

報告 静電容量によるPCグラウト充填度確認手法の基礎的研究

辛 軍青*¹・堅田 茂昌*²・立石 和雄*³・鈴木 誠*⁴

要旨：PC 構造物における PC グラウトの充填度検査が必要となっている。そこで、静電容量測定による検査システムを考案した。これは、PC グラウトの充填度によりシース管内の誘電的、導電的变化を利用したものである。本システムの性能確認に関する基礎実験を実施し、その有効性を確認した。

キーワード：PC グラウト，充填度，静電容量，センサー

1. はじめに

プレストレストコンクリート構造物における 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。これらの役割を果たすためには、シース管内に PC グラウトを完全に充填することが要求される。

近年、国内外で PC グラウトの充填不良に起因した既存構造物の劣化事例が報告されており、新設工事時に PC グラウトの充填状況をリアルタイムで確認することが望まれている。

これまで、シースに取り付けたセンサーによる充填確認手法が報告され、すでに橋梁の新設工事に応用されている事例もある^{1), 2), 3)}。しかし、これらの確認手法では、グラウトの充填度判別にある程度有効であったが、グラウトの充填率などまでは判別できていない。

そこで本研究は、より正確に、容易に判別できるグラウト充填度確認手法を開発する目的で、グラウト充填時にシース管内の誘電的、導電的变化を利用した検査システムの適用性について検討した。

2. 計測原理

本センサーシステムは、シース管外壁に取り付けたセンサーにより、シース管内の空気およびグラウトの誘電率と導電率の違いを電気的手法で計測することによって、グラウトの充填状況を把握するものである。

計測原理については、図-1のシステム概念図に示すように、シース管に一定距離を隔てて二つのセンサー電極を取り付け、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)から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。

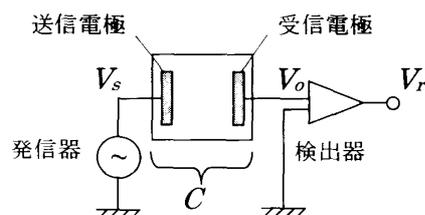


図-1 システム概念図

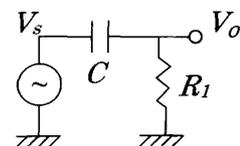


図-2 システムの等価回路

- *1 (株) 安部工業所 技術開発部 工修 (正会員)
 *2 (株) 安部工業所 技術開発部次長 (正会員)
 *3 (株) 横浜システム研究所 代表取締役
 *4 東北大学 大学院工学研究科金属工学専攻教授 工博

この場合、受信信号強度は二つの電極間の静電容量に依存する。具体的には、図-2の等価回路図に示す受信信号電圧 V_0 と発信器信号電圧 V_s の関係は次式となる：

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{R_1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} \quad (C \text{ は誘電率成分と導電率成分を含む})$$

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_0 は電極対間の静電容量 C にしか左右されない。

空気の誘電率 1 に対してフレッシュグラウトは水 (80) に近い誘電率を持つため、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、出力電圧値より非接触かつリアルタイムで充填状況を判断できる。

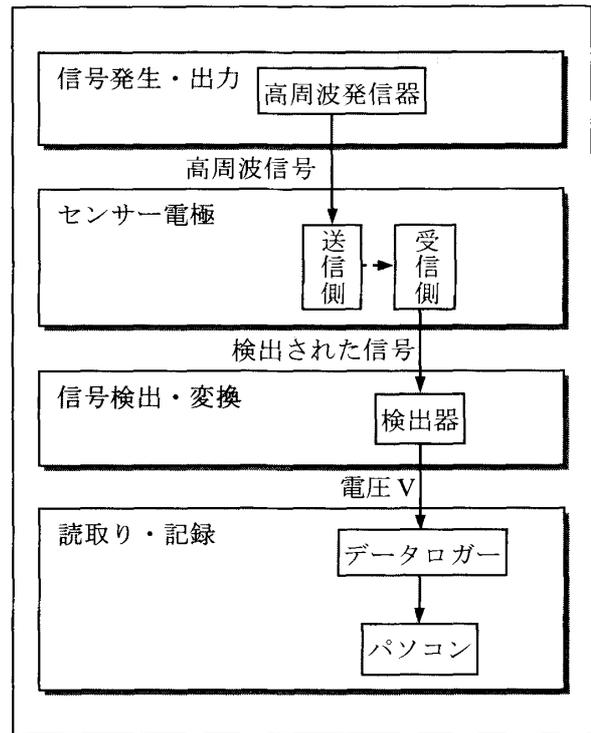


図-3 グラウトセンサーシステムの構成

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、シース外壁にて軸方向に取り付ける。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 1.5m の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。

