

# 論文 湿度勾配を与えたコンクリートの含水率測定に関する基礎的研究

木下 竜一\*1・伊藤 始\*2・岡田 敏美\*3・高島 依里\*1

**要旨:** コンクリートの劣化現象には、乾燥収縮ひび割れやアルカリ骨材反応などのように、コンクリート中の水分に起因して生じるものが多く、高精度な劣化診断にはコンクリート中の水分量を把握することが重要である。本研究では、コンクリート中の水分量測定に関する基礎的な研究として、湿気移動実験と湿気移動解析を行った。その結果、相対湿度や含水率が乾燥とともに減少する傾向を定量的に把握するとともに、相対湿度と含水率の関係を確認した。加えて、湿気移動解析の入力パラメータである透湿率について実験値との比較により、その傾向を把握した。

**キーワード:** 湿気移動, 相対湿度, 含水率, マイクロ波, 透湿率

## 1. はじめに

高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート構造物は、現在アルカリ骨材反応や乾燥収縮によるひび割れなどに起因した劣化現象が目立ちはじめ、構造物の維持管理が重要になってきた。適切な維持管理には、検査技術の高度化が求められ、非破壊試験が注目されている。非破壊試験では、強度推定や内部欠陥の検出などを目的に様々な手法が用いられている。

このような検査の対象となる劣化現象には、コンクリート中の水分に影響を受けるものが多い。乾燥収縮はコンクリート表面からの水分の逸散が劣化要因であり、アルカリ骨材反応は反応性骨材に起因した膨潤性ゲルが水分を吸収することが劣化要因である。そのため、高精度な劣化診断には、非破壊試験によるコンクリート中の水分量の把握が重要である。

コンクリート中に含まれる水分量に関しては、最近になって湿気移動に関する研究が盛んになってきた。籠橋らの研究<sup>1)</sup>では、透湿率や蒸発率などの物性値を考慮した湿気移動の解析法の定式化が行われた。伊与田らの研究<sup>2)</sup>では、相対湿度の経時変化や水分逸散量と乾燥収縮量の相関性の調査が行われた。

以上のことを踏まえ、本研究では非破壊試験と湿気移動解析を組み合わせることで、コンクリート中の水分量を把握するための基礎的な研究として、湿気移動実験と湿気移動解析を行った。研究では、図-1のように、はじめにマイクロ波による含水率測定実験を行った。次に角柱供試体の湿気移動実験を行った。実験では相対湿度に加えて、内部水分量や表面水分量、マイクロ波による含水率などを測定することで、相対湿度と水分量の関係や非破壊試験による水分量の推定方法を検討した。最後に実験を模擬した湿気移動解析を行い、実験結果と解析結果を比較した。

## 2. マイクロ波による含水率測定実験

### 2.1 実験方法

#### (1) 実験概要

含水率測定実験は、均一な含水率分布の供試体について、(a)マイクロ波検査装置(マイクロ波吸収法)、(b)表面水分計(高周波容量法)、(c)炉乾燥による質量変化(質量法)を用いて測定することで行った。

実験は、表-1に示す6ケース、45体で行い、75×100×100mmの角柱供試体と直径100mm、長さ100mmのコア供試体を使用した。

角柱供試体はコンクリートの打込み・脱型後、封緘養生を行い、恒温恒湿室(温度20℃、相対湿度60%)で保管し、材齢16週に封緘を解除し、含水率の測定を開始した。コア供試体はコンクリートブロックから材齢22週に採取し、長さ100mmに成形した。成形後、コア採取前の開放面を除き封緘して、恒温恒湿室で保管した。コア供試体は、翌日から含水率の測定を行った。

角柱供試体およびコア供試体には、同一配合のコンクリートを用いた。セメントには普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材には川砂利(表乾密度2.59g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.45%)、細骨材には川砂(表乾密度2.60g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.88%、粗粒率3.05)を使用した。

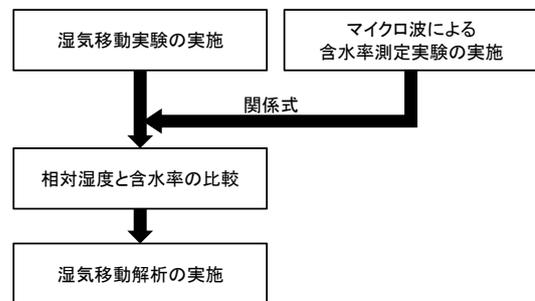


図-1 研究フロー

\*1 富山県立大学 短期大学部専攻科環境システム工学専攻 (正会員)

