

加熱・乾燥を受けるコンクリートの水分予測に関する研究

酒井 正 樹 人 見 尚
平 田 隆 祥 一 瀬 賢 一

Study on Presumption of Water Content in Concrete Subjected to Heating and Drying

Masaki Sakai Takashi Hitomi
Takayoshi Hirata Kenichi Ichise

Abstract

This paper describes a numerical analysis methodology and analysis results for the water content distribution of concrete members subjected to heating and drying. The distinctive of this analytical model are as follows. (1) The model adopts a diffusion analysis method coupled to water, vapor and heat. (2) This model consider heat exchange through the phase change of water and vapor in concrete. (3) the diffusion coefficients of water and vapor depend on the concrete temperature. In order to validate this analytical model, heating and drying experiments were performed on the concrete members. The results revealed that the calculations, of the analytical model well reproduced the water content distribution determined experimentally.

概 要

長期にわたって加熱や乾燥を受けるコンクリート部材の力学性状は、コンクリート内部の温度および含水率の影響を受けることがわかっている。本研究では、温湿度環境に応じて、コンクリート部材内部の熱・水分分布を予測する数値解析モデルを開発した。開発したモデルは次の特徴を有する。(1)コンクリート中の液状水、水蒸気および熱の三成分を拡散体として連成解析できる。(2)熱による液状水と水蒸気の相変化を考慮できる。(3)各成分の拡散係数の温度依存性を考慮できる。数値解析モデルの妥当性を検証するため、コンクリート模擬部材の乾燥試験および片面加熱試験を行い、実測結果と数値解析結果の比較を行った。加えて、既往の加熱・乾燥試験結果に対して、本試験で求めた物性値を用いて数値解析を行った。その結果、加熱・乾燥面近傍を除いて、開発した数値解析モデルにより概ね含水率の実測結果を再現できることがわかった。

1. はじめに

長期にわたって100℃未満の熱を受けるマスコンクリート部材の力学性状は、温度および体積含水率（以下、含水率という）の影響を受けることが既往の研究¹⁾²⁾で報告されている。このような部材の長期間にわたる健全性を評価するには、加熱や乾燥を受けるコンクリート内部の温度および含水率の変化を予測する必要がある。

コンクリート中の温度および含水率の予測は、数値解析による手法が有効であり、国内外に関わらず数多くの研究報告がある。コンクリート中の液状水移動を扱った例としては、阪田らによる拡散係数と供試体表面からの散逸に基づくモデル³⁾、Penettlaらによる凍結による液状水の相変化を化学ポテンシャルにより計算したモデル⁴⁾、Lienらによるエンタルピーや表面張力の接触理論に基づくモデル⁵⁾などがある。

一方、コンクリート中の水は温度勾配により、コンクリート中の温度は水の比熱や相変化に伴う潜熱などの影響により変化する。このため、解析精度を上げるためには、液状水・水蒸気・熱の相互依存性を考慮する必要がある。近年、コンクリート中の液状水移動に加えて水蒸気移動を扱った水分移動モデルが提案されている。たとえば、柳らによる水蒸気移動モデル⁶⁾、丸山らによるセ

メント中の細孔構造および含水率などによる水の移動係数の変化を考慮したモデル⁷⁾、内海による熱力学方程式を基礎にした液状水の吸着などを考慮したモデル⁸⁾などがある。しかしながら、コンクリート中の水分の相変化の影響は明らかとされていないものが多い。

そこで本研究では、上記した研究例を参考にして、液状水、水蒸気および熱の三成分に対して、相変化に伴う各成分間のやり取りを考慮して連成解析する新たな水分移動モデルを構築した。また、解析モデルの妥当性を検証するため、コンクリート模擬部材の乾燥試験および片面加熱試験を行い、実測結果と数値解析結果を比較した。加えて、既往の加熱試験結果に対して、本試験で求めた物性値を用いて開発したモデルによる数値解析を行い、結果の再現性を確認した。

2. 水分移動の数値解析モデル

2.1 支配方程式

2.1.1 各成分の取扱い コンクリート中の水分は、液体成分である液状水と、細孔中において液状水が充填されていない気相部分に存在する水蒸気から構成されるとした。水和組織に取り込まれている結合水は除いた。これにコンクリートの熱を加え、三成分をモデル化した。

水蒸気および熱は拡散体であるとした。液状水は、接触面の抵抗を大きく受ける毛細管中を移動するため、流体として挙動するとは考えにくい。簡易的なモデルとして拡散体であるとした。このことから、すべての成分は拡散方程式に従うものと仮定した。なお、拡散方程式は後述する格子ボルツマン法によって解いたため、空間を立方体に分割した要素の集合として計算を行った。

2.1.2 拡散係数 各成分の拡散係数は、コンクリートの材料や調合によって変化すると考えられる。そのため、同一の材料・調合条件下で試験結果を再現できる値を求めることとした。各成分の拡散係数の温度依存性については、次のようにモデル化した。

液状水の拡散係数 D_w [m^2/s]は、丸山ら⁷⁾の検討結果に従って、温度の上昇に伴い大きくなるとし、コンクリート温度を T [$^{\circ}C$]、基準となる非加熱面の温度を T_0 [$^{\circ}C$]として、式(1)で定義されることとした。基準となる非加熱面の温度での拡散係数 D_0 [m^2/s]および拡散係数の増大割合に関する定数 a [-]は、実験結果とのフィッティングにより求め、本研究においては2.6とした。Fig.1に温度による拡散係数の変化を示す。

$$D_w = D_0 \cdot e^{a \left(\frac{T-T_0}{T_0} \right)} \quad (1)$$

ここに、 D_w : 液状水の拡散係数 [m^2/s]
 D_0 : 基準温度での拡散係数 [m^2/s]
 T : コンクリート温度 [$^{\circ}C$]
 T_0 : 基準温度でのコンクリート温度 [$^{\circ}C$]
 a : 拡散係数の増大割合に関する定数 [-]
 =2.6 (本実験条件)

