

論文 普通エコセメントを用いたコンクリートの海洋環境下への適用性に関する検討

長塩 靖祐^{*1}・山路 徹^{*2}・濱田 秀則^{*3}・榎木 隆^{*4}

要旨：普通エコセメントを用いたコンクリートを海洋環境下に3年間暴露し、圧縮強度および塩化物イオン浸透性について普通セメントを用いたコンクリートと比較検討を行った。普通エコセメントを用いたコンクリートの圧縮強度は暴露3年経過後も強度低下は見受けられなかった。塩化物イオン浸透性は、同一水セメント比の普通セメントを用いたコンクリートよりもやや多くなる傾向が見受けられた。普通エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン浸透を抑制するには普通セメントを用いたコンクリートと同一圧縮強度が得られる場合よりも水セメント比を低減することが必要であると考えられる。

キーワード：普通エコセメント, 海洋環境下, 圧縮強度, 塩化物イオン浸透

1. はじめに

都市ごみ問題の有効な解決策の一つとして、都市ごみ焼却灰を主原料とするエコセメントが開発された。

エコセメントには普通エコセメントと速硬エコセメントの2種類があるが、そのうちの普通エコセメントは塩化物イオン量を0.1%以下に低減し、普通ポルトランドセメントと類似した性状を有していることから、鉄筋コンクリートを含む幅広い用途への適用が期待されている。

普通エコセメントの利用法については、既に検討¹⁾も始まっており、平成14年7月にはJIS R 5214「エコセメント」として制定、平成15年12月にはJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の材料に普通エコセメントが記載されるなど利用促進に向けた整備も行われている。

筆者らは、普通エコセメントを用いたコンクリートの海洋構造物への検討²⁾を行っており、海洋環境下での長期暴露試験を実施して、その適用性について評価を行っている。

本研究は海洋環境下への暴露試験のうち、普

通エコセメントを用いたコンクリート(記号EC)の材齢3年までの圧縮強度、長さ変化、塩化物イオン浸透性、細孔径分布および鉄筋腐食について普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート(記号OPC)と比較検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に使用材料を示す。セメントには普通エコセメントと比較用として普通ポルトランドセメントを用いた。表-2にセメントの化学成分、鉱物組成および物理特性を示す。なお、今回試験に用いた普通エコセメントの塩化物イオン量は0.05%で普通ポルトランドセメントの10倍含有している。

表-1 使用材料

セメント	普通エコセメント(エコ)
	普通ポルトランドセメント(普通)
細骨材	S: 陸砂(密度:2.60g/cm ³ , F.M:2.87)
粗骨材	G: 碎石(密度:2.64g/cm ³ , F.M:6.70)
混和剤	Ad: リグニンスルホン酸系 AE 減水剤

*1 太平洋セメント(株)中央研究所 第1研究部 コンクリート技術グループ (正会員)

*2 独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 材料研究室 主任研究官 工修 (正会員)

*3 独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 材料研究室 室長 工博 (正会員)

*4 太平洋セメント(株)中央研究所 第1研究部 コンクリート技術グループリーダー (正会員)

表 - 2 セメントの化学成分，鉱物組成および物理特性

セメント	化学成分 (%)								鉱物組成 (%)				密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	圧縮強さ (N/mm ²)		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	Cl	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			3d	7d	28d
エコ	17.0	8.0	4.2	60.9	1.9	3.8	0.17	0.050	48	13	14	13	3.17	4650	28.6	38.9	50.2
普通	22.2	5.1	3.2	63.8	1.4	1.6	0.50	0.005	48	28	8	10	3.16	3220	27.1	43.3	58.8

2.2 コンクリート配合

表 - 3 にコンクリート配合を示す。EC の W/C は 40, 50 および 60% の 3 水準とし，比較用の OPC の W/C は 50% の 1 水準とした。配合はスランプ 8 ± 2.5cm, 空気量 4.5 ± 1.5% を目標とし単位水量の調整により決定した。

表 - 3 コンクリート配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					28 日標準養生圧縮強度 (N/mm ²)
			W	C	S	G	Ad	
EC	40	41	158	395	717	1044	0.99	48.2
	50	43	158	316	780	1050	0.79	35.6
	60	45	158	263	835	1037	0.66	27.2
OPC	50	44	160	320	793	1027	0.80	38.7

