

コンクリート中の液状水浸透解析に関する
基礎的研究

2019 年 1 月

金氏 裕也

目 次

第1章 序論

1-1 本研究の背景および目的	1
1-2 本論文の構成	2
参考文献	3

第2章 既往研究

2-1 概説	4
2-2 中性化に関する耐久性照査で用いられる液状水の浸透予測手法と問題点	4
2-3 コンクリート中の塩化物イオンの浸透予測手法と問題点	5
2-4 微細空隙を有する物体中の液状水の浸透に関する既往の研究	8
2-5 毛細管内の液状水の浸透に関する既往の研究	12
参考文献	16

第3章 接触角の動的変化を伴う毛管力を考慮した毛細管内の液状水浸透解析

3-1 概説	17
3-2 毛細管浸透実験	17
3-3 鉛直毛細管内の液状水浸透解析	23
3-4 まとめ	38
参考文献	39

第4章 管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透解析

4-1 概説	40
4-2 毛細管浸透実験	41
4-3 鉛直毛細管内の液状水浸透解析	43

4-4	まとめ	57
	参考文献	58
第5章 モルタル中の液状水浸透解析		
5-1	概説	59
5-2	試験概要	60
5-2-1	供試体概要	60
5-2-2	液状水浸漬試験	61
5-3	試験結果および考察	64
5-4	モルタル中の液状水浸透解析	68
5-5	まとめ	76
	参考文献	78
第6章 結論		
6-1	結論	79
6-2	今後の課題	81
	謝辞	82

第 1 章

序 論

第1章 序論

1-1 本研究の背景および目的

鉄筋コンクリート構造物の劣化要因の一つである中性化による鋼材腐食の照査では、従来から中性化残りによる鋼材腐食の照査が行われている。コンクリート中に二酸化炭素等が侵入することによりコンクリートが中性化し、コンクリート中の鋼材が腐食しやすい状態となるが、近年、鋼材が腐食するためには鋼材への水分の供給が必要であることが報告されている¹⁾。したがって、現在の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、雨水等が供給されることにより生じ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²⁾。コンクリート中の液状水の浸透に関しては、毛細管浸透に基づく経験式である Washburn 式により液状水の浸透量を推定することが推奨されている。ここで、Washburn 式に用いられるコンクリート中の水分浸透速度を表す係数（以下、水分浸透速度係数）は、水分浸漬試験から求めることができる。しかし、水分浸漬試験では乾湿繰り返し作用による影響は考慮していないため、実環境下で乾湿繰り返し作用を受けるコンクリート中の液状水の浸透に対応しているか不明である。また、鉄筋コンクリート構造物の劣化要因の一つである塩害による鋼材腐食の照査においても、コンクリート中の液状水の浸透の影響を考慮する必要があると報告されている³⁾。一般的にコンクリートへの塩化物イオンの浸透特性は、コンクリート中の塩化物イオンの移動を拡散現象として捉え、Fick の拡散方程式を利用して評価されている。Fick の拡散方程式を用いた照査（以下、濃度拡散モデル）は、コンクリート中の内在水と外来塩分との濃度勾配に基づく塩分浸透を主体としているため、暗に飽和状態を仮定したコンクリート中の塩化物イオンの浸透を対象としている。しかし、実環境下では乾燥の影響でコンクリートは不飽和状態であるため、塩化物イオンの浸透を濃度拡散モデルで評価することは必ずしも適当とは言えない。

一方、コンクリートのような微細空隙を有する物体中の液状水の浸透に関する研究⁴⁾⁷⁾の多くは、Darcy 則に基づいた浸透問題として取り扱われている。Darcy 則は透水試験から決定する透水係数に大きく依存し、コンクリート中の液状水の浸透の場合、コンクリートの物性や乾燥程度等に応じて透水係数が変動するため、決定された透水係数の汎用性は低い。また、コンクリートのような不飽和状態における透水係数は約 $1.0 \times 10^{-11} \sim 1.0 \times 10^{-15} \text{ m/s}$ であり⁴⁾、コンクリート内の乾燥程度に応じて最大で 10000 倍程度のばらつきが生じるため、Darcy 則に基づく浸透解析の解析精度には疑問が残る。以上より、コンクリート中の液状水の浸透について未だ不明瞭な点が多く、コンクリートが有する微細空隙中を浸透する液状水の挙動を把握することは、中性化や塩害等に起因する鉄筋コンクリート構造物の鋼材腐食を照査する上で重要である。

そこで、本研究では、コンクリート中の液状水の浸透は毛細管浸透に基づくと考え、まず1本の鉛直毛細管内を浸透する液状水の基礎的な挙動を解析的、実験的に明らかにし、その動的なメカニズムをモルタル中の液状水の浸透に適用することを試みた。

1-2 本論文の構成

本論文は、以下に示すように 6 章からなる。

第 1 章は、本論文の背景および目的を明確にし、論文の構成を示した。

第 2 章は、液状水の浸透が影響する中性化および塩害による鉄筋コンクリート構造物の鋼材腐食の照査の現状について述べるとともに、現行の照査手法の問題点を抽出した。次に、コンクリートのような微細空隙を有する物体中の液状水の浸透および毛細管内の液状水の浸透に関する既往の研究を示した。

第 3 章では、コンクリート中の液状水の浸透は毛細管浸透に基づくと考え、まず 1 本の鉛直毛細管内を浸透する液状水の基礎的な挙動を解析的、実験的に明らかにすることを試みた。既往の研究^{8), 9)}から接触角の速度依存性を考慮する毛細管内の液状水浸透解析を行う場合、接触角の動的変化の影響を含む毛管力（以下、動的毛管力）を定義する必要がある。本章では、ガラス毛細管内の液状水浸透高さを測定する毛細管浸透実験を行った。そして、接触角と液状水の浸透速度との関係について観察を行い、接触角の動的変化の影響を含む動的毛管力を定義し、力のつり合いに基づき液状水浸透を支配する方程式を導出した。さらに、同方程式の解を近似する解析解を求め、毛細管浸透実験の結果との比較、考察を行い、提案した動的なメカニズムと解析解導出時に仮定した近似が正しいことを確認した。

第 4 章では、管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透解析を行った。これは、コンクリート構造物の表層と内部の空隙構造の差が空隙中の液状水の浸透挙動に影響を与えると考え、この影響を反映させた毛細管内の液状水浸透解析である。本章では、管内断面が変化することにより生じる毛細管内の気体の粘性摩擦力を定義して力のつり合いに基づき液状水浸透を支配する方程式を導出した。さらに、同方程式の解を近似する解析解を求め、毛細管浸透実験の結果との比較、考察を行い、管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透に関する動的なメカニズムと解析解導出時に仮定した近似が正しいことを確認した。

第 5 章では、毛細管浸透モデルをモルタル中の液状水浸透解析に適用することを試みた。まずモルタル中の微細空隙を毛細管と仮定し、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¹⁰⁾を利用し、エタノール溶液浸漬試験により微細空隙の見かけの管内半径を推定した。次に、モルタル中の微細空隙と液状水との濡れ性を表す液状水の静的接触角については、モルタル中の液状水の浸透高さを測定し、測定結果と液状水浸透解析の結果とのフィッティングから液状水の静的接触角を推定した。最後に、得られた解析パラメータを毛細管浸透モデルに与えて解析し、その解析結果と液状水浸漬試験の結果との比較から、毛細管浸透に基づくモルタル中の液状水の浸透に関する解析モデルの妥当性と空隙構造の差が液状水の浸透挙動に与える影響について検証した。

第 6 章は、各章で得られた結果を取りまとめて結論とした。

参考文献

- 1) 古賀一八, 林典男, 平田延明 : 高濃度塩化物イオン含有 RC 建築物の含水率および鉄筋腐食調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.783-788, 2008.
- 2) 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.
- 3) 小池賢太郎, 山口明伸, 武若耕司, 福重耕平 : 水分移動を考慮した塩化物イオンの浸透モデルに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.843-848, 2016.
- 4) 福原輝幸, 松岡茂, 柳博文 : コンクリートの毛管浸透と非常法による不飽和透水係数の算定, 土木学会論文集, No.564, V-35, pp.89-96, 1997.
- 5) 村田二郎, 越川茂雄, 伊藤義也 : コンクリートにおける加圧浸透流に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 11 巻, 第 1 号, pp.61-74, 2000.
- 6) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠 : 有限要素法による浸透流解析と現地への適用について, 京大防災研究所年報, 第 20 号, B-2, pp.1-14, 1977.
- 7) Planet, R., Santucci, S. and Ortin, J. : Roughness and intermittent dynamics of imbibition fronts due to capillary and permeability disorder, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.120-121, pp.157-169, 2011.
- 8) Hoffman, R. : A study of the advancing interface. 1. Interface shape in liquid – gas systems, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 50, pp. 228-241, 1975.
- 9) Blake, T. D. and Haynes, J. M. : Kinetics of liquidliquid displacement, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 30, pp. 421-423, 1969.
- 10) Letey, J., Osborn, J. and Pelishek. R. E. : Measurement of liquid – solid contact angles in soil and sand, *Soil Science*, Vol. 93, pp. 149-153, 1962.

第 2 章

既往研究

第2章 既往研究

2-1 概説

中性化や塩害等に起因する鉄筋コンクリート構造物の鋼材腐食の照査を行う上で、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。本章では、まず現行の中性化に関する耐久性照査で用いられる液状水の浸透予測について述べるとともに、現行の照査手法の問題点を抽出した。また、コンクリート中の塩化物イオンの浸透に関して、現行の塩害に関する耐久性照査で用いられる塩化物イオンの濃度拡散モデルについて述べるとともに、塩化物イオンの浸透に関する既往の研究を取り上げ、現行の照査手法の問題点を抽出した。

次に、コンクリート中の液状水の浸透および毛細管内の液状水の浸透に関する既往の研究を示した。

2-2 中性化に関する耐久性照査で用いられる液状水の浸透予測手法と問題点

中性化の進行によりコンクリートの細孔空隙中の液状水の pH が低下し、その液状水が鋼材位置に達すると鋼材腐食が進行しやすくなる。このことから、現在の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、雨水等が供給されることにより生じるコンクリート中の液状水の浸透に伴う鋼材腐食の照査が行われている¹⁾。液状水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査で用いられるコンクリートの細孔空隙中の液状水の浸透予測には、毛細管内の液状水の浸透を表現するために一般的に用いられている Washburn 式が準用できると仮定しており、次式で与えられている。

$$(c - \Delta c_e) = q_d \cdot \sqrt{t} \quad (2.1)$$

ここに、 c はかぶり [mm]、 Δc_e はかぶりの施工誤差 [mm]、 q_d はコンクリートの水分浸透速度係数の設計値 [mm/(hour)^{1/2}]、 t はコンクリートに浸透した液状水が鋼材位置に達するまでの時間 [hour] である。また、鋼材腐食深さは液状水と酸素が鋼材位置に繰り返し作用することで少しずつ増えるとの仮定をもとに、鋼材位置への液状水の到達 1 回当たりの鋼材腐食深さに、鋼材位置への液状水年間到達回数に乗じた値で表現し、次式で与えている。

$$S_{dy} = 1.9 \times 10^{-4} e^{-0.068t} \quad (2.2)$$

ここに、 S_{dy} は鋼材腐食深さの設計値 [mm/year] である。式(2.1)と式(2.2)より鋼材腐食深さの設計値は次式のように変形できる。

$$S_{dy} = 1.9 \times 10^{-4} e^{-0.068 \cdot \left(\frac{c - \Delta c_c}{\gamma_c \cdot q_k} \right)^2} \quad (2.3)$$

ここに、 q_k はコンクリートの水分浸透速度係数の特性値[mm/(hour)^{1/2}], γ_c はコンクリートの材料係数である。ここで、コンクリートの水分浸透速度係数の特性値は、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を用いて設定してよいとされ、次式で与えている。

$$q_p = 31.25 \cdot (W/B)^2 \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.60) \quad (2.4)$$

ここに、 q_p はコンクリートの水分浸透速度係数の予測値[mm/(hour)^{1/2}], W/B は水結合材比である。コンクリートの水分浸透速度係数の予測値はコンクリートの水分浸漬試験を用いた「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験法 (JICE-G 582-2018)」によって求めることができる。水分浸漬試験では、温度 20 ± 2 °Cかつ相対湿度 60 ± 5 %の環境で91日間乾燥させたコンクリートの円柱供試体を使用し、コンクリートを液状水に浸漬後、液状水の浸透状況をコンクリート割裂面の液状水の浸透に伴う変色により判断する。しかし、浸漬試験開始前からコンクリートの細孔空隙中に液状水が存在する場合、浸透した液状水のみを変色により確認することは困難であると考えられる。また、水分浸漬試験では乾湿繰り返し作用による影響は考慮していないため、実環境下で乾湿繰り返し作用を受けるコンクリート中の液状水の浸透に対応しているか不明であることが問題点として挙げられる。

2-3 コンクリート中の塩化物イオンの浸透予測手法と問題点

現行のコンクリート中の塩化物イオンの浸透予測には、コンクリート中の塩化物イオンの浸透過程を巨視的に拡散現象とみなす濃度拡散モデルが用いられる¹⁾。コンクリート中の内在水と外来塩分との濃度勾配に基づく塩化物イオンの拡散現象を式(2.5)に示す Fick の拡散方程式で表し、その解である式(2.6)を用いてコンクリート中の塩化物イオンの浸透予測が行われている。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - D_c \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) C(x,t) = 0 \quad (2.5)$$

$$C(x,t) = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right\} + C_i \quad (2.6)$$

ここに、 x はコンクリート表面からの距離[cm], t は経過時間[year], $C(x, t)$ は塩化物イオン濃度[kg/m³], D_c は塩化物イオンの見かけの拡散係数[cm²/year], C_0 はコンクリート表面塩化物イオン濃度[kg/m³], C_i は初期含有塩化物イオン濃度[kg/m³], γ_{cl} は予測精度に関する安全係数, $\operatorname{erf}(s)$ は誤差関数である。また、式(2.6)はかぶりコンクリートに曲げひび割れが生じていない条件で導出され

た解である。コンクリート中の塩化物イオンの浸透現象は、濃度勾配に依存する拡散や液状水の浸透に起因する移流がセメント水和生成物やセメント成分への固定あるいは吸着等を伴いながら起きるものであり、これらの現象を見かけの拡散として扱い、塩化物イオンの見かけの拡散係数 D_c を定義している。塩化物イオンの見かけの拡散係数は、実構造物から採取したサンプルを調査することにより決定することができるが、調査結果がない場合や新設時の維持管理計画においては次式に示す既往のデータに基づくセメントの種類や水セメント比に応じた近似式により求めてよいとされている。

(a) 普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log_{10} D_c = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (2.7)$$

(b) 低熱ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log_{10} D_c = 3.5(W/C) - 1.8 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (2.8)$$

(c) 高炉セメント B 種相当、シリカフュームを使用する場合

$$\log_{10} D_c = 3.2(W/C) - 2.4 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (2.9)$$

(d) フライアッシュセメント B 種相当を使用する場合

$$\log_{10} D_c = 3.0(W/C) - 1.9 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (2.10)$$

ここに、 W/C は水セメント比 ($0.30 \leq W/C \leq 0.55$) である。一方、コンクリート表面塩化物イオン濃度は、構造物が立地する地域区分と海岸からの距離に応じて表-2.1により求めてよいとされている。

また、対象構造物が建設された地点近傍において、測定された信頼性の高い飛来塩分データが利用可能な場合、次式を用いてコンクリート表面塩化物イオン濃度を求めてもよいとされている。

$$C_0 = -0.016 \times C_{ab}^2 + C_{ab} + 1.7 \quad (C_{ab} \leq 30.0) \quad (2.11)$$

ここに、 C_{ab} は飛来塩分量[mmd, mg/dm²/day]である。

表-2.1 コンクリート表面塩化物イオン濃度 C_0 [kg/m³]¹⁾

		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道, 東北, 北陸, 沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東, 東海, 近畿, 中国, 四国, 九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

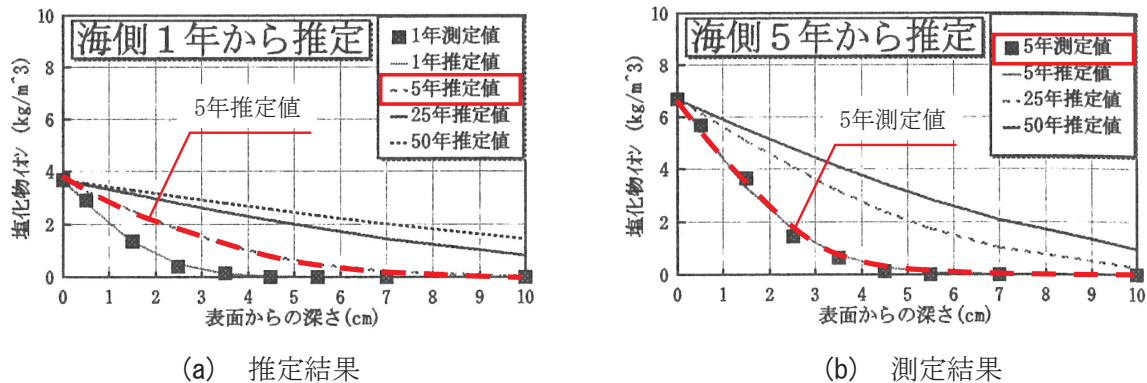


図-2.1 塩化物イオン量の推定値と測定値²⁾

濃度拡散モデルは、コンクリート中の内在水と外来塩分との濃度勾配に基づく塩分浸透を主体としているため、暗に飽和状態を仮定したコンクリート中の塩化物イオンの浸透を対象としている。しかし、実環境下では乾燥の影響でコンクリートは不飽和状態であるため、塩分浸透を濃度拡散モデルで評価することは必ずしも適当とは言えない。金谷ら²⁾は海岸に5年間暴露したコンクリート中への塩化物イオンの浸透量の測定結果から塩化物イオンの見かけの拡散係数を算出し、現行の濃度拡散モデルを用いる方法により塩化物イオンの浸透量の推定値を求めている。図-2.1(a)は海岸に1年間暴露したコンクリート中への塩化物イオンの浸透量の測定結果から塩化物イオンの見かけの拡散係数を算出し、この見かけの拡散係数を用いて材齢5年のコンクリート中の塩化物イオンの浸透量を推定した結果を示す。また、図-2.1(b)は海岸に5年間暴露したコンクリート中への塩化物イオンの浸透量の測定結果を示す。図-2.1から現行の濃度拡散モデルを用いた場合、実際に塩化物イオンが浸透する範囲より深い位置まで塩化物イオンが浸透することを推定しているため、このことから現行の濃度拡散モデルでは精度よく塩化物イオンの浸透予測が行えていないことが示唆される。塩化物イオンの浸透は、暴露試験開始後すぐに飛沫塩水の浸透により短期間で塩化物イオンがコンクリート内部に浸透し、その後拡散現象によりさらに内部まで浸透すると考えられる。したがって、暴露期間が短いコンクリートから得られた測定結果を用いて算出した見かけの拡散係数は、液状水（塩水）の浸透に伴う塩化物イオンの初期浸透に大きく依存するため、この見かけの拡散係数を用いた推定結果と測定結果に差が生じたと考えられる。

小池ら³⁾は、モルタル中の塩化物イオンの浸透を塩化物イオンの濃度拡散と液状水の浸透に伴う塩化物イオンの浸透（移流現象）を考慮した移流拡散方程式を用いて表現している。移流拡散方程式は次式で表され、各項に乗じる塩化物イオンの見かけの拡散係数と液状水の移動速度は各

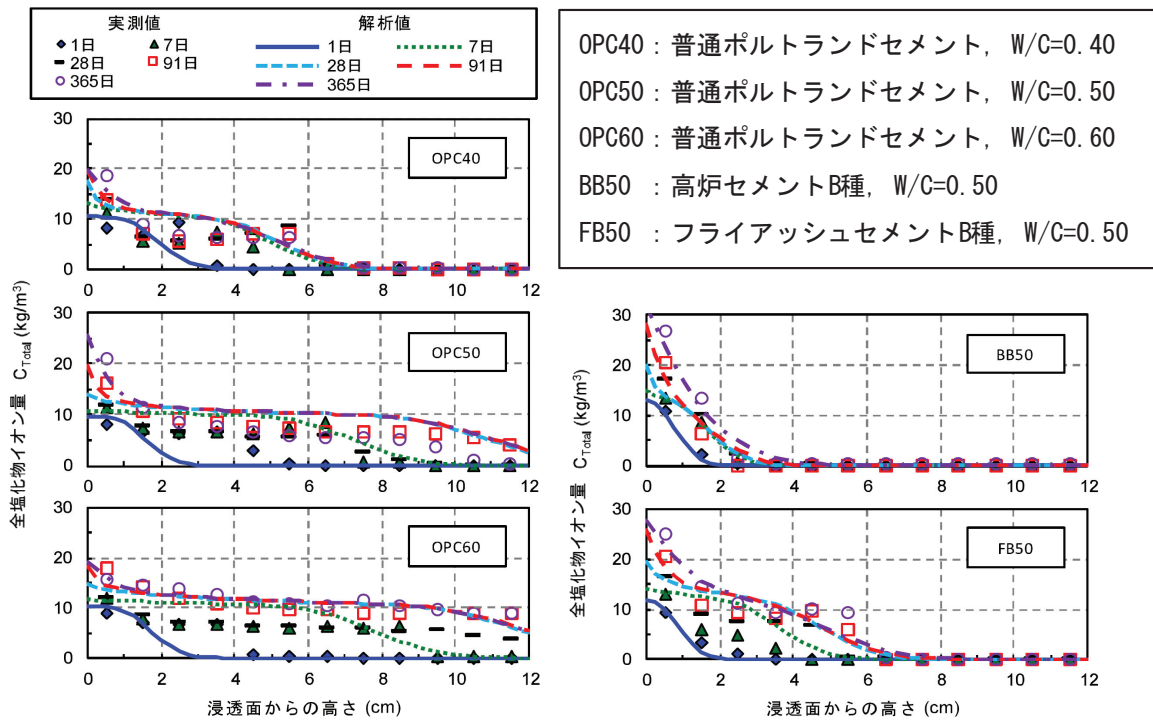


図-2.2 塩化物イオンの浸透に関する実験結果と数値解析結果³⁾

種実験から設定している。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_w \cdot \frac{\partial}{\partial x} - D_c \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) C(x, t) = 0 \quad (2.12)$$

ここに、 x はコンクリート表面からの距離[cm], t は経過時間[day], $C(x, t)$ は塩化物イオン濃度[kg/m^3], D_c は塩化物イオンの見かけの拡散係数[cm^2/year], v_w は液状水の移動速度[cm/day]である。式(2.12)から導出される数値解の妥当性の検証のため、濃度10%のNaCl水溶液に絶乾状態のモルタル供試体の1面を1cm程度浸漬させ、他面は気中位置となるように設置して所定の試験日数経過後に全塩化物イオン量を測定している。図-2.2に示す塩化物イオン浸透試験の結果と数値解析の結果が概ね一致していることから、塩化物イオンの浸透予測に液状水の浸透の影響を考慮する必要があることを示唆している。

以上より、塩化物イオンの浸透を評価する場合、コンクリート中の液状水（塩水）の浸透を考慮する必要がある。

2-4 微細空隙を有する物体中の液状水の浸透に関する既往の研究

2-2節、2-3節で中性化や塩害等に起因する鉄筋コンクリート構造物の鋼材腐食の照査を行う場合、コンクリート中の液状水の浸透を考慮する必要があることを述べた。以降に、コンクリート中の液状水の浸透に関連する既往の研究を示す。

乾燥を伴うコンクリート中の液状水の浸透は不飽和浸透解析により表されている⁴⁾⁶⁾。福原ら⁴⁾

は、不飽和状態のコンクリート中の液状水の浸透は表面張力に起因する毛管圧に基づくと考え、不飽和浸透解析を行っている。コンクリートの空隙中の水蒸気を理想気体、液状水を非圧縮性と見なし、両者の平衡状態を考える場合、「物質 1 mol 当たりのギブスの自由エネルギー（等温等圧過程における仕事に変換可能なエネルギー）」である化学ポテンシャルを液状水と水蒸気について考え、それぞれ次式で与えている。

$$\mu_l = \mu_{l0} + (P_l - P_0) / \rho_l \quad (2.13)$$

$$\mu_v = \mu_{v0} + R_v T \ln(P_v / P_{vs}) \quad (2.14)$$

ここに、 μ_l は液状水の化学ポテンシャル、 μ_v は水蒸気の化学ポテンシャル、 μ_{l0} は大気圧、基準温度において平らな液面を持つ液状水の化学ポテンシャル、 P_l は液状水の圧力、 P_0 は大気圧、 ρ_l は液状水の密度、 R_v は水蒸気的气体定数、 T は温度、 P_v は蒸気圧、 P_{vs} は温度 T における飽和蒸気圧である。水蒸気と液状水がお互いに相平衡の状態にあるとき、両者の化学ポテンシャルは等しいため、式(2.13)、式(2.14)より次式が得られる。

$$\psi = (P_l - P_0) / \rho_l g = R_v T \ln(P_v / P_{vs}) / g \quad (2.15)$$

ここに、 ψ は毛管水頭、 g は重力加速度である。ここで、相対湿度 $RH (= P_v / P_{vs})$ を用いて式(2.15)を変形すると、毛管圧に基づく圧力水頭である毛管水頭と相対湿度の関係式が次式のように導出される。

$$\psi = R_v T \ln(RH) / g \quad (2.16)$$

湿潤過程のコンクリート中の相対湿度を測定する等温吸湿実験から相対湿度と体積含水率の関係が図-2.3に示すように求まるため、この関係と式(2.16)から体積含水率と毛管水頭の関係が図-2.4に示すように求まる。また、不飽和状態のコンクリート中の液状水の浸透は Darcy 則に基づくと考え、支配方程式を次式で与えている。

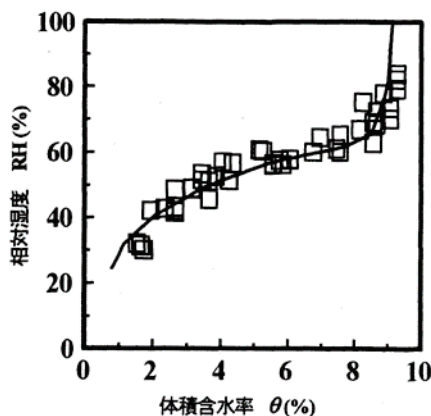


図-2.3 相対湿度と体積含水率の関係

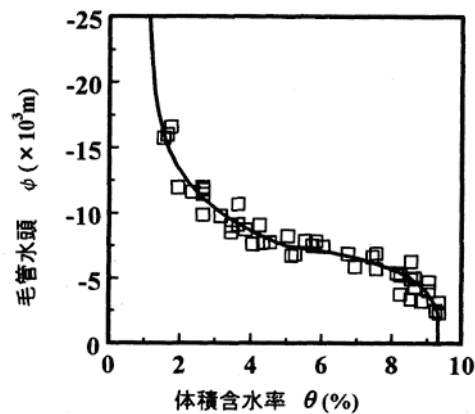


図-2.4 毛管水頭と体積含水率の関係

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - D\{\theta(x,t)\} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] \cdot \theta(x,t) = 0 \quad (2.17)$$

$$D\{\theta(x,t)\} = k\{\theta(x,t)\} \cdot \frac{\partial \psi\{\theta(x,t)\}}{\partial \theta(x,t)} \quad (2.18)$$

ここに、 x はコンクリート表面からの距離[m]、 t は経過時間[day]、 $\theta(x,t)$ はコンクリート中の体積含水率[%]、 $D\{\theta(x,t)\}$ は水分拡散係数[m²/day]、 $k\{\theta(x,t)\}$ は不飽和透水係数[m/day]である。式(2.17)より不飽和状態のコンクリート中の液状水の浸透は、拡散方程式と同型の放物型偏微分方程式に支配されるが、拡散係数相当の係数が含水率の関数になり、非線形偏微分方程式となるため基本的には数値解析により解を求めることになる。図-2.4に示す水分保水曲線に基づき有限要素解析(FEM)から求めた不飽和透水係数と体積含水率の関係を図-2.5に示し、式(2.18)から求めた水分拡散係数と体積含水率の関係を図-2.6に示す。不飽和浸透解析では、境界条件であるコンクリート供試体底面の体積含水率は測定値を用い、水分拡散係数は図-2.6に示す関係から求めている。図-2.7に示す不飽和浸透解析の結果とコンクリート中の液状水の浸透を測定する毛管浸透実験の結果

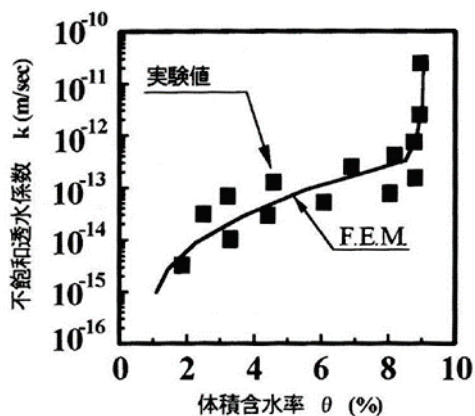


図-2.5 不飽和透水係数と体積含水率の関係

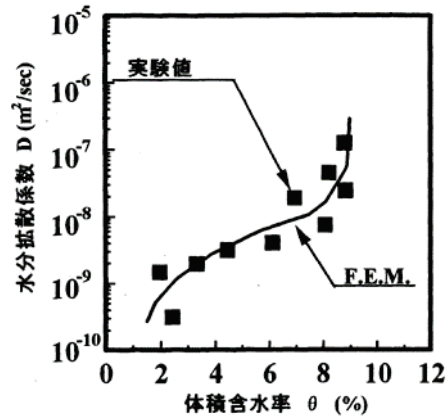


図-2.6 水分拡散係数と体積含水率の関係

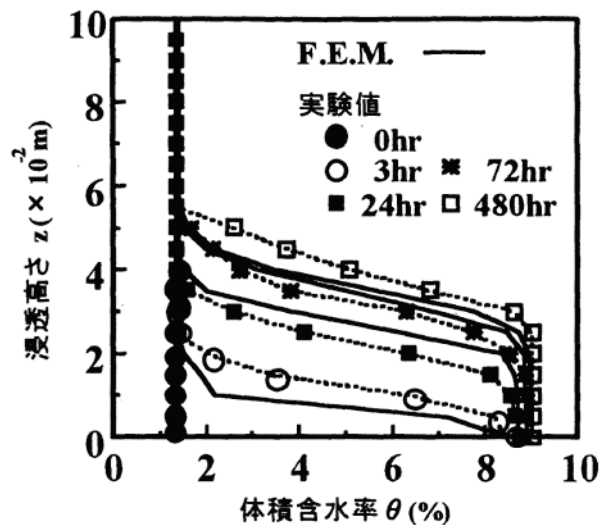


図-2.7 不飽和浸透解析と毛管浸透実験の結果

結果が概ね一致していることから、不飽和状態のコンクリート中の液状水の浸透は毛管圧に基づくことが示唆される。

以上に述べた液状水の浸透に関する解析結果は透水試験から決定する不飽和透水係数に大きく依存する。この不飽和透水係数は透水試験に用いるコンクリートの物性や飽和度、液状水への浸漬日数等に応じて変動するため、決定された透水係数の汎用性は低い。また、図-2.5より不飽和状態のコンクリートの透水係数は約 $1.0 \times 10^{-11} \sim 1.0 \times 10^{-15} \text{ m/s}$ であり、コンクリート内の乾燥程度に応じて最大で 10000 倍程度のばらつきが生じるため、Darcy 則に基づいた浸透解析の解析精度には疑問が残る。

一方、酒井ら⁷⁾は空隙構造が緻密なコンクリート中における塩化物イオンの浸透は液状水の浸透領域に限定されると考え、図-2.8に示すようなランダムに配置した要素を用いた数値解析（以下、パーコレーション解析）により液状水の浸透を表現している。パーコレーション解析では、液状水が浸透できる経路を粗大空隙要素 E_p で表し、液状水が浸透できない箇所を微細空隙要素 E_n と骨材要素で表している。細骨材は直径 2 mm、粗骨材は直径 15 mm の円状要素で表し、粗大な空隙を有する遷移帯の影響を表現するために骨材は E_p に囲まれていると仮定している。また、パーコレーション解析では粗大空隙要素 E_p と全要素数との比率を空隙率と定義している。解析フ

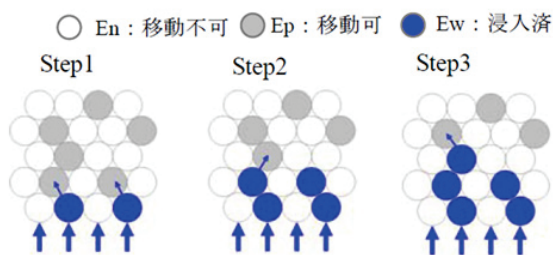


図-2.8 解析プロセス

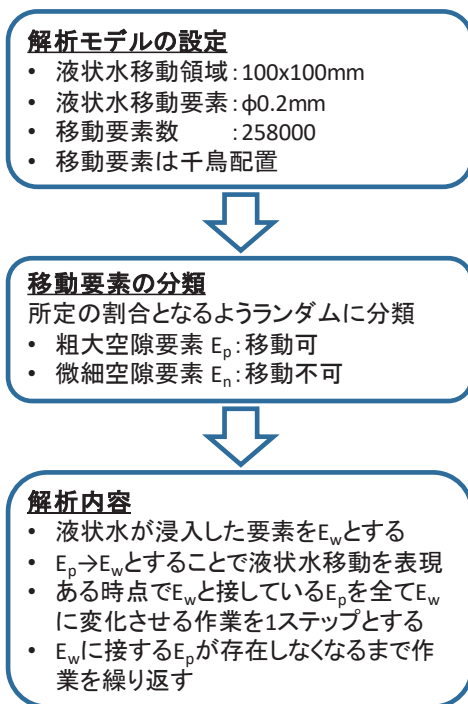


図-2.9 解析フロー

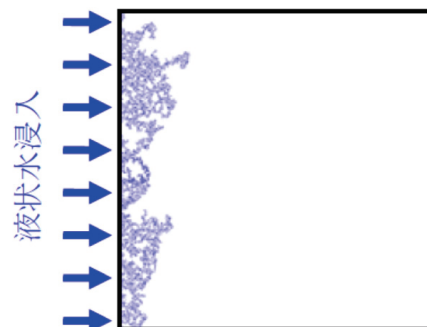


図-2.10 セメントペーストを想定した場合の解析結果

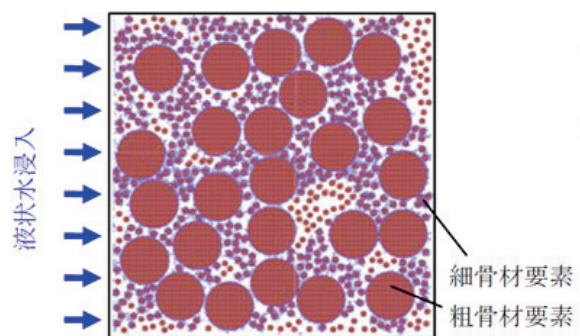


図-2.11 コンクリートを想定した場合の解析結果

ローを図-2.9 に示す。図-2.10, 図-2.11 はそれぞれセメントペースト, コンクリートを想定した解析モデルに解析領域の左端部から液状水を浸透させた場合のパーコレーション解析の結果を示している。しかし, パーコレーション解析は各種要素の大きさや配置パターンに大きく依存するため, これらを適切に設定できなければ解析精度が低下する可能性がある。

2-5 毛細管内の液状水の浸透に関する既往の研究

コンクリートのような微細空隙を有する物体中の液状水の浸透を解析する手法には, 2-4 節で述べた Darcy 則に基づく数値解析により液状水の浸透を解析する手法, 微細空隙を毛細管の束と仮定し毛細管内の液状水の浸透を解析する手法等がある。本節では, 毛細管内の液状水の浸透に関する既往の研究を示す。

