

論文 電気抵抗法を利用したセメント硬化体内部の水分移動測定

溝口 愛実*1・小川 由布子*2・河合 研至*3

要旨: コンクリート構造物の劣化因子となる水分の把握は構造物を維持管理する上で重要である。本研究では、電気抵抗法を用いて、乾燥・吸水・吸湿試験を行い、それぞれの環境下における水分移動について検討した。また、吸水・吸湿試験用供試体を日本の年間平均相対湿度である 70%に長期静置し測定を開始することで、実環境に近い条件で試験を行った。その結果、乾燥・吸湿試験において、曝露面近傍では供試体の比抵抗の増減は供試体内部と周辺環境との相対湿度差に依存し、供試体内部での水分移動には細孔量が影響を及ぼした。また、吸水過程では毛細管現象により水分が内部に浸入することが明らかになった。

キーワード: 水分移動, 電気抵抗法, 初期内部相対湿度, 吸水過程, 吸湿過程, 乾燥過程

1. はじめに

多孔質体であるコンクリートは内部に水分を安定して保持する性質をもち、コンクリート中の水分はコンクリートの劣化要因と密接に関係している¹⁾。例えば、塩害や中性化による鉄筋腐食、アルカリシリカ反応、凍結融解や硫酸侵食といったコンクリート構造物の劣化は、様々なイオンが作用して発生する現象である。そして、すべての劣化現象に関係しているものが水である。そのため、コンクリート中の水の移動を適切に評価することが求められる。

コンクリート中の水分移動には、乾燥・吸水・吸湿過程がある。乾燥過程は、ひび割れや乾燥収縮という劣化に関係し、吸水・吸湿過程は水分が媒体となり様々な劣化因子をコンクリート構造物内に浸入させる原因となる。また、乾燥過程においては、力学的挙動が構造物の劣化に影響することから、研究が多く行なわれてきた。一方で、吸水・吸湿過程についても研究が行なわれているが、吸水・吸湿試験を開始する供試体内部の相対湿度(初期内部相対湿度: IIRH)を 0%として行った研究²⁾が多く、実構造物の IIRH で吸水・吸湿試験を行なった研究は少ない。しかし、実構造物のコンクリートの性状を捉え、設計や補修の適切な時期を検討するためには、天候や周辺の温度、相対湿度によって異なるコンクリートの性質を考慮しなければならないことから、実環境に近い状態のコンクリートの水分移動を捉える必要がある。

水分移動測定方法は、重量法や、湿度センサーを用いる方法、中性子水分計を用いる方法など様々な存在する。その中でも埋め込み式の電気抵抗法は他の方法と比較し、より細かく、同じ供試体を用いて経時的に水分移動を捉えることができる。そのため、水分移動を捉えるには有用な方法であると考えられる。また、セメント系硬化体

の電気抵抗率は電気化学的非破壊試験の精度に大きな影響を及ぼすことから、正確な点検、効果的な補修等により適切な維持管理を行っていくためには、セメント系硬化体の電気抵抗率を正確に把握する必要がある³⁾。しかし、電気抵抗法はコンクリート中の水分の量に対応して変化する抵抗値を測定し、含水の程度を把握するため、値にばらつきがあり、信頼性に欠けるという欠点がある。また、電極を埋め込むことにより、電極が比抵抗に影響を及ぼす可能性も考えられる。

そこで本研究では、電気抵抗法を用いて様々な環境下に置かれた供試体の水分分布を捉えることを目的とし、日本の年間平均相対湿度 70%⁴⁾に長期静置した供試体を用いて、吸水・吸湿試験を行い、水分移動に与える IIRH の影響を検討した。また、電極棒を細かく埋め込むことによる比抵抗への影響を確認するため、電極間隔の異なる供試体を用いて乾燥試験を行なった。

2. 実験概要

2.1 電極間隔の異なる供試体の水分移動(乾燥試験)

(1) 使用材料

本研究ではセメントペースト供試体を作製した。水セメント比(W/C)は 0.35, 0.55 の 2 水準とし、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。表-1 に使用材料と性質を示す。

