

コンクリート専門委員会報告
REPORT OF THE TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE
F-55

各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究

A Study on the durability of concrete made using various cements

2008年3月

(March 2008)

社団法人 セメント協会

JAPAN CEMENT ASSOCIATION

ABSTRACT

This study summarizes the results of tests on the durability of concrete made using various cements including normal, high-early-strength, moderate heat, and low heat portland cement, and Type B blast-furnace slag cement.

Concretes were proportioned with water-cement ratios (W/Cs) of 45, 55, and 65% and a target slump of 12 cm. The test items included the following: test for resistance to freezing and thawing, test for accelerated carbonation, and depth of chloride ion penetration in accordance with JIS, as well as test for apparent diffusion coefficient of chloride ions in concrete by submergence in salt water and test for effective diffusion coefficient of chloride ion in concrete by migration in accordance with the Japan Society of Civil Engineers (JSCE) standards (draft).

As for resistance to freezing and thawing, the relative dynamic modulus of specimens with all cement types was not less than 70% with a W/C of 65% and 55%, 80% with a W/C of 55%, respectively, proving that sufficient resistance is ensured regardless of the cement type, provided the required air content is entrained.

In regard to carbonation, the effective water-binder ratio was found to be in a linear relationship with the carbonation rate coefficient. Also, the test results assuming a general atmosphere revealed that the carbonation rate coefficient with all cement types exceeded the prediction equation specified in the Materials and Construction volume of JSCE's Standard Specifications for Concrete Structures. This can be attributed to the test conditions in which specimens were subjected to no supply of water in the acceleration test period, being prone to CO₂ permeation, and long-term strength gains were not expected to be very large, as drying hampered the progress of hydration.

In regard to apparent diffusion coefficient of chloride ions in concrete, Type B blast-furnace slag cement decreased comparison the others cements, whereas, chloride ion of concrete surface increased. It was found that Type B blast-furnace slag cement was high as ability to fixed of chloride ion, chloride ion was stopped. As well as effective diffusion coefficient of chloride ion in concrete, Type B blast-furnace slag cement decreased remarkable and effective diffusion coefficient increased as the W/C increased. However type B blast-furnace slag cement was remarkable little as all proportioned, it doesn't tend to distinct.

要旨

本研究は、各種セメント、すなわち、普通、早強、中庸熱、低熱の各ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いたコンクリートの耐久性に関する試験結果をとりまとめたものである。

試験を実施したコンクリートの配合は、スランプ 12cm、水セメント比 45、55、65%であり、実施した試験項目は、JIS 規格に準拠した凍結融解試験、促進中性化試験、塩化物イオン浸透深さ試験、また、土木学会規準案に準拠した浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験、電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験である。

凍結融解抵抗性については、水セメント比 55%、65%において、いずれのセメントにおいても相対動弾性係数は 70%以上、水セメント比 55%では 80%以上を満足することが確認され、所定の空気量が運行されていれば、セメントの種類によらず十分な凍結融解抵抗性を確保できることが確認された。

中性化については、有効水結合材比と中性化速度係数とは直線関係にあり、また、試験結果から一般大気中を想定した場合の中性化速度係数は、いずれのセメントにおいても土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕の予測式を上回る結果となった。これは、促進試験期間中、水分供給のない条件下に保存され炭酸ガスが浸入し易い条件であること、更に水分供給がないため水和の進行が停滞し、長期的な強度増進があまり期待できない条件であること等が影響しているものと考えられた。

浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数については、高炉セメント B 種が他のセメントに比べて小さく、一方、コンクリート表面の塩化物イオン量は大きい結果となり、塩化物イオンの固定化能力が大きく、遮塩性が高い傾向がうかがえた。電気泳動による実効拡散係数についても、高炉セメント B 種が著しく小さい結果となった。また、水セメント比が大きいほど実効拡散係数も大きくなる結果となった。ただし、高炉セメント B 種では配合によらず著しく小さい結果となり、傾向は判然としなかった。

序

コンクリートの耐久性に着目した配合設計を行なう場合、用途に応じて使用するセメントの種類やコンクリートの水セメント比を適切に選定する必要がある。

本研究は、コンクリートの耐久設計に資する汎用的な技術資料を得ることを目的として、本委員会が2002年9月から開始したものであり、室内実験と併せて、飛来塩分環境条件下での長期暴露試験についても実施中である。

今般、室内実験の検討結果を取りまとめたので報告するものである。

2008年 3月

社団法人 セメント協会 コンクリート専門委員会
(敬称略 順不同)

委員長	太平洋セメント株式会社	栩木 隆
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)
	電気化学工業株式会社	川原 正秀
	株式会社トクヤマ	土井 宏行
	株式会社宇部三菱セメント研究所	大西 利勝
	新日鐵高炉セメント株式会社	伊代田岳史 (兼安 真司 2007年9月 交替) (堀 健治 2003年8月 交替)
	株式会社宇部三菱セメント研究所	中山 英明 (高尾 昇 2006年3月 交替)
	社団法人セメント協会	村田 芳樹 島崎 泰 泉尾 英文 (野田 潤一 2006年3月 退任) (佐々木健一 2004年3月 退任)

目 次

1. 緒言.....	1
2. 実験概要.....	2
2.1 使用材料.....	2
2.1.1 セメント.....	2
2.1.2 骨材.....	2
2.1.3 練混ぜ水.....	3
2.1.4 混和剤.....	3
2.2 コンクリートの配合.....	3
2.3 コンクリートの練混ぜおよび成形.....	4
2.4 コンクリートの試験項目および方法.....	4
2.4.1 ブリーディング試験.....	4
2.4.2 圧縮強度試験.....	4
2.4.3 凍結融解試験.....	4
2.4.4 促進中性化試験.....	4
2.4.5 塩化物イオン浸透性試験.....	4
2.4.5.1 浸せきによる塩化物イオンの浸透深さ試験.....	4
2.4.5.2 浸せきによる塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験.....	5
2.4.5.3 電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数試験.....	5
2.5 試験項目と水準.....	6
3. 試験結果および考察.....	7
3.1 フレッシュコンクリート.....	7
3.1.1 ブリーディング.....	7
3.2 硬化コンクリート.....	8
3.2.1 圧縮強度.....	8
3.2.2 凍結融解.....	14
3.2.3 促進中性化深さ.....	17
3.2.4 塩化物イオン浸透性.....	21
3.2.4.1 浸せきによる塩化物イオンの浸透深さ.....	21
3.2.4.2 浸せきによる塩化物イオンの見掛けの拡散係数.....	22
3.2.4.3 電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数.....	26
4. 結言.....	32
参考文献.....	34
資料 1 乾式と湿式で切断した試料片の塩化物イオン比較試験結果.....	35

資料 2 試験記録	39
1. 圧縮強度に関する本試験結果とコンクリート標準示方書〔設計編〕の定数、推定 圧縮強度【本編 3.2.1】	39
2. コンクリート表面からの深さごとの不溶残分と全塩化物イオン 【本編 3.2.4.2】	40
3. コンクリート表面の全塩化物イオンと見掛けの拡散係数【本編 3.2.4.2】	41

1. 緒言

21世紀を迎えて、我が国は、地球温暖化防止、循環型社会確立への更なる努力、かつてない速度で進展する少子高齢化社会到来への対応などの諸問題を抱え、社会、産業、技術の大転換期を迎えており、建設分野においても、公共投資の削減やそれに伴うコスト縮減の必要性、新設から維持管理へのシフト、また、環境問題への対応などの大きな流れの中で、構造物の高耐久化、長寿命化を、より合理的に達成することが重要課題となり、これまでの仕様規定型の設計法に代わり、性能照査型の耐久設計への転換が進んでいる状況にある。このような中、コンクリートに対しては、構造物に要求される耐久性能に応じて、設計段階で材料、配合を適切に選定するための技術的蓄積の必要性がこれまで以上に増大するものと考えられる。

普通ポルトランドセメントや高炉セメントといった、国内需要の大部分を占めるセメントについては、例えば土木学会のコンクリート標準示方書においてそれらを用いた場合の各種耐久性関連の予測式が提示されており、また、中庸熱ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントなど、その他のセメントを用いた場合についても、個々にその耐久性を検討した研究については多くの蓄積がある。しかしながら、これら各種セメントを用いたコンクリートについて、その耐久性を総合的に把握できるデータは多くないのが現状と思われる。

本研究は、以上の状況に鑑み、コンクリートの耐久性に着目した配合設計をする上で、用途に応じてセメントの種類やコンクリートの水セメント比を適切に設定するための各種データを収集し、コンクリートの耐久設計に資するための技術資料を得ることを目的として実施したもので、今般、室内試験の結果がまとまったので報告するものである。

実験に使用したセメントは、普通、早強、中庸熱、低熱の各ポルトランドセメントと高炉セメントB種の合計5種類であり、JIS規格に準拠して、凍結融解、促進中性化、塩化物イオン浸透深さを、また、土木学会規準案に準拠して、浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数、電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数を試験した。

なお、中性化および塩化物イオン浸透に関する試験では、室内試験の実施と同時に、飛来塩分の影響を受けない内陸地域（東京都北区）および飛来塩分の影響を受ける海沿い地域（山形県酒田市）で材齢20年までの暴露試験を実施中である。

2. 実験概要

2.1 使用材料

2.1.1 セメント

セメントは、市販の普通ポルトランドセメント（以下、普通セメント、記号 N）、早強ポルトランドセメント（以下、早強セメント、記号 H）、中庸熱ポルトランドセメント（以下、中庸熱セメント、記号 M）、低熱ポルトランドセメント（以下、低熱セメント、記号 L）および高炉セメント B 種（以下、記号 BB）の 5 種類を使用した。なお、中庸熱セメントは 2 銘柄、その他はそれぞれ 3 銘柄を任意に選定し、等量で混合したものを試料とした。

これらセメントの化学成分および物理的性質を表-2.1 および表-2.2 に示す。

表-2.1 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	Na ₂ Oeq	Cl ⁻
N	2.41	0.10	20.36	5.33	2.80	64.59	0.97	2.16	0.27	0.34	0.49	0.016
H	1.36	0.10	20.31	4.78	2.66	65.35	1.10	3.12	0.26	0.39	0.52	0.009
M	0.90	0.05	23.63	3.64	3.82	63.86	0.82	2.07	0.29	0.45	0.59	0.005
L	0.75	0.07	25.94	3.11	3.16	62.83	0.85	2.44	0.25	0.39	0.51	0.003
BB	1.20	0.12	26.12	9.38	1.83	54.77	3.23	1.86	0.25	0.37	0.49	0.012

表-2.2 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)		1 日	3 日	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日
N	3.15	3360	28.0	2-21	3-25	良	—	29.2	44.1	62.8	—	—	—
H	3.13	4460	31.0	1-37	2-40	良	27.4	45.4	54.8	65.3	—	—	—
M	3.21	3290	27.2	3-18	5-05	良	—	21.0	30.2	57.7	—	270	325
L	3.23	3490	28.6	3-44	5-45	良	—	11.4	16.3	54.0	76.1	203	275
BB	3.03	3810	29.6	2-56	4-30	良	—	20.7	33.7	61.3	—	—	—

2.1.2 骨材

粗骨材は、粗粒率が 6.63 の碎石 2005 を、また、細骨材は、粗粒率が 2.77 のものを使用した。これら骨材の粒度および物性を表-2.3 および表-2.4 に示す。

表-2.3 骨材の粒度

分類	種類	産地	ふるい目の寸法 (mm)	ふるい通過量(%)										粗粒率
				25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
粗骨材	硬質砂岩碎石	東京都青梅市産	100	97	79	39	1	0	—	—	—	—	—	6.63
細骨材	山砂	千葉県君津市産	—	—	—	100	92	80	67	52	29	3	—	2.77

表-2.4 骨材の物性

分類	密度 (g/cm ³)		単位容 積質量 (kg/l)	実積率 (%)	吸水率 (%)	微粒 分量 (%)
	表乾	絶乾				
粗骨材	2.65	2.63	1.68	63.9	0.74	0.8
細骨材	2.63	2.59	1.86	71.9	1.63	0.1

2.1.3 練混ぜ水

練混ぜ水は、上水道水を使用した。

2.1.4 混和剤

混和剤は、AE 減水剤および AE 助剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合条件は、目標スランプを 12 ± 1.5 cm、目標空気量を $4.5 \pm 0.5\%$ とし、水セメント比を 45、55、65% の 3 水準とした。また、コンクリート物性に対する粗骨材の影響を平準化するため、すべての配合の単位粗骨材量を同一とした。

コンクリートの配合を表-2.5 に示す。スランプ試験は JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」、空気量試験は JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に準じて行った。

表-2.5 コンクリートの配合

セメ ント の種 類	W/C (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 添加量※ (g/m ³)	AE 剂 添加量 (g/m ³)	スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	温度 (°C)
			水	セメ ント	細骨材	粗骨材					
N	45	42.2	155	344	772	1058	860	17	12.5	4.8	21.0
	55	43.8	155	282	825	1058	705	14	13.0	5.0	21.0
	65	44.9	155	238	861	1058	595	12	13.0	4.7	21.0
H	45	42.1	155	344	770	1058	860	21	12.5	4.7	21.0
	55	43.7	155	282	823	1058	705	14	13.5	4.0	21.0
	65	44.8	155	238	860	1058	595	12	12.5	4.2	21.0
M	45	42.8	152	338	791	1058	845	14	12.5	4.3	21.0
	55	44.3	152	276	841	1058	690	11	13.5	4.3	21.0
	65	45.3	152	234	876	1058	585	9	12.5	4.4	21.0
L	45	42.8	152	338	792	1058	845	17	12.5	4.5	21.0
	55	44.3	152	276	843	1058	690	8	13.5	4.3	21.0
	65	45.3	152	234	878	1058	585	9	10.5	5.0	21.0
BB	45	41.8	155	344	760	1058	860	17	12.5	4.1	21.0
	55	43.5	155	282	828	1058	705	14	12.0	4.3	21.0
	65	44.6	155	238	853	1058	595	12	10.5	4.4	21.0

※ AE 減水剤はセメント質量の 0.25% を添加した。

2.3 コンクリートの練混ぜおよび成形

コンクリートの練混ぜおよび成形は、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」および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。

練混ぜに使用したミキサは、パン型強制練りミキサ(公称容量 55L)であり、練混ぜの方は、粗骨材、細骨材、セメント投入後、空練り 30 秒、その後、混和剤を分散させた練混ぜ水を投入し 90 秒の練混ぜとした。

2.4 コンクリートの試験項目および方法

2.4.1 ブリーディング試験

JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に準じて行った。

2.4.2 圧縮強度試験

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。供試体の寸法は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ とし、養生方法は標準養生とした。試験材齢は、7 日、28 日、91 日とし、低熱セメントのみ 56 日を追加した。

2.4.3 凍結融解試験

JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に準じて行った。水中凍結融解試験方法(A 法)により、30 サイクルごとにたわみ振動の一次共鳴振動数および質量を 300 サイクルまで測定した。試験開始までの養生は 28 日標準養生とし、低熱セメントのみ 56 日を追加した。

2.4.4 促進中性化試験

JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じて行った。促進試験開始後、促進期間が 1 週、4 週、8 週、13 週、26 週の各促進期間で中性化深さを測定した。前養生は 28 日標準養生とし、低熱セメントのみ 56 日を追加した。

2.4.5 塩化物イオン浸透性試験

2.4.5.1 浸せきによる塩化物イオンの浸透深さ試験

濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液に 26 週間浸せき後、JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に従い、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、蛍光を発する部分の深さを測定し、その平均値を塩化物イオン浸透深さとした。

供試体の形状を図-2.1 に示す。 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を 3 体作製し、両端面約 2.5cm を切断除去して、高さ 15cm 程度に成形した。浸せき前の養生は 28 日標準養生とし、低熱セメントのみ 56 日を追加した。養生後、打ち込み側の 1 面のみを残し、底面側の 1 面および側面(円周面)をエポキシ樹脂塗料で被覆して浸せきした。以下、本試験を発色法と称す。

