CC	—	0.19	—	—	55.5	0.32	—	—	—	—	—	—	0.05

※Na₂Oeq=Na₂O+0.658×K₂O

表-3.1.1.5 使用混合材の品質

混和材の種類	塩基度	M・B吸着量	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)
SL	1.85	—	2.89	4170
FAⅡ	—	0.40	2.39	3930
FAⅢ	—	—	2.13	—
CC	—	—	2.70	—

3.1.2 骨材

骨材の粒度と物理的性質を、表-3.1.2.1 および表-3.1.2.2 に示す。

表-3.1.2.1 骨材の粒度

骨材の種類 ふるい目(mm)	ふるい通過量 (%)									粗粒率
	20	15	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	92	44	1	—	—	—	—	—	6.55
細骨材(陸砂) 静岡県菊川市産	—	—	—	100	89	58	36	21	8	2.88

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	塩分含有量(%)	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（エヌエムビー社製、ポゾリス No.70）および AE 剤（エヌエムビー社製、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

鉄筋の直径(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

発錆試験用供試体は、図-3.2.1 に示すように、寸法を $\phi 15 \times 30\text{cm}$ とし、鉄筋をかぶり 5cm および 7cm の 2 箇所配置したものとした。なお、鉄筋は成形前の錆を防ぐために防錆油中に保存し、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、水セメント比 50%、前養生 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。

圧縮強度試験用供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体とした。(なお、後述するように圧縮強度試験および静弾性係数試験以外の試験項目は全て上記の発錆試験用供試体より試料を採取して実施している。)

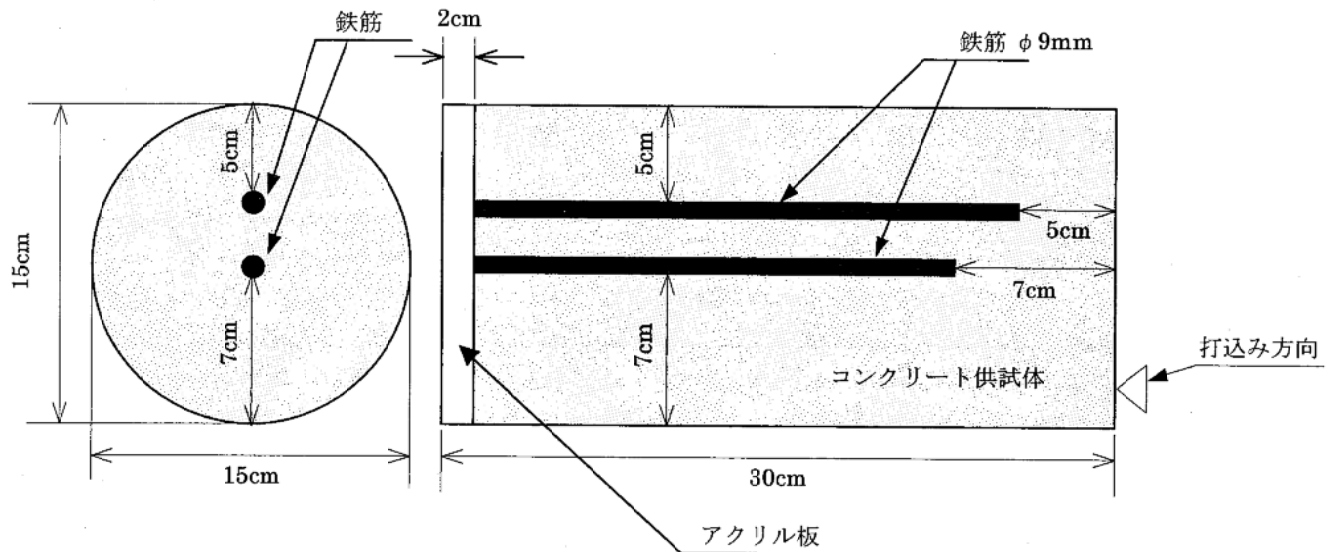


図-3.2.1 配筋状態

3.3 コンクリートの配合、練混ぜおよび供試体の作製

コンクリートの配合条件は、水セメント比を 50% (ただし、前養生 28 日でかつポルトランドセメント系の場合に 40% および 60% を追加) とし、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。

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、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、前記の表-2.3 のとおり発錆試験用の供試体は、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。脱型は成形の翌日に実施した。

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	水セメント比 (%)	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 (%)
			W	C	S	G					
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錆試験用および圧縮強度試験用供試体は、成形翌日に脱型を行い、直ちに温度 20℃、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℃、湿度 80%以上の室内で気中養生を行った。また、比較用の供試体は、成形翌日に脱型を行い、所定材齢まで標準養生を行った。

暴露条件は、前記の表-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。各暴露条件の供試体設置状況を写真-3.4.1～写真-3.4.8 に示す。

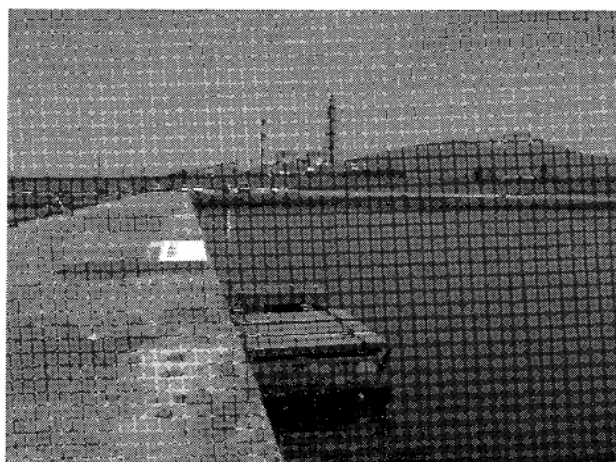


写真-3.4.1 酒田感潮の暴露場所状況

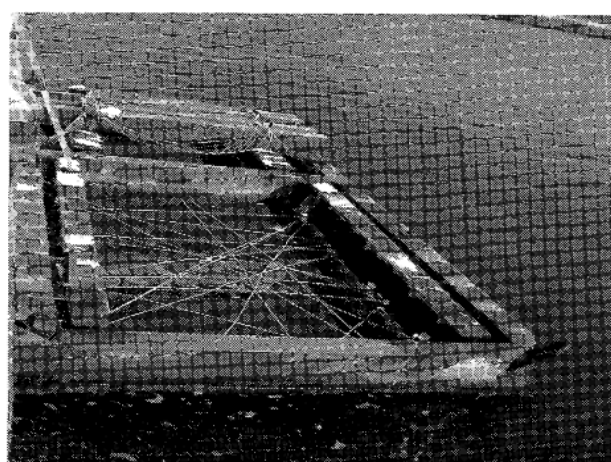


写真-3.4.2 酒田感潮の暴露供試体設置状況

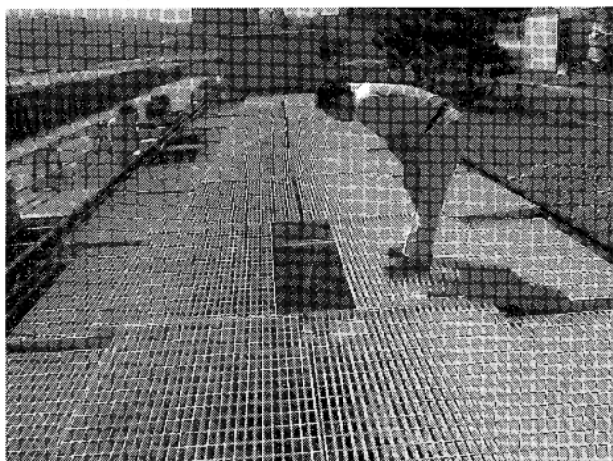


写真-3.4.3 久里浜感潮の暴露場所状況

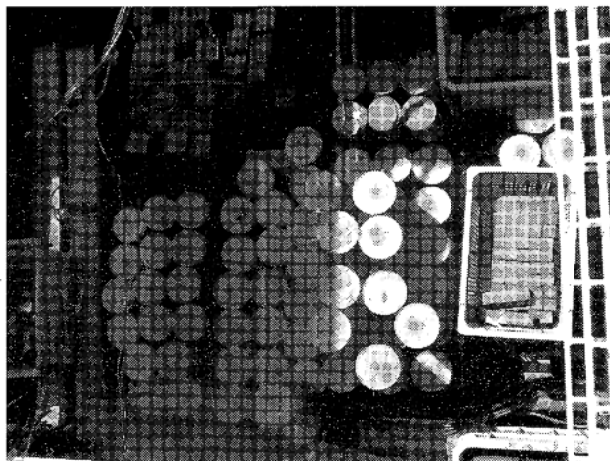


写真-3.4.4 久里浜感潮の暴露供試体設置状況



写真-3.4.5 久里浜海浜の暴露場所状況

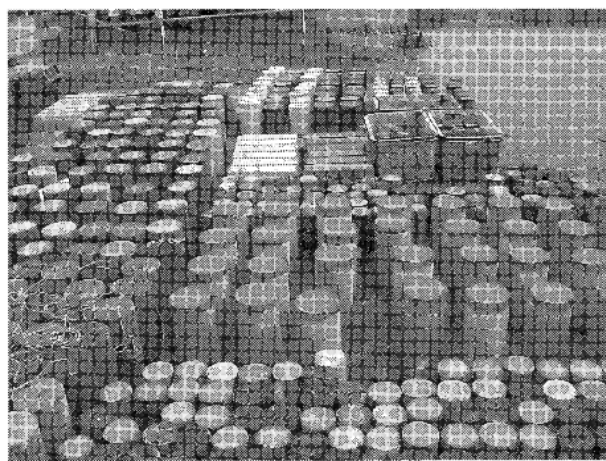


写真-3.4.6 久里浜海浜の暴露供試体設置状況

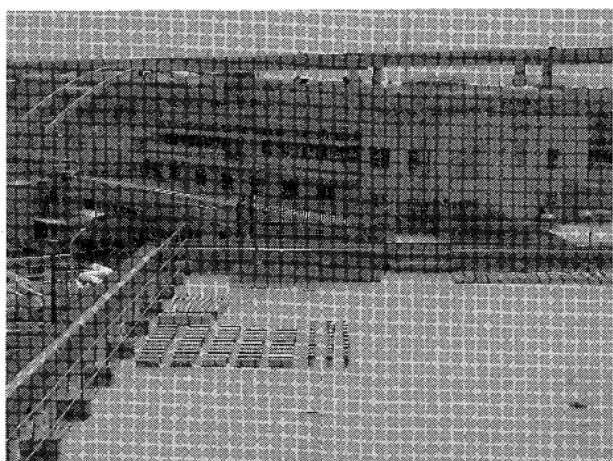


写真-3.4.7 東京屋外の暴露場所状況

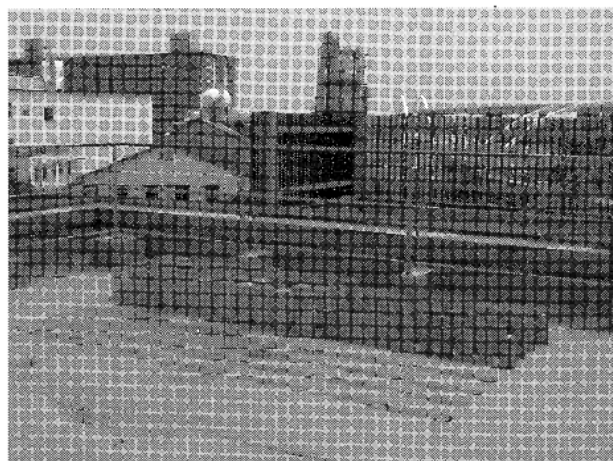


写真-3.4.8 東京屋外の暴露供試体設置状況

3.5 試験手順

試験手順を図-3.5.1 に示す。なお、試験手順は本委員会の既報告書¹⁾に準じて行った。

暴露後の供試体は、暴露条件から含水状態が変化しないよう密閉梱包して試験所に輸送した。

供試体は、鉄筋が露出する方向に発錆試験用供試体を割裂し、配筋状態の確認および中性化深さの測定を行った。その後、鉄筋をはつり出して発錆量の測定を行った。ただし一部（久里浜感潮の水セメント比 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 年まで継続的に行った。

また、鉄筋をはつり出した半割円柱から次の方法で調製した試料を用いて、細孔量、塩分量およびX線回折の各試験を行った。すなわち、半割円柱から図-3.5.2 に示す網掛部を切出し、さらに深さ方向の検討用試料として、図-3.5.3 に示す位置で切断し、それぞれ 5～15mm、20～30mm、35～45mm および 50mm以上の試料とした。なお各試料中心部のの供試体表面からの位置は、10mm、25mm、40mm および 55mm であり、塩化物イオンの拡散係数の計算にはこれらの値を使用した。切断後の試料は粗砕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直ちに 24 時間、D-乾燥を行った。また、2.5mm 未満の細粒は塩分量および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 μ mふるいを全通するように粉碎した。

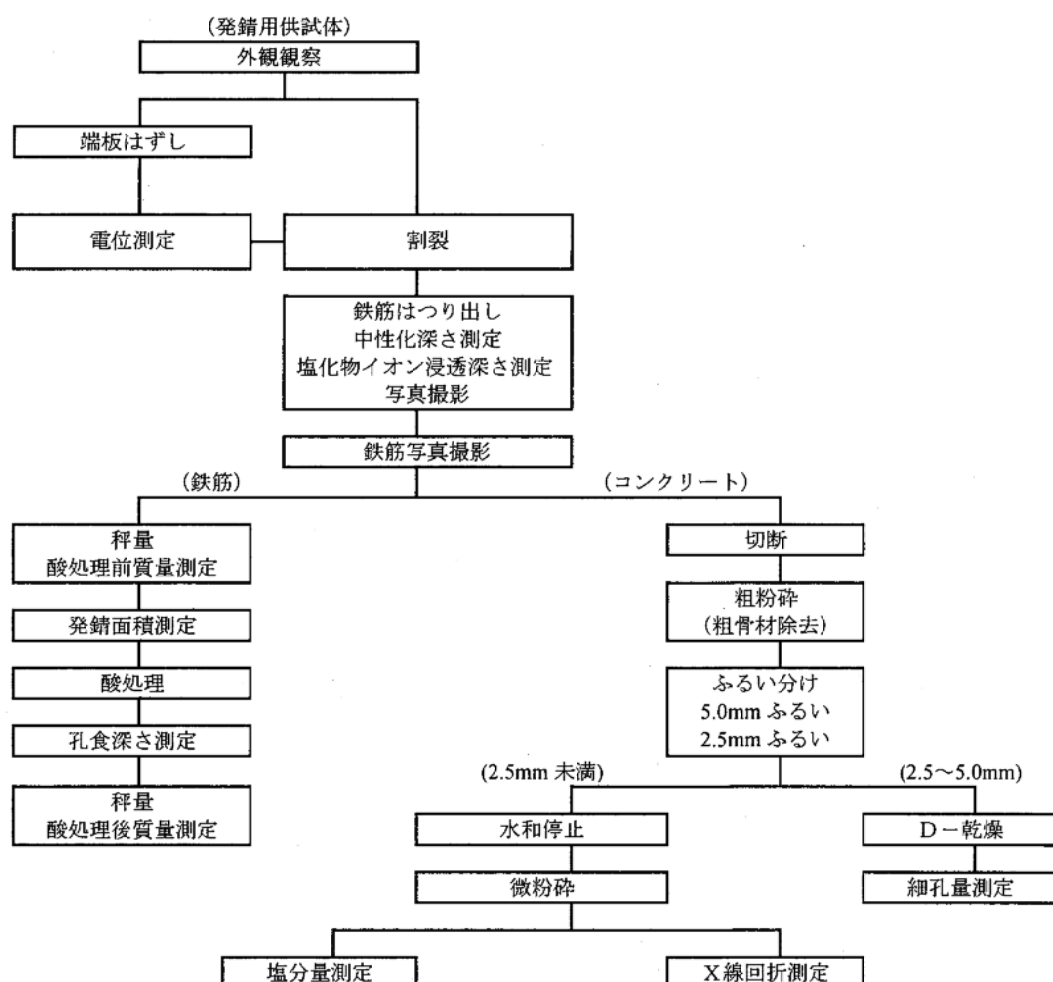


図-3.5.1 試験手順

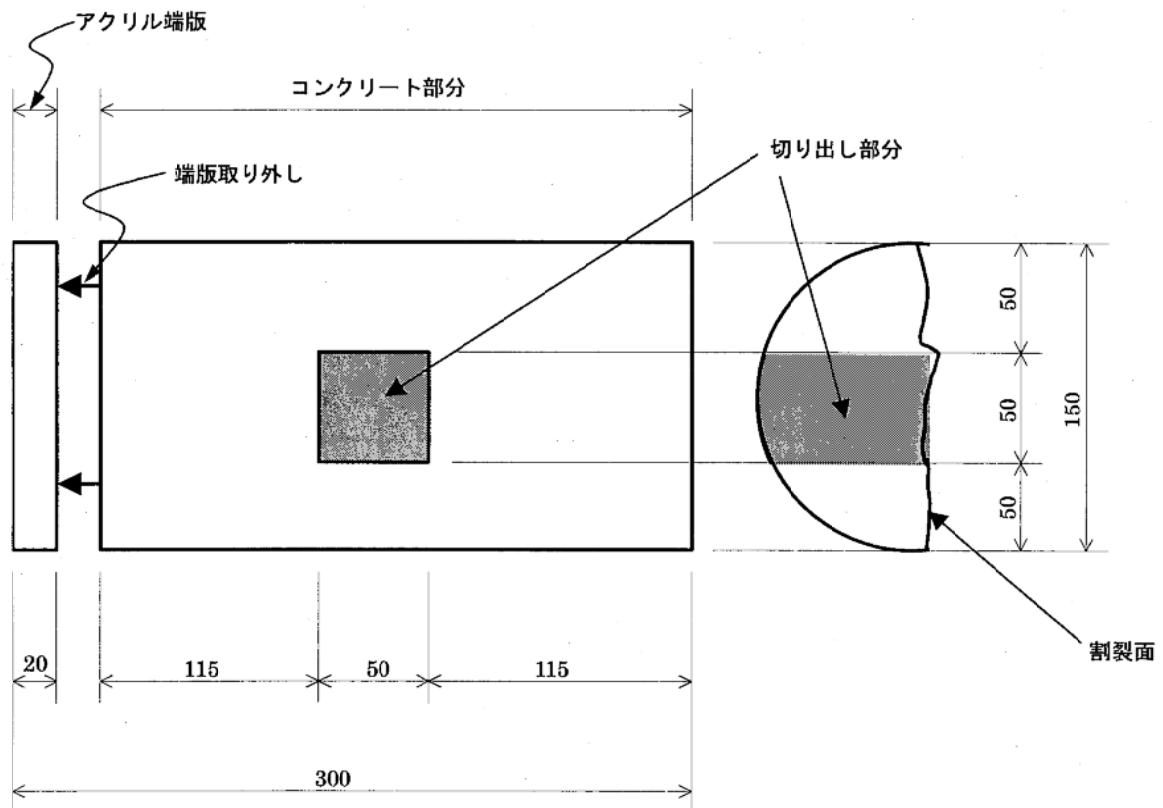


図-3.5.2 試料の切出し位置(mm)

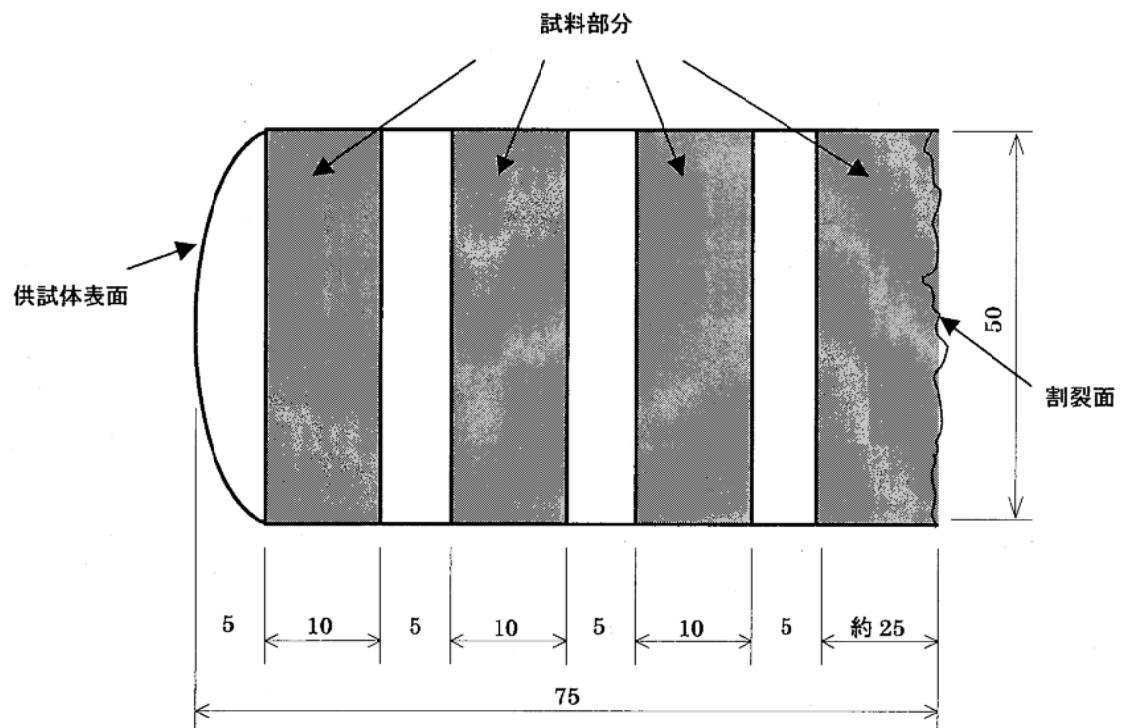


図-3.5.3 切り出し部分の深さ方向の切断位置(mm)

3.6 コンクリートに関する試験方法

3.6.1 外観観察

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

3.6.2 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」に準じて行った。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。

3.6.3 中性化

コンクリートの中性化の程度を調べるため、中性化深さを測定した。中性化深さの測定方法は 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-3.6.1 に示す 10ヶ所の中性化深さを測定し、最大値および平均値を求めた。

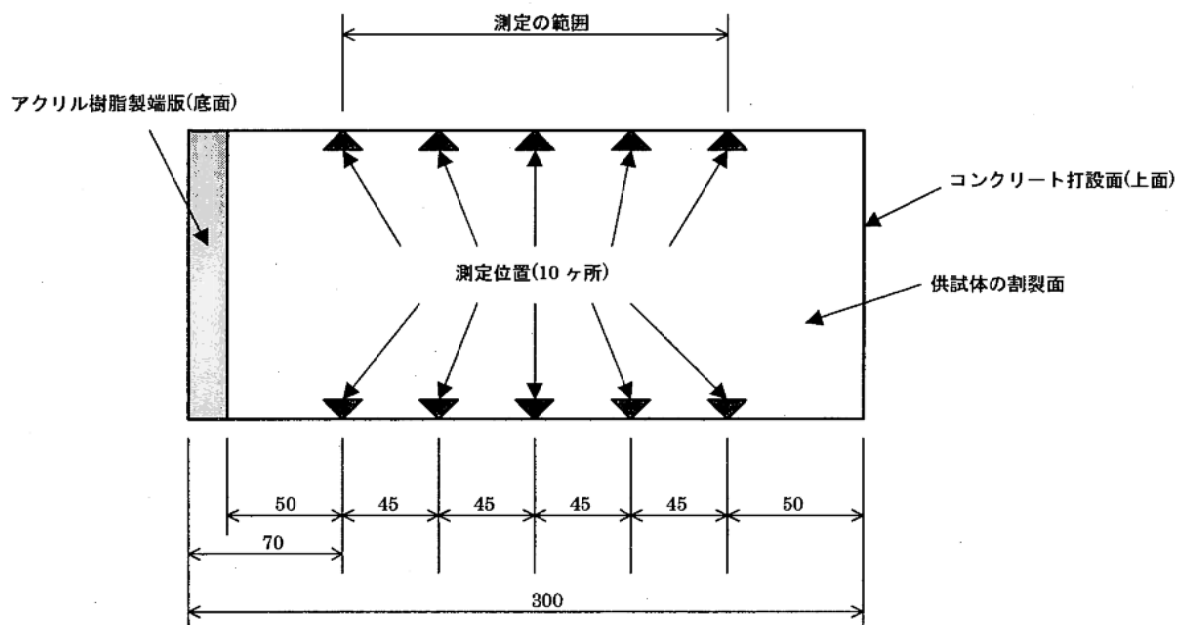


図-3.6.1 中性化深さの測定位置(mm)

3.6.4 塩化物イオン浸透深さおよび塩化物イオン濃度

(1) 塩化物イオン浸透深さ

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、図-3.6.2 に示す位置を 5cm 刻みにて 3ヶ所ずつ計 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。

(2) 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」の電位差滴定法に従って行った。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 4 点（塩化物イオン浸透深さが小さいものは表面から 3 点目まで）とした。

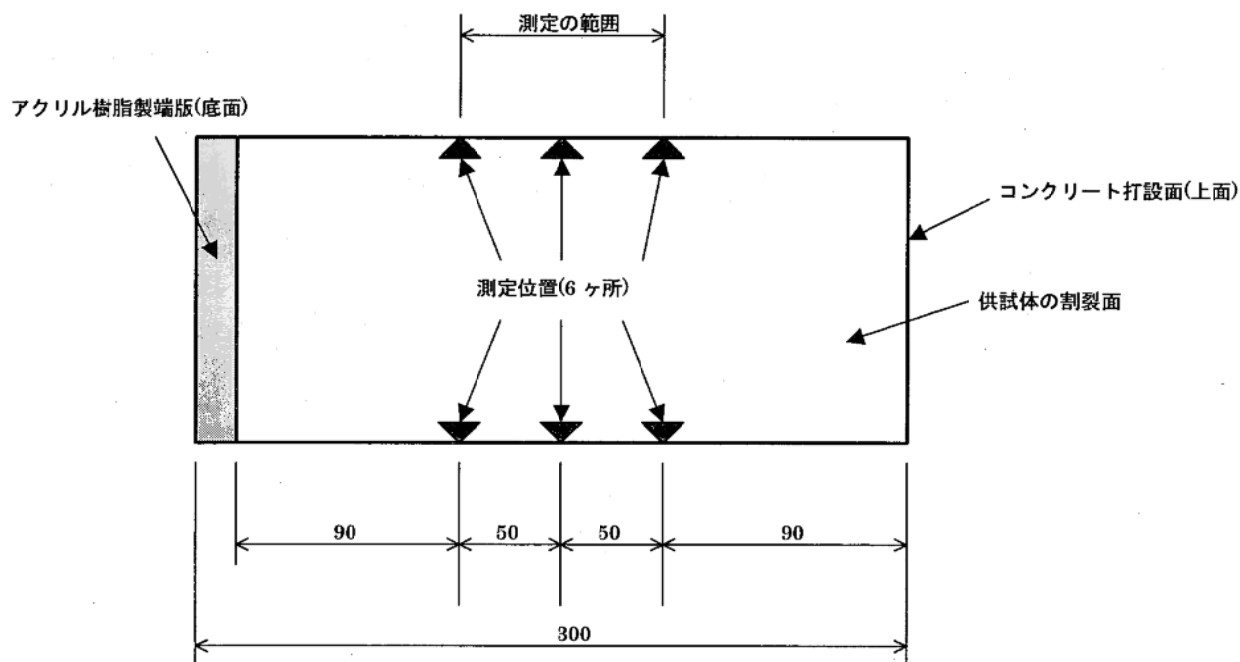


図-3.6.2 塩化物イオン浸透深さの測定位置(mm)

3.6.5 X線回折

図-3.5.3 に示すコンクリートの表面から 5~15mm の部分(表層部分)および 50mm 以上の部分(中心部分)の 2ヶ所についてX線回折測定を実施した。なお、測定用試料(150 μ m ふるい全通試料)に、予め 1000℃で強熱した ZnO を内部標準物質として外割で 8%(質量%)均一混合し、表-3.6.5.1 に示す条件で粉末X線回折試験(定時法)を行った。表-3.6.5.2 に今回着目した結晶を示す。

表-3.6.5.1 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-3.6.5.2 結晶相の回折角度 (2 θ)

エトリンガイト ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)	9.1	ポルトランダイト ($Ca(OH)_2$)	18.0
モノサルフェート水和物 ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$)	9.9	カルサイト ($CaCO_3$)	29.4
フリーデル氏塩 ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot nH_2O$)	11.2	酸化亜鉛 (ZnO)	31.8

3.6.6 細孔量

コンクリートの表面から 5~15mm の部分(表層部分)および 50mm 以上の部分(中心部分)の細孔量を調べた。3.5 に述べた方法により調製した試料を約 3g を使い、水銀圧入式ポロシメーターにより、半径 7.5~7500nm の範囲の細孔量を測定した。

3.7 鉄筋の発錆に関する試験方法

3.7.1 鉄筋の発錆状態の確認

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観察した。その際に既往の文献²⁾を参考にして、表-3.7.6.1 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²⁾の I に相当する。)

表-3.7.6.1 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。

3.7.2 鉄筋の発錆面積率

鉄筋の発錆面積率の測定は、透明な粘着テープを鉄筋に巻き付け、黒色の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、展開図を作成し、この図から画像解析処理装置により錆の表面積を測定することにより、次式に示す鉄筋の発錆面積率を求めた。

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

3.7.3 鉄筋の質量減少率

試験の方法は本委員会の既往の報告書³⁾に準じた。すなわち、コンクリート供試体からは取り出した鉄筋は、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℃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-3.7.3.1 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、鉄筋の質量(除錆後鉄筋質量)を測定した。なお、鉄筋の黒皮の質量測定に際しては、クエン酸二アンモニウム溶液への鉄筋の浸せき時間や溶液の温度、使用回数等がインヒビターの効果に影響を及ぼすと考えられたため、浸せき溶液には、発錆の認められない鉄筋(長・短鉄筋各 12 本)を浸せきロット毎に浸せきした。この発錆の認められない鉄筋の溶液浸せき前後の質量差の平均を黒皮質量として、浸せきロット毎に求めた。鉄筋質量を基に、次式により鉄筋の質量減少率を算出した。

$$\text{鉄筋の質量減少率 (\%)} = \frac{\text{腐食前鉄筋質量} - (\text{除錆後鉄筋質量} + \text{黒皮質量})}{\text{腐食前鉄筋質量}} \times 100$$

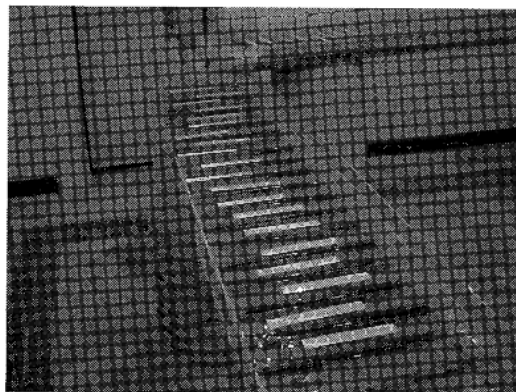


写真-3.7.3.1 酸処理の状況

3.7.4 鉄筋の孔食深さ

鉄筋の孔食深さの測定は、写真-3.7.4.1 に示すマイクロメータ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。

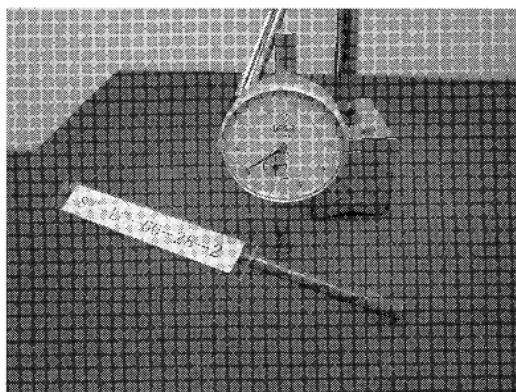


写真-3.7.4.1 孔食深さ測定装置

3.7.5 鉄筋の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、分極抵抗を測定した。また、同時にコンクリート抵抗の測定も行った。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-3.7.5.1に、計測システム概略を図-3.7.5.1に示す。この際用いた照合電極は海水—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、2週間に1回程度の頻度で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-3.7.5.2および図-3.7.5.2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—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⁴⁾。このようにして求められた分極抵抗は、以下の式-3.7.5.1より鉄筋の腐食速度に換算され、 I_{corr} が求められる。

$$I_{corr} = K \cdot (1/R_{ct}) \quad \text{式-3.7.5.1}$$

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。)

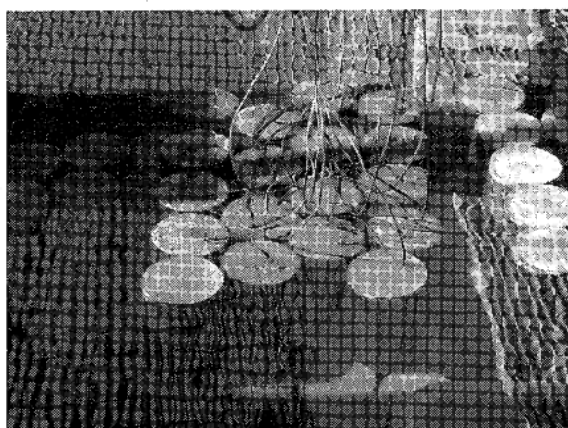


写真-3.7.5.1 自然電位計測用試験体

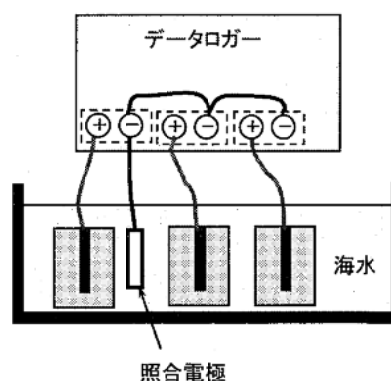


図-3.7.5.1 自然電位測定方法



写真-3.7.5.2 分極抵抗および
コンクリート抵抗測定状況

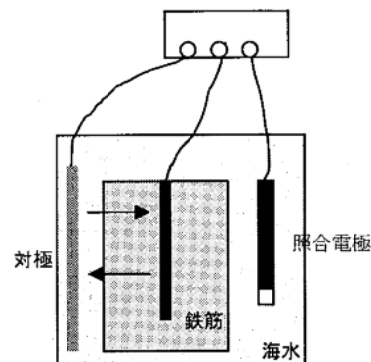


図-3.7.5.2 分極抵抗および
コンクリート抵抗測定方法

4. 試験結果および考察

4.1 コンクリートに関する試験結果および考察

4.1.1 供試体の外観観察

供試体の外観観察を行った結果、ひび割れ等の異常な様子は認められなかった。なお、感潮部の供試体については藻類が付着したものがあり、酒田感潮部に暴露した供試体では貝類が付着したものもあった。しかし、セメントの種類、水セメント比に関わらず一様に付着しており、供試体の外観に違いは認められなかった。各暴露場所の供試体外観を写真-4.1.1.1～写真-4.1.1.4に示す。



写真-4.1.1.1 酒田感潮の供試体の外観



写真-4.1.1.2 久里浜感潮の供試体の外観



写真-4.1.1.3 久里浜海浜の供試体の外観

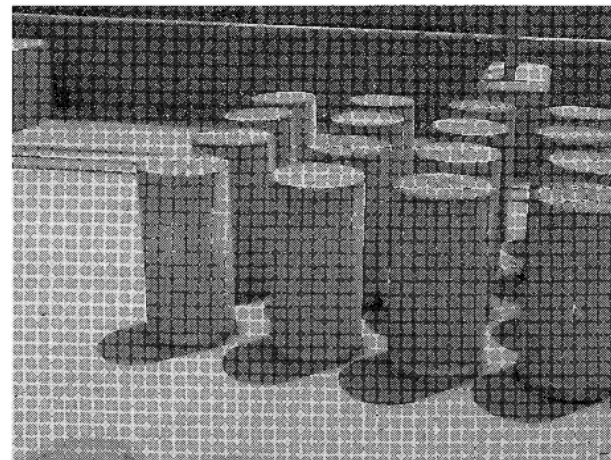


写真-4.1.1.4 東京屋外の供試体の外観

4.1.2 圧縮強度および静弾性係数

表-4.1.2.1 に暴露供試体の圧縮強度および静弾性係数試験結果を示す。また、表-4.1.2.2 に標準養生供試体の圧縮強度試験結果および静弾性係数試験結果を示す。

表-4.1.2.1 暴露供試体の圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

セメントの種類	水セメント比 (%)	前養生 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)					静弾性係数 (k N/mm ²)				
			暴露開始時	材齢 5 年				暴露開始時	材齢 5 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	49.0	63.5	52.8	62.9	64.1	32.8	39.2	38.4	32.5	31.9
	50		42.6	44.6	50.6	53.1	51.9	30.7	37.1	35.8	34.0	29.1
	60		36.5	32.1	34.4	49.3	42.2	30.0	31.6	34.0	32.1	30.1
MC	40		50.0	56.3	66.0	53.3	50.0	31.9	36.1	39.9	33.0	31.6
	50		43.0	38.9	45.6	52.4	52.2	30.9	35.0	35.7	32.3	32.4
	60		32.3	37.2	37.8	51.2	43.4	28.5	32.7	32.8	28.3	30.4
LC	40		50.6	68.0	68.1	68.6	64.4	33.3	38.4	44.3	36.2	34.4
	50		38.9	47.8	42.4	50.3	48.5	30.2	37.3	32.5	33.8	28.1
	60		30.3	38.6	45.9	58.3	49.2	30.2	35.3	35.4	33.5	29.3
NBB	50		32.3	48.8	55.3	40.9	36.7	30.6	38.0	37.9	21.0	21.0
MBB	50		32.5	58.0	62.0	43.9	40.9	30.4	38.4	40.2	26.7	22.5
LBB	50		31.1	50.9	53.9	43.9	39.6	28.8	36.8	36.4	23.7	20.0
FC	50		27.9	51.2	56.1	46.0	43.1	28.3	38.0	36.6	25.6	28.0
FCN	50		28.9	43.5	51.6	47.9	44.1	27.5	35.6	35.5	30.2	26.8
LP	50		26.8	28.3	29.4	38.7	41.7	29.3	31.0	30.8	31.9	31.0
NBF	50		28.4	52.5	55.7	42.2	41.0	29.7	36.2	36.9	25.6	22.1
NC	50	91	49.1	-	54.5	-	55.8	34.4	-	35.9	-	28.5
LC	50		58.5	-	52.9	-	57.9	35.3	-	28.2	-	31.7
NBB	50		45.3	-	51.0	-	34.8	34.3	-	35.4	-	24.4
LBB	50		42.3	-	63.1	-	37.6	34.0	-	37.7	-	21.7
FC	50		39.4	-	61.7	-	41.1	32.6	-	36.0	-	28.5
NBF	50		38.2	-	59.6	-	35.4	32.6	-	38.1	-	23.3

表-4.1.2.2 標準養生供試体の圧縮強度試験および静弾性試験結果

セメントの種類	水セメント比 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)				静弾性係数 (k N/mm ²)			
		材齢				材齢			
		28 日	91 日	1 年	5 年	28 日	91 日	1 年	5 年
NC	40	52.4	56.7	66.0	75.5	32.9	36.0	39.5	40.7
	50	45.7	51.7	54.9	55.2	33.4	35.4	38.5	38.0
	60	38.1	42.7	43.4	43.6	30.7	34.0	36.8	31.5
MC	40	53.8	66.7	69.7	77.6	33.2	37.9	40.0	40.4
	50	44.3	56.8	59.2	65.4	31.8	35.5	37.1	35.8
	60	32.6	43.7	44.7	46.6	29.7	33.3	35.8	32.0
LC	40	53.2	71.9	79.2	91.0	33.8	38.5	41.1	40.7
	50	39.2	55.9	62.5	69.3	29.6	36.4	38.3	37.8
	60	31.8	48.4	54.1	54.9	29.7	34.3	37.9	37.0
NBB	50	37.8	49.7	54.9	59.1	30.0	35.4	38.1	39.2
MBB	50	37.7	52.6	60.8	59.2	30.7	37.2	41.2	38.3
LBB	50	33.1	43.7	54.5	63.6	29.7	35.8	38.0	36.1
FC	50	28.2	40.2	51.3	61.7	28.8	32.1	38.4	42.7
FCN	50	29.6	41.3	49.0	60.4	28.6	31.6	37.3	34.6
LP	50	27.7	34.2	38.3	45.4	31.3	33.7	35.7	39.3
NBF	50	30.7	41.2	50.1	53.9	30.3	35.5	38.6	37.6

(1)ポルトランドセメントの場合

図-4.1.2.1 に各ポルトランドセメントのセメント水比と圧縮強度の関係を暴露条件別に示す。

標準養生では、各セメントともにセメント水比が大きくなると圧縮強度も増大した。材齢 5 年での圧縮強度は $LC > MC > NC$ の順であり、ポルトランドセメントの中でもビーライト量が多い LC や MC では NC に比べて長期強度が大きいことが確認される。また表-4.1.2.2 により材齢 5 年での圧縮強度の伸びを水セメント比別に見ると、水セメント比の小さい場合に伸びが大きい傾向が認められた。また、いずれの暴露条件でもセメント水比が大きくなると圧縮強度も増大する傾向は認められるが、標準養生に比べると傾きが小さくなった。特に東京屋外、久里浜海浜ではその傾向が強く、一部にセメント水比の増大と圧縮強度の増大が対応しない結果も認められた。

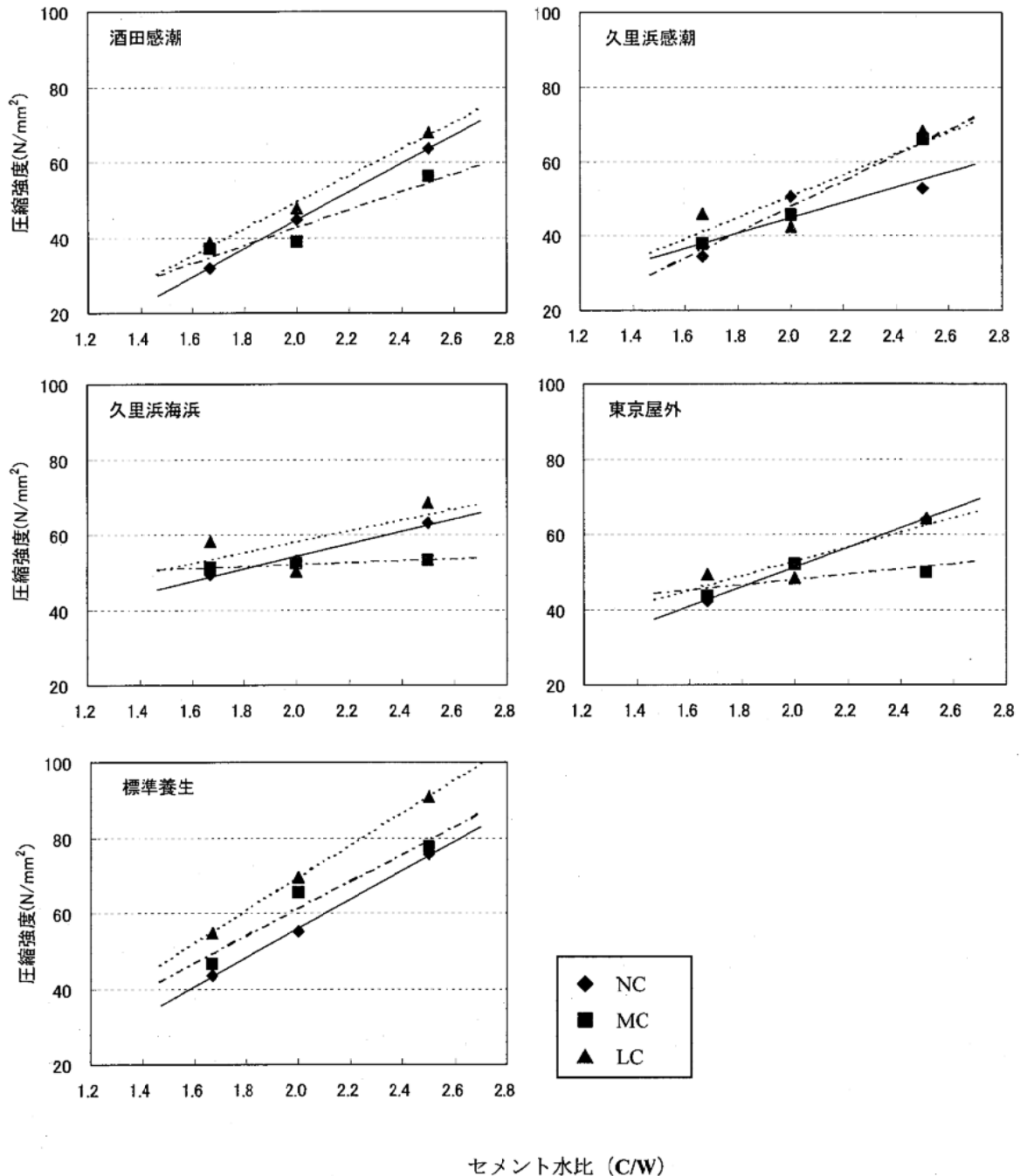


図-4.1.2.1 セメント水比と圧縮強度の関係（暴露条件別）

図-4.1.2.2 にセメント水比と圧縮強度の関係をセメントの種類別に示す。いずれのセメントも暴露状態のものが標準養生より低い値を示した。セメント水比が大きくなるほどその傾向が強く、その差は LC>MC>NC の順であり、標準養生の場合に強度の伸びが大きいセメントほど、その差が大きくなっている。なおセメント水比が小さい場合には、久里浜海浜や東京屋外と比較して酒田感潮や久里浜感潮の圧縮強度はやや低い傾向が見られた。

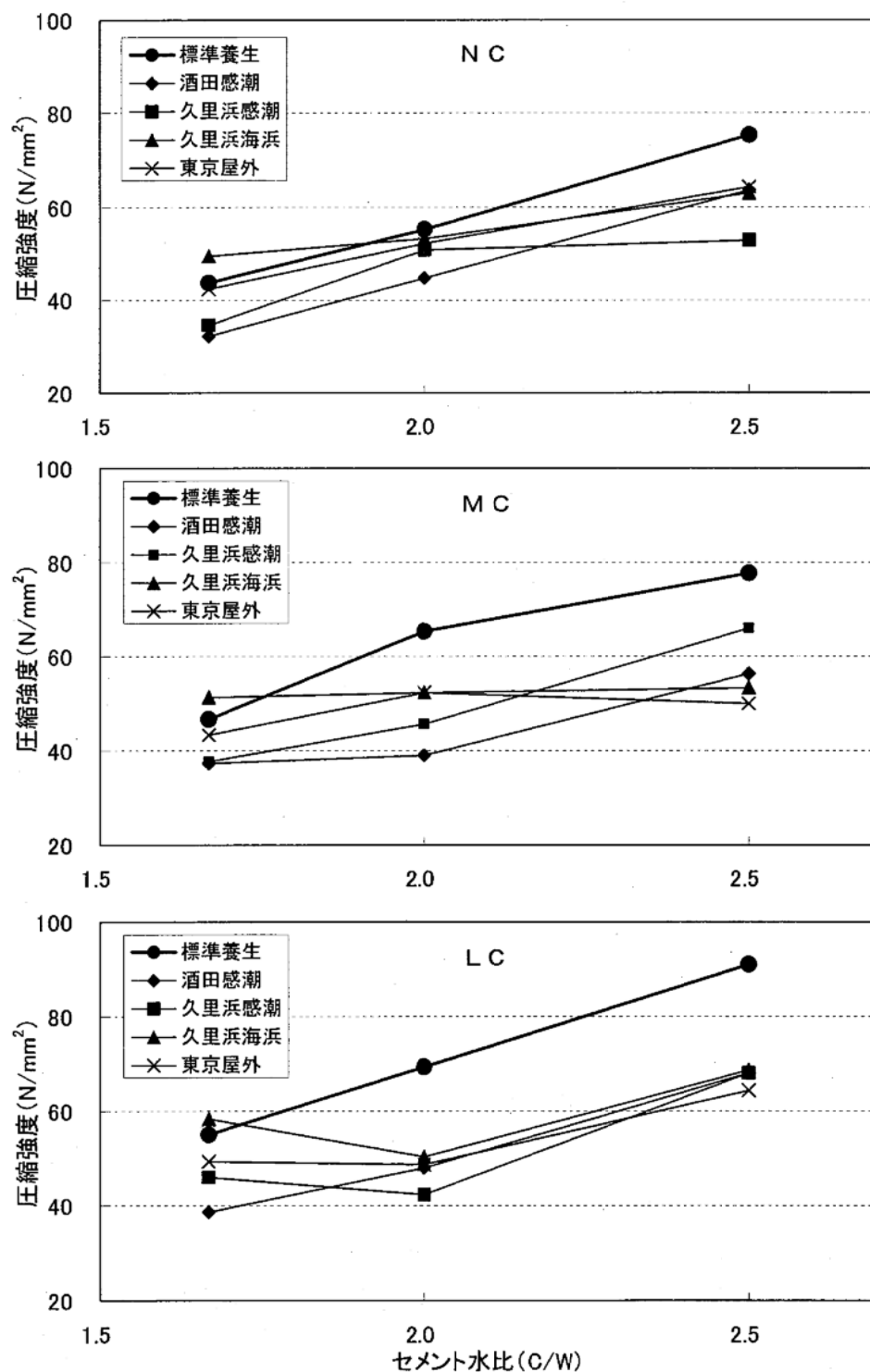


図-4.1.2.2 セメント水比と圧縮強度の関係 (セメント種類別)

(2)混合セメントの場合

図-4.1.2.3に各混合セメントの圧縮強度を暴露条件ごとに示す。酒田感潮、久里浜感潮の強度は、久里浜海浜、東京屋外の強度に比べて大きい傾向にある。NCと比較した場合に、海浜、屋外条件下ではNCよりも強度が小さい傾向にあるが、感潮部の条件下ではNCと概ね同等かそれ以上の強度を示している。これは乾燥を受けにくい感潮条件下で、混合セメント中の高炉スラグ微粉末やフライアッシュの水和反応が長期にわたって発現したためと考えられる。

なお、LPの強度発現は標準養生や感潮部で低い結果を示している。これは、石灰石微粉末が他の混和材のような水和反応を起こさないため、水分供給下での長期的な強度発現を示さなかったものと考えられる。一方でLPは久里浜海浜や東京屋外の条件では他の混和材使用の場合とさほど変わらない圧縮強度を示している。石灰石微粉末を除いて算定した水セメント比を有効水結合材比とすれば、LPの場合は71%であり、この値を図-4.1.2.1に示す各ポルトランドセメントのセメント水比と圧縮強度の関係にあてはめれば、感潮、海浜および屋外条件下での強度発現はほぼ有効水結合材比に対応した結果が得られたものと判断される。ただし標準養生の場合はNCの関係式に対してやや大きい結果である。

(3)前養生期間の影響

図-4.1.2.4に前養生期間の違いによる圧縮強度の比較を示す。感潮条件ではNBBを除き91日の方がやや大きい強度を示しており、概して強度発現の遅いセメントでその傾向が顕著と思われる。一方、屋外条件ではNC、LCでは91日の方がやや大きい強度を示しているが、混合セメントの場合ではほとんど前養生期間の影響が見られない。以上より、感潮条件では暴露前養生期間を長くした方が強度発現に有利な傾向が認められるが、屋外条件では暴露前養生期間の影響は概して小さいと考えられる。

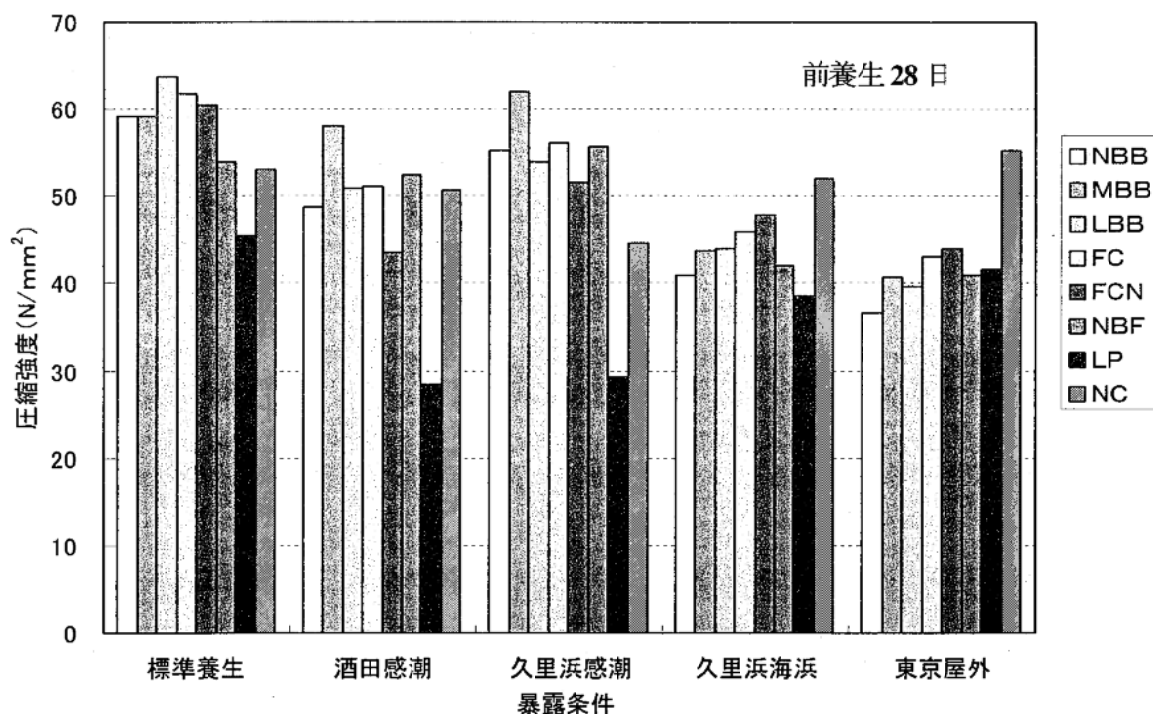


図-4.1.2.3 各混合セメントの暴露条件別圧縮強度

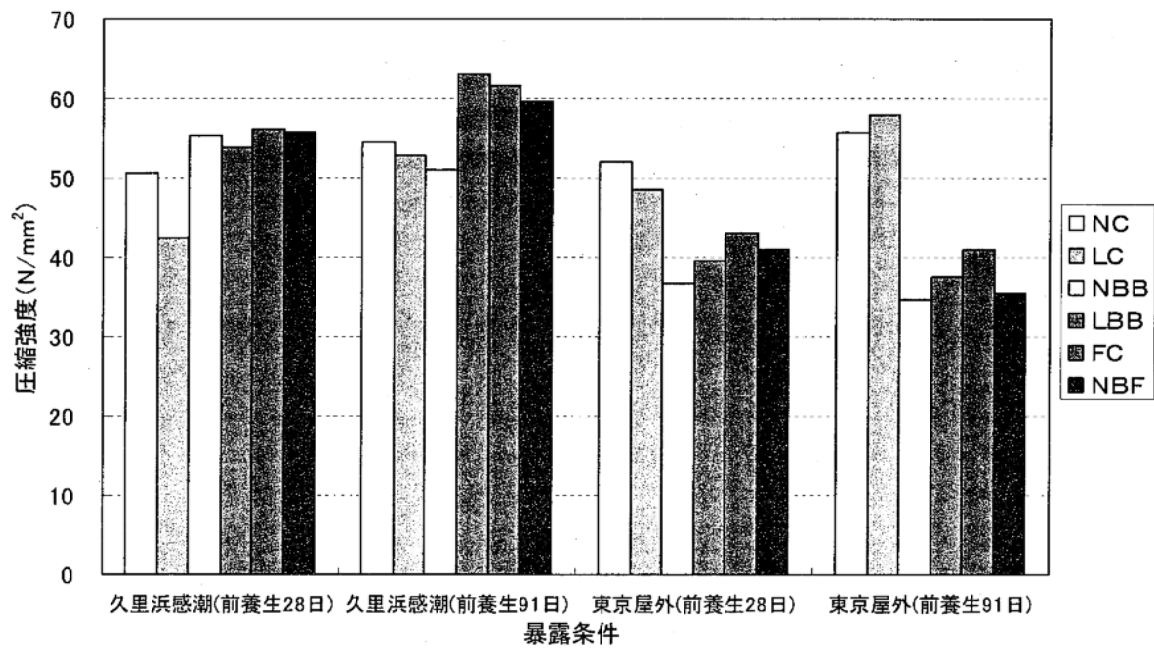


図-4.1.2.4 各セメントの圧縮強度の前養生期間別比較

(4) 静弾性係数

図-4.1.2.5 に圧縮強度と静弾性係数の関係を暴露条件別に示す。また、図-4.1.2.6 に標準養生での圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。

圧縮強度と静弾性係数の関係を示す参考として、土木学会コンクリート標準示方書「構造性能照査編」⁹⁾に記載されている数値を用いた。感潮部では上記示方書より大きな値を示し、標準養生と同じ傾向である。一方、海浜および屋外では上記示方書の値を下回る傾向であり、特に強度の低い場合に顕著である。これは乾燥の影響と考えられる。

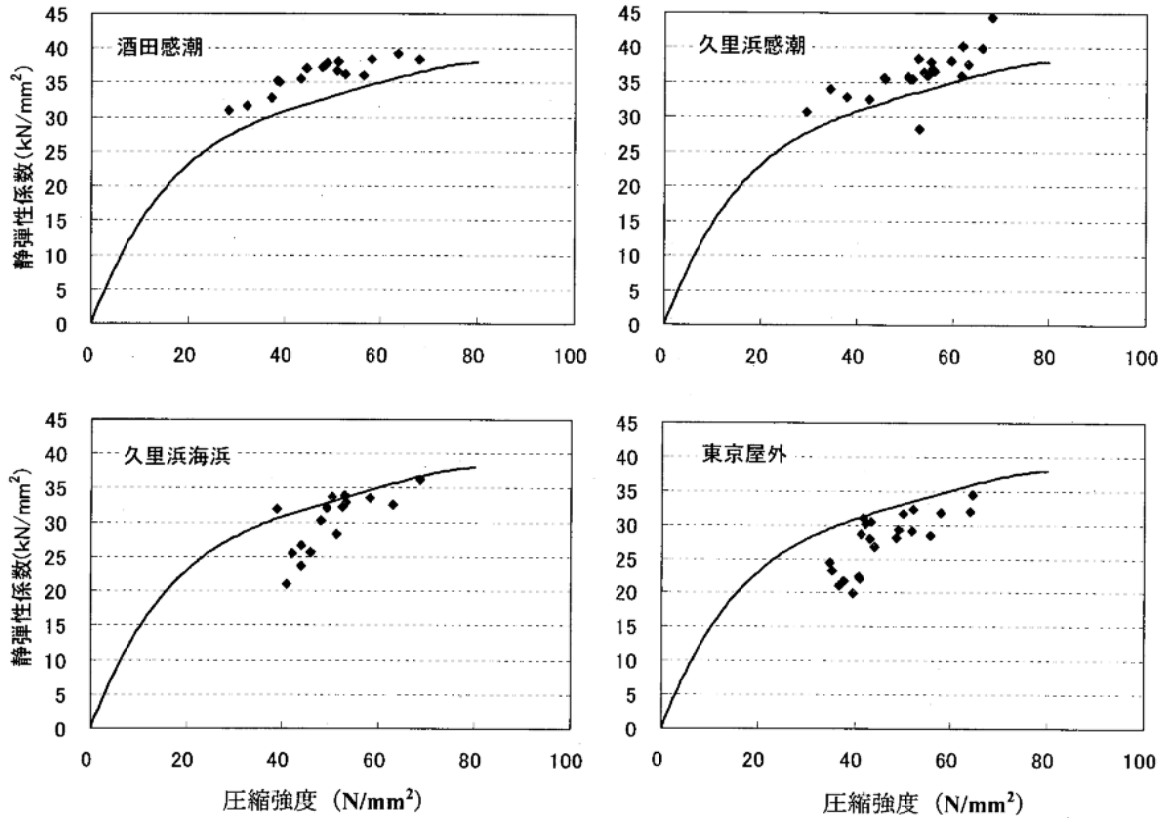


図-4.1.2.5 圧縮強度と静弾性係数の関係(暴露条件別)

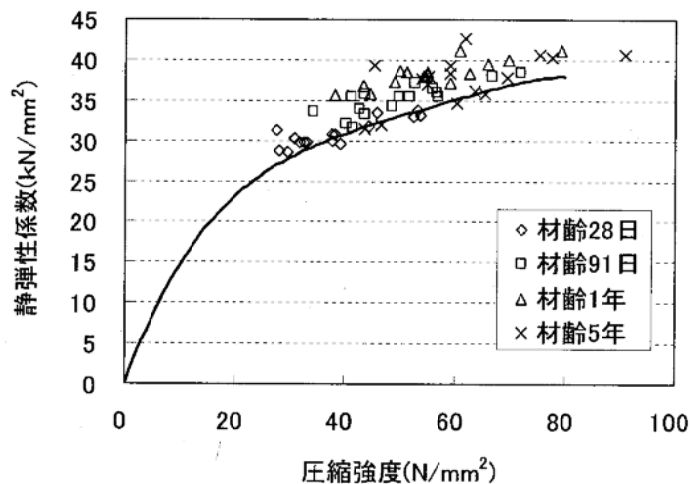


図-4.1.2.6 圧縮強度と静弾性係数の関係 (標準養生)

4.1.3 中性化深さ

コンクリートの中性化深さ測定結果を表-4.1.3.1に示す。なお、以下では表中の平均中性化深さにより考察を行った。久里浜感潮および酒田感潮では中性化はほとんど認められなかった。

(1)ポルトランドセメントの場合

各ポルトランドセメントの水セメント比と中性化深さの関係を図-4.1.3.1に示す。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を示した。また、各種セメントの中性化深さを比較すると、NCに対してMC、LCはやや中性化が大きい傾向が見られた。これはセメントの強度発現性の違いが影響しているものと考えられる。

表-4.1.3.1 中性化深さ測定結果

セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	中性化深さ(mm)							
			酒田感潮		久里浜感潮		久里浜海浜		東京屋外	
			最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均
NC	40	28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	50		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.5
	60		0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	1.8	2.8	1.8
MC	40	28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	50		0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	1.0	2.8	1.2
	60		0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	2.2	3.8	2.3
LC	40	28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.6
	50		0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	1.3	1.7	0.9
	60		0.0	0.0	0.0	0.0	9.8	3.6	3.1	2.3
NBB	50	28	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	2.0	2.9	2.0
MBB	50		0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	1.3	4.5	2.2
LBB	50		0.0	0.0	5.7	0.7	5.7	1.6	3.5	2.5
FC	50		0.0	0.0	1.6	0.9	3.8	2.6	6.7	5.2
FCN	50		0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	2.2	6.9	4.6
LP	50		0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	2.1	7.3	4.7
NBF	50		2.0	1.6	2.1	1.4	8.2	6.6	11.9	9.8
NC	50	91	-	-	0.0	0.0	-	-	1.0	0.4
LC	50		-	-	0.0	0.0	-	-	1.5	0.9
NBB	50		-	-	0.0	0.0	-	-	2.0	1.4
LBB	50		-	-	0.0	0.0	-	-	2.8	2.1
FC	50		-	-	1.9	0.9	-	-	6.1	5.2
NBF	50		-	-	2.2	1.7	-	-	12.0	9.1

