論文 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

齊藤 準平*1

要旨:ひび割れを有するコンクリートは、ひび割れが塩分の浸透を助長するため、その塩分浸透特性評価は 重要となる。本研究は、床版のような広い面の板状部材に複数のひび割れが不規則に散在する場合の塩分浸 透特性を評価する方法を検討することを目的とする。実験では、モデル化したモルタル供試体の電気泳動実 験を行い、実効拡散係数やクーロン等と、ひび割れ幅、ひび割れ本数およびひび割れ深さなどのひび割れ条 件との関係を整理し、塩分浸透特性をひび割れ条件から評価する方法を実験的に検討した。 キーワード:塩分浸透、ひび割れ、実効拡散係数、クーロン

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るため、ひび割れの顕 在化時における補修・補強の必要性を見極めるためにも、 その状態での塩分浸透特性の適切な評価が必要になる。

現状では、土木学会コンクリート標準示方書[設計編] (2007年)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¹⁾(以 下 JSCE 算出方法と略す) によって, 主に曲げひび割れ が生じているはりにおいて、ひび割れからの塩化物イオ ンの侵入速度を塩化物イオンに対する設計拡散係数とし て算出し、評価できるようになっている。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(338 委 員会)報告書においても, 簡便である範囲では結果の妥 当性が保証されており、照査用の算定式として優れると 報告されている²⁾。しかし、コンクリートが緻密な場合 やかぶりが大きい場合などのような特異な場合、温度や 乾燥収縮ひび割れのようにはりの曲げひび割れとは異な る場合への評価方法の適用性の拡大などが求められてお り^{3),4)},多様化するひび割れに対し JSCE 算出方法がより 適切に用いられるには、さらなる検討の必要性がある。 一方,他の評価方法では,ASTM C1202 (AASHTO T277) ⁵⁾がある。クーロンから塩分浸透特性を 5 段階にランク 判定するもので、拡散係数を用いず迅速に簡便に評価で きる促進試験方法として、北米を中心に比較的多く採用 されている ^の。しかし、それにはひび割れを有する場合 の塩分浸透特性の規定がなく、塩分浸透特性へのひび割 れの影響をクーロンにて検討した研究もほとんどない。

本研究は、ひび割れを有する床版のような板状部材に 対し拡散係数で塩分浸透特性の評価方法の検討を行った 報告がほとんどないことに起因しており、JSCE 算出方法 が対象とするはりに発生した曲げひび割れでなく,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 する場合の塩分浸透特性を評価する方法を検討すること を目的とする。具体的には,それらをモデル化したモル タル供試体の実効拡散係数やクーロン等と,ひび割れ幅, ひび割れ本数およびひび割れ深さなどのひび割れ条件と の関係性を整理し,塩分浸透特性をひび割れ条件から評 価する方法を実験的に検討する。

本研究は、短期間に拡散係数やクーロンを求められる こと、ひび割れ条件を与えた供試体の実験実施とその性 能評価が行い易いことから電気泳動法を用いた。電気泳 動法で求まる実効拡散係数と、JSCE 算出方法が対象とす る見掛けの拡散係数とは本質的な意味合いが異なる。し かし、ここではひび割れを有する板状部材の塩分浸透評 価方法を実験的に検討することに重点をおり、その点に おいてはこの試みは十分に意義があるものと考えている。

2. 実験概要

2.1 電気泳動実験方法

本実験で使用する実験装置(図-1)は,実効拡散係 数試験方法(JSCE-G571)⁷⁾に準拠した。塩化物イオンの 電気泳動が定常状態になるまで連続して通電した。

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 および溶液温度で、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)ⁿによって計算した。クーロンの計算は、ASTM C1202 が直流定電圧 60V の 6 時間通電に対し、本研究で は直流定電圧 15V のため、計算には通電開始から 4 倍の 時間(24 時間経過まで)の電流を用いて算出した。

$$D_{e} = \frac{J_{CI}RTL}{|Z_{CI}|FC_{CI}(\Delta E - \Delta E_{c})} \times 100$$
 (1)

ここで, J_{Cl}:塩化物イオンの定常状態の流束(mol/(cm²・年)), D_e: 実効拡散係数(cm²/年), R:気体定数(8.31J/(mol/K)),

*1 日本大学 理工学部社会交通工学科 助手 修士(工学) (正会員)

