

ダム用コンクリート締固め判定手法の開発

古屋 弘 上高克弘
(本社土木本部)

久保貴士
(本社土木本部)

Development of Dam Concrete Compaction Determination Method

Hiroshi Furuya Katsuhiko Ueko

Takashi Kubo

Abstract

In concrete dam construction, compacting the concrete of the dam body is very important to securing water tightness, durability, and strength. The concrete for a dam is concreted by a machine with four internal vibration machines like a backhoe. Judging whether the concrete compaction has been completed depends on both the time of compaction and visual judgment but is generally left to the operator. In addition to using quality materials for the concrete, good construction is important to ensuring the quality of the dam body. In this study, therefore, a technique was developed for using an acceleration sensor to manage concrete compaction. A new system was developed for defining the compaction state of the concrete based on a change in the frequency and the speed square sum from the measured acceleration, and the system was tested at a construction site.

概要

ダムは構造・堤体に使われる材料により様々な種類があるが、いずれのダムでも水密性や耐久性、強度の担保が必要条件となる。コンクリートダムにおいてはこれらを満足するために、堤体に用いるコンクリート自体の品質確保とともに、施工時の締固めが大変重要な施工管理項目となる。堤体コンクリートの締固めには、バックホウに内部振動機を搭載したバイバックと呼ばれる機械が用いられるが、この機械を用いてのコンクリート締固め完了の判断は、締固め時間と目視判断によるところが大きく、いずれもオペレータの経験的な判断に任されている。堤体の品質を確保するためには、コンクリートの材料品質のみならず、施工を担保することは重要と考え、筆者らは締固め管理に加速度センサを用いる手法を開発した。現場試験の結果、計測された加速度に基づく速度二乗和と周波数の変化を捉えることにより、コンクリートの締固め状態を評価でき、システム化においてはバイブレータ挿入位置の管理も重要であることが解った。

1. はじめに

コンクリートダムの施工において、コンクリートの締固め作業は、ダム本体の水密性や耐久性、強度を確保する上で大変重要である。有スランプのダム用コンクリートの締固めには、バックホウに内部振動機（3～4本）を搭載したバイバックと呼ばれる機械が用いられるが、コンクリート締固め完了は、バイブレータでの締固め時間と目視判断によるところが大きく、これらはバイバックのオペレータの経験的な判断に委ねられている。

ところで、コンクリートの締固めに関しては、土木学会のコンクリート標準示方書では、①コンクリートの沈下がなくなること、②大きな気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とされているが、定量的な基準は示されていない。このため、コンクリートの締固めは、バイブレータかけ忘れあるいは不十分な稼働時間による締固め不足、過度な稼働時間による材料分離などが懸念され、均質なコンクリートを得るための

管理状況としては必ずしも十分ではない。

今回、筆者らは、締固め中のコンクリートの振動が、締め固まるにつれ変化すると考え、内部振動機近傍のコンクリートの振動波形の変化を測定することで締固め完了を評価することを検討し、客観的に数値により判断・記録できるダム用コンクリート締固め管理システムを新たに開発した。

本論文では、この品質管理手法の検証、システム構築、現場実験の概要、ならびに実験結果と考察に関し報告する。

2. ダムコンクリートの打設方法

ダムコンクリートは、プラントで練り混ぜし、バケットで打設位置へ搬送され、その後バイバック（バイブレータ）で締固めを行う。ダムコンクリート、およびバイバックの諸元をTable 1 およびTable 2に、打設状況をPhoto 1に示す。ダム堤体の品質の担保には、コンクリー



Photo 1 ダムコンクリートの締固め状況
The Compaction Situation of the Dam Concrete

トの配合を厳守することは言うまでも無いが、バケツから排出した直後は、Photo 1に示すように、コンクリートの材料が不均質で、これをバイバックで締固め、骨材とセメントの均一化とともに、特に空気を追い出し、高品質なコンクリートを形成することにより、所定の品質を確保することとなる。

ところで、一般のコンクリートの場合、締固め時間の目安は5~15秒であるとされている¹⁾。コンクリートダムの施工では、バイブレータを装備した油圧重機を用いるため、振動機の挿入間隔は既に設置されているバイブレータの間隔(今回のバイバックでは60cm程度)で打設箇所をムラ無く締固めることとなる。ダムコンクリートの場合、バイバックによる締固め時間は一般コンクリートよりも長くなり、ダムコンクリートの積算基準から判断すると約40秒である²⁾。しかし、この時間にはバケツから打込み直後の山積みみのコンクリートを複数回に分けて締固める時間も含まれている(同一箇所を何回かに分けて締固める)。

Table 1 ダムコンクリートの諸元
Specifications of the Dam Concrete

使用箇所	単位量(kg/m ³)				設計基準強度(N/mm ²)	最大骨材粒径(mm)	スランプ(cm)
	セメント	水	細骨材	粗骨材			
外部	200	102	644	1467	40	80	3.0±1.0
内部	150	107	696	1448			

Table 2 締固め機械(バイバック)の諸元
Specifications of the Base Machine and Vibrator

ベースマシン(VBH74EHL)

