

論文 シラン系表面含浸材の含浸状況の非破壊評価方法の開発

遠藤 裕丈*1・安中新太郎*2

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削孔を行い、水を噴霧することで把握はできるものの部材の損傷が懸念され、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。著者らは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、水分量、温度、塗布面を変化させて試験を行い、さらに北海道の構造物でも検証を行い、考案した方法の有用性を評価した。

キーワード：シラン系表面含浸材、吸水防止層、含浸状況、非破壊評価、構造物

1. はじめに

シラン系表面含浸材（以下、含浸材と記す）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¹⁾。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ため、部材の耐久性向上が期待される。含浸材は、(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含浸材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ものの、すべての部材においてこの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。

こうしたことから、著者らは含浸材が深さ方向に加えて表面方向へも含浸する特徴を有していることに着目し、図-1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、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、含浸材の含浸状況を非破壊で評価する技術の開発に取り組んでいる²⁾。本論文では、含浸材の含浸に影響を及ぼ



写真-1 削孔による直接的な吸水防止層の確認例

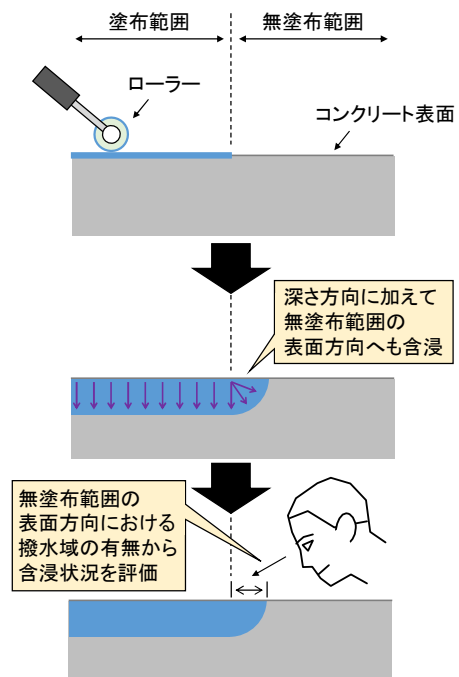


図-1 含浸状況の非破壊評価方法の概念

す水分量や温度および塗布面の向きを変化させるなど、様々な塗布環境下で試験を行い、図-1の技術の有用性を評価した。さらに、北海道内のコンクリート構造物で図-1の有用性を検証する機会を得たので、その結果もあわせて述べる。

*1 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 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*2 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 上席研究員（正会員）

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 |

AE 減水剤：451.2ml/m³， AE 助剤：14.1ml/m³
 スランプの実測値：12.4cm， 空気量の実測値：5.0%

| 材齢(日) | 環境 | | | |
|-------|---------------|----------------------|-------|---------|
| | 高湿・低温 | 高湿・常温 | 低湿・常温 | |
| | 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-2 加湿空間

2. 室内実験の概要

2.1 コンクリートの配合

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/cm³，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砕石(表乾密度2.68g/cm³，吸水率1.77%，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±2.5cm，4.5±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。

2.2 供試体

供試体の寸法は100mm×100mm×400mm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¹⁾。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-2 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



写真-3 電気抵抗式的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

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-2の空間から取り出し、-20℃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℃，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-3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してコンクリート表面付近の含水状態を評価する仕組みになっており、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とを照合したところ、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

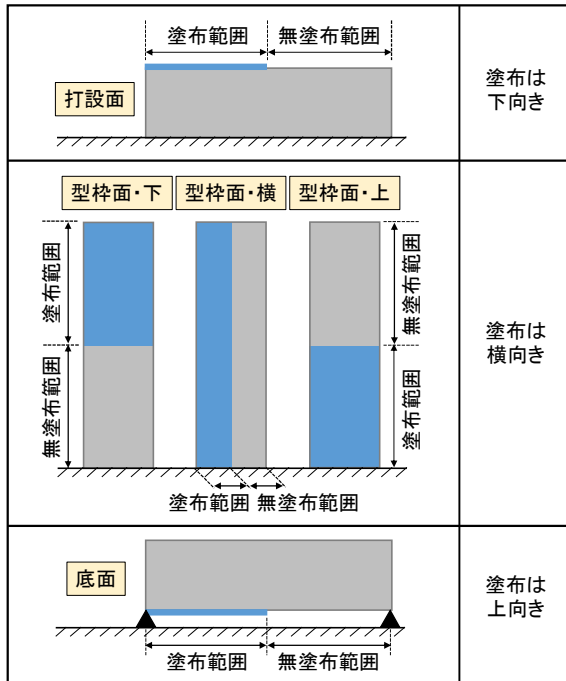


図-3 塗布面の向き・位置（型枠面の「下，中，上」は無塗布範囲への表面方向の含浸の向きを表す）

表-3 実験で使用した含浸材

| 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 |

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。

2.3 含浸材の塗布

供試体表面の含水状態を調べた後、含浸材を塗布した。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、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は実験で使用した含浸材を示している。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含浸材の選定基準の目安⁵⁾を満たす4製品を使用した。

