

論文 多電極型等比共面電極を用いたシラン系表面含浸材による撥水層厚さ推定に関する研究

岩瀬 裕之*1

要旨: 複数の電極を配した多電極型等比共面電極を作製した。これを用いてシラン系表面含浸材を塗布したコンクリートを測定したところ、電極中心間距離 t と静電容量 C とには線形関係が得られた。この回帰直線の傾きの逆数と表面含浸材によって形成された撥水層厚さとは線形関係が得られ、傾きの逆数から撥水層厚さが推定できた。水分を含むコンクリートにおいても各含水率において撥水層厚さを推定する方法を示した。含水率のあるコンクリートでは撥水していない領域が撥水層内に存在し、これを反映し推定した撥水層厚さを有効撥水層厚さとした。有効撥水層厚さは撥水層の性能を表す指標の1つとすることができる。

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

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を向上させることを目的とした技術の一つにシラン系表面含浸材を表面に塗布・浸透させ、改質することでコンクリート内部に撥水層を形成させる工法がある。形成された撥水層により水分の浸入を抑制し、塩分や水分などのコンクリートの劣化因子の侵入を抑制することでコンクリートの耐久性を高めることができる。

撥水層の厚さが耐久性の指標の一つと考えられ、例えば北海道開発局道路設計要領にはシラン系表面含浸材（以下、表面含浸材）の製品選定の目安として凍害に対しては浸透深さが6mm以上あるものとしている¹⁾。

形成された撥水層厚さを確かめるにはコンクリートにコアドリル等で孔をあけて観察する方法しかないが、構造物に傷をつけることになるため撥水層厚さでは管理がなされていない。事前に作製した供試体への塗布量と撥水層厚さとの関係から、塗布量で管理されている。表面含浸材により形成される撥水層厚さはコンクリートの含水率に影響されることが報告されている²⁾。含水率が高いと浸透深さが小さくなる。施工現場において降雨や日射等の影響で含水率が場所によって異なることが考えられる。このため、現場における撥水層厚さは供試体に塗布した量による推定値とは誤差が生じることも考えられる。また、既存のコンクリート構造物に塗布する場合は別途作製した供試体が残っていない場合が多く、供試体への塗布量と撥水層厚さとの関係を求めることができない。このようなことから、表面含浸材を適用する場合、形成された撥水層厚さで管理の方が施工品質を高められると考えられる。

筆者は、図-1に示すような電極の中心から各電極板

中心までの距離 t と電極板面積 S の比 S/t が一定の等比共面電極群を作製した。この電極群を用いて、撥水層が形成された供試体を測定したところ、電極板中心までの距離 t と静電容量 C とには線形関係が得られた。さらに、この回帰直線の傾きの逆数 $1/a$ と撥水層厚さとは線形関係が得られた。回帰直線の傾きを求めることで、撥水層の厚さを推定できる可能性を示した³⁾。

この測定では絶乾状態にしたコンクリート供試体に表面含浸材を塗布し、撥水層が形成された後に供試体を水浸させている。非撥水層は水分を多く含んだ表乾状態で測定しており、このままでは様々な含水状態にある実際の構造物には適用することができない。また、1つの静電容量を得るのに1枚の電極が必要であり、回帰直線

