

令和 3 年 8 月 19 日現在

機関番号：53701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06524

研究課題名（和文）三次元含水率測定方法の開発と多孔質材料表層品質評価への応用

研究課題名（英文）Development of Three-Dimensional Moisture Content Measurement Method and Its Application to Surface Quality Evaluation of Porous Materials

研究代表者

岩瀬 裕之（Hiroyuki, Iwase）

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） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：平行板コンデンサーの静電容量測定原理を利用した等比共面電極を作製した。これを用いてコンクリート表面から、表層と内部の含水状態の差を捉える方法を開発した。電極中心間距離 t と静電容量 C との関係は直線関係が得られ、表層と内部との含水率の差や表層厚さ、内部の空隙によって直線の傾きが変化することが明らかになった。この変化を利用して、シラン系表面含浸材によって形成される撥水層厚さや埋設型枠中の空隙厚さを推定する方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリート構造物の劣化に大きく影響する外部から水分の侵入を抑制するために、シラン系表面含浸材による表層の撥水層への改質や表面に高品質の埋設型枠を設置することなどが効果的である。しかし、耐久性を確保するには撥水層厚さが一定値以上あること、埋設型枠内にコンクリートが充填され空隙が無く一体化していることが要求される。しかし、撥水層厚さおよび型枠内の空隙の存在を非破壊で簡単に確認する方法は無いため、筆者らが開発した等比共面電極と近接センサーを用いて静電容量を測定することで簡単に推定する方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：Equal-ratio coplanar electrodes were fabricated using the capacitance measurement principle of parallel plate capacitors. Using this electrode, we developed a method to detect the difference in water content between the surface layer and the interior of concrete. A linear relationship was obtained between the distance t between the electrode centers and the capacitance C . It was found that the slope of the line changed depending on the difference in moisture content between the surface layer and the interior, the thickness of the surface layer, and the porosity of the interior. Using this change, we developed a method to estimate the thickness of the water-repellent layer formed by the silane-based surface impregnating material and the thickness of air voids in the embedded formwork.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：等比共面電極 静電容量 近接センサー シラン系表面含浸材 撥水層 埋設型枠 空隙

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の劣化には水が大きく影響している。外部から水は塩化物イオンなどの劣化促進イオンなどを含んでコンクリートに浸透し凍害や鋼材腐食などによる劣化を引き起こす原因となる。外部からの浸透を防ぐためには、コンクリート表層を侵入しにくい性質に改質する方法やコンクリート表面に水分を遮蔽する別の板などを設置する方法などがある。

コンクリート表層を改質する方法のひとつとしてシラン系表面含浸材をコンクリート表面に塗布する表面含浸工法がある。シラン系表面含浸材を塗布し浸透させることでコンクリート表面に撥水層を形成させるものである。撥水層の形成により、劣化に繋がる水の浸入を大きく減少させることができる。

また、コンクリート表面に遮蔽性の高い板を設置する方法として、高品質のモルタルやコンクリートで作成された埋設型枠工法がある。工場であらかじめ作成された型枠を工事現場に運搬、組立て、コンクリートを打設する。打設後に型枠をはずさないため、型枠が高品質の材料で作成されていれば、水の浸入を減少させることができる。

表面含浸材工法や埋設型枠工法を使用する場合に次のような問題点がある。

(1) 表面含浸工法

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が、含水率に影響され、塗布量だけでは誤差が生じる。このようなことから、表面含浸工法を適用する場合、撥水層を直接推定する方法が必要である。

(2) 埋設型枠工法

コンクリート打設後も型枠をはずさない埋設型枠が採用されはじめている。高品質で遮蔽性の高い型枠とすることで水分などの侵入を防ぐことができる。

埋設型枠の性能を発揮させるためには、コンクリートが型枠内に密実に充填されていることが重要であるが、型枠表面で空洞などの欠陥が発生することもある。これらの欠陥は施工中には把握しにくく、できるだけ発生させないようにすることが必要であり、可能であればコンクリート打設中に解消しておく必要がある。

