

# シラン系表面含浸材の塗布から長期経年したコンクリートの効果持続状況の簡易判定法の検討

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈  
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 三原 慎弘  
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地技術推進室 村中 智幸

平成19年4月にシラン系表面含浸材によるコンクリート補修に関する内容が北海道開発局道路設計要領に新設され、それから18年が経過した。現在、シラン系表面含浸材は、凍結防止剤散布路線に架かる道路橋を中心に広く適用されている。塗布による吸水抑制効果の持続は、構造物の長寿命化に繋がる。しかし、塗布から長期経年したコンクリートにおける吸水抑制効果の持続状況を、現場で簡易かつ迅速に判定する方法は十分整備されていない。本研究では、効果が持続していると吸水しにくく、一旦表面を濡らし、その後、暖風をあてると表面は早く乾くことに着目し、この特徴を応用した効果持続状況の簡易判定法の開発に向けて検討を行った。

キーワード：コンクリート、シラン系表面含浸材、経年、電気抵抗式水分計

## 1. はじめに

シラン系表面含浸材は、コンクリートへの水の浸入を抑制する含浸性の補修材料である。この材料は、表面を塗膜で覆う被覆材とは異なり、**図-1**に示すように表面に塗布し、表層に含浸させて表層を疎水化し、吸水防止層を形成させることで水の浸入を抑制する。比較的安価で施工が簡便であり、塗布後も外観が変化しないためコンクリートの目視点検が可能である等の長所を有する。

平成19年4月にシラン系表面含浸材によるコンクリートの補修に関する内容が北海道開発局道路設計要領に新設され、それから18年が経過した。現在は**写真-1**に示すように、凍結防止剤散布路線に架かる道路橋の地覆を中心に広く適用されている。

その一方で、シラン系表面含浸材が表層に含浸しておらず、吸水防止層が形成されていない不具合事例も確認されている。このような場合は再劣化防止のため、再塗布を検討する必要がある。しかし、塗布から長期経年した既設コンクリートにおける吸水抑制効果の持続状況を、現場で簡易かつ迅速に判定する方法は十分確立されていない。吸水防止層の有無はコア採取で確認できるが、削孔作業は部材損傷が懸念され、また作業員や環境に与える負担も大きく、効率的な方法とは言い難い。

吸水抵抗性を非破壊で調べる方法として、例えば、**写真-2**の左のようにJSCE-K571に準じ、シーリング材で器具を止め付けて吸水量を測定する方法がある。しかし、シーリング材の硬化には相応の時間を要し、さらに吸水を7日間行う試験であるため、迅速性が要求される現場調査では不向きである。また、近年は**写真-2**の右のよう

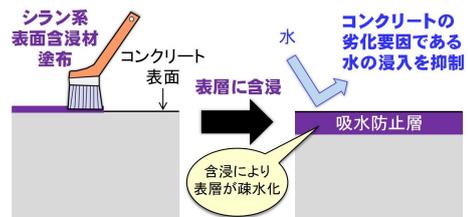


図-1 シラン系表面含浸材による改質の概念



写真-1 道路橋地覆でのシラン系表面含浸材の塗布作業の例

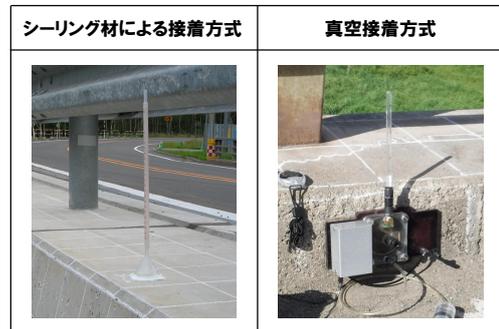


写真-2 吸水抵抗性を確認する器具の例

に真空ポンプで反力を取って器具を密着させる方法も開発されているが、発電装置を要することに加え、表面が粗いもしくは平滑でない場合、細かな隙間が生じて真空を作り出せず、器具が密着しないこともある。また、いずれの方法もコンクリートが緻密な場合は吸水量が小さ

