

# 論文 シラン系表面含浸材による撥水層内の非撥水部がモルタルの凍結融解抵抗性に及ぼす影響

小川 将司\*1・井向 日向\*2・岩瀬 裕之\*3

**要旨:** 本研究では、シラン系表面含浸材を塗布したモルタル供試体を用いて、撥水層厚さの算定と凍結融解試験を実施し、耐久性と撥水層厚さの関係を検討した。その結果、塗布時の含水率が高いほど、撥水層内に水分を含む非撥水部が存在し、その影響によって耐凍害性が低下することを示した。また、含水率が高いモルタルに含浸材を重ね塗りすることが撥水層厚さに与える影響について検討した。含浸材を2回塗布することで撥水層厚さは大きくなること、また1回目塗布時よりも撥水層内の非撥水部の割合が小さくなることを画像解析による解析値および静電容量を用いた推定値(有効撥水層厚さ)で評価できることが明らかとなった。

**キーワード:** シラン系表面含浸材, 有効撥水層厚さ, 含水率, 画像解析, 多電極型等比共面電極

## 1. はじめに

シラン系表面含浸材による表面含浸工法は、含浸材をコンクリートに塗布・浸透させてコンクリート表層部に撥水層を形成し、鉄筋コンクリートの劣化因子である塩分や水分などの浸入を防ぐものである。しかし、含浸材塗布時のコンクリートの水分供給条件が、含浸深さと吸水抑制効果に大きく影響することが報告されている<sup>1)</sup>。例えば、含浸材塗布時のコンクリートの含水率が高い場合、**図-1**に示すように撥水層内部に水を弾かない非撥水部が残ることが確認されている<sup>(例えば2),3)</sup>。このような非撥水部は、含浸材を塗布したコンクリートが見かけ上、十分な撥水層厚さを確保していたとしても、その凍結融解抵抗性を損なわせる一要因になると考えられる。

著者らは、非撥水部を反映した撥水層厚さを有効撥水層厚さと定義し、これが含浸材を塗布したコンクリートの耐久性の指標となることを提唱している<sup>2)</sup>。また、電極を用いた静電容量の測定により、有効撥水層厚さを非破壊で推定できる手法の開発<sup>2)</sup>を進めているとともに、含浸材塗布時のコンクリートの含水率と非撥水部の割合の関係について検討している<sup>3)</sup>。一方、コンクリートには粗骨材が含まれるため、**図-1**に示すように非撥水部と粗骨材、または撥水層と非撥水層の境界を正確に区別して検討するには不都合であった。

本研究では、粗骨材を含まないモルタルについて、含浸材塗布時のモルタルの含水率を実験変数とした場合の凍結融解抵抗性を検討する。また、撥水層内における非撥水部の割合を画像解析により求め、含浸材塗布により形成される撥水層厚さの定量化を試みる。さらに、実構造物での適用を想定し、非破壊で有効撥水層厚さを推定する手法の有用性と、やむなく含水率が高いコンクリー

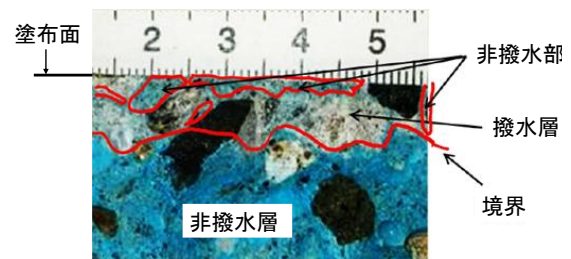


図-1 撥水層中の非撥水部の様子

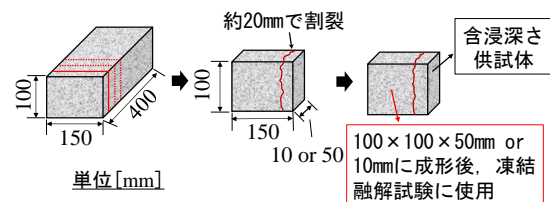


図-2 供試体概要 (2章および3章)

