

Chapter5

不飽和コンクリートにおける 液状水挙動モデル

5.1 はじめに

コンクリート構造物において、コンクリート中の空隙中を占有する物質は主として液状水と空気が存在しており、空隙は不飽和状態にある。不飽和状態にある物質中の液状水は、液状水は表面張力と固相表面の効果によって、同じ高さに存在する基準状態の水の圧力よりも低い状態で存在する [1]。したがって、提案する液状水移動モデルが一般構造物における水分移動解析に資するためには、これらの影響を考慮することが必要である。

第3章での検討では、飽和コンクリートを対象とした透水現象ならびに数理モデルの構築を行った。提案モデルは、飽和コンクリートを対象として、連続空隙モデルを基礎として粘性の空隙径依存性、速度依存性の工学モデルならびに液状水の降伏値を設定しているが、液状水に関するモデルは空隙が飽和状態の場合の適用に限られる。したがって、不飽

和コンクリートへ適用するためには、気相と液相の相互作用を考慮した流体モデルの枠組みの中で、その液層に提案モデルを組み入れることによって、不飽和コンクリートへの拡張が可能であると考えられる。そこで本章では、気相と液相の相互作用に関する既往のモデルに基づき、提案モデルの組み込みを図る。

5.2 不飽和多孔体における既往の透水モデル

土質工学ならびにコンクリート工学の分野において、不飽和多孔体における液状水浸潤現象は、液状水移動則にダルシー則を基礎とし、計算は差分法や有限要素法に基づいて行われているが、空気の流動については考慮されていない [2]。気相の流動の影響を考慮している研究は、鉛直浸透を対象とした佐藤らの研究 [3]、2相流解析を用いた高木らの研究 [4]、ならびに水平方向の数値解析を行った齋藤らの研究 [5] が挙げられる。いずれも空気が封入された閉空間に液状水が浸潤すると、内部の気圧が高まることによって液状水と空気が釣合い、液状水の浸潤が著しく押さえられるという研究である。

コンクリートを対象として気相の影響、つまり大気との境界面が開封か封緘かであるコンクリートの境界条件が物質移動抵抗性に及ぼす影響について検討された研究は極めて少ない。その中で恩田が行った実験を挙げる [6]。恩田はW/Cならびに養生が毛管力による液状水浸潤現象に与える影響について検討を行った。試験に用いたシリンダーの打設面以外をエポキシ樹脂によって封緘を行ったのち、水中に浸漬させたところ、すべての供試体において液状水の浸潤が数 mm に押さえられていることが確認された。なお、この供試体と同一の供試体で、シリンダーの打設面と底面のみ開封し、側面にアルミテープを貼付したものをを用いて、底面のみ液状水を与え、打設面は大気に接するという境界条件では、液状水は数 cm の浸潤が確認できている。液状水が浸潤しなかった原因として、浸潤面以外をエポキシ樹脂で封緘したために、浸潤面コンクリート中の空気の逃げ場が無くなり、コンクリート自身の緻密な空隙構造によって液状水の浸潤に抵抗すると同時に、逃げ場のない空気も液状水の浸潤に抵抗していたものと考えられる。

また、東京大学コンクリート研究室において開発された物質・エネルギーの生成移動に関する連成解析システム (コード名 *DuCOM*) は [7][8][9]、丸山らによる CCBM [10][11]、木全らによる研究 [12] は、数値解析における構成則に気相の影響を考慮している。ただし、これらは、多孔体中の気相に対して空気の圧力は一定かつ大気圧と等しく、その質量が液相と比べて無視できるという仮定を設けており、考慮しているのは水蒸気移動のみである。たとえ、通常起こりうる空気の対流がコンクリート表面に生じたとしても、ごく表面でそのエネルギーが消失してしまう上、コンクリート中の気体は、狭く複雑に交錯し屈曲した細孔組織中を移動するため、気体の移動が極めて困難である。つまり、コンクリート内の気相の圧力は空気の対流程度では影響を受ける事はない [13]。これに加え、コンクリート内の気相は境界面の大気と連続空隙を介して繋がっているため、気相は常に大気圧と等しいとの仮定は、解析空間におけるコンクリートの境界が大気と接している条件下に限り、

妥当であると考えられる。ただし、放射性廃棄物処分技術調査処分場における大型透水試験体に対する物質・エネルギーの生成移動に関する連成解析システムの適用に関する検討において[14]、注水面を水圧 =0.25MPa、排水面を封緘状態とした場合における1次元解析結果を示す図1では、解析空間上で100年経過後にコンクリート中の空隙はすべて液状水で飽和する結果となり、一次元解析にもかかわらず気体の存在が消失している。実空間では液状水の浸潤に対して排出側が封緘であるために逃げ道のない気体が、自身の体積を収縮させつつもボイルの法則に従って自身の圧力を高めて液状水の侵入を抵抗することによって、気体が液状水に溶存しない限りは、排出側が開放状態である場合よりも浸潤位置が著しく注入側に押しえられることが期待できる。しかし本解析では、気体の圧力を大気圧に等しいと仮定しているために、液状水の浸潤位置によらず一定の圧力によって抵抗するために、大気圧よりも大きな注入圧が加わった場合は解析結果のようにコンクリートの空隙がすべて飽和するものと考えられる。また、解析上において液状水が大気圧と釣り合っていた場合も考えられる。この場合は、気液界面において気相における水蒸気の密度差を駆動力とした水蒸気移動が卓越し、空間内が飽和してしまっただと考えられる。しかし、この点においても実空間では、空気の質量が保存されているために、排出面が封緘である場合、水蒸気は乾燥空気との置換が起こらない限り水蒸気移動が卓越することは無いと考えられる。以上を考慮して、気相の圧力ならびにそれが液状水移動に影響及ぼす現象を考慮した解析モデルを構築することとする。

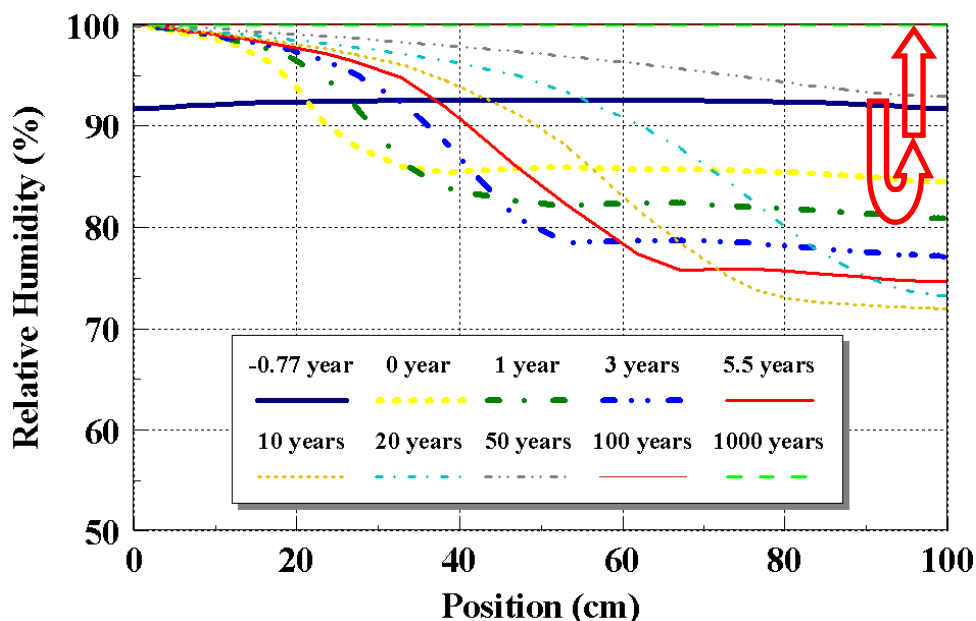


図 5.1 排水面を封緘状態とした場合における1次元解析結果[14]

