

高温・高湿環境下でのシラン系表面含浸材の施工品質確保に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令3～令5

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：島多昭典、内藤勲、遠藤裕丈

【要旨】

シラン系表面含浸材は水や塩化物イオンの侵入を抑制する浸透性の保護材である。塗布の際はコンクリート表層を乾燥させる必要があるが、夏期の高温高湿下で塗布が行われることもある。そこで、高温高湿下でのシラン系表面含浸材の適切な施工法を明らかにすることを目的に実験を行った。その結果、除湿は吸水防止層の形成に有用であること、特に塗布後の除湿は効果が大きいこと、高湿下でも施工中に作用する直射日光も含浸促進に効果的であること、数日間にわたって数回にわけて塗布を行うと高湿下でも吸水防止層が形成されることもあること等がわかった。そして、施工要領への成果反映を見据え、高温・高湿環境下での適切な施工の要点をまとめた。
 キーワード：コンクリート、シラン系表面含浸材、高温高湿、施工、吸水防止層、除湿、暴露実験

1. はじめに

シラン系表面含浸材は、図-1 に示すようにコンクリート表面および表層に吸水抑制機能を付与し、劣化要因である水や塩化物イオンの侵入を抑制する浸透性の保護材料である。この材料は、主成分が加水分解してコンクリート組織に固着することで撥水を呈する。厚い吸水防止層を形成するには、塗布した主成分が深く行き渡るまでの間、加水分解の発生を遅らせる必要がある。そのため、塗布に先立ち、コンクリートを十分乾燥させることが望ましい。

しかし、中には、写真-1 に示すように、湿度が高まりやすい沿岸地域のコンクリート構造物で塗布が行われるケースもある。冬期であれば熱風式ヒーターを使用して、コンクリート表面を加温することで湿度を下げる方法もある²⁾が、気温の高い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。その一方で、高湿下での塗布は、吸水防止層の厚さが小さくなり、吸水抑制効果が短期間で消失し、期待した性能が十分に発揮されない不具合事例につながる懸念され、適切な施工方法の整備が求められる。

そこで本研究では、高温高湿下に曝されているコンクリートへのシラン系表面含浸材の適切な施工方法を明らかにするため、はじめに作業空間の除湿を施したときのコンクリート表層の含水状態の変化と、塗布後の含浸深さに及ぼす除湿の効果について実験的に調べた。そして、実験で得た知見の実用性を検証するため、道路橋において試験施工を行った。また、高温高湿下で塗布した鉄筋コンクリートの腐食抑制性能を調べる

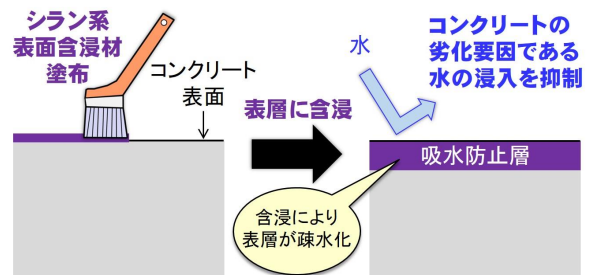


図-1 シラン系表面含浸材による改質の概念

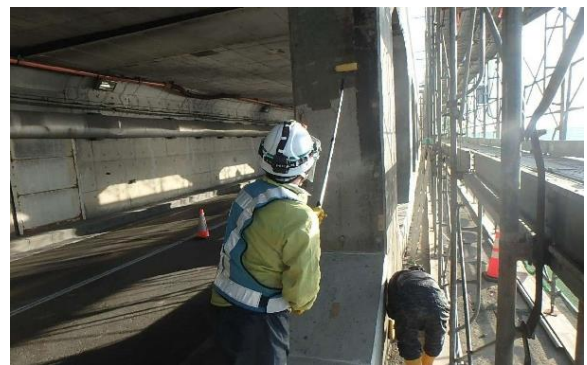


写真-1 湿度が高くなりやすい沿岸覆道での塗布例

表-1 2章におけるコンクリート配合

水セメント比	使用セメント	単体量(kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
55%	普通ポルト	155	282	842	1040

ため、北海道沿岸において暴露実験を行った。

2. 除湿によるコンクリート表層の含水率低下挙動の評価

2章では、作業空間の除湿を施したときのコンクリ

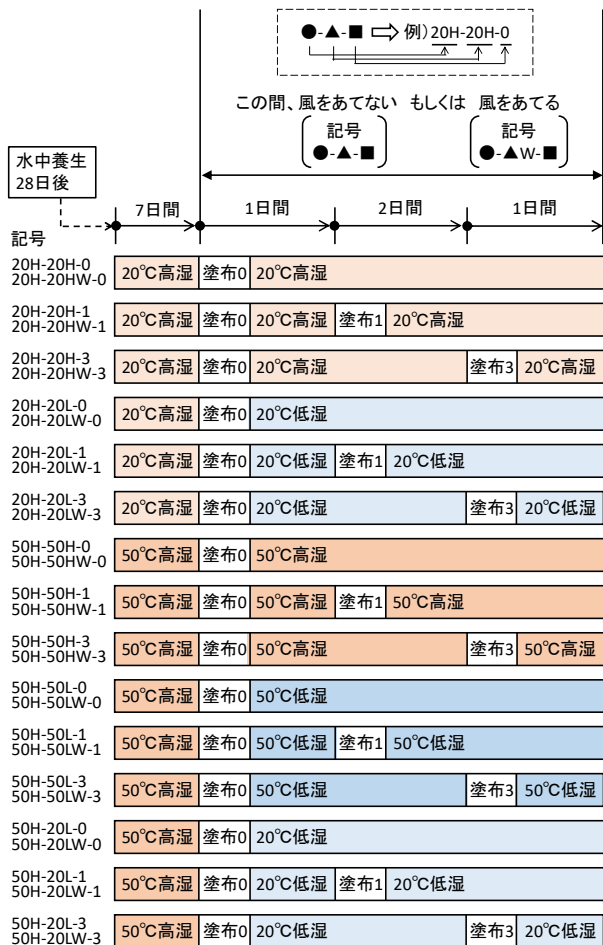


図-2 実験環境

ート表層の含水状態の変化と、塗布後の含浸深さに及ぼす除湿の効果について実験的に調べた。

2. 1 実験概要

2. 1. 1 コンクリート配合

表-1にコンクリート配合を示す。内陸部の鉄筋コンクリート構造物の配合³⁾を模し、水セメント比を55%に設定した。セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材には、表乾密度 2.65g/cm³、吸水率 1.19%、除塩処理済の苫小牧市錦岡産の海砂を使用した。粗骨材には、表乾密度 2.68g/cm³、吸水率 1.65%、最大寸法 20mm の小樽市見晴産の砕石を使用した。スランプは 12±2.5cm、空気量は 5.0±1.5%を目標とし、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. 1. 2 供試体

