

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：53701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420470

研究課題名(和文) 静電容量を利用した表面含浸材による撥水層の非破壊性能評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of evaluation method of non-destructive performance of water repellent layer by surface impregnation material using electrostatic capacity

研究代表者

岩瀬 裕之 (IWASE, Hiroyuki)

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：20160111

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：シラン系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の厚さを推定する方法を改良し推定精度を向上させる方法について検討した。また、この撥水層の性能を吸水性、透水性、耐凍結融解性の各性能の評価を行い、撥水層の各性能に及ぼす撥水層厚さ、塗布量、コンクリートの配合の要因について検討した。

電極および測定方法を改良することで撥水層厚さの推定精度を向上させることができた。表面含浸材を塗布することで各種性能は向上する。吸水性、凍結融解抵抗性では配合による差は現れなかった。透水性は普通配合に比べ低品質配合の供試体が水をよく通し、配合の影響が現れた。

研究成果の概要(英文)：The method for estimating thickness of water repellent layer formed in concrete with silane type surface impregnation material was improved. It was possible to improve the estimation accuracy.

And, the performance of the water-repellent layer was evaluated for each property of water absorbing property, water permeability and freeze-thawing resistance. Various performances are improved by applying surface impregnated material. There was no influence of mix proportion of concrete on water absorption and freeze-thaw resistance. Water permeability of low quality concrete was lower than ordinary concrete. So, the influence of quality of concrete was observed.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：シラン 表面含浸材 撥水層 静電容量 吸水性 透水性 凍結融解抵抗性

### 1. 研究開始当初の背景

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した。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図-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。

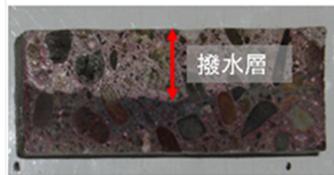


図-1 形成された撥水層(試料上部)

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。

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による試験結果に基づいて施工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。

コンクリートの含水率の差により表面含浸材を等量塗布しても場所によって形成される撥水層厚さが異なり撥水層の透水性などの性能も異なることになる。この場合、撥水層の性能は次のようなことが考えられる。例えば、等量塗布しても形成される撥水層厚さが半分になったとした場合、含浸材の量は変わらないため撥水層中の含浸材濃度は2倍になる。この場合、撥水層厚さが半分になることから、その性能も半分になる。含浸材濃度が2倍になることから、その性能も2倍になる。等量塗布しているためその性能

は変わらない、ということが考えられる。このように形成された撥水層の性能を評価しておくことが必要である。従来の含浸材は浸透性能が低く撥水層は薄いものしか形成されなかった。そのため、撥水層とその奥の撥水層となっていないコンクリート部分と合わせて性能評価が行われており、撥水層だけの性能評価は行われてこなかった。撥水層のみの各性能を把握しておくことは、表面含浸材の性能を把握するために必要であると考える。

### 2. 研究の目的

本研究では表面含浸材によって形成された撥水層厚さについて静電容量を利用して非破壊で精度良く推定する方法を開発する。また、形成された撥水層の性能評価を撥水層のみを対象として性能評価を行うことを目的とする。

浸透能力が高い表面含浸材を使用して全体が撥水層の供試体を作成する。この供試体を用いて、撥水層の吸水性、透水性、耐凍結融解性の各性能の評価を行い、撥水層の各性能に及ぼす撥水層厚さ、撥水層中の含浸材濃度(塗布量)、コンクリートの配合などの要因がどのように影響しているかを明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 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高精度化

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。平行板コンデンサーの静電容量は電極の面積および誘電体の比誘電率に比例し、電極間の距離に反比例するとし、式(1)で表される。

$$C \approx \epsilon_r \epsilon_0 S/d \quad (F) \quad (1)$$

ただし、 $C$ : 静電容量(F),  $\epsilon_r$ : 電極板間の誘電体の比誘電率,  $\epsilon_0$ : 真空の誘電率(=1.0 F/m),  $S$ : 電極面積(m<sup>2</sup>),  $d$ : 電極間距離(m)

電極と電極の間に挟まれた誘電体の比誘電率によって静電容量は変化する。水は比誘電率が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。高周波容量は静電容量と同じものである。

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、この電界上にある材料の静電容量を測定している。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、図-2に示すような単純な円弧状とした。

