

# 論文 フレッシュコンクリートの電気的特性と振動伝播特性を利用した充填と締固め振動の検知に関する研究

山田 勉\*1・海野 雄士\*2・伊代田 岳史\*3

**要旨：**山岳トンネルの覆工コンクリート打込み時に目視困難となる天端部の充填状況および締固め程度をリアルタイムに監視することを目的に、フレッシュコンクリートの電気的特性と振動伝播特性を利用したシート状センサを考案し、適用性を確認するための基礎的実験を行った。その結果、電気的特性の違いにより、空気、ブリーディング水およびフレッシュコンクリートを識別することで、コンクリートの充填判定が可能と考えられた。また、締固め時にバイブレータ振動部からフレッシュコンクリートへ伝播する振動の周波数および振幅が捉えられる可能性が示された。

**キーワード：**シート状センサ、覆工コンクリート、充填、締固め、電気的特性、振動伝播特性

## 1. はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリートは、坑内にセントル（移動式型枠）を設置し、吹付けコンクリート面に敷設された防水シートとセントル面板の間にコンクリートを打ち込んで構築される。側壁および肩部は、セントルに設けられた検査窓を利用して一般的なコンクリート構造物と同様に目視しながら打込みおよび締固めを行う。一方、天端部（アーチ部）は、検査窓を閉じて吹上げ方式による打込みとなるため、充填・締固めの目視確認が困難である。このため、天端部の充填完了は、コンクリートの予定数量と実施数量の比較、妻型枠（通常、木矢板）の隙間からのブリーディング水やモルタルの流出程度等をもとに判断している。また、天端部の締固めは、天端引抜き式バイブレータ等の特殊なバイブレータを用いる事例が多くなっているが、所定のスピードで引き抜く等の対応にならざるを得ず、十分な振動が覆工コンクリート背面まで伝播したか否かは目視確認することはできない。これらの施工条件が原因で、覆工コンクリート天端部背

面への空洞や脆弱部の形成、コールドジョイントの発生および色むら等の品質上の問題が生じる場合があった。

このような背景から、コンクリートの充填・締固めを監視するセンサが利用される事例が多くなっている。充填を検知するセンサには、電極間の放電過程の変化を利用する方法<sup>1)</sup>、ケーブル間の静電容量の変化を利用する方法<sup>2)</sup>、およびダイオード端子間の光検出を利用する方法<sup>3)</sup>等がある。充填および締固め双方を検知するセンサには、圧電セラミックス製の振動デバイスを利用する方法<sup>4)</sup>がある。しかしながら、これらのセンサはいずれも特定点を監視するものであり、覆工コンクリートのように打込みスパン全長（例えば、10.5m）を監視するには、天端の防水シートに多数のセンサを線状または面状に設置するとともに、センサから分析機器まで信号を送るためのケーブルを並列多重に配線・固定する煩雑な作業が必要となる等の問題があった。このため、打込みスパン全長を監視するようなセンサ配置は行われていないのが実情である。

