

モルタル中の液状水浸透に関する簡易解析モデルの検討

鳥取大学大学院	正会員	○金氏 裕也
鳥取大学大学院	正会員	黒田 保
鳥取大学大学院	学生会員	後藤 智和

1. はじめに

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水の浸透の影響も考慮されている。しかし、水の浸透を考慮した設計値である鋼材腐食深さにより照査を行うためには、コンクリート中の水の浸透予測を行う必要があるが、十分な浸透予測方法は確立されていない。また、鋼材腐食深さの設計では、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に把握し、実現象を反映させた予測式を用いる必要がある。実現象で液状水浸透に関わる主な要因として、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などの外的要因と、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の粗雑化などの内的要因がある。内的要因であるコンクリートの表層と内部の空隙の大きさの差異（以下、空隙の差）がコンクリート中の水の浸透に与える影響については、現在のところ明らかにされていない。そこで、本研究ではコンクリート中の空隙の差が水の浸透特性に与える影響に着目した。

本研究では、まずコンクリートのモルタル硬化体中を浸透する水に着目し、モルタルの空隙の差の影響を考慮したモルタル中の水の浸透に関する簡易的な解析モデルを構築する。さらに、モルタルの水への浸漬試験の結果と提案する解析モデルの解析結果を比較し、解析モデルの正確さについて検討した。

2. 液状水浸透解析モデル

(1) 解析モデルの構築

モルタルの空隙中の液状水浸透は毛細管浸透に基づくと考え、簡易的にモルタル全体の空隙を1本の毛細管でモデル化し、モルタル中の液状水浸透解析を行うことを試みる。ここに、液状水とは、水などの液体の総称と定義している。さらに、モルタルの空隙の差の影響を考慮した解析モデルを考えるため、-1 に示すような急縮部を有する毛細管を仮定する。空隙に急縮部が生じると、空隙構造が密な部分の流体（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本の毛細管モデルに反映させる。したがって、解析モデルは、管内半径 r_L の非常に長い毛細管の先端に管内半径 r_S （ただし、 $r_S < r_L$ ）かつ長さ L の毛細管が接続されたモデルを考え、気体の排出速度の低下の影響を把握するために、管内半径 r_L の毛細管内の液状水浸透を解析対象とする（-1 参照）。

(2) 支配方程式の構築と数学解の導出

急縮部を有する毛細管内の液状水浸透に関する力のつり合いは次式となる（-2 参照）。

$$F_i(t) + F_{vl}(t) + F_{vg}(t) + F_g(t) = F_c \quad (1)$$

ここに、 $F_i(t)$ 、 $F_{vl}(t)$ 、 $F_{vg}(t)$ 、 $F_g(t)$ 、 F_c はそれぞれ液状水に作用する慣性力、液状水の粘性抵抗力、気体の粘性抵抗力、重力および毛管力である。ここで、モルタルの微細空隙中を浸透する液状水には大きな粘性抵抗力が作用し、液状水の浸透速度は非常に小さいため、慣性力は無視することができると考えられる。また、微細空隙中の浸透した液状水の質量は小さいため、重力の影響も無視することができると考えられる。したがって、式(1)は次式のように変形できる。

キーワード 毛細管浸透, 急縮部, 気体の粘性抵抗力

連絡先 〒680-8552 鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 TEL 0857-31-5281

$$F_{vl}(t) + F_{vg}(t) = F_c \quad (2)$$

また、急縮部を有する毛細管の入口（管内半径 r_L ）に液状水が接触した場合、毛細管の出口（管内半径 r_S ）から毛細管に内在する気体を排出しながら液状水は毛細管を浸透すると考えられる。したがって、内在する気体を排出するときに発生する気体の粘性抵抗力が、液状水の浸透速度を低下させる要因になると考えられる。急縮部が無い毛細管の場合、気体の粘度は液状水と比較して非常に小さいため、気体の粘性抵抗力は無視できるが、急縮部を有する毛細管の気体を排出する部分（管内半径 r_S ）が長いあるいは断面が小さい場合、気体の粘性抵抗力は大きくなり無視することはできない。そこで、管内半径 r_S の毛細管内の気体の粘性抵抗力を考慮し、浸透する液状水に作用することを考える。以上のことを踏まえ、Hagen-Poiseuille の法則を適用すると気体の粘性抵抗力 $F_{vg}(t)$ は次式となる。

