# 論文 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

岩瀬裕之\*1·武藤丈瑠\*2·加藤絢子\*2

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と静電容量 形近接センサーを用いて型枠表面から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検討した。打 設中のコンクリート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。さらに鉄筋が存在する場合で もかぶり部分では空隙厚さが推定できることを示した。

キーワード:等比共面電極,静電容量,近接センサー,充填状況推定,埋設型枠

#### 1. はじめに

コンクリート構造物の性能を確保するには、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。 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。これらの 欠陥は施工中には把握しにくく、コンクリート硬化後に 型枠をはずして初めて明らかになるか、脱型後も表層コ ンクリートに覆われ目視では確認できないこともある。 最近では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。埋設型枠はコンクリートの充填状況は脱型後 も把握できない。しかし、埋設型枠と充填コンクリート との間に空隙を発生させずに一体性を確保する必要があ り、何らかの方法で確認しておく必要があると考える。

型枠外側から高周波静電容量を測定しコンクリート の充填状況を判定する方法が報告されている<sup>1)</sup>。厚さ 12mmのウレタン塗装合板や厚さ 10mmのアクリル板の 型枠内側に空隙や模擬豆板を設置して高周波静電容量セ ンサーを用いて測定した結果,空隙厚さが 20mm までの 範囲内で充填状況を判定できるとしている。

筆者らは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 を作製した。この電極と高周波容量式水分計を用いてシ ラン系表面含浸材によって形成される撥水層厚さの推定 方法を提案した<sup>2)</sup>。

本研究はこの等比共面電極と高周波容量式水分計の代 わりに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することを目的とする。こ れを埋設型枠に模したモルタル板などにも適用可能かを 検討する。さらに鉄筋の影響についても検討する。

# 2. 静電容量形近接センサーおよび等比共面電極の概要 (1) 静電容量形近接センサー

静電容量形近接センサーはスマートフォンのタッチス クリーンのような電極と人の指などとの間に発生する静 電容量の変化を非接触で感知するセンサーである。これ まで検出距離が数 mm と小さく低感度であったが、検出 距離が約 50cm までの距離を検出できる高感度のものが 自動ドアのセンサーなどの用途として開発されており、 この実験では T 社製のセンサー評価ボードを使用する。 評価用プログラムも公開されており、パソコンに接続し 静電容量を計測できる。評価ボードに感知部として等比 共面電極をつないで計測を行う。

#### (2) 等比共面電極

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  $\varepsilon$ 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。

$$C = \varepsilon \frac{s}{d} \tag{1}$$

ここで, C (F) 静電容量

S (m<sup>2</sup>) 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 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

\*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



図-1 電極と測定の原理

ように電極の中心から電極間距離 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。距離 t に円周率  $\pi$  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  $\epsilon$  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。作成した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 けた。電極間距離 t は 20~90mm で 10mm 間隔に作成し た。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。既報<sup>20</sup>では t が 4~20mm の浅い領



図-2 等比共面電極の概要



写真-1 等比共面電極群

域を対象とするものであったが,さらに深い領域にも対 応可能かを検討し,その後充填推定方法を検討する。

#### 3. 実験概要および結果と考察

#### 3.1 等比共面電極の検討

#### (1) 一層モデル

等比共面電極を用いて、ウレタン塗装型枠合板、モル タル板、スチレンボードの静電容量を測定した。それぞ れ合板型枠,埋設型枠、空隙を想定している。厚さ12mm の型枠合板は4枚、厚さ5.5mmのスチレンボードは10 枚重ねたもの、モルタル板はW/C=40%の1:3モルタルで 厚さ100mmのものを炉乾燥させて絶乾状態として測定 した。合板型枠は気乾状態のものを測定した。

周辺からの電気的なノイズの影響を少なくするため 断熱材用のポリスチレンフォームを2枚重ねた上に測定 する供試体を置き,その上に電極を置き,さらにポリス チレンフォーム4枚,電極と供試体を密着させるために 2kgの重りを置いた。測定結果を図-3に示す。

各材料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  $\varepsilon$  が変化 しなければ静電容量は同じ値となる。

(2) 二層モデル(型枠合板およびコンクリート)

