

散水によるコンクリート表層品質の 簡易評価

西尾 壮平*

Simple Evaluation of Water Permeability in Cover Concrete by Water Spray Method

Sohei NISHIO

The near-surface layers of concrete structures (or cover-concrete) play a crucial role in preventing reinforcing bars embedded in the concrete from corrosion. From the viewpoint of improvement in the durability of reinforced concrete (RC) structures, establishment of on-site testing methods for evaluating the permeability of cover-concrete has become increasingly important in recent years. Therefore, we RTRI have developed a simple testing method, named Water Intentionally Spraying Test or WIST, with especial emphasis on the applicability to the inspection of railway RC structures. By using the latest WIST A-method which is reported in the current paper, it is possible to easily evaluate the cover-concrete quality by visual inspection with the use of a simple implement for spraying a small amount of water.

キーワード：コンクリート，耐久性，表層品質，非破壊検査，散水試験

1. はじめに

近年，土木，建築の分野では，コンクリートの表層部における内部への物質透過に対する抵抗性を指し示す「表層品質」という用語が一般化しつつある。コンクリートの表層品質は鉄筋コンクリート（RC）構造物の耐久性に大きく影響することから，実構造物の表層品質を非破壊で評価する技術を確立するための研究開発が活発化している。例えば，土木学会が例年9月に開催する全国大会の講演を見ると，2008年には「表層品質」をキーワードに含む講演が1件に関連の講演が数件であったものが，2015年には講演の標題に「表層品質」を含む講演が10件，キーワードに表層品質，透気性や透水・吸水性を指定した講演を含めると30件以上もの研究事例が見られる状況となっている。

表層品質に関して各種の非破壊評価手法が検討，提案されるなか，鉄道総研では実構造物検査に対する適用性の観点から簡便性に優れた手法の確立を目指し，(1) 外部電源不要，(2) 省力，(3) 省スペースという独自のコンセプトで研究開発を行ってきた。これまでの成果を基に，乾燥したコンクリート表面に少量の水を散布し，意図的に発生させた表面色（明度）の変化および水の流下現象でコンクリート表層の吸水性状を定量的に把握し，表層品質の簡易評価を行う「散水試験」という手法を提

案している¹⁾。

本報告では，既報¹⁾で言及した，散水試験を鉛直面に適用した際に観察される水の流下現象によるさらなる簡易評価手法の確立に関して検討した結果を報告する。また，散水試験の実用化に資する技術開発の取り組みについて述べる。

2. 散水試験の概要

散水試験を工学的に表現すると，乾燥したコンクリート表面へ意図的に散布した少量の水の消失や流れ出しの挙動を，可視光の反射・吸収特性として目視あるいは計測機器で識別し，コンクリート表層での吸水現象を評価する手法となる。既報では，コンクリート表面の明度変化を計測して算出される指標で表層品質の評価が可能であることを示した。また，鉛直面における水の流下現象に関しては，水の流下試験²⁾による知見等を参考に，散水試験による水の流下距離を指標として表層品質を評価する方法を提案しているが，これは散水試験で副次的に発生する現象と捉えてきた。しかし，目視で観察できる流下現象だけで表層品質を判定することができれば，作業は飛躍的に効率化される。そこで，本研究では流下現象の発生と観察に特化した散水方法等を検討し，鉛直面における水の流下現象を副次的に発生する現象と捉えるのではなく，従来の散水試験から抜き出して単独の手法として新たに構築した。図1に，散水試験の概要を示す。

* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

特集：材料技術

水の流下現象だけを目視で観察して簡易な評価を行う方法を散水試験 A 法（以下、A 法と略記する。）とし、機器による計測を伴う従来の方法を散水試験 B 法（以下、B 法と略記する。）として 2 つに手法を区分して整理した。以下、「散水試験」の表記は A 法と B 法を含めた総称として用いる。