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(96,500C/mol), C_{Cl} : 陰極側の塩化物 イオン濃度 (mol/l), $\Delta E - \Delta E_c$:供試体表面間の電位(V), L:供試体厚さ(mm)である。

2.2 供試体の種類

供試体 (**図**-2) はかぶりを 40mm と設定しモデル化 した立方体で,条件通りにひび割れを施したものである。

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。ただし, 実構造物のひび割れには屈曲や,ひび割れ幅が表面より 内部で小さい場合などがあるのに対し,本研究のひび割 れは直線的でひび割れ幅も変化しないため,実構造物と 同じひび割れ条件でも,本供試体の拡散係数は幾分大き くなる傾向があるものと考えられる。

供試体の種類(**表-1**)は、水セメント比(以下 W/C と略す)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



(シリーズI,シリーズI)(シリーズI)(a)基本的なひび割れを有する場合の塩分浸透特性

樹脂被障有り

を検討するための標準的な供試体

非貫通ひび割れ



図-2 供試体形状



図-1 電気泳動法の実験装置概念図

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) I	45	0.1	40	1	無し
	M-20(45) I M-40(45) I		0.2	20		
	L-40(45) I		0.4	40		
	N(45) I		—	—		
	S-20(55) I		0.1	20	1	
	S-40(55) I	55		40		
	M-10(55) I		0.2	10		
	M-20(55) I			20		
т	M-30(55) I			30		
-	M-40(55) I			40		
	L-20(55) I		0.4	20		
	L-40(55) I			40		
	N(55) I		_	-		
	JS-20(55) I	55	0.1	20	1	
	JS-40(55) I			40		
	JM-20(55) I		0.2	20		
	JM-40(55) I			40		
	JL-20(55) I		0.4	20		
	$S_{-20}(55) \Pi$			40		
	$S=20(55) \Pi$		0.1	20	1 2	、 ・ 無し ・
	$WS = 20(55) \Pi$	55		20		
	$WS = 40(55) \Pi$			40		
	$M = 20(55) \Pi$			20	1	
	M-40(55) II		0.2	40		
	WM-10(55) Π			10	2	
Π	WM-20(55) Π			20		
ш	WM-30(55) II			30		
	WM-40(55) Π			40		
	L-20(55) II		0.4	20	1	
	L-40(55) II			40		
	WL-20(55) II			20	2	
	WL-40(55) II			40		
	N(55) II		—	_	—	

※ 表において、W/C:水セメント比,CW:ひび割れ幅,CD:ひび 割れ深さ,CN:ひび割れ本数を表す。

表-2 供試体の配合

シリ	W/C	s/c	単位量(kg/m ³)			空気量	-0-
ーズ	(%)	(vol%)	W	С	S	(%)	Ţ
Ι	45	400	221.4	492.1	1653	5.07	106
	55	400	257.9	469.0	1576	4.90	144
Π	55	400	257.9	469.0	1576	4.92	148
※ まにおいて W/C・水わかんせ。/の:細母材とわかんの容積							

※ 表において、W/C:水セメントに、S/C:細骨材とセメントの各位 比,W:水,C:セメント,S:細骨材を表す。

表-3 材料の力学的性質

シリ	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	単位容積質量	
ーズ	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(g/cm ³)	
т	39.51	2.871	5.209	2.149	
1	35.61	2.811	4.887	2.117	
Π	36.89	2.699	4.727	2.162	

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Iは、基本的なひび割れを有するモルタルの標



図-3 ひび割れ本数が異なる場合の実効拡散係数 の比較(ひび割れ幅が同一の場合)



図-4 ひび割れ本数が異なる場合の実効拡散係数 の比較(ひび割れ面積の合計が同一の場合)



図-5 実効拡散係数とひび割れ面積比との関係

準型供試体(図-2(a))である。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Ⅱは,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。 図-2において,図-1の電気泳動装置に組み込んだ場 合,非貫通ひび割れはひび割れ開口面が,樹脂皮膜有り は皮膜面が,陰極側セル内水溶液に面している。

ひび割れ幅は, JSCE 算出方法の計算におけるひび割れ 幅の限界値を考慮した。土木学会コンクリート標準示方 書[設計編]¹⁾の鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値に 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 0.005×40mm=0.2mm 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。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。

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る。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。

