

◆ コンクリート特集 ◆

コンクリートの急速塩分透過性試験の適用性

渡辺博志* 河野広隆** 田中良樹*** 渡辺 豊****

1. まえがき

海岸線付近に建設されたコンクリート構造物では、飛来塩分の影響を受け、深刻な塩害による損傷を生じている場合が認められる。塩害による損傷を生じた構造物の維持管理コストはかなり高いものとなる¹⁾。今後、構造物の維持管理の負担を軽減するためには、多少の初期コストアップにはなるが、耐久性に優れた材料を用いて、長寿命化を図ることが好ましい。

例えば、水セメント比を下げた高強度コンクリートは一般的に緻密で²⁾、外部環境から供給される塩分などの浸透を遅らせることが可能となり、構造物の耐久性を向上させることができる。

ここで、このような緻密なコンクリートの使用により、コンクリート中の塩分(塩化物イオン)浸透をどの程度遅らせることができるか定量的に評価するためには、コンクリートの塩分透過性すなわちコンクリートの塩分拡散係数を求める必要がある。

コンクリートの塩分透過性を評価するためには、コンクリート中に浸透した塩分分布を測定し、その測定結果と拡散方程式を解いて得られる塩分分布の解析結果を比較し、実測結果に最も近い解析値が得られるような拡散係数の値を見つけることとなる。ここで、コンクリート中への塩分浸透は、塩水溶液にコンクリートを浸漬するか、もしくは飛来塩分の多い環境条件にコンクリート供試体を暴露することによって行われる。しかし、このような方法を用いた場合、コンクリートの塩分拡散係数を求めるために必要となる浸漬(暴露)期間は少なくとも1年程度と非常に長期間を要することとなる。特に、塩分透過性の小さいコンクリートの場合では、さらに長期間を要することとなり、実用の面では不都合であり、何らかの促進方法を適用し、試験期間を短くすることが求められている。ここでは、コンクリートの塩分拡散係数を得

るための電気泳動を利用した促進試験方法を実用化する前段階として、その妥当性を検証するために行った検討内容を報告する。

2. 電気泳動を用いた促進塩分透過性試験法

これまでにも、このような背景から塩分透過性に関する促進試験の可能性に関する検討がなされており³⁾、ASTM (AASHTO)には、急速塩分透過性試験(以下RCPT)が定められている。これによると、5cm厚の円盤状のコンクリート供試体両端面に60Vの直流電圧を6時間印加する。供試体の両端面には図-1に示すように陽極側にNaCl水溶液、陰極側はNaOH水溶液が充填される。コンクリートの塩分透過性の評価は、通電時間内に供試体を通じた電流量の積算値によっておこなわれ、電流量の大きいものほど塩分透過性が大きいと判断される。この方法では6時間程度の試験時間でコンクリートの塩分透過性の判断が可能となり、実用面では非常に魅力的なものであるが、あくまでもコンクリートの塩分透過性について定性的な判断にとどまっていて塩分拡散係数を算出するまでには至っていない。土木学会コンクリート標準示方書では、塩分浸透量の予測に用いるコンクリートの見掛けの塩分拡散係数については、過去の暴露試験など長期試験によって得られた値を用いることとし、促進試験法で得られた値は用い

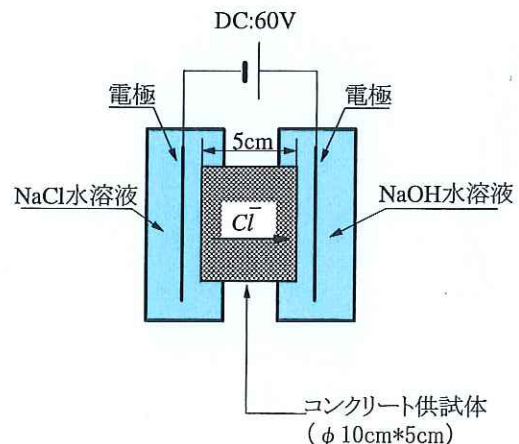


図-1 急速塩分浸透性試験の概略

ないこととしている。塩分透過性の定性的な判断にとどめるのであれば、このような電気的な試験方法を用いるまでもなく、圧縮強度を測定するだけでもある程度の類推は可能であり、試験としての必要性は希薄なものとなる。今後、試験方法としての簡便性や迅速性を保った上で、コンクリートの塩分透過性の定量的な評価を得られるように高度化することが課題である。

