

論文 コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案

林 和彦^{*1}・細田 暁^{*2}・Usman AKMAL^{*3}・藤原 麻希子^{*4}

要旨：コンクリート実構造物の壁面，水平面上面および電柱などの円筒面に適用でき，自動もしくは目視にて物質移動抵抗性を完全非破壊で測定できる表面吸水試験装置を開発した。目視での計測の場合には読取り誤差が相対的に大きいという欠点を有するが，誤差の蓄積しにくい計算手法を提案し，精度良く表面吸水速度を計算することができた。本装置の構造上，計測の進行とともに作用水頭が低下する特徴を有するが，検討の結果，一般的なコンクリート構造物で達成される品質の範囲のコンクリートにおいては水頭の変化が吸水挙動に与える影響は有意でないことを確認した。

キーワード：表面吸水試験，誤差，データ処理，水頭，自動計測，物質移動抵抗性

1. はじめに

コンクリート実構造物のかぶりの物質移動抵抗性を完全に非破壊で測定する手法が求められており¹⁾，著者らは表面吸水試験方法を開発した²⁾。この手法を用いることで，コンクリートの水セメント比や養生の差異による緻密性を定量化することができる^{3),4),5)}。

この試験装置は，コンクリートが水に接する内径が80mm（断面積5024mm²，平面への適用時）の吸水カップ部分および，吸水量の変化を水位変化として読み取る鉛直シリンダー部分で構成され，コンパクトな形状である。吸水量を目視で読み取ることができ，データ収録装置を必ずしも必要としない。コンクリートの単位面積あたりの表面吸水速度は著者らのこれまでの実構造物や供試体の測定から概ね10ml/m²/s以下のオーダーであり，水がコンクリートに接する面積をかけた吸水量の変化は5×10²ml/sと非常に小さいため，水量の変化を水面の高さ変化として目視により読み取るには，水位の変化量が小さく測定誤差が生じやすい。そこで，この装置を使用した場合におけるデータ処理方法を確立する必要がある。

同形状の吸水カップとシリンダーの接続位置を変え，水平面上面を測定できるようにしたものを，**図-3**に示す。吸水カップ上面には若干の適切な傾斜をつけているため空気が溜まることなく同等の時間で注水を完了することができる。

電柱などの円筒面に対しては，吸水カップの表面を円筒面に加工したことで，**図-4**に示すように適用できる。

2.2 シリンダー形状

本装置は，コンクリートのある断面積での微小な吸水量を，それよりも断面積の小さいシリンダーの水位変化として感度を増幅させて計測するという特徴をもつ。

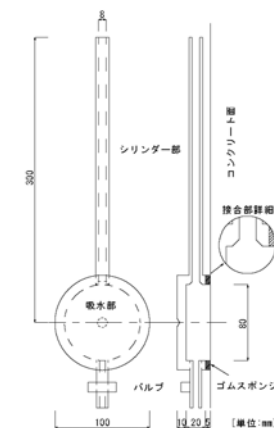


図-1 吸水カップの形状

2. 提案する表面吸水試験装置

2.1 装置の概要

図-1は鉛直面を測定するもので，表面にゴムスポンジのついた吸水カップをコンクリート面に密着させ，別途真空ポンプで吸引してコンクリート面にスタンドおよびフレームを介して反力を取り，吸水カップの固定を行うものである²⁾。実際に壁面に設置した状態を**図-2**に示す。

