

報告 傾斜面および水平面を有するコンクリート部材へ適用できる表面吸水試験法の開発

林 和彦*1・細田 暁*2・三宅 純平*3

要旨: 鉛直面に適用する既報の表面吸水試験法に加え、床版上面、桁下面、傾斜面などについても適用できる手法の開発を行った。まず、装置への注水方法を検討し、短時間で空気だまりを除去するための構造や注水圧の条件を明らかにした。次に、吸水挙動に及ぼす角度の影響はないことを室内実験で示した。その結果、様々な角度の傾斜面、床版の上下面等について吸水抵抗性を完全非破壊で測定することが可能となった。開発した装置を用いて、トンネルの二次覆工コンクリート、道路橋の上部構造（床版上面、張出し床版下面）の実構造物において計測した事例を報告した。

キーワード: 表面吸水試験, 床版上下面, 傾斜面, トンネル, 注水方法

1. はじめに

コンクリートの表層品質を非破壊で評価する非破壊試験手法の必要性が高まっている¹⁾。著者らは、コンクリートの各種劣化と水の浸入の関係が深いことに着目し、表面吸水試験法を開発した^{2),3)}。本手法はコンクリートの吸水抵抗性を定量化することができる。これは新設ならびに既設のコンクリート構造物の品質の定量把握だけでなく、断面補修部位の品質確認や、表面含浸材による表面保護法の施工管理等にも活用することができる。これまで、橋脚、橋台、ボックスカルバート壁面や壁高欄などのコンクリートの鉛直平面について数多くのデータを蓄積してきた^{2),3),4),5)}。

これら鉛直面以外にも、上部構造の桁下面・傾斜面、床版の上面、トンネル覆工コンクリートの傾斜面やクラウン部、等の角度のついた面で表面吸水試験を実施するニーズも高まる可能性がある。これらの部位では、試験装置の形状上、水頭をかけることや、空気だまりを作らずに水を短時間に注水することが技術的に難しく確立されていなかった。

特に、道路橋の床版は繰返し荷重により疲労劣化しやすい部位である上に、雨水や凍結防止剤を含む水の浸入により著しい劣化に至る事例が多数報告されており、適切な設計・施工により吸水抵抗性を高めておくことは重要である。

また、トンネルについては、二次覆工コンクリートは施工上、早期脱型されることが多い。部材厚さが小さく締め固め作業が困難であることや、逆打ちとなるクラウン部のコンクリートの充填は容易ではない。必ずしも密実なコンクリートが施工されなかった覆工コンクリート

においては、ひび割れが顕在化したり、寒冷地においては坑口付近の凍害劣化が見られたりするなど、品質確保へのニーズも高まってきている。

本研究においては、水平面の上面、天井面や桁下面である水平面の下面、トンネルやハンチなどの斜めの角度に適用できる手法を開発し、従来の鉛直面と同様に、短時間に気泡を含まずに注水を完了するシステムを構築した。角度の変化がコンクリートの吸水挙動に及ぼす影響についても検討した。開発した装置を用いて、トンネルの二次覆工コンクリート、道路橋の上部構造（床版上面、張出し床版下面）の実構造物に適用した事例も併せて報告する。

2. 既報の表面吸水試験の概要

著者らが開発した表面吸水試験^{2),3)}について、特に鉛直壁面に設置する装置を例に挙げ特徴と概要を示す。図-1

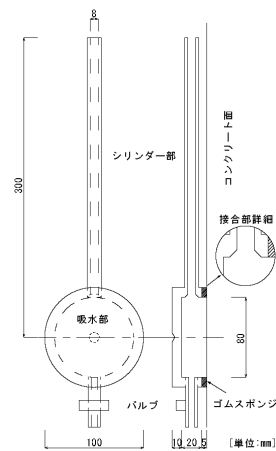


図-1 表面吸水試験装置の概要

*1 香川高等専門学校 建設環境工学科 准教授 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 香川高等専門学校 建設環境工学科 学生

に示すような内径80mmの円形の吸水カップをコンクリート面に設置し、短時間（10秒以内）で吸水カップおよびシリンダー内に注水を行い、コンクリートの時々刻々の吸水量を水位の減少として圧力センサーにより連続的に計測する。吸水総量だけでなく任意の時刻の吸水速度が得られ、吸水速度の時間変化から、かぶりコンクリートの品質を多角的に評価することが可能である³⁾。10分間の測定を標準とし、1回の測定から得られる指標の例は、(1)10分時点での表面吸水速度($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)、(2)注水完了後1秒時点での表面吸水速度 $a(\text{ml}/\text{m}^2/\text{s})$ 、(3)吸水速度の時間変化を表す指標 n 、である^{2),3),5)}。

