

スギ根系の地盤補強効果とせん断中の生体電位に関する研究

STUDY ON THE SOIL REINFORCEMENT EFFECT AND BIOELECTRIC POTENTIAL OF CEDAR ROOTS IN BOX SHEAR TEST

松田 昂大¹・笠間 清伸²・古川 全太郎²・八尋 祐一²

Kodai Matsuda, Kiyonobu Kasama, Zentaro Furukawa, Yuichi Yahiro

¹九州大学大学院工学府土木工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

²九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: matsuda.kodai.123@s.kyushu-u.ac.jp

Key Words: surface collapse, detection, plant, bioelectric potential, machine learning, LSTM

1. はじめに

近年, 山間部において豪雨による表層崩壊が増加傾向にある¹⁾. 例として, 九州北部豪雨, 西日本豪雨, 熊本豪雨などが挙げられ, このような梅雨期の集中豪雨に伴う表層崩壊は日本, 特に九州でここ数年毎年のように起きている. 今後も大きな被害が予測される表層崩壊を防止するための 1 つの手法として, 植物根系のせん断抵抗力による表層崩壊防止機能²⁾の定量化によるメカニズムの解明が期待される. また, 植物には生命維持に関わる情報伝達によって生じる生体電位が存在し, その電位は温度, 湿度, 照度など様々な環境変化によって変動する³⁾. そのため, 表層崩壊に伴う地盤のせん断による外的刺激によって生じる植物の生体電位の反応より, 土のせん断挙動を把握できる可能性がある.

本文では, 植物根系が存在する状態でせん断力を加えることができる一面せん断試験装置を用いて, 植物根系の地盤補強効果とせん断面での根系断面積の関係を求めた. また, 一面せん断試験中に計測した植物の生体電位と供試体に加わるせん断応力の関係を解析するため, 機械学習を用いた. アルゴリズムは, 線形回帰モデルの一種であるロジスティック回帰分析と深層学習の一種である LSTM (Long Short-Term Memory)を用いて, 植物の生体電位と供

表-1 まさ土の土質特性

土粒子の密度	g/cm ³	2.78
最適含水比	%	12.53
最大乾燥密度	g/cm ³	1.95
礫分, 砂分, 細粒分	%	14, 69, 17
土性区分	SF-G	

試体に加わるせん断力の関係を学習し, 植物の生体電位から供試体に加わるせん断応力の予測を試みた.

2. 実験方法

(1) 一面せん断試験

実験試料は, 西日本に広く分布しているまさ土を粒径 5 mm 以下にふるい通過したものを用いた. まさ土の土質特性を表-1 に示す. まさ土は最適含水比 12.53 % に調整し, 図-1 に示す一面せん断試験用のせん断箱内に乾燥密度 1.55 g/cm³ (締固め度約 80 %) で植物と共に各層 20 回ずつ 3 層で締固めた. 締固めには, 質量 24.5 N, 落下高さ 300 mm のランマーを用いた.

表-2 にせん断試験条件と植物の生育条件を示す. 実験に用いた植物は, 日本で最も広く分布している

スギを用いた。初期高さ約 0.3 m のスギを 14, 28 及び 84 日間最適含水比に保つよう適宜灌水を行いながら生育させた後、一定の鉛直拘束圧を載荷する定圧条件で一面せん断試験を行った。鉛直拘束圧（スギの周囲に均等におもりを載荷）は 2.5, 5.0, 10.0 kN/m² の 3 通り、せん断速度は 2.0 mm/min で最大水平変位 30 mm までせん断した。また、初期高さ約 1.0 m のスギを 28 日間生育した条件についても同様の試験を行った。

スギの生体電位測定のために図-1 に示す塩化銀製電極を根系の最大延長の 1/2 の位置、地表付近の茎、高さ 1/2 に位置する葉の 3 か所に貼り付けた。

試験中は、せん断荷重、水平・鉛直変位、及び上記で述べた根系、茎、葉の 3 か所の生体電位をそれぞれ、ロードセル、変位計、塩化銀製電極により 0.5 秒間隔で測定した。