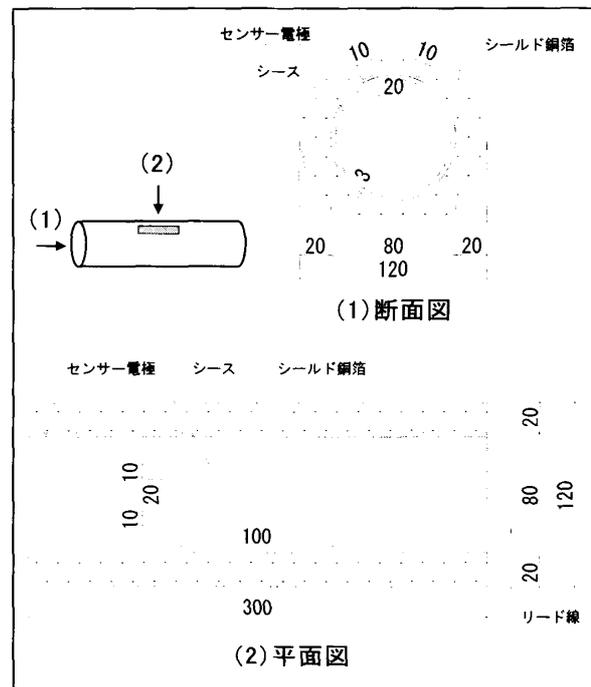


図-4 供試体図 (単位：mm)

表-1 グラウト配合 (参考文献4) により

水セメント比	水 (kg)	セメント (kg)	混和剤 GF-1700(kg)
45%	45	100	1.0

注) 混和剤は材料分離を抑制する目的で使用した。

(3) シールド銅箔：外界のノイズを遮断する目的でシースの外側に設置し、シースとの間にスポンジ材を充填している。寸法は直径 120mm×厚み 0.1mm である。

(4) グラウト：配合設計を表-1に示す。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：12S12.7 の鋼より線を使用した。

4. 実験結果

4.1 グラウト充填時の検討

PC グラウトを充填する際にセンサー電極対間の静電容量の変化を把握するため、解析的シミュレーションおよび充填実験を行い、両者の結果を比較した。

4.1.1 解析による検討

PC グラウトの充填度が変化する時の電位分布を求める目的で解析を行い、センサー電極対間の静電容量変化を調べた。解析は図-4に示す実機の幾何形状をモデル化し、差分計算によって静電容量を計算した。ここで、プラスチック製シース管の誘電率は 2.5 とした。

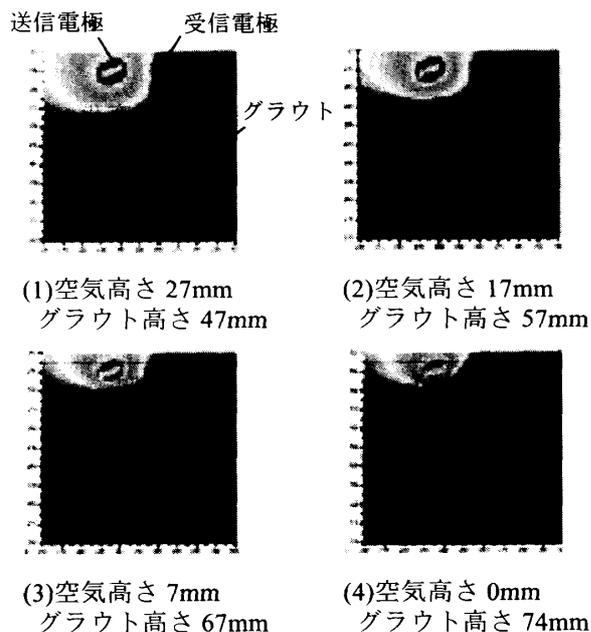


図-5 グラウト充填時の電位分布コンター図

解析により得られた、空気の高さ 27mm, 17mm, 7mm, 0mm の 4 つの場合の電位分布を図-5に示す。また、図における濃淡の違いは電位分布の変化を表している。

4.1.2 グラウト充填実験による検討

図-4に示した供試体シース管内に、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、出力電圧値によりグラウトの充填度の違いを検知できるかを確認した。

