

|| 投稿論文 ||

振動ローラの加速度計測を利用した 地盤剛性値の算出について

横山 隆明¹・藤村 貢²・建山 和由³

¹立命館大学講師 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: t-yoko@fc.ritsumei.ac.jp

²若築建設株式会社 建設事業部門 土木部 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒2-23-18)

E-mail: mituru.fujimura@wakachiku.co.jp

³立命館大学教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: tateyama@se.ritsumei.ac.jp

振動ローラのフレームと振動輪に加速度計を取り付け、両者の加速度計測値を用い地盤反力-振動輪変位関係を導く方法を開発した。この方法を検証するために60cmのまき出し厚で、細粒分質礫質砂、粒度調整碎石、礫混じり土の三種の実験地盤を作製し、振動ローラで複数回転圧する実証実験を行った。実験地盤では、転圧1, 4, 8回目において、小型FWD試験器による地盤剛性(K_{30} 相当値)と、RI試験器による密度の計測を実施した。これらの計測値と振動ローラの加速度計測値から導いた地盤反力-振動輪変位関係から地盤剛性を算出し、小型FWD試験器の計測値と比較した結果、振動ローラの加速度計測から導いた地盤剛性値は小型FWDによる計測結果と同じ傾向を示し、振動ローラの特徴をよく表すことがわかった。

キーワード：振動ローラ, 加速度計測, 振動輪, フレーム, 2質点系バネモデル

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め固め施工においては、転圧機の走行軌跡を用いて締め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。

加速度応答を用いる方法では、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出し、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～変位関係算定方法

図-1に振動ローラ-地盤系のモデル化を示す¹⁾。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。

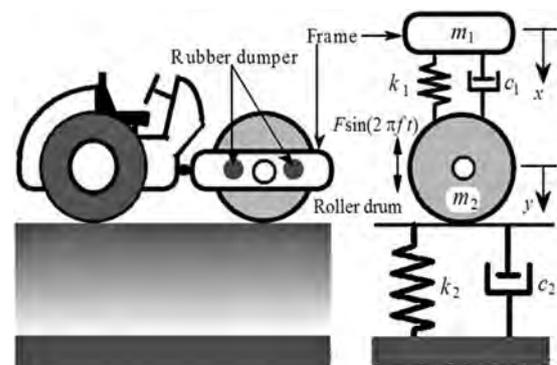


図-1 振動ローラ-地盤系のモデル化

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。

$$m_1\ddot{x} + k_1(x - y) + c_1(\dot{x} - \dot{y}) = m_1g \quad (1)$$

$$m_2\ddot{y} + R(t) - k_1(x - y) - c_1(\dot{x} - \dot{y}) = m_2g + F \sin(2\pi ft - \delta) \quad (2)$$

式(2)中の δ 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 $R(t)$ 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。

$$R(t) = k_2y + c_2\dot{y} \quad (3)$$

式(1)~(3)を用いれば地盤反力 $R(t)$ 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 δ が必要になる。位相差 δ 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²⁾があるが、この場合振動輪内の偏心重りの回転角をとらえる必要があり、振動ローラにあらかじめそのような計測機構を装備しなければならず、既存の振動ローラに後付けでそのような計測機構を導入するのは困難である。

図-2に振動輪の跳躍が無い場合、図-3に振動輪が跳躍する場合の地盤反力-振動輪変位関係を表す。これら

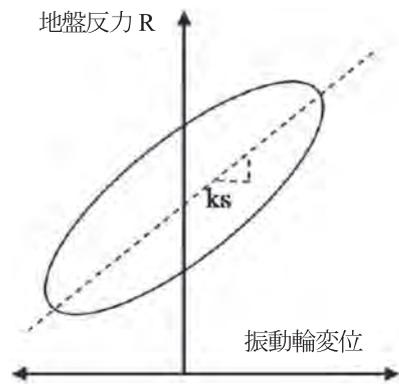


図-2 地盤反力 R と振動輪の変位の関係³⁾
(跳躍が無い場合)

