報告　エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン量に関する合理的管理・検査方法の検討

長塩　靖祐[*1]・栩木　隆[*2]・西崎　到[*3]・河野　広隆[*4]

要旨：エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン量の管理・検査は，フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量測定結果に，セメント中に残存する塩化物イオン量を加える方法が採用されている。しかし，最近の結果ではセメント中に残存する塩化物イオンの量と形態が変化し，前述の計算による管理・検査結果と実際にコンクリート中に含まれる塩化物イオン量の結果が乖離しており，エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン量を適切に評価できないことが判明した。本報告は，エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン量の管理・検査方法について，現実により即した方法を提案するものである。

キーワード：エコセメント，塩化物イオン量，合算，残存比，管理検査方法

1. はじめに

都市ごみ焼却灰を主原料とするエコセメントは2002年7月にJIS R 5214[1)]として，速硬エコセメント，普通エコセメントの2種類が規格化された。このうちの普通エコセメント（以下，エコセメント）の利用法，特に土木分野に関する利用法については，1999～2001年度にかけて独立行政法人土木研究所が地方自治体およびセメントメーカーなどと共同研究を実施しその成果[2)]を公表，また利用技術マニュアル[3)]も発行し，鉄筋コンクリート材料として適用可能な材料であることを示している。

前述した共同研究の中でエコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン量の管理・検査は，エコセメント中の塩化物イオンがその一部しか溶出しないことから，フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量測定結果に，セメント中に残存する塩化物イオン量を加える方法を提案し採用している[1), 2)]。この方法は，セメント中に残存する塩化物イオンの全塩化物イオン量に対する割合を残存比と定義し，その値は試験結果をもとに安全側の値として0.7を用いている。しかし，ここ最近の実態[4), 5)]ではこの残存比が変化しており，0.2～0.45程度の値を示している。そのため残存比を0.7として管理・検査を実施した場合には塩化物イオン量を過大に見積もることになり，エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン量を適切に評価できていないという問題が生じている。

本報告は，上記背景を踏まえ，最近の知見および調査結果をもとに，エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン量に関する合理的管理・検査方法について検討を行い，現実により即した方法について提案するものである。

2. エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン量の検査方法の設定経緯

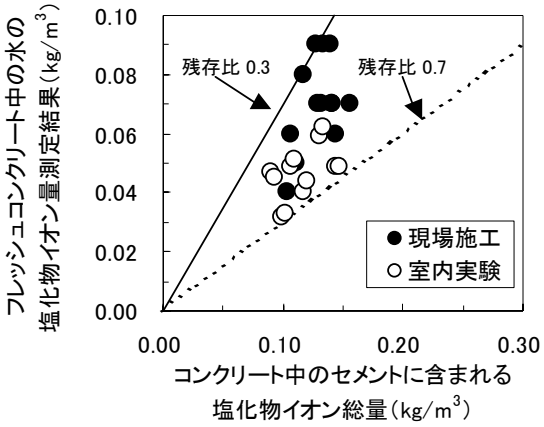
エコセメント（以下，EC）の塩化物イオン量は0.05質量%程度であり，普通ポルトランドセメント（以下，OPC）のJIS規格上限値0.035質量%より多い。しかしECを用いたフレッシュコンクリートの水の塩化物イオン量はOPCと比較

*1 太平洋セメント（株）　中央研究所　研究開発部　コンクリート技術チーム　(正会員)
*2 太平洋セメント（株）　中央研究所　技術企画部　技術情報チームリーダー　(正会員)
*3 独立行政法人　土木研究所　材料地盤研究グループ　新材料チーム　上席研究員　博士（工学）
*4 独立行政法人　土木研究所　材料地盤研究グループ長　博士（工学）　（正会員）