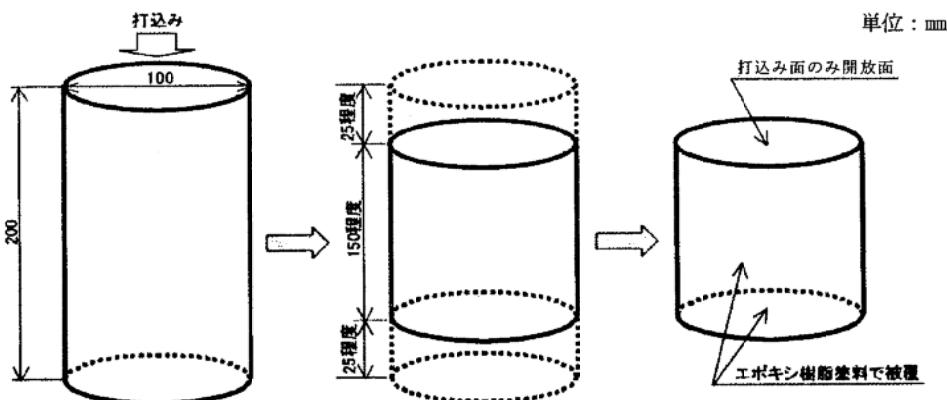


図-2.1 供試体の形状¹⁾

2.4.5.2 浸せきによる塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験

JSCE-G-572-2003「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」¹⁾に準じて行った。同試験は 2.4.5.1 で測定した供試体表面に接着しているエポキシ樹脂塗料を取り除き、コンクリートカッターで打ち込み面から約 0.5cm 厚で 5 箇所より試験片を採取した。これら試験片中の全塩化物イオン量と初期全塩化物イオン量（初期全塩化物イオン量調査用供試体の試験値による）から見掛けの拡散係数を算出した。

全塩化物イオン量の算出に際しては、骨材量の相違による影響を補正するため、JSCE-G-573-2003 「実構造物におけるコンクリート中の塩化物イオン分布の測定方法（案）付属書 コンクリート中の全塩化物イオン濃度の測定結果の含有割合に及ぼす骨材量の影響の補正方法」¹⁾に準じて各試料の不溶残分を測定し、補正算出を行った。

なお、JSCE-G-572-2003 ではコンクリートカッターを用いて乾式で試験片を切り出すこととされているが、試験片が薄い場合には切り出し作業に困難を伴うことが考えられた。そのため、乾式と湿式での比較試験を行ない、測定された塩化物イオン量に明瞭な差異が確認されなかったことから、本実験では湿式により切断を行なうこととした。

比較試験結果を巻末の資料 1（乾式と湿式で切斷した試料片の塩化物イオン比較試験結果）に示す。

2.4.5.3 電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数試験

JSCE-G-571-2003「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」¹⁾に準じて行った。 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を 3 体作製し、標準養生後、コンクリートカッターで中心部から $\phi 10 \times 5\text{cm}$ のコンクリートを切り出して試験供試体とした。

試験方法に基づき供試体にエポキシ樹脂塗料の塗布等を施し、図-2.2 の電気泳動試験装置で陽極側の塩化物イオン濃度を測定し、実効拡散係数を算出した。前養生は 28 日標準養生とし、低熱セメントのみ 56 日を追加した。

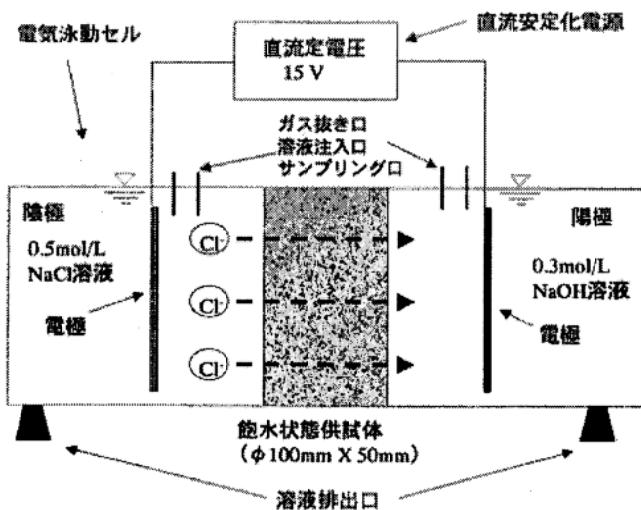


図-2.2 電気泳動試験装置¹⁾

2.5 試験項目と水準

試験項目と水準を表-2.6 に示す。なお以後、適宜、コンクリートの配合を N55（普通セメント使用、水セメント比 55% の場合）等と略記し、低熱セメントについては養生期間を 56 日とした配合を L55（56d）と略記する。

表-2.6 試験項目と水準

試験項目 セメントの 種類 W/C (%)	N			H			M			L			BB		
	45	55	65	45	55	65	45	55	65	45	55	65	45	55	65
ブリーディング	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
圧縮強度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
凍結融解		○	○		○	○		○	○		○	○		○	○
促進中性化	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
塩化物イオン浸透深さ		○			○			○			○			○	
浸せきによる塩化物イオンの見掛けの拡散係数		○			○			○			○			○	
電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリート

3.1.1 ブリーディング

ブリーディング試験結果を表-3.1 および図-3.1 に示す。水セメント比が大きい配合ではブリーディング量ならびにブリーディング率も大きくなる結果となった。また、比表面積の大きい早強セメントを使用したコンクリートではブリーディング量ならびにブリーディング率が小さくなつた。

ブリーディング量が過大な場合、ブリーディング水の上昇によって特に上層部コンクリートは多孔化し、強度、耐久性、水密性などに影響する。

土木学会のコンクリート標準示方書²⁾（以下、示方書）では、特にブリーディング量の上限は定められていないが、日本建築学会の指針類^{3) 4)}では、ブリーディング量の目標値として $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下との値が示されている。

本実験でのすべての配合はこの目標値の半分以下の試験結果を示しており、本実験ではブリーディングの影響が少ない条件での評価が得られたものと考えられる。

表-3.1 ブリーディング試験結果

セメントの種類	W/C (%)	単位水量 (kg/m^3)	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)	ブリーディング率 (%)
N	45	155	0.07	1.89
	55	155	0.10	2.61
	65	155	0.11	2.82
H	45	155	0.05	1.31
	55	155	0.07	1.81
	65	155	0.08	2.08
M	45	152	0.11	2.76
	55	152	0.11	2.89
	65	152	0.12	3.16
L	45	152	0.06	1.67
	55	152	0.09	2.43
	65	152	0.09	2.36
BB	45	155	0.09	2.40
	55	155	0.11	2.71
	65	155	0.11	3.08

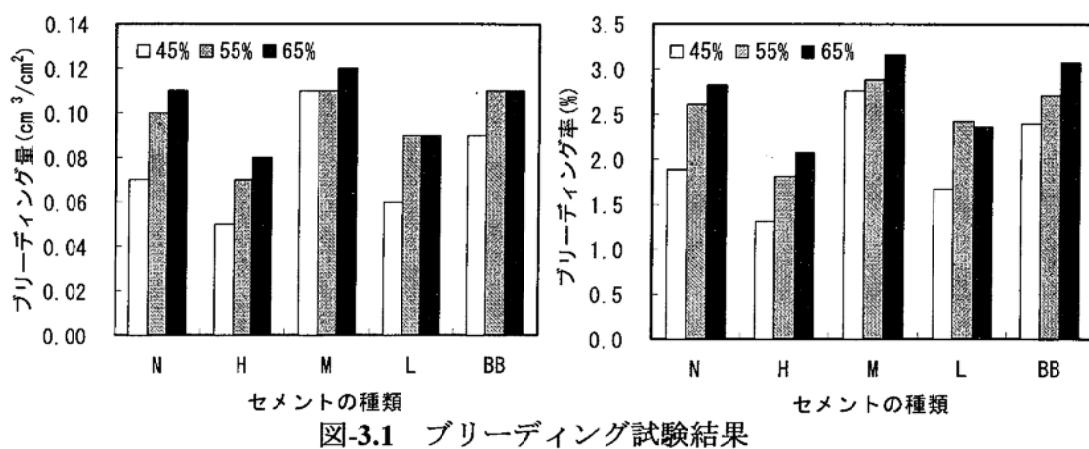


図-3.1 ブリーディング試験結果

3.2 硬化コンクリート

3.2.1 圧縮強度

圧縮強度試験結果を表-3.2、材齢と圧縮強度の関係を図-3.2、普通セメントを用いたコンクリートの圧縮強度を100としたときの強度比を表-3.3に示す。

表-3.2、図-3.2および表-3.3より、材齢7日の圧縮強度は、早強セメント>普通セメント>高炉セメントB種>中庸熱セメント>低熱セメントの順であり、低熱セメントが最も小さい結果を示した。ただし、水セメント比45%では高炉セメントB種よりも中庸熱セメントがやや大きい強度を示し、水セメントにより異なる傾向となった。

その後、材齢の経過とともに、セメント間の差が小さくなり、材齢28日では高炉セメントB種はいずれの水セメント比においても普通セメントとほぼ同等、中庸熱セメントおよび低熱セメントについても低水セメント比では同等かそれに近い強度を示した。材齢91日では高炉セメントB種、中庸熱セメントおよび低熱セメントを用いたコンクリートは早強セメント、普通セメントを用いたコンクリートをやや上回る強度発現を示した。

表-3.2 圧縮強度試験結果

(N/mm²)

セメントの種類	W/C (%)	材齢(日)			
		7	28	56	91
N	65	19.0	27.7	—	30.8
	55	24.5	33.0	—	38.4
	45	32.1	41.5	—	48.0
H	65	23.8	30.2	—	32.2
	55	30.3	36.5	—	37.6
	45	37.2	42.9	—	44.8
M	65	9.9	24.6	—	34.7
	55	14.3	32.0	—	42.7
	45	23.3	43.6	—	54.5
L	65	5.0	19.2	30.6	34.4
	55	7.6	29.1	41.4	44.8
	45	12.1	39.5	51.3	55.2
BB	65	12.7	26.0	—	34.0
	55	16.7	32.2	—	43.3
	45	21.5	38.9	—	50.6

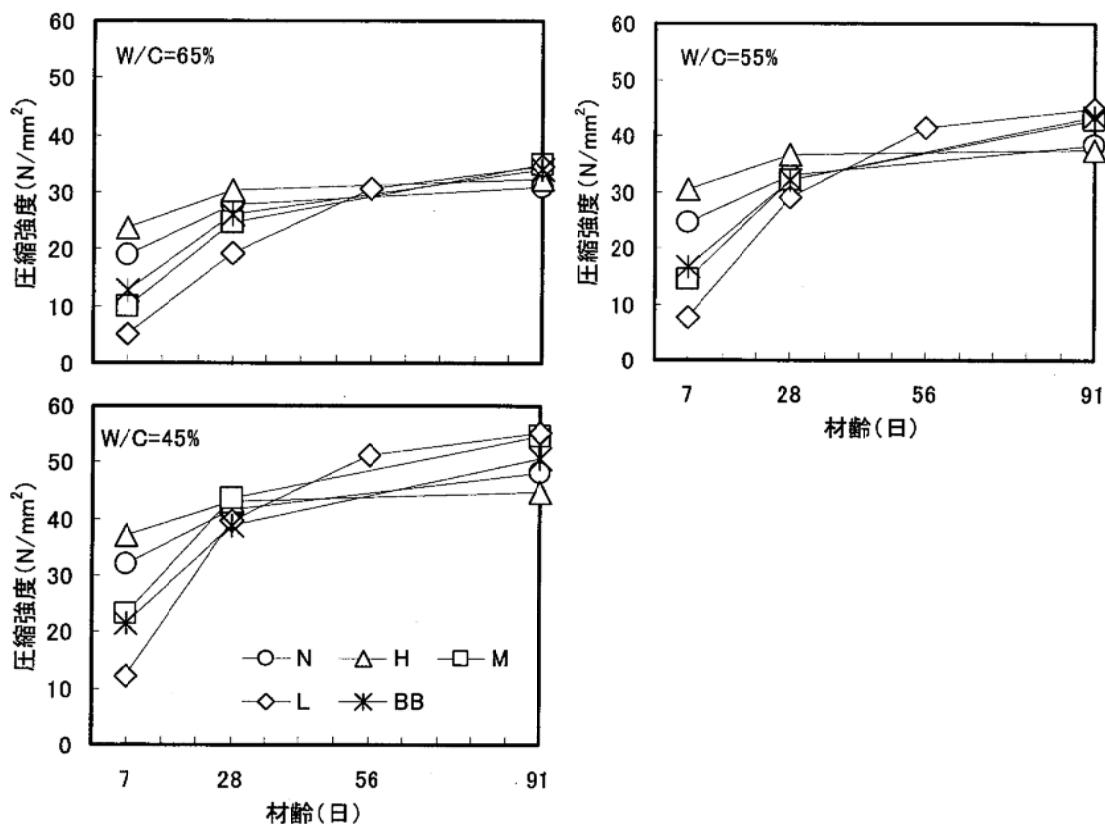


図-3.2 材齢と圧縮強度の関係

表-3.3 普通セメントを用いたコンクリートの圧縮強度を100としたときの強度比 (%)

W/C (%)	セメントの 種類	材齢 (日)		
		7	28	91
65	N	100	100	100
	H	125	109	105
	M	52	89	113
	L	26	69	112
	BB	67	94	110
55	N	100	100	100
	H	124	111	98
	M	58	97	111
	L	31	88	117
	BB	68	98	113
45	N	100	100	100
	H	116	103	93
	M	73	105	114
	L	38	95	115
	BB	67	94	105

各種セメントの材齢 28 日の圧縮強度を 100 としたときの強度比を表-3.4 に示す。表-3.4 よりいずれの水セメント比においても早強セメントは材齢 7 日以降、普通セメントは材齢 28 日以降の強度増進が小さい。一方、高炉セメント B 種、中庸熱セメントおよび低熱セメントは材齢 7 日以降の強度の伸びが大きく、材齢 28 日以降も良好な強度増進を示した。なかでも低熱セメントの強度増進が顕著である。

水セメント比の影響をみると、高炉セメント B 種では材齢 7 日、91 日ともに水セメント比による差はあまり大きくなないのでに対して、中庸熱セメントおよび低熱セメントでは、材齢 7 日では低水セメント比ほど比率が大きく、材齢 91 日では低水セメント比ほど比率が小さくなった。従って、中庸熱セメントおよび低熱セメントでは水セメント比が小さい配合ほど早期に材齢 28 日に近い強度レベルに達し、逆に水セメント比が大きい配合では強度発現が遅いが 28 日以降の強度の伸びが大きい傾向にあるものと考えられる。

表-3.4 各種セメントの材齢 28 日の圧縮強度を 100 としたときの強度比
(%)

セメントの種類	W/C (%)	材齢 (日)			
		7	28	56	91
N	65	69	100	—	111
	55	74	100	—	116
	45	77	100	—	116
H	65	79	100	—	107
	55	83	100	—	103
	45	87	100	—	104
M	65	40	100	—	141
	55	45	100	—	133
	45	54	100	—	125
L	65	26	100	159	179
	55	26	100	142	154
	45	31	100	130	134
BB	65	49	100	—	131
	55	52	100	—	135
	45	55	100	—	130

