

振動ローラ加速度応答法を用いた新しい ICT 土工品質管理手法の提案

前田建設工業 ICI 総合センター フェロー会員○石黒 健

大林組技術研究所 正会員 古屋 弘

酒井重工業 内山恵一 ソイルアンドロックエンジニアリング 正会員 池永太一

高速道路総合技術研究所 正会員 安部哲生 日下寛彦 中島康介

中日本高速道路株式会社 秦野工事事務所 正会員 中村洋丈

1. はじめに

転圧中の地盤の締固まり具合（地盤剛性）を面的・リアルタイムに取得する振動ローラ加速度応答法¹⁾²⁾³⁾は、ICT 土工における有望な現場品質管理手法として期待されており、既にネクスコの土工施工管理要領⁴⁾に導入されている。著者らは、本手法の現場適用性のさらなる拡大と多様化、現場締固め管理の効率化・高度化を目指し、加速度応答値の転圧に伴う収斂傾向を介した現場締固め管理や GNSS・移動式散乱型 RI といった最新の ICT 指標との連携の可能性を模索している。本論文では提案する ICT 土工品質管理手法の考え方と展望を示した後、その現場適用性を模索するために実施した一連の試験盛土（高速道路の実施工現場を含む）の結果を報告する。

2. 新しい ICT 土工品質管理手法の考え方と展望

図-1 に、振動ローラ加速度応答法を用いた新しい ICT 土工品質管理手法の考え方と展望を示す。現場施工が ICT 化されたとしても現場締固め（品質）管理のポイントは変わらない。盛土の要求品質を確実に担保する、という観点からは、①転圧エネルギー（FCEL）管理 ②材料・含水比変動の把握と区分 ③締固めの最適状態の確認、が必須である。ICT 土工においてもその基本的な考え方を遵守したうえで、最新の ICT 計器とそこから得られる ICT 指標を駆使しながら現場品質管理の効率化と高度化を図っていく必要がある。すなわち、上記 3 点に対応する工法規定方式や RI 法による密度・含水比管理、Ds 規定や Va 規定による現場締固め管理といった現状の品質管理レベルを担保したうえで、現在 M1、M2 のレベル⁵⁾で行われている面的管理手法のさらなる効率化と高度化を図っていききたいと著者らは考える。図-1 中には、これらを具現化するために活用可能な ICT 指標と上記締固め管理のポイントとの関係性を示した。現時点で想定している ICT 指標は加速度応答値の他にその収斂傾向、GNSS（X、Y、Z）の 3 座標値、そして移動式散乱型 RI である。図中に青で示した移動式散乱型 RI と GNSS（Z）データについては研究途上であるが、本論文の中でその試行状況と解決すべき技術的課題を示す。表-1 中には、より具体的に現場締固め管理のポイントと現在の管理方法、これらを担保するための新しい ICT 土工管理手法と管理項目、解決すべき技術的課題を整理して示した。

新しい ICT 土工品質管理手法に関する現時点での構想は以下に示す通りである。

- ① 転圧エネルギー管理：GNSS 搭載ブルと GNSS 搭載振動ローラによる撒き出し厚と転圧回数管理及び記録
- ② 材料・含水比の把握と区分：加速度センサ搭載振動ローラによる加速度応答値（地盤剛性）とその収斂傾向、

活用する ICT 指標

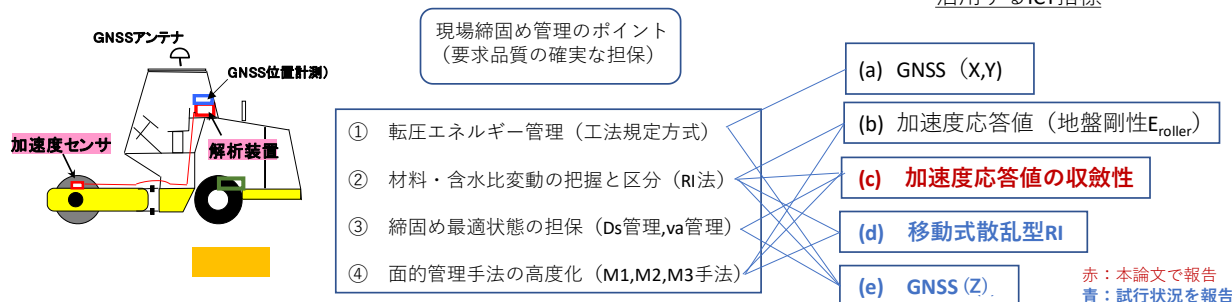


図-1 振動ローラ加速度応答法を用いた新しい ICT 土工品質管理手法の考え方と展望

キーワード ICT 土工, 現場締固め管理, 面的リアルタイム管理, 加速度応答法, GNSS, 移動式散乱型 RI

連絡先 〒302-0021 茨城県取手市寺田 5270 前田建設工業株式会社 ICI 総合センター TEL 0297-85-6171

表-1 新しい ICT 土工品質管理手法の概要と残された技術的課題

現場管理締固め管理のポイント	現在の締固め管理方法	新しいICT土工管理手法	管理項目	技術的課題
① 転圧エネルギー(FCEL)管理	工法規定方式	ブル搭載GNSS(X,Y,Z)	撒き出し厚 t	—
		振動ローラ搭載GNSS(X,Y)	転圧回数 N	—
② 材料・含水比変動の把握と区分	M1手法 (RI法および砂置換法)	振動ローラ搭載加速度計	地盤剛性Eroller,およびその収斂性の変動	材料・含水比変動と加速度応答値の関連性把握
		移動式散乱型RI計	含水比w (面的ばらつき)	移動式RI計器の開発(面的計測)
③ 締固め最適状態の担保	Ds管理,va管理	振動ローラ搭載加速度計	地盤剛性Erollerの転圧に伴う収斂性(間接把握)	転圧(沈下・密度)収斂と加速度応答収斂の関係性把握
		振動ローラ搭載GNSS(Z)	転圧時沈下の収斂性(直接把握)	GNSS(Z)の計測精度向上
④ 面的管理手法の高度化	M1:15点法(RI) M2:振動ローラ加速度応答法(密度)	移動式散乱型RI計	高含水比領域の抽出	移動式RI計器の開発(面的計測)
		振動ローラ搭載加速度計	地盤剛性Eroller,の面的分布(ヒートマップ)	地盤剛性Eroller.と管理基準値(剛性)の関係性把握あるいは簡易な原位置評価手法の提案
	M3:監督員目視		地盤剛性Eroller,最弱部の自動検出(M3の自動化)	最弱部の性能確認方法

