

論文 初期飽和度を考慮したモルタル供試体の液状水挙動に関する基礎的研究

千葉 俊也*1・加藤 佳孝*2・池田 伊輝*3

要旨: 本研究は、あらかじめ切断した供試体をテープで一体化させたものと切断していない供試体を用いて吸水試験を行い、適切な吸水試験方法について実験的に検討した。切断した供試体は切断面の影響が大きく、正確に液状水の移動を把握することが困難な試験方法であることを確認した。飽和度が吸水速度に与える影響を検討するために、飽和度を調整した供試体を用いて吸水試験を行い、*Washburn* の法則に基づいて実験データを整理した。その結果、算定された吸水速度係数が飽和度に依存することがわかった。

キーワード: 水分移動, *Washburn* 式, 飽和度, 拡散方程式

1. はじめに

コンクリート構造物中で生じる水分移動は、乾燥、吸湿、吸水が複合的に作用していると考えられる。そのため、実環境下に暴露されているコンクリート構造物中の水分移動を予測するための第一段階は、乾燥、吸湿、吸水過程の物理的な移動現象を把握し、個別に移動モデルを構築することである。既往の研究を概観すると、乾燥や吸湿過程の気相移動に関しては、非線形拡散方程式を用いて水分移動を表現することができる^{例えば, 1,2)}。しかし、吸水過程に関しては、コンクリート中の液水に毛管張力が作用され、気相の水分移動とは、異なるメカニズムが起きていることが考えられる^{例えば, 3,4)}。

吸水過程を単独で取り扱うのであれば、比較的多くの研究例がある⁵⁾⁻¹⁰⁾。吸水現象を、液状水の表面張力による毛細管流れとしてモデル化し、多孔体の物質移動抵抗性を評価する研究は古くから行われている。吸水による水分移動量は、乾燥や吸湿に比べて圧倒的に大きいため、液状水の表面張力による毛細管流れとする単純なモデルであっても、比較的現象を精度よく記述できることが確かめられている⁵⁾。

中村ら⁶⁾は、モルタル供試体中の空隙を管径一定の水平直管と仮定し、*Hagen-poiseuille* とメニスカス面の幾何学的関係で得られる *Washburn* 式を用いて、液状水の移動を表現している。しかし、多孔質体への水の侵入は *Washburn* 式だけでは説明することが困難であり、現在でも完全な定式化はなされていないため、現状では、液状水の移動を正確に予測することができていないと考えられる。

また、セメント硬化体の吸水試験は、あらかじめ切断した供試体を組み合わせて吸水試験をする方法¹¹⁾や、吸水後に割裂し質量変化を測定する方法⁴⁾等がある。藤原

ら¹²⁾は、乾燥過程の試験方法の妥当性について検討しているが、吸水過程の試験方法に検討している研究は少ない。

さらに、水分移動を考慮した多くの研究は、105°Cでの炉乾燥等による絶乾状態となった供試体を用いて、吸湿および吸水実験を行っている。しかし、実際のコンクリート構造物が暴露されている環境条件では、乾燥、吸湿および吸水による水分の移動が連続的に繰り返されており、絶乾状態のコンクリート構造物は、現実的ではない。そのため、コンクリート構造物内部の水分移動を正確に予測するためには、吸水前のコンクリート内部の含水状態を考慮した水分移動を把握する必要がある。

本研究は、モルタル供試体の吸水試験の方法について検討することに加えて、初期飽和度が吸水挙動に及ぼす影響を把握するために、初期飽和度を調整した供試体を用いて吸水試験を行っている。*Washburn* 式に材料の連結、屈曲および飽和度によって毛管流れの速度に与える影響を表す吸水速度係数を用いて、モルタル供試体の吸水挙動について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究では、切断した供試体を一体化させた供試体を用いた吸水試験(吸水水試験 A)と切断面の影響がない供試体を用いた吸水試験(吸水試験 B)の2パターンの吸水試験を行った。使用したセメントは、普通ポルトランドセメント(記号:C, 密度 3.15g/cm³, 比表面積 3440cm²/g)である。骨材には山梨県富士川産・川砂(記号:S, 表乾密度 2.60g/cm³, F.M.: 2.62)を用いた。モルタルの配合を表-1に示す。供試体は 4×4×16cm の角柱供試体を作製した。

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部 土木工学科 准教授 博(工) (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部 土木工学科

