

論文 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

岩瀬裕之*1

要旨：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を作製した。この電極を用いて、撥水層を模擬し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 とには直線関係が得られた。さらに、この直線の傾きの逆数 $1/a$ は撥水層厚に関係し切片 b は表層付近の含水率と関係することが得られた。シラン系表面含浸材を塗布し、コンクリート中に撥水層を形成させた供試体を測定でも、模擬供試体と同様に回帰直線の傾きの逆数と撥水層厚とは直線関係が得られた。回帰直線の傾きを求めることで、撥水層厚を推定できる可能性を示した。

キーワード：表面含浸材, 静電容量, 撥水層厚, シラン, 非破壊

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、コンクリート内部に撥水層を形成させる工法がある。図-1にシラン系表面含浸材により形成された撥水層を示す。コンクリートを割裂し、その破断面に水性染料を塗布した。撥水層は水を弾くため着色していない。この撥水層により水分の侵入を抑制し、塩分や水分などのコンクリートの劣化因子の浸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、傷をつけることになるため撥水層厚では管理されていない。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、表面含浸工法を適用する場合、形成された撥水層厚で管理の方が施工品質を高められると考える。

筆者らは含水率の高低による静電容量の変化を利用してコンクリートの撥水層厚を推定する方法を開発し提

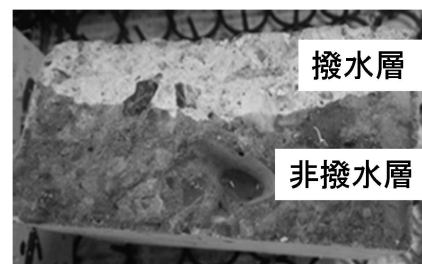


図-1 形成された撥水層

案した³⁾。静電容量を計測してコンクリートの含水率を測定する水分計の電極を改良し、一對の電極板の中心間距離を変化させることで電極板から発生する電界がコンクリート中に到達する深さを変化させる。電界が撥水層内であれば静電容量は一定の割合で減少するが、電界が含水率の高い非撥水層に到達すれば静電容量の減少する割合が変化する。この変曲点を撥水層と普通層の境界とする。推定値は実測値に比較的近い値が得られている。本研究は、さらに電極を改良し撥水層厚の推定方法を簡素化し精度を高めることを目的とする。

2. 撥水層厚の推定方法

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。平行電極が開いて並列に配置された状態とする。平行板コンデンサーの静電容量 C は電極板面積と電極間に挟む誘電体の誘電率に比例し、電極板間の距離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 (m^2) 電極板面積
 d (m) 電極板間距離
 ϵ (F/m) 誘電体の誘電率

*1 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 博(工) (正会員)

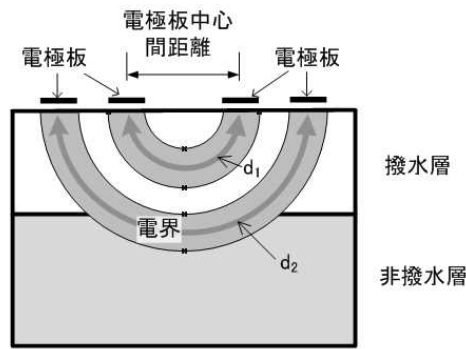


図-2 前回提案した電極の配置と電界形状

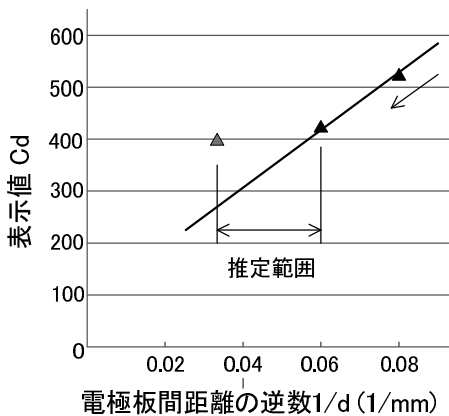


図-3 前回提案した推定方法

1) 前回提案した撥水層厚推定方法³⁾

参考文献3)で提案した撥水層厚推定方法は以下のようである。静電容量はLCRメータ等を用いて計測するが、ここでは市販の高周波容量式水分計を用いて測定する。高周波容量は静電容量と同じものである。