吸水カップは、別途真空ポンプを利用した真空パッドで固定したフレームに反力を取り固定するため、完全に非破壊で設置および測定が可能である。

図-2に示す吸水カップの中心位置において、計測開始時には300mmの水頭が作用する。これは、激しい降雨時にスラブ上面に作用する圧力よりも若干大きい程度であり⁶⁾、地上のコンクリート構造物に作用しうるオーダーの水の圧力といえる。測定時にコンクリートへの吸水とともにシリンダー内の水が減少し、吸水カップの下部に設置した高感度圧力センサーで圧力変化を検知することで吸水した水の体積を測定することができる。測定する水の吸水速度は流速としては非常に小さいため、水の微小な体積変化を計測する際にはこのような測定手法に利点がある。吸水とともに水頭は減少するものの、100mm～500mmの範囲では、水頭が鉛直壁面での吸水挙動に影響を及ぼさないことを既に報告している⁴⁾。この程度の圧力下においては、吸水現象が卓越すると考えられる。

コンクリートが水に接した時点からコンクリートへの吸水が始まる。時間当たりの吸水量は吸水開始直後が大きいので、なるべく短時間で計測を開始することが重要である。本手法では10秒以内に注水を完了させ、注水開始から10秒時点を経算上の0秒として評価している。

10秒以内に注水を完了するために、図-2(1)に示す吸水カップ下方の注入口から注水する方法を採用した。カップの上からの注水では、内部の空気抜きをスムーズにできないため、10秒以内に注水を完了することができない。注水速度を大きくしすぎると、気泡を巻き込んでしまい、その気泡が抜けるまでの時間が余分にかかるため、適度な注水速度にする必要がある。現状では、図-2(1)に示すように長さ1000mmのチューブに接続し上方に設置した注水タンクから、高低差を利用した注水を行うことで適切な水の速度を確保している。この高低差を設ける理由は適切な水の速度を与えるためであり、注水タンクの水面までの約1000mmの水頭をコンクリート面に作用させるものではない。センサーによる計測結果から、注水中

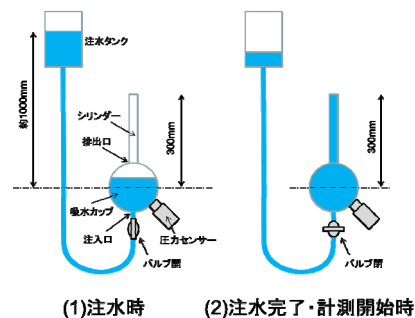


図-2 注水方法と排出部の形状

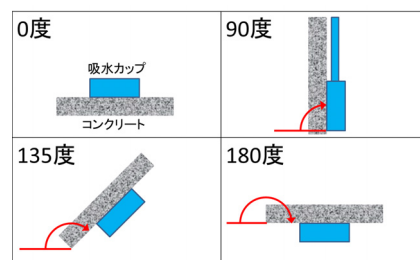


図-3 角度の定義

にはコンクリート面には1000mmの水頭は作用しておらず、吸水カップやシリンダー内の水位上昇に伴う300mm以下の水頭であった。水がシリンダー上部まで達した時点で吸水カップ下部のバルブを閉め、その時を注水完了とする。注水完了時には直径80mmのコンクリート面の中心において300mmの水頭が作用している（図-2(2)）。

図-1に示す吸水カップ内面上部の水平部の長さは5mm以下であり、その部位に気泡が留まらない程度にその長さを小さくした。シリンダーとの取付部には45度の傾斜をつけており、スムーズに気泡が排出されるようにしている。

3. 角度のついた場所へ適用する装置の開発

3.1 角度の定義

図-3に示すとおり水平とコンクリート面とのなす角度を、ここではコンクリート面の角度と定義する。床版上面などの水平面上面の角度を0度とし、鉛直壁面の角度が90度、床版の下面の角度が180度となる。トンネルの肩部を想定し、オーバーハングとなった傾斜面を代表して135度の角度も選定し、0度、90度、135度、180度の4つの角度について適用する方法を検討した。