$$F_{vg}(t) = 8\pi\eta_g \left(\frac{r_L}{r_S}\right)^2 L \frac{dh_g(t)}{dt} \quad (3)$$

ここに、 $h_g(t)$ は時間 t における気体の移動距離、 η_g は気体の粘度、 L は管内半径 r_S の毛細管の長さである。ここで、排出された気体の体積と浸透した液状水の体積が等しいと仮定する（図-3 参照）と $h_g(t)$ は次式となる。

$$h_g(t) = \left(\frac{r_L}{r_S}\right)^2 h_l(t) \quad (4)$$

ここに、 $h_l(t)$ は時間 t における液状水の浸透距離である。したがって、式(2)~(4)より急縮部を有する毛細管内の液状水浸透に関する支配方程式は次式となる。

$$h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + A \cdot \frac{dh_l(t)}{dt} = B \quad (5)$$

ここに、任意定数 A 、 B は次式となる。

$$A = \eta_g / \eta_l \cdot \left(\frac{r_L}{r_S}\right)^4 L \quad (6)$$

$$B = r_L \gamma / 4\eta_l \cdot \cos(\theta_s) \quad (7)$$

ここに、 η_l は液状水の粘度、 γ は液状水の表面張力、 θ_s は静的接触角である。初期条件 ($h_l(0) = 0$) を用いて式(5)を積分すると数学解は次式となる。

$$h_l(t) = \sqrt{A^2 + 2Bt} - A \quad (8)$$

一方、コンクリートの液状水浸透予測に用いられる急縮部の無い毛細管内の液状水浸透に関しては、次式に示す Lucas-Washburn 式（以下、L-W 式）が用いられている。

$$h_l(t) = \sqrt{2Bt} \quad (9)$$

提案した数学解（式(8)）は $r_S = r_L$ （急縮部の無い毛細管）の条件では、気体の粘性抵抗力は無視できるほど小さくなるため ($A = 0$)、L-W 式と等しくなる。