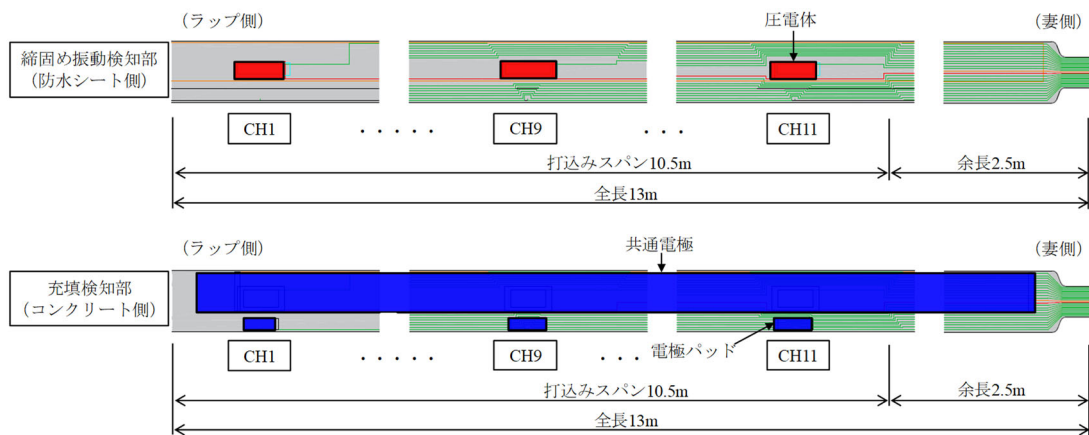


図-1 センサ平面図

\*1 戸田建設（株） 本社土木技術営業部技術2課 課長（正会員）  
 \*2 ムネカタインダストリアルマシナリー（株） 戦略企画室 室長  
 \*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科教授 博士（工学）（正会員）

本研究では、複数の充填・締固め振動検知部および配線を全てシート状基材に集約し、打込みスパン全長の充填および締固め状況を監視する図-1のセンサ（以下、本センサという。）を考案し、適用性を確認するための基礎的実験を行った。

## 2. 本センサの概要

本センサに求める基本的機能は、コンクリートの充填および締固め双方を監視することである。充填および締固めの検知原理は、後述する別々の原理を用いている。図-2に本センサの断面図を示す。厚さ0.1mm程度のシート状基材の両面を利用し、コンクリートと接する側に充填検知部、防水シートに接着する側に締固め振動検知部がそれぞれ配置されている。なお、用途に応じて充填検知部のみ配置して使用することも可能である。

各検知部および配線は、シート状基材上に厚さ0.01mmオーダーの薄膜技術により形成されている。配線は、シート状基材の防水シート側へ全て集約し、接着層兼絶縁層（厚さ0.4mm）で被覆している。これにより、写真-1に示すように検知部と配線が一体型のコンパクトな形態（厚さ1mm未満、幅50mm程度）となり、従来のセンサに比べて、センサ設置作業が容易になっている。

写真-2に覆工コンクリート天端部における本センサの設置状況を示す。打込みスパンあたり最大11点の充填および締固め振動検知部を配置することにより、広範囲をまとめて監視できる。各検知部からの信号は、1本のケーブルを介して写真-3のデータレコーダに取得され、事前に設定した閾値に基づき、図-3のシステムでコンクリートの充填状況および締固め程度が推定される。なお、上記では最大11点としたが、検知部を密に配置することで面的な監視が可能である。

## 3. 充填検知機能

### 3.1 充填物の識別

覆工コンクリートの打込みでは、天端部の打上り面に多量のブリーディング水が集積される場合がある。ブリーディング水の滞留は、天端部背面の空洞や脆弱層形成の原因となるため、妻側へブリーディング水を排出するまで打込みを継続しなければならない。したがって、充填検知機能に求められるのは、空気、ブリーディング水およびフレッシュコンクリートの3種類の識別である。

### 3.2 充填検知の原理

フレッシュコンクリートの液相やブリーディング水には、セメントから溶出した $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 等の陽イオンと $OH^-$ 等の陰イオンが存在する。フレッシュコンクリート等に電圧を印加すると、これらのイオンがキャリアとなり電氣的に導電性を示すと考えられる。そして、練混