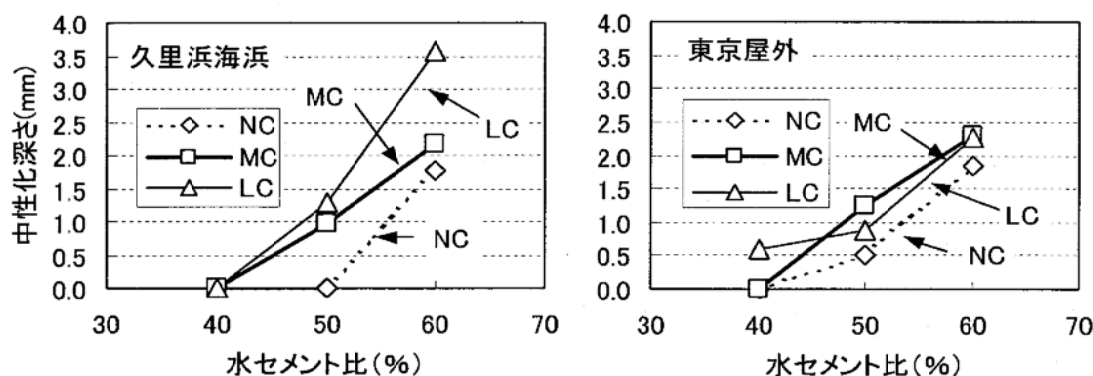


図-4.1.3.1 水セメント比と中性化深さの関係

(2)混合セメントの場合

各混合セメントの中性化深さを図-4.1.3.2に示す。NC、MC および LC に高炉スラグ微粉末をそれぞれ 50%混合した NBB、MBB、LBB では、同一水セメント比のベースセメントと比較して中性化深さが大きくなる傾向を示す。NC にフライアッシュを 30%混合した FC、FCN、およびフライアッシュと高炉スラグ微粉末を混合した NBF にも同様の傾向が認められるが、高炉スラグ微粉末を混合した場合に比べて中性化深さが大きい傾向にあり、特に NBF ではその傾向が著しい。これは高炉スラグ微粉末やフライアッシュが反応する過程でコンクリート中の水酸化カルシウムが消費され、中性化の進行が早まったと考えられる。NC に石灰石微粉末を 30%混合した LP は同一水セメント比の NC と比較して中性化深さが大きくなった。これは、圧縮強度の場合と同様に有効水結合材比が大きくなり、組織の緻密化や強度増進効果があまり期待できず、中性化が進行したものと考えられる。また LP と FC、FCN はほぼ同程度の中性化深さを示している。これらのセメントの混合材混入率はともに 30%であることから、中性化進行に及ぼす影響はフライアッシュと石灰石微粉末とではほぼ同程度であると考えられる。

なお、ポルトランドセメントの場合には傾向が認められなかったが、久里浜海浜と東京屋外を比較した場合に、東京屋外の方が中性化深さが大きい傾向がうかがえた。この傾向は中性化深さの大きい FC、FCN、LP の場合に明瞭に認められる。この理由は、東京屋外の場合に暴露場所は建屋屋上であり、海浜条件に比べてより乾燥し易い条件にあるためと考えられる。

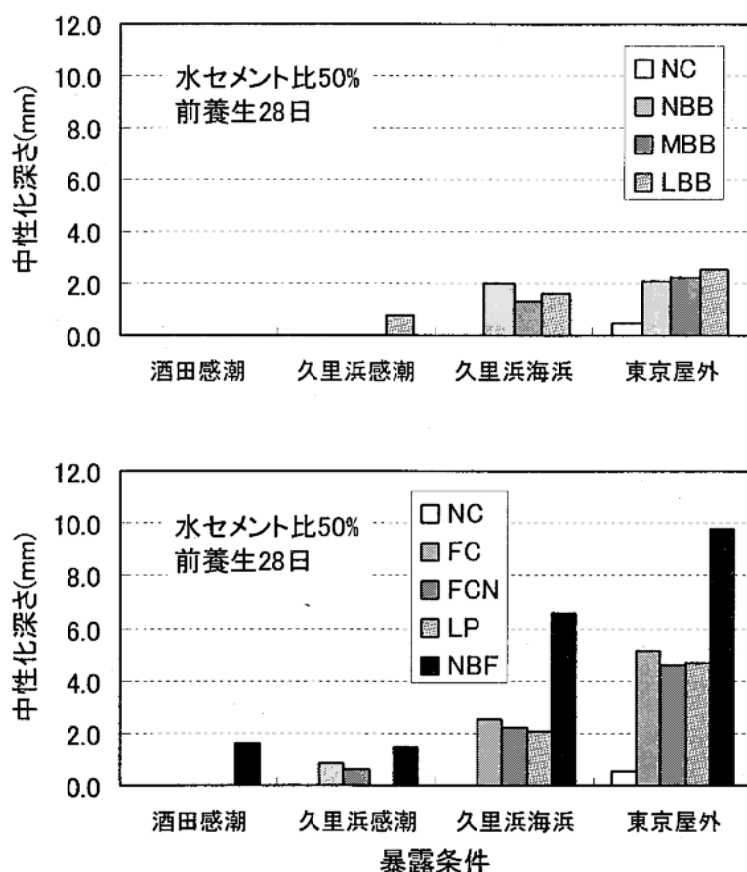


図-4.1.3.2 各混合セメントの中性化深さ

(3)前養生期間の影響

前養生期間と中性化深さの関係を図-4.1.3.3 に示す。同一配合で前養生を28日および91日とした供試体の中性化深さを比較すると、各セメント間で中性化深さは異なるが、前養生期間の違いによる中性化深さに大きな差は認められない。また前記のとおり、感潮条件ではほとんど中性化は進行していない。暴露条件が海浜や屋外の場合には、暴露前の養生期間が28日以上であれば、中性化進行に対して前養生期間はあまり影響を与えないものと考えられる。この理由としては、これらの暴露条件下では、乾燥や水分供給が長期にわたって繰り返されることにより、暴露開始時点での組織の緻密さや強度発現などの影響が現れてこないためと考えられる。

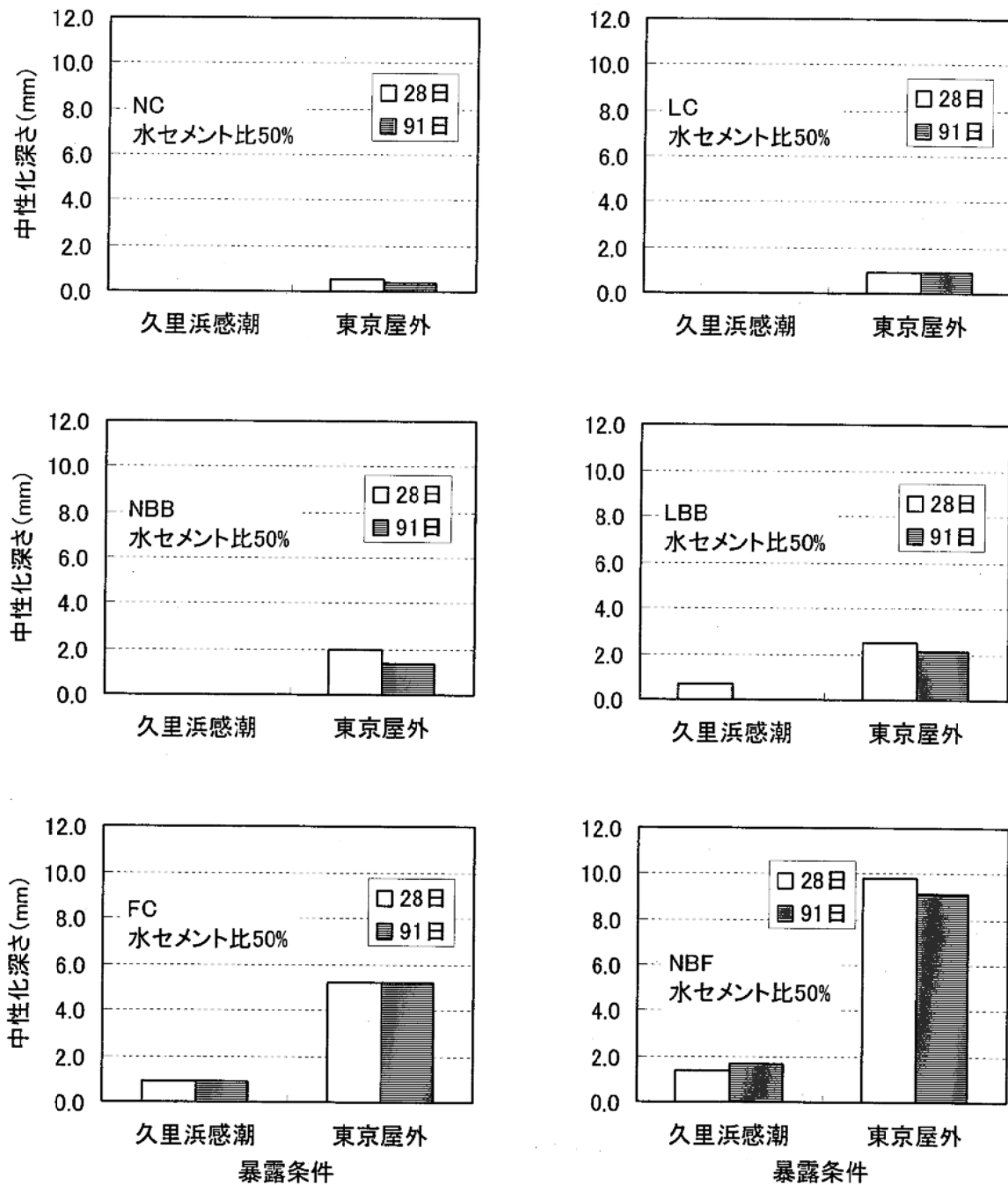


図-4.1.3.3 前養生期間と中性化深さの関係

(4) 圧縮強度の影響

暴露供試体の圧縮強度と中性化深さの関係を図-4.1.3.4 に示す。概ね圧縮強度が大きくなると中性化深さが小さくなっている傾向が認められるが、これはポルトランドセメントにおける水セメント比と中性化深さの関係、またポルトランドセメントと混合セメントの差異を反映しているものである。暴露開始時の供試体の圧縮強度と中性化深さの関係を図-4.1.3.5 に示す。図-4.1.3.4 と同様に、強度が大きくなると中性化深さが小さくなっている傾向が見て取れるが、東京屋外での前養生期間の違いによる影響に着目すると、前養生期間を 91 日として暴露開始時の圧縮強度を増大させた場合でも中性化深さには変化が見られない。これは前記のように、乾燥や水分供給が繰り返されることにより、前養生期間の影響が見られなくなったためと推察される。

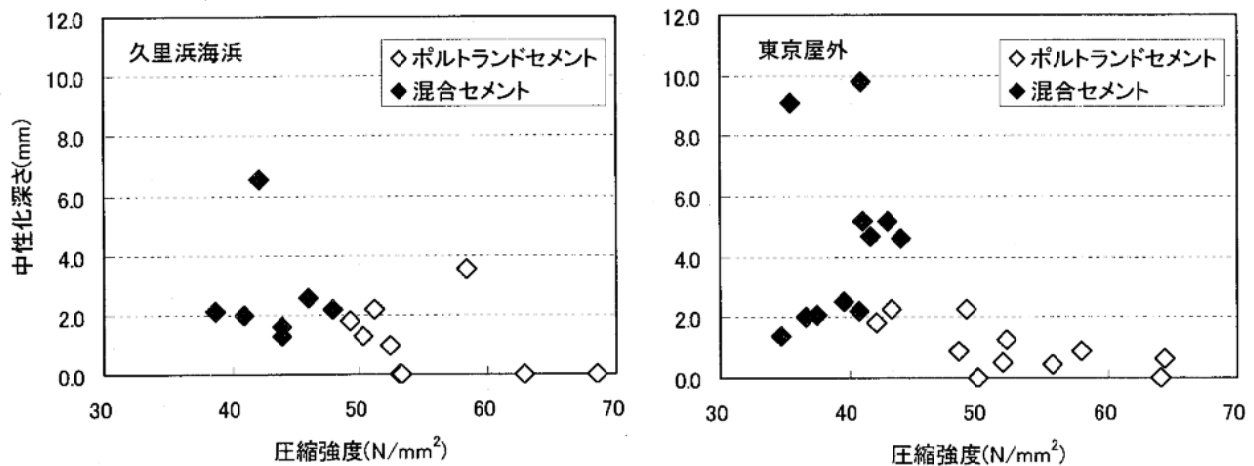


図-4.1.3.4 圧縮強度と中性化深さの関係

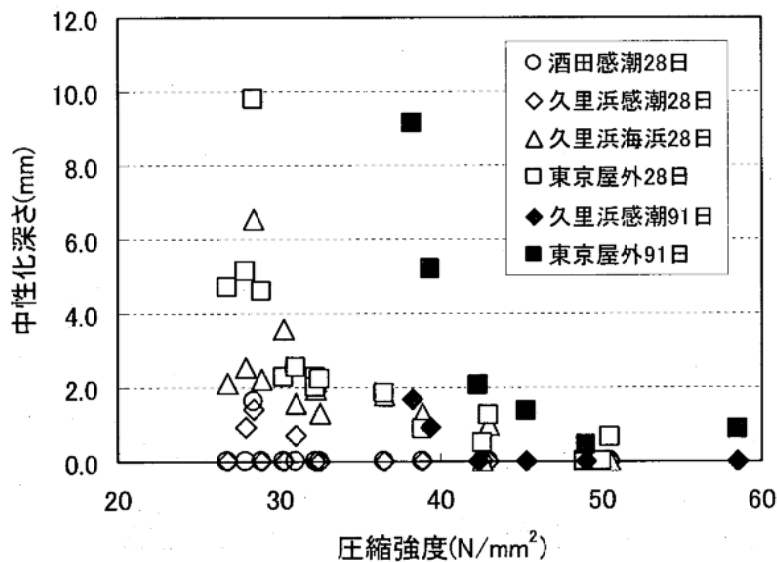


図-4.1.3.5 暴露開始時圧縮強度と中性化深さの関係

(5) 中性化速度係数

今回の試験結果より得られた中性化速度係数を表-4.1.3.2に示す。ここでは土木学会コンクリート標準示方書[施工編]⁶⁾の解説において記載されている中性化速度の計算式より求めた結果と、今回の試験結果とを比較した。

示方書解説に示されている中性化速度係数の計算式（以下、土木学会式）は以下のとおりである。

$$\alpha = -3.57 + 9.0W/B \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$$

ここに、 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 $k=0.7$ ）

また今回の試験結果による中性化速度係数は、以下により算定したものである。石灰石微粉末の場合は、フライアッシュと同様に $k=0$ として計算した。

$$\text{中性化速度係数} = \text{実測中性化深さ}(\text{mm}) / \sqrt{5 \text{ 年}} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$$

以上により得られた中性化速度係数と有効水結合材比の関係を図-4.1.3.6に示す。各暴露条件での中性化速度係数は、東京屋外のNBF以外は土木学会式で計算した中性化速度係数よりも小さい数値となった。ベースセメントと混合セメントを同一水セメント比で比較すると混合セメントの方が高い数値となるが、同程度の有効水結合材比で比較するとばらつきはあるものの、大きな差は認められなくなった。混合セメントを使用した場合は、混合材の種類および添加量を考慮した有効水結合材比による中性化予測が有効であることが確認される。

暴露条件で比較すると、久里浜海滨と東京屋外では有効水結合材比が高くなると中性化速度係数に差が生じるため直線式の傾きが異なり、東京屋外では土木学会式に比較的近い値を示し、久里浜海滨ではそれらより小さい結果となった。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、前記のとおり乾燥の程度が影響したものと考えられる。

表-4.1.3.2 中性化速度係数

セメントの種類	水セメント比(%)	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/√年)	中性化速度係数(mm/√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	0.00	0.00
	50	50		0.93	0.00	0.00	0.00	0.22
	60	60		1.83	0.00	0.00	0.80	0.80
MC	40	40	28	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	50	50		0.93	0.00	0.00	0.45	0.54
	60	60		1.83	0.00	0.00	0.98	1.03
LC	40	40	28	0.03	0.00	0.00	0.00	0.27
	50	50		0.93	0.00	0.00	0.58	0.40
	60	60		1.83	0.00	0.00	1.61	1.03
NBB	50	59	28	1.73	0.00	0.00	0.89	0.89
MBB	50	59		1.73	0.00	0.00	0.58	0.98
LBB	50	59		1.73	0.00	0.31	0.72	1.12
FC	50	71		2.86	0.00	0.40	1.16	2.33
FCN	50	71		2.86	0.00	0.00	0.98	2.06
LP	50	71		2.86	0.00	0.00	0.94	2.10
NBF	50	83		3.93	0.72	0.63	2.95	4.38
NC	50	50	91	0.93	—	0.00	—	0.18
LC	50	50		0.93	—	0.00	—	0.40
NBB	50	59		1.73	—	0.00	—	0.63
LBB	50	59		1.73	—	0.00	—	0.94
FC	50	71		2.86	—	0.40	—	2.33
NBF	50	83		3.93	—	0.76	—	4.07

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⁷⁾に基づいている。

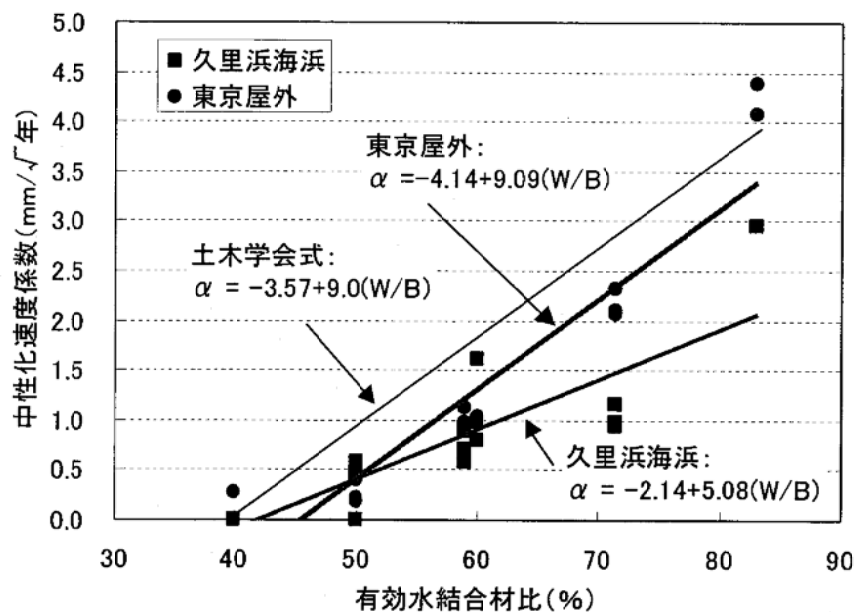


図-4.1.3.6 有効水結合材比と中性化速度係数の関係

4.1.4 塩化物イオン浸透深さおよび塩化物イオン濃度

(1)塩化物イオン浸透深さ

円柱供試体への円周方向からの塩化物イオンの浸透深さを、表-4.1.4.1 および図-4.1.4.1 に示す。

セメントの種類と塩化物イオン浸透深さの関係は、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る傾向にあり、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、海浜条件下では、高炉スラグ微粉末を混合したものは浸透が認められないのに対してフライアッシュを混合したものはわずかに浸透が認められた。

水セメント比と塩化物イオン浸透深さの関係は、水セメント比が小さくなるほど浸透深さは小さくなる傾向にあった。酒田感潮および久里浜感潮のものでは、水セメント比 50%と60%のものは塩化物イオンが供試体中心まで浸透していたので、水セメント比の影響が不明であるが、久里浜海浜のものでは、水セメント比と浸透深さの関係が明瞭である。

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。

表-4.1.4.1 塩化物イオン浸透深さ

セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	塩化物イオンの浸透深さ (mm)		
			酒田感潮	久里浜感潮	久里浜海浜
NC	40	28	48.7	52.7	10.6
	50		> 75.0	> 75.0	10.5
	60		> 75.0	> 75.0	13.4
MC	40	28	65.9	> 75.0	9.2
	50		> 75.0	> 75.0	12.1
	60		> 75.0	> 75.0	19.9
LC	40	28	52.9	54.6	5.2
	50		> 75.0	> 75.0	11.2
	60		> 75.0	> 75.0	20.8
NBB	50	28	28.5	29.8	0.0
MBB			29.6	31.8	0.0
LBB			24.0	25.6	0.0
FC			32.3	29.1	3.4
FCN			41.2	36.1	8.0
LP			> 75.0	> 75.0	16.2
NBF			16.3	17.0	0.0
N	50	91	—	> 75.0	—
L			—	> 75.0	—
NBB			—	33.3	—
LBB			—	27.5	—
FC			—	32.0	—
NBF			—	16.3	—

※硝酸銀噴霧による観察の結果、塩化物イオンが中心まで浸透していた供試体では、浸透深さを「> 75.0」としている。

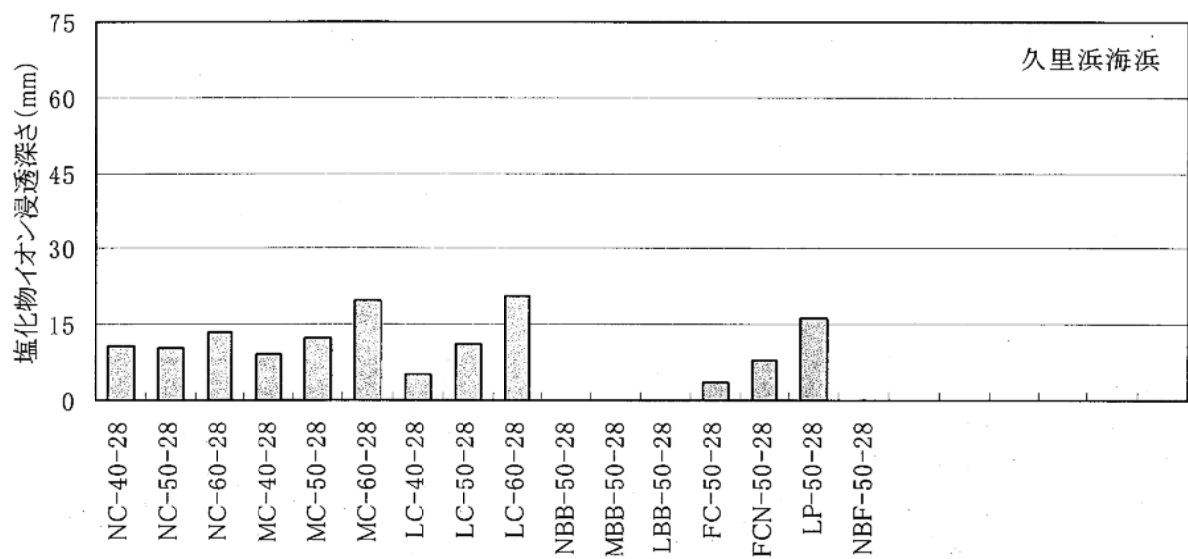
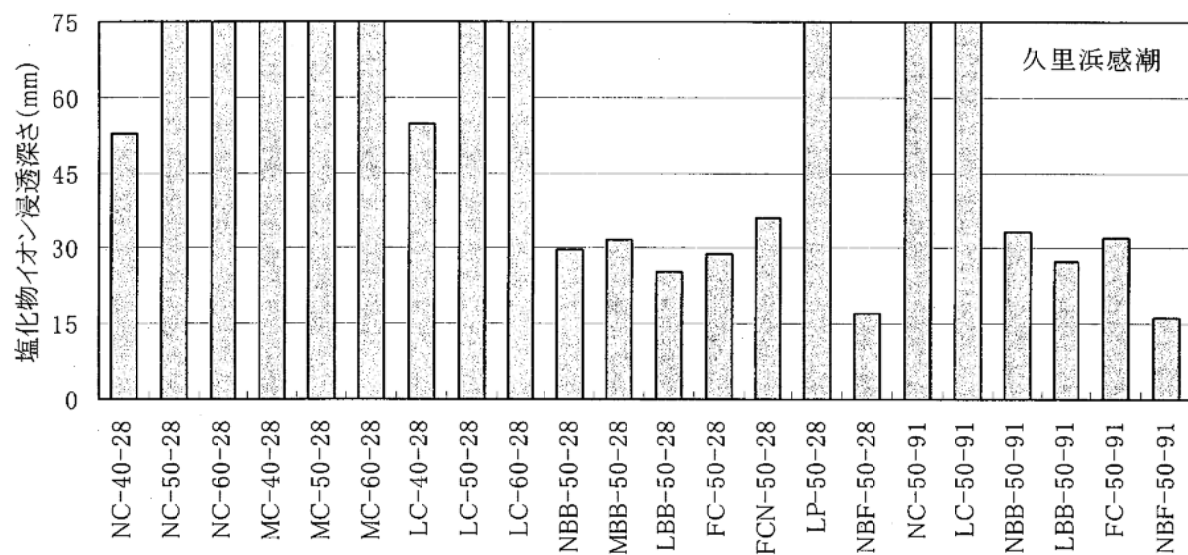
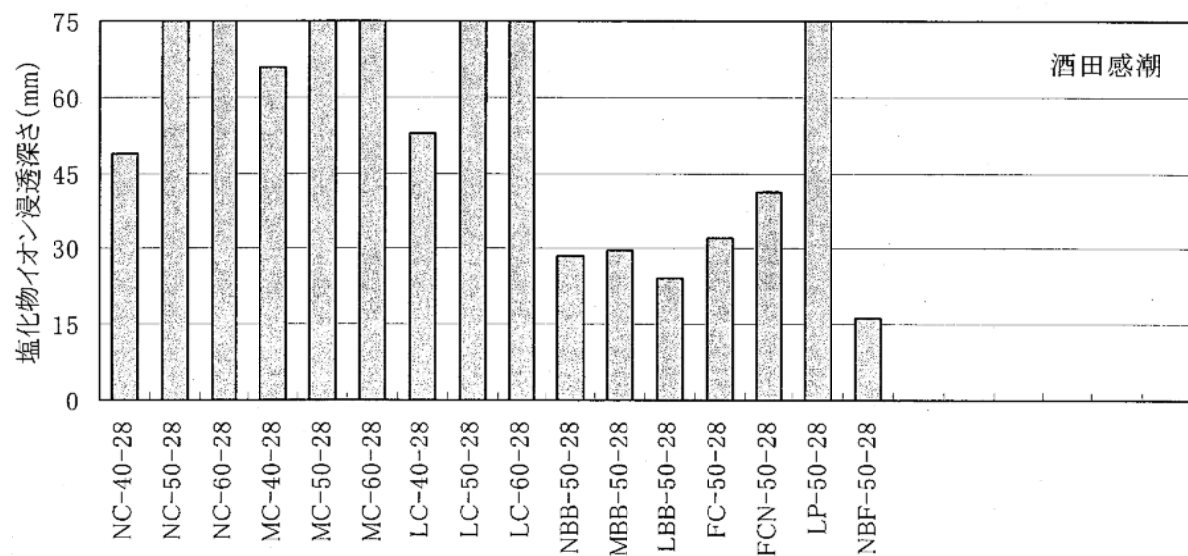


図-4.1.4.1 塩化物イオン浸透深さ

(2)塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度の分布を表-4.1.4.2～表-4.1.4.4に示す。なお、塩化物イオン濃度の測定には粗骨材を除去したモルタル部分を供しているため、表中にはコンクリートの配合を用いて計算で求めたコンクリート換算の塩化物イオン濃度を併記した。これらによれば、感潮条件では水セメント比40%の場合を除く各ポルトランドセメント、および石灰石微粉末混合セメントでは、供試体表面から50mm以上の中心部においても 2kg/m^3 を超える塩化物イオン濃度となっていることが分かる。

表-4.1.4.5～表-4.1.4.7に、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布を基に算出した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、またこれらより推定される鉄筋位置（かぶり5cmおよび7cm）付近の塩化物イオン濃度および腐食発生限界濃度深さを示す。ここでの腐食発生限界濃度深さは、塩化物イオン濃度が土木学会示方書⁸⁾による鉄筋腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 となる深さを示している。

なお今回の試験結果においては、Fickの拡散方程式を円柱座標系に変換して拡散係数を算出した⁹⁾。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-4.1.4.1を用いた計算結果から最小二乗法を用いて、式-4.1.4.2に示す誤差が最小となるような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

$$C = C_0 + 2(C_{ini} - C_0) \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{S_n J_1(S_n)} \right) J_0 \left(S_n \frac{r}{R} \right) \exp \left(- \left(\frac{S_n}{R} \right)^2 D_c t \right) \dots\dots\dots \text{式-4.1.4.1}$$

ここで、

C : 塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_{ini} : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3) ※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 : 塩化物イオン拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

t : 時間 (年)

J_n : 第1種ベッセル関数 $S_n : J_0(S) = 0$ の解

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{x}{2} \right)^{n+2k}$$

$$\text{error} = \sum_{k=1}^n (C_{\text{measured}} - C_{\text{calculated}})^2 \dots\dots\dots \text{式-4.1.4.2}$$

見掛けの拡散係数の一覧を図-4.1.4.2に示す。(なお久里浜海浜の結果については、塩化物イオン浸透が少なく、浸透部分での測定点数も少ないため、見掛けの拡散係数の算出においてその精度は十分でないと考えられるが、ここでは一連のデータであるため、結果の表および図中に示すこととした。)

ポルトランドセメントの場合、セメント種類の違いが拡散係数に及ぼす影響は判然とせず、拡散係数の大きさはほぼ同等であると考えられる。高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用した場合には、ベースのポルトランドセメントに比べて拡散係数は著しく小さくなっており、塩化物イオン浸透抑制効果が顕著に認められた。特に三成分系のNBFは拡散係数が小さくなった。高炉スラグ微粉末を用いた場合、ベースのポルトランドセメントの種類が異なっ

ても拡散係数との関係は定かでなく、塩分浸透に及ぼす影響は認められなかった。フライアッシュを用いた場合、FCN に比べて FC の方が拡散係数がやや小さくなっており、フライアッシュのⅡ種とⅢ種とで塩分浸透抑制効果に若干の差が認められた。

石灰石微粉末を用いた場合の拡散係数の大きさは、ポルトランドセメントとほぼ同程度で、高炉スラグ微粉末やフライアッシュのような塩化物イオン浸透抑制効果は認められなかった。ただし水セメント比 50% の LP の場合、その有効水結合材比は 71% となる。LP の拡散係数を NC の水セメント比 60% の場合と比較すると、LP の方がやや小さい値を示していることから、コンクリート中の粉体量が増大することなどによって何らかの抑制効果が現れたのではないかと考えられる。

塩化物イオン濃度が、鉄筋腐食発生限界濃度(1.2kg/m^3)となる深さを図-4.1.4.3 に示す。酒田感潮および久里浜感潮では、かぶり 5cm の位置において、水セメント比 40% の配合の一部を除くポルトランドセメント、および石灰石微粉末を混合した LP で、塩化物イオン濃度が鉄筋腐食発生限界濃度を超えていた。

ポルトランドセメントを用いた場合の、水セメント比と見掛けの拡散係数の関係を、図-4.1.4.4 に示す。水セメント比が小さくなるほど拡散係数も小さくなる傾向が認められる。久里浜海浜では前記のとおり塩分浸透がわずかであり、水セメント比の影響は認められない。

前養生期間と見掛けの拡散係数との関係を、図-4.1.4.5 に示す。前養生 28 日の拡散係数と前養生 91 日の拡散係数は、ほとんどの場合で同程度であり、前養生による影響は認められなかった。

圧縮強度、塩化物イオン浸透深さ、表面塩化物イオン濃度と、見掛けの拡散係数との関係を、図-4.1.4.6 に示す。圧縮強度と拡散係数の関係については、ポルトランドセメントでは水セメント比の影響を反映して圧縮強度が高いものほど拡散係数が小さくなる傾向が認められる。セメント全種について圧縮強度と拡散係数の関係を見た場合は、圧縮強度よりも混合材の影響の方が卓越していることが分かる。塩化物イオン浸透深さと拡散係数の関係では、当然のことながら塩化物イオン浸透深さが大きくなるほど拡散係数も大きくなる傾向がある。表面塩化物イオン濃度と拡散係数の関係は明瞭ではないが、酒田感潮の場合では表面塩化物イオン濃度が小さいほど拡散係数は大きくなる傾向にあった。

なお久里浜海浜については、前記のとおり塩分浸透がわずかのため傾向がうかがえなかった。

今回得られた見掛けの拡散係数を、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]の解説¹⁰⁾に示されている予測式と比較し、図-4.1.4.7 に示す。これによれば、感潮条件でのポルトランドセメントの試験結果は示方書解説中の予測式に比べてやや大きい、同改定資料¹¹⁾などによる拡散係数のばらつき等に鑑みると、ほぼ一般的な範囲の結果が得られたものと考えられる。一方、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合した場合の試験結果を同予測式（高炉セメントやシリカフューム使用の場合）と比較した場合は、感潮条件において予測式に比べて小さい傾向を示している。また海浜条件での結果については、ポルトランドセメントを使用した場合でも、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合した場合と同じように、同予測式に比べて小さい傾向を示している。この理由としては、前記のように塩化物イオンの浸透が少ない場合では、見掛けの拡散係数の算定においてその精度が十分でなかったことによるものと考えられる。なお石灰石微粉末を混合した LP の水セメント比は 71% (有効水結合材比)として図中にプロットしている。これによれば LP の見掛けの拡散係数は NC の予測式と比べてやや小さく、上記のように石灰石微粉末の場合でも粉体量の影響などの効果が現われたのではないかと考えられる。

塩化物イオン濃度の深さ方向の分布および算出した見掛けの拡散係数による回帰曲線を、図-4.1.4.8(1)～図-4.1.4.8(10)に示す。

表-4.1.4.2 塩化物イオン濃度(酒田感潮)

セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	モルタルベースの 塩化物イオン濃度の実測値(質量%)				コンクリート換算の 塩化物イオン濃度(kg/m ³)			
			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	0.582	0.286	0.207	—	7.44	3.66	2.65	—
	50		0.384	0.321	0.249	0.209	4.82	4.03	3.13	2.63
	60		0.463	0.401	0.358	0.295	5.82	5.04	4.50	3.71
MC	40		0.355	0.230	0.102	0.163	4.53	2.93	1.30	2.08
	50		0.389	0.313	0.251	0.218	4.87	3.92	3.14	2.73
	60		0.410	0.339	0.318	0.278	5.15	4.25	3.99	3.49
LC	40		0.401	0.281	0.173	0.052	5.11	3.58	2.21	0.66
	50		0.368	0.318	0.255	0.203	4.61	3.98	3.19	2.54
	60		0.386	0.303	0.288	0.287	4.84	3.80	3.61	3.60
NBB	50	28	0.560	0.192	0.010	—	7.00	2.40	0.13	—
MBB			0.478	0.178	0.024	—	5.96	2.22	0.30	—
LBB			0.372	0.031	0.003	—	4.64	0.39	0.04	—
FC			0.423	0.120	0.005	—	5.22	1.48	0.06	—
FCN			0.546	0.319	0.105	—	6.78	3.96	1.30	—
LP			0.626	0.442	0.390	0.258	7.81	5.51	4.86	3.22
NBF			0.178	0.003	0.001	—	2.19	0.04	0.01	—

表-4.1.4.3 塩化物イオン濃度(久里浜感潮)

セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	モルタルベースの 塩化物イオン濃度の実測値(質量%)				コンクリート換算の 塩化物イオン濃度(kg/m ³)			
			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	0.475	0.267	0.123	—	6.07	3.41	1.57	—
	50		0.441	0.307	0.275	0.232	5.54	3.86	3.45	2.91
	60		0.506	0.379	0.341	0.344	6.37	4.77	4.29	4.33
MC	40		0.419	0.301	0.206	0.118	5.34	3.84	2.63	1.50
	50		0.568	0.422	0.329	0.311	7.11	5.28	4.12	3.89
	60		0.545	0.494	0.418	0.384	6.84	6.20	5.25	4.82
LC	40		0.843	0.480	0.292	0.123	10.75	6.12	3.72	1.57
	50		0.584	0.344	0.262	0.233	7.31	4.31	3.28	2.92
	60		0.754	0.590	0.449	0.544	9.46	7.40	5.63	6.83
NBB	50	28	0.408	0.062	0.008	—	5.10	0.78	0.10	—
MBB			0.513	0.166	0.023	—	6.39	2.07	0.03	—
LBB			0.667	0.151	0.012	—	8.31	1.88	0.15	—
FC			0.747	0.236	0.030	—	9.21	2.91	0.37	—
FCN			0.556	0.366	0.043	—	6.90	4.54	0.53	—
LP			0.503	0.368	0.312	0.286	6.27	4.59	3.89	3.57
NBF			0.178	0.002	0.002	—	2.19	0.02	0.02	—
N	50	91	0.349	0.279	0.215	0.186	4.38	3.50	2.70	2.34
L			0.528	0.395	0.302	0.241	6.61	4.95	3.78	3.02
NBB			0.593	0.174	0.012	—	7.41	2.18	0.15	—
LBB			0.430	0.070	0.004	—	5.36	0.87	0.05	—
FC			0.341	0.079	0.007	—	4.20	0.97	0.09	—
NBF			0.096	0.005	0.003	—	1.18	0.06	0.04	—

表-4.1.4.4 塩化物イオン濃度 (久里浜海浜)

セメントの 種類	水セメント 比(%)	前養生 (日)	モルタルベースの 塩化物イオン濃度の実測値(質%)				コンクリート換算の 塩化物イオン濃度(kg/m ³)			
			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	0.007	0.002	0.002	—	0.09	0.03	0.03	—
	50		0.035	0.004	0.003	—	0.44	0.05	0.04	—
	60		0.043	0.009	0.003	—	0.54	0.11	0.04	—
MC	40		0.022	0.004	0.006	—	0.28	0.05	0.08	—
	50		0.071	0.014	0.006	—	0.89	0.18	0.08	—
	60		0.038	0.013	0.006	—	0.48	0.16	0.08	—
LC	40		0.022	0.004	0.002	—	0.28	0.05	0.03	—
	50		0.006	0.000	0.000	—	0.08	0.00	0.00	—
	60		0.021	0.003	0.002	—	0.26	0.04	0.03	—
NBB	50	28	0.014	0.004	0.003	—	0.18	0.05	0.04	—
MBB			0.006	0.000	0.000	—	0.07	0.00	0.00	—
LBB			0.005	0.001	0.001	—	0.06	0.01	0.01	—
FC			0.036	0.006	0.003	—	0.44	0.07	0.04	—
FCN			0.099	0.002	0.002	—	1.23	0.02	0.02	—
LP			0.069	0.033	0.023	—	0.86	0.41	0.29	—
NBF			0.029	0.004	0.004	—	0.36	0.05	0.05	—

表-4.1.4.5 見掛けの拡散係数(酒田感潮)

セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)	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)		腐食発生限界濃度深さ(mm)
					かぶり 5cm	かぶり 7cm	
NC	40	28	0.785	9.25	1.261	0.512	50.9
	50		2.093	5.32	2.869	2.451	75.0 以上
	60		2.603	6.29	4.056	3.669	75.0 以上
MC	40		1.388	4.90	1.686	1.196	69.5
	50		2.149	5.27	2.910	2.507	75.0 以上
	60		2.823	5.38	3.673	3.376	75.0 以上
LC	40		1.017	6.39	1.396	0.773	54.0
	50		2.170	5.13	2.857	2.469	75.0 以上
	60		3.164	4.84	3.551	3.326	75.0 以上
NBB	50	28	0.318	11.34	0.101	0.004	31.2
MBB			0.355	9.31	0.131	0.009	31.2
LBB			0.129	11.37	0.000	0.001	19.2
FC			0.272	8.90	0.038	0.001	26.5
FCN			0.637	9.19	0.792	0.230	44.0
LP			1.729	8.60	3.836	3.054	75.0 以上
NBF			0.074	8.32	0.000	0.002	13.0

表-4.1.4.6 見掛けの拡散係数(久里浜感潮)

セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)	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)		腐食発生限界濃度深さ(mm)
					かぶり 5cm	かぶり 7cm	
NC	40	28	0.701	7.96	0.854	0.293	44.5
	50		2.045	5.81	3.067	2.601	75.0 以上
	60		2.693	6.42	4.243	3.865	75.0 以上
MC	40		1.306	6.28	1.994	1.359	75.0 以上
	50		2.032	7.54	3.956	3.349	75.0 以上
	60		2.862	7.32	5.044	4.648	75.0 以上
LC	40		0.884	13.21	2.262	1.074	68.9
	50		1.469	7.82	2.891	2.121	75.0 以上
	60		2.706	9.51	6.306	5.750	75.0 以上
NBB	50	28	0.178	10.44	0.003	0.001	22.2
MBB			0.129	11.37	0.073	0.003	29.6
LBB			0.232	15.10	0.027	0.001	28.4
FC			0.306	15.07	0.113	0.004	33.0
FCN			0.581	9.80	0.672	0.164	42.3
LP			2.166	6.56	3.647	3.150	75.0 以上
NBF			0.067	9.25	0.000	0.002	12.8
NC	50	91	2.025	4.79	2.505	2.118	75.0 以上
LC			1.768	7.29	3.330	2.676	75.0 以上
NBB			0.282	12.49	0.064	0.002	30.0
LBB			0.185	10.78	0.004	0.001	22.9
FC			0.236	7.58	0.015	0.000	23.2
NBF			0.058	5.84	0.000	0.001	9.9

表-4.1.4.7 見掛けの拡散係数(久里浜海浜)

セメントの種類	水セメント比(%)	前養生(日)	見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)	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)		腐食発生限界濃度深さ(mm)
					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		0.276	0.47	0.002	0.000	—
	50		0.223	1.64	0.002	0.000	5.7
	60		0.392	0.71	0.015	0.001	—
LC	40		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	10.1
LP			0.734	1.09	0.129	0.048	—
NBF			0.181	0.72	0.000	0.000	—

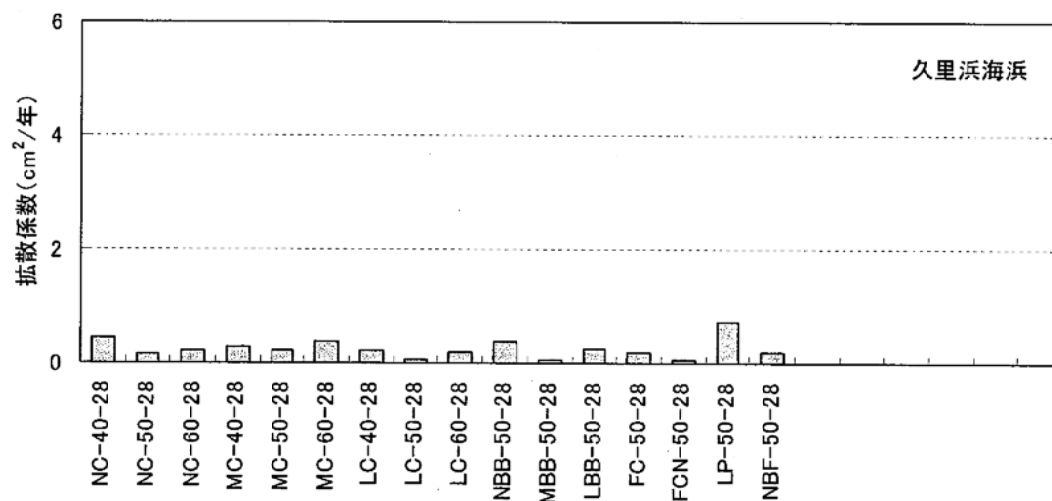
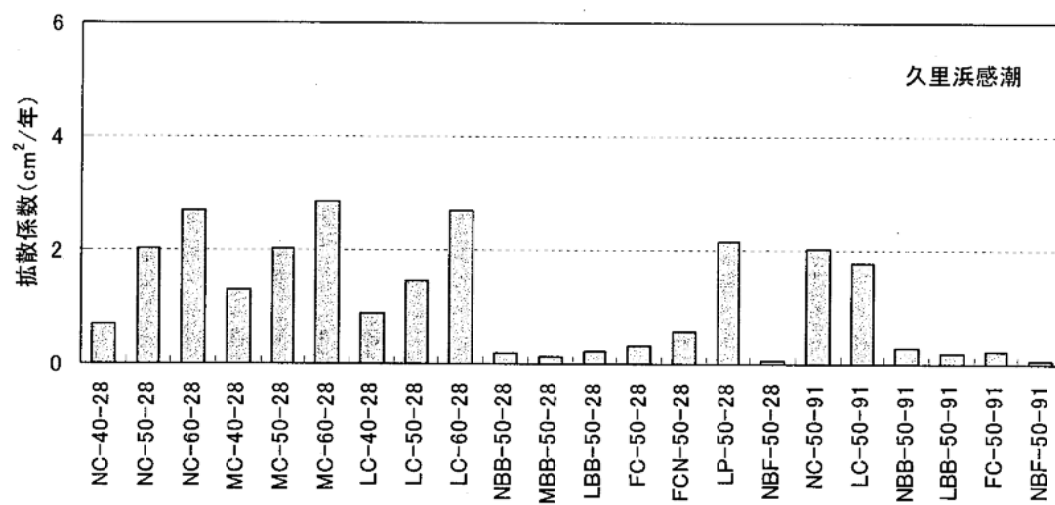
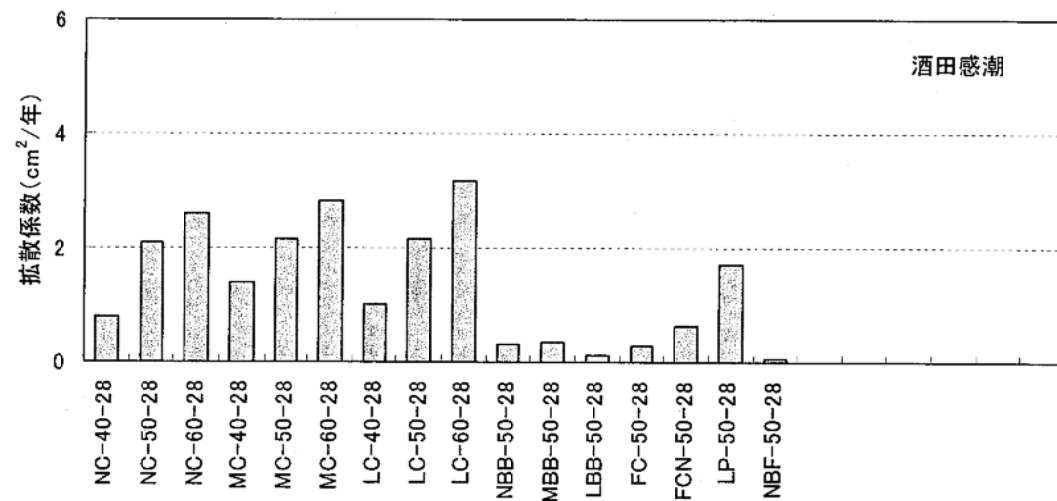


図-4.1.4.2 見掛けの拡散係数

鉄筋腐食発生限界濃度深さ(mm)

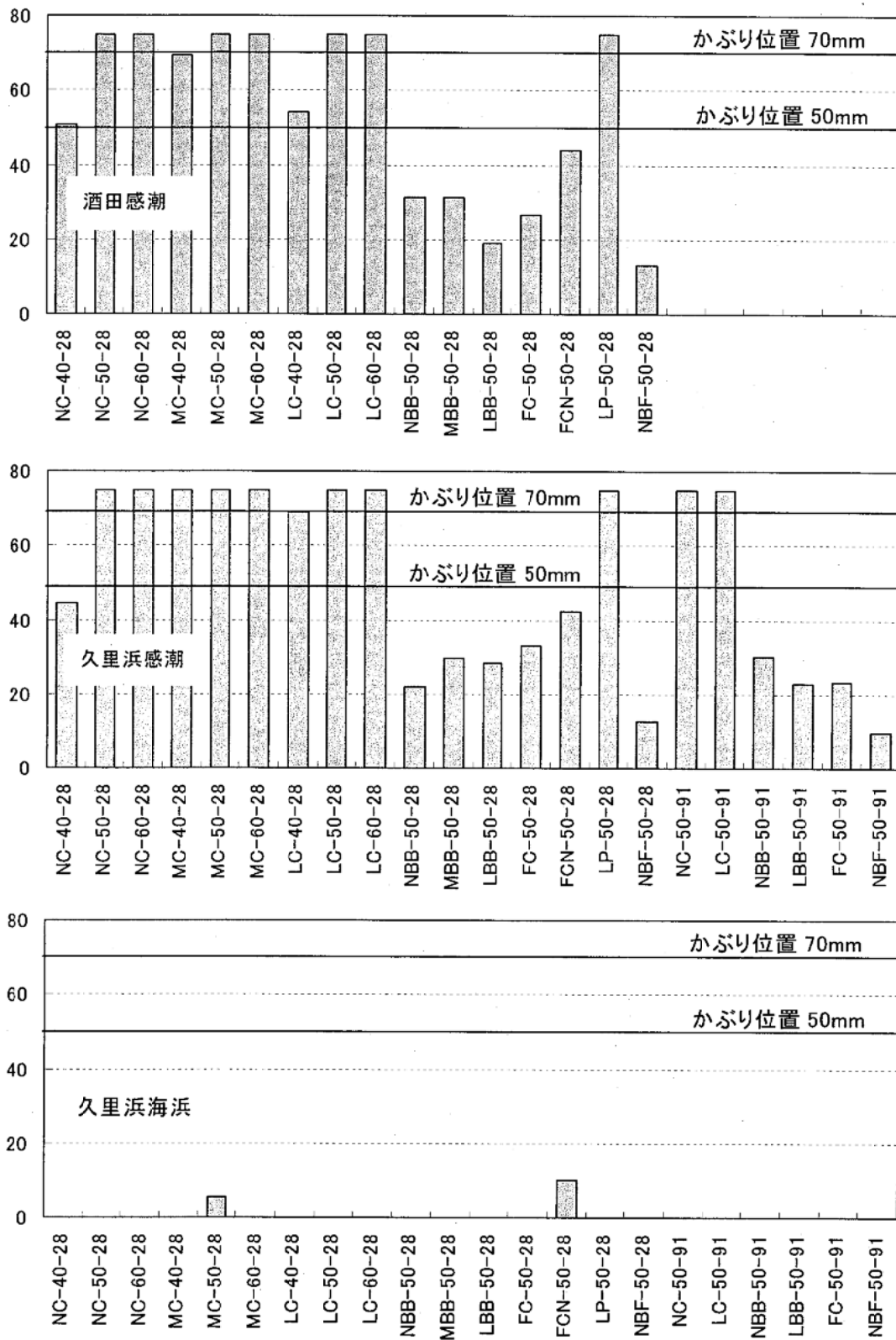


図-4.1.4.3 鉄筋腐食発生限界濃度深さ

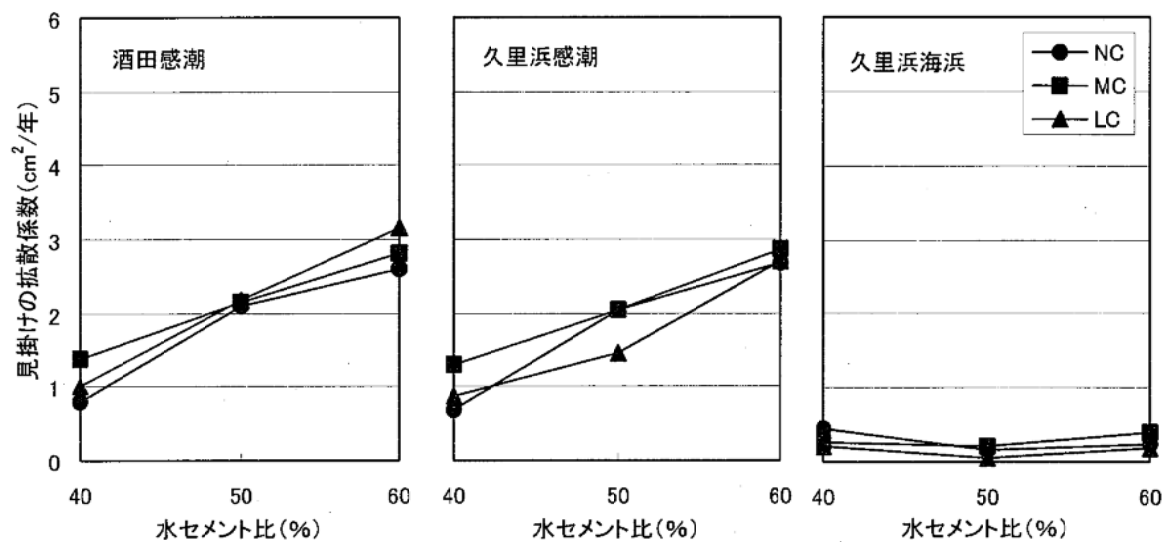


図-4.1.4.4 水セメント比と見掛けの拡散係数の関係

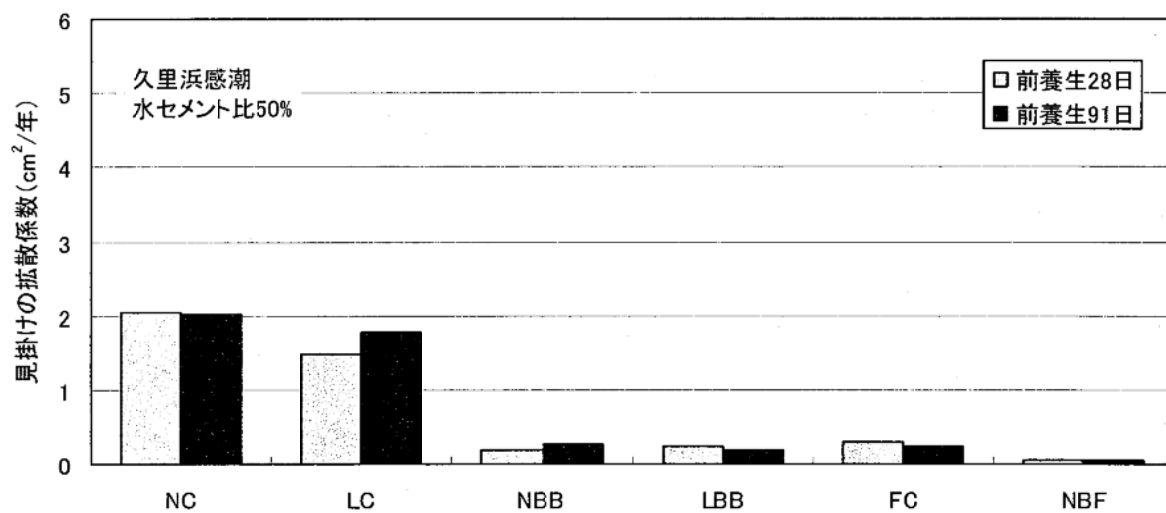


図-4.1.4.5 前養生期間と見掛けの拡散係数の関係

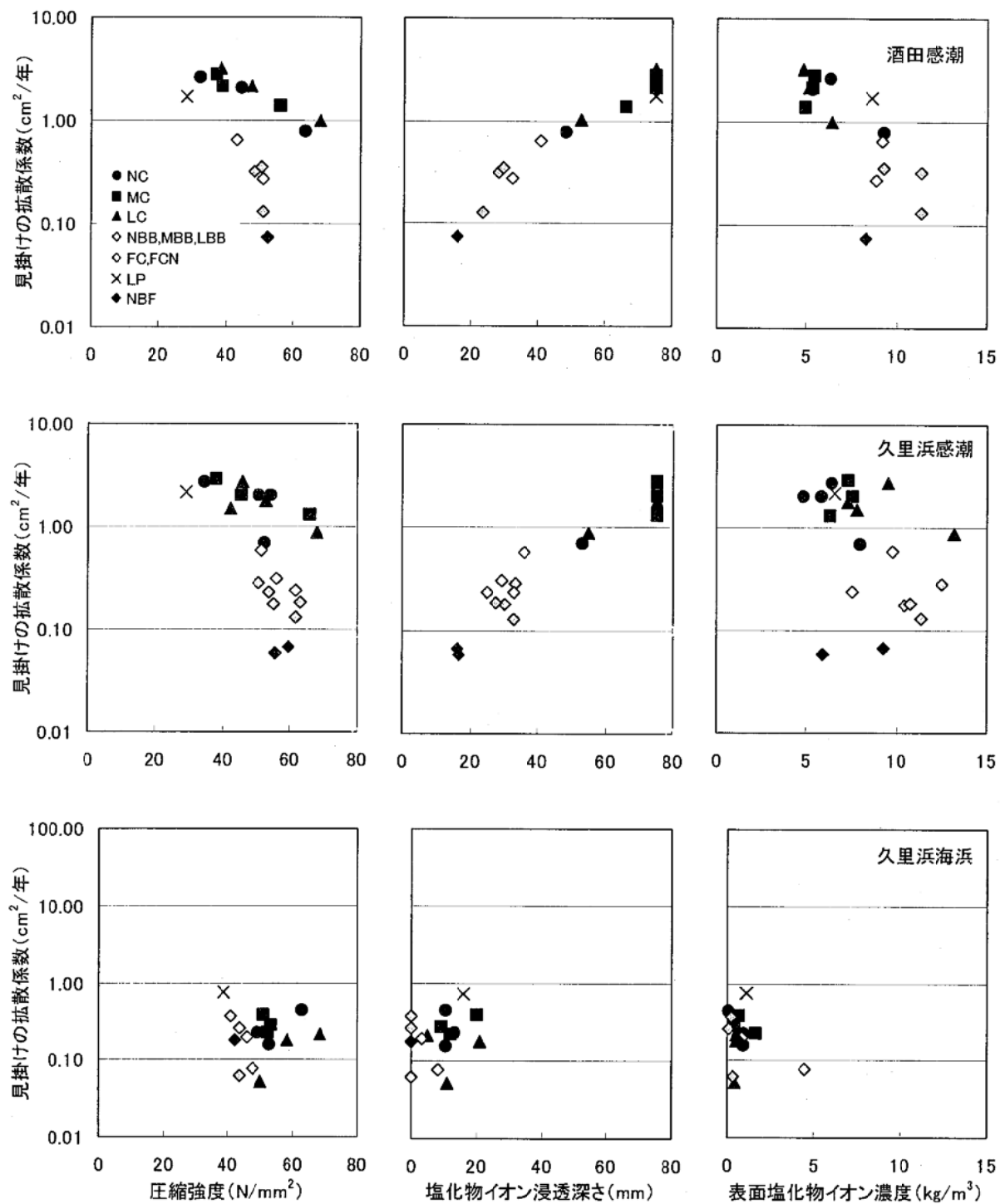


図-4.1.4.6 圧縮強度、塩化物イオン浸透深さ、表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数の関係

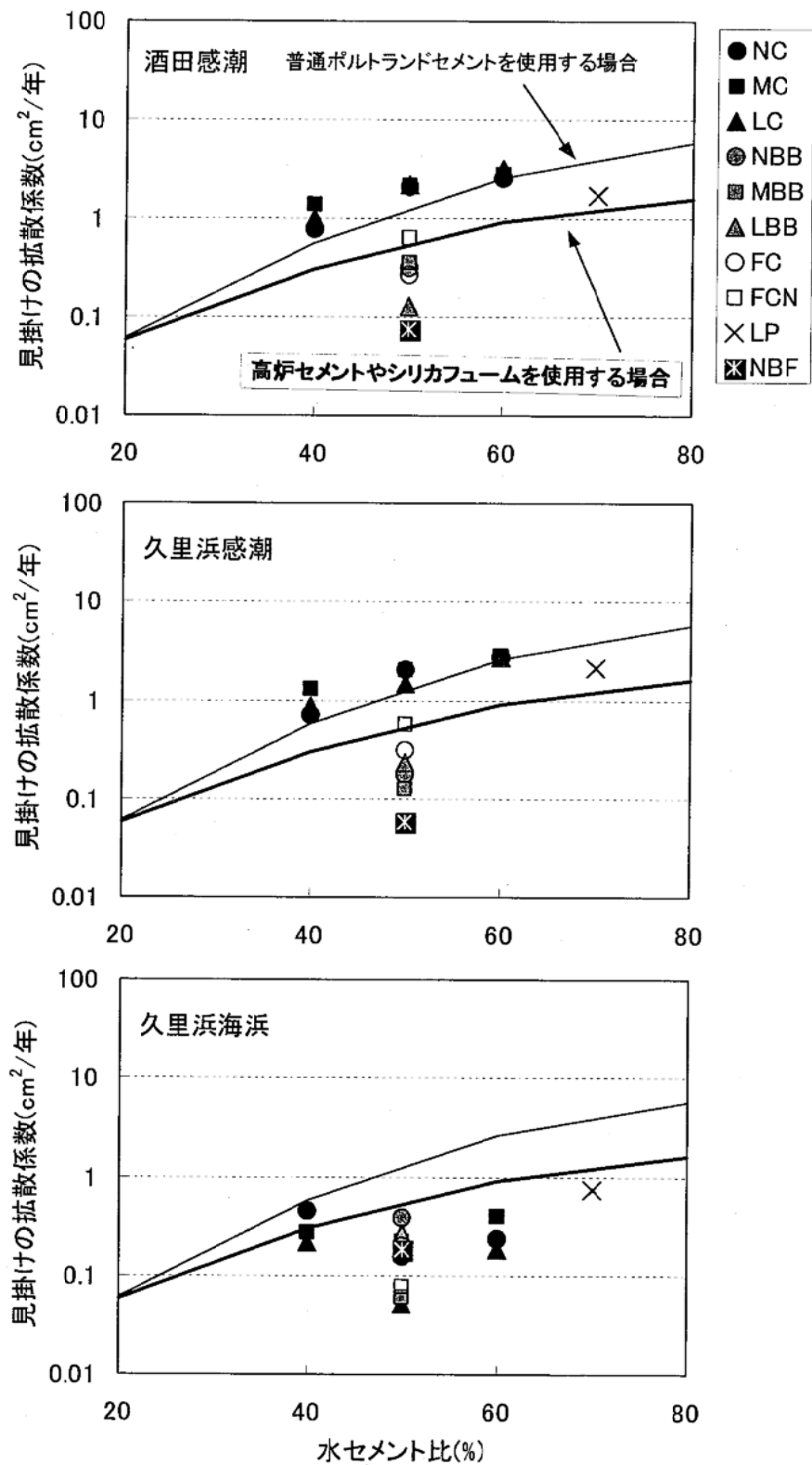


図-4.1.4.7 本試験の見掛けの拡散係数と土木学会示方書の予測式との比較

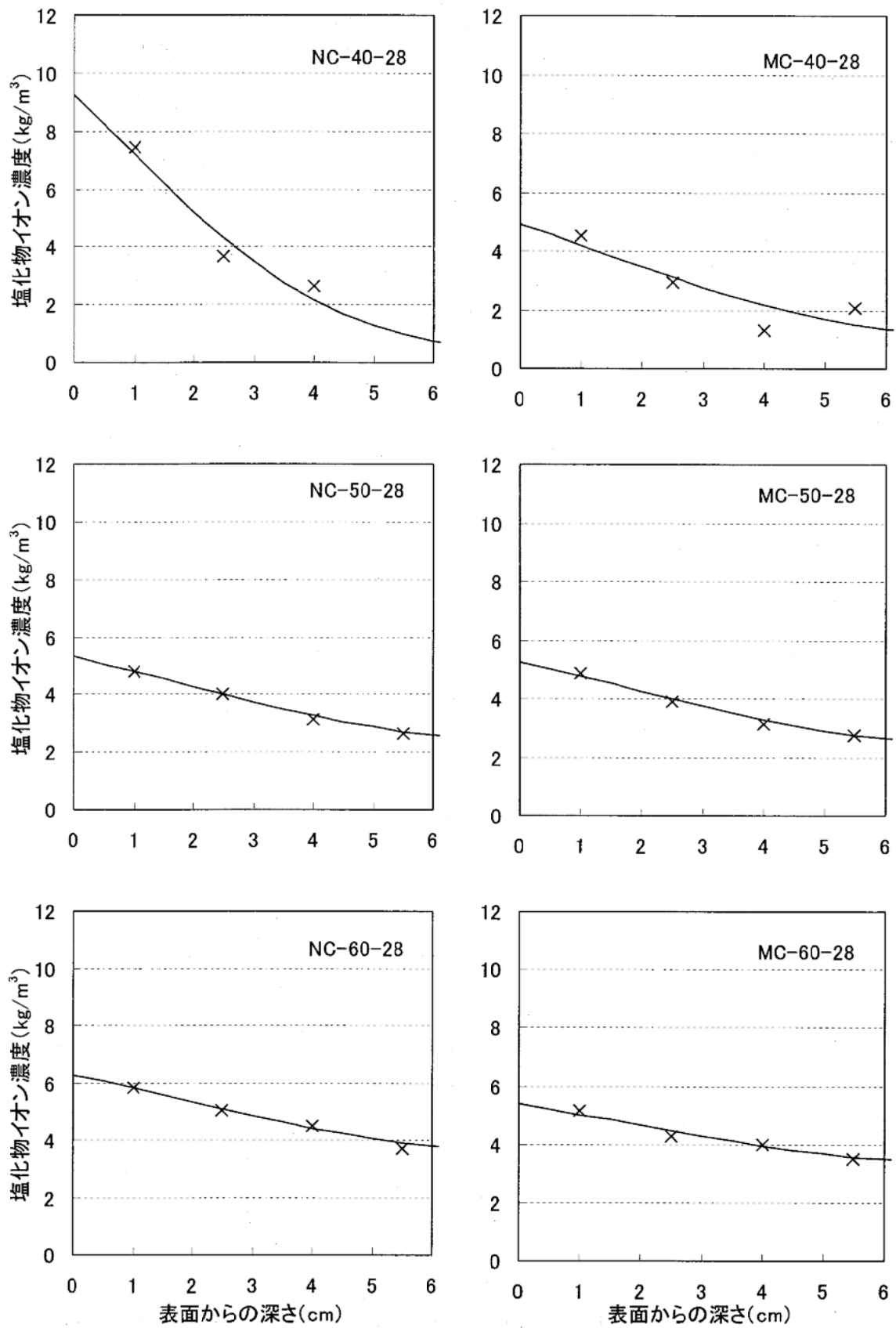


図-4.1.4.8(1) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(酒田感潮)