型枠中のコンクリートを想定して、図ー4に示すよう に練り上がったフレッシュコンクリートをビニール袋に 入れその上に型枠合板を置いて静電容量を測定した。コ ンクリートは W/C=50%とし単位水量を 160 と 190kg/m<sup>3</sup> の2種類とした。コンクリートおよびモルタルの配合を 表-1に示す。粗骨材は長良川産の玉砕石(最大寸法 15mm,表乾密度2.62)を用い、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。また、 フレッシュコンクリートの静電容量は水分が水和に消費 され変化する経時変化があるため<sup>3</sup>、常に同じ条件で計



図-3 各材料の電極間距離と静電容量の関係

	W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
			W	C (早強)	S1 (粗)	S2 (細)	G	AE 剤	高性能 減水剤	スランプ(cm) フロー(mm)
コンクリート W160	50	40	160	320	504	216	986	C×0.04%	C×0.08%	8.0
コンクリート W190	50	40	190	380	468	201	1008	C×0.04%	0	11.0
モルタル	40	_	214	534	1121	481	0	0	C×0.05%	121x115

表一1 配合

測できるようフレッシュコンクリートを模した水性ゲル を作成し、水性ゲルを敷きその上に型枠合板を置いたも のも測定した。水性ゲルはPVA(ポリビニルアルコール) で作成し質量の87%が水分である。水性ゲルの静電容量 は、今回3%の食塩を含む水性ゲルとしたところ約220pF であった。コンクリートは単位水量160kg/mのものは約 180pF,190kg/mのものは約190pFであった。水を入れた ビニール袋でも測定したが液体では不安定になり測定に 支障をきたしたため、ある程度の荷重が支えられる骨格 構造を持つ水性ゲルを使用した。

測定結果を図-5に示す。コンクリート,水性ゲルと も静電容量Cと電極間距離tとには線形関係が得られた。 静電容量の大きいフレッシュコンクリートや水性ゲルの



図-4 二層モデル測定の様子



図-5 電極間距離と静電容量との関係 (コンクリートおよび水性ゲル)

上に静電容量の小さい型枠合板を置く二層モデルとする と傾きが現れた。単位水量が大きいと静電容量も大きく なっている。また、水性ゲルの静電容量はコンクリート よりも大きな値であるが、経時変化がないため安定した 計測ができることから、今後の測定はコンクリートの代 わりに水性ゲルを使用することとした。

(3) 二層モデル(モルタル板およびスチレンボード) 水性ゲルの上にモルタル板およびスチレンボードを置 く二層モデルとしモルタル板の厚さおよびスチレンボー ドの重ね厚さを変化させた。モルタル板の厚さは 18,32, 47,76,100mm とし,スチレンボードは 1~10 枚を重ねて 厚さは 5.5~55mm とした。

図-6にモルタル板の測定結果の一部を示す。型枠合板と同様に静電容量Cと電極間距離tとには線形関係が得られた。モルタル板が厚くなるほど直線の傾きは小さくなった。スチレンボードでも同じ傾向を示した。電極間距離tと静電容量Cの各測定値で回帰分析を行い直線の傾きa、切片b、決定係数R<sup>2</sup>を求め表-2に示す。モルタル板およびスチレンボードの厚さが大きくなると直線の傾きaは小さくなり反比例の関係となった。傾きの逆数1/aを用いれば1/aと厚さは正比例の関係になると考えた。各厚さにおける直線の傾きの逆数1/aとモルタル板およびスチレンボードの厚さとの関係を図-7に示す。各材料において傾きの逆数と厚さとには線形関係が得ら



図-6 電極間距離と静電容量の関係(モルタル板)

	モル	タル板		スチレンボード				
厚さ (mm)	傾き a	切片 b	決定 係数 R2	厚さ (mm)	傾き a	切片 b	決定 係数 R2	
18	0.154	81.05	0.995	11	0.068	77.77	0.994	
32	0.087	80.46	0.994	22	0.041	77.33	0.990	
47	0.061	78.13	0.996	33	0.031	77.41	0.997	
76	0.039	78.01	0.981	44	0.021	75.76	0.969	
100	0.028	78.70	0.797	55	0.017	76.09	0.975	

表-2 厚さと回帰直線の各値



図-7 傾きの逆数 1/a と厚さの関係

れた。既報<sup>2)</sup>では高周波容量式水分計を用いて撥水層の 厚さが約15mmまでの比較的浅い層で線形関係が得られ ていたが、等比共面電極と近接センサーを用いれば 50mmを超える領域でも線形関係が得られた。この測定 システムを用いて型枠内のコンクリート充填推定を行う。