3.2 開発の要件

第2章に示した90度のコンクリート面に適用する場合を基準として、それ以外の角度について装置を開発する場合の要件は、次の通りとなる。(1)初期の水頭を300mmかけ、その後も同程度の圧力を付与することで、圧力を90度の場合と同程度にすること、(2)圧力センサーを用いて吸水量を検知すること、(3)注水を10秒以内に完了させ

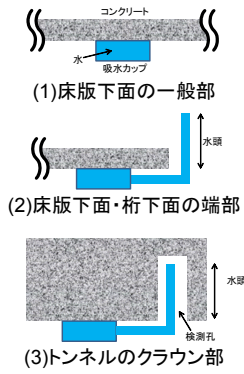


図-4 180度の場合の水頭の付与方法

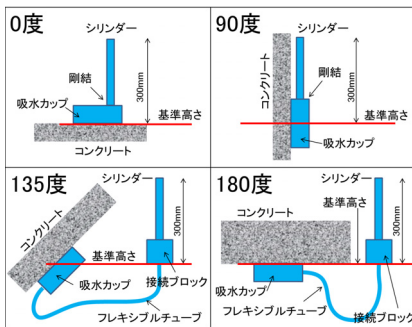


図-5 角度ごとの接続方法

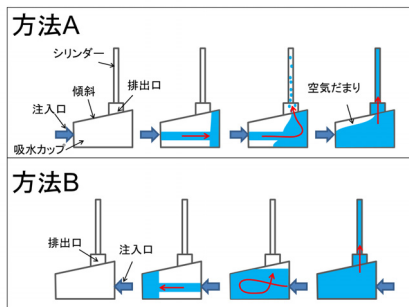


図-6 0度の場合の注水方法

ること、である。

現況では簡便性を考慮し、以下の通り吸水カップよりも上部に張り出した鉛直のシリンダーを用いて圧力を付与方法を採用した。一般に、特に床版下面やトンネルの頂上部である180度の場合においては、通常はコンクリート表面よりも上方の空間は用いることができない(図-4(1))。しかし、例えば桁下面や中空床版橋の床版下面の場合には、側方へ張り出せば延長したシリンダーを鉛直に設置することができるため、90度の場合とほぼ同様の手法で設置、計測が可能となる(図-4(2))。また、トンネルの建設時においては、出来形測定用のための検測孔が二次覆工コンクリートを貫通するようにクラウン部に存在し、その孔を利用してシリンダーを鉛直に設置して300mmの水頭の圧力を付与することができる(図-4(3))。これらの手法の実構造物への適用事例

は、第4章に紹介する。

以上を踏まえて、図-5のように形状を決定した。角度0度および90度は吸水カップとシリンダーが剛結され、シリンダーが鉛直方向に設置されている。135度および180度では、吸水カップと水頭をかけるシリンダーは剛結されておらず、フレキシブルチューブと接続ブロックを介して鉛直シリンダーが設置されている。コンクリートの中心位置とシリンダー上部との高さの差が300mmになり、0度および90度の場合と同じ水頭がかけられている。

3.3 注水方法の検討

(1) 0度の場合

床版上面など水平面の上面で計測する場合は、図-6に示すように吸水カップを下に伏せる形で設置し、その上面にシリンダーを鉛直に配置する。吸水カップ上面に若干の傾斜(角度0.02rad)をつけ、シリンダーが吸水カップ上面の傾斜の頂上に位置するように片側に寄せ、空気がスムーズに抜けるように設計している。

注水方法については、ゆっくりと注水する場合には、傾斜に応じて確実に空気抜きが行われ、注水を完了することができるが、10秒以内に完了することはできない。それを改善するために90度の場合と同様に注水タンクに高低差をつけて流速を大きくして注水する。図-6における方法Aのようにシリンダーと反対側から注水すると、向かい合う側面へ勢いよく水が到達し、そのまま近傍のシリンダー部へ水が流入する。一度シリンダー部へ水が流入すると吸水カップ内の空気が排出されなくなり空気だまりができてしまう。次に、方法Bに示すシリンダー部に近い側から注水すると、水は向かい合う壁面へ到達し、そこから徐々に水が満たされていき、傾斜に応じて空気抜きが図られながら、時間内にスムーズに水を充填することができた。

