

非破壊によるシラン系表面含浸材の浸透深さ管理方法の確立

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 2

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：安中新太郎、菊田悦二、遠藤裕丈

【要旨】

シラン系表面含浸材による高い耐久性向上効果を得るには、適切な製品を選定するとともに、厚い吸水防止層を形成させる必要がある。吸水防止層の形成状況は、部材を削孔し、水を噴霧することで把握できる。しかし、部材の損傷が懸念されることや、また時間や労力を要するなど効率的な方法とは言い難い。そこで、シラン系表面含浸材が深さ方向に加えて表面方向へも含浸する特徴に着目し、塗布範囲と無塗布範囲の境界から無塗布範囲の表面方向に形成される撥水域の有無から含浸状況を非破壊で把握する方法を考案し、その有用性を実験室および北海道内の道路橋で検証するとともに、試験法としてとりまとめた。

キーワード：コンクリート、シラン系表面含浸材、含浸深さ、管理、非破壊

1. はじめに

シラン系表面含浸材（以下、シランと記す）は、コンクリート表層に吸水抑制機能を付与する浸透性の保護材料である。コンクリートの表面に塗布し、含浸させると、材料に含まれる疎水性のアルキル基が内部空隙の壁面に固着し、含浸域が疎水化する。疎水化した含浸域は「吸水防止層」と呼ばれ、吸水防止層によってコンクリートの劣化因子である水や塩化物イオンの侵入が抑制されることから、部材の耐久性向上が期待される。シランは、(1)短期間で作業ができるなど取り扱いが簡便で比較的安価である、(2)材料が無色透明で塗布後も外観が大きく変化しないため、塗布後も目視点検が可能である、(3)水滴は通さないものの水蒸気透過性は保持され、部材内部の水分は蒸発すると外部へ移動できるため、水分の蓄積に起因する内部劣化を抑制できる、などの長所を有しており、部材の耐久性向上対策の一つとして広く活用されている。

高い耐久性向上効果を得るには、適切な製品を選定するとともに、深く含浸させて厚い吸水防止層を形成させる必要がある。しかし、一般に塗布の出来形は塗布状況の写真やシランの使用量で管理され、実際の部材表層の吸水防止層の形成状況までは管理されていない。吸水防止層の形成状況は、写真-1 に示すように、塗布後、削孔を行い、水を噴霧することで把握できる。しかし、すべての部材において、このような方法で確認を行うと、部材の損傷や鋼材の破断が懸念されるとともに、多くの時間と費用および労力を要することから、効率的な方法とは言い難い。

耐寒材料チームでは過年度に行った別の研究²⁾にお

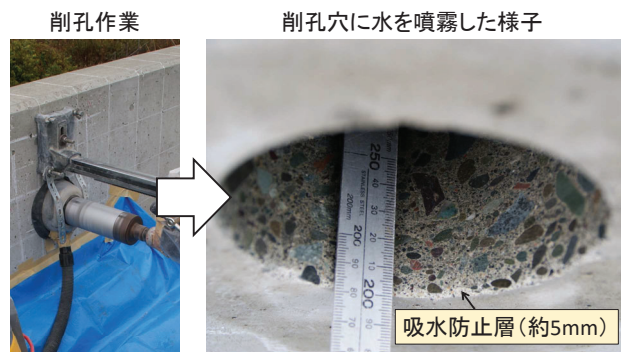


写真-1 削孔による直接的な吸水防止層の確認例

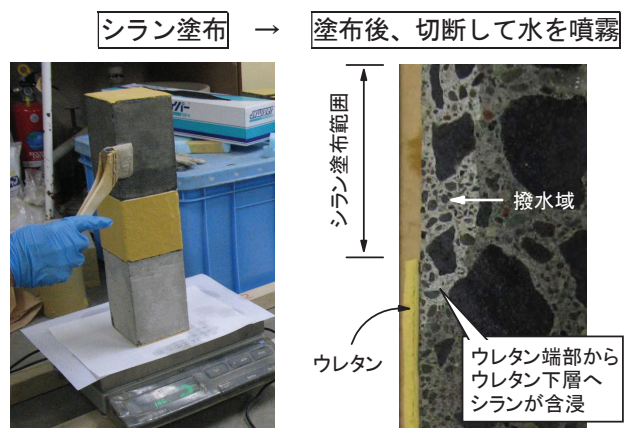


写真-2 施工したウレタンの端部にシランを塗布した際の含浸状況の一例²⁾（過年度に行った別の研究）

いて、ウレタンの剥がれを防止するねらいで、ウレタン端部にシランを塗布する実験を行った。その際、塗布したシランは写真-2 に示すように深さ方向に加え、ウレタン端部へ表面方向にも含浸する特徴があること

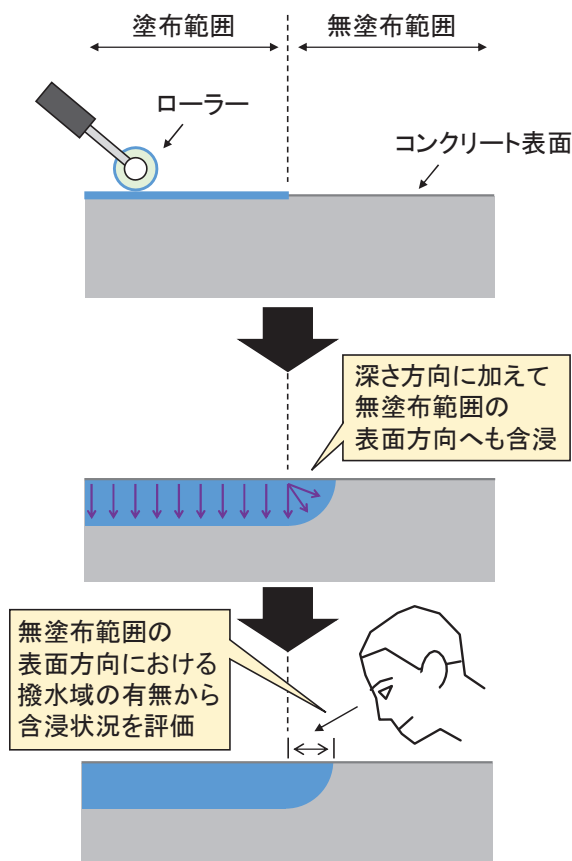


図-1 開発を目指す含浸状況の非破壊評価方法

を確認した。

この特徴に着目し、本研究では図-1 ならび写真-3 に示すように、コンクリート表面の一部に無塗布範囲を設け、外観から確認される、塗布範囲と無塗布範囲の境界から無塗布範囲の表面方向に形成される撥水域の有無や拡がり方から、シランの含浸状況を非破壊で評価する技術を開発することを目的に、様々な実験および現場での検証を行い、図-1 の技術の有用性について評価した。

2. 表面(外観)方向/内部方向との含浸距離の関係の整理

2 章では、塗布面の向きに加えて、含浸のしやすさに差をつけるため、コンクリートの含水状態の2条件を実験水準に設定し、表面(外観)/内部方向における含浸距離の関係について調べた。

2. 1 実験概要

2. 1. 1 配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比は55%とし、普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は苫小牧市錦岡産の海砂(表乾密度 2.67g/cm^3 、吸水率1.24%、粗粒率2.90、除塩処理済)、粗骨材は小樽市見晴産の碎石(表乾密度 2.68g/cm^3 、吸水率1.77%、

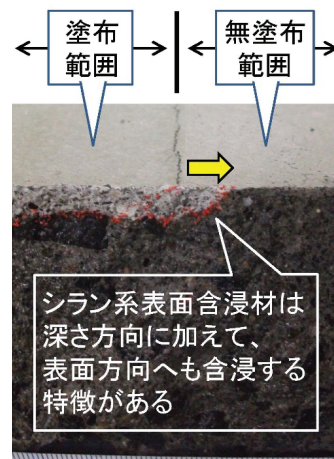


写真-3 図-1 の概念

表-1 コンクリートの配合

| 水セメント比(%) | セメントの種類 | 単位量(kg/m^3) | | | |
|-----------|---------|------------------------|------|-----|------|
| | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |
| 55 | 普通 | 155 | 282 | 854 | 1045 |

スランプの実測値：12.4cm，空気量の実測値：5.0%

粗粒率6.65)を使用した。粗骨材の最大寸法は20mmとした。スランプと空気量の目標値は各々 $12\pm 2.5\text{cm}$ 、 $4.5\pm 1.5\%$ 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. 1. 2 供試体

供試体の寸法は $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$ とし、打設後、常温下で湿布養生を7日間行った。

一般に、コンクリートの表層が高い含水状態にあると塗布後の吸水防止層の形成に支障をきたすことが知られている。そこで、塗布後の品質に幅をもたせるねらいで、供試体を吸水防止層が形成されにくい状態・されやすい状態に調整するため、養生後、図-2 に示すように、高湿・低温、高湿・常温、低湿・常温の3通りの環境下に材齢7~21日の2週間曝した。高湿度の環境は、写真-4 に示すように加湿器を使用し、加湿器から排出される蒸気を断熱材で作製した密閉空間へ送り込んで加湿する形とした。空間内の温度は常温、湿度は100%である。高湿・低温については、材齢20日に供試体を写真-4 の空間から取り出し、 -20°C の冷凍機に1日間存置した。

図-2 の環境に曝した後、すみやかに温度 20°C 、湿度60%の室内で表面の含水状態を確認した。ここでは、表面の含水状態の評価に適する電気抵抗式的水分計³⁾で評価した。この水分計は写真-5 に示すように、直径28mm、長さ120mmの円筒状センサーの下面に10mm

| | | 環境 | | |
|-------|---------------|----------------------|-------|---------|
| | | 高湿・低温 | 高湿・常温 | 低湿・常温 |
| 材齢(日) | 0~7 | 温度20℃、湿度60%の空气中で湿布養生 | | |
| | 7 | 脱型 | | |
| | 7~20 | 加湿空間存置(常温) | | 常温空气中存置 |
| | 20~21 | -20℃空气中存置 | | |
| 21 | 試験開始(塗布、翌日測定) | | | |

