

# 急速試験法 (AASHTO T 277-83) による 各種コンクリートの塩化物イオン透過性の評価

笹谷輝彦<sup>1</sup>・鳥居和之<sup>2</sup>・川村満紀<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株) 国土開発センター 交通技術部 (〒924石川県松任市八東穂三丁目7番地)

<sup>2</sup>正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920石川県金沢市小立野二丁目40番20号)

<sup>3</sup>フェロー 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920石川県金沢市小立野二丁目40番20号)

本研究では、コンクリートの塩化物イオン透過性に及ぼす配合、養生および環境の影響を明らかにするために、異なる環境下に暴露したコンクリートブロックから採取したコアの塩化物イオン透過量および比抵抗値の測定を行った。その結果、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは環境条件に関わらず長期にわたり良好な塩分浸透の抑制効果が期待できること、及び水中養生が継続されたコンクリートと異なり長期間にわたり乾燥の影響を受けたコンクリートでは塩化物イオン透過量が暴露期間の経過とともに増加することが明らかになった。また、急速塩化物イオン透過性試験 (AASHTO T 277-83) における塩化物イオン透過量と塩化物イオンの浸透深さとの間には良好な関係が存在することが確認された。

*Key Words* : AASHTO T 277-83, outdoor and indoor exposure test, mineral admixtures, chloride permeability, electrical resistivity

## 1. まえがき

コンクリート中への塩化物イオンの浸透性を迅速かつ簡単に評価する方法として急速塩化物イオン透過性試験 (AASHTO T 277-83 および ASTM C 1202-91) が提案されており<sup>1), 2)</sup>、アメリカ合衆国やカナダではハイパフォーマンスコンクリート (高耐久性・高強度コンクリート) の品質管理の基準としても活用されている<sup>3)</sup>。本試験法は、比較的短時間で評価できることや、コンクリートを対象とした測定が可能であるなどの優れた点があるが、その一方で大きな電流が流れる場合は供試体の温度がかなり上昇することや電気による強制的な塩化物イオンの移動であるので実際の拡散現象とは異なること、などが問題点として指摘されている<sup>4), 5), 6)</sup>。また、急速試験により得られた塩化物イオン透過量 (クーロン) はコンクリート自身の電気抵抗性と密接に関係しており、とくに鉱物質混和材を使用した場合には普通セメントコンクリートを対象とする本試験法の

評価基準値を見直すことが必要であるとの指摘もある<sup>7), 8)</sup>。著者ら<sup>9)</sup>の実施した暴露期間1年までの結果では、鉱物質混和材の使用によりコンクリートの表層部および内部の塩化物イオン透過性を大きく低減できることを明らかにしているが、長期にわたる養生及び環境条件の影響について検討されたものは非常に少ない。急速塩化物イオン透過性試験 (AASHTO T 277-83) が、AASHTO T 259-80に規定されている90日間の塩水浸漬試験での塩分浸透深さとの関係より有効性が議論されていることについて、さらに長期の試験結果との関連性を明らかにすべきとの指摘もある<sup>10)</sup>。

本研究は各種環境下に5年間暴露したコンクリートブロックより採取したコアの塩化物イオン透過量および比抵抗値を調べることにより、急速塩化物イオン透過性試験 (AASHTO T 277-83) による各種コンクリートの塩化物イオン透過性の評価の有効性を検討したものである。

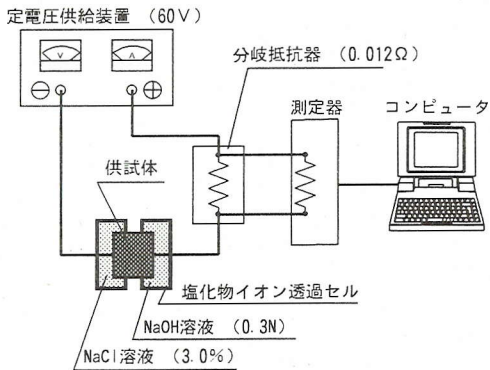


図-1 急速塩化物イオン透過性試験の電気回路図

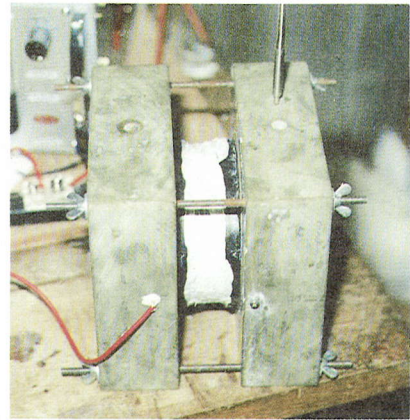


写真-1 急速塩化物イオン透過性試験の塩化物イオン透過セル

表-1 急速塩化物イオン透過性試験の評価基準(AASHTO T 277-83)<sup>1)</sup>

塩化物イオン透過量 (クーロン)	塩化物イオン透過性の 評価	該当するコンクリート
>4,000	High	水/セメント比の高い普通ポルトランドセメントコンクリート(W/C>0.6)
2,000~4,000	Moderate	通常の水/セメント比の普通ポルトランドセメントコンクリート(W/C=0.4~0.5)
1,000~2,000	Low	水/セメント比の低い普通ポルトランドセメントコンクリート(W/C<0.4)
100~1,000	Very low	ラテックス混入コンクリート ワックスビーズ混入コンクリート
<100	Negligible	ポリマー含浸コンクリート ポリマーコンクリート

表-2 塩化物イオンの拡散・透過性試験の比較

試験方法	評価基準	精度	供試体の厚さ	試験期間	コンクリートへの適用性
化学成分分析法	Dc (cm <sup>2</sup> /sec)	近似的	任意	長期間	可
濃度拡散セル法	Dc (cm <sup>2</sup> /sec)	正確	非常に薄い	長期間	不可
AASHTO T 277-83	クーロン	近似的	5cm	6時間	可