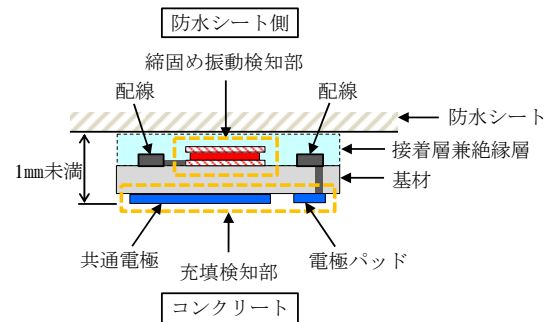


図-2 センサ断面図

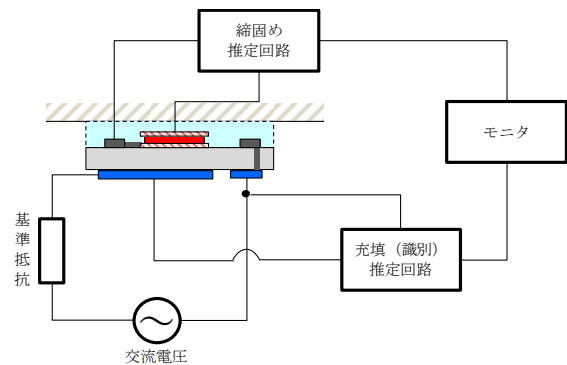


図-3 システムブロック図

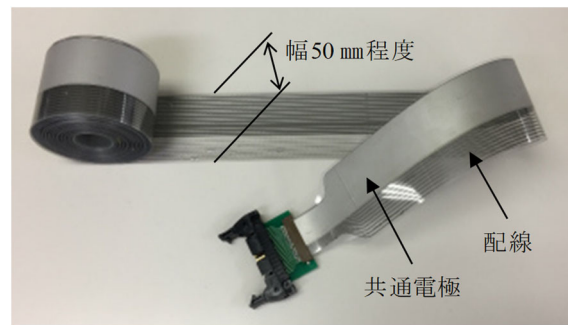


写真-1 センサ形態（接着層なし）

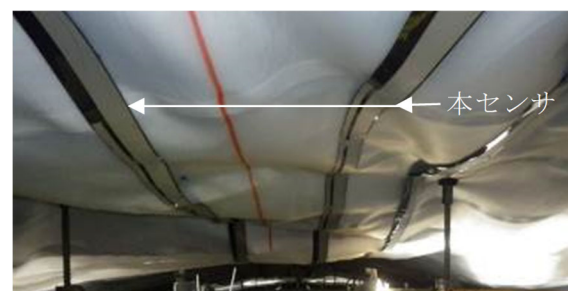


写真-2 センサ設置状況



写真-3 データレコーダ

ぜから凝結の始発前後までは、電気伝導率が経時的に増大することが報告されている<sup>5)</sup>。したがって、電気的特性を測定することで、覆工コンクリート天端部の充填状況を把握できると考えた。

図-4に充填検知部概要図を示す。充填検知部は基材に並列配置した2つの電極で構成することとした。打込みにより電極間が空気から最終的にコンクリートで満たされていく様子を電極間のインピーダンスの変化として把握しようとするものである。

### 3.3 充填検知に関する室内実験

水セメント比が電気的特性に及ぼす影響を調査するために、模擬ブリーディング水、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートを用いて実験を行った。表-1に実験条件、表-2にコンクリートの計画配合を示す。モルタルとブリーディング水の水セメント比については、電気的特性に及ぼす影響を確認するために幅広く設定した。ただし、ブリーディング水は採取可能な範囲とした。

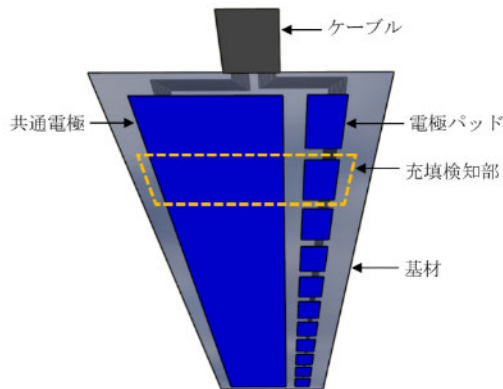


図-4 充填検知部概要図 (コンクリート側)

表-1 実験条件

種別	W/C (%)	使用セメント	測定方法
模擬ブリーディング水 (上澄み水)	50, 55, 60, 70, 100	普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm <sup>3</sup> )	インピーダンスアナライザ (1kHz, 5Vrms) および本センサ
モルタル (S/C=3.0)	30, 40, 50, 55, 60, 70, 100		
コンクリート	58.2, 63.8, 68.3	高炉セメントB種 (密度3.04g/cm <sup>3</sup> )	

表-2 コンクリートの計画配合

呼び方	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
18-15-20BB	68.3	48.4	173	253	879	982	2.53
21-15-20BB	63.8	47.5	173	271	855	990	2.71
24-15-20BB	58.2	46.4	174	299	824	996	2.99

