

# 論文 強さクラス 32.5 セメントを使用した汎用コンクリートの耐久性評価について

小早川 真\*1・三谷 裕二\*2・大森 啓至\*3・山田 一夫\*4

**要旨:** 石灰石微粉末, および高炉スラグ微粉末からなる欧州規格における強さクラス 32.5 の混合セメントを使用したコンクリートの性能を耐久性に関して評価した。スランプを一定とし, 呼び強度 3 水準としたコンクリートを製造し, 各種の耐久性を普通ポルトランドセメントおよび高炉 B 種セメント (それぞれ強さ 52.5, 42.5 クラス) と比較した。強さクラス 32.5 の混合セメントの使用により既存の汎用セメントと同等のコンクリートの耐久性が得られた。セメント種類, 配合によらずコンクリートの耐久性の要因として共通と考えられる項目に関し, 空隙構造を中心に相関分析によって検討した。

**キーワード:** ISO 規格セメント, 耐久性, 中性化, 塩分浸透, 透水性, 凍結融解抵抗性

## 1. はじめに

JIS 規格における各種ポルトランドセメントの強さは最低値のみ規定されており, ユーザーニーズに基づく製造メーカーの努力により年々強くなっている<sup>1, 2)</sup>。これは管理材齢における強さの偏重, 下限値厳守による施工管理の結果ならびにセメント量の低減によるコンクリートのコスト削減要求に起因してきたと推定できる。

レディーミクストコンクリートに規定される強度域の内, 出荷量の多い呼び強度 21 以下では, 骨材事情にもよるが, セメント量が少なく水セメント比が大きいコンクリートが一部出荷されている可能性も否定できない。これはコンクリートの施工欠陥を助長し, 耐久性に関して不利な条件であり, コンクリートとしてのバランスを損なっている可能性がある。

国際規格 ISO 案<sup>2)</sup>と目される欧州規格 (EN197-1:2000) においては, セメントは強さ 32.5, 42.5, 52.5 の三クラスが規定され, それぞれ強さの下限と上限が決められ, コンクリート強度に応じて最適な強さのセメントを適用すると言う思想が示されている<sup>3, 4)</sup>。

筆者らは ISO と JIS の整合化を控え, 欧州の

汎用セメントの実態調査を行い, 汎用セメントにはブレーン調整型および混合型セメントが用いられることを確認した<sup>5)</sup>。またそれらを日本のコンクリートに適用して評価を行い, 汎用コンクリートに対する強さ 32.5 セメントの適性を確認した<sup>5)</sup>。また, コンクリートの耐久性向上に効果のあるセメントとして, 石灰石フィラーセメントの実用化に向けた研究がされている<sup>6)</sup>。これらの結果日本において強さ 32.5 セメントの適用により汎用強度域のコンクリートの総合的な品質向上の可能性が見出された。

本研究ではこの考えを基に試製した強さ 32.5 クラスの石灰石微粉末系 (以下 LS と略記), および石灰石 - 高炉スラグ微粉末系 (以下 BL と略記) の 2 種の混合セメントを使用したコンクリートの性能を, 普通ポルトランドセメント (以下 N と略記) および高炉 B 種 (以下 BB と略記) の場合と比較した。汎用コンクリートにおける耐久性を評価する条件としてスランプを一定とし, 呼び強度 3 水準とした。強さ 32.5 セメントの使用によりもたらされる N と同等の耐久性を, そのメカニズムを含め考察し, 汎用コンクリート用セメントとしての適性を明らかにした。

\*1 太平洋セメント(株)中央研究所コンクリート技術グループ主任研究員 (正会員)

\*2 太平洋セメント(株)中央研究所コンクリート技術グループ 工修 (正会員)

\*3 太平洋セメント(株)中央研究所コンクリート技術グループリーダー 工修

\*4 太平洋セメント(株)中央研究所セメント化学グループ主席研究員 工博 (正会員)

