

論文 環境負荷低減型セメントを用いた建築用コンクリートブロックの耐久性に関する研究

早川 隆之*¹・鹿毛 忠継*²・濱崎 仁*³・吉本 稔*⁴

要旨：都市ゴミ焼却灰などの廃棄物を主原料として製造される環境負荷低減型セメントは，塩化物イオンや硫酸イオンなどの成分を普通ポルトランドセメントに比べて多く含有しているため，コンクリート二次製品等へ適用した場合でも，耐久性について確認する必要がある。本報告は環境負荷低減型セメントを用いた建築用コンクリートブロックの耐久性を把握することを目的とし，乾湿繰り返し試験、屋外暴露試験によってその劣化状況，並びに中詰された鉄筋の腐食，凍結融解抵抗性について実験的検討を行った。その結果，強度特性および鉄筋腐食については普通ポルトランドセメントを用いた場合と同等の性能を示した。

キーワード：環境負荷低減型セメント，鉄筋腐食，促進劣化，屋外暴露，凍結融解抵抗性

1. はじめに

近年，都市ゴミ焼却灰などの廃棄物を主原料に環境負荷低減を目的としたエコセメント（以下 EC と略す）が開発された。その用途に，生コンやコンクリート二次製品が考えられ，現在までに，EC の品質および EC を使用したコンクリートの諸物性に関する報告がなされている¹⁾²⁾。しかし，建築用コンクリートブロック等に代表される即時脱型方式により製造される製品については，EC を使用した場合の基礎的物性のほか，長期耐久性についてもほとんど明確化されていない。また，EC には塩化物イオンや硫酸イオンなどの成分が普通ポルトランドセメント（以下 OPC と略す）よりも多く含有されているため，鉄筋腐食への影響も懸念される。EC を用いたコンクリート中の鉄筋腐食に関する実験的報告はなされているが^{3) 4)}，建築用コンクリートブロックに関する実験報告はない。本報告は，EC を用いた建築用コンクリートブロックの耐久性を把握することを主目的とし，乾湿繰り返し試験および屋外暴露試験により，その劣化状況並びに中詰された鉄筋の腐食，凍結融

解抵抗性について実験的検討を行った結果を報告するものである。

2. 試験体

2.1 試験体の区分と種類

試験体に用いた建築用コンクリートブロック JIS A 5406-200(建築用コンクリートブロック) の区分と種類を表 - 1 に示した。

2.2 使用材料および調査

セメント (C) は普通ポルトランドセメント (OPC : 密度 3.16g/cm^3 , 比表面積 $3350\text{cm}^2/\text{g}$) , 低塩分型のエコセメント (普通エコセメント ^{TR})

表 - 1 試験体の区分と種類

区分	種類
外部形状による区分	基本ブロック
断面形状による区分	空洞ブロック
圧縮強さによる区分	16 (C 種)
化粧の有無による区分	化粧無し
寸法精度による区分	標準精度ブロック
透水性による区分	普通ブロック
長さ、高さのモジュール (mm)	長さ : 400、高さ : 200

*1 太平洋セメント株式会社中央研究所 第一研究部 コンクリート製品グループ (正会員)

*2 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ 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 工修 (正会員)

*4 太平洋セメント株式会社中央研究所 第一研究部 コンクリート製品グループ (正会員)

表 - 2 セメントの化学成分と鉱物組成

種類	化学成分 (%)									鉱物組成 (%)			
	Ig.loss	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
EC	1.1	17.8	7.2	4.1	61.1	1.8	3.9	0.3	0.054	49	12	14	13
OPC	1.5	22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	2.0	0.7	0.004	52	23	8	10

表 - 3 セメントの物理的性質

項目 種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	圧縮強さ (N/mm ²)			水和熱 (J/g)	
			水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)		3d	7d	28d	7d	28d
EC	3.17	4250	28.5	2-12	3-13	良	30.4	41.3	53.0	361	419
OPC	3.16	3350	27.6	2-15	3-35	良	29.2	44.3	60.9	329	374