図-2 打設から試験開始までの期間の環境

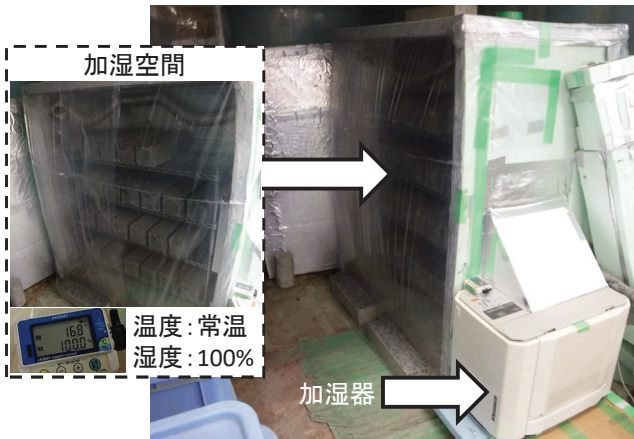


写真-4 加湿空間



写真-5 電気抵抗式の水分計を用いた測定状況

表-2 材齢 21 日における供試体の含水状態

| | | 高湿・低温 | 高湿・常温 | 低湿・常温 |
|----------------|-----|-------|-------|-------|
| カウ ント値 ※ | 打設面 | 225 | 358 | 180 |
| | 型枠面 | 262 | 307 | 188 |
| | 底面 | 174 | 333 | 218 |
| 供試体の含水率 | | 5.5% | 5.5% | 4.4% |

※) カウント値と表面状態の関係 (谷倉ら³⁾)

10~55: 絶乾, 60~132: 乾燥, 137~230: 表面乾燥
235~520: 湿潤, 521~744: 滞水

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て電流を流し、電極間の電気抵抗が水分によって変化する原理を利用することでコンクリートの表面付近における含水状態を評価する仕組みになっている。この水分計に

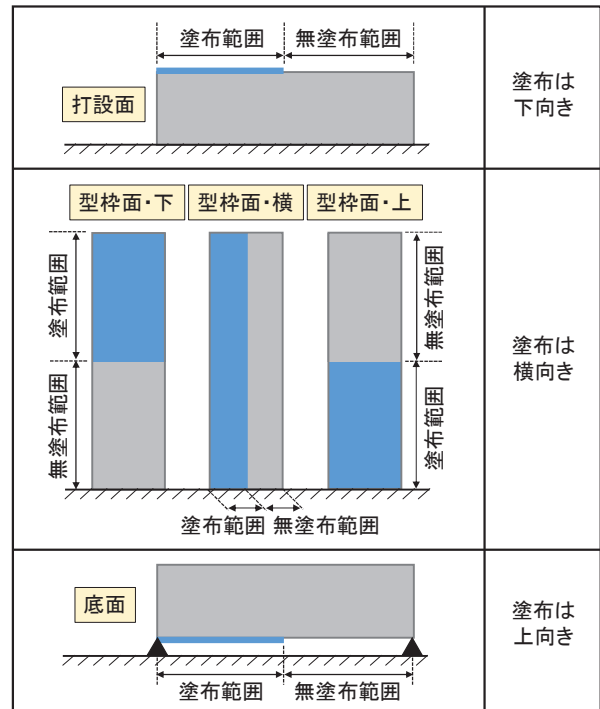


図-3 塗布面の向き・位置 (型枠面の「下, 中, 上」は無塗布範囲への表面方向の含浸向きを表す)

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(以降、カウント値と記す。乾燥しているほど値は小さい)で評価する機能が備わっている。

また、実際の供試体の含水率も、105℃の乾燥機に3日間保存して絶乾状態とした際の質量変化から求めた。表-2に材齢21日における供試体の含水状態を示す。谷倉ら³⁾が既報で示したカウント値と表面状態の関係を照合したところ、高湿・常温に曝した供試体の表面は湿潤状態、低湿・常温に曝した供試体の表面は表面乾燥状態にあった。加湿空間から取り出して-20℃の環境に曝した高湿・低温の供試体は、高湿・常温に曝した供試体に比べるとカウント値は小さいものの、供試体の含水率は同じであった。一般に水の比誘電率は80であるのに対し、氷の比誘電率は3.2と水に比べると小さい⁴⁾。高湿・低温のカウント値が高湿・常温よりも小さく表示されたのは、含水率が小さいためではなく、内部に含まれる水が氷に変化し、供試体の比誘電率が低下して電気抵抗が大きくなったためと考えられる。

2. 1. 3 シランの塗布

供試体表面の含水状態を調べた後、シランを塗布した。ここでは吸水防止材の厚さの評価に及ぼす塗布面の向きの影響を調べるため、塗布は下向き、横向き、上向きの3通りで行った。塗布面は図-3に示すように、

表-3 実験で使用したシラン

| 名称 | 成分 | 外観 | 有効成分 | 塗布量 |
|----|-----------|------|-------|-----------------------|
| A | シラン・シロキサン | ジェル状 | 90%以上 | 0.20kg/m ² |
| B | シラン・シロキサン | ジェル状 | 90%以上 | 0.35kg/m ² |
| C | アルコキシシラン | 液状 | 90%以上 | 0.28kg/m ² |
| D | アルコキシシラン | 液状 | 98%以上 | 0.60kg/m ² |

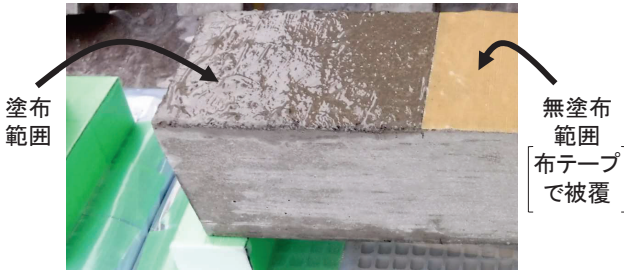


写真-6 塗布後の状況（下向きに塗布した打設面）

下向きは打設面、横向きは型枠面、上向きは底面とし、このうち、横向きについては、塗布範囲に対する無塗布範囲の位置を下、横、上の3通りとした。

表-3は実験で使用したシランを示している。ここでは、北海道開発局道路設計要領の参考資料で示されているシランの選定基準の目安⁵⁾を満たす4製品を使用した。

塗布時は写真-6に示すように、無塗布範囲にシランが付着しないよう、無塗布範囲を被覆した。被覆方法は、コンクリート表面との間に隙間が生じてシランが表面方向へ伝い、表面含浸距離が過大に評価されぬよう粘着性確保の必要性和、現場での作業性の両立に鑑み、布テープを使用した。ここでは布テープを剥がすタイミングが評価に及ぼす影響も調べるため、布テープを剥がす時期を塗布終了5分後、塗布の翌日の2通りとした。なお、型枠面へ横向きに塗布するケースで、無塗布範囲を塗布範囲の下に設定しているものは液だれによる付着が懸念されるため、布テープを剥がす時期は塗布の翌日のみとした。

2. 1. 4 測定・評価

測定は塗布の翌日に行った。ここでは図-4に示す表面含浸距離と吸水防止層の厚さを測定した。表面含浸距離は、表面に付着する布テープの成分を除去して素地面で評価するため、測定前に表面をディスクサンダーでケレンし、表面の極薄層を削り取った後、水を噴霧し、塗布範囲と無塗布範囲の境界位置から無塗布範囲の表面方向への撥水を呈している範囲の距離を測定した。吸水防止層の厚さは、塗布面に対して垂直方向に供試体を割裂し、その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て、その厚さを測

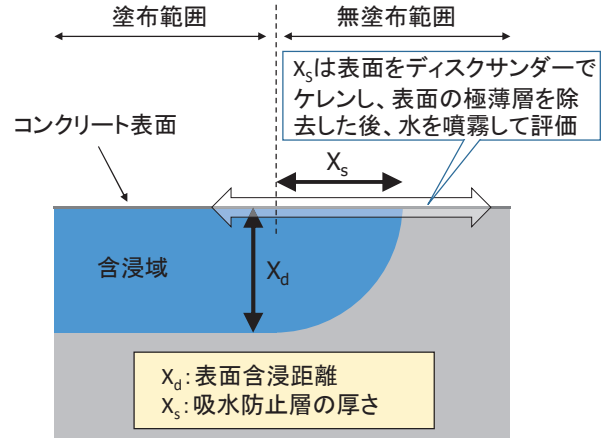


図-4 評価項目

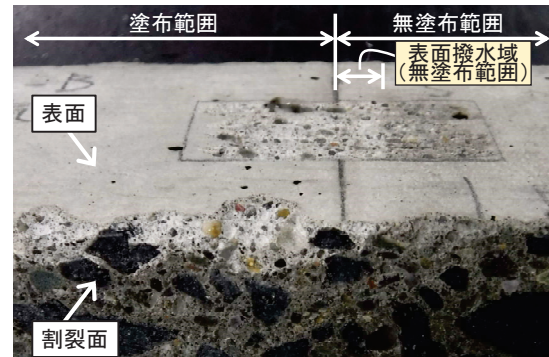


写真-7 測定状況の一例（水を噴霧した様子）

定した。写真-7に測定状況の一例を示す。そして、表面含浸距離と吸水防止層の厚さの乖離の程度を式(1)により評価した。

$$\Delta X_{d-s} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_{d_i} - X_{s_i}|}{n} \quad (1)$$

ここに、 ΔX_{d-s} は誤差の平均、 X_d は吸水防止層の厚さ(mm)、 X_s は表面含浸距離(mm)、 n はデータ数である。

なお、表面含浸距離と吸水防止層の厚さが大きく乖離しているデータが幾つか存在していたとしても、表面含浸距離と吸水防止層の厚さがともにゼロのデータの数が多くなると ΔX_{d-s} は小さくなり、乖離が過小評価されることが懸念される。このため、ここでは表面含浸距離と吸水防止層の厚さがともにゼロのデータを除外した上で ΔX_{d-s} を求めた。

