



バイブレータ音を利用したダムコンクリートの締固め判定

栗本 雅裕・石橋 則秀・林 裕之

ダムコンクリートの締固め判定を定量的に行うことを目的に、コンクリートの締固めの進展とともに変化するバイブレータ音を使った締固め判定装置を開発し実打設時に適用した結果、合理的な締固め判定が可能になった。コンクリートの締固め判定は、締固めが進むにつれてバイブレータ音が大きくなった後小さくなる傾向を利用したもので、バイブレータの音が大きくなることはコンクリートの振動する領域が拡大していること、音が小さくなる傾向はコンクリートの密度増加に対応している。また、判定装置ではニューラル・ネットワーク理論によりバイブレータ音の変化パターンを認識させ、コンクリートの締固め判定に適用した。

キーワード：ダム，コンクリート，締固め，バイブレータ，音圧，ニューラル・ネットワーク

1. まえがき

ダムコンクリート打設において、コンクリートの締固めの適正な判定はダム本体の品質の向上に重要な要素となる。しかしながら、コンクリートの締固めの終了判定は振動締固め機の運転手の勘と経験に頼っているのが現状である。さらに、ダムコンクリートの示方書では、

- ① コンクリートの沈下がなくなること、
- ② 空気の泡が生じなくなること、
- ③ 水が表面に現れて光沢が生じること、

により確認できると表現されており、定量的な規準は示されていない。

このことから、コンクリートの締固めを定量的に評価するため岩崎ら¹⁾によりコンクリート中の加速度とコンシステンシーの関係、徳田ら²⁾による超硬練りコンクリートを対象とした振動ローラによる締固めにおけるセメントペーストの挙動の把握が行われた。

また、社団法人日本コンクリート工学協会フレッシュコンクリートの挙動研究委員会の報告³⁾では構造物の壁、床版を対象とし締固め時の加速度とコンクリート密度、強度の関係が明らかにされている。

これらの研究ではフレッシュコンクリートの締固め度と加速度等変化の関係およびセメントペーストの挙動等を明らかにしたが、得られた知見に基づく締固めの管理にまで適用していない。

上記のことから、過度な締固めによるダムコンクリ

ートの品質低下の防止、さらにグリーンカット量の低減を目的にダムコンクリートの定量的な締固め判定方法に関する研究を行った。本報文では有スランプのダムコンクリートを対象としバイブレータから発生する音の変化を検出し、締固め判定に適用した結果について述べる。

2. 開発概要

振動締固め機を使ったコンクリート締固めにおいて、周囲に伝播するバイブレータ音の変化に着目し、締固め判定への適用性について実験的な研究を行った。実験は次の3種類を実施した。

- ① 締固め時のバイブレータ音の変化とコンクリートの物性値との関係を把握するための要素実験
- ② 実際のダムコンクリートを使った締固め実験
- ③ 締固め判定装置を製作し実打設における適用性の確認

①、②の実験結果から、バイブレータ音および加速度の変化とコンクリートの物性値および締固め現象との関係を確認し、③ではニューラル・ネットワーク理論を適用した締固め判定装置を製作し実打設での適用性について検討した。

3. 要素実験結果

コンクリートを締固めている時のバイブレータの加速度と音圧の計測波形の一例を図-1に、音圧波形の

包絡線を図-2に示す。包絡線は波の振動周期内の最大値と最小値を求めたものである。バイブレータの加速度は締固め開始から30秒までは一定の値を示し徐々に小さくなり50秒以上ではほぼ一定値を示す傾向にある。また、音圧波形は加速度波形と比較すると、対照的に50秒付近までは一定値を示し、その後急増し65秒付近で最大値を示す。その後減少傾向に転じ70秒以上で若干の増加傾向を示すがほぼ一定値となっている。