移動式散乱型 RI による含水比データを併用した「材料・含水比変動」判定と区分結果の記録

- ③ 締固め最適状態の担保：加速度応答値（地盤剛性）の収斂傾向，GNSS(Z)の転圧時収斂傾向の管理及び記録
- ④ 面的管理手法の高度化：加速度応答値（地盤剛性）及びその収斂指標，移動式散乱型 RI（含水比）データ等ヒートマップのリアルタイム表示と記録。「地盤剛性の最弱部＋転圧収斂性の悪化領域＋高含水比集中部」等の内部自動抽出（M3 手法の自動化⁵⁾）及び記録

①は既に ICT 土工において標準化されているが，品質管理の観点から見れば必要条件であって十分条件ではない。②は加速度応答値(地盤剛性)の絶対値だけでなく転圧に伴う収斂傾向にも注目する。地盤剛性値とその収斂傾向は，材料変動と含水比変動（あるいはその両者）の影響を受けて変化する。移動式散乱型 RI のデータがこれに加わると，図-2(a)に示すような内部判定ロジックにより変動要因を分解して判定する事が可能となる。これらの結果をヒートマップ表示する事により転圧面の材料と含水比の分布を大まかであれ，描き出す事が可能となるのではないかと考える（材料・含水比変動の把握と区分を ICT 化）。③は，現場締固めに用いている転圧機械と材料，撒き出し厚の組合せにおいて達成しうる最適状態（これ以上は締固まらない，空気間隙が減らない状態）に到達している事を加速度応答値（間接的）及び振動ローラ搭載の GNSS(Z)データ（直接的）により判定する手法である（Ds 管理と Va 管理を ICT 化）。GNSS(Z)には当然計測精度の問題が存在し，高精度リアルタイム計測の壁は高い。そこで図-2(b)に示すように，第一段階として加速度応答値（地盤剛性）と試験施工時の既存管理指標（転圧時沈下と乾燥密度）の収斂傾向の類似性を利用する。転圧地盤に鉛直一次元圧縮を仮定すると，沈下の収斂＝乾燥密度の収斂となる。ある条件下では加速度応答値（地盤剛性）もまた転圧後密度に良く対応する²⁾³⁾ため，加速度応答値の収斂もまたこれらの収斂傾向と近似的にふるまう可能性がある。④は面的リアルタイム管理の高度化の試みである。現状は M1（RI 法 15 点）と

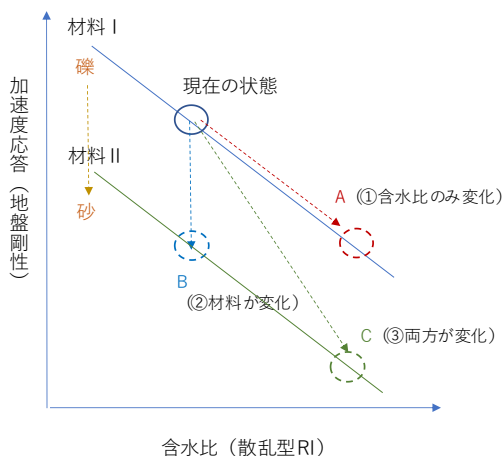


図-2(a) 材料と含水比変動の自動判定(概念図)