トに含浸材を塗布する場合の対策として含浸材を重ね塗りすることの効果についても検討した。

## 2. 含浸材塗布時のモルタルの含水率と凍結融解抵抗性に関する検討

### 2.1 実験概要

#### (1) 供試体および実験シリーズ

供試体概要を**図-2**に示す。また、使用材料を表-1に示す。供試体は寸法150×100×400mmの角柱モルタルを、水中養生後に断面150×100×厚さ10または50mmの直方体に切り出して作製した。切断にはダイヤモンドカッターを用いた。モルタルの配合を表-2に示す。モルタルは、水セメント比60%、セメント砂比を1:5とした。粗砂と細砂は8:2で混合した。セメント砂比は、シラン系表面含浸材の浸透厚さに明確な差が現れることを意図

\*1 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 (学生会員)

\*2 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博士(工学) (正会員)

\*3 岐阜工業高等専門学校 名誉教授 泉建設工業(株) 博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料

名称	記号	物性
水	W	密度：1.00g/cm <sup>3</sup>
普通ポルトランドセメント	C	密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
粗砂	S1	表乾密度：2.61g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率：2.53， 吸水率：2.35%
細砂	S2	表乾密度：2.61g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率：2.16， 吸水率：1.75%
高性能減水剤	Ad.	嵩比重：500kg/m <sup>3</sup>

表-2 モルタルの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				Ad.
	W	C	S1	S2	
60	201	335	1675		C×1.5%~2%
			1340	335	

した極端な比率とした。

目標空気量を5%として配合したが、測定空気量は10%を超えており、締め固めがうまくできず、通常のもルタルに比べて多孔質になった。水中養生後の吸水率は、平均9.8%であった。打設後1日で脱型をし、28日以上水中養生した。厚さ10mmおよび50mmに切り出した供試体を炉乾燥し絶乾状態にした後、所定の含水率0~6%になるような水と一緒にポリエチレン製の袋に入れ密封し、2週間以上静置した。

実験要因を表-3に示す。供試体は各条件について2つずつ用意した。シラン系表面含浸材はアルキルアルコールを主成分とするものを用いた。含浸材は切断面に塗布し、その塗布量は400g/m<sup>2</sup>で一定とした。厚さ50mmの供試体は片面に塗布し形成される撥水層厚さが変化するようにした。厚さ10mmの供試体は供試体全体が撥水層になるように両面から200g/m<sup>2</sup>ずつ塗布した。

(2) 撥水層厚さ(実測値)の測定方法

含浸材塗布から3日以上経過後、図-2に示すように厚さ50mmの供試体を端から20mmの位置で割裂し、青の水性染料を溶かした染料水で割裂面を着色した。撥水層は水を弾くため着色されない。この見かけの撥水層(未着色層)の厚さを精度1/100mmのノギスで測定し、撥水層厚さ(実測値)と定義した。

(3) 凍結融解試験方法

けい酸塩系表面含浸材試験方法 JSCE-K572 に準拠して凍結融解試験を実施した。凍結融解試験時の供試体の浸水方法を図-3に示す。含浸厚さの測定に使用した供試体を100×100×10mm、100×100×50mmにダイヤモンドカッターで成形した。厚さ10mmの供試体は、供試体全体が濃度3%の食塩水中に浸漬するようにした。厚さ50mmの供試体は含浸材塗布面を下にして供試体の浸漬深さが5mmになるようにした。供試体の浸水面以外の面はガラス繊維とエポキシ樹脂で被覆・補強した。

凍結融解試験では、12時間で供試体周囲の温度を-20

表-3 実験要因

寸法[mm]	含水率[%]	塗布量[g/m <sup>2</sup> ]
100×100×10	0	0
	0	400
	2	
	3	
	4	
	5	
100×100×50	0	0
	0	400
	2	
	4	
	6	

