X 線 CT スキャンを利用した植物根系を含む細粒土のせん断強度特性に関する評価

北見工業大学　大学院　学生会員　○山口　滉平，　非会員　宋　白楊
北見工業大学　工学部　正会員　中村　大，川口　貴之，川尻　峻三

1．はじめに

植生工は植物を繁茂させてのり面の表層侵食を防ぎ，根系の侵入で表層地盤を拘束する工法である．このため，草本植物の根系が土のせん断強度に与える影響を把握することは重要であるが，研究例は少ない．本研究では，寒冷地で採用実績が多いケンタッキーブルーグラスを用いて，生育期間や凍結融解履歴が異なる供試体を作製し，低応力下での定圧一面せん断試験を実施した．また，せん断後の供試体に X 線 CT スキャンを行うことで根系の発達状況を観察し，これを用いたせん断試験結果の評価も試みた．

2．試験条件と方法

表 1 は本研究の試験条件（全 5 ケース）をまとめたものであり，試験は各ケース 4 回実施した．供試体は根系を含まない供試体（土供試体）と，これにケンタッキーブルーグラスを播種して根系を発達させた供試体（根系含有土供試体）の 2 種類である．また，根系含有土供試体には生育期間 1 カ月のものと，4 カ月のものがある．さらに，土供試体と生育期間 4 カ月のものの一部には，凍結融解履歴を与えた．

表 1　本研究の試験条件

ケース	供試体の種類	供試体名	植生生育期間	凍結融解
1	土供試体	S1~4	-	無
2	根系含有土供試体	KB1~4	1 カ月	無
3	根系含有土供試体	KB5~8	4 カ月	無
4	土供試体	S5~8	-	有
5	根系含有土供試体	KB9~12	4 カ月	有

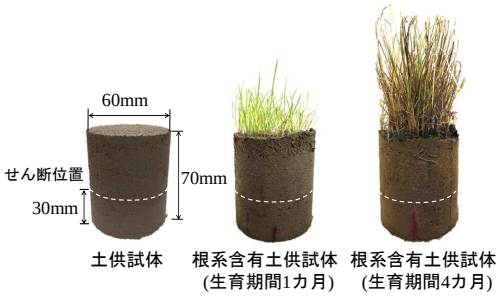

図 1　土供試体，根系含有土供試体の様子

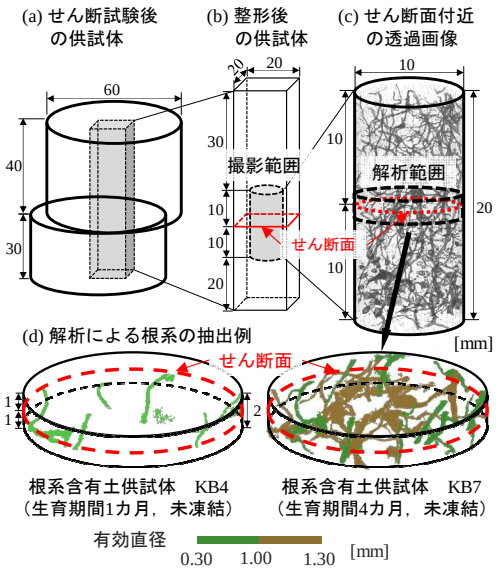

図 2　X 線 CT スキャン方法の概略図

図 1 は土供試体，播種から 1 カ月後，4 カ月後の根系含有土供試体の様子であり，植物の生育状況に明瞭な差を確認できる．土試料は火山灰質粘性土であり，0.85mm ふるい通過分を使用した．土粒子の密度ρ_s は 2.56g/cm^3，最適含水比 w_{opt} は 28%，最大乾燥密度ρ_{dmax} は 1.43g/cm^3 である．播種にかかわらず，供試体は含水比 w=30%の土試料を湿潤密度ρ_t=1.58g/cm^3 となるよう計量してモールド内に投入し，所定の層厚となるよう全断面ピストンをハンマーで打撃して作製した（締固め度 D_c=85%）．供試体は直径 60mm，高さ 70mm の円柱形であり，層厚は下 3 層を 20mm，上 1 層を 10mm とした．根系含有土供試体は上 1 層を撹拌して播種し，屋外に静置して植物を生育させた．

凍結融解履歴のうち，凍結過程は地盤工学会基準（JGS 0172-2009）に準拠した凍上試験で行った．また，融解過程は+2°C の恒温室に設置した一面せん断試験装置内で行った．

せん断試験は地盤工学会規準（JGS 0561-2009）に準じた定圧一面せん断試験とした．本研究では土被り圧の小さいのり面表層を対象としているため，全ての過程において鉛直応力σ は 10kN/m^2 とした．せん断箱間隔は 0.2mm，せん断変位速度は 0.02mm/min，最大水平変位は 7mm である．なお，せん断は 24 時間の浸水飽和後に行い，せん断位置は底面から 30mm とした（**図 1** 参照）．試験装置や試験方法の詳細については，参考文献[1] を参照されたい．

図 2 は各供試体における根系の発達状況等を確認するため，せん断後の供試体に対して実施した X 線 CT スキャンの方法について示した概略図である．根系の判別が可能となる程度に撮影画像を鮮明にするため，供試体を極力乱さないようにカッターナイフで四角柱に整形した．撮影範囲は底面から 30mm の位置をせん断面と考え，この面

キーワード　植生工，植物根系，せん断強度，X 線 CT スキャン，凍結融解履歴
連絡先　〒090-8507　北海道北見市公園町 165 番地　北見工業大学　ＴＥＬ0157-26-9539