このためには、ASTM 規準に示されている RCPT において、測定される積算電流量をコンクリートの塩分透過性の判断として用いる根拠に対する疑問⁴⁾を明らかにしておく必要がある。コンクリート供試体を通る電流は、陰極側の NaCl 溶液中の塩化物イオンの移動によるものと解釈されているが、実際には、供試体中には各種イオンが存在し、測定される電流量はそれらの様々なイオンの移動を総合したものであり、必ずしも塩化物イオンのみの移動を反映したものではない可能性がある。実際、文献⁵⁾によると、モルタル中の各種イオンの電気泳動速度を調べた結果、コンクリート中の OH⁻ イオンの移動速度が非常に大きいことが示されている。

3. 実験と考察

3.1 急速塩分透過性試験での積算電流量と電気抵抗の関係

RCPT で測定される電流量が、コンクリート中の OH⁻ の移動を主に反映したものであるとするならば、電流量の測定結果は、陽極側および陰極側に用いる水溶液の種類にはあまり依存しないことになる。すなわち、RCPT はコンクリートの電気抵抗の測定に過ぎないと考えられる。ここで、RCPT によって測定された積算電流量について塩化物イオンの移動を反映したものとみなすか、あるいは単なるコンクリートの電気抵抗の測定とみなすかによって、RCPT の意義や解釈は大きく異なる。ここでは、RCPT における印加電圧を通過電流の測定値で除して得られる抵抗値と、RCPT のように水溶液を用いるのではなく直接コンクリート供試体に電極を設置し交流電圧を印加して求められるコンクリート抵抗の値を比較した。

試験に用いたコンクリートは水セメント比を 25, 30, 40, 55% と 4 種類に設定した。用いたセメントの種類は普通ポルトランドセメントおよび高ビー

ライトセメントである。単位水量は全ての配合を通じ 160kg/m³ で一定とした。RCPT は ASTM 基準に従って試験を行った。一方、コンクリートの電気抵抗の測定は、交流電圧 (10Vrms, 周波数 1kHz) を用いた。供試体寸法は、RCPT と同じもの (直径 10cm で厚さ 5cm の円盤状供試体) を使用し、陽極・陰極それぞれに NaCl および NaOH の水溶液を用いず、直接電極を設置し電圧を加えた。測定時のコンクリートの材齢は 3ヶ月である。

図-2 は両者の方法で得られたコンクリートの比抵抗 (電位勾配を電流密度で除したもの) を比較した結果を示したものである。比抵抗の値は 60V 直流を用いた RCPT の方がやや小さかったものの、両者ともほぼ同じ値を示している。このことから、RCPT で得られる電流の試験結果は、コンクリート抵抗の大きさを反映したものであり、必ずしも塩化物イオンの移動量の大小を直接的に反映したものではないと考えられる。従って、塩分の拡散係数の定量的な評価には必ずしも適していない。

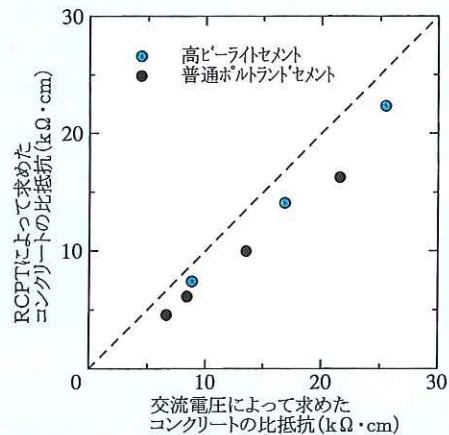


図-2 異なる方法で求めたコンクリート比抵抗の比較

3.2 急速塩分透過性試験と通常の塩分浸漬試験による塩分浸透深さの比較

RCPT では、コンクリート中を移動する塩分の駆動力は電位勾配であり、濃度勾配が駆動力となっている拡散とは異なっている。このように、通常の塩水浸漬試験と RCPT における塩化物イオンの駆動力が異なっているため、RCPT で得られる結果がそのまま、コンクリート中を浸透する塩分の浸透速度の評価に適用できるか疑問が残るところである。