セメント水比と圧縮強度の関係を図-3.3 に示す。なお、図中には近似直線式（圧縮強度 $\sigma = A \times (C/W) + B$ ）を付記した。

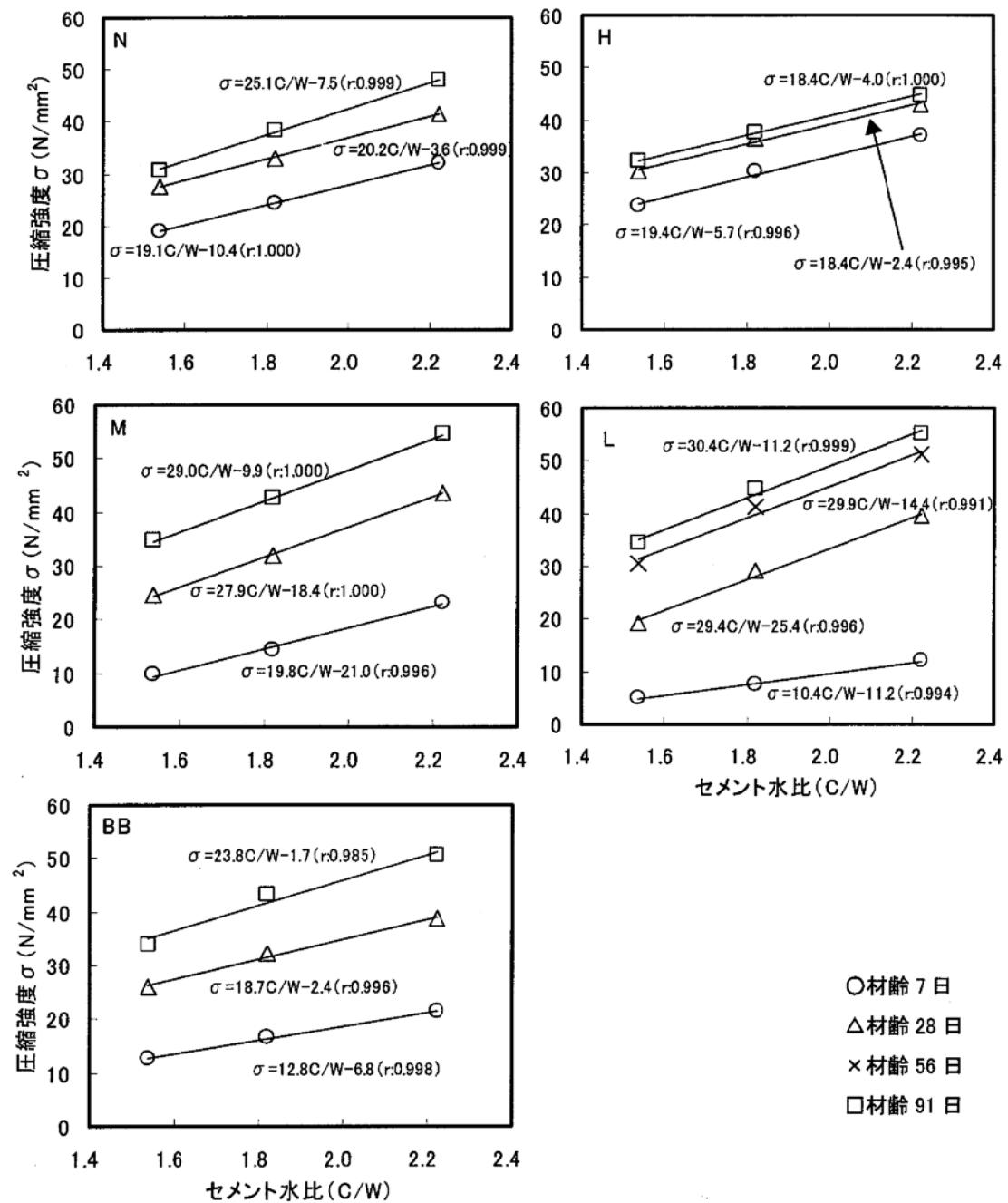


図-3.3 セメント水比と圧縮強度の関係

本試験による圧縮強度を示方書²⁾〔設計編〕に記されている 3.1 式を用いて回帰し、得られた結果を同示方書解説に記載の推定値と比較検討した。

$$f'c(t) = \{t / (a+bt)\} d(i) f'ck \quad 3.1 \text{式}$$

ここに、

$f'c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

$f'ck$: コンクリートの設計基準強度 (N/mm^2)

t : 材齢 (日)

i : 設計基準強度の基準材齢 (日)、 $i=28$ または 91

a, b : 定数

d : 材齢 28 日に対する材齢 91 日の強度の増加率である。セメントの種類によらず $d(91)=1$ とする。

上記 3.1 式の設計基準強度 $f'ck$ を本試験結果における各水セメント比の材齢 91 日の圧縮強度 ($i=91$) とし、最小自乗法によりセメントの種類および水セメント比別に定数 a, b を求めた。さらに、材齢 28 日および 91 日の圧縮強度の推定値から $d(28)$ を算出した。また、3.1 式を用いて推定したそれぞれの結果を図-3.4 に示す。なお、図中には本試験結果の実測値を併記した。詳細のデータは巻末の「資料 2 試験記録」に示す。

図-3.4 より、本試験から求めたコンクリートの圧縮強度の推定値は、セメントの種類によって同示方書解説の推定値と異なる結果となった。すなわち、普通セメントおよび早強セメントの場合、本試験から推定した圧縮強度は同示方書解説より材齢 7 日では最大 $4N/mm^2$ 高く、材齢 28 日および 91 日では $1N/mm^2$ 程度の範囲でほぼ同等となった。また、中庸熱セメントおよび高炉セメント B 種の場合、本試験から推定した圧縮強度は同示方書解説より材齢 7 日では約 $4\sim6N/mm^2$ 低く、材齢 28 日ではほぼ同等、材齢 91 日では約 $4\sim6N/mm^2$ 高くなる結果となった。

これらの結果より、本試験における中庸熱セメントおよび高炉セメント B 種の材齢 28 日から 91 日の強度増進は、同示方書解説における推定式に比べて大きい傾向にあると言える。

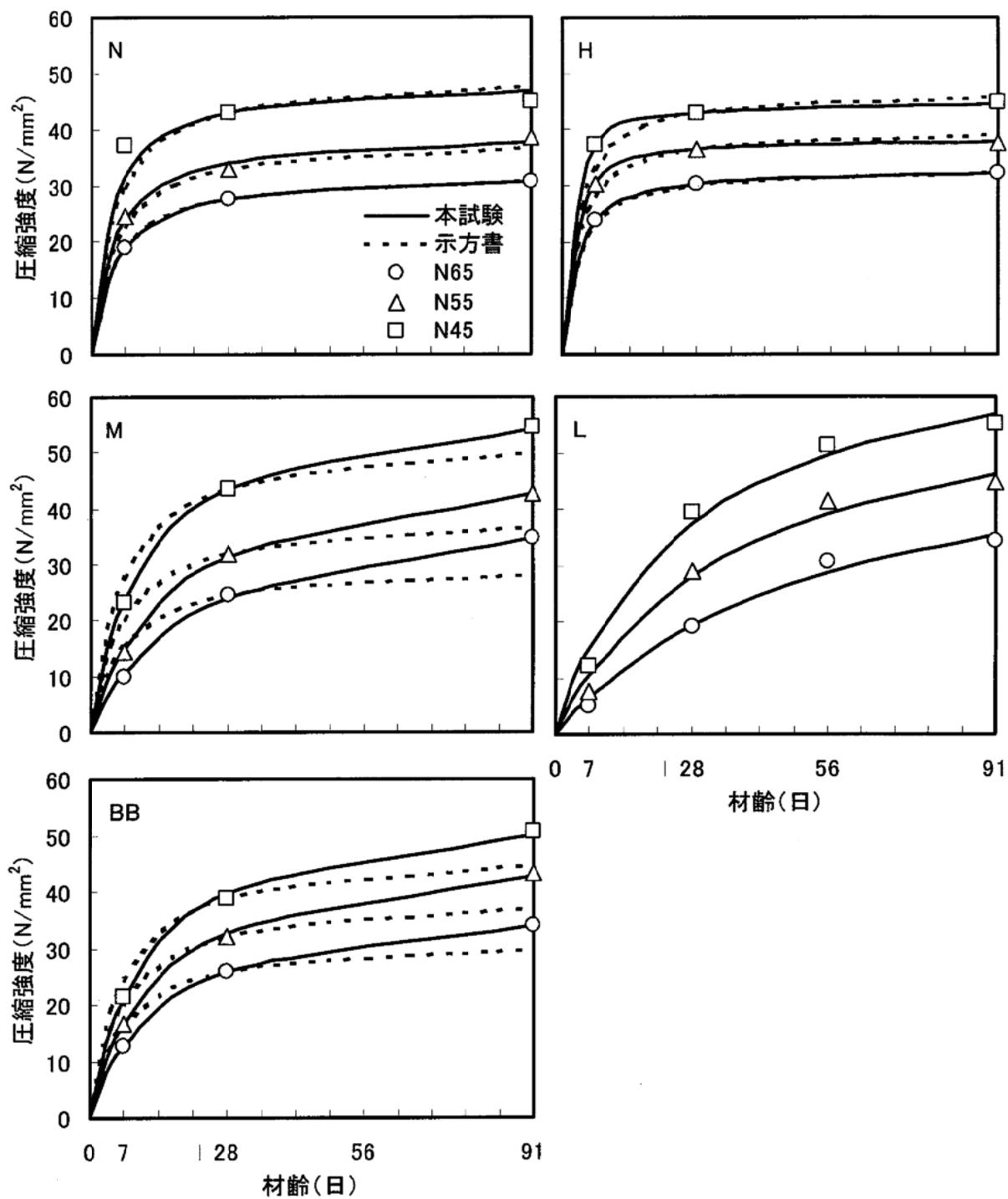


図-3.4 本試験における圧縮強度と示方書〔設計編〕との比較

3.2.2 凍結融解

凍結融解試験によるコンクリートの相対動弾性係数を表-3.5 および図-3.5、質量減少率を表-3.6 および図-3.6 に示す。

示方書²⁾〔設計編〕では、凍害の気象条件が激しい環境においてコンクリートに要求される相対動弾性係数の最小限界値 (Emin) を、連続してあるいはしばしば水に飽和される場合（部材断面が薄い場合を除く）には 70%、普通の露出状態にある場合には 60%としているが、表-3.5 および図-3.5 より、本実験における 300 サイクルにおける相対動弾性係数は、いずれの条件でも 70%以上の結果であり、水セメント比 55%の場合では 80%以上を満足していた。以上より、いずれのセメントを用いた場合でも、所定の空気量を連行することで十分な凍結融解抵抗性を有するコンクリートを得られることが確認された。

表-3.5 相対動弾性係数

(%)

セメントの種類	W/C (%)	養生(日)	凍結融解サイクル(回)										
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	
N	55	28	100	92.4	89.9	89.9	88.8	89.4	88.4	87.8	82.1	85.9	83.3
	65		100	92.1	88.9	87.3	87.3	85.6	84.9	83.9	83.4	73.8	72.8
H	55	28	100	95.1	95.5	94.5	94.3	94.9	95.1	93.8	93.4	87.1	91.7
	65		100	95.9	94.7	93.6	93.8	93.7	93.0	91.9	90.9	92.2	89.7
M	55	28	100	96.3	93.5	88.0	87.4	88.4	86.4	84.5	84.5	84.6	83.9
	65		100	96.4	96.8	96.4	95.4	93.9	93.8	92.7	87.7	84.7	83.3
L	55	28	100	96.8	97.1	93.7	97.0	96.2	96.2	95.3	93.8	92.0	92.2
	65		100	94.4	98.6	94.6	97.0	97.2	95.6	93.8	93.0	91.8	80.9
BB	55	28	100	94.8	93.8	93.0	93.6	93.6	93.0	92.2	92.0	90.8	90.7
	65		100	95.0	94.7	92.8	92.0	92.9	92.4	92.4	91.1	90.9	88.7
BB	55	28	100	95.5	95.6	94.3	93.6	93.2	93.2	94.5	95.4	93.7	94.5
	65		100	92.0	92.1	89.8	90.8	90.0	87.3	88.0	89.0	85.5	86.1

表-3.6 質量減少率

(%)

セメントの種類	W/C (%)	養生(日)	凍結融解サイクル(回)										
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	
N	55	28	0.0	0.2	0.4	0.7	2.3	3.3	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2
	65		0.0	0.4	0.6	1.0	1.5	2.1	2.7	3.3	3.9	4.6	5.3
H	55	28	0.0	0.3	0.6	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	2.0	2.4	4.1
	65		0.0	0.4	0.7	1.1	1.4	1.7	2.1	2.5	2.9	3.4	3.8
M	55	28	0.0	0.2	1.3	2.7	3.1	4.2	4.9	5.3	5.5	5.8	6.1
	65		0.0	0.0	0.4	0.8	1.2	1.8	2.3	2.9	3.7	4.6	5.3
L	55	28	0.0	0.2	0.5	0.8	1.2	1.5	1.9	2.2	2.7	3.1	3.6
	65		0.0	0.4	1.2	2.2	3.0	3.9	4.8	5.7	6.5	7.5	8.4
BB	55	28	0.0	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.2
	65		0.0	0.2	0.4	0.7	1.0	1.4	1.9	2.3	2.7	3.3	3.7
BB	55	28	0.0	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.8	2.2	2.6	3.9	4.6
	65		0.0	0.3	0.7	1.4	2.1	2.6	3.2	3.7	4.2	4.6	5.0

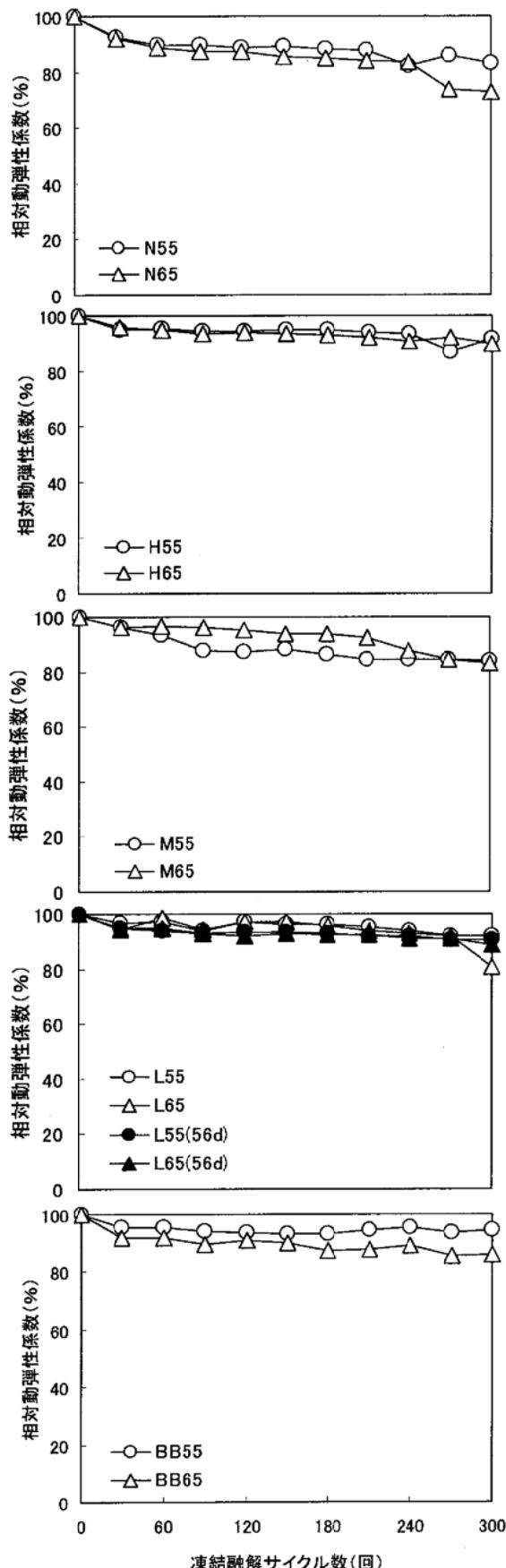


図-3.5 相対動弾性係数

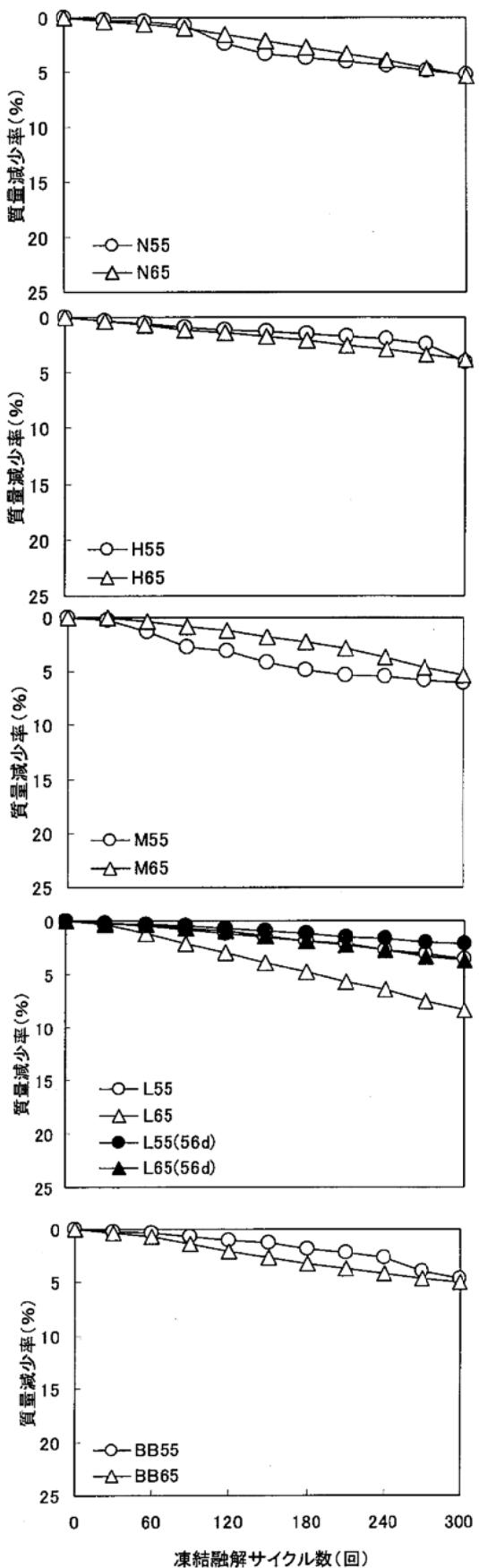


図-3.6 質量減少率

凍結融解開始時の圧縮強度と300サイクル時の相対動弾性係数および質量減少率の関係を図-3.7に示す。これより、凍結融解開始時の圧縮強度が大きいほど300サイクル時の相対動弾性係数は大きく、質量減少率は小さい傾向が認められるが、質量減少率との相関の方が大きいようである。このことは、低熱セメントにおいて凍結融解試験の開始材齢を56日に延ばした場合に、特に質量減少率において顕著な改善が認められたことが反映しており、凍結融解試験に際しては、初期強度発現の遅いセメントを用いた場合の前養生期間、すなわち試験開始時の圧縮強度の影響は、供試体表面のスケーリングに対して、より直接的に現れるものと考えられる。