試験は同じ生育条件、定圧条件下で 3 回ずつ行い、比較のため同様の条件でスギを含まない供試体でも一面せん断試験を行った。

(2) スギ根系の本数、直径の計測方法

阿部の根系補強モデル²⁾（以下、モデルと略する）は、せん断面での根系の直径が根系の補強強度に強く関与することを示したモデルである。以下の式 (1) のように、1 本の根の直径 D_i から補強強度 $\Delta\tau$ を算出し、それらを根の数だけ合計することで根系の補強強度 $\Delta\tau$ を表した。なお、阿部の実測で用いた全ての根系の 98% が直径 0.5 mm 以上である。

$$\Delta\tau = \sum 19.404 D_i^{1.6} (\cos\beta \tan\phi + \sin\beta) / 1000 \quad (1)$$

$\Delta\tau$: 根系による補強強度 (kN/m²)

D_i : 根の直径 (mm)

ϕ : 土の内部摩擦角 (°)

β : せん断により変化した根の角度 (°)

せん断面での根系断面面積は、試験後にせん断面に沿って切断した根系の断面から根系の本数とそれぞれの直径を計測することで求めた。直径 0.5 mm 以上の根系は定規を用いて計測し、直径 0.5 mm 未満の根系は本数が多く目視では計測できないので、別の方法で本数と直径を計測した。まず、直径 0.5 mm 未満の根系から無作為に 10 本選び、それらの根系の平均直径を代表直径 D とする。次に、全ての直径 0.5 mm 未満の根系をせん断面から下に長さ 1 cm の部分を切り取り、水の入っているメスシリンダーに投入した。長さ 1 cm の 1 本の根の体積 $(D/2)^2 \times \pi$ で水の増加体積 V を割ることにより直径 0.5 mm 未満の根系の本数 n を求めた。以下の式 (2) にその計算方法を示す。

$$n = V / ((D/2)^2 \times \pi) \quad (2)$$

n : 直径 0.5 mm 未満の根系の本数

D : 根系の代表直径 (mm)

V : 直径 0.5 mm 未満の根系の体積 (mm³)

(3) 生育後のスギの状態

図-2 にスギ（初期高さ約 0.3 m）の定植開始から試験時までの高さ、せん断面の根系断面面積合計（以下、根系断面面積と略す）の経時変化を示す。図の値は、それぞれ同じ生育期間のスギの平均値である。高さは、生育期間 14 日から 28 日で 0.05 m 増加、84 日で 0.02 m 減少した。根系断面面積は、生育期間 14 日から 28 日で 14.20 mm²、84 日で 25.98 mm² 減少し

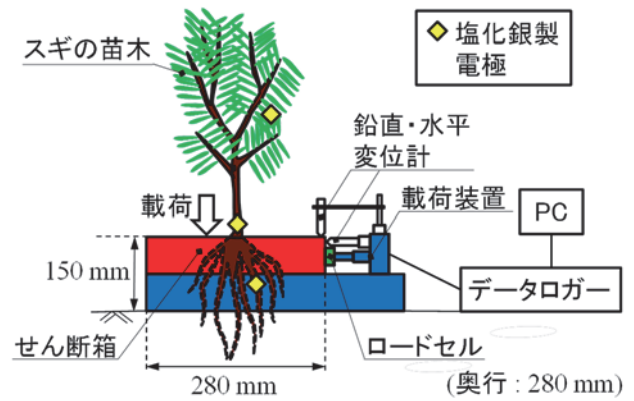


図-1 一面せん断試験機

表-2 実験条件

せん断試験条件		
せん断速度	mm/min	2.0
せん断変位	mm	30
鉛直拘束圧	kN/m ²	2.5, 5.0, 10.0
植物の生育条件		
初期高さ	m	約0.3, 1.0
生育期間	日	14, 28, 84