空気中における水蒸気の拡散係数は、既往の文献⁹⁾においては、経験式として式(2)で算定できるものとされている。

$$D_v = 2.2 \times 10^{-5} \times \left(\frac{273}{T} \right)^{1.75} \quad (2)$$

ここに、 D_v : 空気中での水蒸気の拡散係数 [m^2/s]
 T : 気温[K]

しかしながら本研究においては、式(2)における空気中の水蒸気の拡散係数が温度の関数として指数関数的に変化する性状を確認した上で、コンクリート中の水蒸気の拡散係数 D_v [m^2/s]は、式(1)と同様の関係式を与えることとし、拡散係数の増大割合に関する定数 a [-]は、実験結果とのフィッティングにより求めることとした。

熱の拡散係数 D_t [m^2/s]は、含水率の変化などにより変わるものと考えられるが、ここでは変化の程度は小さいものと判断し、一定の値を用いることとした。

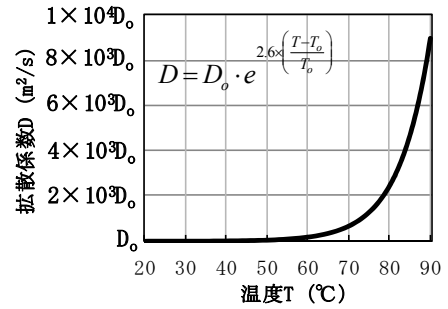


Fig. 1 液状水・水蒸気の拡散係数の温度依存性
 Temperature Dependability of Water and Vapor Diffusion Coefficient

2.1.3 各成分の上限値 液状水は、コンクリートの空隙中に存在しており、その上限を空隙容積に水の比重を乗じた質量として設定した。水蒸気は、コンクリート中の空隙容積より液状水の占める容積を差し引いた容積部分を満たすものとして設定し、上限値は温度の関数として与えられる飽和水蒸気量から求められる密度を乗じた質量として設定した。

飽和水蒸気圧 $E(T)$ [hPa]に関しては、近似的にTetens¹⁰⁾により式(3)が与えられている。

$$E(T) = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T}{T+237.3}} \quad (3)$$

ここに、 $E(T)$: 飽和水蒸気圧 [hPa]
 T : 温度[K]

式(3)に気体の状態方程式を組み合わせ、モル数と密度の関係から飽和水蒸気量 ρ_v [kg/m^3]は式(4)で与えられる。

$$\rho_v = 1.323 \times \frac{e^{\frac{17.26T}{T+237.3}}}{T+237.15} \quad (4)$$

ここに、 ρ_v : 飽和水蒸気量 [kg/m^3]
 T : 温度[K]

また、液状水量と水蒸気量は、気化と液化の関係により変化する質量を、互いにやり取りする機構を設けた。熱に関しては上限値を設けていない。

2.2 相変化に伴う各成分間の収支

2.2.1 相変化に伴い発生する熱 本研究では、境界条件の温度の時刻歴を与えて、液状水、水蒸気および熱の三成分の変化を求めている。

相変化に伴う各成分間の熱の収支として、液状水は蒸発に伴い気化熱としてコンクリートから熱を奪い、水蒸気は液化に伴い凝縮熱としてコンクリートに熱を与える設定とした。

1[kg]の液状水の気化熱(水蒸気の凝縮熱)は 2.267×10^6 [J/kg]であるため、 ρ [kg]の液状水の気化(水蒸気の液

化)に要する気化熱(凝縮熱)Q[J]は、これらの積で求められ、要素に与えられる(奪われる)。コンクリートの比熱をC [kJ/kg/°C]とし、要素の質量をm[kg]とすると、これらの熱による温度変化ΔT[°C]は式(5)となる。ここで、コンクリートの比熱Cは、一般的な値として1.05[kJ/kg/K]¹¹⁾を用いた。コンクリートの調合や比熱の温度依存性は考慮せず一定の値として扱った。

$$\Delta T = \frac{Q}{mC} = \frac{2.267 \times 10^6 \times \rho}{1.05 \times 10^3 \times m} = 2.16 \times 10^3 \cdot \frac{\rho}{m} \quad (5)$$

ここに、ΔT: 相変化熱による温度変化[°C]

Q: 気化熱または凝縮熱[J]

m: 要素の質量[kg]

C: コンクリートの比熱[kJ/kg/°C]

ρ: 液状水または水蒸気の質量[kg]

2.2.2 各成分への熱の振分け規則 解析の流れをFig. 2に示す。相変化に伴う各成分間の振分け規則は次のとおりとする。

空隙中の水蒸気量は、液状水がある状態では常に飽和水蒸気量で平衡状態となると仮定した。そこで、まず任意の時刻から時間増分だけ進めた時刻の全ての要素における水蒸気量ρ_v [kg/m³]を求める。また、全ての要素の飽和水蒸気量ρ_s [kg/m³]を求め、ρ_vとの差をρ_{diff} [kg/m³]とする。このρ_{diff}を以下に示す場合に依りて、各要素の液状水量w [kg/m³]と水蒸気量v [kg/m³]を求める。

(1) ρ_{diff}>0, w>ρ_{diff}(水蒸気量が飽和でなく、飽和まで蒸発できる十分な液状水がある)の場合

液状水からρ_{diff}相当分を差し引き、水蒸気にρ_{diff}を加え、飽和水蒸気量すなわちρ_sに水蒸気量を再定義する。この場合は気化であるため、気化相当分の熱を温度から差し引く。

