

材齢の異なる硬化セメントペースト間の水分移動解析

Analysis of Moisture Transfer between Hardened Cement Pastes of Different Age

紀伊國 洋*, 内海 秀幸**, 足立 一郎***, 多田 眞作****

Hiroshi Kiikuni, Hideyuki Utsumi, Ichiro Adachi, Shinsaku Tada

*工修, 千葉工業大学大学院, 工学研究科土木工学専攻 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

**工博, 千葉工業大学, 工学部土木工学科 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

***工博, 千葉工業大学, 工学部土木工学科 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

****工博, 株式会社テキスト, 代表 (〒191-0032 東京都日野市三沢 2-6-44-203)

Water vapor relative pressure difference in construction joints of hardened cement pastes with different ages and mix proportions were evaluated analytically based on chemical potential concept. Chemical potential was formulated by a system of the cement-water lattice model, developed on the statistical thermodynamics and a general idea of mixing. A system of solution enables prediction of the relative water vapor pressure under various conditions of engineering parameter. Numerical results showed a possibility of reversal moisture transfer between jointed cement pastes depending on their respective ages and mix proportions.

Key Words: moisture transfer, construction joints, hardened cement pastes

1. はじめに

コンクリート構造物におけるコンクリートの打継目では完全な一体化構造とはなりにくく、打継目からのひび割れ、漏水による鉄筋腐食等が指摘されており、打継目に起因した構造物の耐久性低下が問題とされている。このことより、打継目の存在は構造物の耐久性低下に繋がる一要因として重要な検討項目であり、打継目および打継ぎ界面近傍の性状を明らかにすることは工学上重要な課題であると考えられる。

新旧コンクリート間の打継ぎにおいては、旧側と新側の調合やセメントの種類ならびに水和反応の進行程度により、水分状態が異なり、打継目を介した水分移動が存在するものと予測される。セメントと水の水和反応により組織構造が形成されるセメント硬化体において、このような水分の圧力勾配は打継ぎ界面近傍の水セメント比を変化させ、組織構造に影響を及ぼすことが考えられる。以上のことから打継ぎ界面近傍の一性状として、打継ぎ界面を介した水分移動の特性を明らかにすることは極めて重要である。

そこで、本研究では練混ぜ直後から水和反応終了までの全生成過程における様々な状態での新旧硬化セメントペースト間の打継目を介した水分移動特性を解析的に明らかにすることを目的とした研究を行

った。本研究では水分移動の方向性を定める尺度として、熱力学により定式化される¹⁾²⁾自由水基準の化学ポテンシャルを用いる。自由水基準の化学ポテンシャルは平衡状態において水蒸気相の相対圧と等価な関係にあるため、旧側セメントペーストおよび新側セメントペーストの個々の相対圧（水蒸気圧とその温度における飽和水蒸気圧の比）を予測することで、水分の移動を評価することが可能となる。本モデルにおいては化学ポテンシャルを定式化する際に、コンクリート工学特有の水セメント比、質量含水比、結合水率、水和度等の工学パラメータが導入されているため、個々に計算された旧側セメントペーストおよび新側セメントペーストの相対圧より、様々な水和反応の進行程度や調合条件下での硬化セメントペーストの打継目を介した相対圧の差を理論的に評価することが可能である。

解析例として、旧側セメントペーストの水和反応が途中停止した場合や、旧側ならびに新側セメントペーストの水和反応が互いに進行している場合等における打継目を介した相対圧の差に関する検討を行った。また、既往の実験で示された、硬化セメントペーストの水和反応の進行に伴う相対湿度変化³⁾から推定される打継目を介した相対圧の差との相関を比較し、本研究で示した水分移動特性に対する一連の手法の妥当性および適応性を検討した。

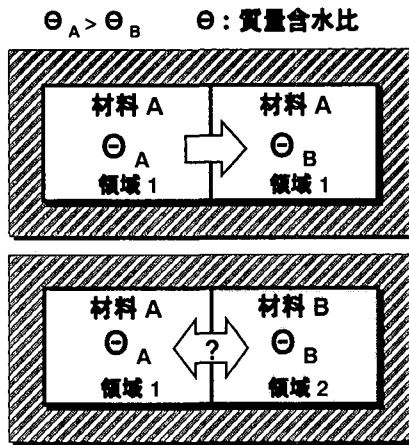


図-1 水分移動の基本概念

2. 水分移動の基本概念

一般に、平衡状態において、同じ材料特性を有する材料が接触している場合、それら材料間の水分移動は体積基準の含水率が高い材料から低い材料へと移動することは明らかである（図-1 参照）。

しかしながら、セメント系材料間の水分移動を考える場合、セメントの種類、水和度により材料内の水分のエネルギーレベルが異なるため、水分が存在する「場」の状態や特性に基づいてその移動を考察する必要がある。なぜなら、自由な状態での水に対して、材料内に存在する水は材料の固体表面からの電氣的、化学的な相互作用を受けることにより、エネルギーレベルが変化するためである。セメント硬化体のような、セメントと水が反応することにより生成される材料においては、調合条件や反応程度が、材料内に存在する水分のエネルギーレベルに及ぼす影響が大きい。