表 - 4 試験体に用いた建築用コンクリートブロックの調合

種類		W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					空隙率 (%)
			水 W	セメント C	川砂 S	3分砂 G	混和剤 AE	
空洞	C種	36	95	270	1383	597	0.54	7

EC：密度 3.17g/cm³，比表面積 4250cm²/g) の 2 種類とした。表 - 2 に EC および OPC の化学組成と鉱物組成を示した。表 - 3 に EC および OPC の物理的性質を示した。骨材は，細骨材に川砂 S:表乾密度 2.62g/cm³ 絶乾密度 2.57g/cm³，実積率 61.4%)，粗骨材に 3 分砂[群馬県利根川産陸砂利](G：表乾密度 2.63g/cm³，絶乾密度 2.58g/cm³，実積率 63.2%，粗粒率 5.45)を使用した。混和剤はコンクリートブロック用可塑剤(Ad：ノニオン系界面活性剤)を使用した。練り混ぜ水(W)は上水道水を使用した。試験体として用いた建築用コンクリートブロック C 種の調合を表 - 4 に示す。水セメント比は 36%とし，混和剤はセメント重量に対し 0.2%を添加した。

3. 試験方法

3.1 乾湿繰り返し試験

乾湿繰り返しの 1 サイクルは，JCI-SC3 に従い，乾燥時が温度 10～15℃，湿度 70%RH 以下で 4 日間，湿潤時が温度 60～70℃，湿度 90%RH 以上で 3 日間とした。試験体はおよそ 10cm 程度間隔を空けて静置した。試験体の配置状況を写真 - 1 に示した。



写真 - 1 試験体の配置状況

(1) 外観観察

目視により試験体のひび割れや欠けなどの損傷の程度，および色調の変化等を観察した。外観観察のサイクルは，試験開始前，10 サイクル，20 サイクル，80 サイクルとした。

(2) 鉄筋腐食試験

試験体は表 - 1 に示した区分による空洞ブロック C 種を使用し，鉄筋はφ13×166mm のみがき棒鋼を使用した。試験体の空洞部中央に鉄筋を各 1 本ずつ配置しモルタルによって充填し中詰めした。鉄筋を中詰めした試験体の形状，寸法を図 - 1 に示した。鉄筋の中詰めに使ったモルタルの質量配合は，セメント（普通ポルトランドセメント）1 部，標準砂 3 部及び水 1/2 部（水セメント比=0.5）としモルタルは普通ポルトランドセメントを用い JIS R 5201 に従

い作成した。鉄筋腐食の測定サイクルは，試験開始前，10 サイクル，20 サイクル，80 サイクルとした。また，鉄筋を中詰めしていない空洞ブロックについても同じ試験槽内に配置し，鉄筋腐食の測定と同じサイクルにて圧縮強さ試験を実施した。圧縮強さ試験は，JIS A 5406-2000（建築用コンクリートブロック）に準拠し，全断面による試験を実施した。加圧面は研磨により平滑に仕上げたものとし，球接面をもつ加圧装置を用い加圧速度は加圧面の断面積に対し 0.2N/mm^2 とした。

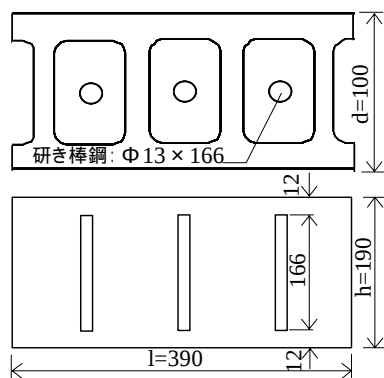


図 - 1 試験体の形状、寸法

鉄筋の質量減少率は，日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断及び補修指針（案）⁵⁾に準拠し，測定時に取り出した後 10%クエン酸水素アンモニウム水溶液中に 24 時間浸漬してさびを除去し，鉄筋の質量を測定した。質量減少率は式(1)により算出した。

