

転圧地盤評価のための分散型センサポッドの開発

—第2報 多点同期振動データの波形歪みに基づく地盤剛性の定量化—

Development of Distributed Sensor Pods for Evaluation of Compacted Ground
-Quantification of Ground Stiffness Based on Waveform Distortion of Multipoint Synchronous Vibration Data-

○学 福田 健太郎 (九大) 中嶋 一斗 (九大)

正 倉爪 亮 (九大)

Kentaro FUKUDA, Kyushu University, k_fukuda@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Kazuto NAKASHIMA, Kyushu University, k_nakashima@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Ryo KURAZUME, Kyushu University, kurazume@ait.kyushu-u.ac.jp

In this study, we develop a sensor terminal with multiple and various sensors named sensor pod, which collects various environmental information at a construction site. The sensor pod is equipped with a 3D-LiDAR and a vibration sensor, which can be used to predict the surrounding hazards and evaluate the ground stiffness. In this paper, we introduce a method of evaluating ground stiffness using the waveform distortion of multi-point synchronized vibration data obtained by the distributed sensor pods.

Key Words: Evaluation of Compacted Ground, Construction Robot, Disaster Response

1 緒言

現在我々は「多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット」の研究開発を行っている [1]. ロボットを用いた無人化施工によるインフラ構築では、施工現場での正確な環境情報の取得が重要である。特に作業現場の空間的形状や重機や作業者の位置などの作業環境の三次元情報、およびロボットの走行可能性の予測に必要な地盤強度の評価は、安全な施工や危険箇所の判別に不可欠である。作業環境の三次元情報をもとに、ロボットや重機による効率的な作業計画や安全を担保した作業が実現できる。また、客観的なデータに基づいて地盤強度を適切に評価することにより、締固め作業終了の判定やロボットの安全な走行経路計画が可能となる。そこで本研究では、作業環境の三次元情報の収集と、転圧による地盤強度の評価の実現を目的に、振動計測センサや3D-LiDARを搭載した分散型センサポッドを開発する。本稿では、開発した分散型センサポッドのシステムについて述べた後、地盤評価手法の提案、実証実験の結果について報告する。

2 関連研究

転圧地盤の剛性評価は、現在でも転圧回数による方式が主流であるが、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 [2, 3] が提案されている。特に、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利用する機会が多い。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ものと考えられている。例えば、藤山ら [2] は、周波数スペクトルに基づき加速度応答の歪み率を定量化した指標「乱れ率」を提案している。振動輪の加速度波形に対して周波数スペクトル分析を行うと、起振振動数に対するスペクトル S_0 以外に、高調波スペクトル S_1, S_2, S_3, \dots , あるいは $1/2$ 分数調波スペクトル $S'_0, S'_1, S'_2, S'_3, \dots$ が卓越してくる。乱れ率は、3次までの高調波・分数調波スペクトルと振動ローラの機械諸元(フレーム質量 m_1 , 振動輪質量 m_2 , 起振力 F) を用いて次式で定義される。

$$\text{乱れ率} = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i + \sum_{i=1}^3 S'_i}{\frac{S_0 + S'_0}{F/(m_1 + m_2)g}} \quad (1)$$

また、周波数スペクトルに基づく別の地盤剛性指標としてCCV(compaction control value)がある。CCVでは、乱れ率 [2] と同様に振動スペクトルの比を用いて、以下の波形歪みを定義している。

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

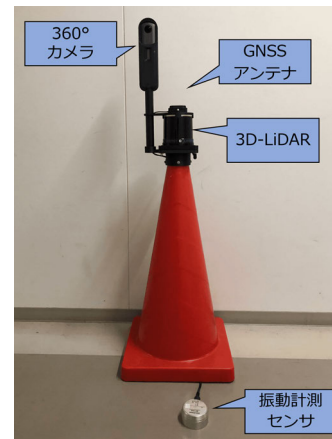


Fig.1 Overview of the sensor pod

しかし、これらの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は振動源である振動ローラにセンサを取り付ける必要がある。そのため、地盤振動の計測精度やセンサの耐久性の点で問題がある。

