

表面吸水試験によるコンクリート構造物の 表層品質の評価方法に関する基礎的研究

林 和彦¹・細田 暁²

¹正会員 横浜国立大学特別研究教員 大学院都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: hayashi-kazuhiko-gj@ynu.jp

²正会員 横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院 (同上)

E-mail: concrete@ynu.ac.jp

完全非破壊で新設および既設コンクリート構造物に適用でき、注水初期から連続的に精度よく吸水量を測定することを特徴とする表面吸水試験手法を開発した。本手法では10分間の測定により吸水抵抗性に関する複数の指標が得られ、深さ方向の影響も含んだ表層品質を評価できる。材料と養生、および暴露環境を変化させた供試体実験からは、水セメント比および型枠存置期間が表層品質に与える影響を表面吸水試験で検知できることを示した。実構造物の測定結果からは、10分時点での表面吸水速度は正規分布をとることが示され、表面吸水試験を表層品質の検査に用いる場合のしきい値の設定方法と検査の判定の考え方を統計的根拠に基づいて提案した。表面吸水試験を用いて微細ひび割れの影響を分析した事例や、膨張材、表面含浸材の効果を検証した事例を紹介した。

Key Words : *surface water absorption test, non-destructive test, covercrete quality, curing, normal distribution, inspection system*

1. はじめに

新設および既設のコンクリート構造物の表層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いる¹⁾²⁾³⁾。著者らは、中性化、塩害などによる鋼材腐食や、凍害やASRなどによるコンクリートの劣化について、液状水が関与することに着目し、吸水抵抗性を評価することが重要であると認識し、実構造物に適用できる完全非破壊の表面吸水試験手法を開発してきた⁴⁾⁵⁾。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化することができる⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。類似の吸水試験装置単体や試験手法の概念は既に存在するものの、完全非破壊かつ、短時間で注水を完了させ連続的に吸水量を取得することに着目したこと本手法の新規性がある。

表層とは、土木学会コンクリート委員会構造物表層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により「コンクリート構造物の中で、養生や環境条件等の影響を受けて性能が変化する可能性がある領域」と定義されており、材料、配合、施工方法によってその領域は変化するとしている。一般的な土木構造物においては、

かぶりの厚さと同程度以下の深さと著者らは考えている。本論文においては、表層品質は、表層における物質移動抵抗性と同義として用いる。

著者らのこれまでの検討において、本手法は実構造物の表層品質の差異を敏感に検知することができ、表層品質の優劣を比較できる可能性を示してきた。表層品質は、コンクリートの配合だけでなく、骨材種類、材料分離に加えて、日射や水分供給などの環境条件の影響も強く受けると考えている。これらの条件の異なる構造物間でも表面吸水試験の結果の絶対値を用いて議論を行うとすれば、これらの影響因子が表層品質に与える影響を把握しておくことが必要である。また、表層品質は水和の進行のみならず、乾燥に伴う含水率の変化の影響も大きく受けるので、打込み後の適切な測定材齢を示すことも重要である。本研究では、これらの課題を解決するために、(1)日射および降雨の影響を排除した環境において構成材料と養生期間が表層品質に与える影響を把握する供試体実験、(2)日射および降雨の影響を把握するための室内外に暴露した供試体実験、(3)実構造物の測定結果の統計的な分析、を実施した。

表面吸水試験の活用方法の一つとして、コンクリート

構造物の表層品質の検査が挙げられる。本手法によって得られる表面吸水指標は、ひとつの構造物においても当然ばらつきをもつ。本研究では、実構造物を含んだ測定結果に基づいて、表層品質の良否を判定するための、表面吸水指標のしきい値を設定する考え方を提案する。測定のばらつきも考慮した、必要測定回数の最小値を決める考え方も提案する。

さらに、本手法の適用事例として、微細ひび割れの影響の分析、膨張材、表面含浸材による表層品質の向上効果の検証などを紹介する。

2. 表面吸水試験の概要

(1) 表面吸水試験装置の形状

本装置^{4,5)}は、コンクリート面に設置した円形の断面形状をもつ吸水カップ(図-1)を通じてコンクリートが吸水する水量を計測するものである。吸水カップの端面には非吸水のゴムスポンジを用い、吸水カップとは別に設置した固定フレームから反力を取りコンクリート面に押し付ける構造である。ゴムスポンジが変形しながら密着するため、新設構造物のみならず、既設の骨材が露出したような凹凸のある面でも水漏れが生じない。壁面などの鉛直面(図-2(a))や床版などの水平面(図-2(b))など、対象物が平面である場合には、真空ポンプを用いて固定フレームを平面に密着させて反力を取り、電柱や小型の柱(図-2(c))のように構造物を抱え込むような形で構造物自体から反力が取れる場合にはフレームのみの構成となる。設置や計測に際しては一切構造物を破壊したり、跡が残ることもない。

吸水カップには鉛直のシリンダーが接続され、シリンダー内の上縁まで水を満たし、吸水による水の減少量を高さの変化として自動または目視で読み取ることで、微小な吸水量を計測する。初期水頭はコンクリートの吸水面中心において300mmであり、吸水の進行とともに水位は減少する。水頭300mmは強い降雨がスラブに生じた際の圧力よりも若干大きい程度である¹¹⁾。吸水試験中に水位が減少するが、それが測定結果に影響を与えないことを確認している⁵⁾。

吸水カップ下部に接続したチューブおよび注水タンクを用いて重力により水を注入し、注入を開始してから5秒程度で注水が完了する。試験終了後は、チューブを通じて注水タンクへ水を回収するため、周囲への水の飛散はほとんどない。熱膨張による測定中の水の体積変化を避けるために、事前にコンクリート構造物表面の温度や外気温に合わせて水温を調整する必要がある。

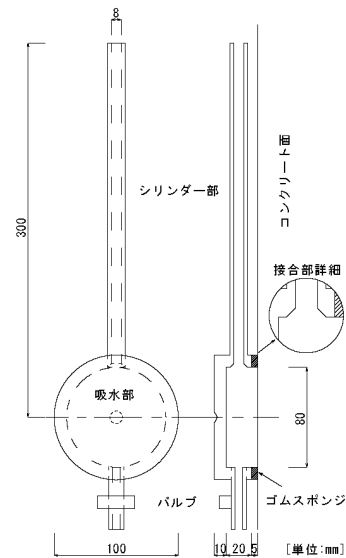
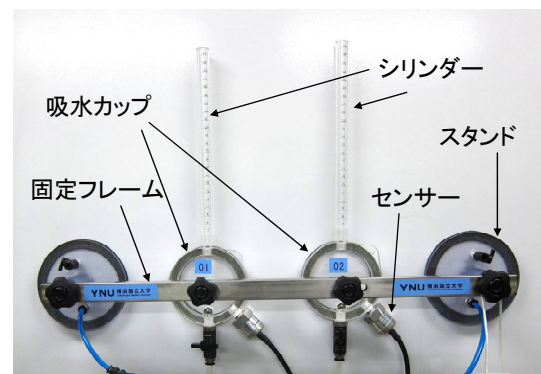
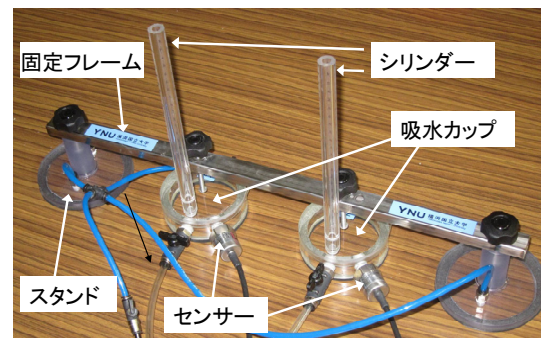


図-1 吸水カップの形状(鉛直面用)



(a) 鉛直面の測定



(b) 平面の測定



(c) 円筒面の測定

図-2 吸水カップおよび固定装置

(2) 吸水挙動の評価

吸水挙動の一例を図-3に示す。累積吸水量は吸水開始直後で傾きが最大であり、時間の増加とともに徐々に傾きが小さくなる。式(1)のとおり単位面積あたりの吸水量の時間変化量を表面吸水速度と定義し、以後表層品質の評価に用いる。

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1)$$

ここに、 p は表面吸水速度($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)、 w はコンクリート単位面積あたりの累積吸水量(ml/m^2)、 t は時間(s)、である。

Levitt¹²⁾はコンクリートへの吸水挙動について次のように説明している。毛細管空隙を移動する粘性流体がHagen-Poiseuilleの法則に基づくとの仮定より、流体の速度 $\frac{dv}{dt}$ は式(2)によって表される。

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\pi H r^4}{8 L S} \quad (2)$$

