

論文 熱・液状水・水蒸気連成によるコンクリート内液状水移動モデルの構築と中性子透過像によるセメント硬化体含水率推定結果への適用

人見 尚^{*1}・酒井 正樹^{*2}・一瀬 賢一^{*3}

要旨：外部の温度環境に応じ、コンクリート中の液状水量の分布の変化を求める解析モデルを開発した。解析モデルでは、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扱った。解析モデルの妥当性を検証するため、セメント硬化体からなる供試体の一面を加熱する試験を行い、供試体中の液状水量の変化を中性子照射による透過像より含水率として求め、これに解析モデルを適用した。開発した解析モデルにより、含水率の測定結果を良く再現できることが分かった。

キーワード：コンクリート中液状水量, 数値解析, 中性子照射, 非破壊観察

1. はじめに

コンクリートは、硬化後も空隙やセメント硬化体組織の中に水和物と結合していない液状水を含有する。

コンクリート中の液状水量は、様々な環境条件で変化すると考えられる。発電施設などにおいて高温の熱源に隣接するコンクリートでは、発熱体側より加熱を受け、コンクリートの加熱面側からの蒸発や、温度上昇による内部の空気圧などの上昇により、より低温側への液状水の移動が考えられ、含水率も表面から内部にわたって変化するものと考えられる。酒井らは 65℃および 90℃に加熱した状態で養生を行い、含水率を変えたコンクリート供試体の強度が材齢によって変化し、強度の増進が見られた例について報告^{1),2)}している。供用中のコンクリート中の含水率の変化の把握は、その健全性評価に資するものとする。さらに、ある時点での測定結果をもとにした長期の含水率の予測は構造物の耐久性や余寿命の予測に有用であると考えられる。

コンクリート中の液状水移動を扱った解析としては、次のような研究が報告されている。阪田らの乾燥収縮による強度の低下予測目的に開発されたもので拡散係数と供試体表面からの散逸に基づくモデル³⁾や、Penetlla の凍結による液状水の相変化を化学ポテンシャルを持ちいてモデル化した例⁴⁾、Lien らのエンタルピーや表面張力の接触理論に基づくモデル⁵⁾を構築した例などが見られる。近年では、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分布、相対湿度や温度勾配など水の詳細性質を考慮したモデル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⁾などが報告されている。

本研究では、近年の研究例を参考に、液状水の移動に寄与すると思われる液状水自身と水蒸気および熱の拡散

の連成による構成則の基づく液状水の移動の解析モデルを考案した。この解析モデルを、モルタル供試体の中性子照射による水分測定結果から推定される含水率と比較を行うことで、解析モデルの妥当性について検証した。

2. 液状水移動の現象論的数値解析モデル

2.1 支配方程式

(1) 各成分の取り扱い

コンクリート中の水分は、液体成分である液状水と、水が細孔を充填できない場合の空気部分に存在する水蒸気から構成されるとして、結晶水は除いた。これにコンクリートの温度を加え、これらの三成分を数値モデル化した。これらのうち、水蒸気および熱は拡散体と考えた。液状水は、接触面の抵抗を大きく受ける毛細管中の挙動であり、流体としての挙動とは考えにくいいため、簡易的なモデルとして拡散体であるとして扱った。以上より、すべての成分は拡散方程式に従うものと仮定した。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扱った。

(2) 拡散係数

各成分の拡散係数は、コンクリートの調合によって変化すると考えられる。このため、同様の条件での実測値を試行解析によって良く再現する量として拡散係数を求めた。また、各成分の拡散係数の温度依存性については以下のようにモデル化を行った。

液状水の拡散係数は、丸山らの検討の結果⁷⁾に従い、温度の上昇に伴い大きくなるとした。コンクリート中の温度 T および加熱をしていない面の温度を T_0 [°C] を用い、液状水の拡散係数 D_w [m²/s] は、式(1)で定義されるとした。 D_0 [m²/s] は加熱していない面の温度における拡散係数である。拡散係数の増大割合に関する定数 a について

*1 大林組 技術研究所生産技術研究部副主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 大林組 技術研究所生産技術研究部研究員 修士(工学) (正会員)

*3 大林組 技術研究所生産技術研究部部長 博士 (工学) (正会員)