3 ハードウェア構成

開発したセンサポッドは、3D-LiDAR (Quanergy M8-Plus), 360°カメラ (Ricoh Theta V) など、周囲環境のデータを取得するセンサを搭載している。また土木現場などの広域で情報を収集するには、複数のセンサポッドのデータを統合する必要があり、各センサポッドが設置された位置情報が不可欠である。そこで、各センサポッドにGNSS受信機 (CORE Cohacoo QZNEO) を搭載し、Network-RTK-GNSS (docomo IoT 高精度GNSS位置情報サービス) による高精度自己位置同定を実現した。また、制御用PCとしてIntel社のNUCを搭載した。センサポッドの全体図を図1に示す。開発したセンサポッドは、制御用PC、バッテリーを本体であるカラーコーンに内蔵している。センサポッド間の通信にはWi-Fi (2.4GHz) を用いており、有線接続の必要はない。

さらに、地盤振動の計測のために高精度振動センサ (小野測器, NP-7310) を搭載した。NP-7310は、 x, y, z 軸方向の振動が同時に計測可能である。

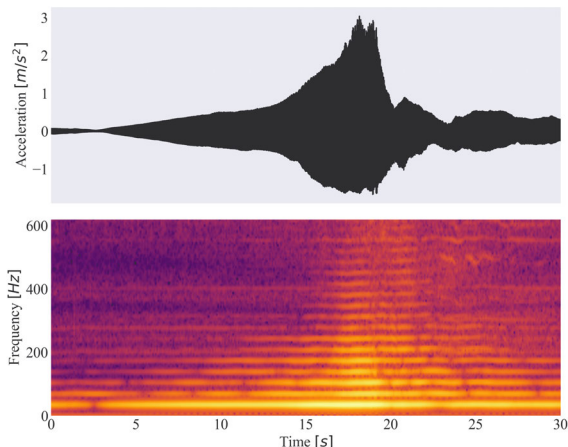


Fig.2 Example of a spectrogram computed from z-axis acceleration signals

4 地盤評価の提案手法

本研究では、以下の2つの手法により地盤剛性の評価を試みる。

1. 振動波の到達時間差による地盤評価手法
2. CCV による地盤評価手法

以下、それぞれの手法の詳細を説明する。

4.1 振動波の到達時間差による地盤評価手法

本手法では、FWD (Falling Weight Deflectometer) 試験機によって起振された地盤振動波の到達時間の差が締固め回数によって変化する現象を利用して地盤の評価を行う。FWD 試験機は、載荷板上に重錘を自由落下させることにより衝撃荷重を加え、振動波を起振する試験機のことである。

まず評価を行う地盤に複数台のセンサポッドを配置する。その後、FWD 試験機により起振し、FWD 試験機から最も近いセンサポッドを基準として、その他のセンサポッドに振動波が到達する差を計測する。計測した3軸データのうち地表の振動である x, y 軸方向の振動のノルムを計算する。得られたデータからピークを求め、基準時間とする。次に、その他のセンサポッドへの到達時間差を求める。基準となるセンサポッドと同様にデータのピークを求め基準との到達時間差を求める。

4.2 CCV による地盤評価手法

次に、複数台のセンサポッドによる多点同期振動データを用いた地盤評価指標について述べる。まず、 N 台のセンサポッドから、振動ローラの走行時間区間に対応する3軸の加速度波形が得られる。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 $\{s_{t,f}^{i,j}\}$ を得る。ただし、 $i \in \{1, \dots, N\}$ はセンサポッド番号、 $j \in \{1, 2, 3\}$ は軸番号、 t は時刻、 f は周波数である。図2に、10往復転圧後の単一センサ・単軸における原信号とスペクトログラムの例を示す。図2では、当該センサポッドを通過する17秒付近で加速度がピークを持ち、スペクトログラムでは高調波が発生していることがわかる。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。

$$\tilde{s}_{t,f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\sum_{j=1}^3 (s_{t,f}^{i,j})^2}. \quad (3)$$

