

論文 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

岩瀬裕之*1・藤村颯飛*2・宮崎祥多*2・長澤弘樹*2

要旨：等比共面電極と静電容量形近接センサーを用いて埋設型枠内の空隙を検出する方法について検討した。型枠厚さ、材料、含水率、補強繊維の種類、補強鉄筋量などの各条件を変化させると、静電容量の値は変化するが、含水率電極板中心までの距離 t と静電容量 C とにはいずれも線形関係が得られた。型枠とコンクリートの間にスチレンペーパーを空隙として設置したのも線形関係が得られた。回帰直線の傾きの逆数と空隙厚さとは線形関係が得られた。この関係を用いることによって、空隙厚さを推定することができる。

キーワード：埋設型枠、空隙検出、等比共面電極、静電容量、近接センサー

1. はじめに

作業時間の短縮や熟練工不足に対応するための生産性向上の面から脱型作業が省略できるようコンクリートやモルタルで作成された埋設型枠が採用されている。工場等であらかじめ製作された型枠を使用することで現場での型枠組立てやコンクリート打設後の型枠撤去作業が省略出来るため、現場作業時間の短縮をはかることが出来る。断面修復工法にも埋設型枠が使用されており、型枠を設置しグラウトを注入した後の型枠撤去作業を省略することが出来る。また、型枠廃材や仮設材の削減を図ることが出来る。埋設型枠は高強度化したモルタルやコンクリートでできており、施工時のひび割れや欠けの抑制や靱性の向上を図るために有機繊維や鋼繊維で補強したもの¹⁾や、構造性能を高めるために鉄筋で補強したもの²⁾など様々なものが開発されている。

構造物の性能を確保するには、コンクリートやグラウトが型枠内に密実に充填されていることが重要である。本体構造物の一部となる構造部材埋設型枠のみならず非構造部材埋設型枠においても耐久性の面から打設したコンクリートと一体化する必要がある。コンクリートの運搬中や施工中の予期せぬトラブルなどの要因で充填不良が発生し型枠内表面で豆板や鉄筋周辺での内部空洞などの欠陥が発生することもある。脱型しない埋設型枠では打設中や打設後にこれらの欠陥を把握することは出来ない。型枠に小孔を開けておき、そこからモルタルやグラウトが流出することで充填したと判定する方法もあるが、埋設型枠の厚さが大きい場合には流出の確認が困難な場合もある。打設中に充填状態や空隙を把握する方法が必要と考える。

筆者らは**写真-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 が一定であるような等比共面電極群を作製した³⁾。この等比共面電極と静電容量形近接センサーを用いて型枠中のコンクリー

トの充填推定方法を開発した。打設中のコンクリートを模擬した水性ゲルと合板型枠を重ねた供試体で測定したところ、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。この直線の傾きの逆数を用いることで合板型枠中の空隙厚さが推定できることを示した。また、埋設型枠を模したモルタル板でも空隙厚さが推定できることを示した。しかし、埋設型枠を模したものはモルタルのみであり、繊維や鉄筋などで補強したものは行っていない。本研究は、水性ゲルを用いた模擬供試体で、この型枠中の空隙を推定する方法を種々の条件下の埋設型枠に適用し、材料、含水率、補強方法などの条件が静電容量に与える影響について検討するとともに、埋設型枠内表面での空隙が検出可能か検討することを目的とする。さらに、実際のコンクリートおよびグラウトを充填する実験を行い、空隙を検出することを目的とする。

2. 等比共面電極および静電容量形近接センサーの概要

(1) 等比共面電極

等比共面電極群の一部を**写真-1**に示す。プラスチックフィルムの上に銅箔テープを貼り、さらにフィルムを厚さ 5.5mm のスチレンボードに貼り付けて作成した。

