

夏期の高温・高湿環境下でのシラン系表面含浸材の適切な施工方法に関する試験施工 —吸水防止層の形成のためのクーラー除湿の留意点整理—

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 島多 昭典

シラン系表面含浸材は、コンクリートの劣化要因の一つである水の浸透を抑えるために使用される補修材である。コンクリート表層にシラン系表面含浸材を適切に含浸させ、吸水防止層を形成させるためには、施工時にコンクリート表層を乾燥させる必要がある。その一方で、湿った空気が充満しやすい夏期の高温・高湿環境下で施工が行なわれることもある。そこで、吸水防止層の形成に及ぼす施工時のスポットクーラー使用による除湿の効果ならびに施工留意点を整理するため、北斗および増毛において試験施工を行ったので、その結果を報告する。

キーワード：コンクリート、シラン系表面含浸材、高温・高湿、試験施工、除湿

1. はじめに

シラン系表面含浸材は、コンクリート構造物の延命化を目的に、コンクリートの劣化要因の一つである水の浸透を抑えるために使用される補修材である¹⁾。この材料は、コンクリート表面を膜で覆う被覆材とは異なり、図-1に示すように、コンクリート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コンクリートに吸水抑制機能を付与する。施工が簡便で、塗布後もコンクリート構造物の外観を変化させない等の長所を有しており、現在、コンクリート構造物の予防保全のために広く適用されている。

吸水防止層は、シラン系表面含浸材の主成分が水分と接触して加水分解²⁾を起こし、シラン系表面含浸材に含まれる疎水基がコンクリート表面や微細ひび割れの壁面に背を向ける形で固着することで形成される。よって、吸水防止層を形成させるためには、シラン系表面含浸材が表層へ行き渡るまでの間、加水分解の発生を遅らせる必要がある。そのため、塗布前にコンクリートを十分乾燥させることが望ましい。その一方で、湿った空気が充満しやすい夏期の高温・高湿環境下で施工が行なわれることもある。冬期であれば、熱風式ヒーターを使用してコンクリートを乾燥させる選択肢もある³⁾。しかし、高温の夏期に熱風式ヒーターを使用することは、作業員の健康に影響が及ぶため現実的ではない。

著者らは既報⁴⁾で、熱風式ヒーターの使用が厳しい夏期を想定し、施工でのクーラー除湿の有用性を調べる室内実験を行った。その結果、気中の相対湿度が高いと（室内実験では98%以上に設定）水蒸気に変化した表層水分を取り込むスペースが気中に少ないため、水分蒸散

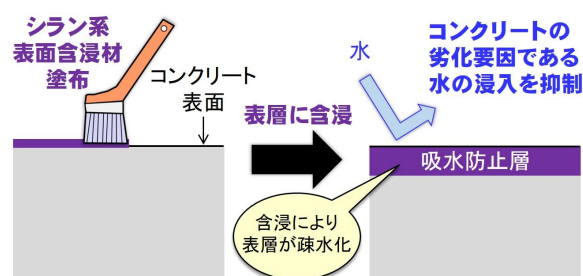


図-1 シラン系表面含浸材による改質の概念

が表面近傍にとどまり、シラン系表面含浸材が表層へ十分行き渡らないこと、また、コンクリート表面に風をあてて乾かすだけでは不十分で、気中の水蒸気の排除に努めることが大切であることを確認した。

本論文では、この知見の普遍性の検証とクーラー除湿による施工の留意点について整理することを目的に、夏期に相対湿度が高まりやすい北海道沿岸部のコンクリート構造物で試験施工を行ったので、その結果を報告する。

2. 試験施工の概要

(1) 現場

試験施工は、1971年に竣工した一般国道228号北斗市三ツ石の瑞石橋主桁下面（以下、北斗と記す）および1970年に竣工した一般国道231号増毛町岩老の湯泊トンネル抗口付近の擁壁表面（以下、増毛と記す）の2箇所で行った。図-2に位置を示す。北斗は橋長7mのPC橋で、写真-1に示すように主桁下面直下に三ツ石川が流れ、常時日陰の環境にある。一方、増毛は、写真-2の左下に示



