

パイブレータ加速度を用いた締固め管理手法のダムコンクリートへの適用性検討

前田建設工業株式会社	正会員	○平田 昌史	正会員	秋田 剛
	フェロー会員	石黒 健	正会員	中野 孝威
	正会員	上馬場 靖	正会員	白石 幸基
株式会社前田製作所	正会員	内山 信		

1. はじめに

コンクリートを打設する際に実施するパイブレータ等を用いた締固め作業は、最終的なコンクリート構造物の品質を左右する重要な作業である。特に耐久性や強度・重量を十分に確保するため、粗骨材が大きく且つ水分量の少ない低スランプのコンクリートが用いられるコンクリートダムの施工では、この締固め作業が構造物の品質を大きく左右することになる。このような背景から、ダムコンクリートの締固め管理を対象として現在様々な管理手法やシステム^{例えば 1)~3)}が提案・研究されている。一方、著者らは一般的な棒状パイブレータを対象として、パイブレータの加速度を用いたフレッシュコンクリートの塑性粘度、加速度分布、締固め時間や締固め範囲を推定することで締固めを管理する手法について検討⁴⁾を行っている。この著者らが提案する管理手法は、古くから研究されてきたパイブレータによる液状化や締固めの実験・理論^{5)~10)}を基に構築した手法であり、具体的にはパイブレータの加速度変化がフレッシュコンクリートによる負荷であると考え、この負荷量（機械インピーダンス）からフレッシュコンクリートの粘性係数を求める。また、この粘性係数を用いてパイブレータの加速度伝播を求め、液状化の条件等から締固め範囲や締固め時間等を推定する、といった手法である。一般的な棒状パイブレータやフレッシュコンクリートだけではなく、大型のパイブレータを用いて低スランプのフレッシュコンクリートを締め固めるダム建設現場においても十分適用可能な手法である。そこで本報告では、著者らが提案する締固め管理手法について簡単に説明するとともに、ダム建設現場の大型パイブレータに対して加速度計を取り付け、著者らが提案する締固め管理手法を適用した結果¹¹⁾について紹介する。

2. パイブレータ加速度による締固め範囲等の誘導方法

(1) フレッシュコンクリートの粘性係数の推定

まず、図-1 に示す空气中（無負荷状態）でのパイブレータの運動について考えてみる。パイブレータでは、内部の偏心錘を高速で回転させ、その起振力によって棒部を振動させている。この時、パイブレータの鉛直方向の加速度分布は、パイブレータ先端からフレキシブルジョイント付近の支点（加速度がゼロとなる点）までの長さを有効振動長 L_0 とした三角形分布⁹⁾となる。この時、パイブレータの運動が定常状態であると仮定し、パイブレータに作用する向心力 F と起振力 F_V が釣り合い状態にあると考える。但し、向心力 F の作用位置 $L_0/3$ に対して起振力 F_V の作用位置は z_w であるため、モーメントの釣り合いを考慮して無負荷状態の運動方程式を次のように置く。

$$\frac{1}{2}m_v g \cdot \alpha_{T0} = \frac{3}{2} \left(1 - \frac{z_w}{L_0}\right) m_w r_w \omega_0^2 \quad (1)$$

m_v はパイブレータ本体の重量、 g は重力加速度、 α_{T0} と ω_0 は無負荷状態におけるパイブレータ先端加速度と角速度である。また、 m_w は偏心錘の重さ、 r_w は偏心錘の回転半径である。次に、図-2 に示すように、パイブレータをフレッシュコンクリートに挿入した場合（負荷状態）を考えてみる。この時、パイブレータにはフレッシュコンクリートによる抵抗力 ΔF が作用し、パイブレータの加速度および角速度が低下する。この負荷状態の運動方程式を、式(1)に倣い以下のように表わす。

$$\frac{1}{2}m_v g \cdot \alpha_T + \Delta F = \frac{3}{2} \left(1 - \frac{z_w}{L_0}\right) m_w r_w \omega^2 \quad (2)$$