ここに、 v は毛細管空隙を流れる流体の体積、 H は水圧、 r は毛細管空隙の平均半径、 L は毛細管空隙の長さ、 S は液体の粘性、である。

式(2)において、 H 、 r 、 S は一定とみなされ、 L は v に比例することから、式(2)は式(3)のように表される。

$$\frac{dv}{dt} = \frac{A}{v} \quad (3)$$

ここに、 A は定数、である。

式(3)を積分して整理すると、式(4)が得られる。

$$\frac{dv}{dt} = at^{-0.5} \quad (4)$$

しかし、Levittは、実際のコンクリートでは、空隙の目詰まり、自然治癒、中性化、水和の進行、等の理由により、式(4)において0.5で一定ではなく、実際にはばらつきを有する値であると認識し、表面吸水速度は式(5)によって表されると提案している。

$$p = at^{-n} \quad (5)$$

ここに、 a および n は定数である。

式(5)において、 a 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。後述のとおり、著者らは、注水が完了してから

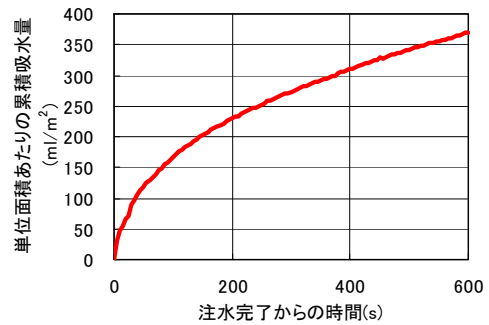


図-3 累積吸水量の推移の一例

1秒、注水を開始してから11秒の時点の吸水速度と定義した。降雨直後の表面が濡れた状態でなければ、ごく表層の粗雑な空隙内の水は逸散しているため、 a の値は降雨や湿度の影響を受けにくい¹³⁾と考えている。 n 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。 n の値が小さいと吸水の低減が小さく、大きいと時間の経過とともに吸水の低減が顕著となる。Levittはひび割れのない室内に静置した供試体を測定した範囲内では n は概ね0.3から0.7の範囲をとると報告している¹²⁾が、著者らが環境条件や寸法の異なる実構造物を測定した結果、その範囲を超える0.3以下や0.7以上の値も得ている。

Levittは、品質の評価基準に表面吸水速度を採用し、測定を開始してから10分、30分、1時間、2時間で値に対して、それぞれ品質評価基準のしきい値を提案している¹⁴⁾。著者らは、それらのしきい値を使用しないが、竣工検査などを考えると測定は短時間で完了する必要がある、10分時点での表面吸水速度を主として表層品質評価に用い、適宜 a や n を併用して現象の理解を行う。

(3) 測定およびデータ処理方法

10分間の表面吸水試験の方法について述べる。吸水カップ下部から注水を開始したのち、初期水位の300mmに達した時点で注水が完了する。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秒経過した時点を実測の開始時間とする。ただし10秒という計測開始時間は、今後の改良による注水時間の短縮や測定精度の向上に伴いさらに短縮することにも検討の余地があると考えている。

自動計測の場合には、吸水カップ内に設置した水圧センサーを用いて、シリンダー内の水の体積変化量を水位変化によるセンサーの圧力変化として検知し、データロガーにより連続的（例えば、1秒間隔）に計測する。すなわち本手法は、測定中に水頭が減少する性質を、精度よく吸水量を測定することに積極的に利用している。

自動計測によらず目視で測定する場合には、1分ごとに10分まで計11回水面の高さを測定する。なお、10分以降も測定する場合には、吸水速度が小さくなるにしたがい、推奨する測定時間間隔は大きくなる。

目視測定の場合には、読取り誤差を含むものの、式(5)にしたがうという仮定を用い、フィッティングによる数値処理を行うことで、精度よく表面吸水速度、 a および n を得ることができる⁹⁾。 a は筆者らは注水完了から1秒時点での表面吸水速度と定め、1分から10分までのデータを外挿して得られる計算上の指標である。自動測定の場合には、式(5)を用いた同様の処理を行うこともできるが、小さい時間間隔で得られた結果を直接数値微分することにより、時々刻々の表面吸水速度を計算することができる。なお、本論文で示す表面吸水試験結果は全て、目視もしくは自動により計測した測定値に対して式(5)のフィッティングにより算出したもので統一し、直接数値微分したものは含まれていない。

(4) 測定精度

本手法によって得られる測定結果は、機器自体の精度だけでなく、コンクリートの品質自体のばらつきや含水率の影響を受ける。品質および含水率の影響をできるだけ小さくするために次の供試体を作製し、精度の検証を行った。一辺が250mmの立方体の無筋コンクリート供試体を9体作製した。普通ポルトランドセメントを用い、 $W/C=0.5$ である。異なった養生条件の下で、各供試体の打込み面の側面（各面の中心位置）に対して、各1点の計4点測定した。これら4点の測定点は、同じ高さに位置しており、材料分離等がコンクリートの品質に与える影響も同程度であると考えられる。9体の供試体について、材齢120, 150, 270日に測定した結果の各供試体の変動係数の9体の平均値は、それぞれ、0.11, 0.12, 0.11であった。

3. コンクリートの配合および養生の影響の分析

(1) 実験概要

ここでは、普通ポルトランドセメントと高炉セメントを用いたコンクリートに対して、水セメント比および養生期間の違いが、表面吸水試験結果に与える影響について実験的に検討を行った。ここでは、型枠存置期間を養生期間とした。

表-1に示すとおり普通ポルトランドセメント（以下、OPC）と高炉セメントB種（以下、BB）を用いた。水セメント比（以下、 W/C ）は、0.4, 0.5, 0.6の3水準とした。型枠存置期間を変えることにより3種類の養生期間をセメントの種類ごとに設定した。型枠存置期間は、十分な

表-1 コンクリートの条件

セメント種類	W/C (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
OPC	40	175	49.3	21.5	3.3
	50		51.3	19.0	3.2
	60		52.7	18.0	3.9
BB	40		48.9	23.5	3.3
	50		50.9	23.0	3.0
	60		52.4	18.0	4.8

表-2 各供試体の脱型と測定を行った材齢

セメント種類	OPC	BB
打込み日	2010年 11月24日	2010年 10月27日
型枠存置期間(日)	1, 7, 28	1, 9, 28
測定材齢 (日)	1ヶ月目	28
	2ヶ月目	57
	3ヶ月目	91
	7ヶ月目	210

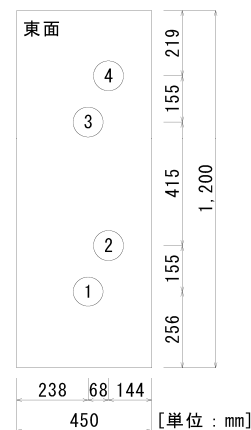


図4 測定位置

養生を確保しない場合を想定して1日、一般的な施工を想定してOPCでは7日、BBでは9日、入念な施工を想定して28日とした。以上の実験要因について、すべての組合せで18種類の供試体を各1体作製した。

供試体の形状は、断面が450mm×900mm、高さ1200mmの直方体である。コンクリートにはレディーミクストコンクリートを使用し、型枠には化粧合板を用いた。コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁵⁾を参考にし、コンクリートの打込みにはバイブレータを用い、打込み後は、上面を養生マットにて脱型時まで湿布した。型枠存置期間を28日に設定した供試体は、7日(OPC)または9日(BB)での脱型後に、全面をフィルム被覆により28日までの水分逸散を防ぐこととした。化粧合板およびフィルムの材質の違いについて、水分逸散に関しては水、水蒸気を通しにくいという点で同等であると考えている。打込み時期は10月から11月にかけてであり、その時期の平均気温は約15℃である。

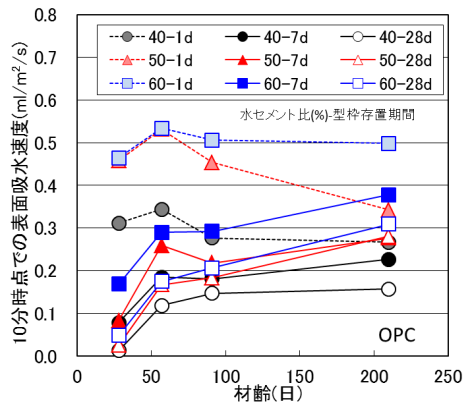


図-5 表面吸水速度の経時変化(OPC)

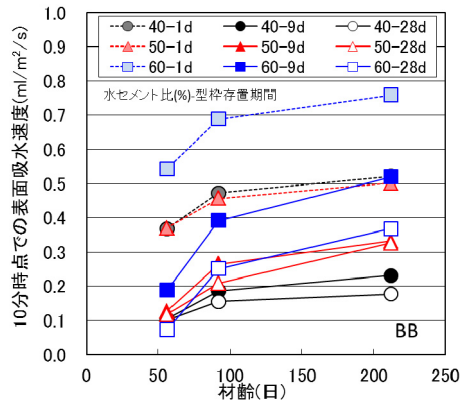
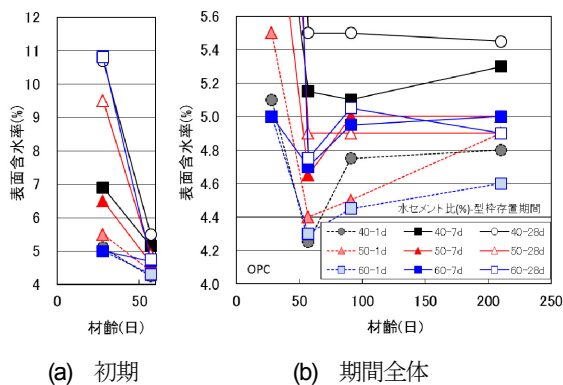