全長×全幅×全高(mm)	重量(kg)	接地圧(kPa)	バイブレータ取り付け台数
7,950×2,350×3,000	7,570	27	HIB150HL×4

バイブレータ能力(HIB150HL)

振動数(Hz)	遠心力(kN)	使用圧力(MPa)	振動部(径×長さ)(mm)	有効範囲(m)	質量(kg/本)
117~133	13.6~17.8	15.7	150×850	1	67

このような施工方法を取ることから、締固めの完了の判定は、バイバック(バイブレータ)の施工時間だけでの判断は難しく、Photo 1の最下段の写真のような状況を客観的に判断することが重要であると筆者らは考えた。

3. コンクリート締固め管理手法の提案

2章で示したように、コンクリートはバケツから打込み後、これをバイバックのバイブレータで締固め、骨材とセメントの均一化とともに、特に空気を追い出す。締固め初期は、コンクリート中に空隙があり、密度が低い状態から、バイブレータによる締固めにより密度の増加を伴い、高品質なコンクリートが形成されることとなる。この密度増加に伴う、コンクリート締固め中の性状の変化を、バイブレータの振動に関連する物理量で判定することを目標に、以下のような仮説を立てた。

コンクリートを締固めるバイブレーターから一定距離離れた場所に質点(M)を置き、その振動の増幅を締固めの判定とする。質点モデルはFig.1のような単純モデルとし、コンクリートの締固めに伴う密度上昇による、減衰定数の低下を予想した。Fig.1に示すモデルは、一般的に以下のような運動方程式で表すことができる。

$$M\ddot{x} + h\dot{x} + k(x - u) = 0 \quad (1)$$

バネ端の変位振幅|u|を生じさせる外力(今回の場合バイブレータ)に対して、フレッシュな状態のコンクリートにより減衰され、エネルギーの質点Mへの伝達率Tは以下のような式で与えられる。

$$T = \frac{|x|}{|u|} = \frac{1 + (2\xi\frac{\omega}{\omega_0})^2}{\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})^2 + (2\xi\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \quad (2)$$

ここで、 ξ : 減衰定数、 ω/ω_0 : 周波数比

$$\xi = \frac{h}{2\sqrt{\frac{M}{c}}} \quad (3)$$

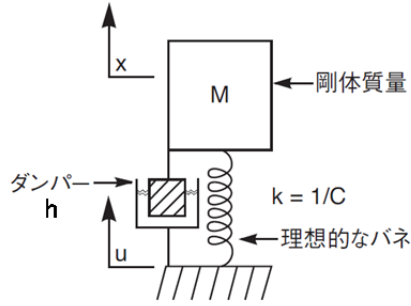


Fig. 1 (1)式で表される単振動調和振動子
Simple Oscillation Harmony Trembler

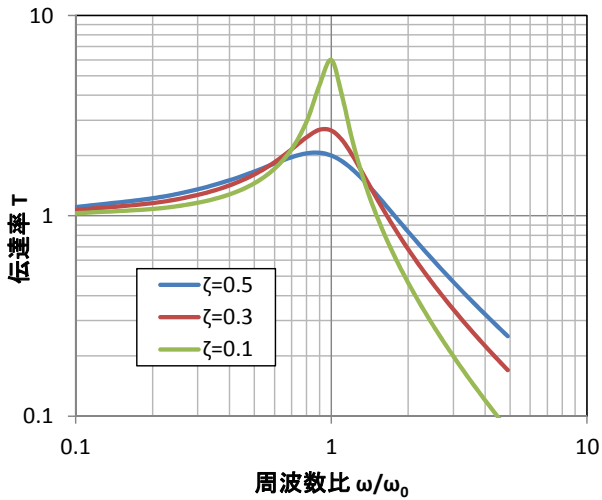


Fig. 2 様々な減衰係数に対する振動系の伝達率
Transmission Rate Pro-vibration for the
Various Decrement Coefficients Level

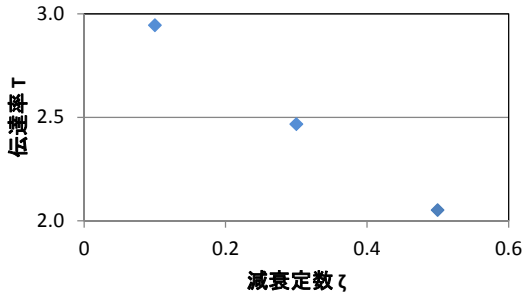
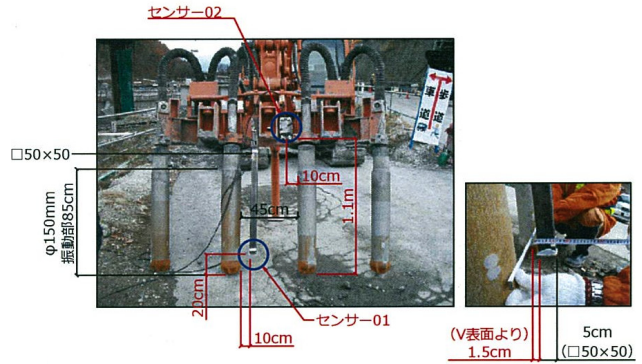