C: 高炉セメントB種, 密度 3.04 g/cm<sup>3</sup>

S: 砂, 表乾密度 2.60 g/cm<sup>3</sup>

G: 砕石, 表乾密度 2.72 g/cm<sup>3</sup>

Ad: AE減水剤 (遅延形 I 種)

これらの試料を写真-4のプラスチック製容器 (幅145×215mm, 高さ160mm) に高さ50mmまで投入し、インピーダンスアナライザ (HIOKI製, IM3570) および本センサを用いて電気的特性を測定した。なお、インピーダンスアナライザは本センサによる測定結果の妥当性を評価するために用い、測定周波数1kHzおよび測定信号レベル5Vrmsとしてインピーダンスを測定した。本センサは電極間のインピーダンスに代えて電圧として出力するが、アナログ信号はプログラム上で扱えないことから、電圧の最大設定値 (5V) を10ビット (1,024) で分割したときの相対値として変換した無次元データ (以下、電圧デジタル信号という。) を出力する。

図-5にインピーダンスアナライザによる測定結果、図-6に本センサによる測定結果を示す。インピーダンスおよび電圧デジタル信号は、コンクリートが最も高く、次にモルタル、模擬ブリーディング水の順となった。これらの比較において、電気的特性に及ぼす水セメント比

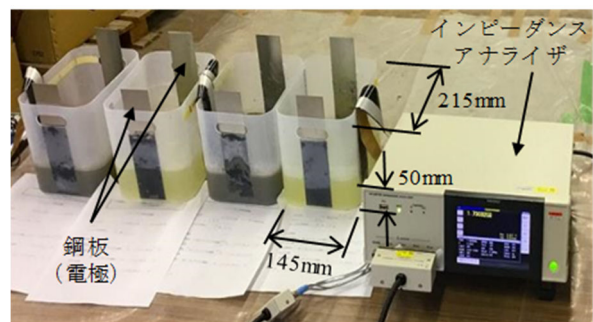


写真-4 充填検知に関する室内実験状況

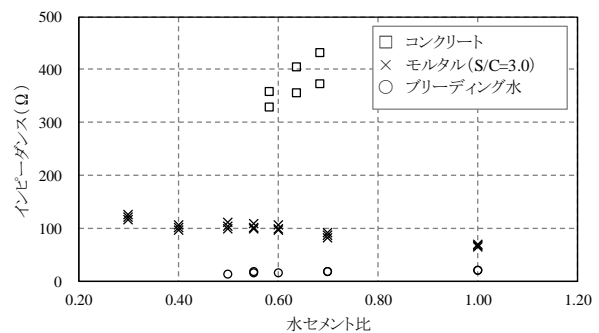


図-5 インピーダンスアナライザによる測定結果

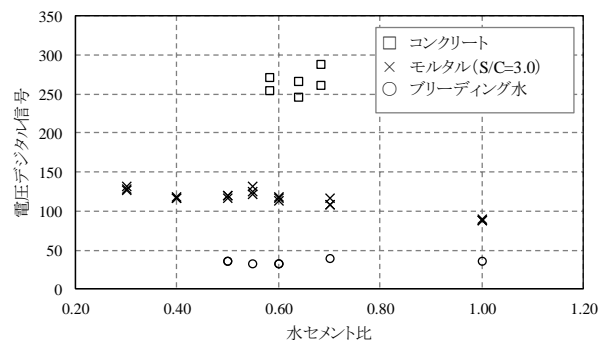


図-6 本センサによる測定結果

の影響は小さく、骨材の単位量の影響が大きい。すなわち、電気的特性は骨材の存在により大きく変化すると考えられる。この結果は、コンクリートとセメントペーストの電気抵抗値を比較した既往の研究結果<sup>6)</sup>とも整合する。なお、同図には示していないが、空気インピーダンスは480MΩでフレッシュコンクリートの10<sup>6</sup>倍、空気の電圧デジタル信号は930でフレッシュコンクリートの約3.2~3.8倍であった。これらの結果は、空気、ブリーディング水およびフレッシュコンクリートを識別するための閾値設定が可能であることを示している。

