

振動ローラ加速度応答を利用した締固め管理装置「 α システム」による地盤評価深さの検討

藤山 哲雄・高橋 浩*¹

The Evaluation Depth of Soil Compaction Quality by Stiffness Evaluating Equipment “ α -System” Using Acceleration Response of Vibratory Roller

Tetsuo FUJIYAMA, Hiroshi TAKAHASHI

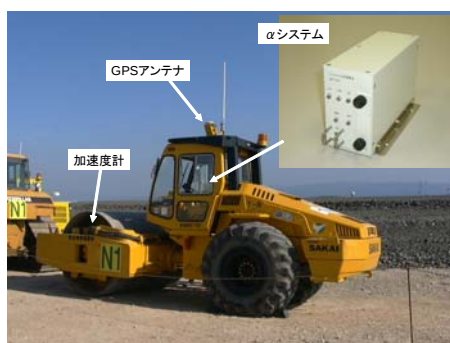
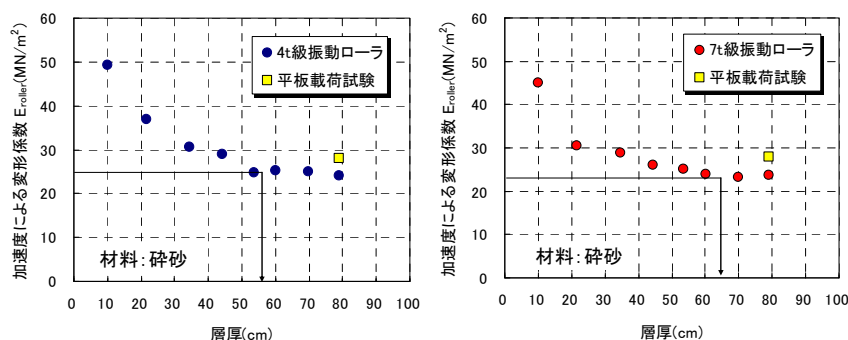


写真-1 振動ローラに搭載するシステム構成



(a) 4t級振動ローラ

(b) 7t級振動ローラ

図-1 α システムによる地盤評価深さの検証結果

研究の目的

地盤の締固めの進行にともない、振動ローラの加速度応答が変化してくる現象が認められる。筆者らはこの現象に着目し、振動ローラ加速度計測から地盤の締固め品質（密度や地盤剛性）を評価する盛土の締固め管理装置「 α システム」を2003年に開発し、既に実施工での適用を図っている。本システムによれば、地盤の締固め品質を転圧を行いながらリアルタイムに、かつ施工面全体にわたって面的に評価できるため、従来のRIや平板載荷試験等の離散的・事後的な測定手法に比べ、効率的かつ高精度な現場締固め管理が可能となる。しかしながら、本手法が「どこまでの地盤深さを評価しているのか」については、これまで明確にされていなかった。

しかし近年、締固め機械の大型化にともない、盛土の1層締固め厚が増大化する傾向にあることから、 α システムによる締固め評価深さを明確にしておく必要性が指摘されていた。そこで、 α システムによる地盤評価深さの定量的な把握を行った。

技術の説明

堅固なコンクリートの基盤上に薄く盛土して振動ローラで転圧すれば（例えば層厚10cm）、振動ローラ加速度応答は硬いコンクリート床版の剛性を拾うため、 α システムによる地盤剛性は高く評価される。しかし、盛土厚を10cm→20cm→…と順次大きくしていけば、コンクリート床版の影響は徐々に小さくなり、ある厚さ以上からコンクリート版の剛性を全く拾わなくなって、加速度応答値は一定値に収束すると考えられる。逆に言えば、この時の盛土厚さが、振動ローラ加速度応答による評価深さと解釈できる。そこで、コンクリート床版上で盛土を10cm→20cm→…→80cmまで10cmずつ積層し、その都度、 α システムにより地盤剛性を計測する転圧試験を行うことで、 α システムによる評価深さの把握を試みた。

主な結論

4t級、7t級の振動ローラを用いた転圧試験の結果、 α システムによる評価深さはおよそ60cm程度であることを把握した。すなわち、 α システムによって通常盛土の1層締固め厚30cmは十分品質を評価でき、さらにNEXCOを始めとして近年導入が図られつつある締固め厚60cmの厚層化にも対応し得ることが確認できた。

*1 本店 土木部 設計グループ

振動ローラ加速度応答を利用した締固め管理装置 「 α システム」による地盤評価深さの検討

藤 山 哲 雄

高 橋 浩^{*1}

要 旨

地盤の締固めの進行にともない、振動ローラの加速度応答が変化してくる現象を利用し、振動ローラ加速度計測から逆に地盤の締固め品質（密度や地盤剛性）を評価する手法が従来から提案されている。本手法によれば、地盤の締固め品質をリアルタイムかつ面的に評価できるため、従来のRIや平板载荷試験等と比べ、効率的かつ高精度な現場締固め管理が可能となる。しかしながら、本手法が「どこまでの地盤深さを評価しているのか」については、これまで明確にされていなかった。

