

# 加速度応答法を用いた盛土のリアルタイム品質管理手法

古 屋 弘

## Real-time Quality Control Method of Embankments using Acceleration Response System of Vibratory Roller

Hiroshi Furuya

### Abstract

In recent years, motorways are increasingly being constructed in mountainous areas, and passing through long tunnels, viaducts, and bridges. An "abutment pier on the embankment (APE)" is adopted for reducing construction cost of such structures. In this construction of the embankment, it is necessary to use high-quality materials and ensure adequate compaction. The use of the acceleration response of the vibrating roller method as a method for quality control during construction is currently under consideration. Through the use of this method, it is possible to ensure the construction of at rigid ground with sufficient quality required for the "APE"; furthermore, this method also reasonably performs quality control. In addition, since the quality check is performed at the time of construction itself, it is possible to immediately rectify area that has poor quality.

### 概 要

近年の高速道路においては、高架や長大トンネル、橋梁が増加する傾向がある。一般的に、道路土工部と橋梁では単位長さ当りの工事費が土工部の方が安価であることから、構造物を縮小化するために「盛りこぼし橋台」が採用されることが多くなってきている。この造成において、盛土部に要求される地盤剛性を施工中に確認できることから、高速道路総合技術研究所では振動ローラの加速度応答法を用いることを現在検討している。この手法の特性を検証する目的で、大型土槽を用いた振動ローラによる締固め実験を実施し、その有効性の確認を実験結果のデータ検証およびFEMで実施した。実験および解析の結果から、加速度応答法は締固めの指標として利用することが可能であることが検証された。この手法は全エリアの品質確認を行えることから、ばらつきの発見も可能となり、盛りこぼし橋台だけでなく堤体工事において、転圧不良部の発見と是正に有効に機能した。

## 1. はじめに

平野部における連続高架橋と道路土工部の境界は、交差物件の制約を受けない場合、経済的な盛土高さによりその境界が決定される。しかし、近年の高速道路は山間部に建設されることが多く、道路交差物の制約ではなく地形的な制約から、長大切土、高盛土や橋梁が計画されている。一般的に、道路土工部と橋梁では単位長さ当りの工事費が橋梁よりも土工部の方が安価であることから、橋梁と土工部の境界の経済的な盛土高さも高くなる傾向にある。高盛土部に橋台を構築する場合、構造物を縮小化することでコスト縮減が可能となるため、大きな土圧が作用する箱式橋台よりもFig.1 に示すような「盛りこぼし橋台<sup>1)</sup>」が採用される傾向にある。この造成には良質な材料を用いて、十分な締固めを行うことが原則となっており、施工時の品質管理の一つの方法として、振動ローラの加速度応答法を用いることが、日本高速道路会社3社 (NEXCO) などの事業者によって現在検討されている<sup>2)</sup>。

本論文では、この品質管理手法の適用性を検証すること、ならびに粗粒材料の転圧特性を検証するために、加速度応答法の適用性の検証を、室内大型土槽を用いて実施した結果に基づき、加速度応答法による品質管理手法

の概要と検証 (2, 3章), 粗粒材料の転圧特性と品質管理手法の適用性 (4章), 実務への適用例 (5章), にそれぞれまとめる。

## 2. 土工の品質管理に関する近年の動向<sup>3)</sup>

道路工事に限らず、国内での盛土工の品質管理はProctorの提唱した締固め試験<sup>4)</sup>に基づく「締固め度」管理が主流であるが、北欧のスウェーデンや西欧のドイツでは、早くから品質管理への統計手法を用いたアプローチと、施工域の全数検査の試みが研究され、その成果は施

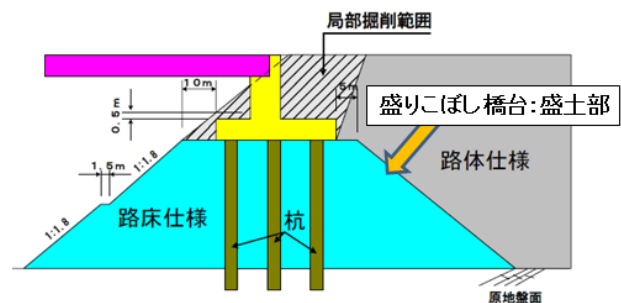


Fig.1 盛りこぼし橋台の概念図  
Outline of Abutment Pier on the Embankment

工管理に適用されている。また、アメリカでもインテリジェント・コンパクション・プロジェクト（以下ICと記述）が実施され、新しい品質管理の実用化に向けた取り組みがなされている。

## 2.1 ドイツの取り組み

ドイツでは土工および舗装工事において、工学的・統計的な概念を取り入れた技術仕様書(ZTVE-StB94)を整備し、施工領域全面の品質管理を実施しようという試みが始まっている。施工区域の全数管理を行う事は、品質管理を行う上で最も望ましいことであるが、その実現は従来の手法では不可能であった。しかし、盛土の締固めに振動ローラが利用されるようになってから、振動ローラの振動加速度応答を用いて締固めの品質管理を行う技術が、1980年にThurnerによって発表され<sup>5)</sup>、CMV(Compaction Meter Value)として地盤の剛性との関連付けが試みられた。この原理を応用し、各研究機関と機械メーカーは作業中に締固め管理を行えるContinuous Compaction Control(CCC)を開発し<sup>6)</sup>、この手法がZTVE-StB94に盛り込まれた。検査および品質管理のイメージをFig.2に示す<sup>7)</sup>。この手法は、新たなセンサーと解析の組み合わせによる土工におけるICT利用の先陣をきるものであった。この品質管理手法はMethod2 (M2手法)と呼ばれ、比較的大規模な施工において用いられることが多いようである。

この手法の利点は、単に管理基準値を境とした合格判定を行えるだけでなく、締固めの均一性も判定できる点にある。さらに当然ではあるが、不良箇所の特定も容易である。しかしその反面、必ず目標とする締固め度と加速度応答のCMV値との相関を求めなければならず、管理指標を定めるのに時間がかかるという欠点もある。

近年、実務ではM2手法を簡易化したMethod3 (M3手法)を適用することが多い。M3手法はM2と同様にCMVで施工エリア全面を計測し、CMV値の最低箇所に関し通常の試験(現場密度試験など)を実施し、その値が統計的な観点から満足すべき値であれば全施工範囲を合格とし、基準に達していない部分は追加転圧または置換する。

これらの検査手法の画期的な点は、CMVの適用、すなわちICTを早くから品質管理へ適用した点もさることな

がら、統計的な観点を検査に取り入れ、一定の不良率を許容している点である。

## 2.2 アメリカの取り組み

アメリカにおける道路工事(土工)の品質管理は、日本と同様に締固め度の管理が一般的である。現場での指標となる締固め度は各州により異なり、路床では92%が多く採用されていた。しかし近年、カンサス州運輸局の道路運用後の調査により、竣工後異常沈下等の多かった盛土は締固め度の平均が94.4%以下という結果を得て、95%を採用する州が増えてきている<sup>8)</sup>。このような取り組みにもかかわらず、設計により定められた管理値(締固め度の基準値)は高く設定されているものの、現場試験の頻度が少ないため、品質の確認・確保が必ずしもうまくいっていない点が指摘されるようになってきた。これを受けて、米国連邦道路管理局(Federal Highway Administration: FHWA)によって品質管理と品質保証を目的としたICの研究を開始し<sup>9)</sup>、一部の州でIC発注仕様書の試験運用<sup>10)</sup>も開始されている。

