

特集：材料技術

水平面に適用可能な コンクリート表面の水分浸透抵抗性評価手法

西尾 壮平*

Evaluation Method for Water Penetration Resistance of Concrete Structures Applicable to Horizontal Surface

Sohei NISHIO

High durability is required for railway structures constructed on the premise of long-term service as social infrastructure. Technological development that leads to longer life of structures is becoming more important in terms of contributing to decarbonization. A method called WIST (Water Intentional Spraying Test) developed by the author of this paper is becoming widespread as a non-destructive test method that can easily evaluate water penetration resistance that affects the durability of reinforced concrete structures. However, due to the principle of measurement, the application of the WIST was limited to vertical planes. This paper reports a new measurement method developed for applying the WIST to horizontal planes. The new method can be implemented just as easily as the conventional WIST with the same equipment.

キーワード：コンクリート，水分浸透抵抗性，耐久性，表層品質，非破壊試験，散水試験

1. はじめに

鉄道高架橋のような鉄筋コンクリート（RC）構造物を長期間供用可能とするためには、コンクリート内部の鉄筋を腐食させないことが重要である。鉄筋などの鋼材の腐食に対する支配的な要因は水分の浸透であると考えられるため、一般的なRC構造物では鉄筋を所定の深さに配置し、水分浸透抵抗性の高いコンクリートで鉄筋位置に水分が浸透しないようにすることが耐久性確保の基本である。近年、土木構造物の建設において、コンクリートの施工を入念に行うことで耐久性に優れた構造物の構築を実現しようとする動きが見られ、鉄道関連ではJR西日本での新設構造物における品質確保の取組みが目目されている¹⁾。JR西日本の取組みでは新設構造物のコンクリート品質向上を目標に掲げて、鉄道総研で実用化した「散水試験（Water Intentional Spraying Test、以下、WISTと表記する。）²⁾³⁾」によるコンクリートの水分浸透抵抗性に関する品質の簡易評価が導入されており、建設工事の途中段階での品質改善、あるいは類似した工事での品質向上が実現されている⁴⁾⁵⁾。

ここで、WISTとは、乾燥したコンクリート表面に少量の水を散布し、コンクリート表面における水分浸透状況を測定者の目視で把握し、水分浸透抵抗性を評価する非破壊試験である。WISTは実構造物の調査等に対する適用性を重視し、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。WISTは測定が手軽であり、JR

西日本（図1）のほか、土木構造物を建設する地方自治体の土木部門、建設事業者、大学等の研究機関などで活用され、普及が進んでいる。WISTの測定対象となる部材は、測定者の手が届く範囲で選定されるため、柱や壁とされることが多い。そのため、WISTは柱や壁のような鉛直部材の側面への適用に特化した形で実用化され、測定の原理上、水平面への適用が不可能であった。WISTの普及に伴い、測定対象を床版や梁のような部材に拡大するニーズが高まり、構造物の下面や上面といった水平面に対しても同様に適用できる、簡便な非破壊試験の確立が求められていた。

以上の背景のもと、WISTと同じ測定器具で水平面における水分浸透抵抗性を評価する手法を新たに開発したので、ここに報告する。なお、鉄道高架橋のように構造



図1 WISTの測定状況の例

* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

表1 コンクリートの水分浸透抵抗性に関する非破壊試験の代表的な例（数値等は著者の調査による）

名称	概要	水圧	水量	水分浸透領域の面積	水の供給開始から測定開始までの時間
散水試験 (WIST)	鉄道総研の提案手法。JR 西日本等で導入。国土交通省の手引き等に記載。	加圧なし (水を散布)	約 0.3ml ^{※1}	約 2,600mm ² (直径 57mm の円形) ^{※3}	約 0.5 秒 (手動式器具による水の散布時間)
表面吸水試験 (SWAT)	林・細田らの提案手法 ⁶⁾ 。国土交通省の手引き等に記載。	30kPa (測定中に減少)	約 25ml ^{※2}	約 5,000mm ² (直径 80mm の円形)	10 秒 (装置により制御)
ダブルチャンバー透水性試験 (W.A.P.P.法)	豊福らの提案手法 ⁷⁾ 。シーリング材を併用。	55kPa (一定圧)	約 30ml ^{※2}	約 2,000mm ² (直径 50mm の円形)	27 秒 (装置により制御)
ドイツ規格に示される吸水試験	ドイツ規格 DIN 1048 Part5 に規定の Water permeability の測定手段に適合した手法 ⁸⁾ 。	10~600kPa (一定圧)	約 200ml ^{※2}	約 3,000mm ² (直径 62mm の円形)	約 30 秒 (手作業による目安時間)