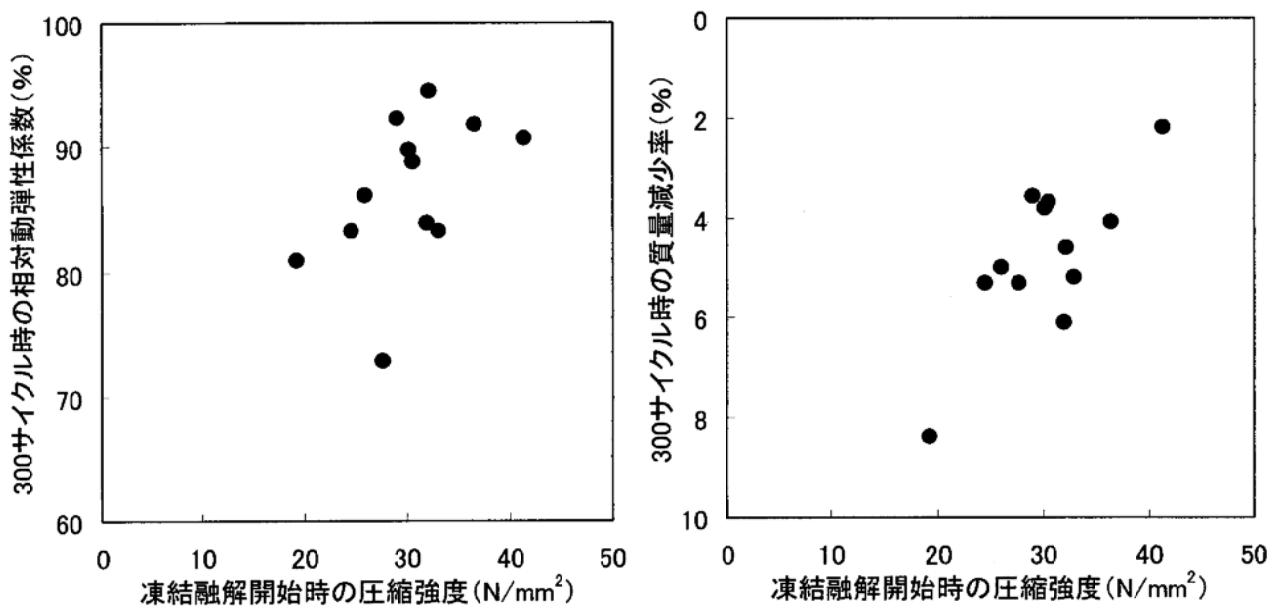


図-3.7 凍結融解開始時の圧縮強度と300サイクル時の相対動弾性係数および質量減少率の関係

3.2.3 促進中性化深さ

促進中性化深さ結果を表-3.7 および図-3.8 に示す。いずれの水セメント比においても、早強セメントを用いたコンクリートの中性化深さが最も小さく、ついで普通セメントの順となり、中庸熱セメント、低熱セメントおよび高炉セメントB種を用いたコンクリートの中性化深さはこれよりも大きくなる傾向となった。また、低熱セメントを用いたコンクリートの中性化深さは水セメント比65%では、中庸熱セメント、高炉セメントB種よりも大きく、水セメント比が大きい場合では中性化速度が大きい傾向がうかがえる。以上の傾向は、促進試験開始時のコンクリートの圧縮強度発現にほぼ対応し、図-3.9 に見られるように、試験開始時の圧縮強度が小さいほど中性化速度が大きくなる傾向となった。このため、低熱セメントは、水中養生期間を28日から56日とすると、コンクリートの中性化深さは普通セメントとほぼ同等となっている。

一般に、コンクリートの中性化深さ (y) は中性化期間の平方根 (\sqrt{t}) に比例するとされ、 $y = \alpha\sqrt{t}$ で表せる。係数 α は中性化の進行速度（中性化速度係数）であり、図-3.8 の右図中に示した直線の傾きがこれに相当する。

表-3.7 促進中性化試験結果

(mm)

セメントの種類	W/C (%)	養生 (日)	促進期間 (週)				
			1	4	8	13	26
N	45	28	1.0	6.5	8.0	9.5	10.0
	55		4.0	10.5	14.5	15.5	19.5
	65		6.5	14.0	19.5	22.0	27.5
H	45	28	0.0	1.5	5.0	5.5	8.0
	55		1.5	9.5	12.0	14.0	18.0
	65		6.0	13.0	16.5	21.0	25.5
M	45	28	0.5	6.5	9.5	10.0	13.0
	55		6.5	13.5	18.5	20.5	28.0
	65		7.5	16.5	23.5	26.5	37.0
L	45	28	3.0	8.0	11.0	11.5	15.0
	55		6.5	13.5	19.0	21.0	27.5
	65		11.0	20.5	30.5	34.5	41.5
BB	45	56	0.5	5.5	9.0	10.0	15.5
	55		4.5	12.0	17.0	20.0	26.0
	65		8.5	15.5	22.5	25.0	35.5
L	45	56	0.0	3.0	5.0	8.0	11.0
	55		5.5	9.5	13.0	19.0	20.0
	65		8.5	16.0	20.5	28.0	30.0

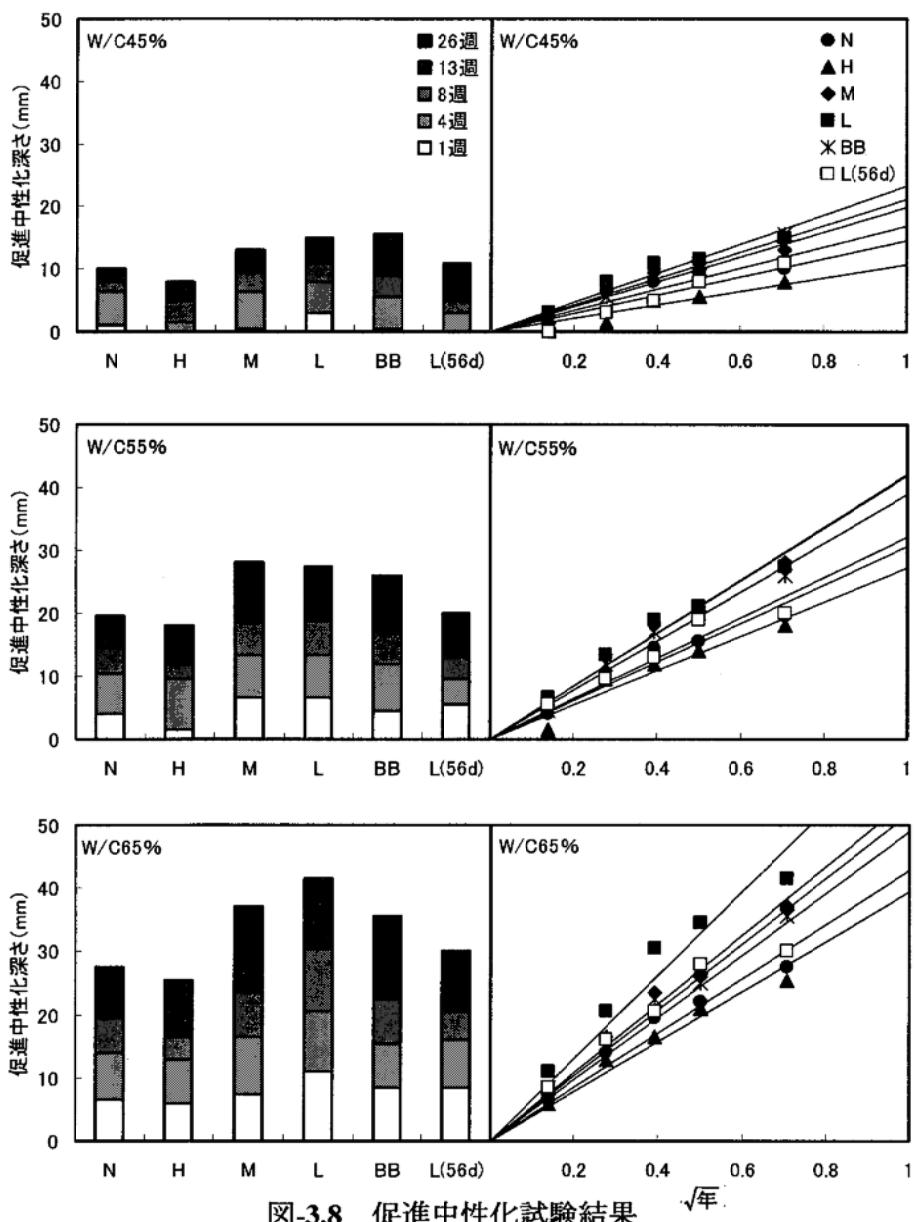


図-3.8 促進中性化試験結果

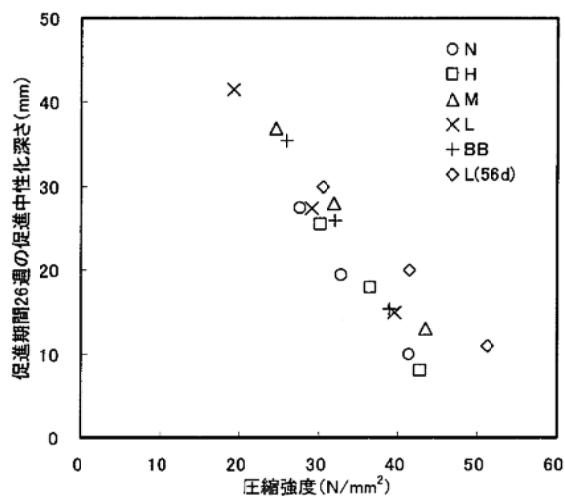


図-3.9 圧縮強度と促進期間 26 週の促進中性化深さの関係

各種セメントの中性化速度係数を水セメント比別に表-3.8 に示す。表-3.8 より、中性化速度係数は各種セメントとも水セメント比増大に従い大きくなり、セメントの種類別では、早強セメント<普通セメント<高炉セメントB種=中庸熱セメント<低熱セメントの結果であった。

表-3.8 各種セメントの中性化速度係数

(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

セメントの種類	養生(日)	W/C (%)		
		45	55	65
N	28	16.9	30.7	42.9
H		10.8	27.3	39.4
M		19.8	42.0	54.2
L		23.3	42.0	65.8
BB		21.1	39.0	51.9
L	56	14.6	32.1	48.9

水セメント比および有効水結合材比と中性化速度係数との関係をセメントの種類別に図-3.10 に、関係式における定数 a 、 b を表-3.9 に示す。ここで、有効水結合材比 (W/B) における有効結合材量 B は、 $B=C_p+k \cdot A_d$ で表され、 C_p はポルトランドセメントの量、 A_d は混和材の量である。また、 k は混和材の効果に関する係数である。算定にあたり、高炉セメント B 種については $C_p:A_d=55:45$ と設定、また、 $k=0.7$ (示方書²⁾ [設計編] による) とし、他のセメントについては $C_p=100$ とした。

図-3.10 より、水セメント比および有効水結合材比と中性化速度係数は、セメントの種類ごとに直線関係で評価できることが確認される。

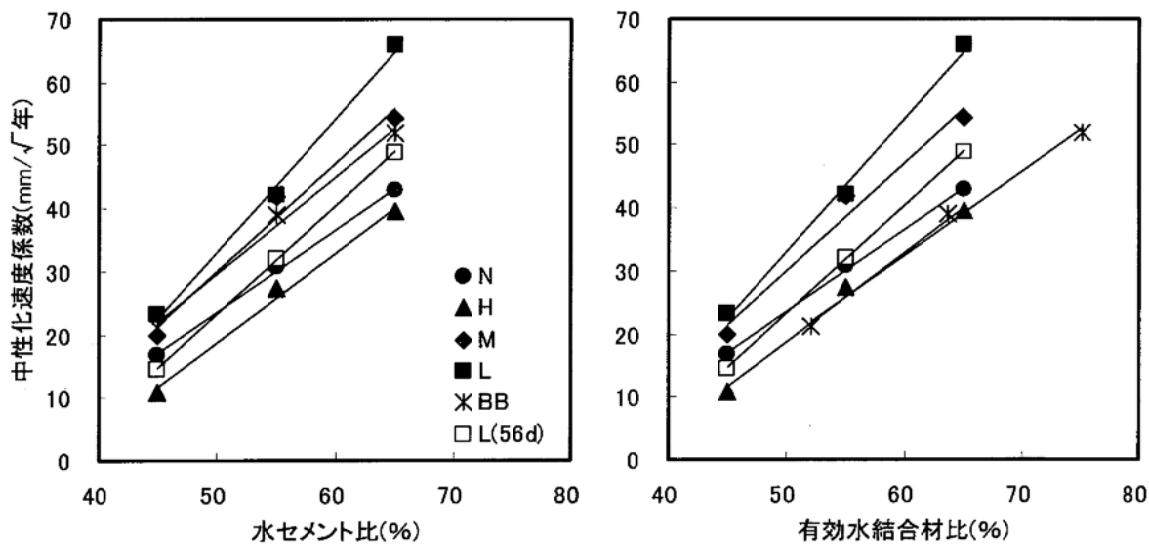


図-3.10 水セメント比および有効水結合材比と中性化速度係数の関係

表-3.9 セメントの種類別の定数

セメントの種類	養生 (日)	$\alpha = a + b \times (W/B)$	
		a	b
N	28	-41.3	129.9
H		-53.0	143.3
M		-56.1	172.3
L		-73.1	212.3
BB		-47.4	133.3
L	56	-62.5	171.5

中性化速度係数が炭酸ガス濃度の平方根に比例する⁵⁾とすれば、一般大気中の炭酸ガス濃度 A (%) における中性化速度係数は、炭酸ガス濃度 5%での中性化速度係数を $\sqrt{A/5}$ 倍することで得られると考えられる。そこで今回の試験結果から、一般大気中で屋外暴露された場合の中性化速度係数を算定した。

一般大気中の炭酸ガス濃度を 0.05%と仮定した場合に、今回の促進試験結果から推定される有効水結合材比と中性化速度係数の関係を図-3.11 に示す。なお、図には示方書²⁾〔設計編〕の式 ($\alpha = -3.57 + 9.0 \times (W/B)$) も併記した。

図-3.11 より、促進中性化試験の結果をもとに算定した一般大気中の中性化速度係数は、すべてのセメントにおいて、示方書²⁾〔設計編〕の式に比べて大きく、セメントの種類に関係なく全データより中性化速度係数の式を求めるとき、 $\alpha = -4.65 + 14.4 \times (W/B)$ となり、土木学会式に比べて有効水結合材比が 45%では 1.4 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$) 程度、75%では 3.0 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$) 程度大きい係数となった。

平成 11 年版コンクリート標準示方書〔施工編〕改訂資料⁶⁾によれば、示方書²⁾〔設計編〕の式は、乾燥し難い環境、または北に面している場合と良く整合するとしている。これに対し、促進中性化試験では水分供給のない条件下に保存され、炭酸ガスが浸入し易い条件であること、更に水分供給がないため水和の進行が停滞し、長期的な強度増進があまり期待できない条件であること等が影響しているものと考えられる。