2. 2 実験結果・考察

2. 2. 1 製品に着目した評価

はじめに、実験結果に及ぼす製品の影響の有無を確認した。表-4は、すべての実験シリーズ（環境(図-2)、

表-4 表面含浸距離と吸水防止層の厚さの関係性に及ぼす製品の影響

| | A | B | C | D |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| 表面含浸距離(mm) | 0.6 | 3.6 | 1.6 | 1.2 |
| 吸水防止層の厚さ(mm) | 2.2 | 3.6 | 3.1 | 2.6 |

数値はすべてのシリーズ (図-2, 図-3) のデータの平均

塗布面の向き (図-3) のデータを対象に平均値を製品別に一括算出し、整理したものである。表面含浸距離と吸水防止層の厚さはいずれも B、C、D、A の順に大きく、表面含浸距離が大きいほど吸水防止層の厚さが大きくなる関係性に及ぼす製品の影響は小さいことを確認した。

そこで、ここでは製品名を区分せず、全体的な傾向について考察を展開することとする。

2. 2. 2 環境に着目した評価

表面含浸距離と吸水防止層の厚さの関係について、養生後に曝した環境ごとに整理した結果を図-5 に示す。この図では布テープを剥がした時期のみ区分し、塗布部位は区分していない。

グラフ右側の破線枠内に示す全データの平均に着目すると、吸水防止層の厚さは、低湿・常温、高湿・常温、高湿・低温の順に大きかった。一般に、コンクリートに水分が多く含まれていると、シランが早期に加水分解を起し、含浸が進まず、十分な厚さの吸水防止層が形成されにくいことが知られている。表-2 で示したように、塗布時の供試体の含水の程度は低湿・常温に比べて、高湿・常温および高湿・低温の方が大きく、吸水防止層の厚さと対応している。表面含浸距離は吸水防止層の厚さに比べると平均で 0.5~約 2mm 小さいものの、低湿・常温、高湿・常温、高湿・低温の順に距離が大きく、吸水防止層の厚さの順位と対応している。このことを整理すると図-6 に示すようになり、図-1 の評価方法は内部方向への大凡の含浸状況を非破壊で把握する方法として有用と言える。

一方、布テープを塗布終了 5 分後に剥がしたケースの ΔX_{d_s} と塗布終了翌日に剥がしたケースの ΔX_{d_s} を比較したところ、塗布終了翌日に剥がした方が ΔX_{d_s} は小さかった。これは、布テープで覆う期間を長く設定したことで、表面含浸距離の測定結果に及ぼす無塗布範囲での揮発の影響が抑えられたためと考えられる。このことを整理すると図-7 に示すようになり、図-1 によって適切に評価するには、無塗布範囲を覆う時間を長くとり、表面と内部の含浸環境を極力、整えることが大切と言える。

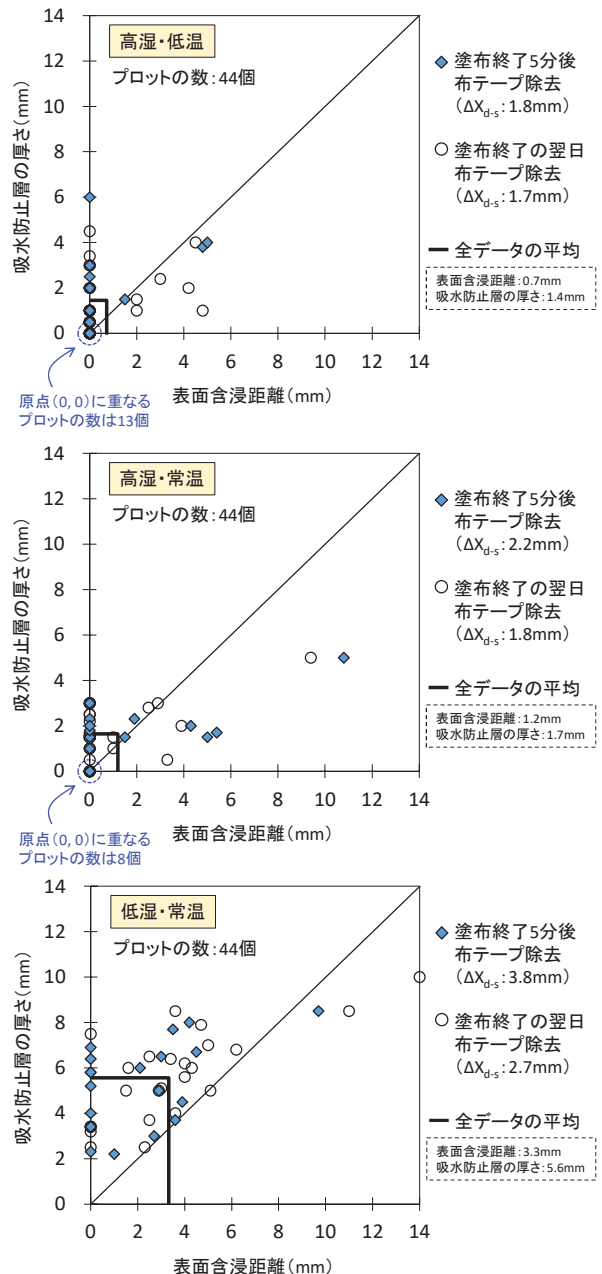


図-5 養生後に曝した環境ごとに整理した表面含浸距離と吸水防止層の厚さの関係

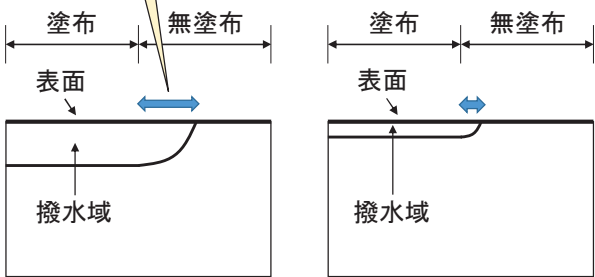
今回の実験の範囲では、表面含浸距離の平均と吸水防止層の厚さの平均は±3mm 程度の差があり、全体的な許容差は±3mm 程度となった。しかし、グラフの縦軸には多くのデータがプロットされ、表面含浸距離がゼロでも吸水防止層が形成されているケースも確認された。この考察は、2.2.3 および 2.2.4 で述べる。

2. 2. 3 部位に着目した評価

表面含浸距離と吸水防止層の厚さの関係について、塗布面の向き・位置ごとに整理した結果を図-8 に示す。ここでは布テープを剥がした時期は区分せずにプロットした。 ΔX_{d_s} は打設面、型枠面・横、型枠面・下、型