高周波容量式水分計を対象物に押し当て材料の静電容量(高周波容量)を測定している。材料に水分を含むと静電容量が増加し、この増加分をあらかじめモルタル、コンクリートなど各種材料で求めておいた換算式で換算して水分量として表示するものである。換算式がない材料では、D(ダイレクト)モードに切り替えることで、静電容量と相関のある数値(以後、表示値Cdと呼ぶ)を表示する。表示値は0~2999の間で表示される。

図-2に示すように電界は片方の電極板から電極板の幅で帯状にもう片方の電極板に届いており、この電界上にある材料の静電容量を測定している。参考文献4)では、くし形電極間の漏れ電界を利用して高分子電気絶縁材料の吸水量を測定している⁴⁾。電界の形状は、境界条件等により円弧状や楕円形状になると考えられるが、参考文献4)の記述「電極間隔に比例した深さまでの、誘電物性量の評価は可能」より、電極板間隔と電界到達深さが単純に比例する円弧状とした。電極板を並列に配置し電界が供試体中を透過するようにする。電極板中心間距離を変化させることで電界が到達する深さが変わる。誘電率

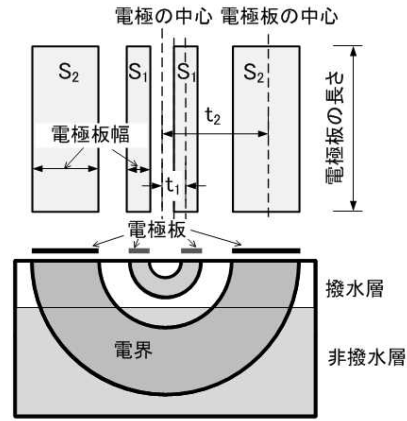


図-4 等比共面電極の配置と電界形状

ϵ は含水率に応じて変化する。電極板間距離 d は円弧状の電界の長さになる。電極板中心間距離が小さければ電界は撥水層にあり、図-3に示すように d の増加とともに表示値 Cd は直線的に減少するが、電界が含水率の高い非撥水層に到達すれば誘電率 ϵ も変化するため、表示値の減少する割合が変化する。この変曲点が撥水層と非撥水層の境界となる。撥水層厚の推定値は実測値に比較的近い値が得られている。しかし、撥水層が薄いと変曲点がすぐ現れるため変曲点の判定が困難である。また、薄い撥水層厚測定用に電極板幅を狭くした場合には推定精度が落ちる欠点がある⁵⁾。

2) 等比共面電極による撥水層厚推定方法

欠点を改良するため、図-4に示すように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 が一定であるような電極を作製した。この電極を等比共面電極と呼ぶ。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 が常に一定となり、誘電率 ϵ すなわち含水率が深さ方向で変化しなければ静電容量 C は一定となる。 t を大きくしていき電界が含水率の高い部分に到達すれば静電容量 C ははじめて変化し、その t の値が撥水層深さとなると考えた。

3. 実験概要および結果と考察

3.1 等比共面電極の検討

t が 4,8,12,16,20mm の等比共面電極を作製した。電極板の長さは 100mm と一定とし電極板幅を変化させて $S/t=100$ とした。この場合、電極板幅は t と同じとなる。電極板はプラスチックフィルムに銅箔テープを貼り付け、さらにフィルムを厚さ 25mm のポリスチレンフォームに貼り付けた。電極板にはビニール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と接触させた。被覆導線同士を近づけると表示される値に影響するためお互いに離すようにした。電極と供試体の間には電氣的に絶縁するためラップフィルムをひいている。また、電極と供試体を密着させるため 2kg の重りをポリスチレン

