

# 論文 湿度一定環境と乾湿繰り返し環境におけるコンクリートの湿気移動特性に関する研究

木下 竜一<sup>\*1</sup>・伊藤 始<sup>\*2</sup>・星野 靖幸<sup>\*3</sup>

**要旨：**アルカリ骨材反応などの劣化現象はコンクリート中の水分の影響を受け、その劣化進行の評価には水分作用の考慮が重要である。本研究では、湿度一定環境の湿気移動実験を実施し、コンクリート中の水分移動現象を捉える湿気移動解析の物性値を検討した。その結果、相対湿度ごとの透湿率と蒸発率を求めることができ、それらを入力した解析値は、実験値に近い値となった。加えて、乾湿繰り返し環境の湿気移動実験を実施し、供試体内部の相対湿度の変化傾向を把握するとともに、解析との相違点について確認した。

**キーワード：**湿気移動解析, 相対湿度, 乾湿繰り返し, 透湿率, 蒸発率

## 1. はじめに

現在、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート構造物において、劣化現象に起因した老朽化が目立ちはじめている。その中でアルカリ骨材反応や乾燥収縮によるひび割れなどの劣化現象は、コンクリート中の水分あるいは相対湿度に影響を受けることが知られている。コンクリート中の水分状態は、構造物が置かれる環境条件に大きく左右される。北陸地方などの比較的温暖な積雪地域では、冬季の降雪と融雪の繰り返しにより、コンクリート表面が長期にわたり水分に曝される環境にあり、劣化進行の評価には水分作用の考慮が重要となる。

一方、コンクリート中の水分移動現象を相対湿度（水蒸気圧）の変化として捉える湿気移動解析が一般的になってきた。湿気移動解析における相対湿度の変化は、透湿率や蒸発率等の物性値に大きな影響を受ける。これらの物性値を適切に設定することで、実現象を再現したより精度の高い解析が可能となる。

これらの物性値について、いくつかの研究<sup>1),2)</sup>で検討されているものの、実験条件が限られており、実験データの更なる集積が必要である。また、これらの物性値は、表面の相対湿度が一定の環境下における実験で求められており、コンクリート表面への降雨や融雪の作用を考慮した物性値の検討は皆無である。

そこで、本研究では、表面の温度および雰囲気湿度が一定の環境（以下、一定環境とも記す）における湿気移動実験を実施し、コンクリートの透湿率と蒸発率を検討するとともに、それらを入力した解析を実施した。加えて、乾燥・湿潤繰り返し環境下の湿気移動実験と解析を実施し、降雨等が湿気移動に与える影響を把握するとともに、実験と解析の相違について検討した。

## 2. 研究方法

研究フローを図-1に示す。はじめに、一定環境下において湿気移動実験を行った。実験では、水セメント比（呼び強度）の異なる角柱供試体の内部の相対湿度を測定し、相対湿度の経時変化を測定した。次に、拡散方程式を用いて、実験結果から透湿率（湿気拡散係数）と蒸発率の解析パラメータの導出を行った。そして、導出した解析パラメータを湿気移動解析に入力し、実験結果と解析結果を比較して、一定環境における湿気移動解析方法の検討を行った。なお、以降の文中において、角柱供試体内部の相対湿度を単に相対湿度と記述し、供試体を設置した空間の湿度を雰囲気湿度と示すこととした。

雰囲気湿度を一定とした環境に対して、実際の外部環境条件として降雨や融雪による表面の湿潤状態を模擬するため、乾燥と湿潤の繰り返し環境における湿気移動実験を行った。実験では、乾燥時の相対湿度と湿潤時の相対湿度を測定し、実験結果と解析結果を比較して、乾燥・湿潤繰り返し環境における湿気移動解析方法を検討した。

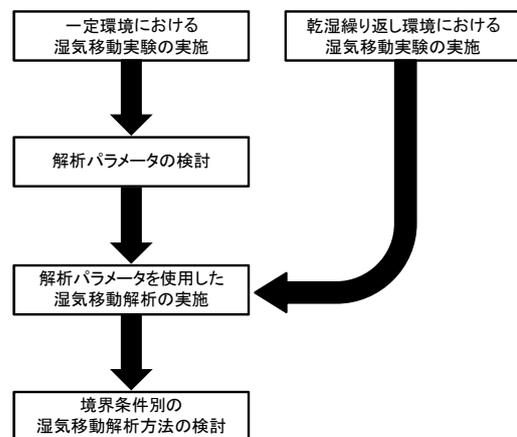


図-1 研究フロー

\*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 環境工学科

### 3. 一定環境における湿気移動実験

#### 3.1 実験方法

実験は、表-1 で示す 3 ケース 6 体で行い、75×100×400mm の角柱供試体を使用した。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。

