

深層学習を用いた土の締固め管理手法の開発

立命館大学理工学部 教授 小林泰三

1. はじめに

土の締固めは、地盤構造物の性能（剛性、遮水性、安定性など）を大きく左右する。近年、自然災害外力の増大、構造物の多様化、良質な地盤材料の不足等により、土の締固めには徹底した品質管理が求められるようになった。これまで、土の締固めは長年、砂置換法や RI 法などを用いた密度や含水比計測による品質管理（品質規定方式）が行われてきた。施工後の品質を直接評価できる手法ではあるが、計測には時間と労力を要し、点管理にならざるを得ない。近年では、品質を満足するまき出し厚と締固め回数を予め規定し、それが守られていることを確認する手法（工法規定方式¹⁾）が普及してきている。GNSS を搭載した締固め機械の導入によって施工と同時に面的な管理が可能となるため、施工不足や過転圧の防止、工期短縮などのメリットが見込まれる。

一方、海外では、1970 年代後半から振動ローラの振動輪挙動計測から地盤の品質を評価する手法（加速度応答法）の開発が始まり、1990 年代後半には我が国でも開発・実用化が進められた²⁾。適用できる土質条件が限られることや、この手法の管理基準がないことから、我が国では広く普及に至らなかったが、近年、ICT 活用促進の機運の高まりを受けて、加速度応答法に再び注目が集まってきている。加速度応答法は、転圧によって地盤の剛性が増大すると振動輪の振動挙動に乱れが発生することに着目し、振動ローラの加速度応答を計測し、その波形の特徴量から締固めた地盤の剛性をリアルタイムに評価するものである。著者らは、加速度応答法の新たな展開として、深層学習を活用した手法の提案に向けた検討を行っている。本報告書では、その実現可能性を探るために実施したフィージビリティ検討の結果を報告する。

2. 深層学習による地盤剛性の評価

2.1 振動輪の加速度応答シミュレーション

本研究では、転圧中の振動輪の加速度応答を入力して、地盤の剛性（最終目標は地盤反力係数 k_s ）を AI（深層学習）によって推定する手法を提案する。一般に、深層学習には大量の教師データが必要となるが、締固めの現場において加速度データと地盤剛性（正解ラベル）の両者を収集するのは困難である。そこで本研究では、図-1 に示すように、振動輪の加速度応答を再現できるシミュレータを

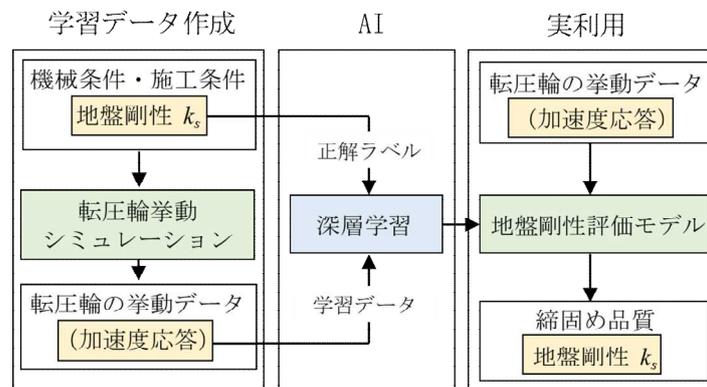


図-1 AI を用いた加速度応答法

構築し、正解ラベルである地盤剛性を変化させた場合の加速度応答データを大量に作成し、これを教師データとして学習させることにした。

本研究では、建山ら³⁾が提案した 2 自由度のマス・バネ・ダンパ系モデル (図-2) を用いて教師データの作成を行うことにした。本モデルは、フレーム-振動輪系と振動輪-地盤系の運動方程式をそれぞれ次式で表現する。

$$m_1\ddot{x} + k_r(x - y) + c_r(\dot{x} - \dot{y}) = m_1g \tag{1}$$

$$m_2\ddot{y} + k_s y + c_s \dot{y} - k_r(x - y) - c_r(\dot{x} - \dot{y}) = m_2g + F \sin(2\pi ft) \tag{2}$$

