

論文 締固め検知機能を付加したコンクリートの充填検知システムの開発

金子 稔*1・安田 正雪*2・末岡 英二*3・坂井 孝*4

要旨: コンクリートの充填確認のため、筆者らは既に振動を利用したセンサに接触する物質の識別を可能としたコンクリートの充填検知システムを実用化した。ここで用いる検知センサは振動加速度が計測可能であることから、本報では、コンクリートの打込み・締固め時に充填確認と併せて密実性を同時に評価できる「締固め検知機能を付加した充填検知システム」の開発を目的とし、検知センサの振動特性や本システムの動作確認の他、検知センサの異方性などの振動加速度計測に及ぼす影響などについて実験的検討を行った。この結果、コンクリートの打込み・締固め時に、密実な充填の確認が可能な現場計測システムを確立した。

キーワード: 締固め検知, 充填検知, 検知センサ, 振動加速度, コンクリート, 密実性

1. はじめに

コンクリート構造体の品質保証のためには、コンクリートの未充填部などの欠陥をなくすことが必要不可欠であり、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ことから、既に筆者らはコンクリートの充填確認が容易に行える検知システムを開発した¹⁾。このシステムは、検知センサに接触する物質(コンクリート, 水あるいは空気)の識別, すなわちコンクリートの充填検知が可能であり、コンクリートの充填をリアルタイムに検知できるため、近年閉鎖空間や過密配筋などへのコンクリート充填確認に活用されている。ここで用いている検知センサは振動加速度の計測が可能であることから、コンクリートの打込み・締固め時に充填確認と併せて密実性を同時に評価, すなわち締固め検知機能を付加できれば、コンクリートの密実な充填確認へ応用できると考えた。

本報は、コンクリートの打込み・締固め時に充填確認と併せて密実性を同時に評価できる「締固め検知機能を付加したコンクリートの充填検知システム」の概要, ならびに検知センサの振動特性と試験体による本システムの動作確認について行ったシリーズⅠ～Ⅲの実験結果を報告するものである。

2. システムの概要

締固め検知機能を付加した充填検知システムは写真-1のように構成され、本体と検知センサを16点接続できるターミナルボックスからなる。コンクリートの充填確認と締固め時の振動加速度の測定は、圧電セラミックスで作製した検知センサ(約17mm角, 厚さ約5mm)を予め鉄筋や型枠面等へ取り付けておき、コンクリートを

打ち込み、高周波棒状振動機(以下、パイブレータと記す)で締め固めした際に、検知センサにコンクリートが接触したことの確認とともに、コンクリート中を伝播する振動加速度を検出する。図-1に本システムのブロック図を示す。その動作はまず始めに切り替えスイッチを2の位置とし、コンクリートの打込み時の充填を検知する¹⁾。このとき検知センサには周波数が時間とともに変化する信号が加えられ、検知センサの中央円形の部分が微小振動する。この振動の周波数特性は検知センサに接触した物質の物性によって変化するため、これを解析して、検知センサ位置におけるコンクリートの充填を検出し、図-2の表示画面でコンクリートの緑色表示となり、



写真-1 コンクリートの充填検知システム

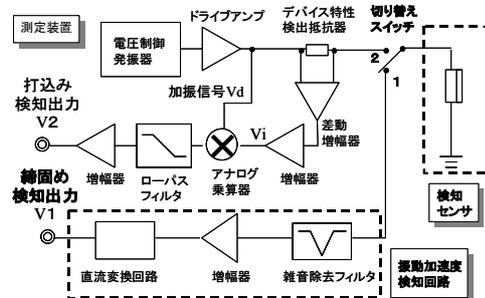


図-1 ブロック図

*1 曙ブレーキ工業(株) 新商品開発部 シニアスタッフエンジニア(正会員)

*2 東洋建設(株) 技術本部美浦研究所材料研究室 主任研究員(正会員)

*3 東洋建設(株) 技術本部美浦研究所材料研究室 室長 博士(工学)(正会員)