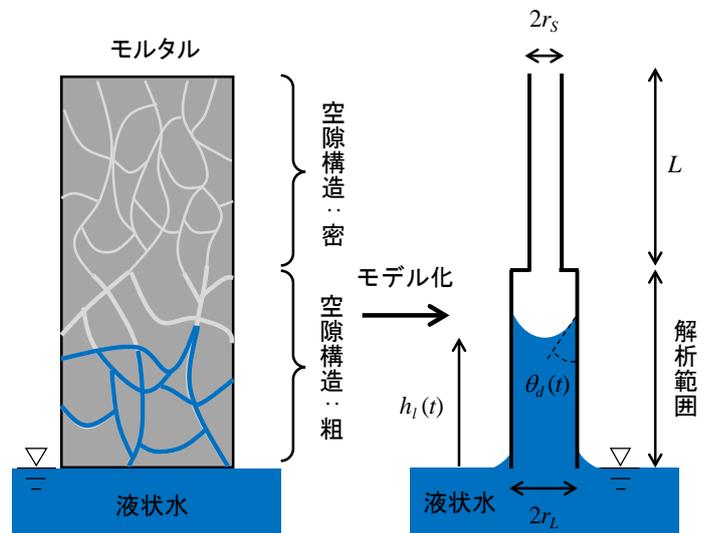


図-1 コンクリートの空隙のモデル化

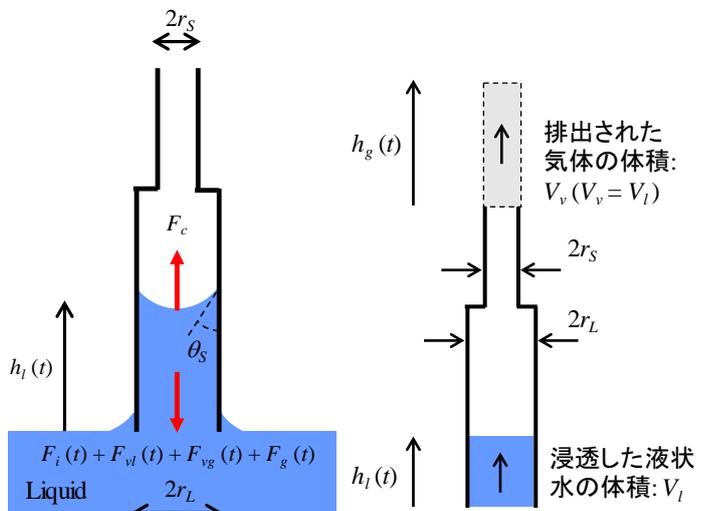


図-2 毛細管内の液状水浸透に関する力 図-3 排出された気体と浸透した液状水の体積

3. 解析結果および考察

(1) 解析パラメータの設定

モルタル中の液状水浸透に関する数学解（式(8)）を解析に用いるためには、未知の解析パラメータである見かけの管内半径とモルタル中の空隙と液状水の濡れ性を表す静的接触角を定める必要がある。解析パラメータの推定では、水セメント比がモルタルの長さ方向に対して均一、すなわち急縮部が無い場合の毛細管を考える。まず見かけの管内半径を決定する。エタノール（ $\eta_l = 1.1 \text{ mPa}$, $\gamma = 22.0 \text{ mN/m}$ ）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、エタノールへのモルタルの浸漬試験から浸透距離を測定し、測定結果と $\theta_s = 0$ を代入した数学解を用いた解析結果とのフィッティング解析から見かけの管内半径を決定する。ここで、水セメント比が小さい程、モルタル中の空隙が緻密となるため、本研究では水セメント比0.65のモルタルにおける見かけの管内半径を r_L 、水セメント比0.45に関しては r_S とし、それぞれフィッティング解析から推定する。エタノールへのモルタルの浸漬試験は、既往研究²⁾の試験方法に従って行った。浸漬試験に用いたモルタルの配合と浸漬試験の概要をそれぞれ表-1、図-4に示し、浸漬試験開始直前のモルタルは極めて乾燥した状態とした。エタノールの浸透距離を測定するために、モルタルを断面中心位置で割裂し、エタノールの浸透フロント位置を示す割裂断面の変色境界位置から浸透距離を測定した（図-5参照）。測定結果と $\theta_s = 0$ とした解析結果とのフィッティング解析から得られた r_L , r_S を図-6に示す。見かけの管内半径を決定できたため、次に静的接触角を決定する。水道水（以下、液状水）へのモルタルの浸漬試験から浸透距離を測定し、測定結果と既知の r_L または r_S を代入した数学解を用いた解析結果とのフィッティング解析から静的接触角を決定する。液状水へのモルタルの浸漬試験より測定される浸透距離は、既往研究²⁾から引用した。測定結果と既知の r_L または r_S を用いた解析結果とのフィッティング解析（図-7）から得られた θ_s は、水セメント比の差に因らず約70°となった。静的接触角は、液状水と液状水が接する固体表面の性質から決定されるため、浸漬試験に用いる液状水とモルタルの物性が同じであれば、空隙の差に因らず静的接触角が決定されると考えられる。また、図-7より、水セメント比がモルタルの長さ方向に対して均一である条件（ $r_S = r_L$ ）では、気体の粘性抵抗力は無視できるほど小さくなるため（ $A = 0$ ）、L-W式と等しくなることを確認した。