(2) 180度の場合

コンクリート部材に対して下面から吸水を行う角度180度の場合の手法について説明する。図-7における方法Aではコンクリート面および注入・排出口との位置関係から、コンクリート面に接する部分に空気が溜まり、吸水試験を行うことができない。この部分の空気を排出し、カップ内を完全に水で満たす必要がある。

そのために、細いチューブを吸水カップ内の上方に配置し、チューブの先端から空気を排出することとする。チューブの根元は図-5の180度の場合で示したとおりフレキシブルチューブ、接続ブロックを介して鉛直シリンダーに繋がっている。

図-7の方法Bにおいては、注入口側(図左側)から注水する際に、吸水カップ内のコンクリート面近傍に設置したチューブを先端が注入口側(図左側)になるように設けておき、チューブの反対側は排出口に接続される。

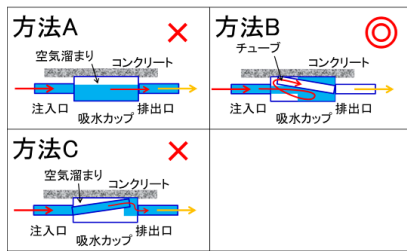


図-7 180度の場合の注水方法

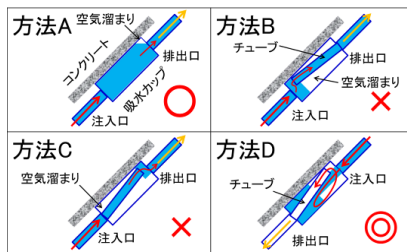


図-8 135度の場合の注水方法



図-9 注水装置の外観

注水した水が排出口側（図右側）の側面に到達し、排出口側（図右側）から順に水が満たされていきチューブを通じて空気および水が排出され、カップ内の全ての空間を水で満たすことができた。方法Cでは、チューブの先端からの水が排出口へ達してしまうため、空気だまりができてしまい、適切な方法ではないことがわかった。

(3) 135度の場合

角度135度のコンクリート面への注水方法を図-8に示す。下方から注水し上方へ排出するだけの方法Aでは、吸水カップ内の上方において空気だまりが残ってしまった。若干の空気だまりであれば許容はできるものの、後述する注水圧力が高すぎる場合には、気泡を巻き込みやすいことや、飛び跳ねた水が空気の抜けるより前に排出口へ達する場合があります、注水は安定しない。

角度180度の場合を参考にして、チューブを配置して効果的に空気を抜く方法を検討した。方法Bのように下方から注水すると、重力の影響で下方に水が溜まるため、その部位からチューブを通じて早期に水が排出されてしまい、それ以上の空気を抜くことができない。方法Dは方法Bと同じものを上下逆に設置したものであり、上方から注水した水は重力の影響で下方へ到達することで吸水カップ下方から順番に水が満たされていき、上方

に位置するチューブの先端から空気を排出し、完全に吸水カップを水で満たすことができた。方法Cでは180度の場合とチューブの先端からの水が排出口へ達してしまうため、空気だまりができ注水が完了できなかった。

3.4 注水圧力の検討

角度0度の場合には、図-2(1)に示す90度の場合と同様に、注水タンクと吸水カップとの高低差を利用した注水を行うことで十分な流速を確保することができる。

180度や135度の場合にはコンクリート面より上部に注水タンクを設置する空間が存在しない、または十分に確保できないことから、別途の注水装置により圧力をかけて注水する必要がある。図-9に示す加圧ポンプを含む注水装置を用いて注水することとする。加圧ポンプと注水タンクの間、空気のリザーブタンクを設けることで、注水時にタンク内の水が減少することで瞬間的に圧力が低下するのを防ぐ。タンク内の空気の圧力を変化させることで、注水速度を制御することができる。

図-9に示した注水装置（空気のリザーブタンク容量1L、ポンプ吐出能力12L/min）において、タンク内の空気の圧力を 0.1N/mm^2 、 0.05N/mm^2 、 0.01N/mm^2 の3段階に変化させて最適な圧力を検討した。 0.01N/mm^2 では注水速度が遅く、10秒以内に注水が完了しなかった。 0.1N/mm^2 、 0.05N/mm^2 では、10秒以内に空気を抜くことができた。ただし、 0.1N/mm^2 では速度が大きすぎて気泡を巻き込む傾向があったため、 0.05N/mm^2 を採用した。ただし、この値は注水装置の性能（リザーブタンク容量、ポンプ吐出能力）により異なる。

