

論文 静電容量を利用したコンクリート中の撥水層厚さの推定方法の提案

岩瀬 裕之^{*1}・玉腰 圭^{*2}

要旨: 静電容量を利用してコンクリートの深さ方向の含水率分布を求める方法を開発した。これを利用して、非破壊で表面含浸材によってコンクリート中に形成される撥水層厚さを推定した。撥水層厚さの推定位置と実測値を比較すると、比較的近い値が得られた。表面含浸材の塗布量の増加によって撥水層厚さは増加した。また、塗布時における供試体の含水率が增加すると撥水層は減少した。これらの傾向も非破壊で捉えることができた。

キーワード: 表面含浸材, 静電容量, 撥水層厚さ, シラン, 非破壊

1. はじめに

コンクリート構造物の供用年数を延伸させることを目的とした耐久性を向上させる技術の一つに表面含浸工法がある。表面含浸工法は、シランやケイ酸を主成分とする表面含浸材をコンクリート表面に塗布し表面から含浸させることによって、コンクリート表面の組織を改質し、塩分や水分などの劣化因子の侵入を抑制する工法である。

本研究では、アルキルアルコキシシランを主成分とするシラン系表面含浸材を対象とする。この材料をコンクリート表面に塗布し含浸させると、コンクリートが改質され**写真-1**に示すような撥水層(防水層)が形成され、水や塩化物イオンなどの侵入が抑制することができる。

写真-1は、アルキルアルコキシシランを主成分とするシラン系表面含浸材を塗布・含浸させた供試体である。撥水層が形成された後、コンクリートカッターで切断し、切断面を水性顔料で染色したものである。撥水層が形成されている上部は水をはじいたため色がついていない。この供試体の場合、撥水層厚さは約20mmである。近年、表面含浸材が改善され、形成される撥水層厚さが40mmに達するものも開発されている。

形成された撥水層により水や塩化物イオンなどの劣化因子の侵入を抑制することができる。また、水蒸気透過性があるため、内部の水分を放出し、過剰な水分による劣化を抑制することができる。この撥水層が形成される厚さは、含浸材の塗布量やコンクリートの配合、塗布時の含水率に影響することが報告されている¹⁾。

撥水層の厚さが、水分浸入を抑制する性能の指標の一つと考えられるが、形成された撥水層厚さを確かめるためには構造物にコアドリル等で孔をあけて観察する方法しかない。しかし、構造物に傷をつけることになるため撥水層厚さで管理はなされておらず、事前に作製した供試体の試験結果から求めておいた塗布量に基づいて施工



写真-1 形成された撥水層（試料上部）

時の塗布量で管理されている。しかし、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や、深さ方向でも含水率が異なることの影響が考えられ、供試体による推定値とは誤差が生じることも考えられる。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さで管理する方が施工品質を高めることができると考えられ、非破壊で撥水層厚さを推定する方法が必要であると考えられる。

本研究では、静電容量を利用してコンクリートの深さ方向の含水率分布を推定する方法を開発し、これを利用して撥水層厚さを推定する方法を開発することを目的とする。測定機は市販の高周波容量式水分計を用いる。高周波容量は静電容量と同じものである。電極を改良して測定範囲を順次変化させることでコンクリート深さ方向の含水率分布を測定する方法を開発した。

2. 実験概要

測定原理はコンデンサーの静電容量の原理を利用している。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、水分が存在すれば静電容量は大きくなる。静電容量は市販の高周波容量式水分計を用いて測定する。

高周波容量式水分計の底部に長さ50mm幅5mmの電極2本が35mmの間隔で配置されており、測定には20MHzの高周波を用いている。対象物に押し当てて材料の静電

*1 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 工博 (正会員)

*2 岐阜工業高等専門学校 専攻科



写真-2 高周波容量式水分計

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。取扱説明書では高周波容量(静電容量)と含水率は直線的な関係となるとされている²⁾。コンクリートでは0~12%が測定範囲とされている。換算式がない材料では、ダイレクトモードに切り替えることで、換算前の数値(以後、表示値と呼ぶ)を表示することができる。表示値は、同じ測定条件ならば同じ値となるが、電極の大きさや間隔などの影響を受けるため、静電容量の絶対値ではなく相対的な値を表示する。表示値は0~2000の間で表示される。

