

平成 23 年 5 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560429

研究課題名 (和文) ひび割れがコンクリート構造物の劣化に及ぼす影響のリスク論的評価と維持管理計画

研究課題名 (英文) Maintenance planning based on risk evaluation of deterioration of cracked concrete structure

研究代表者

西村 次男 (NISHIMURA TSUGIO)

東京大学・生産技術研究所・技術専門員

研究者番号：10466849

研究成果の概要 (和文)：本研究では、ひび割れが中性化の進行に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、ひび割れが鉄筋に到達していなければ、ひび割れが中性化の進行を促進することは無いことが明らかとなった。これは、降雨によってひび割れ中に供給される水分が残留し、二酸化炭素の侵入を妨げているためであった。

研究成果の概要 (英文)：In this research the influence of the crack on the rate of carbonation had been experimentally examined. As a result, it could be concluded that the existence of the crack does not accelerate the rate of carbonation at all when the crack depth does not reach the reinforcement bar. This reason is as follows. The water is supplied in the crack by rainfall. The remaining moisture disturbs the diffusion of the carbon dioxide.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート、ひび割れ、中性化、水分移動

## 1. 研究開始当初の背景

本来、コンクリートは高耐久材料であるとともに、ひび割れが発生しやすい材料であることも事実である。ひび割れの存在は、鉄筋コンクリート (以下、RC) 構造物の構造性能には大きな問題を与えないが、中性化、塩害などの経年劣化を促進するため、構造物の耐久性には多大な影響を及ぼすといわれている。最近では、グリーン購入法の施行とともに利用が促進された高炉セメントを用いたコンクリート構造物において、ひび割れ発生事例が多く存在し、受発注者の頭を悩ませて

いる。発生したひび割れが構造物にとって本当に有害なものであるのか？ということ、定量的に把握していないのにもかかわらず、ひび割れ＝欠陥と、過剰なまでに反応している風潮もある。これまでも、ひび割れの有害性を判断する指標として、国内外において許容されるひび割れ幅が設定されており、細かな条件は異なるが、概ねその値は 0.2～0.4mm である。ただし、過去の論文を調査してみても、これらの値が設定された理論的あるいは実験的根拠は極めて少ない。いつ、どのようにして発生したひび割れが、その後の

構造物の耐久性にとって有害であるかを判断できる材料を揃えることが極めて重要である。また、このような実験的な事実の、竣工検査や維持管理業務への活用方法を検討することも重要なことである。

## 2. 研究の目的

このような現状を鑑み、本研究では以下のテーマを掲げ、ひび割れが RC 構造物の劣化に及ぼす影響を定量的に把握する。

- (1)ひび割れの導入方法の違いが RC の耐久性に及ぼす影響
- (2)ひび割れの導入時期とその後の環境条件が RC の耐久性に及ぼす影響
- (3)ひび割れ幅が RC の耐久性に及ぼす影響
- (4)ひび割れを指標とした既存構造物の維持管理計画方法の検討

## 3. 研究の方法

- (1)ひび割れの導入方法の違いが RC の耐久性に及ぼす影響

コンクリートに発生するひび割れは、収縮ひび割れ、温度ひび割れ、曲げひび割れなど、様々な原因による。ここでは、ひび割れの導入方法によって、ひび割れを介した物質の侵入の差異を検討することを目的とする。なお、本研究で検討するひび割れは主に曲げひび割れとし、(2)、(3)の実験では、曲げ荷重によりひび割れを導入する。ここでは、収縮ひび割れとの差異を明確とするため、(2)で実施する実験の一部条件に関して、乾燥収縮により導入したひび割れを有する鉄筋コンクリート供試体を用いて検討を行い、曲げひび割れの結果と比較する。