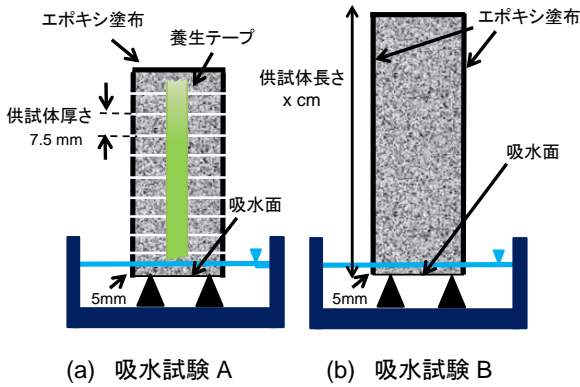


図-1 吸水試験の様子

表-1 配合表

W/C [%]	S/C	単位量 [kg/m ³]		
		W	C	S
40	1.9	276	691	1313
50	2.4	287	575	1380
60	2.9	292	492	1427

2.2 吸水試験方法

打設後1日で脱型し、水和反応を十分に進行させるために、91日間水中養生を行った。図-1に示すように、吸水試験Aでは、吸水面以外の5面にエポキシ樹脂を塗布した後、図-1(a)に示すように吸水面から各要素の厚さが7.5mmになるように精密切断機で切断し、絶乾状態から吸水試験を開始した。図-1(a)に示す養生テープは切断した各要素を一体化するために貼り付けている。しかし、テープの先端が吸水させる水に接触すると、テープとエポキシ樹脂との間に毛細管現象により水分が浸入し、切断面から水分が供給されてしまう可能性がある。そのためテープが直接吸水させる水に接しないように注意して、吸水試験を行った。吸水試験Bでは、供試体長さが1cm、3.5cm、6cm、8cm、16cmごとに切断した絶乾状態のモルタル供試体用い、供試体長さが16cmの供試体は、絶乾状態の供試体とは別に初期飽和度が30%、60%になるように調整したものをを用いた。初期飽和度は、エポキシ樹脂を塗布する前に、吸水面を防湿性のテープでシールし、105°C乾燥炉に静置し、側面から乾燥させることで調整した。飽和度が水平方向に均一することは時間がかかり困難であるが、長さ方向に水分量が一樣にすることができると思われるため、この方法を採用した。エポキシ樹脂を塗布した後に、防湿性のテープを剥がし、吸水試験を開始した。液状水浸入距離の測定は、式(1)に示す推定式を用いて算定した⁵⁾。供試体の空隙率 ε [%]は、アルキメデスの原理より算定した。

$$Z_i = \frac{M_i}{\varepsilon A} \quad (1)$$

ここに、 Z_i : 液状水浸入距離の計算値[cm]、 M_i : 浸透量[cm³]、 A : 吸水面の断面積[cm²]

いずれ吸水試験の場合も飽和状態と絶乾状態を測定した後に、式(2)を用いて飽和度 R_i を求めた。

$$R_i (\%) = \frac{W_i - W_{i(dry)}}{W_{i(sat)} - W_{i(dry)}} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $W_{i(sat)}$: 供試体の飽水時の質量[g]、 $W_{i(dry)}$: 供試体の絶乾時の質量[g]、 W_i : 供試体の吸水試験後の質量[g]

3. 水分移動解析 (Washburnの法則)

本研究では、モルタル供試体中の空隙を管径一定の鉛直管と仮定し、モルタル供試体への液状水の侵入はWashburnの法則に従うとした¹⁴⁾。Washburn式は、Hagen-poiseuille式とLaplace式により表される。次にWashburn式の導出を示す。

液状水の侵入に対する抵抗として、粘性摩擦力が支配的になると考えられ、圧力損失は、式(3)に示すHagen-poiseuille式で表される。

$$Q = \frac{\pi a^4}{8} \cdot \frac{\Delta P}{\eta L} \quad (3)$$

ここに、 Q : 管内の流量[m³/s]、 a : 管内の半径[m]、 ΔP : 圧力損失[Pa]、 η : 粘性係数[m²/s]、 L : 液状水浸入距離[m]

気液界面の圧力差は、メニスカスの幾何学的な関係より、式(4)に示すLaplace式で表される¹⁵⁾。

$$\Delta P = (2\gamma \cos \theta) / r \quad (4)$$

ここに、 ΔP : 気液界面の圧力差[Pa]、 γ : 液体の表面張力[N/m]、 θ : 接触角、毛管半径[m]