コンクリート中の撥水層深さの推定は、以下に示す方法で行う。電界は片方の電極から電極の幅で帯状に曲線を描いてもう片方の電極に届いており³⁾、この電界上にある材料の静電容量を測定している。電極から出た電界が帯状の曲線形であることを利用して測定する。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。その中で、「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」であるとしている⁴⁾。電界の形状は、境界条件等により円弧状や楕円形状にもなると考えられるが、ここでは参考文献3,4を参考として、図-1に示すような単純な円弧

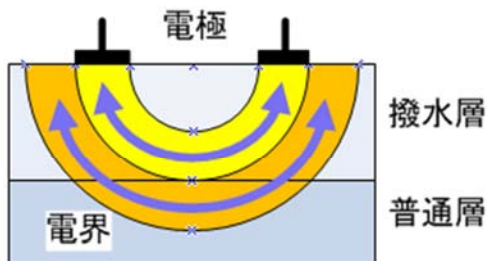
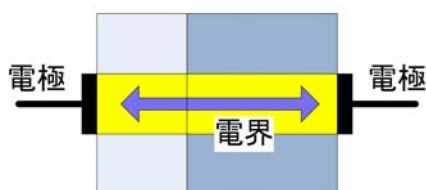


図-1 撥水層深さ推定原理 (円弧透過型計測)



供試体A 供試体B

図-2 直線透過型測定

状とした。

図-1に示すように電極を改良して電極間隔を変化させれば、電界の到達する深さを変化させることができる。電極間隔を狭くすれば浅い部分のみの含水率に対応した値が表示される。電極間隔を広くすれば浅い部分と深い部分の含水率双方の影響を受けた値を表示する。表面含浸材により形成された撥水層部分は他の部分よりも極めて含水率が低いと考えられる。電極間隔を広くしていくと、電界が含水率の高い普通コンクリート層にも届くため表示値が大きく変化する。表示値が大きく変化する深さを撥水層深さと考えることができる。

コンクリート表面に水分計を当てるだけで内部の撥水層深さを推定することが目標であるが、電界の通る各層での円弧の長さが深さによって異なり、条件が複雑になるため、まずその前段階として図-2に示すように、試料の中を高周波による電界が通る経路を直線となるよう電極を配置する「直線透過型測定」で測定した。供試体の含水率や寸法および改良した電極および供試体を重ね合わせることにによる表示値への影響を検討した。

片側に2本の電極を配置する「円弧透過型測定」を行い、「直線透過型測定」と同様に供試体の含水率や寸法および改良した電極および供試体の重ね合わせによる表示値への影響を検討した。

次に、含水率が異なる模擬供試体を重ね合わせたものを用いて「円弧透過型測定」を行い、含水率が変化する境界位置を推定し、実際の値と比較した。

この結果を基にして実際に表面含浸材を塗布した供試体の撥水層厚さを推定した。

3. 実験方法および結果と考察

3.1 直線透過型測定

試料の中を通る電界が直線となるよう電極を改造して配置する「直線透過型測定」で測定した。いわゆる平行板コンデンサーに類似するものである。

試料は、水セメント比 65%の普通コンクリート(最大骨材寸法 15mm)で作製した。表-1にコンクリートの配合を示す。セメントは早強セメントを用いた。粗骨材は長良川産の玉砕石(最大寸法:15mm, 表乾密度:2.61g/cm³, 吸水率:1.62%, F.M.:6.45,)を用い、細骨材には長良川産の粗砂(表乾密度:2.62g/cm³, 吸水率:1.97%, F.M.:2.76)と細砂(表乾密度:2.58g/cm³, 吸水率:2.17%, F.M.:1.43)を7:3の割合で混合したものを用いた。

表-1 コンクリートの配合 (kg)

W/C	s/a	W	C	S	G	AE 剤
0.65	0.44	180	277	794	975	C × 0.04%

100mm×100mm×400mm の供試体を作製し 4 週間以上の養生を行ってから、コンクリートカッターを用いて 10～40mm の厚さに切断したものをを用いた。コンクリートカッターの施工精度により、供試体厚さは 1mm 程度の誤差がある。

各供試体は、炉乾燥をさせて絶乾にし、質量を測定した後、含水率がそれぞれ 1～4% になるように調整した水とともに防湿ポリエチレン袋に入れ十分に吸水させるため約 1 日静置した。吸水していることを確認した後、真空パック器で袋内の空気を吸引しながら口を綴じた。