米国では2002年にこのICの優位性が報告され、FHWA主導で研究プロジェクト(NCHRP 21-09)<sup>11)</sup>が発足した。このプロジェクトの実験はミネソタ州などで実施され、ICすなわちICTの有用性が以下のように総括されている。

- 1) 従来の現場試験(たとえばRI法)は有用であるが結果を得るのに時間を要し、設計特性を検証(現場施工にフィードバック)できないので変更すべきである。
- 2) GNSS(GPS)を用いGISへの記録を行うことにより、施工全データの記録と帳票化が可能となる。

これらの結果を基に、FHWAは2005年に「戦略的IC計画書」<sup>12)</sup>を作成し、実験を実施している。

- 1) ICを用いることにより施工中に品質を把握し、転圧作業を改善(転圧回数の低減)
- 2) 締固め品質の改善(より高く均一な密度)
- 3) 舗装設計の性能規定に対応した地盤・舗装剛性の連続的な取得
- 4) 施工者および発注者への締固め状況の施工・品質の情報提供
- 5) 締固め不足箇所の特定

## 3. 加速度応答を用いた締固め管理

締固め管理の方式には大別して、品質規定方式と工法規定方式の2方式がある。工法規定方式に関しては、タスクメーターに変わり、近年では比較的大規模な現場を中心に、GPSを用いた転圧回数管理が用いられるようになってきている。品質規定方式において、従来は砂置換法および炉乾燥法(急速乾燥法)による密度・含水量管理が主に行われてきたが、近年は簡便かつ迅速に密度と含水量が計測できるRI法が普及してきている。しかし、前節でも述べたとおり、これらは施工後の品質の確認にとどまり、本来の意味での品質管理として十分利用されているとはい

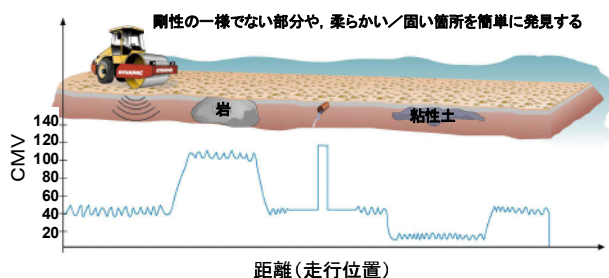


Fig.2 Continuous Compaction Controlのイメージ  
Outline of Continuous Compaction Control

い難い。施工上の制約からこれらは致し方ない面があるが、得られたデータを出来る限り迅速に処理し施工にフィードバックする事が重要である点は言うまでもなく、最近では、測定の迅速性、多点ないしは面的管理などを旨とした各種の試験計測手法が開発され実用化もなされつつある。

### 3.1 加速度応答法による品質管理

筆者は2001年に、加速度応答法を用いた盛土工事の転圧管理システム「 $\alpha$ システム」を開発した<sup>13)</sup>。これは振動ローラ加速度応答を利用した地盤剛性評価手法<sup>13)</sup>の一

つである。Fig.3 は、道路路床材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、転圧の進行による地盤剛性の増加にともない、地盤からの反発を受け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は起振振動数に対するスペクトル 以外に、高調波スペクトル  $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots$  , あるいは  $1/2$  分数調波スペクトル  $S'_1, S'_2, S'_3, S'_4, \dots$  が卓越してくる。この性質を利用し、加速度波形式の定量指標として式(1)に示す「乱れ率( $Ft$ )」を定義する。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。

さらに本システムにおいては、Fig.4 に示すような振動ローラ～地盤系を2自由度振動モデルに置き換えた数値計算による検討を行い、 $Ft$ と振動ローラ機械諸元（フレーム質量  $m_1$ 、振動輪質量  $m_2$ 、振動数  $f_0$ 、起振力  $F$ 、振動振幅  $B$ ）、ならびに地盤の変形係数  $E$  の関係を式(1)および(2)のように定式化し（ $\nu$ はポアソン比）、振動ローラの加速度応答値（乱れ率: $Ft$ ）から直ちに地盤剛性を出力できる手法を採用している。一般に、振動ローラ加速度応答は地盤条件のみならず振動ローラの機械条件によっても異なるため、 $Ft$ と地盤剛性の関係を転圧機種ごとに求めておく必要があるが、本システムではこの問題を解決し、機械諸元を代入することによって任意の機種に対しても直ちに变形係数を算定可能であることが特徴である（詳細は文献14) 参照）。

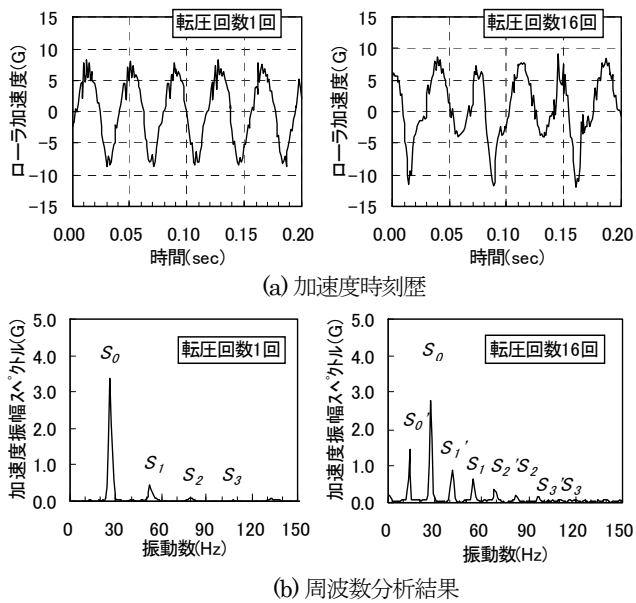


Fig. 3 転圧にともなう加速度波形の計測例

An Example of Measured Vibratory Roller Acceleration during Construction

$$Ft = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i + \sum_{i=1}^3 S'_i}{\frac{S_0 + S'_0}{F/(m_1 + m_2)g}} \quad \dots (1)$$