Fig. 3 減衰定数と伝達率 ($\omega/\omega_0=0.8$)
Relations of a Decay Constant and the Transmission Rate

(2)式は、例えば $\zeta=0.5, 0.3, 0.1$ とした場合、Fig.2のようになる。後述する現場実験において、今回使用したバイバックの振動周波数は110Hzと計測され、計測ロッドの固有振動数は90Hz(計算値)であった。よって、Fig.2より $\omega/\omega_0=0.8$ を抜き出すとFig.3のようになる。これは、コンクリートが締め固まり、減衰定数 ζ が小さくなると伝達率Tが大きくなる事を示している。すなわち、コンクリートが締め固まる状態を、バイブレータからある距離で離れた位置で計測した外力の変化で評価できる可能性を示すものである。今回はこの計測を、バイバックのバイブレータロッドの間に角パイプを取り付け、その先



センサ名称	定格容量	計測範囲
AS-50TB	±50 G	DC~1 KHz

Fig. 4 バイバックへの加速度センサ取り付け状況
Mounting Structure of Acceleration Sensors

端に取り付けた加速度センサで行う事とし (Fig.4参照)、現場での実験で確認することとした。

4. 現場実験による締固め判定手法の検証

4.1 実験概要

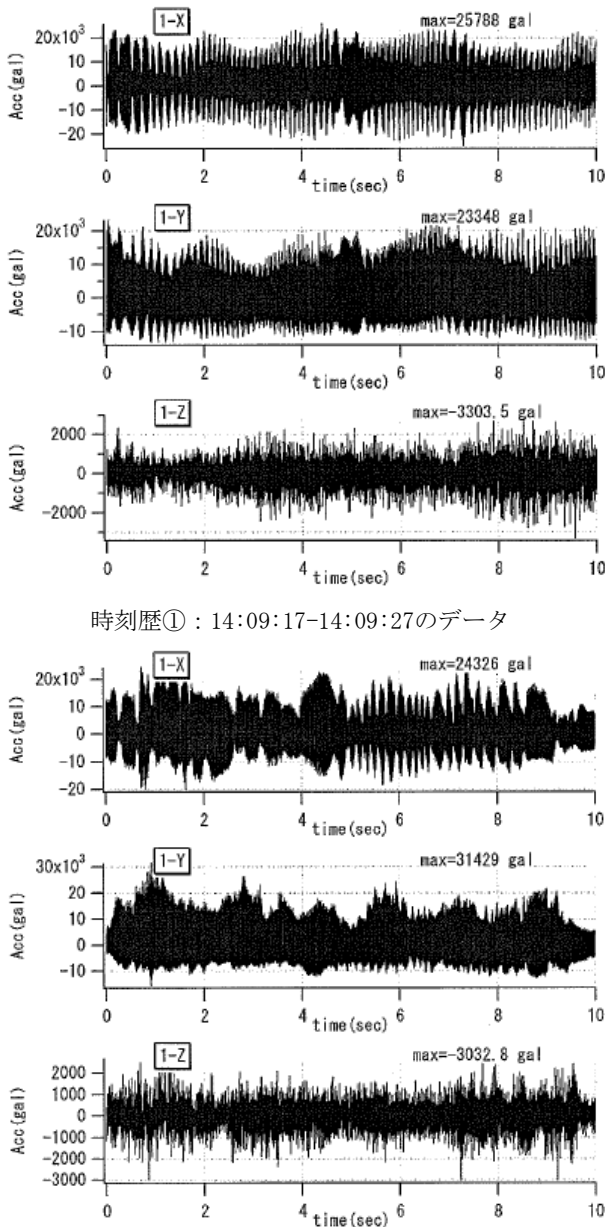
バイバックによるコンクリート締固めの判定手法は、エネルギー伝達を判定することにより評価できる可能性を3章で示したが、実際の施工時の計測を行った上で、判定手法を検討することとした。実験は、当社施工の浅川ダム(長野県長野市浅川ノ瀬、重力式コンクリートダム：堤頂長165m, 堤体高53m, 堤体積14.3万 m^3)にて実施した。

計測に用いる加速度センサは3軸の計測を行えるもので (Fig.4のセンサ01:バイブレータ並び方向:x, 前後方向:y, 鉛直方向:z), バイブレータの間に角パイプを溶接し、Fig.4のようにパイプ内部先端に取り付けた。なお、重機とアーム移動などの振動の影響を検討するために、バイブレータ取り付け部 (Fig.4におけるセンサ02)、および締固めを行っているコンクリート表層部 (バイブレータから1m) にも加速度センサ (センサ03) を設置し、9チャンネルのロガーでデジタル計測を実施した ($\Delta t=1/1000\text{sec}$)。

4.2 計測結果

実施工においては、Photo1で示したように、ダムコンクリートをバケットから打込み後の山のような状態から徐々に締固めを行う。このため、締固め開始直後のバイブレータはコンクリートに深く挿入されず、締固めに有効に寄与しない動作が多い。このため、計測中のバイブプロ締固め状況を撮影したVTRから以下の条件をできるだけ除外した計測データを抽出し、解析用データとした。