散水試験による表層品質の判定方法については 3 章で詳述するが、A 法では、測定者は目視で散水後の水が流れ出したかどうかを観察し、散水後に水が流れ出した時点で測定を終了してそれまでの散水回数で評価を行う。B 法では、測定者はハンディタイプの計測機器で例えば散水後のコンクリート表面の明度変化に関する詳細データを取得し、明度変化が飽和するまでの散水回数で評価を行う。吸水しにくい緻密なコンクリートでは水の流れ出しや明度変化の飽和までに要する散水回数が少なくなる傾向があるため、A 法と B 法のいずれも、良質なコンクリートほど早い段階で測定が終了となる。例えば、散水の繰返し時間間隔を 60 秒とし、1, 2 回の散水で測定が終了した場合、所要時間 2 分程度で測定は終了する。一方、緻密さに劣るコンクリートの場合では、水が吸い込まれ続けることで測定の終了までの散水の繰返し回数が増加するため、所要時間はそれに応じて増大する。

A 法と B 法の散水の繰返し時間間隔は基本的に 60 秒とし、A 法ではその 60 秒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 ～ 10 秒刻みなどでずらして同時進行することで、4 ～ 8 箇所程度を一度に測定することが可能である。

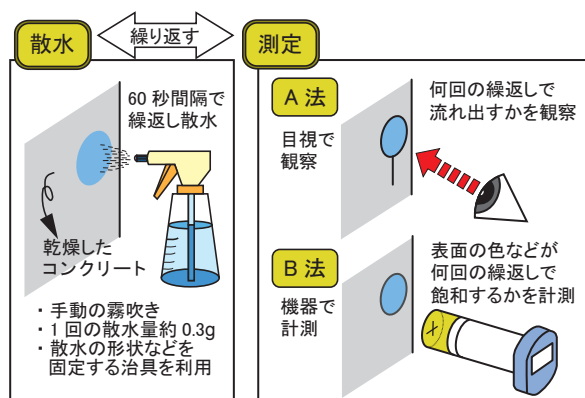


図 1 散水試験の概要

3. 散水試験による表層品質の判定方法

従来の手法である B 法では、散水で一旦暗色化したコンクリートの表面色が水の吸収で徐々に明色化するという現象を定量的に計測し、表層品質の評価を行う。表層品質の評価指標には、明度変化の飽和度を提案している。これは、式 (1) で定義される指標で、吸水しやすいコン

クリートほど明度変化が飽和するまでに多量の水が必要となるという考え方および実験結果に基づいている。

$$S_B = (L_I - L_E) / (L_I - L_{MIN}) \quad (1)$$

ここに、 S_B : 明度変化飽和度、 L_I : 散水前の明度の初期値、 L_E : 任意の時点での明度、 L_{MIN} : 測定箇所における明度の最低値である。

一方、A 法による表層品質評価の根拠として、吸水しやすいコンクリートでは水の流下距離が短くなる傾向にあるという既往の知見がある。また、図 2 は、B 法による明度変化の測定結果に B 法で副次的に観測された水の流下距離を付記した結果であるが、散水の繰返し回数 n の増加に伴って明度変化飽和度 S_B が高くなるとともに、水の流下距離 x も長くなる傾向が確認されている。流下距離 x に関しては数値が漸増していないが、これは水の流下経路となるコンクリート表面に点在する気泡や凹凸などによって流下が一時的に妨げられたり、流下経路が分岐したりすることの影響が現れたものである。なお、ここでは散水後の明度変化と流下距離の計測を確実に実施するため、散水の繰返し時間間隔を 120 秒とした上で、散水 10 秒後から 90 秒後まで明度変化を計測した後に流下距離を計測するという手順で測定を実施した。

鉄道総研では、水の流下距離および明度変化飽和度が所定値に到達するまでの散水回数によって表層品質の優劣を判定する方法を提案している。ここで、水の流下距離および明度変化飽和度に関する暫定的な閾値を、流下距離は 20mm で確実に流下が生じたものとして、明度変化飽和度は 0.9 でほぼ飽和したと見なすものとして、それぞれ設定したとする。その場合、A 法では流下距離 20mm に到達するまでの散水回数によって判定し、B 法では明度変化飽和度が 0.9 に到達するまでの散水回数によって判定することになる。このように、散水試験における表層品質の判定指標は「散水の繰返し回数」であり、「何回」という基準値とする回数を任意に設定して使用方法となる。図 2 を例にとると、A 法での判定は「2 回」、B 法での判定が「6 回」という結果となる。