供試体は、水セメント比を 0.65，0.57，0.50 としたものを 2 体ずつ用意し、それらの呼び強度から実験ケース名を 18A，24A，30A と表すこととした。供試体のコンクリートの打込みから 1 日経過後に脱型し、図-2 上段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、温度 20℃，雰囲気湿度 60% 一定の恒温恒湿室で保管した。材齢 6 ヶ月経過後，恒温恒湿室の雰囲気湿度を 45% に変更した。測定は，打込みから 6 時間経過後に開始し，材齢 1 年まで行った。

#### 3.2 温湿度センサを用いた計測

図-2 下段に温湿度センサの配置図を示す。供試体では，打込み前に蒸発面からの深さ 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>1)</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ビニル管上部を密閉した。

#### 3.3 実験結果

図-3 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-1）を示す。この図では，雰囲気湿度 RH が 60% において，内部相対湿度は日数の経過とともに低下しており，材齢 183 日で蒸発面から深さ 20mm の相対湿度が 69% を示し，他の位置より大きな低下が見られる。これは，コンクリート蒸発面から乾燥によって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。

雰囲気湿度を 45% に変更後に，コンクリート蒸発面から深さ 20mm では相対湿度の急激な低下が見られ，他の位置では相対湿度の低下が緩やかであった。このことから，コンクリート蒸発面付近の相対湿度は，雰囲気湿度の変化の影響を大きく受けるが，蒸発面から 20mm～80mm の間を境に，その影響が小さくなった。

図-4 に材齢 6 ヶ月（雰囲気湿度 60%）と 12 ヶ月（同 45%）における各ケースの蒸発面からの深さと相対湿度の関係を示す。この図では，内部へと深さが進むにつれて相対湿度が高く，深さ 20mm と 200mm の相対湿度に大きな差ができることが分かる。その差は，両材齢ともに，20% 前後であった。深さと相対湿度の勾配に着目すると，24A-2 ケースの深さ 140mm と 200mm の区間を除き，蒸発面に向けて相対湿度が下がる傾向がある。その中で，深さ 20mm と 80mm の区間では，雰囲気湿度の影響を受け，勾配が他の区間に比べて大きくなることが確

表-1 実験ケース

ケース	形状(寸法)	測定	呼び強度 (W/C)	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

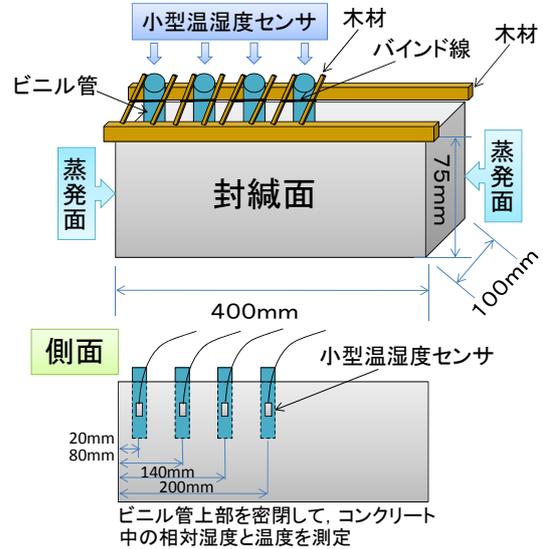


図-2 温湿度センサの配置図

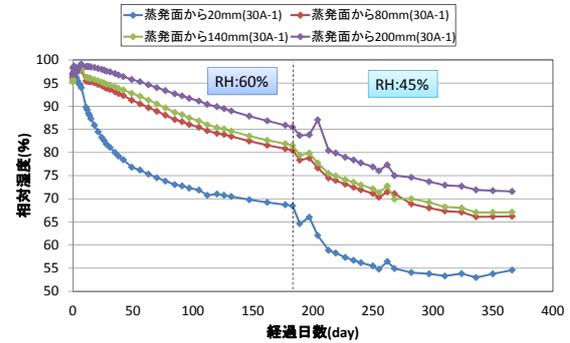


図-3 一定環境における相対湿度履歴(30A-1)

