

論文 試験体採取方法が吸水試験結果に与える影響

久堀 泰誉*1・半井 健一郎*2

要旨：コンクリートの吸水試験は物質移動抵抗性評価のために有用であるが、コア試験体を用いて行われた検討は多くない。本研究は、ASTM C1585 の吸水試験結果に及ぼす試験体採取方法の影響を検討することを目的とし、養生期間、試験体高さおよび試験体の採取高さを変化させて吸水試験を実施した。その結果、コア試験体を用いる場合、360 分間の吸水試験結果から求める初期吸水速度係数では吸水挙動全体を適切に評価できないことがわかった。30 分までの吸水量の変化から得られる起点初期吸水速度係数を定義することで、表層部の品質変動を引き起こす養生や採取高さなどの影響が反映される評価指標が提案できることを示した。

キーワード：吸水特性、初期吸水速度係数、近似式、円柱試験体、コンクリートコア、ブリーディング

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高耐久化が強く求められている。鉄筋コンクリートの耐久性に関しては、鉄筋を保護するかぶりコンクリートの物質移動抵抗性（表層品質）に及ぼす影響要因の解明が望まれる。コンクリートの表層品質は、養生などの施工の良否の影響が大きいことが知られており、硬化後のコンクリート構造物の表層品質を直接的に評価することが重要である。

表層品質を評価する方法としては、吸水特性や透気性などの物質透過抵抗性に着目した検討が進められており（例えば¹⁾²⁾、塩化物イオンの拡散や中性化、凍害などと良好な関係性があることから耐久性指標として有用であると思われる。このうち吸水特性を評価する試験としては、ASTM C1585³⁾や RILEM TC-116⁴⁾、ISAT(BS1881-5)⁵⁾、JSCE G582⁶⁾などが挙げられる。これらはコンクリート表面から吸水させることで、コンクリートの品質を評価する試験である。試験の寸法形状や前乾燥の方法などに違いがあるが、本研究では研究報告の多い ASTM C1585（以下 ASTM 規格）³⁾に着目した。

ASTM 規格の試験は一面からの毛管浸透による吸水を行うことで、コンクリートの表面から内部への 1 次元的な物質移動に対する評価が可能な試験である。吸水試験では、吸水試験開始時の試験体内部の含水率の影響が問題となるが、所定の前乾燥の処理によって、試験体の内部相対湿度が構造物の表面付近で見られる 50%程度で一樣になると報告されている⁸⁾⁹⁾。また、2013 年改正版には、前乾燥前に飽水処理⁷⁾を行うことが追記されている。

以上のように ASTM 規格の吸水試験は実構造物の耐久性を評価するうえで非常に有用であると思われる。これまでに円柱試験体を用いた報告は数多くあるものの、実構造物への適用を考慮した際のコアを用いた報告は多くない。実構造物の場合には表面にブリーディングによ

る比較的低品質の層が形成される¹⁰⁾ことから、コアを用いて吸水試験を行うとブリーディングが吸水試験結果に影響を及ぼすと考えられ、円柱試験体から得られる吸水試験結果と傾向が異なる可能性が考えられる。しかしながら、コアの場合に養生期間やブリーディングが吸水試験結果に与える影響を検討した事例は見当たらない。

そこで本研究では、円柱試験体とコア採取用試験体を作製し、それぞれから吸水試験用試験体とコアを採取した。養生期間を変化させることで、養生条件がそれぞれの吸水試験結果に与える影響を比較し、円柱試験体とコア採取用試験体から得られる吸水特性の違いを検証した。これにより、コアを用いた吸水試験結果の耐久性指標としての妥当性を検証することとした。

2. 吸水試験の概要

2.1 試験体

本研究では、コンクリートの円柱試験体と採取コアを用いて検討を行った。表-1 に使用した材料、表-2 に本研究で作製したコンクリートの配合表を示す。セメントには高炉セメント B 種を用いた。フレッシュ性状の目標値は、スランプを 8.0cm、空気量を 4.5%とした。

