

加速度応答システムの適用性評価

橋本 毅・茂木 正晴・梶田 洋規

振動締め機械の振動挙動が接している地盤の剛性に影響を受けることを利用し、振動締め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システムが、振動ローラや前後進コンパクタなどで商品化されている。このシステムは地盤剛性を面的に施工しながら確認できるため、効率化や省力化などを可能とする技術として注目されている。

(国研) 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、国内で商品化されている複数の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について報告する。

キーワード：締め固め，振動ローラ，振動コンパクタ，加速度応答システム

1. はじめに

振動ローラや平板式振動コンパクタなどの振動締め機械の振動挙動は、接している地盤の剛性の影響を受ける。このことを利用し、振動締め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システムが、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（多点で）、かつ締め固め施工を行いながら確認できるため、品質の確保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。

現在、世界の各メーカーから様々なシステムが商品化されているが（表—1, 2）、すべて振動締め機械の振動部に取り付けた加速度計から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（図—1）では車載 PC 等にて結果を記録し、GNSS 等による位置情報と組み合わせることが可能であるメーカーが多い。一方前後進コンパクタ用システム（図—2）では、現在は記録や位置情報とのリンクを行うことができず、解析結果を機体に登載された複数の LED など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）。

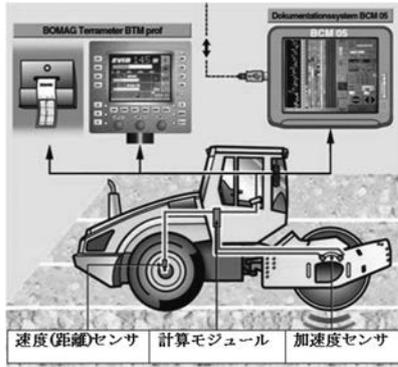
(国研) 土木研究所では民間企業 10 社と共同で「盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する共同研究」を平成 23～25 年度に実施し、その中で国内で商品化されている複数のシステム、複数の振動締め機械、複数の土質条件によるシステムの表示値と地盤剛性との関係を同一の実験条件下で測定し、システムの地盤剛性測定器としての適用性を調査してきた。本報ではその実験結果について報告する。

表—1 主な振動ローラ用加速度応答システム

| システム名 | a | CCV | Evib | ACE | DCA | CMV | CompAnalyser | HCQ |
|-------|------------------|-----------|-------------|--------------|------------------|------------------|----------------|------------|
| メーカー | a システム研究会 (日本) | 酒井重工 (日本) | BOMAG (ドイツ) | AMMANN (スイス) | Dynapac (スウェーデン) | Caterpillar (米国) | VOLVO (スウェーデン) | HAMM (ドイツ) |

表—2 主な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 | ACE | COMPATROL |
|-------|-----------|-------------|--------------|-------------|
| メーカー | 三笠産業 (日本) | BOMAG (ドイツ) | AMMANN (スイス) | Weber (ドイツ) |



図一 1 振動ローラ用システム概略



図一 2 前後進コンパクト用システム概略

表一 6 前後進コンパクト仕様

| | | | |
|-------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 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 |

(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一 7 に、粒径加積曲線を図一 3 に示す。また、実施した実験パターンを表一 8 に示す。実験は、本共同研究全体の計画や予算の都合等により、表一 8 の全パターンについて実施できなかったが、多くの条件によるデータを取得できた。

(3) 実験フィールド

実験は写真一 1 に示す土木研究所土工実験施設内の実験ピット (幅 5 m, 長さ 44.8 m, 深さ 4 m) 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 2.8 m

2. 実験概要

(1) 使用システム・使用締固め機械

実験では国内で入手が可能なシステム、締固め機械を使用した。本実験で使用したシステムの詳細情報を表一 3, 4 に、締固め機械の仕様を表一 5, 6 に示す。

表一 3 実験に使用した振動ローラ用加速度応答システム

| | | | |
|-------|-----------------|-------|--------|
| システム名 | a | CCV | Evib |
| メーカー | a システム 研究会 | 酒井重工 | BOMAG |
| 出力値 | 乱れ率 | CCV 値 | Evib 値 |

