

報告 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性状

徳村 忠太^{*1}・山田 義智^{*2}

要旨: 本研究は、普通エコセメントを用いたコンクリートの強度発現性や細孔構造を実験的に検討した。また、乾湿繰り返し塩化物イオン浸透促進試験を行い、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性状および埋設された鉄筋の腐食状況についても実験的に検討した。その結果、普通エコセメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べ、7日以降の強度発現が小さいこと、水セメント比 60%ではポーラスであること、塩化物イオンが浸透しやすいことが確認された。さらに、鉄筋周りにおいて塩化物イオン量が 1.2kg/m^3 を超えると鉄筋が発錆することが確認された。

キーワード: 普通エコセメント, 圧縮強度, 塩化物イオン浸透, 鉄筋腐食

1. はじめに

近年、最終処分場の処理許容量の切迫、焼却灰に含まれる有害物質等が社会問題になっている。このような状況において、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¹⁾。

エコセメントは、平成 14 年 7 月に JIS R 5214 として制定され、さらにその翌年の平成 15 年 12 月には JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の材料として記載され、利用促進にむけた準備が整いつつある²⁾。

エコセメントには、脱塩素化技術により塩化物イオン量をセメント質量の 0.1%以下に低減した普通エコセメントと塩化物イオンをクリンカー鉱物として利用する速硬エコセメントとに区分される¹⁾。ここで、普通エコセメントの性質は普通ポルトランドセメントと類似しており、鉄筋コンクリート等を含む幅広い用途への適用が期待されている²⁾³⁾。

その一方で、JIS 規格の範囲内ではあるが、普通エコセメントは普通ポルトランドセメントに比べると塩化物イオンの含有量が多いことから、普通エコセメントを用いた鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食に関する検討が必要となる。

そこで、本研究では普通エコセメントを用い

たコンクリート（記号を ECC とする）および普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート（記号を OPC とする）について、圧縮強度や細孔量などを比較するとともに、両者の遮塩性能の違いを検討するために乾湿繰り返しによる塩化物イオン浸透促進試験を行ったので、その検討結果を報告する。

2. 実験の概要

2.1 使用材料について

各種試験に用いるコンクリート試験体には、普通エコセメントと比較用の普通ポルトランドセメントを用いており、セメント以外の骨材、混和剤は同一のものを使用した。**表-1**に本実験の使用材料を示し、**表-2**にセメントの化学成分と物理特性を示す。

表-1 コンクリートに使用した材料

セメント	普通エコセメント (ECC)	
	普通ポルトランドセメント (OPC)	
粗骨材	G : 碎石 (密度 : 2.70, F.M : 6.43)	
細骨材	S1 : 海砂 (密度 : 2.62) NaCl : 0.001%	F.M : 2.39 *1:1 混合
	S2 : 砕砂 (密度 : 2.64) NaCl : 0.001%	
混和剤	Ad : リグニンスルホン酸 AE 剤	

*1 琉球大学 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科 助教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 セメントの化学成分および物理特性

セメント	化学成分(%)								密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	Cl		
ECC	16.85	7.19	3.90	61.73	2.09	3.91	0.53	0.040	3.17	4220
OPC	20.68	5.24	3.01	64.70	1.08	2.04	0.65	0.014	3.16	3220

2.2 コンクリートの調合

表-3 に本実験で用いたコンクリートの調合を示す。普通エコセメントおよび普通ポルトランドセメントともに、水セメント比は 60 および 50% の 2 水準とした。

調合においては単位水量を一定として、水セメント比の違いと使用するセメント種類の違いによる影響が判りやすいようにした。

なお、本調合においては、スランプ 18±2.5cm、空気量 4.5±1.5% を目標とした。

表-3 コンクリート調合

種類	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (k g / m ³)				
			W	C	S	G	A d
OPC50	50	49	183	366	844	905	2.745
OPC60	60	50.5	183	305	896	902	1.525
ECC50	50	48	183	366	828	923	4.575
ECC60	60	49	183	305	870	932	3.050

