

スギ根系の地震時斜面安定への影響に関する 実験的・解析的検討

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDIES FOR STABILIZATION EFFECTS OF CEDER ROOT ON SLOPE STABILITY

古川 全太郎¹・笠間 清伸²・八尋 裕一³
Zentaro FURUKAWA, Kiyonobu KASAMA and Yuichi YAHIRO

¹九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: z.furukawa@civil.kyushu-u.ac.jp

²東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: kasama.k.ab@m.titech.ac.jp

³九州大学大学院工学府 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: yahiro@civil.kyushu-u.ac.jp

Key Words: root reinforcement, shaking table test, slope stability analysis

1. はじめに

日本における地震観測件数は増加傾向にある¹⁾。近年では平成 28 年熊本地震²⁾や北海道胆振東部地震³⁾等、強い地震動により山間地の自然斜面や土構造物の崩壊が発生しており、今後一層の被害の甚大化が危惧されている。一方で、山間地の斜面に生育する根系が地震時にせん断補強効果を発揮することが知られている。要素試験や模型実験、原位置試験により、根系による地盤のせん断補強効果の定量化が試みられているが⁴⁾⁵⁾⁶⁾、模型実験の場合⁷⁾⁸⁾には、実際の根よりも高い剛性を有する 3D モデルを用いたり、根と等価な繊維材料で代用するなど、実物の植生を用いない場合が多く、植生の補強効果を直接測定した研究は少ない。

根系による地震時のせん断補強効果を把握するためには、実際の根系を模型地盤に定植させ、作製した地盤に対して振動台実験を行い、その効果を定量的に評価することが有効であると考えられる。

本報ではスギ根系を有する模型斜面を対象に、1G 場での振動台実験を行い、根系が存在する場合の斜面の加速度応答、変形挙動及び根系による補強効果を調査した。加えて、Janbu 法による地震力と根系に

よる補強効果を考慮した斜面の安定解析を行い、実験結果と比較した。

2. 実験条件

図-1 に模型斜面の概略図を示す。模型斜面は、地震が起こって滑落し、背後に植生が残っている急斜面が再び地震により被災する状況を想定し⁹⁾、下幅 800 mm、高さ 700 mm、奥行 400 mm、斜面の傾斜角は 80° とし、アクリル製の土槽内に作製した。土質材料は、図-2 に示す粒度分布を有する粒径 4.75 mm 以下のまさ土を用いた。実験条件を表-1 (a) (b) 及び図-3 (c) に示す。表-1 (a) の通り、模型斜面は、最適含水比 12.2 % に調整したまさ土を用いて厚さ 175 mm ずつ 4 層で締固め、乾燥密度 16.4 kN/m³ となるように作製した。

根系はスギの苗木を用いた。表-1 (b) に植生の条件を示した。スギは日本全国に分布しており、日本の人工林の 44 % を占めることから¹⁰⁾、代表的な山間地の植物として選択した。苗木は、Case1 と 2 については、斜面天端を 4 等分した長方形のそれぞれの対角線の交点に 2 本 2 列で配置した。Case3 は斜面天端を 2 等分した長方形のそれぞれの対角線の交

点に2本1列で配置した (図-1 参照). 根系深さは, 実寸の1/20を想定し, 参考文献¹⁾を参照し, Case1では75 mm (実寸1.5 m), Case2では125 mm (実寸2.5 m)とした. スギ苗の地上部の高さはいずれの条件でも300-400 mmに統一した. なお, 根系を設置しないCase0についても同様の斜面形状・加振条件で実験を行った.

図-1に示す法肩から100, 300, 500 mmの距離の鉛直変位をレーザー変位計により測定した. 水平変位は, 高さ175, 350, 525 mmの斜面表面をレーザー変位計により測定した. 図-1中の長方形は, 変位測定のための反射板を示しており, 反射板の中央部の変位を測定した. また, 鉛直・水平変位測定位置の延長線で交差する9点に加速度計を配置した. 設置位置を法面側からFront, Middle, Backとし, 加振中の応答加速度を測定した.

