

コンクリートの塩素イオン浸透性とその評価法

金沢大学 工学部 正員 川 村 満 紀
 金沢大学 工学部 正員 鳥 居 和 之
 金沢大学 工学部 学生員○浅 野 篤 郎

1. まえがき コンクリートの塩素イオンの拡散・透過性については、海洋環境下におけるコンクリート構造物の含有塩分量および鉄筋腐食状況の調査結果に基づいて、鉄筋腐食が活発になるコンクリート中の塩素イオン量の限界値が明らかにされており、その結果を耐久設計および寿命予測に結びつける検討も始まっている。急速塩素イオン透過性試験 (AASHTO T-277) は6時間の短時間でコンクリートの塩素イオン透過性を簡単かつ迅速に評価できるのが特徴である。しかし、本試験における測定条件は、長期間に渡って徐々に進行する海洋環境下における塩素イオンの拡散・浸透現象とは相違することも予想されるので、本試験より得られた測定値と海洋環境下での実際の塩分の浸透状況との関係について明確にしておく必要がある。本研究では、各種配合のコンクリートを対象として、急速塩素イオン透過性試験の結果と塩分濃度の化学分析の結果より求めた拡散係数との関係について2、3の検討を行なった。

2. 実験概要 普通セメントコンクリートは、単位セメント量 300 kg/m^3 で、水-セメント比が45%、55%および65%である。混和材を使用したコンクリートは、単位結合材量 300 kg/m^3 で、水-結合材比が55%であり、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームの重量置換率はそれぞれ30%、50%および10%である。養生条件は水中養生 (28日材令まで温度 20°C の水中に浸漬、略号W) および気中養生 (水中養生7日後、温度 20°C 、湿度60%の屋内に28日材令まで放置、略号A) の2種類である。各種コンクリートの配合および強度を表-1に示す。急速塩素イオン透過性試験は、塩水への浸漬開始時 (28日材令) において円柱供試体の中央部より切り出された直径 $10 \text{ cm} \times$ 厚さ 5 cm の円盤状のものを用いて実施した。一方、実験室内での塩水 (3% NaCl 溶液) への浸漬・乾燥の繰り返しおよび石川県美川海岸での海岸暴露を同時に実施した。約8ヵ月間の暴露後、供試体より直径 5 cm のコンクリートコアを採取し、

表-1 各種コンクリートの配合および圧縮強度

混和材の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)		スラブ (c m)	空気量 (%)	圧縮強度 (28日材令) (kgf/cm^2)
			水	セメント			
普通セメント	55	38	165	300	8.5	5.5	267
フライアッシュ30%	55	38	165	210	15.5	5.5	204
スラグ50%	55	38	165	150	12.5	5.2	246
シリカフェーム10%	55	38	165	270	2.0	5.6	285

表-2 塩素イオン拡散透過性の評価法

表面からの深さ方向での塩分濃度を全塩分の簡易分析法 (JCI) に従って電位差滴定法により測定した。塩分の濃度分布はフィツクの第2法則に近似できるとして、表面塩分濃度 (C。) および見掛けの拡散係数 (cm^2/day) を計算した。塩素イオンの拡散・透過性の評価法の特徴を表-2に示す。

	評価基準	測定精度	試験体の厚さ	測定期間	備考
塩分濃度分析試験	拡散係数 (cm^2/sec)	やや近似的	任意の厚さのスライス片	長期間	コンクリートに適用可
拡散セル試験	拡散係数 (cm^2/sec)	高い精度が可能	厚さ 1 cm 程度の薄いもの	長期間	セメントペーストに限定
急速透過性試験 (AASHTO T-277)	電気量 (coulombs)	近似的	厚さ 5 cm の円盤状のもの	簡単かつ迅速 (6時間)	コンクリートに適用可

表-3 各種コンクリートの塩素イオン透過量

3. 実験結果および考察 3-1. 急速塩素イオン透過性試験

各種コンクリートの塩素イオン透過量 (クーロン) を表-3に示す。普通セメントコンクリートでは、水-セメント比の増加に比例して塩素イオン透過量が増加する。一方、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、同一の水-セメント比の普通セメントコンクリートよりも塩素イオン透過量がいずれも小さくなり、シリカフェームを使用したコンクリートは、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末のものよりもさらに塩素イオン透過量が低下する。また、養生条件の塩素イオン透過性に及ぼす影響は、普通セメントコンクリートよりもフライアッシュ、

配合条件	養生条件	Cl-イオン透過量 (クーロン)	配合条件	養生条件	Cl-イオン透過量 (クーロン)
P L 45 %	A28	2640 (M)	F A 30 %	A28	5560 (H)
	W28	2990 (M)		W28	3160 (M)
P L 55 %	A28	5230 (H)	B S 50 %	A28	3850 (M)
	W28	5270 (H)		W28	2760 (M)
P L 65 %	A28	7790 (H)	S F 10 %	A28	1340 (L)
	W28	6210 (H)		W28	920 (VL)

(): AASHTO T-277における評価
 (H: High, M: Moderate, L: Low, VL: Very Low)