ここでは、RCPT 実施後のコンクリート供試体を割裂して割裂面に硝酸銀溶液を噴霧し、塩分浸透深さを測定するとともに、別途実施したコンク

リート塩水浸漬試験 (5% NaCl 水溶液) で得られる塩分浸透深さの比較を行った。塩水中の浸漬期間は6ヶ月である。

試験を実施したコンクリートは、水セメント比が25%, 30%, 35%の3種類である。使用骨材は、普通細骨材・粗骨材、および軽量細骨材・軽量粗骨材である。使用した軽量骨材の物性試験結果を表-1に示す。使用したセメントは、早強ポルトランドセメントである。コンクリートの配合を表-2に示す。練り上がりコンクリートのフレッシュ性状、コンクリートの圧縮強度試験結果 (材齢28日)、コンクリート密度の試験結果も表-2にあわせて示す。なお、表-2中の補正水 ΔW の欄は、コンクリート練混ぜ中に軽量骨材が吸水することによって失われる練混ぜ水を補うために加えた水量を示している。

図-3は、6ヶ月間の塩水浸漬試験を行った供試体で測定した塩分浸透深さと、RCPTを実施後の円盤状供試体を割裂して測定した塩分浸透深さの関係を示したものである。図中の点線は両者の間の回帰直線を示したものである。この結果によると、電位勾配を与えて強制的に塩分を浸透させた場合と、塩水中の浸漬により塩分を浸透させた場合

で得られる塩分浸透深さの間には相関性が認められる。この結果から、電位勾配を与えて強制的にコンクリート中に塩化物イオンを浸透させた場合であっても、通常の拡散によって塩化物イオンが達する深さを評価することが可能であると考えられる。

次に骨材の種類が及ぼす影響について検討する。図-4は水セメント比と圧縮強度の関係を示したものであり、骨材の種類によって、同じ水セメント比でも圧縮強度は異なっていて、細骨材粗骨材とも軽量骨材を用いたものが最も強度は小さくなっている。RCPTを行う際、通電前に供試体の真空飽水処理を行うが、飽水処理前後の供試体の重量変化より供試体の吸水率が求められる。図-5は供試体の密度と吸水率の関係を示したものである。図-6はRCPTで通電後の供試体で測定し

表-1 軽量骨材の物理試験結果

骨材種類	試験結果
軽量細骨材	絶乾密度 1.50g/cm ³ 、吸水率 16.4%
軽量粗骨材	絶乾密度 1.29g/cm ³ 、吸水率 10.0%

注) 吸水率は24時間吸水時の値

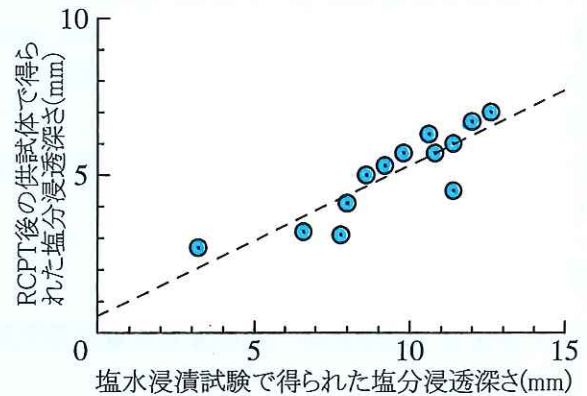


図-3 塩水浸漬試験で測定した塩分浸透深さと RCPT 後の供試体で測定した塩分浸透深さの比較

表-2 コンクリートの示方配合および試験結果

水セメント比 (%)	骨材種類	単位量 (kg/m ³)					試験結果		
		水 W	セメント C	粗骨材 G	細骨材 S	補正水 ΔW	スランプ (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)
35	細骨材、粗骨材とも軽量	150	429	441	513	69	11	55.6	1.623
30			500	427	496	67	21	60.8	1.668
25			600	406	472	63	20	66.9	1.712
20			750	375	436	59	0	69.7	1.779
35	細骨材のみ軽量	160	457	867	498	50	17	66.8	2.105
30			533	855	481	48	19	77.5	2.117
25			640	809	455	46	17	87.8	2.143
35	粗骨材のみ軽量	160	457	429	877	17	21	68.5	1.940
30			533	413	845	17	52/56*	66.3	1.981
25			640	391	800	16	19	76.3	2.009
35	普通骨材	160	457	975	789	0	21	81.9	2.424
30			533	940	760	0	21	93.3	2.440
25			640	890	720	0	24	99.3	2.453