充填実験の結果として、グラウトの高さと出力電圧値の関係を解析結果と併せて図-6に示す。ここで示す解析結果は出力電極位置の電位分布を電圧に変換したものであり、また、比較しやすいため初期値（充填率 0%）は実験結果の初期値と一致させた。

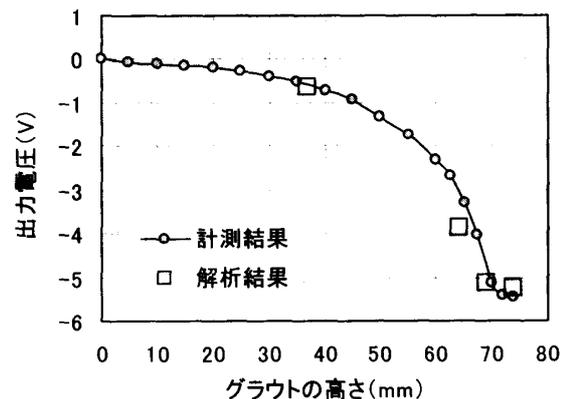


図-6 実験結果と解析結果の比較

実験結果によると、シース管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。これはグラウトの誘電率は空気の誘電率よりはるかに大きいいため、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。

さらに、解析結果は実験結果とほぼ同じ傾向を示すことが分かる。したがって、シース直径などを考慮した事前解析によってあらかじめ未充填部の出力電圧値の特性曲線を把握し、実測値との比較によりその位置の充填度を推測することができる。

4.2 グラウト充填後の実験結果の経時変化

グラウト充填度が異なった供試体をそれぞれ作成し、グラウト硬化後までの出力電圧値の経時変化を確認した。各供試体のパラメーターを表-2に、実験状況を図-7の写真に示す。

実験により得られた各供試体の出力電圧値の経時変化を図-8に示す。ここで、各供試体におけるグラウト充填前の初期値は $0 \pm 0.5V$ の範囲内であったが、比較の簡便性を考え、すべて $0.0V$ とした。また、初期値の差異はセンサーなどの供試体の製作時に発生するバラツキによるものとする。

まず、充填直後の各供試体の出力電圧値を見るといずれも急激に減少し、充填率が高いほうが減少量が大きくなることを確認した。この結果は図-6の充填時実験結果と一致している。

次に、グラウト充填後から硬化までの経時変化を見ると、出力電圧値は多少増加する動きを示した。ただし、増加量は材令2日間で最大 $0.5V$ 程度であり、また時間とともに安定化していく特徴があり、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さく、充填度を判別する時に無視できると考える。

この出力電圧値増加の原因については、充填後のグラウトに水和反応に伴って水分が減少し、誘電率が変化したと考える。また、グラウトの水和反応に必要な水分以外に、余剰水分は硬化後のグラウトにも残っており、硬化後のグラウトの誘電率はフレッシュ状態と大きく変化していなかったため、出力電圧値の増加量が小さかった原因であるとする。

4.3 PC 鋼材配置の影響

PC 鋼材は接地された導体であり、グラウト内の電位分布に大きく影響するため、その影響を実験により確認し、対策を検討した。

供試体については、図-9に示すように、PC 鋼材配置位置を底部、中央、上部の3種類を作成し、グラウト充填実験を行った。

表-2 各供試体のパラメーター

充填状況	グラウトの高さ	空隙の高さ	空隙率
半分充填	37mm	37mm	50%
空隙 10mm	64mm	10mm	13%
空隙 5mm	69mm	5mm	7%
フル充填	74mm	0mm	0%