図-6 表面吸水速度の経時変化(BB)



(a) 初期

(b) 期間全体

図-7 含水率の経時変化(OPC)

暴露地は千葉県千葉市稲毛区弥生町に位置し、シェルターのある屋外で打込みを行い、脱型後も同じ場所に静置した。かまぼこ形のシェルターは東西方向が開口しており、供試体の4面がほぼ東西南北を向くように設置し、一連の表面吸水試験の測定は、全て東面で行った。シェルター内の設置位置の関係から、供試体西面については、一部の供試体に西日が当たる環境であったが、表面吸水試験の測定面である東面には一切直射日光は当たらず、日射の影響を排除でき、18体の供試体はほぼ同等の環境条件が保たれたと考えている。しかし、シェルター内に

局地的な雨漏りが生じ一部の供試体（例えば、OPC, W/C=0.5, 1日脱型）に雨が当たった。そのためか後述する経時変化が他と異なる傾向となったが、その影響も含めて全体の傾向を論じる。

打込み日を基準として材齢1, 2, 3, 7ヶ月を目安に経時的な測定を行った。実際に測定した材齢を表-2に示す。

測定位置を図-4に示す。1体につき、4ヶ所の測定を行った。一部の供試体において、型枠上部から300mm程度の位置においてブリーディング水が型枠を伝った跡が見られ、測点4がその範囲に重なった。そのような供試体の4点のデータのばらつきは大きくなったものの、以降の18体の平均値の相対比較を行う限りにおいては、全体の傾向は変わりがなかったことから、一律に4点の平均値で評価した。

(2) 実験結果

a) 表面吸水速度

10分時点での表面吸水速度について、全測定点の平均値の経時変化を図-5, 図-6に示す。これらの図から概ね測定材齢の経過とともに10分時点での表面吸水速度は増加し、3ヶ月程度で頭打ちになる傾向を示している。W/C=0.5, 型枠存置期間1日(50-1d)の供試体のみ、材齢とともに値が減少しているのは、前述の雨漏りの影響による水和促進による緻密化であると考えており、ここでは除外して考える。一般にコンクリートは水和の進行により組織が緻密になるが、表面吸水試験においては含水率の影響が大きいので、供試体の乾燥も同時に進行した結果3ヶ月程度で表層の含水率が落ち着いたためと考えている。ただし、乾燥の影響は供試体の寸法に依存するため、寸法が異なるとその時期は変化すると考えている。参考までに、市販のコンクリート表面水分計（高周波容量式, 20MHz）で計測したOPCの表面含水率の経時変化を図-7に示す。1ヶ月時点では含水率が大きく、収束していないことがわかる。

図-5, 図-6において、材齢28日のデータで、脱型28日のものは、脱型後の乾燥期間が短くほとんど吸水をしない場合があった。このように極端に乾燥期間が短い場合を除けば、材齢28日程度以降において、水セメント比や型枠存置期間の違いにより10分時点での表面吸水速度は大きく異なっている。

図-8と図-9に、材齢3ヶ月の測定結果について、型枠存置期間および水セメント比によって整理した結果を示す。表面吸水試験を用いることで、水セメント比を固定した場合には型枠存置期間が表層品質に与える影響を、型枠存置期間を固定した場合には水セメント比が表層品質に与える影響を、それぞれ検知できることを示している。セメントの種類による違いを見ると、図-8において、OPCと比較してBBの場合に型枠存置期間の違いによる

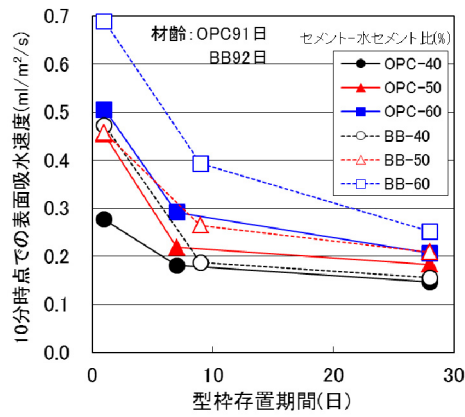


図-8 型枠存置期間の違いが表面吸水速度に与える影響

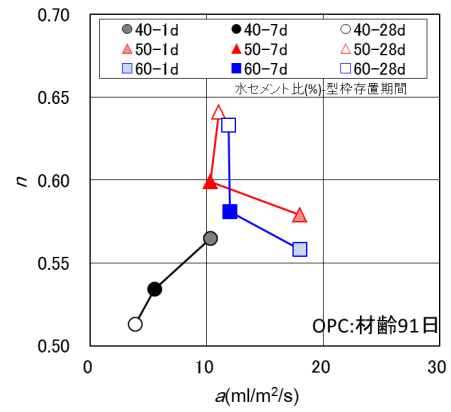


図-10 OPCにおける a と n (材齢 91 日)

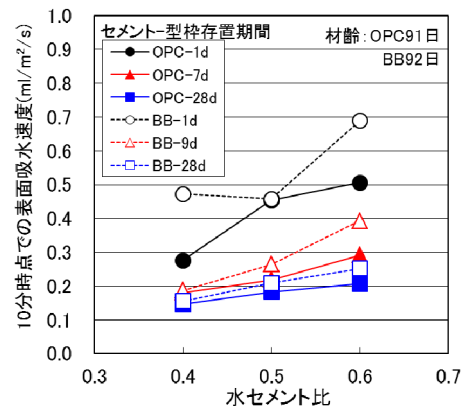


図-9 水セメント比の違いが表面吸水速度に与える影響

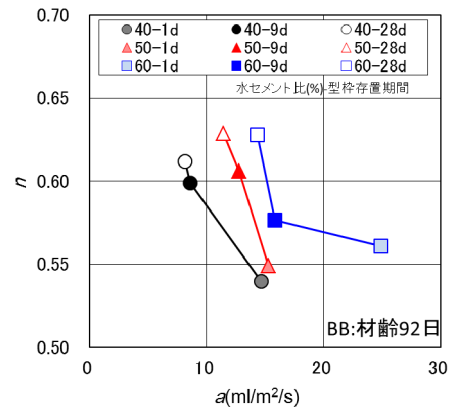


図-11 BBにおける a と n (材齢 92 日)

10分時点での表面吸水速度の変化が大きい。高炉セメントを用いた場合の表層品質が初期の養生の影響を敏感に受けることを示している。

b) a および n による考察

図-10および図-11に、材齢3ヶ月で得られた a および n について示す。 a は、測定結果から、注水完了後1秒時点（注水開始時から11秒時点）での表面吸水速度を求めた計算値であり、ごく表層の品質を表していると考えている。全ての条件について、水セメント比および型枠存置期間および増加すると、 a の値も増加する傾向があるため、 a の値は、10分時点での表面吸水速度と同様に、水セメント比や養生の影響を大きく受ける。

n は、時間の経過に伴う吸水速度の低減を表す指標であり、 n が大きいほど吸水速度の低減が大きい。すなわち、 n が大きいほど奥行き方向に緻密であることを示す。図-10および図-11においても、各条件において、型枠存置期間が増加するにつれて、 n の値も増加する傾向が見える。型枠存置期間が増加するにつれて、表面からある深さまでのコンクリートが緻密化し、表面から離れた位置ではコンクリートの乾燥が進みにくく含水率も高いため、測定時間の経過に伴う表面吸水速度の低減が大きく

なったものと考えている。

Dhirら¹⁶⁾によると表面吸水試験で計測している領域はせいぜい表面から15mm程度であり、山口県の構造物のコアを用いた分析⁷⁾からも表面吸水試験で養生の影響を検知できる深さは20～30mm程度までと考えているが、今後さらに検討を重ねる。

OPCにおいて、 $W/C=0.4$ で28日脱型のものは a の値が他と比べて小さく非常に緻密であることから、計測初期の吸水量の絶対量が小さいために、1回の計測の時間経過に伴う吸水量の相対値である n が計算上小さくなった。反対に、BBの $W/C=0.6$ で1日脱型の供試体については、表層の品質が悪く、初期の表面吸水速度が非常に大きいため n の値が他の条件と比べ計算上大きくなる結果となった。このようにコンクリートが一般に比べて極端に緻密（例えば、 $W/C=0.4$ で型枠存置期間28日）や粗雑（例えば、 $W/C=0.6$ で型枠存置期間1日）である場合には n の値には特殊な値が見られるものの、それらを除いた大部分のコンクリートであれば、 n は養生による表面から深さ方向への品質の分布の違いを表しうる指標であると考えている。

4. 実構造物および柱供試体における表面吸水速度の分布

(1) 検討の概要

実構造物において表面吸水試験結果がどのような値やばらつきを持つのか把握する必要がある。構造物の種類や環境によって異なると考えられるため、柱を模擬した供試体および実構造物での測定を行った。