3.5 装置開発のまとめ

コンクリート面と水平面との角度が0度、90度、135度、180度の4つのケースを取り上げ、これらの角度に適用できる表面吸水試験手法を確立した。ただし180度に関しては、コンクリート表面よりも上の空間に張り出すことができることが必要である。よって大きな床版下面の中央部などは適用が困難であることや、箱桁内部の上床版下面などは横方向に移動することができないため、適用ができない。

結果として135度と180度の場合の装置は同一形状となっている。135度の方法についても、135度に限定されるわけではなく、それよりも大きい角度、小さい角度でも適用可能である。ゆえにこの方法によって90度から180度まで1つの形状で任意の角度について適用できる。

3.6 角度の変化が吸水挙動に及ぼす影響

測定する角度が変化するには、表面吸水試験結果に与える角度の影響について検討する必要がある、室内実験を行った。吸水特性に及ぼす影響因子としては、水セメント比やセメント種類等の配合条件、養生条件、微細ひび割れ等の表面状態などがある。本研究では橋梁の下

部構造等を想定し、水セメント比が55%、高炉セメントB種の条件で検討した。

一辺が300mmの正方形、高さ70mmの版状の供試体とし版の下面を測定に供した。1体の供試体には4つの測定点を設け、角度が0度、90度、135度、180度の条件を各1回計測した。供試体数は4体であり合計16点で測定した。コンクリート打込み後、20度、湿度約40%の室内にて養生し、材齢7日で脱型後、測定面の反対面と側面をシールして1方向の乾燥とした。測定時の材齢は40日である。

表面吸水速度（単位は $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ ）は単位時間、水が接するコンクリートの単位面積あたりの吸水量である³⁾⁴⁾。既報では表面吸水速度は注水完了からの時間の累乗関数で近似でき、測定時間10分間のデータを全て用いた近似計算により表面吸水速度を算出していた³⁾⁴⁾。今回測定中にセンサーを介して収録された吸水量のデータには、新たに開発した注水方法や装置の構造に伴うノイズ成分が多く含まれたため、累乗関数への近似計算ができなかった。今回はノイズの影響をできるだけ排除するために前述の累乗関数への近似を採用せずに、10分時点での表面吸水速度について10分の直前90秒のデータを用い、90秒間の平均的な速度として最小二乗法により計算した。

図-10に実験により得られた10分時点での表面吸水速度の測定結果と角度ごとの平均値を示す。平均値が最低値の90度（平均値0.242，標準偏差0.036）と最高値の180度（平均値0.324，標準偏差0.057）（全て単位は $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ ）について、平均値の差の検定を行った結果、優位な差は見られなかった。すなわち、設定した条件においては、測定面の角度が表面吸水試験に及ぼす影響は見られないことを統計的に確認した。今後、水セメント比、セメントの種類、微細ひび割れの影響等を含めて、角度の影響の詳細な分析を継続する予定である。ノイズが入らない注水方法の開発や、ノイズの除去方法は今後の課題としたい。

4. 実構造物への適用

開発した表面吸水試験方法を用いてトンネル二次覆工コンクリート、PC中空床版橋に適用した事例示す。

4.1 トンネル二次覆工コンクリート

建設中のトンネルの二次覆工コンクリートを測定した。図-11の横断方向断面図に示すとおり、逆打ちとなるクラウン部を含む90度、135度、180度の位置で測定した。

本トンネルの壁面の曲率半径はおよそ7000mmであり、吸水カップの幅100mmにおいてコンクリート面の凹凸は1mm以下であり、吸水カップのゴムスポンジの変形の範囲内であるため、コンクリートは曲面ではなく平面であると仮定しても問題なく、第3章に示した装置を用いて測定を行った。180度の位置においては、図-12に示す