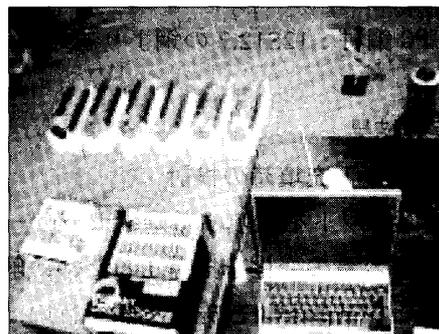


図-7 実験状況の写真

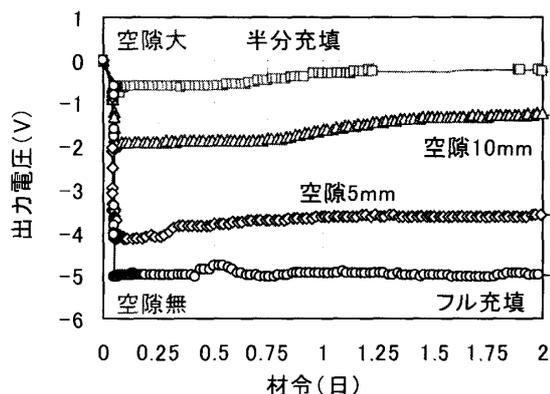


図-8 出力電圧値の経時変化



図-9 PC 鋼材の配置図

実験結果を図-10に示す。ここで、参考のため、PC 鋼材を配置しない供試体の実験結果も示した。これによると、PC 鋼材は底部、中央に配置する場合、グラウト充填前後の出力電圧値変化量は鋼材なしの場合と若干差があるが、グラウト充填度の判断に影響しないとする。

一方、PC 鋼材をシース管上部に配置すると、グラウト充填量に対して出力電圧値の変化量が小さく、グラウト充填度が不明確となるため、計測手法やデータ処理手法を見直す必要がある。

上記三種類の供試体実験を実施する時、PC 鋼材の配置位置に係らず信号検出器には同じ増幅率を設定していた。しかし、センサーごとで増幅率を設定すると、各計測位置の出力電圧値の変化量を最大化することができる。つまり、**図-11**に示すように「鋼材は上部」の実験データを増幅校正すると、「鋼材は底部」と近い結果が得られる。

このように、本確認手法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、各計測位置の出力電圧値が最大となるよう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。

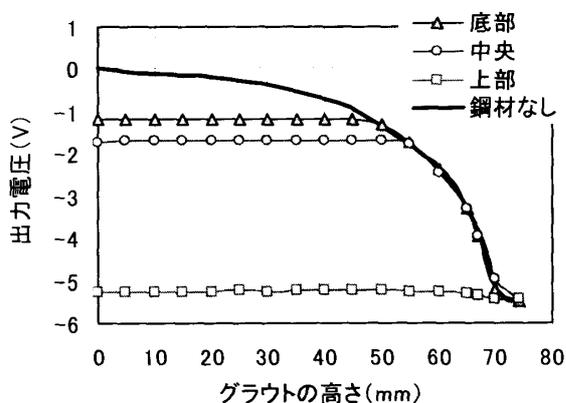


図-10 PC 鋼材の影響 (校正前)

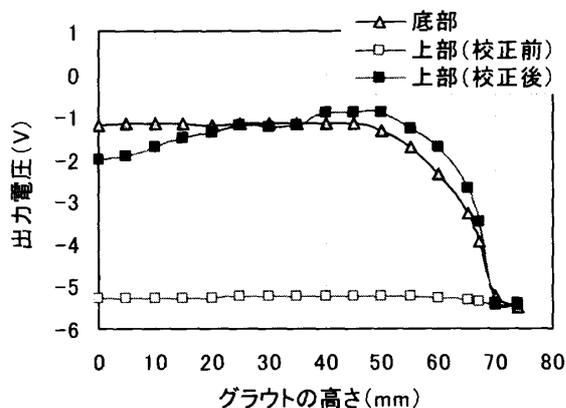


図-11 PC 鋼材の影響 (校正後)

4.4 温度の影響

外気温の変化はセンサー電極対間の静電容量にどんな影響を及ぼすかを実験で検証した。シース管内にグラウトをフル充填して約1週間に渡って計測した結果を**図-12**に示す。

実験した結果、出力電圧値は外気温の日変動によって波状となり、その原因は供試体を構成する材料自体の線膨張特性と関連すると考える。さらに、出力電圧値と外気温の関係を調べると(**図-13**)、今回の実験の範囲内に限られるが、両者はおおよそ以下の線形関係が成り立つ。

$$V(\text{出力電圧値}) = 0.06 \times T(\text{温度})$$

よって、本確認手法を現場計測に応用する場合、計測期間中の温度変化が小さい場合、温度の影響が無視できる。温度変化が激しい場合にも、上式のように出力電圧値から温度が影響する部分を線形補正することが可能である。

