

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* 三澤孝史**
石橋則秀*** 戸澤清浩****

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。また、「コンクリート標準示方書ダム編」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に岩崎等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についての研究が、徳田等²⁾により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のフレッシュコンクリートの挙動研究委員会報告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の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ているがコンクリートの締固め判定には適用していない。

本報告では、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、グリーンカット量の低減を目的にバイブレータ音の変化に着目したダムコンクリートの締固め判定装置の開発を行い、現場での実証試験によりその適用性を確認した。

2. バイブレータ音の変化と締固めの関係

2.1 実験方法

コンクリートの締固めとバイブレータ音、加速度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図-1に示す実験装置で実験を行った。容器の大きさは幅40cm、長さ80cm、深さ40cmである。実験は治具にバイブレータを固定し容器の中にコンクリートを投入し振動により締め固めた。また、実験に使用したコンクリートはダムコンクリートに近い性状を模擬するためには有スラ

ンプの配合を参考にして決定した。

実験ではバイブレータおよびコンクリート表面に加速度計、コンクリート表面の沈下量の把握を目的とした変位計およびマイクロフォンの3種類の計測器を使用した。加速度計はバイブレータおよびコンクリート表面にバイブレータから10cm、20cm、30cm、変位形は10cm、20cmの位置に、またマイクロフォンはバイブレータから60cmの位置に設置した。サンプリング周波数はバイブレータの周波数が約260Hzであるため、4000Hzとした。

2.2 実験結果

締固め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-2に示す。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を示した。また、音圧波形は加速度波形と比較すると、対照的に40秒付近まで

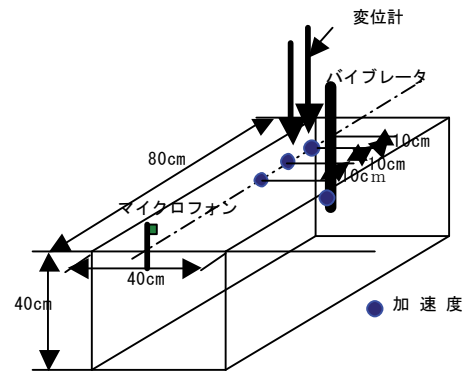


図-1 実験装置

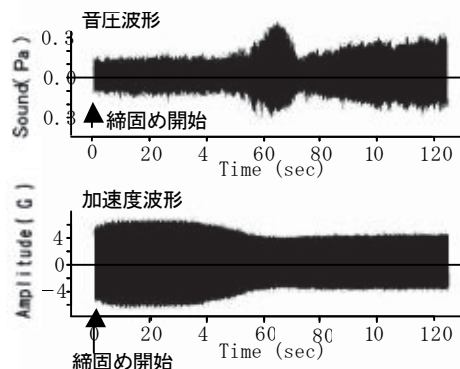


図-2 計測波形の一例

*構造研究室 **機電研究室 ***東京支社機械部 ****広島支社土木部

は一定値を示し、その後急増し 55 秒付近で最大値を示す。その後減少傾向に転じ 65 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。同様な傾向が締固め可能であるコンクリートを対象とした締固め実験で表れることを確認している。

図-2 に示すような計測波形から、バイブレータの振動周期 (約 0.0038 秒) 毎に最大値および最小値を求め、それぞれ 2 秒間の時間平均を算出し、(最大値-最小値) / 2 を求めた。このようなデータ処理を行って求めた。バイブレータおよびコンクリート表面の加速度、コンクリート表面の沈下速度および音圧の時間変化を図-3、図-4、図-5 に示す。

図-3 において、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 120G (G: 重力加速度) から 85G まで低下したのち、ほぼ 90G 程度の一定値を示している。また、バイブレータから 10cm 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に急激に増加を始め、42 秒において最大値 4.7G を示した後に減少に転じている。この時刻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 10cm まで達したものと考えられる。また、20cm の位置での加速度は締固め開始から 50 秒で最大値 0.4G となり、その後減少している。また、30cm の位置ではバイブレータの振動加速度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 25cm 程度までであった。

次に、図-4 はコンクリート表面の沈下速度を示したものである。バイブレータから 10cm 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、20cm の位置では 34 秒に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 10cm、20cm の位置での表面沈下速度はほぼ等しくなっている。

