

論文 ひび割れが中性化進行に及ぼす影響に関する実験的検討

水上 翔太*1・西村 次男*2・加藤 佳孝*3・勝木 太*4

要旨: 本研究では、コンクリートのひび割れが中性化に及ぼす影響を把握するために、若材齢におけるひび割れ発生時期と乾湿繰返しの影響に着目し、実験的検討を行った。その結果、ひび割れの発生時期は、ひび割れが鉄筋に到達していない場合には、ほとんど中性化進行に影響しないことがわかった。乾湿繰返しの影響では、本研究で設定した条件の場合、ひび割れ内部からの中性化は進行しなかった。その要因として、ひび割れ内部の残留水分の影響が考えられ、ひび割れ内部の水分の吸水・逸散挙動に関する基礎的な情報の把握を行った。

キーワード: ひび割れ, 中性化, 乾湿繰返し, 吸水, 水分逸散, 含水率

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化は、構造物の性能低下に大きく影響する。その代表的な劣化原因として「ひび割れ」が挙げられ、形状、幅、長さ、発生原因、時期などは様々である。ここで、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾の鋼材腐食に対する照査では、ひび割れ幅の限界値が設定されている。さらに塩害の照査では、塩化物イオンに対する拡散係数の算定の際に、ひび割れの影響を考慮する方法が示されているが、中性化に伴う鋼材腐食に対する照査では、設計値や環境条件のばらつきを考慮した安全係数が設定されているが、ひび割れ幅を考慮した係数の設定はされていない。これは、ひび割れ幅が限界値以下であれば、中性化進行に与える影響は大きくないことを前提としているためである。

しかし、既往の研究^{例えば 2)}によって、ひび割れ幅は初期の中性化進行に影響を及ぼす可能性が示されており、将来的には、必要に応じてひび割れの影響も考慮した中性化の照査手法の確立が必要であると考えられる。

既往の研究の多くは、水和反応が概ね終了した時点で発生するひび割れの影響について検討を行っているものであり、水和反応が比較的活発な若材齢時に発生したひび割れを対象とした例は少ない。また、塩害劣化では一般的に検討されている乾湿繰返しの影響について検討を行った例も少ない。さらに、湿度の影響を検討したものはあるが、降雨を想定した乾湿繰返しを考察したものは多くない。

中性化進行では、「水」は相反する役割を担っており、水の存在は二酸化炭素の侵入を抑制するが、水が存在しなければ炭酸化反応は生じない。さらに、ひび割れ中の水分移動を考えると、外部から供給される水分は健全部のコンクリートと比較してひび割れ中を容易に移動

するが、その後の乾燥過程では、健全部に比較して多くの水分が残留し、ひび割れ中に水分が長時間存在することとなる³⁾。

本研究ではひび割れが中性化の進行に及ぼす影響を明らかにする検討の中で、若材齢時におけるひび割れ発生時期の相違と、実際の環境を模擬した乾湿繰返しが、ひび割れからの中性化進行に及ぼす影響について、実験的に検討した。

2. ひび割れ発生時期が中性化に及ぼす影響

2.1 実験概要

(1) 方法・水準

表-1 に実験要因および水準を示す。寸法が 100×100×180mm の角柱型の普通コンクリート(W/C=50%, 目標スランプ=12cm, 空気量=6%)とし、中央に異形鉄筋(D10)を配置した。養生は各々の期間を 28 日とし、所定のひび割れ時期にひび割れを導入した後は、各々の養生条件に戻している。ひび割れの導入方法は、圧縮強度試験機を用いた 3 点載荷によって行い、 π ゲージを利用して残

表-1 実験要因・水準

要因		水準
使用材料	OPC BB	普通ポルトランドセメント 高炉セメント B 種:比表面積 4310cm ² /g
養生	W F	標準水中(20℃) 屋外湿潤→屋外曝露
ひび割れ導入時期		打設後 1(1d), 4(4d), 7 日(7d)
ひび割れ幅		0.2mm
促進中性化期間		4, 8, 12 週
促進中性化環境		CO ₂ 濃度 5%, 相対湿度 60%, 温度 20℃

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 技術専門員 (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 准教授 博(工) (正会員)

*4 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 工博 (正会員)