- 1) バイブプロロッドの上下移動が少ない(一定深度)。
- 2) コンクリートの流動が少ない。
- 3) バイブレータ挿入箇所10sec間継続する。



時刻歴③ : 13:56:28-13:56:38のデータ
Fig. 5 計測された加速度波形 (センサ01の計測値)
The Acceleration Wave Pattern

以上の条件を満たした解析用データを、22データ×3地点×3成分=198波抽出した。

Fig.4に示す位置に取り付けた加速度センサ (センサ01,02) と地表部 (センサ03) で計測した加速度は、センサ02ではセンサ01の1/20程度、さらにバイバックのバイブレータの振動以外と思われるノイズが計測されたため、これらのセンサ位置での計測値は利用できないものと判断した。

以上の予備検討の結果から、締固め判定にはバイブレータ間に設置した角パイプに取り付けたセンサ01を利用する事とした。計測された加速度波形の一部をFig.5に示し、データの特徴を以下に示す。

- 1) バイバック位置 (センサ01) のコンクリート打込

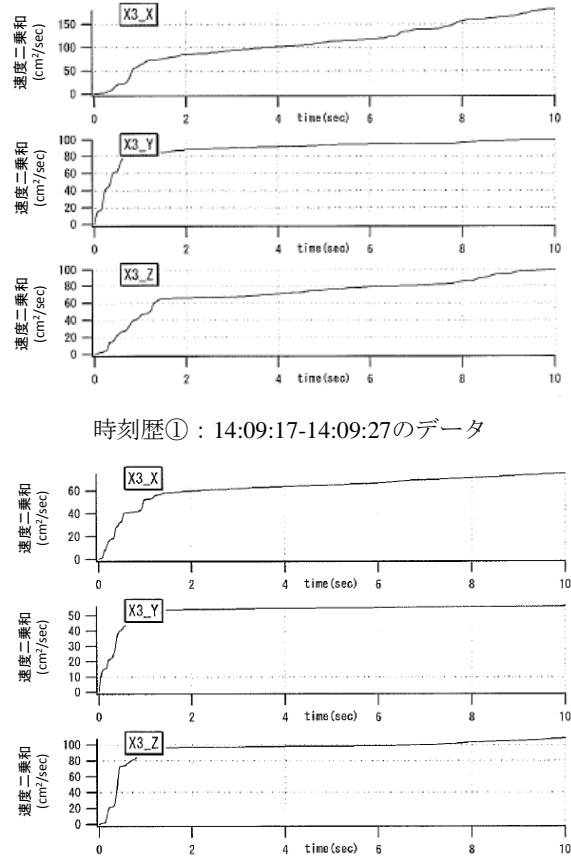


Fig. 6 速度二乗和の時刻歴 (センサ01の計測値)
Square Speed calculated from Acceleration

み時の加速度の最大値は、x,y方向で20~40G、z方向で2~10G程度であった。

- 2) 振幅の変化はx,y方向は大きく、z方向は小さい。
- 3) Fig.5のデータのフーリエスペクトルは、x,y方向のデータはバイバックによる締固めに伴い変化が見られた (後述Fig.8参照)。

4.3 加速度データの解析

今回の実験では、3章で示した仮説に基づき、コンクリートの締固めに伴い減衰定数が低下し、それにより加速度に変化が生じ、締固めの評価に用いられるか否かの評価が目的であった。加速度波形をもとに、以下のようなデータ抽出と評価を行うこととした。

- 1) 締固めに伴う減衰定数の低下から、質点 (センサ取り付け部) に伝わるエネルギーが大きくなることが予想されるので、加速度を積分し速度を計算して、速度二乗和 ($V^2(t)$) を計算する (Fig.6)。
 - 2) 加速度波形の10sec間を0~3、3~6、6~9secに区分し、各部のフーリエスペクトルを算出し、時間経過による振動数特性の変化を評価する (Fig.8)。
- なお、評価にあたり重機自体の振動を排除するため、加速度波形から10Hzより長周期成分をカットした。