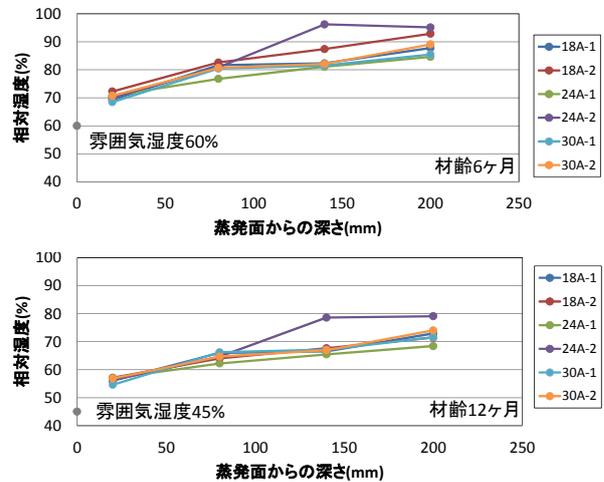


図-4 蒸発面からの深さと相対湿度の関係

認できる。雰囲気湿度をあわせて見ると、蒸発面にかけてさらに勾配が大きくなることが推察できる。

### 3.4 解析パラメータの検討

雰囲気湿度を一定とした湿気移動実験の結果を用いて、解析に入力する湿気拡散係数および蒸発率を拡散方程式から導出することを検討した。本検討では、透湿率を湿気容量で除した値を湿気拡散係数と呼ぶこととした。

#### (1) 湿気拡散係数

湿気移動解析は、水蒸気圧  $P$  の非定常拡散方程式を基本とし、 $X$  軸方向への移動のみを考えると拡散方程式は式(1)となる<sup>4),5)</sup>。

$$C \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここに、 $C$ : 湿気容量 ( $\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{mmHg}$ )、 $\lambda_p$ : 透湿率 ( $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$ )、 $P$ : 水蒸気圧 ( $\text{mmHg}$ )

この式の両辺を湿気容量  $C$  で除すことで、右辺の係数を湿気拡散係数  $D_p (= \lambda_p / C)$  ( $\text{cm}^2/\text{hr}$ ) と設定できる。また、相対湿度  $RH$  は、水蒸気圧  $P$  から温度の関数として与えられる飽和水蒸気圧  $P_{sat}$  を介して計算される。本実験では温度を  $20^\circ\text{C}$  一定としており、式(2)で一義的に求められる。

$$RH = \frac{P}{P_{sat}} = \frac{P}{17.536} \quad (2)$$

図-4 で蒸発面にかけて勾配が大きくなると考えられたことから、図-5 のように水蒸気圧の分布を2次曲線と仮定することで、測点1と測点2の水蒸気圧  $P_1$  と  $P_2$ 、2点間の距離  $X$  を使って式(3)として算定した。

$$D_p = \frac{\lambda_p}{C} = \frac{\Delta P_1 X^2}{2(P_2 - P_1)\Delta t} \quad (3)$$

ただし、ケース 24A-2 では図-4 に示すように  $P_1$  と  $P_2$  がほぼ同じ値になり、拡散係数が非常に大きな値となることが想定されたことから、 $P_1$  と  $P_3$  の値を用いて算定することとした。

図-6 に各ケースの湿気拡散係数  $D_p$  の算定値の経時変化を示す。同図には、その時期の対象測点  $P_1$  と  $P_2$  の平均相対湿度を10%区切りで記した(例えば、90%は85.0~94.9%の範囲の値)。乾燥開始初期および雰囲気湿度を60%から45%に切替えた時期は、湿気拡散の2次曲線の仮定が成り立たなくなり、ばらつきが大きくなっていることが分かる。そのため、これらの時期を除いて検討することとした。また、相対湿度のばらつきにより生じた負側の値についても除外した。