毛細管内の液状水浸透に関する最初の力学的理論は Lucas⁸⁾, Washburn⁹⁾によって提案され, 図-2.12 に示すような水平毛細管内の液状水浸透に関する動的な力のつり合いに基づき導出した次式から, 毛細管内の液状水の浸透距離を求めている。

$$\rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} + \frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} = \frac{2\gamma}{r} \cos(\theta_s) \quad (2.19)$$

ここに, $h_l(t)$ は液状水浸透距離, t は時刻, r は毛細管内半径, γ は表面張力, θ_s は静的接触角, ρ_l は液状水の密度, η_l は液状水の粘度である。式(2.19)は毛細管内の液状水浸透に関する慣性力項, 液状水の粘性摩擦力項, 毛管力項から構成される。ここで, 液状水の浸透開始以降の浸透加速度が小さく, 慣性力項が液状水の粘性摩擦力項と比較して無視できるほど小さいと考え, 式(2.19)を次式のように変形している。

$$\frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} = \frac{2\gamma}{r} \cos(\theta_s) \quad (2.20)$$

また, 浸透開始前 ($t=0$ s) では液状水は静止状態であるため, 初期条件は次式で与える。

$$h_l(0) = 0 \quad (2.21)$$

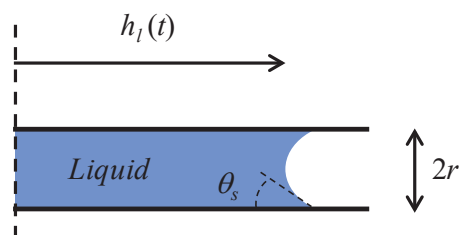


図-2.12 水平毛細管内の液状水の浸透

式(2.20)と式(2.21)より水平毛細管内の液状水の浸透距離に関する解析解（以下，L-W 式）は次式となる。

$$h_l(t) = \sqrt{\frac{r\gamma \cos(\theta_s)}{2\eta_l} t} \quad (2.22)$$

しかし，L-W 式では重力の影響を無視しており，鉛直上向きの毛細管を対象とした場合，液状水に作用する重力と毛管力が釣り合う位置での停滞状態を表現できない。

図-2.13 に示すような鉛直上向きの毛細管内の液状水浸透に関しては，式(2.19)に重力の影響を加え，次式で表される。

$$\rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} + \frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \rho_l g h_l(t) = \frac{2\gamma}{r} \cos(\theta_s) \quad (2.23)$$

ここに， $h_l(t)$ は液状水浸透高さ， g は重力加速度である。

Fries et al.¹⁰⁾は，液状水の浸透開始以降の浸透加速度が小さく，慣性力項が液状水の粘性摩擦力項および重力項と比較して無視できるほど小さいと考え，式(2.23)を次式のように変形している。

$$h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + A \cdot h_l(t) = B \quad (2.24)$$

ここで， A ， B は次式のように定義している。

$$A = \frac{\rho_l g r^2}{8\eta_l} \quad (2.25)$$

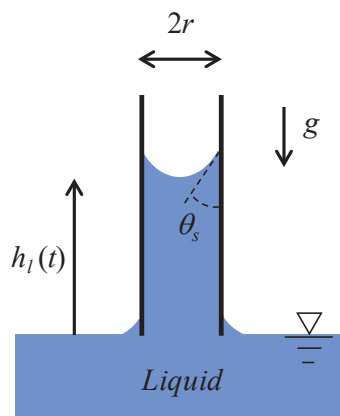


図-2.13 鉛直毛細管内の液状水の浸透

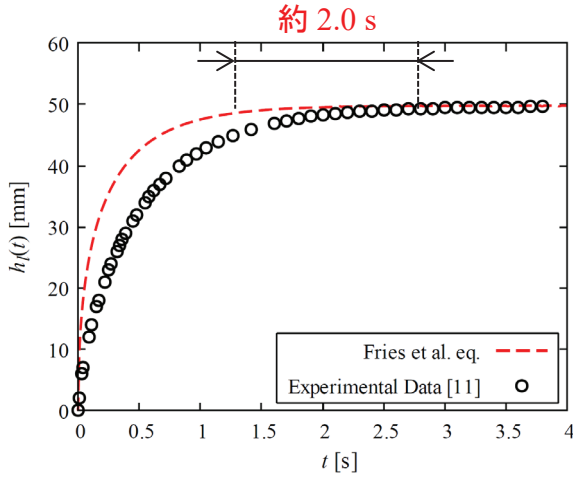


図-2.14 Fries et al.の解析解による解析結果と実験結果¹¹⁾の一例

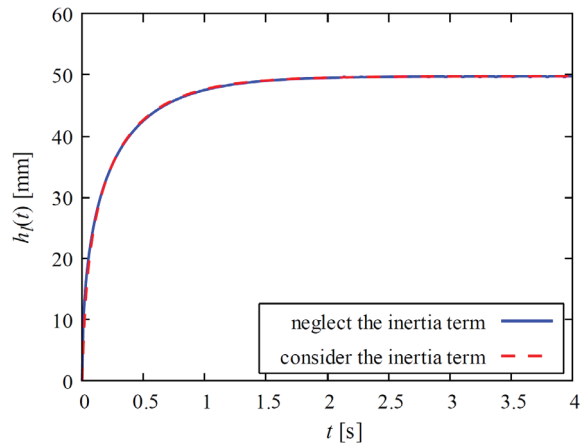


図-2.15 液状水浸透に関する慣性力項の影響

$$B = \frac{r\gamma \cos(\theta_s)}{4\eta_l} \quad (2.26)$$

式(2.24)と初期条件である式(2.21)より鉛直毛細管内の液状水の浸透高さに関する解析解は次式となる。

$$h_l(t) = \frac{B}{A} \left\{ 1 + W \left(-e^{-\frac{B+A^2t}{B}} \right) \right\} \quad (2.27)$$

ここに、 $W(x)$ は Lambert の W 関数である。

図-2.14 は r が 0.295 mm のガラス毛細管内の純水の浸透に関して、Fries et al.の解析解による解析結果と実験結果¹¹⁾の比較を示す。図-2.14 より、最終浸透高さに達するまでに要する時間は、解析結果と実験結果で約 2 秒の差があり、差が生じた原因として接触角の速度依存性を考慮していないことが挙げられる。また、式(2.23)の慣性力項の有無が解析結果に与える影響について、図-2.15 に慣性力項を考慮した場合と、無視した場合に生じる差について有限差分法を用いて考察した例を示す。図-2.15 より式(2.23)の慣性力項の有無により解析結果に大きな差は生じていないため、慣性力項が液状水の浸透挙動に与える影響は小さいと考えられる。

接触角の速度依存性を考慮した先行研究として、Hoffman¹²⁾は毛細管内の液状水を強制的に浸透させ、浸透速度が動的変化を考慮した接触角（以下、動的接触角）の3乗に比例することを実験で示し、Blake et al.¹³⁾は濡れの過程を化学反応とみなす分子動力学モデルを用いて、液状水の浸透速度と動的接触角の関係を示した。分子動力学モデルを用いた液状水浸透解析に関して既に多くの研究がなされており^{13)~18)}、分子動力学モデルを用いた場合の動的接触角は次式で与えられる。

$$\theta_d(t) = \cos^{-1} \left\{ \cos(\theta_s) - \frac{nkT}{\gamma\kappa^0\lambda} \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \quad (2.28)$$

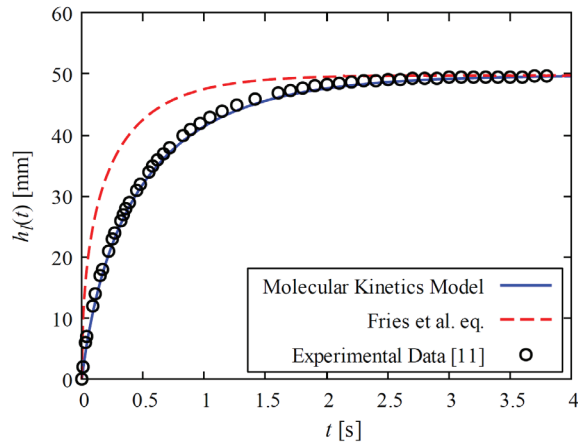


図-2.16 分子動力学モデルを用いた解析結果と実験結果¹¹⁾の一例

ここに、 θ_d は動的接触角、 k はボルツマン定数、 T は温度、 n は吸着サイト数、 λ はサイトの平均間隔、 κ^0 は吸着速度定数である。ここで、式(2.24)に接触角の動的変化を与えると次式となる。

$$\frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \rho_l g h_l(t) = \frac{2\gamma}{r} \cos\{\theta_d(t)\} \quad (2.29)$$

さらに、式(2.28)を式(2.29)に代入すると次式となる。

$$\frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \rho_l g h_l(t) = \frac{2\gamma}{r} \left\{ \cos(\theta_s) - \frac{nkT}{\gamma\kappa^0\lambda} \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \quad (2.30)$$

図-2.16は r が0.295 mmのガラス毛細管内の純水の浸透に関して、分子動力学モデルである式(2.30)を用いた解析結果およびFries et al.の解析解による解析結果と実験結果¹¹⁾の比較を示す。図-2.16より、分子動力学モデルを用いた解析結果はFries et al.の解析解による解析結果より実験結果と良い一致を示している。しかし、分子動力学に基づく場合、局所的な接触角を対象とするため毛細管内の液状水浸透で考えるような巨視的な接触角と対応しているか不明であることから、より詳細な検証が必要であると考えられる。

以上のような背景から、接触角の速度依存性を含む毛細管内の液状水の浸透に関する新たな解析手法を確立する必要がある、これはコンクリート中を浸透する液状水の挙動を評価する上で非常に重要であると考えられる。

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) 金谷光秀，榊田佳寛，阿部道彦，西村直洋：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.747-752，1996.
- 3) 小池賢太郎，山口明伸，武若耕司，福重耕平：水分移動を考慮した塩化物イオンの浸透モデルに関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.843-848，2016.
- 4) 福原輝幸，松岡茂，柳博文：コンクリートの毛管浸透と非定常法による不飽和透水係数の算定，土木学会論文集，No.564，V-35，pp.89-96，1997.
- 5) 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，第 316 号，pp.145-152，1981.
- 6) 秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法，土木学会論文集，No.490，V-23，pp.101-110，1994.
- 7) 酒井雄也，岸利治，中村兆治：微細空隙中を毛管張力により浸入する液状水挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.730-735，2012.
- 8) Lucas, R. : Ueber das Zeitgesetz des kapillaren Aufstiegs von Flüssigkeiten, *Kolloid-Z.* Vol. 23, pp. 15-22, 1918.
- 9) Washburn, E. W. : The dynamics of capillary flow, *Phys. Rev.*, Vol. 17, pp. 273-283, 1921.
- 10) Fries, N. and Dreyer, M. : An analytic solution of capillary rise restrained by gravity, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 320, pp. 259-263, 2008.
- 11) Hamraoui, A., Truresson, K., Nylander, T. and Yaminsky, V. : Can a Dynamic Contact Angle Be Understood in Terms of a Friction Coefficient?, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 226, pp. 199-204, 2000.
- 12) Hoffman, R. : A study of the advancing interface. 1. Interface shape in liquid – gas systems, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 50, pp. 228-241, 1975.
- 13) Blake, T. D. and Haynes, J. M. : Kinetics of liquidliquid displacement, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 30, pp. 421-423, 1969.
- 14) Chen, L., Yu, J. and Wang, H. : Convex Nanobending at a Moving Contact Line : The Missing Mesoscopic Link in Dynamic Wetting, *ACS Nano*, 8(11), pp. 11493-11498, 2014.
- 15) Sedev, R. : The molecular – kinetic approach to wetting dynamics : Achievements and limitations, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 222, pp. 661- 669, 2015.
- 16) Feng, D., Li, X., Wu, K., Li, J. and Zhao, W. : Capillary dynamic under nanoconfinement : Coupling the energy dissipation of contact line and confined water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp. 329-338, 2018.
- 17) Puah, L. S., Sedev, R., Fornasiero, D. and Ralston, J. : Influence of Surface Charge on Wetting Kinetics, *Langmuir*, 26(22), pp. 17218-17224, 2010.
- 18) Zhao, L. and Cheng, J. : Analyzing the Molecular Kinetics of Water Spreading on Hydrophobic Surfaces via Molecular Dynamics Simulation, *scientific reports*, 7(1), 10880, 2017.

第 3 章

接触角の動的変化を伴う毛管力を考慮した
毛細管内の液状水浸透解析

第3章 接触角の動的変化を伴う毛管力を考慮した毛細管内の液状水浸透解析

3-1 概説

本章では、コンクリート中の液状水の浸透は毛細管浸透に基づくと考え、まず1本の鉛直毛細管内を浸透する液状水の基礎的な挙動を解析的、実験的に明らかにする。第2章で示したように、接触角の速度依存性を考慮する毛細管内の液状水浸透解析を行う場合、接触角の動的変化の影響を含む毛管力（以下、動的毛管力）を定義する必要がある。

そこで、本章では、ガラス毛細管内の液状水浸透高さを測定する毛細管浸透実験を行った。そして、接触角と液状水の浸透速度との関係について観察を行い、接触角の動的変化の影響を含む動的毛管力を定義し、力のつり合いに基づき液状水浸透を支配する方程式を導出した。さらに、同方程式の解を近似する解析解を求め、毛細管浸透実験の結果との比較、考察を行い、提案した動的なメカニズムと解析解導出時に仮定した近似が正しいことを確認する。

3-2 毛細管浸透実験

(1) 実験概要

図-3.1に実験装置の概要を示す。本実験では、鉛直上向きの毛細管内の液状水浸透を観察するために、ガラス毛細管（以下、毛細管）を図-3.1に示すように固定し、毛細管下方から液状水を与えることにより液状水浸透を生じさせる。毛細管内の液状水浸透の様子は高速度カメラを用いて観察した。また、毛細管の材質はホウケイ酸ガラスであり、管内半径 r が 0.235 mm, 0.525 mm, 0.695 mm の毛細管を用い、液状水に水道水を用いた。

(2) 実験方法

実験方法として、まず液状水浸透開始から最終浸透高さに達するまでを高速度カメラ (Photron, FASTCAM SA-X2) により記録する。次に高速度カメラで記録した画像データから毛細管内の液状水浸透高さと時間を測定する。実験装置を図-3.2, 図-3.3に示し、毛細管として使用したガラ

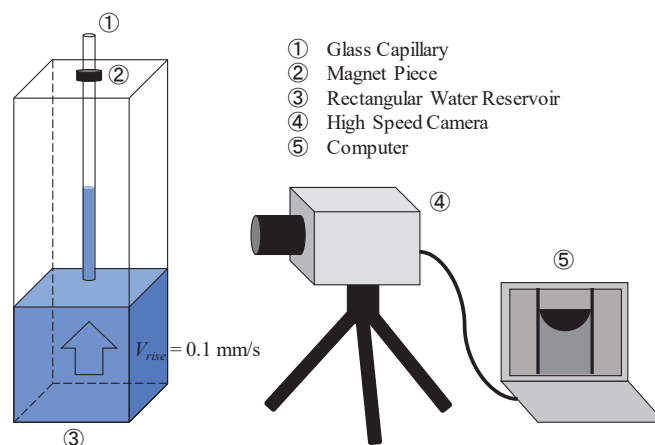


図-3.1 実験装置概要

ス毛細管を図-3.4に示す。毛細管内の液状水の浸透に関する慣性力、液状水の粘性摩擦力および毛管力は毛細管内半径 r に依存する。そこで、 r が 0.235 mm, 0.525 mm, 0.695 mm の毛細管を用い、 r が変化することによる液状水の浸透挙動の変化を確認する。毛細管内の液状水の浸透を開始させるために、毛細管下方から水槽内の水面を低速で上昇させ、毛細管入口に接触させた。ここで、毛細管接触時の水槽内の水面の揺らぎにより毛細管内の液状水の浸透に乱れを生じさせないために、液状水流入口から毛細管入口までの長さを十分に取り、上昇する水槽内の水面の揺らぎを抑えた。また、毛細管と水槽内の水面との接触時の衝撃圧による毛細管内への液状水の強制浸透を生じさせないために、水位上昇速度 0.1 mm / s 程度で水槽内の水面を上昇させて毛細管に接触させた。水槽内の水面が毛細管に接触した瞬間の記録画像からは外的作用による明らかな水面の揺らぎは確認されなかったため、水位上昇速度 0.1 mm / s 程度では、衝撃圧による毛細管内への液状水の強制浸透は生じていないと判断した。

毛細管内の液状水浸透高さの測定に用いた高速度カメラの撮影速度は 1000 fps で解像度は 1024

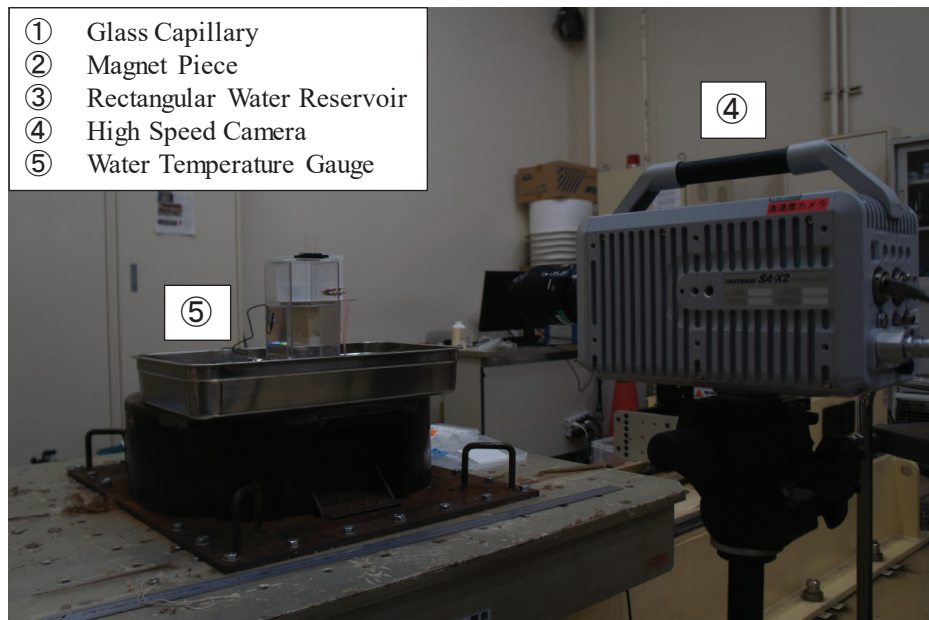


図-3.2 実験装置 (全体)

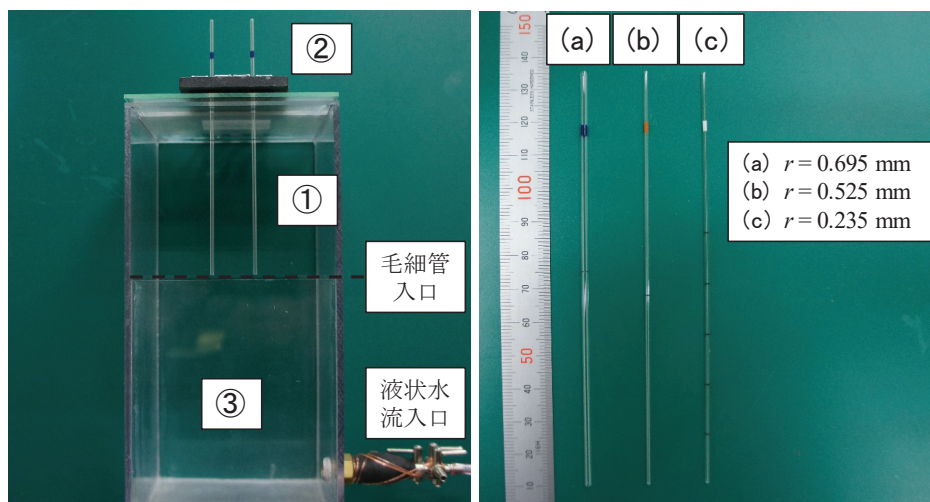


図-3.3 実験装置 (毛細管)

図-3.4 ガラス毛細管

×1024 pixels とし、記録した画像は高速度カメラと接続されたコンピュータにより確認を行った。また、高速度カメラ設置位置付近から毛細管に向けて照明（メタルハライドランプ）をあてることにより、光の屈折の関係で毛細管内の液状水面部が黒色となるため、この輝度差を利用して液状水浸透高さを測定した。図-3.5 に記録画像の一例を示す。液状水浸透高さの測定は、動画編集・解析ソフト（KEYENCE、ハイスピードマイクロスコープ VW-9000）を用いて、図-3.6 に示すように記録画像に 1.0 mm 間隔のクロススケールを表示し、浸透高さが 1.0 mm 到達毎の時間を測定した。また、実験は 20 ± 5 °C の室温で、液状水温度は 20 ± 0.5 °C で行った。

(3) 液状水浸透高さの測定結果

図-3.6 にガラス毛細管 ($r = 0.695$ mm) 内の液状水浸透高さの測定結果の一例を示す。測定結果のばらつきを考慮するため、測定された浸透高さに対して Thompson の棄却検定¹⁾を行い、採択された測定値の平均を採用する。 $r = 0.695$ mm のガラス毛細管については 20 データ、 $r = 0.525$ mm、 $r = 0.235$ mm のガラス毛細管については 10 データを浸透実験から記録し、それぞれ有意水準を 5% とした場合の棄却検定を行った。棄却検定後の各ガラス毛細管の液状水浸透高さの時間変化（以下、液状水の浸透時間曲線）を図-3.7 に示す。

(4) 液状水浸透に伴う接触角の動的変化

図-3.8 に液状水に水道水を用いた場合の浸透高さ $h_l(t)$ の測定結果と液面形状の記録画像を示す。図-3.8 の縦軸は液状水の浸透高さ $h_l(t)$ を最終浸透高さ h_{max} で除し、無次元量で表している。毛細管浸透実験から得られた記録画像からは接触角の測定は困難であったため、液面形状の記録画像から接触角の動的変化について考察する。図-3.8(a) に $r = 0.695$ mm のガラス毛細管を用いた



図-3.5 記録画像の一例 ($r = 0.695$ mm)

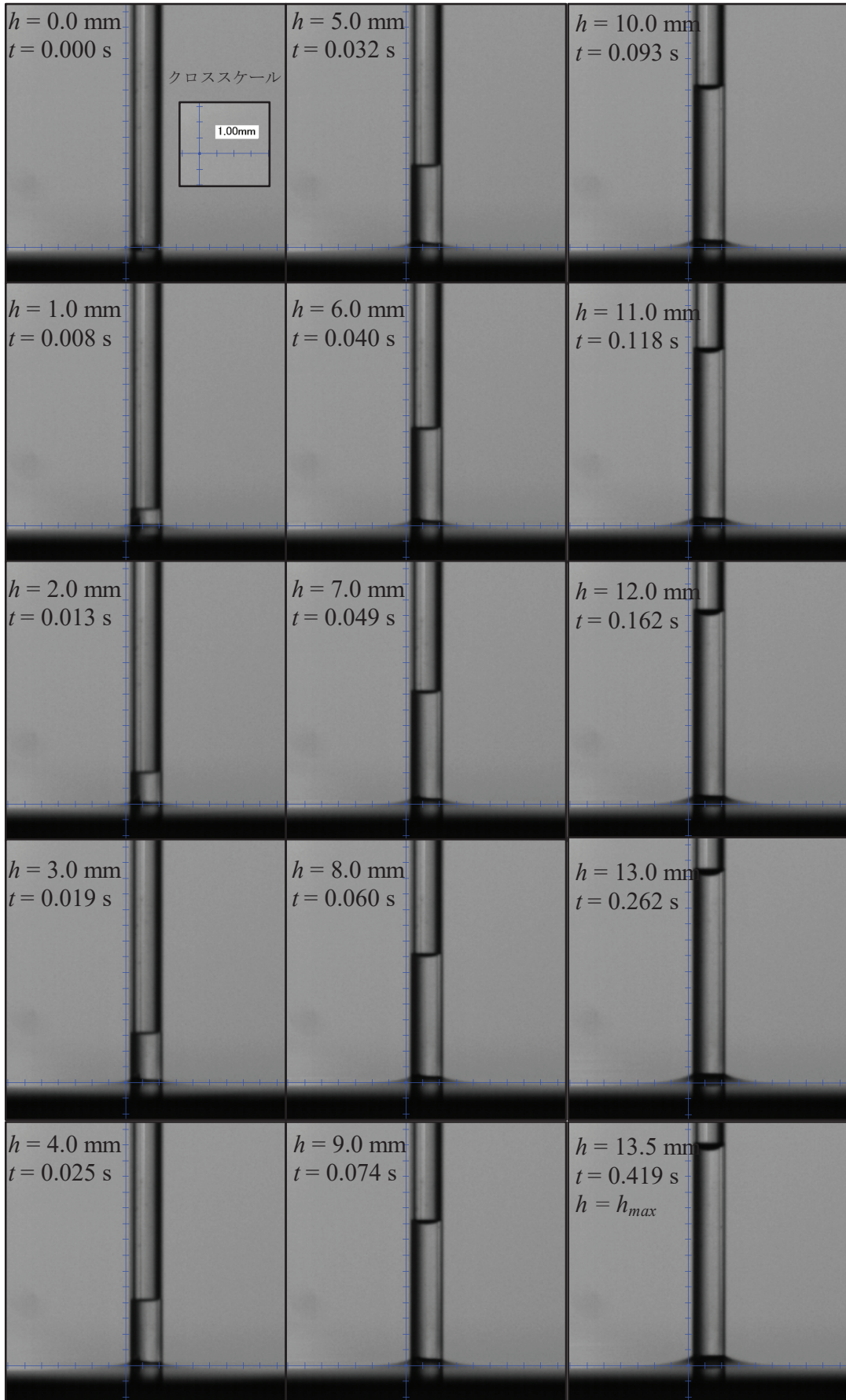
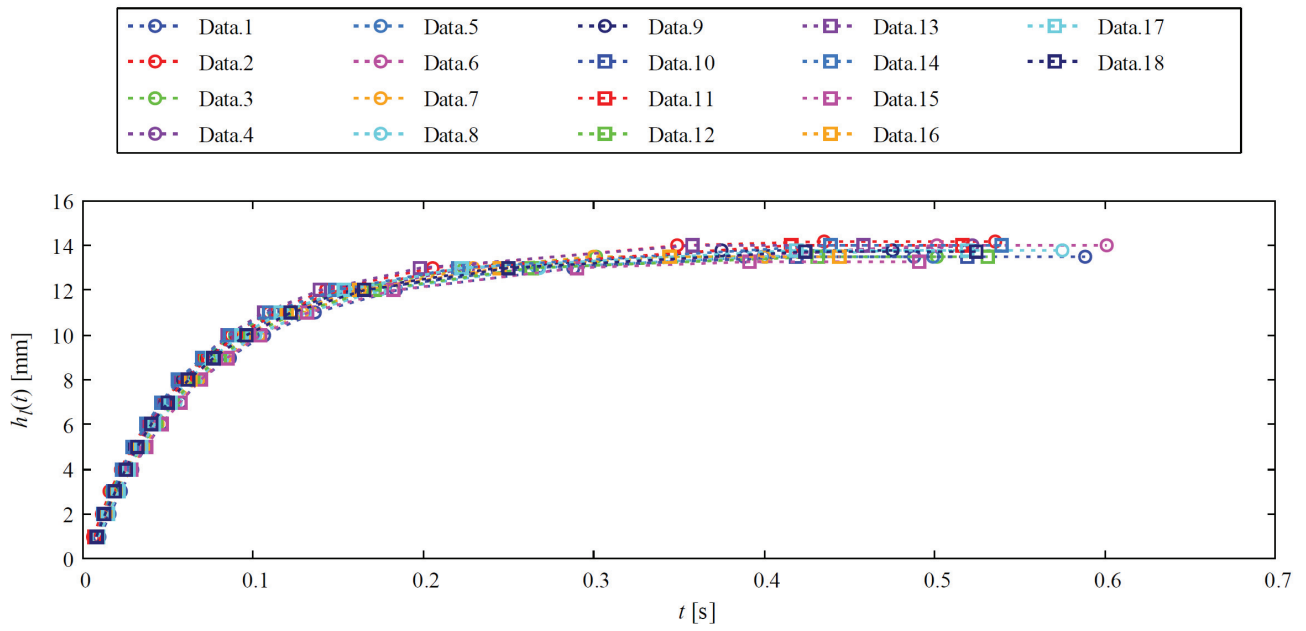
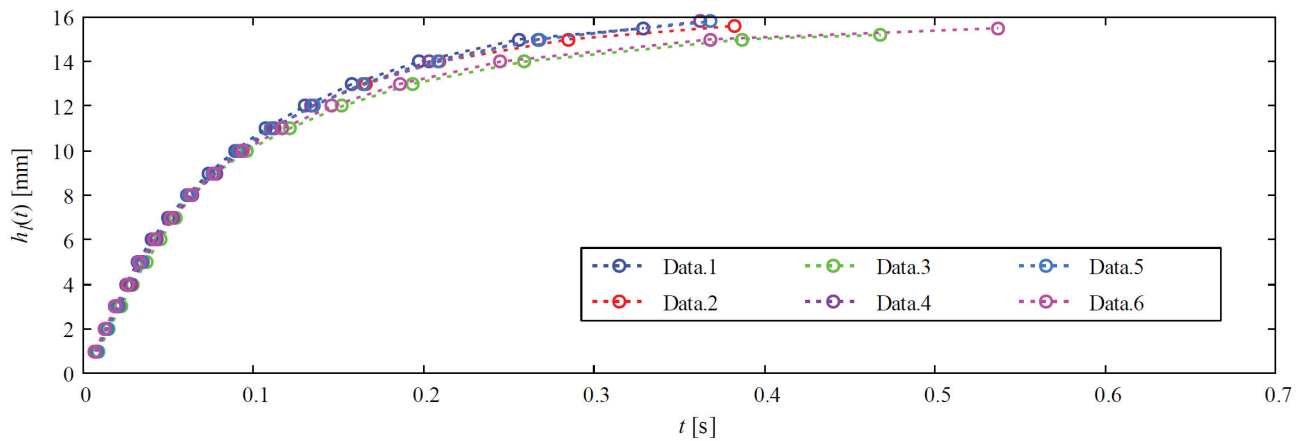


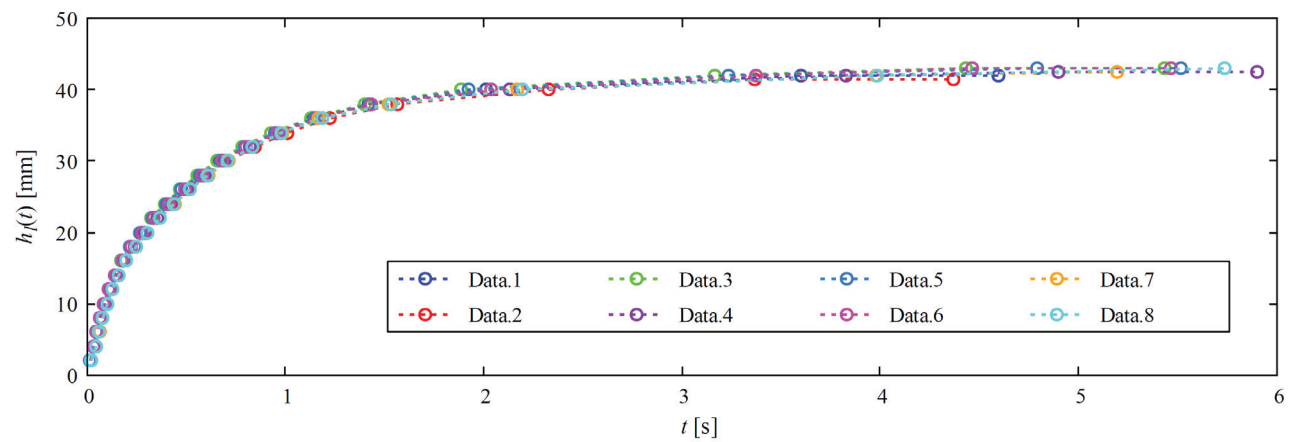
図-3.6 液状水浸透高さの測定の一例 ($r = 0.695 \text{ mm}$)



(a) $r = 0.695$ mm

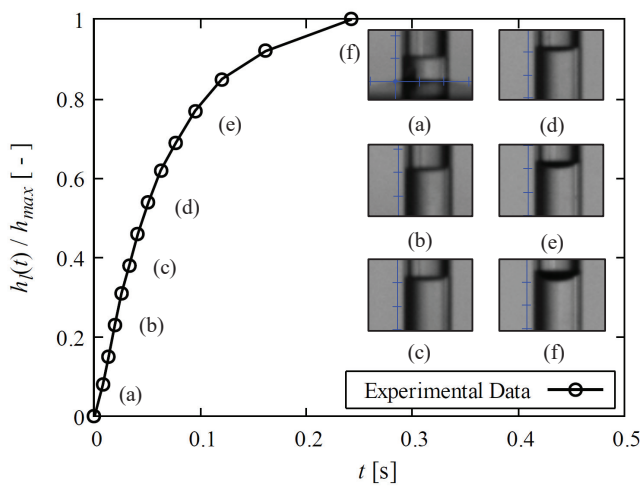


(b) $r = 0.525$ mm

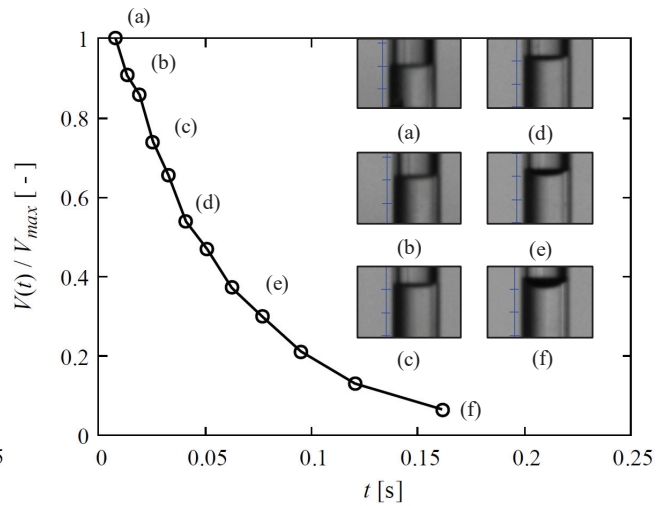


(c) $r = 0.235$ mm

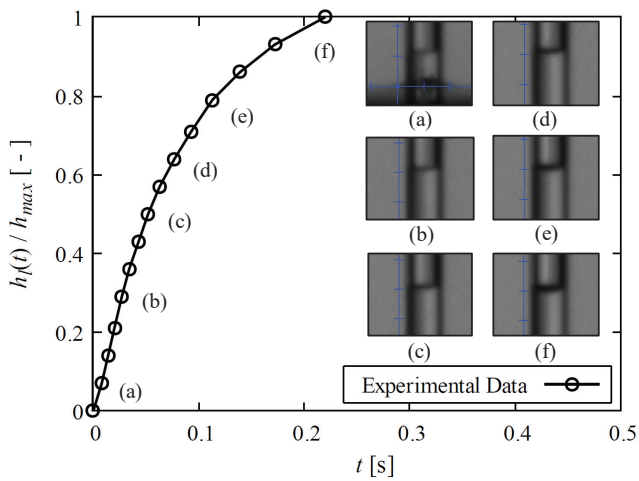
図-3.7 液状水の浸透時間曲線



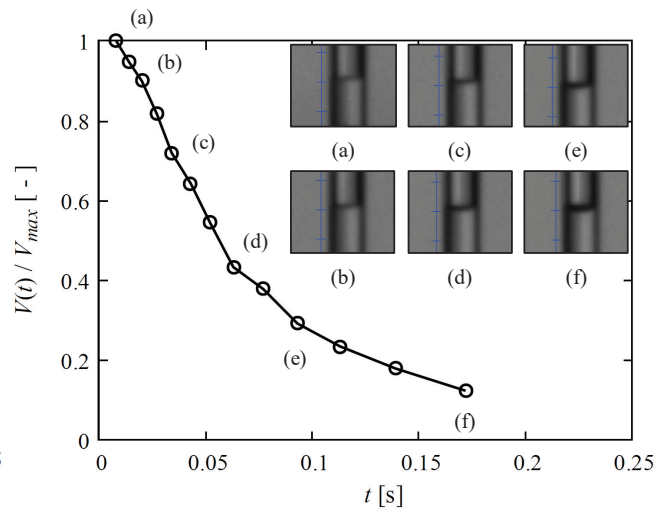
(a) $r = 0.695$ mm



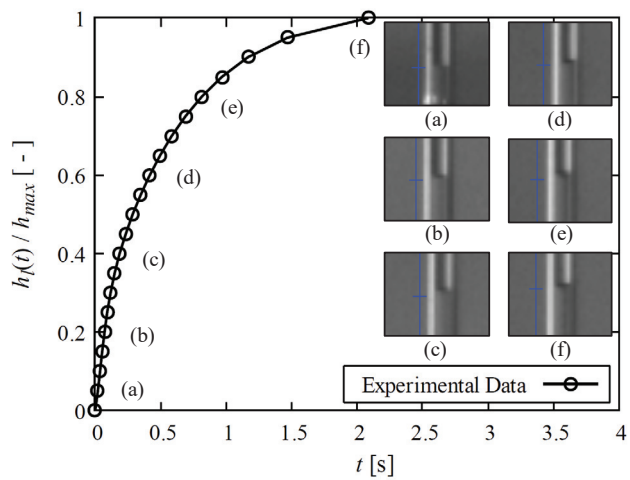
(a) $r = 0.695$ mm



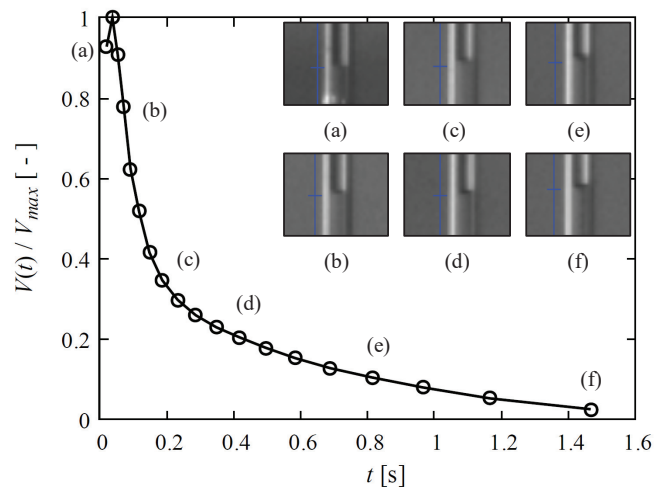
(b) $r = 0.525$ mm



(b) $r = 0.525$ mm



(c) $r = 0.235$ mm



(c) $r = 0.235$ mm

図-3.8 液状水の浸透時間曲線 (Water)