- ・低湿の方が吸水防止層は厚くなる
- ・低湿度の方が表面含浸距離(← →)は大きい

→ 表面含浸距離は、シランの含浸傾向を適切に評価

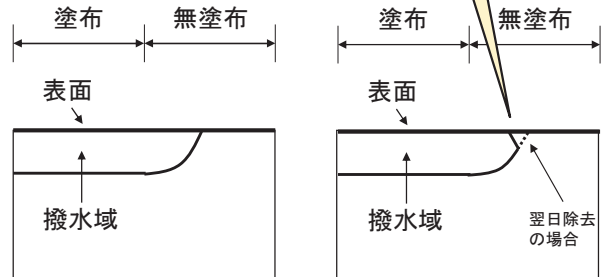


低湿における塗布後の断面

高湿における塗布後の断面

図-6 湿度に着目した考察

早期に布テープを除去すると、気中に曝される無塗布表面でシランの揮発が進みやすく、表面方向へ満足に含浸しにくい。



塗布翌日に布テープを除去した場合の断面

塗布5分後に布テープを除去した場合の断面

図-7 布テープを貼る時間に関する考察

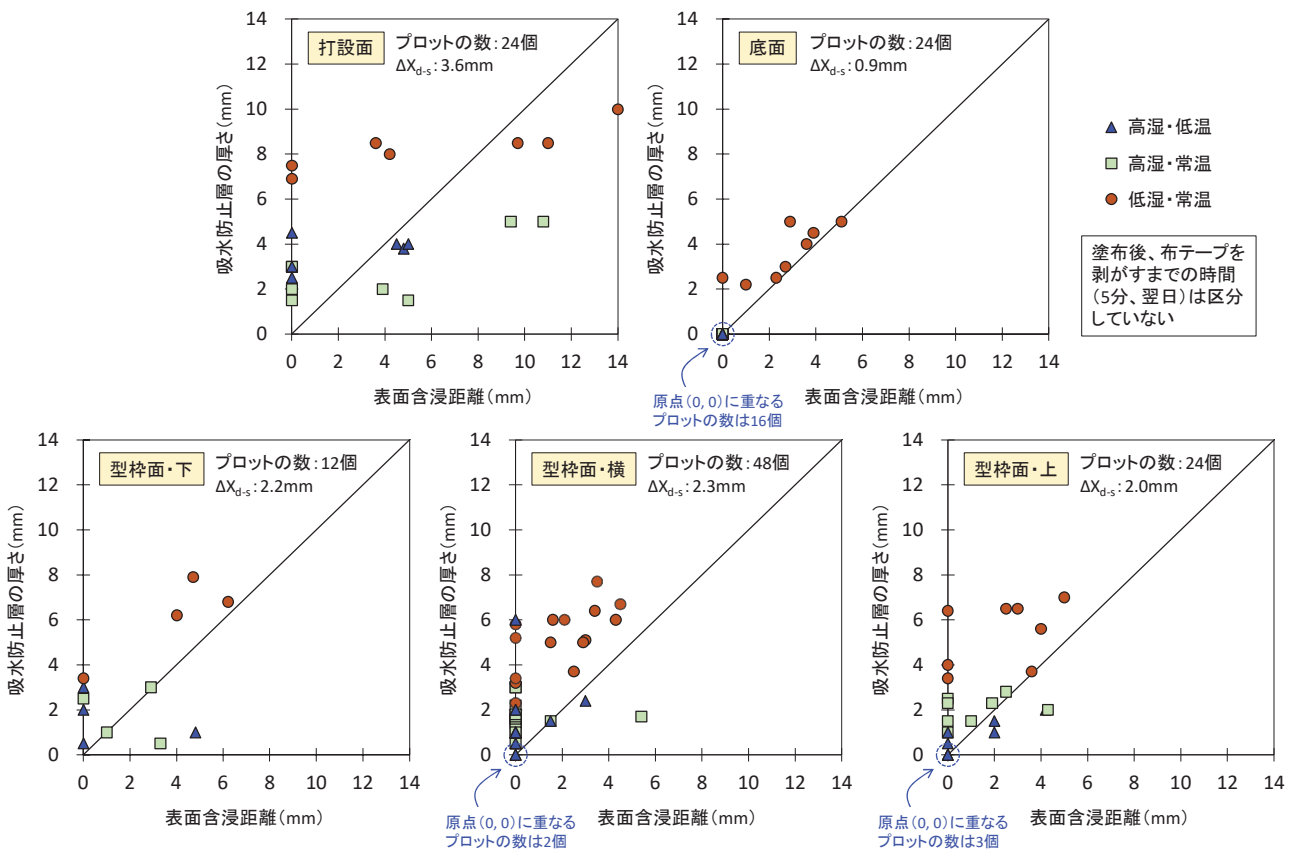


図-8 部位ごとに整理した表面含浸距離と吸水防止層の厚さの関係

枠面・上、底面の順に大きく、打設面でばらつきが大きかった。

打設面の結果をみると、表面含浸距離の方が大きいケースもあれば、吸水防止層の厚さの方が大きいケースもあり、ばらつきの傾向は一様ではなかった。表面含浸距離の方が大きくなる要因として、ブリーディング水の上昇により組織が脆弱になりやすいことや、表

面の凹凸に起因して布テープとコンクリート表面の間に隙間が生じやすいこと、一方、吸水防止層の厚さに対して表面含浸距離の方が小さくなる要因として、例えばレイタンス¹⁾等の表面方向へのシランの含浸を阻害する物質の蓄積が推察され、表面含浸距離に影響を及ぼす様々な要素が複雑に関与していることが理由に考えられる。このことを整理すると、図-9、10のよう

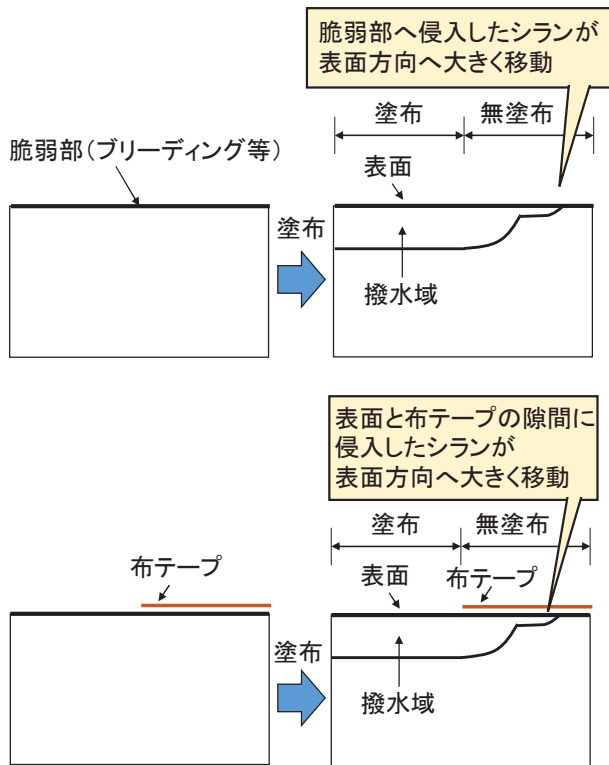


図-9 表面方向への含浸が多くなる要因の考察

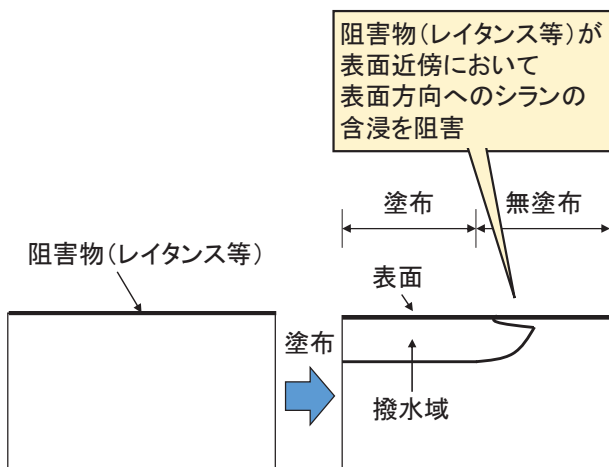


図-10 表面方向への含浸が阻害される要因の考察

になる。

これに対し、底面はブリーディングの影響を受けないため表面・表層の品質が安定しやすく、脆弱な組織も形成されにくい。このため、表面含浸距離と吸水防止層の厚さの割合がおおよそ 1:1 に近い形の分布を呈し、 ΔX_{d_s} は最も小さい値を示したと考えられる。このことから、図-1 による評価を行う際は、塗布前に表面に存在する脆弱な組織や含浸を阻害する物質を除去することが適切であると言える。

型枠面では、無塗布範囲への表面方向の含浸の向きを下、横、上の 3 通り設定したが、いずれにおいても

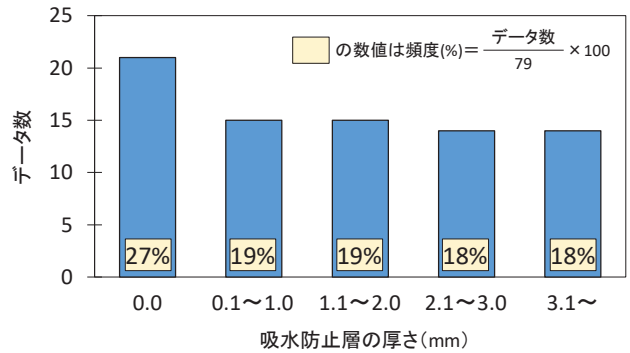


図-11 表面含浸距離が 0.0mm のケースにおける吸水防止層の厚さの分布



写真-8 赤外線カメラによるケレン時のディスクサンダーの刃の熱の測定状況

表面方向への含浸が確認され、 ΔX_{d_s} は打設面と底面の中間程度の約 2mm となり、図-1 による評価に及ぼす重力など表面方向への含浸の向きの影響は明確ではなかった。

2. 2. 4 表面含浸距離の測定結果が 0.0mm のケースにおける吸水防止層の厚さ

この実験では、表面含浸距離の測定結果が 0.0mm でも、図-5 や図-8 の縦軸にはデータがプロットされており、吸水防止層が形成されている場合もあることが示唆された。そこで、表面含浸距離が 0.0mm であった 79 データについて、吸水防止層の厚さの分布を調べた。図-11 に分布を示す。79 データのうち、21 データが吸水防止層の厚さが 0.0mm、15 データが 0.1~1.0mm であった。このデータには、レイタンスが発生しにくい型枠面や型枠面や底面も含まれている。

写真-8 は、表面にディスクサンダーをかけた際の温度を赤外線カメラで調べた状況の一例である。刃の先端が高温になっていることがわかる。気中側は約 60°C を示しているが、気中は 18°C であるため、刃の熱が冷やされている可能性もあり、コンクリート側の刃の熱はこれよりも高いように思われる。シラン成分のアルキル基は 120°C 以上の温度で分解が進行する⁹⁾ことが知られており、切断時の摩擦熱によってアルキル基の

一部が分解したために、吸水防止層が見えにくくなったものと考えられる。このため、本節 2.2.3 で述べた表面方向への含浸を阻害するレイタンスの影響に加え、素地を出すディスクサンダー処理の過程で、表面方向に形成された撥水構造が、表面近傍においてはサンダーの刃の熱で消失した可能性もある。

2 章の実験の範囲では、図-1 による評価において、表面含浸距離の測定結果が 0.0mm のケースについては、約 5 割の確率で吸水防止層が 1.0mm 以下と判定するのが適当と言える。なお、これに関しては、塗布前にケレンや紙やすり等の表面処理によって表面の脆弱組織を除去することで、吸水防止層の厚さが薄いほど表面含浸距離が小さくなる結果が確実に得られると考えられる。

3. 無塗布範囲へ表面方向に形成された撥水域の非・微破壊確認技術の開発

2 章の実験において、シランを塗布すると表層では概ね図-1 に示すような含浸形態を示すことはわかった。しかし、外観から表面方向の撥水域を適切に観察できない場合もあるケースも示された。この要因の一つに、例えば写真-8 で述べたように、塗布後、表面含浸距離の測定にあたって、素地を出すために行ったディスクサンダー処理時におけるサンダーの刃の熱の影響などが疑われた。

3 章では、無塗布範囲へ表面方向に形成された撥水域を適切に確認できる技術について検討を行った。

3. 1 実験概要

3. 1. 1 配合・供試体

表-5 にコンクリートの配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。水セメント比は、含浸のしやすさに差をつけるため、30%、55%、65% の 3 水準とし、細骨材は苫小牧市錦岡産の除塩処理済の海砂（密度 2.69g/cm³、吸水率 1.19%）、粗骨材は小樽市見晴産の碎石（密度 2.67g/cm³、吸水率 1.80%、最大粒径 25mm）を用いた。供試体の寸法は 100mm×100mm×400mm とし、打設後、材齢 7 日まで湿布養生を行った後、材齢 28 日まで恒温恒湿室（温度 20℃、湿度 60%）に静置した。

3. 1. 2 シランの塗布

シランは、2 章で使用した A~D の 4 種類（表-3）に加えて、北海道開発局道路設計要領の基準⁵⁾を満たす 1 製品（名称：E、主成分：アルコキシシラン、外観：無色、有効成分：99%以上、標準塗布量：0.35kg/m²）を加えた 5 種類を実験に供した。