測定は平行板コンデンサー静電容量の原理を用いて

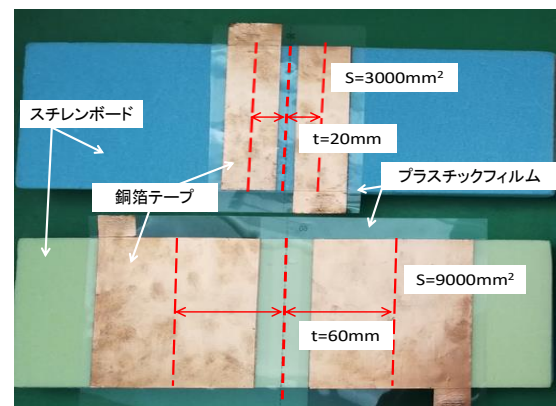
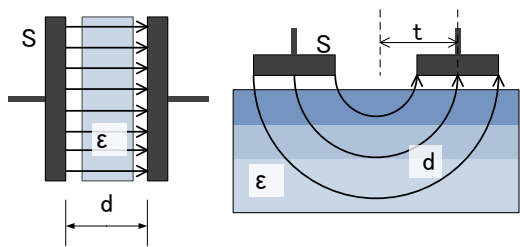


写真-1 等比共面電極群

*1 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*2 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科



(a) 平行板電極 (b) 共面電極
図-1 電極と測定の原理

いる。平行板コンデンサーは図-1(a)に示すもので、静電容量 C は電極板面積 S と電極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 (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

共面電極は図-1(b)に示すように平行板電極が開いて並列に配置された状態である。電極の中心から各電極板中心までの電極間距離を t とし、 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。さらに図-2に示すように電極間距離 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。電極間距離 t に円周率 π を乗じれば電極板間距離 d になる。 S/t (S/d) が一定であるため、式(1)において静電容量 C は深さ方向の誘電率 ϵ を反映した値となると考えた。電極間距離 t は 20~80mm で 10mm 間隔に作成した。

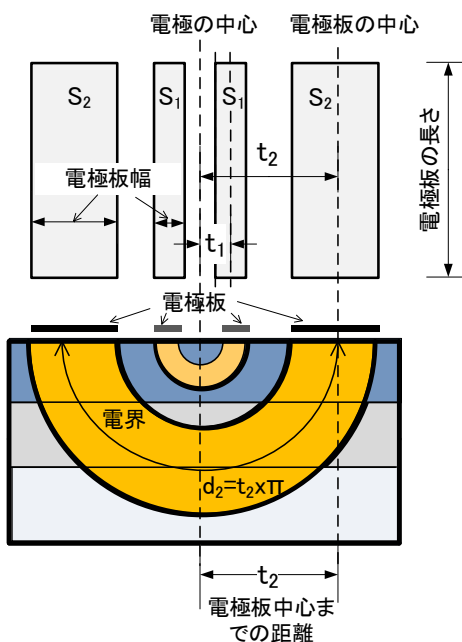


図-2 等比共面電極の概要

(2) 静電容量形近接センサー

静電容量形近接センサーは静電容量の変化を非接触で感知するセンサーである。人の手などの接近検出（近接センシング）や水位検出などに使用されている。検出距離が 50cm 程度までの距離や位置を検出できる高感度のもが開発されている。この実験では T 社製の静電容量センサー評価ボードを使用する。評価ボードに感知部として等比共面電極をつないで測定を行う。

3. 実験概要および結果と考察

3.1 水性ゲルによる等比共面電極の検討

合板型枠を用いた既報の実験³⁾において水性ゲルはフレッシュコンクリート同様に電極間距離 t と静電容量 C とには線形関係が得られており、埋設型枠の実験でも水性ゲルを使用して材料や含水率の影響を検討した。フレッシュコンクリートは水和によって静電容量が変化するが、経時変化のない水性ゲルを使用した。水性ゲルの骨格成分で埋設型枠や重りを安定して支えることができる。水性ゲルは PVA（ポリビニルアルコール）で作成し質量の 10% がゲル骨格成分、87% が水分であり、3% の食塩を含んでいる。