※1：装置の操作1回あたりに散布される水量。一部の水が治具等に付着するためコンクリートへの供給量は減少する。

※2：コンクリートに接触した容器等の内部に充填される水の量であり、容器の接続部等に溜まる水の量を除く。

※3：鉛直面に適用する WIST-V では円形の範囲内の一部領域に水が散布されず、測定に影響する面積は約 1,000mm² となる。

物の直下を利用する可能性のある構造物においては、部材下面のコンクリートにおける品質確保の重要性が高い。そのため、手法の開発においては、水平面のうち特に構造物の下面に適用できることを前提条件とした。また、測定状況として、建設中の足場等を利用して下面に近接して行われる調査に適用される状況を想定した。

2. 評価手法の概要

2.1 開発コンセプト

表1に、水分浸透抵抗性に関する非破壊試験の代表例を示す。これらの手法は国内で装置が市販され、論文等での検証事例が見られるものである。WISTを除く3種類の手法では、専門的な知識を備えた技術者の手に測定を委ねるのが一般的である。今回、新規手法の開発においては、WISTと同様に鉄道事業者等で建設や保守の各種業務に携わる実務者が自身の手で測定できることを念頭に置き、手法の手軽さを優先した。水分浸透抵抗性を評価するためには、コンクリートに水分を供給し、水分の浸透に伴う変化を何らかの方法により定量化した指標が必要となる。水分の供給方法について、WISTのように水を散布する方式①と、湿らせた物体を接触させて浸潤させる方式②、容器に入れた水を接触させる方式③、などが想定される。表1に示したWISTを除く3種類の手法では、方式③の水を溜めた容器をコンクリート表面に密着させて連続的に水分を供給する方式を採っている。このような方式では水圧が作用するため、より内部までの水分浸透現象を捉えられるメリットがある。一方で、容器を固定するための機構が必要であるため、機材の複雑化や、測定に伴う準備や作業の規模の面でデメリットがあり、手法としての手軽さに欠けるものと判断し、方式③は検討対象から除外した。次に、水を散布する方式①として2種類（霧吹き方式、エアゾール方式）、湿らせた物体の接触による方式②として2種類（湿布・

スポンジの貼付けによる方式、筆やローラーによる塗布方式）を検討した。検討の結果、湿らせた物体の接触による方式②では、実構造物への適用を想定した際に水分の供給量の確認と制御が難しく、実務への導入が困難な手法となることが予想された。そのため、水分の供給はWISTと同様の散布による方式①を採用し、水平面に適用可能な測定手順と評価指標に関する詳細検討を進めることとした。

2.2 測定手順と評価指標

図2に新規開発した手法の測定手順の概要を示す。測定では専用の手動の器具を使用してコンクリート表面に対して一定量かつ微量の水を散布する。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。この水はガイド器具により直径57mmの円形の範囲に噴霧され、器具に付着する水量を除くと、コンクリート表面に対して供給される面積当たりの散水量は約0.1mg/mm²となる。このような水の散布の方式は従来のWISTと同一である。そのため、手法の名称は面の種別によらず「WIST」と表記し、手法を区別する必要がある場合は、新規開発した手法を「水平面に適用するWIST (WIST-H)」、従来の手法は「鉛直面に適用するWIST (WIST-V)」といった形で、適用する面の方向を付記して表記する。

