

報告 静電容量型グラウトセンサーシステム開発の基礎実験

(株)安部工業所 正会員 工修 ○辛 軍青
 (株)安部工業所 正会員 堅田 茂昌
 (株)横浜システム研究所 立石 和雄
 東北大学大学院工学研究科 工博 鈴木 誠

1. はじめに

PC グラウトは、PC 鋼材の防食および PC 鋼材とコンクリート部材間の一体性を確保する重要な役割を担っており、その品質や施工の良否により PC 構造物の耐久性に大きな影響を与える。

近年、PC グラウトの充填は、材料及び施工技術の進歩により確実に向上しているが、想定外のヒューマンエラーやトラブルなどにより充填不良が発生した場合、その事実の確認や事後の補修には相当の時間とコストが必要となる。PC グラウトが確実に充填されたことを保証するため、グラウト作業中に充填状況を精度良くリアルタイムで検査することが要求される。

従来、グラウトの充填確認は排気口・排出口にて目視で検査する方法がある。しかし、この手法ではシース内部の状況確認が困難である。最近、シースに取付けたセンサーによる充填確認手法が報告されたが¹⁾、これらの確認手法ではセンサーをシースの内部に取付ける必要があり、PC 鋼材挿入及び緊張時にセンサー検出部が損傷の恐れがあるなど、普及に多数の課題が残されている。

筆者らは、グラウト充填時にシース内物質の誘電的变化を利用する静電容量型センサーシステムを提案した。静電容量型センサーはシース内充填物のわずかの变化も捉える精度が良いセンサーとなる可能性がある。また、検出部をシースの外壁に取付けるかシース壁に埋め込むことができ、PC 鋼材挿入等による破損が発生せず、実構造物を計測する際の安全性、確実性が確保される。今回、本提案システムのグラウト充填度検査への適用性に関して基礎的な検証実験を実施したので、その実験結果をここに報告する。

2. 計測原理

静電容量型センサーシステムの概念図を図-1に示す。本センサーシステムは、シース外壁に一定距離を隔てて二つの金属製センサー電極を設置し、片方(送信側)に高周波発信器によって交流電圧 V_s を印加し、もう一方(受信側)を経由して検出器のアンプにより受信信号強度に比例した電圧 V_r を出力する。

この場合、図-2の等価回路図に示す受信信号電圧 V_o と発信器信号電圧 V_s の関係は次式となる：

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}}$$

ここで、アンプの入力抵抗 R_1 と発信信号の角速度 ω ($\omega=2\pi f$) は一定値であるため、 V_o は電極対間の静電容量 C にしか左右されない。空気の比誘電率 1 に対してフレッシュグラウトは水 (80) に近い比誘電率を持つため、グラウト充填時に電極対間の静電容量が大幅に変化することになる。本センサーシステムはこの原理を利用したものであり、出力電圧値より精度が良くかつリアルタイムで充填状況を判断できる。

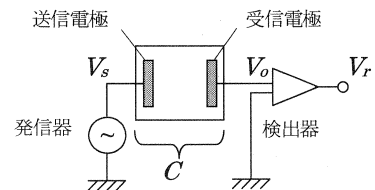


図-1 システム概念図

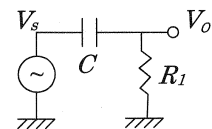


図-2 システムの等価回路図

3. 確認実験

3.1 測定装置及び測定方法

図-3に示すように、本センサーシステムは信号発生・出力、センサー電極、信号の検出・変換および読み取り・記録の四つの部分からなっている。

高周波発信器からセンサー電極の送信側に周波数455kHzの交流電圧を与え、受信側を経由して検出器により電圧を出力し、データロガーおよびパソコンにより記録する。

3.2 供試体概要

供試体図を図-4に示す。また、主な使用材料は以下となる。

(1) センサー電極：1セットは2枚の銅箔を使用し、シース外壁の上部にて軸方向（長さ方向）にて平行に設置する。寸法は長さ100mm×幅10mm×厚み0.03mmであり、電極間距離は20mmとした。また、リード線は同軸ケーブルを使用した。

(2) シース：充填状況を確認しやすいため、アクリル樹脂製の透明パイプを使用し、寸法は外径80mm×厚み3mm×長さ300mmとした。アクリル樹脂製の比誘電率(3.5~4)は空気に近いので、グラウト充填の判定に影響しないと考えられる。

(3) シールド銅箔：外界の電氣的なノイズを遮断する目的で、シースの外側に直径120mm、厚み0.1mmの銅箔をシールドとして設置した。シールドとシースとの間にスポンジ材を充填している。

(4) グラウト：配合はW/C=45%の標準配合設計²⁾を使用した。供試体を水平状態に設置し、グラウト充填作業は自然流下式により行い、グラウト液面とセンサー電極の距離を一定に保持しながら充填した。