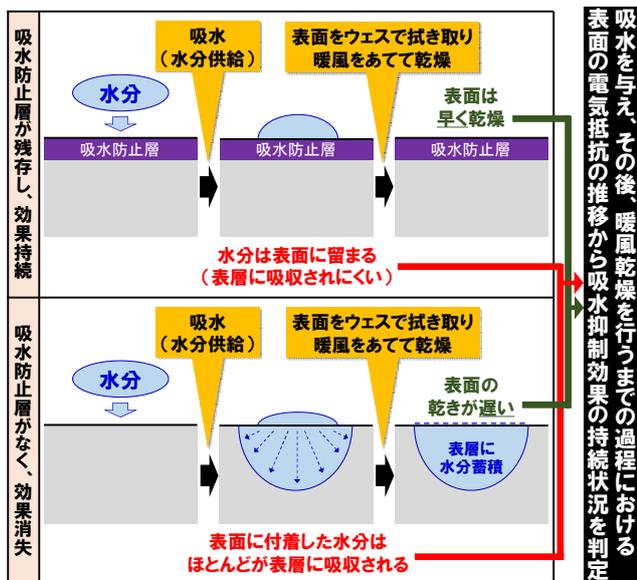


図-2 本研究で開発を目指す効果持続状況の簡易判定法の概念

く、判定に資する有意な差が得られないこともある。

そこで本研究では、竈本ら<sup>2)</sup>が行った電気抵抗式水分計による検査法を参考に、吸水抑制効果の持続状況の簡易判定法の開発を目指すこととした。図-2に概念を示す。

はじめに、濡れた布を表面に密着させ、コンクリートに水分を供給させる。吸水防止層が形成されている場合、水分の多くは表層に吸収されにくいいため、表面に留まる。一方、吸水防止層が形成されていない場合、水分は少量でも緩やかに表層に吸収され、表層の空隙広範囲に行き渡る。次に、表面を乾いたウェスで拭き取り、充電式のヒートガンを使用して表面に暖風をあてる。吸水防止層が形成されている場合、表面は早く乾燥する。これに対し、吸水防止層が形成されていない場合、表層に蓄積された水分は蒸発して表面方向へ移動する<sup>3)</sup>ことから、表面の乾き方は遅くなる。

よって、吸水を与え、その後、暖風乾燥を行うまでの間、吸水防止層が形成されている場合、表面の電気抵抗は水分が少ないため常に高い状態で推移することになる。

すなわち、図-2の過程で表面の電気抵抗の推移を調べることで、塗布から長期経年後の吸水抑制効果の持続状況を、表面の粗さや上・下・横向きによらず、簡易かつ迅速に判定できる可能性がある。そこで、まず、この方法の妥当性を検証するための室内実験を行った。次に、シラン系表面含浸材が塗布されている道路橋地覆において、この方法の有用性を検証した。

## 2. 室内実験

### (1) コンクリート配合

表-1にコンクリート配合を示す。水セメント比は55%、セメントは普通ポルトを使用した。細骨材は表乾密度

表-1 コンクリート供試体の配合 (室内実験)

水セメント比	使用セメント	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
55%	普通ポルト	155	282	845	1040

表-2 シラン系表面含浸材の諸元 (室内実験)

材料名	主成分	塗布量
A	シラン・シロキサン	350 g/m <sup>2</sup>
B	アルキルアルコキシシラン	600 ml/m <sup>2</sup>
C	アルキルアルコキシシラン	300 g/m <sup>2</sup>

表-3 吸水防止層の厚さ (室内実験)

	吸水防止層の厚さ (mm)		
	材料A	材料B	材料C
低湿環境下で塗布した供試体	5.7	5.3	5.1
高湿環境下で塗布した供試体	0.2	0.0	0.0

2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.98%、除塩処理済の苫小牧錦岡産海砂、粗骨材は表乾密度2.68g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.66%、最大径20mmの小樽見晴産砕石を用いた。スランプは12±2.5cm、空気量は5.0±1.5%とし、AE減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体) とAE助剤 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤) で調整した。

