

# 18. 振動ローラの加速度計測を利用した地盤反力算定について

立命館大学  
若築建設  
立命館大学

○ 横山 隆明  
藤村 貢  
建山 和由

## 1. はじめに

GNSSやTSの普及とともに道路や空港などの盛土の締固め施工においては、転圧機の走行軌跡を用いて締固め施工管理を行う管理手法が導入されるようになったが、転圧時にリアルタイムで地盤の剛性を評価することができれば、併せて盛土の品質を直接評価することが可能となる。

リアルタイムで地盤剛性を評価する手法としては、振動ローラの加速度応答を利用する方法が一般的である。この手法は、地盤剛性に依存して変化する振動ローラの挙動から逆に地盤剛性を評価する手法であり、振動加速度の周波数特性か加速度応答から地盤反力～変位関係を計測しこれを利用する場合が多い。

後者の手法では、その計測原理から加速度の応答信号の計測と同時に起振機の回転角度の計測を行う必要があり、既存の振動ローラへ後付けでそのような計測システムを搭載することは困難であった。本研究では振動ローラの振動輪とフレームに取り付けた加速度計から得られる応答信号の情報だけから地盤反力を直接算定し、地盤反力～変位関係を求めることができる手法の開発を行い、その適用性を現場実験で検証した。

## 2. 振動ローラの加速度計測値による地盤反力～変位関係算定及び地盤反力係数の取得方法

図-1に振動ローラ-地盤系のモデル化を示す<sup>1)</sup>。振動ローラはフレームと振動輪の2質点系にモデル化され、フレーム-振動輪-地盤間はバネとダッシュポットで結ばれる。

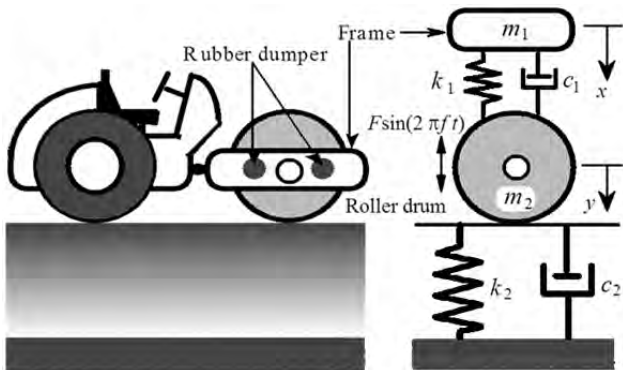


図-1 振動ローラ-地盤系のモデル化

モデル化した2質点系の強制振動は一般的に以下の式で表される。

$$m_1 \ddot{x} + k_1(x - y) + c_1(\dot{x} - \dot{y}) = m_1 g \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$m_2 \ddot{y} + R(t) - k_1(x - y) - c_1(\dot{x} - \dot{y}) = m_2 g + F_0 \sin(2\pi f_0 t - \delta) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式(2)の $\delta$ は振動輪と起振機の位相差を表す。また $R(t)$ は振動輪が地盤から受ける地盤反力であり、式(3)のように表される。地盤反力 $R$ が負値をとるときには $k_2 = c_2 = 0$ とすることにより振動輪が地盤から飛び上がる現象を表現することができる。

$$R(t) = k_2 y + c_2 \dot{y} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式(1)～(3)を用いれば地盤反力 $R$ を求めることができるが、その際には振動輪と起振機の位相差 $\delta$ が必要になる。位相差 $\delta$ については、起振機内にタイミングセンサーを設置して直接求める方法、振動輪に特定の角度を持った加速度ピックアップを2つ取り付けて求める方法<sup>2)</sup>などがある。位相差 $\delta$ が求めれば地盤反力 $R$ と振動輪の変位関係を求めることができる。図2,3にその一例を示す<sup>3)</sup>。

図-2は振動輪の跳躍が無い場合、図-3は振動輪が跳躍する場合を表す。これらの図からグラフの傾き $Ks$ を求めることで締固めている地盤の地盤剛性が推定できるとされている。

