論文　エコセメントを用いたコンクリートの遮塩性に関する検討

湯浅　昇[*1]・笠井　芳夫[*2]・松井　勇[*3]・高橋　英孝[*4]

要旨：本研究は，エコセメントを用いたコンクリートの塩分浸透性を提案促進試験と沖縄・辺野喜，北海道・泊における暴露試験によって検討したものである。その結果，提案促進試験及び暴露試験の結果とも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し，塩化物イオンの見掛けの拡散係数が大きいことがわかった。また，暴露試験については，セメントの種類ごとに，乾燥開始材齢による有意差は認められたが，普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは乾燥開始材齢が早い程，見掛けの拡散係数が大きいのに対し，エコセメントを用いたコンクリートではその逆であった。

キーワード：塩害，塩化物イオン浸透，エコセメント，拡散係数，促進試験，暴露試験

1. はじめに

近年，資源循環型社会の実現を目的とし，様々な分野で研究が進められている。セメント業界では，都市ゴミ焼却灰や下水汚泥などの廃棄物を主原料としたエコセメントが開発され，平成14年7月にJIS R 5214として規格化された。開発当初，エコセメントは，塩化物イオンを1%程度含むため，その用途は無筋コンクリートや地盤改良用固化材に限られてきたが，製造技術の進歩により，塩化物イオンが0.1%以下に低減が可能となり，普通ポルトランドセメントに似た性質を持つに至っている。

今後，このような環境負荷低減型材料の使用を広めるためにも基礎物性をはじめ様々な施工状況を想定した研究を進める必要がある。

本報告は，既往の研究１),2)に関連して，エコセメント及び普通ポルトランドセメントを用いた2種類のコンクリート(以下，それぞれEC-C，OPC-Cと称す)について，乾燥開始材齢(1, 3, 7及び28日)の異なる試験体を作製し，促進塩分浸透試験及び沖縄・辺野喜海岸，北海道・泊海岸への暴露試験に供して，各試験体の遮塩性を比較検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体作製

エコセメント（密度3.18g/cm^3），普通ポルトランドセメント（密度3.16 g/cm^3），大井川産川砂（表乾密度2.62 g/cm^3），大井川産川砂利（表乾密度2.66 g/cm^3）及び化学混和剤を使用し，**表-1**に示す調合表に基づき，コンクリートを練り混ぜた。スランプ及び空気量は，**表-1**に併記した。**図-1**は，コンクリートの強度増進性を示している。試験体の形状は，100×100×200（mm）の角柱供試体とした。

打設後，温度20℃，相対湿度60%のほぼ無風の恒温恒湿室内に静置し，材齢1日，3日，7日及び材齢28日におい

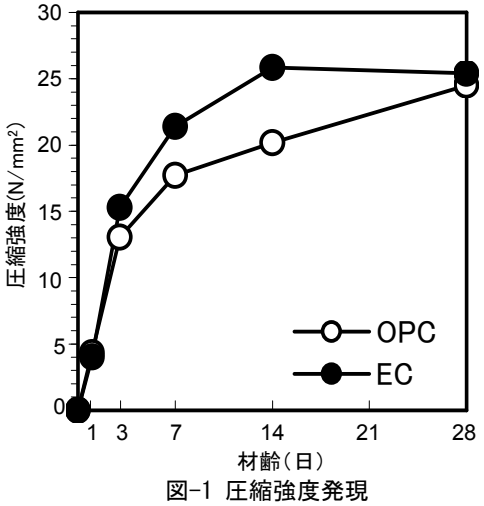


図-1 圧縮強度発現

表-1　コンクリートの調合とスランプ及び空気量の実測値

コンクリートの種類	W/C	単位水量	絶対容積（l/m^3）			質量（kg/m^3）			混和剤（g/m^3）		スランプ	空気量
	(%)	(kg/m^3)	セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	空気量調整剤	(cm)	(%)
エココンクリート	60	185	97	319	353	308	836	939	770	6218	21.5	6.2
普通コンクリート	60	185	97	319	353	308	386	939	770	6218	21.5	4.8

*1　日本大学　生産工学部建築工学科准教授　博士(工学)　（正会員）
*2　日本大学名誉教授　工学博士　（正会員）
*3　日本大学　生産工学部建築工学科教授　工学博士　（正会員）
*4　日本大学大学院　生産工学研究科建築工学専攻　大学院生　（正会員）