筆者らは、振動ローラ加速度応答を利用した締固め管理装置「 α システム」を開発し、既に実施工での適用を図っている。しかし近年、大型土工を中心に、1層締固め厚さが増大化する傾向にあるため、 α システムにより締固め1層分の品質を評価できるかを明らかにしておく必要性があった。そこで本研究では、盛土厚さを変えた現場転圧試験を行うことによって、 α システムによる地盤評価深さの定量的な把握を行った。この結果、4t級、7t級の振動ローラでは、およそ60cm程度まで評価できることがわかった。

キーワード 振動ローラ／加速度／ α システム／締固め管理／評価深さ／

目 次

- | | |
|---------------------|------------------------------|
| 1. はじめに | 3. α システムによる地盤評価深さの検証 |
| 2. α システムの概要 | 4. おわりに |

The Evaluation Depth of Soil Compaction Quality by Stiffness Evaluating Equipment “ α -System” Using Acceleration Response of Vibratory Roller

Tetsuo FUJIYAMA

Hiroshi TAKAHASHI

Synopsis:

“ α -System” measures soil stiffness and density of soils based on the acceleration data for the vibratory roller collected during roller compaction. The system uses the phenomenon of acceleration response of vibratory rollers varying as roller compaction progress. Real-time quality assessment of the entire soil surface under compaction enables much more accurate and efficient quality control of embankments than conventional plate loading tests or radio-isotopic techniques.

This paper reveals the evaluation depth of soil compaction quality using “ α -System”. The acceleration responses of vibratory rollers are measured by “ α -System” on the different thickness embankments which banked on the stiff concrete slab. The field measuring tests using vibratory rollers of which weight-class are 4,000kg and 7,000kg reveals that the evaluation depth of soil compaction quality is about 60cm.

* 1 本店 土木部 設計グループ

1. はじめに

振動ローラは、振動輪（ロール）内の偏心錘を回転させて振動力を得ながら、自重と振動の効果により効率的に土の締固めを行う機械であり、大規模土工から舗装転圧まで、現在最も多用されている転圧機械の一つである。

この振動ローラの振動輪部の加速度を計測すると、地盤の締固めが進行するにしたがい、加速度応答が変化してくることが認められる。この現象を利用し、転圧中の振動輪加速度の計測から、逆に地盤の締固め程度（締固め密度や地盤剛性）を評価する手法が従来から提案されている（例えば¹⁾）。本手法によれば、転圧しながらリアルタイムに、かつ施工面全体にわたって面的に締固め品質を評価できるため、従来のRI法や砂置換法、平板载荷試験のような離散的・事後的な測定手法に比べ、より効率的かつ高精度な現場締固め管理が可能となる。

筆者らはこれまで、本手法の実用化を目指し、適用土質の明確化²⁾や、振動ローラ機種が加速度応答に与える影響等に関する基礎検討³⁾を進め、加速度計測から地盤剛性・密度の判定までを自動的に行う実機搭載型の盛土品質管理装置「 α システム」⁴⁾を2003年に開発し、既に多くの盛土施工現場に展開している。しかしながら、 α システム（振動ローラ加速度応答による締固め管理手法）が「どの程度の地盤深さまで評価しているのか」については、これまで明確にされていなかった。しかし近年、締固め機械の大型化にともない、盛土の1層締固め厚が増大化する傾向にあることから、 α システムによる締固め評価深さを明確にする必要性が指摘されていた。

そこで本研究では、締固め地盤の厚さを変化させた現場転圧試験を行い、 α システムによる締固め評価深さを定量的に明らかにすることを試みる。

2. α システムの概要

2.1 α システムの測定原理

図-1 はある道路現場における路体材（軟岩土砂）の転圧試験により得られた振動ローラ加速度波形とその周波数分析結果の一例である。図に示すように、締固めの進行にともない、地盤からの反発が大きくなることにより振動ローラの加速度波形が乱れ、その周波数分析結果においては高調波スペクトル $S_1, S_2, S_3, \dots$ 、さらには 1/2 分数調波スペクトル $S_1', S_2', S_3', \dots$ が卓越してくることがわかる。この性質を利用し、 α システムでは、加速度波形の定量指標として下式(1)に示す「乱れ率」を定義している⁴⁾。すなわち、乱れ率が大きいほど地盤が締固まっていることを表す。

$$\text{乱れ率} = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i + \sum_{i=1}^3 S_i'}{S_0 + S_0'} \quad \dots \text{式(1)}$$