ここに、 m_1 : フレームの質量、 m_2 : 振動輪の質量、 x : フレームの鉛直変位、 y : 振動輪の鉛直変位、 k_r : フレーム-振動輪間の防振ゴムのばね係数、 k_s : 地盤のばね係数、 c_r : フレーム-振動輪間の防振ゴムの粘性減衰係数、 c_s : 地盤の粘性減衰係数、 F : 振動輪の起振力 f : 振動輪の基本振動数である。

地盤は圧縮力のみには抵抗して引張力には抵抗しない。よって振動輪には地盤からの引張力は作用しないはずである。建山らは、このことを反映するために、地盤反力が負の値を取るとき、すなわち、 $k_s x + c_s \dot{y} < 0$ となるときには地盤のばね係数 k_s と粘性減衰係数 c_r をともに 0 にする条件式を導入した。この条件のもと、式(1)と式(2)を連立して数値的に解くことで、各パラメータに応じたフレームや振動輪の鉛直変位の時系列変化や加速度応答 (教師データ) を計算することができるようになる。

図-3 は、11t 級の振動ローラを想定して計算された加速度時刻歴波形 (上段) とそれを高速フーリエ変換 (FFT) した振幅スペクトル図 (下段) の一例である。同図には、盛土造成現場で実測された実波形データも併せて示している。図-3(a)~(c)は、地盤ばね係数をそれぞれ $k_s = 38.6, 63.8,$

