

特集：材料技術

散水試験によるコンクリートの表層品質評価 におよぼす影響要因

西尾 壮平*

Influencing Factors of Water Intentional Spraying Test for the On-site Evaluation of Cover-concrete Quality

Sohei NISHIO

Cover-concrete plays a crucial role in preventing reinforcing bars from corrosion. From the viewpoint of improvement in the durability of reinforced concrete structures, simple on-site testing methods for evaluating the cover-concrete quality become increasingly important. Therefore, we have developed a simple testing method, named Water Intentional Spraying Test (WIST), with especial emphasis on the applicability to on-site inspection. In this paper, we describe the experimental results of the factors that influence the quality evaluation by the WIST and propose a new measurement procedure that applies the WIST to the horizontal plane.

キーワード：コンクリート，物質透過抵抗性，耐久性，表層品質，非破壊試験，散水試験

1. はじめに

主要な建設材料のひとつであるコンクリートは、流動性のある状態で製造、運搬され、型枠内に流し込まれる形で使用される。その後、時間の経過とともに硬化して強度を発現したコンクリートは、鉄道高架橋のような鉄筋コンクリート（RC）構造物において、構造面で圧縮力を負担する役割を担うと同時に、内部の鉄筋を保護するバリアとなる。鉄筋を保護する部分のコンクリートをかぶりコンクリートと呼び、かぶりコンクリートには、所定の強度のほか、鉄筋への劣化因子の到達を遮るために一定の厚みと高い物質透過抵抗性が求められる。ここで、図1に示すようなコンクリートの外観上の不具合¹⁾が見られる部位では物質透過抵抗性が劣ることは明白である。これに対して、かぶりコンクリートの外観上の不具合が見られない部位における、水や酸素といった物質の透過に対する抵抗性を、本報告において「表層品質」と表記する。

かぶりコンクリートの厚みが同等の場合、表層品質の優れた構造物ほど鉄筋腐食に対して高耐久であると考えることができる。かぶりコンクリートの厚みは、建設時にコンクリートを流し込む型枠と鉄筋の位置関係で決まるため、基本的にコンクリートの硬化後には変化しない。それに対して、かぶりコンクリートの物質透過抵抗性、すなわち表層品質は、同一の材料を用いた場合でもコンクリートの施工時および施工後の条件によって変化する。例えば、硬化して間もないコンクリートを乾燥雰囲気

中に放置すると、表面からの蒸発によってコンクリートの緻密化に資する水分が失われるため、表層品質は顕著に低下する。一方、図2に示すように、例えば表層透気係数のような表層品質の非破壊評価値の高低あるいは優劣を、単純な目視で判別することは一般に困難である。

このように、RC構造物の耐久性に影響があり、かつ変化する因子である表層品質に関して、著者らは実構造物の表層品質を非破壊で手軽に評価する手法として散水試験A法（以下、散水試験と略記する。）を開発した²⁾。

散水試験とは、乾燥したコンクリート表面に少量の水を散布し、コンクリート表層の吸水性状を測定者の目視で把握し、表層品質を評価する手法である。物質透過抵抗性の対象物質は水となる。散水試験には、実構造物の調査等に対する適用性の観点から、外部電源が不要で省力および省スペースという特長がある。これらの特長を活かして、散水試験は専門家による調査や研究^{3)~7)}だけでなく、鉄道事業者や自治体等で建設工事の発注、施工管理等を担当する部門で、担当者自らが行う調査等^{8)~10)}に



図1 外観上の明らかな不具合の例¹⁾

* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

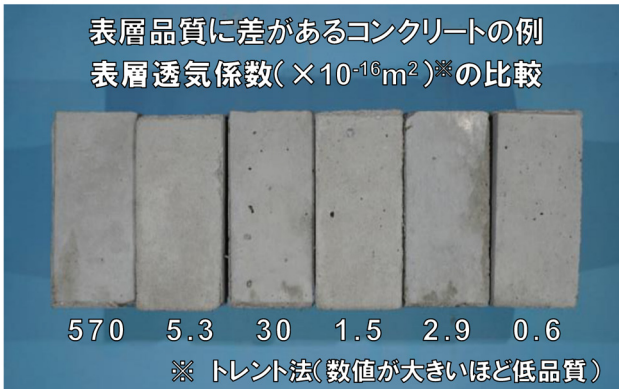


図2 外観上は不明な表層品質の差異

使用されている。

本報告では、散水試験を実構造物に適用する際の影響要因についての検討結果を整理するとともに、散水試験で使用する測定器具に求められる性能について報告する。また、従来の散水試験では測定対象を壁や柱のような鉛直部材の側面としていたが、新たに水平部材の上下面への適用方法を提案したので合わせて報告する。