図-3 に示すように、フレッシュコンクリートを模してポリ袋に入れた厚さ 40 mm の水性ゲルを 2 枚重ねたものの上に埋設型枠を置き、その上に等比共面電極を置き、さらにポリスチレンフォームと電極と水性ゲルを密着させるために 2kg の重りを置き静電容量を測定した。ポリスチレンフォームおよびポリ袋には導電性は無い。電極間距離 t の異なる等比共面電極を交換し、 t の変化にともなう静電容量 C を測定した。埋設型枠の配合は水セメント比 $W/C=40\%$ の 1:2 モルタルと、これにポリプロピレン繊維 (PP) と鋼繊維 (SF) を体積で 1% 繊維を混

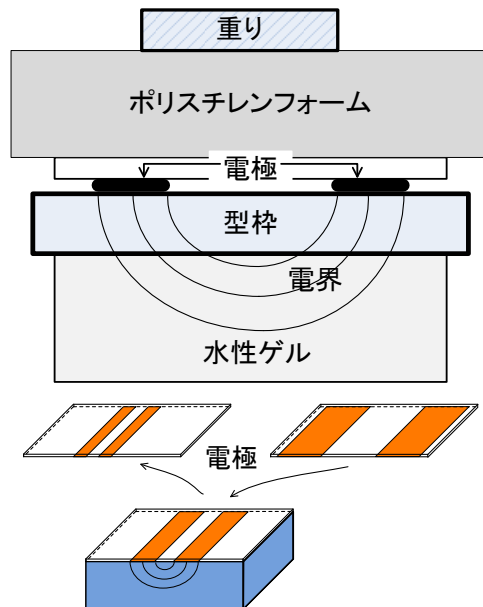


図-3 測定の様子

表-1 配合

	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)								フロー (mm) スランプ (cm)
			W	C (早強)	S1 (粗)	S2 (細)	G	Fiber	AE 剤	高性能 減水剤	
モルタル	40	-	247	616	862	370	0	-	0	0	125×115
ポリプロピレン(PP) 繊維補強モルタル	40	-	245	610	853	366	0	9.1	0	C×0.1%	156×160
鋼繊維(SF) 補強モルタル	40	-	245	610	853	366	0	78.5	0	C×0.1%	143×142
コンクリート	65	40	180	277	500	214	1008	-	C×0.04%	0	11.0