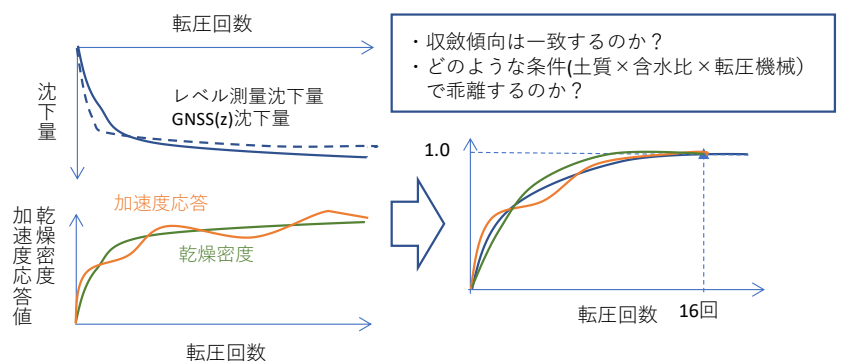


図-2(b) 既存管理指標と ICT 指標の収斂性検証のイメージ

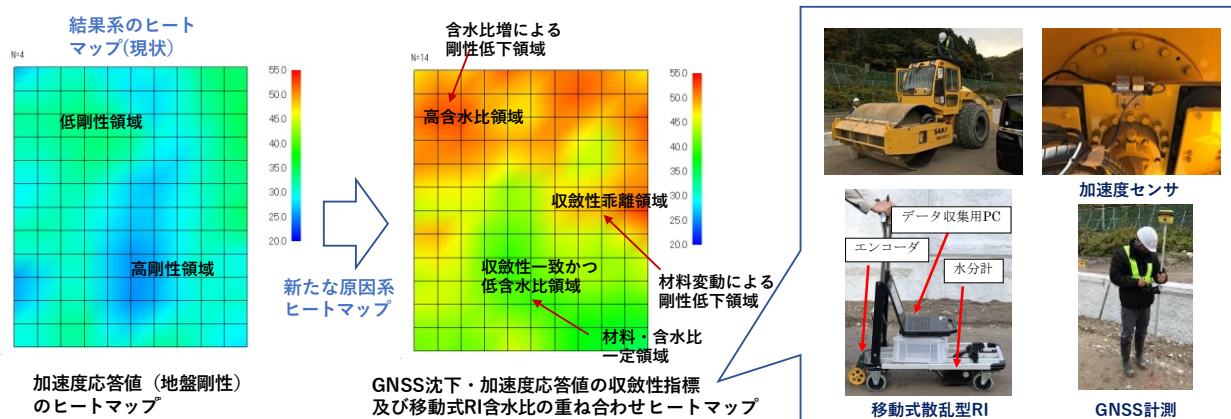


図-2(c) 加速度応答（地盤剛性）、収斂指標及び移動式 RI 含水比データのヒートマップ（概念図）

M2（加速度応答値を介した面的密度管理）が併用されているが、前者は離散管理である事、後者はあらかじめ加速度応答値と乾燥密度の相関性の取得が必要となる点がボトルネックとなる。現場で材料や含水比が日々、局所的に変動した際、離散的な M1 手法はこれを捉えきれず M2 手法もまた都度乾燥密度とのキャリブレーションを実施する事は現実的に難しい。さらに、現状 M1 と M2 の 2 つの管理を重複して行っている事は現場の負担軽減に逆行する。そこでこれに代替するものとして、加速度応答値より求まる地盤剛性²³⁾を指標としたヒートマップ（自動生成）を利用する。この際、加速度応答値から求まる地盤剛性と平板载荷など既存手法による地盤剛性の関係性を今一度明瞭にする事、および小型 FWD など原位置において簡易に地盤剛性を確認する手法の適用性検討（加速度応答値との相関性確認）等が今後の課題となる。一方、提案手法で新たに加えているのは M3 手法の ICT 自動化⁵⁾である。従前は監督員の目視により抽出していた転圧面弱部（低剛性部）を加速度応答値（地盤剛性）のヒートマップから自動抽出する。②で示した材料及び含水比変動の記録データをこれに紐づけることにより、単に地盤剛性の低い箇所ではなく、「加速度応答の収斂傾向が不安定、もしくは移動式散乱型 RI により計測された高含水比が集中する領域＝材料のみが変化、もしくは材料かつ含水比が変化した箇所」を自動抽出する事も可能となる。これまでとの大きな違いは、加速度応答値（地盤剛性）が相対的に低い事（＝現場締固めの結果）だけでなく、それが何故（材料変動か含水比変動か両方か）生じているのか（＝その原因）を大まかであれ把握し、対処方法の決定時に参照し、それを次施工や施工完了後の維持管理のための参考データとして記録に残せる点にある。理想的な（夢のような）ICT 土工品質管理手法の構想を長々と述べてきた。この後、本手法の妥当性を実大試験盛土で検証あるいは試行した結果について、以下の順に報告していく。

- (a) 加速度応答値（地盤剛性）とその収斂傾向が材料と含水比の組合せでどう変わるのか（②の検証）
- (b) 加速度応答値（地盤剛性）の収斂傾向が既存指標（転圧時沈下と乾燥密度）とどう対応するか（③の検証）
- (c) GNSS (Z) や移動式散乱型 RI といった最新の ICT 指標がどの程度使えるのか（使えないのか）（②～④の検証）

3. 試験盛土 A, B の概要

2 種類の実大試験盛土 A, B を実施した。図-3(a) (b) に、試験盛土の平面図及びヤード造成・高含水比ヤードの現場加水状況を示す。試験盛土 A では材料と含水比及び振動ローラの組合せを種々に変え上記②、③の検証を試みた。試験盛土 B では、高速道路路床の本施工ヤードの中で実路床材料を用いた再確認を行った。紙面の関係から試験詳細は文献⁶⁾⁷⁾⁸⁾に譲る。従来の試験施工（転圧時沈下、RI 密度の計測）に加え、加速度応答値の計測、GNSS (Z) データと移動式散乱型 RI の計測、小型 FWD による地盤剛性計測等を併せ実施した。図-4 に試験盛土及び本施工で用いられた 5 材料の粒度特性を、表-2 には転圧に用いた振動ローラの諸元と加速度計の取付状況を示す。試験盛土 A では礫 (C-40)、砂（スクリーニングス）、粘土の 3 種類を、試験盛土 B では本施工で用いられる破碎材とトンネルズリの 2 種類を使用し、各々自然含水比及び現場加水により調整した高含水比ヤードを準備した。図中にはネクスコの現場で使用されている路床材料の粒度範囲と平均値を併記したが、粘土を除けば今回用いた材料はいずれも既往路床材の粒度範囲内にあり、砂（スクリーニングス）は細粒側、礫と現場材料は平均粒度に近い。試験盛土 A では 10t 級と 4t 級、試験盛土 B では 10t 級振動ローラを転圧機械として用いた。試験盛土 A, B における現場締固めの状況を概観する目的で

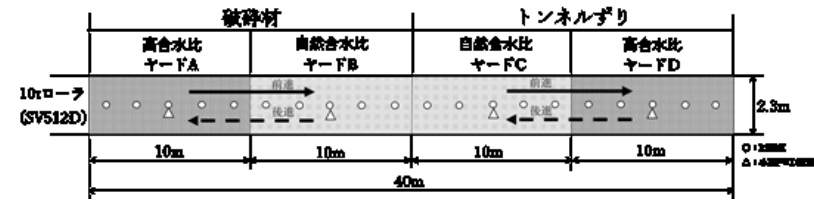
図-5(a)(b)を準備した。本論文の主眼が加速度応答法とその周辺技術にある事と紙面の関係から、転圧性状に関しては文献⁶⁾⁷⁾⁸⁾を参照されたい。図-5を見ると、いづれのヤードにおいても人為的に加水した高含水比ヤードはむしろ最適含水比に近く、締固め密度も自然含水比ヤードより大となる結果となった(室内締固め特性に対応。現場密度は最終的にはB法あるいはE法の室内締固め密度付近まで上昇)。なお礫(C-40)や試験盛土Bの結果を見ると、これら粗粒材料の自然含水比は最適含水比のドライ側に位置し、現場で極端な加水を試みても最適含水比を大きく超える状態には至らなかった(透水性の高さによる)。砂(スクリーニングス)の湿潤側ヤードは転圧面が倦んだ状態となり地表面からの水の滲み出しが観察された。粘土ヤードは初期含水比では振動ローラの走破性が確保できなかったため石灰を50kg、100kg/m³添加して試験に供した(この結果E,Fヤードは結果的に類似した挙動となった)。