### (2) 供試体

寸法は後述の紫外線照射装置の仕様にあわせて70mm×70mm×20mmとした。先ず本章(1)で製造したフレッシュコンクリートを100mm×100mm×400mmの型枠に打設した。材齢7日まで湿潤養生を施し、その後、湿度45%もしくは85%空間に置いた。湿度の設定根拠は後述する。そして本章(3)で述べるシラン系表面含浸材の塗布を終えた後、70mm×70mmの面が塗布面となるようにコンクリートカッターで所定の寸法に成形した。

### (3) シラン系表面含浸材

シラン系表面含浸材は市販の3製品を使用した。表-2に諸元を示す。塗布は材齢31日に行った。

吸水防止層は、含浸するシラン系表面含浸材の主成分がコンクリート内で加水分解<sup>4)</sup>を起こし、空隙の壁面に固着することで形成される。含浸挙動は主成分の固着とともに終了する。よって、厚い吸水防止層を形成させるには、深く含浸するまでの間、加水分解がなるべく発生しないよう、低湿環境で塗布を行う必要がある。

ここでは、吸水防止層の厚さに差をつけるため、吸水防止層が形成されやすい湿度45%の低湿環境下、もしくは、吸水防止層が形成されにくい湿度85%の高湿環境下で塗布を行った。表-3に吸水防止層の厚さを示す。

写真-3に材料Aを塗布した供試体を割裂し、水を噴霧して確認した吸水防止層を示す。水が付着せず、白色を呈している層が吸水防止層である。

### (4) 実験方法

図-3に実験の流れを示す。

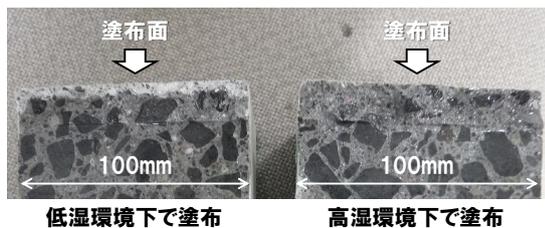


写真-3 材料Aの吸水防止層（室内実験）

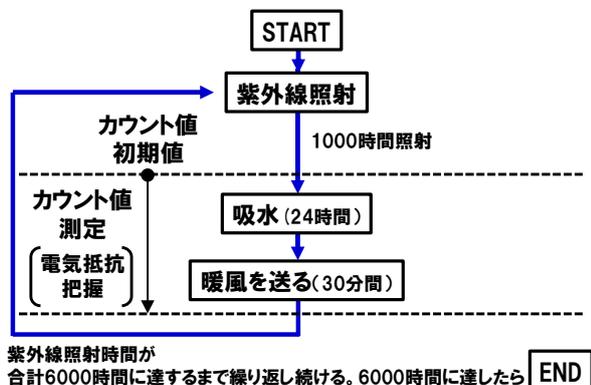


図-3 実験の流れ（室内実験）



写真-4 紫外線照射装置（室内実験）

実環境のコンクリート構造物は、常に紫外線を受け続けている。室内実験ではこれを模擬するため、70mm×70mm×20mmの供試体の塗布面に対して、JIS K 5600-7-7に準じたキセノンランプによる紫外線照射を継続して行った。写真-4に使用した紫外線照射装置を示す。

室内実験では、紫外線照射の合間に、図-2で示した作業を行った。ここでは、紫外線照射を1000時間行う → 表面に吸水を与える（電気抵抗を把握） → 表面を拭き取って暖風を与える（電気抵抗を把握） → 紫外線照射を1000時間行う → …の繰り返しを、照射時間の合計が6000時間に達するまで行った。

