

報告 表面吸水試験における計測データのノイズ処理アルゴリズムの検討

小松 怜史*1・田島 涼*2・林 和彦*3・細田 暁*4

要旨: 本研究では、表面吸水試験の計測データから吸水挙動の評価指標を自動計算するアルゴリズムについて、その有用性を検証した。表層品質の異なる種々のコンクリートで検証するため、コンクリート構造物の種類、使用材料、養生条件、計測条件が異なる計測データを選定した。結果、提案する自動計算法の方が従来法よりも平均値で7%程度大きな値を示す傾向にあった。計測中に水漏れが生じるような品質の悪いコンクリートのとき、シリンダーの水位の急激な上下振動が記録されたときに、両手法の差は最大で0.08ml/m²/sであった。コンクリートの品質の区分を大きく見誤る差ではないことから、自動計算法は有用であるといえる。

キーワード: 表面吸水試験, ノイズ処理, 表面吸水速度, 自動計算

1. はじめに

新設、既設問わずコンクリート構造物の表層コンクリートの物質移動抵抗性を非破壊で測定する手法が求められており^{1), 2)}、著者らは実構造物に適用できる完全非破壊の表面吸水試験方法を開発した(図-1)^{3), 4)}。この手法を用いることで、供試体および実構造物に対して、コンクリートの表層品質を定量評価することが可能となった^{5), 6), 7), 8), 9)}。

これまで、現場で取得したコンクリートの吸水挙動のデータを、別途表計算ソフト上で吸水挙動の評価指標に計算処理する手法(以下、従来法)を採用していた。しかし、この方法はデータ処理が煩雑であり、計測直後にコンクリートの品質がわからず現場で議論や考察がしにくい。

そこで筆者らは、現場で取得したデータからリアルタイムに吸水挙動の評価指標を自動計算するアルゴリズムを開発し、ソフトとして表面吸水試験に搭載した(以下、自動計算法)。本報告では、複数の実構造物で取得した吸水挙動のデータを活用して、自動計算法の適用性の検討を行う。

2. 表面吸水試験の試験方法と評価指標

2.1 試験方法

コンクリートの吸水挙動を経時的に定量的に測定するため、本装置(図-1)では吸水カップに取り付けられたシリンダー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ている。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、シリンダーの水位を0.1mm以下の分解能で測定できる。図-2は、