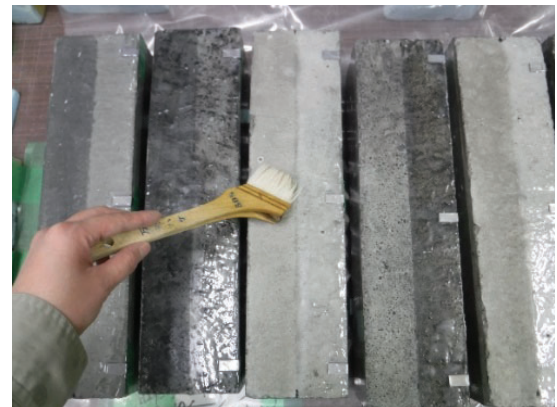
表-5 コンクリートの配合

| 水セメント比(%) | セメントの種類 | 単位量(kg/m ³) | | | |
|-----------|---------|-------------------------|------|-----|------|
| | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |
| 30 | 普通 | 140 | 467 | 718 | 1034 |
| 55 | | 148 | 269 | 874 | 1062 |
| 65 | | 152 | 234 | 922 | 1070 |

無塗布範囲の覆い方：テープ



無塗布範囲の覆い方：エポキシ



無塗布範囲の覆い方：プルオフ



写真-9 塗布状況（刷毛）と無塗布範囲の覆い方

写真-9 に塗布方法を示す。無塗布範囲を覆う方法として、布テープ（3 章ではテープと記す）、エポキシ樹脂（3 章ではエポキシと記す）、プルオフ試験治具⁷⁾（3

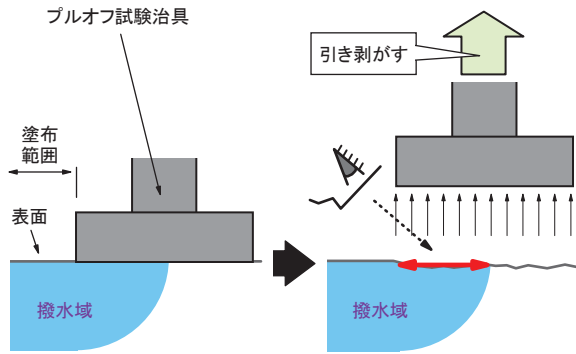


図-12 プルオフ法による評価概念

章ではプルオフと記す) の3種類を設定した。エポキシは、図-9の右図に示すように、テープとコンクリート表面の間に隙間が生じ、その隙間へシランが侵入し、表面方向の含浸距離(図-4の X_s)が過大になる懸念に

鑑み、隙間をなくすねらいで設けた条件である。プルオフは、図-12に示す概念のように、ディスクサンダーのように刃の熱の影響が作用することなく、素地を露出できるように着目して設けた条件である。塗布面は打設面、型枠面、底面の3水準とした。

塗布後、図-4で示した表面含浸距離と吸水防止層の厚さを測定した。なお、素地を出すためのディスクサンダーケレンについては、測定前(プルオフは治具引き剥がし後)にかけるパターンと、かけないパターンの2条件を設けた。なお、打設面はすべての供試体において測定前にディスクサンダーをかけている。

3.2 実験結果・考察

図-13に実験結果を示す。なお、水セメント比とシランの種類については区分していない。グラフを全体

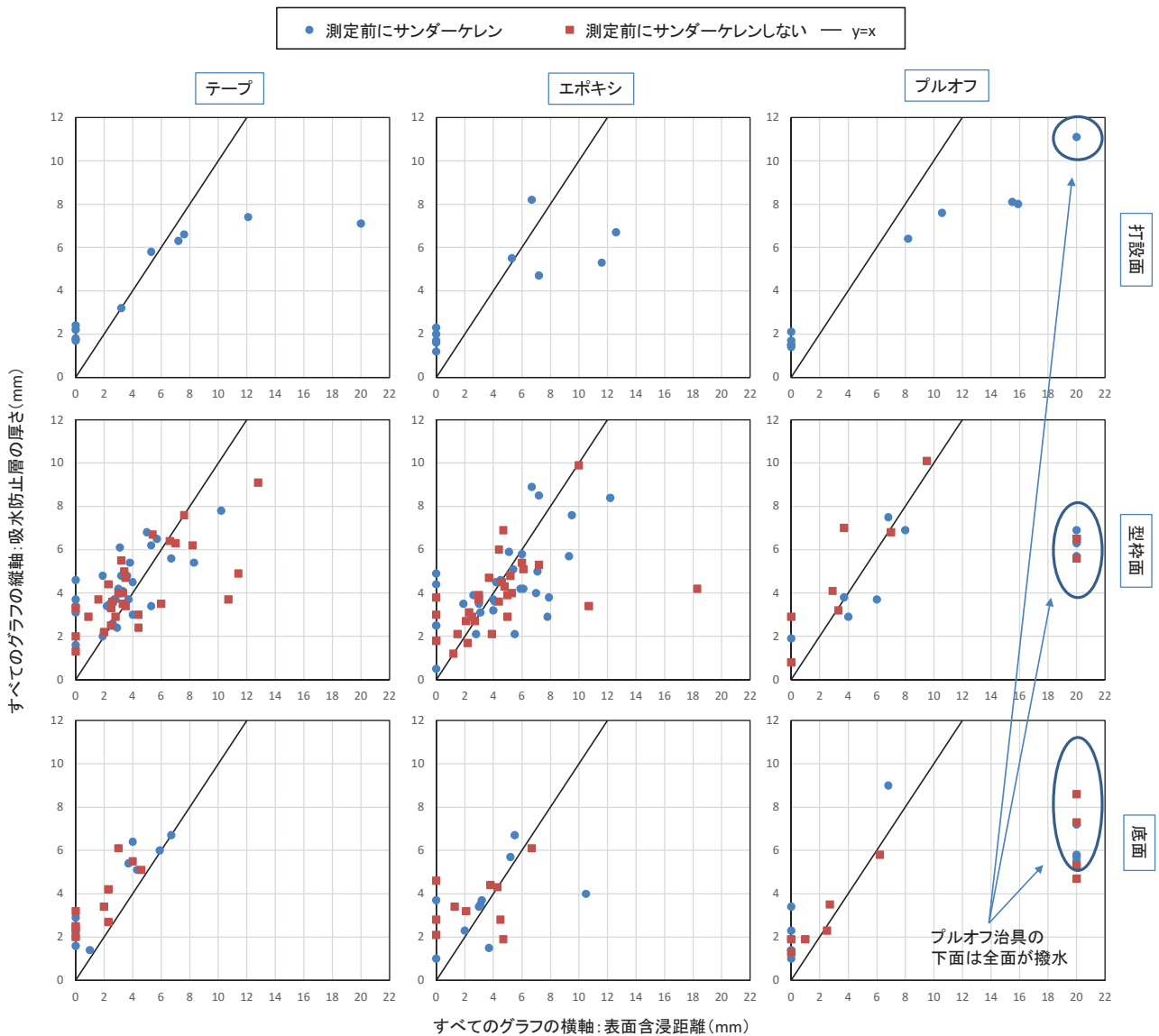


図-13 実験結果

表-6 各条件の ΔX_{d-s}

| 無塗布面 保護方法 | テープ | | エポキシ | | プルオフ | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| | 実施 | 未実施 | 実施 | 未実施 | 実施 | 未実施 |
| 測定前の サンダー | 実施 | 未実施 | 実施 | 未実施 | 実施 | 未実施 |
| 打設面 | 2.81 | — | 2.52 | — | 3.72 | — |
| 型枠面 | 1.64 | 1.56 | 1.76 | 1.87 | 5.05 | 6.18 |
| 底面 | 1.89 | 1.42 | 1.84 | 1.67 | 5.96 | 6.80 |

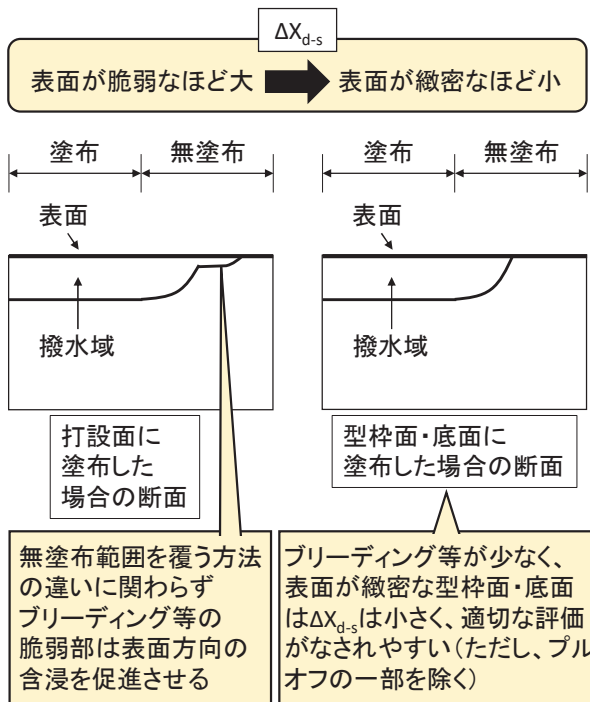


図-14 部位に着目した考察

的にみると、表面含浸距離が大きいほど、シランは確実に内部へ含浸していると評価できる傾向が示されており、図-1で述べた概念に近い結果となった。

表-6は式(1)で示した ΔX_{d-s} を求めた結果である。テープとエポキシの結果をみると、打設面よりも型枠面や底面の方が ΔX_{d-s} は小さい傾向となっている。これは、打設面はブリーディングの影響で表面組織が脆弱になりやすく、コンクリートと無塗布範囲を覆う材料（テープやエポキシ）との隙間を小さくするためにエポキシを使用したとしても、脆弱組織の影響が卓越し、図-14に示す概念のように、表面方向へ大きく含浸する場合があることを示している。

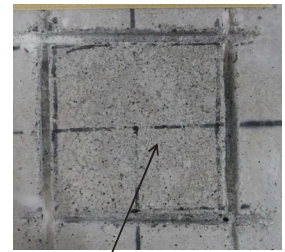
このことから、 ΔX_{d-s} を小さくするには、無塗布面を保護する方法よりも、塗布前に試験面の脆弱部を除去する調整の方が有効である。なお、3章の室内実験では、 ΔX_{d-s} に及ぼすディスクサンダーの影響は明確に現れなかった。3章の室内実験では、塗布によって形成された表面方向の撥水域の品質が極めて高く、熱