気液界面の圧力差と圧力損失は等しいため、式(3)および式(4)を連立することにより、式(5)に示すWashburn式を得ることができる。

$$L = K \sqrt{r\gamma \cos \theta / 2\eta} \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

ここに、 K : 吸水速度係数[-]、 t : 吸水時間[s]

吸水速度係数 K は、細孔組織の連結、屈曲および飽和度の影響等のモルタル供試体の直円管内の流速に与える材

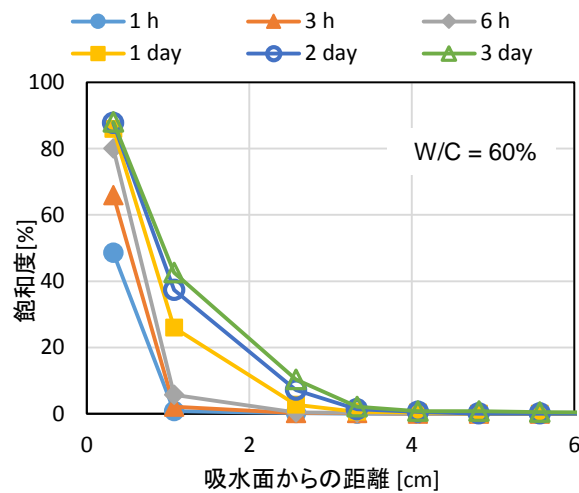
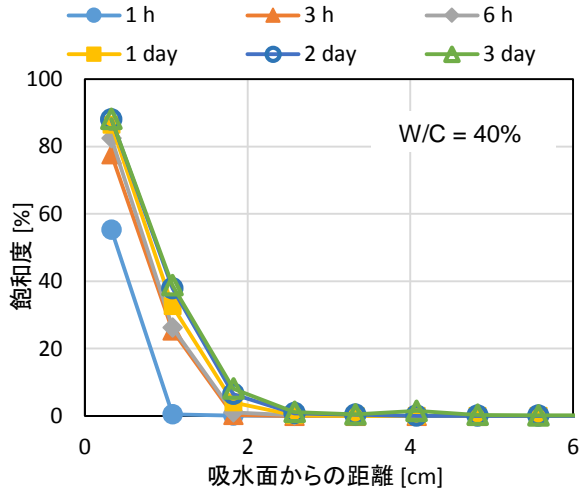


図-2 飽和度分布の測定結果 (吸水試験 A の結果)

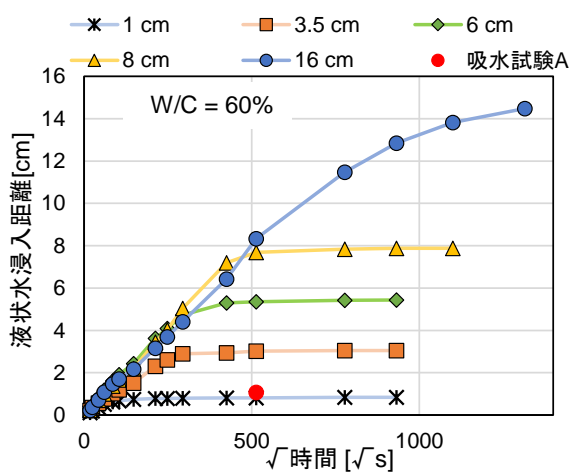
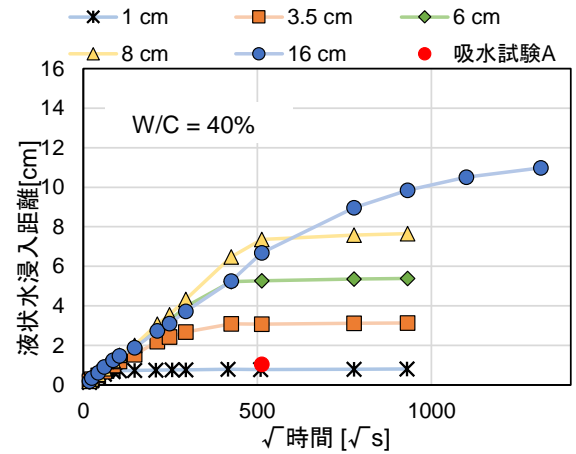