ここで、 α_T と ω は負荷状態におけるパイブレータ先端加速度と角速度である。これらの式(1)に示した無負荷状態の

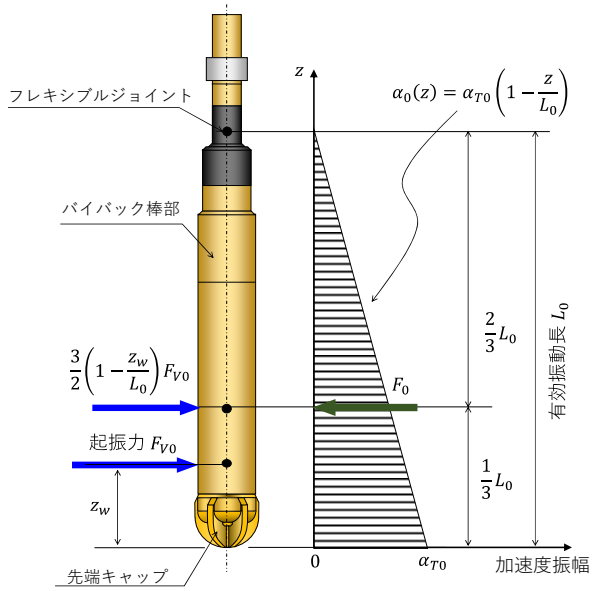


図-1 バイブレータの模式図（無負荷状態）

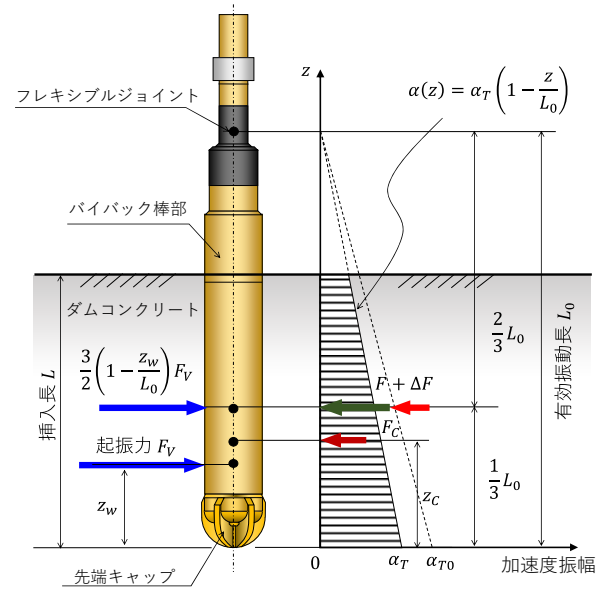


図-2 バイブレータの模式図（負荷状態）

運動方程式と式(2)に示した負荷状態の差分から、バイブレータに作用するフレッシュコンクリートの抵抗力 ΔF は次の様に求められる。

$$\Delta F = \frac{1}{2} m_v g \alpha_{T0} \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - \frac{\alpha_T}{\alpha_{T0}} \right) \quad (3)$$

一方、バイブレータに作用する抵抗力 ΔF は、液状化したフレッシュコンクリートの粘性によって生じる流体力であると捉えることができる。そこで、図-3に示すようなバイブレータ表面におけるフレッシュコンクリートの微小要素を取り上げ、バイブレータの円運動によってせん断応力を受けると考える。このせん断応力に粘性流体の振動平板流れの解を適用すると、微小要素に作用する応力 f_c は次のように表わされる。

$$f_c = \sqrt{\frac{\rho \mu}{2\omega}} g \alpha_T \left(1 - \frac{z}{L_0} \right) \quad (4)$$

ρ はフレッシュコンクリートの密度、 μ はフレッシュコンクリートの粘性係数（塑性粘度）である。フレッシュコンクリートの流体力 F_c は、この微小要素に作用する応力 f_c をフレッシュコンクリートの接触面積で積分すればよい。バイブレータのフレッシュコンクリートへの挿入長を L 、バイブレータ径を ϕ として積分すると、流体力 F_c は次のように求められる。

$$F_c = \pi \phi \sqrt{\frac{\rho \mu}{2\omega}} g \alpha_T \left(1 - \frac{L}{2L_0} \right) L \quad (5)$$

流体力 F_c と抵抗力 ΔF の関係は、図-2に示した作用位置の違いによるモーメントを考慮して次のようになる。

$$\Delta F = \frac{3}{2} \left(1 - \frac{z_c}{L_0} \right) F_c, \quad \text{但し } z_c = L \left(\frac{1}{2} - \frac{L}{3L_0} \right) / \left(1 - \frac{L}{2L_0} \right) \quad (6)$$

z_c は流体力が作用位置（バイブレータ先端からの距離）であり、流体力が台形で作用すると考えると、挿入長 L と有効振動長 L_0 から式(6)の様を求めることができる。この式(6)に式(3)と式(5)を代入し整理すれば、粘性係数 μ は以下のような式で表わされる。

$$\mu = \frac{2\omega m_v^2}{9\rho A_L^2} \left(\frac{\alpha_{T0}}{\alpha_T} \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right)^2, \quad \text{但し } A_L = \pi \phi L \left(1 - \frac{L}{L_0} + \frac{L^2}{3L_0^2} \right) \quad (7)$$