5.3 気相の影響を考慮した多孔体における3相流体モデル

5.3.1 気相と液相を支配する基礎方程式

本研究では、気相と液相の相互作用を考慮した液状水移動モデルの構築を行う。

Meiri[15], Hoeg[16], ならびに Tsakiroglou[17] らは土中の気相と液相それぞれの質量保存則、毛管力が気相と液相の差で表現される構成則を基礎式とし、空間内は液状水と気体のみで構成されるといった体積保存則を拘束条件として課すことによって、気液の各運動を連立させた。また、本モデルに基づいて、齋藤ら [5] は空気の圧縮を考慮した基礎式を提案した。本研究では、齋藤らの提案するモデルを基礎式として、空隙構造モデルならびに水蒸気移動モデルを組み入れた解析コードへの高度化を行う。

はじめに、本解析モデルのフレームについて説明する。本解析空間上はコンクリートのみ存在し、コンクリート中の空隙を占有するのは液状水と空気の2相のみであると仮定する。またその空気は水蒸気と乾燥空気の2種で構成されるものとする。本解析では、はじめに水蒸気と乾燥空気両者を含む空気と、液状水の気液2相流体の相互作用を解く。空間内の液状水量はこの計算によって決定される。空間内の水蒸気量は、先程の計算によって移動する空気に乗って変化する移流に加え、前ステップでの空間内における水蒸気密度差を勾配とした拡散によって移動する量を加算することによって水蒸気量を計算する。この計算を毎ステップ繰り返すことによって、時々刻々と変動する空間内の物質占有度の計算を行う。

以下、具体的な計算方法について数式を用いて説明を行う。なお、本解析は一次元水平方向の流体モデルを対象としているため、液状水ならびに空気に及ぼす重力の影響は考えない。

はじめに、コンクリート中に存在する物質の質量保存則を規定する。コンクリート中を流れる流体（液状水、気体（水蒸気＋乾燥空気））の質量保存則は以下のように表されるとする。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\phi_0 S_w \rho_w)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_w q_w) = 0 \\ \frac{\partial(\phi_0 S_g \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g q_g) = 0 \end{array} \right. \quad (5.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial(\phi_0 S_w \rho_w)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_w q_w) = 0 \\ \frac{\partial(\phi_0 S_g \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g q_g) = 0 \end{array} \right\} \quad (5.2)$$

ここに、

ϕ_0 : 多孔体の空隙率,

S_w : 液状水の飽和度,

S_g : 気体の飽和度,

ρ_w : 液状水の密度,

- ρ_g : 気体の密度,
- q_w : 液状水の流速成分,
- q_g : 気体の流速成分,
- t : 時刻

である.

本保存則は、空間内の質量の時間変化量は、空間内の流入 - 流出量に等しいという関係を表現している。コンクリートに質量保存則を適用する場合、質量の消失・生成項を付加させる必要がある。これは、コンクリート中における液状水の場合、セメントの水和に水分が消費されるので、この消費分を質量の収支に考慮する必要があるからである。本研究では、コンクリートは水和が十分に完了しているのに十分な期間が経過しているものを対象とし、コンクリート中に未水和分が残存していてもその量はすでに硬化した水和物量と比較して極めて微量であり、これらが水和しようとして消費される液状水量は無視できるという条件を、本解析では前提とする。

また、コンクリートの空隙中は液状水と空気のみ存在し、それ以外の流体は存在しないので、各流体の飽和度は独立ではなく、以下の拘束条件を有する。

$$S_w + S_g = 1 \quad (5.3)$$

次に、流速成分についての検討を行う。流速成分は運動方程式に基づき以下の式で表現される。

$$\left\{ \begin{array}{l} q_w = -\frac{K_w}{\eta_w} \frac{\partial p_w}{\partial x} \\ q_g = -\frac{K_g}{\eta_g} \frac{\partial p_g}{\partial x} \end{array} \right. \quad (5.4)$$

$$(5.5)$$

ここに、

K_w : 液状水の移動係数で、液状水の飽和度と圧力に依存する関数,

K_g : 気体の移動係数で、空気の飽和度と圧力に依存する関数,

η_w : 液状水の粘性,

η_g : 気体の粘性,

p_w : 液状水の圧力,

p_g : 気体の圧力,

である。

各式，ダルシー則と同じ形式であるが，液状水ならびに気体の移動係数は，各流体の圧力に依存する関数となっているため，動水勾配（圧力勾配）と流速成分は線形関係であるとは限らない。

ここで，これらの構成式を解く際に，簡単のため，水の密度変化，コンクリートの空隙率の時間変化を無視する，つまり

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = 0 \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial t} = 0 \quad (5.7)$$

とする。セメントと液状水の化学反応によって硬化体が形成されるが，硬化体の形成後においてもセメントの未水和分が空隙中に残っており，液状水が供給されることによって水和反応が起こり，水和熱が発生しうる。よって温度依存性を有する水の密度は水和熱の影響を受けると考えられるが，未水和セメントは極めて微量であると既に仮定しているため，この水和によって発生する熱量の時間変化も微量であるとしてよいと考えられる。そこで本研究では水の密度を一定とし，時間変化を許容しないものとする。また，未水和セメントが液状水の供給による水和によって空隙率が減少すること，ならびに液状水と長期間接触することによる溶脱の影響による空隙率の増加，さらに溶脱部分における水和物の析出による現象など，空隙構造は複雑に変化する。ただし，本研究では未水和セメントは極めて微量であるとの仮定を置いているため，空隙率はほとんど変化しないものと仮定し，本研究ではこれらの影響による空隙構造変化はないものとする。

以上の仮定のもと，式 (5.1)(5.2)(5.4)(5.5)(5.6)(5.7) より，液状水および空気は以下のように表される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_0 \frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_w}{\eta_w} \frac{\partial P_w}{\partial x} \right) \end{array} \right. \quad (5.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_0 \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g S_g) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_a \frac{K_g}{\eta_w} \frac{\partial P_g}{\partial x} \right) \end{array} \right. \quad (5.9)$$

以下，気相における時間依存性について検討を行う。空気は圧縮性を考慮するので，密度 ρ_a は絶対温度 T と圧力 P_a を用いて以下のように表現される。

$$\rho_g = \frac{P_g}{RT} \quad (5.10)$$

ここに,

R : 気体定数

である.

また, 標準状態における空気の密度 ρ_{as} は P_{as} を用いて以下のように表現される.

$$\rho_{gs} = \frac{P_{gs}}{RT} \quad (5.11)$$

空間内で質量が一定であると仮定すると, 任意の状態にある空気は以下のように表現される.

$$\rho_g V_g = \rho_{gs} V_{gs} \quad (5.12)$$

ここで, 構成体積率 $\beta_g = V_g/V$ を定義すると, 式 (5.12) は以下のような表現となる.

$$\rho_g = \rho_{gs} \frac{V_{gs}}{V_g} = \frac{\rho_{gs}}{\beta_g} \quad (5.13)$$

また β_g は式 (5.11) を用いて以下のように表現できる.

$$\beta_g = \frac{P_{gs}}{P_g} \frac{T}{T_s} \quad (5.14)$$

以上, 空気の飽和度の時間変化量を表現する式は, 以下のように書き換えられる.

$$\phi_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_g}{\beta_a} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_g}{\beta_a \eta_w} \frac{\partial P_g}{\partial x} \right) \quad (5.15)$$

また, 毛管力 P_c は液状水の圧力と空気の圧力を用いて以下の式によって表現される.

$$P_c = P_g - P_w \quad (5.16)$$

式(5.16)に加え、 β_a は圧力 P_g の関数であり、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\beta_a} \right) = \frac{d}{dP_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right) \frac{\partial P_a}{\partial t} \quad (5.17)$$