盛土材料 含水状態 ヤード名	(a) 砕石C-40		待機 ゾーン	(b) スクリーニングス		待機 ゾーン	(c) 粘土(安定処理)	
	自然含水比	高含水比		自然含水比	高含水比		100kg [※]	50kg
10tローラ	前進 →	後進 ←		前進 →	後進 ←		前進 →	後進 ←
	後進 ←	前進 →		後進 ←	前進 →		後進 ←	前進 →
4tローラ	前進 →	後進 ←		前進 →	後進 ←		前進 →	後進 ←
	後進 ←	前進 →		後進 ←	前進 →		後進 ←	前進 →
延長	5m	5m	3m	5m	5m	3m	5m	5m



① 試験盛土A 全景 ② 湿潤ヤード加水状況

図-3(a) 試験盛土Aのヤード平面と盛土全景及び高含水比ヤード加水状況



① 試験盛土B 造成状況 ② 湿潤ヤード加水状況

図-3(b) 試験盛土Bのヤード平面と盛土造成及び高含水比ヤードの加水状況

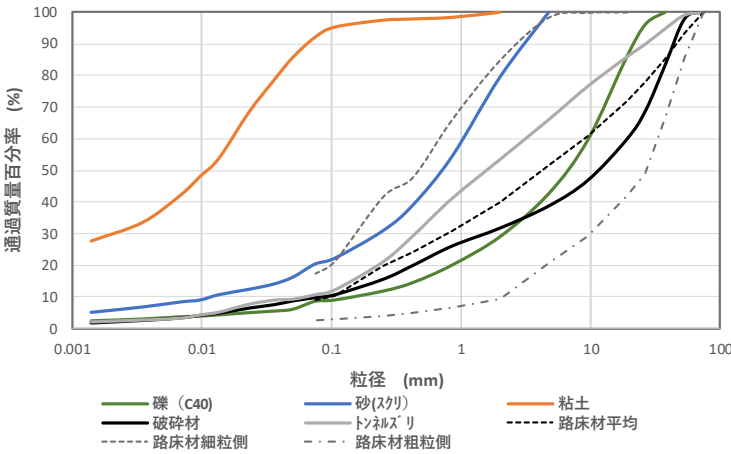


図-4 試験盛土で用いた材料の粒度特性と路床材の粒度範囲

表-2 試験盛土で用いた振動ローラの諸元

	10t roller (SV514D)	4t roller (SW354W-K)
Weight [kg]	11,740	2,940
Width of Compaction [mm]	2,130	1,200
Vibration Force [kN]	255.0	20.6
Frequency [Hz]	28.8	55.0

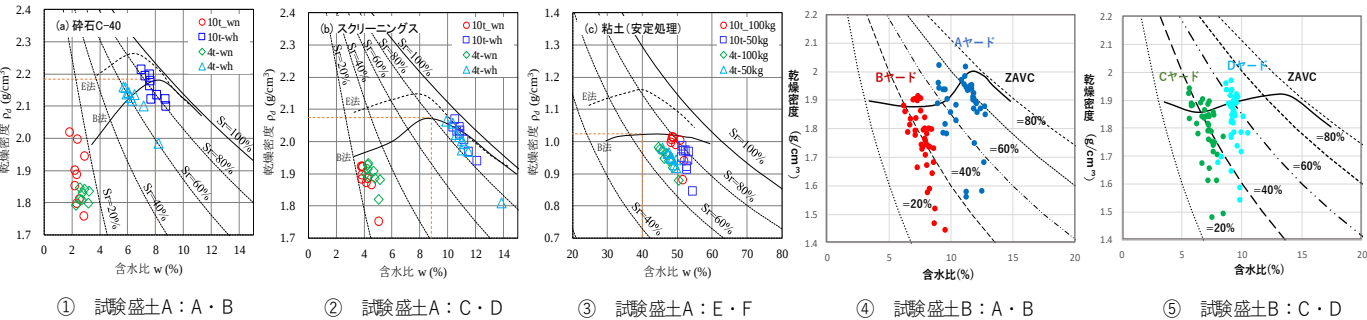


図-5 試験盛土A,Bにおける転圧に伴う乾燥密度の変化(盛土BはE法による締固め曲線を示した)

4. 新しい ICT 土工品質管理手法に関する幾つかの検証及び試行結果

4.1 材料と含水比の組合せが加速度応答値に及ぼす影響

振動ローラの加速度応答値が材料と含水比(飽和度)の組合せにより変化する事は従前よりよく知られている²⁾³⁾。試験盛土 A, B でこれを再確認した結果が図-6 であり, 各レーン毎の含水比, 飽和度, 加速度応答値の距離程データを連続的に表示した。加速度応答値は CCV と乱れ率 (α システム) の 2 種類を並行計測したが両者はほぼ 1:1 に対応する⁷⁾。図より, 加速度応答値が材料と含水比の組合せに応じて変化する事, 高含水比(飽和度)ヤード, 特に飽和度が 80%を超える条件下では加速度応答値が大きく低減する事が再確認できる。図-7 は図-2(a) の模式図を意識して同様の整理を試みた結果である(横軸を対数にしたのは図を見やすくするためであり特段の意味はない)。現場施工データを逐次図のように蓄積・分析していく事で, 転圧面における盛土材料と含水比の変動の様子をリアルタイムに捉えようとする事が第一の試みとなる。図-7(b) の縦軸の範囲を図-7(a) 中に併記した。この点の説明は次節に譲る。