注*) スランプの欄の52/56はスランプフローを示す。

た塩分浸透深さと供試体密度の関係を示したものである。図-5、図-6の凡例は図-4と同じである。

図-5から、コンクリートの吸水率と密度の関係は、骨材の種類によらずおよそ同一の関係があると考えられる。また、細骨材粗骨材とも軽量骨材を用いた場合には水セメント比の違いによって吸水率にやや差が生じているが、その他の場合では水セメント比の影響はあまり顕著でない。すなわち、コンクリート中への水分の浸透量は、骨材およびペースト分を含めたコンクリート中の空隙量に依存していることが分かる。一方、図-6によ

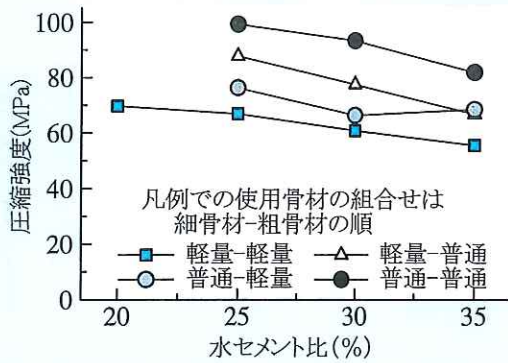


図-4 水セメント比と圧縮強度の関係

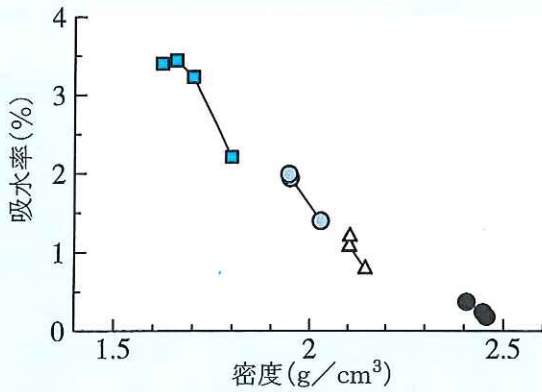


図-5 コンクリート供試体密度と吸水率の関係

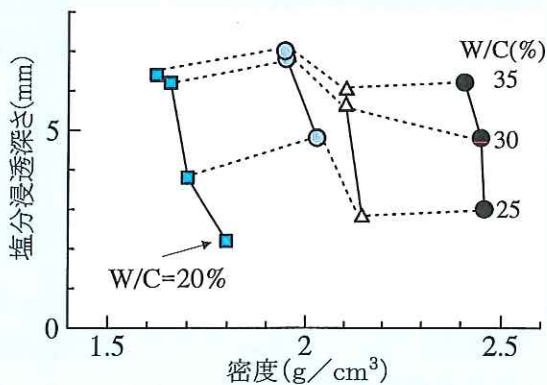


図-6 コンクリート供試体密度と塩分浸透深さの関係

ると、粗骨材として軽量骨材を用いた方が、同一水セメント比で比較するとやや塩分浸透深さが大きくなっている。ただし、コンクリート密度と塩分浸透深さの関係は、使用骨材によってまったく異なったものになっていて、コンクリートの密度よりは水セメント比の影響が相対的に大きく現れている結果となっている。軽量コンクリートの場合、普通コンクリートと比べ水分の浸透速度は水セメント比を下げてあまり小さくならないが、塩分の浸透に着目すれば、水セメント比を下げることにより、塩分浸透速度を低下させることが可能であるといえる。

