

ダム用コンクリート締固め判定システムの開発

コンクリートの振動解析により締固めを判定

上 高 克 弘・古 屋 弘

ダムのコンクリート締固め作業は、ダム本体に必要な強度や水密性・耐久性を確保するうえで重要な作業である。有スランプ（3～4 cm）のダムコンクリート締固めは、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を用いるが、締固め完了の判断は締固め時間と経験に基づく目視判断によるところが大きい。このため締固め忘れや締固め不足、過度な締固めによる材料分離などが懸念されている。そこで締固まるにつれ変化するコンクリートの振動を加速度センサで直接計測し、振動波形を解析することで締固めの完了を客観的な数値により判断・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。これによりオペレータの経験や技量によらず、最適な締固め完了が判定可能となった。

キーワード：ダムコンクリート, 締固め, 品質管理, 加速度解析, リアルタイム

1. はじめに

コンクリートダムの施工では、ダムコンクリートの締固め作業が、ダム本体に必要な強度や水密性・耐久性に大きく影響する。通常のダムコンクリートの打設・締固め作業では、硬練りのコンクリートを大量に打設することから、バックホウの先端に油圧バイブレーター（3～4本）を搭載したバイバック（写真—1）が用いられる。

従来の締固め完了の判定基準は、締固め時間と監督員や熟練オペレータによるコンクリート表面の目視により判断する方法が一般的であり、土木学会のコンクリート標準示方書（ダムコンクリート編）¹⁾において、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解説されているが、定量的な基準は示されておらず、締固めが適正に完了したかを判断する明確な基準はない。このため締固めの完了は、個人の技量と経験に頼る部分が大きく、締固め不足や過剰な締固めによる材料分離の発生、熟練オペレータ不足やオペレータの経験不足に起因する施工不具合などが懸念されている。

これらの状況に対応し、締固め作業の過不足を防止して、効率的な作業とコンクリート品質を確実に確保するための技術が求められており、今回、筆者らは、バイブレーターによる締め固め中のコンクリートの振動が、締固めに伴う密度増加により変化するものと考え、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の完了を評価する手法を検討し、客観的な数値により判断・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。

2. ダムコンクリートの一般的な打設方法

今回の実験現場におけるダムコンクリート、およびバイバックの諸元を表—1および表—2に、コンクリート締固め状況変化を図—1に示す。

バケットで搬送直後のコンクリートは、骨材・セメント・水・空気が混在した状態で山積み状態になっており、これをバイバックで締め固め、骨材とセメントの均一化とともに、特に空気を追い出し、密実なコン



写真—1 ダムコンクリート締固め状況

表一 ダムコンクリートの諸元 (例)

使用箇所	単用量 (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	1,467	4.0	80	3.0 ± 1.0
内部	150	107	696	1,448			

表二 締固め機械 (バイバック) の諸元

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

クリートを形成することで、所定の品質を確保できる。一般のコンクリートの場合、締め固め時間の目安は5～15秒であるとされている。ダムコンクリートの場合、ダムコンクリートの積算基準²⁾から判断すると、バケットから投下直後の山積みのコンクリートを複数回に分けて締め固める時間も含め約40秒である。このような締め固め方法のため、締め固め完了の判定は、単純にタスクメータを用いた管理のようなバイバックの施工時間だけでの判断は難しく、これまでは熟練したオペレータや監督員の現場での判断に任されていた。そこで筆者らは、図一1の最下段の写真のようなコンクリートが「十分に締め固めが実施された」状況を客観的に判定する手法を開発することとした。

3. コンクリート締め固め管理手法の提案

コンクリートはバケットから投下後、締め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、バイブレータにより密度が増加して締め固まる。この密度増加に伴う、コンクリート締め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は既往の研究で幾つかの試みが行われているが^{3), 4)}、今回はコンクリートの締め固めに伴う性状変化に関して、以下のような仮説を立てた。