## 2. 急速塩化物イオン透過性試験の概要

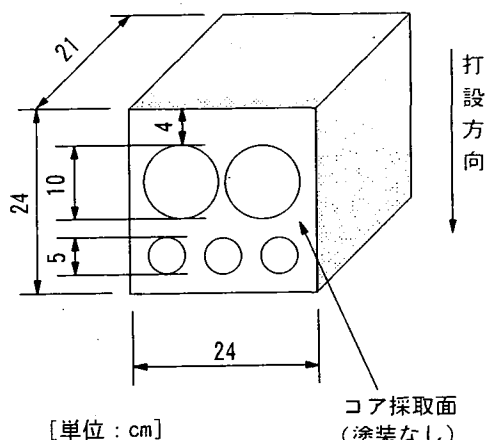
急速塩化物イオン透過性試験の電気回路図および外観を図-1および写真-1に示す。塩化物イオン透過セルの正極側セルには0.3NのNaOH溶液が、負極側セルには3%のNaCl溶液が満たされており、60Vの一定電圧下で6時間の間にコンクリート中を流れる電流量(クーロン)によりコンクリートの塩化物イオン透過性を評価するものである。AASHTOにおいて提案されている評価基準値を表-1に示す。

従来、塩化物イオンの拡散・透過性の評価法としては、塩水浸漬したコンクリートから採取したコアによる塩分濃度分布の測定が一般的であり、セメントペーストやモルタルなどの薄い断片を対象とした場合には拡散セル法により塩化物イオンの拡散係数を直接求めることも行われてきた。しかし、表-2に示すように化学成分分析法では測定結果を得るのに長い期間を要することや、濃度拡散セル法をコンクリートに対して適用する場合は、粗骨材の寸法との関係で供試体厚さを大きくする必要があり、その

表-3 コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			スランブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	混和材		
OPC45	45	36	135	300		2.0	4.5
OPC55	55	38	165	300		8.5	5.5
OPC65	65	40	195	300		18.0	5.7
FA55	55	38	165	210	90	15.5	5.5
BS55	55	38	165	150	150	12.5	5.2
SF55	55	38	165	270	30	2.0	5.6

OPC: 普通ポルトランドセメント, FA: フライアッシュ,  
BS: 高炉スラグ微粉末, SF: シリカフェーム



[単位: cm]

コア採取面  
(塗装なし)

表-4 コンクリートの養生および暴露条件

記号	初期養生条件	暴露条件
1W28	水中養生 28 日	水中養生
1D7	水中養生 7 日 + 気中養生 21 日	屋内暴露 (気中養生)
1D28	水中養生 28 日	屋内暴露 (気中養生)
OD7	水中養生 7 日 + 気中養生 21 日	屋外暴露 (金沢大学建物屋上)
OD28	水中養生 28 日	屋外暴露 (金沢大学建物屋上)

水中養生: 温度 20°C の水中

気中養生: 温度 20°C, 湿度 60% の恒温恒湿室内に放置

図-2 コンクリートブロックの  
コア採取位置

ため試験期間が長くなることなどが欠点となっている。

一方、急速塩化物イオン透過性試験 (AASHTO T 277-83) の問題点の一つは、この試験法により求めた塩化物イオン透過量 (クーロン) と塩化物イオンの拡散係数とを直接結びつけて議論できないことである。

近年、一定電圧下での塩化物イオンの移動量より拡散係数を求める方法が Andrade ら<sup>11)</sup> や Gjovrv ら<sup>12)</sup> により提案されており、急速試験による供試体中への塩分浸透状況から塩化物イオンの拡散係数の算出方法を提案している Nilsson ら<sup>13)</sup> の手法とともに、急速塩化物イオン透過性試験を改良した様々な手法が開発されている。

### 3. 実験概要

#### (1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント (略号 OPC, 比重: 3.15, ブレーン値: 3230 cm<sup>2</sup>/g) を使用した。細骨材および粗骨材は、富山県早月川産の川砂 (比重: 2.61, 吸水率: 1.3%) および富山県早月川産の砕石 (比重: 2.61, 吸水率: 0.8%, 最大寸法 25mm) である。コンクリートの配合は、単位セメント量または結合材量が 300 kg/m<sup>3</sup>, 水セメント比が 45%, 55% および 65% であり、

珪物質混和材を使用した場合の水結合材比は 55% である。また、フライアッシュ (略号 FA, 比重: 2.28, ブレーン値: 3960 cm<sup>2</sup>/g), 高炉スラグ微粉末 (略号 BS, 比重: 2.92, ブレーン値: 3700 cm<sup>2</sup>/g) およびシリカフェーム (略号 SF, 比重: 2.33, BET 比表面積: 24.2 m<sup>2</sup>/g, シリカ含有率: 90.4%) の質量置換率はそれぞれ 30%, 50% および 10% である。本実験に使用したコンクリートの配合を表-3 に示す。コンクリート供試体は図-2 に示すような比較的大きな立方体状のもの (24 × 24 × 21 cm) を使用した。なお、打設翌日に脱枠し、全ての供試体について環境の影響を受ける 1 面以外の 5 面はアクリルゴム系塗料で塗装した。コンクリートは打設後 28 日間の初期養生を行った後に、表-4 に示すような各種環境下に約 5 年間放置し、採取したコンクリートコア (φ10 cm 2 本および φ5 cm 3 本) を使用して各種試験を実施した。

#### (2) 実験方法

##### a) 圧縮強度試験

コンクリートブロックと同様の環境に暴露した円柱供試体 (φ10 × 20 cm) を使用した。

##### b) 中性化深さの測定

コンクリートブロックの割裂面をブロー吹きし、1% のフェノールフタレイン溶液を噴霧して求めた。

表-5 コンクリートの圧縮強度  
(暴露期間5年)

	OPC45	OPC55	OPC65	FA55	BS55	SF55
IW28	42.6	36.8	27.0	37.6	43.3	42.9
ID7	34.8	30.0	23.0	23.0	22.6	26.0
ID28	39.4	31.4	23.7	31.9	32.1	40.7
OD7	40.0	32.9	27.8	35.7	39.4	36.8
OD28	41.6	32.2	26.5	34.3	38.0	38.1

(単位: MPa)

表-6 コンクリートの中性化深さ  
(暴露期間5年)

