

Ⅲ-384

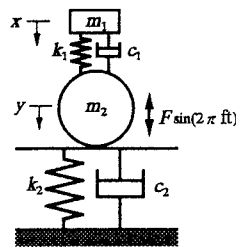
振動ローラの振動加速度を利用した地盤剛性評価手法

前田建設工業(株) 正会員 藤山哲雄
京都大学工学部 正会員 建山和由

1.はじめに 振動ローラを用いた土の締固めにおいて、締固めが進行し地盤剛性が増加するに従ってローラの振動加速度が変化する。この性質を利用して、ローラの加速度計測から地盤の締固め度をリアルタイムに評価することにより施工管理の合理化を目指した研究が従来より行われている¹⁾。しかし、振動ローラの振動挙動は地盤条件のみならずその機械条件(重量、振動数など)によっても変化するため、多種多様な振動ローラへ適用することが困難となっていた。著者らは既に、発振本体のみの構造をもつ起振機を対象とした同様のテーマに対し上述の問題点の解決する手法を提案したが²⁾、今回数値計算による検討をもとに、起振機(ローラ)とフレームの2質点構造をもつ振動ローラへの適用を試みたので報告する。

2.数値計算方法 振動ローラ～地盤系を図1に示す2自由度振動モデルに置き換え、(1)式で表される運動方程式をRunge-Kutta法を用いて解くことにより時間変化に伴うローラの加速度等を計算する。ただし地盤は引っ張り力が発揮できないと考え、地盤反力 $k_2y + c_2\dot{y}$ が負値をとるときに $k_2 = c_2 = 0$ として計算し、ローラが地表面より跳ね上がる現象もシミュレートする。地盤バネ係数 k_2 は実施工で得られた平板載荷試験等の結果を参考に設定し、また地盤粘性減衰係数 c_2 は $2D\sqrt{m_2k_2}$ で与え、地盤上で振動する基礎の問題等を参考に減衰比 D を0.4とした³⁾。

3.ローラの振動挙動の検討 図2は、硬さの異なる2種類の地盤上におけるローラの加速度波形とそれを周波数分析した計算結果の一例である。地盤が軟らかいときローラは正弦振動をするが、地盤が硬くなるとローラは地表面より跳ね上がり、地表面衝突時に急激に加速度が変化するため波形が乱れ、その周波数分析結果においては乱れた加速度成分に対応して高調波スペクトルや1/2分数調波スペクトルが出現する。そこで、基本振動数のスペクトルに対する高調波・1/2分数調波スペクトルの総和の比をとり、これを乱れ率と名付け締固めの進行に伴う加速度波形の乱れ具合を定量化する。ただし、基本振動数に対するスペクトルの値を起振力の自重に対する倍率で除しているが、これについては後述する。



m_1 : フレーム質量 (kg)
 m_2 : 振動輪質量 (kg)
 f : 振動数 (Hz)
 F : 最大起振力 (N)
 k_1 : 防振ゴムバネ係数 (N/m)
 c_1 : 防振ゴム粘性減衰係数 (Nsec/m)
 k_2 : 地盤のバネ係数 (N/m)
 c_2 : 地盤の粘性減衰係数 (Nsec/m)

図1 振動ローラ～地盤系モデル

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x} + k_1(x-y) + c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_1g \\ m_2\ddot{y} + k_2y + c_2\dot{y} - k_1(x-y) - c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_2g + F\sin(2\pi ft) \end{aligned} \quad (1)$$

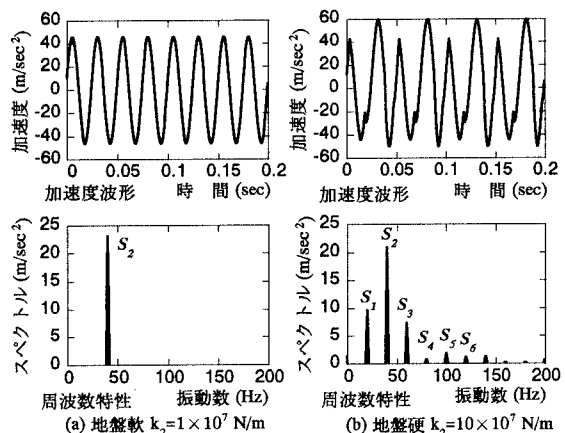


図2 ローラの加速度波形と周波数特性

乱れ率

$$= \frac{\text{高調波・1/2分数調波スペクトルの総和}}{\text{基本振動数+1/2基本振動数のスペクトル}} = \frac{\sum_{i=3}^{\infty} S_i}{S_1 + S_2} = \frac{\sum_{i=3}^{\infty} S_i}{F / (m_1 + m_2)g}$$

4.機械条件の影響を除去する試み 図3は種々の振動ローラを想定し地盤バネ係数と乱れ率の関係を計算により求めたものである。両者の関係は機械条件の影響を受けるため、この手法を多様な機種が使用される実施工に適用するには、この影響を除去する必要がある。本研究ではこの問題を次のように解決した。

図4は振動輪の跳ね上がり高さや振動数の関係を模式的に表した図であり、図中の f_{jump} とは振動輪が地表面より跳ね上がるか跳ね上がらないかの境界となる振動数である。運動方程式が(1)式で表される2自由度振動系の場合、この振動数を理論的に求めることはできないが、一般にフレームの振動加速度振幅はローラのそれに比べ非常に小さいことから、フレームからローラに作用する力を近似的にフレームの自重のみとみなせば、(1)式は近似的に次式(3)のように書き換えることができる。

$$m_2 \ddot{y} + k_2 y + c_2 \dot{y} = (m_1 + m_2)g + F \sin(2\pi f t) \quad (3)$$