いずれのグラフも日数の経過すなわち内部の相対湿度の低下とともに湿気拡散係数が低下していることが確認できる。また、すべてのケースで2つの供試体の変化傾

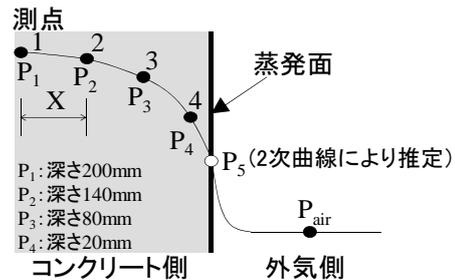


図-5 水蒸気圧分布と伝達境界の関係

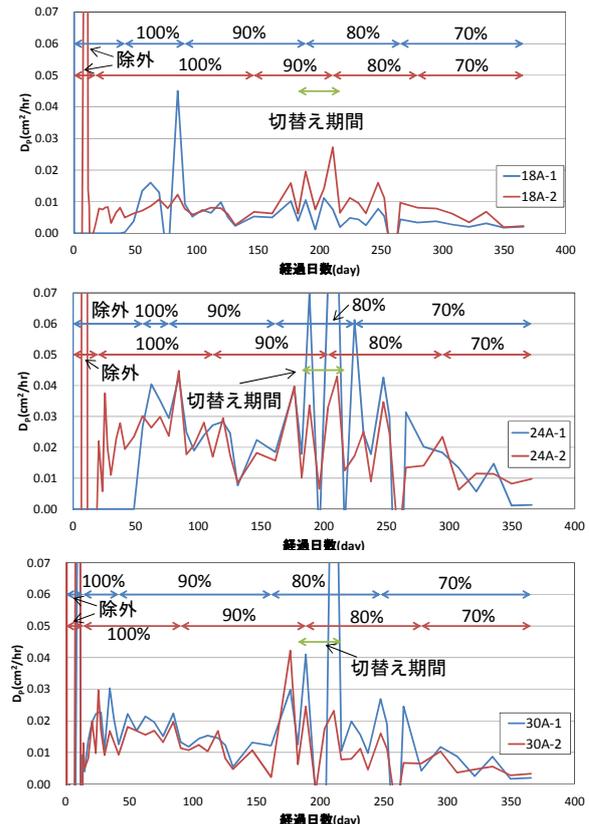


図-6 湿気拡散係数  $D_p$  (上: 18A, 中: 24A, 下: 30A)

向が類似しており、恒温恒湿室内の微妙な湿度や温度の変化を捉えたことで、ばらつきが生じた可能性が考えられた。24A の湿気拡散係数は、他のケースの値に比べ大きな値となった。

#### (2) 蒸発率の検討

湿気拡散係数と同様に蒸発率についても検討した。蒸発率は、水蒸気圧  $P$  のコンクリートから外気への伝達を表す値である。蒸発率の推定は、まず図-5 の相対湿度の測点のうち3測点 ( $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ) に2次曲線を仮定し、コンクリート境界面の水蒸気圧  $P_5$  を推定した。ここでの曲線を決定する3測点には、外側の  $P_1$  (深さ 200mm) と  $P_4$  (同 20mm) を選定し、次に区間ごとの水蒸気圧の差が極力均等になるように  $P_3$  (同 80mm) を選定した。

$P_5$  と外気の水蒸気圧  $P_{air}$  の関係には、式(4)に示すような水蒸気圧の流束  $q$  ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ ) が与えられる。そのため、境界面と測点4の間に微小立方体を仮定し、そこで