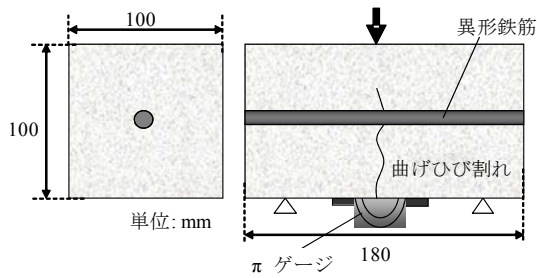


図-1 実験方法

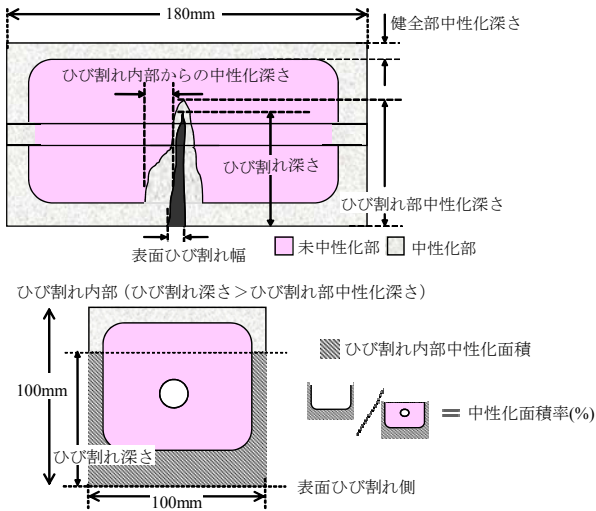


図-2 測定項目

留ひび割れ幅が0.2mmとなるよう制御した(図-1参照)。なお、一水準につき2つの供試体を作成し、その平均値を結果として求めた。

(2) 測定項目

図-2に測定項目を示す。健全部の中性化深さや、ひび割れが導入された箇所における、ひび割れ表面からの中性化進行を適切に評価するために、「中性化面積率」を定義した。これは、ひび割れ断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した後に撮影した画像をもとに、ひび割れが貫通している面に対し、その範囲内の中性化部面積の割合を求めたものである。

また、本実験ではすべての供試体のひび割れが鉄筋に達していることから、鉄筋とコンクリートの界面からの中性化を目視観察した他、顕微鏡を用いて導入時および養生後のひび割れの幅・形状の変化を観察した。鉄筋近傍の考察に関しては、3.2にて検討を行っているため、本実験結果での報告は割愛した。

2.2 実験結果・考察

使用材料の影響を比較すると、健全部ではBBの進行が速いことがわかる(図-3参照)。高炉スラグ微粉末を混合したことで水和反応時に水酸化カルシウムが消費され、細孔溶液のpH保持能力が低下するためである。

図-4に、各条件におけるひび割れ内部の中性化面積率を示す。ひび割れ導入時期の影響を比較すると、中性

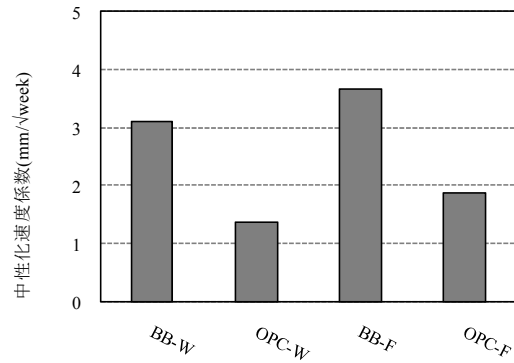


図-3 中性化速度係数(健全部)