図-3.9 浸透速度比と液面形状 (Water)

場合の液状水の浸透高さの測定結果と液面形状の記録画像を示す。図-3.8(a)から液状水浸透高さ比が0~0.4程度では液面の形状がわずかに凹形状となり（記録画像(a)~(c)）、液状水の浸透時間曲線の勾配が緩やかになるにつれて凹曲面の曲率が大きくなる（記録画像(d)~(f)）ことを確認した。また、図-3.8(b)、図-3.8(c)に示すように $r = 0.525 \text{ mm}$, $r = 0.235 \text{ mm}$ の毛細管を用いた場合においても液状水浸透高さ比と液面形状の変化について同様の傾向が見られた。液状水の浸透高さの時間変化は液状水の浸透速度であるため、液面形状は液状水の浸透速度と関係があることが示唆される。

次に、液状水の浸透高さの時間変化から液状水の浸透速度を算出し、液状水の浸透速度と接触角の関係を考察する。図-3.9に液状水に水道水を用いた場合の液状水の浸透速度 $V(t)$ の算出結果と液面形状の記録画像を示す。図-3.9の縦軸は液状水の浸透速度 $V(t)$ を最大浸透速度 V_{max} で除し、無次元量で表している。図-3.9(a)に $r = 0.695 \text{ mm}$ のガラス毛細管を用いた場合の液状水の浸透速度の算出結果と液面形状の記録画像を示す。図-3.9(a)から液状水浸透速度比が0.7~1.0程度では液面の形状がわずかに凹形状となり（記録画像(a)~(c)）、液状水浸透速度比が0.7程度以下では浸透速度比が小さくなるにつれて凹曲面の曲率が大きくなる（記録画像(d)~(f)）ことを確認した。また、図-3.9(b)、図-3.9(c)に示すように $r = 0.525 \text{ mm}$, $r = 0.235 \text{ mm}$ の毛細管を用いた場合においても液状水浸透速度比と液面形状の変化について同様の傾向が見られた。このことから、液状水の浸透速度が低下するにつれて接触角が小さくなることが考えられる。以上より液状水の浸透速度と接触角の動的変化には関係があり、この関係を鉛直毛細管内の液状水浸透解析に反映させることを考える。

3-3 鉛直毛細管内の液状水浸透解析

(1) 動的毛管圧の設定

液状水の浸透速度と接触角の動的変化の関係を鉛直毛細管内の液状水浸透解析に反映させるため、接触角の動的変化の影響を含む毛管力（以下、動的毛管力）を定義する。ここで、接触角の動的変化の影響を含む毛管圧（以下、動的毛管圧）は、Young – Laplace の式を用いて表すと次式となる。

$$p_c(t) = \frac{2\gamma}{r} \cos\{\theta_d(t)\} \quad (3.1)$$

ここに、 $p_c(t)$ は動的毛管圧、 t は時刻、 r は毛細管内半径、 γ は表面張力、 $\theta_d(t)$ は動的接触角である。式(3.1)に毛細管内の断面積 πr^2 を乗じると動的毛管力は次式となる。

$$F_c(t) = p_c(t) \cdot \pi r^2 \quad (3.2)$$

ここに、 $F_c(t)$ は動的毛管力である。ここで、液状水浸透開始時 ($t = 0 \text{ s}$) に作用する動的毛管圧と浸透開始後、時間が十分に経過した時に作用する動的毛管圧を導出する。

まず、図-3.10に示すような接触角の動的変化を考慮した鉛直上向きの毛細管内の液状水浸透

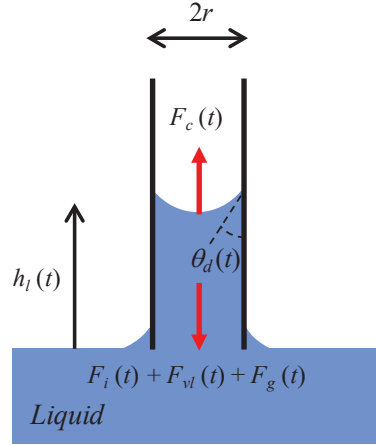


図-3.10 毛細管内の液状水浸透

に関する動的な力のつり合いから液状水浸透開始時に作用する動的毛管圧を導出する。毛細管内の液状水浸透に関する動的な力のつり合い式は次式となる。

$$F_i(t) + F_{vl}(t) + F_g(t) = F_c(t) \quad (3.3)$$

$$F_i(t) = \rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \cdot \pi r^2 \quad (3.4)$$

$$F_{vl}(t) = \frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \cdot \pi r^2 \quad (3.5)$$

$$F_g(t) = \rho_l g h_l(t) \cdot \pi r^2 \quad (3.6)$$

ここに、 $F_i(t)$ 、 $F_{vl}(t)$ 、 $F_g(t)$ はそれぞれ浸透する液状水に作用する慣性力、液状水の粘性摩擦力、重力、 $h_l(t)$ は液状水浸透高さ、 ρ_l は液状水の密度、 η_l は液状水の粘度、 g は重力加速度である。式(3.3)の両辺を断面積 πr^2 で除して圧力に関するつり合い式に変形すると次式となる。

$$\rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} + \frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \rho_l g h_l(t) = p_c(t) \quad (3.7)$$

また、浸透開始時 ($t = 0$ s) では液状水は静止状態であるため、初期条件は次式となる。

$$h_l(0) = 0 \quad (3.8)$$

式(3.8)を式(3.7)に代入すると次式となる。

$$p_c(0) = \rho_l V_0^2 \quad (3.9)$$

$$V_0 = \frac{dh_l(0)}{dt} \quad (3.10)$$

ここに、 V_0 は液状水の初期浸透速度である。式(3.9)より液状水浸透開始時に作用する動的毛管圧は液状水の初期浸透速度に依存することを示唆する。

次に、浸透開始後、時間が十分に経過した時に作用する動的毛管圧を導出する。時間が十分に経過し、液状水の浸透速度が 0、すなわち液状水が停滞状態となる時、動的毛管圧は静的接触角から決まる毛管圧になるため、次式のように表す。

$$p_c(\infty) = \frac{2\gamma}{r} \cos(\theta_s) \quad (3.11)$$

ここに、 θ_s は静的接触角である。ここで、動的毛管圧は液状水の浸透速度と線形関係にあると仮定し、次式で定義する。

$$p_c(t) = p_c(0) \cdot \frac{1}{V_0} \frac{dh_l(t)}{dt} + p_c(\infty) \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{V_0} \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \quad (3.12)$$

(2) 解析解の導出

式(3.12)を式(3.7)に代入した次式から、鉛直毛細管内の液状水の浸透高さに関する解析解を導出する。

$$\rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} + \frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \rho_l g h_l(t) = p_c(\infty) + \frac{p_c(0) - p_c(\infty)}{V_0} \cdot \frac{dh_l(t)}{dt} \quad (3.13)$$

式(3.13)は毛細管内の液状水浸透に関する慣性力項、液状水の粘性摩擦力項、重力項、動的毛管力項から構成される。ここで、式(3.13)の慣性力項を考慮した場合と、無視した場合に生じる解析結果の差について有限差分法を用いて考察した例を図-3.11に示す。図-3.11より慣性力項が液状水の浸透挙動に与える影響は小さいと考え、本検討では慣性力項を無視する。毛細管内の液状水の浸透に関する動的な力のつり合いにおいて、慣性力項の影響が小さくなる要因として、液状水の浸透開始以降の浸透加速度が小さいことが考えられる。よって、式(3.13)を次式のように変形する。

$$h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \frac{r^2 \{p_c(\infty) - p_c(0)\}}{8\eta_l V_0} \cdot \frac{dh_l(t)}{dt} + A \cdot h_l(t) = B \quad (3.14)$$

ここに、式(3.14)の係数 A 、 B は次式で表す。

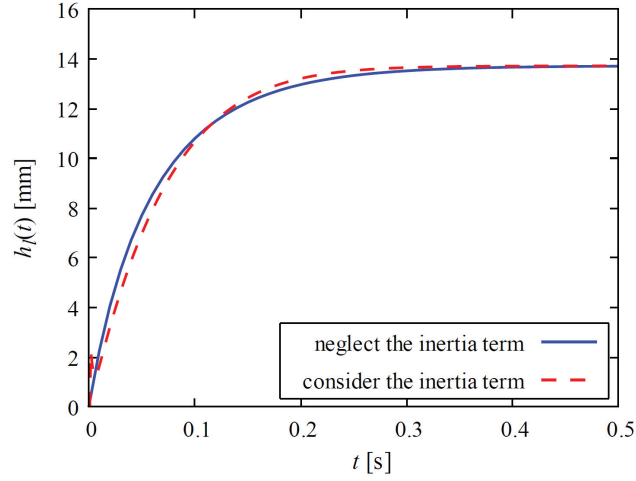


図-3.11 液状水浸透に関する慣性力項の影響 (Water, $r = 0.695$ mm)

$$A = \frac{\rho_l g r^2}{8\eta_l} \quad (3.15)$$

$$B = \frac{r\gamma \cos(\theta_s)}{4\eta_l} \quad (3.16)$$

また、浸透開始時 ($t = 0$ s) では液状水は静止状態であるため、初期条件は次式で与える。

$$h_l(0) = 0 \quad (3.17)$$

ここで、式(3.17)を式(3.14)に代入すると浸透開始時の液状水の浸透速度は次式となる。

$$\frac{dh_l(0)}{dt} = \frac{p_c(\infty)}{p_c(\infty) - p_c(0)} \cdot V_0 \quad (3.18)$$

式(3.18)は浸透開始時の液状水の浸透速度が、動的毛管圧の比と液状水の初期浸透速度 V_0 から成り立つことを表す。

式(3.14)を積分すると解析解は次式となる。

$$h_l(t) = \frac{B}{A} \left\{ 1 + (1 + AC) \cdot W \left(-\frac{1}{1 + AC} e^{-\frac{B + A^2 t}{B(1 + AC)}} \right) \right\} \quad (3.19)$$

$$C = \frac{p_c(\infty) - p_c(0)}{p_c(\infty) V_0} \quad (3.20)$$

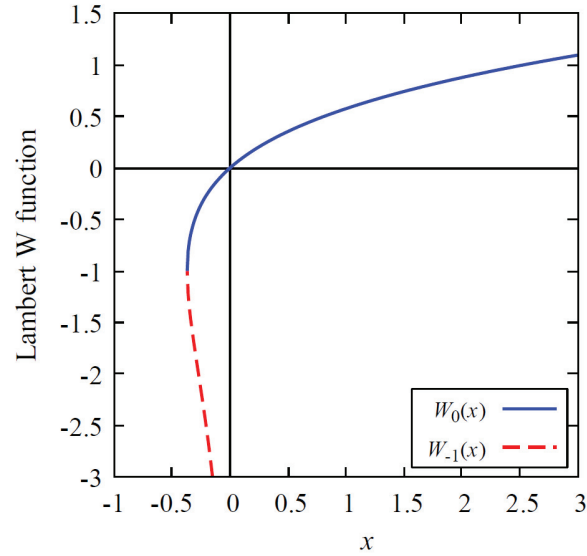


図-3.12 Lambert の W 関数

ここに、 $W(x)$ は Lambert の W 関数であり、関数としての特徴を図-3.12 に示す。W 関数は単調増加区間に対応する $W_0(x)$ と単調減少区間に対応する $W_{-1}(x)$ があるが、本研究では $W_0(x)$ を $W(x)$ と定義する。ここで、式(3.19)は $p_c(0)$ が $p_c(\infty)$ と等しい、すなわち接触角の動的変化に伴う毛管圧の変化を考慮しないとき Fries et al.²⁾ の解析解と一致する。また、 $t \rightarrow \infty$ では、接触角の動的変化に伴う毛管圧の変化の有無に因らず、式(3.19)と Fries et al. の解析解は一致する。

(3) 液状水の初期浸透速度の設定

式(3.9)に示すように液状水の初期浸透速度は毛細管入口に液状水が付着した瞬間に発生する毛管力に起因すると考えられる。ここで、式(3.1)と式(3.9)から導出した次式により液状水の初期浸透速度を定義する。

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_l r} \cos\{\theta_d(0)\}} \quad (3.21)$$

液状水の浸透開始時の動的接触角 $\theta_d(0)$ は毛細管内半径、液状水の粘度、表面張力および静的接触角の変化に大きく影響を受けると考え、これらの影響を含む動的接触角を次式で近似する。

$$\cos\{\theta_d(0)\} \approx \cos(\theta_s) \cdot Y \quad (3.22)$$

$$Y = \left(\frac{\gamma^* \eta^*}{r^*} \cdot X \right)^S \quad (3.23)$$

$$X = \frac{r}{\gamma \eta} \quad (3.24)$$

ここに、 X , Y は任意変数、 r^* , η^* , γ^* , S はそれぞれ実験データと解析結果とのフィッティングにより定める基準化した毛細管内半径、液状水の粘度、表面張力、指数である。ここで、次式に示すように式(3.23)の両辺に対して対数を取り、回帰分析により基準化した毛細管内半径、液状水の粘度、表面張力、指数を決定する。

$$\ln(Y) = S \cdot \ln(X) + S \cdot \ln\left(\frac{\gamma^* \eta^*}{r^*}\right) \quad (3.25)$$

各種パラメータの決定には、Hamraoui et al.³⁾が実施した純水、純エタノールを用いた毛細管浸透実験の結果と Extrand et al.⁴⁾が実施したエチレングリコールを用いた毛細管浸透実験の結果を採用し、各種液状水の実験パラメータを表-3.1に示す。図-3.13に示すように回帰分析を行い、次式に示す式(3.25)の回帰式を得た。

$$\ln(Y) = 1.2807 \cdot \ln(X) - 4.2145 \quad (3.26)$$

ここで、回帰式である式(3.26)とフィッティングにより得られた3データとの相関は0.959であり、強い相関を確認した。

表-3.1 実験パラメータ

Liquid	r (mm)	ρ_l (kg/m ³)	η_l (Pa s)	γ (mN/m)	θ_s (rad)
Water (pure)	0.295	1000	0.00100	72.00	0.00000
Ethanol	0.295	801	0.00117	22.00	0.00000
Ethylene Glycol	0.400	1110	0.02000	48.00	0.07552

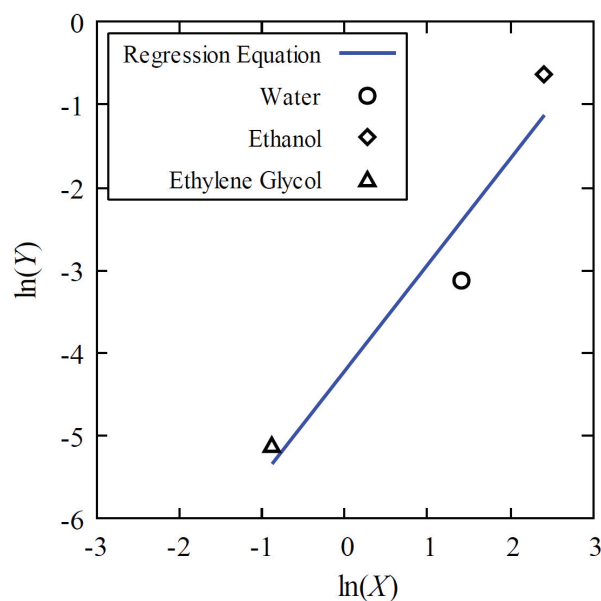
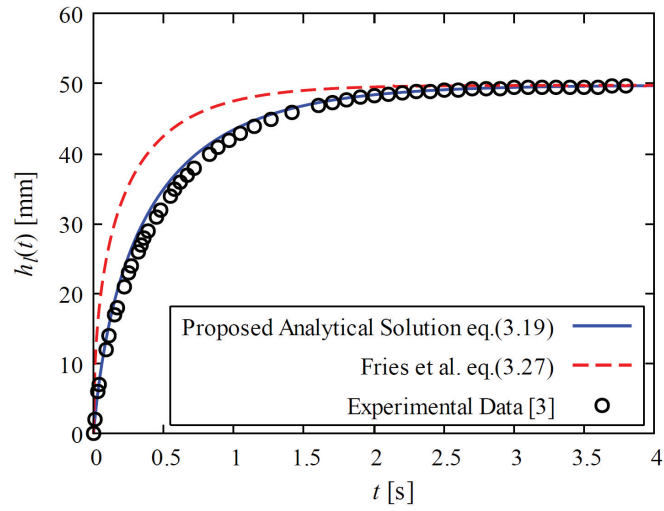
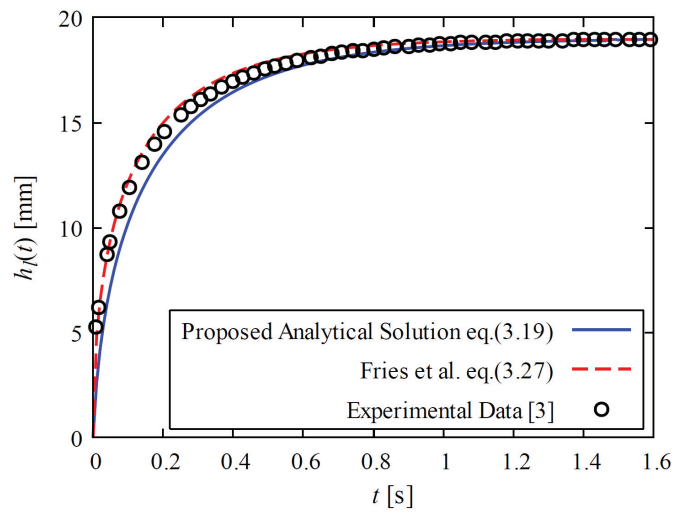


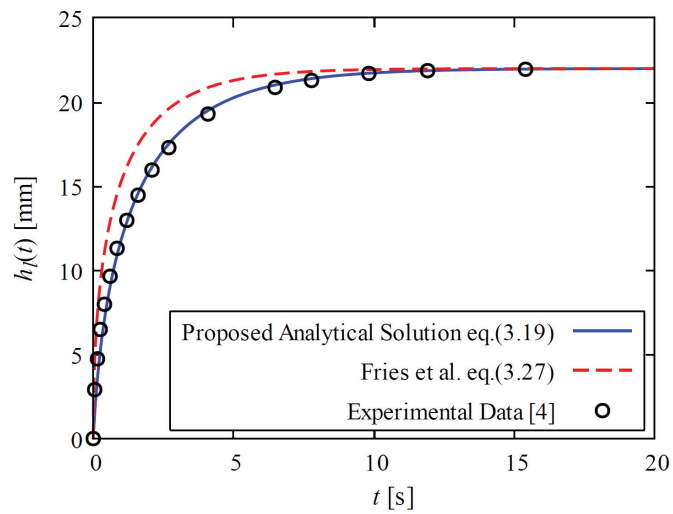
図-3.13 回帰分析



(a) Water (Pure)



(b) Ethanol



(c) Ethylene Glycol

図-3.14 液状水の浸透時間曲線

表-3.2 液状水の初期浸透速度に関するパラメータ

r^* (mm)	η^* (Pa s)	γ^* (mN/m)	S
1.934	0.00100	72.00	1.2807

また、図-3.14 に各種液状水の毛細管浸透実験の結果、式(3.19)による解析結果および Fries et al. が導出した解析解による解析結果を示す。ここに、Fries et al.の解析解を次式に示す。

$$h_l(t) = \frac{B}{A} \left\{ 1 + W \left(-e^{-\frac{B+A^2t}{B}} \right) \right\} \quad (3.27)$$

ここに、 A 、 B は次式のように定義している。

$$A = \frac{\rho_l g r^2}{8\eta_l} \quad (3.28)$$

$$B = \frac{r\gamma \cos(\theta_s)}{4\eta_l} \quad (3.29)$$

各種液状水の毛細管浸透実験の結果と解析結果とのフィッティングにより、表-3.2 に示すように基準化した毛細管内半径、液状水の粘度、表面張力、指数を決定した。決定したパラメータを式(3.21)に反映させると液状水の初期浸透速度の近似式は次式となる。

$$V_0 \approx \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_l r} \cos(\theta_s) \cdot e^{-4.2145} \cdot \left(\frac{r}{\gamma\eta_l} \right)^{1.2807}} \quad (3.30)$$

決定した各種パラメータはそれぞれに対しては同一の数値で表されるため、物性の異なる液状水を用いた解析を行う場合、新たにフィッティング処理を行う必要がないことが示唆される。しかし、フィッティングで用いた毛細管浸透実験の結果は、全て液状水の温度が約 20 °C の場合の結果であるため、温度変化に応じて液状水の密度、粘度、表面張力および接触角が大きく変化する場合は、実験結果と解析結果に差が生じる可能性がある。

(4) 実験結果と解析結果の比較

本章で実施した毛細管浸透実験の結果、既往研究の毛細管浸透実験の結果と本検討における液状水浸透解析の結果を比較する。本研究における静的接触角は、測定した液状水の最終浸透高さを用い、液状水に作用する重力と毛管力の静的な力のつり合いから次式で算出した。

$$\theta_s = \cos^{-1} \left\{ \frac{\rho_l g r h_l(\infty)}{2\gamma} \right\} \quad (3.31)$$

表-3.3 解析パラメータ

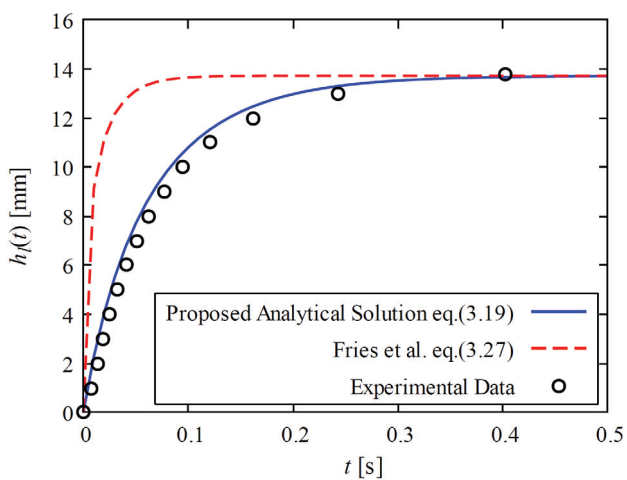
Liquid	r (mm)	ρ_l (kg/m ³)	η_l (Pa s)	γ (mN/m)	θ_s (rad)
Water (tap water)	0.695	998	0.00100	72.73	0.87414
	0.525	998	0.00100	72.73	0.98916
	0.235	998	0.00100	72.73	0.84512
Carbon tetrachloride ⁶⁾	0.300	1587	0.00090	26.40	0.23704
	0.360	1587	0.00090	26.40	0.08027
n-Tetradecane ⁶⁾	0.300	756	0.00210	26.10	0.35759
	0.550	756	0.00210	26.10	0.13133
n-Hexadecane ⁶⁾	0.550	773	0.00300	27.00	0.26740
Water – Ethanol Mixture (7.0 wt %) ³⁾	0.295	996	0.00100	50.37	0.00000
Polydimethylsiloxane (PDMS) oil ⁷⁾	0.315	918	0.00500	19.70	0.24144
	0.315	935	0.01000	20.10	0.24845
Water – Glycol mixture (70 wt %) ⁸⁾	0.215	1181	0.02200	65.30	0.00000
	0.440	1181	0.02200	65.30	0.10665
Water – Glycol mixture (85 wt %) ⁸⁾	0.440	1221	0.11000	64.50	0.01160
Water – Glycol mixture (100 wt %) ⁸⁾	0.215	1255	1.11000	63.80	0.10285

ここに、 $h_l(\infty)$ は液状水の最終浸透高さである。液状水浸透解析で用いるパラメータを表-3.3に示す。また、本実験で用いた液状水の物性は平成30年度理科年表⁵⁾から引用した。

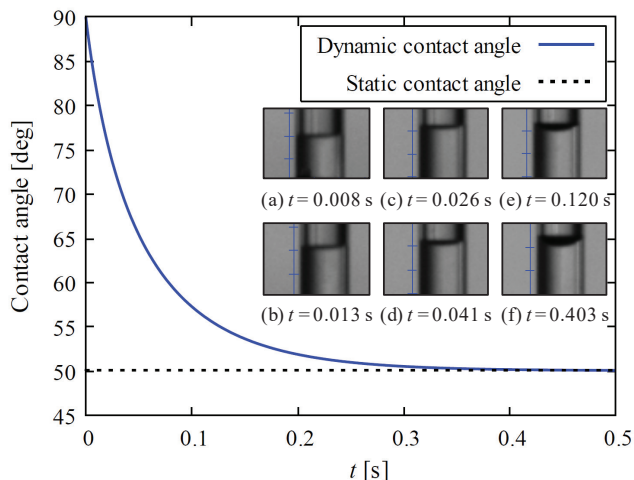
液状水に水道水を用いた場合の浸透時間曲線を図-3.15に示す。本検討における解析結果は、接触角の速度依存性による液状水浸透の特性を再現できており、Fries et al.の解析解による解析結果より実験結果と良い一致を示している。また、図-3.15より毛細管内半径が小さい程、液状水が最終浸透高さに達するまでに要する時間が長くなることを確認した。これは、毛細管内半径が小さい程、毛細管内の粘性摩擦の影響が大きくなり、液状水の浸透速度が低下するためである。

液状水に水道水を用いた場合の動的接触角の時間曲線を図-3.16に示す。ここに、動的接触角は式(3.19)を時間に関して微分し、式(3.1)と式(3.12)より次式となる。

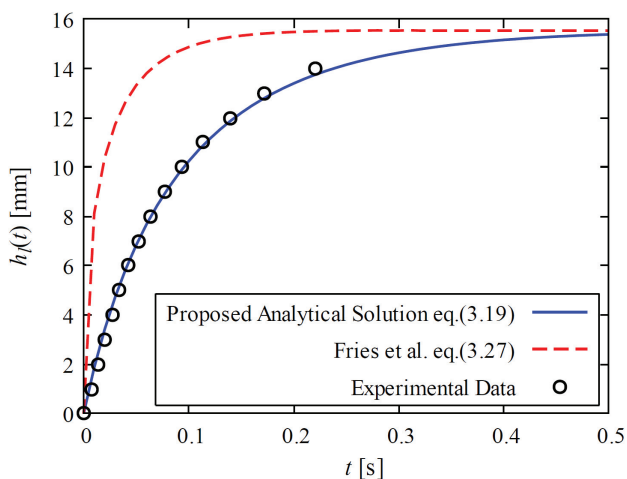
$$\theta_d(t) = \cos^{-1} \left[\frac{r}{2\gamma} \left\{ p_c(0) \cdot \frac{1}{V_0} \frac{dh_l(t)}{dt} + p_c(\infty) \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{V_0} \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \right\} \right] \quad (3.32)$$



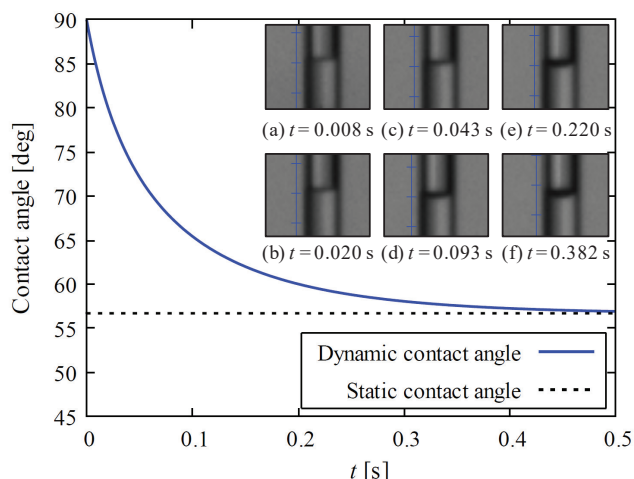
(a) $r = 0.695$ mm



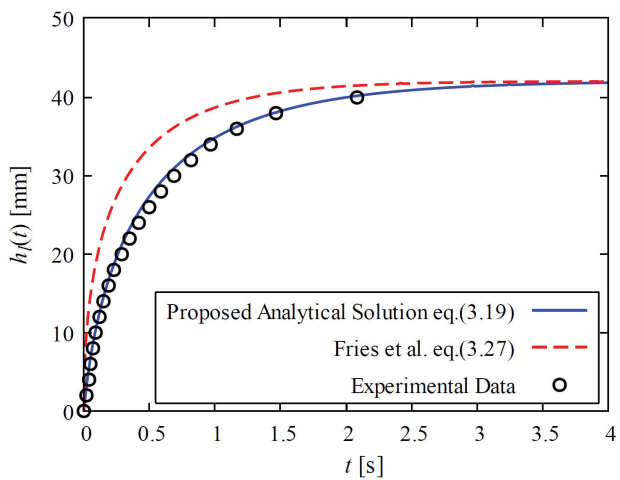
(a) $r = 0.695$ mm



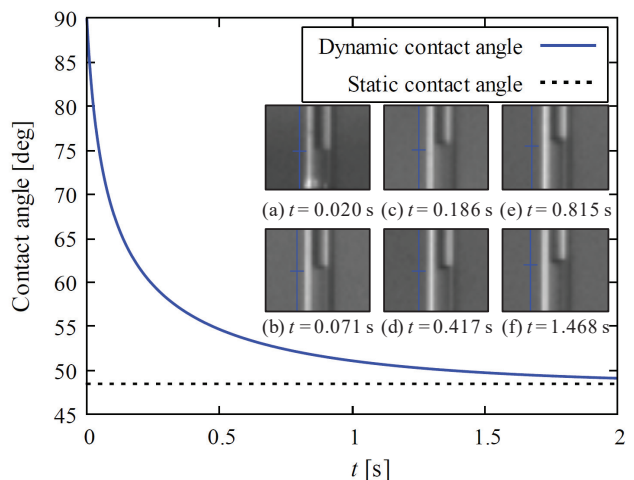
(b) $r = 0.525$ mm



(b) $r = 0.525$ mm



(c) $r = 0.235$ mm



(c) $r = 0.235$ mm

図-3.15 液状水の浸透時間曲線 (Water)

図-3.16 動的接触角の時間曲線 (Water)

$$\frac{dh_l(t)}{dt} = -\frac{A \cdot Z(t)}{1+Z(t)} \quad (3.33)$$

$$Z(t) = W \left\{ -\frac{1}{1+AC} e^{-\frac{B+A^2t}{B(1+AC)}} \right\} \quad (3.34)$$

毛細管浸透実験から得られた記録画像からは接触角の測定は困難であったため、液面形状の記録画像から式(3.32)に示す動的接触角に関する解析解の妥当性を検証する。図-3.16より浸透開始直後の液面形状（記録画像(a)）はわずかに凹形状であることが確認でき、動的接触角は90°以下であることが考えられる。本検討の解析により得られた浸透開始直後の動的接触角は90°以下であり、また浸透開始後の液面形状（記録画像(b)～(e)）の時間変化に関しても本検討の解析では動的接触角の特徴を概ね再現できていると考えられる。毛細管浸透実験から得られた最終浸透高さに達する時刻（記録画像(f)）と、本検討の解析により得られた動的接触角が静的接触角と等しくなる時刻が概ね一致することを確認した。

図-3.17は式(3.32)に示す慣性力項を無視した場合の動的接触角に関する解析結果と、慣性力項を考慮した場合の動的接触角の解析結果の比較を示す。慣性力項を考慮した場合の動的接触角は、液状水浸透高さに関する解析解である式(3.19)を式(3.7)に与え、次式により算出した。

$$\theta_d(t) = \cos^{-1} \left[\frac{r}{2\gamma} \left\{ \rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} + \frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \rho_l g h_l(t) \right\} \right] \quad (3.35)$$

ここで、図-3.17では、慣性力項を無視した場合の動的接触角を $\theta_d(t)_{\text{neg}}$ 、慣性力項を考慮した場合の動的接触角を $\theta_d(t)_{\text{con}}$ と表記している。式(3.7)の慣性力項、液状水の粘性摩擦力項、重力項の時間変化と動的接触角の時間変化の関係について考察する。ここで、式(3.7)の慣性力項、液状水の粘性摩擦力項、重力項はそれぞれ次式に示す。

$$p_i(t) = \rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \quad (3.36)$$

$$p_{vi}(t) = \frac{8\eta_l}{r^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \quad (3.37)$$

$$p_g(t) = \rho_l g h_l(t) \quad (3.38)$$

ここに、 $p_i(t)$ 、 $p_{vi}(t)$ 、 $p_g(t)$ はそれぞれ浸透する液状水に作用する単位断面積当たり（断面積 πr^2 ）の慣性力、液状水の粘性摩擦力、重力である。図-3.17より同じ物性の液状水を用いた場合、毛細管内半径が大きい程、式(3.32)と式(3.35)から得られた浸透初期の動的接触角の差が大きくなる