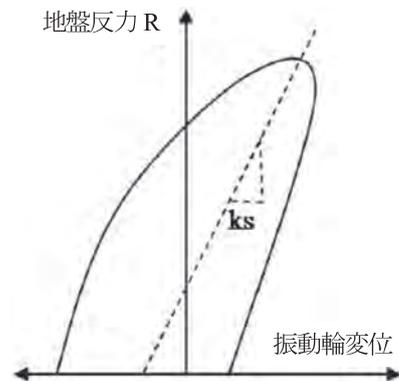


図-3 地盤反力 R と振動輪の変位の関係³⁾
(跳躍がある場合)

の図からグラフの傾き K_s を求めることで締固めている地盤の地盤剛性がリアルタイムで推定できる。

これら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、本研究では、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 $R(t)$ を評価することとした。フレームの加速度を計測することで、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 $R(t)$ を評価する式として利用することができる。

$$R(t) = m_1(g - \ddot{x}) + m_2(g - \ddot{y}) + F \sin(2\pi ft - \delta) \quad (4)$$

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。そして(4)に含まれる振動輪と起振機の位相差 δ については、跳躍していない場合は(3)式と比較することで、跳躍している場合は、跳躍時には振動輪に起振機からの入力以外に外力が働かなくなる事を利用し、振動輪と起振機の位相が等しくなるとして位相差 δ を求める事ができる。

上記のような振動ローラのフレームと振動輪の加速度計測値から地盤剛性を求める手法がどの程度の妥当性をもつか検証するため現場実験を行った。

3. 現場実験の概要

建設現場の一角に図-4に示す盛土地盤を作製し転圧実験を行った。各盛土地盤は、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60cmとして作製した。

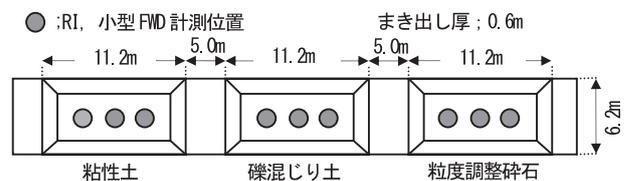


図-4 現場試験地盤と計測位置

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試験は透過型の計測器を用いた。

各盛土材料諸元を表-1に示す。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。以後は細粒分質礫質砂と表記することとする。細粒分質礫質砂の含

表-1 盛土材料諸元

項目	材料名		
	粘性土	礫混じり土	粒度調整碎石
石分 (%)	-	-	-
礫分 (%)	31.0	62.1	68.7
砂分 (%)	53.7	30.1	26.6
細粒分 (%)	15.3	7.8	4.7
シルト分 (%)	10.2	-	-
粘土分 (%)	5.1	-	-
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	細粒分質礫質砂	細粒分混じり砂質礫	-
土粒子密度 (g/cm ³)	2.653	2.652	2.667

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。

表-2に今回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工業製の 11 t 級 SV512D-1 を用いた。また、図-4に示した盛土地盤に対し振動ローラで合計 8 回の転圧を行い、走行前、1 回目、4 回目、8 回目の転圧終了後に RI および小型 FWD 試験機による計測を行った。転圧時の走行速度はすべて低速度で行い、転圧の振動については、1 回目は Low モードで 2 回目以降は High モードで締固めた。

表-2 振動ローラの諸元

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

4. 実験結果及び考察

4.1 RI による密度試験結果

RI を用いて転圧回数毎に測定した乾燥密度が土質試験によって得られた最大乾燥密度の何%に相当するか計算した結果を締固め度として図-5に示す。図よりいずれの試験盛土においても転圧回数が増加するにつれて締固め度が増加している。細粒分質礫質砂については転圧を行わない時点から締固め度が大きく、転圧 1 回目

