

# 多点同期振動データの波形歪みに基づく地盤剛性評価手法の提案

○福田 健太郎<sup>\*1</sup>, 中嶋 一斗<sup>\*1</sup>, 倉爪 亮<sup>\*1</sup>

## A Method for Evaluating Ground Stiffness Based on Waveform Distortion of Multipoint Synchronous Vibration Data

Kentaro Fukuda<sup>\*1</sup>, Kazuto Nakashima<sup>\*1</sup>, and Ryo Kurazume<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 九州大学, Kyushu University

本研究では、振動ローラを用いた転圧作業における新たな地盤剛性の評価手法を提案する。本手法は、作業領域に複数台の振動センサを分散配置し、得られた多点同期振動データの波形歪みに基づき、地盤剛性を評価するものである。シミュレーションによる提案手法の原理確認を行ったのちに、振動ローラを用いた転圧実験にて有用性を実証した。

**Key Words** : 地盤剛性評価, 環境センシング, ローラ加速度, 品質管理

### 1. 緒言

振動ローラによる締固め施工管理は、現在でも転圧回数による方式が主流である。一方、より実際の地盤状況を反映した定量的な評価手法として、振動ローラの加速度応答に基づく方法<sup>(1,2)</sup>が提案されている。この手法は転圧地盤の剛性増加に伴って振動ローラの加速度波形が乱れる現象を用いており、波形の歪み率を定量化している。また、この現象は、剛性の高い地盤に対して振動輪が跳ね上がり、地盤に衝突することで生じると考えられている。

しかし、この加速度応答に基づく方法は、振動源である振動ローラにセンサを取り付けており、計測精度やセンサの耐久性の点で問題がある。本研究では、地盤側に分散配置したセンサから振動データを取得し、地盤剛性の評価を行う新たな手法を提案する。

### 2. 提案手法

本研究では、複数台の振動センサによる多点同期振動データを用いた地盤評価手法を提案する。まず、作業領域周辺に分散配置したN台の振動センサから、振動ローラの走行時区間に対応するx, y, z軸方向 (z:鉛直上向き)の振動の3軸の加速度波形を得る。次に、加速度波形に短時間高速フーリエ変換を適用し、3軸のスペクトログラム $\{s_{t,f}^i\}$ を得る。ただし、 $i \in \{1, \dots, N\}$ は振動センサ番号、 $j \in \{1, 2, 3\}$ はx, y, zに対応した軸番号、 $t$ は時刻、 $f$ は周波数である。さらに、得られたスペクトログラムを次式にしたがって軸合成を行う。

$$\bar{s}_{t,f} = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (s_{t,f}^j)^2} \quad (1)$$

得られた合成スペクトログラム $\bar{s}_{t,f}$ に対して時刻  $t$  ごとの波形歪み率を計算する。本研究では、波形歪み率として周波数スペクトルに基づく地盤剛性指標である CCV (compaction control value) を採用する。CCV の定義式を次式に示す。

$$CCV = \frac{S'_0 + S'_1 + S_1 + S'_2 + S_2}{S'_0 + S_0} \quad (2)$$

ただし、 $S_0$ は振動輪の基本振動数に対するスペクトル、 $S_n$ は  $n$  倍の振動数に対する高調波スペクトル、 $S'_n$ は  $n + 0.5$  倍の周波数に対する1/2分数調波スペクトルである。地盤の剛性が高まると、振動輪の跳ね上がりにより加速度波形が乱れることで  $S_n$  と  $S'_n$  が卓越し、CCV が上昇する。式 (2) より、N 台の振動センサごとに走行経路に対応した時系列 CCV を得る。最後に、時刻ごとに N 個の CCV の平均を算出する

### 3. 実証実験

**3.1 実験環境** 九州大学伊都キャンパス内に設けられた野外実験場にて、振動ローラ(SAKAI SV514D)、高感度振動センサ(小野測器, NP-7310)を用いた転圧データ取得実験を行った。NP-7310 は、x, y, z軸方向の振動が同時に計測可能である。実験では、転圧を行う盛土上に転圧レーンと計測レーンを用意する。転圧レーン

ンでは振動ローラを用いて地盤を 10 往復転圧し、計測レーンでは 5m 間隔で分散配置した振動センサ 4 台により加速度データを計測する。

**3.2 実験結果** 振動輪に直接設置したセンサから算出した従来の CCV を図 1、地盤上に設置した単一のセンサから算出した CCV を図 2 に示す。また、地盤上に設置した 4 台のセンサから得られる CCV を平均した結果(提案手法)を図 3 に示す。図 2、3 中の点線は振動ローラがセンサを通過した時刻を示す。従来手法(図 1)でも転圧回数によって CCV が増加し収束する傾向がみられるが、多点同期振動データを用いた手法(図 3)では転圧回数に関する弁別性が向上していることがわかる。この違いは図 2 に示すように、振動センサから離れた位置で顕著に表れる。