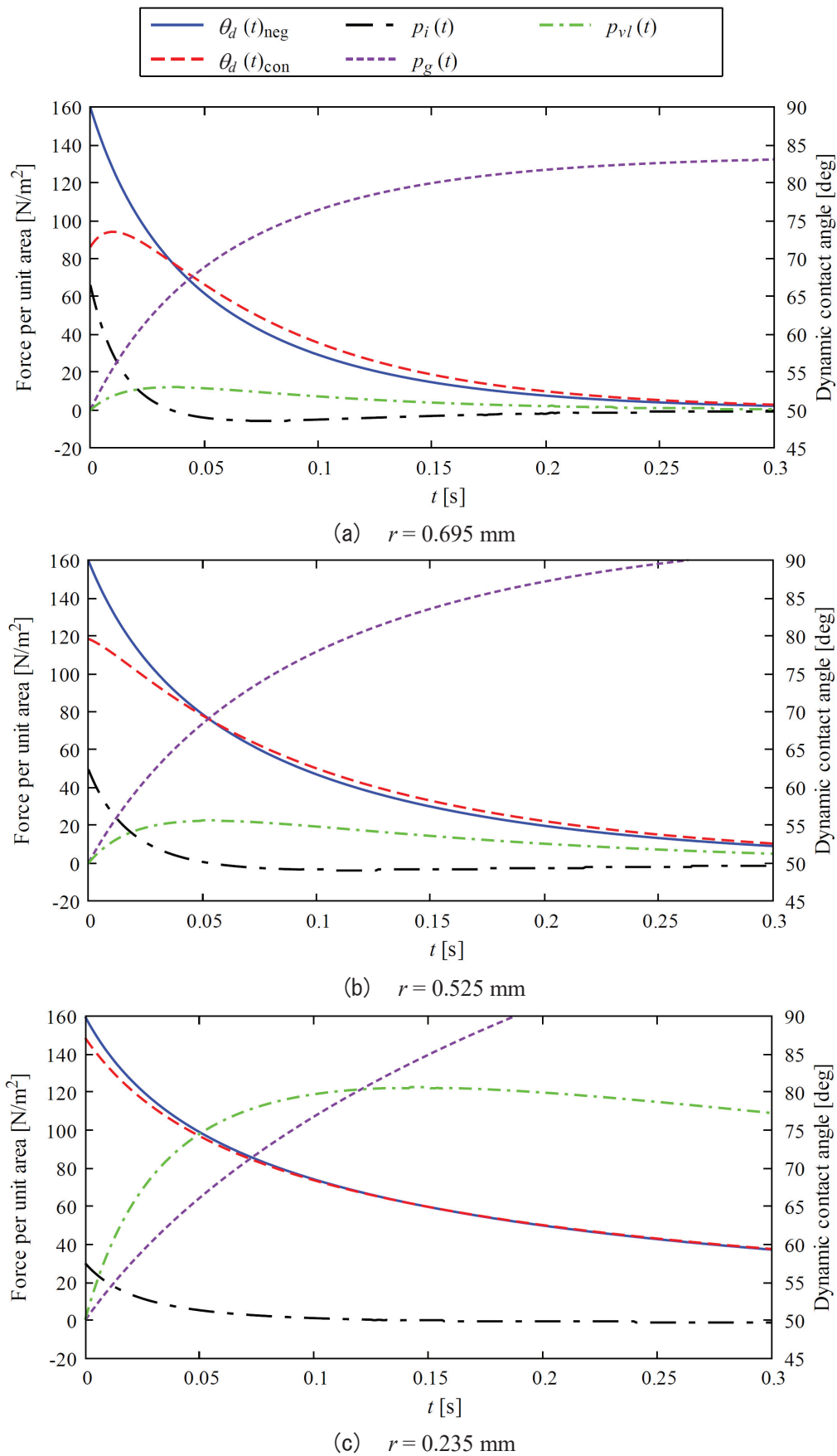


図-3.17 動的接触角と式(3.13)の各項の時間変化

ことを確認した。これは、毛細管内半径が大きい程、浸透する液状水の質量が増大し、慣性力が大きくなるため、慣性力項の有無が解析結果に影響を与えることを示唆する。浸透開始後、時間の経過に伴い液状水に作用する液状水の粘性摩擦力と重力が大きくなり、液状水に作用する慣性力が無視できる条件では式(3.32)を用いた場合の解析結果と式(3.35)を用いた場合の解析結果は概ね良い一致を示す。また、液状水の浸透速度が大きい場合に動的接触角が大きくなる傾向は Siebold et al.⁹⁾の測定結果と一致した。以上より、管内半径が大きい毛細管を対象とする場合、液状水に作用する慣性力の影響が大きくなるため、浸透初期では慣性力項を無視した解析解(式(3.19))を用いた液状水浸透解析の精度が低下することが考えられる。一方、コンクリート中の液状水の浸透を対象とした場合、コンクリート中の空隙は直径 10 nm~5 μm 程度¹⁰⁾と微細であるため液状水に作用する慣性力の影響は小さいと考えられる。したがって、コンクリート中の液状水浸透解析では、本検討で示した慣性力項を無視した解析解が適用できる可能性があると考えられる。

既往研究の毛細管浸透実験の結果と本検討で導出した液状水浸透解析の結果から得られた浸透時間曲線を図-3.18~図-3.20に示す。図-3.18~図-3.20より、毛細管浸透実験に用いた溶液の種類、毛細管内半径に因らず解析結果は、Fries et al.の解析解による解析結果より実験結果と良い一致を示した。

純水と純エタノールを用いた場合の動的接触角の時間曲線を図-3.21に示す。図-3.21は式(3.32)を用いた場合の解析結果と、濡れの過程を化学反応とみなす分子動力学モデルを用いた Hamraoui et al.³⁾の解析結果の比較を示している。図-3.21より式(3.32)を用いた場合の解析結果と分子動力学モデルを用いた解析結果は概ね一致していることを確認した。また、分子動力学モデルを用いた場合の動的接触角は次式で与えられる。

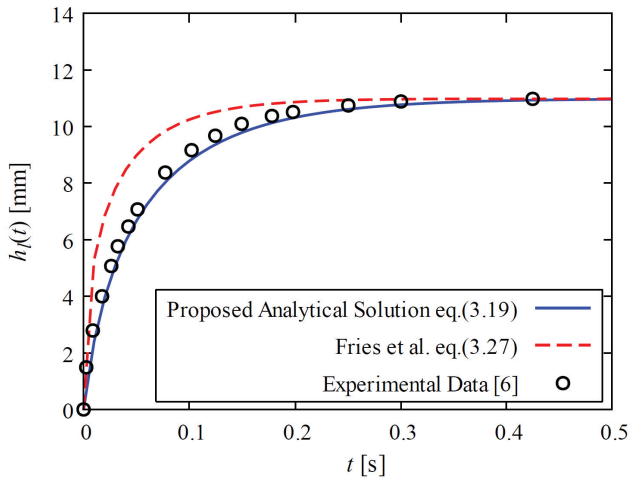
$$\theta_d(t) = \cos^{-1} \left\{ \cos(\theta_s) - \beta \cdot \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \quad (3.39)$$

$$\beta = \frac{nkT}{\gamma\kappa^0\lambda} \quad (3.40)$$

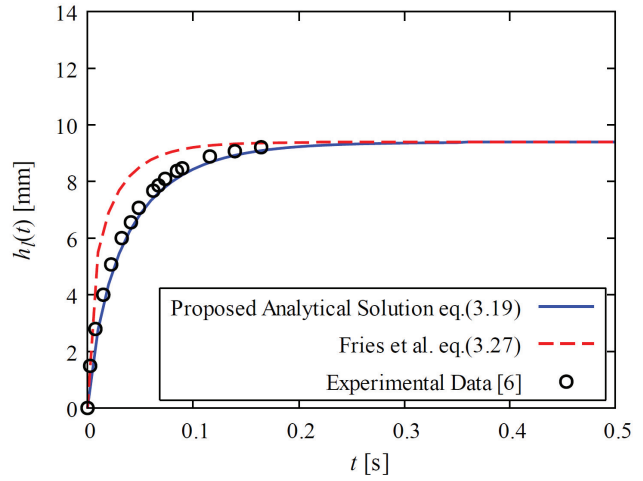
ここに、 k はボルツマン定数、 T は温度、 n は吸着サイト数、 λ はサイトの平均間隔、 κ^0 は吸着速度定数である。式(3.39)を用いる場合、吸着速度定数 κ^0 を求める必要があり、Eyring の反応速度式を拡張した次式から κ^0 を推定する手法が提案されている^{11), 12)}。

$$\kappa^0 = \frac{kT}{\eta_l\nu} e^{-\frac{\Delta G_0}{kT}} \quad (3.41)$$

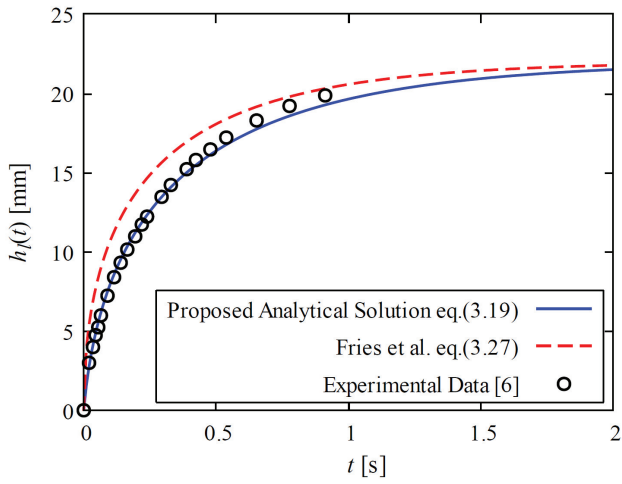
ここに、 ΔG_0 は活性化エネルギー、 ν は液状水のモル体積である。しかし、式(3.39)は局所的な接触角を考えており、毛細管内の液状水浸透で考えるような巨視的な接触角と対応しているか不明である。また、活性化エネルギーが動的接触角に依存することも考えられること¹³⁾から、分子動力学モデルを解析に用いる場合は、より詳細な検証が必要であると考えられる。Hamraoui et al.^{3), 7)}の解析では、分子パラメータである β を液状水浸透高さに関する解析結果と実験結果とのフィッ



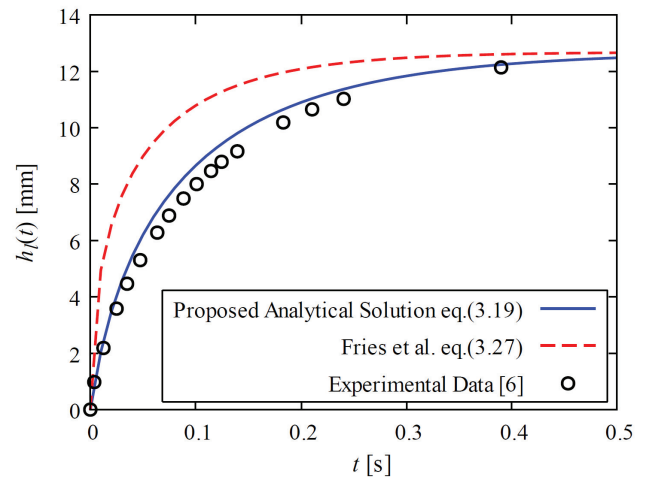
(a) Carbon tetrachloride, $r = 0.300$ mm



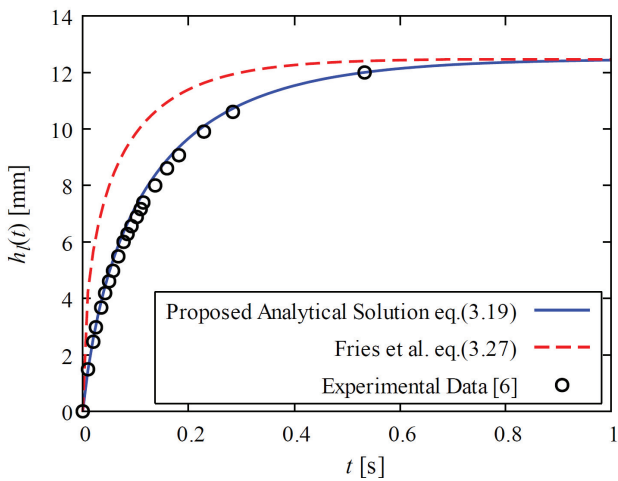
(b) Carbon tetrachloride, $r = 0.360$ mm



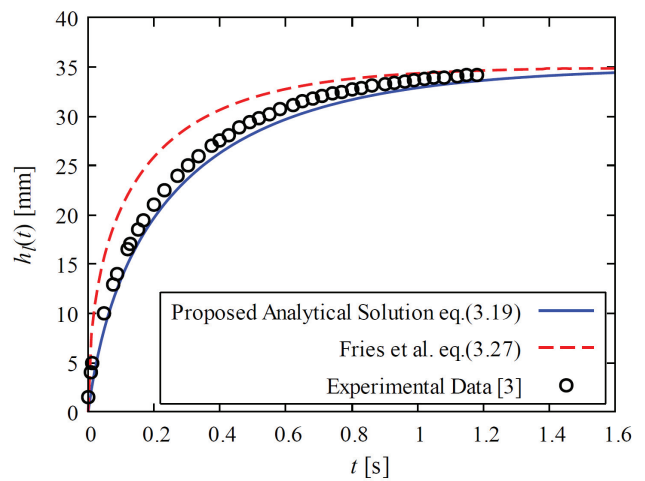
(c) n-Tetradecane, $r = 0.300$ mm



(d) n-Tetradecane, $r = 0.550$ mm

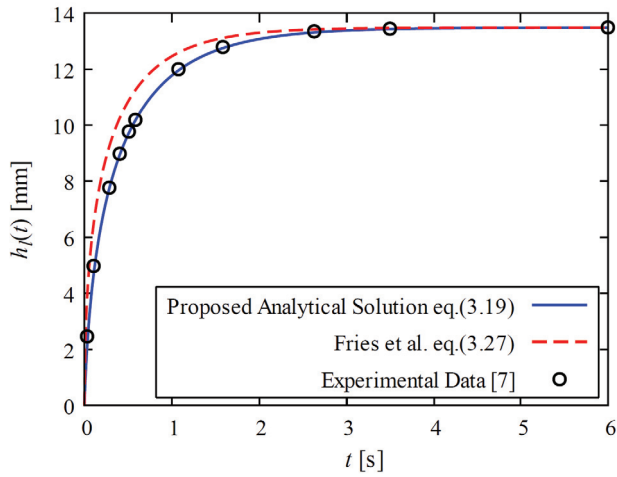


(e) n-Hexadecane, $r = 0.550$ mm

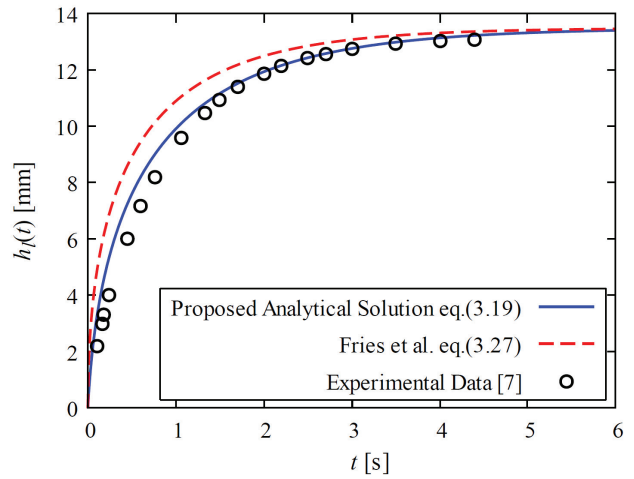


(f) Water-Ethanol mixture, $r = 0.295$ mm

図-3.18 液状水の浸透時間曲線

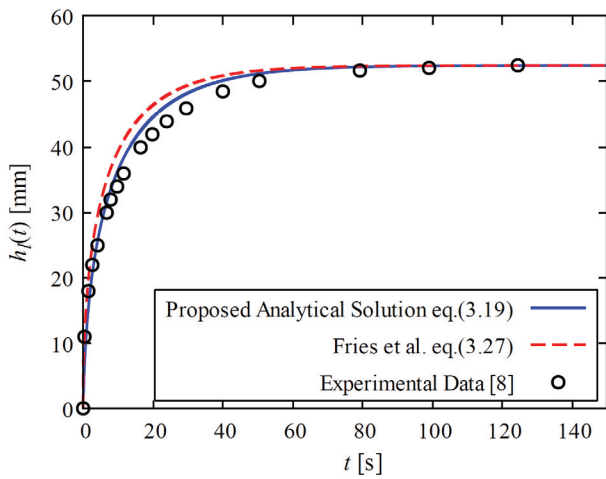


(a) PDMS oil, $\eta_l = 0.0050$ Pa s

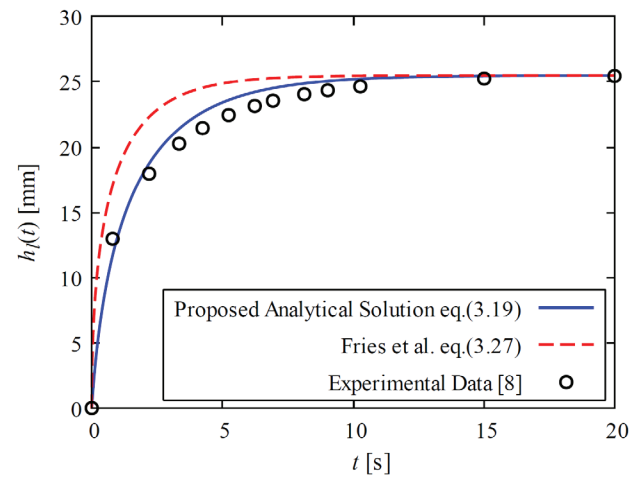


(b) PDMS oil, $\eta_l = 0.0100$ Pa s

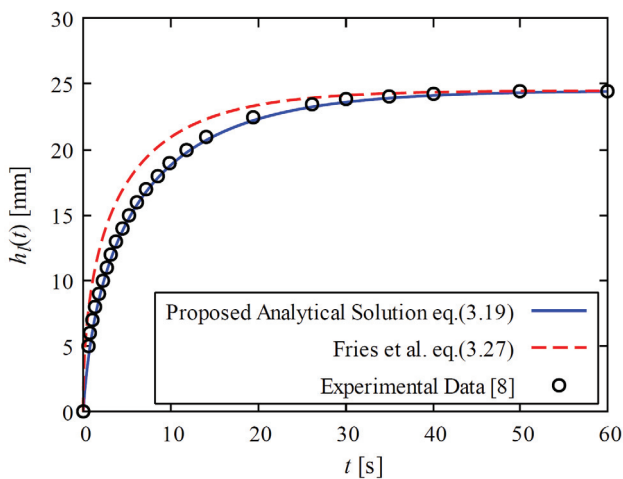
図-3.19 液状水の浸透時間曲線



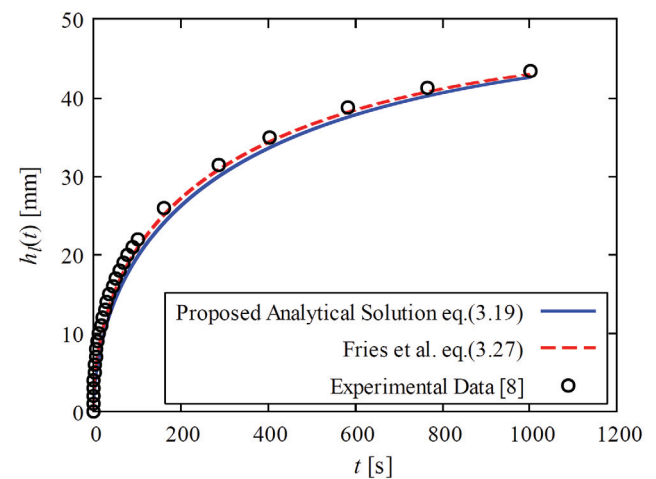
(a) 70 wt %, $r = 0.215$ mm



(b) 70 wt %, $r = 0.440$ mm



(c) 85 wt %, $r = 0.440$ mm



(d) 100 wt %, $r = 0.215$ mm

図-3.20 液状水の浸透時間曲線 (Water-Ethanol mixture)

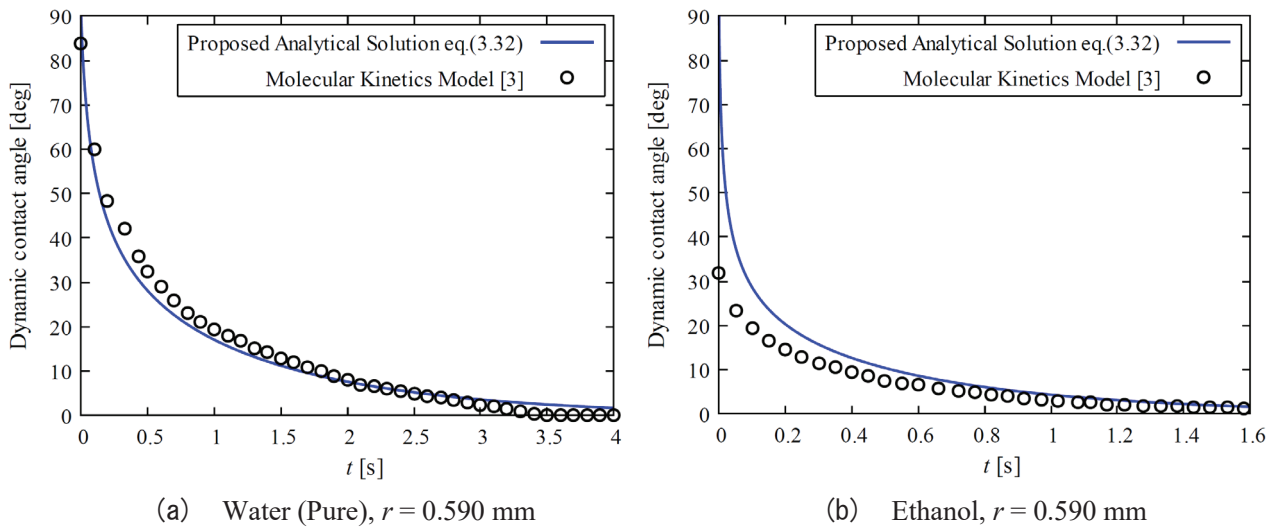


図-3.21 動的接触角の時間曲線

ティングにより決定しているが、 β の定式化については議論されていない。本解析では、Hamraoui et al.の解析で用いられる β に相当する液状水の初期浸透速度 V_0 を液状水の物性や毛細管内半径に因らず単一の近似式 (式(3.30)) で表すことができたため、本検討で導出した液状水の浸透に関する解析解は優位性があると考えられる。

3-4 まとめ

本章では、接触角の速度依存性を考慮した毛細管内の液状水浸透に関する解析解を導出することを目的として、接触角の動的変化の影響を含む毛管力を組み込んだ支配方程式を導出し、近似的な解析解を与え、実験結果と比較した。本検討によって得られた主な成果は以下の通りである。

- 1) 液状水の浸透速度と接触角の動的変化の関係を鉛直毛細管内の液状水浸透解析に反映させるため、接触角の動的変化の影響を含む動的毛管圧を定義した。動的毛管圧は液状水の浸透速度と線形関係にあると仮定し、液状水浸透解析の結果と毛細管浸透実験の結果との比較により、その妥当性を確認した。
- 2) 液状水浸透開始時に作用する動的毛管圧は液状水の初期浸透速度に依存すると考え、液状水の初期浸透速度の近似式を導出した。液状水の初期浸透速度の近似式は、いくつかの実験結果とのフィッティングによって定義したものであるが、近似式に付随する各パラメータはそれぞれに対して同一の数値で表すことができたため、汎用性が高いことを示した。
- 3) 2)の結果は、温度変化に伴う液状水の物性の変化を考慮していないため、温度変化によって液状水の物性が大きく変化する場合では、解析精度が低下する可能性があることを指摘した。
- 4) 本検討で導出した解析解による解析結果と実験結果は、液状水の種類や毛細管内半径に因らず概ね良い一致を示した。
- 5) 本解析では、Hamraoui et al.の解析で用いられる分子パラメータ β に相当する液状水の初期浸透速度 V_0 を液状水の物性や毛細管内半径に因らず単一の近似式で表すことができたため、本検討で導出した液状水の浸透に関する解析解は優位性があると考えられる。

参考文献

- 1) 木村都, 砂田久一, 辻和男 : 生物検定のための応用推計学-付・BASIC プログラムリスト-, 廣川書店, pp.52-55, 1987.
- 2) Fries, N. and Dreyer, M. : An analytic solution of capillary rise restrained by gravity, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 320, pp. 259-263, 2008.
- 3) Hamraoui, A., Truresson, K., Nylander, T. and Yaminsky, V. : Can a Dynamic Contact Angle Be Understood in Terms of a Friction Coefficient?, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 226, pp. 199-204, 2000.
- 4) Extrand, C. W. and Moon, S. I. : Experimental measurement of forces and energies associated with capillary rise in a vertical tube, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 407, pp. 488-492, 2013.
- 5) 自然科学研究機構 国立天文台編 : 理科年表 平成 30 年 第 91 冊 国立天文台編, 丸善出版, pp. 391-396, 2018.
- 6) Wu, P., Nikolov, A. and Wasan, D. : Capillary dynamics driven by molecular self-layering, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 243, pp. 114-120, 2017.
- 7) Hamraoui, A. and Nylander, T. : Analytical Approach for the Lucas-Washburn Equation, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 250, pp. 415-421, 2002.
- 8) O'Loughlin, M., Wilk, K., Priest, C., Ralston, J. and Popescu, M. N. : Capillary rise dynamics of aqueous glycerol solutions in glass capillaries : A critical examination of the Washburn equation, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 411, pp. 257-264, 2013.
- 9) Siebold, A., Nardin, M., Schultz, J., Walliser, A. and Oppliger, M. : Effect of dynamic contact angle on capillary rise phenomena, *Colloids and surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 161, pp. 81-87, 2000.
- 10) Kumar Mehta, P., Paulo J.M. Monteiro ; 田澤榮一, 佐伯昇監訳 : コンクリート工学 微視構造と材料特性, 技報堂出版, pp. 27-29, 1998.
- 11) Puah, L. S., Sedev, R., Fornasiero, D. and Ralston, J. : Influence of Surface Charge on Wetting Kinetics, *Langmuir*, 26(22), pp. 17218-17224, 2010.
- 12) Zhao, L. and Cheng, J. : Analyzing the Molecular Kinetics of Water Spreading on Hydrophobic Surfaces via Molecular Dynamics Simulation, *scientific reports*, 7(1), 10880, 2017.
- 13) De Gennes, P.G., Brochard-Wyart, F., Quere, D. ; 奥村剛訳 : 表面張力の物理学 - しずく, あわ, みずたま, さざなみの世界 -, 吉岡書店, pp. 136-143, 2003.

第 4 章

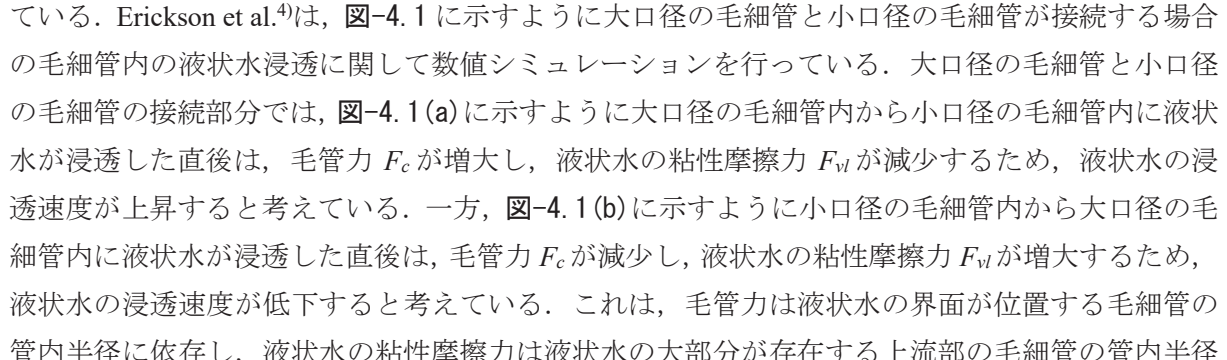
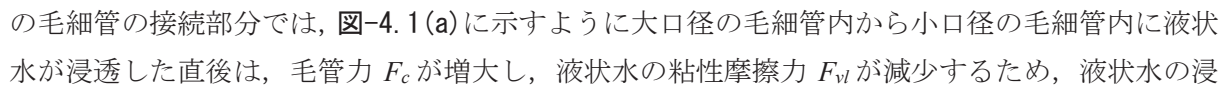
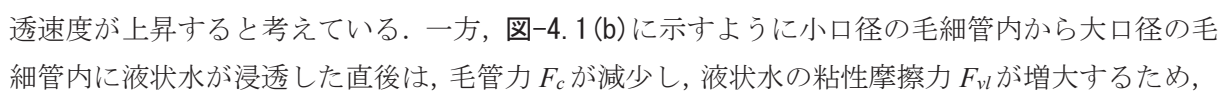
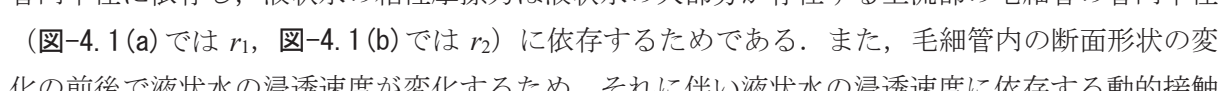
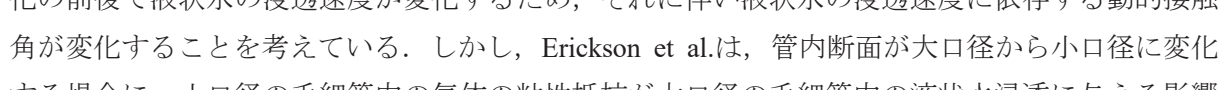
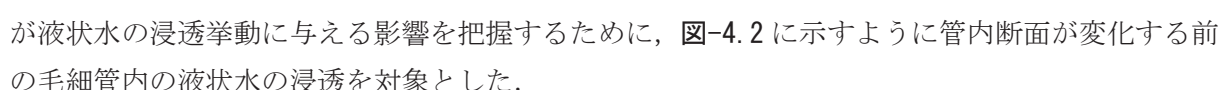
管内断面が変化する 毛細管内の液状水浸透解析

第4章 管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透解析

4-1 概説

コンクリート構造物の表層における物質移動抵抗性、強度特性に関する性状等（以下、表層品質）は、構造物の耐久性に大きな影響を与える。土木学会の「構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会」は、「表層」をコンクリート構造物の中で、環境条件や養生等の影響を受けて性能が変化する可能性がある領域と定義し、構造物の劣化予測を行う上で、表層品質を考慮する必要があることを指摘している¹⁾。また、同委員会は、表層のコンクリートの物質移動抵抗性が特に構造物の耐久性に影響を与えることを指摘している。中性化や塩害等による鋼材腐食は液状水が関与するため、コンクリート構造物の表層における液状水の浸透挙動を把握することは重要である。

コンクリート構造物の表層においては、乾燥の影響や施工不良等によりコンクリート中の空隙構造は粗な状態になると考えられる。一方、コンクリート内部は、乾燥等の外的要因により空隙構造が粗な状態になることは少ないと考えられる。また、コンクリート中の内在水により水和反応が生じるため、コンクリート内部の空隙構造はコンクリート構造物の表層と比較して密な状態であると考えられる。したがって、コンクリート構造物の表層と内部ではコンクリート中の空隙構造に差があると考えられる。毛細管内の液状水浸透に関する解析モデルを適用してコンクリート中の液状水の浸透挙動を解析する場合、コンクリート構造物の表層と内部の空隙構造の差が、空隙中の液状水の浸透挙動に影響を与えると考えられるため、この影響を解析モデルに反映させる必要がある。そこで、コンクリート中の空隙構造の差を管内断面が変化する毛細管で表し、管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透に関する解析モデルを構築することを考える。

既往研究^{2)~4)}では、数値解析により管内断面が変化する毛細管内の液状水の浸透挙動を再現している。Erickson et al.⁴⁾は、に示すように大口径の毛細管と小口径の毛細管が接続する場合の毛細管内の液状水浸透に関して数値シミュレーションを行っている。大口径の毛細管と小口径の毛細管の接続部分では、に示すように大口径の毛細管内から小口径の毛細管内に液状水が浸透した直後は、毛管力 F_c が増大し、液状水の粘性摩擦力 F_{vl} が減少するため、液状水の浸透速度が上昇すると考えている。一方、に示すように小口径の毛細管内から大口径の毛細管内に液状水が浸透した直後は、毛管力 F_c が減少し、液状水の粘性摩擦力 F_{vl} が増大するため、液状水の浸透速度が低下すると考えている。これは、毛管力は液状水の界面が位置する毛細管の管内半径に依存し、液状水の粘性摩擦力は液状水の大部分が存在する上流部の毛細管の管内半径（では r_1 、では r_2 ）に依存するためである。また、毛細管内の断面形状の変化の前後で液状水の浸透速度が変化するため、それに伴い液状水の浸透速度に依存する動的接触角が変化することを考えている。しかし、Erickson et al.は、管内断面が大口径から小口径に変化する場合に、小口径の毛細管内の気体の粘性抵抗が大口径の毛細管内の液状水浸透に与える影響については議論していない。そこで、本検討では、縮小断面を有する毛細管内の気体の粘性抵抗が液状水の浸透挙動に与える影響を把握するために、に示すように管内断面が変化する前の毛細管内の液状水の浸透を対象とした。

本章では、管内断面が変化するガラス毛細管内の液状水浸透高さを測定する毛細管浸透実験を

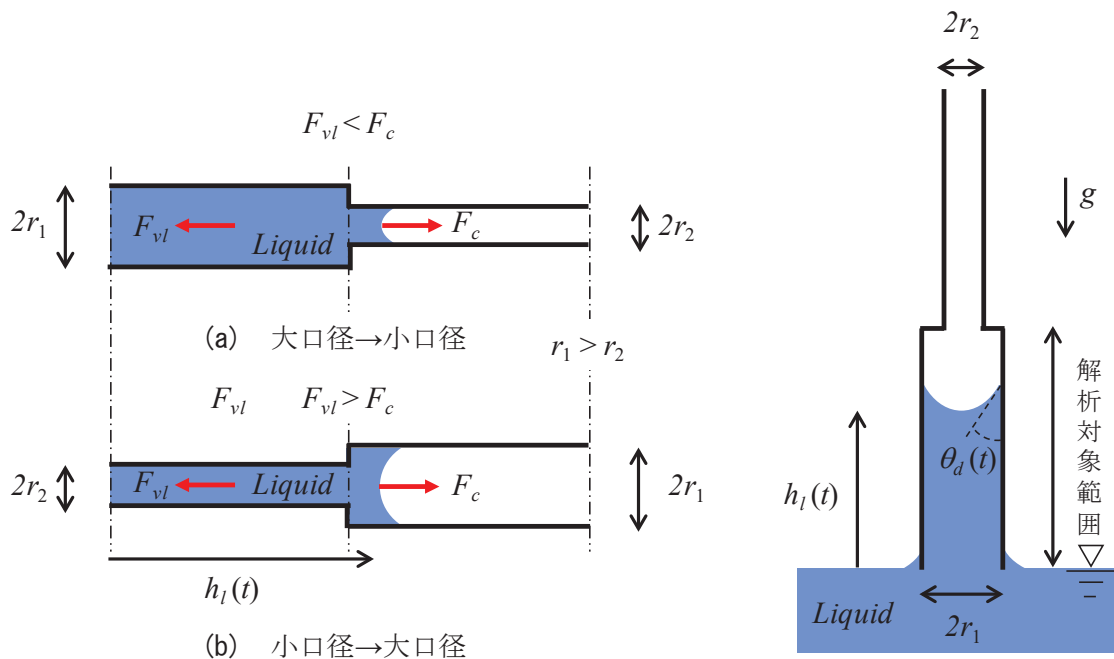


図-4.1 管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透

図-4.2 液状水浸透解析の対象範囲

行った．次に管内断面が変化することにより考慮する必要がある毛細管内の気体の粘性摩擦力を定義し，力のつり合いに基づき液状水浸透を支配する方程式を導出した．さらに，同方程式の解を近似する解析解を求め，毛細管浸透実験の結果との比較，考察を行い，提案した動的なメカニズムと解析解導出時に仮定した近似が正しいことを確認する．

