

ひび割れを有するコンクリート中の 塩化物イオン移動評価手法の提案

塚原絵万¹・加藤佳孝²・魚本健人³

¹ 正会員 博士(工) 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1)
(現) 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

² 正会員 博士(工) 東京大学 生産技術研究所 講師 (〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1)

³ フェロー会員 工学博士 東京大学 生産技術研究所 教授 (〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1)

コンクリートのひび割れ部を開放面と同様に取扱い、ひび割れ深さ毎のひび割れ中の Cl⁻濃度、ひび割れ部の Cl⁻量、および Cl⁻量に対する質量保存則を考慮することにより、コンクリート中における濃度拡散と擬似吸着をマクロ的に表現した Cl⁻移動評価モデルを構築した。提案モデルは、湿潤および乾湿繰返し環境下におけるひび割れを有するコンクリート試験体の Cl⁻濃度分布を精度良く評価することが可能であった。また、ひび割れ幅およびひび割れ中の見かけの Cl⁻拡散係数がコンクリート中の Cl⁻移動に及ぼす影響について検討を行った。

Key Words: chloride ion, crack, diffusion, boundary chloride content

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート構造物はかぶりによって塩化物イオン、酸素および水分等腐食因子の侵入を抑制している。しかし、コンクリートにひび割れが存在する場合、それらの物質は鉄筋まで容易に達するため、早期に鉄筋腐食が生じることとなり、鉄筋の付着力の減退、鉄筋断面積の減少等を引き起こす。したがって、構造物は期待される供用年数内にその性能を喪失することとなる。既往の研究によれば^{1), 2)}、表面ひび割れを有するコンクリートのひび割れ部鉄筋の腐食形態はマクロセル腐食となることが多く、局部腐食を誘発する危険性があることが指摘されている。このように、ひび割れが構造物の耐久性能に与える影響が多大であることは認識されているが、ひび割れを有するコンクリート中の物質移動に関しては、定量的な評価がなされていないのが現状である。

本研究では、ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動性状を把握することを第1の目的とした。そして、得られた情報に基づいて、移動評

価におけるひび割れの取扱い方法を提案し、ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動モデルを構築した。

2. ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動性状

(1) 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は富士川産川砂(表乾密度: 2.63g/cm³, 吸水率: 2.60%, F.M. 2.81)、粗骨材は両神産碎石(表乾密度: 2.69g/cm³, 吸水率: 0.96%, F.M. 6.70)を用いた。なお、セメント中に含まれる Cl⁻は 0.010% (平均) である。表-1 にコンクリートの配合および諸性質を示す。

試験体概要を図-1 に示す。70×120×380mm の型枠にコンクリートを打設し、24 時間後脱型して材齢 28 日まで 20℃水中養生を行った。鉄筋はかぶり 30,60,90mm となるよう試験体の中心に配置した。養生後、2 点支持 2 点荷重により試験体下面に曲げひび割れを設けた。除荷後、開口面におけるひび割れ幅を顕微鏡により、試験体両側面より目

表-1 コンクリートの配合および諸性質

Gmax	W/C	s/a	単体量(kg/m ³)					空気量 %	スランブ cm	f ₂₈ N/mm ²
			W	C	S	G	SP			
20	0.39	0.420	177	454	720	1016	4.99	5.4	20	57.4
20	0.55	0.463	167	304	857	1016	2.43	3.6	11	41.0

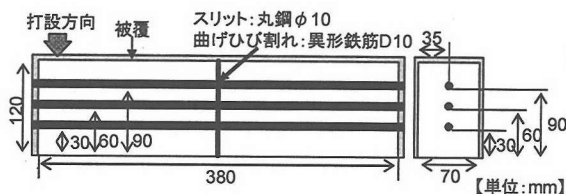


図-1 試験体概要

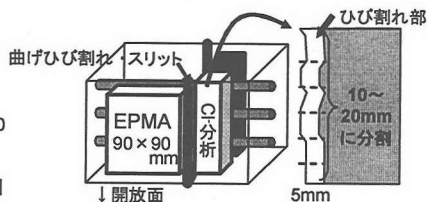


図-2 分析試料の採取

視範囲内のひび割れ深さを測定した。その後、ひび割れ開口面（以降、開放面と呼ぶ）を除く5面をエポキシ系樹脂により被覆し、Cl⁻が1面のみから侵入するようにした。鉄筋両端部は自己癒着テープを用いて被覆し、端部からのCl⁻の侵入を防いだ。なお、ひび割れ幅は開放面におけるひび割れ幅7点の平均値である。

また、中央に1本スリットを設けた試験体を同時に作成した。型枠にかぶり30,60,90mmとなるよう丸鋼（直径10mm）を配置した後、鉄筋位置に孔（直径10.2mm）を開けた鋼板を設置し、上面よりコンクリートを打設した。なお、養生後と試験終了後にスリット幅を測定した結果、スリット幅は打設時と変わらず0.20mm一定であった。その他、養生、被覆等は曲げひび割れを有する試験体と同様である。

Cl⁻浸透試験は材齢35日から行い、3.0%NaCl水溶液浸漬試験、また、1日間の3.0%NaCl水溶液浸漬および6日間の乾燥（相対湿度60%）を1サイクルとする乾湿繰返し試験を、それぞれ13サイクルまで行った。NaCl水溶液の温度、乾燥時の環境温度は常時40℃一定となるよう設定した。

試験終了後、ひび割れ部およびスリット部のCl量の測定と、EPMAを用いたCl分析を行った。測定試料は、試験体より鉄筋を取り除いた後、図-2に示すようにひび割れ周辺部をカッターで切り出して作成した。ここで、本研究では、ひび割れ、またはスリットより垂直方向0~5mmの範囲を「ひび割れ部」として定義する。これは、平均骨材粒径より考えられるひび割れ表面の凹凸を考慮して設定した範囲である。ひび割れ部のCl量は、JCI-SCS³を参考に粉体試料から測定試料を作成し、塩分分析計により把握した。また、EPMA試料については、測定面を鏡面研磨し炭素蒸着を行って測定に供した。

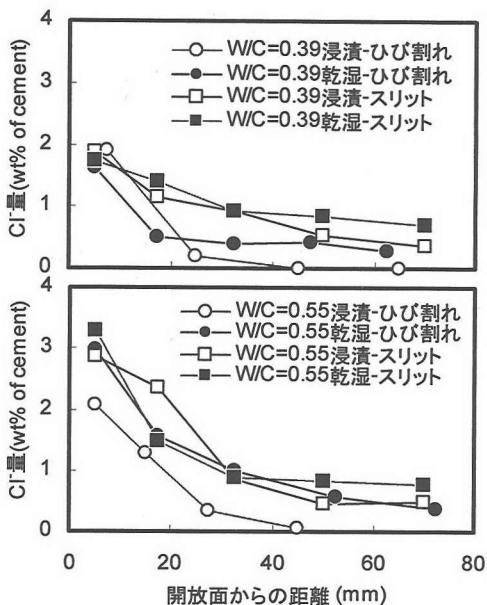


図-3 ひび割れ部のCl量分布

表-2 試験前後のひび割れ幅の変化

環境	浸漬		乾湿繰返し	
	0.39	0.55	0.39	0.55
試験前	0.090	0.070	0.10	0.088
試験後	0.030	0.040	0.062	0.070