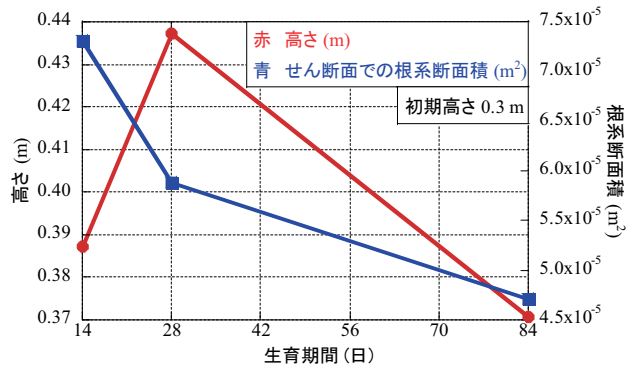


図-2 スギの生育後の状態

た. このことから, 生育期間 84 日まではスギの物理的成長はあまり見られず, 生育前の初期状態がグラフに強く反映されていることが示唆される.

3. 機械学習の解析条件

(1) 概要

図-3 に試験中に計測したスギの根系, 茎, 葉での生体電位を示す. 生体電位は, 初期値が $0 \mu\text{V}$ になるように設定し, 絶対値をとった. 図-4 には, スギを含む供試体と土のみの供試体の結果を比較した一面せん断試験のせん断応力(τ) - 水平変位(δ) 曲線と鉛直変位(ΔH) - δ 曲線を示す.

本文では, 図-3 に示すスギの根系, 茎, 葉の生体電位を入力データとし, 図-4 に示すせん断応力を出力データとして予測する機械学習のプログラムを構築する. 機械学習のアルゴリズムにはロジスティック回帰分析と LSTM の 2 つを用いる. 各供試体の計測データの前半 70% で学習し, 後半 30% をテストデータとして予測値を求め, その予測値と実測値を比較し, プログラムの予測精度を評価する. 予測精度の評価指数は式 (3) に示す平均絶対誤差 MAE と決定係数 R^2 を用いた.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\tau_{\text{pre}} - \tau_{\text{obs}}| \quad (3)$$

n : データの総数

τ_{pre} : せん断応力の予測値

τ_{obs} : せん断応力の実測値

(2) ロジスティック回帰分析について⁴⁾

ロジスティック回帰分析とは, ベルヌーイ分布に従う変数の一般化線形回帰モデルの一種であり, いくつかの要因が複合的に作用する確率事象の予測に適している非線形モデルである. また, このモデルは式 (4) のシグモイド関数で表され, 回帰式から得られる出力値は必ず 0 から 1 の間に存在する. そのため, データはすべて正規化した値を用いて, 最後に復元し, 予測精度を評価した.

$$Y = \frac{1}{1 + \exp\{-(w_0 + \sum_{i=1}^n w_i X_i)\}} \quad (4)$$

Y : せん断応力の予測値

X_i : 説明変数 (生体電位)

w_0 : 回帰式の切片

w_i : 説明変数 X_i の重み (偏回帰係数)

(3) LSTM について

LSTM は RNN (再帰型ニューラルネットワーク) における勾配消失問題を解決し, 長期依存による学

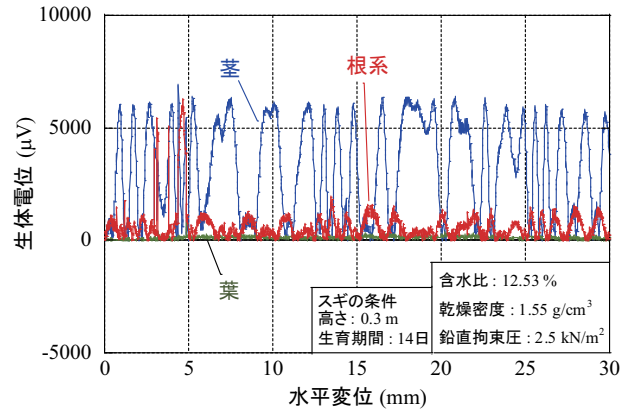


図-3 生体電位(入力データ)