供試体の寸法は 100mm×100mm×200mm とした。打設後、水中養生を 28 日間行った。水中養生後、塗布を行う供試体の底面（100mm×200mm、以降、試験面と記す）以外からの水分の浸入・蒸散を防ぐため、試

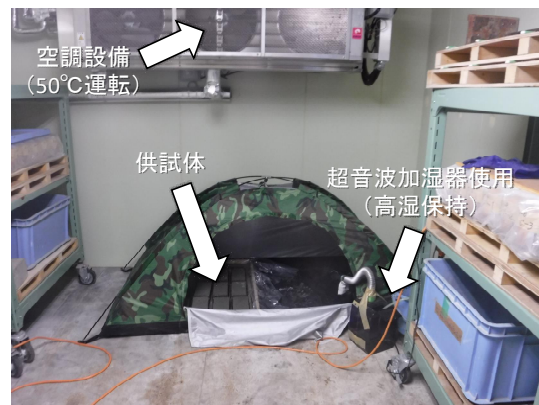


写真-2 50°C高湿の様子



写真-3 供試体に風をあてている状況

験面以外の 5 面をエポキシ樹脂で被覆した。

2. 1. 3 実験環境

図-2 に実験環境を示す。

はじめに、高湿環境に曝されているコンクリート構造物の状態を再現するため、高湿下に 7 日間、供試体を曝した。温度は夏期を想定して 20°C と 50°C の 2 条件とした。50°C は、夏は日射の作用で表面温度が 50°C に達する場合もある⁴⁾ことに鑑みたものである。写真-2 に一例として、温度 50°C の高湿環境（50°C 高湿）の様子を示す。50°C の実験室にタープを設置し、タープ内部に供試体を置くとともに、タープ内部の床面が結露する様に超音波加湿器を運転し、湿度 98% 以上の高湿環境にした。20°C 高湿は温度以外、同じ方法である。7 日間曝した後、試験面にシラン系表面含浸材を塗布した。以降、この塗布作業を「塗布 0」と記す。

塗布 0 実施後、高湿をそのまま保持させた環境、もしくは、現場でのスポットクーラー使用による除湿を想定した低湿下に供試体を静置した。低湿環境は、超音波加湿器の運転を停止するとともに、実験室の湿度を 60% に設定することで調整した。ここで、塗布 0 の塗布作業により、水分の浸入抑制とともに、コンクリート表層の水分が徐々に気中へ蒸散し、表層の水分減少が進んだ後に再び塗布すると、主成分がより深く行き渡ると考え、塗布 0 から 1 日後もしくは期間を空けた 3 日後に再び塗布を行うケースを設けた。以降、前者の塗布作業を「塗布 1」、後者の塗布作業を「塗布

表-2 室内実験で使用したシラン系表面含浸材

材料	主成分	塗布量
A	アルキルアルコキシシラン	280g/m ²
B	シラン・シロキサシ、樹脂成分	200g/m ²
C	アルキルアルコキシシラン	530g/m ²

3) と記す。

さらに、現場での送風機使用による乾燥の効果についても調べるため、図-2 の環境のもとで風をあてるケースも設けた。実験では、写真-3 に示すように扇風機を使用し、試験面に約 2m/s の風を当て続けた。

図-2 に示す実験記号は、(i)塗布 0 までの環境（温度、高湿を表す H）、(ii)塗布 0 以降の環境（温度、高湿を表す H もしくは低湿を表す L、風をあてた場合は風を表す W）、(iii)塗布時期（塗布 0 のみ行った場合は 0、塗布 0 と塗布 1 を行った場合は 1、塗布 0 と塗布 3 を行った場合は 3）の 3 つの組み合わせで構成されている。

2. 1. 4 シラン系表面含浸材

表-2 に実験で使用したシラン系表面含浸材を示す。ここでは、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⁹⁾を満たす 3 製品（以降、材料名をそれぞれ A、B、C と記す）を使用した。A と C の主成分はアルキルアルコキシシラン、B はシラン・シロキサシと樹脂成分が配合されている。塗布量は製造会社指定の標準量の単位を g/m² に統一換算して表示した。

2. 1. 5 コンクリート表面の水分状態

塗布実施時のコンクリート表面の水分状態を確認するため、水分計による測定を行った。ここでは、塗布時の電気抵抗式水分計の測定値が吸水防止層の厚さと対応した既報⁹⁾に鑑み、電気抵抗式水分計を使用した。写真-4 に測定状況を示す。この水分計は、10mm 間隔で 2 本配置されている長さ 20mm、幅 5mm の導電ゴム製の電極をコンクリート表面に押し当て、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付近の水分状態を評価する仕組みとなっている。この水分計には、コンクリート表面が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。表-3 はカウント値とコンクリート表面状態の関係を示している⁷⁾。

2. 1. 6 吸水防止層の厚さ

図-2 に示す期間を終えた後、試験面に対して垂直



写真-4 電気抵抗式水分計による測定状況

表-3 電気抵抗式水分計のカウント値とコンクリート表面状態の関係（谷倉ら⁷⁾の実験結果より）

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

方向へ供試体を割裂し、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、ノギスで厚さを測定した。

2. 2 実験結果・考察

2. 2. 1 コンクリート表面の水分状態

図-3 に塗布 0（図-2）実施時と塗布 1（図-2）実施時のカウント値を示す。塗布 0 前は無塗布の状態が高湿下に 7 日間曝したため、塗布 0 実施時のカウント値は湿潤や滞水に相当する 500~600 程度であった。一方、塗布 1 実施時のカウント値は、塗布 0 後の環境によらず 100~200 程度まで低下した。石神ら⁸⁾はコンクリートの水分状態と電気抵抗は関係があることと、シラン系表面含浸材の塗布によってコンクリート表面の電気抵抗が著しく向上することを報告しており、試験面では撥水付与に繋がる主成分の加水分解による水分消費で乾燥が生じていることが考えられる。なお、低湿に曝したケースでは湿度低下のみの影響も考えられたため、何も塗布しない供試体を別途用意し、その測定値を破線で図示した。50H-20L-1 では棒グラフと破線がほぼ同値となり、湿度低下の影響が大きいと思われるが、棒グラフの値が破線以下のケースもあり、低湿に曝したケースでも塗布の影響が関与していると言える。

図-4 は、塗布 1 実施時のカウント値に及ぼす風の影響を整理したものである。風をあてた方が乾燥は進み、カウント値はさらに小さくなると考えていたが、今回の実験では $y=x$ の直線付近に多くのデータがプロットされ、風の影響は明確に表れなかった。また、塗布

