

# 論文 外力による損傷を受けたコンクリートの塩分浸透特性に関する電気泳動法を用いた実験的検討

齊藤 準平\*1・下邊 悟\*2

**要旨:** ひび割れを有すコンクリート構造物のかぶり部分のモデル化供試体に対し、無負荷状態、加力によって損傷を与えその加力を維持した状態ならびにその加力を除荷した状態における電気泳動実験を実施した。損傷は表面から視認可能なひび割れと視認困難な内部損傷を想定し、それらがコンクリートの塩分浸透に及ぼす影響を、実験結果から求めた拡散係数やひび割れの影響を表す定数等から検討した。さらに、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕の塩害に対する照査における、ひび割れ条件や部材の適用範囲の制限を拡張した著者の提案式への上述した損傷因子の導入の妥当性を検討した。

**キーワード:** 塩分浸透, ひび割れ, 外力, 損傷, 電気泳動

## 1. はじめに

塩害を受けたコンクリート構造物への維持補修計画の効率的な遂行のためには、塩分浸透特性を適切に評価する必要がある。特にひび割れを有する場合は、ひび割れが塩分の浸透を助長する恐れがあり、またひび割れは増加進展する可能性があるため、現状のひび割れにおける補修・補強の必要性を見極めるためには、その状態での塩分浸透特性の適切な評価が必要になる。

第一著者は、多様化するひび割れや部材への塩分浸透特性評価のために、ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性を拡散係数で評価する方法として、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕(以下、標準示方書と略称する)で提示されている、塩害に対する照査における鋼材位置における塩化物イオン濃度の算出方法<sup>1)</sup>(以下、JSCE算出方法と略称する)を、実験によって検討し、ひび割れ面積比を用いること、ひび割れ深さの影響をひび割れの影響を表す定数を減ずることによって、評価できるひび割れ条件や部材の適用範囲の制限を拡張してきた<sup>2)3)4)</sup>。この拡張式(式(1))<sup>2)</sup>(以下、提案式と略称する)によって、JSCE算出方法が対象とするはりに発生した曲げひび割れだけでなく、床版のような広い面に対し、不規則な複数のひび割れが散在する場合や、ひび割れが鉄筋まで達していない場合の塩分浸透特性が評価できる可能性を得た。

$$D_{cr} = \left( \frac{A_{cr}}{A} \right) \times D(x) \quad (1)$$

ここで、 $D_{cr}$ : ひび割れの影響を考慮した拡散係数、 $A_{cr}/A$ : ひび割れ面積比、 $A_{cr}$ : ひび割れ面積(=ひび割れ幅×ひび割れ長さ×ひび割れ本数)、 $A$ : 対象となるコンクリート面積、 $D(x)$ : ひび割れ深さに関する変数(= $D_0 \times (x/\text{かぶり})$ )、 $D_0$ : ひび割れの影響を表す定数(200 (cm<sup>2</sup>/年))、 $x$ : ひび割れ

深さ(上限値=かぶり)である。

一方で、本提案式の実構造物への適用という面では、人工的に作製したひび割れではなく、より現実的な作用、すなわち加力によって発生した損傷ひび割れに対しての適用性を検討する必要があると考えられる。これは、加力が表面の視認できるひび割れの発生を誘引するだけでなく、コンクリートの内部の不可視な微細ひび割れ等の損傷を生じさせ、これらが結果的に塩分の浸透に影響するにもかかわらず、提案式には内部の微細ひび割れ等の損傷の考慮がなされていないからである。

そこで、本論文ではひび割れを有するコンクリート構造物のかぶり部分をモデル化したモルタル供試体に対し、無負荷状態、加力によって損傷を与えその加力を維持した状態ならびにその加力を除荷した状態における電気泳動実験によって、増加進展するひび割れならびに内部損傷が塩分浸透特性に及ぼす影響を検討した。さらに、これら結果に基づく、加力による増加進展ひび割れと内部損傷の影響の提案式への導入の妥当性を検討した。

## 2. 実験概要および供試体

実験の進行手順は表-1のように加力状態を変化させた全3段階とする。段階1は、人工ひび割れ(初期ひび割れ)が有る無負荷状態、段階2は加力によって新たなひび割れが発生し、そのひび割れが進展した状態(加力維持)、段階3は段階2の加力を除荷した状態とする。それら各段階に対し電気泳動実験を行い塩分浸透特性との

表-1 実験の進行手順

段階	加力状態	ひび割れ		電気泳動実験	
		人工ひび割れ	加力による増加進展	非定常状態	定常状態
1	無負荷	○	—	○	○
2	加力	○	○	—	○
3	除荷	○	○	—	○

\*1 日本大学 理工学部交通システム工学科助教 博士(工学)(正会員)