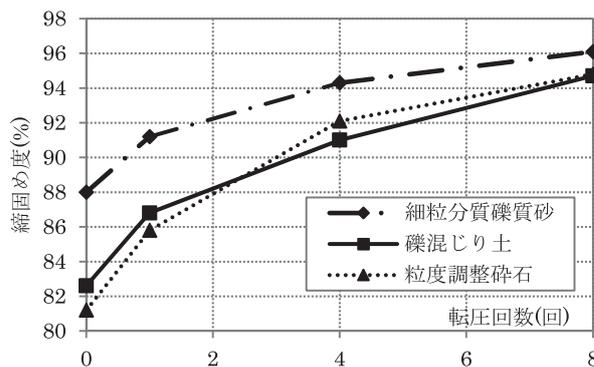


図-5 試験盛り土の転圧回数と RI 計測による締固め度の関係

90%以上の締固め度を示している。また礫混じり土と粒度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。

4.2 小型 FWD 試験による地盤反力計測結果

図-6に小型 FWD 試験による地盤剛性値(K₃₀相当値)の計測結果を示す。細粒分質礫質砂は 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剛性値が低下している。礫混じり土と粒度調整碎石は RI による密度試験結果と同様に地盤剛性値が増加する結果となった。細粒分質礫質砂については転圧によって盛り土の密度は上昇しているが地盤剛性は逆に低下しており、振動ローラによる締固めでは注意を要する現象が発生している⁴⁾。

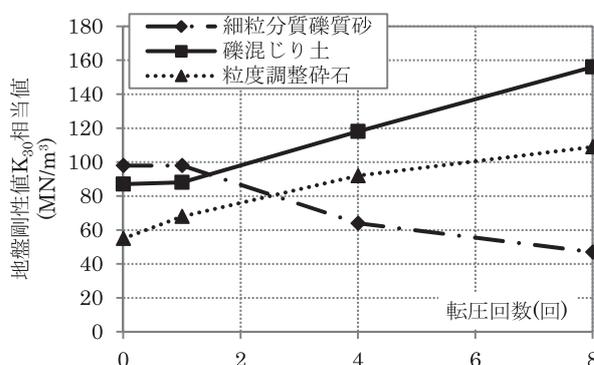


図-6 転圧回数と FWD 計測による地盤剛性値 (K₃₀ 相当) の関係

4.3 加速度計測からの地盤反力と地盤剛性値の算定

振動ローラのフレームと振動輪に加速度計を取付け振動加速度を計測した。計測例として細粒分質礫質砂及び粒度調整碎石の転圧 8 回目の加速度計測結果を図-7、8に示す。

図-7、8に示した振動ローラによる 8 回目の転圧の場合、細粒分質礫質砂では振動輪が地盤から跳躍しなかったが、粒度調整碎石では振動輪の跳躍する現象が見られた。振動輪が跳躍しているかどうかは振動輪の加速度をフーリエ変換することで判別可能⁵⁾である。図-7、8に

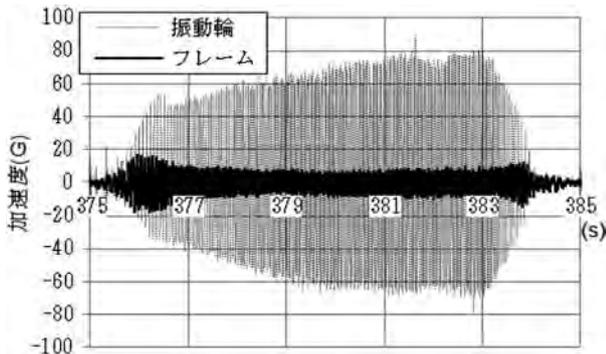


図-7 振動輪とフレームの加速度 (細粒分質礫質砂 8 回目)