2.3 暴露環境条件

表 - 4 に暴露環境条件を示す。海洋環境下の暴露場所は，港湾空港技術研究所内の海水循環水槽を使用した。なお，供試体は材齢 28 日標準水中養生後に暴露を開始した。

表 - 4 暴露環境条件

区分	環境条件
標準養生	20 標準水中養生
海中部	水深 1m 付近，海水温度約 17 (年間平均値)
干満部	H.W.L.+1.5m, L.W.L.+0.0m で 1 日 2 回水位変動 供試体位置は+0.0m, 浸水時間約 9 時間 / 回
飛沫部	海水を 2 回 / 日 (1 回約 3.5 時間) 噴霧

2.4 試験項目とその方法

(1) 圧縮強度および静弾性試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に，静弾性係数試験は JIS A 1149 に準拠して行った。供試体寸法は 10 × 20cm とし，圧縮強度試験は材齢 6 ヶ月，材齢 1 年および 3 年，静弾性係数試験は材齢 1 年および 3 年にて実施した。

(2) 長さ変化試験

長さ変化試験は JIS A 1129 に準拠して行った。また，同時に質量変化も測定した。供試体寸法は 10 × 10 × 40cm とし，試験は材齢 1 年および 3 年にて実施した。

(3) 全塩化物イオン量および細孔径分布

全塩化物イオン量および細孔径分布の測定には供試体寸法 15 × 30cm としたものを試料として用いた。測定試料 15 × 30cm から，図 - 1 に示す部分を切り出し，さらに切り出した試料を表層部から中心部へ深さ方向に 10mm ずつ 60mm 部分まで切断した。全塩化物イオン量は JCI-SC5 に準拠して試料の深さ方向 10, 20, 30, 40 および 60mm 部分の 5 箇所について測定を行った。細孔径分布は水銀圧入式ポロシメーターにより深さ方向 40mm の部分の 1 箇所について測定を行った。全塩化物イオン量の測定は材齢 1 年および 3 年で，細孔径分布の測定は暴露開始前 (材齢 28 日) および材齢 3 年にて実施した。

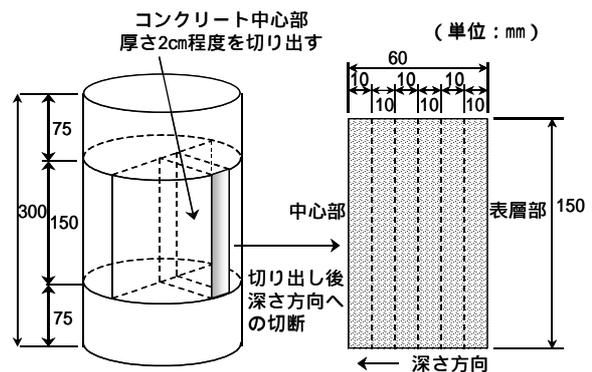


図 - 1 試料切り出し位置

(4) 鉄筋腐食試験および自然電位

鉄筋腐食試験は供試体寸法 15 × 30cm とし，13mm の磨き棒鋼 (SGD-3) をかぶり 30mm および 50mm の 2 箇所に配置して行った。図 - 2 に鉄筋の配筋図を示す。腐食面積の測定は鉄筋

に透明シートを巻き付け、発錆部分を写し取り面積の測定を行った。測定箇所は鉄筋の中心から 100mm ずつ、計 200mm の範囲について行った。自然電位の測定は ASTM C 876-91 に準拠し、かぶり 30mm 部分について行った。電極は銅-飽和硫酸銅電極(以下、CSE)を用いた。腐食発生の判定結果については表 - 5 に示す ASTM C 876-91 の評価基準に従った。鉄筋腐食試験および自然電位は材齢 1 年および 3 年にて実施し、試験は EC のみとした。表 - 6 に暴露環境条件と試験項目の水準を示す。

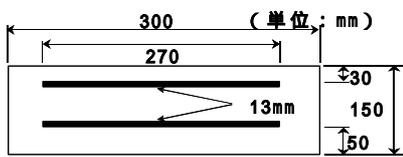


図 - 2 鉄筋配筋 (15 × 30 断面)

表 - 5 評価基準

電位 E (mV vs CSE)	評価基準
-200 < E	90%以上の確率で腐食なし
-200 E > -350	腐食状態は不確定
E -350	90%以上の確率で腐食あり