供試体においては、暴露環境を屋内および屋外とし、降雨や日射の影響についても検討した。実構造物の測定では、施工状況の違いが与える影響を検討した。

本手法はコンクリートの含水状態の影響を受けるが、現時点では、含水率により表面吸水試験結果を補正することは考えていない。補正に必要な信頼できる含水率測定手法が存在しないことや、補正メカニズムが不明確であることだけでなく、構造物の置かれる環境は様々である中で、一つの環境条件に合致するように補正をかけることの意味が見いだせないためである。今後、本手法を竣工検査に用いる場合には、しきい値の設定が課題となるが、構造物の種類、周辺環境や測定材齢によりしきい値は変化すべきものであると考えている。

(2) 検討の対象

a) 供試体による検討

図-12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-3および表-4のとおりで、レディミクストコンクリートを使用し、鋼製型枠を用いた。フレッシュコンクリートの特性を表-5に示す。高さ方向に2層に分けて、コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁵⁾を参考にし、各層4ヶ所に棒状バイブレータをかけ、表面の気泡を除去するために型枠の表面を木槌で叩いて打ち込んだ。打込み後は、上面を養生マットを敷き、温度を制御しない室内に静置した。型枠存置期間7日間で脱型後、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、打込み後1週間の平均気温は約5℃であった。暴露地は神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台である。

供試体は、それぞれの面が東西南北面を向くように設置した。東側には約6mの距離に高さ約10mの建物があるため、午前中は若干日陰となる。南側および西側には、日射に影響を及ぼすような建物はな。なお、降雨の際に観察したところ、雨の当たる状況は一樣ではなかった。風向き、降雨の強さが影響することや、供試体の上面に若干の傾斜があったためである。

表-6のとおり各々の環境で約5ヶ月間静置した後、測

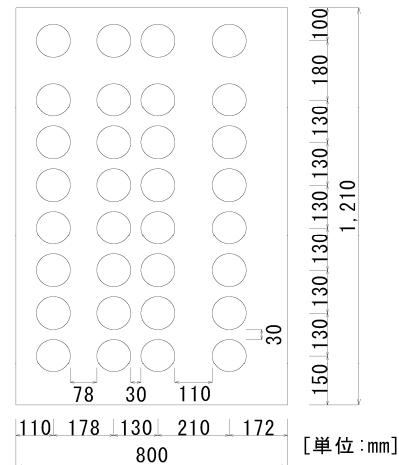


図-12 供試体形状と測定位置

表-3 コンクリートの使用材料

材料	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15	-	-
細骨材	千葉県君津産山砂	2.61	1.82	2.62
粗骨材	埼玉県秩父郡横瀬町産石灰砕石	2.71	0.32	6.53
混和剤	AE減水剤およびAE剤	-	-	-

表-4 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
55	44.5	157	285	822	1061	2.28	0.0114

Ad1: AE減水剤, Ad2: AE剤 (Ad1, Ad2はWの内割混入)

表-5 フレッシュコンクリートの特性

スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)
95	39	11.2

表-6 脱型および測定を行った材齢

実験・作業の内容	材齢(日)
脱型	7
屋内または屋外暴露の開始	7
屋外柱供試体の屋内への移動	159
屋内柱供試体の測定実施	164~165
屋外柱供試体の測定実施	172~175

表-7 調査対象構造物の概要

主体	名前	構造 形式	セメ ント	W/C (%)	打込み 年月	測定 材齢	測定 点数
山口県	ひび割れ 抑制シス テム前	ボック スカル パート	BB	不明	2004年	8年	34
	Nランプ		BB	54	2008年 6~9月	3年 3~6月	62
	瀬々川		BB	53	2007年 4~7月	4年 5~8月	48
横浜市	下水処理 施設	壁	BB	52	2010年 10月	0年3月	41

*Nランプ、瀬々川は、ひび割れ抑制システム実施後

定のために屋外暴露供試体を屋内設置供試体と同じ室内へ移動した。屋外供試体は直前の降雨による測定位置での含水率の違いが見かけの測定結果に影響を与えることを排除するために、室内に移動してから測定までの期間を13日以上あけた。この日数は、別途の予備検討により十分な時間であることを確認している。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点について、10分間の表面吸水試験を行った。

b) 実構造物における検討

構造形式、セメント種類、W/C、測定材齢、測定点数を表-7に示す。山口県にて実施している「ひび割れ抑制システム¹⁷⁾」の施行前後に設計施工されたボックスカルバート3基の内壁部分、および水密性を必要とされる横浜市の下処理施設の壁部材1基（建設中に測定、測定時までは日射が当たる環境）を対象とした。

山口県のひび割れ抑制システムは、2005年度に実構造物群での試験施工が始まり、2006年度に制度運用の試行を行い、2007年度から制度を運用している。本研究で測定したひび割れ抑制システムの開始前のカルバートでは、誘発目地の仕様が現在とほぼ同様である。システムの開始前ではあるが、山口県や施工者がカルバートのひび割れに対して体系的ではないもののすでに配慮を始めていたとの情報を得ている。よって、このカルバートは、ひび割れ抑制システムの開始前の構造物の品質を代表するものではなく、システム開始後の構造物の品質に比較的近い、と山口県の管理する構造物を数多く調査した筆者らは考えている。

(3) 測定結果

a) 供試体の暴露環境の影響の分析

図-13および図-14に、屋内柱供試体および屋外柱供試体の測定面ごとの10分時点での表面吸水速度の高さ方向の分布を示す。全般的に、屋外に比較して屋内の供試体の値が大きいことがいえる。

屋内柱では、方角の影響は見られないものの、高さ方向について明らかな傾向がみられる。柱供試体のコンクリートは、高さ1210mmの半分の約600mmの位置において、打ち重ねられている。この1回の打込み高さにおいて、重力の影響で下部ほど密実になるとともに、ブリーディング水の影響で、上部ほど緻密性が低下したものと考えている。なお、下部から5番目の測定高さの測定結果が他と比べてより大きくばらついているのは、打重ねの高さが必ずしも600mmに揃っていなかったことや、打重ね部の上方部に、前の層のコンクリート上面に溜まっていたブリーディング水が上部のコンクリートの打込みによって型枠面に集まって上昇した結果、表層のW/Cが相対的に上昇したこと¹⁸⁾などの影響によるものと考えている。

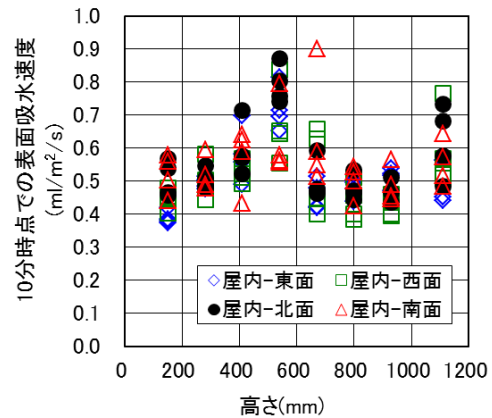


図-13 屋内柱供試体の表面吸水速度の高さ方向分布

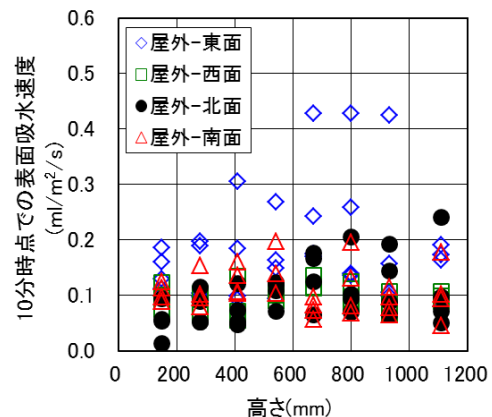


図-14 屋外柱供試体の表面吸水速度の高さ方向分布

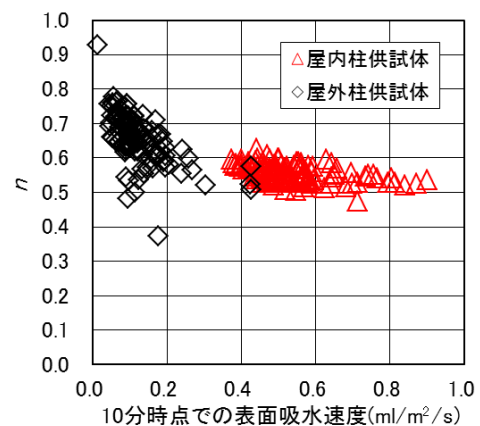


図-15 n と10分時点での表面吸水速度との関係

屋内柱については、屋外柱に比べて全体的に10分時点での表面吸水速度が大きい。室内に設置されていたため、外部からの液状水の供給がなく、コンクリート表層が緻密化しにくかったものと考えている。図-15に10分時点での表面吸水速度と n の関係を示すとおり、屋内柱の n の値が屋内に比べて小さいことから、コンクリート内部方向に乾燥し、粗雑になっていることを示していると考えている。

