

## ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動のモデル化

東京大学大学院 学生会員 塚原 絵乃  
 東京大学生産技術研究所 正会員 加藤 佳孝  
 東京大学生産技術研究所 F 会員 魚本 健人

### 1. はじめに

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、未だ定量的な評価がなされていないのが現状である。著者らは、ひび割れを有するコンクリート中の湿潤環境下での Cl<sup>-</sup>移動モデルの構築を試み、物質移動評価におけるひび割れの取扱い方について提案した<sup>1)</sup>。本報では、乾湿繰り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<sup>-</sup>移動モデルの構築を試みる。

### 2. コンクリート中の塩化物イオン移動のモデル化

本研究では、乾湿繰り返し環境下における Cl<sup>-</sup>の移動性状を、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下を問わず、常に平均的に移動すると仮定して表現する。解析概要を図-1 に示す。Cl<sup>-</sup>移動解析は、湿潤環境下における Cl<sup>-</sup>移動解析、ひび割れ部の Cl<sup>-</sup>量の設定とコンクリート中の Cl<sup>-</sup>拡散（乾湿繰り返し環境）より構成される。コンクリートの乾湿繰り返しサイクルが、(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<sup>1)</sup>。これより、湿潤環境期間中のひび割れ中の平均 Cl<sup>-</sup>濃度（雰囲気濃度）を求める。次に、湿潤解析から得られた情報をもとに、乾湿繰り返し環境(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は実験結果を式 1) に適用して、コンクリート中の Cl<sup>-</sup>拡散係数は、式 1) を境界条件とする Fick 則の厳密解より求める。

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

ここに、 $C_0(t)$ ：表面塩分量、 $C^*$ ：収束塩分量、 $b$ ：係数

また、ひび割れ部(ひび割れ或いはスリットより垂直方向 0 ~ 5mm の範囲)では、湿潤環境のひび割れ中の平均 Cl<sup>-</sup>濃度と乾湿繰り返し環境下における境界条件式(式 1), 2))を用いて Cl<sup>-</sup>量を設定する。

$$C^* = ([Cl^-])^{1/2} \cdot a \quad \dots 2)$$

ここに、 $a$ ：係数、 $[Cl^-]$ ：ひび割れ中の平均 Cl<sup>-</sup>濃度

以上の乾湿繰り返し環境下における Cl<sup>-</sup>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<sup>-</sup>拡散係数の設定、(2)ひび割れ部の Cl<sup>-</sup>量の設定、の順に述べる。

#### (1) 開放面における境界条件とコンクリートの Cl<sup>-</sup>拡散係数の設定

コンクリートの境界条件であ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、健全なコンクリートの開放面から 5mm までの全塩分量の経時変化を実験的に把握した。配合を表-1 に示す。開放面 1 面のみを浸

キーワード ひび割れ、塩化物イオン、表面塩分量

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 Tel.03-5452-6098 (内線 58090)

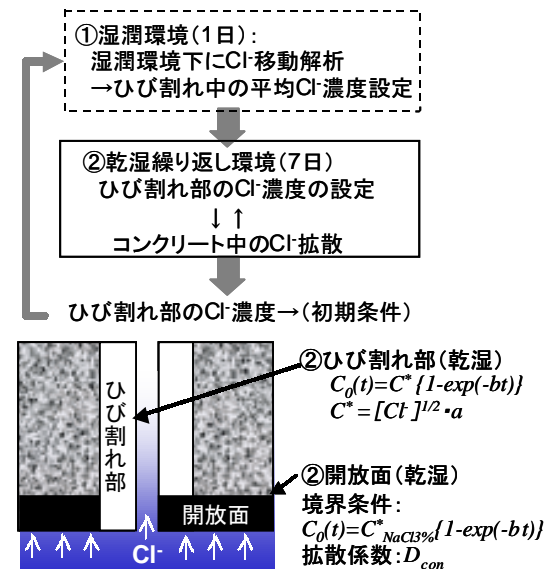


図-1 解析の基本的な流れ

表-1 コンクリートの配合

Gmax	W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	SP
20	0.55	0.463	167	304	857	1016	2.43
20	0.39	0.420	177	454	720	1016	4.99

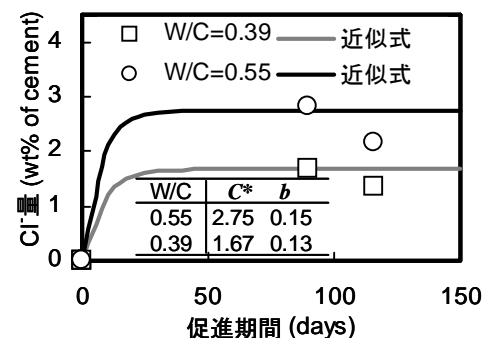


図-2 表面塩分量の経時変化

漬・乾燥面とし、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り返し試験を13サイクルまで行った。浸漬期間中、NaCl濃度は常時一定、環境温度は乾・湿ともに40一定である。ここで、開放面における実際の表面塩分量は浸漬時に増加し、乾燥時は減少することが考えられる。また、コンクリート中のClも乾燥の影響により開放面方向へ移動する。本研究では、乾燥期間中日に資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。表面塩分量測定結果と回帰分析結果を図-2に示す。また、同試験体より得られた健全部におけるコンクリート中のCl拡散係数は、W/C=0.39のとき $8.10 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、W/C=0.55のとき $1.96 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ と算出された。