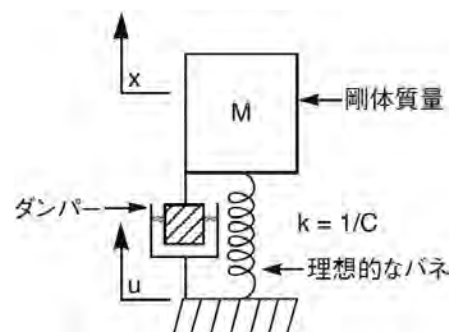
コンクリートを締め固めるバイブレータから一定の距離離れた場所に質点 (M) を置き、その振動の増幅を締め固めの判定とする。質点モデルは図二のような単純モデルとし、コンクリートの締め固めに伴う密度上昇による、減衰定数の低下を予想した。図二に示すモデルは、一般的に以下のような運動方程式で表すことができる。

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

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



図一1 ダムコンクリートの締め固め状況変化



図二 (1) 式で表される単振動調和振動子

伝達率 T は以下のような式で与えられる。式 (2) は、例えば $\zeta = 0.5, 0.3, 0.1$ の場合、図-4 のようになる。

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

ここで、 ζ : 減衰定数, ω/ω_0 : 周波数比

後述する現場実験において、使用したバイバックの振動周波数は 125 Hz (中心値) であり、計測ロッドの固有振動数は 90 Hz (計算値) であった。よって、図-3 より $\omega/\omega_0 = 90/125 = 0.72$ を抜き出すと図-4 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の間に取り付けられた加速度センサで行う事とし、現場実験で確認することとした。

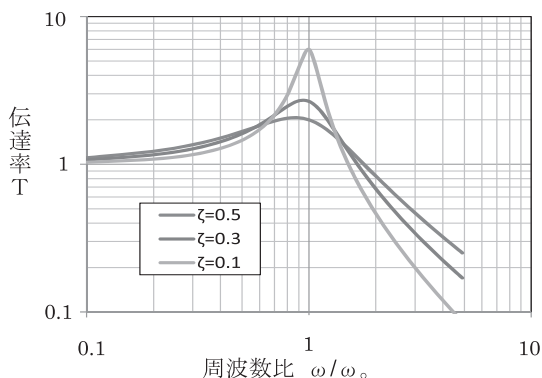


図-3 様々な減衰係数に対する振動系の伝達率

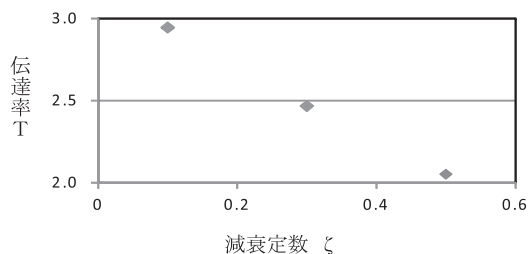


図-4 減衰係数と伝達率 ($\omega/\omega_0 = 0.72$)

4. 現場実験による締め固め判定手法の検証

実際のバイバックによるコンクリート締め固め時の加速度計測による判定を現場にて行った。加速度センサは3軸の計測を行えるもので、バイブレータ並び方向: x, 前後方向: y, 鉛直方向: z とし、バイブレータの

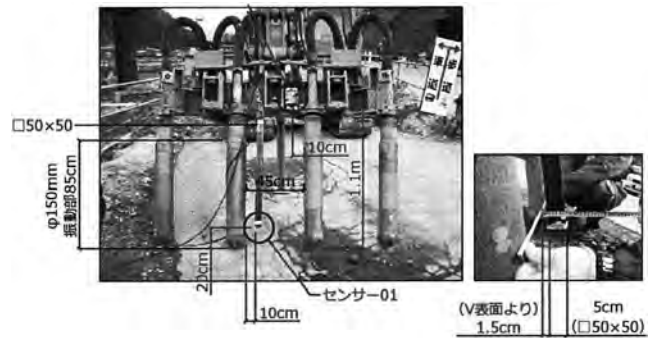


図-5 加速度センサ取り付け状況

間に設置した角パイプ内部先端に取り付けた (図-5)。

(1) バイブレータのエネルギー伝達範囲計測

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、この振動の大きさと伝達範囲を把握するために計測を行った。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 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m の位置のコンクリート中の加速度を計測した。計測結果を図-6 に示す。図中には近似曲線も示しているが、距離 0.5 m と 1.0 m では加速度は概ね2倍となっていた。

