

モルタルの乾燥程度および空隙構造が 液状水浸透特性に与える影響

鳥取大学大学院 金氏 裕也

1. 本研究の背景

1.1 コンクリート中の液状水の浸透と構造物の劣化との関係

鉄筋コンクリート構造物の主な劣化・損傷要因

- ・ 塩害
- ・ 中性化
- ・ アルカリ骨材反応
- ・ 凍害 etc.

↓ 鋼材腐食に着目した場合…

鋼材が腐食するためには、**鋼材への水分の供給**が必要不可欠である。

↓ 鋼材腐食の予測を行う場合…

コンクリート中を浸透する液状水の挙動を把握することは重要である。

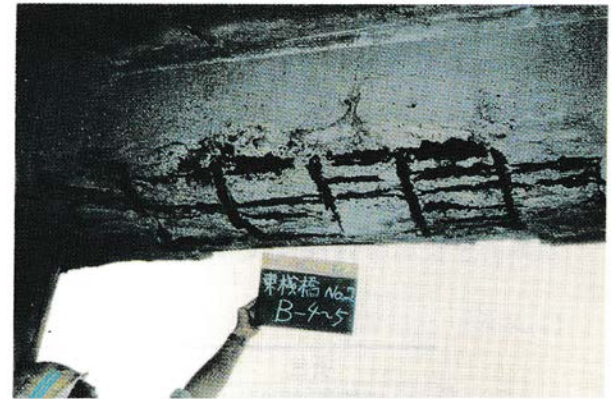


写真-1.1 塩害による鉄筋腐食

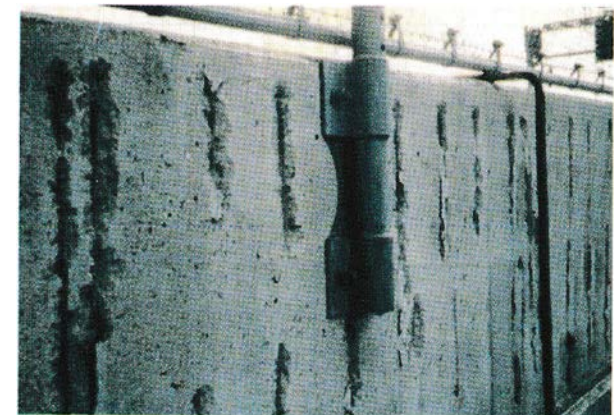


写真-1.2 中性化による鉄筋腐食

引用：2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]

1.2 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査

土木学会が規定する中性化による鋼材腐食の照査では、従来の中性化残りによる鋼材腐食の照査に加えて、水掛かり等による**コンクリート中の液状水の浸透**の影響も考慮されている。

3.1.3 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査

3.1.3.1 一般

(1) 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対して、鋼材腐食深さが設計耐用期間中に鋼材腐食深さの限界値に達しないことを確認することを、鋼材腐食に対する照査の原則とする。

(2) 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査を中性化深さを用いて行う場合には、中性化深さが設計耐用期間中に鋼材腐食発生限界深さに達しないことを確認することで、鋼材腐食に対する照査としてよい。

抜粋：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，p.150

1.2 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査

3.1.3.2 鋼材腐食深さに対する照査

鋼材腐食深さに対する照査は、鋼材腐食深さの設計値 s_d (mm)の、鋼材腐食深さの限界値 s_{lim} (mm)に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行うことを原則とする。

$$\gamma_i \cdot s_d / s_{lim} \leq 1.0 \quad (3.1.1)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数. 一般に、1.0~1.1としてよい.

s_{lim} : 鋼材腐食深さの限界値(mm). 構造物の重要性, 維持管理区分, 照査の不確実性や信頼性等を考慮して適切に設定する.

s_d : 鋼材腐食深さの設計値(mm). 一般に、式 (3.1.2) で求めてよい.

$$s_d = \gamma_w \cdot s_{dy} \cdot t \quad (3.1.2)$$

ここに、 γ_w : 鋼材腐食深さの設計値 s_d のばらつきを考慮した安全係数.

s_{dy} : 1年あたりの鋼材腐食深さの設計値(mm/年).

t : 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する耐用年数 (年). 一般に、耐用年数100年を上限とする.

1.2 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査

降雨の回数や継続時間等の構造物の立地条件を、特別検討しない場合は、一般に次式により S_{dy} (mm/year) を求めてもよいとされている。

$$S_{dy} = 1.9 \times 10^{-4} \cdot \exp \left\{ -0.068 \cdot (c - \Delta c_e)^2 / q_d^2 \right\} \quad (1)$$

Δc_e : かぶりの施工誤差 (mm)

q_d : コンクリートの水分浸透速度係数の設計値 (mm / hr^{1/2}), $q_d = \gamma_c \cdot q_k$

γ_c : コンクリートの材料係数, 一般に1.3としてよい

q_k : **コンクリートの水分浸透速度係数の特性値 (mm / hr^{1/2})**

1.2 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査

3.1.3.3 コンクリートの水分浸透速度係数の設定

コンクリートの水分浸透速度係数の特性値 q_k は、実験あるいは既往のデータに基づき、コンクリートの水結合材比および結合材の種類から推定される予測値 q_p を用いて設定してよい。