3.3 急速塩分透過性試験での通過電流量とコンクリートの塩分透過性の関係

RCPTにおいて供試体を通じた電流量と、通電後の供試体の塩分浸透深さの関係について検討した。コンクリートに用いた骨材は、普通骨材であり、水結合材比は40%である。配合上変化させた要因は、高炉スラグ微粉末(粉末度 6000cm²/g)の使用量であり、それぞれ早強ポルトランドセメントをベースとし、高炉スラグ微粉末の置換率を30, 50, 70%と3種類に設定した。ここで、高炉スラグ微粉末を混入した理由は、これの使用によりコンクリートの塩分透過性を小さく出来るとされているためである。コンクリートの単位水量はいずれも 174kg/m³ で一定である。コンクリート打込み後、材齢 3ヶ月で試験を実施した。

測定結果を図-7に示す。図中には、各配合条件ごとに4点ずつ測定結果がプロットされているが、それらは養生方法をそれぞれ変化させたものであ

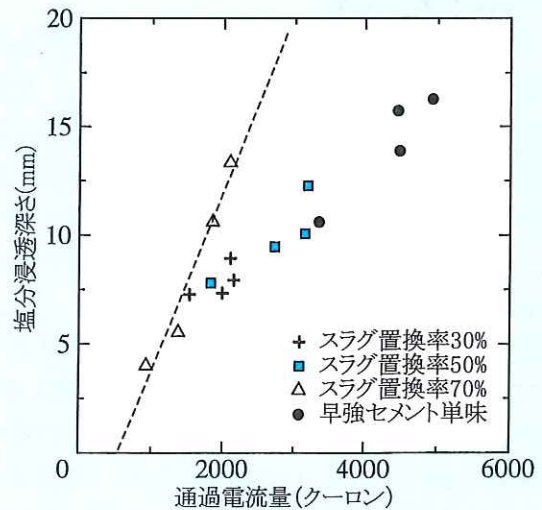


図-7 RCPT での通過電流量と塩分浸透深さの関係

る。図中の一点鎖線は、スラグ置換率 70%のもののみを取り出して、回帰直線を描いたものである。

図-7より、RCPTで測定した通過電流量と、通電後の供試体で測定した塩分浸透深さの間には強い相関関係が認められる。すなわち、RCPTで測定結果として得られる通過電流量は、直接的に塩化物イオンの移動速度を示したものではないものの、コンクリートの塩分透過性を間接的に表す指標であると考えられる。ただし、早強ポルトランドセメントの70%を高炉スラグ微粉末に置き換えたコンクリートでは、その他のコンクリートの場合と傾きが異なっている。高炉スラグ微粉末は硬化する際、ポルトランドセメントの水和によって生じた $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を消費すると考えられるため、高炉スラグ微粉末の置換率の高い場合、コンクリート中に存在する OH^- の量が、相対的に少なくなっている可能性が高い。コンクリート供試体中を通過する電流量に最も大きな影響を及ぼすイオンが OH^- であるとすると、通過電流量の大きさは、 OH^- の移動のしやすさ(透過性)と OH^- の量の双方が関与していると考えられる。たとえコンクリート中のイオンの透過性が同じであっても、イオン量そのものが少ない場合には、測定される電流量は少なくなるはずである。従って、潜在水硬性を有する微粉末を混和材料として大量に含み OH^- が消費されている可能性の高いコンクリートと、通常のポルトランドセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン透過性を相対的に比較する場合には、通過電流量の大きさだけでは判断できないものと考えられる。

3.4 測定材齢の影響

コンクリートは長期材齢においてもわずかずつではあるがセメントの水和反応が進行し、次第に緻密になっていくと考えられる。このため、同じ配合条件のコンクリートであっても、水和反応が進行するだけの湿度条件が整っていれば、コンクリートの塩分浸透に対する抵抗性は材齢とともに向上すると考えられる。

図-8は、3.2で示したシリーズのコンクリートについて、コンクリート打込み後28日後と4ヶ月後にRCPTを実施し、通電後の供試体の塩分浸透深さを比較したものである。なお、供試体は打込み後2日間は封緘養生とし、その後は湿度60