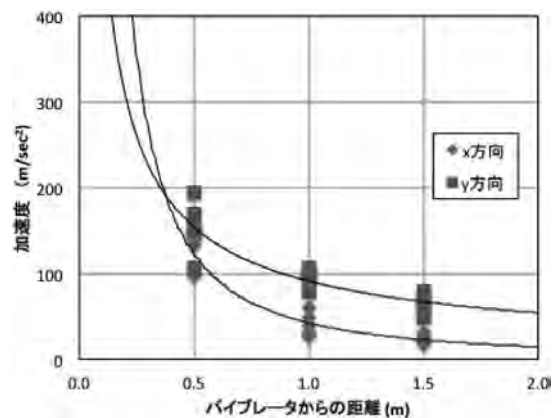
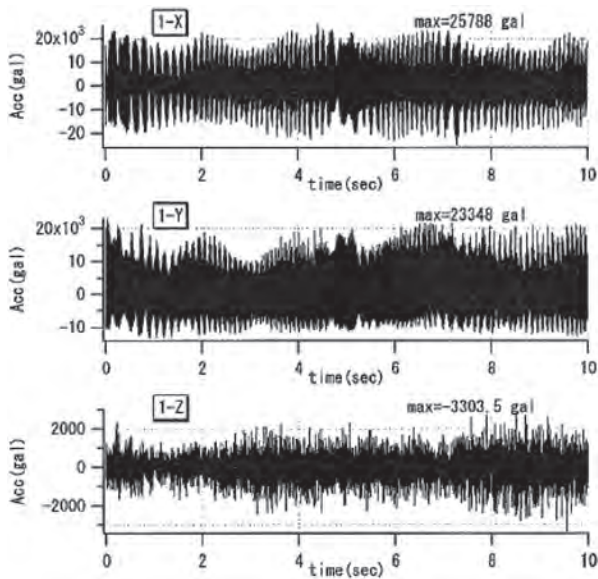


図-6 バイブレータの加速度分布

(2) 加速度計測

現場での締め固め時の計測データを、22 データ × 3 地点 × 3 成分 = 198 波抽出し、解析用データとした。計測結果から、加速度センサ (センサ 01) で計測された加速度波形の一部を図-7 に示し、データの特徴を以下に示す。

- 1) コンクリート締め固め時の加速度の最大値は、x, y 方向で $20 \sim 40 \times 10^3$ gal, z 方向で $2 \sim 10 \times 10^3$ gal 程度。
- 2) 振幅の変化は x, y 方向は大きく、z 方向は小さい。



時刻歴①：14:09:17-14:09:27 のデータ
 図一七 計測された加速度波形 (センサ01)

