

論文 振動を利用したコンクリート充填検知システムに関する基礎実験

金子 稔*1・坂井 孝*2・安田 正雪*3・末岡 英二*4

要旨：型枠や鉄筋に小型の振動デバイスを設置して、その振動デバイスの振動を能動的に制御するコンクリート充填検知システムを試作し、本システムの検知能力および適用性に関する基礎的実験を行った。その結果、振動デバイス周囲の水、空気、コンクリートなどの識別が可能であり、コンクリートの充填部と未充填部を確実に検知できた。

キーワード：非破壊検査、弾性波振動、振動デバイス、コンクリート充填検知、周波数特性

1. はじめに

一般に、型枠内へコンクリートを確実に充填するため所定の打込み・締固め方法を遵守して作業を実施するが、過密配筋、狭隘個所では、打込み・締固めが不十分な場合にコンクリートの品質変動などと相俟って未充填部などの欠陥が発生することも少なくない。また、水中部などのコンクリート打込みでは充填状況の目視確認が困難な場合が多い。構造体の品質保証のためには、コンクリートの充填状況を確認しながら打込み・締固めを実施することが重要である。従来のコンクリートの充填状況を感知する方法には、型枠外部から充填を調べる打撃音法¹⁾、赤外線方²⁾のほか、型枠内部に電極を設置して電圧を印可する電圧印可方式³⁾、通電抵抗値法⁴⁾などがあるが、現場環境、操作性およびコストなどから、さらなるコンクリートの充填確認の容易な検査方法が期待されている。

本報は、弾性波を利用して小型の振動デバイスを振動させ、その周波数特性からコンクリートの充填を検知できる簡便なシステムを試作し、この振動デバイスを型枠内に設置することで打込み・締固めにおけるコンクリートの充填状況の検知に関する基礎実験の結果について述べたものである。

2. システム概要と測定原理

本システムは写真-1に示す圧電セラミックで製作した小型の振動デバイス（直径約15mm、厚さ約3mm）を可聴域の周波数（3～15kHz）で振動させ、この周波数特性を検出することによって振動デバイスに接するものが空気、水、コンクリートのいずれであるのかを検知するものである。システム概念図を図-1に示す。

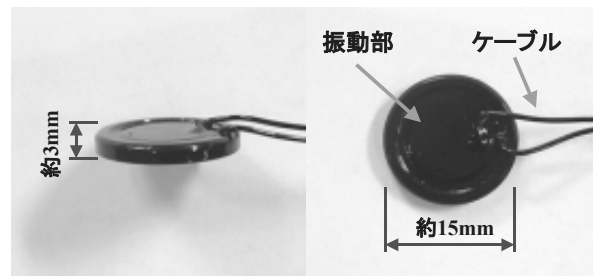


写真-1 振動デバイス

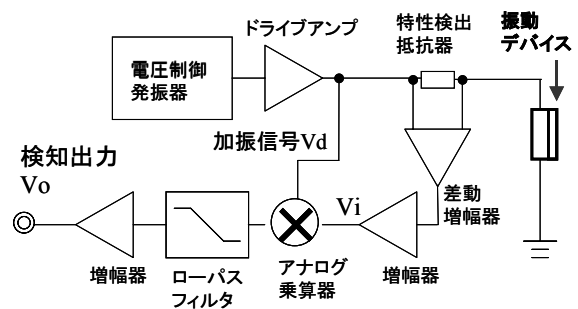


図-1 システム概念図

*1 曙ブレーキ工業（株）新規事業室 I C A T 係長（正会員）
 *2 曙ブレーキ工業（株）新規事業室 I C A T チームリーダー
 *3 東洋建設（株）美浦研究所材料研究室主任研究員（正会員）
 *4 東洋建設（株）美浦研究所材料研究室主任研究員 工修（正会員）