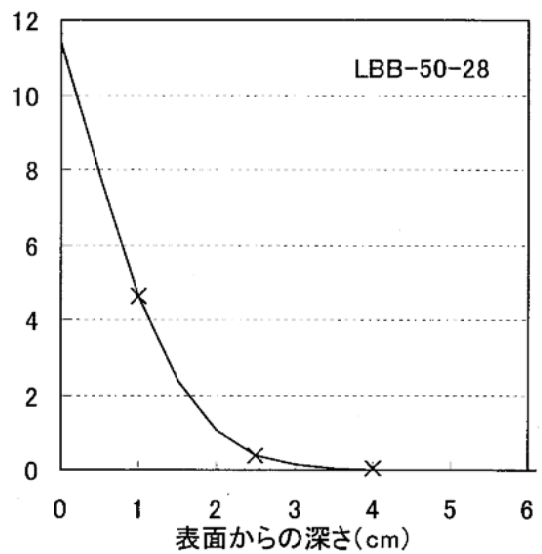
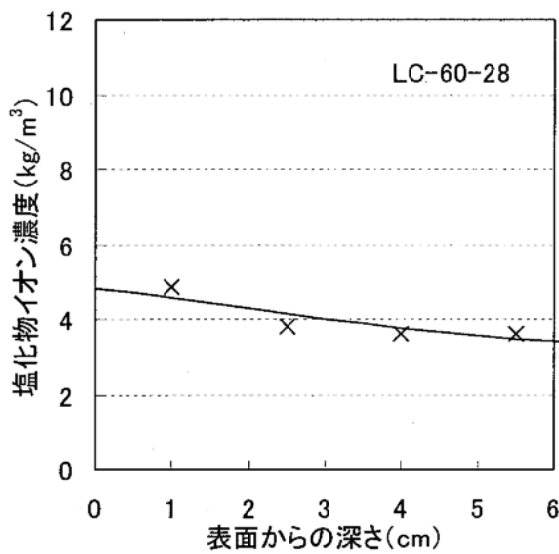
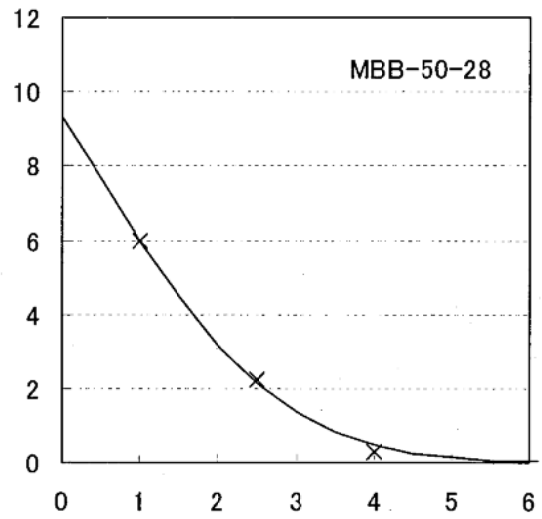
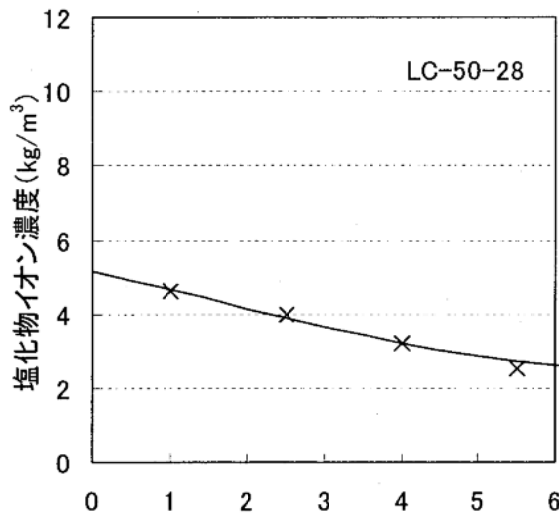
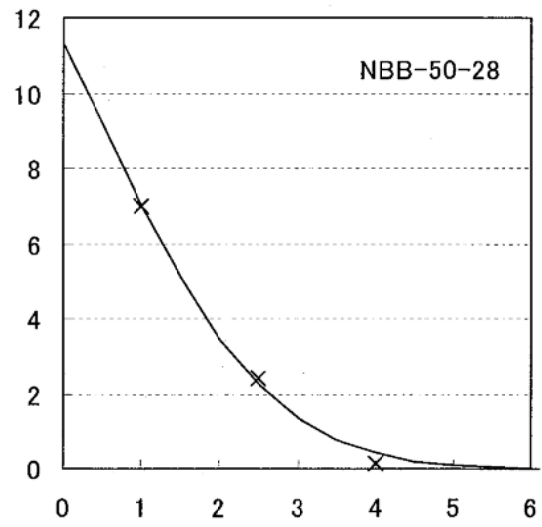
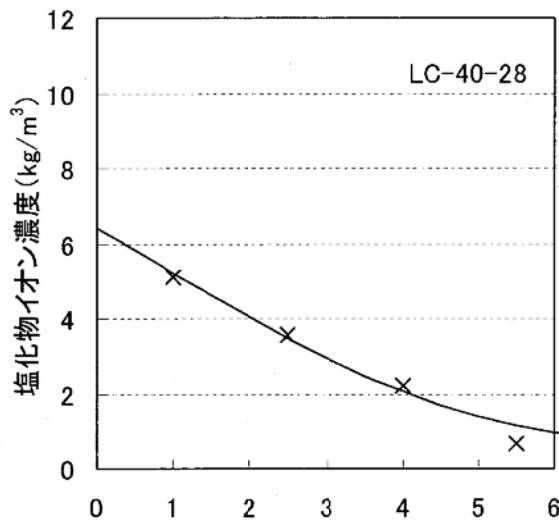


図-4.1.4.8(2) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(酒田感潮)

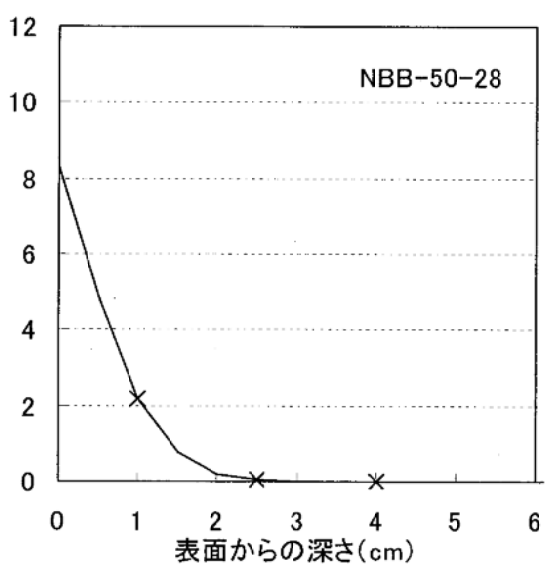
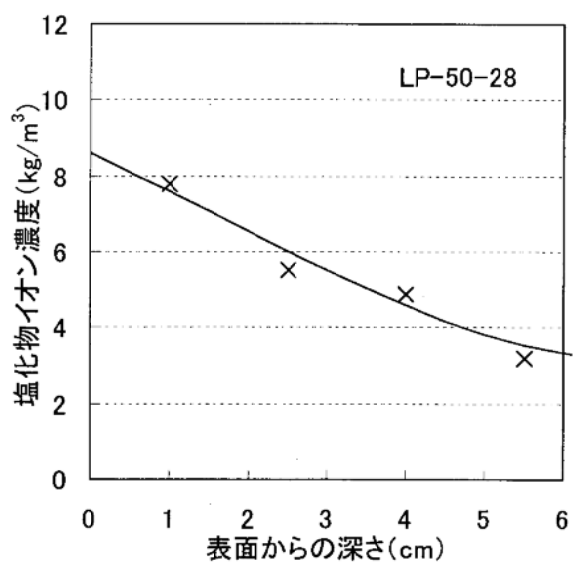
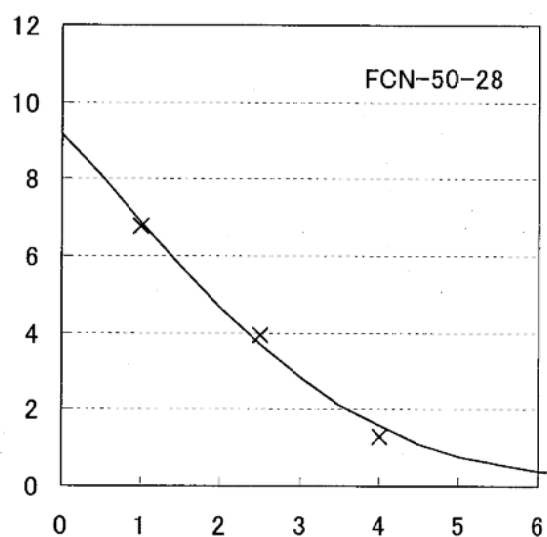
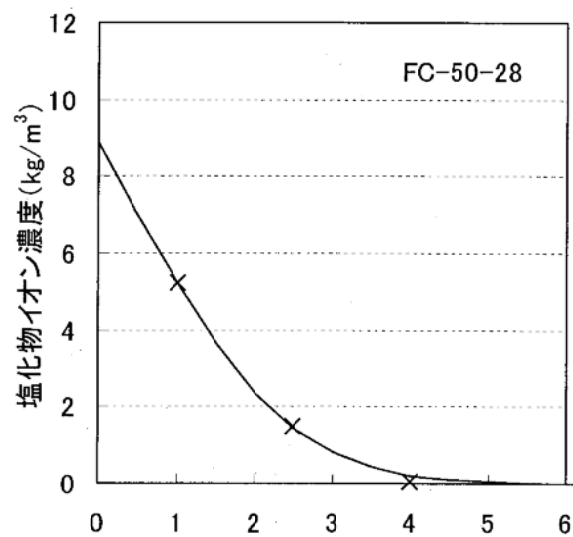


図-4.1.4.8(3) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(酒田感潮)

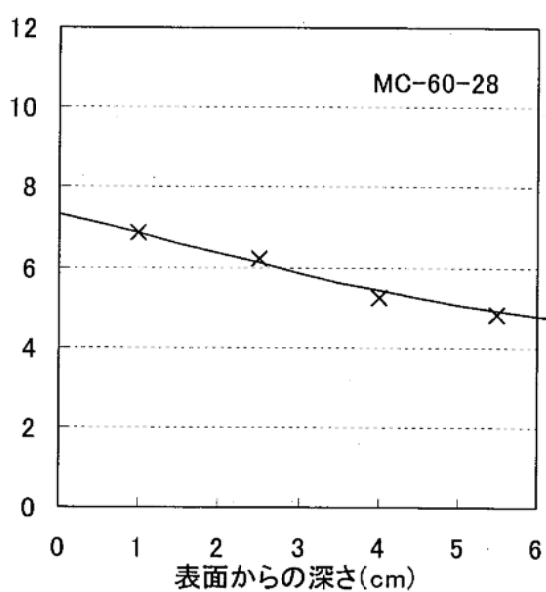
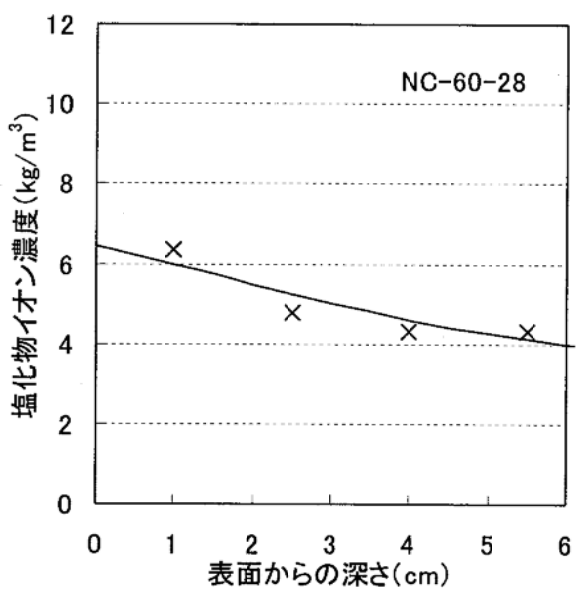
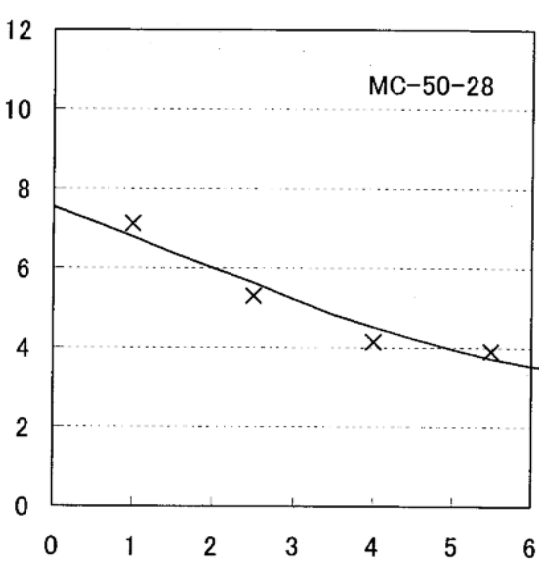
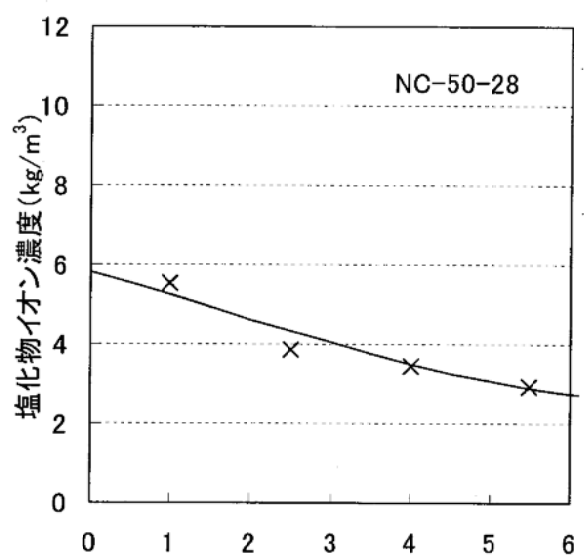
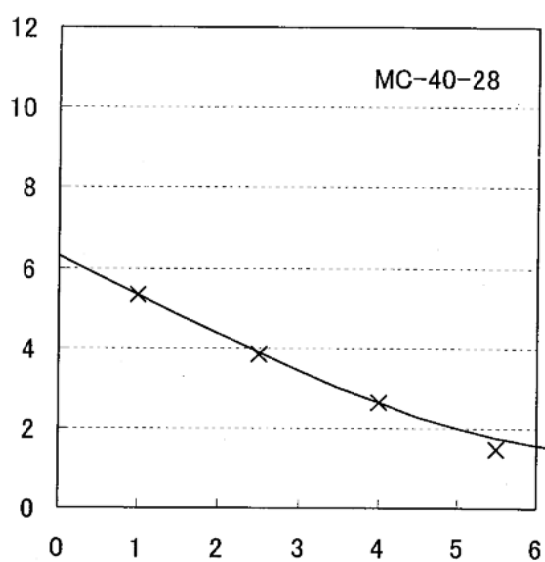
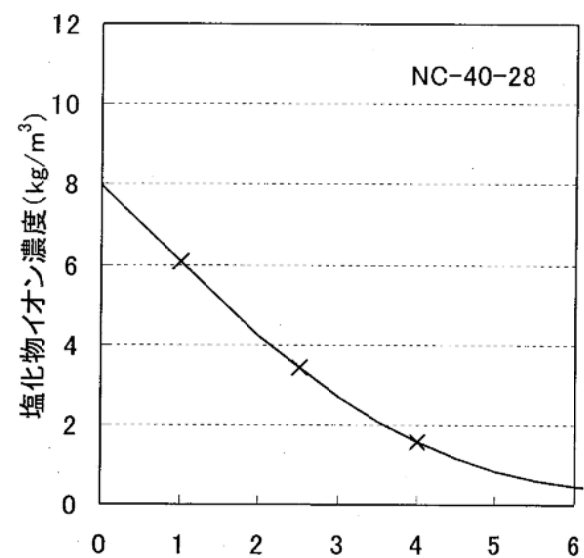


図-4.1.4.8(4) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(久里浜感潮)

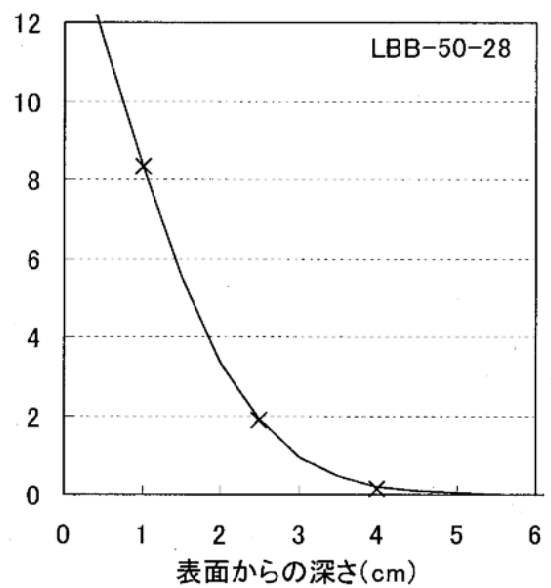
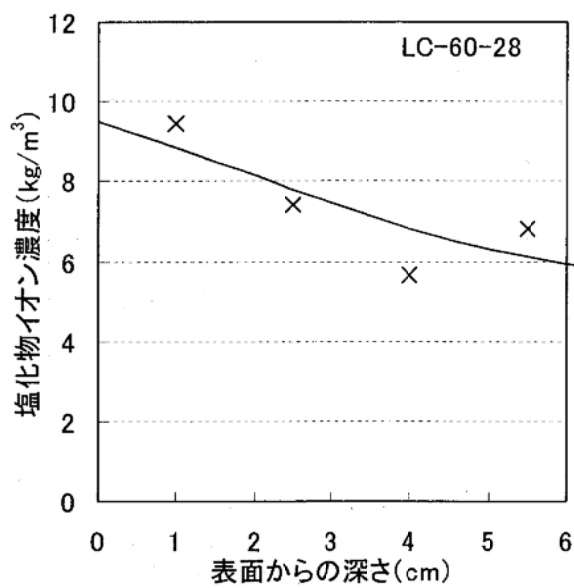
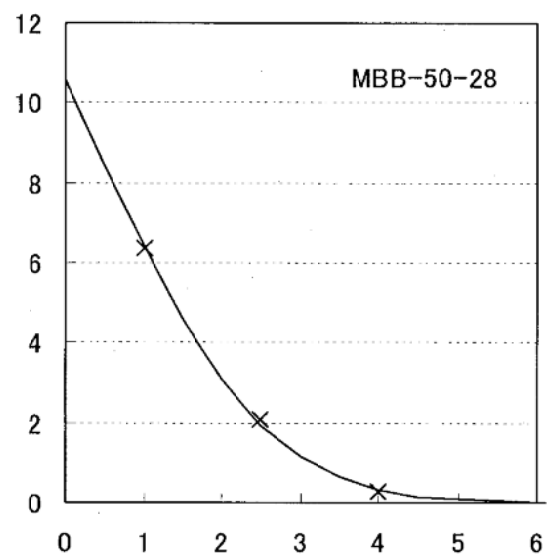
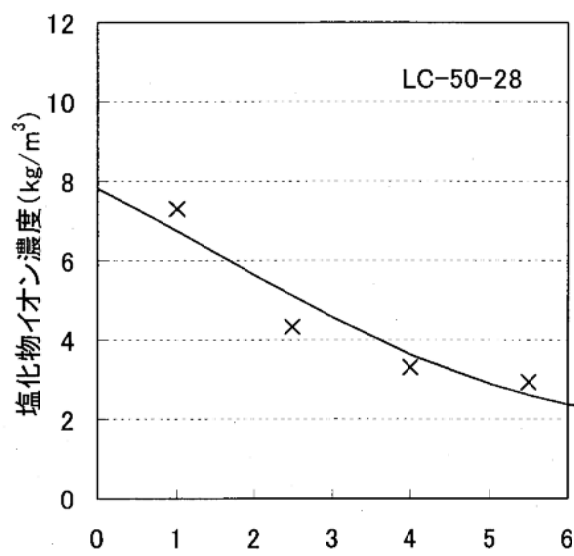
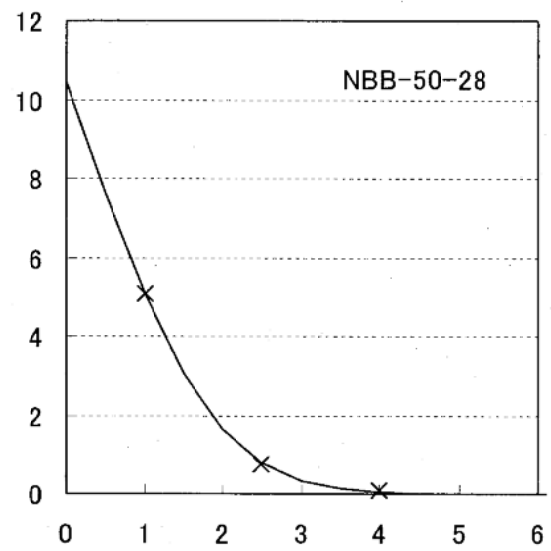
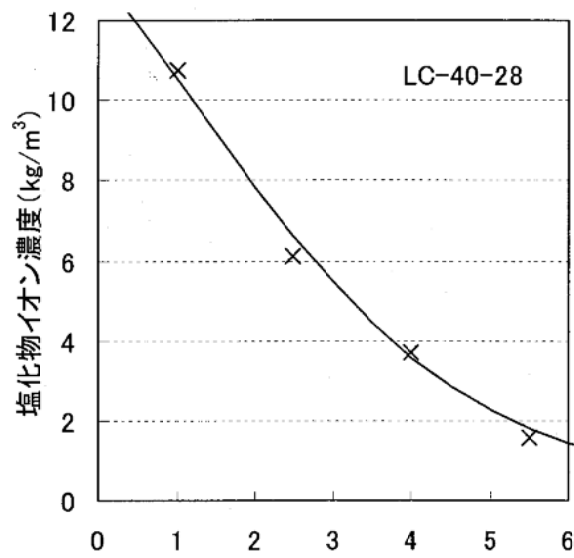
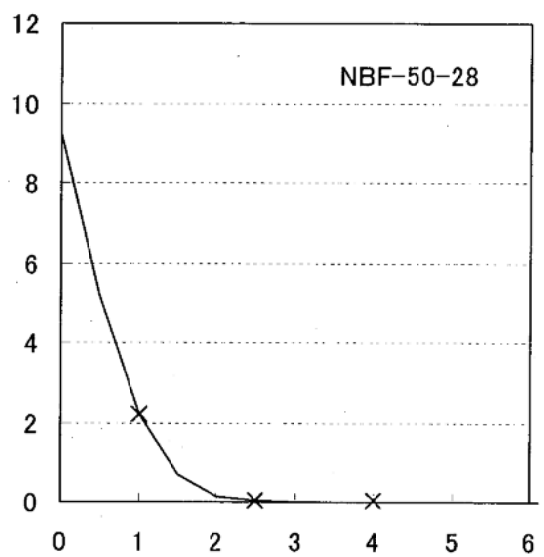
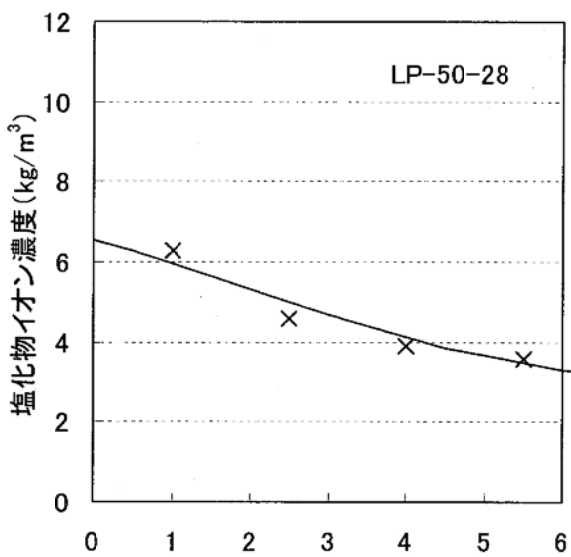
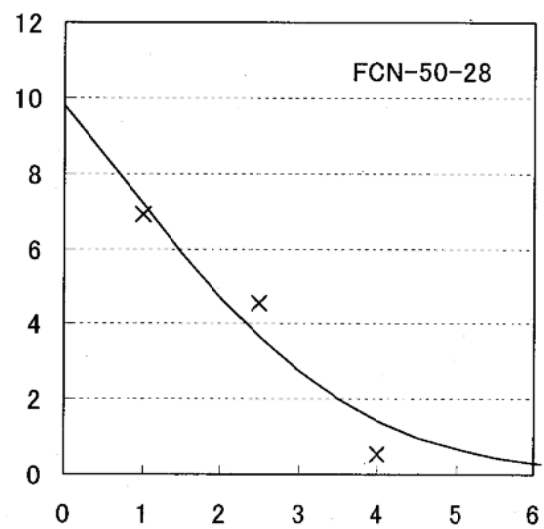
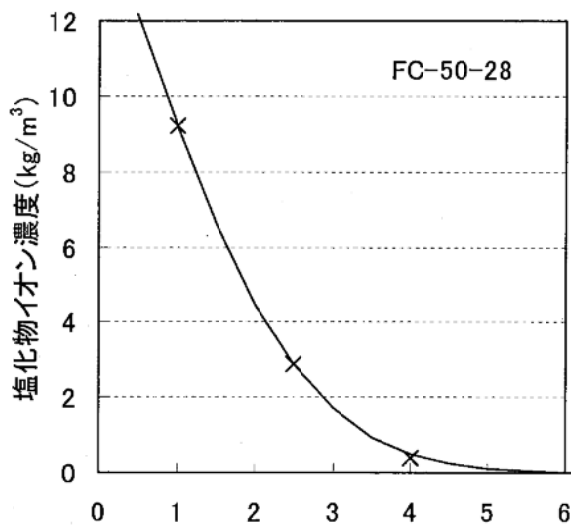


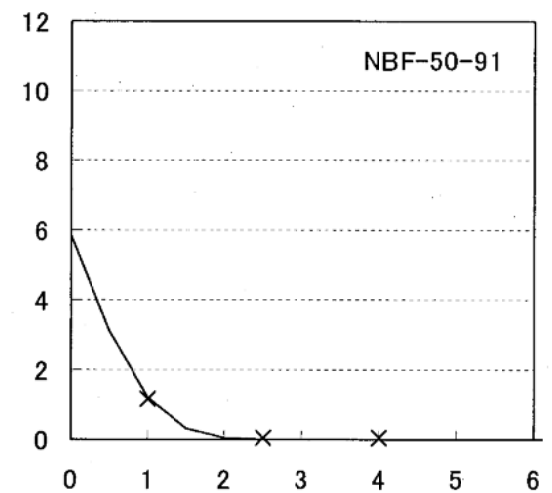
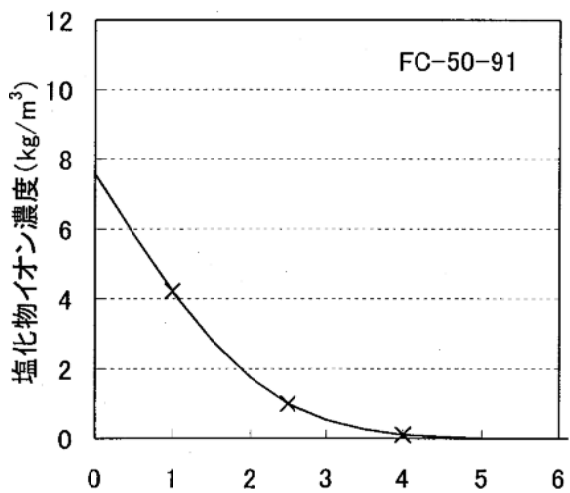
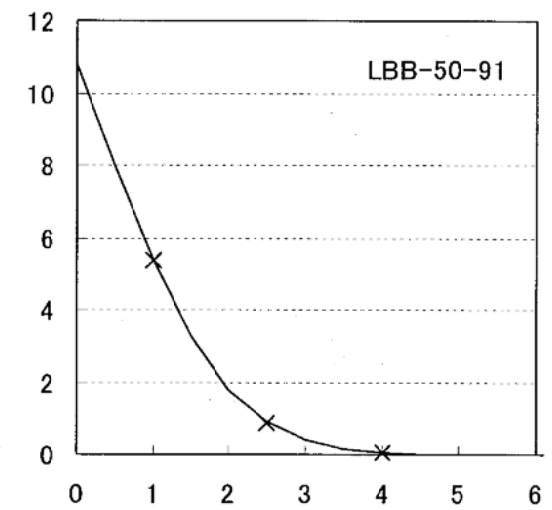
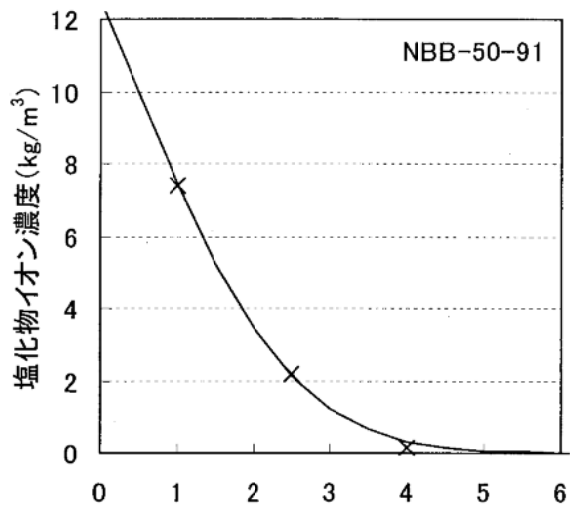
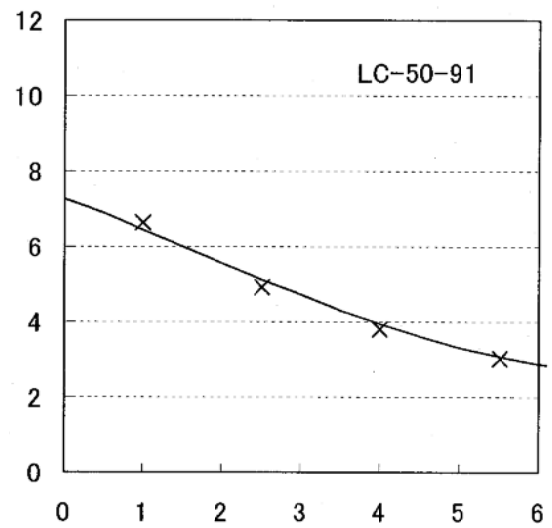
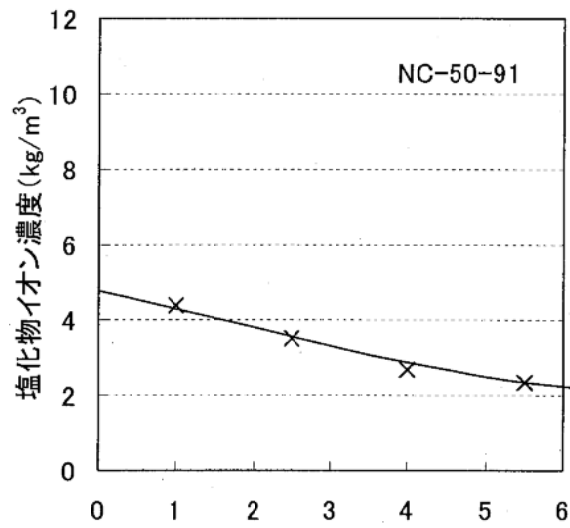
図-4.1.4.8(5) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(久里浜感潮)



表面からの深さ(cm)

表面からの深さ(cm)

図-4.1.4.8(6) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(久里浜感潮)



表面からの深さ (cm)

表面からの深さ (cm)

図-4.1.4.8(7) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(久里浜感潮)

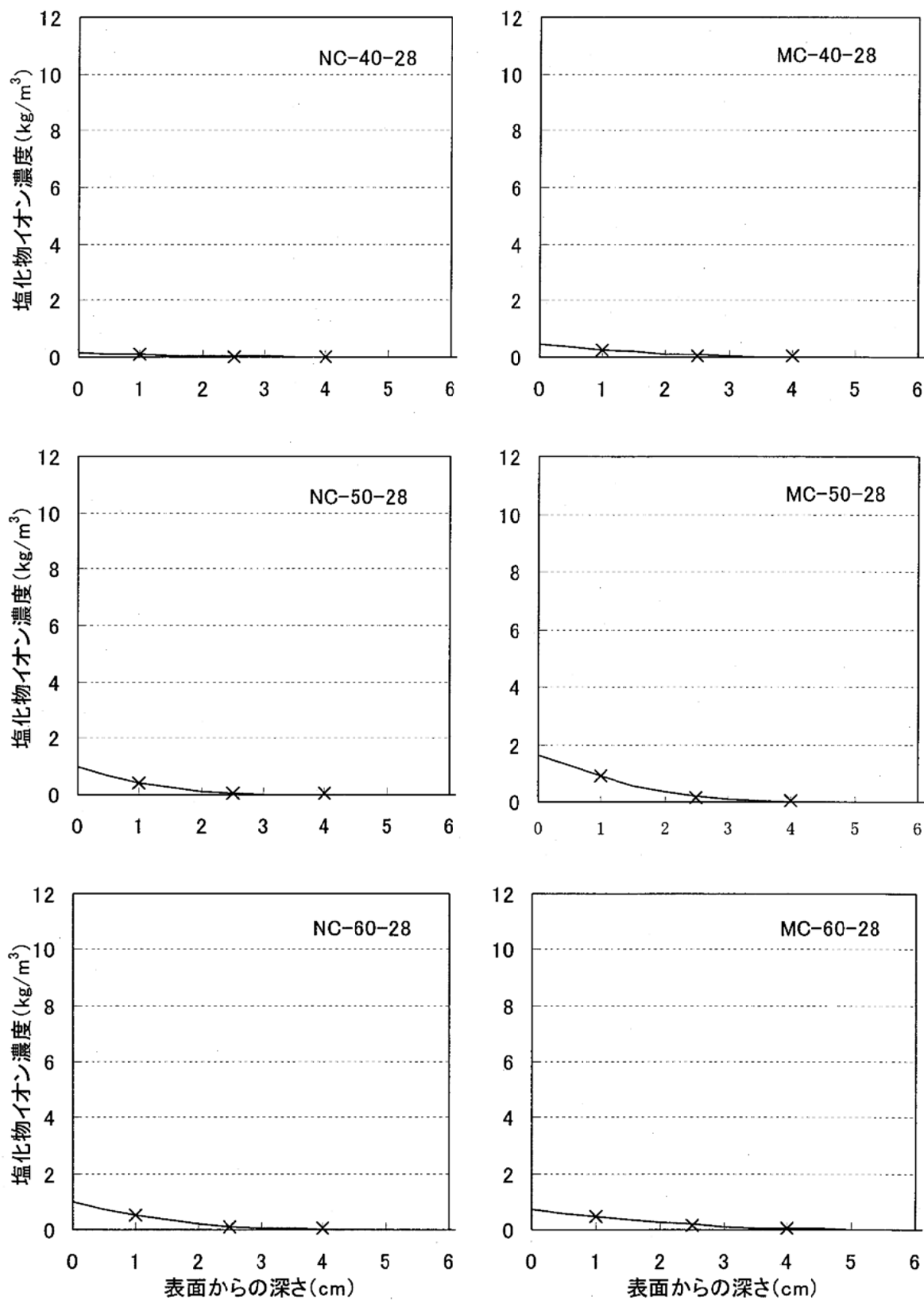


図-4.1.4.8(8) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(久里浜海浜)

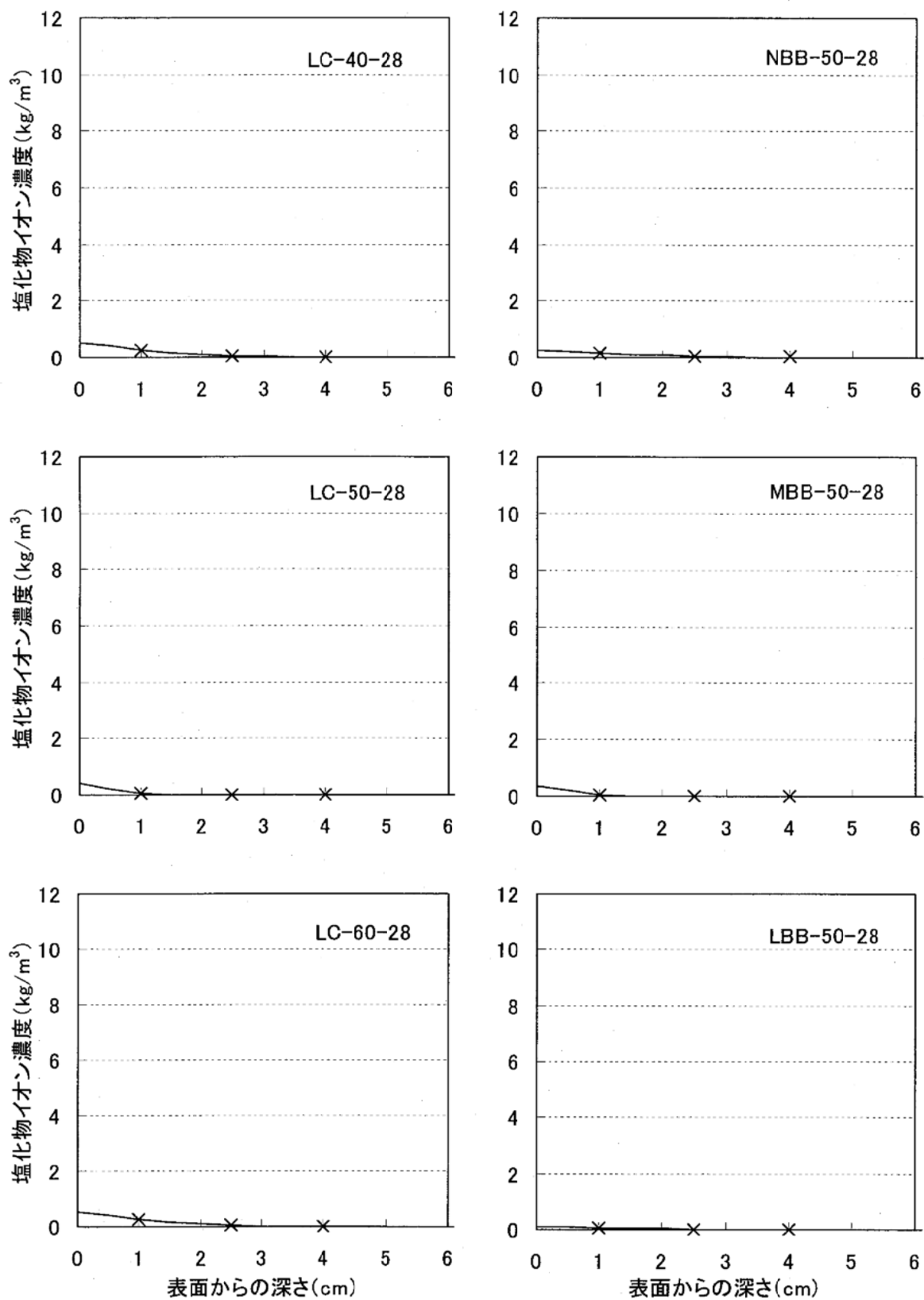


図-4.1.4.7(9) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(久里浜海浜)

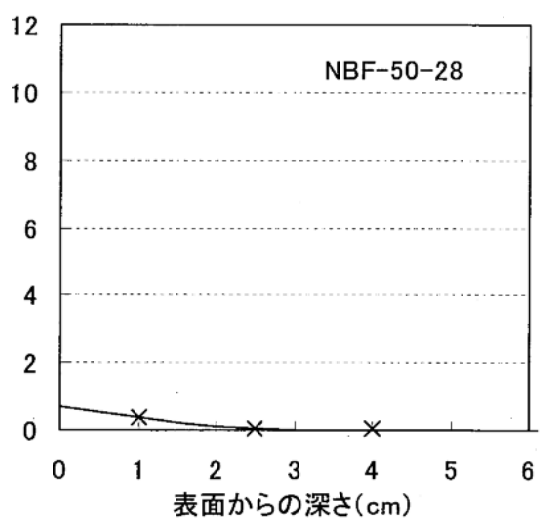
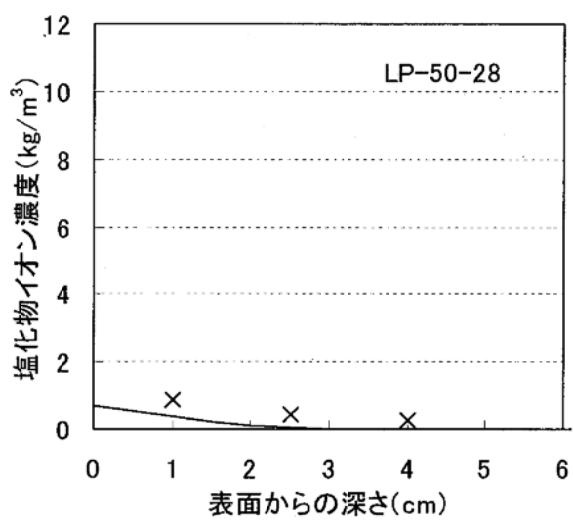
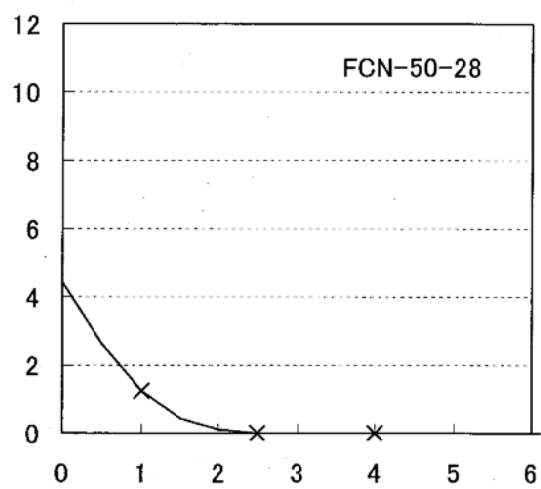
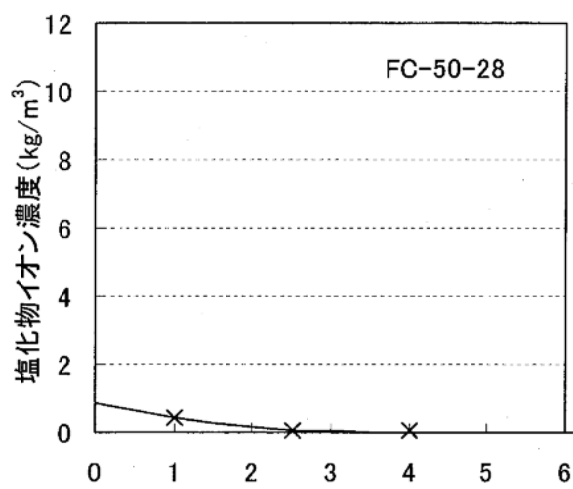


図-4.1.4.8(10) 塩化物イオン濃度と回帰曲線(久里浜海浜)

4.1.5 X線回折

X線回折試験結果を表-4.1.5.1～表-4.1.5.3 に示す。

X線回折試験は、エトリンガイト、モノサルフェート水和物、フリーデル氏塩、ポルトランダイトおよびカルサイトの5種類の結晶に着目し、内部標準物質（ZnO）との相対強度を用い、それらの生成量についてセメントの種類、暴露条件、供試体表面からの深さ（5～15mmの部分と50mm以上の部分）、水セメント比、前養生期間の違いによる影響について検討を行なった。

(1)ポルトランダイトとカルサイト

ポルトランダイト（水酸化カルシウム）は、その生成量が多い（相対強度が高い）ほど中性化し難いと言え、また中性化している可能性が低くなると考えられる。

カルサイト（炭酸カルシウム）は、ポルトランダイト等が炭酸化することにより生成されることが考えられるため、同じコンクリートにおいてそれが増加することは中性化している可能性が高くなると言える。

図-4.1.5.1 および図-4.1.5.2 に各セメントの水セメント比50%、前養生28日におけるポルトランダイトおよびカルサイトの相対強度を示す。また、図-4.1.5.3 および図-4.1.5.4 にポルトランダイトおよびカルサイトの材齢5年目の相対強度から暴露開始時の相対強度を引いた相対強度の差を示す。

混合セメントでは、久里浜海浜などで一部例外もあるが、暴露後のポルトランダイトの相対強度は暴露開始前に比べて概ね小さい結果となった。特にフライアッシュを用いたセメントは、暴露開始前のポルトランダイトの相対強度がポルトランドセメントと同程度であったため、材齢5年後のポルトランダイトの減少量は高炉スラグ微粉末を用いたセメントに比べ大きいものとなった。これは、初期の段階でのポルトランダイト量の生成量の違いと、高炉スラグ微粉末が比較的早い段階で水酸化カルシウムを消費するのに対し、フライアッシュは長い期間をかけて消費されていく傾向にあることが影響しているためではないかと推察できる。

また NBF は暴露後のポルトランダイトの相対強度が他のセメントに比べて小さい結果を示した。これは、NBF が他の混合系セメントに比べ、ポルトランダイトの生成量がもともと少なく、さらにポルトランダイトを水和の過程で消費する高炉スラグ微粉末やフライアッシュのセメントに占める割合が高いこと等が影響しているためと考える。

カルサイトについては、当然のことながら石灰石微粉末混合セメントであるLPが暴露開始前、暴露後ともに大きな相対強度を示した。また、カルサイトの相対強度においては、混合セメントで、中心部よりも表面部の方がやや大きい値を示す傾向が見られた。特に、酒田感潮と東京屋外にその傾向を捉えることが出来る。なおここでの表面部の試料は、供試体表面部から5～15mmのものである。表-4.1.3.1 に示す中性化深さ測定結果によれば、NBFを除き材齢5年では中性化深さが概ね5mm以下であることを考えると、今後中性化の進行により、カルサイトの相対強度における表面部と中心部との差異が明瞭に現れてくることが考えられる。

ポルトランドセメント使用配合における水セメント比との関係、前養生期間の影響については、明瞭な傾向が認められなかった（資料-図-2.1～図-2.4）。

以上のX線回折におけるポルトランダイト量とカルサイト量の結果をまとめると、中性化の目安となると考えられるポルトランダイトの量は混合セメントよりポルトランドセメントのほうがやや大きい傾向にあり、中性化を抑制するためには、混合セメントよりポルトランドセメントを用いたほうが有利であることがX線回折試験においても確認された。

(2) エトリンガイトおよびモノサルフェート水和物とフリーデル氏塩

海水に含まれる主な元素は、ナトリウムイオン、塩化物イオン、硫酸イオン、マグネシウムイオンなどである。このため、コンクリートへ海水が侵入すると、硫酸イオンとカルシウムイオンの化合物であるセッコウが生成され、さらにセッコウがモノサルフェート水和物や未反応セメント中の C_3A と反応してエトリンガイトが生成する。またフリーデル氏塩は、モノサルフェート水和物の硫酸イオンが塩化物イオンに置き換わった水和物で、一定量までは塩化物イオンの侵入量が多くなるほど生成量も多くなると考えられている。以上に基づいて、これらの水和物の変化を調べることによって、間接的に海水の影響がどの程度まで及んでいるのかを確認した。

図-4.1.5.5～図-4.1.5.7に各種セメントの水セメント比 50%、前養生 28 日におけるエトリンガイト、モノサルフェート水和物、フリーデル氏塩の相対強度を示す。エトリンガイトおよびモノサルフェートにおいては、セメント種類、暴露条件等の影響についての明瞭な傾向は認められなかった。一方フリーデル氏塩については、海浜および屋外に比べて塩分供給が多いと思われる感潮の方が相対強度が大きい傾向が認められ、また感潮の結果を見ると、供試体中心部のフリーデル氏塩の相対強度は、ポルトランドセメントが混合セメントよりも大きい傾向が認められ、ポルトランドセメント間の比較においては、相対強度は $NC > MC > LC$ の順であった。混合セメントは、中心部ではフリーデル氏塩は認められないか、供試体表面部に比べて小さい結果であった。

ポルトランドセメント使用配合における水セメント比とフリーデル氏塩の関係においては、一部に水セメント比が大きくなるとフリーデル氏塩の相対強度が大きくなる結果が見られたものの、全体的に見れば明瞭な傾向は認められなかった。前養生期間とフリーデル氏塩の関係においても明瞭な傾向は認められなかった（資料-図-2.5 および資料-図-2.6）。なおエトリンガイトとモノサルフェート水和物の和とフリーデル氏塩の相対強度との関係を調べたが、明瞭な関係を得るには至らなかった（資料-図-2.7）。

今回の X 線回折試験結果において、混合セメントでの中心部のフリーデル氏塩が、ポルトランドセメントのフリーデル氏塩の値に比べて小さい結果となり、さらにポルトランドセメントでは、供試体中心部と表面部のフリーデル氏塩の相対強度が同程度となったの対し、混合セメントの場合では、供試体中心部のフリーデル氏塩の値が表面部のフリーデル氏塩の値に比べ小さい結果となった。これらのことから、混合セメントを用いたコンクリートは、表面からコンクリート内部への塩化物イオンの浸透が、ポルトランドセメントを用いた場合に比べ抑制されるものと考えられ、塩化物イオンの浸透に対する抵抗能力がポルトランドセメントより高いと思われる。この結果は、塩化物イオンの浸透深さの測定結果と一致する。

また、NC に比べ MC、LC を用いた場合のフリーデル氏塩の相対強度が低い結果となったことから、同じポルトランドセメントでも NC に比べ MC および LC はフリーデル氏塩としての塩化物イオンの固定能力が低い傾向にあることがうかがえた。これは、 Al_2O_3 の含有量の差などによるものと思われる。

表-4.1.5.1 X線回折試験結果（暴露開始時）

セメントの 種類	水セメント 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 フェート	フリーデル 氏塩	ホルトラン ダイト	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		*	*	*	0.869	0.522
	50		*	*	*	0.819	0.542
	60		*	*	*	1.083	0.396
LC	40		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		91	*	*	*	1.069	0.526
LC			0.149	*	*	0.837	0.920
NBB			*	0.155	*	0.524	0.552
LBB	*		*	*	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ったことを示す（相対強度が0.1未満）

表-4.1.5.2 X線回折試験結果(暴露後その1)

暴露条件	セメントの種類	水セメント比 (%)	前養生(日)	各結晶相の相対強度										
				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	ボルト 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	ボルト ンダイト	カル サイト	
酒田感潮	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		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		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		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	
	久里浜感潮	NC		40	91	*	*	0.532	1.098	0.553	*	*	*	1.273
50				*		*	0.856	0.942	0.840	*	*	0.830	1.010	0.545
60				*		*	1.156	0.799	0.676	0.106	*	0.832	0.799	0.525
MC		40		*		*	0.125	0.731	0.271	*	*	*	0.654	0.287
		50		*		*	0.202	0.337	0.226	*	*	0.210	0.544	0.237
		60		*		*	0.492	0.198	0.195	*	*	0.176	0.125	0.529
LC		40		0.387		*	0.342	0.752	0.774	0.364	*	*	1.253	0.683
		50		0.164		*	0.175	*	0.571	*	*	*	0.105	0.547
		60		0.365		*	0.517	0.219	0.578	0.395	*	0.456	0.228	0.669
NBB		50		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		50	*	*		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)

表-4.1.5.3 X線回折試験結果(暴露後その2)

暴露条件	セメントの種類	水セメント比 (%)	前養生(日)	各結晶相の相対強度									
				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	ボルトラ 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	ボルトラ ンダイト	カル サイト
久里浜海浜	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
	MC	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
	LC	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		*	*	*	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
東京屋外	NC	40	91	*	*	*	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		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		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		*	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			0.210	0.137	0.142	0.126	1.063	0.352	0.161	0.178	0.178	0.413
	NC	50		*	*	*	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)

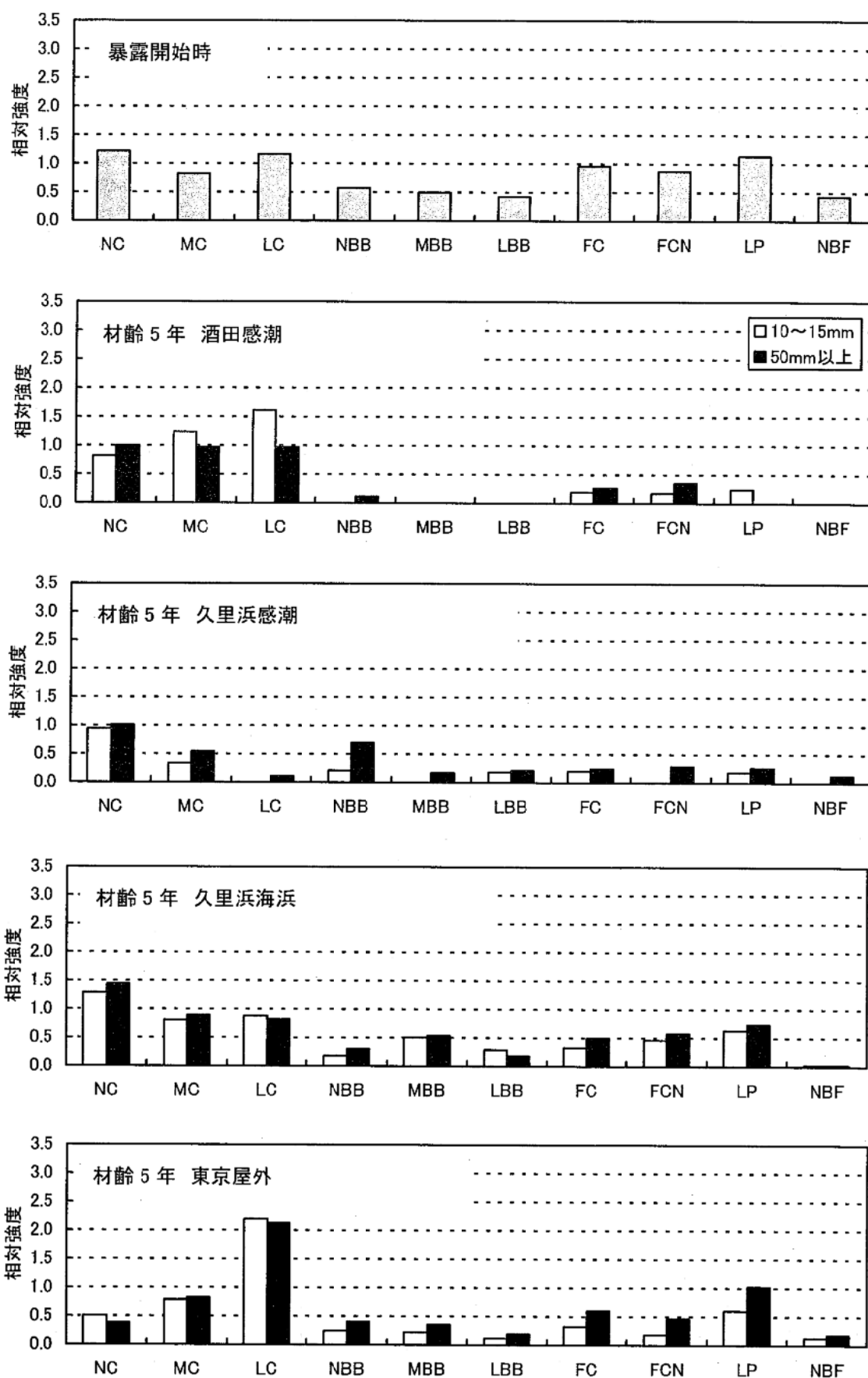


図-4.1.5.1 ポルトランドライトの相対強度（水セメント比 50%，前養生 28 日）

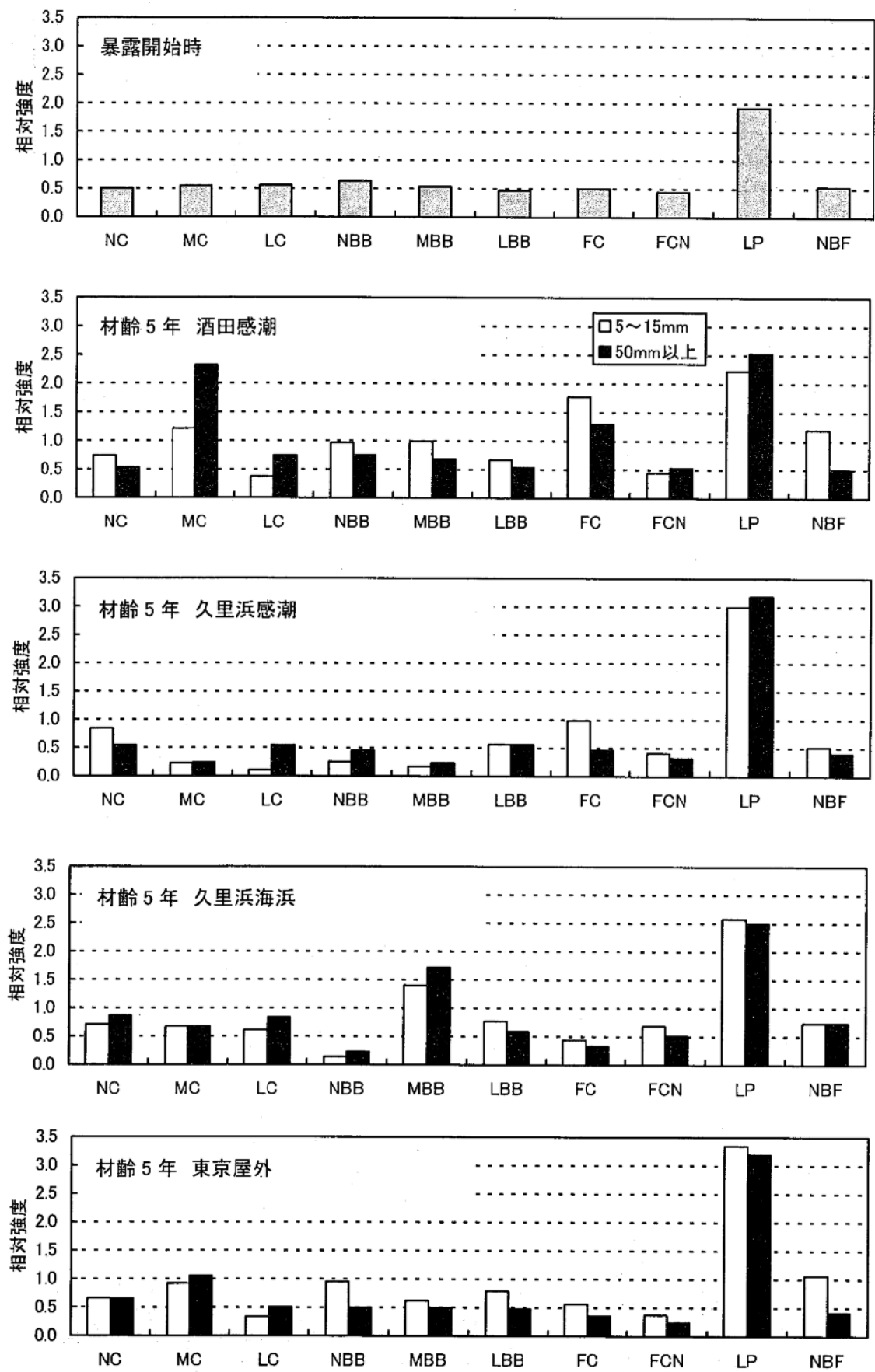


図-4.1.5.2 カルサイトの相対強度（水セメント比 50%，前養生 28 日）

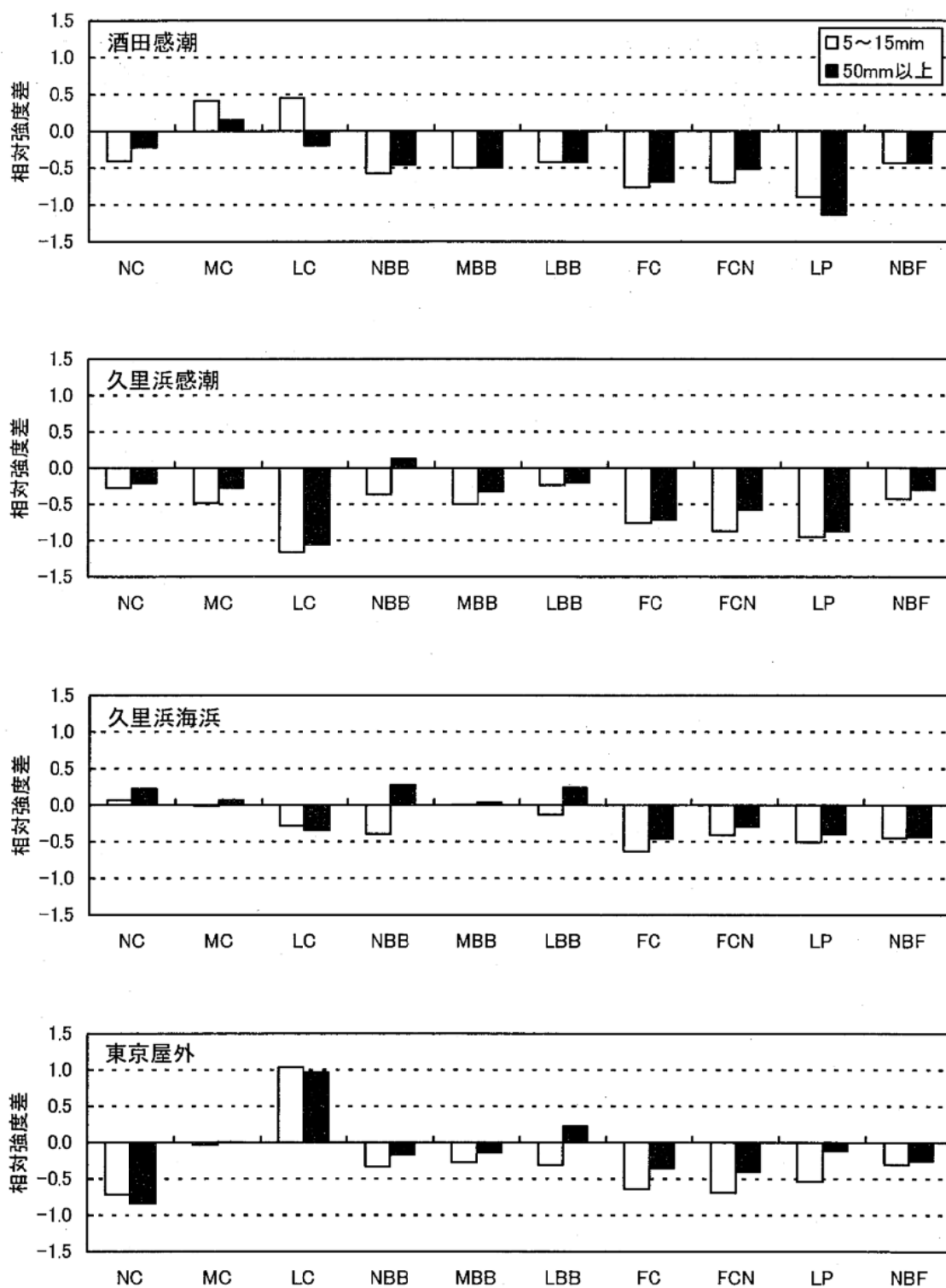


図-4.1.5.3 暴露前後でのポルトランドライターの相対強度の差(=材齢5年-暴露開始時)
(水セメント比 50%, 前養生 28 日)