2.3 使用材料と配合

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。

3. 実験結果および考察

3.1 実効拡散係数の検討

(1) ひび割れ本数との関係

図-3 に、ひび割れ幅が同一の場合でひび割れ本数が 異なる場合の実効拡散係数の比較を示す。ひび割れ本数 が1本から2本に増加しひび割れ面積の合計が増加する と、実効拡散係数は増加する傾向があることがわかる。 その増加割合はひび割れ幅が大きく、ひび割れ深さが大 きくなるに伴い、顕著となることがわかる。これは、ひ び割れ幅の違いへはひび割れ面積の違いによる塩分供給 量の違いに起因し、ひび割れ深さの違いへは非貫通ひび 割れの場合ひび割れ先端から陽極側までのモルタルによ る塩分浸透速度の低下が起因しているためと考えられる。

図-4 に供試体断面積内におけるひび割れ面積の合計 が同一の場合でひび割れ本数が異なる場合の実効拡散係 数の比較を示す。1 本のひび割れ面積と2 本のひび割れ 面積の合計が同じになるひび割れ条件を比較した。ひび 割れ本数が1本から2本に増加しても、この場合では実 効拡散係数はほぼ同程度となることがわかる。特にひび 割れ本数が1本の貫通ひび割れでひび割れ幅0.4mmの場 合は、ひび割れ本数が1本から2本になると実効拡散係 数が1.63倍になる(図-3)が、ひび割れの面積の合計 が同一の場合では0.99倍と、1本と2本で一致する(図 -4)ように顕著な結果となった。一方で、ひび割れ本 数が1本の非貫通ひび割れでひび割れ幅0.2mmのように、 ひび割れ本数が2本に変化した時にひび割れ面積の合計 が変化しても、また同一であっても実効拡散係数が同じ で、ひび割れ面積の違いの影響をほとんど受けない場合 もあった。このようにひび割れ幅積の合計と実効拡散係 数の関係に明確な違いが表れにくいことがわかった。

(2) ひび割れ面積比との関係

ひび割れ面積の合計と実効拡散係数の関係には、前述の ように一部で明確な違いが表れにくい場合があることから、

データ数を増し、実効拡散係数とひび割れ面積比との関係 (図-5)から、実効拡散係数とひび割れ本数との関係をさ らに検討する。ただし、ひび割れ面積比の定義上、ひび割 れ深さにおいては貫通と非貫通が区別できないため、ひび 割れ面積比との関係を検討する場合は貫通と非貫通を区別 して図示する。各ひび割れ条件で3点以上のデータがある ものは、データの近似線を示した。近似線は線形近似を基 本とするが、ひび割れ面積比と塩分浸透性の関係の特徴を 把握するため、線形近似で相関が良くない場合は多項式近 似とした。貫通ひび割れは線形近似と多項式近似のどちら も良い相関が得られ、非貫通の場合は多項式近似に良い相 関が得られる傾向を示した。この貫通ひび割れと非貫通ひ び割れの近似線の傾向の違いは、非貫通ひび割れはひび割 れの非貫通部分にあるモルタルが塩分浸透速度を低下させ ること、およびひび割れへの塩化物イオン供給量とひび割 れ幅の関係に起因することによるものと考えられる。W/C の違いについては、貫通ひび割れ供試体で比較すると、切 片には W/C の違いがみられ, W/C が大きいほうが切片は大 きくなった。一方で、傾きには W/C の影響はほとんど見ら れなかった。これにより,切片部分がコンクリートの性質, 傾き部分がひび割れ条件の違いの影響を表していると考え られる。

実効拡散係数とひび割れ本数との関係を検討すると,貫 通と非貫通の違いに関わらずひび割れ本数が異なってもひ び割れ面積比で実効拡散係数との関係を整理すると概ね一 致する結果となり,ひび割れ幅,ひび割れ本数が異なる場 合でもひび割れ面積の合計とした形で整理することによっ て,同一指標上で扱うことができることがわかった。この ことで,板状部材のような広い面に対して不規則に散在す る複数のひび割れをひび割れ面積の合計として扱うことに よる塩分浸透特性の評価の可能性が示されたと考えられる。

3.2 実効拡散係数による評価方法の検討

JSCE 算出方法では、ひび割れがある場合の拡散係数
(D) の算出の概念を、コンクリートの拡散係数 (D_N)
と、ひび割れの影響を考慮した拡散係数 (D_{cr})の和(式
(2))として拡散係数を評価し、鋼材位置における塩化
物イオン濃度を推定している¹⁾。

 $D=D_{N}+D_{cr}$ (2)