【単位:mm】

(2) ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動性状

図-3 にひび割れ部におけるひび割れ深さ方向のCl⁻量分布を示す。ひび割れ部のCl⁻量は、開放面が最も高くひび割れ深さ方向に進むにしたがって小さくなった。水セメント比W/Cを比較すると、W/C=0.55の方がややCl⁻量が多い傾向を示しており、また、環境条件について比較すると、乾湿繰返し環境下の方

が同一ひび割れ深さにおける Cl 量が多くなった。

ここで、実験開始前および終了後における各試験体のひび割れ幅の変化状況を表-2 に示す。ひび割れ試験体の開放面におけるひび割れ幅(平均)は試験期間中に変化しており、また、ひび割れ内部は複雑な形状となっている⁴⁾ため、この試験体からひび割れがコンクリート中の Cl 移動に及ぼす影響を同定することは困難である。そこで、深さ方向の幅も 0.20mm 一定であるスリット試験体について、同様にスリット部の Cl 量の測定を行った。結果を図-3 に併せて示す。スリット試験体もひび割れ試験体と同様、開放面に Cl 量を多く含み、ひび割れ深さ方向に進むにしたがって少なくなった。伊代田⁹⁾らが行った曲げひび割れを有するコンクリートのひび割れ部と健全部の塩分浸透深さの比較実験においても、この現象は確認されており、ひび割れ面からの塩分浸透深さ(ひび割れ垂直方向)は、開放面からの塩分浸透深さよりも小さい傾向にあると報告されている。

以上のことから、ひび割れ深さの増加に伴うひび割れ部 Cl 量の減少は、ひび割れ幅およびスリット幅の変化に拘わらず生じるものであり、ひび割れ中の Cl 量とひび割れ中からひび割れ部へ侵入する Cl の移動量の大小関係によって生じるものと考えられる。したがって、本研究では、ひび割れ中の Cl 移動を拡散と仮定し、ひび割れ中-ひび割れ部における Cl の移動を、任意の溶液濃度(ひび割れ中の Cl 濃度)に対する表面塩分量(ひび割れ部 Cl 量)の関係をもとに考慮することによって、ひび割れを有するコンクリート中の Cl 移動を表現することとした。

3. ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動性状のモデル化

コンクリート中の Cl 移動予測を試みた既往の研究の多くは、濃度勾配を駆動力とする Fick 則に従い Cl 移動を定式化している。しかし、Cl の固定化、吸着、また、乾湿繰返し環境下においては移流の発生等、実際の移動形態は複雑なメカニズムを伴う。丸屋⁶⁾は、コンクリート中の Cl 移動を実現象に基づいて詳細に表現した汎用的なモデルを提案し、種々の配合・環境下における Cl 移動予測を行っている。しかし、これには複数の実験データや逆解析等が必要であり、Cl 移動予測を行うためのプロセスが複雑である。そこで、本研究では容易な実験・解析により Cl 移動予測を合理的に行うことを重視した。

本研究では、Cl 移動現象を見かけの拡散現象として表現し単純化して取扱う。対象とする塩分は、固

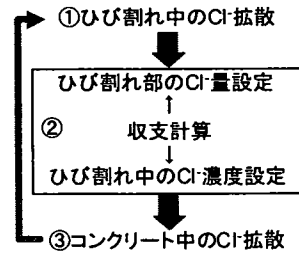


図-4 Cl 移動解析の基本的な流れ(浸漬)

定化や吸着等、全ての Cl 移動に関わる機構が含まれた結果である全塩分量である。

図-4 に Cl 移動モデルの概要を示す。提案モデルは、

- ①ひび割れ中の Cl 拡散
 - ②ひび割れ部の Cl 量の設定・ひび割れ中-ひび割れ部における Cl 量の収支計算
 - ③コンクリート中の Cl 拡散
- より構成される。

ここで、ひび割れ部はひび割れ中の NaCl 溶液と接しているため、開放面と同様に取り扱うことが妥当であると考えられる。丸屋⁶⁾は、コンクリート表層部の移動機構を濃度拡散と擬似吸着により説明している。通常、溶液濃度は 3.0%NaCl 一定であるため、擬似吸着の流束はコンクリート表層部のみに依存する形としても問題はない。しかし、前述のように、ひび割れ中の溶液濃度は、ひび割れ中の Cl の拡散とひび割れ中からひび割れ部への Cl の移動量によって深さ毎に異なることが考えられるため、流束は溶液濃度と表層部の Cl 濃度の関数として定義しておく必要がある。しかし、現状では擬似吸着の流束を実験的に決定することは困難である。そこで、本研究では、開放面における表面塩分量の設定方法をひび割れ部にも拡張して用いることとした。つまり、ひび割れ部の表面塩分量は、ひび割れ中の Cl 濃度により決定される。このとき、ひび割れ中からひび割れ部への Cl の侵入に関して、両領域の Cl 量の大小関係および質量保存を考慮することにより、濃度拡散と擬似吸着の現象をマクロ的にモデル化する。ひび割れ部で生じている現象へのアプローチは実現象と異なるが、提案するモデルは得られる事実のみを利用したものであり、ひび割れを有するコンクリート中の Cl 移動の評価方法として簡便なモデルである。

次節より、以上の解析条件の設定について詳細を説明する。

(1) ひび割れ中の塩化物イオン移動性状

ここではひび割れ中の Cl⁻濃度分布を解析を得るために、ひび割れ中の見かけの Cl⁻拡散係数を実験的に求めた。これは、以下に述べる拡散セル試験にて把握した。

a) 実験概要

図-5 に試験体概要を示す。試験体は 2. (1) のコンクリートと同時に作成し、配合は表-1 と同様である。養生後、割裂引張試験によりひび割れを設けた。割裂後、試験体周囲をエポキシ樹脂によりコーティングし厚さ約 30mm に切断した後、マイクروسコープを用いてひび割れ幅を測定した。この後表記するひび割れ幅は、切断後試験体の両面におけるひび割れ幅 5 点×2 面の平均値である。試験体は拡散試験前に、真空ポンプを用いて飽水状態とした。また、鋼製のスリット試験体 (スリット長さ 80mm, 幅 0.025 ~ 0.20 mm) についても同様に拡散試験を行った。これは、割裂試験体の割裂破断面と比較してひび割れ (スリット) 内部が平滑であり、試験体両面におけるひび割れ幅の変化がほとんど無いため、ひび割れ中の Cl⁻拡散の基礎性状把握に最適と考えたためである。