表-1 使用材料の特徴

セメント (置換率 mass%) 微粉末 (高炉スラグ:B, 石灰石:L)	強さ クラス	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ブレン比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	モルタル強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
				2d	7d	28d
BL (N:B:L=65:15:20)	32.5N	3.00	4210	14.1	31.8	46.8
LS (N:L=70:30)	32.5R	3.00	4200	14.6	31.6	41.0
N	52.5N	3.15	3390	20.9	43.2	59.5
BB	42.5N	3.02	3890	15.6	33.8	58.0

骨材	産地	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粗粒率	AE 減水剤	AE 助剤	水
海砂	長崎県壱岐郡郷ノ浦沖合海砂	2.59	2.37	リグニンスルホン酸 化合物およびポリオ ール複合体	アルキルアリルスルホ ン酸化合物系陰イオ ン界面活性剤	水道 水
砕砂	北九州市小倉南区産砕砂	2.69	2.95			
粗骨材	北九州市門司区産砕石 2005	2.83	6.64			

表-2 IS032.5 クラスセメントおよび汎用セメントを用いたコンクリート配合 スランプ 12cm

呼び 強度	目標 強度	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤 (C×%)	AE 助剤 (A)
					水	セメント	海砂	砕砂	粗骨材		
24	28.8	BL (ISO32.5N)	60.0	47.5	171	285	348	521	1035	0.25	1.8
		LS (ISO32.5R)	53.3	46.0	171	321	331	496	1047		1.8
		N (国内汎用)	71.6	50.5	184	257	369	553	975		0.8
		BB (国内汎用)	72.7	49.5	177	243	367	550	1007		2.3
30	36	BL	50.9	46.0	168	330	330	495	1047	0.25	2.0
		LS	45.9	45.0	173	377	313	470	1035		2.4
		N	61.1	47.5	173	283	349	523	1038		1.5
		BB	66.9	48.5	173	259	358	538	1027		2.2
36	43.2	BL	44.5	44.5	172	387	308	463	1041	0.25	1.5
		LS	39.6	40.5	178	449	269	404	1070		2.0
		N	53.5	46.0	176	329	329	493	1044		0.8
		BB	55.6	46.0	165	297	337	506	1070		2.2

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および実験配合

使用材料の特徴を表-1 に示した。コンクリート配合を表-2 に示した。骨材は砕石、砕砂および海砂であり西日本地区の使用骨材環境に近い材料である。汎用コンクリートに適用するためのセメント評価であり生コンでの使用実績の多い AE 減水剤配合とした。コンクリートは 3 水準の呼び強度についてスランプ 12±1.5cm, 空気量 4.5±1.5%とし気温 20℃, 相対湿度 80%の恒温恒湿室において製造した。従来の耐久性の指標である水セメント比 60%以下を耐久的なコンクリートと考えると, BL, LS を使用した場合, 低い呼び強度域でも耐久的範囲内にある。また単位水量も JASS5 における耐久的な範囲になっている。

s/a は土木学会コンクリート標準示方書(施工編, 平成 8 年度制定)に習い修正した。

### 2.2 実験方法

#### (1) コンクリートの練混ぜおよび成型

温度 20℃において表面乾燥飽水状態の骨材を用いた。50 リットル強制パン型ミキサーを用い 35 リットル程度のコンクリートを練混ぜた。セメントおよび骨材を 15 秒間空練り後, 減水剤を含む水を投入し 90 秒間練混ぜ排出した。

供試体の成型は JIS A 1132 に従った。

#### (2) スランプ・空気量

スランプ試験は JIS A 1101, 空気量は JIS A 1128 に従った。

#### (3) 圧縮強度

JIS A 1108 に準拠した。

#### (4) 空隙径分布の測定

20℃において水中養生 4 週間行った円柱供試体 φ10×20cm をダイヤモンドカッターで約 1cm 大のサイコロ状に切断し, アセトン浸漬により水分置換し乾燥させた。低真空乾燥 1 週間に続