(2) バイブレータ加速度の伝播式

バイブレータによる締固め作業では、振動がどの範囲にどの程度伝播するのかが重要である。フレッシュコンク

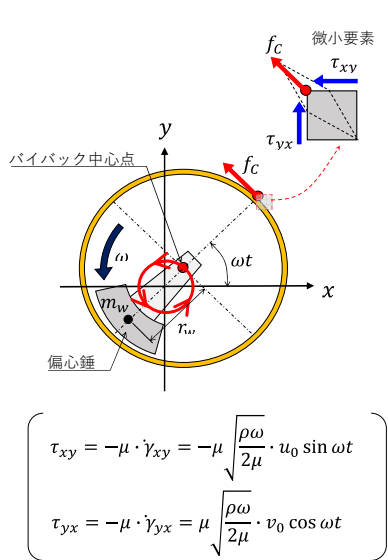


図-3 微小要素に作用する力

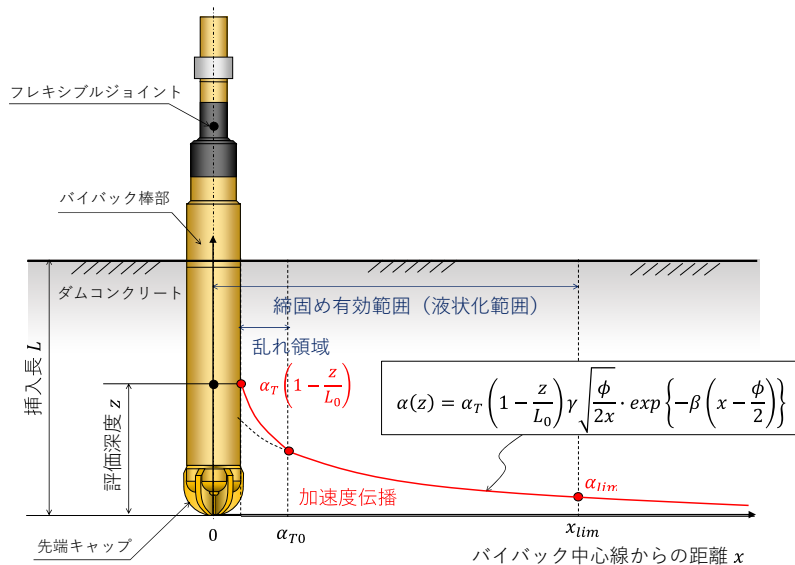


図-4 フレッシュコンクリート内の加速度の減衰

リート内を伝播する振動（加速度）特性については、古くから数多くの試験が実施されており、指数関数的に減衰すること^{12)~18)}が知られている。そこで図-4に示すように、フレッシュコンクリート内を伝播する加速度を次のように定義する。

$$\alpha(x, z) = \alpha_T \left(1 - \frac{z}{L_0}\right) \gamma \sqrt{\frac{\phi}{2x}} \exp\left\{-\beta \left(x - \frac{\phi}{2}\right)\right\} \quad (8)$$

x はパイプレタ中心からの距離、 z はパイプレタ先端からの距離（深度）である。また、 β は材料減衰係数、 γ は境界減衰係数である。材料減衰係数 β は、フレッシュコンクリート中を伝播する振動（加速度）の減衰を表す係数であり、図-4に示すような断面で加速度の減衰を考えると、その振動は縦波（圧縮波）として捉えられる。このような平面波の場合、圧縮による体積変化を無視すれば、波動方程式より材料減衰係数 β は次のように誘導できる。

$$\beta = \frac{2\omega^2}{3\rho c^3} \mu, \quad \text{但し } c = \sqrt{\frac{1}{A(1-A)} \frac{K_A}{\rho_c}} \quad (9)$$

なお、 c はフレッシュコンクリート内を伝播する縦波（圧縮波）の波速であり、ここでは式(8)に示す岩崎・坂本¹⁷⁾による推定式を用いている。 A は体積比で表した空気量、 ρ_c は空気を含まないフレッシュコンクリートの密度、 K_A は空気の体積弾性率（ $1.43 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ）である。境界減衰係数 γ は、指数減衰する加速度から推定した見掛け上のパイプレタ加速度と、実際のパイプレタ加速度の比として定義した係数である。パイプレタ近傍では、フレッシュコンクリートの乱れの影響により振動の伝播が妨げられ加速度が急激に低下する領域があり、この領域では式(8)に示した指数減衰する加速度推定式は適用できない。これは、フレッシュコンクリート内を伝播する振動を縦波（圧縮波）と仮定しているのに対し、実際のパイプレタは水平断面では円運動であり、その近傍では振動は螺旋状に広がるのが要因の1つであると考えられる。そこで、乱れの領域を横波（せん断波）による影響が大きい領域であると捉え、その影響範囲 d を振動平板の境界層の厚さ（Stokes層の99%厚）を用いて以下のように定義する。

$$d = 4.6 \sqrt{\frac{2\mu}{\rho\omega}} \quad (10)$$

また、乱れ領域内では加速度伝播が $1/n$ 乗則に従うと考え次のように置く。

$$\alpha(x, z) = \alpha_T \left(1 - \frac{z}{L_0}\right) \left\{1 - \left(\frac{2x - \phi}{2\delta}\right)^{\frac{1}{n}}\right\} \quad (11)$$