このような、材料中の水分のエネルギーレベルを定量的に取扱う上で、水分の化学ポテンシャルという概念が導入される。水分の化学ポテンシャル $\Delta\mu$ は熱力学的平衡状態では水分の単位物質質量 N あたりのギブス自由エネルギー G として次式で表される⁴⁾。

$$\Delta\mu = \left(\frac{\partial G}{\partial N} \right)_{T,P} \quad (1)$$

また、化学ポテンシャル $\Delta\mu$ は R をガス定数、 T を絶対温度、 P/P_{sat} を相対圧（ P_{sat} : 飽和水蒸気圧）として

$$\Delta\mu = RT \ln(P/P_{sat}) \quad (2)$$

のように直接的に相対圧と関係づけられる物理量である。水分がどのような媒体に含まれていたとしても、また、どのような相であろうと統一的に取扱う

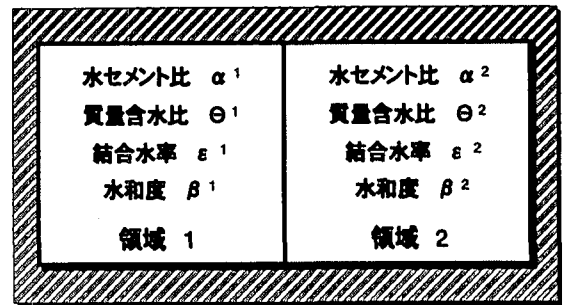


図-2 セメント-水系モデル

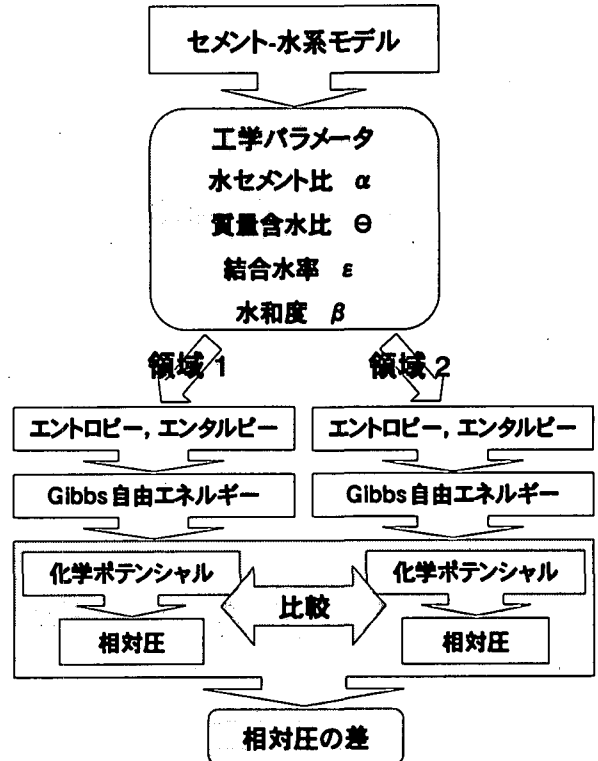


図-3 解析手順

ことのできる化学ポテンシャルを評価することにより、水分移動の方向性を規定することが可能である。なお、水分移動の駆動力は化学ポテンシャルの差にほかならない。

3. 研究の方法

本研究における、解析モデルおよび解析の手順を図-2、3に示す。本研究では、閉ざされた系（封緘状態）における新旧硬化セメントペースト間の水分移動を対象とする。化学ポテンシャルは式(1)に示すように、自由エネルギーを単位水分量で偏微分することにより定式化される。自由エネルギーの定式化には文献¹⁾²⁾に示されるセメント-水系の統計熱力学モデルに基づいて行う。

自由エネルギー ΔG は、定温定圧条件下における熱力学的系がなす仕事量に等しく、エンタルピー変化 ΔH にエントロピー変化 ΔS と温度 T を乗じたもの

の差として次式のように定義される。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3)$$

自由エネルギー式には、材料の状態や特性に応じた水分のエネルギーレベルを評価するために水セメント比、質量含水比、結合水率、水和度の工学パラメータを導入した。なお、式(3)のエントロピー変化 ΔS はセメントと水の配分変化に基づいて、また、エンタルピー変化 ΔH はセメントと水の相互作用による結合エネルギーに基づいてそれぞれ評価される。

各系に対して導入した工学パラメータに基づいて、様々な条件下での自由エネルギーを評価するとともに、式(1)、式(2)の関係より、自由水基準の化学ポテンシャルと相対圧を計算し、それぞれの差を検討することにより打継目を介した水分移動の方向を明らかにする。