き D-乾燥（水蒸気圧  $5 \times 10^{-4}$  mmHg 下）を 2 週間行い試料の乾燥状態を調整した。空隙径分布は水銀圧入式ポロシメータにより測定した。試料量は 15 g 程度とし 4 回の測定の平均を示した。

#### (5) 硬化体の BET 比表面積

試料は (4) と共通の試料を用い、さらに硬化体の組織を残しかつ粉砕による BET 比表面積の変化を減じるため、鉄鉢で粗粉砕し骨材を取り除き 0.6~1.0mm にふるいで粒度調整した。試料約 1g を用い 1 点式により測定を行った。

#### (6) 促進中性化試験

角柱供試体  $10 \times 10 \times 40$  cm を温度  $20^\circ\text{C}$  において水中養生 4 週間、さらに温度  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60% で 4 週間乾燥後、打設面、底面、端面の四面をシールした。促進試験は温度  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60%、炭酸ガス濃度 5% で実施した。測定材齢 (1, 4, 8, 13 週) においてフェノールフタレイン 1% のエタノール溶液を指示薬とし中性化深さを測定した。原点を通る促進日数の平方根に対する近似直線から促進中性化速度係数を求めた。供試体数 2~3。

#### (7) 乾湿繰返し塩分浸透試験

角柱供試体  $10 \times 10 \times 40$  cm を温度  $20^\circ\text{C}$  において水中養生 1 週間、さらに温度  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60% で 3 週間乾燥後、打設面、底面、端面の四面をシールした。浸漬溶液は温度  $20^\circ\text{C}$ 、NaCl 濃度 3% とし、乾燥は温度  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60% とした。浸漬 3 日乾燥 4 日を 1 サイクルとした。1, 4, 8, 13 サイクルに割裂面の塩分浸透深さを 0.01N 硝酸銀と 0.1% フルオレセインナトリウム溶液の呈色により測定した。促進塩分浸透速度係数はサイクルの平方根に対し原点を通る浸透深さの近似直線から求めた。供試体数 2。

#### (8) 透水試験

円柱供試体 ( $\phi 15$  cm  $\times 30$  cm) を温度  $20^\circ\text{C}$  において水中養生 4 週後高さ方向に 3 等分に切断し約  $\phi 15$  cm  $\times 10$  cm の円柱にした。さらに温度  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60% で 4 週間乾燥後、試験を実施した。

インプット法を用い打ち込みと同方向に水を

浸透させた。透水圧力は 5 気圧とし 1 週間載荷後、割裂断面の浸透深さを測定し拡散係数を求めた<sup>7)</sup>。供試体数 1。

#### (9) 乾燥収縮長さ変化試験

角柱供試体  $10 \times 10 \times 40$  cm を温度  $20^\circ\text{C}$  において水中養生 1 週間後、基長を測定し、相対湿度 60% で質量変化および長さ変化を測定した。測定は乾燥材齢 182 日までの値を示した。供試体数 3。

#### (10) 凍結融解抵抗性試験

角柱供試体  $10 \times 10 \times 40$  cm を温度  $20^\circ\text{C}$  において水中養生 2 週間後、基準の動弾性係数および質量を測定した。供試体数 3。凍結融解は ASTM C666 A 法および動弾性係数の測定は JIS A 1127 のたわみ振動を用いて行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 圧縮強度発現

材齢 28 日のコンクリートの圧縮強度をそろえた場合 (図-1)、いずれの呼び強度配合においても BL の強度発現は N と類似していた。LS は初期材齢の強度発現が N より大きい特徴があった。BB は初期の強度発現が小さく材齢 7 日以降の強度増進が特徴であった。強さ 32.5 クラスセメントの組成を適切に選定すれば 52.5 クラスである N と比べ早期型あるいは同様な強度発現速度とすることが可能であった。N より強さが低い 32.5 クラスセメントを用いたコンク