図-3 液状水浸入距離の経時変化

料の特性を表現しており、 $0 < K < 1$ の間で表される。

4. 実験結果

4.1 吸水試験方法の検討

吸水試験 A から得られた飽和度分布の経時変化を図-2 に示す。吸水面から徐々に飽和度の上昇が見られ、水分がモルタル内部に浸透していることが分かる。W/C が 40% よりも 60% の方が水分の浸透が多く、空隙構造が粗であったため、吸水が進んだことが考えられる。図-3 に吸水試験 B から得られる液状水浸入距離の経時変化を示す。供試体長さが異なる実験データに注目すると、いずれの配合も吸水初期に液状水浸入距離と経時変化の平方根が比例関係にあり、Washburn の法則が成立することが確認できる。線形の関係を示す範囲では、異なる供試体長さでも 16cm の供試体と概ね一致しており、吸水試験結果を概ね正確に表していることがわかる。供試体長さ 8cm までは、液状水浸入距離が供試体長さと同程度で一定値に収束しており、ほとんど吸水が支配的であると考えられる。しかし、16cm の供試体は 8cm 以降の浸透と異なり、吸水時間が約 $500\sqrt{s}$ (吸水日数 3 日) で、

比例関係とは異なる穏やかな上昇が見られる。これは、水分移動の物理的な挙動が異なっていると考えられる。Washburn の法則が成り立つと考えられる。W/C50% の結果は提示していないが、W/C40% と W/C60% に大きな違いは見られなかったため結果を省略した。毛管力による液状水の移動は、吸水 3 日まで続き、その後停滞することが考えられる。毛管力による液水移動の停滞は、吸水面からのメニスカスまでの距離が時間と共に長くなり、管壁の摩擦抵抗の合力がそれにつれて大きくなるためと考えられている⁵⁾。これ以降の物理的な移動現象については、毛管水移動に先行してメニスカス上面からの水蒸気拡散による穏やかな水分移動が起こったことや⁵⁾、コンクリートへの浸潤が粗大空隙から微小空隙へと移行するため、浸潤速度が減少したことが考察されているが⁴⁾、実際の現象は明らかにされていない。

W/C が 40% よりも 60% の方が液状水浸入距離は大きく、浸入速度も速いことから、図-2 の考察と同様に空隙構造の粗密の違いが影響したことが考えられる。しかし、吸水試験 A と B の結果を比べると、吸水試験 A では、いずれの配合も吸水量が少ないことがわかる。図-3 の

表-2 Washburn 式に用いた諸係数

しきい細孔径 [nm]	粘性係数 [Pa·s]	接触角 [°]	表面張力 [N/m]
52	0.001	60	0.0725

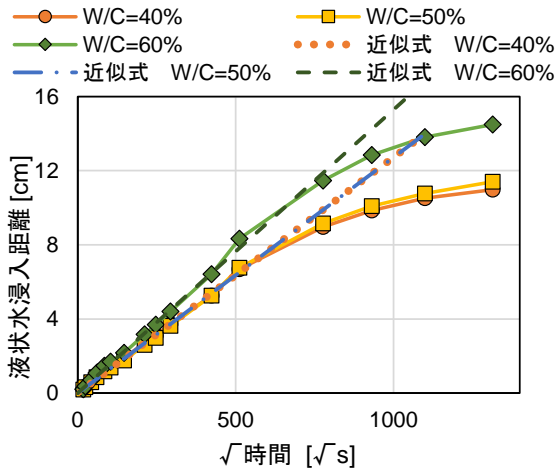


図-4 液状水浸入距離の経時変化と近似値

表-3 吸水速度係数

W/C (%)	40	50	60
K	0.131	0.131	0.157

赤いプロットは、吸水試験 A の吸水 3 日目の実験結果より、各要素の質量増加量を合計し、液状水浸入距離に変換した値を示している。W/C40%では 1.04cm, W/C60%では 1.07cm となり、吸水試験 B の同等の吸水 3 日の結果の約 6 分の 1 以下であることがわかった。吸水試験 A の方法では、切断による不連続面が液水の移動を妨げたことにより、現実的なモルタル供試体の吸水が起こらなかったことが考えられる。すなわち、あらかじめ切断をした後に各要素を一体化して吸水試験をする方法は正しく液状水の移動を把握することができず、セメント硬化体の吸水試験方法としては適切ではないことが考えられ、飽和度分布を正しく測定するには別の方法を検討する必要がある。

