

## 論文 塩化物イオンの移動評価におけるひび割れのモデル化

塚原絵万<sup>\*1</sup>・加藤佳孝<sup>\*2</sup>・魚本健人<sup>\*3</sup>

要旨：ひび割れを有するコンクリートの Cl<sup>-</sup> 移動性状の実験結果を基に，Cl<sup>-</sup> 移動評価におけるひび割れの取り扱い方法を提案し，ひび割れを有するコンクリートの Cl<sup>-</sup> 移動のモデル化を行った。本モデルは実験結果を概ね評価しており，解析的検討により，Cl<sup>-</sup> 供給量を決定するひび割れ幅と Cl<sup>-</sup> 消費量を決定するコンクリートの拡散性状によりひび割れ部の Cl<sup>-</sup> 量は決定され，【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における Cl<sup>-</sup> 濃度の支配要因となることが分かった。

キーワード：ひび割れ，塩化物イオン，表面塩分量

### 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り腐食因子である塩化物イオン，酸素および水分等の浸透を抑制している。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し早期に鉄筋腐食が生じることとなり，構造物が期待される供用年数内にその性能を喪失することが考えられる。ひび割れが構造物の耐久性能に与える影響が多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。

本研究では，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，物質移動評価におけるひび割れの取り扱い方について提案することを目的とした。

### 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

ひび割れを有するコンクリート中の Cl<sup>-</sup> 移動モデルの構築にあたり，まず，コンクリートの塩水浸漬実験により現象の把握を行った。

#### 2.1 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，粗骨材は両神産碎石を用いた。表-1 にコンクリートの配合および諸性質を示す。試験体寸法は 70×120×400mm であり，かぶり 30,60,90mm となるよう異形鉄筋 D10 を配置した。28 日水中養生後，2 点支持 2 点載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マイクロスコブにより測定した。その後，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<sup>-</sup> が 1 面のみから侵入するようにした。なお，表記する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。スリット試験体はかぶり 30,60,90mm となるよう丸鋼（10mm）を配置した。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 であり，スリット深さは 120mm 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<sup>-</sup> 浸透試験は材齢 35 日から行い，NaCl3.0% 水溶液浸漬試験（温度 40 一定）を 13 週間行った。試験終了後，ひび割れおよびスリット周辺の Cl<sup>-</sup> 量を測定した。今後表記する「ひび割れ

*1 東京大学大学院	工学系研究科社会基盤工学専攻	工修	（正会員）
*2 東京大学	生産技術研究所	博士（工学）	（正会員）
*3 東京大学	生産技術研究所	工博	（正会員）

表-1 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 <sup>3</sup> )					スラブ (cm)	空気量 (%)	f <sub>28</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
			水	セメント	細骨材	粗骨材	SP			
20	0.39	0.420	177	454	720	1016	C*1.1%	20	5.4	57.4
	0.55	0.463	167	304	857	1016	C*0.8%	11	3.6	41.0

部」は、ひび割れ或いはスリットより垂直方向 0～5mm の範囲を示す(図-1 参照)。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ものである。JCI-SC5 を参考に粉体試料から測定試料を作成し、塩分析計を用いてセメント中に含まれる全塩分量の測定を行った。