(2) 供試体概要

水分移動用供試体は図-1 に示すとおり、寸法 40x35x160mm の供試体を、オイルカッターを用いて半分に切断し、40x35x80mm のセメントペースト供試体を作製した。ステンレス電極(SUS304, φ=0.9mm)を 4x4mm, 4x8mm, 8x4mm, 8x8mm (長手方向 x 短手方向 mm)の 4 条件の間隔で打ち込み時に埋め込んだ。すべての供試体

*1 広島大学 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (学生会員)

*2 広島大学 工学研究科社会基盤環境工学専攻助教 工博 (正会員)

*3 広島大学 工学研究科社会基盤環境工学専攻教授 工博 (正会員)

は、打設後、20°C の環境で 24 時間封緘養生を行った後に、水和反応の影響が小さくなる材齢 28 日まで 20°C で水中養生を行なった。

(3) 実験方法

40x35mm 以外の 5 面をエポキシ樹脂でコーティングし、一面曝露の状態を 20°C、相対湿度 60% の環境に静置し、乾燥試験を行なった。

2.2 初期内部相対湿度を変えた供試体の水分移動(吸水・吸湿試験)

(1) 使用材料

実環境を模擬する供試体として、日本の年間平均相対湿度である相対湿度 70%⁴⁾ の環境に後述のとおり静置したが、結果として供試体内部相対湿度 80% で、比抵抗が安定したことおよび恒量を確認したため、以下では IIRH=80% の供試体と示す。また、既往の研究に多い IIRH=0% の供試体を比較用として作製した。

IIRH=0% からの吸湿試験用として、セメントペースト供試体を作製した。水セメント比(W/C)は 0.35, 0.55 とし、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。さらに、IIRH=80% からの吸水・吸湿試験用として、セメントペースト供試体(P)およびモルタル供試体(M)を作製した。水セメント比(W/C)は 0.35 および 0.55 とし、セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には 6 号および 7 号砂を用いた。ペーストと骨材は体積比が 6.3 : 3.7 となるようにした^{5) 6)}。その際、砂 6 号と 7 号の体積比を 4 : 6 で一定とした。材料の性質を表-1 に示す。

(2) 供試体概要

吸水・吸湿試験用供試体およびキャリブレーション用供試体を作製した。吸水・吸湿試験用には、40x35x160mm

表-1 使用材料の性質

材料名	種類・特性
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3,360cm ² /g
細骨材	6 号砂 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.18%
	7 号砂 表乾密度 2.63g/cm ³ , 吸水率 0.16%

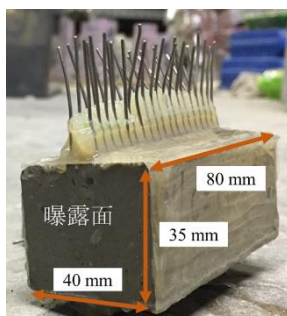


図-1 乾燥試験用供試体



図-2 吸水試験の様子

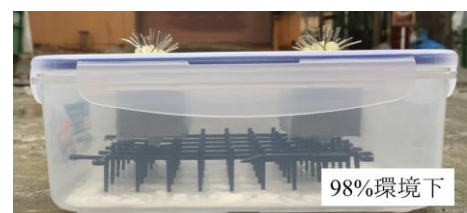


図-3 吸湿試験の様子

の供試体を作製し、ステンレス電極を長手方向に 4mm の間隔で埋め込んだ。キャリブレーション用も同様に 40x35x160mm の供試体を作製し、ステンレス電極は長手方向に 8mm 間隔で配置した。

すべての供試体は打設後 20°C の環境で封緘養生し、24 時間後、脱枠を行ない、材齢 28 日となるまで水中養生を行なった。その後、オイルカッターを用いて、IIRH=0% からの吸湿試験用の供試体は 40x35x80mm の寸法に切断し、IIRH=80% からの吸水・吸湿試験用の供試体は調湿期間を短くするために、供試体の両端を 20mm ずつ切断した後、二分割して 40x35x60mm の寸法とした。また、キャリブレーション用供試体は 40x35x8mm の寸法に切断した。