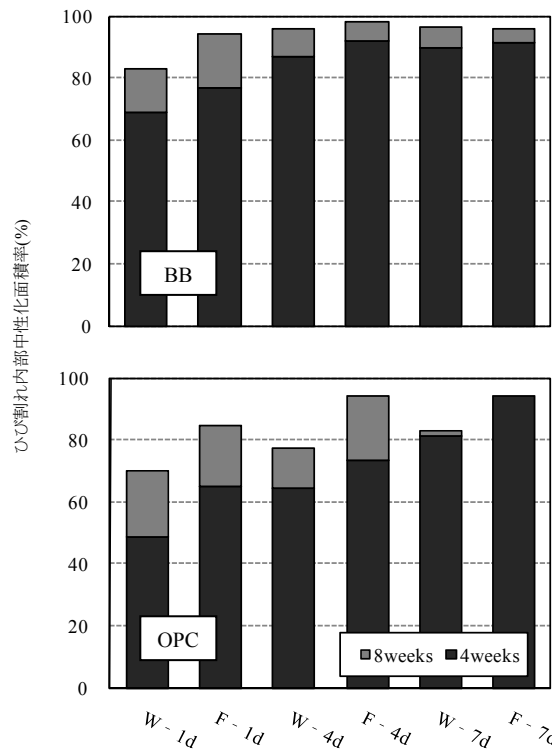


図-4 中性化面積率

化促進期間4週目までの、ひび割れ導入時期が打設後1日の場合、他の条件に比べ中性化の進行が遅い。これは、ひび割れ近傍に存在する未水和セメントの水和反応により、ひび割れが閉塞したことに起因すると考えられるが、顕微鏡による表面観察の結果、ひび割れの変化は明確には確認できなかった。さらに、促進期間が長くなるに従い、ひび割れ導入時期による中性化面積率の差が小さくなった。また、全ての条件において、ひび割れ内部からはほとんど中性化の進行が確認できなかった。以上より、ひび割れの導入時期による中性化進行への影響は、あまり大きくないと考えられる。

3. ひび割れと鉄筋界面からの中性化進行に及ぼす乾湿繰返しの影響

3.1 実験概要

かぶりコンクリートのひび割れが鉄筋に到達していない場合、中性化はコンクリート表面およびひび割れから進行すると考えられる。一方、鉄筋に到達している場合には、上記に加えて鉄筋界面からも進行すると考えられる。そこで、本研究では、それぞれの状態を図-5に示すように模擬した。

(1) ひび割れが鉄筋に到達していない場合

前実験と同配合のコンクリートを使用し、初期養生として脱型後5日間屋外で湿潤養生をした後、線荷重によって供試体中央部分を割裂した。割裂面の端部6箇所にてテフロンシートを均等に置き、割裂した供試体同士を合わせることでひび割れを模擬した。なお、ひび割れ幅は異なる厚さのテフロンシートを用い、表-2の水準になるようにした。さらに、5面をアルミテープでシールすることで外部の影響を受けない状態に保ち、残った1つの開放面をひび割れ面とした。その後湿潤養生を28日間行った。ひび割れの導入時期による影響はあまり大きくないことが前述した実験で確認できたため、導入時期はこの1水準のみとした。乾湿繰返しの影響を把握するため、大気中を模擬した促進中性化試験槽(20℃, 60%)と、降雨を模擬した水中(20℃)との2種類の環境を設け、それらの周期を変化させた(表-2参照)。なお、二酸化炭素濃度は、case1で1%, 5%および室内気中曝露(0.03%)の3条件、case2では5%と設定した。

テフロンシートを置いた面を「ひび割れ面」とした時、ひび割れ面からコンクリート内部への中性化深さを「ひび割れ内部からの中性化深さ」とした。健全部内部からの中性化深さおよびひび割れ内部からの中性化深さは、ひび割れ面と垂直に割裂し、フェノールフタレイン溶液噴霧による計測を行った。

(2) ひび割れが鉄筋に到達している場合

配合は前述したものと同様のコンクリートを使用した。鉄筋周辺の中性化を明確に確認するため、鉄筋むき出し面のみを開放し、残りの5面をアルミテープで保護し、外部の影響を排除した。環境条件はcase2と同様とした。乾湿繰返し期間終了後、健全部および鉄筋近傍の中性化深さを計測した。また、鉄筋の腐食状況は目視によって観察し、腐食状態の判定にはコンクリート標準示方書[維持管理編]⁹⁾による判定を行った。