$$\text{質量減少率 } R(\%) = (W_0 - W_n) / W_0 \times 100 \quad (1)$$

R：鉄筋の質量減少率

W_0 ：試験体製作前の鉄筋の単位質量（g/cm）

W_n ：試験後の鉄筋の単位質量（g/cm）

発錆面積率は，透明セロファンに鉄筋の中央 10cm 部分の腐食状況をトレースし，画像処理により面積を測定した。発錆面積率は式（2）により算出した。

$$\text{発錆面積率}(\%) = \text{発錆面積} / \text{測定範囲面積} \times 100 \quad (2)$$

鉄筋腐食の評価は，表 - 5 に示した補修工法の補修効果評価試験（案）⁵⁾鉄筋腐食の評価グレードに準じ，本試験を通して一人の試験者が評価した。

表 - 5 鉄筋腐食の評価グレード

グレード	評価基準
	腐食がない状態または表面にわずかな点さびが生じている状態
	表面に点錆びが広がって生じている状態
	点錆びがつながって面錆びとなり、部分的に浮きさびが生じている状態
	浮き錆びが全面に広がって生じ、コンクリートに錆びが付着している状態
	膨張性の錆びが生じており、断面欠損が見られる状態

3.2 凍結融解試験

JIS A 1435-1991（建築用外壁材料の耐凍害性試験方法）に準拠し，気中凍結水中融解の条件で実施した。試験開始時は試験体作製から 3 ヶ月を経過した時点とし，30 サイクル毎に試験体を取り出し外観観察，圧縮強さ，質量変化率を測定した。測定サイクルは最大 150 とした。

3.3 屋外暴露試験

試験は，寒冷地および塩害地を想定し，試験体を北海道泊村，沖縄県辺戸名町の海岸沿いに配置した。暴露場所の環境条件を表 - 6 に，試験体の配置図を図 - 2 および図 - 3 に示した。暴露による経時劣化状態は圧縮強さ，及び質量変化により評価した。また，沖縄県では中詰めされた鉄筋の腐食について自然電位を測定することにより評価を行った。試験項目および実施の有無を表 - 7 に示す。試験材齢は，試験開始前，3 ヶ月，6 ヶ月，1 年，2 年とした。

表 - 6 環境条件

環境条件	暴露場所	
	寒冷地 - 北海道	塩害地 - 沖縄県
気温の年平均値（℃）	8.5	22.7
最高気温の年平均値（℃）	12.5	25.3
最低気温の年平均値（℃）	4.8	20.5
相対湿度の年平均値（％）	70	75
日最大風速 10m/s 以上の年間平均日数（日）	6.7	87.9

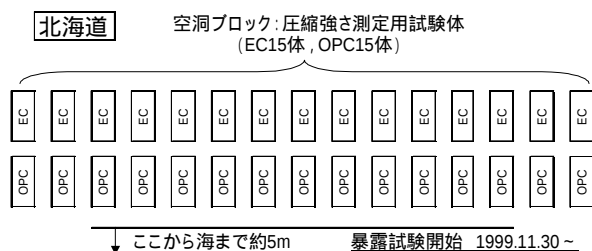


図 - 2 試験体配置図 (北海道)

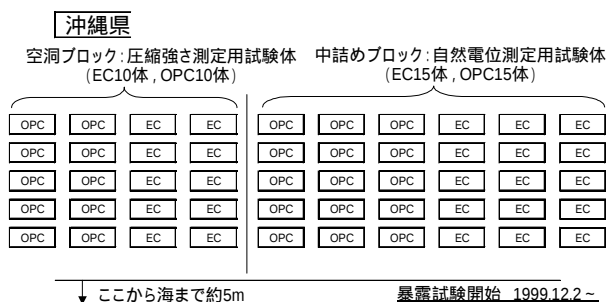


図 - 3 試験体配置図 (沖縄県)

表 - 7 試験項目

暴露場所	種類	試験項目		
		圧縮強さ 質量変化	外観 観察	鉄筋腐食
寒冷地 - 北海道	EC	○	○	-
	OPC	○	○	-
塩害地 - 沖縄県	EC	○	○	○
	OPC	○	○	○