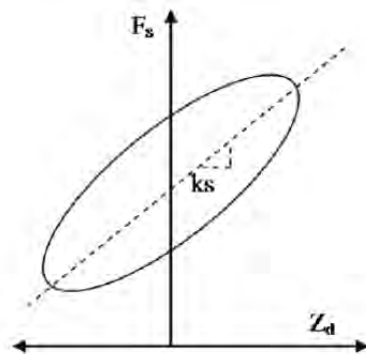
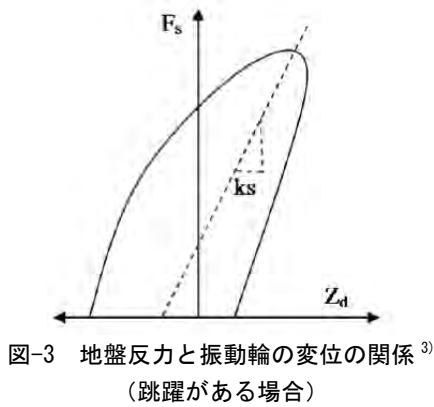
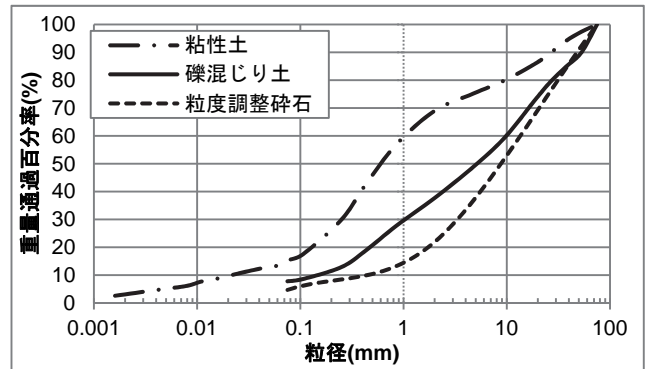


図-2 地盤反力 $R$ と振動輪の変位の関係<sup>3)</sup>  
(跳躍が無い場合)



測器を用いた。盛り土材料の粒土分布を図-5 に、材料諸元を表-1 に示す。



上記の方法では振動輪の加速度のみを計測しフレームの加速度は計測しないのが一般的であるが、フレームの加速度を計測することでより正確に地盤反力 R を評価することができる。その場合、地盤反力を表す式(3)と共に、式(1)と(2)を用いて導いた以下の式(4)も地盤反力 R を評価する式として利用することができる。

図-5 盛り土材料の粒土分布

表-1 盛り土材料諸元

項目	粘性土	礫混じり土	粒度調整碎石
自然含水比 (%)	15.2	4.3	6.4
最適含水比 (%)	13.7	6.8	8.9
均等係数	50.5	70.3	—
曲率係数	2.8	0.8	—
分類名	殺粒分質礫質砂	細粒分混じり砂質礫	—
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.653	2.652	2.667

$$R(t) = m_1(g - \ddot{x}) + m_2(g - \ddot{y}) + F_0 \sin(2\pi f_0 t - \delta) \dots\dots\dots(4)$$

式(4)においてフレームの加速度  $\ddot{x}$  と、振動輪の加速度  $\ddot{y}$  を計測し、計測値を累積誤差を排除しながら積分することでフレームと振動輪の速度及び変位が求められる。また式(3)と(4)に含まれる振動輪と起振機の位相差  $\delta$  についてはフレームと振動輪の加速度を計測し式(3)と(4)式を用いることで推定することが可能になる。

表-1 から、本実験では 3 種類（粘性土、礫混じり土、粒度調整碎石）の土質材料で試験盛り土を造成したが、当初粘性土と評価していた材料は最大粒径が 75mm の礫を含む材料であり砂質土と分類される材料であることがわかった（混乱を避けるため以後も粘性土と表記）。粘性土の含水比は 15.2% で最適含水比より若干大きい状態であり、礫混じり土および粒度調整碎石は最適含水比よりやや小さい値であった。

これらの式の妥当性の検証のため、実験用盛土地盤作成し振動ローラでの締固め試験を行った。締固め時の振動ローラの加速度波形と締固め後に IR と小型 FWD 試験機を用いて盛土の地盤情報を取得し、得られたデータから算出された地盤剛性比較した。

表-2 に使用した振動ローラの諸元を示す。振動ローラは酒井重工業製 11t 級 Sv512D-1 を用いた。

### 3. 現場実験の概要

建設現場の一角に盛土地盤を作成し転圧実験を行った(図-4)。各地盤は、粘性土、礫混じり土および粒度調整碎石の 3 種類の材料を用い、まき出し厚さは 60cm とした。