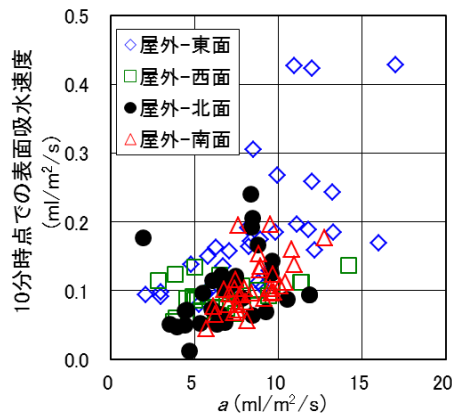
図-16 屋外供試体の10分時点での表面吸水速度と a の関係

表-8 10分時点での表面吸水速度の統計値

名称	種別	測定 点数	平均値 (ml/m²/s)	標準 偏差 (ml/m²/s)	尖度	歪度
屋内柱	全体	127	0.537	0.108	1.42	1.23
	選択 ^{*1}	63	0.480	0.053	-0.42	0.01
屋外柱	全体	127	0.122	0.069	7.75	2.39
	東面	32	0.184	0.096	1.84	1.52
	西面	32	0.096	0.021	-0.58	-0.08
	南面	31	0.108	0.038	0.36	0.84
	北面	32	0.099	0.052	0.74	1.00
ひび割れ抑制 システム前	全体	34	0.188	0.118	0.40	0.88
	選択 ^{*2}	16	0.209	0.121	-1.09	0.16
Nランプ	全体	62	0.222	0.117	0.98	1.00
	選択 ^{*3}	42	0.204	0.096	-0.36	0.46
瀬々川	全体	48	0.092	0.058	-0.29	0.41
下水処理施設	全体	41	0.251	0.071	2.62	1.33

*1 高さ番号1,2,6,7のみ選択

*2 端部の第1,6ブロックを除外

*3 端部の第1,8ブロックを除外

次に、屋外柱について考察する。全般的に屋内柱と比較して表面吸水速度は小さい。さらに、打込み高さの影響が屋内柱ほど明確に認められない。これは、屋外柱は、日射による乾燥などの悪影響を受けるものの、降雨や湿度による天然の追加養生が行われて緻密化したことにより、測定を行った時点では、全体として品質が向上した結果、高さ方向の影響が小さくなったためと考えている。

日射の影響を分析するために、屋外柱について、10分時点での表面吸水速度と a の関係を図-16に示す。北面と南面を比較すると、北面が10分時点での表面吸水速度および a の両方が小さくなっている。これは日射の影響により、南面がより乾燥した影響が含まれていると考えられるが、表-8に示した平均値と標準偏差を考慮すると、有意な差とはいえない。日射の影響が顕著にはならなかったのは、1月に打込んで、5ヶ月間の屋外暴露であったため、梅雨の時期を経験したものの、夏の直射日光が一番厳しい時期を経っていないためと考えられる。日射の影



図-17 屋外供試体北面の降雨状況の一例

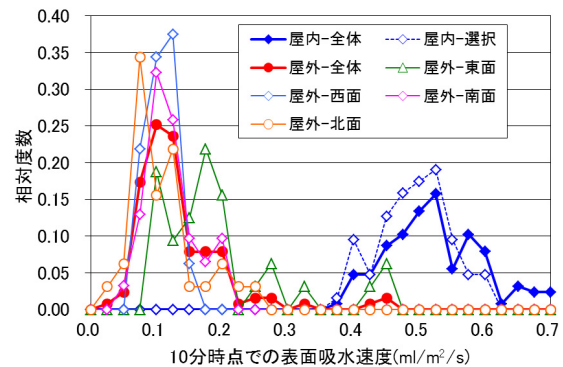


図-18 柱供試体の相対度数分布

響を詳細に検討するためには、夏場の暴露も必要であろう。

屋外柱の東面が全体的に10分時点での表面吸水速度が大きくなった理由としては、降雨の当たり方が異なったためと考えている。図-17は数時間の比較的弱い降雨が終了した直後の北面の状況である。風がない場合には降雨は柱上面のみに降り注ぎ、壁面に直接に降雨が当たることはほとんどなく、柱上面からあふれた水が、若干低いところから流れ落ちる。よって、このような風をうけない降雨時には、毎回同じ個所に雨が流れることとなる。

本章では、限定した期間において屋外、屋内の条件下での表面吸水試験による品質のばらつきの度合いを考察したが、屋外に置かれた供試体が屋内に置かれたものに比べ品質が高くなるということが論点ではない。屋外暴露期間が長くなることで、例えば日射の影響により屋内暴露に比べて品質が低下する可能性も十分に考えられる。

b) 供試体における10分時点での表面吸水速度の分布

柱ごとの全測定点の10分時点での表面吸水速度の分布傾向を見るために、区間が $0.02\text{ml/m}^2/\text{s}$ の相対度数分布を図-18に、計算された統計値を表-8に示す。データ群が正規分布であるときには計算される尖度、歪度は0の値を示す。尖度が正の値をとるにしたがい正規分布よりも中央に多く集中することを示し、負の値はその逆の傾向を表す。歪度は正の場合には平均値よりも右側に、負の

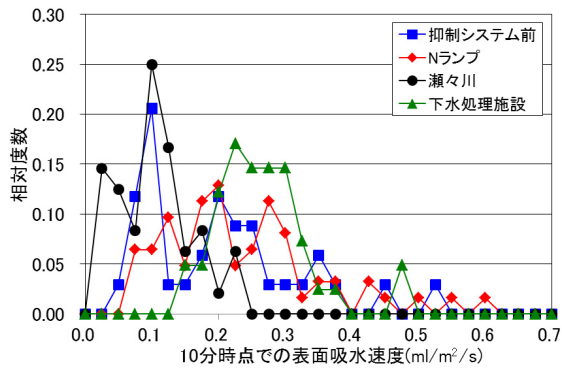
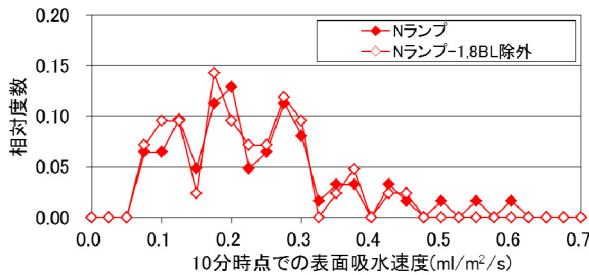
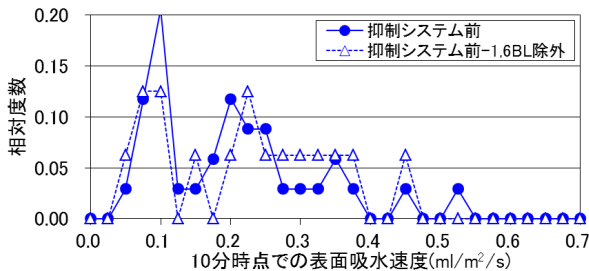


図-19 実構造物の相対度数分布



(a) Nランプボックスカルバート



(b) ひび割れ抑制システム前ボックスカルバート

図-20 端部ブロックの除外による違い

場合には左側に全体が分布することを示す。

図-18より、屋内および屋外供試体ともにそれぞれある範囲に集中している傾向が見える。この時の屋外供試体全体は尖度7.7、歪度2.4より、中心値により多く集まり、中心よりもやや右に分布している。表面吸水速度は負の値にはならないため、全体的に表面吸水速度が小さい場合には、平均値を中心として左右均等にはならないためである。一方、屋内供試体全体では尖度1.4、歪度1.2であり、屋外に比べてより正規分布に近いことを示す。

供試体のうち、屋外柱では、前述の方角の違いによる影響を除去するために、方角ごとに整理した結果、尖度の絶対値は0.3～1.8の範囲、歪度は0.1～1.5の範囲へとそれぞれ減少した。屋内柱では、前述の高さ方向の打重ねやブリーディングの影響を除去するために、影響を大きく受けていると思われる高さ方向が下から3、4、5、8番目の測定点をすべて除いた結果、尖度0.4、歪度0.0へと低下した。

以上より、同一のコンクリートを用いて製作した部材

について表面吸水試験で計測した結果は正規分布に似た分布した傾向をもつこと、さらに、環境や部位の影響をできるだけ排除した場合には、ばらつきは小さくなり、より正規分布に近くなることがわかった。

c) 実構造物における10分時点での表面吸水速度の分布

実構造物の測定結果について、表-8に計算された統計値を、図-19に区間が $0.02\text{ml/m}^2/\text{s}$ の相対度数分布を示す。

山口県の3つのボックスカルバートのうち、瀬々川とNランプはひび割れ抑制システムが開始した以降に建設されたものである。3つのカルバートはすべて、同時期の冬季に測定された。

瀬々川ボックスカルバートは平均値 $0.092\text{ml/m}^2/\text{s}$ 、標準偏差 $0.058\text{ml/m}^2/\text{s}$ であり、3構造物の中で最も小さかった。目視でも、微細なひび割れやセパレータの孔の付近の沈下ひび割れなどもほとんど観察されず、丁寧な施工がなされた様子が伺え、目視観察で品質が高いと推察されたことが、表面吸水試験において表面吸水速度が小さい結果と一致していた。