してそれほど大きな差が認められない結果にあり，EC 中の塩化物イオンはフレッシュコンクリート中の水にはその一部しか溶出しないことが判明している[2)]。すなわち，フレッシュコンクリート中の水に溶け出さずにセメント中に残存している塩化物イオンが存在することになり，このフレッシュコンクリート中の水に溶け出さずにセメント中に残存している塩化物イオンのEC中に含まれる全塩化物イオン量に対する割合を残存比と定義している。したがって，EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量の検査をフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量の測定により行う場合は，コンクリート中の塩化物イオン量を過少評価することになる。そのため，EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量の検査方法について検討する必要性が生じたことから，フレッシュコンクリート中の水に溶け出さずにセメント中に残存している塩化物イオン量の割合について検討を行い，残存比を明らかにしている[2)]。**図－1** にその検討結果を示す。残存比は 0.3～0.7 の範囲にあり，この検討結果から，EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量を適切に評価するためには，フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量測定結果に，セメント中に残存する塩化物イオンを加える必要があることが判明した。

利用技術マニュアル[3)] では前述のように定義した残存比を変数αとして，EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量を求める式(1)を提案し，ECを用いたコンクリートの塩化物イオン量として管理することとしている。この方法では残存比αの設定が重要であるが，前述のように残存比が 0.3～0.7 程度であることから，残存比α＝0.7とすることにより安全側の運用が可能である。（なお，JIS R 5214 のエコセメント解説は残存比を安全側である 0.7 固定値として採用し，塩化物イオン量を算出することを記載[1)] している。）

現状，EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量の管理・検査には式(1)を用いて，また残存比は安全側の値である 0.7 を採用している。



図－1　コンクリート中のセメントに含まれる塩化物イオン総量とフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量測定結果との関係[2)]

$$A = B + \alpha \times C \times D/100 \qquad (1)$$

ここで，A：EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量（kg/m^3），B：フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量測定値（kg/m^3），C：単位セメント量（kg/m^3），D：EC の塩化物イオン量（%），α：EC 中に含まれる全塩化物イオン量のうちのフレッシュコンクリート中の水に溶け出さずにセメント中に残存している塩化物イオン量の比率（残存比）

3. EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量管理・検査の現況

3.1 プレキャストコンクリート製品の場合

図－2 に EC を用いて製造したプレキャストコンクリート製品（以下，製品）について，工場で連続的に測定したフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量測定結果の一例を示す。測定期間は 2003.6～2005.4 の約 2 年間実施した。コンクリート配合は，W/C：47%，単位水量：169kg/m^3，単位セメント量：360kg/m^3 である。図中にはフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量測定結果の他に，前述式(1)による管理・検査結果（残存比 0.7 で計算）およびセメント由来の全塩化物イオン量の計算結果も示している。なお，セメント由来の全塩化物イオン量（単位セメント量 360kg/m^3×セメントの塩化物イオン量）は，当月の試験成績表記載のセメントの塩化物イオン量の最大値を使用している。コンクリートの塩化物イオン量は，そのほとん

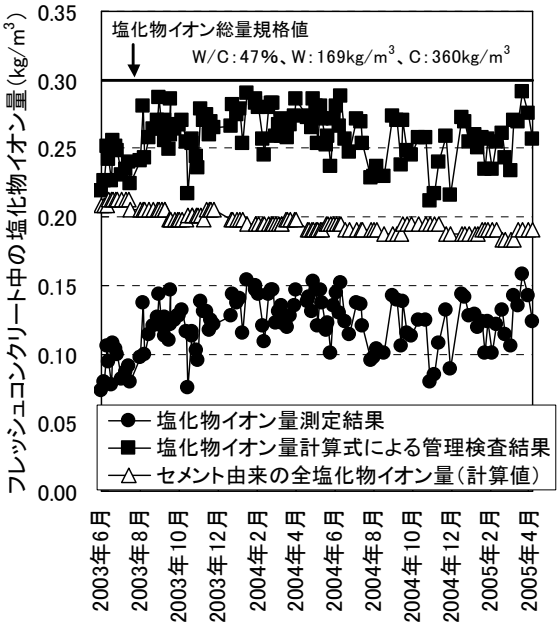
どがセメント由来のものであり他の材料（細骨材：山砂 0.001%（NaCl 換算），練混ぜ水：地下水 0.0006~0.0011%[6]）からの塩化物イオン量は非常に少ない。**図－2** より，EC を用いたフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量の測定結果は 0.10～0.15kg/m^3 程度であり，式(1)（残存比 0.7）による管理・検査では 0.25～0.30kg/m^3 程度であった。式(1)の計算による検査では，セメント由来の全塩化物イオン量よりも高い結果にあった。これは残存比が小さく，現状の残存比 0.7 による管理・検査では塩化物イオン量を過大に見積もっているためである。現行の残存比 0.7 による計算方法では，EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量を適切に評価していないものと考えられる。