供試体の含水率分布が一様になるよう、測定を開始するまでさらに 1 週間以上静置した。含水率 0% のものも同様に防湿ポリエチレン袋に入れた。

防湿ポリエチレン袋内側にポリ塩化ビニリデンが塗布してある。ポリ塩化ビニリデンはポリエチレンなど他のプラスチック素材からなるフィルムに比べて、ガス透過性、透湿性とも群を抜いて低く、長期にわたって供試体の含水率が変化しないとされている。試料を作成してから 1 ヶ月後に、袋毎の質量を測定したが、質量の変化はほとんど無かった。

電極は幅 10mm、長さ 100mm の銅板を用い、ポリスチレンフォーム板に貼り付けた。ポリスチレンフォームを用いても表示値に影響しない。電極にはビニール被覆銅線を取り付け板の外側まで延長させ、高周波容量式水分計の電極と接触させた。

同じ含水率の供試体を 1 枚または 2 枚組み合わせて向かい合わせた電極間に設置し、電極間距離(電界長さ) d と表示値 C の変化を計測した。

含水率が 0, 2, 4% の供試体における電極間距離の逆数 ($1/d$) と表示値 C の関係を図-3 に示す。

電極間距離(電界長さ)の逆数 ($1/d$) が大きくなると、すなわち電極間距離 d が小さくなると表示値が直線的に大きくなった。

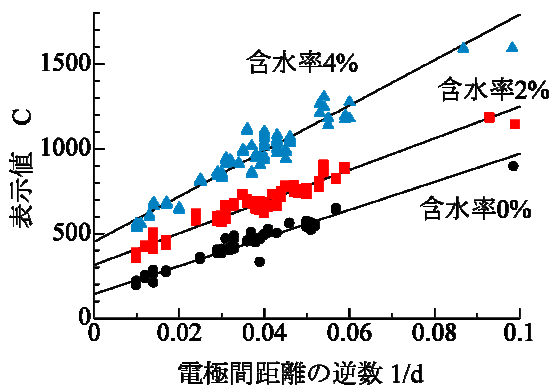


図-3 電極間距離の逆数と表示値の関係 (直線透過型測定)

平行板コンデンサーの静電容量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る。すなわち電極の面積(極板面積)を S (m^2)、極板間距離を d (m)、誘電体の誘電率を ϵ (F/m) とすると、コンデンサーの静電容量 C は、 $C = \epsilon S / d$ で表される。「直線透過型測定」においても表示値(静電容量)は電極間の距離に反比例している。本実験に当てはめると誘電率は含水率に相当する。含水率の増加に伴って表示値は大きくなった。また、含水率の増加によってグラフの傾きは大きくなった。

3.2 円弧透過型測定

「直線透過型測定」の結果を元に「円弧透過型測定」を行った。「直線透過型測定」と同様に、電極は幅 10mm、長さ 100mm の銅板を用い、ポリスチレンフォーム板に並列に貼り付けた。電極にはビニール被覆銅線を取り付け板の外側まで延長させ、高周波容量式水分計の電極と接触させた。電極と電極の中心間隔を 15mm から 50mm とし 5mm ずつ変化させた。供試体は、「直線透過型測定」を行ったコンクリートと同じ配合とし、厚さ約 10mm に切断したものをを用いた。表面含浸材は T 社製の 100E を用いた。100E はアルキルアルコキシシランを主成分とするシラン系表面含浸材である。浸透性が比較的高く施工条件によっては 20mm 以上浸透し撥水層を形成する材料である。絶乾にした供試体の表面に $1 m^2$ 当り 400g 塗布し供試体全体を撥水層にしたものと無処理のものを用いた。塗布量はメーカー推奨値とした。表面含浸材を塗布した供試体を数枚抜き取り、コンクリートカッターで切断して撥水層の形成を確認したところ、すべての供試体で断面すべてが撥水層であった。

それぞれの供試体を、炉乾燥で絶乾状態にしたものと 48 時間以上吸水させた後に表乾状態としたものを用いた。表面含浸材を塗布したものの吸水率は 1.1% であり、無処理のものは 6.6% であった。