写真-5は、吸水させた供試体に暖風をあてている様子である。室内実験は図-2の妥当性の検証が目的であるため、供試体に十分な吸水を与えることとし、吸水時間を24時間に設定した。次に表面を拭き取り、供試体をボックスに収納し、除湿機の放熱器から排出される約40℃の暖風をボックスへ送り込む形で、表面へ均等に暖風を30分間当てた。

吸水開始から暖風乾燥までの間の表面の電気抵抗の推移は、写真-6に示す電気抵抗式水分計で調べた。この水分計は、長さ20mm、幅5mmの導電ゴム製の電極が10mm



写真-5 吸水後の供試体に暖風をあてている様子（室内実験）



写真-6 電気抵抗式水分計による測定の様子（室内実験）

表-4 カウント値と表面状態の関係<sup>5)</sup>

カウント値	10~55	60~132	137~230	235~520	521~744
表面状態	絶乾	乾燥	表面乾燥	湿潤	滞水

間隔で2本配置されている。表面に電極を押し当てて電流を流し、電極間の電気抵抗が表面の含水状態によって変化する原理を利用し、乾燥状態のときに最小40、湿潤状態のときに最大990の電気抵抗換算値（以下、カウント値と記す）を表示することで、表面の状態を評価する仕組みになっている。カウント値と表面状態の関係として、既報5)には表-4が示されており、カウント値が低いほど電気抵抗は高いと解釈することができる。

本研究では、このカウント値を電気抵抗の目安とし、カウント値で表面状態を評価することとした。

### (5) 実験結果・考察

図-4に吸水開始から暖風乾燥までの間の表面のカウント値の推移を示す。

無塗布と低温環境下で塗布した供試体のカウント値を比較すると、紫外線照射6000時間までの間、材料A、B、Cのいずれも、材料Cの紫外線照射5000時間のグラフを除いて低温環境下で塗布した供試体の方がカウント値は常に低かった。これは、主成分は有機で紫外線抵抗性に劣るため、表面の撥水機能は早期に消失しやすい一方、紫外線の作用は表層までは及ばないため、低温環境下で塗布した供試体に形成されている5~6mmの吸水防止層は消失せず、そのために吸水過程では表層に水分が吸収されにくく、また、吸水後の暖風乾燥の過程では表面が早く乾きやすいことを示し、図-2の概念と対応している。

高温環境下で塗布した供試体のカウント値の推移は、材料によってばらつきがあり、材料Aは紫外線照射4000時間まで、材料Bは紫外線照射3000時間までは無塗布よりもカウント値は低い傾向にあった。しかし、さらに紫