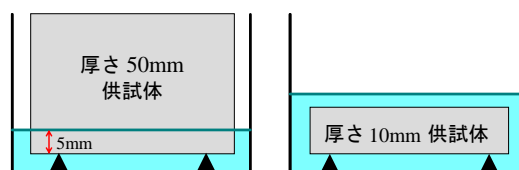


図-3 凍結融解試験時の供試体の浸水方法

表-4 供試体割裂面の着色状況の一例

	含水率	
	2%	6%
供試体厚さ10mm		
供試体厚さ50mm		
	撥水層厚さ：6.14mm	撥水層厚さ：8.15mm

~20℃に変動させる工程を1サイクルとした。厚さ10mmの供試体では、6サイクル毎にスクレーピング片をろ過し、炉乾燥して欠損質量とし後日計測した。厚さ50mmの供試体では、厚さ10mmの同様の方法で12サイクル毎に欠損質量を計測した。

試験の終了条件は、欠損質量と試験前の供試体質量の比である欠損割合が所定の値を超えた場合とした。厚さ10mmの供試体は欠損割合が10%を超えた場合、厚さ50mmの供試体は、欠損割合が5%を超えた場合を破壊サイクル数とした。

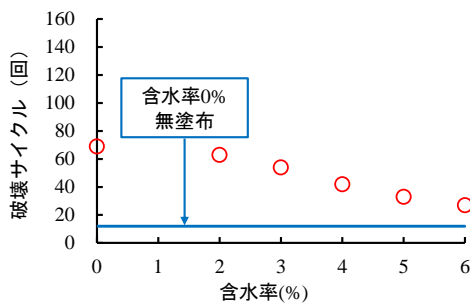
2.2 実験結果および考察

供試体割裂面の着色状況の一例を表-4に示す。含水率6%で塗布した場合、厚さ10mm、50mmの供試体ともに撥水層内部に薄く着色した部分、つまり非撥水部が存在していることが確認された。含水率2%で塗布した厚さ10mmの供試体は濃い着色が割裂面内に一部残っていることが確認される。両面から含浸材と塗布したため、撥水層が形成される過程で水分が供試体内に閉じ込められたことにより、割裂面中央部付近の一部が非撥水部になっていると考えられる。含水率2%で塗布した厚さ50mmの供試体は、薄い着色部のない撥水層が形成さ

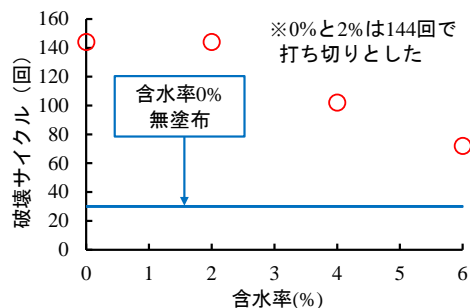
れている。しかし、撥水層厚さ（実測値）は約 6 mm から約 8 mm となっており、含水率の違いによる有意な差はみられない。

塗布時の含水率と凍結融解試験の破壊サイクルの関係を図-4 に示す。図中の結果はいずれも 2 体の供試体の結果の平均値である。参考のため、同図には含水率 0% で含浸材無塗布の供試体の結果も併記した。厚さ 50 mm の供試体のうち、含水率 0% と 2% で塗布した供試体は 144 サイクルでも破壊せず、試験を打ち切りとした。

含浸材を塗布した供試体は、いずれも含浸材無塗布のものに比べて破壊サイクルが大きくなった。また、含水率が高くなるほど破壊サイクルは小さくなる傾向が確認された。したがって、含浸材を塗布したモルタルの凍結融解抵抗性には、含浸材塗布時のモルタルの含水率が影響しているといえる。