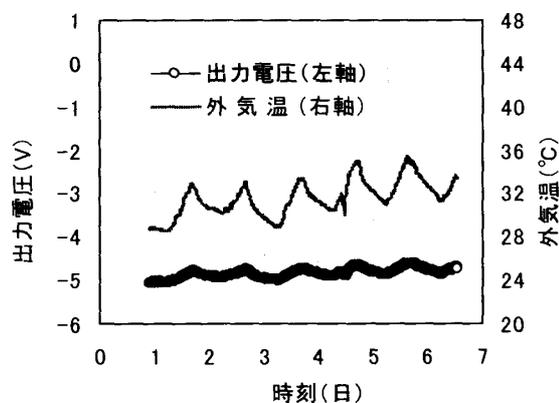


図-12 出力電圧値と外気温の経時変化

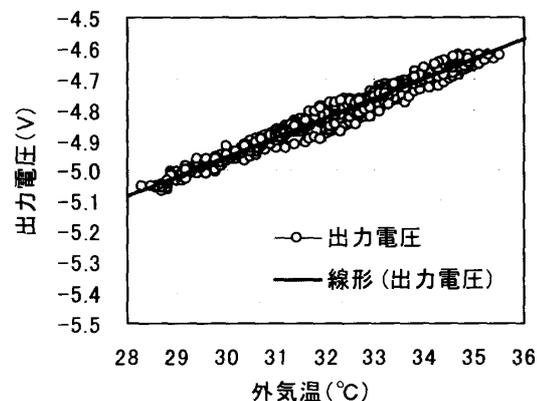


図-13 出力電圧値—外気温の関係

5. 実施工時の本確認手法の適用

実施工において、PC グラウトの充填を管理する目的で、本センサーシステムを現場計測に適用できる。

図-14 に一例として、新設橋梁の PC 上部工を計測対象とした計測イメージ図を示す。センサー電極と一体化されるカップラーシースを、充填不良が発生しやすいとされる個所にあらかじめ設置しておき、信号発生・検出器を経由して、市販のデータロガーおよびパソコンで計測管理が容易にできる。

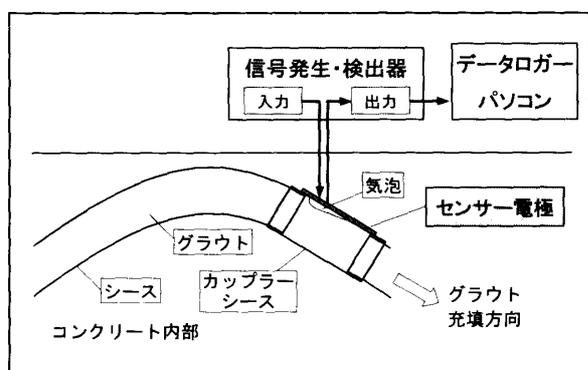


図-14 実施工時の計測イメージ図

センサー電極は使い捨てとなるが原理が簡単のため、同じく使い捨て型のセンサーと比べて、容易に入手できる銅箔の簡単な加工によって、センサーを容易に生産でき、取り付け作業も特別のノウハウを必要としない。

また、現状で実用化しているセンサーには、直接グラウトと接触しなければ計測できない特徴があり、センサーを必ずシース壁の内側に取り付けするため、グラウト充填前、PC 鋼材挿入時にセンサーが破損することなどがある。一方、本センサーシステムはカップラーシース壁の外側に付けるか壁に埋め込むため、現場作業による破損が発生しにくく、長期計測にも適用可能である。

今後、実用化実験によりセンサー電極の最適寸法を検討し、よりコンパクトなセンサーが作られると予想する。

6. まとめ

本研究は PC グラウト充填時のセンサー電極対間の静電容量の変化を利用するグラウト充填度確認手法について検討を行い、本システムは充填度検知に有効であることが確認できた。

- (1) グラウト充填実験の結果、出力電圧値はグラウト充填度により変化することを確認し、解析の結果と比較して両者は一致した。
- (2) 出力電圧値の経時変化について、水和反応に起因する水分変化により、計測結果は若干変化したが、時間と共に安定化になるため、充填度判別に影響しない。
- (3) シース管内の PC 鋼材配置は計測結果に影響することを確認したが、充填前の検出器設定により校正することが可能である。
- (4) 外気温は出力電圧値に多少影響するが、温度変化が大きい場合に、出力電圧値を線形補正することができる。

以上の確認実験の結果を踏まえ、本センサーシステムは性能が優れてかつ容易に判別するものであり、十分実用化になる可能性があると考えられる。

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) 立田修司ほか：鳥取自動車道 千代川橋 グラウト施工の報告，第 13 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，pp561-564，2004
- 3) 坂田康行ほか：超低粘性型 PC グラウトの第二東名高速道路矢作川橋主桁部への適用，第 13 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，pp129-132，2004
- 4) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル，pp16，2002