(2) ρ_{diff}>0, w<ρ_{diff}(水蒸気量が飽和でなく、飽和水蒸気量相当分まで蒸発できる液状水がない)の場合

液状水の全てを水蒸気に変化させる。すなわち対象となる要素の液状水量は0とし、相当分を水蒸気に加える。気化相当分の熱を温度から差し引く。

(3) ρ_{diff}<0, w>ρ_{diff}(水蒸気量が飽和を超えている)の場合

水蒸気は飽和水蒸気量に設定する。液状水は水蒸気量から飽和水蒸気量分を差引いた値を加える。液化となるので、相当分の熱を温度に加え上昇させる。

(4) w=0, v=0(液状水が0, 水蒸気が0となった場合)

上記の場合に当てはめて処理することができる。

以上の振り分け規則に従って、各要素へ熱を振り分け、各成分への再分配を行うことで、高温部で液状水が気化して水蒸気となり、低温部に拡散して、温度の低下に伴い再び液化するという過程を経た水分移動を模式した。

2.3 境界条件

境界条件は、加熱面の表面温度および基準となる非加熱

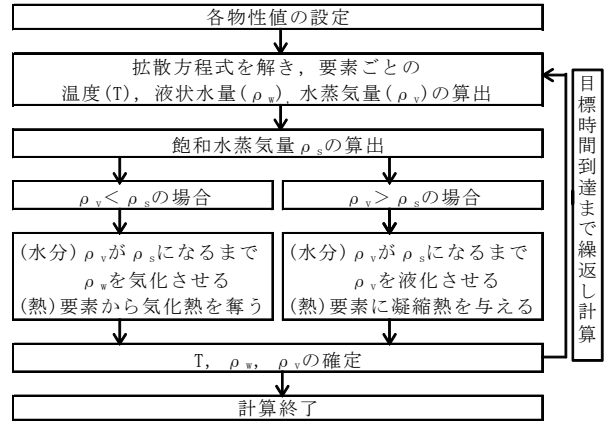


Fig. 2 解析の流れ
Flow Chart for Analysis

面の表面温度と水分散逸条件が必要となる。ここでは、解析ステップごとに一定の割合で液状水、水蒸気および熱の各物性量を境界面から除去する工学的流出境界条件を用いた。除去する割合については、実験値とのフィッティングにより求めた。

2.4 数値解析

2.4.1 数値解析法 数値解析法は、格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method : LBM)¹²⁾を用いた。LBMは流体解析に加え、拡散解析を扱うことができる。本研究では、解析対象の空間を格子に区切って格子点を周囲の空間の代表点として扱い、液状水量などの値を持たせて分布関数に分解し、隣接する格子点との間のやり取りによって拡散を扱った。

LBMの支配方程式を、式(6)に示す。

LBMのモデルは、3次元15方向モデルを用いた。これは、元の格子点と第一隣接と第二隣接格子点までを伝達範囲とするモデルである。また、LBMでは無次元化された長さや時間を用いており、式(6)に示すように、格子点の情報量を隣接する格子点へと随時伝播させることで現象を模擬している。

$$f_i(x+c\Delta t, t+\Delta t) - f_i(x, t) = \Omega(f_i(x, t)) \quad (6)$$

ここに、f_i(x,t): 分布関数 [-]

x : 位置 [-]

c : 単位速度 [-]

Δt : 時間刻み [-]

cΔt : 隣接格子間隔 [-]

Ω : 拡散効果の項 [-]

i : 方向 (インデックス)

2.4.2 境界条件の処理方法 解析モデルの端部は、液状水、水蒸気および熱の各物性量が一定の割合で逸散するものとし、その割合を除去割合として設定した。また、解析モデルの側面4面は、右端は左端、上端は下端とつながっていると考える周期的境界条件を設定した。

3. 加熱・乾燥試験結果との比較による水分移動解析モデルの検証

3.1 加熱・乾燥試験の概要

3.1.1 シリーズ I：模擬部材の乾燥試験 試験の組合せをTable 1に示す。シリーズ I では、一般建築物の壁を想定して、Fig. 3に示す部材厚が200, 300, 400mmの3水準の模擬部材を作製し、材齢7日の脱型後から材齢882日まで恒温恒湿室及び屋内静置により乾燥試験を行った。模擬部材の乾燥は左右2面から行い、側面4面にはアルミテープを貼り付けて水分が逸散しないようにした。

含水率の測定方法をTable 2に示す。含水率の測定は、電極法¹³⁾により行った。電極の形状をFig. 4に示す。電極値の測定はデータロガーとアダプタを用いて行い、校正曲線(電極値と含水率の関係)により含水率を算定した。校正曲線は、中心に電極を埋め込んだ供試体(φ75×150mm)を予め作製し、供試体の含水率を変化させた時の電極値を測定することにより作成した。

含水率の測定時期は8水準とした。含水率の測定位置は、左右対象に2面から乾燥を行っているため、代表して片側の乾燥面から中心方向に距離を変えた5水準とし、断面内の分布を測定した。

コンクリートの調合と基礎性状をTable 3に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)、細骨材は秩父産砕砂(表乾密度2.67g/cm³, 吸水率1.70%)と成田産陸砂(表乾密度2.57g/cm³, 吸水率1.76%)の混合砂、粗骨材は横瀬産砕石(表乾密度2.70g/cm³, 吸水率0.45%)と栃木産砕石(表乾密度2.70g/cm³, 吸水率0.66%)の混合砕石を使用した。