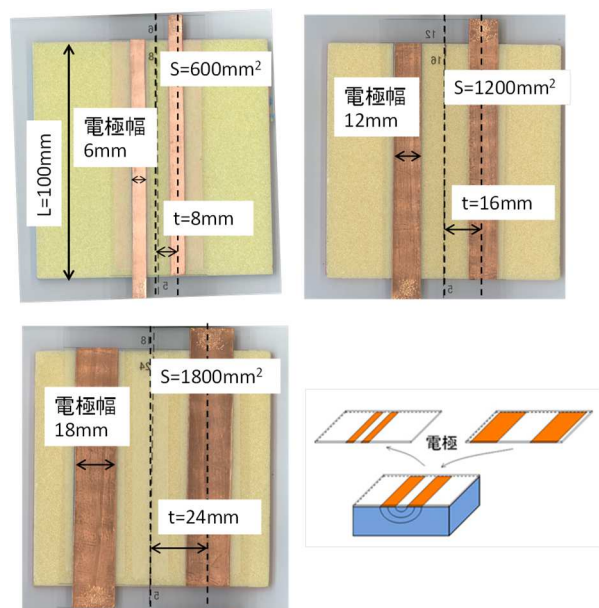
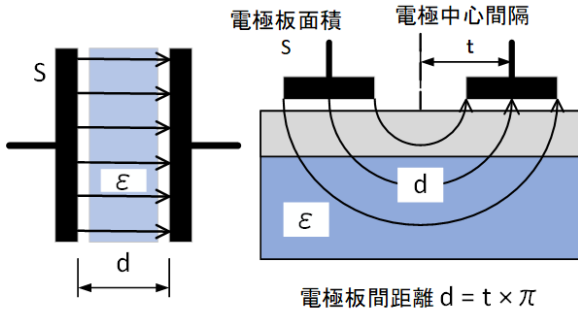


図-1 等比共面電極群（従来型）

*1 岐阜工業高等専門学校 環境都市学科 名誉・嘱託教授 博士(工学) (正会員)



(a) 平行板電極 (b) 共面電極

図-2 電極と測定の原理

を得るためには多数の電極を順次取り換える必要があり煩雑で手間がかかる。

本研究は、埋設型枠内の充填不良を検出するために開発した1枚の電極で複数の測定値が得られる多電極型等比共面電極⁴⁾を小型化し、シラン系表面含浸材による撥水層厚さの推定に適用できるようにする。さらに、実際の現場を想定した様々な含水率のコンクリート構造物に表面含浸材を塗布して形成された撥水層厚さを推定できるようにすることを目的とする。

2. 多電極型等比共面電極の測定原理

測定は平行板コンデンサー静電容量の原理を用いている。平行板コンデンサーは図-2(a)に示すもので、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ε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。

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

ここで、
 C (F) 静電容量
 S (m²) 電極板面積
 d (m) 電極板間距離
 ε (F/m) 誘電体の誘電率

共面電極は図-2(b)に示すように平行板電極が扇状に開いて並列に配置された状態であり、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。電極と電極の間に挟まれた誘電体の誘電率によって静電容量は変化する。水を含まないコンクリートの誘電率は4~6であるのに対して、水は誘電率が80と他の物質に比べて大きな値を示すことから、水分を含むコンクリートの静電容量は大きくなる。含水率に応じて誘電体であるコンクリートの見かけの誘電率が変化し含水率が測定できる。

電極の中心から各電極中心までの距離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が測定できる。

図-1に示すように、電極の中心から各電極板までの距離（電極中心間距離）tと電極板面積S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π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ε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εのみに関連した静電容量（含水率）を測定できる。しかし、1枚の等比共面電極で1つの静電容量しか測定できず、複数点を測定するにはtが異なる電極を順次取り替える必要があり煩雑となり、また測定を自動化することも困難である。そのため、図-3に示すような複数の電極による測定を1枚の電極でできるように多電極型等比共面電極を開発した。プラスチックフィルムの上に幅3mm×長さ100mmの銅箔テープを電極の中心から6mmの位置に貼り、次からは4mm間