### 2.2 ひび割れ部の塩化物イオン濃度分布

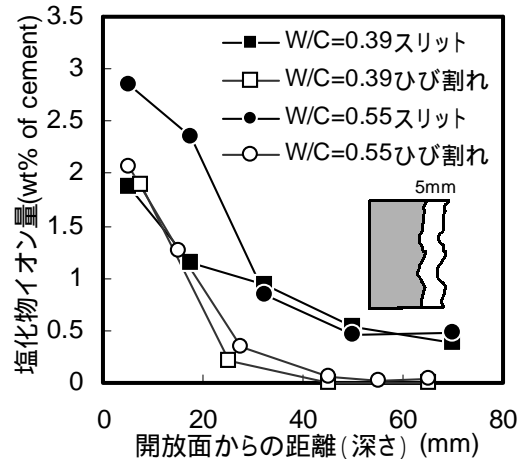
図-1 にひび割れ部におけるひび割れ深さ毎の Cl<sup>-</sup> 濃度分布 (13 週) およびひび割れ試験体のひび割れ幅・深さを示す。ひび割れ部付近の Cl<sup>-</sup> 濃度は、開放面が最も高くひび割れ深さ方向に進むにしたがって低くなるのが分かる。スリット試験体もひび割れ試験体と同様の傾向を示した。W/C を比較すると、W/C=0.55 の方がひび割れ部の濃度が高くなった。これについては、伊代田ら<sup>1)</sup>が行った曲げひび割れを有するコンクリートのひび割れ部と健全部の塩分浸透深さの比較実験でも見受けられ、ひび割れからの浸透深さ(ひび割れ垂直方向)は、開放面からの浸透深さよりも小さい傾向にあると報告されている。これらの結果は、ひび割れ内において Cl<sup>-</sup> 濃度勾配が生じていることを示唆していると考えられる。なぜなら、浸漬試験中、ひび割れ・スリット内は常に NaCl 水溶液で満たされており、これが濃度一定であれば、図-1 の Cl<sup>-</sup> 濃度分布は開放面からの距離によらずほぼ一定値になると考えられるからである。

以上の実験結果および考察を基に、次節よりひび割れを有するコンクリート中の Cl<sup>-</sup> 移動現象のモデル化を行う。

## 3. 塩化物イオン移動性状のモデル化

### 3.1 解析の基本的な考え方

本研究では、Cl<sup>-</sup> 移動現象を見かけの拡散現象



W/C	ひび割れ幅	ひび割れ深さ
0.39	0.90mm	72mm
0.55	0.70mm	84mm

図-1 ひび割れ部の Cl<sup>-</sup> 濃度分布

として表現し、単純化して取扱うことを重視した。対象とする塩分は、固定化や吸着等、全ての Cl<sup>-</sup> 移動に関わる現象が含まれた結果である全塩分量である。

提案する Cl<sup>-</sup> 移動モデルは、

ひび割れ内の Cl<sup>-</sup> の拡散

コンクリートひび割れ部の Cl<sup>-</sup> 濃度の設定およびひび割れ内-ひび割れ部における Cl<sup>-</sup> 量の収支計算

コンクリート中の Cl<sup>-</sup> 拡散

より構成される。

ここで、コンクリートひび割れ部はひび割れ内の 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。丸屋<sup>2)</sup>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、溶液の濃度は 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、ひび割れ内の溶液濃度は深さ毎に異なることが考えられるため、流束は溶

液濃度と表層部の塩化物濃度の関数として定義する必要がある。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コンクリートひび割れ部にも拡張して用いることとした。つまり、コンクリートひび割れ部の表面塩分量はひび割れ内の  $Cl^-$  濃度により決定される。この時、ひび割れ内からコンクリートひび割れ部への  $Cl^-$  の浸透に関して、両領域の濃度勾配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モデル化する。コンクリート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、前述 ~ の解析条件について順に詳細を述べる。

### 3.2 ひび割れ内の塩化物イオンの拡散

ここでは、ひび割れ内の  $Cl^-$  濃度分布を求めることを目的とする。ひび割れ内の拡散解析における境界条件は、浸漬溶液中の  $Cl^-$  濃度（一定）となる。その他、解析条件としてひび割れ内の見かけの  $Cl^-$  拡散係数が必要となる。これは、 $NaCl$  3.0% 水溶液と蒸留水を用いた拡散セル試験にて把握した。

図-2 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、割裂試験によりひび割れを設けた。この後表記するひび割れ幅は、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 0.025~0.20mm）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殆ど無いため、ひび割れ内の  $Cl^-$  拡散の基礎性状把握に最適と考えたためである。