表面吸水試験で1秒ごとに吸水量を測定した例であり連続的な値が得られている。

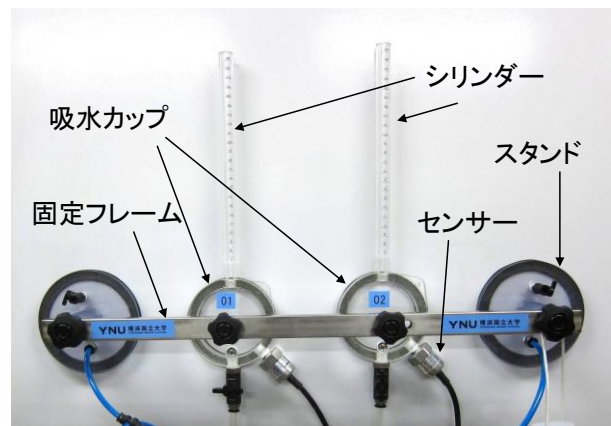


図-1 表面吸水試験装置

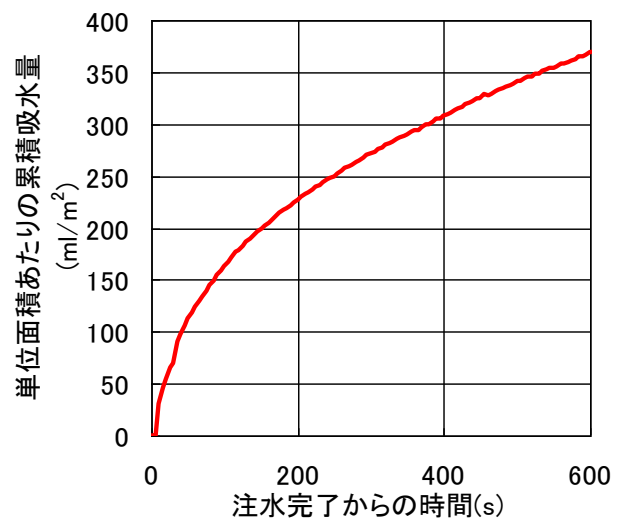


図-2 注水完了からの吸水量の経時変化

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 助教 博士(工)(正会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 都市地域社会コース 博士課程前期

*3 香川高等専門学校 建設環境工学科 准教授 博士(工)(正会員)

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

計測では吸水カップ下部に設置したバルブから注水を開始し、吸水カップ並びにシリンダー上部まで完全に水が満たされた状態（初期水位の300mmに達した時点）を時刻0秒とし、600秒間のシリンダー内の水面の高さ変化を測定する。現状の計測装置では、注水完了までに5秒程度を要する。そこで、測定条件を合わせるために注水開始から10秒経過した時点に注水完了時点として計算処理を開始することとしている。今後の改良による時間短縮や測定精度の向上に伴い、さらに短縮することも検討の余地があると考えている。

2.2 コンクリートの表層品質の評価指標

1秒毎に得られるシリンダーの水位の変化から、コンクリートの単位面積あたりの吸水速度を算出して、注水完了から600秒後時点でのコンクリートの吸水速度（表面吸水速度、以下 p_{600} と表記）を品質評価に活用している。表面吸水速度の計算方法は3章に後述するが、具体的にはBritish Standard 1881に規定されているISAT（Initial Surface Absorption Test）¹⁰も参考に評価指標として提案している。 p_{600} の値が0.25(ml/m²/s)を下回るとコンクリートの品質は“良”，0.25~0.5(ml/m²/s)は“一般”，0.5(ml/m²/s)以上は“劣”と定義している。本研究では、従来法と自動計算法それぞれから算出される、この p_{600} の値を検討対象とする。

3. 計測データの処理方法

3.1. 既往の処理方法

1秒毎（目視で計測の場合には60秒毎としている）に得られたシリンダーの水位の値から、表面吸水速度を算出する方法を以下に示す。

Levitt¹¹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。

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

a （定数）は初期の吸水速度であり、表面付近のごく表層のコンクリートの品質を表すと筆者らは考えている。また n （定数）は、時間とともに吸水が低減する程度を表しており、内部の乾燥の程度、表面から内部への品質の分布の影響を受けると考えている^{3), 11)}。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ーである。得られた一定時間間隔の有限個の水位データから最小二乗法により式(1)を算出することが本手法の骨子である。以下に具体的な手順を示す。

各々の時刻での水位の値 h_i （ $i=0\sim 600$ の計601個、ただし目視でシリンダーの水位を測定する場合は $i=0\sim 10$ の計11個）を用いると、コンクリート単位面積あたりの累積吸水量 w_i 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/m²)、 h_i は読み取った水位(mm)、 A_{cyl} はシリンダーの内断面積(mm²)、 A_{con} はコンクリートが水に接する部分の面積(mm²)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、式(3)の計算を行うが、1個1個のデータは誤差を伴うため、連続する値の差分は誤差を含む。

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

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。

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

式(7)も t に関する指数関数である。ゆえに、測定によって得られた全601個（または全11個）の水位データから得た式(6)の平均速度 V_i について、時間 t の指数関数で近似すればよいことがわかる。指数関数の一般式は式(8)で表されるため、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。