一方、図-5 より、音圧が増加から減少に転じる時刻 50 秒は 10cm、20cm 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とが分かる。

2.3 バイブレータ音の変化と締固めの関係

コンクリートの締固め開始直後は、コンクリート中の空隙が非常に多く、振動はバイブレータのごく近傍のみに伝達され最初にその部分が流動化する。コンクリートの流動化部分が拡がるにつれてバイブレータの応答加速度は流動化したコンクリートの付加マス効果により低減し一定値を示し始める。その後、コンクリートの流動化部分が拡がりコンクリート表面の応答加速度が増加し最大値を示した後、漸減する。これはコンクリートの流動化部分の拡大、すなわち振動するコンクリートの質量が増加しコンクリート表面の応答加速度が低下するためと考えられる。

また、音圧が大きくなる現象はコンクリートの流動化

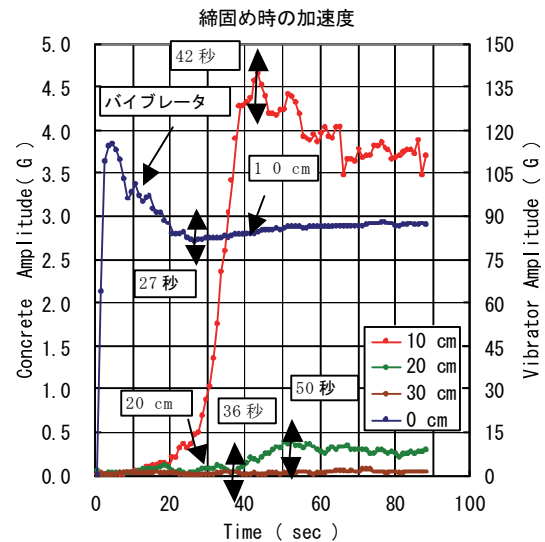


図-3 コンクリート表面の加速度

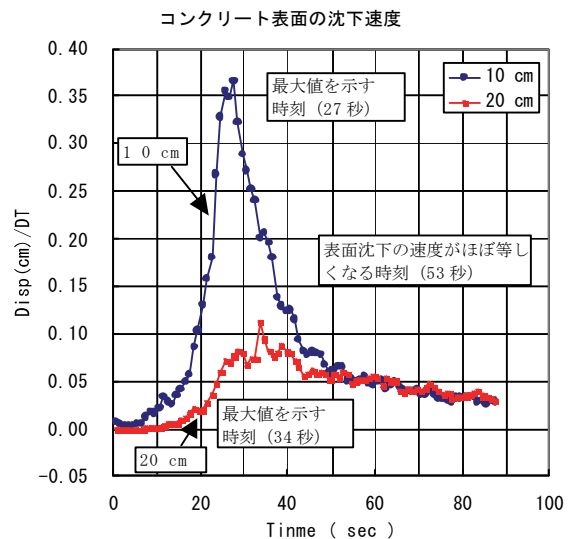


図-4 コンクリート表面の沈下速度

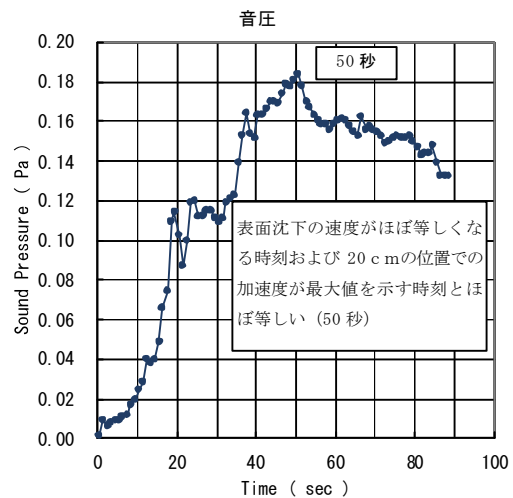


図-5 バイブレータ音の変化

部分の拡大により振動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が一致している実験結果、②また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も一致している実験結果から言える。

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コンクリートに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。

したがって、バイブレータの音圧が増大から減少に転じた後に一定値を示す時刻ではコンクリートの振動締固めによる密度増加がほぼなくなったものと考えられ、この時刻において締固め終了と判断できる。