は、後述する実験結果を良く再現するような値を求めた。

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

空気中における水蒸気の拡散係数 D_v [m^2/s]は経験式として以下で与えられる⁹⁾。

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

ここでは、式(2)の指数関数的に変化する性状に注目し、式(1)と同じ関係式を与えた。

コンクリート中の熱拡散係数は、一定の値を用いることとした。

(3) 各成分の上限值

液状水量は、コンクリートの空隙に存在できるとして、その上限を空隙容積に水の比重を乗じた重量として設定した。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に存在できるとした。この部分に水蒸気の密度として、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ものを上限として与えた。飽和水蒸気圧[hPa]に関しては、近似的に Tetens の式¹⁰⁾が与えられている。

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

これに、気体の状態方程式を組み合わせ、モル数と密度の関係より、飽和水蒸気量 ρ_v [kg/m^3]の関係式は式(5)となる。

$$\rho = 1.323 \cdot \frac{e^{\frac{17.267}{T+237.3}}}{T+273.15} \quad (4)$$

また、液状水量と水蒸気量は記述する気化と液化の関係により、その量を互いにやり取りする機構を設け、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

(1) 相変化に伴い発生する熱

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から熱を与える設定とした。1[kg]の水の気化(凝縮)熱は、 2.267×10^6 [J/kg]であるため、 ρ [kg]の水が気化(凝縮)するときに要する気化(液化)熱 Q [J]は、これらの積で求められる。この熱は、要素に奪われ(与えられ)る。コンクリートの比熱 C とし、要素の質量を m とすると、これらの熱による温度変化 ΔT は、式(5)となる。

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

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]を用いた¹¹⁾。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。

(2) 各成分への熱の振り分け

本研究では、空隙中の水蒸気量は液状水がある状態で

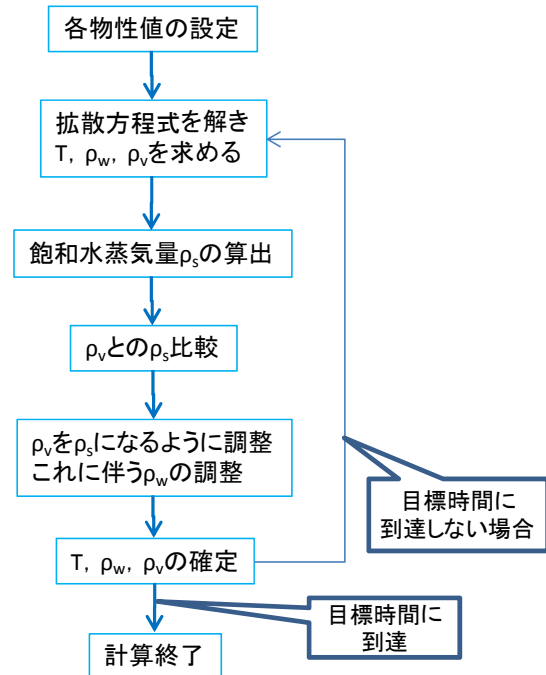


図-1 解析の流れ

は常に飽和水蒸気量で平衡状態となると仮定した。図-1に解析の流れを示す。まず、任意の時刻から時間増分を進めた時刻の全ての要素における水蒸気量 ρ_v を求める。また全ての要素の飽和水蒸気量 ρ_s を求め、 ρ_v との差を ρ_{diff} とする。この ρ_{diff} の以下に示す場合に応じて、各要素の水の量 w と水蒸気量 v を定める。

- 1) $\rho_{diff} > 0$, $W > \rho_{diff}$ のとき(水蒸気量が飽和でなく、飽和まで蒸発できる十分な水がある)、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) $\rho_{diff} > 0$, $W < \rho_{diff}$ のとき(水蒸気量が飽和でなく、液状水はあるが飽和水蒸気量相当分まで蒸発できる液状水はない)場合、液状水のすべ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、液状水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) $\rho_{diff} < 0$, $W > \rho_{diff}$ のとき(水蒸気量が飽和を超えている)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し引いた値を液状水に加える。液化となるので、相当分の熱を温度に加え上昇させる。
- 4) 液状水が 0、水蒸気が 0 となった場合も上記場合に当てはめて処理することができる。