\*2 日本大学 理工学部交通システム工学科教授 工学博士(非会員)

関係を検討する。ただし、段階1から段階3まで同一供試体で電気泳動実験を行うことから、段階2、段階3では電気泳動開始と同時に定常状態となるため、第1段階で見られる電気泳動実験における非定常状態はない。また、人工ひび割れは、増加進展ひび割れの発生機構の一部を担っている。

## 2.1 電気泳動実験

### (1) 実験装置と測定項目

本実験で使用する実験装置（実験装置の概念図（図-1）、電気泳動実験装置（加力フレーム付き）（図-2））は、実効拡散係数試験方法（JSCE-G571）<sup>5)</sup>に準拠した。

主な測定項目は、電流、電位差、陽極側と陰極側の塩化物イオン濃度、pHおよび溶液温度である。実効拡散係数は、塩化物イオン濃度の経時変化が一定になった時の流束から、式(2)<sup>5)</sup>によって計算した。

$$D^* = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $D^*$ ：実効拡散係数（ $\text{cm}^2/\text{年}$ ）、 $J_{Cl}$ ：塩化物イオンの定常状態の流束（ $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$ ）、 $R$ ：気体定数（ $8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ）、 $T$ ：絶対温度（ $\text{K}$ ）、 $Z_{Cl}$ ：塩化物イオンの電荷（ $=-1$ ）、 $F$ ：ファラデー定数（ $96,500\text{C}/\text{mol}$ ）、 $C_{Cl}$ ：陰極側の塩化物イオン濃度（ $\text{mol}/\text{l}$ ）、 $\Delta E - \Delta E_c$ ：供試体表面間の電位差（ $\text{V}$ ）、 $L$ ：供試体厚さ（ $\text{mm}$ ）である。

### (2) 供試体形状

供試体（図-3）は、コンクリート構造物のかぶりを40mmと設定し、塩分浸透面を表面（電気泳動実験では陰極側）、鉄筋位置を裏面（電気泳動実験では陽極側）と

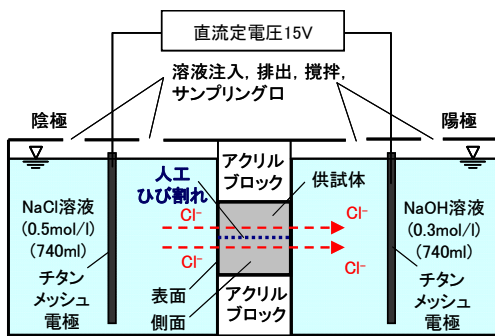


図-1 電気泳動法の実験装置の概念図

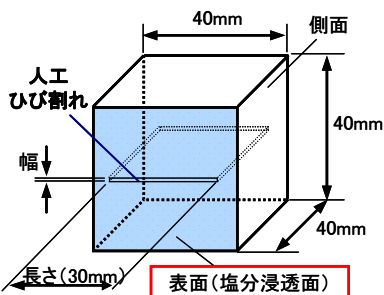
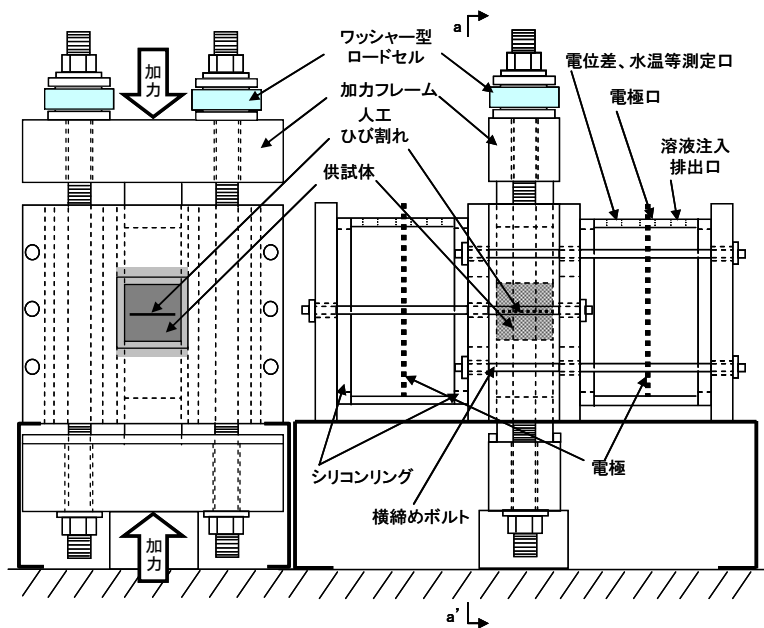


図-3 供試体形状



断面図 (a-a' 断面)