表 - 6 暴露環境条件と試験項目

種類	暴露環境条件	試験項目			
		圧縮強度 静弾性	長さ 変化	全塩化物 細孔径	鉄筋腐食 自然電位
EC OPC	標準水中				
	海中部				
	干満部				
	飛沫部				

*) が実施項目, 鉄筋腐食および自然電位は EC のみ

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度・静弾性係数

図 - 3 に暴露環境条件別に材齢と圧縮強度の関係を示す。EC の圧縮強度は、海洋環境下の海中部, 干満部および飛沫部において、いずれの W/C においても暴露 3 年までの強度低下は見受けられなかった。W/C50% の EC の暴露 3 年後における圧縮強度は、暴露前(材齢 28 日)に比べて、暴露条件に係わらず、10% ~ 20% 程度増加した。一方、OPC の暴露 3 年後における圧縮強

度は、暴露条件に係わらず、20% ~ 40% 程度増加した。EC の圧縮強度は、OPC と比較するといずれの暴露環境下においても材齢 6 ヶ月以降の強度増進が小さい傾向にあり、W/C が大きいほどその傾向は顕著であった。この理由としては、普通エコセメントの場合、普通ポルトランドセメントと比較して、長期強度の発現に寄与する C₂S 量が少ないこと、また、比表面積も高いことから、EC は相対的に初期材齢において強度が発現していると考えられる。

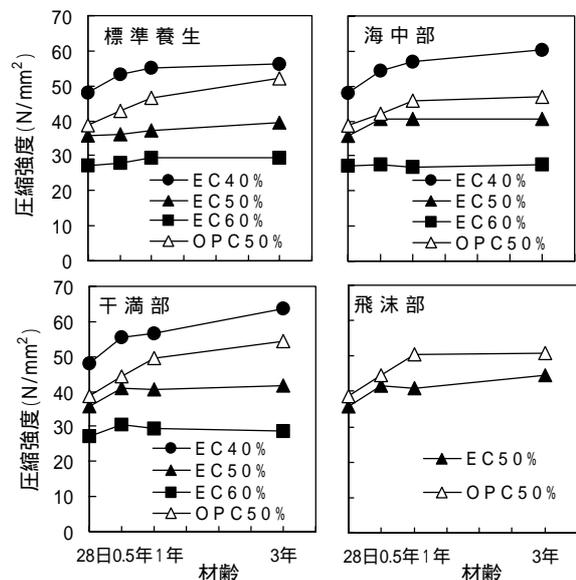


図 - 3 材齢と圧縮強度

図 - 4 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。EC の静弾性係数は、材齢 3 年経過後も低下は見受けられず、また、暴露条件による影響も見受けられなかった。EC の圧縮強度と静弾性係数の関係は、暴露 3 年後も相関関係が認められ OPC と同様な関係にあった。

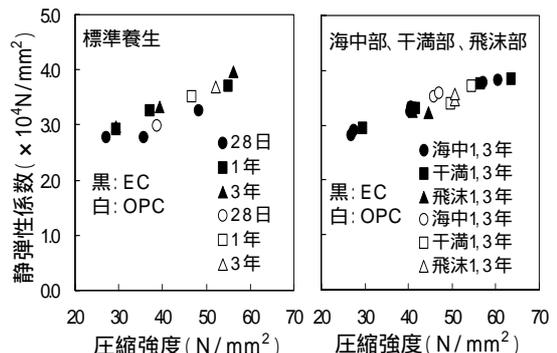


図 - 4 圧縮強度と静弾性係数

3.2 長さ変化

図 - 5 に海中部に暴露した場合の長さ変化率および質量変化率を示す。EC の暴露 3 年後における長さ変化率は OPC と同程度であった。また、W/C による影響も見受けられなかった。EC の暴露 3 年後における質量変化率は、OPC よりもやや大きい傾向にあったが、その差は 0.5% 程度とわずかであった。EC では使用セメント中の C_3A 量が多いことから、エトリンガイトの生成量が多くなり、長さ変化率および質量変化率は OPC より大きくなると考えられる。しかしながら、今回の実験では EC の長さ変化率は 0.5% 程度、質量減少率は 1% 程度であった。EC のエトリンガイトの生成量は、暴露期間も 3 年であることから、まだ少ないのではないかと推察される。以上より EC の暴露 3 年後における長さ変化率、質量変化率は OPC と同程度であると考えられる。