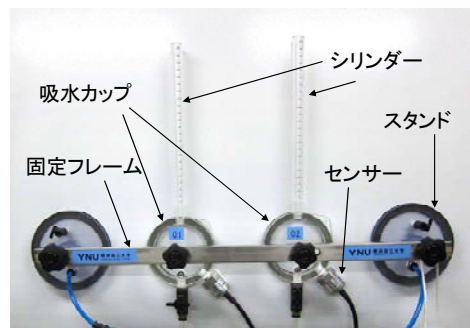


図-2 鉛直面への適用例

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 特別研究教員 博（工）（正会員）

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 准教授 博（工）（正会員）

*3 横浜国立大学大学院 環境情報学府 博士課程後期 修（工）（学生会員）

*4 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 博士課程前期

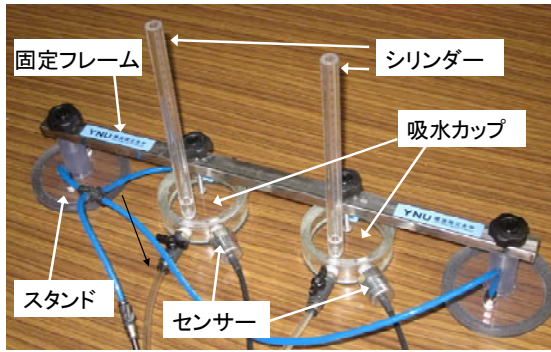


図-3 水平面上面への適用例



図-4 円筒面への適用例

コンクリートの吸水量の大小に応じて、測定時間間隔の水位変化量が測定の分解能を上回るようにシリンダーの断面積を変化させることで、適切な計測精度を得ることができる。

シリンダーは交換式であり、緻密から粗雑なコンクリートまで対応できるように内径を変えたシリンダーを複数用意している。これまでの供試体や実構造物の測定により、内径8mmのシリンダーが全般的なコンクリート構造物の測定に適するが、新設構造物で多くの水を含むコンクリートや非常に緻密なコンクリートの場合には、より小さな内径（例えば4mm）が適する。

3. 測定およびデータ処理

3.1 測定手法

10分間の表面吸水試験の方法について述べる。高低差を利用した自然流下により吸水カップ下部から注水を開始し、初期水位の300mmに達した時点時刻0とし、自動もしくは目視により、10分間の水面の高さを測定する。目視の場合には、1分間隔で測定する。なお、10分以降も測定する場合には、推奨する測定時間間隔は変わってくる。

現状では注水は5秒程度で完了できるが、測定条件を合わせるために注水開始から10秒経過した時点計測の開始時間とする。ただし、10秒という計測開始時間は、今後の改良による時間短縮や測定精度の向上に伴い、さ

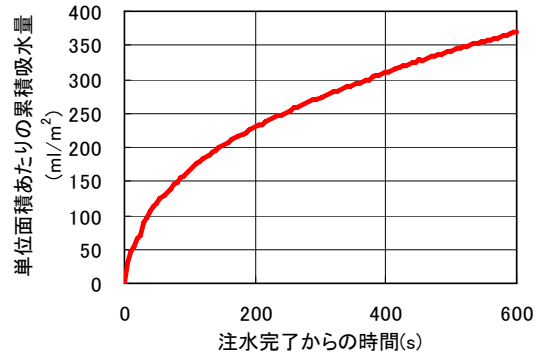


図-5 自動計測による累積吸水量の推移の一例

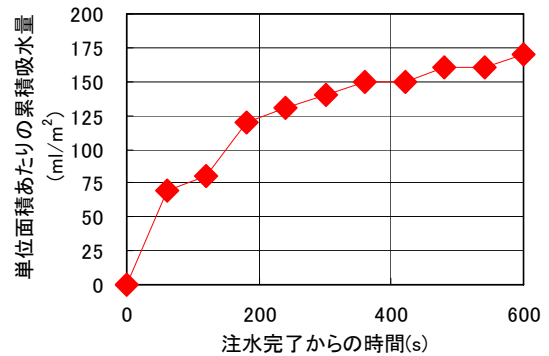


図-6 目視計測による累積吸水量の推移の一例

らに短縮することも検討の余地があると考えている。

3.2 自動による計測

吸水量を自動で測定する手法としては、理論的にはフローメーターで直接計測が可能であるが、表面吸水試験においては時間あたりの吸水量が微量であるため、提案する吸水カップの断面積程度では、現在市販のフローメーターでは精度良く測定することはできない。そこで本装置ではシリンダー部の水位が変化することを利用し、水圧の変化を圧力センサーで読み取ることで、間接的に水位を計測し、吸水量を求めることとした。