この振り分け規則に従い、再分配を行うことで、高音部で気化した液状水が水蒸気となり周縁部に拡散し、温

度の低下に伴い液化する過程を経るという液状水の移動が起きることになる。

2.3 境界条件

境界条件は、加熱面の壁面温度、加熱面および解放面の散逸条件が必要となる。ここでは、工学的流出境界条件を用いた。この条件は、境界における液状水量などを一定の割合で除去した。ここでは、除去割合をフィッティングにより決定させるものとして、結果を良く再現する値を求めた。

2.4 数値解析

(1) 数値解析法

数値解析法は、格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, 以下 LBM と表記)を用いた¹²⁾。LBM は解析対象の空間を格子に区切り、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、これらの値を分布関数なる関数に分解し、隣接する格子点との間のやり取りによって拡散を扱うことができる。

LBM の支配方程式を、式(6)に示す。

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

式(6)における $f_i(x,t)$ は、分布関数、 c は単位速度、 Δt は時間刻み、 $c\Delta t$ は隣接格子間隔で、 Ω は拡散効果を示す。インデックス i は方向を表す。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。式(3)に示されるように LBM では格子点の情報(量)が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。

(2) 境界条件の処理方法

解析モデルの端部において、実際に端部となる場合は一定割合の量が散逸する条件を除去割合として課した。また、連続する材料の一部を抽出する形でモデル化を行った場合は、本来連続するはずの端部において周期的境界条件を課した。

3. 中性子ラジオグラフィによる含水率測定と解析モデルによる結果の再現

コンクリート内液状水移動モデルの検証のため、中性子照射により含水率を求めた結果に対し解析モデルを適用し、モデルの妥当性を検証した。

3.1 測定対象

測定対象はセメント硬化体とした。水セメント比は 50% とし、セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)を用いた。供試体は、幅 100mm×高さ 47mm×厚さ 20mm の形状に成型し、上端面を除き全て液状水に関しシーリングした。シーリングはアルミテープの 3 重巻立てによって行った。加熱試験は、図-3 に示すよう

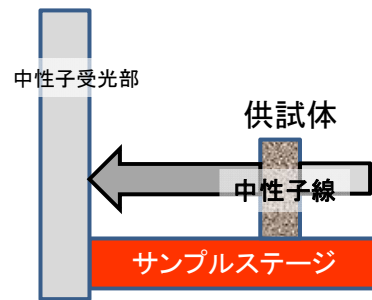


図-2 中性子照射試験方法



写真-1 照射台上に載せた供試体と中性子受光部

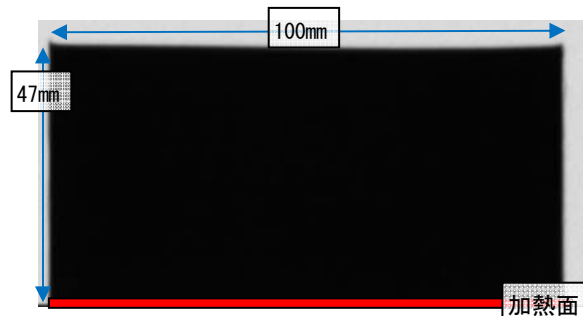


図-3 加熱前の透過像

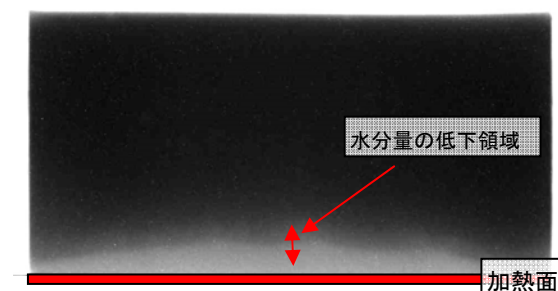


図-4 3時間加熱後の透過像

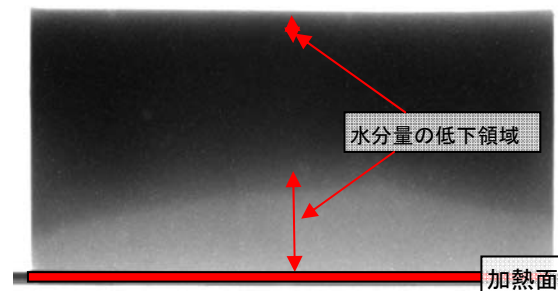


図-5 8時間加熱後の透過像

に供試体下部のシールした面を加熱した。加熱はシートによって行い、端部の温度は90℃とした。加熱は8時間継続した。周囲の温度は20℃で、湿度は相対湿度で20%であった。

