

論文 ひび割れ部での水分移動に基づくコンクリートへの塩化物浸入について

矢田 一也^{*1}・HUSSEIN Nour-Allah^{*2}・田中 和幸^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：本研究では台風等の風雨または降雨により運ばれる塩化物が供給されるひび割れ部を想定し、貫通ひび割れ部断面内で電極間の抵抗を直接的に測定することにより、経時的なひび割れ部の水分移動特性を把握し、さらにひび割れ周囲の塩化物分布を測定することにより、水分移動と塩化物浸入に及ぼすひび割れの影響を評価した。

キーワード：ひび割れ、塩化物浸入、電気抵抗、不飽和、水分移動

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物では、供用中に曲げひび割れや乾燥収縮ひび割れ等が生じるのが普通である。これらのひび割れはコンクリートへの水分および塩化物等の物質移動を容易にし、容易に鉄筋にまで達すると考えられる。しかし、物質の移動および鉄筋の腐食にひび割れが多大な影響を及ぼすと考えられるが、ひび割れに水分や塩化物がどのように浸入し、またどのようにひび割れからコンクリート中に浸入するかは必ずしも明らかにされていない。

そこで、本研究では台風等の風雨による飛来塩分が供給されるひび割れ部を想定し、前報¹⁾に引き続き、ひび割れ面の水分供給方向に沿った電極間の抵抗を計測することで、経時的なひび割れ部の水分移動特性を把握するとともに、塩化物浸入に対するひび割れの検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

本研究では、W/C40%、粗骨材の最大寸法40mmの舗装コンクリートを対象とした。材料としてセメントには、普通ポルトランドセメント、骨材には賀茂郡黒瀬町産細砂および賀茂郡黒瀬町産砕石を用い、リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩を主成分とするAE減水剤

を使用した。実験で用いた配合を表-1に示す。

2. 2 供試体概要および養生方法

本研究で用いた供試体概要を図-1に示す。供試体は150×200×900mmの角柱供試体とし、供試体中心部に奥行き10mm、幅5mmの切込みを予め設けて、断面図心にD19、SD345異形鉄筋を配置した。電気抵抗の測定に用いた供試体には、さらにひび割れ部、ひび割れから40mm、及び、ひび割れから225mm（以下、ひび割れの影響が無視し得ると考えられるため一般部と呼ぶ）の断面に電気抵抗測定用ステンレス製電極棒（φ:2mm）を埋め込んだ。本研究では、降雨を受ける面を上面、それと対になる面を底面、それ以外の面を側面と呼ぶことにする。

供試体は、水和の影響を極力小さく、後述のひび割れ導入を行い、さらに飽水状態にある電気抵抗を初期値とするため、7日間の湿潤養生後、室内気中暴露を55日間行い、さらに、水中にひび割れた供試体を8日間浸漬した。ひび割れ導入は室内気中暴露中に行った。ひび割れの導入は、長手方向中央断面に曲げによりひび割れを導入した後、両端部鉄筋を両引きした。両引き試験時、鉄筋応力が平均約231N/mm²、ひび割れ幅が平均約0.3mmになったところで、切り込み部に無収縮モルタルを埋め込んだ。無収縮モルタルが硬化したのを確認した後に除荷し、

*1 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻（正会員）

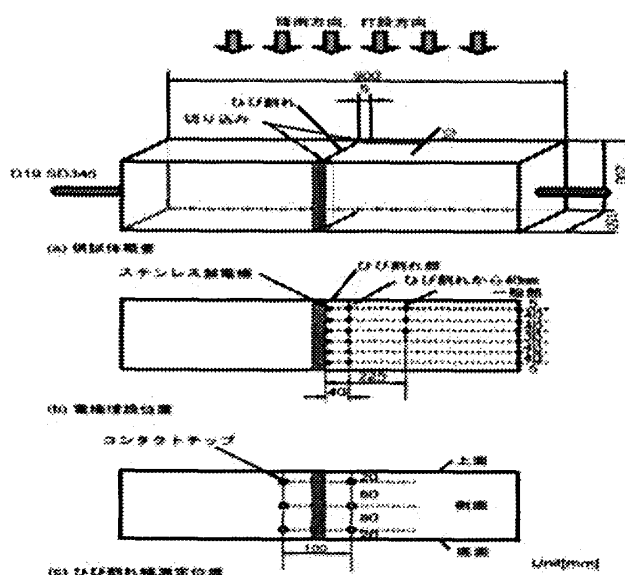
*2 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻 工修（正会員）