図-2 試験施工場所



写真-3 電気抵抗式水分計

表-1 電気抵抗式水分計のカウント値と
コンクリート表面の含水状態の関係⁹⁾

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

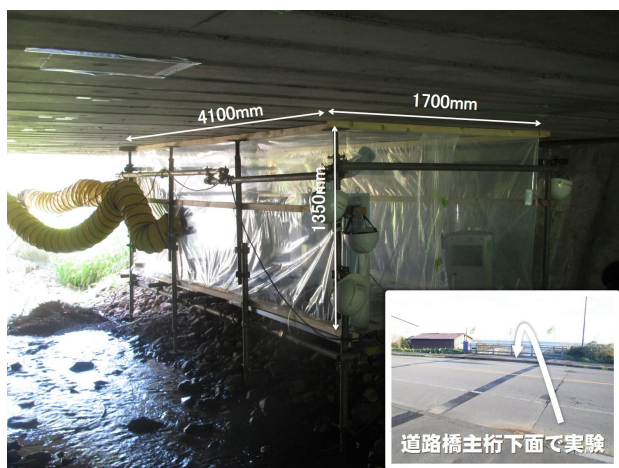


写真-1 試験施工の様子（北斗）

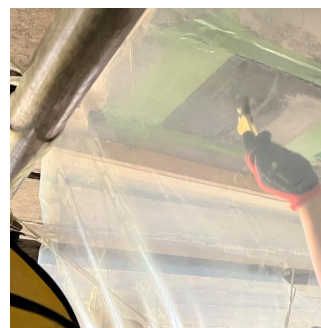


写真-4 塗布状況の一例（北斗）

表-2 試験施工で使用したシラン系表面含浸材

材料名	主成分	塗布量
A	アルキルアルコキシシラン	300g/m ²
B	アルキルアルコキシシラン	600ml/m ²

コンクリート表面の含水状態は、写真-3に示す電気抵抗式水分計で調べた。この水分計には長さ20mm、幅5mmの導電ゴム製の電極が10mm間隔で2本配置されており、コンクリート表面に電極を押し当てて（写真-3の左上）電流を流し、電極間の電気抵抗が水分によって変化する原理を利用してコンクリート表面の含水状態を評価する仕組みになっている。この水分計には、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。乾燥しているほどカウント値は小さい）が表示される機能が備えられている。

既報⁹⁾には、カウント値とコンクリート表面の含水状態の関係として、表-1が示されている。

(3) 使用したシラン系表面含浸材

写真-4にシラン系表面含浸材の塗布状況の一例、表-2に試験施工で使用したシラン系表面含浸材を示す。シラン系表面含浸材は、北海道開発局道路設計要領第3集第2編参考資料Bに示されている選定目安⁶⁾を満たす2製品（以下、材料A、材料Bと記す）を使用した。いずれの



写真-2 試験施工の様子（増毛、コンクリート面に布テープを貼って仕切った枠内がシラン系表面含浸材塗布範囲）

すように日本海に面しているが、北斗とは対照的に、擁壁表面に直射日光が作用しやすい環境にある。

ここでは、単管とビニールで塗布作業空間を囲うとともに、囲い内部にスポットクーラーを設置して除湿を行った。除湿の方法は、北斗と増毛でそれぞれ異なるため、3章および4章で後述する。