\*2 富山県立大学 短期大学部専攻科環境システム工学専攻 准教授 (工学部環境工学科 兼任) 工博 (正会員)

\*3 富山県立大学 工学部情報システム工学科 教授 工博

(2) マイクロ波検査装置による測定

測定は、図-2 に示すように供試体の両端に送信、受信アンテナを設置し、ネットワークアナライザから2.4GHzのマイクロ波を送信することで行った<sup>3)</sup>。測定値は、コンクリート内を伝搬した電波の受信強度とした。測定は、供試体1~3個を重ねて、等価的な厚さを変えることで行い、受信強度とコンクリートブロックの厚さの勾配から透過波の強度の減衰率を求めた。

(3) 表面水分計による測定

測定は、表面水分計のセンサ部分をコンクリート表面に押し当てることで行った。角柱供試体では4面、コア供試体では2面を測定し、平均した。

(4) 炉乾燥による質量変化の測定

供試体の一部をマイクロ波の測定後に質量変化が一定になるまで炉乾燥(105°C一定)し、炉乾燥前の質量から

表-1 マイクロ波による含水率測定実験・実験ケース

ケース	形状(寸法)	呼び強度 (W/C)	個数
18N-A	角柱供試体 (75×100×100mm)	18 (0.65)	12
24N-A		24 (0.57)	12
30N-A		30 (0.50)	12
18N-C	コア供試体 (φ100×L100mm)	18 (0.65)	3
24N-C		24 (0.57)	3
30N-C		30 (0.50)	3



(a)アナライザ



(b)測定状況

図-2 マイクロ波検査装置

炉乾燥後の質量を引くことで、質量の変化量を求め、炉乾燥後の供試体の質量との割合を含水率とした。

2.2 実験結果

図-3 に炉乾燥による質量変化と表面水分計による含水率の関係を示す。今回の測定では、角柱供試体、コア供試体ともに炉乾燥の質量変化により得られた含水率と表面水分計による含水率が概ね一致したことから、表面水分計で真値に近い値を得られることが確認できた。

図-4 にマイクロ波測定値として受信強度とブロック厚さの関係の一例を示す。この図では、コンクリートブロックが厚くなるほど、受信強度が小さくなる傾向が見られる。これは、コンクリートブロックが厚くなると、マイクロ波の伝搬距離が長くなり、コンクリート内の水分によるマイクロ波の吸収量が増加するために、計測される透過波の強度が減衰するものと考えられる。

図-5 に表面水分計による含水率とマイクロ波の減衰率の関係を示す。この図では、含水率の増加に伴い、マイクロ波の減衰率が大きくなる傾向が見られる。これは、コンクリート中の水分が少ない場合、受信強度の減衰率が小さく、水分が多い場合、受信強度の減衰率が大きいことを表している。この関係からマイクロ波の減衰率を