○が実施項目

(1) 外観観察

目視により試験体のひび割れや欠けなどの損傷の程度、および色調の変化等を観察した。外観観察の材齢は、試験開始前、3ヶ月、6ヶ月、1年、2年とした。

(2) 自然電極電位法による鉄筋腐食評価

試験体は、端部にリード線を接続したみがき棒鋼を試験体空洞部の中央に配置しモルタルで中詰めした。測定は ASTM C876-91 に準拠して実施した。電極は、銅 - 飽和硫酸銅電極とし、電極面と試験体表面の接触には、電解質溶液を使用した。測定は、試験体を 24 時間水中浸漬して測定した。なお、試験体表面が乾いている場合には、表面を湿らせて、電位の値が 5 分間に $\pm 20\text{mV}$ 以内の変化になるようにして測定した。測定後、表 - 8 に示した ASTM C876-91 の評価

基準に従った。電位の測定状況を写真 - 2 に示した。

表 - 8 ASTM C876-91 による評価基準

電位測定値 $E(\text{mV})$	評価基準
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-200 \leq E \leq -350$	腐食状態は不確定
$E < -350$	90%以上の確率で腐食あり



写真 - 2 自然電位の測定

(3) 圧縮強さ試験

圧縮強さ試験は、JIS A 5406-2000 (建築用コンクリートブロック) に準拠し、全断面による圧縮強さ試験を実施した。試験材齢は、試験開始前、3ヶ月、6ヶ月、1年、2年とした。また、試験体は試験の開始前 24 時間は室温 20℃ の室内に静置した。

4. 試験結果および考察

4.1 乾湿繰り返し試験

(1) 外観観察

目視による外観観察を実施した結果、試験開始前、10 サイクル、20 サイクル、80 サイクルの時点において、試験体にひび割れや欠けなどの損傷は認められず、色むらや著しい色調の変化等も確認されなかった。

(2) 鉄筋腐食試験

乾湿繰り返しサイクルに伴う鉄筋の質量減少率を図 - 4 に、圧縮強さの変化を図 - 5 に示した。80 サイクル終了時において EC、OPC 試験体いずれにおいても中詰め鉄筋中央 10cm 部分に錆びは認められず鉄筋腐食のグレード評価は全て I であった。ただし、鉄筋の質量減少は、

乾湿繰り返しサイクルの増加とともに減少傾向を示したが、これは試験体のかぶり厚さの薄い鉄筋端部に生じたわずかな錆びが剥離除去され減少したものと考えられる。また、80 サイクル終了時の圧縮強さは EC が 17.3N/mm^2 、OPC が 21.4N/mm^2 であった。EC の圧縮強さは OPC に対し 2 割程度低い値を示したが表 - 3 に示したセメントの物理的性質によれば、EC における圧縮強さの発現は OPC に比べて 1 割程度低い値であった。そのため、本試験における EC 試験体の圧縮強さの発現性は、セメントの物理特性によるものと推察される。なお、EC および OPC いずれの試験体においてもサイクル数に伴う強度の低下は認められず、80 サイクル終了後の圧縮強さは試験開始前に対し 4~5 割程度増進した。また、本報告は 80 サイクルまでの試験結果についての報告であるが塩分浸透の影響も考慮し、今後さらにサイクル数を与えた場合についての調査も行う予定としている。

