

加速度応答システムの地盤剛性測定への適用性評価 (土中水分による影響)

橋本 毅・藤野健一・茂木正晴

1. はじめに

振動締固め機械の振動挙動が接する地盤の剛性の影響を受けることを利用し、機械に搭載した加速度計の信号を解析して地盤剛性を推定する手法が、これまで大型の振動ローラや小型の前後進コンパクタなどで商品化されている。このシステムは国内では一般的に「加速度応答システム（以下「システム」という。）」と呼ばれ、地盤剛性を面的に締固め施工を行いながら確認できるため、施工の効率化や地盤剛性計測作業の省力化などを可能とする技術として注目されている。

土木研究所では民間企業10社と共同で「盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する共同研究」を平成23～25年度に実施し、その中で複数のシステム、振動ローラ、前後進コンパクタ、土質条件による加速度応答システム表示値と地盤剛性との関係を測定し、加速度応答システムの地盤剛性測定器としての適用性を調査してきた。本報ではその実験結果のうち、砂質土を用いた結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用システム・使用締固め機械

本実験で使用したシステムの詳細情報を表-1、2に示す。

システムは、振動締固め機械の振動部に加速度計を取り付け、その信号を各メーカー独自の手法で解析し、地盤剛性推定値をリアルタイムで表示するものである。振動ローラ用システムでは車載PCにて結果を記録することができ、GNSSなどによる位置情報と組み合わせることも可能である。前後進コンパクタ用のシステムは、現在では記録や位置情報とのリンクを行うことができず、解析結果を機体に搭載された複数のLEDによりオペレータに表示している（点灯個数が多いほど剛性が高い）。図-1に前後進コンパクタ用システムの

概略を、表-3、4に本実験で使用した搭載締固め機械の仕様を示す。

表-1 振動ローラ用加速度応答システム

システム名	α	CCV	Evib
メーカー	αシステム研究会	酒井重工	BOMAG
出力値	乱れ率	CCV 値	Evib 値
搭載可能ローラ	SV512 BW141	SV512 BW141	BW141

表-2 前後進コンパクタ用加速度応答システム

システム名	COMPASS	ECONOMIZER
メーカー	三笠産業	BOMAG
出力値	LED 点灯個数	LED 点灯個数
搭載可能前後進コンパクタ	MVH-306 MVH-406	BPR45/55D

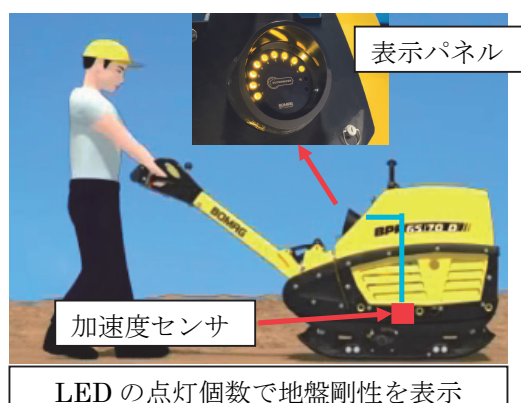


図-1 前後進コンパクタ用システム概略

表-3 振動ローラ仕様

メーカー	酒井	BOMAG
型式	SV512D	BW141AD-4AM
総質量 (kg)	11050	8700
振動輪荷重(kg)	5700	4550
起振力 (kN)	226	144
振動数 (Hz)	27.5	45
締固め幅 (m)	2.13	1.5
搭載システム	α, CCV	α, CCV, Evib

表-4 前後進コンパクタ仕様

メーカー	三笠	三笠	BOMAG
型式	MVH-306 DSC-PAS	MVH-406 DSC-PAS	BPR45/55D
総質量 (kg)	330	410	396
起振力 (kN)	45	50	45
振動数 (Hz)	73	73	70
締固め幅 (m)	0.445	0.5	0.55
実験F溝幅(m)	0.5	0.55	0.6
搭載システム	COM PASS	COM PASS	ECONO MIZER

表-5 材料の物理特性

呼称	土質 (1)	土質 (2)	土質 (3)	土質 (4)
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.647	2.666	2.675	2.681
最大粒径 D_{max} (mm)	9.5	9.5	9.5	19.0
細粒分含有率 F_c (%)	4.3	14.8	15.3	33.4
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.571	1.625	1.674	1.666
最適含水比 w_{opt} (%)	18.2	17.8	16.0	18.8