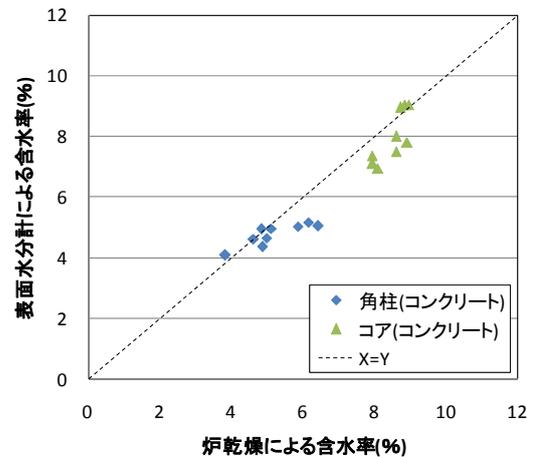


図-3 炉乾燥と表面水分計による含水率の関係

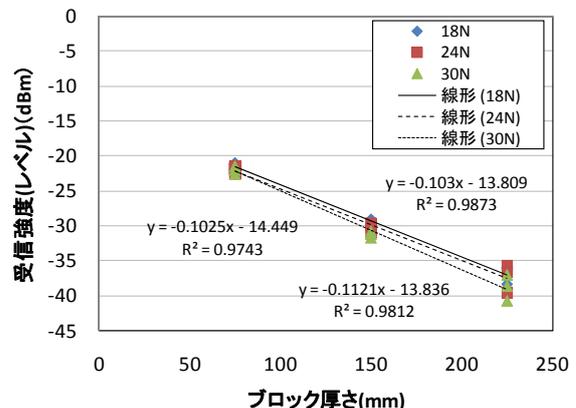


図-4 受信強度とブロック厚さの関係

求めることでコンクリート中の含水率を推定可能であることが確認できた。以降の検討では、図中の関係式を用いてマイクロ波の減衰率を含水率に換算することとする。

### 3. 湿気移動実験

#### 3.1 実験方法

##### (1) 実験概要

湿気移動実験は、相対湿度と内部水分量、表面水分量などの関係を明らかにすることを目的として、水分勾配を与えた供試体の相対湿度や水分量を測定することで行った。測定には、(a)温湿度センサ、(b)水分センサ、(c)マイクロ波検査装置、(d)表面水分計、(e)恒温恒湿室での乾燥による質量変化を用いた。実験ケースは、表-2に示すように供試体の形状寸法と呼び強度、測定項目を変えた10ケース20体で行った。

角柱供試体の寸法は、75×100×400mm および75×100×200mm とし、配合は前述のマイクロ波による含水率測定実験と同一とした。供試体は、コンクリートの打込み・脱型後、図-6に示した蒸発面以外をアルミテープまたはエポキシ樹脂でシールし、恒温恒湿室(温度20℃、相対湿度60%)で保管した。実験スケジュールを図-7に示す。

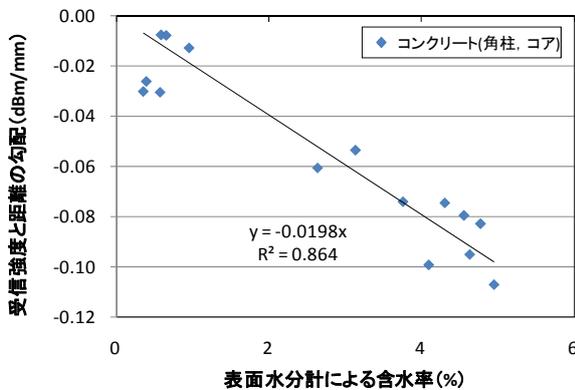


図-5 表面水分計による含水率とマイクロ波の減衰率の関係

表-2 湿気移動実験・実験ケース

ケース	形状(寸法)	測定	呼び強度(W/G)	個数
18A	角柱供試体 (75×100×400mm)	温湿度センサ	18 (0.65)	2
24A			24 (0.57)	2
30A			30 (0.50)	2
24B		水分センサ	24 (0.57)	2
18C		マイクロ波 (表面水分計, 質量)	18 (0.65)	2
24C			24 (0.57)	2
30C	30 (0.50)		2	
18D	角柱供試体 (75×100×200mm)	マイクロ波	18 (0.65)	2
24D			24 (0.57)	2
30D			30 (0.50)	2

##### (2) 温湿度センサによる測定方法

図-6に温湿度センサと水分センサの配置図を示す。温湿度センサ用の供試体では、打込み前に蒸発面から20, 80, 140, 200mmの位置にビニル管を設置し、管内に温湿度センサを挿入した<sup>2)</sup>。センサ挿入後、ビニル管内部が乾燥しないようテープで密閉した。

##### (3) 水分センサによる測定

水分センサ用の供試体において、水分センサは温湿度センサと同じ位置に直接設置した<sup>4)</sup>。水分センサは、コンクリート中に印加した電荷を放電させ、そのときの残留電圧の変化を計測し、コンクリート中の水分の変化を相対的に捉えるものである。

##### (4) マイクロ波検査装置による測定方法

測定は、前述した方法で行った。厚さ200mm, 400mmの供試体の受信強度を測定し、受信強度と厚さの勾配を求めた。マイクロ波用の供試体には、センサを設置していない。

##### (5) 表面水分計による測定

測定は、前述した方法で行った。供試体はマイクロ波測定用と兼ねた。厚さ400mmの供試体では、蒸発面2面を測定して平均し、厚さ200mmの供試体では、蒸発面1面を測定した。