(a) 厚さ 10mm の供試体



(b) 厚さ 50mm の供試体

図-4 含水率と破壊サイクルの関係

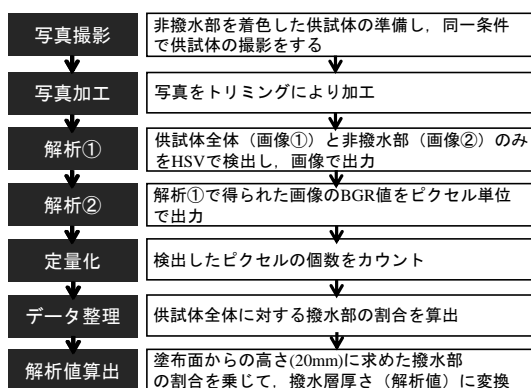


図-5 撥水層厚さ（解析値）の算出手順

### 3. 非撥水部の割合を考慮した撥水層厚さと凍結融解抵抗性の関係に関する検討

#### 3.1 検討概要

2章では、厚さ 10mm の供試体は供試体全体が撥水層になっており、また、厚さ 50mm では含水率によらず撥水層厚さの実測値は 6~8 mm と大差ないことが確認された。一方、含水率が高くなると凍結融解抵抗性は低下することが示された。本章では画像解析により割裂面内における撥水部（未着色部）と非撥水部（着色部）の割合を検出し、これに基づき撥水層厚さ（解析値）を求め、実測値ならびに凍結融解抵抗性との関係を検討する。

#### 3.2 撥水層厚さ（解析値）の解析方法

2.1 で説明したように、本研究では供試体割裂面に染料水を塗布して非撥水部を可視化している。その供試体を用いて、割裂面内における撥水部と非撥水部の割合を既往研究<sup>3)</sup>と同じ画像解析手法によって検出した。

解析は、図-5 に示す解析手順で実施した。撮影画像は、割裂面を着色した供試体を際立たせるために光吸収率の高い黒色のポリウレタン製の紙の上に置き、カメラと供試体の間の距離を固定して撮影した。用いた供試体は、非撥水層に空隙が多くみられ、解析において不都合だったため、図-6 に示すように 100×50 mm 面を塗布面から高さ 20 mm、横幅は両端から 25 mm ずつ切り取り、20×50 mm となるようにトリミング加工した。

次に解析①では BGR 色空間から HSV 色空間（色相:Hue, 彩度:Saturation, 明度:Value から成る色空間）に変換した。このような変換処理を実施した理由は、本検討のように色の濃淡を検出する場合、HSV 色空間の方が閾値を指定しやすいためである。

非撥水部を検出するための閾値は、あらかじめ図-7 に示す断面 100×50 mm の模擬断面に対して同じ解析結果が得られるように、閾値を変数としたパラメータスタディを実施したうえで決定した。パラメータスタディの結果、安定的に同じ解析結果を得られる閾値は、下限値

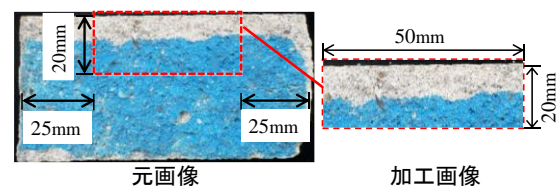


図-6 トリミング加工処理の概要

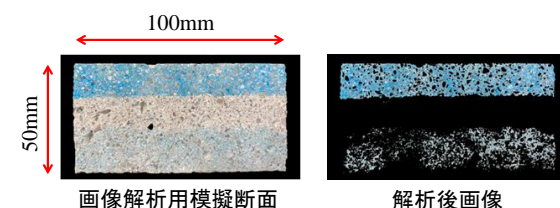
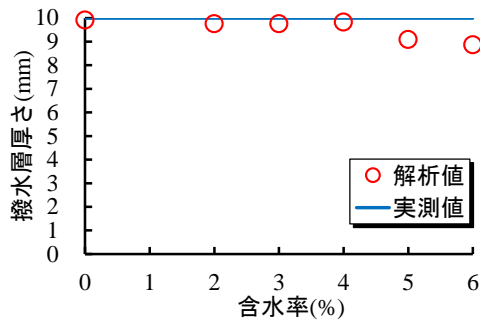
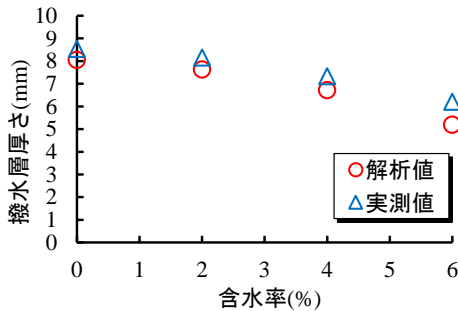