側面図

図-2 電気泳動実験装置（加力フレーム付き）

表-2 供試体の種類

供試体名	人工ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ面積比
S-40	0.1	0.0018
M-40	0.2	0.0037
L-40	0.4	0.0074
N	-	-

表-3 供試体の配合

W/C (%)	S/C (vol%)	単用量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			空気量 (%)	フロー
		W	C	S		
55	400	257.9	469.0	1576	4.92	148

表-4 材料の力学的性質

W/C (%)	圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	曲げ強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	単位容積質量 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )
55	36.89	2.699	4.727	2.162

なるようにモデル化した立方体である。

電気泳動法の適用では供試体中に鋼材は配置できないため、設定通りの人工ひび割れを精度良く設置するために、ひび割れの幅と同じ厚みのシートを配置してモルタルを打設し、硬化後にシートを抜き取り作製した。電気泳動実験への使用は、打設から28日経過後とした。

### (3) 供試体の種類

供試体の種類を表-2に示す。人工ひび割れは、ひび割れ幅のみ変化させた。ひび割れ幅は、標準示方書の鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値<sup>6)</sup>に準じて、一般の環境下の鉄筋と想定した式より、ひび割れ幅の限界値を $0.005 \times 40\text{mm} = 0.2\text{mm}$ とし、ひび割れ幅の限界値前後になるように、0.1、0.2、0.4mmの3種類とした。比較の

ために、ひび割れがないタイプ N を同時に作製した。

#### (4) 使用材料と配合

表-3 に供試体の配合を、表-4 に材料の力学的性質を示す。供試体はモルタルを用いた。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は山砂(2.5mm ふるい通過、表乾密度 2.654g/cm<sup>3</sup>) を用いた。

#### 2.2 増加進展ひび割れの作製方法

加力によるひび割れの増加進展は、図-4 に示すような作製方法によって、人工ひび割れの上下部においてそれぞれ加力により単純はりのような応力状態を形成させ(図-4(b)), 引張応力によって曲げひび割れを誘引する仕組みとした。加力は実験装置の加力フレームで与え、その値はワッシャー型ロードセルにて随時確認した。増加進展ひび割れの幅が 0.1mm からひび割れ幅の限界値(0.2mm) 程度の間になるように調整しながら加力を与えた。この際、ひび割れ幅はクラックスケールによって計測した。なお、加力による引張応力によって増加進展ひび割れが発生進展および拡大する一方で、圧縮応力により人工ひび割れの幅は縮小するため、各段階で人工ひび割れと増加進展ひび割れのひび割れ幅を計測した。

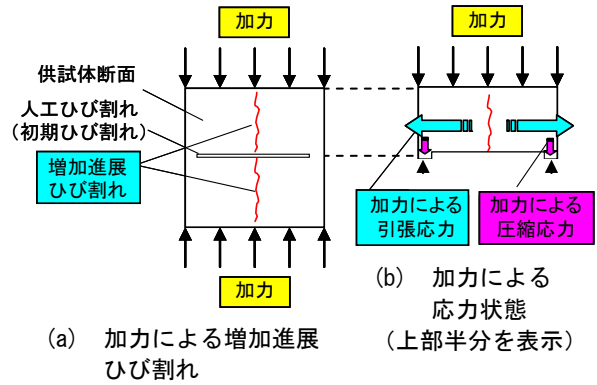


図-4 増加進展ひび割れの作製方法

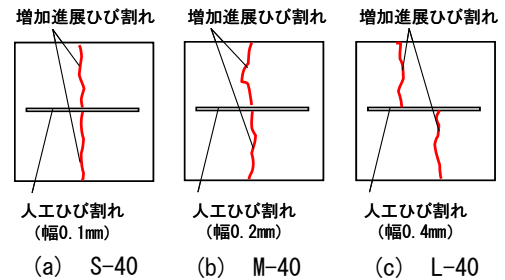


図-5 増加進展ひび割れ状況 (塩分浸透面)

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 各段階におけるひび割れの増加進展状況

図-5 に増加進展ひび割れ状況 (塩分浸透面) を示す。加力による増加進展ひび割れは図-4 に示すように概ね予定通り、水平方向中央部付近に鉛直方向に発生し進展した。表-5 に加力(段階 2) および除荷(段階 3) によるひび割れ幅の変化を示す。表より、段階 2 において、加力による引張応力によってひび割れが発生、増加進展および拡大し、他方、人工ひび割れの幅は加力による圧縮応力によって縮小したことが確認された。また、段階 3 において、発生した応力が除荷によって解放されることにより、人工ひび割れの幅は段階 1 (無負荷) のひび割れ幅に戻り、増加進展ひび割れの幅は段階 2 (加力) より縮小したことが確認された。