であることを考慮すると、式(5.8)と式(5.9)の左辺はそれぞれ以下のように表現される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_0 \frac{\partial S_w}{\partial t} = \phi_0 \frac{dS_w}{dP_c} \frac{\partial P_c}{\partial t} = \phi_0 \frac{dS_w}{dP_c} \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) \\ \phi_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_g}{\beta_g} \right) = \phi_0 (1 - S_w) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\beta_a} \right) - \phi_0 \frac{1}{\beta_a} \frac{dS_w}{dP_c} \frac{\partial P_c}{\partial t} \\ = \phi_0 (1 - S_w) \frac{d}{dP_g} \left(\frac{1}{\beta_a} \right) \frac{\partial P_g}{\partial t} - \phi_0 \frac{1}{\beta_a} \frac{dS_w}{dP_c} \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) \end{array} \right. \quad (5.18)$$

飽和度 S_w は毛管力 P_c の関数であることを考慮し、空気の圧縮性を考慮すると式(5.8)、式(5.9)は式(5.18)、式(5.19)のように変形され、本式群を基礎方程式とする。

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_0 C \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_w}{\rho_w \eta_w} \frac{\partial P_w}{\partial x} \right) \\ \phi_0 \left\{ (1 - S_w) B - \frac{C}{\beta_a} \right\} \frac{\partial P_g}{\partial t} + \phi_0 \frac{C}{\beta_a} \frac{\partial P_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_g}{\rho_g \eta_g} \frac{\partial P_g}{\partial x} \right) \end{array} \right. \quad (5.20)$$

ここに、 $B = \frac{d}{dP_g} \left(\frac{1}{\beta_g} \right)$ 、 $C = \frac{dS_w}{dP_c}$ 、 $(\beta_g$: 気相の体積と標準状態の気相の体積の

比)

である。

解法は、基礎方程式内で $\frac{\partial P_w}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial P_g}{\partial t}$ を変数とした連立方程式を解くことによって各

相の時間増分を得、次ステップの各相の圧力を得る。式 (5.16) によって毛管力と各相の圧力が関連づけられているので、毛管力が得られる。毛管力と飽和度も関連付けを行うことによって次ステップの飽和度を得ることができる。次の節では仮定した空隙構造のもと、毛管力と飽和度を関連付ける。

5.3.2 飽和度と毛管力

次に、空隙構造モデルを基礎方程式に組み込むこととする。空隙構造は、コンクリート中の毛細管空隙を模擬し、以下の式で表現されるとする。

$$\phi(r) = \phi \{1 - \exp(-Br)\} \quad (5.22)$$

ここに、

$\phi(r)$: 空隙分布

r : 空隙半径

B : 空隙のピークを表現する定数

である。

連続空隙内における液状水は、径の小さい空隙から埋まることと仮定する。すなわち、空隙内では、液状水が存在する最大半径が存在し、これを r_s とする。気液界面は r_s の半径を有する空隙に存在する。一般に、半径 r の円管における液状水に働く毛管力は以下のように表現される。

$$p_c = \frac{2\gamma}{r} \quad (5.23)$$

ここに、

γ : 表面張力

である。

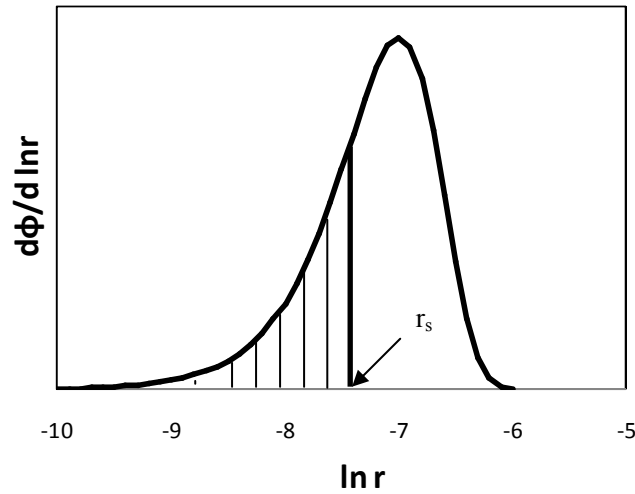


図 5.2 空隙構造と液状水が存在できる最大半径

コンクリートの空隙中において気液界面は r_s の部分に存在するため、空隙が多様に分布している空隙において毛管力は以下のように表現されるものとする。

$$p_c = \frac{2\gamma}{r_s} \quad (5.24)$$

次に、式 (5.24) で表現された毛管力と飽和度の関連性について検討する。液状水飽和度は液状水が存在する最大半径 r_s を用いて以下のように表現される。

$$\begin{aligned} S_w &= \frac{\int_0^{r_s} \frac{d\phi(r)}{dr} dr}{\phi_0} \\ &= 1 - \exp(-Br_s) \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{2\gamma}{p_c}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{2\gamma}{p_g - p_w}\right) \end{aligned} \quad (5.25)$$

なお、気体の飽和度は液状水の飽和度とともに式(5.3)によって関連づけられているので、以下の用に表現できる。

$$S_w = \exp\left(-\frac{2\gamma}{p_g - p_w}\right) \quad (5.26)$$

次に、式 (5.26) を用いて $C = \frac{dS_w}{dP_c}$ で表現される項を計算すると、

$$C = \frac{dS_w}{dP_c} = \frac{2\gamma B \exp\left(-\frac{2\gamma B}{p_c}\right)}{p_c^2} = \frac{2\gamma B \exp\left(-\frac{2\gamma B}{p_g - p_w}\right)}{(p_g - p_w)^2} \quad (5.27)$$

以上、式 (5.20) , (5.21) で表現される基礎方程式ならびに各ステップにおける飽和度は液状水ならびに空気の圧力によって関連づけることができた。

5.3.2 液状水と空気の移動係数

不飽和状態における細孔空隙中の液状水ならびに空気は、各々の流体の圧力差を駆動力として移動を行う。その移動量は式 (5.27) に規定される移動係数に支配されている。液状水によって飽和している半径 r の円管において、圧力勾配が存在する場合、3章における検討より以下の速度則式が成立する。

$$v_w(r) = -\frac{r^2}{8\eta_w} \text{grad}(p_w) \quad (5.28)$$

ここに、

$v_w(r)$: 半径 r における流速
である。

また、ならびに空隙分布を規定する関数の微小区間における流束は以下のように表現できる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} J_w(r) &= -\rho_w \frac{d\phi(r)}{dr} v_w(r) \\ &= \rho_w \frac{d\phi(r)}{dr} \frac{r^2}{8\eta_w} \text{grad}(p_w) \end{aligned} \quad (5.29)$$

ここに、

$J_w(r)$: 半径 r における液状水の質量流速
である。

式 (5.29) を全ての空隙径に渡って全てを足し合わせることによって流束の式が得られる。

$$\begin{aligned}
 J_w &= \int_0^{r_s} \left\{ \frac{d}{dr} J_w(r) \right\} dr \\
 &= \int_0^{r_s} \left\{ \rho_w \frac{d\phi(r)}{dr} \frac{r^2}{8\eta_w} \right\} dr \times \text{grad}(p_w)
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

J_w : 液状水の質量流速
である.

また, 液状水の質量流速と流速は以下の関係を有する.

$$J_w = \rho_w q_w \tag{5.31}$$

式 (5.30) と式 (5.31) より, 液状水の流速は以下の表現できる.

$$q_w = \int_0^{r_s} \left\{ \frac{d\phi(r)}{dr} \frac{r^2}{8\eta_w} \right\} dr \times \text{grad}(p_w) \tag{5.32}$$

以上, 式(5.4)と比較して, 液状水の移動係数は, 以下のように表現できる.

$$K_w = \int_0^{r_s} \left\{ \frac{d\phi(r)}{dr} \frac{r^2}{8} \right\} dr \tag{5.33}$$

同様に, 気体の移動係数は, 以下のように表現できる.

$$K_g = \int_{r_s}^{\infty} \left\{ \frac{d\phi(r)}{dr} \frac{r^2}{8} \right\} dr \tag{5.34}$$

以上規定した移動係数は, ハーゲンポアズイユ流理論に基づく流速によって算出された式である. 第3章で提案した非ニュートン流体力学に基づく液状水移動モデルの, 不飽和コンクリートへの適用については, 後の節で述べることとする.