4-2 毛細管浸透実験

(1) 実験方法

実験概要と実験方法は，第3章で実施した毛細管浸透実験と同様である．実験装置を図-4.3に示し，毛細管浸透実験で使用するガラス毛細管を図-4.4に示す．管内断面が変化するガラス毛細管は， $r = 0.695 \text{ mm}$ のガラス毛細管の先端に $r = 0.145 \text{ mm}$ ， $r = 0.235 \text{ mm}$ ， $r = 0.300 \text{ mm}$ のガラス毛細管を接続させることにより作製した．また，毛細管内の気体の粘性摩擦力は気体が移動する毛細管の長さにより変化するため， $r = 0.695 \text{ mm}$ のガラス毛細管の先端に接続するガラス毛細管の長さ L は 62.5 mm ， 125 mm を用いた．ここで，ガラス毛細管の接続に用いる接着物質が固化する際に生じるガスにより管内の濡れ性が変化することを避けるため，ガラス毛細管の接着には固化時にガスが発生しない石塑粘土を用いた．

(2) 液状水浸透高さの測定結果

ガラス毛細管内の液状水の浸透高さの測定結果は，第3章と同様に測定結果のばらつきを考慮するため，測定された浸透高さに対して Thompson の棄却検定を行い，採択された測定値の平均を採用する．毛細管浸透実験の実験ケース毎に3データを浸透実験から記録し，それぞれ有意水準を5%とした場合の棄却検定を行った．棄却検定後の各ガラス毛細管内の液状水の浸透時間曲



図-4.3 実験装置 (毛細管)

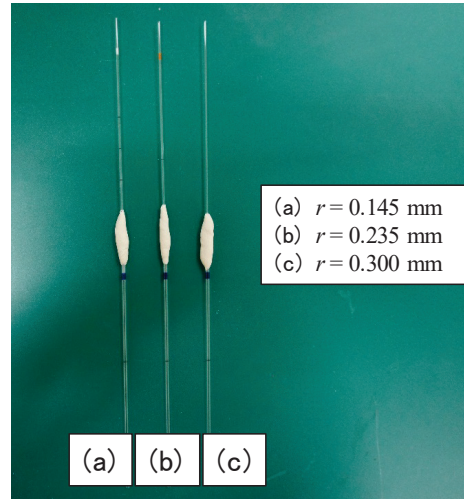
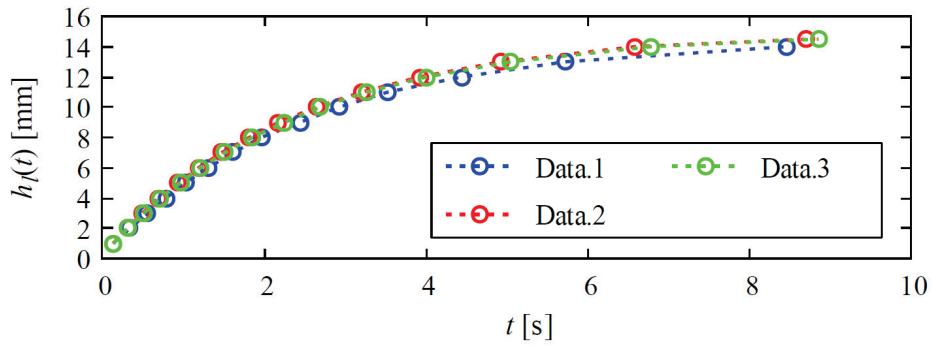
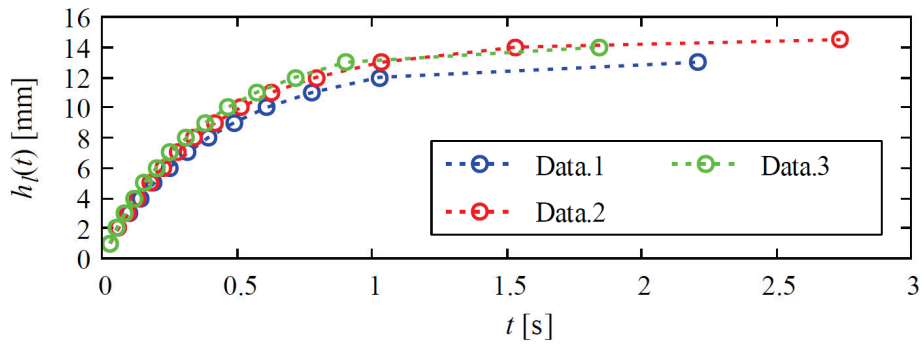


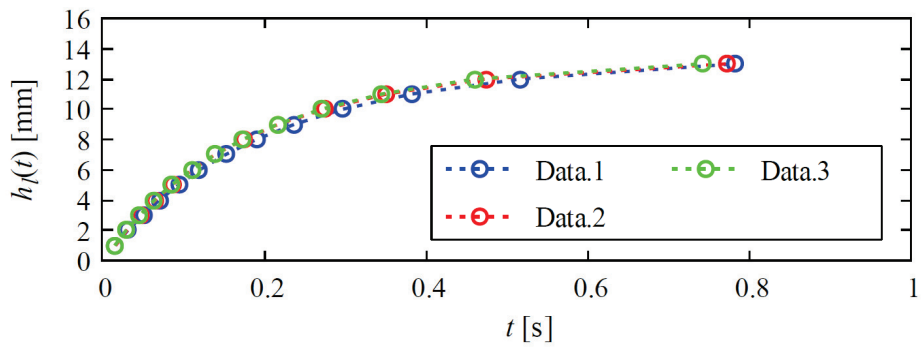
図-4.4 ガラス毛細管



(a) $A_2 / A_1 = 0.044$

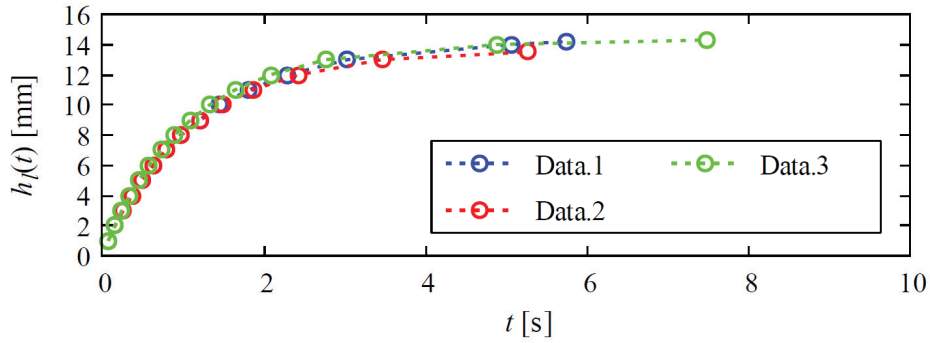


(b) $A_2 / A_1 = 0.114$

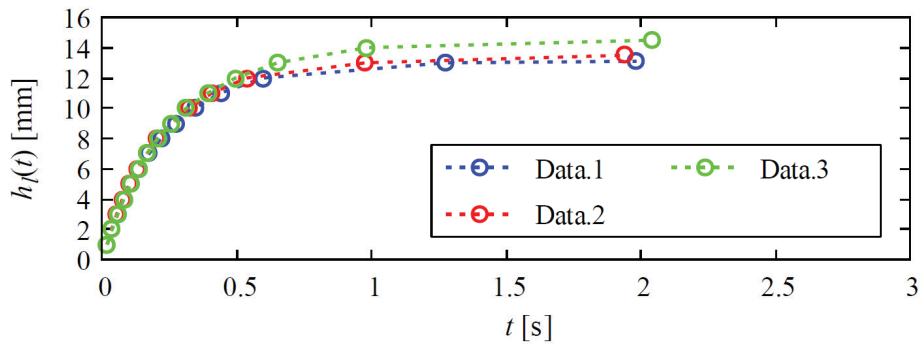


(c) $A_2 / A_1 = 0.186$

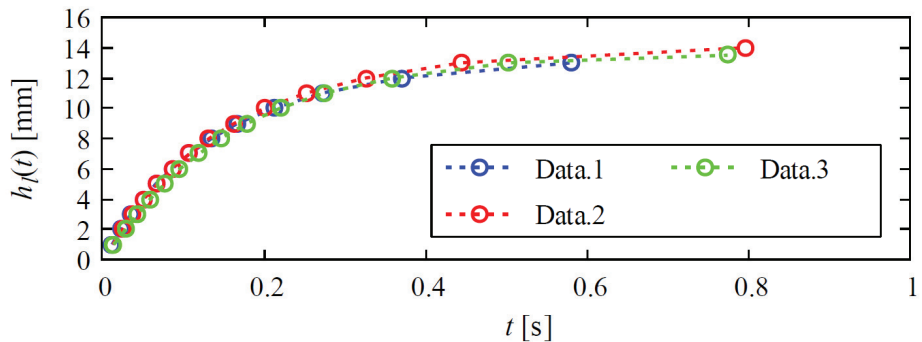
図-4.5 液状水の浸透時間曲線 ($L = 125$ mm)



(a) $A_2 / A_1 = 0.044$



(b) $A_2 / A_1 = 0.114$



(c) $A_2 / A_1 = 0.186$

図-4.6 液状水の浸透時間曲線 ($L = 62.5$ mm)

線を図-4.5, 図-4.6 に示す. ここに, A_1 は半径 r_1 の毛細管内断面積, A_2 は半径 r_2 の毛細管内断面積 (ただし, $A_1 > A_2$) である.

4-3 鉛直毛細管内の液状水浸透解析

(1) 解析解の導出

本章では, 図-4.7 に示すような管内断面が変化する鉛直毛細管内の液状水の浸透を対象とする. ここで, 毛細管内の液状水浸透に関する動的な力のつり合い式は次式となる.

$$F_i(t) + F_{vi}(t) + F_{vg}(t) + F_g(t) = F_c(t) \quad (4.1)$$

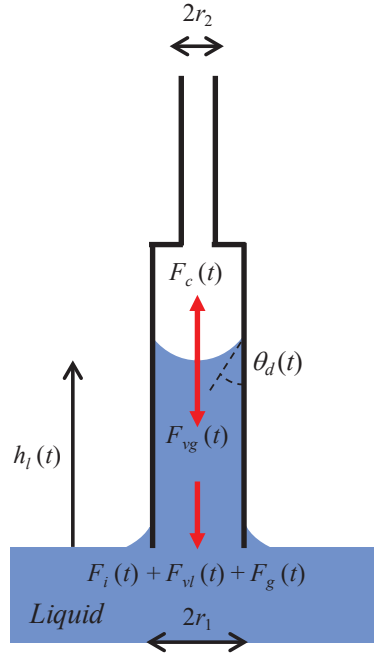


図-4.7 管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透

$$F_i(t) = \rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \cdot \pi r_1^2 \quad (4.2)$$

$$F_{vl}(t) = \frac{8\eta_l}{r_1^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \cdot \pi r_1^2 \quad (4.3)$$

$$F_{vg}(t) = p_{ng}(t) \cdot \pi r_1^2 \quad (4.4)$$

$$F_g(t) = \rho_l g h_l(t) \cdot \pi r_1^2 \quad (4.5)$$

$$F_c(t) = p_c(t) \cdot \pi r_1^2 \quad (4.6)$$

ここに、 $F_i(t)$ 、 $F_{vl}(t)$ 、 $F_{vg}(t)$ 、 $F_g(t)$ はそれぞれ浸透する液状水に作用する慣性力、液状水の粘性摩擦、気体の粘性摩擦、重力、 $F_c(t)$ は動的毛管力、 $p_{ng}(t)$ は気体-毛細管間に生じる粘性抵抗による圧力損失、 $p_c(t)$ は動的毛管圧、 $h_l(t)$ は液状水浸透高さ、 $h_g(t)$ は気体浸透高さ、 t は時刻、 r_1 、 r_2 は毛細管内半径 ($r_1 > r_2$)、 ρ_l は液状水の密度、 g は重力加速度、 η_l は液状水の粘度である。式(4.1)の両辺を断面積 πr_1^2 で除して圧力に関するつり合い式に変形すると次式となる。

$$\rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} + \frac{8\eta_l}{r_1^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + p_{ng}(t) + \rho_l g h_l(t) = p_c(\infty) + \frac{p_c(0) - p_c(\infty)}{V_0} \cdot \frac{dh_l(t)}{dt} \quad (4.7)$$

$$p_c(0) = \rho_l V_0^2 \quad (4.8)$$

$$p_c(\infty) = \frac{2\gamma}{r_1} \cos(\theta_s) \quad (4.9)$$

ここに、 γ は表面張力、 θ_s は静的接触角、 $p_c(0)$ は液状水浸透開始時 ($t=0$ s) に作用する動的毛管圧、 $p_c(\infty)$ は浸透開始後、時間が十分に経過した時に作用する動的毛管圧、 V_0 は液状水の初期浸透速度である。式(4.7)は毛細管内の液状水浸透に関する慣性力項、液状水の粘性摩擦力項、気体の粘性摩擦力項、重力項、動的毛管力項から構成される。ここで、本検討では管内断面が変化する前の毛細管内の液状水浸透を考えているため、管内半径 r_1 の毛細管内の液状水浸透を対象とする。したがって、管内半径 r_1 の毛細管内が液状水で満たされ、管内半径 r_2 の毛細管内に浸透する液状水の挙動に関しては本検討では対象としていない。また、管内半径 r_1 の毛細管で生じる気体の粘性抵抗は、管内半径 r_2 の毛細管で生じる気体の粘性抵抗と比較して極めて小さいため無視した。管内半径 r_2 の毛細管内の気体の粘性抵抗が液状水の浸透に対する抵抗力として液状水面(断面積 πr_1^2) に作用すると仮定し、気体の粘性抵抗による圧力損失 $p_{ng}(t)$ に断面積 πr_1^2 を乗じて気体の粘性摩擦力とした。また、第 3 章と同様に式(4.7)の慣性力項を無視し、式(4.7)を次式のように変形する。

$$\frac{8\eta_l}{r_1^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + p_{ng}(t) + \rho_l g h_l(t) = p_c(\infty) + \frac{p_c(0) - p_c(\infty)}{V_0} \cdot \frac{dh_l(t)}{dt} \quad (4.10)$$

気体の粘性摩擦力項は Poiseuille の式より次式で定義する。

$$p_{ng}(t) = \frac{8\eta_g}{r_2^2} L \frac{dh_g(t)}{dt} \quad (4.11)$$

ここに、 η_g は気体の粘度、 L は管内半径 r_2 の毛細管長さである。図-4.8 は毛細管断面 I - 断面 II 間の領域内の気体に着目し、液状水の浸透に伴い気体が移動する状態を示す。ここで、 $h_g(t)$ は毛細管内の気体流れが低速であると仮定し、図-4.8 に示すように浸透する液状水の体積 V_l と、液状水の浸透に伴い毛細管断面 II - 断面 III 間の領域内を移動する気体の体積 V_g が等しいと考え、 $h_g(t)$ を次式で定義する。

$$h_g(t) = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \cdot h_l(t) \quad (4.12)$$

式(4.11)、式(4.12)を式(4.10)に代入すると次式となる。

$$h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \left\{ \frac{\eta_g}{\eta_l} L \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^4 + \frac{r_1^2 \{p_c(\infty) - p_c(0)\}}{8\eta_l V_0} \right\} \cdot \frac{dh_l(t)}{dt} + A \cdot h_l(t) = B \quad (4.13)$$

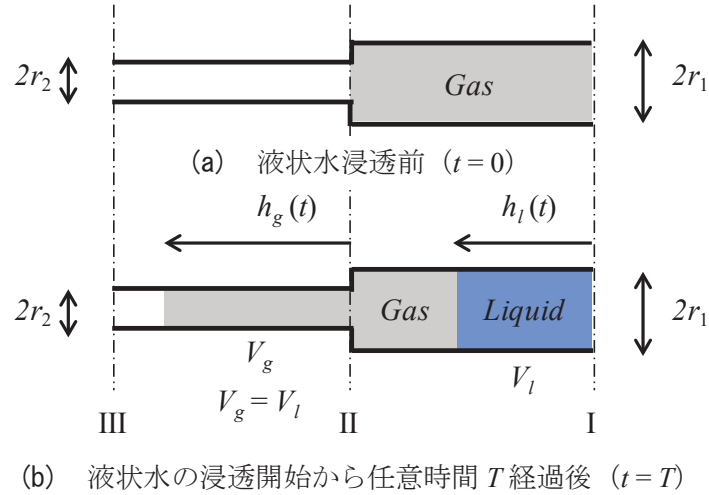


図-4.8 任意時間 T 経過後の流体の体積変化

ここに、式(4.13)の係数 A 、 B および V_0 は次式で表す。

$$A = \frac{\rho_l g r_1^2}{8\eta_l} \quad (4.14)$$

$$B = \frac{r_1 \gamma \cos(\theta_s)}{4\eta_l} \quad (4.15)$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_l r_1} \cos(\theta_s) \cdot e^{-4.2145} \cdot \left(\frac{r_1}{\gamma \eta_l}\right)^{1.2807}} \quad (4.16)$$

また、浸透開始前 ($t=0$ s) では液状水は静止状態であるため、初期条件は次式で与える。

$$h_l(0) = 0 \quad (4.17)$$

ここで、式(4.11)を式(4.7)に代入すると浸透開始時の液状水の浸透速度は次式となる。

$$\frac{dh_l(0)}{dt} = \frac{p_c(\infty)}{\frac{8\eta_g}{r_1^2} L \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^4 \cdot V_0 + p_c(\infty) - p_c(0)} \cdot V_0 \quad (4.18)$$

式(4.18)に示す浸透開始時の液状水の浸透速度は、動的毛管圧の比と初期浸透速度 V_0 および気体の粘性摩擦に関する項から成り立つことを表す。また、式(4.18)は $A_2/A_1 < 1$ である場合、気体の粘性摩擦の影響が大きくなるため、浸透開始時の液状水の浸透速度が低下することを表す。

式(4.13)を積分すると解析解は次式となる。

$$h_l(t) = \frac{B}{A} \left\{ 1 + (1 + AC) \cdot W \left(-\frac{1}{1 + AC} e^{-\frac{B + A^2 t}{B(1 + AC)}} \right) \right\} \quad (4.19)$$

$$C = \frac{1}{p_c(\infty)} \cdot \left\{ \frac{8\eta_g}{r_1^2} L \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^4 + \frac{p_c(\infty) - p_c(0)}{V_0} \right\} \quad (4.20)$$

ここに、 $W(x)$ は Lambert の W 関数である。ここで、毛細管の管内断面が一定（管内断面積比 $A_2/A_1 = 1$ ）である場合、気体の粘度は液状水の粘度と比較して極めて小さいため、式(4.20)右辺第1項の気体の粘性摩擦に関する項が0になり、式(4.19)と式(3.19)は一致する。また、 $t \rightarrow \infty$ では、接触角の動的変化に伴う毛管圧の変化の有無および管内断面の変化の有無に因らず、式(4.19)と Fries et al.の解析解は一致する。

(2) 実験結果と解析結果の比較

本章で実施した毛細管浸透実験の結果と液状水浸透解析の結果を比較する。本検討における静的接触角は式(3.31)より算出する。液状水浸透解析で用いる液状水および気体の物性に関するパラメータを表-4.1、毛細管に関するパラメータを表-4.2に示す。本実験で用いた液状水および気体の物性は平成30年度理科年表⁵⁾から引用した。

表-4.1 液状水および気体の物性に関する解析パラメータ

Fluid	ρ_l or ρ_g (kg/m ³)	η_l or η_g (Pa s)	γ (mN/m)	θ_s (rad)
Water (tap water)	998	0.001000	72.73	0.87414
Gas (atmosphere)	1.20	0.000018	-	-

表-4.2 毛細管に関する解析パラメータ

Capillary tube	r_1 (mm)	r_2 (mm)	L (mm)
Case1	0.695	0.145	62.5
Case2	0.695	0.145	125
Case3	0.695	0.235	62.5
Case4	0.695	0.235	125
Case5	0.695	0.300	62.5
Case6	0.695	0.300	125

液状水に水道水を用いた場合の浸透時間曲線を $L = 125 \text{ mm}$ に関しては図-4.9, $L = 62.5 \text{ mm}$ に関しては図-4.11 に示す. 図-4.9, 図-4.11 より, 本検討における解析結果は, 実験結果と良い一致を示しており, 管内断面が変化する毛細管内の液状水の浸透挙動を再現できている. また, 管内断面積比 A_2 / A_1 が小さい程, もしくは縮小断面を有する毛細管の長さ L が大きい程, 液状水が最終浸透高さに達するまでに要する時間が長くなることを確認した. A_2 / A_1 が小さい程, 毛細管内の気体の排出経路が狭くなり, 縮小断面を有する毛細管内の気体の粘性摩擦の影響が大きくなるため, 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する. また, 縮小断面を有する毛細管内は常に気体で満たされている状態であるため, L が大きい程, 気体の排出経路が長くなる. L が大きい程, 縮小断面を有する毛細管内の気体の粘性摩擦の影響が大きくなり, 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する. したがって, A_2 / A_1 が小さい程, もしくは L が大きい程, 液状水の浸透速度が低下し, 液状水が最終浸透高さに達するまでに要する時間が長くなると考えられる.

液状水に水道水を用いた場合の動的接触角の時間曲線を $L = 125 \text{ mm}$ に関しては図-4.10, $L = 62.5 \text{ mm}$ に関しては図-4.12 に示す. ここに, 動的接触角は式(4.19)を時間に関して微分し, 式(3.1)と式(3.12)より次式となる.

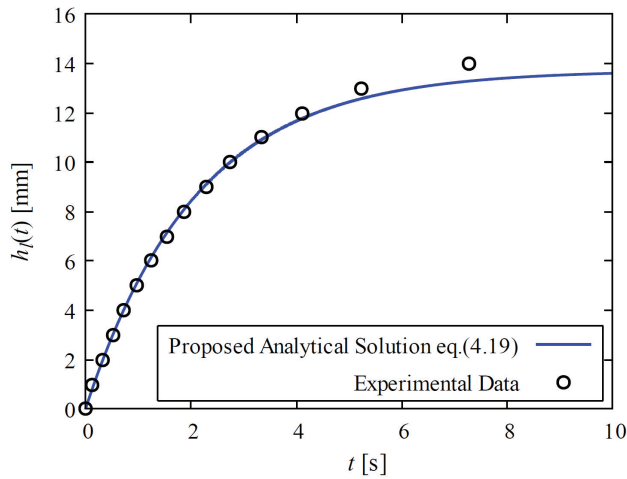
$$\theta_d(t) = \cos^{-1} \left[\frac{r}{2\gamma} \left\{ p_c(0) \cdot \frac{1}{V_0} \frac{dh_l(t)}{dt} + p_c(\infty) \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{V_0} \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \right\} \right] \quad (4.21)$$

$$\frac{dh_l(t)}{dt} = -\frac{A \cdot Z(t)}{1 + Z(t)} \quad (4.22)$$

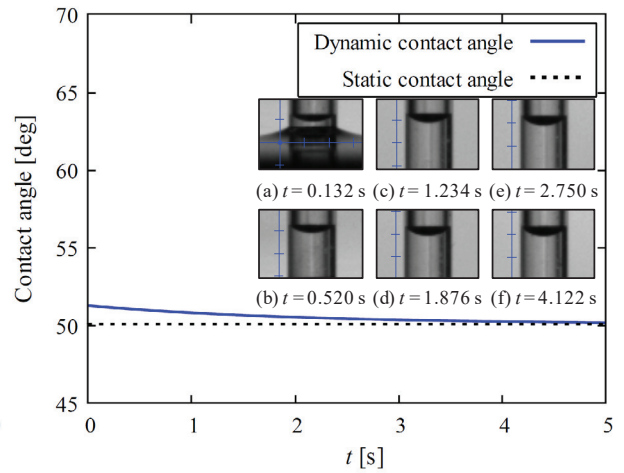
$$Z(t) = W \left\{ -\frac{1}{1 + AC} e^{-\frac{B + A^2 t}{B(1 + AC)}} \right\} \quad (4.23)$$

毛細管浸透実験から得られた記録画像からは接触角の測定は困難であったため, 液面形状の記録画像から式(4.21)に示す動的接触角に関する解析解の妥当性を検証する. 図-4.10, 図-4.12 より浸透開始直後の液面形状(記録画像(a))は, A_2 / A_1 が小さい程, もしくは L が大きい程, 凹曲面の曲率が大きくなり, 動的接触角は小さくなる傾向にあることを確認した. 本検討の解析結果では A_2 / A_1 が小さい程, もしくは L が大きい程, 浸透開始直後の動的接触角は小さくなるため, 毛細管浸透実験から確認した動的接触角の特徴を概ね再現できていると考えられる. また, 本検討の解析結果から A_2 / A_1 が小さい程, もしくは L が大きい程, 動的接触角が一定, すなわち動的接触角が静的接触角と等しくなるまでに要する時間が長くなる傾向にあることを確認した. これは気体の粘性抵抗が大きくなることに伴い毛細管内の液状水の浸透速度が低下し, 接触角と液状水の浸透速度との関係から動的接触角の時間変化が緩やかになったためと考えられる.

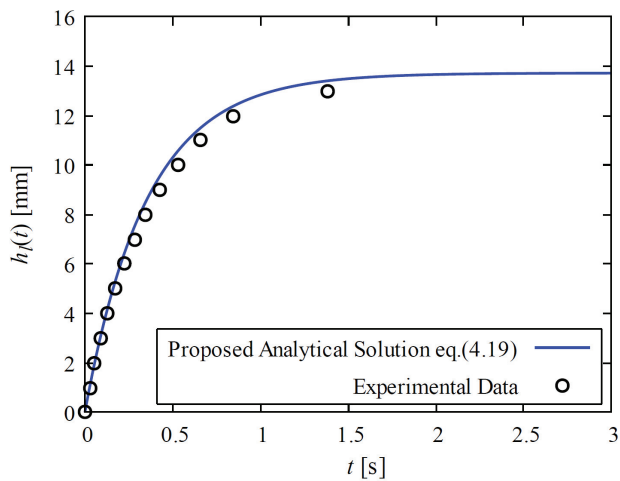
図-4.13, 図-4.14 は式(4.19)に示す慣性力項を無視した場合の動的接触角に関する解析結果と, 慣性力項を考慮した場合の動的接触角の解析結果の比較を示す. 慣性力項を考慮した場合の動的接触角は, 液状水浸透高さに関する解析解である式(4.19)を式(4.7)に与え, 次式により算出した.



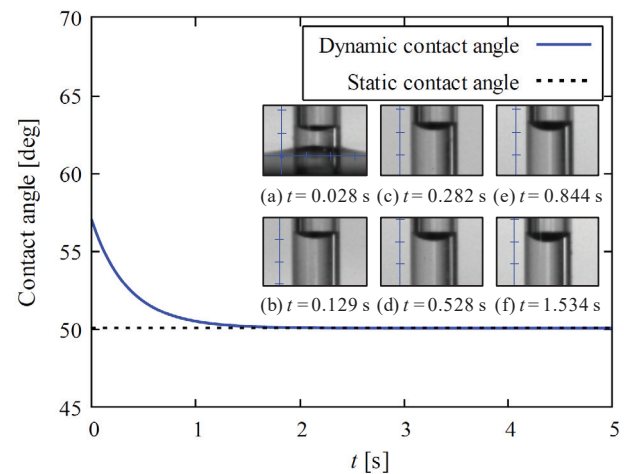
(a) $A_2 / A_1 = 0.044$



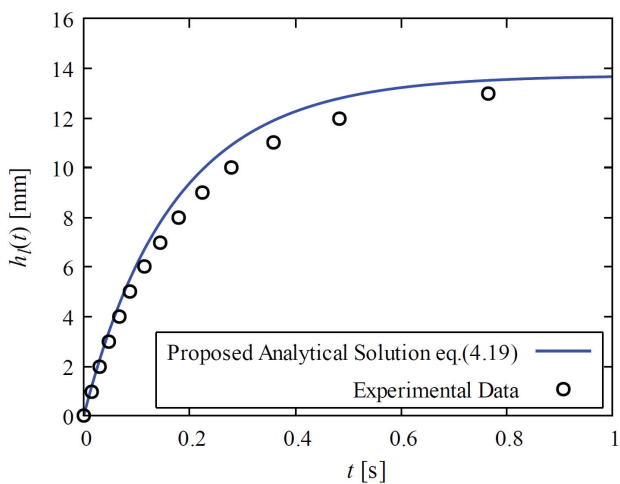
(a) $A_2 / A_1 = 0.044$



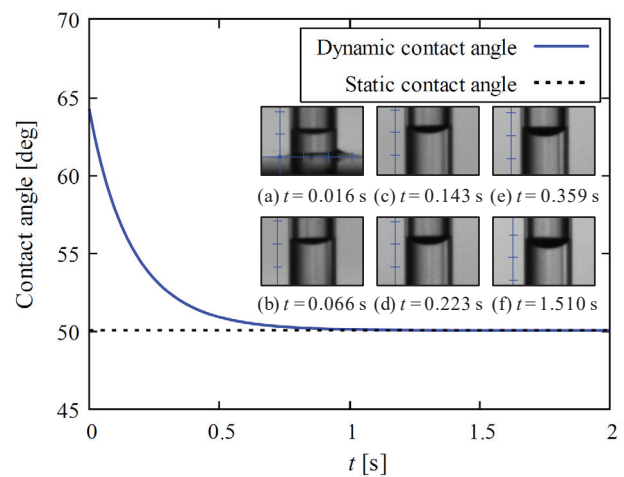
(b) $A_2 / A_1 = 0.114$



(b) $A_2 / A_1 = 0.114$



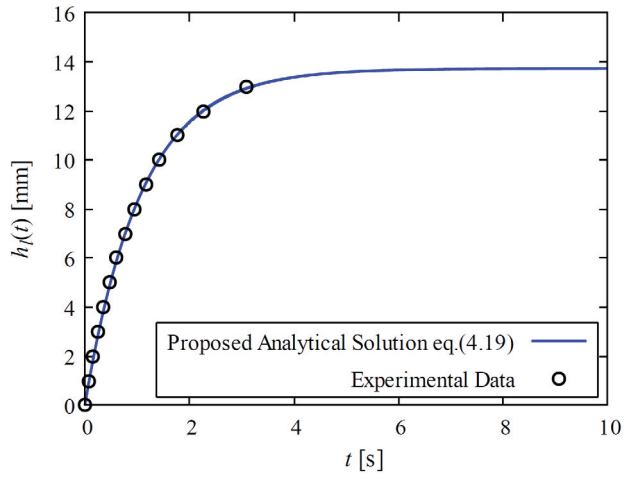
(c) $A_2 / A_1 = 0.186$



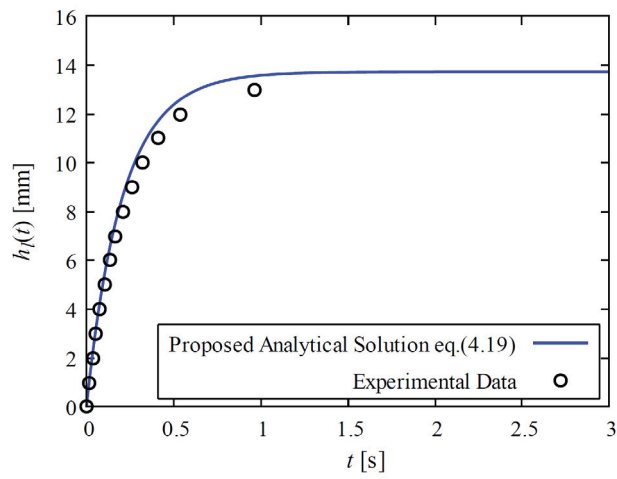
(c) $A_2 / A_1 = 0.186$

図-4.9 液状水の浸透時間曲線
(Water, $r_1 = 0.695$ mm, $L = 125$ mm)

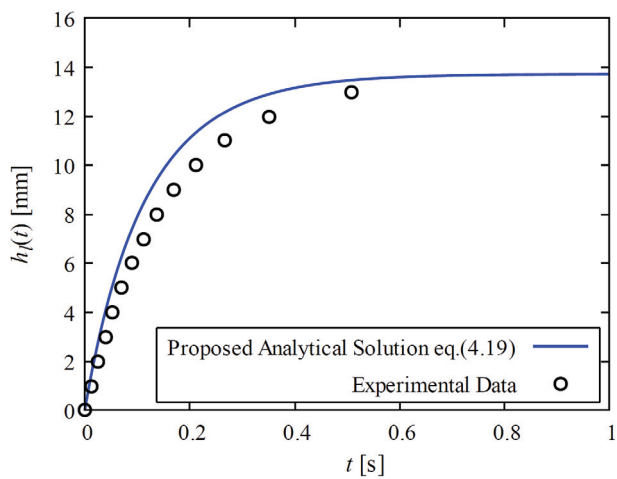
図-4.10 動的接触角の時間曲線
(Water, $r_1 = 0.695$ mm, $L = 125$ mm)



(a) $A_2 / A_1 = 0.044$

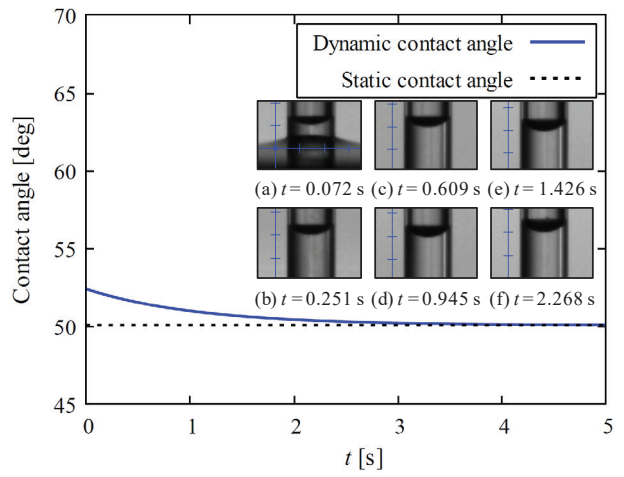


(b) $A_2 / A_1 = 0.114$

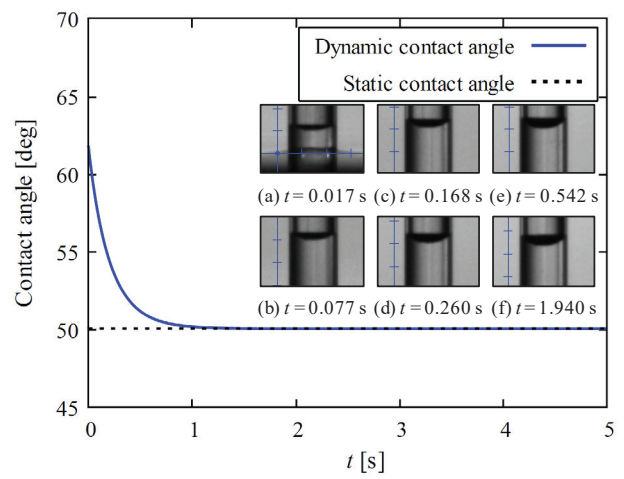


(c) $A_2 / A_1 = 0.186$

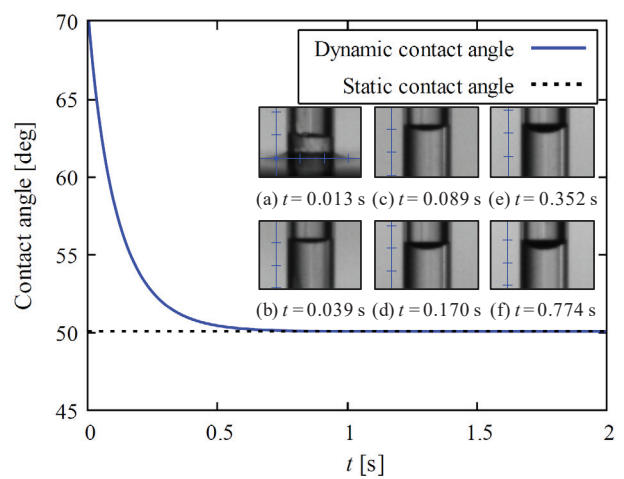
図-4.11 液状水の浸透時間曲線
(Water, $r_1 = 0.695$ mm, $L = 62.5$ mm)