測定原理を以下に述べる。本システムは振動デバイスに周波数が時間と共に変化してゆく信号を加えて振動デバイスの周波数特性を検出して、振動デバイスに接触したものの違いを検出するものである。振動デバイスを振動させるため式(1)に示す加振信号 V_d を特性検出抵抗器を通して振動デバイスに加える。このとき特性検出抵抗器の両端には振動デバイスに流れる電流に対応した電圧が発生する。この電圧を差動増幅器で増幅して、式(2)に示す電圧 V_i を得る。但し、 A および B は振幅、 ω は周波数、 α および β は位相のズレである。この電圧 V_i は振動デバイスに流れる電流の特性を反映している。この振動デバイスへ加える電圧と流れる電流の振幅と位相差はその周波数によって大きく変化し、これらは振動デバイスの周波数特性を反映している。この V_i の振幅および V_d との位相差を求めるために V_i と V_d をアナログ乗算器で乗算を行い、式(3)に示す結果を得る。

$$V_d = A \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

$$V_i = B \sin(\omega t + \beta) \quad (2)$$

$$V_i \times V_d = A \sin(\omega t + \alpha) \times B \sin(\omega t + \beta) \\ = 1/2 \cdot AB \{ \cos(\beta - \alpha) - \cos(2\omega t + \alpha + \beta) \} \quad (3)$$

式(3)の結果から2倍の周波数成分 $\cos(2\omega t + \alpha + \beta)$ をローパスフィルタで除去して振幅と位相差の情報のみを持った成分 $1/2 \cdot AB \cos(\beta - \alpha)$ 、すなわち周波数特性検出出力電圧 V_o を得る。この V_o は振動デバイスの機械的共振により変化する。この変化の度合いは振動デバイスの振動系要素（質量、バネ、減衰特性）に関係し、この振動系要素は振動デバイスに接触するものの固有音響インピーダンスなどによって異なるため空気、水、コンクリートなどを電気的に検出することが可能となる。

3. 実験方法

本システムの検知能力および適用性に関する

基礎的な実験として、1)振動デバイスに接触するものの識別、2)振動デバイスが受ける圧力の影響、3)鉄筋周りの未充填部の検知、4)水中打設での充填検知、5)充填状況の連続検知の確認などを行った。

3.1 空気、水、コンクリートなどの識別

1辺が15cmの鋳物型枠の内側面に振動デバイスを貼り付けて、水、ペースト、モルタル、コンクリートをそれぞれ充填して、その周波数特性からこれらが識別できることを確認した。コンクリートは最大寸法20mmの砕石を使用した $W/C=55\%$ 、 $W=171\text{kg/m}^3$ 、 $S/a=44.2\%$ 、スランプ15cm、空気量4.5%のコンクリートとし、ペーストはコンクリートの配合から粗骨材、細骨材を、モルタルは粗骨材をそれぞれ除いたものとした。その際の周波数特性波形を図-2に、この波形からピークの電圧値とその周波数をマッピングしたものを図-3に示す。本システムの振動デバイスの周波数特性は、図-2に示すように振動デバイスに接触するものによってピーク電圧値とその発生する周波数が変化する。

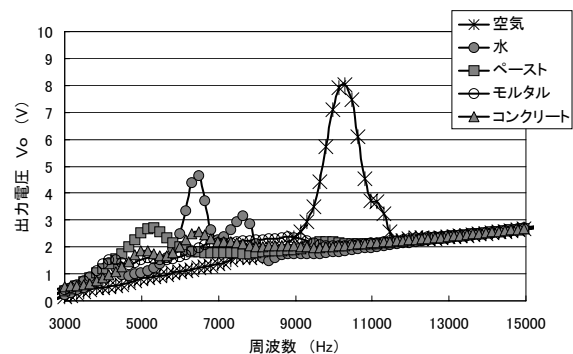


図-2 周波数特性

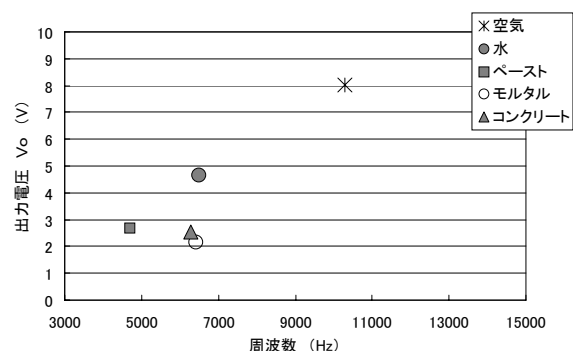


図-3 ピーク電圧値と周波数の関係

図-3のように空気、水、コンクリートなどそれぞれ固有の値を示すことからそれぞれを識別することが可能であるといえる。モルタルとコンクリートの判別は明らかでなく、これはコンクリート中の粗骨材周囲がモルタルで充填されているためと考えられる。