	OPC45	OPC55	OPC65	FA55	BS55	SF55
IW28	0	0	1	4	1	3
ID7	6	14	17	26	27	17
ID28	6	12	13	24	14	15
OD7	0	2	2	12	5	3
OD28	0	2	1	10	2	3

(単位: mm)

### c) 急速塩化物イオン透過性試験

試験に用いた供試体は、φ10cmのコアであり、表面からの深さが、0~5cm、5~10cm、10~15cmとなるように5cmごとに切断した。その後、供試体の側面をエポキシ樹脂により被覆し、耐圧容器内にて3時間真空状態に置き、その後24時間吸水させ試験に用いた。なお、試験方法については2.に前述の通りである。

### d) 塩化物イオン浸透深さの測定

急速試験終了後、供試体を割裂し、その破断面に0.1N硝酸銀溶液を噴霧し、白色に変色した領域の平均深さを塩化物イオンの浸透深さとした。

### e) 比抵抗値の測定

急速試験終了後、ただちに供試体を取り出し、測定を実施した。測定には交流電気抵抗測定装置を使用し、負荷電圧を10mV、印加周波数を1kHzに固定して行った。なお電極には10cm×10cmの銅板を使用し、カルボキシメチルセルロースナトリウムを蒸留水で練り混ぜて(重量比で1:10)ゲル状にしたものを供試体と電極の間に塗布し、両者の電気的な接続を確保した<sup>14)</sup>。比抵抗値ρの算出は以下の式にて行った。また、φ5cmのコアについても表面から2.5cmの間隔で切断し、急速塩化物イオン透過性試験の試験体と同様な方法で吸水させ、塩分が浸透していない状態における比抵抗値を同様に測定した。

$$\rho = \frac{R \times A}{h} \quad (1)$$

ρ: 比抵抗値(Ω・cm)

R: 電気抵抗値(Ω)

A: 供試体の断面積(cm<sup>2</sup>)

h: 供試体の長さ(cm)

### f) 細孔径分布の測定

コンクリート供試体の表面部(0~1cm)および内部(5~6cm、10~11cm)より得られたモルタル試料(5mm程度の立方体状のもの)を凍結乾燥(-55℃にて48時間)した後、水銀圧入式ポロシメータにて細孔

径分布の測定を行った。

## 4. 実験結果及び考察

### (1) 圧縮強度および中性化深さ

表-5に各種環境下に5年間暴露したコンクリートの圧縮強度を示す。屋内暴露供試体の場合、水中養生7日(ID7)のものは水中養生28日のもの(ID28)と比較して暴露期間中の強度の増加が小さくなり、乾燥による強度発現の抑制は普通セメントコンクリートよりも鉱物質混和材を使用したコンクリートにてより顕著である。一方、屋外暴露供試体の場合、水中養生期間の相違による強度の差はほとんどなく、水中養生供試体と同様に良好な強度発現が認められる。屋外暴露供試体では、暴露期間中に降雨により水分の供給が行われるためにセメントおよび鉱物質混和材の水和反応が継続的に進行したものと考えられる。

表-6に各種環境下に5年間暴露したコンクリートの中性化深さを示す。コンクリートの中性化深さは屋外暴露よりも屋内暴露の方が顕著であり、水中養生期間が短いものは中性化が大きい。とくに、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の中性化深さは同一の水セメント比の普通セメントコンクリートおよびシリカフェームコンクリートよりもかなり大きくなり、中性化の顕著な屋内暴露5年では最大27mmにも達している。

### (2) 塩化物イオン透過量(クーロン)

#### a) 急速塩化物イオン透過性試験における電流値の変化

図-3に急速試験における電流値の測定結果の一例を示す。本試験法の評価に用いられている塩化物イオン透過量(クーロン)は電流値(アンペア)と時間(秒)との積分値であり、60V、6時間の条件にてコンクリート中を流れた電気量を示している。図-3に示すように、普通セメントコンクリート(W/C=55%)では測定時間経過に伴う電流値の増加が

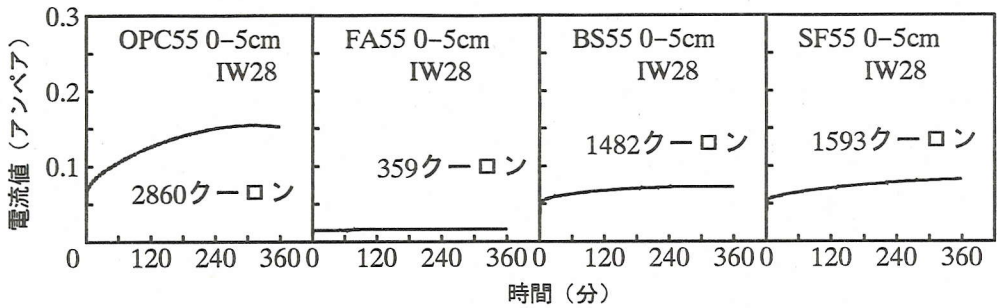


図-3 急速塩化物イオン透過性試験の測定例

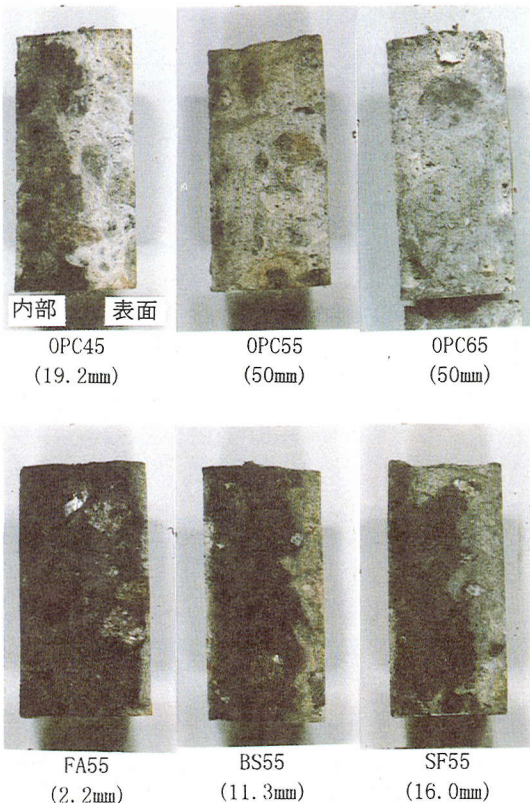


写真-2 塩化物イオンの浸透状況 (水中養生供試体)