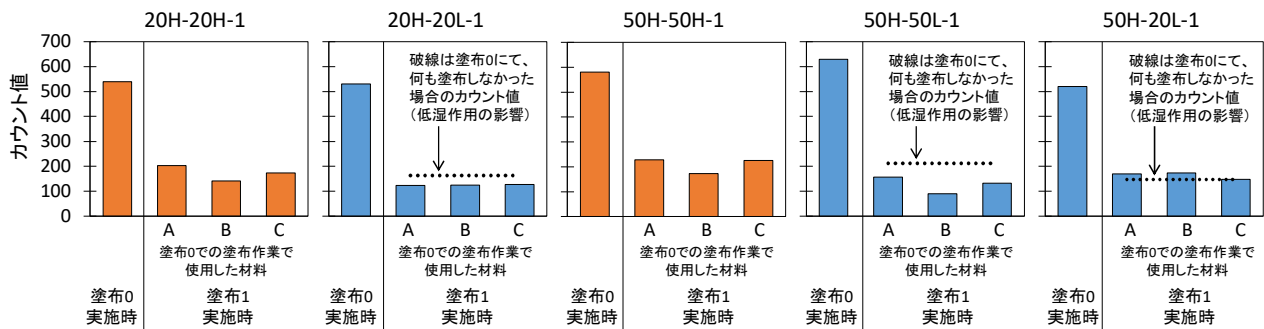


図-3 塗布0実施時と塗布1実施時のカウント値

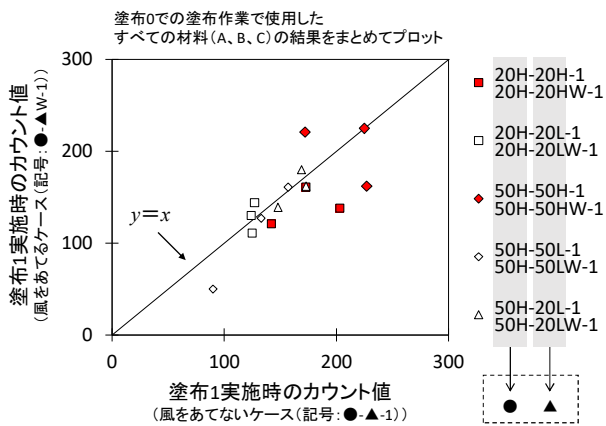


図-4 塗布1実施時のカウント値に及ぼす風の影響

0 後も高湿に曝し続けた場合、風による乾燥の効果でカウント値が下がった供試体もあったが、風をあててもカウント値が最も高い状態のままの供試体も見られた。この理由として、風をあてたものの、この供試体周囲の気中では水蒸気が滞留して湿度が下がらず、表層の水分蒸散が進まなかったことが考えられる。

2. 2. 2 吸水防止層の厚さ

図-5 に風をあてなかった供試体における吸水防止層の厚さの測定結果を示す。材料 A を用いた場合、実験記号 20H-20H-■、20H-20L-■、50H-50H-■、50H-50L-■ (■は 0、1、3 のいずれか) の結果をみると、■=0 に対して、■=1 もしくは ■=3 の方が吸水防止層は形成されやすい傾向にあった。これは、塗布 0 (図-2) 後にカウント値が低下した図-3 結果より、塗布 1 (図-2) もしくは塗布 3 (図-2) の段階で表層の水分が減少し、2 回目の塗布時には シラン系表面含浸材の主成分が表層に行き渡りやすい状態になったためと考えられる。

全体的に温度より塗布 0 後の高湿・低湿の影響が大きく、塗布 0 後に低湿へ曝したケースに対し、塗布 0 後も高湿に曝し続けた方が吸水防止層は薄いもしくは確認されない結果となった。木下ら⁹⁾は湿度が 100%か

ら 90%に下がるとコンクリートの含水率は大きく低下する一方、90%以下では含水率の低下速度が緩やかになると述べており、このことから高湿に曝し続けた場合は含水率が極めて高く、表面は乾燥していても表層は水分蒸散が大きく進行せず、シラン系表面含浸材の加水分解⁹⁾が塗布後に早期に発生し、深く含浸せず、試験面近傍薄層への含浸にとどまったと思われる。この傾向は 50℃のケースでやや明確に表れた。既報¹⁰⁾でも温湿度とコンクリート表面水分の関係について、本条件に近い温度 20、60℃、湿度 60、90%では、水分変化に及ぼす湿度の影響は 60℃が大きい傾向となっており、主として湿度の影響は大きい、温度の関与も伺える。材料 B、C でも、■=0 より ■=1 や ■=3 の方が吸水防止層は形成されやすい傾向が見受けられた。なお、材料 B の吸水防止層の厚さが全体的に小さかった理由について、材料 A、C との成分の違いの影響も考えられるが特定に至らなかった。

図-6 は風をあてた場合の吸水防止層の厚さの測定結果である。高湿に曝し続けた場合、タープ内へ風を送り続けたものの、全体的に吸水防止層の厚さは小さかった。これは、水蒸気がタープから排出されずに滞留し、表層の水分の蒸散が進まなかったことが要因と考えられる。このことは、風でコンクリート表面を乾燥させるだけでは不十分で、コンクリート周囲から水蒸気を追い出して湿度を下げるのが大切であることを示している。なお、材料 A に関しては、低湿に曝したケースで吸水防止層の厚さが図-5 よりも減少していた。塗布したシラン表面含浸材の多くが風の作用で揮発した可能性があり、材料の揮発のしやすさを含め、今後、詳しく調べていきたいと考えている。