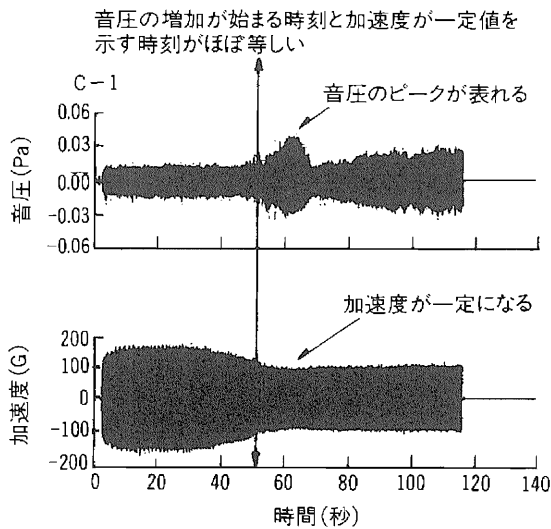


図-1 計測波形の一例

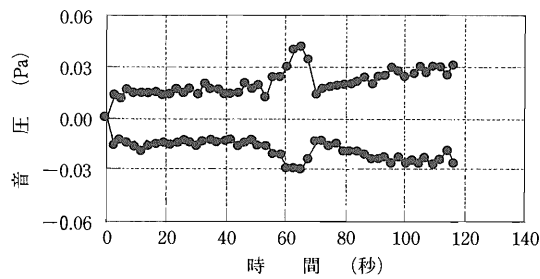


図-2 波形の包絡線

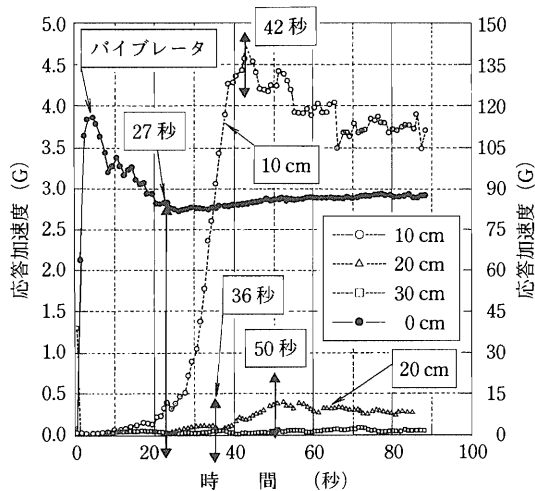


図-3 締固め時の加速度変化

バイブレータおよびコンクリート表面の加速度を図-3に示す。

バイブレータの加速度は締固め開始から27秒において約120 G (G:重力加速度) から85 Gまで低下したのち、ほぼ90 G程度の一定値を示している。また、バイブレータから10 cmの位置での加速度はバイブレータの加速度が低下し一定値を示す時刻で急激に増加を始め、42秒において最大値4.7 Gを示した後に減少に転じている。この時点においてコンクリートが振動により締固められている領域がバイブレータから10 cmまで達したものと考えられる。また、20 cmの位置での加速度は締固め開始から50秒で最大値0.4 Gとなり、その後減少している。また、30 cmの位置ではバイブレータの振動はほとんど伝達されていない。目視観測からコンクリート表面が投入時と比較して変化が認められたのは約25 cm程度であった。

締固め時のコンクリート表面の沈下速度を図-4に示す。

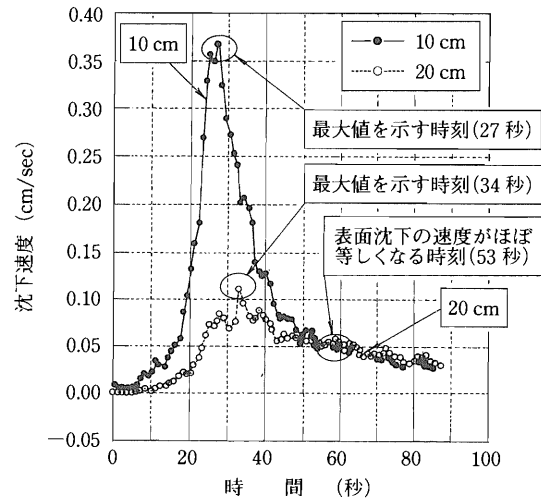


図-4 締固め時のコンクリート表面の沈下速度

バイブレータから10 cmの位置でのコンクリート表面の沈下量は20秒付近から急激に増加が始まり、27秒において表面沈下速度は最大値を示している。また、20 cmの位置では34秒において最大値を示している。また、締固め開始から53秒付近において10 cm、20 cmの表面沈下速度はほぼ等しくなっていることが分かる。