*4 曙ブレーキ工業(株) 新商品開発部 課長

次に、スイッチを1へ切り替えて検知センサからの振動加速度を捉えて締固めを検知する。検知センサに内蔵された圧電セラミックスは、コンクリート内を伝播する振動を受けることにより、その加速度に応じた電荷を発生する。その発生した電荷を雑音除去フィルタに通した後、アンプにより増幅し直流変換回路で直流電圧に変換する。振動加速度は3.1に後述するように直流電圧と比例関係にある。本システムでは、演算した振動加速度をコンクリートの締固め程度の判定指標として、表示画面上に判りやすく表示するため、1回の振動加速度の計測時間および振動レベルの閾値を任意に設定し、その時間内に閾値を超えた場合に図-2に示すように青玉1ヶが点灯し、合計3ヶまで点灯するようにして締固め状況を瞬時に判定できるようにした。青玉の点灯はコンクリートの充填確認がされていない場合には点灯しない。なお、計測時間と計測点数の組合せで任意の締固め時間を設定できる。計測の流れの例を図-3に示す。1ヶの青玉点灯には約2.7秒を要し、振動計測を優先させ、多点化をはかっている。

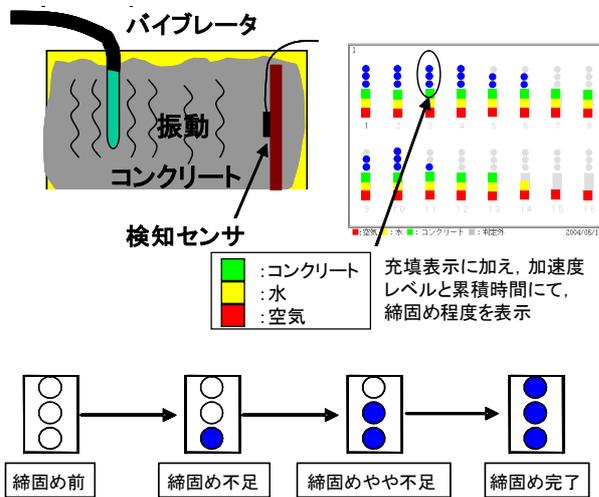


図-2 検知イメージと表示画面の表示例

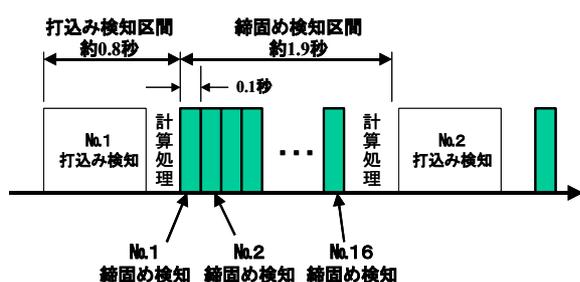


図-3 計測の流れ (青玉3ヶ点灯に約9秒)

3. シリーズI 検知センサの特性に関する実験

シリーズIでは、検知センサがパイプレータの振動を計測できることを確認した。

3.1 動電型加振器による出力電圧の確認

動電型加振器のベッドに検知センサを取り付けて、約 98m/s^2 (10G) までの任意の 250Hz の正弦波振動加速度を与えて、検知センサからの正弦波振動加速度の平均電圧出力を調べた。その結果を図-4に示す。この図から、加振器の正弦波振動加速度と検知センサからの正弦波振動加速度の電圧出力は線形であり、検知センサを用いて振動加速度が測定可能であることがわかる。

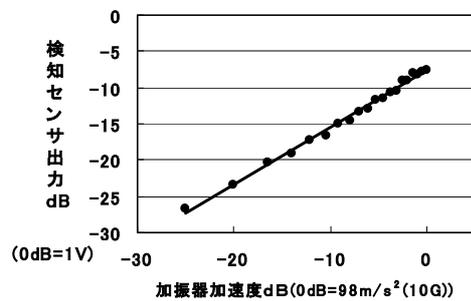


図-4 検知センサの振動加速度出力

3.2 コンクリート中の出力電圧の確認

図-5に示すように、塗装合板を用いて作製した幅30cm、長さ90cm、高さ40cmの型枠内の垂直鉄筋に検知センサを取り付けて、W/C=50%、スランプ15cm、空気量2%、単位水量 165kg/m^3 のコンクリートを2層に分けて打込み、パイプレータ(周波数250Hz、棒径25mm)を用いて各層A、B、C、D点にて20秒加振し、検知センサより得られる平均振動加速度を測定した。またひずみ式加速度計をパイプレータと段取り筋に適宜取り付け併せて測定した。