切断後、IIRH=0% の吸湿試験用供試体は 105°C 乾燥炉に恒量となるまで静置した。キャリブレーション用供試体は、105°C 乾燥炉に恒量となるまで静置した後に、飽和塩法を用いて 20°C の環境下で相対湿度 6%, 12%, 23%, 33%, 43%, 60%, 70%, 75%, 85%, 98% に調湿された環境に静置し吸湿を行なった。IIRH=80% の吸水・吸湿試験用供試体は、飽和塩法を用いて 20°C、相対湿度 70% に調湿された環境に静置した。一方でキャリブレーション用供試体は飽和塩法を用いて、20°C、相対湿度 70% に調湿された環境に静置し、恒量確認後、20°C で相対湿度 75%, 85%, 98% に調湿された空間に静置した。JIS B 7920:2000 を参考に、表-2 に示す塩を用いて調湿した。

(3) 実験方法

実験項目は、時間経過に伴う供試体の水分分布を把握

表-2 使用した塩の種類

使用した塩類		相対湿度(%) 20°C
硫酸カリウム	K ₂ SO ₄	98
塩化カリウム	KCl	85
塩化ナトリウム	NaCl	75
ヨウ化カリウム	KI	70
臭化ナトリウム	NaBr	60
炭酸カリウム	K ₂ CO ₃	43
塩化マグネシウム	MgCl ₂	33
酢酸カリウム	CH ₃ COOK	23
塩化リチウム	LiCl	12
臭化リチウム	LiBr	6

するための水分移動試験，比抵抗を相対湿度に変換するためのキャリブレーション試験，および供試体の内部構造を把握するための細孔径分布試験である。吸水・吸湿試験は 40x35mm 以外の 5 面をエポキシ樹脂でコーティングし，一面曝露の状態で行なった。吸水試験は，エポキシ樹脂を用いてプラスチック製の箱を曝露面に取り付け，横から吸水を行なった(図-2)。吸水試験用の水には，水道水を 1 度煮沸し，水の中の気泡を取り除いたものを用いた。一方で，吸湿試験は飽和塩法で 98% に調湿された環境に静置し吸湿を行なった(図-3)。

細孔径分布試験用供試体は，吸水・吸湿試験用供試体と同条件で養生を行ない，その後，相対湿度 0%，70% の環境に静置した。吸水・吸湿試験開始時に 2.5~5mm の寸法になるように試料を破碎した。また，水和停止を行なうために，24 時間アセトンに浸漬させた後，供試体を乾燥させるために真空脱気装置に 24 時間静置した試料を試験に用いた。測定には水銀圧入式ポロシメータを用い，4.5nm~10000nm の細孔径分布を測定した。

2.3 電気抵抗値の測定

電気抵抗法の測定において，直流電圧は交流電圧に比べてより微弱な電流を測定することが可能である。しかし，直流電圧を使用した場合，イオン分極が生じ抵抗値が安定するのに時間がかかるため，1kHz ほどの比較的高周波の交流を 3V 以下の低電圧で印加する方法が望ましい⁸⁾とされている。そこで本研究では交流 1kHz・1V とし，試験開始から所定の時間ごとに LCR メーターを用いて測定した。電気抵抗値は電極形状などの影響を受けるため，式(1)により，比抵抗に変換した。

$$\rho = R / \left\{ \log \left(\frac{a}{a'} \right) / (\pi \times l) \right\} = R / Sf \quad (1)$$

ここで， R ：電気抵抗(k Ω)， a ：電極棒の半径(cm)， d ：電極間隔(cm)， l ：通電部の長さ(cm)， ρ ：比抵抗(k Ω ·cm)， Sf ：電極固有の形状係数(本研究では電極間隔が 4mm のとき： $Sf = 0.0863$ ，電極間隔が 8mm のとき： $Sf = 0.1137$ と算出された。)

3. 結果および考察

3.1 電極間隔の異なる供試体の水分移動(乾燥試験)