*3 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻（非会員）

*4 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻 教授 工博（正会員）

表－１ コンクリートの配合

コンクリートの種類	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 %	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				
						W	C	S	G	SP
NC	40	6.5	4.5	40	40.0	168	420	676	1030	C*1%



図－１ 供試体の概要

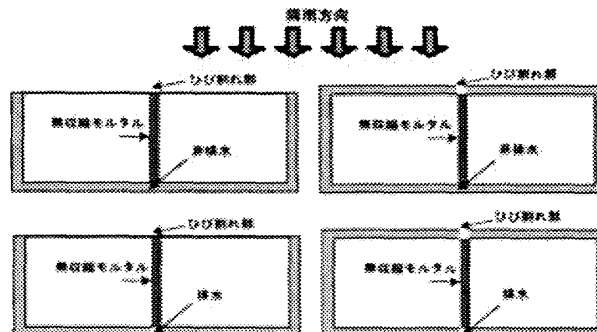
その残留値を 0.3mm 程度に制御した。また、ひび割れ幅の測定には JIS A 1129 に規定されるコンタクトゲージ法を用いた。

ひび割れ幅の測定位置を図－１に示す。表面から 20mm (上面付近)、表面から 100mm (中央位置)、底面から 20mm (底面付近) の位置で測定した。最終的な供試体のひび割れ幅を表－２に示す。

図－２に示すように、供試体には４種類のシーリングを施した。底面のひび割れ部がシールによって閉塞しているものと、開口しているものの２種類、さらにひび割れの影響を抽出するために上面ひび割れ部を除く上面にシールしたものの２種類、計４種類である。側面及び底面は両者ともシールした。シーリング材には、エポキシ系樹脂を用いた。

2. 3 乾湿繰り返し環境

台風等の風雨または降雨に曝されるひび割れ部を想定し、鉄筋腐食を促進させる過程における水分移動および塩化物浸入状況を把握するため、40℃の水中に、8日間の浸漬し、7日間の乾燥環境 (40℃, R.H.60%) に曝した後、40℃、



図－２ シール条件

表－２ ひび割れ幅

	電極埋設供試体			
	シールなし		上面シール	
	排水	非排水	排水	非排水
上面付近	0.33	0.33	0.31	0.27
鉄筋位置	0.22	0.26	0.29	0.27
底面付近	0.16	0.26	0.34	0.33

	塩化物測定供試体			
	シールなし		上面シール	
	排水	非排水	排水	非排水
上面付近	0.37	0.31	0.28	0.28
鉄筋位置	0.22	0.25	0.25	0.26
底面付近	0.16	0.26	0.28	0.31

Unit(mm)

NaCl を 3% 含む降雨環境 (降水量約 55mm/hr) に 24 時間、40℃, R.H.60% の雰囲気にて 6 日間の暴露を 1 サイクルとする乾湿繰り返しを供試体 (図－１) に与えた。

2. 4 相対含水率と電気抵抗の関係

本研究では水分移動をとらえるための含水率の基準として、105℃で炉乾燥した状態および飽水状態をそれぞれ相対含水率 0%, 100% と定義する。すなわち、相対含水率は次式で表される。

$$W = \phi / \phi_s \times 100 \quad (1)$$

ここで、 ϕ : 含水率、 ϕ_s : 飽水時の含水率であり、8 日間の水中浸漬後を飽水時とした。また、飽水時の比抵抗に対する各水分状態の比抵抗の比を相対比抵抗 P と定義する。電気抵抗に

よる相対含水率推定のためのキャリブレーション試験を、寸法 50×60×150mmの断面中心部にステンレス電極を埋め込んだ小供試体を用いて別途行った¹⁾。結果を式(2)に示す。

$$\ln W = 4.605 - 0.357 \ln P \quad (2)$$

式(2)は断面内での水分状態が一樣ではなく、水分分布があると考えられるが、3体の小供試体から得られた相関係数は0.99である。この小供試体のコンクリートは各条件の供試体と同一バッチのコンクリートとし、両者の差異を極力排除した。これに基づきここでは式(2)を適用することとした。ひび割れ部においても相対含水率と相対比抵抗のキャリブレーションカーブが適用可能であるかの予備実験を行ったが、本論文では詳細¹⁾については割愛する。