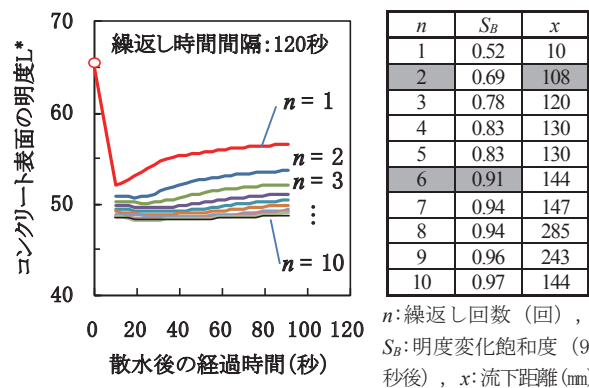


図 2 B 法による明度の経時変化の測定例と副次的に計測した水の流下距離の測定例

4. 散水試験 A 法に適した散水方法の検討

4.1 概要

著者らによる既往の研究では、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ことが確認されたため、散水器具の散水量と散水領域の面積を試験条件として考慮してきた。散水量は散水器具の性能に依存するため、所定の散水性能を有する器具を選定して使用している。一方、散水領域の形状については、B 法で使用する明度の計測器の形状に合わせた円形としてきた。しかし、鉛直面における流下現象の観察と評価を目的とした場合、散水領域の形状を円形とする必要はなく、円形とは異なる形状で散水することで手法の精度や作業性を向上させられる可能性がある。そこで、A 法に適した散水形状の検討を行った。また、前節で述べたように、A 法で「流下距離」が所定値に到達することによって判定を行う場合、流下距離を計測する必要がある。そのためには、測定者は散水しながらメジャーを扱うことなどを求められることになる。つまり、B 法で各種の情報を取得するために行う「機器での計測」と同様の作業を伴うこととなるため、作業性を追求するためには「流下距離の計測」という行為を省略するのが理想である。そこで、散水方法を工夫することで流下距離の計測を省略する方法についても同時に検討した。

検討を簡易に実施するため、測定は国立研究所内の実構造物の壁面で行った。コンクリートの経年は5～10年程度で使用材料などの詳細は不明である。そのため、流下に要する散水回数の比較などの詳細検討は行っていない。なお、測定部位は直射日光や雨がかりの影響が少ない箇所とした。流下が発生するまで同一箇所約1秒に1回のペースで散水を繰り返し行い、流下の発生後に散水形状の観察を行った。

4.2 流下の発生部位の散水形状に関する検討

B 法では、使用する明度の計測器の直径に2mm程度の余裕を加えた直径約60mmの円形で散水できるように、真円の開口部を有する治具（以下、散水ガイドとする。）を測定部位のコンクリート表面に設置し、かつ使用するスプレーの先端に円錐状の器具を装着して散水領域を制御している。図3に、散水試験における散水器具の構成と使用状況を示す。散水ガイドは、散水試験で散水とA法の観察あるいはB法の測定とを交互に繰り返す際に、測定位置を一定の範囲内で再現するための位置決めガイドとしても重要な役割を果たしている。

ここで、A法の鉛直面での流下現象に特化させることを考えた場合、散水の形状によって水の流下の仕方が変化することは想像に難くない。図4に、鉛直面における水の流下現象と散水形状の関係性を模式的に示す。散水

直後にコンクリートに吸水されない水は重力で下方に流下するが、散水領域の縁部では表面張力が作用するため下縁部に沿って左右から中央に向かって集積する。そのため、散水形状の下縁部を下方に引き延ばした縦長の形状とすることで、水が中央に集積しやすくなり、流下現象の発生を促すことができる。また、縁部を円弧とするか直線とするかによって流下の様子は異なることが予想される。そこで、散水ガイドの開口部の形状を従来の円形とは極端に異なる逆三角形とし、流下性状を比較した。逆三角形は二等辺三角形で頂角を30度刻みで120度までの4段階で検討を行った。