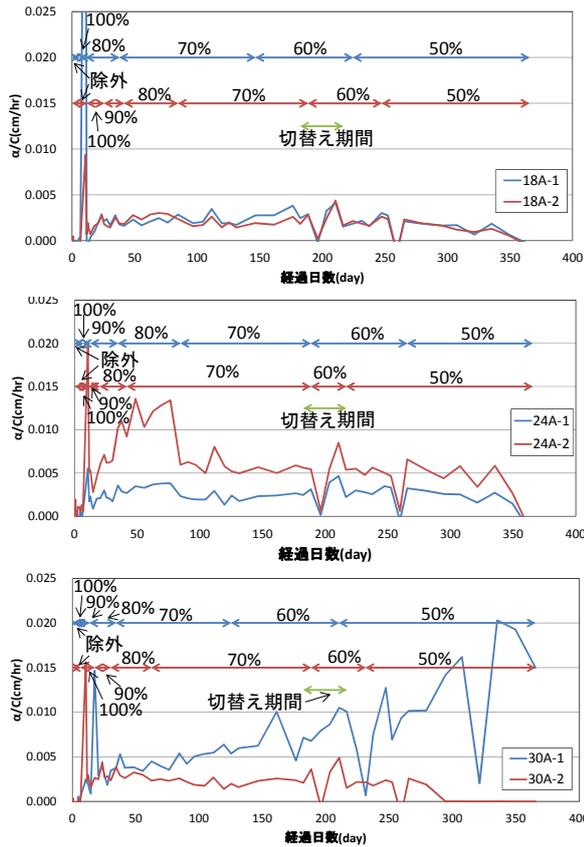


図-7  $\alpha/C$  の比較(上 : 18A, 中 : 24A, 下 : 30A)

の水蒸気圧の収支から蒸発率  $\alpha$  ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$ ) を求めた。蒸発率  $\alpha$  も湿気拡散係数と同様に、湿気容量  $C$  で除した値  $\alpha/C$  ( $\text{cm}/\text{hr}$ ) を用いて検討することとした。

$$q = \alpha(P_s - P_{air}) \quad (4)$$

図-7 に各ケースの  $\alpha/C$  の算定値を示す。 $\alpha/C$  の算定には後述(図-8)の相対湿度区間ごとの透湿率を使用した。同図には、その時期の対象測点  $P_s$  の相対湿度を10%区切りで記した。湿気拡散係数と同様に、乾燥開始初期や相対湿度を60%から45%に切替えた時期は、値のばらつきが大きく、この時期を除いて検討を行った。また、湿気拡散係数と同様に、負側の値についても除外した。

ケース18Aでは2つの供試体で類似した結果となった。一方、ケース30Aでは供試体間の値に徐々に差ができる結果となっており、30A-1供試体では、300日程度で0.01 cm/hrを超えて、他の供試体の5倍程度の値となった。

### (3) 透湿率と蒸発率の推定値の比較

本検討で求めた湿気拡散係数  $D_p (= \lambda_p / C)$  および  $\alpha/C$  の値に既往の研究<sup>1),6)</sup>での湿気容量  $C$  を代入して求められる透湿率  $\lambda_p$  および蒸発率  $\alpha$  を図-8 および図-9 に示す。透湿率  $\lambda_p$  は、相対湿度70%以下の湿気拡散係数を70%の値で一定として与え、蒸発率  $\alpha$  は、相対湿度50%以下の  $\alpha/C$  を50%の値で一定として与えた。これは、既往の研究<sup>1)</sup>において、これらの物性値を60%以下で一

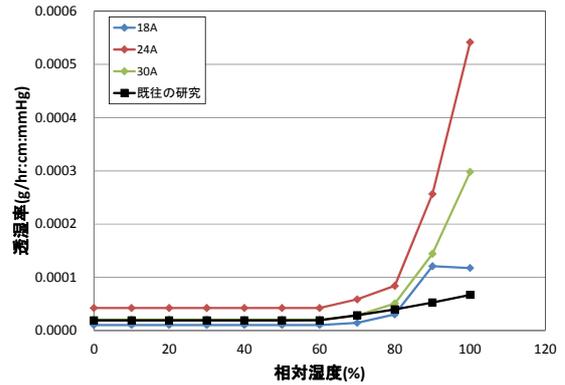


図-8 透湿率のパラメータ

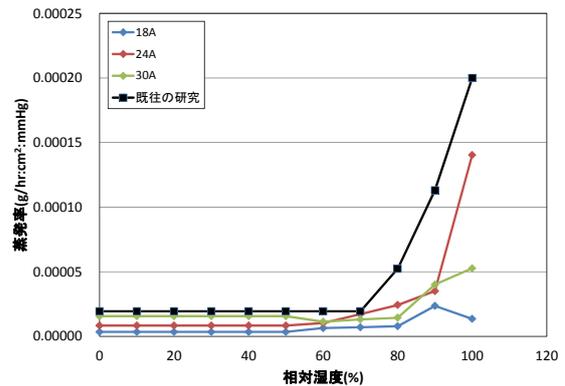


図-9 蒸発率のパラメータ

定としていることと本実験で求められた値が70%と50%までであったことによる。また、湿気容量  $C$  は相対湿度に応じて0.0025~0.0186まで変化する値として与えた。