2. 散水試験によるコンクリート表層品質評価の概要

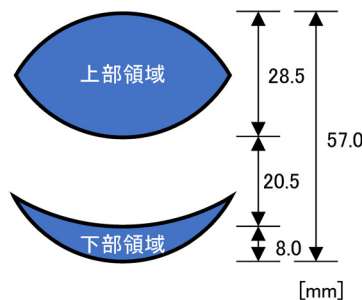
2.1 散水試験の概要

図3に、散水試験の概要を示す。散水試験では手動のスプレー器具による水の散布を同一箇所でも1分ごとに繰り返し行う。水の散布量はスプレー器具の1回の操作あたり約0.3gである。この水は直径約60mmの円形の範囲に噴霧され、面積当たりの散水量は約0.1mg/mm²となる。コンクリート表面における水の散布形状は、目視による水の流下の判定を確実にするため、上下に分割された特徴的な意匠となっている(図3(b))。

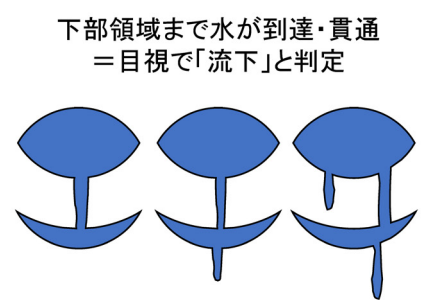
散水試験では、測定者は目視で散水後の水が流下(図3(c)に示すように下部領域に水が到達・貫通)した時点で測定を終了し、それまでの散水回数で評価を行う。



(a) 測定状況(水の流下後)



(b) 水の散布形状



(c) 水の流下が発生した状況の例

図3 散水試験の概要

吸水しにくい緻密なコンクリートほど少ない散水回数で水が流下するため、早い段階で測定が終了する。例えば、1, 2回の散水で測定が終了した場合、所要時間は2分程度となる。一方、緻密さに劣るコンクリートの場合は水が吸い込まれ続けるため、測定の終了までの繰返し回数が増加し、所要時間はそれに応じて増大する。図4に、実構造物と同時に作製したRC試験体等での検証事例⁷⁾における、散水回数と表層透気係数の関係を示す。低品質なほど散水回数および表層透気係数が増加することがわかる。

実際の測定においては、散水の繰返し時間間隔の1分間を単なる待機時間とするのではなく、近傍箇所での測定を5秒刻みなどでずらして同時進行することで、10箇所程度を一度に測定することが可能である。

2.2 活用事例・応用事例

鉄道事業者での活用事例として、耐久性に優れたRC構造物を構築するために、二期施工の建設工事において一期目工事の品質チェックと二期目工事の品質向上に散水試験を活用した事例がある^{9) 10)}。同事例では、表層品質の向上を目的としたPDCAサイクルにおけるC(チェック機能)を担う非破壊評価手法の一つとして散水試験が採用された。一期目の工事で構築された構造物の表層品質の評価結果を参考に二期目の工事における施工方法の改善が図られた。これにより、ラーメン高架橋の柱において表層品質の向上が見られたことが報告されている^{9) 10)}。なお、同報告において散水試験は日射や降雨等の影響が少ない部位で実施されたが、測定時期によって測定結果が変動したことが指摘されている。研究者らによる散水試験の応用事例として、Jnyan Shiら^{11) 12)}は補修材による補修効果の定量的評価や蒸気養生コンクリートにおける熱影響の定量的評価において散水試験が有効であることを報告している。これらの活用事例、応用事例から示唆されるように、表層品質の相対的な優劣は散水試験で定量的に評価できるが、絶対的評価の基準値を定めるためには測定時の環境条件等による影響の度合いを定量化しておく必要がある。