4.2 Washburn 式を用いたモデル

供試体長さ 16cm の実験データを基に、式(5)を用いて Washburn 式に近似させ、吸水速度係数 K を算定する。吸水時間が約 $500\sqrt{s}$ (吸水日数 3 日) までは、Washburn 式が成り立つと仮定し、吸水が 72 時間以内のデータを用いて近似させた。本研究で用いた Washburn 式の諸係数は中村ら⁷⁾の計測結果を参考に決定した(表-2)。コンクリートと液状水の見かけの接触角は、配合によらず 60° とし⁶⁾、普通ポルトランドセメントを用いて作製さ

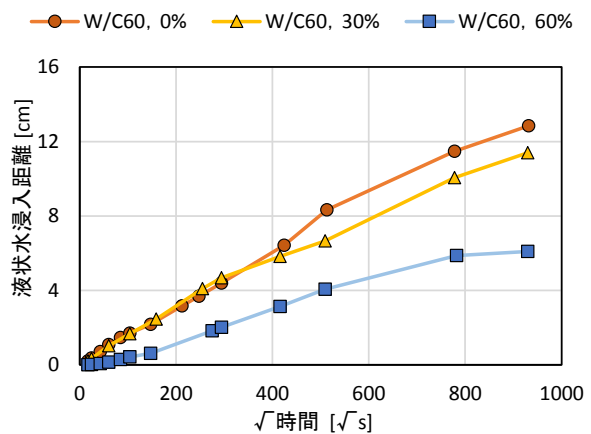
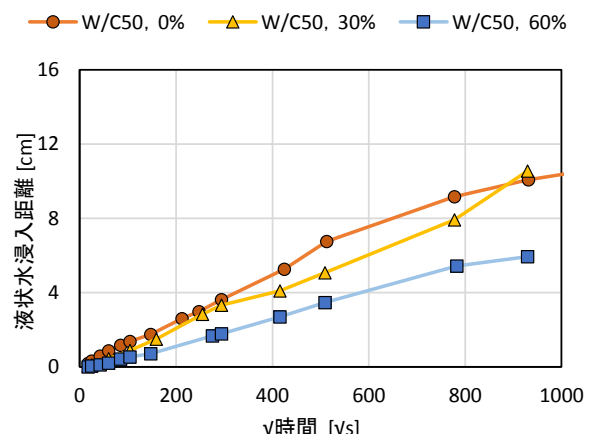
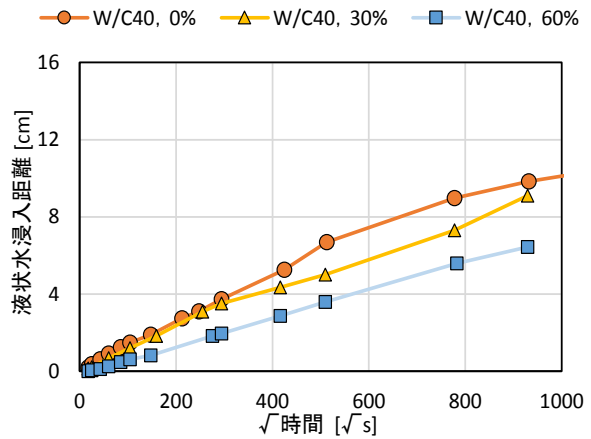


図-5 初期飽和度が異なる液状水浸入距離の経時変化

れたモルタル供試体のしきい細孔径が、水セメント比によらず約 52nm であったことから⁶⁾、モルタル供試体中の空隙を管径一定の鉛直管を 52nm として計算した。

図-4 に供試体長さが 16cm の液状水浸入距離の経時変化、および Washburn 式と実験値より得られた近似式の結果を示す。Washburn 式で用いた諸係数は配合に寄らず等しいため、近似式の傾きの違いは、吸水速度係数 K が影響していることが分かる。表-3 に吸水速度係数 K を示す。W/C が 40% と 50% は同一な傾きを持ち、空隙

構造に大きな差は見られないことが考えられる。しかし、W/C が 60%は他よりも 1.2 倍ほど大きいため、Washburn 式が成立する間の液状水浸入距離は、W/C が 40%および 50%の浸潤深さの 1.2 倍大きくなっていることが推測される。