図-2 は、図-1 に示した転圧試験結果について、RIで計測した乾燥密度と乱れ率の転圧回数に対する傾向を示し

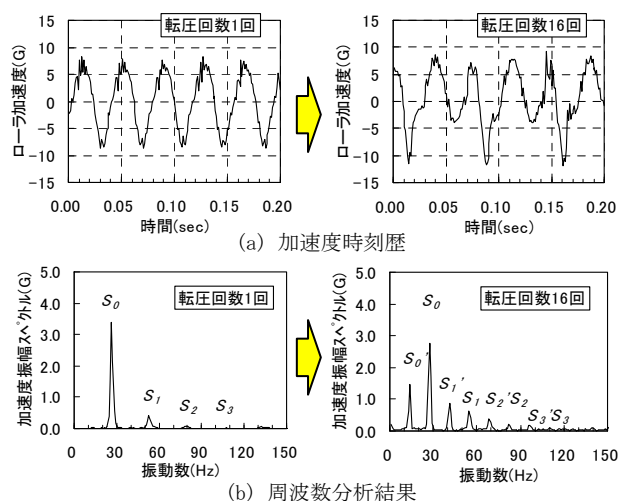


図-1 締固めに伴う振動ローラ加速度波形の計測例⁴⁾

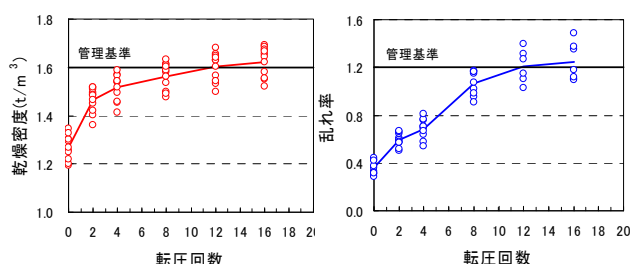
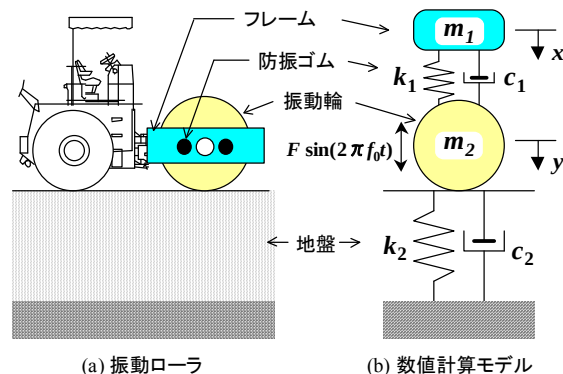


図-2 転圧回数に対するRI乾燥密度と乱れ率の測定例⁴⁾



$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x} + k_1(x-y) + c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_1 g \\ m_2 \ddot{y} + k_2 y + c_2 \dot{y} - k_1(x-y) - c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_2 g + F \sin(2\pi f_0 t) \end{aligned}$$

ただし、 $k_2 y + c_2 \dot{y} < 0$ のとき、 $k_2 = c_2 = 0$

図-3 振動ローラ～地盤系の数値計算モデル³⁾

たものである⁴⁾。これを見ると、乱れ率は締固め密度の増加を適切に表していることがわかる。 α システムは、両者の相関を転圧試験で取得し、その関数形を入力することで、乱れ率から密度をリアルタイムに評価できる機構となっている。

ただし、乱れ率は単に加速度の変化を定量化した指標に過ぎず、その値自体に力学的な意味はない。そこで、藤山・建山³⁾は、図-3 に示すような地盤を半無限弾性地盤と仮定した振動ローラ～地盤系の2自由度振動モデルを用いて、地盤バネ係数 k_2 (N/m) の大きさ、および振動ロー

ラ機械条件（フレーム質量 m_1 (kg), 振動輪質量 m_2 (kg), 振動数 f_0 (Hz), 起振力 F (N)) を様々に変化した場合の振動ローラ挙動を考察し、その結果から乱れ率と振動ローラ機械諸元、ならびに地盤の変形係数 E の関係を式(2)のように定式化している（ ν ：ポアソン比， B ：振動振幅(m)）。

$$E = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2)}{B \cdot \pi} \cdot \frac{\left(\frac{4}{3} \text{乱れ率} + 1\right)^2 \cdot (2\pi f_0)^2 \cdot m_2}{1 - 0.32\alpha + \sqrt{0.1024\alpha^2 - 1.64\alpha + 1}}$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{F}{(m_1 + m_2)g}\right)^2 \quad \dots \text{式(2)}$$

α システムでは、式(2)を演算プログラムに取り込んでおり、振動ローラの機械諸元を入力することによって、計測した乱れ率から地盤の変形係数 E をリアルタイムに算出する機構となっている。図-4 は、複数種類の材料に対し、式(2)を用いて乱れ率から評価した地盤変形係数と、平板载荷試験により求めた変形係数（沈下 1.25mmまでの初期割線勾配による K_{30} を弾性理論解を用いて変形係数に直したもの）を比較した結果である⁴⁾。図-4 を見ると、飽和度の高い道路路体材からフィルダムロック材を含む多様な材料について、乱れ率から推定した地盤変形係数は、平板载荷試験で得られる地盤変形係数とほぼ 1 : 1 の関係で評価できていることがわかる。しかも、これらは複数の振動ローラ機種を使用した測定結果であるが、その影響が除去されていることが確認できる。