フォームの上に置いている。

この電極を用いて、一定の含水率としたケイカル板およびコンクリートの表示値を測定した。ケイカル板は厚さ5mmで加工もしやすく、また吸水率も高く吸水速度も速いため供試体の作製が容易であるため採用した。厚さ5mm×縦100mm×幅100mmのものを105℃の下で24時間炉乾燥させたものを含水率0%の状態とし、この状態における供試体の質量を下に1枚ずつ所定の含水率となるような質量の水とともにポリ袋に入れ吸水させた後に密閉した。含水率は0.6,12%とした。ケイカル板の絶乾密度は約0.7g/cm³とコンクリートに比べて1/3程度であるため、含水している水量も同じ含水率ではコンクリートの約1/3になる。同じ含水率のケイカル板を8枚重ね、等比共面電極で表示値を計測した。また、コンクリートは水セメント比55%で作製した100×100×400mmのコンクリート供試体を100mm角の立方体に切断し、水で飽和させ表乾状態(含水率6.4%)としたものと、同じ寸法で含水率4.0%および0%となるように調整したものをポリ袋に入れ密閉したものを用いた。

図-5に電極板中心までの距離 t と表示値 C_d の関係を示す。各含水率における電極中心までの距離 t が大きくなっても表示値の値は変化せずほぼ一定となった。式(1)に示すように S/d が一定であり、電極中心までの距離 t を大きくして電界が到達する位置を深くしても誘電率 ϵ (含水率)が変化しなければ表示値は同じ値となる。また、含水率が高くなると表示値の値は大きくなっている。

3.2 撥水層を模擬した供試体による電極の検討

この改良した電極を用いて撥水層を模擬した供試体の測定を行った。図-6に示すように、この含水率6.4%および4.0%のコンクリート立方体の上に0.6,12%のケイカル板を1~3枚載せ、各電極で表示値を測定した。ケイカル板は含水率が低い撥水層を、コンクリートは含水率が高い非撥水層を模擬した2層のモデルとした。

含水率6.4%のコンクリートの上に含水率0%のケイカル板を1,2,3枚載せて計測した電極板中心までの距離 t と各表示値 C_d の関係を図-7に示す。誘電率 ϵ すなわ

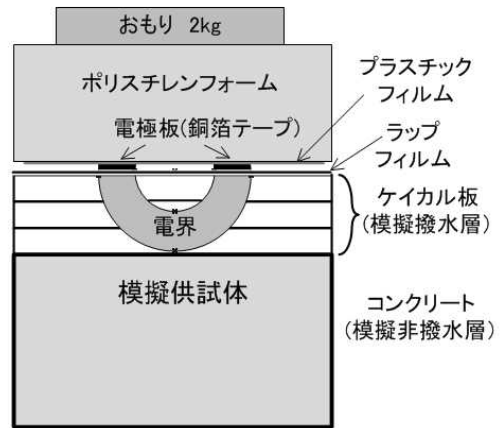


図-6 模擬供試体測定の方法

ち含水率が変化する位置で表示値が急激に変化すると予想した。ケイカル板が3枚(15mm厚さ)の場合、 t が4および8mmの電極では電界が含水率の高い非撥水層には届いていないため表示値は変化せず、非撥水層に届きはじめる12,16mm以上で急激に大きくなると予想したが、表示値は連続的に増大し t と表示値 C_d には直線関係が得られた。電界形状について電極板幅のまま円弧状になると仮定したが、供試体中での電界の形状や含水率の差の影響などの今後詳しい解析が必要である。