(2) 温度と相対湿度およびコンクリート表面の含水状態

温度と相対湿度の管理は、囲い内部に温湿度センターを取り付けて行った。除湿効果の確認のため、囲いの外（以下、囲い外と記す）にもセンサーを取り付けた。

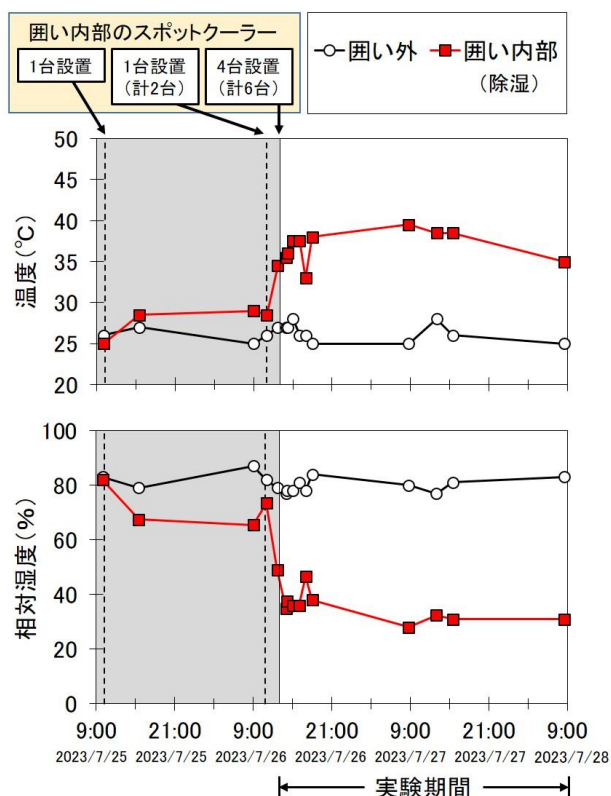


図-3 温度と相対湿度の経時変化（北斗）

製品も、主成分はアルキルアルコキシシランである。なお、塗布量は統一せず、製造会社指定の標準量とした。

(4) 吸水防止層の形成状況の確認

試験施工終了から約1ヶ月後にコア採取を行った。そして、コアを割裂して割裂面に水を噴霧し、撥水を呈した範囲を吸水防止層と判断し、厚さを測定した。

3. 日陰環境での検証（北斗）

(1) 温度と相対湿度

常に日陰環境にあり、川も流れる北斗での試験施工は、2023年7月25～28日に行った。

図-3は囲い外と囲い内部の温度と相対湿度の経時変化を示している。なお、本章での「囲い外」は写真-1で示した日陰空間を指し、橋上ではない。囲い外の気温は、夜間が日中より2～3℃低いものの変動は小さく、概ね25℃程度で推移した。相対湿度は約80%であった。

一方、囲い内部は、7月25日11:00に除湿能力1.6ℓ/hのスポットクーラー（電力量600W）を1台設置したものの、相対湿度は60～70%程度までしか下がらなかった。そこで、7月26日11:00に除湿能力1.9ℓ/hのスポットクーラー（電力量790W）を1台、さらに追加で、同日13:00に除湿能力0.4ℓ/hのスポットクーラー（電力量220W）を4台設置し、除湿能力の合計を5.1ℓ/hまで高めたところ、囲い内部の相対湿度は30%程度まで低下した。この調整を踏

実験前の 表面処理	実験期間(2023/7/26 13:00～)		
	塗布前 除湿時間		塗布後 除湿時間
研掃+アセトン	44時間	塗布	1時間
研掃+アセトン	27時間	塗布	18時間
研掃+アセトン	24時間	塗布	21時間
研掃	21時間	塗布	24時間
研掃+アセトン	21時間	塗布	24時間
クエン酸+アセトン	21時間	塗布	24時間
研掃+アセトン	3時間	塗布	42時間
なし	なし	塗布	なし

図-4 実験水準（北斗）

まえて、7月26日13:00以降を実験期間とした。また、除湿に起因する温度低下による結露を防止するため、クーラーの排熱ダクトは外気へ出さず、クーラーの排熱は囲い内部に放散させた。そのため、囲い内部の温度は、囲い外よりも12℃ほど高い約37℃で推移した。