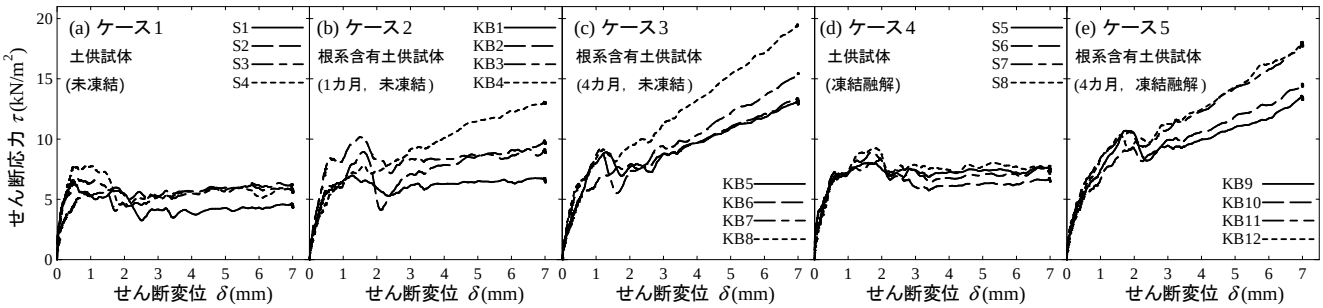

図 3　全 5 ケースにおける定圧一面せん断試験結果

から上下 10mm，直径 10mm の円柱形とした．ボクセルサイズは 0.028mm であり，得られた X 線 CT スキャン画像を解析ソフト（ExFact VR）で 3 次元再構成し，Region Growing 法を用いた解析を行うことで根系を抽出した．解析は前述の撮影範囲のうち，せん断面から上下 1mm の領域のみに対して実施している．図中には根系の抽出例も示しているが，色の違いは複雑な形状の根系を空隙と捉え，その体積を球体に置き換えた場合の直径（有効直径）に対応している．

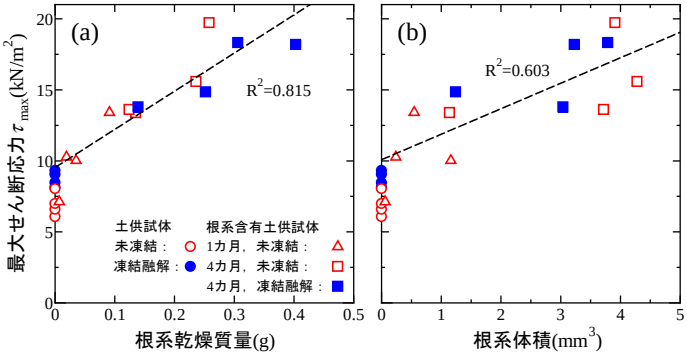

図 4　最大せん断応力τ_{max}と根系乾燥質量および X 線 CT スキャン画像から抽出した根系体積の関係

3．試験結果と考察

図 3 は定圧一面せん断試験時におけるせん断変位δに伴うせん断応力τの推移をケースごとに比較したものである．凍結融解履歴を与えていない 3 ケースを比較すると（**図 3**(a), (b), (c)），δが小さな領域（2mm 程度まで）では根系含有土供試体と土供試体のせん断挙動にそれほど大きな違いは見られないが，それ以降では大きな違いが見られ，根系含有土供試体ではδに伴ってτが上昇していることがわかる．また，生育期間が長いケース 3（**図 3**(c)）の方がケース 2（**図 3**(b)）に比べてτの上昇が顕著であり，根系が発達することで，特にδが大きい領域（大変形時）でのせん断抵抗が大きくなっており，靭性を向上させていることが伺える．凍結融解履歴を与えた 2 ケースを比較すると（**図 3**(d), (e)），先述した凍結融解履歴を与えていない 3 ケースと同様な傾向を示しており， 根系の含有によるせん断抵抗の上昇が確認できる．また，凍結融解履歴の有無で比較しても大きな違いは見られず，凍結融解履歴によって根系が大きく損傷したような影響は確認できない[1)]．

図 4 は各試験の最大せん断応力τ_{max}と根系乾燥質量および X 線 CT スキャン画像から抽出した根系体積との関係をプロットしたものである．なお，**図 4**(a)の根系乾燥質量はせん断試験後の供試体から根系のみを採取して計測したものである．また，両図には根系含有土供試体のみ（ケース 2, 3, 5）の試験結果を近似した直線も示している．**図 4**(a)から，根系乾燥質量とτ_{max}との間に正の相関が認められ，供試体内に含まれる根系量がせん断抵抗に直接的な影響を与えていることが伺える．**図 4**(b)から，解析から得られた根系体積においても根系乾燥質量と同様な相関が得られており，供試体内（特にせん断面周辺）の根系量や太さ，その配置等がせん断抵抗を増加させていると理解できるとともに，それを把握する手段として X 線 CT スキャンが極めて有効であると解釈できる．

4．まとめ

- 根系含有土供試体では，せん断変位が小さな領域では土供試体のせん断挙動とそれほど大きな違いは見られないものの，せん断変位が大きくなるにつれてせん断抵抗が大きくなることが確認された．
- 一面せん断試験後の供試体を用いた X 線 CT スキャン画像から，せん断面周辺における根系の含有量とせん断抵抗の大きさには相関が見られ，X 線 CT スキャンがせん断抵抗に及ぼす根系の影響を把握する手段として，極めて有効であることがわかった．

参考文献

1) 川内谷勇真，宋白楊，中村大，川口貴之，川尻峻三，山下聡 ：凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む細粒土のせん断特性に関する基礎的研究，日本緑化工学会誌, Vol.43, No.1, pp.144-149, 2017.