(5) PC鋼材：φ12.7mmの鋼より線12本を使用した。

4. 実験結果

4.1 グラウト充填時の実験結果

図-4に示した供試体シース内に、グラウトを未充填からフル充填まで徐々に充填した場合、グラウト充填度と出力電圧値との関係性を求めた。

実験結果は図-5に示すように、シース内のグラウト高さが高くなるにつれて、出力電圧値が小さくなっていく傾向が見られる。これはグラウトの比誘電率は空気の比誘電率よりはるかに大きいため、静電遮蔽効果により出力電圧値が小さくなったと考える。また、事前に本実験供試体をモデル化して電位分布を求める解析を実施し、解析結果と実験結果を比較するとほぼ同じ傾向を示すことが分かる。

したがって、事前にグラウト充填のキャリブレーションによりグラウトの充填度と出力電圧値との関係曲線を把握すれば、解析検証を加えて、実測値との比較により充填度を高い精度で推測することができる。

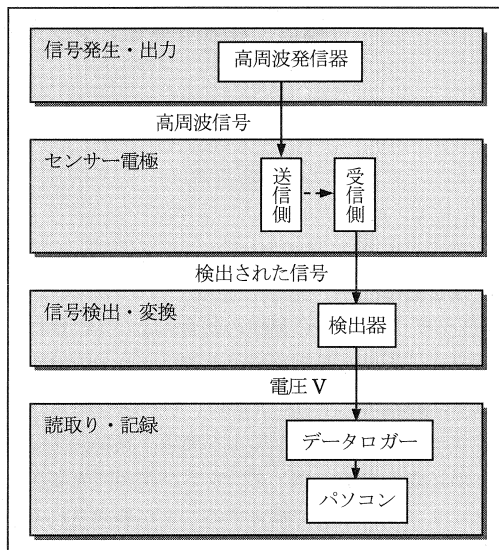


図-3 グラウトセンサーシステムの構成

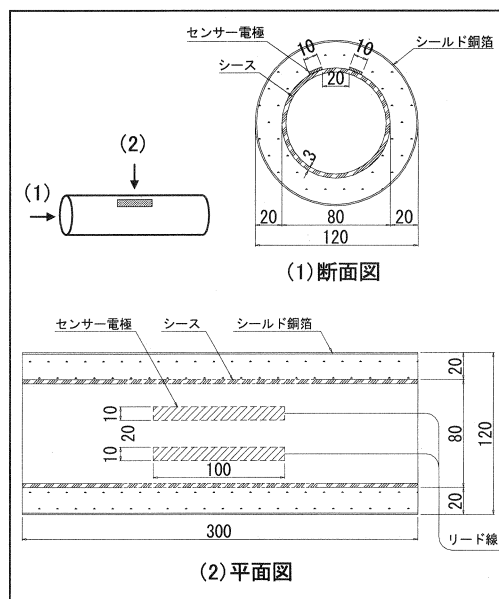


図-4 供試体図 (単位: mm)

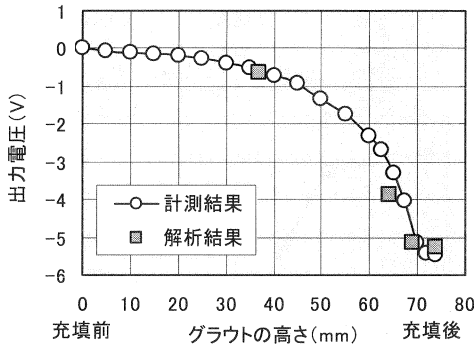


図-5 グラウトの高さと出力電圧値の関係

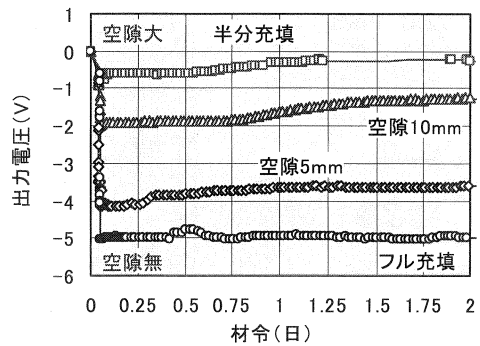


図-6 出力電圧値の経時変化

4.2 グラウト充填後の経時変化

表-1 各供試体のパラメーターと計測結果

試体番号	充填状況	グラウトの高さ	空隙の高さ	空隙率	主な計測結果 (V)			
					充填前	充填直後	充填6時間後	充填2日後
1	半分充填	37mm	37mm	50%	0	-0.610	-0.614	-0.279
2	空隙 10mm	64mm	10mm	13%	0	-1.933	-1.887	-1.372
3	空隙 5mm	69mm	5mm	7%	0	-4.109	-3.992	-3.601
4	フル充填	74mm	0mm	0%	0	-5.024	-4.990	-4.986

グラウト充填度が異なった供試体4種類を作成し、充填前から硬化後までの出力電圧値の経時変化を確認した。供試体パラメーターと主な計測結果を表-1に、各供試体の出力電圧値の経時変化を図-6に示す。なお、実験状況を図-7の写真に示す。

実験結果について、充填直後に各供試体は出力電圧値が急に減少し、充填率が高いほうは減少量も大きかったことを確認した。更に、出力電圧値は充填6時間以内ではほぼ変化がなく、充填2日後まで最大0.5V程度の増加を示したが、グラウト充填による出力電圧値の減少量と比べて極めて小幅であり、また時間経過とともに安定化していく特徴があるため、充填度を判別する時に無視できると考えられる。また、この出力電圧値増加の原因は、グラウト中の一部の水分は水和反応中に消費され、グラウトの比誘電率が多少変化を起こしたと考える。