図-7 画像解析結果の例



(a) 厚さ 10mm の供試体



(b) 厚さ 50mm の供試体

図-8 含水率と撥水層厚さの関係

$H=180^\circ$  ,  $S=0\%$  ,  $V=12\%$  , 上限値  $H=222^\circ$  ,  $S=100\%$  ,  $V=100\%$  であったのでこれらの数値を画像解析に用いた。

解析①で得られた画像を再び BGR 色空間に変換後、画像①と画像②の B 値が 1 以上となったピクセル数を出力し、画像内における青色着色部（非撥水部）の割合を算出した。

以上の手順で求めた撥水層内の非撥水部の割合に対し、撥水層厚さの実測値を乗じた値を撥水層厚さ（解析値と定義した。例えば、図-7 に示す模擬断面では、非撥水部（薄い着色部分）と無着色の部分の面積割合は 18:82 となった。濃い青色の部分（含浸材が浸透されていない非撥水層部分）を除いた厚さは 35mm である。したがって、撥水層厚さ（解析値）は  $35 \times 0.82 = 28.7\text{mm}$  となる。このようにして定義した撥水層厚さ（解析値）は撥水層内の非撥水部分の厚さを差し引いた値といえる。

### 3.3 検討結果および考察

含水率と撥水層厚さの関係を図-8 に示す。図-8(a) の厚さ 10 mm の供試体では断面全体を撥水層とみなし、撥水層厚さ（実測値）は全供試体で 10 mm とした。

図-8(a) より、厚さ 10 mm の供試体では、すべての含水率において概ね実測値と解析値が一致する傾向にある。含水率 5% 以上では実測値よりも解析値の方がわずかながら小さくなったが、その差は 1.5 mm 程度であった。

図-8(b) より、厚さ 50 mm の供試体では、含水率が高くなると撥水層厚さは実測値および解析値ともに小さくなった。また、同含水率で比較すると含水率が高くなるほど実測値と解析値の差は大きくなる傾向がみられた。

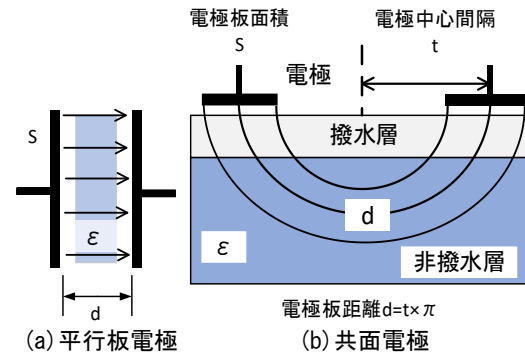


図-9 電極と推定原理

これは、2.2 で確認されたように含浸材塗布時の含水率が高いほど撥水層内部に非撥水部（薄い着色部分）が残りやすくなるためだと推察される。また、2.2 の破壊サイクルと含水率の関係を踏まえると、耐凍害性と撥水層厚さ（解析値）には相関関係があるといえる。

## 4. 撥水性能を向上させる方法と既往の非破壊推定手法の妥当性に関する検討

### 4.1 検討概要

シラン系表面含浸材はできるだけコンクリートが乾燥した条件で塗布するのが望ましいが、実際の現場では降雨や工期などの影響もあり、必ずしも適度に乾燥した状態で塗布することができない。その対策として撥水層が効果的に形成されるよう、シラン系表面含浸材の重ね塗りを行い、その効果を検討した。また、実構造物において形成された撥水層の様相を確認するには、現状ドリル等による削孔など破壊を伴う方法しかない。本研究では非破壊で撥水層厚さの推定ができる既往の多電極型等比共面電極<sup>2)</sup>を用いて、この手法の妥当性を評価する。