(1) 円柱サンプル

吸水試験用の円柱試験体（以下、円柱サンプル）を採取するために、直径 100mm×高さ 200mm の円柱試験体を作製した。打設した試験体は脱枠するまでは封緘養生とし、材齢 1 日、7 日、28 日で脱枠後、いずれも雨掛かりのない屋内で全面気中暴露とした。円柱試験体は養生期間によらず材齢 28 日で図-1 に示すように底面と上面それぞれから直径 100mm×高さ 50mm の吸水試験用の円柱サンプルを 2 体採取した。以下、高さ 200mm の円柱試験体の上面から採取したサンプルを C-200、底面から採取したサンプルを C-0 とする。

*1 広島大学 大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻（学生会員）

*2 広島大学 大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻教授 博士（工学）（正会員）

(2) コアサンプル

コアを採取するために、試験体寸法を変化させた3種類の試験体を作製した。小型の試験体Sでは養生期間を3水準に変化させ、また、試験体M（高さ300mm）と試験体L（高さ1000mm）によって試験体高さを比較できるようにした。試験体寸法と養生期間に関してそれぞれ表-3に示す。養生期間中は型枠存置の封緘養生とした。試験体L、試験体Mは脱枠後、全面気中曝露とした。試験体Sは脱枠後、上面、端面、底面にはアルミテープを貼り付けることで、脱枠後に800mm×300mmの試験面以外からの乾燥を防止し、養生の影響を試験面のみとした。コア採取用試験体はおよそ材齢6か月において、表-4に示すように湿式ドリルで直径100mmのコアを各条件で2つつ採取した。乾燥時の曝露面から湿式コンクリートカッターで高さ50mmに切断し、吸水試験用の試験体（以下コアサンプル）とした。

2.2 吸水試験方法

本研究では、円柱サンプル、コアサンプルともに以下に示すASTM規格に準拠した吸水試験を行った。

ASTM規格は吸水試験前に所定の乾燥調整処理を行う。乾燥調整の前に、サンプル内部の含水履歴の影響を除去するためにASTM C1202¹⁾に規定された真空飽水処理を行う。その後、サンプルを器内温度50℃、器内相対湿度80%の環境に設定した恒温恒湿器内に3日間静置した後、気温20℃の環境下に静置しておいた密封容器にサンプルを入

れ、15日間20℃で密封静置した。

以上に示した乾燥調整処理後、吸水試験を行う。吸水試験中にサンプルが乾燥することを防ぐために、側面はアルミテープで被覆し、コンクリートカッターで切断した面はラップをかぶせた。吸水試験は図-2に示すように、下面からの一面吸水とし、円柱サンプルは打設時の底面から、コアサンプルは型枠に接していた面から吸水させた。吸水試験には水温を約20℃にしておいた水道水を用いた。質量の測定は吸水直前を0分として、吸水開始後から1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360分で行った。このときの0分からの質量変化量と経過時間の平方根との関係から初期吸水速度係数を算出した。なお、質量変化量は吸水面積で除した値を用いた。

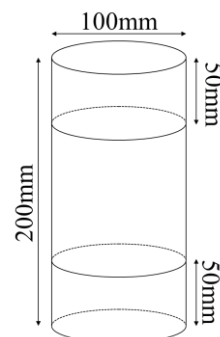


図-1 円柱サンプル採取概要

表-1 材料特性

材料	記号	種類 / 物性
水	W	水道水
セメント	C	高炉スラグセメントB種 / 密度：3.04 (g/cm ³)
細骨材	S	黒瀬町産砕砂 / 表乾密度：2.58 (g/cm ³), 吸水率：1.25 (%)
粗骨材	G	黒瀬町産砕石 / 表乾密度：2.61 (g/cm ³), 吸水率：0.56 (g/cm ³)

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

W/C	単位体積質量 (kg/m ³)				スランプ cm	空気量 %
	W	C	S	G		
0.50	170	340	774	977	9.0	4.9

※使用した化学混和剤の種類と量を以下に示す。

AE剤：1.87 (kg/m³)

AE減水剤：0.68 (kg/m³)

表-3 コア採取用試験体

試験体名	寸法 (mm) 幅×奥行き×高さ	封緘養生期間 (日)
試験体S	800×400×300	1
		7
		28
試験体M	800×600×300	28
試験体L	800×600×1000	28