パイプレータに取り付けたひずみ式加速度計の振動加速度波形を図-6に示す。パイプレータ位置A点とし、

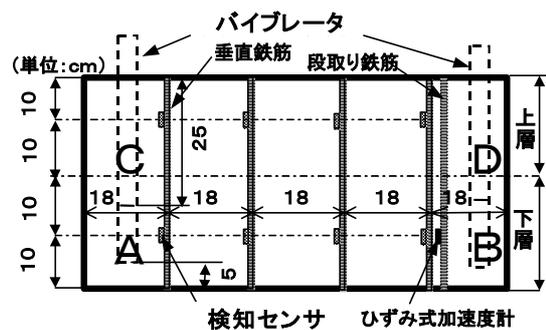


図-5 パイプレータと検知センサの位置

バイブレータからの距離 45cm 垂直鉄筋に取付けた検知センサの振動加速度波形を図-7 に示す。いずれの周波数も 250Hz を示しており、バイブレータの振動が検知センサに伝搬していることがわかる。

次に、下層についてバイブレータの位置を基準として、検知センサで計測した距離による振動加速度の推移を図-8 に示す。振動加速度はそれぞれバイブレータからの検知センサまでの距離が長くなると減衰する傾向を捉えている。なお、上層でも同様な傾向であった。ここで、バイブレータから 63cm 近傍に取り付けたひずみ式加速度計による振動加速度の値は検知センサの値とほぼ一致していることから、検知センサによりコンクリート中の振動加速度の測定が可能であることが確認できたといえる。

一般に、圧縮強度を指標とした振動締固めの有効範囲は振動加速度と密接な関係にある²⁾とされていたが、実際の現場施工ではコンクリートの密実な充填確認で高価な市販の振動加速度計を埋設するのは難しかった。しかし、安価な検知センサを利用し、図-2 や図-3 で示した画面表示や計測方法を工夫することで、実際の現場施工でも瞬時にコンクリートの密実な充填確認が可能になると考えられる。

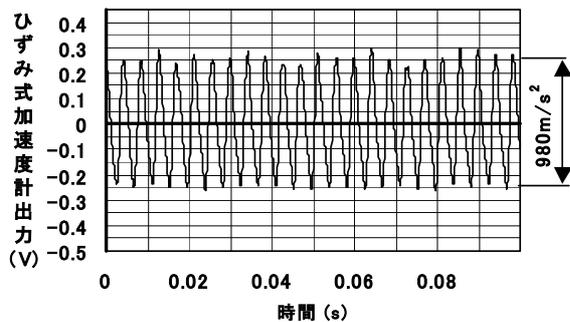


図-6 バイブレータの振動加速度波形

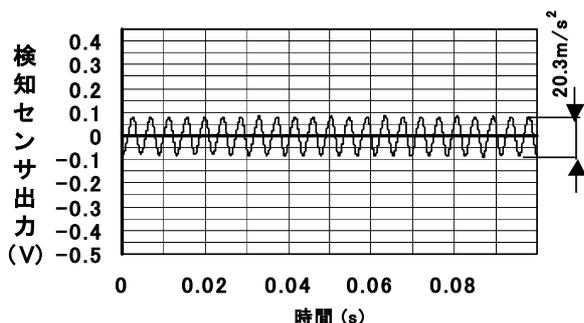


図-7 検知センサの振動加速度波形

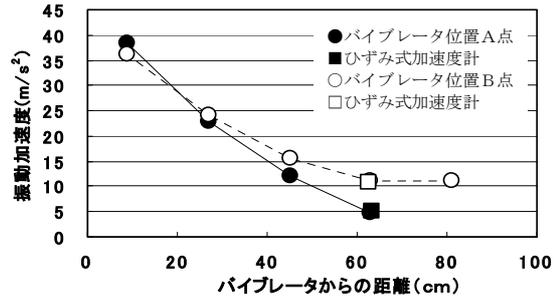


図-8 下層の振動加速度の推移

4. シリーズⅡ システムの動作確認と密実性の評価

シリーズⅡでは、各種コンクリートについてバイブレータによる締固め位置と検知センサの取付け位置による振動加速度の距離減衰状況の把握とシステムの動作確認を行なうとともに、検知センサと市販の圧電型加速度計により計測される振動加速度の比較を行なった。またコンクリートの材齢 28 日において、コア強度および単位容積質量を求めて、それぞれ振動加速度との関係で密実性を評価した。なお、シリーズⅡおよびⅢでは、本システムから別途計測用のデータレコーダへ図-3 に示した測定周期約 2.7 秒で振動加速度を計測記録して示した。ただし、締固め検知の振動加速度の測定範囲は 438m/s² までとした。