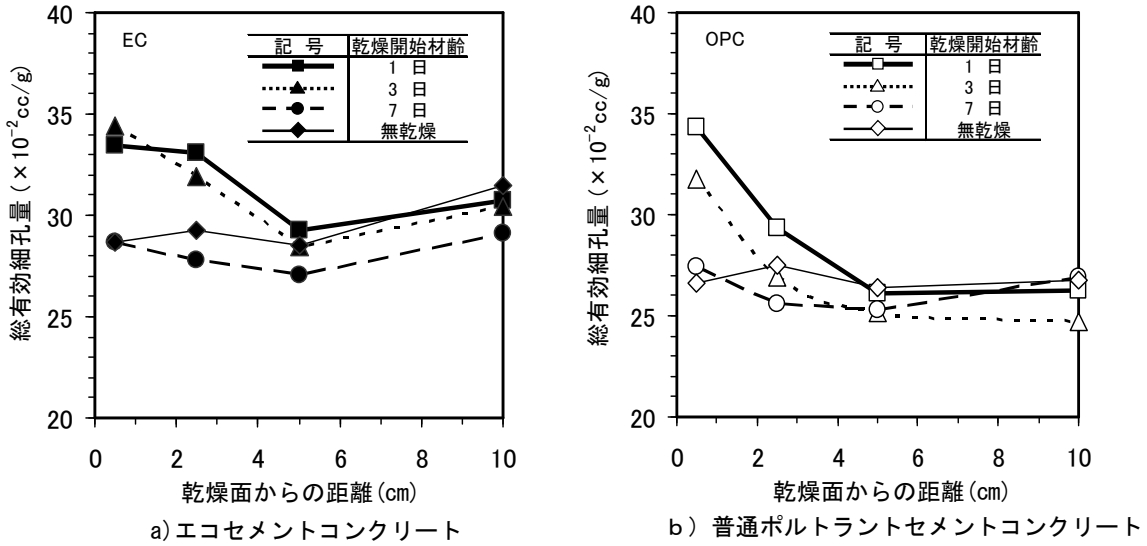


図-2　総有効細孔量分布　（材齢28日）

て，試験体の側面（10×10cm）2面を開放し，乾燥させた。他の面は，脱型直後より，ウレタン樹脂等で密封した。**図-2**は，材齢28日における総有効細孔量分布を示したものである。

2.2 促進塩分浸透試験

促進塩分浸透試験（提案促進試験）は，文献4)の大城・山田らの方法を参考に，試験条件を**表-2**の通りとした。促進試験は材齢14ヵ月目に開始し，20サイクル，40サイクル時に試験体を回収した。

2.3 暴露試験

塩害環境として比較的厳しい沖縄・辺野喜，北海道・泊の2カ所の海岸（**図-3**，**表-2**）に，材齢2ヶ月で暴露し，1年を経過した試験体を回収した。

2.4 塩化物イオン量の測定

暴露面から1cm間隔で切断し，JIS A 1154に規定される電位差滴定法により，全塩化物イオン量（以下，全塩分量と称す）を測定した。

表-2 試験概要

促進試験		1サイクルの条件 Ⅰ．塩水浸漬過程3日（72時間） NaCl　3%，50℃（撹拌機能有） Ⅱ．乾燥過程4日(96時間) 50℃（熱風、脱気機能有）
暴露試験	北海道・泊	北海道岩内郡共和町字梨野舞の海岸線から40mの位置 （緯度43度1分，経度140度36分） 平成18年7月18日より暴露
	沖縄・辺野喜	沖縄県国頭郡国村字辺野喜の海岸線から約40mの位置 （緯度26度47分，経度128度15分） 平成18年7月25日より暴露