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおいてより顕著に認められる。

3-2. 塩素イオン濃度の分布状況 海岸暴露供試体の塩分濃度の分布状況を図-1および図-2に示す。本暴露試験場は、夏季の期間は波しぶきが直接かかることは少ないが、冬季の期間(11月~3月)には多くの供試体は海水のしぶきを受ける状態にあり、JCI-SC7の環境区分Aに相当する厳しい環境条件である。図-1に示すように、普通セメントコンクリート中の塩分は、表面から4cm程度の深さまで徐々に減少しており、水-セメント比55%および65%のものは一冬季間の暴露でも比較的多くの塩分が浸透しているのが認められる。一方、図-2に示すように、混和材を使用したコンクリートでは、表面部(0~2cm)の塩分濃度は同一水-セメント比の普通セメントコンクリートよりも大きい、それより内部では塩分の浸透がほぼ完全に抑制されている。このような傾向は、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームのいずれにおいても同様に確認できる。混和材を使用したコンクリートにおける塩分の内部への浸透の抑制は、高炉スラグコンクリートにおいてこれまで指摘されてきた塩素イオンの固定化現象だけでなく、混和材を使用したコンクリートにおける細孔構造の不連続性とも関連づけて解明すべきであると考えられる。屋内での浸漬・乾燥繰り返し供試体の塩分濃度の分布状況を図-3および図-4に示す。普通セメントコンクリートおよび混和材を使用したコンクリートのいずれの場合も、塩分濃度の分布状況は海洋暴露の場合と類似しているが、表面部の塩分濃度は浸漬・乾燥繰り返し供試体の方が海洋暴露供試体よりもかなり大きくなり、またより内部にまで塩分が浸透している。

3-3. 塩素イオン透過量と拡散係数の関係 本実験で得られたコンクリートの拡散係数は、 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{day}$ の範囲にあり、コンクリートの透過性に影響を及ぼす混和材の種類、水-結合材比および養生条件により大きく相違する。急速塩素イオン透過性試験と塩分濃度の分布の測定とでは、測定の対象とするコンクリートの範囲が相違するので、両者の間には必ずしも明確な関係が存在するとは限らないようである。しかし、図-5および図-6に示すように、両者にはある程度の比例関係が存在し、急速塩素イオン透過性試験の結果より拡散係数を推定することも可能である。

4. まとめ 今後、急速塩素イオン透過性試験および拡散係数のデータを蓄積していくことによって、各種配合のコンクリートに対しての塩素イオン透過性の評価基準が確立できれば、本試験装置の迅速評価法としての有効性がさらに増大するものと考えられる。

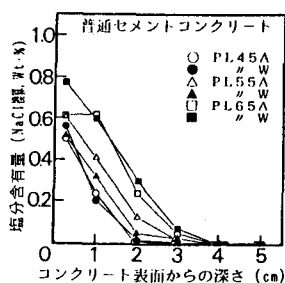


図-1 海岸暴露供試体の塩分濃度の分布状況(普通セメントコンクリート)

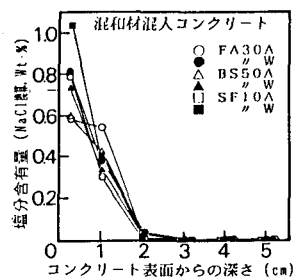


図-2 海岸暴露供試体の塩分濃度の分布状況(混和材混入コンクリート)

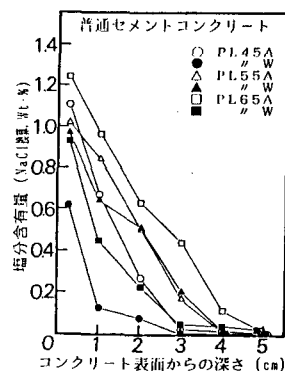


図-3 屋内塩水繰り返し供試体の塩分濃度の分布状況(普通セメントコンクリート)

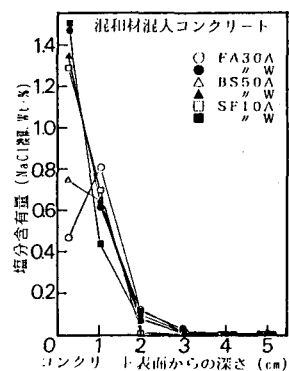


図-4 屋内塩水繰り返し供試体の塩分濃度の分布状況(混和材混入コンクリート)

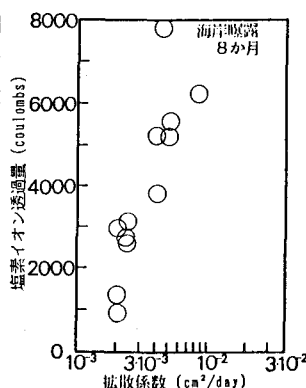


図-5 塩素イオン透過量と拡散係数(海洋暴露供試体)

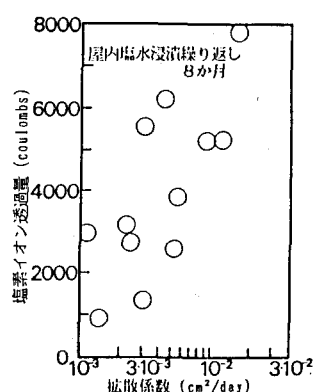


図-6 塩素イオン透過量と拡散係数(屋内塩水繰り返し供試体)