表面から撥水層や型枠内部などのコンクリートの状態を把握する方法を開発することが必要である。

2. 研究の目的

撥水層と非撥水層とでは含水率が異なる。また、硬化したコンクリートでできた埋設型枠と内部のフレッシュコンクリートにおいても含水状態が異なる。この表層と内部との含水状態の差をとらえる方法を開発し、表層と内部の品質を評価する方法を開発する。測定は静電容量を用いる。撥水層や硬化したコンクリートは含水率が低く静電容量は小さい、一方、水分を多く含んだ非撥水層やフレッシュコンクリートの静電容量は大きくなる。これらの静電容量を測定し、シラン系表面含浸材でコンクリート内部に形成された撥水層厚さおよび型枠内のコンクリート充填状況を推定する方法について開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 等比共面電極の開発

平行板コンデンサー静電容量の原理を用いて、等比共面電極を開発する。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等比共面電極を複数作製する。 t および S を変化させた電極を複数作成し、静電容量 C を計測する。

この電極を用いて、撥水層と非撥水層が重なった2層モデル構造を模擬した供試体の測定を行う。図-1に示すように、この含水率が高いコンクリート立方体の上に低含水率のケイカル板を載せ、各電極で静電容量を測定する。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層のモデルとする。

t を変化させて静電容量 C を測定し、 t と C との関係を求め、層の厚

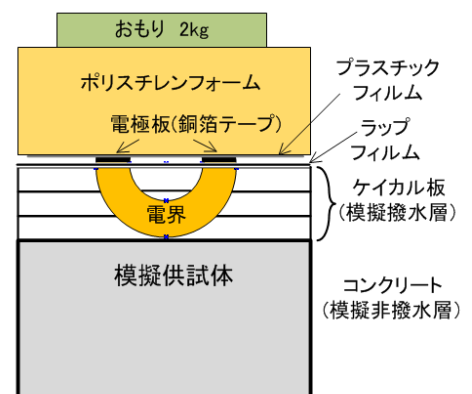


図-1 模擬供試体測定の方法

さや含水状態による変化を検討する。

(2) 撥水層厚さの推定

(1)で求めた2層モデルでの関係を、撥水層を形成した供試体に適用する。含水率が低い撥水層と含水率が高い非撥水層の2層とする。

角柱供試体から切り出したものを絶乾状態にし表面含浸材を塗布する。撥水層を形成後、水浸して供試体内の撥水層と非撥水層に含水率の差をつけた後、等比共面電極で計測する。

(3) 型枠内の充填不良の推定

(2)で検討した2層モデルを3層モデルに拡張し、型枠内の空隙厚さの推定を行う。型枠内に発生する空隙が存在するとして、型枠、空隙としてのスチレンボード、フレッシュコンクリートとしての水性ゲルの3層モデルとして、スチレンボードの厚さを変化させて、等比共面電極で静電容量の変化を計測する。また、型枠の材質についても検討する。

4. 研究成果

(1) 等比共面電極の開発

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。

$$C = \epsilon S / d \quad (1)$$

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

電極の中心から各電極板中心までの電極中心間距離 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る。電極の中心から電極中心間距離 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 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。

図-2に示すような銅箔テープで電極を作製した。電極中心間距離 t は20~90mmとし、 $S/t=100$ として電極板の長さは100mmと一定とし電極板幅を変化させた。

この電極を用いて含水率を一定とした1層モデルとしてケイカル板およびコンクリートの静電容量を測定した。測定結果を図-3に示す。各含水率における電極中心までの距離 t が大きくなっても静電容量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)が変化しなければ静電容量は同じ値となる。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。

次に、含水率6.4%および4.0%のコンクリート立方体の上に含水率の低いケイカル板を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。得られた t と C の関係を図-3に示す