4. 自由エネルギーと化学ポテンシャルの定式化

セメント-水系の統計熱力学モデルによる自由エネルギーの定式化については、文献¹²⁾に詳細な記述があるので、ここでは概要のみを述べる。

本モデルでは、セメントと水の水和反応において、それらの結合は一種の化学結合をするものとみなし（擬化学的方法）、粒子は結晶のようにある擬格子状に無秩序に選択性なく配列されるものと考え、粒子間の相互作用は最近接粒子間にのみあるものと仮定しており、次式のように自由エネルギー式が定式化される。

$$\Delta G = RT \left(\chi_{gwe} \phi_{we} \phi_g + \frac{\phi_g}{x} \ln \phi_g + \phi_{we} \ln \phi_{we} \right) \quad (4)$$

ここで、 ϕ_g はゲル粒子、 ϕ_{we} は蒸発可能水粒子、 ϕ_w は水粒子、 ϕ_c はセメント粒子それぞれの体積分率である。 η は、 β を水和反応の進行程度を表す水和度（ $\beta=1$ ：完全水和）、 ε をセメント特性や環境条件による水和反応の進行限界を表す最終結合水率（ゲル粒子生成時のセメント粒子と結合する水分の割合）として次式のように定義される。

$$\eta = 1 + \beta \varepsilon \quad (5)$$

各粒子の体積分率の相関関係は式(5)の η を用いて次式のようなである。

$$\begin{cases} \phi_w = 1 - \phi_c \\ \phi_g = \eta \phi_c \\ \phi_{we} = 1 - \eta \phi_c \end{cases} \quad (6)$$

なお、水セメント比 α は水粒子とセメント粒子の重量比として $\alpha = \phi_w / \phi_c \cdot d_{cw}$ と定義し（ $d_{cw} = d_w / d_c$ 、 d_w ：水粒子の密度、 d_c ：セメント粒子の密度）、質量含水比 θ は蒸発可能水粒子とゲル粒子の重量比として定義した。

χ_{gwe} はゲル粒子と蒸発可能水粒子の反応に起因した相互作用パラメータであり次式のように定義した。

$$\chi_{gwe} = \frac{z Q_{gwe}}{k_B T} \quad (7)$$

χ_{gwe} はフローリーの相互作用定数と呼ばれ、 z は配位数（6～12）、 Q_{gwe} はゲル粒子と蒸発可能水粒子の結合エンタルピーを表し $Q > 0$ の時吸熱、 $Q < 0$ なら発熱を伴う反応を意味する。 x は重合度を表し、反応時のクラスターを構成する粒子の数を規定する定数である。

式(1)、式(4)より、自由水基準の化学ポテンシャル変動 $\Delta \mu$ は以下のように表される。

$$\Delta \mu = \chi_{gwe} \eta^2 \phi_c^2 + \frac{1}{x} [\ln(\eta \phi_c) - \eta \phi_c] + \ln(1 - \eta \phi_c) + \eta \phi_c \quad (8)$$

5. 解析例と考察

5.1 物性値の設定

セメントと水の水和反応過程においては全般的に凝集作用が生じていると考えられる。一般に粒子同士が凝縮するか否かの臨界エネルギーは常温において $1.5 k_B T$ 程度である。そこで、反応の相互作用は常温程度でVan der Waals力程度と考え $Q_{gwe} = 0.01 \text{ eV}$ 、配位数は $z=6$ として式(7)より相互作用係数は $\chi_{gwe} = 2.4$ とした。 χ_{gwe} の値は上記の凝縮作用の臨界エネルギーに対して1.5倍程度である。また、重合度は $x=50$ とした。

さらに、完全水和時（ $\beta=1.0$ ）に反応系内の水分が水和反応により完全に消費されている場合、質量含水比 θ は0となるため、工学パラメータの相関関係より次式を満たす必要がある。

$$\frac{\alpha}{d_{cw}} - 1 \cdot \varepsilon = 0 \cdots (\beta=1) \quad (9)$$

式(9)より、最終結合水率は完全水和に必要な水セメント比による調合が25%（ $\alpha=0.25$ ）と考え⁶⁾、 $\varepsilon=0.775$ とした。ここで、密度比 d_{cw} は、セメントの密度が 3.1 g/cm^3 程度であることから $d_{cw}=0.323$ として計算している。

5.2 単一反応系を対象とした解析例

(1) 化学ポテンシャルと相対圧

図-4 に水和度と化学ポテンシャルの関係を示す。化学ポテンシャルは、各水セメント比とも水和反応の進行に伴って減少する傾向を示しており、低い水セメント比ほど、その減少量が大きくなる傾向を示している。この化学ポテンシャルの変化は自由な状態での水を基準として、セメントと水が混合され反応が進行することに起因したエネルギー変化である。

図-5 に水和度と相対圧の関係を示す。相対圧の変化は水セメント比が大きいほど、反応初期において高い値を示し、水和反応の進行に伴って減少する傾向が認められる。水セメント比 $\alpha=0.25$ における相対圧は完全水和時 ($\beta=1.0$) では 0 を示しており、この変化傾向は $\alpha=0.25$ が完全水和に必要な調合条件として、最終結合水率を設定していることに起因している。