### 3.3 充填検知に関する現場実験

トンネル工事現場において、覆工コンクリート天端部の充填状況を本センサで監視した。表-3にコンクリートの計画配合、図-7にセンサ設置状況図、図-8に電圧デジタル信号の経時変化を示す。図-8のCH1はラップ側、CH6は中間部、CH11は妻側の充填検知部を表している。吹上げ口からの打込みに切り替え、最初に吹上げ口近傍のCH1にコンクリートが接してから64分経過後、妻側のCH11にコンクリートが到達した様子が確認できる。中間のCH6の電圧デジタル信号が上下しているのは、締固めによるコンクリート沈降の影響である。なお、コンクリートの電圧デジタル信号が図-6では246~288に対し、図-8ではおおよそ300~400となっているのは配線の材料仕様の変更等に伴うものである。また、実験を行った現場はトンネル軸方向4%の下り勾配(ラップ側が妻側よりも高い)での打込みとなり、ブリーディング水が妻側へ

自然に流れ出る状況であったため、ブリーディング水を示す電圧デジタル信号(仕様変更後の実験を踏まえて100以下に設定)は検知されていない。

いずれの充填検知部においても最初にコンクリートと接触したと推定される電圧デジタル信号に比べて、打込み完了時の電圧デジタル信号は若干低下していた。各充填検知部に最初にコンクリートが接触したときは、型枠内のコンクリートが流動している状態で天端部背面まで十分な圧力が加えられていない。一方、打込み完了時は、妻側までコンクリートが充填された後にさらに圧入を行い、天端部背面まで圧力が伝達された状態である。この現象は、フレッシュコンクリートに作用する圧力が電気的特性に影響を及ぼすことを示唆している。今後、このメカニズムを明らかにするための検討を行う予定である。

## 4. 締固め振動検知機能

### 4.1 締固め振動の検知

コンクリートの締固めに用いる棒状パイプレータの周波数には200~240Hz程度の高周波が用いられている。既往の研究によれば、棒状パイプレータからの振動がフレッシュコンクリート中を伝播しても周波数はほとんど変化しないが、振幅は減衰することが報告されている<sup>7)</sup>。したがって、このような特徴を有する締固めに有効な振動を捉える必要がある。

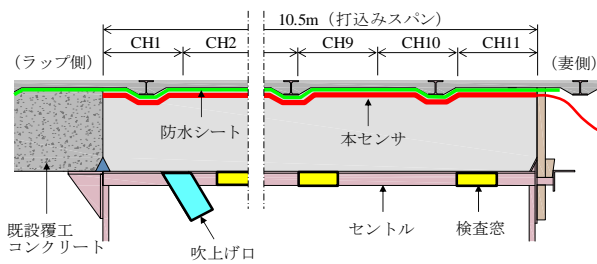


図-7 センサ設置状況図(天端部縦断面図)

表-3 コンクリートの計画配合

呼び方	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
27-18-25N	51.0	46.0	170	333	817	962	3.00

C: 普通セメント, 密度 3.15 g/cm<sup>3</sup>

S: 砂, 表乾密度 2.62 g/cm<sup>3</sup>

G: 砂利, 表乾密度 2.62 g/cm<sup>3</sup>

Ad: 高性能AE減水剤(標準形 I 種)