3.1.2 シリーズ II：模擬部材の加熱試験 試験の組合せをTable 4に示す。シリーズ II では、Fig. 5に示すW400×D400×H1000mmの模擬部材を作製し、材齢91日から91日間の片面加熱試験を行った。模擬部材の加熱は下面から行い、非加熱面である上面は外気に開放した。加熱温度は90℃、非加熱面の開放条件は20℃、60%R.H.とした。加熱面は、鋼板型枠を存置して加熱面から水分が逸散しないようにしたシール条件と、鋼板型枠を脱型して加熱面から水分が逸散するアンシール条件の2種類を設定した。側面4面は、鋼板型枠を存置して水分が逸散しないようにしたシール条件とし、断熱材を巻いて一方の熱・水分移動が生じるようにした。

含水率の測定方法をTable 5に示す。含水率の測定は、シリーズ I で実施した電極法による含水率に加えて、加熱91日で乾式コア(φ75×150mm)を採取し、105℃絶乾質量を測定する方法でも行った。電極法による含水率の測定は試験期間にわたって連続して行い、乾式コアによる含水率の測定は加熱前と加熱91日の2材齢で行った。含水率の測定位置は、Fig. 5に示す加熱面からの距離を変えた6水準として、断面内の含水率分布を測定した。コンクリートの調合と基礎性状をTable 6に示す。コンクリートはレディーミクストコンクリートを使用した。セメン

Table 1 試験の組合せ(シリーズ I)
Combination of Experiment (Series I)

| 項目 | 摘要 | 水準数 |
|-------|--|-----|
| 試験体寸法 | 1000mm×1000mm ×(壁厚)200, 300, 400mm | 3 |
| 前養生 | 材齢7日まで封かん養生 | 1 |
| 乾燥条件 | 材齢7日：乾燥開始 材齢7日～材齢367日：20℃・60%R.H. 材齢368日～材齢882日 ：屋内静置(20±5℃, 60±) | 1 |
| 境界条件 | 乾燥面：壁の左右2面を外気に露出 側面4面：アルミテープによるシール | 1 |

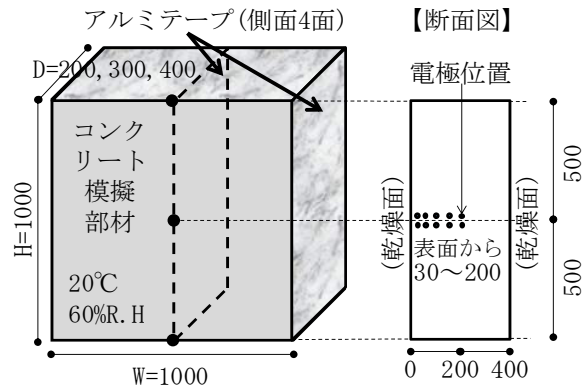


Fig. 3 乾燥試験方法と含水率測定位置(シリーズ I)
Drying Test Method and Measurement Position of Water Content (Series I)

Table 2 含水率の測定方法(シリーズ I)
Measurement Method of Water Content (Series I)

| 項目 | 摘要 | 水準数 |
|------|---|-----|
| 測定項目 | 電極法による含水率 | 1 |
| 測定時期 | 乾燥前, 乾燥7日, 乾燥28日, 乾燥91日, 乾燥149日, 乾燥367日, 乾燥452日, 乾燥882日 | 8 |
| 測定位置 | 表面より30mm, 50mm, 100mm, 150mm, 200mm(壁厚の中心まで) | 5 |

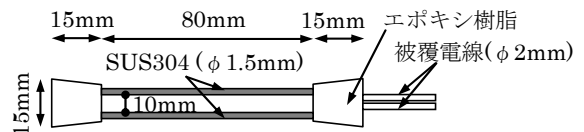


Fig. 4 電極の形状
Shape of Electrode Sensor

Table 3 コンクリートの調合と基礎性状(シリーズ I)
Mix Proportion and Basic Property of Concrete (Series I)

| W/C (%) | 目標スランプ (cm) | 目標空気量 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|-------------|-------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----|-----|
| | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |
| 58 | 18 | 4.5 | 185 | 308 | 847 | 931 |
| 実測スランプ (cm) | 実測空気量 (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | | 静弾性係数 (kN/mm ²) | | |
| 20.0 | 4.8 | 封かん91日 | | 封かん91日 | | |
| | | 29.3 | | 26.6 | | |

トは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ），細骨材は飯能産砕砂（表乾密度 2.63g/cm^3 ，吸水率 1.69% ）と富津産陸砂（表乾密度 2.60g/cm^3 ，吸水率 1.70% ）の混合砂，粗骨材は飯能産碎石（表乾密度 2.65g/cm^3 ，吸水率 0.78% ）と西多摩産碎石（表乾密度 2.67g/cm^3 ，吸水率 0.96% ）の混合砕石を使用した。

3.2 加熱・乾燥試験結果と数値解析結果の比較

3.2.1 シリーズ I：模擬部材の乾燥試験結果との比較

模擬部材の乾燥882日までの含水率分布の実測結果をFig. 6中に点で示す。模擬部材は左右2面を外気に露出しているため，ここでは片側について部材厚の中心までの含水率分布を示した。

Table 4 試験の組合せ（シリーズII）
Combination of Experiment (Series II)

| 項目 | 摘要 | 水準数 |
|--------|--|-----|
| 試験体寸法 | W400mm×D400mm×H1000mm | 1 |
| 前養生 | 材齢91日まで封かん養生 | 1 |
| 加熱条件 | 加熱面：加熱温度 90°C 非加熱面： $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{R.H.}$ | 1 |
| 加熱期間 | 91日間 | 1 |
| 水分境界条件 | 加熱面（下面）：シール／アンシール | 2 |
| | 側面（4面）：鋼板によるシール | 1 |
| | 非加熱面（上面）：外気開放 | 1 |