表-2 振動ローラの諸元

機種名	SV512D-1 11t 級	
質量 (t)	フレーム (m <sub>1</sub> )	1865
	振動輪 (m <sub>2</sub> )	6350
寸法 (mm)	ロール径/ロール幅	1544/2130
起振力 F <sub>0</sub> (kN)	Low/High モード	181/260
振動数 f <sub>0</sub> (Hz)	Low/High モード	33/26

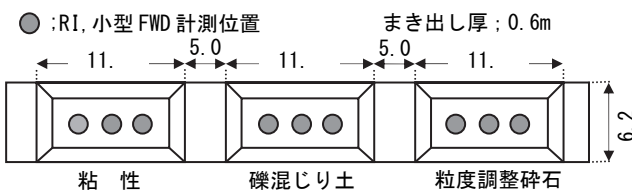


図-4 現場試験地盤と計測位置

盛土地盤に 8 回の締固めを行い、走行前、1、4、8 回目の締固め終了後に IR と小型 FWD 試験機による計測を行った。締固め時の走行速度はすべて低速度で行い、締固めの振動については、1 回目は Low モード、2 回目以降は High モードで締固めた。

図-4 に示す計測位置において RI による密度試験と小型 FWD 試験を行った。RI 試験は透過型の計

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 IRによる密度試験結果

図-6にIRによる密度計測結果及び締固め実験後に行った各試験盛土の締固め試験から得られた最大乾燥密度を用いて算出した締固め度を示す。図-6より、いずれの試験盛土においても締固め回数が増加するにつれて締固め度が増加しており、粘性土については締固めを行わない時点から締固め度が大きく、締固め1回目で90%以上の締固め度を示している。また礫混じり土と粒土調整碎石は転圧前の締固め度は若干異なるが転圧4回目以降ではほぼ同じ締固め度になっていることがわかる。

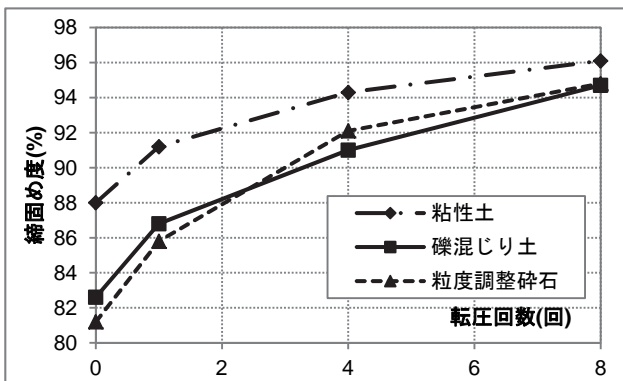


図-6 試験盛り土の転圧回数と締固め度の関係

##### 4.2 小型 FWD 試験による地盤反力係数計測結果

図-7に小型 FWD 試験による地盤反力係数 (K30 相当値) の計測結果を示す。

粘性土は、RI による密度試験結果と異なり転圧回数が増加するにつれて地盤反力係数が低下している。礫混じり土と粒土調整碎石は RI による密度試験結果と同様に地盤反力係数が増加する結果となった。粘性土については転圧によって盛り土の締固めがあまり進まず、練り返しの状態になっている可能性がある。

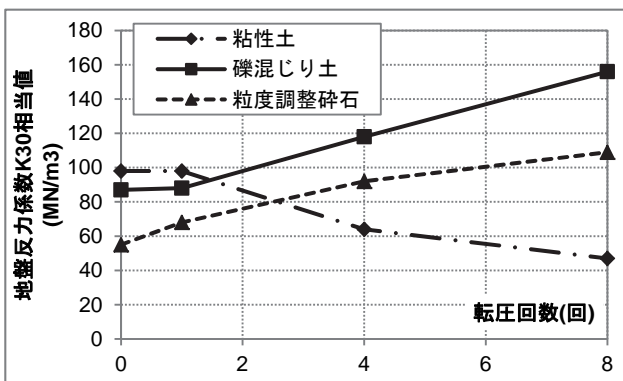


図-7 転圧回数と地盤反力係数 (K30 相当) の関係

##### 4.3 加速度計測値からの地盤反力の算定

振動ローラのフレームと振動輪の加速度計測結果を積分し式(4)を用いて起振機と振動輪の位相差  $\delta$  を求めることにより、地盤反力-変位関係が得られる。各試験盛り土での転圧回数による地盤反力-変位関係の変化を図-8~10に示す。各グラフにおいて変位の方向は図-1に示したモデル化と同じく鉛直方向を正方向として描いている。