Nランプボックスカルバートは、全長約80mの8ブロック全体では、平均値 $0.222\text{ml/m}^2/\text{s}$ 、標準偏差 $0.117\text{ml/m}^2/\text{s}$ 、尖度1.0、歪度1.0となり、正規分布よりも結果が大きくばらついた。そこで、そのばらつきを考察するために、一般に湿度が高く日射が当たらないボックスカルバートの一般部とは環境が異なり、日射や風の影響を受けると考えられる端部1ブロック分を除外して中央の6ブロックのみで検討した。その結果、表-8および図-20（相対度数の区間は $0.02\text{ml/m}^2/\text{s}$ ）にみられるとおり表面吸水速度の平均値 $0.204\text{ml/m}^2/\text{s}$ 、標準偏差 $0.096\text{ml/m}^2/\text{s}$ 、尖度0.36、歪度0.46と絶対値が低下し、平均値、標準偏差も小さくなった。ボックスカルバート内の環境は均一ではなく、日射や乾燥の影響により、端部付近の側壁の品質が低下したものと考えている。南側の端部が、北側の端部よりも品質が劣る傾向も認められた。

ひび割れ抑制システムの開始前のボックスカルバートにおいて、Nランプと同様の理由で端部1ブロックを除いた検討を行った。その結果、表面吸水速度の平均値 $0.209\text{ml/m}^2/\text{s}$ 、標準偏差 $0.121\text{ml/m}^2/\text{s}$ となり、ひび割れ抑制システム開始後のNランプボックスカルバートとは平均値は大きくは変わらないが、ばらつきが大きくなる傾向が認められた。山口県のひび割れ抑制システムの骨子のひとつが、「施工の基本事項の遵守」を体系的な取り組みで達成したことである¹⁷⁾が、これが表層品質の違いに表れたと考えている。ただし、ボックスカルバートは端部を除いて日射および乾燥の影響が、橋台などに比べて比較的小さく、相対的に品質が高くなる傾向にある⁷⁾。表面吸水試験による、橋台も含めた山口県の構造物の詳細な分析は、別報にて報告する予定である。

下水処理施設の構造物では、底版から打ち継がれた壁

において、鉛直に発生した3m離れた隣接する2つのひび割れ間で測定している。尖度2.62, 歪度1.33となり他の3構造物と比べて分布形状を表すパラメーターが大きくなり、図-19では台形の形状をしている。この理由としては、打継ぎ目やひび割れに近い位置の測定も含まれるため、外部拘束により発生した微細ひび割れ¹⁹⁾の影響もあると考えている。

以上より、実構造物においては、外部拘束の影響の差を大きく含む場合でなければ、10分時点での表面吸水速度の分布は概ね正規分布にしたがうことがわかり、1つの構造物内における日射の当たり方や風の当たり方による湿度の違いの影響を除外することで、よりばらつきが少なくなり正規分布により近くなることがわかった。

表面吸水試験を用いて、構造物の緻密性の差を検知できることが示されたが、同時に構造物の置かれる環境の影響を受けることも分かった。そのことを十分に理解した上で、表面吸水試験を利用する必要があるといえる。たとえば、竣工検査時に施工が適切になされたかを検査する場合には、環境の影響を受けにくい場所を選定して評価する、などの対処である。

ここでは十分に検討できなかったが、測定の季節による温度、湿度の違いが測定結果に影響を与える可能性があることを示唆するデータも著者らは得ており、今後検討を重ねたい。

5. 表面吸水試験を用いた表層品質の検査システムを構築する考え方

(1) 検査システムの概要

本章では、表面吸水試験を用いた表層品質の検査システムを構築する場合の考え方を提案する。現行のコンクリート標準示方書²⁰⁾では、施工の検査は、施工プロセスが施工計画書どおりであることを目視で確認することが中心である。現実の構造物の表層品質は材料、施工のみならず環境条件の影響も受ける。できあがったコンクリートに対して表層品質の検査をおこなうことで、粗悪な材料や施工を排除することが可能となる¹²⁾。

表層品質の検査システムにはいくつかの考え方²⁾がある。ここでは、施工者が当然達成すべき比較的低いレベルの表層品質をしきい値として設定する考え方に基づいて議論を進める。すなわち、表面吸水速度として最低限満たすべき値を提示した検査システムである。簡易な試験により数値が得られ、部材内でのばらつきも明らかになるため、その結果を踏まえて施工者、材料供給者がより良いものを作ろうとする行動にもつながる可能性がある。

ここで採用するのは、10分時点での表面吸水速度にし

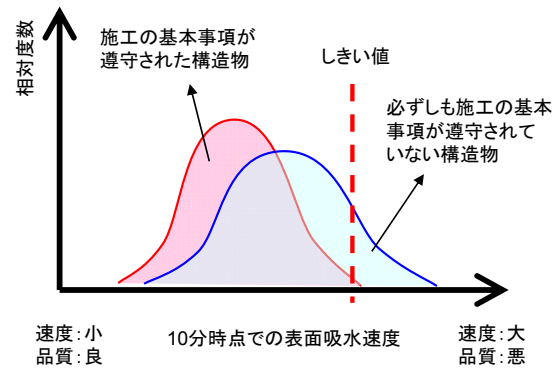


図-21 しきい値の設定の概念図

きい値を設定し、適切な数の計測を行なって、しきい値を満足することで検査に合格したとするシステムである。具体的なしきい値を提案することが本研究の目的ではない。まず、表面吸水試験の検査におけるしきい値を設定するためには、今後のデータの蓄積と分析が不可欠である。そして、具体的なしきい値の設定は、検査の目的、構造物の重要性や置かれる環境条件、供用期間などを勘案して、構造物の管理者が決定すべきである。

ここでは、第4章で述べた山口県のボックスカルバートを例にとり、山口県における施工の基本事項が遵守されていない構造物を不合格と判定するシステムを構築する場合を想定して、しきい値を設定する考え方を議論する。

(2) しきい値の設定の考え方

第4章において、供試体および実構造物の10分時点での表面吸水速度は概ね正規分布することを示した。ここでは、正規分布するとの仮定に基づいた上でしきい値の設定の考え方について考察する。

図-21に提案する手法の概念を示す。山口県の構造物において、「ひび割れ抑制システム」適用後には、「施工の基本事項の遵守」のシステムが構築されており、施工由来のひび割れをほぼ根絶することに成功している。よって、システム適用後の実構造物の表面吸水速度（値が大きい方が低品質）の上限値よりも、しきい値を大きく設定すべきであろう。この上限値には、システム適用後の実構造物のデータ群の片側1%棄却域を用いてもよいであろう。正規分布を仮定した場合この上限値は式(6)で表すことができる。

$$Y_{lim} = \mu + 2.33\sigma \quad (6)$$

ここに、 Y_{lim} は表面吸水速度の上限値、 μ は平均値、 σ は標準偏差である。

一方、図-21において、ひび割れ抑制システム適用の

前後のボックスカルバートの品質にはオーバーラップしている領域があり、システム適用前のこの構造物を不合格にする場合のしきい値をどの値にするべきかの議論を以下に展開する。

ひび割れ抑制システム適用後の構造物の実測値として、Nランプボックスカルバートの実測値を用いる。なお、比較対象とするひび割れ抑制システム前のボックスカルバートは、本研究で測定した構造物は、現行のシステムと同等のひび割れ誘発目地が設置する配慮がなされており、山口県のシステム前のひび割れの多い構造物を必ずしも代表しているものではない。

ボックスカルバートの端部のブロックでは、日射や風による乾燥の影響が見られるため、表-8よりNランプボックスの両端1ブロックを除外した値を用いることとした。その結果、 $\mu=0.204(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ 、 $\sigma=0.096(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ となり、式(6)から計算される表面吸水速度の上限値 $Y_{\text{lim}}=0.428(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ となった。

この $Y_{\text{lim}}=0.428(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ という値から、いくつかの考え方によって、しきい値が提案できうる。ひとつの考えとしては、必要な有効数字、区切り値などで数値を定め、例えば、切り下げて $0.4\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ 、切り上げて $0.5\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ 、 $0.05\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ 単位で丸めて $0.45(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ などとなる。

もうひとつの考え方は、判定に必要な測定回数と併せてしきい値を設定する方法である。統計的に検定を行う場合には、測定回数が少なければ検定の精度は悪くなり、それでも誤判定を少なくするにはしきい値を緩くする必要がある。

後述の(3)のとおり、試行回数が10回程度で合格の判定が行えるようにすることを考慮すると、今回においては、 $0.5\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ と設定することが妥当であると考えた。

山口県のシステムにおいて表面吸水試験による検査を導入するとした場合、施工の基本事項が遵守されている構造物や、必ずしも遵守されていない構造物などのデータを蓄積することで、表面吸水試験を竣工検査に導入した場合に用いる適切なしきい値を提案することが可能になると考えている。

(3) 測定点数の設定

表面吸水試験を、しきい値を設定して検査に用いる場合、必要な測定点数と判定方法を提案する必要がある。ここでは検査において、表面吸水速度のしきい値を下回することを合格として、その判定の統計的根拠について考察する。対象構造物の測定点の95%以上が表面吸水速度のしきい値を下回することで合格と判定する検査システムを考える。

