

論文 エコセメントを使用したコンクリートの長期特性に関する研究

棚野 博之*¹・鹿毛 忠継*²・濱崎 仁*³

要旨：エコセメントを使用したコンクリートの調合方法や施工方法などについては、既往の文献等で整備が進んでいる。しかし、エコセメントが開発されてからまだ10年程度しか経っておらず、エコセメントを使用したコンクリートの中・長期的な力学特性や耐久性に関しては、まだ不明な点が少なくない。本報告では、材齢9年までの圧縮強度およびヤング係数の発現挙動、および沖縄県の海岸地帯で屋外暴露試験を行ったコンクリート中の塩化物イオン量の変化および鉄筋の腐食状態について報告した。

キーワード：エコセメント，耐久性，長期特性，圧縮強度，鉄筋腐食

1. はじめに

エコセメントは、都市ごみ焼却灰や下水汚泥を主原料としている環境負荷低減型のセメントであり、塩化物イオン量1000ppm以下の普通エコセメントと同5000～15000ppmの速硬エコセメントが2002年にJIS A 5214(エコセメント)としてJIS化された。建築分野での適用については、一部工場二次製品への活用を除くと、普通ポルトランドセメントなど既存のセメントと同様の物性、性能を有する普通エコセメント(以下、特別な場合を除きエコセメントと略す)が、JIS A 5308などのレディーミクストコンクリートに使用するセメントとして利用される場合が主である。エコセメントを使用するためのガイドラインや仕様書類としては、(独)建築研究所の建築研究報告¹⁾や日本建築学会の指針(案)²⁾の発刊、更には本年2月に改定されたJASS 5³⁾への導入など、建築分野での適用のための環境整備も整いつつある。

一方、現行の建築基準関連法令(建設省告示平成12年第1446号第二)ではJIS A 5308に適合するコンクリートへのエコセメントの適用が除外されており、エコセメントを使用したコンクリートを建築分野の鉄筋コンクリート構造物などに使用する場合には、建築基準法第37条第二号の規定によって国土交通大臣の認定が必要となっている。これは、告示改正当時は、まだエコセメントが開発されてから数年しか経っておらず、エコセメントを使用したコンクリート(以下、エコセメントコンクリートと略す)の耐久性を評価するための技術資料が不足していたこと、建築分野での施工実績が極めて少ないこと、などが適用除外となった一因と考えられる。大臣認定取得のためには、事前に指定性能評価機関での性能評価が必要であり、エコセメントコンクリートの施工実績が少ない現状においては、大臣認定ならびに性能評価を取得する際に、施工者がエコセメントコンクリートの施

工実験や模擬試験体を作製し、コンクリート強度の補正值などを確認するとともに、構造体コンクリートの所要性能を満足することを確認しなければならない。その他にも、エコセメント特有の塩化物イオン量の管理や強度の管理材齢など、エコセメントコンクリートの製造や施工の管理方法は普通ポルトランドセメントや高炉セメントなど既存のセメントを使用した場合と異なる点が少なくない。その後、塩化物イオン量や強度管理材齢など、エコセメントコンクリートの製造や施工の管理方法については、上記1)～3)の文献によって大凡整備されるに至っている。しかし、耐久性に関する技術資料については、上記文献でも促進試験によるデータが主であり、各種暴露試験など実環境下で得られたデータを基にした技術資料は、筆者らが発表した材齢3年程度までの既存発表文献¹⁾しかない。そのため、例えば、材齢4週以降の圧縮強度が長期的にどの様に変化するのか(圧縮強度の管理材齢を4週のみとしたことの適否の判断)、鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価指標の一つである中性化速度は他のセメントと比較してどの程度大きいのか(耐久性の予測)、などエコセメントコンクリートの長期特性については未だ確認されていない点が多く、建築用構造物のコンクリート用材料としてエコセメントを広く活用するためには、長期特性の収集と分析が必要不可欠である。