2.3 試験項目およびその実施方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して行った。試験体のサイズは φ10×20cm とし、養生は水中養生 (水温 20±3℃) と屋外における封緘養生の 2 種類にて行った。圧縮試験の材齢は 7 日, 28 日, 91 日, 183 日である。

(2) 細孔量

細孔量の測定には、圧縮強度用試験体と同サイズの試験体を使用し、試験体の打設面と底面の間から厚さ 2cm のコンクリート円柱を切り出して細孔量測定用の試料とした。

細孔量の測定は、コンクリートの材齢 28 日で行い、その間の養生は水中養生 (水温 20±3℃) とした。細孔量は水銀圧入式ポロシメーターに

より測定し、その測定結果は硬化ペーストに対応する指標である有効細孔量で整理した⁴⁾。

有効細孔量は、水銀圧入式ポロシメーターにより測定した細孔量を溶解率で除して得る値である。ここで、コンクリート試料のセメントペースト部分を溶解させ残った質量を不溶残分質量と称し、試料の質量からこの不溶残分質量を減じた後に試料の質量で除した値を溶解率とした。なお、試料の溶解にはグルコン酸ナトリウムを用いた。

(3) 乾湿繰り返し塩化物イオン浸透促進試験

乾湿繰り返し塩化物イオン浸透促進試験 (以降、促進試験と称する) では、寸法 15×15×53cm の角柱試験体を塩水槽 (3%NaCl 溶液, 水温 50℃) に 4 日間浸漬させた後、室温で 1 日静置させ、その後、乾燥機内において 3 日間 50℃ の温風で強制乾燥させた。ここでは以上の 8 日間を 1 サイクルとした。

所定のサイクル終了後に φ7cm のコンクリートコアを角柱試験体より 2 本採取した。採取したコアは、コンクリート表面から 1cm 間隔で切断し、それぞれの深さ位置における全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量を各々 2 回ずつ測定した。本報告では、10 サイクル時と 20 サイクル時の結果について示す。

試験体作製にはコンクリート曲げ試験体用の鋼製型枠を用い、コンクリートの打設面と底面以外の 4 面には塩化物イオンの浸透を防ぐためにエポキシ系塗膜によって被覆した。なお、促進試験に入る前の養生は、角柱試験体を養生シートで覆い、散水して 28 日間湿潤養生を行った。

(4) 鉄筋腐食に関する電気化学的な測定

本研究においては、試験体の一部 (水セメント比 50% の試験体 10 体中の 4 体 (内 OPC2 体, ECC2 体)) に、図-1 に示すように長さ 20cm の

黒皮付きの異形鉄筋(D13)を、底面側からかぶり 2.5cm および 3.5cm 位置に埋め込み配置した。

電気化学的な測定は、現場用に開発された交流インピーダンス測定器を用い、鉄筋の自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗を促進試験の 5 サイクル間隔で測定した。

上記の測定には、照合電極を内蔵し電流分散抑制機能をもつ 2 重対極センサを用いる。試験は、まず自然電位を測定し、次にこの電位を基準に±10mV の高低 2 周波 (10Hz, 20mHz) 交流電圧を別々に印加し、それぞれの応答電流と両電気信号の位相差を測定する。これら高低 2 周波の交流インピーダンス値から分極抵抗を求め、10Hz のインピーダンス値から見かけのコンクリート抵抗を求めている。

促進試験の 20 サイクル後には、一部の試験体を解体し、鉄筋の腐食面積を測定した。腐食面積の測定には透明シートを巻きつけ、発錆部位を写し取り面積の測定を行った。

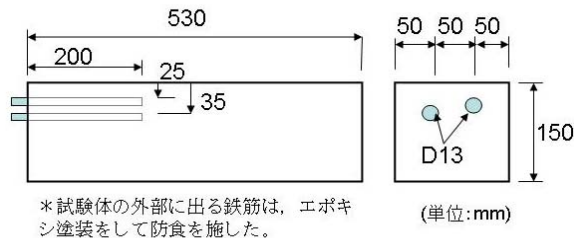


図-1 試験体の概要

3. 試験結果およびその考察

3.1 圧縮強度試験結果について

水セメント比および養生条件別の材齢と圧縮強度の関係を図-2 に示す。

いずれの水セメント比および養生条件においても、材齢 7 日以降の圧縮強度の伸びは、ECC の方が OPC に比べて少ない傾向にある。水セメント比 60% においては、いずれの養生においても OPC の方が 28 日以降の強度は大きい。水セメント比 50% においては、同程度かわずかに ECC の方が強度は大きい。しかし、ECC は OPC と比較して長期強度の発現に寄与する C_2S 量が少ないと考えられることから、183 日以降の強度