入力加速度を図-3(c)に示す. 入力加速度はsin波, 周波数を10 Hzとし, 加速度振幅を100 gal, 200 gal, 300 gal, 400 galと段階的に増加させた. それぞれの加速度の継続時間を, 100 gal, 200galおよび300 galでは10秒, 400 galでは60秒とした.

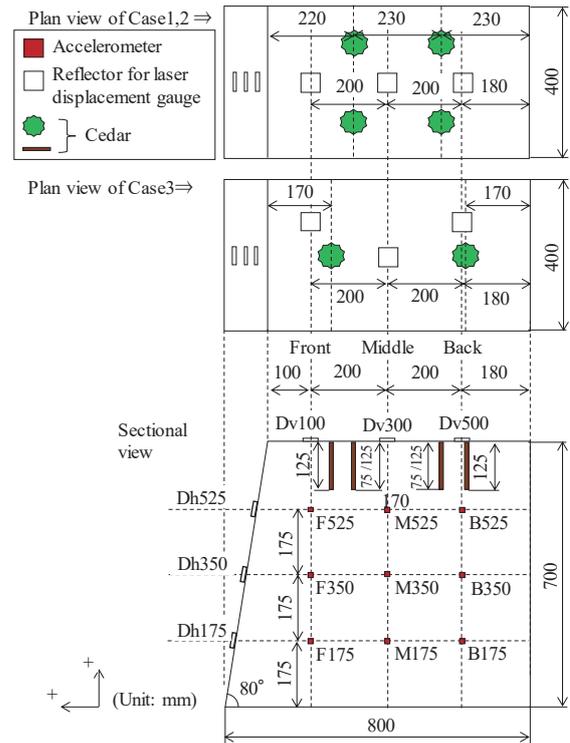


図-1 模型斜面の概略図

3. 実験結果

(1) 模型地盤の水平変位と鉛直変位

図-3(a)に斜面の水平変位の時間変化を示す. 図-1の紙面左向き変位を正とする. 図-3(b)に斜面天端の鉛直変位の時間変化を示す. 図-1の紙面上向きを正とする. 図-3(a)(b)の変位が顕著に変化した時刻を崩壊時刻とすると, Case0では55.0秒, Case1では52.2秒, Case2では36.7秒, Case3では93.5秒であった. Case2は300 gal, その他のCaseは400 galでの加振時に法尻から亀裂が入り崩壊が起こった. 崩壊に至るまでの時刻は, Case3が最も長かった. 根系2本のCase3及び根系なしのCase0と比較して, 根系4本のCase1と2で早く崩壊した理由として, 根系の動揺により土中に亀裂が生じ, 表層付近の模型斜面が崩壊しやすくなったことが考えられる.

(2) 模型地盤の加速度応答倍率

図-4(a) - (c)に, 崩壊が起こる直前の斜面左端の加速度応答倍率の高さ分布を示す. 加速度応答倍率は, 入力加速度に対する測定加速度の割合である. この値は, 崩壊時の加速度 (Case0, 1, 3は400 gal, Case2は300 gal)での値を示している. なお, 図-4(a)は図-1のF(法面側), (b)はM(中央付近), (c)