検査時には、対象構造物の母平均、母分散は未知であるため、統計上必要最小限の測定点数を一律に定めることはできない。しきい値よりも十分品質の良い場合や非

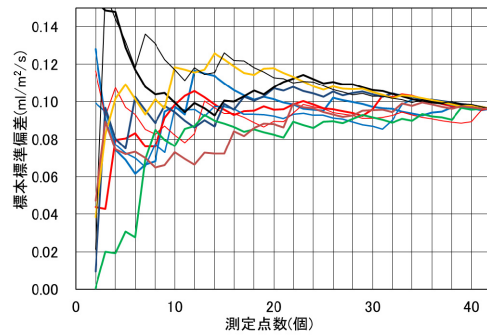


図-22 Nランプボックスの測定点数と標本標準偏差

常に品質が悪い場合には、測定の測定点数が少なくても統計的な判定が可能である。逆に、構造物の表層品質がしきい値の周囲に分布する場合には、測定点数を増やす必要がある。

母平均、母分散がわからない場合には、 n 回の測定からの母平均の推定値 μ_0 は自由度 $n-1$ の t 分布にしたがうことから、 μ_0 の片側上位5%は式(7)で推定できる。

$$\mu_0 = \bar{x} + t_{0.05, n-1} \frac{\bar{s}}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

ここに、 μ_0 は母平均の推定値、 $t_{0.05, n-1}$ は自由度 $n-1$ 、棄却域5%の t 分布における確率密度、 \bar{s} は標本標準偏差、 n は測定個数である。

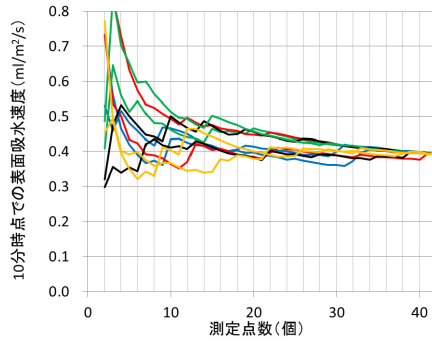
母平均、母分散がわからない場合には、 n 回の測定からの母標準偏差の推定値 s は自由度 $n-1$ のカイ2乗分布にしたがうため、 n 回の試行から母標準偏差の推定値 s の片側上位5%は式(8)で推定できる。

$$s = \sqrt{(n-1) \frac{\bar{s}^2}{X_{n-1}^2}} \quad (8)$$

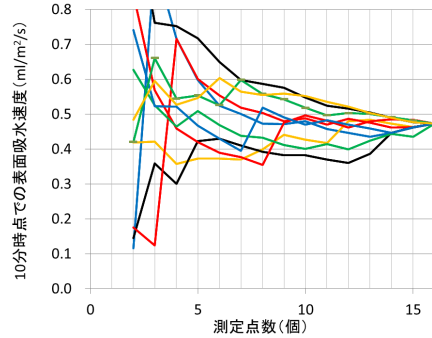
ここに、 s は母標準偏差の推定値、 X_{n-1}^2 は自由度 $n-1$ のカイ2乗分布の確率密度である。

式(8)を用いると推定した標準偏差は母標準偏差に比べ大きな値となる。しかし、Nランプボックスカルバートの実測結果を用いて n 回の測定ごとの標本標準偏差 \bar{s} の計算を、ランダムに10回行った結果、図-22(ランダム試行結果のため凡例は示さない)のとおり測定点数が少ない時には大きくばらつくものの、測定点数を増やしていくと概ね10回でばらつきが少なくなり、母標準偏差の値 $0.096\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ の±25%程度となった。

以上より、Nランプボックスの場合は、測定点数を10個程度以上とすれば、母平均の推定値は式(7)を、母標準偏差の推定値は標本標準偏差を用いる、という考え方は妥当であるとしてよいであろう。判定に用いる10



(a) N ランプボックスカルバート



(b) ひび割れ抑制システム前ボックスカルバート

図-23 試行回数の検討

分時点での表面吸水速度の母集団の 5%上限値の推定値 $Y_{0.05}$ は、正規分布の仮定により式(9)のように計算できる。

$$Y_{0.05} = \mu_0 + 1.65\bar{s} \quad (9)$$

ここに、 $Y_{0.05}$ は母集団の 5% 上限値の推定値である。

式(9)を用いて、N ランプおよびひび割れ抑制システム前のボックスカルバートについて、実測値を用いて判定に必要な測定点数を検討した。実測値をランダムな順番に並び替え、 n 回の測定ごとに式(9)を用いて 10 分時点での表面吸水速度の上限値を算出する計算を各構造物 10 回行った結果を図-23 (ランダム試行結果のため凡例は示さない) に示す。その結果、N ランプボックスカルバートは概ね 10 ヶ所の測定にて、しきい値 $0.5\text{ml/m}^2/\text{s}$ を下回り検査に合格になることがわかり、ひび割れ抑制システム前ボックスカルバートでは、概ね 6~10 ヶ所の測定で、30%の割合で不合格と判定されることが示されている。

6. 表面吸水試験の適用の事例

表面吸水試験はコンクリートの表層の緻密性を定量化する手法であり、これまで水セメント比、養生の影響を

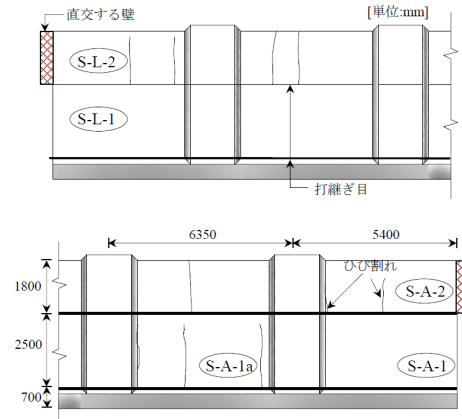


図-24 拘束条件とひび割れの状況

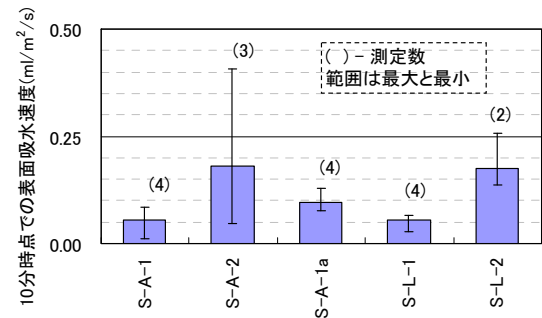


図-25 外部拘束の影響

検知できることを示してきた。これらに加え、以下では、外部拘束、膨張材、表面含浸材、微細ひび割れなどが表層品質に与える影響を、表面吸水試験を用いることで敏感に検知できることを示す。

(1) 既設部材の外部拘束の影響

対象部材は、水密性が要求される下水処理施設のコンクリート壁面である⁸⁾。セメントには高炉セメントB種が用いられ、 $W/C=0.5$ である。製作順序により、壁部材の打込み時には、底版以外の外部拘束がないS-A-1、S-L-1と、新たに打込む壁の両端が、すでに打ち込まれた柱部材や壁部材に接するために外部拘束条件が厳しいS-A-2、S-L-2が混在する。図-24に部材の位置とひび割れ発生状況を示す。外部拘束の影響が大きい箇所にひび割れが発生していることがわかる。

高炉スラグ微粉末含有コンクリートは、蒸気養生のような高温履歴を受ける場合に骨材周囲に微細損傷が発生して引張強度が低下することが報告されており²¹⁾、外部拘束を受ける場合には、AE法による分析で微細ひび割れの程度が大きくなり、引張強度の低下がさらに顕著になることが報告されている¹⁹⁾。

図-25のとおり、より厳しい外部拘束を受けるS-L-2、S-A-2、S-A-1aは、外部拘束以外の条件が同等と思われる

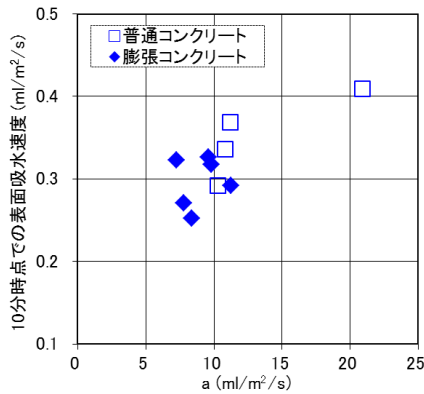


図-26 膨張材の影響

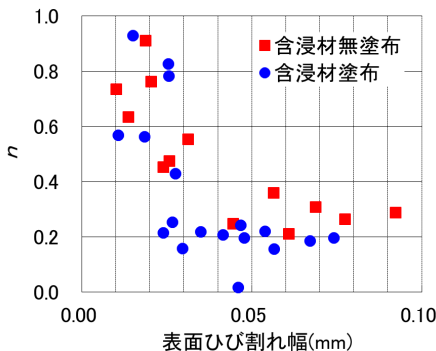


図-27 表面ひび割れ幅とnの関係

箇所とそれぞれ比較すると、表面吸水速度が大きく、ばらつきも大きい傾向が認められた。ひび割れの発生した壁部材において巨視的なひび割れが生じていないコンクリートの表面吸水速度が大きくなっているのは、この外部拘束による微細ひび割れ発生の影響が表れていると考えている。