図3にWIST-VとWIST-Hの比較を示す。WIST-VとWIST-Hでは評価指標が異なっている。WIST-Vを適用する鉛直面では浸透しなくなった水が表面を流下する状況を目視で確認して評価するのに対して、WIST-Hを適用する水平面では浸透によって表面から水分が消失する状況を目視で確認して評価する方式としている。それぞれ評価指標は「流下時散水回数」と「水沢保持時間」である。このように鉛直面と水平面とで異なる評価指標とした理由は、WISTでコンクリートに供給する水分の浸透挙動には重力の作用が影響し、その影響が不可避であったためである。2種類の指標はそれぞれ異なる現象

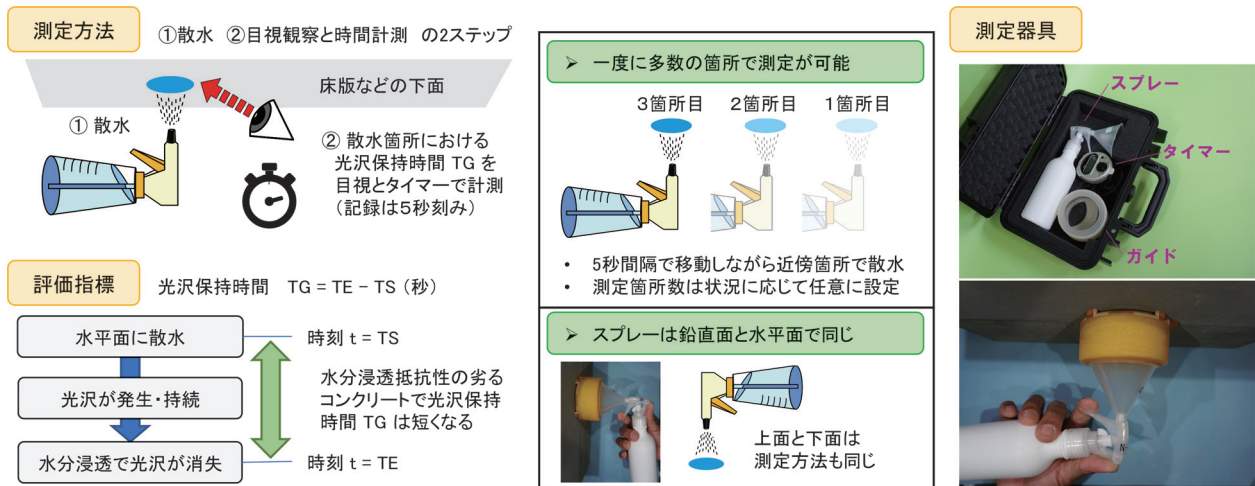


図2 水平面に適用する散水試験 (WIST-H) の概要

で間接的に水分浸透抵抗性を定量化したものであり、水分浸透抵抗性に優れたコンクリートほど流下時散水回数が少なくなるのに対して、光沢保持時間は長くなる。なお、光沢保持時間は水平面のほか、鉛直面を含むあらゆる角度の傾斜面にも適用できると考えられるため、検討を進めている。

図4に水平面の下面における測定状況の例を示す。表1に示したように、WISTの測定の規模は各種の手法と比較して、水分浸透領域の面積は同程度としながら、使用する水の容量、ならびに水の供給から測定開始に要する時間は桁違いに小さい。また、WISTでは水の供給や容器の保持で加圧等を行うための機材や電源を必要としない。これは、WISTでは水の供給を連続的なものとせず、一定量かつ微量の水の散布による供給を、一度だけあるいは一定の時間間隔で断続的に行う方式としている

ことによる。このような特徴により、WISTでは手動式の器具を用いた手軽な測定を実現している。また、測定の作業が軽微であるため、近傍箇所での測定を5秒刻みでずらして同時に進行することで、一度に複数の位置での測定が可能である。著者らの実構造物を対象とした実績では、WIST-Vを1m×1m程度の範囲内で10箇所程度、WIST-Hを15cm程度ずつずらして6m程度の範囲で40箇所での測定を一度に実施した例がある。測定結果のばらつきを考慮すると実構造物では測定データ数を1箇所あたり6点以上とするのが望ましいと考えられるため、一度の測定でこのような多点でのデータが取得できる点は、他手法にないWISTの特長のひとつとなっている。