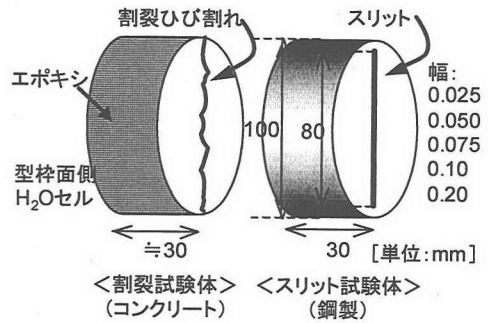


図-5 Cl⁻拡散試験-試験体概要

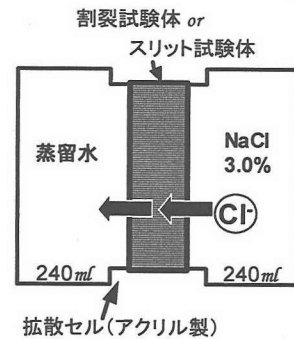


図-6 Cl⁻拡散試験概要

図-6 に Cl⁻拡散試験の概要を示す。試験体はシリコンゴムを用いて拡散セルにセットし、一方のセルに NaCl 3.0% 溶液、他方には蒸留水を満たした。このとき、コンクリート打設面側を NaCl セルに、型枠面側を H₂O (蒸留水)セルに同時にセットした。40℃ 一定環境下で拡散試験を開始し、NaCl および H₂O セルにおける Cl⁻濃度変化を塩分分析計にて測定した。また、スリット試験体については、比較のために 20℃ 環境下についても試験を行った。

b) 塩化物イオンの移動評価方法

Cl⁻拡散係数 D は式(1)⁷⁾から求める。

$$J = \frac{V_{H_2O}}{A} \frac{dC_{H_2O}}{dt} = \frac{D}{l} (C_{NaCl} - C_{H_2O}) \quad (1)$$

ここに、 J : H₂O セルへのイオン流速、 A : 試験体断面面積、 l : 試験体厚さ、 V_{H_2O} : H₂O セル内の溶液体積、 C_{NaCl} , C_{H_2O} : 試験体表面部のイオン濃度

ここではひび割れ内の Cl⁻の拡散を対象とするため、試験体断面積としてひび割れ断面積を用いることとした。このとき、スリット試験体は内部が平滑であるため、ひび割れ断面積 (スリット幅×長さ) および移動距離 (試験体厚さ) は容易に把握することができる。しかし、割裂試験体の破断面の状況は表面から把握することは出来ず、それらは実際には

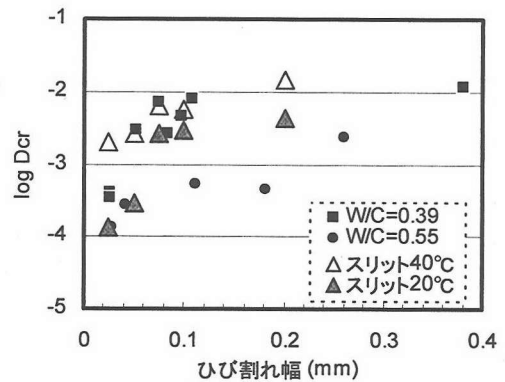


図-7 ひび割れ幅と Cl⁻拡散係数の関係

ひび割れ長さや試験体厚さに代表されない。そこで、レーザ変位センサによって割裂破断面を 0.20mm 間隔で測定し、ひび割れ長さおよび試験体厚さを求めた。これを式(1)中で考慮することにより、ひび割れ中の Cl⁻拡散係数を求めた。

c) ひび割れ中の塩化物イオン移動性状

ひび割れ幅とひび割れ中の Cl⁻拡散係数 D_{cr} の関係を図-7 に示す。これより、ひび割れ幅が大きくなるにつれて、Cl⁻拡散係数は大きくなり、ある程度のひ

ひび割れ幅（スリット試験体の結果より、ひび割れ幅0.075mm～）以上では拡散係数は収束することが考えられる。W/Cに注目した場合、W/C=0.39では40℃スリット試験体と同程度のひび割れ幅とCl⁻拡散係数の関係となっている。しかし、W/C=0.55のひび割れ幅とCl⁻拡散係数の関係は、W/C=0.39と比較して1オーダー程度小さな値となった。W/Cの大きいコンクリートは空隙が多いため、W/Cの小さなものと比較するとコンクリート自体の拡散係数が大きくなる。したがって、W/C=0.55の場合、破断面からコンクリート内部にCl⁻が侵入したことが考えられる。一般に、Cl⁻のセメント硬化体内の移動現象においては、Cl⁻の固定化現象が拡散現象と共に発生しており、単純な物質移動現象として捉えることは困難と考えられている。拡散セル試験から得られたひび割れの無い試験体のCl⁻拡散係数は、W/C=0.39では $5.94 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、W/C=0.55では $1.41 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ であり、ひび割れ中のCl⁻拡散係数と比較して 10^5 倍程度の値となった。これらは、拡散・固定化等を経たのちにH₂Oセルに到達したCl⁻より得られた、移動可能なCl⁻の拡散係数である。ひび割れ中のCl⁻の拡散においてもそれらが生じていると考えられるが、割裂試験体の結果と固定化を生じにくいと考えられる鋼製スリット試験体の拡散係数がほぼ同じであったことから、その影響は無視できる程度であったと考えられる。したがって、提案モデル中ではスリット試験体から得られた見かけのCl⁻拡散係数を用いた。なお、今回得られたひび割れ中のCl⁻拡散係数は、全て、希薄電解溶液中のCl⁻拡散係数よりも大きい値であった。これについては現段階では不明であり、今後の検討課題とする。

(2) ひび割れ中-ひび割れ部間の塩化物イオン量の収支計算

ここでは、コンクリートひび割れ部のCl⁻量を設定する。任意の溶液濃度に対するCl⁻量の定式化を行うにあたり、ひび割れの無いコンクリートの開放面から5mmまでのCl⁻量の経時変化を実験的に把握した。コンクリートの配合および諸性質は表-1と同様であり、試験体寸法はφ100×100mmである。円柱底面を開放面とした1.0, 2.0, 3.0, 5.0%NaCl水溶液への浸漬を4,7,13,17週間行い、前述した方法により全塩分量を測定した。浸漬期間中、NaCl濃度は常時一定であり、水溶液の温度は40℃一定である。

図-8にW/C=0.39および0.55のNaCl水溶液濃度毎のCl⁻量の経時変化を示す。Cl⁻量は水溶液濃度が高いほど多く、ある時期よりそれぞれの水溶液濃度およびW/Cにおいて一定値に収束する。既往の研究よ