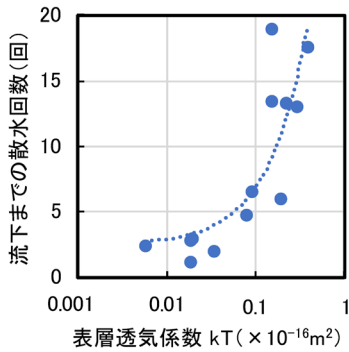


図4 散水回数と表層透気係数の関係⁷⁾

3. 実構造物における測定時の影響要因の検討

3.1 日射の影響

厚さが400mmで幅と高さが1200mmの壁状のRC試験体により、日射の影響を検証した。表1に、壁状RC試験体と測定の概要を示す。壁状RC試験体には降雨の影響を避けるため、コンクリートの打込み直後に仮設の屋根を設置した。測定は、試験体の高さ600mmの位置ではほぼ等間隔に8箇所を選定し、材齢約2箇月で行った。図5に、日射が散水試験に及ぼす影響を示す。日射を受ける面で散水回数の平均値は約40%増加した。なお、測定時の表面温度は約10℃でほぼ同程度の条件であったが、日射を受ける箇所では表面含水率が約0.5%低下していたこと、またトレント試験による表層透気係数の平均値は約10倍(1グレード)大きくなっていたことを確認している。このように、測定時の外気温やコンクリートの表面温度が同等の条件下でも、日射を受ける面ではコンクリートの乾燥によって散水回数が増加する点に留意する必要がある。

表1 壁状RC試験体の概要

コンクリートの特徴	レディーミクストコンクリート、呼び強度24MPa、最大粗骨材径20mm、スランプ8cm、普通セメント、W/C=57%
寸法・形状	1200×1200×400mm・壁状
脱型・養生条件	材齢7日脱型、屋外気中曝露(屋根あり)
測定条件	材齢約2箇月、屋外(約10℃、約30%RH)

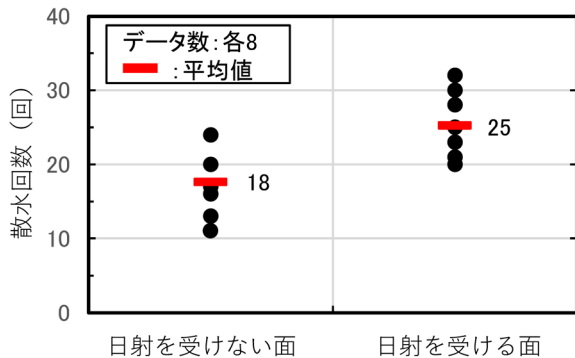


図5 日射の影響

3.2 温度の影響

温度の影響を検証するために、あらかじめ散水試験を実施して散水回数に差が見られた板状のモルタル9体を供試体として室内試験を行った。供試体寸法は約10×100×100mmである。表2に、温度影響の試験条件を示す。モルタル供試体および使用する水の温度を恒温槽で調整し、各試験条件での測定を同一の供試体で3回実施した。供試体の含水状態は測定前の重量に基づいて同等であるものと見なした。図6に、各温度条件における散水回数の比率を示す。水の流下性状が水温により変化し、5℃の冷水では20℃の標準条件に比べて散水回数が10%程度増加し、40℃の温水では散水回数が30%以上減少した。また、供試体と水温が共に高温の条件では、水が流下しやすくなった一方で含水率の低下による影響が同時に作用し、散水回数は20℃の標準条件に対して10%程度の増加となった。供試体と水温を共に5℃の低温とした条件で影響が最も大きく、散水回数は平均で30%程度増加した。これらのことから、流下までの散水回数に及ぼす温度の影響は、水の流下性状の変化と、コンクリートの含水状態に依存する吸水性状の変化の両方

表2 温度の影響に関する検証実験の試験条件

標準(20℃)	供試体:20℃, 水:20℃, 環境:20℃・60%RH
低温(5℃)	供試体:5℃, 水:5℃, 環境:20℃・60%RH
高温(40℃)	供試体:40℃, 水:40℃, 環境:40℃・20%RH
冷水(5℃)	供試体:20℃, 水:5℃, 環境:20℃・60%RH
温水(40℃)	供試体:20℃, 水:40℃, 環境:20℃・60%RH