抜粋：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，p.152

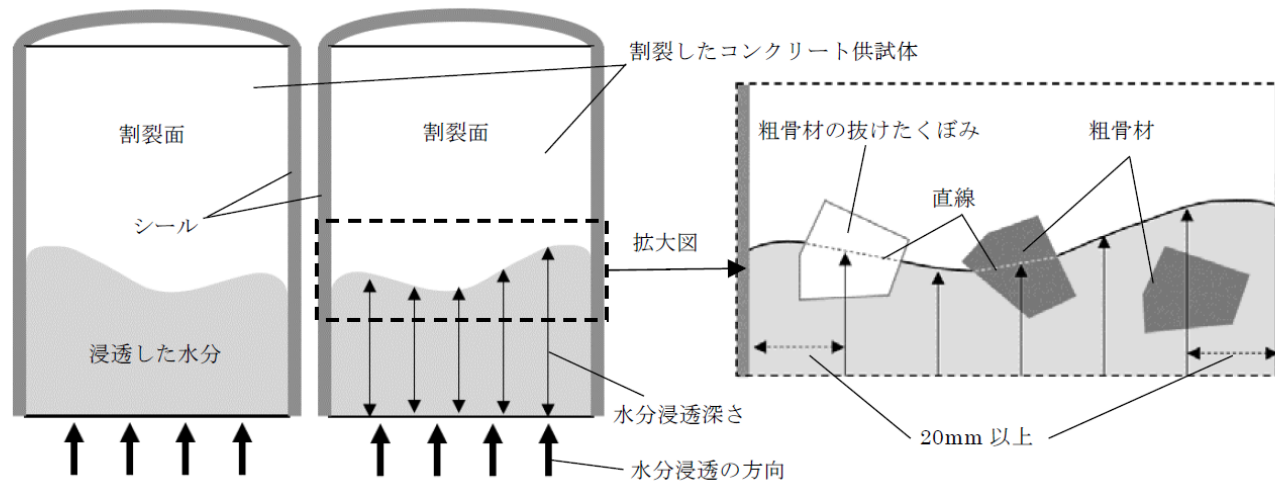
S_{dy} を予測する上で重要なパラメータである q_p は、実験（JSCE-G 582-2018）あるいは、次式に示す既往の実験結果を基に定められた経験式から推定してよいとされている。

$$q_p = 31.25 \cdot (W/B)^2 \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.60) \quad (2)$$

式(2)は結合材が、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種である場合に用いてよいとされ、水結合材比 W/B が0.40, 0.50, 0.60のコンクリートに対する実験から得られたものである。

1.2 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査

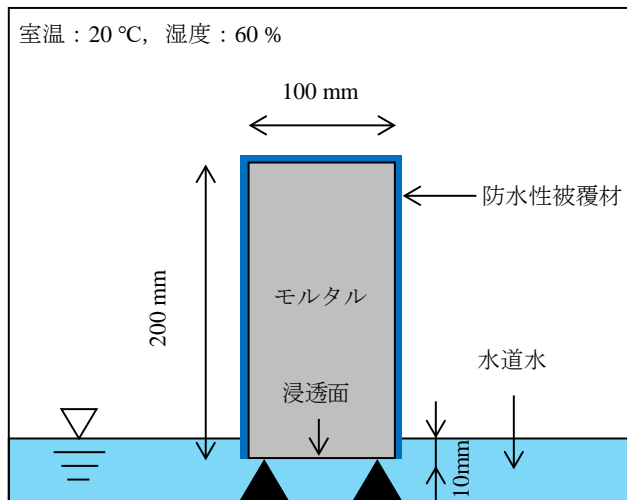
JSCE-G 582-2018では、降雨や一時的な水的作用などの**短期的な水掛かり**による**水分浸透**を想定しており、所定の養生後、室内で91日間静置した後、浸漬試験を実施する。浸漬開始から5, 24, 48時間後（標準）に供試体を割裂して、現像剤を噴霧し割裂面から水分浸透深さを測定する。



抜粋：JSCE-G 582-2018

図-1.1 水分浸透深さの測定のために割裂した供試体の模式図

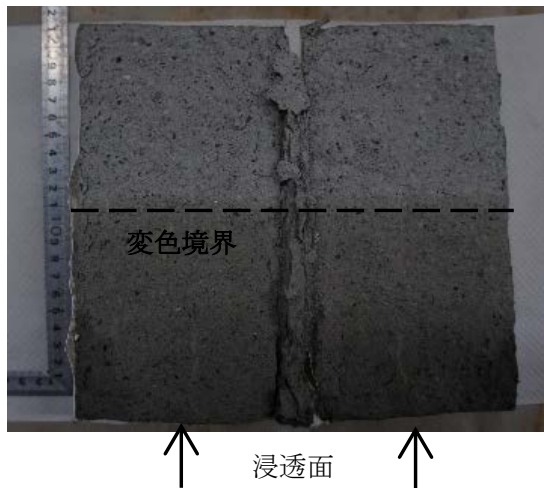
1.2 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査



(a) 浸漬試験概要図



(b) 浸漬試験状況



(c) 割裂断面



(d) 現像剤噴霧状況

図-1.2 浸漬試験の一例

1.2 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査



(a) 現像剤噴霧前

(b) 現像剤噴霧後

図-1.3 絶乾状態のモルタル (W/C=0.45) の水分浸透状況 (1日浸漬)

1.2 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査

水分浸透深さ L と浸漬時間 t の平方根は、以下に示す関係で近似できることが確認されている。

$$L = q_p \sqrt{t} + B \quad (3)$$

L : 水分浸透深さ (mm), B : 定数, t : 浸漬時間 (hr)

測定した L と t を用いて最小二乗法により q_p を定める。

$$q_p = \frac{\sum_{i=1}^N (\sqrt{t_i} - \overline{\sqrt{t}}) \cdot (L_i - \overline{L})}{\sum_{i=1}^N (\sqrt{t_i} - \overline{\sqrt{t}})^2} \quad (4)$$


$$B = \overline{L} - q_p \overline{\sqrt{t}} \quad (5)$$

N : データ数, L_i, t_i : それぞれ i 番目のデータの浸透深さと浸漬時間

1.2 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査

留意点として…

S_{dy} は、中性化が進行しつつ、鋼材位置に水と酸素の供給が繰り返されることにより鋼材腐食が少しずつ進行すると考えて設定されたものである。

 したがって…

実環境下で鋼材位置への水の供給が大きい場合には、腐食速度が式(1)より大きくなる、すなわち危険側の設計になる可能性がある。

 そこで…

設計では、実際の環境条件を再現した実験・計測や、同条件を有する実構造物の劣化状況を十分な把握し、**実現象を反映させた予測式**を用いる必要がある。

1.3 コンクリートの液状水浸透特性に関わる要因

液状水浸透に関わる主な要因

- 降雨による雨水の直接的な影響や構造物表面の漏水の影響
- 結露による水の影響（立地条件）
- コンクリートの乾燥の影響
- 経年劣化や初期欠陥等によるコンクリートの表層の空隙構造の変化
etc.