4.3 初期飽和度が吸水挙動に及ぼす影響

図-5 に初期飽和度が液状水浸入距離の経時変化に与える影響を示す。初期飽和度を調節した供試体の液状水浸入距離は、吸水試験前からあらかじめ水分が含まれているが、吸水試験開始時からの質量増加量を用いて算定した。いずれの配合も初期飽和度が 60%の場合には、絶乾状態の供試体よりも吸水量が少なく、吸水速度が遅くなっている。初期飽和度 0%と 30%のデータは、吸水時間が約 $\sqrt{300}$ s (吸水 1 日) まで同じくらいの液状水浸入距離を示し、約 $\sqrt{420}$ s (吸水 2 日) から液状水浸入距離の増加が穏やかになっていることが分かる。いずれの配合も最終的な液状水浸入距離は、初期飽和度が低い順に大きくなっており、吸水による液水の浸潤速度は、初期飽和度が高いほど遅くなることがわかる。

図-5 の実験データより、配合ごとの吸水速度係数を算定した結果を図-6 に示す。初期飽和度 0%と同様に、吸水 3 日以下のデータを用いて吸水速度係数を算定した。初期飽和度が 60%では、配合の違いは見られないが、いずれの配合も吸水速度係数は、飽和度の増加とともに減少していくことが分かる。これより、図-6 に示したように線形近似を行い、吸水係数を飽和度の関数として表す。近似式の傾きと切片を表-4 に示す。実環境下のコンクリート構造物は、乾燥、吸湿、吸水が複雑に作用し、本実験条件のような一様な飽和度であることは考えにくい。そこで、乾燥あるいは吸湿を受けて図-7 に示すような飽和度分布を持つモルタル供試体 (W/C=40%) について、得られた近似式を用いて吸水過程の液状水浸入距離を算定する。まず、図-6 より得られた飽和度と吸水速度係数の関係を用いて、図-7 に対応する吸水速度係数の分布を求める。得られた吸水速度係数と式(5)に代入し、液状水浸入距離の時間変化を計算する。図-8 に飽和度に依存する吸水速度係数を用いて液状水浸入距離を算定した結果を示す。乾燥後の吸水は、吸水面よりも内部の方が高飽和度であるため、内部への吸水の進行とともに吸水速度が徐々に小さくなり、また吸湿後の吸水では、内部の方が低飽和度であり、内部への吸水の進行とともに吸水速度が上昇することが考えられ、解析値はこれらの影響が表されていると考えられる。今後は、飽和度分布が既知のモルタル供試体を用いて吸水試験を実施し、飽和度に依存する吸水速度係数を用いた解析方法の妥当性について検討する必要がある。