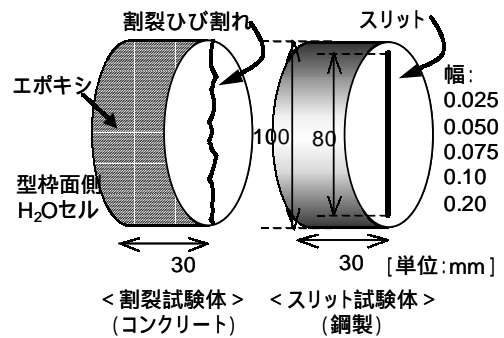


図-2 ひび割れおよびスリット試験体概要

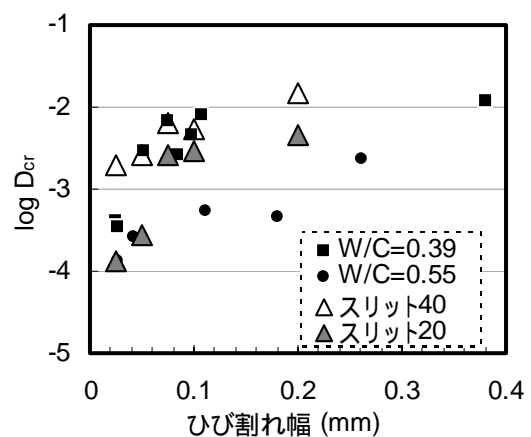


図-3 ひび割れ幅と  $Cl^-$  拡散係数の関係

ひび割れ内の  $Cl^-$  拡散係数  $D_{cr}$  は式 1)<sup>3)</sup> から求めることができる。

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

ここで、 $J$ :  $H_2O$  セルへのイオン流速、 $A$ : ひび割れ断面積、 $V_{H_2O}$ :  $H_2O$  セルの溶液体積、 $l$ : 試験体厚さ、 $C_{NaCl}$ ,  $C_{H_2O}$ : 試験体表面部のイオン濃度である。

なお、割裂試験体については、破断面の形状をレーザー変位センサーによって把握し、ひび割れ長さおよび試験体厚さ方向の流路長を考慮して拡散係数を算出した。

図-3 にひび割れ幅と  $Cl^-$  拡散係数の関係を示す。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、ある程度のひび割れ幅以上では拡散係数は収束することが考えられる。

以上の実験より得られたひび割れ幅毎のひび割れ内  $Cl^-$  拡散係数より、ひび割れ内の  $Cl^-$  濃

度分布の計算が可能となる。

### 3.3 ひび割れ部の塩化物イオン濃度の設定および収支計算

ここでは、コンクリートひび割れ部の  $Cl^-$  濃度の設定を行うことを目的とする。

任意の溶液濃度環境下における表面塩分量の定式化を行うにあたり、健全なコンクリートの開放面から 5mm までの  $Cl^-$  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 100 × 100mm である。1.0, 2.0, 3.0, 5.0% NaCl 水溶液への浸漬を行い、全  $Cl^-$  量を測定した。期間中、溶液濃度および環境温度(40 )は一定である。

図-4 に各配合における溶液濃度毎の表面塩分量の経時変化を示す。既往の研究より<sup>4)</sup>、表面塩分量の経時変化は以下の式2)で近似できる。

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

ここで、 $C_0(t)$ : 表面塩分量、 $C^*$ : 収束塩分量、 $b$ : 収束速度を表す係数である。

ここで、 $b$  は配合・環境条件が等しければ溶液濃度によらず一定であると仮定すると、溶液濃度毎に収束塩分量  $C^*$  が決定される。得られた  $C^*$  と溶液中  $Cl^-$  濃度の関係を図-5 に示す。収束塩分量  $C^*$  と浸漬溶液中の  $Cl^-$  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、収束塩分量  $C^*$  は以下の式3)により表すことができる。

$$C^* = ([Cl^-])^{1/2} \cdot a \quad 3)$$

ここで、 $a$ : 図-5 の近似直線の傾き、 $[Cl^-]$ : 浸漬溶液中の  $Cl^-$  濃度である。

解析モデル中のコンクリートひび割れ部の濃度は、ひび割れ内の拡散解析の結果得られる  $Cl^-$  濃度とコンクリートひび割れ部の濃度に依存し、質量保存則の基に式3)で表した溶液濃度と表面塩分量の関係を適用することで算出した。ここで、任意の時間  $t$  におけるひび割れ内任意の点の  $Cl^-$  濃度を  $C_{cr}(t)'$  とし、収支計算前のコンクリートひび割れ部の  $Cl^-$  濃度を  $C_{con}(t-\Delta t)$  とお