5.3.3 水蒸気と乾燥空気の移動則

前節では、水蒸気を含む気体の圧力と、液状水の圧力を算出する基礎方程式群の算出ならびに、各飽和度とこれらの圧力の算出方法について述べた。気相には乾燥空気と水蒸気で構成される。本節では空気に含まれる水蒸気と乾燥空気の挙動を検討する。水蒸気と乾燥空気の体積変化ならびに質量変化などを評価するためには、空気に含まれる気体の各状態量を規定する必要がある。前節の検討によって各ステップの空気の圧力が算出される。空気は水蒸気と乾燥空気から構成されると仮定しているため、各分圧は水蒸気と乾燥空気のかく密度に比例して、分配される。また、各気体は厳密に状態方程式に従うため、分圧が算出されると、各状態量を把握することができる。水蒸気圧は気液界面における熱力学的平衡の条件を表現する Kelvin 式によって以下の関係が成立している。

$$\ln \frac{p_v}{p_{v0}} = -\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L} \frac{1}{r_s} \quad (5.35)$$

ここに、

p_v : 水蒸気分圧

p_{v0} : 飽和水蒸気圧

M_w : 水の分子量

R : 気体定数

T : 絶対温度

である。

本 (5.35) 式によって、各ステップにおける水蒸気圧は以下のように表現される。

$$p_v = p_{v0} \exp\left(-\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L} \frac{1}{r_s}\right) \quad (5.36)$$

$$p_g = \rho_g \frac{RT}{M_g} \quad (5.37)$$

$$p_a = \rho_a \frac{RT}{M_a} \quad (5.38)$$

$$p_v = \rho_v \frac{RT}{M_v} \quad (5.39)$$

ここに,

p_g : 気相の全圧
 p_a : 乾燥空気に分圧
 p_v : 水蒸気に分圧
 ρ_g : 気相の密度
 ρ_a : 乾燥空気の密度
 ρ_v : 水蒸気の密度
 M_g : 混合気体の平均分子量
 M_a : 乾燥空気の平均分子量
 M_v : 水蒸気の分子量
 である.

また気相の全圧と乾燥空気と水蒸気に分圧は以下の関係を有する.

$$p_G = p_A + p_V \quad (5.40)$$

式 (5.40) によって水蒸気に分圧が計算できるので, 式 (5.40) によって水蒸気の密度が以下のように計算できる.

$$\rho_V = p_V \frac{M_V}{RT} \quad (5.41)$$

また, 式 (5.40) と式 (5.41) より, 乾燥空気に分圧は以下のように表現できる.

$$p_A = p_G - p_V \quad (5.42)$$

式 (5.42) より, 乾燥空気の密度が以下のように計算できる.

$$\begin{aligned} \rho_a &= p_a \frac{M_a}{RT} \\ &= (p_g - p_v) \frac{M_a}{RT} \end{aligned} \quad (5.43)$$

以上, 乾燥空気と水蒸気に分圧が求められた. 前々節では気相と液相の相互運動について述べた. 本節で論じるのは, 気相内における乾燥空気と水蒸気の相互運動である. 水蒸

気、乾燥空気の移動現象は、両者を含む気相の移動、つまり移流によって起こる現象と、水蒸気圧ならびに乾燥空気の圧力差を駆動力とする拡散現象の2種から構成される。はじめに、移流について検討する。

気相全体の運動を記述する量として、次式で定義される気相の質量中心速度を考える。

$$v_n = \frac{\rho_a v_a + \rho_v v_v}{\rho_a + \rho_v} \quad (5.44)$$

ここに、

v_m : 気相の質量中心速度

である。

固定座標に対する各成分気体の運動は、上式で表される気相の質量中心の運動と、気相の質量中心に対する着目成分の相対的な運動の組み合わせにより記述することができる。核成分気体の流速は結局、それぞれ次のように表される。

$$J_a = \frac{\rho_a}{\rho_g} J_g + J_{am} \quad (5.45)$$

$$J_v = \frac{\rho_v}{\rho_g} J_g + J_{vm} \quad (5.46)$$

ここに、

J_a : 乾燥空気の質量流束

J_v : 水蒸気の質量流束

J_g : 気相全体の質量流束

J_{am} : 気相の質量中心に対する乾燥空気の質量流束

J_{vm} : 気相の質量中心に対する水蒸気の質量流束

である。

また、質量流束と流速の関係は以下のように表現できる。

$$J_a = \rho_a q_a \quad (5.47)$$

$$J_v = \rho_v q_v \quad (5.48)$$

$$J_g = \rho_g q_g \quad (5.49)$$

また2式右辺第2項の気相の質量中心に対する各成分気体の相対流束は、独立ではなく次の関係がある。

$$J_{am} + J_{vm} = 0 \quad (5.50)$$

本関係は、 J_{AM} と J_{VM} は一方がある方向に移動するとき、同じ質量の他方の成分が逆方向に移動する現象、つまり相互拡散現象を示していることに他ならない。本研究において乾燥空気と水蒸気との相互拡散に、質量分率勾配を基準としたFickの第1法則[18]を適用すれば次のようになる。

$$J_{vm} = -\rho_g D_{v0} \text{grad} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \quad (5.51)$$

以上、水蒸気の移動則、ならびに乾燥空気の移動則は以下のように表現できる。

$$J_a = \rho_a q_g - \rho_g D_{v0} \text{grad} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \quad (5.52)$$

$$J_v = \rho_v q_g + \rho_g D_{v0} \text{grad} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \quad (5.53)$$

5.3.4 液状水に対する提案モデルの適用

第2章において、飽和コンクリートにおける液状水に対し、非ニュートン流体モデルを適用し、解析を行ったところ、その手法が妥当であるとの結果を得た。本節においては液相に本モデルを適用手法について説明する。はじめに、液状水の降伏値の適用について検討を行う。

半径 r の円管が液状水で飽和している場合、壁面に働くせん断応力は以下の式で表される。

$$\tau = -\frac{r}{2} \text{grad}(p_w) \quad (5.54)$$

ここに、 τ : 壁面に働くせん断力である。

3章で提案したモデルでは、壁面に働くせん断力 τ がせん断降伏値 τ_0 を上回らないと流動しないというモデルを構築し、非ダルシー性の表現に成功した。気相の影響を考慮する本解析においても同様の特性を有するとして、半径 r の円管内の液状水が流動する条件

は以下の式で表現される.

$$\tau > \tau_0 \quad (5.55)$$

また, $\tau = \tau_0$ となる空隙半径を r_0 とすると, 以下の式で表現できる.

$$r_0 = -\frac{2\tau_0}{\text{grad}(p_w)} \quad (5.56)$$

式 (5.55) と式 (5.56) 壁面に働くせん断力 τ がせん断降伏値 τ_0 を上回らないと流動しないという現象は, 半径が r_0 以下の半径では流動が起こらないと換言することができる. つまり, 液状水は, 空隙半径が r_0 から r_s までに存在する影響水のみが移動できることになる. 本現象を液状水の移動係数として表現すると, 以下の式となる.

$$K_w = \int_{r_0}^{r_s} \left\{ \frac{d\phi(r)}{dr} \frac{r^2}{8} \right\} dr \quad (5.57)$$

降伏値の概念の適用に関する検討は以上である. 次に透水現象を支配する液状水の粘性に対する速度依存モデルの適用について検討する. 第3章において, 液状水の粘性に対して以下の定式化を行った.

$$\eta_w = \eta_{w0} \left(\frac{V}{H} \right)^{\frac{a}{H}} \quad (5.58)$$

本式から管径 r の流量は以下のように表現できる.

$$Q = -\frac{\pi}{8\eta_{w0}} \left(-\frac{dp}{dz} \right)^\alpha r^{4+\beta} \quad (5.59)$$