2. 5 ひび割れ部の塩化物浸入実験概要

45 サイクル終了後に、ひび割れ部周辺、鉄筋周囲および一般部において、全塩化物イオン量をJCI-SC5²⁾に準じて測定した。分析試料のサンプリングは、供試体を割裂し鉄筋を取り除いた後、図-3に示すようにひび割れ断面から深さ10mmまでドリルサンプリングを3箇所行い、約2gを分析試料とした。しかし、実際は鉄筋周囲で図-4の模式図³⁾のように内部ひび割れ、ブリーディングによる脆弱部が存在すると考えられる。本研究におけるひび割れ導入においても、図-4に示すような内部ひび割れが存在すると考えられるため、これらの影響をなるべく排除すべく鉄筋周囲からのサンプリングは避けた。別途、鉄筋周囲のみのサンプリングを行った。一般部においては、取り出した供試体の中央付近250mmの範囲でドリルサンプリングを行った。また、分析試料中には骨材によるばらつきがあると考えられるため、分析試料を硝酸で溶解し分析試料に含まれる骨材量を求め、補正した。本研究では、水和度100%および105℃炉乾燥後のセメントゲルの25%が結合水および層間水であると仮定⁴⁾し、セメント中に含まれる塩化物量を算出した。ひび割れ部表面に付着した塩分は試験前にエタノールで除去した⁵⁾。