(2) 実験水準

図-4は実験水準を示している。

ここでは、含浸に及ぼす塗布前・後の除湿時間の影響を調べるため、塗布前・後の除湿時間の合計を45時間に定めた上で、塗布前の除湿時間を長くしたケース（塗布前44時間、塗布後1時間）、塗布後の除湿時間を長くしたケース（塗布前3時間、塗布後42時間）および塗布前・後の除湿時間をそれぞれ約1日分確保した上で除湿時間に差をつけたケース（塗布前27・24・21時間、塗布後18・21・24時間）をそれぞれ設定した。また、比較のため、囲い外の主桁下面において、塗布前・後の除湿を一切行わないで塗布するケースも設けた。

塗布前に実施する表面処理は、研掃と水分除去を目的としたアセトン洗浄を基本としたが、ここでは含浸に及ぼす表面処理の影響を調べるため、塗布前の除湿21時間、塗布後の除湿24時間のケースを代表して、研掃とアセトン洗浄、研掃のみ、および、コンクリート内部での経年の水分移動によって溶け出したカルシウムと二酸化炭素との反応でコンクリート表面に固着した結晶物の除去効果を期待したクエン酸10%水溶液の噴霧とアセトン洗浄、の3水準を設けた。

(3) コンクリート表面の含水状態

図-5は、2023年7月25日9:00から、シラン系表面含浸材を塗布する直前までの間に調べた相対湿度と主桁表面のカウント値（表-1）の関係を示している。相対湿度が約80%の囲い外の主桁下面におけるカウント値は200～260であり、表-1に基づくコンクリートはほぼ湿潤状態にあった。一方、実験期間である7月26日13:00以降の相対湿度が30%程度の囲い内部の主桁下面におけるカウント値は110～220であり、表-1に基づくコンクリートは表面乾燥状態もしくは乾燥状態にあった。

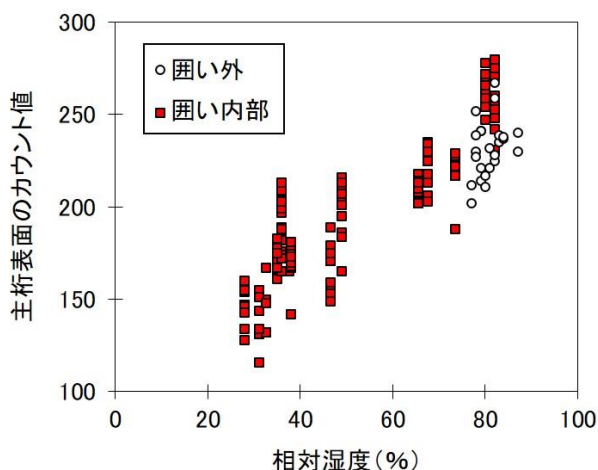


図-5 北斗で調べた相対湿度と主桁表面のカウント値の関係
(シラン系表面含浸材塗布直前までの測定値)

(4) 吸水防止層の厚さ

図-6は吸水防止層の厚さの測定結果を、塗布前・後の除湿時間の影響に着目して整理したものである。材料A、Bのいずれも、塗布前・後に除湿を一切行わなかったケースは吸水防止層が確認されなかった。また、塗布前の除湿時間が44時間と長い一方で、塗布後の除湿時間が1時間と短いケースでも同様に吸水防止層が確認されなかった。これは、塗布後の除湿が不十分で、含浸が本格的に始まる前に相対湿度が上昇して加水分解が発生し、含浸が早期に終了したものと考えられる。これに対して、塗布前の除湿時間が44時間よりも短い3～27時間である一方で、塗布後の除湿時間を18～42時間確保したケースでは吸水防止層が確認された。これは、塗布前の除湿が3時間程度でも、塗布後も一晩以上、主桁下面の乾燥を保持させると加水分解の発生が遅延し、含浸も進行することを示す。このことから、吸水防止層の形成に及ぼす除湿の効果は高く、とりわけ、塗布後の除湿時間の影響が大きいことがわかった。