#### 3.2 コンクリート充填推定の検討

### (1) 型枠近傍の空隙推定(三層モデル)

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等比共面電 極で静電容量を計測した。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 5.5~



図-8 電極間距離と静電容量との関係(三層モデル)

55mm に調整した。

図-8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。

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として 次の式(2)で合成した三層モデルとして傾きcを求めた。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{c} \tag{2}$$

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-3に示す。 また,合成した傾きcと実測値dの関係を図-9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とには 線形関係が得られた。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の関係を図-7のようにあらかじめ求め ておけば,求めたbの値から空洞の厚さが推定できる。

厚さ32mm,76mmと100mmのモルタル板を用いて同様 に合成した傾きcと実測値dとの関係を図-10に示す。 厚さ32mm,76mmのモルタル板でも型枠合板と同様に線 形関係が得られた。モルタルなどで作成された埋設型枠 でも型枠中の空隙厚さが推定できる。しかし厚さが 100mmのモルタル板では測定で得られる傾きは小さく なり推定が困難であった。電極板の面積Sや電極間距 離tを大きくした電極にするなどして感度を上げ,さら に深い位置まで精度良くする必要があると考える。

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

表-3 合成した傾きと実測値



図-9 合成した傾きと実測値との関係(型枠合板)



# 図-10 合成した傾きと実測値との関係 (モルタル板)

## (2) 内部空洞の推定(四層モデル)

型枠表面ではなくコンクリート内部に発生した内部 空洞を想定して、水性ゲルの上に置いたスチレンボード と型枠合板との間に厚さ25mmの水性ゲルをはさみ静電 容量を測定した。スチレンボードの厚さを0~55mmに 変化させた。電極間距離tと静電容量Cとの関係の一部 を図-11に示す。スチレンボードの厚さに関わらず各直 線はほぼ重なっており、内部空洞は推定できなかった。 型枠の傾き等により型枠側からコンクリートが充填され ていく場合にはこの等比共面電極による方法は適用でき



図-11 電極間距離と静電容量との関係(内部空洞)

ず他の方法の検討が必要である。

(3) 鉄筋の影響

電気を通しやすい鉄筋が静電容量計測に与える影響 について検討した。(a)コンクリートが全く充填されてい ない状態,(b)コンクリートは型枠内部に充填されている が鉄筋には届いていない状態,(c)コンクリートが鉄筋位 置まで充填されているがかぶり部分は未充填の状態の3 つの状態を想定した。鉄筋を電界と平行に配置した状態 で(a)(b)(c)の検討を行い、電界と直交に配置した状態では (b)のみを行った。図-12 に鉄筋の配置状況を示す。電界 と平行に配置した状態では2枚のスチレンボードの間に 縦11×90mmの間隙を設け、鉄筋として直径10mmのス テンレス丸鋼を1~3本配置した。電界と直交に配置した 状態では、2枚のスチレンボードの間に 11×11mm の間 隙を 40mm 間隔に配置し直径 10mm の丸鋼を 1~7 本配 置した。(a)ではポリスチレンフォームの上にスチレンボ ードを10枚置き、その上に丸鋼を配置したスチレンボー ド、型枠合板を置き測定した。型枠表面から丸鋼中心ま での距離 A は 11mm になる。(b)では水性ゲルの上に丸鋼 を配置したスチレンボード、型枠合板を置いた。丸鋼を 配置したスチレンボードと水性ゲルおよび型枠合板の間 にスチレンボードを挿入し型枠から丸鋼中心までの距離 A,鉄筋中心から水性ゲルまでの距離 B を変化させた。 鉄筋中心から型枠までの距離Aおよび鉄筋中心から水性 ゲルまでの距離 B は 11,22,33mm である。(c)では厚さ 22mmの水性ゲルの中心に丸鋼を3本配置したものを作 成した。丸鋼を配置した水性ゲルと下部の基板とした水



(a) 電界と平行



(b) 電界と直交 図-12 鉄筋の配置状況

測定	鉄筋	水性ゲル	型枠表面から 鉄筋中心まで の距離 A(mm)	鉄筋中心から 水性ゲルまで の距離 B(mm)	鉄筋本数					
条件	条件 方向	の有無			0	1	2	3		
(a)		無	11	_	0.006	0.019	0.024	0.031		
		有	11	11	0.025	0.021	0.026	0.030		
	電界と	有	11	22	0.018	0.022	0.028	0.032		
(b) 平行	平行	有	11	33	0.013	0.026	0.036	0.042		
		有	22	11	0.019	0.021	0.024	0.021		
			有	33	11	0.018	0.020	0.021	0.022	
						1	3	5	7	
(b)	電界と 直交	有	11	11	0.042	0.043	0.043	0.046	0.040	