2. 2. 3 塗布時のカウント値と吸水防止層の厚さの関係

図-7 は塗布実施時のカウント値と吸水防止層の厚さの関係を整理したものである。塗布実施時のカウン

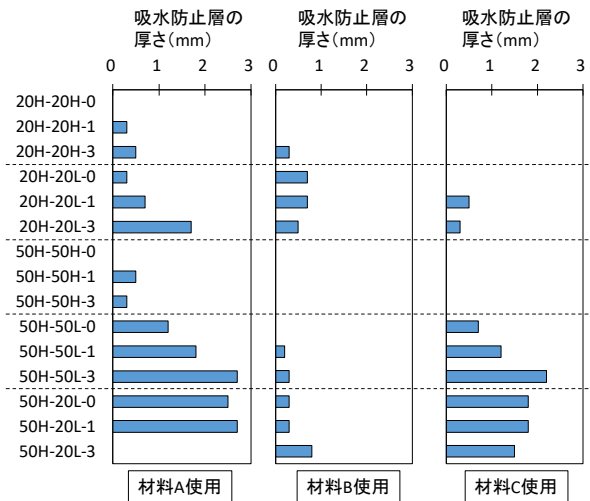


図-5 吸水防止層の厚さの測定結果（風なし）

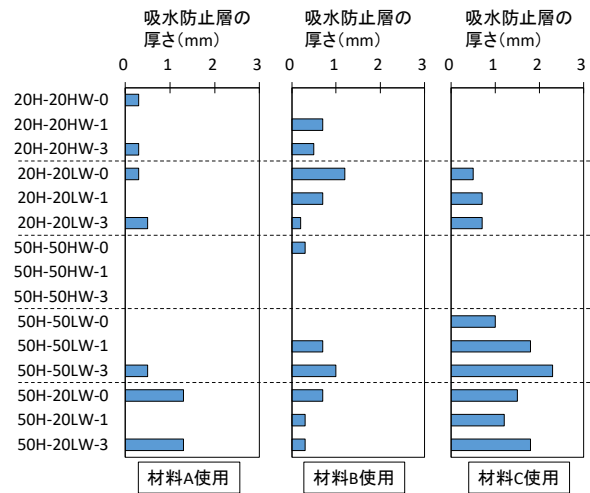


図-6 吸水防止層の厚さの測定結果（風あり）

ト値は、塗布 0（図-2）でのみ塗布作業を行ったケースでは塗布 0 実施時のカウント値、塗布 0 と塗布 1（図-2）で塗布作業を行ったケースでは塗布 1 実施時のカウント値、塗布 0 と塗布 3（図-2）で塗布作業を行ったケースでは塗布 3 実施時のカウント値で整理している。最も大きかった吸水防止層の厚さは約 3mm であるが、塗布 0 後に低湿に曝したケース（白抜きプロット）をみると、カウント値が小さいほど吸水防止層の厚さ 2~3mm の範囲にデータが多くプロットされていた。一方、塗布 0 後も高湿に曝し続けたケース（塗りつぶしプロット）では、塗布時のカウント値によらず、吸水防止層の厚さは 1mm 未満に留まった。

このことから、以下のことが考察される。

図-8 に示すように、高湿が持続すると、表層の水分が蒸散することなくとどまり、シラン系表面含浸材が深く行き渡らなくなる。一方、塗布実施時のカウント値が大きくても、塗布後、低湿に調整すると表層の水

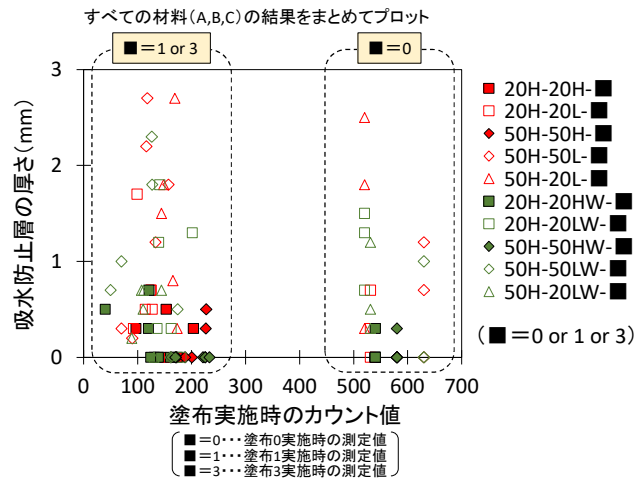


図-7 塗布実施時のカウント値と吸水防止層の厚さの関係

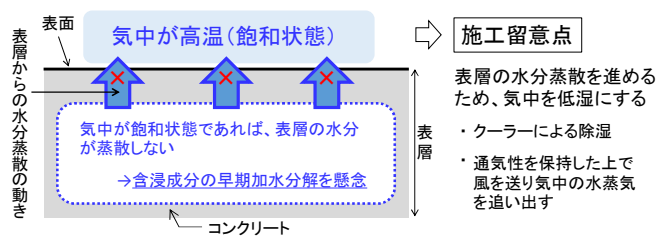


図-8 高湿下での施工留意点

分蒸散が進み、まだ加水分解を起こしていないシラン系表面含浸材の含浸が継続する。さらにカウント値が大きく低下した数日後に再び塗布すると、厚い吸水防止層が形成されやすくなる。

3. シラン系表面含浸材の施工管理方法の整理

2 章では、施工における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、図-8 で示したように、気中の相対湿度が高いと、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、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。

3 章では、この知見に鑑みた施工留意点の整理を目的に、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。

3. 1 試験施工概要

3. 1. 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

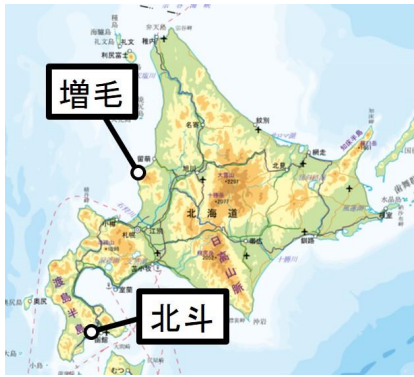


図-9 試験施工場所（地理院地図をもとに作成）

箇所で行った。図-9に位置を示す。北斗は橋長7mのPC橋で、写真-5に示すように主桁下面直下に三ッ石川が流れ、常時日陰の環境にある。一方、増毛は、写真-6の左下に示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、3.2および3.3で後述する。

3. 1. 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サ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。コンクリート表面の含水状態は、写真-4で示した電気抵抗式水分計で調べた。

3. 1. 3 使用したシラン系表面含浸材

写真-7にシラン系表面含浸材の塗布状況の一例、表-4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⁵⁾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。

3. 1. 4 吸水防止層の形成状況の確認

試験施工を終了してから約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. 2 日陰環境での検証（北斗）