化学ポテンシャルと相対圧の変化傾向ならびに変化範囲は水セメント比により大きく異なっており、調合条件である水セメント比が水和反応の進行に伴う水分のエネルギー変化に大きく影響することが分かる。

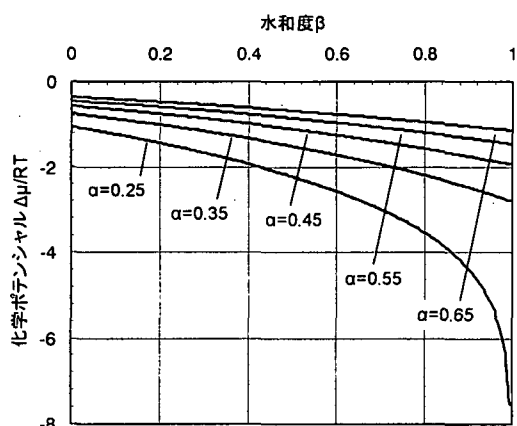


図-4 化学ポテンシャルの変化

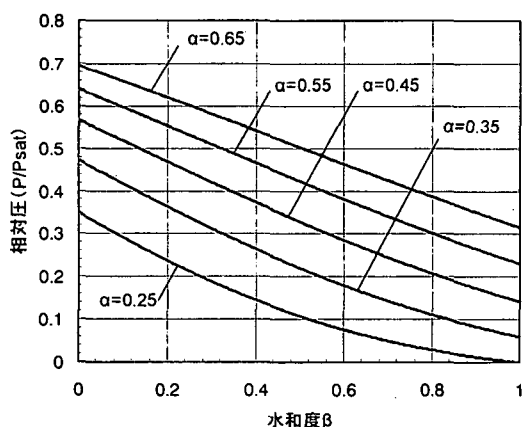


図-5 相対圧の変化

(2) 最終結合水率が相対圧に及ぼす影響

本研究において水和度は、任意の材齢におけるセメント量当たりの結合水量として定義しており、セメント特性としての最終結合水率は、水和度を定義する上で極めて重要なパラメータであると考えられる。しかしながら、実際のモデルにおいて最終結合水率はセメントの特性としてだけではなく、調合および養生条件に大きく影響を受けるため特定な値として定められていない場合が多い⁶⁾。一般的に普通ポルトランドセメントでは水セメント比 $\alpha=0.25$ がセメントと水が完全に水和反応するための調合条件とされており、前節の解析結果においても水セメント比 $\alpha=0.25$ を基準として最終結合水率 ε を設定したが、最終結合水率の変化が材料内部の相対圧に与える影響を検討することは工学上重要であると考えられる。ここでは、極度に自己乾燥を受けやすい調合条件やフライアッシュなどの混入時に生じる最終結合水率の低下を想定し、最終結合水率 ε が水和反応の進行に伴った材料内部の相対圧変化に与える影響を検討する。

図-6, 7, 8 には式(9)に基づき、完全水和に必要な水セメント比を $\alpha=0.10\sim0.25$ と設定した場合の最終結合水率 $\varepsilon=0.310\sim0.775$ における水和反応の進行に伴った材料内部の相対圧変化を示す。

図より、相対圧の変化傾向および変化範囲は各水セメント比とも最終結合水率 ε により大きく異なり、最終結合水率が低くなるにつれて、水和度が同じ場合における相対圧は高くなる傾向を示し、完全水和した状態における蒸発可能水量を増加させる傾向が認められる。

また、水セメント比 $\alpha=0.25$ の場合、 $\varepsilon=0.465\sim0.775$ における相対圧は水和度の増加に伴って指数的な減少傾向を示すのに対し、水セメント比 $\alpha=0.45, 0.65$ では各最終結合水率とも相対圧はより線形的な減少傾向を示している。これより、最終結合水率が水和反応の進行に伴う材料内部の相対圧に与える影響は水セメント比ごとに異なることが分かる。

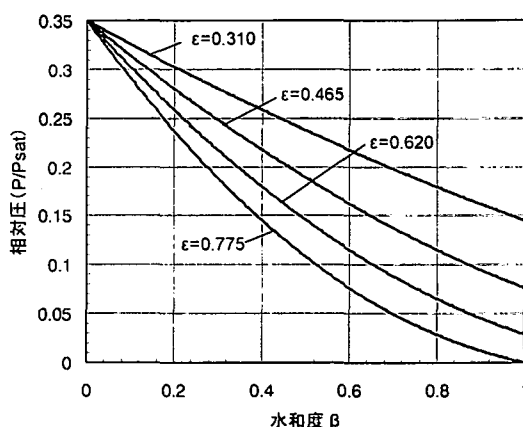


図-6 ε 変化に伴う相対圧変化 ($\alpha=0.25$)

