

# 論文 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

矢田 一也<sup>\*1</sup>・HUSSEIN Nour-Allah<sup>\*2</sup>・田中 和幸<sup>\*3</sup>・佐藤 良一<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究では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、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、水分浸入および乾燥に伴う水分逸散状況を定性的に評価した。ひび割れ幅 0.3mm 程度では、水分は容易に底面にまで達することが明らかとなったが、ひび割れ部で水分が飽和状態として流れていない可能性を示した。

**キーワード**：ひび割れ、電気抵抗、水分浸入、水分逸散、相対含水率

## 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すると考えられる。しかし、降雨がひび割れ部にどのように浸透し、塩化物がひび割れ部からどのように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、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により、貫通ひび割れ部での水分移動状況を電極を用いて直接的に計測することを試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

本実験では、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（密度 3.16g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3280cm<sup>2</sup>/g）および高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3910cm<sup>2</sup>/g）、骨材には、賀茂郡黒瀬町産細砂（表乾密度 2.58g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.57%、粗粒率

2.94）および、賀茂郡黒瀬町産砕石（表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.35%、粗粒率 7.20）、また、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

本実験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。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、さらに飽和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。ひび割れを導入した方法を図-2 に示す。長手方向中央断

\*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 工学部第 4 類（非会員）

\*4 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 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 <sup>3</sup> )				
						W	C	S	G	SP
NC	40	6.5	4.5	40	40.0	168	420	676	1030	C*1%
BB	40	6.5	4.5	39.5	38.4	167	423	643	1048	C*1%

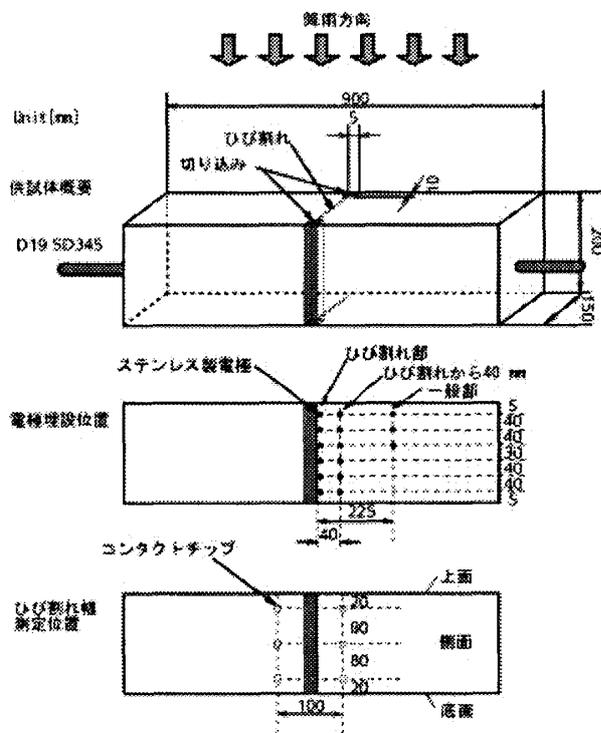


図-1 供試体の概要

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/mm<sup>2</sup>、ひび割れ幅が平均約 0.3mm になったところで、切り込み部に高性能グラウト材を埋め込んだ。高性能グラウト材が硬化したのを確認した後に除荷し、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 (表面付近)、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。

供試体には2種類のシーリングを施した。底面のひび割れ部がシーリングによって閉塞しているものと、開口しているものの2種類である。側

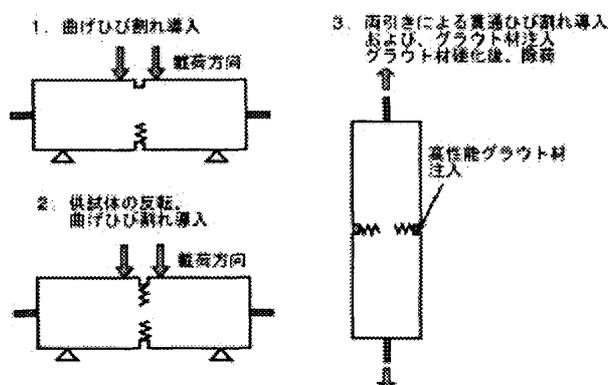


図-2 ひび割れ導入手法

表-2 ひび割れ幅

	NC-U	NC-D	BB-U	BB-D
表面付近	0.33	0.33	0.44	0.34
中央位置	0.22	0.26	0.30	0.29
底面付近	0.16	0.26	0.19	0.28

