

粒度を改質したビーライト系セメントを用いたコンクリートの塩分浸透性

Chloride Permeability of Concrete Using Modified Grading Belite-Based Cement

北海道開発土木研究所 ○正 員 吉田 行 (Susumu YOSHIDA)
北海道開発土木研究所 正 員 田口 史雄 (Fumio TAGUCHI)
日鐵セメント株式會社 正 員 渡辺 宏 (Hiroshi WATANABE)

1. はじめに

厳しい経済情勢下において、近年、コンクリート構造物の早期劣化が問題となってきた。このため、コンクリート構造物においては、長期にわたって性能を維持することが要求されている。特に、厳しい積雪寒冷地である北海道においては、耐凍害性はもとより、周囲を海で囲まれ、また冬期には円滑な交通を確保するために道路に凍結防止剤が散布されていることから、塩害に対しても高い耐久性が要求される。

一方、コンクリート構造物の耐久設計は、基本的には土木学会のコンクリート標準示方書・施工編に準じて行われてきたが、同示方書は平成 11 年度に性能照査型への移行に向けた大幅な改訂がなされた¹⁾²⁾。塩害に対しては、設計耐用期間、鋼材位置に蓄積される塩化物イオン濃度を塩化物イオンの拡散係数を用いて算出し、その値が鋼材腐食発生濃度以下であることを照査する形式となっている。この規定は、今後、北海道などの厳しい環境でコンクリート構造物を設計する際、かぶり厚さの増大などの課題を有することから、塩分の浸透を小さくするなど新たな性能を有するコンクリートの研究・開発とそれらの結果に基づいた北海道仕様を作ることが喫緊の課題となる。

著者らはこれまで、長期耐久性を有する可能性があるセメントとしてビーライト系セメントに着目し、強度や発熱特性および凍結融解抵抗性について広範な検討を行ってきた³⁾⁴⁾。その結果、ビーライト系セメントの粒度や鉱物組成を改質することにより、多様な性能を有するコンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。

本研究では、上述のような背景をもとに、改質したビーライト系セメントを用いたコンクリートの塩分浸透性について検討を行った。また、改訂された示方書には拡散係数の予測式が示されたが、これらの式は主に水セメント比 40～60%のデータに基づいた回帰式であり、30%以下の領域や本研究のような特殊なセメントについてはデータが少なく適用が難しいと考えられることから、拡散係数を実測する必要がある。本研究では、電気的手法を利用した促進透過性試験を適用して拡散係数を算定すると共に、その試験法の適用性についても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1、表-2 に使用材料およびビーライト系セメントの鉱物組成を示す。セメントは、ビーライト系ポルトランドセメント（以下、ビーライトセメントと略記）、普

通ポルトランドセメント（以下 OPC と略記）および高炉 B 種セメント（以下 BB と略記）を用いた。ビーライトセメントは、一般的なビーライトセメント（以下 B4 と略記）と粉砕器を用いて製造したビーライトセメント（以下 B6 と略記）の 2 種類を用いた。混和剤は、カルボキシル基、特殊グラフト基およびスルホン基を含有する水溶性共重合体を主成分とする高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）をセメントの分散性に応じて 2 種類用いた。併せて、空気量を調節するため AE 助剤（ロジン系）を用いた。なお、高性能 AE 減水剤は、コンクリートが材料分離を起こさない範囲で最大量用いた。

2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートの練混ぜには、容量 55 ℓ の 2 軸強制ミキサーを用いた。練混ぜ時間は、全材料投入後 2 分とした。コンクリートの配合を表-3 に示す。コンクリートの目標スランプおよび空気量はそれぞれ 8±1cm および 2.5～4.5±1%とした。水セメント比 (W/C) は、25、30、40% の 3 水準とした。養生は、供試体作製後 1 日湿気養生し、脱型後所定の材齢まで水中養生を行った。

2.3 塩分浸透試験用供試体の作製

塩分浸透試験用供試体は、材齢 91 日まで水中養生した φ10×20cm の円柱供試体を、厚さ 5cm の円盤状になるようにダイヤモンドカッターで切断したものを用いた。この供試体を同じ厚さのゴム製アタッチメントに取り付け、エポキシ系接着剤を用いて固定し、漏水を防いだ。その後 AASHTO T-277 に準拠して、真空デシケータ内で