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

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

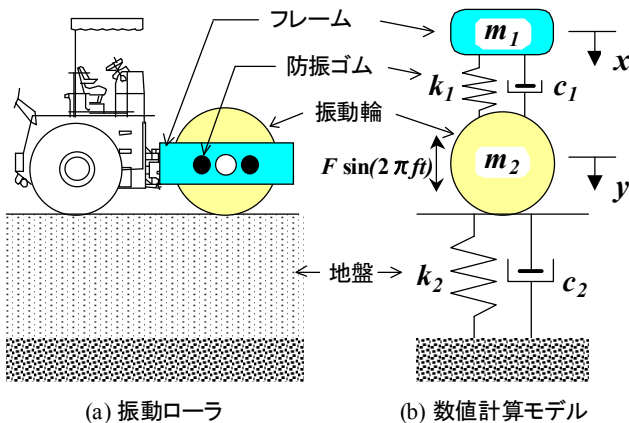


Fig. 4 振動ローラ～地盤系のモデル

Simulation Model for the Roller and Ground

ここで、式(2)を用いて乱れ率( $Ft$ )から地盤变形係数を求め、別途平板載荷試験 (JIS A 1215) により評価した地盤变形係数との関係を整理した結果をFig.5 に示す<sup>15)</sup>。図には、道路の路体材料の他、道路路床材料、フィルダムロック材料など複数の材料の転圧試験結果もプロットしている（材料物性や機械諸元は文献16) 参照）。Fig.5 を見ると、高飽和度材料を含む多様な材料について、提案手法は平板載荷試験相当の地盤剛性を評価可能であることがわかる。しかも、Fig.5 では転圧機種も数種類用いているが、機種が異なっても適切に地盤剛性を評価しており、理論的に導出した式(2)の妥当性を確認することができる。このように、提案手法は任意の材料、任意の機種について地盤剛性を適切に評価可能であり、例えば道路・空港路床、宅地造成など、転圧面の剛性確保が

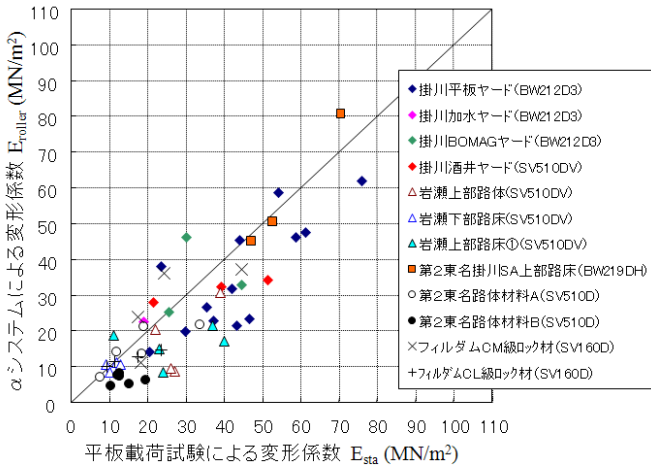


Fig. 5 加速度による推定変形数と実測変形係数の比較  
Comparison Stiffness between Measured by Plate Loading Tests and Estimated by Roller Acceleration at Various Conditions of Materials and Rollers

必要となる対象に対して非常に適用性が高いと考えられる。

### 3.2 2質点モデルによる加速度応答法の有効性検証

兵庫県姫路市のフィルダムの現場で計測されたデータを基に、加速度と地盤の物性値の関連性について考察を行った。地盤上を振動する質点が基礎に及ぼす問題の解析手法を参考に<sup>17)</sup>、振動ローラと地盤をFig.4に示すモデルで再現することとした。モデルの構成式(運動方程式)を以下に示す。

$t$ :時間(sec),  $c_1, c_2$ :振動ローラおよび地盤の減衰係数(Nsec/m),  $x, y$ :変位(m),  $g$ :重力加速度(m/sec<sup>2</sup>)としたとき、

$$m_1 \frac{d^2x}{dt^2} + k_1(x - y) + c_1 \left( \frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} \right) = m_1 g \quad \dots (3)$$

$$m_2 \frac{d^2y}{dt^2} + k_2 y + c_2 \frac{dy}{dt} - k_1(x - y) - c_1 \left( \frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} \right) = m_2 g + F \sin(2\pi f_0 t) \quad \dots (4)$$

$$c_1 = 2h_1 \sqrt{m_1 k_1} \quad \dots (5)$$

$$h_1 = \sqrt{\frac{m_1}{2m_2(1 + m_1/m_2)}} \quad \dots (6)$$

$$c_2 = 2D_2 \sqrt{m_2 k_2} \quad \dots (7)$$

ここで、 $D_2$ は地盤上の振動する基礎問題<sup>18)</sup>を参考に0.4とした。なお、重力方向を正としたとき、振動ローラが跳ね上がると地盤と振動輪の接点は無くなることから、

$$k_2 y + c_2 \frac{dy}{dt} < 0 \quad \text{のとき} \quad k_2 = c_2 = 0 \quad \dots (8)$$

また、 $r$ : 振動輪の半径(m),  $\alpha, \beta$ : 補正係数とした

とき、地盤バネと平板載荷試験から求められる地盤バネの値の関係は次式による<sup>17)</sup>。

$$k_2 = \alpha BK_{30} \left[ r^2 \sin^{-1} \frac{\sqrt{2ry - y^2}}{r} - (r - y) \sqrt{2ry - y^2 + 2\beta y} \right] / y$$

$$= \frac{BK_{30}}{y} \left[ r^2 \sin^{-1} \frac{\sqrt{2ry - y^2}}{r} - (r - y) \sqrt{2ry - y^2 + 0.014y} \right] \quad \dots (9)$$

なお、(9)式の $\alpha, \beta$ は、地盤のバネ係数を求める際の振動輪を考慮した係数であり、前者は平板載荷のような静的な載荷条件と振動輪のような動的載荷を補正する係数であり、後者は振動輪の地盤に対する載荷面が曲面であることを考慮する係数である。今回の解析では、文献15)を参考に、それぞれ1.0, 0.7cmと設定した。

これらに基づき、(9)式によって転圧回数 $N=1, 3, 6$ 回の $k_2$ を設定し、 $t=4 \sim 6$ secの振動輪の加速度、およびスペクトルの実測値と解析値の対比した結果をFig. 6, 7に示す。

Fig. 6 に示す加速度の実測値と解析値の比較結果は、各転圧回数において解析値の方が加速度は大きく、波形の乱れも大きくなっている。Fig. 7 はFig.6 のFFTの結果であるが、振動輪のスペクトルの結果は、基本振動数( $f_0=28$ Hz)の $n$ 倍振動数における最大振幅の大きさが解析値の方がやや大きいものの、実測値の傾向を良く表している。また、 $N=3$ 回から出現する $1/2$ 基本振動数( $1/2 \cdot f_0$ の $(2n-1)$ 倍周波数)も解析で表すことが出来ている。