本式より, 移動係数ならびに式 (5.20) 右辺は以下のように書き換えられる.

$$K_w = \int_{r_0}^{r_s} \left\{ \frac{d\phi(r)}{dr} \frac{\pi}{8\eta_{w0}} r^{2+\beta} \right\} dr \quad (5.60)$$

$$\phi_0 C \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_w}{\rho_w} \right) \left(\frac{\partial P_w}{\partial x} \right)^\alpha \quad (5.61)$$

5.3.5 数値計算手法

以上、不飽和コンクリート中の水分移動ならびに気体移動を支配する現象の定式化が完了した。本節では、電子計算機で計算可能となるために必要な離散化手法について述べる。計算領域は一次元とし、時間に関する離散化には、前進差分を、座標に関する離散化には、中心差分を用いることとする。

解析対象は、第1章に示した大型供試体における透水試験である。なお、解析対象とした流れはにおける流れは一次元方向への流動であり、液状水は流動→停止の挙動のみであるので、第3章で決定した停止動水勾配 $\tau_0 = 0.2(\text{N/m})$ を採用した。以下設定条件を挙げる。

設定条件として、供試体厚：1m，コンクリートの空隙構造は第3章で示した気中養生を施した W/C=45% のペースト供試体における粗大な空隙を参考とし、全区間一様に $\phi=0.10$ ， $B=2 \times 10^6$ とした。初期条件として、全区間飽和度 =90% を設定する。

境界条件としては、注入側を水分飽和度 100%，水圧 0.25MPa，気相の圧力を水圧と等しい 0.25MPa とした。また、排出側は、相対湿度 70% とした場合において、計算されるコンクリート中の飽和度の値を採用した。

5.4 提案モデルの妥当性の検証とコンクリートの遮蔽性能評価

5.4.1 修正降伏値モデルを用いない場合の解析

図 5.3 に、修正降伏値モデルを用いずに、粘性空隙径依存モデルのみを用いた場合における解析結果を、図 5.4 に 5.5 年次に測定された飽和度分布の結果と解析結果を示す。なお、本解析は、微小空隙中の粘性増加の影響を加味する既往の熱力学連成水分移動解析と同じ水分移動則に基づいていることとなる。飽和度が急低下する位置を浸潤位置と仮定すると、5.5 年後においておおよそ浸潤位置は 20~30cm の辺りに存在し、浸潤位置が 6cm である実験結果を相当に過大評価することとなった。またおおよそ 100 年後には液状水の飽和度分布が定常状態に至っていることから、加圧面からの注水と排水面からの水分逸散が平衡状態に達しており、この状況からは排水面側から水分が液状水として流出することはないと考えられる。ただし、液状水の浸潤は定常状態に至るまで停止しておらず、採取コアの割裂による目視によって確認された、液状水の停止の再現には至っていない。

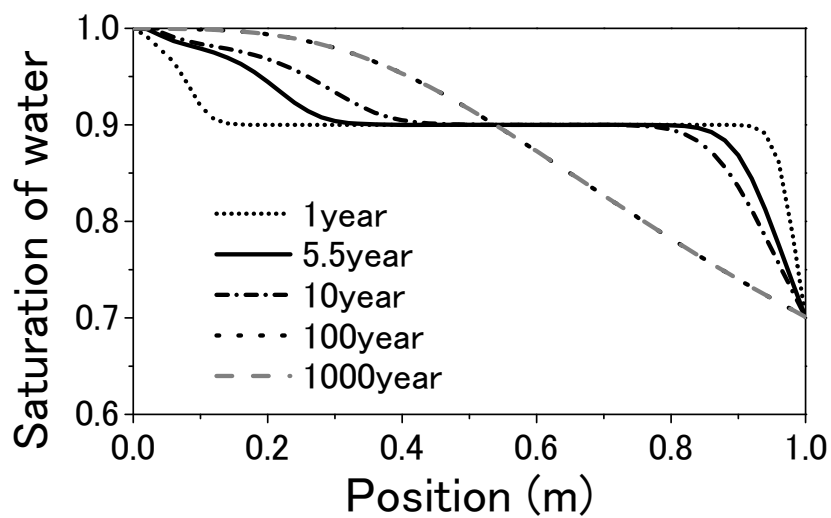


図 5.3 修正降伏値モデルを用いない場合における水分飽和度分布の解析結果

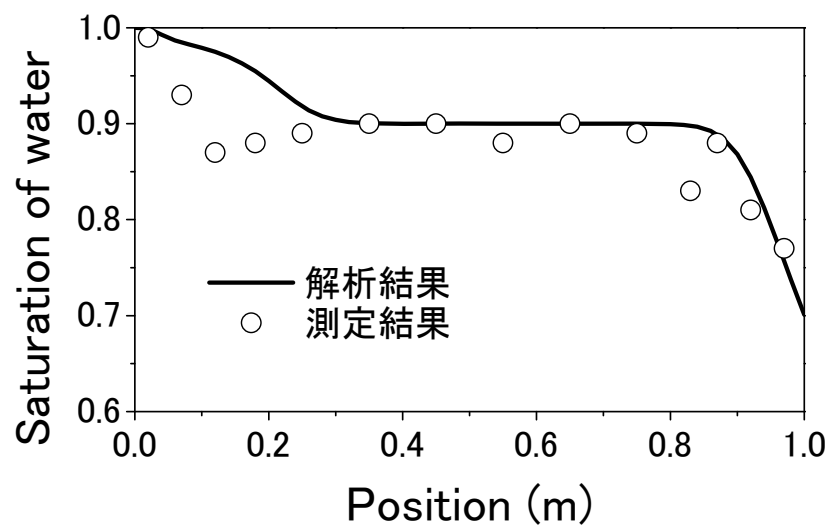


図 5.4 修正降伏値モデルを用いない場合における解析結果と測定結果 (5.5 年次)

5.4.2 修正降伏値モデルを用いた解析

図 5.5 に修正降伏値モデルを用いた場合における水分飽和度分布を、図 5.6 に 5.5 年次における水分飽和度の測定結果と解析結果を示す。

降伏値モデルおよび粘性速度依存モデルを液状水に適用したことにより、液状水の浸潤が若干押さえられている。採取コアによる浸潤位置観察より、液状水は6cmの位置で停止しており、液状水の停止位置から水蒸気移動が卓越することにより浸潤面がぼやけていることが確認された。本解析では水分移動として液状水移動と水蒸気移動を考慮しており、水分飽和度の漸増が両者いずれかの寄与かは区別できない。そこで、水蒸気項を無視した解析を行い、液状水移動のみの水分飽和度の変化への寄与についての抽出を行う。図 5.7 に本解析の水分飽和度分布の将来予測を示す。