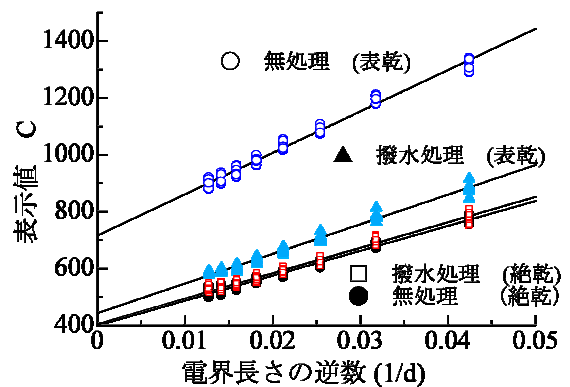


図-4 電界長さの逆数と表示値の関係 (円弧透過型測定)

同じ種類の供試体を数枚重ね、片側に電極を配置し、電極間隔を変化させる「円弧透過型測定」を行った。供試体を重ねる組み合わせを変えて測定した。電極の中心を通る円弧の長さを電界長さdとした。例えば、電極間中心距離が20mmの場合、電界長さdは31.4mmとなる。各供試体における電界長さの逆数(1/d)と表示値Cの関係を図-4に示す。

「直線透過型測定」と同様に、各条件における「円弧透過型測定」においても、電界長さの逆数(1/d)と表示値Cには線形関係が得られた。

電界長さ(1/d)と表示値Cの関係を直線回帰すると、各々以下の式が得られた。

・無処理+絶乾状態
 $C=8757(1/d)+400$ (1)
 相関係数 $|r|=0.99$ 標準誤差 10.0

・無処理+表乾状態
 $C=14533(1/d)$ (2)
 相関係数 $|r|=0.99$ 標準誤差 16.7

・撥水处理+絶乾状態
 $C=8954(1/d)+405$ (3)
 相関係数 $|r|=0.99$ 標準誤差 11.1

・撥水处理+表乾状態
 $C=10412(1/d)+444$ (4)
 相関係数 $|r|=0.99$ 標準誤差 11.3

絶乾状態の場合、表面含浸材を塗布する撥水处理したものと同処理のものでは、表示値にほとんど差はなく、表面含浸材による処理はほとんど表示値には影響していない。

表乾状態のものは、水分を含んでいるため絶乾状態よりも表示値は大きくなっており、吸水率に応じて表示値

は大きくなった。

3.3 モデル供試体による絶乾層深さの推定

厚さ約10, 15, 20, 25mmの絶乾状態にある無処理のコンクリートの下に厚さ40mmの表乾状態の無処理のコンクリートを置き、「円弧透過型測定」を行って絶乾と表乾の境界位置を推定した。電極幅は10mmとし電極中心間隔は15mmから50mmとし5mmずつ変化させた。

電界長さの逆数(1/d)と表示値Cの関係の測定結果の例として、絶乾深さが15mm(G15-1), 20mm(G20-2), 25mm(G25-1)のものを図-5に示す。また、3.2で求めた無処理+絶乾状態の電界長さの逆数(1/d)と表示値Cの関係式(1)を直線で示す。

各供試体とも電界長さが大きくなると、すなわち電界長さの逆数(1/d)が小さくなると表示値Cは減少するが、その減少する割合は小さくなり、式(1)で予想される値より大きくなっている。

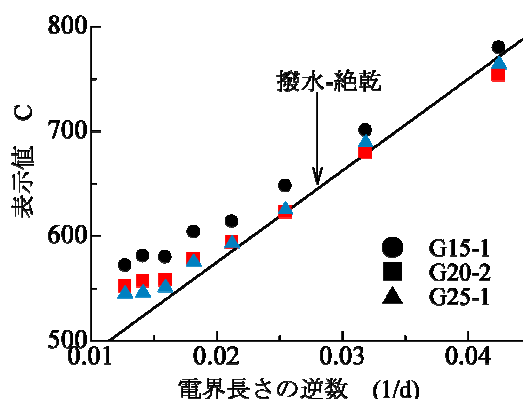


図-5 電界長さの逆数と表示値の関係 (モデル供試験体)