表-4 コアサンプル採取高さ

試験体名	試験体 高さ (mm)	採取 場所	コア採取高さ (mm)
試験体S	300	側面	150
試験体M	300	底面	0
		側面	150
		上面	300
試験体L	1000	底面	0
		側面	750, 500, 250
		上面	1000

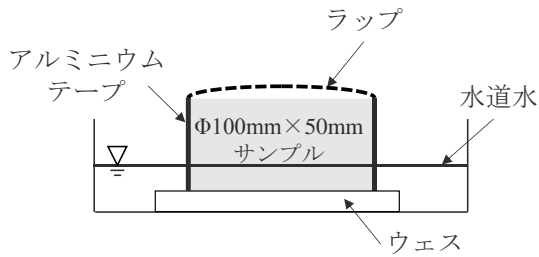


図-2 吸水試験概要

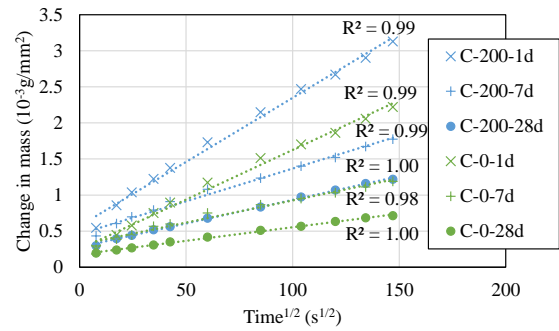
3. 試験結果と考察

3.1 吸水量の経時変化

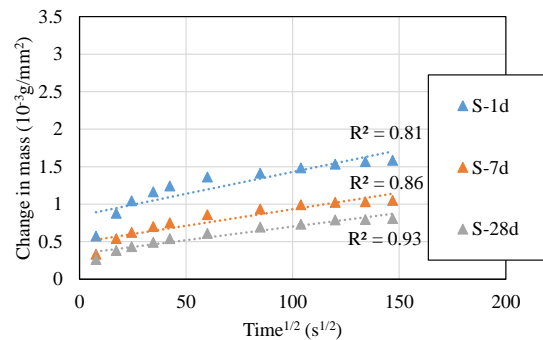
吸水試験中の試験体質量の時間の平方根に対する経時変化を、図-3 に示す。図中には、ASTM 規格に準拠して算出した回帰直線および決定係数をあわせて示した。ASTM 規格ではこの回帰直線の傾き（本研究では I_{360} と表記）を初期吸水速度係数としてコンクリートの耐久性評価を行う。図-4 には、 I_{360} について、養生期間あるいは試験サンプルの採取高さとの関係として示す。なお、回帰直線の決定係数が ASTM 規格の基準を満足していないものが含まれる点に関しては、(2)や(3)で詳細に議論する。

まず、養生の影響に関して、養生期間を変化させた円柱サンプルと試験体 S から採取したコアサンプルの吸水試験結果（図-3(a), (b), 図-4(a)）より分析する。養生期間が短くなるほど、吸水量が増加し、 I_{360} が大きくなっていることがわかる。養生が不十分であると内部構造が緻密にならないため、吸水量が増加したと考えられる。このことは従来の数多くの報告^{例えば 12),13)}と一致する傾向である。一方で、コアサンプルでも養生期間の影響が確認できるが、その影響程度は小さくなっている。コアサンプルを採取したコア採取用試験体は円柱試験体と比較して大きく、また 1 面（試験面）のみからの限られた乾燥であったため、脱枠後の乾燥の影響が小さかったと思われる。