本研究は、エコセメントコンクリートの長期強度特性と耐久性に関する技術資料を作成することを目的としたもので、本報告では、エコセメントコンクリートの長期特性として、屋内外で実施している長期暴露試験から得られた材齢6年から9年までの圧縮強度、ヤング係数、塩分浸透および鉄筋腐食の測定結果と、これらを基に検討したエコセメントコンクリートの用途とその仕様の一部について報告する。

*1 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ上席研究員 工博 (正会員)

*2 独立行政法人建築研究所 建築生産研究グループ上席研究員 工博 (正会員)

*3 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ主任研究員 工博 (正会員)

2. 実験の概要

2.1 実験の要因と水準

実験は試験項目毎に要因を定め、それぞれ次の2つのシリーズに分けて行った。各シリーズの実験要因とその水準は、表-1に示した。

シリーズ1は、エコセメントコンクリートの圧縮強度とヤング係数の長期発現挙動を確認することを目的に、エコセメントの塩化物イオン量とコンクリートの水セメント比、養生方法（屋外暴露を含む）およびセメントの種類を要因とし供試体を作製・養生したもので、今回材齢9年までの試験結果を報告する。

シリーズ2は、エコセメントを使用した場合の鉄筋腐食挙動を確認することを目的に、セメントの種類、コンクリート中の塩化物イオン量および暴露環境を要因として供試体を作製・養生したもので、今回材齢約6.5年までの試験結果を報告する。

なお、本研究報告の対象となる主な供試体を作製した平成11年～13年はJIS A 5214が制定される直前で、当時のエコセメントの塩化物イオン量は、原材料となる焼却灰中の塩化物量の影響などにより製造ロットによって大きく変動しており、筆者らの調査結果¹⁾によれば旧田原工場での平均値は350ppm～600ppm、市原工場では平均500ppm～700ppmで、ピンポイント的には300ppmを下回る場合や、逆に800ppmを上回る場合もあった。このため、シリーズ1では、エコセメント中の塩化物イオン量の変動と硬化特性との関連性を確認するため、塩化物イオン量の異なる3種類のエコセメントを要因として加えた。

2.2 使用材料および調合

実験に使用した材料の概要を表-2に、セメントの化学成分および鉱物組成を表-3および表-4に示した。

供試体は、目標スランプ 18 ± 1.5 cm、目標空気量 $4.5 \pm 0.5\%$ を満足するように、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ に空調した試験室内で所定の調合に従ってコンクリート試料を作製し、スランプ、空気量、単位容積質量等のフレッシュ試験を行った後に型枠に打設し、翌日脱型して 20°C 水中養生槽内に静置した。水中養生の供試体はそのまま試験直前まで水中

浸漬した。気中養生の供試体は、4週間 20°C 水中養生槽内に静置した後に取り出し、試験直前まで 20°C の養生室内で室内養生を行った。暴露試験に供した供試体は、4週間 20°C 水中養生槽内に静置した後に取り出し、一部を建築研究所屋外暴露施設のコンクリート製架台に静置した。その他は、エアークッションと段ボール紙で梱包して各暴露地に輸送し、材齢6週前後の時期に各暴露地の架台に梱包を解いて静置した。

2.3 試験方法

圧縮強度および静弾性数の測定はJIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）およびJIS A 1149（コンクリートの静弾性係数試験方法）に、凍結融解試験はJIS A 1148（コンクリートの凍結融解試験方法）のA法（水中凍結融解法）に準じて行った。耐凍害性評価の為の屋外暴露試験は北海道函館市近傍の暴露試験場（2階建て事務所棟2階ベランダ）に架台を設けて、動弾性係数（JIS A 1127）および質量を測定すると共に、供試体表面を撮影した。鉄筋の腐食グレードの分類は4段階とし、その定義は表-5に示す状態とした。

