

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：56203

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820202

研究課題名(和文) 表面吸水試験を用いたコンクリート実構造物の品質評価手法の確立

研究課題名(英文) Development of methods for quality evaluation of actual concrete structures by surface water absorption test

研究代表者

林 和彦 (HAYASHI, Kazuhiko)

香川高等専門学校・建設環境工学科・准教授

研究者番号：20334633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：非破壊試験のひとつであるコンクリートの吸水抵抗性を計測する表面吸水試験は、養生の違いを敏感に検知する特徴があるが、適用箇所が限られていた。コンクリート構造物は、トンネル内、桁や床版下面のように、水平面に対して様々な角度を有しており、今回の技術開発によって、任意の角度に対して適用することが可能となった。検討の結果、角度の変化が表面吸水速度へ与える影響は小さいことがわかった。表面吸水速度と塩化物イオンの拡散係数の関係性を調べた結果、概ね相関があることが実験的に明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Surface water absorption test to measure the water absorption resistance of concrete is one of non-destructive testing methods. Though it is characterized to sensitively detect the difference in curing of concrete, applicable angle of concrete was limited. New surface water absorption test method was developed. It can be applied to all angle of concrete surface like inner surface of tunnels and bottom surface of slabs. As results, the surface water absorption rate was not affected by the change of application angle of concrete surface. It was experimentally clarified that the surface water absorption speed correlate roughly with the diffusion coefficients of chloride ions.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 非破壊試験 耐久性 表面吸水試験 適用角度 塩化物イオンの拡散係数

1. 研究開始当初の背景

ライフサイクルコストの最小化、長寿命化の観点から、コンクリート構造物の耐久性を確認する手法、すなわち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。

私は、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、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。

種々の水セメント比に対して、養生（型枠存置）期間を変化させた供試体の表面吸水試験結果より、養生期間が表層品質に与える影響を、この手法で敏感に検知することができる。また、実構造物を模擬した中規模供試体（水セメント比、養生方法、セメント種類が異なる）の建設後約 2 年時の中性化速度係数（促進ではない、実環境下）と、表面吸水試験結果（横軸）を比較した結果から、非常に高い相関が得られた。以上より、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がある。

表面吸水試験によって得られた指標（表面吸水速度など）がどのような耐久性の指標と関係があるのかについて、明らかにする必要がある。現状では養生や材料の変化について感度が高いことは分かっているが、耐久性指標との比較として、供試体の中性化速度との対応が供試体レベルで取れている程度である。吸水のメカニズムを明らかにし、さらに表面吸水試験結果が試験手法に依存しない固有透気係数や固有透水係数へ換算することができれば、耐久性設計 - 耐久性検証システムに組み込める可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、開発した表面吸水試験を用いて、コンクリート実構造物の品質を評価する手法を構築することを目標とする。具体的には次の事柄を達成目標とする。

(1) 角度の変化する場所への表面吸水試験を適用する技術の開発

現状では、鉛直面および水平面上面のみの開発が完了した。水平面下面（桁の下面、上床版、スラブ下面）への適用ができるようになれば、構造物のほぼすべての箇所に適用できる。注水時に水に圧力を付加したり、コンクリートと接する面に気泡が溜まらないような構造へ改良する。

(2) 吸水挙動へ及ぼす設置角度の影響

角度の変化したコンクリートに対して表面吸水試験を適用した結果、得られた結果の評価を行うためには、角度が吸水挙動の及ぼす影響を把握しておく必要がある。

(3) 表面吸水試験によって得られる表面吸水速度から耐久性指標への換算

表面吸水試験によって得られる指標が、どういった耐久性能に対応しているのか、につ

いて明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 角度の変化する場所への表面吸水試験を適用する技術の開発

既存の方法を参考にして、トンネル内のように鉛直面ではないコンクリート面に適用する装置を開発した。

(2) 吸水挙動の及ぼす角度の影響

これまで実績のある角度 90 度（鉛直面）に対して、角度が変化した場合に結果がどれだけ異なるかについて、まずは実験的に明らかにする。そのためには、品質が同じ供試体を準備する必要があるが、実際には全く同じ吸水特性をもつコンクリートを複数用意することが困難であるため、準備した材齢の経過したコンクリートに対して、事前に表面吸水試験を実施して、品質を把握した上で、ばらつきが出ないような組み合わせを検討し、統計的に検討した。