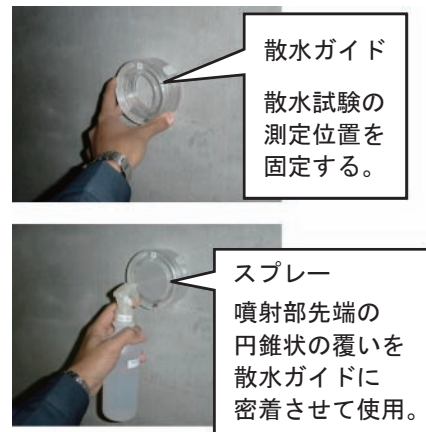


図3 散水試験の散水器具

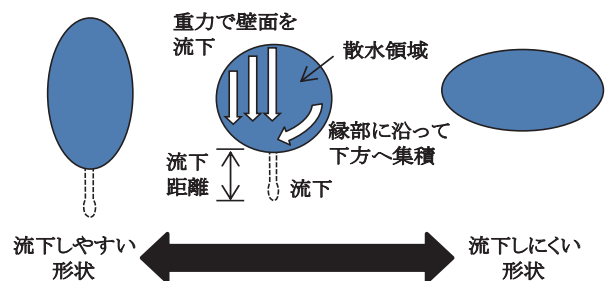


図4 水の流下現象と散水形状の関係性

図5に、散水形状の比較と流下状況の例を示す。検討の結果、散水面積あたりの散水量が同等であっても流下の様子は大きく異なることが確認できた。得られた知見を整理すると以下のとおりである。

- (1) 縁部が直線であるか曲線であるかによらず、水の流下は散水領域の最下端以外からも生じることがある。
- (2) 散水領域の下縁部を鋭角にすることで流下の発生位置を散水領域の最下端に導くことができる。ただしその場合でも水は必ずしも真下に流下しない。
- (3) 円形以外の散水形状では形状に方向性があり、散水ガイドの設置時に下縁部の先端が正確に鉛直下向きとならない場合がある。鉛直下向きとの角度のずれによる影響は、下縁部を鋭角にするほど大きくなる。
- (4) 散水試験で散水と測定を交互に繰り返す際の散水位

特集：材料技術

置のずれの影響は、散水形状の下縁部が鋭角であるほど大きい。

これらの知見を基に、A法では散水領域の下縁部の形状を円弧とすることとした。

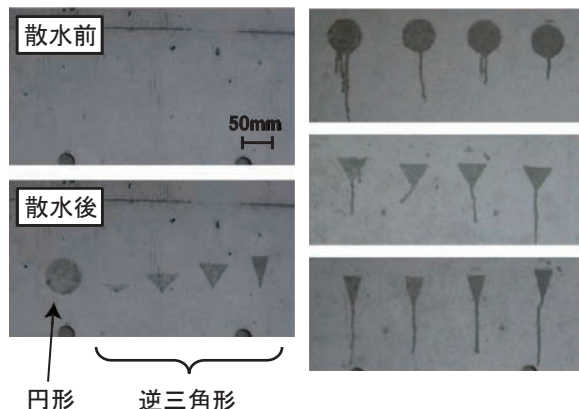


図5 散水形状と散水領域からの流下状況の例

4.3 流下距離の計測を省略する散水方法の検討

流下距離の計測を省力化する方法として、次の3つのステップで検討を行った。

- (1) 流下距離を計測しない
- (2) 流下距離の計測準備を事前に行う
- (3) 流下距離の計測を省略可能とする散水方法の考案

上記(1)は、次の考え方によるものである。コンクリートの吸水抵抗性が劣るほど表面で所定の距離を水が流下するのに必要な水量が多くなるということは、付与した水量が瞬時に吸水される量より少ない場合は流下が生じない、すなわち流下距離が0となるものと考えることができる。水の流下が発生した時点を1とし、流下距離ではなく流下の発生の有無を目視で0か1かで捉えて判断することとし、これにより流下距離の計測は省略される。図6に、上記(1)の概念で流下の有無による判定を検討した例を示す。吸水抵抗性の高いコンクリートなど、1回から数回の散水で10mm以上の明確な水の流下が発生した場合であれば、流下の発生を視認して判定することは容易であった。流下の兆候が見られてから即座に水が流下するためである。しかし、図6の右側の例に示すように、吸水抵抗性が劣るコンクリートの場合、散水領域の縁部で浸みを生じて流下の兆候が不明瞭となった。また、図7に示すように、流下の発生が著しく遅いコンクリートでは、流下ではなく浸みによる散水領域の拡大が見られ、拡大の進展の速度は数分間で1mmのような遅いものであった。そのため、散水領域からの水の流下と浸みの拡大とを一定の精度で区別することが困難となることから、流下の有無で判定を行うことにより流下距離の計測を省略するという方法は適当ではないものと判断した。