4.2 加速度応答値と既存管理指標値の転圧収斂性の比較結果

第二の試みは転圧回数の増加に伴う各指標の収斂傾向を利用するものである。図-8 は, 2 つの試験盛土で得られた加速度応答値と転圧回数の関係を示す。礫質や砂質で自然含水比状態の場合, 加速度応答値は概ね転圧回数の増加と

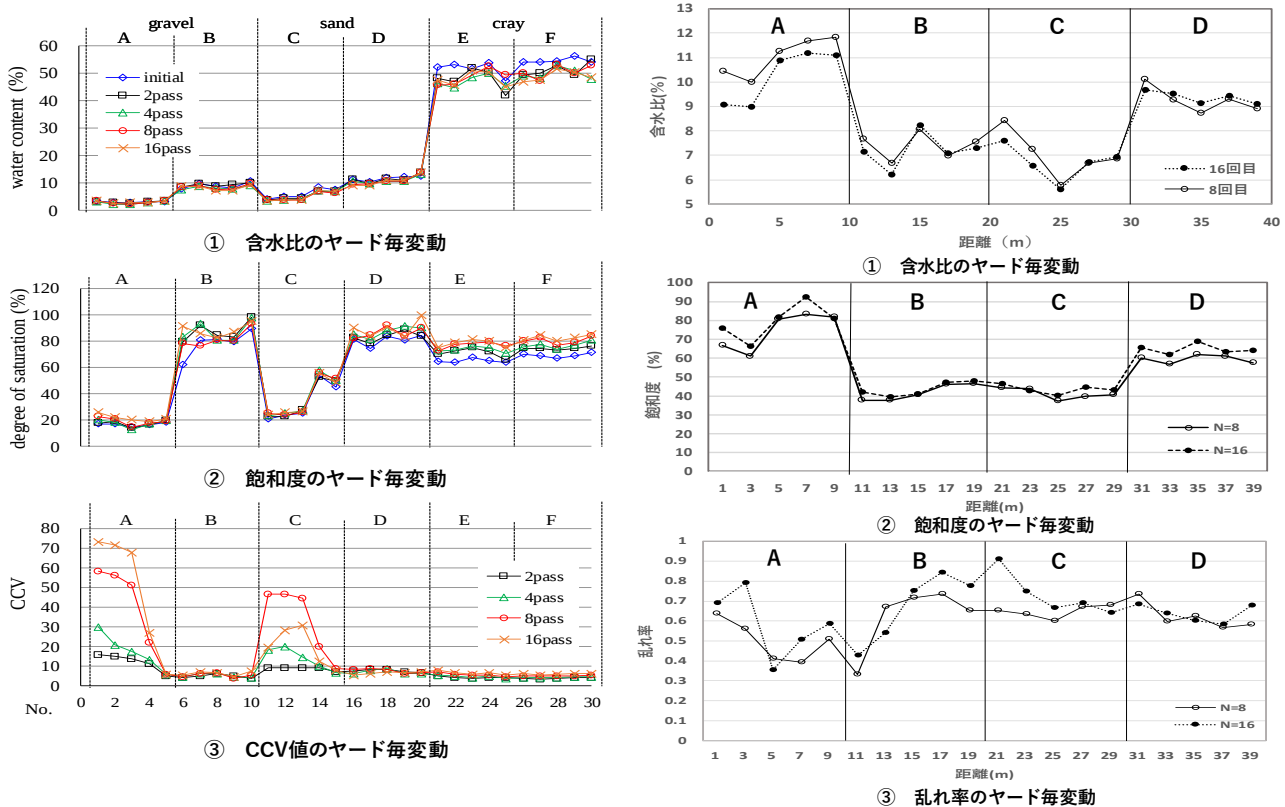


図-6(a) 材料・含水比・飽和度と加速度応答値の関係(試験盛土 A 10t)

図 6-(b) 試験盛土 B

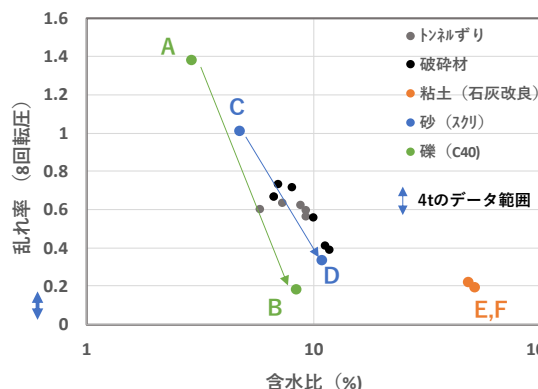


図-7(a) 含水比と乱れ率の関係(10t ローラ, 8 回転圧)

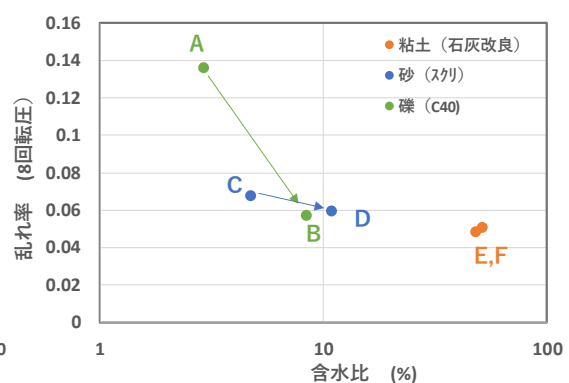


図 7-(b) 4t ローラ 8 回転圧

共に次第に収斂する傾向を示すが、含水比や飽和度が高くなると加速度応答値自体が小さくなるだけでなく、転圧に伴う収斂性も悪化する。試験盛土 A, B の加水ヤード B, D (③の拡大図参照) がこれに相当するが、粘性土 E, F であっても 10t 級ローラかつ飽和度 80%以下であればそれなりの収斂性を示す事は興味深い。④に示すように 4t ローラは振幅 (=振動輪のジャンプ量) が小さく加速度応答値そのものが小さい。振動ローラを地盤剛性検出装置と見た場合その分解能が低い事を示しており、4t ローラによって転圧収斂性を精緻に検出する事は中々難しそうである。では、試験施工時に転圧収斂の確認に用いられるレベル沈下量や乾燥密度の収斂性はどうか。図-9 は、16 回転圧時の値を 1 として正規化した収斂カーブを作成し、沈下・乾燥密度・加速度応答値の 3 者を重ね合わせてみた結果である。

