

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760430

研究課題名(和文) ひび割れを有するコンクリートの実効拡散係数試験による塩分浸透特性評価

研究課題名(英文) Experimental Study on the Evaluation of Chloride Ion Penetration in Cracked Concrete by the Method for Effective Diffusion Coefficient

研究代表者

齊藤 準平 (SAITO, Junpei)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：20349955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、多様化するひび割れを持つ様々な部材への塩分浸透特性評価を簡便にすることを目的に、土木学会コンクリート標準示方書で提示されている、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を、ひび割れを有するコンクリートに電気泳動法を適用し検討した。

それにより、ひび割れ面積比を用いること、ひび割れ深さの影響を考慮するためにひび割れの影響を表す定数にひび割れ深さに応じた係数を乗すること、外力による損傷の影響を考慮するためにその定数を割り増すことなどによって、評価できるひび割れ条件やコンクリートの材料条件および部材の適用範囲の制限を拡張する式を構築することができた。

研究成果の概要(英文)：This study was investigated the Evaluation Equation (JSCE Equation) of diffusion coefficient for chloride concentration at the location of reinforcement which is used in the examination of chloride attack. The electrical migration tests were carried out using specimens modeled concrete cover with various types of cracks in order to evaluate chloride ion penetration on reinforced concrete structures with diversified types of cracks. In the results, this study was built to evaluate equation (proposed equation) of diffusion coefficient of chloride ion. In the proposed equation, the limit on the range of application has been expanded to include various crack conditions and various reinforced concrete members. For the expansion of limit of JSCE Equation, this study was used the crack area ratio (the ratio of crack area to concrete area) and the decreasing of the constant which represents the effect of cracks according to the depth of cracks for the proposed equation.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：塩分浸透 ひび割れ 電気泳動 拡散係数 塩化物イオン ひび割れ幅

1. 研究開始当初の背景

(1)土木学会コンクリート標準示方書[設計編]で提示されている鋼材位置における塩化物イオン濃度の算出方法(以下、JSCE 算出方法と略称)がある。しかし、コンクリートの塩分浸透に及ぼすひび割れの影響を定量的に評価する際、JSCE 算出方法では評価可能なひび割れの条件が限定されること、ひび割れ以外の部材の違いや外力による損傷の影響などの条件を考慮されていないことなど、評価が難しい場合や評価の精度が低くなるなどの課題が残されている。

(2)土木学会コンクリート委員会「コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会」報告書においては、JSCE 算出方法は、特定の実験結果に基づくものではなく、理想的モデル化と工学的配慮、およびパラメータスタディの結果に基づくものであるから、算出方法の実験による直接の検証が困難であるとの問題点が残る、と報告されている。さらに、同委員会での過去の研究動向の取りまとめ、この分野における研究が少なく発展途上で、未だ多くの課題が残されていることを示している。

2. 研究の目的

本研究は、多様化するひび割れを持つ様々な部材の塩分浸透特性を簡便にできる式を構築することを目的とした。この式の構築によって、JSCE 算出方法が対象とするはり部材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が可能となる。以下の(1)～(3)に具体的な目的を示す。

(1)ひび割れを有するコンクリートへの電気泳動法の適用を試み、JSCE 算出方法の実験による直接の検証を行う。

(2)ひび割れを有するコンクリートへ電気泳動法を適用し、ひび割れを様々なパターンの条件に設定し電気泳動実験を行う。実験結果から、様々なひび割れに対応できる式の構築を検討する。

(3)外力によってひび割れが進展した場合の塩分浸透特性を評価できるように、外力を付加、除荷した際の電気泳動実験を行う。実験結果から、外力を受けた場合の塩分浸透特性の評価できる式の構築を検討する。

3. 研究の方法

(1)電気泳動実験方法

研究には実効拡散係数試験方法(JSCE-G571)に準拠した実験装置(図1)を使用し、電気泳動実験は塩化物イオンの電気泳動が定常状態になるまで継続する。

主な測定項目は、電流、電位、陽極側と陰極側の塩化物イオン濃度、pHおよび溶液温度とし、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(1)によって計算する。

$$D_e = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 J_{Cl} : 塩化物イオンの定常状態の流束($\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$)、 D_e : 実効拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 R : 気体定数($8.31\text{J}/(\text{mol}/\text{K})$)、 T : 絶対温度測定値(K)、 Z_{Cl} : 塩化物イオンの電荷($= -1$)、 F : ファラデー定数($96500\text{C}/\text{mol}$)、 C_{Cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度(mol/l)、 $E - E_c$: 供試体表面間の電位(V)、 L : 供試体厚さ(mm)である。