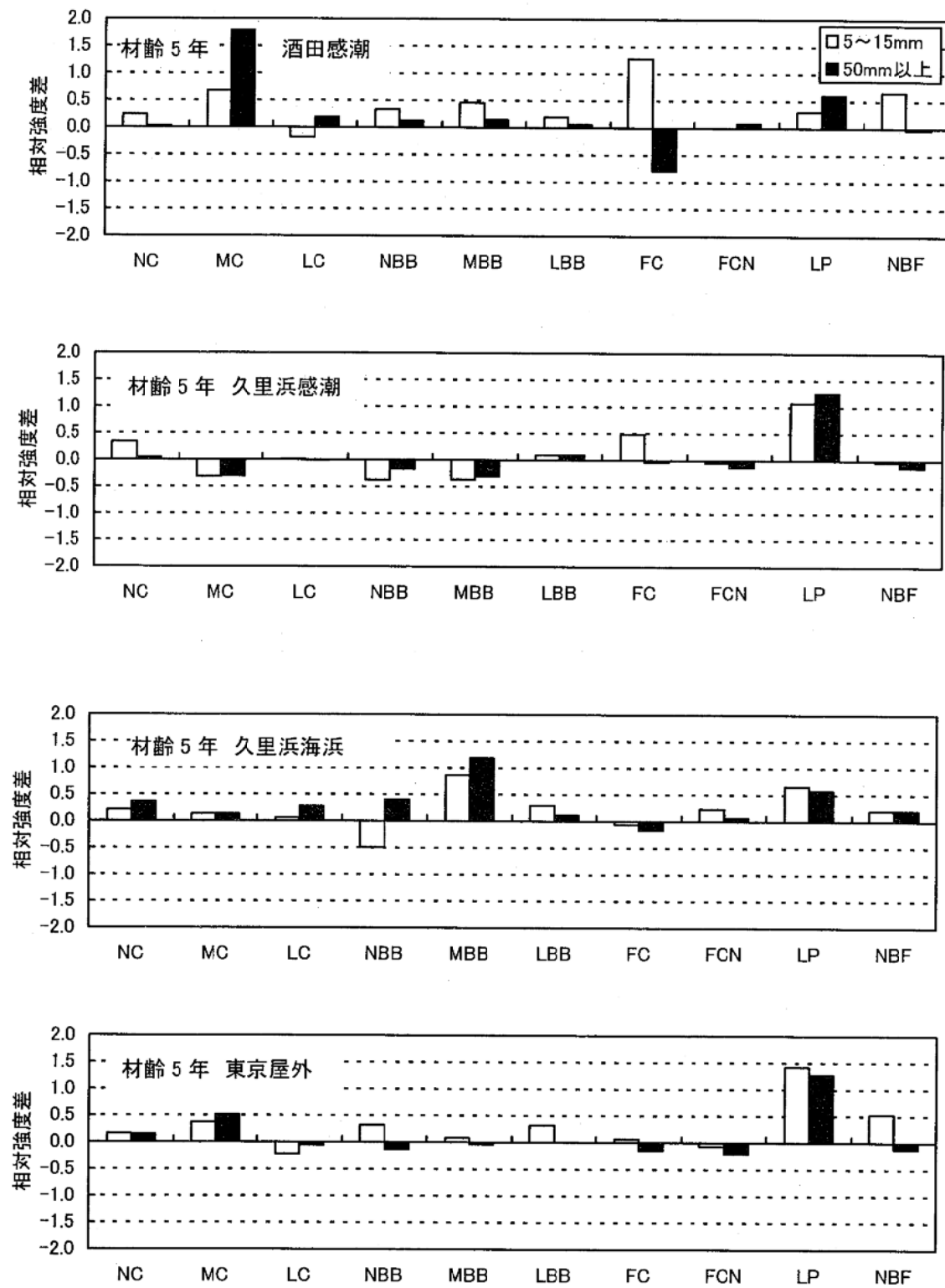


図-4.1.5.4 暴露開始前とのカルサイトの相対強度の差(=材齢5年-暴露開始時)
(水セメント比 50%, 前養生 28 日)

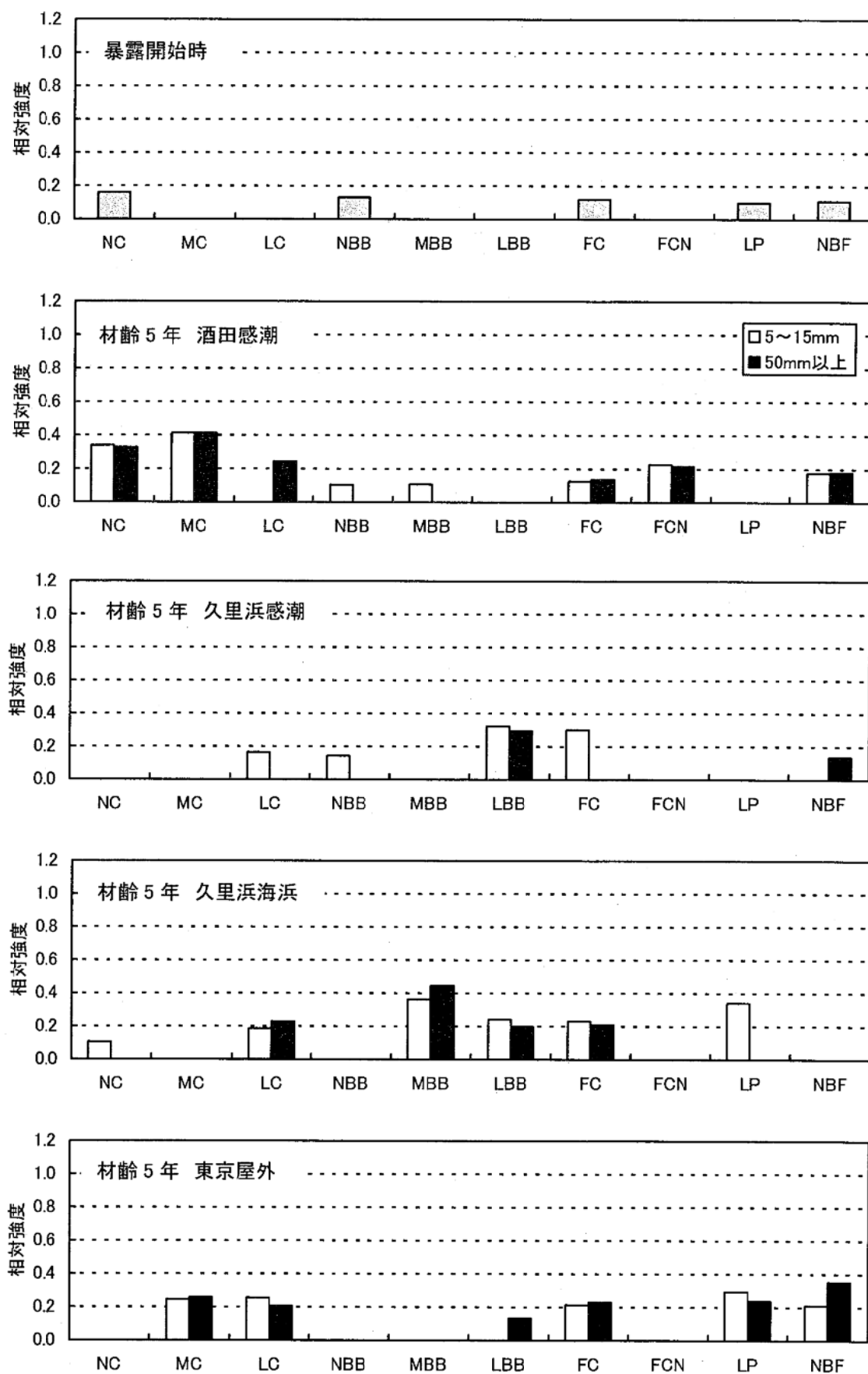


図-4.1.5.5 エトリングイトの相対強度（水セメント比 50%, 前養生 28 日）

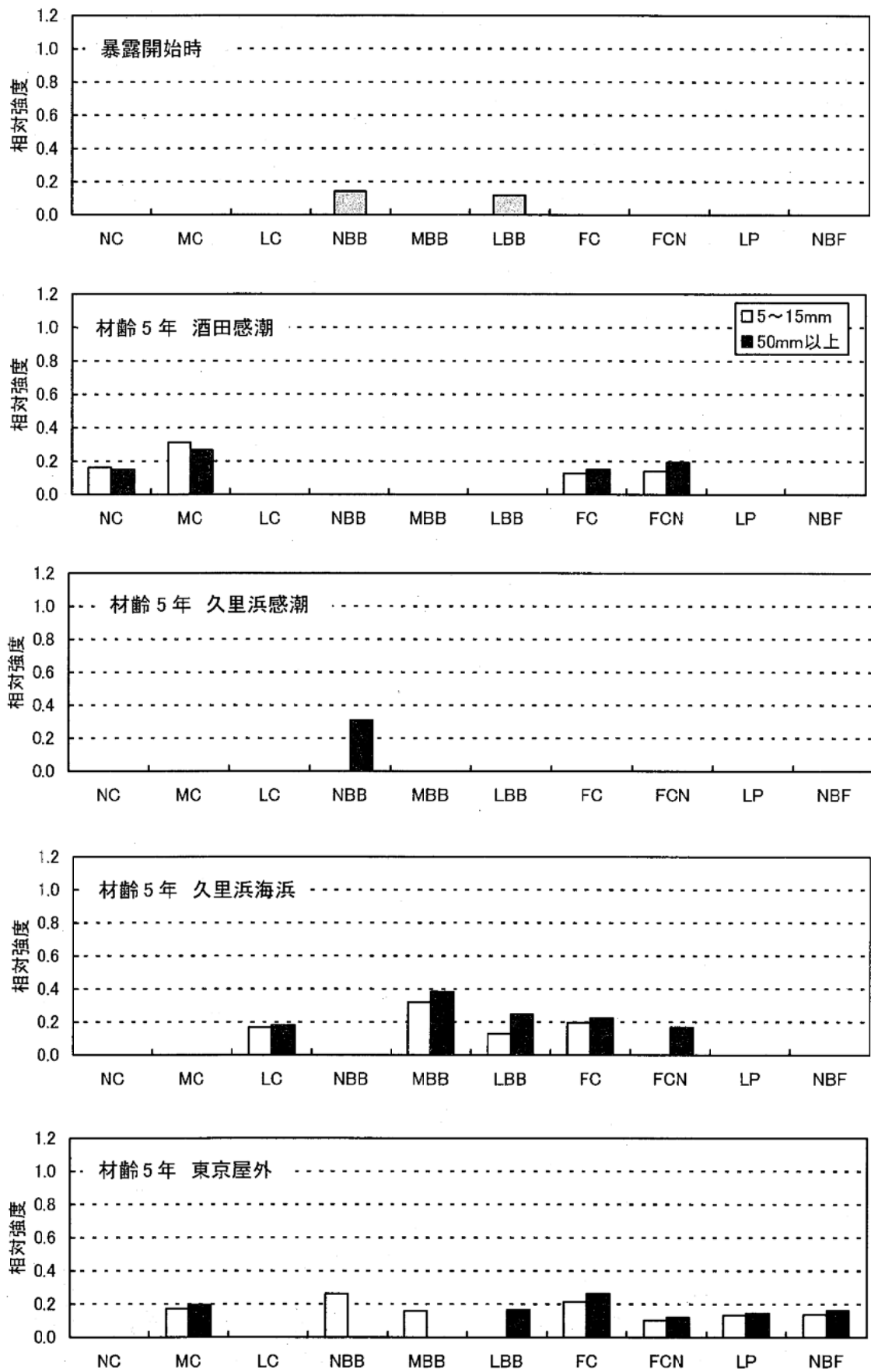


図-4.1.5.6 モノサルフェイト水和物の相対強度（水セメント比 50%，前養生 28 日）

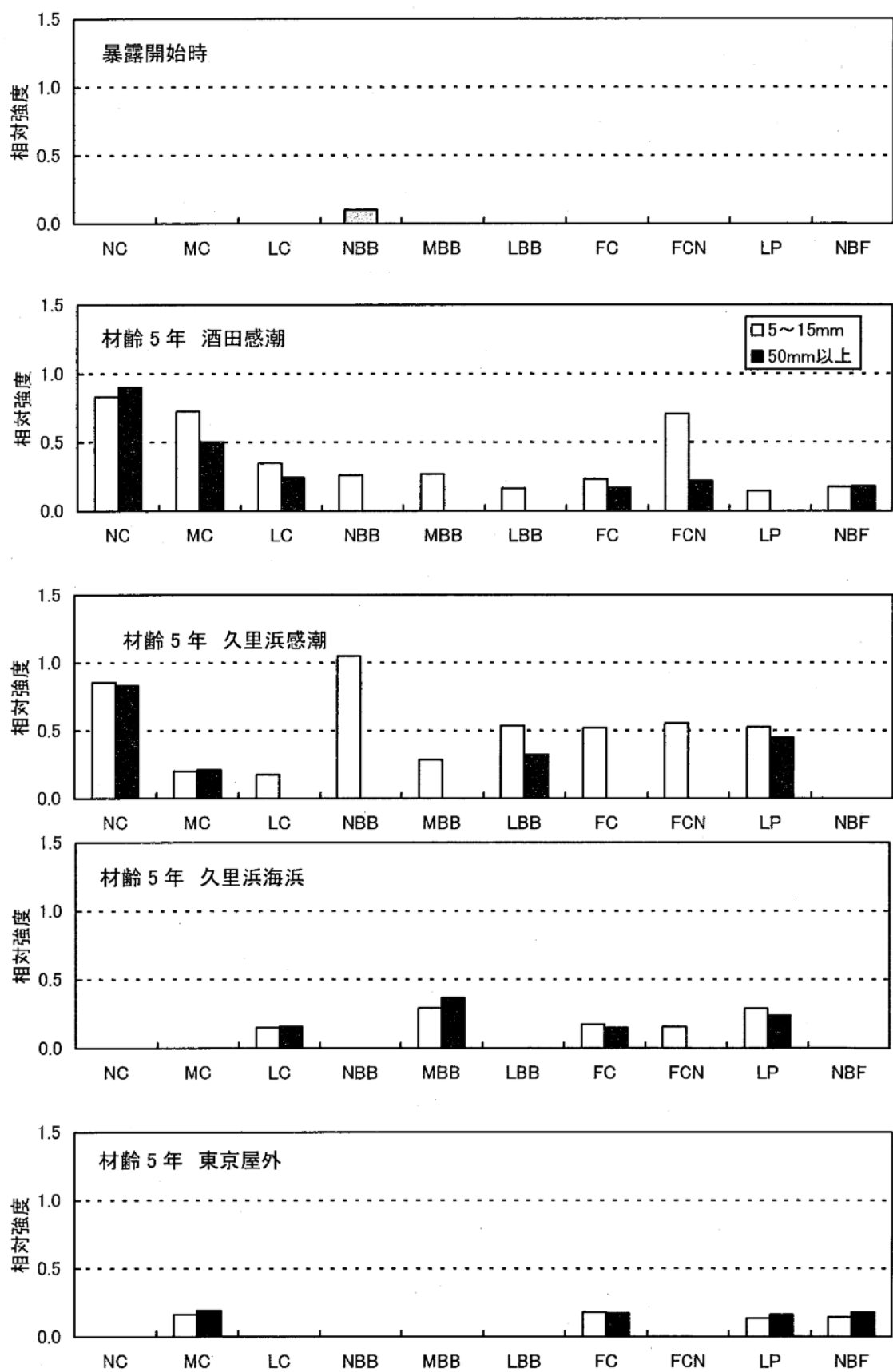


図-4.1.5.7 フリーデル氏塩の相対強度（水セメント比 50%，前養生 28 日）

4.1.6 細孔量

暴露開始時および材齢 5 年におけるコンクリートの細孔量(7.5~7500nm)を表-4.1.6.1 に示す。なお、材齢 5 年のコンクリートについては、表面から 5~15mm および 50mm 以上の 2 種類の深さから試料を採取した。また、全試料の細孔径分布を資料-3 として巻末に付す。

表-4.1.6.1 細孔量測定結果

セメントの 種類	水セメント 比 (%)	前養生 (日)	細孔量 (mm ³ /g)									
			暴露 開始 時	材齢 5 年								
				酒田感潮		久里浜感潮		久里浜海浜		東京屋外		
				5~15 mm	50mm 以上	5~15 mm	50mm 以上	5~15 mm	50mm 以上	5~15 mm	50mm 以上	
NC	40	28	31.8	22.7	27.5	32.6	31.7	31.9	30.3	23.5	30.7	
	50		31.4	31.8	34.5	36.3	35.0	48.9	48.0	36.2	33.6	
	60		40.0	36.1	37.4	42.5	40.5	51.2	48.8	40.2	37.6	
MC	40		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	
LC	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		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	91	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	

細孔量とセメントの種類との関係を図-4.1.6.1 に、細孔量と水セメント比との関係を図-4.1.6.2 に示す。暴露開始時(前養生 28 日)において、NC は MC や LC より細孔量が少なかった。また一部ばらつきはあるが、水セメント比が大きいほど細孔量が多くなる傾向が認められた。一方、各種高炉セメントの細孔量は、ベースのポルトランドセメントが MC や LC の場合では高炉スラグ微粉末の混合により細孔量はやや減少した。フライアッシュや石灰石微粉末を混合したセメントはベースの NC よりも細孔量が多かった。フライアッシュ混合の場合は前養生 28 日時点ではポゾラン反応が進行していないこと、石灰石微粉末混合の場合は実質の水セメント比(有効水結合材比)が大きいことによるものと考えられる。

暴露後の細孔量については、各ポルトランドセメントについて見ると、酒田感潮および久里浜感潮では、材齢 5 年においても NC および MC の細孔量は暴露開始時と同程度であったが LC は減少した。久里浜海浜および東京屋外では、暴露開始時より細孔量がやや増加した。これらの細孔量の変化は中心部分より表層部分で顕著であった。また、ばらつきはあるが、暴露開始時と同様に水セメント比が大きいほど細孔量が多かった。

各種高炉セメントについては、酒田感潮および久里浜感潮では暴露開始時に比べて細孔量は減少し、久里浜海浜および東京屋外では細孔量は暴露開始時と同程度かやや増加する程度であった。このため暴露条件によらず、いずれの高炉セメントでもベースのポルトランドセメントよりも細孔量はやや少なくなる傾向が認められた。フライアッシュを混合したセメントでも高炉セメントとほぼ同様な傾向が認められたが、久里浜海浜や東京屋外ではベースの NC より細孔量が多い傾向も見られた。石灰石微粉末を混合した LP では暴露開始時と同様にベースの NC よりも細孔量が多い。高炉スラグ微粉末とフライアッシュを混合している NBF はベースの NC よりも細孔量が少ない傾向にあったが、東京屋外では表層部分で細孔量が増大している結果も見られた。以上のように、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合したセメントでは、感潮条件の場合において長期にわたる水和反応によって組織が緻密化し細孔量が減少するが、海浜や屋外条件では暴露開始時に比べて細孔量が増大する傾向も見られ、乾燥の影響がうかがえた。

細孔量と前養生期間との関係を図-4.1.6.3 に示す。ここでは前養生 28 日での細孔量に対する前養生 91 日での細孔量の割合(%)の形でその影響を示した。NC および LBB を除くセメントでは、前養生期間を長くとることにより暴露開始時の細孔量は少ない傾向となり、例外も見られるが、暴露後も総じてほぼ同様の傾向が認められた。

細孔量と圧縮強度の関係を図-4.1.6.4 に示す。酒田感潮および久里浜感潮で暴露したコンクリートについては、セメントの種類によらず、細孔量が多いほど圧縮強度が小さくなる傾向が認められた。久里浜海浜および東京屋外においては、混合セメントはポルトランドセメントと比べて細孔量が同程度であるにも関わらず圧縮強度は小さくなる傾向が認められた。

細孔量と静弾性係数との関係を図-4.1.6.5 に示す。両者の間に明瞭な関係はうかがわれない。

細孔量と塩化物イオン浸透深さおよび塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係を図-4.1.6.6、図-4.1.6.7 に示す。塩化物イオン浸透深さについては、ポルトランドセメントと混合セメントの差異は現われるものの、細孔量との明瞭な関係は認められない。塩化物イオンの見掛けの拡散係数については、感潮条件において細孔量が多いほど、見掛けの拡散係数は大きくなる傾向が認められるが、ポルトランドセメントと混合セメントの差異による影響が大きい。また細孔量と水和物の X 線回折相対強度との間についても明瞭な関係は認められなかった（巻末の資料-図-3.29～3.33 参照）。

以上の検討により、暴露後の細孔量は暴露条件やセメント種類の影響を受け、感潮条件では細孔量は減少傾向、海浜や屋外条件では暴露開始時と同程度かやや増加の傾向にあること、細孔量と圧縮強度の関係や塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係においては、ポルトランドセメントと混合セメントとの差異による影響が大きいことなどがわかった。

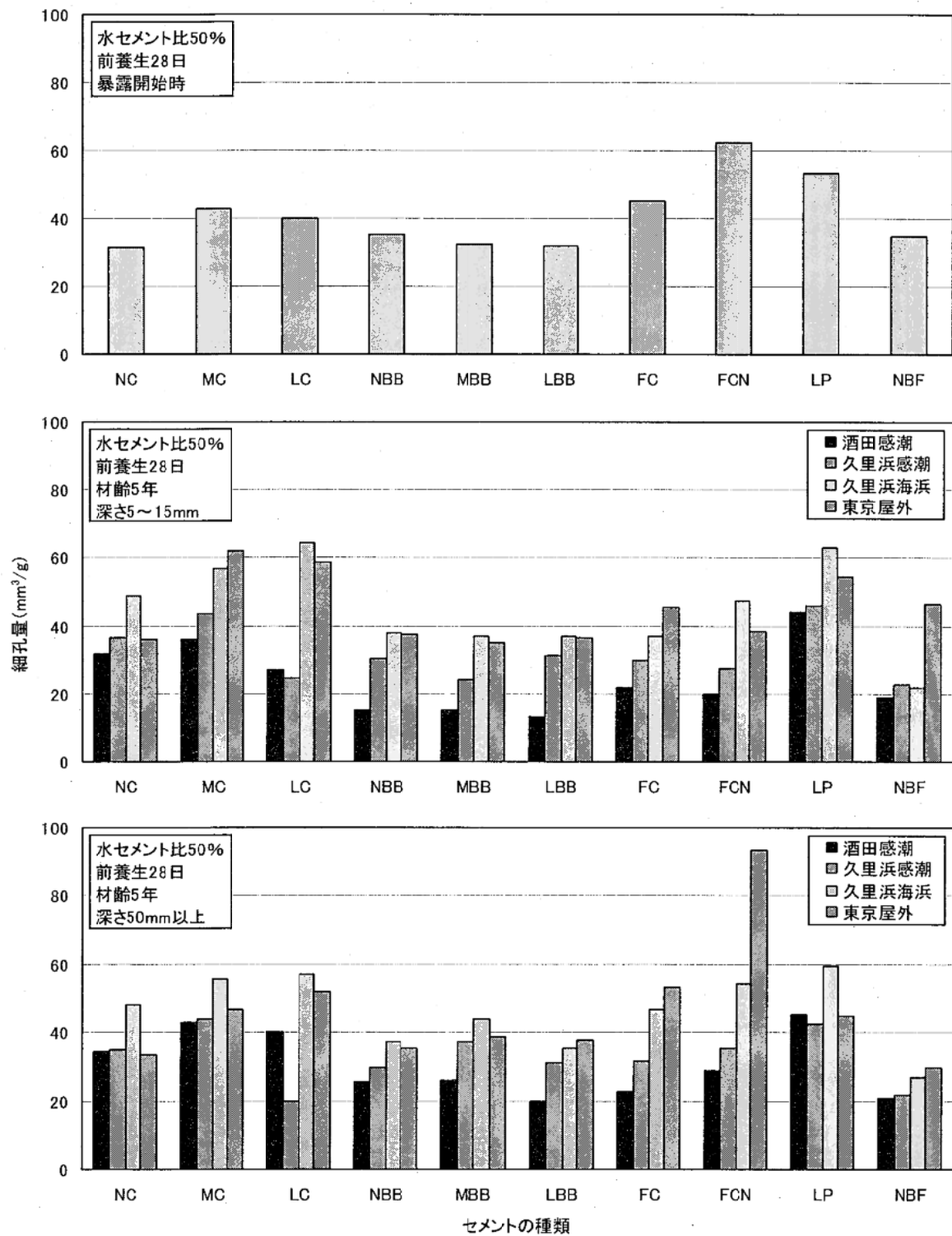


図-4.1.6.1 セメントの種類と細孔量の関係

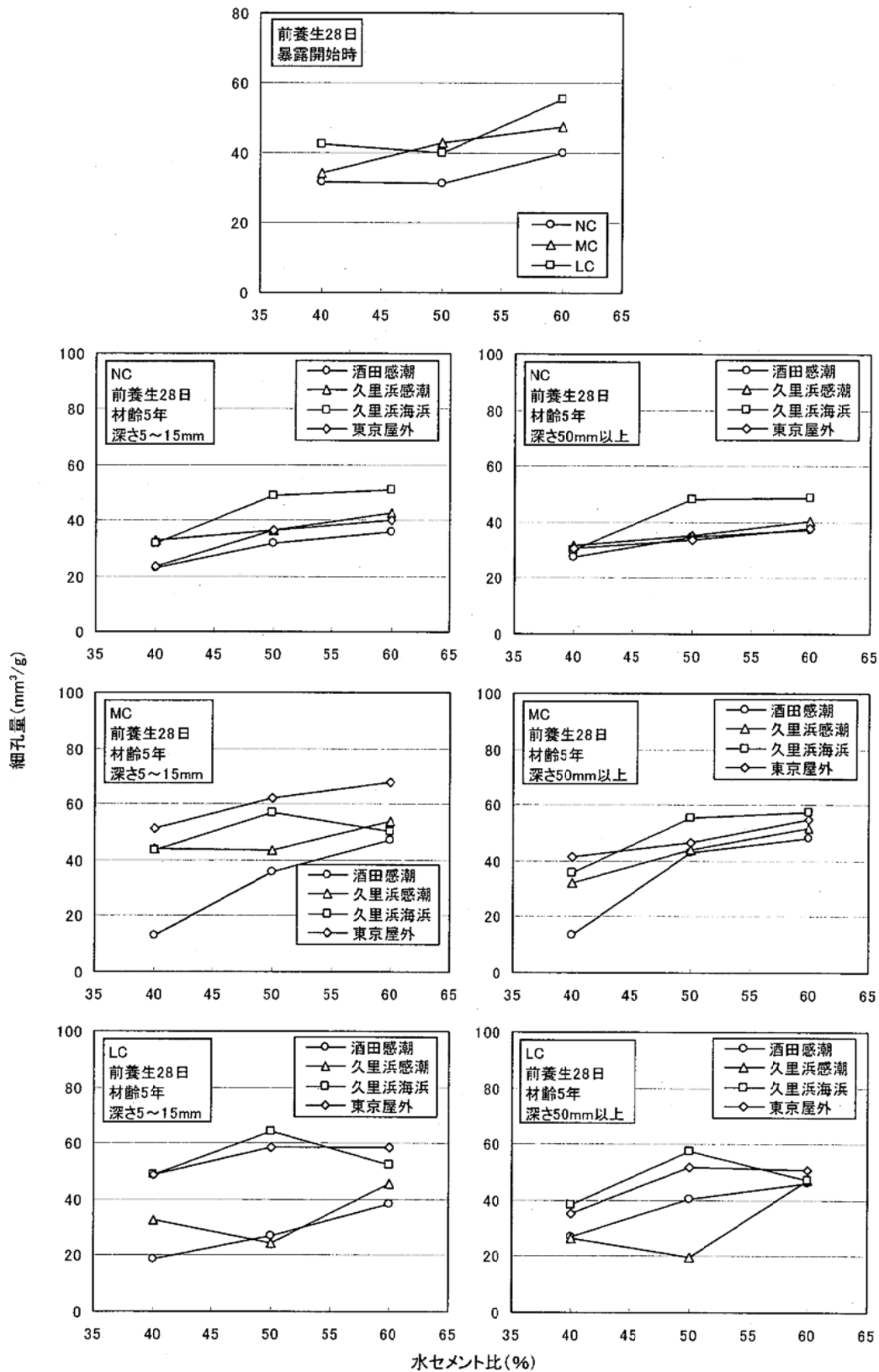


図-4.1.6.2 水セメント比と細孔量の関係

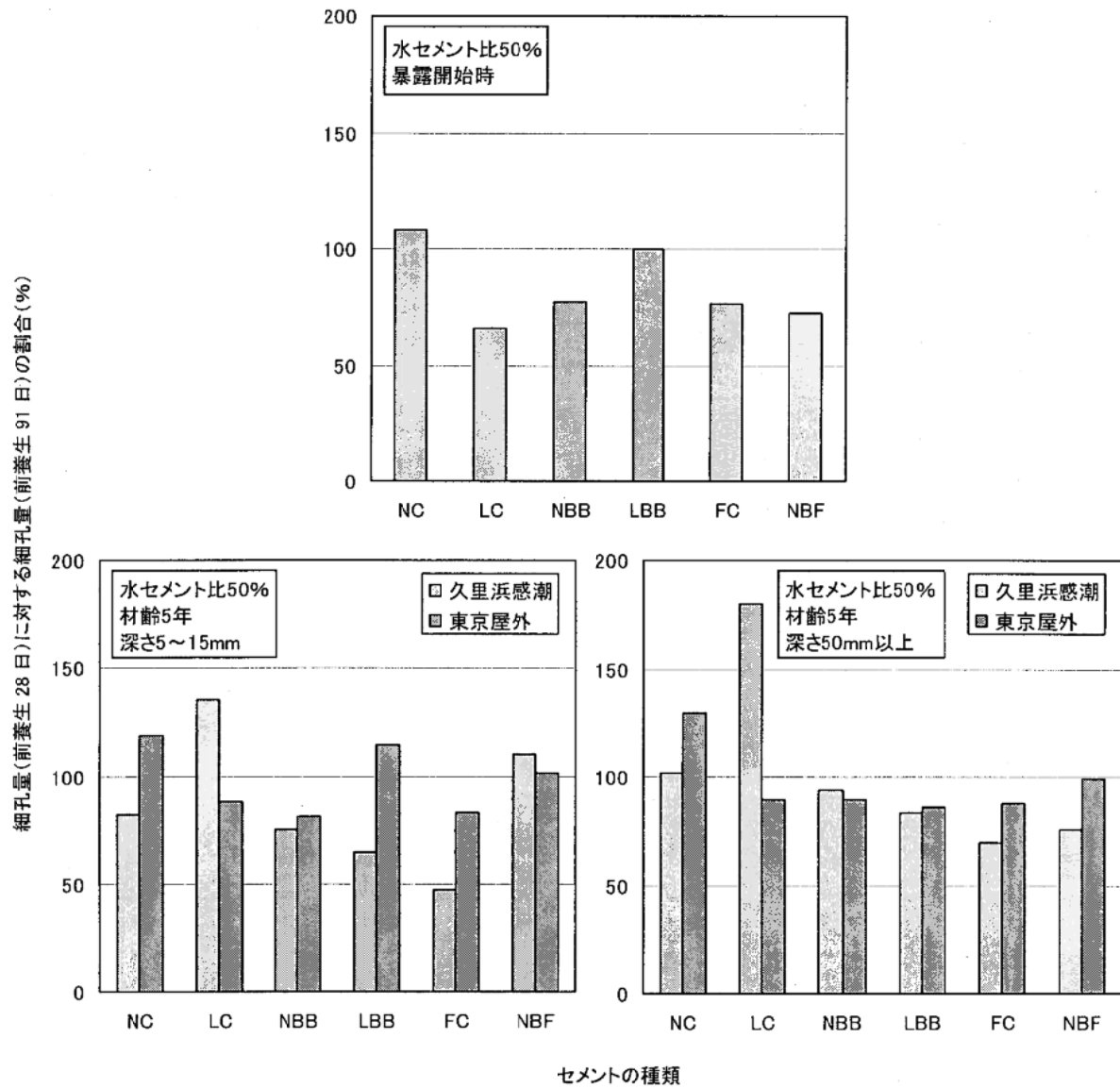


図-4.1.6.3 前養生期間と細孔量の関係

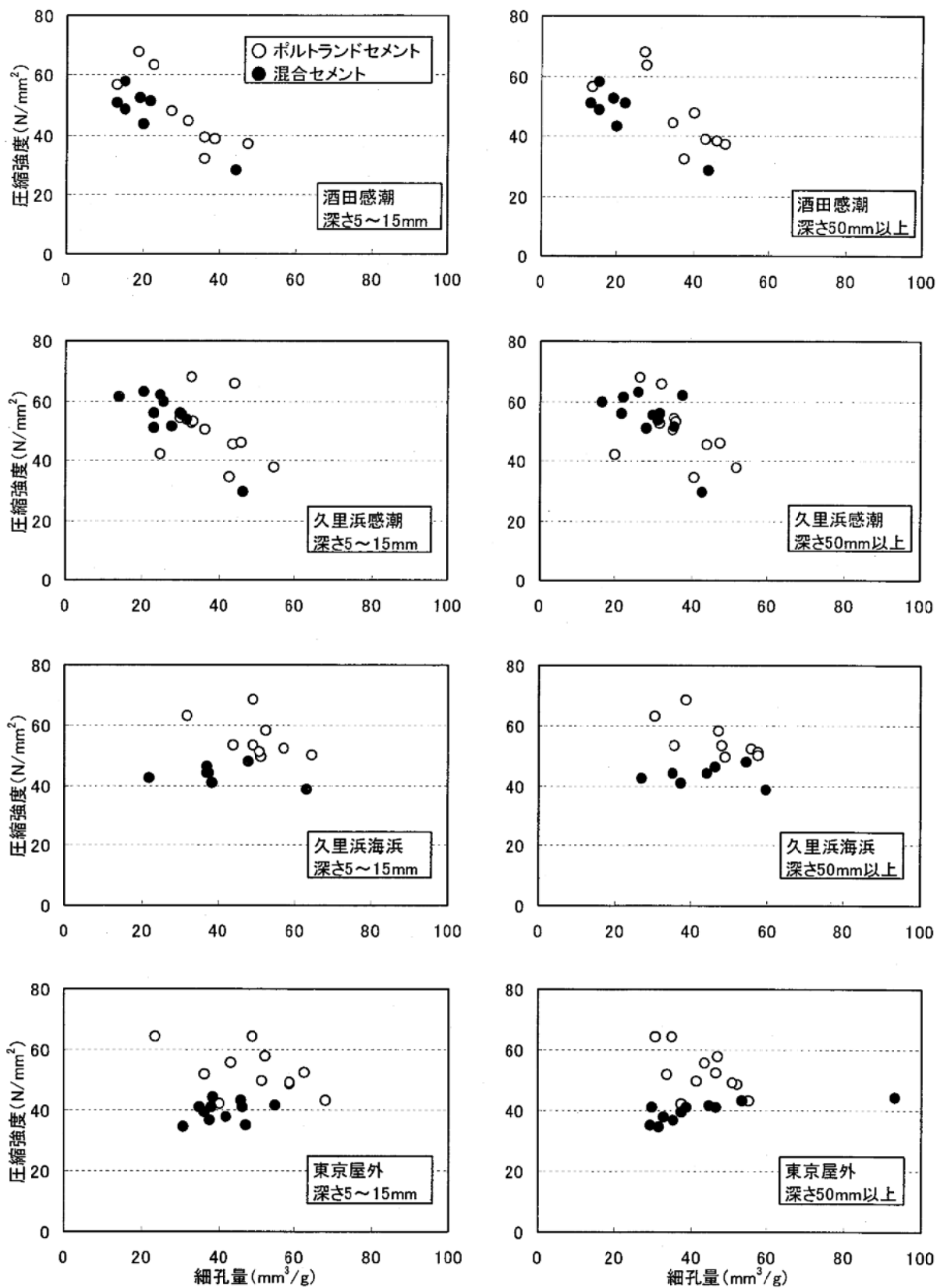


図-4.1.6.4 細孔量と圧縮強度の関係

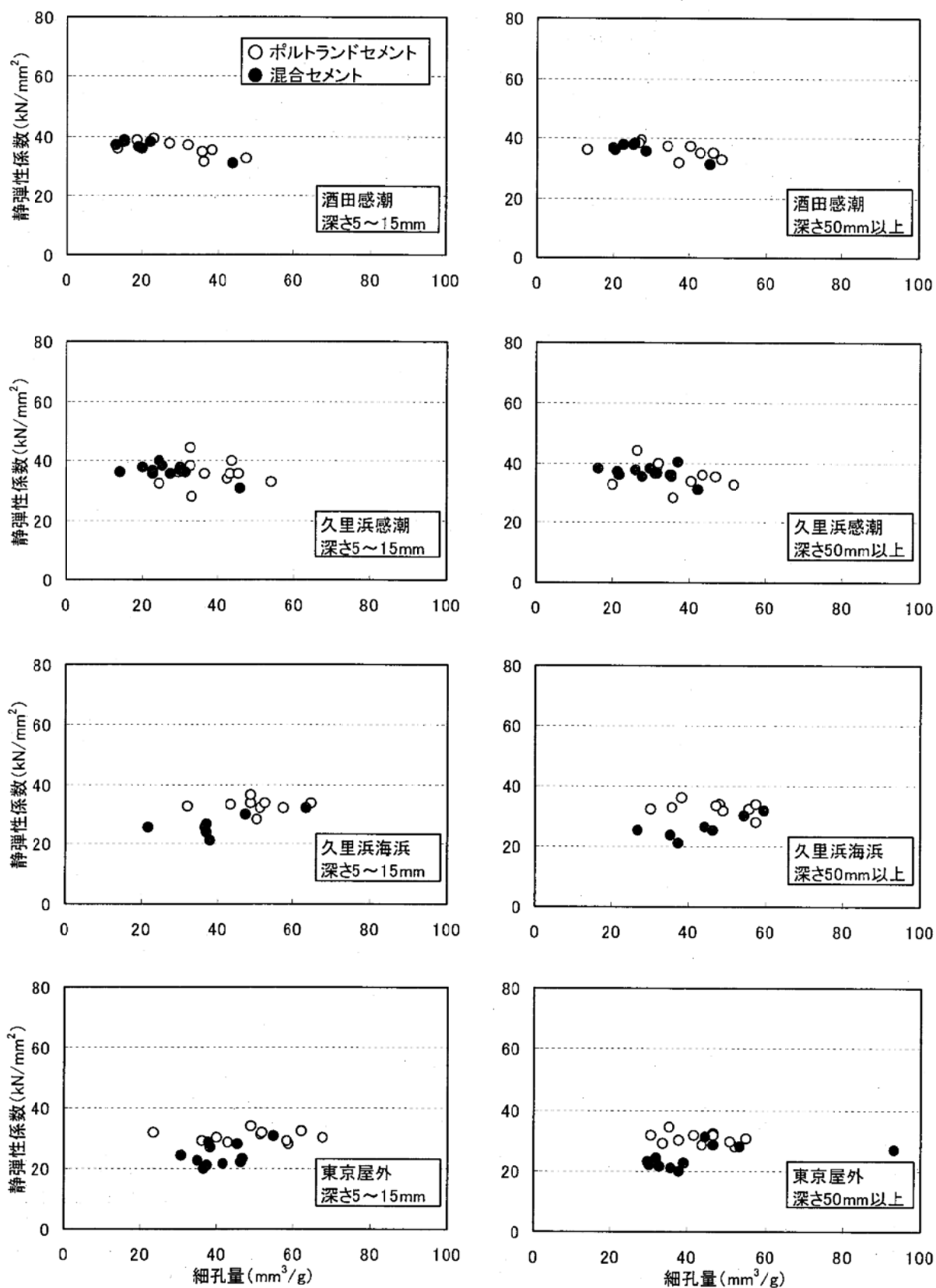


図-4.1.6.5 細孔量と静弾性係数の関係

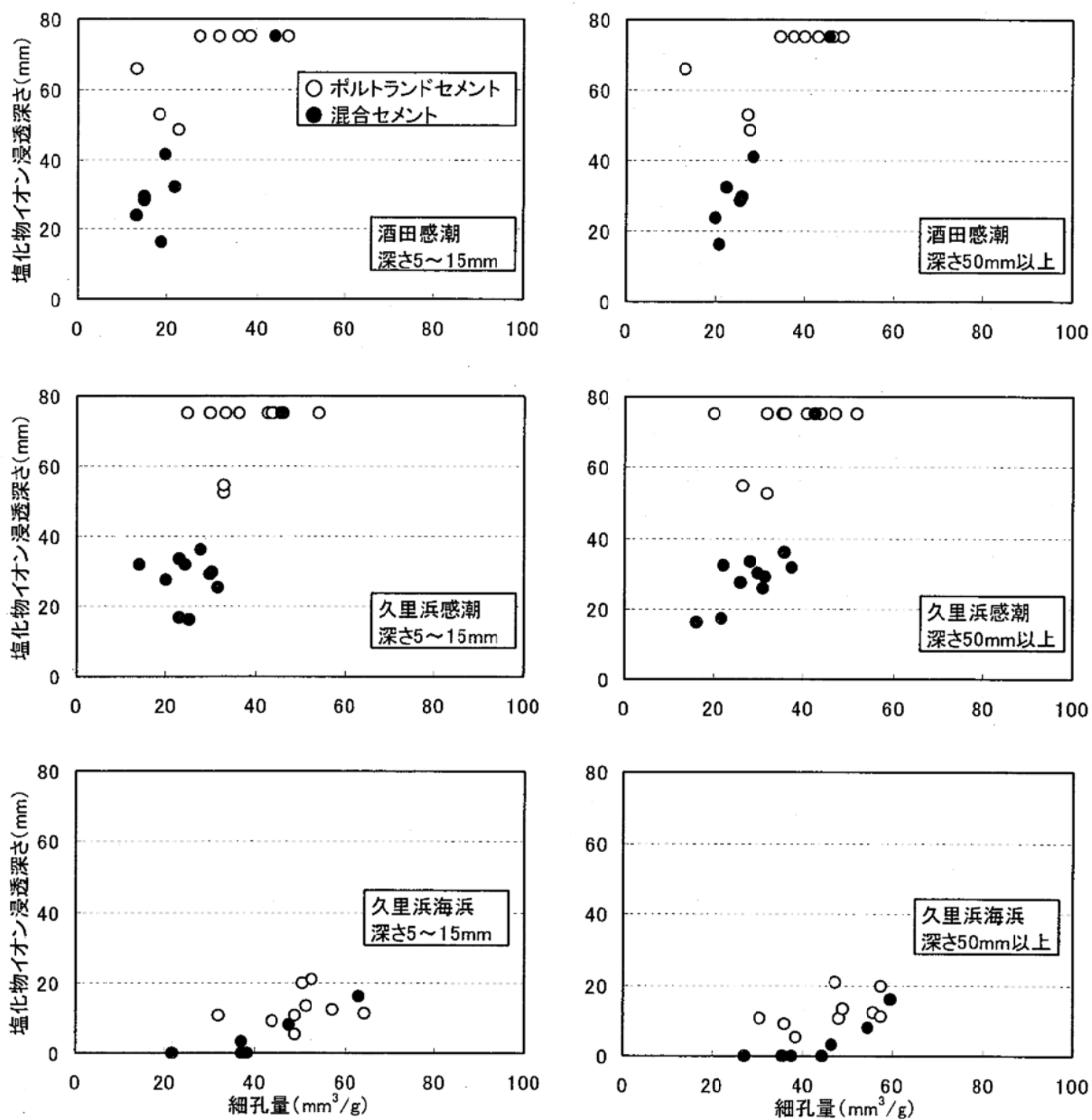


図-4.1.6.6 細孔量と塩化物イオン浸透深さの関係

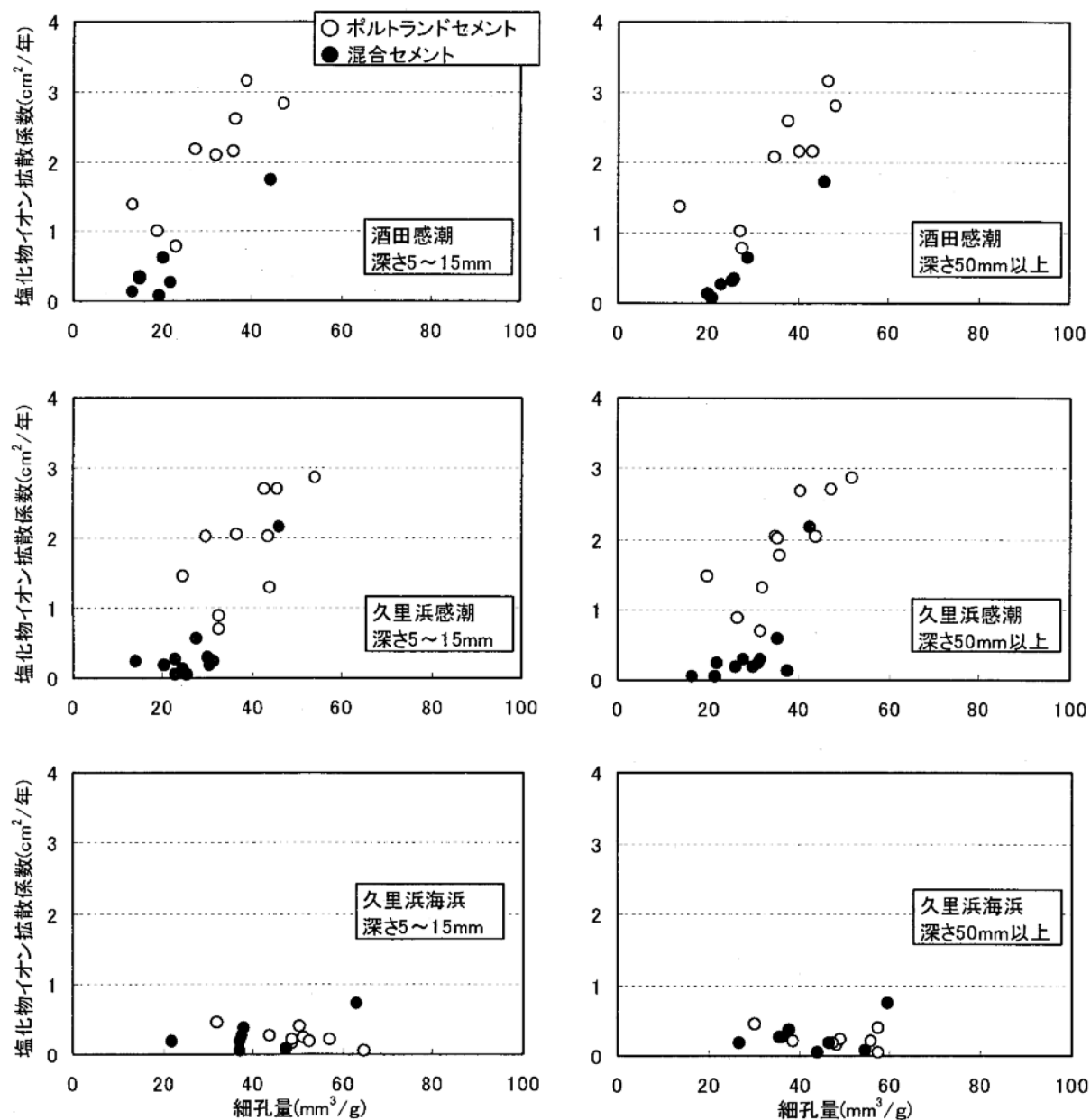


図-4.1.6.7 細孔量と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

4.2 鉄筋の発錆に関する試験結果および考察

4.2.1 鉄筋の発錆状態

供試体を割裂して鉄筋を露出させ目視により観察した結果、いずれの供試体も発錆が少なく、表-3.7.6.1 に示す鉄筋の腐食グレードは、最大でも I⁺（ここでは「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」とした）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はない。なお、発錆部近傍のひび割れ等の異常は見受けられなかった。腐食グレードは巻末の資料-4 に示す。

4.2.2 鉄筋の発錆面積率

発錆面積率の測定結果を表-4.2.2.1 に示す。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）の鉄筋の平均で示した。また、セメントの種類と発錆面積率の関係を図-4.2.2.1、水セメント比との関係を図-4.2.2.2 に示す。なお試験結果の詳細は巻末の資料-4 に示す。

供試体から鉄筋をはつり出して発錆面積の測定を行ったところ、全供試体のうちの約 2 割程度しか発錆していなかった。海浜や屋外では感潮に比べて発錆が少なく、特に屋外では発錆面積は非常に小さい。感潮条件については酒田と久里浜で明瞭な違いは認められなかった。セメントの種類では、高炉スラグ微粉末を混合した NBB、MBB、LBB、フライアッシュⅡ種を混合した FC、および高炉スラグ微粉末とフライアッシュⅡ種を混合した NBF では発錆がなく、これらセメントは、混合材の発錆抑制効果が認められた。各ポルトランドセメントについては、水セメント比が大きくなると発錆が見られ、発錆面積が大きくなる傾向も認められた。石灰石微粉末を混合した LP についても感潮条件では発錆が認められた。前養生が 91 日の供試体は発錆が認められなかった。表-4.1.4.6 によれば、NC、LC の場合の鉄筋位置付近での塩化物イオン濃度は、前養生 28 日の場合、91 日の場合、ともに 2 kg/m^3 以上の値を示しており、前養生条件による差は見られない。従って前養生期間が 91 日の場合に鉄筋の発錆が認められなかったことについてはその理由は判然としない。かぶり厚さとの関係についても傾向は判然としない。これらについては、今後暴露期間が進むにつれて明確になってくるものと考えられる。

鉄筋近傍の塩化物イオン濃度と鉄筋の発錆面積率の関係を図-4.2.2.3 に示す。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鋼材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 $1.2\sim 2.4\text{ kg/m}^3$ 程度と示されている¹²⁾。久里浜海浜において例外はあるが本試験結果においても、鉄筋近傍の塩化物イオン濃度が 2 kg/m^3 程度を超えた付近から発錆面積が増大する傾向が見られた。

表-4.2.2.1 発錆面積率

(%)

セメント の 種類	水セ メント比 (%)	前養生 (日)	暴露条件							
			酒田感潮		久里浜感潮		久里浜海浜		東京屋外	
			鉄筋のかぶり厚さ							
			5cm	7cm	5cm	7cm	5cm	7cm	5cm	7cm
NC	40	28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50		0.34	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.09
	60		1.32	1.30	0.13	0.23	0.00	0.00	0.00	0.15
MC	40		0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.09	0.07
	50		0.01	0.21	0.15	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00
	60		0.67	0.52	0.17	0.44	0.89	0.29	0.00	0.00
LC	40		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50		0.00	0.00	0.08	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
	60		0.18	0.69	2.55	0.85	0.23	0.17	0.00	0.00
NBB	50		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MBB	50		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LBB	50		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FC	50		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FCN	50		0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LP	50		0.15	0.17	0.48	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
NBF	50		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注：前養生 91 日は発錆が見られなかったので表中から省略した。

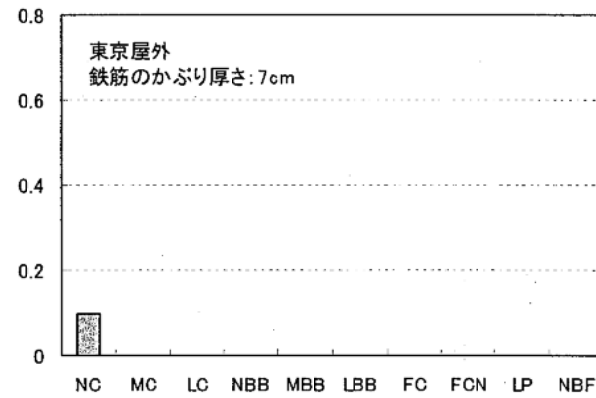
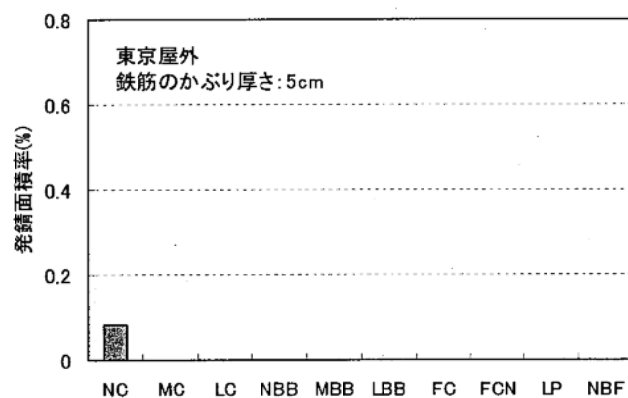
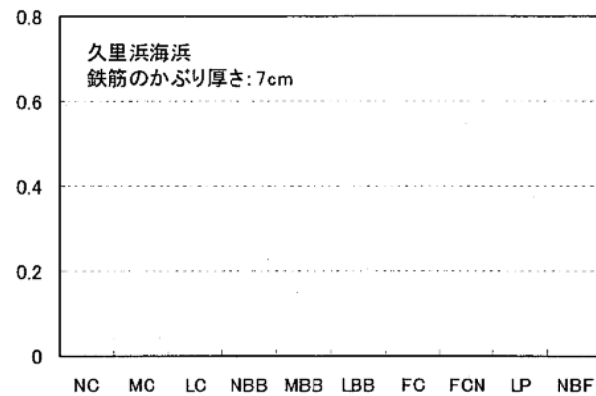
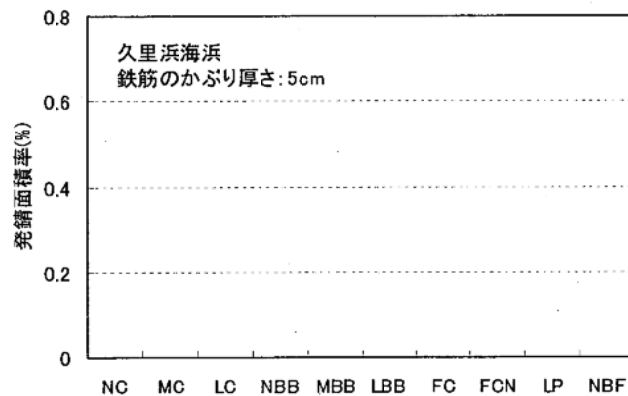
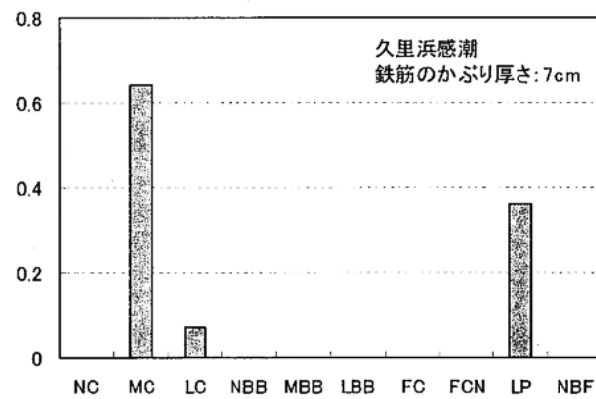
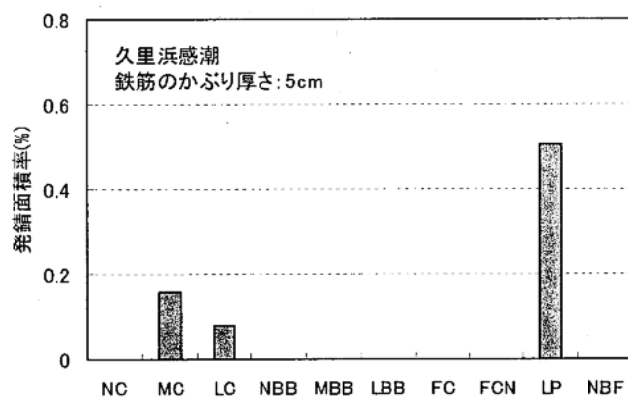
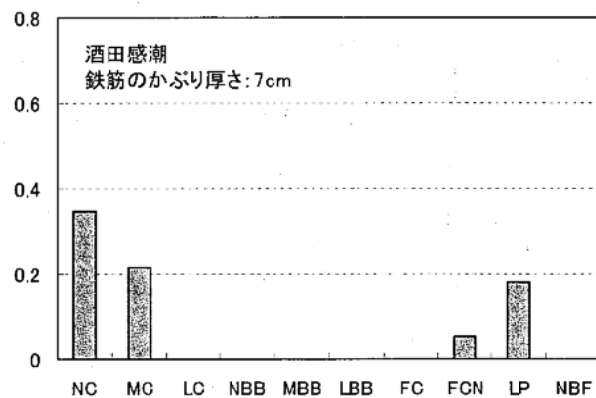
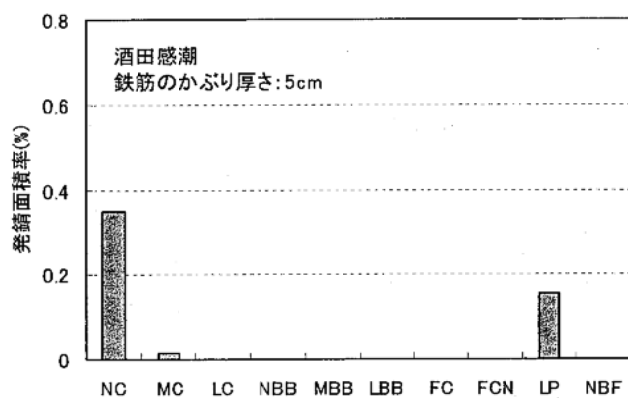


図-4.2.2.1 セメントの種類と発錆面積率の関係(水セメント比 50%, 前養生 28 日)