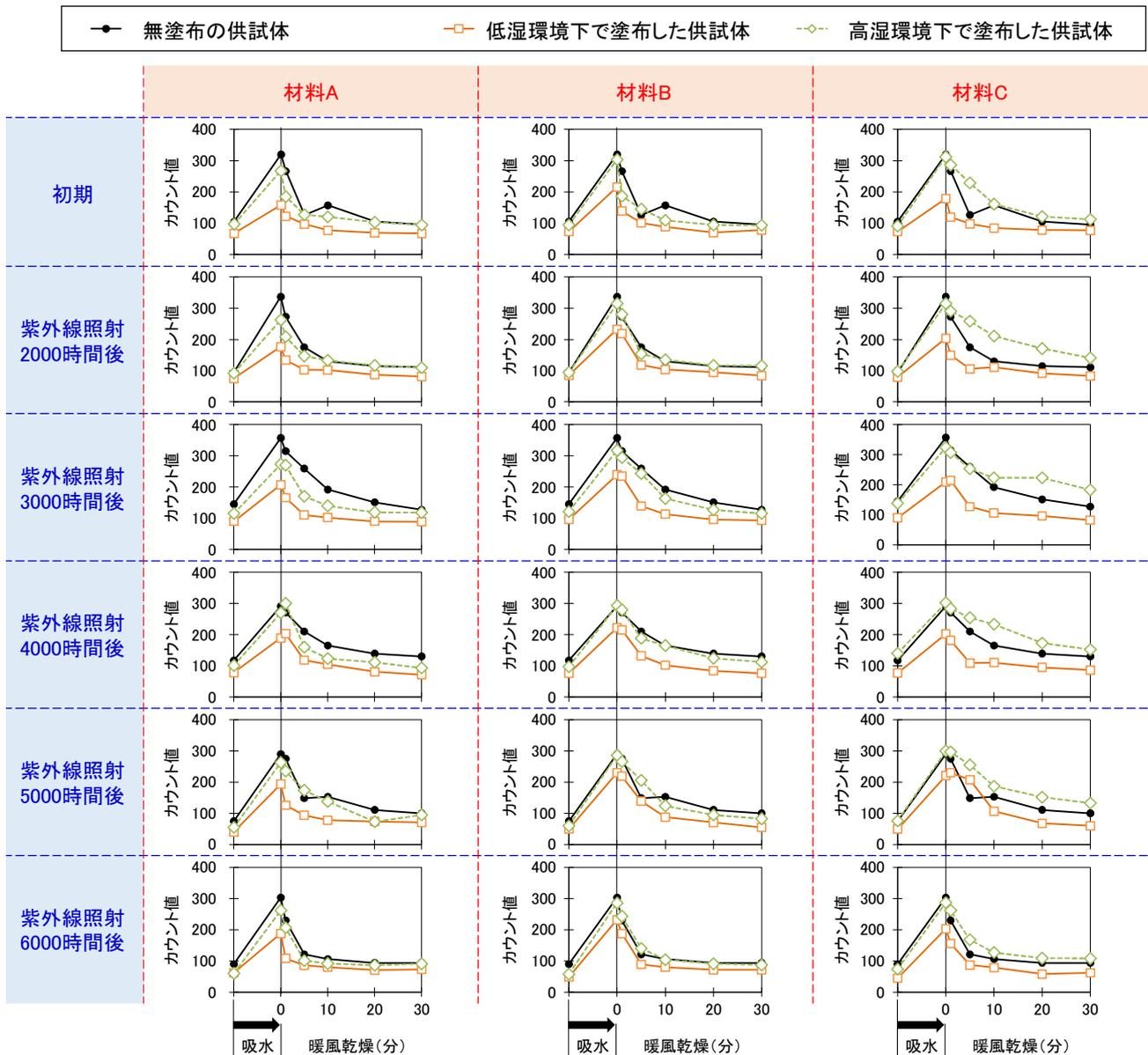
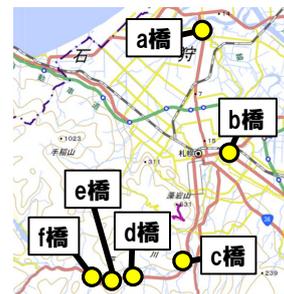


図-4 カウント値の推移（室内実験）

外線を照射し続けたところ、無塗布との差が縮まり、吸水抑制効果の消失が疑われる結果となった。材料Cについては初期の段階で無塗布よりもカウント値は高かった。材料A、Bに関しては、表-3で示したように十分な厚さの吸水防止層が形成されておらず、紫外線照射3000～4000時間までは含浸せずに表面近傍に固着した主成分が吸水抑制機能を発揮したものの、紫外線照射の継続によってその機能も低下に陥り、吸水抑制効果の消失に至ったと考えられる。無塗布よりもカウント値が低い期間が材料Bよりも材料Aの方が1000時間長かったのは、材料Aの供試体に厚さ0.2mmの薄い吸水防止層が存在していたため（表-3）と思われる。