3.2 実験結果

(1) ひび割れが鉄筋に到達していない場合

図-6より、健全部の中性化においては、一般的な見解と概ね一致する傾向を示すことを確認した。ここで、OPCの結果について、参考として魚本・高田式⁴⁾を適用

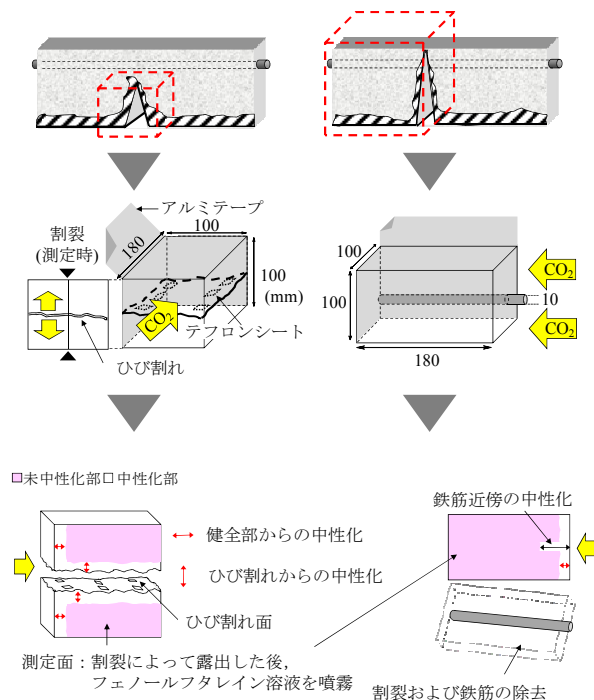


図-5 供試体作成および測定方法

表-2 実験要因・水準

要因	水準	
使用材料	OPC	普通ポルトランドセメント
	BB	高炉セメントB種:(比表面積4310cm ² /g)
養生	割裂後、屋外曝露(28日間)	
ひび割れ幅	0.1, 0.2, 0.5mm	
環境条件	case1	水中1日, 促進6日(1サイクル)
	case2	水中2日, 促進12日(1サイクル)
実験期間	4, 8, 16週	

表-3 鉄筋腐食度判定表⁵⁾

腐食度	腐食状態
A	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
B	部分的に浮きさびはあるが、小面積の斑点状である。
C	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
D	断面欠損が生じている。

した結果と比較した。

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) \times e^{(8.748 - 2563/T)} \times (2.94WC - 101.2) \times 10^{-2} \times \sqrt{Ct} \quad (1)$$

ここに、X：中性化深さ(mm)，C：二酸化炭素濃度(%)，
WC：水セメント比(%)，T：絶対温度(T)，
t：経過時間(週)

結果より、予測式よりも中性化の進行は遅いことがわかった。これは、魚本・高田式が乾湿繰返しを考慮していないためと考えられる。また、case1、case2の5%促進結果を比較すると、case2の方が、中性化が進行していることがわかる。これは、2週間単位で考えると、case2が水中への浸漬回数が1回なのに対し、case1は2回のため、促進中性化中でも高含水状態が続き、結果として中性化が抑制されたためと推察できる。

次に、写真-1に測定面を示す。写真から、OPC供試体を8週間促進中性化させた結果、健全部からの中性化進行は確認できるが、ひび割れからはほとんど進行していないことがわかる。しかし、ひび割れ面の様子を写真-2に示すと、ひび割れ面の表面部は完全に中性化していることが確認できた。したがって、ひび割れ空間内に二酸化炭素が侵入していることは明らかである。ひび割れからの中性化が進行しない理由としては、前述したように、水分の影響が考えられる。乾湿繰返しの場合、ひび割れへの水分の浸透と逸散のバランスが重要であり、本実験で設定した繰返し条件下では、ひび割れ空間内に水分が残留し、ひび割れ面の表面部は中性化するものの、ひび割れからの中性化進行を妨げていると考えられる。

(2) ひび割れが鉄筋に到達している場合

表-4に示すように、健全部に比べ鉄筋近傍のコンクリートの中性化進行は明らかに速いことがわかる。これは、マトリックス部と比較して、遷移帯が形成されているために物質が移動しやすい領域が発生していると推察でき、そこから二酸化炭素が浸透したものと考えられる。W/C=40%の場合、材齢に応じて異なるが、健全部の中性化速度係数に比べて数10倍から数100倍、鉄筋近傍の中性化速度係数が大きくなった。また健全部と同様に、OPCに比べBBの方が、中性化速度係数が大きくなる傾向も確認できた。