4 条件の間隔で電極を埋め込み， $W/C=0.35$ および $W/C=0.55$ について乾燥試験開始から 182 日後の結果を図-4，図-5 にそれぞれ示す。比抵抗の比は式(2)を用いて求めた。

$$\text{比抵抗の比} = \frac{W_{dry}}{W_{0d}} \quad (2)$$

ここで， W_{dry} ：乾燥試験開始から 182 日経過後の比抵抗， W_{0d} ：乾燥試験開始時の比抵抗

乾燥試験において，4 条件とも同程度の比抵抗の比を示した。このことから，電極の形状係数を考慮した比抵抗を用いることで，電極間隔にかかわらず，電気抵抗法は水分移動を測定する方法として有効な方法であるといえる。

表面近傍の比抵抗の比は両水セメント比ともに同様の値を示したが，曝露面から 12mm~40mm の部分では， $W/C=0.35$ よりも， $W/C=0.55$ のほうが比抵抗の比は大きくなった。これは，表面近傍は供試体の水セメント比にかかわらず，曝露環境の相対湿度が主に影響しているが， $W/C=0.55$ のほうが $W/C=0.35$ と比較して，粗な空隙構造を持つため，供試体内部においては乾燥しやすいことを示していると考えられる。また，さらに内部に着目すると， $W/C=0.35$ は曝露面からの距離が長くなるにつれて比抵抗の比は下がるが，40mm 以深において，比抵抗の比は 1.3 とほぼ一定の値を示した。一方， $W/C=0.55$ の場合，比抵抗の比は同様に低下していくが，40mm 以深においても下がり続け，60mm 以深において 1 を示した。 $W/C=0.55$ のほうが供試体は粗であることを考慮すると内部の水分移動は起こりやすいと考えられ， $W/C=0.35$ の供試体端部の比抵抗の増加は自己乾燥により自由水が減

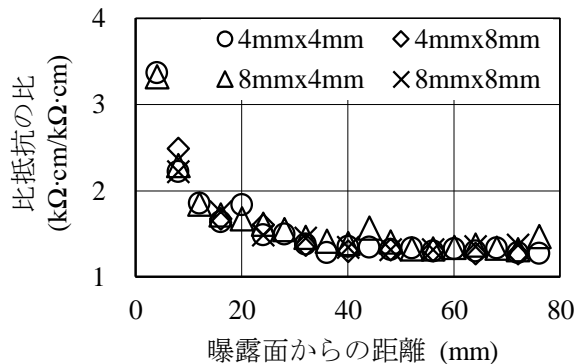


図-4 それぞれの電極間隔で乾燥試験を行った時の比抵抗の比 ($W/C=0.35$)

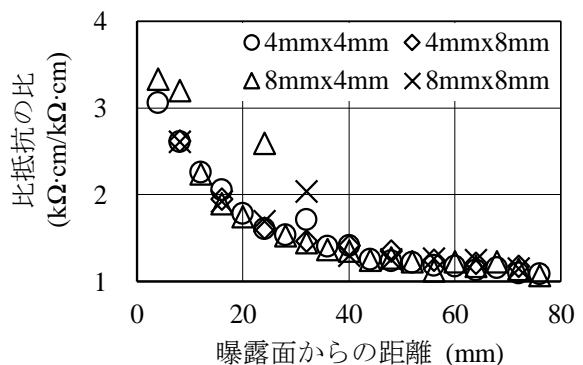


図-5 それぞれの電極間隔で乾燥試験を行った時の比抵抗の比 ($W/C=0.55$)

少し下がっていると考えられる。

3.2 初期内部相対湿度を変えた供試体の水分移動(吸水・吸湿試験)

(1) 細孔径分布試験結果

図-6 に細孔径分布試験結果を示す。IIRH で比較をすると、同じ水セメント比の供試体でも、総細孔量は IIRH=0%のほうが IIRH=80%よりも大きい値を示した。これは、IIRH=0%の供試体は水中養生後すぐに乾燥炉に入れたため、水分が蒸発して水和反応が停止し、一方で IIRH=80%の供試体は水中養生後から 70%の環境に長期静置している期間(約 17ヶ月)に水和反応が進行したため、総細孔量が減少したと考えられる。また、IIRH=0%、IIRH=80%にかかわらず、高水セメント比の方が総細孔量は大きくなった。