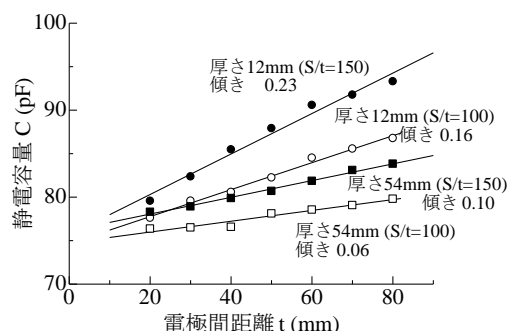


図-4 静電容量に与える電極面積および型枠厚さの影響

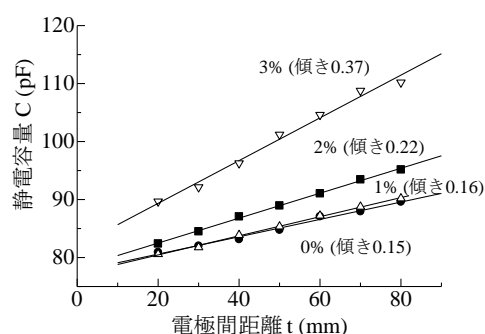


図-5 静電容量に与える型枠含水率の影響

入したものを用いた。使用した繊維は長さ 30 mm , 公称直径 0.5 mm のポリプロピレン繊維 (PP) と長さ 35 mm , 直径 0.55 mm で端部フック付きの鋼繊維 (SF) を使用した。細骨材には長良川産の粗砂 (F.M. 2.76, 表乾密度 2.61) と細砂 (F.M. 1.43, 表乾密度 2.60) を 7:3 の割合で混合したものを用いた。配合を表-1 に示す。寸法 100×100×400mm の供試体を作成し, 28 日水中養生後にコンクリートカッターで切断し所要の厚さの型枠板を作成した。板の厚さはモルタルでは 12,24,28,54,100mm, PP で補強したもの(以下 PP 板)は 27mm, SF で補強したもの(以下 SF 板)は 24mm とした。鉄筋を配筋した厚さ 24mm のモルタル板とフレッシュコンクリートおよびグラウトの用いた空隙の検出に用いた厚さ 30mm の PP 板は切り出しではなく型枠で作成した。

(1) 電極面積および型枠厚さの影響

厚さ 12mm および 54mm のモルタル板を用い電極面積が静電容量に与える影響について検討した。含水率は 1.5%とした。電極間距離 t と電極板面積 S の比 S/t を 100 および 150 とした。電極の長さはどちらも 100mm とした。 t が 20mm の場合 $S/t=100$ では幅 20mm, $S/t=150$ では幅 30mm の電極となる。この 2 種類の等比共面電極を用いて得られた電極間距離 t と静電容量 C との関係を図-4 に示す。

どちらの電極を用いても t と C とには線形関係が得られた。図中に線形回帰した直線の傾きも示す。 $S/t=150$ の電極で求めた直線の傾きは $S/t=100$ のものより傾きは

大きくなっており感度が高くなっている。以下の測定は感度の高い $S/t=150$ の電極を使用することとした。

モルタル板の厚さが大きいほど直線の傾きは小さくなった。既報³⁾でもモルタル板の厚さが大きくなるほど直線の傾きは小さくなっている。

(2) 型枠含水率の影響

埋設型枠を使用するまでの保管状態により含水率が様々な値となると考えられる。型枠含水率が静電容量に与える影響について検討した。厚さ 28mm のモルタル板を用いた。炉乾燥させた後, 質量含水率が 0,1,2,3%となる量の水と一緒にポリ袋に入れ 1 週間以上静置したものをを用いて測定した。測定結果を図-5 に示す。

含水率が変化しても t と C とには線形関係が得られた。含水率が高くなると同じ電極間距離 t に対する静電容量 C は大きくなり傾きは大きくなった。

(3) 補強繊維の影響

埋設型枠には施工時のひび割れ・欠けの抑制や靱性の向上を目的として有機繊維や鋼繊維などが混入されている。混入する繊維が静電容量に与える影響について検討した。モルタル板および SF 板の厚さは 24 mm とし, 含水率は 2%として静電容量を測定した。PP 板は厚さが 24 mm のものを用意できなかったため 27 mm のもので測定した。測定結果を図-6 に示す。どちらの繊維を混入したのもモルタル板と同じく t と C とには線形関係が得られた。鋼繊維(SF)は電気を通す導体であるため, 静電容量の測定に影響を与えたと考えられたが, 傾きがモ