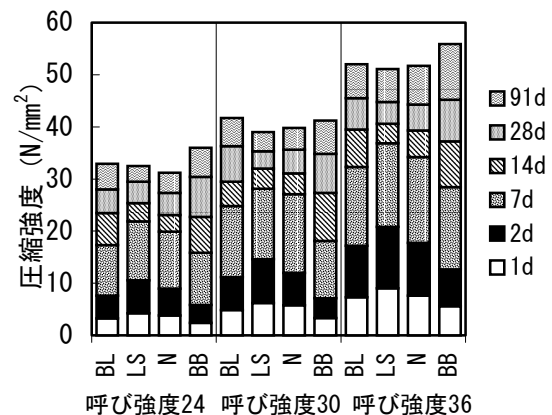


図-1 呼び強度毎の圧縮強度発現のセメント種類による比較

表-3 呼び強度, セメント毎の BET 比表面積

呼び強度	材齢28日硬化体のBET比表面積(m <sup>2</sup> /g)			
	BL	LS	N	BB
24	5.40	6.59	4.74	5.94
30	6.06	6.58	6.14	4.91
36	9.03	9.28	8.57	7.30

表-4 促進中性化速度

セメント	促進中性化速度(mm/√日)		
	呼び強度24	呼び強度30	呼び強度36
BL	2.35	1.80	1.42
LS	2.28	1.71	1.36
N	2.15	1.73	1.24
BB	2.66	2.27	1.67

表-5 乾湿繰り返し促進塩分浸透速度係数

セメント	塩分浸透速度係数(mm/√サイクル)		
	呼び強度24	呼び強度30	呼び強度36
BL	4.74	3.74	2.38
LS	5.85	4.44	2.50
N	5.93	4.22	2.31
BB	2.88	2.79	2.35

リートについても材齢と強度の関係は従来と変わりなかった。

### 3.2 硬化体の空隙構造

#### (1) 空隙径分布

硬化体の総空隙量は呼び強度の増加により減少する傾向があった(図-2)。セメントの種類による差は材齢 28 日ではあまりなかった。水和生成物である C-S-H の層間に相当する径 3nm~6nm の空隙量は, 呼び強度が増加すると増加し, セメント種類では BB に多かった。骨材界面に多く分布し遷移帯に相当する径 50nm~100nm~1μm の空隙量を比較すると, N, BB に比べ 32.5 クラスの BL, LS では小さい径 50nm~100nm の空隙の比率が高く, 遷移帯が緻密になっていた。

#### (2) 硬化体の BET 比表面積

C-S-H 等水和物の構成や量を反映すると考えられる硬化体の BET 比表面積(表-3)は, 呼び強度が高くなると増加していた。セメント種では呼び強度 24 以外では LS が大きく, BB が小さい傾向であった。