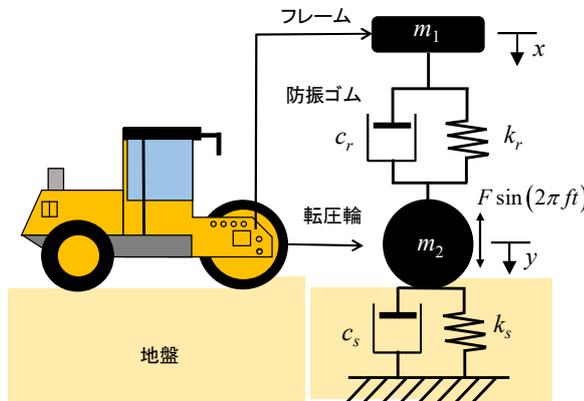


図-2 地盤-締固め機械系相互作用モデル³⁾

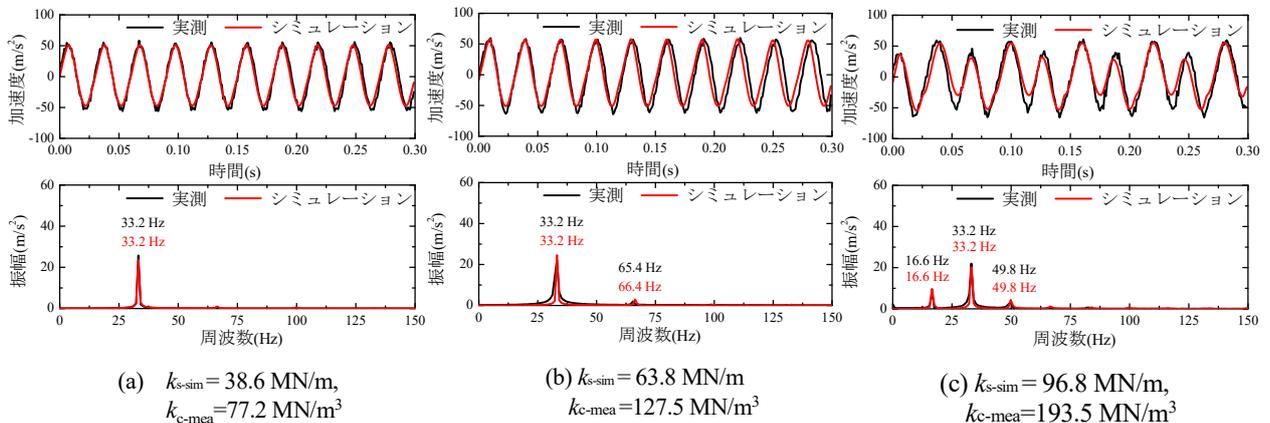


図-3 シミュレーションで得られた加速度波形と実測波形の比較

96.8MN/m に設定したときのシミュレーション結果である（他の諸パラメータの詳細については後述する）。同図における実測データは、それぞれ 2, 8, 16 回の転圧を行ったときの加速度応答である。図-3(a)の加速度応答波形は規則的な正弦波を示しており、卓越する振幅スペクトルは振動輪の偏心錘の周波数 33.3Hz（これを基本振動数と呼ぶ）と一致している。すなわち、締め固めが十分でない柔らかい地盤では振動輪の起振力が支配的であり、地盤の剛性は振動輪の挙動に影響を及ぼさない。やや剛性を大きくした図-3(b)では、加速度応答波形の概形は大きく変化していないものの、振幅スペクトルでは基本周波数（33.3Hz）の 2 倍にあたる 2 次高調波成分（66.4Hz）が現れており、振動輪の挙動に変化が表れていることが確認できる。同図(c)では、加速度応答波形に大きな乱れが確認でき、振幅スペクトルにも基本周波数に対する 1/2 次分調波成分（16.6Hz や 49.8Hz）が出現している。このように、上述したモデルによるシミュレーションによって、実際の振動ローラの振動輪の挙動をよく再現できることを確認することができる。

2.2 教師データと深層学習モデル

本研究では、図-4 に示す 7t 級の振動ローラ（起振力に High モードと Low モードがある）をモデル機として、提案する手法の概念検証（Proof-of-Concept）を行った。同振動ローラの諸元（カタログ値）を表-1 に示す。ここでは、表-1 に示したパラメータに基づいて High モードと Low モードに応じた加速度シミュレーション波形を生成し、それらを学習したモードごとの地盤剛性推定モデルを構築した。



図-4 検証に用いた 7t 級振動ローラ

表-1 振動ローラの諸元（計算パラメータ）

フレーム質量 m_1 [kg]	1,480
振動輪の質量 m_2 [kg]	2,340
振動輪の直径 D [m]	1.22
振動輪の幅 B [m]	1.7
起振力 F [kN]	118.0 (H), 93.0 (L)
振動輪の基本振動数 f [Hz]	30 (H), 38(L)
防振ゴムのばね係数 k_r [N/m]	10,000
防振ゴムの粘性減衰係数 c_r [Ns/m]	769.41

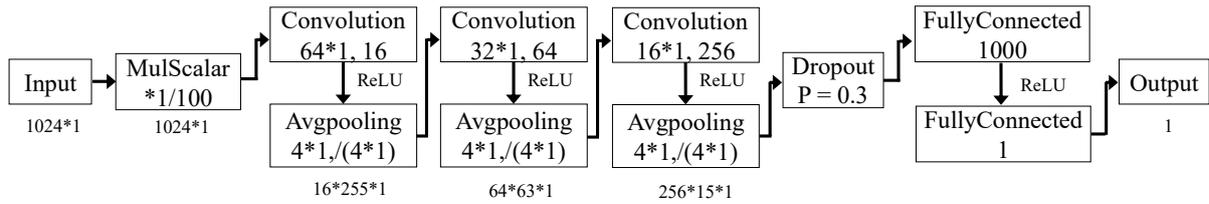


図-5 1D-CNN のネットワーク構造

本研究では、深層学習に 1 次元の畳み込みニューラルネットワーク (1D-CNN) を用いた。ここでは、図-5 に示すように、畳み込み層、活性化関数、Average pooling 層のセットを 3 回繰り返し、その下位に Dropout 層と全結合層 2 層を配置するネットワーク構造とした。活性化関数には ReLU 関数、損失関数には二乗誤差関数を用いて、地盤ばね定数 k_s を数値で予測する回帰モデルを構築した。

