

27. 加速度応答法の品質管理への適用

振動ローラを用いた締固め管理に関する大型土槽実験結果と考察

(株)大林組 ○古屋 弘
前田建設工業(株) 松尾 健二 飯島 健
酒井重工業(株) 内山 恵一
中日本高速道路(株) 中村 洋丈
(株)高速道路総合技術研究所 藤岡 一頼

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図-1に示すような「盛りこぼし橋台¹⁾」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、NEXCOなどの事業者によって現在検討されている²⁾。

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、粗粒材料の転圧特性と品質管理手法の適用性に関して報告するとともに、実務への適用に関して提案する。

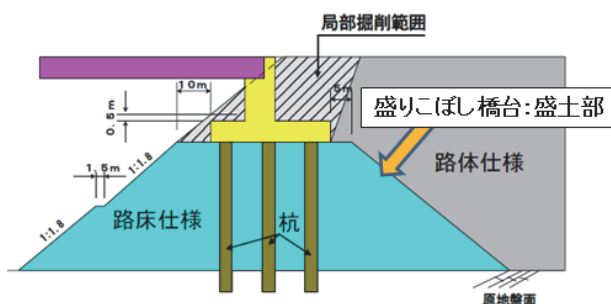


図-1 盛りこぼし橋台の概念図

2. 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、GNSS(GPS)を用いた転圧回数管理が用いられるようになっている。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、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えない。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と言うまでもなく、最近では、測定の迅速性、多点ないしは面的管理などを目指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。

この手法の一つがローラ加速度応答法を用いた盛土の締固め管理であり、1980年にドイツで開発され³⁾、国内でも1985年にこれに関連した調査研究が実施された⁴⁾。国内の実用化に関しては2000年以降に幾つかのシステムが提案されている^{5),6),7)}。

今回の実験で用いた加速度応答法(CCV, α システム)も、振動ローラ加速度応答を利用した地盤剛性評価手法⁶⁾の一つである。図-2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。CCV, α システムとも、この性質を利用し、地盤の締固めを評価する手法である。

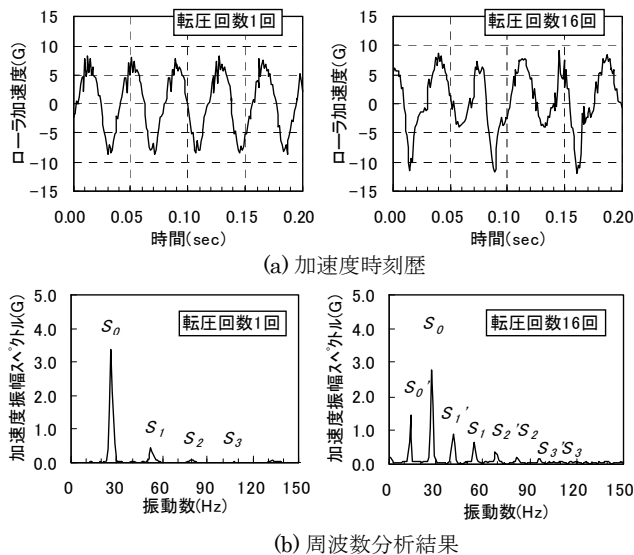


図-2 転圧にともなう加速度波形の計測例

3. 大型室内土槽試験

本報告における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^{8),9)}。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（参考文献 10 参照）。

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。試験ケースは表-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¹⁰⁾。

3.1 大型土槽実験の概要

(1) 試験ヤード

試験ヤードの状況を写真-1 に示す。試験ヤード（ピット）は全長 20m、試験区間 15m、幅 3m、深



写真-1 大型土槽実験の状況(TW502)

さ 95cm であり、表-1 に示す実験を 2 回に分けて実施した。

(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¹⁰⁾。

試験における計測項目は、表-2 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。

(3) 加速度応答検出装置

今回用いた装置は、国内で用いられている CCV（酒井重工業(株)）、および α システム（ α システム研究会）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^{11),12)}。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) 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表-1 に示すような内容で行う事とした。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。なお、実験目的は参考文献 10 にも示すが、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

表-1 大型土槽試験の概要

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		

表-2 試験における計測項目

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 α システム	連測計測 連続計測

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^{13,14)}、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し、加速度応答値の変化を計測するものである。

CASE-2 および 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。

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。

3.2 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、 α システムと CCV を使用している。 α 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 α 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 α 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。