表-2 モデル供試体による絶乾層深さの推定結果

電極中心距離(mm)	15	20	25	30	35	40	45	50	絶乾深さ(mm)	
									推定位置	実測値
電界中心深さ(mm)	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25		
電界到達深さ(mm)	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30		
G10-1	37	57	74	83	98	91	114	123	0~7.5	10.2
G10-2	35	64	64	78	89	89	105	122	0~7.5	9.8
G15-1	8	23	25	28	45	41	57	60	15~17.5	16.6
G15-2	8	27	15	28	37	37	49	62	15~17.5	16.6
G20-1	-12	15	15	22	33	29	42	52	15~17.5	19.9
G20-2	-18	2	0	8	19	19	33	40	20~22.5	20.6
G25-1	-8	11	2	7	16	12	22	33	22.5~25	26.4
G25-2	-21	-4	-10	-7	5	0	14	20	25~	27.4

式(1)は、電界が絶乾状態の領域にある場合の値であり、電界が水分の存在する供試体下部の表乾状態の領域に入ると表示値は大きくなり、式(1)で予想される値よりも大きくなると考えられる。

表-2には、各供試体において電極中心距離を変化させて行った「円弧透過型測定」の結果と式(1)で予想される値との差を示す。

どの供試体とも、電界中心距離が大きくなると、すなわち電界の深さが大きくなると計測値と式(1)で予想される表示値との差が大きくなっている。

電極中心間隔を増加させていき、この差が式(1)の標準誤差の3倍の値である30を初めて超えるところまでを絶乾状態領域として、その深さを推定位置として表-2に示す。電極中心間隔を5mmずつ増加させていることから、推定位置はその半分の2.5mmの範囲がある。電極中心間隔の最小値は15mmとしたため、電界中心深さは7.5mmからとなり、推定位置が7.5mm以下は0~7.5mmの範囲と記した。また、電極中心間隔の最大値は50mmとしたため、25mm以上と判定した場合は25mm~と記す。また、実際の絶乾状態の供試体厚さの実測値も表-2に示す。

両者を比較すると、実測値が約10mmのものは推定できていないが、15mm以上では実測値が推定範囲に入っているか、または推定範囲に近い値となっており、比較的近い値を推定している。この推定方法を次項の撥水層厚

さ推定に用いることとする。

3.4 表面含浸材による撥水層深さの推定

表面含浸材を塗布した供試体に形成される撥水層の深さを3.3で用いた判定方法を用いて推定し、供試体を切断して求めた実際の値と比較検討した。また、形成される撥水層深さに対する表面含浸材の量および供試体の含水率の影響についても検討した。

同じ配合のコンクリートをコンクリートカッターで切断し、断面100×100mm、厚さ40mmの供試体を作製した。供試体は、絶乾状態にした後、含水率0%のものはそのまま、含水率が1%のものは1%となるように調整した水とともに防湿ポリエチレン袋に入れ、口を綴じた。

各供試体内の含水状態が一定となるように十分に時間をおいた後、撥水材を含浸させる面にパテで土手を作り、撥水材を塗布した。土手は撥水材が側面に垂れ、そこから撥水材がコンクリートに浸透するのを防止するためのものである。撥水材の塗布量はメーカー推奨値の400g/m²と、その0.5倍、1.5倍、2倍の量の200、600、800g/m²とした。一度に浸み込まないものは所定の量を数回に分けて塗布した。供試体の種類を表-3に示す。

塗布した後、再度防湿ポリエチレン袋に入れ、撥水層が形成されるのに必要な時間とされる約1週間以上静置した。1週間以上静置した供試体を袋から取り出し、供試体下部の撥水層の無い部分から約2日間吸水させた。水深は1cmとした。

吸水させた供試体表面の水分を取り、「円弧透過型測定」を行った。測定後、コンクリートカッターで切断し撥水する部分の厚さを測定し撥水層深さとした。

図-6に電界長さの逆数(1/d)と表示値Cの関係の測定結果の一部を示す。また、3.2で求めた撥水処理+表乾状態の電界長さの逆数(1/d)と表示値Cの関係式(3)を

表-3 供試体の種類

供試体名	含水率(%)	表面含浸材塗布量(g/m ²)
E02-1	0%	200
E02-2		
E04-1		400
E04-2		
E06-1		600
E06-2		
E08-1		800
E08-2		
E12-1	1%	200
E12-2		
E14-1		400
E14-2		
E16-1		600
E16-2		
E18-1		800
E18-2		