図-8の3ケースの透湿率は、相対湿度100%から80%の間で急激に小さくなる傾向を示した。また、80%以下では相対湿度に対して緩やかに低下することが共通であった。ケース18Aの透湿率は30Aに比べて小さくなり、呼び強度の関係とは逆の結果となった。30Aの透湿率は、相対湿度90%と100%で既往の研究の値に比べ3~4倍になり、相対湿度70%と80%ではほぼ同じ値となった。

図-9の3ケースの蒸発率は、相対湿度100%から80%にかけて小さくなり、80%以下ではほぼ一定値になることが共通であった。ケース30Aの蒸発率は、相対湿度80%~100%で既往の研究の値に比べ1/3~1/4倍になった。

## 3.5 湿気移動解析

### (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>6)</sup>。解析は、一定環境における湿気移動実験に用いた角柱供試体の形状寸法や周囲環境条件を模擬し、図-10に示す解析モデルを用いて行った。解析の測定箇所は湿気移動実験で測定した位置と同様に、蒸発面からの深さ20, 80, 140, 200mmの位置である。初期蒸気圧は17.536mmHg(相対湿度100%, 温度20℃)とした。解析は、本研究で検討した30Aの透湿率と蒸発

率を用いて行った。加えて、既往の透湿率と蒸発率<sup>1)</sup>を用いた解析も実施した。湿気容量には、両者とも既往の値を用いた。

## (2) 解析結果

図-11 にケース 30A-1 を対象とした相対湿度の実験値と解析値を示す。プロットが実験値であり、破線が本研究の物性値を用いた解析値①、点線が既往の物性値を用いた解析値②である。

いずれの解析値も、実験値に比べて相対湿度が大きくなった。測点ごとの比較をすると、蒸発面から深さ 20mm の相対湿度は、200 日付近まで解析値②（既往）が実験値に近くなり、それ以降は解析値①（本研究）が実験値に近くなった。深さ 20mm を除く測点では、総じて解析値①が実験値に近い値となり、蒸発面から深い測点ほど近い値となった。

解析値①の 20mm の相対湿度は、100% から 80% に低下する区間で実験値との差異が大きく、80% 以下では差異が小さくなる傾向にある。深さ 20mm よりも深い測点では曲線の傾きにそれほど差異が生じていないことから、この区間での実験値と解析値の差異は相対湿度 100% と 90% での蒸発率を小さく評価していることが要因と考えられた。

## 4. 乾燥・湿潤繰り返し環境における湿気移動実験

### 4.1 実験方法

実験には、一定環境下の湿気移動実験で使用した 18A-1、24A-1、30A-1 の 3 種類の 75×100×400mm の角柱供試体を用いた。材齢 1 年経過後から、乾燥・湿潤の繰り返し環境下を模擬し、相対湿度の測定を行った。そのため、初期の内部相対湿度は一定環境の実験終了時点の内部相対湿度である。

乾燥環境は、恒温恒湿室の温度を 20℃、雰囲気湿度を 60% 一定とし、一定環境における湿気移動実験と同様に角柱供試体の蒸発面を左右 2 面とした（図-2）。湿潤環境は、温度 20℃ 一定とした環境で、角柱供試体の蒸発面に水を十分に含ませた PVA スポンジを設置し、スポンジの水分が蒸発しないようパラフィルムで封緘して保湿状態を維持した。蒸発面の方向は乾燥環境時と同様である。各環境条件の期間は、乾燥状態を 3 日半、湿潤状態を 3 日半として 1 週間を 1 サイクルとした。相対湿度の測定は、湿潤状態から始め、環境条件の変更前に行った。

### 4.2 実験結果

図-12 に温湿度センサで測定した相対湿度の経時変化を示す。蒸発面から深さ 20mm では、実験開始初期に相対湿度が急激に上昇し、以降は乾燥・湿潤の繰り返しの影響により相対湿度の上下の変化が見られ、ケース 30A-1 で相対湿度の上下の変化幅が大きいことが分かる。