締固め時間とコンクリートの特性を把握するためダムコンクリートを使用した締固め実験を行った。実験は締固め時間を 10、20、40、80 秒とした場合についておこなった。

実験方法は直径 88cm のドラム缶内にダムコンクリートを投入しダム用振動締固め機で締固め音圧を計測した。本実験において音圧が最大値を示した時刻は、いずれのケースにおいても締固め開始から約 30 秒後であった。

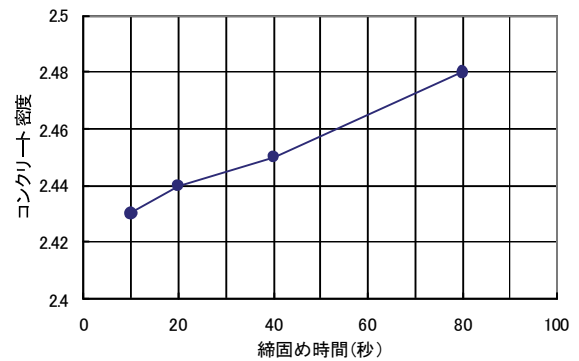


図-6 締固め時間とコンクリートの密度

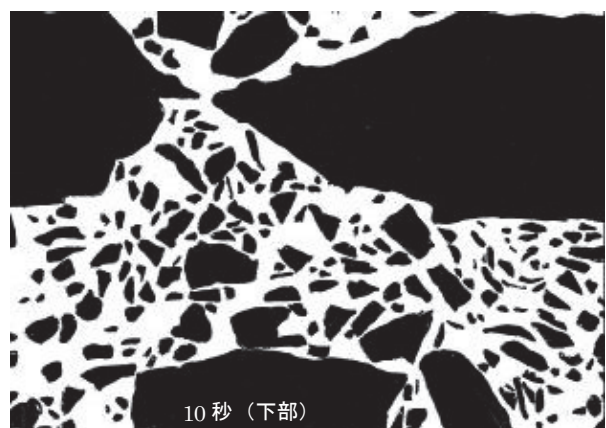
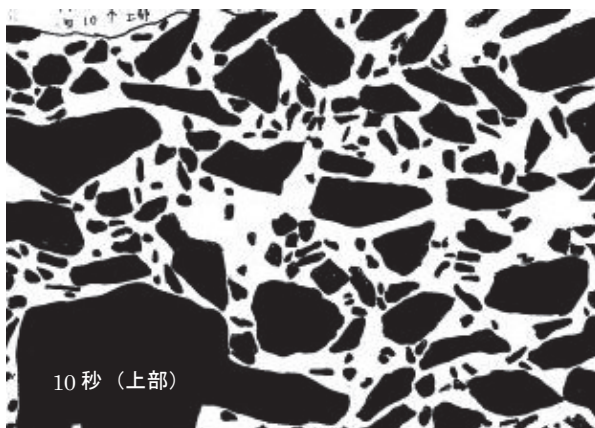


図-7 骨材の粒度分布 (締固め時間 10 秒)



図-8 骨材の粒度分布 (締固め時間 80 秒)

大値を示

2.4 締固め時間、

した後、50 秒間締固めていることになる。

締固め時間とコンクリート密度の関係を図-6に示す。コンクリート密度は締固め終了後、重量を測定し求めた。コンクリートの密度は締固め時間が長くなるのに伴って微増する傾向が確認された。

次に、締固め試験に使用した供試体から直径 10cm、長さ 75cm のコアを採取した。締固め時間 10 秒と 80 秒のコア表面の骨材分布を図-7、図-8に示す。図の左側はコアの上部、右側はコアの下部の部分である。図中の黒い部分は骨材、白い部分はモルタル部分を示している。また図の黒い大きい部分は 150mm の骨材が表れたものである。

締固め時間 10 秒の場合は、コア上部において骨材が若干多い傾向が表れているが、骨材はほぼ均等に配置されている。これに対して 80 秒の場合は上部のコアには大きい骨材は表れず、下部のコアに多く分布している。この骨材の不均一は過度な締固めにより骨材が沈みこんだものと推測できる。