3. 試験結果および考察

3.1 長期の強度特性について

図-1a～1cに塩化物イオン量が300ppm、500ppm、700ppmのエコセメント（EC3、EC5、EC7）および普通

表-2 使用材料

セメント(C)	普通ポルトランドセメント（三社混合） エコセメント（JIS A 5214に規定される普通エコセメントに適合するもの）
細骨材(S)	大井川水系産陸砂 （表乾密度： $2.58 \sim 2.60 \text{g/cm}^3$ ， 吸水率： $1.81 \sim 1.96\%$ ， 粗粒率： $2.97 \sim 2.52$ ）
粗骨材(G)	岩瀬産硬質砂岩 （表乾密度： $2.64 \sim 2.65 \text{g/cm}^3$ ， 吸水率： $0.68 \sim 1.15\%$ ， 実積率： $58.4 \sim 59.9\%$ ， 粗粒率： $6.80 \sim 6.57$ ）
AE減水剤	リグニンスルホン酸系（標準型）
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系標準型

表-1 実験の要因と水準

シリーズ	要因	水準
1	セメントの種類	エコセメント：300ppm(EC3)，500ppm(EC5)，700ppm(EC7) 普通ポルトランドセメント：3社混合(OPC)
	水セメント比(%)	40%，50%，60%
	養生方法	標準水中養生，気中養生，屋外暴露
2	セメントの種類	エコセメント：500ppm，普通ポルトランドセメント：3者混合
	コンクリート中の全塩化物イオン量	セメント中の塩化物量のみ， 全塩化物イオン量が 1.0kg/m^3 となるように塩分を添加
	暴露環境（暴露地）	一般的環境：茨城県つくば市（建築研究所屋外暴露試験場内）， 亜熱帯環境：沖縄県辺土名海岸

表－3 セメントの化学成分

種類	化学成分(%)												
	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
EC3	1.27	17.60	7.48	4.05	61.12	1.80	3.74	0.36	0.02	0.68	1.29	0.07	0.015
EC5	1.22	16.69	7.96	4.20	60.92	1.87	3.82	0.16	0.01	0.74	1.32	0.08	0.054
EC7	1.13	16.86	7.86	4.27	61.50	1.85	3.79	0.13	0.01	0.72	1.33	0.08	0.086
EC	1.18 - 1.25	17.40 - 17.80	7.23 - 7.48	4.12 - 4.60	60.47 - 60.90	1.76 - 2.11	3.78 - 3.84	0.24 - 0.37	0.01 - 0.02	0.70 - 0.75	1.23 - 1.25	0.07 - 0.10	0.055
OPC	1.46	21.57	5.45	2.54	64.0	1.72	1.97	0.31	0.41	0.33	0.12	0.15	0.004

表－4 セメントの鉱物組成

種類	鉱物組成(%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
EC3	48	14	13	12
EC5	49	12	14	13
EC7	52	9	14	13
EC	48	13~ 15	12~ 14	12
OPC	51	24	10	8

表－5 腐食グレードの定義

グレード	鉄筋腐食の状態
1	黒皮の状態、またはさびが生じているが、全体的には薄い緻密なさびである。
2	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
3	断面欠損は目視では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
4	断面欠損が生じている。

ポルトランドセメント (OPC) を使用した 4 種類のコンクリートの材齢 3 日から約 9 年までの標準水中養生による圧縮強度発現状況を水セメント比別に示した。既に参考文献^{1), 4), 5)}などで報告されているようにエコセメントコンクリートの圧縮強度は、同一水セメント比の普通コンクリートの圧縮強度と比較すると材齢 28 日以降で小さい傾向にある。これは、普通ポルトランドセメントと比較するとエコセメントの C₃S 量がやや少なく、また P₂O₅ の量が多いため水和反応がやや遅くなるためと考えられているが、材齢 28 日までの強度発現の差は、高炉セメントやフライアッシュセメントなどの混合セメントの強度発現挙動と比較すると比較的小さいと言える。しかし、エコセメントを建設構造物のコンクリートに使用する上で注意が必要なのは、材齢 28 日以降は圧縮強度の増加がほとんど見込めない場合があることである。この原因の一つは、長期材齢に影響を及ぼす C₂S 量が普通ポルトランドセメントよりも少ないためと考えられる。既往の報告等^{1)~5)}では、水セメント比が小さい場合には、普通ポルトランドセメントほどではないが、材齢 28 日以降も一定の割合で増加することが報告されているが、水セメント比が大きい場合には材齢 28 日以