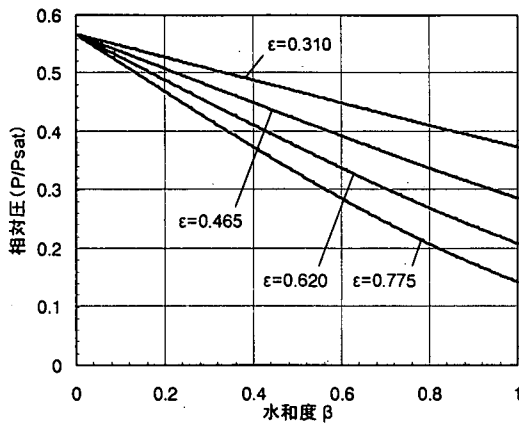


図-7 ϵ 変化に伴う相対圧変化 ($\alpha=0.45$)

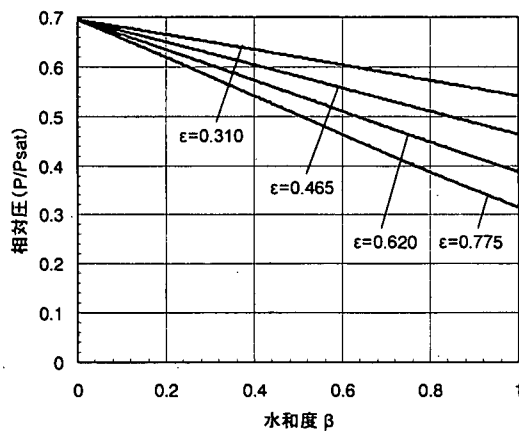


図-8 ϵ 変化に伴う相対圧変化 ($\alpha=0.65$)

5.3 打継ぎ問題を考慮した水分移動解析

(1) 旧側セメントペーストが水和反応の進行途中で停止した場合の打継目を介した相対圧差

任意の水和度で水和反応が停止した旧側に新側を打継いだ場合の打継目を介した相対圧の差を検討する。本研究における打継目を介した相対圧差とは、個々に計算された旧側および新側の相対圧の差と定義する。

図-9, 10, 11 は旧側の水セメント比を $\alpha=0.45$ と設定し、水和度が $\beta=0.6$ および $\beta=0.8$ で停止した状態ならびに $\beta=1.0$ と完全水和した状態への新側 ($\alpha=0.25\sim0.65$) を打継いだ場合における打継目を介した相対圧差を示したものである。なお、最終結合水率は $\epsilon=0.775$ とした。図の x 軸は新側の水和度 β であり、 y 軸は各系の相対圧差を表しており、0 以上は新側から旧側への水分移動方向を表し、0 以下は旧側から新側への水分移動方向を示している。

図より、打継ぎ際の旧側の水和度に関係なく、打継ぎ後、特定の水和度で相対圧差が 0 を示す場合があり、新側から旧側への水分移動が、旧側から新側へと逆転する傾向を示している。また、水セメント比 $\alpha=0.65$ の新側を打継いだ場合、水分移動方向の

変化は見られないものの、旧側の水セメント比よりも低い水セメント比の新側を打継いだ場合においては、水分移動方向の変化は打継いでから間もない水和度の低い範囲で大きく変化する傾向を示している。以上のことより、水和反応が途中で停止した旧側に新側を打継いだ場合、新側の水セメント比により水分移動方向の変化が大きく異なり、打継目を介した水分の揺れ戻り現象が生じることが予想される。

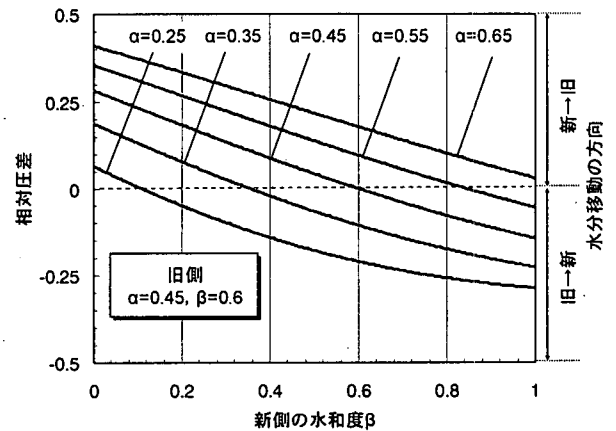


図-9 打継目を介した相対圧差 (旧側 $\beta=0.6$ 固定)

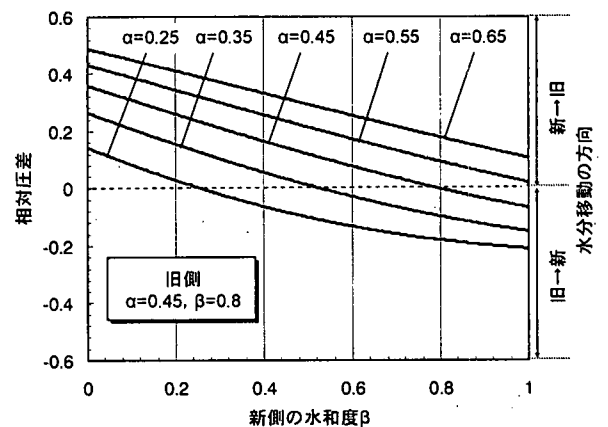


図-10 打継目を介した相対圧差 (旧側 $\beta=0.8$ 固定)