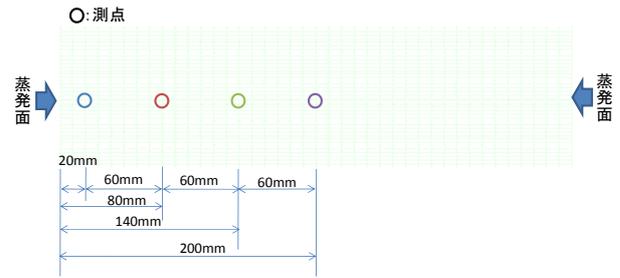
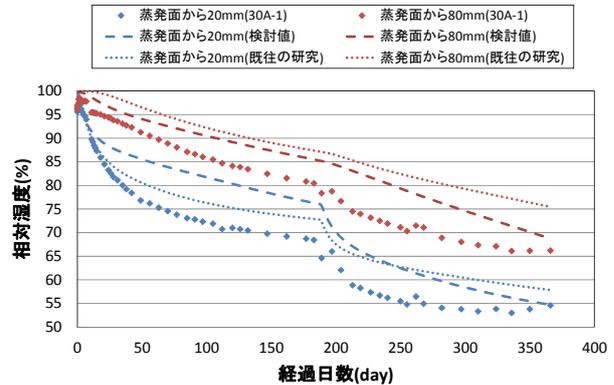
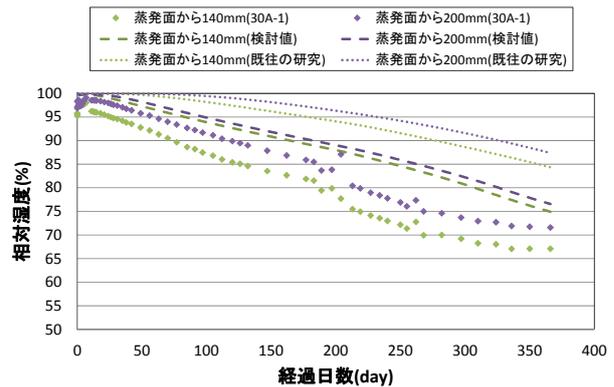


図-10 湿気移動解析モデル



(a) 蒸発面からの深さ 20mm, 80mm



(b) 蒸発面からの深さ 140mm, 200mm

図-11 相対湿度履歴(30A-1)

深さ 80mm の相対湿度は、呼び強度が小さくなるにつれて上昇割合が大きく、18A-1 は実験開始 30 日程度で深さ 20mm の相対湿度とほぼ同じになった。これは水セメント比の違いによってコンクリート内部の細孔構造が異なり、18A-1 は他のケースより細孔構造が大きいことで、水蒸気圧の伝達が速くなることが要因と考えられた。これに対し、30A-1 は他ケースより細孔構造が小さく、蒸発面付近で水蒸気圧が停滞することが要因と考えられた。

深さ 140mm と 200mm の位置では、実験開始 45 日まで相対湿度に大きな変化が見られないが、140mm の位置では少し上昇傾向を示し、湿気移動に時間がかかることが確認できた。

### 4.3 湿気移動解析

#### (1) 解析方法

解析は、乾燥・湿潤繰り返し環境を模擬し、それ以外の条件を一定環境の解析と同様とした。境界条件として、

湿潤状態で表面の相対湿度を 100%，乾燥状態で 60% とした。解析パラメータは、既往の物性値<sup>1)</sup>を用いた。初期の相対湿度は、一定環境における湿気移動解析終了時の相対湿度を使用した。

## (2) 解析結果

図-13 にケース 30A-1 を対象とした相対湿度の解析値と実験値を示す。深さ 20mm の相対湿度の解析値は、実験値で見られた急激な上昇は見られなかったが、乾燥と湿潤の繰り返しによる相対湿度の上下の変化幅は実験値と同程度となった。深さ 80mm の相対湿度の解析値は、実験値と同様に緩やかに上昇した。しかしながら、深さ 20mm と同様に解析値の上昇速度は小さく、本研究で用いた一般的な解析方法<sup>1),6)</sup>では、降雨等の影響を再現することができなかった。そのため、今後、降雨等の影響を再現可能な解析方法や物性値の設定方法を検討していくことが課題となった。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 一定環境下の湿気移動実験の結果を用いて、透湿率（湿気拡散係数）および蒸発率を拡散方程式から導出した結果、ばらつきが大きいものの供試体内部の相対湿度の変化に伴う傾向を確認することができた。
- 2) 導出した透湿率は既往の値より大きくなり、蒸発率は小さくなった。本研究で導出した透湿率および蒸発率を入力した解析では、既往の物性値を入力した解析に比べ実験値に近い値となった。
- 3) 乾燥・湿潤繰り返し環境下の湿気移動実験では、供試体の水セメント比が大きいほど、蒸発面付近の内部相対湿度が早期に増加する傾向が見られた。
- 4) 乾燥・湿潤繰り返し環境下の実験において、実験の相対湿度の上昇速度は解析値に比べて大きくなった。本研究で用いた一般的な解析方法では、降雨等の影響を再現することができなかった。