### 4.2 多電極型等比共面電極による撥水層厚さの推定

#### (1) 推定原理の概要

図-9 に電極による撥水層厚さの推定原理の概要を示す。既報<sup>2)</sup>で報告した推定手法は図-9(a) に示す平行板コンデンサーの静電容量の原理を基本としている。静電容量  $C$  は電極板面積  $S$  と電極板間に挟む誘電体の誘電率  $\epsilon$  に比例し、電極板間の距離  $d$  に反比例するという特性があり、式(1)で表される。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (1)$$

図-9(b) の共面電極は平行板電極が扇状に開いて並列に配置した状態であり、電極をコンクリートに押し当てて含水率の測定に利用されている。水分は比誘電率  $\epsilon$  が 80 と他の物質に比べ大きな値を持ち、コンクリートが水分を含むと静電容量が大きくなることを利用して含水率を測定できる。電極の中心から各電極までの距離  $t$  を変化させることで電界が到達する深さを変えることができ、

任意の深さまでの含水率を測定できる。電極の中心から電極板までの距離（電極中心間距離） $t$ と電極板面積 $S$ との比 $S/t$ が一定であるような電極とする。この電極を等比共面電極と呼ぶ。電極中心間距離 $t$ に円周率 $\pi$ を乗じれば電極板間距離 $d$ になる。式(1)において $S/d$ を一定とすれば、静電容量 $C$ は誘電率 $\epsilon$ のみが関係することになる。 $t$ を変化させれば電界が到達する深さを変化させることができ、その深さまでの誘電率 $\epsilon$ のみに関連した静電容量(含水率)を測定できる。さらに、図-10に示すような複数の短冊状にし、使用する電極を切り変えることで、1枚の電極で複数点を測定できる。この電極を多電極型等比共面電極と呼び、その有用性を報告した<sup>2)</sup>。本研究では測定不安定さを解消するため、各電極の寸法を幅4mm、長さ150mmと面積を大きくした。

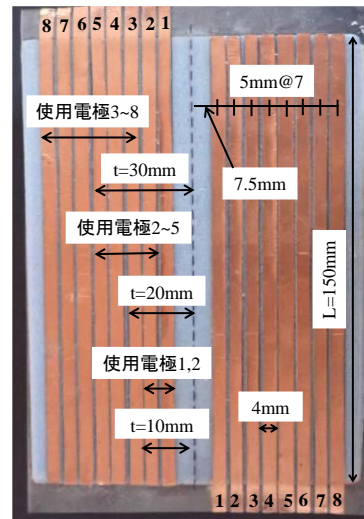


図-10 多電極型等比共面電極

この多電極型等比共面電極を用いて電極中心間距離 $t$ と静電容量 $C$ との関係を求めると、 $t$ と $C$ には線形関係があり、その直線の傾きの逆数と撥水層厚さとは線形関係が得られることが示された。あらかじめ傾きの逆数と撥水層厚さとの関係（検量線）を求めておけば、測定に用いた供試体より得られた傾きの逆数から撥水層厚さ（推定値）が非破壊で求めることができる。この推定値が有効撥水層厚さとなる。

### (2) 検量線の作成

有効撥水層厚さを推定するための検量線を、多電極型等比共面電極を用いて作成した。2章の実験と同じ配合のモルタルで作製した供試体から、寸法150×100mmで、厚さ3.5, 6.9, 7.8, 9.2, 13.2, 15.7, 20.0mmの直方体を切り出し、これを炉乾燥させて水分を含まないものを模擬撥水層とした。これらの模擬撥水層を、含水率が3%, 4%, 6%にした寸法150×100×50mmの供試体の上に置き、電極中心間距離 $t$ と静電容量 $C$ との関係を求め近似直線を算定した。各模擬撥水層厚さにおける近似直線の傾きを求めた。さらに各含水率において、近似直線の傾きの逆数と撥水層厚さとの関係を近似した。