図-5は音圧波形の包絡線の正側のみを示している。音圧が増加し音圧が減少に転じる時刻50秒は10 cm、20 cmの位置での表面沈下速度がほぼ等しくなった時刻に対応している。

これらの実験結果から音圧が大きくなる現象はコンクリートが流動化している部分の拡大、すなわち振動

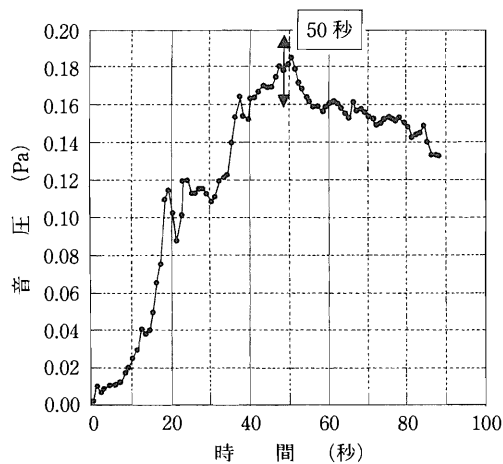


図-5 締固め時の音圧変化

が音として空气中に伝播する面積が大きくなることにより発生すると考えられる。したがって、音圧が減少傾向に転じる時刻は流動化部分の拡大が止まる時刻であると推測できる。これは、

- ① 音圧が最大値を示す時刻と表面の沈下速度がほぼ等しくなる時刻と一致している実験結果、
- ② コンクリート表面の応答加速度が一定値を示し始める時刻と一致している実験結果、

から説明できる。

すなわち、コンクリートの締固めにおいて、バイブレータの加速度が伝達され流動化の領域が拡大する時間では音圧は増加傾向を示し、流動化の拡大が止まり流動化部分の密度増加のみの現象に変化した時刻において、音圧は減少傾向を示すと考えられる。音圧の減少は、密度増加によりコンクリートと空気の影響インピーダンス比が変化しコンクリート内部で発生している音の外部への透過が小さくなることによるものと考えられる。

4. 現場締固め試験結果

要素実験結果よりバイブレータ音の変化とコンクリートの締固めの現象との関係を把握した。要素実験の結果と実際のダムコンクリート締固め時に発生する現象との対応性の確認および音圧データの締固め管理への適用性を評価することを目的として、実際のダムコンクリートを使った締固め実験を実施した。

締固め実験の状況を写真-1に示す。

ドラム缶にコンクリートを投入し、ダム用振動締固め機のバイブレータを1本使い、締固め時間を変えた締固め実験を行った。また、供試体の重量測定および直径10 cmのコアを採取した。締固め時間40秒およ



写真-1 現場締固め試験状況

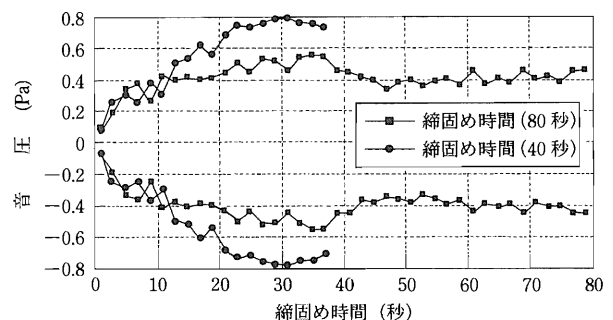


図-6 締固め時間と音圧変化

び80秒の音圧変化を図-6に示す。締固め時間40秒、80秒は音圧が最大値を示した時間から10秒間および45秒間、締固めた場合である。音圧波形の包絡線は徐々に大きくなり最大値を示した後減少している。

締固め実験に使用した供試体からコアを採取し、コアの表面を観察した。コアの長さは骨材の粒度分布を調べるための長さ75 cmとした。締固め時間80秒のコアを写真-2に示す。上部仕上げ面から3 cm程度の範囲においては粗骨材がほとんど存在せず、モルタル状であった。