本研究では、**コンクリートの乾燥の影響**と**コンクリート表層の空隙構造の変化**が液状水の浸透特性に与える影響に着目をした。

1.4 本研究の目的

<問題提起>

- コンクリート構造物の鉄筋腐食の発生時期を予測するためには、コンクリート中の液状水の浸透を精度よく予測する必要がある。
- 実際の環境条件を再現した実験・計測や、同条件を有する実構造物の劣化状況を十分な把握し、**実現象を反映させた予測式**を用いる必要がある。
- コンクリートの液状水浸透特性を把握するためには、**コンクリートの乾燥とコンクリート表層の空隙構造の変化**を考慮する必要がある



<研究目的>

本研究では、**コンクリートの乾燥とコンクリート表層の空隙構造の変化**を考慮した液状水浸透予測式を定式化することを目的とする。

2. コンクリート中の液状水浸透に関する実験的考察

2.1 液状水浸透特性を把握するための実験

予測式を定式化するために、実験によりコンクリートの液状水浸透に関する基本的な性質を把握する必要がある。



本研究では、まずモルタル硬化体中を浸透する液状水に着目し、**液状水へのモルタルの浸漬試験**により、モルタル中の液状水浸透特性を把握することを目的とする。

2.2 モルタルの液状水浸漬試験

モルタルの液状水浸透特性に影響を与えるモルタルの物性は以下のものが挙げられる。

水セメント比 (W/C)

W/Cが小さい程，モルタルの空隙は緻密な構造となるため，モルタル中の**液状水の浸透速度は小さくなる**。

乾燥程度

モルタルの含水量が大きい程，モルタルの空隙に存在する液状水（内在水）が多くなるため，気体の排出速度は低下し，それに伴い**液状水の浸透速度は小さくなる**と考えられる。

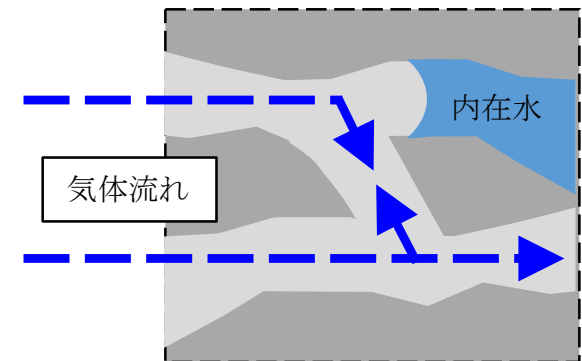


図-2.1 気体の排出機能の低下
(内在水の影響)

2.2 モルタルの液状水浸漬試験

試験条件

コンクリートの乾燥とコンクリート表層の空隙構造の変化がモルタルの液状水浸透特性に与える影響を把握するために、以下の条件を設定した。

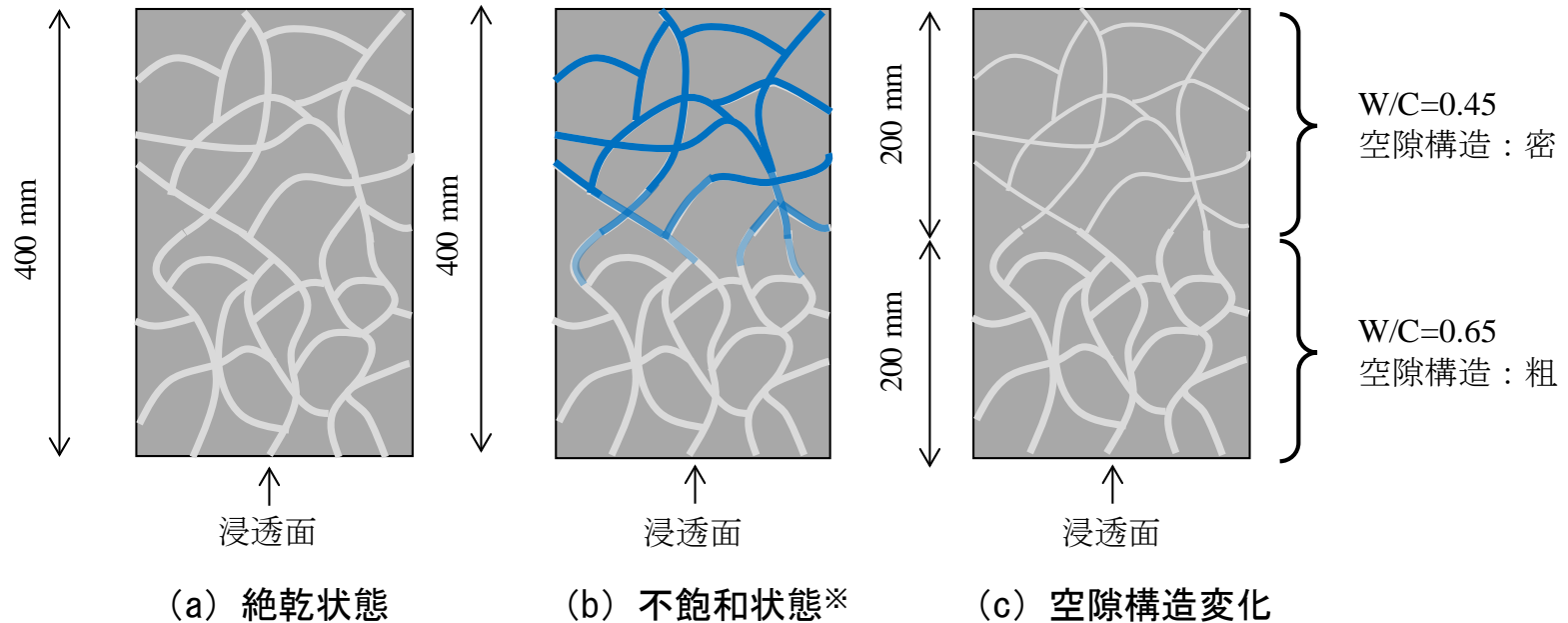


図-2.2 モルタルの乾燥および空隙構造の状態 ※現在、詳細な定義を検討中

2.2 モルタルの液状水浸漬試験

試験概要

表-2.1 試験条件

W/C	0.45, 0.65, 0.65-0.45
$\phi \times L$ (mm)	100 × 400
浸漬期間	12時間, 1日, 2日, 3日, 7日, 14日
液状水	水道水