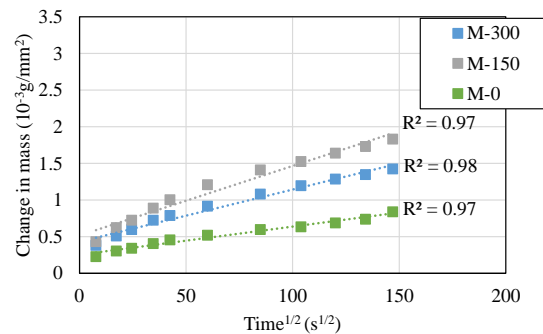
次に、試験体高さともコア採取高さの影響に関して、寸法を変化させた試験体から採取したサンプルの吸水試験結果（図-3(a), (c), (d), 図-4(b)）から分析を行う。サンプルの採取高さに着目すると、最も寸法の小さい円柱試験体（高さ 200mm）から採取した円柱サンプルにおいても、底面 C-0 と比較して上面 C-200 の吸水量や I_{360} が大きくなっていることがわかる。C-200 は吸水面にブリーディングの影響を受けるため、表面付近のセメントペーストのコンクリートの体積割合が相対的に大きくなり、吸水量が増加したと考えられる。同様に試験体高さ 1000mm の試験体 L においても、サンプルの採取高さが大きくなるほど吸水量や I_{360} が大きくなる傾向が確認された。



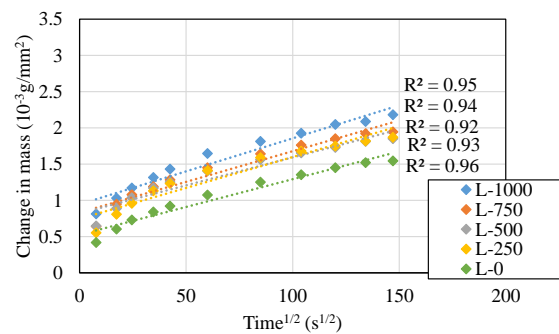
(a) 円柱サンプル



(b) コアサンプル（試験体 S）



(c) コアサンプル（試験体 M）



(d) コアサンプル（試験体 L）

図-3 吸水試験中の質量変化量

続いて、試験体高さに着目し、各試験体の採取高さ 0mm で採取したサンプル (C-0-28d, M-0, L-0) 間の比較を行う。試験体高さの大きい試験体 L から採取したコアサンプルが吸水量、 I_{360} ともに大きくなる結果であった。試験体底面 (採取高さ 0mm) はブリーディングに伴う骨材沈下の程度が異なったため、吸水量が変化したと思われる。なお、試験体の高さが大きいほどブリーディング量は大きくなることが報告されており¹⁴⁾、整合する結果となった。

3.2 吸水試験結果の直線回帰性

一次元の吸水挙動では、時間の平方根で整理すると直線関係が得られること (\sqrt{t} 則) が多くの研究^{15),16)}で報告されており、ASTM 規格においても同様の整理が行われている。実際に、(1)で示した吸水試験結果においては、円柱サンプルにおいては、養生期間やサンプルの採取高さによらず従来の研究と同様に、高い決定係数による直線回帰ができています。一方、図-3(b), (c), (d)からわかるように、コアサンプルの試験結果においては、円柱サンプルの試験結果と比較すると測定値と回帰直線がかい離し、一部は ASTM 規格が求める 0.96 以上の決定係数を満たしていません。特に接水後 30 分までの吸水量の増加が大きくなっており、全体の直線回帰の傾きとして得られる吸水速度係数 I_{360} では、この部分の評価が過小になるとと思われる。そこで吸水速度係数を求めるための直線回帰に関して検討を深めることとした。

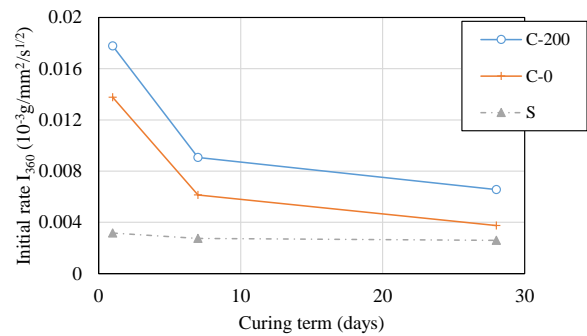
図-5 に、決定係数と養生期間あるいは採取高さとの関係を示す。養生期間を変化させた試験体 S から採取したコアと採取高さを変化させた試験体 M、試験体 L から採取したコアについてそれぞれ検討を行った。