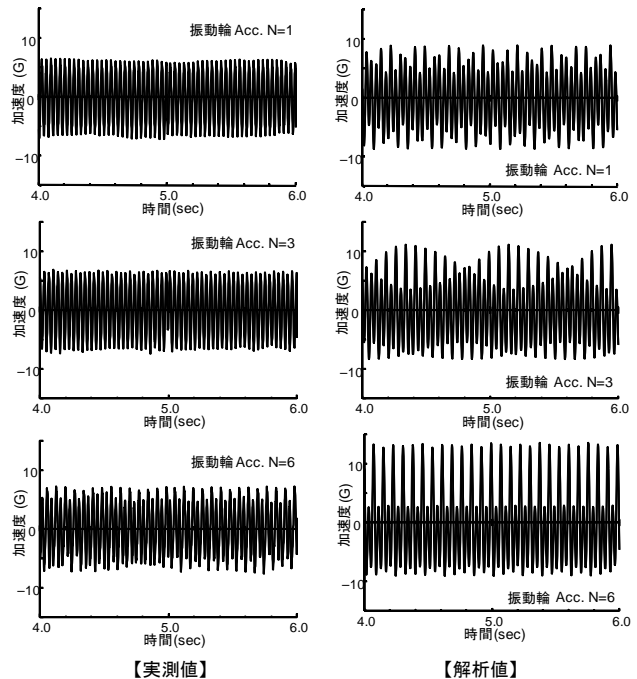


Fig. 6 振動輪加速度(実測値と解析値)  
Acceleration of Wheel Vibration  
(Analysis Value with the Measured Value)

以上の結果から、振動ローラの転圧状況を比較的簡易な2質点系モデルで表すことにより、本論文で締固め度の指標とする乱れ率の基となるスペクトルのピークの出現状況を解析で確認することができた。

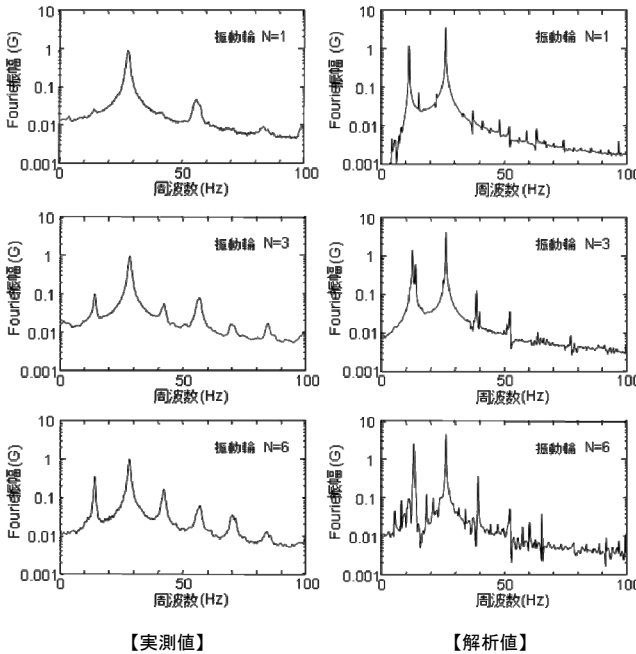


Fig. 7 振動輪スペクトルの比較 (実測値と解析値)  
Comparison of Wheel Vibration Spectrum (Analysis Value with the Measured Value)

Table 1 大型土槽試験の概要  
Outline of Large Scale Indoor Test

条件・目的	CASE-1 砕石を使用した 高剛性地盤	CASE-2 砂質土を使用した 高剛性地盤	CASE-3 砂質土を使用した 低剛性地盤
基盤の剛性	砕石C-40を基礎層に使用 地盤剛性が高い	砂質土を基礎層に使用 地盤剛性が高い	砂質土を基礎層に使用 地盤剛性が低い
影響深さの確認	基盤層+試験層 30~90cmまで (30,40,50,60,70,90cmで計測) 基盤弱部の作成 (発泡スチロールブロック)	基盤層+試験層 30~90cmまで (30,40,50,60,70,90cmで計測) 塩ビ管(VP)埋設	
転圧機種の違い	4t級振動ローラ (酒井重工業TW502) 10t級振動ローラ (酒井重工業SV512) 仕上げ面(12回転圧後) 加速度応答の違い		
転圧機械の振動の違い	4t級振動ローラ (酒井重工業TW502) 低振幅/高振幅 10t級振動ローラ (酒井重工業SV512) 低振幅/高振幅 仕上げ面(12回転圧後) 加速度応答の違い		

Table 2 試験に用いた振動ローラ  
Outline of Vibratory Roller

機種	10t級振動ローラ SV512D-1	4t 振動ローラ TW502S-1
運転質量 (kg)	11,950	3,540
機械質量 (kg)	11,950	3,230
寸法 全長×全幅×全高 (mm)	5,895×2,300×2,890	3,105×1,390×1,705
締固め幅 (mm)	2,130	1,300
走行速度 低/高 (km/h)	0-4.0-5.5, 0-11.0	0-9/0-12
起振力 低/高 (kN)	181/260	26.5/34.3

#### 4. 大型室内土槽試験

ローラ加速度応答法を用いた施工管理手法に関する研究は、平成23年度から振動ローラ加速度応答法の開発者、NEXCO総研が参画し、品質管理手法や技術的な課題に対する検証を目的として実施している<sup>19),20)</sup>。平成23年度には合計6現場で試験施工を実施したが、今年度は、平成23年度の試験結果で課題となった、振動ローラの振幅の影響、施工層下の基盤や下層の影響、下層の降雨や含水状態の影響を検証するため、室内のピット試験を行った。

今回の試験では上述の3つの課題の確認をすることを目的とし、各試験で密度、含水比、変形係数、加速度応答値等を計測し、影響度合いを評価することとした。試験ケースはTable 1 に示すように設定し、振動ローラの機種の違い(2機種)、振動の違い(高/低振幅)、基礎地盤の剛性の影響をそれぞれ調査することとした。

##### 4.1 大型土槽実験の概要

4.1.1 試験ヤード(大型土槽) 試験ヤードとして用いた大型土槽(ピット)の状況をPhoto 1に示す。試験ヤードは全長20m、試験区間15m、幅3m、深さ95cmであり、Table 1 に示す実験を2回に分けて実施した。Fig.8 にCASE-1の試験、Fig.9 にCASE-2,3 の試験概要を示す。

4.1.2 使用機械、計測器、材料土 試験に用いた振動ローラは、一般土工に用いられる10t級(200kN級振動ローラ)と、路床・路盤に多用される4t振動ローラの2種類を用いた。それぞれの機械諸元をTable 2 に示す。

Table 3 試験における計測項目  
The Measurement Items in the Test

計測項目	試験機器	数量
含水比、密度測定	RI計器 (10, 15cm線源)	15箇所/層
変形係数測定	小型FWD	15箇所/層
表面沈下量	レベル	15箇所/層
試験層沈下量	沈下板	2箇所
土圧計測	土圧計	4箇所
加速度応答値	CCV	連測計測
	αシステム	連続計測

Table 4 試験に用いた土の特性  
Characteristics of the Soil Used in the Test

工学的分類	細粒分まじり砂質礫(GS-Cs)	
土粒子の密度	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.720
自然含水比	$w_n$ (%)	2.4
粒度組成	最大粒径 (mm)	37.5
	礫分 (%)	59.8
	砂分 (%)	30.0
	細粒分 (%)	10.2
最大乾燥密度	E-b法 (g/cm <sup>3</sup> )	2.296
最適含水比	$w_{opt}$ (%)	5.6
CBR	$w=4\%$ , E法, 非水浸 (%)	213.6