3. 2. 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

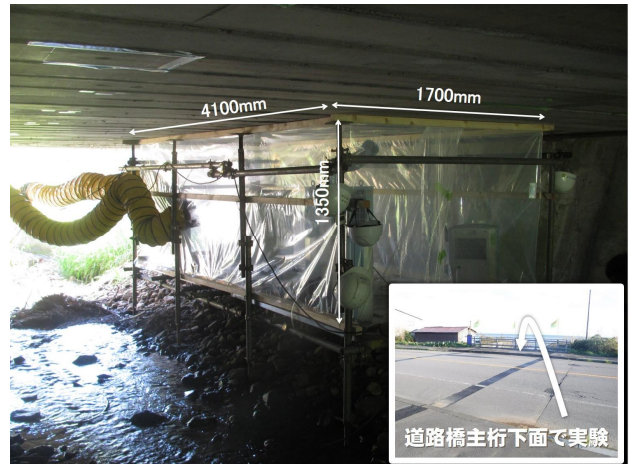


写真-5 試験施工の様子（北斗）



写真-6 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）

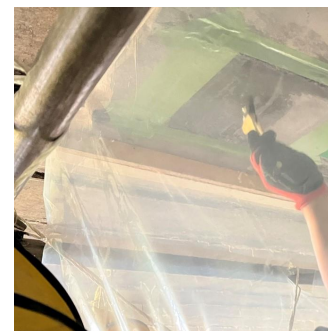


写真-7 塗布状況の一例（北斗）

表-4 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

は、2023年7月25～28日に行った。

図-10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、ここでの「囲い外」は写真

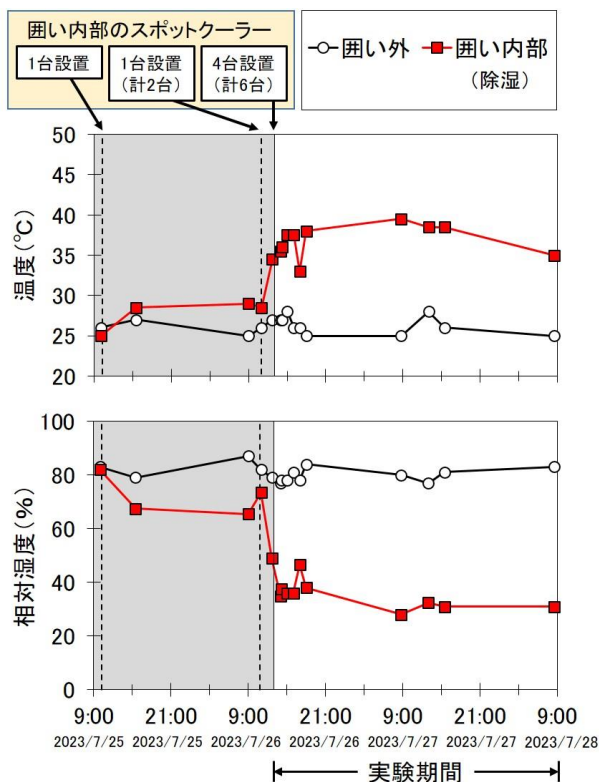


図-10 温度と相対湿度の経時変化（北斗）

-5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。

3. 2. 2 実験水準

図-11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

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	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-11 実験水準（北斗）

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. 2. 3 コンクリート表面の含水状態

図-12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-3）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-3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-3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。

3. 2. 4 吸水防止層の厚さ

図-13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で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

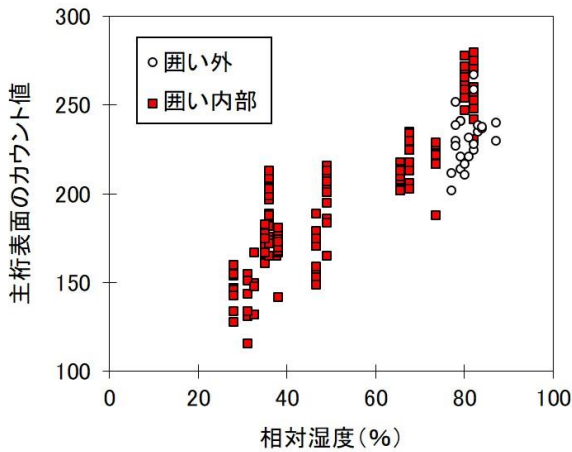


図-12 北斗で調べた相対湿度と主桁表面のカウント値の関係（シラン系表面含浸材塗布直前までの測定値）

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かった。

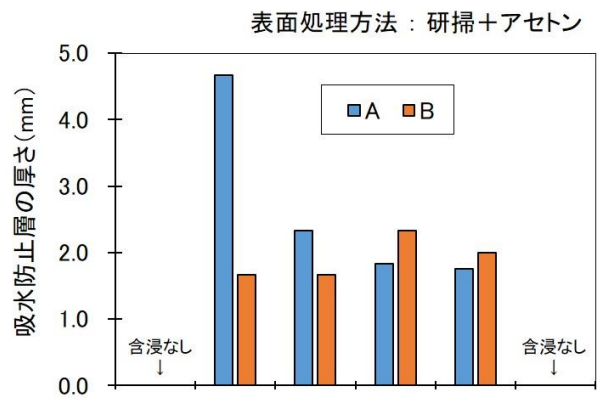
図-14 は吸水防止層の厚さの測定結果を、塗布前の表面処理方法の影響に着目して整理したものである。吸水防止層の厚さは、クエン酸10%水溶液の噴霧とアセトン洗浄を行ったケースが相対的に最も大きく、含浸を阻害するカルシウム結晶物の除去の効果が示される結果となった。研掃のみのケースと研掃とアセトン洗浄を併用するケースを比較すると、研掃のみの方が吸水防止層の厚さは大きかった。これは、今回の実験では塗布前に実施した除湿だけでも主桁下面の乾燥が進んだためと思われる。

3. 3 日向環境での検証（増毛）

3. 3. 1 温度と相対湿度

海岸沿いで湿度は高めであるものの、日射を遮る障害物がなく、晴天時には常に直射日光を受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



塗布前 除湿時間	44	27	24	21	3	なし
塗布後 除湿時間	1	18	21	24	42	なし

図-13 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）

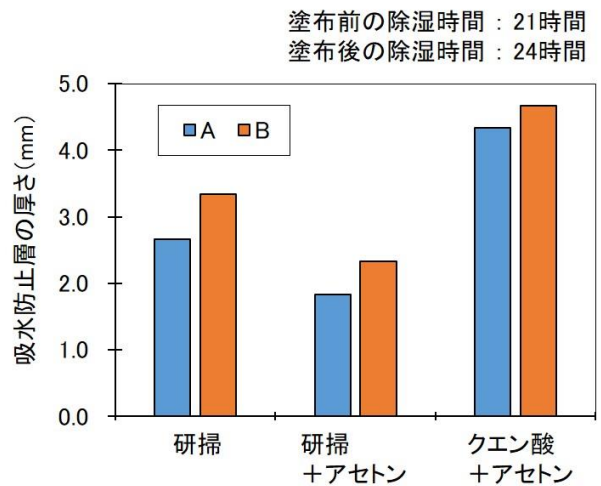


図-14 北斗における吸水防止層の厚さの測定結果（塗布前の表面処理方法の影響）

×1300mm×1300mm）である（写真-5、6）。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-15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、日向環境の増毛では囲い外の温度が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