- (2)ひび割れの導入時期とその後の環境条件が RC の耐久性に及ぼす影響

ひび割れの導入時期とひび割れ導入後の環境条件が、ひび割れを通じた中性化の進行に及ぼす影響を考慮するために、以下の実験を実施する。

配合条件：普通コンクリート、高炉セメントコンクリート（ブレンド：2,000, 4,000 程度）。ひび割れ導入材齢：1, 4, 7 日。ひび割れ幅：0.2mm。養生方法と期間：水中、気中で 5 日間（高炉セメントは 7 日間）。養生後の環境条件：打設後の供試体は封緘養生し、24 時間後に脱型した。脱型後の養生は「20℃水中養生」と「こも巻きによる湿潤養生 7 日のあと屋外暴露」の 2 種類とし、それぞれ期間を 28 日とした。所定のひび割れ導入時期にひび割れを導入した後は、各々の養生条件に戻した。ひび割れ導入方法：曲げ荷重、除荷後の変位が目標ひび割れ幅となるように  $\pi$  ゲージにより制御。耐久性試験：CO<sub>2</sub> 濃度 5%，RH60% の中性化促進試験槽。計測項目：ひび割れの開閉状況をマイクロスコープ

により把握、試験後の中性化進行をフェノールフタレイン溶液により確認（詳細は図 1 を参照）。

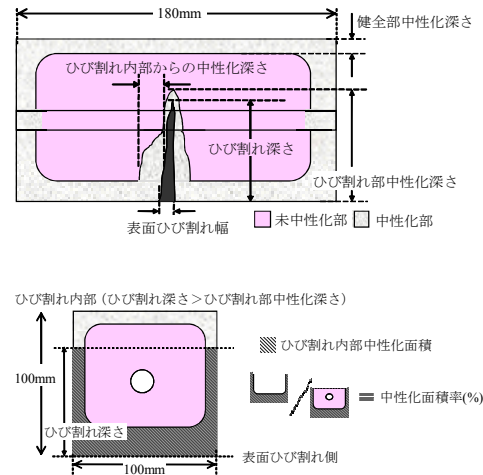


図 1 測定項目

- (3)ひび割れ幅が RC の耐久性に及ぼす影響

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 2 に示すように模擬した。

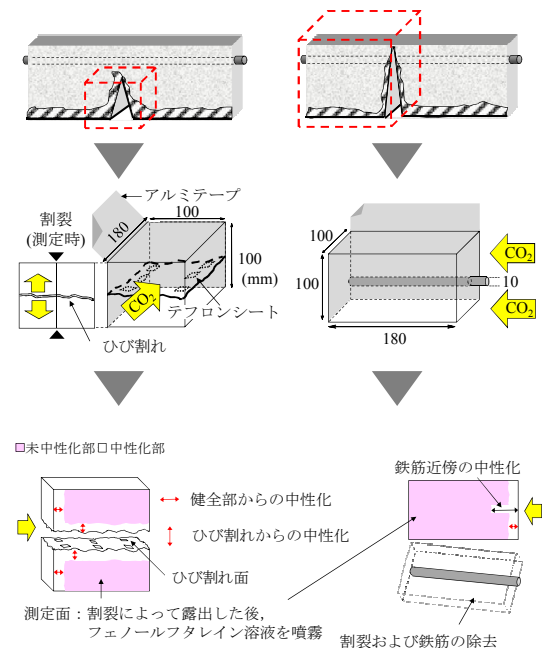


図 2 供試体作成および測定方法

- 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、線載荷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、0.1mm、0.2mm、0.5mmとした。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(case1: 水中1日+促進6日, case2: 水中2日+促進12日)。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た。

#### ③ひび割れ内部の水分挙動の把握

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。

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、前記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。設定した条件は、ひび割れ幅0.2、0.5mm、ひび割れ無し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。

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3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性100%、吸水開始を含水性0%と仮定し、逸散試験を開始する含水性を設定した。

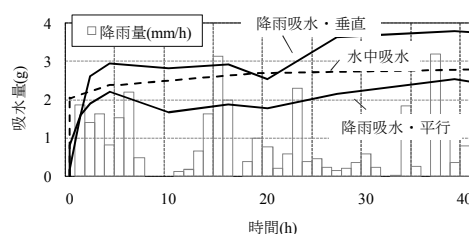


図3 吸水量および降雨量

吸水試験と同様の乾燥処理を行った後、吸水試験の結果をもとに、含水性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)ひび割れを指標とした既存構造物の維持管理計画方法の検討