図-7 実験状況の写真

4.3 PC鋼材配置の影響

PC鋼材は接地した導体であり、シース内の電位分布に影響する恐れがある。対策を検討するため、PC鋼材配置位置を底部、中央、上部の3種類の供試体を作成し、グラウト充填実験を行った。

実験結果を「鋼材なし」の結果と合せて図-8に示す。まず、PC鋼材は底部、中央に配置する場合、「鋼材なし」の結果と比べ充填初期に若干差が出たが、グラウト充填度の判断に影響しないと考える。一方、「鋼材は上部」の方は、当初に変化量が小さく、グラウト充填度の判明が不明確であった。これに対して、信号検出器の増幅率を充填前の初期値を最大になるように調整すると、他ケースに近い結果が得られた。

このように、本センサーシステムを現場計測に応用する場合、PC鋼材緊張後、グラウト充填前に、各センサーの出力電圧値が最大となるようにセンサーごとに検出器の増幅率を設定すると、PC鋼材の有無、配置位置によらずグラウトの充填度を十分な精度で検出できると考える。

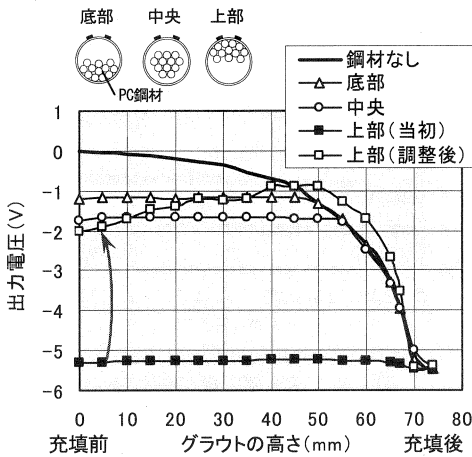


図-8 PC鋼材の影響

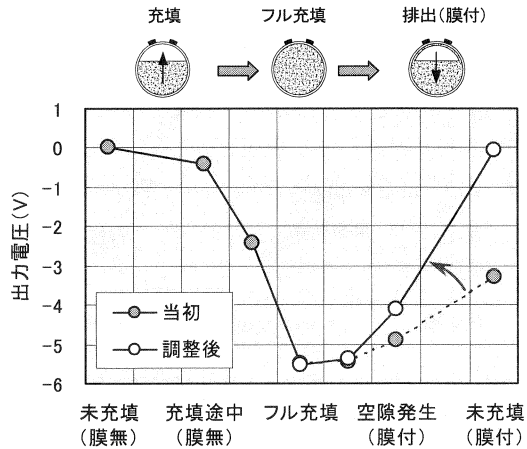


図-9 グラウト膜の影響

4.4 グラウト膜の影響

グラウトを充填する際に、センサー電極が取付ける位置にて一度に全断面充填された後に空隙が発生することも想定できる。この場合、シース内壁面に粘性があるグラウトは膜状で付着し、シース内空隙を検出するのに障害する恐れがある。これに対して、グラウトを内壁に付着させた供試体を作成して対策を検討した。

実験結果を図-9に示す。実験は最初に膜がない状態でグラウトをフル充填まで充填し、出力電圧値は前述の実験結果と同様に減少したことを確認した。その後、膜が付いた状態でグラウトを排出し、シース内に空隙を生成させた。その際に充填度の減少に伴い出力電圧値が上昇することが確認されたが、変化量は膜がない状態より少なかった。これに対して、信号検出器の増幅率を適切に調整すると、膜がない場合と同様な精度で充填度を判断することができる。

このように、本センサーシステムを実用する場合、グラウト充填中に出力電圧値がフル充填を示す最小値に達した後に、検出器の増幅率調整により、一度フル充填後に発生する空隙も検出できると考える。

5. まとめ

- 1) 充填中：グラウト充填中に、出力電圧値の変化からグラウト充填度を判明することができ、センサーシステムの有効性を確認した。
- 2) 経時変化：出力電圧値の経時変化は小幅であり、充填度判別に影響しない。
- 3) PC鋼材の影響：充填前の検出器設定により、シース内のPC鋼材の影響を校正できる。
- 4) グラウト膜の影響：充填中の検出器設定により、シース内壁面に付着するグラウト膜の影響を校正できる。

以上の静電容量型グラウトセンサーの基礎実験結果により、本センサーシステムは充填度検知に有効であることが確認できた。今後は、確認実験の結果を踏まえ、将来予想される現場計測を念頭におき、システムの製品化、自動化などを目的として現実的な試験・研究を実施していくことを考える。

参考文献

- 1) 正司明夫ほか：センサーによるグラウト充填の確認方法に関する検討，第12回プレストレストコンクリートに関するシンポジウム論文集，pp49 - 52，2003
- 2) (社) PC建設業協会：PCグラウト&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル，pp16，2002