(a) $A_2 / A_1 = 0.044$



(b) $A_2 / A_1 = 0.114$



(c) $A_2 / A_1 = 0.186$

図-4.12 動的接触角の時間曲線
(Water, $r_1 = 0.695$ mm, $L = 62.5$ mm)

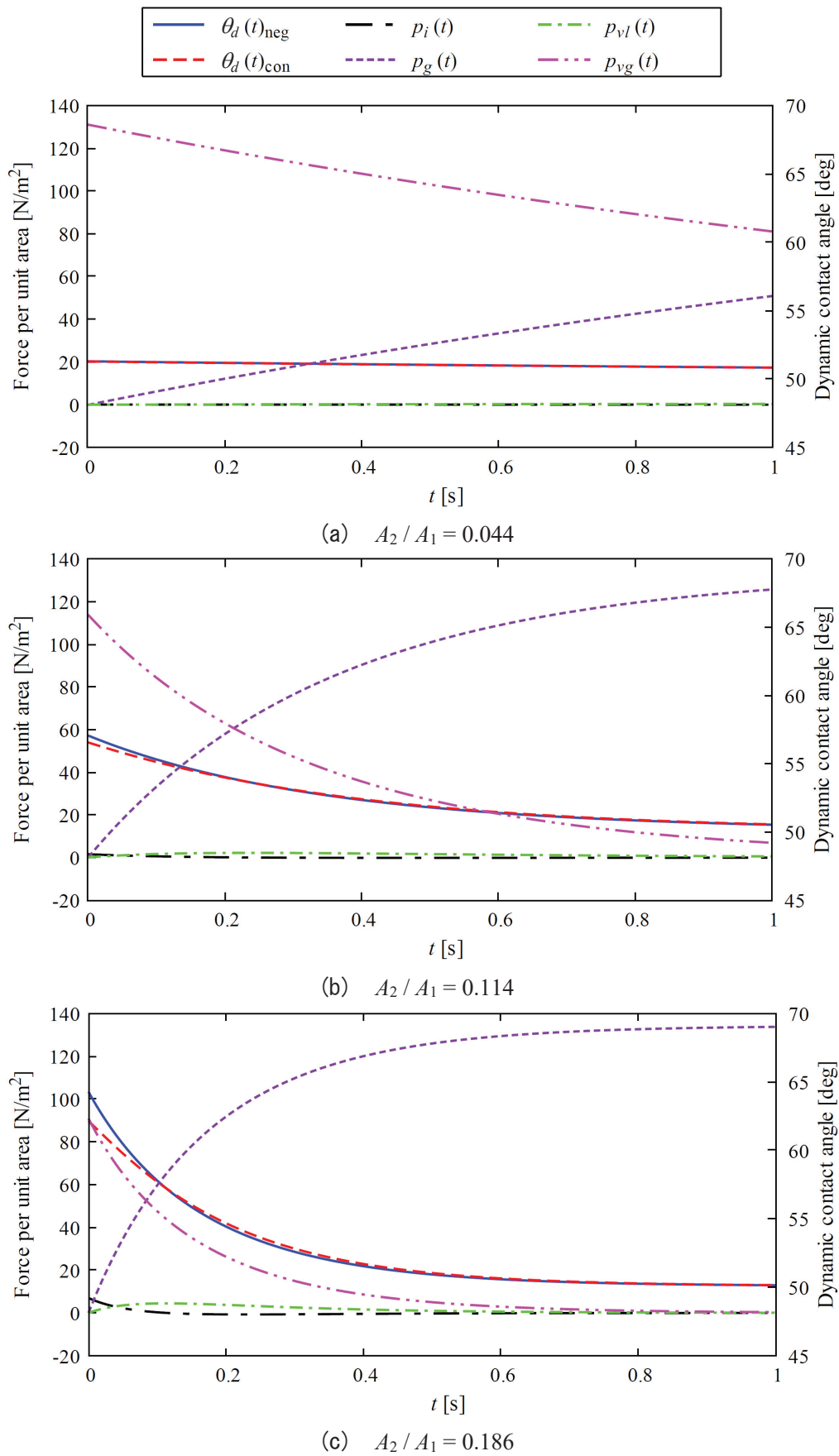


図-4.13 動的接触角と式(4.7)の各項の時間変化
(Water, $r_1 = 0.695$ mm, $L = 125$ mm)

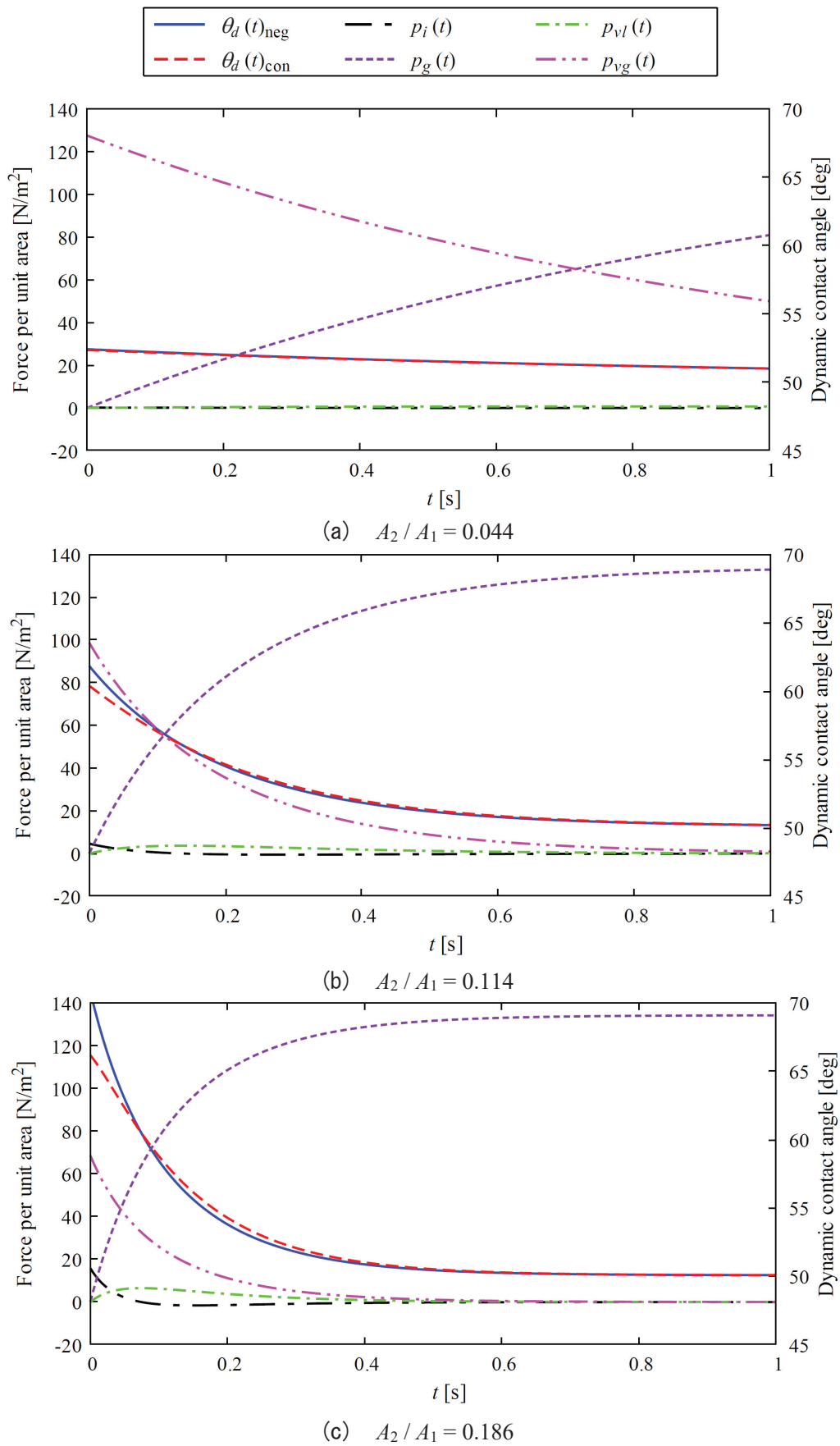




図-4.14 動的接触角と式(4.7)の各項の時間変化
(Water, $r_1 = 0.695$ mm, $L = 62.5$ mm)

$$\theta_d(t) = \cos^{-1} \left[\frac{r}{2\gamma} \left\{ \rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} + \frac{8\eta_l}{r_1^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} + \frac{8\eta_g}{r_2^2} L \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \frac{dh_l(t)}{dt} + \rho_l g h_l(t) \right\} \right] \quad (4.24)$$



ここで、, では、慣性力項を無視した場合の動的接触角を $\theta_d(t)_{\text{neg}}$ 、慣性力項を考慮した場合の動的接触角を $\theta_d(t)_{\text{con}}$ と表記している。式(4.7)の慣性力項、液状水の粘性摩擦力項、気体の粘性摩擦力項、重力項の時間変化と動的接触角の時間変化の関係について考察する。ここで、式(4.7)の慣性力項、液状水の粘性摩擦力項、気体の粘性摩擦力項、重力項はそれぞれ次式に示す。

$$p_i(t) = \rho_l \frac{d}{dt} \left\{ h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \right\} \quad (4.25)$$

$$p_{vl}(t) = \frac{8\eta_l}{r_1^2} h_l(t) \frac{dh_l(t)}{dt} \quad (4.26)$$

$$p_{vg}(t) = \frac{8\eta_g}{r_2^2} L \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \frac{dh_l(t)}{dt} \quad (4.27)$$

$$p_g(t) = \rho_l g h_l(t) \quad (4.28)$$

ここに、 $p_i(t)$ 、 $p_{vl}(t)$ 、 $p_{vg}(t)$ 、 $p_g(t)$ はそれぞれ浸透する液状水に作用する単位断面積当たり（断面積 πr_1^2 ）の慣性力、液状水の粘性摩擦力、気体の粘性摩擦力、重力である。, より同じ物性の液状水を用いた場合、 A_2/A_1 が大きい程、もしくは L が小さい程、式(4.21)と式(4.24)から得られた浸透初期の動的接触角の差が大きくなることを確認した。 A_2/A_1 が大きい程、もしくは L が小さい程、浸透開始時（ $t=0$ s）の気体の粘性摩擦力が小さくなり、それに伴い式(4.18)に示す浸透開始時の液状水の浸透速度が大きくなる。浸透開始時の液状水の浸透速度が大きい程、次式に示すように液状水に作用する慣性力が大きくなるため、慣性力項の有無が解析結果に影響を与えることが考えられる。

$$p_i(0) = \rho_l \left\{ \frac{dh_l(0)}{dt} \right\}^2 \quad (4.29)$$



浸透開始後、液状水の浸透速度の低下に伴い液状水に作用する慣性力が小さくなり、慣性力が無視できる条件では式(4.21)を用いた場合の解析結果は式(4.24)を用いた場合の解析結果と概ね良い一致を示す。また、, より、 A_2/A_1 が小さい程、もしくは L が大きい程、単位断面積当たりの気体の粘性摩擦力は、単位断面積当たりの液状水の粘性摩擦力と比較して極めて大きくなることを確認した。これは、縮小断面を有する毛細管の条件によって、液状水の粘性摩擦力を無視できることを示唆する。ここで、毛細管内の液状水浸透解析により、液状水の粘性摩擦

表-4.3 毛細管に関する解析パラメータ

(a) A_2 / A_1 の変化に関する条件

(b) L の変化に関する条件

	A_2 / A_1	L (mm)		A_2 / A_1	L (mm)
Case1	0.05	100	Case1	0.50	1
Case2	0.10	100	Case2	0.50	10
Case3	0.20	100	Case3	0.50	100
Case4	0.30	100	Case4	0.50	500
Case5	0.50	100	Case5	0.50	1000
Case6	1.00	100	Case6	0.50	5000

力を無視することができる場合の縮小断面を有する毛細管の条件について考察を行う。液状水浸透解析で用いる液状水および気体の物性に関するパラメータを表-4.1, 毛細管に関するパラメータを表-4.3に示す。

図-4.15, 図-4.16 は式(4.10)に示す液状水の粘性摩擦力項を無視した場合の液状水浸透高さに関する解析結果と, 液状水の粘性摩擦力項を考慮した場合の液状水浸透高さに関する解析結果の比較を示す。また, 図-4.15, 図-4.16 は, それぞれ表-4.3(a), 表-4.3(b)の条件で解析した場合の解析結果である。液状水の粘性摩擦力項を無視した場合の液状水浸透高さは, 気体の粘性摩擦力項, 重力項および動的毛管力項から構成される次式から導出する。

$$\frac{8\eta_g}{r_2^2} L \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \frac{dh_l(t)}{dt} + \rho_l g h_l(t) = p_c(\infty) + \frac{p_c(0) - p_c(\infty)}{V_0} \cdot \frac{dh_l(t)}{dt} \quad (4.30)$$

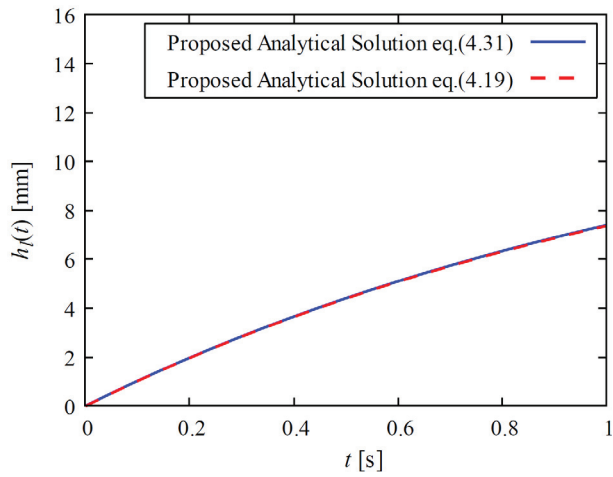
式(4.30)を式(4.17)に示す初期条件を与え, 積分すると次式となる。

$$h_l(t) = \frac{B}{A} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (4.31)$$

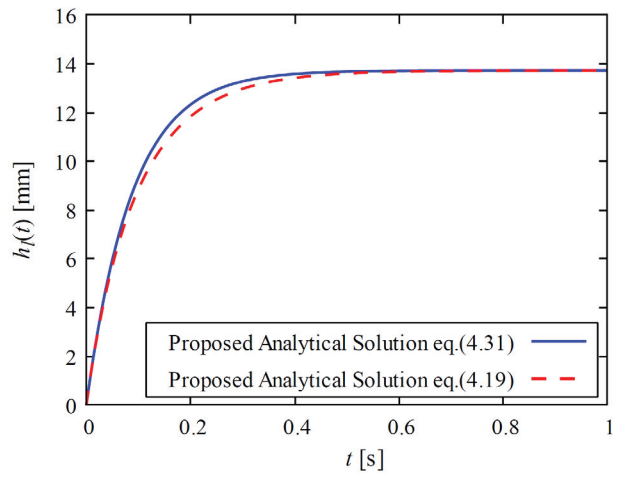
ここに, 式(4.31)の係数 α は次式で表す。

$$\alpha = \frac{\rho_l g}{\frac{8\eta_g}{r_2^2} L \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 + \frac{p_c(\infty) - p_c(0)}{V_0}} \quad (4.32)$$

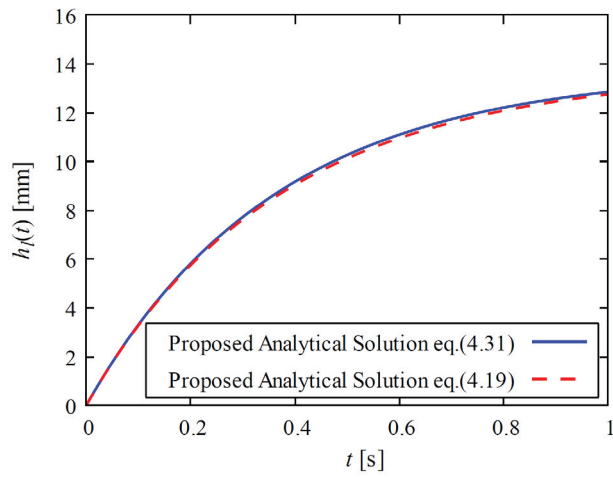
図-4.15 より L が 100 mm の場合, A_2 / A_1 が 0.10 以下では液状水の粘性摩擦力項の有無に因らず液状水の浸透時間曲線が概ね一致することを確認した。また, 図-4.16 より A_2 / A_1 が 0.50 の場合, L が 1000 mm 以上では液状水の粘性摩擦力項の有無に因らず液状水の浸透時間曲線が概ね一致することを確認した。したがって, A_2 / A_1 が小さい, かつ L が大きい条件では液状水の粘性摩擦力項を無視することが可能であることが示唆される。



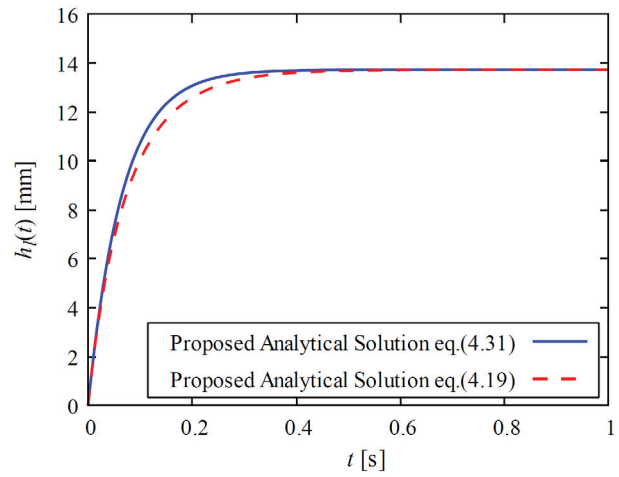
(a) $A_2 / A_1 = 0.05$



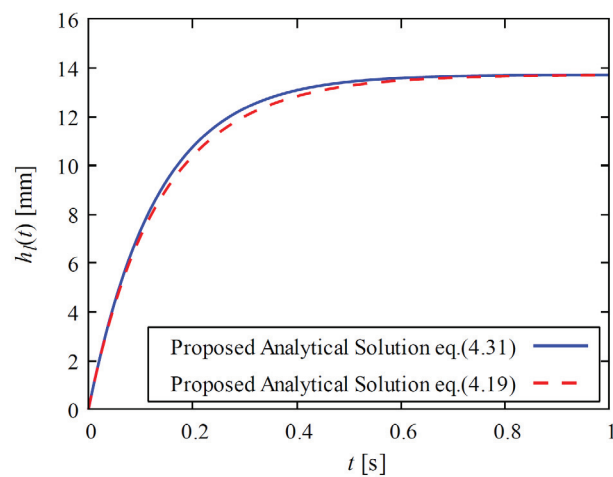
(d) $A_2 / A_1 = 0.30$



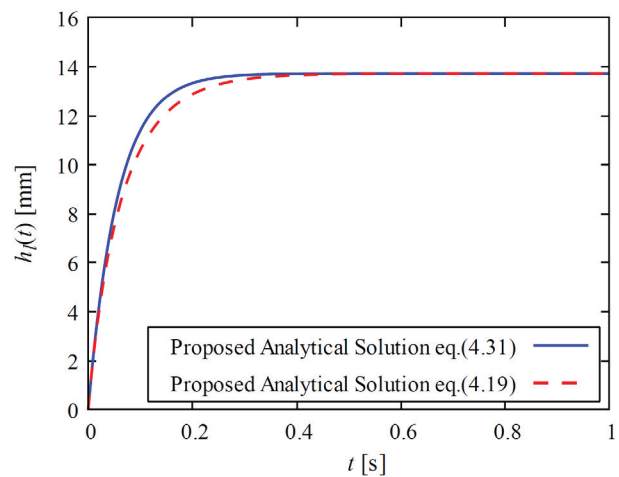
(b) $A_2 / A_1 = 0.10$



(e) $A_2 / A_1 = 0.50$

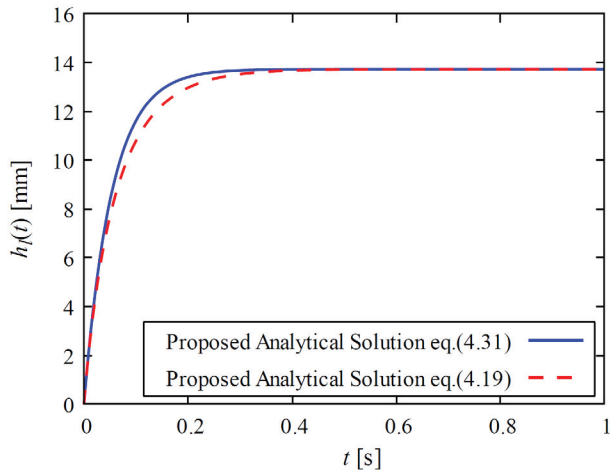


(c) $A_2 / A_1 = 0.20$

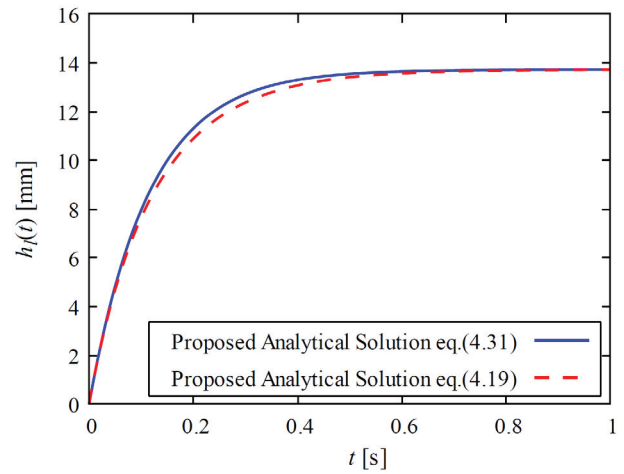


(f) $A_2 / A_1 = 1.00$

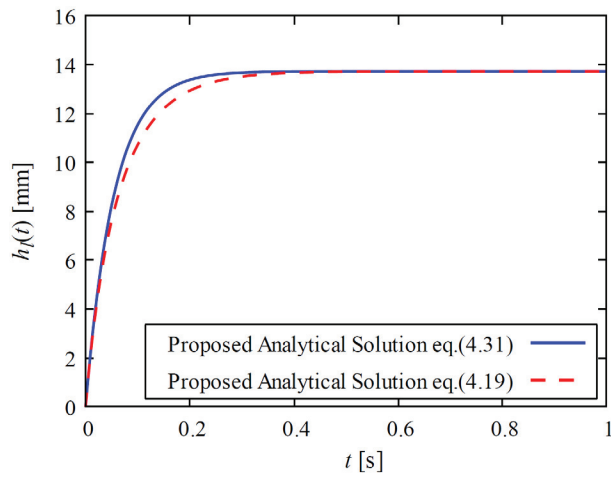
図-4.15 液状水の浸透時間曲線 (Water, $L = 100$ mm)



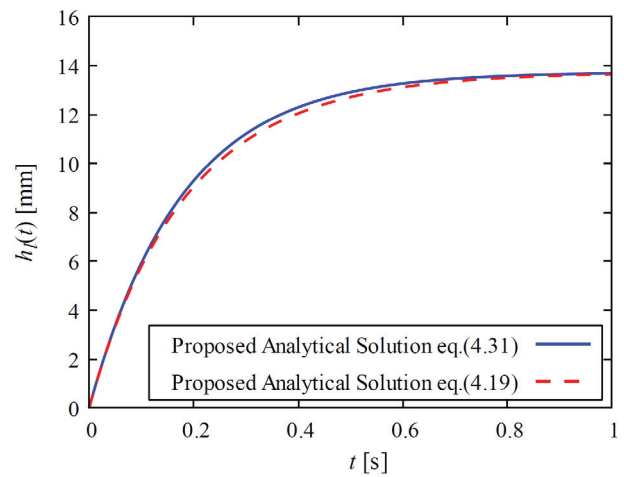
(a) $L = 1$ mm



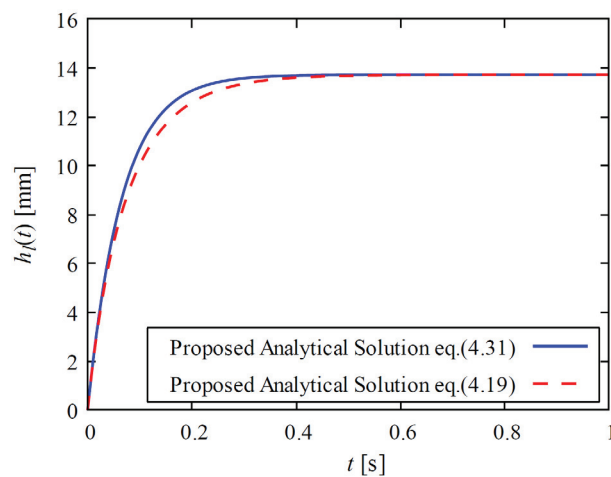
(d) $L = 500$ mm



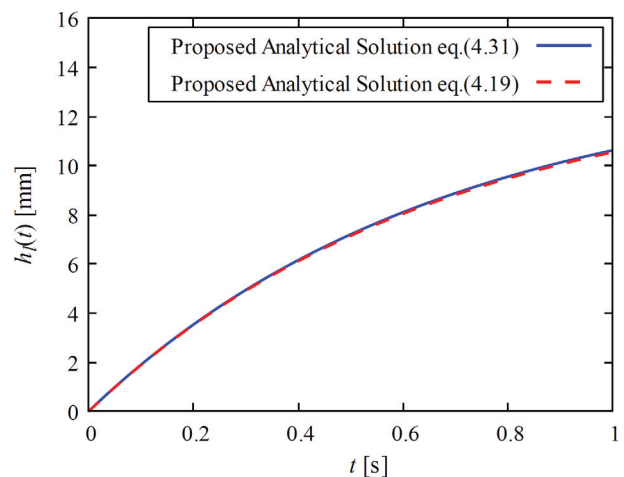
(b) $L = 10$ mm



(e) $L = 1000$ mm



(c) $L = 100$ mm



(f) $L = 5000$ mm

図-4.16 液状水の浸透時間曲線 (Water, $A_2 / A_1 = 0.50$)

4-4 まとめ

本章では、管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透に関する解析解を導出することを目的として、管内断面が変化することにより生じる毛細管内の気体の粘性抵抗の影響を考慮した支配方程式を導出し、近似的な解析解を与え、実験結果と比較した。本検討によって得られた主な成果は以下の通りである。

- 1) 管内断面が変化することにより考慮する必要がある毛細管内の気体の粘性摩擦力を定義し、力のつり合いに基づき液状水浸透を支配する方程式を導出した。
- 2) 毛細管内の気体流れが低速であると仮定し、浸透する液状水の体積と液状水の浸透に伴い移動する気体の体積が等しいと考え、気体の浸透高さの近似式を導出した。
- 3) 本検討で導出した解析解による解析結果と毛細管浸透実験の結果とは概ね良い一致を示した。
- 4) 毛細管の管内断面積比 A_2 / A_1 が小さい程、もしくは縮小断面を有する毛細管の長さ L が大きい程、液状水が最終浸透高さに達するまでに要する時間が長くなることを確認した。これは A_2 / A_1 が小さい程、もしくは L が大きい程、毛細管内の気体の粘性摩擦の影響が大きくなり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するためである。
- 5) 解析結果から A_2 / A_1 が小さい程、もしくは L が大きい程、動的接触角が静的接触角と等しくなるまでに要する時間が長くなる傾向にあることを確認した。これは気体の粘性抵抗が大きくなることに伴い毛細管内の液状水の浸透速度が低下し、接触角と液状水の浸透速度との関係から動的接触角の時間変化が緩やかになったためと考えられる。また、 A_2 / A_1 が小さい、かつ L が大きい条件では液状水の粘性摩擦力項を無視することが可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 80 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会成果報告書，公益社団法人土木学会，2008.
- 2) Wang, Q., Graber, E. R. and Wallach, R. : Synergistic effects of geometry, inertia, and dynamic contact angle on wetting and dewetting of capillaries of varying cross sections, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 396, pp. 270-277, 2013.
- 3) Liou, W. W., Peng, Yongqing. and Parker, P. E. : Analytical modeling of capillary flow in tubes of nonuniform cross section, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 333, pp. 389-399, 2009.
- 4) Erickson, D., Li, D. and Park, C. B. : Numerical Simulations of Capillary-Driven Flows in Nonuniform Cross-Sectional Capillaries, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 250, pp. 422-430, 2002.
- 5) 自然科学研究機構 国立天文台編：理科年表 平成 30 年 第 91 冊 国立天文台編，丸善出版，pp. 391-396, 2018.

第 5 章

モルタル中の液状水浸透解析

第5章 モルタル中の液状水浸透解析

5-1 概説

本章では、第4章に示した管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透解析（以下、毛細管浸透モデル）に基づき、モルタル中の液状水浸透に関する解析モデルを構築することを目的とする。モルタルのような微細空隙を有する物体中の毛細管現象に基づく液状水の浸透解析手法として、亀甲状に広がる微細空隙を毛細管の束と仮定して液状水の浸透を解析する手法¹⁾や、規則的な網目状に配置された毛細管と仮定して液状水の浸透を解析する手法²⁾等がある。本検討では、モルタル中の鉛直上向きの液状水浸透を対象とし、モルタル中の亀甲状に広がる微細空隙を、様々な大きさを有する鉛直毛細管の束と仮定する。さらに、簡易的に束になった複数の鉛直毛細管の管内径を平均し、モルタル中の微細空隙を1本の毛細管と仮定してモルタル中の液状水浸透解析を行うことを考える。毛細管内の液状水浸透解析では、液状水および気体の物性に関する解析パラメータとして液状水と気体の密度および粘度、液状水の表面張力および静的接触角、また毛細管に関する解析パラメータとして管内半径、縮小断面を有する毛細管の長さを設定する必要がある。亀甲状に広がる微細空隙を1本の毛細管と仮定して液状水浸透解析を行う場合、以上の解析パラメータの中で、液状水の静的接触角と毛細管の管内半径、縮小断面を有する毛細管の長さを液状水浸漬試験等により設定する必要がある。

そこで、本章では、まず、図-5.1に示すようにモルタル中の微細空隙を1本の毛細管と仮定し、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³⁾を利用し、モルタルのエタノール溶液浸漬試験により微細空隙の見かけの管内半径を推定した。次に、モルタル中の微細空隙と液状水との濡れ性を表す液状水の静的接触角については、モルタル中の液状水の浸透高

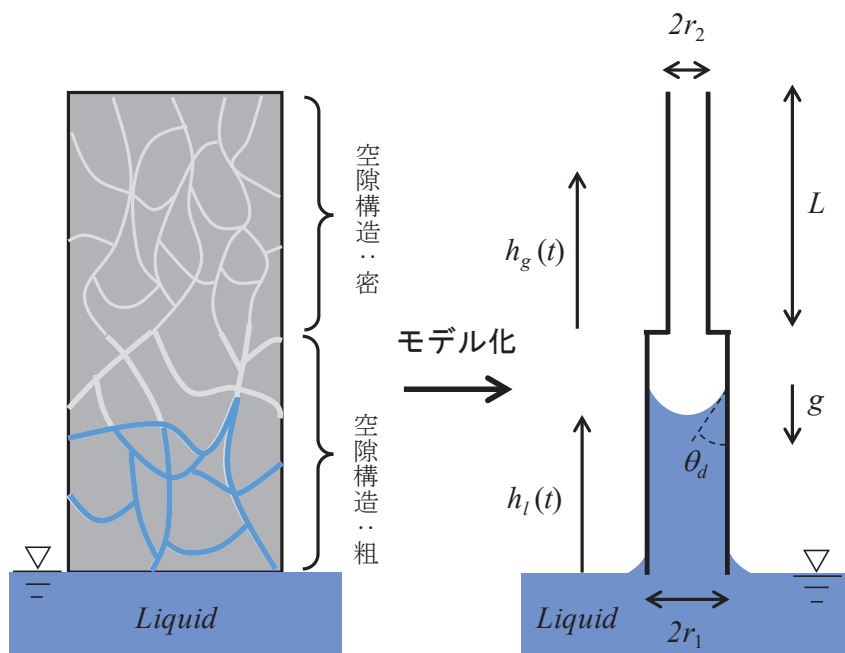


図-5.1 コンクリート中の液状水浸透に関するモデル化

さを測定し、測定結果と液状水浸透解析の結果とのフィッティングから液状水の静的接触角を推定する。最後に、得られた解析パラメータを毛細管浸透モデルに与えて解析し、その解析結果と液状水浸漬試験の結果との比較から、毛細管浸透に基づくモルタル中の液状水浸透に関する解析モデルの妥当性を検証した。

5-2 試験概要

5-2-1 供試体概要

供試体として用いるモルタルの配合は、水セメント比がモルタル中の液状水の浸透に及ぼす影響を確認するために表-5.1に示すものとした。配合のケースは普通ポルトランドセメントを使用して、水セメント比を0.45, 0.65とした。また、モルタルの配合は、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ 、スランプ $8.0 \pm 1.5\text{ cm}$ の基準を満足するコンクリートの配合をモルタルに換算した値を設定した。ここで、水の密度は 1.00 g/cm^3 、セメントの密度は 3.16 g/cm^3 、細骨材の表乾密度は 2.66 g/cm^3 、粗骨材の表乾密度は 2.76 g/cm^3 である。化学混和剤は、AE減水剤、AE剤を使用した。また、モルタル形状は $\phi 100 \times 200\text{ mm}$ とし、打設後の型枠養生を1日、脱型後は27日間の水中養生を実施した。さらに、水中養生終了後に、モルタルを $105\text{ }^\circ\text{C}$ の乾燥炉で前日との質量差が 0.1% 以内になるまで乾燥した。乾燥後、モルタルが気中の水分を吸水しないように防水性被覆材（エポキシ系樹脂）によりモルタル側面を被覆した。

モルタル中の内在水が液状水の浸透に及ぼす影響を確認するため、液状水浸漬試験開始直前のモルタルの初期の乾燥状態は「絶乾状態」、「半乾燥状態」の2ケースとした。ここで、「絶乾状態」は被覆前のモルタルを $105\text{ }^\circ\text{C}$ の乾燥炉で乾燥して前日との質量差が 0.1% 以内となった状態と定義し、図-5.2(a)に示すようにモルタル中の連続空隙が液状水の浸透経路となる状態を考えている。また、「半乾燥状態」は図-5.2(b)に示すように浸透面から約 100 mm 以深のモルタル中の空隙を液状水で満たした状態と定義する。半乾燥状態のモルタルの液状水浸漬試験により、空隙中に液状水が存在することに起因する気体の排出機能の低下がモルタル中の液状水の浸透挙動に与える影響を把握する。半乾燥状態は、まず飽和状態のモルタルの質量と絶乾状態のモルタルの質量の差分である水分量を測定し、水分量が半分となるために必要な吸水期間を設定した。次に設定した吸水期間、図-5.3に示すようにモルタルの浸透面と反対となる面（以下、吸水面）から吸水させ、吸水後のモルタルの乾燥状態を「半乾燥状態」と定義する。図-5.4に3日吸水させたモルタルの割裂断面を示している。図-5.4より、液状水の浸透フロント位置を示す変色境界が浸透面から約 100 mm （モルタル長さ 200 mm ）の位置にあり、割裂断面からモルタル中の水分量がほぼ半分であることが確認できたため、吸水期間を3日とした。

モルタル中の空隙構造の変化が液状水の浸透に及ぼす影響を確認するため、図-5.5に示すようにモルタルの配合を、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。水セメント比が小さい程、モルタル中の空隙構造が緻密になるため、水セメント比 0.45 のモルタルは、水セメント比 0.65 のモルタルと比較して空隙中の気体の粘性摩擦の影響が大きくなる。したがって、水セメント比 0.45 のモルタル部で気体の排出速度が低下し、水セメント比 0.65 のモルタル部の液状水の浸透挙動に影響を与えられらる。