降の圧縮強度の増加が停止するような挙動を示す場合もあった。従って、エコセメントコンクリートを安全性・耐久性が要求される構造部材等に使用するためには、より長期材齢での強度発現挙動を確認しておくことが極めて重要である。今回行った材齢約 9 年までの試験結果によると、水セメント比 50% および 60% の場合には、材齢 28 日以降の圧縮強度増加が極めて少ないものもあったが、材齢 28 日の強度を下回ることにはなかった。また、高性能 AE 減水剤を使用し水セメント比 40% とした場合には、材齢 28 日に対し 15~30% 強度が増加していた。これらの傾向は、エコセメントの品質 (塩化物量) に係らず同様であった。

練上がり温度の異なる柱模擬部材 (60×60×100cm) を暴露養生し、同部材よりコア採取した供試体の材齢約 6 年までの圧縮強度発現状況をセメント種類別および練上がり温度別に図-2、図-3 に示した。暴露部材からのコア供試体の場合には、水セメント比 50% でも材齢 28 日以降の強度増加が普通コンクリートと同程度に認められた。また、寒中、暑中に相当する練上がり温度が 5℃ や 35℃ の場合には、何れの材齢も標準期と比較すると小さくなることが確認された。一方、ヤング係数の場合は、図-4 に示すように水セメント比 60% の場合でも材齢 28 日以降も普通ポルトランドセメントを使用した場合とほぼ同様の傾向で増加しており、圧縮強度のような懸念はほぼないと考えられる。よって、エコセメントコンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係も普通コンクリートと同様に、建築学会式や New RC 式等で管理できるものであると考えられる (図-4a, 4b)。

3.2 塩分浸透特性について

図-5 は、沖縄県北部の海岸地帯にて屋外暴露した供試体 (水セメント比 65%, 単位水量 180~182kg/m³: 材齢 6.5 年) の暴露表面 (図上部) からの塩素イオン濃度の分布を EPMA により面分析した結果である。同供試体の暴露前の塩素イオン濃度は約 0.05% (500ppm) で、外部塩分の浸透は材齢 6.5 年の時点で同図の分析範囲を超える 80mm 以上に達していた。

図-6 および図-7 は、図-5 の結果を含め建築研究所屋外暴露試験場内および沖縄県の海岸地帯に屋外暴

露（材齢 6.5 年）した供試体の暴露表面からの塩素イオン濃度をセメントの種類別にプロットしたものである。海岸線より 30km 以上離れた内陸部に位置する建築研究所屋外暴露試験場（つくば市内）で暴露を行った供試体は（図-6）、セメントの種類にかかわらず、風雨によ

る溶出が原因と考えられる、表面から約 10mm までの表層部で塩素イオン濃度が減少している状況が確認された。一方、沖縄県の海岸に面した暴露場所場で暴露を行った供試体では（図-7）、海塩粒子の浸入による塩素イオン濃度の増加が、セメントの種類にかかわらず認め

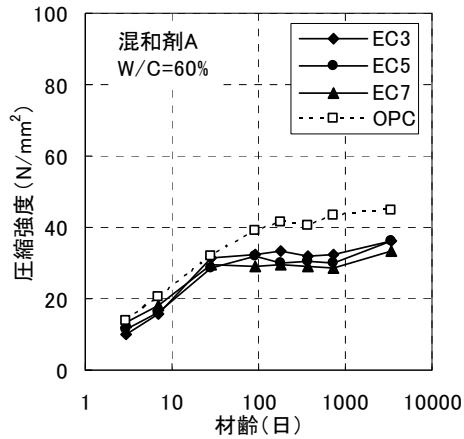


図-1 a 材齢と圧縮強度の関係 (W/C=60%)
(標準水中養生を行った供試体の強度特性)