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

式(7)と式(8)の係数を比較すると、次のようになる。

$$\frac{a}{-n+1} = k \quad (9)$$

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

式(9)は、式(10)を用いて次のように変形できる。

$$a = k(m+1) \quad (11)$$

指数関数への近似計算の方法は幾つかあるが、ここでは、対数（底が 10 の常用対数）をとり、対数をとったものに対し一次関数の直線近似を行う手法を採用した。

式(8)の両辺の常用対数をとると、次のようになる。

$$\log_{10} V_i = \log_{10} k t^m = \log_{10} k + m \log_{10} t \quad (12)$$

式(12)の $\log_{10} V_i$ は、 $\log_{10} t$ に関する一次関数である。

ゆえに、得られた平均速度の常用対数 $\log_{10} V_i$ に対して、時間の常用対数 $\log_{10} t$ に関する一次関数近似を行う。

Xに関する一次関数Yの一般式は式(13)で表される。

$$Y = B + AX \quad (13)$$

最小二乗法により一次関数近似し、その結果得られる式(13)の切片B、傾きAは、式(12)の係数にそれぞれ一致するので、係数同士を比較すると、式(14)、式(15)のとおりとなる。

$$\log_{10} k = B \quad (14)$$

$$m = A \quad (15)$$

式(14)を変形すると、式(16)になる。

$$k = 10^B \quad (16)$$

このkとmを用いると、式(11)、式(10)により、aとnが求まる。

600 秒時点での表面吸水速度 p_{600} は、t に 600 秒を代入すると、式(1)により求まる。

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（を時間で割ったもの）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。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。

式(5)の累積吸水量においても指数近似を行うことができるが、式(6)の平均速度に変形させてから指数近似を行う方法を採用した。その理由は次のとおりである。まず、手動測定（データ数が11個の場合）の条件において、決定係数が若干ではあるが大きかった。次に、目視測定では目盛間隔が1mmと大きいため、吸水速度が小さいと計測時に前回と同じ値が計測されることがあり、その時に吸水量が0となり、計算上それを避けるためである。平均速度とすれば、時間で割るため前回と全く同じ値にはなりにくいため、計算上のエラーを少なくすることができる。

3.2. 従来法と自動計算法のアルゴリズムの違い

自動計算法においても、シリンダーの水位の経時変化のデータから評価指標である表面吸水速度を求める方法は、基本的には 3.1 で示した方法と同様である。計算結果に大きな差異が出てくるところとしては、以下に示すような状況であると考えている。