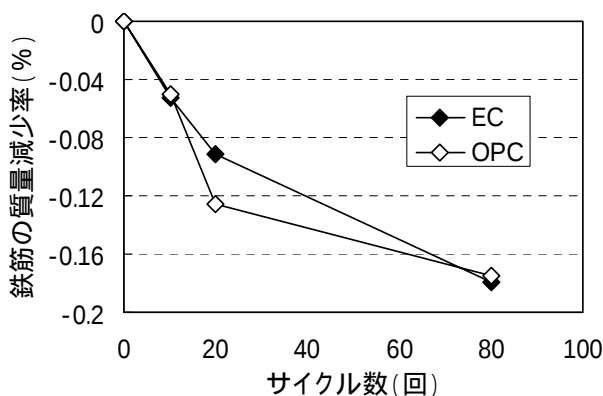


図 - 4 サイクルに伴う鉄筋の質量変化

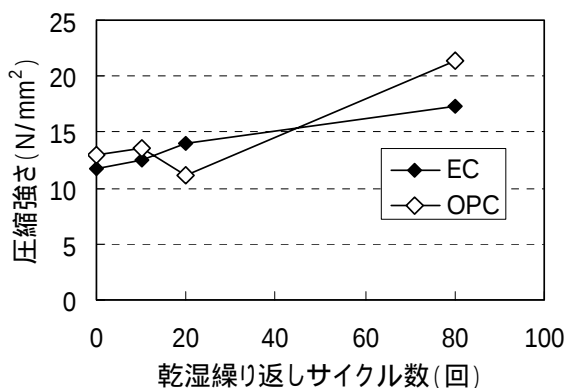


図 - 5 サイクルに伴う圧縮強さの変化

4.2 凍結融解試験

図 - 6、図 - 7 に凍結融解サイクルに伴う圧縮強さおよび質量変化を示した。EC 試験体における圧縮強さは、120 サイクル終了時までには著しい強度の低下は認められず、150 サイクル終了時の質量減少は試験開始前の 5% 程度の減少に留まった。しかしながら、OPC を使用した試験体は 90 サイクルにて大きなクラック、欠けを生じ破損に至った。別途実施した OPC を用いた建築用コンクリートブロックの凍結融解試験による質量変化率の既存試験結果では 180 サイクル終了時においても欠けや破損は生じなかった。今後要因についてさらに詳細な検討が必要であると考えられる。

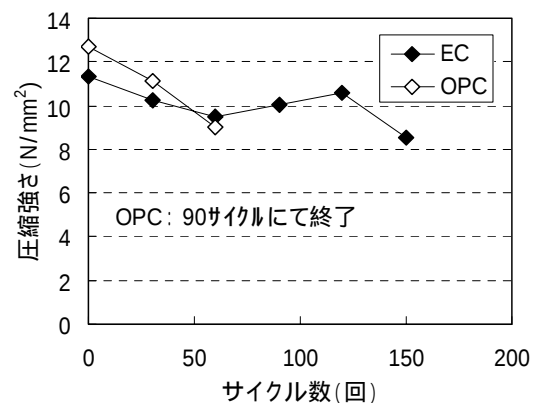


図 - 6 凍結融解サイクルに伴う圧縮強さ変化

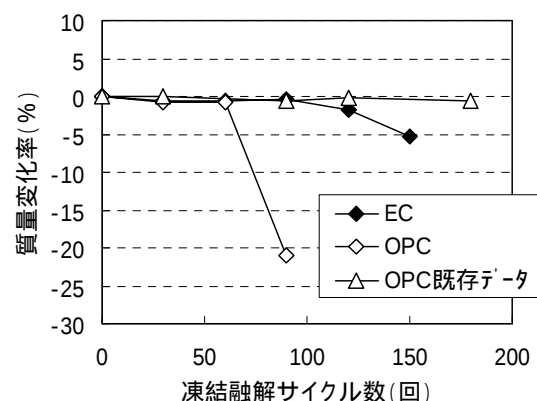


図 - 7 凍結融解サイクルに伴う質量変化

4.3 屋外暴露試験

(1) 外観観察

試験体暴露後 2 年時において、試験体にひび割れや欠け、スケーリング等による破損は認められなかった。

(2) 圧縮強さ試験

図 - 8 に北海道，沖縄における暴露試験体の圧縮強さの経時変化を，図 - 9 に経時に伴う質量変化率を示した。暴露条件の違いにかかわらず，暴露後 2 年時の圧縮強さは EC，OPC 試験体で同等であった。ここで，暴露材齢 2 年に対し，1 年時での圧縮強さが増加したのは，試験体の含水率の減少により見かけ上強度が大きくなったものと考えられる。

(3) 自然電位測定による鉄筋腐食評価

沖縄における自然電位測定の結果を図 - 10 に示した。試験開始後 2 年を経過した時点での EC および OPC の自然電位は，それぞれ 178.2mV，155.3mV であった。表 - 8 に示す ASTM C876-91 評価基準によれば 90%以上の確率で腐食はないと推測される。なお，暴露 1 年から 2 年にかけて EC および OPC いずれの自然電位も卑の方向に転じており，一見今後さらに卑の方向に進むことも予測されるが図 - 7 を参考とすると試験体の含水率の変化によるものと推察される。