図-2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。電界の中心を通る円弧の長さを電界長さ $l$ とする。含水率が同じであれば比誘電率 $\epsilon$ は一定であり、表示値 $C$ と電界長さの逆数 $1/l$ とは式(1)より線形関係となるが、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比誘電率が変化し、その結果表示値が大きく変化する。表示値が大きく変化する所を撥水層と普通コンクリート層との境界とすることができ、しかし、推定を分解能 2.5mm でしか行うことができないことや、7.5mm 以下の撥水層厚さに適用できないことが課題となった。このときの電極は長さ 100mm、幅 10mm 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ものである。

分解能を高めるためと 4mm ~ 10mm の撥水層厚さが測定できるように、電極を改良し、長さ 100mm、幅 6mm、厚さ 0.1mm の銅板 2 枚をポリスチレンフォーム板に貼り付けて作製したものをを用いた。電極中心間隔はそれぞれ 8 ~ 30mm とした。従来のもより電極幅を小さくし、また電極中心間隔も 2mm ずつ増加させているため撥水層深さの推定は 1mm 単位の分解能で行うことができる。

供試体はモルタル、コンクリートを用いた。供試体は 100 × 200 × 40mm とした。表面含浸材の塗布量は 40 ~ 400g/m<sup>2</sup> の 8 水準とした。

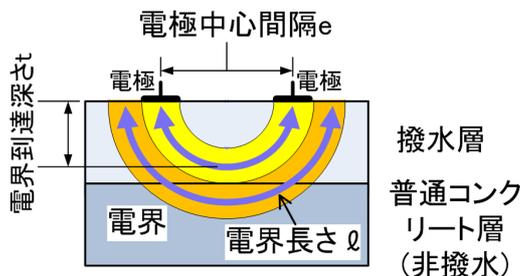


図-2 撥水層深さ推定原理

### (2) 撥水層厚さ推定方法の実用化に関する検討

推定の高精度化を目指した(1)の研究において 4 ~ 12mm の撥水層厚さを推定できた。しかし、撥水層厚さが 4mm 以下の推定は電極間隔の制約からできなかった。(1)では、電極は幅 6mm の銅板 2 枚をポリスチレンフォーム板に貼り付けて作製している。電極と電極の中心間隔を 8 ~ 30mm とし、これより、電界の中心が電極中心間隔の半分の深さ 4 ~ 15mm まで届くようにしている。電極中心間隔が 8mm の場合、電極部分が片側 3mm ずつあり、電極の間隙は 2mm となる。間隙をこれ以上狭くできないため測定ができなかった。

このため、測定方法の改善を行う。図 3 に示すように、5 ~ 8mm 程度の厚さのモルタル板を作成し、これに表面含浸材を塗布し全体を撥水層としたものを供試体と電極の間に挟み込み測定を行う。すなわち見た目の撥水層を厚くして測定し、推定後にモルタル板の

厚さを差し引くことで厚さ 4mm 以下の撥水層が推定可能になる。供試体はモルタルを用い寸法は(1)と同じにした。

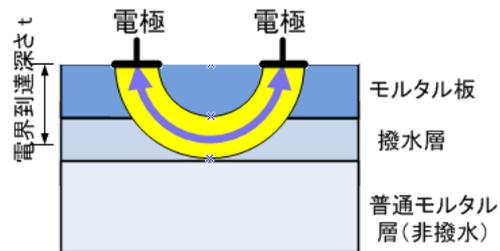


図 - 3 浅い部分の測定方法

### (3) シラン系表面含浸材によって形成された撥水層のみに着目した性能評価

撥水層のみを対象として吸水性、透水性、耐凍結融解性の各性能の評価を行うために、供試体厚さをある程度以上確保する必要があり、また含浸材濃度を変化させられるよう 10mm とした。撥水層厚さがほぼ 10mm となる 200 g/m<sup>2</sup>以上とし、200,300,400,500g/m<sup>2</sup>および 0(無塗布)とした。含浸材は片面から塗布した。厚さは 10mm と一定にしていることから含浸材塗布量を多くすると、供試体内部中の含浸材濃度はその割合で高くなる。

また、透水試験では撥水層厚さを変化させるために厚さ 40mm の供試体も用いた。含浸材の塗布量は 50,100,400g/m<sup>2</sup>とした。実験終了後に測定した撥水層厚さは、普通配合、低品質配合とも、約 5,8,15mm であった。