この概念に従い、ひび割れの開口の影響を考慮した実 効拡散係数(D_{crm})は、実験で得られたひび割れ有りの 場合の実効拡散係数(D_e)から実験で得られたひび割れ 無しの場合の実効拡散係数(D_N)を差し引いて算出した (**式(3)**)。そして、それとひび割れ面積比との関係を検

討し, JSCE 算出方法の床版への適用の可能性を検討した。

 $D_{crm} = D_e - D_N$ (3)

(1) 貫通ひび割れの場合

図-6 に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示し、線形近似の回帰係数を示 す。それらは、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)程度で一致した。

ひび割れの影響を考慮した実効拡散係数の算出方法は、 これまでの検討から、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。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 算出方法にお けるひび割れの影響を考慮した拡散係数の算出方法の基 準となった式¹⁾(ひび割れ幅をひび割れ間隔で除し、コ ンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの 影響を表す定数(一般に 200(cm²/年))を掛けるもの)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 算出方法とその定数が実験で検証される結果となった。

(2) 非貫通ひび割れの場合

非貫通ひび割れの場合,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(図-6)は相関の よい線形近似が難しく,その回帰係数の算出は難しい。 そこで,回帰係数と同等の意味を持つひび割れ部分にお ける拡散係数を全データから算出し,さらにひび割れ面 積比ごとの平均値を回帰係数の目安として整理した。

ひび割れ部分における拡散係数は,式(4)⁸にて単位ひ び割れ面積当たりの拡散係数とすることでひび割れ幅, ひび割れ本数の要因をそれから除外した拡散係数となる。 この場合,ひび割れ深さの要因は除外されていない。

$$D_{0m} = \frac{AD_{crm} + A_{cr}D_{e}}{A_{cr}}$$
(4)

ここで、D_{0m}:実効拡散係数から求めたひび割れ部分にお

ける拡散係数(cm²/年), A:モルタル供試体断面積(mm²), A_{cr}:ひび割れ面積(mm²), D_{crm}:ひび割れの影響を考慮した 実効拡散係数 (cm²/年), D_e:実効拡散係数(cm²/年)である。

図-7 に実効拡散係数から求めたひび割れ部分におけ



る拡散係数とひび割れ面積比との関係を示す。図には貫 通ひび割れおよび非貫通ひび割れ(ひび割れ深さ 20mm) を示し,それぞれのひび割れ面積比ごとの平均値を示し ている。さらに、参考のために、JSCE 算出方法における コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れ の影響を表す定数 (D_0 (JSCE) と図示する)ならびに塩 化物イオンの水中の拡散係数(化学便覧を参照(338 委 員会報告書²⁾記載))($D_{Cl}(希薄溶液)$ と図示する)を示し ている。ひび割れ部分における拡散係数は、ひび割れ面 積比が最小の場合を除き、貫通ひび割れの平均値は 230 (cm^2/F)程度で回帰係数とよく一致した。非貫通ひび 割れは概ね 100 (cm^2/F)程度を示し、ひび割れ深さが 40mm から 20mm に 1/2 になったのと同等に貫通ひび割 れの約 1/2 になり、ひび割れ深さとひび割れ部分におけ る拡散係数に相関があることがわかった。

ひび割れ面積比ごとに同一ひび割れ深さごとのひび割 れ部分における拡散係数を平均し,ひび割れ部分におけ る拡散係数とひび割れ深さとの関係(図-8)を検討し た。ひび割れ深さが10mmと30mmのデータが少ないた め一部ばらつくものもあるが,ひび割れ部分における拡 散係数の平均値とひび割れ深さとの関係には,貫通した 時(ひび割れ深さ40mm)の値がJSCE 算出式における コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れ 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の時が0(cm²/年)程度を示す線形 近似となった。以上から,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 の影響を表す定数をひび割れ深さに応じて減じひび割れ 面積比に乗ずることで可能になると考えられる。