##### (6) 恒温恒湿室での乾燥による質量変化の測定

質量変化は、はかりで供試体の質量を測定することで求めた。供試体はマイクロ波測定用と兼ねた。

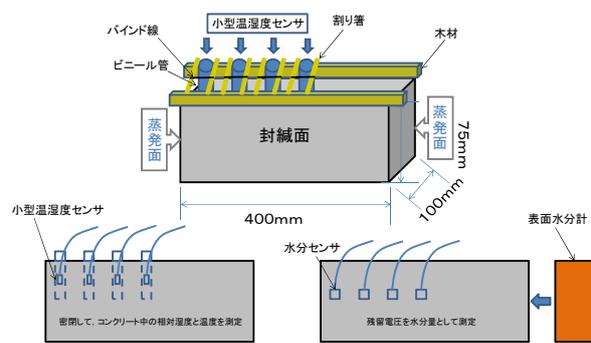


図-6 温湿度センサと水分センサの配置図

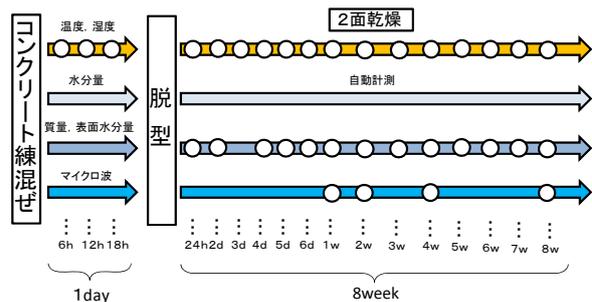


図-7 湿気移動実験・実験スケジュール

### 3.2 実験結果

#### (1) 温湿度センサによる相対湿度の測定結果

図-8 に温湿度センサで測定した相対湿度の経時変化の一例 (30A) を示す。この図では、試験開始初期において、相対湿度が増加する傾向が見られる。これは、試験開始初期ではビニル管内の空気中の相対湿度よりコンクリート蒸発面の相対湿度が高いことが要因と考えられる。試験開始初期以降は日数とともに相対湿度が低下しており、蒸発面に近い測点ほど相対湿度の低下が大きく、蒸発面から 20mm の位置での相対湿度が材齢 56 日で 76%程度となった。これは、コンクリート蒸発面から水分が蒸発することで、コンクリート中の水蒸気圧が低下したことが要因と考えられる<sup>1)</sup>。

#### (2) 水分センサによる測定結果

図-9 に水分センサで測定した相対含水率の経時変化の一例を示す。これは 24B の蒸発面から 20mm の位置を示した図である。相対含水率とは、コンクリートの打込み時を 100%としたコンクリート中の相対的な水分量を表す。この図では、日数とともに相対含水率が低下していくことが分かる。これは、蒸発面から水分が蒸発したことに加え、セメントの水和により水分が消費されたことが要因と考えられる。

#### (3) マイクロ波による含水率の測定結果

図-10 にマイクロ波による含水率の経時変化を示す。この図では、日数とともに、含水率が低下している。28

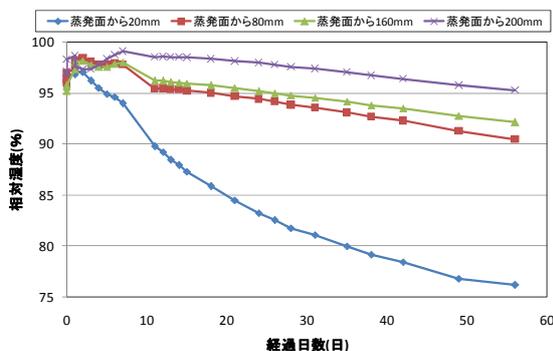


図-8 相対湿度の経時変化

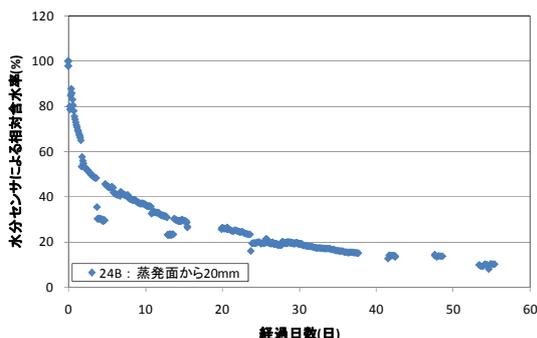


図-9 水分センサによる相対含水率の経時変化

日の 30D を除き、含水率は後述する表面水分計による含水率と近い値を示し、今回の手法でコンクリート中の含水率を推定可能であることが確認できた。

#### (4) 表面水分計による含水率の測定結果

図-11 に表面水分計による含水率の経時変化を示す。この図では、日数とともに含水率が低下しており、打込み直後では 5%程度だったものが、56 日で 2.5%程度になった。18C ケースの含水率は、他のケースに比べて小さくなっている。これは、水セメント比が大きいことで蒸発面からの水分の逸散が多くなったことが要因だと考えられる。