厚さ5mmのケイカル板が1枚と薄い場合には直線の傾きが大きく、3枚重ねて15mmとした厚い場合には傾きが小さくなった。また、ケイカル板の厚さにかかわらず、切片はほぼ同じ値になっており、その値は図-5に示した含水率が0%のケイカル板を重ねた場合の表示値に近い値を示した。他の含水率のケイカル板を用いたものでも直線関係が得られた。コンクリートおよびケイカル板の含水率および重ねたケイカル板の枚数を変化させて測定し得られた t と C_d の関係を最小自乗法により直線回帰して求めた各直線の傾き a と切片 b を表-1に示す。撥水層に見立てたケイカル板の含水率と非撥水層に見立てたコンクリートとの含水率の差が大きいほど回帰直線の傾きが大きくなった。コンクリートの含水率が4%で上に載せたケイカル板の含水率が12%と両者の含水量

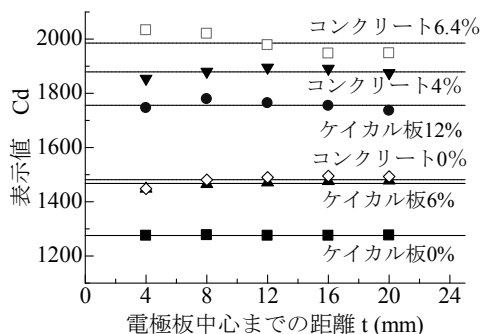


図-5 含水率が一定の場合の表示値 C_d

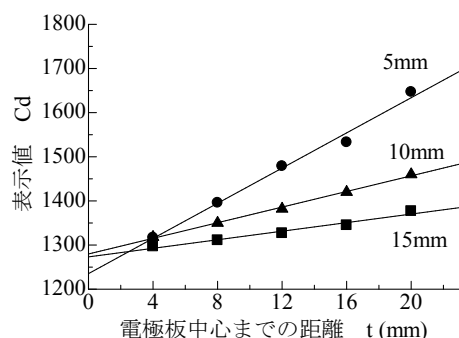


図-7 模擬供試体による表示値 C_d の変化

表-1 回帰直線の傾き a と切片 b

非撥水層 含水率	撥水層 含水率	厚さ (mm)	傾きa	切片b
6%	0%	5	19.9	1235
		10	8.85	1280
		15	4.85	1273
	6%	5	17.3	1493
		10	9.93	1454
		15	2.78	1542
	12%	5	7.90	1821
		10	3.33	1833
		15	2.60	1765
4%	0%	5	12.2	1255
		10	6.23	1254
		15	3.95	1243
	6%	5	10.0	1413
		10	6.08	1376
		15	1.88	1431
	12%	5	5.40	1638
		10	-2.25	1730
		15	0.00	1674

の差があまり無い場合、ケイカル板の枚数を増やすと傾きがマイナスになり、回帰直線の相関係数も小さくなった。また、撥水層の厚さが大となると、すなわちケイカル板の枚数が増えると傾きが小さくなった。ケイカル板の含水率が同じ場合、図-8に示すように重ねる枚数を変化させても切片 b はほぼ同じ値になった。

コンクリートの含水率が6%および4%で重ねるケイカル板の含水率が0%および12%としたケイカル板の厚さを変化させて得られたそれぞれの回帰直線の傾きの逆数 $1/a$ とケイカル板の厚さとの関係を図-9に示す。それぞれ傾きの逆数 $1/a$ とケイカル板の厚さには直線関係が得られた。