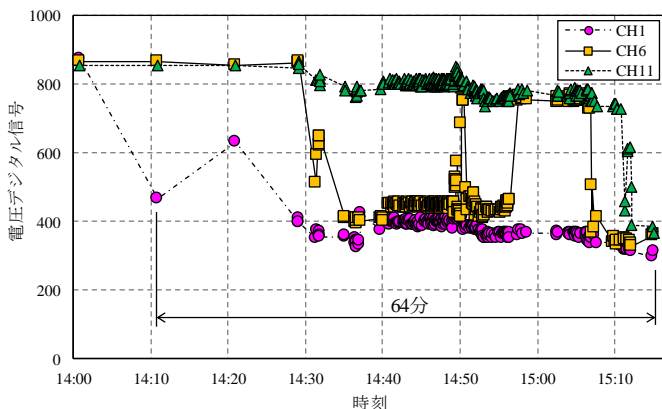


図-8 電圧デジタル信号の経時変化

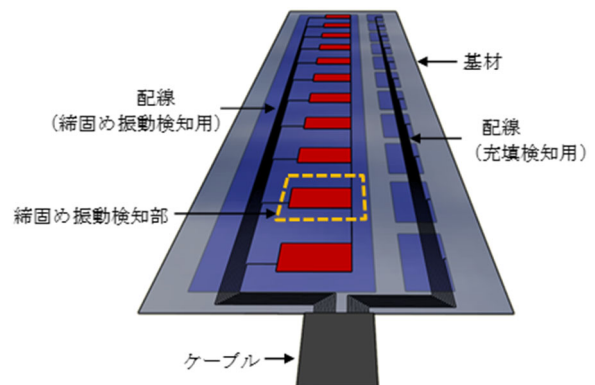


図-9 締固め振動検知部概要図(防水シート側)



## 4.2 締固め振動検知の原理

締固め振動検知部は、外力（ひずみ）を与えることで電気が発生するという圧電体の特性を利用する。従来の圧電体は形状や材質等が限られていたが、スプレーコーティング<sup>8)</sup> またはペースト塗布等の技術により、薄膜かつ任意形状の圧電体（圧電膜）の形成が可能になった。

図-9に締固め振動検知部概要図を示す。圧電膜を薄膜電極で挟んだ圧電素子を締固め振動検知部として用い、パイプレータ振動部から発振された振動を捉えて電圧を発生させ、その周波数、振幅および時間をもとに締固め程度の目安を提示する。

## 4.3 締固め振動検知に関する室内実験

### (1) 予備的実験

写真-5に小型型枠を用いた実験状況を示す。小型の木製型枠（幅300×300mm、高さ500mm）の高さ400mmの位置に棒状パイプレータ挿入孔付きの蓋を設置し、その下側に防水シート（厚さ0.8mm）を敷設し、覆工コンクリート天端部を簡易的に模擬した。振動測定に用いる本センサは締固め振動検知部が1箇所のプロトタイプとし、防水シートに貼り付けた。フレッシュモルタル（W/C=60.0%、S/C=3.0）を木製型枠に投入後、棒状パイプレータ（振動部直径φ52mm、インバータの出力周波数200Hzに設定）を挿入・加振し伝播する振動を測定した。

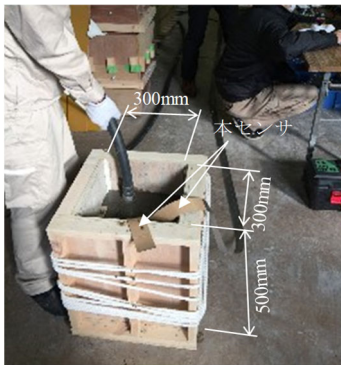


写真-5 小型型枠を用いた実験状況

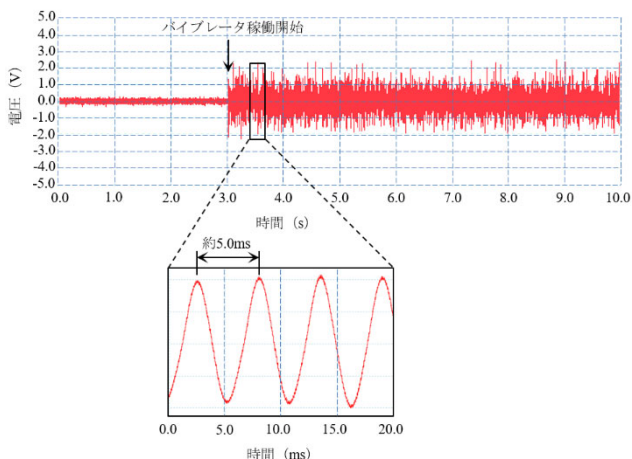


図-10 モルタル中の振動伝播

図-10に本センサの締固め振動検知部が出力した電圧の波形を示す。あらかじめ設定した棒状パイプレータの周波数である約200Hz（周期5.0ms）の波形が確認された。したがって、本センサにより棒状パイプレータの振動を捉えられる可能性があると考えられた。なお、本センサによる出力電圧の周波数は、200Hz付近以外にも離散的に複数確認された。これらの周波数は、棒状パイプレータ振動部の内蔵モータや周辺の電子機器等に起因する電磁ノイズと推定された。そこで、締固め振動検知部および配線を包含する図-4の共通電極（シールド電極）の配置やフィルタの設定により電磁ノイズ低減を図ることとした。