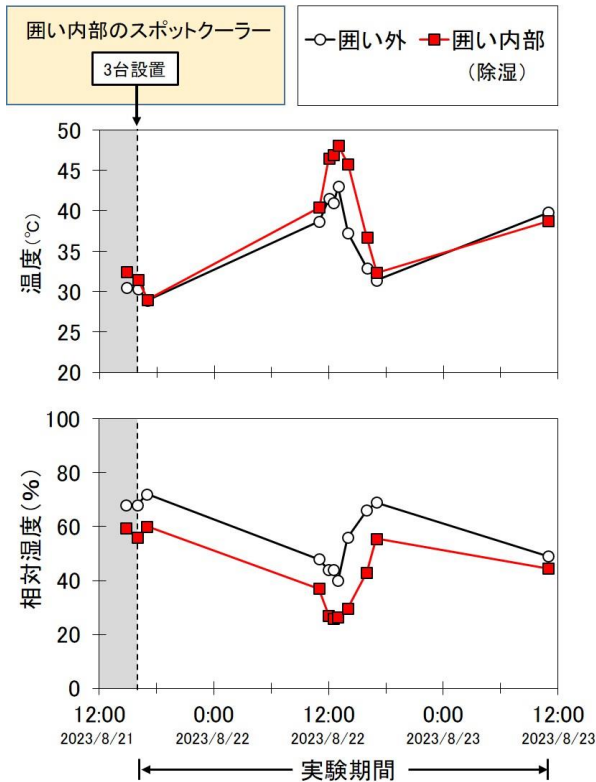


図-15 温度と相対湿度の経時変化（増毛）

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-16 実験水準（増毛）

は北斗（図-10）に比べると小さかった。

3. 3. 2 実験水準

図-16 に実験水準を示す。ここ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について調べた。表面処理方法については、研掃の有無の2水準とした。

3. 3. 3 コンクリート表面の含水状態

図-17 は擁壁表面のカウント値の経時変化である。測定は図-16 の工程に即して、塗布範囲近傍の無塗布面（写真-6 の布テープで仕切った枠の外）で行った。増毛では、囲い内部と囲い外ともカウント値は一部を

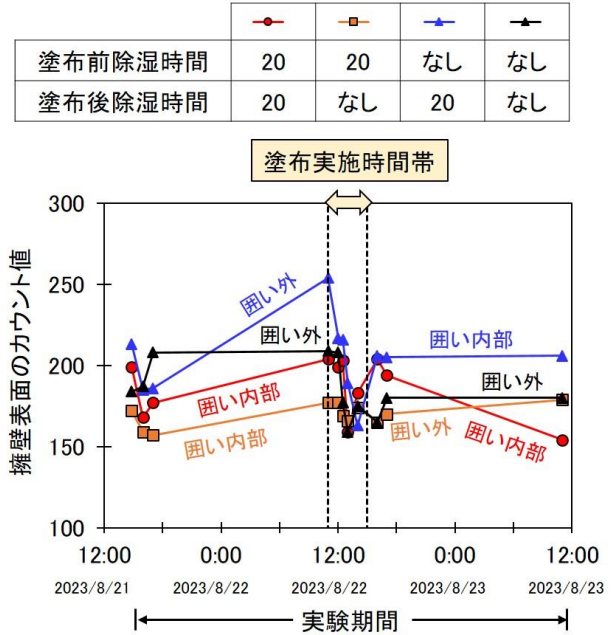
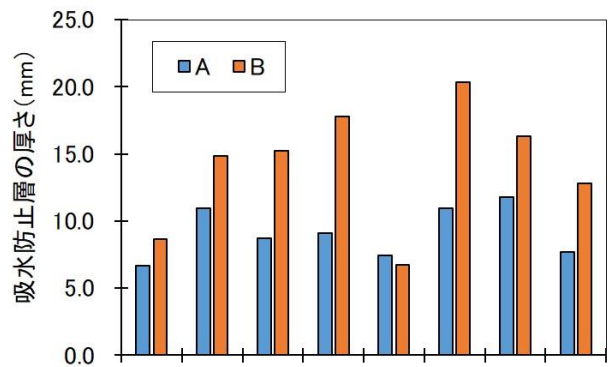


図-17 擁壁表面のカウント値の経時変化（増毛）



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-18 増毛における吸水防止層の厚さの測定結果

除いて 150～220 となり、表-1 に基づくと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間には隙間があり（写真-6）、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。

3. 3. 4 吸水防止層の厚さ

図-18に吸水防止層の厚さの測定結果を示す。縦軸のレンジは北斗の結果（図-13、14）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

表-5 4章におけるコンクリート配合

水セメント比	使用セメント	単位量(kg/m ³)		
		水	セメント	細骨材 粗骨材
65%	普通ポルト	155	238	897 1022

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。

4. 寒地沿岸域での暴露実験に基づく耐久性検討

高温高湿下でシラン系表面含浸材を塗布すると吸水防止層が形成されにくく、除湿など適切な湿度管理が大切であることはわかったが、吸水防止層は未形成でも塗布によって表面は撥水を呈する。4章では、このようなコンクリート部材の腐食抑制性能を調べるため、沿岸部において、高温高湿下でシラン系表面含浸材を塗布した鉄筋コンクリート供試体の暴露実験を行った。

4. 1 実験概要

4. 1. 1 配合・供試体・使用材料・塗布環境

表-5にコンクリート配合を示す。ここでは劣化を促進させる観点から、水セメント比を65%と高めに設定した。セメントの種類、使用した細骨材と粗骨材、目標スランプおよび空気量、供試体の寸法、使用したシラン系表面含浸材は2章に同じである。ここでは、供試体にD13鉄筋を埋設した。かぶりは10mmに設定した。塗布環境は、図-2で示した条件のうち、50H-50H-0、50H-50H-3の2条件とした。吸水防止層の厚さはいずれも極めて小さく、0mmもしくは1mm未満であった。

4. 1. 2 暴露実験

暴露実験は日本海に面し、飛来塩分の影響を受ける北海道増毛町の増毛暴露実験場において、2021年10月より行っている。2021年10月～2022年10月の増毛の最高気温は30.5℃、最低気温は-13.0℃である¹²⁾。コンクリートの凍結温度とされる-2℃¹³⁾をもとに、最低温度が-2℃以下で最高温度が-2℃より高い日を凍結融解日数、最低・最高温度とも-2℃以下の日を凍結持続日数とし、それぞれ求めたところ、増毛の凍結融解日数は65日、凍結持続日数は14日であった。