このことより傾きの逆数と撥水層厚の関係をあらかじめ

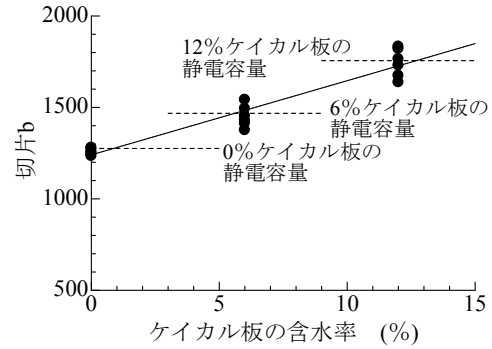


図-8 各含水率における切片 b

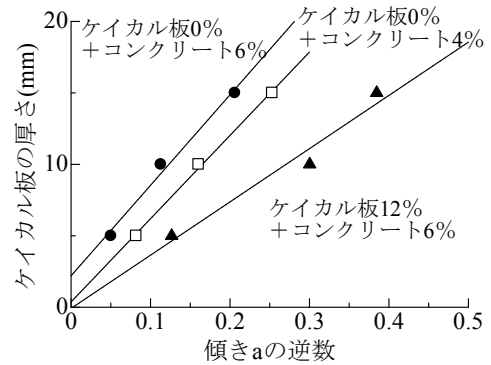


図-9 各含水率における傾きの逆数と厚さ

め求めておけば、等比共面電極で測定し得られた t と Cd の回帰直線の傾き a から撥水層厚が推定できると考えられる。

3.3 撥水層があるコンクリート供試体での検討

撥水層を形成した供試体を等比共面電極で測定し、模擬供試体で得られたような回帰直線の傾きの逆数と撥水層厚との関係があるか検討した。

コンクリートは3種類の配合のものをを用いた。コンクリートの配合および28日圧縮強度を表-2に示す。水セメント比は40, 55, 70%とした。一般的な構造物に使用されている水セメント比55%で空気量も5%程度の普通コンクリートおよび比較的高強度を想定した水セメント

表-2 配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)							スランプ (cm)	空気 量(%)	養生 方法	圧縮強度 (N/mm ²)
		W	C	S1 (粗)	S2 (細)	G	AE 剤	高性能 減水剤				
40	40	180	450	459	196	993	C× 0.04%	C× 0.05%	17.9	4.6	水中	49.7
											気中	39.2
55	40	180	327	492	208	1050	C× 0.04%	C× 0.035%	10.7	5.0	水中	38.3
											気中	35.2
70	40	180	257	506	215	1089	0	0	4.0	1.7	水中	30.9
											気中	26.6

表-3 骨材の物性

骨材		採取場所	表乾密度 (g/cm ³)	粗粒率	吸水率 (%)	実積率 (%)	最大寸法 (mm)
粗骨材	G	長良川	2.61	6.45	1.62	59.9	15
細骨材	S1 (粗)		2.62	2.76	1.97	62.4	—
	S2 (細)		2.60	1.43	2.17	57.2	—

比40%のものと、比較的low品質のコンクリートを想定した水セメント比70%の低強度でAE剤を使用せずに空気量が小さくなるようにしたものとした。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。養生は脱型後28日間水中養生と、気中養生の2種類とした。100mm×100mm×400mmの角柱供試体を作製し、養生後、コンクリートカッターを用いて切断し50mm×100mm×130mmとした。100mm×130mmの切断面に表面含浸材が供試体側面に垂れないように土手を作った後、炉乾燥し絶乾状態にしたものに表面含浸材を塗布した。表面含浸材はT社製とD社製のものを用いた。T社製は液体状であり、D社製はジェル状である。どちらも成分はシラン系で標準使用量が200g/m²とされている。塗布量は100g/m²~500g/m²とし、一部の供試体は50および800g/m²を塗布した。供試体数は68個になる。撥

水層が形成されるよう塗布後4日以上静置した後、供試体をバットに入れ水浸させた。水の深さは供試体の高さとし、供試体底面と側面から4日間吸水させた。撥水層は吸水速度が非常に低く、非撥水層は吸水速度が高いため3.2で検討した模擬供試体と同じく含水率が小さい撥水層と含水率が高い非撥水層の2層モデルになる。

図-10に例として、W/C=55%で水中養生したものに、T社製表面含浸材を100,300,500g/m²塗布したものの電極中心までの距離tと表示値Cdとの関係を示す。模擬供試体と同様に電極板中心までの距離tと表示値Cdには直線関係が得られた。計測後、各供試体を割裂させ実際に形成された撥水層厚を測定した。測定は中心部とその両側25mmの位置の部分での値を平均した。塗布量が少なく形成された撥水層が薄い場合には傾きaが大きく、厚い場合には小さくなった。また、切片bはほぼ同じ値になり、撥水層部分の含水率は同じだと考えられる。