3.2 測定

測定は、3回(加熱前、3時間加熱後および8時間加熱後)、中性子線の照射により透過像を測定した。中性子は幅100mm×高さ50mmの面に照射されているため、厚さ方向の情報は積分した形で透過像として結像する。

中性子線源は、日本原子力研究開発機構に設置の研究用原子炉 JRR-3(Japan Research Reactor-3)を用い、JRR-3の TNRF 第2撮影室を使用した^{13),14),15)}。照射時間は10秒間とした。中性子線は、原子数の少ない、例えば水素のような軽元素と相互作用を起こし、エネルギーを相手の元素に与える。このため、透過像では軽元素、特に水素の多い領域では透過する中性子の量が減少する。水は水素を多く含むため、中性子照射試験では非破壊観察により水の有無を検知することが可能となる。透過像においては、含有する液状水に応じて明度が異なり、液状水量の多い領域では暗色で表示される。

3.3 測定結果

(1) 供試体の透過像

セメント硬化体の中性子線による透過像として加熱前の結果を図-3、3時間加熱後の結果を図-4および8時間加熱後の結果を図-5に示す。加熱前に比べて、3時間加熱後および8時間加熱後の透過像では明るい領域が供試体下部から上方に向かって広がることを確認した。これは時間の経過とともに明瞭に現れる結果となった。また、8時間加熱後の透過像では、上端にもわずかながら明るい領域がみられた。明るい領域は含水率が低下している領域であり、供試体内部の乾燥が時間とともに進むことを確認できた。

(2) 画像処理により変化の抽出

加熱による供試体内部の変化を求めするため、加熱前の供試体の透過像を基準として、3時間加熱と加熱前、および8時間加熱と加熱前の透過像の組み合わせで画像の間の差分操作を行った画像(以下、差分像と表記)を求めた。図-6および図-7に差分像を示す。含水状態に変化の見られなかった領域を明色で、液状水の減少の見られた領域を暗色で表示した。画像の処理には画像処理ソフトである ImageJ を用いた。温度に関しては、側面の断熱が期待できないため、左右の端部に近い側のデータは用いず、黄色の点線で囲った領域を検討領域とし、この領域に関しては、(3)で述べる定量化法を用いて、含水率の低下割合を求めた。図-6および図-7においては供試体の両端は水分移動の傾向が異なっており、加熱面に対し水平方向に均質な含水率の傾向を示す、中央部の幅

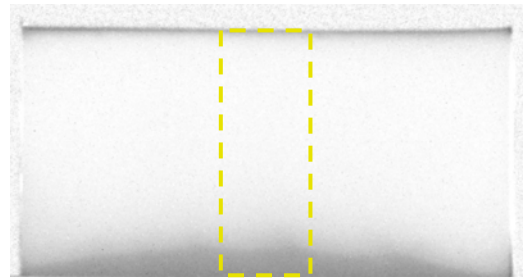


図-6 3時間加熱後の差分像

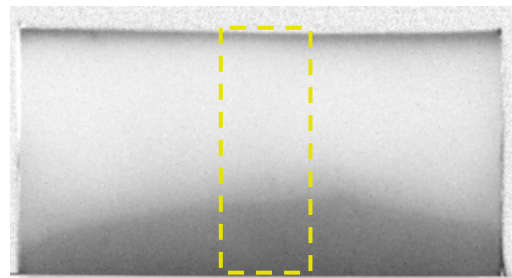


図-7 8時間加熱後の差分像

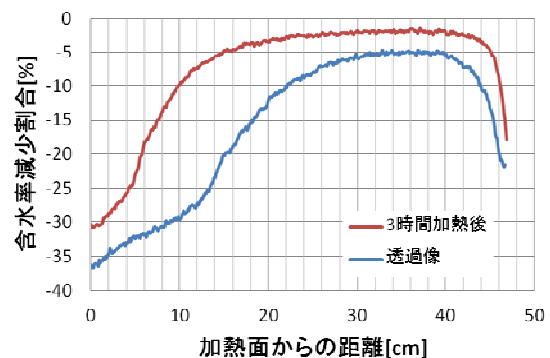


図-8 加熱後の含水率減少分布

20mm×高さ47mmの範囲を検討領域とした。

加熱時間の経過に伴い、液状水量の低い領域が広がることを確認できた。また、加熱面及び側面はシールしており、これらの面からの液状水の散逸することはないため、加熱面から上方に向かって液状水が移動していると推察された。