得られた合成スペクトログラム $\tilde{s}_{t,f}$ 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、波形歪み率として第2章で紹介したCCVの定義式を採用する。最終的に振動ローラの走行経路に対応した時系列CCVを得る。

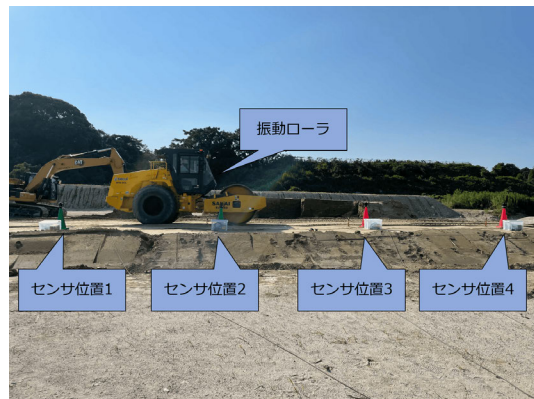


Fig.3 The layout of the sensor pod



Fig.4 Experiment setup in an outdoor field

5 実験

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)、FWD 試験機 (東京測器研究所 FWD-Light)、分散型センサポッド4台を用いたデータ取得実験を行った。本実験では、各センサポッドの正面でFWD試験を行い、重錘の衝突振動を計測する。また、地盤を転圧する振動ローラの振動も計測する。実験は、振動ローラを用いて地盤を10往復転圧し、2往復ごとにFWD試験を実施し、振動を計測した。センサポッドの配置図を図3、実験の様子を図4、上空からの実験の様子を図5に示す。

5.1 振動波の到達時間差の結果

FWD試験を行った地点から最も近いセンサポッド (センサ位置1) を基準とし、そのほかの3台 (センサ位置2, 3, 4) までの到達時間を計測した。実験の結果を図6に示す。

図6から分かるように転圧回数が増え、地盤強度が増すと到達時間が一定になる。実験の結果、振動の到達時間差と地盤強度には相関関係があると考えられる。本実験では、4回の転圧で十分な地盤強度が得られた可能性がある。

5.2 CCVの結果

図7に、振動ローラの走行時間に対応する (a) 単体のセンサポッド4で算出されたCCV、および (b) 4台のセンサポッドを式3にしたがって統合したCCVを示す。また、図7(a)(b)の点線は4台のセンサポッドを通過する時刻を示している。いずれの結果も転圧回数の増加にしたがって各時刻におけるCCVが増加し、一定値に収束している。また、振動輪から直接計測した従来のCCVの結果を図7(c)に示す。ただし、図7(c)の時刻は図7(a)(b)の10~30秒付近に対応している。このように、従来のCCVでも転圧回数により値が収束する傾向が見られるが、外部に設置したセンサポッドを用いた場合 (図7(a)(b)) のほうが、収束の傾向が顕著にみられることがわかる。一方で、図7(a)の単体のセンサポッドで計測したCCVでは、センサポッドと振動ローラの距離によって傾向が大きく異なっている。特に転圧回数