セメントペーストとモルタルで比較すると、水セメント比によらず、総細孔量に違いは見られなかった。細孔径が 1000nm から 10000nm の細孔量は 0.35P, 0.35M, 0.55P, 0.55M においてそれぞれ 0.0007cm³/g, 0.0019 cm³/g, 0.0036 cm³/g, 0.0105 cm³/g となり、モルタル供試体の方がセメントペースト供試体よりも多かった。これは、セメントペーストと細骨材の間にある遷移帯が影響していると考えられる。また、メソポア(4.5~50nm の細孔)はセメントペーストの方が多かった。

(2) キャリブレーション試験結果

図-7 にキャリブレーション試験の結果を示す。IIRH=0%(0%), IIRH=80%(80%)ともに水セメント比にかかわらずどの相対湿度においても比抵抗値はほぼ同じ値を示した。また、相対湿度 98%において、どちらの初期内部相対湿度も、比抵抗はほぼ同じ値を示したが、98%以外の相対湿度では IIRH=0%のほうが IIRH=80%よりも比抵抗が大きい値を示した。IIRH で比抵抗が異なったのは乾燥・吸湿過程で比抵抗が異なるという現象のヒステリシスが関係している。

(3) 水分移動試験結果(吸湿試験)

図-8, 図-9 に、IIRH=0%から吸湿試験を行った W/C=0.35 および W/C=0.55 の供試体の結果をそれぞれ示す。吸湿開始から 7 日において、曝露面から水分到達距離(試験開始時の比抵抗と、水分移動試験によって変化した比抵抗を比較した際に、10 kΩ·cm 以上の差がある供試体深さの曝露面から最深の距離)までの比抵抗の減少量は、W/C=0.35 において 30,000 kΩ·cm であり、W/C=0.55 においては 1,700,000 kΩ·cm であった。W/C=0.55 の方が W/C=0.35 よりも比抵抗の減少量が大きいことに加えて、水分到達距離は W/C=0.35 が曝露面から 12mm の深さであるのに対して、W/C=0.55 はより深い 20mm の深さまで到達した。これは、総細孔量が W/C=0.35 と比較して 2

倍以上ある W/C=0.55 の方が水分の浸透が起こりやすく、表面近傍においては、比抵抗の減少に影響を及ぼしている。また、吸湿開始から 28 日後において、W/C=0.35 も W/C=0.55 も表面近傍ではほぼ同様の値を示した。一方で供試体深さ 32mm から 4mm にかけて W/C=0.35 は比抵抗が約 30,000 kΩ·cm 減少したのに対し、W/C=0.55 にお