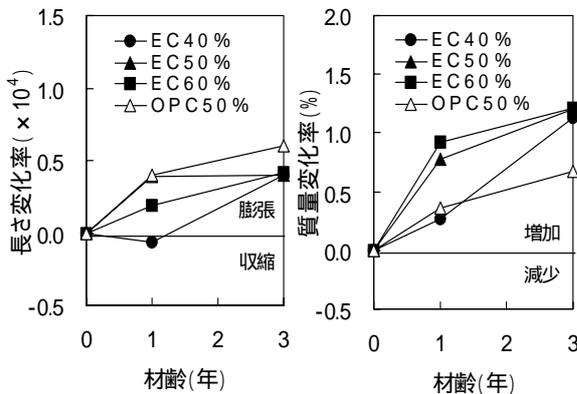


図 - 5 長さ変化および質量変化

3.3 塩化物イオン浸透性・細孔径分布

図 - 6 に全塩化物イオン量の浸透状況を表 - 7 には見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を示す。見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度は、全塩化物イオン量の分布状況を Fick の第二法則の解 (式 (1)) に回帰することにより求めた³⁾。なお、本試験では全塩化物イオン量の測定に円柱供試体を用いており、厳密な一次浸透ではないが EC と OPC の相対比較から検討を行った。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad \text{式 (1)}$$

ここに、 C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (wt%), erf: 誤差関数, t : 期間 (s), x : コンクリート表面からの距離 (cm), D : 見掛けの拡散係数 (cm^2/s)

EC の塩化物イオン浸透量は、材齢の経過に伴い多くなることが認められた。W/C の影響は、W/C が大きくなると供試体中心部まで浸透する傾向が認められた。暴露条件の影響は、海中部よりも干満部の方が浸透量が多い傾向にあった。EC の塩化物イオン浸透量は、同一 W/C の OPC と比較するとやや多い傾向にあった。EC の見掛けの拡散係数は、暴露条件に係わらず、材齢の経過に伴い W/C50% および 60% では大きく、W/C40% では小さくなった。EC の表面塩化物イオン濃度は、暴露条件および W/C に係わらず、材齢の経過に伴い大きくなった。EC の W/C40% は表層部で塩化物イオンの浸透が抑制されており内部まで浸透していないことが認められた。EC は W/C を低減し、圧縮強度を OPC と同一とすることにより、OPC と同程度の耐久性が得られるが¹⁾、塩化物イオン浸透については圧縮強度を同一としても OPC よりやや多くなると考えられる。EC の塩化物イオン浸透を抑制するには OPC と同一圧縮強度が得られる場合よりも W/C を低減することが必要であると考えられる。

表 - 7 見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度

種類	暴露環境	W/C (%)	見掛けの拡散係数 ($\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$)		表面塩化物イオン濃度 (%)	
			1年	3年	1年	3年
			EC	海中部	40	2.28
50	6.13	8.74			0.150	0.372
60	13.35	14.79			0.146	0.251
干満部	40	4.04		1.84	0.158	0.449
	50	4.28		8.74	0.146	0.331
	60	8.09		39.25	0.151	0.449
OPC	海中部	50	2.21	4.45	0.287	0.212
	干満部	50	3.01	2.63	0.329	0.481