t と C との関係には直線関係が得られた。ケイカル板が1枚と薄い場合には直線の傾きが大きく、重ねる枚数を多くするにつれて傾

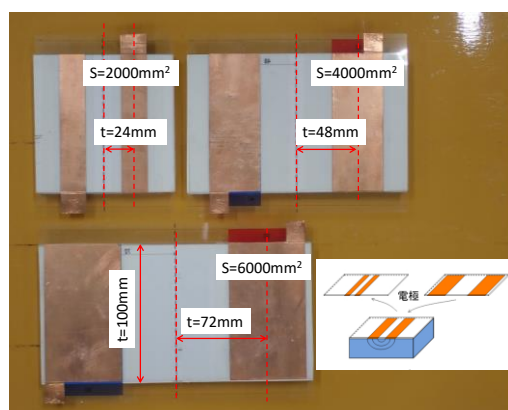


図-2 等比共面電極（従来型）

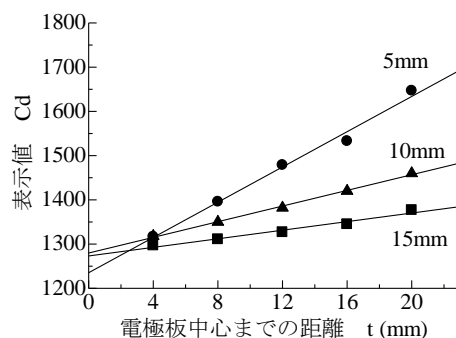


図-3 模擬供試体による表示値 Cd の変化

きが小さくなった。

コンクリートの含水率がおよび重ねるケイカル板の含水率と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-4に示す。それぞれの傾きの逆数 $1/a$ とケイカル板の厚さには直線関係が得られた。

(2) 撥水層厚さの推定

コンクリート表面にシラン系表面含浸材を塗布すると、図-5に示すようにコンクリート内に撥水層が形成される。図-5では、割裂し、その破断面に水性塗料を塗布している。撥水層は水を弾くため着色していない。

撥水層を形成した供試体の静電容量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さとの関係を求めた。

表面含浸材はT社製とD社製のものを用いた。どちらも成分はシラン系で塗布量は $50\text{g/m}^2 \sim 800\text{g/m}^2$ を塗布した。撥水層が形成されるよう4日以上静置した後、供試体を水浸させた。撥水層は含水率が非常に低く、非撥水層は含水率が高い層の2層モデルになる。

模擬供試体と同様に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。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。

各供試体の回帰直線の傾きの逆数と撥水層厚さの実測値との関係を図-6に示す。傾きの逆数と撥水層厚さには模擬供試体と同様に直線関係が得られた。使用する表面含浸材の種類が異なっても、コンクリートの配合が同じであれば同じ直線上にある。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。あらかじめ同じ配合で傾きの逆数と撥水層厚さとの関係を求めておく。現場で表面含浸材を塗布したコンクリート構造物の表面を計測して得られた直線の傾きの逆数を、あらかじめ求めた傾きの逆数と撥水層厚さとの関係に適用することで、未知の撥水層厚を推定できる。

(3) 型枠内の充填不良の推定

予期せぬトラブルでなどの要因で型枠内に空隙などの充填不良が発生することがある。

型枠内の空隙厚さの推定を行った。型枠、空隙、フレッシュコンクリートの3層構造にモデル化される。(1)で示した2層モデルでの t と C との関係性を3層モデルに拡張し、このモデルを用いて型枠内の空隙厚さ推定を行った。

水性ゲルの上に空隙を模したスチレンボードを置き、その上に合板型枠を載せた三層モデルとして計測した。水性ゲルと合板型枠の間に挟むスチレンボードの枚数を変化させて空隙厚さを変化させた。

図-7に電極間距離 t と静電容量 C との関係の一部を示す。三層モデルでも電極間距離 t と静電容量 C とには線形関係が得られた。スチレンボードの厚さが大きくなるほど直線の傾きは小さくなった。

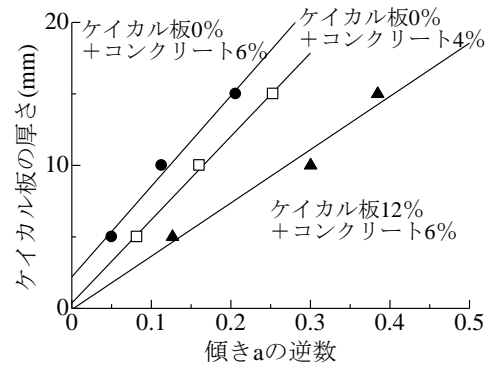


図-4 各含水率における傾きの逆数と厚さ



図-5 形成された撥水層

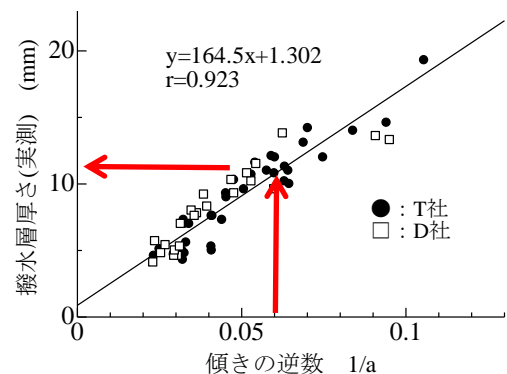


図-6 傾きの逆数と撥水層厚(実測値)