塗布時は写真-4に示すように、無塗布範囲に含浸材が付着しないよう、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含浸材が表面方向へ伝い、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、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

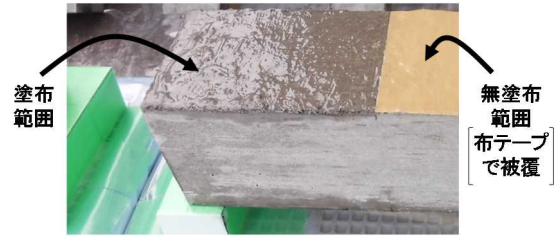


写真-4 塗布後の状況（下向きに塗布した打設面）

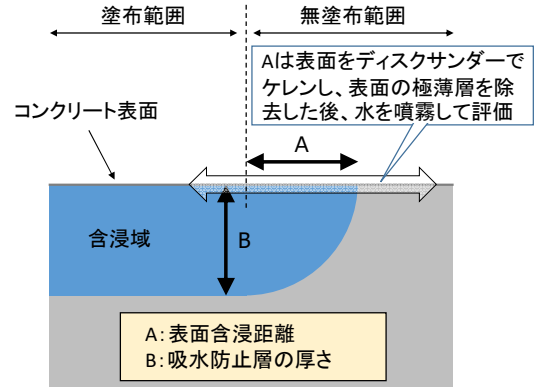


図-4 評価項目

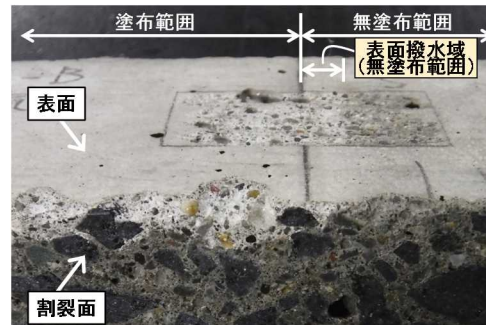


写真-5 測定状況の一例（水を噴霧した様子）

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、テープを剥がす時期は塗布の翌日のみとした。

2.4 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最長距離を測定した。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、その厚さを測定した。写真-5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。

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

表-4 表面含浸距離と吸水防止層の厚さの関係性及び製品の影響

| | 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

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増えると 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。

3. 室内実験の結果および考察

3.1 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)、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増える関係性及び製品の影響は小さいことを確認した。

そこで、本節以降に示すグラフでは製品名を区分せず、全体的な傾向に関して考察を展開することとする。

3.2 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。

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。

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、含浸材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