#### 3.2 陽極側塩化物イオン濃度の経時変化

図-6 に各供試体の段階 1 (無負荷) における陰極側から陽極側に移動した塩化物イオン濃度の経時変化を示す。なお、本研究における塩化物イオン濃度の経時変化には、通電以外の因子による濃度変化は除外している<sup>7)</sup>。図より、ひび割れ無し (N) よりひび割れ有り (S-40, M-40, L-40) の方が塩化物イオン濃度の増加傾向が早いこと、人工ひび割れ幅の大きいものほど塩化物イオン濃度の増加速度は高く、また濃度増加率が一定となる定常状態ではその傾きも大きくなることわかる。

図-7 に各供試体の全段階とひび割れ無しの場合における陽極側塩化物イオン濃度の経時変化を示す。段階 2,

表-5 加力および除荷によるひび割れ幅の変化

供試体名	段階	データ名	加力状態	ひび割れ幅 (mm)		ひび割れ面積比	電流の平均値 (mA)
				人工ひび割れ	増加進展ひび割れ		
S-40	1	S-40NL	無負荷 (No-Loading)	0.1	—	0.0018	4.77
	2	S-40L	加力 (Loading) (加力: 26.5kN)	0.05 (縮小)	0.1 (発生、拡大)	0.0033	6.16
	3	S-40UL	除荷 (Un-Loading)	0.1 (拡大)	0.05 (縮小)	0.0030	6.69
M-40	1	M-40NL	無負荷 (No-Loading)	0.2	—	0.0037	5.21
	2	M-40L	加力 (Loading) (加力: 8.34kN)	0.05 (縮小)	0.15 (発生、拡大)	0.0047	6.28
	3	M-40UL	除荷 (Un-Loading)	0.2 (拡大)	0.1 (縮小)	0.0062	7.00
L-40	1	L-40NL	無負荷 (No-Loading)	0.4	—	0.0074	6.30
	2	L-40L	加力 (Loading) (加力: 8.56kN)	0.3 (縮小)	0.2 (発生、拡大)	0.0105	6.96
	3	L-40UL	除荷 (Un-Loading)	0.4 (拡大)	0.1 (縮小)	0.0098	7.21
N	1	N-NL	無負荷 (No-Loading)	—	—	—	4.66

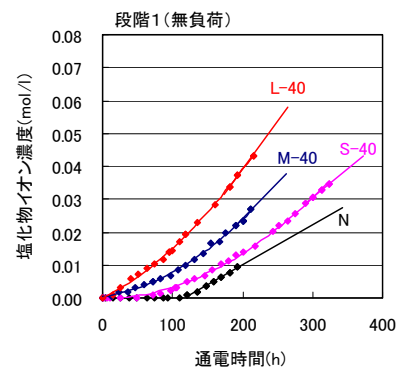


図-6 各供試体の段階 1 (無負荷) における陽極側塩化物イオン濃度の経時変化

3 の経時変化には実験値を示し、段階 1 およびひび割れ無しの経時変化には定常状態の実験値を近似した傾きを示した。これは、通電後即定常状態となる段階 2, 3 の実験値の経時変化と、通電後非定常状態の後に定常状態となる段階 1 (図-6) およびひび割れ無しの定常状態部分の経時変化を比較するためである。図によると、ひび割

れ無しよりひび割れ有りが塩分浸透速度が速いことがわかる。また、段階1より段階2、および段階2より段階3での塩化物イオン濃度の増加が早い傾向にあることがわかる。段階1から段階2以降への塩化物イオン濃度の増加傾向の変化は、ひび割れ面積比の変化(表-5)が示す通り、加力によるひび割れの増加進展および幅の拡大によりひび割れ面積が大きくなったことや、加力による内部損傷によって塩分浸透がしやすくなったものと考えられる。段階2と段階3の塩化物イオン濃度の増加傾向の違い、すなわちS-40、L-40で見られるようなひび割れ面積比がほぼ同じでありながら段階2が段階3より塩化物イオン濃度の増加傾向が遅くなっている状況、M-40で見られるようなひび割れ面積比の変化の影響以上に段階2が段階3より塩化物イオン濃度の増加傾向が遅くなっている状況については、ひび割れ面積比の変化以外の影響因子として、加力状態維持と除荷の違いが寄与していると考えられる。

