

深層学習を用いた土の締固め品質評価手法に関する基礎的研究

立命館大学 学生会員 ○寺本 昌太
立命館大学 正会員 小林 泰三

1. はじめに

近年、土の締固め現場において、施工しながら品質をリアルタイム評価できる加速度応答法¹⁾が注目されている。加速度応答法とは、転圧によって地盤の剛性が増大すると振動ローラー（振動輪）の振動波形が変化することに着目し、その加速度応答の特微量と地盤剛性を関連付けて品質をリアルタイム評価しようとする方法である。著者らは、加速度応答法の新たな展開として、AI（深層学習）を活用した締固め地盤の剛性評価に関する検討を行っている。本報では、そのフィージビリティ検討の結果を報告する。

2. シミュレーションによる教師データ作成

教師あり深層学習では、学習モデル構築のために良質な大量の教師データが必要となる。しかしながら、品質（密度や剛性）の正解ラベルを持つ加速度応答データを大量に収集することは現時点では困難である。そこで著者らは、それをPCシミュレーションによって再現・代用できないかと考えた。

本研究では、藤山・建山¹⁾が提案した地盤－締固め機械系の相互作用モデルを用いて、振動輪の加速度応答波形を再現した。本モデルは、図1に示すように、振動輪－地盤系および振動輪－フレーム系をそれぞれフォークトモデルで単純化し、それらを直に結合したモデルである。紙面の都合上、詳細は割

表 1 機械緒元及び地盤条件

振動輪質量 m_1	4070 kg
フレーム質量 m_2	2080 kg
起振力 F	25500 kN
振動周波数 f	33.3 kg
接続部のバネ係数 k_1	1000 kg
防振ゴムの粘性減衰係数 c_1	$2D_1\sqrt{m_1k_1}$
地盤の粘性減衰係数 c_2	$2D_2\sqrt{m_2k_2}$

愛するが、振動輪とフレームに関する連立運動方程式を立て、それを数値的に解くことによって、地盤の剛性（地盤のバネ係数 k_2 ）に応じた振動輪の加速度応答を得ることができるようになる。本研究の計算に用いた機械緒元と地盤条件を表1に示す。

図2は、後述するフィールド実験で得られた加速度応答とシミュレーション加速度応答の一例を示したものである。地盤の剛性が大きくなると、負の加速度ピーク値が乖離してしまっている部分もあるが、シミュレーションによって加速度波形の概形を再現できていることがわかる。

3. 深層学習モデルの構築

本研究では、図2に示したシミュレーション加速度波形のグラフ画像を教師データとし、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）による深層学習を行った。加速度波形は、地盤剛性を $0.1\sim500\text{ MN/m}^3$ の範囲で 0.1 MN/m^3 刻みに変化させて 5000 枚作成した。各画像の正解ラベルはそれぞれのシミュレーションに入力した地盤剛性値である。画像は全て $512\text{ pixel}\times512\text{ pixel}$ とし、凡例、軸タイトル、軸目盛りを除いたものとした。

本研究では、畳み込み層 1 層とプーリング層 1 層の組み合わせ 5 段と全結合層 2 層を重ねた学習ネットワークを構築し、回帰問題として、加速度波形画像から地盤の剛性値を数値として推定する。

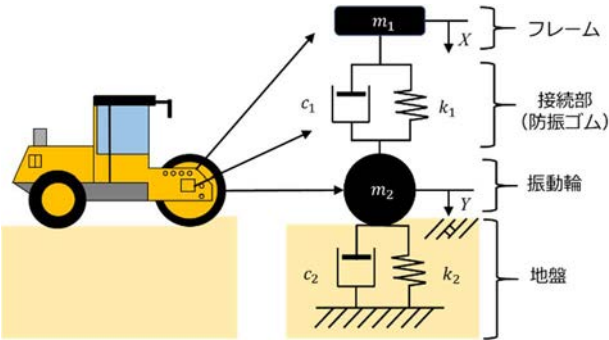


図 1 地盤－締固め機械の相互作用モデル¹⁾

キーワード 土の締固め，深層学習，加速度応答法，ICT，振動ローラー

連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 理工学部環境都市工学科 TEL077-599-4183