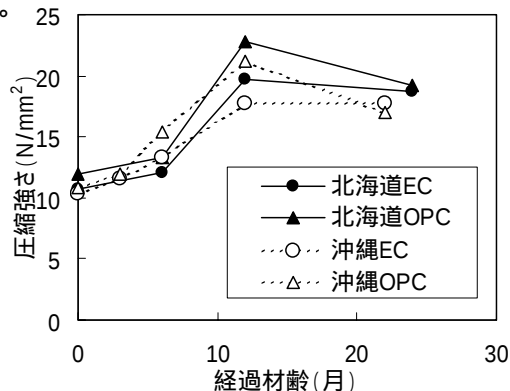


図 - 8 圧縮強さの経時変化

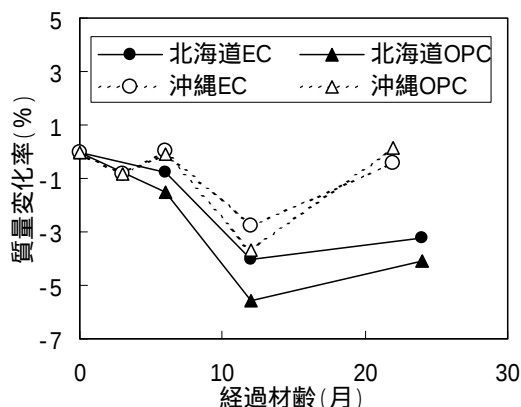


図 - 9 質量変化率の経時変化

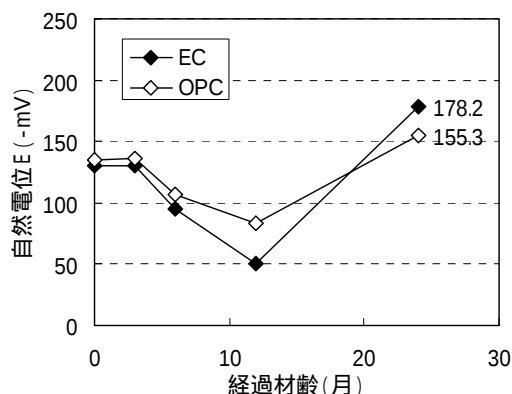


図 - 10 自然電位の経時変化

5. まとめ

EC を用いた建築用コンクリートブロックの耐久性に関して以下にまとめる。

- (1) 乾湿繰り返し試験の結果 80 サイクル終了時において鉄筋の腐食は確認されなかった。
- (2) 凍結融解試験では，120 サイクル時までは強度低下や試験体の破損等は生じなかった。
- (3) 屋外暴露試験では，暴露環境の違いにかかわらず試験開始 2 年後の試験体に破損等は認められなかった。
- (4) 塩害地を想定した沖縄における自然電位測定によれば，暴露 2 年を経過した時点で，鉄筋の腐食はないと予測できた。

EC の建築用コンクリートブロックへの適用は，すでに実用化の段階に入っている。本研究において暴露 2 年の時点で OPC と同様に耐久性に関して使用上問題となるような相違は認められなかったが，今後も長期的な調査を実施することが必要であると考えられる。

【参考文献】

- (1) 田中敏嗣，濱崎仁ほか：環境負荷低減型セメントを用いたコンクリート中の鉄筋腐食に関する実験的検討その 1 屋外暴露試験 1 年間の結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）A-1，pp.193-194，2001。
- (2) 濱崎仁，棚野博之ほか：環境負荷低減型セメントを用いたコンクリート中の鉄筋腐食に関する実験的検討その 2 乾湿繰り返し促進劣化試験の結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）A-1，pp.195-196，2001。
- (3) 棚野博之ほか：環境負荷低減型セメントの品質に関する検討，第 54 回セメント技術大会講演要旨，pp.460～461，2000。
- (4) 棚野博之ほか：環境負荷低減型セメントを使用したコンクリートのフレッシュ時の性状と強度，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.469-474，2000。
- (5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説，1997