### 3.3 塩化物イオンの実効拡散係数

図-7で示した塩化物イオンの浸透速度を定量的に検討するため、式(2)によって、供試体の断面積や厚さの違いおよび各段階の実験中の電位差や溶液量の違いの影響を解消し、各供試体の全段階における塩化物イオンの実効拡散係数  $D^*$  を計算した。図-8に各供試体における全段階の塩化物イオンの実効拡散係数  $D^* (=D_N^* + D_{cr}^*)$  を、材料の品質の影響を考慮した実効拡散係数  $D_N^*$  と、ひび割れの影響を考慮した実効拡散係数  $D_{cr}^*$  に区分して示す。ここで、 $D_N^*$  はひび割れ無しの実効拡散係数であり、 $D_{cr}^*$  はひび割れを有する各供試体の各段階の実効拡散係数  $D^*$  からひび割れ無しの実効拡散係数  $D_N^*$  を差し引いたものである。なお、見掛けの拡散係数と実効拡散係数は本質的に異なるため、それらを区別するため当該量記号右肩に\* (アスタリスク) を付している。

図より、ひび割れ幅の違いに関わらず、段階1から段階2や段階3へと進むにつれて、加力によるひび割れ面積比の増加と内部損傷の影響によって、ひび割れの影響を考慮した実効拡散係数  $D_{cr}^*$  が大きくなること、段階2から段階3へと進むにつれて、加力状態が除荷されることによって  $D_{cr}^*$  が大きくなること、それにより  $D_N^*$  と  $D_{cr}^*$  の合計である実効拡散係数  $D^*$  が大きくなる傾向があることがわかる。ただし、図-9に示すように、実際には段階2における材料の品質の影響を考慮した実効拡散係数  $D_N^*$  は、迫井ら<sup>8)</sup>の研究結果を参考にすると、加力(圧縮力)の程度にもよるが本研究の場合には加力によって  $D_N^*$  は小さくなっていると推測される。そのため段階2の  $D_{cr}^*$  は上述の計算によった場合は実際より小さく計算されていると考えられ、実質的には段階3と同等かそれ

より大きい可能性が高いと思われる。しかしながら、圧縮力による  $D_N^*$  の減少量を無視できないことから、段階2の  $D_{cr}^*$  は、ひび割れや内部損傷による  $D_{cr}^*$  の増加量と  $D_N^*$  の減少量の両方を踏まえ、 $D_{cr}^*$  は  $D_N^*$  の減少分を考慮された形として扱うこととする。

### 3.4 ひび割れの影響を表す定数

内部損傷の塩分浸透性への影響は、表面から材料部分を浸透する経路より、内部までのひび割れを介する経路の方が内部損傷部分に塩分が浸透しやすくなることが推測でき、また式(1)の各パラメータに限った場合では、内部損傷が