ルタル板のみより大きくなったがモルタル板と同様に

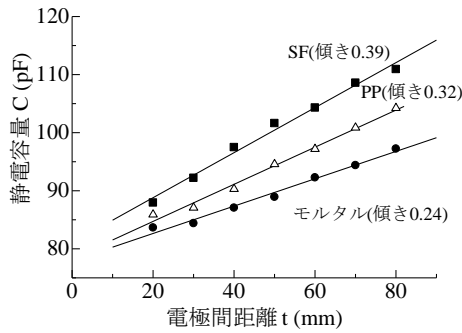


図-6 静電容量に与える補強繊維の影響

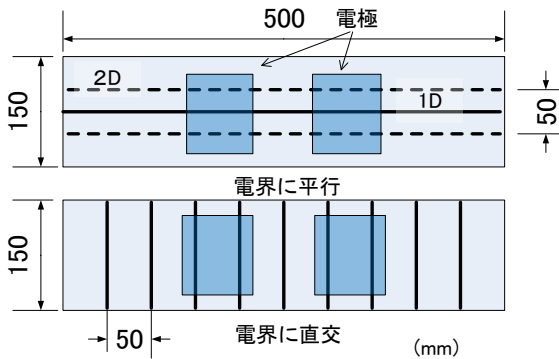


図-7 配筋の様子

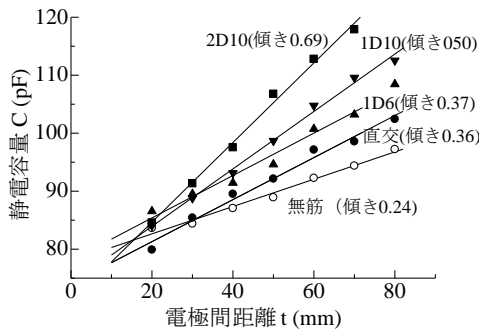


図-8 (a) 静電容量に与える補強鉄筋の影響

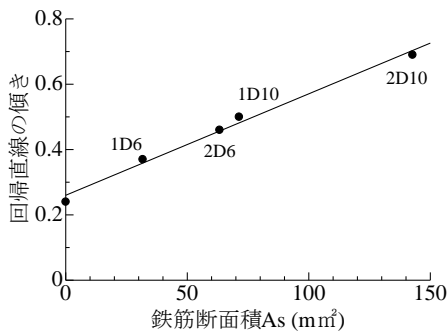


図-8 (b) 鉄筋量と回帰直線の傾き

線形関係が得られた。また PP 板を用いたものも線形関係が得られその傾きはモルタル板よりも大きくなった。

(4) 補強鉄筋の影響

鉄筋はコンクリート中に分散している鋼繊維と異なり、連続した導体となる。埋設型枠中の補強鉄筋が静電容量に与える影響について検討した。

縦 150×横 500×厚さ 24 mm のモルタル板に、図-7 に示すように電極により発生する電界と平行に D6, D10 の異形鉄筋を 1 本または 2 本配置した。1 本のもは中心に、2 本のもは中心から 25 mm ずつ離れた位置に配置した。また、電界と直交方向に D6 の鉄筋 9 本を 50 mm 間隔で配置した。含水率は鉄筋の質量を減じたモルタルのみの質量に対して 2% とした。

測定結果の一部を図-8 (a) に示す。いずれも線形関係が得られた。電界と平行に鉄筋を配置したものは、鉄筋断面積が多くなるにつれて直線の傾きは大きくなった。鉄筋断面積と回帰直線の傾きとの関係を図-8 (b) に示す。鉄筋断面積と傾きには線形関係が得られた。電界と直交方向に鉄筋を配置したものは無筋のものより大きくなったが、鉄筋を平行方向に配置したものは傾きは小さかった。電極直下にある鉄筋は電極間距離 t が 20~50 mm で 1 本、 t が 60~80 mm では 2 本となるが、回帰直線にはその影響が現れなかった。

以上より各条件の下で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。以後に記す 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。

3.2 水性ゲルを用いた埋設型枠中の空隙の検出

厚さ 1 mm のスチレンペーパー (以下 SP) を模擬空隙として水性ゲルと埋設型枠の間に挿入し、空隙の検出を行った。埋設型枠にコンクリートの打設を想定した場合と、断面修復を想定して埋設型枠とコンクリートの間にグラウトを注入することを想定した。

(1) コンクリートの打設を想定した場合の空隙の検出

一般的なコンクリートの打設を想定し、水性ゲルの上に埋設型枠のみを設置したものと埋設型枠と水性ゲルとの間に厚さ 1 mm の SP を 1 または 3 枚を挿入したものを等比共面電極で静電容量の変化を測定した。型枠は厚さ 12 mm, 100 mm のモルタル板および厚さ 27 mm の PP 板で行った。型枠の含水率は 2% とした。