1 つ目は、外的要因でシリンダーの水位の著しく大きな上昇下降が記録された場合（ノイズと定義）である。

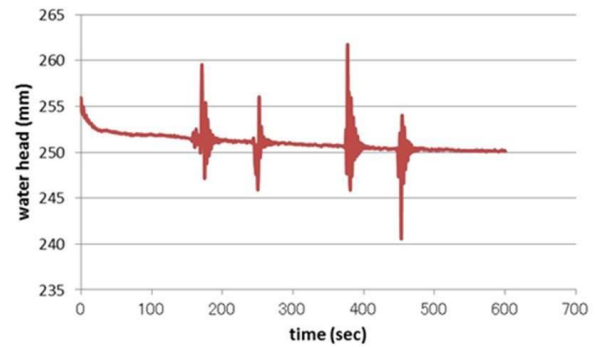


図-3 交通荷重で計測データにノイズが混入した場合

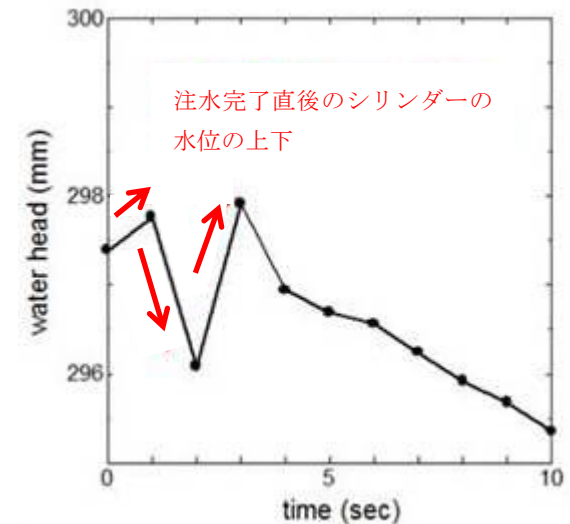


図-4 注水時の水の慣性力による注水完了直後のシリンダーの水位の上下変化

例えば計測点近くに発生する交通荷重等やその他衝撃の作用が圧力センサーに検出された場合で、吸水現象の一部とは考えにくいシリンダーの水位の急激な変化が記録される場合がある（図-3）。このような場合、従来法では、特別な値の補完は行わず計算処理されている。その理由は、601 個のデータでフィッティングするため、個別のノイズの影響は小さいためである。一方、自動計算法では以下の手順で値を補完して計算している。

- ① 注水完了後 600 秒間の全データから標準振れ幅（1 秒間の水位の変動の平均値）を算出
 - ② ①で求めた標準振れ幅×倍率よりも大きな振幅があった場合、ノイズの可能性があると判断（本研究で、ほぼすべての計測データが補完され式(1)に近づくように倍率 5 を採用した。係数については今後検討の余地があると考えている。）
 - ③ ノイズの可能性があると判断された振幅が 3 秒間に上昇下降前の平らな付近（標準振れ幅×倍率 5 以下）まで戻っていた場合ノイズと判断し、ノイズ前後の値の平均値を採用して補完する
- 2 つ目は、内的要因で注水完了時（注水開始から 10 秒目）のシリンダーの水位よりも、その 1 秒後（注水開始

表-1 検討対象の構造物

構造物名	呼び強度	W/B	調査材齢	脱型材齢	養生条件	備考
T-tunnel (lining)	24N/mm ²	52.5%	61days	7days	湿潤養生なし	計測中水漏れあり
M-bridge (slab)	24N/mm ²	42.4%	232days	91days	保湿養生	交通荷重によるノイズ
O-box (side wall)	27N/mm ²	49%	149days	26days	湿潤養生なし	
D-viaduct (column)	27N/mm ²	不明	116days, 72days	16days, 11days	シート養生(19日、5日間)	打重ね線上
U-tunnel (lining)	24N/mm ²	51%	84days	21hours	保湿養生、シート養生	

から 11 秒目のシリンダーの水位のほうが大きな値を示した場合（こちらをノイズと定義）である。例えば、注水時の水の慣性力によって、注水完了後も僅かにシリンダーの水位が上下している場合が挙げられる（図-4）。従来法では前後の値を用いて補完すると定められている。今回は注水開始から 10 秒目と注水開始から 12 秒目の平均値をとって注水開始から 11 秒目の値として計算処理した。一方、自動計算法では注水開始から 11 秒目の値を注水開始から 10 秒目の値と同じ値にデータを修正して計算処理している。

自動計算の結果、図-5 に示すように注水完了から時々刻々変化するコンクリートの吸水速度を確認することが可能となった。

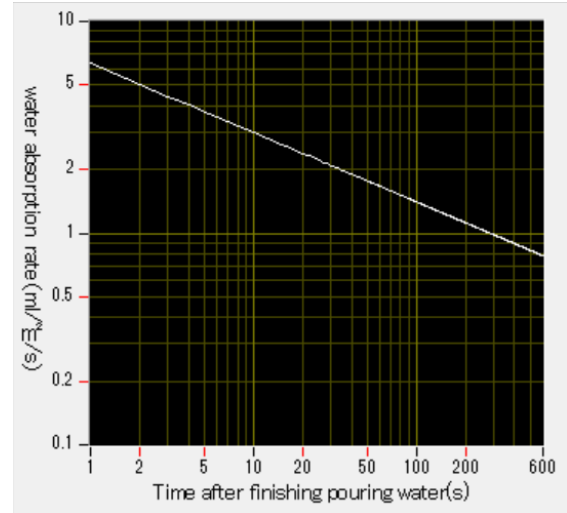


図-5 注水完了直後からの表面吸水速度の経時変化

4. 計測結果を用いた自動計算法アルゴリズムの検証

自動計算法のアルゴリズムの有用性を確認するため、十分硬化したコンクリート構造物から取得した表面吸水試験の実測データ（表-1）を用いて試算を行った。様々な品質のコンクリートで検討するため、構造物の種類、使用材料、養生条件、計測条件が異なるデータを選定した。5種類の構造物からなる、合計26測定点である。各の条件において、従来法と、自動計算法による p_{600} の算定結果の比較を行った。