表-5.1 各種試験に用いたモルタルの配合

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

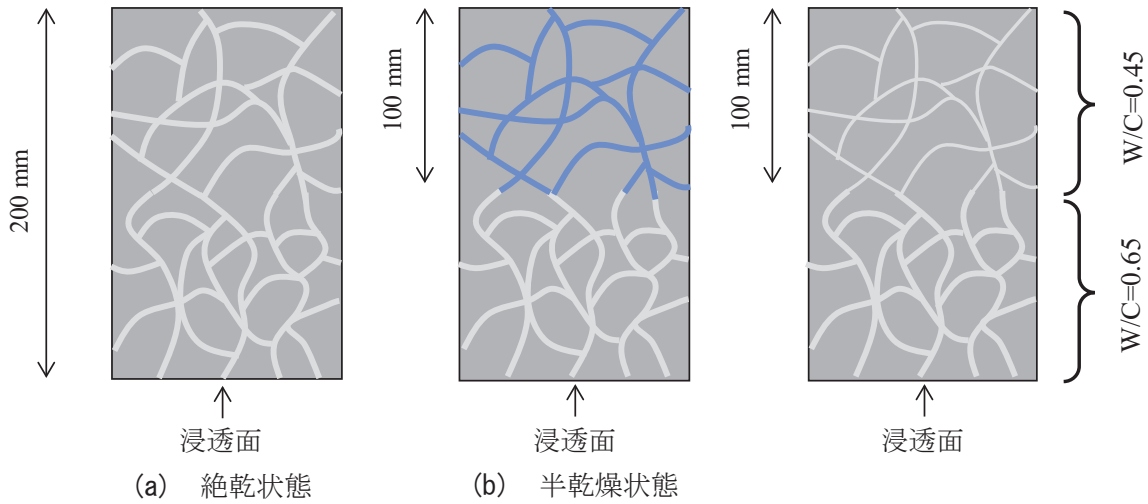


図-5.2 モルタルの乾燥度

図-5.5 空隙構造変化

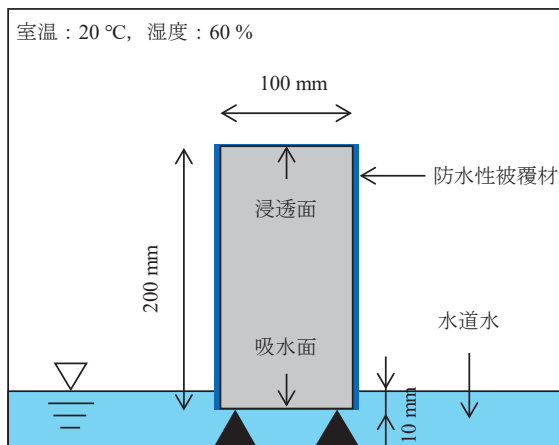


図-5.3 液状水吸水試験概要

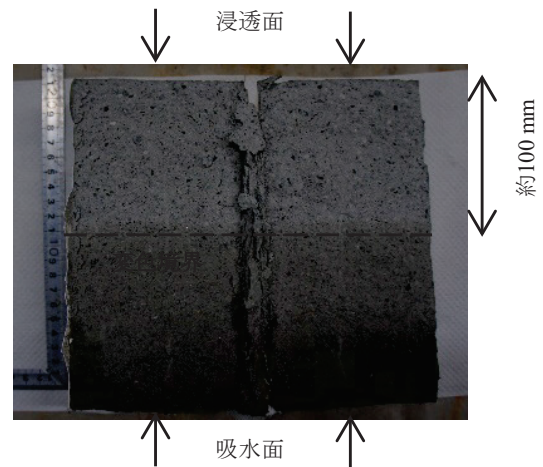
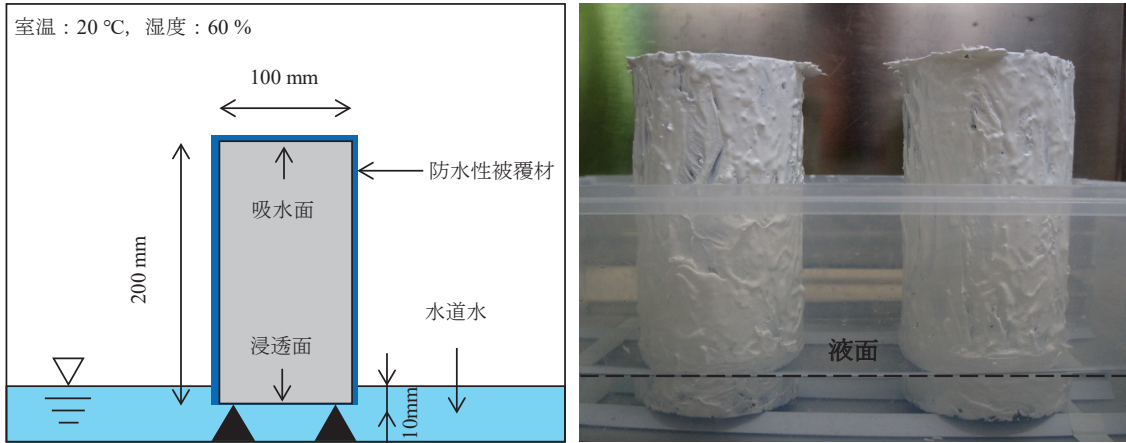


図-5.4 半乾燥状態のモルタル割裂断面

5-2-2 液状水浸漬試験

(1) 試験方法

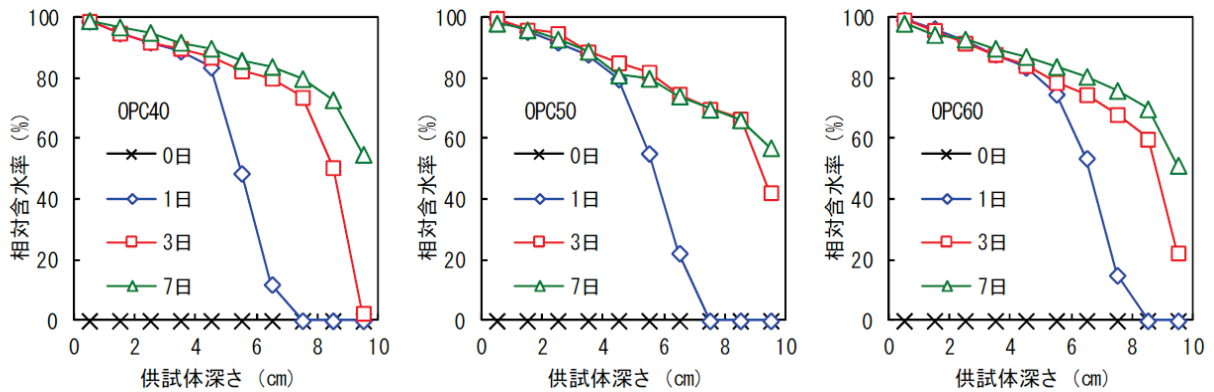
液状水浸漬試験の概要と試験状況を図-5.6に示す。モルタルが気中の水分を吸水しないように、液状水浸漬試験開始前に各種乾燥状態のモルタルの浸透面以外を被覆する（以下、片面開放）。ここで、片面開放状態のモルタルの液状水浸漬試験の結果は、吸水面を開放した状態（以下、両面



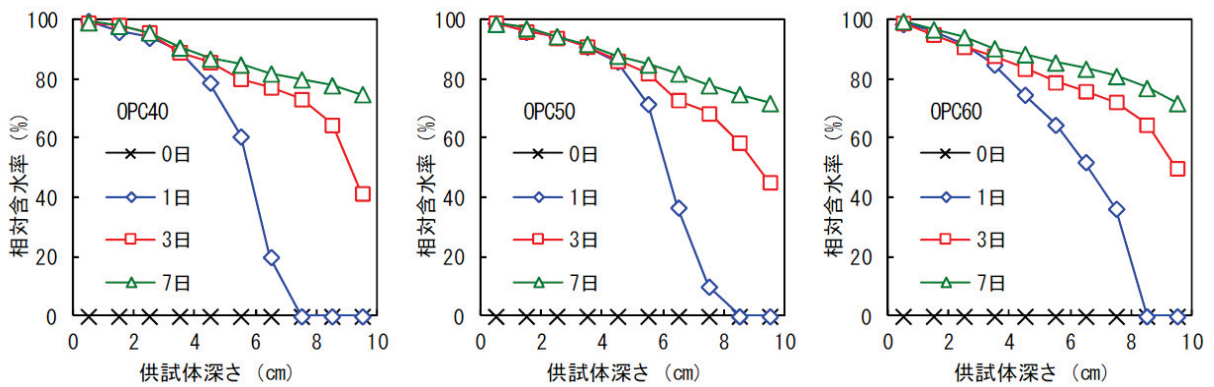
(a) 試験概要

(b) 試験状況

図-5.6 液状水浸漬試験



(a) 片面開放



(b) 両面開放

図-5.7 絶乾状態から吸水を開始した場合の相対含水率分布⁴⁾

開放) のモルタルの液状水浸漬試験の結果と比較して、空隙中の気体の流れが制限され液状水の浸透が阻害されると考えられるが、図-5.7に示す既往のモルタルの液状水浸漬試験の結果⁴⁾より浸漬期間が7日程度では開放状態の違いが液状水の浸透に与える影響は小さいと考えられる。ここに、図-5.7の凡例の日数は浸漬期間を示し、相対含水率はモルタル中の液状水の浸透状況を示

す。よって、本検討では、液状水浸漬試験に用いるモルタルは片面開放状態とした。液状水は水道水を使用し、液状水浸漬期間は 1, 3, 7 日とした。モルタルの配合は水セメント比 0.65, 0.45 とし、初期の乾燥状態は絶乾状態、半乾燥状態とした。また、空隙構造が変化する絶乾状態のモルタルを用いた液状水浸漬試験も行った。

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、モルタル中の微細空隙の見かけの管内半径を推定するためにモルタルのエタノール溶液浸漬試験を行った。浸漬試験には濃度 99.5 wt %のエタノール溶液を使用し、浸漬期間は、1, 3 日とした。モルタルの配合は水セメント比 0.65, 0.45 とし、初期の乾燥状態は絶乾状態とした。浸漬試験でエタノール溶液を用いる場合、エタノール溶液は水と比較して揮発性が高いため、液面付近をシートで覆いエタノール溶液が蒸発により逸散しないようにする。エタノール溶液の浸透高さの測定は、浸漬試験後のモルタルを圧縮試験機により割裂し、浸透面から割裂断面の変色境界までの長さを測定する。これは、エタノール溶液は揮発性が高く、コンクリートカッターを用いた切断を行うと、切断時に発生する熱によりエタノールが蒸発する可能性があるためである。

(2) 飽和度の測定

モルタル中の液状水の浸透を確認するために、浸漬試験後のモルタルを図-5.8 に示すように 15mm 厚の試験片に切断し、試験片の質量 m_a [g] を測定する。測定後、試験片を 105 °C の乾燥炉で乾燥し、絶乾状態の試験片の質量 m_d [g] を測定する。さらに、絶乾状態の試験片を吸水させ、飽和状態の試験片の質量 m_s [g] を測定する。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 S_r [%] を次式に従い算出する。

$$S_r = \frac{m_a - m_d}{m_s - m_d} \times 100 \quad (5.1)$$

また、半乾燥状態のモルタルの初期飽和度に関しても同様に式(5.1)から飽和度を算出する。

図-5.9 は絶乾状態に対して、式(5.1)より求めたモルタル高さ方向の飽和度の分布を示す。図-5.9 の縦軸は飽和度 S_r 、横軸はモルタルの任意断面位置であり、0 mm 位置が浸透面を示す。また、絶

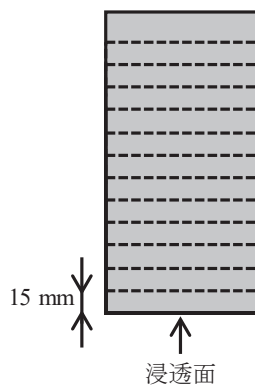


図-5.8 モルタル切断位置

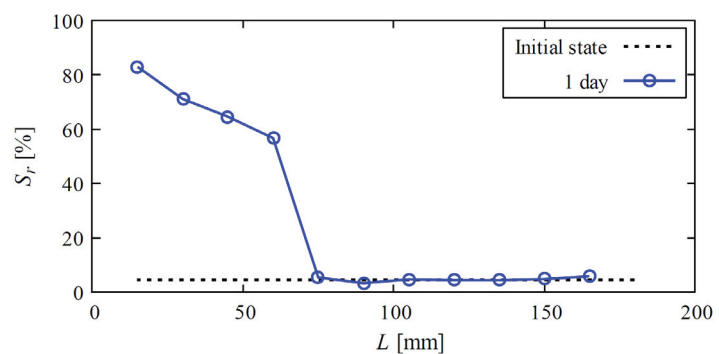


図-5.9 飽和度の測定結果の一例
(W/C=0.65, 絶乾状態, 1日浸漬)

乾状態の初期飽和度は、絶乾状態のモルタルの液状水浸漬試験（1日浸漬）により得られた液状水が浸透していない範囲の飽和度を用いた。液状水が浸透していない範囲の飽和度は、モルタル高さ方向に対してほぼ一定であるため、この飽和度を平均し、絶乾状態のモルタル全体の飽和度とした。

5-3 試験結果および考察

(1) 液状水浸漬試験

図-5.10 は絶乾状態の水セメント比 0.45 のモルタルを液状水に 1 日浸漬した場合の飽和度の分布を示し、測定結果のばらつきを確認するため、同条件で 3 データを記録した。ここで、測定された浸透高さに対して有意水準を 5%とした場合の Thompson の棄却検定を行った結果、3 データ全て採択されたため、測定結果のばらつきは小さいと考え 1 つの試験条件に対して 1 データを記録する。また、本検討では飽和度が急激に減少する位置を浸透面からの液状水の浸透高さとする。

図-5.11 は絶乾状態のモルタルを用いた場合の液状水浸漬試験から得られた飽和度の分布を示す。図-5.11 より絶乾状態のモルタルを液状水に 1 日浸漬した場合の液状水の浸透高さは、水セメント比 0.45 のモルタルでは浸透面から 45 mm、水セメント比 0.65 のモルタルでは浸透面から 60 mm の位置であり、水セメント比の差により液状水の浸透高さが変化することを確認した。これは、水セメント比が小さい程、モルタル中の空隙構造が緻密、すなわち微細空隙径が小さくなるため、水セメント比 0.45 のモルタル中の液状水の浸透高さは、水セメント比 0.65 のモルタルより小さくなったと考えられる。また、1 日浸漬した場合の水セメント比 0.45 と水セメント比 0.65 のモルタルの飽和度分布は概ね等しく、これは浸漬期間が極めて短期間であったため、水セメント比の差による液状水の浸透挙動の差が明確に確認できなかったと考えられる。一方、3 日、7 日浸漬した場合、水セメント比の差による液状水の浸透挙動の差が明確になり、各浸漬期間の水セメント比 0.45 のモルタルの液状水の浸透高さは、水セメント比 0.65 のモルタルより小さくなることを確認した。

図-5.12 は半乾燥状態のモルタルを用いた場合の液状水浸漬試験から得られた飽和度の分布を示し、図-5.13 は空隙構造が変化するモルタルを用いた場合の液状水浸漬試験から得られた飽和度の分布を示す。図-5.11 と図-5.12 より、モルタルの空隙中の内在水が、モルタル中の液状水の浸透挙動に与える影響を考察する。図-5.11(a)と図-5.12(a)より、水セメント比 0.45 のモルタルを液状水に 1 日浸漬した結果、乾燥度の差に因らず液状水の浸透高さが浸透面から 45 mm の位置であることを確認した。また、浸透面から 60 mm の位置の飽和度は、絶乾状態では 50%程度であり、半乾燥状態では 30%程度であるため、半乾燥状態のモルタルは絶乾状態のモルタルと比較して液状水の浸透が抑制されていることを確認した。図-5.11(b)と図-5.12(b)より、水セメント比 0.65 のモルタルを液状水に 1 日浸漬した結果、絶乾状態では液状水の浸透高さが浸透面から 60 mm の位置である一方、半乾燥状態では浸透面から 45 mm の位置であることを確認した。したがって、水セメント比の差に因らず、半乾燥状態のモルタルは絶乾状態のモルタルと比較して液状水が浸透しにくいことが考えられる。これは、図-5.14(a)に示すように、モルタルの空隙中に液状水が存在する場合、不連続空隙部が生じることにより気体の排出が制限され、それに伴い液状水の浸透が抑制されたためであると考えられる。

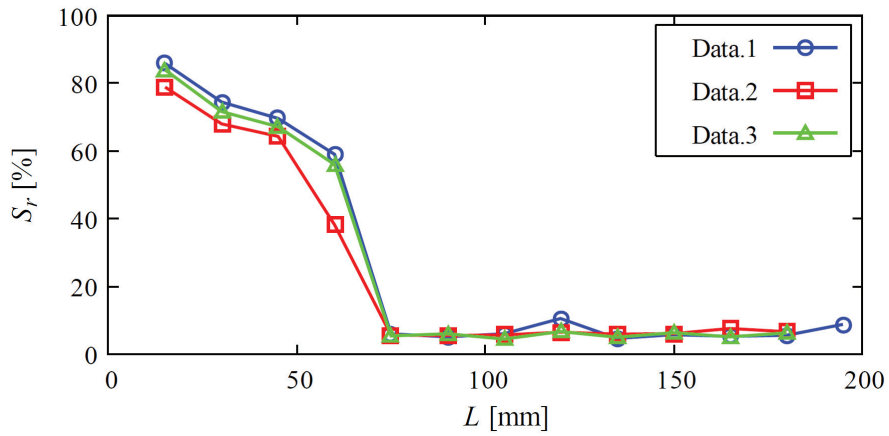
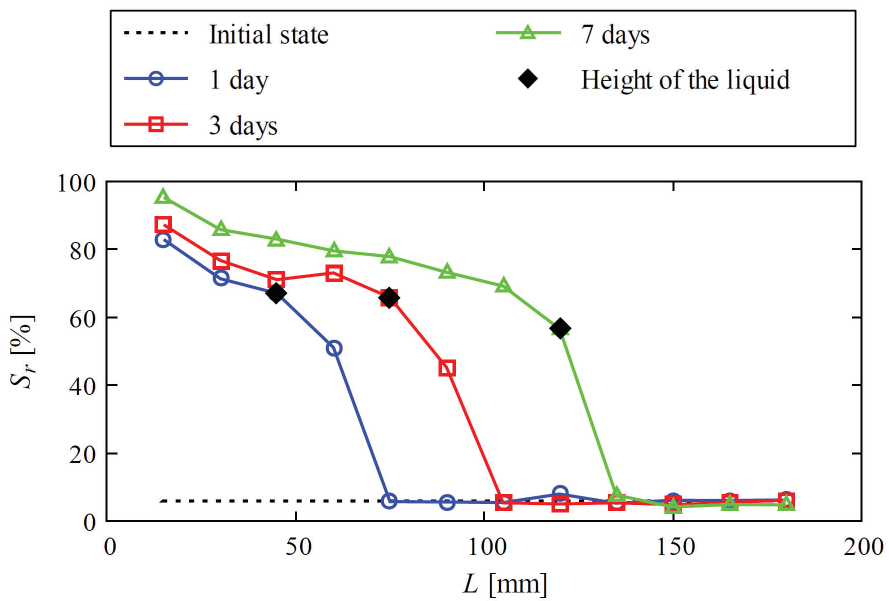
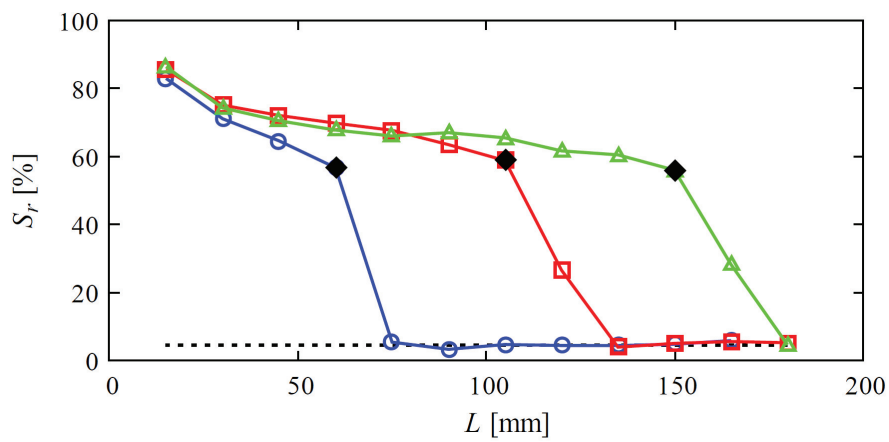


図-5.10 飽和度の測定結果 (W/C=0.45, 絶乾状態, 1日浸漬)

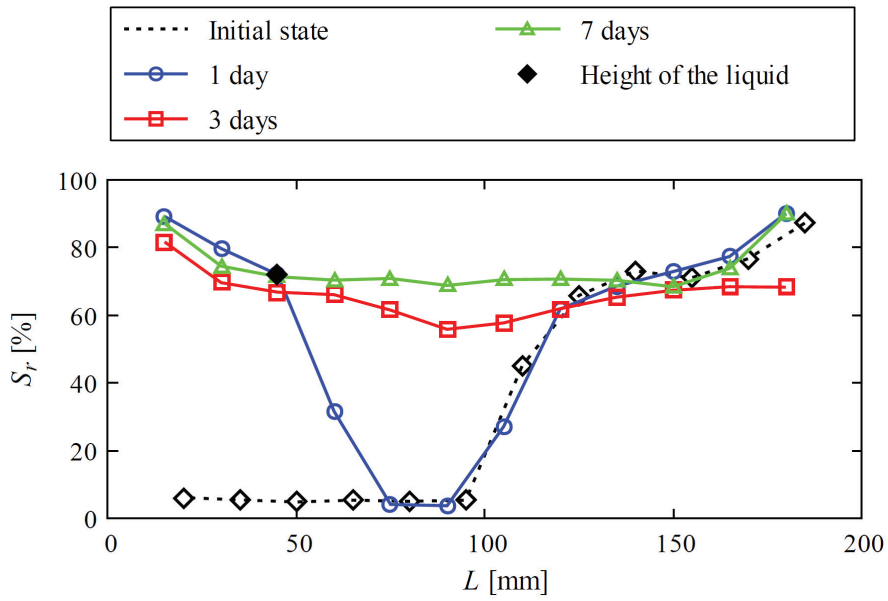


(a) W/C=0.45

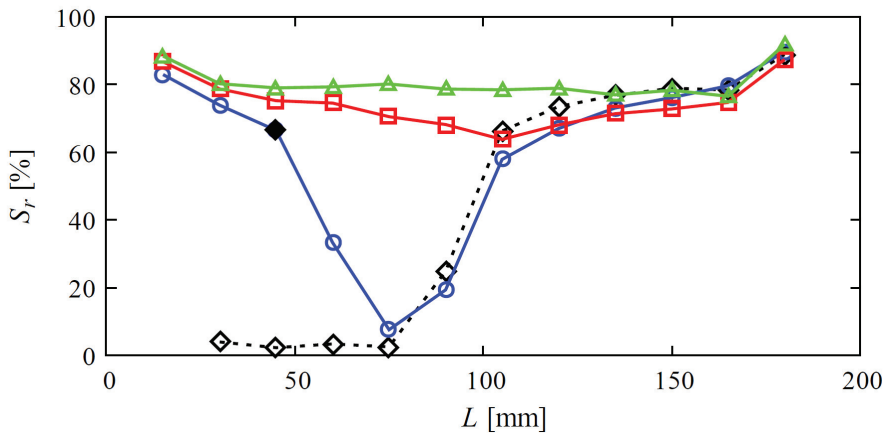


(b) W/C=0.65

図-5.11 絶乾状態のモルタルの飽和度



(a) W/C=0.45



(b) W/C=0.65

図-5.12 半乾燥状態のモルタルの飽和度

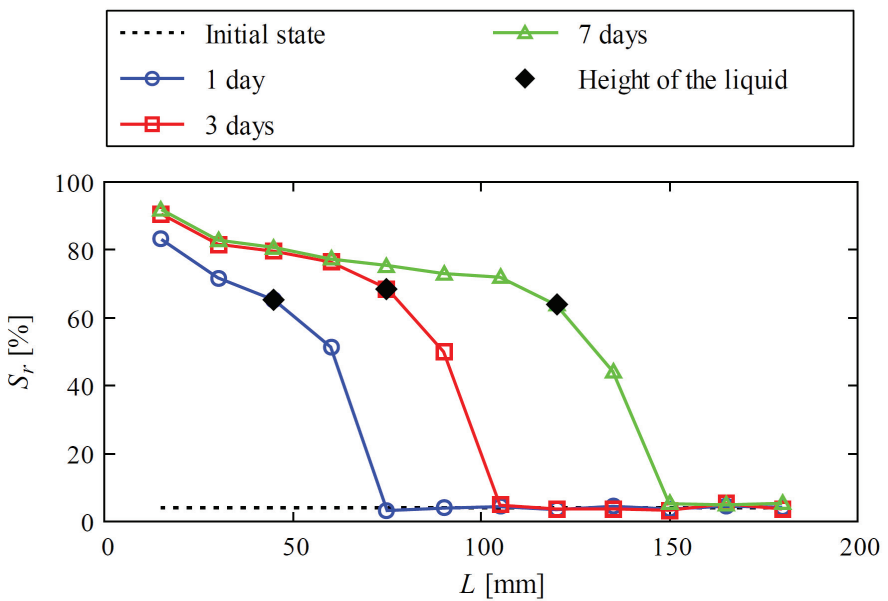


図-5.13 空隙構造が変化する絶乾状態のモルタルの飽和度

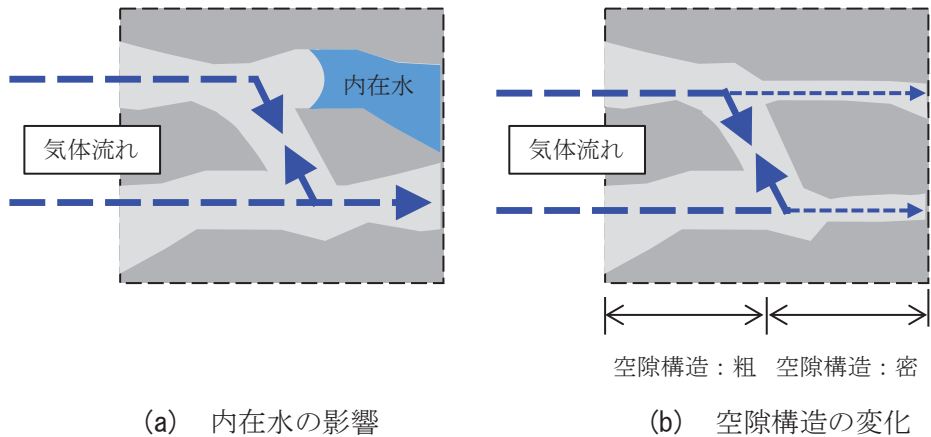


図-5.14 気体の排出機能の低下

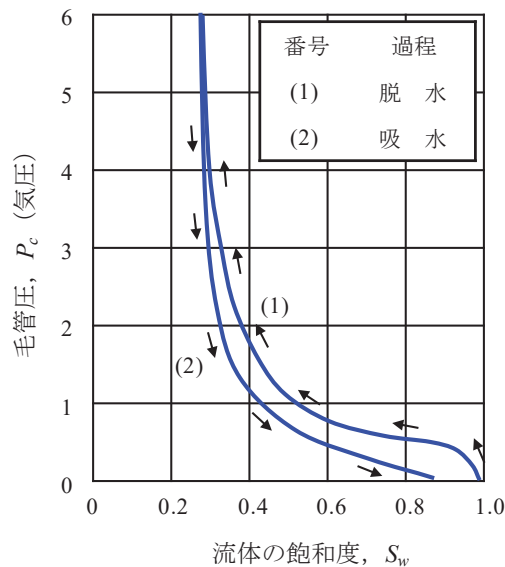


図-5.15 水分特性曲線概念図⁵⁾

図-5.11(b)と図-5.13より、モルタルの空隙構造の変化がモルタル中の液状水の浸透挙動に与える影響を考察する。図-5.11(b)は水セメント比0.65のモルタルを用いた場合の浸漬試験の結果であり、図-5.13は浸透面から約100mmまでの範囲を水セメント比0.65、浸透面から約100mm以深を水セメント比0.45としたモルタルを用いた場合の浸漬試験の結果である。モルタルを液状水に1日浸漬した場合の液状水の浸透高さは、空隙構造に変化がある場合は45mmであり、変化がない場合は60mmであることを確認した。また、3日浸漬した場合の液状水の浸透高さは、空隙構造に変化がある場合は75mmであり、変化がない場合は105mmであるため、モルタルの空隙構造が変化する場合では液状水の浸透は抑制されることを確認した。これは、図-5.14(b)に示すように、モルタル中の気体の排出経路が狭くなり、空隙中の壁面摩擦による気体の粘性摩擦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であると考えられる。

モルタル中の液状水は、浸透面から順次飽和度が100%、すなわち飽和状態になりながら浸透すると想定していたが、図-5.11～図-5.13より飽和度は直線勾配を有し低下することを確認した。また、浸透した液状水や内在水が存在する箇所では飽和度が100%とならず、70%程度ではぼ一定

となった。図-5.15は多孔性岩石に対する代表的な水分特性曲線⁵⁾を示しており、モルタルのような亀甲状に広がる微細空隙を有する物体中の液状水の浸透挙動は、この水分特性に依存すると考えられる。水分特性曲線はインクボトル効果等により飽和状態の物体を脱水後、吸水させた場合、完全には飽和状態に戻らないことを表している。したがって、液状水浸漬試験開始前のモルタルは飽和状態から乾燥により絶乾状態にしているため、浸漬後および吸水後のモルタルの飽和度は100%にならないと考えられる。また、液状水浸漬試験後の飽和度は直線勾配を有し低下しているが、これはモルタルを貫通する空隙以外に不連続空隙が存在することにより気体の排出が制限され、それに伴い液状水の浸透が抑制されたためであると考えられる。

5-4 モルタル中の液状水浸透解析

(1) 解析方法

本章では、モルタル中の亀甲状に広がる微細空隙を1本の毛細管と仮定し、第4章で導出した管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透高さに関する解析解である次式により解析を行う。また、コンクリート中の空隙は直径10nm～5μm程度⁶⁾と微細であり、浸透する液状水に作用する慣性力の影響は極めて小さいと考え、解析では慣性力を無視している。

$$h_l(t) = \frac{B}{A} \left\{ 1 + (1 + AC) \cdot W \left(-\frac{1}{1 + AC} e^{-\frac{B + A^2 t}{B(1 + AC)}} \right) \right\} \quad (5.2)$$

ここに、式(5.2)の係数 A 、 B 、 C および V_0 は次式で表す。

$$A = \frac{\rho_l g r_1^2}{8\eta_l} \quad (5.3)$$

$$B = \frac{r_1 \gamma \cos(\theta_s)}{4\eta_l} \quad (5.4)$$

$$C = \frac{1}{p_c(\infty)} \cdot \left\{ \frac{8\eta_g}{r_1^2} L \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^4 + \frac{p_c(\infty) - p_c(0)}{V_0} \right\} \quad (5.5)$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_l r_1} \cos(\theta_s) \cdot e^{-4.2145} \cdot \left(\frac{r_1}{\gamma \eta_l} \right)^{1.2807}} \quad (5.6)$$

ここに、 $h_l(t)$ は液状水浸透高さ、 t は時刻、 r_1 、 r_2 は毛細管内半径 ($r_1 > r_2$)、 γ は表面張力、 θ_s は静的接触角、 ρ_l は液状水の密度、 g は重力加速度、 η_l は液状水の粘度、 η_g は気体の粘度、 L は管内径 r_2 の毛細管長さ、 $p_c(0)$ は液状水浸透開始時 ($t = 0$ s) に作用する動的毛管圧、 $p_c(\infty)$ は浸透開始後、時間が十分に経過した時に作用する動的毛管圧、 V_0 は液状水の初期浸透速度である。

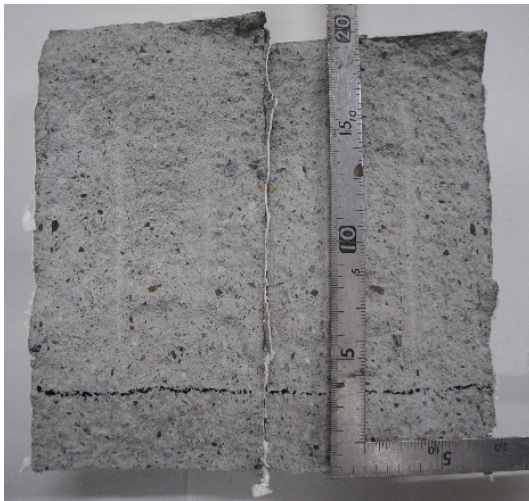
(2) 解析パラメータの設定

毛細管内の液状水の浸透に関する解析解である式(5.2)をモルタル中の液状水浸透解析に適用する場合、モルタル中の微細空隙の見かけの管内半径と、微細空隙壁面と液状水との濡れ性を表す液状水の静的接触角を設定する必要がある。本検討では、最初に静的接触角を 0 とした毛細管浸透モデルによる解析結果とエタノール溶液浸漬試験の結果からモルタル中の微細空隙の見かけの管内半径を推定し、次に推定した管内半径を用いた毛細管浸透モデルによる解析結果と液状水浸漬試験の結果から液状水の静的接触角を推定することを考える。まず、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、モルタルのエタノール溶液浸漬試験により微細空隙の見かけの管内半径を推定する。モルタルのエタノール溶液浸漬試験では、浸漬期間を 1, 3 日とし、使用するモルタルの配合は水セメント比 0.65, 0.45 とし、初期の乾燥状態は絶乾状態とした。図-5.16 と 図-5.17 に所定の浸漬期間経過後のモルタルの割裂断面を示し、測定したエタノール溶液浸透高さを表-5.2 に示す。モルタル中のエタノール溶液浸透高さの測定結果と毛細管浸透モデルによる解析結果とのフィッティングからモルタル中の微細空隙の見かけの管内半径を推定する。ここで、測定結果と解析結果が良い一致を示す場合、解析で用いた管内半径をモルタル中の微細空隙の見かけの管内半径とする。図-5.18 にエタノール溶液の浸透時間曲線とエタノール溶液浸透高さの測定結果を示す。水セメント比 0.45 では管内半径を 1.40×10^{-6} mm とした場合の解析結果と測定結果が良く一致し、水セメント比 0.65 では管内半径を 2.75×10^{-6} mm とした場合の解析結果と測定結果が良く一致した。したがって、モルタル中の微細空隙の見かけの管内半径 r を、水セメント比 0.45 に関しては 1.40×10^{-6} mm、水セメント比 0.65 に関しては 2.75×10^{-6} mm と推定した。