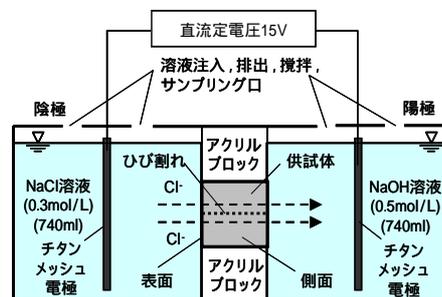


図1 電気泳動法の実験装置概念図

(2)供試体の種類および配合

供試体の種類

供試体(図2)はかぶり厚を40mmと設定しモデル化した立方体とし、条件通りにひび割れを施す。電気泳動法の適用により鋼材は配置できないため、設定通りのひび割れを精度良く設置するために、ひび割れの幅、深さと同じ大きさ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する。

供試体の種類(表1)は、水セメント比(以下W/Cと略称)55%を標準とし、W/Cの違い影響の検討のため、一部のひび割れ条件にはW/C45%を設けた。ひび割れ条件は、ひび割れ幅、ひび割れ深さ、ひび割れ本数とした。シリーズは、基本的なひび割れを有するモルタルの標準型供試体(図2(a))で、樹脂被膜は、供試体表面に樹脂被膜処置を施し、塩分浸透をひび割れ部に限定したものである。シリーズは、床版のように広い面に不規則なひび割れが散在する状態を検討するためにひび割れ本数を変化させてモデル化した応用型供試体(図2(b))である。

ひび割れ幅は、0.1、0.2、0.4mmの3種類

とした。ひび割れ深さについては、鉄筋までひび割れが貫通したことを想定した場合（貫通ひび割れ）はかぶりと同じ 40mm とし、貫通していないことを想定した場合（非貫通ひび割れ）はかぶりの 1/2 の深さの 20mm とし、一部かぶりの 1/4（10mm）、3/4（30mm）の深さを追加した。ひび割れがないタイプ N を同時に作製した。図 1 の電気泳動装置の供試体の設置は、非貫通ひび割れ供試体はひび割れ開口面が、樹脂皮膜有り供試体は皮膜面が、陰極側セル内水溶液に面する。

なお、ひび割れが含まれた場合の供試体の実効拡散係数、ひび割れ面積、ひび割れ面積比の値は、試験体の寸法に依存して計算され、ひび割れ面積はひび割れ幅とひび割れ長さの積、ひび割れ面積比はひび割れ面積を供試体断面積で除したものと定義する。

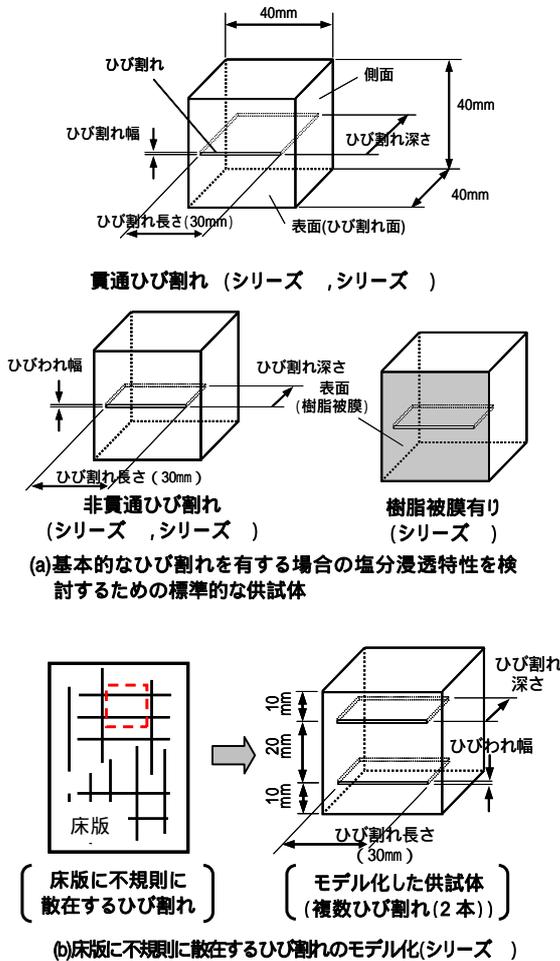


図 2 供試体形状

供試体の配合

表 2 に供試体の配合を、表 3 に材料の力学的性質を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は山砂 (表乾密度 2.654g/cm³、2.5mm ふるい通過) を用いた。強度試験は、打設後封緘養生し 28 日後に実施した。