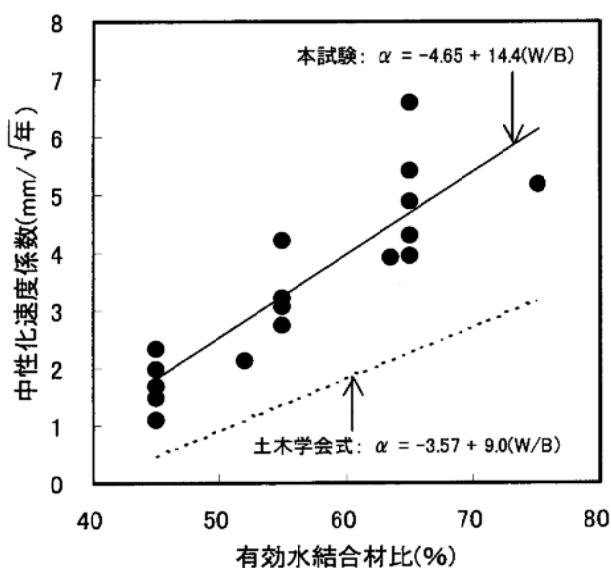


図-3.11 本試験結果から推定される一般大気中の有効水結合材比と中性化速度係数との関係

3.2.4 塩化物イオン浸透性

3.2.4.1 浸せきによる塩化物イオンの浸透深さ

発色法による塩化物イオンの浸透深さ試験結果を表-3.10 および図-3.12 に示す。

表-3.10 および図-3.12 より、発色法による塩化物イオンの浸透深さは、高炉セメント B 種がポルトランドセメントを用いた場合に比べて小さくなつた。この理由として高炉セメント B 種はフリーデル塩の生成量が多く、塩化物イオンの固定能力が高いためと考えられる。また、低熱セメントは、養生期間を 28 日から 56 日に長くした場合、塩化物イオンの浸透深さは小さくなつた。試験開始前の養生期間を長くして圧縮強度を増進させることで遮塩性が向上したものと考えられる。

表-3.10 発色法による塩化物イオンの浸透深さ試験結果

セメントの種類	W/C (%)	養生 (日)	浸せき期間
			26週
N	55	28	23.7
H			29.1
M			30.5
L			27.6
BB		56	14.4
L			21.0

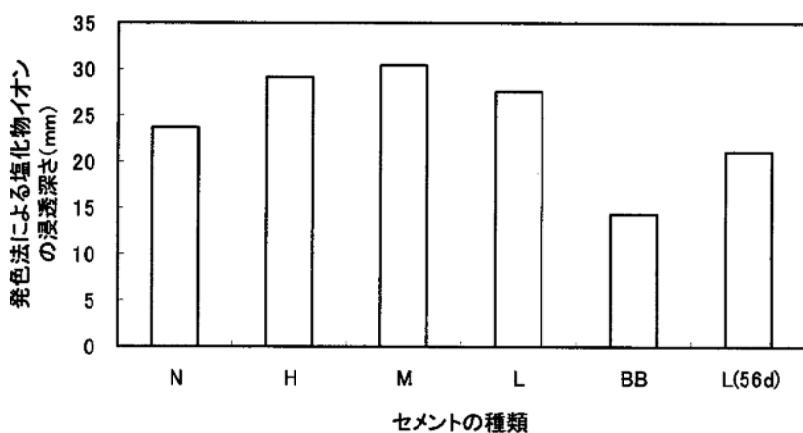


図-3.12 発色法による塩化物イオンの浸透深さ結果

3.2.4.2 浸せきによる塩化物イオンの見掛けの拡散係数

コンクリート表面からの深さごとの全塩化物イオン測定結果を表-3.11に、コンクリート表面からの深さと全塩化物イオンの関係を図-3.13に示す。また、表-3.11に示す全塩化物イオン測定結果から非線形最小自乗法により、コンクリート表面の全塩化物イオン(C_{a0})および拡散係数(D_{ap})を求めた結果を表-3.12に示す。また、図-3.14および図-3.15に各セメントにおけるコンクリート表面の全塩化物イオンおよび見掛けの拡散係数を示す。

コンクリート表面の全塩化物イオンは、高炉セメントB種が他のセメントに比べて大きく、一方、見掛けの拡散係数は小さくなっている、塩化物イオンの固定能力が大きく遮塩性が高い傾向がうかがえる。また、低熱セメントは浸せき前の養生期間を長くすると見掛けの拡散係数が小さくなる結果となった。以上の結果は、発色法による塩化物イオンの浸透深さの測定結果と傾向が一致している。

なお、図-3.13中には発色法による塩化物イオンの浸透深さの位置も示している。その位置における全塩化物イオンを読み取ったものを図-3.16に示す。発色法による塩化物イオン浸透深さの位置における全塩化物イオンは、セメントによって差異が見られ、高炉セメントB種の場合にはやや大きくなる。発色法による塩化物イオン浸透深さは可溶性塩分と相関があるといわれており⁷⁾、一方、図-3.16は全塩化物イオンを示している。従って、セメントの種類間の差は塩化物イオンの固定化量の差に影響されたものと考えられ、高炉セメントB種の結果はその影響を反映しているものと考えられる。

表-3.11 コンクリート表面からの深さごとの全塩化物イオン測定結果

セメントの種類	W/C (%)	養生(日)	浸せき期間 26週					
			コンクリート表面からの目標深度(cm)	0 ~ 0.5	0.85 ~ 1.35	1.70 ~ 2.20	2.55 ~ 3.05	3.40 ~ 3.90
N	55	28	全塩化物イオン(%)	0.313	0.249	0.174	0.087	0.042
H				0.343	0.287	0.199	0.096	0.048
M				0.264	0.180	0.104	0.055	0.022
L				0.279	0.192	0.109	0.061	0.025
BB				0.528	0.221	0.061	0.024	0.037
L				0.169	0.105	0.057	0.020	0.007

※表中の全塩化物イオンは3本の平均値。コンクリート表面からの深さは各試料の厚さをノギスで測定し、その平均値とカッターナイフの厚さから算出。詳細のデータは巻末の「資料2 試験記録」に示す。

表-3.12 コンクリート表面の全塩化物イオン(C_{a0})と見掛けの拡散係数(D_{ap})

セメントの種類	W/C (%)	養生(日)	浸せき期間 26週	
			C_{a0} (%)	D_{ap} (cm ² /年)
N	55	28	0.355	5.83
H			0.386	7.67
M			0.292	5.48
L			0.310	5.06
BB			0.633	1.43
L			0.196	3.38

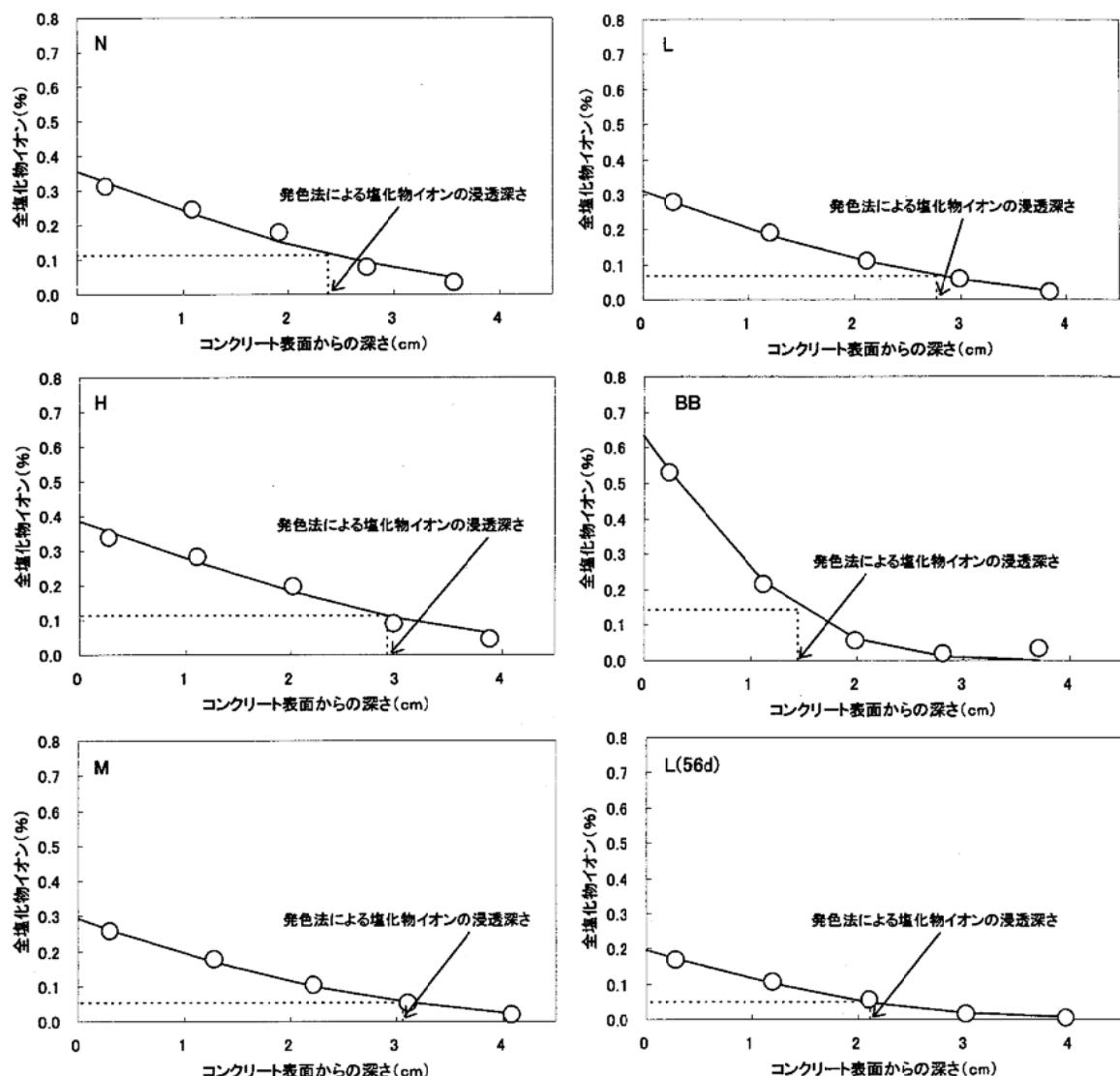


図-3.13 コンクリート表面からの深さと全塩化物イオンの関係

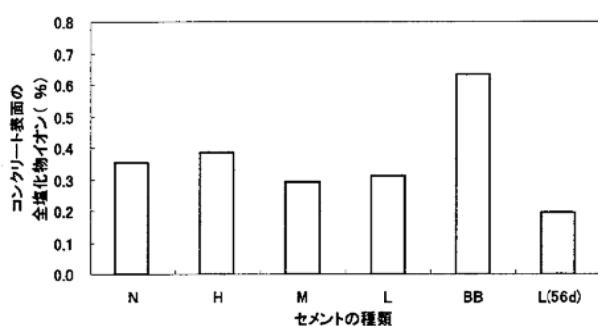


図-3.14 コンクリート表面の全塩化物イオン(C_{a0})

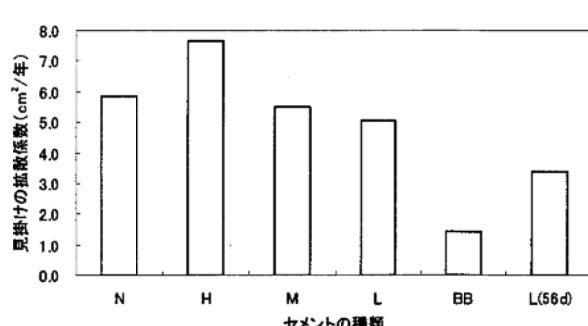


図-3.15 見掛けの拡散係数(D_{ap})

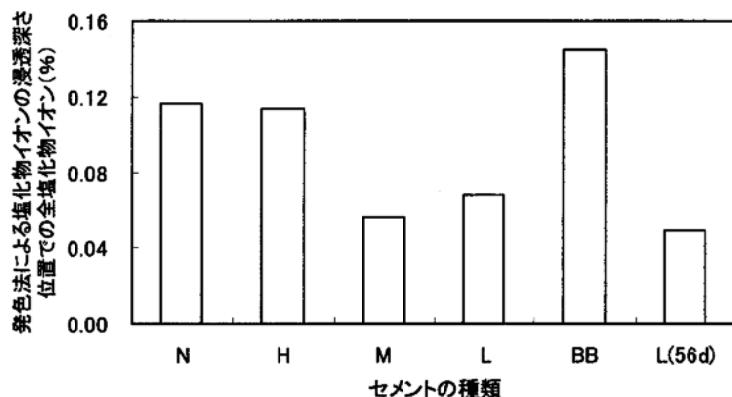


図-3.16 発色法による塩化物イオンの浸透深さ位置での全塩化物イオン

材齢 91 日の圧縮強度と見掛けの拡散係数（浸せき前の養生期間 28 日の場合）の関係を図-3.17 に示す。ここで材齢 91 日の圧縮強度を検討対象としたのは、材齢 28 日以降、26 週の浸せき期間中にもコンクリート強度が増進していることを考慮したためである。図-3.17 より、高炉セメント B 種を除くポルトランドセメントに関しては、材齢 91 日の圧縮強度が高いものほど見掛けの拡散係数が小さくなる傾向を示した。

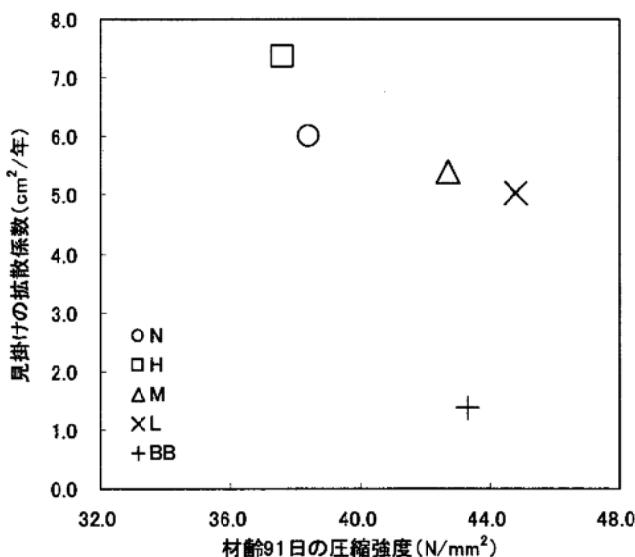


図-3.17 材齢 91 日の圧縮強度と見掛けの拡散係数の関係

表-3.13 および図-3.18 に見掛けの拡散係数について本実験値、既往の実験値の一例⁸⁾、示方書²⁾〔設計編〕による計算値との比較を示す。なお、上記文献⁸⁾における実験条件は本実験と同様、JSCE-G-571 の方法でスランプ 12cm、水セメント比 55%、浸せき前の養生期間が 28 日、浸せき期間 26 週である。

表-3.13 および図-3.18 より本実験で得られた見掛けの拡散係数は、文献⁸⁾に示される既往実験値および示方書²⁾〔設計編〕の計算値より大きい結果であった。

文献¹⁾によると、見掛けの拡散係数には種々の要因が影響し、今回のように短期間の試

験で求めた拡散係数は長時間を経た現実のコンクリート構造物の拡散係数よりも通常は大きい値となる。本実験結果と示方書²⁾【設計編】との差異は、このことが一因と推察される。

表-3.13 見掛けの拡散係数の既往資料との比較

(cm²/年)

セメント の種類	W/C (%)	実験値 (浸せき期間 26 週)	既往の実験値 [*] (浸せき期間 26 週)	示方書
N		5.83	4.06	1.91
M	55	5.48	2.81	
BB		1.43	1.14	0.73

* 参考文献 8) の図より読み取り

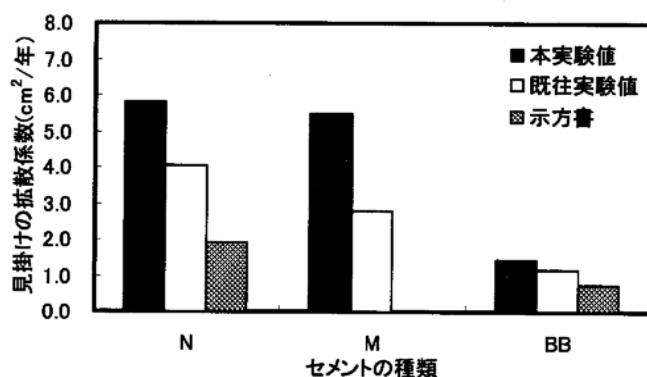


図-3.18 見掛けの拡散係数の既往資料との比較

3.2.4.3 電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数

定常状態における塩化物イオンの流束 (J_{Cl}) およびそれより求めた実効拡散係数 (D_e) を表-3.14 に示す。比較のため、同表に浸せき期間 26 週の見掛けの拡散係数 (D_{ap}) を追記した。