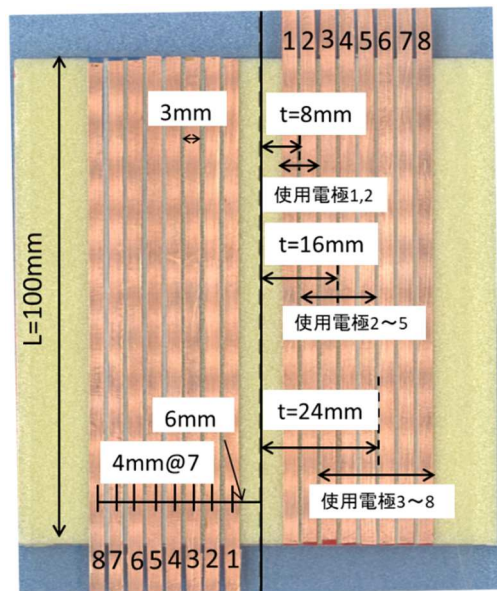


図-3 多電極型等比共面電極

表-1 多電極型等比共面電極の諸元

| 電極幅 | 使用電極番号 | 1,2 | 2~5 | 3~8 | S/t |
|-----|---------------------------|-----|------|------|-----|
| 3mm | 電極面積 S (mm ²) | 600 | 1200 | 1800 | 75 |
| | 電極中心間隔 t (mm) | 8 | 16 | 24 | |

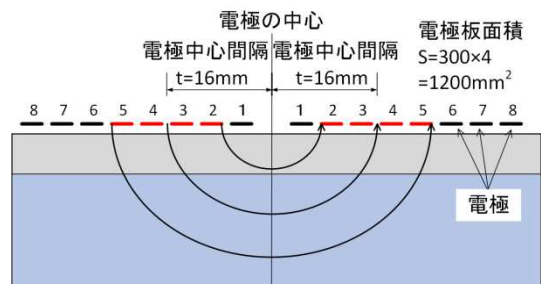


図-4 多電極型等比共面電極の使用例(2~5の場合)

隔で貼り付けた。電極の中心を対称として反対側にも同様に 3mm の銅箔を貼り付けた。電極の中心として左右に 8 枚の銅箔となる。さらにプラチックフィルムを厚さ 5mm のスチレンボードに貼り付けた。貼付した電極を中心に近い順から 1～8 番とする。表-1 に多電極型等比共面電極の諸元を示す。図-4 に左右の 2～5 番の電極を同時に使用して測定する例を示す。電極板面積 S は $300 \times 4 = 1200\text{mm}^2$ で電極中心間隔 t は 16mm となり S/t は 75 となる。1,2 番の電極を使用する場合、電極板面積 S は 600mm^2 で電極中心間隔 t は 8mm となり S/t は同じく 75 となる。3～8 番では、 S は 1800mm^2 、 t は 24mm、 S/t は同様に 75 となり、1 枚の電極で 3 点の静電容量を測定できる。

多電極型等比共面電極（以下、多電極型）とは別に等比共面電極（以下、従来型）も作製した。電極中心間距離 t は同じ 8, 16, 24mm とその中間の 12, 20mm とした。各電極幅は 6,9,12,15,18mm とした。多電極型でも従来型でも t が同じであれば S および S/t は同じ値 75 となる。多電極型と従来型では電極全体の幅は異なる。電極板には被覆銅線を取り付け延長し、市販の高周波容量式水分計の電極に接触させた。高周波容量式水分計は D モードで使用し、水分率に換算する前の静電容量と相関のある数値（以後、表示値 C_d と呼ぶ）を表示する⁹⁾。

3. 実験概要および結果と考察

3.1 多電極型等比共面電極と従来型電極との比較

絶乾状態のコンクリートに表面含浸材を塗布し撥水層を形成させた後、水浸して非撥水層を表乾状態にした供試体を用いて、多電極型と従来型との比較を行った。

用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。水セメント比は 55% とした。セメントは早強セメントを用いた。

また、使用した骨材の物性を表-3 に示す。粗骨材は

表-2 配合

| W/C | s/a | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|-----|-----|--------------------------|-----|--------|--------|------|---------|----------|
| | | W | C | S1 (粗) | S2 (細) | G | AE 剤 | 高性能減水剤 |
| 55 | 40 | 180 | 327 | 492 | 208 | 1050 | C×0.04% | C×0.035% |