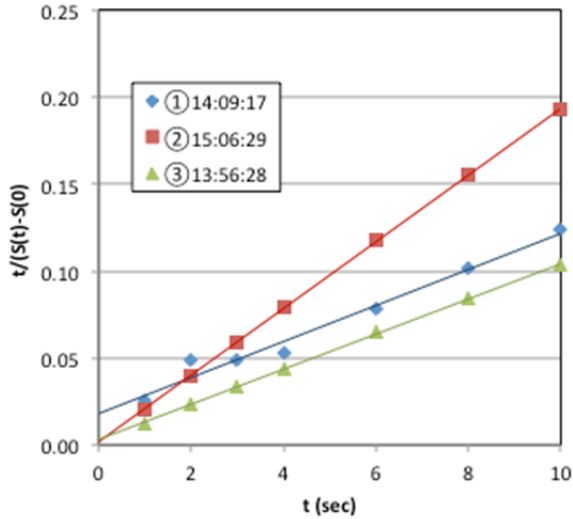
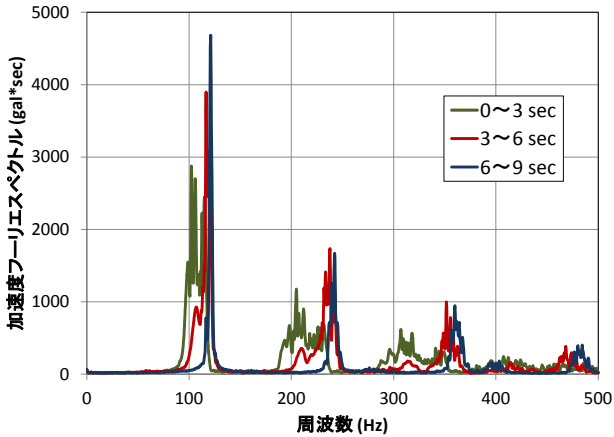
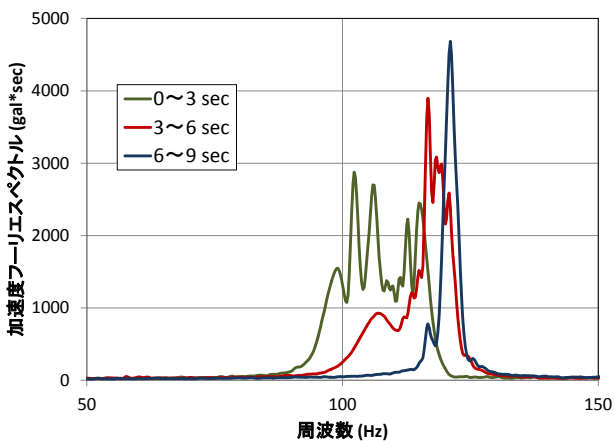


Fig. 7 y軸方向の速度二乗和の双曲線近似 (時刻歴①, ②, ③)
Hyperbola Approximation of the Square Speed



時刻歴① : 14:09:17-14:09:27のデータ



100Hz付近拡大図
Fig. 8 y軸方向のフーリエスペクトル
Fourier Spectrum

4.3.1 速度二乗和の評価 Fig.6 にFig.5に示した波形データの速度二乗和を示す。コンクリートはパイプレータによって締固められ、減衰定数が小さくなることに

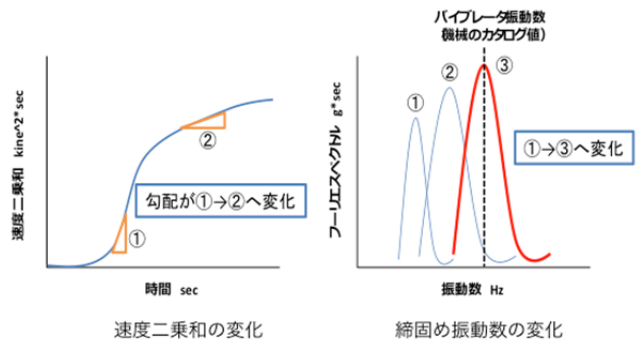


Fig. 9 締固め判定手法の概念図
Conception Diagram of the Compaction Judgment Technique

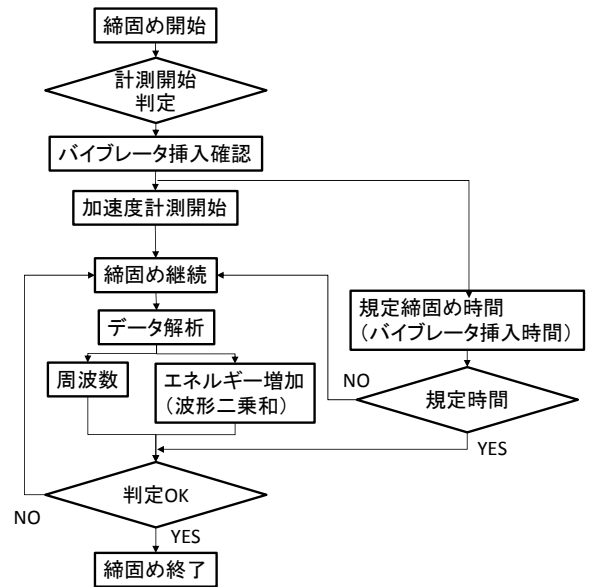


Fig. 10 締固め判定フロー図
Figure of Compaction Judgment Flow

より加速度センサ部分に届くエネルギーが大きくなることが予想されたが、x,y,zの3成分ともこの傾向が現れている。ここで、x成分 (パイプレータの列方向) は他の方向のデータよりも速度二乗和の上昇が緩慢である。これは、パイプレータ間にロッドを配置したことから、ロッドの両側の振動の干渉と考えられる。

ここで、時刻tにおける速度二乗和の計算値 $V^2(t)$ を、 $t=10\text{sec}$ における速度二乗和の計算値 $V^2(10)$ で除したものを $S(t)$ とし、y成分のデータに関して双曲線近似した結果をFig.7に示す。グラフのy軸の切片を α 、近似線の傾きを β とすると、

$$S(t) = S(0) + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (3)$$

この結果は、速度二乗和の計算値が一定の値に収束することを示している。ただし、Fig.7のグラフの傾き(β)は異なることから、特定の値に収束するものではない。よって、評価手法としては、絶対値として数値を用いるのではなく、速度二乗和の収束状況を用いることとした。