陽極側の積算塩化物イオンの経時変化は図-3.19 に示すとおりであり、図-3.19 から定常状態部分を抽出したものが図-3.20 である。表-3.14 の実効拡散係数 (D_e) は、図-3.20 より、下記の「塩化物イオンの実効拡散係数の計算方法」¹⁾ を用いて算出したものである。

表-3.14 定常状態における流束 (J_{Cl}) および実効拡散係数 (D_e)

セメントの種類	W/C (%)	養生 (日)	J_{Cl} (mol / (cm ² ・年))	D_e (cm ² /年)	D_{ap} (cm ² /年) *
N	45	28	0.040	0.797	—
	55		0.074	1.513	5.83
	65		0.086	1.869	—
H	45		0.025	0.512	—
	55		0.047	0.951	7.67
	65		0.056	1.189	—
M	45		0.055	1.123	—
	55		0.094	1.946	5.48
	65		0.119	2.298	—
L	45		0.044	0.919	—
	55		0.092	1.948	5.06
	65		0.126	2.646	—
BB	45		0.006	0.136	—
	55		0.007	0.151	1.43
	65		0.008	0.165	—
L	45	56	0.038	0.771	—
	55		0.072	1.520	3.38
	65		0.074	1.621	—

*表-3.12 より

塩化物イオンの実効拡散係数の計算方法¹⁾

$$D_e = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_C)} \times 100$$

ここに D_e : 実効拡散係数(cm²/年) R: 気体定数(8.31J/(mol·K)) T: 絶対温度測定値(K)

L: 供試体厚さ(mm) Z_{Cl} : 塩化物イオンの電荷(= -1) F: フラデー一定数(96500C/mol)

C_{Cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値(mol/L) $\Delta E - \Delta E_C$: 供試体表面間の測定電位(V)

J_{Cl} : 塩化物イオンの定常状態における流束(mol/(cm²・年))

ただし $J_{Cl} = \frac{V^II}{A} \frac{\Delta C_{Cl}^II}{\Delta t}$ ここで V^II : 陽極側の溶液体積(L) A: 供試体断面積(cm²)
 $\Delta C_{Cl}^II / \Delta t$: 陽極側塩化物イオン濃度の増加割合((mol/L)/年)

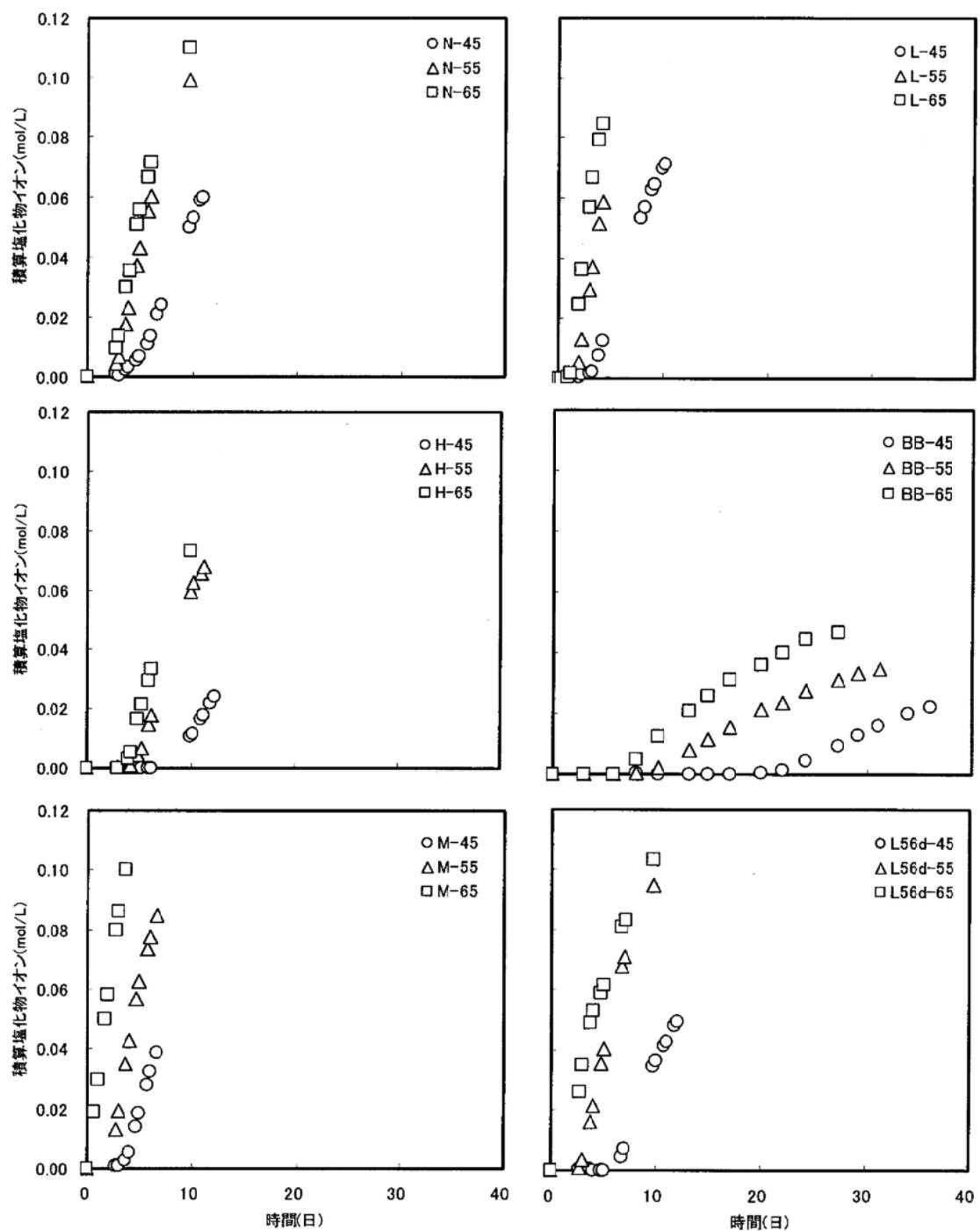


図-3.19 積算塩化物イオンの経時変化

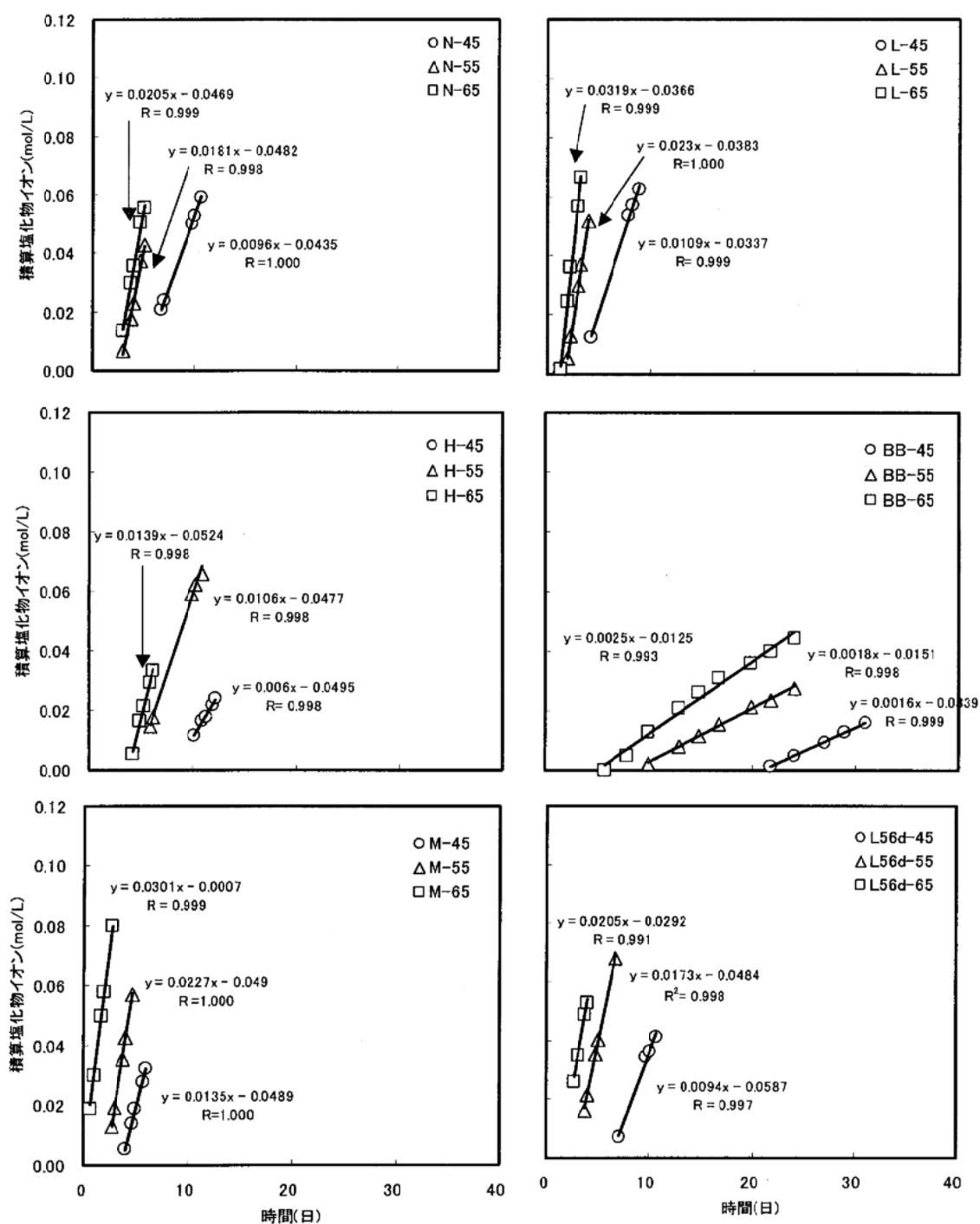


図-3.20 定常状態における積算塩化物イオン

セメントの種類と実効拡散係数の関係を図-3.21、セメント水比と実効拡散係数の関係を図-3.22に示す。

図-3.21より、極めて実効拡散係数が小さい結果となった高炉セメントB種を除いて、水セメント比が大きいほど実効拡散係数も大きくなり、図-3.22によればセメント水比と実効拡散係数は概ね直線的な関係が見られた。また、実効拡散係数をセメントの種類別に見ると、高炉セメントB種<早強セメント<普通セメント<中庸熱セメント=低熱セメントのような結果となり、試験開始時(28日)の圧縮強度とほぼ対応する傾向となった。試験前の養生期間を長くした低熱セメント(56d)は普通セメントとほぼ同等の結果となり、試験開始時の圧縮強度を反映する傾向となった。

実効拡散係数と試験開始時の圧縮強度の関係を図-3.23に示す。図-3.23より、高炉セメントB種を除いたポルトランドセメントでは、試験開始時の圧縮強度が大きいほど実効拡散係数は小さくなる関係が認められる。前述の浸せきによる見掛けの拡散係数の試験と異なり、実効拡散係数の試験は、試験開始後比較的短期間に終了するため、試験開始時の圧縮強度の影響が顕著になるものと考えられる。

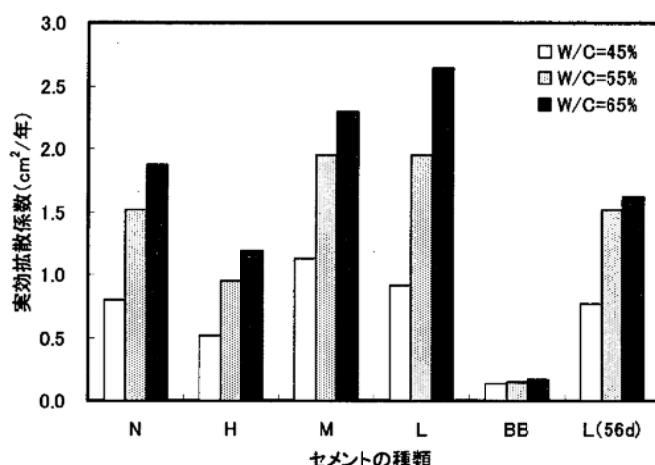


図-3.21 セメントの種類と実効拡散係数の関係

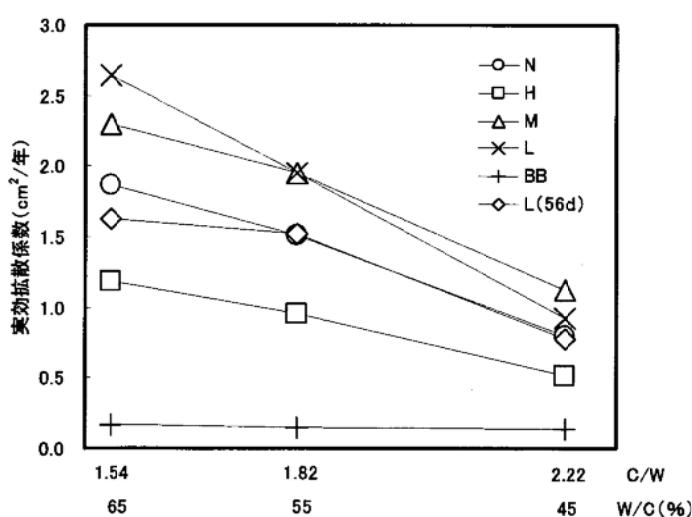


図-3.22 セメント水比と実効拡散係数の関係

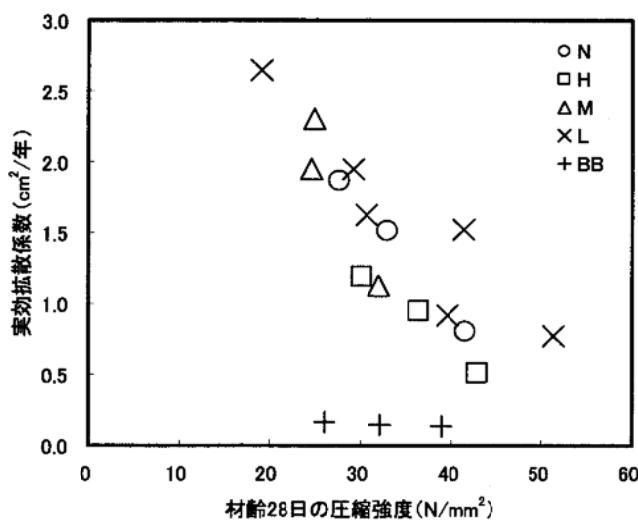


図-3.23 実効拡散係数と試験開始時の圧縮強度の関係

浸せき期間 26 週における発色法による塩化物イオンの浸透深さと実効拡散係数の関係を図-3.24、見掛けの拡散係数と実効拡散係数の関係を図-3.25 に示す。データ数が少ないこともあるが、双方とも明瞭な相関は認められなかった。特に後者においては、早強セメントは見掛けの拡散係数は他のポルトランドセメントよりも大きいが実効拡散係数は小さいなど、一部傾向が逆転している。

以上の理由として、見掛けの拡散係数は全塩化物イオンで評価されるが、実効拡散係数および発色法による塩化物イオンの浸透深さは可溶性の塩化物イオンで評価されるためと考えられる。また、前述のように、発色法による塩化物イオン浸透深さや見掛けの拡散係数は、浸せき期間 26 週における結果であるためコンクリートの長期的強度発現の影響を受けるのに対して、実効拡散係数は比較的短期間の試験であるため、試験開始時である材齢 28 日の強度発現の影響が大きいことなども試験結果相互の相関が明瞭に現れない理由と考えられる。

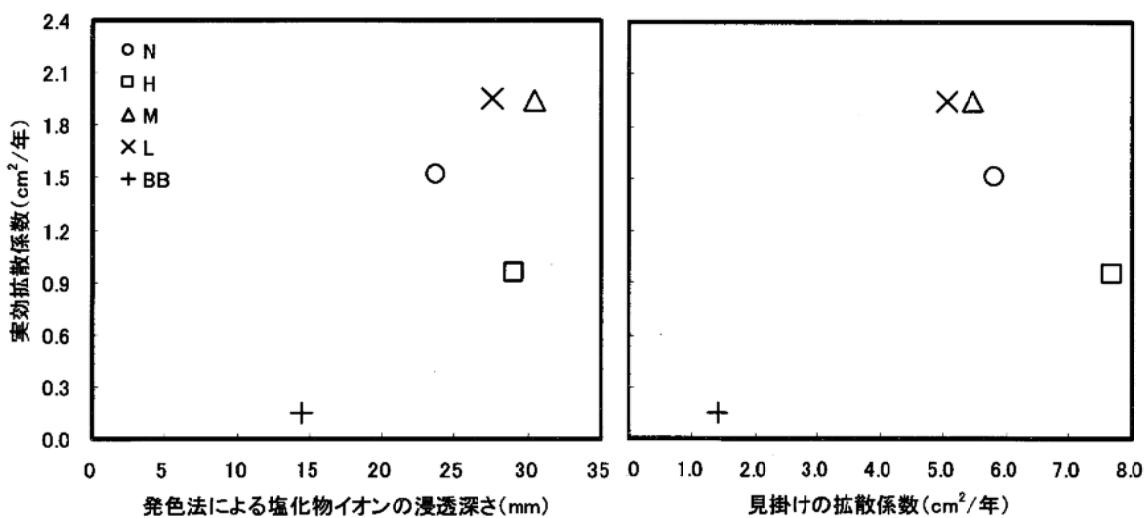


図-3.24 発色法による塩化物イオンの
浸透深さと実効拡散係数の関係
(W/C55%)