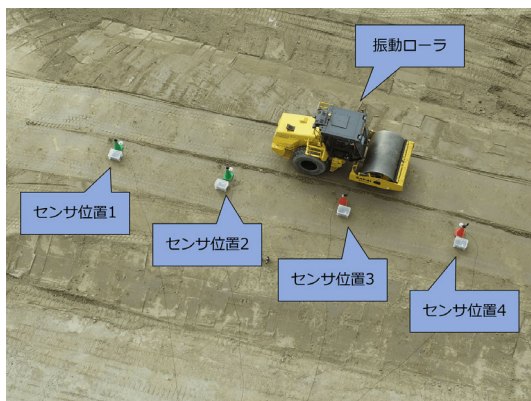


Fig.5 Experiment setup in an outdoor field taken from above

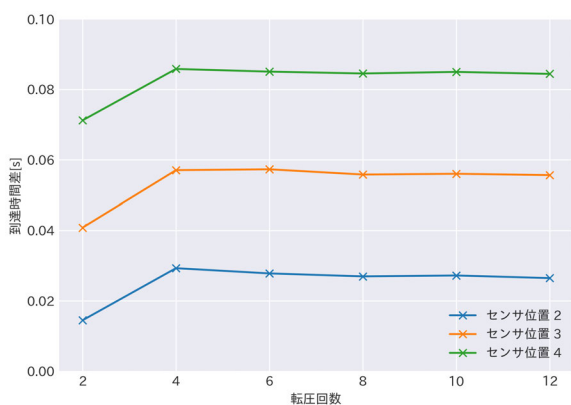


Fig.6 Arrival time difference of vibration wave

に関する CCV の弁別性に着目すると、計測するセンサポッドから離れた特定の位置で高い傾向がある。それに対して図 7(b) の 4 台のセンサポッドを統合した CCV では全域で転圧回数に関する弁別性の改善が見られる。

6 結言

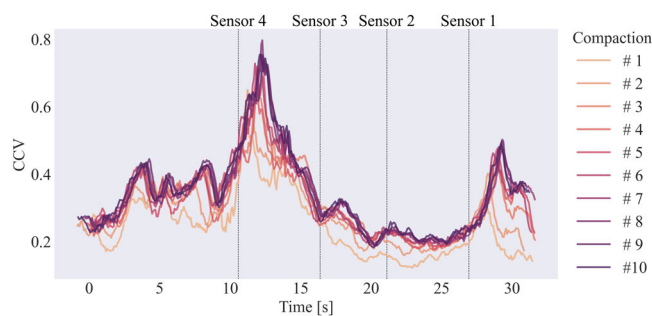
本稿では、土木施工現場の環境把握を目的に、現在開発している分散型センサポッドについて紹介した。また開発した分散型センサポッドを用いて、振動ローラ、FWD 試験機による地盤振動を計測し、センサポッドによる地盤評価手法について有効性を示した。今後、より高精度な地盤評価の実現を目指すとともに、インフラ構築を革新する協働 AI ロボットの実現を目指す。

謝辞

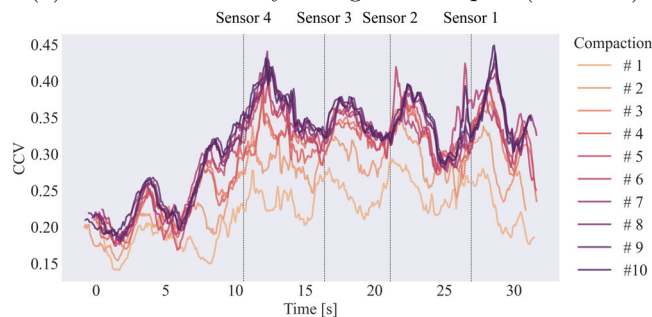
本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】 Grant 番号【JPMJMS2032】の支援を受けたものです。

参考文献

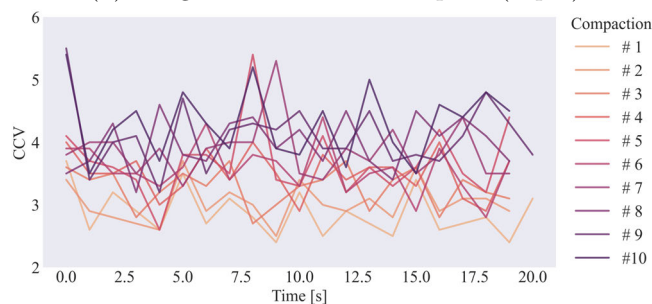
- [1] ムーンショット型研究開発事業, 目標 3・自ら学習・行動し人と共生する AI ロボット, 「多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働 AI ロボット」, <https://moonshot-cafe-project.org/>
- [2] 藤山哲雄, 建山和由, “振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法”, 土木学会論文集 No.652/III-51, pp.115~123, 2000.
- [3] Hiroshi Yamamoto, Masaharu Moteki, Hui Shao, Kenzi Ootuki, Yuji Yanagisawa, Yuki Sakaida, 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.



(a) CCV measured by a single sensor pod (Sensor 4)



(b) Integration of four sensor pods (Eq. 3)



(c) Conventional CCV measured by the sensor on the roller

Fig.7 CCV based on our distributed sensor pods.