認められた。これは、試験開始直後から電流により供試体内に塩化物イオンが浸透し、コンクリートの電気抵抗が低下したことによるものと考えられる。一方、フライアッシュを使用したコンクリートでは、初期電流値が他のものと比較して非常に小さくなっている。また、測定時間の経過に伴う電流の変化も全く認められなかったが、これは写真-2に示すようにフライアッシュコンクリートでは供試体内への塩分浸透がほとんど進行しなかったことによるものである。なお、塩化物イオン透過量が4000クーロン

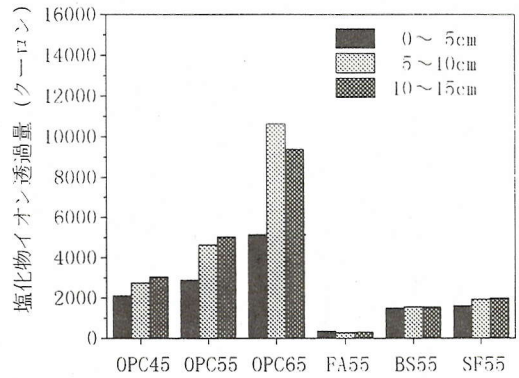


図-4 水中養生を5年間継続したコンクリートの塩化物イオン透過量

以上の大きなものでは、測定後半において電流値が低下する傾向が認められた。これは、電気伝導性に関係するCl<sup>-</sup>およびOH<sup>-</sup>イオンの供給量が低下したことや、大きな直流電流の作用による温度の上昇、さらに電極である銅網の腐食などの影響によるものと思われる。

#### b) コンクリートの種類および表層部と内部における塩化物イオン透過量の変化

図-4に水中養生を5年間行った各種コンクリートの塩化物イオン透過量を示す。普通セメントコンクリートでは、水セメント比が大きなものほど塩化物イオン透過量は増大する。その傾向は、表層部(0~5cm)よりも内部(5~10cm, 10~15cm)において顕著となる。すなわち、本供試体は水中養生を継続して行っているため環境による劣化作用を受けていないので、内部のものでは5~10cmと10~15cmとがほぼ同様な値を示しているのに対して、表層部では内部よりも塩化物イオン透過量がかなり小さくなっている。これらの結果は、表層部と内部とのセメントの水和度の相違によるものよりも、表面部のセメントペースト層の塩化物イオンの浸透抑制効果によるものと考えられる。AASHTO T 277-83の規格では、本



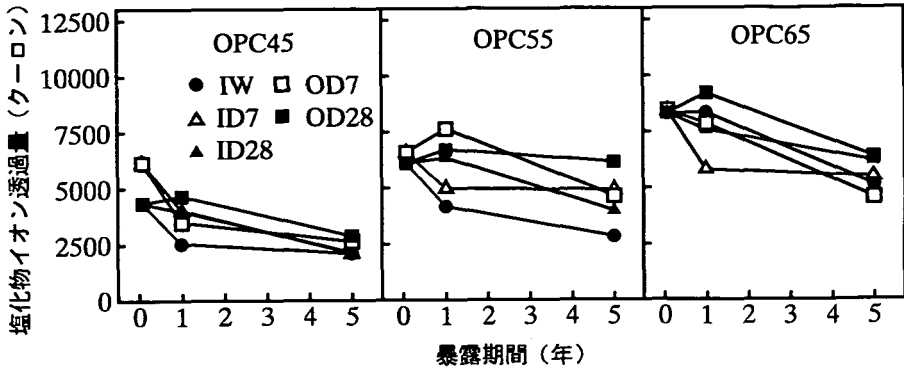


図-5 塩化物イオン透過量の経時変化 (表層部(0~5cm), 普通セメントコンクリート)

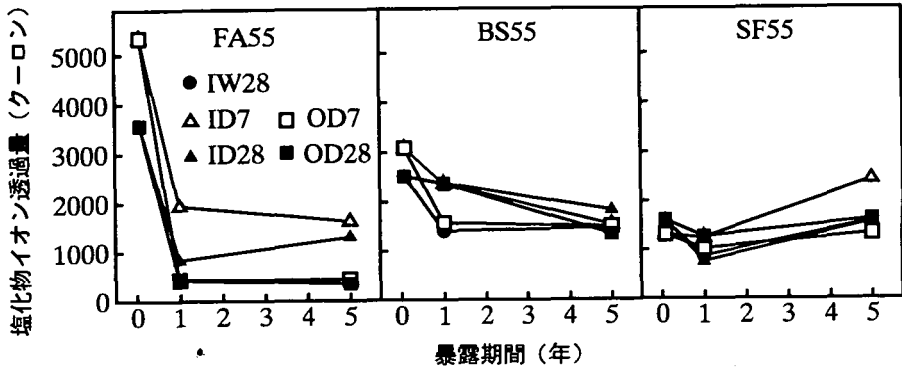


図-6 塩化物イオン透過量の経時変化 (表層部(0~5cm), 鉱物質混和材を使用したコンクリート)

試験に使用する試験体は、小型の型枠に打設されたものでも、また円柱供試体を切断したものでもよいとされているが、両供試体の測定結果の比較においては前者の供試体、すなわちコンクリート表面にセメントペースト層が存在する供試体の方が切断面を持つ供試体よりも小さな塩化物イオン透過量を示すことが著者らの実験で確認されている<sup>15)</sup>。一方、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、普通セメントコンクリートと比較して塩化物イオン透過量は全体的に小さくなり、また表層部と内部との明確な相違も認められない。