#### (5) 質量変化による含水率の計測結果

図-12 に質量変化による含水率の経時変化を示す。ここでの含水率は、示方配合から供試体の乾燥質量と水分質量を求め、測定値から乾燥質量を引いた値を乾燥質量で除して求めた。この図では、日数とともに含水率が低下しており、打込み直後では 8%程度だったものが、56 日で 6~7%程度となった。18C ケースでの含水率は、他のケースに比べて小さくなった。これは、水セメント比が大きいほど水で消費されない余剰水分量が多く、乾燥により失われやすいことが要因だと考えられる<sup>6)</sup>。

### 3.3 各測定値間の関係

図-13 に相対湿度と表面水分計による含水率の関係を示す。この図では、蒸発面付近の相対湿度の低下に伴

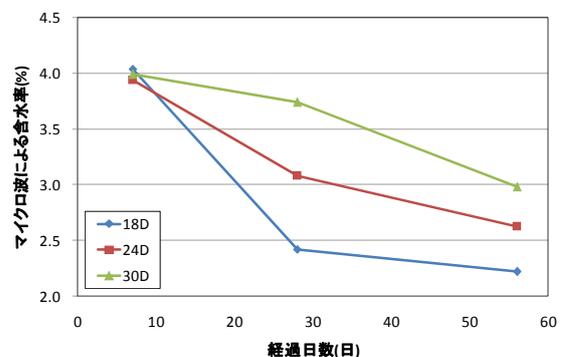


図-10 マイクロ波による含水率の経時変化

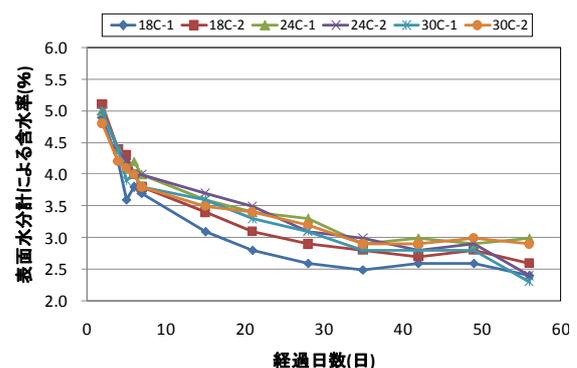


図-11 表面水分計による含水率の経時変化

い、含水率の低下が見られる。相対湿度が 100%から 90%にかけて低下するとき、含水率は大きく低下している。これは、相対湿度が細孔構造内の水蒸気圧を表すのに対し、含水率がコンクリート自体の水分量を表し、水和の影響を含んでいることが要因と考えられる。相対湿度 90%以下では含水率が緩やかに低下している。

図-14 に相対湿度と水分センサによる含水率の関係を示す。この図では、蒸発面付近の相対湿度の低下に伴い、含水率の低下が見られる。相対湿度が 100%付近において含水率が 90%から 40%まで低下するが、それ以下では緩やかに低下している。