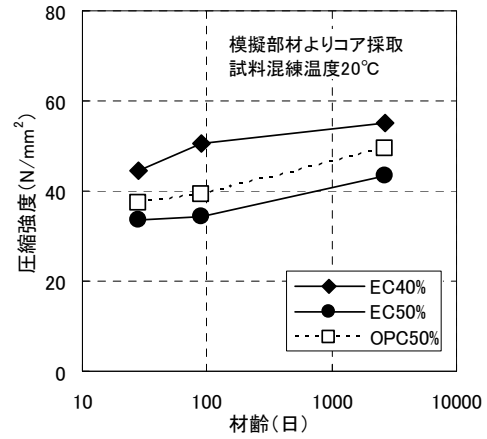


図-2 材齢と圧縮強度の関係 (練上り 20°C)
(暴露供試体よりコア採取した供試体の強度特性)

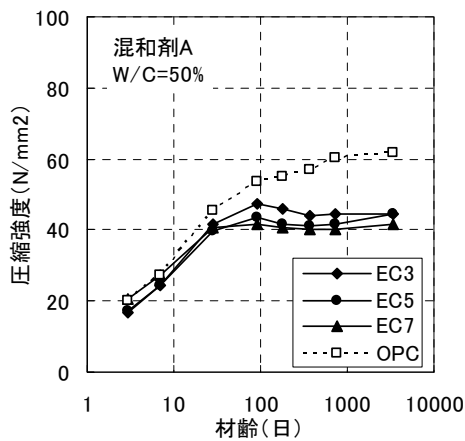


図-1 b 材齢と圧縮強度の関係 (W/C=50%)
(標準水中養生を行った供試体の強度特性)

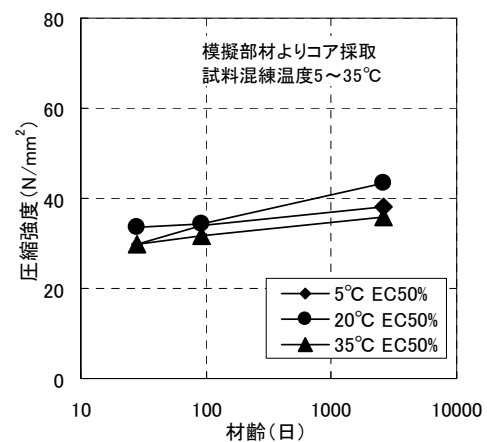


図-3 材齢と圧縮強度の関係 (練上り温度別)
(暴露試験体よりコア採取した供試体の強度特性)

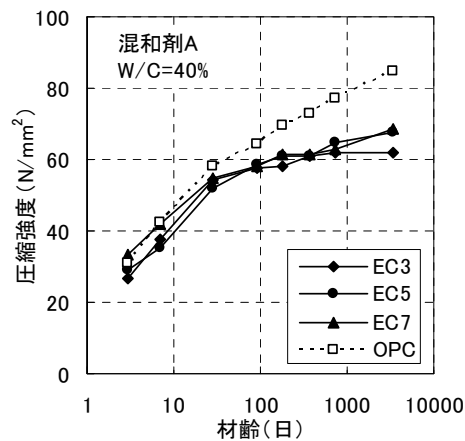


図-1 c 材齢と圧縮強度の関係 (W/C=40%)
(標準水中養生を行った供試体の強度特性)