4.3.2 フーリエスペクトルの評価 ロッドのセンサ

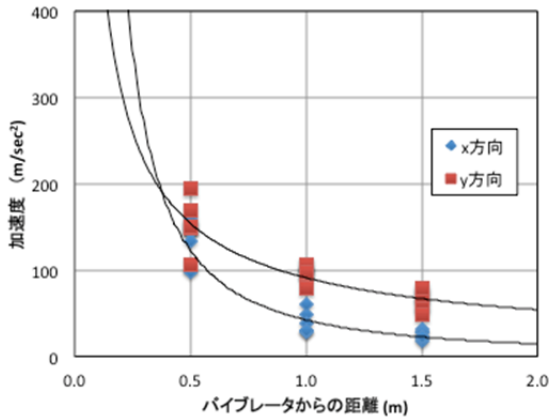


Fig. 11 バイブレータの加速度分布
(バイブレータ軸からの距離)
Acceleration Distribution of the Vibrator

の計測時間10秒間を0～3sec, 3～6sec, 6～9secの3つに分割し、各々のフーリエスペクトルを算定した。結果の一部をFig.8に示す。初期(0～3sec)は計測ロッドの固有振動数(90Hz)付近にピーク振動数が発生しているが、バイブレータの加振とともにバイブレータの振動数(110Hz)に近づいていくことが解った。また、振幅も大きくなる傾向が見られる。すなわち、バイブレータの中間に取り付けたロッドのスペクトルは、振動数は0～3sec→3～6sec→6～9sec→の順に振幅が増加し、周波数は高くなる事がわかる。これはコンクリートが締まっていく過程が振動数に表れている可能性を示すものである。

この結果から、周波数の変化とフーリエ振幅の増加を、コンクリートの締固めの判定指標とすることが出来る可能性が解った。

4.3.3 締固め判定手法 以上の結果から、バイバックによる締固めの判定手法を、①速度二乗和の収束状況、②周波数の遷移(バイブレータの振動数に近づく)、の2つを用いることとした。判定手法の概念図をFig.9に示す。

ただし、コンクリートの締固めには、参考文献1に示されるように、標準的な締固め時間もあることから、判定のロジックはFig.10に示すように、バイブレータの稼働(挿入)時間も考慮することとした。

4.3.4 バイブレータのエネルギー伝達範囲 今回の締固め管理システムの機構上、バイブレータの振動がどの程度まで伝達しているかを計測した。バイバックに取り付けられたバイブレータは4連で稼働しているが、この振動がどの程度の範囲に伝達しているかの計測を行った。計測は、バイバックのバイブレータの列と直交方向に、今回の計測用パイプと同様な治具を製作し、バイバックから0.5m,1.0m,1.5mの位置のコンクリート中の加速度を計測した。計測結果をFig.11に示す。図中には近似曲線も示しているが、距離0.5mと1.0mでは加速度は概ね2倍となっていた。