4.1 システムの動作確認実験

(1) 実験方法

図-9 に示すように塗装合板を用いて作製した幅 30cm、長さ 90cm、高さ 30cm の型枠内の垂直鉄筋に検知センサと圧電型加速度計を背中合わせに 4ヶ所取り付けて、表-1 に示すスランブ 8cm と 18cm の 2 種類のコンクリートをそれぞれ打ち込み、バイブレータ (周波数 250Hz、棒径 25mm と 42mm) を用いて A 点にて 20 秒間加振し、この間、検知センサと圧電型加速度計による振動加速度の時間経過をそれぞれ 2.7 秒周期で 7 ポイント測定した。

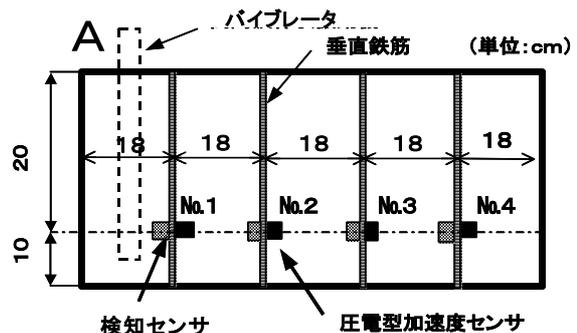


図-9 バイブレータと検知センサなどの位置

表-1 コンクリートの調合条件と性質

コンクリートの調合条件				フレッシュコンクリートの性質		
スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	W (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
8	50	4.5	160	8.5	3.6	18.0
18	50	4.5	180	18.0	4.5	18.0

(2) 実験結果と考察

パイプレータ（棒径 42mm）を用いた加振で生じた振動加速度の時間変化を図-10 および図-11 に示す。いずれも左図は検知センサの振動加速度の値、右図は圧電型加速度計の振動加速度の値である。これらの図より、振動加速度の大きさは若干異なるが、各位置における検知センサは圧電型加速度計と同様に振動加速度を測定することができているといえる。また、打込み時の充填については、いずれのスランプのコンクリートもスコップでの打込み時点では2～3箇所の検知センサが図-2 に示す空気表示であったが、振動締め開始後数秒で全ての検知センサがコンクリートを表示した¹⁾。また検知センサ面はコンクリートなどが接触しないと振動加速度を捉えないので、振動加速度が大きく計測された位置では確実にコンクリートが充填されていると判断できる。

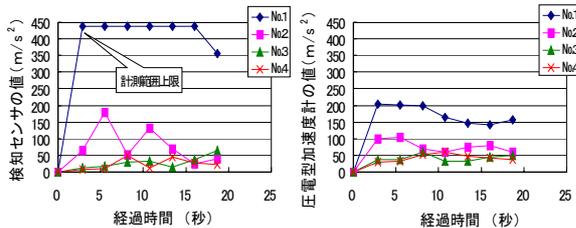


図-10 スランプ 8cm の振動加速度の時間変化

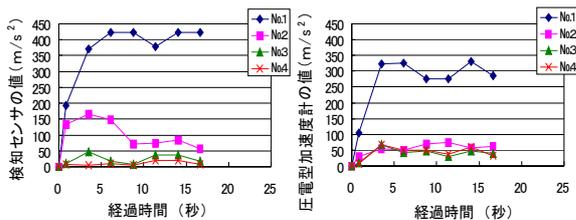


図-11 スランプ 18cm の振動加速度の時間変化

次に、各棒径パイプレータ毎に各検知センサ位置の 20 秒間（7ポイント）の平均の振動加速度（以下、平均振動加速度と記す）を算出して、図-12 および図-13 にパイプレータからの距離と平均振動加速度との関係について示す。振動加速度の距離減衰の状況と棒径による違いや、パイプレータの近傍では急激に振動加速度が大きくなるのが検知センサでも捉えられた。

なお、これらの結果において、検知センサの振動加速度が圧電型加速度計のものよりも若干大きく計測された理由として、圧電型加速度計は 1 軸方向のみに感度があるのに対して、検知センサは後述するシリーズⅢの結果