続いて検討を行った上記(2)の考え方は、流下距離の計測を省略するために測定位置周辺への目印や寸法の

書込み、目標物やメジャーの貼付けなどを行うという単純な方法である。これらの方法は1箇所あたり数分程度で完了できる単純な作業ではあるものの、いくつかの課題が明らかとなった。一つは、4.2節に示したように流下の発生位置が不確実な点である。散水領域の下縁部を円弧とした場合、流下距離の目印などは直線ではなく同心円を書き込む必要がある。そのほか、図7のような浸みが進展していく際には流下距離の目安とする位置のマーキング精度が求められるといった留意点があり、作業がやや煩雑となることがわかった。

最終的に検討した上記(3)の考え方は、散水ガイドの開口部の形状を工夫し、散水時の余剰な水分によって散水と同時に目印を付加するという着想に基づくもので、詳細は次節で述べる。

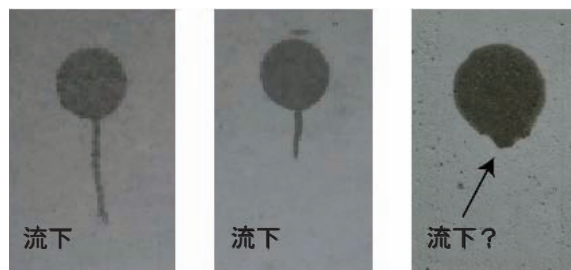


図6 流下の有無の判定

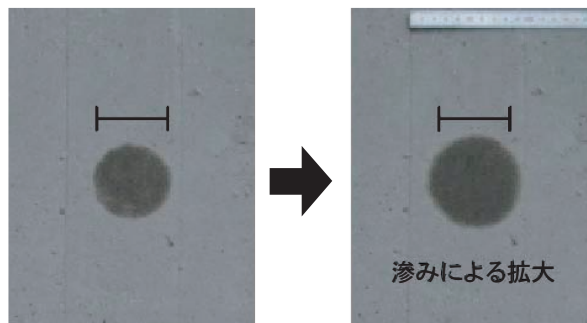


図7 浸みによる散水領域の拡大

4.4 散水試験A法に適した散水方法の提案

図8に、考案した散水形状と水の流下状況を示す。図8(a)に示した散水形状の最大の特徴は、円形の散水領域を上下に分割した点である。下方の三日月状の領域が上方のラグビーボール状の領域からの流下距離の目安となる部分で、両者の距離は最短で20mmとなっている。つまり、流下距離が20mmに到達しない段階(図8(b))と20mmを超過した段階(図8(c))を即座に視認することが可能な形状となっている。なお、図8(c)に示すように、上方から流下した水が下方の三日月状の領域に到達した場合、下方の三日月状の領域からさらに下方まで水が流下する状況が多く見受けられる。一方、流下しにくいコンクリートでは浸みによって散水形状が徐々に拡大する(図8(d))。

図8 (a) に示した散水形状での A 法によって得られた知見を整理すると以下のとおりである。

- (1) 散水領域を上下に分割することで流下の完了や流下しないコンクリートの判定が非常に容易となる。
- (2) 上部の散水領域の下端から流下が始まらない場合が見受けられるものの、位置ずれの影響が抑制できるため下縁部は円弧とするのが良い。
- (3) さらに、下部の散水領域の上縁部についても円弧とすることで、上部からの流下がいずれの位置で発生してもほぼ同等の流下距離で流下の判定ができる。