3) x, y 方向のデータのフーリエスペクトルは、締固めに伴う変化が見られ (後述図一10 参照), この成分を判定に用いることができる可能性が高い。

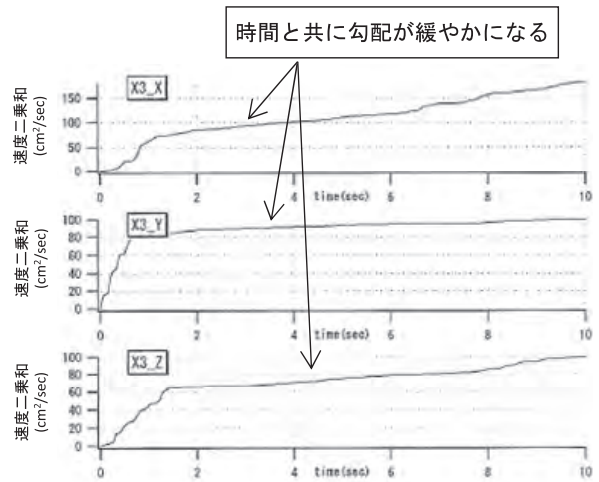
(3) 加速度データの解析

計測し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。

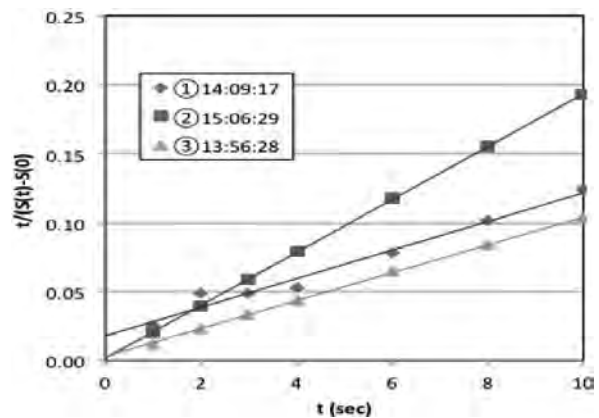
- 1) 締固めに伴う減衰定数の低下から、質点 (センサ取り付け部) に伝わるエネルギーが大きくなることが予想されるので、加速度を積分し速度を計算して、速度二乗和 $\{V2(t)\}$ を計算する (図一8)。
- 2) 加速度波形の 10 sec 間を 0~3, 3~6, 6~9 sec に区分し、各部のフーリエスペクトルを算出し、時間経過による振動数特性の変化を評価する。

(4) 速度二乗和の評価

図一9 に図一8 に示した波形データの速度二乗和を示す。コンクリートはバイブレータによって締め固められ、減衰定数が小さくなることに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、x, y, z の3成分ともこの傾向が現れている。ここで、バイブレータ列と直角方向の y 成分に着目し、時刻 t における速度二乗和の計算値 $\{V2(t)\}$ を、t = 10 sec における速度二乗和の計算値 $\{V2(10)\}$ で除したものを S (t) とし、双曲線近似した結果を図一9 に示す。グラフの y 軸の切片を a、近似線の傾きを β とすると、



時刻歴①：14:09:17-14:09:27 のデータ
 図一八 速度二乗和の時刻歴 (センサ01)



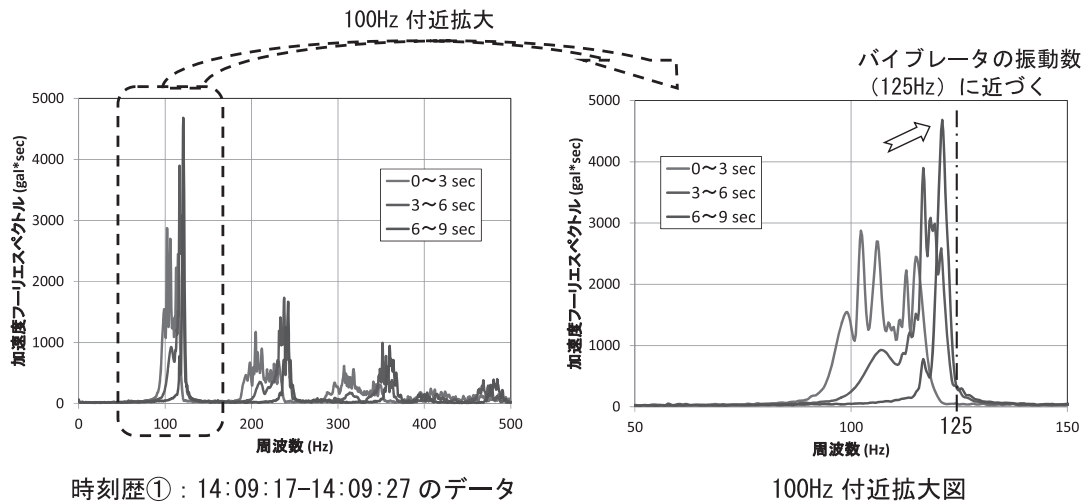
図一九 y 軸方向の速度二乗和の双曲線近似

$$S(t) = S(0) + \frac{t}{a + \beta t} \tag{3}$$

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、図一9 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。

(5) フーリエスペクトルの評価

センサの計測時間 10 秒間を 0~3 sec, 3~6 sec, 6~9 sec の3つに分割し、各々のフーリエスペクトルを算定した。結果の一部を図一10 に示す。初期 (0~3 sec) は計測ロッドの固有振動数 (90 Hz) 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 (125 Hz) に近づいていくことが解った。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。



時刻歴①：14:09:17-14:09:27のデータ
図-10 y軸方向のフーリエスペクトル

以上の結果から、バイバックによる締固めの判定手法を、a. 速度二乗和の収束状況、b. 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図-11に示す。ただし、コンクリートの締固めには、標準的な締め固め時間も