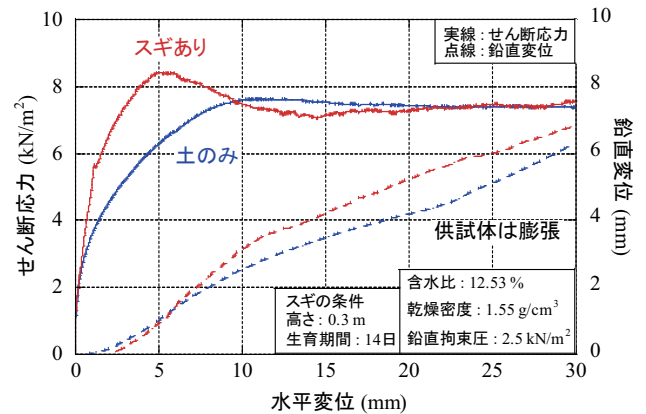


図-4 τ - δ 曲線(出力データ)と ΔH - δ 曲線

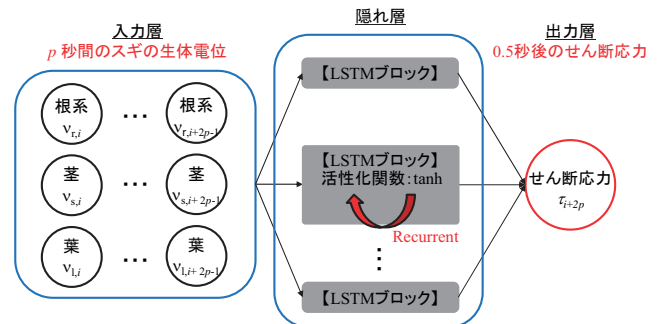


図-5 LSTM の概略図

習を可能とした深層学習の一種であり, 前後関係が重要な時系列データの予測によく使用される⁵⁾.

図-5 に本文で構築した LSTM の概略図を示す. 0.5 秒後のせん断応力を予測するのに必要な入力データ数を $2p$ (入力データに必要な計測時間 = p (s)) とする. 0.5 秒後のせん断応力を予測するために, 根系, 茎, 葉で計測したスギの生体電位のデータをそれぞれ i 番目から $i+2p-1$ 番目のデータで区切り, 「3 行 \times $2p$ 列」の行列を形成する. その行列を 1 層と設定した隠れ層中の LSTM ブロックに入力する. LSTM ブロックは, 過去の学習結果を記憶し, 次の学習に与える影響を調整する仕組みとなっており, プ

表-3 LSTMのパラメータ

パラメータ		値
0.5秒後の予測値に要する入力データの計測時間 p (秒)		600
LSTMブロック数		50
学習回数		400
バッチサイズ		4
最適化アルゴリズム		adam
活性化関数	LSTMブロック	tanh
	出力層	linear

ブロック数は50とした。最後に、各 LSTM ブロックで得た結果より、 $i+2p$ 番目 (0.5 秒後) のせん断応力を出力する。以上の学習を $i=1$ から繰り返し行う。