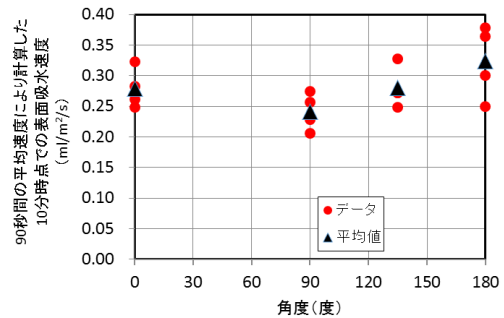


図-10 吸水挙動に及ぼす角度の影響

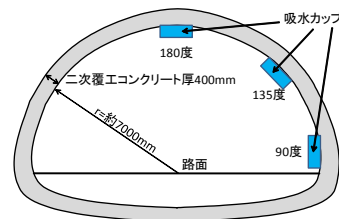


図-11 トンネルの横断方向断面図

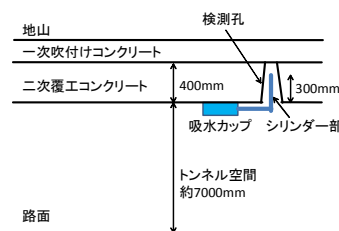


図-12 トンネルの縦断方向断面図

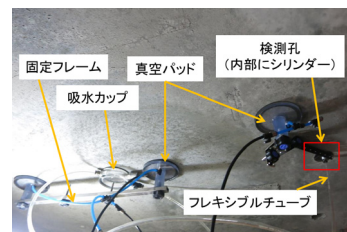


図-13 トンネルの180度の位置での測定状況

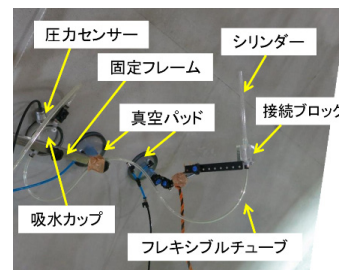


図-14 トンネルの135度の位置での測定状況

トンネル縦断方向断面図のように、検測孔が存在するため、その位置にフレキシブルチューブで接続したシリンダー部を設置し、コンクリート面に対して300mmの水頭を与えた。

180度の面に設置した状況を図-13に示す。円筒形の検



図-15 トンネルの90度の位置での測定状況



図-16 張出し床版下面での測定状況



図-17 床版上面での測定状況

測孔に、鉛直のシリンダーが挿入され、300mmの初期の水頭がコンクリート面に作用している。

次に、135度の場合を図-14に示す。傾斜面に吸水カップを設置し、離れた位置にシリンダーを鉛直に設置し300mmの初期の水頭をかけることができる。また、今回135度の方法として提示した方法は、135度以外の角度でも使用可能であり、90度から180度までトンネルの部位に応じて連続的に角度を変化させて計測が可能である。

90度の場合の測定状況を図-15に示す。前述のとおり、壁面の曲率半径は大きく、平面と仮定してそのまま固定することができた。

4.2 PC中空床版橋

建設中のPC中空床版橋の測定を行った。測定箇所は、張出し床版下面、床版上面とした。図-16は、張出し床版下面の測定の状況である。張出し床版は、構造物の断面形状および構造物についての横断勾配により、この部位は水平ではなく若干傾斜がついている。135度の方法を用いチューブの先端の部分がコンクリートの高い位置になるように設置することで計測ができた。図-17は0度の方法を用いた床版上面の測定の状況であり、防水層や舗装が施工される前のコンクリート面の測定ができた。

5. まとめ

コンクリート面と水平面との角度が90度の既存の方法に加え、0度、135度、180度の角度を取り上げ、それらの角度の測定面へ適用できる表面吸水試験法について検討を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) 短時間で気泡を巻き込まずに注水を行うための適切な手法を明らかにし、すべての角度において表面吸水試験が適用できるようになった。ただし180度の場合には上方に一部空間があり別途水頭が立てられる必要がある。したがって、箱桁内部の天井面などについては適用ができない。
- (2) 室内実験において水セメント比が55%の条件では吸水挙動に及ぼす角度の影響は見られなかった。
- (3) トンネル二次覆工コンクリートの比較的大きな曲率半径を有する鉛直壁面、傾斜面、クラウン部、および中空床版橋の床版上面、張出し床版下面に対して適用性を検討し、測定ができることを確認した。

謝辞：本研究の一部の実施には、2013年度 科学研究費補助金（研究課題番号25820202，研究代表者：林 和彦）の助成を受けた。角度のついた部位への適用手法の検討に関しては、香川高等専門学校学生の小橋賢人氏、鈴木貴大氏、藤井裕也氏らの協力を得た。関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物表層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)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
- 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
- 3) 林和彦，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方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013
- 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) 林和彦，Usman AKMAL，細田暁：埋込みセンサーを用いたコンクリートの表面吸水試験における水分移動の分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1789-1794，2013
- 6) 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