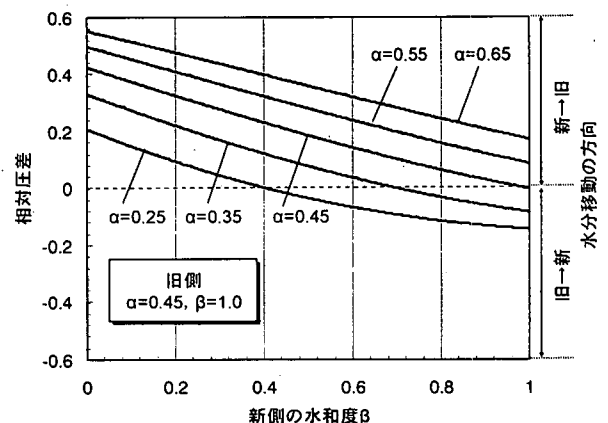


図-11 打継目を介した相対圧差 (旧側 $\beta=1.0$ 固定)

(2) 旧側および新側セメントペーストの水和反応がともに進行している場合の打継目を介した相対圧差

旧側の水和反応の進行中に新側を打継いだ場合の打継目を介した相対圧差の差を検討する。

図-12, 13, 14 はそれぞれ旧側の水セメント比を $\alpha=0.55$ とし, 新側の水セメント比 $\alpha=0.25, 0.45, 0.65$ を旧側の水和度 $\beta=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の時に打継いだ場合の打継目を介した相対圧差を示したものである。なお, 最終結合水率は前節同様 $\varepsilon=0.775$ とした。図の x 軸は新側を打継ぐ時の旧側の水和度 β であり, グラフは旧側の水和度 β を基準として描いたものである。 y 軸は前節と同様に, 0 以上は新側から旧側への水分移動方向を表し, 0 以下は旧側から新側への水分移動方向を示している。

図より, 新側の水セメント比 $\alpha=0.25$ および $\alpha=0.45$ の場合, 旧側のどの水和度 β で打継いだとしても水分移動方向は旧側から新側への一方にしか移動していない。また, 新側の水セメント比 $\alpha=0.65$ では, 旧側の水和度 $\beta=0.2$ の時に打継いだ場合においては, 水分移動方向が変化していることから, 打継目を介した水分の揺れ戻り現象が生じることが予測できる。

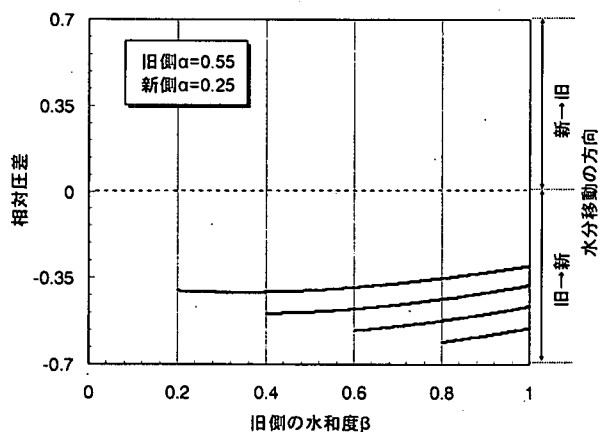


図-12 打継目を介した相対圧差 (新側 $\alpha=0.25$)

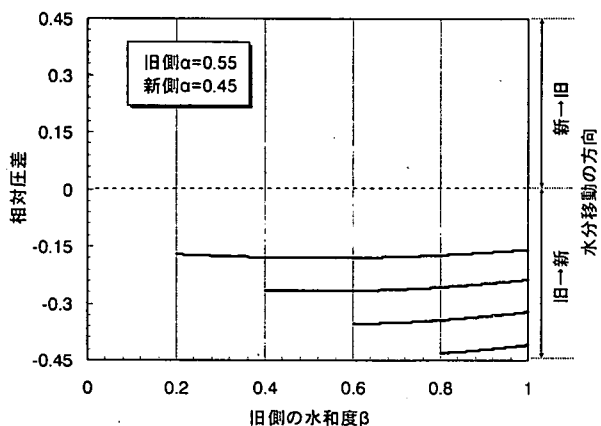


図-13 打継目を介した相対圧差 (新側 $\alpha=0.45$)