表面方向の
撥水域の長さが
測定できた例



撥水域 無撥水

表面方向の
撥水域の長さが
測定できなかった例
(図-13の楕円で表示)



プルオフ治具下面是
全面撥水

写真-10 プルオフにおける表面含浸状況の測定例
(測定前のサンダーケレンなし)

に対する抵抗性が大きかった可能性があるが、詳細な原因は不明であり、これについては4章の試験施工で引き続き検討することとしたい。

今回の実験で最も ΔX_{d-s} が大きかったのは、プルオフであった。なお、図-13に示すように、データが全体的にばらついていただけではなく、データは、 ΔX_{d-s} が小さくなる $y=x$ のグラフ近傍にプロットされるデータ群（写真-10の左）と、プルオフ治具を貼り付けた範囲が全面的に撥水（ここでは、表面含浸距離を治具一辺の長さ4cmの1/2の20mmと評価）するデータ群（写真-10の右）の2つに大別され、後者のデータ群が ΔX_{d-s} に大きな影響を及ぼしたのである。

写真-10の右に示すような、プルオフ治具を貼り付けた範囲全面が撥水を呈した原因は不明であるが、図をみると、この現象は比較的、吸水防止層の厚さが大きかった供試体で確認されていることから、使用した供試体がシランが含浸しやすい品質状態にあったことに加えて、塗布範囲から無塗布範囲への表面方向のシランの含浸が一方のみのテープやエポキシとは異なり、プルオフは無塗布範囲に設定した4×4cmの四方周囲からシランが含浸してくるため、これらの影響によってもたらされた結果のように思われる。

今回の実験により、無塗布範囲へ表面方向に形成された撥水域を適切に確認するには、無塗布面を保護する方法（テープ、エポキシ、プルオフ）よりも、塗布前に試験面の脆弱部を除去する調整を適切に行うことの方が大切であることが確認された。すなわち、無塗布面を保護する方法は、表面方向の含浸に影響を及ぼす脆弱部が存在しない場合、テープでもよいことになる。



図-15 瑞石橋の位置



写真-11 加温の様子

4. 実構造物での適用性評価

次に、北海道内のコンクリート構造物においてシランの試験施工を実施し、2～3章で得られた適切な測定方法に関する知見をふまえながら、図-1の評価方法の有用性を検証した。

4. 1 実験概要

4. 1. 1 現場

実験は一般国道228号北斗市瑞石橋の主桁下面で行った。図-15に位置を示す。瑞石橋は三ッ石川に架かる片側1車線、橋長7mのPC橋で、津軽海峡に面している。1971年に建設され、供用開始から39年経過している。河川敷から主桁下面までの高さは約2mである。

4. 1. 2 塗布・測定

塗布は冬期に実施した。塗布時の外気温は5°Cであった。ここでは、写真-11に示すように、熱出力35kW、吐出口φ455mm、熱風吐出量45～52m³/分、暖房適応面積167～200m²の熱風式ヒーターを使用し、主桁下面の加温を行った。一般に、加温時間を長くとると、含水率は低下し、シランが含浸しやすくなる⁸⁾。そこで、0～24時間の範囲で加温時間を調整し、加温時間



写真-12 塗布状況



写真-13 表面含浸距離の測定状況（ケース3）

の長い区間と短い区間（無加温を含む）を設け、主桁下面を部分的に含浸しやすい状態～含浸しにくい状態へあらかじめ調整した上で試験を行った。

写真-12に塗布状況を示す。塗布範囲を養生テープで囲い、テープを貼った範囲を無塗布範囲にあてた。シランは、表-3で示したC、Dを用いた。塗布後、数日後に養生テープを剥がし、部材表面を水で濡らし、写真-13に示すように、塗布・無塗布の境界から、無塗布範囲に向けて形成されている撥水域の長さを測定し、これを表面含浸距離とした。次に、吸水防止層の厚さを確認するため、部材からコアを採取し、実際の吸水防止層の厚さを測定した。

図-16は実験フローを示している。ケース1とケース2は、ディスクサンダーを使用し、塗布・無塗布の境界付近をケレンして素地を出すシリーズである。ケース1はケレンを実施する時期を塗布後、ケース2は塗布前としたものである。ケース3は写真-10に示すように、素地を出さず、そのまま表面を濡らして評価を行うシリーズである。

4. 2 実験結果・考察

4. 2. 1 塗布後にケレンをかけた場合

塗布後、素地を露出させるためのケレンをかけたケース1の実験結果を図-17に示す。ここでは、シラン

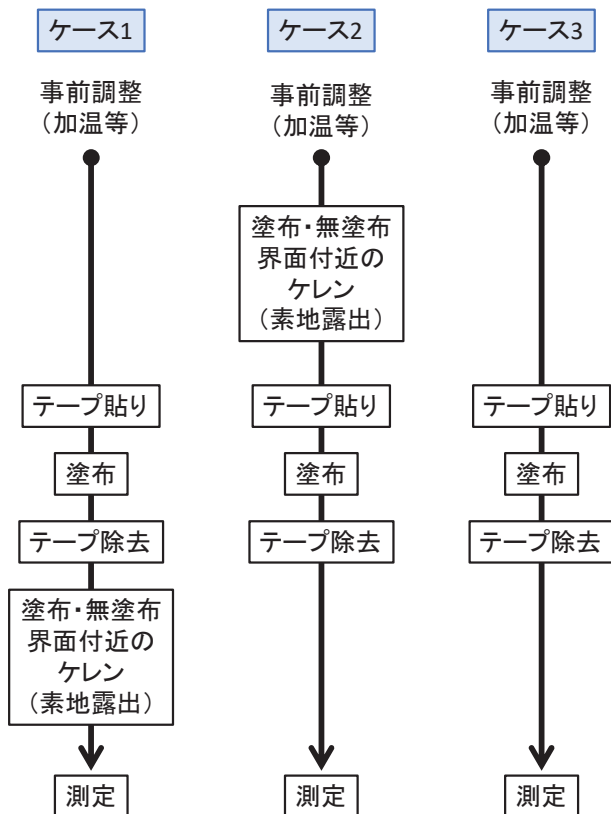


図-16 実験フロー

の種類については区分していない（後述するケース2、3についても同じ）。吸水防止層の厚さに関わらず、塗布を行ったいずれの箇所でも表面含浸距離は0mmとなり、外観からは表面含浸距離を把握することができなかった。これは、写真-8でも述べたように、図-18に示すように、ディスクサンダーでケレンした際の刃の熱によって表面の撥水域が消失した可能性が考えられる。3章の実験では表面の撥水域がディスクサンダーによって消失する結果は示されなかったが、3章の結果は、塗布環境が比較的穏やかで、形成された表面方向の撥水域の品質が高かったため、熱に対する抵抗性が大きかったとも考えられ、塗布後にディスクサンダーで素地を露出させる作業は避けた方がよいと言える。

4. 2. 2 塗布後にケレンをかけなかった場合

次に、塗布後、ケレンをかけなかった場合の結果について述べる。塗布前に素地を露出させるためのケレンをかけたケース2、および、ケレンをかけなかったケース3の実験結果を図-19および図-20に示す。全体的に、吸水防止層の厚さが大きいほど、外観で観察される表面含浸距離は大きい傾向となっており、図-1の概念に近い結果となっている。なお、今回の実験では全

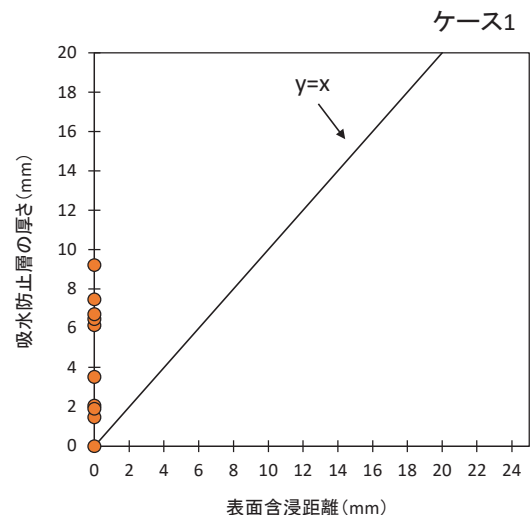


図-17 瑞石橋主桁下面での実験結果（ケース1）

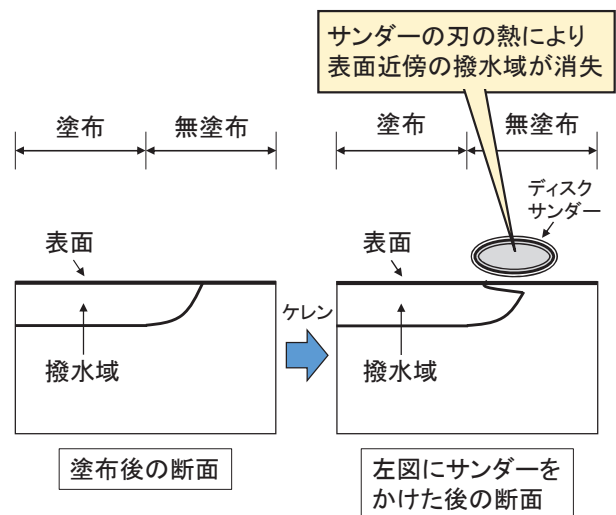


図-18 ケース1に関する考察

体的に吸水防止層の厚さに対し、表面含浸距離の方が大きい傾向となった。この要因として、図-21に示すように、4章での塗布作業は、外気温5℃の主桁表面を加温して行っているため、主桁は内部に比べて、表面に近い組織ほど、加温の作用・効果を強く受けるため、相対湿度も低くなり、シランが含浸しやすい状態にある。このことから、表面含浸距離の方が大きめに表示されたものと思われる。また、図-9で示したように、テープと主桁表面の間の隙間へシランが侵入している可能性もある。