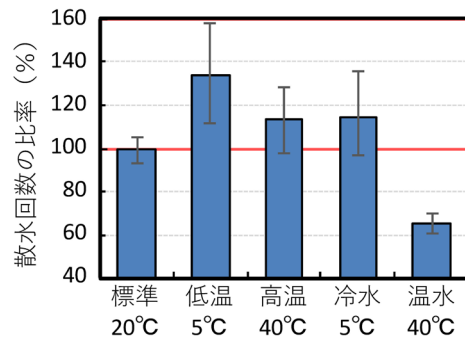


図6 温度の影響¹⁾

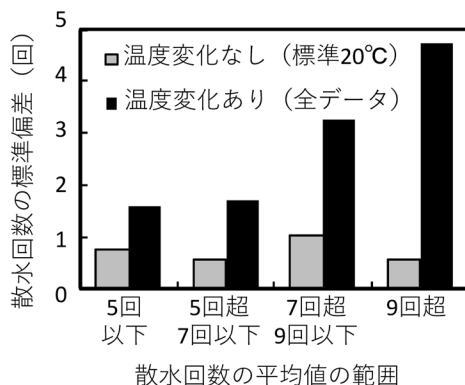


図7 温度影響によるばらつき¹⁾

が影響することが示唆される。続いて、温度条件による散水回数の変動について、散水回数の平均値の範囲と標準偏差に関する分析を行った。図7に分析結果を示す。温度による散水回数の変動は、散水回数の平均値が大きい場合に、つまり測定対象の表層品質が劣るほど大きくなった。5℃～40℃の範囲における温度の影響による散水回数の変動係数は30%程度となった。なお、低温時における散水回数の増加を抑制するためには冷水の使用を避けることが有効である。

3.3 コンクリートの含水状態の影響

散水試験の測定結果はコンクリートの含水状態に変化するが、コンクリートの含水量は練混ぜの直後から常に変動し、屋外環境下で定常状態となることはない。また、コンクリートの表面および内部方向における水分の分布状況も一様ではない。図8に、市販の接触式含水率計による表面含水率のモニタリング例¹³⁾を示す。市販の2種類の機種を用いて、屋外環境下に曝露した1m³規模の試験体の表面含水率を脱型直後から断続的に計測した結果である。機種や雨がかりの有無で表面含水率の計測値に差異が見られることがわかる。屋外環境下の実構造物においては、表層品質の評価値の補正を行うための指標として市販機器による表面含水率の計測値を活用することは難しいと考えられる。

一方で、コンクリートの打込み直後においては、水和の進行や表面からの逸散により、コンクリートの含水量は時間の経過と共に単調に減少していくと考えられる。つまり、外部からの水分供給がなければ、コンクリートは若材齢であるほど相対的に含水量が多い状態であると見なすことができる。そこで、脱型直後からの含水量の経時変化と散水回数の関係性を実験的に検証した。

表3に、実験で使用した角柱供試体および各種測定の概要を示す。角柱供試体は表層品質の差を与えるために脱型材齢を1・7・26日の3水準に設定した。脱型直後の含水状態と散水回数の経時変化を調べるために、脱型後の経過日数が1・2・4・7・14日の5回の時期に試験体の重量変化を計測したのち、供試体の4側面の中心付近において散水試験を実施した。散水回数は10回を上限とし、上限に達した場合は散水回数を11とした。図

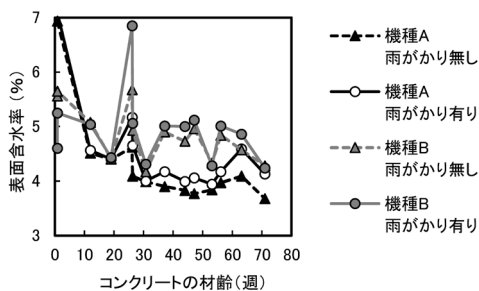


図8 表面含水率のモニタリング例¹³⁾

表3 角柱供試体および測定の概要

コンクリートの特徴	レディーミクストコンクリート、呼び強度24MPa、最大粗骨材径20mm、スランブ10cm、空気量4.7%、普通セメント、W/C=57%
寸法と数量	W150×D150×H200mm、養生期間を3水準（1日、7日、26日）として各8体
散水試験の測定条件	散水量：約0.06mg/mm ² /回、散水繰返し時間間隔：60秒、測定面の方向：鉛直面
環境条件	恒温恒湿試験室内（20℃、60%RH）