表-1 使用材料

セメント	ビーライトセメント(B4)	3300※
	ビーライトセメント(B6)	6410※
	普通ポルトランドセメント(OPC)	3320※
	高炉 B 種セメント(BB)	4060※
細骨材	登別産陸砂	密度 2.68g/cm ³ 、吸水率 1.35%、FM2.70
粗骨材	白老産碎石	比重 2.68、吸水率 1.84%
高性能 AE 減水剤	水溶性共重合体	
AE 助剤	樹脂酸塩系	

※ブレン比表面積 (cm²/g)

表-2 ビーライトセメントの鉱物組成

ビーライトセメントの種類	鉱物組成			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
B4	28	50	3	12
B6	25	54	3	12

表-3 コンクリートの配合

セメント の 種 類	水セ メント 比 (%)	空 気 量 (%)	S P の 種 類	S P 添加量 (C*%)	s/a (%)	コンクリート単位量 (Kg/m ³)					
						W	C	S	G	SP	AE剤 (C*%)
B6	25	2.5	HP11	1.10	43	98	392	871	1151	4.31	0.0100
	30	3.5		1.00	44	102	340	894	1133	3.40	0.0045
	40	4.5		0.80	46	113	283	931	1089	2.26	0.0022
B4	25	2.5	HP11	0.90	43	107	428	848	1120	3.85	0.0100
	30	3.5		0.80	44	109	363	877	1112	2.90	0.0045
	40	4.5	HP8	0.75	46	117	293	922	1078	2.20	0.0015
BB	25	2.5	HP11	0.70	43	124	496	793	1047	3.47	0.0140
	30	3.5		0.65	44	113	377	858	1089	2.45	0.0050
	40	4.5	HP8	0.75	46	118	295	912	1067	2.21	0.0010
OPC	25	2.5	HP11	0.70	43	143	572	749	989	4.00	0.0120
	30	3.5		0.70	44	120	400	847	1074	2.80	0.0050
	40	4.5	HP8	0.80	46	124	310	904	1057	2.48	0.0010

飽和処理を行い試験に供した。

2.4 実験方法

2.4.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠して行い、φ10×20cm の供試体を用いた。試験材齢は 28 日および 91 日の 2 材齢とし、所定の材齢まで標準養生を行った。

2.4.2 塩分浸透性能試験

図-1 に塩分浸透試験装置の概略を示す。陰極側セルに 0.51mol/ℓ の NaCl 溶液を、陽極側セルに 0.30mol/ℓ の NaOH 溶液を入れ、電極間の電位差が 15V (3V/cm) になるように電圧を制御し、陽極側の塩化物イオン量の経時変化を測定した。塩化物イオンの拡散係数は、塩化物イオン濃度が試験日数の経過とともに増加し始め、経過日数に対する塩化物イオン濃度の増加割合が一定に達した時を、コンクリート中の塩化物イオンの移動が定常状態に達したと判断して、そのときの塩化物イオンの泳動速度から流束（フラックス）を求め、ネルンスト・プランクの式を応用して求めた。本実験では、使用した電極と溶液の接触電位を考慮した式-1 により塩化物イオン拡散係数（D_{Cl}）を算定した。

$$D_{Cl} = \frac{RT}{Z_{Cl} \cdot F \cdot C_{Cl} \cdot \left\{ (\Delta E - \Delta E_c) / L \right\}} \cdot J_{Cl} \quad (\text{式-1})$$

- R:気体定数(8.314J/mol・K)
- T:絶対温度(K)
- J_{Cl}:定常状態における塩化物イオンのフラックス (mol/cm²・s)
- Z_{Cl}:塩化物イオンの電価
- F:ファラデー定数
- C_{Cl}:陰極側の塩化物イオン濃度(0.51mol/ℓ)
- ΔE:電位差(15V)
- ΔE_c:電極における接触電位(V)
- ΔE-ΔE_c:測定電位(V)
- L:供試体厚さ(5cm))