表-3 骨材の物性

| 骨材 | 表乾密度 (g/cm ³) | 粗粒率 | 吸水率 (%) | 実績率 (%) | 最大寸法 (mm) | |
|-----|---------------------------|------|---------|---------|-----------|----|
| 粗骨材 | G | 2.61 | 6.45 | 1.62 | 59.9 | 15 |
| 細骨材 | S1 (粗) | 2.62 | 2.76 | 1.97 | 62.4 | — |
| | S2 (細) | 2.6 | 1.43 | 2.17 | 57.2 | — |

長良川産の玉砕石を用い、細骨材には長良川産の粗砂と細砂を 7:3 の割合で混合したものを用いた。100×100×400mm の角柱供試体を作製し、脱型後 28 日間水中養生し、その後実験室内に静置した。静置した供試体をコンクリートカッターで切断し 47×100×130mm とした。炉乾燥で絶乾状態とし 100×130mm の切断面に表面含浸材を塗布した。用いた表面含浸材はジェル状であり、シラン・シロキサンが主成分である。形成される撥水層厚さを塗布量によって変化させるため、塗布量を 50,100, 200,300 g/m² とした。塗布後 4 日以上静置した後、供試体をバットに入れ水浸させた。供試体には全面から吸水させた。撥水層は吸水しにくく、非撥水層は吸水しやすいため、含水率が低い撥水層と含水率が高い非撥水層の 2 層となる。これらの供試体を、多電極型および従来型の等比共面電極で測定した。

図-5 に示すように、撥水層を上にして供試体の上に等比共面電極を置き、その上に厚さ 25mm のポリスチレンフォームを置き、さらに電極と供試体を密着させるために 2kg の重りを置いた。図-6 に塗布量を 50 および 200 g/m² としたものを多電極型、従来型で測定した電極中心間距離 t と表示値 C_d との関係を示す。多電極型で測