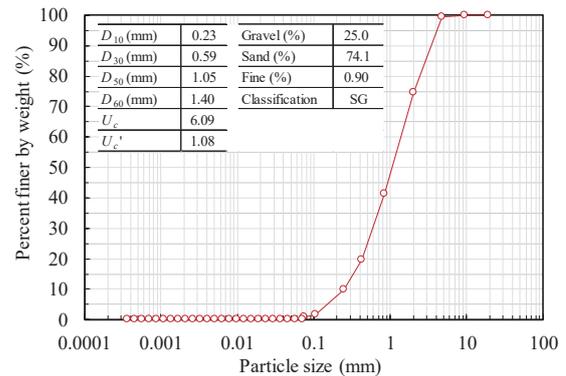


図-2 まさ土の粒径加積曲線

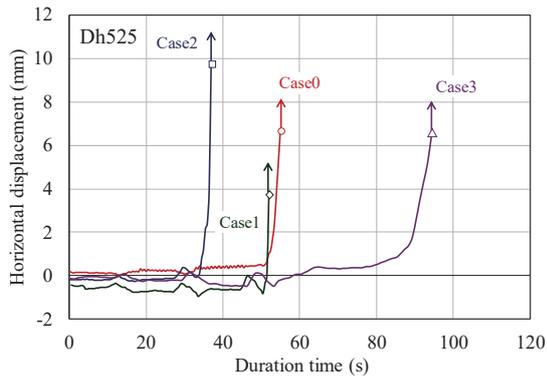
表-1 模型の作成条件

(a) 土質条件

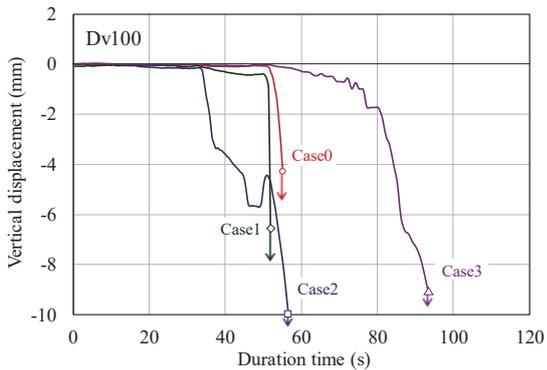
Soil	Decomposed granite soil (sieved under 4.75 mm)
Dry density ρ_d	kN/m ³ 16.4
Water content w	% 12.2

(b) 植生条件

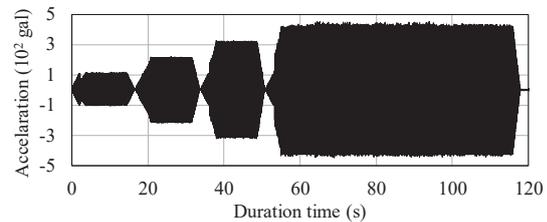
Case	Number of roots	Depth of roots (mm)	Distance from root to crest (mm)	Kind of plant
0	0	-	-	None
1	4	75	220, 450	Ceder
2	4	125		
3	2		170, 510	



(a) 斜面法肩付近 (Dh525) の水平変位



(b) 斜面法肩付近 (Dv100) の鉛直変位

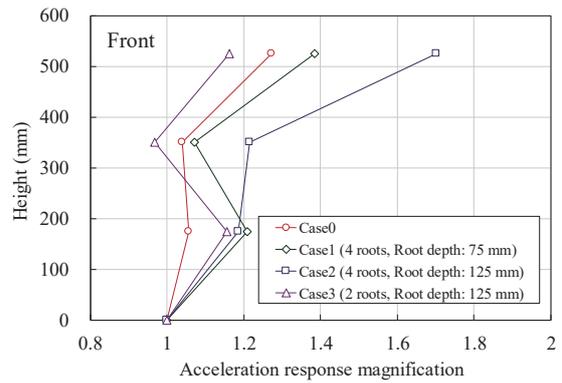


(c) 入力加速度

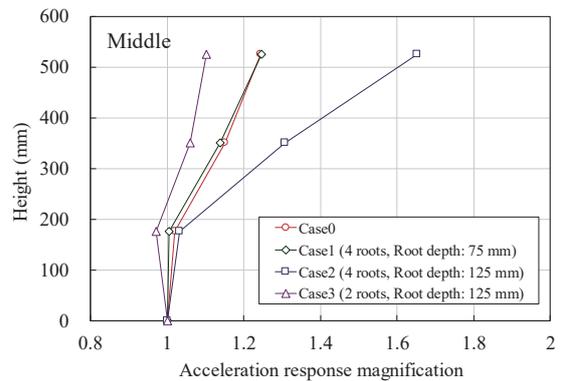
図-3 高さ 525 mm 斜面表面 (Dh525) の水平変位
及び入力加速度

