

## 棒状バイブレータによる振動伝播の推定手法の検討 ～ 加速度分布式の誘導 ～

前田建設工業株式会社 正会員 ○ 平田 昌史 笹倉 伸晃  
白根 勇二 南 浩輔  
中島 良光 舟橋 政司

### 1. はじめに

建設施工現場において、コンクリートを打ち込む際の空洞（未充填）や気泡、豆板やコールドジョイント等の発生を抑制するためには、内部振動機（棒状バイブレータ等）による締固め作業が重要である。棒状バイブレータの振動伝播特性や締固め時間、締固め範囲については、これまで数多くの研究（例えば1),2),3)）が行われており、フレッシュコンクリートの加速度（エネルギー）分布を用いた締固め管理方法等（例えば4),5)）も検討されている。しかしながら、これらの手法ではフレッシュコンクリート内に加速度計を設置する必要があり、加速度計の設置・撤去等に時間やコストが掛かるため汎用性が乏しいと考えられる。そこで本研究では、バイブレータ棒部の運動（加速度、振動数）から、フレッシュコンクリート内の振動伝播特性を推定する手法について検討を行った。

### 2. バイブレータの運動とフレッシュコンクリートの粘性係数の関係

バイブレータが定常状態であると仮定すると、バイブレータ棒部の運動は図-1に示す様な振り子運動である。この場合、フレッシュコンクリートから受ける抵抗力  $F_c$  [N] とバイブレータの向心力、起振力は釣合い状態にあるため、作用位置  $z = L_0/3$  における運動方程式は、

$$\frac{1}{2} m_v g \alpha_r = \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{z_w}{L_0} \right) m_w r_w \omega^2 - F_c \quad (1)$$

と求められる。  $L_0$  はバイブレータの有効長 [m]、  $m_v$  はバイブレータ棒部の重量 [kg]、  $g$  は重力加速度、  $\alpha_r$  および  $\omega$  はバイブレータ棒部先端の加速度 [G] と角速度 [rad/s]、  $m_w$  および  $r_w$  は偏心錘の重量 [kg] と偏心距離 [m] である。また、空气中（無負荷状態）における運動方程式は、バイブレータ棒部先端の加速度  $\alpha_{r0}$ 、角速度  $\omega_0$  とすると、

$$\frac{1}{2} m_v g \alpha_{r0} = \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{z_w}{L_0} \right) m_w r_w \omega_0^2 \quad (2)$$

と求められ、式(1)および式(2)より抵抗力  $F_c$  は、

$$F_c = \frac{1}{2} m_v g \alpha_{r0} \left( \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - \frac{\alpha_r}{\alpha_{r0}} \right) \quad (3)$$

と表わされる。一方、フレッシュコンクリートを非圧縮性の粘性流体であると仮定し、以下の様にモデル化する。

$$\tau = \tau_f + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

$\tau_f$  は降伏値 [N/m<sup>2</sup>]、  $\mu$  は粘性係数 [Pa·s]、  $\dot{\gamma}$  はせん断ひずみ速度 [s<sup>-1</sup>] である。バイブレータは高周波（約 200Hz）であるためニュートン流体（ $\tau_f = 0$ ）に近い挙動になると考え、せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  に振動平板の解を適用すると、フレッシュコンクリートの流体力は、

$$F_c = \frac{3}{2} A_L S \sqrt{\frac{\rho \mu}{2\omega}} \cdot g \alpha_r \quad , \quad A_L = 1 - \frac{L}{L_0} + \frac{L^2}{3L_0^2} \quad (5)$$

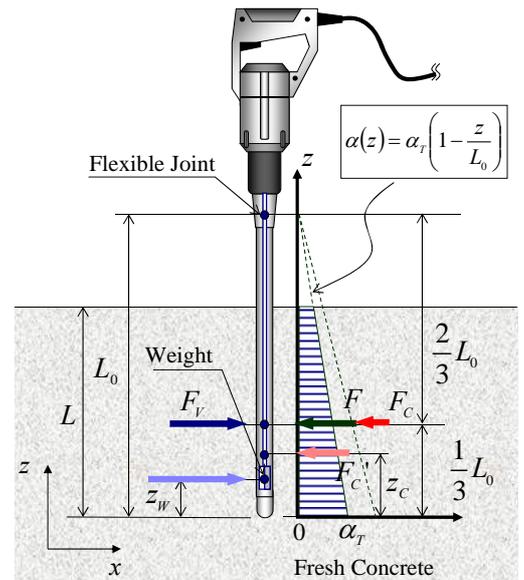


図-1 バイブレータの力の釣合い

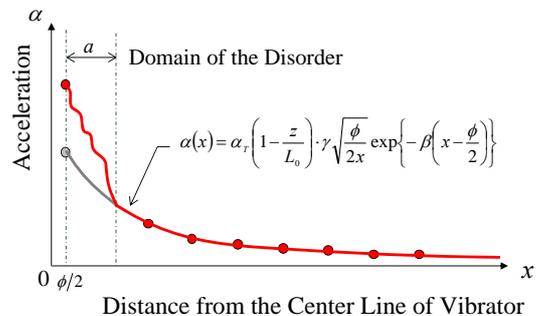


図-2 乱れ領域と加速度の分布

と求められる.  $S$  はバイブレータ棒部とフレッシュコンクリートの接触面積 [m<sup>2</sup>],  $\rho$  はフレッシュコンクリートの密度 [kg/m<sup>3</sup>] である. 式(3)と式(5)より, フレッシュコンクリートの粘性係数  $\mu$  は以下の様に求められる.

$$\mu = \frac{2\omega \cdot m_v^2}{9\rho A_L^2 S^2} \left( \frac{\alpha_{T0}}{\alpha_T} \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right)^2 \quad (6)$$