表-3 に、LSTM のパラメータを調整した結果の値を示す。

4. 実測結果

(1) スギ根系の地盤補強効果

表-4 にスギ根系を含む供試体が各定圧条件下で示した最大せん断応力の最大値、平均値、最小値及び根系断面積を記す。この結果より、スギ根系の補強強度と強度定数を求め、根系断面積との関係を求めた。

a) 根系断面積と補強強度の関係

図-6 に根系断面積 A_r とスギ根系の補強強度 $\Delta\tau$ の関係を示す。○はスギの初期高さ約 0.3 m、生育期間 14 日のスギ根系を含む供試体、□はスギの初期高さ約 0.3 m、生育期間 28 日のスギ根系を含む供試体、◇はスギの初期高さ約 0.3 m、生育期間 84 日のスギ根系を含む供試体、△はスギの初期高さ約 1.0 m、生育期間 28 日のスギ根系を含む供試体の実験結果を示す。スギ根系の補強強度 $\Delta\tau$ は、実測値から計算した値 (実測値) を $\Delta\tau_t$ 、モデルから得た値 (モデル値) を $\Delta\tau_m$ で表し、図-6 では前者の値のプロットのみ塗りつぶして示すことで後者と区別している。実測値の回帰曲線は実線、モデル値の回帰曲線は点線で示す。実測値 $\Delta\tau_t$ は、以下の式 (5) より求めた。

$$\Delta\tau = \tau_{r,\max} - \tau_{s,\max} \quad (5)$$

$\tau_{r,\max}$: スギ根系を含む供試体の最大せん断応力

$\tau_{s,\max}$: 土のみの最大せん断応力

根系断面積が 0 m^2 の供試体は土のみの供試体と

表-4 一面せん断試験結果

鉛直拘束圧 (kN/m^2)	回数	最大せん断応力 (kN/m^2)		根系断面積 ($\times 10^{-5} \text{ m}^2$)
		最大	平均	
2.5	12	最大	9.49	4.78
		平均	8.20	
		最小	5.55	
5	12	最大	12.43	2.55
		平均	11.02	
		最小	9.70	
10	12	最大	17.62	9.11
		平均	15.11	
		最小	13.56	

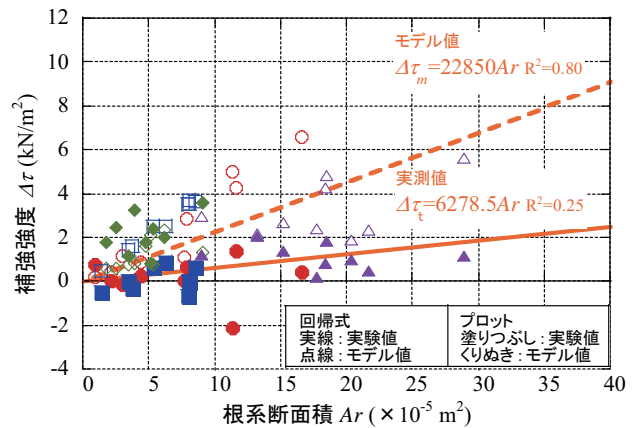


図-6 根系断面積と補強強度の関係

し、補強強度が 0 kN/m^2 と仮定した。そのため、切片が 0 になるように回帰式を導出すると、実測値とモデル値はそれぞれ式 (6)、(7) のようになった。

$$\Delta\tau_t = 6278.5A_r \quad (6)$$

$$\Delta\tau_m = 22850A_r \quad (7)$$

回帰式 (6)、(7) より、根系断面積 A_r と実測値とモデル値のスギ根系の補強強度 $\Delta\tau_t$ と $\Delta\tau_m$ には共通して微弱な正の相関傾向にあった。せん断面での根系の直径が根系の補強強度 $\Delta\tau$ に強く関与することは阿部の根系補強モデル²⁾より分かっており、スギ 1 本の根系とその補強強度 $\Delta\tau$ を定量的に表すにはせん断面でのスギ根系の直径を用いて求める根系断面積 A_r が適している。そのため、根系断面積 A_r と根系の補強強度 $\Delta\tau$ には正の相関があると考察する。また、モデル値 $\Delta\tau_m$ は実測値 $\Delta\tau_t$ の 3.64 倍の補強強度を示した理由として、直径 0.5 mm 未満のスギ根系が阿部の根系補強モデルよりも小さい補強効果を示すことが示唆される。本実験では直径 0.5 mm 未満のスギ根系が全ての供試体のスギ根系の 97% を占めており、直径 0.5 mm 未満のスギ根系の実際の補強効果よりも阿部の根系補強モデルで想定したモデ