(1) 養生の影響

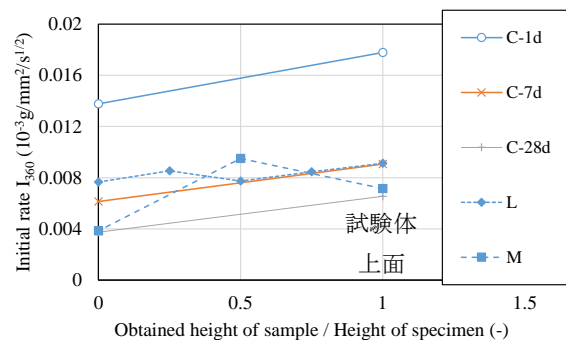
図-5(a)より、円柱サンプルの吸水試験結果の決定係数は、いずれの養生においても 0.98~1.00 と大きく、高い直線性を有していたが、コアサンプルの決定係数は 0.81~0.93 と小さく、円柱サンプルの吸水試験結果と比較して直線性が大きく低下した。特に養生期間が十分ではないときに顕著で、コアサンプルの表層と内部の材料特性の不均質性によるものと考えられる。この不均質性の原因としては、脱枠後の乾燥方向が異なることが考えられる。円柱サンプルは脱枠後全面から乾燥の影響を受けるのに対し、コアサンプルでは型枠面(吸水試験時の吸水面)のみからの乾燥である。円柱サンプルは全面曝露のため養生によらず試験体全体に乾燥の影響があるものの、コアサンプルは 1 面からの乾燥に限られており、表層から内部にかけての内部構造の差が顕著となり、吸水挙動の直線性を低下させたと思われる。

(2) 採取高さの影響

図-5(b)より円柱サンプルの吸水試験結果の決定係数

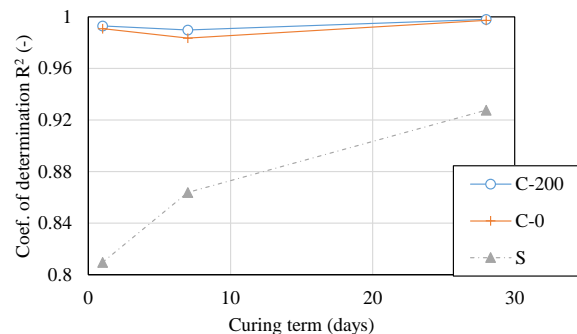


(a) 養生期間による変化

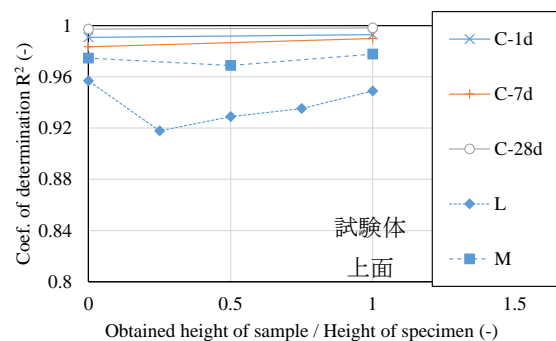


(b) 採取高さによる変化

図-4 初期吸水速度係数 I_{360}



(a) 養生期間による変化



(b) 採取高さによる変化

図-5 決定係数

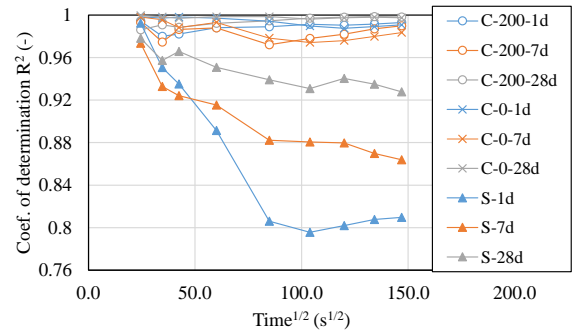
は、養生を変化させた場合と同様にいずれの採取高さにおいても 0.98~1.00 と大きく、高い直線性を有していた。一方で、コアサンプルの決定係数は 0.91~0.97 とやや小さく、円柱サンプルの吸水試験結果と比較して直線性が高くなかった。コアサンプルにおける直線性の低下は試験体高さが大きいときに顕著で、養生を変化させた場合と同様に表層と内部の材料特性の不均質性によるものと考えられる。採取高さを変化させた場合には、ブリーディングの影響が考えられる。フレッシュコンクリートを流し込むと、型枠界面でブリーディング水が上昇する。結果として表面付近には、緻密ではない層が形成される。養生期間が長い場合であっても、試験体高さやコア採取高さを変化させた場合には、表面と内部の材料特性が不均質となり、直線性を有していなかったと思われる。なお、試験体 L においてコア採取高さが大きくなるほど決定係数が大きくなったが、本研究ではこの原因を明らかにできなかった。