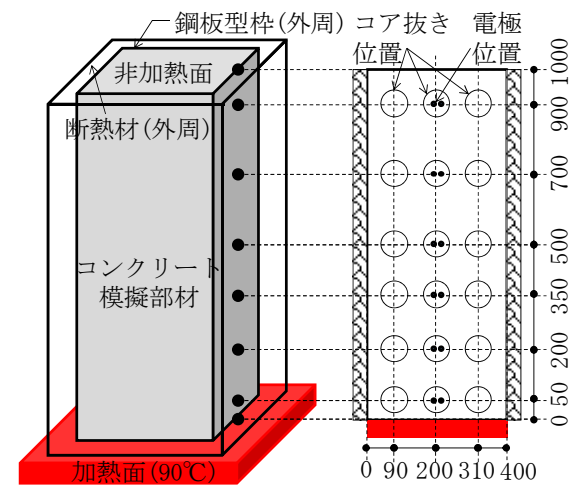


Fig. 5 加熱試験方法と含水率測定位置（シリーズII）
Heating Test Method and Measurement Position of Water Content (Series II)

Table 5 含水率の測定方法（シリーズII）
Measurement Method of Water Content (Series II)

| 項目 | 摘要 | 水準数 |
|------|---|-----|
| 測定項目 | 電極法による含水率 乾式コアによる乾燥質量法含水率 | 2 |
| 測定時期 | （電極法）加熱開始より連続計測 （乾燥質量法）加熱前，加熱91日 | 2 |
| 測定位置 | 加熱面より50mm, 200mm, 350mm, 500mm, 700mm, 900mm | 6 |

乾燥試験開始より，全ての部材厚で表面から含水率の低下が始まり，乾燥材齢の経過に伴い内部の含水率も低下した。模擬部材の中心から表面にかけて生じた含水率勾配は，部材厚が薄いほど大きくなる傾向が認められた。部材厚が厚い（300mm, 400mm）ものでは，部材の中心部分で含水率勾配はほとんど生じなかった。この傾向は，乾燥材齢が経過して，断面全体の乾燥が進行しても変わらなかった。乾燥882日の模擬部材内部の含水率分布は，部材厚の違いに関わらず，5～8vol%程度まで低下した。本試験条件（ $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{R.H.}$ ）における，一般建築物の壁を想定した模擬部材の乾燥試験では，乾燥面近傍だけではなく，部材の中心まで含水率が低下することを確認した。

Table 6 コンクリートの調合と基礎性状（シリーズII）
Mix Proportion and Basic Property of Concrete (Series II)

| W/C (%) | 目標スランブ ^o (cm) | 目標空気量 (%) | 単位量 (kg/m^3) | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|------|--------|-----|
| | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |
| 60 | 18 | 4.5 | 182 | 303 | 900 | 894 |
| 実測スランブ ^o (cm) | 実測空気量 (%) | 圧縮強度 (N/mm^2) | 静弾性係数 (kN/mm^2) | | | |
| | | | 封かん91日 | | 封かん91日 | |
| 19.0 | 5.5 | 33.9 | 25.9 | | | |

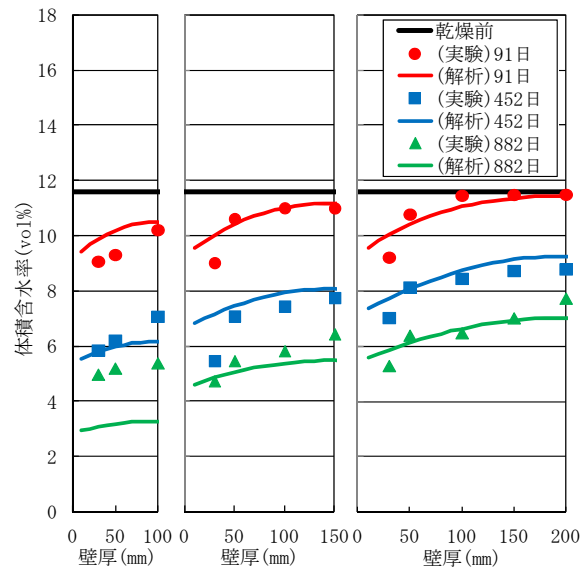


Fig. 6 模擬部材乾燥時の含水率分布の変化
Water Content Distribution of Concrete Exposed to Drying

Table 7 フィッティングにより求めた乾燥試験における物性値（シリーズI）
Diffusion Coefficient and Boundary Condition Determined by Drying Test (Series I)

| | 水 | 水蒸気 | 熱 |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 基準温度の拡散係数 (m^2/s) | 6.0×10^{-8} | 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-4} |
| 乾燥側の除去割合 | 0.0001 | 0.01 | 0.3 |

次に、数値解析のための各物性値を決定する。コンクリート中の液状水、水蒸気、熱の拡散係数および境界面からのそれぞれの除去割合の値はわかっていないため、試験結果を再現できる物性値をフィッティングにより求めることとした。得られた物性値をTable 7に示す。

フィッティングにより求めた物性値については、液状水および水蒸気の基準となる温度(本試験では乾燥面の20°C)での拡散係数は、既往の値(液状水⁸⁾: $1.0 \times 10^{-10} \sim 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, 水蒸気⁶⁾: $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ と比較して、若干大きいものの概ね妥当な値となった。一方、熱の拡散係数は文献の値(熱¹¹⁾: $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ と比較して約100倍となった。本解析モデルでは、相変化に伴う熱のやり取りを考慮しているが、熱の収支と熱の拡散係数の変化に関しては、今後の課題といえる。