5. 締固め管理手法のシステム化

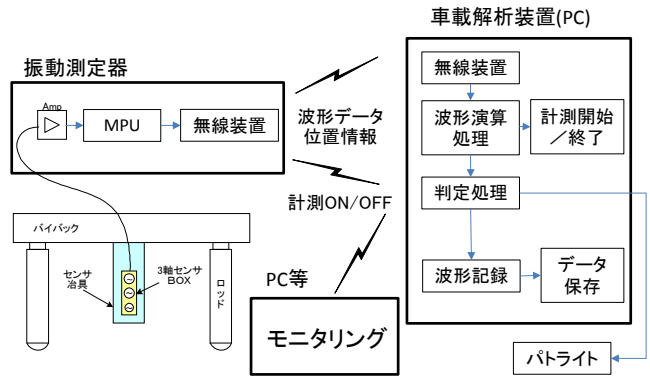


Fig. 12 締固め管理システム構成図
Configuration of Compaction Management System

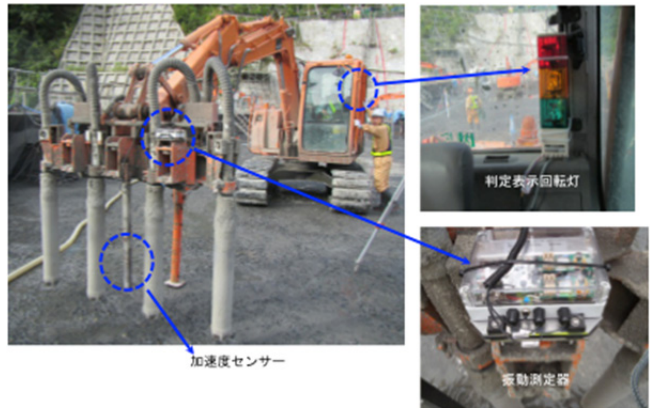


Photo 2 バイバック及び締固め管理システム全景
Administration Whole View of the System

4章に示した検討結果に基づき、ダムコンクリート締固め管理システムを製作した。システムの構成図をFig.12に示す。システム構築において、以下の目標を掲げた。

- ①締固めの判定をリアルタイムに行うこと
- ②オペレータへの情報伝達
- ③バイブレータ挿入位置の記録
- ④センサ類のケーブルレス化

システムの準備としては、バイバックに加速度センサを内蔵した角パイプを溶接する必要があるが、上記目標の①、②、④に関しては、センサからのデータ信号は、MPU・無線LANを介して車載の判定用PCに送信し、判定処理を行うこととした。これにより、複雑な動きをするバイバックの作業に支障をきたすことなくデータ計測と締固め判定を実施できることとなった。判定結果はFig.13に示すように、3色の回転灯表示にてオペレータに確認される。また、③に関しては、コンクリートの締固めをムラ無く均一に行う事は、品質の担保のためにも非常に重要な管理項目である。今回、システムでバイブレータの挿入位置を記録することを試みることとした。しかし、ダムの特性上、狭隘な地形での施工を行う事や、狭隘な場所でホッパーや作業員が錯綜することから、GNSS(GPS)やTS(トータルステーション)での計測は行えない。このためジャイロによる相対位置座標の計測機構を搭載した。

Table 3 判定においてクリティカルとなった要素
The Item which Became Critical in a Judgment

	速度二乗和	周波数	挿入時間	計
計測点数	16	13	6	35
割合 (%)	45.7	37.1	17.1	100

システム構築後、長野県の浅川ダム工事施工現場にて、ダムコンクリートの実打設による締固め試験を、3章での実験後にさらに2回実施し、締固め中のコンクリートの加速度測定と締固め完了判定の試験を行った（Photo 2 参照）。締固め判定はFig.10の締固め判定フロー図のとおりとし、締固め完了の判定時には回転灯にて表示し、打設管理者やオペレータもその場で分かるようにした。コンクリートの加速度測定値・システムによる締固め判定とコンクリート表面の状況を確認し、締固め判定の有効性を確認した。

5.1 システムの動作結果

システムによるコンクリートの締固め判定結果は、上記のように3色回転灯でオペレータに知らされる。この3色回転灯は、パイバックのパイブレータが空中にある（コンクリートに挿入されていない）時は「赤」、コンクリートに挿入され、締固め開始されると「黄」、判定がすべて基準値をクリアした場合「緑」を点灯する。それぞれの閾値は任意に設定することが可能であるが、今回行った実験での閾値は、速度二乗和の増分： $\Delta t=0.5\text{sec}$ での増分が4連続3%以下、周波数108Hz、規定時間5secとした。

パイバックのパイブレータが、コンクリート中に挿入されたことの判定は、判定計測用の加速度センサからの情報を利用することとした。これは、パイブレータおよび計測用センサが、コンクリートの中に入ることにより振動を検知することを利用したもので、 $0.2G(1.96\text{m/sec}^2)$ を閾値とした。

システムによる締固めの判定は、本来は密度を計測する必要があるが、本施工であったためにこれは実施できなかった。しかし、職員および技能員の目視確認とシステムの判定は一致しており、有効性を確認することが出来た。なお、判定においてクリティカルとなった判定項目は、Table3に示すように速度二乗和であった。この判定で『緑』が点灯するまでの時間は平均6.2秒であった。また、17%はセンサからの判定は合格であったが、規定時間に満たないと判断されていた。この結果は、良好な条件であれば、施工指針に示されている規定時間よりも短い締固め時間で、良好な締固めが行える可能性も示している。

5.2 ジャイロによる計測結果

近年では、重機の位置情報を基に、重機の位置管理（例えば工事車両の運行管理システム）や軌跡管理（転圧管理システム）が実施されている。これらは近年急速に導入が進んでいるICT施工の代表的なものであるが、これらの座標取得にはGNSSやTSが用いられている。今回は