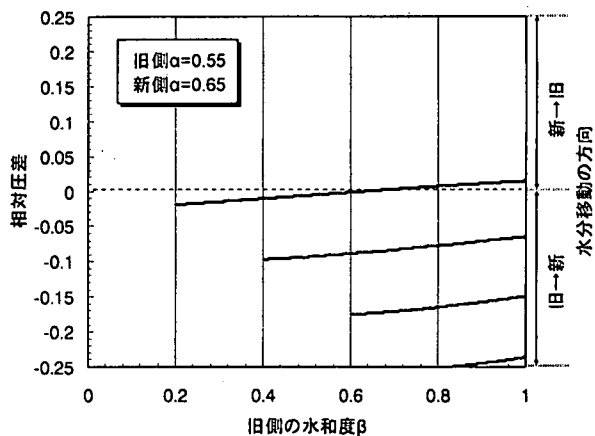


図-14 打継目を介した相対圧差 (新側 $\alpha=0.65$)

(3) 最終結合水率が打継ぎ直後における打継目を介した相対圧差に及ぼす影響

旧側および新側の水和反応が互いに進行する場合, 最終結合水率 ε が打継ぎ直後の打継目の相対圧差に与える影響を検討する。

図-15, 16 は旧側の水和度 $\beta=0.2$ ならびに $\beta=0.8$ の時に新側を打継いだ場合の打継ぎ直後 ($\beta=0$) における打継目を介した相対圧差を示したものである。なお, 旧側と新側の水セメント比を同じ場合を想定し, 完全水和に必要な水セメント比を $\alpha=0.10\sim0.25$ として最終結合水率は $\varepsilon=0.310\sim0.775$ と設定した。

図より, 最終結合水率 ε の増加に伴い, 各水セメント比とも打継ぎ直後の打継目を介した相対圧差は増加する傾向が認められ, 打継ぐ際における, 旧側の水和度 β の増加に伴い, その増加傾向は変化している。

これより, 最終結合水率が打継ぎ直後の打継目を介した水分移動に与える影響は, 旧側と新側の水セメント比が同じ場合, 新側を打継ぐ際の旧側の水和度により大きく異なることが予測できる。

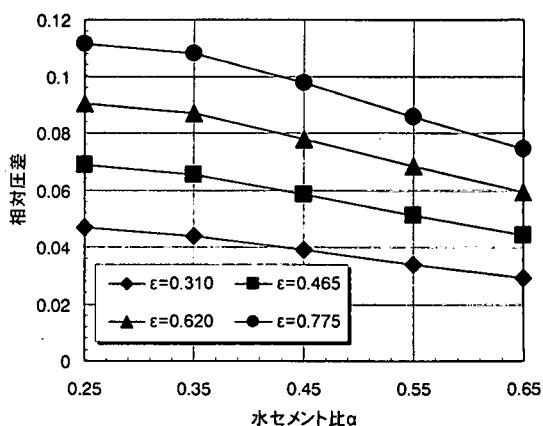


図-15 打継ぎ直後の相対圧差 (旧側 $\beta=0.2$)

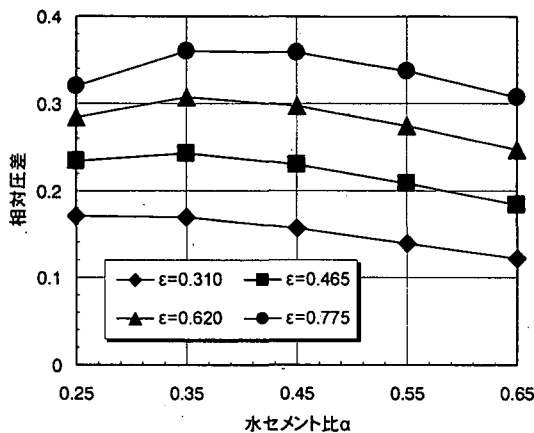


図-16 打継ぎ直後の相対圧差 (旧側 $\beta=0.8$)

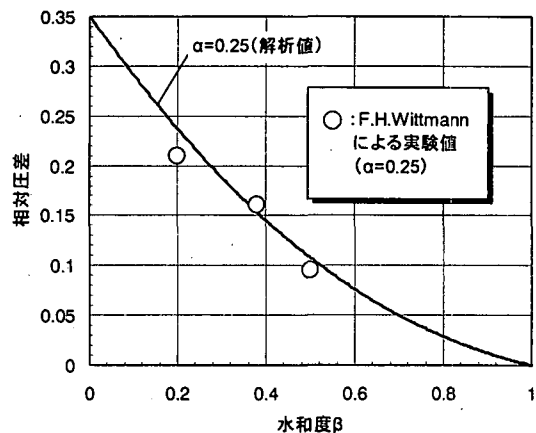


図-17 解析結果と既往の実験データとの比較

6. 本モデルと実験データとの整合性

本研究における、水分移動特性に対する一連の手法の妥当性を検討するため、既往の研究で示された実験結果との比較を行う。

比較には、F.H.Wittmann により示された、封緘状態において連続的に計測した水セメント比 $\alpha=0.25$ の硬化セメントペーストにおける水和反応の進行に伴った相対湿度 (相対圧) 変化の実験データ³⁾を用いる。この実験データを基に、完全水和した旧側に新側を打継いだ場合の、打継目を介した相対圧差を算出し、本モデルによる解析結果との整合性を検討することとした。なお、旧側および新側の水セメント比は $\alpha=0.25$ を想定した。