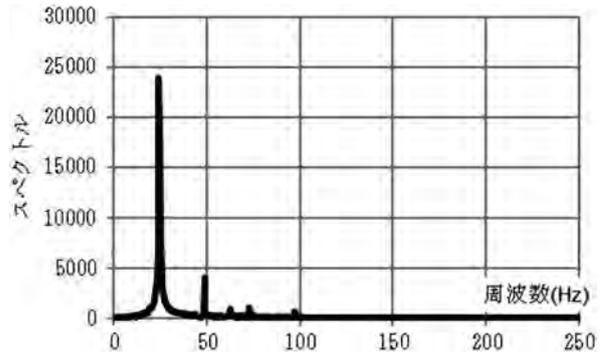


図-9 振動輪加速度の周波数分析 (細粒分質礫質砂 8 回目)

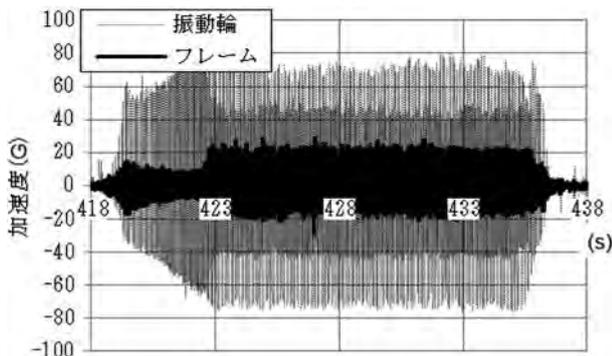


図-8 振動輪とフレームの加速度 (粒度調整碎石 8 回目)

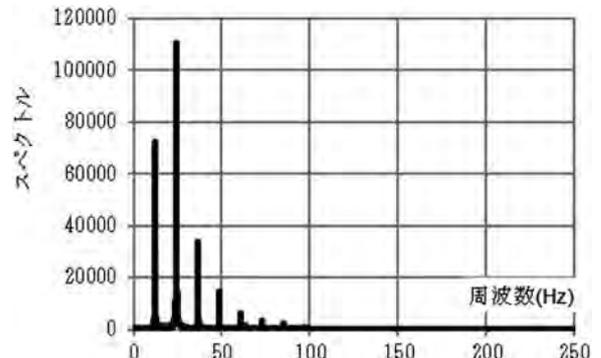


図-10 振動輪加速度の周波数分析 (粒度調整碎石 8 回目)

示した転圧 8 回目の振動輪加速度のフーリエ変換結果を 図-9, 10 に示す。

図-9 より細粒分質礫質砂の場合は振動ローラの強震動モードの周波数 26 Hz 付近が卓越しているため、跳躍は発生していない事がわかる。それに対して、図-10 からは 26 Hz 以外に 26 Hz およびその半波長の整数倍成分が現れ振動輪は跳躍と接地を繰り返す複雑な振動状態になっていることが示されている。

一方、前述したように、振動輪とフレームの加速度を積分し式(3)と(4)を用いて起振機と振動輪の位相差 δ を求めることにより、地盤反力-変位関係が得られる。

細粒分質礫質砂の 8 回目転圧時の地盤反力-変位関係を 図-11 に、粒度調整碎石 8 回目転圧時の地盤反力-変位関係を 図-12 に示す。各グラフにおいて変位の方法は、図-1 に示した振動ローラのモデル化と同じく鉛直上向きを正方向として描いている。

図-11 より、細粒分質礫質砂の様に地盤が柔らかい場合は跳躍せず、図-2 に示したような斜めの楕円形を示すことがわかる。また図-11 においてマイナス部分が表れているのは、鉛直上向きをプラスとし地盤反力を算出しているため、マイナス方向成分である重力加速度の影響が表れているためと考えられる。