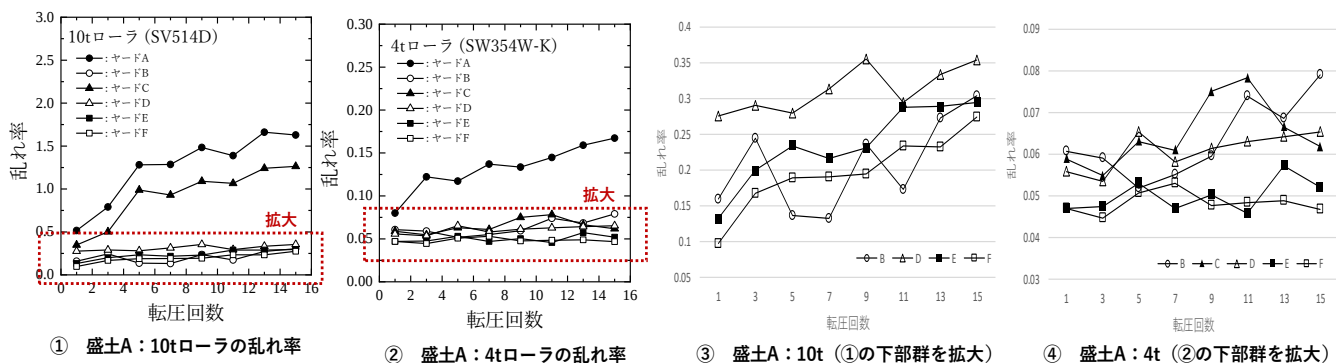


図-8 加速度応答値と転圧回数関係 (試験盛土 A)

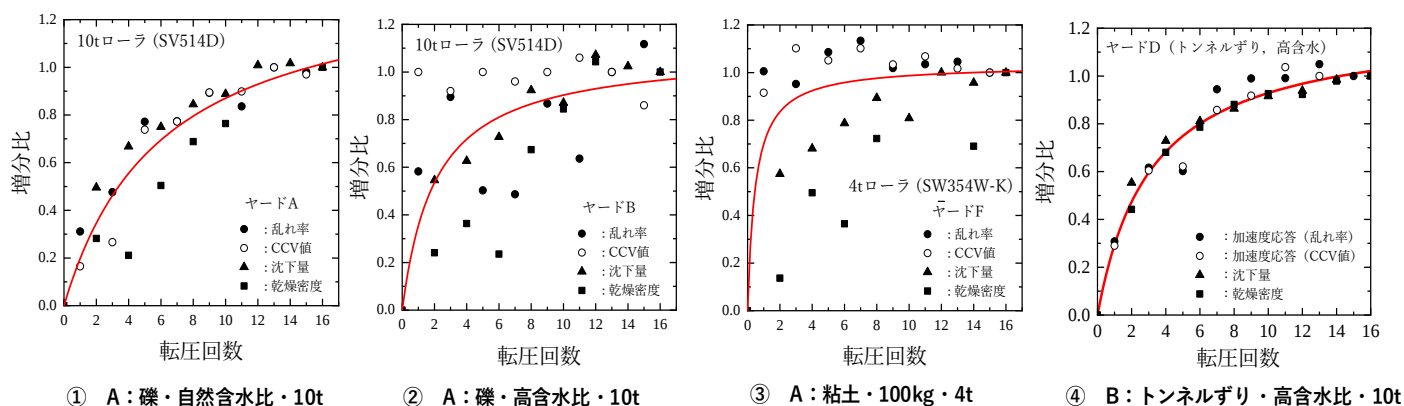


図-9 加速度応答値・沈下量・乾燥密度の転圧回数に対する収斂性比較 (試験盛土 A, B 一部を抜粋)

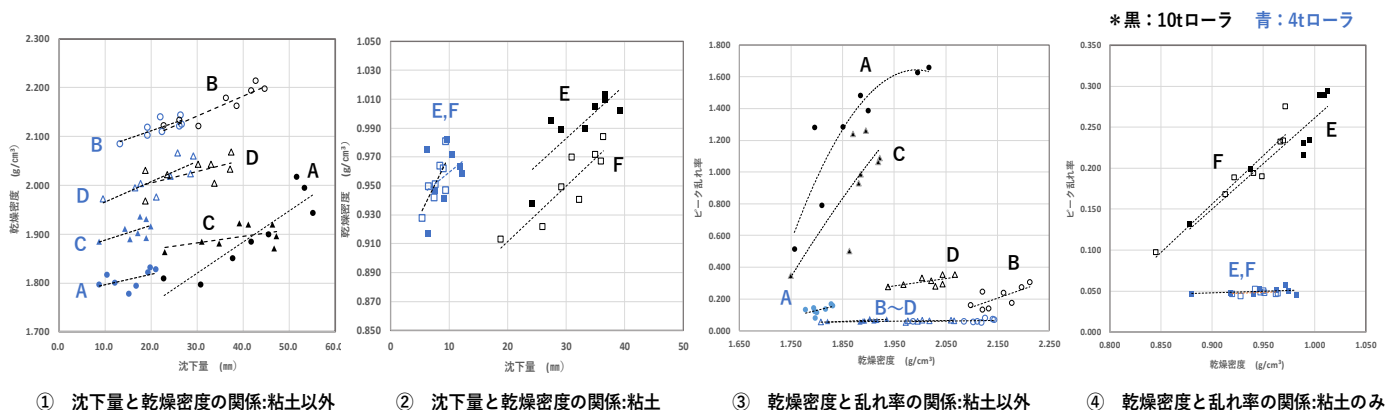


図-10 加速度応答値・沈下量・乾燥密度の相互関係 (試験盛土 A)