以上、本節で得られた知見に基づき、A 法では図8 (a) に示す上下二分割型の形状で散水を行うこととした。

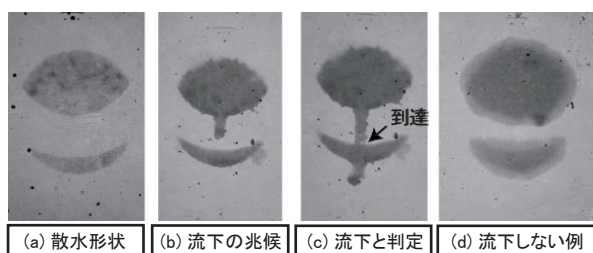


図8 散水試験 A 法に特化させた散水形状

4.5 散水試験 A 法の散水回数を指標とした表層品質の簡易評価方法の提案

A 法の散水回数が実構造物の表層品質の非破壊評価に利用可能であることを検証するため、壁状の鉄筋コンクリート製試験体（以下、壁状試験体とする。）により、A 法による流下開始までの散水回数を調査した。表1および図9に、壁状試験体の概要を示す。壁状試験体は型枠の脱型条件が異なる2体を作製し、屋外で屋根の下に設置して降雨が直接かからないようにした。測定は日射の影響を受けにくい北側の面(図9の左側の面)で実施し、測定位置の高さは壁状試験体の底面から600mm付近とし、8箇所測定を行った。測定時のコンクリートの材齢は約2箇月である。また、A法の測定を実施する直前に、A法とは異なる12箇所表層透気試験を実施した。

図10および図11に、壁状試験体による散水試験A法および表層透気試験の測定結果を示す。1日で脱型を行ったW1試験体では、7日脱型のW2試験体に比べて散水回数および表層透気係数のいずれも数値が顕著に増大した。作製条件を変えて同時に作製したコンクリートでは、表層透気係数の相対的な差異が散水試験A法でも容易に判定可能であることが確認された。すなわち、流下するまでの散水回数の大小によって表層品質を簡易に判定し、散水回数が少ないほど表層品質の優れたコンクリートと判定することが可能である。なお、図11に示した表層透気試験のデータに見られるように、部材寸法が1,000mm程度となる試験体や実構造物での測定結果は、小規模な供試体による試験室内での測定結果に比

表1 壁状試験体の概要

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，スランブ8cm，普通セメント，W/C=57%
寸法・形状	1200×1200×400mm・壁状
脱型条件	1日（W1試験体），7日（W2試験体）
養生条件	屋外気中曝露
測定時の材齢	約2箇月
測定時の環境条件	冬季の屋外環境（約10℃，約30%RH）



図9 壁状試験体

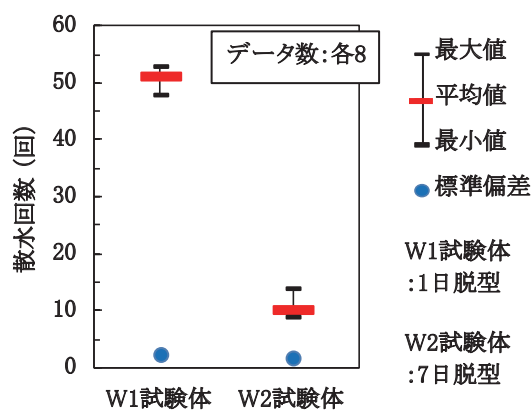


図10 壁状試験体の測定結果（散水試験 A 法）

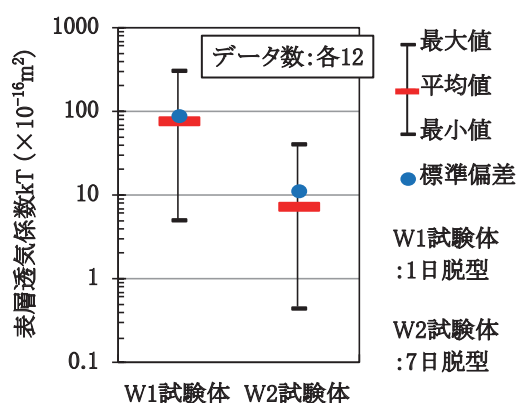


図11 壁状試験体の測定結果（表層透気試験）

べてデータのばらつきが大きくなる傾向が確認されている。100mm～500mm程度の小型供試体を室内で作製する場合は比較的入念な施工が可能であり、コンクリートの打込みや締固めの作業におけるムラが小さいものと想定されるため、その影響が現れたことが考えられる。実構造物の表層品質を評価する際は、1箇所あたり4点