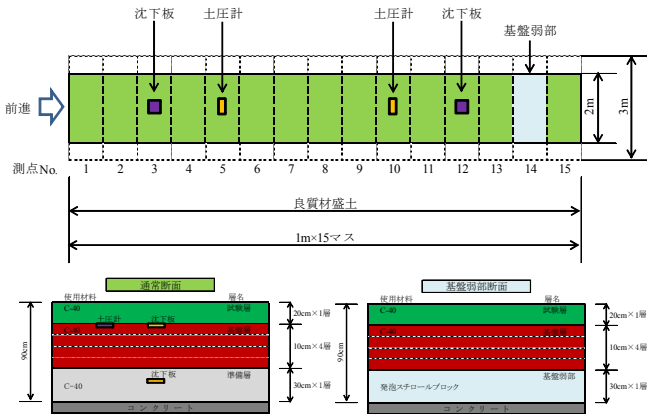


Fig. 8 CASE-1 試験平面および断面図

Plane and Cross-sectional View of CASE-1 Test

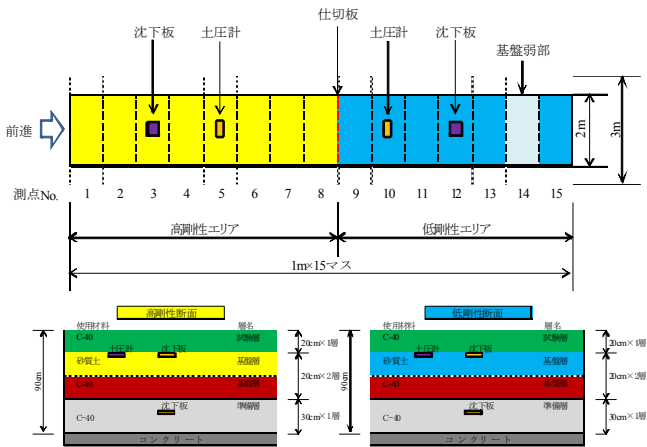


Fig. 9 CASE-2,3 試験平面および断面図

Plane and Cross-sectional View of CASE-2 and 3 Tests

試験における計測項目は、Table 3 に示すように、各層の転圧時に加速度応答および土圧計測を、転圧後に沈下量、密度、剛性を計測した。

材料土は、CASE-1の基盤層はC-40相当、CASE-1の試験層はC-40相当、CASE-2・3の基盤層は砂質土、CASE-2・3の試験層はC-40相当を用いた。また、CASE-1の基盤弱部にはEPS ( $E=12\text{MN/m}^2$ ) を用い、試験層を構成した (Fig.8,9参照)。試験層(粗粒土)の物理性状をTable 4 に示す。

**4.1.3 加速度応答検出装置** 今回の用いた装置は、国内で用いられているCCV (酒井重工業(株))、および $\alpha$ システムを用いた。いずれも振動ローラの振動輪の鉛直加速度を計測し、振動輪の起振周波数と締固めに伴う振動輪の地盤からの反発に起因する周波数の比較により、締固めの指標を算出するものである<sup>19,20</sup>。今回は、2つのシステムを同時に振動ローラに搭載し、計測を行った。

**4.1.4 試験内容** 今回の試験は、振動ローラの大きさ、および振動の低振幅と高振幅による加速度応答の特性の違いを検証するためにTable 1に示すような内容で行う



Photo 1 大型土槽実験の状況

Outline of Large Scale Indoor Test

事とした。本論文では、CASE-1の実験に関し計測結果と解析をまとめることとするが、実験目的は以下に示すとおりである。

CASE-1は、振動ローラを用いた締固め管理手法の一つである「加速度応答法」が、地盤の平均的な剛性指標を示すと言われていることから<sup>21,22</sup>、この計測される深度(影響深さ)を求めるための試験である。土槽内に20cmの準備層(C-40で構成；土圧計を埋設)を敷設後に、C-40の試験層を10cm毎に転圧回数12回の薄層転圧を繰り返す、加速度応答値の変化を計測するものである。

CASE-2およびCASE-3は、盛土材料の剛性による加速度応答の違いを検証するものである。CASE-1の実験終了後に表層の40cmを撤去し、20cmの砂質土層を設け、低剛性エリアを作成するために、CASE-3で示す部分に散水を行った。なお、この時に埋設管等の異物検出、およびCASE-1での加速度応答法の検出深さを検証する目的で、CASE-2試験エリアに塩ビ管(VP;  $\phi 114\text{mm}$ )を最終仕上がり層からの深度40~80cmに埋設した(本論文ではこの結果に関しては割愛)。

以上の試験を平成25年1月~3月に実施し、加速度応答と地盤剛性の相関性を検証した。

## 4.2 試験結果

今回の実験では、加速度応答による転圧管理手法の検証に、 $\alpha$ システムとCCVを使用した。 $\alpha$ システムとCCVは振動ローラに加速度計を搭載し得られた振幅スペクトルを $\alpha$ システムは乱れ率として、CCVはCCV値として算出する。ただし、処理方法の違いにより $\alpha$ システムはFFT演算の制約(サンプリング2ms)から2秒毎に、CCVは0.2秒毎に値を返す仕様となっている。

以下、本論文では大型土槽試験において、 $\alpha$ システムから計算される乱れ率と地盤反力係数の相関を比較した結果に関して考察する。

Fig. 10,11 に、加速度応答の演算結果と、小型FWD試験による地盤変形係数 $K_{p,FWD}(\text{MN/m}^3)$ との相関を示す。なお、図中凡例の先頭2文字は機種名を表し(SV:SV512D, TW:TW502S)、3文字目は転圧時のローラの振幅(H:高振

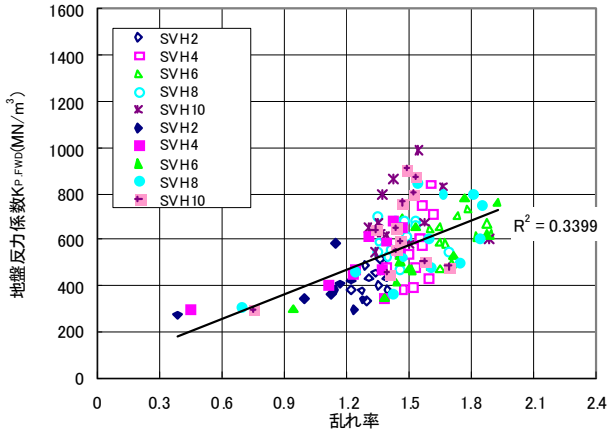


Fig. 10 加速度応答結果と地盤反力係数の相関  
Correlation of Subgrade Stiffness and Acceleration Response