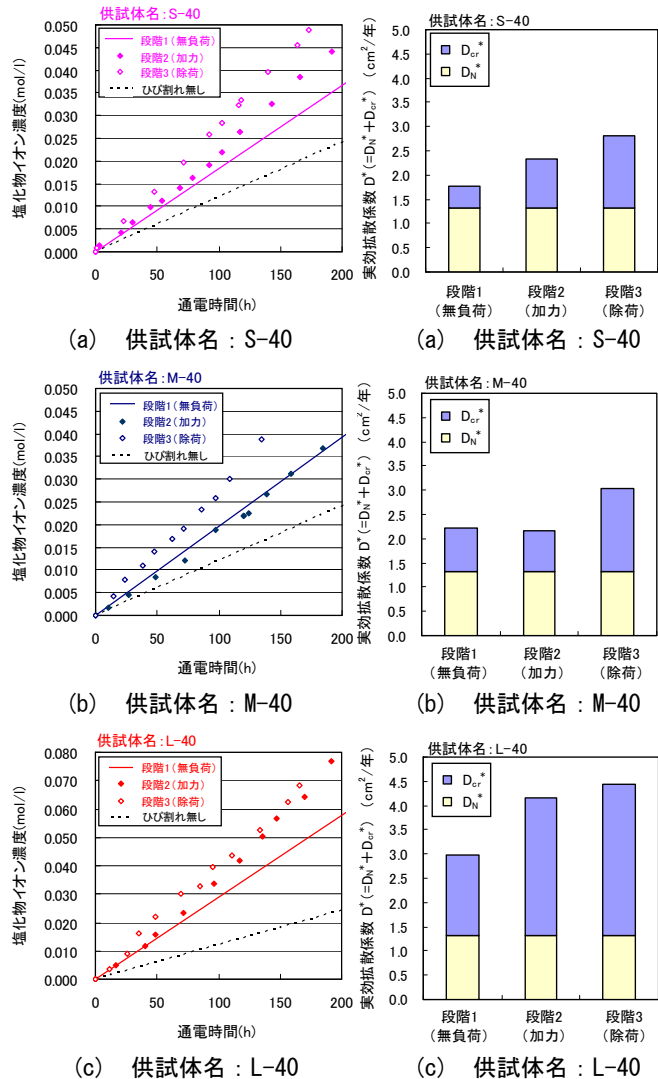


図-7 陽極側塩化物イオン濃度の経時変化

図-8 塩化物イオンの実効拡散係数

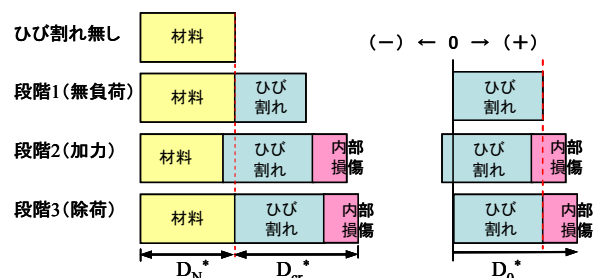


図-9  $D^* (=D_N^* + D_{cr}^*)$  と  $D_0^*$  の構成のイメージ図

表面のひび割れとして現れないとすると、内部損傷の影響を考慮するパラメータとしては、ひび割れの影響を表す定数  $D_0$  が適当と考えられる。そこで、全段階および各段階別のひび割れ面積比とひび割れの影響を考慮した実効拡散係数  $D_{cr}^*$  の関係 (図-10) から、ひび割れの影響を表す定数  $D_0^*$  を意味する近似線の傾きを算出し、各段階の  $D_0^*$  を検討した。図には、本実験と同じひび割れ条件で無負荷状態における第一著者の既往の研究結果<sup>2),3),4)</sup>を併記し、本実験値ならびに当該既往の研究に基づく近似線とその傾きおよび相関係数を示した。また参考として、標準示方書で用いられているひび割れの影響を表す定数  $D_0$  (200 (cm<sup>2</sup>/年))<sup>1)</sup>、ならびにその  $D_0$  を決定する際の参考値とされた水中の塩化物イオンの拡散係数  $D_{Cl}$  (400 (cm<sup>2</sup>/年))<sup>9)</sup>を併記した。

算出したひび割れの影響を表す定数  $D_0^*$  は、 $D_0$  (200 (cm<sup>2</sup>/年)) と  $D_{Cl}$  (400 (cm<sup>2</sup>/年)) の数値間に概ね収まった。 $D_0^*$  の各段階別では、全段階は 277 (cm<sup>2</sup>/年) であるが、段階 1 で 230 (cm<sup>2</sup>/年)、段階 2 で 260 (cm<sup>2</sup>/年)、段階 3 で 316 (cm<sup>2</sup>/年) と段階が進むにつれて大きくなった。また、段階 1 の結果ならびにそれとほぼ同程度であった無負荷状態の既往の研究(齊藤 2),3),4))における  $D_0^*$  (238 (cm<sup>2</sup>/年)) より、無負荷状態では  $D_0^*$  は標準示方書で用いられている  $D_0$  (200 (cm<sup>2</sup>/年)) に比較的近い数値となることが明らかとなった。

加力の維持と除荷の違いによる  $D_0^*$  への影響は、図-9 より、段階 2 と段階 3 のひび割れの影響を表す定数  $D_0^*$  の差分 (56 (cm<sup>2</sup>/年))、すなわち段階 2 の  $D_0^*$  が段階 3 の  $D_0^*$  より 18%減少した分として表された。一方、内部損傷による塩分浸透への影響は、図-9 より、加力の影響が無い状態の  $D_0^*$  の差、すなわち段階 1 と段階 3 のひび割れの影響を表す定数  $D_0^*$  の差に相当すると考えられる。その  $D_0^*$  の増加分 (段階 1 と段階 3 の差) は 86 (cm<sup>2</sup>/年) で、段階 3 は段階 1 より 37%増加しており、この増加分が加力による内部損傷の塩分浸透を早めることへの寄与分であるといえる。これは、迫井ら<sup>8)</sup>や Saito ら<sup>10)</sup>の研究によって得られた、健全なコンクリートに加力を与えた場合、外力が大きくと内部のコンクリートを破壊し浸透性が高くなることや、遷移体を伝わって浸透性が高くなることなどの結論によって理由付けられる。