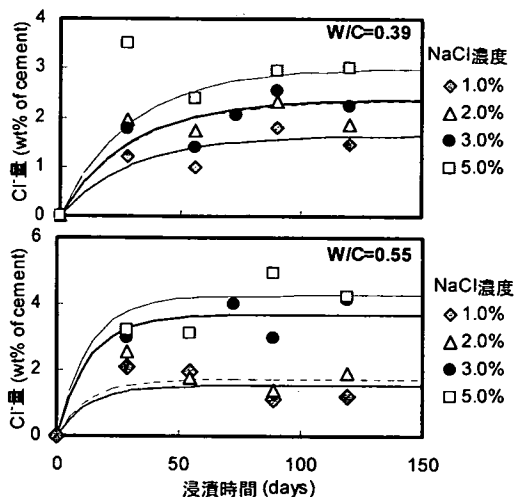


図-8 表面塩分量の経時変化

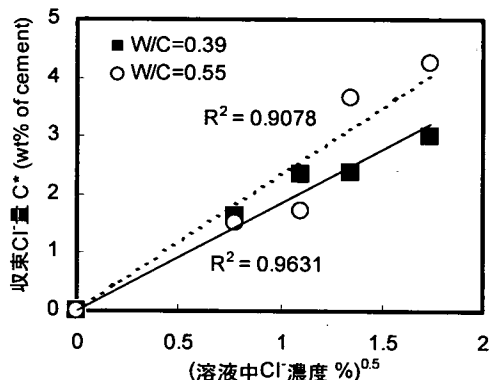


図-9 収束塩分量C*と溶液濃度の関係

り^{8),9)}、表面塩分量の経時変化は以下の式(2)で近似できる。

$$C_0(t) = C^* \{1 - \exp(-bt)\} \quad (2)$$

ここに、 $C_0(t)$ ：表面塩分量、 t ：試験期間、 C^* 、 b ：係数

ここで、 C^* は収束塩分量を表し、 b は収束速度を表す係数である。竹田ら⁹⁾はセメントペースト(W/C=0.35~0.80)の浸漬試験から可溶性塩分の経時変化について検討しており、収束速度はW/Cが大きくなるにつれて速くなると報告している。これより、 b は試験体の内部構造により変化する係数と考えられ、配合が等しければ溶液濃度によらず b は一定と考えることができる。これに基づいて、式(2)により回帰分析を行った結果を図-8に合わせて示す。

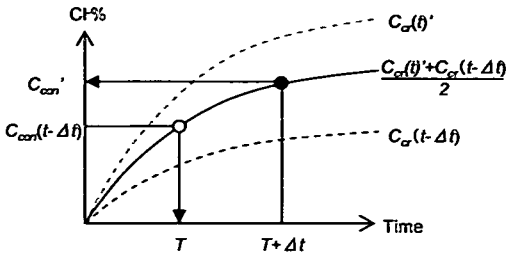


図-10 ひび割れ部 Cl 量の設定

以上の様に決定された溶液濃度毎の収束塩分量 C^* と溶液濃度（雰囲気濃度）の関係を図-9に示す。収束塩分量 C^* と雰囲気濃度の 1/2 乗には相関関係が認められ、W/C 毎にほぼ直線で近似できる結果となった。これより、各雰囲気濃度における収束塩分量は、以下の式(3)のように表すことができる。

$$C^* = (C_{cr})^{1/2} \cdot a \quad (3)$$

ここに、 C^* ：収束塩分量、 a ：図-9中の近似直線の傾き、 C_{cr} ：溶液中の Cl 濃度（雰囲気濃度）

図-10に解析におけるひび割れ部 Cl 量の設定方法の概念を示す。ここで、任意の時間 t におけるひび割れ中の任意の位置における Cl 濃度を $C_{cr}(t)$ とし、収支計算前のひび割れ部の Cl 量を $C_{con}(t-\Delta t)$ とおく。 $C_{con}(t-\Delta t)$ は前ステップにおいて収支計算を経て求められた濃度である。ここで、 $t-\Delta t$ から t におけるひび割れ中の雰囲気濃度を $(C_{cr}(t) + C_{cr}(t-\Delta t))/2$ と近似的に表すと、 $C_{con}(t-\Delta t)$ はこれを雰囲気濃度とする表面塩分量として、仮想時間 T を用いて式(2)と同様に表すことができる。

$$C_{con}(t-\Delta t) = C_{(C_{cr}(t) + C_{cr}(t-\Delta t))/2} \{1 - \exp(-b(T))\} \quad (4)$$

ここに、 $C_{(C_{cr}(t) + C_{cr}(t-\Delta t))/2}$ ：雰囲気濃度 $(C_{cr}(t) + C_{cr}(t-\Delta t))/2$ のときの収束塩分量

仮想時間 T から Δt 経過時の Cl 量を時間 t におけるひび割れ部 Cl 量とすると、式(4)より求めることができ、これを C_{con}' とおく。次に、ひび割れ中の Cl をコンクリートひび割れ部へ供給するための収支計算を行う。このとき、受け渡しに使用する領域面積をひび割れ中において A_{cr} 、コンクリートにおいて A_{con} とすると、両領域中の Cl 総量のつり合いより、両領域の Cl 量が決定される。

以上の収支計算の結果として得られる $C_{con}(t)$ は、コンクリート全体の拡散解析において使用され、 $C_{cr}(t)$ は次ステップのひび割れ中の Cl 拡散解析において初期濃度となる。

(3) 開放面における表面塩分量およびコンクリートの塩化物イオン拡散係数

前節(2)で述べた 3.0%NaCl 水溶液浸漬実験の表面塩分量の経時変化より、開放面の境界条件は式(5)および(6)の様に表せる。

$$W/C=0.39 : C_0(t) = 2.40 \cdot \{1 - \exp(0.034t)\} \quad (5)$$

$$W/C=0.55 : C_0(t) = 3.67 \cdot \{1 - \exp(0.076t)\} \quad (6)$$

コンクリートの見かけの拡散係数は、(2)と同じ試験体より得られた Cl 量分布 (NaCl 3.0%-13 週間浸漬) から求めた。境界条件を式(2)とした場合の Fick 則の厳密解¹⁰⁾より、コンクリートの見かけの拡散係数は、W/C=0.39 のとき $D_{con}=1.39 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、W/C=0.55 のとき $D_{con}=2.13 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ と算出された。

ここで、既往の研究において、コンクリートの Cl 拡散係数は時間依存する傾向があると指摘されている¹¹⁾。しかし、本研究では Cl 拡散係数の時間依存性については考慮せず、浸漬 13 週試験体から得られた見かけの拡散係数を用いることとした。

以上の境界条件、Cl 拡散係数、および(2)で算出されたひび割れ部 Cl 量を初期値として、ひび割れを有するコンクリートの Cl 移動性状を再現した。解析モデルにおいては、開放面からひび割れ奥行き方向までひび割れ幅は一定として設定した。

(4) 解析モデルの検証

構築したモデルの妥当性について、スリット幅が 0.20mm 一定であるスリット試験体により検証を行った。図-11に、W/C=0.39 および 0.55 における解放面からの距離とひび割れ部 Cl 量の関係を示す。プロットは実測値を示し、実線は解析値を示す。図より、解析値は実験値を概ね再現していることが分かる。

次に、図-12に EPMA 分析から得られたスリット試験体の Cl 量分布と、解析より得られた 0.20mm のひび割れを有するコンクリートの Cl 量分布を示す。こちら、解析結果は実験結果を概ね評価しており、W/C=0.39 の場合はコンクリート自体の拡散係数が小さいため、W/C=0.55 の結果と比較して、ひび割れからひび割れ部、そしてコンクリート内部への Cl