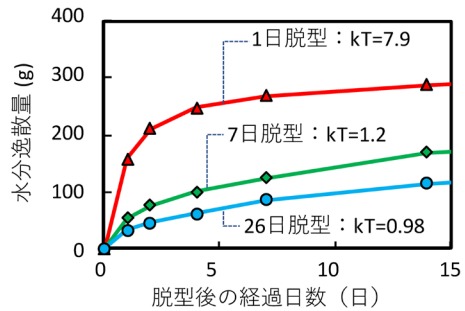


図9 水分逸散量の経時変化¹⁾

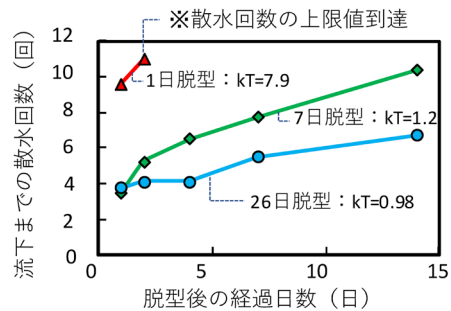


図10 散水回数の経時変化¹⁾

9および図10に、水分逸散量と散水回数の経時変化¹⁾を示す。図中には供試体の脱型時期、材齢91日でトレント法により取得した表層透気係数kTの測定値を付記した。脱型時期が早い供試体ほど水分逸散が速く、水分逸散量が大きい。また、散水回数は日数の経過に伴う水分逸散の進行によって増加した。散水回数は10回を上限として打ち切られているものの、測定時期が同じであれば脱型時期が早く表層品質の劣るコンクリートほど散水回数が大きくなることが確認された。これらのことから、コンクリートの表層品質が劣るほど水分の出入りが容易であるため、含水状態が変動しやすく、散水回数の変動も大きくなることが示唆される。

4. 散水量の変動要因の検証

4.1 散水器具の影響

散水試験では、測定部位の面積当たりの散水量が散水試験の測定結果に大きく影響する。散水量は使用する器具に依存するため、一定の精度を確保するためには所定の散水性能を有することが確認された適切な器具を使用する必要がある。著者らは、散水量の異なるスプレー

器具による測定結果を比較し、散水量が $0.03 \sim 0.12\text{mg}/\text{mm}^2$ の範囲内では、散水試験による水の流下までの散水回数と、スプレー器具の操作1回あたりの散水量を乗じた値である流下発生時までの総散水量は、スプレー器具によらずおおむね同等となることを明らかにしている⁵⁾。

4.2 手動での散水による個人差の影響

散水試験で使用するスプレー器具は手動式であるため、測定者の個人差が散水量の差として現れる。図11は、同一のスプレー器具による散水量を複数の測定者で比較した結果である。実験の対象は、熟練者1名、年代の異なる散水試験の未経験者3名とし、熟練者による10分程度の技術指導の効果についても検証した。その結果、未経験者では散水量が大幅に増大する傾向が見られること、10分程度の技術指導で個人間での散水量のばらつきが低減し、かつ熟練者とはほぼ同等の散水量を再現できることが確認された。

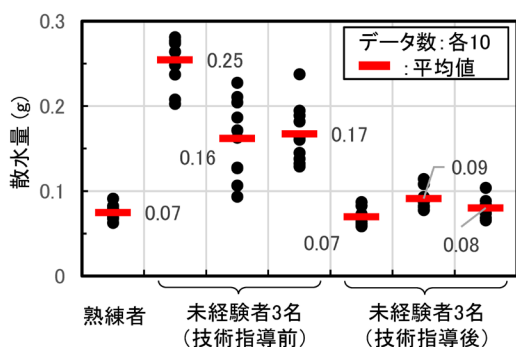


図11 散水量の個人差

5. 水平部材への適用方法

これまでに述べた散水試験では、水の流れ出す状況を捉える必要があるため、水がほとんど流動しない水平な面に適用することは不可能であった。しかしながら、例えば高架橋のように構造物の直下に利用可能な空間を有する構造物においては、第三者影響等を考慮すると部材下面の表層品質が重要となる。そこで、散水試験を水平面に適用する方法を実験的に検討した。

実験では、測定の対象をコンクリート試験体の底面における表層品質とした。なお、試験体の上面（打込み面）に対しても以下に述べるものと同様の方法が適用でき、表層品質の評価が可能であることを明らかにしている¹⁴⁾。供試体は、底面が $200 \times 200\text{mm}$ で高さ 100mm の扁平な形状で、レディーミクストコンクリートと合板型枠で作製した。コンクリートの特徴は、呼び強度 30MPa 、スランプ 14cm 、空気量 5.2% 、普通ポルトランドセメント、単位水量 $167\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比 0.5 とし、実際に建設された鉄道高架橋の仕様を反映した。実験では上述のコンクリート（Nシリーズ）だけでなく、