本報では、シミュレーションで生成した 1.024 秒間の加速度値を時系列に一次元配列した数値データ (1,000Hz, 1,024 点) を学習させることにした。加速度シミュレーション波形は、地盤ばね係数 k_s を 0.05~250MN/m の間で 0.05MN/m ピッチで変化させて、High/Low モードごとにそれぞれ合計 5,000 データ生成した。防振ゴムと地盤の粘性減衰係数 c_r , c_s は、振動輪-車体フレーム系および振動輪-地盤系の臨界減衰係数 $2\sqrt{m_r k_r}$, $2\sqrt{m_s k_s}$ に減衰比 D_r , D_s をそれぞれ乗じたものとした。ここでは、藤山・建山³⁾の先行事例を参考に、 $D_r = 0.1$, $D_s = 0.4$ と設定した。また、振動輪の基本周波数 f については、実現場においては多少変動することが分かっており、カタログ値 (f Hz) を中心に ± 2 Hz の範囲でランダム (一様分布) に与えることにした。

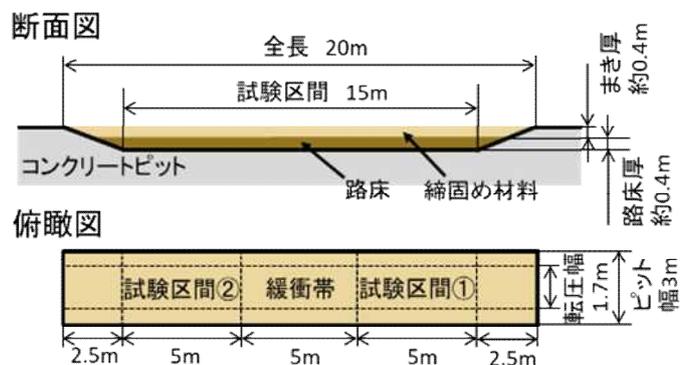
3. 実機を用いた実験検証

3.1 実験の条件と方法

本研究では、深さ 0.8m、幅 3m、全長 20m のコンクリート製ピット (図-6) において、前述した 7t 級振動ローラを用いた検証実験を行った。地盤材料には、礫分：6.1%、砂分：50.5%、細粒分 43.3% の礫交じり細粒分質砂 (SF-G) を用いた。本実験では、最適含水比 $w_{opt} = 13.0\%$ (最大乾燥密度：1.940g/cm³) に対して、乾燥側 $w_1 = 9.45\%$ 、やや乾燥側 $w_2 = 11.35\%$ 、やや湿潤側 $w_3 = 13.59\%$ の 3 条件のモデル地盤 (まき厚は約 0.4m) を作製し、それぞれで 2~16 回 (8 往復) の転圧を行った。図-6(b) に示すように、全長 20m のピットを中央の 5m 区間を挟んで右側と左側の 2 区間 (試験区間①と②) に分割し、試験区間①では High モード、試験区間②では Low モードの締固めを行った。



(a) 実験ピット



(b) 試験区間の設定

図-6 室内実験ヤード



図-7 小型 FWD 試験による地盤反力係数の計測

また、深層学習モデルによる推定値の妥当性を検証するために、本研究では、締固めた地盤に対して小型 FWD 試験⁴⁾ (図-7) を実施し、実測値として地盤反力係数 $K_{30\text{FWD}}$ を得た。小型 FWD 試験は、地表面に接地した載荷板上に重錘を自由落下させて衝撃荷重を加え、これによって生じた荷重と変位を測定して地盤の剛性を評価する可搬型の原位置試験装置である。ここでは各試験区間 (各試験条件) につき 5 点の計測を行った。

3.2 実験結果と剛性評価の妥当性検証

図-8 は、転圧回数と小型 FWD で計測した実測地盤反力係数 $K_{30\text{FWD}}$ の関係を示したものである。図(a)の Low モード、図(b)の High モードともに、最適含水比よりも乾燥側の w_1 , w_2 の含水条件においては (図(b)の w_2 の 16 回転圧時を除いて), 転圧回数の増加とともに地盤反力係数が増大していることが分かる。また、より乾燥している w_1 の場合の方が、 w_2 の場合よりも剛性が大きくなっていることが分かる。一方、やや湿潤側の w_3 の条件では、Low モード、High モードのいずれにおいても転圧回数を増やしても剛性が大きくならなかった。最適含水比よりもやや乾燥側で最大の剛性を示すことや、含水比が高い場合は過転圧が生じやすいことは一般に良く知られていることであり、本実験で得られた傾向と定性的に一致する。