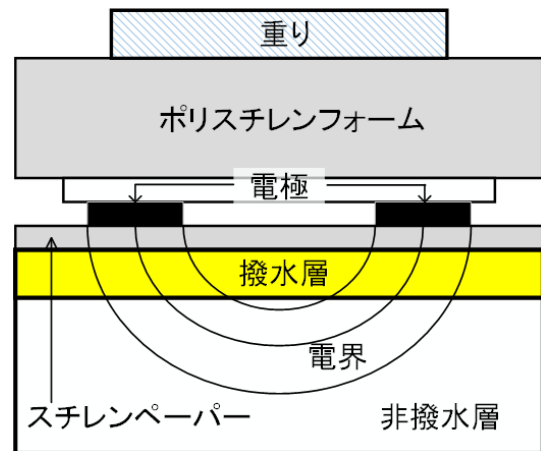


図-5 測定の方法

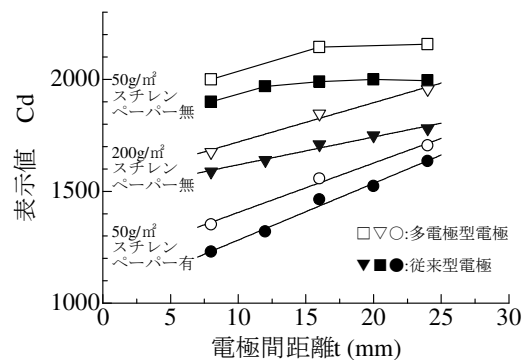


図-6 スチレンペーパーの効果

定した表示値は従来型で測定したものより大きな値を示しているが、同じ傾向を示した。表面含浸材を 200 g/m^2 を塗布したものは線形関係が得られたが、 50 g/m^2 を塗布したものは上に凸の形となり線形関係が得られなかった。過去に行った実験でも上に凸の結果が得られている³⁾。 200 g/m^2 のものに比べて塗布量の少ない 50 g/m^2 のものは、内部に形成される撥水層厚さが小さいために起因すると考え、擬似的に撥水層厚さを大きくするよう厚さ 1 mm のスチレンペーパーを供試体と電極の間に挟んだ。誘電率 1 の空気泡を多く含むスチレンペーパーは厚さ 1 mm でも疑似的に撥水層を大きくする効果があると考えた。 1 mm のスチレンペーパーを挟んで測定した結果を同じ図-6に示す。表示値はスチレンペーパー無しの結果よりも全体的に小さくなっているが、線形関係を示した。撥水層が小さい場合の測定にはスチレンペーパーを挟むことは有効である。スチレンペーパーと多電極型等比共面電極で測定した $50 \sim 300 \text{ g/m}^2$ と塗布したものの電極中心間距離 t と表示値 C_d との関係を図-7に示す。各測定値は線形関係が得られており、塗布量を多くすると表示値は小さくなり、また回帰直線の傾きは小さくなった。

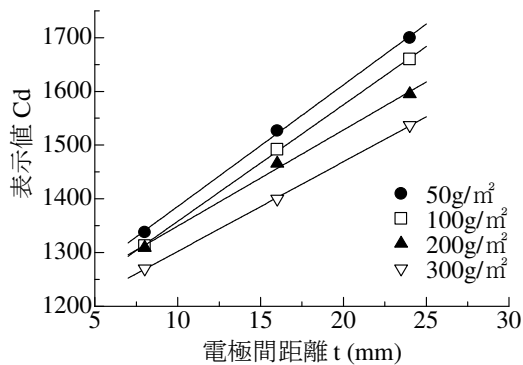


図-7 塗布量の違いによる電極間距離 t と表示値 C_d

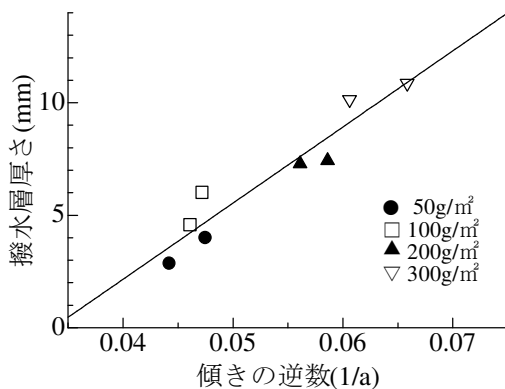


図-8 傾きの逆数と撥水層厚さ

測定後に供試体を割裂し、破断面にフタロシアン顔料で着色した。非撥水層は着色するが、撥水層は水をはじくため着色しない。この着色する境界の位置を測定し撥水層厚さとした。測定は端部から 2 cm のところから 1 cm 間隔で7点測定し、平均値を撥水層厚さとした。各回帰直線の傾きの逆数と撥水層厚さとの関係を図-8に示す。塗布量を多くすると撥水層厚さは大きくなり、また傾きの逆数と撥水層厚さとは線形関係が得られた。従来型電極で得られた結果と同じ結果となり、今後は多電極型で測定することとした。

3.2 含水率を持つ供試体内の撥水層厚さの推定

3.1 では、絶乾状態のものに表面含浸材を塗布し撥水層が形成された後に供試体を水浸させたものを対象とした。測定では非撥水層は表乾状態で撥水層は絶乾状態に近い状態で行っている。しかし、実際の構造物では湿度や降雨の影響などで様々な含水率となる。撥水層厚さはコンクリートの含水率に影響され²⁾、使用したシラン系表面含浸材では高周波容量式水分計で 6% 以下の含水率での使用が推奨されている。ここでは、様々な含水率のコンクリートに表面含浸材を塗布した場合の撥水層厚さについて検討した。

コンクリートは3.1で使用したコンクリートと同じ配合とし、絶乾状態の供試体と質量で含水率が $1.0, 2.0, 3.0, 4.0\%$ となる水量とを一緒にポリ袋に入れ2週間静置した。また、別の供試体を水浸させ吸水率も求めた。使用したコンクリートの吸水率は 5.6% であった。各含水率の供試体を高周波容量式水分計で測定した値と実際の含水率との関係を求め、図-9に示す。実際の含水率と水分計で測定した値とは線形関係が得られたが、実際の含水率と水分計での値とは一致していない。水分以外のセメントや骨材などのコンクリートを構成する材料の静電容量も測定値に反映していることや供試体寸法などが影響していると考えられる。水分計で 6% 以下の値となる実際の