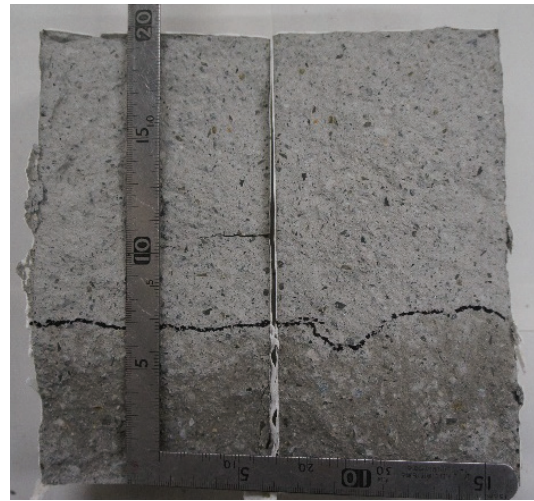
モルタル中の微細空隙壁面と液状水との濡れ性を表す液状水の静的接触角については、モルタル中の液状水の浸透高さを測定し、測定結果と毛細管浸透モデルによる解析結果とのフィッティングから液状水の静的接触角を推定する。ここで、測定結果と解析結果が良い一致を示す場合、解析で用いた液状水の静的接触角をモルタル中の微細空隙壁面と液状水に関する静的接触角とする。図-5.19 に液状水の浸透時間曲線と液状水浸透高さの測定結果を示す。水セメント比の差に因らず、液状水の静的接触角を 65° (1.13446 rad) とした場合の解析結果と測定結果が良く一致した。したがって、モルタル中の微細空隙壁面と液状水に関する静的接触角 θ_s を、水セメント比の差に因らず 65° (1.13446 rad) と推定した。ここで、水セメント比の差に因らずモルタル中の微細空隙壁面と液状水に関する静的接触角が推定されたことについて考察する。固体の表面張力 γ_s 、液体の表面張力 γ_l および固体-液体間の界面張力 γ_{sl} の間には、図-5.20 に示すような水平方向に作用する力のつり合いにより次式が成り立つ⁷⁾。

$$\gamma_{sl} - \gamma_s + \gamma_l \cdot \cos(\theta_s) = 0 \quad (5.7)$$

式(5.7)より静的接触角は、液体と固体の固有の物性から決定できることが考えられる。したがって、浸漬させる液状水やモルタルの空隙壁面がそれぞれ同じ物性であれば、空隙構造（水セメント比）の差に因らず静的接触角が決定されると考えられる。



(a) 1日浸漬

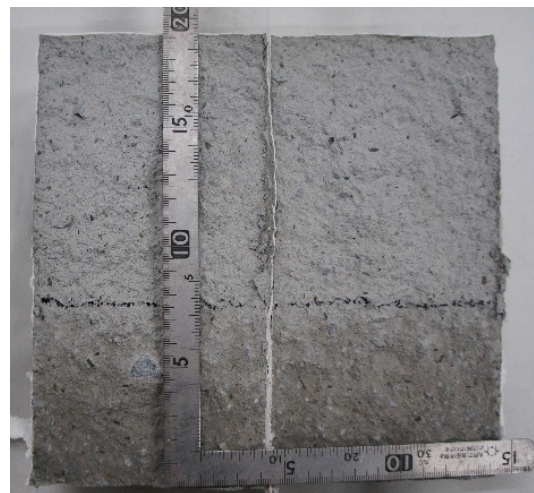


(b) 3日浸漬

図-5.16 エタノール溶液浸漬試験後のモルタルの割裂断面 (W/C=0.45)



(a) 1日浸漬

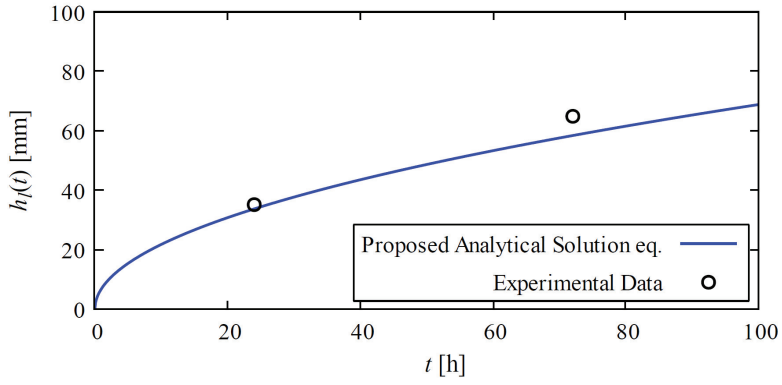


(b) 3日浸漬

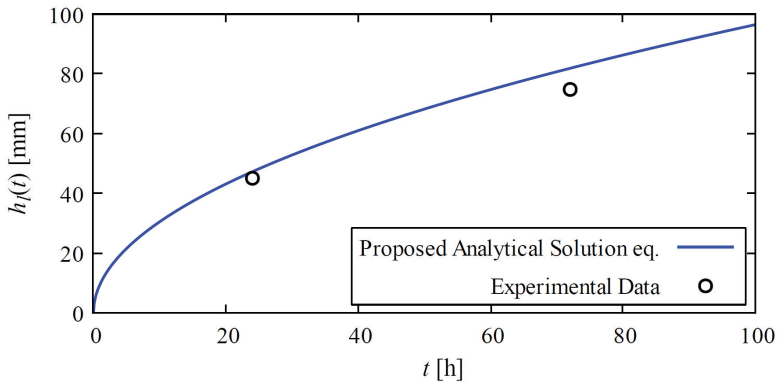
図-5.17 エタノール溶液浸漬試験後のモルタルの割裂断面 (W/C=0.65)

表-5.2 モルタル中のエタノール溶液浸透高さ

t (day)	h_i (mm)	
	W/C=0.45	W/C=0.65
1	35	45
3	65	75

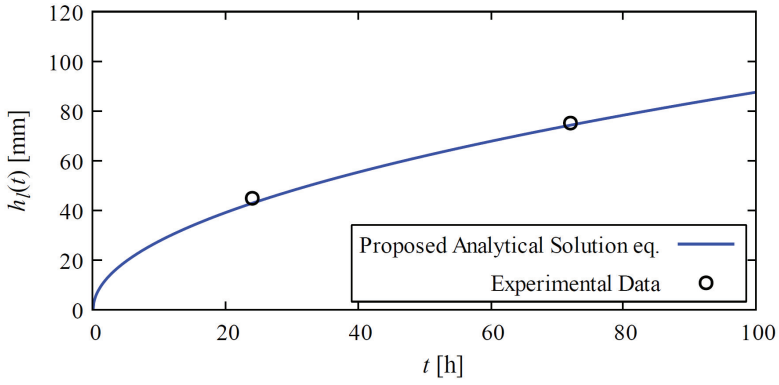


(a) W/C=0.45

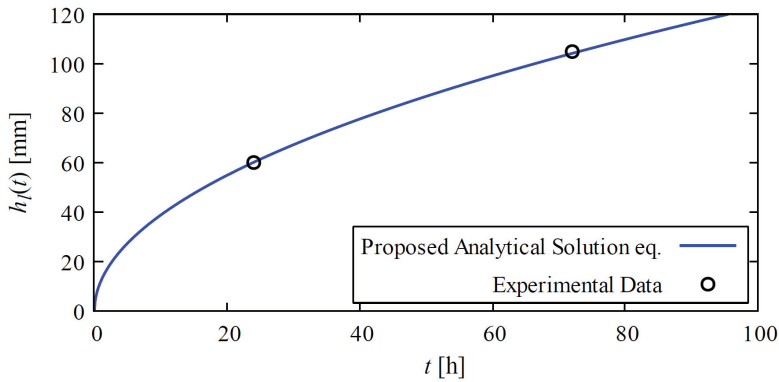


(b) W/C=0.65

図-5.18 モルタル中の微細空隙の見かけの管内半径を推定



(a) W/C=0.45



(b) W/C=0.65

図-5.19 モルタル中の微細空隙壁面と液状水に関する静的接触角の推定

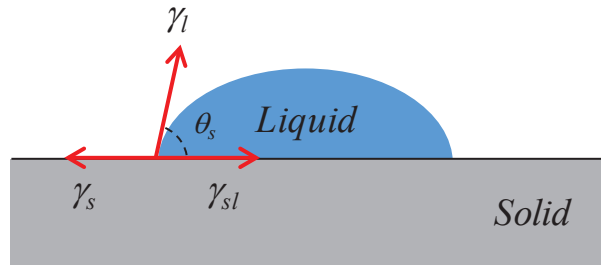


図-5.20 固体表面上の液体

表-5.3 液状水および気体の物性に関する解析パラメータ

Fluid	ρ_l or ρ_g (kg/m ³)	η_l or η_g (Pa s)	γ (mN/m)	θ_s (rad)
Water (tap water)	998	0.001000	72.73	1.13446
Gas (atmosphere)	1.20	0.000018	-	-

表-5.4 モルタル中の空隙構造に関する解析パラメータ

W/C	r_1 (mm)	r_2 (mm)	L (mm)
0.45	1.40×10^{-6}	-	-
0.65	2.75×10^{-6}	-	-
0.65-0.45	2.75×10^{-6}	1.40×10^{-6}	100

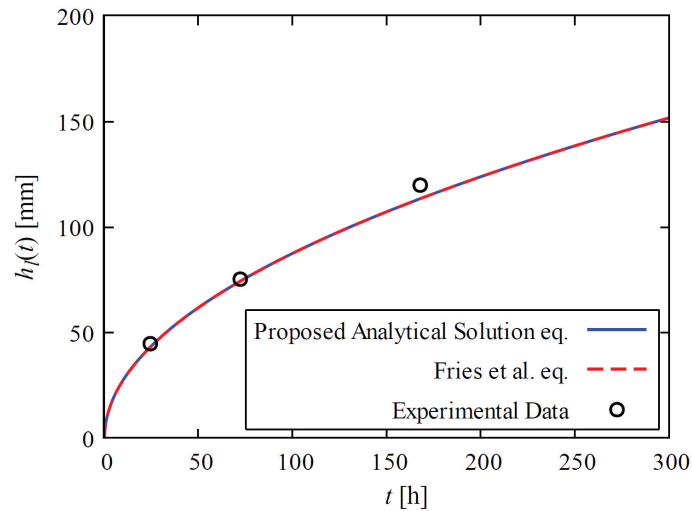
(3) 試験結果と解析結果の比較

液状水に水道水を用いた浸漬試験の結果と液状水浸透解析の結果を比較する。液状水浸透解析で用いるパラメータを表-5.3, 表-5.4 に示す。また, 本実験で用いた液状水の物性は平成30年度理科年表⁸⁾から引用した。また, モルタル中の液状水浸透解析において, 動的接触角の影響を考察するために式(5.2)による解析結果と Fries et al.の解析解による解析結果を比較する。ここに, Fries et al.の解析解を次式に示す。

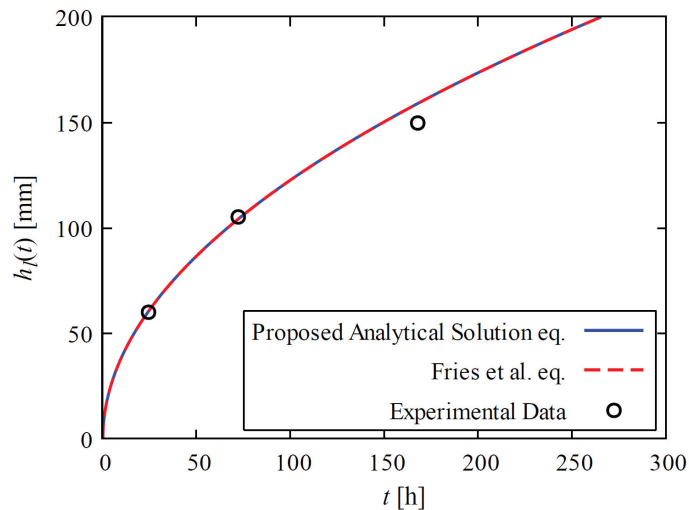
$$h_l(t) = \frac{B}{A} \left\{ 1 + W \left(-e^{-\frac{B+A^2t}{B}} \right) \right\} \quad (5.8)$$

ここに, A, B は次式のように定義している。

$$A = \frac{\rho_l g r_1^2}{8\eta_l} \quad (5.9)$$



(a) W/C=0.45

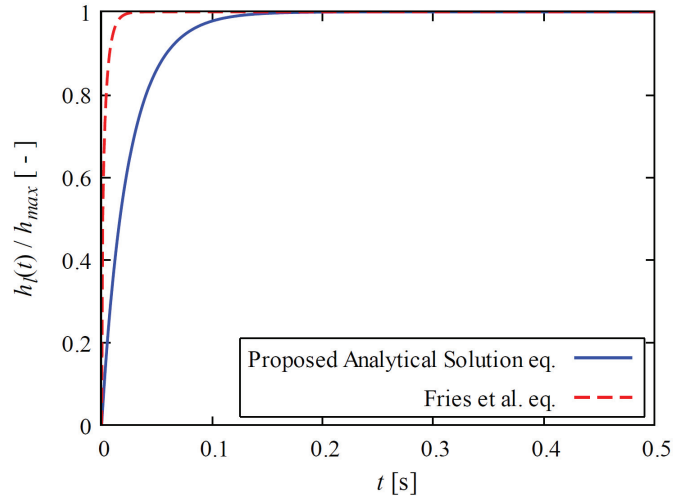


(b) W/C=0.65

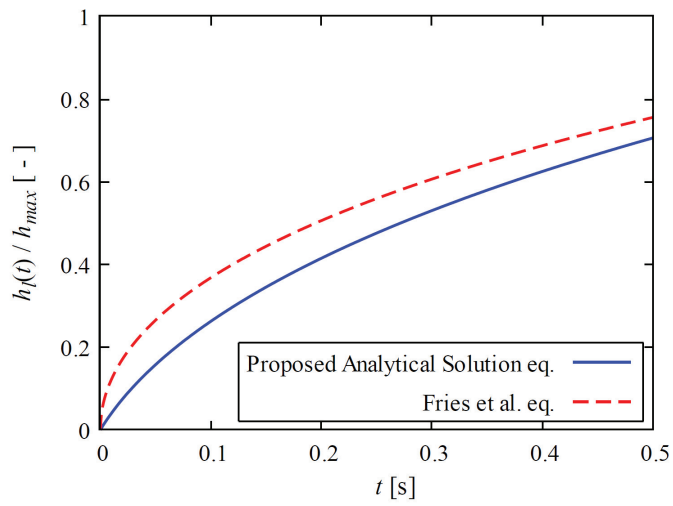
図-5.21 液状水の浸透時間曲線

$$B = \frac{r_l \gamma \cos(\theta_s)}{4\eta_l} \quad (5.10)$$

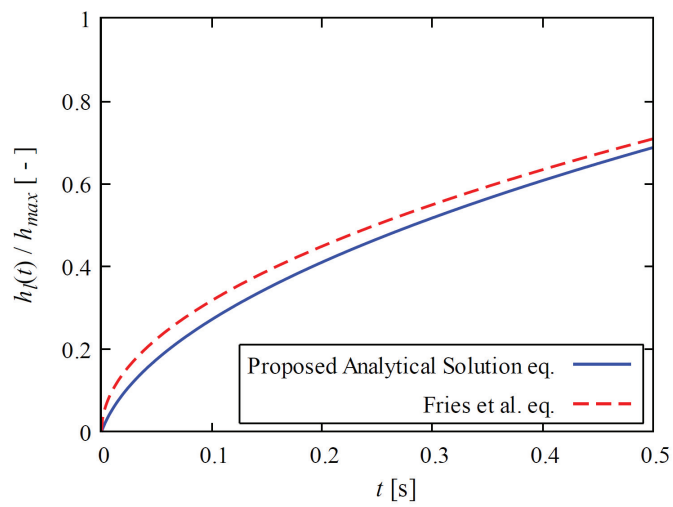
液状水に水道水を用いた場合の浸透時間曲線を図-5.21 に示す。図-5.21(a)，図-5.21(b)はそれぞれ水セメント比が 0.45，0.65 のモルタルの液状水浸透解析の結果と浸漬試験から得られた結果である。1日(24 h)浸漬と3日(72 h)浸漬に関する浸漬試験の結果は、フィッティング解析に用いているため、7日(168 h)浸漬に関する浸漬試験の結果と液状水浸透解析の結果について考察する。図-5.21(a)，図-5.21(b)より本検討における解析結果は、浸漬試験の結果と概ね良い一致を示している。また、本検討における解析結果と Fries et al.の解析解による解析結果は一致しているため、微細空隙中の液状水浸透では接触角の速度依存性の影響は極めて小さいと考えられる。図-5.22 に動的接触角とモルタル中の微細空隙の見かけの管内半径 r の関係を表す液状水の浸透時間曲線を示す。また、図-5.22 の縦軸は液状水の浸透高さ $h_l(t)$ を最終浸透高さ h_{max} で除し、



(a) $r = 1.00000$ mm

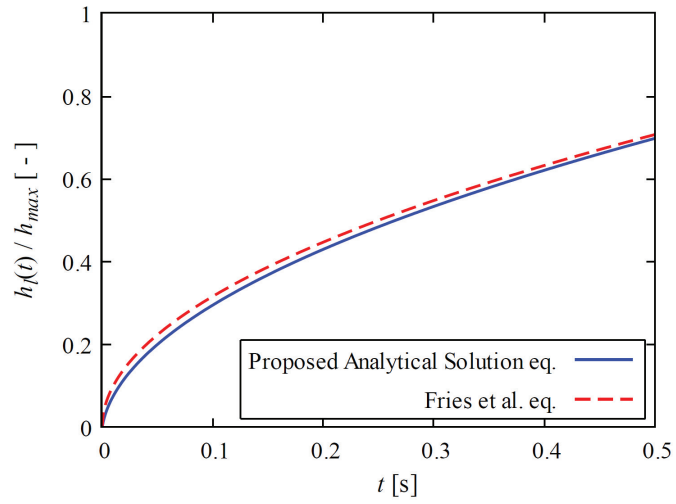


(b) $r = 0.10000$ mm

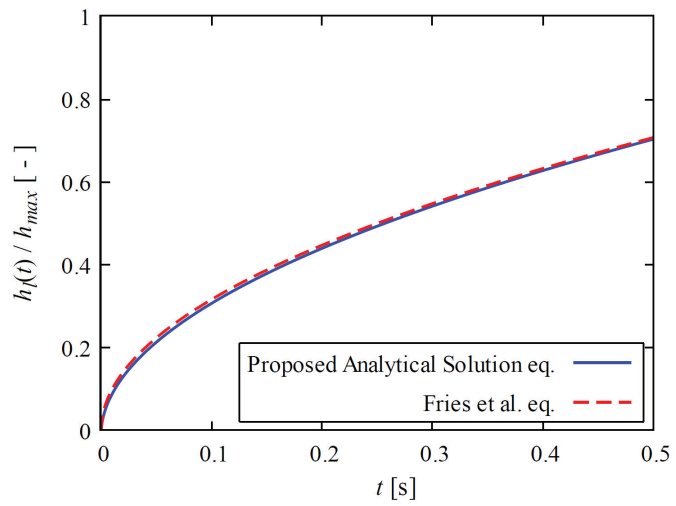


(c) $r = 0.01000$ mm

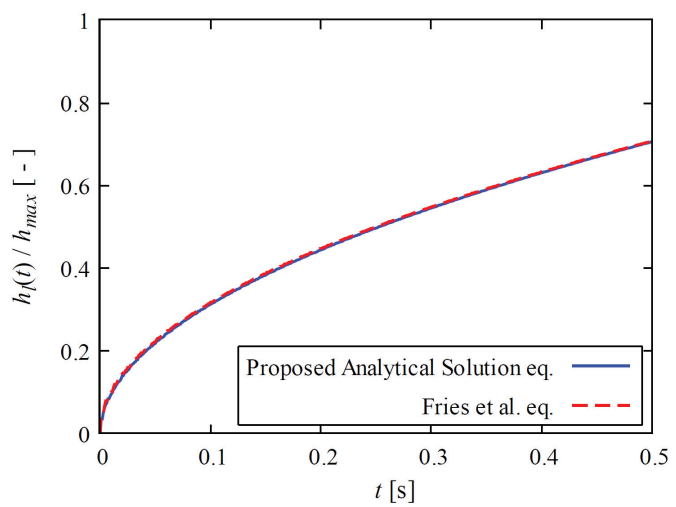
図-5.22 動的接触角との管内半径 r の関係



(d) $r = 0.00100$ mm



(e) $r = 0.00010$ mm



(f) $r = 0.00001$ mm

図-5.22 動的接触角との管内半径 r の関係

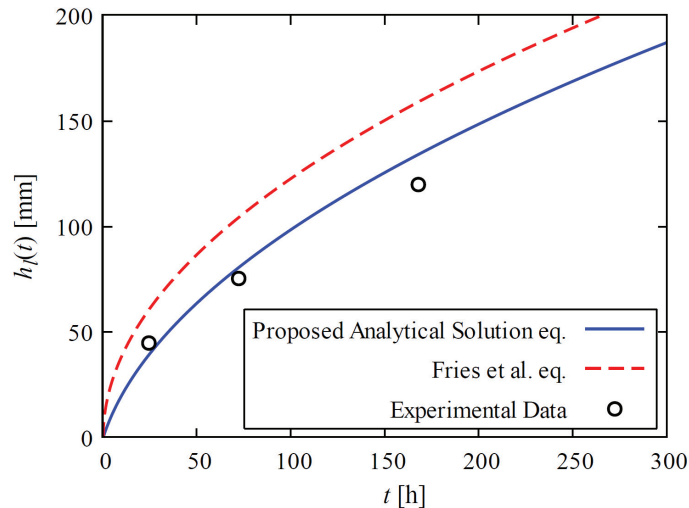


図-5.23 液状水の浸透時間曲線 (W/C=0.65-W/C=0.45)

無次元量で表している。液状水および気体の物性に関しては表-5.3に示す解析パラメータを用い、管内半径 r を 1.00000 mm, 0.10000 mm, 0.01000 mm, 0.00100 mm, 0.00010 mm, 0.00001 mm と変化させて浸透解析を行った。図-5.22より管内半径 r が 0.00100 mm 以上では、本検討における解析結果と Fries et al.の解析解による解析結果に差が生じ、管内半径が大きくなる程、解析結果の差が大きくなることを確認した。したがって、管内半径 r が 0.00100 mm 以上で液状水の浸透挙動に接触角の速度依存性の影響が表れることが考えられる。コンクリート中の空隙は直径 10 nm~5 μm 程度であるため、モルタルの液状水の浸透挙動に接触角の速度依存性の影響が表れる可能性がある。しかし、図-5.22より接触角の速度依存性の影響は、浸透開始から非常に短い時間領域で生じるため、液状水の浸透速度が小さいモルタル中の液状水の浸透を対象とした場合、この影響は無視できると考えられる。

図-5.23に浸透面から約 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場合の液状水浸透解析の結果と浸漬試験の結果を示す。図-5.23より本検討における解析結果は、空隙構造が変化するモルタル中の液状水浸透特性を概ね再現できており、Fries et al.の解析解による解析結果より 1日 (24 h) 浸漬と 3日 (72 h) 浸漬に関する浸漬試験の結果と概ね良い一致を示している。しかし、7日 (168 h) 浸漬に関する浸漬試験の結果と本検討における解析結果には差が生じている。これは、本検討の解析解は、管内半径 r_1 を有する毛細管内の液状水浸透を解析対象としており、管内半径 r_2 を有する毛細管、すなわち浸透面から約 100 mm 以深のモルタル中の液状水浸透に関しては解析の対象となっていないためである。したがって、大口径の毛細管内から小口径の毛細管内に液状水が浸透する場合の解析を行う必要であり、今後の検討課題である。

5-5 まとめ

本章では、管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透解析に基づき、モルタル中の液状水浸透に関する解析モデルを構築し、モルタル中の液状水浸透解析の結果と液状水浸漬試験の結果と比較した。本検討によって得られた主な成果は以下の通りである。

- 1) モルタル中の微細空隙を 1 本の毛細管と仮定し、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、モルタルのエタノール溶液浸漬試験により微細空隙の見かけの管内半径を推定した。
- 2) モルタル中の微細空隙と液状水との濡れ性を表す液状水の静的接触角について、モルタル中の液状水の浸透高さを測定し、測定結果と液状水浸透解析の結果とのフィッティングから液状水の静的接触角を推定した。
- 3) 設定した解析パラメータを用いてモルタルの液状水浸透解析を行った。本検討における解析結果は、浸漬試験の結果と概ね良い一致を示している。また、本検討における解析結果と Fries et al. の解析解による解析結果は一致しているため、微細空隙中の液状水浸透では接触角の速度依存性の影響は極めて小さくなることを確認した。
- 4) 本検討における解析結果は、空隙構造が変化するモルタル中の液状水浸透特性を概ね再現できており、Fries et al. の解析解による解析結果より 1 日 (24 h) 浸漬と 3 日 (72 h) 浸漬に関する浸漬試験の結果と概ね良い一致を示した。
- 5) 7 日 (168 h) 浸漬に関する浸漬試験の結果と本検討における解析結果には差が生じることを確認した。これは、本検討の解析解は、管内半径 r_1 を有する毛細管内の液状水浸透を解析対象としており、管内半径 r_2 を有する毛細管、すなわち浸透面から約 100 mm 以深のモルタル中の液状水浸透に関しては解析の対象となっていないためである。

参考文献

- 1) Green, W. H. and Ampt, G. A. : Studies on soil physics Part I. The flow of air and water through soils, *The Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, pp. 1-24, 1911.
- 2) Lenormand, R., Zarcone, C. and Sarr, A. : Mechanisms of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 135, pp. 337-353, 1983.
- 3) Letey, J., Osborn, J. and Pelishek. R. E. : Measurement of liquid – solid contact angles in soil and sand, *Soil Science*, Vol. 93, pp. 149-153, 1962.
- 4) 小池賢太郎, 山口明伸, 武若耕司 : モルタル中の水分移動が塩分浸透に及ぼす影響, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)成果報告書(その 2)およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ No.99 巻, pp. 333-338, 2012.
- 5) R.E.コリンズ : 浸透理論 多孔性物体中の流体の運動, 畑地農業振興会, pp. 27-28, 1974.
- 6) Kumar Mehta, P., Paulo J.M. Monteiro ; 田澤榮一, 佐伯昇監訳 : コンクリート工学 微視構造と材料特性, 技報堂出版, pp. 27-29, 1998.
- 7) 小野周 : 物理学 One Point-9 表面張力, 共立出版, pp. 71-85, 1980.
- 8) 自然科学研究機構 国立天文台編 : 理科年表 平成 30 年 第 91 冊 国立天文台編, 丸善出版, pp. 391-396, 2018.

第 6 章

結 論

第 6 章 結論

6-1 結論

本研究では、コンクリート中の液状水の浸透は毛細管浸透に基づくと考え、まず 1 本の鉛直毛細管内を浸透する液状水の基礎的な挙動を解析的、実験的に明らかにし、その動的なメカニズムをモルタル中の液状水の浸透に適用することを試みた。

本章では、各章での検討内容と得られた結果について総括した。

第 1 章は、現在の鉄筋コンクリート構造物の中性化および塩害に対する耐久性に関する照査の概要を述べ、現行の中性化におけるコンクリート中の液状水の浸透評価手法とコンクリート中の塩化物イオンの浸透評価手法の問題点を取り上げた。また、中性化や塩害等に起因する鉄筋コンクリート構造物の劣化予測を行う上で、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の重要性を述べ、本論文の背景および目的とした。

第 2 章では、まず現行の中性化に関する耐久性照査で用いられる液状水の浸透予測について述べるとともに、現行の照査手法の問題点を抽出した。また、コンクリート中の塩化物イオンの浸透に関して、現行の塩害に関する耐久性照査で用いられる塩化物イオンの濃度拡散モデルについて述べるとともに、塩化物イオンの浸透に関する既往の研究を取り上げ、現行の照査手法の問題点を抽出した。さらに、コンクリート中の液状水の浸透および毛細管内の液状水の浸透に関する既往の研究を示した。

第 3 章は、接触角の速度依存性を考慮した毛細管内の液状水浸透に関する解析解を導出することを目的として、接触角の動的変化の影響を含む毛管力を組み込んだ支配方程式を導出し、近似的な解析解を与え、実験結果と比較した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 液状水の浸透速度と接触角の動的変化の関係を鉛直毛細管内の液状水浸透解析に反映させるため、接触角の動的変化の影響を含む動的毛管圧を定義した。動的毛管圧は液状水の浸透速度と線形関係にあると仮定し、液状水浸透解析の結果と毛細管浸透実験の結果との比較により、その妥当性を確認した。
- 2) 液状水浸透開始時に作用する動的毛管圧は液状水の初期浸透速度に依存すると考え、液状水の初期浸透速度の近似式を導出した。液状水の初期浸透速度の近似式は、いくつかの実験結果とのフィッティングによって定義したものであるが、近似式に付随する各パラメータはそれぞれに対して同一の数値で表すことができたため、汎用性が高いことを示した。
- 3) 2)の結果は、温度変化に伴う液状水の物性の変化を考慮していないため、温度変化によって液状水の物性が大きく変化する場合には、解析精度が低下する可能性があることを指摘した。
- 4) 本検討で導出した解析解による解析結果と実験結果は、液状水の種類や毛細管内半径に因らず概ね良い一致を示した。
- 5) 本解析では、Hamraoui et al.の解析で用いられる分子パラメータ β に相当する液状水の初期浸

透速度 V_0 を液状水の物性や毛細管内半径に因らず単一の近似式で表すことができたため、本検討で導出した液状水の浸透に関する解析解は優位性があると考えられる。

第 4 章は、管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透に関する解析解を導出することを目的として、管内断面が変化するにより生じる毛細管内の気体の粘性抵抗の影響を考慮した支配方程式を導出し、近似的な解析解を与え、実験結果と比較した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 管内断面が変化するにより考慮する必要がある毛細管内の気体の粘性摩擦力を定義し、力のつり合いに基づき液状水浸透を支配する方程式を導出した。
- 2) 毛細管内の気体流れが低速であると仮定し、浸透する液状水の体積と液状水の浸透に伴い移動する気体の体積が等しいと考え、気体の浸透高さの近似式を導出した。
- 3) 本検討で導出した解析解による解析結果と毛細管浸透実験の結果とは概ね良い一致を示した。
- 4) 毛細管の管内断面積比 A_2 / A_1 が小さい程、もしくは縮小断面を有する毛細管の長さ L が大きい程、液状水が最終浸透高さに達するまでに要する時間が長くなることを確認した。これは A_2 / A_1 が小さい程、もしくは L が大きい程、毛細管内の気体の粘性摩擦の影響が大きくなり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するためである。
- 5) 解析結果から A_2 / A_1 が小さい程、もしくは L が大きい程、動的接触角が静的接触角と等しくなるまでに要する時間が長くなる傾向にあることを確認した。これは気体の粘性抵抗が大きくなることに伴い毛細管内の液状水の浸透速度が低下し、接触角と液状水の浸透速度との関係から動的接触角の時間変化が緩やかになったためと考えられる。また、 A_2 / A_1 が小さい、かつ L が大きい条件では液状水の粘性摩擦力項を無視することが可能であることが示唆された。

第 5 章は、管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透解析に基づき、モルタル中の液状水浸透に関する解析モデルを構築し、モルタル中の液状水浸透解析の結果と液状水浸漬試験の結果と比較した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) モルタル中の微細空隙を 1 本の毛細管と仮定し、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、モルタルのエタノール溶液浸漬試験により微細空隙の見かけの管内半径を推定した。
- 2) モルタル中の微細空隙と液状水との濡れ性を表す液状水の静的接触角について、モルタル中の液状水の浸透高さを測定し、測定結果と液状水浸透解析の結果とのフィッティングから液状水の静的接触角を推定した。
- 3) 設定した解析パラメータを用いてモルタルの液状水浸透解析を行った。本検討における解析結果は、浸漬試験の結果と概ね良い一致を示している。また、本検討における解析結果と Fries et al. の解析解による解析結果は一致しているため、微細空隙中の液状水浸透では接触角の速度依存性の影響は極めて小さくなることを確認した。
- 4) 本検討における解析結果は、空隙構造が変化するモルタル中の液状水浸透特性を概ね再現できており、Fries et al. の解析解による解析結果より 1 日 (24 h) 浸漬と 3 日 (72 h) 浸漬に関する浸漬試験の結果と概ね良い一致を示した。
- 5) 7 日 (168 h) 浸漬に関する浸漬試験の結果と本検討における解析結果には差が生じることを

確認した。これは、本検討の解析解は、管内半径 r_1 を有する毛細管内の液状水浸透を解析対象としており、管内半径 r_2 を有する毛細管、すなわち浸透面から約 100 mm 以深のモルタル中の液状水浸透に関しては解析の対象となっていないためである。

第 6 章は、各章で得られた結果を取りまとめて結論とした。

6-2 今後の課題

本研究から得られた結果を基に、コンクリート中の液状水浸透に関する解析モデルを構築するために解決する必要がある課題を以下に示す。

- 1) 本検討の毛細管浸透実験では動的接触角の測定が困難であったため、高精度の画像解析や 2 枚の平行板を用いた浸透実験等により動的接触角を測定する必要がある。
- 2) 本検討の解析解は温度変化に伴う液状水の物性の変化を考慮していないため、温度変化によって液状水の物性が大きく変化する場合では、解析の精度が低下する可能性がある。したがって、温度変化に伴う液状水の物性変化が液状水の浸透特性に与える影響を把握する必要がある。
- 3) 本検討の解析解は管内断面が変化する前の毛細管内の液状水の浸透を解析対象としているため、まず大口径の毛細管内から小口径の毛細管内に液状水が浸透する場合の解析手法を確立し、解析対象範囲を拡大することを考えている。また、コンクリート中の微細空隙は、ランダムな形状を有しているため、様々な空隙半径を有する毛細管を複数連結させる場合の解析手法を確立する必要がある。
- 4) モルタル中の内在水の影響を考慮した液状水浸透解析は、モルタル中の飽和度と見かけの管内半径の関係が不明瞭であるため、これを適切に定義する必要がある。本検討より、モルタルの微細空隙中に液状水が存在する場合、液状水の浸透速度が低下することを確認した。したがって、微細空隙中に液状水が存在する場合、見かけ上微細空隙径が小さくなると考えられるため、見かけの管内半径は初期飽和度に依存すると考えられる。初期飽和度に依存する微細空隙の見かけの管内半径を推定するために、まず簡易的に本検討で定義した半乾燥状態を対象とし、管内断面が変化する毛細管内の液状水浸透解析（毛細管浸透モデル）を適用する。初期飽和度の異なるモルタルを用いた液状水浸漬試験により、液状水の浸透挙動と初期飽和度の関係を把握し、毛細管浸透モデルによる解析結果と液状水浸漬試験の結果から、初期飽和度に依存する微細空隙の見かけの管内半径を推定することを考える。
- 5) コンクリート中の液状水浸透解析で毛細管浸透モデルを用いる場合、粗骨材が液状水の浸透挙動に与える影響を考慮する必要がある。コンクリート中のモルタル部と粗骨材の隙間を液状水が浸透する場合、液状水は粗骨材に沿って浸透すると考えられるため、亀甲状に広がる微細空隙中の液状水の浸透と比較して浸透速度が大きいと考えられる。したがって、粗骨材の存在は、コンクリート中の液状水の浸透挙動に大きな影響を与えることが考えられる。コンクリート中の液状水浸透解析を行う場合、毛細管浸透モデルによる解析結果とコンクリートの液状水浸漬試験の結果から、粗骨材の影響を含む微細空隙の見かけの管内半径と液状水の静的接触角を推定する必要がある。

謝辞

本研究の遂行から論文の取りまとめに至るまで，平素から熱意をもってご指導してくださいました，鳥取大学教授・黒田保博士に心より感謝し深く御礼申し上げます。また，本論文をとりまとめるにあたり，鳥取大学准教授・吉野公博士，鳥取大学教授・谷口朋代博士，鳥取大学教授・小野祐輔博士には，貴重なご助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

毛細管内の液状水の浸透に関する解析モデルを構築するにあたり，貴重なご助言をいただきました鳥取大学助教・大信田丈志博士に厚く御礼申し上げます。

ガラス毛細管内の液状水浸透高さを測定する毛細管浸透実験を行うにあたり，高速度カメラを用いた測定に関する貴重なご助言とご指導をいただきました鳥取大学講師・松野隆博士に厚く御礼申し上げます。

毛細管浸透実験に用いる装置や器具を準備していただきました鳥取大学技術職員・畑岡寛氏，モルタル中の液状水浸漬試験等の各種試験にご協力いただいた鳥取大学工学部社会システム土木系学科建設材料学研究室の学生諸氏に感謝申し上げます。