この結果によると、コンクリート打込み後4ヶ

月目にRCPTを実施した場合は、4週間目に実施した場合に比べて、塩分浸透深さは約半分に減少していることがわかる。従って、コンクリート構造物の塩化物イオンの浸透の予測を行うために用いる見かけの塩分拡散係数を得る場合は、試験の実施材齢を遅らせて設定することが望ましいと考えられる。

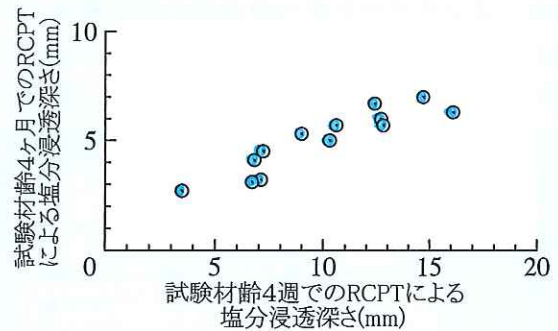


図-8 試験材齢が異なる RCPT での塩分浸透深さの比較

4. まとめ

ここでは、コンクリートの塩分透過性の促進評価試験法として RCPT を取り上げ、その妥当性について検討を行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

- ① RCPT で供試体を通過した積算電流量からコンクリートの塩分拡散係数を定量的に評価することは必ずしも妥当ではない。これは、積算電流量そのものはコンクリートの電気抵抗を反映したものと解釈でき、塩化物イオンの移動速度を直接的に反映したパラメータではないと考えられるためである。あえて通過電流量からコンクリートの塩分拡散係数を定量的に評価するためには、あらかじめ浸漬試験や暴露試験により塩分拡散係数を求めておき、これと通過電流量の関係を明らかにしておかなければならないと考えられる。
- ② 一方、通電後の供試体の塩分浸透深さは実際の塩化物イオンの移動を捉えたパラメータであり、単独で塩分拡散係数の定量的評価に使える可能性がある。
- ③ 高炉スラグ微粉末の置換率の高い混合セメントを用いたコンクリートでは、塩分浸透深さと電気比抵抗の関係がポルトランドセメントを用いたコンクリートとは異なっている。このた

め、RCPTで供試体を通過した積算電気量による評価では、種々の結合材を用いたコンクリートの塩分透過性を相対比較できない場合もありうる。

④ 軽量骨材を用いたコンクリートでRCPTを適用した結果、軽量骨材を用いた方が若干塩分透過性は大きくなる結果を得た。コンクリートの密度と吸水率の関係は水セメント比に関わらず、一意的な関係があると考えられる。しかし、塩分透過性について言えば、水セメント比の影響が大きく現れ、コンクリート密度が小さくても、水セメント比を低下させることにより透過性をかなり小さくすることができる。

⑤ コンクリートの材齢の進行に伴い、塩分透過性は小さくなることが確認された。

なお、本研究は土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究「PC部材の軽量・高耐久性化に関する共同研究」の活動の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 国土交通省土木研究所コンクリート研究室他：コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究—コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査—, 土木研究所資料第 3811 号, 2001.3
- 2) 例えば、国土交通省土木研究所、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法に関する共同研究報告書, 共同研究報告書 266 号, 2001.3
- 3) 杉山隆文：コンクリートの塩化物イオン拡散係数を算定するための電気的手法を用いた新しい試験方法, コンクリート工学, Vol.35, No.5, pp.26-32, 1997.5
- 4) Caijun Shi, J.A.Stegemann, and R.J Caldwell : Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and its Implications on Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T227 and ASTM C1202) Results, ACI Material Journal, July-August, pp.389-394, 1998.
- 5) 長滝重義、大即信明、久田真、遠藤平：コンクリート中のイオンの通電泳動に関する研究, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.77-86, 1995.8.

渡辺博志*



独立行政法人土木研究所
技術推進本部構造物マネ
ジメント技術チーム主任
研究員
Hiroshi WATANABE

河野広隆**



同 構造物マネジメン
ト技術チーム主席研究員
Hiroataka KAWANO

田中良樹***



同 構造物マネジメン
ト技術チーム研究員
Yoshiki TANAKA

渡辺 豊****



同 構造物マネジメン
ト技術チーム交流研究員
Yutaka WATANABE