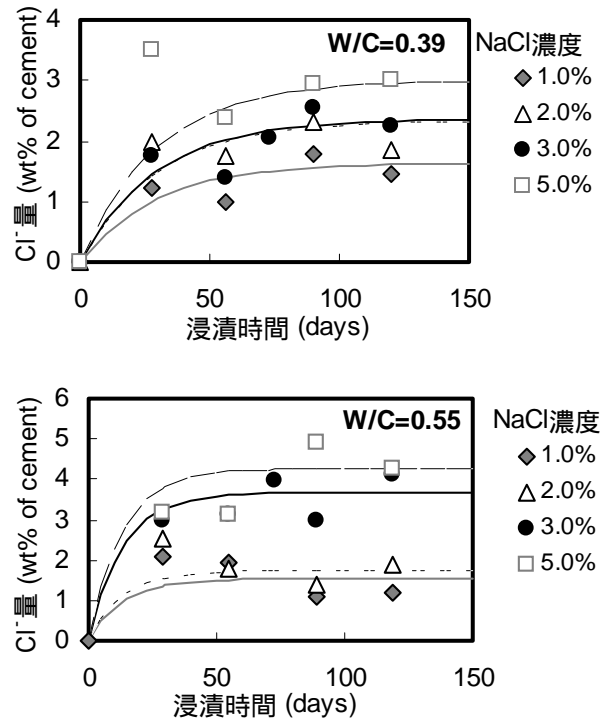


図-4 表面塩分量の経時変化

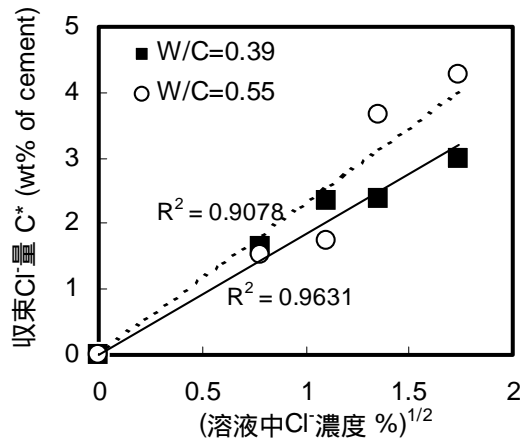


図-5 収束  $Cl^-$  量  $C^*$  と溶液濃度の関係

く。ここで、 $t-\Delta t$  から  $t$  におけるひび割れ内の  $Cl^-$  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  $(C_{cr}(t)' + C_{cr}(t-\Delta t))/2$  を雰囲気(溶液)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。

$$C_{con}(t - \Delta t) = C_{\frac{C_{cr}(t)'+C_{cr}(t-\Delta t)}{2}} \{1 - \exp(-b(T))\} \quad 4)$$

ここで、 $C_{(C_{cr}(t)'+C_{cr}(t-\Delta t))/2}$ : 雰囲気濃度  $(C_{cr}(t)'+C_{cr}(t-\Delta t))/2$  のときの収束塩分量である。

仮想時間  $T$  から  $\Delta t$  経過時の  $\text{Cl}^-$ 濃度を時間  $t$  におけるコンクリートひび割れ部の  $\text{Cl}^-$ 濃度として  $C_{con}'$  とする (図-6 参照)。次に、ひび割れ内の  $\text{Cl}^-$ 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。この際、受け渡しを行うひび割れ内・ひび割れ部の両領域の  $\text{Cl}^-$ 総量の釣り合いにより、コンクリート中に侵入する  $\text{Cl}^-$ 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内の  $\text{Cl}^-$ 拡散解析において初期濃度となる。