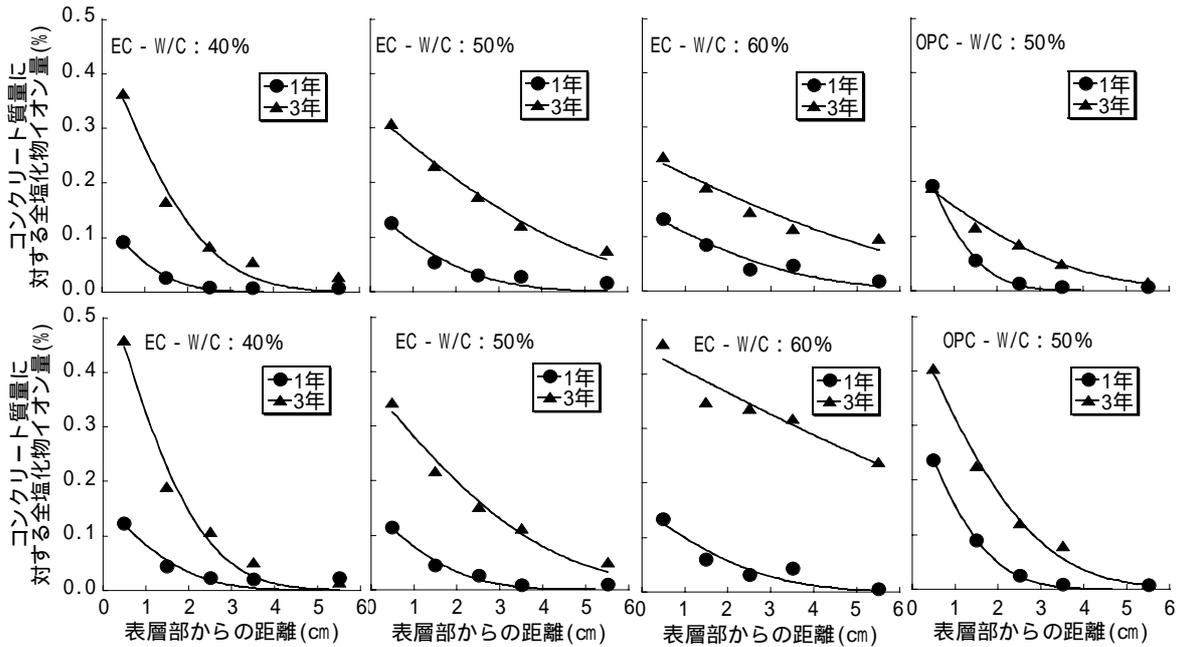


図 - 6 全塩化物イオン量浸透状況 (上段：海中部、下段：干満部)

図 - 7 に空隙分布を示す。EC の全空隙量は暴露条件および W/C に係わらず、暴露前と比較して暴露 3 年経過後も大きな変化は認められなかった。一方、OPC の全空隙量は暴露前と比較して暴露 3 年経過後はやや増加した。これは、増加量が 1% 程度であることから、試験のばらつきの影響ではないかと考えられる。暴露 3 年の EC の全空隙量は、OPC と比較すると同一 W/C では大きく、W/C40% でほぼ同等であった。暴露 3 年の EC の空隙分布は OPC と比較して、0.05 ~ 1 μm 付近の空隙量が多く、0.003 ~ 0.006 μm の空隙量が少ない傾向にあった。この理由としては、セメントの鉱物組成の違いに起因するものと考えられる。塩化物イオンが毛細管空隙中を主に移動する⁴⁾とすると、毛細管空隙と説明されている 0.05 ~ 1 μm 付近⁵⁾の空隙が多い EC は OPC より塩化物イオン浸透量が多くなることを推察できる。しかしその一方で、塩化物イオン浸透にはセメント水和物への固定についても考慮する必要があり⁶⁾、セメント硬化体での塩化物イオンの固定量にはセメント中のアルミナ含有量と相関があると考えられている⁷⁾。EC では OPC よりも使用セメント中のアルミナ含有量が多いことから、塩化物イオンの固定量が多くなり、浸透

は遅くなると考えられるが、本研究では EC の塩化物イオン浸透は速い傾向にあった。既往の報告⁸⁾において塩化物イオン浸透予測のためには、アルミナ含有量および毛細管空隙量の両方を考慮する必要性も指摘されているため、EC の塩化物イオン浸透の機構を明らかにするためには、暴露試験を継続しデータの蓄積を行うとともに、全塩化物イオン量だけでなく可溶性塩化物イオン量の測定などを行う必要があると考える。