次に、塗布前にケレンをかけた場合（ケース2）とかけなかった場合（ケース3）の結果を比較する。ケース2の場合、吸水防止層の厚さは表面含浸距離の約0.3倍であったのに対し、ケース3の場合、吸水防止層の厚さは表面含浸距離の約0.5倍であった。今回の試験施工

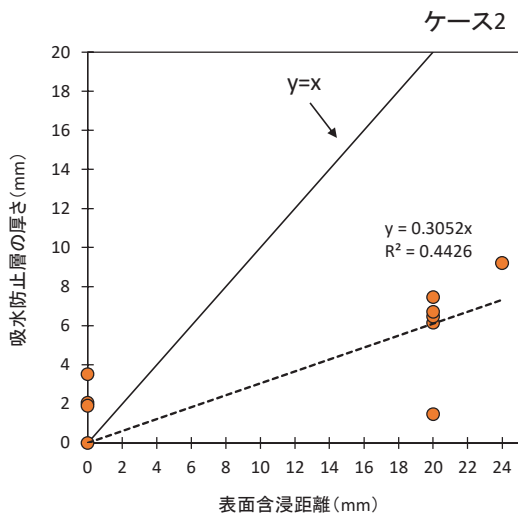
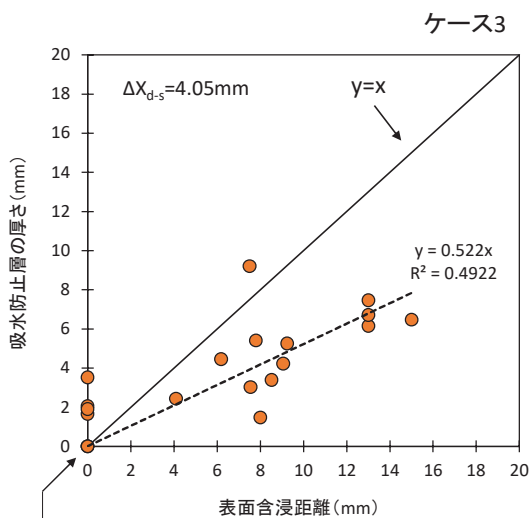


図-19 瑞石橋主桁下面での実験結果（ケース2）



ケース3のみ、
原点には3つのデータが
重なってプロットされている

図-20 瑞石橋主桁下面での実験結果（ケース3）

では、塗布前にケレンをかけた方が表面含浸距離が大きくなる傾向が示された。これは、塗布前にケレンを行ったことで表面方向へのシランの含浸を阻害する各種物質が塗布前に除去されたことで、図-21で述べた要因により、表面含浸距離が大きくなったものと考えられる。

5. 非/微破壊によるシラン系表面含浸材の含浸深さ管理技術の提案

2～4章で述べた実験結果をもとに、吸水防止層が形成されていることを非破壊で評価する方法について、図-23、写真-14のように整理・提案した。

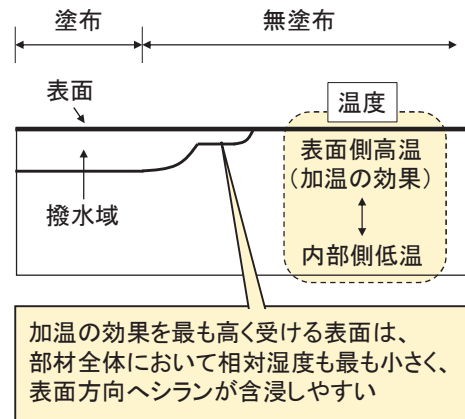


図-21 ケース1と3における加温の影響に関する考察

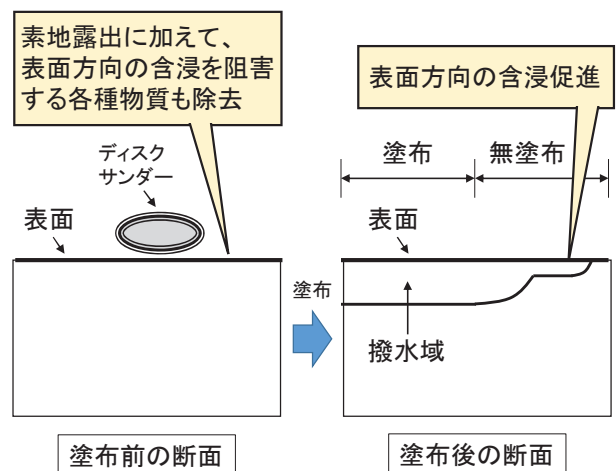


図-22 塗布前のケレンの影響に関する考察

はじめに、無塗布範囲を設定するとともに、その範囲および近傍において、ブリーディングやレイタンスなど、表面方向へのシランの含浸を阻害する要素を事前に取り除く（図-9の上、図-10）。その方法としてディスクサンダーが効果的ではあるが（図-22）、新設部材の表面を傷つけてしまうことや、サンダーや発電機の準備など作業性の低下が懸念される。そこで、表面処理の方法として、表面に砂粒が見える程度まで紙やすりをかける簡易な方法を提案することとした。

次に、塗布・無塗布の境界に沿って養生テープを無塗布面に張る方法を提案することとした。無塗布面を保護する方法に関しては、3章でテープやエポキシおよびプルオフについて検討したが、表面の脆弱部が適切に処理されていれば、無塗布範囲を覆う方法の違いを問わず、表面方向と内部方向の含浸距離（深さ）の差である ΔX_{d-s} は小さくなる結果（図-14）をふまえて、ここでは作業がしやすい養生テープを使用することを提案した。無塗布面は作業性に鑑み、10cm×20cmを基本とすることを提案した。この詳細は後述する。

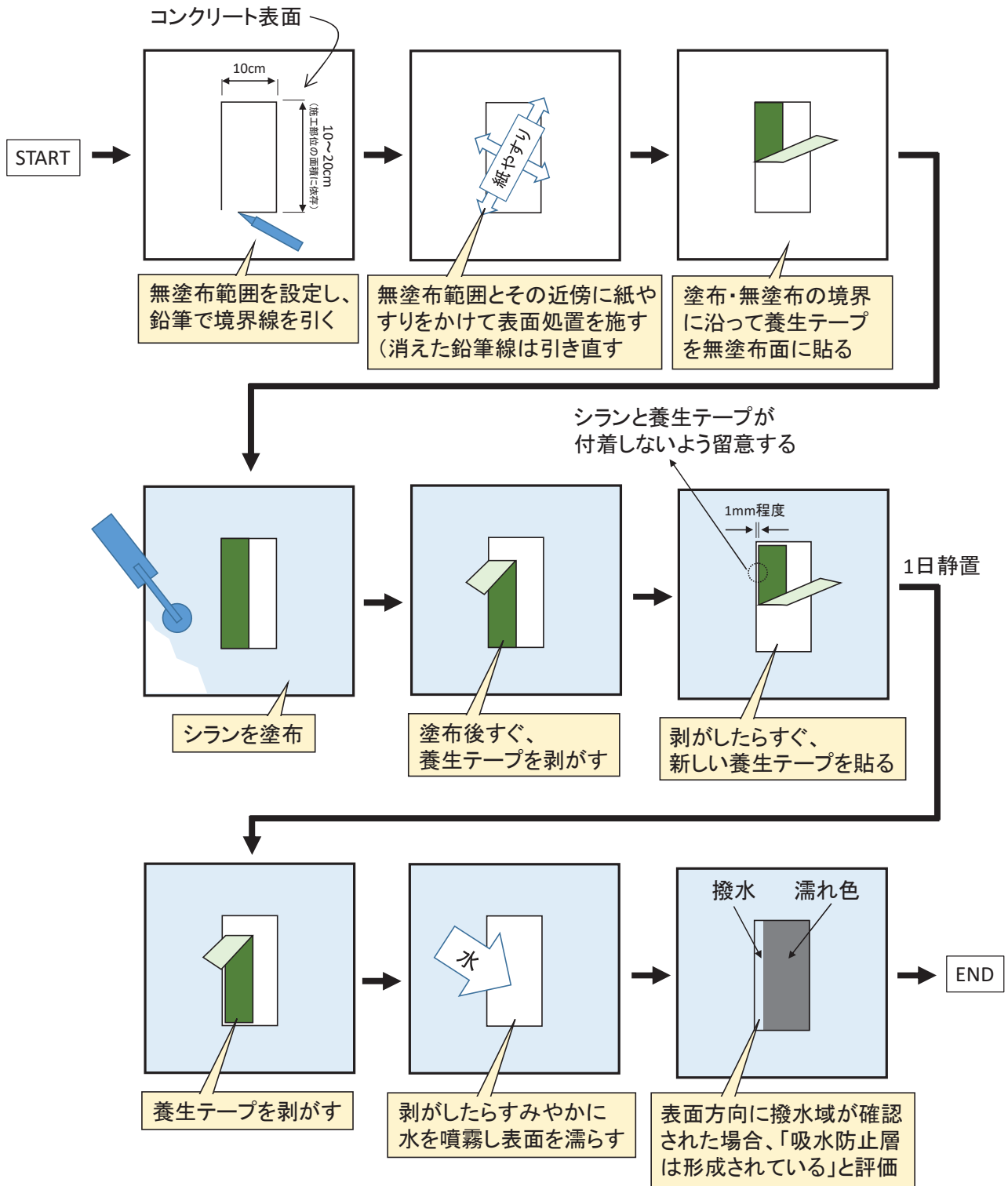


図-23 本研究で提案する非破壊によるシランの含浸状況の評価法

養生テープを貼り終えたらシランを塗布することになるが、塗布後すぐに養生テープを剥がし、剥がしたらすぐに新しい養生テープを貼る流れを提案することとした。これは、塗布直後、シランと養生テープは基本的に接触しており、このままではコンクリート表面とテープの隙間にシランが侵入し、表面方向への含