(3) 吸水速度係数の算定法に関する検討

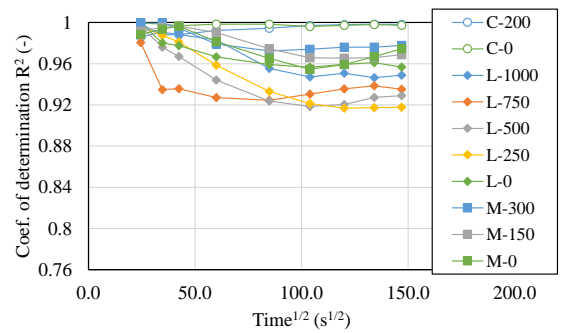
全体の吸水挙動をひとつの数値に代表させて評価するためには、 \sqrt{t} 則以外の関数によって回帰することも考えられるが、本実験結果のすべてを適切に回帰する関数を得ることができなかった。そこで本研究では、直線の回帰性を低下させている吸水直後の挙動に着目することとした。これは、コンクリートの耐久性指標としての適用やコンクリート表面から劣化因子が浸入する可能性が高いことを考慮すると、表面近傍の表層部分を適切に評価することが望ましいと考えたためである。

表層部分の評価が適切にされるように線形回帰を行う際の算出時間を変化させた。図-6 には、最初の測定となる吸水開始 1 分後から 10 分まで、20 分まで、・・・、6 時間までのそれぞれの範囲で線形回帰を行って算出した決定係数を示す。最後の 6 時間までの範囲での計算は I_{360} と一致する。

図-6 より、コアサンプルから算出した決定係数は、算出する時間が長くなるほど小さくなり、180 分(100s^{1/2})程度で、(2)で議論したような小さな決定係数になった。逆に、算出する時間を短期間にするると決定係数が大きくなり、吸水開始後 30 分(42.4s^{1/2})までで算出した決定係数は、ASTM 規格の 0.96 を満たす条件が多い。S-7d、S-28d や L-750 が規格の 0.96 を満たさなかったものの、0.92 以上と大きくなっており、測定値が直線性を有している。本研究では 1 分から 30 分までの傾きを起点初期吸水速度係数 I_{30} として定義した。図-7 に起点初期吸水速度係数と養生期間、採取高さの関係を示す。円柱サンプルは I_{360} と同様に養生期間によって変化しているが、 I_{30} でも同様の関係が確認された。 I_{30} は I_{360} と比較して表面部分の影響が特に反映されていると思われる。 I_{30} はコンクリー