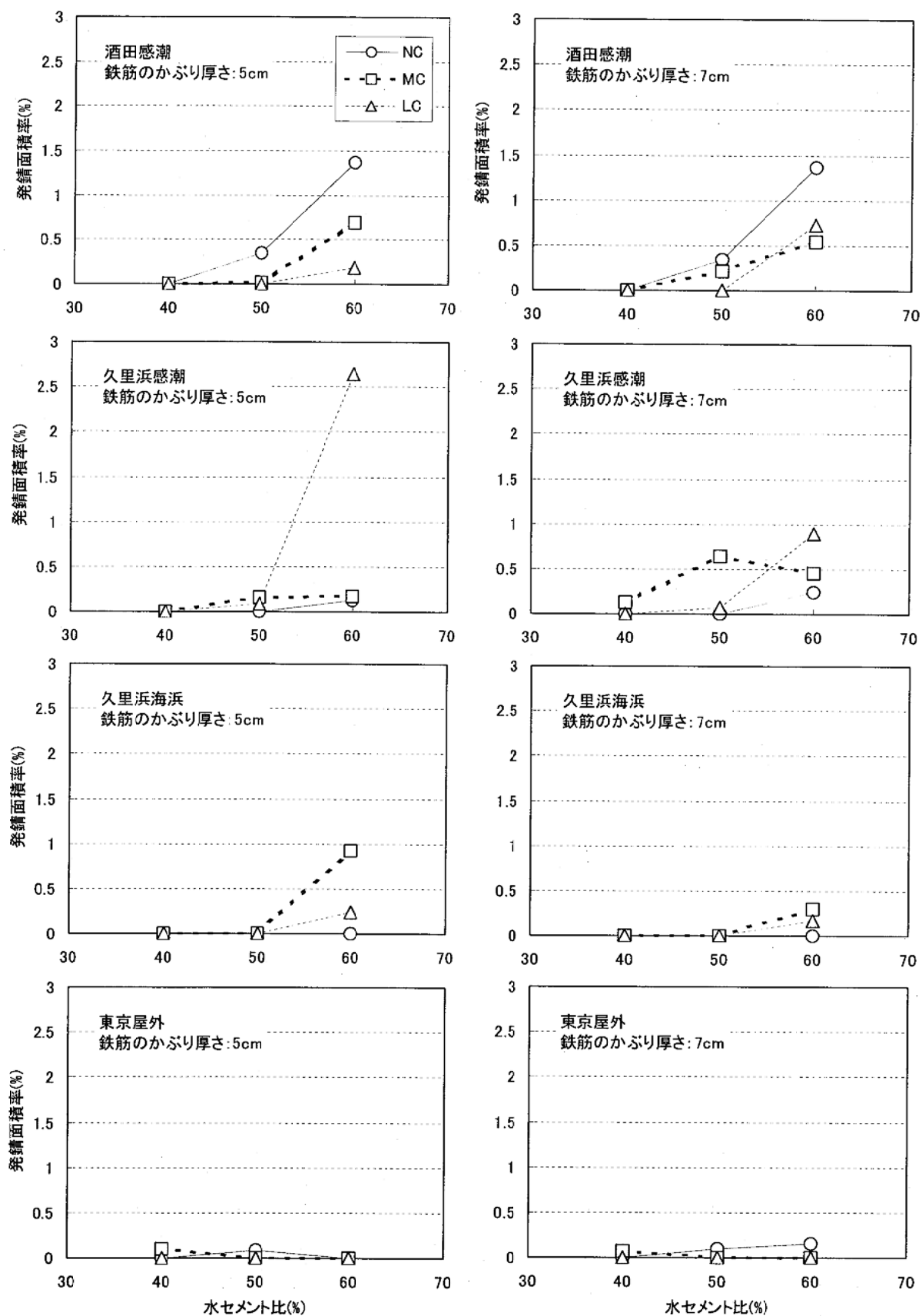


図-4.2.2.2 水セメント比と発錆面積率の関係(前養生 28 日)

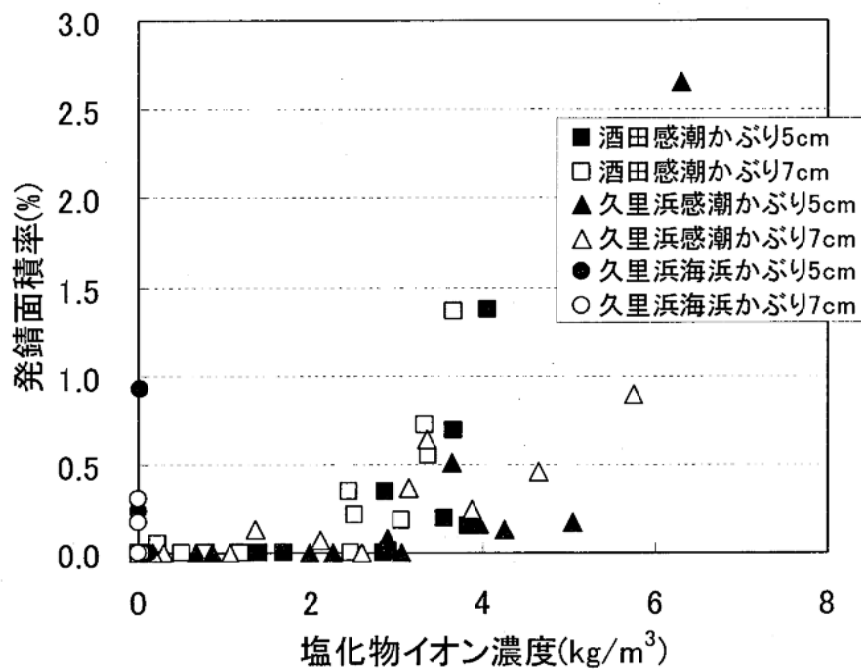


図-4.2.2.3 鉄筋近傍の塩化物イオン濃度と鉄筋の発錆面積率の関係

4.2.3 鉄筋の質量減少率

(1)セメント種類および暴露条件と鉄筋の質量減少率

鉄筋の質量減少率の測定結果を表-4.2.3.1に示す。鉄筋の質量減少率は、発錆面積率と同様に鉄筋のかぶり厚さ毎に2本の鉄筋の平均値で示した。また、セメントの種類と質量減少率との関係を図-4.2.3.1、水セメント比と質量減少率との関係を図-4.2.3.2、前養生と質量減少率との関係を図-4.2.3.3に示す。なお試験結果の詳細は巻末の資料-4に示す。

図-4.2.3.1によれば、感潮条件においては質量減少が認められたが、海浜や屋外条件ではほとんど質量減少は認められなかった。セメントの種類では、高炉スラグ微粉末を混合したものは質量減少率が少ない傾向にあった。フライアッシュを混合したものについては、久里浜感潮では質量減少が認められないものの、酒田感潮での質量減少率はNCとほぼ同程度の結果を示しており、高炉スラグ微粉末とは傾向を異にした。また石灰石微粉末を混合したLPの質量減少率については、有効水結合材比がベースのNCよりも大きいものの、酒田感潮ではNCと同程度の質量減少率に止まっていた。また鉄筋のかぶり厚さによる影響は傾向が認められなかった。いずれにしても、前記の発錆面積率と同様に、質量減少率についても暴露材齢5年の段階ではまだ小さく、今後材齢が進むにつれて傾向が明瞭になってくると考えられる。なお、鉄筋発錆面積率が0の鉄筋においても質量減少が認められる場合がある。これは、全体的に鉄筋の腐食の程度が少ないために試験方法の相違による影響が現れたものと考えられる。

図-4.2.3.2によれば、感潮条件において水セメント比が大きくなると質量減少率も大きくなる傾向が認められた。なお前養生期間の影響については、図-4.2.3.3に見られるとおり、前養生期間91日の場合には質量減少を生じた鉄筋がほとんど見られず、前記の鉄筋発錆面積率と対応した結果となっている。

表-4.2.3.1 質量減少率の測定結果 (%)

セメント の種類	水セメ ント比 (%)	前養生 (日)	暴露条件							
			酒田感潮		久里浜感潮		久里浜海浜		東京屋外	
			鉄筋のかぶり厚さ							
			5cm	7cm	5cm	7cm	5cm	7cm	5cm	7cm
NC	40	28	0.26	0.14	0.05	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
	50		0.52	0.48	0.09	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00
	60		0.41	0.45	0.32	0.36	0.03	0.00	0.04	0.00
MC	40		0.00	0.03	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
	50		0.23	0.04	0.67	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00
	60		0.35	0.34	1.06	0.91	0.03	0.00	0.07	0.00
LC	40		0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00
	50		0.07	0.00	0.22	0.09	0.01	0.00	0.00	0.12
	60		0.29	0.85	1.16	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00
NBB	50		0.11	0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
MBB	50		0.10	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LBB	50		0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FC	50		0.19	0.29	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
FCN	50		0.44	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LP	50		0.36	0.41	0.37	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00
NBF	50		0.20	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NC	50	91	—	—	0.10	0.00	—	—	0.00	0.00
LC	50		—	—	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00
NBB	50		—	—	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00
LBB	50		—	—	0.01	0.00	—	—	0.00	0.00
FC	50		—	—	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00
NBF	50		—	—	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00

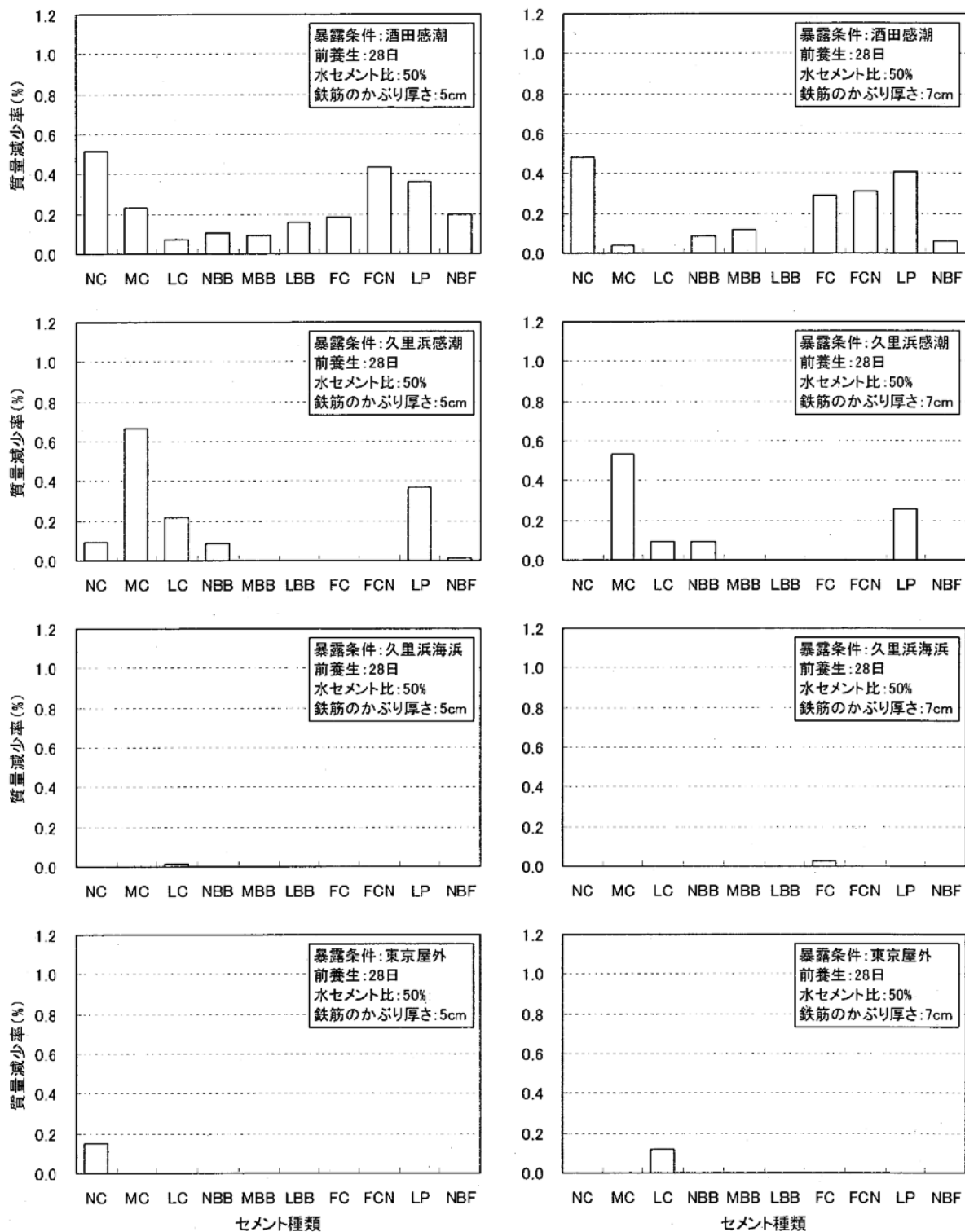


図-4.2.3.1 セメント種類と質量減少率の関係

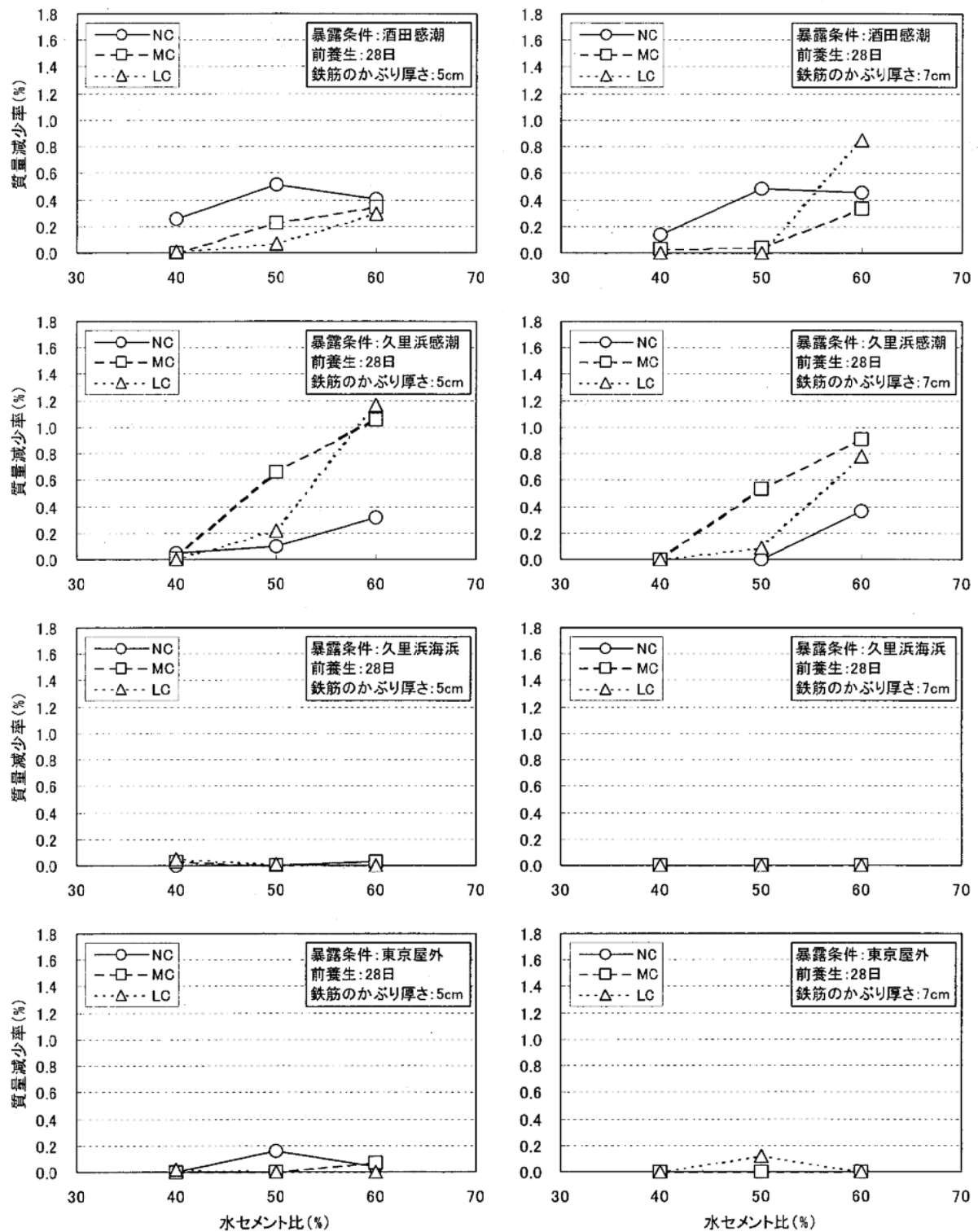


図-4.2.3.2 水セメント比と質量減少率の関係

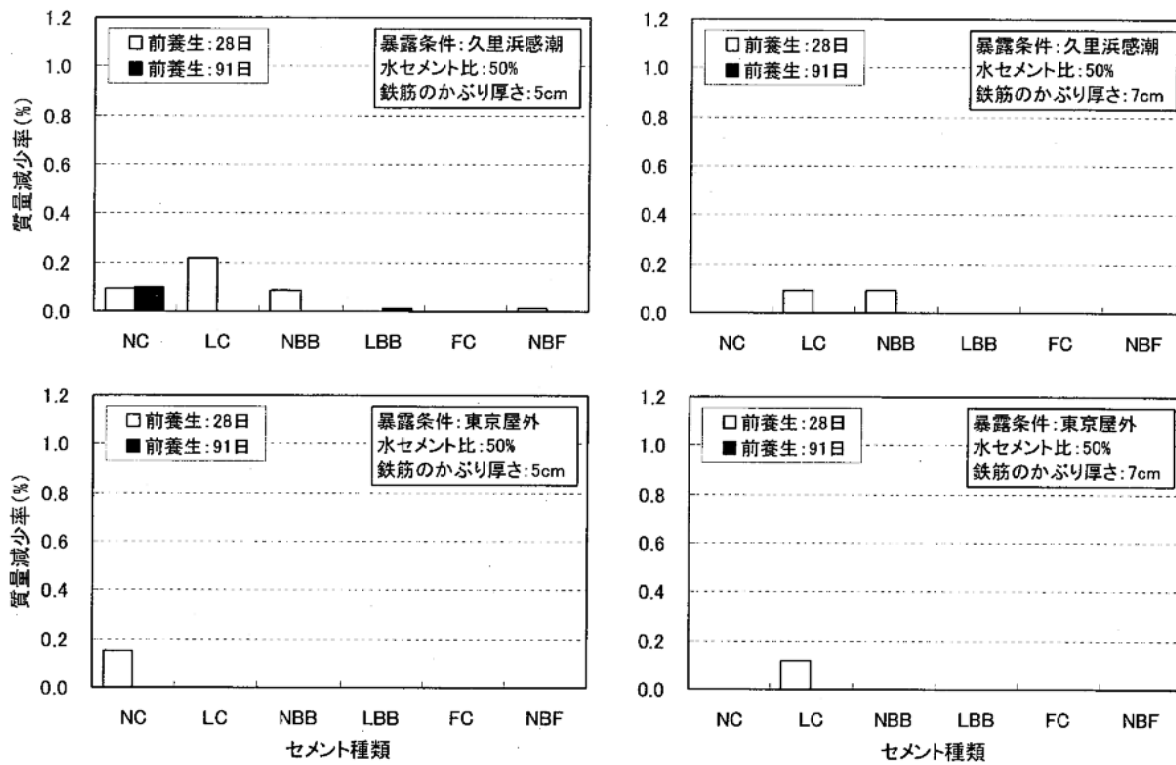


図-4.2.3.3 前養生期間と質量減少率の関係

(2) コンクリートの諸性状と鉄筋の質量減少率

鉄筋の質量減少率を鉄筋のかぶり厚さ毎に検討したが、明確な差が認められなかったため、塩分量および細孔量との関係は鉄筋のかぶり厚さで区別せず、4本(2本のコンクリート供試体より各2本)の鉄筋の平均値で検討した。

1) 塩分量と鉄筋の質量減少率

塩化物イオン浸透深さおよび塩化物イオンの見掛けの拡散係数と質量減少率との関係を図-4.2.3.4に、塩化物イオン濃度と質量減少率との関係を図-4.2.3.5に示す。

塩化物イオン浸透深さと質量減少率の関係については、感潮条件においてポルトランドセメントのデータの多くが塩化物イオンの浸透が供試体中心まで及んでいる結果であったため明瞭な傾向は認められなかった。塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係については、感潮条件において拡散係数が大きいほど質量減少率も大きい傾向がうかがえる。

また、図-4.2.3.5により塩化物イオン濃度と質量減少率の関係について見ると、鉄筋のかぶり厚さよりも深い部分である深さ50mm以上での塩化物イオン濃度との相関が比較的高く、この部分の塩化物イオン濃度が 2kg/m^3 程度を超えた付近から質量減少率が大きくなる傾向が認められた。

2) 細孔量と鉄筋の質量減少率

細孔量と質量減少率との関係を図-4.2.3.6に示す。細孔量と質量減少率との関係において、質量減少率が小さい久里浜海浜および東京屋外では傾向が判然としないが、久里浜感潮および酒田感潮では細孔量が大きいほど質量減少率が大きくなる傾向が認められた。前記のように、ポルトランドセメントにおいては水セメント比の大きい配合では細孔量が大きく、それに対応して質量減少率も大きい結果を反映していると考えられる。

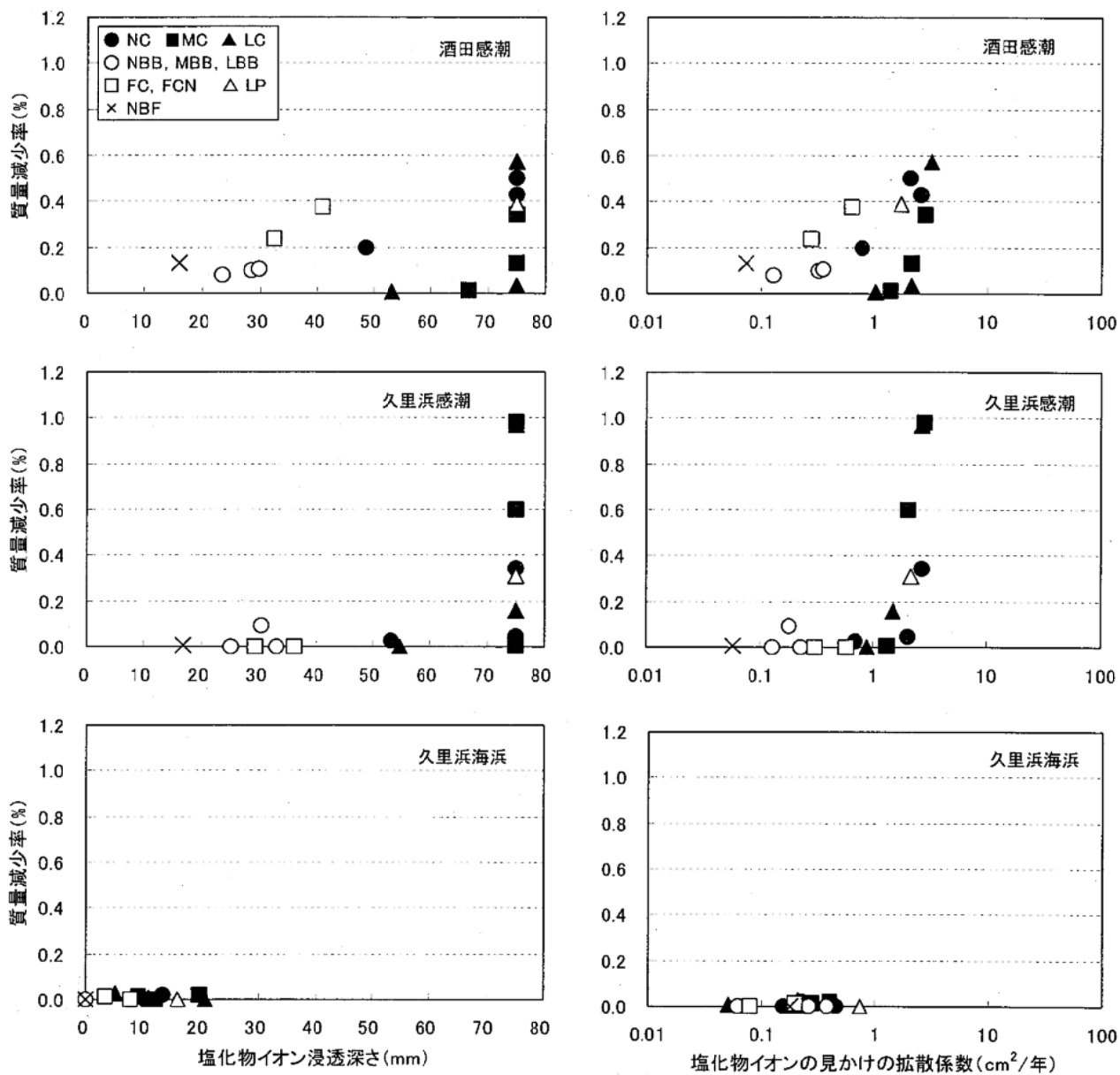


図-4.2.3.4 塩化物イオン浸透深さおよび塩化物イオンの見掛けの拡散係数と
質量減少率との関係

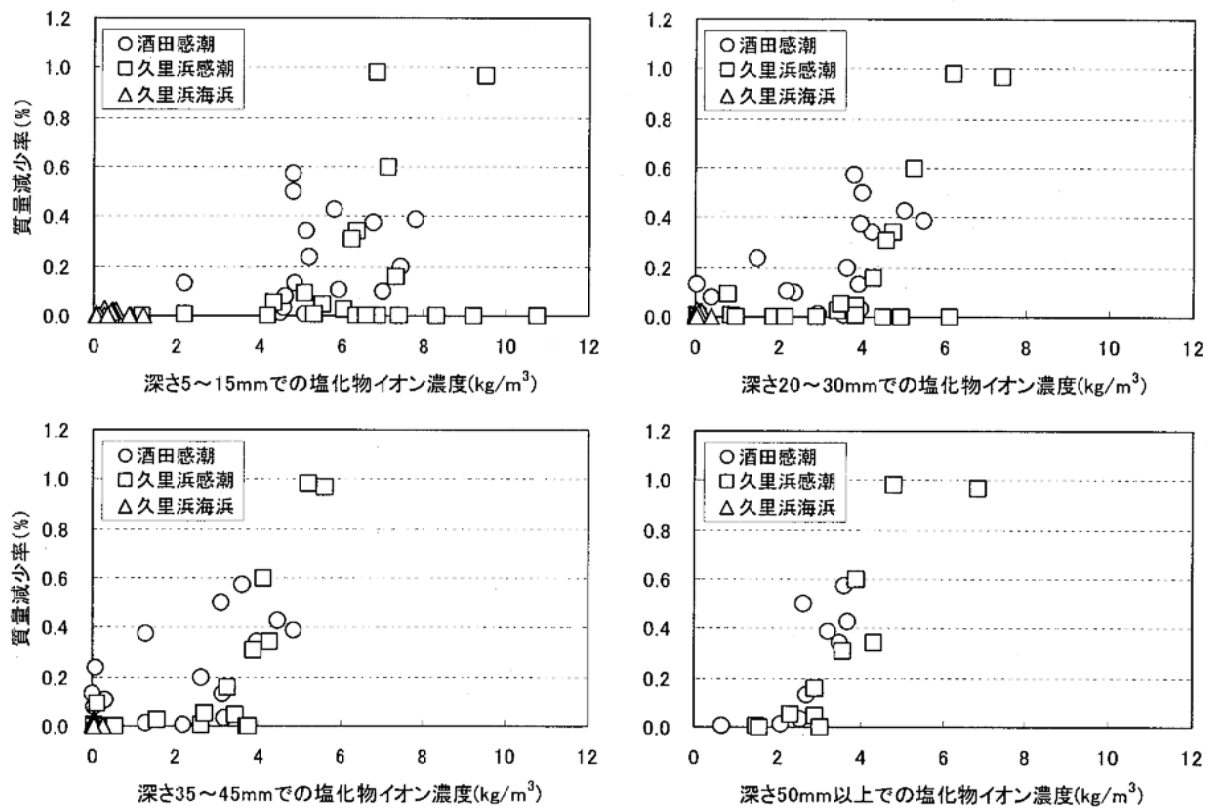


図-4.2.3.5 塩化物イオン濃度と質量減少率との関係

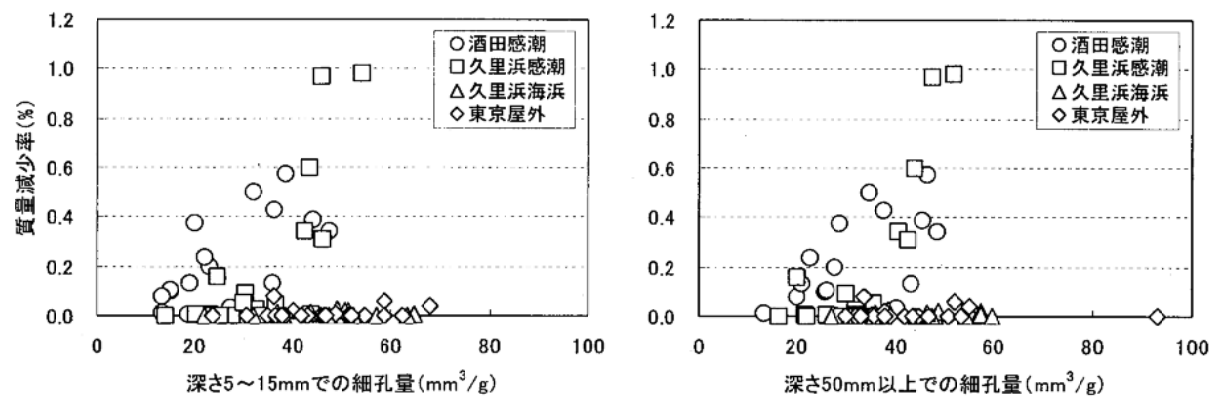


図-4.2.3.6 細孔量と鉄筋の質量減少率の関係

4.2.4 鉄筋の孔食深さ

鉄筋の孔食深さの測定結果を表-4.2.4.1に示す。鉄筋の孔食深さは、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)の鉄筋での最大値で示した。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。試験結果の詳細は、巻末の資料-4に示す。以下に今回の試験によって得られた結果について述べる。

海浜や屋外条件では孔食は認められなかった。また前養生期間91日の場合についても孔食は認められなかった。感潮条件で孔食が認められたのはポルトランドセメントおよび石灰石微粉末を混合したセメントであり、ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末やフライアッシュが混合されたセメントでは孔食は認められなかった。水セメント比と孔食深さとの関係を図-4.2.4.1に示す。水セメント比が大きくなるほど孔食深さが大きくなる傾向が認められる。前養生期間と孔食深さとの関係については、前養生91日において孔食が認められず、前養生28日とで結果に差異が見られたものの、28日での孔食についてもまだあまり進行していないため、現段階では明確な傾向として結論し難いと思われる。

表-4.2.4.1 最大孔食深さの測定結果 (mm)

セメントの種類	水セメント比 (%)	前養生 (日)	暴露条件			
			酒田感潮	久里浜感潮	久里浜海浜	東京屋外
NC	40	28	0.00	0.00	0.00	0.00
	50		1.60	0.00	0.00	0.00
	60		1.07	0.71	0.00	0.00
MC	40		0.00	0.00	0.00	0.00
	50		0.00	1.20	0.00	0.00
	60		1.18	1.04	0.00	0.00
LC	40		0.00	0.00	0.00	0.00
	50		0.00	0.30	0.00	0.00
	60		1.10	0.90	0.00	0.00
NBB	50		0.00	0.00	0.00	0.00
MBB	50		0.00	0.00	0.00	0.00
LBB	50		0.00	0.00	0.00	0.00
FC	50		0.00	0.00	0.00	0.00
FCN	50		0.00	0.00	0.00	0.00
LP	50		0.68	0.42	0.00	0.00
NBF	50		0.00	0.00	0.00	0.00

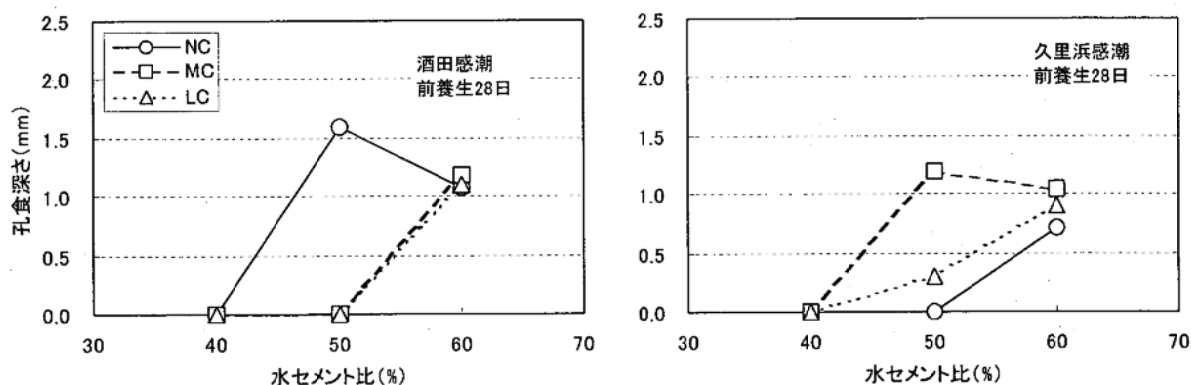


図-4.2.4.1 水セメント比と孔食深さの関係

4.2.5 鉄筋の自然電位および分極抵抗

暴露開始時から約3年後まで実施した連続計測における鉄筋の自然電位変化を図-4.2.5.1に示す。暴露半年後頃から全体的に卑の方向へ変化する傾向を示している。またセメントの種類に関係なく自然電位は夏季に卑になる傾向が認められる。

暴露約2年後から3年後まで実施した定期的な計測における自然電位、コンクリート抵抗および腐食速度（分極抵抗から算出）変化を図-4.2.5.2、図-4.2.5.3、図-4.2.5.4に示す。

自然電位は、 $-200\text{mV} \sim -600\text{mV}$ 程度の値を示し、図-4.2.5.1と同様に夏季に卑になる傾向が見られる。また同一試験体での変動幅は概ね 200mV 程度であるが、一部 300mV 程度のものもあり、季節的変動はかなり大きいと言える。かぶり厚さの影響は判然としない。セメント種類の影響についてみると、ポルトランドセメントの場合では、NCに比べMCやLCはやや卑の傾向にある。また石灰石微粉末を混合したLPは、NCとほぼ同程度の値を示している。高炉スラグ微粉末を混合した場合は、NCに比べてNBBはやや貴、MBBはほぼ同程度、LBBではやや卑の傾向にあったが最終的にはNCと同程度か、やや貴の傾向になった。フライアッシュを混合した場合は、NCとほぼ同程度である。高炉スラグ微粉末とフライアッシュを混合した三成分系のNBFはNCよりもやや貴の傾向を示した。なお図-4.2.5.2中には、ASTMにおいて90%以上の確率で腐食と判定される値を示したが、今回の自然電位測定値はほぼこのラインよりも卑の結果である。

コンクリート抵抗については、自然電位と同様に季節の影響を受けており、夏季に小さくなる傾向を示す。また自然電位と同様にかぶり厚さの影響は判然としない。セメント種類の影響について見ると、三成分系>フライアッシュ混合>高炉スラグ微粉末混合>ポルトランドセメントの順であり、自然電位の場合に比べてセメント種類による影響が明瞭に認められる。ポルトランドセメントの場合では、NCに比べてMC、LCはやや小さい傾向を示した。石灰石微粉末を混合したLPは、MC、LCと同程度の値であった。

腐食速度については、自然電位やコンクリート抵抗と異なり季節による変動はあまり明瞭でない。かぶり厚さの影響は、自然電位やコンクリート抵抗と同様に認められない。セメント種類の影響について見ると、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合した場合、またその両者を混合した三成分系のセメントはNCに比べて腐食速度が小さく、一方、石灰石微粉末を混合したLPはポルトランドセメントよりも腐食速度が大きい。ポルトランドセメントの場合では、かぶり 5cm の場合でNCに比べてMC、LCの腐食速度はやや大きい傾向であったが、かぶり 7cm の場合では各ポルトランドセメントの腐食速度はあまり差がなかった。なお図-4.2.5.4中には、ヨーロッパにおける基準¹³⁾による腐食程度の判定ラインを示したが、今回の結果では、LPの腐食速度は同基準による激しい腐食の領域にあった。

また、同時期に測定した海水循環水槽中の海水水温および溶存酸素量の変化を図-4.2.5.5に示す。これによれば、海水水温は夏に上昇し、一方、溶存酸素量は減少している。コンクリート抵抗は環境温度の上昇と共に減少する¹⁴⁾。また、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。以上のことから、コンクリート抵抗が環境温度（海水温度）により変化し、その影響を受け自然電位の値も変化したものと考えられる。また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。今回暴露環境は干満帯であるが、1日約6時間は浸水しており、また日陰に位置しているため、比較的湿潤な環境である。鉄筋表面への酸素供給量は常時少ないと考えられる。また、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。この溶存酸素の影響のため、自然電位の値は常時比較的に卑な値を示し、さらに夏季で卑な傾向を示していると考えられる。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¹⁵⁾、この影響は小さいと考えられる。

図-4.2.5.6に暴露5年時の割裂前に計測した自然電位、コンクリート抵抗および腐食速度を示す。先に示した暴露約2年後から3年後までの結果と比べて若干傾向に差が見られた。すなわち、自

然電位については、NC に比べて MC、LC はやや卑の傾向にあり、LP を除く混合セメントは NC と同程度か若干貴の傾向であり、石灰石微粉末を混合した LP は MC、LP と同様に NC よりも卑の傾向を示した。コンクリート抵抗については、先に示した暴露約 2 年後から 3 年後までの結果に比べてポルトランドセメントや LP では値がやや大きくなったため他の混合セメントとの差は小さくなった。高炉スラグ微粉末とフライアッシュを混合した三成分系の NBF は、暴露約 2 年後から 3 年後までの結果と同様に他のセメントに比べて大きい値を示している。腐食速度については、MC、LC および LP では、暴露約 2 年後から 3 年後までの結果に比べて値が大きくなっており、NC との差が拡大していた。

図-4.2.5.7 に自然電位と発錆面積率の関係を示す。自然電位がある値以下（ここでは-500mV 程度よりも卑）になった場合に腐食が生じている。このことは、今回のような比較的湿潤な環境においても、自然電位の測定が鉄筋腐食のモニタリングに有効であることを示すものである。ここで、ASTM C876-95 によれば、自然電位が-284mV（今回使用した照合電極(海水-銀塩化銀電極)を用いた場合の換算値)よりも卑であると「90%以上の確率で腐食」と判定されるが、今回の値は全体的にそれよりも卑であった。これは、前述したように、暴露環境が比較的湿潤時間が長い干満帯であったため酸素の供給量が少なく、値が卑となったものと考えられる。すなわち、コンクリートが比較的湿潤な環境に位置する場合において、自然電位により腐食状況を判定する場合、そのしきい値は ASTM C876-95 に示されている値よりも卑な値となることに注意する必要があると考えられる。

図-4.2.5.8 に腐食速度と発錆面積率の関係を示す。自然電位同様に腐食速度がある値以上になると、腐食が生じている。このことは、分極抵抗の測定が鉄筋腐食のモニタリングに有効であることを示すものである。ここで、ヨーロッパにおける基準¹³⁾によれば、腐食速度が $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超えると「激しい腐食」と判定される。今回腐食したものはそれをはるかに上回っていた。なお、同様の供試体を 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¹⁶⁾においても、腐食速度が $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超えているにも関わらず、腐食は軽微あるいはほとんど生じていない場合が見られた。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。これは、式-3.7.5.1 における定数 K は、鉄筋周囲の環境によって変化するものであり、今回試験を行った環境における K の値は今回用いた 0.026(V)よりも小さい可能性が考えられる。

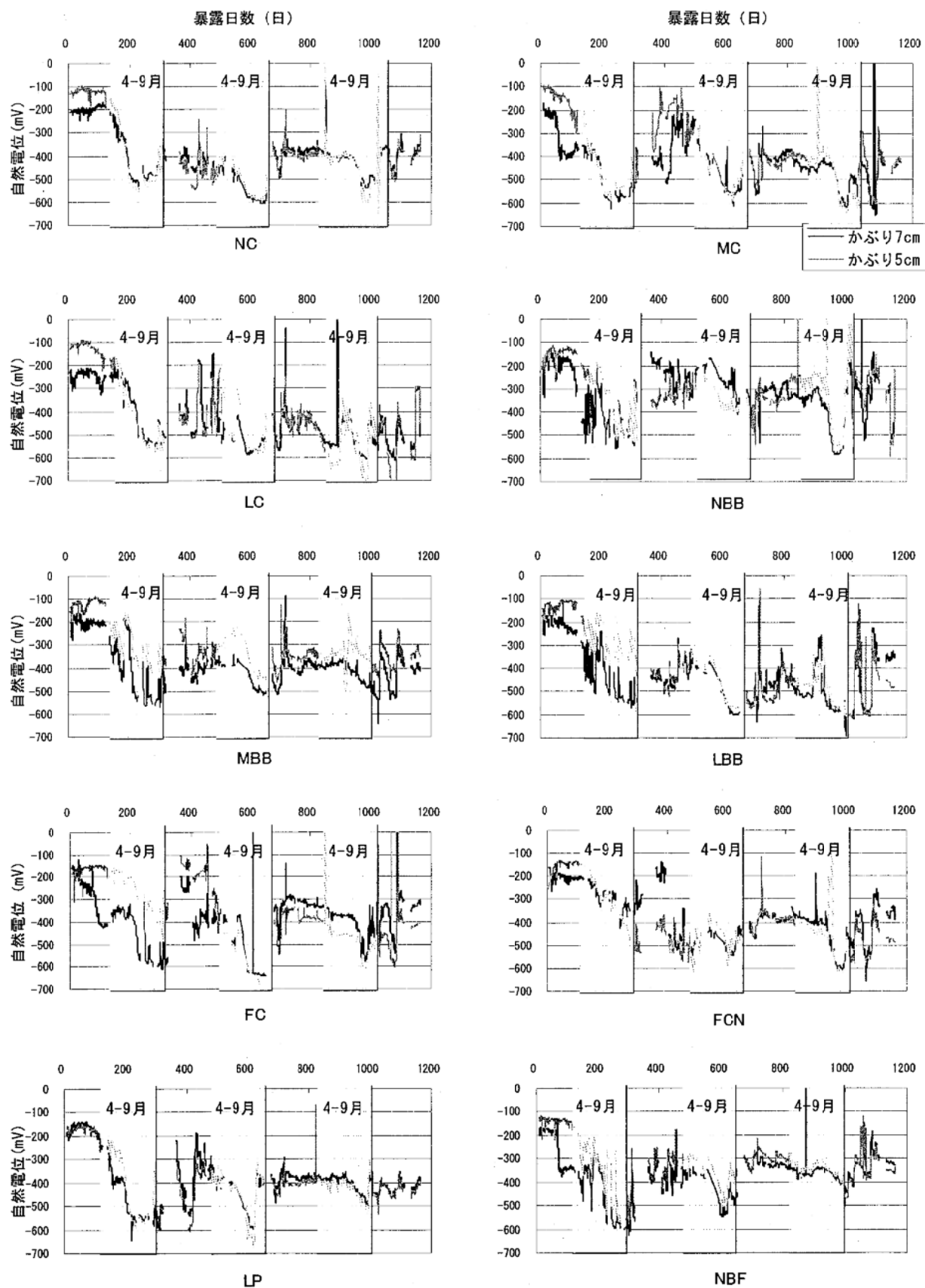


図-4.2.5.1 自然電位変化（暴露開始（1998.10.21）から約3年間）

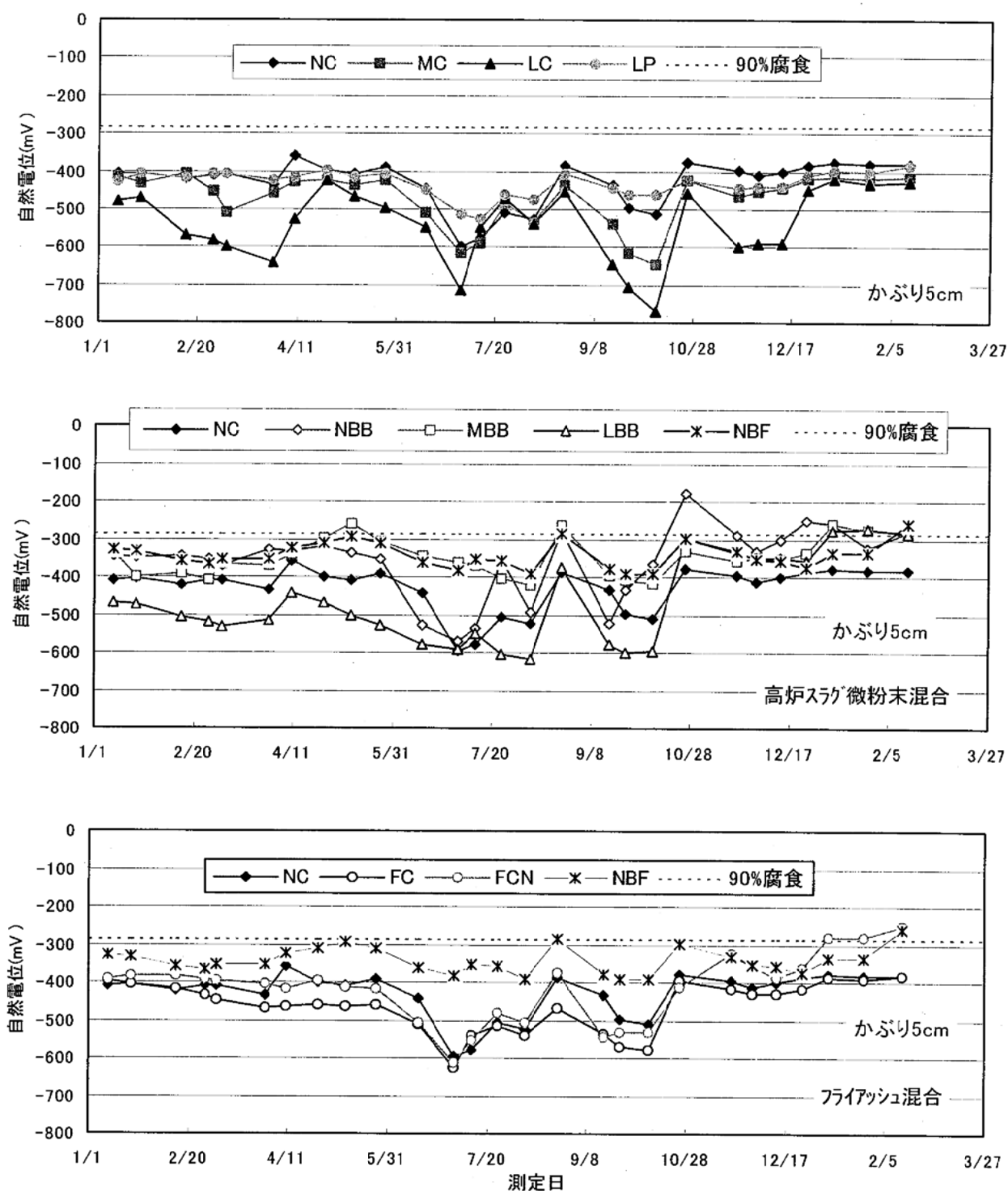


図-4.2.5.2 (1) 自然電位変化 (かぶり 5cm)

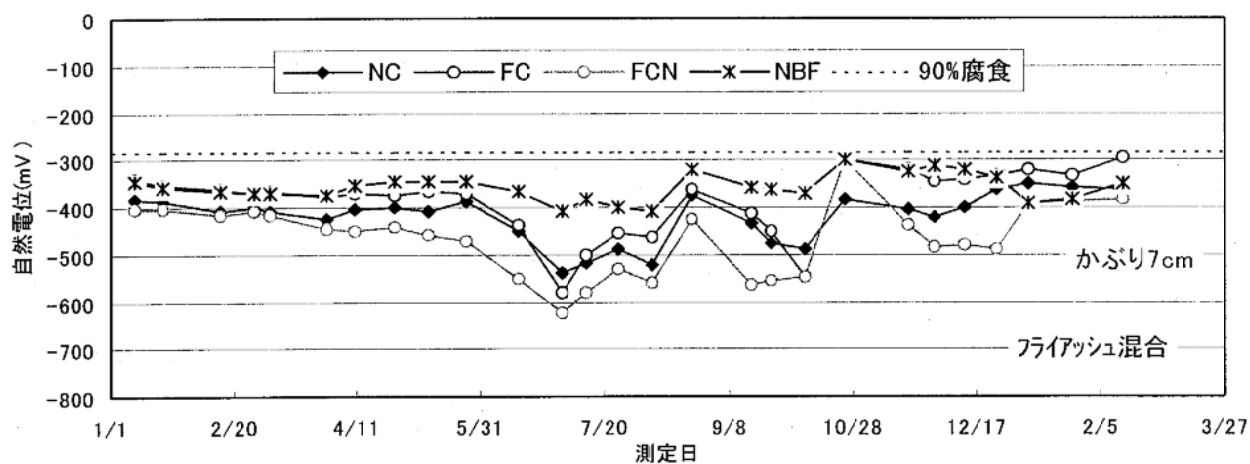
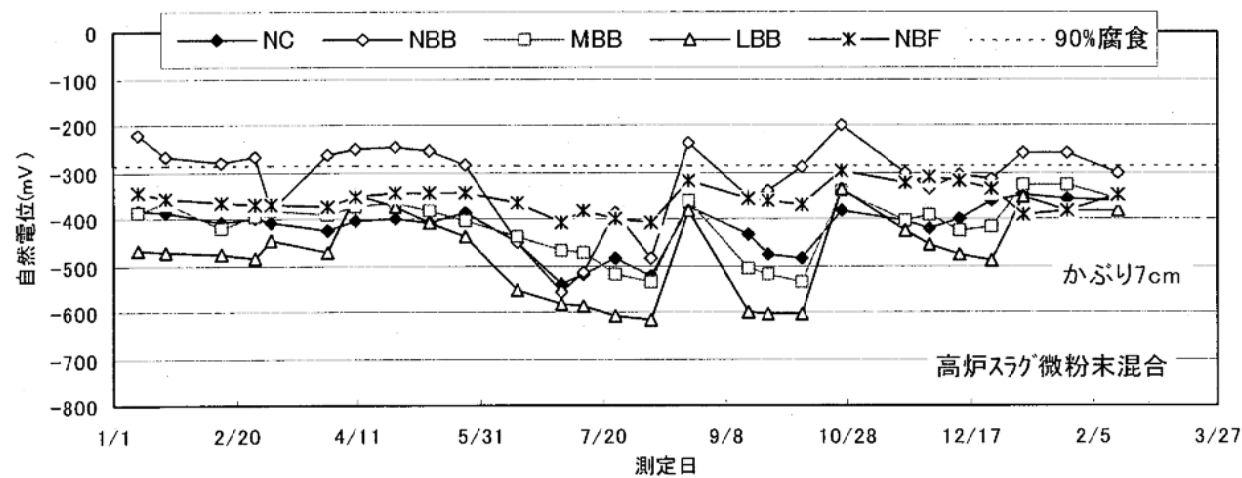
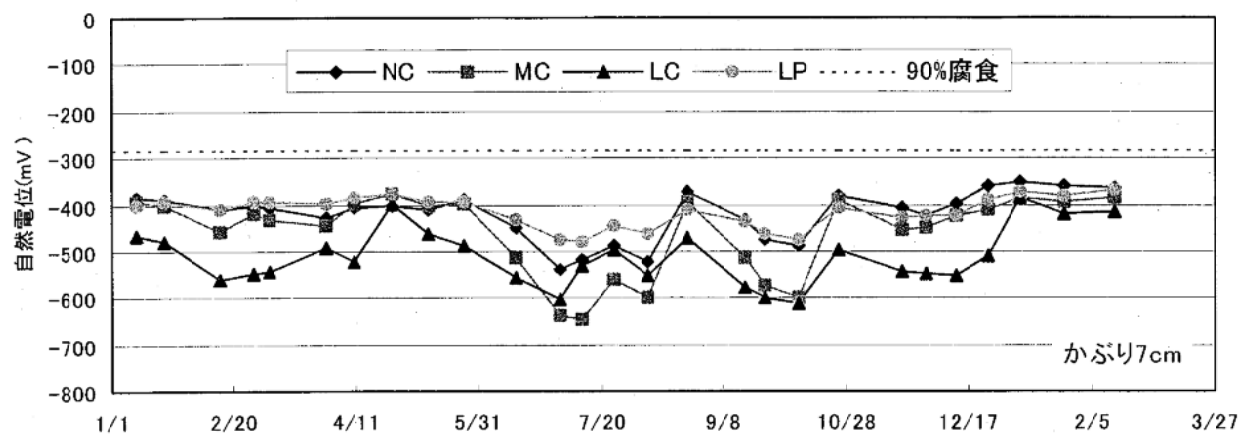


図-4.2.5.2 (2) 自然電位変化 (かぶり 7cm)

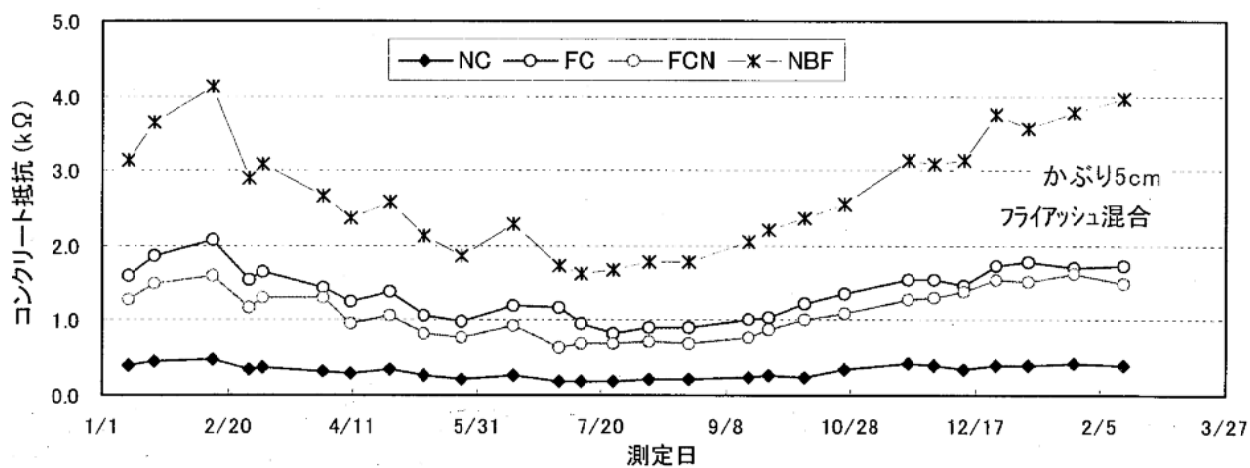
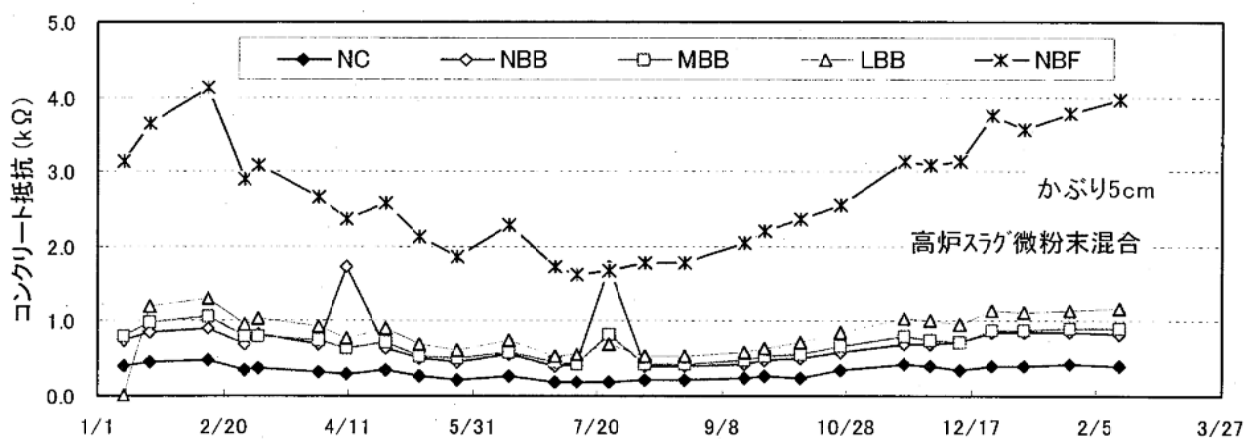
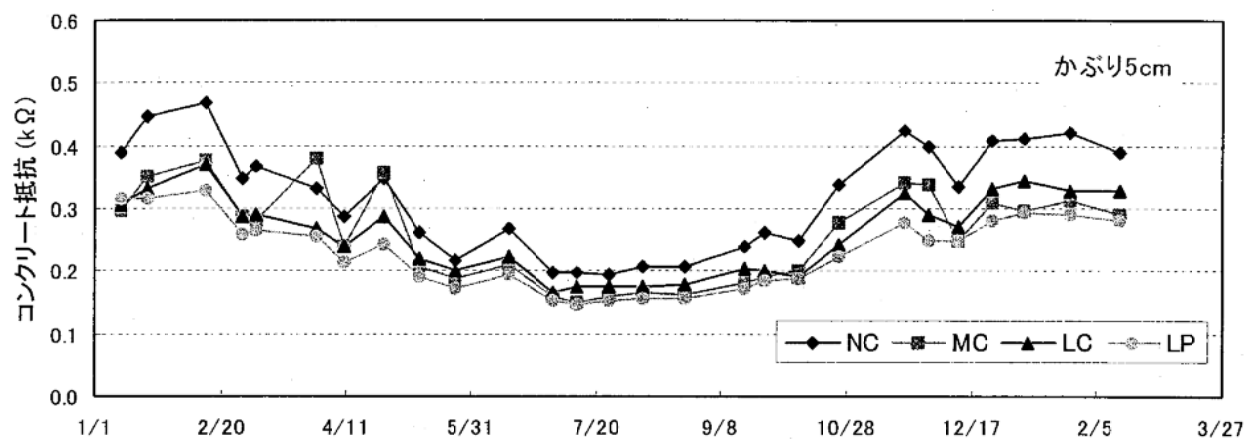


図-4.2.5.3 (1) コンクリート抵抗変化 (かぶり 5cm)

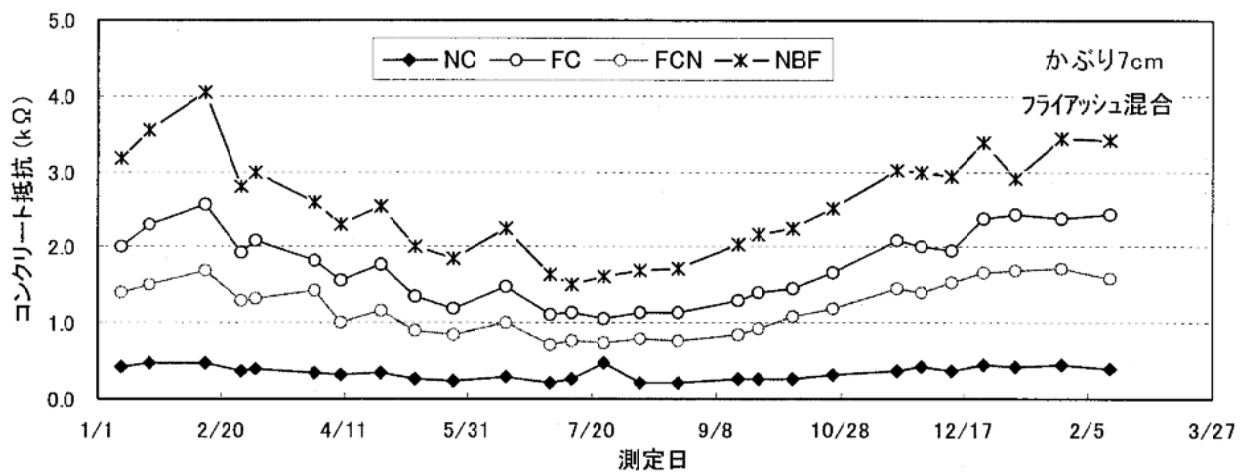
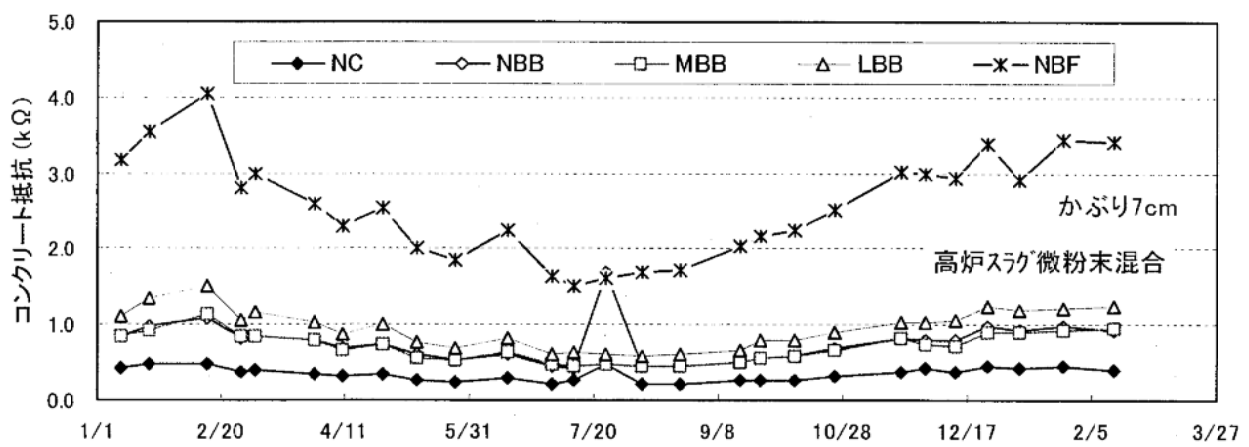
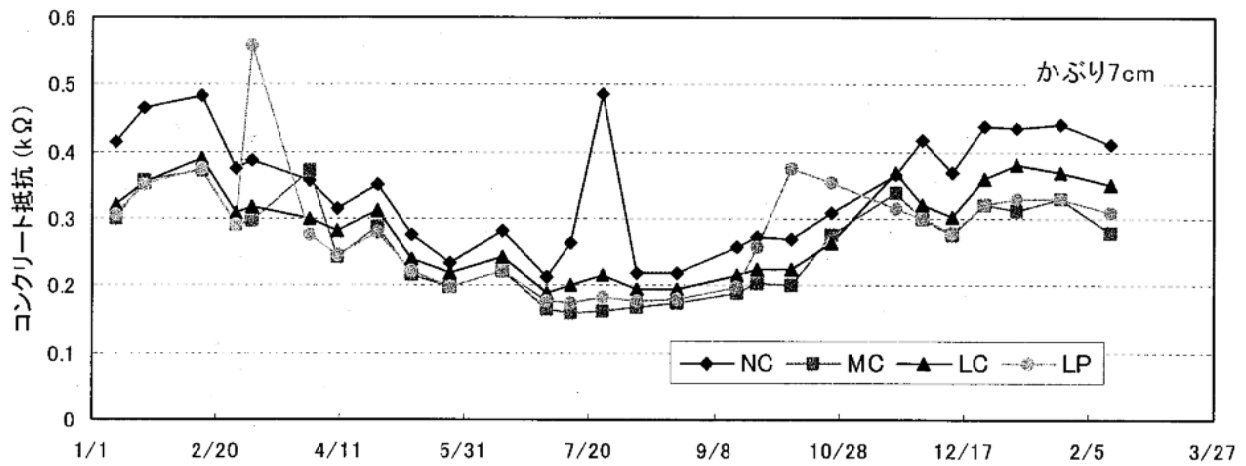


図-4.2.5.3 (2) コンクリート抵抗変化 (かぶり 7cm)