3.2 レディーミクストコンクリートの場合

表－1 に EC をレディーミクストコンクリートに用いた場合（たまエコセメント建設工事：工期 2004.3～2005.3）のフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量測定結果を示す[4), 5)]。土木配合は W/C：59%，単位水量：181kg/m^3，単位セメント量：307kg/m^3，EC の塩化物イオン量：0.054%，建築調合は W/C：51%，単位水量：175kg/m^3，単位セメント量：343kg/m^3，EC の塩化物イオン量：0.043%である。EC をレディーミクストコンクリートに用いた場合においても，EC の残存比は 0.2～0.45 程度，平均では 0.34 であった。レディーミクストコンクリートの結果からも，製品に使用した場合と同様に，残存比 0.7 では EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量を適切に評価できていないことが判明した。

3.3 残存比の実態

以上の結果から，残存比が 0.7 から 0.3 程度に小さくなっていることが判明した。残存比が小さくなっている理由としては，EC の原料である都市ごみ焼却灰中の塩素量の増加に伴い，塩素を揮発させるために必要なアルカリを増加させており，その結果，水溶性のアルカリ塩としての存在が多くなっているためと推察している[7)]。



図－2　製品に用いた場合の測定結果の一例

表－1　レディーミクストコンクリートに用いた場合の塩化物イオン量試験結果[4), 5)]

配合種類	アジテータ車台数	測定場所	セメントに由来するコンクリート中の Cl$^-$量 (kg/m^3)	簡易法による Cl$^-$量測定結果 (kg/m^3)	残存比 α	試験日
土木配合	1	出荷	0.166	0.101	0.392	2004.7
		荷卸	0.166	0.114	0.313	2004.7
	3	出荷	0.166	0.129	0.223	2004.7
		荷卸	0.166	0.109	0.343	2004.7
	6	出荷	0.166	0.127	0.235	2004.7
		荷卸	0.166	0.136	0.181	2004.7
建築調合	2	出荷	0.147	0.105	0.286	2005.2
		荷卸	0.147	0.081	0.449	2005.2
		筒先	0.147	0.093	0.367	2005.2
	4	出荷	0.147	0.098	0.333	2005.2
		荷卸	0.147	0.086	0.415	2005.2
		筒先	0.147	0.088	0.401	2005.2
	6	出荷	0.147	0.093	0.367	2005.2
		荷卸	0.147	0.093	0.367	2005.2
		筒先	0.147	0.085	0.422	2005.2

4. JIS A 5364，JIS A 5308 における塩化物量の規定と EC を用いたコンクリートへの適用

EC は JIS A 5364「プレキャストコンクリート製品（以下，製品）－材料及び製造方法の通則」（2004 年版），JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」（2003 年版）で使用出来ることになっている。JIS A 5364 の塩化物量の規定は，「コンクリートに含まれる塩化物イオン量（Cl$^-$）は，

PC 製品及び RC 製品で 0.30kg/m^3 以下及び URC（無筋）製品で 0.60kg/m^3 以下とする。」とされている。ただし，その試験方法については本文中に規定がなく，解説中に「フレッシュコンクリートから採取した練混ぜ水の塩化物イオン濃度の測定によって求めることができる【JIS A 1144（フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度試験方法）】。」との記述されている。