注) 最大乾燥密度、最適含水比：JIS A 1210 A-c 法

表-6 実験パターン表

土質	(1)		(2)		(3)		(4)
目標実験時含水比(%)	16.0	16.0	17.0	17.0	10.0	15.0	16.0
	付近	付近	付近	付近	付近	付近	付近
SV512		○	○	○	○	○	○
BW141	○	○	○				○
MVH-306	○		○				○
MVH-406	○						○
BPR45/55D				○	○	○	

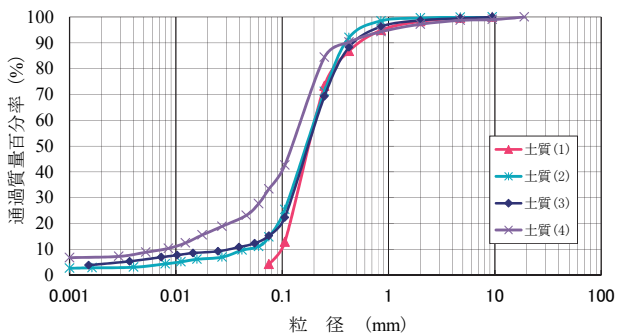


図-2 粒径加積曲線



写真-1 振動ローラ (SV512) 実験状況

2.2 実験土質・実験パターン

本実験で使用した土の物理特性を表-5 に、粒径加積曲線を図-2 に示す。また、実施した実験パターンを表-6 に示す。

2.3 実験フィールド

実験は土木研究所土工実験施設内の実験ピット(幅 5m, 長さ 44.8m, 深さ 4m)を使用した。ピット底面の影響を受けないように、振動ローラの場合は、山砂を用いてピット底面より高さ 2.8m まで十分に締固められた基礎地盤をピット内に製作し、その上に表-5 に示す実験材料を表-6 に示す目標含水比付近になるよう調整し、仕上がり厚さ 300mm になるよう盛り立てて実験フィールドを製作した。前後進コンパクタの場合は、同様の基礎地盤を高さ 3.0m まで作成し、その基礎地盤の壁際に、各締固め機械の接地幅に応じて設定された溝幅(表-4 の実験 F 溝幅)×長さ 25m×深さ 0.3m の溝を掘削し、そこへ同様に実験材料を仕上がり厚さ 300mm になるよう盛り立てて実験フィールドを製作した。

2.4 データ計測方法

上記実験フィールド上を、各締固め機械にて 16 回締固めを行い(8 往復)、0、2、4、6、8、12、16 回時の地盤剛性、システム表示値を測定した。実験状況を写真-1 に示す。

地盤剛性値は超小型動的平板載荷試験装置(アプライドリサーチ社製:IST03)を用いて実験フィールド区間内の 3 点で行い平均値を採用することとした。この装置は平板載荷試験や小型 FWD などと同様の地盤反力係数 K_{30} 値を測定できることが参考文献 1)や予備実験などによって確認されている。またシステム表示値は、振動ローラにおいては車載 PC にて各締固め回数時の値を記録し平均値を算出した。前後進コンパクタにおいては各締固め回数時の LED 点灯状況をビデオ撮影し「平均 LED 点灯個数」を算出した。

3. 実験結果

実験結果の一例として、MVH-306 における平均 LED 点灯個数と地盤剛性値との関係を図-3 に示す。(近似曲線と相関係数も併せて示す)

図-3 の土質(1)および(4)のように、システム値(平均 LED 点灯個数)と地盤剛性値との相関係数が 0.7 以上あり強い正の相関がある場合は、システム値から地盤剛性値を推定することが可能であり、システムの適用性が高いといえる。従って、相関係数が 0.7 を超えているか否かで、システムの適用性を評価することが可能である。

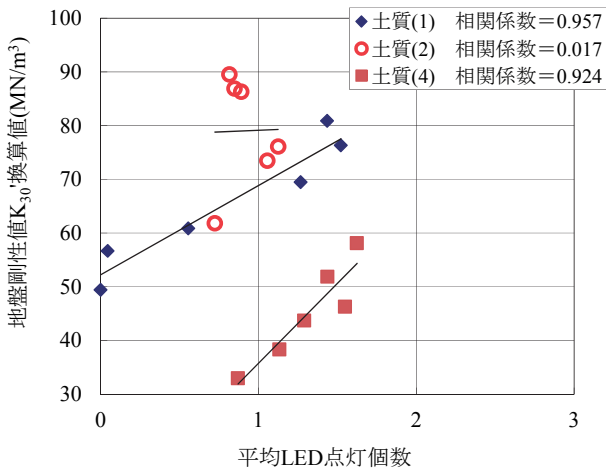


図-3 平均LED点灯個数－地盤剛性値 (MVH-306)