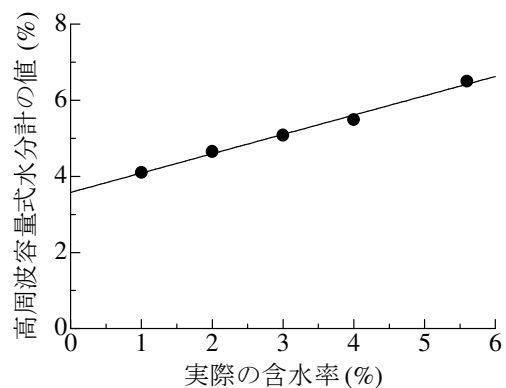


図-9 実際の含水率と高周波容量式水分計の値

表-4 含水率を持つ供試体の
撥水層厚さの実測値と推定値

| 塗布前含水率 | 塗布量 (g/m ²) | 実測値 (mm) | 推定値 (mm) |
|--------|-------------------------|----------|----------|
| 1.0% | 100 | 4.0 | 5.0 |
| | 200 | 7.7 | 7.0 |
| | 300 | 10.6 | 13.5 |
| 2.0% | 100 | 5.6 | 2.4 |
| | 200 | 7.4 | 4.6 |
| | 300 | 11.5 | 5.4 |
| 3.0% | 100 | 6.9 | 7.9 |
| | 200 | 9.5 | 3.6 |
| | 300 | 8.6 | 8.0 |
| 4.0% | 100 | 4.9 | 2.9 |
| | 200 | 8.3 | 4.9 |
| | 300 | 11.6 | 5.0 |

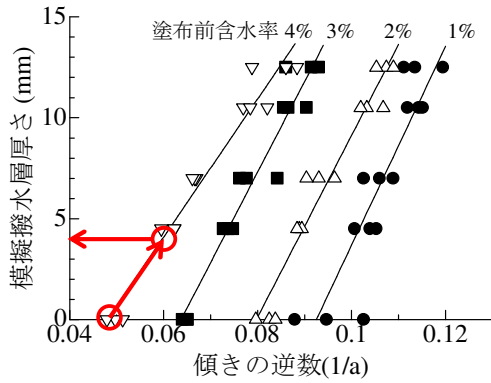


図-10 各含水率における傾きの逆数と撥水層厚さ

含水率 1.0~4.0%の供試体を用い、この上に撥水層を模擬したコンクリート板を置き、多電極型等比共面電極で表示値 Cd を測定した。コンクリート板は幅 100×長さ 130mm×厚さ 4.5,7.0,10.5,12.5mm で切り出し絶乾状態としたものを用いた。測定した電極中心間距離 t と表示値 Cd との関係直線回帰し、回帰直線の傾きの逆数と模擬撥水層厚さとの関係を求めた。得られた関係を図-10 に示す。各含水率において、模擬撥水層厚さと傾きの逆数とは線形関係が得られた。各含水率において撥水層が無い場合、傾きの逆数は異なる値となるが、模擬撥水層厚さが増加するにつれてばらつきはあるものの、その位置から同じような傾きで増加した。

この関係を利用して供試体内に形成された撥水層厚さを推定することができる。様々な含水率において、模擬撥水層を複数の厚さで変化させて撥水層厚さと傾きの逆数との関係を図-10 のように作成しておく。表面含浸材を塗布する前すなわち撥水層が無い供試体を等比共面電極で測定し傾きの逆数を求める。この傾きの逆数から塗布前の含水率が推定できる。次に表面含浸材を塗布し撥水層が形成された供試体を再び測定し傾きの逆数を求める。塗布前の含水率に対応する傾きの逆数と撥水層厚さとの関係から撥水層厚さを推定できる。