4.1 微細なひび割れを伝って水漏れが生じた場合

コンクリート表層に生じている微細なひび割れを伝って、計測中に水が吸水カップの縁から染み出すほどコンクリートの表層品質が悪いコンクリート（表-1における T-tunnel (lining)）を対象とした検討の結果、従来法での計算結果は $p_{600}=1.08(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ 、自動計算法での計算結果は $p_{600}=1.25(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ となり、自動計算法での結果のほうが $0.17(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ 大きく算定される結果となった。品質を区分する閾値が $0.25(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ 毎に設定されており、絶対値で見ると両手法での p_{600} の計算結果の差は大きい。しかし、後述するように $0.5(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ を下回るコンクリートでは、従来法と自動計算法の計算結果の差は $0.1(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ を下回っており、コンクリートの品質を大きく見誤るような結果は算出しないと考えている。

4.2 交通荷重で計測データにノイズが混入した場合

測定中に車両が通行したことで桁が振動し、水面が急激に上下に振動したことで計測結果が乱されたケース（表-1での M-bridge (slab)）の検討の結果、従来の方法

での計算結果は $p_{600}=0.02(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ 、自動計算法での計算結果は $p_{600}=0.03(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ となり、差が $0.01(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ となった。品質を区分する閾値が $0.25(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ 毎に設定されていることを考えると、大きな差とは考えておらず、自動計算法の有用性は大きいといえる。

4.3 打重ね線上で計測した場合

施工の基本事項が遵守¹²⁾されたにも関わらず打重ね線が生じたコンクリート構造物において、打重ね線を跨ぐように表面吸水試験を行ったところ、同じ部材の打重ね線上以外の箇所と同程度の吸水抵抗性を有していることが筆者らの既往の研究¹³⁾からわかった。施工の基本事項が遵守¹²⁾されていたことでコンクリートが一体化していると考えられる。同じデータ（表-1における D-viaduct (column)）を用いて、自動計算法においても同様な値が算出されるか検討した。

その結果、従来法での計算結果は $p_{600}=0.15(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ 、自動計算法での計算結果は $p_{600}=0.18(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ となり、両手法での p_{600} の計算結果の差が $0.03(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ となった。自動計算法でも、コンクリートの品質を大きく見誤るような結果は算出されることがわかった。

4.4 従来法と自動計算法の計算処理結果の比較

表層品質の異なるコンクリートの計測データを用いて従来法と自動計算法での計算処理結果(p_{600})を比較し、自動計算法の有用性を確認する。データ数は 25 測定点（全 26 測定点のうち水漏れが生じた No.1 の測定点を除く）で、コンクリートの品質として“良”とされる

表-2 従来法および自動計算法での p_{600} の比較

No		①従来法での p_{600}	②自動処理法での p_{600}	①-②	備考
1	T-tunnel	1.08	1.25	0.17	水漏れあり
2		0.23	0.29	0.06	追加検討
3	M-bridge	0.02	0.03	0.01	交通荷重あり
4	O-box	0.14	0.15	0.01	
5		0.32	0.36	0.04	
6		0.18	0.22	0.04	
7		0.23	0.24	0.01	
8		0.4	0.41	0.01	
9		0.39	0.46	0.07	追加検討
10	D-viaduct	0.31	0.33	0.02	
11		0.3	0.33	0.03	
12		0.28	0.31	0.03	
13		0.2	0.24	0.04	
14		0.25	0.24	0.01	
15		0.09	0.11	0.02	
16		0.42	0.5	0.08	追加検討
17		0.3	0.33	0.03	
18		0.12	0.14	0.02	
19		0.09	0.1	0.01	
20		0.15	0.18	0.03	打重ね線上
21	U-tunnel	0.49	0.49	0	
22		0.57	0.61	0.04	
23		0.17	0.18	0.01	
24		0.25	0.26	0.01	
25		0.24	0.18	0.06	追加検討
26		0.29	0.26	0.03	