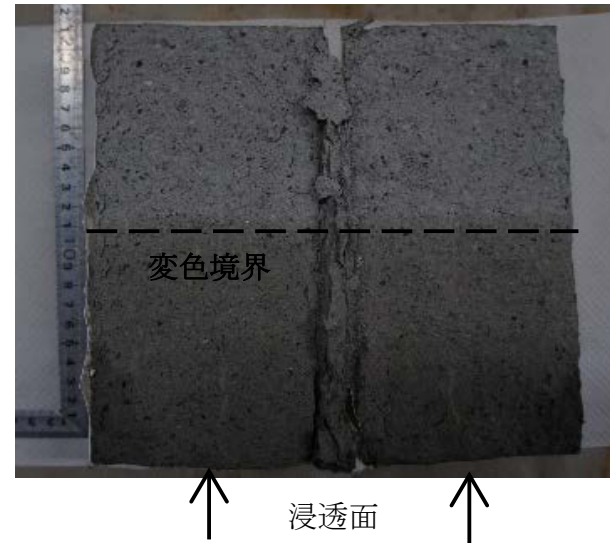


図-2.3 割裂断面

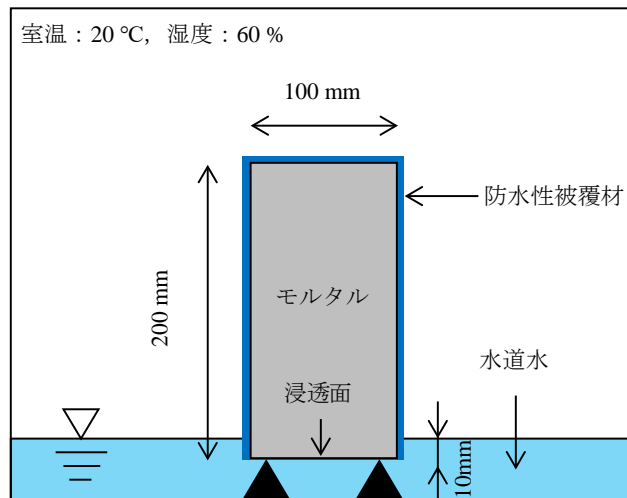


図-2.4 液状水浸漬試験概要



図-2.5 浸漬試験状況

2.2 モルタルの液状水浸漬試験

測定データ

(1) 飽和度

浸漬試験後のモルタルを図-2.6に示す15 mm厚の試験片に切断し，各試験片の飽和状態における水分量と浸漬試験後の水分量から飽和度を算出する。

$$S_r = \frac{m_a - m_d}{m_s - m_d} \times 100 \quad (6)$$

S_r : 飽和度, m_a : 浸漬試験後の試験片の質量,

m_d : 絶乾状態の試験片の質量, m_s : 飽和状態の試験片の質量

(2) 浸透高さ測定

モルタルの割裂面に現像剤を噴霧し，変色部を測定する（供試体3本平均）。