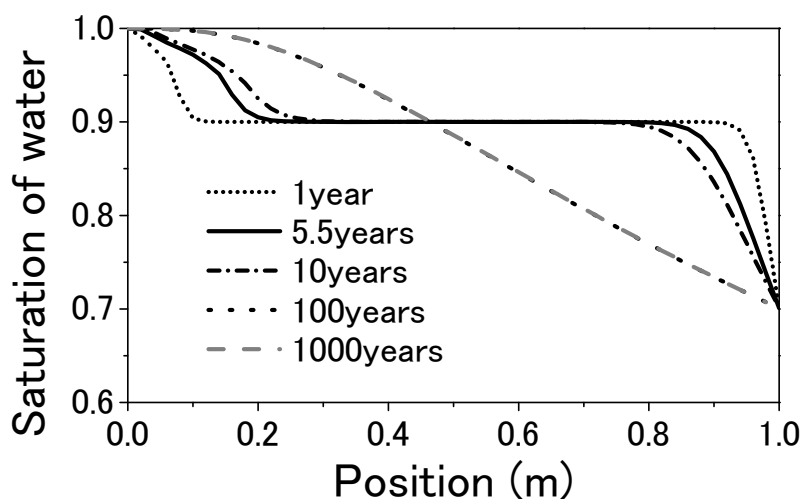


図 5.5 修正降伏値モデルを用いた場合における水分飽和度分布の解析結果

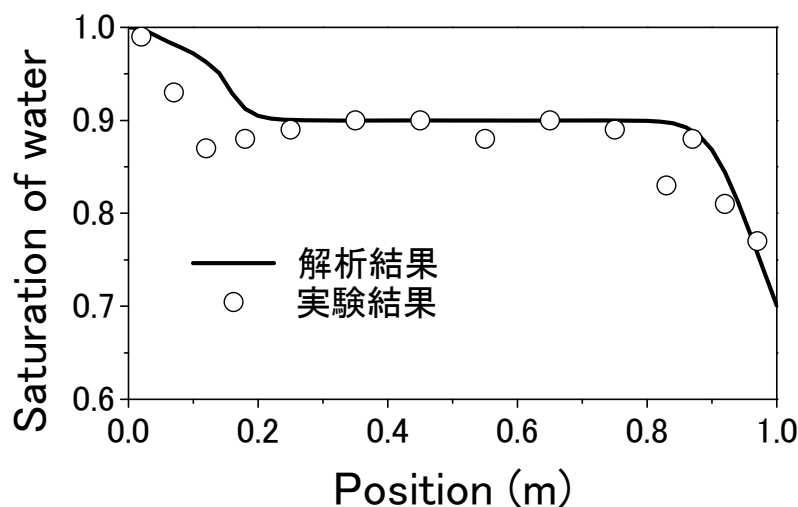


図 5.6 修正降伏値モデルを用いた場合における解析結果と測定結果 (5.5 年次)

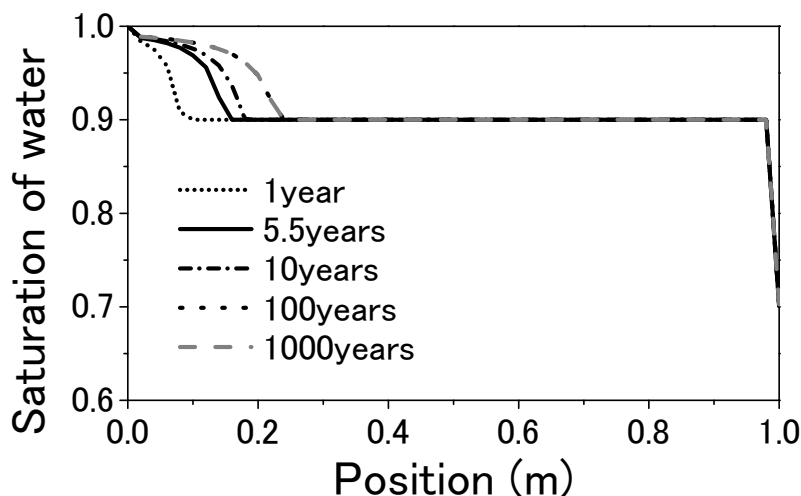


図 5.7 修正降伏値モデルを用いた場合における解析結果と測定結果（水蒸気項無視）

経時的に液状水の浸潤は確認されるものの、100年後においては液状水の浸潤が停止しており、液状水が停止すると言ったコアの観察結果を再現できていることが解析によって確認された。つまり、水蒸気項を考えた場合、およそ100年経過までは液状水移動と水蒸気移動両者が卓越し、およそ100年後程度で液状水は停止し、それ以降は水蒸気移動のみが確認されると考えられる。これにより、液状水の浸潤面が判然としないといったコアの目視結果とも整合し、本解析は時間スケールを不問とした場合に限りて妥当なものであることが確認された。ただし、図 5.5 の示す飽和度分布の結果は実験値を過大評価している。これは、本計算に適用した修正降伏値モデル、ならびに速度依存性を司るパラメータには第3章で決定したコンクリートの物性を用いており、本解析の対象としている大型供試体に用いられた物性と異なることに起因していると考えられる。第3章で検討したコンクリートには普通ポルトランドセメントを用いたのに対して、本解析の対象としている大型供試体には低熱ポルトランドセメントが用いられている [14]。第2章で行った検討により、壁面の水酸化カルシウム量によって透水量が大きく変化すること、ならびに第3章で行ったレオメータによる試験よりプレートの種類によって粘性挙動が変わることから、用いたセメントの種類の違い、つまりセメントの鉱物組成が液状水挙動に大きな影響を及ぼすことは明白であると考えられる。そこで本供試体から採取されたコアを用いて空隙構造の同定、ならびに飽和透水試験を行うことにより液状水挙動パラメータを同定した後に、再び解析を行うこととする。

5.4.3 低熱ポルトランドセメントを用いた供試体における透水特性

図 5.8 にパラメータ修正前、修正後それぞれの飽和透水試験結果を示す。

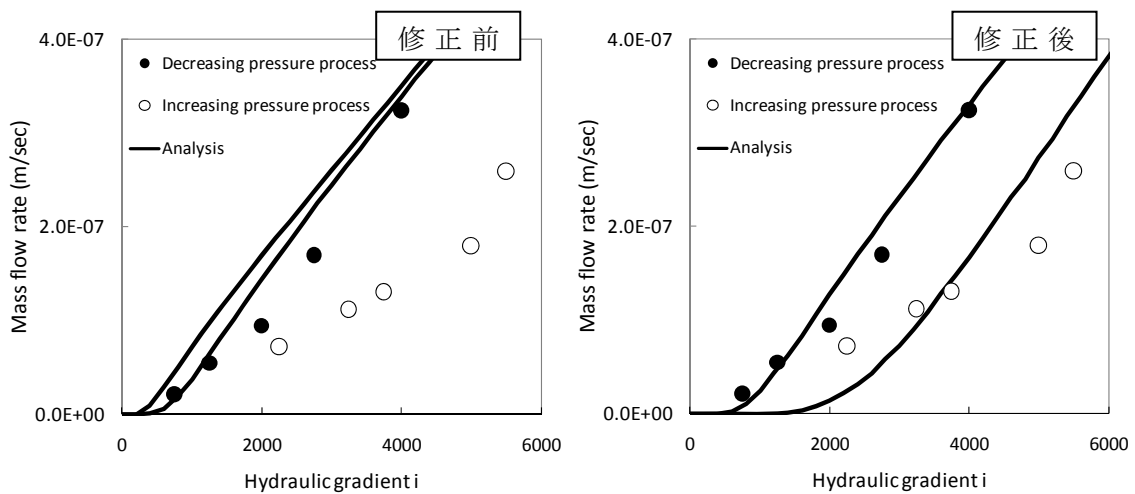


図 5.8 パラメータ修正前と修正後の飽和透水試験の解析結果

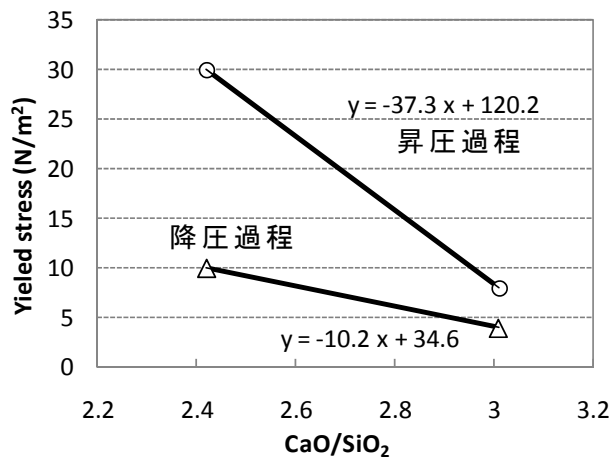


図 5.9 Ca/Si 比と降伏値パラメータの関係

降伏値モデルのパラメータ：

$$\tau_0 = 4N/m^2 \quad (\text{降圧過程, 停止動水勾配を表現}) \quad \rightarrow \tau_0 = 10N/m^2$$

$$\tau_0 = 8N/m^2 \quad (\text{昇圧過程, 始動動水勾配を表現}) \quad \rightarrow \tau_0 = 30N/m^2$$