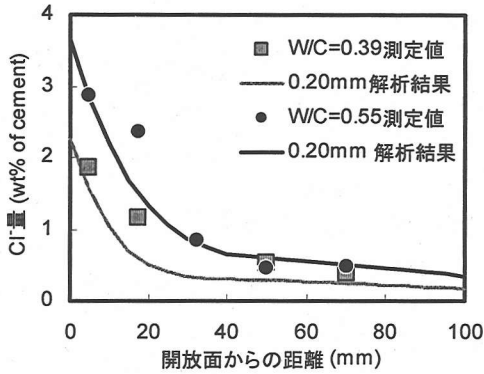


図-11 ひび割れ部 Cl⁻量分布 (浸漬13週)

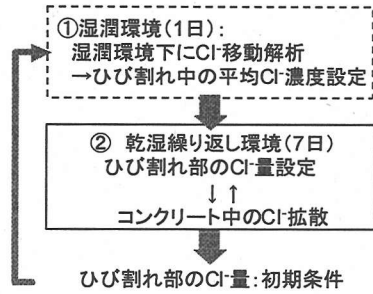


図-14 Cl⁻移動解析の基本的な流れ (乾湿繰返し)

4. 乾湿繰返し環境下におけるコンクリート中の塩化物イオン移動性状のモデル化

ここでは、コンクリート中で生じる現象として考えられる濃度拡散や吸着および固定化以外に、吸水・乾燥に伴って移流が発生すると考えられる、乾湿繰返し環境下におけるコンクリート中の Cl⁻移動評価モデルの構築を行う。本研究では、乾湿繰返し環境下における Cl⁻移動性状を、環境条件におけるマクロ的アプローチとして、乾燥および湿潤の環境を問わず、常に平均的に移動すると仮定して表現する。

乾湿繰返し環境下における Cl⁻移動解析の概要を図-14に示す。解析は、

- ① 湿潤環境下における Cl⁻移動解析
- ② ひび割れ部の Cl⁻量の設定とコンクリート中の Cl⁻拡散 (乾湿繰返し環境)

より構成される。コンクリートの乾湿繰返しサイクルが、湿潤1日+乾燥6日=7日間の場合、まず、1日間の湿潤環境下における移動計算を行う。これは、3章で示したモデルである。これより、湿潤期間中のひび割れ中の平均 Cl⁻濃度(雰囲気濃度)を求める。これは、ひび割れ部の Cl⁻量を決定する表面塩分量を湿潤時の溶液濃度に依存する形で定式化しているためである。次に、湿潤解析から得られた情報をもとに、乾湿繰返し環境(7日間)の移動解析を行う。このとき、開放面における境界条件およびコンクリート中の拡散係数は、乾湿繰返し試験結果を式(2)および式(3)に適用して求める。また、ひび割れ部では、湿潤環境のひび割れ中雰囲気濃度と乾湿繰返し環境下における境界条件式、および式(3)を用いて Cl⁻量が設定される。

以上の Cl⁻移動解析条件の詳細について、(1)開放面における境界条件とコンクリートの Cl⁻拡散係数、(2)ひび割れ部の Cl⁻濃度の設定、の順に詳細に説明する。

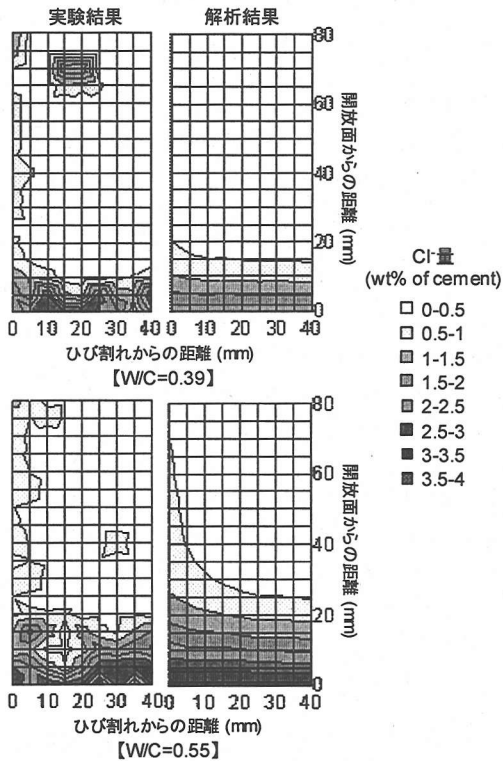


図-12 Cl⁻量分布 (浸漬13週)

の移動が抑制されていることが分かる。ひび割れ試験体のひび割れ部およびその周辺についても同様に、解析値は実験値を概ね評価することが可能であった。

以上より、開放面における表面塩分量の設定方法をひび割れ部にも拡張し、ひび割れ中-ひび割れ部の Cl⁻量に対する質量保存則を考慮した本解析は、実現象におけるひび割れを有するコンクリート中の Cl⁻の移動評価が可能であると考えられる。

(1) 開放面における境界条件とコンクリートの塩化物イオン拡散係数の設定

境界条件となる開放面における表面塩分量のモデル化を行うにあたり、ひび割れの無いコンクリートの開放面から5mmまでのCl量の経時変化を実験的に把握した。コンクリートの配合および諸性質は表-1と同様であり、試験体寸法はφ100×100mmである。円柱底面を開放面とした開放面1面のみを浸漬・乾燥面として、1日間の3.0%NaCl水溶液浸漬および6日間の乾燥（相対湿度60%）を1サイクルとする乾湿繰返し試験を行った。浸漬期間中、NaCl濃度は常時一定であり、また環境温度は乾燥・浸漬ともに40℃一定である。

ここで、乾湿繰返し環境下における表面塩分量は、乾燥・湿潤に伴い複雑に変化することが考えられるが、本研究では乾燥期間中日に試料の採取を行うことにより表面塩分量の変化を平均的に表現できると仮定し、これに対応するコンクリート中のCl拡散係数を用いて移動性状を表現した。表面塩分量は、実験結果を湿潤環境下と同様に式(2)に適用し、W/C毎に設定した。表面塩分量の経時変化は、式(7)および(8)の様に表せる。

$$W/C=0.39: C_0(t) = 1.67 \cdot \{1 - \exp(0.13t)\} \quad (7)$$

$$W/C=0.55: C_0(t) = 2.75 \cdot \{1 - \exp(0.15t)\} \quad (8)$$

ひび割れの無い試験体より得られたCl濃度分布（乾湿繰返し13サイクル経過）から、見かけのCl拡散係数は、W/C=0.39のとき $D_{con}=8.10 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、W/C=0.55のとき $D_{con}=1.96 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と算出された。

(2) ひび割れ部の塩化物イオン濃度の設定

図-3に示したひび割れ部Cl量分布より、乾湿繰返し環境下においても湿潤環境と同様、ひび割れ中のCl量とひび割れ部へ侵入するClの移動量の大小関係を考慮する必要があると考えられる。このため、各サイクルにおけるひび割れ中の平均Cl濃度を算出する必要がある。本解析では、3章に述べた湿潤環境下のCl移動解析を、実際の湿潤期間行うことにより、ひび割れ中の平均的なCl濃度（雰囲気濃度）を求める。これを基に、各サイクルにおける乾湿繰返し環境下のひび割れ部Cl量を決定する。