### (2) 実規模実験

写真-6に実規模型枠を用いた実験状況を示す。長尺の木製型枠（幅400mm、高さ500mm、長さ10.5m）の内側の側面に防水シート（厚さ0.8mm）と透水性緩衝材（厚さ3mm）を敷設し、覆工コンクリート天端部を実規模で模擬した。振動測定に用いる本センサは締固め振動検知部（長辺60mm、短辺10mm）を11箇所設けた長尺タイプとし、側面の防水シートの間高さ付近に貼り付けた。表-4のフレッシュコンクリートを木製型枠に投入後、棒状パイプレータ（振動部直径φ52mm、インバータの出力周波数200Hzに設定）の挿入位置を順次変えて加振

表-4 コンクリートの計画配合

呼び方	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
24-15-20BB	56.0	47.4	172	308	838	949	3.08

C: 高炉セメントB種、密度 3.04 g/cm<sup>3</sup>  
 S1: 砕砂、表乾密度 2.58 g/cm<sup>3</sup>  
 S2: 石灰砕砂、表乾密度 2.67 g/cm<sup>3</sup>  
 S3: 細目砂、表乾密度 2.58 g/cm<sup>3</sup>  
 G1: 碎石、表乾密度 2.62 g/cm<sup>3</sup>  
 G2: 石灰碎石、表乾密度 2.69 g/cm<sup>3</sup>  
 Ad: AB減水剤（標準形 I 種）

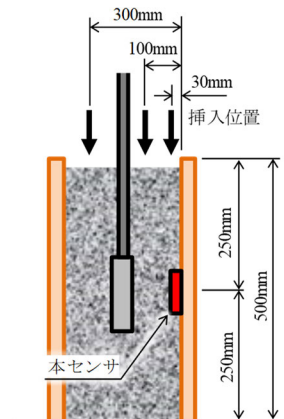
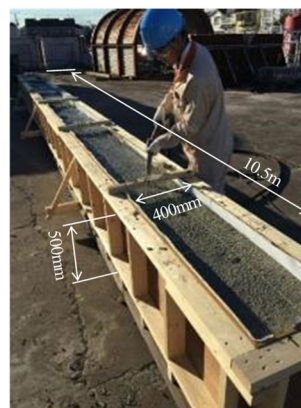


写真-6 実規模型枠を用いた実験状況

し、各締固め振動検知部へ伝播する振動を測定した。

図-11～図-13 に棒状パイプレータ中心部と締固め振動検知部との離隔が 30mm, 100mm, 300mm のときに本センサの締固め振動検知部が出力した電圧の波形を示す。いずれの離隔においても出力電圧の周波数は約 180Hz (周期 5.5～5.6ms) であり、離隔による低下は認められなかった。振動部の周波数 (200Hz) と比べて低下したのは、振動部内の偏心錘の高速回転によって生じる振動部の回転運動がコンクリートの抵抗を受け、角速度が低下したことが原因と考えられる。また、離隔が大きくなるにしたがい、電圧振幅は減衰した。この減衰の程度は配合によって異なると考えられるため、複数の配合を用いた実験に供しいずれの配合においても振動が捉えられる締固め振動検知部のアスペクト比 (長辺/短辺) および面積を検討する必要がある。なお、予備の実験と同

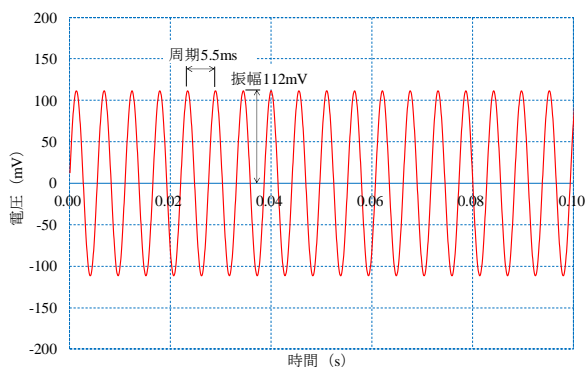


図-11 コンクリート中の振動伝播 (離隔 30mm)