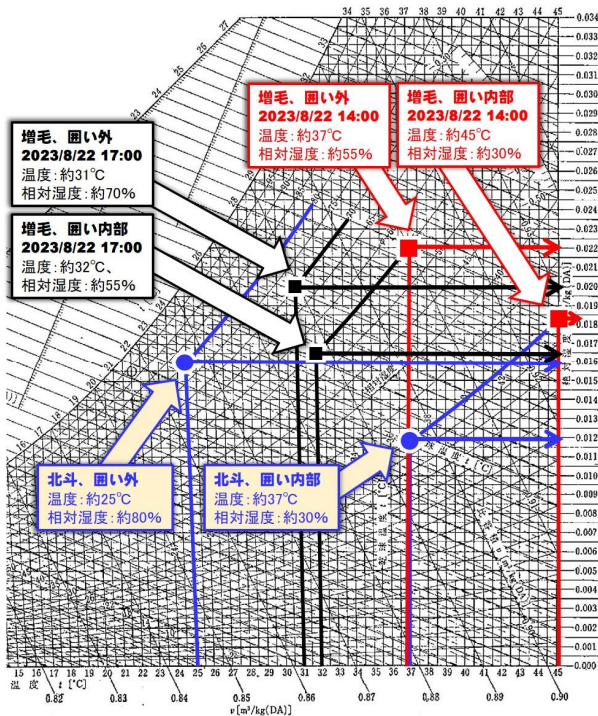


図-19 湿り空気線図に基づいて整理した北斗と増毛の絶対湿度^{文献1)}を加工 (縦軸が絶対湿度)

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-10、15で示した温度と相対湿度をもとに、図-19¹¹⁾の湿り空気線図から北斗と増毛の絶対湿度を調べた。図-19より北斗の絶対湿度は、囲い内部が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-6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-17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、増毛で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-18)、実験期間を通じて



写真-8 暴露実験の様子

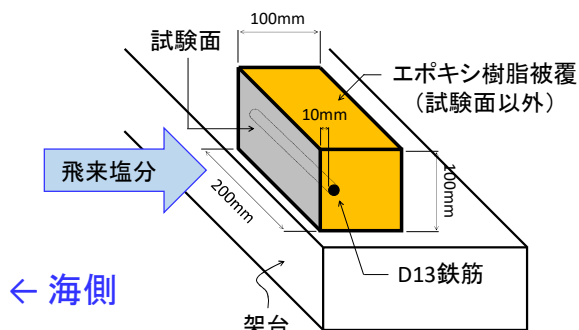


図-20 供試体の設置方法

写真-8 に暴露実験の様子、図-20 に供試体の設置方法を示す。供試体は、塗布を行った試験面以外からの飛来塩分や水分の侵入を抑えるため、試験面以外の5面をエポキシ樹脂で被覆した。

4. 1. 3 測定

ここでは電気抵抗式水分計（写真-4）によるカウント値と ASTM C 876¹⁴⁾ に準じた自然電位の測定を行った。暴露1年後の測定前1週間の降雨状況は、測定3日前に降雨があったが、それ以外はほとんど降雨がなかった。

4. 2 実験結果・考察

図-21 に自然電位の経年変化を示す。また、表-6 に ASTM C 876 における自然電位の評価基準もあわせて示す。4. 1. 1 で述べたように、高温高湿下で塗布したために十分な厚さの吸水防止層が形成されなかったこともあり、暴露1年目から全体的に卑な方向へシフトした。なお、材料Bの50H-50H-3に関しては、そのシフト量は小さかった。材料Bには樹脂成分が含まれており（表-2）、樹脂成分によって自然電位の低下が抑えられたことが考えられる。しかしながら暴露2年目には、材料Bの50H-50H-3も-350mV以下となった。また、材料Bおよび材料Cの50H-50H-3に関してのみ、1年目から2年目にかけて自然電位が低下している。3日後の再塗布による効果・影響の可能性もあるが、今後の経過を待ちたい。

図-22 に電気抵抗式水分計のカウント値と自然電位

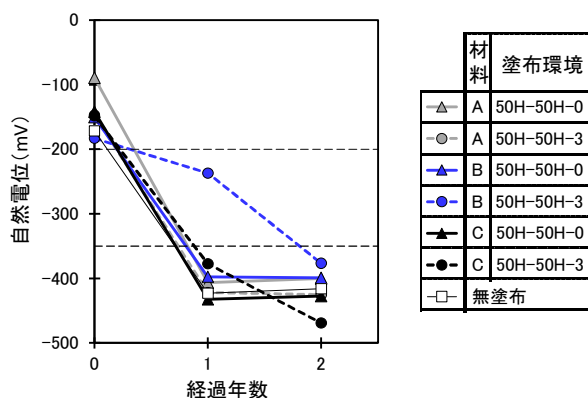


図-21 自然電位の測定結果

表-6 ASTM C 876 における評価基準¹⁴⁾

自然電位 E (mV)	鉄筋腐食の可能性
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E \leq -200$	不確定
$E \leq -350$	90%以上の確率で腐食あり

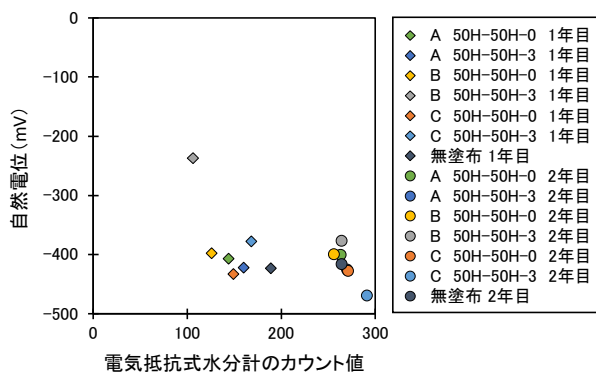


図-22 電気抵抗式水分計のカウント値と自然電位の関係

の関係を示す。全体的にみると、カウント値が大きくなるほど、自然電位は小さくなる形の分布を呈している。このことは、コンクリート表面の水分に対応するカウント値の経年増加が鉄筋の腐食進行に影響している可能性を示しており、吸水防止層を形成させることが大切とも言えるが、今回の結果が長期的な変化なのか1、2年目の測定条件によるものかは、今後の経過を待ちたい。

5. 高温・高湿環境下でのシラン系表面含浸材施工要領提案

図-23 は今回の研究成果をもとに整理した高温・高湿環境下での適切なシラン系表面含浸材の施工要点である。

1 点目として、除湿は吸水防止層の形成に有用である。湿度が高いままでは、表面に風をあてても表面のみが乾燥して、表層の水分蒸散が進まずに含浸しにく

いこと（図-6、8）、一方で除湿による結露が懸念され

高温・高湿環境下での適切なシラン系表面含浸材の施工の要点

- 除湿は吸水防止層の形成に有用である
 - ・高湿環境では、表面に風をあてて乾かすだけでは、表面のみ乾燥して表層の水分は蒸散しにくく、シラン系表面含浸材が深く行き渡りにくい。そのため、除湿が大切である。
 - ・なお除湿は、水蒸気を含む暖かい空気を排除する作業であるため、温度が低下し、結露しやすい。結露が懸念される場合、除湿器から出る排熱を活用する等、温度低下による結露の防止に努めることも望ましい。
- 特に塗布後の除湿は効果が大きい
 - ・塗布前の除湿が3時間程度でも、塗布後の除湿時間を十分確保することにより、吸水防止層の形成が見込める。
 - ・塗布後の除湿が不十分であれば、含浸前に周囲の高湿環境の影響を受け、シラン系表面含浸材が加水分解して含浸挙動が短時間で終了し、十分な厚さの吸水防止層が形成されない。
- 数日後に再塗布を行うと、高湿環境下でも吸水防止層が形成されることもある
 - ・1回目の塗布によって、表面のカウント値は減少しており、加水分解による水分消費が起きている。そのため、数日後に再塗布すると、吸水防止層の厚さを増やせることもある。
- 施工中に作用する直射日光も含浸促進に効果的
 - ・直射日光による乾燥効果により、吸水防止層の厚さが大きくなることもある。