ここで、 δ は式(11)の加速度がゼロとなる領域の厚さ、 n はパイブレータ表面の形状や骨材の混入量等の影響により変化する指数である。ここでは、この $1/n$ 乗則の関数が乱れ領域の境界位置 d において指数関数へ移行すると考え、境界減衰係数 γ を次のように定義した。

$$\gamma = \left(1 - X^{\frac{1}{n}}\right) \sqrt{\frac{2d + \phi}{\phi}} \exp(\beta d), \quad \text{但し } X = \frac{d}{\delta} = \sqrt{\frac{\phi}{2d + \phi}} \exp(-\beta d) \quad (12)$$

(3) 締固め有効範囲の推定

先に述べたように、フレッシュコンクリートの締固めとは、パイブレータの振動によりフレッシュコンクリートを液状化させ、その自重により気泡を抜くとともに骨材等を沈降・移動し再配置するというものである。よって、締固めの有効範囲は、フレッシュコンクリートが液状化する範囲と置き換えて考えることが出来る。フレッシュコンクリートが Bingham 流体であるとし、その降伏値を超えることで液状化が進行すると考えると、降伏値に対応する加速度が液状化に必要な加速度の下限值 α_{lim} であると定義できる。ここでは、式(9)からパイブレータに作用する加速度平均値 $\bar{\alpha}$ を用いて、以下のように置く。

$$\alpha_{lim} = \left(\frac{\beta \cdot c}{\omega}\right)^2 \bar{\alpha}, \quad \text{但し } \bar{\alpha} = \alpha_T \left(1 - \frac{L}{2L_0}\right) \quad (13)$$

一方、フレッシュコンクリートの締固めはこの加速度下限値 α_{lim} より小さい加速度では進行しないため、締固めの限界範囲を x_{lim} として、式(8)より次のように置く。

$$\alpha_{lim} = \alpha_T \left(1 - \frac{L}{2L_0}\right) \gamma \sqrt{\frac{\phi}{2x_{lim}}} \exp\left\{-\beta \left(x_{lim} - \frac{\phi}{2}\right)\right\} \quad (14)$$

締固め限界範囲 x_{lim} は、式(13)と式(14)を連立することで求められる。但し、締固め限界範囲 x_{lim} に対して陽な形で解くことは困難であるため、以下に示す Newton 法による反復計算を用いて締固め限界範囲 x_{lim} を求める。

$$x_{t+1} = x_t - \frac{f(x_t)}{f'(x_t)} \quad (15)$$

添字 i は反復回数である。また、関数 $f(x_i)$ およびその接線勾配 $f'(x_i)$ は式(14)より次のように定義する。

$$f(x_i) = C \sqrt{\frac{1}{x_i}} \exp(-\beta x_i) - \alpha_{lim}, \quad f'(x_i) = \left(-\frac{1}{2x_i} - \beta\right) C \sqrt{\frac{1}{x_i}} \exp(-\beta x_i) \quad (16)$$

$$\text{但し } C = \alpha_T \left(1 - \frac{L}{2L_0}\right) \gamma \sqrt{\frac{\phi}{2}} \exp\left(\beta \frac{\phi}{2}\right)$$

締固め限界範囲 x_{lim} は、式(15)により求められた x_{i+1} が以下の収束条件を満たした場合とすればよい。

$$|x_{t+1} - x_t| \leq \varepsilon_x \quad (17)$$

ε_x は反復計算の収束値である。なお、締固め限界範囲 x_{lim} は実務的に cm 単位の精度で得られれば十分であるため、今回の検討では収束値 ε_x に 0.01m を採用している。

3. ダム現場における試験施工と適用性評価

(1) 加速度計の設置とキャリブレーション試験

著者らが提案する締固め管理手法を実施するためには、パイブレータの先端付近に加速度計を設置する必要がある。しかしながら、粗骨材の粒径が大きく低スランプであるダムコンクリートの場合、パイブレータへの負荷が大きく特に先端部での摩耗が激しいため、表面に加速度計を設置するのは耐久性の観点から非常に困難である。そこで、パイブレータ本体と先端キャップの間に別途作成したアダプタを挟み、このアダプタ内に加速度計を設置する