表-3(a) 転圧時収斂性の判定結果

	礫質土		砂質土		粘性土	
	低含水比	高含水比	低含水比	高含水比	低含水比	高含水比
10t級振動ローラ	○	×	○	×	○	○
4t級振動ローラ	○	×	×	×	×	×

表-3(b) 材料変動に対する内部判定の考え方

		加速度応答値の絶対値	
		一定	変動
転圧に伴う収斂傾向	一定	両者共に一定	主に材料が変動
	変動	主に含水比が変動	両者が変動 (分離不可)

紙面の関係から一部のみ示したが、各指標の収斂性が一致する場合（礫質＋自然含水比＋大型ローラの組合せ）とそうでない場合（逆方向の組合せ）が様々に生じている事が見て取れる。図-10 は 3 指標のそれぞれの間の関係性を調べた結果であり、材料・含水比・ローラ規模の組合せに応じて次第にこれらの関係性が崩れていく（＝転圧収斂性も崩れていく）様子を表している。なお、実路床材料を用いた試験盛土 B では、加水の有無に関係なく良好な収斂性を確認する事ができた。表-3(a) は、これを定性的に整理した結果である。図中の○の組合せでは、加速度応答値の収斂性をリアルタイムに確認する事で、転圧時沈下や密度増加の収斂を間接的に評価する事が可能となる。図-7 と図-9 を照らし合わせると、表-3(b) のような内部判定ロジックが見えてくる。加速度応答値の絶対値と収斂性の変化を追跡する事で、材料と含水比のどちらが変化しているのかを概ね判定できるかもしれない。しかし、両者が同時に変化した場合、加速度応答法はお手上げである。その際の有望な対処法の一つが、次に述べる移動式散乱型 RI である。

4.3 新たな ICT 管理指標（GNSS(Z) および移動式散乱型 RI）の適用性試行事例

図-11、図-12 に、試験盛土 B における移動式散乱型 RI の試行状況と試行結果を示す。導入した装置はプロト機であるが、実際の転圧面で人力により移動させ GPS による緯度経度の取得が可能である事も確認した（これらを連動させれば含水比ヒートマップが描ける）。図-12 に示すように、散乱型 RI による含水比は従来の透過型 RI や炉乾燥法に比べて実務上遜色ない精度で計測が行なわれており、③に示すように距離程に対するプロットを見ても加水による高含水比ゾーンの境界を明瞭に捉えている事が判る。残された課題は機械の開発及び、施工中あるいは 1 層転圧後に迅速に現地を走行しながらデータを取得する際の精度の確保である。図-13 は第三の試み、GNSSZ 方向データによる転圧時沈下の直接評価の試行結果である。10t ローラでは転圧初期の収斂こそ何とか捉えているものの、複数の衛星にまたがるリアルタイム計測ではどうしても連続性のあるデータを取得する事が難しいのが現状である。GNSS 衛星測位の精度向上を待つ必要はあるが、現状においては現場転圧面の多点データに対して統計処理を施すなど、後処理による解消の可能性を模索したい。図-14 は、地盤剛性に基づく面的管理手法（表-2 の④）に関する検討例である。地盤剛性のヒートマップ出力は既に実装済みの機能であり、ここから最弱面を抽出する事は難しくない。現状の乾燥密度の面的管理 (M2) から地盤剛性の面的管理（キャリブレーション不要）に移行するためには、再度加速度応答法で求まる変形係数 E_{roller} と路床設計等で用いられる地盤剛性 E の関係性について整理する事が必要と考えている。また試験施工時に簡易な小型 FWD による転圧地盤剛性 E_{FWD} の確認が出来れば、想定する相関性を現地確認したり、剛性デ