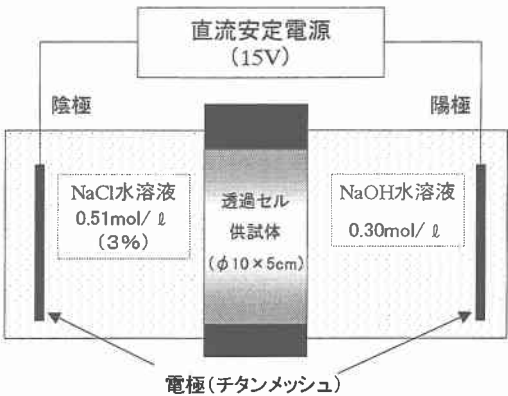


図-1 塩分浸透試験

2.4.3 細孔径分布の測定

コンクリート中のセメントペースト硬化体の細孔径分布は水銀圧入法により測定した。測定に用いた試料は、供試体内部のコンクリートを 5mm 立方体に切断し、アセトン中で洗浄した後、D-dry (5×10⁻⁴mmHg) で 7 日間乾燥させて測定を行った。細孔容積は、試料容積から骨材容積を除いた硬化セメントペースト容積当たりの空隙率で表記した。骨材容積はセメント協会法 (F-18) に準拠して得られた不溶解残分量を骨材密度で除して求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2 に材齢 28 日および 91 日の各コンクリートの圧縮強度を示す。圧縮強度は、いずれのセメントにおいても水セメント比の低減および材齢の進行とともに増加した。セメントの種類の違いで比較すると、粒度を改質した B6 は両材齢とも最も強度が大きかった。他のセメントは、材齢 28 日では、OPC、BB、B4 の順となったが、材齢 91 日の長期強度はほぼ同程度となった。

3.2 塩化物イオン濃度の経時変化

図-3 に各コンクリートの塩化物イオン濃度の経時変化を示す。塩化物イオン濃度は、ある経過日数まではほとんど増加せず、その後日数の経過とともに一定の割合で増加した。塩化物イオンが増加するまでの経過日数は