図-3.25 見掛けの拡散係数と実効拡散係数
の関係 (W/C55%)

コンクリートの実効拡散係数に関して本試験結果と既往の研究^{1) 9) ~13)}で報告されている実験結果を比較した。

普通セメントを図-3.26、高炉セメントB種（高炉スラグ微粉末50%置換を含む）ならびに低熱セメントを図-3.27に示す。なお、図-3.26の普通セメントに関するデータは本実験と同様に養生条件が水中28日養生のデータのみを引用、図-3.27の高炉セメントおよび低熱セメントに関するデータは本実験と同一の養生条件による報告が少なかったので異なる養生条件の結果も併記した。

図-3.26および図-3.27より、同一水セメント比であっても既往データは広い範囲にばらついているが、本試験における普通セメントと高炉セメントはこれら既往のデータよりもやや小さく、低熱セメントは概ね同程度の値を示す結果となっている。

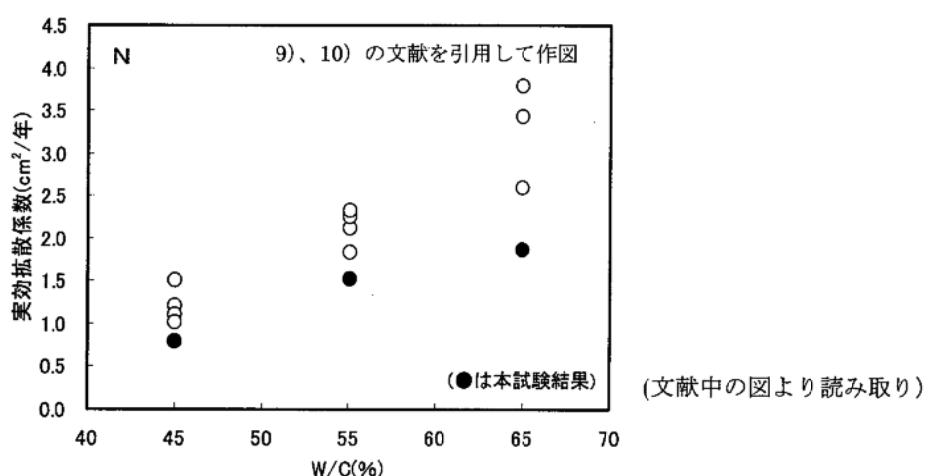
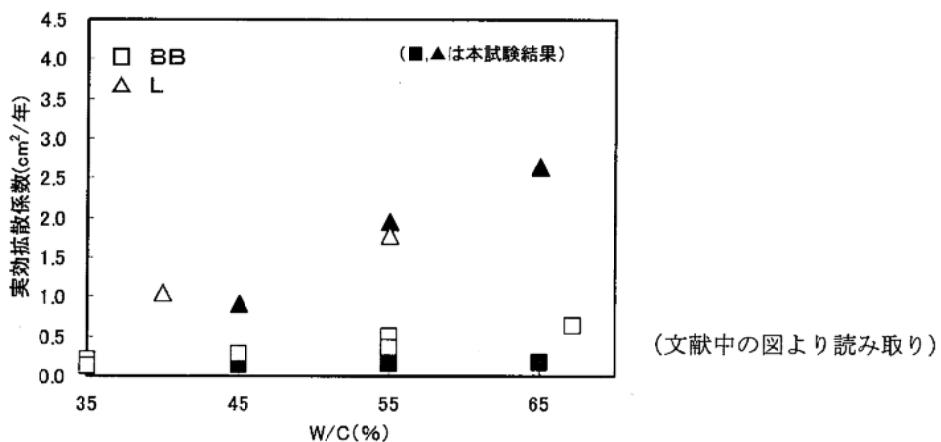


図-3.26 本実験と既往の研究の比較（普通セメント）



備考) 引用したBB(BFS50%置換を含む)の前養生期間は、水中7,28,91日養生or水中28日後、気中7日養生or不明。Lの前養生期間は不明or水中28日養生後、気中7日養生。

図-3.27 本実験と既往の研究の比較（低熱セメント、高炉セメントB種）

4. 結言

コンクリートの耐久性に着目した配合設計を行なう上で、構造物の用途、環境条件などに応じて、セメント種類や水セメント比、また、養生方法などを適切に設定する必要がある。そのための基礎的資料を得る目的で、各種の耐久性関連の試験を実施した。

実験に使用したセメントは、普通（N）、早強（H）、中庸熱（M）、低熱（L）の各ポルトランドセメントと高炉セメントB種（BB）の合計5種類、試験に用いたコンクリート配合は、スランプ12cm、空気量4.5%、水セメント比45、55、65%の一般的なものである。また、実施した耐久性試験の項目は、凍結融解、促進中性化、塩化物イオン浸透性である。

本研究により得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) プリーディング

本試験に用いたコンクリートのプリーディング量は最大でも $0.12\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、耐久性の観点から定められている学会指針類の目標値に比べて小さい結果であった。

(2) 圧縮強度

圧縮強度発現の大きさは、材齢7日では概ねH、N、BB、M、Lの順、材齢28日ではHが最も大きく、N、BB、Mがほぼ同程度、Lが最も小さい結果であった。材齢91日ではM、L、BBともにHやNを上回る強度発現を示した。

(3) 凍結融解

水セメント比65%、55%の配合とともに、300サイクル時点での相対動弾性係数は70%以上、また、水セメント比55%の配合では80%以上であり、いずれのセメントを用いた場合でも、所定の空気量を運行することで十分な凍結融解抵抗性を確保出来ることが確認された。また、Lについては、試験前の養生期間を長くすることで質量減少率が少なくなり、スケーリングに対する抵抗性が向上することが認められた。

(4) 促進中性化

中性化深さは水セメント比および有効水セメント比の増大に伴い大きくなり直線的関係が認められた。また、いずれの水セメント比においても、Hが最も中性化深さが小さく、ついでNの順であり、M、L、BBはこれらよりも大きくなつた。また、水セメント比65%では、Lの中性化深さはM、BBよりも大きくなり、水セメント比が大きい場合には中性化速度も他のセメントより大きくなる傾向がうかがえた。以上の傾向は促進試験開始時の圧縮強度とほぼ対応し、Lにおいても試験前の養生期間を長くするとNと同程度の中性化速度となつた。

(5) 塩化物イオン浸透性

26週間塩水中に浸せきした供試体割裂面へ試薬を噴霧し、それによる発色をもとに測定した塩化物イオン浸透深さは、ポルトランドセメントのN、M、Lに対してBBでは50～60%と小さかった。また、Lは浸せき前の養生期間を長くすることで塩化物イオン浸透深さが小さくなつた。

26週間塩水中に浸せきした供試体の深さ方向の塩化物イオン量を測定することにより求めた見掛けの拡散係数は、ポルトランドセメントのN、M、Lに対してBBが小さく、表面塩化物イオン量は逆にBBが大きい結果となつた。BBは塩化物イオンの固定化能力が大きいためと考えられる。また、Lは浸せき前の養生期間を長くすることで見掛けの拡散係数は小さくなつた。

28日間標準養生した供試体を用いて測定した電気泳動による塩化物イオンの実効拡散

係数は、BB が著しく小さく、以下小さいものから H、N、M、L の順であった。なお、L では、試験前の養生期間を長くすることで実効拡散係数は小さくなつた。また、水セメント比が大きくなるほど実効拡散係数は大きくなり、セメント水比と実効拡散係数との間に直線関係が認められた。

各試験方法における塩化物イオン浸透性と試験時のコンクリート圧縮強度は、BB の場合を除いてほぼ対応し、圧縮強度が大きいほど塩分浸透性は小さくなつた。

以上のように、コンクリートの耐久性を確保する上で、使用する各種セメントの特徴、また、水セメント比や養生期間などの影響を考慮して配合設計や施工を行うことが重要である。本報告がその際の参考資料の一つとして役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向（コンクリート技術シリーズ 55），2003 年 9 月
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書，2007 年 12 月
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策（設計・施工）指針・同解説，2002 年 12 月
- 4) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説，1991 年 7 月
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説，2004 年 3 月
- 6) 土木学会：平成 11 年版コンクリート標準示方書[施工編]改訂資料（コンクリートライブラリー99 号），2000 年 1 月
- 7) 竹田宣典，十河茂幸，迫田恵三，出光隆：種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する研究，土木学会論文集，No.599/V40, pp.91～104, 1998 年 8 月
- 8) 中永秀彦，石中正人，佐藤明大，松嶋信行：各種セメントを用いたコンクリートの塩化物イオンの拡散係数に関する研究，第 59 回セメント技術大会講演要旨，pp.106～107, 2005
- 9) 杉山隆文，高見満，RITTHICHAUY Worapatt，辻幸和：単位水量の増加がコンクリートの塩分浸透性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.819～824, 2004
- 10) 杉山隆文，Sorn VIRA，辻幸和，大城武：フライアッシュコンクリートの塩分浸透性の迅速評価に関する電気泳動法の適用，土木学会論文集 No.711/V-56, pp.191～203 2002 年 8 月
- 11) 細川佳史，山田一夫，高見満，杉山隆文：浸せき法および電気泳動法により評価した塩化物イオン拡散係数に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.725～730, 2003
- 12) 河野広隆，渡辺博志，丁海文，安泰松：高強度コンクリートの塩分浸透性と電気比抵抗特性に関する研究，第 55 回セメント技術大会講演要旨，pp.166～167, 2001
- 13) 佐藤健一，鳥居和之，笛谷輝彦，川村満紀：電気的促進試験法による高炉スラグ微粉末コンクリートの塩化物イオン拡散係数の算定，コンクリート工学年次論文集，Vol.19, No.1, pp.961～966, 1997

資料1 乾式と湿式で切断した試料片の塩化物イオン比較試験結果

1. 目的

JSCE-G-572-2003 には切断方法として「コンクリートカッターを用いてドライな状態で、分析用のコンクリート試験片を切り出す」と記述されている。

ドライな状態での切断、すなわち、乾式切断は、切断時におけるカッターナイフとコンクリートとの摩擦が大きく、カッターナイフに大きな負荷が生じるとともに、薄片の試験片を試料として切断しようとすると、試験片が破碎して回収出来ない可能性が高く、ある程度の厚みのある試験片とする必要がある。このことは、塩化物イオンの浸透深さがあまり大きくなれないコンクリート試験などでは、表面から内部への塩化物イオン濃度の変化を調べる上で大きな制約となっている。また、多量の粉塵が発生するなど作業上の問題点も多い。

一方、湿式切断は、乾式切断に比べてこれらの不具合が緩和されるものの、切断時にコンクリート試験片中の塩化物イオンの一部が流出し、実際に含有している塩化物イオンよりも少なくなることが懸念される。

そこで、今回、乾式と湿式の切断方法の相違がコンクリート中の塩化物イオン量の測定結果に及ぼす影響を確認するための比較試験を行なった。

2. 試験概要

使用材料は本編「2.1 使用材料」記載のもの、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの配合は、表-1 に示すとおりで、本編「2.2 コンクリートの配合」記載の水セメント比 55% のものとした。

なお表-1 に示す配合で作成した試験と併せて、練混ぜ時に塩化物イオンが混入された場合を想定し、コンクリート 1m³あたり塩化物イオン量で 1.2kg 相当（質量%では 0.052%）の塩化ナトリウムを練混ぜ水に加えた配合により作製した試験を追加した。なお、使用材料中の塩化物イオンは検討に際して考慮していない。以後、それぞれ配合記号 N、N1.2 と記述する。

両配合ともに本編「2.4 コンクリートの試験項目および方法」と同様に 28 日標準養生後、濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。浸せき期間は、N では 3 ヶ月、N1.2 では 2 ヶ月とした。

測定項目は、全塩化物イオン、可溶性塩化物イオンおよび不溶残分とした。可溶性塩化物イオンについては、固定化された塩化物イオンを含む全塩化物イオンに比べて、湿式によるカッティング作業中に流出する割合が多くなる可能性も考えられたため追加したものである。全塩化物イオンおよび不溶残分の試験方法は本編「2.4 コンクリートの試験項目および方法」と同様とし、可溶性塩化物イオンは JCI-SC4（硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法）に準じて測定した。

表-1 コンクリートの配合

配合記号	セメントの種類	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				AE 減水剤添加量※ (g/m ³)	AE 剤添加量(g/m ³)
				水	セメント	細骨材	粗骨材		
N	普通ポルトランドセメント	55	43.8	155	282	825	1058	705	14

※ AE 減水剤はセメント質量の 0.25% を添加した。

3. 試験結果

3.2 配合記号 N

配合記号 N は浸せき期間 3 ヶ月経過後、コンクリート表面からの深さが 1.0~2.1cm の範囲で湿式および乾式で切断して塩化物イオンを測定した。測定試料数は 4 試料とした。また、コンクリート表面からの深さの相違によって塩化物イオン量も影響されるため、表面からの深さと塩化物イオンとの関係図をもとに切断方法の影響を検討することとした。

コンクリート表面から 1.0~2.1cm 深さの塩化物イオンを表-2 に、表面からの深さと塩化物イオンの関係について、全塩化物イオンおよび可溶性塩化物イオンのそれぞれで湿式と乾式を比較したものを図-1 に示す。

表-2 コンクリート表面から 1.0~2.1cm 深さの塩化物イオン

(不溶残分補正後)

切断方法	コンクリート表面からの深さ		全塩化物イオン		可溶性塩化物イオン		(可溶性塩化物イオン/全塩化物イオン) ×100	
	cm	平均	%	平均	%	平均		平均
乾式	1.18	1.62	0.211	0.148	0.163	0.110	77.3	74.3
乾式	2.08		0.078		0.056		71.8	
乾式	1.18		0.218		0.161		73.9	
乾式	2.02		0.085		0.061		71.8	
湿式	1.10		0.198		0.142		71.7	
湿式	2.01	1.54	0.070	0.155	0.051	0.113	72.9	72.9
湿式	1.09		0.247		0.184		74.5	
乾式	1.96		0.107		0.077		72.0	

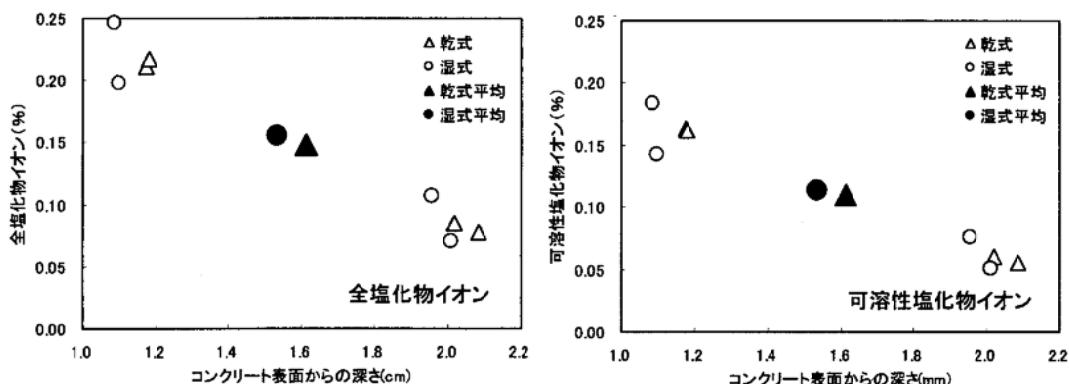


図-1 コンクリート表面から 1.0~2.1cm 深さの湿式と乾式の比較

3.2 配合記号 N1.2

配合記号 N1.2 は浸せき期間 2 ヶ月経過後、コンクリート表面からの深さが 1.2~1.8cm、5.0~5.8cm、6.0~6.5cm の範囲で湿式および乾式で切断して塩化物イオンを測定した。なお、測定試料数はコンクリート表面からの深さ 1.2~1.8cm および 5.0~5.8cm が 3 試料、6.0~6.5cm が 1 試料とした。深さ 1.2~1.8cm の試料については、前述と同様にコンクリート表面からの深さと塩化物イオンとの関係図より検討した。一方、5.0cm 以上の試料については、コンクリート表面からの塩化物浸透の影響はないものとし、深さの影響を考慮せず