3. フレッシュコンクリート内の加速度分布式

フレッシュコンクリート中を伝播する振動(加速度)は, 指数関数的に分布・減衰することが知られている. 本研究では, 深度位置  $z$  における加速度分布として, 村田<sup>6)</sup>が提案する式に, バイブレータ径  $\phi$  による影響<sup>2)</sup>を考慮した次の様な式を採用する.

$$\alpha(x) = \alpha_T \left( 1 - \frac{z}{L_0} \right) \cdot \gamma \sqrt{\frac{\phi}{2x}} \exp \left\{ -\beta \left( x - \frac{\phi}{2} \right) \right\} \quad (7)$$

$\beta$  はフレッシュコンクリートの粘性による材料減衰係数,  $\gamma$  はバイブレータ近傍の乱れ領域の影響(図-2 参照)による境界減衰係数である. 材料減衰係数  $\beta$  は, 波動方程式を解くことにより次の様に求めることができる.

$$\beta = \frac{2\omega^2}{3\rho c^3} \mu, \quad c = \sqrt{\frac{n_k}{(1+n_k A)(1-A)} \cdot \frac{K_A}{\rho_c}} \quad (8)$$

$c$  は波速 [m/s],  $A$  は体積比で表した空気量,  $\rho_c$  は空気を含まないフレッシュコンクリートの密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $K_A$  は空気の体積弾性率 [N/m<sup>2</sup>] ( $\cong 1.43 \times 10^5$ ),  $n_k$  はフレッシュコンクリートと空気の体積弾性率の比 ( $\cong 1.53 \times 10^4$ ) である. 一方, 境界減衰係数  $\gamma$  については, 乱れ領域の範囲を  $a$  [m] と定義し, 乱れ領域内では加速度が次に示す  $1/n$  乗則に従い減衰するものと仮定する.

$$\alpha_D(x) = \alpha_T \left( 1 - \frac{L}{2L_0} \right) \left\{ 1 - \left( \frac{2x - \phi}{2\delta} \right)^{\frac{1}{n}} \right\} \quad \text{但し, } \phi/2 \leq x \leq a + \phi/2 \quad (9)$$

乱れ領域の境界位置 ( $x = a + \phi/2$ ) で加速度分布が式(9)から式(8)に移行し, 且つこの境界で乱れの影響が消失すると考えると, 境界減衰係数  $\gamma$  は次の様に求められる.

$$\gamma = \left( 1 - X^{\frac{1}{n}} \right) \sqrt{\frac{2a + \phi}{\phi}} \exp(\beta \cdot a) \quad \text{但し, } X = \frac{a}{\delta} \approx \sqrt{\frac{\phi}{2a + \phi}} \exp(-\beta \cdot a), \quad a = 4.6 \sqrt{\frac{2\mu}{\rho\omega}} \quad (10)$$

4. 既往の実験結果を用いた加速度分布の推定例

提案する加速度分布式の有効性を検討するため, 川崎ら<sup>1)</sup>が実施した実験結果に対して加速度分布を推定した. コンクリートの物性およびバイブレータ ( $\phi = 5\text{cm}$ ,  $L_0 = 33\text{cm}$ ,  $m_v = 4.23\text{kg}$ ) の加速度, 振動数を表-1 に示す. 図-3 は, 実験結果による加速度分布(図中の青ライン)と, 提案する推定式から得られた加速度分布(図中の赤ライン)の比較である. この図を見ると, 提案する推定式は, 実験結果をほぼ再現できていると考えられる.

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 岩崎訓明, 坂本信義: コンクリート中における内部振動機の振動の伝播特性, 土木学会論文集, 第 402 号/V-10, pp.87-96, 1989.
- 3) 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.
- 4) 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的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.
- 5) 梁俊, 丸屋剛, 坂本淳, 吉澤崇幸: 締固め完了エネルギーによるコンクリートの締固め性の評価に方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1235-1240, 2011.
- 6) 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.

表-1 コンクリートの物性とバイブレータの振動<sup>1)</sup>

フレッシュコンクリート					バイブレータ			
スランブ [cm]	W/C [%]	s/a [%]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	空気量 [%]	無負荷時		負荷時	
					$\alpha_0$ [G]	$f_0$ [Hz]	$\alpha$ [G]	$f$ [Hz]
2.0	53.0	46.0	2.390	3.5	89.9	191	64.6	187
11.0	53.0	46.0	2.370	3.5	90.3	190	69.8	184

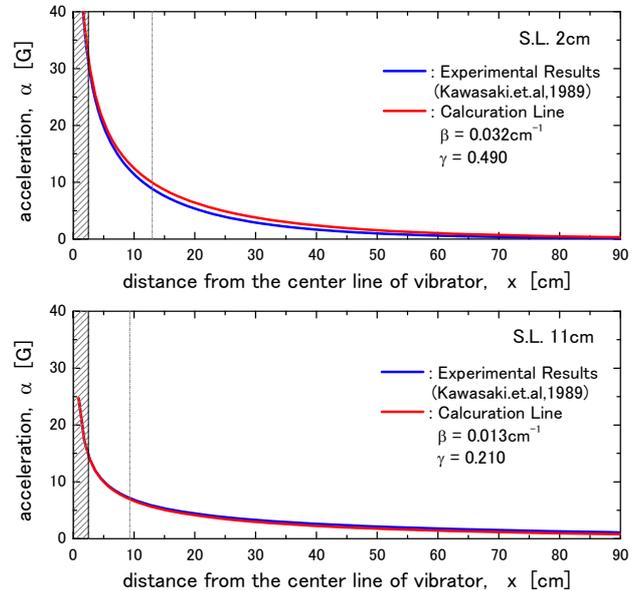


図-3 実験結果<sup>1)</sup>と推定式の比較