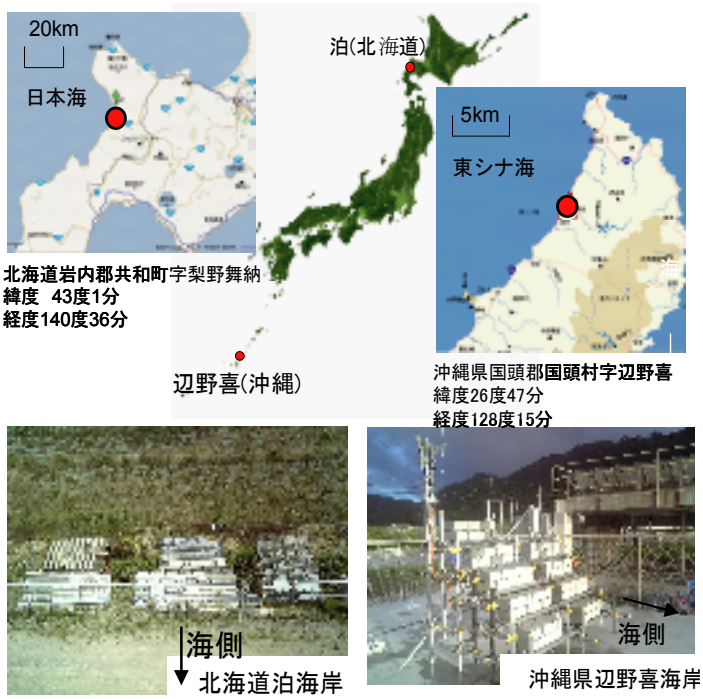


図-3 暴露地概要

3．結果及び考察

3.1 促進塩分浸透試験

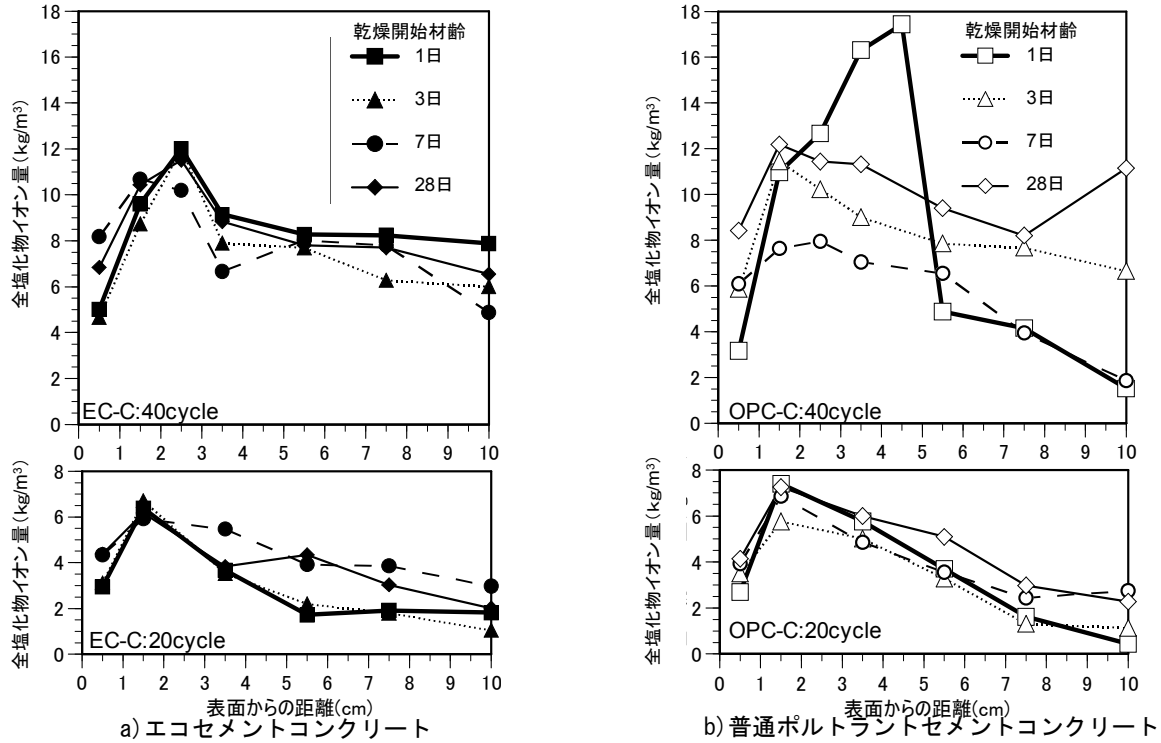
図-4は，EC-C及びOPC-Cを用いたコンクリートの促進塩分浸透試験結果(20サイクル，40サイクル)を示している。材齢1年を経過して試験を行ったため，中性化により表層の塩化物イオン量はどれも低かった。**表-3**は，これをもとに式（1）により算出した見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン量である。なお，算出にあたり表層部分の値は除外している。

$$C(x,t)-C_i=C_{0s}\left\{1-erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a\cdot t}}\right)\right\} \qquad (1)$$