ひび割れ部Cl量の設定方法の概念図を図-15に示す。まず、任意の時間 t におけるひび割れ部Cl量を $C_{con}(t)$ とし、開放面からの高さ x におけるひび割

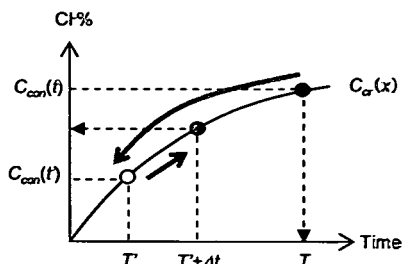


図-15 ひび割れ部Cl量の設定

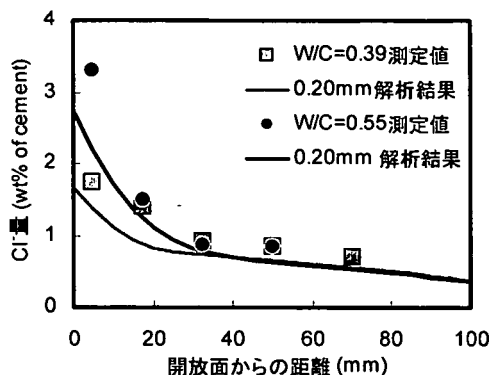


図-16 ひび割れ部Cl量分布（乾湿13週）

れ中のCl濃度を $C_c(x)$ とする。雰囲気濃度とひび割れ部の収束塩分量の関係が式(3)で表せるとすると、Cl量は $C_c(x)$ を基に、仮想時間 T を用いて式(2)と同型式で表すことができる。ここで、Clはコンクリート全体に拡散するため、ひび割れ部Cl量は減少し $C_{con}(t)$ (Time= T)となる。 $t+\Delta t$ 時のCl量は、拡散後のCl量 $C_{con}(t')$ (Time= $T'+\Delta t$)を基に、式(2)より $C_{con}(t+\Delta t)$ と表せる。

以上の境界条件、Cl拡散係数、およびひび割れ部Cl量を用いて、乾湿繰返し環境下におけるひび割れを有するコンクリート中のCl移動性状を再現した。本解析を行うには、コンクリートの湿潤環境および乾湿繰返し環境下におけるCl移動性状の双方を実験的に把握することが必要である。また、現時点では、湿潤・乾燥状態をサイクルとして表せる環境下のCl移動性状のみ表現できるモデルであることを特記する。

(3) 解析モデルの検証

構築したモデルの妥当性について、スリット幅が0.20mm一定であるスリット試験体により検証を行った。図-16に、W/C=0.39および0.55における解放面からの距離とひび割れ部Cl量の関係を示す。プ

ロットは実測値を示し、実線は解析値を示す。これより、乾湿繰り返し環境における解析結果は実験値を概ね評価していることが分かる。ひび割れ試験体のひび割れ部についても同様に、解析値は実験値を概ね評価することが可能であった。しかし、スリット深さ（ひび割れ深さ）に対するCI量の減少は実験値と同様の傾向を示しているが、いずれの位置においても実験値より低いCI量となった。これについては、式(7)および(8)における表面塩分量の設定が原因と考えられる。

濱田・Swamy¹¹⁾によれば、海中では比較的早期にコンクリート表面の塩含有量がほぼ一定となるのに対し、干満部ではデータが得られている範囲で10年、飛沫部では20年まで増加する。本研究では、収束塩分量 C^* と係数 b （表面塩分量が一定となる時間を決定する係数）を、短期間の試験結果より設定した。これが適切でなければ、式(3)として表した雰囲気濃度と収束塩分量の関係も不適切なものとなり、結果として、ひび割れ中・ひび割れ部のCI移動量の適切な表現が不可能となる。したがって、CI移動性状の予測精度を向上させるためには、特に表面塩分量の経時変化式の設定が重要であるといえる。

5. 提案モデルを用いた塩化物イオン移動評価の一般化の可能性について

提案モデルは、対象とするコンクリートに関して、①ひび割れ幅、②環境CI濃度、③表面塩分量の経時変化、④コンクリート中のCI拡散係数、⑤ひび割れ中のCI拡散係数、⑥乾湿サイクル条件、が把握されれば、湿潤・乾湿繰り返し環境下におけるコンクリート中のCI移動性状の推定が可能となる。

ここで、①については目視による把握の他に、非破壊試験を用いて詳細な情報を得ることができる。さらに、ひび割れ幅がCIの移動に及ぼす影響が解明されれば、詳細点検の有効範囲を示すことが可能となる。また、⑤ひび割れ中のCI拡散係数は3章(1)に示した実験より求めることができる。しかし、対象とするひび割れ幅・環境温度毎に、ひび割れ中の拡散係数を求めることは効率的ではない。また、ひび割れ中の拡散係数はコンクリート自体の見かけの拡散係数よりも 10^5 倍程度大きく、これがコンクリート中の移動性状にどれほど影響を与えるのか不明である。そこで、ひび割れ幅およびひび割れ中の拡散係数がひび割れを有するコンクリート中のCI移動評価に及ぼす影響について、解析的に検討を行った。

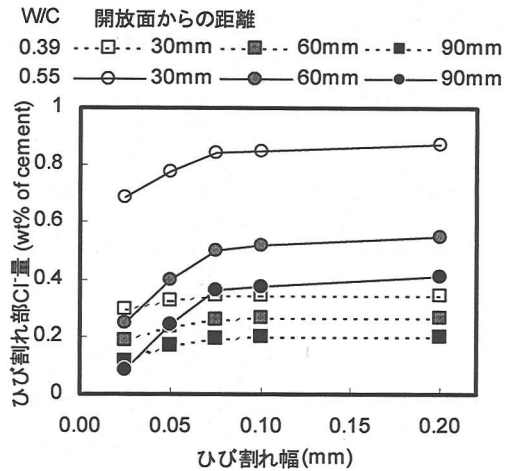


図-17 ひび割れ幅とひび割れ部CI量の関係

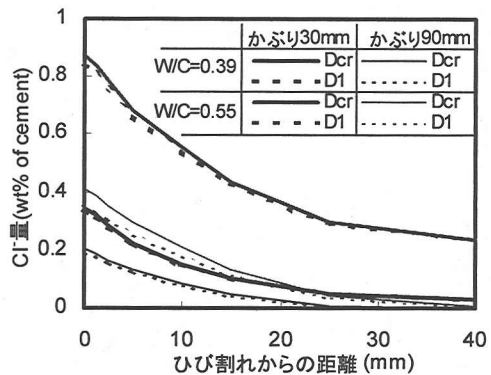


図-18 ひび割れ中のCI量拡散係数の影響

(1) ひび割れ幅が塩化物イオン侵入に及ぼす影響

図-17に、ひび割れ幅とひび割れ深さ30,60,90mmにおけるひび割れ部CI量の関係（浸漬13週-解析結果）を示す。なお、ひび割れ中のCI拡散係数は、第3章(1)鋼製スリット試験体より求められた値を用いた。いずれのひび割れ深さにおいても、CI量はひび割れ幅0.075mmまでは増加し、その後1.0mmまでほぼ一定となった。また、この現象はW/C=0.39と比較してW/C=0.55の方が顕著に表れている。これより、CI供給量を決定するひび割れ幅と、CI消費量を決定するコンクリート自体のCI拡散係数により、コンクリートひび割れ部のCI量（コンクリート全体への影響も含まれている）は決定され、【供給量<消費量】の条件下において、ひび割れ幅がコンクリートひび割れ部CI量の支配要因となることが考えられる。また、W/C=0.55はW/C=0.39と比較してコンクリートの拡散係数が大きく、結果としてCI消費量