上記の物性値により数値解析した含水率分布の結果を、Fig. 6中に実線で示す。

実測結果と数値解析結果を比較すると、部材厚の違いに関わらず、乾燥882日までの模擬部材内部の含水率分布の実測結果を、解析により概ね再現することができることを確認した。しかし、薄い部材の長期乾燥後(部材厚200mm, 乾燥882日)の含水率は、解析結果が実測結果と比較して2vol%程度小さくなった。また、乾燥面から30mmの位置の含水率は、解析結果が実測結果と比較して若干大きく、乾燥面近傍の含水率勾配がうまく再現されなかった。これらの点については今後の課題といえる。

3.2.2 シリーズII：模擬部材の加熱試験結果との比較

模擬部材加熱時の温度分布の変化をFig. 7中に点で示す。

模擬部材内部の温度は、加熱面のシール条件に関わらず加熱7日以降に定常状態となり、加熱面から50mmの位置で75~80°C程度、加熱面から離れるにつれて温度が低下し、加熱面から900mmの位置で30°C程度となった。

加熱時の含水率分布の実測結果をFig. 8中に点で示す。

加熱面がシールの条件では、加熱面から50mmの位置の含水率が13vol%程度まで低下したが、加熱面から200mm以上離れた位置の含水率はほとんど変化が認められなかった。

一方、加熱面がアンシールの条件では、加熱面から50mmの位置の含水率が絶乾状態に近い3vol%程度まで低下し、加熱面近傍で大きな含水率勾配が生じた。

なお、電極法による含水率は乾式コアの絶乾質量による含水率より若干高くなった。電極法による含水率の測定は、得られた電極抵抗値から校正曲線により算出しており、変換の際に誤差が生じたものと推察される。

次に、数値解析のための各物性値を決定した。模擬部材の乾燥試験と同様にして、コンクリート中の液状水、水蒸気、熱の拡散係数および境界面からのそれぞれの除去割合の値をフィッティングにより求めた。得られた物性値をTable 8に示す。加熱側の水分除去割合は、加熱面シールでは0.00005, 加熱面アンシールでは0.02となった。

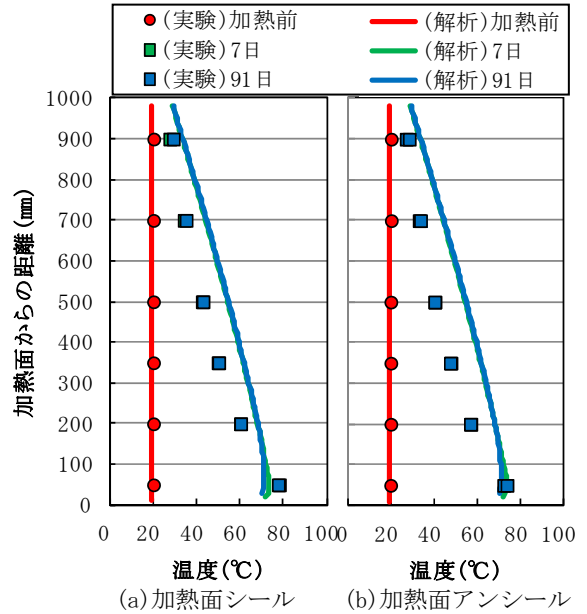


Fig. 7 模擬部材加熱時の温度分布の変化
Temperature Distribution of Concrete Exposed to Heating

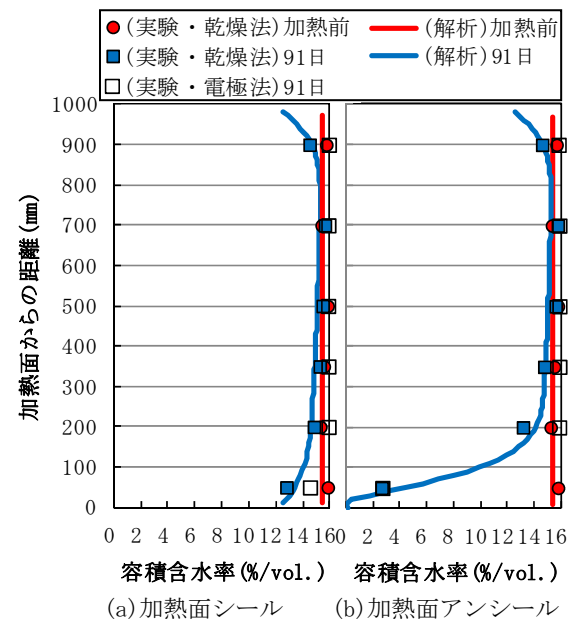


Fig. 8 模擬部材加熱時の含水率分布の変化
Water Content Distribution of Concrete Exposed to Heating

Table 8 フィッティングにより求めた加熱時における物性値(シリーズII)
Diffusion Coefficient and Boundary Condition Determined by Heating Test(Series II)

| 【加熱面シール】 | 水 | 水蒸気 | 熱 |
|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 基準温度の拡散係数(m ² /s) | 6.0×10^{-8} | 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-4} |
| 加熱側の除去割合 | 0.00005 | 0.01 | 0 |
| 非加熱側の除去割合 | 0.0001 | 0.01 | 0.3 |
| 【加熱面アンシール】 | 水 | 水蒸気 | 熱 |
| 基準温度の拡散係数(m ² /s) | 6.0×10^{-8} | 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-4} |
| 加熱側の除去割合 | 0.02 | 0.01 | 0 |
| 非加熱側の除去割合 | 0.0001 | 0.01 | 0.3 |