2.3 評価指標に関する事前検討

鉄道総研におけるこれまでの研究成果⁹⁾においては、水の散布によりコンクリート表面へ水分供給を行った後、水分の浸透に伴う明度の変化を主体に整理してきた。明度変化を定量化する場合、色見本や測色機器を使用する必要があり、開発コンセプトの手軽さは達成されない。そこで、鉄道総研で2017年度に開発した、画像解析に

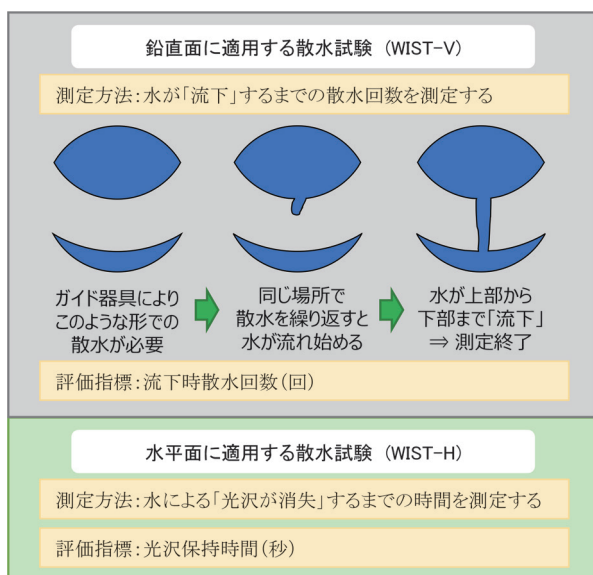


図3 WIST-V と WIST-H の比較



図4 WIST-H の測定状況

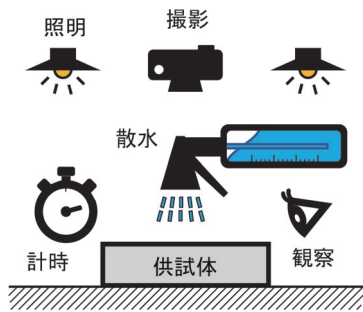


図5 実験の概要



図6 画像解析による抽出画像の例

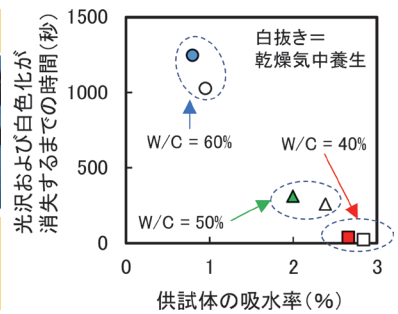


図7 水分浸透に関する実験結果

より明度変化を定量化するシステム¹⁰⁾を利用して、新たな評価指標を模索した。同システムでは画像情報の経時変化に基づいて明度変化を定量化できるため、同システムと目視観察を組み合わせた実験により散水後の光沢変化に関する検証を行った。図5に実験の概要を示す。供試体は、寸法が40×40×80mmで、コンクリートの水セメント比を40・50・60%の3水準、材齢1日で脱型後に材齢28日までの養生方法を標準気中養生（20℃、60%RH）と乾燥気中養生（20℃、40%RH）の2水準に設定して作製した6種類を用意した。供試体は材齢28日以降、標準気中養生環境下で保管されたもので、実験時の材齢は約6年である。供試体の水分浸透抵抗性を把握することを目的として、実験に先立って水中浸漬による吸水試験を行った。水分浸透抵抗性の目安としてここでは水中浸漬試験で求めた吸水率を採用した。浸漬時間は2時間とし、吸水率の算出は気中乾燥状態の質量を基準とした。吸水試験の後、供試体を標準気中養生環境下で68日間乾燥させた後に、供試体の打込み面に対して上方から水を散布し、水分浸透状況を目視で観察して時間を計測するとともに画像で記録した。図6に解析結果に基づいて抽出した画像の例を示す。水を散布した領域において、表面に水分が滞留した部位では光の反射によって明るく感じられる状態が引き起こされ、目視では光沢として視認できること、画像では白色化すること、光沢あるいは白色化は水分の浸透と共に消失することが確認された。