表 1 供試体の種類

シリーズ	供試体名	W/C (%)	CW (mm)	CD (mm)	CN (本)	樹脂被膜	
	S-40(45)	45	0.1	40	1	無し	
	M-20(45)		0.2	20			
	M-40(45)			40			
	L-40(45)			40			
	N(45)			-			-
	S-20(55)	55	0.1	20	1		
	S-40(55)			40			
	M-10(55)			10			
	M-20(55)			20			
	M-30(55)			30			
M-40(55)	40						
L-20(55)	0.4		20				
L-40(55)			40				
N(55)			-	-		-	
JS-20(55)			55	0.1		20	1
JS-40(55)		40					
JM-20(55)	0.2	20					
JM-40(55)		40					
JL-20(55)		0.4		20			
JL-40(55)				40			
S-20(55)	55	0.1	20	1	無し		
S-40(55)			40				
WS-20(55)			20			40	2
WS-40(55)							
M-20(55)			0.2			20	1
M-40(55)						40	
WM-10(55)		10					
WM-20(55)		20					
WM-30(55)		30					
WM-40(55)		40					
L-20(55)		0.4	20	1			
L-40(55)			40				
WL-20(55)			20			2	
WL-40(55)			40				
N(55)			-			-	-

備考) 表中の記号は、CW: ひび割れ幅、CD: ひび割れ深さ、CN: ひび割れ本数である。

表 2 供試体の配合

シリーズ	W/C (%)	s/c (vol%)	単位量 (kg/m ³)			空気量 (%)	フロー
			W	C	S		
	45	400	221.4	492.1	1653	5.07	106
	55	400	257.9	469.0	1576	4.90	144
	55	400	257.9	469.0	1576	4.92	148

表 3 材料の力学的性質

シリーズ	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	単位容積質量 (g/cm ³)
	39.51	2.871	5.209	2.149
	35.61	2.811	4.887	2.117
	36.89	2.699	4.727	2.162

(3) 外力付加・除荷方法 (加力によるひび割れの増加進展)

外力によってひび割れが進展した場合の塩分浸透特性の評価方法の構築に向けて、供試体に加力を与え、電気泳動実験を行う。加力状態は、無負荷状態、加力状態、除荷状態とした。電気泳動装置に図 3 に示す加力フレームを設置し、図 4 に示すような作製方法によって、人工ひび割れを発生させる。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