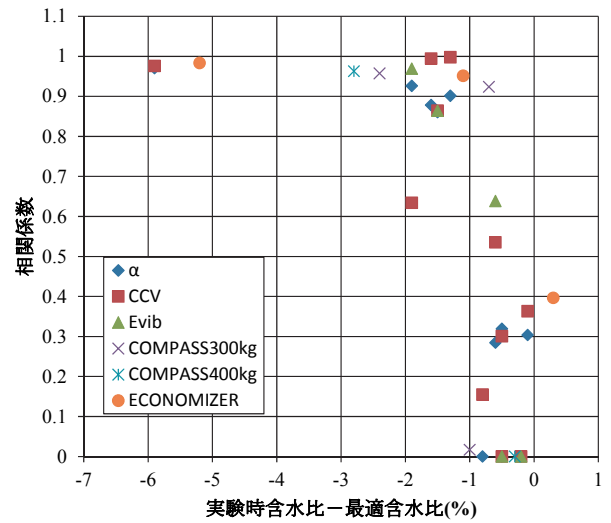


図-4 (実験時含水比－最適含水比)－相関係数

表-7 強い正の相関の有無および実験時含水比

土質	(1)	(2)	(3)			(4)
最適含水比 (%)	18.2	17.8	16.0			18.8
目標実験時含水比 (%)	16.0 付近	16.0 付近	17.0 付近	10.0 付近	15.0 付近	16.0 付近
SV512 α		●	○	●	●	○
		16.2	17.0	10.1	14.7	15.9
SV512 CCV		●	○	●	●	○
		16.2	17.0	10.1	14.7	15.9
BW141 α	●	●	○			○
	16.3	16.3	17.3			15.8
BW141 CCV	○	●	○			○
	16.3	16.3	17.3			15.8
BW141 Evib	●	●	○			○
	16.3	16.3	17.3			15.8
MVH-306 COMPASS	●		○			●
	15.8		16.8			18.1
MVH-406 COMPASS	●					○
	15.4					18.5
BPR45/55D ECONOMIZER			●	●	○	
			10.8	14.9	16.3	

● : 相関係数 0.7 以上 ○ : 相関係数 0.7 未満
 下段 : 実験時含水比

すべての実験ケースにおける相関係数を算出し、0.7 以上の強い正の相関を示す場合を黒丸にて表したものを、表-7 に示す。なお、表には実験時含水比も併せて示している。

表-7 によると、相関係数が 0.7 以上か否かは、締固め機械、システムの違いによる明確な傾向はない。また、土質(2)、(3)の結果から、同じ土質でも含水比が低い場合は相関係数が 0.7 以上あり、高い場合は 0.7 未満となっている。従って相関係数が 0.7 以上か否かは締固め機械やシステムではなく含水比に影響を受けていると考えられる。

これは、実験中の土表面状態が、相関係数が 0.7 を下回る場合は表面に水がしみ出ていることが多く、逆に 0.7 を上回る場合は表面はほぼ乾燥したままであったことから推察できる。

そこですべての実験ケースにおける相関係数を、各実験時の含水比と各土質の最適含水比との差(実験時含水比－最適含水比(%))でまとめたものを図-4 に示す。なお、図中では相関係数が負になった場合はすべて 0 (ゼロ) にて表している。

図-4 によると、実験時含水比－最適含水比が、約-1%より小さい(実験時含水比が乾燥側)場合は、相関係数がおおむね 0.7 以上あり、約-1%より大きい(実験時含水比が湿潤側)場合は相関係数が 0.7 より低くなっていることがわかる。

以上から、システムの適用性は含水比の影響を受け、施工時含水比を最適含水比 (JIS A 1210 A-c 法で求めた) より 1%以上乾燥側にて締固め施工を行えば、適用性が高いことになる。