図7に散水による供試体表面の光沢と白色化が消失するまでの時間と供試体の吸水率の関係を示す。吸水率が低く水分浸透抵抗性の高いコンクリートで光沢の消失までの時間が長くなることが判明した。同等のW/Cで比較した場合、コンクリートの品質に対して悪影響を及ぼすと考えられる乾燥気中養生の条件（白抜きプロット）でプロットが右下に位置することがわかる。これらの検討結果に基づいて、散水後の光沢発生から消失までに要した時間を水平面における水分浸透抵抗性の評価指標とすることとし、これを「光沢保持時間」と定義した。

なお、目視による光沢の観察の妥当性について、目視

観察と市販の光沢センサーでの比較を簡易な実験で検証している。光沢センサーでは光沢の度合いを定量的に評価できるメリットがあるが、測定領域は直径で数mm程度の範囲に限定される。それに対して目視観察ではセンサーよりも広範囲を観察する形となる。そのため、観察あるいは測定範囲の違いにより光沢保持時間の測定結果には差が生じるが、WIST-Hにおいては作業性を優先して目視を基本とすることとした。また、光沢保持時間はストップウォッチなどを使用して0.1秒単位で計測できるが、図7に示したように水分浸透抵抗性の差異は数十秒や数分といった差で現れる傾向が確認されたこと、計測頻度を減らすことで同時に複数個所での測定が容易となることなどを考慮し、目視による光沢保持状況の確認は5秒刻みで行うこととした。

3. 構造物下面を想定した適用性の検証

3.1 室内試験による検証

構造物下面を想定した室内試験として、コンクリート供試体の底面における吸水抵抗性を検証した。実験の状況は図4左の写真に示すとおりである。供試体は、底面が200×200mmで高さ100mmの扁平な形状で、実際に建設された鉄道高架橋の仕様を反映したレディーミクスコンクリートと合板型枠で作製した。実験では材齢1日での早期脱型の影響を検証したほか、水分浸透抵抗性を意図的に低下させることを目的として打込み直前に約30kg/m³加水した低強度配合のコンクリートで早期脱型したシリーズを用意した。供試体は各条件で3体とし、試験室内で養生し、脱型4日後にWIST-Hの測定を供試体底面の2箇所で行った。散水量は予備実験の結果に基づいて約0.2mg/mm²とした。供試体の物質透過抵抗性の目安とするため、材齢約1年まで試験室内で乾燥させた供試体の表層透気係数をトレント法により測定した。トレント法は底面の5箇所で行った。

図8に、光沢保持時間と表層透気係数の関係を示す。同図では3.2節で後述する構造物Dで取得したデータを併せてプロットした。図の縦軸が対数軸となっているこ

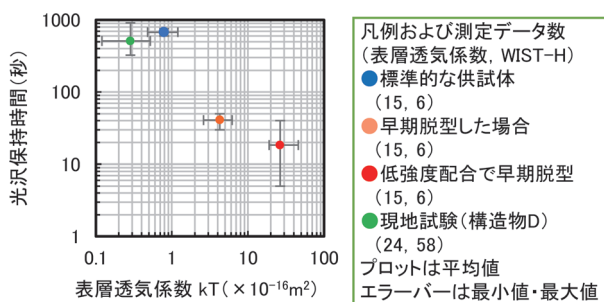


図8 光沢保持時間と表層透気係数の関係

とからわかるように、光沢保持時間は早期脱型の供試体で顕著に減少することが明らかとなった。また、表層透気係数が大きく物質透過抵抗性の低い供試体で光沢保持時間が短くなるのがわかる。光沢保持時間は、コンクリートの物質透過抵抗性の代表的な非破壊評価値である表層透気係数と一定の相関が見られることが確認された。