測定結果を図-9 (a) (b) に示す。SP を挿入した場合でも t と C とには線形関係が得られた。厚さ 12 mm のモルタル板の場合、SP を挿入しないものの回帰直線の傾きは 0.50 であったが、厚さ 1 mm の SP を挿入したものの傾きは 1 枚では 0.28, 3 枚では 0.15 となり、SP の厚さが大

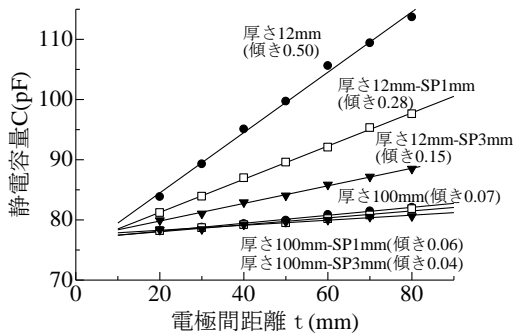


図-9 (a) 静電容量に与える空隙の影響(モルタル板)

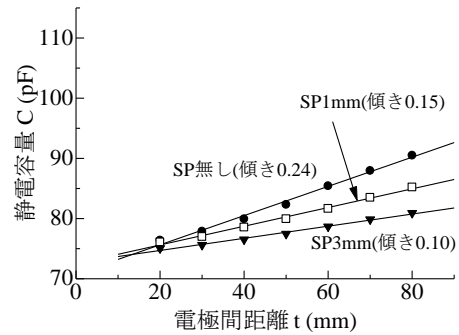


図-9 (b) 静電容量に与える空隙の影響(PP板)

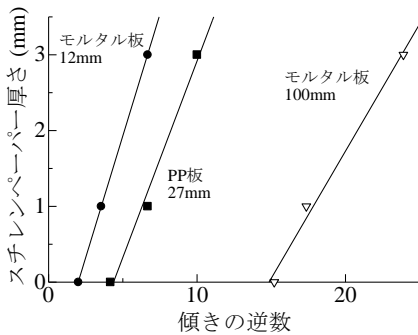


図-10 傾きの逆数と SP 厚さの関係(水性ゲル)

きくなれば傾きは低下した。厚さ 27 mm の PP 板では、SP を挿入しなかったものの回帰直線の傾きは 0.24 であったが、挿入することにより 0.15, 0.10 と低下した。厚さ 100 mm のモルタル板では 0.07 から 0.06, 0.04 へと低下した。埋設型枠の厚さが 12 mm のものの回帰直線の傾きは大きく変化したが、型枠厚さが大きくなるにつれて、傾きの変化は小さくなった。厚さ 100 mm のモルタル板では傾きの変化が小さいが、電極面積を大きくするなどの改良を行うことで傾きの変化を大きく捉えることができると思われる。

各回帰直線の傾きの逆数と SP 厚さとの関係を図-10 に示す。同じ型枠であれば回帰直線の傾きの逆数と SP の厚さとは線形関係が得られた。等比共面電極を用いて回帰直線の傾きの逆数と空隙の厚さ (SP の厚さ) との関係をあらかじめ求めておけば、打設現場で回帰直線の傾きを求め、その逆数を用いて未知の空隙厚さを検出することができる。また、傾きの逆数に閾値を設定しておき、閾値を下回れば充填されたと判断することができる。

(2) グラウトの注入を想定した場合の空隙の検出

埋設型枠を使用した断面修復工法を想定し、型枠と基板コンクリートの間に水性ゲルと SP を挿入した供試体を等比共面電極で測定した。基板コンクリートとして厚さ 100mm で含水率 6% のコンクリート板として、埋設型枠として厚さ 27mm, 含水率 2% の PP 板を用いた。コンクリートの配合は表-1 に示す。基板コンクリートと埋設型枠の間に厚さ 24mm の水性ゲルを設置した場合、お