基準となる温度(本試験では非加熱面の20℃)での拡散係数および非加熱側での各成分の除去割合は、模擬部材の乾燥試験で求められた値と同じになった。

上記の物性値により数値解析した温度分布の結果をFig. 7中に実線で示す。また、数値解析した含水率分布の結果をFig. 8中に実線で示す。

温度の解析結果は、模擬部材の中央で実測結果よりも5~8℃大きくなった。熱の解析については、熱収支に関するモデル化方法などを再検討する必要がある。

含水率の解析結果は、加熱面がシール条件、アンシール条件ともに、数値解析により実測結果を概ね再現できた。

4. 既往の加熱・乾燥試験結果に対する数値解析モデルの適用と結果の再現性の確認

4.1 既往の乾燥試験結果の検証

コンクリート部材の乾燥試験に関する既往の研究報告のうち、試験後の含水率の実測結果が示されている椎名ら¹⁴⁾、長尾ら¹³⁾の乾燥試験結果に対して、開発した数値解析モデルを適用し、含水率の実測結果が再現性を検証した。

数値解析に用いた物性値(コンクリート中の液状水、水蒸気、熱の拡散係数および境界面からのそれぞれの除去割合の値)は、各実験によってコンクリート材料および乾燥条件は異なるものの、ここでは本研究での乾燥試験結果からフィッティングにより求めたTable 7の乾燥時における物性値を用いた。

なお、椎名らの研究では、水分量の変化を相対湿度により実測していたため、既往の研究¹⁴⁾を参照して、式(7)により相対湿度を体積含水率に換算して比較を行った。

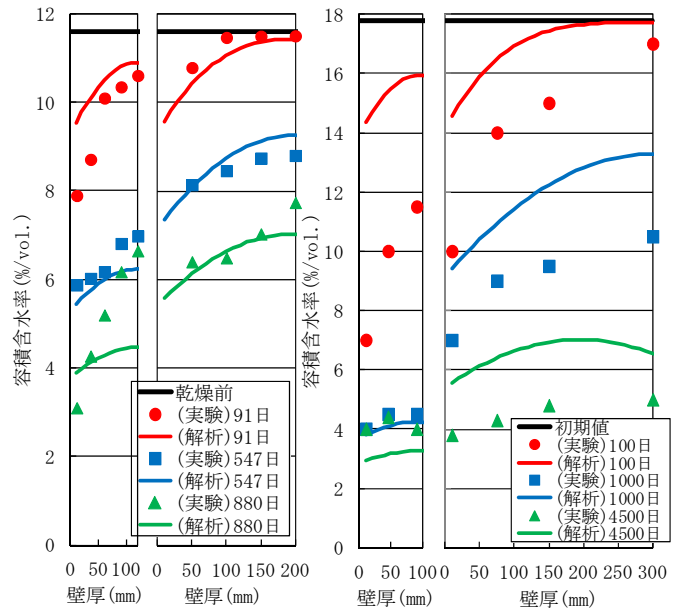
$$W = 1.1033 \times e^{(0.0246 \times M)} \quad (R^2=0.94) \quad (7)$$

ここに、W：体積含水率(vol%)
M：相対湿度(%R.H.)

既往の乾燥試験結果と、本研究の数値解析結果の比較をFig. 9に示す。

椎名らの実験結果と数値解析結果を比較すると、本試験で実施した乾燥試験結果と同様に、部材厚が厚い(400mm)場合は部材内部の含水率分布の変化を数値解析により概ね再現できるが、部材厚が薄い(200mm)場合は実測結果と比較して、数値解析結果による値が小さくなる傾向が認められた。

長尾らの実験結果と解析結果を比較すると、部材厚に関わらず、乾燥100日において2%/vol.程度、解析結果の値が小さくなった。乾燥1000日、乾燥4500日と長期材齢の経過に伴い、含水率分布の変化を解析により概ね再現できるようになった。乾燥初期に実験結果と解析結果の差異が大きくなった理由として、長尾らの研究では、実躯体を測定対象としており、仕上げ材の有無や温湿度の



(a)椎名らの実験結果 (b)長尾らの実験結果

Fig. 9 既往の乾燥試験結果と本研究の解析結果の比較 Comparison Water Content Distribution Exposed to Drying of This Study and Previous Studies

季節変動などの影響を受けている。そのため、本研究の乾燥試験結果からフィッティングにより求めた乾燥側の除去割合の値では、長尾らの実験条件を再現できなかったことが考えられる。

以上より、既往の乾燥試験における含水率の実測結果と本研究で開発したモデルによる数値解析結果を比較した結果、実験条件により境界条件が異なるため、乾燥面近傍において誤差が生じる場合があるが、コンクリート模擬部材の含水率の実測結果を概ね再現できることが明らかになった。

4.2 既往の加熱試験結果の検証

コンクリート部材の加熱試験に関する既往の研究報告のうち、試験後の含水率の実測結果が示されているH.P.Lienら⁵⁾、仕入ら¹⁶⁾、G.L.England¹⁷⁾らの加熱試験結果に対し、開発した数値解析モデルを適用し、含水率の実測結果の再現性を検証した。

なお、数値解析に用いた物性値(コンクリート中の液状水、水蒸気、熱の拡散係数および境界面からのそれぞれの除去割合の値)は、各実験によってコンクリート材料および加熱条件は異なるが、ここでは本研究での加熱試験結果からフィッティングにより求めたTable. 8の加熱時における物性値を用いた。