従来の平板载荷試験は測定に手間がかかるため、測点数は極めて少数にならざるを得ないが、 α システムは任

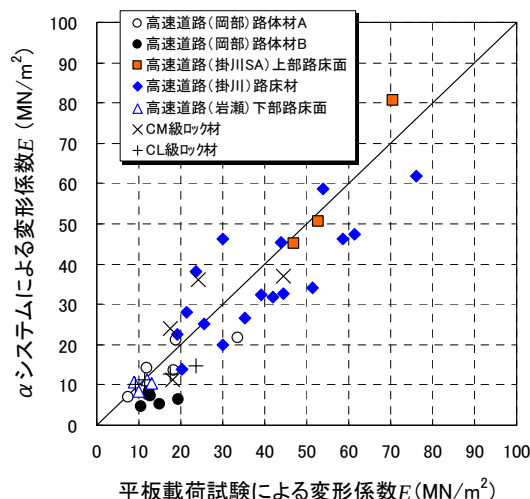


図-4 α システムと平板载荷試験による変形係数の比較⁴⁾

意の材料および任意の振動ローラ機種について、地盤変形係数をリアルタイムに定量評価可能である。したがって、例えば道路・空港路床、宅地造成など、均一な地盤剛性の確保が必要となる土構造物に対し、 α システムは現場の品質管理手法として極めて適用性が高いといえる。

2.2 α システムの構成と特徴

振動ローラに搭載するシステムの構成を写真-1 に示す。システム構成は、加速度を取得する加速度計、加速度から乱れ率や地盤変形係数をリアルタイムに算出する α システム本体、ならびに振動ローラの走行位置を取得するGPS からなる。GPS は、市販のGPS を外付けするタイプ

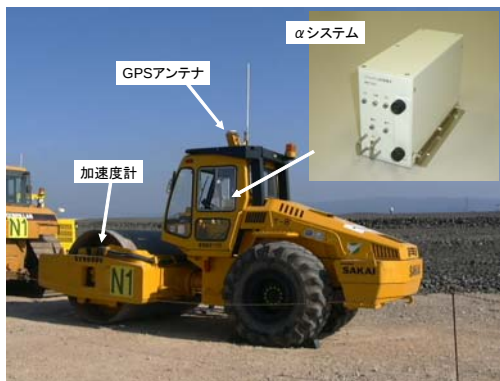


写真-1 振動ローラに搭載するシステム構成

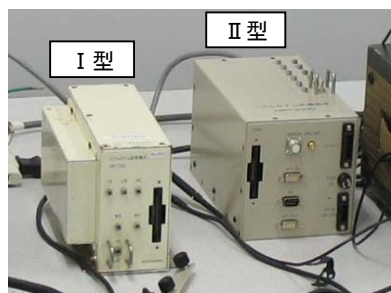


写真-2 α システム I 型（GPS 非内蔵型）および II 型（GPS 内蔵型）の外観

表-1 α システム I 型と II 型の機能の違い

タイプ	データ出力頻度	GPS	開発年
α システム I 型	2.0sec毎	外付けのGPS受信機を利用	2003年度
α システム II 型	0.5sec毎	GPSボードを内蔵	2008年度

表-2 α システム II 型で利用可能な GPS 測位方式の概要

測位方式	概要	基準局	誤差
MSAS	専用の静止衛星MTSATからのGPS補正情報を利用した測位システムMSASを利用する方式。2007年から国土交通省航空局が提供を開始。従来のD-GPSでは、GPS衛星自身に起因する誤差、GPS衛星からの信号が電離層を通過する際に発生する遅延誤差などが生じていたが、これらを補正する情報を取得することで、精度や信頼性が向上。	不要	数十cm
RTK	1台の受信機を既知点（基準局）に備え付け継続観測しながら、もう1台の受信機（移動局）を順次移動して、5衛星以上から受信した搬送波位相や観測データが無線等を利用して送受信することで、3次元的な位置を算定する方法。mmの精度をもつ搬送波位相を測定値として利用するため、cmレベルで測定が可能	必要	数cm
VRS	複数の既設の基準局で観測されたデータをもとに、仮想的に決めた場所でのRTK受信機で観測されると推測されるデータ（仮想基準点）を生成する方式。ネットワーク型RTKと呼ばれる。これにより現場で固定基準局を設置するコストや手間が省略できる。ただし、基準局の補正パラメータ等を取得するためにデータ配信センターとの契約が必要。	不要	数cm