は B (背面側) のセンサーの出力値から算出した。

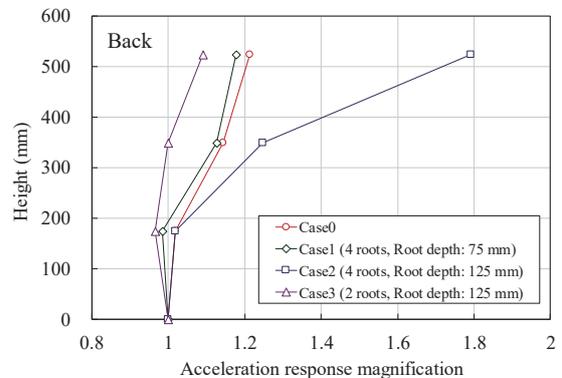
図-4 より、根系がある場合、最も法尻に近い斜面左下 (F175) の加速度応答倍率は、同じ高さの Middle, Back の値と比較して 16.3-25.3 % 増加した。スギ 2 本の Case3 を根系なしの Case0 と加速度応答倍率を比較すると、100, 200 gal 時点では差は見られなかったが、崩壊前の 300 gal 時点では Front において 6.9-8.7%, Middle において 4.7-11.4%, Back において 5.3-12.5% 低減した。Case3 を根入れ深さが同様でスギ 4 本の Case2 と比較すると、200 gal 時に平均 4.8%, 300 gal 時に平均 27.7% 低減した。Case2 に作用している加速度応答倍率が最も高いことがわかる。このことも、Case2 のみ 300 gal で崩壊した理由の一つであると推測できる。



(a) F175, F350, F525 (F: 法面側)



(b) M175, M350, M525 (M: 中央付近)



(c) M175, M350, M525 (B: 背面側)

図-4 崩壊直前の加速度応答倍率分布

(3) 模型地盤の崩壊後の傾斜角

根系数が最も多く、根系深さが他の条件よりも深い Case2 の模型斜面が最も早く崩壊した理由を考察するため、図-5 のように斜面の崩壊後の角度を計算した。図-5 の崩壊斜面のトレース線 (赤い実線) の法肩と法尻を結んだ直線 (赤い破線) の角度を崩壊後の角度とした。図-5 は一例として Case2 を示して

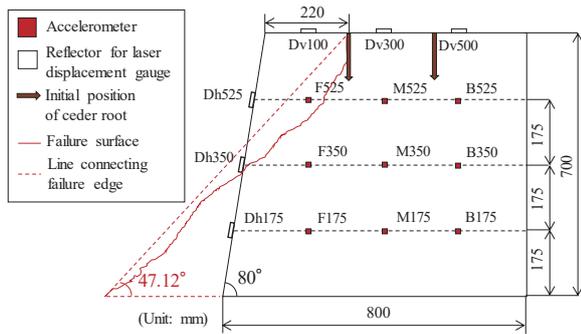


図-5 崩壊形状の一例 (Case2)