3. 施工現場での音の特性

ダムコンクリートの締固め状況を写真-1に示す。計測用のマイクロフォンは運転室下部に、締固め判定装置は運転室後部に設置した。また、電源は振動締固め機のバッテリーを使用した。音圧波形の一例を図-9に示す。音圧データには、バイブレータ音以外に周囲の雑音、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。

音圧波形の周波数特性を調べるため、計測データを2秒間隔でフーリエ解析を行った。その結果を重ね合わせて図-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65Hz、80~95Hz、110Hzであった。これらの周波数は離れているためバンドパスフィルターによりバイブレータ音のみを抽出した。適用したバンドパスフィルターの周波数特性を図-11に示す。周波数の通過帯域はバイブレータ音の振動数が110Hzより100Hz~120Hzとした。

図-11に示す周波数特性を時間領域で漸化型のフィルターに変換し締固め判定システムに組み込んだ。

ダムコンクリート実施工における締固め時の音圧波形の包絡線を図-12に示す。このデータはダムの内部コンクリート打設時に、「コンクリート標準示方書ダム編」に示されている判定規準にしたがって人間が締固め判定を行ったときの結果である。

音圧波形の包絡線は締固めの進展とともに大きくなり、その後小さくなっている。締固めの終了判定は音圧が下がったのち増加に転じてから4~5秒後である。図中のデータは締固め終了判定までを示しており、最終時刻は



写真-1 ダムコンクリート締固め状況

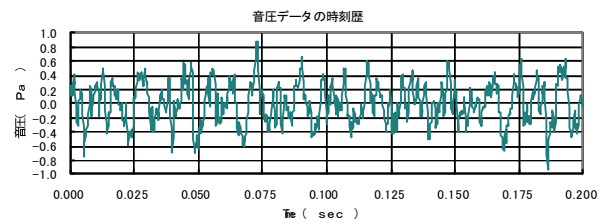


図-9 音圧波形の一例

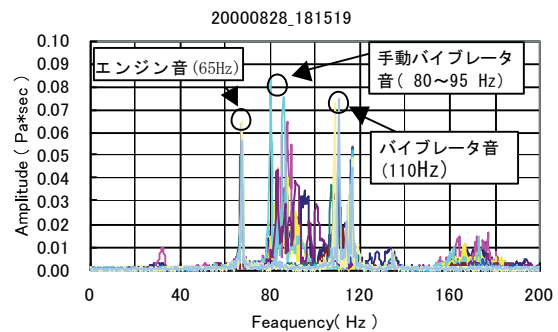


図-10 音圧の周波数特性

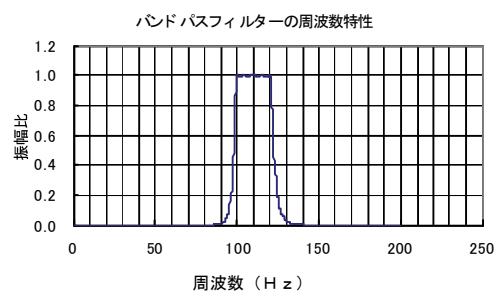


図-11 バンド・パスフィルターの特性

締固めが終了した時刻である。

4 締固め判定システム

4.1 システムの概要

ニューラル・ネットワークを適用した締固め判定システムは、締固め時のバイブレータの音圧が、一定のパターンを呈していることに着目したものである。締固め

時の音圧を計測し、音の変化が締固め終了時のパターンに合致しているかどうかをニューラルネットワークにより判定させた。

ニューラル・ネットワークとは、人間や高等動物の脳神経細胞網を計算機上で模倣し情報処理を行うものである。パターン認識、予測、最適化問題などに応用され多数の適用事例がある。

適用したニューラル・ネットワークは、一つの間層を有する3層の階層型ネットワークを用いており、学習方法としては逆誤差伝播法(Back Propagation 法)を用いた。

ニューラルネットワークの構造を図-13に示す。入力層は11ユニット、中間層は10ユニット、出力層は1ユニットである。入力、音圧データとし、出力値としては、締固め終了を{1}、締固め未終了を{0}としている。