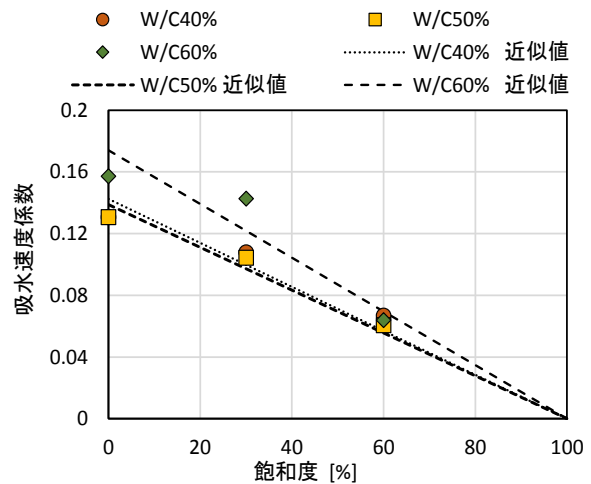


図-6 吸水速度係数と飽和度の関係

表-4 近似式の傾きと切片

W/C[%]	40	50	60
傾き	-0.0014	-0.0013	-0.0017
切片	0.142	0.138	0.173

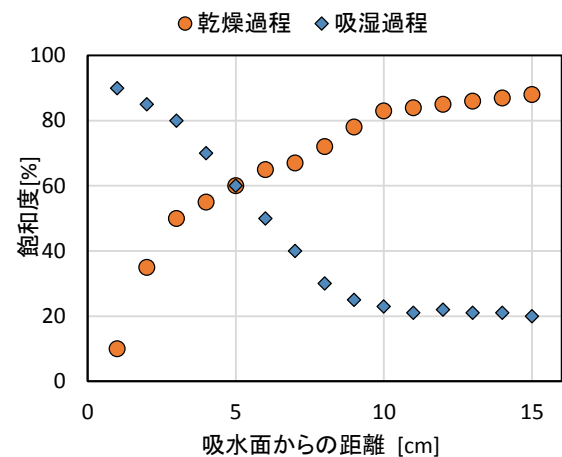


図-7 乾燥、吸湿後に想定される飽和度分布

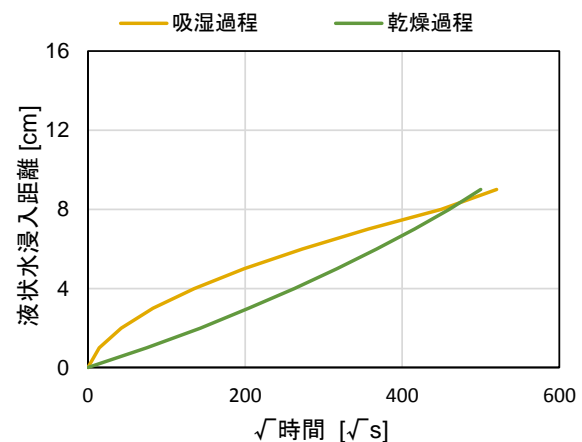


図-8 液状水浸入距離の解析

5. まとめ

モルタル供試体の吸水試験方法に関する検討、および初期飽和度が吸水速度に与える影響を検討した結果、得られた知見を次にまとめる。

- 1) あらかじめ切断した供試体をテープで一体化させた供試体と切断していない供試体の吸水試験を行った結果、切断した後に各要素を一体化して吸水試験をする方法は正確に液状水の移動を把握することができず、セメント硬化体の吸水試験方法としては適切ではない可能性があることがわかった。
- 2) 長さが異なる供試体を用いて吸水試験を行った結果、比例関係を示す範囲では、供試体長さ16cmの結果と概ね一致しており、正しく液状水の移動を把握することができる吸水試験結果であることを示した。液状水浸入距離の経時変化より、比例関係を示す範囲では *Washburn* の法則に従うことがわかった。
- 3) 異なる初期飽和度に調節した供試体を用いて、吸水試験を行った結果、初期飽和度が高いほど、吸水速度が遅くなり、吸水速度係数は飽和度に依存することがわかった。

参考文献

- 1) 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，Vol.23，No.490，pp.101-110，1994
- 2) 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，Vol.312，pp.142-145，1981.12
- 3) 酒井雄也，岸利治，中村兆治：サイズオーダーの異なる空隙への液状水侵入に関する数値解析的検討，第66回セメント技術大会講演要旨，pp.106-107，2012
- 4) 秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動，土木学会論文集，No.420，V-13，pp.61-69，1994.5
- 5) 越川茂雄，萩原能男：コンクリートの毛管浸透試験方法に関する研究，土木学会論文集，No.426，V-14，pp.183-191，1991.2
- 6) 中村兆治，酒井雄也，岸利治：コンクリート中の液水挙動に与える物理的ならびに化学的性質の影響に関する検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.444-451，2012
- 7) 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
- 8) 朴同天，兼松学，野口貴文：ポリマーセメントモルタルの吸水水分拡散特性および補修部位の拘束応力発生に関する研究，コンクリート工学論文集，第18巻第2号，pp.83-94，2007.5
- 9) 酒井雄也，岸利治，中村兆治：微細空隙中を毛管張力により侵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
- 10) 柳博文，福原輝幸，松岡茂：不飽和コンクリートの吸水過程に及ぼす水セメント比の影響，土木学会論文集，No.683，V-52，pp.65-73，2001.8
- 11) 丸山一平，五十嵐豪，岸直哉：セメント硬化体中の水分移動に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.668，pp.1737-1744，2011.
- 12) 藤原忠司，佐藤嘉一郎，小西俊之：乾燥に伴うコンクリート内部での水分移動について，セメント技術年報42，pp.427-430，1988
- 13) 土木学会：2012年度制定コンクリート標準示方書「施工編」，2013
- 14) E.W. Washburn：The dynamics of capillary flow，Physical Review，Vol.17，pp.273-283，(1921)
- 15) Daniel Hillel：環境土壌物理学〈1〉土と水の物理学—耕地生産力の向上と地球環境の保全，農林統計協会，2001