したがって、加力により発生したひび割れを有するコ

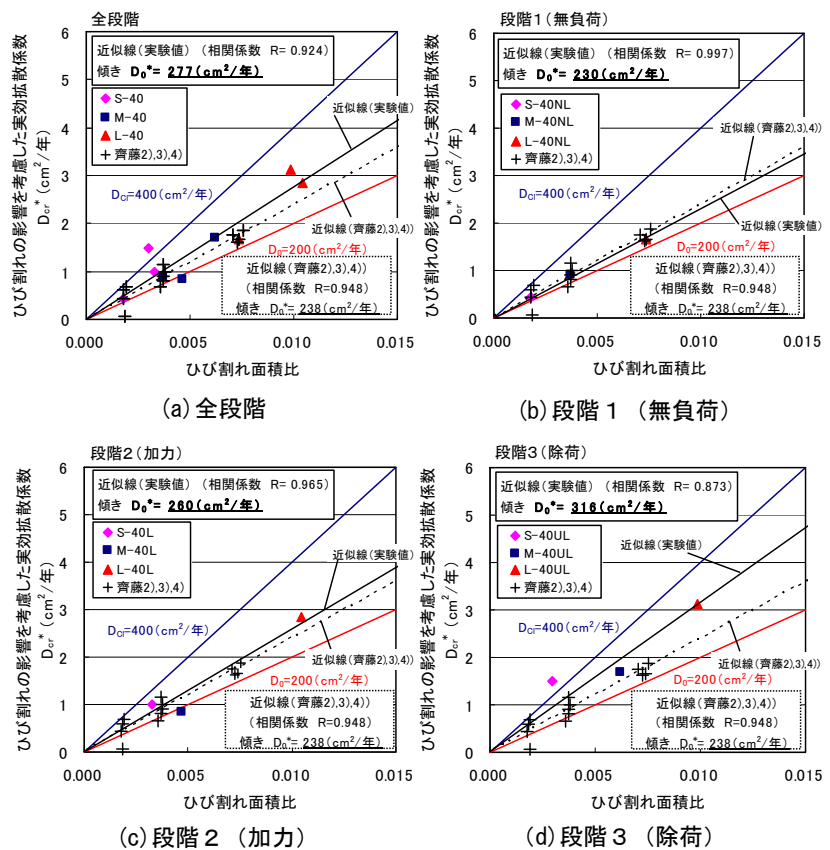


図-10 ひび割れ面積比と  $D_{cr}^*$  の関係

ンクリート構造物の塩分浸透特性を評価する際には、このように外部から見えるひび割れ状況(ひび割れ面積比)だけでなく、内部の損傷状況を考慮した評価が必要であると考えられる。

### 3.5 $D_{cr}$ の実験値と本提案式による計算値の比較

図-11 に、全段階および各段階別のひび割れの影響を考慮した拡散係数の実験値  $D_{cr}^*$  ならびに既往の研究結果<sup>2),3),4)</sup>と本提案式による計算値  $D_{cr}$  の比較を示す。ひび割れの影響を表す定数  $D_0$  には、全段階には標準示方書で用いられている 200 (cm<sup>2</sup>/年) を用い、各段階別には、それに 200 (cm<sup>2</sup>/年) より大きい 300 (cm<sup>2</sup>/年) を用いて計算し併記した。 $D_0$  に 300 (cm<sup>2</sup>/年) を用いたのは、ひび割れ面積比とひび割れの影響を考慮した実効拡散係数  $D_{cr}^*$  の関係において、段階 3 の  $D_0^*$  が段階 1 の  $D_0^*$  より大きくなった内部損傷の影響を、ひび割れの影響を表す定数  $D_0$  に導入した効果の検討を行うためであり、この 300 (cm<sup>2</sup>/年) は JSCE 算出方法で提示された、ひび割れの幅や間隔を精度良く求めることが困難な場合に用いられる係数  $\beta_{cl}=1.5$  を参考に、200 (cm<sup>2</sup>/年) の 1.5 倍として決定した。さらに、計算結果の精度を図るため、相対誤差  $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$  の比較線を示した。

図より、全段階の場合では、 $D_{cr}$  は値が大きい場合には、危険側になる傾向が見られた。段階別に見ると、段階 1 では、 $D_0$  を 200 (cm<sup>2</sup>/年) とした場合は危険側ではあるが

相対誤差10%程度に収まり、 $D_0$ を $300(\text{cm}^2/\text{年})$ とした場合は安全側になるものの相対誤差は10%よりも大きくなることから、無負荷状態では $D_0$ を $200(\text{cm}^2/\text{年})$ とするのが精度の上で適切であることがわかった。一方、段階2、段階3ともに、 $D_0$ を $200(\text{cm}^2/\text{年})$ とした場合は、ほとんどが危険側に計算されたが、 $D_0$ を $300(\text{cm}^2/\text{年})$ とした場合は1:1線に近づき、相対誤差が小さくなったことから、内部損傷の影響の $D_0$ への導入の効果が見られた。