表一 4 実験に使用した前後進コンパクト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 |

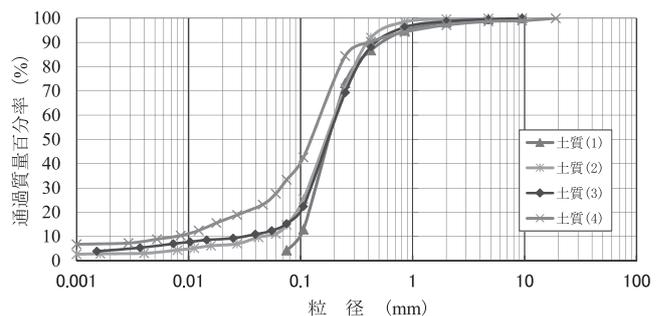
表一 5 振動ローラ仕様

| | | |
|------------|-----------|-----------------|
| 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 | a , CCV | a , CCV, Evib |

表一 7 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 $\rho_{d_{max}}$ (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



図一 3 粒径加積曲線

表一 8 実験パターン表

| 土質 | (1) | | (2) | | (3) | | (4) |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 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 | 18.0 付近 |
| SV512 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| BW141 | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ |
| MVH-306 | ○ | | ○ | | | | ○ |
| MVH-406 | ○ | | | | | | ○ |
| BPR45/55D | | | | ○ | ○ | ○ | |



写真一 実験ピット

まで十分に締固められた基礎地盤をピット内に製作し、その上に表一 7 に示す実験材料を表一 8 に示す目標含水比付近になるよう調整し、仕上がり厚さ 300 mm になるよう盛り立てて実験フィールドを製作した。前後進コンパクトの場合は、同様の基礎地盤を高さ 3.0 m 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 (表一 6 の実験 F 溝幅) × 長さ 25 m × 深さ 0.3 m の溝を掘削し、そこへ同様に実験材料を仕上がり厚さ 300 mm になるよう盛り立てて実験フィールドを製作した。

(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。実験状況を写真一 2, 3 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。測定状況を写真一 4 に示す。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。前後進コンパクト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



写真二 振動ローラ実験状況



写真三 前後進コンパクト実験状況



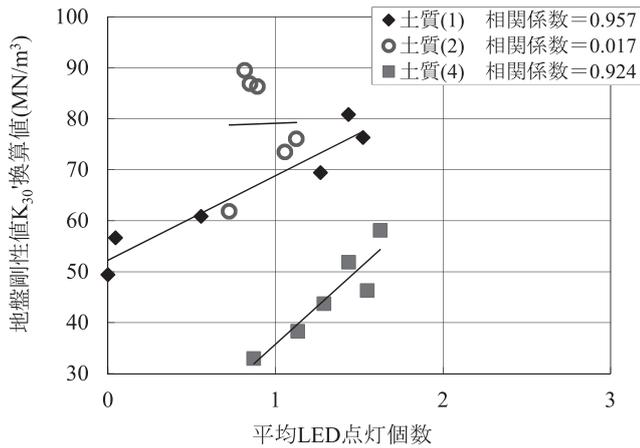
写真四 地盤剛性測定状況

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一 4 に示す (近似曲線と相関係数も併せて示す)。

図一 4 の土質 (1) および (4) のように、システム値 (平均 LED 点灯個数) と地盤剛性値の両者に強い正の相関がある場合は、システム値から地盤剛性値



図一 4 平均 LED 点灯個数と地盤剛性値の関係 (MVH-306)

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。しかし、土質 (2) のように、両者に相関がない場合は、システム値から地盤剛性値を推定することが困難であり、システムの適用性は低いことになる。文献 2) などによると、一般的な目安として、相関係数が 0.7 以上あれば両者にかなり強い正の相関があると判断できる。そこで本報では相関係数が 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とした。

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、表一 9 に示す。なお、表には実験時含水比も併せて示している。