図-12 より、粒度調整碎石のように締め固められ易い地盤では転圧回数が増えるに従って振動輪が跳躍し 図-3

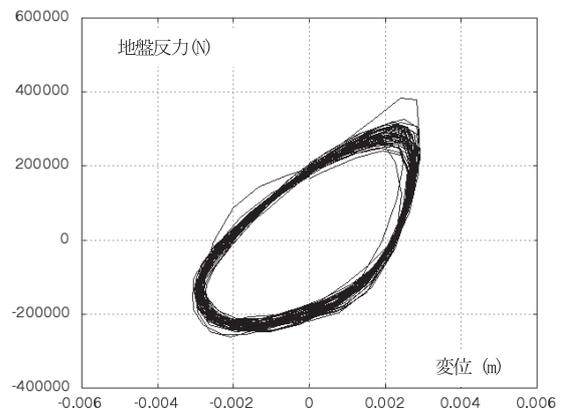


図-11 地盤反力-変位関係 (細粒分質礫質砂 8 回目)

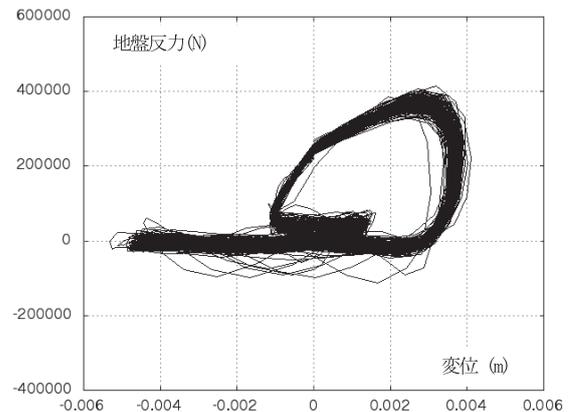


図-12 地盤反力-変位関係 (粒度調整碎石 8 回目)

に示したような軌跡になることがわかる。地盤反力は鉛直上方向をプラスとしている。また図-12において地盤反力がゼロで変位がマイナス方向に増加している部分は振動輪が跳躍している事を示している。

各地盤で振動ローラでの転圧回数による地盤反力-振動輪変位関係の変化を見るために、転圧回数1, 4, 8回目において1波長分の軌跡を抽出し重ねて描いたグラフを図-13～15に示す。

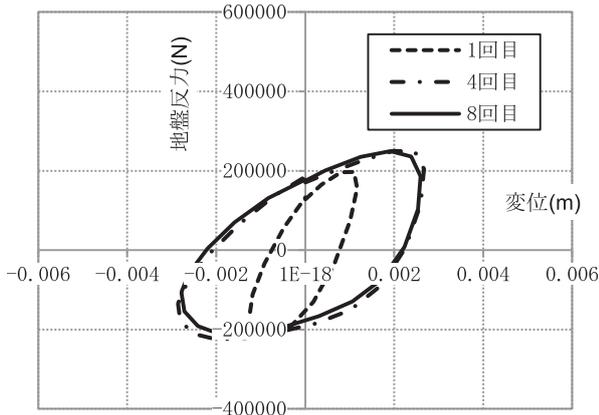


図-13 地盤反力-振動輪変位関係 (細粒分質礫質砂)

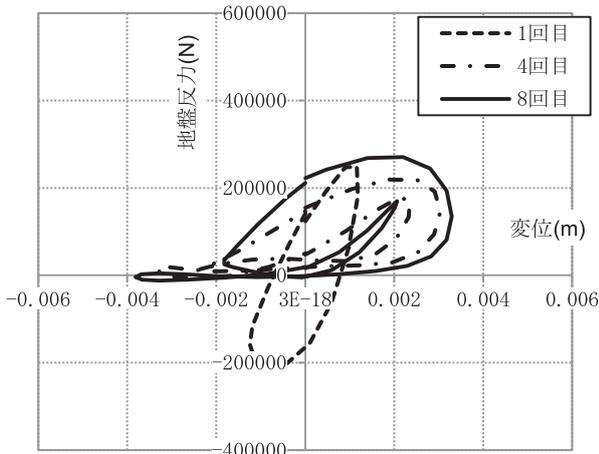


図-14 地盤反力-振動輪変位関係 (礫混じり土)