ここに、

X　：表面からの距離(cm)

t　：コア採取までのサイクル(cycle)



a)エコセメントコンクリート　　b)普通ポルトラントセメントコンクリート

図-4　塩化物イオン分布（促進試験）

表-3　促進試験における見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン量

	促進サイクル	エコセメントコンクリート				普通ポルトラントセメントコンクリート			
		乾燥開始材齢1日	乾燥開始材齢3日	乾燥開始材齢7日	乾燥開始材齢28日	乾燥開始材齢1日	乾燥開始材齢3日	乾燥開始材齢7日	乾燥開始材齢28日
見掛けの拡散係数 (cm^2/cycle)	促進20cycle	0.575	0.777	3.84	2.30	0.671	0.829	1.16	1.73
	促進40cycle	3.07	1.56	2.40	2.36	0.569	2.68	0.671	2.88
表面塩化物イオン量(kg/m^3)	促進20cycle	12.45	8.56	6.50	7.10	9.65	7.24	8.36	8.56
	促進40cycle	13.56	14.35	11.2	13.6	11.7	12.4	11.0	13.1

$C(x,t)$　：距離x、時間tにおける塩化物イオン量(kg/m^3)

C_{0s}　：表面の塩化物イオン量(kg/m^3)

C_i　：初期（内在）塩化物イオン量(kg/m^3)

D_a　：見掛けの拡散係数（cm^2/ year)

Erf　：誤差関数

図-5は，促進20サイクル及び促進40サイクルにおいて，乾燥材齢ごとに，EC-C及び OPC-Cの見掛けの拡散係数の関係を示したものである。EC-Cは，OPC-Cに比し概ね見掛けの拡散係数が大きいことがわかる。ここで，使用したセメントの種類及び乾燥開始材齢の見掛けの拡散係数に及ぼす影響を考察するため，これらを要因とする二元配置の分散分析を行った結果,危険率1%で使用したセメントの種類による有意差が認められた。一方，乾燥開始材齢による有意差は危険率5%でも認められなかった。

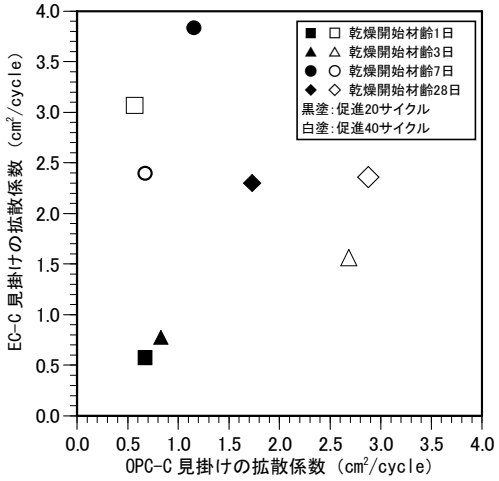
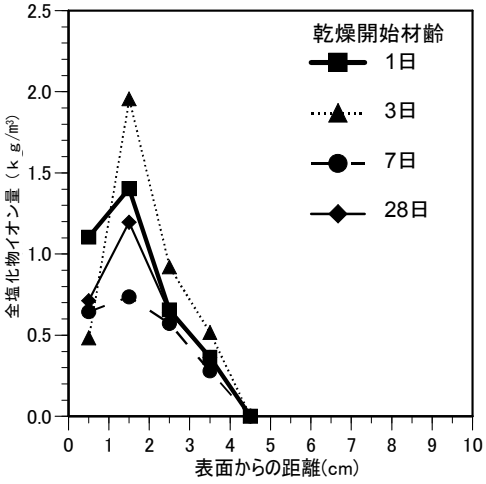