各供試体の回帰直線の傾きの逆数と撥水層厚の実測値との関係を図-11に示す。傾きの逆数と撥水層厚には模擬供試体と同様に直線関係が得られた。表面含浸材の種類、コンクリートの配合、養生条件の差による影響は現れていない。

3.4 実際の構造物を想定した供試体での検討

3.2および3.3で測定に用いた供試体では、撥水層は含水率が低く、非撥水層は表乾状態に近い高含水率とした2層モデルとしてきた。しかし、実際の構造物では含水率は2層モデルではなく、表面付近が低く中に行くほど連続的に高くなる傾斜分布と考えられる。傾斜分布を想定し、W/C=55%で水中養生した角柱供試体を2等分し、切断面以外を水分の出入りしないようにゴム系塗料でシールしたものを3日浸水させた後、実験室中に7日および1日静置した。それぞれ2本ずつ静置した。実験室内での温度、湿度は測定していない。この7日間の岐阜気象台の記録では平均気温は6.3℃、平均湿度は62%であった。静置後に切断面にD社製表面含浸材を200g/m²塗布した。塗布前と塗布後4日後に電極で表示値Cdを測定した。測定後割裂させ撥水層深さを測定した。図-12(a)(b)に塗布前と塗布後の電極中心までの距離tと表示値Cdの関係の例を示す。7日静置させたものの塗布前の表示値はtが4mmでは低く、8mm以上ではほぼ同じ値になっている。8mm以上での値は図-5に示した表乾

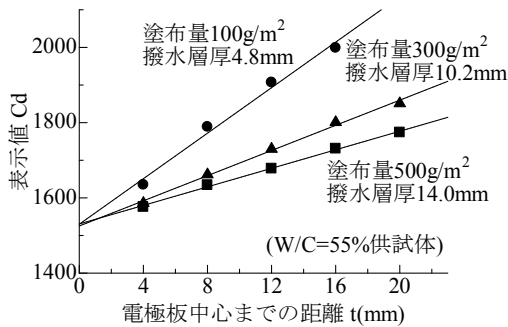


図-10 コンクリート供試体による静電容量の変化

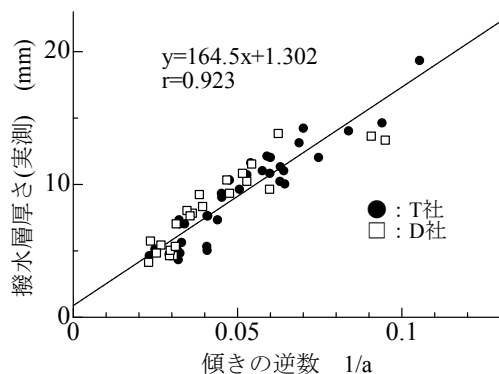


図-11 傾きの逆数と撥水層厚(実測値)

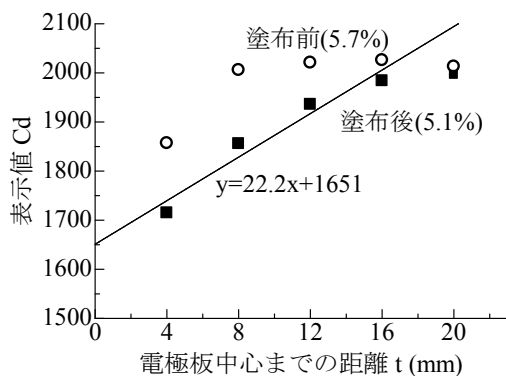


図-12(a) 傾斜含水率分布を持つ供試体の表示値 Cd の変化 (静置 7 日)