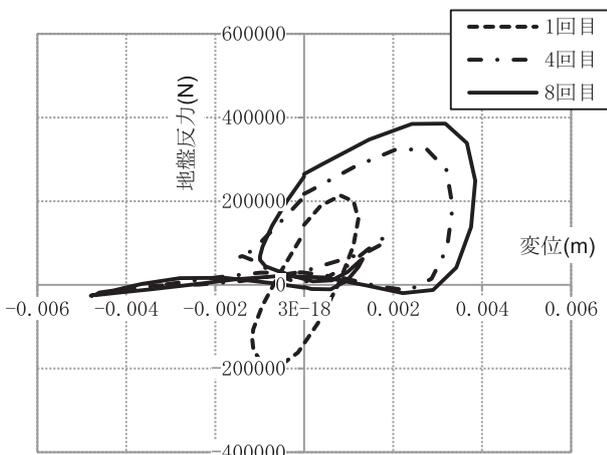


図-15 地盤反力-振動輪変位関係 (粒度調整碎石)

図-13～15から各試験盛り土の1回目については振動ローラのLowモードで締め固めを行っていること、また締め固め初期のため地表面が均一に締め固められていない事などの理由により、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、細粒分質礫質砂では全転圧回数において跳躍していないが、礫混じり土と粒度調整碎石では転圧1回以外は跳躍していることがわかる。跳躍の高さを示すマイナス方向への変位を見ると礫混じり土より粒度調整碎石が長く伸びており締め固めが進展していることがうかがえる。

地盤反力-変位関係のグラフは上述した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。したがって地盤反力-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、図-2, 3と同じくグラフの中心軸から地盤剛性を求めることとし、細粒分質礫質砂のように跳躍していない場合は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、粒度調整碎石のように跳躍をしている場合は、地盤反力最大値点と変位幅の1/2の地点を結ぶ直線を求め、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-16, 17に非跳躍時と跳躍時の地盤剛性の算定方法を示す。

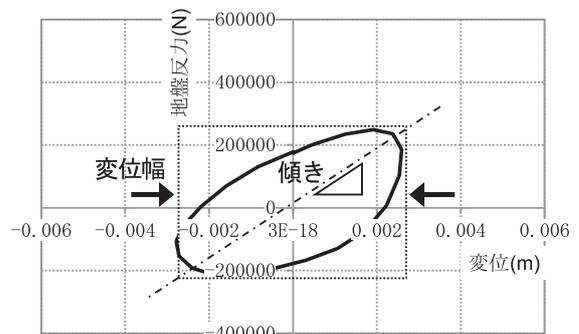


図-16 地盤剛性の評価方法 (跳躍していない場合)

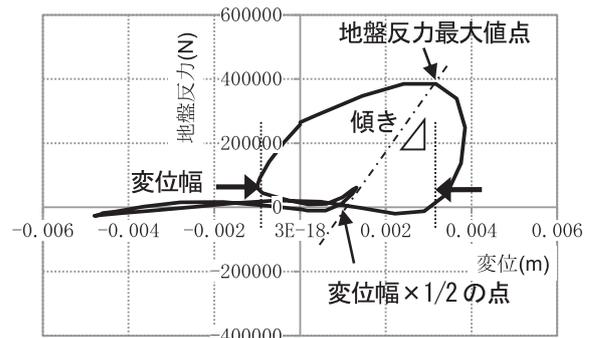


図-17 地盤剛性の評価方法 (跳躍している場合)

このような方法を用いて各試験盛り土での地盤剛性値を振動締固め時に得られた振動輪加速度波形について1波長づつ算出した。例として細粒分質礫質砂および粒度調整碎石の転圧8回目時の地盤剛性を図-18, 19に示す。