図-5 促進試験におけるEC-CとOPC-Cの見掛けの拡散係数の相違

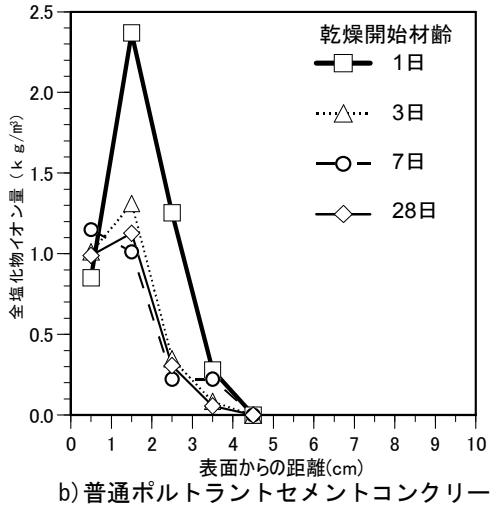
3.2 自然環境暴露

図-6，**図-7**は，それぞれ沖縄・辺野喜，北海道・泊におけるEC-C及びOPC-Cの塩化物イオン量分布を示している。**表-4**は，これをもとに算出した見掛けの拡散係数である。

図-8は，沖縄・辺野喜，北海道・泊の暴露において，乾燥材齢ごとに，EC-C及びOPC-Cの見掛けの拡散係数の相違を示したものである。促進試験での結果以上に，EC-Cは，OPC-Cに比し見掛けの拡散係数が大きいことがわかる。ここで，促進試験の結果同様，使用したセメントの種類及び乾燥開始材齢の見掛けの拡散係数に及ぼす

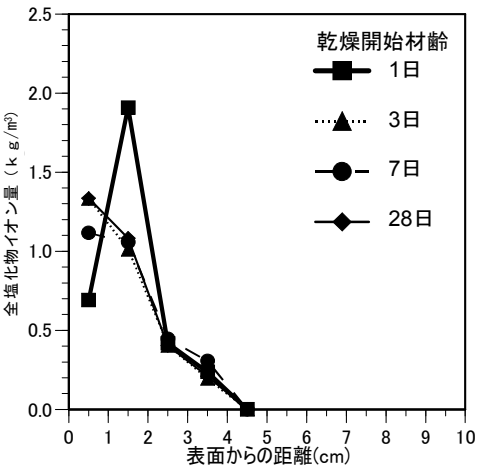


a)エコセメントコンクリート

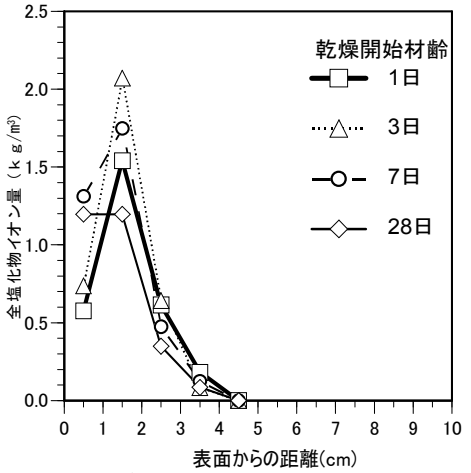


b)普通ポルトラントセメントコンクリート

図-6　塩化物イオン分布（沖縄暴露）



a)エコセメントコンクリート



b)普通ポルトラントセメントコンクリート

図-7　塩化物イオン分布（北海道暴露）

表-4　暴露試験における見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン量

	暴露地	エコセメントコンクリート				普通ポルトラントセメントコンクリート			
		乾燥開始材齢1日	乾燥開始材齢3日	乾燥開始材齢7日	乾燥開始材齢28日	乾燥開始材齢1日	乾燥開始材齢3日	乾燥開始材齢7日	乾燥開始材齢28日
見掛けの拡散係数 (cm^2/day)	沖縄・辺野喜	0.00548	0.00658	0.00132	0.00822	0.00438	0.00282	0.00219	0.00205
	北海道・泊	0.00274	0.00630	0.00959	0.00715	0.00422	0.00301	0.00271	0.00285
表面塩化物イオン量(kg/m^3)	沖縄・辺野喜	6.80	1.64	1.30	1.60	3.85	6.50	6.00	3.90
	北海道・泊	3.10	3.80	1.15	2.19	5.80	4.30	4.10	4.80