表一 9 強い正の相関の有無および実験時含水比

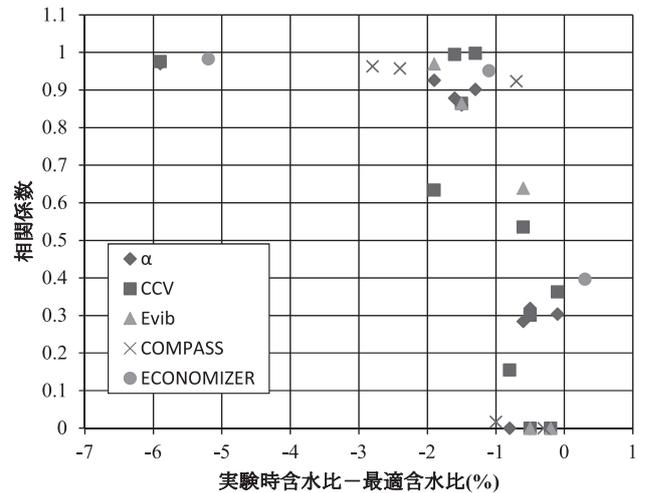
| 土質 | (1) | (2) | (3) | | (4) | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 最適含水比 (%) | 18.2 | 17.8 | 16.0 | | 18.8 | | |
| 目標実験時含水比 (%) | 16.0 | 16.0 | 17.0 | 10.0 | 15.0 | 16.0 | 18.0 |
| 付近 | 付近 | 付近 | 付近 | 付近 | 付近 | 付近 | |
| SV512 α | | ● | ○ | ● | ● | ○ | ○ |
| 16.2 | 17.0 | 10.1 | 14.7 | 15.9 | 18.3 | | |
| SV512 CCV | | ● | ○ | ● | ● | ○ | ○ |
| 16.2 | 17.0 | 10.1 | 14.7 | 15.9 | 18.3 | | |
| BW141 α | ● | ● | ○ | | | ○ | ○ |
| 16.3 | 16.3 | 17.3 | | | 15.8 | 18.2 | |
| BW141 CCV | ○ | ● | ○ | | | ○ | ○ |
| 16.3 | 16.3 | 17.3 | | | 15.8 | 18.2 | |
| BW141 Evib | ● | ● | ○ | | | ○ | ○ |
| 16.3 | 16.3 | 17.3 | | | 15.8 | 18.2 | |
| 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

表一 9 によると、相関係数が 0.7 以上か否かは、締め固め機械、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 以上か否かは締め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一 5 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。



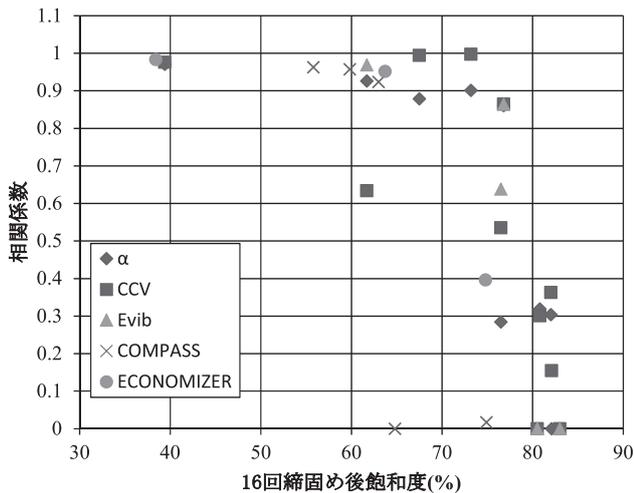
図一 5 (実験時含水比 - 最適含水比) と相関係数の関係

図一 5 によると、実験時含水比 - 最適含水比が、約 -1% を境に傾向の相異があり、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、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% 以上乾燥側にて締め固め施工を行えば、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。



図一六 16回締固め後飽和度と相関係数の関係

図一五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一六に示す。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。図一六によると、ばらつきはあるが概ね飽和度70～80%を境とする形で図一五と同様な傾向の差異が見られることがわかる。これは地盤剛性測定器（本実験ではIST03）とシステムが表す測定値の傾向が、飽和度70～80%を境に異なっていることを示している。

文献3)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%程度より低い場合で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%程度より高い場合で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。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. おわりに

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。

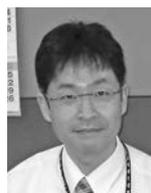
本研究をさらに進め加速度応答システムの適用範囲を明らかにすることにより、システムの現場導入が加速され施工の効率化や地盤剛性計測作業の省力化などが可能となることが期待できる。また、現行商品化されているシステムの課題の一つとして、図一四の例のようにシステム表示値が土質条件によっては非常に低い値になってしまうため、値の読み取りが困難になることが挙げられる。今後、土質条件等に応じた表示レンジの調整機構などの開発に期待したい。

JICMA

《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) 柳井, 高値: 新版多変量解析法, p.10, 朝倉書店, 1985.
- 3) 地盤工学会: 土の締固め, pp.7～9, 2012.

【筆者紹介】



橋本 毅 (はしもと たけし)
 (国研) 土木研究所
 技術推進本部先端技術チーム
 主任研究員



茂木 正晴 (もてき まさはる)
 国土交通省関東地方整備局
 関東技術事務所
 技術情報管理官
 (元土木研究所主任研究員)



梶田 洋規 (かじた ひろき)
 (国研) 土木研究所
 技術推進本部先端技術チーム
 上席研究員