室内実験の結果から、塗布から長期経年したコンクリートの吸水抑制効果の持続状況は、図-2で示した概念によって簡易かつ迅速に判定することができるように考えられる。



橋名	塗布実施年月
a橋	2009年10月
b橋	2009年1月
c橋	2012年12月
d橋	2012年11月
e橋	2012年11月
f橋	2009年10月

図-5 検証箇所および塗布実施年月（道路橋地覆）

### 3. 道路橋地覆での検証

#### (1) 調査箇所

次に、シラン系表面含浸材が塗布されている道路橋地覆において、図-2の有用性を検証した。図-5に検証箇所

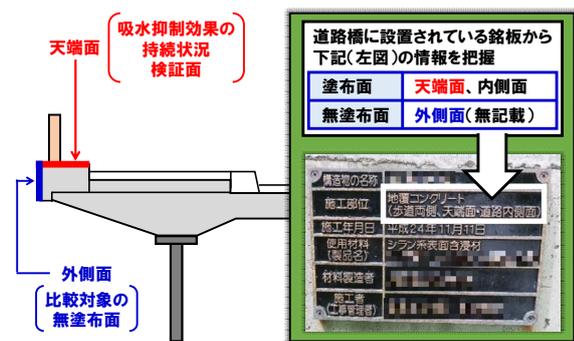


図-6 検証を行った部位と銘板(道路橋地覆、一部画像処理)

を示す。検証は札幌市内のa、b、c、d、e、fの6橋で行った。この6橋には、図-6の右に示すようなシラン系表面含浸材の塗布記録を明記した銘板が設置されている。著者らは検証に先立ち、この銘板の記録をもとに、6橋ともシラン系表面含浸材は地覆の天端面と内側面(道路側)に塗布されていることを確認している。そこで、図-6の左に示すように、吸水抑制効果の持続状況の検証面を天端面、無塗布面を外側面とし、図-2の有用性の検証を実施した。図-5の右は、銘板に記されていた塗布実施年月を示している。今回検証を行った地覆は、塗布から12~15年経過している。

## (2) 検証方法

図-7に吸水抑制効果の持続状況の簡易判定に関する検証の流れを示す。検証時の現場の天候は晴れもしくは曇りであった。

はじめに、コンクリートに付着している汚れを除去するため、表面を紙ヤスリで擦った。紙ヤスリによる表面処理に続いて行う作業は吸水であるが、供用中の地覆表層に既に存在する水分が判定結果に及ぼす影響についても調べることにした。吸水前に表面を充電式ヒートガンで事前乾燥させるケースとさせないケースをそれぞれ設けた。事前乾燥させるケースでは5分間、表面をヒートガンで乾燥させた。その後、吸水を行った。

吸水は、十分に濡らした布を地覆の天端面および外側面にあてることで行った。布をあてる時間は、現場で要求される迅速性を考慮し、ここでは15分間に設定した。次に、表面を乾いたウェスで拭き取り、表面に暖風をあてる作業を行った。暖風の供給は写真-7の中央に示すように、充電式のヒートガンを使用して行った。暖風が地覆表面に均等に行き渡るよう、写真-5で示した室内実験と同様に、地覆表面を断熱材で作製したボックスで囲った状態で暖風を供給した。暖風を送る時間は、図-4で示した室内実験において、暖風乾燥時間が20分経過以降ではカウント値に大きな変化がみられなかったことから、現場で要求される迅速性も考慮し、ここでは20分間に設定した。

吸水開始から暖風乾燥までの間の表面の電気抵抗の推移は、室内実験と同様、写真-6で示した電気抵抗式水分計を使用して調べた。写真-7の右は地覆表面に電気抵抗

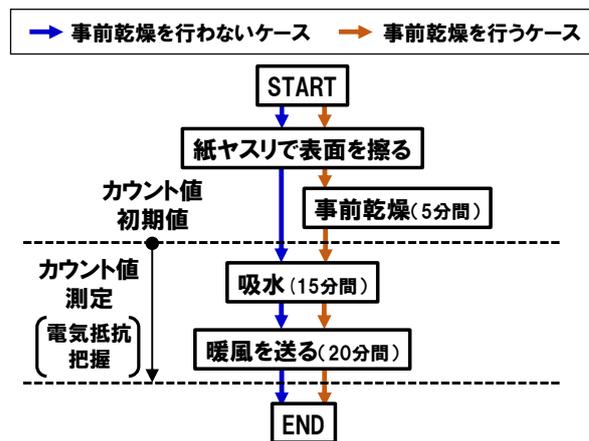


図-7 検証の流れ(道路橋地覆)