図-7は吸水防止層の厚さの測定結果を、塗布前の表面処理方法の影響に着目して整理したものである。吸水防止層の厚さは、クエン酸10%水溶液の噴霧とアセトン洗浄を行ったケースが相対的に最も大きく、含浸を阻害するカルシウム結晶物の除去の効果が示される結果となった。研掃のみのケースと研掃とアセトン洗浄を併用するケースを比較すると、研掃のみの方が吸水防止層の厚さは大きかった。これは、今回の実験では塗布前に実施した除湿だけでも主桁下面の乾燥が進んだためと思われる。

4. 日向環境での検証（増毛）

(1) 温度と相対湿度

日射を遮る障害物がなく、晴天時は常に直射日光を受

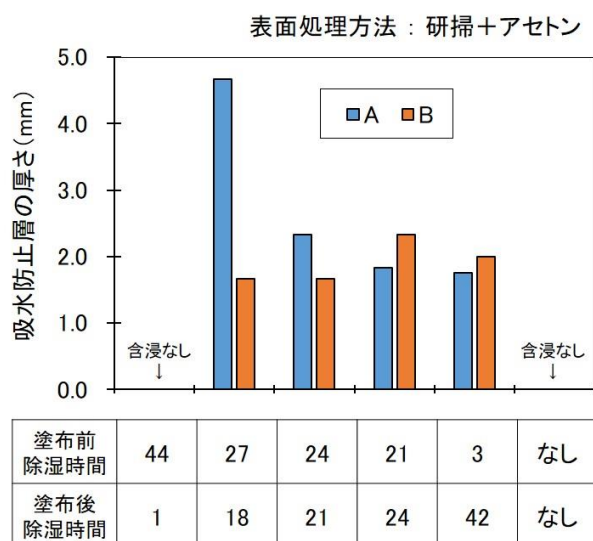


図-6 北斗における吸水防止層の厚さの測定結果
(塗布前・後の除湿時間の影響)

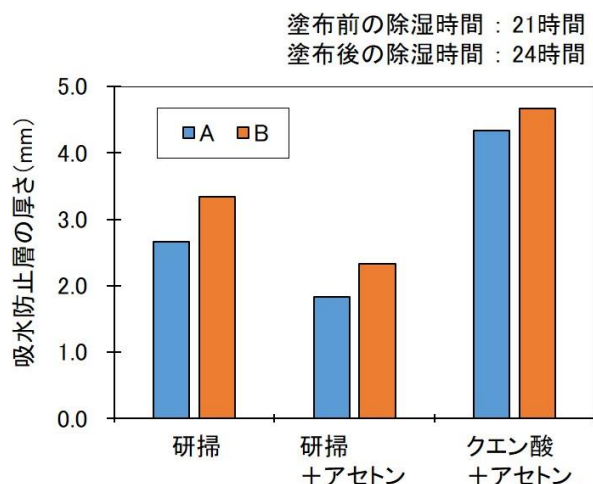


図-7 北斗における吸水防止層の厚さの測定結果
(塗布前の表面処理方法の影響)

ける増毛での試験施工は、2023年8月21～23日に行った。

囲い内部の容積は、北斗が約9.4m³ (4100mm×1700mm×1350mm) に対し、増毛は約2.2m³ (1300mm×1300mm×1300mm) である(写真-1、2)。増毛では、北斗の囲い内部における容積1m³あたりの除湿能力が5.1ℓ/h÷9.4m³＝0.54ℓ/h/m³であったことに鑑み、除湿能力を0.54ℓ/h/m³×2.2m³＝1.2ℓ/hに設定し、除湿能力0.4ℓ/hのスポットクーラー(電力量220W)を2023年8月21日15:00に3台設置した。除湿能力を北斗と整合させるため、増毛ではこれ以降を実験期間とした。増毛でも結露を防止するため、クーラーの排熱は囲い内部へ放散させた。

図-8に囲い外と囲い内部の温度と相対湿度の経時変化を示す。囲い内部の相対湿度は囲い外より低めに推移したが、日陰環境の北斗とは対照的に、日向環境の増毛は囲い外の温度が30～40℃と高く、相対湿度も55～70%で推移したこともあり、相対湿度の減少幅は北斗(図-3)に比べると小さかった。