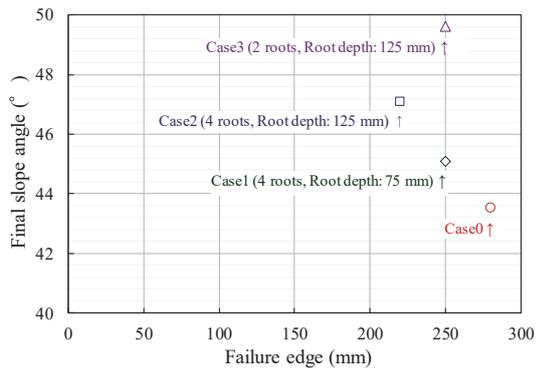


図-6 法肩の崩壊距離と崩壊後の斜面の角度の関係

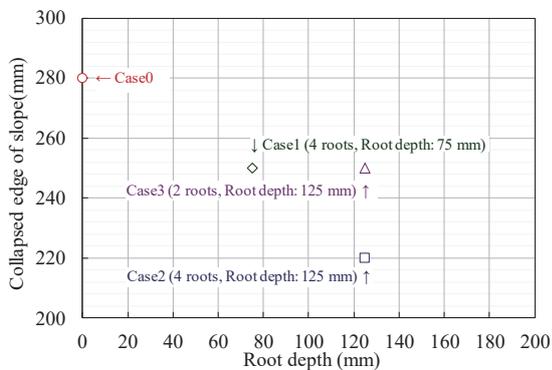


図-7 根系深さと法肩の崩壊距離の関係

いる。図-5と同様に、各条件で崩壊後の斜面の角度を計算した。

図-6に崩壊端の法肩からの距離と最終崩壊角度の関係を示す。図-6より、根系が崩壊前の法肩に最も近いCase3の最終崩壊角度49.6°が最も高く、次にCase2(47.1°), Case1(45.1°), Case0(43.5°)の順に崩壊角度が緩やかであった。このことから、根系がある場合、根系が法肩に近いほど最終崩壊角度は高くなり、水平方向の崩壊を抑えることができると推測できる。加えて、図-7に根系深さと崩壊端と法肩の距離の関係を示す。Case1とCase3を比較すると、

表-2 粘着力 c_D と内部摩擦角 ϕ_D の設定値¹³⁾

Number of roots	Cohesion c_D (kN/m ²)	Friction angle ϕ_D (°)
0	5.4	35.8
1	10.6	39.7
2	11.4	40.6

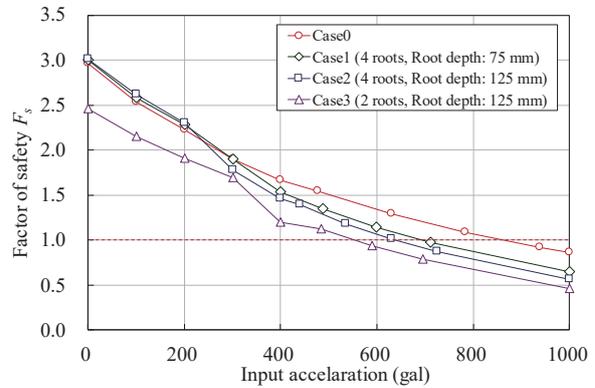


図-8 入力加速度と安全率の関係

根が深いCase3の方が法肩の崩壊量を12%抑えられたことがわかる。このことから、加速度応答倍率を抑えることができる適切な根系本数があると推測できる。

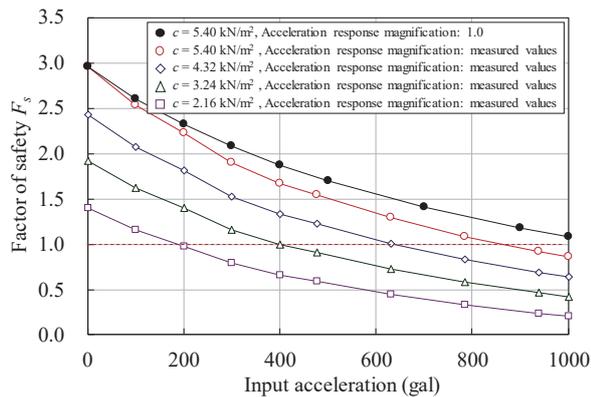
4. 斜面安定解析

2. 3. に示した模型斜面について、地震力を考慮したJanbu法¹²⁾(式(1))により安全率を求めた。

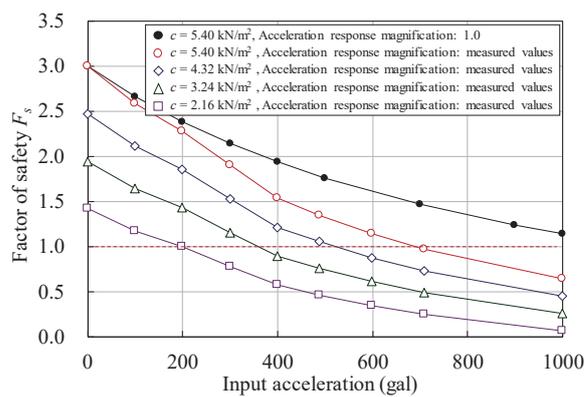
$$F_s = \frac{1}{\sum \{k_h \Delta W_i + \Delta W_i \tan \theta_i\}} \times \sum \frac{\{c_D l_i \cos \theta_i + \Delta W_i - u_i l_i \cos \theta_i\} \tan \phi_D}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi_D / F_s)} \quad (1)$$