(2) 解析モデルと試験結果の比較

提案した解析モデルの正確さを検討するために、液状水の浸透面から約100 mmまでの範囲を水セメント比0.65、浸透面から約100 mm以深を水セメント比0.45としたモルタルを用いた浸漬試験の結果²⁾と比較する。解析に用いるパラメータは表-2に示す。また、液状水は水道水（ $\eta_l = 1.0 \text{ mPa}$, $\gamma = 72.0 \text{ mN/m}$ ）、気体は空気（ $\eta_g = 0.018 \text{ mPa}$ ）を対象とした。図-8はモルタルの空隙に差が生じた場合のモルタル中の液状水浸透距離に関する解析結果と測定結果の比較を示す。図-8の縦軸は液状水浸透距離、横軸は浸漬時間を示す。また、解析結果には提案した解析モデルと、空隙の差の影響を無視したL-W式による結果を示している。図-8より、提案した解析モデルによる解析結果は、測定結果と概ね一

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)		
		W	C	S
45	7.4±1.5	271	602	1236
65	7.3±1.5	268	412	1408

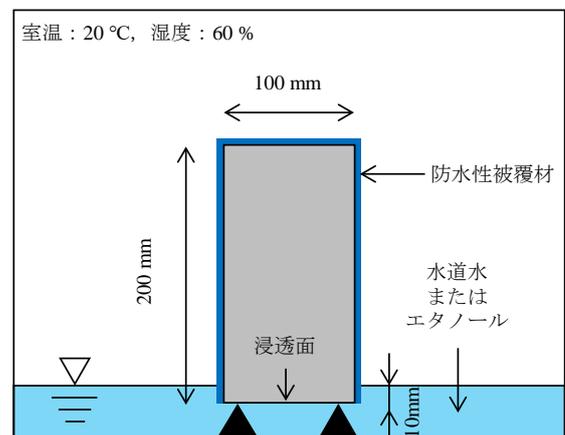


図-4 液状水浸漬試験概要

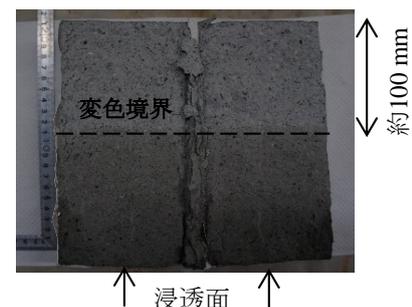


図-5 割裂断面の変色境界

致した。ただし、7日（168 h）浸漬時点に関しては、測定結果と解析結果に比較的大きな差が生じた。解析モデルは、管内半径 r_s （水セメント比0.45）、長さ L の毛細管の影響を考慮した管内半径 r_L （水セメント比0.65）の非常に長い毛細管内の液状水浸透現象を仮定している。したがって、解析モデルでは水セメント比0.45の部分へ浸透した液状水の挙動を再現するとはできないため、水セメント比0.65（浸透面から約100 mmまで）の範囲を超えて、水セメント比0.45の部分まで液状水が浸透する測定結果とは差が生じると考えられる。また、モルタルの空隙の差の影響を考慮した場合、液状水の浸透が抑制されることを確認した。モルタルの空隙が粗から密、すなわち空隙径が大口径から小口径に変化する場合、空隙中の気体の排出経路が狭くなることにより空隙の壁面摩擦による気体の粘性摩擦力が大きくなる。気体の粘性摩擦力が大きくなることによって気体の排出速度が低下し、それに伴い液状水の浸透速度が低下したため、モルタルの空隙に差が生じる場合では液状水の浸透は抑制されたと考えられる。図-8に示す比較により提案した解析モデルの正確さが概ね検証されたが、さらに精度を上げるためには、モルタルの空隙の分岐や不連続性等を考慮して解析モデルを改良する必要があると考えられる。