(2) ひび割れ部のCl濃度の設定

本解析では、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濃度を求める。これを基に、各サイクルにおける乾湿繰り返し環境下のひび割れ部Cl量の初期値を決定する。ひび割れ部Cl量の設定方法の概念図を図-3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 $x$ におけるひび割れ中のCl濃度を $C_{cr}(x)$ とする。ここで、ひび割れ中のCl濃度とひび割れ部の収束塩分量の関係が式2)で表せるとすると、ひび割れ部Cl量は $C_{cr}(x)$ を基に仮想時間 $T$ を用いて式1)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。 $t+\Delta t$ 時のひび割れ部Cl量は、拡散後Cl量 $C_{con}(t')$  (Time= $T'+\Delta t$ )を基に、式1)より $C_{con}(t+\Delta t)$ と表せる。以上の解析モデルにより、乾湿繰り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移動性状を再現した。

3. 塩化物イオン移動モデルの妥当性

モデルの妥当性について、中央に1本スリットを持つ試験体（70×120×400mm）により検討を行った。試験体にはかぶり30,60,90mmとなるよう丸鋼（10mm）を配置しており、スリットは幅0.20mm、深さ120mmである。28日水中養生後、開放面（スリット開口面）を除く5面をエポキシ系樹脂により被覆し、Clが一面から侵入するようにした。配合は表-1と同様であり、環境条件は上記(1)と同様である。

スリット深さとコンクリートひび割れ部Cl量の関係を図-4に示す。また、水セメント比0.39について、EPMA分析から得られたスリット試験体のCl分布と、ひび割れ幅0.20mm時の解析結果を図-5に示す。これらの結果より、乾湿繰り返し環境を考慮した解析結果は実験値を概ね評価していることが分かる。

以上より、本研究において提案する物質移動評価におけるひび割れの取扱いは妥当であり、構築したモデルを用いてCl移動性状を予測することが可能である。また、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(式1)および2))の設定が重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 塚原絵万・加藤佳孝・魚本健人：塩化物イオンの移動評価におけるひび割れのモデル化，JCI年次論文報告集，2002（投稿中）

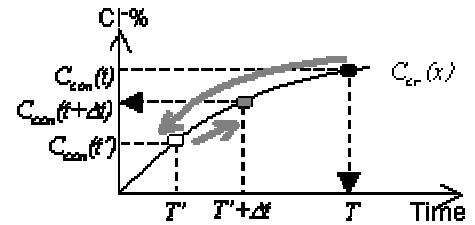


図-3 ひび割れ部Cl量の設定方法

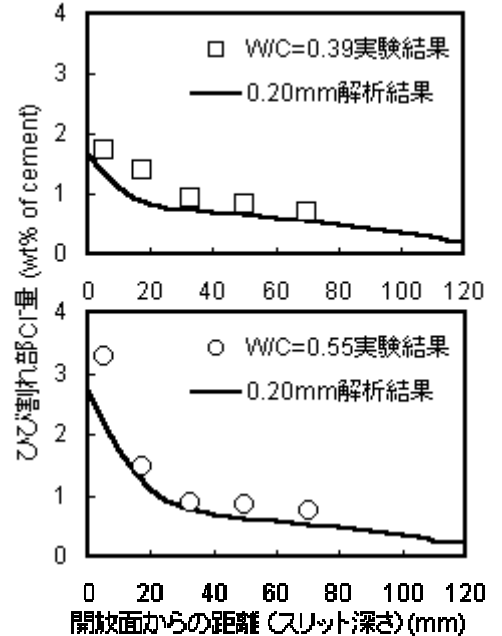


図-4 ひび割れ部Cl量の分布

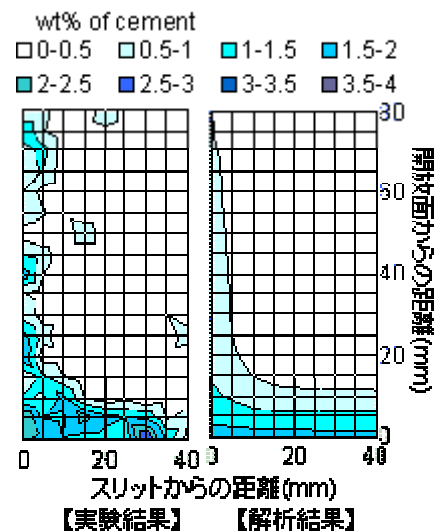


図-5 Cl量分布（13週）