写真-7 検証状況(道路橋地覆)

式水分計の電極をあててカウント値の推移を調べている様子である。

## (3) 検証結果・考察

図-8に吸水開始から暖風乾燥までの間の表面のカウント値の推移を示す。

a橋、b橋、c橋、f橋は、無塗布の外側面よりも、シラン系表面含浸材が塗布されている天端面の方がカウント値が常に低い傾向となっている。この傾向は事前乾燥の実施有無に関係なく表れているが、事前乾燥を実施した方がより顕著に表れていた。この4橋に関しては、吸水防止層が存在し、吸水抑制効果が持続している可能性が高い。

c橋は、事前乾燥を行わなかったケースに着目すると、吸水過程では外側面よりも天端面の方がカウント値は低く、この時点の状況からは吸水抑制効果は持続しているように見える。しかし、暖風を与え始めたところ、外側面のカウント値が天端面よりも急速に大きく減少し、暖風乾燥20分後には天端面のカウント値を下回る特異な結果となった。この要因として、外側面は表層に微細ひび割れが存在し、暖風乾燥時に表層に蓄積されている多くの水分が蒸発し、ひび割れを介して外気へ急速に逸散した可能性がある。事前乾燥を行った場合は、僅差ではあるが、天端面の方が常にカウント値は低い傾向となっている。外側面とのカウント値の差が僅かだったのは、外側面の表層に存在する微細ひび割れの影響が考えられる。

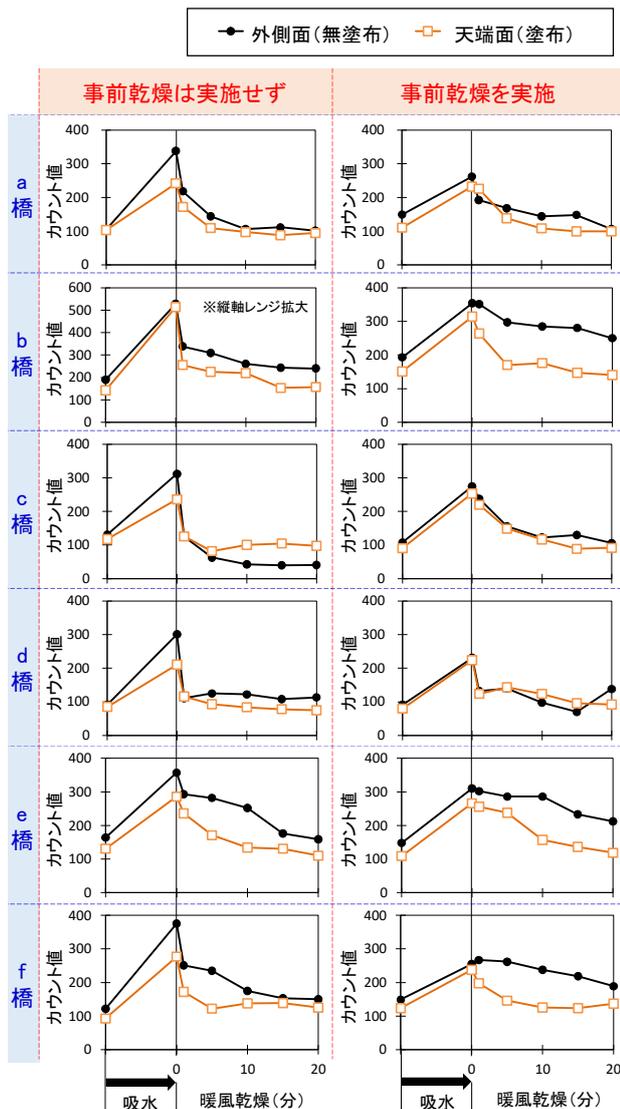


図-8 カウント値の推移 (道路橋地覆)