3.2 振動デバイスが受ける圧力の影響

本システムの振動デバイスが型枠に設置された際に受ける圧力の影響を調査した。実験は直径が 125mm の加圧ブリーディング容器 (JSCE-F502) の底面に振動デバイスを設置して、水、コンクリートなどをそれぞれ充填してアムスラーにより 0.3MPa (水深にして約 30m 相当) まで加圧し、周波数特性を計測した。圧力による変化を図-4 に示す。

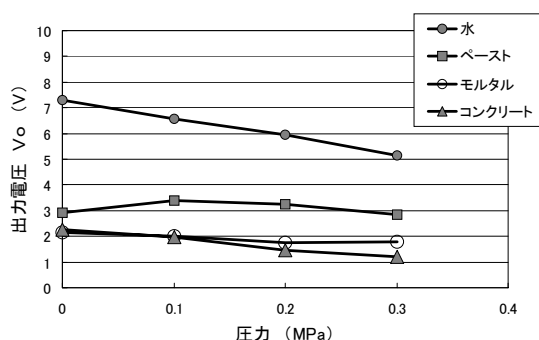


図-4 圧力の影響

図-4 より水は圧力が大きくなると出力電圧のピーク電圧値が小さくなってゆることがわかる。これは圧力によって振動デバイスの振動部の振幅が制限されるためと思われる。ただし、ピーク電圧値の周波数は大きく変わることはなかった。このことから振動デバイスに接触する水、コンクリートなどの判別は圧力の影響があっても問題なく行うことができるといえる。なお、水のピーク電圧値が約 7.3V と図-3 より高い値を示しているが、これは圧力容器が本システムの測定周波数と共振をおこしたためと思われる。

3.3 鉄筋周りの未充填部の検知

写真-2 に示した厚さ 12mm の塗装合板で作

製した 10×10×40cm の長方形型枠に振動デバイスを取り付けた D25 の鉄筋を中央部に設置し、そこへスランプ 15cm の普通コンクリートと擬似的に未充填部をつくるために粗骨材の量を 2 倍にしたコンクリート (以下、粗骨材 2 倍のコンクリート) をそれぞれハンドスコップで打ち込み、木槌で型枠側面をたたいた後、未充填部の有無が検知できることを確認する。それぞれのコンクリートを打込んだときの検知波形を図-5 および図-6 に示す。図-5 の普通コンクリートでは打込み後、出力電圧のピーク電圧値が小さくなり、確実に充填されたことがわかる。図-6 の粗骨材 2 倍のコンクリートでは