## 謝辞

本研究の実施にあたりご協力を頂きました（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) 寺澤正人，田畑美紀，鈴木基行：薄板形状供試体を用いた収縮特性試験結果を解析定数とする乾燥収縮応力解析，土木学会第 66 回年次学術講演会概要集，V-451，2011.9

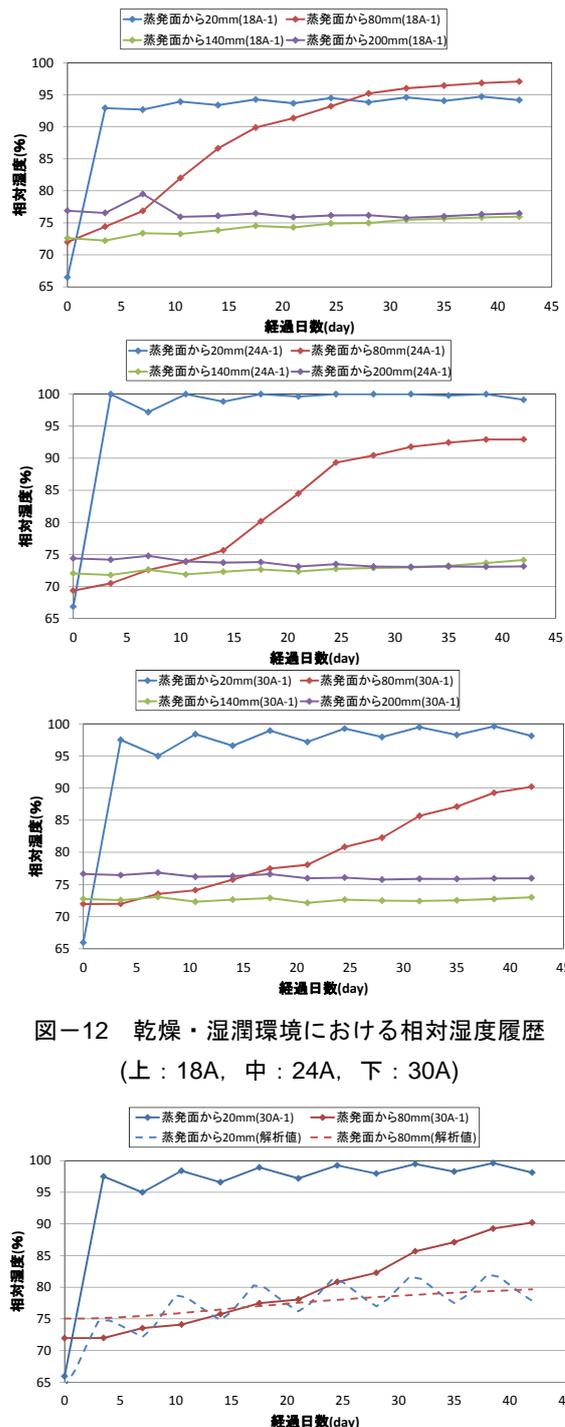


図-12 乾燥・湿潤環境における相対湿度履歴 (上：18A，中：24A，下：30A)

図-13 実験値と解析値の比較(30A-1)

- 3) 木下竜一，伊藤始，岡田敏美，高島依里：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，コンクリート工学論文集，Vol.33，No.1，pp.779-784，2011.7
- 4) 矢川元基，宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，1985
- 5) 土木学会：コンクリートのクリープおよび乾燥収縮 II，コンクリート技術シリーズ，2000
- 6) 計算力学研究センター：ASTEAMACS 資料，2010