浸の結果に影響を及ぼすため(図-9の下)、この接触を切る必要があるためである。新しく養生テープを貼る際は、シランと養生テープは付着しないよう留意する必要がある。この隙間については1mm程度を目標とすることとする。養生テープの幅は5cmであるが、無塗布範囲の幅をテープにあわせて5cmとすると、新しい

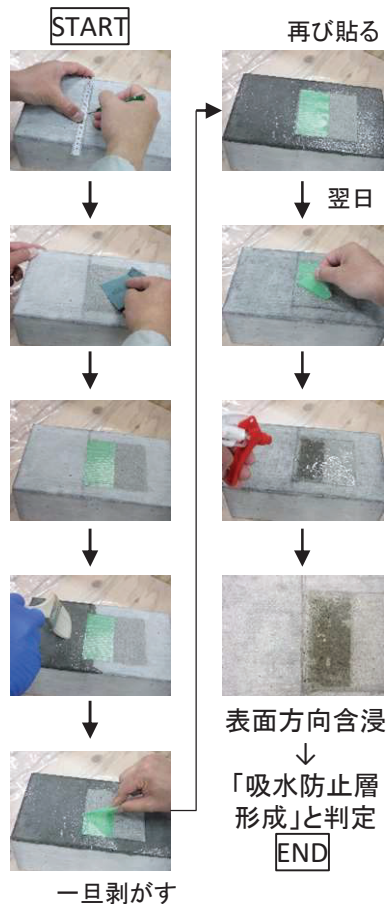


写真-14 図-23に基づいた評価の実演

養生テープを貼る際、シランがテープや手に付着する恐れがある。このため、無塗布範囲の幅は5cmではなく、10cmと余裕をもたせたのである。なお、新しい養生テープを貼る理由は、コンクリート表面とテープの隙間へのシランの侵入を切る（図-9の下）ことも一つあるが、これに加えて、養生テープを貼らないと無塗布表面は外気に触れ、揮発しやすい状態となり、表面方向と内部方向で異なる含浸挙動を示すことが懸念され、これを防ぐためでもある。

新しく貼った養生テープは、1日静置後に剥がす。その後、測定となるが、剥がしたらすみやかに水を噴霧し、表面を濡らす必要性を強調することとした。これは、剥がしてそのまま放置すると、塗布面から揮発したシランが無塗布範囲に蒸着し、適切な測定が行えない可能性があるためである。また、養生テープを剥がし、水を噴霧するまでの間、紙やすり等で表面を磨くことは避ける必要がある。これは、表面を擦ると、表面に形成された撥水域が消失する場合があるためである（図-18）。

そして、水の噴霧により、塗布・無塗布の境界線から無塗布範囲に撥水域が形成されていた場合「吸水防

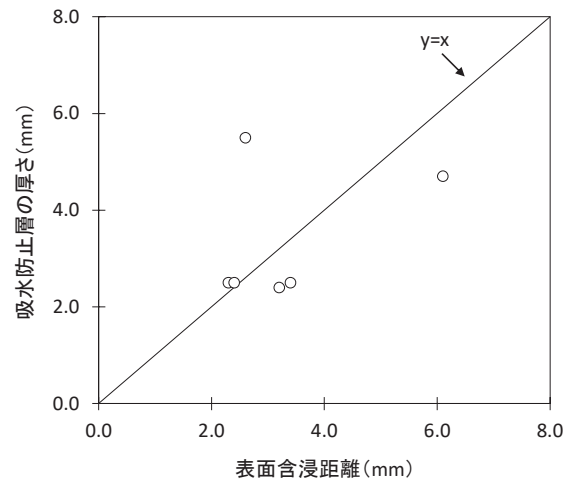


図-24 実験結果

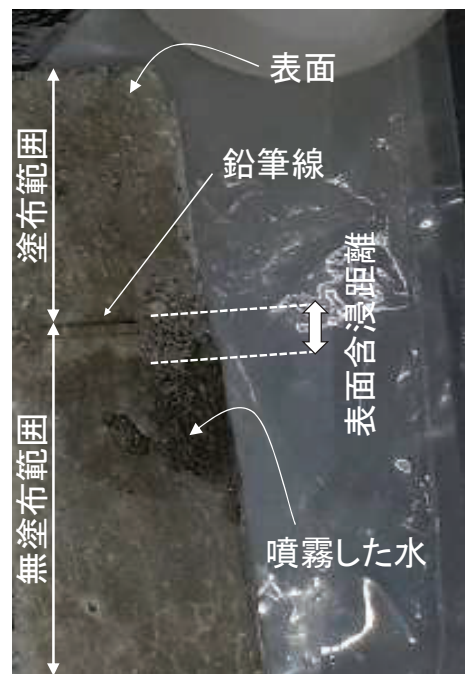


写真-15 表面含浸距離の一例

止層は形成されている」と評価する。表面含浸距離と吸水防止層の厚さの関係については、図-13では型枠面や底面において $y=x$ の近傍にプロットされたものの、図-20では吸水防止層の厚さは、表面含浸距離の約0.5倍となる等、厚さを特定できるまでには至らず、本研究の範囲では、吸水防止層の厚さは表面含浸距離の0.3～1倍の範囲と解釈（図-13、図-19、図-20）することが適当と言える。しかしながら、「吸水防止層が形成されている」ことを、コアを採取せずに評価できる図-23の方法は、現場管理技術の向上に資すると考えている。

ここで、図-23の妥当性を検証するための実験を行った。

実験は、過年度に別の研究において作製され、未使

用状態のコンクリート供試体を使用して行った。シランは2章で適用したA～Dおよび3章で適用したEを使用した。実験は供試体の型枠面を使用し、**図-23**で示した方法を試した。紙やすりは粗さが#120（中目）のものを使用し、目標の研磨深さは0.07～0.1mm程度とし、表面のペースト分が除去され、砂粒が見える程度にまで研磨した。型枠面が垂直となるよう、供試体を立て、横向きに塗布した。表面含浸距離の向きは水平方向とした。

図-24 に実験結果、**写真-15** に表面含浸距離の一例を示す。なお、シランの種類については区分せずにプロットした。表面含浸距離が確認されたシリーズでは吸水防止層が形成され、表面含浸距離が大きいほど、吸水防止層の厚さが大きいことが期待される結果となった。以上のことから、**図-23** の妥当性を確認することができた。

6. まとめ

シランをコンクリート表面の一部に塗布すると、深さ方向に加えて、概ね同心円状に表面水平方向へも含浸する特徴に着目し、表面水平方向への含浸状況をもとに、深さ方向への大凡の含浸状況を非破壊で簡易に管理できる技術を整備・提案することを目的に研究を行った。得られた知見を整理すると下記ようになる。

- (1) 表面（外観）/内部方向における含浸距離の関係を調べたところ、ばらつきはあるものの、表面方向へ含浸する場合は内部方向へも含浸することを確認し、両者は概ね対応していた。
- (2) 無塗布範囲へ表面方向に形成された撥水域の非・微破壊の確認方法について検討し、①測定のための表面の目荒しは塗布前に行う、②測定は、表面方向へ含浸させるための無塗布面を保護するテープを剥がしたらすぐに行う、等の留意により、評価が行えることを明らかにした。
- (3) 実構造物での適用性を評価するため、道路橋の桁下面で試験施工を実施し、適用できることを確認した。
- (4) これまでに得た知見を整理し、「非/微破壊によるシラン系表面含浸材の含浸状況の管理」に関する

試験方法をとりとまとめた。

今回の研究を通じ、**写真-1** に示すようにコアを採取しなくても、**写真-14** に示すようにシランの含浸状況（含浸の有無）を非破壊により簡易に管理できる方法（**図-23**）を整理することができた。

今後は、実構造物での実績を集め、必要に応じて改善を行うなど、試験方法のブラッシュアップを図りたいと考えている。

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，pp.146-172，2005.4
- 2) 遠藤裕丈，島多昭典，鈴木哲：表面被覆材端部の剥がれ抑制技術に関する研究－剥がれ抑制効果の実験的評価，道路橋での施工性検証－，第57回（平成25年度）北海道開発技術研究発表会発表概要集，2014.2
- 3) 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
- 4) 酒井昇：食品の誘電物性とマイクロ波加熱，日本食品工学会誌，Vol.11，No.1，pp.19-30，2010.3
- 5) 国土交通省北海道開発局：平成31年度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」，2019.4
- 6) 荒瀬晃，増田弦，伊藤昌明，伊藤光臣，鈴木章：トリアルキルボランの極性化合物存在下での熱分解反応，日本化学会誌，Vol.1972，No.2，pp.395-401，1972.
- 7) コンクリート診断技術'02 [基礎編]，社団法人日本コンクリート工学協会，pp.97-100，2002.1
- 8) 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

ESTABLISHMENT OF NON-DESTRUCTIVE PENETRATION DEPTH CONTROL METHOD OF SILANE-TYPE SURFACE PENETRANTS

Research Period : FY2017-2020

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

Author : YASUNAKA Shintaro, KIKUTA Etsuji and ENDOH Hirotake

To achieve the greatest effectiveness when using silane-type surface penetrants, it is important to select suitable materials. Moreover, the penetrant needs to impregnate deep inside the concrete during construction to form a thick water-repellent layer. In construction, however, what is managed is mainly the penetrant application amount. There is no direct management of how deep the penetrant impregnates the concrete member. Although the penetration depth of silane penetrant can be understood after construction by sampling cores from members and spraying water on the cores, this method cannot be considered efficient for managing the penetrant. When a silane-type surface penetrant is applied to the concrete surface, not only does it penetrate in the depth direction, but it also penetrates roughly concentrically in the direction horizontal to the concrete surface. This study addressed this characteristic of silane penetrant and conducted various experiments to develop an easy nondestructive method for managing the approximate penetration depth by visually inspecting the distance the penetrant horizontally impregnates the concrete surface. We devised a method to grasp the situation non-destructively, verified its usefulness in the laboratory and road bridges in Hokkaido, and summarized it as a test method. The usefulness was verified in the laboratory and the road bridge in Hokkaido. Then, it was summarized as a test method.

Key words : Concrete, Silane-type Surface Penetrants, Penetration Depth, Management, Non-destructive