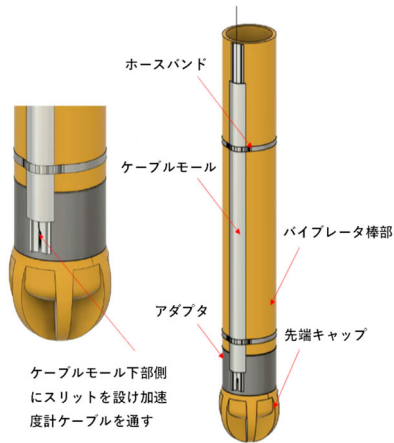


図-5 加速度計アダプタ概略図



写真-1 加速度計アダプタ取付け状況

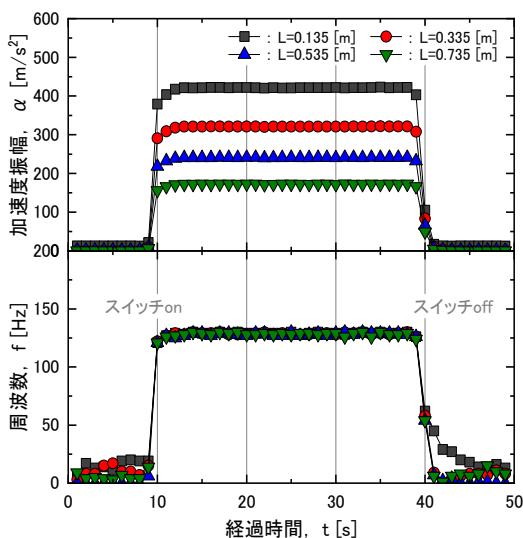


図-6 加速度計アダプタ概略図

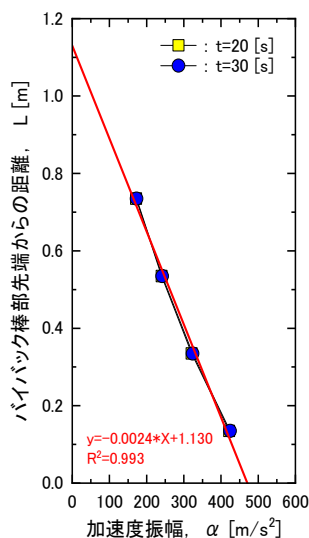


図-7 無負荷時加速度分布

表-1 計算に必要な各諸元一覧

フレッシュコンクリート			
スランプ	SI	cm	: 3.0
水	W	kg/m ³	: 107
セメント	C	kg/m ³	: 210
細骨材	S	kg/m ³	: 496
粗骨材	G	kg/m ³	: 1568
水セメント比	W/C	%	: 51.0
細骨材率	s/a	%	: 24.0
密度	ρ	kg/m ³	: 2381
空気量	A	%	: 2.0
バイバック諸元			
直径	φ	m	: 0.150
バイバック棒部の重量	m _v	kg	: 73.00
バイバック棒部の有効長さ	L ₀	m	: 1.130
締固め時の挿入長さ	L	m	: 0.650
加速度計位置	z	m	: 0.135
無負荷時加速度	α ₀	m/s ²	: 422.0
無負荷時先端加速度	α _{T0}	m/s ²	: 479.3
無負荷時周波数	f ₀	Hz	: 130.0
無負荷時角速度	ω ₀	rad/s	: 816.8

ことで対応した。加速度計のケーブルについては、バイブレータ側面に貼り付けたアルミ製のモール内を通すことで保護している。図-5に加速度計アダプタの概略図、写真-1に加速度計アダプタの取付け状況を示す。なお、この写真-1に示したように加速度計アダプタは4連バイブレータの左側1本にのみ設置している。

先に述べたように、締固め管理に用いる粘性係数や締固め範囲等はバイブレータの加速度変化から求めるため、使用するバイブレータに対して基準となる無負荷状態でのキャリブレーションが必要となる。そこで、バイブレータに加速度計を追加で3カ所設置し、バイブレータを空回しすることで無負荷時の初期先端加速度 α_{T0} と初期周波数 f_0 、有効振動長 L_0 を求めた。図-6は、このキャリブレーションで計測した加速度振幅と周波数である。これらの値は、1000Hzで計測した加速度波形から1秒間の平均値として算出している。図-7は、図-6からバイブレータの運動が定常状態に至っていると判断される20秒後、30秒後の加速度振幅を抜き出し、その分布を示したグラフである。バイブレータの加速度は三角形に分布しており、図中赤線で近似することで初期先端加速度 α_{T0} と有効振動長 L_0 が求められる。表-1に、これらの値を含む締固め管理計算に必要な各諸元の一覧を示す。

(2) 型枠内での締固め試験

ダム現場施工で計測を実施する前に、別途型枠を準備して加速度から求められる粘性係数や締固め範囲についての検証試験を実施した。型枠の大きさは幅1.6m、奥行2.0m、高さ0.9m、内側にはバイブレータの振動が反射しないように発泡スチロールを貼り付けている。このような型枠を4つ準備し、条件を変えた締固め試験(Case1~Case4)を実施した(写真-2参照)。Case1およびCase2では、型枠内にコンクリートをホッパーで投入後、均し作業をせずにそのまま締固め作業を実施している。この2つのケースでは、ダムコンクリートは低スランプであるため型枠内で十分に均されるまで加速度が安定せず、得られた加速度を用いた締固め判定が困難であった。そこで、Case3およびCase4では型枠内にコンクリートをホッパーで投入後、バイブレータを用いて均し作業を実施し、その後に締