以上より、外力を受けた場合のひび割れの塩分浸透特性を評価する場合は、本研究の範囲内においては、内部損傷を考慮して $D_0$ の値を標準示方書で提示された $200(\text{cm}^2/\text{年})$ よりも大きくする必要があった。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) ひび割れの影響を考慮した実効拡散係数 $D_{cr}^*$ は、ひび割れ面積比が大きくなることにより大きくなる。
- (2) 無負荷状態では、ひび割れの影響を表す定数 $D_0^*$ は標準示方書で用いられている当該定数 $D_0$  ( $200(\text{cm}^2/\text{年})$ )に近い値となる。
- (3) 無負荷状態と加力除荷状態のひび割れの影響を表す定数 $D_0^*$ に生じた差は、外力による内部損傷の影響によるものと考えられる。
- (4) 外力を受けてひび割れを有するコンクリート構造物の塩分浸透特性を評価する場合は、その内部損傷を考慮し、ひび割れの影響を表す定数 $D_0$ を標準示方書で提示された $200(\text{cm}^2/\text{年})$ よりも大きくする必要があると考えられる。

#### 謝辞

本研究は、科研費(平成23年4月)(若手(B)No.23760430)の助成を受けたものである。ここに付記し、謝意を表します。

#### 引用・参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕(2007年版)，pp.119-121, 2007.
- 2) 齊藤準平：モルタル供試体を用いた板状部材における複数ひび割れの塩分浸透特性評価に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，pp.790-795, 2012.7.
- 3) 齊藤準平：ひび割れを有する板状コンクリート部材の

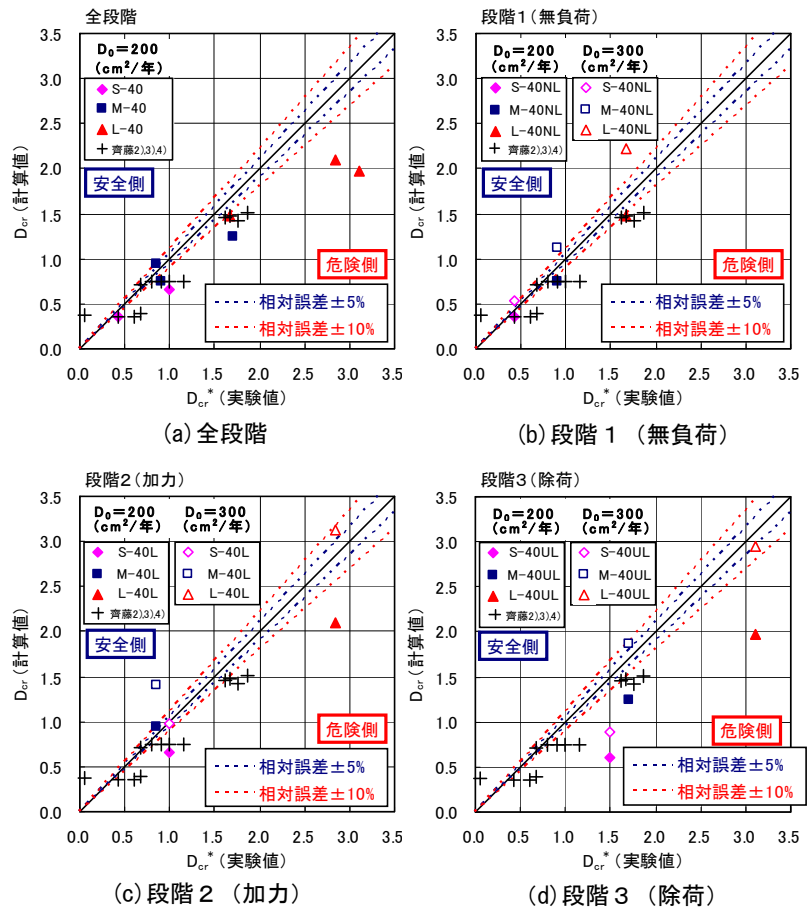


図-11  $D_{cr}$ の実験値と計算値の比較

- 塩分浸透特性に関する実験的検討,日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル, No.127, pp.1-10, 2012.2.
- 4) 齊藤準平,柳沼善明：コンクリートの塩分浸透特性におよぼすひび割れ深さの影響に関する実験的検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.815-820, 2011.7.
  - 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔規準編〕土木学会基準および関連基準(2007年版)，pp.277-284, 2007.
  - 6) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕(2007年版)，p.113, 2007.
  - 7) 齊藤準平：ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性評価に関する電気泳動法を用いた実験的研究，日本大学学位請求論文，pp.39-44, 2012.12.
  - 8) 迫井裕樹,川北昌宏,堀口敬：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの塩分浸透性及び圧縮応力の影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.18,No.3,pp.1-7,2007.
  - 9) 土木学会：コンクリートライブラリー108 2002年版 コンクリート標準示方書 改訂資料, pp.36-38, 2002.
  - 10) Mitsuru Saito and Hiroshi Ishimori: Chloride Permeability of Concrete under Static and Repeated Compressive Loading, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.4, pp. 803-808, 1995.