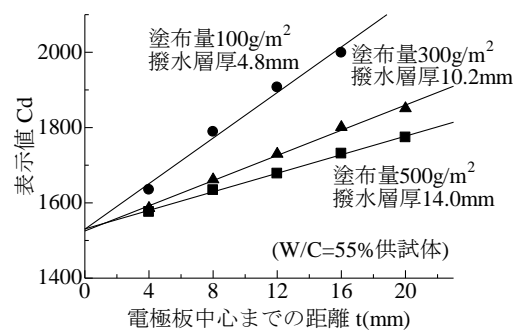


図-7 コンクリート供試体による静電容量の変化

二層モデルで求めた合板型枠と水性ゲルでの回帰直線の傾きを a とし、各スチレンボードの厚さで求めたスチレンボードと水性ゲルでの回帰直線の傾きを b とし、次の式(2)で合成した三層モデルとして傾き c を求めた。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{c} \quad (2)$$

ここで、 a : 合板型枠と水性ゲルでの傾き

b : スチレンボードと水性ゲルでの傾き

c : 合成した傾き

水性ゲル、スチレンボードと合板型枠の三層モデルで求めた回帰直線の傾きの実測値 d とともに表-1 に示す。合成した三層モデルでの傾き c と実測した傾き d とはほぼ同じ値となった。この関係を用いると施工中の型枠とコンクリートとの間の空隙厚さを推定できる。

型枠合板の規格厚さは一定であるため傾き a は一定である。空隙の厚さ（スチレンボードの厚さ）が未知の場合、実測で傾き d を求めれば式(2)より傾き b の値が求まる。空隙の厚さと傾き b の関係をあらかじめ求めておけば、求めた b の値から空洞の厚さが推定できる。

埋設型枠を想定したモルタル板や繊維や鉄筋で補強されたモルタル板でも等比共面電極によって測定した t と C との関係にはいずれも線形関係が得られた。その直線の傾きには型枠厚さ、補強繊維などの材料ばかりでなく型枠含水率も影響した。t と

C との関係を用いて型枠中の空隙を推定する場合、型枠の保管条件で変動する型枠含水率も考慮する必要がある。

表-1 合成した傾きと実測値

スチレン厚さ(mm)	型枠合板の傾き a	スチレンの傾き b	合成した傾き c	実測値 d
5.5	0.128	0.113	0.060	0.056
11.0	0.128	0.068	0.044	0.041
16.5	0.128	0.053	0.037	0.032
22.0	0.128	0.041	0.031	0.028
27.5	0.128	0.032	0.026	0.025
33.0	0.128	0.031	0.025	0.024
38.5	0.128	0.021	0.018	0.025
44.0	0.128	0.021	0.018	0.016
49.5	0.128	0.019	0.016	0.018
55.0	0.128	0.017	0.015	0.021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 岩瀬裕之, 藤村颯飛, 宮崎祥多, 長澤弘樹	4. 巻 42
2. 論文標題 等比共面電極を用いた埋設型枠中の空隙検出方法に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1492-147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩瀬裕之, 武藤丈瑠, 加藤絢子	4. 巻 41
2. 論文標題 等比共面電極と静電容量形近接センサーを用いたコンクリートの充填状況推定方法に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1253-1258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩瀬裕之	4. 巻 39
2. 論文標題 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	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1639-1644
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	所 哲郎 (TOKORO Tetsurou) (10155525)	岐阜工業高等専門学校・その他部局等・教授 (53701)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	犬飼 利嗣 (INUKAI Toshitsugu) (30548326)	岐阜工業高等専門学校・その他部局等・教授 (53701)	
研究分担者	藤田 一彦 (FUJITA Kazuhiko) (40249793)	岐阜工業高等専門学校・その他部局等・教授 (53701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関