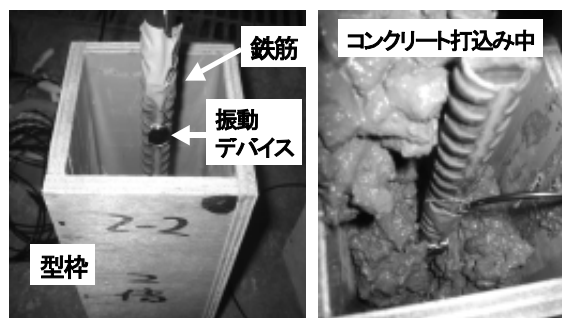


写真-2 振動デバイスの取付けと打込み状況

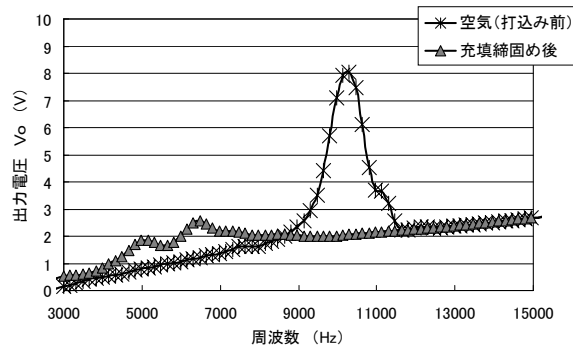


図-5 普通コンクリート

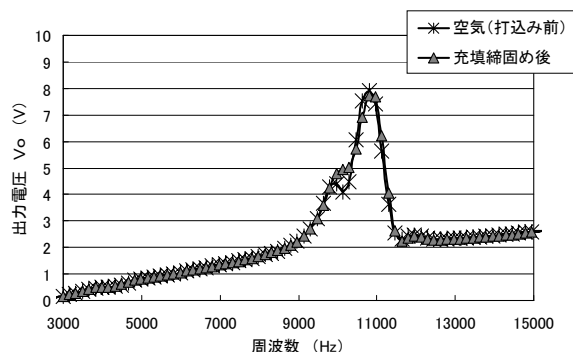


図-6 粗骨材2倍のコンクリート

木槌による締固め後でも打込み前のときの波形と変化がなく、振動デバイス周辺には未充填部があると判断された。この検知結果を確認するため、コンクリートの硬化後に切断した断面を写真-3および写真-4に示す。振動デバイス周辺には普通コンクリートではコンクリートが密実に充填されていたが、粗骨材2倍のコンクリートでは未充填部がみられた。

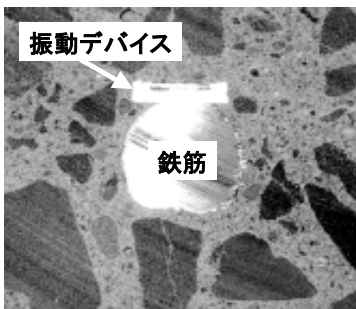


写真-3 普通コンクリート



写真-4 粗骨材2倍コンクリート

3.4 水中打設での充填検知

3.1 で使用した同じ鋳物製型枠内の鉄筋に振動デバイスを取り付けたものを水中に沈めて、これに最大寸法 20mm の砕石を使用した W/C=55%, W=231kg/m³, スランプフロー約 55cm の水中不分離性コンクリートとスランプ約 15cm の普通コンクリートをそれぞれ 10cm 水中落下させて打ち込み、その充填状況を検知した。このときの検知波形を図-7に示す。充填前は型枠内の水のピークを検出しており、充填後は水中不分離性コンクリートの場合、出力電圧のピークは小さくなりコンクリートを検知したのに対し、普通コンクリートは空洞であるこ

とを検知した。なお、充填状況を確認するため硬化後カットした断面を観察した結果、検知結果が正しいことが確認された。このことから水中におけるコンクリートの打設も検知できるといえる。

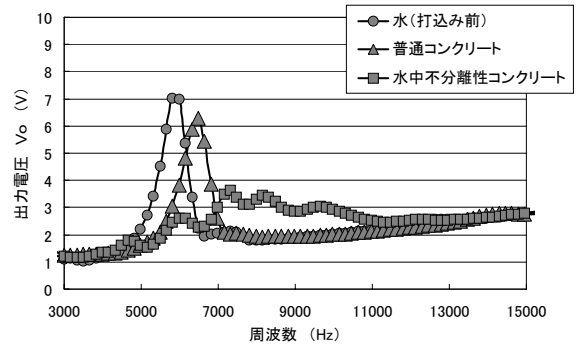


図-7 水中打設の検知

3.5 充填状況の連続検知の確認

(1) 自己充填の場合

型枠内に振動デバイスを複数設置することによりコンクリートの流れを平面的に捕らえることを確認する。L型の透明モデル型枠に振動デバイスを9個設置して、そこへ最大寸法 20mm の砕石を使用した W/C=50%, W=170kg/m³, スランプフロー約 61cm の増粘剤系の高流動コンクリートを打込み、その充填の状況を計測した。打込み途中の状態を図-8および写真-8に、打込み終了時の状態を図-9および写真-9にそれぞれ示す。なお、図中のアルファベットは写真に示す振動デバイスの位置を表している。