表-3 コンクリートの配合および諸性質

Gmax	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)					空気量 %	スランブ cm	f ₂₈ N/mm ²
			W	C	S	G	SP			
20	0.6	0.490	161	268	897	974	0.80	4.0	6.1	31.7

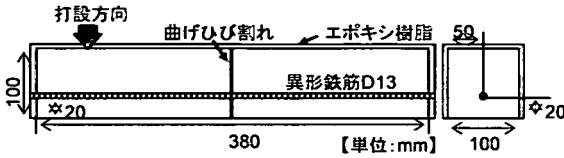


図-19 試験体概要

が多くなる。したがって、ひび割れ幅の減少に伴ってひび割れ中のCl量が不足する現象が顕著に表れことが考えられる。

(2) ひび割れ中の塩化物イオン拡散係数が塩化物イオン侵入に及ぼす影響

ひび割れ中の拡散係数がCl移動性状に及ぼす影響を検討するため、ひび割れ幅が一定であり、ひび割れ中の拡散係数が異なる2つのケースについて解析を行った。

図-18にW/C=0.39および0.55のコンクリートにおけるひび割れ中の拡散係数が、コンクリートのCl量分布に及ぼす影響を示す。解析モデルのひび割れ幅は0.20mmであり、ひび割れ中のCl拡散係数として、第3章(1)に示した鋼製スリット試験体(スリット幅0.20mm)の実験結果である $1.45 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{sec}$ ($=D_{cr}$)、およびスリット幅0.025mmの実験結果である $2.02 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ ($=DI$)を使用した。

コンクリートの拡散係数は、第2章(3)で示した浸漬時の見かけの拡散係数を使用した。解析結果より、ひび割れ部に近いほど、 D_{cr} と DI によるCl量には差があり、かぶりが大きいほどその差は大きくなることが分かる。また、W/Cが大きいほど計算結果に差が生じており、 DI のときのCl量計算結果は、 D_{cr} による計算結果よりも、W/C=0.39の時は5%程度、W/C=0.55の時は10%程度小さい値となった。

これより、ひび割れ中のCl拡散係数については、その影響程度を認識し有意性を考慮した上で設定することが必要である。しかし、安全側の予測をするのであれば、鋼製スリット試験体の結果である $1.45 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度を用いても実務上問題は無いと考えられる。

(3) 提案モデルを用いた塩化物イオン移動評価の一般化の可能性について

これまでの検討より、提案モデルを使用するには、

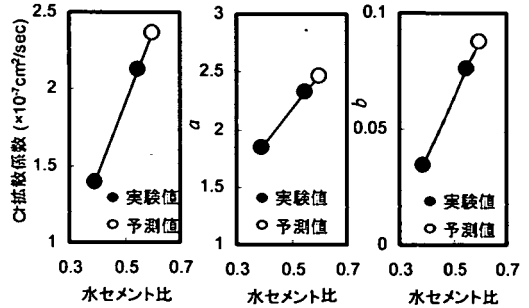


図-20 各係数の予測

各環境下における表面塩分量およびCl拡散係数を把握すればよい。ここで、乾湿繰返し環境下に適用するには、乾湿繰返し環境下における表面塩分量および拡散係数だけでなく、同じ配合条件のコンクリートの湿潤環境下における表面塩分量および拡散係数を把握することが必要となる。しかし、湿潤環境下のそれら係数の把握は、実験室レベルでのみ可能なことである。つまり、湿潤環境下における表面塩分量および拡散係数の環境・材料条件に基づいた一般化がなされれば、本研究で構築したモデルはさらに汎用性をもつことが期待される。そこで、一般化への試みとして、これまでと異なる配合・環境条件の試験体を用いて、提案モデルの適用性について検討を行った。

a) 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は富士川産川砂、粗骨材は両神産砕石を用いた。表-3にコンクリートの配合および諸性質を示す。なお、セメント中に含まれるClは、セメント重量に対し0.007% (平均) である。

試験体概要を図-19に示す。100×100×380mmの型枠にコンクリートを打設、24時間後脱型し、材齢28日まで20℃水中養生を行った。鉄筋はかぶり20mmとなるよう試験体の中心に配置した。養生後、2点支持1点载荷により試験体下面に曲げひび割れを設けた。除荷後、開口面におけるひび割れ幅を測定した。その後、ひび割れ開口面を除く5面をエポキシ系樹脂により被覆し、Clは1面のみから侵入とした。Cl浸透促進試験は、4日間の3.0%NaCl水溶液浸漬、および3日間の乾燥(相対湿度60%)を1サイクルとする乾湿繰返し環境とし、20℃一定環境下にて13サイクルまで行った。試験終了後、ひ

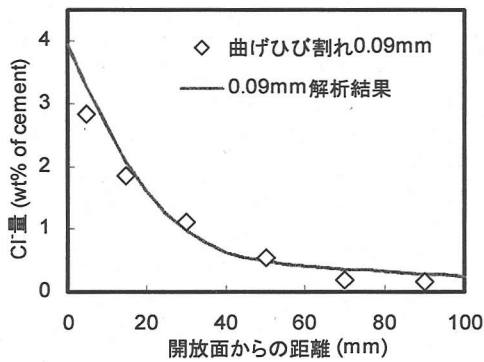


図-21 ひび割れ部 Cl⁻量 (W/C=0.60 乾湿 13 週)

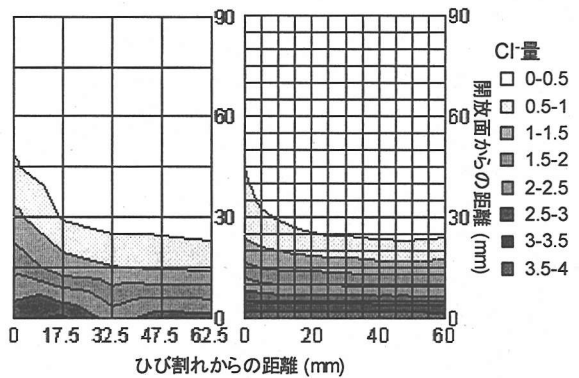


図-22 Cl⁻量分布 (W/C=0.60 乾湿 13 週)