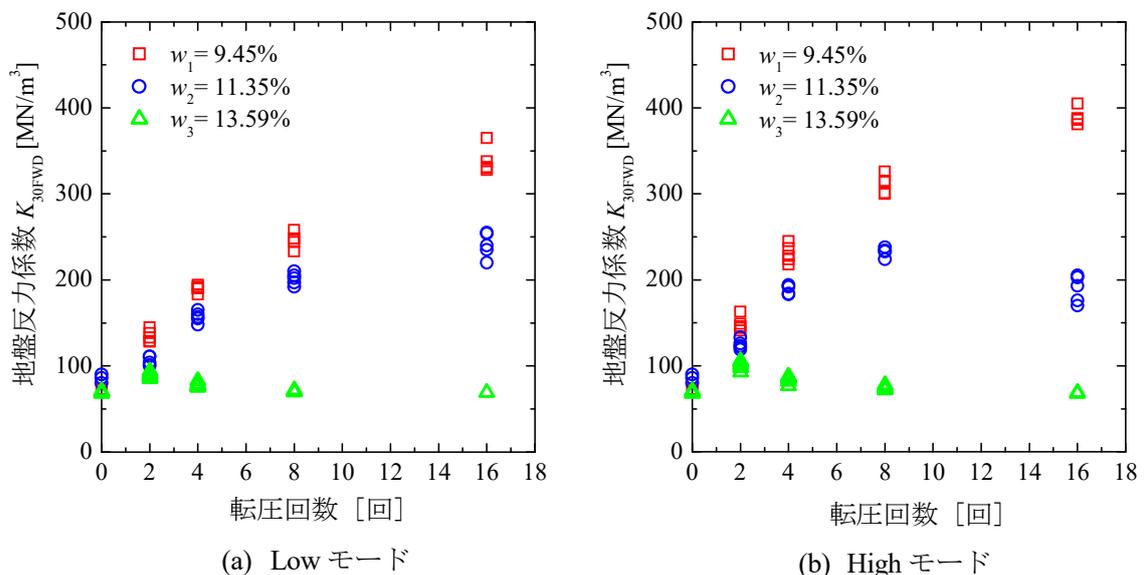


図-8 転圧回数と地盤反力係数の関係

提案する手法の妥当性を検証するために、ここでは、振動ローラが小型 FWD 試験の測定点を通じた際の 1.024 秒間（直線距離にして約 40cm）の加速度応答を切り出し、時系列に一次元配列した数値データを AI 剛性推定モデルに入力して地盤ばね係数 k_s の推定値を得た。剛性推定モデルによる推定値 k_s と小型 FWD 試験機による実測値 K_{30FWD} の関係を図-9 に示す。ここで、実測値 K_{30FWD} は地盤反力係数 (MN/m³) であり、推定値 k_s は地盤ばね係数 (MN/m) であることに留意されたい。従って、ここでは両者の数値の一致ではなく、 K_{30FWD} の k_s の相関性が重要となる。

ここでは、既存の加速度応答法との比較を目的に、同実測加速度波形に基づいて CCV⁹⁾ (Compaction Control Value) を算出し、 K_{30FWD} と CCV の相関性についても調べた (図-10)。ここに、CCV は酒井重工業㈱が導入・実用化している地盤の締固め状態を表す指標値 (無次元量) であり、次式で与えられる。

$$CCV = \frac{A_{0.5\Omega} + A_{1.0\Omega} + A_{1.5\Omega} + A_{2.0\Omega} + A_{2.5\Omega} + A_{3.0\Omega}}{A_{0.5\Omega} + A_{1.0\Omega}} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $A_{1.0\Omega}$ は振動ローラの基本周波数における加速度振幅であり、 $A_{0.5\Omega}$, $A_{1.5\Omega}$, $A_{2.0\Omega}$, $A_{2.5\Omega}$, $A_{3.0\Omega}$