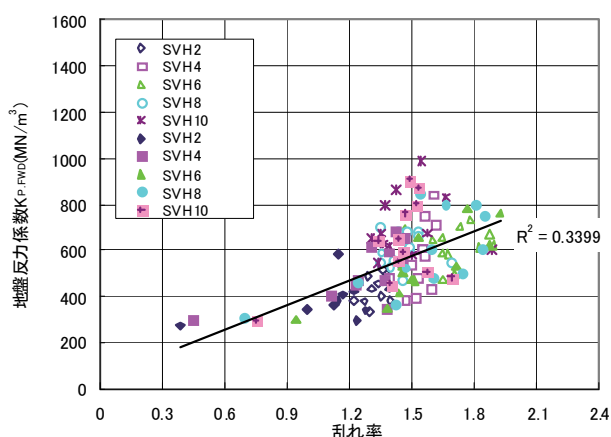


図-3 加速度応答結果と地盤反力係数の相関

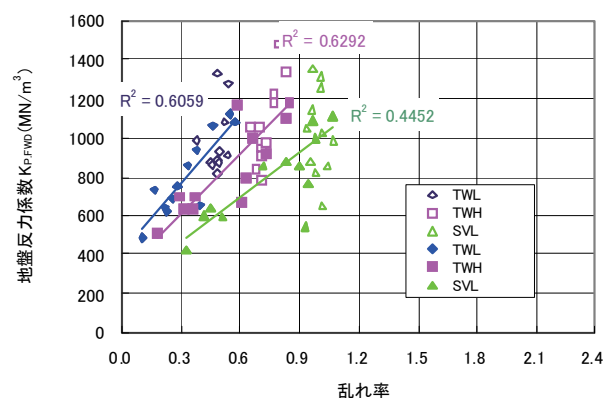


図-4 機種別の加速度応答結果と地盤反力係数の結果

以下、大型土槽試験において、 α 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まとめる。

図-3, 4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 $K_{pFWD}(MN/m^3)$ 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:高振幅, L:低振幅)を、その後の数字は転圧回数を示す。

図-3 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の相関は、乱れ率が大きくなるとばらつきが大きくなっているが、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。

図-4 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。

過転圧に関しては、一般には粘性土盛土で含水比が高い場合の転圧時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. 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（図-5 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：今回はローラの前速度を考慮し、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。

2) 図-6 に示す手順で、ローラの起振 1 波毎の鉛直ひずみ ε_y を求め、その累積 n 回転圧時の累積残留ひずみ ε_r 、単位体積重量 ρt 、せん断弾性係数 G_0 を求める。なお、波数 $N \sim \varepsilon_y$ の傾き α_n ($\Delta \log \varepsilon_y / \Delta \log N$) を設定した。この α_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 (Dr) に応じて文献 15) から、 $Dr=30\%$ で 0.4, $Dr=100\%$ 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 15) に示された粗粒材料地盤 ($D_{max}=30mm$, $G_0=12.3MN/m^2$, $\nu=0.3$) 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表-3 に、 $G/G_0 \cdot h \sim \gamma$ を表-4 に示す。

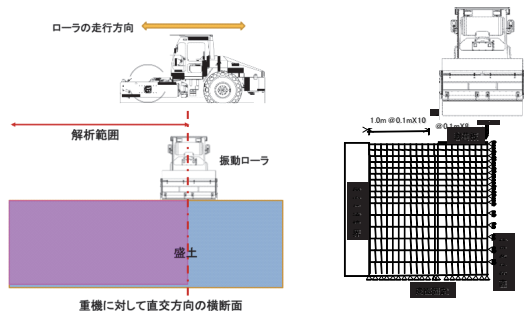


図-5 解析断面（ローラ進行方向直交断面 1/2 モデル）

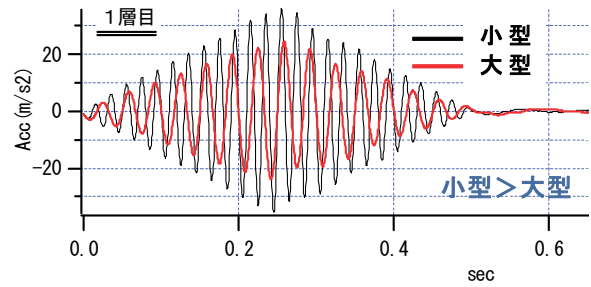


図-7 FEM による解析結果（地表面加速度）

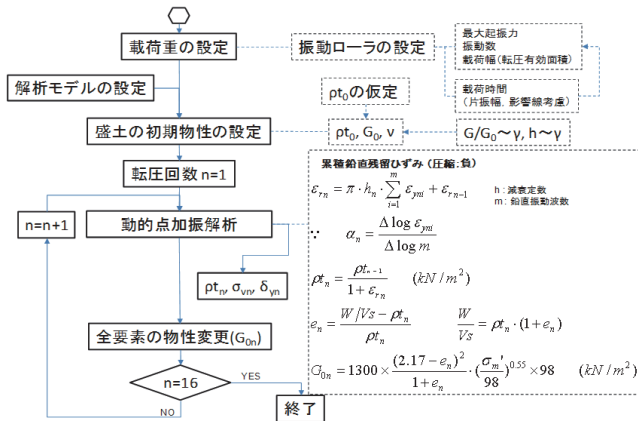


図-6 解析方法

表-3 設定地盤の相対密度と間隙比

相対密度 Dr (%)	pd		e	備考
	g/cm³	kN/m³		
100	2.2	21.56	0.325	e _{min}
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 _{max}