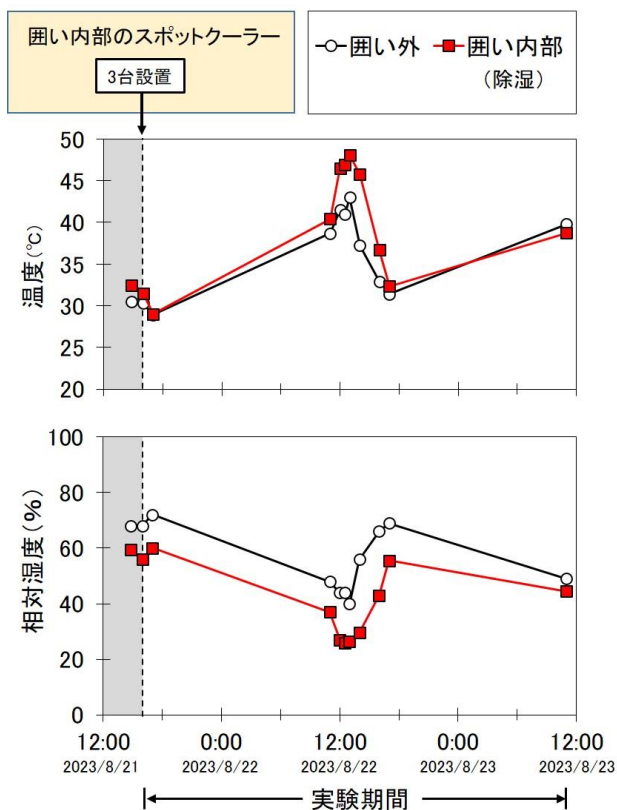


図-8 温度と相対湿度の経時変化（増毛）

実験前の 表面処理	実験期間（2023/8/21 15:00～）	
	塗布前除湿時間 2023/8/21 15:00～2023/8/22 11:00	塗布後除湿時間 2023/8/22 15:00～2023/8/23 11:00
研掃	20時間	塗布 20時間
研掃	20時間	塗布 なし（囲い外に曝す）
研掃	なし（囲い外に曝す）	塗布 20時間
研掃	なし（囲い外に曝す）	塗布 なし（囲い外に曝す）
なし	20時間	塗布 20時間
なし	20時間	塗布 なし（囲い外に曝す）
なし	なし（囲い外に曝す）	塗布 20時間
なし	なし（囲い外に曝す）	塗布 なし（囲い外に曝す）

図-9 実験水準（増毛）

(2) 実験水準

図-9に実験水準を示す。本章でも吸水防止層の形成に及ぼす塗布前・後の除湿の影響と表面処理方法の影響を調べた。表面処理方法は、研掃の有無の2水準とした。

(3) コンクリート表面の含水状態

図-10は擁壁表面のカウント値の経時変化である。測定は図-9の工程に即して、塗布範囲近傍の無塗布面（写真-2の布テープで仕切った枠の外）で行った。増毛は、囲い内部と囲い外ともカウント値は一部を除いて150～220となり、表-1に基づくコンクリートは表面乾燥状態にあった。囲い内部は北斗とは対照的に乾燥状態にまで達しなかったが、これは、擁壁表面と囲いの単管との