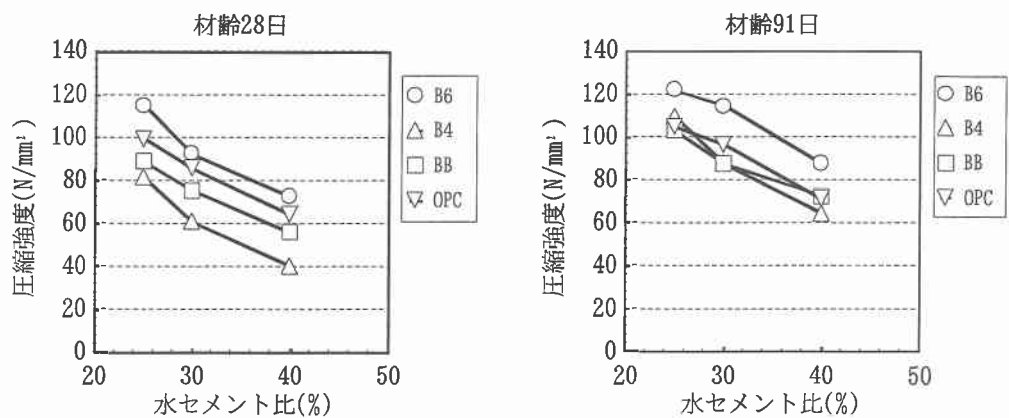


図-2 圧縮強度

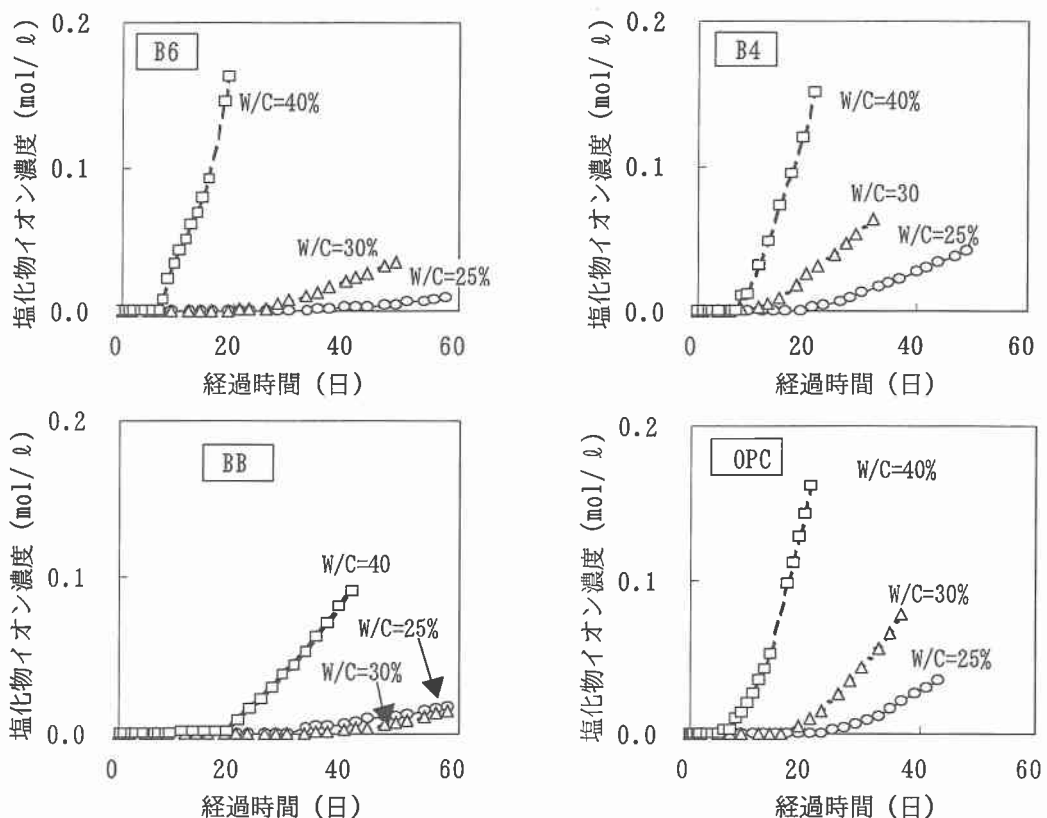


図-3 塩化物イオン濃度の経時変化

水セメント比が小さいほど長く、その後の増加割合は小さい傾向が見られた。また、これらの傾向は、B6 および BB で顕著に見られた。なお、この塩化物イオン濃度の経過日数に対する増加割合（直線の傾き）を定常状態における塩化物イオンのフラックスとして、式-1 により拡散係数を算出した。

3.3 塩化物イオン拡散係数

図-4 に各セメントの塩化物イオン拡散係数に及ぼす水セメント比の影響を示す。いずれのセメントも水セメント比が小さくなるほど拡散係数は小さくなった。また、W/C=40%では、いずれのビーライトセメントも OPC より拡散係数は大きかったが、W/C=30%以下では B6 の拡散係数は OPC の 1/2~1/3 であった。一方、BB の拡散係数はいずれのセメントよりも極めて小さく、W/C=25%では OPC の 1/4 程度であった。なお、本実験で得られた拡

散係数は、OPC および B4 については、土木学会標準示方書 [施工編] の回帰式（図中線）や既往の塩水浸漬試験による結果⁹⁾とほぼ一致していることから、本試験法は短期的に拡散係数を求める手法として有効と考えられる。しかし、BB では、W/C=40%では示方書の回帰式とほぼ一致しているが、30%以下では値が相違していることから、水セメント比が小さい領域においては本研究のデータや本試験法などを参考にして拡散係数を実測し確認する必要がある。

3.4 電流密度と拡散係数の関係

図-5 に電流密度と拡散係数の関係を示す。塩分浸透試験開始時および塩分の浸透開始時とも両者に高い相関関係が認められた。このことから、電流密度を求めることにより簡易的に拡散係数を推定することが可能であると考えられる。