### 3.3 耐久性

#### (1) 促進中性化

促進中性化速度(表-4)はいずれのセメントでも呼び強度の増加により減少した。32.5 クラスセメント BL, LS は N より中性化速度が大きか

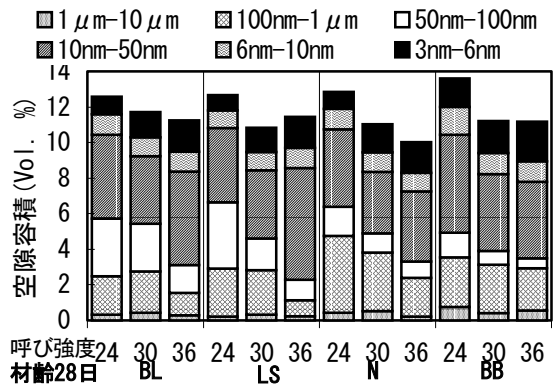


図-2 空隙径分布の呼び強度に対する変化

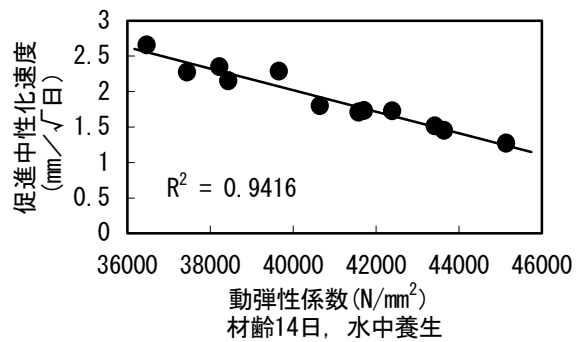


図-3 促進中性化と動弾性係数の関係

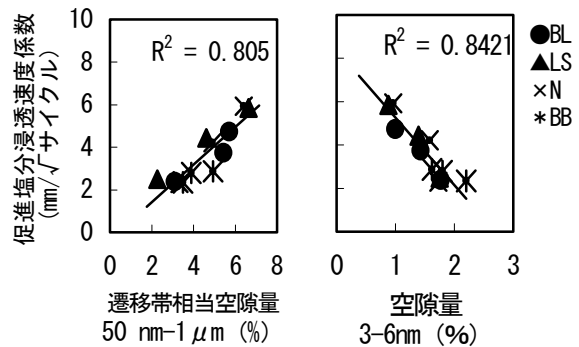


図-4 塩分浸透と空隙の関係

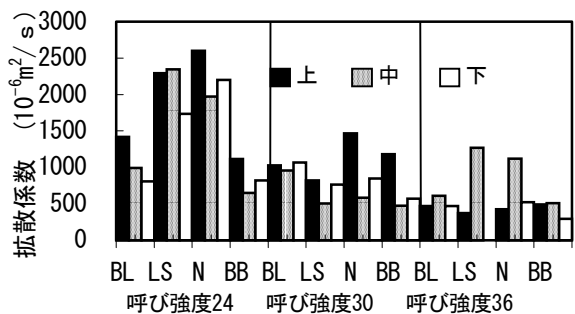


図-5 円柱供試体上中下部の透水試験結果

った。BB の中性化速度が最も大きかった。促進中性化速度と材齢 14 日の動弾性係数は負の強い相関があった(図-3)。動弾性係数は空隙構造と強度を反映した値と考えられ有為な相関と考えられる。同一骨材であれば, 早期に非破

壤で中性化特性を推定でき有効な評価手段と考えられる。また圧縮強度の材齢 28 日までの結果とも負の強い相関があった。材齢 28 日の総空隙量とは正の強い相関があった。

## (2) 促進塩分浸透

呼び強度 24 の配合における促進塩分浸透速度係数は BB が最も小さい(表-5)。次いで BL も小さく高炉スラグの水和反応による効果と考えられる。呼び強度の増加によりいずれのセメントにおいても塩分浸透速度係数は小さくなった。呼び強度 36 ではセメント種による差はなくなった。

塩分浸透速度係数と遷移帯の空隙量とは、セメント種類、配合によらず正の強い相関があり、C-S-H の生成量と関連が高い径 3nm~6nm の空隙量とは負の強い相関があった(図-4)。また透水試験による拡散係数とは正の強い相関があった。空隙構造と水和物による塩分の固定吸着<sup>8)</sup>が塩分の浸透速度を決定していると考えられる。

## (3) 透水試験

拡散係数は供試体の部位により変動が大きい(図-5)。高炉スラグを含有したセメントにおいて拡散係数は小さい傾向があった。拡散係数は圧縮強度および径 3nm~6nm の空隙量とは負の相関が強く、また遷移帯の空隙量とは正の相関があった。強さ 32.5 クラスセメントでは N と同等の透水性能のコンクリートとなっていた。