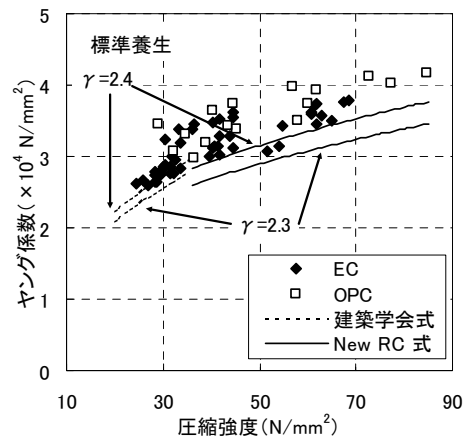


図-4a 圧縮強度とヤング係数の関係
(標準水中養生を行った供試体の場合)

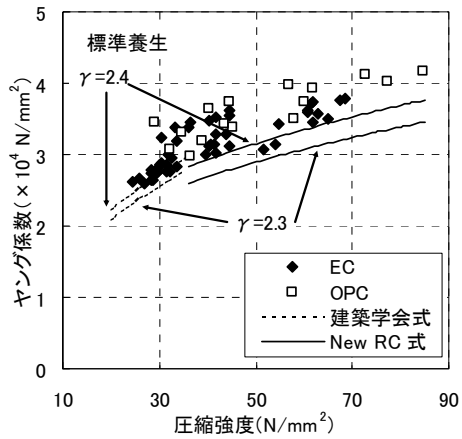


図-4b 圧縮強度とヤング係数の関係
(暴露試験よりコア採取した供試体の場合)

られた。しかし、塩素イオンの濃度や表面からの浸透深さは普通コンクリートとエコセメントコンクリートでは大きく異なった。普通コンクリートでは、まず極表面部分で塩素イオン濃度が高くなるが(内在量の10倍以上)、それ以降に一旦減少し、再び表面から10mm前後の箇所まで濃度値がピークとなる。それ以降再び減少し、30mm前後の箇所まで内在量の0.02%程度と同程度となる。よって、普通コンクリートの場合と同環境・材齢での外部塩分浸透深さは20~30mmである。一方、エコセメントコンクリートの場合でも、極表面層で濃度が増大するが、内在量の2倍程度である。それ以降で一旦減少するが、普通コンクリートよりも深い、表面から約20mmの箇所まで濃度値がピークとなった。塩素イオン濃度はそれ以降緩やかに減少するが、分析可能範囲の最大値80mmの箇所でも0.07%以上の値を示しており、エコセメントコンクリートの同環境・材齢での外部塩分の浸透深さは100mm以上と推定される。これは、筆者らが既往文献で報告している促進試験による中性化速度¹⁾(同一水セメント比の場合、エコセメントコンクリートの中性化速度は普通コンクリートの1.5~2倍程度大きくなる)の結果と同様、エコセメントコンクリートの組織構造が普通コンクリートよりも粗な状態であるためであろう。

3.3 鉄筋腐食について

図-8に、3.2項塩分浸透特性と同じ暴露試験を行った供試体中(水セメント比65%)のかぶり厚さ10mm及び20mmの鉄筋の腐食状況(表-5に示した腐食グレード)と暴露期間との関係を、セメントの種類および塩化物イオン量別に示した。

コンクリート中の全塩化物イオン量を1kg/m³相当に調整した普通コンクリート(OPC(0+20))、エコセメントコンクリート(EC(5+15))の鉄筋は、既に暴露1年目の段階で塩化物イオン量を調整していないコンクリート