(3) 表面吸水試験によって得られる吸水係数から耐久性指標への換算

塩化物イオンの拡散係数とどれだけ相関を持つのかについて、表面吸水速度との対応関係を調べた。

4. 研究成果

(1) 角度のついた場所へ適用する装置の開発

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。

これまで開発が完了している 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。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、() 圧力センサーを用いて吸水量を検知すること、注水を 10 秒以内に完了させること、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する方法を採用した。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。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。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。

以上を踏まえて、図1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。

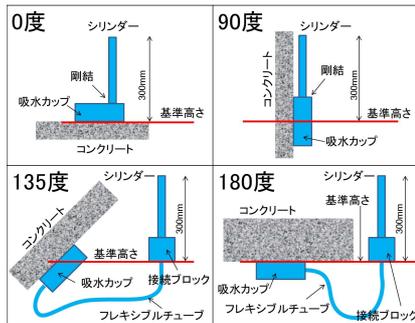


図1 角度ごとの接続方法

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2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2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。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。

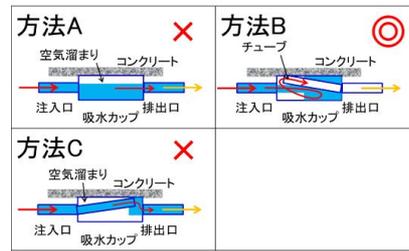


図2 180度の場合の注水方法

角度135度のコンクリート面への注水方法を図3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。

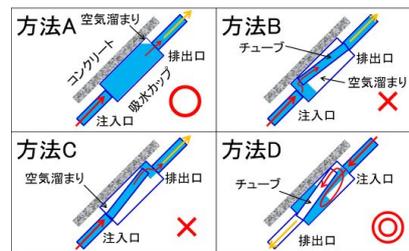


図3 135度の場合の注水方法

角度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。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。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/mm², 0.05N/mm², 0.01N/mm² の 3 段階に変化させて最適な圧力を検討した。0.01N/mm²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/mm², 0.05N/mm²では、10秒以内に空気を抜くことができた。ただし、0.1N/mm²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/mm²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。

コンクリート面と水平面との角度が 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必要がある。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。

(2)角度の変化が吸水挙動に及ぼす影響

供試体寸法は縦 300×横 300×厚さ 70mm の板状として、打込み時の底面を測定面とした。コンクリート打込み後、20 日、湿度 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 13 ヶ月である。使用セメントは高炉セメント B 種とした。w/c は 40%、55%、65%の 3 種類とした。供試体の数はそれぞれ 5 個である。各供試体に測点は 4 点ずつ設置した。

使用した供試体は初期品質自体の差や、若干の設置環境の違い等により各測点にコンクリートの品質のばらつきが考えられるため、そのばらつきを把握した上で、角度の影響を調べる必要がある。測定時の設置角度は全て 90 度とした。全ての測点で表面吸水試験を行い、各測点の 10 分時点での表面吸水速度と吸水総量を把握した。

図 4 に測定結果をそれぞれ示す。それぞれの測点において品質のばらつきがあることがわかる。図 4 より表面吸水速度と吸水総量には概ね比例関係があることがわかるため、設置角度を変化させた実験の測点の振り分けには 10 分間の吸水総量を使用した。設置角度変化実験は、1 回の実験で 5 種類の角度で行い、各角度 3 測点ずつ測定するため、測点が 15 点必要である。品質のばらつき調査実験の結果で吸水速度と吸水総量の値が平均値の値から近い 15 点を使用する測点に選定した。その中で吸水量が多い順に 5 点ずつグループ 1, 2, 3 とグループ分けを行い 5 種類