Unit(mm)

面及び底面は両者ともシーリングし、上面には何も施さず、雨滴を受けるようにした。シーリング材には、エポキシ系樹脂を用いた。この2種類の供試体はひび割れ内部での水分の移動が圧力勾配に依存するかどうかを確認する目的で行ったものである。

### 2.3 水分浸入および水分逸散条件

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状況を把握するため、40℃、NaClを3%含む降雨環境(降水量55mm/hr)に24時間、40℃、R.H.60%の雰囲気にて6日間の暴露の乾湿繰り返しを供試体(図-1)に与えた。

### 2.4 相対比抵抗と相対含水率の関係

供試体に乾湿繰り返し過程を与えている間、経時的に LCR メーターを用いて電気抵抗の測定を行った。温度補正は既往の研究<sup>1)</sup>に従って

行った。測定は、分極を避ける目的<sup>2)</sup>で印加電圧は交流 1V、周波数は 1kHz で行い、また、電極形状の補正<sup>3)</sup>のため、電気抵抗  $R$  形状係数  $C(1/cm)$  を用いて比抵抗  $\rho$  に換算した。

電極の形状係数  $C$  は、比抵抗既知の 1%塩化ナトリウム水溶液 (25℃, 60[Ωcm]) 中に電極を浸漬し、電極間の抵抗値を測定する。水溶液の比抵抗が既知であることから、式 (1) より求めることができる。

$$R = C\rho \quad (1)$$

また、予め実験を行ったところ、電気抵抗値はイオンの有無による影響は顕著に現れたが、塩化ナトリウムの濃度の影響は無視できるほど小さかったので、本研究では塩化ナトリウム濃度による電気抵抗値の補正は行っていない。

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 8 日間の浸漬後の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  $W$  は次式で表される。

$$W = \phi/\phi_s \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $\phi$  : 含水率,  $\phi_s$  : 飽水時の含水率である。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。なお、ここでは、8 日間の浸漬後に重量変化が無く、それ以上の水分侵入が無いとの仮定により、この状態を飽水状態とした。

電極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として、寸法 50×60×150mm の小型供試体を作製し、塩化物浸入供試体と同様の材齢で、8 日間水中に浸漬し、供試体を飽水状態にした後、40℃の乾燥炉で乾燥を開始し、経時的に質量変化と電気抵抗を測定した。これを用いて供試体内部の水分状態を表す相対含水率と相対比抵抗の関係性を求めた。キャリブレーション試験供試体を図-3に示す。また、ひび割れ部においても電極と含水率の状況が測定できるかどうかの確認として、図-4に示される

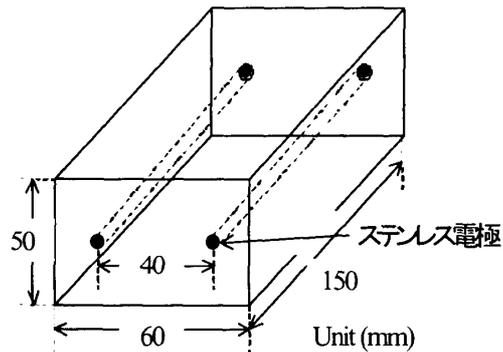


図-3 キャリブレーション用小供試体  
ステンレス電極

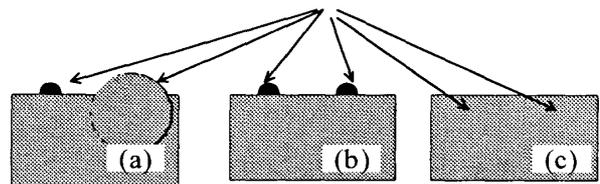


図-4 各状態における電気抵抗値の検討

表-3 コンクリートの強度特性

	圧縮 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ 強度 (N/mm <sup>2</sup> )
NC	57.7	4.3	6.3
BB	54.3	4.1	6.4

(a), (b), (c)の各状態における電気抵抗を測定したところ、電気抵抗はほとんど変わらなかった。このことから、本研究では電極埋設位置にひび割れが生じている場合にも、キャリブレーションカーブが適用可能であるものとした。また、鉄筋の埋設による電気抵抗への影響に関しては検証実験を行っていないが、本研究においては影響が無いものと仮定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 コンクリートの強度特性