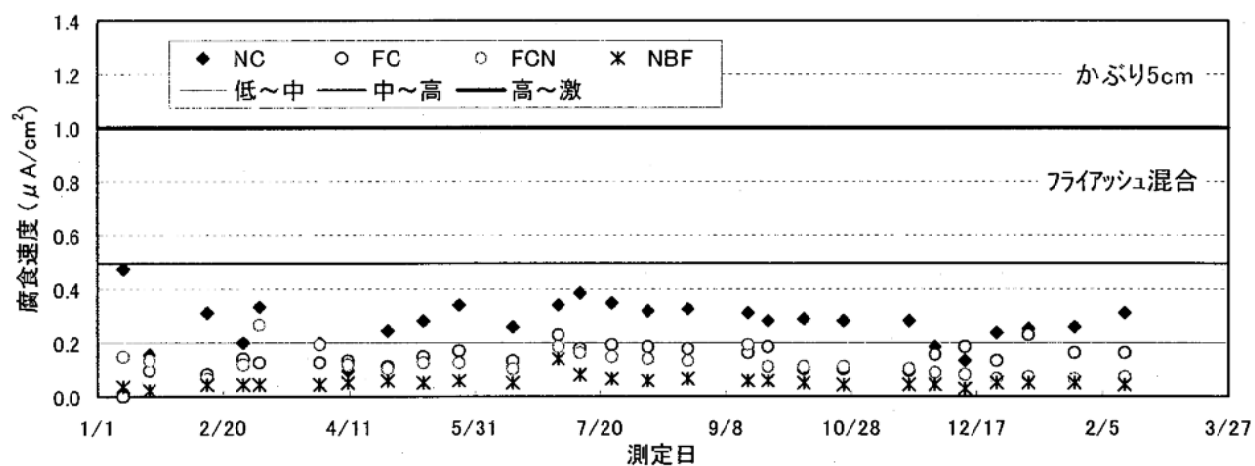
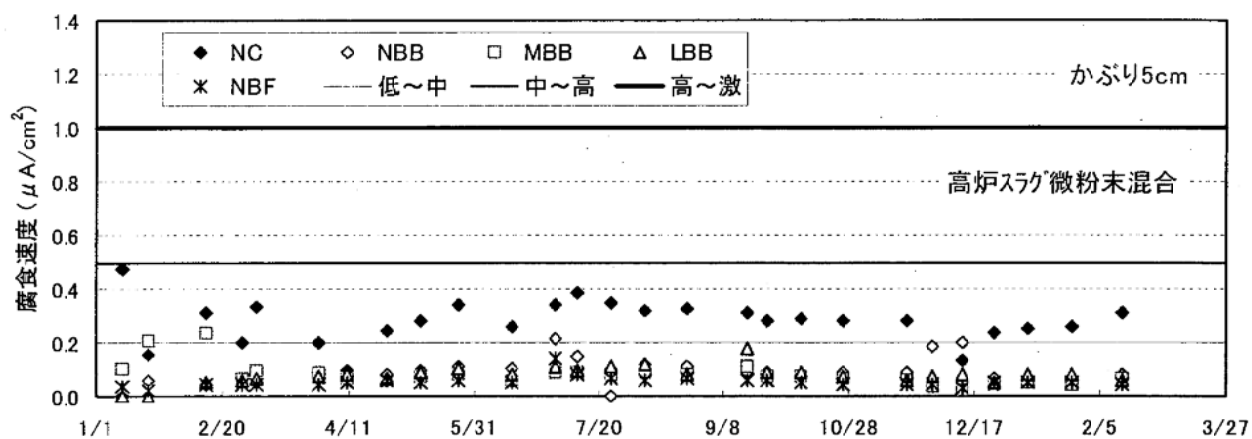
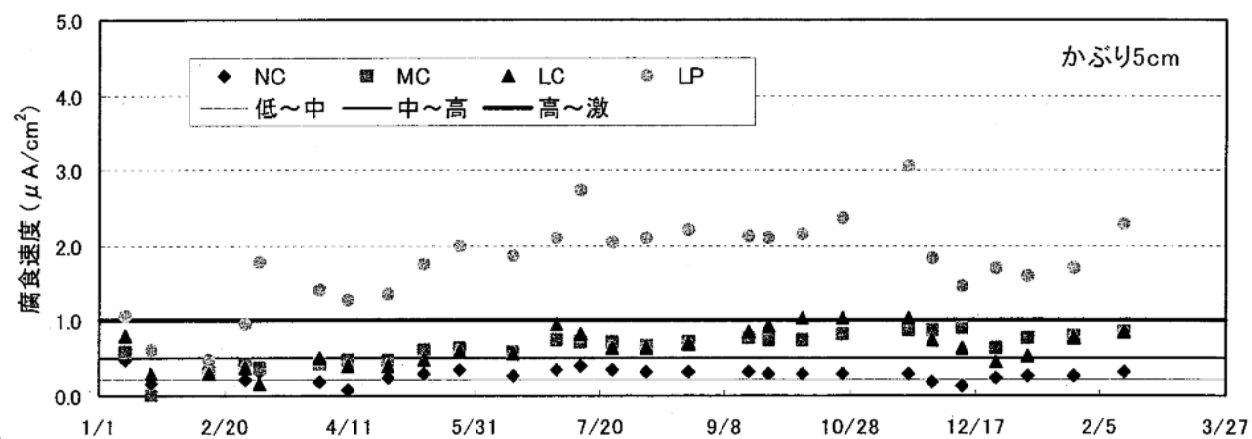


図-4.2.5.4 (1) 腐食速度変化 (かぶり 5cm)

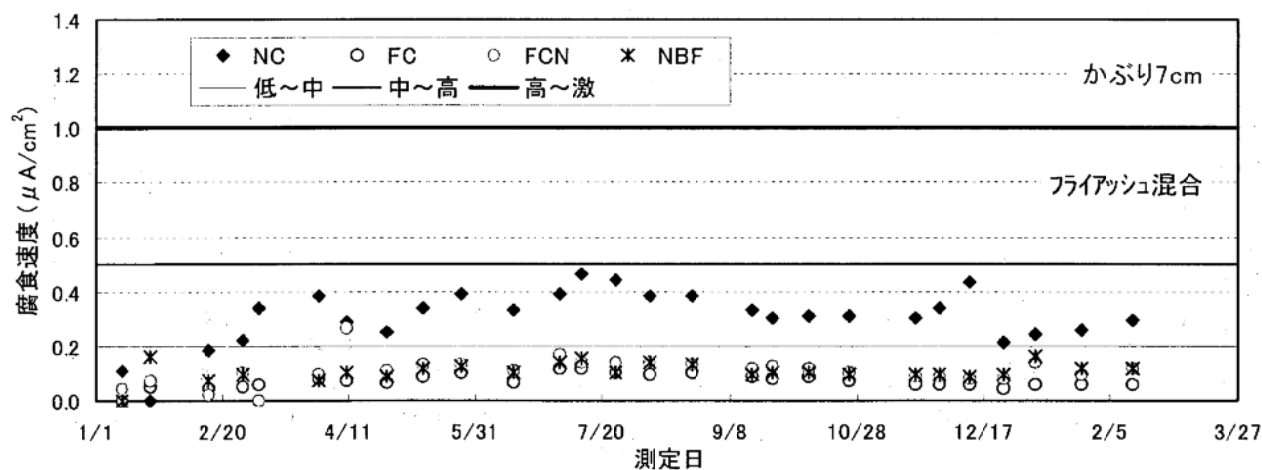
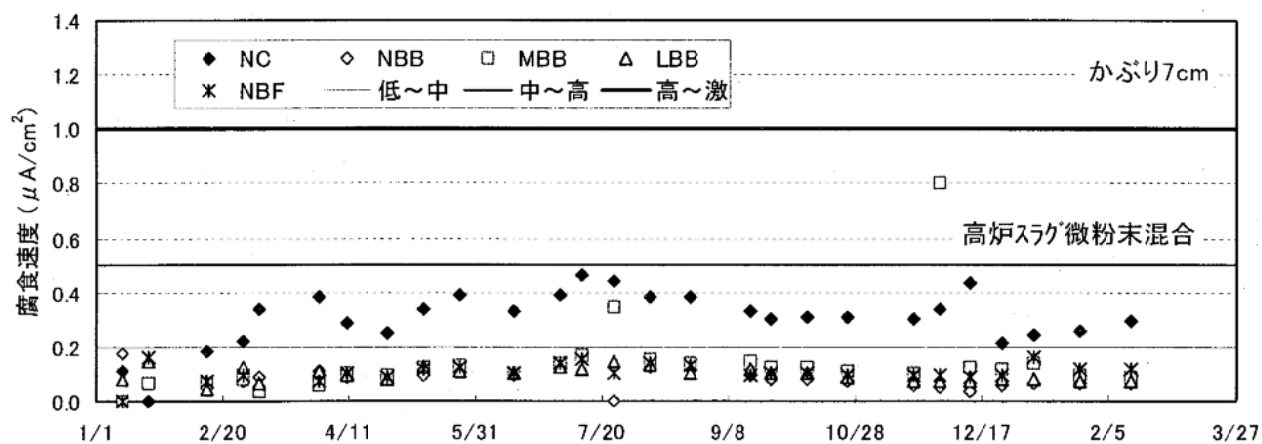
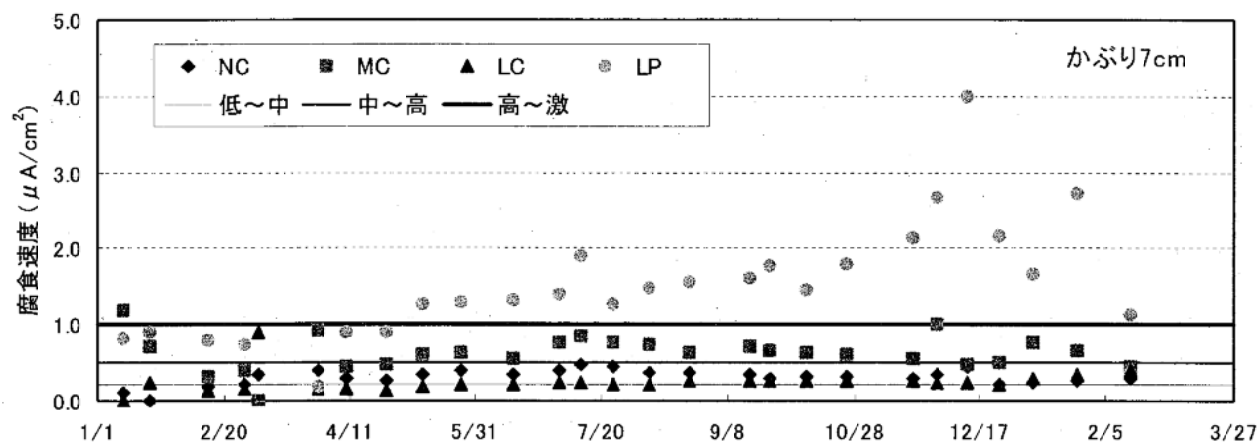


図-4.2.5.4 (2) 腐食速度変化 (かぶり 7cm)

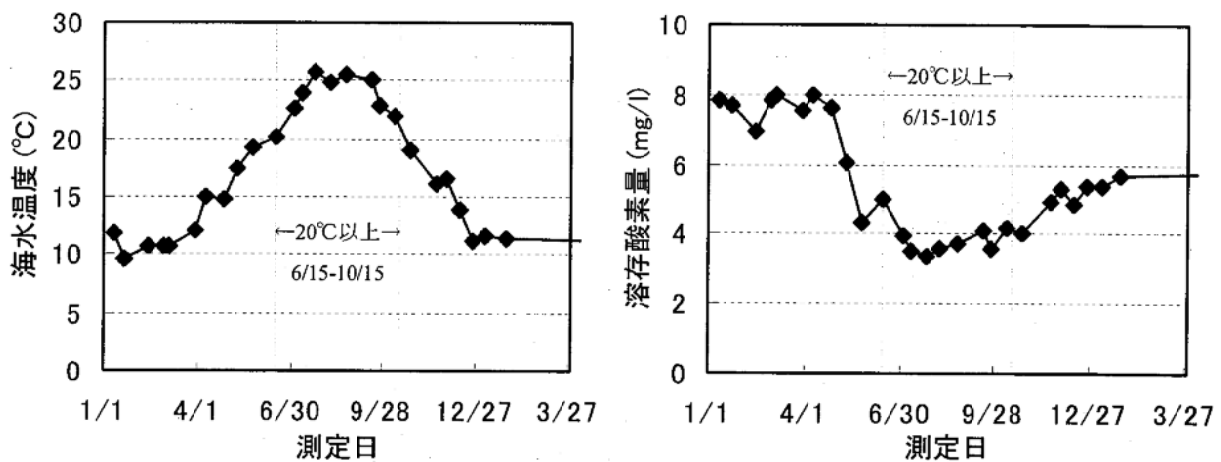


図-4.2.5.5 海水温度と溶存酸素量の変化

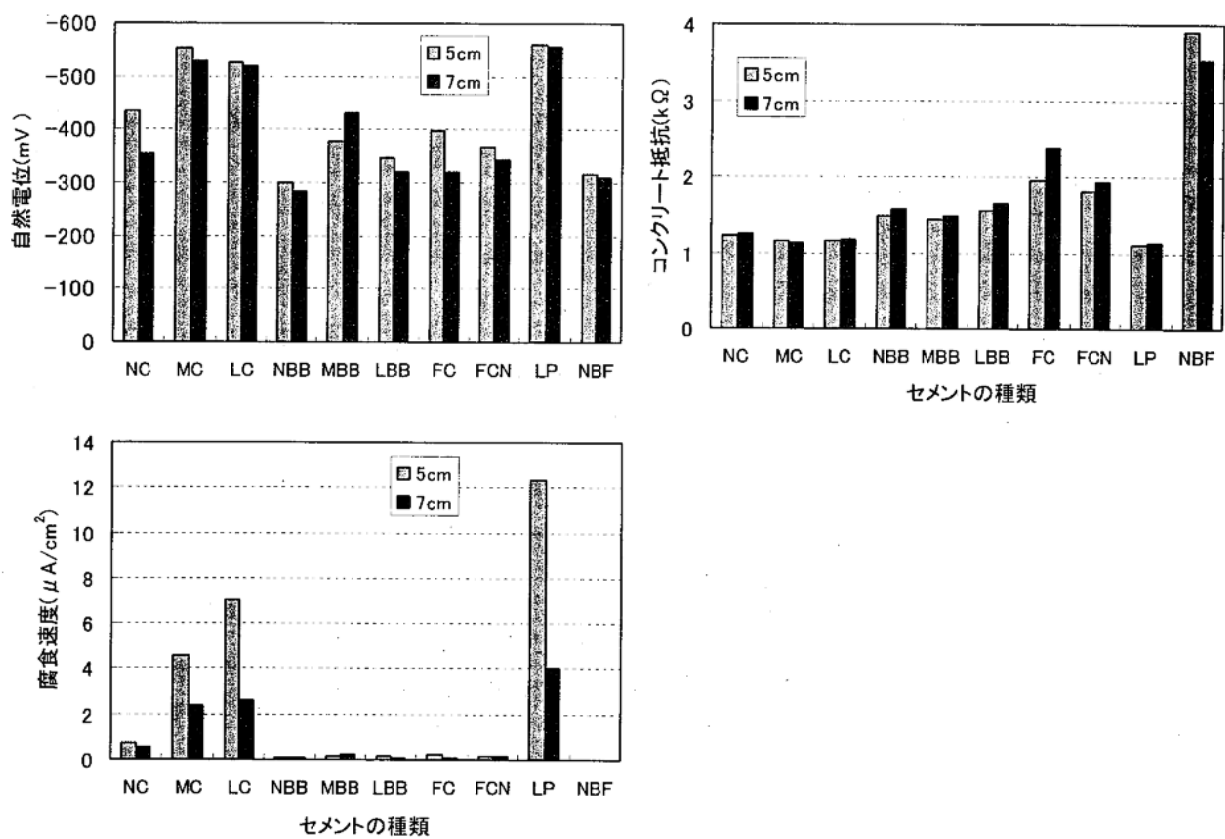


図-4.2.5.6 暴露5年時の割裂前に計測した自然電位,コンクリート抵抗および腐食速度

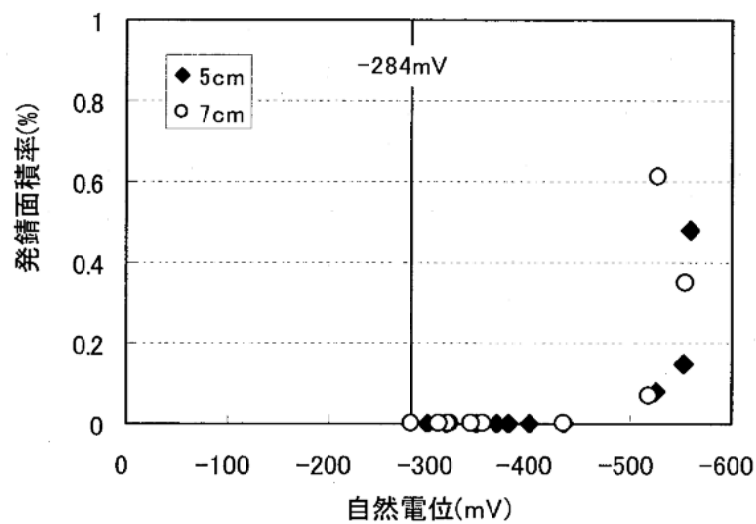


図-4.2.5.7 自然電位と発錆面積率の関係

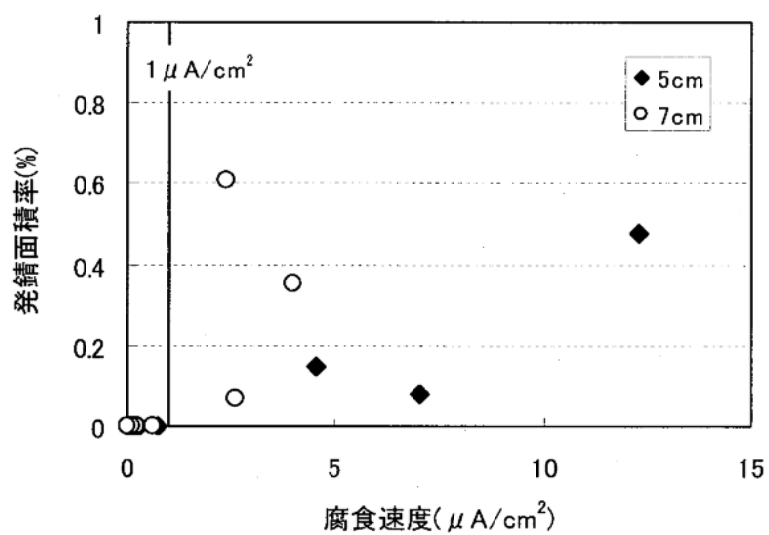


図-4.2.5.8 腐食速度と発錆面積率の関係

5. 結言

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セメント微粉末をそれぞれ 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、スランプ 8cm、空気量 4.5%、ポルトランドセメント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セメント比 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、一部の条件ではこれを 91 日とした場合も加えている。暴露期間は 10 年を予定しているが、今般、各条件下で 5 年間暴露したコンクリート供試体に対して、外観観察、強度特性の変化、中性化の進行、塩化物イオンの浸透、水和生成物や細孔構造の変化、鉄筋発錆状況等についての検討を行った。

結果を試験項目毎にまとめると以下に示すとおりであり、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合した二成分系、また両者を混合した三成分系の混合セメントでは、中性化が速い一方で、塩化物イオンの浸透はポルトランドセメントに比べて少なく、海洋環境下での鉄筋腐食抑制の面では有利な傾向にあること、石灰石微粉末を混合したセメントでは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合した場合のような鉄筋腐食抑制に対する効果は認められないこと等、セメントあるいは混合材種類毎の概略の傾向を把握することが出来た。

中間材齢である暴露期間 5 年では、中性化の進行や鉄筋腐食の程度もまだ少なく、最終的な結論は最終材齢である暴露期間 10 年の結果を待つ必要があるが、今回得られた結果については、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える。

[供試体の外観観察]

供試体の外観観察では、セメント種類、コンクリート配合に関わらず、どの暴露条件下でもひび割れ等の異常は認められない。

[強度特性]

(1) 標準養生条件下では各ポルトランドセメントともにセメント水比の増大に対応して長期強度も増進した。特にセメント水比が大きい場合に強度の伸びが大きい。標準養生 5 年での圧縮強度の大きさは、 $LC > MC > NC$ の順であり、ビーライト含有量の多い低発熱型のセメントほど長期強度が大きいことが確認された。

(2) 暴露条件下、特に海浜および屋外条件では、標準養生の場合に比べてセメント水比増大に対応する強度増大の程度が少なく、セメント水比が大きいほど標準養生との差も大きくなった。標準養生との差は、 $LC > MC > NC$ の順であり、標準養生での強度の伸びが大きいセメントほど差が大きくなった。また水セメント比が大きい場合には、海浜および屋外条件に比べて感潮条件での強度発現はやや小さい傾向にあった。

(3) 高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合したセメントでは、ポルトランドセメントに比べて感潮条件下での強度発現は概して良好であるが、海浜や屋外条件下での強度発現は小さい傾向にある。

(4) 石灰石微粉末を混合したセメントは、実質の水セメント比が大きいため他のセメントに比べて強度が小さい傾向にある。ただし乾燥の影響を受ける海浜および屋外では、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合したセメントとの強度差は小さくなった。

(5) 前養生期間の差が強度特性に及ぼす影響については、感潮条件下では強度発現の遅いセメントの場合に前養生期間が長い場合のほうが暴露後の強度が大きい傾向が見られた。海浜や屋外条件下では混合セメントの場合に前養生期間の影響が見られなかった。

(6) 圧縮強度と静弾性係数との関係については、感潮条件下では、標準養生の場合と同様に土木学会コンクリート標準示方書に記載の関係式よりもやや大きい傾向にあった。一方乾燥の影響を受ける海浜や屋外条件では、同関係式よりも小さくなった。

[中性化]

(1) 感潮条件下ではほとんど中性化は認められなかった。海浜や屋外条件では混合セメントで最大 10mm 程度の中性化が認められた。

(2) ポルトランドセメントでの中性化深さは、概略 $LC > MC > NC$ の傾向であり、強度発現特性の影響がうかがわれた。

(3) 高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合したセメントでは、ベースのポルトランドセメントに比べて中性化が大きい。両者を混合した三成分系セメントではさらに中性化が大きい。

(4) 石灰石微粉末を混合したセメントの中性化深さはフライアッシュを混合した場合と同程度であった。

(5) 前養生期間の差が中性化深さに及ぼす影響は認められない。

(6) 混合材の種類と混合量を考慮した有効水結合材比と中性化深さについては、ほぼ直線関係が得られ、有効水結合材比による中性化深さの予測が有効であることが確認される。ただし高炉スラグ微粉末とフライアッシュを混合した三成分系セメントの場合は、同一有効水セメント比においても他のセメントに比べて中性化が大きい傾向にあった。

[塩化物イオン浸透性]

(1) ポルトランドセメントでは、感潮条件下での塩化物イオン浸透が大きく、水セメント比 50%、60% の場合で供試体中心部まで塩化物イオンが到達している結果であった。海浜条件下では 5~20mm 程度の浸透深さであり、水セメント比が大きくなると浸透深さ、拡散係数が大きくなる傾向が認められた。

(2) 高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合したセメントはポルトランドセメントに比べて塩化物イオン浸透深さが小さく、感潮条件下でも浸透深さは概ね 40mm 以下であった。塩化物イオンの見掛けの拡散係数についても、ポルトランドセメントに比べて小さい結果となり、混合材による塩化物イオン浸透抑制効果が認められた。

(3) 海浜条件下では高炉スラグ微粉末を混合したセメントは塩化物イオン浸透が認められなかった。一方フライアッシュを混合したセメントはわずかながら浸透が見られた。

(4) 高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した三成分系のセメントは、さらに塩化物イオン浸透抑制効果が大きかった。

(5) フライアッシュの場合、Ⅲ種品を用いた場合はⅡ種品を用いた場合に比べてやや塩化物イオン浸透深さ、拡散係数が大きい結果となった。

(6) 石灰石微粉末を混合したセメントの塩化物イオン浸透深さは各ポルトランドセメントと同程度であり、塩化物イオン浸透抑制効果は認められなかった。ただし同一有効水結合材比の NC と比較すると拡散係数は小さい傾向にあると考えられる。

(7) 前養生期間の差が塩化物イオン浸透深さ、拡散係数に及ぼす影響は認められなかった。

(8) 感潮条件下では、水セメント比 50%、60% のポルトランドセメント、および石灰石微粉末を混合したセメントの場合に、鉄筋かぶり 5 cm および 7 cm の位置での塩化物イオン濃度が、土木学会コンクリート標準示方書による鉄筋腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 を超える結果となってい

た。

[X 線回折 (ポルトランドイトおよびカルサイト)]

(1) 混合セメントセメントでは、暴露開始前のポルトランドイトの相対強度に比べて暴露後では概して相対強度が小さくなる傾向を示し、特に三成分系セメントで顕著であった。

(2) 暴露後のカルサイトの相対強度については、混合セメントセメントの多くで、供試体中心部よりも表面部がやや大きい傾向が見られた。

(3) 水セメント比の影響、前養生期間の影響については、明瞭な傾向は認められなかった。

[X 線回折 (エトリンガイト、モノサルフェート水和物、フリーデル氏塩)]

(1) エトリンガイトおよびモノサルフェート水和物については、セメント種類や暴露条件などによる明瞭な傾向は認められなかった。

(2) フリーデル氏塩については、海浜および屋外条件に比べて感潮条件で大きな相対強度を示した。またポルトランドセメントでは、供試体中心部と表面部でフリーデル氏塩の相対強度が同程度であるのに対して、混合セメントでは表面部に比べて中心部が小さく、混合セメントでは塩化物イオンの内部への浸透が抑制されていることがうかがえた。

(3) 各ポルトランドセメントの比較では、NC に比べ MC、LC でフリーデル氏塩の相対強度がやや小さい結果であった。

[細孔量]

(1) 暴露開始時の細孔量については、NC は MC、LC よりも少なく、また水セメント比が大きい場合には細孔量も多い。またベースのポルトランドセメントが MC や LC の場合は、スラグ微粉末の混合により暴露開始時の細孔量はやや減少した。フライアッシュや石灰石微粉末を混合した場合は、ベースの NC よりも細孔量が多い結果であった。

(2) 暴露後の細孔量については、感潮条件下において NC、MC は暴露開始時と同程度であり、LC については細孔量が減少した。海浜および屋外条件下では暴露開始時よりもやや細孔量が増加した。また暴露開始時と同様に、水セメント比が大きい場合には暴露後の細孔量も多い。

(4) 高炉スラグ微粉末を混合した場合は、暴露条件によらずベースのポルトランドセメントよりも細孔量がやや少なかった。フライアッシュを混合した場合は、感潮条件下ではベースの NC よりも細孔量が減少傾向にあったが、海浜および屋外条件の場合には逆の結果も見られた。高炉スラグ微粉末とフライアッシュの両者を混合した NBF は高炉スラグ微粉末を混合した場合とほぼ同様の傾向であったが、屋外の場合では表層部の細孔量が多い結果も見られた。

(5) 石灰石微粉末を混合した場合は、暴露開始時、暴露後ともにベースの NP よりも細孔量が多かった。

(6) 前養生期間を長くした場合は、例外もあるが、総じて暴露前の細孔量は減少し、暴露後も概ね同様の傾向が認められた。

(7) 感潮条件下では、細孔量が多いほどコンクリートの圧縮強度が小さい傾向が認められた。海浜および屋外では、混合セメントはポルトランドセメントと細孔量が同程度であっても圧縮強度が小さい傾向が見られた。

(8) 細孔量と塩化物イオン浸透深さや拡散係数との関係については、ポルトランドセメントと混合セメントとの差異が現れるものの、相互の明瞭な関係は認められなかった。

[鉄筋の発錆 (発錆状態)]

いずれの供試体も発錆が少なく、腐食グレードは最大 I + [腐食していても均一な薄い緻密なさび層(黒または茶色淡色)が密着している状態] までであり、暴露 5 年の段階では、試験条件の違いによる影響は判然としなかった。ひび割れ発生等の異常も認められなかった。

[鉄筋の発錆 (発錆面積率)]

(1) 感潮条件下では鉄筋の 2 割に発錆が生じ、海浜および屋外でも一部に発錆が見られたが、屋外の発錆面積は非常に小さい。また前養生 91 日の供試体には発生が見られなかった。

(2) 発錆が認められたものは、ポルトランドセメントおよび石灰石微粉末混合セメントであり、一部例外を除いて、高炉スラグ微粉末混合やフライアッシュセメント、またそれら両者を混合したセメントでは発錆が見られなかった。

(3) ポルトランドセメントでは水セメント比が大きいと発錆面積率も大きくなった。

(4) 鉄筋位置の塩化物イオン量が 2kg/m^3 程度を超えた付近から発錆面積が増大する傾向が見られた。

[鉄筋の発錆（鉄筋の質量減少率）]

(1) 感潮条件下では鉄筋の質量減少が認められたが、海浜および屋外ではほとんど鉄筋の質量減少が認められなかった。

(2) 高炉スラグ微粉末を混合したセメントはベースのポルトランドセメントに対して鉄筋の質量減少率が少ない傾向にあった。一方フライアッシュを混合したセメントは、一部の条件で NC とほぼ同様の結果であり、混合材の種類によって効果を異にした。石灰石微粉末を混合したセメントは NC と同程度の鉄筋質量減少率であった。

(3) ポルトランドセメントでは水セメント比増大とともに鉄筋の質量減少率も増大した。

(4) 鉄筋位置の塩化物イオン量が 2kg/m^3 程度を超えた付近から鉄筋の質量減少率が増大する傾向が見られ、発錆面積率の結果と対応していた。

[鉄筋の発錆（鉄筋の孔食深さ）]

(1) 感潮条件下で孔食が認められ、海浜および屋外では認められなかった。

(2) 孔食が認められたセメントは、ポルトランドセメントおよび石灰石微粉末混合セメントであり、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合したセメントでは孔食が認められなかった。

(3) ポルトランドセメントでは水セメント比が大きいと孔食深さも大きくなった。

[鉄筋の自然電位および分極抵抗]

(1) 自然電位は暴露半年後頃から全体的に卑になる傾向を示し、セメントの種類に関わらず夏季に卑になる傾向が認められた。

(2) NC と比較して MC、LC では自然電位がやや卑の傾向にあった。混合セメントでは NC と同程度かやや貴の傾向にあった。石灰石微粉末を混合したセメントは NC よりもやや卑の傾向にあった。

(3) コンクリート抵抗については、三成分系 > フライアッシュ混合 > 高炉スラグ微粉末混合 > 各ポルトランドセメント > 石灰石微粉末混合、の順であった。

(4) 腐食速度については、石灰石微粉末混合 > LC > MC > NC > 他の混合セメント、の順であった。

(5) コンクリートが比較的湿潤な環境に位置する場合において、腐食状況判定のしきい値は ASTM に示されている値よりも卑な値となるものと考えられる。

(6) 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、実際の腐食状況より大きな値を示すと考えられ、CEB の基準において「激しい腐食」を生じるとされる値に対して、今回の試験結果はかなり大きい結果となった。

参考文献

- 1)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.8,1999年3月
- 2)岸谷孝一,西澤紀昭他編,大即信明,樫野紀元,片脇清士,小林明夫,友澤史紀,榊田佳寛,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
- 3)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
- 4)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年3月
- 5)土木学会：コンクリート標準示方書,構造性能照査編, p.28, 2002年3月
- 6)土木学会：コンクリート標準示方書,施工編, p.79, 2002年3月
- 7)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
- 8)土木学会：コンクリート標準示方書,施工編, p.24, 2002年3月
- 9)審良喜和・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講演集、Vol.27、No.1、pp.613-618(2005)
- 10)土木学会：コンクリート標準示方書,施工編, p.80, 2002年3月
- 11)土木学会：2002年版コンクリート標準示方書改訂資料,コンクリートライブラリー,No.108, pp.83-88, 2002年3月
- 12)土木学会：コンクリート標準示方書,施工編, p.26, 2002年3月
- 13)CEB Working Party V/4.1 : Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft.4), BRI-CSTC-WTCB , Dec. 1997
- 14)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年2月
- 15)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
- 16)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

資 料

1. X線回折試験による結晶相の相対強度計算方法
2. X線回折試験関連図
3. 細孔径分布測定結果および関連図
4. 鉄筋の発錆に関する試験測定結果

資料-1 X線回折試験における結晶相の相対強度計算方法

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った。
また、回折強度はピーク高さを用いた。

<計算例>

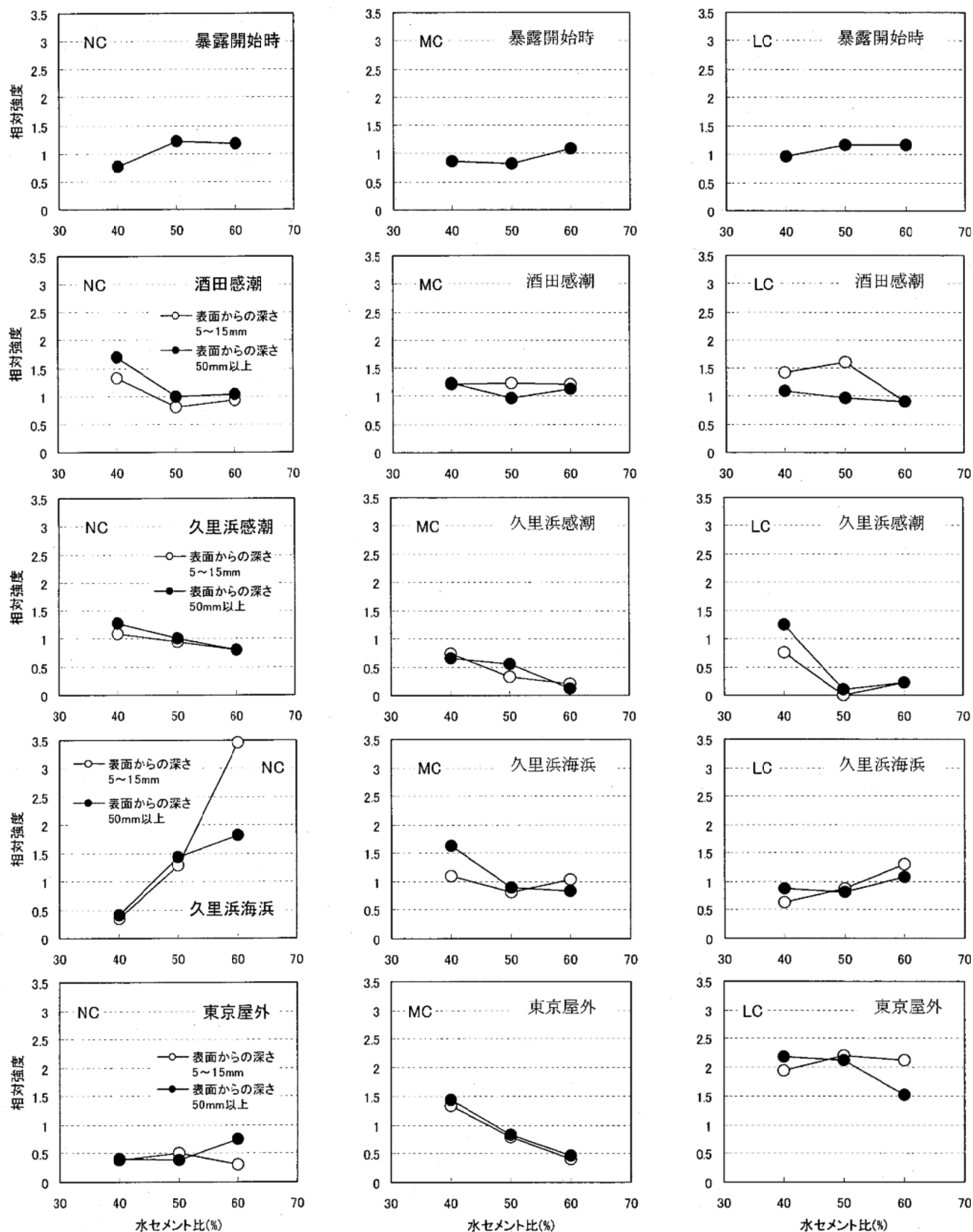
標準物質 (ZnO) の回折強度 (cps) = 1139

各結晶相の回折強度 (cps) = 501 (例: ポルトランダイト)

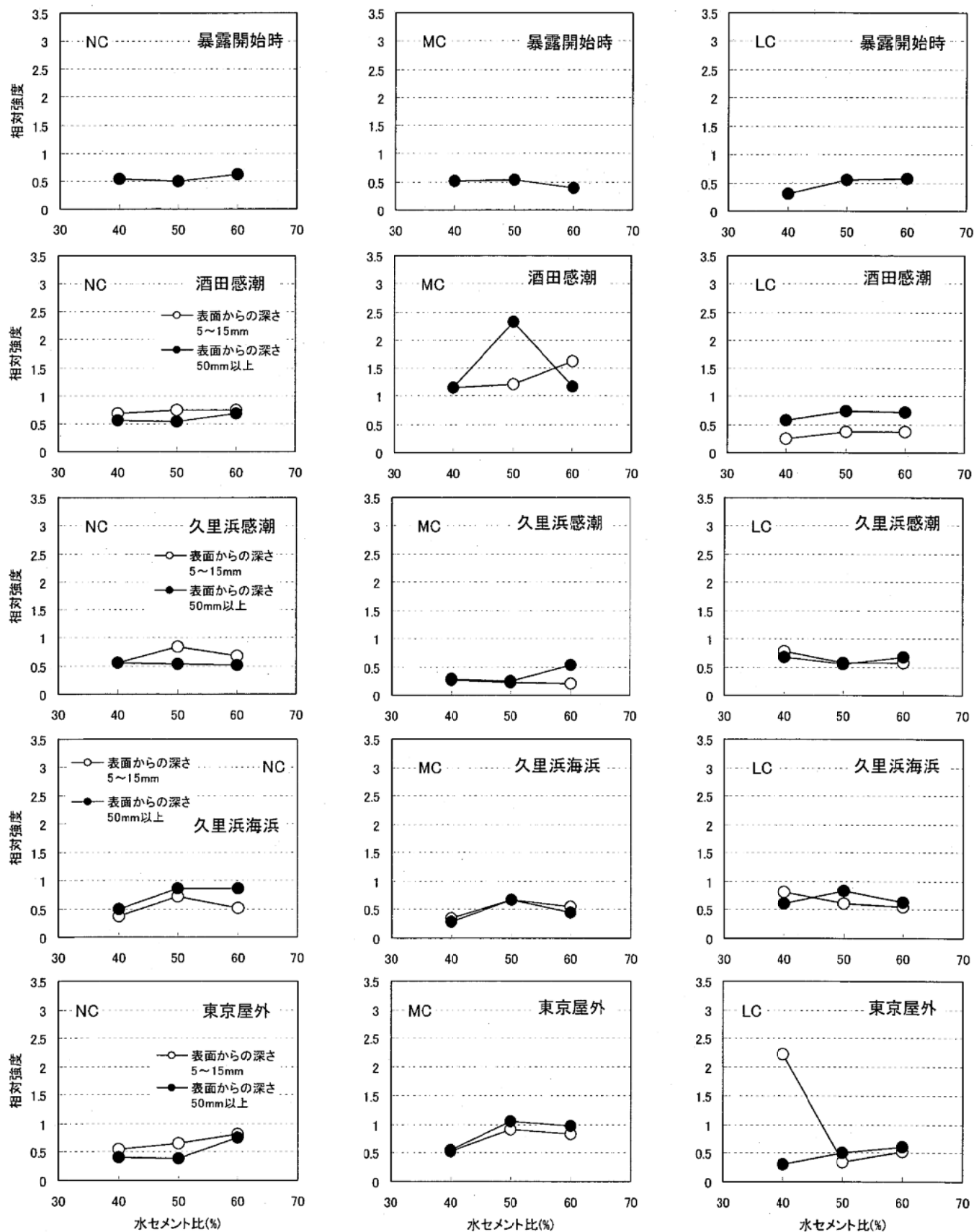
$$\begin{aligned}\text{換算前の相対強度} &= \frac{\text{各結晶相の回折強度 (cps)}}{\text{標準物質の回折強度 (cps)}} \\ &= \frac{501}{1139} \\ &= 0.440\end{aligned}$$

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

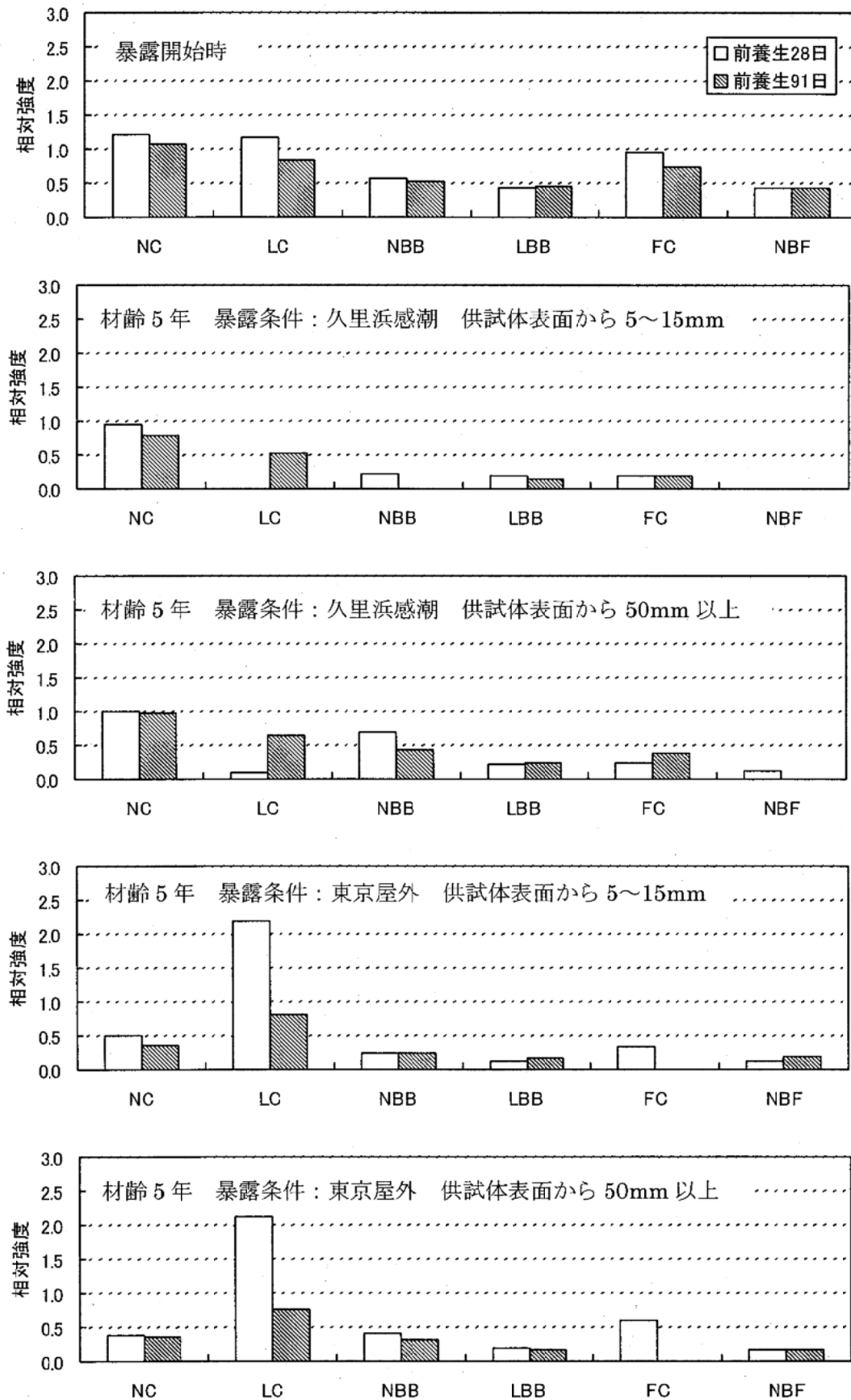
資料-2 X線回折試験関連図



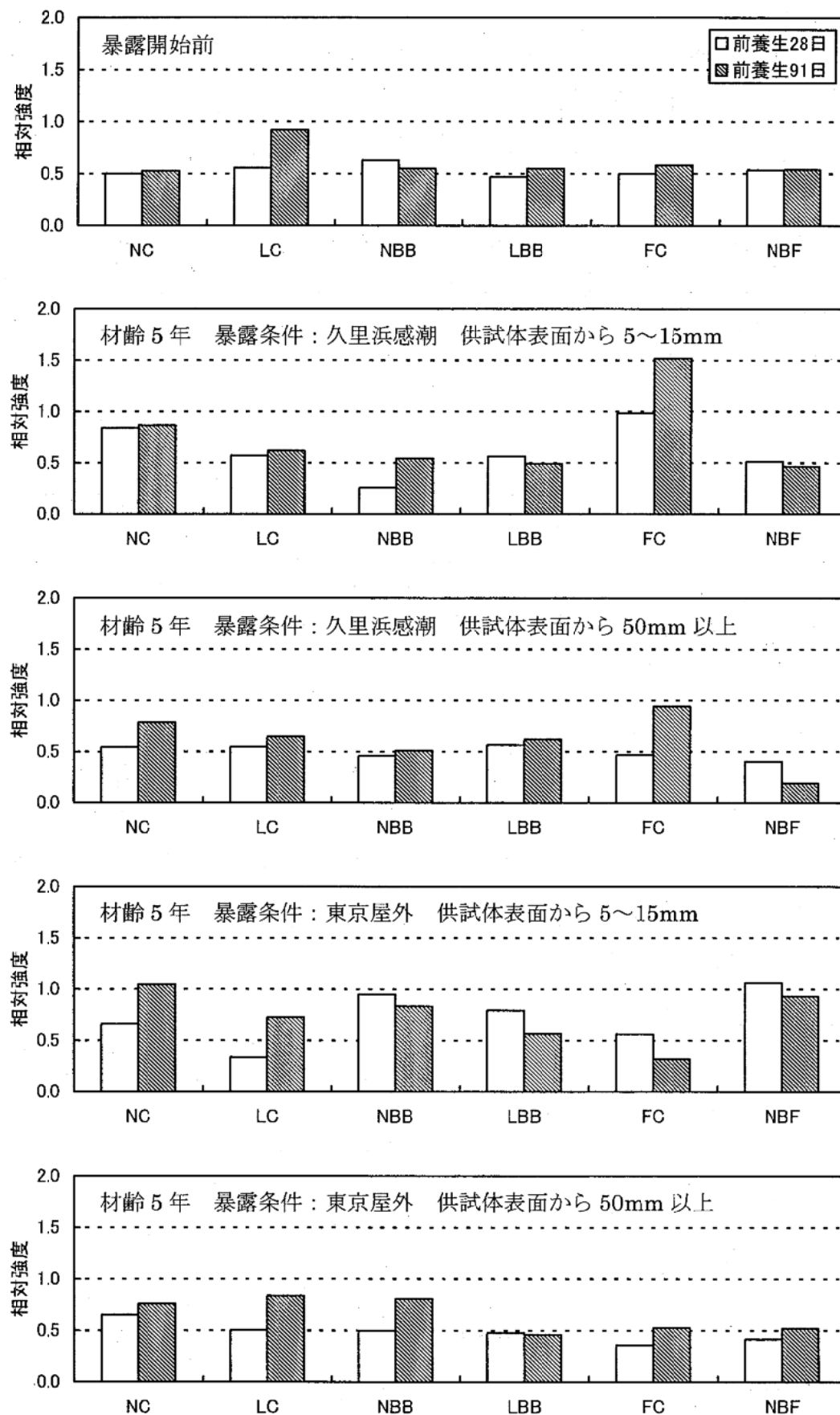
資料-図-2.1 水セメント比とポルトランダイトの相対強度の関係 (前養生 28 日)