d橋は、事前乾燥を行わなかった場合、a橋、b橋、e橋、f橋と同様、外側面よりも天端面の方がカウント値は常に低い傾向となっており、吸水抑制効果は持続しているように見える。しかし、事前乾燥を行った場合、暖風乾燥の過程において、外側面と天端面のカウント値の推移にばらつきが認められた。ここで、事前乾燥を行わなかったケースに再び着目すると、吸水過程から暖風乾燥に切り替わった直後の外側面のカウント値の低下がやや大きいように見える。これはc橋でみられた傾向に近く、外側面の表層に微細ひび割れの存在が疑われる。

箇所数は6橋であるが、2章の室内実験の結果と照らし合わせると、塗布から長期経年した道路橋地覆の吸水抑制効果の持続状況も図-2の概念により、1箇所あたり約35～40分間(図-7)で非破壊で簡易かつ迅速に判定できるように考えられる。事前乾燥の可否に関しては、事前乾燥を行ったケースで、暖風乾燥時にカウント値の差がより顕著に表れたことに鑑みると、事前乾燥の実施が望ましいように思われるが、これについては今後もさらに多くの地覆でデータを積み上げ、詳しく検討していき

たい。また一方で、微細ひび割れの存在が疑われるコンクリートに図-2を適用するとc橋のようにカウント値がばらつく可能性があり、そのような場合の適切なスクリーニング方法、また、塗布面近傍に無塗布面が存在しない場合の検証方法についても引き続き検討していきたい。

#### 4. まとめ

本研究では、塗布から長期経年した既設コンクリートにおける吸水抑制効果の持続状況を、表面の粗さや上・下・横向きによらず、簡易かつ迅速に判定できる判定方法の開発を目指すこととしている。

今回はその一環として、吸水防止層が形成されている場合、水分を与えると表層に吸収されにくいいため表面に留まり、続けて表面を乾いたウェスで拭き取って暖風をあてると表層に吸収された水分が少ないために表面は早く乾燥することから、表面の電気抵抗は常に高い状態で推移することに着目し、表面に水分を与えて電気抵抗の推移を調べることで吸水抑制効果の持続状況を判定する方法を考案し、その妥当性を室内実験と道路橋地覆で検証した。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 室内実験では、吸水防止層が形成されている場合、紫外線照射を6000時間行っても吸水抑制効果の持続が期待されることを、考案した方法によって判定することができた。
- (2) 考案した方法によって、塗布から長期経年した道路橋の地覆の吸水抑制効果の持続状況を非破壊で簡易かつ迅速に判定できることがわかった。
- (3) 微細ひび割れの存在が疑われる場合、無塗布面に暖風乾燥を行うと水分がひび割れを介して急速に外気へ逸散して電気抵抗が高まる場合があり、適切なスクリーニング方法について課題が残った。

謝辞：道路橋地覆での調査にあたり、現場を提供いただいた北海道開発局札幌開発建設部に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル 2022年版，土木研究所資料，No.4433，pp.V-43-V-44，2022.12
- 2) 竈本武弘，浅井貴幸：電気抵抗式水分計を用いたコンクリート表面含浸材検査方法の検討，土木学会第66回年次学術講演会，V部門，V-309，pp.617-618，2011.9
- 3) 阪田憲次：硬化コンクリート中の水分の移動，コンクリート工学，Vol.32，No.9，pp.16-19，1994.9
- 4) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案) [工種別マニュアル編]，コンクリートライブラリー119，p.149，2005.4
- 5) 谷倉泉，榎園正義，後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究，構造工学論文集，Vol.59A，pp.1112-1123，2013.3