の角度を振り分けた。供試体は水分を与えない状態で室内に保管されており内部まで過度に乾燥していることが危惧されたため、一旦 1 日間水に浸漬させた上で、2 週間乾燥させることで、表面から内部にかけて湿度勾配を持たせた。よって、以後の設置角度変化実験では、コンクリートの含水率が若干上昇しているため、特に w/c=40 では 10 分間の吸水総量が大きく低下している。

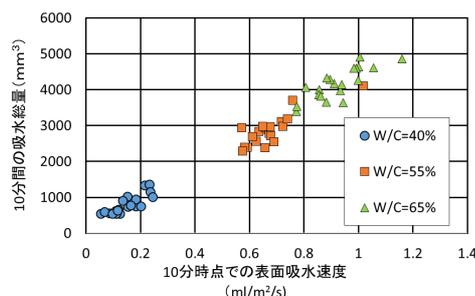


図 4 全測点の表面吸水試験結果(角度 90 度)

本実験に使用する測定角度を 0°, 45°, 90°, 135°, 180° の 5 種類に定めた。さらに w/c ごとに 15 点の測点を、十分な乾燥期間とみなせる 10 日以上あけて 2 回の計 30 回測定を行った。1 回目と 2 回目の測定ではグループ内で測定角度を変えた。

測定に使用した測点にはグループごとに初期での吸水総量に若干差がある。グループ 1 と 3 には w/c=65%では 689.9mm³, w/c=55%では 506.4mm³, w/c=40%では 375.7mm³の差がある。この差がある状態でデータの比較を行うことは適切ではないため各グループの差を考慮して正規化を行った。結果の一例として、w/c=55%の測定結果を図 5 に示す。

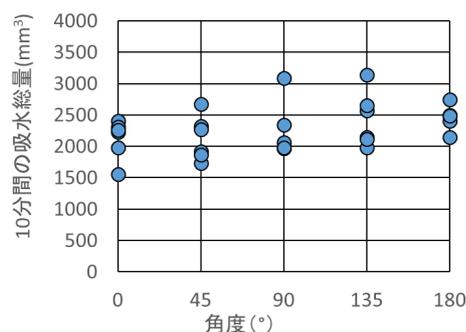


図 5 w/c=55%の測定結果

設置角度の影響がないことを示すために、平均値の差の検定を行った。検定には t 検定を用いた。t 検定とはいくつかのグループの平均の差が偶然的な誤差の範囲にあるか判断する検定である。観察された差が偶然で起こった確率である P 値が優意水準 5%を超えているとき有意な差はなく、見かけの差は誤差の範囲であるといえる。基準となる 90 度の吸水総量とその他の角度の吸水総量についてそれぞれ検定を行った。その結果、全ての w/c で P 値が有意水準を超えた。よって、

平均値で 90 度の吸水総量とその他の角度での吸水総量には優位な差はないといえる。

表面吸水試験における吸水現象はコンクリートの毛細管現象と透水現象によって成り立っている。設置角度によって水の吸水方向に対する重力の作用方向が変化すると、透水現象に影響し、コンクリート面における吸水挙動が変化する可能性もあると考えられるが、設置角度による影響よりもコンクリートの毛細管現象による力のほうが支配的であるため設置角度による影響がないと考えられる。

(3)表面吸水試験によって得られる表面吸水速度から耐久性指標への換算

本実験に使用した供試体は、w/c が 40% から 60%までである。予め表面吸水試験を実施したこれらの供試体に対して、10%の濃度の塩化ナトリウム水溶液に浸漬させた。

蛍光 X 線装置で分析した各切断深さの塩化物濃度の値、浸漬日数、各測点の切断深さの数値を用いてフィックの第二法則より、塩化物イオンの拡散係数を計算した。

比較した結果を図 6 に示す。図 6 を見ると全体的に右上がりの結果となり、概ね相関があることが分かった。

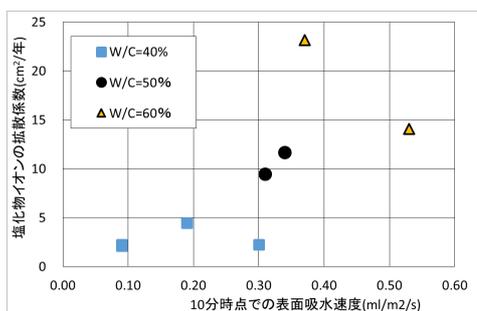


図 6 表面吸水速度と拡散係数の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1) 原亮太, 林和彦, 増尾敬, 井上翼: 表面吸水試験の適用角度がコンクリートの吸水挙動に及ぼす影響, 土木学会四国支部第 21 回技術研究発表会講演概要集, 査読無, 2015 年 5 月