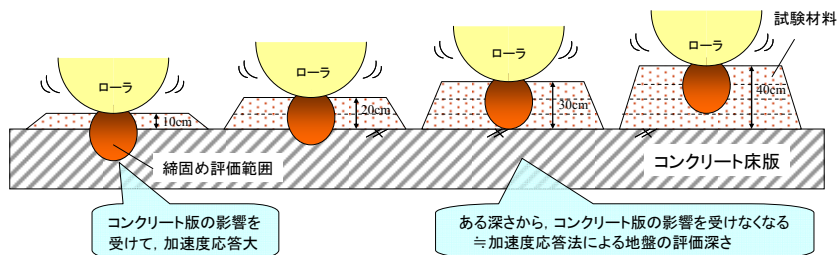


図-5 締固め評価深さ検証試験の概念図

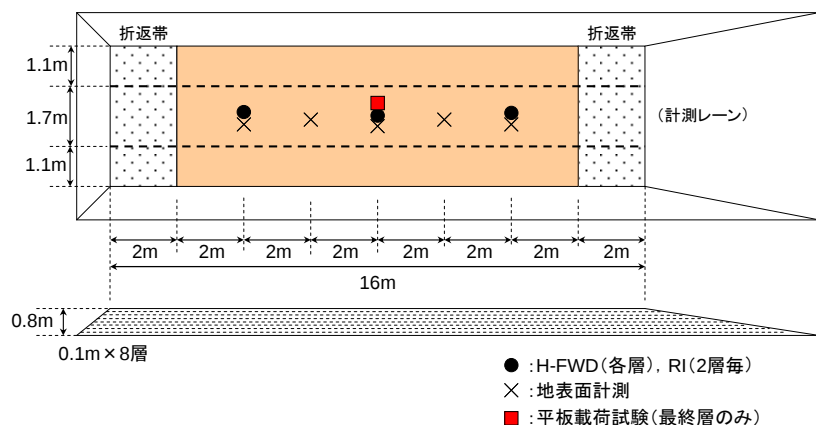


図-6 転圧試験ヤード形状と計測配置



(a) 4t 級振動ローラ
(SAKAI TW502-1)



(b) 7t 級振動ローラ
(SAKAI SW750)

写真-3 使用した振動ローラ

のほか、GPS ボードを α システム本体に内蔵した GPS 一体型タイプを 2008 年度に新たに開発した。外付け GPS を利用する従来タイプ（以下、 α システム I 型と称する）、および GPS を内蔵するタイプ（以下、 α システム II 型と称する）の外観を写真-2 に、両者の機能の違いを表-1 に示す。また、 α システム II 型で利用可能な GPS の測位方式の概要を表-2 に示す。 α システム II 型は、固定基準局の不要な MSAS および VRS モードの利用も可能であり、コスト面等の制約から GPS 基準局の設置が困難な小規模現場などにも適用性が高いと考えられる。また、従来の α システム I 型は、乱れ率や地盤変形係数を 2.0 秒ピッチで出力（一般土工における振動ローラの走行速度は 1m/sec 程度であるから、振動ローラが約 2m 転圧する毎に 1 回の割合でデータを出力）していたが、舗装転圧のように振動ローラの走行速度が速いケースにも対応可能なように、 α システム II 型では演算処理速度を向上させ、乱れ率や地盤変形係数の出力を 0.5 秒ピッチとしている。

3. α システムによる地盤評価深さの検証

3.1 検証転圧試験の概要

α システムによる地盤の評価深さは、次のような方法により把握するものとした。すなわち、図-5 に示すように、堅固なコンクリートの基盤上に薄く盛土して転圧すれば（例えば層厚 10cm）、振動ローラ加速度応答は硬いコンクリート床版の剛性を拾うため、地盤剛性は高く評価される。しかし、盛土厚を 10cm $\rightarrow$ 20cm $\rightarrow$ …と順次大きくしていけば、コンクリート床版の影響は徐々に小さく

なり、ある厚さ以上からコンクリート版の剛性を全く拾わなくなって、加速度応答値は一定値に収斂すると考えられる。逆に言えば、この時の盛土厚さが、振動ローラ加速度応答による評価深さと解釈できる。そこで、コンクリート床版上で盛土を 10cm $\rightarrow$ 20cm $\rightarrow$ … $\rightarrow$ 80cm まで 10cm ずつ積層し、その都度、 α システムにより地盤剛性を計測する転圧試験を行った。盛土の深さ方向の剛性が一定となるよう、材料を 1 層撤き出した後に 16 回転圧を行い、締固めが収斂したことを確認した後に α システムを 1 往復計測、これを 8 層分繰り返した。

試験ヤードの形状・計測位置を図-6 に示す。各層が均一の締固め度になっていることを確認するために RI を、また α システムによる地盤剛性（地盤変形係数）の評価値を検証するため、各層にて小型 FWD、また最終層の転圧後に平板載荷試験の測定を行った。転圧機種は、写真-3 に示す 4t 級、7t 級の 2 種類の振動ローラを使用した。表-3 に使用した振動ローラの機械緒元を示す。また、盛土材料はアスファルト合材の骨材などに用いられる砕砂を用いた。盛土材料の土質特性を図-7 に示す。

3.2 検証試験結果

図-8(a)(b)に、盛土を 10cm $\rightarrow$ 20cm $\rightarrow$ … $\rightarrow$ 80cm まで積層した時の α システムによる地盤変形係数の評価結果を示す。各層厚における変形係数はヤードの平均値で示している。また、層厚は転圧後のレベル測量による実測値でプロットした。これをみると、層厚が大きくなるに従って徐々に評価剛性は小さくなり、(a)の 4t 級振動ローラでおよそ 55cm、(b)の 7t 級振動ローラでおよそ 65cm あたり