(3) 透過像からの含水率の推定

供試体中の含水率低下割合の定量化については、土屋らの研究¹⁵⁾を参考として式(7)により行った。

$$c = \frac{\rho_w}{\varepsilon} = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c \varepsilon} \times 100(\%) \quad (7)$$

ここで、 c は相対含水率(%), ρ_w は水のコンクリート体積中のかさ密度(g/cm^3), ε はコンクリート体積中に入りうる水の重量($=0.331(\text{g}/\text{cm}^3)$), ΔP_w は差分液状水強度(-), λ_w は水の質量吸収係数($=1.68(\text{cm}^2/\text{g})$)および δ_c は試験体厚さ(cm)を表す。

液状水の質量吸収係数 λ_w については、絶乾状態と含水状態のセメント硬化体の供試体について、本測定と同様の測定を行い、輝度 ΔI の変化より求めた。輝度 ΔI は得られた画像間の差分操作によって求め、数値化した値を用いた。輝度 ΔI と λ_w の関係を式(8)として表される。

$$\Delta I = \lambda_w \cdot \rho_w \cdot \delta_w \quad (8)$$

ここで、 ρ_w はセメント硬化体中のかさ密度、すなわち単位含水量で、 δ_c は δ_w と等しく 20mm である。

これらの関係を用いて、黄色の囲み線の領域における画像の色調変化の数値データを ΔI として画像解析より求めた。この値が式(7)の ΔP_w に相当する。加熱後の含水率低下割合の結果を図-8に示す。加熱面からの距離を横軸、縦軸は含水状態を 1、空気を 0 としてその変化割合としてグラフ化した。グラフ化は画像処理と同様に ImageJ を用いた。

この結果より 3 時間加熱後の供試体では、加熱面より 20mm の範囲と 45mm から上端面までのおよそ 3mm の範囲で液状水量の低下がみられた。8 時間加熱後の供試体では、加熱面から 30mm、上端から 10mm の範囲で液状水量の低下がみられと。中性子透過像により、供試体内部の含水率の変化を定量的に測定できた。

3.4 解析結果

(1) 試験結果を再現する物性値

図-8の結果をもとに、図-6および図-7に示した囲み線の領域に関し、拡散係数などを変えた試行解析を行い、結果を良く再現する拡散係数や除去割合の各物性値を求めた。事前の試験より、セメント硬化体の空隙率は 33% とし、含水割合は 85% とし、これを初期値と設定した。セメント硬化体の表-1に結果を示す。コンクリート中の液状水の拡散係数が水蒸気の 1/10 程度である結果を得た。また、式(1)における a の値は 30.0 とした。本解析モデルでは、液状水も大きな拡散係数を持つこととなった。この値は、高温領域で含水率が高い場合は透気経路を持たない水蒸気の膨張圧が駆動力となっていることも考えられる。本検討の範囲では、拡散係数にこれらの効果も織り込まれていた結果と考える。

(2) 解析結果の詳細

加熱開始から 1 時間ごとの温度変化を図-9に示す。加熱開始から徐々に熱が伝播している結果となった。加熱後 8 時間では、熱の伝播は加熱面より 30mm 程度となった。

解析で求めた液状水量を含水率減少量に換算し、中性子照射の結果と合わせて 3 時間加熱後の結果を図-10に、8 時間加熱後の結果を図-11に示す。解析結果は各加熱時間の中性子照射の結果より推定された含水率に対しておおむね再現できたと考えられる。しかし、細部をみると 3 時間加熱後では、0~40[mm]までの領域で透過

表-1 試行解析で得られた各物性値

	水分	水蒸気	熱
拡散係数[m ² /s]	2.5×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵
加熱側除去割合	0.004	0.01	0.0
解放側除去割合	0.0008	0.01	0.1