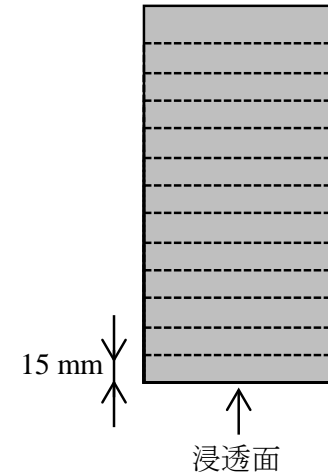


図-2.6 モルタルの切断位置



図-2.7 現像剤噴霧状況

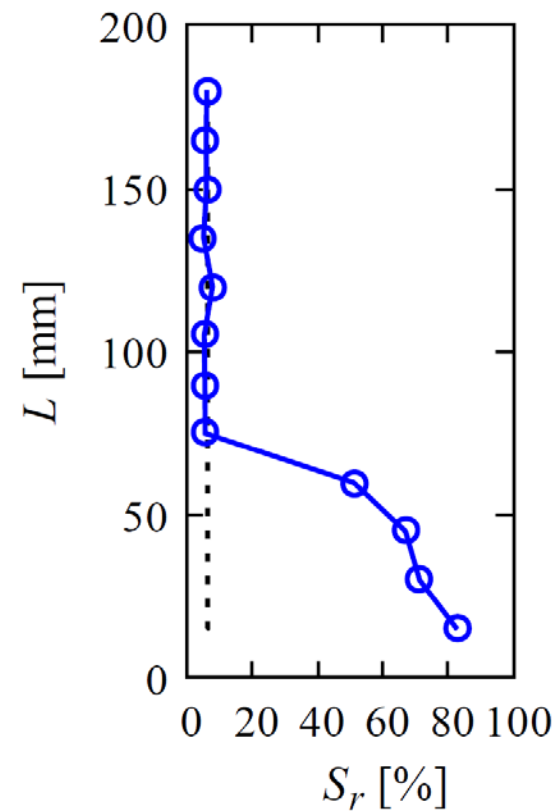
2.2 モルタルの液状水浸漬試験

測定結果



(a) 浸透高さ

----- Initial state \circ — 1 day

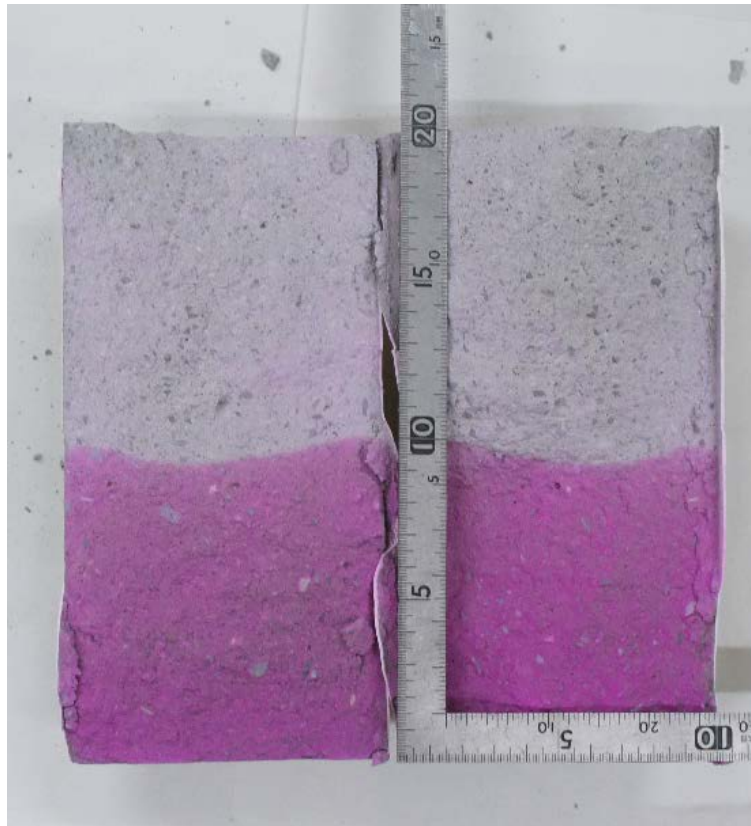


(b) 飽和度

図-2.8 絶乾状態のモルタル (W/C=0.45) の液状水浸透状況 (1日浸漬)

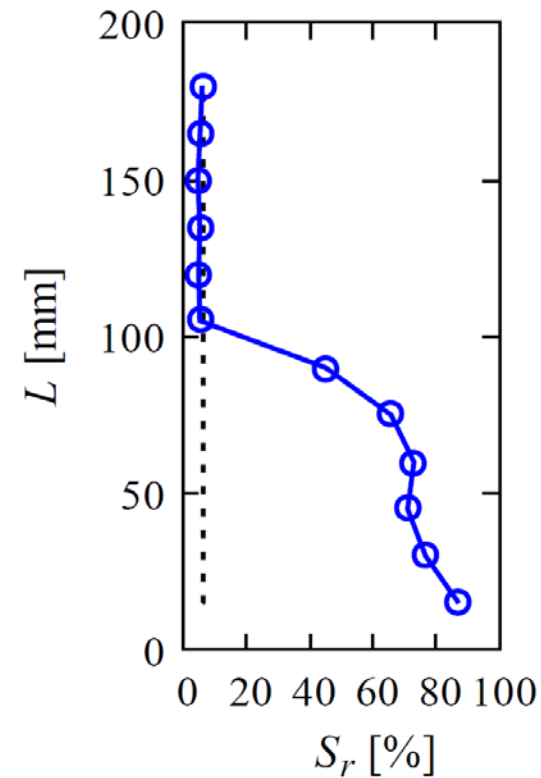
2.2 モルタルの液状水浸漬試験

測定結果



(a) 浸透高さ

----- Initial state —○— 1 day



(b) 飽和度

図-2.9 絶乾状態のモルタル (W/C=0.45) の液状水浸透状況 (3日浸漬)