実際に含水率がある供試体に表面含浸材を塗布し形成された撥水層厚さの推定を行った。ポリ袋に密閉し含水率を 1.0~4.0%に調整した供試体の表面含浸材塗布前の回帰直線の傾きの逆数を求めた。表面含浸材を 100,200, 300 g/m²塗布した後、再びポリ袋に密閉し撥水層が形成された後に傾きの逆数を求め、図-10 に示した関係から撥水層を推定した。推定後、割裂し破断面を着色し撥水層厚さを測定した。表-4 に含水率を持つ供試体撥水層の実測値と推定値を示す。いずれの塗布前含水率においても表面含浸材の塗布量が多くなると撥水層厚さの実測値は大きくなった。推定値も塗布量が多くなると塗布前の含水率が 3%のものを除いて大きくなった。しかし、

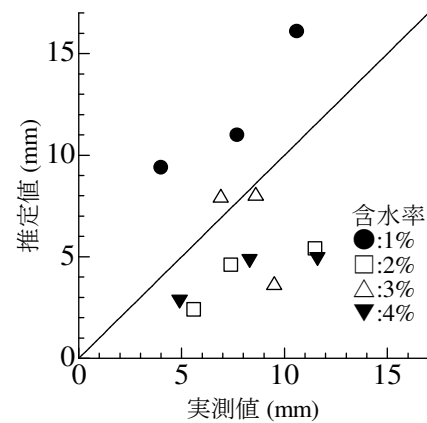


図-11 撥水層厚さの実測値と推定値

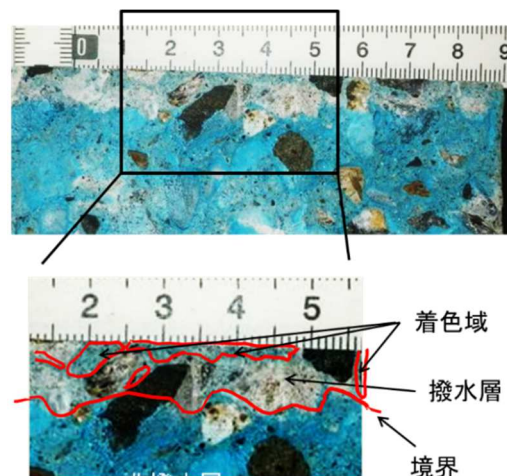


図-12 破断面の撥水層の様子

塗布前の含水率が高くなると撥水層厚さが小さくなるという関係は現れなかった。

図-11 に実測値と推定値の関係を示す。塗布前の含水

表－5 水分を含む模擬撥水層厚さの実際値と推定値

| 模擬撥水層 | 含水率 厚さ | 1% | 1% | 1% | 0% 4.5mm | 1% 6.0mm | 0% 7.5mm | 1% 6.0mm | |
|-------------|-----------|-------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|------|
| | | 6.0mm | 11.0mm | 13.5mm | 1% 6.0mm | 0% 4.5mm | 1% 6.0mm | 0% 7.5mm | |
| | | 合計 | 6.0 | 11.0 | 13.5 | 10.5 | 10.5 | 13.5 | 13.5 |
| 非撥水層 含水率 | 2% | 推定値 | 4.7 | 7.3 | 6.7 | 8.4 | 8.1 | 11.1 | 10.4 |
| | 4% | | 4.8 | 6.8 | 7.8 | 8.8 | 9.1 | 9.4 | 12.7 |