### 3.4 ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオンの拡散

ここでは、により得られたひび割れ部  $\text{Cl}^-$ 濃度と、開放面における境界条件およびコンクリートの見かけの拡散係数  $D_{con}$  を用いて、ひび割れを有するコンクリート中の  $\text{Cl}^-$ の拡散を計算する。

コンクリートの見かけの拡散係数は、表面塩分量把握実験と同じ試験体より得られた  $\text{Cl}^-$ 濃度分布実測値 (NaCl3.0% 溶液-13 週間浸漬) より求めた。境界条件を式 2)とした場合の Fick 則の厳密解<sup>5)</sup>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。また、開放面における境界条件は、3.3 で述べた NaCl 3.0%の表面塩分量(式 2)となる。

以上、の解析条件を図-7 に簡単にまとめる。これより、ひび割れを有するコンクリートの塩化物イオン移動性状をシミュレートした。

### 4. ひび割れが $\text{Cl}^-$ 浸透に及ぼす影響

構築したモデルの妥当性について、スリット試験体 (幅: 0.20mm) により検討を行った。図-8 に、 $W/C=0.39$  および 0.55 における開放面からの距離とコンクリートひび割れ部の  $\text{Cl}^-$ 量の関係を示す。図中プロットは実測値を示し、実線は解析値を示す。解析値は実験値を概ね再現しており、開放面における表面塩分量の設定方

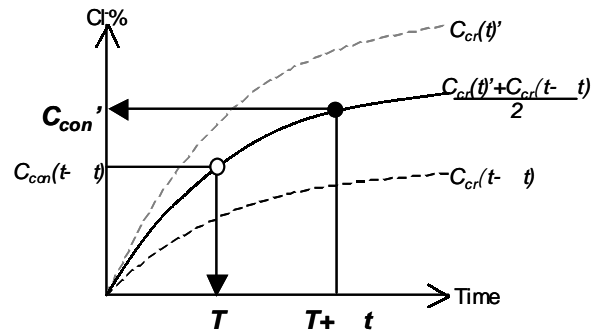


図-6 ひび割れ部における  $\text{Cl}^-$ 濃度の設定

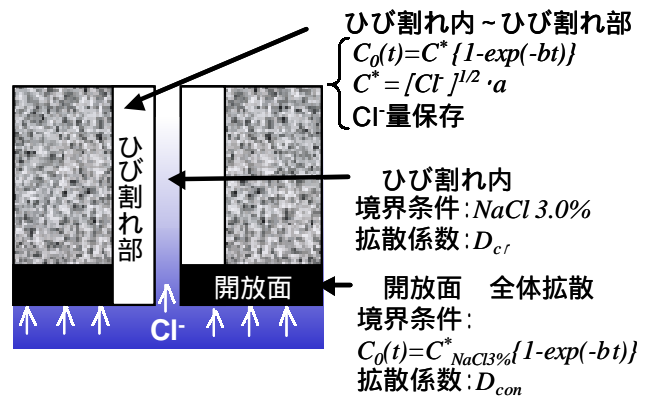


図-7 解析条件概略

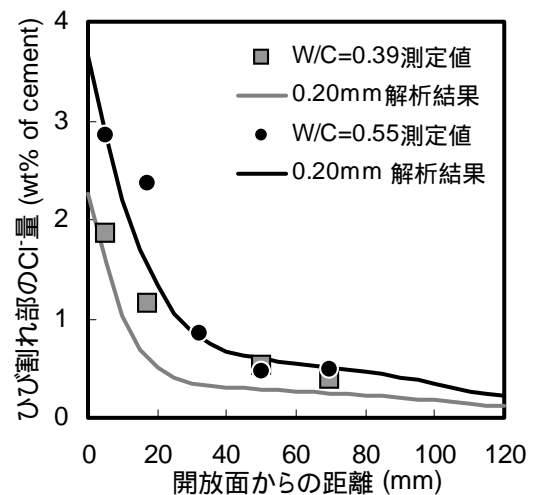


図-8 解析モデルの検証 (スリット試験体)