#### c) 養生および環境条件による塩化物イオン透過量の変化

図-5および図-6にコンクリート表層部(0~5cm)の塩化物イオン透過量(クーロン)の経時変化を示す。普通セメントコンクリートでは各環境条件において水セメント比の増加とともに塩化物イオン透過量が増大している。水中養生供試体はいずれの水セメント比についても材令の経過に伴い塩化物イオン透過量が減少するが、初期水中養生を7日間行った屋内暴露供試体の水セメント比55%および65%

のものは暴露1年以後塩化物イオン透過量の変化がほとんど認められない。

一方、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、初期養生条件およびその後の環境条件には関係なく同一の水セメント比の普通セメントコンクリートと比較して小さな塩化物イオン透過量を示す。とくにフライアッシュを使用したコンクリートでは、暴露開始時の塩化物イオン透過量は普通セメントコンクリートとほぼ同程度の値を示すが、暴露期間1年で急激に減少し、5年後でもそれを維持しており、長期にわたる優れた塩化物イオン浸透の抑制効果が認められる。また高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートでも暴露期間の経過に伴う塩化物イオン透過量の減少が認められるが、暴露期間の経過に伴う塩化物イオン透過量の減少効果はフライアッシュを使用したコンクリートよりも小さい。さらに、シリカフュームを使用したコンクリートでは、いずれの暴露条件下においても暴露期間1年から5年の間で塩化物イオン透過量が増大している。長期間にわたって乾燥の影響を受けたシリカフュームコンクリートでは、乾燥収縮および自己収縮により微細なひび割

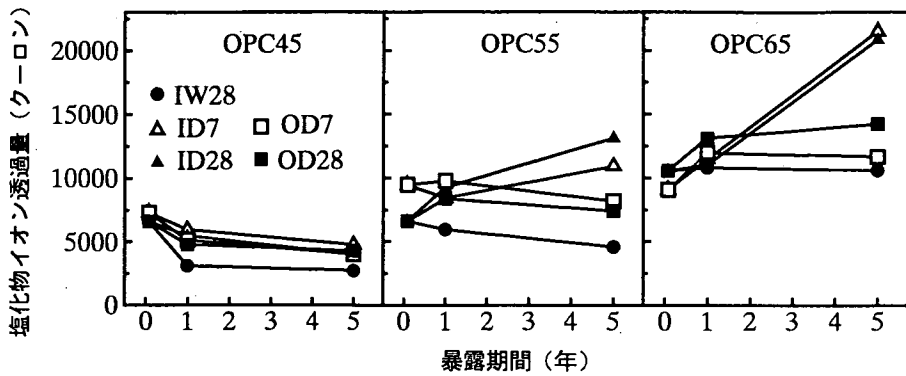


図-7 塩化物イオン透過量の経時変化 (内部(5~10cm), 普通セメントコンクリート)

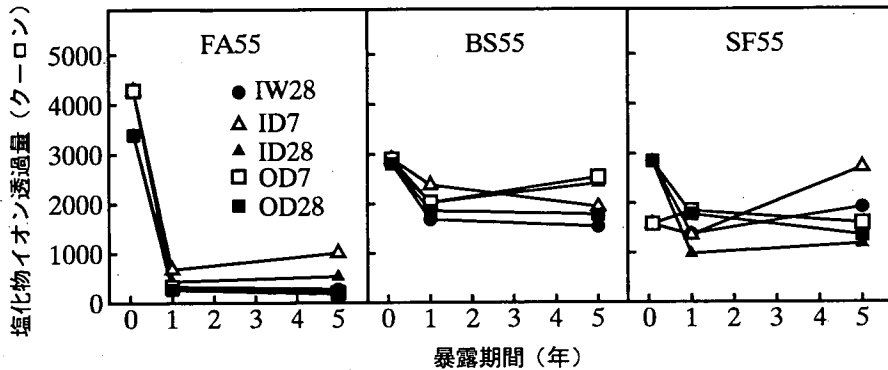


図-8 塩化物イオン透過量の経時変化 (内部(5~10cm), 鉱物質混和材を使用したコンクリート)

れが発生し、このことが塩化物イオン透過量を増大させた可能性がある。また、屋外暴露供試体では、乾湿繰返しや凍結融解の影響を受けることから、微細なひび割れが発生し、塩化物イオン透過量が増大することも予想されたが、長期間の暴露による変化はほとんど認められなかった。屋外暴露では劣化作用に加えて、降雨による水分の供給により水和反応およびポズラン反応が進行するため、経年劣化の進行度合いと塩化物イオン透過量との関係を明確にすることはできなかった。

図-7および図-8にコンクリート内部(5~10cm)の塩化物イオン透過量(クーロン)の経時変化を示す。普通セメントコンクリートでは表層部と同様に水セメント比の増加とともに塩化物イオン透過量が大きくなり、同一の水セメント比における塩化物イオン透過量も水中養生<屋外暴露<屋内暴露の順番に増大している。また、水セメント比45%のものではいずれの環境条件においても塩化物イオン透過量が暴露期間とともに減少しているのに対して、水セメント比55%および65%のものは屋内暴露供試体が暴露期間1年から5年の間で塩化物イオン透過量

が顕著に増大している。これは長期間の乾燥の影響がかなり内部(5~10cm)にまで及んだことによるものと考えられる。一方、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、いずれの環境条件においても同一の水セメント比の普通セメントコンクリートと比較して小さな塩化物イオン透過量を示すが、長期間にわたって乾燥の影響を受けたシリカフェームコンクリートでは表層部と同様に塩化物イオン透過量の増加が認められる。

### (3) 比抵抗値の表面からの深さ方向での変化

図-9および図-10に各種コンクリート(暴露期間5年,  $\phi$ 5cmのコアを使用)の比抵抗値の表面からの深さ方向での変化を示す。普通セメントコンクリートではいずれの水セメント比のものも表層部(0~2.5cm)の比抵抗値がそれより内部のものと比較して大きな値を示している。表層部での比抵抗値の増加は屋内暴露供試体でとくに顕著であり、炭酸化による表面組織の緻密化および細孔溶液の水酸化アルカリ濃度の低下によるものと考えられる。また、内部については水セメント比が大きなものほど小さな