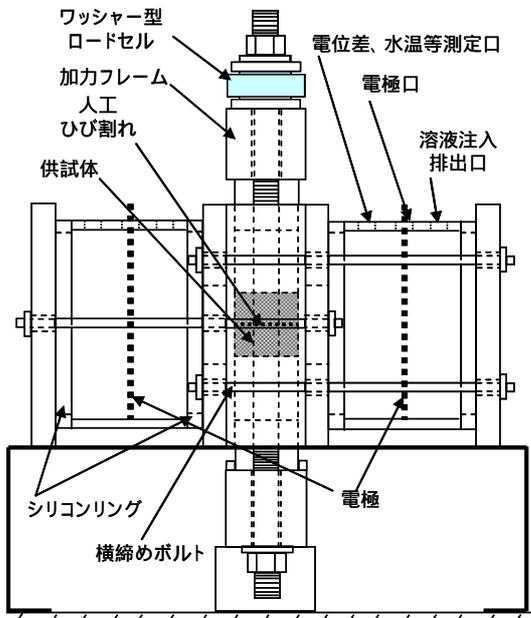


図3 加力フレーム付き電気泳動実験装置

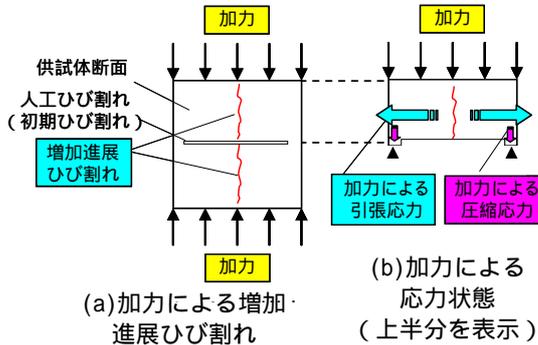


図4 増加進展ひび割れ作製状況

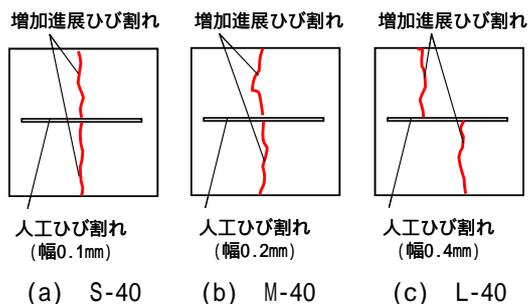


図5 増加進展ひび割れ状況

表4 加力・除荷によるひび割れの変化

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
				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
	2	S-40L	加力 (Loading) (加力: 26.5kN)	0.05 (縮小)	0.1 (発生、拡大)	0.0033
	3	S-40UL	除荷 (Un-Loading)	0.1 (拡大)	0.05 (縮小)	0.0030
M-40	1	M-40NL	無負荷 (No-Loading)	0.2	-	0.0037
	2	M-40L	加力 (Loading) (加力: 8.34kN)	0.05 (縮小)	0.15 (発生、拡大)	0.0047
	3	M-40UL	除荷 (Un-Loading)	0.2 (拡大)	0.1 (縮小)	0.0062
L-40	1	L-40NL	無負荷 (No-Loading)	0.4	-	0.0074
	2	L-40L	加力 (Loading) (加力: 8.56kN)	0.3 (縮小)	0.2 (発生、拡大)	0.0105
	3	L-40UL	除荷 (Un-Loading)	0.4 (拡大)	0.1 (縮小)	0.0098
N	1	N-NL	無負荷 (No-Loading)	-	-	-

時確認し、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。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5、表4)。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

ひび割れの影響を考慮した実効拡散係数とひび割れ面積比との関係を図6に示す。線形近似の回帰係数を併記する。図より、W/C、樹脂被膜の有無、ひび割れ本数の違いに関わらず、200~250 (cm²/年) 程度で一致することがわかった。このことから、ひび割れの影響を考慮した実効拡散係数の算出方法は、ひび割れ面積比×回帰係数(200~250 (cm²/年))として良いと考えられる。

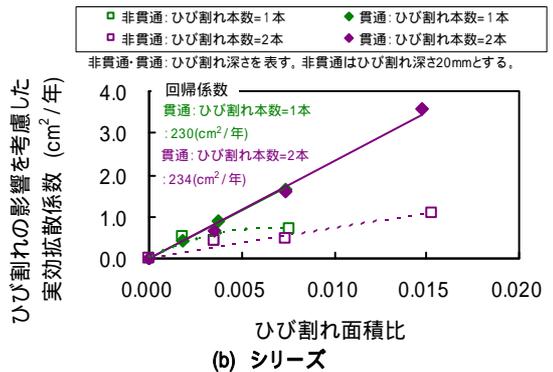
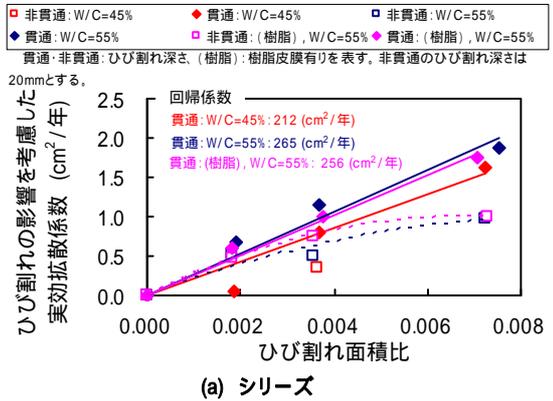