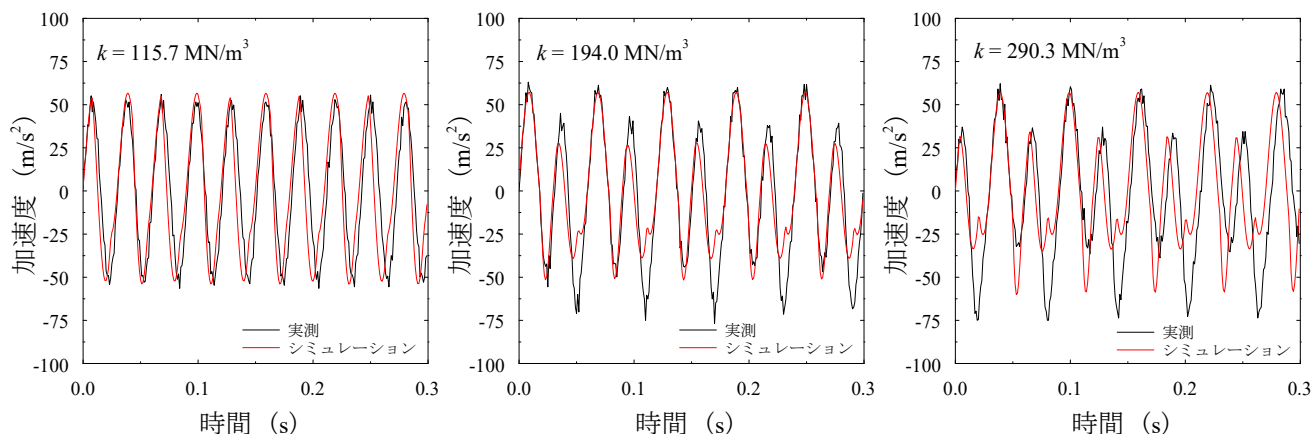


図2 シミュレーションと実測値の加速度波形

4. 妥当性の検証

構築した深層学習モデルに対して、シミュレーションによって別途作成した加速度波形画像（400枚）を判定させた。波形作成時に入力した剛性値（正解値と呼ぶ）と波形画像から推定された剛性値の比較を図3に示す（図中の+のプロット）。正解値と推定値には良好な一致が見られ、シミュレーションによって再現された加速度波形に対しては、波形と地盤剛性の関連性をうまく学習できていることがわかる。

次に、実際の締固め現場で取得した実測加速度応答を判定させた。実測加速度応答は、細粒分質砂質礫を盛土材とする大規模造成現場において、転圧回数（剛性）の異なるレーンで取得したものである（図2に示した波形はその一例）。締固めには、10t級の振動ローラーを使用した。また、それぞれのレーンにおいて、別途、簡易支持力試験機（キャスポル）²⁾を用いて地盤反力係数（実測値と呼ぶ）を求め、推定値との比較を行った。

その結果を図3中に○のプロットで示す。この図から、推定値は実測値を過大評価するものの、両者には相関性のあることが確認できる。剛性を評価するための各種載荷試験にはそれぞれ固有の特性があり、著者らは、推定値が簡易支持力試験機の実測値と必ずしも一致する必要はないと考えている（相関性が得られること自体が重要である）。ここで、全ての推定値を0.62倍して再プロットしたところ、実測値と良い一致が見られるようになった（図中の□のプロット）。なお、この補正値0.62は、推定値と実測値が最もよく一致するようにフィッティングして得た値である。以上のことから、簡単な補正が必要になるかもしれないが、著者らは、提案する手法によって、載

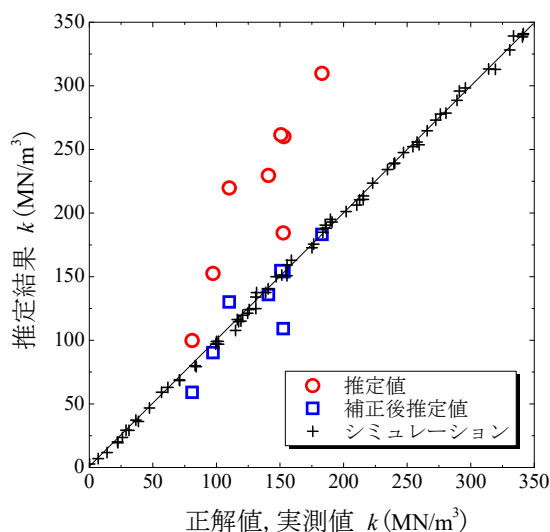


図3 深層学習による地盤剛性の推定結果

荷試験に応じた剛性評価ができるようになることを考えている。

5. まとめ

シミュレータで作成した振動ローラーの加速度応答画像を教師データとする深層学習によって、地盤の剛性推定が実現できる可能性を示すことができた。今後、更なる実証データ検証を進めるとともに、より推定精度の高い教師データ、ネットワークのあり方について検討を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 藤山・建山：振動ローラー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，No.652/III-51，115-123,2000
- 2) 近畿地方整備局：簡易支持力測定器（キャスポル）利用手引き，<<https://www-1.kkr.mlit.go.jp/kingi/database/16.html>> 2021年3月30日最終アクセス