現状においては、センサーおよび収録装置の組合せにより、シリンダーの水位は0.1mm以下の分解能で測定できる。図-5は、自動計測による1秒ごとに吸水量を測定した一例である。連続的な値が得られている。

自動計測により、測定者によるエラーの排除や改ざん防止が期待できる。

3.3 目視による計測

時刻0から1分ごとに10分まで計11回水面の高さを測定する。現場にて目視によりメニスカスを考慮しながら水位を読み取るため、1mmごとに刻まれたスケールのうち目視で2分割した0.5mmの分解能で計測するのが限界である。図-6に目視による測定の一例を示す。この例において8個目、10個目の読取りデータがそれぞれ直前と同じ値を示すのは、直前の1分間の吸水量が小さく、

最小分解能に満たなかったためである。グラフが滑らかではないのは、この分解能の粗さと人的な読取り誤差の影響を含む。

内径8mmのシリンダーを使用した場合、10分間の吸水による水位の変化は、これまでの著者らの実測例では高々100mmであり、緻密なコンクリートであれば10分間の水位変化は10mmに満たない場合もある。このような条件において0.5mmの分解能はかなり粗といえる。以後、このような条件でのデータ処理方法を検討する。

3.4 コンクリートの吸水挙動とモデル化

Levittはコンクリートへの吸水挙動について、単位面積あたりの吸水速度 p は式(1)で表されると提案している⁶⁾。

$$p = at^{-n} \quad (1)$$

a および n 、は定数である。時々刻々の吸水速度だけでなく、 a および n も表面吸水試験における重要なパラメータである^{2),6)}。

3.5 データ処理方法

目視測定により得られた各々の時刻での水位の値 h_i ($i=0\sim 10$ の計11個)より、コンクリート単位面積あたりの累積吸水量は、式(2)で表される。

$$w_i = \frac{10^3(h_0 - h_i)A_{cyl}}{A_{con}} \quad (2)$$

ここに、 w_i はコンクリート単位面積あたりの累積吸水量(ml/m^2)、 h_i は読み取った水位(mm)、 A_{cyl} はシリンダーの内断面積(mm^2)、 A_{con} はコンクリートが水に接する部分の面積(mm^2)である。

w_i は、毎回の読取り誤差を含んでいることに注意する。表面吸水速度 p を直接計算する場合には、

$$p_i = \frac{w_i - w_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (3)$$

という計算を行うが、 w_i の誤差が大きいため、例えば図-7の直接計算のプロットに示す通り、直接計算して求めた表面吸水速度 p_i のグラフは連続にならない。本測定方法は毎回の読取り誤差が大きいに加え、差分をとることで誤差が蓄積するためである。

p_i はコンクリート単位面積あたりの吸水速度であることから累積吸水量の微分係数に相当するため、式(4)で表すことができる。

$$p_i = \frac{dw_i}{dt} \quad (4)$$

よって、式(4)を時間積分し、式(1)と合わせることで、式(5)が得られる。

$$w_i = \int p_i dt = \frac{a}{-n+1} t^{-n+1} \quad (5)$$

ここで、各時刻 t_i での、測定を開始してからの累積吸水量を時間 t_i で除したものを、すなわち平均速度 V_i を求めると式(6)になる。なお、式(6)で示した平均速度 V_i は計算の

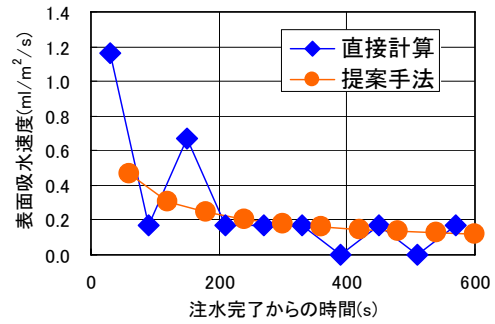


図-7 表面吸水速度の計算方法による違い

過程にのみ用いるだけであり、計算により求めようとしている時々刻々の表面吸水速度とは異なるものであることに注意する。

$$V_i = \frac{w_i}{t_i} = \frac{10^3(h_0 - h_i)A_{cyl}}{A_{con}t_i} \quad (6)$$

式(6)は、式(5)を用いることによって、式(7)のように表すこともできる。

$$V_i = \frac{\frac{a}{-n+1} t^{-n+1}}{t} = \frac{a}{-n+1} t^{-n} \quad (7)$$

これより、測定によって得られた全11個の水位データから得た式(6)の平均速度 V_i を使って時間 t についての指数関数で近似すればよいことがわかる。具体的には、式(8)を用いて最小二乗法により近似を行い、得られた k と m について、式(7)の係数と比較することで、 a と n を得ることができる。