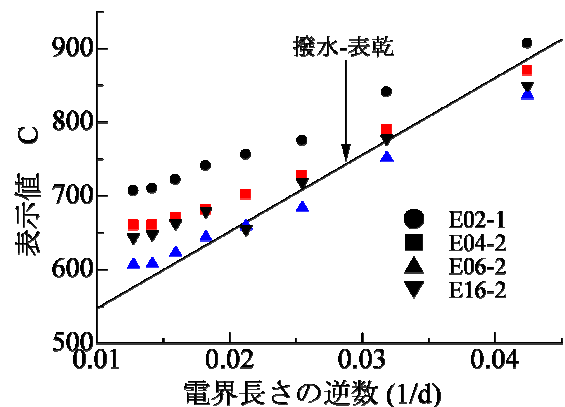


図-6 電界長さの逆数と表示値の関係 (表面含浸材を塗布した供試体)

表-4 表面含浸材を塗布した供試体の撥水層深さと推定結果

電極中心間距離 (mm)	15	20	25	30	35	40	45	50	撥水層深さ(mm)	
									推定位置	実測値
電界中心深さ(mm)	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25		
E02-1	21	66	66	91	108	113	119	131	7.5~10	11.0
E02-2	65	93	98	113	117	124	129	138	0~7.5	8.5
E04-1	-54	-13	-1	23	35	43	49	62	15~17.5	17.5
E04-2	-16	14	18	37	48	61	69	84	12.5~15	17.5
E06-1	-45	-24	-39	-4	12	19	26	37	22.5~25	21.0
E06-2	-49	-23	-25	-6	11	14	17	31	25~	23.5
E08-1	-72	-41	-38	-15	2	7	4	20	25~	27.5
E08-2	-52	-37	-39	-25	-8	-9	-10	1	25~	21.5
E12-1	154	171	178	191	195	197	205	221	0~7.5	8.0
E12-2	128	153	158	175	196	195	197	213	0~7.5	8.0
E14-1	29	66	87	104	136	136	145	154	7.5~10	12.0
E14-2	8	65	77	108	132	148	152	170	7.5~10	10.0
E16-1	-48	-31	-38	-21	-8	-6	-7	5	25~	12.5
E16-2	-36	3	10	-10	46	54	57	68	15~17.5	14.0
E18-1	2	33	42	64	81	84	90	104	10~12.5	14.0
E18-2	-47	-24	-26	-12	4	-2	-3	13	25~	17.5

直線で示す。吸水させているため、表乾状態として式(3)を用いた。

いずれの供試体においてもモデル供試体と同じように電界長さが大きくなるほど表示値は小さくなり、また式(3)で予想される値とは離れていった。表-4には、各供試体において電極中心距離を変化させて行った「円弧透過型測定」の結果と式(3)で予想される値との差を示す。

計測値と式(3)で求められる値との差が式(3)の標準誤差の3倍の値33を初めて超えるところまでを撥水層領域と推定した。表-4には推定位置と実測値も示す。

写真-1に示すように、撥水層は水をはじくため濡れておらず、白く写っている。表面含浸材塗布面から色が変わる境界面までを撥水層として、その厚さを求めた。

表面含浸材塗布時の供試体の含水率が0%と1%のものを比較すると、含水率が1%のものは0%に比べて撥水層厚さが小さい。また、表面含浸材の塗布量の増大によって撥水層厚さは増加している。しかし、防水層厚さは塗布量には比例していなかった。

推定領域と実測値を比較すると、比較的近い値となっている。また、表面含浸材の塗布量や供試体の含水率が撥水層厚さにおよぼす影響についても、その傾向を示している。

電極の形状や間隔・配置等をさらに改良することによって撥水層厚さ推定の精度の向上を図ることができると考える。

5. まとめ

静電容量を利用してコンクリートの深さ方向の含水率分布をもとめ、これを利用して表面含浸材によってコンクリート中に形成される撥水層厚さを推定する方法を開発した。

撥水層厚さの推定領域と実測値を比較すると、比較的近い値が得られた。

表面含浸材の塗布量の増加によって撥水層厚さは増加した。また、塗布時における供試体の含水率が増加すると撥水層は減少した。これらの傾向も推定することができた。

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
- 2) コンクリートモルタル水分計 HI-520 取扱説明書, ケット科学研究所
- 3) 花岡良一, 石田隆弘: 基礎からの高電圧工学, pp. 23-25, 日新出版, 2010
- 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