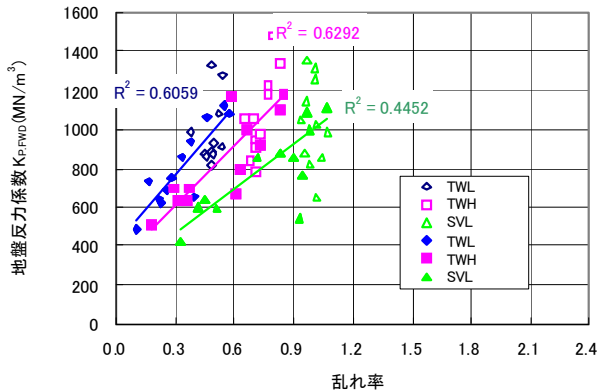


Fig. 11 機種別の加速度応答結果と地盤反力係数の結果  
Result of Subgrade Stiffness and Acceleration Response on Each Machinery

幅, L:低振幅)を, その後の数字は転圧回数を示す。

Fig.10 は, 全試験の計測データを1つのグラフにまとめたものである。小型FWDによる地盤反力係数と乱れ率は, ばらつきは大きいものの相関性が見て取れる, 図中では, 乱れ率が大きくなるとばらつきが大きくなっているが, 実験の状況から, これは過転圧で地盤が固くなり, 振動輪が跳ね上がる状況が生じたためであると考えられる。

Fig.11 は転圧機種毎に振幅の高/低別で計測結果を再整理したものである。SV512D よりTW502Sの方相関が良くなっている理由は, TW502Sは機械重量および転圧力が小さく, 過転圧状況が生じなかったためであると考えられる。

過転圧は, 粘性土盛土で含水比が高い場合の留意点として挙げられているが, 粗粒材料においても過転圧に留意する必要があることが解る。

### 4.3 FEMによるシミュレーション

大型土槽実験で得られた転圧結果に対して, FEMによ

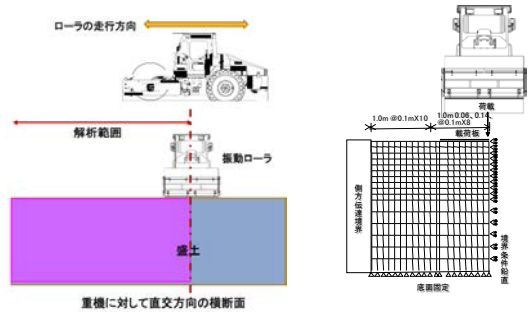


Fig. 12 解析断面 (ローラ進行方向直交断面 1/2モデル)  
FEM Analysis Model (Cross-section)

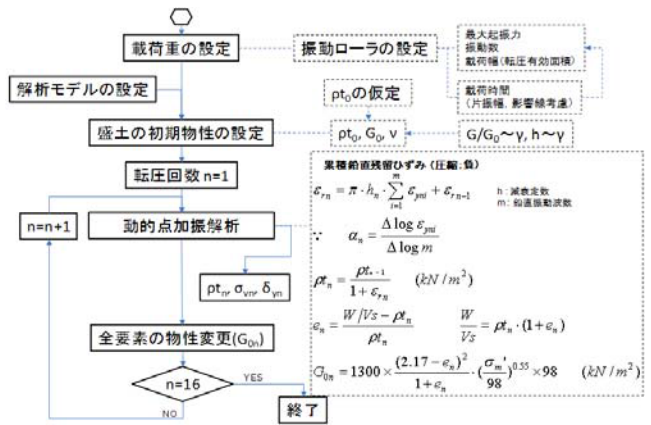


Fig.13 解析方法  
Analysis Method (Flow chart)

Table 5 設定地盤の相対密度と間隙比  
Void Ratio and Relative Density of Test Soil

相対密度 Dr (%)	pd		e	備考
	g/cm³	kN/m³		
100	2.2	21.56	0.325	e <sub>min</sub>
80	1.98	19.40	0.400	
60	1.85	18.13	0.467	
30	1.7	16.66	0.560	転圧開始前
0	1.595	15.631	0.662	e <sub>max</sub>

Table 6 解析に用いるG/G<sub>0</sub>・h~γ  
G/G<sub>0</sub>・h~γ to be Used in the Analysis

γ	1E-06	3.16E-06	1E-05	3.16E-05	1E-04	3.16E-04	1E-03	3.16E-03	1E-02
G/G <sub>0</sub>	1.0	0.96	0.91	0.8	0.65	0.44	0.24	0.15	0.10
h	0.02	0.021	0.027	0.035	0.05	0.08	0.128	0.162	0.18

るシミュレーション解析を実施し, 振動ローラの転圧特性と転圧時の地盤に作用する加速度の状況を再現した。

今回の解析は2次元FEMモデル (Fig.12 参照) による点加振解析とした。解析は以下の手順で実施した。

- 1) 加振力はローラ起振力+ローラ自重とし, ローラの前後進は影響線を考慮して設定する: 今回はローラの前を進を考慮し, 断面直上±0.25secを荷重の影響範囲とし, 波形強度を三角形分布とした。

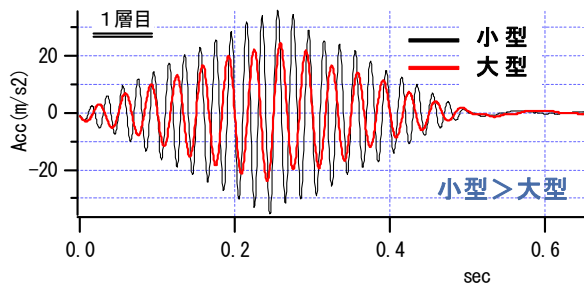


Fig. 14 FEMによる解析結果（地表面加速度）  
Ground Acceleration Analyzed by FEM

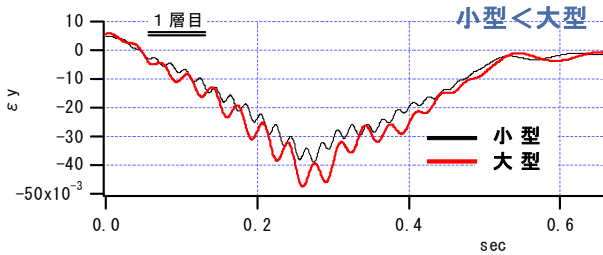


Fig. 15 FEMによる解析結果（地表面鉛直ひずみ）  
Vertical Strain at Ground Surface Analyzed by FEM

2) Fig.13 に示す手順で、ローラの起振1波毎の鉛直ひずみ $\epsilon_y$ を求め、その累積 $n$ 回転時の累積残留ひずみ $\epsilon_r$ 、単位体積重量 $\rho_t$ 、せん断弾性係数 $G_0$ を求める。なお、波数 $N \sim \epsilon_y$ の傾き $\alpha_n$  ( $\Delta \log \epsilon_y / \Delta \log N$ )を設定した。この $\alpha_n$ は密度が増加することにより小さくなるように設定し、相対密度( $D_r$ )に応じて文献23)から、 $D_r=30\%$ で0.4、 $D_r=100\%$ で0.01とした。