既往の加熱試験結果と本研究での数値解析結果の比較をFig. 10に示す。

H.P.Lienらの実測結果と数値解析結果を比較すると、加熱面から150mm付近で見られる局所的な含水率の増加現象については、数値解析により再現できなかったも

の、加熱による部材内部の含水率の分布の変化は概ね再現できることが確認された。

仕入ら、G.L.Englandらの実測結果と数値解析結果を比較すると、実測結果では加熱面近傍においてほぼ絶乾状態となっているのに対して、数値解析結果では含水率が6~8%/vol.となった。しかし、この実測結果については、先のH.P.Lienらの実測結果と比較しても含水率の低下量が大きくなっており、両者の実験結果の整合性が低い。大型部材を用いた加熱試験においては、100℃を超える高温部における確実なシールの実現が難しく、加熱試験中に気密性が低下した可能性も推察される。なお、加熱面より200mm以上の位置では、加熱による部材内部の含水率分布の変化は、数値解析により概ね再現できることが確認された。

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) コンクリート中の液状水、水蒸気および熱の三成分を拡散体と考え、熱による液状水と水蒸気の相変化および各成分の拡散係数の温度依存性を考慮して連成解析できる数値解析モデルを開発した。
- 2) 開発した数値解析モデルにより、本試験により得られた加熱・乾燥を受けるコンクリート模擬部材の含水率の実測結果を概ね再現できる。
- 3) 開発した数値解析モデルにより、既往の加熱・乾燥試験における含水率の実測結果を、加熱・乾燥面近傍の一部を除き、概ね再現できる。

参考文献

- 1) 嵩英雄ほか：高温にさらされたコンクリートの性状変化に関する研究，コンクリート工学年次講演論文集，pp25～28，1979.5
- 2) 酒井正樹ほか：強度・含水状態の異なるコンクリートの100℃未満加熱時における力学性状の変化，コンクリート工学年次論文集，vol.32，pp.293～298，2010
- 3) 阪田憲次ほか：乾燥に伴うコンクリート中の水分逸散と乾燥収縮に関する研究，土木学会論文報告集，No.316，pp.145～152，1981
- 4) Penntala V.：Freezing-induced strains and pressures in wet porous materials and especially in concrete mortars, Advanced cement based materials, Vol.7, pp.8～19, 1998
- 5) Lien H. P.: Mass transfer in inhomogeneous porous media under thermal gradients, Nuclear engineering and design, Vol.179, pp.179～189, 1998
- 6) 柳博文ほか：不飽和コンクリート中の水蒸気移動特性と水蒸気拡散係数，コンクリート工学論文集，Vol.12, No.3, pp.61～68，2001

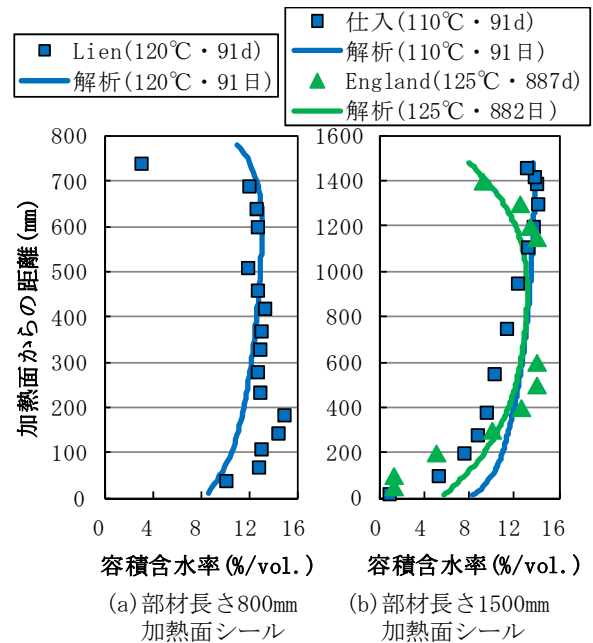


Fig. 10 既往の加熱試験結果と本研究の解析結果の比較
Comparison Water Content Distribution Exposed to Heating of this study and previous studies

- 7) 丸山一平ほか：水熱連成移動解析に基づく高強度マスコンクリート中の温度及び湿度分布の予測，日本建築学会構造系論文集，Vol.609，pp.1～8，2006
- 8) 内海秀幸：新たな水蒸気吸着等温関係式に基づくセメント硬化体内水分の拡散係数に対する数理表現式，コンクリート工学論文集，Vol.20，pp.39～49，2009
- 9) Cussler E.L.: Diffusion, 3rd Edition, pp.118-119, 2009
- 10) Tetens, O.: Uder einige meteorologische Begriffe. Zeitschrift fur Geophysik, 6, pp.297～309, 1930
- 11) 土木学会コンクリート委員会編：2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]，第1版，pp.44～45, 2007
- 12) 人見尚，竹田宣典，入矢桂史郎：格子ボルツマン法(LBM)を用いたコンクリートの溶脱解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.20, No.1, pp. 619～624, 2005
- 13) 長尾覚博ほか：竣工後13年を経過した構造体コンクリートの含水率の変化，大林組技術研究所報，No.50，pp.65～70，1998
- 14) 椎名国雄ほか：コンクリートの内部湿度と変形，コンクリートジャーナル，Vol.7, No.6, pp.1～11, 1969
- 15) 酒井正樹ほか：乾燥を受けた模擬壁部材の含水率と相対湿度の関係，日本建築学会学術講演梗概集，材料施工A，pp.485～486，2012.9
- 16) 仕入豊和ほか：一面加熱を受けるマスコンクリート部材中の強度性状に関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，第387号，pp.8～14，1988.5

G.L.England : Effects of moisture migration on shrinkage, porepressure and other properties, Trans. 4th Int. Conf. SMILT Vol.H, 1977