び割れ部およびその周辺 (約 70×100mm) のコンクリート中の Cl⁻量を測定した。

b) 解析条件

促進試験 4 週および 13 週における表面塩分量および Cl⁻量分布より、これまでと同様、乾湿繰返し環境における表面塩分量の経時変化式 (式(9)), 収束塩分量と雰囲気濃度の関係式 (式(10)), および Cl⁻拡散係数 ($D_{con}=3.36 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$) を求めた。

$$C_0(t) = 3.98 \cdot \{1 - \exp(0.050t)\} \quad (9)$$

$$C^* = (C_{cr})^{1/2} \cdot 2.95 \quad (10)$$

ここで、この試験体については、湿潤時の Cl⁻移動性状を把握していない。したがって、3 章において得られた W/C=0.39 および 0.55 の湿潤環境下の Cl⁻拡散係数を用いて、W/C=0.60 の場合の湿潤時 Cl⁻拡散係数、および表面塩分量式における係数 a および b を概算した。各係数の予測方法と結果を図-20 に示す。求める係数は全てコンクリートの内部構造に依存する係数と考えられるため、全てが W/C によって定まると仮定し、この予測方法を採用した。

このケースの場合、コンクリートの乾湿繰返しサイクルが (湿潤 4 日 + 乾燥 3 日) = 7 日間であるため、まず 4 日間の湿潤環境下における Cl⁻移動計算を行う。これより、ひび割れ中の平均 Cl⁻濃度を求め、乾湿繰返し環境 (7 日間) の移動解析を行った。このときの Cl⁻拡散係数および境界条件は、乾湿繰返し環境下における実験結果である。

c) 解析結果

ひび割れ幅 0.09mm の試験体を対象としたひび割れ部 Cl⁻量の解析結果を、実験結果とともに図-21 に示す。また、図-22 に、実験および解析より得られ

たひび割れ周辺部の Cl⁻量分布を示す。解析結果は、ひび割れ部 Cl⁻量を精度良く評価しており、コンクリート内奥部に至るまで実験結果を度良く再現していることが分かる。

以上より、湿潤環境下を概算したにも関わらず、本手法により乾湿繰返し環境下におけるコンクリート中の Cl⁻移動性状を評価することが可能であることが示された。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 3.0%NaCl 水溶液への浸漬試験および乾湿繰返し試験において、コンクリートひび割れ部およびスリット部の Cl⁻量は、開放面が最も高く、ひび割れ深さが大きくなるにつれて低くなった。この現象はひび割れ・スリット幅の変化如何によらず生じるものであり、ひび割れ中の Cl⁻量とひび割れ中からひび割れ部へ侵入する Cl⁻の移動量の大小関係によって生じるものと考えられる。
- 2) コンクリートひび割れ部を開放面と同様に取扱い、ひび割れ深さ毎のひび割れ中の Cl⁻濃度、ひび割れ部の Cl⁻量、および Cl⁻量に対する質量保存則を考慮することにより、コンクリート中における濃度拡散と擬似吸着をマクロ的に表現した Cl⁻移動評価モデルを構築した。
- 3) 提案モデルは、湿潤および乾湿繰返し環境下におけるひび割れを有するコンクリートの Cl⁻移動性状を概ね再現することができた。精度の良い推定のためには、表面塩分量の経時変化式の設定が重要である。
- 4) Cl⁻供給量を決定するひび割れ幅と、Cl⁻消費量を

決定するコンクリートの Cl⁻拡散係数のバランスにより、ひび割れ部の Cl⁻量は決定される。そして、【供給量<消費量】の条件下において、ひび割れ幅がひび割れ部 Cl⁻量の支配要因となる。本研究では、ひび割れ幅 0.075mm 未満においてこの条件を満足する。

5) 提案モデルを乾湿繰返し環境下に適用するには、乾湿繰返し環境下における表面塩分量および拡散係数だけでなく、同じ配合条件のコンクリートの湿潤環境下における表面塩分量、および拡散係数を把握、或いは予測することが必要である。但し、その環境を乾湿サイクルとして表せることが解析モデルの適用条件である。

本研究では、表面塩分量を式(2)により、雰囲気濃度と表面塩分量の関係を式(3)の様に表示し、これを用いてコンクリート中の Cl⁻移動評価を行った。コンクリートの配合条件および環境条件と、収束塩分量 C^{*}、または係数 a、b、および見かけの拡散係数の関係を、詳細に検討し定式化することができれば、本モデルはより汎用性を持ち、塩分環境下におけるひび割れを有するコンクリートの Cl⁻移動性状の精度良い推定が可能となると考えられる。

謝辞：本研究は東京大学生産技術研究所魚本研究室にて行われた。本研究を行うにあたりご協力いただいた芝浦工業大学 矢島哲司教授、同大学 勝木太助教授、東京大学生産技術研究所 星野富夫氏、魚本研究室の皆様へ深く感謝いたします。また、本研究の一部は平成 13 年度吉田研究奨励金により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

1) 例えば 大即 信明, 宮里 心一, 柴田 常徳, 久田 真, Tarek Uddin Md., 長瀧 重義: 鉄筋コンクリートの曲

げひび割れ部に生じる腐食の形態機構に及ぼす水セメント比の影響, 土木学会論文集, No.606/V - 31, pp.63 - 73, 1998.11.

- 2) 岡田 清, 小柳 治, 宮川 豊章: コンクリート部材のひび割れと鉄筋腐食に関する研究, 土木学会論文集, No.281, pp.75 - 87, 1979.
- 3) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案), 1987.
- 4) 後藤 幸正, 大塚 浩司: 引張りを受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 294 号, pp.85 - 108, 1980.2.
- 5) 伊代田 岳史, 矢島 哲司, 魚本 健人: コンクリートのひび割れが塩分の浸透深さに及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集 V, Vol.53, pp.210 - 211, 1998.
- 6) 丸屋 剛: コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析手法の構築, 東京大学学位論文, 1995.
- 7) Buenfeld, N. R. and Newman, J. B.: The Permeability of Concrete in Marine Environment, Magazine of Concrete Research, Vol.36, No.127, pp.67 - 80, 1984.
- 8) 栢田 佳寛, 友沢 史紀, 安田 正雪, 原 謙治: コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.493 - 498, 1988.
- 9) 竹田 祐二, 栢田 佳寛, 中村 茂春, 吉瀬 健二: セメントペーストの塩化物イオン浸透メカニズムに関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.505 - 510, 2001.
- 10) Crank, J.: The Mathematics of Diffusion Second Edition, Oxford Science Publications, 1995.
- 11) 濱田 秀則, Swamy, R.N.: 種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの侵入過程および侵入量に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp.369 - 374, 1996.

(2002.5.24 受付)

A STUDY ON THE EVALUATION METHOD OF CHLORIDE ION MOVEMENT IN CRACKED CONCRETE

Emma TSUKAHARA, Yoshitaka KATO and Taketo UOMOTO

This paper aims to develop the evaluation method of chloride penetration in cracked concrete. The method is based on a simple apparent diffusion theory of chloride through concrete, enabling the prediction by obtaining the data at periodic inspection. Considering the chloride distribution in crack and mass preservation rule of chloride ion and applying different boundary chloride conditions to cracked portion and other surface, chloride penetration in cracked concrete can be predicted numerically in case of the wetting condition and cyclic wetting and drying condition. And effects of crack widths and apparent diffusion coefficient inside crack can be evaluated numerically.