3.3 クーロンによる塩分浸透特性判定

図-9に実効拡散係数とクーロンの関係を示す。図中 のクーロンによる塩分浸透性ランクは、ASTM C1202⁵⁾に て規定されたものである。実効拡散係数とクーロンは, それらが概ね相関関係にあり、クーロンが大きくなると 実効拡散係数が増加し塩分浸透特性が高くなることが示 された。この際、ひび割れ有りのクーロンはひび割れ無 しのクーロンより大きく,ひび割れ面積,ひび割れ深さ の増加に伴い、大きくなる傾向が確認された。これによ り、ひび割れ無しのひび割れ有りへのクーロンの増加割 合によって、ひび割れを有する場合の塩分浸透特性の評 価の可能性が示されたと考える。ひび割れを有する場合 のクーロンによるランク判定については、シリーズIで は W/C55%の判定はひび割れがない供試体と変わらなか った。しかし、W/C45%の判定はひび割れ幅、ひび割れ 深さの増加に伴い、1 ランク危険側に変化する場合が確 認された。シリーズⅡではひび割れ面積が極端に大きく なったものは W/C55% であるものの判定が1 ランク危険

側に変化した。これら結果から,W/C55%のようにモル タル自体の塩分浸透特性が低くない場合は,W/C45%と 同じひび割れ条件の変化でも判定結果にひび割れ無しか らひび割れ有りへのクーロンの増加が反映されない場合 があること,W/C45%のようにモルタル自体の塩分浸透 特性が低い場合は,ひび割れが供試体の塩分浸透特性に 大きく影響すると考えられ,低水セメント比の範囲にお いてはランク判定が適用し易いことがわかった。

クーロンによるひび割れの影響の評価方法において, クーロンとひび割れ条件の定量的な関係が未解明な現状 においては、ひびわれ無しのクーロンに一律の係数を乗 じ割り増すことでひび割れ有りのクーロンを求め、その 値から塩分浸透特性をランク判定するのが適当と考える。 この場合、クーロンでの評価は、ひび割れの貫通、非貫 通の区別無く, 簡易的に行うことができる。図-10に実 効拡散係数とクーロンの関係におけるひび割れ無しに対 するひび割れ有りの割合を示す。ひび割れ有りのクーロ ンをひび割れが無しのクーロンからを求めるために割増 す程度を検討すると、ひび割れ幅の限界値(0.2mm)以 内では概ねその増加割合はクーロンと実効拡散係数では 同程度で、その値は概ね1~1.5倍程度であった。しかし、 ひび割れ幅の限界値より大きい場合やW/Cが小さい場合 は、クーロンの増加割合に対して実効拡散係数の増加割 合が大きくなり、クーロンによる塩分浸透特性評価は過 小評価される傾向があることがわかった。





ひび割れ無しに対するひび割れ有りの割合

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) 実効拡散係数およびひび割れの影響を考慮した実効拡 散係数に対し、ひび割れ本数が増加してもひび割れの面 積の合計が同じ場合は,同程度となる傾向がある。また, ひび割れ幅、ひび割れ本数が異なる場合でもそれらをひび 割れ面積比とすることで関係が整理できる。 (2)貫通ひび割れの場合、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の回帰係数は、W/C の違い、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, 概ね一致した。 (3) 貫通ひび割れのひび割れの影響を考慮した実効拡散係数 は、ひび割れ面積比×回帰係数で算出して良いと考えられる。 また、回帰係数と JSCE 算出方法における塩化物イオンの 移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数は、ほぼ一致した。 (4) 非貫通ひび割れのひび割れの影響を考慮した実効拡散 係数は,貫通ひび割れのひび割れ面積比に乗ずる係数を, ひび割れ深さに応じて減じて使用することで可能となる。 (5) 実効拡散係数とクーロンの関係におけるひび割れ有り に対するひび割れ無しの割合は,ひび割れ幅の限界値 (0.2mm) 以内では、その増加割合はクーロンと実効拡散 係数では同程度で、その値は1~1.5倍程度であった。

謝辞

本研究は、科研費(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。

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)土木学会:コンクリート技術シリーズ No.86 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(338 委員 会)委員会報告書, pp.76-78, 2009.
- 3)田中和幸, 矢田一也, 石田剛朗, 佐藤良一:ひび割れ部での 塩水浸透に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文 集, Vol.28, No.1, pp.941-946, 2006.
- 4)佐藤良一, 丸山一平:収縮ひび割れの予測と制御のあるべき 姿, コンクリート工学, pp.11-20, 2005.
- 5)Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM Designation : C1202, 2010.
- 6)鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と動向,土木 学会技術シリーズ, pp.70-72, 1997(その1), p.107, 2000(その2).
- 7)土木学会:コンクリート標準示方書 [規準編] (2007 年版), pp.277-284, 2007.
- 8)A.Djerbi, S.Bonnet, A.Khelidj and V.Baroghel-bouny:Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete, Cement and Concrete Research, Vol.38, pp.877-883, 2008.