$$V_i = kt^m \quad (8)$$

すなわち、以下のように計算できる。

$$a = k(m+1) \quad (9)$$

$$n = -m \quad (10)$$

以上の手法は、各読取り値の差分をとることなく吸水量の累積値を直接用いるため、毎回の読取り誤差が蓄積しないため計算上有利である。提案する手法により表面吸水速度を計算した結果と直接計算との比較を図-7に示す。滑らかな曲線が得られている。著者らが実測した供試体及び実構造物のデータにおいては、式(8)における近似の決定係数は概ね0.99以上であった。なお、式(5)においても指数近似を行うことができるが、式(6)に変形させてから指数近似を行う方が、より決定係数が大きかったため、この方法を採用した。

緻密なコンクリートや水分を多く含んだコンクリートのように吸水量が小さい場合において計測開始から j 回 ($j>1$) 連続して同じ高さの水位を測定した(その間の吸水量が0であった)場合には、数値計算上、指数関数で近似計算ができないが、2回から j 回までのデータを削除することで対処できる。この場合、($j+1$)回目に初めて目視で水の減少を確認したことになる。

4. 水頭の影響

4.1 検証方法の概要

本手法では、コンクリートの吸水部に対して初期に平均300mmの水頭が与えられ、吸水と共に水頭が減少する。一方で、British Standard 1881に規定されているISAT (Initial Surface Absorption Test) においては、初期水頭が200mmでその後も水頭は変化しない⁷⁾。本研究で提案する手法は、形状が小さく構造が簡易であることから現場への適用性がよいことと、自動計測に際して水位の変化を圧力センサーで検出することができる利点がある。これらが有効であることの前提として、提案する初期水頭および測定中の水頭の変化がコンクリートの吸水挙動に影響を与えないことを確認しておく必要がある。

そこで、実構造物で生じうる高品質から低品質のかぶりのコンクリート供試体に対して、100mmから500mmまでの一定の水頭を与えて、表面吸水速度（以後すべて10分時点での値）を測定し、水頭の影響を実験的に検討した。この検討は、同一の表面吸水速度の箇所を選定する実験（測定1）と、水頭の影響を把握する実験（測定2）により構成される。

4.2 水頭の影響の検証方法

(1) 同一の表面吸水速度の箇所を選定する実験（測定1）

水頭の差による影響を実験的に確認するにあたり、水頭以外は同じ条件で比較を行う必要がある。コンクリートの全く同じ箇所、水頭を変えて表面吸水試験を連続して測定するには一度乾燥させなければならず煩雑であるため、今回は同程度の表面吸水速度を有するコンクリート供試体を複数準備することとした。

図-8に示す、断面が800mm角、高さ1210mmの角柱形の無筋コンクリート供試体を2体製作した。実構造物で用いられる一般的なコンクリートを想定してW/C=0.55とした。材料および配合は表-1および表-2の通りで、レディーミクストコンクリートを用いた。高さ方向に2層に分けて、各層棒状パイプを掛け、鋼製型枠の表面を木槌で叩いて打ち込んだ。温度を制御しない室内で7日間の封緘養生後に脱型し、1体はそのまま直射日光の当たらない室内へ設置し、もう1体は同じ敷地内の屋外で暴露した。屋外では、直射日光や降雨の環境に曝される。製作時期は1月で、日中の気温は約10℃であった。

表-3の通り各々の環境で約5ヶ月間静置した後、測定のために屋外暴露供試体は同じ室内へ移動し、湿度や降雨などによるコンクリートの含水率の違いによる影響を排除するために測定1の実施まで13日以上あけた。