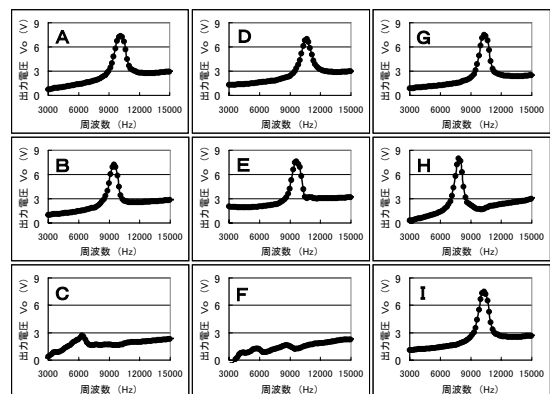


図-8 打込み途中の検知波形

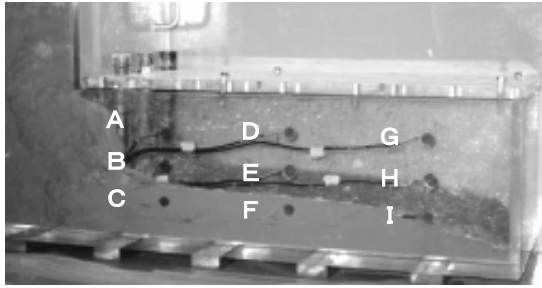


写真-8 打込み途中の様子

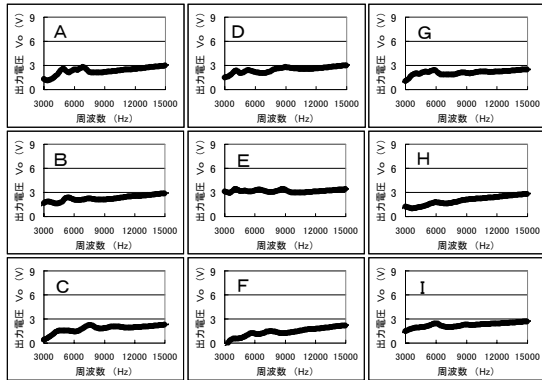


図-9 打込み終了時の検知波形

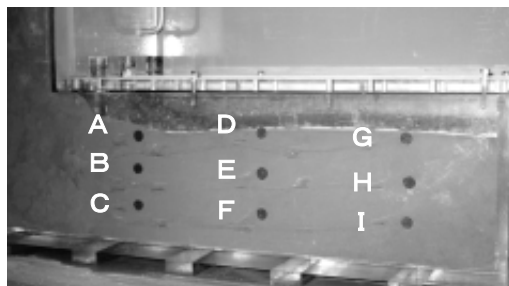


写真-9 打込み終了直前の様子

以上のように振動デバイスを二次元的に多点配置に設置することによってコンクリートの打込み状況とその充填状況を把握することができるといえる。

(2) 振動締めめの場合

バイブレータの加振による締めめの進行状況を連続的にとらえることを確認するため、図-10に示すように振動デバイスを設置した塗装合板で製作した20×20×180cmの型枠へ、最大寸法20mmの砕石を使用したW/C=55%、 $W=158\text{kg/m}^3$ 、スランプ約8cmの普通コンクリートをスコップで打込み、X、Y点において順次バイブレータで加振して、加振点からの距離

と締めめの効果の検知を調査した。

コンクリートの打込み直後の検知波形を図-11に示す。5点の設置点全てにおいて空隙、すなわち未充填部が検出されている。次にX点においてバイブレータで15秒加振したときの検知波形を図-12に示す。振動デバイス設置位置A～Cまで締めめによってコンクリートが充填されたことがわかる。さらにY点の位置にバイブレータで15秒加振した時の検知波形を図-13に示す。振動デバイスDまで締めめによってコンクリートが充填されたことがわかる。しかし、振動デバイスEは空隙であることを示している。