増進は少ないことが予想される。この強度発現性状の違いは、長期間後の塩化物イオン浸透試験結果にも影響を及ぼすと考えられ、183 日以降の強度発現は今後も観察する。

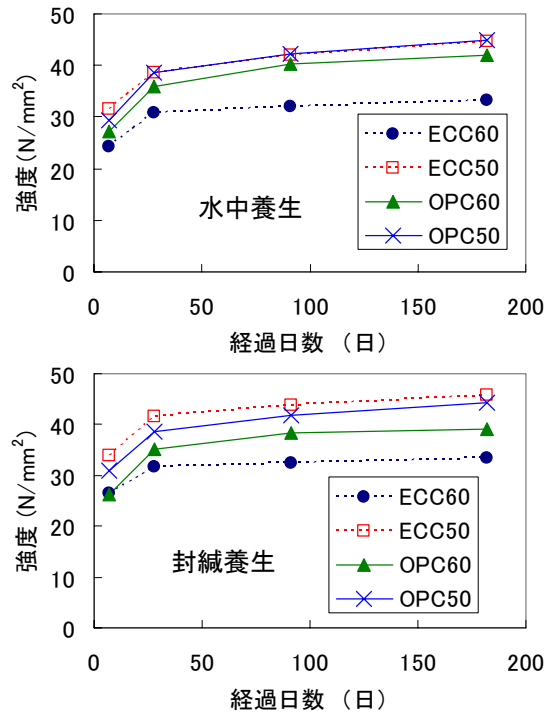


図-2 材齢と圧縮強度の関係

3.2 細孔量測定結果について

図-3 において、有効細孔量分布を OPC と ECC で比較して示す。同図中の(a)は水セメント比 60%、(b)は水セメント比 50%の結果である。

水セメント比 60%ではいずれの細孔径においても ECC の方が有効細孔量が多く、ポーラスになっていることが分かる。このことが、OPC と ECC の水セメント比 60%の 28 日における圧縮強度の差とも関連していると考えられる。

一方、水セメント比 50%では、ECC の方が OPC に比べて 10^2nm 以下の有効細孔径が若干多く、逆に 10^2nm より大きい有効細孔径は OPC の方が ECC に比べ若干多い結果となった。また総有効細孔量は ECC で $46.60(\times 10^{-2}\text{cc/g})$ 、OPC で $46.35(\times 10^{-2}\text{cc/g})$ とほぼ等しくなった。このことは、水セメント比 50%の OPC と ECC の 28 日における圧縮強度がほぼ等しくなっていることに関連していると考えられる。