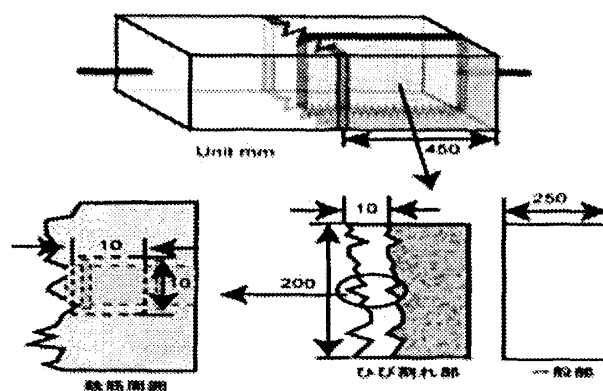


図-3 分析試料サンプリング位置

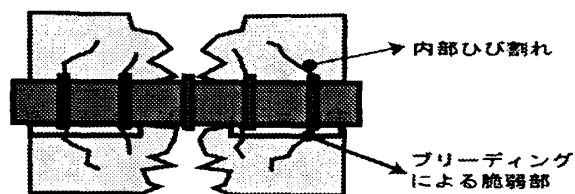


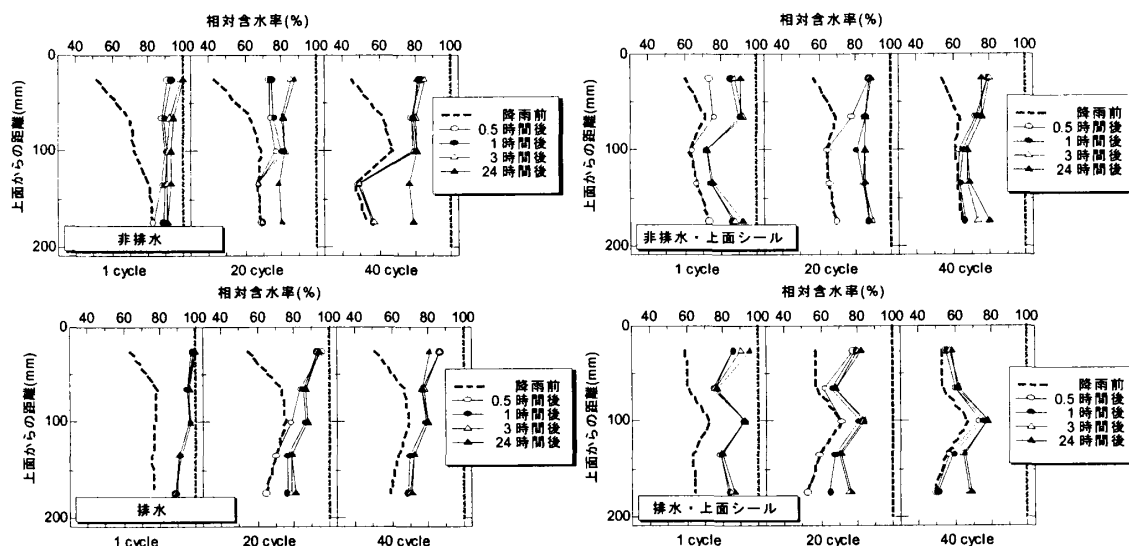
図-4 鉄筋周囲の内部ひび割れ³⁾

3. 実験結果および考察

3. 1 ひび割れ部での水分移動状況

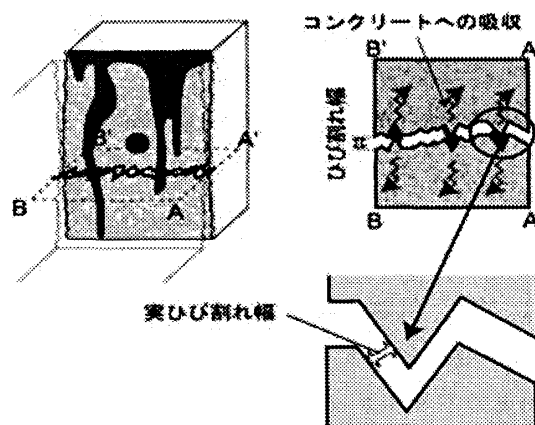
1, 20, 40 サイクルでの水分浸入状況を図-5に示す。1 サイクルにおいて、ひび割れ幅0.3mm程度では底面ひび割れ部排水の有無に依存せず相対含水率の変化から水分がひび割れ内部に非常に短い時間で浸入可能であったことが確認できる。別途、供試体底面からのひび割れ部の水分の吸いあがりを確認したところ、5分間で約75mmまで水分の上昇を確認できた。このことから、ひび割れ幅0.3mm程度では、水分供給初期では、重力の影響は小さく、表面張力が支配的な駆動力であると考えられることができる。

底面非排水の供試体においても、水分供給初期では、表面張力が支配的な駆動力であると考えられるが、底面ひび割れ部が非排水であるので、水分が飽和状態で流れているのであれば、比較的早期にひび割れ部が充填され、相対含水率も100%になると考えられる。図-5に見られるように、水分はひび割れ内部に容易に浸入し、一方で降雨24時間後においても表面ひび割れ部以外では相対含水率は100%にはならない。すなわち、水分がひび割れ部を飽和状態として



図－5 1, 20, 40 サイクル・ひび割れ部での水分浸入状況

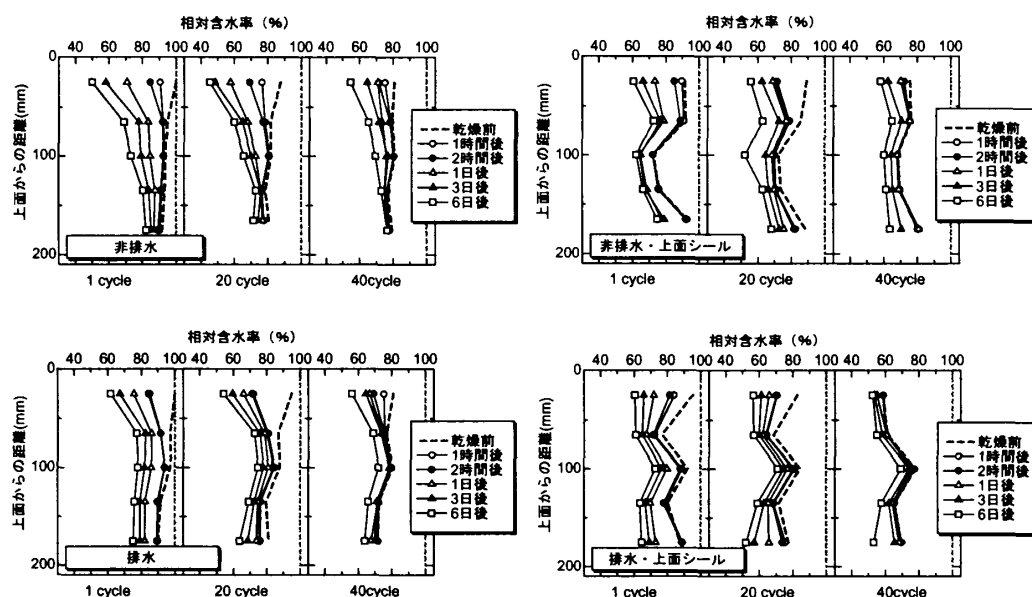
流れていない可能性がある。この理由として、ひび割れ幅はひび割れ断面内で一定ではなく、不規則な内部性状および分布をしている。すなわち、図－6に示すように、水分の移動経路となりうる、実ひび割れ幅が存在すると考えられる。実ひび割れ幅の小さいところでは、水分は表面張力を駆動力とし飽和に近い状態で、ひび割れ面からコンクリート内部に浸透しながら移動し、実ひび割れの大きいところでは、水分は不飽和の状態すなわち、ひび割れ表面を連続しない状態でひび割れ面からコンクリート内部に浸透していると考えられる。一方で、上面シール供試体では、1 サイクルでも、上面付近においても相対含水率が 100%に達しておらず、ひび割れ断面全域にわたって、上面シールをしていない供試体に比べ、相対含水率が小さい値を示している。これは、ひび割れ部での水分移動は、上面からコンクリート内部への水分浸透に関係しており、上面シールしていない供試体では、上面付近では、上面からコンクリート内部への水分の浸透が大きく、ひび割れ面からコンクリート内部への水分の浸透は少ない。すなわち、上面からひび割れに浸入した水分は上面付近では、ひび割れ面からコンクリート内部への浸透はほとんどなく、ひび割れ面内を移動する。一方、上面シール供試体では、上面からコンクリート内部への浸透がないため、ひび割れに浸