また、結合係数および閾値の初期値は、0から1までの乱数で与えた。入力層、中間層、出力層の各ユニットの出力関数には、式-1に示すシグモイド関数を用いた。

$$f(x) = 1/(1 + \exp(-x)) \quad \text{--- (1)}$$

教師データは、図-12に示す熟練者による判定時の音圧波形の包絡線を用いた。図-12に示す包絡線の正負の差を取った後、これを3次曲線で近似したものを与えた。その結果を図-14に示す。

教師データの一例を図-15に示す。教師データは、締固め終了パターンのみでは、十分な学習結果が得られなかったため、未終了パターンについても学習させている。

締固め終了判定時の音圧波形は、図-12の終了パターンのように音圧が下がった後、再び増加に転じて数

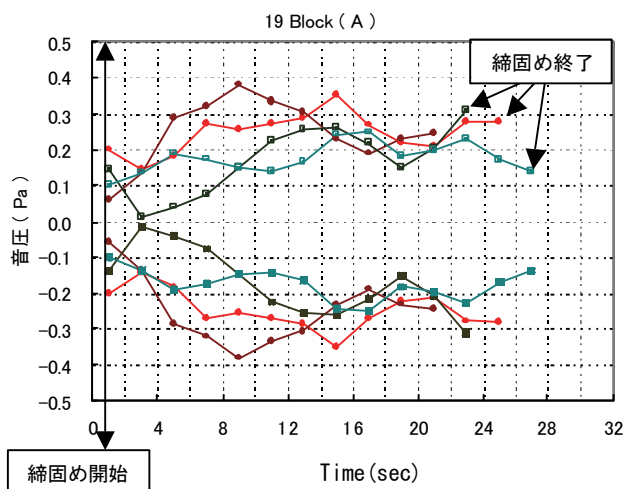


図-12 締固め時の音圧データ

秒後である。したがって、締固め終了信号の出力は、

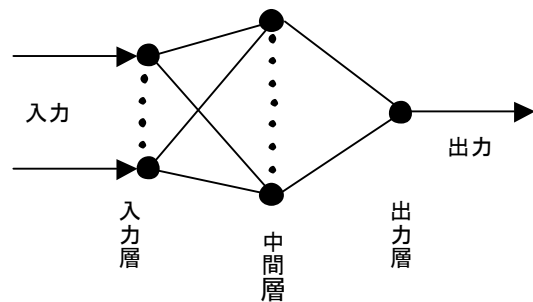


図-13 ニューラル・ネットワークの構造

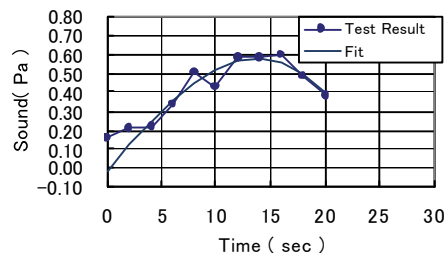


図-14 包絡線のフィティング結果

図-15に示すように、ニューラル・ネットワークによる締固め終了判定後、数秒の遅延時間を設定している。

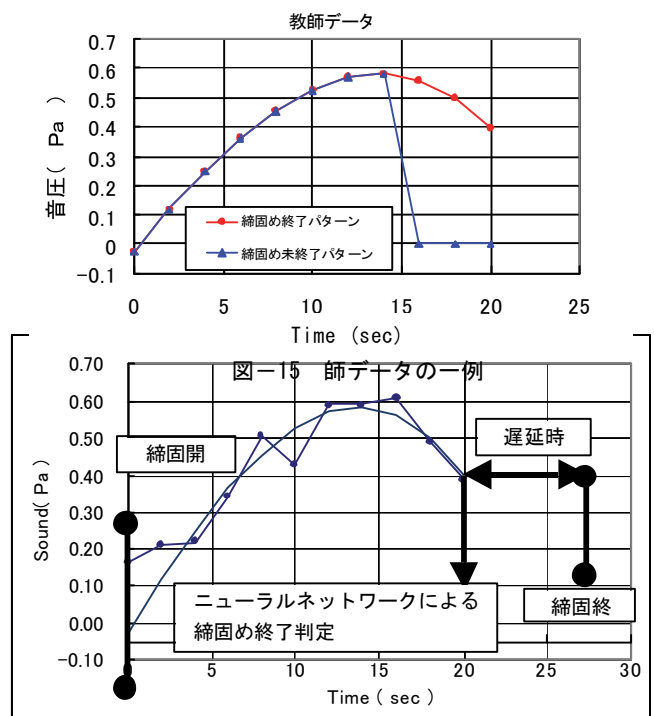
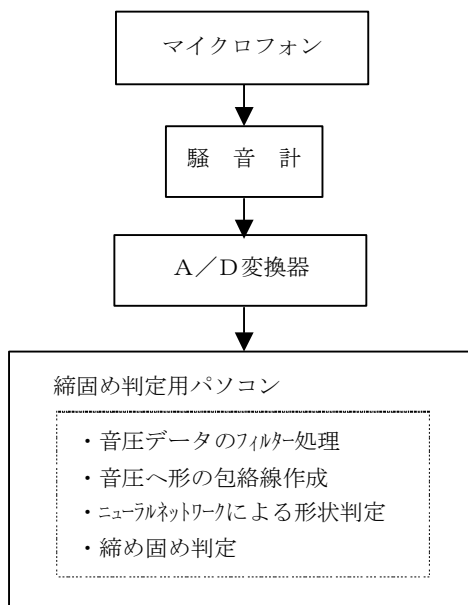