表-3 転圧試験・数値計算に用いた振動ローラ機械緒元

転圧機種		転圧試験および数値計算で使用		数値計算のみ使用
		4t振動ローラ	7t振動ローラ	19t振動ローラ
		SAKAI TW502-1	SAKAI SW750	SAKAI SV900DV
機械質量	M	3,230 (kg)	8,550 (kg)	19,400 (kg)
フルーム質量	m_1	1,186 (kg)	2,260 (kg)	4,680 (kg)
ロール質量	m_2	804 (kg)	1,840 (kg)	6,920 (kg)
最大起振力	F	34.3 (kN)	78.4 (kN)	343.0 (kN)
公称振動数	f_0	55 (Hz)	50 (Hz)	23 (Hz)
締固め幅	B	1.30 (m)	1.68 (m)	2.15 (m)

から、評価剛性は一定値に落ち着いていることがわかる。すなわち、 α システムによる地盤の評価深さは、4t 級ローラ、7t 級ローラとも、およそ 60cm 程度であると判断できる。

一方、図-9 に各層で計測した小型FWDによる変形係数の結果を示す。小型FWDは、重錘をある落下高さから載荷版に落下させ、載荷版に内蔵した加速度計による衝撃加速度の積分値から載荷版変位を求め、これと重錘の衝撃力から地盤の変形係数を推定するものである⁵⁾。したがって、振動ローラ加速度応答と同様、盛土層厚が薄い場合、コンクリート床版の影響を受ける。図-9 を見ると、小型FWDの場合は盛土厚さがおよそ 40cm で評価剛性が一定になっており、 α システムより評価深さが小さいことが伺える。一般に、盛土の1層締固め厚さは 30cm が標準的だが、近年、施工の合理化を目的として、高速道路盛土を始め、大型土工を中心に1層締固め厚さは 60cm が採用されるケースが多くなってきている。このような場合、載荷エネルギーが小さい小型FWDでは1層分の締固め品質を評価することは困難であるが、 α システムであればこれが可能であることがわかる。

なお、図-8 には最終層の転圧面で実施した平板載荷試験による地盤剛性をプロットしているが、先の図-4 と同様、 α システムにより評価した地盤剛性とほぼ整合していることが確認できる。また、図-9 の小型FWDによる地盤剛性の測定値は、平板載荷試験の約2倍となっているが、これは既往文献⁵⁾に示されている平板載荷試験：小型FWD $\approx 1:2$ の関係と符合している。すなわち、各測定手法による地盤剛性は、 α システム：平板載荷試験：小型FWD $\approx 1:1:2$ の関係となる。

3.3 数値計算による評価深さの検討

以上のように、 α システムの評価深さを実験的に求めた結果、およそ 60cm と評価された。この妥当性を検証するため、簡単な数値計算によるアプローチにより、地盤評価深さの検討を試みる。

転圧中の振動ローラ加速度波形が本来の正弦波から乱れる理由は、地表面から跳ね上がりながら振動する振動輪が、地表面に衝突する際、上向きに地盤反力が加わるためと考えられる⁶⁾。この地盤反力は、振動輪が地表面に

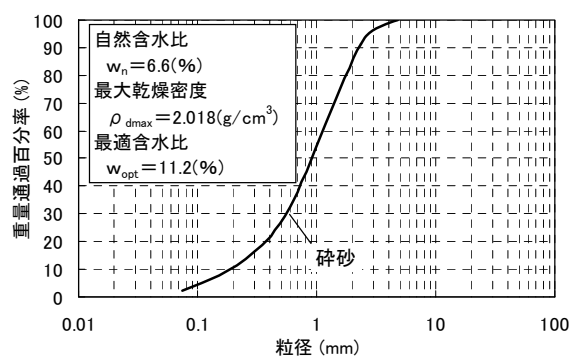
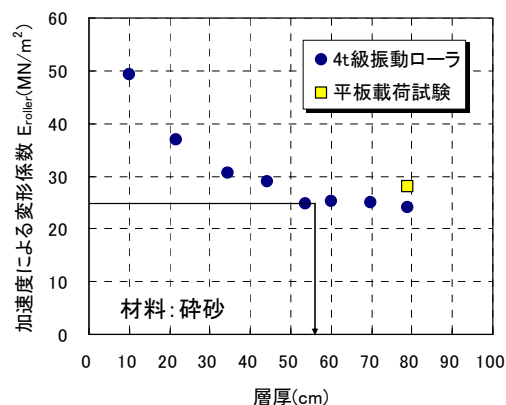
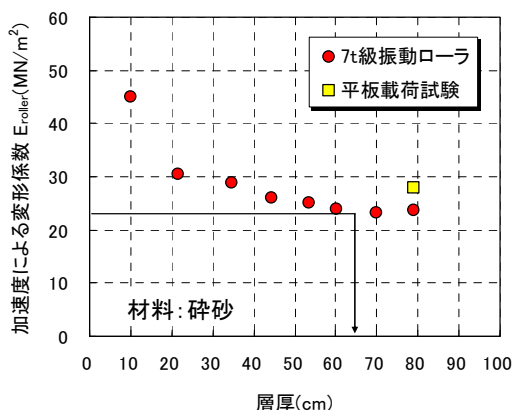