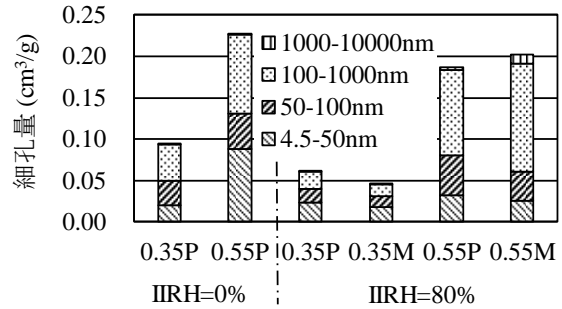


図-6 IIRH ごとの細孔径分布試験結果

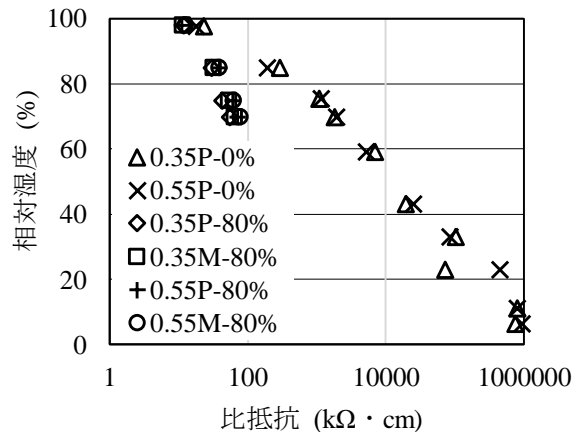


図-7 キャリブレーション試験結果

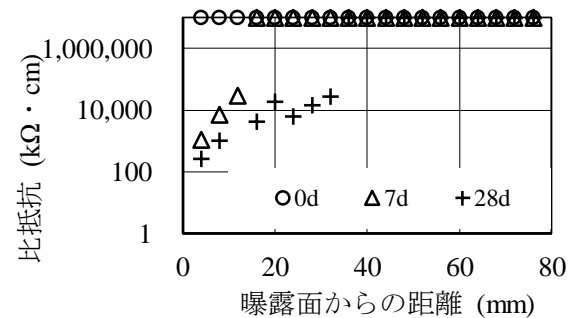


図-8 IIRH=0%の供試体の吸湿試験(W/C=0.35-P)

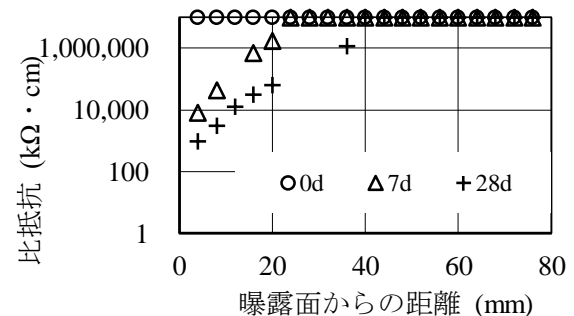


図-9 IIRH=0%の供試体の吸湿試験(W/C=0.55-P)

いては約 1,200,000 $k\Omega \cdot cm$ 比抵抗が減少した。これは吸湿開始から 7 日における比抵抗の減少と同様に、供試体内部では細孔量が水分移動に大きく影響することを示している。一方で、表面近傍では細孔量の影響よりも IIRH と周辺環境の相対湿度差の影響が大きいため、水セメント比にかかわらずほぼ同様の値を示したと考えられる。この現象は乾燥過程と同様である。

図-10, 図-11, 図-12 に、IIRH=80%から吸湿させた W/C=0.35 のセメントペーストとモルタルおよび W/C=0.55 のセメントペースト供試体の結果をそれぞれ示す。セメントペースト供試体と比較すると吸湿試験開始から 7 日後、曝露面から 4mm の地点において、W/C=0.35 では 14 $k\Omega \cdot cm$ 、W/C=0.55 では 28 $k\Omega \cdot cm$ の比抵抗の減少がみられた。W/C=0.35 と比べて総細孔量が約 3 倍の W/C=0.55 の供試体は水分が内部に浸入しやすいためであると考えられる。また、吸湿試験開始から 28 日経過

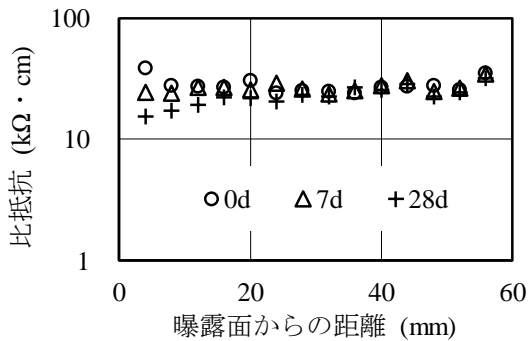


図-10 IIRH=80%の供試体の吸湿試験 (W/C=0.35-P)

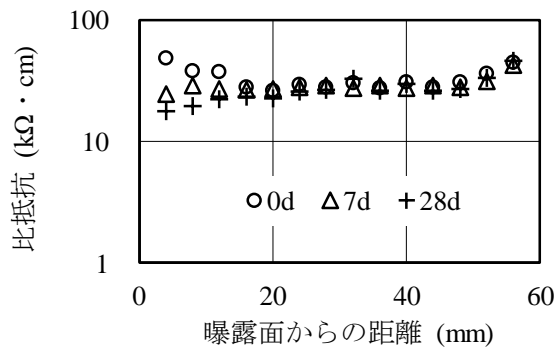


図-11 IIRH=80%の供試体の吸湿試験 (W/C=0.35-M)