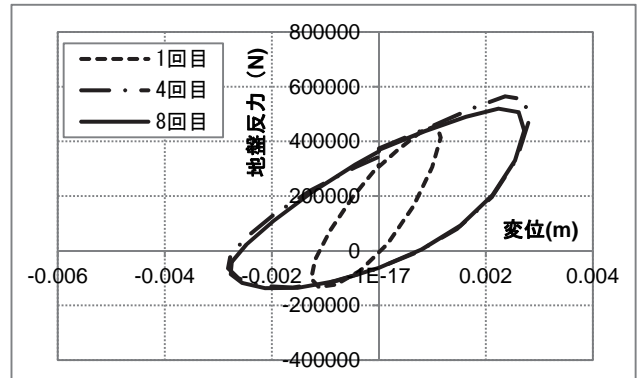


図-8 地盤反力-変位関係 (粘性土)

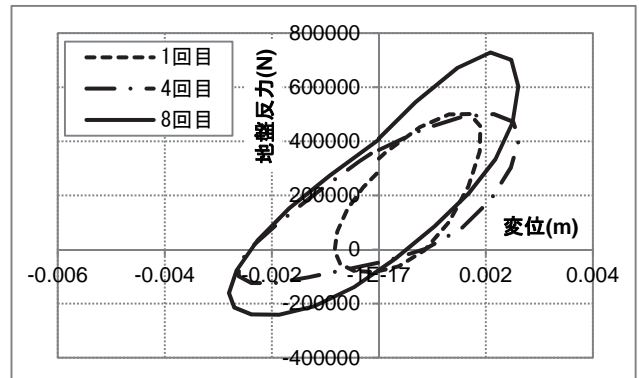


図-9 地盤反力-変位関係 (礫混じり土)

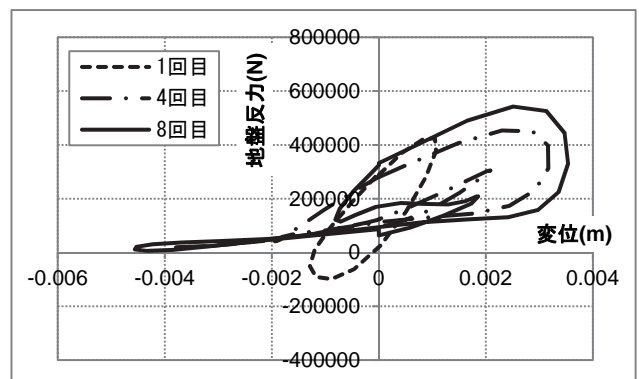


図-10 地盤反力-変位関係 (粒土調整碎石)

図-8~10から各試験盛り土の1回目については振動ローラのLowモードで締固めを行っているため4回目と8回目とは傾向が異なっているのがわかる。また、粘性土の4回目と8回目では小型FWDによる地盤反力係数 (K30 相当値) が減少し

ているが、図-8に示す地盤反力-変位関係においてもグラフの面積が減少しその傾向が現れている。逆に礫混じり土及び粒土調整砕石では小型 FWD による地盤反力計測値が増加しているが、図-9, 10に示されているようにグラフの面積が増加しており、この場合もその傾向が示されている。

図-8の粒度調整砕石では4回目以降のグラフを見ると変位のマイナスエリアに直線部分が現れているが、これは地盤反力の増加無しに変位が上方向に増加している事を示し、跳躍状態を表していることがわかる。

地盤反力-変位関係のグラフは地盤剛性値と密接に関係していると思われるが、これらのグラフは地盤と振動輪の相対的な位置関係によって刻々と変化する振動輪の接地面積の影響を含んでいる。地盤反力-変位関係のグラフから地盤剛性を評価するためには、何らかの方法でこの接地面積の影響を考慮する必要がある。

今回は各グラフの地盤反力と変位それぞれの最大値と最小値を結んだ直線を求め、その直線の傾きを各グラフから得られる変位幅から算出した接地面積で除することで地盤剛性を評価することとした。図-11, 12にその原理を示す。