次に、鉄筋の腐食状況を写真-3に示す。腐食度の評価方法として、表-3に示した基準を使用した。5週ではいずれも腐食は見られず、12週経過後では開放面近くからの鉄筋腐食が確認できた。腐食状態から、OPCは両方とも「A」、BBはコンクリート面にさびが付着していたことから「B」と判定した。また、打設面と反対の面から鉄筋の腐食が確認できたのは、水分が打設面方向に移動するのを鉄筋が妨げ、貯留したために脆弱部を形成したためと考えられる。

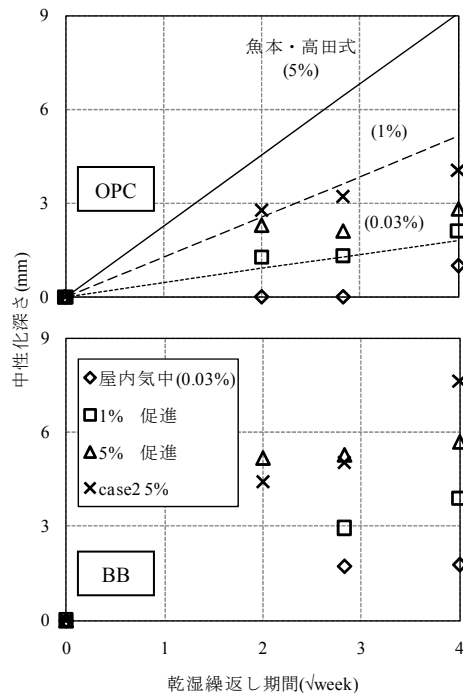


図-6 健全部中性化深さ

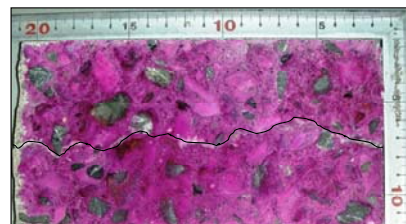


写真-1 健全部およびひび割れからの中性化の様子
(OPC・0.5mm・case1・1%促進・8週目)

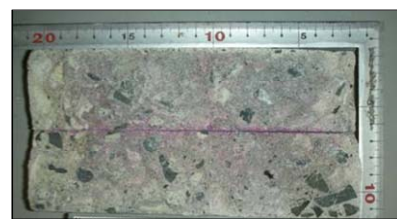


写真-2 ひび割れ面の中性化の様子

4. ひび割れ内部の水分挙動の把握

4.1 実験概要

本実験では、前述した乾湿繰返しを考慮した促進中性化試験の結果、ひび割れ内部に水分が残留している可能性があることと推察されたことから、ひび割れ内部の水分挙動を実験的に把握することを試みた。

(1) 供試体作成方法および前処理

供試体は40×40×80の角柱型モルタル(W/C=50%)とした。脱型後91日間水中養生を行い、3章と同様の方法によりひび割れを有する供試体を作成した(図-7参照)。

表-4 中性化速度係数(mm√週)

測定部位	配合		5weeks	12weeks
	セメント	W/C(%)		
健全部	OPC	40	0.2	0.2
		50	1.2	1.1
	BB	3.3	2.6	
鉄筋近傍	OPC	40	11.8	32.8
		50	25.2	測定不可
	BB	25.0	37.5	

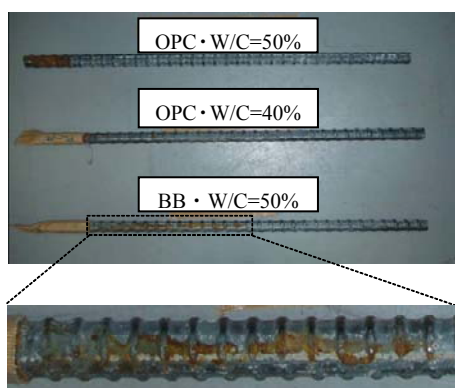


写真-3 鉄筋腐食状況(12週目)

設定した条件は、ひび割れ幅 0.2, 0.5mm, ひび割れ無し の 3 種類である。養生終了後, 2 週間程度乾燥(40℃)し, 供試体質量の減少が概ね停止することを確認した。