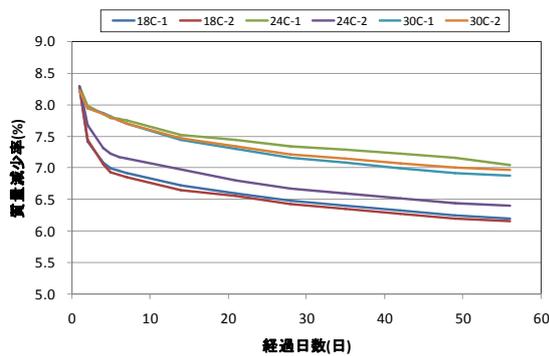


図-12 質量変化による含水率の経時変化

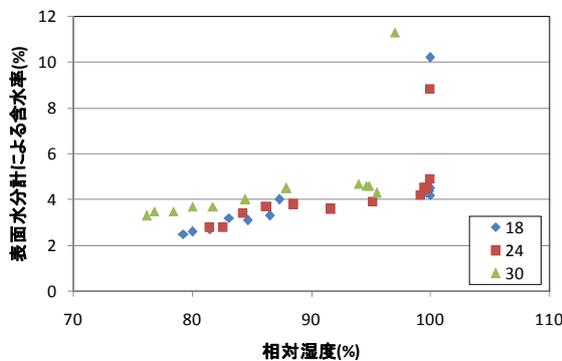


図-13 相対湿度と表面水分計による含水率の関係

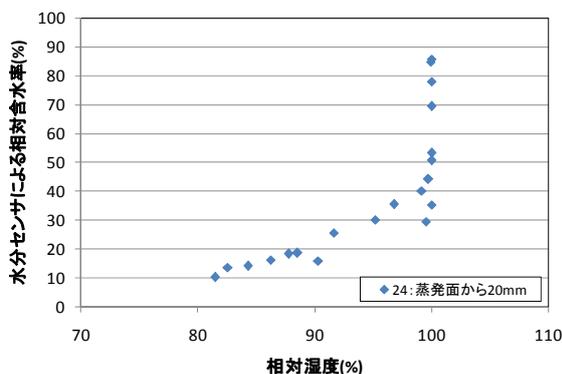


図-14 相対湿度と水分センサによる相対含水率の関係

## 4. 湿気移動解析

### 4.1 解析方法

湿気移動解析は、2次元 FEM 解析（温度応力解析）プログラムを用いて行った<sup>5)</sup>。解析は、湿気移動実験に用いた供試体の形状寸法や周囲環境条件を模擬し、図-15 に示す解析モデルを用いて行った。入力物性値を表-3 に示す。解析では、透湿率 $\lambda$ を3水準に変化させたパラメータ解析を実施した。透湿率は、図-16 のように、既往の研究<sup>1)</sup>の値 ( $1.0\lambda$ ) とその値の2倍 ( $2.0\lambda$ )、0.5倍 ( $0.5\lambda$ ) とした値を用いた。なお、今回の解析では、コンクリートの配合（呼び強度）による透湿率などの物性の違いは考慮していない。

### 4.2 解析結果

図-17 に湿気移動実験と解析から得られた蒸発面から 20mm と 80mm の測点における相対湿度の履歴を呼び強度ごとに示す。なお、今回の解析では配合条件により解析パラメータを変えていないため、解析の相対湿度はいずれの図も同じグラフである。解析の相対湿度は、実

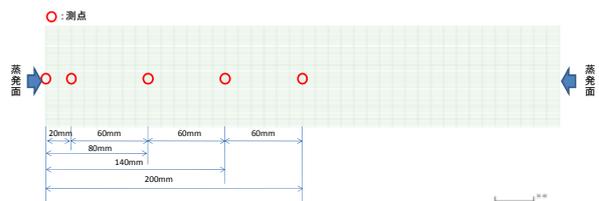


図-15 解析モデル

表-3 入力物性値

項目	物性値
初期水蒸気圧	17.536mmHg (相対湿度 100%RH)
透湿率	図-16 に従う
湿気容量	相対湿度により変化 <sup>5)</sup>
蒸発率	相対湿度により変化 <sup>5)</sup>

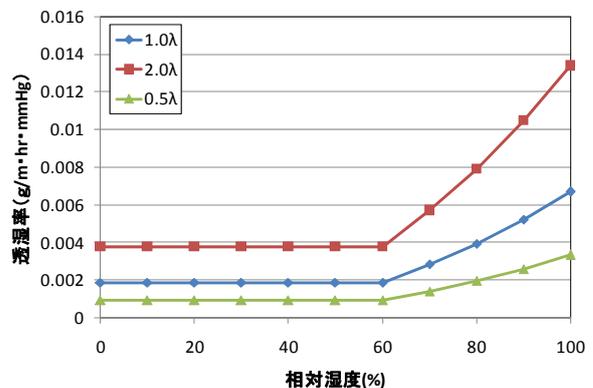


図-16 透湿率の解析パラメータ

験と同様に時間とともに減少し、1.0λの測定20mmの相対湿度は、56日で80%となった。透湿率を1.0λから0.5λに小さくすることで56日の相対湿度が82.5%となり、低下が緩やかになることが確認できた。

図-17の実験と解析の相対湿度の履歴を比較すると、呼び強度18と30のケースでは、両方の測点で2.0λの解析値が実験値に近くなった。呼び強度24のケースでは、測点20mmの0.5λの解析値が実験値に近く、測点80mmの2.0λの解析値が実験値に近くなった。