影響を考察するため，これらを要因とする二元配置の分散分析を行った結果,危険率1%で使用したセメントの種類による有意差が認められ，また，使用したセメントの種類ごとに,危険率5%で乾燥開始材齢による有意差が認められた。しかしながら，この乾燥開始材齢による有意差は使用したセントにより意味が異なっている。すなわち，**図-9**で明らかのように，OPC-Cでは，乾燥開始材齢が早い程，見掛けの拡散係数が大きいのに対し，EC-Cではその逆である。促進試験では有意差がないことも含めて，これらの相違を更に分析・検討する必要がある。

また，**図-10**は，使用したセメント別に，同一乾燥開始材齢，同一深さごとに，暴露地による相違を示したも

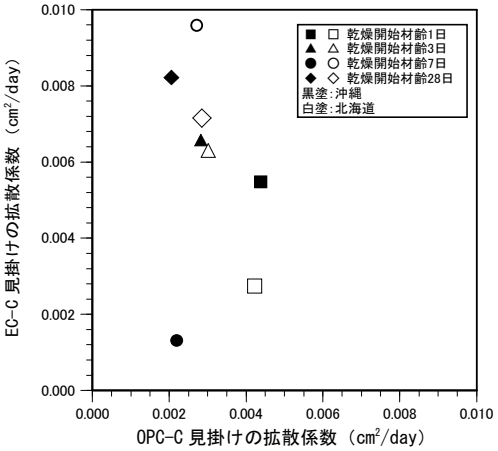


図-8 暴露試験におけるEC-CとOPC-Cの見掛けの拡散係数の相違

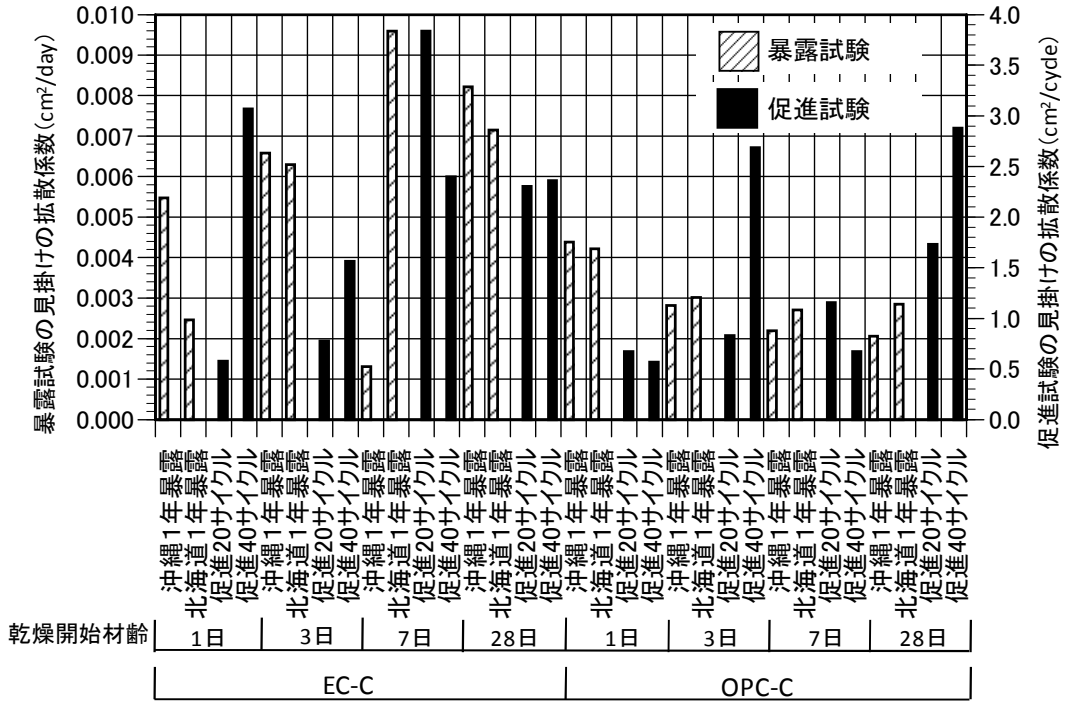
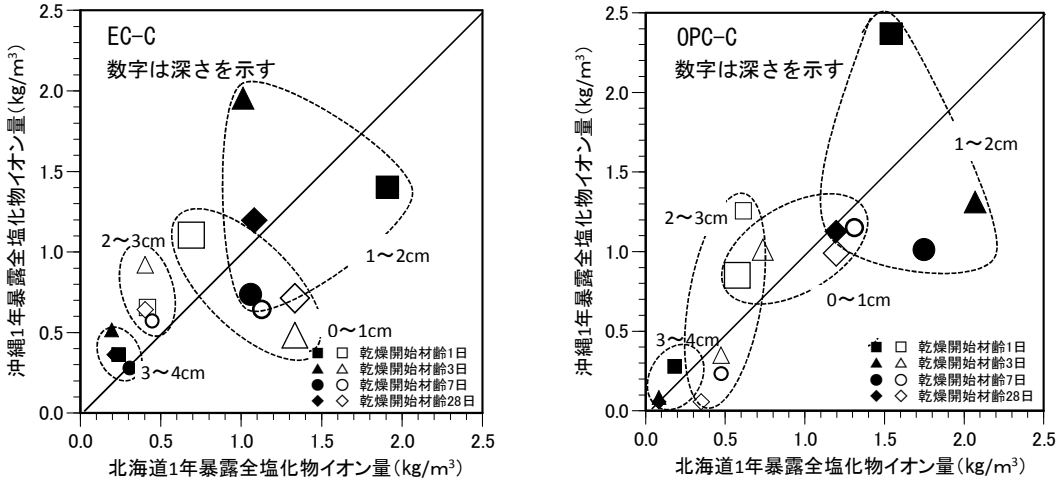