率が高いほど実測値より推定値が小さくなった。図－12に実測値と推定値の差が大きい塗布前含水率が3%で表面含浸材を200 g/m²塗布したものの破断面を示す。破断面にはフタロシアン顔料で着色した後に乾燥させた。濃く着色した非撥水層と着色しない撥水層の境界を撥水層厚さとしたが、撥水層の中に淡く着色した領域が現れた。この領域は完全には撥水層に改質されていないと考えられる。表面含浸材はコンクリート内部の水分と反応しながら浸透していくが、含水率が高いと反応に使われなかった余剰水分によって浸透が阻害されることにより撥水化していない領域が残ったと考えられる⁶⁾。すなわち、この撥水化していない領域に残る水分の影響により測定される静電容量が高くなる。その結果、回帰直線の傾きが大きくなることで、撥水層厚さの推定値は実測値より小さな値となると考えられる。

また、10mm厚さのコンクリート板の両面から表面含浸材を200 g/m²塗布し、撥水層形成後に2週間水浸し吸水率を求めたところ2.1%であった。使用した骨材の吸水率より大きな値となっており骨材以外の部分も吸水していると考えられる。割裂し断面を着色したが、着色した部分は目視では確認できなかった。目視では撥水層となっても施工時の含水率によっては水分を含んでいる可能性がある。

水分が残存している撥水層をモデル化して、含水率が1%のコンクリート板および、含水率が0%と1%のコンクリート板を重ねたものを、水分を含む模擬撥水層として含水率が2%および4%の供試体の上に置き、その測定結果から推定した厚さを表－5に示す。含水率が0%で厚さが4.5mmのものと同含水率が1%で厚さが6mmのものを重ねた模擬供試体は厚さが10.5mmであるが、推定値は8.1～9.1mmとなるなど、いずれの測定においても推定値は実際の値よりも小さな値となっており、模擬撥水層内の水分を反映した撥水層厚さを示していると考えられる。この推定値を有効撥水層厚さと呼ぶ。絶乾状態のコンクリートに表面含浸材を塗布して形成した撥水層は水分を含んでいないが、含水率のあるコンクリートに塗布した場合は、撥水層内の撥水化していない部分や撥水層が水分を含んでいる。有効撥水層厚さは、この水分を反映した撥水層厚さを示しており、目視より小さい値を示す。有効撥水層厚さは撥水層の性能を表す指標の1

つとすることができる。今後、有効撥水層厚さその他の耐久性指標との関係を求める必要がある。

4. おわりに

複数の電極を配した多電極型等比共面電極を作成した。これを用いてシラン系表面含浸材を塗布したコンクリートを測定したところ、電極中心間距離 t と静電容量 C とには線形関係が得られた。この回帰直線の傾きの逆数と表面含浸材によって形成された撥水層厚さとは線形関係が得られ、撥水層厚さが推定できた。水分を含むコンクリートにおいても各含水率において含水率の影響を反映した撥水層厚さを推定する方法を示した。含水率のあるコンクリートに表面含浸材に塗布した場合、撥水していない領域や撥水層が含む水分を反映し推定した撥水層厚さを示しており、これを有効撥水層厚さとした。有効撥水層厚さは撥水層の性能を表す指標の1つとすることができる。今後、有効撥水層厚さと透水性や耐凍害性などの他の耐久性指標との関係を求める必要がある。また、撥水層厚さを推定する方法はばらつきがあり、さらに精度を高める必要があるとともに、推定方法が適用できる範囲を検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 令和4年度北海道開発局道路設計要領,第3集橋梁第2編コンクリート橋 参考資料 pp.3-3 B-6-3 B-7, 2022
- 2) 細田,今野,松田,小林: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
- 3) 岩瀬裕之:改良した電極によるシラン系表面含浸材の撥水層厚の推定法,コンクリート工学年次大会論文報告集,39号,pp.1639-1644, 2017.7
- 4) 岩瀬裕之:多電極型等比共面電極による充填不良の検出,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,第21巻,pp.472-477,2021.10
- 5) 株式会社ケツト科学研究所,コンクリート・モルタル水分計 HI-520-2 取扱説明書
- 1) 近藤,小松,仲本,水谷,横井,國元:早期材齢でシラン系表面含浸材を適用したモルタルの強度特性,材料,Vol.68,No.9,pp.680-685, Sep 2019