写真-2 採取したコア

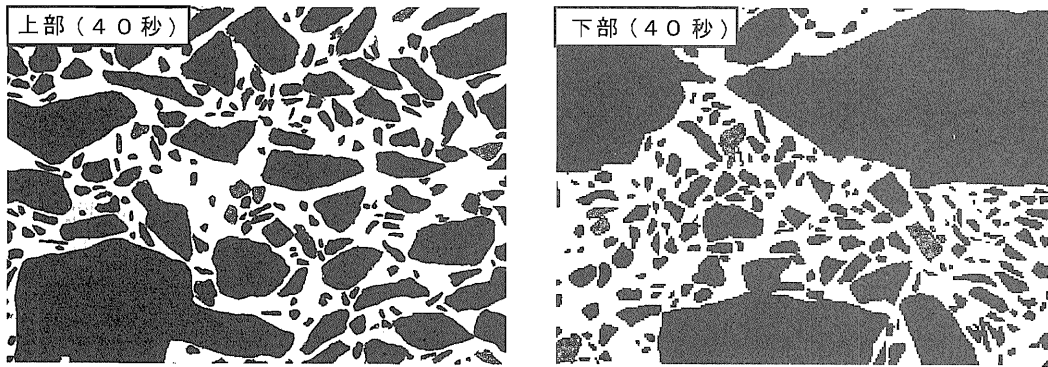


図-7 締固め時間と骨材の粒度分布 (40秒)

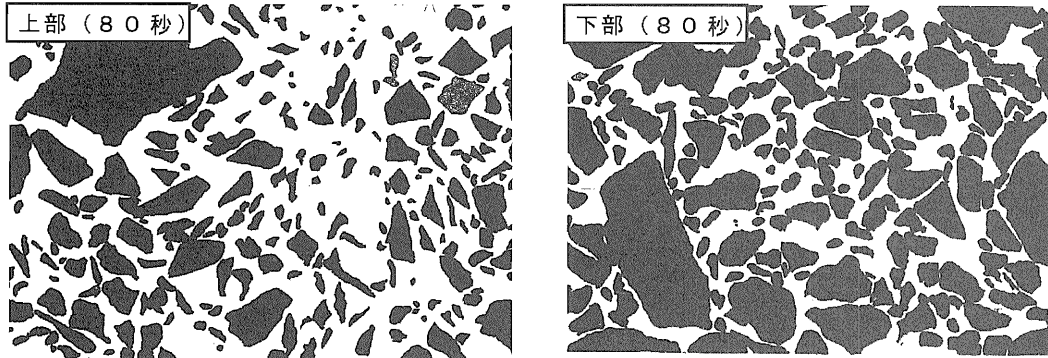


図-8 締固め時間と骨材の粒度分布 (80秒)

採取したコアの上部，下部のコア表面の骨材分布を図-7，図-8に示す。図-7は締固め時間が40秒，図-8は80秒の場合である。

図において黒い部分が骨材を白い部分がモルタル等の骨材以外の部分を示している。図において黒い大きい部分は150mm程度の骨材が現れたものである。コアの上部は締固め時間が40秒の場合，150mm程度の骨材は均等に配置されている。締固め時間が80秒の場合，上部のコアには大きい骨材は現れていないこと，下部では骨材が40秒の場合と比較して密に詰まっていることがわかる。これは過度な締固めにより骨材が沈み込んだものと推測できる。

締固め時間40秒では骨材が一様に分布し，骨材分布から締固めは良好であると考えられる。

要素実験および現場での締固め実験結果より，バイブレータの音圧が大きくなり，その後小さくなり一定値を示し始めるとコンクリートの締固めが完了したと判定して良いと考えられる。また，音圧が最大値を示した後の過度な締固めは骨材の粒度分布が不均一になりコンクリートの品質低下を招くことがわかった。