検量線の作成結果を図-11に示す。含水率が4%, 6%では切片は異なるがほぼ同じ傾きとなっている。含水率が比較的低い3%では、近似直線のばらつきは大きい、他と同程度の傾きを示した。供試体の含水率が小さくなると計測する静電容量が小さくなるため相対的に計測値に対して誤差が大きくなり、ばらつきが大きくなったと考えられる。より精度のよい推定には電極の大型化や配置の工夫が必要であると考えている。

### 4.3 実験概要

供試体概要を図-12に示す。供試体は断面200×100mmで厚さ50mmとした。炉乾燥し絶乾状態にした後、含水率が3%, 4%, 6%になるようにした。各供試体にシラン系表面含浸材を400g/m<sup>2</sup>で塗布した。含浸材の塗

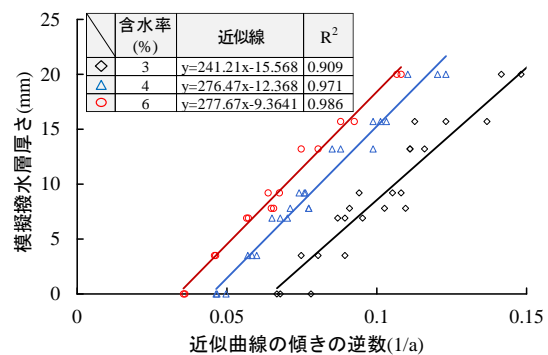


図-11 模擬撥水層によって作成した検量線

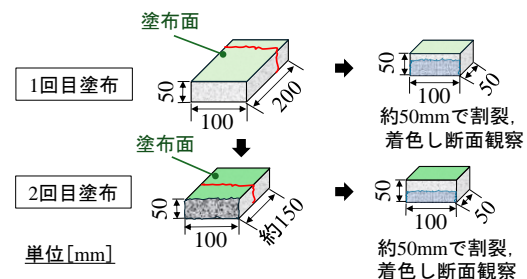


図-12 供試体概要（4章）

布後、供試体を袋に戻し、約3日後に多電極型等比電極を用いて撥水層厚さ（推定値）を算定した。次に供試体を端から20mmの箇所まで割裂および着色した断面に対し、撥水層厚さ（実測値）と画像解析による撥水層厚さ（解析値）を求めた。残った供試体（寸法150×100×50mm）に含浸材を400g/m<sup>2</sup>塗布し（2回目の塗布）、約3日後、1回目の塗布時と同じ手順で撥水層厚さの推定値、実測値、解析値を求めた。

### 4.4 検討結果および考察

図-13に各塗布段階における供試体割裂面の着色状況の一例を示す。図は、塗布時の含水率が6%のときの塗布後に割裂し着色した断面である。1回目の塗布後の断面では撥水層内に薄く青色に着色している非撥水部が残っているが、2回目の塗布後の断面では非撥水部が大幅

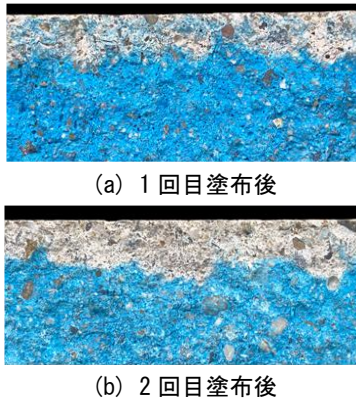


図-13 各塗布段階における割裂面の着色状況

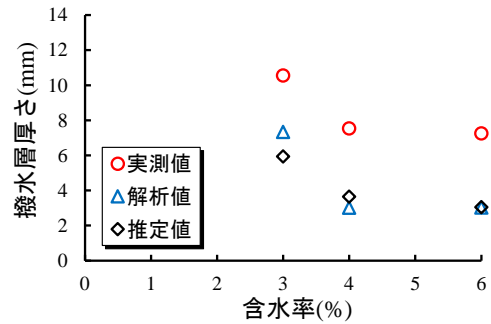
に少なくなっている。2 回目に塗布した含浸材が非撥水部にある水分と反応しモルタルを改質して撥水層に変化させたと考えられる。