を踏まえると、コンクリート中にあれば振動加速度に対する感度の異方性が少なく、効率よく振動加速度を捉えることができるためと考えられる。

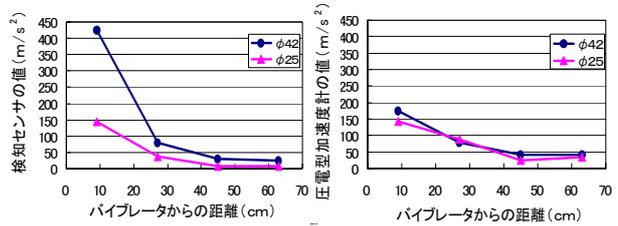


図-12 スランプ 8cm の振動加速度距離減衰

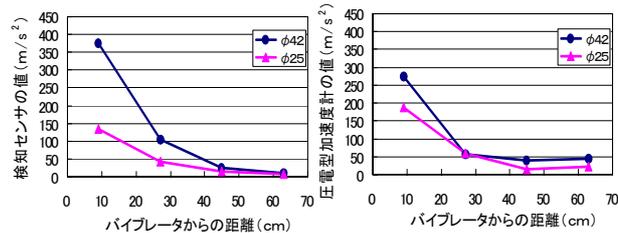


図-13 スランプ 18cm の振動加速度距離減衰

4.2 振動加速度と密実性について

(1) 実験概要

4.1 で作製した試験体は材齢 7 日まで実験室内で養生した後型枠を脱型し、材齢 21 日に図-14 に示す位置でφ10cmのコア供試体を採取した。コア供試体は長さ約20cmに成形し、20°C、60%の実験室で養生後、材齢 26 日より水中養生を施し、材齢 28 日に単位容積質量の測定と圧縮強度試験を実施した。コア供試体の単位容積質量は、コア供試体の質量と水中におけるその見掛けの質量の測定を行ない、算出した。また、材齢 28 日において標準養生したφ10×20cm 供試体の圧縮強度および単位容積質量を求めた。なお、28 日間の平均気温は 10.6°C であった。

(2) 実験結果と考察

図-15 に、平均振動加速度とコア強度、単位容積質量の関係を各コンクリート毎にそれぞれ示す。平均振動加速度の値は 4.1 に示した平均振動加速度を指数近似し、パイプレータとコア中心までの距離で補完して算出した値を用いた。いずれも平均振動加速度が大きくなると圧縮強度や単位容積質量はともに大きくなる傾向となっており、振動加速度は圧縮強度や単位容積質量の指標と密接な関係があることがわかる。このことから、既往の文献²⁾ などにも示されているように、振動締固めの有効範囲はある一定以上の振動加速度が得られた範囲と定めれば、有効範囲内にあるコンクリートの締固めは十分であり、コンクリートの密実性には問題がないものと推定することができる。したがって、実際の現場作業でも振動