法をひび割れ部にも拡張し、ひび割れ内・ひび割れ部の  $\text{Cl}^-$ 濃度および  $\text{Cl}^-$ 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  $\text{Cl}^-$ 移動評価が可能であると考えられる。

次に、ひび割れ幅がコンクリートひび割れ部

の CI 量に及ぼす影響について解析的に検討を行った。図-9 にひび割れ幅とかぶり 30,60,90mm におけるひび割れ部の CI 量の関係 (13 週解析結果) を示す。何れの場合も, CI 量はひび割れ幅 0.075mm まで増加し, その後はほぼ一定となった。また, この現象は W/C=0.55 の方が顕著に表れている。これは, 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の拡散性状のバランスにより, ひび割れ部の CI 量は決定され, 【CI 供給量 < CI 消費量】の条件下において, ひび割れ幅がひび割れ部 CI 量の支配要因となることによると考えられる。本研究では, ひび割れ幅が 0.075mm より小さい場合においてこの条件を満足し, 他においては供給量が卓越するため, ひび割れ幅はコンクリートひび割れ部 CI 量の支配要因とならないことが考えられる。さらに, W/C の影響に関しては, W/C=0.55 は W/C=0.39 と比べてコンクリートの拡散係数が大きく, 結果として CI 消費量が多くなるため, ひび割れ幅の減少に伴ってひび割れ内の CI 量が不足する現象が顕著に表れたと考えられる。

## 5. まとめ

本研究により得られた成果を以下に示す。

- 1) コンクリートひび割れ部を開放面と同様に取り扱い, ひび割れ内の CI 濃度, コンクリートひび割れ部の CI 濃度, および CI 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表現した CI 移動評価モデルを構築した。
- 2) 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の拡散性状のバランスにより, コンクリートひび割れ部の CI 量は決定され, 【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における CI 濃度の支配要因となる。本研究では, 0.075mm より小さいひび割れ幅の場合にこの条件を満足する。

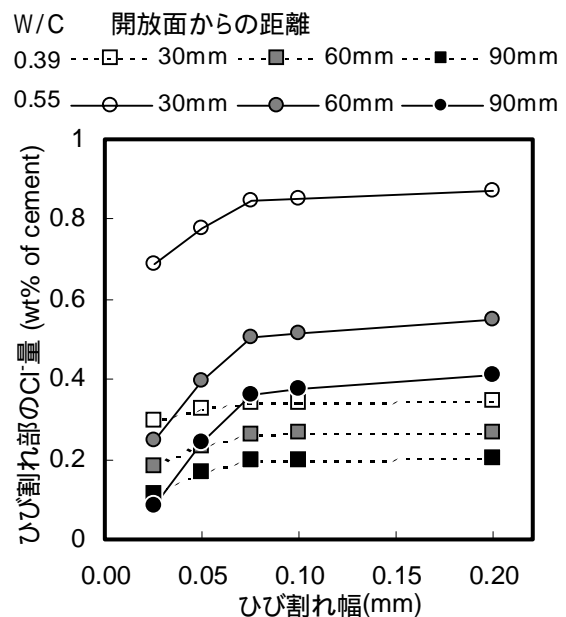


図-9 ひび割れ幅とひび割れ部の CI 量の関係 (解析結果-13 週)

謝辞：本研究を実施するにあたりご協力頂いた芝浦工業大学 矢島 哲司 教授, 勝木 太 助教授に深く感謝致します。また, 本研究の一部は平成 13 年度科学研究費補助金 (基盤研究(A), 課題番号 12305029) により行われたことを付記する。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) N. R. Buenfeld and J. B. Newman: The Permeability of Concrete in Marine Environment, Magazine of Concrete Research, Vol.36, No.127, PP.67-80, 1984
- 4) 例えば 榎田 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, 1988
- 5) J. Crank: The Mathematics of Diffusion Second Edition, Oxford Science Publications, 1995