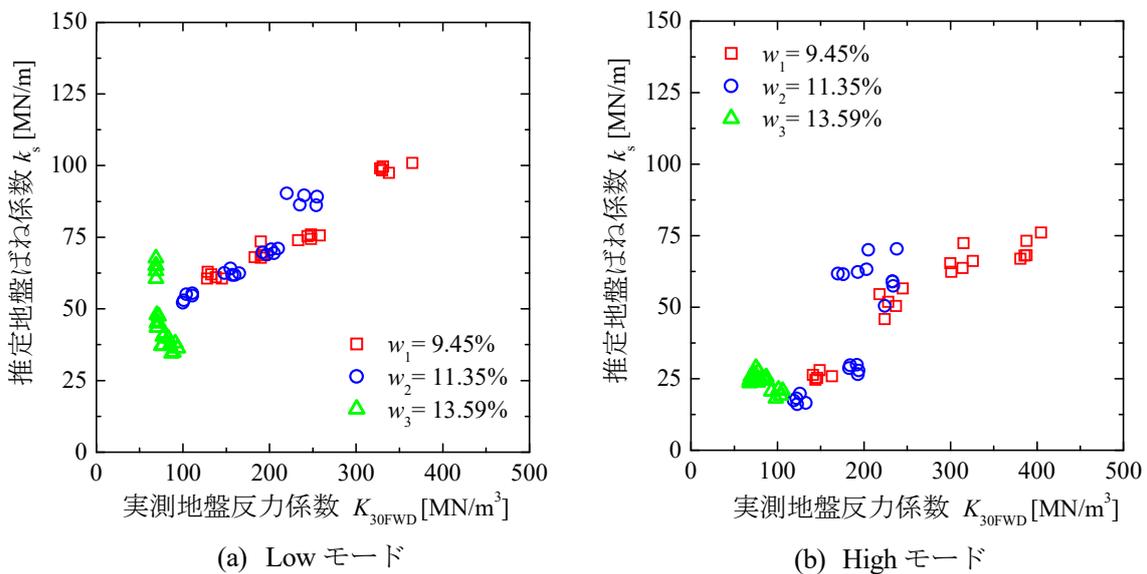


図-9 地盤ばね係数の推定結果

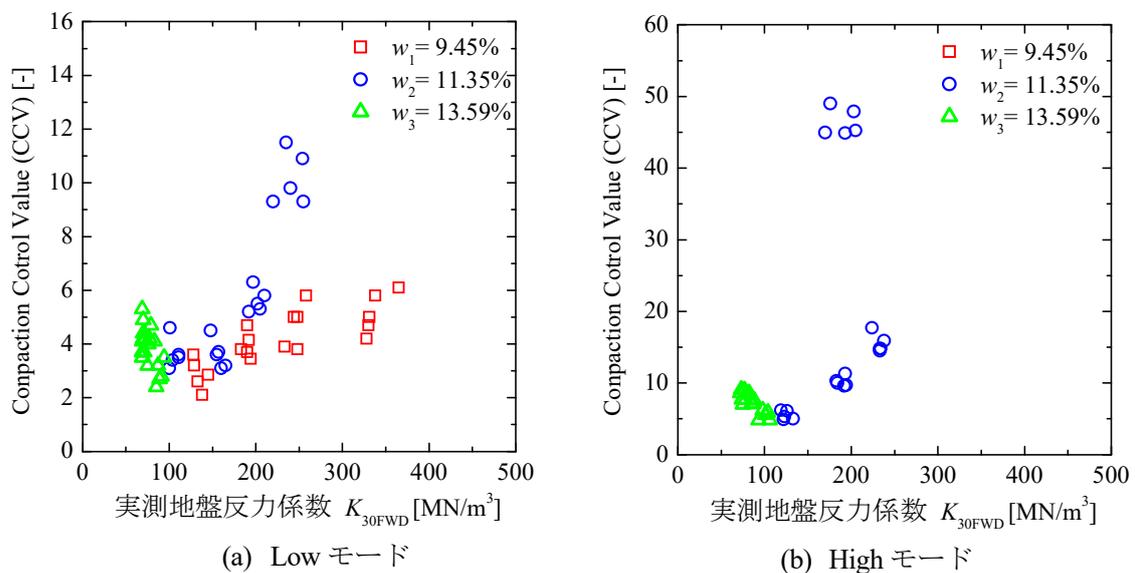


図-10 Compaction Control Value (CCV) の計測結果

はそれぞれ、基本周波数に対する 1/2, 3/2, 2, 5/2, 3 次調波成分の加速度振幅である。

図-9 に示す提案手法では、Low モード、High モードともに、多少のばらつきはあるものの、実測値と推定値には正の相関性が認められる。一方で、図-10 に示す従来法では、いずれのモードも含水比によってデータが大きくばらついており、従来から指摘されている加速度応答法の問題（含適用できる含水比範囲が狭いこと）が顕在化した。両者を比較すると、AI 剛性評価モデルの方が良好な相関性が得られており、提案手法は従来法に比べて含水比変化に対してロバストに評価できることを示唆する結果と言える。また、CCV が物理的な意味を持たない指標であるのに対して、提案手法は地盤の剛性を意味する物理パラメータである点でも有為性が高いと考えられる。

以上の通り、実測された地盤反力係数と剛性評価モデルによる推定値に相関性を確認することができたが、評価モデルの出力値（推定値）は、地盤ばね係数 (MN/m) である。地盤構造物の設計等には、地盤の剛性として地盤反力係数 (MN/m³) が用いられる。地盤反力係数は、通常、平板載荷試験⁶⁾によって求められるパラメータであり、平板載荷時の荷重強度（単位面積当たりの荷重 [MN/m²]）～沈下量 [m]関係の勾配）として定義されるものである。