3) 上記で求めたパラメータを各要素に代入し、各転圧回数での残留変形をFEM自重解析により求める。

上記の方法を用いて、参考文献23)に示された粗粒材料地盤( $D_{max}=30\text{mm}$ ,  $G_0=12.3\text{MN/m}^2$ ,  $\nu=0.3$ )の締固め解析を実施した。想定地盤の相対密度と間隙比をTable 5 に、 $G/G_0 \cdot h \sim \gamma$ をTable 6 に示す。

**4.3.1 重機のおよび大きさによる転圧の違い** Fig.14 に示す応答加速度波形では、大型ローラ(SV512D)よりも小型ローラ(TW502S)の方が大きな値を示している。これは、高振幅状態において、大型ローラが振動数26Hzに対し小型ローラは34Hzであることから、この振動数の影響によるものと考えられる。一般的に振動ローラの振動数は、締固め対象の土や舗装材料(アスファルトなど)の対象物の締固め効果を研究し、それに適した振動数が選択されている。小型で自重の小さいローラは、締固めにおけるニーディング効果(重機の荷重および振動による粒子再配置ではなく、こね返しによる締固め効果)を高めるために振動数を上げ、締固め効果を向上させる設計がなされているが、今回の解析でもその目的が発揮され

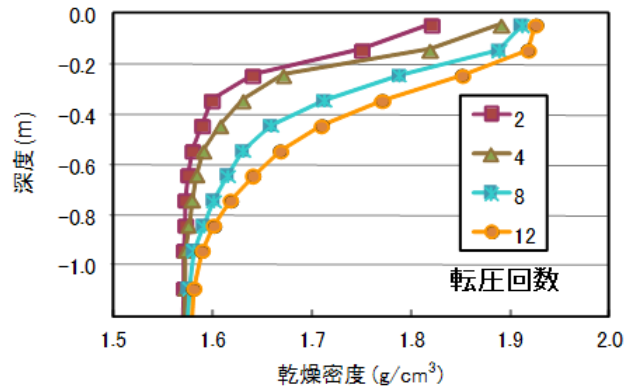


Fig. 16 FEMによる解析結果（密度の深度分布）  
Depth Distribution of the Soil Density Analyzed by FEM

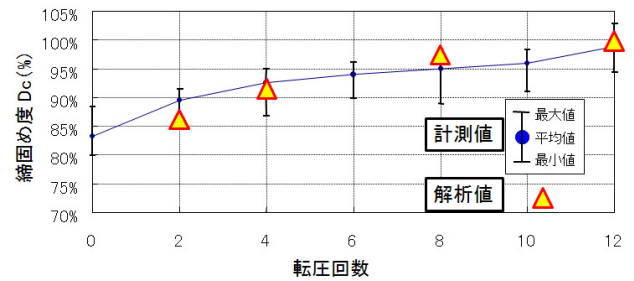


Fig. 17 転圧回数と地表面密度（締固め度）の比較  
Comparison of the Ground Surface Density  
(Degree of Compaction)  
-Compare with Measured and Calculated-

ていることが解る。ところが、応答加速度に反して、Fig.15 では地盤のひずみは大型ローラの方が大きくなっている。地盤の応答ひずみが大きいと言うことは締固め効果が大きいことを意味し、この結果は大型ローラの方が締固め効果は大きいという一般的な認識と合致するものである。振動ローラの締固めに及ぼす主因は振動荷重による圧縮、すなわち重量であることが解る。

**4.3.2 締固めによる密度増加** 大型土槽実験では、試験土を20cm毎の薄層で撒出し、転圧を実施したが、FEMを用いて土槽内に均一な状態で土を撒出し、転圧を行った状況を想定し解析した結果を、Fig.16に示す(図中には転圧回数2,4,8,12回の分布を表示)。図は転圧の進行(転圧回数の増加)に従い、土槽内の締固めが進行していく状況と、密度の深度分布の計算値を示している。大型の振動ローラでも、深部までは締固めのエネルギーが到達せず、密度が上がらない状況が表現されている。このことから薄層撒出しと転圧の重要性が解る。

また、この結果の地表面部(解析ではGL-5cm)の密度と、実際の実験でRIを用いて計測した結果を比較したものがFig.17である。図は、盛土の地表面密度(表層から15cmの締固め度)で比較している。転圧回数が少ない状



況では、解析値の方が密度を低く計算しているが、転圧回数が増加するに従い計算値の方が密度を大きく計算し、転圧12回で概ね一致している。この結果から、FEMは比較的良い精度で転圧状況を予測できることが解る。

以上の解析結果から、以下の知見を得た。

- 1) 大型ローラの方が締固め効果が高い。
- 2) Fig.16 において、密度の分布から締固め効果を確認すると、地表面から大型ローラでの転圧において、40cm程度で密度増加がほとんど無くなっていることから、締固めの効果はこの程度までが限界であることが示唆される。
- 3) 上記の結果から、薄層転圧は重要である。

## 5. 実務への適用

加速度応答法は、近年、新しい土工（締固め工事）の品質管理手法として適用される事例が増えてきており、筆者らが開発した「 $\alpha$ システム」も、2001年以降70以上の現場で適用されている（2013年6月現在）。この手法は、盛土材料として粗粒材料の品質管理を対象としたもので、必ずしもすべての土質に適用できるものではない、しかし、適用可能な環境下では、GNSS(GPS)を用いた転圧管理システムと併用することにより、転圧状況（主に工法規定における転圧回数管理）を客観的に管理できるばかりでなく、加速度応答による品質もリアルタイムに計測できる。

通常の盛土工事の品質管理では、施工後に現場密度試験を行うことが一般的で、電子レンジ法(JGS 0122)などの普及により、従来よりも迅速な密度計測が行えるようにはなったが、試験結果が迅速に施工に反映できることはまれで、一種の確認試験的な扱いである。さらに、それらはサンプル検査であり、例えば道路土工指針では1,000m<sup>3</sup>につき1回（路体の場合）である<sup>24)</sup>。すなわち施工領域全体の品質を必ずしも計測しているわけではなく、サンプルの評価によって全体品質を推定（確認）していることとなる。

それに対し、上記のように、加速度応答法は施工を行いながら計測でき、迅速に結果を処理できること、および施工領域全体の品質を施工を行いながら取得できることが大きな特徴であり、不具合（所定の密度や剛性に達していない場合など）が発生した場合に迅速な対処が出来る可能性がある。

Fig.18 には、2011年に近畿地方の堤防上部の道路施工に加速度応答法による品質管理を適用したことにより、「転圧不良部を発見し、再転圧を行う事ができた事例」を示している。加速度応答法（ $\alpha$ システム）にて弱部を発見し（コンターの色の異なる部分）、それを是正した状況が図中の右上の部分に表示されている。今回の工事のように、道路の路床部で土工の不具合を放置した場合、それより上部の路盤および表層（アスファルト舗装）にまで影響を与えかねないので（疲労破壊に対する耐久性