このとき、 f_{jump} は次のように理論的に与えることができる。

$$f_{\text{jump}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{k_2} \sqrt{1 - 2\alpha D^2 + \sqrt{4\alpha D^4 - 4\alpha D^2 + 1} - \alpha}} \quad (4)$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{1}{m_1 + m_2} \right)^2 \quad D = 0.4 ; \text{減衰比}$$

先述したように、加速度波形の乱れはローラの地表面からの跳ね上がりと共に続く地表面への衝突が原因であるから、跳ね上がり高さが大きいほど地表面衝突時の衝撃が大きく加速度波形の乱れも大きいといえる。そこで、図4の振動数～跳ね上がり高さ曲線の形状から、ローラの振動数と f_{jump} の離れ具合を示す次のような指標 R が加速度波形の乱れに密接に関係すると予想し、この指標 R によって図3の乱れ率を整理し直すことを考える。

$$R = \frac{f_{\text{jump}} - f}{f} \quad (5)$$

その際、乱れ率は跳ね上がり高さの増減に伴う乱れた加速度成分 ($S_3 + S_4 + S_5 + \dots$) の変化の度合いを適切に表す指標でなければならない。一般に起振力 F が変化する場合は、基本振動に対するスペクトル ($S_1 + S_2$) もそれに比例し変化する。このため(2)式の乱れ率定義式においては ($S_1 + S_2$) を起振力（自重に対する倍率）で除してこの影響を防ぎ、(2)式の分子の乱れた加速度成分 ($S_3 + S_4 + S_5 + \dots$) の変化の度合いのみを乱れ率に反映させるためである。図3に示した全ての振動条件に対し、この乱れ率を指標 R によって整理し直したものが図5であるが、ほぼ1本の直線でまとめることができた。図5を利用すれば、任意の振動ローラに適用可能なローラ加速度計測による地盤剛性評価手法を構築することができる。1) ローラの加速度を計測し、周波数分析を行う。2) 定義式に従い、乱れ率を計算する。3) 図5より、対応する R を求める。4) (4)、(5)式より、 R は振動ローラの諸元 (m_1, m_2, f, F) と地盤バネ係数 k_2 の関数ゆえ、既知の値である振動ローラの諸元を代入することにより、地盤バネ係数 k_2 を求めることができる。

5.おわりに 数値計算による検討により、任意の振動ローラに適用可能な、ローラ加速度計測による地盤剛性評価手法を提案した。今後は、現場実験を行って本手法の適用性を検証していく予定である。

参考文献 1) 嶋津晃臣他：振動ローラによる盛土の締固めに関する調査，土木研究所資料第2184号，1985。
2) 建山和由他：振動式締め固め機械の振動特性を利用した地盤の締め固め度の評価手法について，土木学会論文集 No.487，1994。3) 岩崎敏男・嶋津晃臣訳：土と基礎の振動，pp207～263，鹿島出版会，1975。

m_1 (kg)	m_2 (kg)	f (Hz)	F (N)	k_1 (N/m)
○ 500	1000	20	$2(m_1+m_2)g$	1.0×10^6
□ 500	1000	60	$2(m_1+m_2)g$	1.0×10^6
◇ 500	1000	20	$3(m_1+m_2)g$	1.0×10^6
● 500	1000	60	$3(m_1+m_2)g$	1.0×10^6
■ 3000	4000	20	$4(m_1+m_2)g$	1.0×10^6
△ 3000	4000	60	$4(m_1+m_2)g$	1.0×10^6

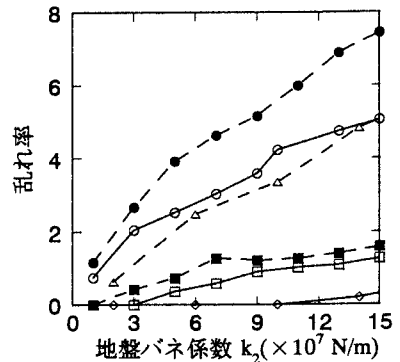


図3 乱れ率と地盤バネ係数の関係

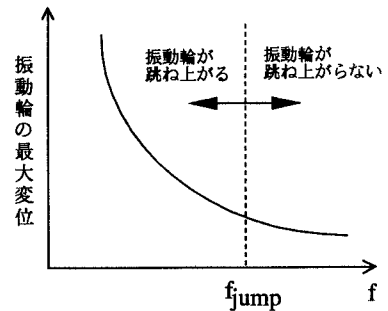


図4 振動数と跳ね上がり高さの関係

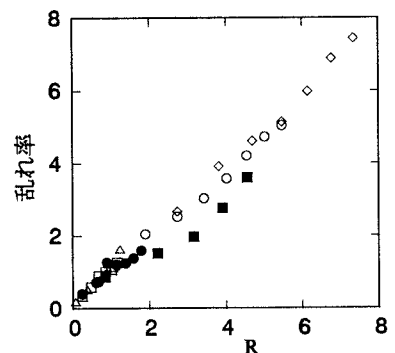


図5 乱れ率とRの関係