載荷板には直径 30 cm の円盤が用いられることが多く、地盤反力係数は K_{30} と表記されるが、本研究では小型 FWD による推定換算値を用いており、 K_{30} と区別するために K_{30FWD} と表記している。地盤反力係数が荷重強度（応力）と沈下量の関係で定義されるのに対して、地盤ばね係数は、地盤を質点系のばねと見なして荷重（力）と沈下量の関係で定義される。したがって、推定される地盤ばね係数 k_s を地盤反力係数に換算するためには、 k_s を振動輪の接地面積で除す必要がある。そこで本報では、推定値である地盤ばね係数 k_s から地盤反力係数を換算する手段として次の方法を提案する。

まず、地盤剛性評価モデルで推定された地盤ばね係数 k_s (MN/m) を構築した加速度シミュレーションに入力し、その k_s に対する振動輪の加速度波形を再現する。その加速度波形を時間について 2 階積分して振動輪の変位の応答を求め、その振幅（地盤ばねの最大縮み量）を求める。それを転圧時の沈下量と仮定すると、振動輪の直径と幅の幾何学的関係から地盤と振動輪が接地している面積が算出できるようになる。本報では、地盤ばね係数 k_s (MN/m) を接地面積で除したものを推定地盤反力係数 K_{est} (MN/m³) とし、実測地盤反力係数 K_{30FWD} と比較した（図-11）。図(a)の Low モードでは実測値に対して推定値がやや上振れし、図(b)の High モードでは逆にやや下振れする傾向はあるも