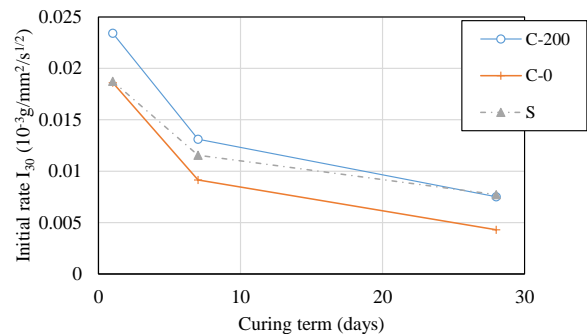


(a) 養生期間の影響

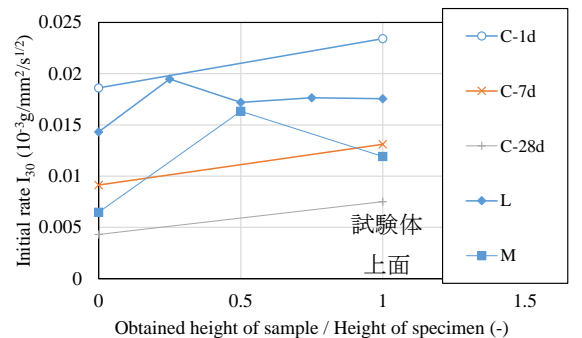


(b) 採取高さの影響

図-6 1 分から各時間までで算出した決定係数



(a) 養生期間による変化



(b) 採取高さによる変化

図-7 起点初期吸水速度係数

ト表面の乾燥を受けた部分の影響が抽出されたため養生で変化したと思われる。また、図-7(b)より、 I_{30} は吸水量と同様に試験体 L > 試験体 M > 円柱試験体の関係であった。ブリーディングも養生の影響と同様に表面付近に影響があるため、試験体高さで変化したと考えられる。

4.まとめ

本研究では、ASTM C1585 における吸水試験用のコンクリート試験体の採取方法の違いに関して検討した。その結果、コアサンプルを用いて吸水試験を行うと、ASTM 規格に準拠して算出した回帰直線と測定値は残差が大きく、吸水時間の平方根で整理した試験結果の直線性が十分ではないことが示された。このことは、360 分間の吸水試験結果から求める初期吸水速度係数 I_{360} が吸水挙動全体を適切に評価できないことを意味する。そこで本研究では、線形近似が可能な 30 分までの起点初期吸水速度係数 I_{30} を新たに定義した。 I_{30} は、 I_{360} と比較して、養生や採取高さなどの影響を反映していることが示された。また、この 30 分間での I_{30} を用いた評価は、吸水試験時間を大きく短縮できることからも有用であると考えられる。今後は中性化や塩分浸透などの耐久性試験結果との比較を行うことが必要である。

参考文献

- 1) 井川倫宏, 玉岡優児, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価基準に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol.29, pp.101-109, 2018
- 2) Nokken, M. R. and Hooton, R. D.: Dependence of rate of absorption on degree of saturation of concrete, Cement, Concrete and Aggregates, Vol.24, No.1, pp.20-24, 2002
- 3) ASTM International, ASTM C1585: Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes, 2013
- 4) RILEM TC116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability, Materials and Structures, Vol.32, No.4, pp.174-179, 1999
- 5) British Standards, BS 1881, Part 5: Methods of testing hardened concrete for other than strength. 1971.
- 6) 土木学会: 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方法(案), 土木学会規準 JSCE G572, 2018
- 7) Castro, J., Bentz, D. and Weiss, J.: Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete, Cement and Concrete Composites, Vol.33, No.8, pp.805-813, 2011
- 8) Bentz, D. P., Ehlen, M. A., Ferraris, C. F. and Winpiger, J. A.: Service life prediction based on sorptivity for highway concrete exposed to sulfate attack and freeze-thaw conditions, National Institute of Standards and Technology, FHWA Report FHWA-RD-01-162, Federal Highway Administration, 2002
- 9) DeSouza, S. J., Hooton, R. D. and Bickley, J. A.: A field test for evaluating high performance concrete covercrete quality, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.25, No.3, pp.551-556, 1998
- 10) 三田勝也, 加藤佳孝: 型枠界面に生じるブリーディング水の挙動に関する実験的検討, 土木学会論文集, E2, Vol.71, No.4, pp.385-397, 2015
- 11) ASTM International, ASTM C1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, 2018
- 12) Parrott, L. J.: Water absorption in cover concrete, Materials and Structures, Vol.25, No.5, pp.284-292, 1992
- 13) Elawady, E., El Hefnawy, A. A. and Ibrahim, R. A.: Comparative Study on Strength, Permeability and Sorptivity of Concrete and their relation with Concrete Durability, Certified International Journal of Engineering and Innovative Technology, Vol.4, No.4, pp.132-139, 2008
- 14) 三田勝也, 加藤佳孝: ブリーディング水がコンクリート表層部の品質に与える影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1385-1390, 2011
- 15) Dias, W. P. S.: Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation, Cement and Concrete Research, Vol.30, No.8, pp.1255-1261, 2000
- 16) Liu, X., Chia, K. S. and Zhang, M. H.: Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete, Construction and Building Materials, Vol.25, No.1, pp.335-343, 2011