に比較した。

コンクリート表面から 1.2~1.8cm 深さの塩化物イオンを表-2 に、表面からの深さと塩化物イオンの関係について、全塩化物イオンおよび可溶性塩化物イオンのそれぞれで湿式と乾式を比較したものを図-2 に示す。

表-2 コンクリート表面から 1.2~1.8cm 深さの塩化物イオン

(不溶残分補正後)

切断方法	コンクリート表面からの深さ cm	全塩化物イオン		可溶性塩化物イオン		(可溶性塩化物イオン /全塩化物イオン) ×100	平均
		%	平均	%	平均		
乾式	1.75	1.62	0.128	0.130	0.075	0.079	58.6
	1.35		0.137		0.090		65.7
	1.75		0.124		0.071		57.3
湿式	1.55	1.48	0.166	0.169	0.104	0.109	62.7
	1.25		0.200		0.135		67.5
	1.65		0.141		0.087		61.7

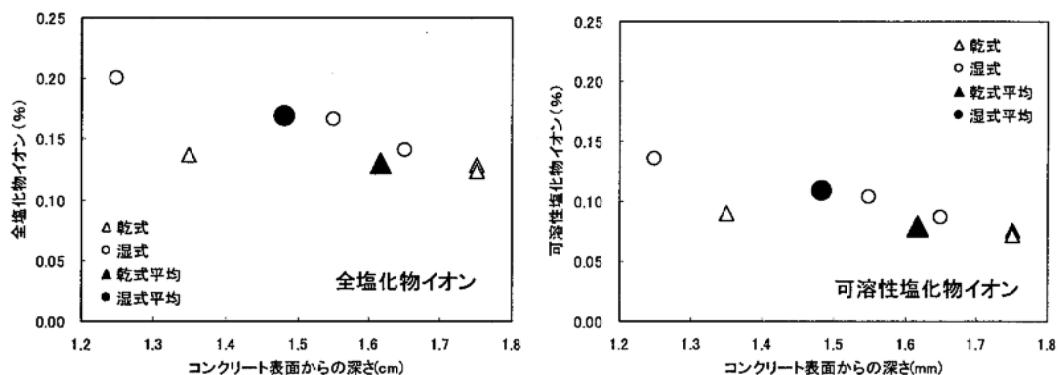


図-2 コンクリート表面から 1.2~1.8cm 深さの湿式と乾式の比較

コンクリート表面から 5.0~5.8cm および 6.0~6.5cm 深さの塩化物イオンをそれぞれ表-3、表-4 に、同表の湿式と乾式の比較を図-3、図-4 に示す。

表-3 コンクリート表面から 5.0~5.8cm 深さの塩化物イオン

(不溶残分補正後)

切断方法	全塩化物イオン		可溶性塩化物イオン		(可溶性塩化物イオン /全塩化物イオン) ×100	平均
	%	平均	%	平均		
乾式	0.048	0.050	0.024	0.026	50.0	52.0
	0.052		0.029		55.8	
	0.049		0.023		46.9	
湿式	0.047	0.050	0.023	0.024	48.9	48.0
	0.051		0.025		49.0	
	0.051		0.025		49.0	

表-4 コンクリート表面から 6.0~6.5cm 深さの塩化物イオン
(不溶残分補正後)

切断方法	全塩化物イオン (%)	可溶性塩化物イオン (%)	(可溶性塩化物イオン／全塩化物イオン) ×100
乾式	0.052	0.030	57.7
湿式	0.055	0.031	56.4

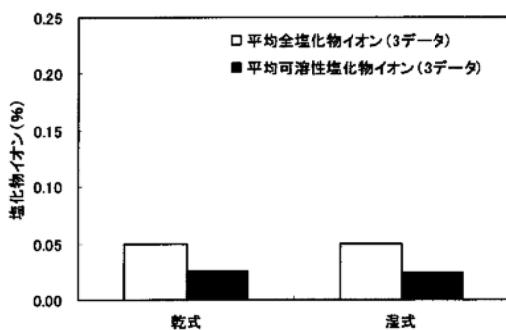


図-3 コンクリート表面から 5.0~5.8 cm 深さの湿式と乾式の比較

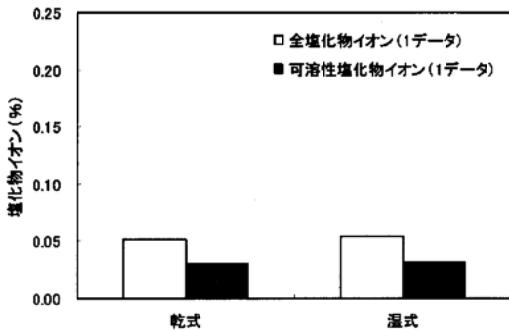


図-4 コンクリート表面から 6.0~6.5 cm 深さの湿式と乾式の比較

4. 考察

図-1 および図-2 より、個々の塩化物イオン測定データを見ると、コンクリート表面から深くなるに伴い減少し、数 mm オーダーで影響を受けることがわかるが、乾式切断、湿式切断ともにほぼ同一の線上にプロットされており、切断方法によらずほぼ同等の結果となった。また、全塩化物イオン、可溶性塩化物イオンに関わらず同様の傾向が得られていることが確認される。

表-3、表-4 および図-3、図-4 より、コンクリート表面から 5.0~5.8cm 深さおよび 6.0~6.5cm 深さの全塩化物イオンは 0.050~0.055% であり、乾式と湿式の切断方法による差は図-1、図-2 と同様に認められなかった。可溶性塩化物イオンについても同様に切断方法による差は見られなかった。なお、上記全塩化物イオンの値は練混ぜ時に混入した塩化物イオン量とほぼ等しく、コンクリート表面からの塩化物イオン浸透の影響はないものと考えられる。

因みに、全塩化物イオンに対する可溶性塩化物イオンの割合は、塩水浸せきの影響のみを受けた場合（表-2）では 74% 程度、また、練混ぜ時に混入した塩化物イオンのみの場合（表-3、表-4）では、ばらつきがあるが 54% 程度であり、前者の方が可溶性塩化物イオン量の割合が多い結果となっている。

5. まとめ

今回測定した範囲では、乾式と湿式の切断方法の相違がコンクリート中の塩化物イオン量の測定結果に及ぼす影響は認められなかった。よって、湿式で切断してもコンクリート中の塩化物イオン量の測定結果に及ぼす影響は小さいと判断し、本研究では湿式切断を採用することとした。

資料2 試験記録

1. 圧縮強度に関する本試験結果とコンクリート標準示方書〔設計編〕の定数、推定圧縮強度【本編3.2.1】

セメント の種類 定数および推定圧縮強度		a	b	d (28)	推定圧縮強度 (N/mm ²)									
					材齢 7 日			材齢 28 日			材齢 91 日			
					W/C 65%	W/C 55%	W/C 45%	W/C 65%	W/C 55%	W/C 45%	W/C 65%	W/C 55%	W/C 45%	
N	本試験	W/C 65%	4.7	0.95	1.12	19.0	—	—	27.6	—	—	30.7	—	—
		W/C 55%	4.4	0.97	1.11	—	24.0	—	—	34.1	—	—	37.7	—
		W/C 45%	3.8	0.98	1.09	—	—	31.5	—	—	43.0	—	—	47.0
	示方書	4.5	0.95	1.11	19.3	23.0	29.9	27.7	33.0	42.9	30.8	36.7	47.6	
	本試験－示方書				-0.3	1.0	1.6	-0.1	1.1	0.1	-0.1	1.0	-0.6	
H	本試験	W/C 65%	2.7	0.97	1.07	23.8	—	—	30.2	—	—	32.2	—	—
		W/C 55%	1.8	0.97	1.04	—	30.6	—	—	36.4	—	—	38.0	—
		W/C 45%	1.5	0.99	1.04	—	—	37.2	—	—	42.9	—	—	44.5
	示方書	2.9	0.97	1.07	23.3	28.2	33.2	30.1	36.4	42.8	32.3	39.0	45.8	
	本試験－示方書				0.5	2.4	4.0	0.1	0.0	0.1	-0.1	-1.0	-1.3	
M	本試験	W/C 65%	17.9	0.80	1.44	10.3	—	—	24.1	—	—	34.8	—	—
		W/C 55%	14.5	0.84	1.36	—	14.7	—	—	31.4	—	—	42.7	—
		W/C 45%	10.1	0.89	1.25	—	—	23.4	—	—	43.6	—	—	54.4
	示方書	6.2	0.93	1.15	15.6	20.3	27.6	24.6	32.0	43.5	28.3	36.9	50.2	
	本試験－示方書				-5.3	-5.6	-4.2	-0.5	-0.6	0.1	6.5	5.8	4.2	
L	本試験	W/C 65%	32.6	0.61	1.83	6.5	—	—	19.4	—	—	35.5	—	—
		W/C 55%	25.3	0.69	1.65	—	10.4	—	—	28.1	—	—	46.3	—
		W/C 45%	20.2	0.75	1.51	—	—	15.2	—	—	37.5	—	—	56.8
	示方書	6.2	0.93	1.15	16.5	20.4	24.6	26.0	32.2	38.9	30.0	37.1	44.8	
	本試験－示方書				-3.7	-4.2	-3.7	0.0	0.6	0.9	4.1	5.8	5.4	
B B	本試験	W/C 65%	12.6	0.86	1.31	12.8	—	—	26.0	—	—	34.1	—	—
		W/C 55%	12.6	0.87	1.31	—	16.2	—	—	32.8	—	—	42.9	—
		W/C 45%	10.7	0.89	1.26	—	—	20.9	—	—	39.8	—	—	50.2
	示方書	6.2	0.93	1.15	16.5	20.4	24.6	26.0	32.2	38.9	30.0	37.1	44.8	
	本試験－示方書				-3.7	-4.2	-3.7	0.0	0.6	0.9	4.1	5.8	5.4	

2. コンクリート表面からの深さごとの不溶残分と全塩化物イオン【本編 3.2.4.2】

セメントの種類	W/C (%)	養生(日)	初期に含まれるコンクリートの試験片	浸せきしたコンクリート						
				全塩化物イオン(%)	不溶残分(%)	コンクリート表面からの目標深さ(cm)	0 ~ 0.50	0.85 ~ 1.35	1.70 ~ 2.20	2.55 ~ 3.05
N	0.006	79.1	実測深さ(cm)	0.27	1.09	1.91	27.5	3.56		
			全塩化物イオン(%)	0.259	0.214	0.140	0.074	0.036		
			不溶残分(%)	80.3	79.7	80.8	79.9	79.7		
			補正全塩化物イオン(%)	0.313	0.249	0.174	0.087	0.042		
	0.004	79.4	実測深さ(cm)	0.28	1.12	2.02	2.98	3.89		
			全塩化物イオン(%)	0.306	0.242	0.165	0.078	0.039		
			不溶残分(%)	79.1	80.0	80.2	80.5	80.4		
			補正全塩化物イオン(%)	0.343	0.287	0.199	0.096	0.048		
	0.005	80.0	実測深さ(cm)	0.30	1.28	2.22	3.11	4.08		
			全塩化物イオン(%)	0.220	0.152	0.088	0.049	0.018		
			不溶残分(%)	80.6	80.4	80.4	79.5	80.9		
			補正全塩化物イオン(%)	0.264	0.180	0.104	0.055	0.022		
H	0.004	80.4	実測深さ(cm)	0.29	1.21	2.11	2.99	3.85		
			全塩化物イオン(%)	0.258	0.192	0.103	0.056	0.024		
			不溶残分(%)	79.0	77.7	78.6	79.2	78.4		
			補正全塩化物イオン(%)	0.279	0.192	0.109	0.061	0.025		
	0.004	80.2	実測深さ(cm)	0.24	1.12	1.98	2.80	3.72		
			全塩化物イオン(%)	0.443	0.194	0.049	0.019	0.031		
			不溶残分(%)	80.1	79.4	80.7	80.7	80.3		
			補正全塩化物イオン(%)	0.528	0.221	0.061	0.024	0.037		
M	0.004	80.4	実測深さ(cm)	0.28	1.20	2.11	3.02	3.96		
			全塩化物イオン(%)	0.152	0.103	0.053	0.019	0.006		
			不溶残分(%)	79.5	78.0	79.0	78.2	79.9		
			補正全塩化物イオン(%)	0.169	0.105	0.057	0.020	0.007		
	0.004	80.2	実測深さ(cm)	0.24	1.12	1.98	2.80	3.72		
			全塩化物イオン(%)	0.443	0.194	0.049	0.019	0.031		
			不溶残分(%)	80.1	79.4	80.7	80.7	80.3		
			補正全塩化物イオン(%)	0.528	0.221	0.061	0.024	0.037		
L	0.004	80.4	実測深さ(cm)	0.28	1.20	2.11	3.02	3.96		
			全塩化物イオン(%)	0.152	0.103	0.053	0.019	0.006		
			不溶残分(%)	79.5	78.0	79.0	78.2	79.9		
			補正全塩化物イオン(%)	0.169	0.105	0.057	0.020	0.007		
	0.004	80.2	実測深さ(cm)	0.24	1.12	1.98	2.80	3.72		
			全塩化物イオン(%)	0.443	0.194	0.049	0.019	0.031		
			不溶残分(%)	80.1	79.4	80.7	80.7	80.3		
			補正全塩化物イオン(%)	0.528	0.221	0.061	0.024	0.037		
	0.004	80.4	実測深さ(cm)	0.28	1.20	2.11	3.02	3.96		
			全塩化物イオン(%)	0.152	0.103	0.053	0.019	0.006		
			不溶残分(%)	79.5	78.0	79.0	78.2	79.9		
			補正全塩化物イオン(%)	0.169	0.105	0.057	0.020	0.007		

備考 1) 初期に含まれるコンクリート供試体の試料数は 1 試料、浸せき供試体の試料数は 3 試料とし、表には平均値で示す。

備考 2) 細骨材の不溶残分は 97.5%、粗骨材の不溶残分は 93.3%であり、配合毎に骨材の不溶残分を算出し、N、H、BB は 95.1%、M、L は 95.2%であった。

備考 3) 補正全塩化物イオンは下記の式から算出した。不溶残分で補正した初期コンクリートの全塩化物イオンは N が 0.007%、H、M、BB、L が 0.005%であった。

$$\text{補正全塩化物イオン(%)} = \frac{\text{全塩化物イオン(%)}}{\frac{1 - \frac{\text{单位容積あたりの骨材量(kg/m}^3}{\text{単位容積質量(kg/m}^3}}{\text{試料の不溶残分(%)}} \times 100}} \times 100$$

3. コンクリート表面の全塩化物イオンと見掛けの拡散係数【本編 3.2.4.2】

セメントの種類	W/C (%)	養生 (日)	コンクリート表面の全塩化物イオン、見掛けの拡散係数		
			試料No.	コンクリート表面 の全塩化物イオン C_{s0} (%)	見掛けの拡散係数 D_{ap} (cm ² /年)
N		28	1	0.324	4.74
			2	0.400	7.17
			3	0.342	5.58
			平均	0.355	5.83
			1	0.414	6.11
			2	0.372	10.40
			3	0.372	6.49
			平均	0.386	7.67
			1	0.194	4.55
			2	0.306	6.95
M		55	3	0.377	4.93
			平均	0.292	5.48
			1	0.294	5.31
			2	0.355	6.37
			3	0.282	3.51
			平均	0.310	5.06
			1	0.654	1.37
			2	0.732	1.14
			3	0.512	1.78
			平均	0.633	1.43
L		56	1	0.208	3.46
			2	0.249	3.73
			3	0.131	2.95
			平均	0.196	3.38

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	碎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	碎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	レデミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告

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

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

ISBN978-4-88175-096-4 C3358 ¥1500E

コンクリート専門委員会報告 F-55

定価 : [本体 1,500+税]

平成 20 年 3 月 20 日 印刷

社団法人 セメント協会

平成 20 年 3 月 25 日 発行

東京都中央区八丁堀 4-5-4

ダヴィンチ桜橋 7 階 702 号

電話 03(3523)2701(代)

発行所 社団法人 セメント協会研究所

東京都北区豊島 4 丁目 17 番 33 号

電話 03(3914)2691(代)

印刷所 有限会社 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