図-14 に重ね塗りした供試体の撥水層厚さと含水率の関係を示す。1 回目および 2 回目の塗布後の撥水層厚さの実測値、画像解析による解析値、等比共面電極による推定値をそれぞれ示した。塗布回数によらず、各撥水層厚さの値は、含水率が高くなるほど小さくなっている。また、解析値と推定値は同等の値となっている。図-14(a) に示す 1 回目の塗布時では、実測値と、解析値および推定値との差は大きい。解析値は実測値から非撥水部の厚さを差し引いた値であると考えられる。また、推定値については、検量線は水を含まない模擬撥水層により作成したが、実験供試体では撥水層内の水分の存在が推定値に反映されたものと考えられる。図-14(b) に示す 2 回目の塗布時では、各値の差は 1 回目塗布時よりも小さくなっている。非撥水部にある水分が 2 回目に塗布された含浸材と反応し消費されたことにより水分が少なくなり、各値が近づいたためと考えられる。含水率が 6% と高い場合は非撥水部の水分が消費されずに残るため、実測値と解析値および推定値との差は、含水率 3% の場合に比べて大きい。

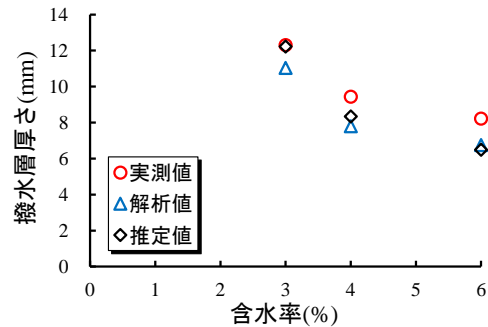
以上より解析値および推定値は、撥水層内の非撥水部を除いた値（有効撥水層厚さ）であると考えられ、特に推定値は非破壊で求められるため、実用的であるといえる。また、含浸材を 2 回塗ることによって撥水層厚さは実測値、解析値、推定値の各値が大きくなっており、重ね塗りは撥水層の性能改善に有効であると考えられる。

## 5. まとめ

- (1) 含水率が高い状態でシラン系表面含浸材を塗布したモルタル供試体では、撥水層内に水分を含む非撥水層が存在することが確認された。また、その影響により耐凍害性は含水率が高くなるほど低下した。
- (2) 撥水層厚さの実測値は含水率が高くなるほど、小さく



(a) 1 回目塗布時



(b) 2 回目塗布時

図-14 各塗布段階の撥水層厚さと含水率の関係

なる傾向が確認された。非撥水部を考慮した画像解析による撥水層厚さは、その傾向がより顕著に現れた。また、耐凍害性と撥水層厚さの解析値も相関関係が確認された。

- (3) 含水率が 3% 以上のモルタルに含浸材を重ね塗布することで、撥水層厚さの実測値と画像解析による撥水層厚さの差は、1 回目塗布時よりも 2 回目塗布時の方が小さくなった。解析値は撥水層内の水分が減少することを反映した値であるためと考えられる。
- (4) 多電極型等比共面電極を用いた撥水層厚さの推定値（有効撥水層厚さ）は、上記(3)で示す解析値と同様に非撥水部を考慮しており、解析値と同等となった。したがって、有効撥水層厚さは耐凍害性に対する撥水層厚さの性能を評価するうえで有効な指標である。

## 参考文献

- 1) 細田暁, 今野拓也, 松田芳範, 小林薫: シラン系表面含浸材を用いた最適な表面保護システムのための基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol. 64, No. 2, pp. 323-334, 2008.5
- 2) 岩瀬裕之: 多電極型等比共面電極を用いたシラン系含浸材による撥水層厚さ推定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No.1, pp.1366-1371, 2023.7
- 3) 安藤愛来, 井向日向, 岩瀬裕之: シラン系含浸材塗布面表層に現れる非撥水部に関する検討, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集 V-44, 2024.3