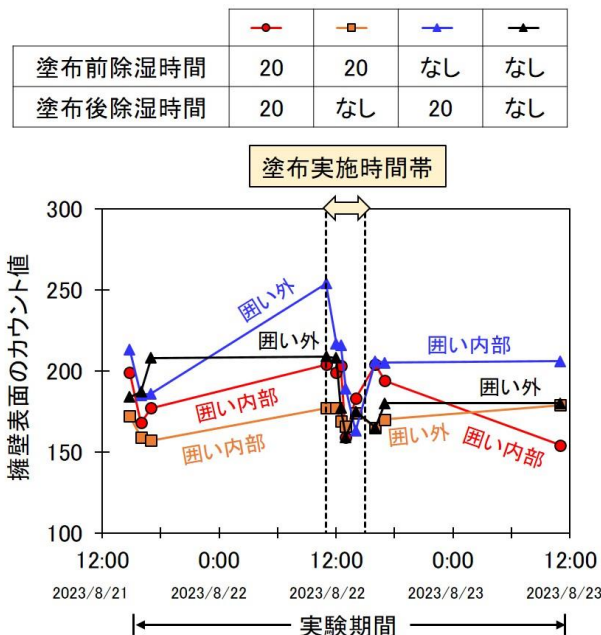
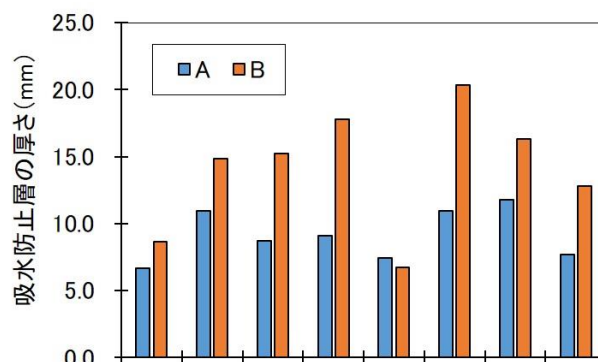


図-10 擁壁表面のカウント値の経時変化（増毛）



塗布前 除湿時間	20	20	なし	なし	20	20	なし	なし
塗布後 除湿時間	20	なし	20	なし	20	なし	20	なし
表面処理	研掃				なし			

図-11 増毛における吸水防止層の厚さの測定結果

間には隙間があり（写真-2）、気中の水蒸気の一部が隙間を介して囲い内部へ浸入した可能性があり、この影響が疑われる。

(4) 吸水防止層の厚さ

図-11に吸水防止層の厚さの測定結果を示す。縦軸のレンジは図-6、7よりも大きく表示している。増毛では、塗布前・後の除湿時間や表面処理の方法によらず、いずれのケースでも厚さ5mm以上の吸水防止層が確認された。また、全体的にみると、材料A、Bともに塗布前・後に除湿を20時間行ったケースで、吸水防止層の厚さが相対的に最も小さい特異な結果となった。

この理由を考察するため、図-3、8で示した温度と相対湿度をもとに、図-12の湿り空気線図から北斗と増毛の絶対湿度を調べた。図-12より北斗の絶対湿度は、囲

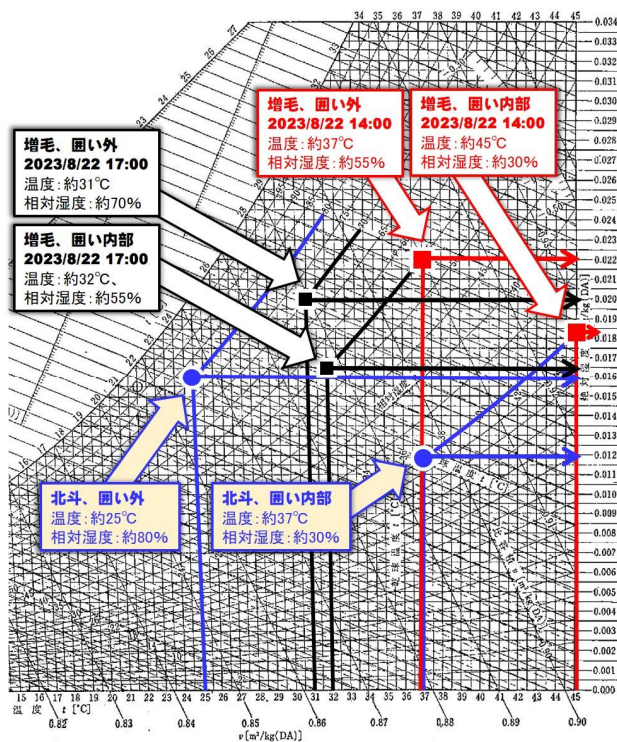


図-12 湿り空気線図に基づく北斗と増毛の絶対湿度(文献7を加工
(グラフの縦軸が絶対湿度))