2) A. Hosoda, K. Hayashi: Evaluation of covercrete quality by surface water absorption test, Forth international symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE2014), 査読無, Nov. 2014

3) 伊藤忠彦, 細田暁, 林和彦, 西尾隆, 八巻大介: 覆工コンクリート品質向上の取組みと表層品質の評価, トンネル工学報告集, pp.1-9, 査読有, 2014 年 12 月

4) 林和彦, 小橋賢人: コンクリートのブリーディングと水分逸散が表層品質に及ぼす影響, 第 14 回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 査読有, 2014 年 10 月

5) 細田暁, 二宮純, 田村隆弘, 林和彦: ひび割れ抑制システムによるコンクリート構造物のひび割れ低減と表層品質の向上, 土木学会論文集 E2, 査読有, Vol.70, No.4, pp.336-355, 2014 年

6) 伊藤忠彦, 小滝恵三, 児玉直幸, 林和彦, 八巻大介, 細田暁: 覆工コンクリートの表層品質評価手法の確立と品質向上への取組み(その 2) -表面吸水試験(SWAT)-, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 査読無, VI-691, pp.1381-1382, 2014 年 9 月

7) 林和彦, 細田暁, 三宅純平: 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, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, No.1, pp.2170-2175, 2014 年 7 月

8) 三宅純平, 林和彦: 表面吸水試験の設置角度の変化によるコンクリートの吸水挙動への影響, 土木学会四国支部第 20 回技術研究発表会講演概要集, 査読無, V-6, pp.255-256, 2014 年 5 月

〔学会発表〕(計 7 件)

1) 原亮太, 林和彦, 増尾敬, 井上翼: 表面吸水試験の適用角度がコンクリートの吸水挙動に及ぼす影響, 土木学会四国支部第 21 回技術研究発表会講演概要集, 2015 年 5 月

2) A. Hosoda, K. Hayashi: Evaluation of covercrete quality by surface water absorption test, Forth international symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE2014), Nov. 2014

3) 伊藤忠彦, 細田暁, 林和彦, 西尾隆, 八巻大介: 覆工コンクリート品質向上の取組みと表層品質の評価, トンネル工学報告集, pp.1-9, 2014 年 12 月

4) 林和彦, 小橋賢人: コンクリートのブリーディングと水分逸散が表層品質に及ぼす影響, 第 14 回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 2014 年 10 月

5) 伊藤忠彦, 小滝恵三, 児玉直幸, 林和彦, 八巻大介, 細田暁: 覆工コンクリートの表層品質評価手法の確立と品質向上への取組み(その 2) -表面吸水試験(SWAT)-, 土木学会第 69 回年次学術講演会, VI-691, pp.1381-1382, 2014 年 9 月

6) 林和彦, 細田暁, 三宅純平: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2170-2175, 2014 年 7 月

7) 三宅純平, 林和彦: 表面吸水試験の設置角度の変化によるコンクリートの吸水挙動への影響, 土木学会四国支部第 20 回技術研究発表会講演概要集, V-6, pp.255-256, 2014 年 5 月

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：吸水試験装置

発明者：林 和彦

権利者：国立高等専門学校機構

種類：特許

番号：特願 2014-123377

出願年月日：2014 年 6 月 16 日

国内外の別：日本国内

取得状況（計 0 件）

6．研究組織

(1)研究代表者

林 和彦（HAYASHI, Kazuhiko）

香川高等専門学校・建設環境工学科・准教

授

研究者番号：20334633