図-7 盛土材料の土質特性



(a) 4t 級振動ローラ



(b) 7t 級振動ローラ

図-8 α システムによる地盤評価深さの検証結果

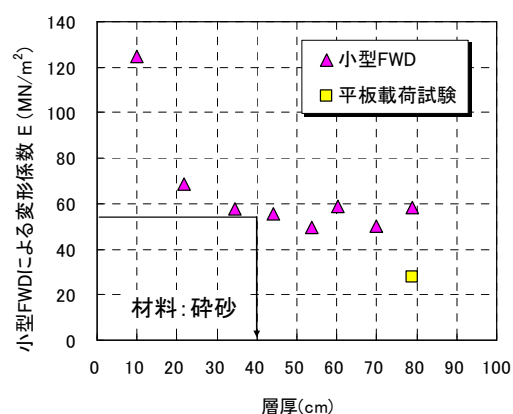


図-9 小型 FWD による地盤評価深さの検証結果

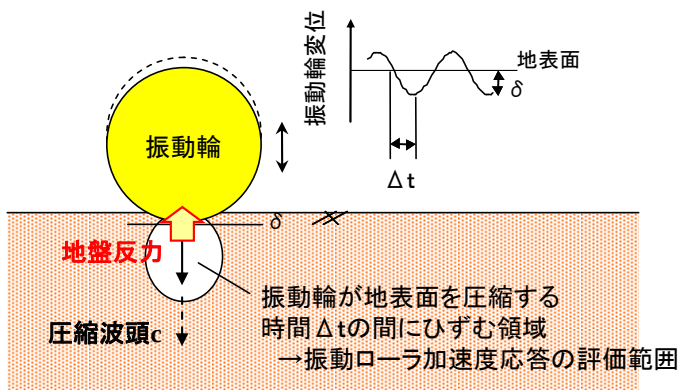


図-10 振動ローラ加速度による評価深さの概念

接しているごく短い時間内に、地盤が圧縮されることによって生じるものであるから、図-10 の概念図に示すように、振動中の振動輪が地表面を圧縮する微小時間内に地盤の圧縮ひずみが及んでいる領域が、すなわちローラ加速度応答（乱れ率）による評価深さと解釈できる。この考えにもとづき、振動ローラ加速度応答による評価深さを次のように求めてみた。

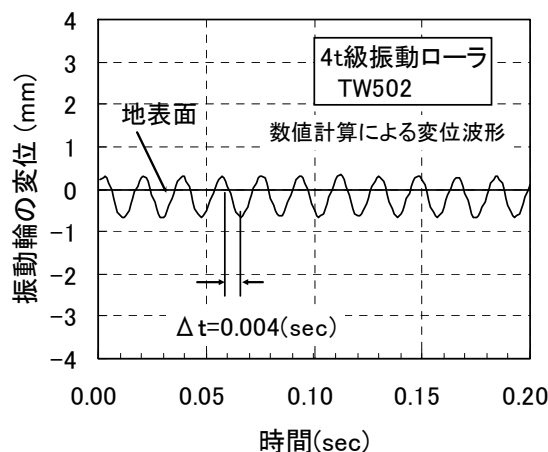
① 振動輪が地表面を圧縮する微小時間を Δt (sec)、地中に生ずる圧縮波頭の伝播速度を c (m/sec) とすれば、振動輪の接地時間内において地盤がひずむ深さは、波頭の伝播距離 $c \cdot \Delta t$ で表される。地盤を弾性係数 E 、密度 ρ をもつ半無限弾性体と仮定すると、地中での圧縮波頭の伝播速度は $c = \sqrt{E/\rho}$ で表されるから⁷⁾、本試験地盤の平板載荷試験結果 $E=28(\text{MN/m}^2)$ 、RIによる測定密度 $\rho=1990(\text{kg/m}^3)$ から、本試験地盤における圧縮波頭の伝播速度は $c = \sqrt{28 \times 10^6 / 1990} = 119$ ((m/s)と求まる。

② 振動輪が地表面を圧縮する微小時間 Δt は実測できないので、図-3 に示した振動ローラ～地盤系の2自由度振動モデルによる数値計算により求める。地盤バネ係数 k_2 は平板載荷試験から得た変形係数から設定し、また振動ローラの機械条件は表-3 の値を用いて、4t級、7t級振動ローラが本試験地盤を振動する際の変位波形をシミュレーションした結果（図-11(a)(b)）、圧縮する微小時間 Δt は、4t級振動ローラ：0.004sec、7t級振動ローラ：0.006secと求められた。