い内部が0.012kg/kgで囲い外は0.016kg/kgであった。増毛の絶対湿度は、例えば気温が高い2023年8月22日14:00時点では囲い内部が0.018kg/kgで囲い外が0.022kg/kg、気温が低い同日17:00時点では囲い内部が0.017kg/kgで囲い外が0.020kg/kgであった。このことから、乾いた空気1kgに含まれる水蒸気の絶対量は、増毛の方が多くなる。

一方で、写真-2の左下で示したように、増毛の擁壁表面は直射日光を受けている。また、図-10で示したように、増毛は囲い内部、囲い外によらず、コンクリート表面は乾燥状態にある。このため、常時日陰環境の北斗とは対照的に、増毛の擁壁のコンクリート表層の温度は気中の温度よりも高い可能性がある。すなわち、増毛はクーラー除湿ならびに研掃の影響よりも直射日光の作用の影響が卓越し、擁壁表面が全体的に大きく乾燥していたため、吸水防止層の厚さが北斗を大きく上回る結果になったと考えられる。塗布前・後に除湿を20時間行ったケースで吸水防止層の厚さが相対的に最も小さくなったのは(図-11)、実験期間を通じて擁壁表面に常時設定した囲いによって日射が長時間にわたって遮蔽され、コンクリート表面に作用する直射日光の強さが和らいだことが原因と思われる。

このことから、高温の夏期におけるシラン系表面含浸材の塗布に関して、気中の湿度は高いものの、施工期間中、直射日光の作用でコンクリート表層の除湿・乾燥が継続的に十分図られるような立地条件下であれば、クーラーによる除湿作業を省いても吸水防止層の形成に及ぼす影響はさほど大きくないと考えられる。

5. まとめ

本論文では、湿った空気が充満しやすい夏期の高温・高湿環境下でのシラン系表面含浸材の適切な施工方法の構築に向け、施工でのスポットクーラー使用による除湿の効果ならびにその施工の留意点について整理するため、常時日陰環境にあって川も流れる北斗市内の道路橋主桁下面と、日本海沿岸に位置し、湿度は高いものの日向環境にある増毛町内のトンネル抗口の擁壁表面で試験施工を行った。

本研究の範囲で得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- (1) 吸水防止層の形成に及ぼす除湿の効果は高い。
- (2) 塗布後の除湿の影響は大きく、塗布前の除湿が3時間程度であっても、塗布後の除湿時間を十分確保することにより、吸水防止層が形成されることが見込まれる。
- (3) 塗布後の除湿時間が不十分であれば、含浸が本格的に始まる前に相対湿度が上昇して加水分解が発生し、含浸が早期に終了し、十分な厚さの吸水防止層が形成されないことがある。
- (4) コンクリート表面が直射日光を受ける場合、除湿の効果よりも直射日光による乾燥作用の影響が大きく卓越することで、吸水防止層の厚さが大きくなる可能性がある。

謝辞：今回の試験施工の実施にあたり、現場を提供いただいた北海道開発局函館開発建設部と留萌開発建設部をはじめ、ご協力いただいた関係各位に対して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.146，2005.4
- 2) 文献1)，p.175
- 3) 遠藤裕丈，島多昭典：冬期のシラン系表面含浸材塗布作業時の最適な加温方法に関する実橋実験—吸水防止層を確実に形成させる施工技術を目指して—，第64回（令和2年度）北海道開発技術研究発表会発表概要集，2021.2
- 4) 遠藤裕丈，島多昭典：高温多湿下でのシラン系表面含浸材の適切な施工方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.1510-1515，2023.7
- 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
- 6) 北海道開発局道路設計要領，第3集橋梁，第2編コンクリート，参考資料B「道路橋での表面含浸材の適用にあたっての留意事項」，p.3-コB-6，2023.4
- 7) 空気調和・衛生工学会：空気調和設備の実務の知識，オーム社，p.16，1971.5