粘性挙動モデルのパラメータ：

$$\alpha = 1 \quad \rightarrow \alpha = 1$$

$$\beta = 0.2 \quad \rightarrow \beta = 0.2$$

また、図 5.9 にセメントの Ca/Si 比で修正降伏値モデルのパラメータの値を整理したグラフを示す。2点のみで直線回帰を行ったものではあるが、図中の関係式を用いることによって、任意の Ca/Si のセメントに対するパラメータの外挿が可能である。以上のパラメ

ータを用いて再び不飽和コンクリートの計算を行った。

5.4.4 パラメータの修正後の解析

図5.10に、修正降伏値モデルを用いずに、粘性空隙径依存モデルのみを用いた場合における解析結果を、図5.11に5.5年次に測定された飽和度分布の結果と解析結果を示す。修正前の解析よりも水分飽和度の増加速度が減少していることが確認できる。また、図5.11に示す5.5年次の解析値は、若干の乖離が確認されるものの、修正前よりも精度良く飽和度分布を再現していることが確認される。また、図5.12にパラメータ修正後のモデルにおいて水蒸気項を無視した場合の解析結果を示す。5.5年後においておよそ液状水が浸潤停止に至っており、割裂コアの観察結果とほぼ同様の結果を得ることとなり、本提案モデルは気相の影響を考慮した不飽和透水現象を定量的に評価できているものと考えられる。

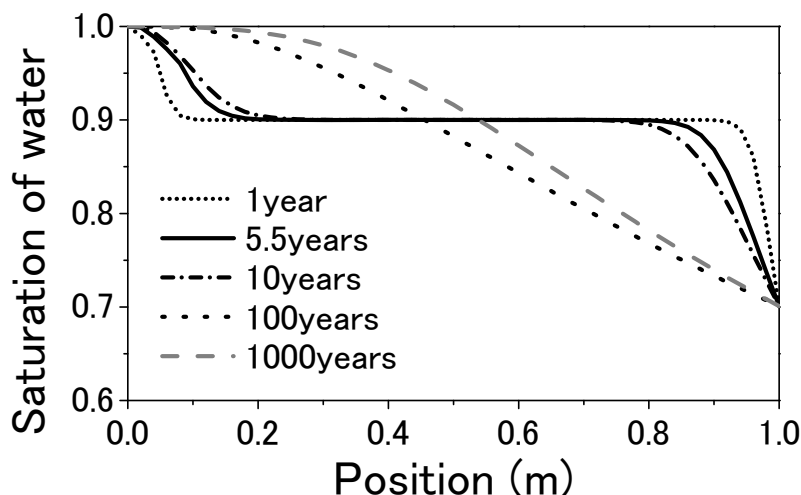


図 5.10 パラメータ修正後の水分飽和度分布の解析結果

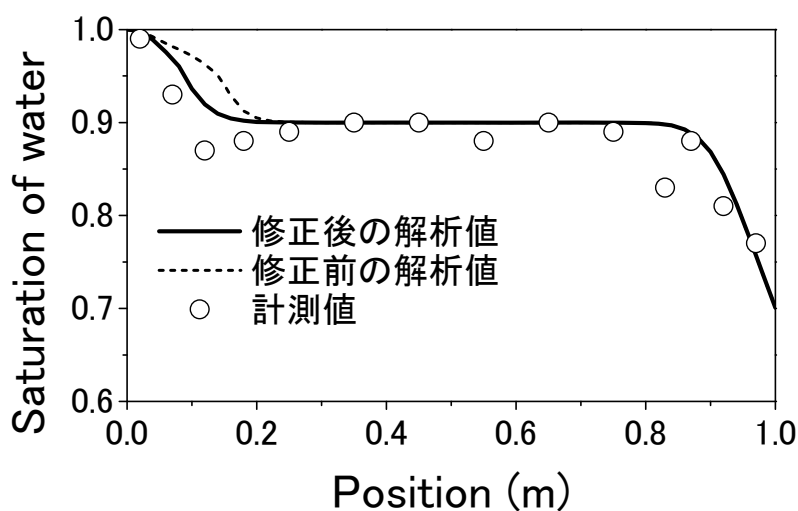


図 5.11 パラメータ修正後の解析結果と測定結果 (5.5 年次)

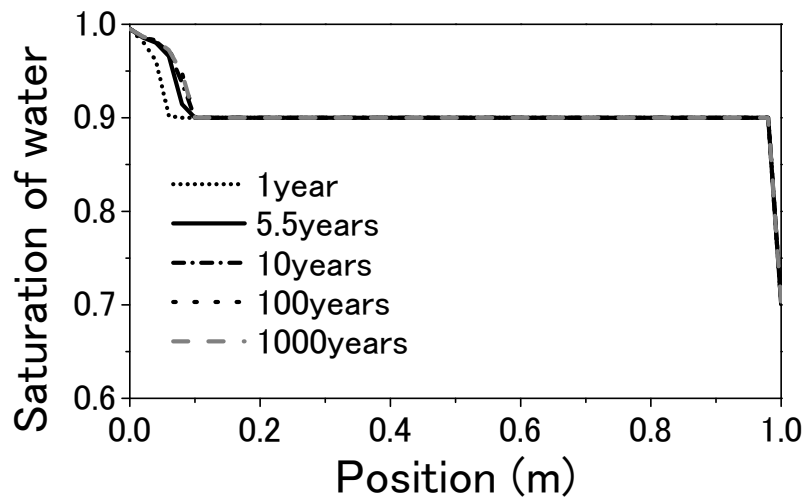


図 5.12 パラメータ修正後の水分飽和度分布の解析結果 (5.5 年次)

5.4.5 実際の運用状況を模擬した解析

図 5.13 に示すように、実際の供用状態は、コンクリートの施設内に廃棄物パッケージ，ならびに充填モルタルで充填されている．つまり，内部に封入された空気の逃げ場はなく，計算条件においては，排出側を封緘状態にある場合が実際の供用状態を模擬した場合の計算が必要である．ただし，既往の計算結果では気相における乾燥空気分圧を考慮していないために，図 38 のように気相が消失してしまうという結果となる．本解析モデルにおいても，式 (5.21) の左辺第 1 項，ならびに式 (5.22) を無視すると，空気分圧の影響を無視した解析になる．その解析モデルに基づく計算結果を図 5.14 に示す．