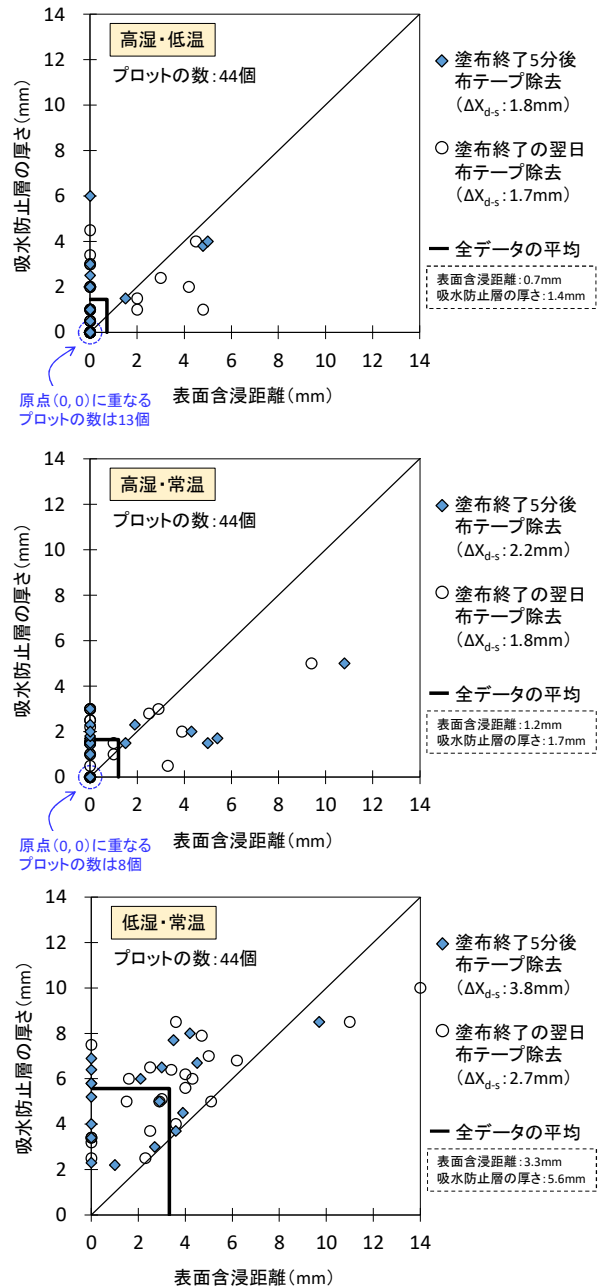


図-5 養生後に曝した環境ごとに整理した表面含浸距離と吸水防止層の厚さの関係

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おり、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、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。

一方、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、次の 3.3, 3.4 で述べる。

3.3 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

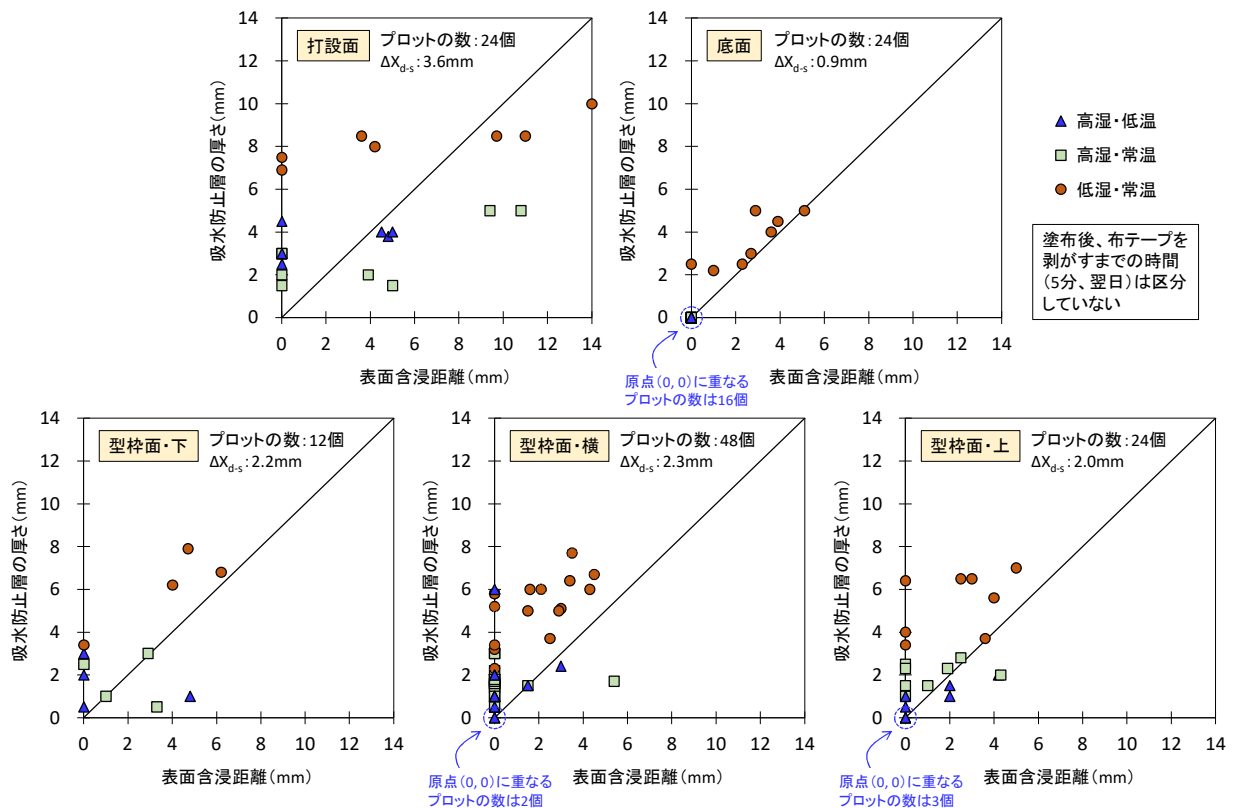


図-6 部位ごとに整理した表面含浸距離と吸水防止層の厚さの関係

布面の向き・位置ごとに整理した結果を図-6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、型枠面・上、底面の順に大きく、打設面では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樣ではなかった。これは、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、その反面、含浸材の含浸を阻害するレイタンスリが蓄積されやすいこと、さらには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等、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やすい部位であることが要因と考えられる。