図-17 に既往の実験データと本モデルによる解析結果を併せて示す。図の実線は解析結果であり、○は実験結果に基づいて算出した相対圧差である。実験結果は水和反応の進行期間が約 700 時間までしか示されておらず、永松らの文献⁹⁾に基づき、 $\beta=1$ (完全水和) を 2400 時間と仮定して時間を水和度に換算すると 700 時間で約 $\beta=0.6$ 程度であった。したがって、比較に際して既往の実験データは $\beta=0.6$ 未満の相対圧を用いることとした。

図より、水和後期における比較検討はできていないが、 $\beta=0.2\sim0.5$ の範囲において本解析結果と既往の実験データはほぼ同様な変化傾向を示し、この範囲においては十分な相関が認められることから、本研究における水分移動特性に対する一連の手法は定性的には妥当であると考えられる。

7. まとめ

本研究では、練混ぜ直後から水和反応終了までの全生成過程における様々な状態を考慮した材齢の異なる新旧セメントペースト間の水分移動特性を理論的に評価し、以下のような検討項目に対する解析例を

示した。

- ① 旧側セメントペーストの水和反応が途中停止した状態で新側セメントペーストを打継いだ場合における打継目を介した相対圧差
- ② 旧側ならびに新側セメントペーストが互いに水和反応を進行させる場合における打継目を介した相対圧差
- ③ 旧側ならびに新側セメントペーストの水セメント比が同じ場合における最終結合水率が打継ぎ直後の打継目の相対圧差に与える影響

これら一連の検討より、工学上興味深い結果として、各種の打継ぎにおいて、ある特定の水和度で相対圧差の符号が変わる場合があり、当初、新側から旧側へと生じている水分の移動が、旧側から新側へと逆転する、水分移動の揺れ戻りが生じる可能性が認められたことである。このことより、材料特性や材齢の異なる材料間における複雑な水分移動特性を理論的に解釈する上で、本研究は有効な一連の理論体系を構築したと考えられる。

8. 今後の課題

本研究において、打継目を介した水分移動の方向性とその相対圧差を解析的に評価し、水分移動特性に対する一連の手法の定性的な妥当性および広範な適応の可能性を示すことができた。しかし現段階では、このような水分のポテンシャル勾配が打継ぎ界面周辺に形成される組織構造にどのような影響を与えるかということは検討していない。また、本解析は常に平衡条件下における圧力差を検討しているため、実際のモデルにおいて遷移的に生じている水和反応と打継目を介した水分移動については考慮され

ていない。

今後、本解析モデルと対応した実験を実施し、その適応性を詳細に検討するとともに、水分のポテンシャル勾配から予測される、打継目を含む材料系の空間的な湿度分布、ひいては水セメント比分布を明らかにすることが課題である。

参考文献

- 1) 多田眞作：硬化セメントペーストの水分のエネルギーと吸着等温線，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.823-828，1999
- 2) 内海秀幸，多田眞作，足立一郎：水和反応の進行に伴う水分の化学ポテンシャルの変動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.721-726，2000
- 3) F.H.Wittmann：Surface tension, shrinkage and strength of hardened cement paste, Materials and Constructions, Vol.1, No.6, pp.547-552, 1968
- 4) Keth J.Laidler 著（高石哲男 訳）：化学反応速度論Ⅱ（第25版），産業図書株式会社，pp.75-80，1997
- 5) 永松静也，竹田吉紹，佐藤嘉昭：乾燥を受けるセメント硬化体の水和の進行を表す式，日本建築学会構造系論文報告集，第361号，pp.21-30，1986
- 6) 小林一輔 著：最新コンクリート工学（第3版），森北出版，pp.10-11，1992
- 7) 杉山央，榊田佳寛：非定常拡散理論に基づくセメントの水和反応・組織形成モデル，セメント・コンクリート論文集，Vol.53，pp.50-57，1999
- 8) 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，第420号/V-13，pp.61-69，1990
- 9) 阪田憲次，蔵元修：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，土木学会論文集，第316号，pp.145-152，1981
- 10) 沼尾達弥，三橋博三，福沢公夫：加熱乾燥を受けるコンクリートの水分逸散過程解析に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第441号，pp.1-7，1992
- 11) 後藤幸正，藤原忠司：軽量コンクリートの乾燥収縮応力について，土木学会論文集，第287号，pp.95-106，1979
- 12) 中西正俊：コンクリートおよびモルタルの乾燥収縮過程を拡散方程式で表したときの諸係数について，日本建築学会論文報告集，第190号，pp.11-20，1971

（2002年4月19日 受付）