(2) 吸水試験

実環境では, 水は主に降雨によって供給されると考えられる。そこで, 水中浸漬(20℃)の場合の吸水特性と, 降雨時に屋外に曝露した場合の吸水特性を比較し, 水中浸漬試験で降雨を模擬することの妥当性を検証した。降雨による吸水方法は, 降雨が観測できた時間帯のみ曝露し, 降雨が停止している時間帯は供試体を封緘状態にすることで質量を保持した。さらに, 降雨に対してひび割れ面が垂直方向になるように置いたものを「垂直」, 平行方向になるように置いたものを「平行」と定義した。

図-8 に水中浸漬および降雨による吸水量に加え, 同時刻に計測した降雨量(mm/h)を示す。吸水方法によって, 吸水速度に若干の差が生じているが, 水中浸漬による吸水方法によって, 降雨による吸水を概ね再現できることがわかる。そこで, 本実験で用いる吸水方法として, 試験の簡便性も考慮し水中浸漬で行うこととした。

水中吸水による質量増加が概ね停止した時点での質量を含水率 100%, 吸水開始を含水率 0%と仮定し, 逸散試験を開始する含水率を設定した。

(3) 逸散試験

吸水試験と同様の乾燥処理を行った後, 吸水試験の結

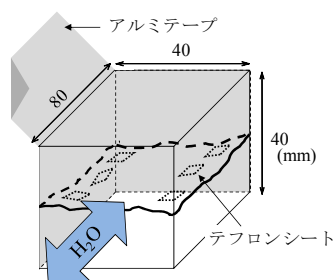


図-7 実験方法

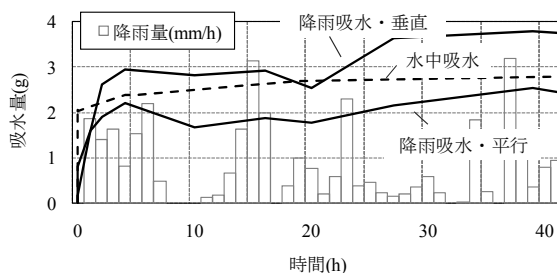


図-8 吸水量(ひび割れ幅 : 0.5mm)および降雨量

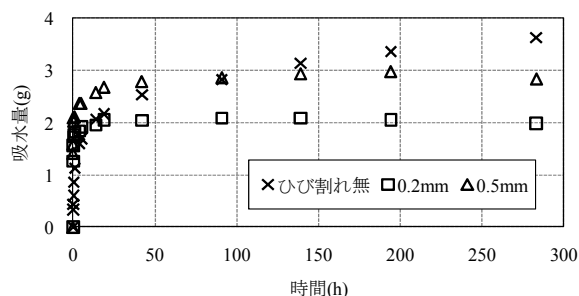


図-9 吸水量(ひび割れ内部増加分)

果をもとに, 含水率 30, 60, 90%の供試体を作成した。以上の前処理の後, 乾燥機(40℃)による水分逸散試験を行い, それぞれの経時的な質量変化を計測した。

4.2 実験結果・考察

(1) 吸水試験

水中浸漬による吸水試験結果を図-9に示す。なお, ひび割れ無しの場合には, 供試体全体の質量の増分を吸水量として示している。また, ひび割れを有している供試体全体の質量の増分から, ひび割れ無しの吸水量を引いた値を, ひび割れ内部の吸水量とした。ひび割れを有している場合には, 吸水開始後, いずれも数十時間経過するとひび割れ内部の水分量の増加は概ね停止した。一方, ひび割れ無しの場合にも吸水開始後短時間で急速に増加する傾向は示すが, その後も緩やかに増加することが確認できる。したがって, 健全部に比べてひび割れ内部への吸水は急速に進行し, 短時間で停止する可能性があることがわかった。

(2) 逸散試験

図-10に逸散水量の経時変化を示す。ひび割れを有している場合、含水率が大きくなるに従い、逸散速度が速いことがわかる。ひび割れ無の場合においても若干の傾向は確認できるが、ひび割れを有している場合ほど、その傾向は顕著ではないことがわかる。