5. ニューラル・ネットワークを適用した締固め判定

ダムコンクリート打設時におけるバイブレータ音は写

真-3に示すように，運転室下部に設置したマイクロフォンにより測定した。また締固め判定装置（パソコン）は運転手後部に配置した。

写真-3に示した状況で計測した音圧データの時刻歴の一例を図-9に示す。計測は高周波数の分解能を



写真-3 締固め時の音の測定方法

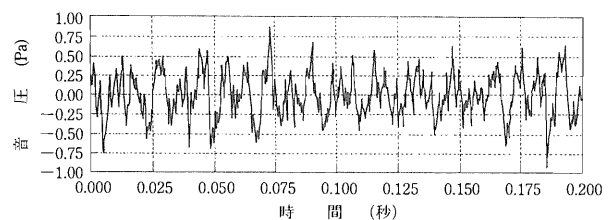


図-9 締固め時の音圧波形の一例

持たせるためサンプリング周期は5,000 Hzとした。また、図-9の音圧データは0.2秒間のみを示したものである。計測データには周囲の雑音、エンジン音さらに型枠際の締固めに使用する手動のバイブレータ音が含まれている。音圧波形のフーリエ・スペクトルを図-10に示す。図-10からエンジン、手動バイブレータおよびバイブレータから発生する音の卓越周波数はそれぞれ65 Hz, 80~95 Hz, 110 Hzと判断できる。

また、エンジン音、手動バイブレータ音およびバイブレータ音の卓越周波数は離れていることから狭帯域のバンドパスフィルタを用い110 Hzのバイブレータ音を取出した。

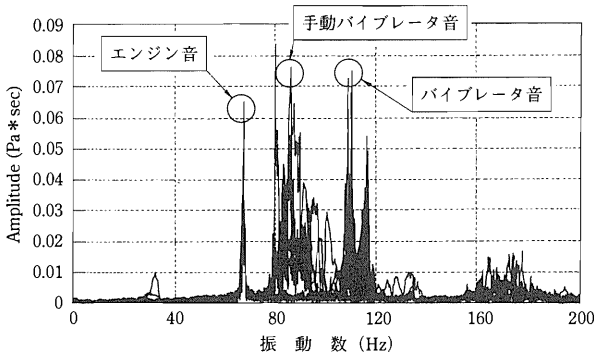


図-10 音圧波形のフーリエ・スペクトル

ダムコンクリート実打設時において、図-9に示すような波形からバイブレータ音を抽出し音圧波形の包絡線を2秒間隔で算出した。その結果を図-11に示す。図-11は現場の主任技術者がコンクリート標準示方書「ダム編」の規準にしたがって締固め終了判定をした時のデータである。音圧波形の包絡線はコンクリートの締固めの進展につれて大きくなりその後小さくなっている。また、締固め終了判定は音圧が下がったのち増加に転じて4~5秒で行われている。

この傾向はほぼすべての締固めケースで表れ、音圧

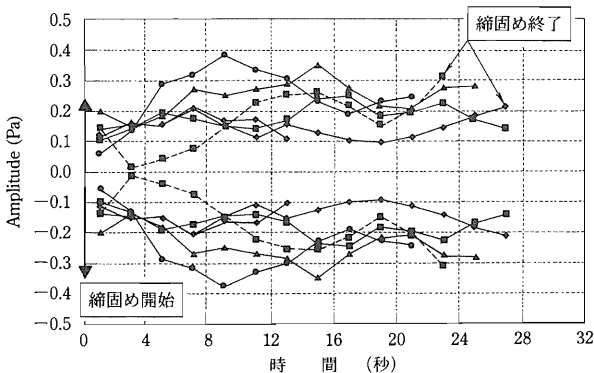


図-11 コンクリート打設時の音圧波形の包絡線

の増加・減少の勾配は要素実験およびドラム缶を使用した締固め試験とは若干異なるが、音圧変化の傾向はほぼ同様であった。

図-11に示したダムコンクリート実打設時のバイブレータ音の変化パターンを教師データとしてニューラル・ネットワークにより学習させ締固め判定に適用した。

ニューラル・ネットワークによる締固め判定事例を図-12に示す。図-12において楕円で囲んだ部分は振動締固め機のバイブレータをコンクリート内に挿入している時間帯である。すなわち、締固め開始ボタンが押された時刻から音圧が下がり続ける場合は、ニューラル・ネットワークの締固め判定を飛ばし、音圧が増加傾向に転じた時刻で始めてニューラル・ネットワークの判断に入るように設定した。