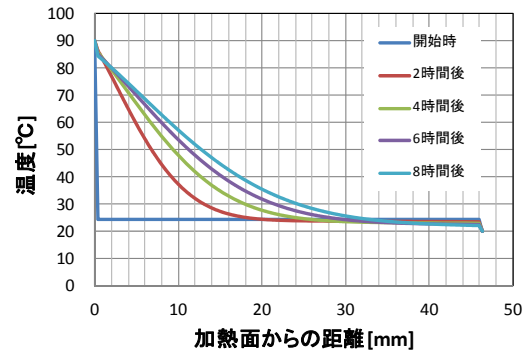


図-9 加熱開始後からの温度分布の変化

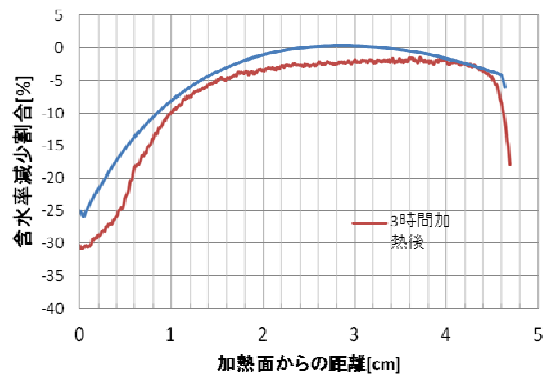


図-10 3 時間加熱後の含水率分布の解析結果

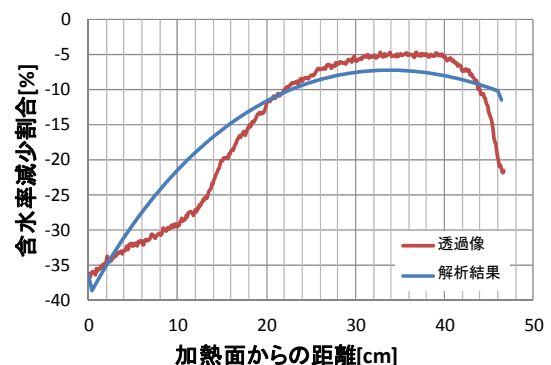


図-11 8 時間加熱後の含水率分布の解析結果

像の結果に対して大きくなっており、8 時間加熱後の結果では、供試体の加熱面から 0~30[mm]の領域での含水率の複雑な変化の再現には至っていない。結果となり、モデルの改良が必要である結果となった。以上より、加熱面からの含水率の変化には再現しきれていない部分もあり、メカニズムの検討などの課題を有していることが

分かった。

4. まとめ

外部の温度環境に応じ、コンクリート中の液状水量の分布の変化を求める解析モデルを開発した。また、セメント硬化体供試体に一面を加熱する試験を行い、液状水量の変化を中性子線による透過像から求め、開発した解析モデルを中性子照射によるセメント硬化体の含水率測定結果に適用し以下の結果を得た。

- 1) コンクリート中の液状水、水蒸気および熱の拡散による解析モデルを開発した。
- 2) 解析モデルでは、液状水の相変化や各成分の拡散係数の温度依存性を考慮した。
- 3) 解析モデルの妥当性の検討のため、セメント硬化体中の含水率を中性子照射によって求め、開発した解析モデルにより、中性子照射による測定結果より推定された含水率を良く再現できることが分かった。

参考文献

- 1) 酒井正樹, 平田隆祥, 一瀬賢一: 100℃未満の加熱を受けたコンクリートの物性変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.562-567, 2012
- 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講演論文集, Vol.32, No.1, pp.293-298, 2010
- 3) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の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) Pennttala 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, 福原輝幸, 脇敬一, 松岡茂: 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.61-67, 2001
- 7) 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, No. 2, pp.39-49, 2009.5
- 8) 丸山一平, 野口貴文, 佐藤良一: 水熱連成移動解析にもとづく高強度マスコンクリート中の温度および湿度分布の予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol.609, pp.1-8, 2006
- 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) 兼松学ほか: 中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ部における自由水挙動に関する研究、セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.160-167, 2008
- 14) 兼松学, 野口貴文, 丸山一平, 飯倉寛: 中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ部における水分挙動の可視化および定量化に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.981-986, 2007
- 15) 土屋直子, 兼松学, 野口貴文, 飯倉寛: 中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の水分定量に関する研究, Vol.30, No.2, pp.769-774, 2008