あることから、判定のロジックは図-12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。

5. 締固め管理手法のシステム化

(1) 締固め管理システムの概要

ダムコンクリート締固め管理システムの構成図を図-13、システム全景を図-14に示す。判定結果は締

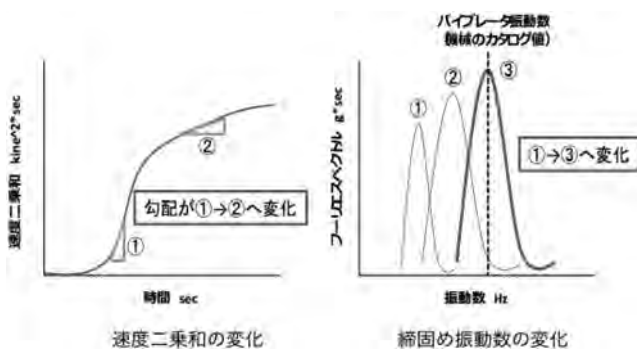


図-11 締固め判定手法の概念図

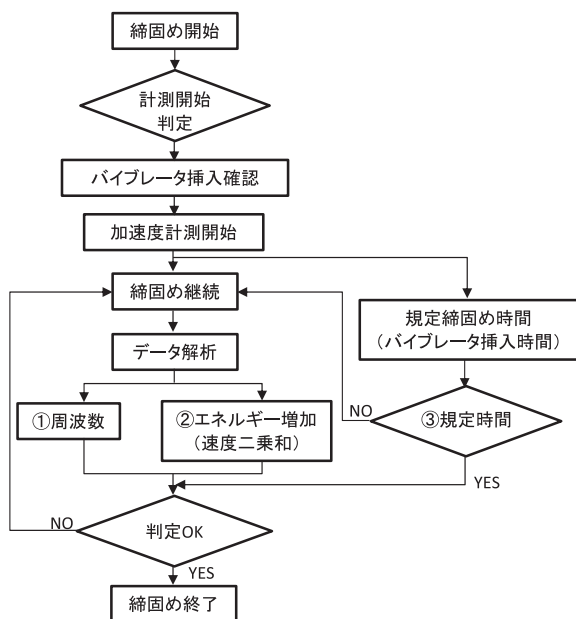


図-12 締固め判定フロー図

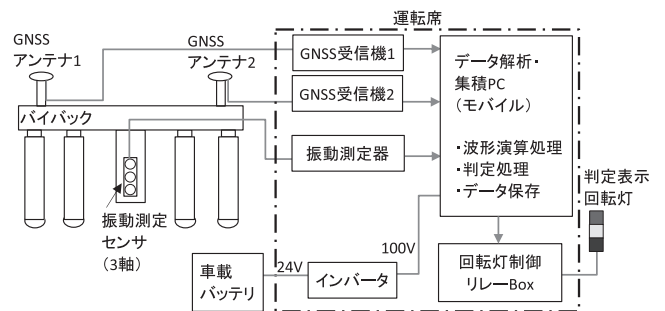


図-13 締固め管理システム構成図

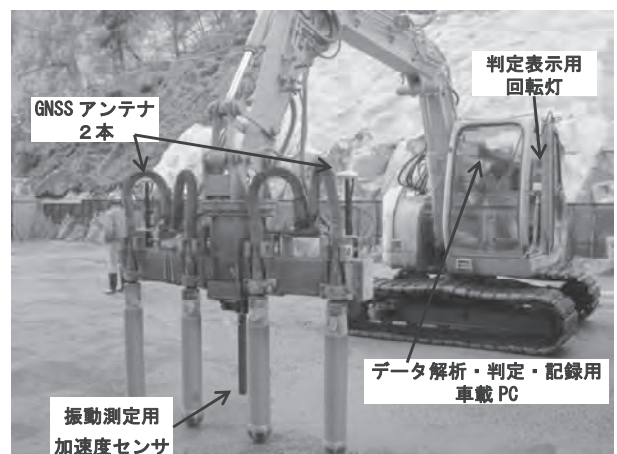
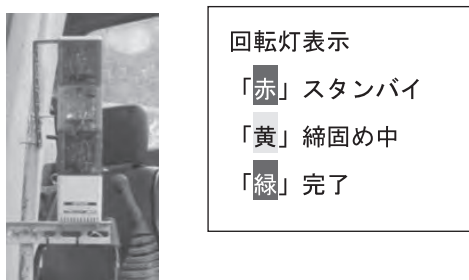
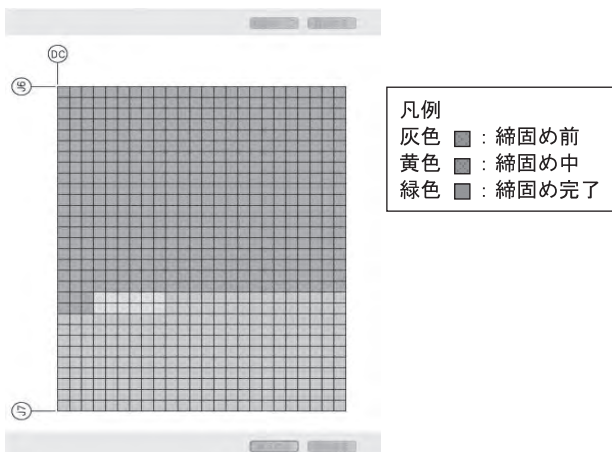