図-18, 19から、地盤剛性値はそれぞれ1波長づつ算出しているためばらつきが見られるが、全体としては細粒分質礫質砂の場合より粒度調整碎石の場合の方が高い剛性値を示していることがわかる。

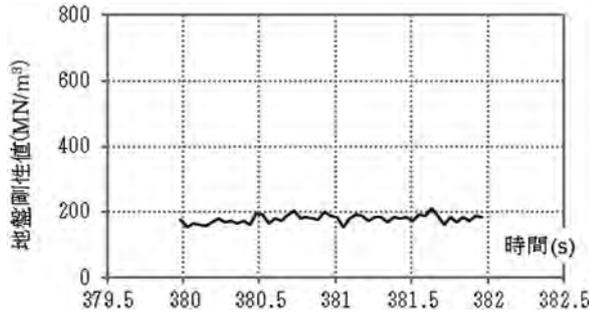


図-18 振動ローラでの地盤剛性値 (細粒分質礫質砂 8 回目)

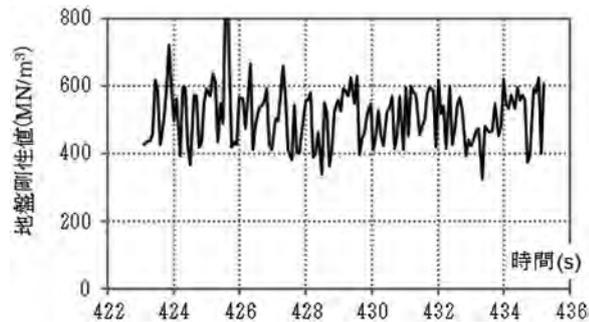


図-19 振動ローラでの地盤剛性 (粒度調整碎石 8 回目)

今回、振動ローラによる締固め実験を行った細粒分質礫質砂、礫混じり土、粒度調整碎石の3種の地盤の締固め時に得られた加速度から算出した地盤剛性値を、締固め後に小型FWD試験器を用いて計測した地盤剛性値(K₃₀相当)を比較したものを図-20に示す。図-20中の振動ローラによる地盤剛性値は各地盤の各転圧回数で得られた値の上下10%を除いた平均値とした。

図-20を見ると振動ローラ計測による地盤剛性算定値の方が、小型FWD計測による地盤剛性値より大きな値を示すことがわかる。また振動ローラによる地盤剛性算定値は、転圧1回目ではFWD計測値に見られるような傾向とは異なり、その後の転圧回数に比べて相対的に高い値を示しているが、これは小型FWD試験は振動ローラでの1回目の転圧後の地盤の剛性を計測しているのに対し、振動ローラはまだ締め固められていない地盤に対する振動ローラの応答から地盤剛性を求めていること