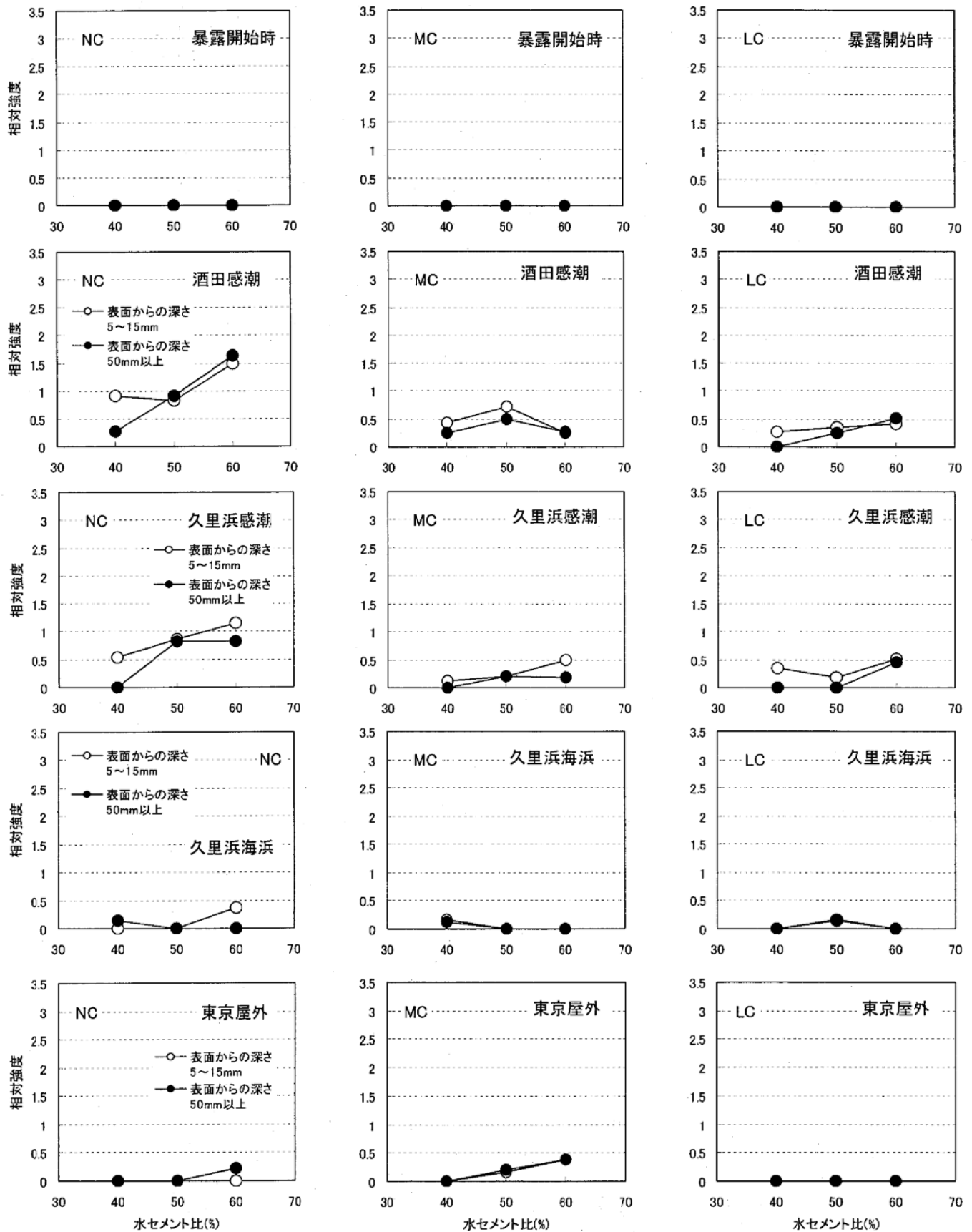
資料-図-2.2 水セメント比とカルサイトの相対強度の関係（前養生 28 日）



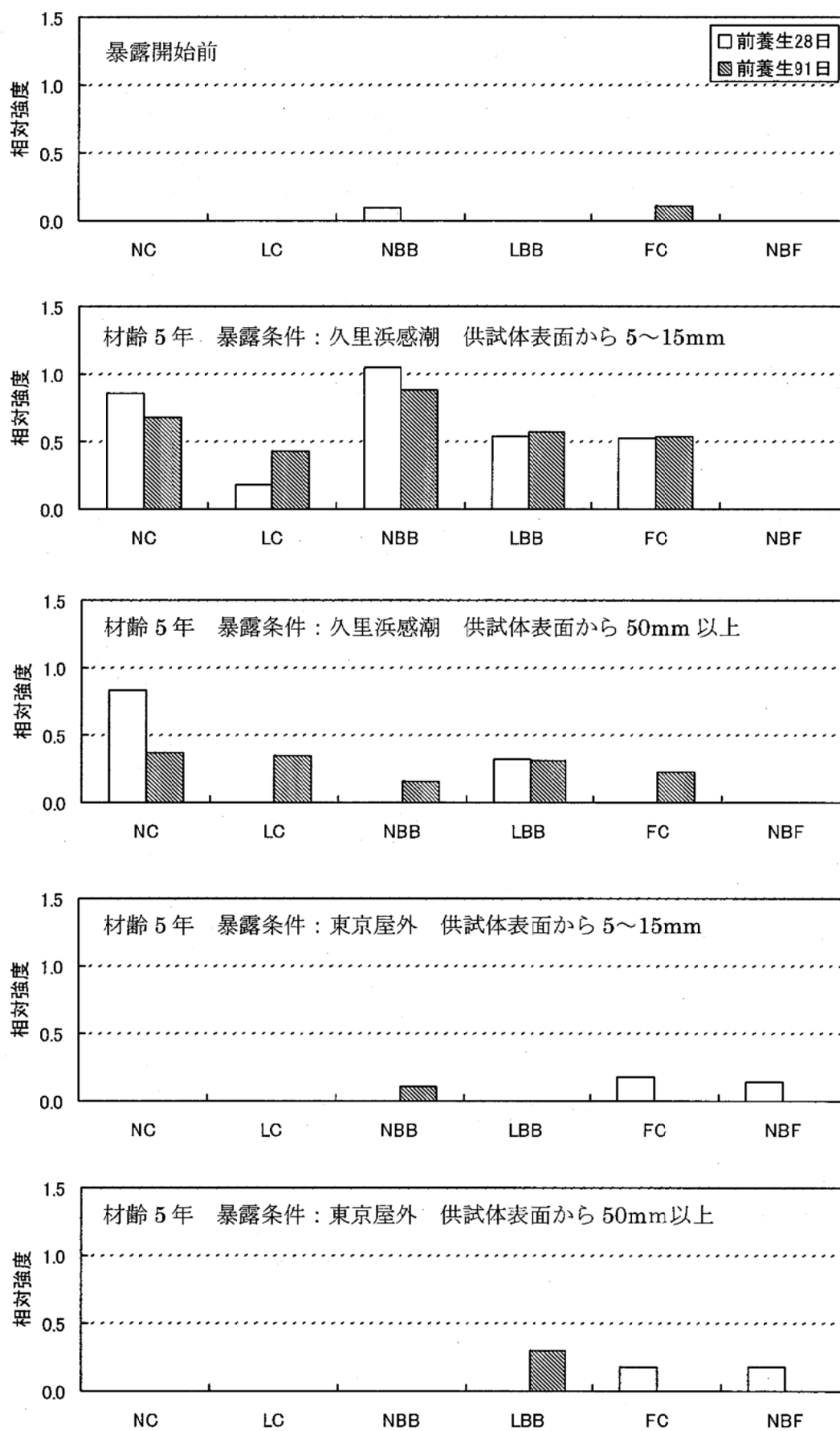
資料-図-2.3 前養生とポルトランダイトの相対強度（水セメント比 50%）



資料-図-2.4 前養生とカルサイトの相対強度（水セメント比 50%）

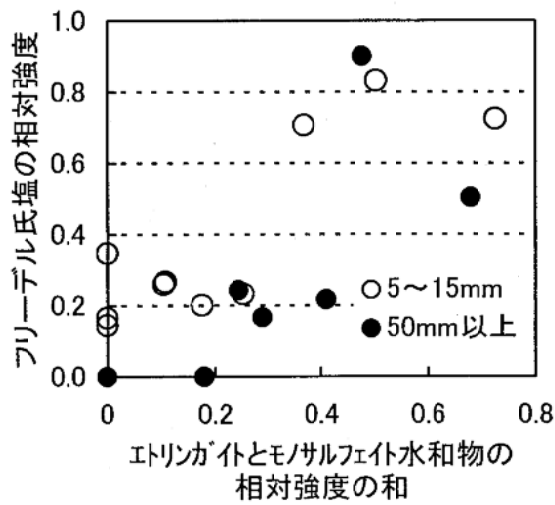


資料-図-2.5 水セメント比とフリーデル氏塩の相対強度の関係（前養生 28 日）

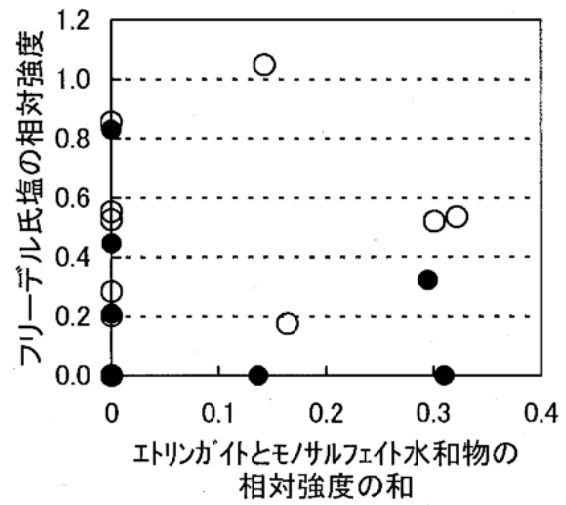


資料-図-2.6 前養生とフリーデル氏塩量の相対強度の関係（水セメント比 50%）

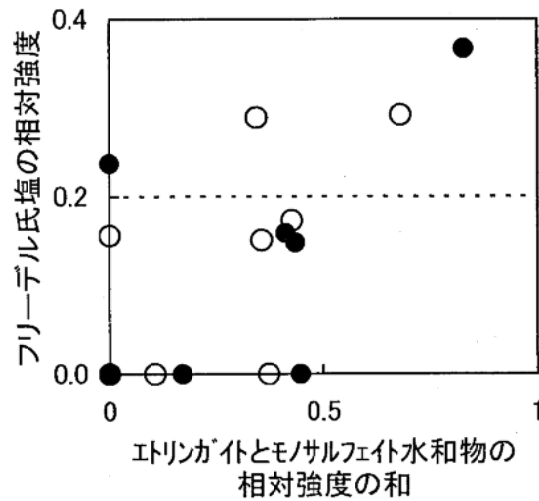
<材齢5年 暴露条件：酒田感潮>



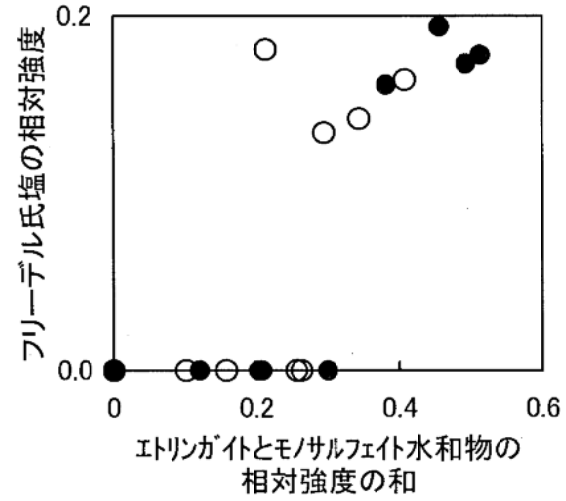
<材齢5年 暴露条件：久里浜感潮>



<材齢5年 暴露条件：久里浜海浜>

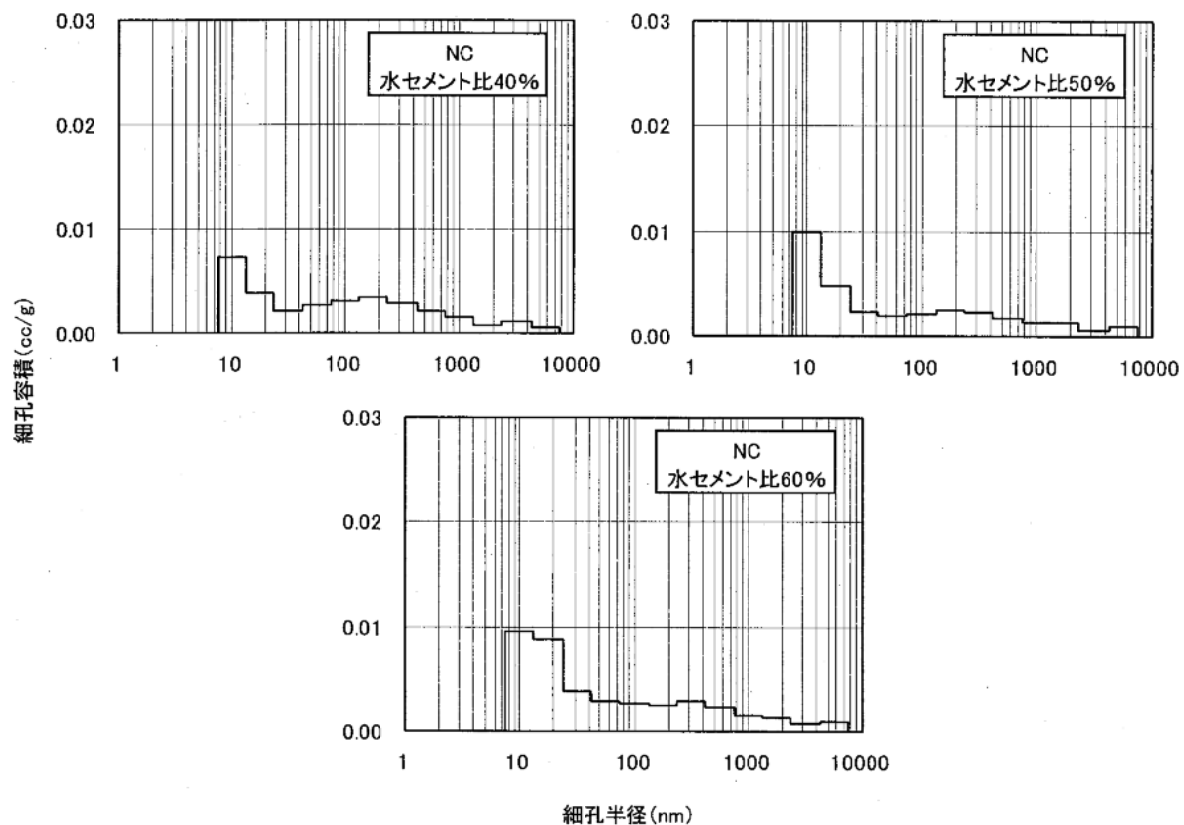


<材齢5年 暴露条件：東京屋外>

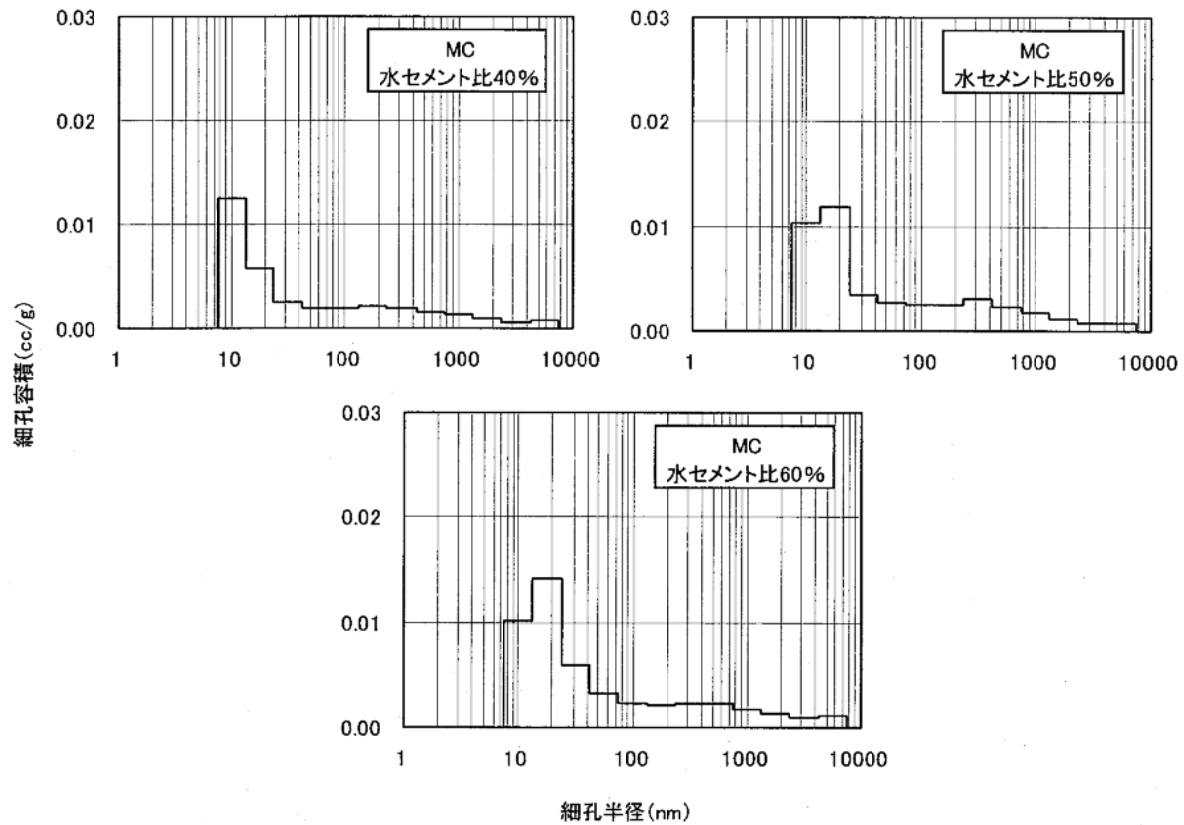


資料-図-2.7 エトリンガイトとモノサルフェイト水和物の相対強度の和とフリーデル氏塩の相対強度の関係（前養生28日）

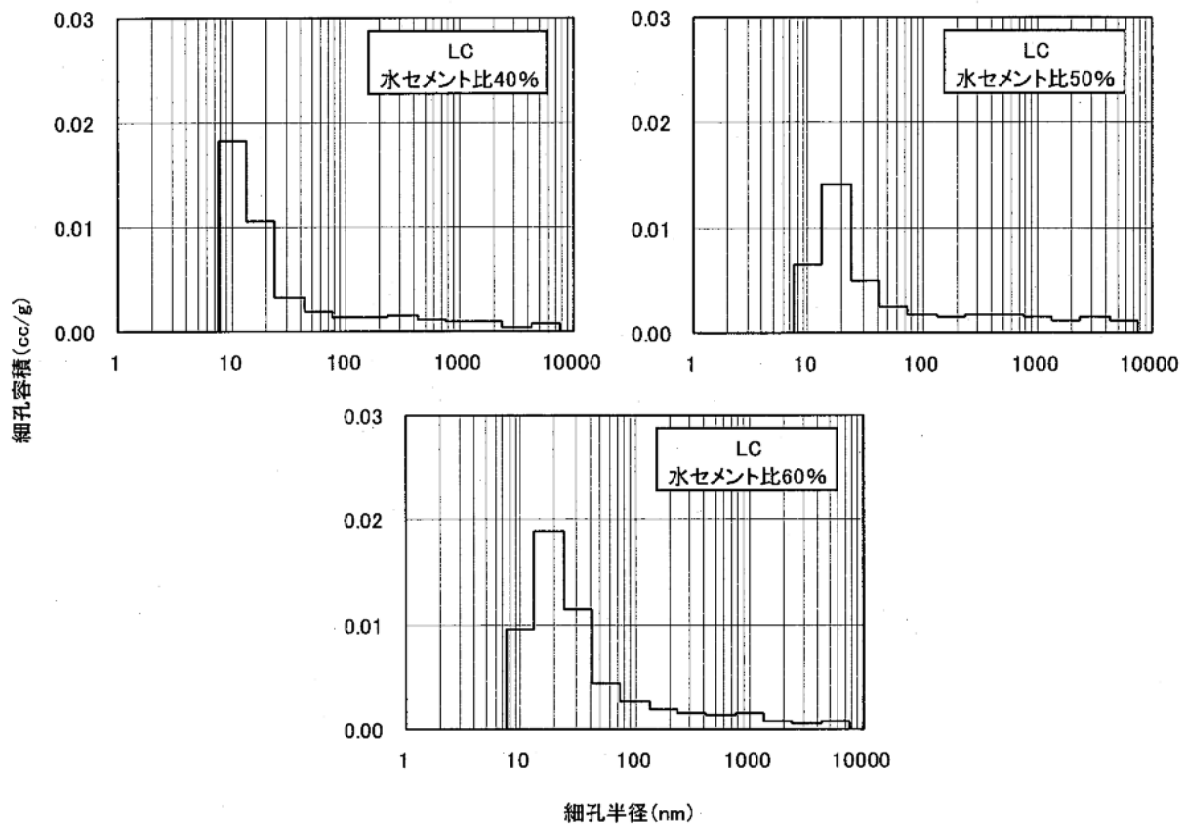
資料-3 細孔径分布測定結果および関連図



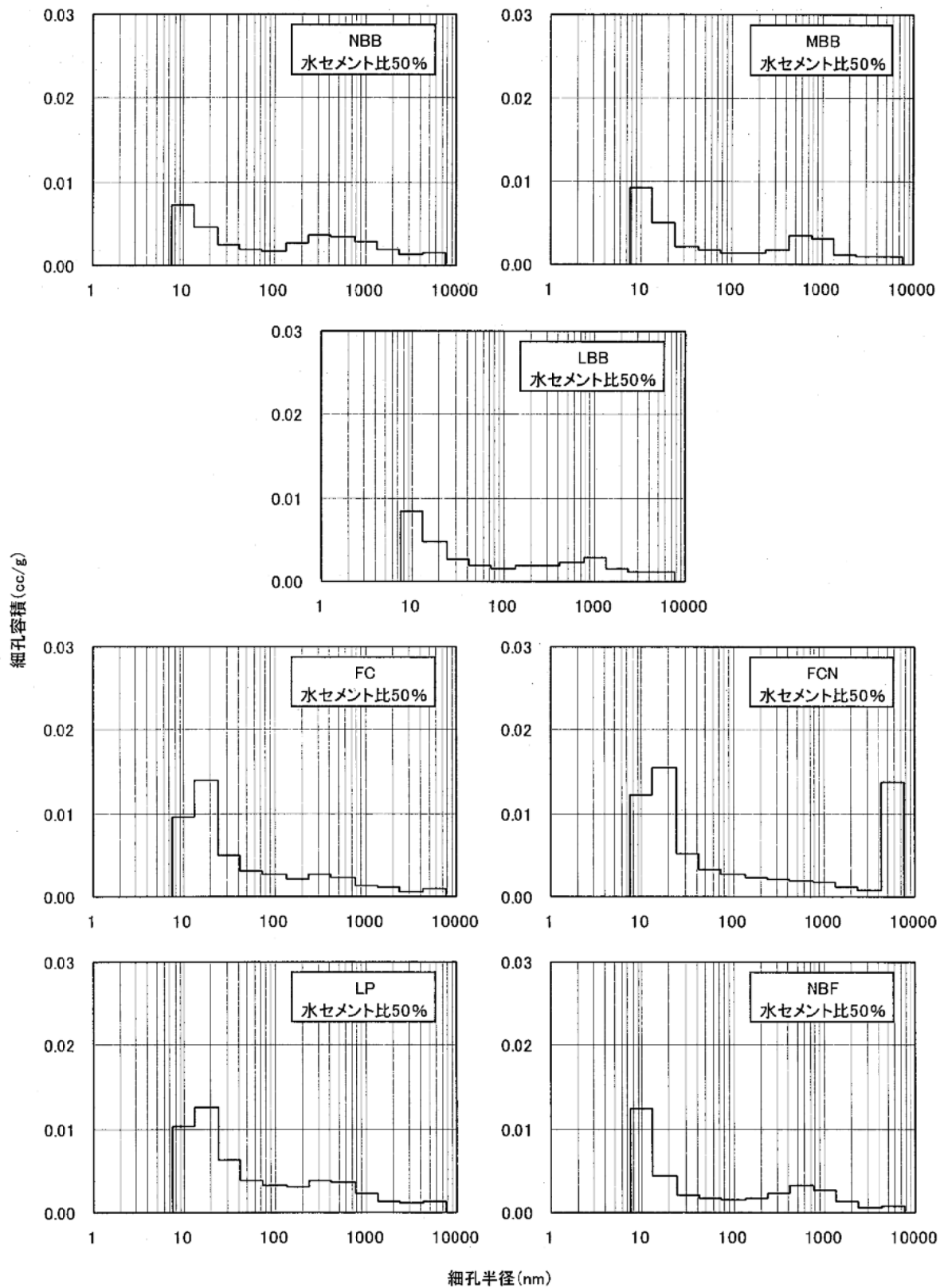
資料-図-3.1 細孔径分布 (NC、前養生 28 日、暴露開始時)



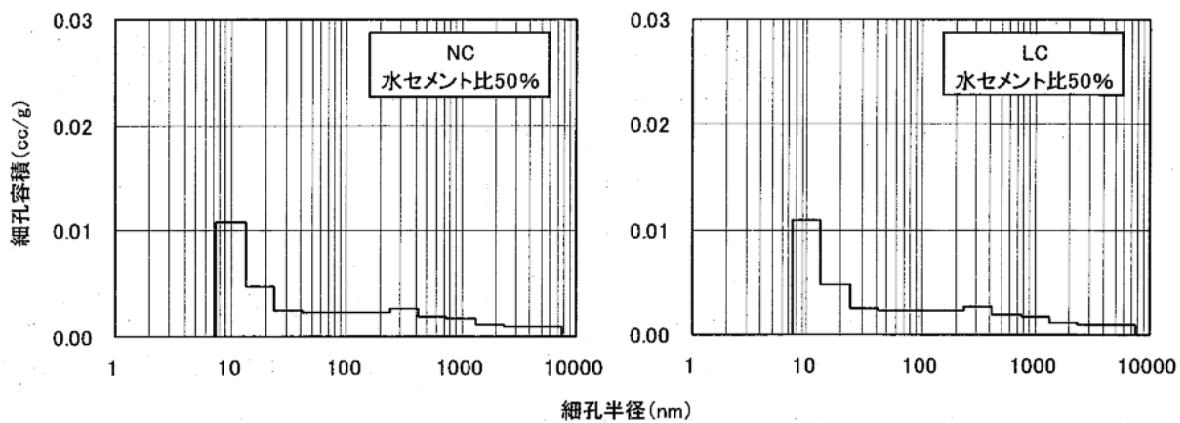
資料-図-3.2 細孔径分布 (MC、前養生 28 日、暴露開始時)



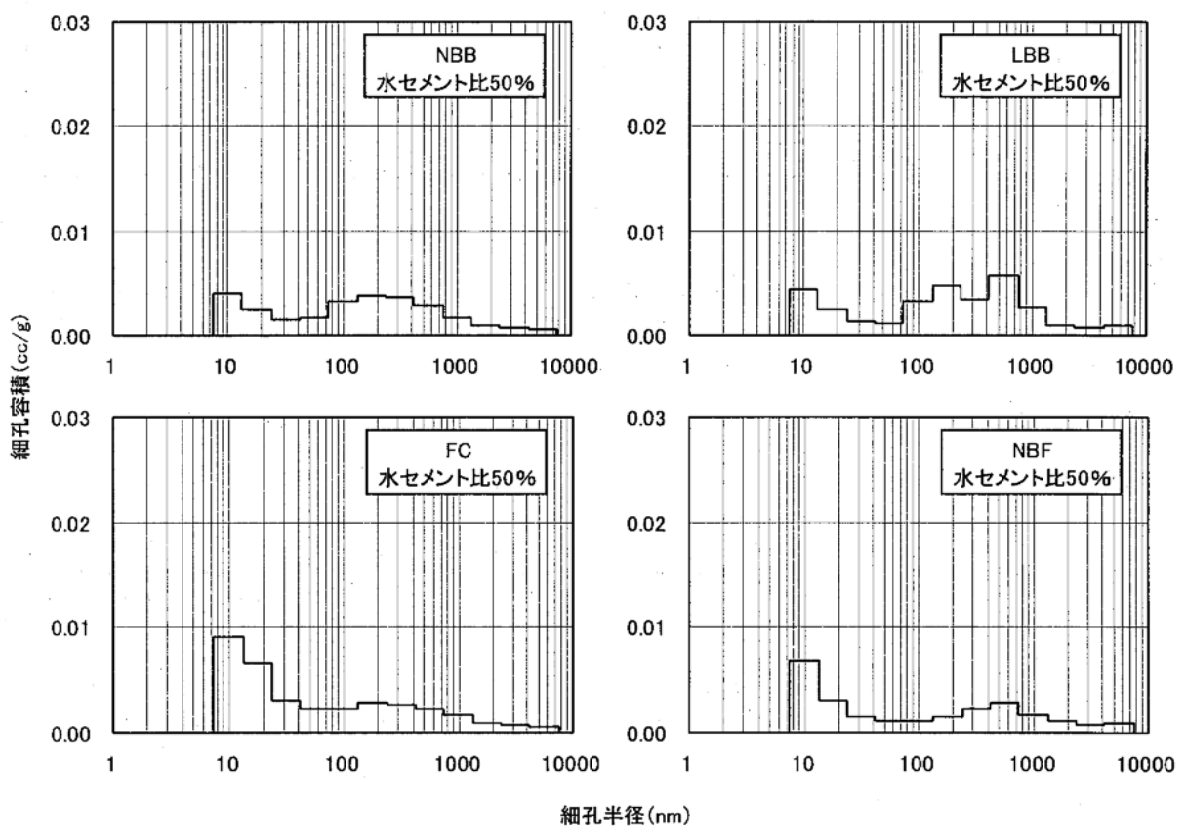
資料-図-3.3 細孔径分布 (LC、前養生 28 日、暴露開始時)



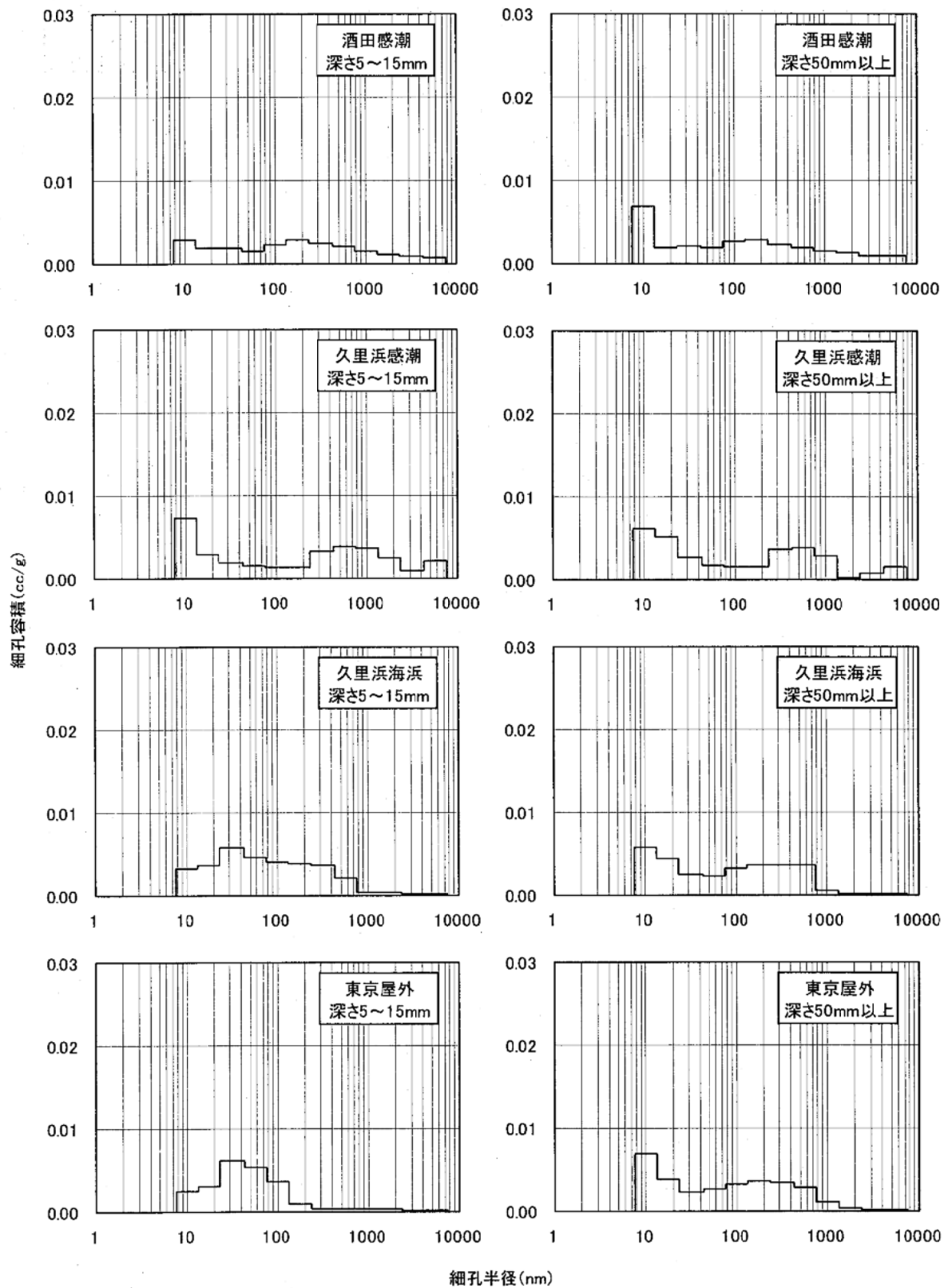
資料-図-3.4 細孔径分布 (混合セメント、前養生 28 日、暴露開始時)



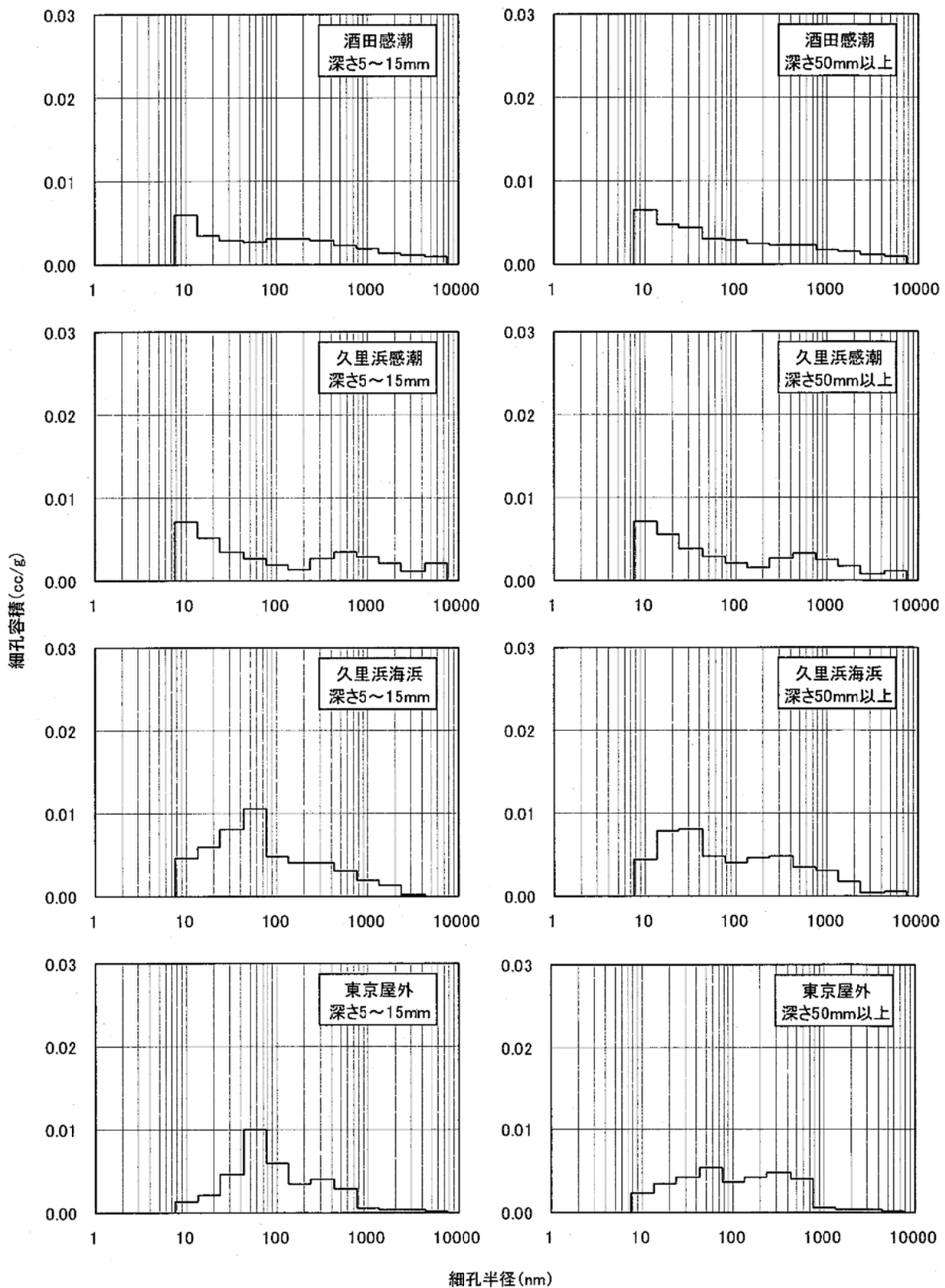
資料-図-3.5 細孔径分布（ポルトランドセメント、前養生 91 日、暴露開始時）



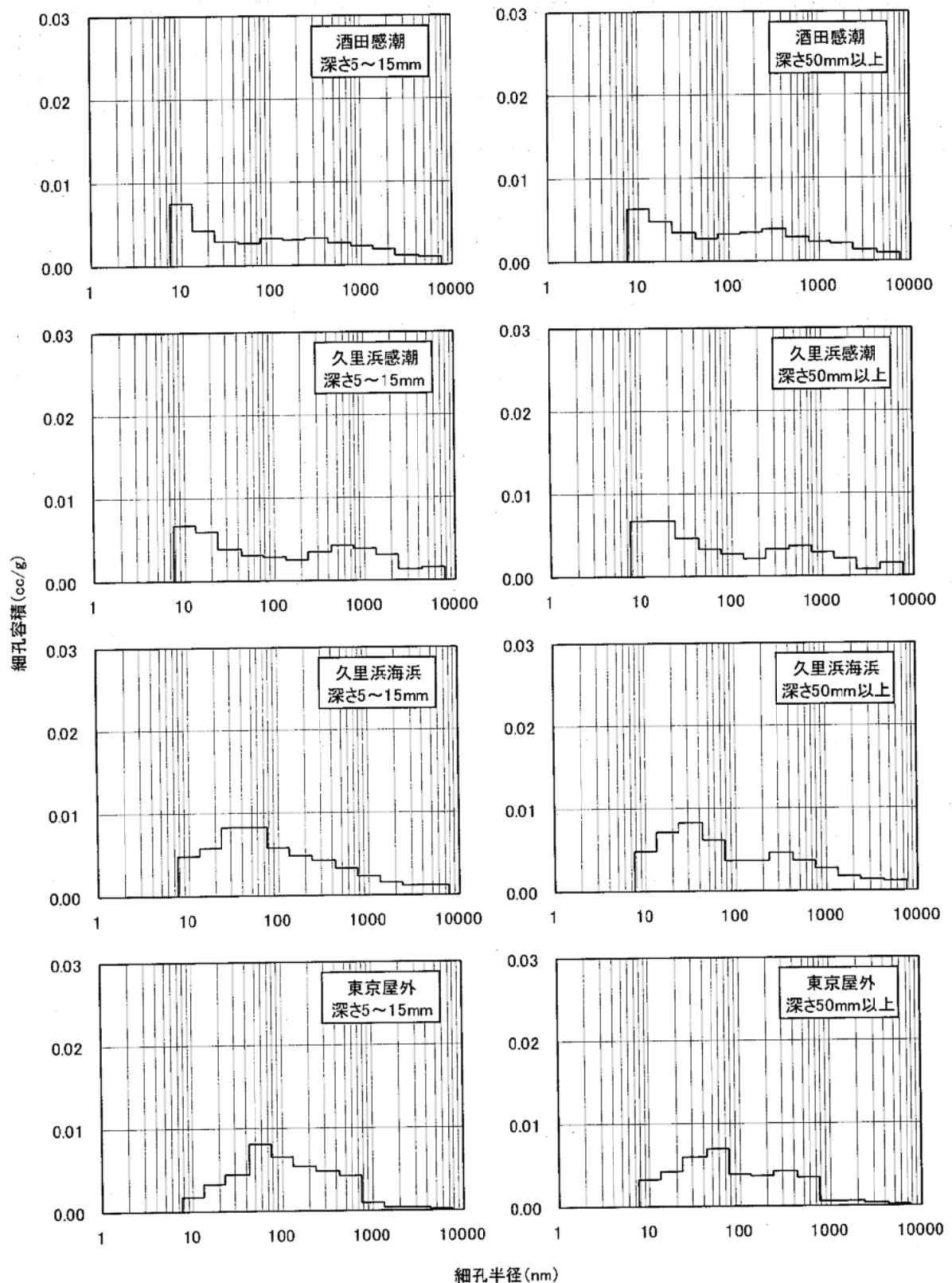
資料-図-3.6 細孔径分布（混合セメント、前養生 91 日、暴露開始時）



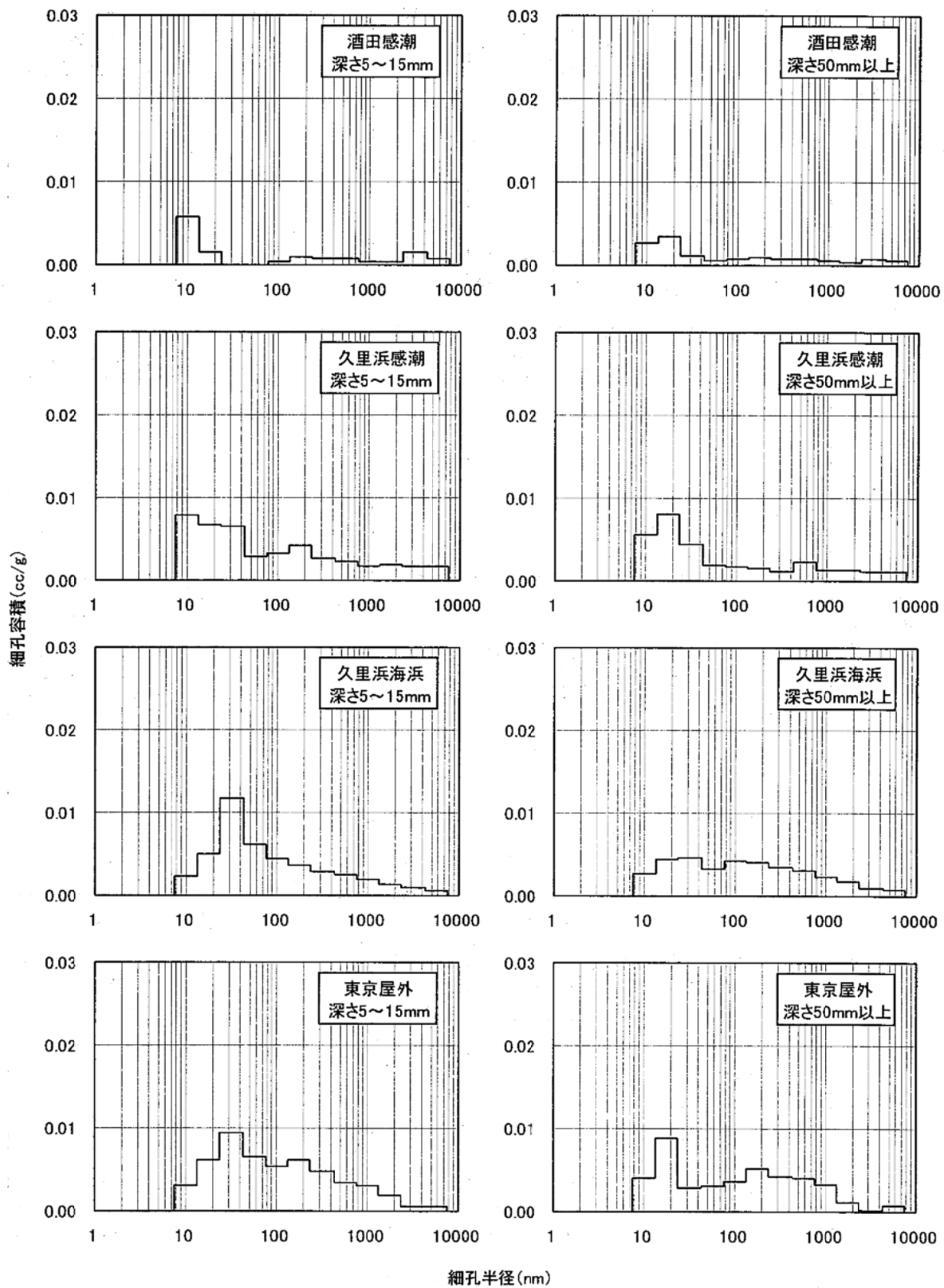
資料-図-3.7 細孔径分布 (NC、水セメント比 40%、前養生 28 日、材齢 5 年)



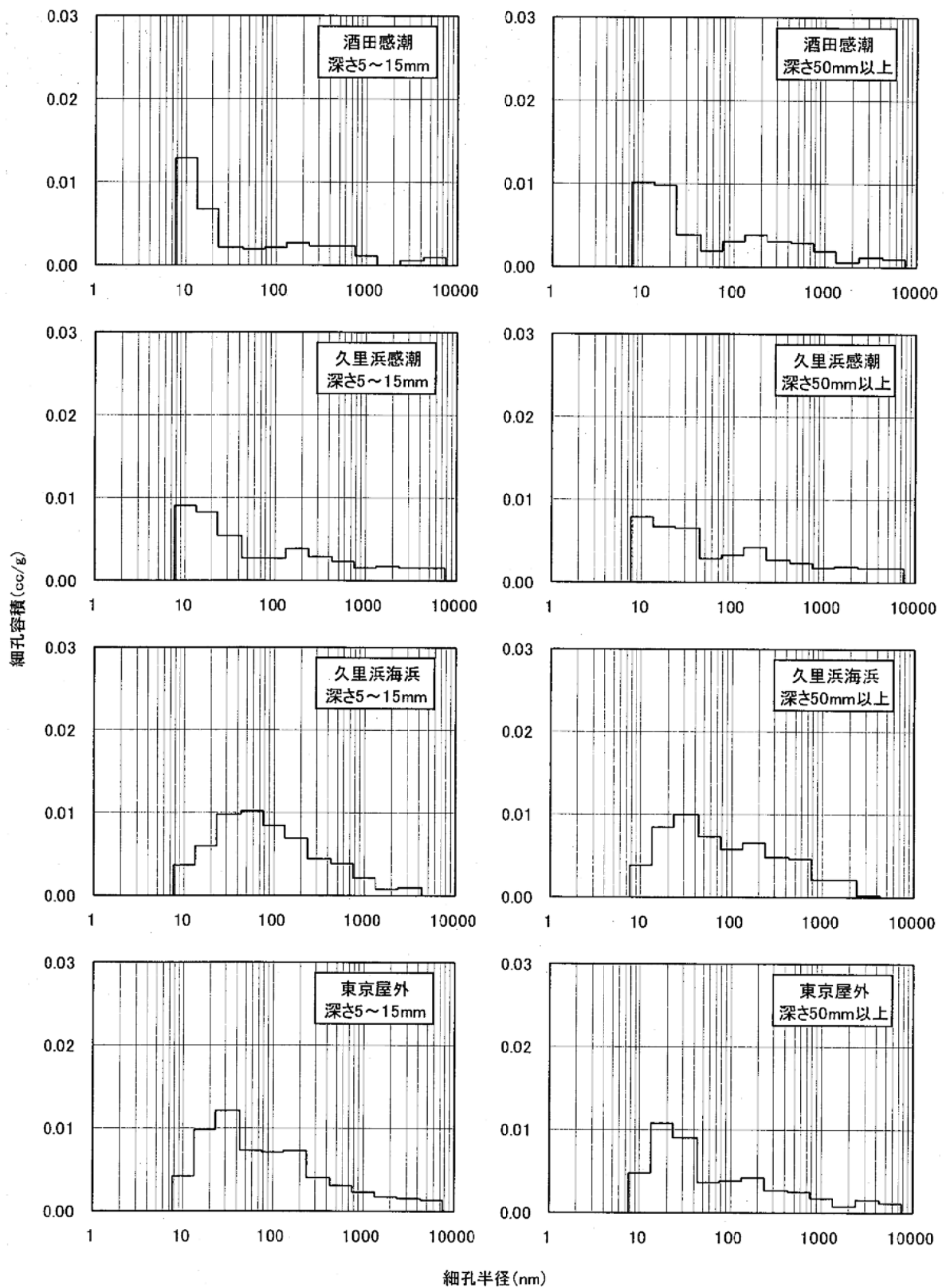
資料-図-3.8 細孔径分布 (NC、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



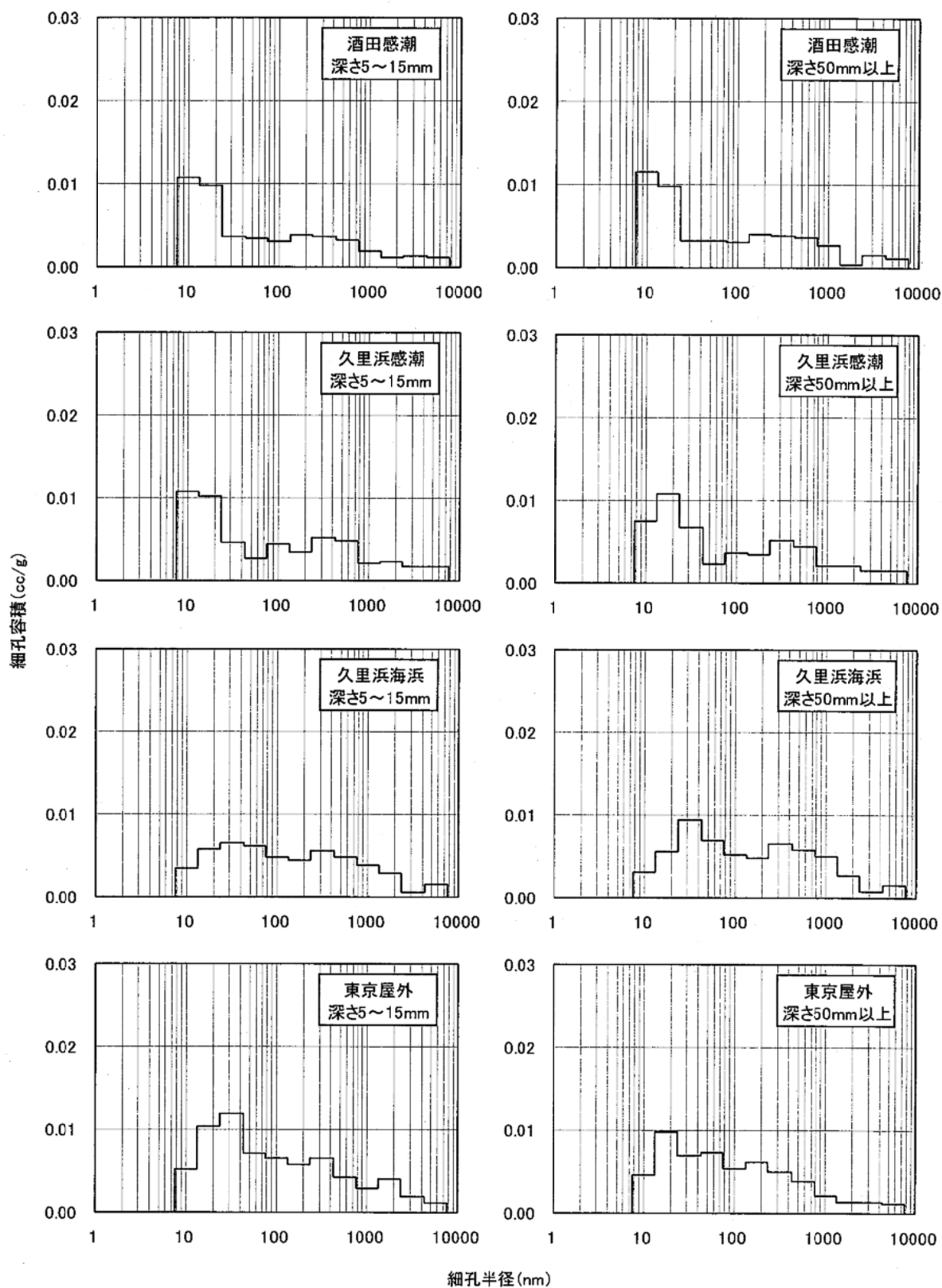
資料-図-3.9 細孔径分布 (NC、水セメント比 60%、前養生 28 日、材齢 5 年)



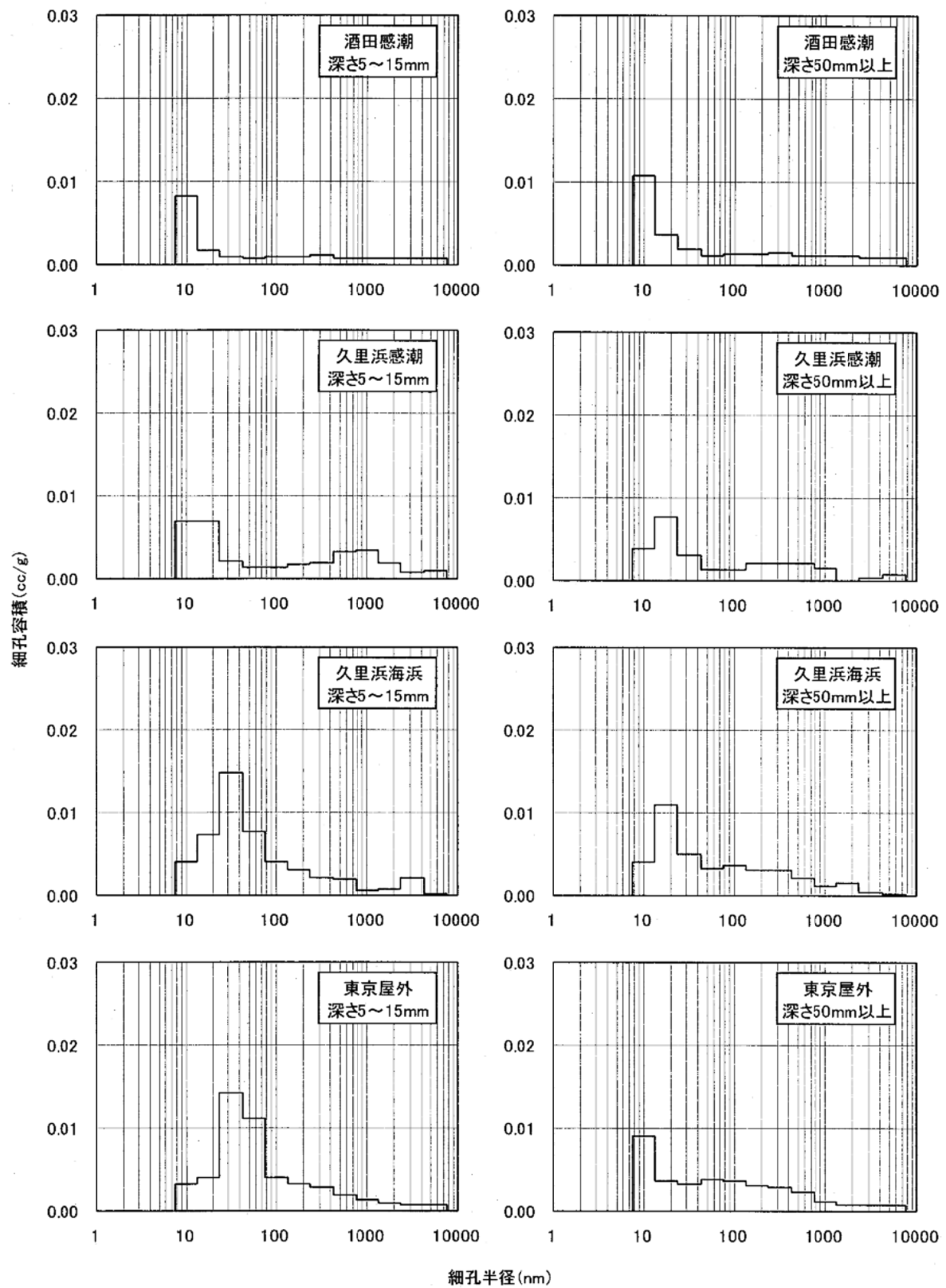
資料-図-3.10 細孔径分布 (MC、水セメント比 40%、前養生 28 日、材齢 5 年)



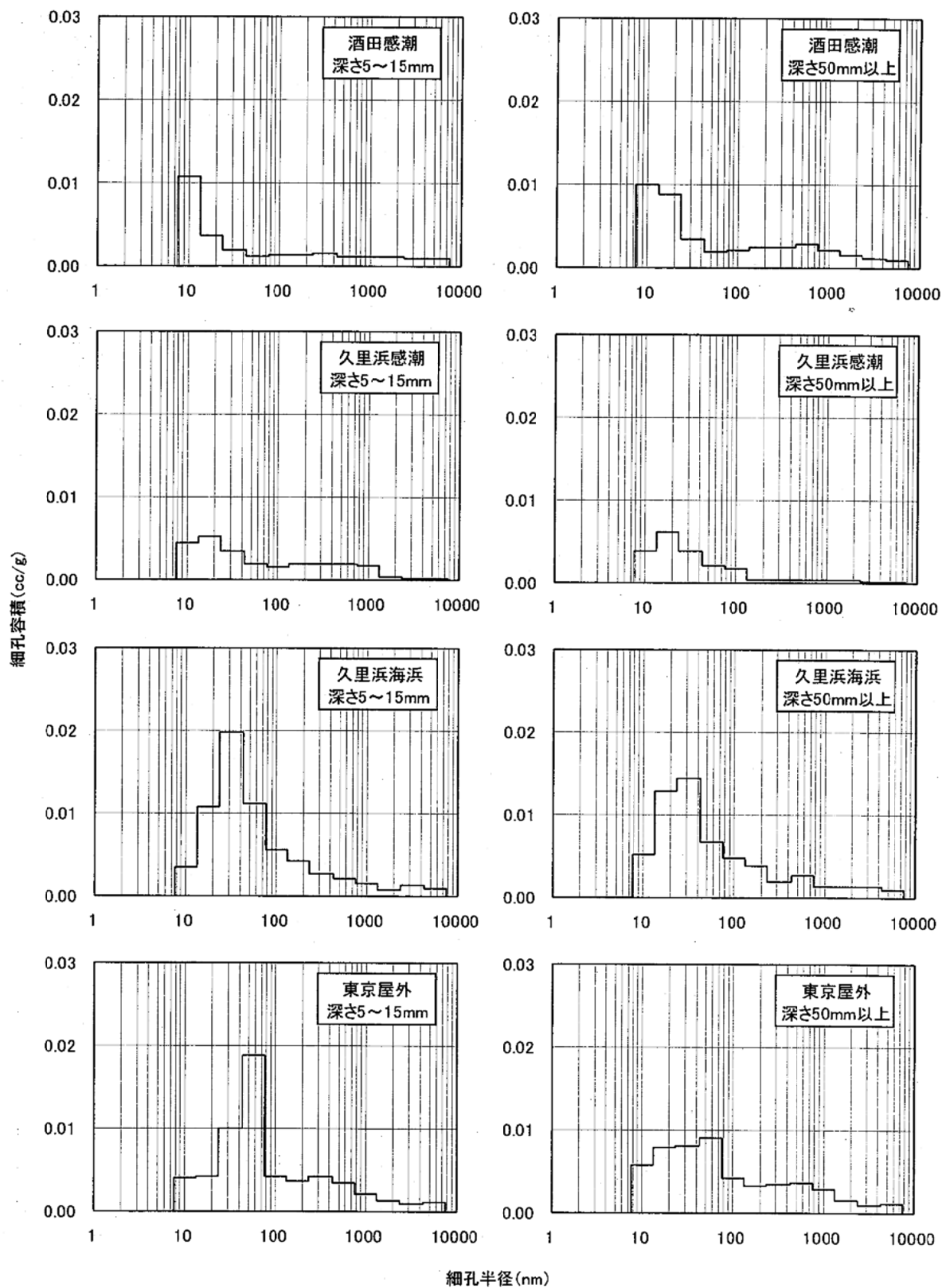
資料-図-3.11 細孔径分布 (MC、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



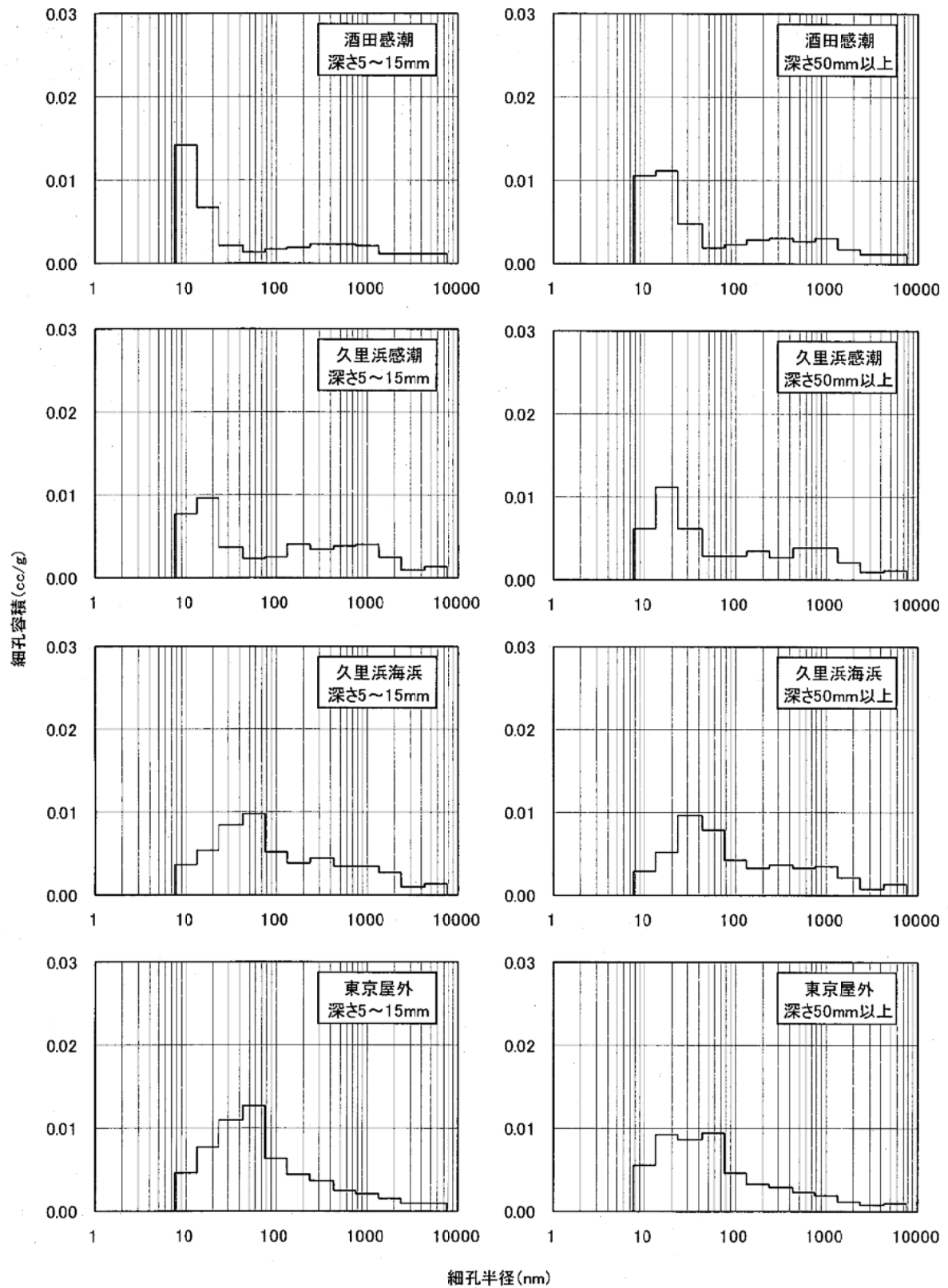
資料-図-3.12 細孔径分布 (MC、水セメント比 60%、前養生 28 日、材齢 5 年)



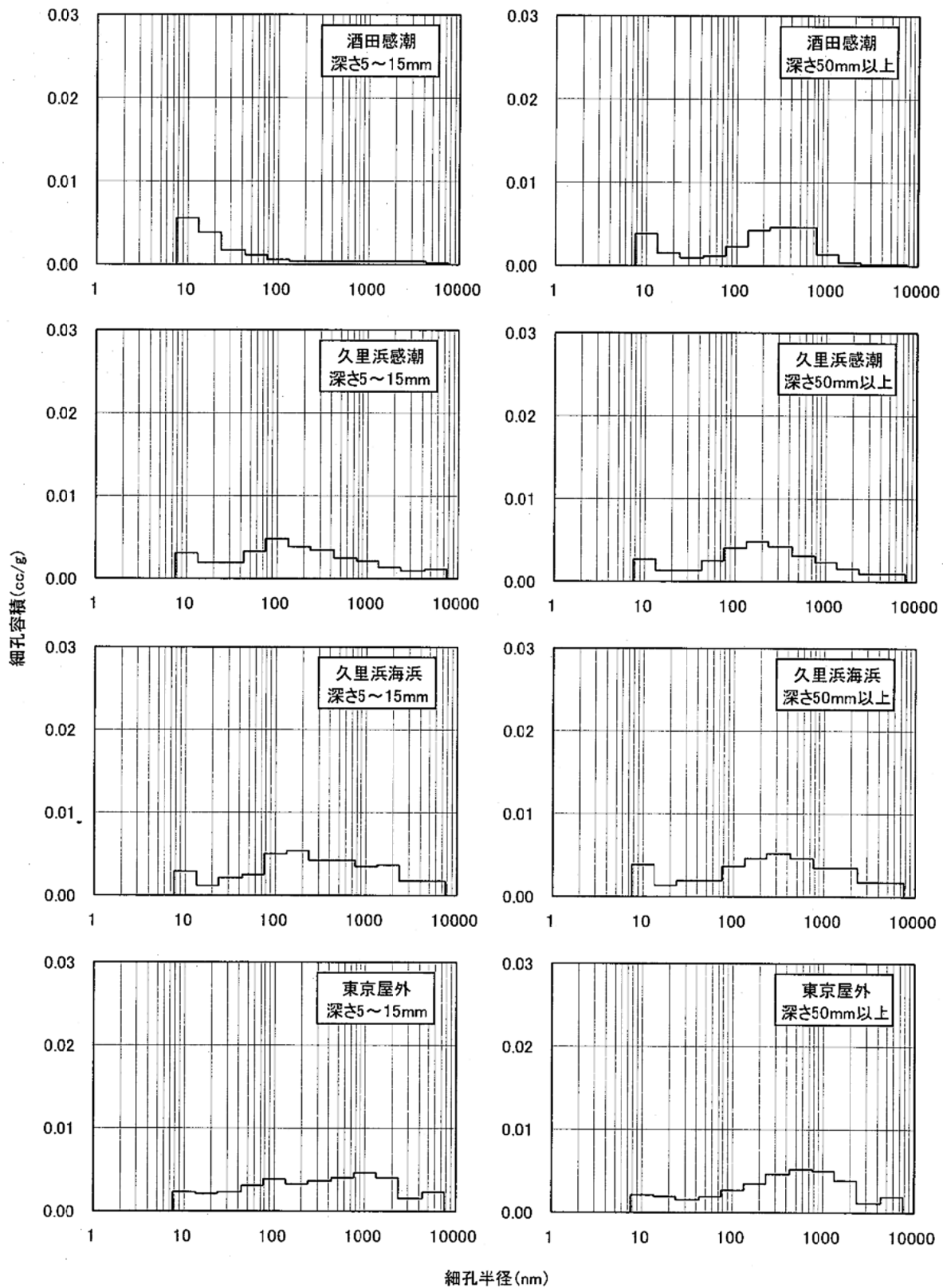
資料-図-3.13 細孔径分布 (LC、水セメント比 40%、前養生 28 日、材齢 5 年)



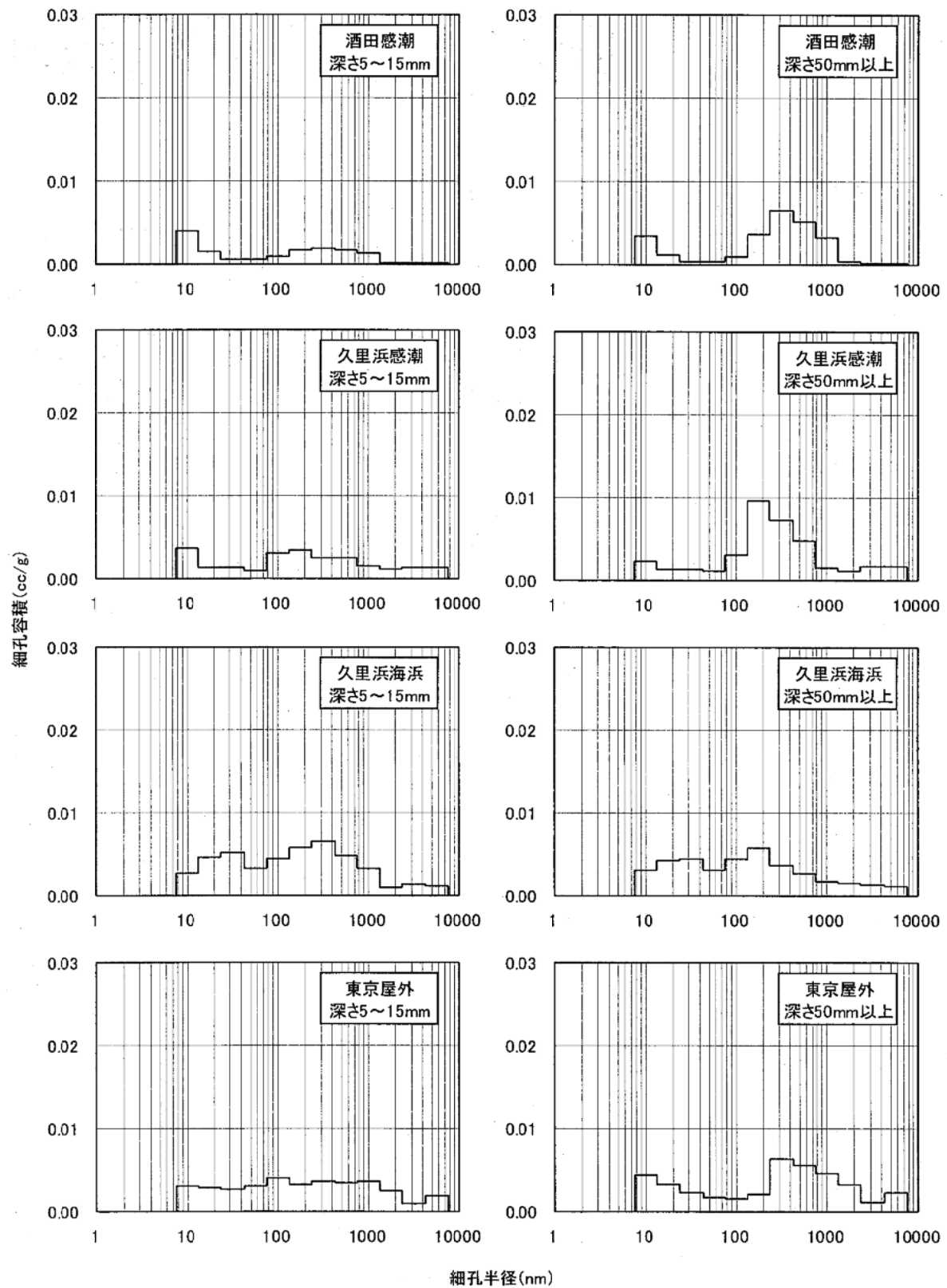
資料-図-3.14 細孔径分布 (LC、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



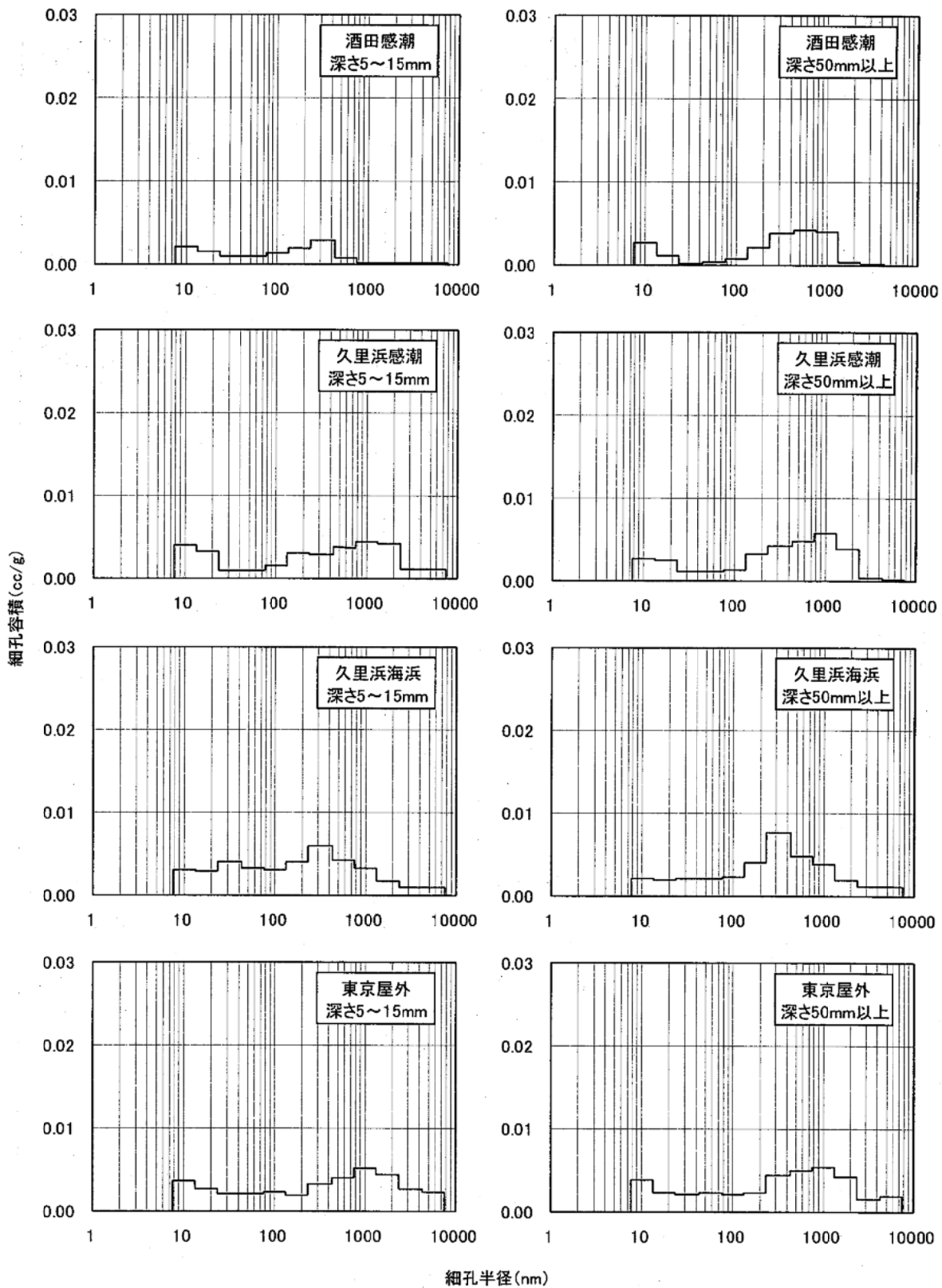
資料-図-3.15 細孔径分布 (LC、水セメント比 60%、前養生 28 日、材齢 5 年)