表-4 解析に用いた $G/G_0 \cdot h \sim \gamma$

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_0	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

4.1 重機の大きさによる転圧違い

図-7 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であると考えられる。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

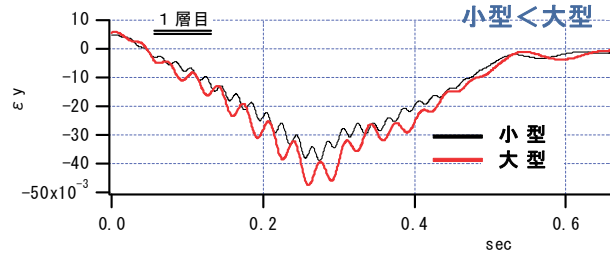


図-8 FEM による解析結果（地表面鉛直ひずみ）

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ていることが解る。ところが、応答加速度に反して、図-8 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い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。

4.2 締固めによる密度増加

大型土槽実験では、試験土を 20cm 毎の薄層で撤出し、転圧を実施したが、FEM において土槽内に均一な状態で土を撤出し、転圧を行った状況を解析したものを、図-9 に示す（図中には転圧回数 2,4,8,12 回の分布を表示）。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。このことから薄層撤出しと転圧の重要性が解る。

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図-10 である。この状況を、盛土の地表面密度（表層から 15cm）で比較したものが Fig.17 である。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

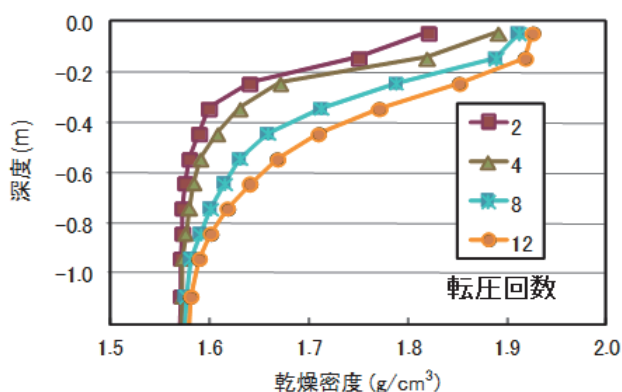


図-9 FEMによる解析結果（密度の深度分布）

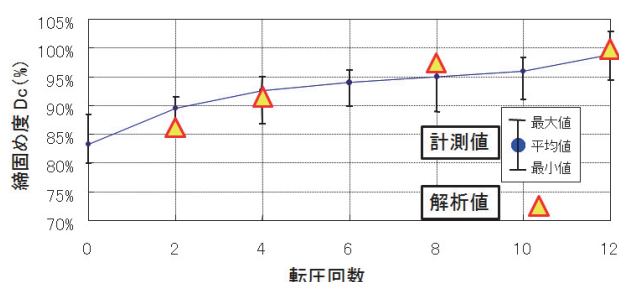


図-10 転圧回数と地表面密度の比較

適用事例

aシステムによる計測事例

河川堤防上の道路(路床)

迅速な結果出力

不具合の発見

再転圧

品質の確保

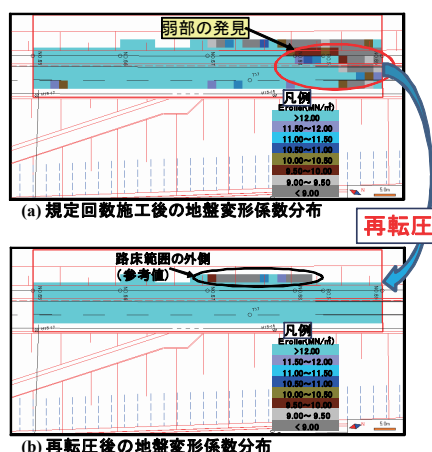


図-11 加速度応答法を用いて不具合を処理した事例

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。FEMは比較的良好な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. 実務への適用の可能性

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、加速度応答法は、2001年以降、関西国際空港2期島造成工事をはじめ、多くの現場で適用されている。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1,000m³につき1回（路体の場合）である¹⁶⁾。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、および施工領域全面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。

図-11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（α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。ここで示した道路工事のように、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で以下の知見を得た。

- (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面の品質を取得・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8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 α 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、施工領域全面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。

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²⁾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考ええる。

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^{17),18),19)}、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ろう。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指したい。

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) H.Thurner and A.Sandstrom：A new device for compaction control, Proc. of the Int. Conf. on Compaction, pp.611~614, 1980.
- 4) 建設省土木研究所 機械施工部施工研究室：振動ローラーによる盛土の締固めに関する調査，pp.1~76，1985.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 中村洋丈，藤岡一頼，古屋 弘，内山恵一，松本江基，浅田浩司：振動ローラ加速度応答法による盛土締固めの品質管理への適用，平成25年度 建設施工と建設機械シンポジウム（投稿中），2013.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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「 α システム」の開発と実用化，建設の施工企画 No.728, pp.42~46, 2010.
- 14) 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.
- 15) (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)
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.