20℃で標準養生したコンクリートの圧縮強度、割裂引張強度、曲げ強度を表-3に示す。表-3からわかるように、BBは圧縮強度では、NCに劣るものの、舗装コンクリートを設計する上で指標となる曲げ強度は、NC、BBともに同程度となった。

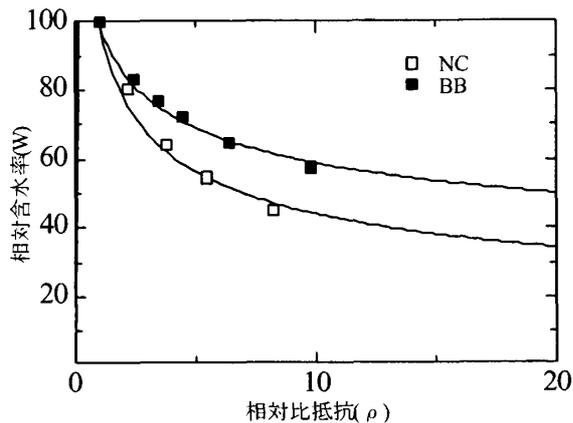


図-5 キャリブレーションカーブ

### 3. 2 キャリブレーションカーブ

普通ポルトランドセメント(NC), 高炉セメントB種(BB)を用いたコンクリートの相対含水率と相対比抵抗の関係を求めたキャリブレーションカーブの結果を図-5に示す。また図中のカーブに対応した回帰式を以下に記す。

$$\ln W = 4.605 - 0.357 \ln P \quad (3)$$

$$\ln W = 4.605 - 0.231 \ln P \quad (4)$$

相関係数はそれぞれ 0.990, 0.993 であった。このことは、求めたキャリブレーションカーブは、推定に十分な精度を持っていることを示しており、かつ、予備実験で確認したひび割れが電極にまたがった場合にも電気抵抗に変化がなかったため、ここで得られたキャリブレーションカーブと電極による抵抗値測定によってコンクリート内部の相対含水率を推定すること可能であることを示している。

また、比抵抗値の測定結果をその材齢での飽水状態(W=100%)の比抵抗で無次元化することによって、本実験の硬化したコンクリートの範囲では、飽水状態に及ぼす水和反応の影響をほぼ消去できたといえる<sup>4)</sup>。

また、図-5 からわかるように BB の方が同じ相対含水率で NC よりも相対比抵抗が大きい。比抵抗は、液相の占める容積率(空隙率)