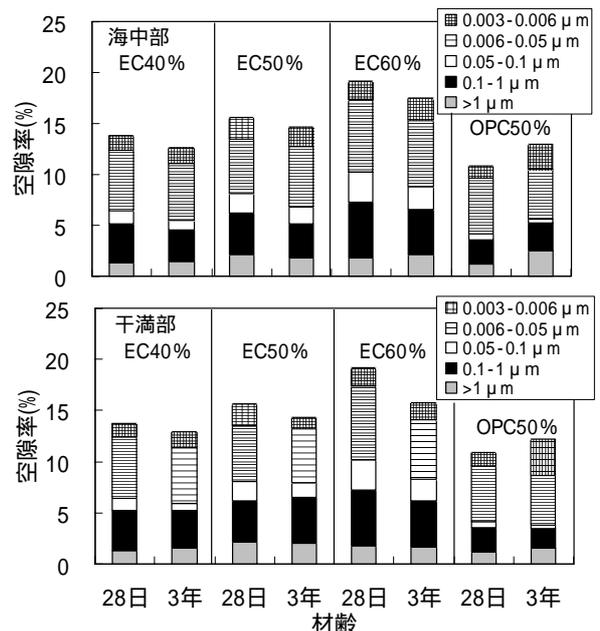


図 - 7 空隙分布

3.4 鉄筋腐食および自然電位

表 - 8 に干満部に暴露した場合の鉄筋腐食および自然電位測定結果を示す。EC の鉄筋腐食は暴露 3 年経過後もいずれのかぶり厚さにおいても認められなかった。また、自然電位による腐食発生の判定結果も 90%以上の確率で腐食なしおよび不確定であった。かぶり 30mm 位置付近における塩化物イオン量は鋼材腐食発生限界濃度と示される「 1.2kg/m^3 」⁹⁾よりも多かったが、腐食は認められなかった。この理由としては、暴露環境条件が干満部であり、供試体の湿潤時間が長く、鉄筋に供給される酸素量が少なかったことがその一因ではないかと考えられる¹⁰⁾。

表 - 8 鉄筋腐食および自然電位

種類	W/C (%)	腐食面積 (mm ²) (材齢 3 年)		自然電位 (mV vs CSE) (かぶり 30mm)	
		30mm	50mm	1 年	3 年
		EC	40	0.0	0.0
	50	0.0	0.0	-341	-183
	60	0.0	0.0	-267	-325

4. まとめ

EC を海洋環境下に 3 年間暴露し、圧縮強度、長さ変化、塩化物イオン浸透性、細孔径分布および鉄筋腐食について、OPC と比較検討を行った。本結果をまとめると以下のものである。

- (1) EC の圧縮強度は、暴露 3 年経過後も強度低下は認められなかった。EC の圧縮強度の増進は OPC と比較すると小さい傾向にあった。
- (2) EC の長さ変化は、海中暴露 3 年経過後も OPC と同程度であった。
- (3) EC の塩化物イオン浸透量は、OPC と比較すると暴露材齢の経過に伴い多くなる傾向にあった。EC の塩化物イオン浸透を抑制するには OPC と同一圧縮強度が得られる場合よりも W/C を低減することが必要であると考えられる。
- (4) EC の細孔径分布は、暴露材齢の経過に伴う

空隙の大きな変化は認められなかった。EC の空隙量は OPC と比較すると多い傾向にあった。

- (5) EC の鉄筋腐食は、暴露 3 年経過においては認められなかった。これは、暴露条件が干満部であり、供試体の湿潤時間が長く、鉄筋に供給される酸素量が少なかったことがその一因ではないかと考えられる。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所ほか：都市ごみ焼却灰を用いた鉄筋コンクリート材料の開発に関する共同研究報告書 独立行政法人土木研究所共同研究報告書第 289 号，2002.12
- 2) 田中敏嗣ほか：普通形エコセメントを用いたコンクリートの海洋環境下への適用性に関する検討，土木学会第 56 回年次学術講演会，pp.424-425，2001.10
- 3) 後藤誠史ほか：セメント硬化体中の塩化物イオンの拡散，窯業協会誌，Vol.87, No.3，pp126-133，1979.3
- 4) Torii, K. and Kawamura, M.: Pore Structure and Chloride Ion Permeability of Mortars Containing Silica Fume, Cement and Concrete Composites, Vol.16, pp279-286, 1994
- 5) 田代忠一：セメント硬化体中の水分，コンクリート工学，Vol.32, No.9，pp12-15, 1994.9
- 6) 竹田博彦ほか：化学結合と電気拘束に基づくセメント硬化体中の塩化物イオン固定性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.1，pp133-138，2000.6
- 7) 平尾宙ほか：セメント硬化体における塩化物イオンの固定性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.2，pp1-6，2001.6
- 8) 上村祐一郎ほか：鉱物組成の異なるセメントを用いたコンクリートの塩素浸透に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1，pp825-830，2002.6
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002
- 10) 山路徹ほか：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論文集，Vol.23, No.2，pp577-582，2001.6