ここに、 F_s : 安全率、 c_D : 斜面の粘着力 (kN/m²)、 ϕ_D : 斜面の内部摩擦角、 k_h : 水平震度、 l_i : 分割土塊の下辺の長さ (m)、 ΔW_i : 分割土塊の自重 (kN)、 θ_i : すべり円弧の中心から半径方向に伸ばした線と鉛直方向がなす角度 (°)。

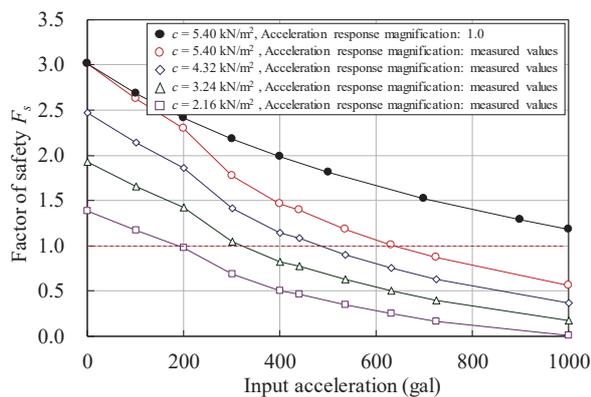
モデル斜面の傾斜角は、模型斜面と同様の80°とした。水平震度 k_h は、100 - 400 galの加振加速度で得られた地盤内の加速度のうち、Front(法尻から約234mm)の最大値を用いた。400 gal以降の加速度応答倍率は、各条件で入力加速度-応答倍率の関係を直線近似し、近似式により応答加速度を算出した値を計算に用いた。すべり面の設定角度は、最終崩壊角



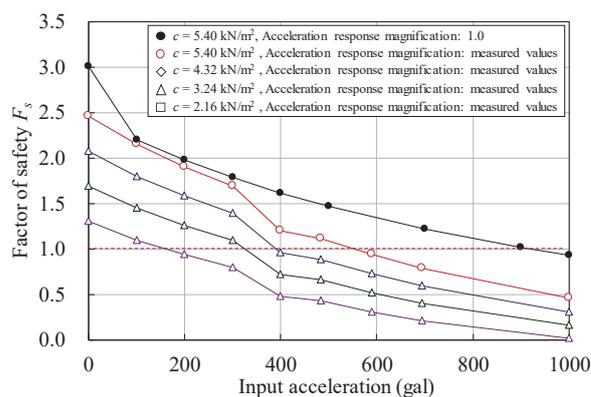
(a) Case0 (根系なし)



(b) Case1 (根系4本, 根深さ75 mm)



(c) Case2 (根系4本, 根深さ125 mm)



(d) Case2 (根系2本, 根深さ125 mm)

図-9 粘着力を低減させた場合の入力加速度と安全率の関係

度とした。斜面分割数は20とし、根系を有する分割土塊のみ、 c_D と ϕ_D を変更した。 c_D と ϕ_D は、模型斜面と同様の土質、乾燥密度、含水比、根系で行った田代らの根系を含む一面せん断試験結果¹³⁾を参照した。参照した c_D 、 ϕ_D の値を表-2に記す。各分割土塊に存在する根の本数を考慮し、根が存在しない分割土塊には「0本」、Case1,2の根が存在する分割土塊には表-2の「2本」、Case3の根が存在する分割土塊には「1本」のときの c_D 、 ϕ_D を用いた。なお、表-2の c_D 、 ϕ_D の値は静的なせん断試験から得られた値である。根系が存在する分割土塊において、分割土塊の高さに対して、根の深さから根系が存在する割合を計算し、 c_D と ϕ_D の増加割合を決定した。

図-8に入力加速度と安全率の関係を示す。図-8より、いずれのCaseでも、崩壊時の入力加速度 (Case0, 1, 3では400 gal, Case2では300 gal) のときの安全率はそれぞれ1.0を上回った。式(1)の粘着力 c_D は、表-2の値を用いて計算している。実際には加振により模型斜面に亀裂が入ったことにより、粘着力が低減しており、安全率が過大に算出されていると考えられる。また、粘着力の増加割合は考慮しているものの、粘着力の増分を根系が存在する分割土塊全体