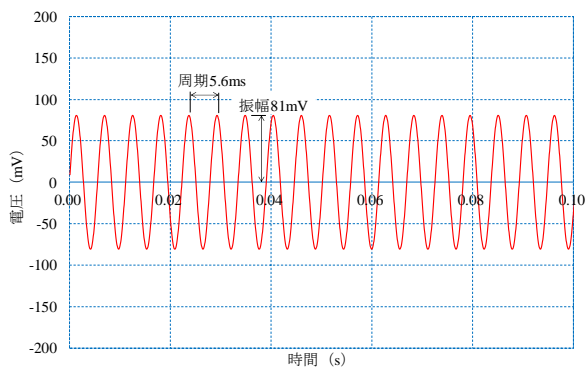


図-12 コンクリート中の振動伝播 (離隔 100mm)

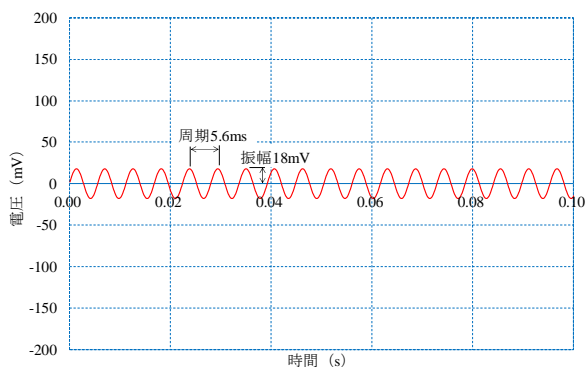


図-13 コンクリート中の振動伝播 (離隔 300mm)

様に出力電圧の周波数は複数確認されたが、離隔による電圧振幅の減衰が認められない周波数帯や振動部の周波数よりも大きい周波数帯は電磁ノイズ等の考慮すべきでないものと考えられる。現在、これらの結果を踏まえて改良した本センサを現場適用し、感度および電磁ノイズ低減効果を確認中である。

## 5. まとめ

本センサについて適用性を確認するために実施した今回の基礎的実験により、以下の知見が得られた。

- (1) 導電性は、ブリーディング水、フレッシュコンクリート、空気順に低下する。電気的特性をもとに、これらの識別が可能である。
- (2) 薄膜の圧電素子を用いて、パイプレータから伝播する振動を捉えることが可能である。ただし、電磁ノイズを低減する対策が必要である。

今後は、測定データを拡充しコンクリートの充填状況および締固め程度推定の信頼性を高めていく予定である。

## 参考文献

- 1) 平田隆祥, 十河茂幸「電圧印加方式によるコンクリートの充填感知に関する研究」コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996
- 2) 藤倉裕介「静電容量の変化によるコンクリートの打込みから硬化過程の水分量評価と施工時の品質管理手法に関する検討」コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 2012
- 3) 坂井吾郎, 万木正弘, 坂田昇, 岩城実「品質保証を考慮した高流動コンクリートの施工について」コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, 1995
- 4) 佐野清史, 安田正雪, 高橋宏治, 坂井孝, 金子稔「振動を利用したコンクリートの打込み・締固め検知システムに関する基礎実験」土木学会第 58 回年次学術講演会, V-424, 2003
- 5) 阿保寿郎, 松田浩朗, 松元和伸, 平間昭信, 寺澤正人「電気的な特性値を用いたコンクリートの凝結の進行の把握に関する基礎実験」土木学会第 65 回年次学術講演会, VI-508, 2010
- 6) 太田真帆, 伊代田岳史「電気抵抗値によるコンクリート硬化判定技術の検討」第 5 回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, 2015
- 7) 岩崎訓明, 坂本信義「コンクリート中における内部振動機の振動の伝播特性」土木学会論文集, 第 402 号/V-10, 1989
- 8) スプレーコーティングに関する技術情報: <https://www.munekata.co.jp/eh/method.html#s01> (閲覧日 2019 年 12 月 11 日)