図-9　見掛けの拡散係数の相違



a)エコセメントコンクリート　　b)普通ポルトラントセメントコンクリート

図-10　塩化物イオン量の暴露地による違い

のである。暴露地による違いは小さく，見掛けの拡散係数を対象に,分散分析を行っても危険率5%でも暴露地による有意差は認められなく，両暴露地の塩分浸透環境は同程度であることがわかった。

3.3 提案促進試験結果と自然環境暴露試験結果の関係

図-11, **図-12**は，それぞれEC-C, OPC-Cの促進試験（20サイクル時）結果と2ヶ所の自然環境暴露試験（1年時）結果の同一条件の試験体の同一深さごとの関係を示したものである。

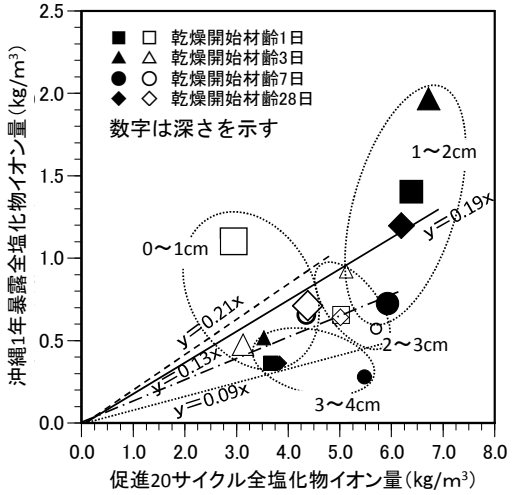
提案促進試験では，自然環境暴露試験に比し，表層における浸透量の対応を基準とすると，内部ほど浸透量が多くなることがわかる。ただし，その比率は，北海道・泊での暴露によるものと沖縄・辺野喜での暴露によるものとでは，似通った値となった。**表-5**は，それぞれの暴露試験に対する提案促進試験の塩化物イオン量の比を示したものである。