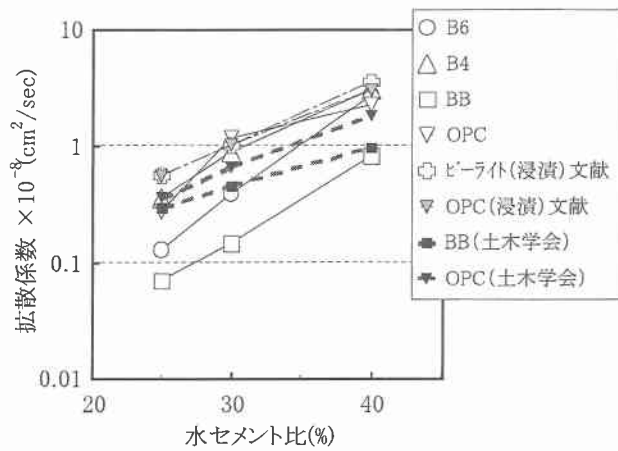


図-4 拡散係数と水セメント比の関係

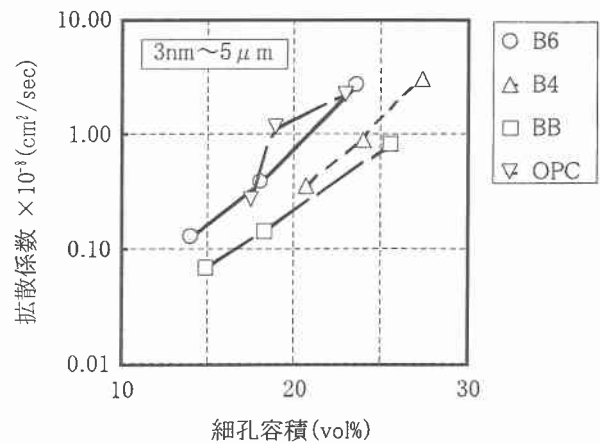


図-6 総細孔容積と拡散係数の関係

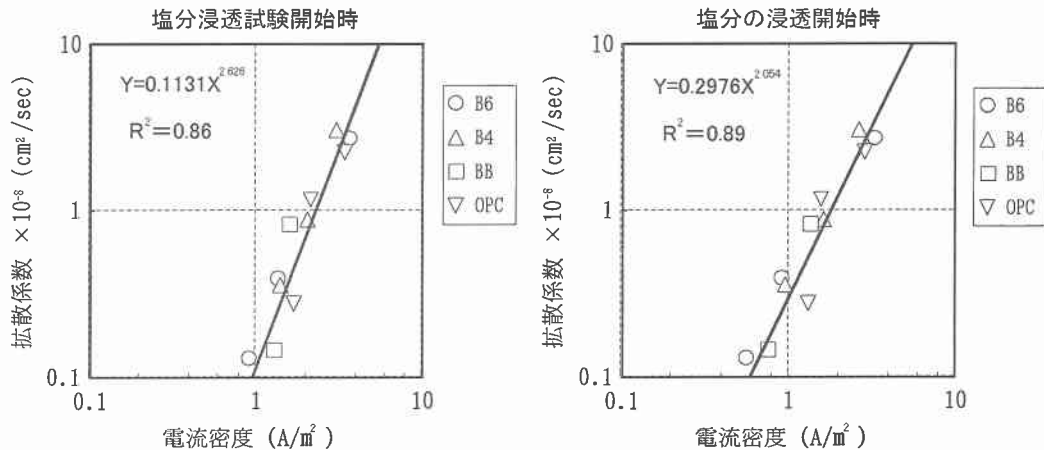


図-5 電流密度と拡散係数の関係

3.5 拡散係数に及ぼす細孔容積の関係

図-6 に各コンクリートの総細孔容積と拡散係数の関係を示す。すべてのセメントコンクリートで細孔容積の増大とともに拡散係数は増加する傾向が認められる。細孔容積は水セメント比が小さいほど小さくなっていたことから、塩化物イオン拡散係数を小さくするには水セメント比を低減することが有効であることがわかる。一方、同じ細孔容積でも、セメントにより拡散係数の大きさが異なることから、塩分浸透性は細孔容積などの物理的要因だけでなく、塩分の固定化などを含めた化学的要因も大きく影響することがわかる。

4. まとめ

以上の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 粒度を改質した比表面積が大きいビーライト系セメントは一般的なビーライトセメントよりも塩分浸透性は小さくなった。
- (2) 水セメント比を小さくすることで、比表面積が大きいビーライトセメントは普通ポルトランドセメントよりも、塩分拡散係数を小さくすることが可能となる。
- (3) 本実験で適用した塩分浸透試験は、従来のデータとも比較的対応しており、短期的に拡散係数を求める促進試験法として有効であると考えられる。
- (4) 電流密度を測定することにより、簡易的に塩分拡散

係数を同定することが可能と考えられる。

- (5) 塩分拡散係数は、細孔容積と密接な関係があると考えられるが、セメントの種類により異なることから、化学的要因についても検討する必要がある。
- (6) 改質したビーライトセメントは総じて塩分浸透性を向上させるのに有効と考えられるが、さらに向上させるには、改質したビーライトセメントと高炉スラグ微粉末を組み合わせる使用などが考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：平成 11 年版コンクリート標準示方書[施工編]—耐久性照査型—、2000
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー99 平成 11 年版コンクリート標準示方書[施工編]—耐久性照査型—改訂資料、2000
- 3) 吉田行、堺孝司、熊谷守晃：改質ビーライト系セメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.1、pp.79-84、2000
- 4) 吉田行、田口史雄、嶋田久俊：改質ビーライト系セメントを用いたコンクリートの強度・発熱特性および凍結融解抵抗性、北海道開発土木研究所月報、No.578、pp.4-13、2001.8
- 5) 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