図-14 バイバック及び締固め管理システム全景



図一 15 締固め状況の表示 (回転灯)



図一 16 締固め状況のリアルタイム表示 (例)

固め判定システムで解析され、3色の回転灯表示(図一15)にてオペレータに確認される。

また、バイブレータの位置確認は、コンクリートの締固め不足を解消し、品質の確保のためにも非常に重要な管理項目である。今回のシステムではGNSS(GPS)を用いて、締固めが完了したバイブレータの挿入位置座標を車載PCのモニタにリアルタイムに表示(図一16)し、記録することとした。

システム構築後、長野県の浅川ダムおよび広島県の庄原ダムの現場にて、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。締固めの判定は、システムによる締固め判定とコンクリート表面の状況(特に気泡)を観察し、締固め判定の有効性を確認した。

(2) 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を表示する3色回転灯は、バイバックのバイブレータが空中にある時は「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120 Hz、規定時間6 secとした。

バイバックのバイブレータが、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、バイブレータおよび計測用センサが、気中(バイブレータが挿入されていない状態)から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、 0.2 G (1.96 m/sec^2)を閾値とした。

実験によるシステムの締固め判定は、監督員、打設管理者およびオペレータの目視確認と一致しており、有効性を確認することが出来た。なお、結果を判定項目で分類すると、表一3に示すように速度二乗和による判定が主な判定項目であった。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%は規定時間(6秒)の判定で合格であったが、その他(速度二乗和、周波数)は規定時間以下で合格と判断されていた。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。

表一 3 基準値をクリアした判定項目の計測点数内訳

	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

(3) システム化の課題

ダムコンクリートの打設は、バイバックを浅く山積みコンクリートに挿入し、山を崩すような作業を短時間に繰り返すことも多く、この場合は締固め完了前にバイブレータを引き抜くため、今回のシステムで正しく判定は行えない。このような特性を把握して、本システムが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。

また締固め判定位置については、締固め完了位置をGNSSにて計測・記録し、リアルタイムにPCモニタに表示しているが、打設管理者がリアルタイムに締固め位置の管理を行うには、ハンディ機器にも締固め位置表示ができるシステムの開発が必要である。

6. おわりに

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、加速度を解析することでリアルタイムに締固め完了を判定できることが分かった。この加速度解析による判定を用いたシステムを用いることで、今まで施工経験に依存し、目視およびトータル施工時間の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、打設全面の品質を確保できる。さらに、品質に悪影響を与える過剰な締固め時間の削減も可能となり、生産性向上にも寄与することが可能であると考ええる。

建設労働人口の減少と高齢化、若年労働者の不足により、ICTを用いた施工の合理化は、今後ますます進展すると予想されるが、今回の手法は情報化施工技術を用いた品質管理^{5), 6)}への1つのアプローチであり、品質向上に寄与できる施工管理にもICTの適用は可能と考える。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。

JCMIA

《参考文献》

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（ダムコンクリート編），2013
- 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：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.
- 6) 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.

【筆者紹介】

上高 克弘（うえこう かつひろ）
 ㈱大林組
 大阪本店 川上ダムJV工事事務所
 副所長



古屋 弘（ふるや ひろし）
 ㈱大林組
 技術研究所
 上級主席技師