ル値の方が大きくなった可能性がある。

b) 根系断面積と強度定数の関係

図-7 に根系断面積 A_r とスギ根系を含む供試体の強度定数である粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の関係を示す。粘着力 c は○、内部摩擦角 ϕ は□で示し、それぞれの実測値のプロットを塗りつぶして示すことで、モデル値と区別した。なお、根系断面積が 0 m^2 の供試体は土のみの供試体とし、回帰式は土のみの強度定数 ($c=5.67\text{ kN/m}^2$, $\phi=40.12^\circ$) を通ると仮定した。図-7 より、粘着力 c の実測値 c_t とモデル値 c_m の回帰式は以下の (8), (9) 式となった。

$$c_t = 5.67e^{3134.8A_r} \quad (8)$$

$$c_m = 5.67e^{4326.9A_r} \quad (9)$$

回帰式 (8), (9) より、根系断面積 A_r と実測値とモデル値のスギ根系を含む供試体の粘着力 c_t と c_m には共通して微弱な正の相関傾向があった。

また、内部摩擦角 ϕ の実測値 ϕ_t とモデル値 ϕ_m の回帰式は以下の式 (10), (11) となった。

$$\phi_t = 40.12 - 7279.9A_r \quad (10)$$

$$\phi_m = 40.12 + 29094A_r \quad (11)$$

回帰式 (10), (11) より、根系断面積 A_r と実測値とモデル値のスギ根系を含む供試体の内部摩擦角 ϕ_t と ϕ_m には共通の相関がなかった。根系を含む供試体の粘着力と内部摩擦角については、今井の樹木根系の斜面崩壊抑止効果に関する調査研究⁹⁾においても同様の結果が記載されており、根系は見かけの粘着力の増加として機能し、内部摩擦角はほとんど変化しないといった内容が示されている²⁾。本実験結果で得た回帰式はいずれも決定係数が小さく精度が良い評価とは言えないが、今井⁹⁾の研究を参考に上記のような結果とした。また、そのメカニズムとして、土の密度が高く、鉛直拘束圧を増加させても土の中で根系が動かないように固定する働きをしている接線摩擦力に影響を及ぼさなかったため、内部摩擦角はほとんど変化せず、その代わりに最大せん断応力の増加による根系の補強効果はほとんど粘着力の増加が関係すると考察する⁷⁾。

そのため、根系断面積 A_r とスギ根系を含む供試体の粘着力には正の相関があり、根系断面積 A_r とスギ根系を含む供試体の内部摩擦角 ϕ には相関がなく、内部摩擦角 ϕ はスギ根系を含む供試体の補強効果には関与しないことが示唆される。