3.2 実構造物の現地試験による検証

鉄道のRC橋りょうの建設工事現場（構造物A・B・C・Dの4種）にて現地試験を実施し、実構造物の下面に適用するWIST-Hの測定手順の適用性を検証した。図9に現地試験で取得したデータを示す。同図でプロットしたデータに関して、構造物Aで測定した全50点のデータは、10箇所と同時に測定したデータと40箇所と同時に測定したデータを合わせたものである。測定は近傍箇所位置を15cm程度ずつずらしながら実施した。同様に、構造物Bでは全20点の測定データを一度の測定で取得し、構造物Cの全50点のデータは20箇所と30箇所と同時に測定したデータを合わせたもの、構造物Dでは全58点のデータを10箇所ないし9箇所ずつ同時に測定したものである。このように、実構造物での測定においてWIST-Hの同時測定箇所数は40箇所とした場合でも問題なく測定が実施できることを確認した。

一方で、図9に示したデータのばらつきは同一の構造物においても変動係数で20%程度となった。実構造物では供試体に比べてコンクリートの施工が大がかりであるため、コンクリートの打込み、締固め、養生などの条件には部位による差があると見なす必要がある。そのため、同一部材の近傍箇所においてもこのような数値のばらつきを生じたものと考えられる。実構造物の評価においては、数値のばらつきを考慮し、多数の測定データを取得することが必要である。なお、図9に示した光沢保持時間には数十分を超過したデータが多数見られるが、当該構造物の品質が比較的優れていたことのほか、測定時期が冬季で外気温とコンクリート表面温度が約7℃程度であったこと、コンクリートの含水率が計測器の上限値を超過する程度に高い含水状態であったことなどが影響したと考えられる。

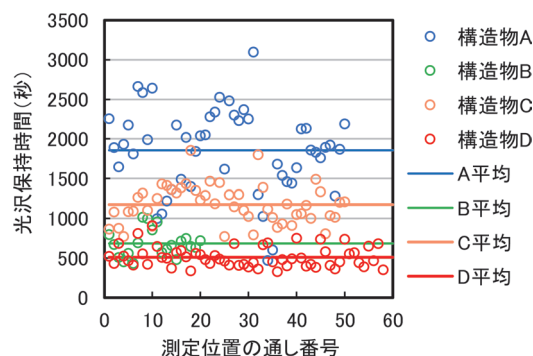


図9 実構造物の測定結果

現地試験では、図4中の右写真に示したようにJRの社員による測定が可能であることを確認した。また、建設工事の現場代理人等を含めた10名以上が測定に立会い、散水後の光沢保持状況の目視観察を体験し、目視での光沢保持時間の測定が可能であることを実感してもらうことができた。このように、目視観察には測定の立会者が誰でも実行可能であるという特徴があり、測定結果が共有できる、不正が行われにくい、同意や見解を求めることができる、といったメリットがあると考えられる。

4. 測定結果に影響をおよぼす各種要因の検討

4.1 目視による測定の個人差

図10は水平面における目視観察による光沢保持時間の測定結果に関する個人差を検証した結果である。前述の実構造物Dの下面を測定対象とし、WIST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。測定は20箇所で行った。散水は熟練者が行い、光沢保持時間を3名が個々に計測した。その結果、未経験者2名による40件のデータのうち約60%が熟練者の測定値と一致し、約90%の測定結果が10秒程度の差異に収まることを確認された。なお、測定の作業自体は1名で実施可能であるが、複数の人員で測定する場合はコミュニケーションを取りつつ測定を行うことでこのような差は解消できると考えられる。

4.2 測定時の温度条件の影響

同一のコンクリート試験片（寸法約120×120×10mm厚）による測定を異なる温度条件で実施し、測定時の温度条件が光沢保持時間に及ぼす影響を検証した。試験片は水分浸透抵抗性の異なるA・Bの2水準で各3枚を用意し、測定は各試験片で3回実施した。なお、水の温度は20℃で統一した。図11に示すように、標準条件（温度20℃・相対湿度60%）を基準とした場合、試験片A・Bともに光沢保持時間は低温条件（温度5℃・相対湿度50%）で80%程度増加し、高温条件（温度40℃・相対