図6 ひび割れの影響を考慮した実効拡散係数とひび割れ面積比の関係

本研究で導いた算出方法は2軸方向へのひび割れを対象としている点では異なるが、式の構成は結果的に JSCE 算出方法と同じになった。さらに本実験の回帰係数と JSCE 算出式における定数は概ね一致し、本研究の範囲内では JSCE 算出方法およびその定数が実験で検証された。

実験による検証の成功の要因は、ひび割れ中の塩物移動の駆動力を、これまでの研究は水溶液の濃度勾配としたのに対し (この場合

の化学的、物理的要因による塩分移動の混在の影響は不明) 本研究は電位勾配のみを塩分移動の駆動力とし、通電以外の塩分移動の要因を完全に排除したためと考えている。

ひび割れ部分における拡散係数(平均値)とひび割れ深さとの関係を図7に示す。ひび割れ部分における拡散係数(平均値)とひび割れ深さとの関係には、貫通ひび割れの値がJSCE算出式におけるひび割れの影響を表す定数(200 (cm²/年))に概ね近い値を示し、ひび割れ深さが0mmの値が0 (cm²/年)程度を示す線形近似となった。これにより、非貫通ひび割れにおけるひび割れの影響を考慮した実効拡散係数の算出は、ひび割れの影響を表す定数にひび割れ深さに応じて比例減少させた係数を乗ずることで可能となった。

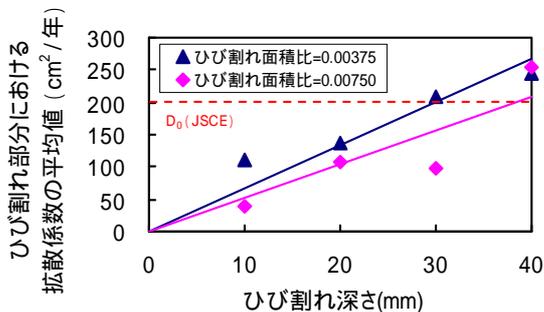


図7 ひび割れ部分における拡散係数(平均値)とひび割れ深さとの関係

検討結果から、多様化するひび割れを持つ様々な部材の塩分浸透特性を簡便に評価できる式は、式(2)のように構築することができた。この式により、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が可能となる。

$$D_{cr} = \left(\frac{A_{cr}}{A} \right) \times D(x) \quad (2)$$

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 (cm²/年))、 x : ひび割れ深さ(上限値=かぶり)である。

加力を与えない状態(無負荷状態)と、加力によりコンクリート内部に損傷を与えた後その加力を除いた状態(除荷状態)の、ひび割れの影響を考慮した拡散係数の実験値 D_{cr}^* ならびに構築した式による計算値 D_{cr} の比較を図8に示す。ひび割れの影響を表す定数 D_0 には、200 (cm²/年) と 300 (cm²/年) を用いて計算した。図より、無負荷状態では D_0 を

200 (cm²/年) とするのが精度の上で適切であることがわかった。除荷状態では、 D_0 を 300 (cm²/年) とした場合に精度が上がった。

これにより、外力を受けた場合の塩分浸透特性を評価する場合は、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 (cm²/年) よりも大きくする必要があること、その大きさは一般に 1.5 倍程度が妥当であることがわかった。

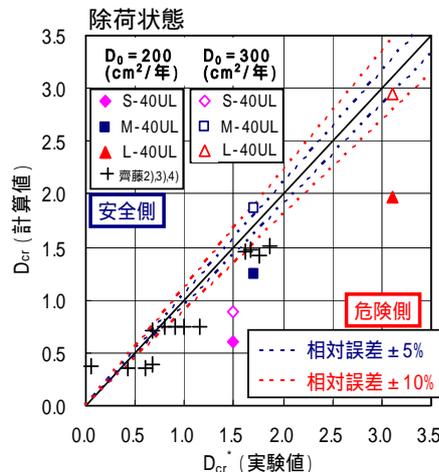
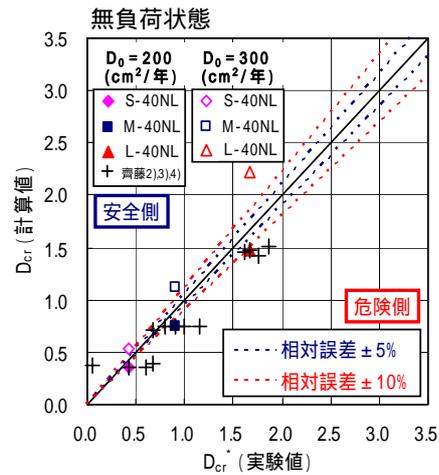