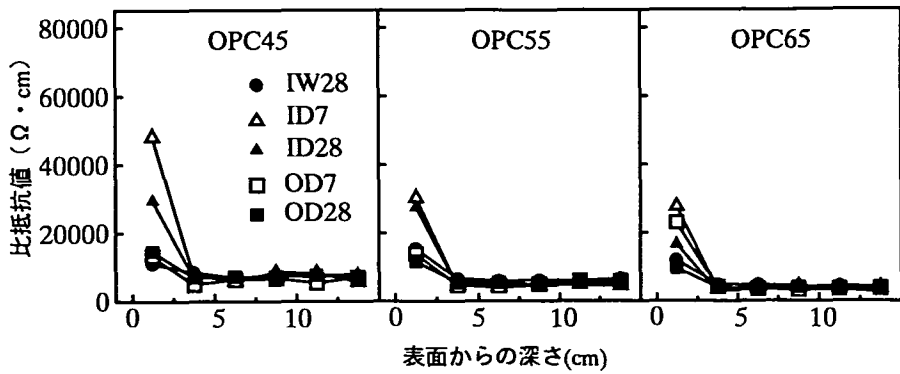


図-9 比抵抗値の表面からの深さ方向での変化 (普通セメントコンクリート)

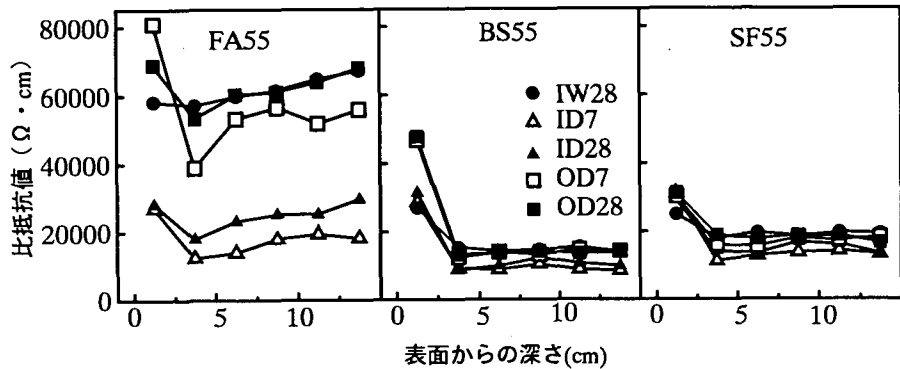


図-10 比抵抗値の表面からの深さ方向での変化 (鉱物質混和材を使用したコンクリート)

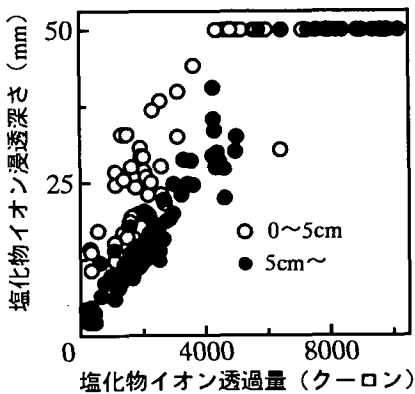


図-11 塩化物イオン透過量と塩化物イオン浸透深さとの関係

比抵抗値を示す傾向があるが、深さ方向における変化はほとんど認められない。一方、鉱物質混和材を使用したコンクリートでも普通セメントコンクリート同様に表層部の比抵抗値がそれより内部のものと比較して大きな値を示すが、その傾向は中性化深さ

の測定結果とは必ずしも一致していない。中性化領域では炭酸カルシウムの生成や水和生成物の分解による組織の変化と空隙中の細孔溶液の組成の変化が生じており、それらの複合された結果として表層部の比抵抗値が変化するものと考えられる。図-10より明らかなように、フライアッシュを使用したコンクリートは屋内暴露供試体と屋外暴露供試体との間の比抵抗値の相違が大きく、また屋外暴露供試体の比抵抗値は高炉スラグ微粉末やシリカフェームを使用したコンクリートよりも3倍ほど大きな値を示す。この結果は、急速塩化物イオン透過性試験において認められたフライアッシュコンクリートの非常に小さな塩化物イオン透過量(クーロン)の結果とも一致している。

#### (4) 塩化物イオン透過量(クーロン)と塩化物イオン浸透深さとの関係

図-11に塩化物イオン透過量(クーロン)と試験終了後の塩化物イオン浸透深さとの関係を示す。塩化物イオン透過量(クーロン)と供試体中への塩化物イオンの浸透深さとの関係は、図-11に示す



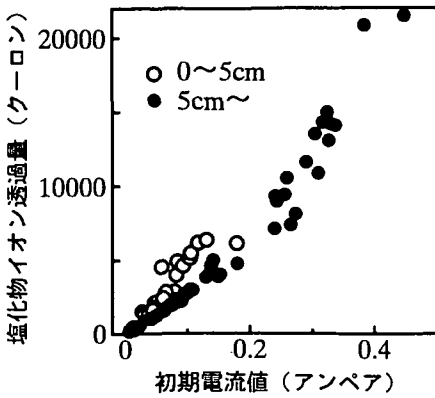


図-12 塩化物イオン透過量と急速試験開始時の初期電流値との関係

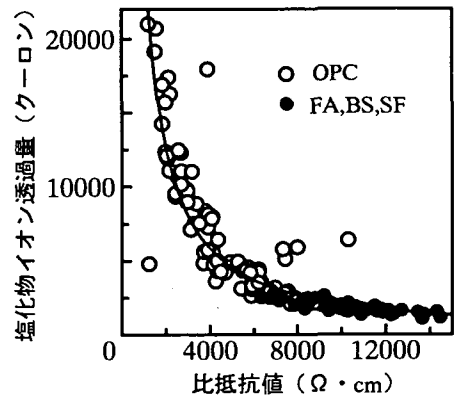


図-13 塩化物イオン透過量と急速試験終了後の比抵抗値との関係

ように表層部(0~5cm)よりも内部(5cm~)において、ばらつきが少なくより相関性が高くなる。本試験では各種環境下に長期間暴露を行った供試体にて実施しているので、コンクリートの表層部では乾燥や乾湿の繰り返しによるひび割れ、降雨による表面浸食および中性化等の環境作用の影響が現れている。そのため、表層部での塩化物イオンの浸透深さは同一の塩化物イオン透過量を示す内部のものより大きな値を示すものと考えられる。また、急速試験の評価基準がHigh(4000クーロン以上)の領域のものは塩化物イオン浸透深さが5cm(厚さ5cmの供試体に塩化物イオンが完全に浸透していることを示す)となり、急速試験で規定された6時間の測定中に塩化物イオンが負極側(3% NaCl溶液)から正極側(0.3N NaOH溶液)のセルにまで到達していることがわかる。これらの結果より、塩化物イオン透過量は実際のコンクリート内への塩化物イオンの浸透性とも相関性があり、コンクリートの塩分浸透性を評価する手段として有効であることが確認された。