同じ供試体でも位置により物質移動抵抗性が異なる。材料分離の影響、打込み時の高さの違いによる圧力の影響、屋外暴露の場合には日射や降雨の程度が方角により異なること、などによる。測定1では、同程度の表

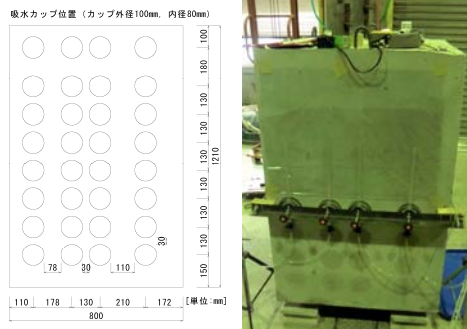


図-8 供試体形状と測定状況

表-1 コンクリートの使用材料

材料	種類	密度 (g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.13
細骨材	千葉県君津産山砂	2.61
粗骨材	埼玉県秩父郡横瀬町産石灰砕石	2.70

表-2 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	Ad1	Ad2
0.55	0.444	157	286	819	1064	2.29	1.13

Ad1 : AE減水剤, Ad2 : AE助剤

表-3 脱型・測定を行った材齢

実験の内容	材齢(日)
脱型	7
屋内・屋外暴露の開始	7
屋外柱供試体の屋内への移動	159
屋内柱供試体：測定1	164~165
屋外柱供試体：測定1	172~175
屋内柱供試体：測定2	210~226
屋外柱供試体：測定2	269~278

面吸水速度を有する箇所を把握するために、柱供試体の全面に対して、2および3で述べた初期水頭300mmの通常の表面吸水試験を実施した。供試体1体につき測定面は4面あり、各面に対して4列8段の、計128点の測定を行い、表面吸水速度を求めた。得られた表面吸水速度を供試体ごとに降順に並び替え、ほぼ同じ値の表面吸水速度の測定箇所をグループ化した。1グループには5個の測定箇所を含み、グループ内の表面吸水速度のばらつきについては、最大値と最小値の比率が最大でも1.1（平均では1.03）以内に収まるようにした。屋外に暴露した柱供試体からは7グループ、屋内に暴露した柱供試体からは11グループの、合計18グループを選定した。

グループごとの平均の表面吸水速度の分布は、図-9に示すように0.05~0.80ml/m²/sの範囲であり、著者らが別に検討を行っている供試体や実構造物の測定結果から、壁や橋脚などの下部構造物を通常に施工した場合の上限から下限の表面吸水速度の範囲をほとんどカバーしている。