一方，JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」(2003 年版）では，本文中に試験方法として「レディーミクストコンクリートの塩化物含有量はフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度と配合設計に用いた単位水量の積として求める。フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度の試験は JIS A 1144 による。ただし塩化物イオン濃度の試験は，購入者の承認を得て，精度が確認された塩分含有量測定器によることができる。」と規定されている。

このように JIS A 5364 と JIS A 5308 では，塩化物量管理方法についての扱いに差異があり，JIS A 5364 では，その解説中に JIS A 5308 に準じた方法が記述されているが，拘束力のある本文中には塩化物量の規格値の記述があるのみである。そのため製品の塩化物量管理については，合理的な方法を設定しそれに基づいた安全側の運用が可能であれば，解説中に記載の方法（JIS A 1144 に準じた方法）によらない場合でも，JIS A 5364 に準拠した管理は可能であると解釈できる。

EC は現在のところその製造の拠点は関東地区（千葉・東京）のみであり，定常的に使用されているのは製品工場である。これら関東地区の製品工場では細骨材として海砂は使用されておらず，化学混和剤から導入される塩化物イオンも微量であり，コンクリートの塩化物イオン量はそのほとんどが EC に由来することから，コンクリート中に導入される塩化物イオン量の変動についても，使用される EC 中の塩化物イオン量の変動によるものと考えられる。

EC 中の塩化物イオン量は，OPC と同様に月別試験成績表において当該月の最大値が提示されている。そのため，使用者は EC の試験成績表をもとに，コンクリートの塩化物イオン量が 0.30kg/m^3 を超えないような配合を設定することが可能であり，また EC を含めた各使用材料の試験成績表を基に，使用する各材料の塩化物イオン量の合算値により，製造するコンクリートの塩化物イオン量が 0.30kg/m^3 を超えていないことを容易に確認・検査できる。

一方，EC をレディーミクストコンクリートに用いる場合は，前述のように JIS A 5308 の本文中に試験方法が規定されている。したがって，使用する各材料の塩化物イオン量の合算により，コンクリートの塩化物イオン量を管理する方法を，JIS A 5308 に基づいて製造・出荷されるレディーミクストコンクリートに適用することはできない。よって，現行 JIS A 5308 の規定の中で，現実に即し合理的な管理・検査方法について検討が必要である。

5. 塩化物イオン量の管理・検査方法の提案

EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量の管理方法として，以下の方法を提案する。

5.1 プレキャストコンクリート製品の場合

【提案方法】各材料から持ち込まれる塩化物イオン量の値を合算した値が，0.30kg/m^3 以下であることを確認する。なお各材料の塩化物イオン量は，セメントについては試験成績表の最大値を，骨材，練混ぜ水および混和剤については最新の試験成績表の値とする。

この提案は，コンクリート中のアルカリ量を規制する抑制対策と同様な考え方である。つまり各材料から持ち込まれる塩化物イオン量の合算値が，コンクリートの塩化物イオン量である 0.30kg/m^3 であることを確認する方法である。これは，前述に示すように製品では合理的管理が可能であれば必ずしもフレッシュ時での測定は必要ないことに基づくものである。なお，本方法提案の理由としては，以下のとおりである。

(1) 使用する各材料の塩化物イオン量の実績を基に妥当な配合を定めているため，検査時にお

いては自動的にコンクリートの塩化物イオン量 0.30kg/m^3 以下の条件を満足する。

（2）EC については，焼成工程，製品工程，出荷工程の品質管理によって塩化物イオン量が大きく変動することはなく，異常値の製品が出荷されないことが担保されている。

（3）EC の主要な需要先となる関東地方における製品工場では使用されるその他の材料についても，海砂など塩化物イオン量の多い材料はほとんど使われておらず，セメント以外の材料に起因する塩化物イオン量の変動はほとんどない。