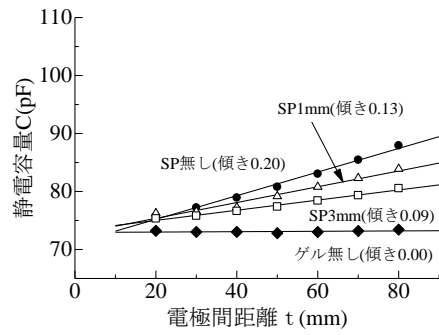


図-11 静電容量に与える空隙の影響(水性ゲル)

よび水性ゲルと埋設型枠との間に厚さ 1mm の SP を 1, 3 枚挿入した場合、水性ゲルも SP も設置しない場合について測定した。

図-11 に測定結果を示す。t と C には線形関係が得られた。埋設型枠と基板コンクリートとの間に水性ゲルのみの場合では回帰直線の傾きは 0.20 となり、SP の厚さが大きくなるにつれて 0.13, 0.09 と小さくなり、空隙を検出することができた。水性ゲルを挿入しない場合は直線の傾きは 0 であった。一般的なコンクリートの打設と同様にグラウト注入を想定した場合でも空隙の検出ができた。

3.3 コンクリートおよびグラウト用いた埋設型枠中の空隙の検出

3.2 で用いた水性ゲルの代わりに実際にフレッシュコンクリートおよびグラウトを用いて空隙の検出を行った。

(1) フレッシュコンクリートを打設した場合の空隙の検出

硬化後のコンクリートの寸法が縦 650×横 350×厚さ 100mm となるように合板で作製した型枠をテーブルバイブレータの上に設置し、その上に縦 650×横 300×厚さ 30mm の PP 板の埋設型枠をのせ、50mm の隙間から振動をかけながらコンクリートを打設した。PP 板の内側には吸水調整剤を塗布し、コンクリート打設中や測定中に PP 板がフレッシュコンクリートから水分が移動し単位水量の低下や型枠の含水率が増加しないようにした。また、型枠内側には SP を 1, 3 枚貼付し空隙とした。また

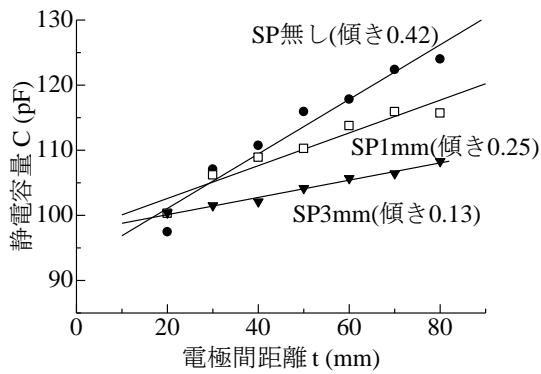


図-12 静電容量に与える空隙の影響(コンクリート)

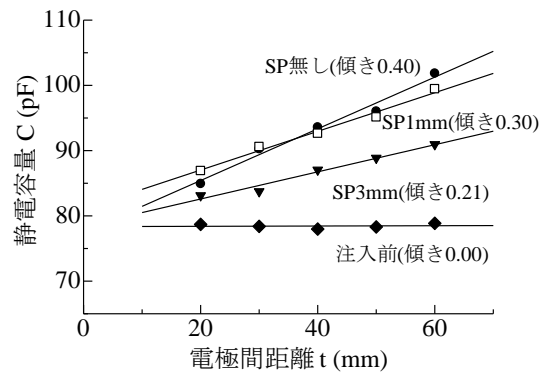


図-13 静電容量に与える空隙の影響(グラウト)