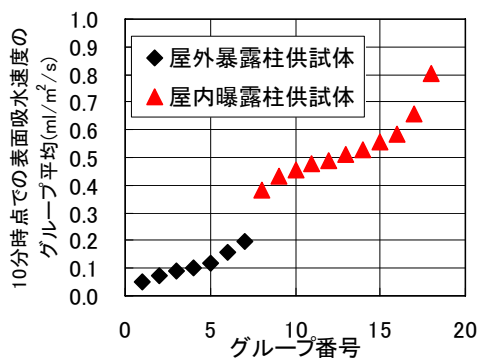


図-9 各供試体の10分時点での表面吸水速度の範囲

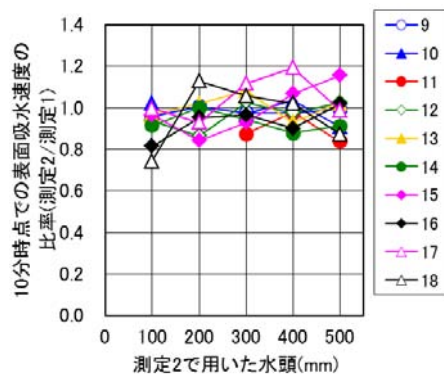


図-11 屋内柱の10分時点での表面吸水速度の比率

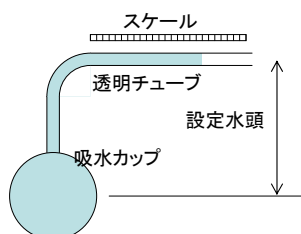


図-10 一定水頭の表面吸水試験装置の概念図

なお、図-9に示したように、表面吸水速度が屋内外の暴露環境の違いにより大幅に異なり、屋外暴露供試体の結果が屋内設置供試体の値を大きく下回った。この理由は、降雨での水分の供給による追加の湿潤養生効果によりコンクリートが緻密化し、日射による乾燥の悪影響を上回ったためと考えている。今後、別報で詳細を報告予定である。

(2) 水頭の影響を把握する実験（測定2）

選定した各グループにおいて、水頭が100, 200, 300, 400, 500mmとなるように設定し、水頭が一定に保たれる条件で表面吸水試験を行った。試行数は1つの箇所につきいずれかの水頭1回のみである。図-10に示すような測定中の水頭が一定となる表面吸水試験装置を別途製作し、吸水現象に伴う水の減少を、水平に配置した内径6mmの透明チューブ内の水面の動きで計測した。測定条件の組合せについては、グループ内のごくわずかな表面吸水速度の大小と、設定する水頭の大小に傾向が現れないように、直交表の概念を参考にし、ランダムな組合せを設定した。

この測定2においては、測定1終了後からの材齢が、屋内柱供試体で45日、屋外柱供試体で94日であり異なっているが、本検討から得られる結論に影響を与えるものではないと考えている。

4.3 実験結果と考察

測定2の水頭一定の測定結果から得られた表面吸水速度について、同じ箇所でも初期水頭300mmの結果との比較により結果を整理する。測定2での結果を測定1での結果

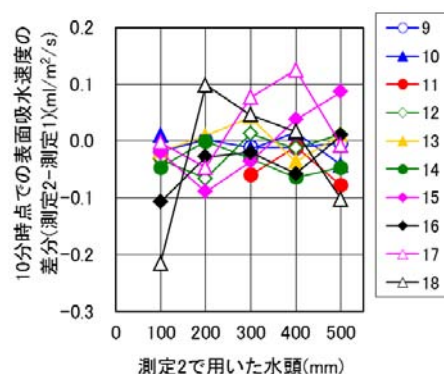


図-12 屋内柱の10分時点での表面吸水速度の差分

で除した比率および、測定2での結果から測定1での結果を引いた差分の両方で評価する。測定に失敗したデータは個別に除外したため以後の図においてグループ内で連続でないものも存在する。

まず、当初から屋内に設置した柱供試体の結果を示す。図-11は、同じ箇所でも水頭を変えた時の表面吸水速度の変化の比率について、設定した水頭ごとに比較したものである。結果は概ね 1.0 ± 0.2 の範囲に収まっていて、11のグループ全体で水頭による明確な違いの傾向がみられないことから、水頭による影響は有意でないことがわかる。次に図-12は、比率ではなく、測定2と測定1の差分を示したものである。同様に水頭による特定の傾向が見られず、さらにほとんどのデータが $0.1 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ の範囲に収まっていることがわかる。前述のとおり一般条件で作られた実構造物で達成される表面吸水速度の範囲 $0.8 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ に対して、 $0.1 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ 以下という差分は十分に小さいといえる。

次に、屋外柱供試体について同様の図を用いて説明する。図-13に、測定2と測定1の表面吸水速度の差分を示す。すべての箇所で表面吸水速度は増加し、その増分はほとんど $0.1 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ の範囲に収まることわかる。