（4）製品工場は製造工程が一貫して管理されており，使用材料中の塩化物イオン量によって管理すればコンクリートの塩化物イオン量が計算から求まった塩化物イオンを超えることはほとんどない。

具体的な方法としては式(2)によるものとする。

$$Cl_T \leqq 0.30\text{kg/m}^3 \qquad (2)$$

ただし，$Cl_T = Cl_C + Cl_S + Cl_M + Cl_W$

Cl_T：コンクリート中の塩化物イオン量の総和

Cl_C：コンクリート中のセメントに含まれる塩化物イオン量＝単位セメント量×セメント中の塩化物イオン量

Cl_S：コンクリート中の骨材に含まれる全塩化物イオン量＝単位細骨材量×細骨材中の塩化物イオン量

Cl_M：コンクリート中の混和剤に含まれる全塩化物イオン量＝単位混和剤量×混和剤中の塩化物イオン量

Cl_W：コンクリート中の水に含まれる全塩化物イオン量＝単位水量×練混ぜ水中の塩化物イオン量

また，各材料の管理値の設定（案）を下記に，各材料および EC を用いたコンクリートの検査頻度（案）を**表－2** に提案する。

【各材料の管理値の設定(案)】

（1）セメント：セメントについては，試験成績表に記載されている塩化物イオン量の最大値を使用する。

（2）細骨材：細骨材については，最新の試験成績表における塩化物イオン量の値とする。

（3）練混ぜ水：練混ぜ水については，最新の試験成績表における塩化物イオン量の値とする。ただし上水道水を利用する場合は，水道局の公示データに基づき設定する。

（4）混和剤：混和剤については，最新の試験成績表における塩化物イオン量の値とする。

表－2　各材料および EC を用いたコンクリートの検査頻度（案）

材料およびコンクリート	検査方式	検査ロット	試験方法
セメント	生産者が発行する試験成績表により確認する。	1 回/1 ヶ月以上	JIS R 5202
細骨材	抜取	1 回/12 ヶ月以上又は産地の変更都度	JIS A 5002 5.5
水	抜取	1 回/12 ヶ月以上	JIS A 5308 附属書 3
混和剤	生産者が発行する試験成績表により確認する。	1 回/3 ヶ月以上	JIS A 6204
コンクリート	各材料の塩化物イオン量の合算による確認	1 回/1 ヶ月以上又はセメント以外の使用材料が変わった時	計算による確認

＊）セメント以外の材料の検査ロットは JIS A 5308 個別審査事項に準拠した

5.2 レディーミクストコンクリートの場合

【提案方法】利用技術マニュアル [3] どおり，残存比 α を考慮した算定式により塩化物イオン量を管理する。なお，残存比 α については試験成績表に記載することとする。評価を安全側に判定するために，EC の塩化物イオン量はその当該月の試験成績表に記載されている最大値を，また残存比 α についてもその最大値を用いることとする。なお，残存比についてはセメントペースト管理とする。

具体的な管理方法としては前述の式(1)と同様に次によるものとする。

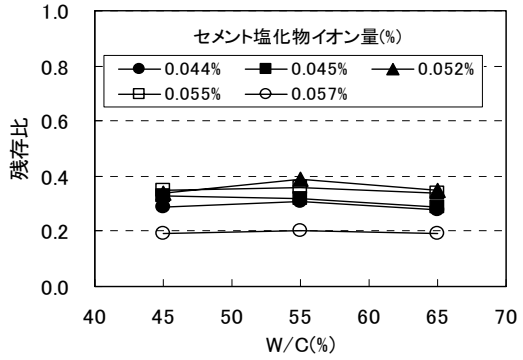
$$A = B + \alpha \times C \times D/100 \qquad (1)$$

ここで，A：EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量（kg/m^3），B：フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン量の測定値（kg/m^3），C：単位セメント量（kg/m^3），D：EC の塩化物イオン量（%），α：EC 中に含まれる全塩化物イオン量のうちのフレッシュコンクリート中の水に溶け出さずにセメント中に残存している塩化物イオン量の比率（残存比）