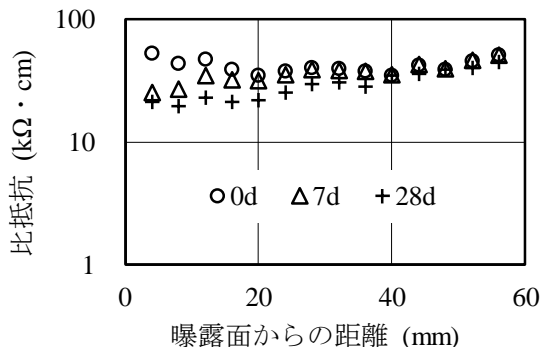


図-12 IIRH=80%の供試体の吸湿試験 (W/C=0.55-P)

後において、曝露面から 4mm の比抵抗の減少量は W/C=0.35 では 23 $k\Omega \cdot cm$ 、W/C=0.55 では 32 $k\Omega \cdot cm$ であり、時間の経過とともに比抵抗は減少した。さらに、高水セメント比のほうが内部への水分の浸入が容易に行われたことが表されていると考えられる。

W/C=0.35 のセメントペーストとモルタルでは、試験開始から 7 日後において、モルタル供試体のほうが表面の比抵抗の減少量が大きくなった。既往の研究において、10~100nm までの細孔径ではクヌーセン拡散に依存して気体の拡散が起こり、100~10000nm の細孔径では、分子の移動によって気体の拡散が起こるため、拡散係数は分子の移動が起こる 100nm から 10000nm の細孔径であるほうが大きいと示されている⁹⁾。そのため、セメントペーストのほうがモルタルよりも総細孔量が多いが、1000nm から 10000nm の細孔量はモルタルのほうが多いため、水分が内部に浸透しやすい環境であったと考えられる。その一方で乾燥開始から 28 日後において、曝露面から 4mm の地点で W/C=0.35 の比抵抗は 18 $k\Omega \cdot cm$ 、W/C=0.55 の比抵抗は 16 $k\Omega \cdot cm$ とほぼ同様の値を示した。

IIRH=0%と IIRH=80%の結果を比較すると、IIRHにかかわらず、水セメント比の大きい供試体のほうが、水分が内部に速く浸入する傾向がみられた。IIRH=0%のほうが IIRH=80%よりも総細孔量が多かったが、この程度の違いであれば水分移動速度に影響を及ぼさないことが示唆された。しかし、表面近傍の比抵抗の減少量は、IIRH=80%よりも IIRH=0%のほうが大きくなった。これ

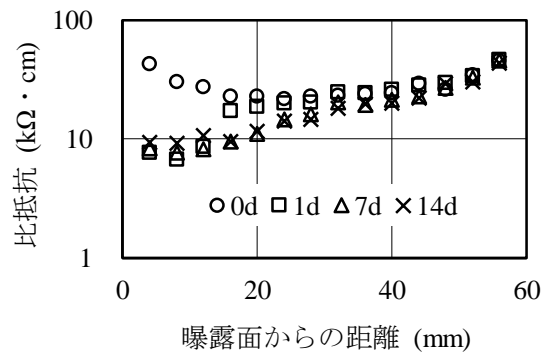


図-13 IIRH=80%の供試体の吸水試験 (W/C=0.35-P)

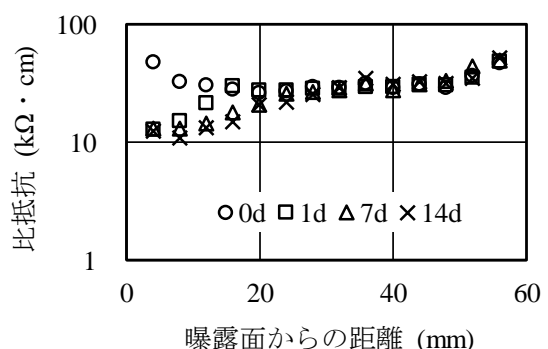


図-14 IIRH=80%の供試体の吸水試験 (W/C=0.35-M)