(2) 膨張材の微細ひび割れ抑制効果

対象部材は、全長7mの壁供試体であり、底版による外部拘束を受ける²³⁾。壁供試体における膨張材の有無、および底版による外部拘束の無い場合、さらに鉄筋による内部拘束も無い場合について、表面吸水試験で分析した。水結合材比は0.55で、普通ポルトランドセメントを使用した。

図-26より、膨張コンクリートにおいては、スラブによる外部拘束、鉄筋による内部拘束によりケミカルプレストレスが導入され、通常生じるであろう乾燥収縮による微細ひび割れが生じず、表面吸水抵抗性が向上したと考えている。逆に普通コンクリートにおいては、乾燥収縮による微細ひび割れの発生と思われるが、表面吸水速度がばらつき、膨張コンクリートと比べて吸水抵抗性が小さかった。

図-26では、普通コンクリートに4点の計測結果が示されているが、示していない2点において、乾燥収縮によ

る表面に発生した微細ひび割れが、吸水カップのゴムスポンジを跨いでおり、測定中に水漏れが生じたため、データが取得できていない。これらを考慮すると、普通コンクリートと膨張コンクリートの差は大きいことがわかる。

(3) シラン系表面含浸材を塗布した後に発生する微細ひび割れの影響

シラン系表面含浸材の塗布により、無塗布と比べてコンクリートの吸水抑制効果があることを表面吸水試験で検知できる^{23), 24)}。さらに、含浸材を塗布したコンクリートに対して目視で認識できない程度の微細なひび割れの影響を表面吸水試験で検出できることを既報^{9), 23)}で示した。ここでは、曲げによってひび割れ幅を制御し、微細なひび割れの影響を表面吸水試験で分析した事例²⁵⁾を紹介する。

曲げモーメントの付加によりひび割れ幅を制御できる梁部材において、引張縁側にシラン系表面含浸材を塗布した。W/C=0.40、早強ポルトランドセメントを用い、高温で養生したこともあって、ひび割れ部以外での吸水はほぼゼロである。ひび割れ幅を徐々に増加させながら各段階において表面吸水試験を実施した。

表面ひび割れ幅がある幅を超えると、表面吸水速度が急激に増加する結果を得た。表面吸水速度が大きく変化するひび割れ幅が2つあり、1つはひび割れ深さが含浸材の含浸層を超えたときであり、もう1つはひび割れ深さが鉄筋に到達したときであることを、樹脂注入により視覚的にも確認した。図-27には、この試験における表面ひび割れ幅と表面吸水試験のnとの関係を示しており、含浸材を塗布したものでは、含浸材を塗布しない普通コンクリートでは見られない0.2を下回るnの値が得られた。これは、含浸材の効果により表面では吸水が抑制されているものの、ひび割れを通して内部までゆっくりと吸水が継続していることを表している。表面からの吸水試験で、ひび割れの内部の状況を推定できる可能性を示唆している。

他にも、コンクリートの打継ぎ目、コンクリートの打重ね部をまたぐように表面吸水試験を実施することにより、継ぎ目の一体性について評価することもできると考えている。

7. 結論

コンクリート構造物に対して完全非破壊で測定できる表面吸水試験手法を開発し、供試体での検討および実構造物の調査の結果から得られた知見を以下に取りまとめる。

- 1) 表面吸水試験から得られる指標により、水セメント比、型枠存置期間が表層品質に与える影響を検知することができた。
- 2) 表面吸水試験から得られる指標には、材料分離による部材内の高さ方向の分布が確認され、日射や降雨の影響が見られることを示した。
- 3) 表面吸水試験は含水率の影響を大きく受けるが、表面が濡れた状態でなければ材齢が28日程度以降において、表層品質の違いを検知できることを示した。
- 4) 供試体および実構造物の測定から、10分時点での表面吸水速度は正規分布にしたがうと考えてよいことを示した。環境条件の違いや材料分離等による高さ方向のばらつきを排除することで、正規性が高まることを示した。
- 5) 表面吸水試験を用いて表層品質の検査システムを構築する考え方を示した。表層品質を検査するためのしきい値の設定方法と、必要な測定点数を決める考え方を提示した。本研究で調査したボックスカルバートの例では、概ね10点の測点定数で判定できることを示した。
- 6) 表面吸水試験を用いて、部材の外部拘束が微細ひび割れに与える影響、膨張材の微細ひび割れ抑制効果、表面含浸材による吸水抵抗性向上効果に対する微細ひび割れの影響を分析できることを示した。

謝辞：本研究の一部の実施には、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）の助成を受けた。第3章の供試体の測定は、土木学会コンクリート委員会 構造物表層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（JSCE335委員会）（委員長：岸 利治 東京大学生産技術研究所教授）の活動の一環として実施されたものである。第4章の山口県実構造物の測定では故 国重典宏氏をはじめとする山口県より多大なる協力を得た。下水処理施設の測定は横浜市水道局の協力のもと実施された。測定と分析に関しては、横浜国立大学大学院生（当時）のUsman Akmal氏、青木勇人氏の協力を得た。関係各位に深謝いたします。

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性能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) 土木学会：構造物表層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(JSCE335委員会)第二期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.97，2012。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) Akmal, U., Hosoda, A., Hayashi, K. and Motoshige, N.: 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.
- 9) Akmal, U., Hosoda, A., Hayashi, K. and Fujiwara, M.: 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.
- 10) Akmal, U., Hosoda, A., Hayashi, K. and Suhara, K.: Evaluation of covercrete of expansive concrete with external restraint by surface water absorption test, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol. 34, No. 1, pp. 760-765, 2012.
- 11) Neville, A. M., 三浦尚訳：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，pp.600-604，2006。
- 12) Levitt, M.: 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.
- 13) Powers, T. C. and Brownyard, T. L.: Studies of the physical properties of hardened portland cement paste Part.7 Permeability and absorptivity, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 18, No. 7, pp. 865-880, 1947.
- 14) Concrete Society Working Party: Permeability testing of site concrete - a review of methods and experience, *Concrete Society Technical Report*, No. 31, pp. 1-95, 1987.
- 15) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書，施工編，2008。
- 16) Dhir, R. K., Hewlett, P. C. and Chan, Y. N.: Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39, No. 141, pp. 183-195, 1987.
- 17) 国重典宏，田村隆弘，二宮純，森岡弘道：山口県における「コンクリートひび割れ抑制システム」について，コンクリート工学，Vol.49，No.5，pp.91-95，2011。
- 18) 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，pp.1385-1390，

- 2011.
- 19) 細田暁, 高橋智亮, Ha Ngoc Son: 外部拘束が高炉スラグ微粉末含有コンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響の AE 法による分析, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.290-297, 2011.
- 20) 土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書, 施工編, p.207, 2008.
- 21) Ha, N. S. and Hosoda, A.: Detection of microcracking in concrete subjected to elevated temperature at very early age by acoustic emission, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 201-211, 2010.
- 22) 栖原健太郎, 吉野亮悦, 平井吉彦, 細田暁: 膨張コンクリートを用いた底版拘束を受ける壁体の膨張・収縮挙動, 高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会シンポジウム論文集, 日本コンクリート工学会, pp.465-472, 2011.
- 23) 下田智也, 細田暁, 松田芳範, 小林薫: 含水率による表層の吸水抵抗性と表面含浸材の効果の分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1613-1618, 2010.
- 24) 松田聡美, 細田暁, 林和彦, 松田芳範: シラン系表面含浸材を塗布したコンクリートに対する飛来塩分の侵入に関する検討, 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.355-360, 2011.10.
- 25) 村井剛大, 細田暁, 林和彦, 松田芳範: マイクログ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.

(2012. 2. 16 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON EVALUATION METHOD OF COVERCRETE QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES BY SURFACE WATER ABSORPTION TEST

Kazuhiko HAYASHI and Akira HOSODA

Completely non-destructive technique of surface water absorption test (SWAT) for newly-constructed and existing concrete structures was developed by the authors. SWAT can measure absorbed water volume continuously and accurately immediately after filling up water. Through the measurement by SWAT in 10 minutes, several indicators for resistance against water absorption are obtained, and covercrete quality from the surface to some depth can be evaluated by these indicators.

In this research, the following three investigations were conducted; 1) tests for concretes with different constituent materials, W/C, and curing conditions without the effect of rainfall, 2) tests for concretes in different exposure environment, 3) measurement of actual structures.

SWAT could detect the effects of W/C and curing condition on covercrete quality for concretes with OPC and slag cement. It was proved that water absorption rate at 10 minutes obtained from actual structures could be considered to follow normal distribution. In order to establish inspection system with SWAT, a method to set threshold value and a way of judgment in inspection were proposed based on a statistical approach. As practical applications of SWAT, analyzing the adverse effect of microcrack on covercrete quality, and detecting the effects of expansive additive and silane type water repellent on improving covercrete quality were introduced.