4. まとめ

エコセメントを用いたコンクリートの遮塩性について検討した結果，下記のことが明らかになった。

(1)促進塩分試験及び暴露試験の結果ともEC-Cは，OPC-Cに比し，見掛けの拡散係数が大きいことがわかった。

(2)暴露試験については，セメントの種類ごとに，乾燥燥始材齢による有意差は認められたが，意味は相違し，



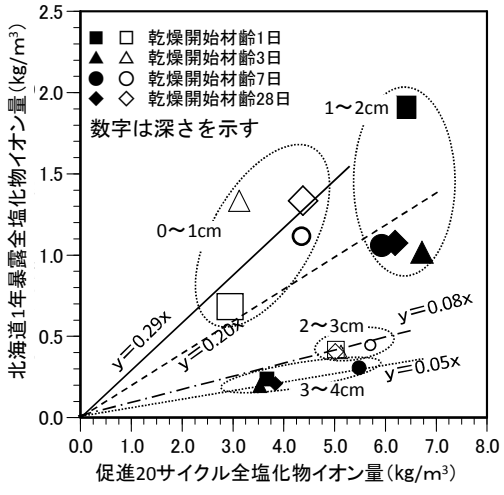
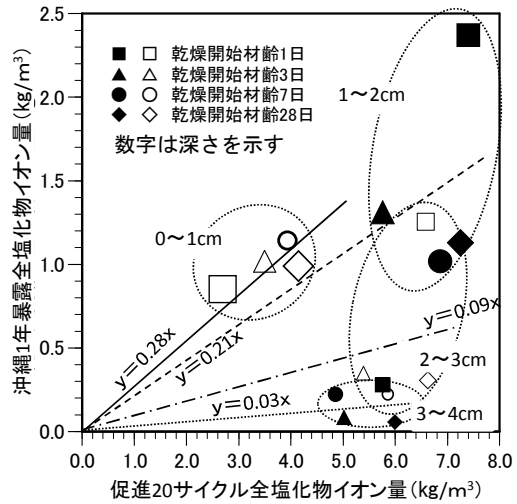


図-11 促進試験(20サイクル)と自然暴露(1年)の関係（エコセメントコンクリート）



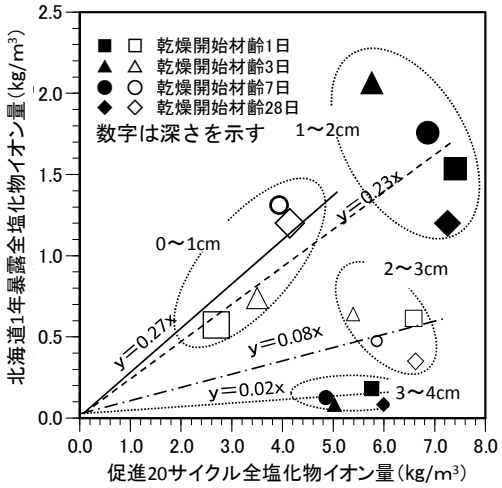


図-12 促進試験(20サイクル)と自然暴露(1年)の関係（普通ポルトラントセメントコンクリート）

OPC-Cでは乾燥開始材齢が早い程，見掛けの拡散係数が大きいのに対し，EC-Cではその逆であった。また，促進試験ではどちらのセメントを使用した場合であっても乾燥開始材齢には有意差がなかった。

また，付随的に下記のことがわかった。

(3)現在，暴露試験を行っている沖縄・辺野喜暴露場と北海道・泊暴露場の塩分浸透環境は同程度であった。

(4)提案促進試験結果と自然環境暴露試験結果の関係を示すことができ，表層における浸透量の対応を基準とすると，提案促進試験では内部ほど浸透量が多くなることがわかった。

表-5 暴露試験(1年)に対する促進試験(20サイクル)の比

対暴露地	セメント種	表面からの距離（cm）			
		0～1	1～2	2～3	3～4
沖縄・辺野喜	EC-C	5.26	4.76	7.69	11.1
	OPC-C	3.57	4.76	11.1	33.3
北海道・泊	EC-C	3.44	5.00	12.5	20.0
	OPC-C	3.70	4.35	12.5	50.0

【参考文献】

1) 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築学会構造系論文集，第509号，pp.9-16，1998.7

2) 西田健治・湯浅昇・松井勇・笠井芳夫・佐々木隆:エコセメントを用いたコンクリートの含水率及び細孔構造，日本建築学会大会学術講演集（関東）A-1，pp.257-258，2006.9

3) 湯浅昇：コンクリートの塩化物イオン促進浸透試験方法の検討，第6回日本大学大学院生産工学研究科生命工学・リサーチ・センター研究発表講演会講演概要，pp.21-24，2008.10

4) ソーンウィーラ，山田義智，杉山隆文，大城武：フライアッシュを細骨材の一部として代替したコンクリートの遮塩性評価，日本建築学会構造系論文集，No.560，pp. 17-25，2002.10