表-4 撥水層の推定値と実測値

静置日数	傾き a	推定値(mm)	実測値(mm)
7 日	33.5	6.2	5.0
	22.2	8.7	7.3
1 日	—	推定不能	7.0
	—	推定不能	1.0

状態(含水率 6.4%)のコンクリートの表示値に近い値となっており、内部は飽和した状態と考えられる。塗布後は 4,8,12mm で表示値は低下し、16mm 以上で塗布前の値に近い値となった。塗布後の表示値の増加がほぼなくなる 16mm までの値を用いて直線回帰を行い傾き a を求めた。この傾きを用い、3.3 で求めた傾きの逆数と撥水層厚との関係から撥水層厚の推定を行った。推定値と実測値を表-4 に示す。推定値と実測値は比較的近い値を示している。

1 日乾燥させたものは、図-12(b) に示すように塗布前の表示値は t が 4mm でも表乾状態(含水率 6.4%)の表示値に近い値となっており、ほとんど水分は蒸発しておらず飽和した状態であると考えられる。塗布後でも表示値は減少したが、ほぼ一定の値であり明確な傾きが得られず、撥水層厚は推定できなかった。

実際の構造物を想定した傾斜がある含水率分布での撥水層厚の推定は、実験例が少ないこともあり有効であるかは不明である。今後、含水率を変化させるなどをしてさらに検討が必要である。

4. まとめ

1. 電極の中心から電極板中心までの距離 t と電極板面積 S の比 S/t が一定であるような等比共面電極を作製した。
2. この電極を用いて、含水率の高い層の上に、含水率の低い撥水層を重ねた 2 層モデルの模擬供試体を測定したところ、電極中心までの距離 t と表示値 Cd とには直線関

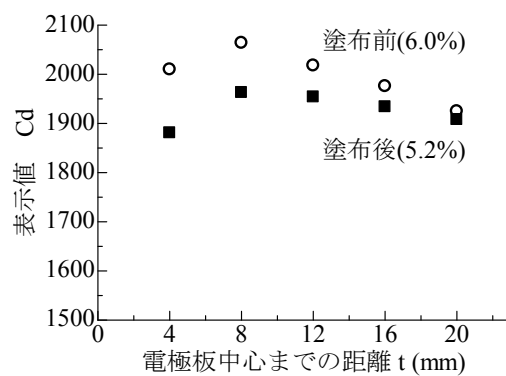


図-12(b) 傾斜含水率分布を持つ供試体の表示値 Cd の変化 (静置 1 日)

係が得られた。この回帰直線の傾きの逆数 1/a は撥水層厚に関係し、切片 b は表層付近の含水率と関係することを明らかにした。

3. シラン系表面含浸材を塗布し、コンクリート中に撥水層を形成させた供試体に吸水させ模擬供試体と同じ 2 層モデルに近い条件とした場合、模擬供試体と同様に回帰直線の傾きの逆数と撥水層厚とは直線関係が得られた。回帰直線の傾きを求めることで、撥水層厚を推定できる可能性がある。

4. 実際の構造物を想定した傾斜がある含水率の供試体を作製し、撥水層厚を推定したところ、近い値を示したもののあったが、推定できない場合もあった。傾斜がある含水率分布での撥水層厚の推定方法は含水率を変化させるなどをしてさらに検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 平成 25 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-5-3-3 B-7, 2013
- 2) 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
- 3) 岩瀬裕之, 玉腰圭: 静電容量を利用したコンクリート中の撥水層厚の推定方法の提案, コンクリート工学年次大会 2012 論文報告集, 34 号, pp.1786-1791, 2012.7
- 4) 所哲郎: 表面深さ分解能を有する誘電計測による高分子電気絶縁材料の劣化診断技術の開発, 平成 16-18 年度 科学研究費補助金(16360142) 成果報告書, 2007
- 5) 岩瀬裕之, 吉村涼: シラン系表面含浸材により形成された撥水層厚さ推定方法の実用化に関する検討, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム論文報告集第 14 巻, pp.535~540, 2014