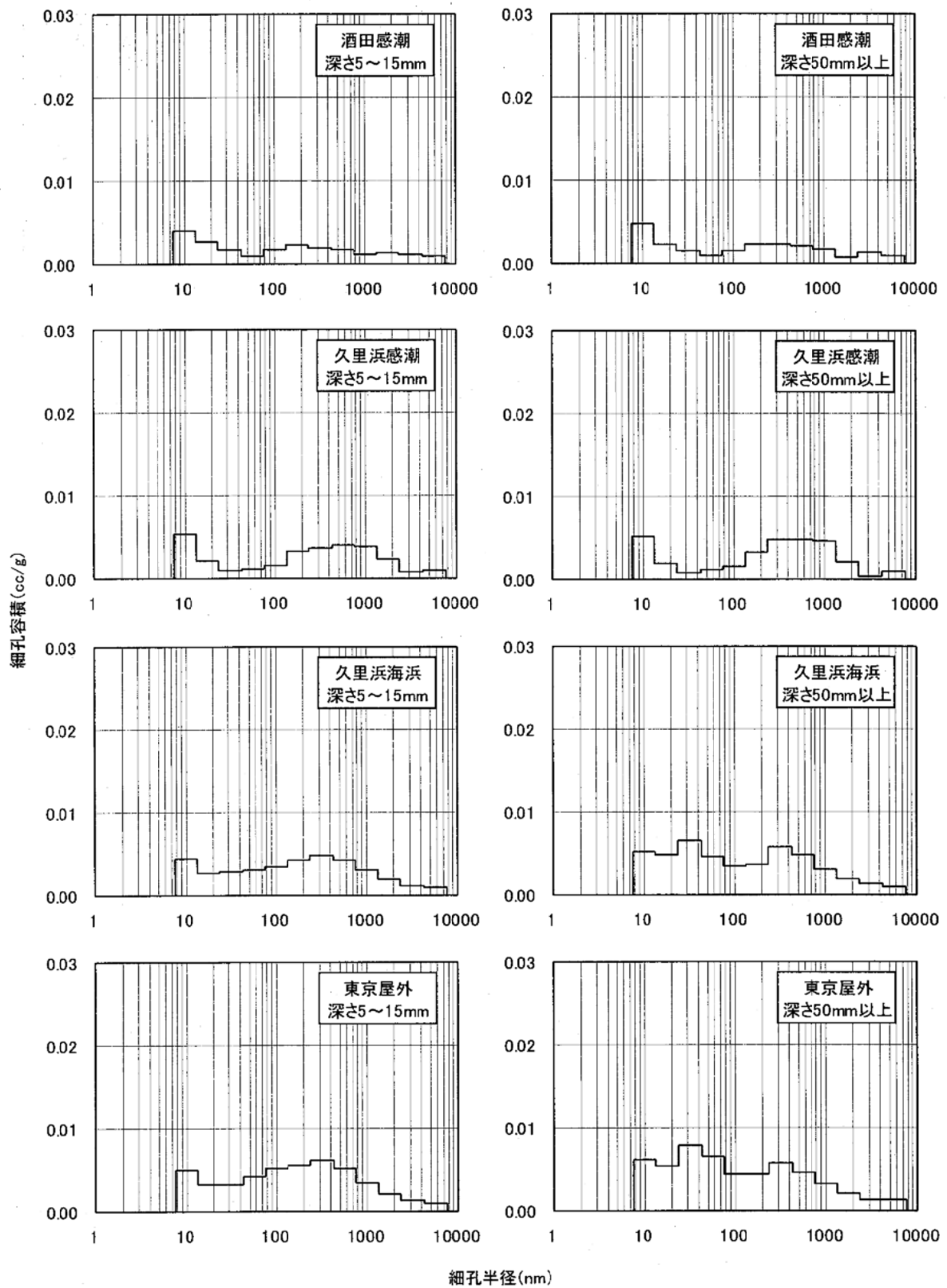
資料-図-3.16 細孔径分布 (NBB、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



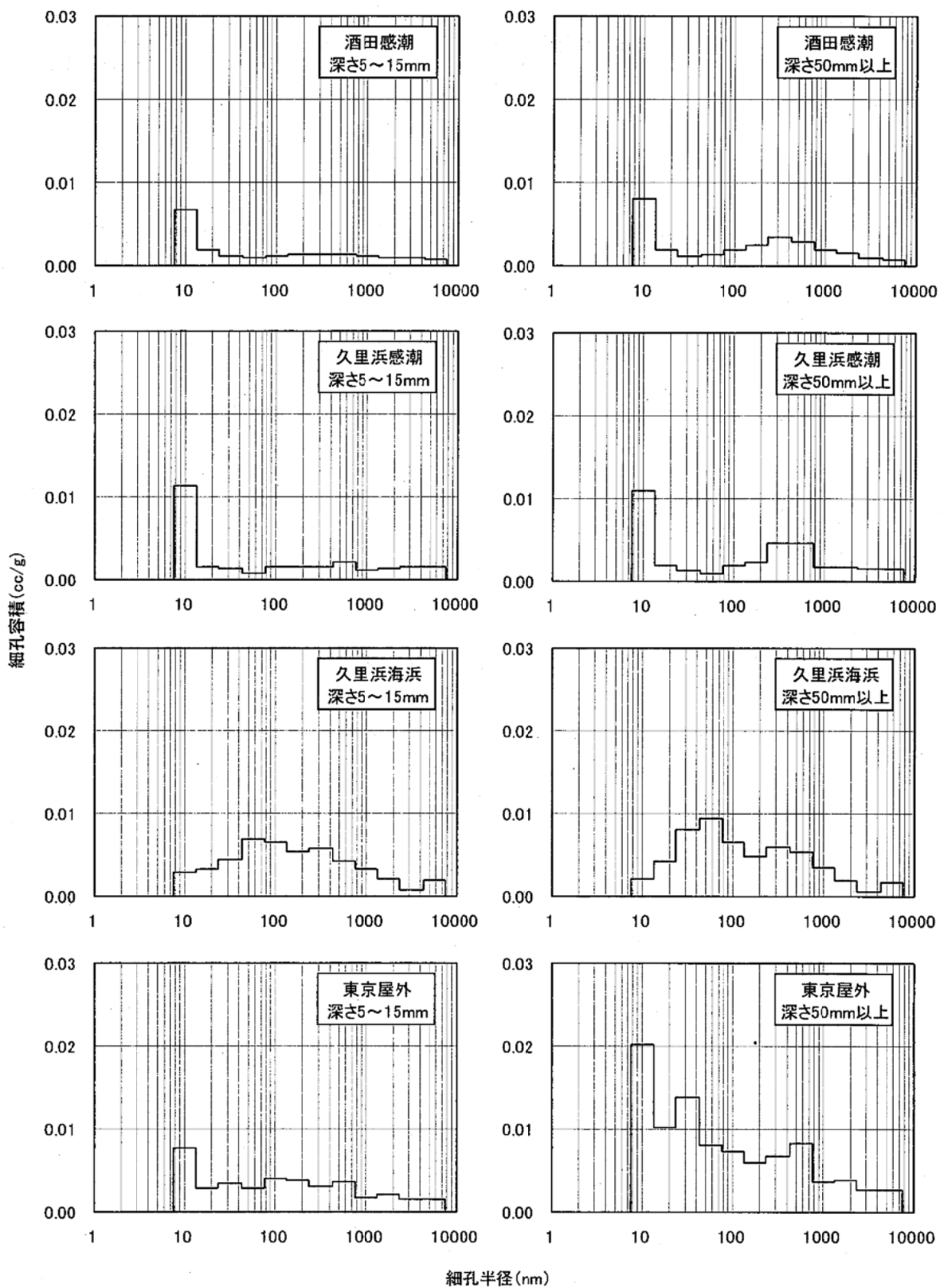
資料-図-3.17 細孔径分布 (MBB、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



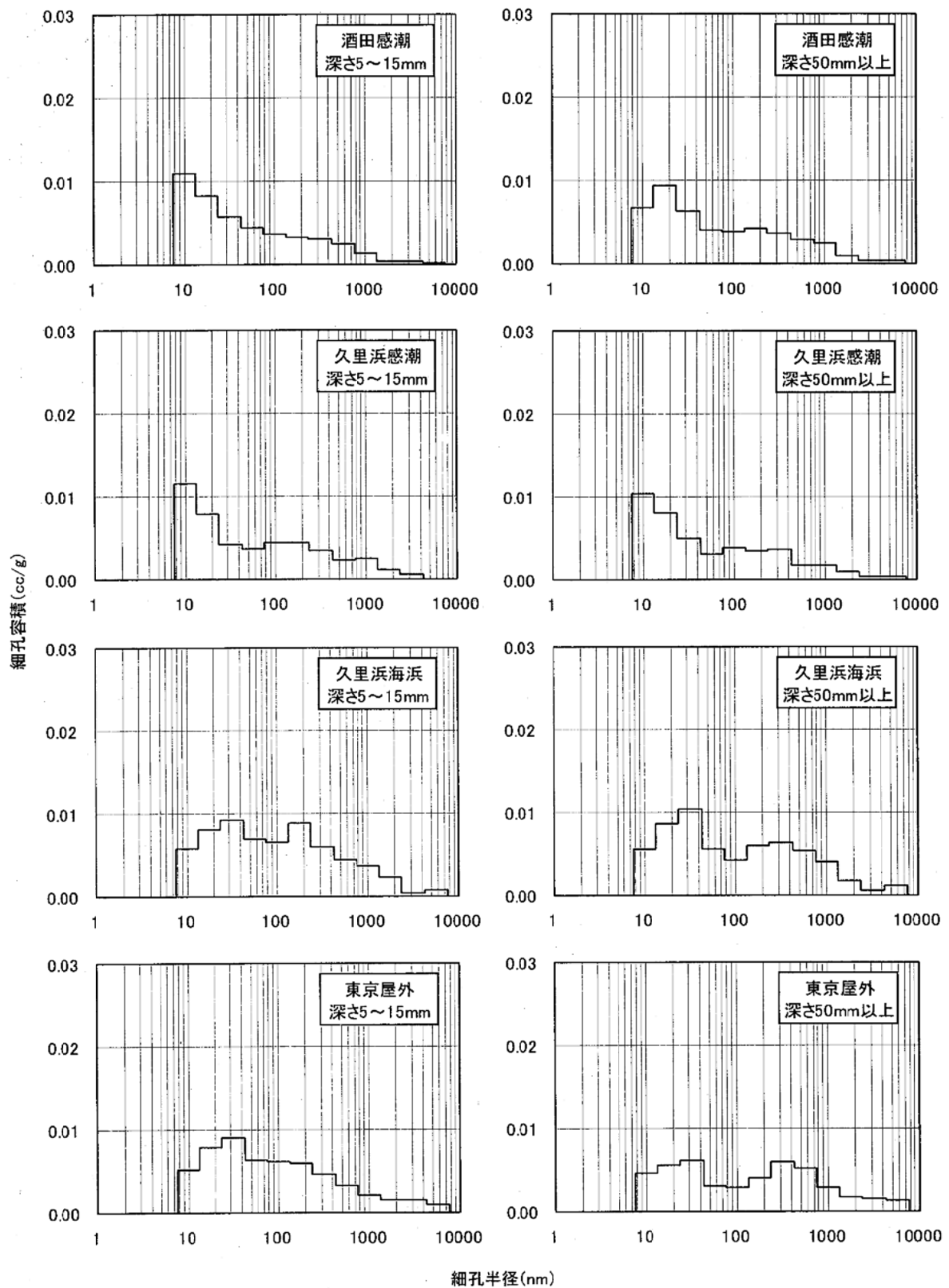
資料-図-3.18 細孔径分布 (LBB、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



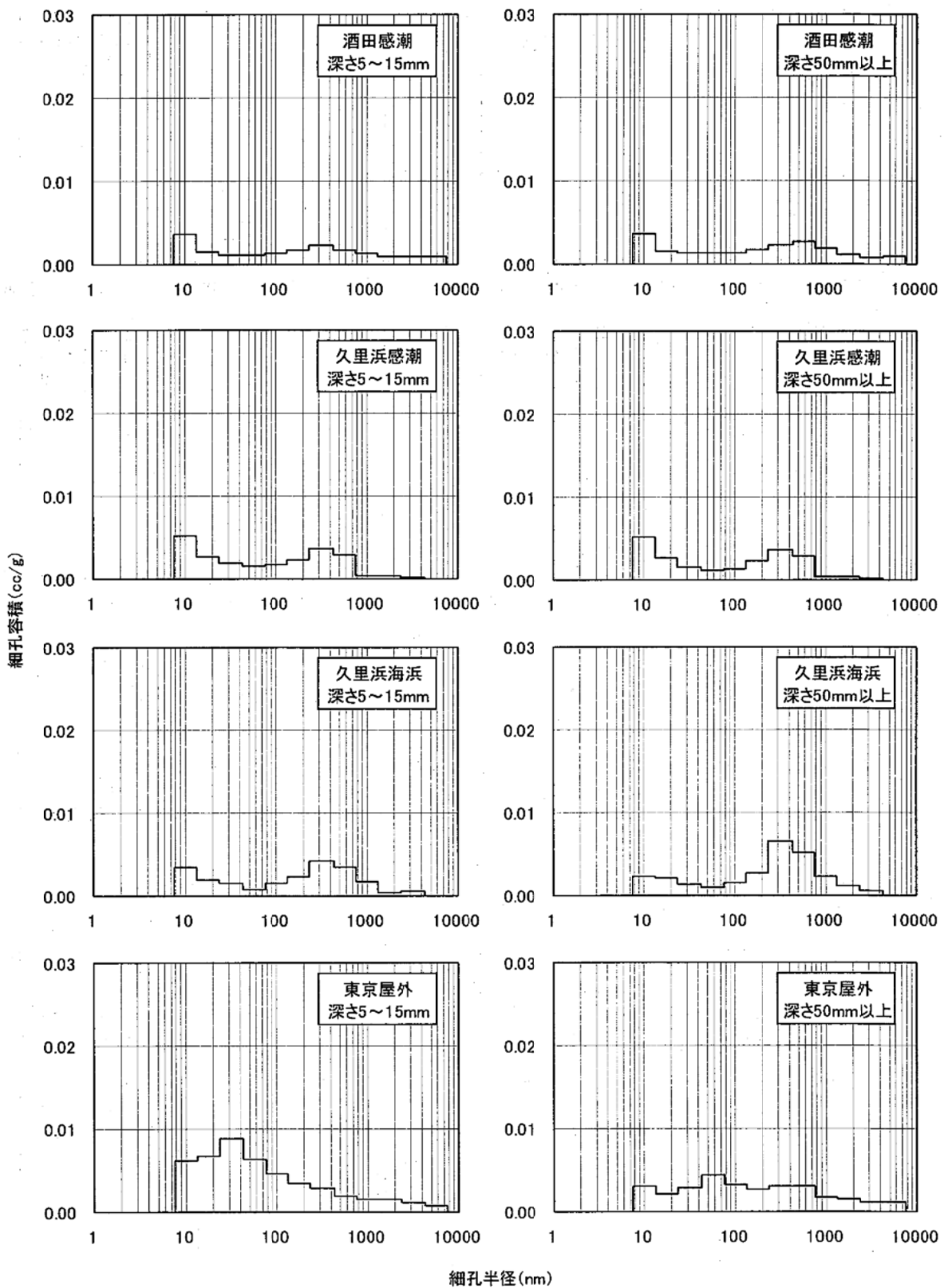
資料-図-3.19 細孔径分布 (FC、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



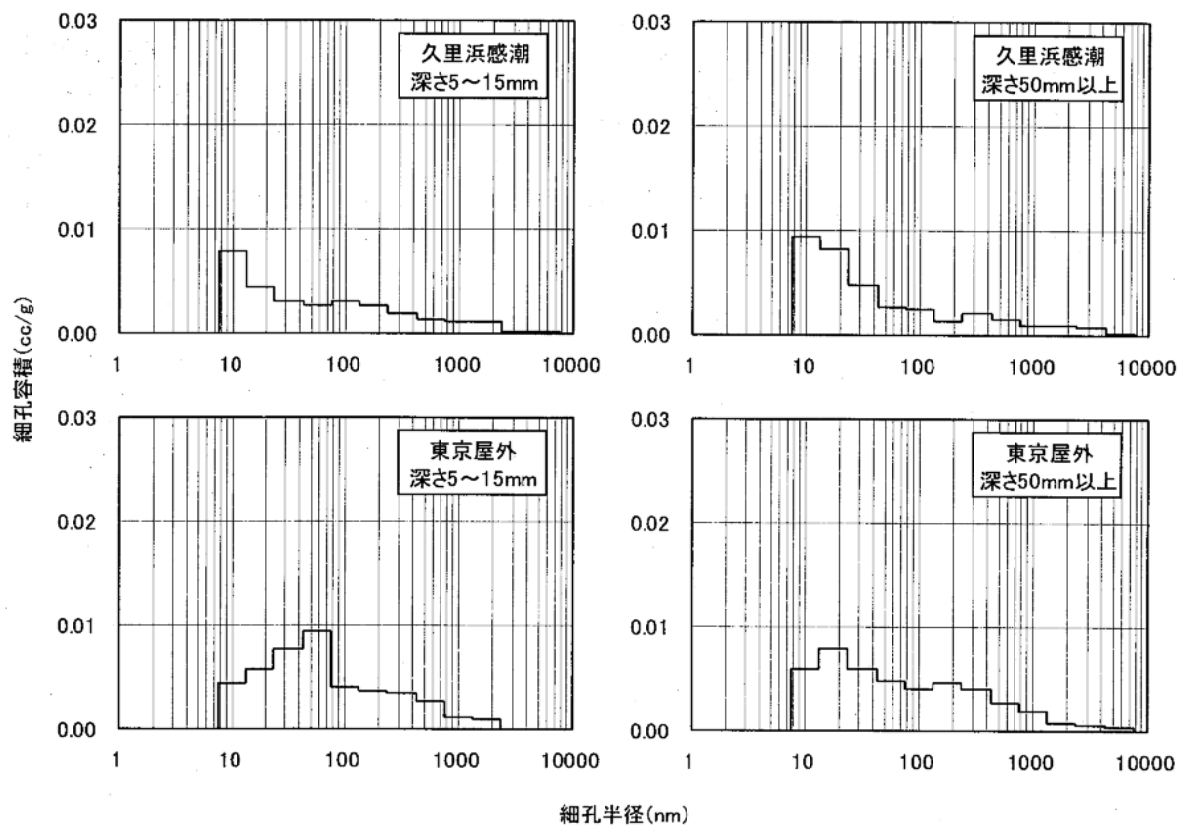
資料-図-3.20 細孔径分布 (FCN、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



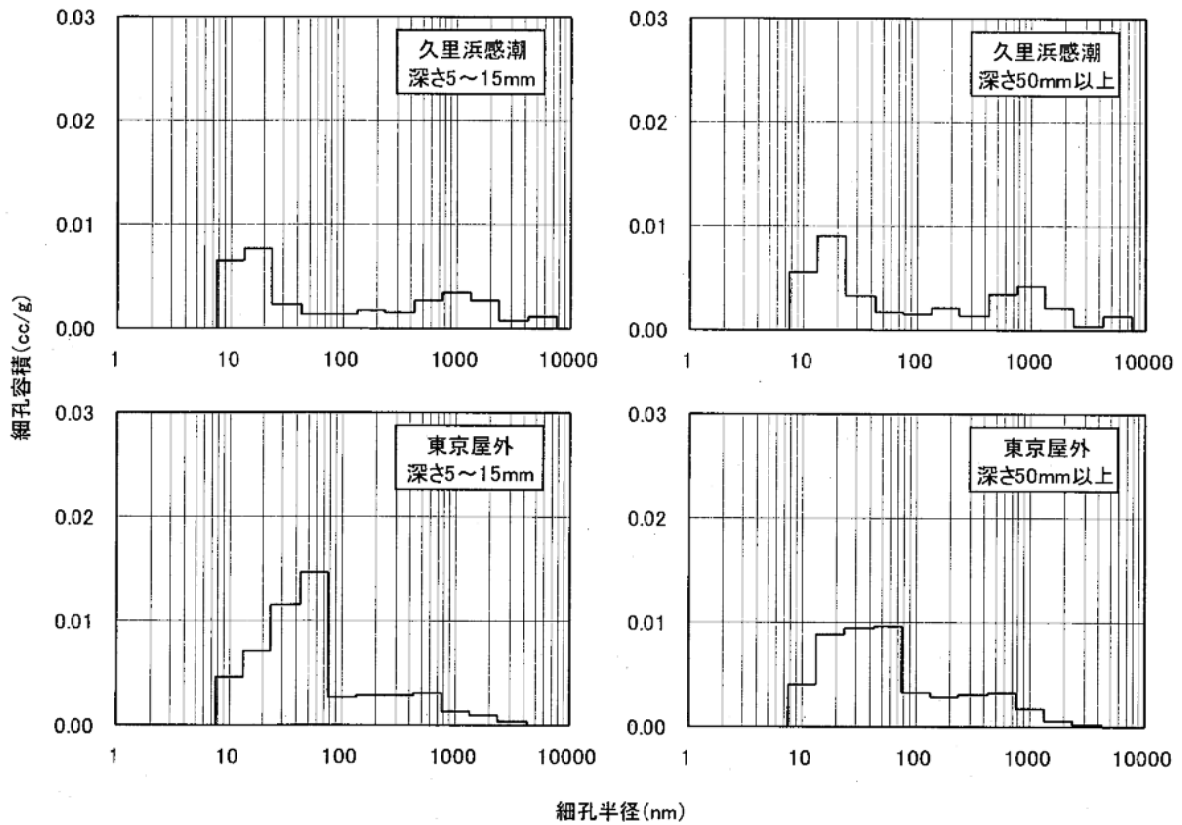
資料-図-3.21 細孔径分布 (LP、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



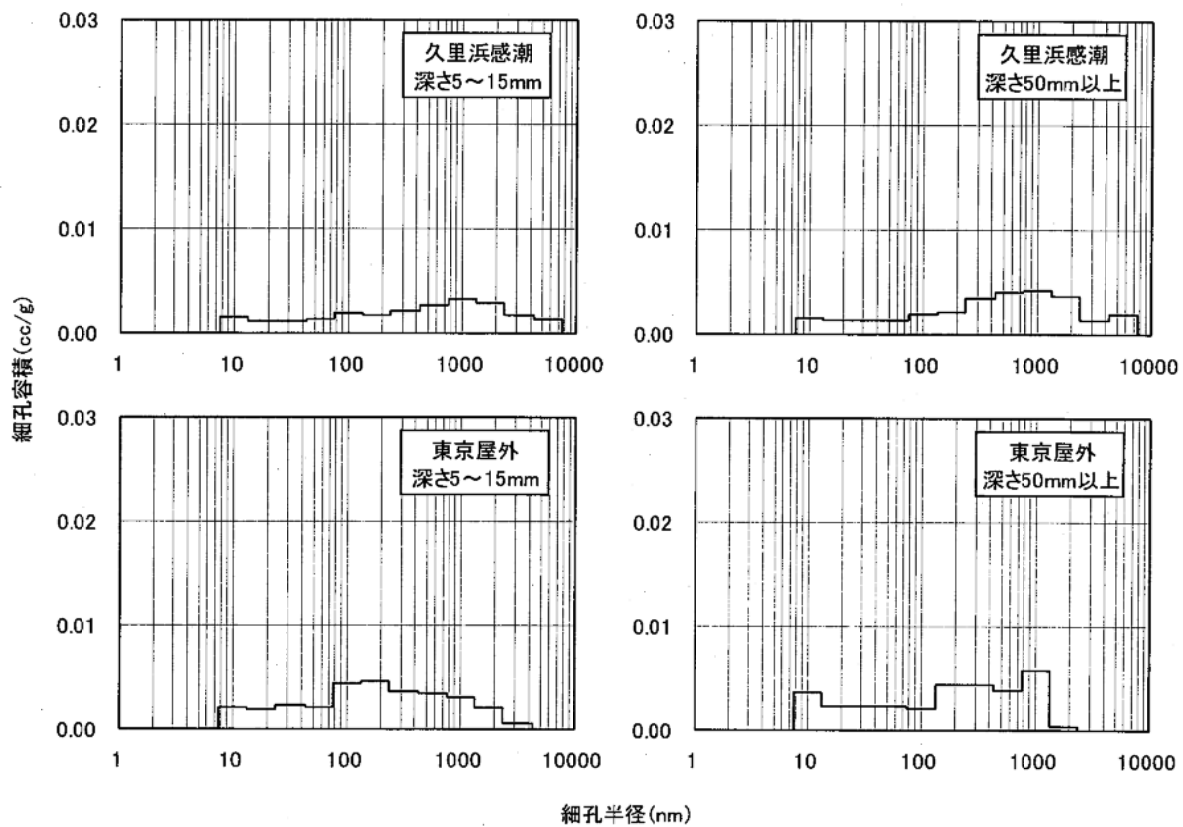
資料-図-3.22 細孔径分布 (NBF、水セメント比 50%、前養生 28 日、材齢 5 年)



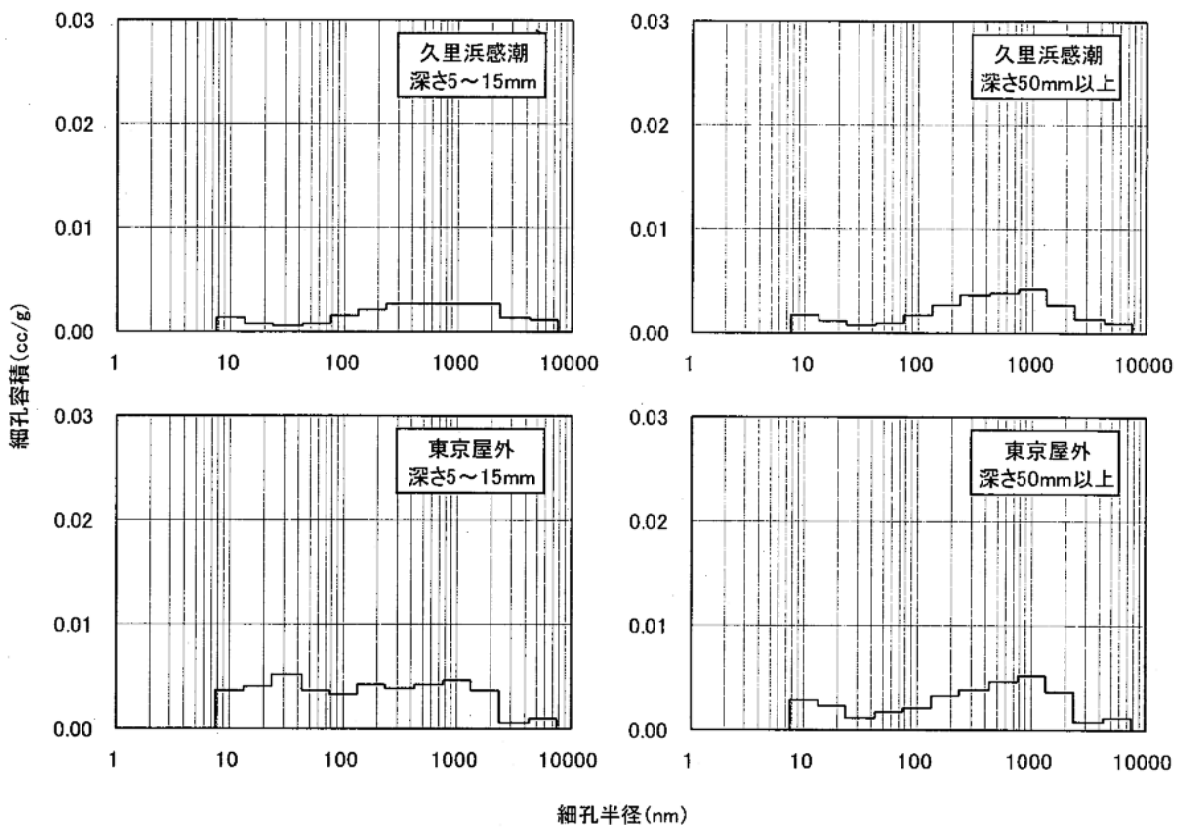
資料-図-3.23 細孔径分布 (NC、水セメント比 50%、前養生 91 日、材齢 5 年)



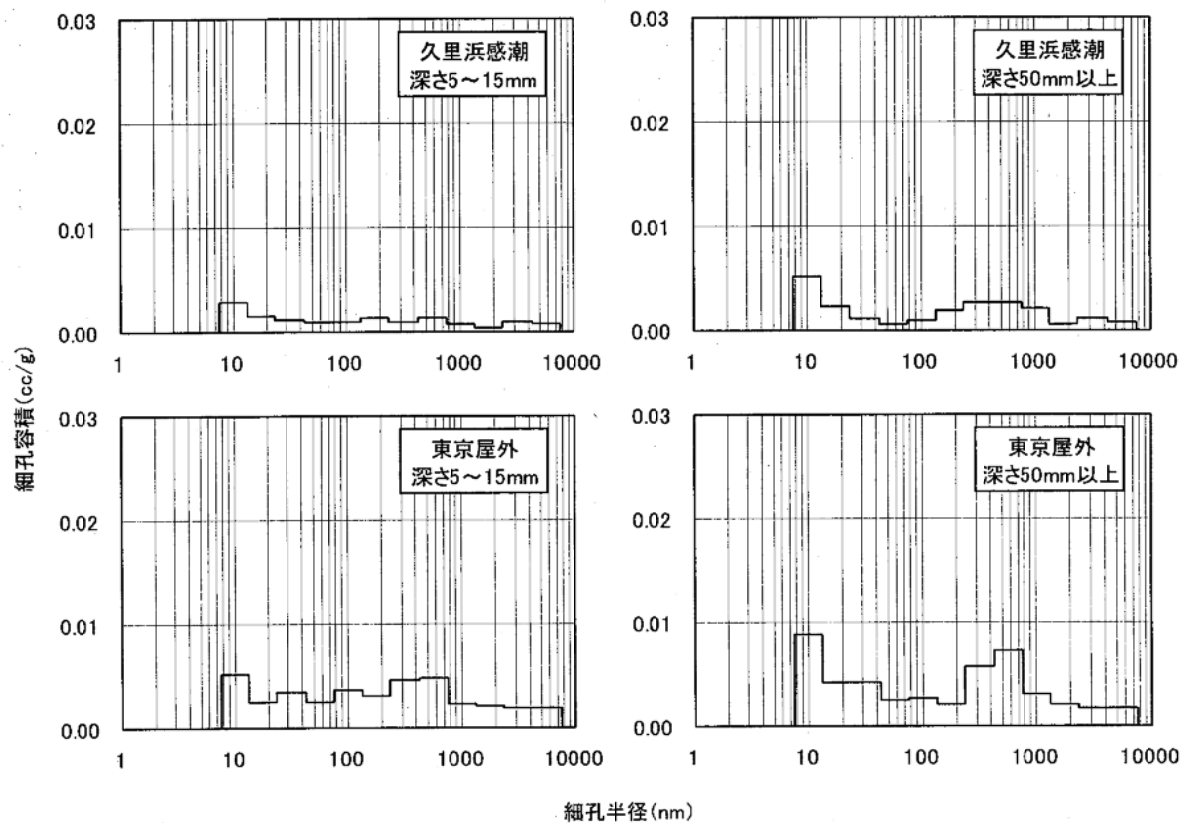
資料-図-3.24 細孔径分布 (LC、水セメント比 50%、前養生 91 日、材齢 5 年)



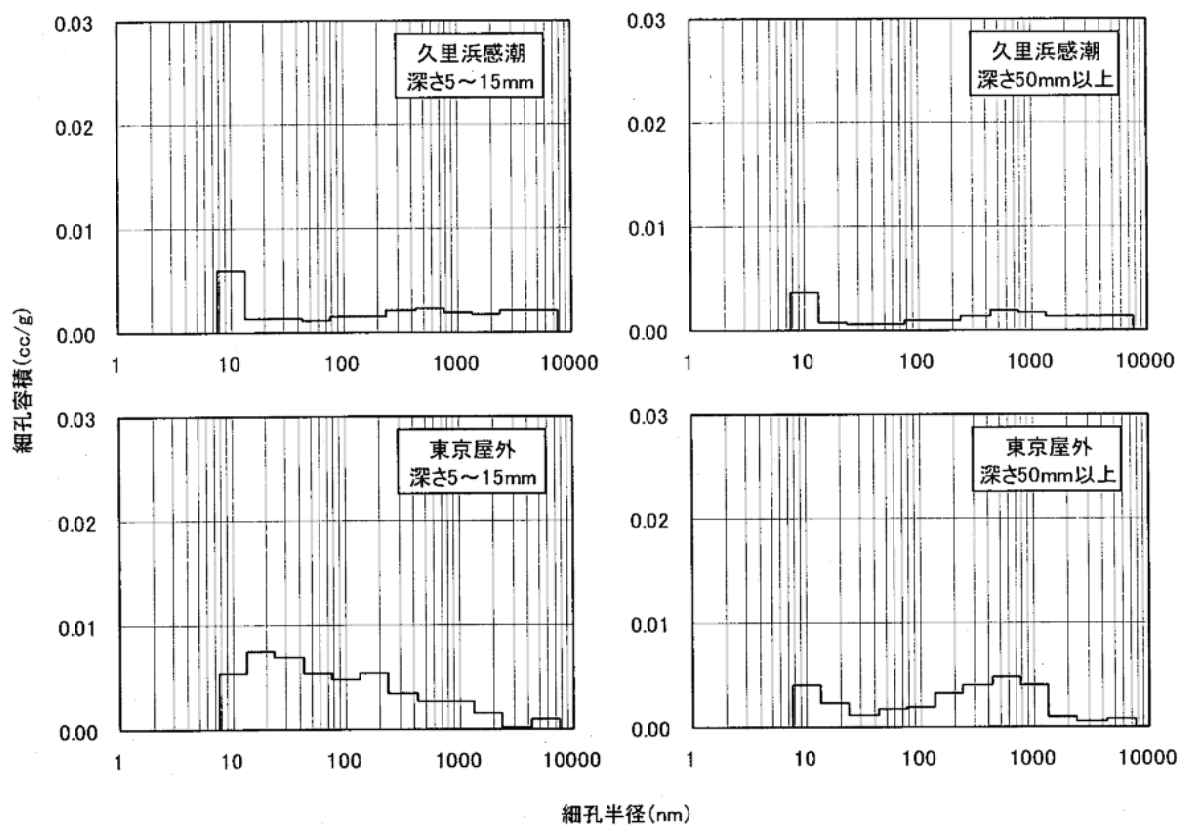
資料-図-3.25 細孔径分布 (NBB、水セメント比 50%、前養生 91 日、材齢 5 年)



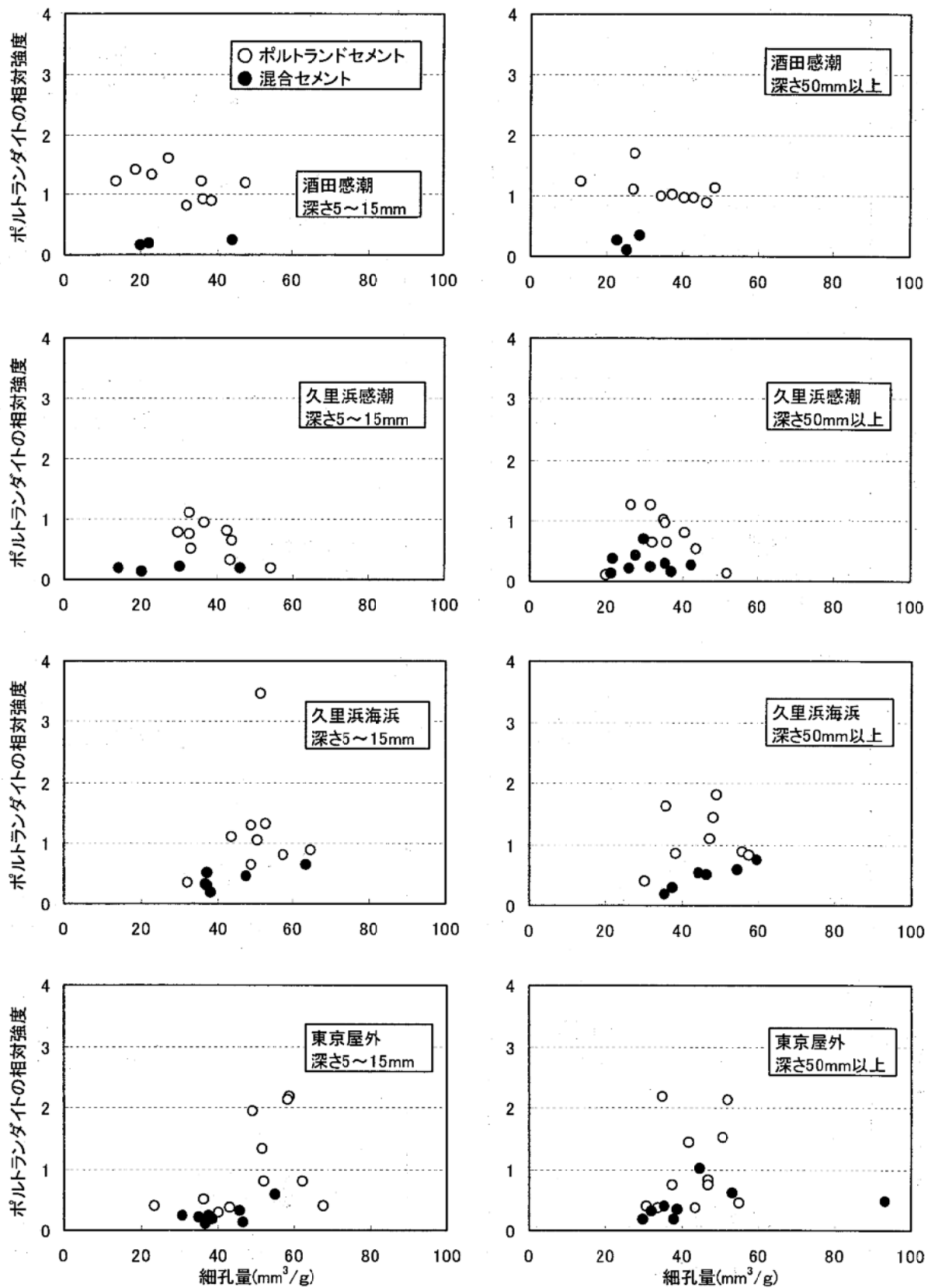
資料-図-3.26 細孔径分布 (LBB、水セメント比 50%、前養生 91 日、材齢 5 年)



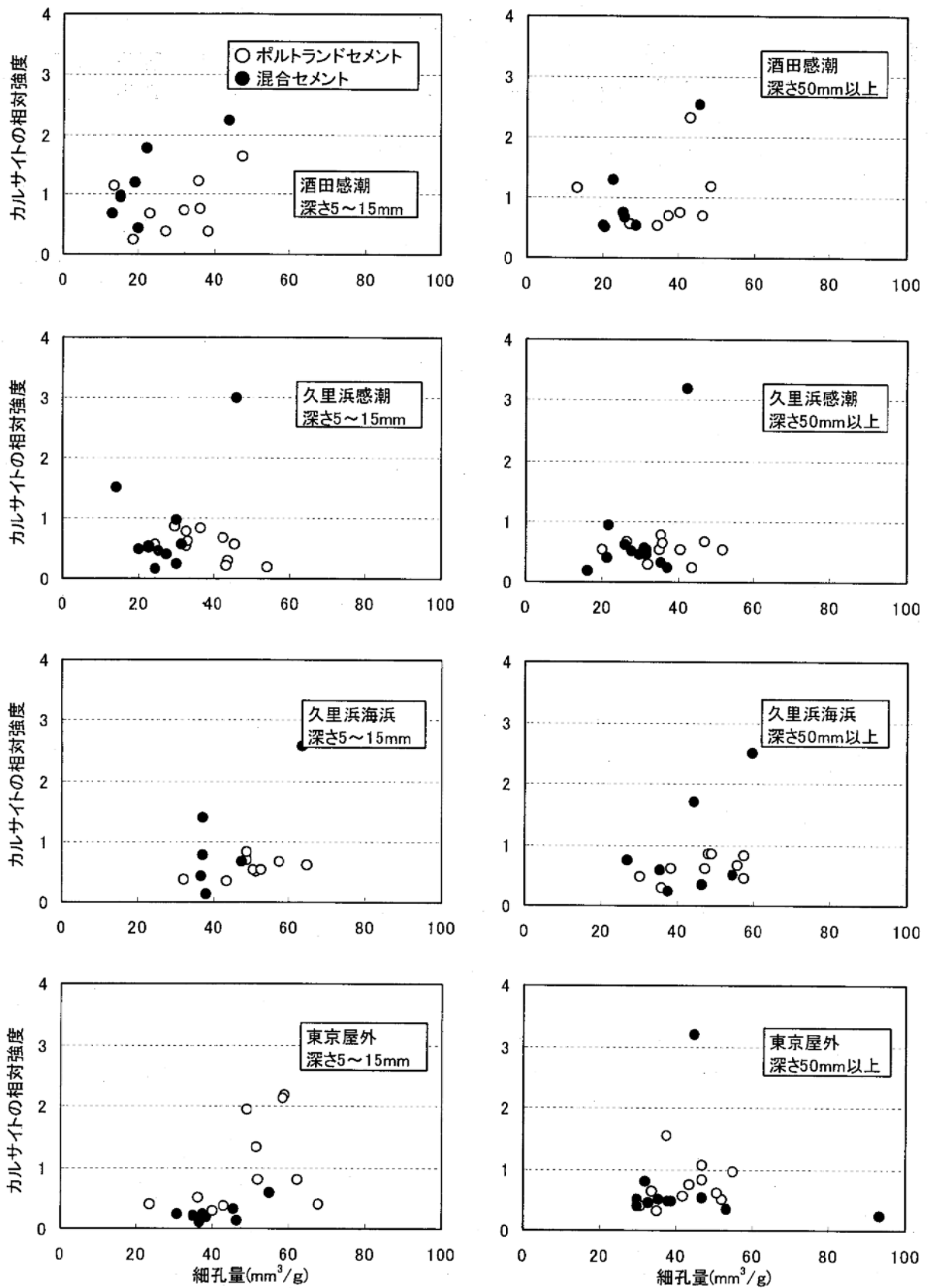
資料-図-3.27 細孔径分布 (FC、水セメント比 50%、前養生 91 日、材齢 5 年)



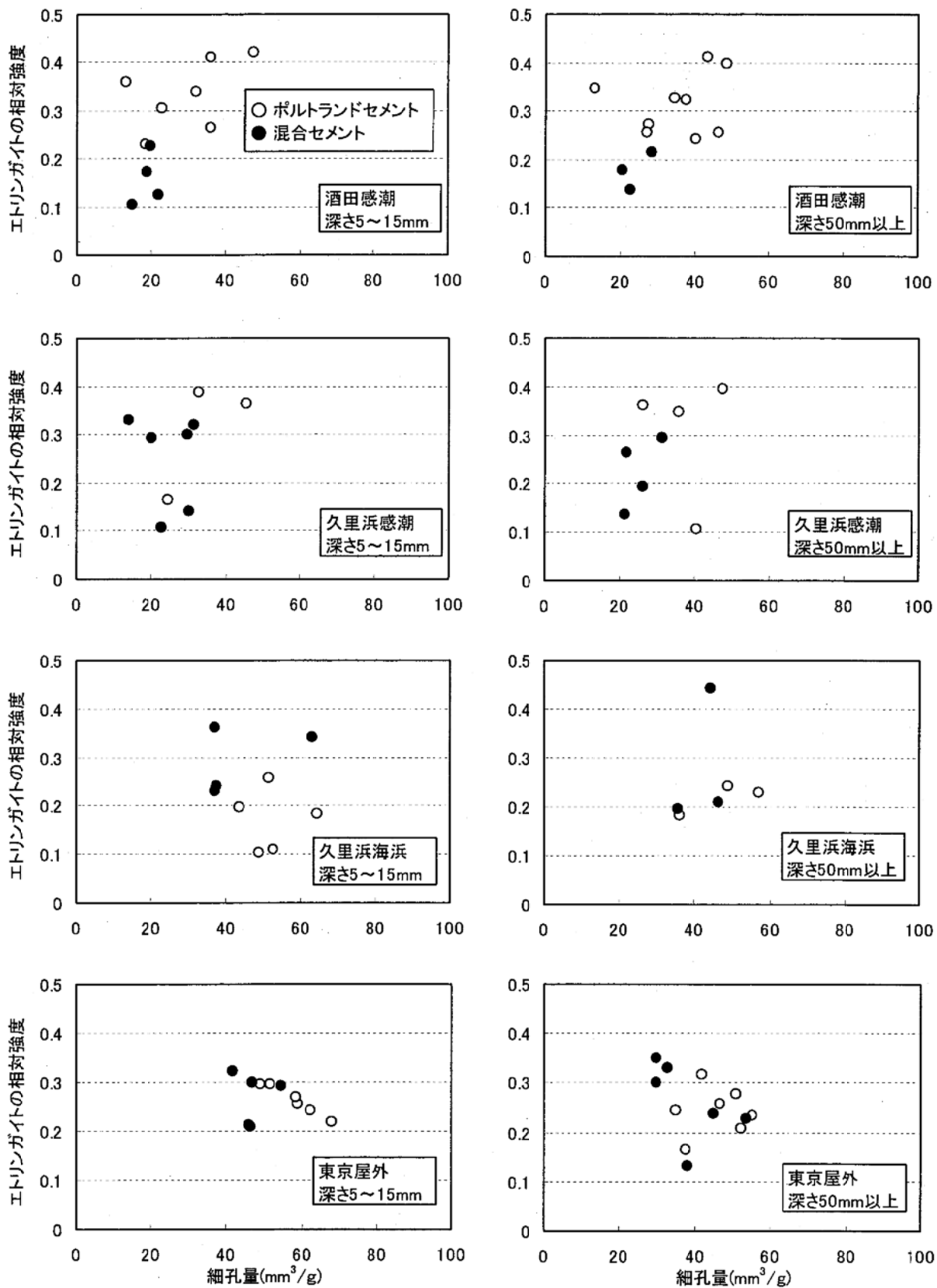
資料-図-3.28 細孔径分布 (NBF、水セメント比 50%、前養生 91 日、材齢 5 年)



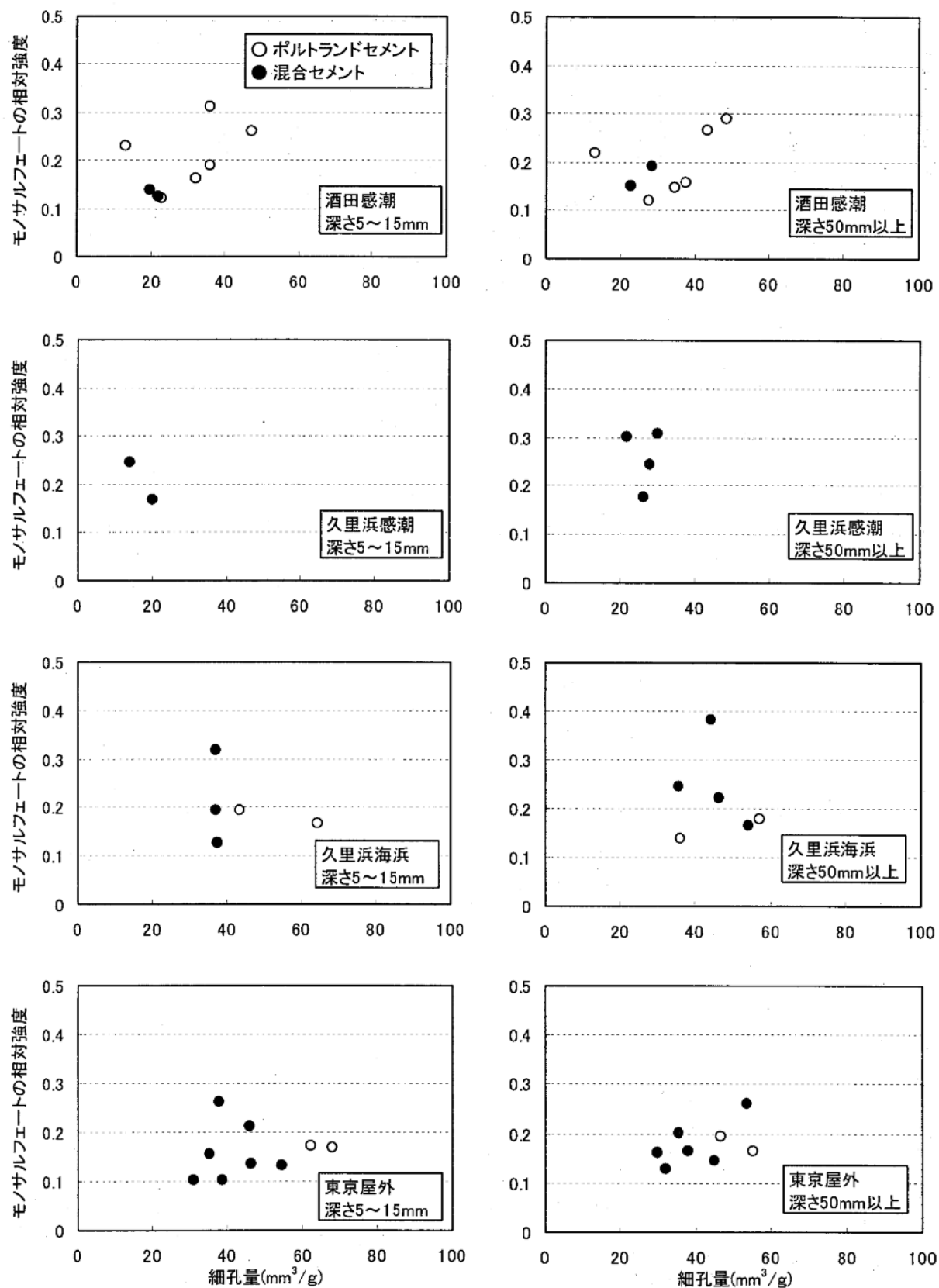
資料-図-3.29 細孔量とポルトランドセメントの相対強度の関係



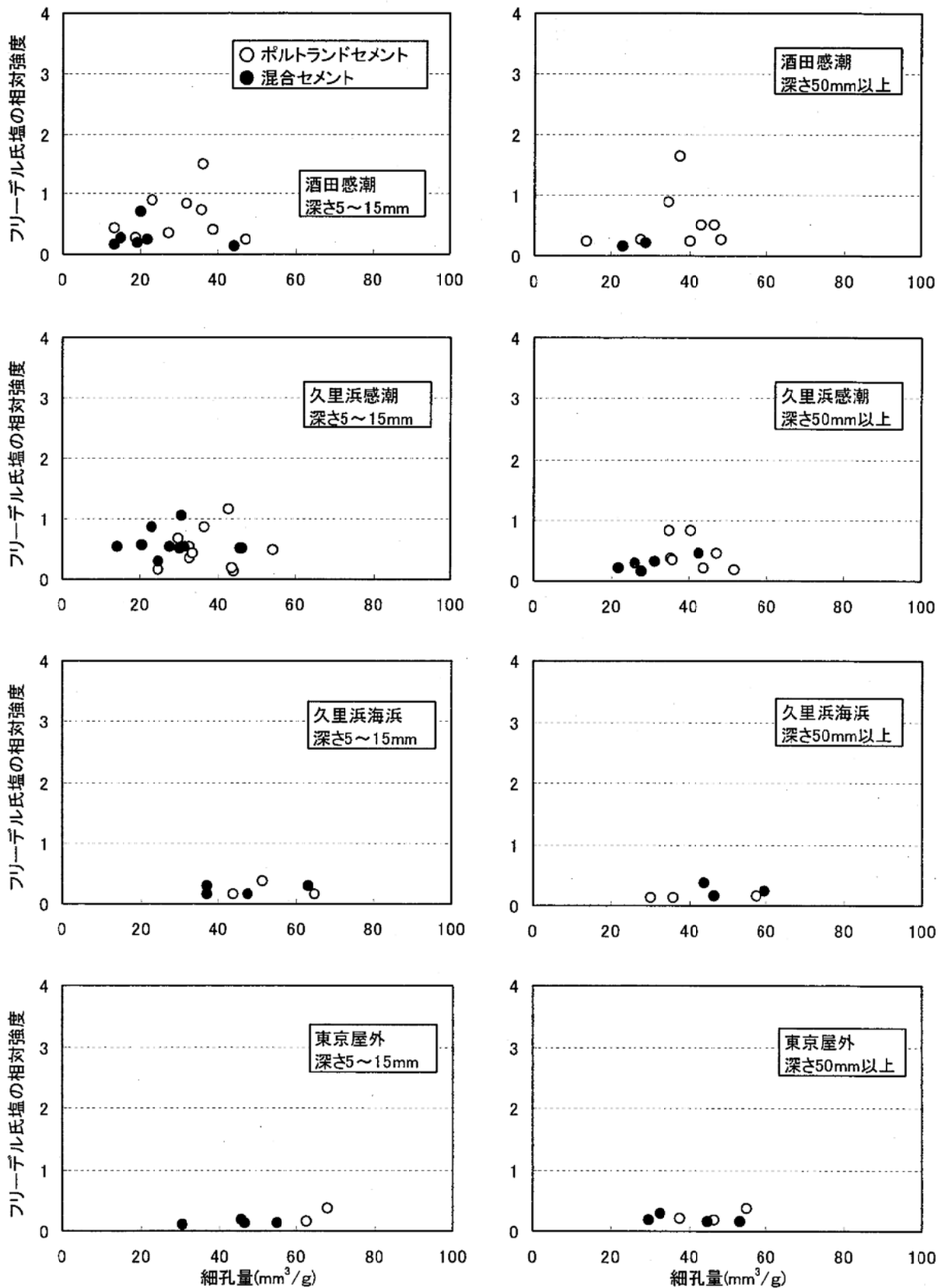
資料-図-3.30 細孔量とカルサイトの相対強度の関係



資料-図-3.31 細孔量とエトリンガイトの相対強度の関係



資料-図-3.32 細孔量とモノサルフェートの相対強度の関係



資料-図-3.33 細孔量とフリーデル氏塩の相対強度の関係

資料-4 鉄筋の発錆に関する試験測定結果

資料-表-4.1 鉄筋の発錆に関する試験結果(酒田感潮)

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	116.14	0.26	0.22	0.26	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I
				116.03	0.34	0.29			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			—	I
	50		5	115.71	0.48	0.41	0.52	33.8	0.48	0.34	0.34	1.01	I	
				115.19	0.71	0.62		13.7	0.19			—	I	
			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	
	60		5	114.85	0.56	0.49	0.41	26.1	0.37	1.32	1.31	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	0.00	—	I
				115.16	0.01	0.01			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			—	I
	50		5	115.33	0.31	0.27	0.23	2.0	0.03	0.01	0.11	—	I	
				115.03	0.22	0.19		0.00	0.00			—	I	
			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	
	60		5	115.80	0.60	0.52	0.35	81.5	1.15	0.67	0.60	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	0.00	—	I
				116.47	0.03	0.03			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			—	I
	50		5	115.46	0.17	0.15	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I
				115.29	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			—	I
	60		5	115.47	0.06	0.05	0.29	0.57	13.3	0.19	0.18	0.44	1.10	I
				115.39	0.62	0.54			12.8	0.18			1.06	I
			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-4.2 鉄筋の発錆に関する試験結果(酒田感潮)

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	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	0.00		—	I
				106.71	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I
MBB	50		5	115.20	0.24	0.21	0.10	0.11	0.00	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	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	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	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	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	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	0.00	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	0.05		—	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	0.15	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	0.17		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	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	0.00		—	I
				106.41	0.10	0.10			0.00	0.00			—	I

資料-表-4.3 鉄筋の発錆に関する試験結果(久里浜感潮)

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	0.0		—	I
				115.83	0.12	0.10			0.0	0.0			—	I
			7	105.27	0.00	0.00	0.00		0.0	0.0	0.0		—	I
				105.79	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I
	50		5	116.32	0.17	0.15	0.09	0.05	0.0	0.0	0.0		—	I
				115.57	0.05	0.04			0.0	0.0			—	I
			7	106.69	0.00	0.00	0.00		0.0	0.0	0.0		—	I
				106.10	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I
	60		5	114.94	0.32	0.28	0.32	0.34	18.0	0.25	0.13		0.71	I ⁺
				115.48	0.42	0.36			0.0	0.0			0.35	I ⁺
			7	106.06	0.32	0.31	0.36		30.2	0.46	0.23		0.43	I ⁺
				106.08	0.44	0.42			0.0	0.0			0.31	I ⁺
MC	40		5	116.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0		—	I
				115.77	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I
			7	105.84	0.01	0.01	0.00		16.1	0.25	0.12		—	I ⁺
				105.95	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I
	50		5	115.70	0.46	0.40	0.67	0.60	21.5	0.30	0.15		0.43	I ⁺
				115.61	1.08	0.93			0.0	0.0			1.08	I ⁺
			7	106.71	0.45	0.43	0.53		79.7	1.23	0.61		0.77	I ⁺
				105.32	0.67	0.64			0.0	0.0			1.20	I ⁺
	60		5	115.25	1.03	0.89	1.06	0.98	24.1	0.34	0.17		0.75	I ⁺
				115.48	1.41	1.22			0.0	0.0			1.04	I ⁺
			7	105.24	0.89	0.85	0.91		57.2	0.88	0.44		0.61	I ⁺
				105.76	1.02	0.97			0.0	0.0			0.85	I ⁺
LC	40	5	115.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0		—	I	
			116.94	0.01	0.01			0.0	0.0			—	I	
		7	105.56	0.00	0.00	0.00		0.0	0.0	0.0		—	I	
			106.27	0.01	0.01			0.0	0.0			—	I	
	50	5	115.43	0.39	0.34	0.22	0.15	11.0	0.16	0.08		0.12	I ⁺	
			114.99	0.11	0.10			0.0	0.0			—	I	
		7	106.07	0.19	0.18	0.09		9.0	0.14	0.07		0.30	I ⁺	
			105.97	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I	
	60	5	115.74	1.21	1.05	1.16	0.97	76.5	1.08	2.55		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 ⁺	
NBB	50	5	115.63	0.19	0.16	0.09	0.09	0.0	0.0	0.0		—	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	0.0		—	I	
			107.06	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I	
MBB	50	5	115.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0		—	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	0.0		—	I	
			105.38	0.00	0.00			0.0	0.0			—	I	

資料-表-4.4 鉄筋の発錆に関する試験結果(久里浜感潮)

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		
LBB	50	28	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		0.00	0.00	—	I
				106.98	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I		
FC	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		0.00	0.00	—	I
				106.95	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I		
FCN	50		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		0.00	0.00	—	I
				106.27	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I		
LP	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		0.00	0.00	—	I	
			106.47	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I			
NC	50	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			—	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			—	I			
LC	50	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			—	I			
		7	108.71	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	—	I	
			108.66	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I			
NBB	50	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			—	I			
		7	108.51	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	—	I	
			108.28	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			—	I			
		7	108.29	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	—	I	
			108.72	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			—	I			
		7	108.91	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	—	I	
			108.65	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			—	I			
		7	108.95	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	—	I	
			109.20	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I			

資料-表-4.5 鉄筋の発錆に関する試験結果(久里浜海浜)

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	0.00	—	I		
				115.52	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
				106.81	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			
				115.99	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			
				106.64	0.01	0.01		0.00	0.00		—	I					
	60		5	115.34	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I			
				115.53	0.08	0.07		0.00	0.00		—	I					
			7	106.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I			
				106.41	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I					
MC	40	5	115.66	0.07	0.06	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I			
			115.96	0.00	0.00			0.00	0.00				—	I			
		7	106.56	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	—	I	
			106.53	0.00	0.00			0.00	0.00				—	I			
	50	5	115.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I				
			115.03	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I						
		7	106.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I				
			105.94	0.01	0.01		0.00	0.00		—	I						
	60	5	116.23	0.08	0.06	0.03	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.59	—	I			
			115.42	0.01	0.00		125.6	1.78		—	I ⁺						
		7	105.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00		—	I			
			106.24	0.01	0.01		37.5	0.58		—	I ⁺						
LC	40	5	115.26	0.13	0.11	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I			
			115.42	0.00	0.00			0.00	0.00				—	I			
		7	106.22	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	—	I	
			107.09	0.00	0.00			0.00	0.00				—	I			
	50	5	115.47	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I			
			115.81	0.03	0.02		0.00	0.00		—	I						
		7	105.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		—	I			
			106.88	0.00	0.00		0.00	0.00		—	I						
	60	5	115.27	0.01	0.01	0.00	32.2	0.46	0.23	0.20	—	I ⁺					
			115.25	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I					
		7	105.78	0.01	0.01	0.00	21.9	0.34	0.17		—	I ⁺					
			105.95	0.00	0.00		0.00	0.00			—	I					

資料-表-4.6 鉄筋の発錆に関する試験結果(久里浜海浜)

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	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	0.00	0.00	0.00	—	I
				106.39	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I
MBB	50		5	115.42	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	106.04	0.00	0.00	0.00	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	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	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	0.00	—	I
				115.78	0.01	0.01			0.00	0.00			—	I
			7	105.85	0.06	0.06	0.03	0.02	0.00	0.00	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	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	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	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	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	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	0.00	0.00	0.00	—	I
				105.80	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I

資料-表-4.7 鉄筋の発錆に関する試験結果(東京屋外)

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
				115.57	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I
			7	107.06	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I
				105.41	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 ⁺
				116.35	0.35	0.30			0.00	0.00			—	I
			7	107.21	0.00	0.00	0.00		12.2	0.19	0.09		—	I ⁺
				105.91	0.01	0.01			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
				115.41	0.09	0.08			0.00	0.00			—	I
			7	105.74	0.00	0.00	0.00		19.7	0.30	0.15		—	I ⁺
				105.77	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I ⁺
MC	40		5	115.46	0.00	0.00	0.00	0.00	4.6	0.06	0.09	0.08	—	I
				116.09	0.01	0.01			8.3	0.12			—	I
			7	105.62	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.07		—	I
				105.42	0.01	0.01			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
				115.45	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I
			7	106.78	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I
				106.10	0.01	0.01			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
				115.59	0.01	0.01			0.00	0.00			—	I
			7	105.88	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I
				105.43	0.01	0.01			0.00	0.00			—	I
LC	40	5	115.06	0.00		0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I	
			115.53	0.04	0.04			0.00	0.00			—	I	
		7	105.44	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
			105.66	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	
			115.93	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	
		7	106.14	0.00	0.00	0.12		0.00	0.00	0.00		—	I	
			106.55	0.25	0.23			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	
			115.46	0.01	0.01			0.00	0.00			—	I	
		7	105.68	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		—	I	
			106.05	0.01	0.01			0.00	0.00			—	I	
NBB	50	5	115.57	0.00	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	0.00		—	I	
			105.41	0.01	0.01			0.00	0.00			—	I	
MBB	50	5	115.63	0.00	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	0.00		—	I	
			106.75	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	

資料-表-4.8 鉄筋の発錆に関する試験結果(東京屋外)

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	
LBB	50	28	5	116.22	0.00	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	0.00	0.00	0.00	—	I	
				105.43	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	
FC	5		115.47	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		106.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I		
			107.09	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I		
FCN	50		5	115.64	0.00	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	0.00	0.00	0.00	—	I	
				106.70	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	
LP	50		5	115.69	0.00	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	0.00	0.00	0.00	—	I	
				106.04	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I	
NBF	50	5	115.32	0.00	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	0.00	0.00	0.00	—	I		
			106.20	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I		
NC	50	5	117.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I		
			117.93	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	0.00	—	I		
			108.61	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I		
LC	50	5	118.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	I		
			118.14	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	0.00	—	I		
			108.27	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	0.00	—	I		
			118.44	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	0.00	—	I		
			108.59	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	0.00	—	I		
			118.82	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	0.00	—	I		
			108.12	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	0.00	—	I		
			118.58	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	0.00	—	I		
			108.69	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	0.00	—	I		
			118.74	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	0.00	—	I		
			108.13	0.00	0.00			0.00	0.00			—	I		

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AE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AE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AE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AE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
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

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
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
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昇
F-52	2005年7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

ISBN4-88175-078-0C3358¥1500E

コンクリート専門委員会報告 F52

定 価 : 本体 1,500 + 税

平成 18 年 3 月 20 日 印刷
平成 18 年 3 月 25 日 発行

社団法人 セ メ ン ト 協 会
東 京 都 中 央 区 八 丁 堀 4-5-4

ダヴィンチ桜橋 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 プリントニューライフ

東京都千代田区三崎町 2-12-5

電話 03 (3263) 0633

JCA