#### (5) 塩化物イオン透過量(クーロン)と初期電流値、比抵抗値との関係

図-12および図-13に塩化物イオン透過量(クーロン)と急速試験開始時の初期電流値、急速試験終了後の比抵抗値との関係を示す。初期電流値とは試験開始後から30秒経過した時点での電流値である。いずれのコンクリートについても初期電流値が大きなものほど塩化物イオン透過量も大きくなる傾向が認められ、大賀ら<sup>16)</sup>により報告されているように、測定時間中に電流値の大きな変化がないものではコンクリートの塩化物イオン透過量を初期電流値より推定できる可能性を示唆している。しかし、塩化物イオン透過量が8000クーロン程度までは

一次の相関性が比較的高いが、それ以上になると初期電流値に対する塩化物イオン透過量がかなり大きくなっている。塩化物イオン透過量の大きなものは測定中の温度上昇や塩化物イオンの浸透により電気抵抗性が次第に低下し、このため測定時間とともに流れる電流量が増大したものと考えられる。一方、図-13に示すように、コンクリートの塩化物イオン透過量(クーロン)と試験終了後の比抵抗値との間には反比例の関係が存在している。従って、SHRP Product No.2026の報告<sup>17)</sup>にもあるように、急速塩化物イオン透過性試験(AASHTO T 277-83)の代替法として急速試験の初期電流値や急速塩化物イオン透過性試験後の比抵抗値からコンクリートの塩化物イオン透過性を推定することも十分に可能であると思われる。

#### (6) 塩化物イオン透過量と細孔量との関係

塩分環境下でのコンクリートは、セメント硬化体中の空隙、骨材との界面および微細なひび割れを通して塩化物イオンが内部に浸透することが知られている<sup>18)</sup>。したがって、コンクリートの細孔量およびその連続性は塩化物イオンの浸透性に大きな影響を及ぼす重要な要因と考えられる<sup>15)</sup>。急速塩化物イオン透過性試験における塩分浸透の機構は直流電圧下での電気泳動によるものであるが、その浸透経路は通常塩分環境下でのものと同様であると推測される。

図-14に塩化物イオン透過量と全細孔量との関係を示す。普通セメントコンクリートおよび鉱物質混和材を使用したコンクリートともに塩化物イオン透過量と全細孔量の間には明確な相関性は認められない。図-15に塩化物イオン透過量と0.1 $\mu$ m以下の微細な細孔量との関係を示す。普通セメントコ

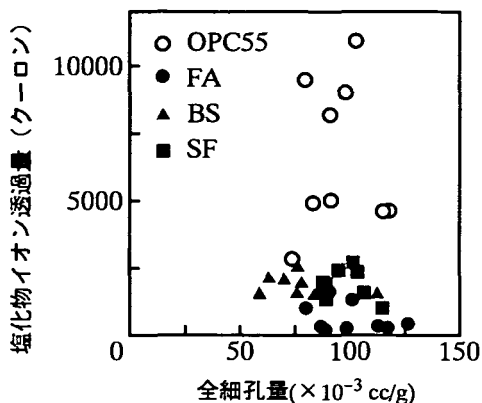


図-14 塩化物イオン透過量と全細孔量との関係

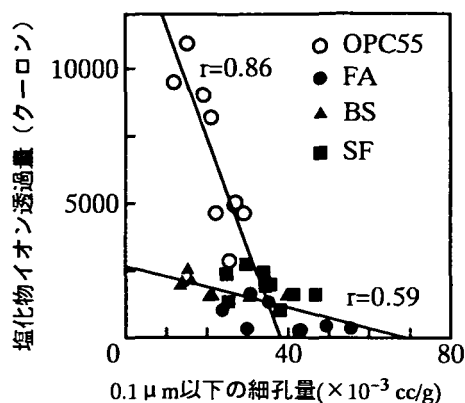


図-15 塩化物イオン透過量と0.1 $\mu\text{m}$ 以下の細孔量との関係

ンクリートについては、0.1 $\mu\text{m}$ 以下の細孔量の多いものほど塩化物イオン透過量が減少しており、大きな径を有する細孔が小さな径の細孔に移行した結果として0.1 $\mu\text{m}$ 以下の微細な細孔量が増大し、塩化物イオン透過量が低減したと考えられる。一方、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、普通セメントコンクリートと比較して塩化物イオン透過量が全体的に小さいが、細孔組織の細分化により0.1 $\mu\text{m}$ 以下の細孔量は大きくなっている。そのため、両者の相関性は普通セメントコンクリートよりも低い。これは、鉱物質混和材を使用したコンクリートの塩化物イオン透過量は、細孔組織とともに細孔溶液の組成変化（ポズラン反応の過程で水酸化アルカリの濃度が減少する）の影響を受けていることによるものである。セメント硬化体の細孔組織は通常インクボトル型であり、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、水銀圧入時の組織破壊の影響で、必ずしも実際の細孔組織を表現していないことが知られている<sup>19)</sup>。実際、測定を行った鉱物質混和材を使用したコンクリートの細孔径分布曲線<sup>9)</sup>は、細孔の不連続化およびインクボトル型の細孔組織の形成を示す凹型の形状を示すものが多く、加圧時および減圧時の水銀残存（ヒステリシス）も普通セメントコンクリートより多くなった。