打込み直前に約 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 加水して品質を低下させたコンクリート（Lシリーズ）も用意した。さらに、硬化後のコンクリート品質に差をつけるために、脱型材齢を1日（1D）と7日（7D）の2段階に設定した。脱型後の試験体は、 20°C 、 $60\% \text{RH}$ に制御された恒温恒湿試験室内で養生し、散水試験を脱型4日後に実施した。また、コンクリートの圧縮強度を把握するために、円柱供試体による圧縮試験を材齢28日で実施した。散水試験および圧縮試験の試験体は試験条件ごとにそれぞれ3体とした。

水平面に対する散水試験の実験では、コンクリート試験体の底面に対して下方から上向きに純水を噴霧した。水の噴霧方法は、1分に1回、合計で3回とした。1回の散水量は約 $0.06\text{mg}/\text{mm}^2$ である。水の噴霧の直後に、コンクリート表面で水が残っている場所では光沢が増加する。このような散水後の光沢は、吸水によって徐々に消失する。光沢の有無と消失は目視で確認できる。実験では、水の噴霧が完了してから、光沢の保持時間を目視とタイマーにより確認した。光沢保持時間は5秒刻みで取得した。

表4に、圧縮強度、底面における光沢保持時間の測定結果を示す。圧縮強度は早期脱型により23%減少した。また、加水による圧縮強度の減少率は27%となった。光沢保持時間は早期脱型のシリーズで著しく減少した。測定値の変動係数は、標準的なコンクリートの場合には約10%となっ

表4 実験結果

シリーズ	N-7D	N-1D	L-7D	L-1D	
圧縮強度 (MPa)	31.8 (100%)	24.6 (77.3%)	23.3 (73.2%)	16.5 (51.8%)	
光沢保持時間	データ数	6	6	6	6
	最小値	600秒	30秒	260秒	5秒
	最大値	760秒	50秒	410秒	40秒
	平均値	676秒	41秒	345秒	18秒
	標準偏差	66秒	8秒	51秒	17秒
変動係数	9.7%	19.6%	14.7%	92.4%	

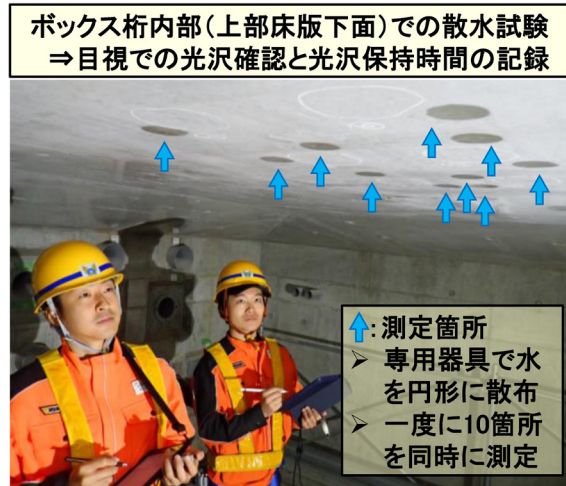


図12 床版下面での散水試験の試行状況

たが、早期脱型の試験ケース「L-ID」では増大した。

以上のように、目視で取得する散水後の光沢保持時間は、低品質のコンクリートで数値が減少し、特に、早期脱型による光沢保持時間の減少が顕著であることが確認された。室内試験の結果を受け、鉄道事業者の協力を得て建設工事が進行中の構造物における測定を試行した。図12に、測定状況を示す。散水試験の熟練者1名と未経験者2名による光沢保持時間を比較した結果、約90%の測定結果が10秒前後の差異に収まることを確認した。

室内試験による検討および実構造物での試行の結果が良好であったことから、コンクリート表層品質に関するシンプルな非破壊試験手法として、光沢保持時間を評価指標とした散水試験を新たに提案している。光沢保持時間による表層品質の評価における影響要因に対する検証は十分でないものの、各種の要因による数値変動の影響は、著しく表層品質の劣るコンクリート、あるいはその対極にある表層品質に優れたコンクリートの判別においての支障とはならないと考えてよい。散水試験による品質評価は、耐久性に優れた構造物の建設や構造物調査の労力低減に貢献できると思われる。