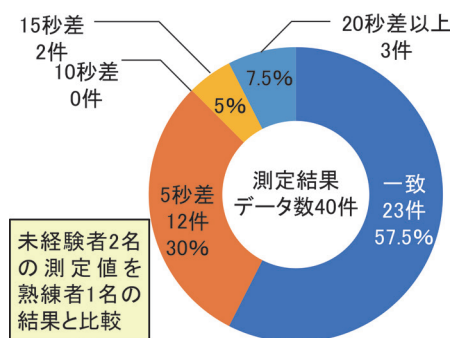


図 10 光沢保持時間の目視計測の個人差

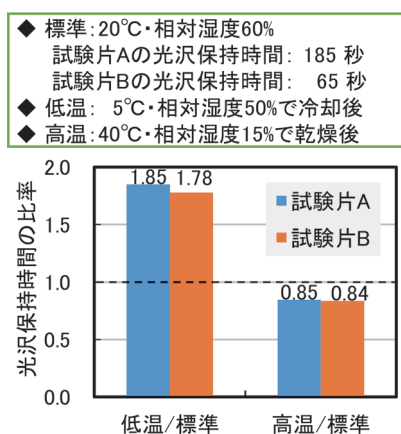


図 11 温度条件の影響

湿度 15%) では約 15% 減少する結果となった。水分浸透抵抗性の異なる 2 種類の試験片のいずれにおいても、高温条件での光沢保持時間の減少の影響よりも低温条件での光沢保持時間の増加の影響の方が大きくなることが確認された。光沢保持時間の測定においては、低温条件での水の性質の変化が強く影響する可能性がある。低温条件では水分浸透抵抗性を過大評価する恐れがある点に留意が必要である。

5. まとめ

本報告では、コンクリートの水分浸透抵抗性を評価する WIST について、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) 水分浸透抵抗性の高いコンクリートでは散水後の水分の存在による光沢が長時間継続する傾向があり、水平面での散水時に見られるこのような光沢の継続時間を「光沢保持時間」と定義した。
- (2) 光沢保持時間は、散水後の目視によって測定でき、物質透過抵抗性の代表的な非破壊評価値である表

層透気係数と一定の相関がある。

- (3) 目視により測定した光沢保持時間の個人差を 3 名の被験者で検証した結果、約 90% の測定結果が 10 秒程度の差異に収まることを確認した。
- (4) 光沢保持時間の測定結果におよぼす環境温度の影響は、高温時よりも低温時で大きい。

なお、光沢保持時間による水分浸透抵抗性の評価基準を定めるためには測定データの蓄積が必須であるため現時点では提唱していない。また、光沢保持時間とコンクリートの各種物性値との関連性についてもさらなる検証が必要であるため、これらは今後の検討課題としたい。

文 献

- 1) 半井健一郎, 半井恵介, 西尾壮平: 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
- 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) 西尾壮平: 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, 鉄道総研報告, Vol.34, No.10, pp.11-16, 2020
- 4) 黒川浩嗣, 猿渡隆史: おおさか東線新大阪・放出間における橋りょうの施工品質管理, セメント・コンクリート, No.869, pp.25-30, 2019
- 5) 川端誠, 佐藤雅義, 半井恵介, 田嶋亮佑: 広島高速 5 号線矢賀こ線橋の施工, 橋梁と基礎, Vol.54, No.6, pp.7-12, 2020
- 6) 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
- 7) 豊福俊泰, 高橋典子, 永松武則, 細川土佐男: ダブルチャンバー透気性試験・ダブルチャンバー透水性試験による表層コンクリートの非破壊検査法の技術開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1801-1806, 2015
- 8) 野中英, 三谷和裕, 清水峻, 湯浅昇: 表層透水試験に関する検討, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, Vol.6, pp.175-180, 2018
- 9) 西尾壮平, 上田洋: 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, Vol.28, No.2, pp.5-10, 2014
- 10) 西尾壮平: 画像解析によるコンクリート表層における吸水性状の評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, V-263, pp.525-526, 2017