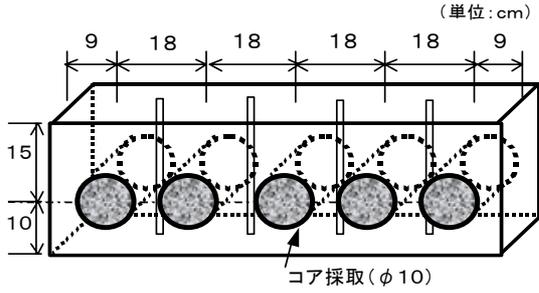


図-14 試験体とコア供試体の採取位置

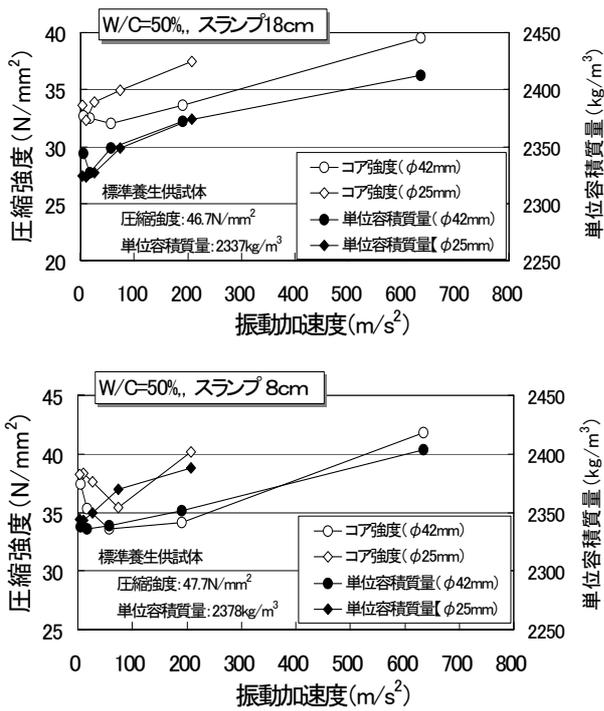


図-15 振動加速度とコア強度，単位容積質量の関係

加速度を指標として，内部コンクリートの密実性を瞬時に評価可能であると考えられる。

5. シリーズⅢ 振動加速度の測定条件による検討

シリーズⅢでは，振動加速度計測時における検知センサの異方性やパイプレータが鉄筋に接触した場合などの影響について実験した。

5.1 検知センサの異方性

(1) 実験概要

図-16に示すように，50cm角の高さ25cmの型枠を用いて，検知センサの検知面とパイプレータ（周波数250Hz，棒径25mm）の振動部との角度が0°（平行），30°，60°，90°（垂直）となるように，振動部から約20cmに位置する鉄筋へ取り付けました。型枠内へ，W/C=50%，スランプ15cmのコンクリートを打ち込み，中心部を20秒間加振し，その平均振動加速度を測定した。

(2) 実験結果と考察

図-17に，振動部に対する角度と平均振動加速度の関係を示す。平均振動加速度はいずれの角度のものも大差がないことから，検知センサの検知面が振動部に対していずれの角度でも計測結果に及ぼす影響は少ないと思われる。このため検知センサの設置位置の自由度が大きいといえる。

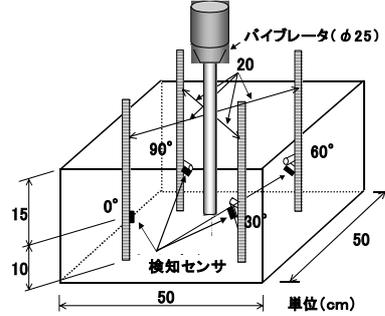


図-16 検知センサの異方性の実験

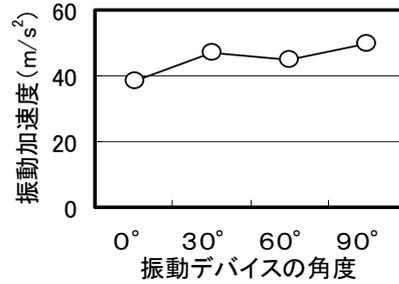


図-17 検知センサの異方性

5.2 振動機が鉄筋や型枠に接触した場合

(1) 実験概要

図-18に示すように，検知センサを適宜鉄筋に取り付けた型枠内へ，W/C=50%，スランプ15cm，空気量4.5%のコンクリートを打ち込み，振動機（周波数250Hz，棒径25mm）を用いて，A点，B点，C点で20秒間加振し，その平均振動加速度を測定した。ただし，B点では鉄筋に，C点では合板型枠に振動部をそれぞれ接触させた。

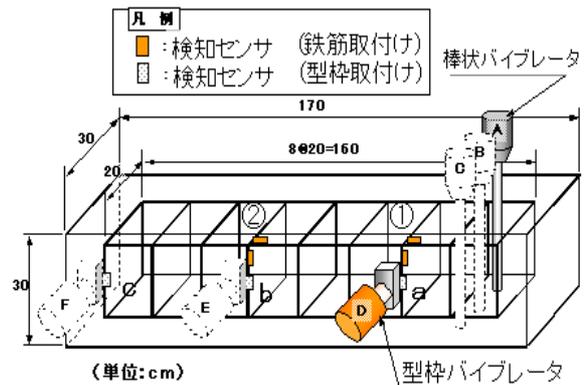
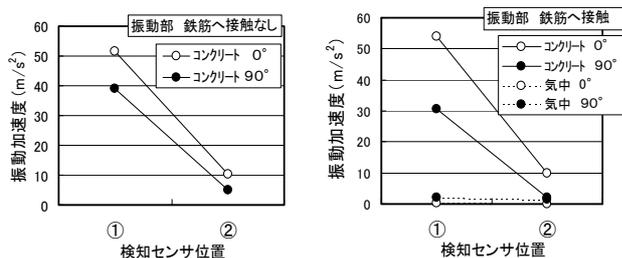