写真-2 型枠内締固め試験状況

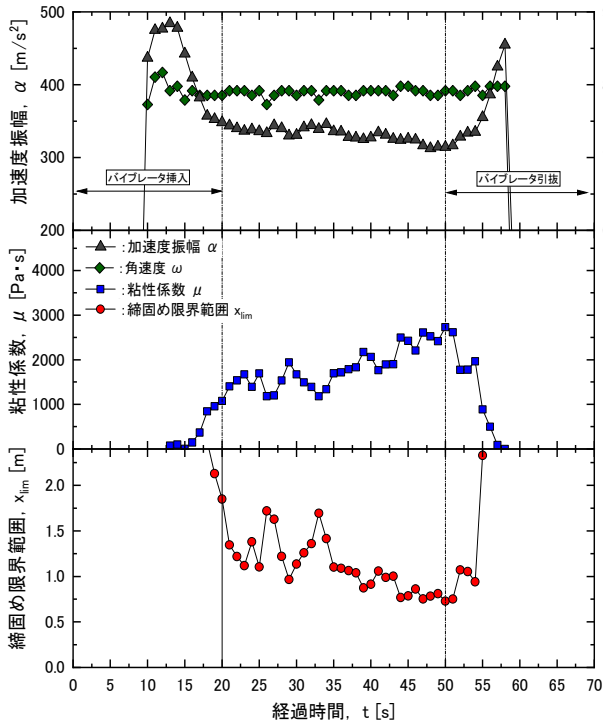


図-8 型枠内締固め試験結果 (Case3)

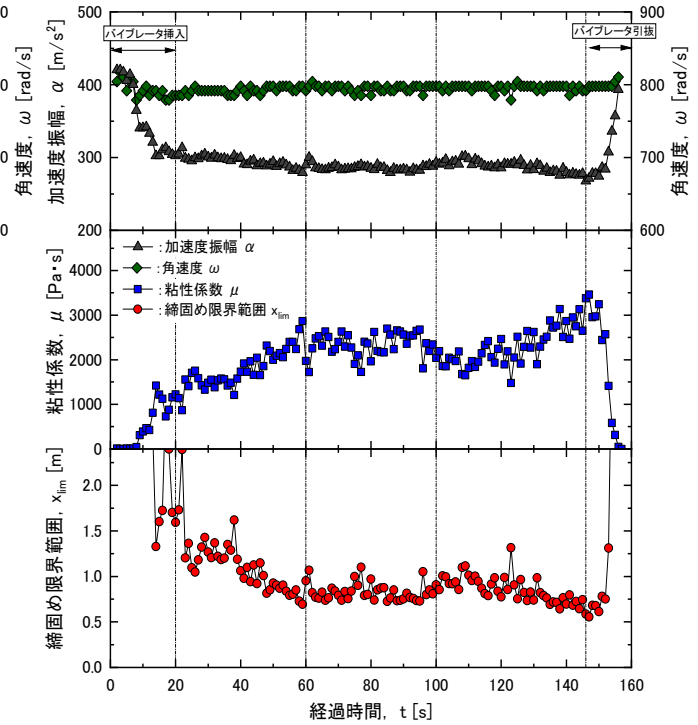


図-9 型枠内締固め試験結果 (Case4)



写真-3 締固め有効範囲 (Case4)



写真-4 σ_{91} コアと採取位置 (Case4)

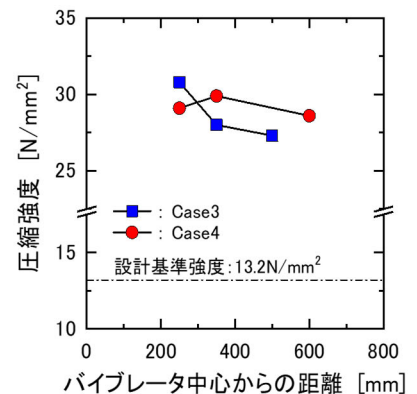


図-10 圧縮強度の分布

固め作業を実施した。Case3では締固め時間30秒、Case4では締固め時間120秒としている。ここでは、加速度が安定しなかったCase1とCase2の結果については割愛し、均し作業後に計測を実施したCase3とCase4の結果のみを示す。図-8はCase3の試験結果である。先に実施したキャリブレーション試験と同様に、1000Hzで測定した加速度波形から1秒毎の加速度振幅と各速度(周波数)を求め、粘性係数と締固め限界範囲を計算している。このCase3では、バイブレータ挿入後(計測開始から20秒後)から、実施工に近い約30秒間の締固め作業を実施している。この図を見ると、締固め作業中は徐々に加速度振幅が小さくなり、バイブレータへの負荷が大きくなっていくことがわかる。これは、バイブレータの振動による液状化の範囲が徐々に広がることで、バイブレータへの負荷が増加