#### 1) 吸水試験

供試体厚さを一定(10mm)のもとで塗布量を変化させることによって含浸材濃度を变化させた供試体を用いて含水率を求める。絶乾状態の供試体を水に浸し定期的に取り出し含水率を求めた。含浸材を塗布していない供試体は吸水速度が速いため、水中質量の変化を連続的に測定し、時間に伴う水中重量の増加の割合を実験前後の気中質量の増加量にあてはめ、時間に伴う気中質量に換算したものをを用いて含水率の変化を求めた。

#### 2) 透水試験

供試体は含浸材濃度を变化させた厚さ 10mm のものと、厚さ 40mm で内部の撥水層厚さを变化させたものを用いた。

図-4 に示すように含浸材塗布面に漏斗を接着した。漏斗には目盛りが付いたメスピペットを接着し水量の変化を計測した。浸透面からの初期水頭は 360mm とした。供試体上面および側面にこれらの面からの水の蒸発を防ぐためシリコンシーラントで被覆した。

供試体を温度 20℃、湿度 60% に設定した恒温恒湿器に静置し、浸透し供試体底面にしみ出した水が蒸発するように恒温恒湿器のファンを利用して常時風をあてた。時間ごとの水の減少量を測定し透水量とした。

#### 3) 凍結融解試験

厚さを 10mm と一定とし含浸材濃度を变化させた供試体を金属容器に置き、濃度 3% の食塩水を入れた。恒温器で庫内温度を -20 で 10 時間、+30 で 2 時間を 1 サイクルとして凍結融解試験を行った。容器内の温度は -20 から +10 の間で変化しており、供試体の温度も同じ変化を受けているとする。5~12 サイクルごとに供試体を取り出し、表面の水をぬぐって質量を求めた。吸水 7 日後の質量に対する質量を残存質量率として求めた。

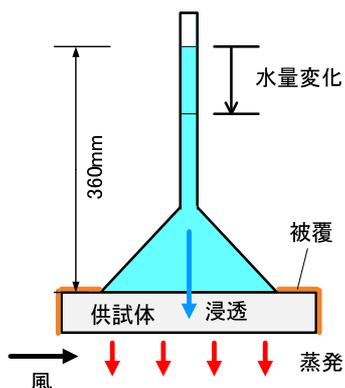


図-4 透水試験の概要

#### 4. 研究成果

(1) 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高精度化

2 日以上吸水させた供試体を用い電極中心間隔を变化させて表示値 C を測定した。図-5 に表面含浸材を 100g/m<sup>2</sup> 塗布したものの電界長さの逆数(1/l)と表示値 C の測定結果との関係を示す。電極中心間隔が 8.0~9.0mm のとき、すなわち電界長さの逆数が 0.08~0.071 では回帰直線上にある。電極中心間隔が 10mm では表示値が回帰式から求められる値よりも大きくなった。電界の一部が含水率の高い普通コンクリート層に達したことにより表示値が大きくなったと考えられる。帯状の電界の中心が到達した位置を電界到達深さとすると、電界到達深さは電極中心間隔の 1/2 の値となる。

回帰式(3)の標準誤差は 6.85 であるため、その約 3 倍の値の 21 を閾値として、表示値と回帰式で求められる値との差が初めて 21 を超える所に該当する電界到達深さとその一つ前の電界到達深さととの間に撥水層と非撥水の普通コンクリート層との境界があると推定した。すなわち図-5 に示した供試体では撥水層厚さを 5~6mm の範囲にあると推定した。また、目視により求めた撥水層厚さの実測位置も図-5 上に示す。

推定ができた供試体では、多くの供試体で実測値が推定範囲内にあるか推定範囲内になくとも推定範囲と実測値との差は約 3mm 以内であった。撥水層厚さの実測値が 3mm 以下のものは電極間距離が一番小さな電極でも推定ができなかった。