## 5. 結論

本研究では、各種環境下に5年間暴露したコンクリートブロックからコアを採取し、コンクリートの塩化物イオン透過性に及ぼす配合、養生および環境の影響についての検討を行った。

本研究で得られた主要な結果は以下に示すとおりである。

(1) 鉱物質混和材を使用したコンクリートの圧縮強度は、屋内暴露供試体では普通セメントコンクリートと比較して材令の経過に伴う強度発現が抑制されたが、屋外暴露供試体では水中養生供試体と同程度であった。

(2) 鉱物質混和材を使用したコンクリートは普通セメントコンクリートと比較して中性化深さが大きくなり、その傾向は初期水中養生期間の短い屋内暴露供試体について顕著であった。

(3) 鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、普通セメントコンクリートと比較して、養生および環境条件に関わらず長期にわたり良好な塩化物イオンの浸透抑制効果を発揮することが確認された。とくにフライアッシュを使用したコンクリートは非常に小さな塩化物イオン透過量（クーロン）を示したが、このことは同コンクリートの比抵抗値の増大と関係していた。

(4) 水セメント比の高い普通セメントコンクリートやシリカフェームを使用したコンクリートでは、長期にわたる乾燥環境下での暴露期間中に、塩化物イオン透過量（クーロン）が増加した。

(5) 急速塩化物イオン透過性試験は純粋な拡散・透過性を示すものではないが、塩化物イオン透過量（クーロン）はコンクリート中への塩化物イオンの実際の浸透深さとも良く対応していた。

(6) 急速塩化物イオン透過性試験の代替法として、急速試験の初期電流値や急速試験後の比抵抗値からコンクリートの塩化物イオン透過量（クーロン）を推定することが可能である。

**謝辞：**本研究の実施にあたり貴重な助言を賜りました金沢大学工学部土木建設工学科梶川康男教授に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) AASHTO T 277-83: AASHTO Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete, Methods of Sampling and Testing, Washington D.C., 1986.
- 2) ASTM C 1202-91: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Philadelphia, 1992.
- 3) Goodspeed, C.H., Vanikar, S. and Cook, R.A.: High-Performance Concrete Defined for Highway Structures, *Concrete International*, Vol.18, No.2, pp.62-67, 1996.
- 4) 鳥居和之, 川村満紀, 笹谷輝彦: コンクリートの塩素イオン透過性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.506-511, 1990.
- 5) Misra, S., Yamamoto, A., Tsutsumi, T. and Motohashi, K.: Application of Rapid Chloride Permeability Test to Quality Control of Concrete, *ACI SP-145-25*, pp.487-502, 1994.
- 6) Feldman, R. F., Chan, G. W., Brousseau, R. J. and Tumidajski, P. J.: Investigation of the Rapid Chloride Permeability Test, *ACI Materials Journal*, Vol.91, No.2, pp.246-255, 1994.
- 7) Torii, K. and Kawamura, M.: Pore Structure and Chloride Ion Permeability of Mortars Containing Silica Fume, *Cement and Concrete Composites*, Vol.16, No.4, pp.279-289, 1994.
- 8) Ozyilirim, C.: Rapid Chloride Permeability Testing of Silica-Fume Concrete, *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol.16, No.1, pp.53-56, 1994.
- 9) 鳥居和之, 川村満紀: コンクリート表層部の細孔構造と塩素イオン透過性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13-1, pp.639-644, 1991.
- 10) Pfeifer, D.W., McDonald, D.B. and Krauss, P.D.: The Rapid Chloride Permeability Test and its Correlation to the 90-Day Chloride Ponding Test, *PCI Journal*, Vol.39, No.1, pp.38-47, 1994.
- 11) Andrade, C.: Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements, *Cement and Concrete Research*, Vol.23, No.3, pp.724-742, 1993.
- 12) GjØrv, O.E.: Important Test Methods for Evaluation of Reinforced Concrete Durability, Concrete Technology Past, Present, and Future, *ACI SP-144*, pp.545-574, 1994.
- 13) Tang, L. and Nilsson, L.O.: Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, *ACI Material Journal*, Vol.89, No.1, pp.49-53, 1992.
- 14) 関博, 宮田克二, 北峯博司, 金子雄一: 比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的考察, 土木学会論文集, No.451, pp.49-57, 1992.
- 15) Kawamura, M. and Torii, K.: Chloride Permeability of Concrete Containing a Flyash and a Blastfurnace Slag, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol.137, pp.411-416, 1989.
- 16) 大賀宏行, Hooton, R. D.: 急速塩化物試験の評価, 第49回土木学会年次講演会講演概要集, pp.440-441, 1994.
- 17) SHRP Product No.2026: Proposed Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete by AC Impedance, *Mechanical Behavior of High Performance Concretes*, Vol.1, 1993.
- 18) Mehta, P.K.: Durability of Concrete in Marine Environment a Review, *ACI SP-65-1*, pp.1-20, 1980.
- 19) Brown, P.K., Shi, D. and Skalny, J.: Porosity/ Permeability Relationships, *Materials Science of Concrete II*, Skalny, J. and Mindees, S. eds., The American Ceramic Society, pp.83-109, 1991.

(1996. 5. 7 受付)

## EVALUATION OF CHLORIDE PERMEABILITY OF VARIOUS CONCRETES USING RAPID CHLORIDE PERMEABILITY TEST(AASHTO T 277-83)

Teruhiko SASATANI, Kazuyuki TORII and Mitsunori KAWAMURA

This paper presents the data on the application of the Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) to the evaluation of chloride ion penetration into concretes with and without mineral admixtures. Changes in the chloride permeability of concrete with the depth from the exposed surface were determined using RCPT.

The results of RCPT showed that both surface and interior concretes with mineral admixtures were much less permeable to chloride ions than the corresponding OPC concretes. Furthermore, it was found that there were good relations between the change passed in RCPT, the initial direct current and the electrical resistivity, which also correlated well with the chloride ion penetration depth into the specimens after RCPT.