今回のパラメータ解析では、湿流に関する係数の透湿率を変化させることで実験の相対湿度履歴に近づけることが可能であり、蒸発率などのパラメータを適切に設定することで、実験を再現できる可能性を示した。

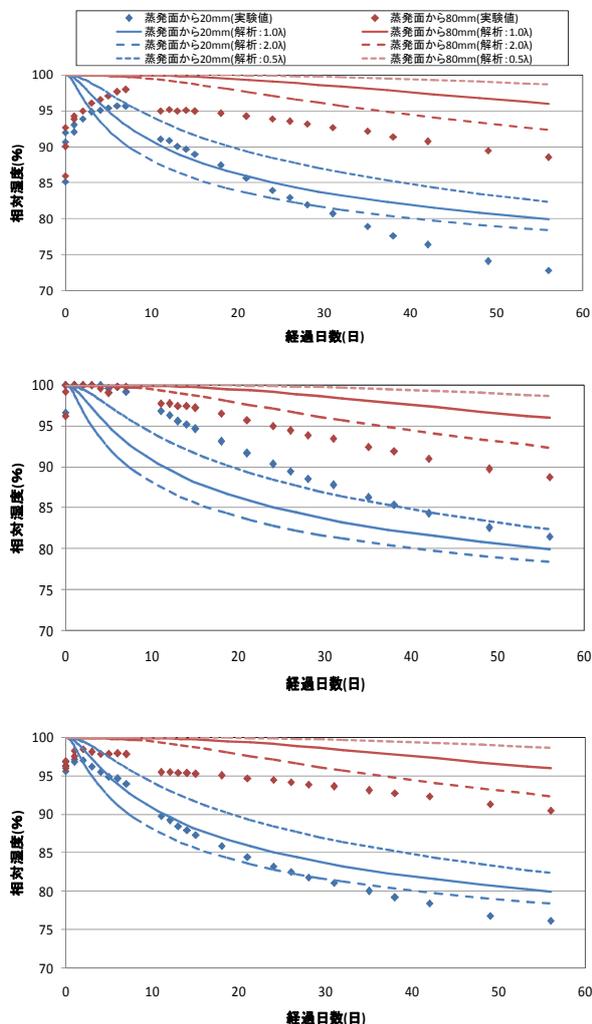


図-17 実験値と解析値の比較

(上：呼び強度 18, 中：呼び強度 24, 下：呼び強度 30)

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) コンクリート中の含水率の増加に伴い、マイクロ波の減衰率が大きくなった。この関係からマイクロ波を用いたコンクリート中の含水率推定手法を提案し、湿気移動実験により含水率の推定に適用できることを確認した。
- 2) 湿気移動実験において、温湿度センサによる相対湿度、マイクロ波および表面水分計によって計測される含水率がコンクリートの乾燥とともに減少する傾向を捉えることができた。
- 3) 相対湿度と含水率の関係から、コンクリート中の含水率の減少は、相対湿度の減少に比べて急激であることが確認できた。
- 4) 湿気移動解析に用いる透湿率を適切に設定することで、湿気移動実験がある程度、再現可能であることを確認できた。

## 謝辞

本研究の実施にあたりご協力を頂きました(株)アイペック、(株)計算力学研究センターに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 籠橋忍, 秦泳, 小沢満津雄, 森本博昭: 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.685-690, 2001.7
- 2) 伊代田岳史, 松崎晋一郎, 井ノ口公寛, 歌川紀之: 養生とその後の環境による内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響, コンクリート工学論文集, Vol.32, No.1, pp.425-430, 2010.7
- 3) T. Okada, S. Takami, A. Yamamoto, T. Miyake, and K. Ishisaka: Non-destructive diagnostic tool for concrete by microwave array antenna, Proc. of AP-RASC'10, B4-2, Toyama, Japan, 2010.
- 4) 佐野禎, 末吉良敏, 平田隆祥, 十河茂幸: 印加電圧方式によるコンクリートの水分率推定方法に関する基礎研究, コンクリート工学論文集, Vol.27, No.1, pp.589-594, 2005.7
- 5) 計算力学研究センター: ASTEA-MACS 資料, 2010
- 6) 戸祭邦之: コンクリートの実像, 理工図書, 1999