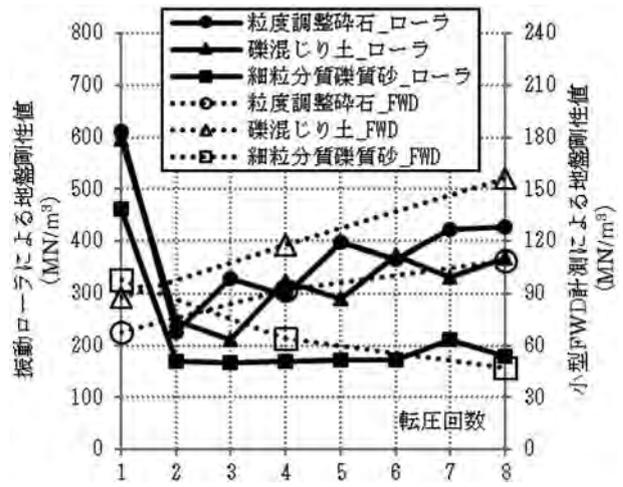


図-20 振動ローラ解析による地盤剛性値と小型FWD計測 (K₃₀相当)による地盤剛性値の比較

が影響しているためと考えられる。

細粒分質礫質砂に関しては、小型FWD計測値では転圧2回目時の計測を行っていないが、振動ローラの応答や材料の諸元を見ると振動2回目で既に剛性がかなり低下していると考えられるので、小型FWDと振動ローラによる地盤剛性値はほぼ同じ傾向を示していると考えられる。また図-5に示したRIによる密度計測結果から、細粒分質礫質砂では、締固めの進行によって密度は増加するが地盤の剛性は低下するという振動ローラによる締固めでは注意を要する現象が表れているが、振動ローラの応答から求めた地盤剛性では転圧回数を重ねても地盤剛性が増加せず、その現象を捉えられていると考えられる。

粒度調整碎石に関しては、小型FWDによる地盤剛性計測結果と振動ローラによる地盤剛性算定結果の傾向はほぼ一致していると言える。

礫混じり土に関しては、小型FWDによる計測結果では他の地盤より高い地盤剛性を示しているのに対し、振動ローラでは粒度調整碎石の地盤反力算定結果の方が高い値を示し傾向が一致してはいないが、これは礫混じり土の場合、細粒分質礫質砂や粒度調整碎石とは異なり、振動ローラにより地表面のみが主に締め固められたため、小型FWDでは締め固められた地表面の影響を強く受け、振動ローラでは締め固められた地表面以下に存在する締固めが弱い部分の影響を強く受けた結果と考えられる。

以上の事から振動ローラのローラとフレームの加速度から求めた地盤反力-変位関係を用いて導いた地盤剛性値は、振動ローラの特徴を反映した妥当な値が得られていると考えられる。

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 δ 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、細粒分質礫質砂、礫混じり土、粒度調整石の試験地盤を作製し、実際に振動ローラで合計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た。得られた加速度値から地盤反力-変位関係を導き、振動ローラが跳躍していない場合と跳躍している場合それぞれで設定した変位幅から算出した接地面積を考慮し地盤剛性を算出した。得られた地盤剛性値は、小型FWD試験から導かれる地盤剛性(K_{30} 相当値)と異なった値となったが、全体としては今回実験した地盤条件と振動ローラの特性を反映した妥当な値を示したと考えられる。

本方法は振動ローラに後付けで搭載することが可能な計測手法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.
- 4) 地盤工学会, 地盤工学・実務シリーズ 30, 土の締固め, p.53.
- 5) 建山和由, 藤山哲雄, 西谷誠之: 締固め施工における振動ローラの振動挙動に関する考察, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.231-237.

(2016.7.1 受付, 2016.12.12 採用決定)

CALCULATION OF SOIL STIFFNESS VALUE USING THE ACCELERATION MEASUREMENT OF VIBRATORY ROLLER

Takaaki YOKOYAMA¹, Mitsuru FUJIMURA² and Kazuyoshi TATEYAMA³

¹ Lecturer, College of Science and Engineering, Ristumeican University

² Construction Division Civil Engineering Department, Wakachiku Construction Company Limited

³ Professor, College of Science and Engineering, Ristumeican University.

We have developed the method to grasp the relationship between subgrade reaction and vibratory roller displacement from the acceleration values measured by acceleration sensors attached on the roller and frame of vibratory roller. To verify this calculation method, the field experiment for three kinds or types of ground of silty sand, containing gravel soil and grain-size-regulated fine sand, was conducted. The density of the compacted ground after the 1, 4 and 8 roller passes was measured by the radioactive isotope sensor and the soil stiffness (K_{30} equivalent value) was measured by small Falling Weight Deflectometer(FWD). From the comparison with the stiffness of the compacted ground measured by FWD and the calculation value from the acceleration of roller and frame, it was indicated that the calculation value through this method was reasonable as the compacted results by the vibratory roller.