4mm 以下の推定には、電極および測定方法の改良が必要である。

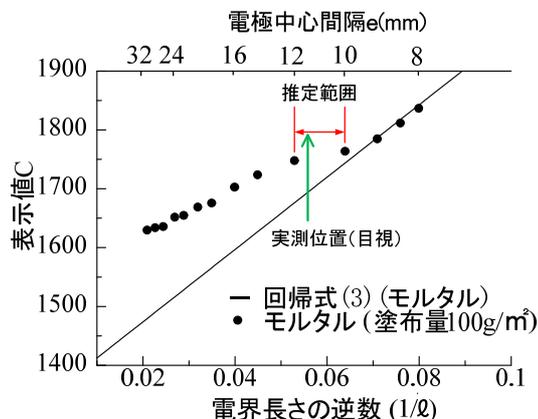


図-5 撥水層の推定の一例

#### (2) 撥水層厚さ推定方法の実用化に関する検討

厚さ 4.4~9.6 mm の撥水モルタル板を各供試体の表面含浸材を塗布した面に重ね、同じ電極を用いて電界到達深さと表示値の関係を求め、供試体内に形成された撥水層厚さを推定した。電界深さが小さいところから 1 点ずつ測定値を増やしながらか回帰直線を作成した。この回帰直線から次の測定値が 8 以上離れた場合を電界が非撥水層の層に入ったとして、その前の電界深さととの間に境界があるとした。グラフを目視して境界の推定が可能であったものの各回帰直線の標準誤差が 1~8 であったことから、閾値が一番大きな標準誤差と同じ 8 としたが、回帰直線を求めるためのデータ数が少ないため、閾値を決定する方法について今後検討する必要がある。閾値を 8 として求めた見かけの推定範囲、見かけの推定範囲から撥水モルタル板の厚さを減じて求めた推定範囲、および実測値を表-1 に示す。

含水率が 4% 以上のものは推定ができ、実測値と推定範囲の中心からの差は 1~2 mm 以内であったが、一部 3 mm の差を示すものもあった。また、撥水層厚さが 4 mm 以下のものも推定できている。しかし、含浸材の含水率が撥水層の含水率に近いものは推定が困難であり、含水率が比較的高い供試体にしか適用できなかった。限られた条件の下ではある

表-1 撥水層の推定範囲と実測値

含水率		撥水モルタル板の厚さ(mm)				実測値(目視)
		4.4	5.3	7.9	9.6	
7%	見かけ推定範囲	8-9	9-10	10-11	推定不能	3.0mm
	推定範囲	3.6-4.6	3.7-4.7	2.1-3.1		
6%	見かけ推定範囲	10-11	9-10	10-11	推定不能	3.5mm
	推定範囲	5.6-6.6	3.7-4.7	2.1-3.1		
5%	見かけ推定範囲	9-10	10-11	推定不能	推定不能	3.5mm
	推定範囲	4.6-5.6	4.7-5.7			
4%	見かけ推定範囲	8-9	推定不能	12-13	推定不能	4.0mm
	推定範囲	3.6-4.6		4.1-5.1		
3%	見かけ推定範囲	推定不能	推定不能	推定不能	推定不能	4.5mm
	推定範囲					
2%	見かけ推定範囲	推定不能	推定不能	推定不能	推定不能	5.0mm
	推定範囲					
1%	見かけ推定範囲	推定不能	推定不能	推定不能	推定不能	6.5mm
	推定範囲					

が、ある程度の精度をもって推定できる。  
 (3) シラン系表面含浸材によって形成された撥水層のみに着目した性能評価

### 1) 吸水試験

図-6 に普通配合の水浸時間と含水率の関係を示す。無塗布 ( $0\text{g/m}^2$ ) のものは水浸後すぐに水を吸収し、約 24 時間後に 90% 以上飽水しているのに対し、表面含浸材を塗布したものは吸水速度が遅くなっている。また含水率も無塗布のものに比べて低くなっている。塗布量が  $300, 400, 500\text{g/m}^2$  の供試体の含水率は近い変化を示している。供試体内はすべて撥水層となっていると考えられ、撥水層となれば、塗布量 (供試体内の含浸材濃度) に関係なく同じ含水率になると考えられる。 $200\text{g/m}^2$  のものは他の塗布量のものに比べて含水率が大きくなっている。供試体内部がすべて完全な撥水層となっておらず、非撥水層部分の吸水が大きく、そのため含水率が大きくなったと考えられる。

含浸材を塗布したものは水浸 720 時間後の含水率、無塗布のものは 250 時間後の含水率を供試体がほぼ飽水した状態になったとしてこのときの含水率を吸水率とした。吸水率と塗布量との関係を図-7 に示す。低品質配合で塗布量  $200\text{g/m}^2$  では他の塗布量とほぼ同じ値になっていることから、完全に撥水層が