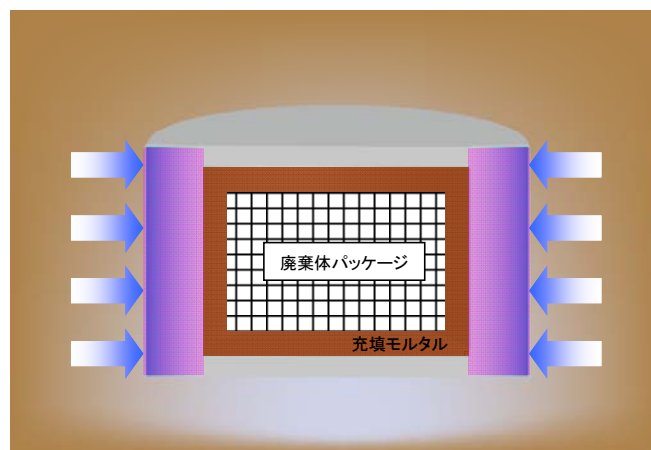


図 5.13 実際の運用状況

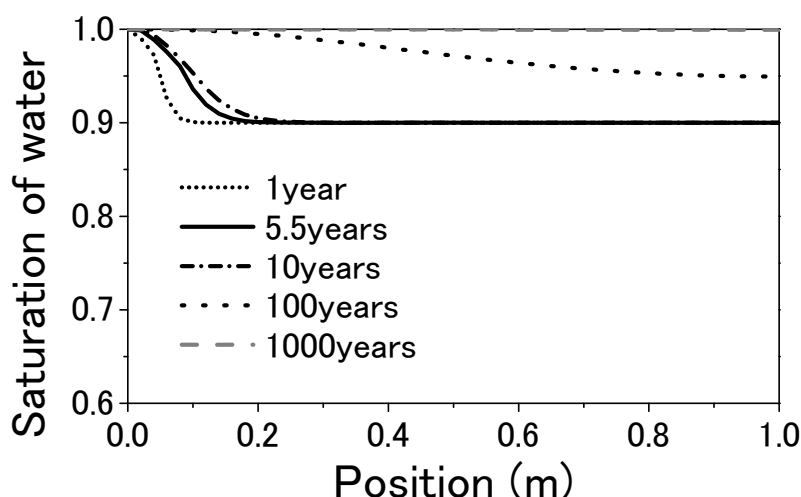


図 5.13 気相を考慮しない場合の解析結果

なお，排出側を封緘した場合における境界条件は，ノイマン条件においてあらゆる状態量のフラックスを外部に許容しないという以下の式で表現する．

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} \quad (5.63)$$

ここに，

- α : 任意の状態量
- n : 排出部のメッシュ座標

である．

時間の経過とともに空間の飽和度が増加し，1000年後には空間が全て飽和することとなる．空間内には乾燥空気が存在しており，水蒸気が乾燥空気と置換しない限り飽和しないはずであるが，本計算結果は再現に至っていない．本研究が提案する解析モデルでは気相の分圧を考慮している．その計算結果を図 5.14 に，拡大図を図 5.15 に示す．徐々に水分の浸潤するものの，空気が封緘されることにより，液状水の浸潤に伴う空気の圧縮によって気圧が高められ，液状水の浸潤が押さえられている．また，ある一定の値までに気圧が高められることによって気相の圧力があがることすら許容していない状況が再現されている．これにより，気相の圧力が増加することによって水蒸気分圧が上昇し，液状水に凝縮，水蒸気圧が減少するが，再び気圧高まりによって水蒸気圧が上昇し，凝縮するといった一連の過程を乾燥空気を考慮することによって再現に至ったものと考えている．以上より，実際の供用状態を模擬した場合，つまり乾燥空気を封入できる状況を再現することができれば，元来高い遮蔽性能を有するコンクリート構造物に，さらなる遮蔽性能を付与させることができるものと考えられる．

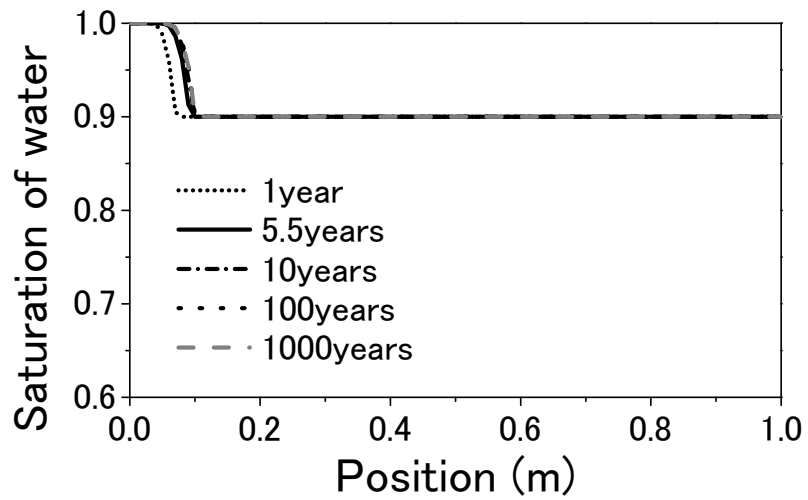


図 5.14 気相を考慮した場合の解析結果

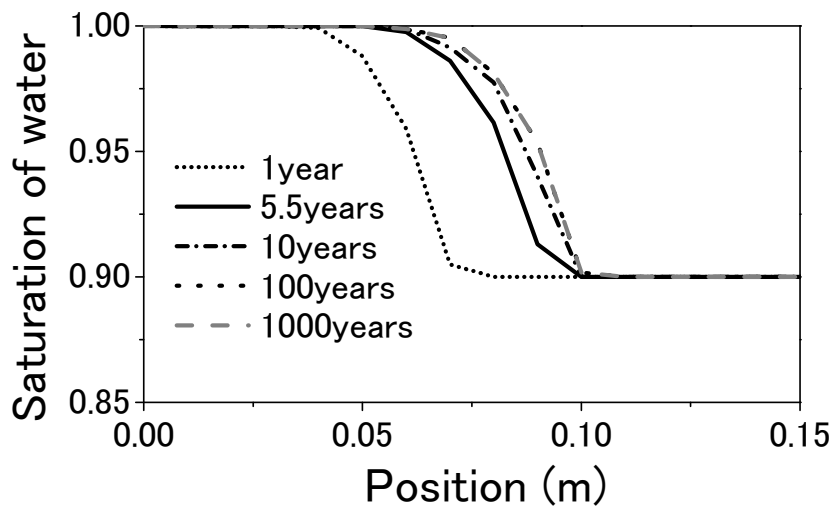


図 5.15 気相を考慮した場合の解析結果（拡大図）

第5章の参考文献

- [1] ウィリアム・ジュリー, ロバートホーン: 土壌物理学, 築地書館, 2006
- [2] 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和 - 不飽和浸透流の解析, 土木学会論文集, 第264号, pp.87-96, 1977
- [3] 佐藤邦明: 間隙空気の圧縮を伴う鉛直浸透に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第216号, pp21-28, 1973
- [4] 高木不折, 森下忠司: 2相流としての不飽和鉛直浸透解析, 土木学会論文報告集, 第271号, pp37-54, 1978
- [5] 齋藤雅彦, 川谷健: 間隙内空気の運動を考慮した数値シミュレーションによる雨水浸透・浸出過程に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.865-872, 2003
- [6] 恩田亮介, 透水性からみたかぶりの品質評価とブリーディング水を利用した給水養生の可能性, 芝浦工業大学卒業論文, 2007
- [7] Koichi Maekawa, Rajesh Chaube, Toshiharu Kishi: MODELLING OF CONCRETE PERFORMANCE, E&FN, 1999
- [8] 前川宏一, 岸利治, Chaube, R.P, 石田哲也: セメントの水和発熱・水分移動・細孔構造形成の相互連関に関するシステムダイナミクス, セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学会, pp45-52, 1995
- [9] 朱銀邦, 細孔内水分の熱力学的状態量に基づくコンクリートの複合構成モデル, 東京大学学位論文, 2003
- [10] 丸山一平, 野口貴文, 松下哲郎: 水和反応モデル (CCBM) によるポルトランドセメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇予測, 日本建築学会構造系論文集, No.600, pp. 1-8, 2006
- [11] 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及び湿度分布の予測, 日本建築学会構造系論文集 第609号, pp1-8, 2006
- [12] 木全博聖, 大下英吉, 田辺忠顕: 不飽和コンクリート中の気相・液相の移動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, 1995
- [13] 下村匠, 細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 1993
- [14] 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成14年度低レベル放射性廃棄物処分技術調査処分高度化システム確証試験報告書, 2003
- [15] F.D.Meiri: Two-phase flow simulation of air storage in an aquifer, Water Resources Research, Vol.17, No.5, pp.1360-1366(1981)
- [16] S.Hoeg, H.F.Scholer, J.Warnatz: Assessment of interfacial mass transfer in water-unsaturated soils during vapor extraction, Journal of Contaminant Hydrology, 74, pp.163-195, 2004

- [17] C.C.Tsakiroglou , D.G.Avraam, A.C.Payatakes : Transient and steady-state relative permeabilities from two-phase flow experiments in planar pore networks, *Advances in Water Resources* , Vol.30 , pp.1981-1992 , 2007
- [18] 小宮山宏 : 速度論, 朝倉書店, 1990