写真-5 現場における均し作業状況



写真-6 現場における締固め作業の計測状況



したためだと考えられる。なお、液状化範囲の広がり
は徐々に収束する傾向にあるため、これに伴い加速度
も収束すると考えられるが、30秒後では収束する方向
にシフトしつつあるものの明確ではない。一方、図-9
はCase4の計測結果である。Case4では、約120秒間の
締固めを実施することでオーバーコンパクションによる
材料分離等の影響について検討している。この図-9
を見ると、バイブレータ挿入後40秒（計測開始から60
秒）で加速度が収束しており、これに伴い計算される
粘性係数や締固め有効範囲も安定している。なお、こ
の時の締固め範囲は0.8~0.9mと計算されており、写
真-3に示した実際の締固め範囲（液状化した範囲）約
0.8mと良く一致している。その後、計測開始から100
秒後を超えたあたりから加速度に再び変化が表れ、オ
ーバーコンパクションが生じていると考えられる。

型枠による締固め試験では、σ91においてコアを採
取し圧縮試験により強度を確認している。写真-4は、
Case4における採取したコアと採取位置である。また、
図-10は採取した位置に対する圧縮強度（Case3と
Case4）の分布である。締固め範囲であると判定された半径0.8m以内で採取したコアの圧縮強度は、設計基準強度
である13.2N/mm²以上を十分に確保していることが確認できる。なお、圧縮強度の傾向として、Case3ではバイブ
レータに近い位置ほど強度は高く、よく締め固まっていると判断できる。これに対してCase4では、Case3よりも
長時間締固めを実施しているため、圧縮強度はCase3よりも高い傾向にあるが、バイブレータに近い位置ではオ
ーバーコンパクションの影響で圧縮強度が低下しており、Case3よりも圧縮強度は低くなっている。以上のように、
バイブレータ加速度を用いて締固めに必要な時間や範囲の管理だけでなく、オーバーコンパクション等も判断で
きることが分かった。

(3) 現場施工時のデータ取得結果

実際のダムコンクリート施工現場において、加速度計を設置したバイブレータを用いて締固め作業時の計測を実
施した。なお、先ほどの型枠を用いた締固め試験では、締固め前の均し作業を実施する必要がある結果となったが、
実際の施工でも写真-5に示すような均し作業は必須である。このため、写真-6に示した締固め作業に対してのみ加
速度計測を実施している。なお、この写真-6より締固め作業中のバイブレータ挿入長さは0.65mと設定して計算を
行っている。図-11は、締固め施工中に計測した加速度振幅と角速度と、粘性係数および締固め範囲の計算結果の
一例であり、試験的に締固め時間を20秒、30秒、40秒とした計3回の締固めを実施した例である。締固め①（締

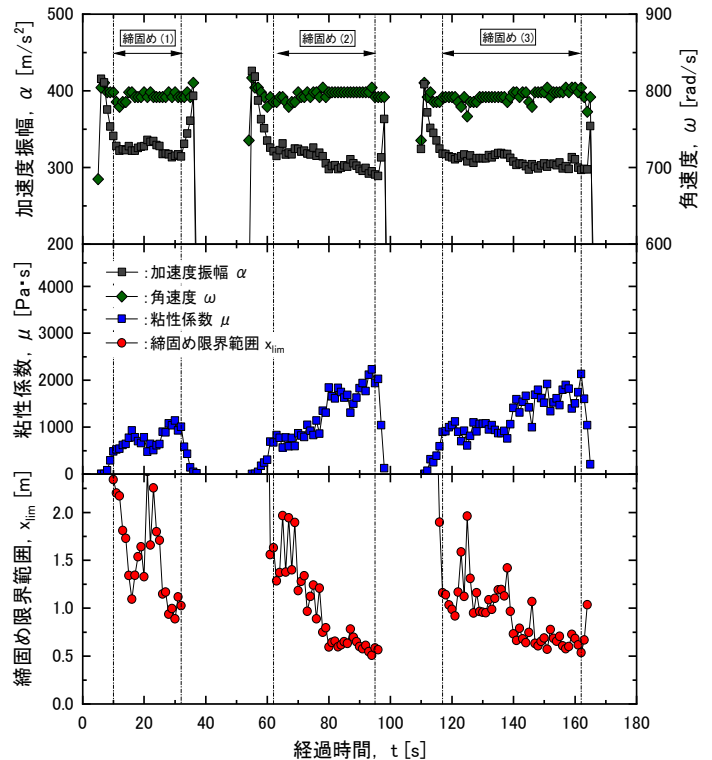


図-11 現場締固め施工時の計測結果

固め時間 20 秒) を見ると, 加速度振幅は十分に収束しておらず締固めが不十分であると判断できる. これに対して締固め②と③(締固め時間 30 秒と 40 秒) では, 加速度振幅は収束傾向を示しており, 計算された粘性係数は約 1800Pa・s, 締固め範囲は 0.6~0.7m 程度の値に収束していると読み取ることができる. つまり, 本現場における締固め作業には少なくとも 30 秒から 40 秒程度の時間が必要であり, その際の締固め範囲はバイブレータの中心から 0.6~0.7m 程度と判断される.