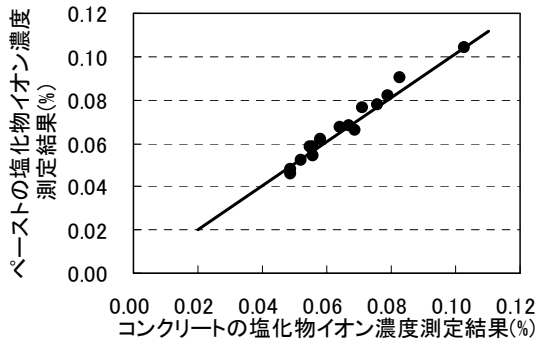
（1）残存比 α の管理について

残存比 α のセメントペースト管理にあたり，

セメントの塩化物イオン量を 5 水準（0.044～0.057%間の 5 水準），W/C を 3 水準(45, 55, 65%)変化させ，W/C の残存比の関係（コンクリート試験）およびセメントペーストとコンクリートの塩化物イオン濃度の関係について検討を行った。コンクリートの配合は単位水量：158kg/m^3，スランプ 8cm，セメントペーストの W/C，使用したセメントはコンクリート試験と同様とした。塩化物イオンの試験は JIS A 1144（フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度試験方法）に準拠した。**図－3** に W/C と残存比の関係を，**図－4** にコンクリートとセメントペーストの塩化物イオン濃度の関係を示す。



図－3　W/C と残存比の関係（コンクリート）



図－4　コンクリートとセメントペーストの塩化物イオン濃度測定結果の関係

図－3 より残存比は W/C の影響は少なくセメントロットの影響を受ける傾向が見受けられ[2)]，変数として捉えるべきものと考えられる。また，**図－4** よりコンクリート中の水とセメントペースト中の水での塩化物イオン濃度が同等であることが判明した。検討結果から，残存比は変数として設定することが，また残存比はセメントペーストで十分に管理できると考えられる。

表－3 に今回提案する塩化物イオン量管理方法をまとめた。

表－3　塩化物イオン量管理方法

種類	管理方法
プレキャストコンクリート製品	各材料の塩化物イオン量の合算 $Cl_T \leqq 0.30kg/m^3$ ただし，$Cl_T = Cl_C + Cl_S + Cl_M + Cl_W$
レディーミクストコンクリート	残存比を考慮した計算式による管理 $A = B + \alpha \times C \times D/100$ α：残存比（変数）

6. まとめ

EC を用いたコンクリートの塩化物イオン量の管理・検査法について検討を行った。その結果，以下実態に即した方法を提案する。

（1）プレキャストコンクリート製品では，各材料から持ち込まれる塩化物イオン量の値を合算した値が，0.30kg/m^3 以下であることを確認する。

（2）レディーミクストコンクリートでは，残存比を考慮した算定式により塩化物イオン量を管理する。なお，残存比については従来の固定値とせず，変数として取り扱うこととする。

参考文献

1) 日本規格協会：JIS R 5214「エコセメント」，2002.7
2) 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
3) 独立行政法人土木研究所：エコセメントコンクリート利用技術マニュアル，技報堂，2003.3
4) 栩木隆ほか：エコセメントコンクリートによるセメント製造施設の施工，土木学会全国大会第 60 回年次学術講演会，pp795-796, 2005.9
5) 長塩靖祐ほか：エコセメントコンクリートによるセメント製造施設の施工（その 2.エコセメントコンクリートによる施工結果），建築学会学術講演梗概集，pp91-92，2005.9
6) 千葉県企業庁工業用水部，水質の概要，2002
7) 横山滋ほか：都市ごみ焼却灰を主原料としたセメントクリンカーに及ぼす塩素並びにリンの影響とセメントの物性の研究，セメント・コンクリート，No.646，pp.44-50，2000.12