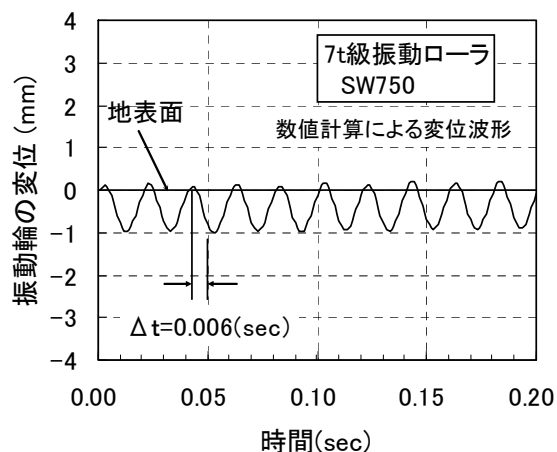
③ したがって、「振動輪が地表面を圧縮している間に圧縮ひずみが及んでいる領域」⇔「振動ローラ加速度応答による評価範囲」と解釈すれば、①②より、4t級振動ローラ： $L=c \cdot \Delta t=47\text{cm}$ 、7t級振動ローラ： $L=71\text{cm}$ となる。

これは、上述の転圧試験で把握された評価深さ 60cm と大体整合しており、概略的な検討ながら、実験結果に対する一つの傍証となりそうである。

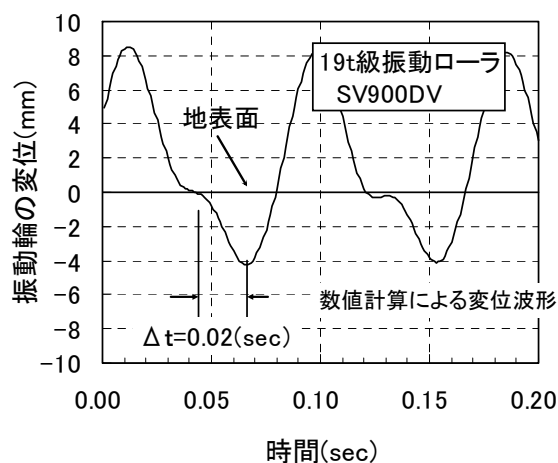
ちなみに、本試験地盤上において、ロックフィルダム



(a) 4t 級振動ローラ



(b) 7t 級振動ローラ



(c) 19t 級振動ローラ

図-11 数値計算による振動輪の変位波形

等の大型土工で用いられる 19t 級の大型振動ローラで転圧を行ったと仮定し、表-3 に示す機械緒元（ここでは SAKAI SV900DV を例とした）を用いて、同様の計算を行ってみた。この結果、19t 級振動ローラが地表面を圧縮する微小時間 Δt は 0.020sec であり（図-11(c)）、評価深さは $L=237\text{cm}$ となった。上記計算では、圧縮波頭が減衰す

ることなく地中に伝播すると仮定しているが、実際にはエネルギーが減衰し、ここまでの地盤深さまでは圧縮されないと考えられるから、振動ローラ加速度による評価範囲はもっと小さい可能性が高い。このように、上記方法による評価では限界があるため、大型振動ローラにおける振動ローラ加速度法の評価深さを把握するには、今回同様の実験的な検証を行う必要があると考えられる。

4. おわりに

本報告では、これまで不明確だった α システム（振動ローラ加速度法）による地盤の評価深さについて検討し、4t級、7t級振動ローラでおよそ60cm程度であることを把握した。すなわち、このクラスの小型の振動ローラであっても、通常盛土の1層分の締固め厚30cmは α システムで十分評価でき、さらに近年の締固め厚層の増大化にも対応し得ることを確認した。

今後は、一般土工で用いられている大型の振動ローラについても同様の検証を進めていきたい。

謝辞：「 α システム」は㈱大林組との共同開発技術であり、本研究も共同で実施したものです。普段から多大なご尽力を頂いている共同開発メンバーの大林組古屋弘氏、疋田喜彦氏にこの場をお借りして深く感謝いたします。また、現場実験の実施に際しては、大林道路㈱の関係各位に多大なご協力を頂きました。末筆ながら、謝意を表します。

参考文献

- 1) 嶋津晃臣，見波 潔，中田公基，嶋田 功，足立賢一：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，pp.37～76，1985.
- 2) 藤山哲雄，益村公人，建山和由，石黒 健，三嶋信雄：種々の土質条件に対するローラ加速度応答法の締固め管理への適用性，土木学会論文集 No.701／III-58，pp.169～179，2002.
- 3) 藤山哲雄，建山和由：振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法，土木学会論文集 No.652／III-51，pp.115～123，2000.
- 4) 藤山哲雄・古屋 弘・高橋 浩・石黒 健・細谷芳巳：振動ローラ加速度応答を用いた地盤剛性評価装置「 α システム」の開発，土木学会土木建設技術シンポジウム2005 論文集，p.137～142，2005.
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 省力化軌道用土構造物，pp.220～223，1999.
- 6) 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.231～237，1996.
- 7) 建山和由，畠昭治郎，森川 勝：塑性波頭の伝播からみた土の衝撃締固め機構について，土木学会論文集 No.454／III-20，1992.