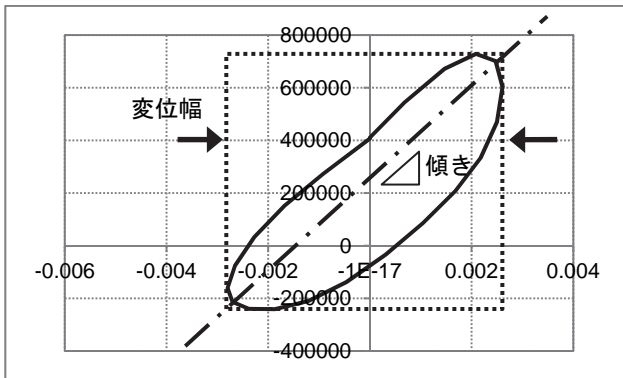


図-11 地盤剛性の評価方法（粘性土：8回目）

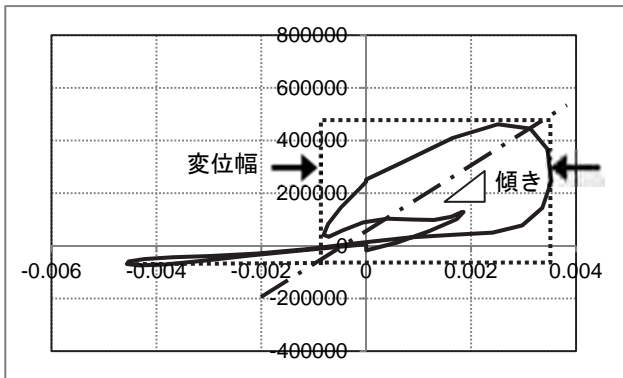


図-12 地盤剛性の評価方法（粒土調整砕石：8回目）

図-12に示すように、振動輪が跳躍している場合の変位については跳躍部分を除いて評価するこ

ととした。このような方法で各試験盛り土での地盤剛性値を算出した。算出した地盤剛性値と小型 FWD を用いて計測した地盤剛性（K30相当値）との比較を図-11に示す。

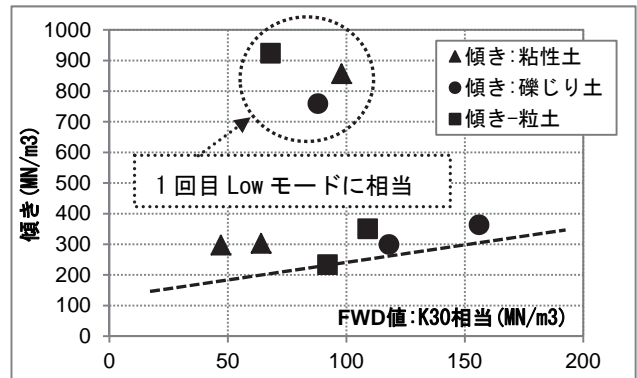


図-13 算出した傾きと地盤剛性（K30相当値）との比較

図-13をみると1回目 Low モード時の傾きを除けば、各地盤反力-変位関係から導いた傾きと、小型 FWD 試験で求めた地盤剛性（K30相当値）は直線関係にあり良い対応を示していることがわかる。

## 5. まとめと今後の課題

振動ローラのフレームと振動輪に加速度ピックアップを取り付けそれらの振動を計測し、フレームの振動の影響も考慮することで振動輪と起振機の位相差  $\delta$  を推定し、地盤反力  $R$  を算定する手法を開発した。開発した手法を検証するため、粘性土、礫混じり土、粒度調整石の試験地盤を作成し、実際に振動ローラで8回の転圧を行い、転圧時のフレームと振動ローラの加速度を計測し、地盤反力-変位関係を導き、変位幅から算出した接地面積を考慮することで得られる傾きの値が、小型 FWD 試験から導かれる地盤剛性（k30相当値）と良い関係があることが確かめられた。

本方法は振動ローラに後付けで設置することが可能であり適用範囲が広いと思われる。今後は本手法の他の地質の地盤での適応性について検証し、現場での適用性の向上につとめる必要がある。

## 参考文献

- 1) 建山和由：振動ローラの振動挙動計測による土の締固め度評価手法，土と基礎，48(7)，pp.1-4，2000年7月
- 2) NCHRP 21-09. Intelligent soil compaction systems, pp.21-26, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, 2010.
- 3) Anderegg, D.A., and Kaufmann, K., Intelligent compaction with vibratory rollers-feedback control systems in automatic compaction and compaction control, pp.24-134, Transportation Research Record No. 1868, Journal of the Transportation Research Board, 2004.