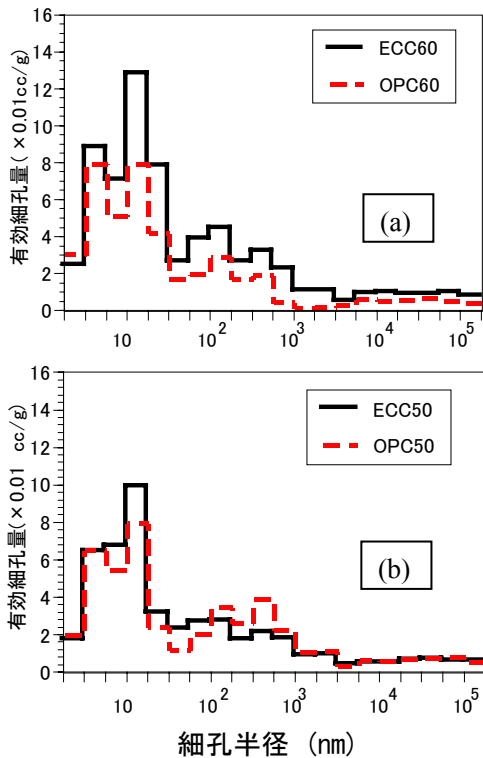


図-3 各調(配)合の有効細孔径分布

3.3 塩化物イオン浸透促進試験結果について

塩化物イオン浸透促進試験の 10 および 20 サイクル後の塩化物イオン濃度のコンクリート内部での分布状況を図-4 に示す。図中(a), (b)は OPC の全塩化物イオン濃度分布を示し、図中(c), (d)は ECC の全塩化物イオン濃度の分布を示す。これらの分布には初期塩化物イオン量も含まれる。また、図において、表面からの距離 0cm 位置は打設面側、15cm 位置は底面側である。

図より、サイクル数が進むと塩化物イオン量も増加している。また、セメント種類が同じ場合、水セメント比が大きい方が内部に多くの塩化物イオンが浸透していることが分かる。OPC と ECC を比較すると、ECC の方が各水セメント比とも塩化物イオン量が内部に浸透している。海洋環境下に 3 年間暴露した文献²⁾の塩化物イオンの浸透状況によれば、ECC の塩化物イオン浸透を抑制するためには、OPC 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必要があるとしているが、本促進試験においても同様な傾向が認められた。

可溶性塩化物イオン量と全塩化物イオン量の

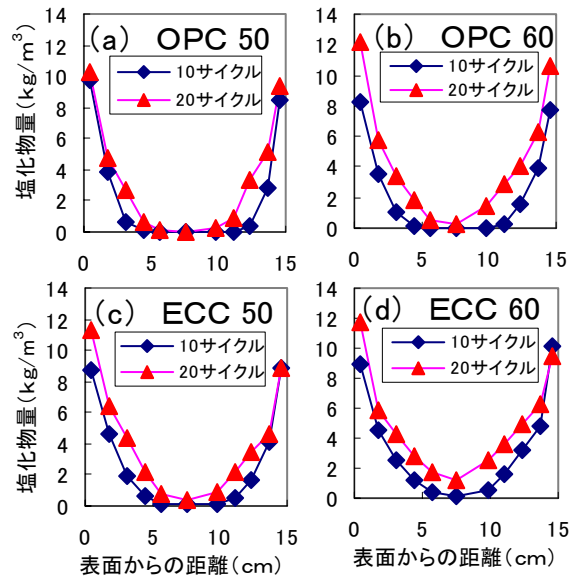


図-4 コンクリート中の塩化物イオン濃度

割合について、Welch の t 検定を行ったところ、セメント種類や水セメント比によらずその割合は同じと考えてもよいことが有意水準 5%で統計的に示された。その結果をうけて図-5 には、セメント種類および水セメント比を区別せず可溶性塩化物イオン量と全塩化物イオン量の関係を示す。

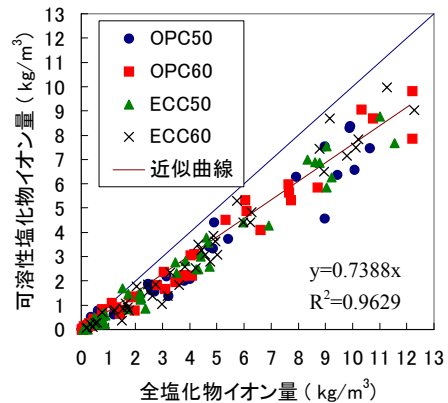


図-5 全 Cl⁻量と可溶性 Cl⁻量の関係

図-5 より両者の関係が直線で示され、全塩化物イオン量の約 7 割が可溶性塩化物イオンであることが分かる。ここで、可溶性塩化物イオンはコンクリート中を移動する塩分とみなし、全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量の差を固定化塩化物イオン量とみなすと、セメント種類および水セメント比に係わらず全塩化物イオ

ン量の約 3 割が固定化塩化物イオン量となっている。文献^{2) 5)}によれば、ECC は OPC に比べ使用セメント中のアルミナ含有量が多く、かつ、間隙質が多いことより、固定化塩化物イオン量が多いことが予測されたが、今回の実験ではその差は認められなかった。