特集：材料技術

～8点程度の測定を実施し、測定値のばらつきを確認した上でデータの比較を行う必要がある。

5. 散水試験 A 法の実用化に向けた技術開発

A 法の真の実用化を達成するには、鉄道事業者等で A 法を実務に適用できる状況を整える必要がある。具体的には、試験手法の確立に留まらず、試験キットを製品レベルで具現化することが要求される。そこで、A 法で使用する試験キットのプロトタイプを試作を行った。また、散水試験では 60 秒間隔で同一箇所での散水を繰り返す必要があり、さらに 60 秒の待機時間で複数箇所の測定を同時に進行することで作業の効率性を向上させている。そのため、散水のタイミングや測定箇所を測定者が正確に把握しておく必要がある。研究開発の当初は一般的なストップウォッチをタイマーとして使用していたが、散水試験に適したタイミングでの鳴動が可能な機種は見当たらないことから、専用のタイマー機能およびアナウンス機能を有したアプリケーションソフト（以下、アプリとする。）を独自開発し、スマートフォンなどのタブレット端末にインストールして使用することを検討した。

図 12 に、開発した A 法の試験キットを示す。試験キットは、スプレー、散水ガイド、タイマーおよび附属品で構成される。B 法ではこれに表面色を計測する機器が追加される。スプレーと散水ガイドは、散水試験における測定作業の根幹となる「散水」をコントロールする器材となるため、これらの器材を合わせたものを「散水器具」と呼んでいる（図 12 (b)）。スプレーのノズル部分およびボトルに関しては一般に流通している手動の霧吹きを採用しているが、散水試験で重要な散水量を制御するためにノズルの先端には専用の加工を施した円錐状のカップを装着している。さらに、散水試験に適した一定の散水を行うために、カップを散水ガイドと密着させて使用する。散水ガイドは、カップの吐出側の開口部とフィットし、前節に示した A 法の散水形状を実現するための所定の形状の開口部を有している必要がある。近年、3D プリント技術が一般化し、各種の材料でさまざまな形状の物体を造り出すことが可能となっている。そこで、3D プリント技術を利用して散水ガイドを試作した（図 12 (c)）。市販のタブレット端末で起動するタイマーアプリ（図 12 (d)）は、散水試験の将来的な改良などへの拡張性を持たせて開発した。アプリの動作保証やバージョンアップ対応などの管理体制の構築に課題があるため、当面の間は鉄道総研での研究開発にのみ利用する形となる。タイマーアプリは、タイマー機能、測定者への音声案内機能、測定結果の記録機能を備えており、ストップウォッチを利用した散水試験と比べて作業の正確性が向上し、かつスピーディーな測定が可能とな

る。タイマーアプリを利用することで A 法では 8 箇所、B 法では 2 箇所の測定を同時に進行可能となった。



図 12 散水試験 A 法の試験キット

6. まとめ

コンクリート表面に少量の散水を行い、目視で表層品質の簡易判定を行う「散水試験 A 法」を考案し、それに適した散水方法の検討を行うとともに、実用化に向けた技術開発を行った。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 鉛直面における水の流下現象の観測およびそれを活用した簡易判定に効果的な散水方法を考案し、目視で表層品質の簡易評価ができる散水試験 A 法を考案した。
- (2) 散水試験 A 法の散水回数を指標とした表層品質の簡易評価が可能であることを、実物規模で屋外に曝露された壁状の試験体で確認した。
- (3) 散水試験 A 法の試験キットのプロトタイプを 3D プリント技術で試作し、また専用のタイマーアプリを開発し、手法の実用化を現実的なものとした。

なお、散水試験 A 法の散水回数とコンクリートの諸物性との関係性を定量的に解明するため、測定データの蓄積および実験的検討を今後も進めていく予定である。

文献

- 1) 西尾壮平ほか：コンクリート表層品質の簡易な非破壊評価手法の開発、鉄道総研報告，pp.5-10, 2014.2
- 2) 家辺麻里子ほか：水の流下試験によるコンクリート構造物の表層品質評価に関する研究，第 66 回セメント技術大会講演要旨，pp.94-95, 2012