2.2 モルタルの液状水浸漬試験

測定結果

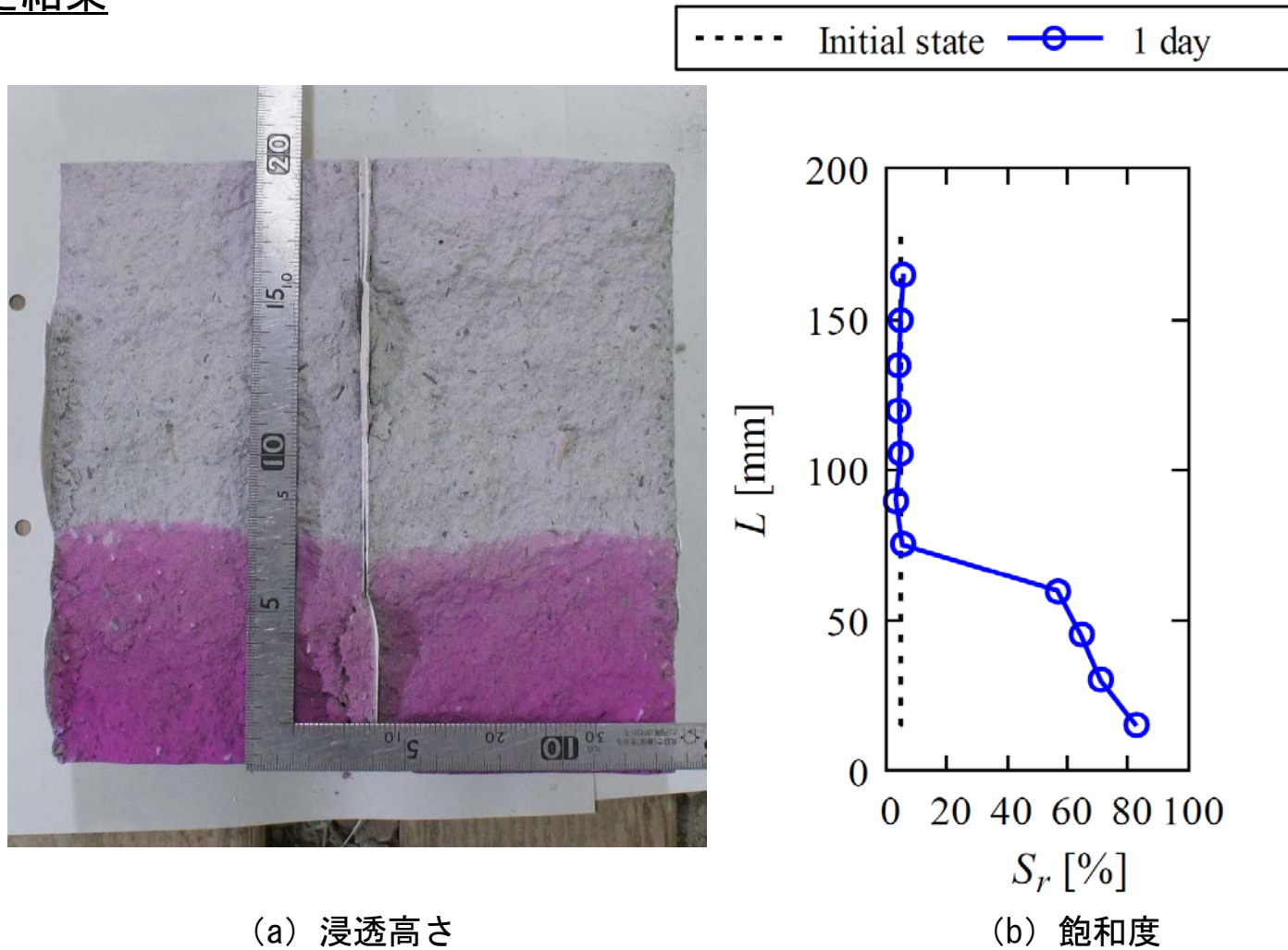


図-2.10 絶乾状態のモルタル (W/C=0.65) の液状水浸透状況 (1日浸漬)

2.2 モルタルの液状水浸漬試験

測定結果

- W/Cが65%より45%のモルタルの液状水浸透高さが小さかったため、W/Cが小さい程、モルタル中の液状水の浸透速度は小さくなることを確認した。
- 絶乾状態のモルタルでは、極めて浸透速度が大きいことを確認した。



コンクリートの乾燥とコンクリート表層の空隙構造の変化がモルタルを用いた液状水浸漬試験は現在進行中である。



これらの測定結果より、モルタルの液状水浸透特性を把握し、液状水浸透を予測する解析モデル（予測式）を構築する。

表-2.2 測定結果

W/C - 浸漬期間	浸透高さ (mm)
0.45 - 1日	55.5
0.45 - 3日	99.2
0.65 - 1日	74.7

3. モルタルの液状水浸透解析モデルの構築

3.1 解析モデルの概要

コンクリートのような複雑で連続な空隙構造を有する物体中の液状水浸透は、**毛細管浸透**に基づくとされている。



そこで…

コンクリートのような複雑で連続な空隙構造を1本の毛細管でモデル化し、毛細管浸透に基づく液状水浸透解析を行うことを試みる。

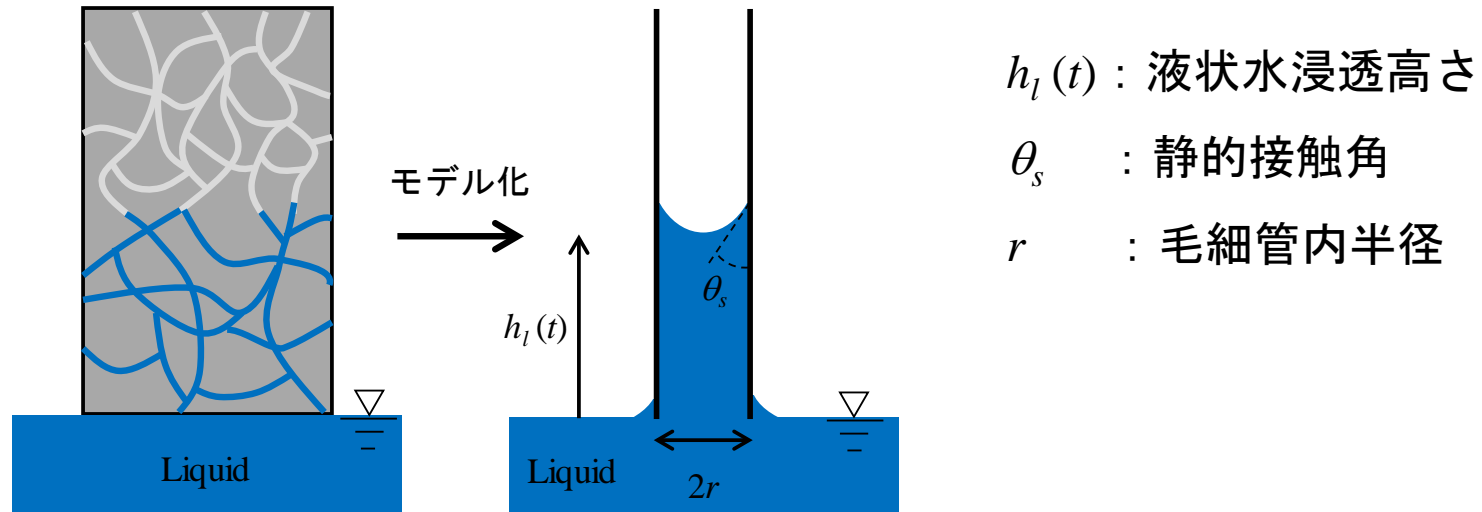


図-3.1 毛細管浸透モデル

3.2 解析モデルの理論

コンクリート構造物の表層と内部で空隙構造に差が生じると、空隙構造が密な部分の流体（液状水，気体）の浸透速度が低下する。それに伴いコンクリートに侵入する液状水の浸透速度が低下すると考えられるため、この現象を1本の毛細管でモデル化することを試みる。