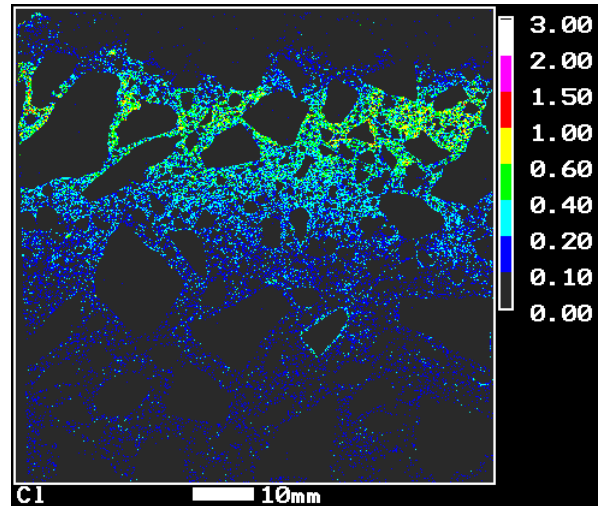


図-5 海岸地帯で屋外暴露したエコセメントコンクリートの塩素イオン濃度の分布状態 (EPMA分析結果)

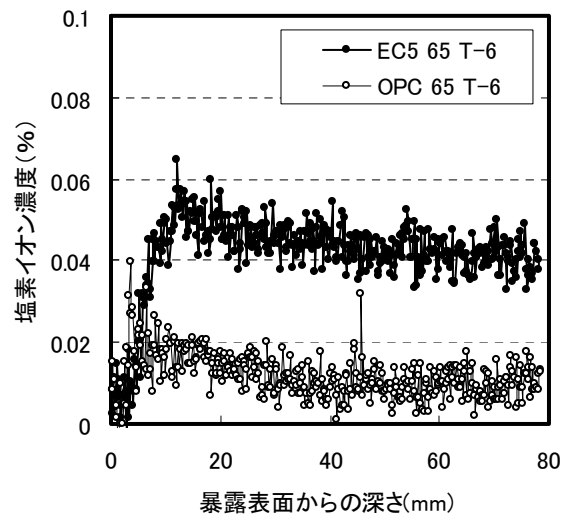


図-6 暴露表面からの塩素イオン濃度の変化
(暴露場所: 建築研究所屋外暴露試験場内)

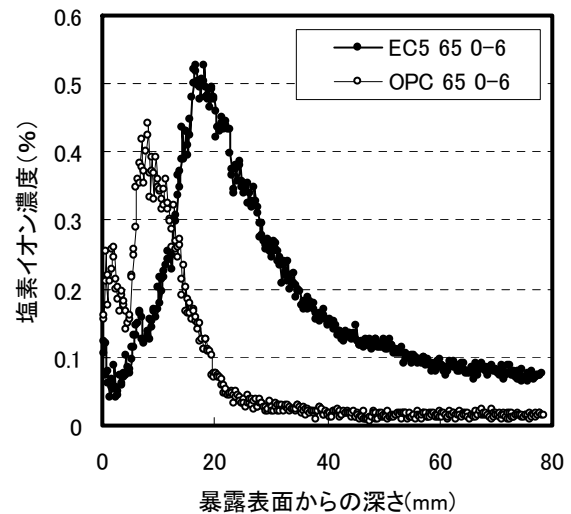


図-7 暴露表面からの塩素イオン濃度の変化
(暴露場所: 沖縄県辺土名海岸地帯)

中の鉄筋と比較して腐食グレードに差が認められ、暴露6.5年の段階でもその違いは明確である。また、エコセメントコンクリートと普通コンクリートを比較した場合でも暴露1年目からその差が確認でき、6.5年の段階では、同じセメントで塩化物イオン量を調整したものと調整しなかったものとの差よりも腐食グレードの差は大きかった。3.2 塩分浸透特性で記したように、エコセメントコンクリートの組織構造は普通コンクリートよりもポーラスで、炭酸ガスや塩分などの外部劣化因子の浸透速度が早くなるため、中性化の進行および塩化物イオンの大量の蓄積につながり、これが鉄筋腐食の増大原因となっていると考えられる。