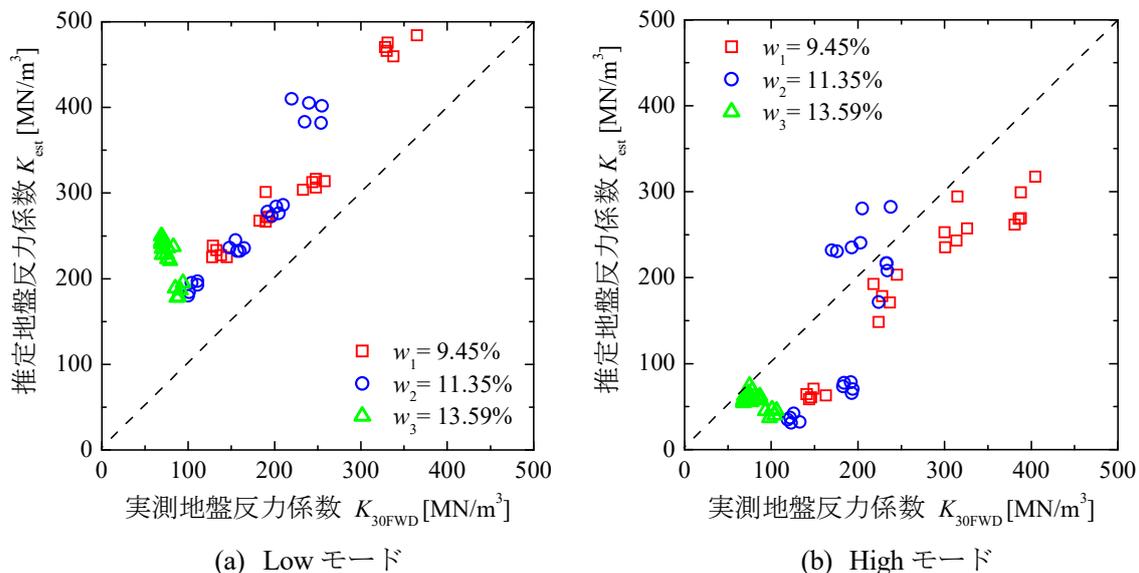


図-11 地盤反力係数への換算結果

の、縦軸と横軸の数値が概略一致していることが分かる。振動輪の沈下量を何らかの方法によって観測（実測）することができればより信頼性の高い換算が実現できる可能性もあるが、シミュレーション結果に基づく換算でも、地盤反力係数を推定することができることを実証することができた。

4. おわりに

本研究では、振動ローラ転圧輪の加速度応答を教師データとする深層学習（畳み込みニューラルネットワーク）によって、締固めた地盤の剛性評価が実現できる可能性（フィージビリティ）を確認することができた。盛土の締固めは、長年、密度（締固め度）によって管理されてきたが、本来、設計パラメータである剛性や強度といった力学特性によって品質評価されるべきである。近年では、路床・路体、舗装材料の弾性特性を考慮した舗装構造設計（多層弾性理論⁷⁾を用いた設計）が行われるようになり、道路土工と舗装の設計を一体化（合理化）を試みる研究⁸⁾も見られるようになった。本研究で提案する品質管理手法は、地盤剛性をリアルタイムで面的に評価する点で、土工のみならず、舗装工の設計・施工の合理化に応用できる方法のひとつになると考えている。今後、提案手法の実用化に向けて、学習モデルの汎化性能向上と実現場データによる検証を深化させていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領，2012.
- 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，土木学会論文誌, No.652/III-51, pp. 115-123, 2000.
- 3) 古屋 弘（建山和由編）：土の締固め，第 5 章 情報化施工の導入，pp. 83-115，地盤工学会，2012.
- 4) 舗装工学委員会編：FWD および小型 FWD 運用の手引き，舗装工学ライブラリー2，土木学会，2003.
- 5) 北村佳則，西尾貴至，内山恵一：ローラ加速度応答を用いた盛土品質評価，第 25 回日本道路会議論文，CD-ROM，07P04，2003.
- 6) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説—二分冊の 2—，第 3 章 平板載荷試験，地盤工学会，pp.697~735，2013.
- 7) 土木学会舗装工学委員会・舗装構造小委員会編：多層弾性理論による舗装構造解析入門：GAMES (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems) を利用して，土木学会，2005.
- 8) 土木研究所 平成 28 年度研究開発プログラム報告書：道路土工と舗装の一体型設計に関する研究，<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2016/pdf/pro-7-1.pdf>（2023/4/28 アクセス）