表-4 回帰直線の傾き(型枠空隙中に鉄筋がある場合)

表-5 回帰直線の傾き(水性ゲル中に鉄筋がある場合)

測定 4 条件 5	鉄筋	スチレンボー ドの位置	スチレンボードの厚さ(mm)						
	方向		0	5.5	11	22	33	44	
(c)	電界と 平行	鉄筋上部	0.126	0.062	0.040	0.016	0.011	0.008	
		鉄筋下部	0.126	0.119	0.125	0.118	0.124	0.119	

性ゲルとの間および上部の型枠合板との間にスチレンボ ードを挿入した。それぞれ電極間距離 t と静電容量 C の 関係を求め,回帰直線の傾きを求めた。結果を表-4, 5に示す。

型枠中にコンクリートが充填されていない状態すなわ ち水性ゲルがない状態(a)では鉄筋が存在すると傾きは 大きくなり鉄筋本数の増加とともに大きくなった。コン クリートは型枠内部に充填されているが鉄筋には届いて いない状態(b)では、型枠から鉄筋までの距離 A が 11mm と一定の場合,鉄筋本数の増加にともなって傾きが大き くなった。また,鉄筋中心から水性ゲルまでの距離 B が スチレンボードを入れて大きくなるとすなわち空隙が大 きくなると傾きが大きくなった。3.1(2)に示したような 無筋の場合は空隙が大きくなると傾きは小さくなるが, 鉄筋が存在すると逆の現象が現れた。鉄筋が電界と直交 に配置された場合は、鉄筋の本数にかかわらずほぼ同じ 傾きであった。静電容量の測定には型枠中の鉄筋が影響 すると考えられる。しかし、使用した鉄筋は直径 10mm の丸鋼1種類のみであり,鉄筋が与える影響については, 鉄筋径や配筋状態などさらに検討する必要がある。

コンクリートが鉄筋位置まで充填されている状態すな わち水性ゲル中に鉄筋がある状態(c)では、鉄筋と型枠の 間に空隙がある場合は空隙の厚さが増加するとともに傾 きは小さくなった。表-2の無筋の場合と比較すると、 空隙の厚さの増加に伴う傾きの減少は鉄筋がある場合は その割合は小さくなったが、無筋の二層モデルと同じく 傾きの逆数と空隙の厚さは線形が得られた。有筋の場合 でもコンクリートが鉄筋位置まで充填されていれば、鉄 筋の存在の影響は受けるが、型枠と鉄筋との間のかぶり 部分に充填状態を推定する方法は適用できると考える。 鉄筋と基板となる水性ゲルとの間に空隙が有る場合は空隙の厚さおよび鉄筋の存在に関わらず傾きはほぼ一定となり,無筋の内部空洞がある場合(四層モデル)と同じく鉄筋および空隙の存在の影響は現れなかった。

# 4. 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模 擬材料を用いて検討した。

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、この直線の傾きの逆数を用いることで型枠中 の型枠表面にある空隙の厚さが推定できることを示した。 合板型枠ばかりでなくモルタルなどで作成された埋設型 枠でも推定できた。また、鉄筋が存在する場合でもかぶ り部分では空隙厚さが推定できることを示した。しかし、 コンクリート内部にある空隙の存在は推定できなかった。

今後,模擬材料ではなくコンクリートを用いた供試体 で充填状況を推定する方法を検討していく予定である。

#### 参考文献

瀬古繁喜,三井健郎,結城秀恭,中川裕巳:型枠面での高周波静電容量測定によるコンクリート充填状態の判定に関する研究,コンクリート工学年次大会論文報告集,29号,pp.697-702,2007.7

2) 岩瀬裕之: 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, コンクリート工学年次大会論文報告 集,39 号,pp.1639-1644, 2017.7

 (3)藤倉裕介:静電容量の変化によるコンクリートの圧縮 強度の推定手法に関する基礎的検討,土木学会第67回年 次学術講演会概要集,CS8-013,pp.25-26, 2012.9