4. おわりに

本報告では, 著者らが提案するバイブレータ加速度を用いた締固め管理手法をダムコンクリート施工に適用する方法を述べるとともに, 実際のダム建設現場で締固め時の加速度を計測した結果について紹介した. この締固め作業で取得した加速度から計算した締固め時間や締固めの範囲は実施工とも一致しており, 設計基準強度も十分満足していることを確認した. 本締固め管理手法は, 締固め不足やオーバーコンパクションを客観的かつ定量的に判定可能であり, 締固めの品質向上(不具合防止や基準値の確保)に貢献する技術であると言える. 現在, 均し作業と締固め作業の自動判別等を含むシステムの開発を順次進めており, 将来的には全自動・無人化施工の基礎技術になることが期待できる.

[参考文献]

- 1) 竹内啓五, 宇野昌利, 藤内隆, 加瀬俊久, 長谷川悦央: ダムコンクリート締固め自動判定技術の開発-三次元計測による評価-, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.41, pp.181-184, 2016.
- 2) 上高克弘, 古屋弘: ダム用コンクリート締固め判定手法の開発, ダム工学, Vol.103, pp.115-118, 2016.
- 3) 天明敏行, 齋藤淳, 寺田幸男: ダムコンクリートのバイバックによる締固め評価システム, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1618-1623, 2014.
- 4) 平田昌史, 白根勇二, 南浩輔, 笹倉伸晃, 中島良光: 棒状バイブレータを用いたフレッシュコンクリート締固め管理手法の検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.73, No.2, pp.165-178, 2017.
- 5) 村田二郎: フレッシュコンクリートの挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.21-33, 1987.
- 6) 村田二郎, 川崎道夫, 小倉拓也: 振動締固めの評価方法に関する研究, セメント技術年報, No.41, pp.283-286, 1987.
- 7) 岩崎訓明, 坂本信義: 内部振動機によるコンクリートの締固めに関する研究, 土木学会, 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, pp.121-126, 1989.
- 8) 岩崎訓明: 振動によるフレッシュコンクリートの液状化と内部振動機の作用領域に関する考察, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.1-18, 1991.
- 9) 村田二郎: コンクリート振動機の知識, コンクリート工学, Vol.33, No.8, pp.26-34, 1995.
- 10) 岡本寛昭, 鈴木立人, 小野寺三男, 内山寛信: フレッシュコンクリートの振動締固め挙動に対する新しい評価法, セメント・コンクリート論文集, No.55, pp.226-231, 2001.
- 11) 中野孝威, 平田昌史, 石黒健, 杉野裕之, 上馬場靖, 桑野陵一, 内山信: 加速度を用いた締固め管理手法のダムコンクリートへの適用性評価, 第 79 回土木学会年次学術講演会講演集, VI-499, 2024.
- 12) 神山一, 遠藤博之: 振動締固め中の軽量コンクリートの振動伝ば性状, 材料, Vol.18, No.185, pp.115-120, 1969.
- 13) 佐久田昌治, 坂本昭夫, 金沢正則: コンクリート中におけるバイブレータの振動伝播, 日本建築学会, 関東支部研究報告集, Vol.49, pp.265-268, 1978.
- 14) 黒川善幸, 谷川恭雄, 森博嗣, 渡辺貴樹: フレッシュコンクリートの振動伝播特性に関する実験的・解析的研究, コンクリート工学年次講演集, No.22, Vol.2, pp.403-408, 2000.
- 15) 渡辺貴樹, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 山口征邦: 内部振動機による強制振動力を受けるフレッシュモルタルの振動伝播性状に関する実験的研究, 日本建築学会, 東海支部研究報告集, 第 38 号, pp.5-8, 2000.
- 16) 安井孝文, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 山口征邦: 内部振動機による強制振動力を受けるフレッシュコンクリートの振動伝播性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.707-708, 2000.
- 17) 西林新蔵, 木山英郎, 阪田憲次, 井上正一: フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究-モルタルの弾性波伝播特性について-, 鳥取大学工学部研究報告, 第 7 巻, pp.64-74, 1976.
- 18) 川崎道夫, 越川茂雄, 佐藤次郎: 内部振動機による締固め有効範囲の推定に関する研究, 土木学会, 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, pp.127-132, 1989.