## (4) 乾燥収縮

乾燥収縮量は配合によらず乾燥材齢 28 日では 0.03~0.04%、91 日では 0.05~0.06%とほぼ同じような値となった。

乾燥収縮による長さ変化と質量変化の関係は呼び強度で異なった(図-6)。質量変化に対する長さ変化は、BB が他より大きい傾向があった。BL, LS は N と同等であった。乾燥による質量変化は呼び強度が低いほど大きい。収縮応力は空隙構造のメニスカスと関連が高く配合により異なると考えられる<sup>9)</sup>そこで材齢 28 日の空隙構造を代表値と仮定し検討した。

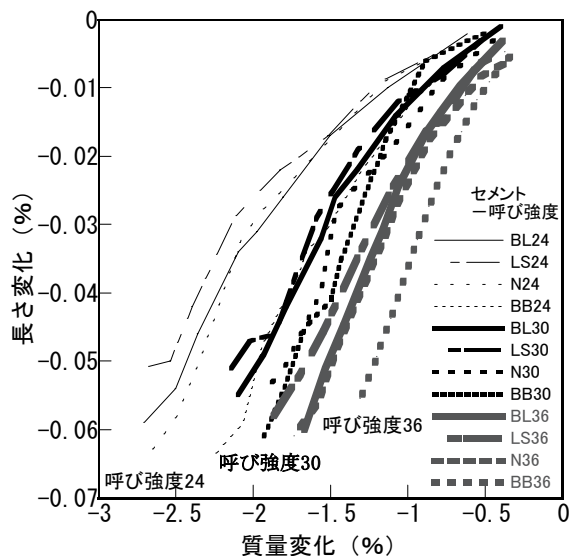


図-6 乾燥収縮と質量変化の関係

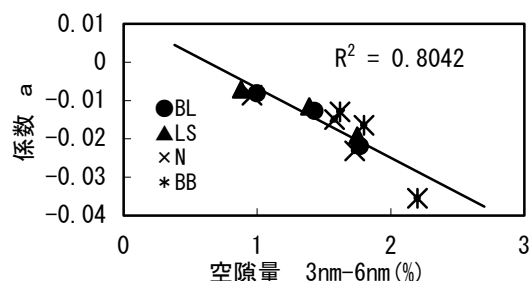


図-7 水分減量に対する収縮率の近似 2 次式の係数と径 3nm~6nm の空隙量の関係

長さ変化率(y)と質量変化(x)の関係を式(1)で近似した。

$$y=ax^2 \quad (1)$$

質量減少あたりの長さ変化率に相当する係数 a は空隙径 3nm~6nm の空隙量とは負の強い相関があった(図-7)。これは、C-S-H の結晶層間のメニスカス量が収縮を支配していることを意味する。ケルビン式からも相対湿度 60%では空隙径約 4nm まで乾燥すると想定されるので、乾燥収縮は C-S-H 層間に相当する空隙量と密接に関係している。強さ 32.5 クラスセメント固有の傾向はなかった。

## (5) 凍結融解抵抗性

凍結融解はいずれのセメント、配合においても 300 サイクルで相対動弾性係数が 60%以上あり問題はなかった(図-8)。呼び強度が高くなると耐久性が向上していた。

凍結融解のスケーリングによる質量減少率は

空隙径 50nm~100nm および遷移帯に相当する空隙量とは正の相関があり、空隙径 3nm~6nm とは負の相関があった。

凍結融解 300 サイクル前後の動弾性係数の低下量と、空隙径 3nm~6nm また圧縮強度 28 日および 91 日とは負の強い相関があった。32.5 クラスセメントに特別な現象は認められなかった。

#### 4. まとめ

欧州規格の強さ 32.5 クラスに相当するセメントを用いたコンクリートの耐久性について、スランブを 12cm 一定とし、呼び強度 3 水準にわたり検討した。従来の汎用セメントである普通ポルトランドセメントや高炉 B 種セメントと比較し各種耐久性に関するメカニズムは同様に考えることができ遜色ない耐久性を発揮することが確認され、汎用セメントとしての強さ 32.5 クラスの適性が示された。以下に本研究で明らかになった耐久性メカニズムに関する知見を中心にまとめる。