図-18 振動機の鉄筋，型枠の接触による影響

(2) 実験結果と考察

図-19に、振動機の振動部を鉄筋に接触させない場合の振動加速度の計測結果を示す。垂直鉄筋と水平鉄筋に取り付けたそれぞれの振動加速度の値は大差がなく、5.1と同じように検知面の角度の影響は少なかった。次に振動部を鉄筋や型枠に接触した場合の計測結果をそれぞれ図-20および図-21に示す。図-20にはコンクリート打込み前に、振動部を鉄筋へ接触させて振動加速度を計測した結果をあわせて示した。振動部を鉄筋へ接触させた場合の振動加速度は、コンクリート打込み前では極めて小さく、打込み後では振動部と平行の検知センサは図-19と同程度の振動加速度であったのに対して、垂直のものは小さくなる傾向が見られた。また、型枠面に取り付けた検知センサでは振動部を型枠へ接触させた場合のほうが小さくなる傾向が見られた。

本来、バイブレータの振動部を鉄筋や型枠へ接触させることは避けるべきであるが、以上の結果から検知センサを用いたコンクリートの締固め時における振動加速度の計測において、それらの影響を把握することができた。



注) ①振動部から約30cm, ②振動部から約90cm

図-19 鉄筋の接触なし 図-20 鉄筋に接触あり

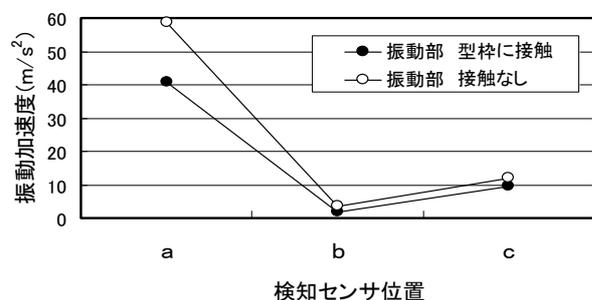


図-21 振動機が型枠に接触した場合

5.3 型枠バイブレータを用いた場合

(1) 実験概要

図-18の試験体の合板型枠外側から型枠バイブレータ(周波数280Hz)を用いて、D、E、F点から順次それぞれ20秒間加振し、その平均振動加速度を測定した。

(2) 実験結果と考察

図-22に、型枠面の各位置から振動を加えた場合の型枠内面に取り付けた検知センサの振動加速度の計測結果を示す。検知センサは振動位置が変化した場合の振動加速度を捉えている。このことから、検知センサは、内部のみならず外部振動機による締固めについても振動加速度を指標として、内部コンクリートの密実性を瞬時に評価可能であると考えられる。

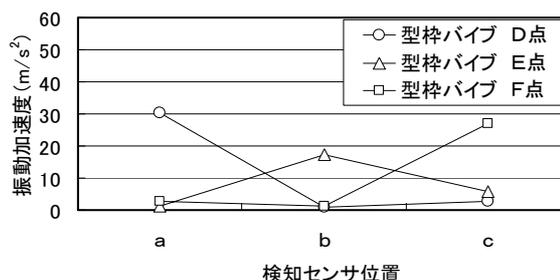


図-22 型枠バイブレータの振動加速度計測

6. まとめ

本実験の範囲では、以下の結論が得られた。

- (1) 検知センサを利用して、ひずみ式などの市販加速度計と同じように振動加速度を計測できた。
- (2) 検知センサで測定した振動加速度を指標として、コンクリートの圧縮強度や単位容積質量に及ぼす締固め時の振動加速度の影響について実験し、密実性を定量評価できた。
- (3) 検知センサによる振動加速度の計測における、検知センサの異方性や、鉄筋や型枠への振動機の接触による影響を把握した。

以上、既に実用化しているコンクリート充填検知システムに締固め検知機能を付加し、計測方法や画面表示に工夫を加えることで、現場で簡便かつ迅速に、コンクリートの打込み・締固め時に密実な充填確認の判定できるシステムの実用化に目途をつけることができた。

参考文献

- 1) 金子稔, 坂井孝, 安田正雪, 末岡英二: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 24, No. 1, pp. 1527-1532, 2002
- 2) 例として, フレッシュフレッシュコンクリートの挙動研究委員会振動締固めワーキンググループ: コンクリートの振動締固めに関する実験報告書, (社)日本コンクリート工学協会, 1990年3月