4. 含水比に影響を受ける理由の考察

システムの適用性が含水比に影響を受ける理由を考察するために、土粒子間の水の状態を表す指標のひとつである飽和度にてデータを整理することを考える。図-4 の相関係数を施工終了後(16回締固め後)の飽和度にて整理したものを図-5 に示す。飽和度は 16 回締固め後の地盤 3 カ所の含水比と密度をコアサンプルにて測定し、平均値から算出した。図-5 によると、ばらつきはあるが概ね飽和度 70~80%を境に図-4 と同様な傾向

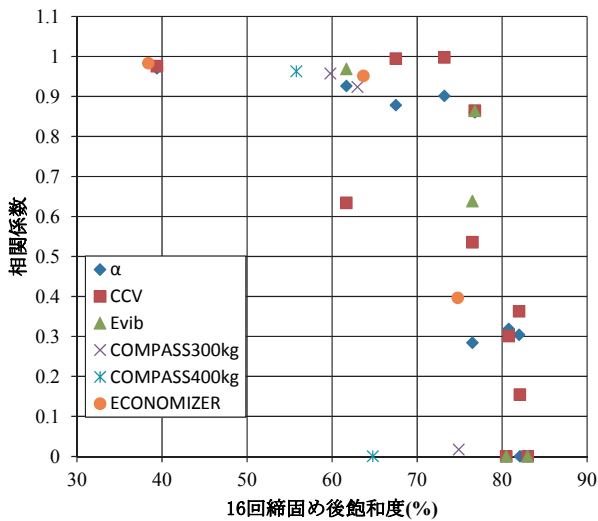


図-5 16回締固め後飽和度－相関係数

の変化が見られることがわかる。

文献 2)によると、外力によって土が変形するときの抵抗力は、飽和度約 70%程度より低い場合には土粒子間に懸架された水の表面張力によって発生する土粒子間摩擦力が主体であり、約 70%程度より高い場合には土粒子間からの水の排出抵抗が主体であるとしている²⁾。このことを参考にすると、IST03（や小型 FWD）などのように単発の衝撃を与える地盤剛性測定機器と、細かい振動を与える加速度応答システムは、土粒子間摩擦力が主体の場合は同じ傾向を示すが、排出抵抗が主体の場合は土粒子間から水を排出させるメカニズムが異なるため両者の傾向に違いが生じ、それにより両者の相関が低下する、すなわち加速度応答システムの適用性が悪化するのではないかと考えられる。

今後さらにデータを蓄積するとともに、水の排出メカニズムについても研究を進め、加速度応答システムの適用範囲の拡大を検討していきたい。

5. まとめ

本研究の結果、本実験条件の範囲内であれば、以下のことがいえる。

- 1) 加速度応答システムの適用性は、締固め機械の違い、システムの違いに影響を受けない。
- 2) 加速度応答システムの適用性は、含水比に影響を受け、施工時含水比を（JIS A 1210 A-c 法で求めた）最適含水比より 1%以上乾燥側で施工を行えば適用性が高い。
- 3) システムの適用性が含水比に影響を受ける理由には、飽和度が関わっていると考えられる。今後さらなる研究が必要である。

本研究をさらに進め加速度応答システムの適用範囲を明らかにすることにより、施工の効率化や地盤剛性計測作業の省力化などが可能となることが期待できる。今後の課題の一つとして、図-3の例のようにシステム表示値が土質条件によっては非常に低い値となってしまうため、土質条件による表示レンジの調整機構などが必要な点が挙げられる。今後の開発に期待したい。

また龍岡らによると、最近の振動締固め機械は室内試験（JIS A 1210 A-c）より高い締固めエネルギーを発揮できるため、室内試験で求めた最適含水比より乾燥側が振動締固め機械を用いる場合の最適含水比であるとしている³⁾。今後システムの適用性のみではなく、最適な施工についても検討を行いたい。

参考文献

- 1) 境、極壇：重錘落下による地盤反力係数の測定、第41回地盤工学研究発表会論文集、pp.975～976、2006
- 2) 地盤工学会：土の締固め、pp.7～9、2012
- 3) 龍岡文夫：盛土の締固め②、基礎工、Vol.41、No.8、pp.102～105、2013

橋本 毅



土木研究所技術推進本部先端
技術チーム 主任研究員、工博
Dr.Takeshi HASHIMOTO

藤野健一



土木研究所技術推進本部先端
技術チーム 主任研究員
Kenichi FUJINO

茂木正晴



土木研究所技術推進本部先端
技術チーム 主任研究員
Masaharu MOTEKI