図-12に示すデータは締固め終了信号としてニューラル・ネットワークが判定した最終時刻までのデータである。ブザーによる締固め終了信号の出力は図-11の結果を考慮して図-12の最終時刻から4秒後とした。

また、締固め判定装置のブザー音とコンクリート表面の目視観測からニューラル・ネットワークによる締固め判定は人間の判断に近い形で行われたことを確認した。

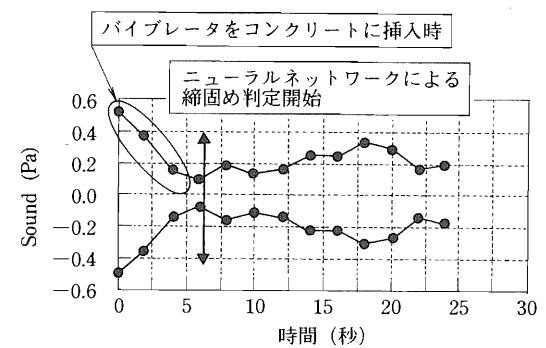
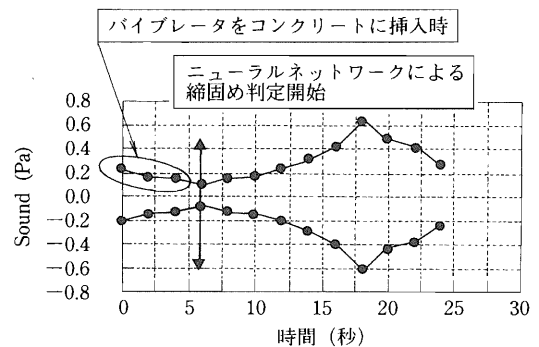


図-12 締固め判定結果

6. 結 論

ダムコンクリートの品質向上およびグリーンカット量の低減を目的に定量的な締固め判定について要素実験、現場での締固め実験およびニューラル・ネットワークを使った締固め判定装置を製作しダムコンクリートの実打設に適用した結果、次に示すことが結論付けられる。

振動締固め機によるダムコンクリート締固めにおいてバイブレータから発生する音の変化は、コンクリートの締固め時の現象と密接な関係があることが分かった。

すなわち、締固めにおいてバイブレータの音圧が大きくなる時間ではコンクリートの振動領域が拡大、また音圧が減少傾向を示す時間ではコンクリート内の水、空気が上昇することにより密度が増加している。

上記の現象はダムコンクリートの実打設時にも発生することを確認した。

過度な締固めは骨材の粒度分布が不均一になることを確認した。

ニューラル・ネットワークにダムコンクリート締固めにおけるバイブレータの音圧変化パターンを組込んだ締固め判定装置により、締固め判定が実工事に適用可能となった。

JCM/A

《参考文献》

- 1) 岩崎, 坂本: 内部振動機によるコンクリートの締固めに関する研究フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, 1984年4月度
- 2) 徳田, 加賀谷, 川上, 辻子: 超硬練りコンクリートの締固め度に及ぼす打ち込み方法および締固め方法の影響に関する基礎実験, 土木学会論文集, 第408号/V-11, 1989年8月
- 3) 社団法人日本コンクリート工学協会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, 1990年3月

〔筆者紹介〕



栗本 雅裕 (くりもと まさひろ)
株式会社奥村組
技術研究所
第4グループ
グループ長



石橋 則秀 (いしばし のりひろ)
株式会社奥村組
東京支社機械部
課長



林 裕之 (はやし ひろゆき)
株式会社奥村組
東京支社土木部
課長

移動式クレーン Planning 百科

社団法人日本建設機械化協会機械部会建築生産機械技術委員会移動式クレーン分科会（石倉武久分科会長）では、約2年間の編集作業を終え標記の図書を刊行しました。

本書は、

- ・建築工事計画担当者、
- ・工事担当者、
- ・作業実施担当者、

にとって、短期間に移動式クレーン作業の要点を習得するのに最適な書物です。担当する建築工事に適合する移動式クレーンをより迅速に、より効果に選定・運用する際に大いにご活用下さい。

A4判 159頁 定価2,000円（消費税別） 送料400円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289