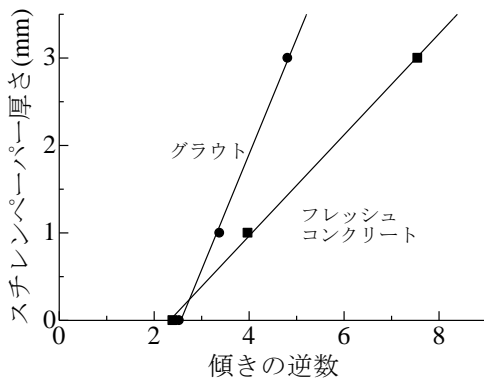


図-14 傾きの逆数と SP 厚さの関係

未貼付の部分も設けた。

図-12 に測定結果を示す。水性ゲルを用いた場合と同様に線形関係が得られ、SP の厚さが大きくなるにつれて傾きは小さくなった。

(2) グラウトの注入した場合の空隙の検出

(1)で作製したコンクリートを基板として(材齢7日)、この上に24mmの角材を介して(1)で使用したものと同じ寸法のPP板をおき24mmの空洞を設けた。埋設型枠を支えるための角材を設置したため空洞幅は240mmとなる。供試体は約10度傾けグラウトを注入した。PP板の含水率は2%とした。基板のコンクリートの含水率は測定していない。埋設型枠には(1)と同様にSPを空隙として設置した。グラウトはプレミックス型の無収縮モルタルを使用した。練り混ぜ水量は取扱説明書にある最大の水量とし、セメント系無収縮材25kgに対して4.9kg混入した。コンシステンシーは測定していない。空洞の幅が240mmであるため、電極間距離tが60mmまでの電極を用いて測定した。

図-13 に測定結果を示す。水性ゲルを用いた場合と同じく、空隙厚さが大きくなるにつれて回帰直線の傾きは小さくなった。また、注入前の回帰直線の傾きは0であった。フレッシュコンクリートおよびグラウトを用いた場合の静電容量は水性ゲルを用いた場合に比べて大きな値となった。埋設型枠の含水率などの条件ばかりでなく

コンクリートやグラウトなどの打設する材料も静電容量の測定値に影響する。

フレッシュコンクリートおよびグラウトを打設して求めた回帰直線の傾きの逆数と設置したSPの厚さとの関係を図-14に示す。水性ゲルを用いた場合と同じく回帰直線の傾きの逆数とスチレンパーパーの厚さとは線形関係が得られた。

まとめ

等比共面電極と静電容量形近接センサーを用いて埋設型枠内のコンクリートの充填状況を推定する方法について検討した。型枠厚さ、材料、型枠含水率などの各条件を変化させると、静電容量の値は変化するが、電極板中心までの距離tと静電容量とはいずれも線形関係が得られた。型枠とコンクリートの間にSPを空隙として設置したのも線形関係が得られた。回帰直線の傾きの逆数と空隙厚さとは線形関係が得られた。この関係を用いることによって、未知の空隙厚さを推定することができる。実際の現場打設と同じ条件で空隙厚さと傾きの逆数との関係をあらかじめ求めておき、現場で測定した傾きの逆数を代入して空隙の厚さを推定できる。また、傾きの逆数に閾値を設定しておき、閾値を下回れば充填されたと判断することができる。

参考文献

- 1) 松林卓, 坂口伸也, 原夏生, 三島徹也: ビニロンファイバー混入コンクリート製埋設型枠の構造性能に関する検討, コンクリート工学年次大会論文報告集, 26号, pp.757-762, 2004.7
- 2) 河野一徳, 篠田佳男, 安同祥, 清宮理: ステンレス筋を補強材としたPCa埋設型枠の開発, 土木学会第66回年次学術講演会, V-458, pp.915-916, 2011.9
- 3) 岩瀬裕之, 武藤丈瑠, 加藤絢子: 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, コンクリート工学年次大会論文報告集, 41号, pp.1253-1258, 2019.7