(2) 機械学習による予測結果

3. 機械学習の解析条件により、根系、茎、葉で計測したスギの生体電位から供試体に加えたせん断応

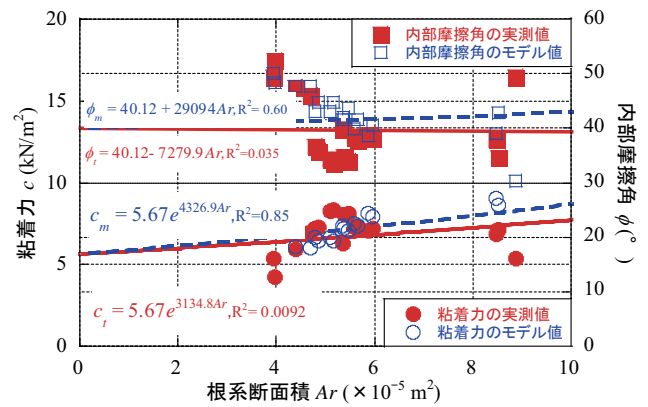


図-7 根系断面積と強度定数の関係

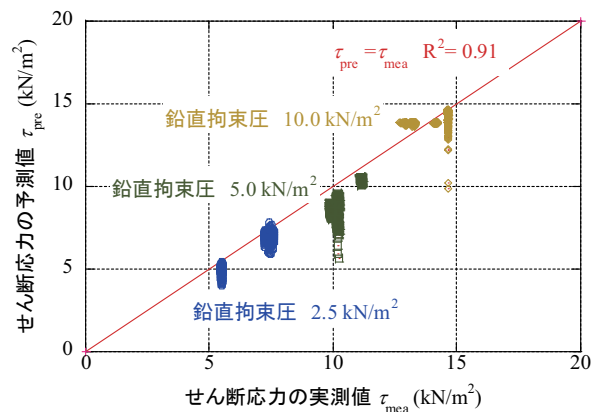


図-8 せん断応力の実測値とロジスティック回帰分析の予測値の関係

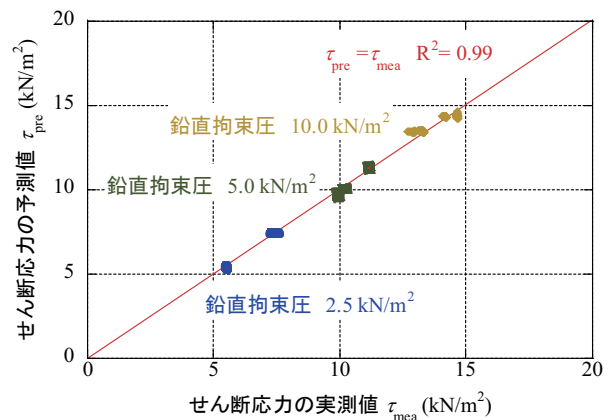


図-9 せん断応力の実測値と LSTM の予測値の関係

力を予測した。その結果より、せん断応力の実測値と予測値の関係をロジスティック回帰分析と LSTM の予測結果でそれぞれ示し、予測精度を比較する。

図-8 にせん断応力の実測値とロジスティック回帰分析を用いた予測値の関係を示す。実測値と予測値の誤差は 4.76 kN/m^2 (44.94%) 以内で、誤差の平均値は 0.77 kN/m^2 (7.87%) となり、決定係数は 0.91 である。図-9 にせん断応力の実測値と LSTM を用い

た予測値の関係を示す。実測値と予測値の誤差は、 0.78 kN/m^2 (6.14%) 以内で、誤差の平均値は 0.17 kN/m^2 (1.52%) となり、決定係数は 0.99 である。平均値 (%表示) の比較より、LSTM の方がロジスティック回帰分析より 0.19 倍小さい誤差で予測した。

図-10 にロジスティック回帰分析と LSTM によるせん断応力の予測結果を示す。せん断応力の実測値 (鎖線)、ロジスティック回帰分析 (点線) と LSTM (実線) を用いたせん断応力の予測値を示す。

表-5 にロジスティック回帰分析と LSTM の学習精度と予測精度を示す。決定係数では、LSTM がロジスティック回帰分析の 1.28 倍の精度で学習し、1.09 倍の精度で予測した結果となった。また、平均絶対誤差 (MAE) では、LSTM がロジスティック回帰分析の 382 倍の精度で学習し、4.75 倍の精度で予測した結果となった。ゆえに、試験中におけるスギの生体電位とせん断応力には、時系列で強い関係性があり、解析にはロジスティック回帰分析より LSTM が有効であることが明らかとなった。

5. まとめ

本文では、一面せん断試験の実施により、スギ根系の地盤補強効果の根系断面積による定量化とスギの生体電位と供試体に加わるせん断応力の関係を機械学習を用いて考察した。以下に、本文で得た知見をまとめる。