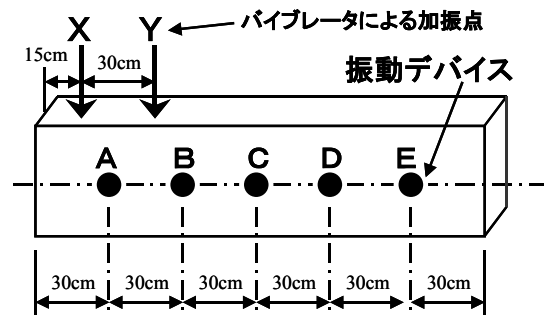


図-10 締めめ効果の確認実験

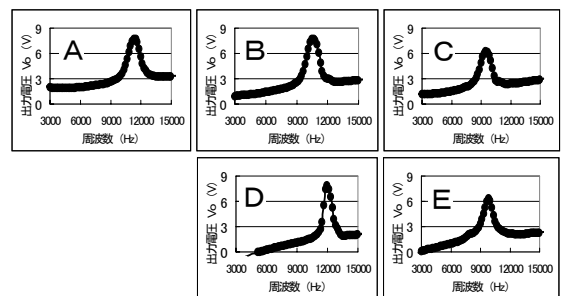


図-11 打込み直後の検知波形

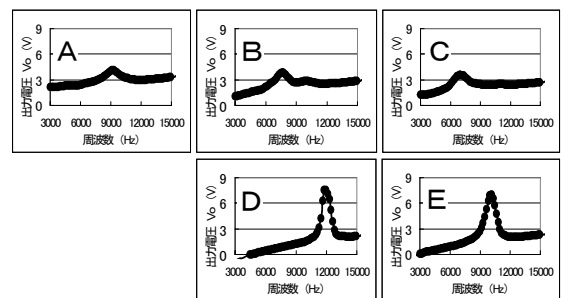


図-12 締めめ1回目の検知波形

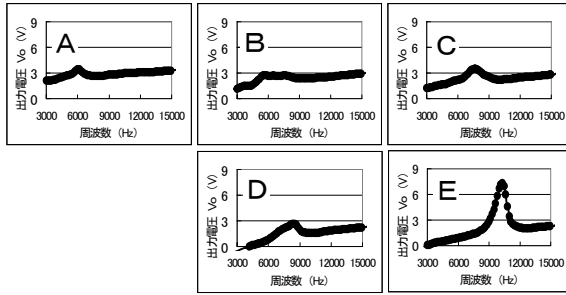


図-13 締固め2回目の検知波形

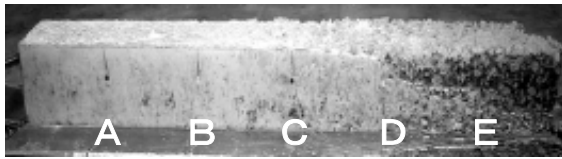


写真-10 脱型後のコンクリートの充填状況



写真-11 振動デバイスE付近の拡大

以上の結果を確認するために、硬化後脱型したコンクリート表面の状況を写真-10に、設置した振動デバイスEの付近を拡大した状況を写真-11に示す。これらの写真からわかるように、本システムによる検知結果通り振動デバイスA～Dまではコンクリートが十分充填されており、Eの付近は未充填部となっていた。

なお、本測定システムは振動デバイスを能動的に制御することから外部のノイズの影響を受けにくく、今回の測定でバイブレータによる加振中であっても締固めによってコンクリートが充填されてゆく状況を連続的に観察することができた。

4. まとめ

小型の振動デバイスを能動的に制御する本システムによって得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 周波数特性の波形から振動デバイスに接しているものが空気、水、コンクリートなどの違いを識別することができた。振動デバイスが約0.3MPaの圧力を受けても、水とコンクリートなどの違いを識別できた。
- (2) 気中および水中におけるコンクリートの打設において、未充填部の有無を確認することができた。
- (3) 振動デバイスを多点設置することによって、コンクリートの自己充填および振動締固めによるコンクリートの充填状況をリアルタイムに把握することができた。

今後は、電気化学的な影響を受けず現場での校正が不要である振動デバイスを利用した本システムの実用化を目指して、現場での適用実験およびシステムの改良を行ってゆく。

参考文献

- 1) 佐々木晴夫，山本康弘他：打音法によるハーフ Pca 板に打設したコンクリート充填検査に関する研究，日本建築学会大会梗概集，pp.139～140，2000.9
- 2) 久保倉拓，磯健一，濱野卓哉：赤外線カメラを用いた型枠プレキャストへのコンクリートの充填性確認に関する研究，日本建築学会大会梗概集，pp.347～350，2001.9
- 3) 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集，Vol.18，No.1，pp.69～74，1996
- 4) 野崎喜嗣：振動締め固め中のコンクリートの評価その1 通電抵抗値法に関する基礎的検討，日本建築学会大会梗概集，pp.705～706，1996.9