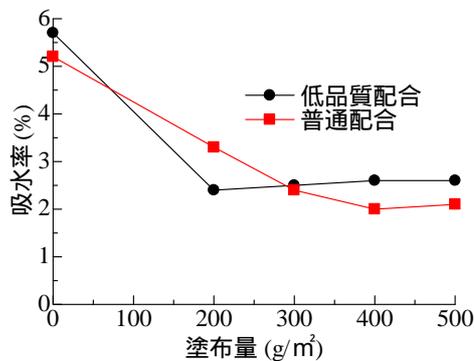


図-6 塗布量と吸水率の関係

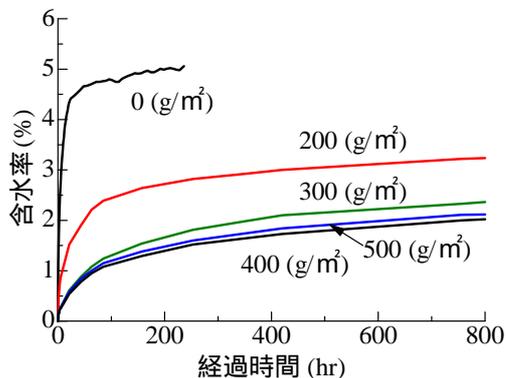


図-7 水浸時間と含水率との関係

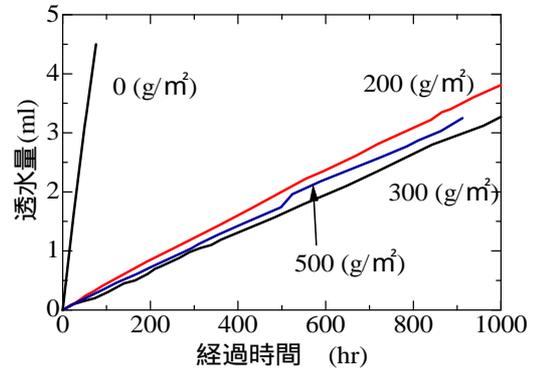


図-8 透水時間と透水量との関係

形成されていると考えられる。

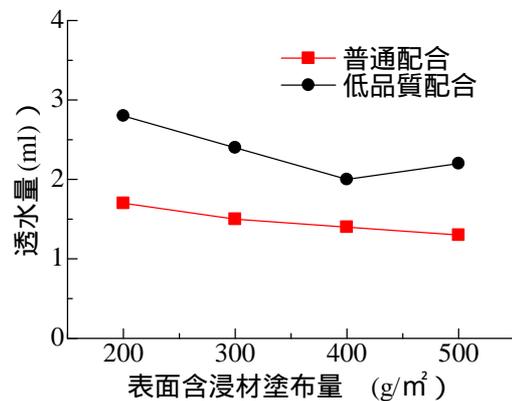


図-9 塗布量と透水量との関係

吸水率は撥水層が形成されていれば無塗布のものに比べて半分以下のほぼ近い値になっている。普通配合では塗布量  $300\text{g/m}^2$  以上で、低品質配合では  $200\text{g/m}^2$  以上でほぼ同じ値になっており、含浸材濃度には影響されていない。また、普通配合、低品質配合とも吸水率に差はなく、コンクリートの配合の影響も現れていない。

### 2) 透水試験

図-8 に低品質配合の供試体の経過時間と透水量との関係を示す。各関係とも直線関係を示している。無塗布のものは  $3\text{ml}$  透水するのに約 50 時間要したのに対し、塗布したものは同量透水するのに約 800~900 時間と 16 倍以上の時間を要している。また、塗布量(含浸材濃度)に関わらず、同じような透水量となっている。

図-9 には 720 時間経過後の塗布量と透水量との関係を示す。各配合において塗布量の増加に伴い透水量は少し低下する傾向があるがほぼ同じ値を示しており、含浸材濃度の影響は大きくは現れていない。それに対して、同じ塗布量では普通配合に比べ低品質配合の供試体は  $0.5 \sim 1.0\text{ml}$  程度透水量は大きくなっており、配合の影響が現れている。

図-10 には厚さ  $40\text{mm}$  の供試体内に形成した撥水層厚さと透水量の関係を示す。低品質

配合では撥水層厚さの増加に伴って透水量が減少し、撥水層厚さが影響を及ぼしている。普通配合では、撥水層厚さが約 5mm から 15mm まで増加しても透水量の減少はわずかであった。低品質配合で撥水層厚さが 15mm の場合より、普通配合で撥水層厚さが 5mm の場合の方が透水量は少なく、透水量にはコンクリートの品質の影響が大きいといえる。