図-6 は、可溶性塩化物イオン量(C)と固定化塩化物イオン量(S)の関係を示したものである。今回の実験結果の範囲においては、図中に示す回帰式を用いて F 値による検定を行ったところ、有意水準 5% で統計的に有効であることが示された。従って、ばらつきは多少大きい但其の関係性は図中の直線式のように線形(S=RC)で表される。

また、ここでも Welch の t 検定によりセメント種類および水セメント比による差異について検討したが、その差異は認められなかった。

文献⁹⁾によれば、固定化量を考慮した可溶性塩化物イオン量の浸透は次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{D}{1+R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = D' \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここに、D：見掛けの拡散係数(cm²/day)、R：固定率(=0.327)、t：時間(day)、x：表面からの距離(cm)、D'：固定化を考慮した見掛けの拡散係数(cm²/day)。

表-4 には、20 サイクル後 (t=160 日) の底面側から試験体中央までの可溶性塩化物イオン濃度の実測値を用いて、次式により表面濃度 C₀ と固定化を考慮した見掛けの拡散係数 D' を同定し、その値を示す。ここで、erf は誤差関数である。

$$C = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D' \cdot t}} \right) \quad (2)$$

表-4 より、同じ水セメント比同士を比較した場合、文献³⁾の結果と同じく OPC に比べ ECC の D' 値が大きく塩化物イオンが内部まで浸透する。また、セメント種類を同じとした場合、水セメント比が大きい方の D' 値が大きく塩化物イオン

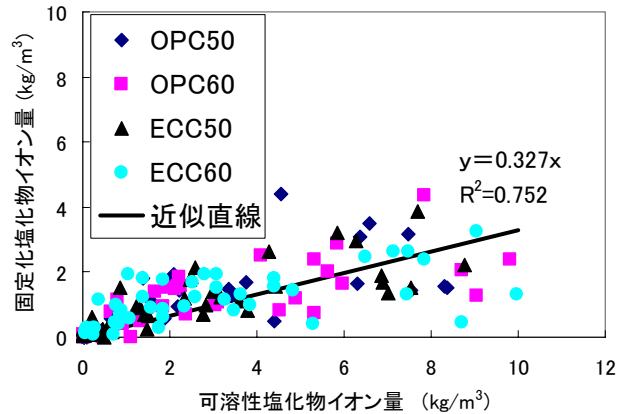


図-6 可溶性 Cl⁻量と固定化 Cl⁻量の関係

表-4 C₀およびD' の同定値

調(配)合	表面濃度 C ₀ (kg/m ³)	拡散係数 D' (×10 ⁻⁸ cm ² /s)
OPC50	9.361	21.98
OPC60	9.819	33.08
ECC50	7.918	33.12
ECC60	8.322	55.13

が内部まで浸透することが分かる。

図-6 に示すように、可溶性塩化物イオン量と固定化塩化物イオン量の比である R はセメント種類、水セメント比に係わらず一定であることから、式(1)の D 値がセメント種類および水セメント比によって変わるものと考えられる。この D 値は、細孔の空隙量、含水率、屈曲率や、水分移動に伴う移流・分散に影響されると考えられるが、本研究の範囲では、これらの影響を分析するまでは至らなかった。

3.4 自然電位・分極抵抗の測定結果について

図-7 に促進試験の 5 サイクル毎の自然電位および分極抵抗の測定値を示す。なお、今回の実験では、かぶりを確保する作業のミスから OPC を用いた試験体では所定のかぶりが確保されていなかったため、ここでは ECC(W/C50%)の結果のみについて示す。なお、図中の(a),(c)はかぶり 2.5cm の鉄筋の自然電位と分極抵抗値を各々表し、図中の(b),(d)はかぶり 3.5cm の鉄筋の自然電位と分極抵抗値を各々表す。

図-4 の全塩化物イオン濃度分布と比較してみると、かぶり 2.5cm 位置の鉄筋では、全塩化物イオン量が 1.2kg/m³ を超える 10 サイクル辺り

から自然電位は ASTM 規格⁷⁾で「90%以上の確率で腐食あり」の領域に入り、分極抵抗値も CEB⁸⁾が提案する $130\sim 260\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上の不動状態から腐食領域に入る傾向が見られる。