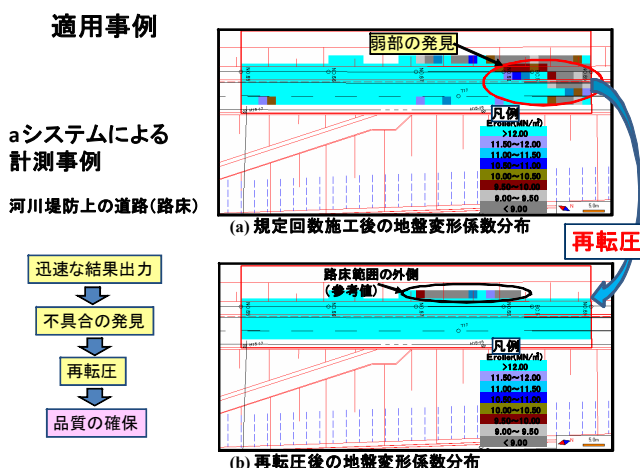


Fig.18 加速度応答法を用いて不具合を処理した事例  
Case of Processing the Defect  
Using the Acceleration Response Method

の低下など）、不具合の早期是正は重要である。

## 6. まとめ

今回の実験および解析によって以下の知見を得た。

- (1) 加速度応答法は、粗粒材料を材料とした盛土工事において、振動ローラの応答を解析することにより、地盤の剛性を評価でき、「盛りこぼし橋台」の品質管理への適用も可能である。
- (2) 加速度応答の解析値（乱れ率）は、小型FWDの計測値と相関が高く、地盤の剛性評価に用いることが可能である。
- (3) GNSSと組み合わせたシステムを用いることにより、リアルタイムに施工領域全体の品質を取得・評価することができる。
- (4) リアルタイムな品質評価は、不具合の早期是正に有効である。

本論文にまとめた加速度応答法は、適用上の課題も多い。例えば粘性土や高含水比の土に対しては、加速度応答値での品質管理は適用が困難であり、これらの適用限界に関しては、現在、独立行政法人土木研究所にて実験を行い、検討を進めている（2013年6月現在）。しかし、適用可能な盛土材料に対しては、これまで示したような品質管理指標として十分な指標（乱れ率や $\alpha$ システムでは直接変形係数の算出も可能）を取得することが出来るとともに、施工領域全体の品質管理も可能となる。さらに、施工中にデータを取得できることから、重機と作業員の現場での混在を少なくすることができ、安全面でもメリットが生まれる。

2章でもまとめたように、海外でも加速度応答法を用いた品質管理は実用化されつつあり、国内でもNEXCOなどで品質管理要領<sup>2)</sup>に記載されていることから、今後

は適用事例も増加するものとする。

土木工事における今後の品質管理は、情報化施工をさらに取り入れ<sup>25),26),27)</sup>、新しい計測手法やデータ解析技術が適用されることとなる。加速度応答法についても、今後も検討を重ね、国内での適用に対してのノウハウの蓄積と、システムの改善をさらに行い、建設の品質向上に寄与できる技術にまで昇華することを目標としたい。

#### 参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領 第二集 橋梁建設編，(1998)
- 2) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：土工施工管理要領，参127，(2013)
- 3) 古屋 弘：論説：海外のICTの現場への適用—施工時の品質管理—，地盤工学会誌 Vol.62 No.5 Ser.No.628，pp.2～5，(2010)
- 4) R.Proctor：Fundamental Principles of Soil Compaction，Engineering News-Record，Vol.111，No.9,10,12, and 13，(1933)
- 5) H.Thurner and A.Sandstrom：A new device for compaction control，Proc. of the Int. Conf. on Compaction，pp.611～614，(1980)
- 6) H.Thurner：Continuous compaction control specification and experience，Proc.，XII IRF World Congress，pp.951～956，(1993)
- 7) D.Peterson，J. Siekmeier and R. Peterson：Intelligent Soil Compaction-Technology，Results and a Roadmap Toward Widespread Use，TRB，83rd Annual Meeting，(2006)
- 8) 月本行則：米国における盛土の締固め管理，基礎工 Vol.37，No.7，pp.64～70，(2009)
- 9) www.Intelligentcompaction.com，(2013)
- 10) D.White，M.Thompson and P.Vennapusa：Implementing Intelligent Compaction Specification on Minnesota TH64：Synopsis of Measurement Values，Data Management，and Geotechnical Analysis，TRB，86th annual meeting，(2008)
- 11) M.Mooney and D.White：Intelligent Soil Compaction Systems，NCHRP Soil IC Project 21-09，(2009)
- 12) B.Horan and T.Ferragut：FHWA Intelligent Compaction Strategic Plan，FHWA，(2005)
- 13) 古屋弘，藤原宗一，三好哲也：加速度計とGPSを利用した締固めの管理方法の高度化，建設の機械化，pp.20～25，(2003)
- 14) 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)
- 15) 横田聖哉，益村公人，藤山哲雄，石黒健：道路路床の施工管理の合理化に関する考察—(その1) ローラ加速度応答を利用した剛性評価手法の適用性—，第37回地盤工学研究発表会講演集，(2002) 建設省土木研究所 機械施工部施工研究室：振動ローラによる盛土の締固めに関する調査，pp.1～76，(1985)
- 16) 岩崎敏男・島津晃臣訳：土と基礎の振動，pp.207～263，鹿島出版会，(1975)
- 17) Richart，F. E.，Jr. Hall，J. R.，Jr. Woods，R. D.，Vibration of Soils and Foundations，Prentice-Hall，Inc.，(1970)
- 18) 古屋 弘，砂町康夫，三井和久，伊藤 悟，横田聖哉，中村洋丈：施工現場におけるローラ加速度応答法を用いた盛土品質管理手法の検討(その1) 高速道路高盛土の建設時における圧縮沈下特性，土木学会第67回年次学術講演会，pp.841～842，(2012)
- 19) 横田聖哉，中村洋丈，内山恵一，神庭浩二：施工現場におけるローラ加速度応答法を用いた盛土品質管理手法の検討(その2) 高速道路高盛土の建設時における圧縮沈下特性，土木学会第67回年次学術講演会，pp.839～840，(2012)
- 20) 古屋 弘，藤山哲雄：振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「 $\alpha$ システム」の開発と実用化，建設の施工企画 No.728，pp.42～46，(2010)
- 21) 藤山哲雄，高橋 浩，古屋 弘，疋田喜彦：振動ローラ加速度応答法を利用した締固め管理手法による地盤評価深さの検討，第64回土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol.64，3-344，pp.687～688，(2009)
- 22) (財)電力中央研究所 土木技術研究所：広いひずみ範囲における粗粒材の動的変形特性と減衰特性，(1980)
- 23) 社団法人 日本道路協会：道路土工盛土工指針(平成22年度版)，(2010)
- 24) 古屋 弘：近年の施工管理技術の中での情報化施工，地盤工学会誌 Vol.58 No.1 Ser.No.624，pp.24～25，(2010)
- 25) 古屋 弘：【総説】建設事業における情報化施工(ICT)の活用，基礎工 Vol.40，No.5，pp.2～7，(2012)
- 26) 公益社団法人 地盤工学会：土の締固め—地盤工学・実務シリーズ30—，(2012)