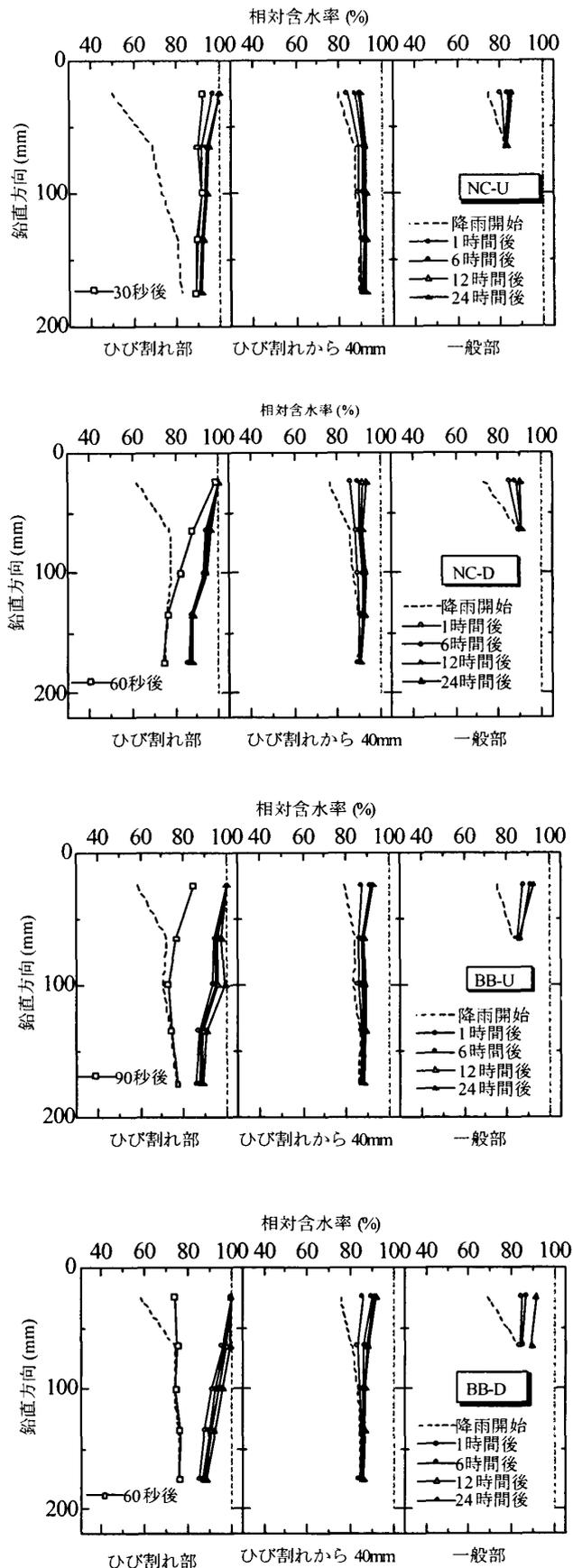


図-6 降雨による水分浸入状況

と電気伝導率によって支配されていると考えられる<sup>5)</sup>。一方で、本実験において、飽水状態の質量から24時間105°Cで乾燥させた後の質量の差、すなわち自由水の量は、NC、BBともにほぼ同程度であった。すなわち、空隙率はNC、BBともにほぼ同程度であるが、電気伝導率が異なる。このことは、BBのほうがNCよりも、細孔内の毛細管空隙が不連続的であり、塩分拡散といった観点では緻密であると考えられる。

### 3. 2 水分浸入状況

40°C、R.H.60%の降雨環境における水分浸入状況を図-6に示す。ひび割れ幅0.3mm程度ではシール条件、セメントの相違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。NC-D、BB-Dにおいては、ひび割れは上面および底面で開放されていることから、上面と底面での圧力勾配は無い。また、ひび割れ幅0.3mm程度では、重力の影響は小さいと予測できることから、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。

NC-U、BB-Uでも、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。

しかし、図-6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。この理由として、水分がひび割れ部を飽和状態として流れてはおらず、不飽和の状態すなわちひび割れ面の電極間を連続しない状態の水分が表面部を移動する、水滴の状態でひび割れ部を移動する、あるいはひび割れ部で水分が供試体内部に浸透しながら移動することなどが考えられる。一方で、図-6に見られるように各供試体において、ひび割れ部底面での相対含水率の変化が観察されることから1時間後には水分は底面にまで浸入している