- 1) スギ根系の根系断面積 A_r と補強強度 $\Delta\tau$ には微弱な正の相関傾向があり、実測値 $\Delta\tau = 6278.5A_r$ の回帰式を示した。ゆえに、スギ根系の根系断面積は地盤補強効果に関与することが示唆される。
- 2) 根系断面積 A_r とスギ根系を含む供試体の粘着力 c には、微弱な正の相関傾向があり、実測値 $c = 5.67e^{3134.8A_r}$ の回帰式を示した。ゆえに、スギ根系の補強効果は粘着力の増加として現れると示唆される。一方、内部摩擦角には相関がみられず、スギ根系の補強効果には関与しないことが示唆される。
- 3) 機械学習を用いて供試体に加わるせん断応力を予測すると、せん断応力の実測値と比較して、誤差 44.94% 以内 (ロジスティック回帰分析)、6.14% 以内 (LSTM) となり、LSTM の方が 0.19 倍小さな誤差で予測した。
- 4) 平均絶対誤差で評価すると、LSTM は、ロジスティック回帰分析の 382 倍の訓練精度、4.75 倍の予測精度を示した。ゆえに、スギの生体電位と供試体に加わるせん断応力は時系列で強い関係性

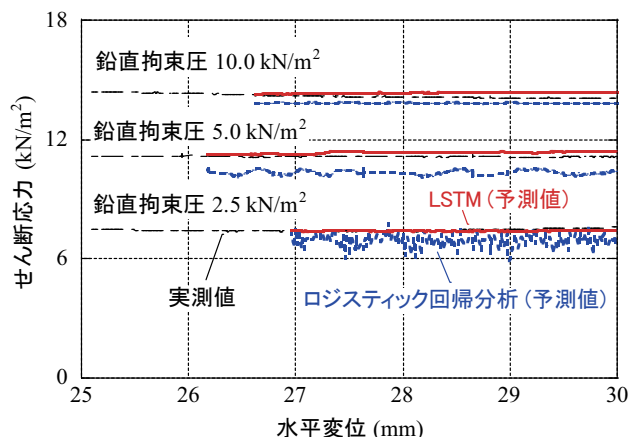


図-10 ロジスティック回帰分析と LSTM によるせん断応力の予測結果

表-5 ロジスティック回帰分析と LSTM の学習精度と予測精度

		MAE	R ²
ロジスティック回帰分析	学習精度	0.84	0.78
	予測精度	0.76	0.91
LSTM	学習精度	0.0022	1.00
	予測精度	0.16	0.99

を持っていることが示唆された。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP19K15089 および 22K04318 の助成を受けたものです。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大津宏康ら: 短期間集中豪雨に起因する斜面崩壊機構に関する研究, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.63, No.3, pp.271-278, Mar.2014.
- 2) 阿部和時: 原位置一面せん断試験によるスギ根系の斜面崩壊防止機能の研究, 日本緑化工学会誌, 22 (2), pp.95-108, 1996.
- 3) 新保達也・東野翼・大藪多可志・木村春彦・南戸秀仁: 風速変化に対する植物生体電位反応, 電学論 E, 126-E, 7, pp.370-375, 2006.
- 4) 古川全太郎ら: モンゴル乾燥地における薬用植物「カンゾウ」適正生存環境予測のための機械学習を用いたロジスティック回帰分布, 第 14 回環境地盤工学シンポジウム, pp.229-236, 2021.
- 5) 張曉齊ら: オープンデータと LSTM を用いた犯罪発生予測及び時間的近接性における考察, 情報学, 16 巻 1 号, pp.56-70, 2019.
- 6) 今井久: 樹木根系の斜面崩壊防止効果に関する調査研究, ハザマ研究年報, pp.34-52, 2008.12.
- 7) 阿部和時: 根系の引き抜き抵抗力によるせん断補強強度の推定, 日本緑化工学会誌, 16(4), pp.37-45, 1991.

(2022. 5. 30 受付)