- (1) 圧縮強度発現はコンクリートの呼び強度を一定とした場合、32.5 クラスセメントの使用により普通ポルトランドセメントと同等の強度発現が得られ、石灰石微粉末系セメントでは初期強度発現を高めることができる。
- (2) 促進中性化速度は 32.5 クラスセメントの使用により普通ポルトランドセメントより大きく、高炉 B 種セメントよりも小さくなった。
- (3) 中性化速度の目安として非破壊で測定できる動弾性係数を適用できる可能性がある。
- (4) 促進塩分浸透速度係数は高炉 B 種セメントが顕著に低い。遷移帯が塩分浸透経路となり、ゲル水和物が浸透を抑制すると考えられる。
- (5) 乾燥収縮のメカニズムは 32.5 セメントと従来のセメントとも同じであり、ゲル空隙の量を指標に乾燥質量減率と長さ変化率の関係が回帰された。32.5 セメントを使用した場合の収縮量は普通ポルトランドセメントと同等であった。
- (6) 凍結融解抵抗性は 32.5 セメントを使用し

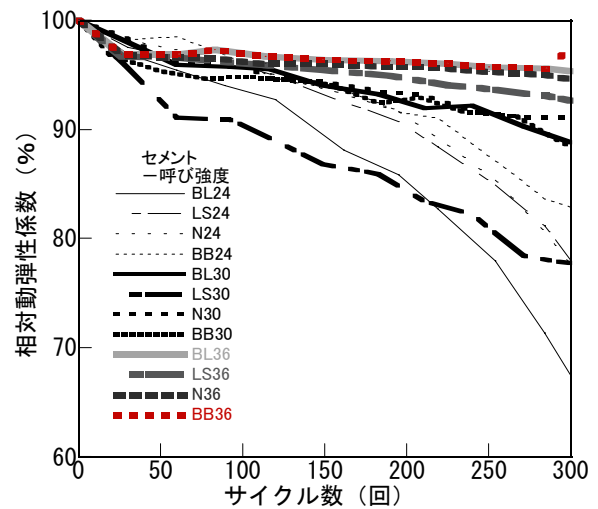


図-8 凍結融解抵抗性

ても従来のセメントと変わりがなく、ゲル空隙の増加および圧縮強度の増加により耐久性が向上し、遷移帯空隙量の増加により低下した。

謝辞：実験に協力頂いた香春太平洋セメント株式会社コンクリート試験所に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書 コンクリートの劣化と評価 セメント系材料長期耐久性，日本コンクリート工学協会，pp. 113-148, 2000.5
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書 コンクリートの劣化と評価 セメント系材料長期耐久性，日本コンクリート工学協会 pp. 230-244, 2000.5
- 3) 日本道路公団試験研究所橋梁研究室：試験研究所技術資料第 419 号打設コンクリートの品質等の調査研究報告書(その 8)，1996.8
- 4) 下田孝：21 世紀のセメント・コンクリート研究開発とセメント産業の役割，セメント・コンクリート，No.635，pp.2-9, 2000.1
- 5) 城国省二，沢木大介，山田一夫：21 世紀に求められるセメント像-欧州汎用セメントの解析をとおして-，太平洋セメント研究報告，第 140 号，pp. 4-24, 2001.6
- 6) セメント協会：石灰石微粉末委員会報告書，2001.10
- 7) 村田二郎，越川茂雄，伊藤義也：コンクリートにおける加圧浸透流に関する研究，コンクリート工学論文集，第 11 巻，第 1 号，pp. 61-74, 2000.1
- 8) セメント協会：セメント硬化体委員会報告書，pp.203-240, 2001.5
- 9) 田代忠一，田澤栄一，笠井芳夫編：セメント・コンクリート中の水の挙動，TCR，pp. 206-209, 1993.10