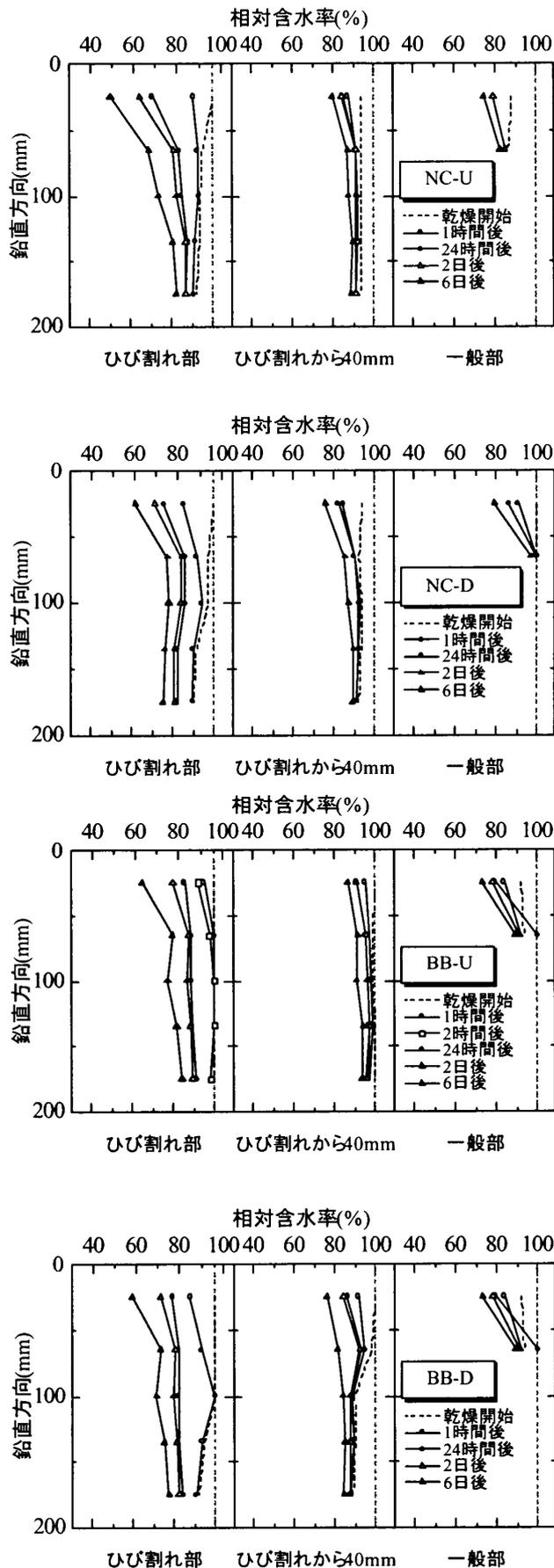


図-7 乾燥による水分逸散状況

と考えられる。しかし、その後相対含水率の変化がほとんどなかった。このことは、降雨過程におけるひび割れ部のコンクリート表面では、水分が飽和状態で流れていない可能性を示している。少なくとも降雨後 24 時間においては、浸漬状態と同等の状態にはならない。このことは、降雨状況におけるひび割れ部の水分移動現象に関して、雨滴に直接接触するコンクリート表面部とひび割れ内部のコンクリート表面部が同一の状態が無い可能性が高いことを意味している。

また、ひび割れから 40mm の位置および一般部では、相対含水率の変化が微小になっており、表面から受ける降雨の影響から表面付近では相対含水率の変化量は大きい、底面付近では相対含水率の変化量が小さい。その相対含水率の変化量はひび割れに近い方が大きく、一般部の方が小さかった。このことから、ひび割れの存在によって水分がコンクリート内部に短時間で到達することを示している。

### 3. 3 乾燥による水分の逸散状況

40°C, R.H.60%の乾燥環境における水分の逸散状況を図-7に示す。この図に示すように、ひび割れ部の底部における相対含水率は、底面非排水の U の供試体が、底面排水の D の供試体より、若干大きい傾向がある。このため、6 日間の乾燥後のひび割れ内部は、特に NC-U, BB-U において供試体鉛直方向に相対含水率の勾配が大きい。

NC, BB の違いによる乾燥に伴う水分の逸散傾向は図-7からもわかるように顕著には現れなかった。

## 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、水分浸入および乾燥に伴う水分逸散状況を定性的に評価することができた。
- 2) 水分浸入過程において、水分の浸入はひび割れ幅 0.3mm 程度では、重力の影響が小さいので、表面張力を駆動力とする流れであ

ると考えられる。

- 3) ひび割れ部での水分の流れが、飽和状態として流れていない可能性を示した。また、供試体を水中に浸漬した状態とは異なる可能性を示唆した。
- 4) 乾燥による水分逸散過程で、底面のシール条件の相違により、水分逸散過程に若干異なった傾向が確認できた。

謝辞 多大なるご協力を賜りました中国電力(株)技術研究センターの皆様に深く感謝致します。

## 5. 参考文献

- 1) 田中良樹・河野広隆・丁海文・鹿島孝之：硬化コンクリートの比抵抗と含水率の関係，土木学会第 55 回年次学術講演概要集，V-226，2000
- 2) 桂修・吉野利幸・田畑雅幸・鎌田英治：交流 2 電力法によるコンクリート中の含水率測定についての理論的検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.16, No.1, 1994
- 3) 竹内崇剛・楊楊・河合研至・佐藤良一：水分逸散及び自己乾燥による高強度コンクリート断面内の水分分布，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.2, 2001
- 4) 福安直行・山田和夫：電気抵抗法を適用したコンクリートの含水量評価に及ぼす材齢の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.21, No.2, 1999
- 5) 鳥居和之・三好政彦・笹谷輝彦・川村満紀：セメント・フライアッシュ硬化体の比抵抗と塩化物イオンの拡散係数，コンクリート工学年次論文集，Vol.18, No.1, 1996