4. まとめ

以下に本研究のまとめを示す。

- (1) モルタルの空隙の差の影響を考慮した解析モデルによる解析結果は、測定結果と概ね一致した。
- (2) 提案した解析モデルの正確さが概ね検証されたが、さらに精度を上げるためには、モルタルの空隙の分岐や不連続性等を考慮して解析モデルを改良する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会ほか：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，公益社団法人土木学会，pp.148-164，2017。
- 2) 金氏裕也，黒田保，吉野公，後藤智和：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.479-484，2019。

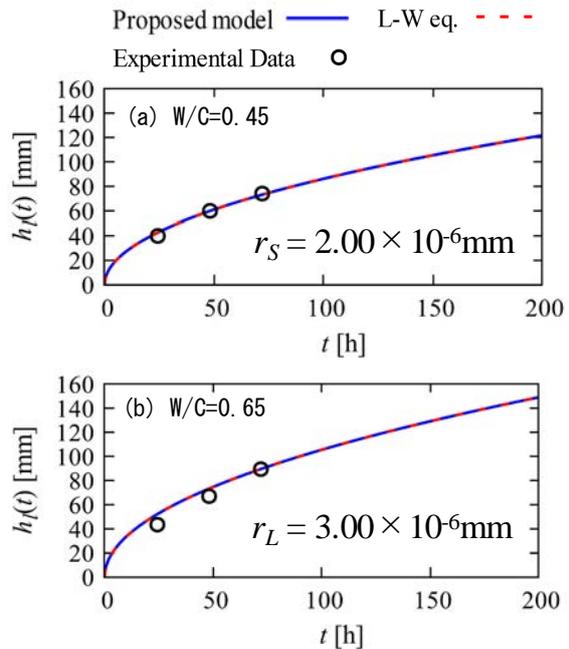


図-6 見かけの管内半径推定のためのフィッティング解析結果

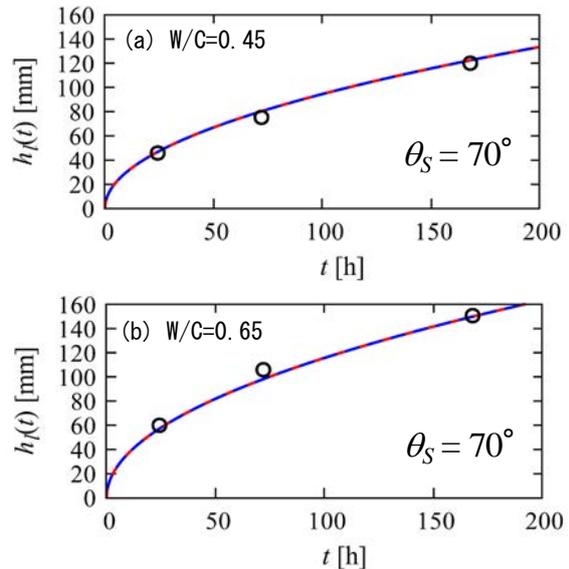


図-7 静的接触角推定のためのフィッティング解析結果

表-2 解析パラメータ

r_L (mm) (W/C=0.65)	r_s (mm) (W/C=0.45)	L (mm)	θ_s (deg)
3.00×10^{-6}	2.00×10^{-6}	100	70

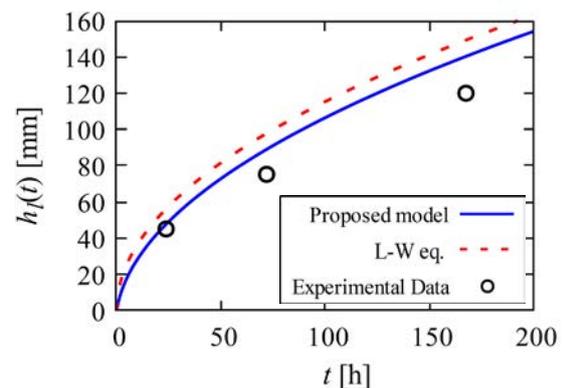


図-8 解析結果と測定結果