図－6 水分移動機構

入した水分は、上面付近でも、ひび割れ表面からコンクリート内部へ浸透しながら、ひび割れ面内を移動すると考えられる。

各供試体において、サイクルを重ねるごとに、上面付近においても相対含水率が 100%でなく、ひび割れ断面全域にわたって、相対含水率が小さい値を示している。底面非排水供試体では、20 サイクル、40 サイクルでは少なくとも 3 時間では底面にまで水分が達していないのが確認できる。排水・上面シール供試体では、40 サイクルでは、ほとんど上面付近で相対含水率の変化がない。この理由として、ひび割れ面のコンクリートと水分との化学反応による固定物の析出による実ひび割れ幅の減少⁶⁾。あるいは、降雨環境過程で、水分とともに浸入した塩化物が乾燥過程でひび割れ内部において結晶化され、水分の移動経路となる実ひび割れ幅が減少したな



図－7 1, 20, 40 サイクル・ひび割れ部での水分逸散状況

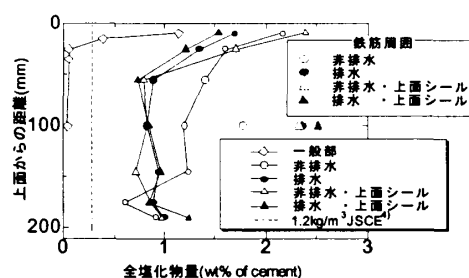
どの理由が挙げられるが、前者は本研究では明らかにできず、後者は供試体を割裂し、ひび割れ断面の目視による観察においては、塩化物の結晶は見られなかった。以上の点については、実測値の再現性およびステンレス電極の配置等供試体解体後の分析を含め、今後の検討課題としたい。

1, 20, 40 サイクルでの水分逸散状況を図－7に示す。底面付近における相対含水率は、底面非排水の供試体の方が、排水供試体より、若干大きい傾向を示している。乾燥6日後の上面付近の相対含水率は、非排水供試体では45%前後、その他は60%前後を示しており、経時的な変化はほとんどしていない。

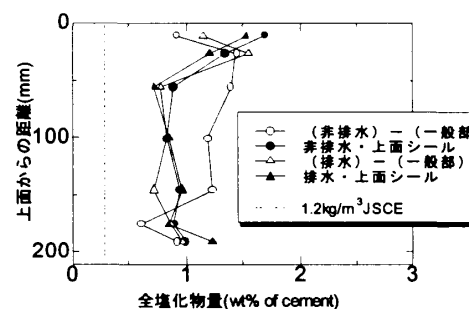
3.3 ひび割れ部での塩化物浸入状況

45 サイクル終了時のひび割れ部周辺、一般部および鉄筋周囲の塩化物浸入状況を図－8に示す。図中に示す破線は、鋼材腐食発生限界塩化物濃度⁷⁾1.2kg/m³を配合から換算したものである。ひび割れ部周辺の塩化物量は、底面ひび割れ部排水の有無に依存せず、ほとんどの場合上面から深さ方向に約50mmまで減少し、それより下部ではほぼ一定値を示している。