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。

3.4 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

表面含浸距離の測定結果が0.0mmでも、図-5や図-6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。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-7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。3.3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サンダーの刃の熱で消失した可能性もあり、今後、測定方法の改良を図りたいと考えている。

今回の実験の範囲では、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、塗布前に脆弱組織を除去する表面処理を施すことで、表面含浸距離が小さいほど吸水防止層の厚さが極めて小さくなる結果が確実に得られるように思われ、今後、検討していきたい。

4. 構造物での有用性の検証

次に、北海道内のコンクリート構造物で図-1の評価方法の有用性を検証した。検証は、1981年建設の覆道A

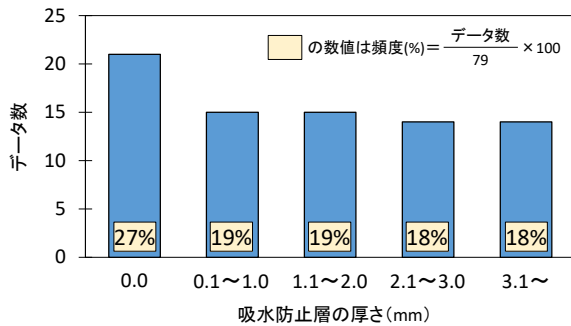


図-7 表面含浸距離が0.0mmのケースにおける吸水防止層の厚さの分布



写真-6 試験状況 (道路橋 B の地覆)

の高さ 4.5m の既設柱 7 箇所、2019 年に打換えられた橋長 60m の道路橋 B の地覆 1 箇所、1971 年建設の橋長 7m の道路橋 C の桁下面 10 箇所で行った。

写真-6 は道路橋 B の地覆での試験状況を示している。はじめに 50mm×100mm の布テープを表面に貼り、その後、含浸材を塗布した。その数日後に布テープを剥がし、塗布範囲と無塗布範囲の境界付近の表面をディスクサンダーでケレンし、ヒートガンで表面を乾かしてから水を噴霧し、表面含浸距離を測定した。そして、吸水防止層の厚さとの比較を行った。ここでは部材の品質評価ではなく、表面含浸距離と吸水防止層の厚さとの対応を調べることをねらいとしているため、塗布時の部材表面の含水状態の評価は行っていない。

なお、3.4 で述べたケレンの影響を調べるため、表面に荒れや凹凸等が見受けられず、品質が比較的良好な道路橋 C の桁下面ではケレンを省略し、布テープを剥がした直後に水を表面に噴霧し、表面含浸距離を調べた。

図-8 に結果を示す。全体的に見ると、表面含浸距離が小さい箇所ほど吸水防止層の厚さは小さい傾向にあった。今回の調査の範囲では、表面含浸距離と吸水防止層の厚さは概ね対応する結果となり、含浸状況を非破壊で

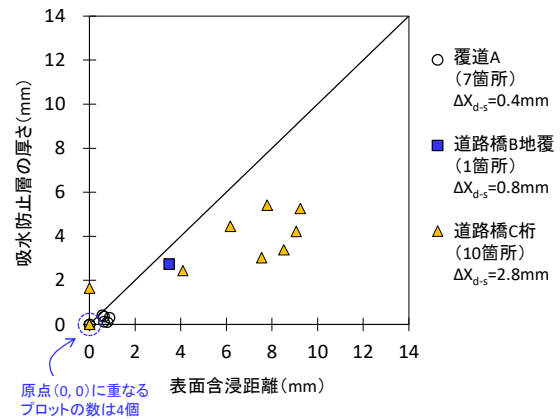


図-8 検証結果 (道路橋 C はケレンを省略して測定)

把握する図-1 の有用性を現場で確認することができた。また、道路橋 C 桁下面の調査より、現場によってはケレン省略など作業手順を簡素に見直せる可能性も示された。

5. まとめ

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材の含浸状況を非破壊で把握する方法を考案し、水分量、温度、塗布面を変化させて試験を行い、さらに構造物で検証を行い、有用性を評価した。得た知見を以下に示す。

- (1) 表面含浸距離が大きいくほど、内部へ確実に含浸している傾向にあり、考案した方法の有用性を確認した。
- (2) 評価に際しての留意点として、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、無塗布範囲を被覆する布テープは塗布の翌日以降に剥がず、などの事項を整理できた。

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，pp.146-172，2005.4
- 2) 遠藤裕丈，安中新太郎，林大介，室野井敏之：シラン系表面含浸材の含浸深さを非破壊で管理する技術の開発に向けての基礎的研究，寒地土木研究所月報「寒地土木技術研究」，No.765，pp.2-9，2017.2
- 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