一方、かぶり 3.5cm 位置の鉄筋は 20 サイクルにおいて、自然電位および分極抵抗値とも上述の腐食領域に入っており、この場合も全塩化物イオン量は $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超えている(図-4 参照)。

20 サイクル時に試験体を解体して鉄筋の腐食状況を調べたところ、かぶり 2.5cm 位置の鉄筋腐食面積率は、16.1%で、かぶり 3.5cm 位置の鉄筋腐食面積率は 9.2%であった。

以上より、本実験条件下では、全塩化物イオン量 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 近傍の値が ECC を用いたコンクリートの鉄筋発錆限界値となっている。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に纏める。

- 1) 材齢 7 日から材齢 28 日の間の圧縮強度の伸びは ECC の方が OPC に比べて少ない。
- 2) 総有効細孔量は、W/C60%で比較した場合に ECC の方が OPC より少ない。一方、W/C50%ではほぼ等しい値であった。
- 3) 塩化物イオン量は、OPC よりも ECC の方が多く浸透した。
- 4) 全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量、可溶性塩化物イオン量と固定化塩化物イオン量の関係には各々線形関係が認められ、その関係はセメント種類、水セメント比に係わらず同じであった。
- 5) 本実験条件下では、全塩化物イオン量 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 近傍の値が ECC を用いたコンクリート中の鉄筋の発錆限界値となっている。

謝辞：普通エコセメントは太平洋セメント(株)よりご提供頂きました。また、細孔量の測定は日本大学生産工学部助教授 湯浅昇先生にご協力頂きました。記して感謝の意を表します。

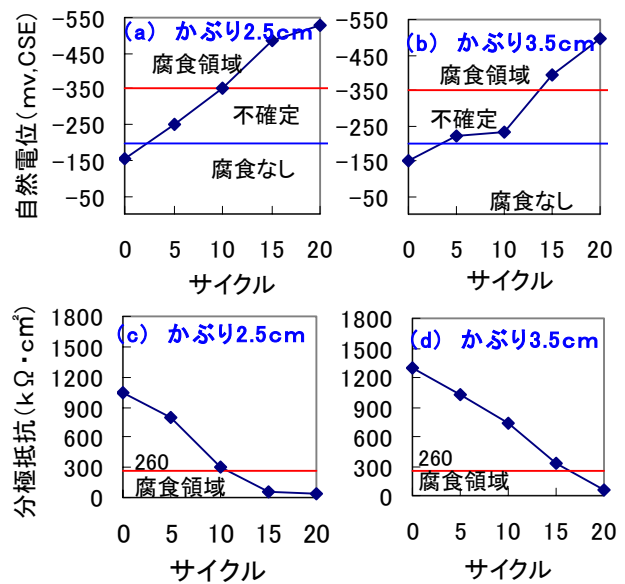


図-7 自然電位と分極抵抗の経過時間変化

参考文献

- 1) 土木研究所 編著：エコセメントコンクリート利用技術マニュアル，技報堂出版，pp2-3,2003.3
- 2) 長塩靖祐ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, PP.1479-1484, 2004
- 3) 河合研至ほか：普通形エコセメントを用いたコンクリートの塩分浸透性状，セメント・コンクリート論文集，No.56, pp.406-411, 2002
- 4) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率，細孔構造の不均質性，日本建築学会構造系論文集，No.509, pp.9-16, 1998.7
- 5) 平尾宙，横山滋：都市ゴミ焼却灰を主原料としたエコセメントの硬化体における塩化物イオンの挙動，コンクリート工学論文集，Vol.13, No2, pp.129-138, 2002.5
- 6) 佐伯竜彦，二木央：不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動，コンクリート工学年次論文集，Vol.18, No.1, PP.963-968, 1996
- 7) ASTM C876-91: Standard Test Method for Half Cell Potential of Reinforcing Steel in Concrete, 1991
- 8) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion. BBRI - CSTC - WTCB, Dec. 1997