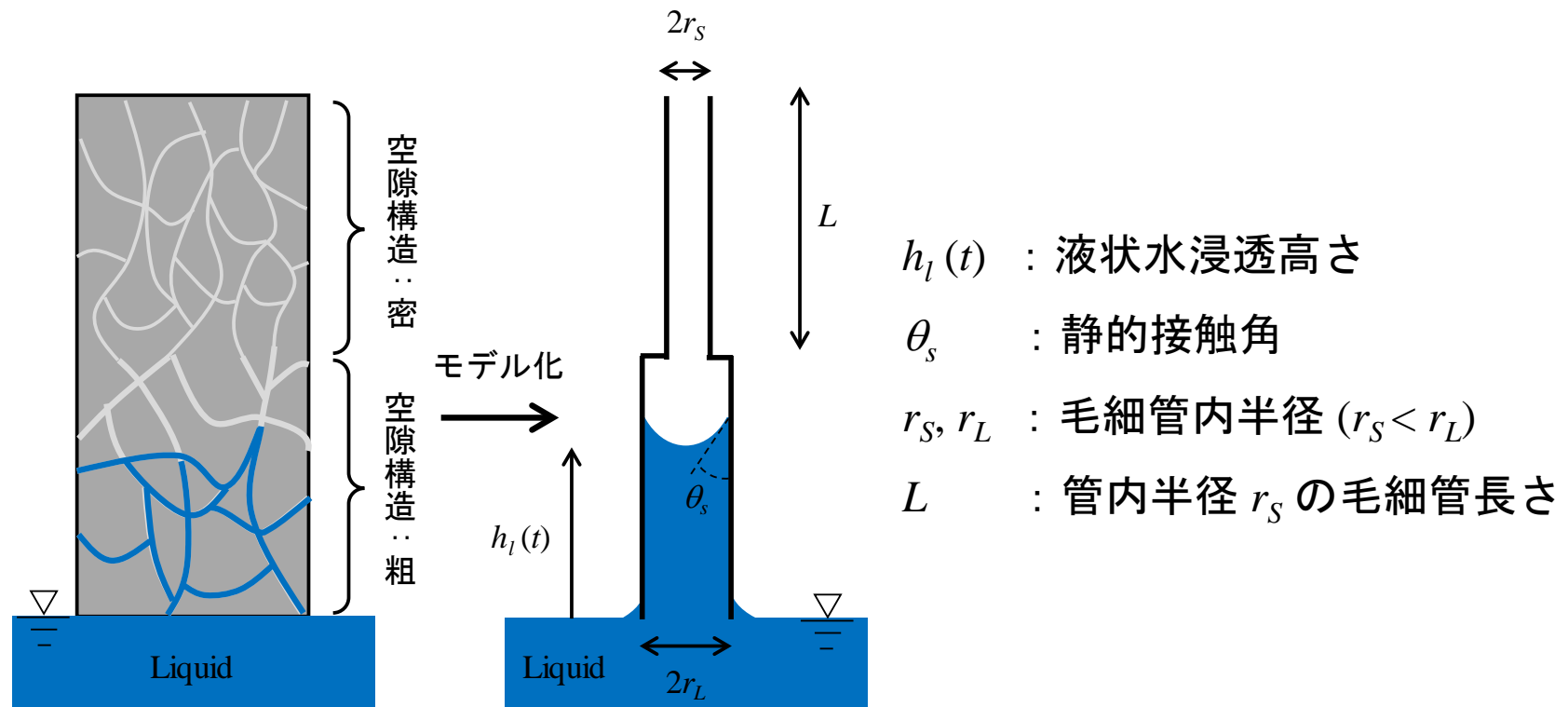


図-3.4 毛細管浸透モデル

3.2 解析モデルの理論

毛細管内の液状水に作用する力を以下に示す.

- 慣性力 $F_i(t)$
- 液状水の粘性抵抗 $F_{vl}(t)$
- 気体の粘性抵抗 $F_{vg}(t)$
- 重力 $F_g(t)$
- 毛管力 F_c

ここで、慣性力の影響は極めて小さいため、4つの力の動的なつり合いにより支配方程式は次式となる.

$$F_{vl}(t) + F_{vg}(t) + F_g(t) = F_c \quad (12)$$

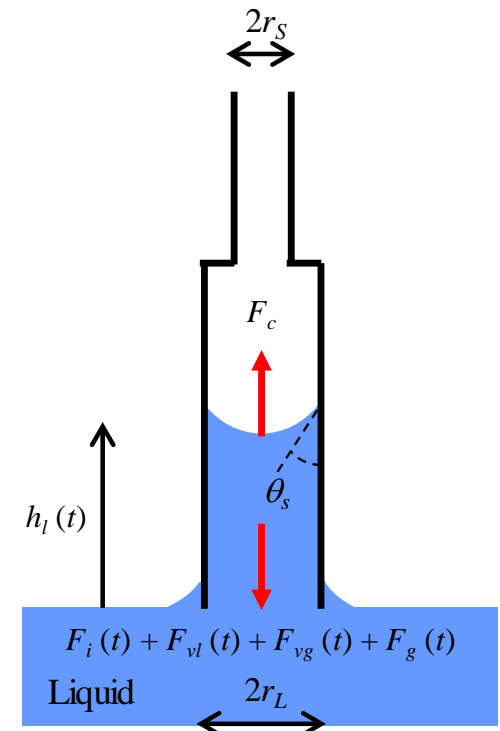


図-3.5 液状水に作用する力

3.2 解析モデルの理論

式(7)をPoiseuille則等を用いて展開すると次式となる.

$$\frac{8\eta_l}{r_L^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \frac{8\eta_g}{r_s^2} L \frac{dh_g(t)}{dt} + \rho_l g h_l(t) = \frac{2\gamma}{r} \cos(\theta_s) \quad (13)$$

η_g : 気体の粘度, $h_g(t)$: 気体浸透高さ

式(13)に各種仮定を施し, t に関して積分すると, $h_l(t)$ に関する数学解を得る.

$$h_l(t) = \frac{B}{A} + \frac{B+AC}{A} \cdot W \left\{ -\frac{B}{B+AC} \exp\left(-\frac{B+A^2t}{B+AC}\right) \right\} \quad (14)$$

$$A = \frac{\rho_l g r^2}{8\eta_l} \quad (15)$$

$$B = \frac{r\gamma}{4\eta_l} \cos(\theta_s) \quad (16)$$

$$C = \frac{\eta_g}{\eta_l} \cdot \frac{L}{B} \left(\frac{r_L}{r_s} \right)^4 \quad (17)$$