に付与していることも、安全率が過大に算出されている原因の一つであると推測できる。

そこで、粘着力を元の値の80%、60%、40%に低下させた場合の安全率を求め、入力加速度400 galにおいて、安全率が1以下となる粘着力を求めた。それぞれの条件の入力加速度と安全率の関係を図-9(a) - (d)に示す。その結果、入力加速度400 galのときの粘着力は、Case0の場合は初期粘着力から59.9%低下していることが示唆された。同様にCase1, 2, 3では、それぞれ粘着力が61.5%、64.2%、59.1%低下していることが示唆された。

6. まとめ

本報は、スギ根系を有する模型斜面を対象に、1G場での振動台実験を行い、根系が存在する場合の斜面の加速度応答、変形挙動及び根系による補強効果を調査した。加えて、Janbu法による地震力と根系の補強効果を考慮した斜面安定解析を行い、実験時の地震による粘着力の低減を評価した。その結果、下記のような結論が得られた。

1) 根系が法肩に近いほど斜面の最終崩壊角度は高

くなり、水平方向の崩壊が抑えることができると推測できる。

- 2) 加速度応答倍率は崩壊前の 300 gal 時においてスギ 2 本の場合と根系なしの場合を比較すると、Front, Middle, Back はそれぞれ 6.9 - 8.7 %, 4.7 - 11.4 %, 5.3-12.5 %低減した。
- 3) 実験で得られた最終崩壊角度をもとに斜面安定解析を行ったところ、粘着力は、初期粘着力から Case0, 1, 2, 3 でそれぞれ 59.9 %, 61.5 %, 64.2 %, 59.1 %低下したと推測できる。

今後、模型地盤の条件として、乾燥密度が小さい場合、含水比が低い場合の実験を実施することで、植生による粘着力の増加による影響を大きくし、明確に補強効果を確認する必要がある。また、植生の条件では、斜面に根系が存在する場合や、根系の種類、配置、深さによる影響を、斜面表面の変位や地盤内の加速度を測定することにより把握し、根系による斜面安定への効果や粘着力の増加効果を定量化できると考えている。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP16K18151 “植生生体電位を活かした表層崩壊バイオアラームの開発”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) 気象庁, 震度データベース,
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>
- 2) (公社) 地盤工学会 熊本地震地盤災害調査団, 平成28年熊本地震地盤災害調査報告書, pp. 25-113, 2017.
- 3) 小山内信智, 海堀正博, 山田孝他, 平成30年北海道胆振東部地震による土砂災害, 砂防学会誌, Vol. 71, No. 5, pp. 54-65, 2019.
- 4) 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), 95-108, 1996.
- 5) 今井久, 樹木根系の斜面崩壊抑止効果に関する調査研究, ハザマ研究年報, pp. 34-52, 2008.
- 6) Xin-zhe, L., Jian-lin, L., Hua-feng D., In-Situ Direct Shear Test Research of Rock and Soil of Typical Bank Slope in Three Gorges Reservoir Area, EJGE, 19, 2525-2534, 2014.
- 7) Pallewatta, M., Indraratna, B., Heitor, A., Rujikiatkamjorn, C., Shear strength of a vegetated soil incorporating both root reinforcement and suction, Transportation Geotechnics, 18, 72-82, 2019.
- 8) Docker, B.B. and Hubble T. C. T., Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species, Geomorphology, 100, 401-408, 2008.
- 9) 石川芳治, 久保田哲也, 青戸一峰ほか43名, 平成28

年熊本地震による土砂災害, 砂防学会誌, Vol. 69, No. 3, 55-66, 2016.

- 10) 林野庁, スギ・ヒノキに関するデータ,
https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/kafun/data.html
(2020年8月4日閲覧)
- 11) 苅住昇, 樹木根系の形態と分布, 林業試験場研究報告第94号, pp. 40-42, 1957.
- 12) (公社) 地盤工学会, 新編 土と基礎の設計計算演習, pp. 388-398, 2000.
- 13) 田代直樹, 古川全太郎, 笠間清伸, 根系を含む土のせん断が植物根系の生体電位に及ぼす影響, 第13回環境地盤工学シンポジウム論文集, 405-408, 2019.

(2020. 7. 1 受付)