図-23 施工要領への反映に向けて整理した提案内容

る場合は除湿器から出る排熱を活用する等、温度低下による結露の防止に努めることが望ましい（図-10）ことを書き添えた。

2点目として、除湿の効果は、特に塗布後が大きいことを明記した。塗布後の除湿時間を十分確保することで吸水防止層の形成が見込めることと、逆に塗布後の除湿が不十分であれば、含浸が本格化する前に周囲の高湿環境の影響を受けて湿度が上昇し、早期にシラン系表面含浸材が加水分解して含浸挙動が短時間で終了し、十分な厚さの吸水防止層が形成されない（図-13）ことを書き添えた。

3点目として、数日後に再塗布を行うと、高湿環境下でも吸水防止層が形成されることもあることを明記した。1回目の塗布によって表面のカウント値は減少するとともに、表面近傍では加水分解による水分消費が起きているため、数日後に再塗布すると、吸水防止

層の厚さを増やせることもある（例えば、図-5）ことを書き添えた。

4点目として、施工中に作用する直射日光も含浸促進に効果的であることを明記した。直射日光による乾燥の効果により、吸水防止層の厚さが大きくなることもある（図-18）ことを書き添えた。

高温・高湿環境におけるシラン系表面含浸材の十分な効果を期待するため、今後、これらの事項を道路設計要領等へ反映させていく予定である。

6. まとめ

本研究では、高温高湿下に曝されているコンクリートへのシラン系表面含浸材の適切な施工方法を明らかにするため、はじめに、作業空間の除湿を施したときのコンクリート表層の含水状態の変化と塗布後の含浸深さに及ぼす除湿の効果を実験的に調べた。そして、実験で得た知見の実用性を検証するため、道路橋において試験施工を行った。また、高温高湿環境下で塗布した鉄筋コンクリートの腐食抑制性能を調べるため、北海道沿岸において暴露実験を行った。そして、現場への成果の反映に向けて、研究で得た成果をもとに、高温・高湿環境下でのシラン系表面含浸材の施工要点を整理した。得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 塗布後に高湿環境が持続すると、表層の水分がとどまり、シラン系表面含浸材の主成分が深く行き渡らなくなる。
- (2) 十分な吸水防止層を形成させるには、塗布後、気中の飽和状態を解消するため、低湿に調整する必要がある。また、単に風をあてるだけではなく、除湿することが大切である。
- (3) 吸水防止層の形成に及ぼす除湿の効果は高い。
- (4) 除湿は、塗布後の効果が大きく、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。
- (5) 塗布後の除湿時間が不十分であれば、含浸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。
- (6) コンクリート表面が直射日光を受ける場合、高湿環境であって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こともある。
- (7) 吸水防止層が十分形成されていない場合、沿岸環境

下での腐食抵抗性は小さくなる。高湿下でシラン・シロキサンと樹脂成分を主成分とするシラン系表面含浸材を2回塗布した場合、暴露1年目は樹脂の効果で腐食抵抗性が大きく改善したものの、吸水防止層の厚さが小さいこともあり、暴露2年目には自然電位が-350mV低下まで低下した。

(8) 現場への成果の反映に向けて、高温・高湿環境下でのシラン系表面含浸材の施工要点を整理した。

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.149，2005.4
- 2) 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，pp.660-665，2021.2
- 3) 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，第2章コンクリートの品質，p.3-コ2-5，2022.4
- 4) 冨板崇，浜幸雄，濱崎仁：コンクリート供試体表面温度の気象因子による推定とその応用，自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム，pp.203-208，2005.6
- 5) 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-6，2022.4
- 6) 遠藤裕丈，安中新太郎：冬期の施工環境がシラン系表面含浸材の含浸深さに及ぼす影響，第20回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，pp.417-422，2020.10
- 7) 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
- 8) 石神暁郎，堀耕次，大久保謙治，竹村浩志：表面含浸材によるコンクリートの電気抵抗率の安定化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1655-1660，2011.7
- 9) 木下竜一，伊藤始，岡田敏美，高島依里：湿度勾配を与えたコンクリートの含水率測定に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.779-784，2011.7
- 10) 荒巻卓見，大塚秀三，八木修，中田善久：シラン系表面含浸材の表面保護効果に及ぼす温湿度の影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1645-1650，2013.7
- 11) 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
- 12) 気象庁：アメダスデータ
- 13) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'99，p.155，1999.9
- 14) ASTM C 876：Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

STUDY ON CONSTRUCTION QUALITY ASSURANCE OF SILANE-TYPE SURFACE PENETRANTS UNDER HIGH-TEMPERATURE AND HIGH-HUMIDITY ENVIRONMENTS

Research Period : FY2021-2023

Research Team : Cold -Region Maintenance Engineering Research Group (Materials)

Author : SHIMATA Akinori, NAITO Isao, and ENDOH Hirotake

Abstract : The silane-type surface penetrants is a permeable protective material that suppresses the intrusion of water and chloride ions. When applying, it is necessary to dry the concrete surface layer. However, it is sometimes applied under high-temperature and high-humidity conditions in the summer. Therefore, the experiment to clarify the appropriate method for applying silane-type surface penetrants under high-temperature and high-humidity conditions were conducted. As a result, the following were found: (1)Dehumidification is useful for forming a water-repellent layer, (2)Dehumidification after application is especially effective, (3)Direct sunlight that acts during construction is also effective in promoting impregnation even under high-humidity conditions, (4)If applied several times over several days, a water-repellent layer may be formed even under high-humidity. In addition, with an eye to reflecting the results in the construction procedure, we have summarized the key points for the appropriate construction of silane-type surface penetrants in high-temperature, high-humidity environments.

Key words : Concrete, Silane-Type Surface Penetrants, High-Temperature and High-Humidity, Construction, Water-Repellent Layer, Dehumidification, Exposure Test