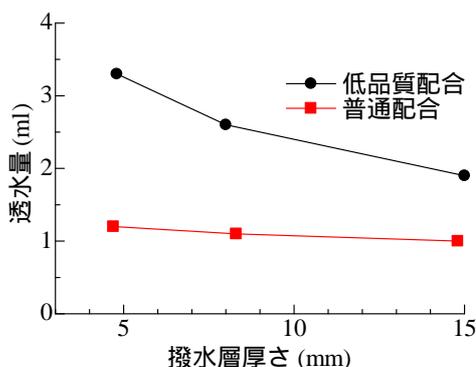


図-10 撥水層厚さと透水量との関係

### 3)凍結融解試験

供試体が最終的に割れた時を破壊とし、それ以前に測定した時の回数を破壊サイクル数とした。表面含浸材塗布量と破壊サイクル数との関係を図-11 に示す。低品質配合で表面含浸材を 200g/cm<sup>2</sup> 以上塗布したもので、普通配合では 300g/cm<sup>2</sup> 以上塗布した供試体の破壊サイクル数は 110 以上となり、ほぼ同じ破壊回数となっている。撥水層が形成されていれば、配合に関わらず、凍結融解に対してほぼ同じ耐久性を有していると考えられる。

以上のことから次の結論を得た。

- ・静電容量を利用した撥水層厚推定方法を改良することで、限られた条件の下ではあるが、ある程度の精度をもって推定できる。
- ・表面含浸材により形成された撥水層では非撥水のコンクリートに比べて、吸水性、透水性は低下し凍結融解抵抗性は向上しており各性能は改善された。
- ・試体内の表面含浸材濃度を変化させても、吸水性、凍結融解抵抗性にはほとんど影響し

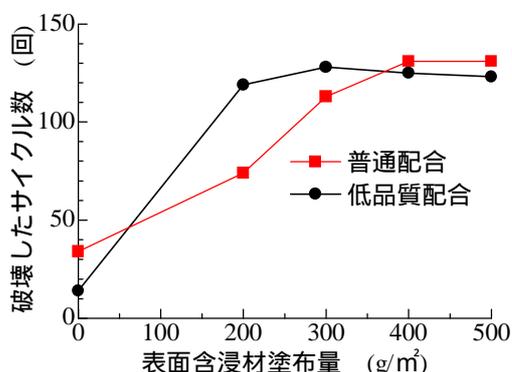


図-11 表面含浸材塗布量と破壊サイクル数

なかった。

・普通配合と低品質配合の 2 種類の配合を比べると、吸水性、凍結融解抵抗性では配合による差は現れなかった。透水性は普通配合に比べ低品質配合の供試体が水をよく通し、配合の影響が現れた。

・撥水層厚さを変化させた供試体での透水試験結果では、低品質配合で撥水層厚さが増大すると透水量は減少した。撥水層厚さを大きくすることは透水性の改善に貢献すると考えられる。

・撥水層自体は凍結融解抵抗性があるが、撥水層を通して水分が非撥水層へ浸透し、凍結融解抵抗性の低い非撥水層の劣化がおりり全体の劣化につながる可能性がある。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

撥水性計測を用いたシリコンゴムとコンクリートの表面性能劣化診断技術の開発」, 所 哲郎, 長尾雅行, 岩瀬裕之, 電気学会論文誌 A, Vol.136, No.9, pp.580-585, 2016.09 DOI: 10.1541/ieejfms.136.580

〔学会発表〕(計 10 件)

「撥水状態の非接触計測によるポリマーがいし材料表面状態劣化診断 技術の開発」, 三輪昌徳, 所哲郎, 長尾雅行, 第 47 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, MVP-14, pp.197-200, 2016.08-31-09-02, 20160901

シラン系表面含浸材によって形成された撥水層のみに着目した性能評価, 岩瀬裕之, 江尾総人, 日比野真子, 査読有り, 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 15 巻 pp.155 ~ 160, 2015.10

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, 岩瀬裕之, 吉村 涼, 査読有り, 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, 2014.10

シラン系表面含浸材により形成された撥水層厚さ推定法の高精度化, 岩瀬裕之, 長屋敬大, 査読有り, 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 13 巻 pp.87 ~ 92

(他 6 件)

### 6. 研究組織

(1)研究代表者

岩瀬 裕之 (IWASE, Hiroyuki)  
岐阜工業高等専門学校・環境都市工学科・教授  
研究者番号: 20160111

(2)研究分担者

所 哲郎 (TOKORO, Tetsuro)  
岐阜工業高等専門学校・電気情報工学科・教授  
研究者番号: 10155525