これは、全体的傾向としてみれば、図－5、図－7にみられるように、ひび割れ部を含む上



図－8 ひび割れ部周辺、一般部および鉄筋周囲での塩化物分布



図－9 ひび割れ表面からコンクリート内部への塩化物浸入量

面部の乾湿繰り返しによる濃縮、塩分供給の繰り返しがおもな原因と考えられる。

ひび割れ面からコンクリート内部への塩化物浸入は、【上面シールした供試体】および【ひび割れ周辺の塩化物量から一般部での塩化物量を差し引いたもの】である。ひび割れ面からの塩化物浸入を図－9に示す。【上面シール供試体】では、図－8の結果と同ようで、上面付近で最

大値を示し、深さ方向に約 50mm まで減少し、それより下部ではほぼ一定値を示している。これから、ひび割れの影響のみで上部部では濃縮、塩分供給の繰り返しが行われているのが認められる。この領域より下部では、図-5、図-7より深さ方向で含水率の変化は小さくなく、水分の浸透、逸散量も大きく異ならないと思われる。これに対応して塩化物濃度もほぼ等しい。なお、詳細に見れば、図-5、図-7の結果に対応して、排水の場合下部で若干塩化物量が大きくなる傾向を示している。このことからひび割れ表面からコンクリート内部への塩化物浸透量は、塩化物溶液が供給されるひび割れ部の乾湿繰り返しの影響を大きく受けるものと思われる。

【(ひび割れ周辺) - (一般部)】は、上面付近で塩化物浸入が少なく、上面から約 30mm まで増加傾向にあり、その後、減少し一定値を示している。上面付近では水分浸入機構と同様に、上面からの塩化物浸透の影響が大きく、拡散の駆動力となる濃度差が小さいためひび割れ面からコンクリート内部への浸透が少ないと考えられる⁸⁾。そのために、両者では上面付近で、ひび割れからの塩化物浸入量が異なっている。また、すべての供試体で鉄筋周囲での塩化物浸入量が極めて大きい値を示している。この理由として、図-4に示すように、鉄筋周囲では微細な内部ひび割れが存在し、上面からひび割れ部に水分とともに浸入した塩化物が鉄筋周囲に蓄積された可能性が考えられる。

4. まとめ

- 1) 貫通ひび割れ部断面内で電極間の抵抗を直接的に測定することにより、水分移動状況を評価することができた。
- 2) ひび割れ部での水分移動は上面からコンクリート内部への水分浸透が影響していると考えられる。
- 3) ひび割れ部の相対含水率が経時的に減少する傾向を示した。
- 4) ひび割れ部周辺の塩化物量は、底面ひび割れ部排水の有無に依存せず、ほとんどの場合上面から深さ方向に約 50mm まで減少し、それより下部ではほぼ一定値を示した。
- 5) ひび割れ面からコンクリート内部への塩化物浸入は、上面シールの有無で、上面からの距離約 50mm まで異なった傾向を示した。
- 6) 本研究の範囲では、鉄筋周囲の塩化物量は極めて大きい値を示した。

参考文献

- 1) 矢田一也ほか：電気抵抗測定に基づく鉄筋コンクリートひび割れ部での水分移動の評価について、コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.701-706，2003
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準（案），1987
- 3) 後藤幸正・大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.294，pp.85-100，1980
- 4) セメント・コンクリート中の水の挙動，セメント・コンクリート研究会 水委員会，1993
- 5) 竹上浩史ほか：高炉スラグ微粉末を混入したセメント硬化体中の塩化物移動・平衡則，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002
- 6) 伊藤洋・坂口雄彦・西山勝栄・清水昭男：コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究，セメント技術年報，No.41，pp.217-220，1987
- 7) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002
- 8) 矢田一也ほか：電気抵抗測定に基づく鉄筋コンクリートひび割れ部での水分移動と塩分浸透について，第 57 回セメント技術大会講演要旨，pp.116-117，2003