図8 D_{cr} の実験値と計算値の比較

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究の第一の目的に挙げた、これまでの研究者が行っていない、ひび割れを有するコンクリートへの電気泳動法の適用を試み、JSCE算出方法の実験による直接の検証を行うことに関して、ひび割れを有するコンクリートへ電気泳動法を適用でき JSCE算出方法の実験による直接の検証を行うことができた。この成果は、国内外に対し最も発信すべき結果であると考えられる。

その成果をもとに、様々なひび割れ条件、はり部材だけでなく床版のような板状部材への適用を試みた条件、さらに外力の有無の影響などの条件下における実験結果から構築した評価式は、JSCE算出方法が対象とする

はり部材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、および外力による損傷を受けた場合において、塩分浸透特性の評価を可能にすると考えられる。この成果は、各研究者への参考研究となることを踏まえると国内外に対し広く発信すべき結果であると考えられる。それと同時に、今後の JSCE 算出方法の将来的な改訂への良好な影響が予想される。

さらに、この成果（構築した評価式）は、今後増大する診断を要する構造物に対して JR や NEXCO のように最新の診断体制のとれない財源の逼迫した小さな自治体に用いられることによって、住民に安全に使用される社会基盤の維持に貢献できる大きな可能性を有していると考えられ、この研究成果の波及効果や意義として非常に大きい。

(3) 今後の展望

モデル実験の本研究結果より構築された塩分浸透特性の評価式は、実構造物に適用されるためには、実構造物とモデル実験の供試体のサイズの違いの影響を解決しなければならない。つまり、構築された評価式の実構造物への適用性の検討である。実際、実構造物のコンクリート面積はモデル実験に用いた供試体と比べて極端に大きい。そのため、実構造物では、モデル実験と異なり、ひび割れから垂直方向への塩分濃度はひび割れ付近とひび割れから離れた位置とでかなりの差を生じると考えられる。構築した評価式はコンクリート面積の濃度分布を平均化しているため、実構造物を対象とするとコンクリート面積がかなり大きくなり、その結果、塩分浸透特性はひび割れ付近の実際に塩分濃度が高い範囲でも著しく低く計算され、危険側に評価される。

今後の展望として、構築した評価式を実構造物へ適用できるようにするためには、評価式におけるコンクリート面積の設定方法について、改善していく必要がある。今後は、ひび割れからの塩分浸透の影響を強く受ける範囲（塩分浸透影響範囲）を定め、その範囲内外に応じて、コンクリート面積の値を使い分けて、コンクリート面積を適切に設定できる方法を検討する。これにより、面積の大きい部材に少ない短いひび割れがある場合でも、ひび割れに近い塩分浸透影響範囲に限定して、維持補修等の対応が効率的に行えると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

Junpei SAITO and Satoru SHIMOBÉ、

EVALUATION EQUATION OF DIFFUSION COEFFICIENT OF CHLORIDE ION FOR CRACKED CONCRETE、Proceedings of Third International Conference on Geotechnique、Construction Materials and Environment、査読有、2013、pp.327-332

齊藤 準平、下辺 悟、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、2013 コンクリート工学年次講演会論文報告集、査読有、2013、pp.823-828

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、2012 コンクリート工学年次講演会論文報告集、査読有、2012、pp.790-795

齊藤 準平：ひび割れを有する板状コンクリート部材の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、査読有、No.127、2012、pp.1-10

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、2011 コンクリート工学年次講演会論文報告集、査読有、2011、pp.815-820

〔学会発表〕(計7件)

Junpei SAITO：EVALUATION EQUATION OF DIFFUSION COEFFICIENT OF CHLORIDE ION FOR CRACKED CONCRETE、Third International Conference on Geotechnique、Construction Materials and Environment、2013.11.14、Nagoya
齊藤 準平、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、2013 コンクリート工学年次講演会、2013年7月10日、名古屋

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、2012 コンクリート工学年次講演会、2012年7月5日、広島

齊藤 準平、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、2011 コンクリート工学年次講演会、2011年7月12日、大阪

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 準平 (SAITO, Junpei)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：20349955