は、乾燥試験と同様に表面近傍の比抵抗の変化は供試体内部の相対湿度と周辺環境の相対湿度差に影響するものであるということが示唆された。

(4) 水分移動試験結果(吸水試験)

図-13、図-14に W/C=0.35 で IIRH=80%から吸水を行ったセメントペーストおよびモルタルの結果をそれぞれ示す。吸水開始から、1, 7, 14 日を水セメント比で比較すると、いずれの測定日においてもモルタルよりもセメントペーストのほうが、水が速く内部に浸透する。これは総細孔量がセメントペーストのほうが大きいこと、また、細孔径の小さな細孔が多いセメントペーストは毛細管現象により内部に水分が浸入しやすい状況であったためと考えられる。これは吸湿試験結果とは逆であり、直接水に触れさせる吸水試験と、相対湿度の高い環境に静置する吸湿試験とでは水分の移動形態が違うということが示された。

4. 結論

本研究では、水分移動測定方法として電気抵抗法を用い、様々な環境下で変化する水分移動を把握した。研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 乾燥過程において、電極間隔は比抵抗に影響を及ぼさない。また、表面近傍の比抵抗の増加は供試体内部と周辺環境との相対湿度差に依存し、供試体内部の比抵抗の増加は総細孔量に依存する。
- (2) それぞれの初期内部相対湿度において、比抵抗は水セメント比にかかわらずほとんど同じ値を示した。
- (3) 吸湿過程において、高水セメント比のほうが低水セメント比よりも供試体内部に水分が容易に浸入した。また、細骨材を入れたほうが、水分移動は速くなった。しかし、表面近傍において、比抵抗の減少は供試体内部と周辺環境の相対湿度差に依存した。
- (4) 吸水過程において、小さい細孔径が多い供試体のほうが供試体内部への水分の浸入は速い。
- (5) 吸湿と乾燥過程において、表面近傍の比抵抗の変化は供試体内部の相対湿度と周辺環境の相対湿度差に影響されるという同様の傾向が見られた。しかし、吸水と吸湿過程では、吸水過程において細孔径 4.5~50nm の細孔量が多い供試体のほうが水分の移動が容易に起こり、吸湿過程において細孔径 1000~10000nm の細孔量が多い供試体のほうが供試体内部に水分が浸入しやすいという、逆の

傾向が見られた。

電気抵抗法を用いて様々な環境下での水分移動を測定することができた。電極間隔の異なる供試体の水分移動について吸水・吸湿過程も実施し、電極間隔が比抵抗へ及ぼす影響について、さらに検討を深めていく必要がある。

参考文献

- 1) 石田哲也, Chaube R.P., 岸利治, 前川宏一: 任意の乾湿繰り返しを受けるコンクリートの含水状態予測モデル, 土木学会論文集, No. 564, pp.199-209, 1997
- 2) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, 土木学会論文集, No. 420, pp.61-69, 1990
- 3) 菊池道生, 金沢貴良, 斎藤豪, 佐伯竜彦: セメント硬化体の電気抵抗率とその影響因子に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol. 66, No. 1, pp.189-196, 2012
- 4) 気象庁, 過去の気象データ参照: https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=&block_no=&year=2017&month=&day=&view= (閲覧日: 2018年3月10日)
- 5) 藤岡聡, 林明彦, 半井健一郎, 石田剛朗, 河合研至: 吸水過程における電気抵抗試験による水分移動の測定, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, Vol. 68, 2013
- 6) Bui, P.T., Ogawa, Y., Nakarai, K., Kawai, K.: Electrical resistance measurement to assess moisture transfer in cement-based mortar through water absorbing and drying processes, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp.813-818, 2016
- 7) 鹿島孝之, 河野広隆, 渡辺博志, 田中良樹: コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 21, No. 2, pp.895-900, 1999
- 8) 桂修, 吉野利幸, 田畑雅幸, 鎌田英治: 交流 2 電極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, pp.735-740, 1994
- 9) 酒井雄也, 中村兆治, 岸利治: コンクリートの物質移動抵抗性を代表する空隙構造指標の抽出と検証, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol. 70, No. 4, pp.390-401, 2014