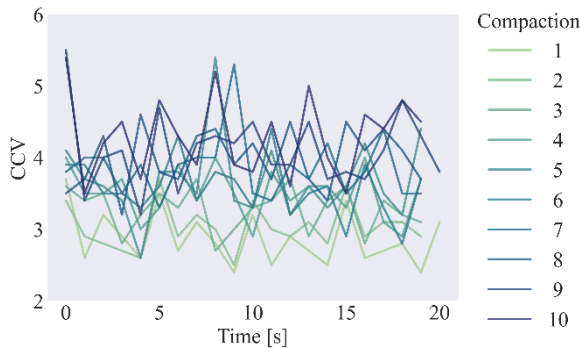


Fig. 1 Conventional CCV calculated from sensors installed directly on the vibrating wheel

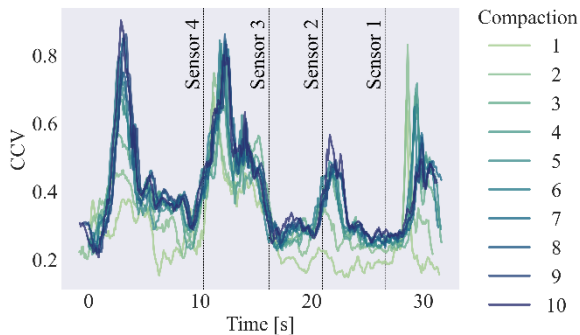


Fig. 2 CCV calculated from a single sensor placed on the ground

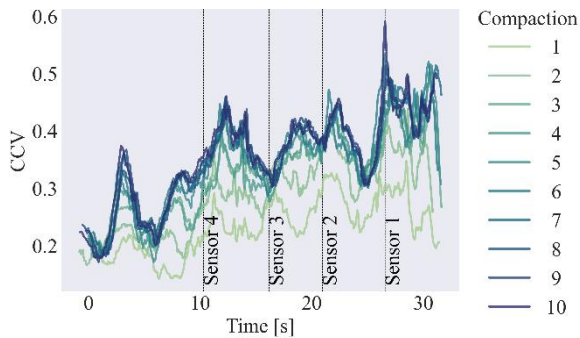
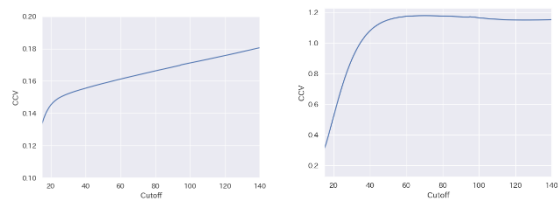


Fig. 3 Results of the proposed method for integrating vibration data from four sensors installed on the ground

**3.3 シミュレーションによる原理確認** 実機実験で得られた弁別性に関する結果の原理を確認するために、提案手法のシミュレーションを行った。本実験では、地盤が受ける衝撃を  $\cos$  波 1.5 周期で近似し、CCV を算出した。また、地盤剛性による振動減衰の変化を模擬するためにローパスフィルタを適用し、転圧回数に応じてカットオフ周波数を高くする。図 4(a), (b)の結果から従来手法では低い値で線形に推移するのに対して、提案手法では序盤の転圧では大きく CCV が向上しており、終盤では収束している。この結果からセンサを外部に設置することで CCV の変化が急峻になることがわかり、転圧回数の弁別性が向上した一因となった可能性がある。



(a) Conventional method (b) Proposed method

Fig. 4 Change in CCV calculated by simulation

## 4. 結言

本稿では、多点同期振動データの波形歪みに基づく地盤評価手法を提案した。提案手法は、振動源である振動ローラにセンサを取り付ける従来手法と異なり、作業領域である地盤上に複数の振動センサを分散配置する。実験では、実機による計測およびシミュレーションによる原理確認を行い、提案手法が CCV の弁別性と収束性において優れていることを確認した。

## 謝辞

本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】グラント番号【JPMJMS2032】の支援を受けたものである。

## 参考文献

- (1) 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, 2000 巻 652 号, pp. 113-123, 2000.
- (2) Hiroshi Yamamoto, Masaharu Moteki, Hui Shao, Kenzi Ootuki, Yuji Yanagisawa, Yuki Sakaida, Akira Nozue, Takashi Yamaguchi and Shinichi Yuta, "Development of the Autonomous Hydraulic Excavator Prototype Using 3-D Information for Motion Planning and Control", IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.49-54, 2010.