ここで、屋外柱供試体のすべての箇所で表面吸水速度が増加したのは、測定時のコンクリートの含水率の違い

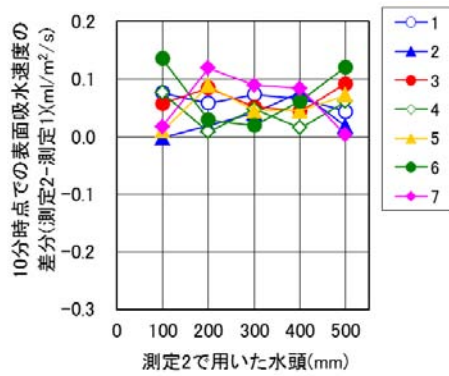


図-13 屋外柱の10分時点での表面吸水速度の差分

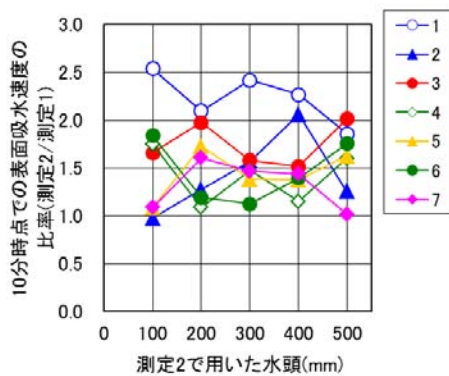


図-14 屋外柱の10分時点での表面吸水速度の比率

によるものと考えている。屋外暴露を終えて室内へ移動し測定1を開始する前までに、降雨などにより含まれていた水分を乾燥させて除去する必要があり当初13日間で十分であると考えたものの、結果として含水率が室内に設置した状態に完全に近づくには期間が十分でなかった。その結果、測定1終了後から測定2開始までの94日間にさらに乾燥が進み、表面吸水速度が増加した。ただし、ここでの主眼は水頭の影響であり、乾燥による表面吸水速度の増加は主たる論点ではない。

参考までに、屋外柱供試体についても測定2と測定1の比率を計算した結果が図-14である。図-9に示すとおり元々の測定1における表面吸水速度の絶対値が小さかったために、差分が $0.1\text{ml/m}^2/\text{s}$ 程度でも、比率に直すと2.5に達するものも出てきている。

なお、以上のとおり表面吸水試験はコンクリートの含水率にある程度の影響を受けるものの、影響を受けた際に変化する絶対量を見極めた上で本手法を活用していくべきと考えている。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 完全非破壊で新設および既設の実構造物に適用できる簡便な形状を有する表面吸水試験装置を開発した。

この装置を用いて、鉛直面および水平面の上面、および円筒状のコンクリート面に対して、自動もしくは目視により吸水量を測定することができる。

- (2) 目視による測定の場合、各時間でのデータの読取り誤差が、単位時間の吸水量に比較して相対的に大きいものの、誤差を小さくする計算手法を提案した。
- (3) 提案する表面吸水試験装置は、初期水頭が300mmであり測定中に水頭が変化するが、一般的な設計および施工で達成される実構造物の10分時点での表面吸水速度の範囲 ($0.8\text{ml/m}^2/\text{s}$ 以下) においては、100mmから500mmの範囲の水頭の影響は有意ではない。

謝辞：本研究の一部は、平成21～23年度 鉄道建設・運輸施設整備支援機構、運輸分野における基礎的研究推進制度（研究代表者：岸 利治 東京大学生産技術研究所教授）の助成を受けて実施しました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会(335委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ，No.80，2008.4
- 2) 林和彦，細田暁：コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1769-1774，2011.7
- 3) Akmal Usman, Akira Hosoda, Kazuhiko Hayashi and Makiko Fujiwara: Analysis of Quality of Covercrete Subjected to Different Curing Conditions Using New Surface Water Absorption Test, Proceedings of the 13th International Summer Symposium, JSCE, pp.287-291, Aug. 2011
- 4) 吉田早智子，細田暁，林和彦，内田晃一：表面吸水試験および透気試験による山口県の構造物の表層品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1823-1828，2011.7
- 5) 村井剛大，細田暁，林和彦，松田芳範：マイクロクラックの幅および深さが表面含浸材の吸水抑制効果に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第11巻，pp.367-372，2011.10
- 6) M. Levitt: Non-destructive Testing of Concrete by the initial surface absorption method, *Proceedings of a Symposium on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber*, London, June 1969, Institution of Civil Engineers, pp.23-26, 1970
- 7) British Standard, BS1881, Part 5, Methods of testing hardened concrete for other than strength, 1971