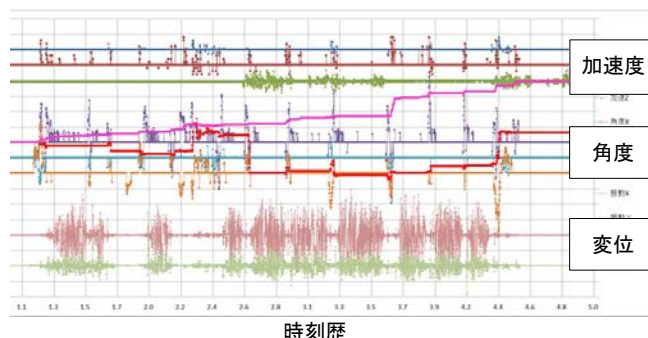


Fig.13 ジャイロの角度データ（時刻歴）
Angle Data of the Gyro

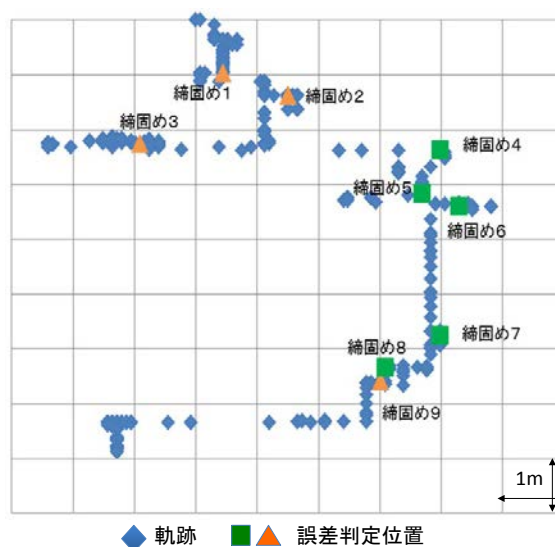


Fig.14 ジャイロによる位置の計算値
Calculated Value of the Position with the Gyro

前述のように、現場の制約条件からジャイロを用いた位置取得機構をシステムに搭載し、精度と実用性を検証した。

ジャイロは、既知点からの相対位置を算出することとなる。今回は、締固め開始直前に、ダム型枠端部（既知点：CAD上で座標を確認）に接触後3分間のデータを解析した。ジャイロからのデータをFig.13に、そのデータを用いた座標算出結果をFig.14に示す。パイバックはバックハウのアームが3次元的な動きをするので、この影響で時々角度データに大きな変化量が入ることがあるが、概ね安定している。解析値と実際のパイブレータ挿入位置は、実施工中であったため、現場写真からの位置比較にて行った。位置の誤差は平均15cm程度となったが、ジャイロの特性上、時間が長くなると誤差が徐々に大きくなってしまふ（Fig.14の9（締固め9）では20cm）。既知点でのリセットを数多く行う事によりこの誤差拡大は回避できるが、運用上の工夫が必要である。また、Fig.14はリアルタイムではなく、計測後の解析結果である。リアルタイム計測を行うためには、演算能力の限界があり、今回の計測用のPCの他のシステムが必要となるなど、問題点も明らかになった。

しかし、ジャイロはGNSS等 비해非常に安価であることと、天空、視通の制約を受けないので、今後とも利用方法を含めたシステム検討を継続することとしている。

5.3 システム化の課題

このような手法をシステム化する場合、今回示した手法で判定したコンクリートの物性評価や、システム自体の耐久性の検討も必要であると考ええる。また、ダムコンクリート打設は、前述の通り、バケットで投入された低スランプコンクリートを、同一位置でも数回に分けて締固める必要がある。すなわち、Photo 3に示すような理想的な状態になる前に、バイバックを浅く山積みのコンクリートに挿入し、徐々に平滑にしつつ締固めを行う。このように、バケットでコンクリート搬入直後は、Photo 3に示すような状態ではなく、低スランプのコンクリートを均すような作業も兼ね、浅くバイブレータを挿入することが多く、コンクリート内に深くバイブレータが挿入されていない。この場合には、今回のシステムで正しく締固めの判定は行えない。このような特性を把握して、本システムの有効に機能する範囲内で活用することは、システム活用の制約条件である。

このような課題はあるものの、今回の手法は情報化施工を用いた品質管理^{6),7)}への一つのアプローチであると考ええる。

6. まとめ

締固め中のコンクリートの加速度の変化は、コンクリートの締固め状況と密接な関係があり、以下に示すように締固め完了を判定できることが分かった。

- 1) コンクリートの締固めが進行するとバイバック（バイブレータ）の振動数に近づく。
- 2) コンクリート振動波形の振幅の二乗和が一定値に近づく（増分量が低下する）。
- 3) これらにより定量的にコンクリートの締固め状況を判断することで、オペレータの技量によらず締固め完了を判定できる。
- 4) バイブレータ挿入位置の管理も重要である（ジャイロに関してはシステム上の課題が残った）。

以上のように、本システムを利用すれば、今まで施工上で経験に依存し、トータル施工時間でみのチェックしか行えなかった締固め管理が、定量的かつ客観的に実施できる可能性があることが解った。ただし、本計測結果から得られた加速度と締固めの有効性に関しては、客



Photo 3 締固め判定現場試験状況
The Field Test Situation

観的な関連性は今のところ解らない。文献調査を継続するとともに、追加実験も検討中である。

近年、設計の高度化が進みつつあるなかで、施工の高度化にICTを用いた新しい技術や考え方が導入されることは容易に予想されるが、今回示したような建設の品質向上に寄与できるような施工管理にもICTの適用事例は増加するものと考ええる。今後も引き続き本システムの改善を継続することとしたい。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），2011
- 2) ダム技術センター：ダム工事積算の解説（平成23年度版），2011
- 3) 梁 俊，新井博之，坂本淳，松元淳一，黒羽陽一郎，原山之克，松尾 健：ダムコンクリートの締固め評価を目的とした加速度測定方法に関する検討，大成建設技術センター報，第46号，2013
- 4) 金子 稔，安田正雪，末岡英二，坂井 孝：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.2077-2082，2009
- 5) 古屋 弘：加速度センサを用いたリアルタイム施工管理手法に関する研究，北海道大学博士論文，2001.3.
- 6) 古屋 弘：近年の施工管理技術の中での情報化施工，地盤工学会誌 Vol.58 No.1，pp.24-25，2010.1.
- 7) 古屋 弘：【総説】建設事業における情報化施工（ICT）の活用，基礎工 Vol.40，No.5，pp.2～7，2012.5.