次に、本実験で把握したひび割れ内部の吸水および水分逸散挙動を、前述した乾湿繰返し環境条件の case1(表-2 参照)に反映させ、ひび割れ内部の水分残留程度の検討を行った(図-11 参照)。ただし、1 サイクル中の吸水時間は 24 時間であるため、含水率は 90%と仮定した。結果より、吸水量はひび割れ幅によって 0.6g 程度の差が生じることがわかる。しかし逸散過程では、水分逸散速度はひび割れ幅によらずほぼ等しいため、結果としてひび割れ幅が大きい方が、ひび割れ内部により多くの水分が残留する可能性があることがわかる。計算結果では、ひび割れ幅が 0.2mm の場合、ひび割れ内部の残留水分はほとんど無く、0.5mm の場合、0.4g 程度であった。今回の水分逸散試験の乾燥条件は 40℃であり、3.の促進中性化試験の条件より、乾燥しやすい環境である。乾燥条件が異なるために直接比較することはできないが、乾燥の程度を考慮すれば、計算結果よりも 3.の実験ではひび割れ内部の残留水分が多くなると推測でき、これが、ひび割れ内部からの中性化が進行しなかった原因の一つとして考えられる。

5. まとめ

本研究から得られた成果を以下にまとめる。

- (1) ひび割れが鉄筋に到達していなければ、若材齢時におけるひび割れの発生時期の相違が中性化進行に及ぼす影響は少ないことがわかった。
- (2) ひび割れが鉄筋に到達している場合、乾湿繰返し環境下における中性化は、健全部に比べ鉄筋近傍は著しく進行することがわかった。
- (3) 本研究で設定した乾湿繰返し環境下では、ひび割れ内部からは中性化がほとんど進行せず、ひび割れ内部に残留している水分によって、その進行が妨げられている可能性が考えられる。
- (4) 水中浸漬と降雨による吸水とでは、その挙動は概ね一致することがわかった。
- (5) ひび割れ内部の吸水・水分逸散挙動を基礎的な実験により把握した結果、本実験で設定した乾湿繰返し条件では、ひび割れ内部に水分が残留している可能性が高いことを確認した。今後、適切な乾湿繰返し環境条件を設定し、再度、ひび割れの中性化進行に及ぼす影響について検討を行う予定である。

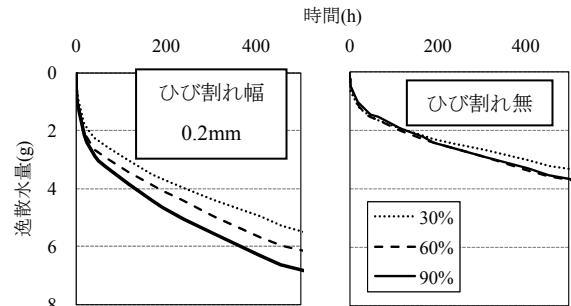


図-10 逸散水量(供試体全体減少分)

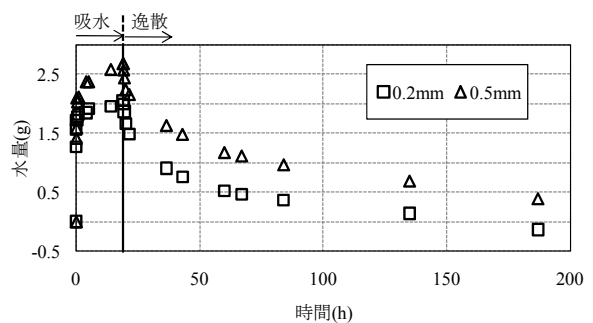


図-11 移動水量(ひび割れ内部)

謝辞

本論文をまとめるにあたり、元芝浦工業大学卒論生小松直人君、小林良輔君、斎藤宗一郎君に多大なご助力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。なお、本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)(研究代表者：西村次男)によるものである。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，pp.117-119，2007
- 2) 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中性化速度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.979-984，1998
- 3) 小林良輔，西村次男，蔵重勲，加藤佳孝：ひび割れと鉄筋界面からの中性化進行に及ぼす乾湿繰返しの影響，生産研究，Vol.61，No.4，pp.649-652
- 4) 魚本健人，高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集，No.451，V-17，pp.119-128，1992
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，pp.90，2007