なお、光沢保持時間の測定は、原理上、すべての方向の測定面に適用できると考えられる。しかしながら、測定面の傾斜角度が異なる条件での比較等を行っていないため、データの蓄積と合わせて今後の検討課題としたい。

6. まとめ

本報告では、少量の散水を行い、目視でコンクリート構造物の表層品質を評価する散水試験について、試験方法と活用事例を概説するとともに、実構造物への適用に際しての影響要因に関する知見を整理した。また、従来は柱の側面のような鉛直面だけを測定対象としていた散水試験を水平面に適用する方法を提案した。本報告に整理した知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 測定時の外気温やコンクリートの表面温度が同等の条件下でも、日射を受ける面ではコンクリートの乾燥によって流下までの散水回数が増加する。
- (2) 5℃～40℃の範囲における温度の影響による散水回数の変動係数は30%程度となった。
- (3) コンクリートの含水率の影響で流下までの散水回数は増減するが、実構造物でコンクリートの含水率を正確に捉えることが難しいため、散水回数の数値補正は困難である。
- (4) 散水試験の測定結果におよぼす測定時の環境条件の影響は、測定対象のコンクリートの表層品質が劣るほど大きくなる。
- (5) 散水試験の測定者による個人差の影響は、手動式器具の使用に関する技術的な指導で軽減できる。

- (6) 水平面に適用する散水試験の評価指標として、散水後の水分の存在による光沢の保持状況を目視で観察して取得できる「光沢保持時間」を用いる方法を考案し、表層品質の評価に適用できることを確認した。

文 献

- 1) 西尾壮平：散水試験によるコンクリート構造物の表層品質評価、鉄道施設協会誌、Vol.57, No.12, pp.36-39, 2019
- 2) 西尾壮平：散水によるコンクリート表層品質の簡易評価、鉄道総研報告、Vol.30, No.6, pp.5-10, 2016
- 3) K. Nakarai et al.: Long-term permeability measurements on site-cast concrete box culverts, Constr. Build. Mater., 198, pp.777-785, 2019.
- 4) M. H. Nguyen, K. Nakarai, Y. Kubori, S. Nishio: Validation of simple nondestructive method for evaluation of cover concrete quality, Constr. Build. Mater., 201, pp.430-438, 2019.
- 5) M. H. Nguyen, K. Nakarai, S. Nishio: Durability index for quality classification of cover concrete based on water intentional spraying tests, Cement and Concrete Composites. 104, 103355, 2019.
- 6) M. H. Nguyen, K. Nakarai, Y. Kai, S. Nishio: Early evaluation of cover concrete quality utilizing water intentional spray tests, Constr. Build. Mater. 231, 117144, 2020.
- 7) 半井健一郎ら：ボックスカルバートおよび附属試験体における表層品質測定、土木学会第70回年次学術講演会講演概要集、V-435, pp.869-870, 2015.8
- 8) 半井恵介、横田直倫、西尾壮平：鉄道構造物への散水試験と目視評価の試行と一考察、土木学会第71回年次学術講演会講演概要集、V-311, pp.621-622, 2016
- 9) 田畑勝幸：耐久性の高いコンクリート構造物の構築に向けたPDCAサイクルの確立、鉄道施設協会第33回総合技術講演会概要集（土木工事施工）、pp.77-80, 2018
- 10) 半井健一郎、西尾壮平、半井恵介：かぶりコンクリートの役割と検査方法③かぶりコンクリートの品質の確保と評価、コンクリート工学、Vol.57, No.8, pp.585-590, 2019
- 11) Jinyan Shi, et al.: Experimental study of performance of repair mortar: Evaluation of in-situ tests and correlation analysis: Journal of Building Engineering, Vol.31, 101325, 2020.
- 12) Jinyan Shi, et al.: Effect of steam curing on surface permeability of concrete: Multiple transmission media: Journal of Building Engineering, Vol.32, 101475, 2020.
- 13) 西尾壮平：散水によるコンクリート表層品質評価の基準値設定に関する実験的検討、土木学会第73回年次学術講演会講演概要集、V-263, pp.793-794, 2018
- 14) 西尾壮平：散水後の光沢感の保持時間によるコンクリートの吸水性状の簡易評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.891-892, 2018