図-11 移動式散乱型 RI プロット機と試行状況（試験盛土 B）

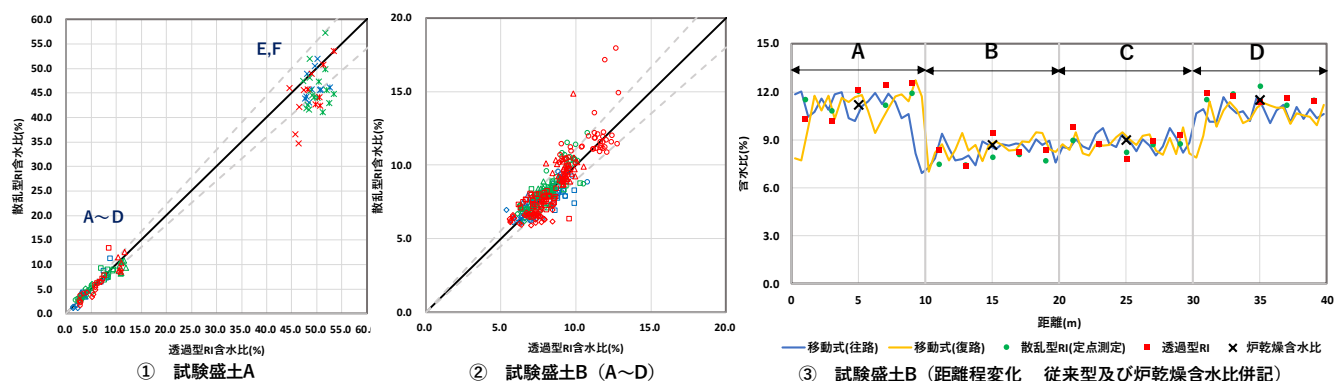


図-12 移動式散乱型 RI プロット機による試行結果（試験盛土 A, B）

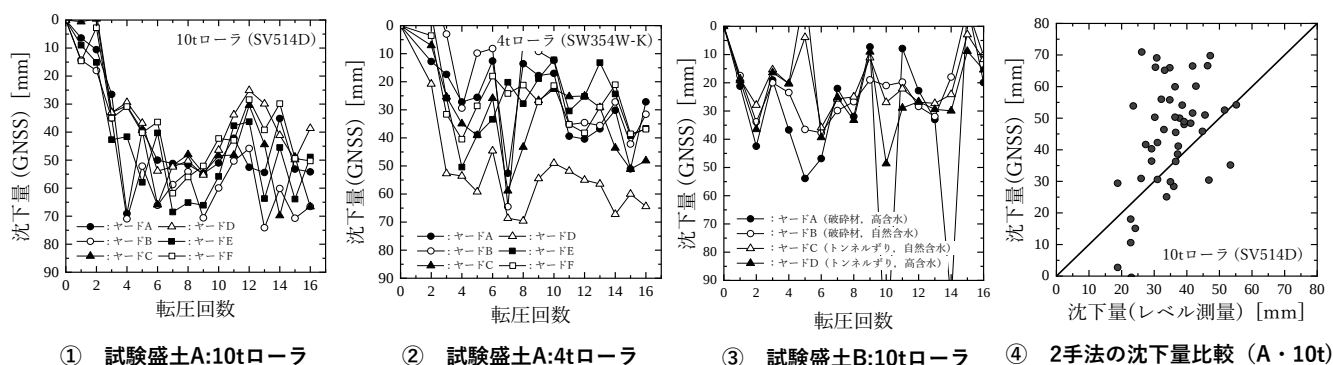


図-13 GNSS (Z) 計測による転圧回数収斂判定の試み (試験盛土 A, B)

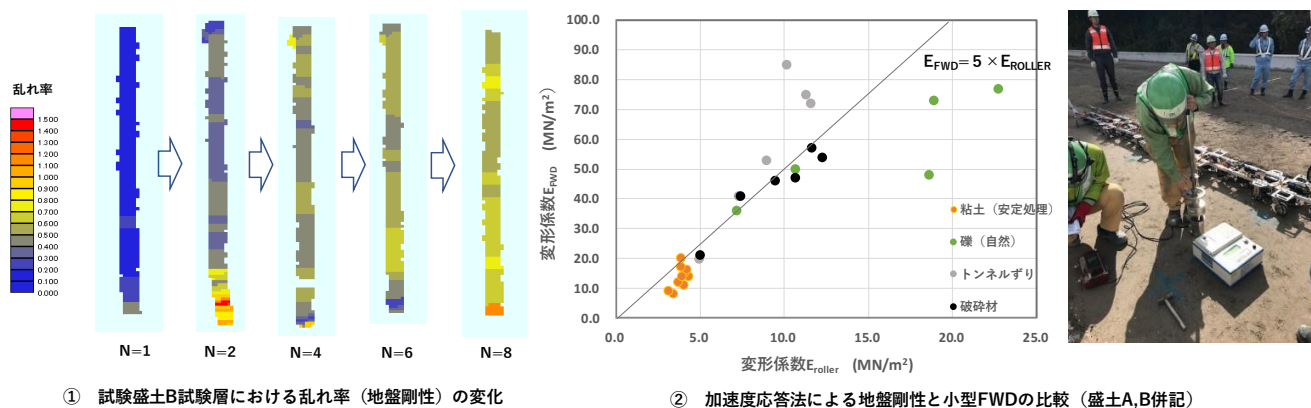


図-14 地盤剛性に基づく面的リアルタイム管理手法 (M2, M3) に対する試行例 (試験盛土 B)

ータの蓄積と相関式のさらなる精緻化を図っていくことも可能になるのではと思われる。図-14 中には今回の試験盛土 A, B で得られた E_{roller} と E_{FWD} の関係を整理した一例を併記した (10t ローラで収斂性を確認したケースを主に抽出)。両者には正の相関が確認できるが、加速度応答法と小型 FWD の計測条件の違い (計測領域、ひずみレベル、ひずみ速度効果等) を勘案しつつ、データの持つ意味や設計思想との関連性を議論していく事が肝要と思われる。

5. おわりに

加速度応答法を中核とした新たな ICT 土工品質管理手法の展望と試行状況を報告した。将来的には振動ローラに搭載した解析装置の中に加速度応答値や GNSS3 成分データ、移動式 RI 含水比データ等の ICT 指標をすべて取り込み、転圧回数や緯度経度情報との紐づけを行いたい。そのうえで図-2 に示したような内部判定を解析装置の内部で行い、現場の転圧状況や剛性弱部、あるいは材料と含水比の変動データ (原因系データ) の保存から帳票出力までを一気通貫で行うシステムの構築を構想している。加速度応答値と材料・含水比の関連性 DB の構築、材料変動や転圧収斂判定のアルゴリズム構築、移動式散乱型 RI の機械開発と精度確認、GNSS (Z) データの精度向上 (あるいは統計的補正)、加速度応答法による地盤剛性 E_{roller} と設計変形係数の関係性検討など、残された技術的課題は数多い。「道なお、いまだ遠し」である。

【参考文献】1) 建山・藤山・西谷: 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, 231-237, 1996. 12. 2) 藤山・建山: 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, 115-123, 2000. 6. 3) 藤山ら: 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, 169-179, 2002. 4) ネクスコ土工施工要領: XI ローラ加速度応答法を用いた盛土の品質管理案, 平成 29 年 7 月. 5) 橋本毅: ドイツにおける ICT を利用した締固め管理技術, 建設の施工企画 '10, 3. 6) 中村ら: 振動ローラ加速度応答の土質及び含水状態による変化 (その 1) ~ 現場密度・地表面沈下・FWD 測定 ~ 第 54 回地盤工学研究発表会. 7) 平田ら: 振動ローラ加速度応答と乾燥密度・沈下量の相関性について, 第 75 回土木学会年次学術講演会, 2020. 8) 安部ら: 盛土の密実性と強度と含水比の関係, 第 75 回土木学会年次学術講演会, 2020.