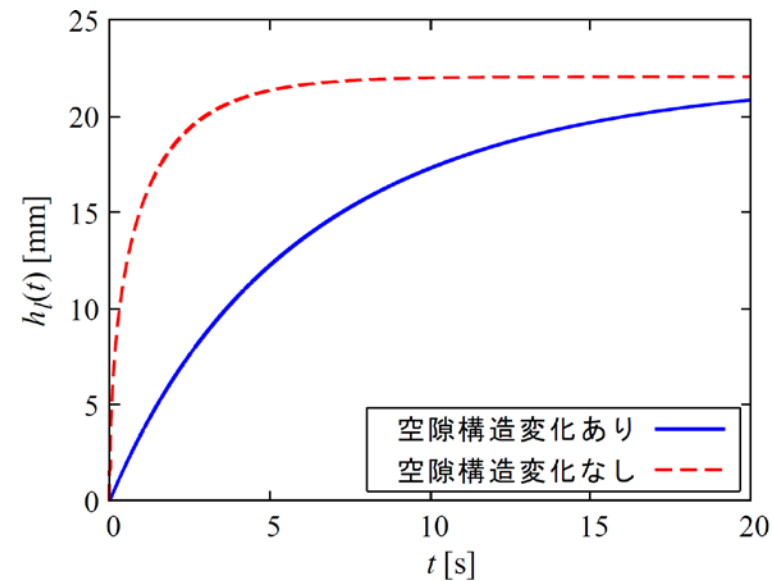


図-3.6 解析結果の一例

3.3 解析パラメータの設定

モルタル中の液状水浸透解析を行うためには、**モルタル中の微細空隙を1本の毛細管と見なした場合の見かけの管内半径 r_S, r_L** とモルタル中の微細空隙と液状水の濡れ性を表す液状水の**静的接触角 θ_s** を定める必要がある。

見かけの管内半径

エタノール溶液があらゆる物体に対して静的接触角がほぼ0である特性を利用し、エタノール溶液へのモルタルの浸漬試験から浸透高さを測定し、測定結果と解析結果とのフィッティング解析から推定する。

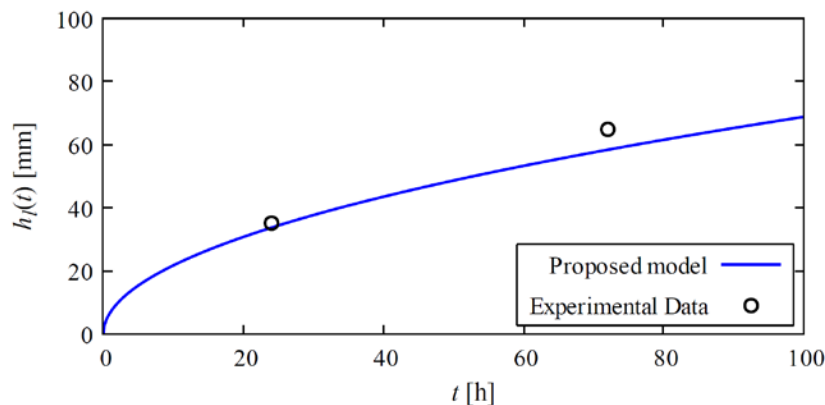


図-3.7 フィッティング解析の一例

$\theta_s = 0$ で固定し、 r_S, r_L を変動させて解析を行い、測定結果（エタノール）と解析結果を比較する。



測定結果と解析結果がほぼ一致するときの、 r_S, r_L を解析パラメータとして決定する。

3.3 解析パラメータの設定

静的接触角

液状水へのモルタルの浸漬試験から浸透高さを測定し，測定結果と見かけの管内半径を適用した解析結果とのフィッティング解析から推定する．

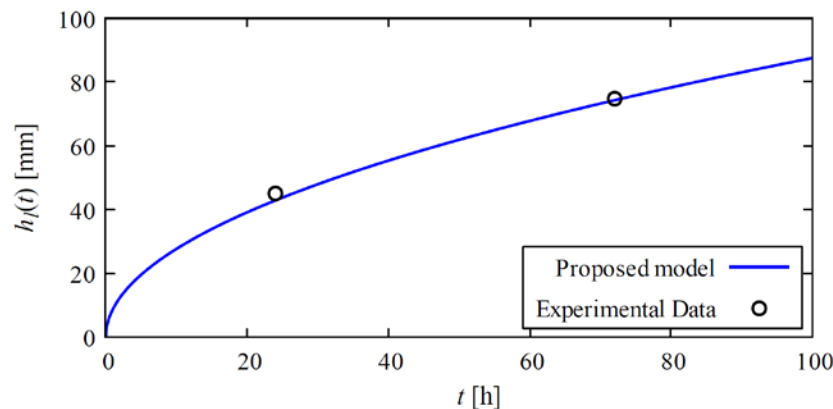


図-3.8 フィッティング解析の一例

決定した r_S, r_L で固定し， θ_s を変動させて解析を行い，測定結果（液状水）と解析結果を比較する．



測定結果と解析結果がほぼ一致するときの， θ_s を解析パラメータとして決定する．

3.4 モルタルの液状水浸透解析

推定した見かけの管内半径と静的接触角を毛細管内の液状水浸透モデルに与えて解析し、その解析結果と様々な条件（W/C、浸漬期間等）で実施した液状水へのモルタルの浸漬試験の結果との比較から解析モデルの妥当性を検証する。




モルタルの液状水浸透の基本的な特性を再現できる解析モデルを構築することができれば、実際の環境条件を再現した実験・計測や実構造物からサンプルを採取し実験を行う必要がない。また、未知の解析パラメータ (r_S, r_L, θ_s) の一般性を証明できれば、解析モデルは数学解に基づき構築されているため、簡易的に解析を行うことが可能である。



非破壊かつ簡易的に液状水浸透予測を行うことが可能である。

4. 本研究のまとめと今後の展望

本研究は、コンクリート中の液状水浸透に関して、簡易的に精度よくその挙動を予測する解析モデルを構築することを目的としている。

 現段階では…

モルタルの液状水浸透に着目し、コンクリートのような複雑で連続な空隙構造を1本の毛細管でモデル化し、毛細管浸透に基づく液状水浸透解析を行うことを試みている。毛細管内の液状水浸透に関する数学解は導出できているが、未知の解析パラメータの決定および数学解の妥当性を検証するためのモルタルの液状水浸漬試験は現在行っているところである。

 今後は…

モルタルの液状水浸透の基本的な特性を再現できる解析モデルを構築することができれば、この解析モデルに基づき、コンクリートの液状水浸透解析モデルを構築することを試みる。