全ての実験結果に基づき、ひび割れ発生要因、発生時期、ひび割れ幅を関数として有害、無害なひび割れ幅を定量的に評価し、竣工検査時の許容ひび割れ幅を提案する。

#### 4. 研究成果

##### (1)ひび割れの導入方法の違いがRCの耐久性に及ぼす影響

10×10×40cmの供試体を用いて乾燥収縮ひび割れを導入できる方法を検討するため、供試体内部にコンクリートの変形を拘束する鉄筋を配置し、鉄筋径、側面の鋼板の厚さ、自由収縮の範囲などを変化させた型枠を作成したが、本研究の範囲では、ひび割れの発生位置や幅を制御することは不可能であった。そのため、導入方法の違いは今後の検討課題とした。ただし、実験(2)では、曲げひび割れのみを対象としたが、実験(3)では、導入

方法の影響を排除するため、供試体を完全に割裂したのちに、厚さの異なるテフロンシートによってひび割れ幅を制御する方法を開発し、この方法を用いて実験を行うこととしている。

(2)ひび割れの導入時期とその後の環境条件がRCの耐久性に及ぼす影響

使用材料の影響を比較すると、健全部では高炉スラグセメントの進行が速いことがわかる(図4参照)。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。

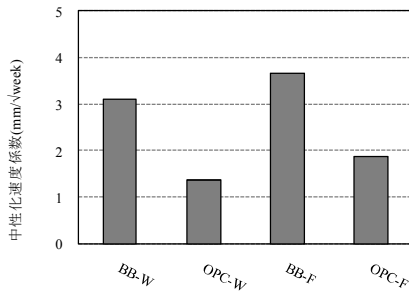


図4 中性化速度係数(健全部)

図5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)ひび割れ幅が鉄筋コンクリートの耐久性に及ぼす影響

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・高田式を適用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(K), t: 経過時間(週)

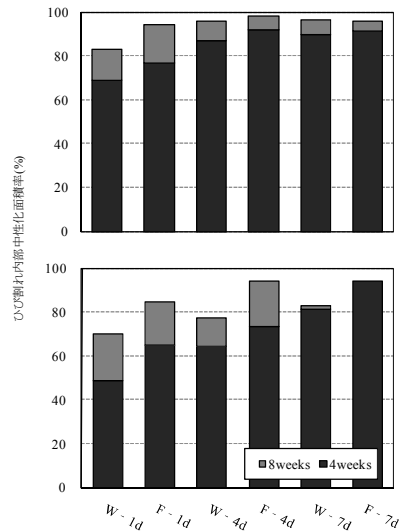


図5 中性化面積率

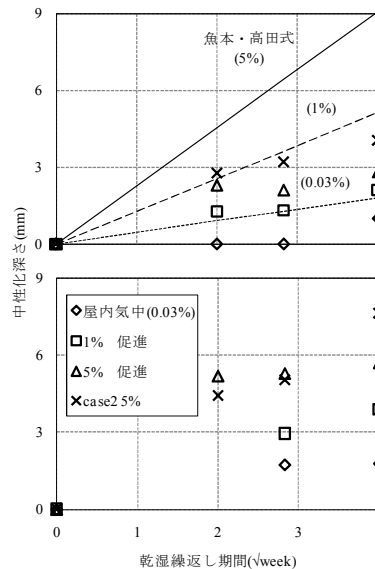


図6 健全部中性化深さ

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。

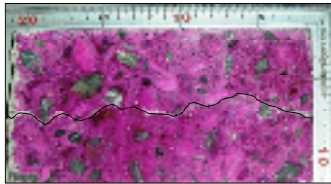


写真1 健全部およびひび割れからの中性化 (OPC・0.5mm・case1・1%促進・8週目)



写真2 ひび割れ面の中性化の様子

②ひび割れが鉄筋に到達している場合

表1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。

表1 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
鉄筋近傍	OPC	40	11.8	32.8
		50	25.2	測定不可
		BB	25.0	37.5