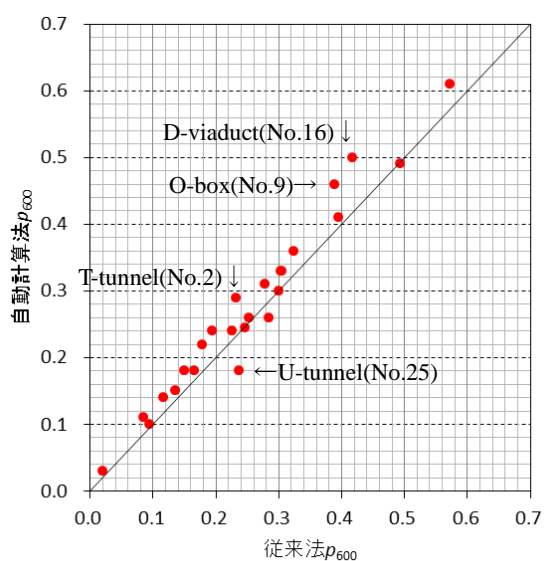


図-6 p_{600} について自動計算法と従来法の比較

0.25(ml/m²/s)を下回るものから，“劣”とされる0.5(ml/m²/s)上回るものまで検討した。

従来法と自動計算法で算出した p_{600} の計算結果を比較した結果を表-2 および図-6 に示す。自動計測法の値の方が従来法よりも平均値で 7%程度大きいことがわかった。その理由として、3.2 に示したように、補完される数値の個数が従来法と自動計算法で異なったことで p_{600} の計算結果に差が生じたと考えられる。しかし、両手法での p_{600} の計算結果の差は今回の検討では最大 0.08(ml/m²/s)であった。一方、均質なコンクリート構造物における p_{600} のバラつきを確認するため、施工に十分留意して

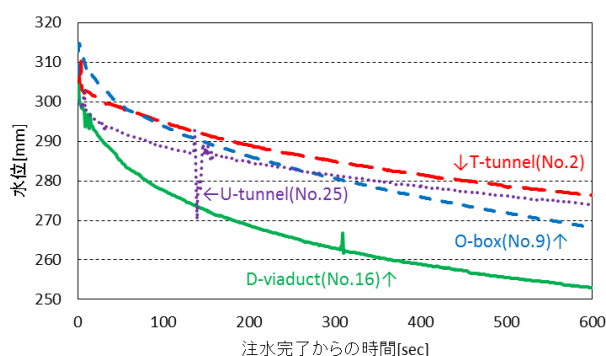


図-7 従来法と自動計算法の計算結果に 0.05(ml/m²/s)以上の差が生じたケースのシリンダーの水位の経時変化

造られた山口県のコンクリート構造物で複数回測定したところ、標準偏差は 0.07(ml/m²/s)であった¹⁴⁾。従来法と自動計算法の p_{600} の計算結果の差は、今回の検討の範囲では測定値のバラつき程度であったため、自動計算法を用いてもコンクリートの品質区分を大きく見誤るような結果は生じないと考えている。

25 測定点のデータ群の中から、両手法での p_{600} の計算結果に 0.05(ml/m²/s)以上の差が生じているデータについて詳細に分析した。その結果、データ内にシリンダーの水位の急激な上下振動が記録されていることがわかった(図-7)。特に、注水完了直後にシリンダーの水位の急激な上下振動が記録された場合、補正のアルゴリズムの違いから求まる定数 a の値が異なり両計算方法に差が生じやすいことが分かった(表-3)。シリンダー内の水位の上下振動によって、3.2 に示した標準振れ幅が大きく