4. エコセメントコンクリートの用途と仕様について

冒頭、1. はじめに記したように建築分野におけるエコセメントコンクリートの調合方法や施工方法については参考文献 1)~3)によって大凡整備されるとともに、資源循環型社会を推進する上で、年々増加する都市ゴミの再資源化や枯渇化が著しい都市部処分場の延命などの有効策としてエコセメントの活用が期待されている。一方で、持続的社会的基盤材料としてエコセメントを使用していくためには、中長期性能を担保するだけのデータはまだ十分とは言えないだろう。上述したように、調合条件によっては、普通ポルトランドセメントや高炉セメントなど既存のセメントを使用したコンクリートとは異なる挙動を示す場合も少なくない。したがって、エコセメントコンクリートの当面の想定される用途としては、戸建て住宅や小規模低層の共同住宅等の比較的供用期間が短い（第一世代程度）物件で、塩害や凍害など外部劣化因子による影響を受けにくい環境に立地するものが対象と考えられる。また、調合・施工の仕様としては、本年度改定された JASS 5 の 27 節（エコセメントを用いるコンクリート）が基本となるが、今回の試験結果から少なくとも次の事項を追加的に設ける必要があるのではないかと考えられる。

- ・調合時の強度補正値 $_{28}S_{91}$ の標準値は、JASS 5 では、予想平均気温 θ の範囲が 6°C 以上で $3 (\text{N}/\text{mm}^2)$ として規定されていないが、 30°C を上回る場合については、別途検討する必要があると考えられる。

- ・海水の作用を受けるコンクリートにはエコセメントを使用しない。

5. まとめ

本報告では、エコセメントコンクリートの6年～9年の中期までの圧縮強度特性と耐久性の一部（鉄筋腐食状況）を報告した。水セメント比が50%以上の場合には、材齢28日以降の強度増加は、材齢3年までの既往の報

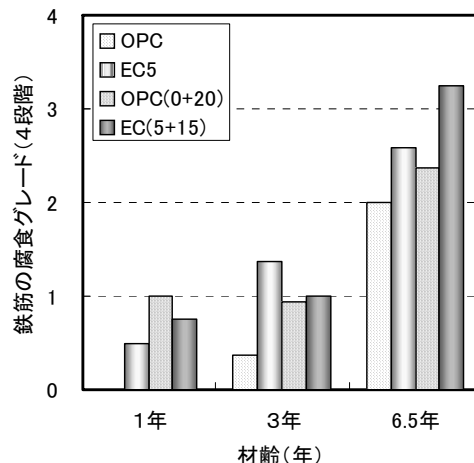


図-8 暴露期間と鉄筋腐食グレードとの関係
(セメントの種類および塩化物イオン量)

告と同様、わずかであった。ただし、40%では普通コンクリートの半分程度の強度増加が確認された。

海岸地帯での屋外暴露試験により、海塩粒子による塩分浸透が確認され、普通コンクリートよりも浸透速度が速いことが確認された。また、これに伴い、コンクリート中の鉄筋腐食も普通コンクリートより速くなることが確認された。

今後、同時期に実施した中性化や鉄筋腐食関連の試験結果などについても、整理・分析が完了しだい随時報告していく予定である。

参考文献

- 1) 棚野博之, 鹿毛忠継, 濱崎仁, 横山滋, 田中敏嗣, 長塩靖祐, 木村正尚, 椎野宏明: エコセメントを使用したコンクリートの物理・力学特性ならびに調合設計・施工技術に関する研究, 独立行政法人建築研究所, 建築研究報告, No.144, 2005.12
- 2) エコセメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説, 日本建築学会, 2007.10
- 3) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 (鉄筋コンクリート工事), 日本建築学会, 2009.2
- 4) 棚野博之, 鹿毛忠継, 田中敏嗣, 木村正尚: 普通エコセメントを使用したコンクリートの調合・力学特性および耐久性に関する研究, コンクリート工学, Vol.40, No.7, pp.16-24, 2002.7
- 5) 佐藤幸恵, 榊田佳寛: エコセメントを用いるコンクリートの強度発現と混和材による長期強度改善, コンクリート工学論文集, Vol.28, No.1, pp.47-52, 2006.7