③ひび割れ内部の水分挙動の把握

水中浸漬による吸水試験結果を図7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。

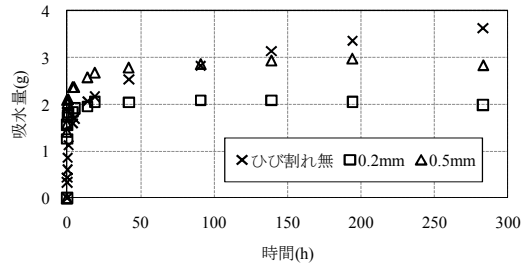


図7 吸水量 (ひび割れ内部増加分)

図8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。

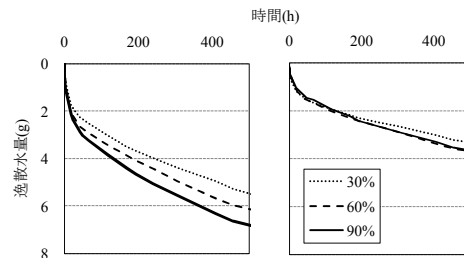


図8 逸散水量 (供試体全体減少分)

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 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9参照)。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、前記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、計算結果よりも前記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。

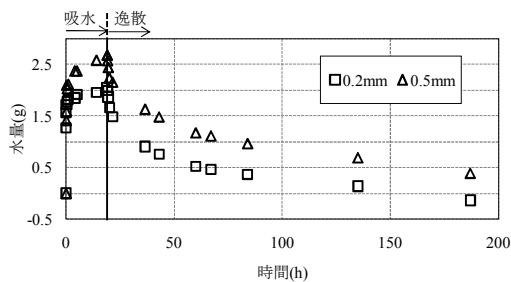


図9 移動水量（ひび割れ内部）

(4)ひび割れを指標とした既存構造物の維持管理計画方法の検討

これまでの実験結果をまとめると、

- 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。
- 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。
- 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。

以上のことから、中性化の進行に関しては0.5mm程度のひび割れが発生していても、ひび割れが鉄筋の到達しておらず、日本のように定期的に降雨が観測される地域では、ひび割れの存在が中性化の進行を促進することはほとんど無いといえる。すなわち、ひび割れ幅のみならず、ひび割れ深さを計測することが重要であるといえる。ひび割れの深さは、超音波法などの非破壊試験によって計測でき、実構造物では、これらの手法を用いてひび割れ深さを計測し、ひび割れの有害性を判断することが重要となる。ただし、降雨が直接かからない構造物では、ひび割れ内部が水分で満たされることがないことから、ひび割れを介して中性化が進行する可能性がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① 水上翔太, 西村次男, 加藤佳孝, 勝木太: 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, 査読有りコンクリート工学年次論文集 Vol.32, pp.599-604, 2010.7
- ② 齊藤宗一郎, 水上翔太, 西村次男, 加藤佳孝, 勝木太: ひび割れ内部の水分挙動に関する実験的検討, 査読無, 生産研究, Vol.62, No.4, pp51-54, 2010.7
- ③ 加藤佳孝, 西村次男, 魚本健人: 骨材周囲の遷移帯厚さおよび空隙率の簡易算定手法の提案, 査読有, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.308-315, 2010.2
- ④ 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, 査読無, 生産研究, Vol.61 No.4, pp.649-652, 2009.5

〔学会発表〕(計3件)

- ① 齊藤宗一郎, 西村次男, 加藤佳孝, 勝木太: ひび割れ内部の水分挙動に関する実験的検討, 第37回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 V-8, 2010.3.10, 東京
- ② 西村次男, 小林良輔, 蔵重勲, 加藤佳孝: 乾湿繰返し環境下におけるひび割れからの中性化進行に関する実験的検討, 第64回年次学術講演会講演概要集, pp 465-466, 2009.9.2, 福岡
- ③ 小林良輔, 西村次男, 加藤佳孝, 勝木太: 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, 第36回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 V-42, 2009.3.10, 東京

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

退職にともないホームページ削除

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

西村 次男 (NISHIMURA TSUGIO)  
 東京大学・生産技術研究所・技術専門員  
 研究者番号: 10466849

### (2)研究分担者

加藤 佳孝 (KATO YOSHITAKA)  
 東京大学・生産技術研究所・准教授  
 研究者番号: 80272516