なる（補完される値が少なくなり、従来法に近い算出方法になる傾向）。しかし、標準振れ幅は 600 秒間の全データから算出するため、標準振れ幅が大きくなる影響よりもノイズによって補完される値が多くなる影響が支配的であり、結果として両手法での p_{600} の計算結果の差が大きくなったと考えている。

5. まとめ

本研究では、表面吸水試験の計測データから吸水挙動の評価指標を自動計算するアルゴリズムの有用性について検証した。

その結果、従来法と自動計算法それぞれで算出した p_{600} の値を比較したところ、自動計算法で算出した方が従来法で算出したよりも、平均値で 7%程度大きいことが分かった。コンクリートの品質が著しく悪い場合（従来法で計算した場合に $p_{600}=1.08\text{ml/m}^2/\text{s}$ ）、および計測中にシリンダーの水位の急激な上下振動が記録された場合に従来法と自動処理法で算出した p_{600} の値に最大 $0.08\text{ml/m}^2/\text{s}$ の差が生じた。特に、注水完了時の水位変動に注意する必要がある。しかし、この差はコンクリートの品質の区分を大きく見誤るような差ではなく、自動計算法の有用性は確認された。

謝辞：本研究は、株式会社丸東製作所の今井保行氏の協力を得て実施した。また、本研究の一部は橋梁調査会の平成 27 年度橋梁調査開発助成ならびに横浜工業会の平成 27 年度学術研究奨学事業の助成を受けたものである。深謝致します。

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
- 2) 湯浅昇監修：第三者が検証可能なRC構造体の品質・性能評価方法，建築技術，No.703，pp.91-177，2008
- 3) 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
- 4) 林和彦，細田暁，Usman AKMAL，藤原麻希子：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1804-1809，2012
- 5) 細田暁，林和彦，下田智也，吉田早智子：コンクリート表層のマイクロクラックが表面の吸水性と透気性に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.196-203，2010

表-3 従来法と自動計算法の p_{600} と a の比較

急激な水位の上下	p_{600}		定数 a	
	①-②	①従来法	②自動計算法	①-②
あり	0.08	13.03	10.15	2.88
	0.07	10.27	7.21	3.06
	0.06	8.63	5.14	3.49
なし	0.004	9.27	9.47	0.20
	0.003	7.43	7.85	0.42
	0.001	4.95	5.49	0.54

- 6) 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) Usman Akmal, Akira Hosoda, Kazuhiko Hayashi and Naoya Motoshige: Inspection of Cover Concrete of an Actual Structure by Surface Water Absorption Test, *Proceedings of the 9th International Symposium on High Performance Concrete -Design, Verification and Utilization*, Rotorua, New Zealand, C9-1, 2011
- 8) Usman Akmal, 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, 2011
- 9) Usman AKMAL, Akira HOSODA, Kazuhiko HAYASHI and Kentaro SUHARA: Evaluation of Covercrete of Expansive Concrete with External Restraint by Surface Water Absorption Test, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 2012
- 10) British Standard, BS1881, Part 5, Methods of testing hardened concrete for other than strength, 1971
- 11) 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
- 12) 細田暁，二宮純，森岡弘道，阿波稔，田村隆弘：施工状況把握チェックシートによるコンクリート構造物の品質確保と協働関係の構築，コンクリートテクノ，34(5)，pp.63-82，2015
- 13) 細田暁，小松怜史，中川恵理，佐藤和徳：コンクリート構造物の品質向上の取組みと非破壊試験による効果の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1273-1278，2015
- 14) 青木勇人：山口県のひび割れ抑制システムにおける表面吸水試験を用いた施工の影響の定量的評価，横浜国立大学，修士論文，2012