図-16 締固め判定方法

システム構成を図-17に示す。マイクロフォンにより、連続的に音を計測し、騒音計を通して電圧信号として締固め判定用パソコンへデータを取り込んでいる。締固め判定用パソコンにより判定し、ブザーによる終了信号により、オペレーターに締固め終了を知らせる。

ダムコンクリート打設時の判定結果の一例を図-18に示す。図のデータは、ニューラルネットワークが締固



め終了判定をした最終時刻までを示している。図に示すように、締固め初期段階において、音圧減少はパイプレータをコンクリート中に挿入している段階であるため、ニューラル・ネットワークによる判定回路に入らないように設定している。

図より、教師データで想定したパターンによって

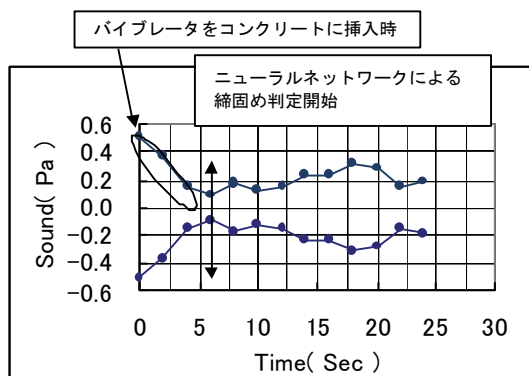
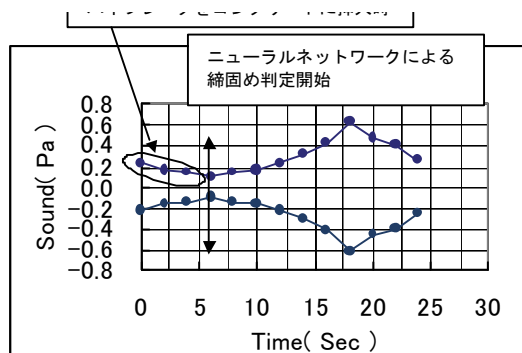


図-18 締め固め判定結果



ニューラル・ネットワークが判定していることがわかる。

5 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め固め判定について要素実験、現場での締め固め実験およびニューラル・ネットワークを使った締め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。

- i. 振動締め固め機によるダムコンクリート締め固めにおいてパイプレータから発生する音の変化は、コンクリートの締め固め時の現象と密接な関係があることが分かった
- ii. すなわち、締め固めにおいてパイプ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増加している
- iii. 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。
- iv. 過度の締め固めはグリーンカット量の増加と骨材の沈降をもたらす。
- v. ニューラル・ネットワークにダムコンクリート締め固めにおけるパイプレータの音圧変化パターンを組み込んだ締め固め判定装置により締め固め判定が実工事に適用可能となった

【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め固めに関する研究」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 1989年4月 P121～126
- 2) 徳田、加賀谷、川上、辻子：「超硬練りコンクリートの締め固め度に及ぼす打ち込み方法および締め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)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め固めワーキンググループ「コンクリートの振動締め固めに関する実験報告書」1990年3月