

樹木を有する斜面の地震時応答特性・安定性

田中 宣多¹・中村 満太²・上田 恭平³・渦岡 良介⁴

¹正会員 京都大学研究員 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: tanaka.yoshikazu.5m@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 京都大学研究生 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: manta.nakamura.32u@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: uzuoka.ryosuke.6z@kyoto-u.ac.jp

平成 30 年北海道胆振東部地震で崩壊した斜面は、尾根を残して中腹から立木を伴うすべりが確認された。尾根に残った部分と崩壊した部分には樹木が分布しており、崩壊に影響を及ぼした可能性がある。これまでに樹木根系が斜面安定に寄与することは分かっている。しかし地震時の斜面に対する樹木影響はよく分かっていない。そこで本研究は、樹木を有する斜面において地震時の応答性と安定性を明らかにするために、線形全応力解析と安全率算定を行った。解析の結果、樹木なし地盤の地表面における応答周期は、入力波の 3.6 倍、樹木-地盤系の応答周期が地盤の応答周期と近い場合、樹木の応答加速度は入力波の 13.5 倍に増幅されていた。安全率算定結果も踏まえると、地震時斜面は樹木の影響を受ける特定の条件がある可能性を示した。

Key Words: *slope failure, tree effect, linear analysis, factor of safety,*

1. はじめに

平成 30 年北海道胆振東部地震は、9 月 6 日 3 時 07 分に発生し、最大震度 7 の地震であった。北海道胆振地方に位置する厚真町では、同時多発的に斜面崩壊が発生した。崩壊斜面は、尾根を残して斜面中腹から立木を伴って崩れる形がみられた。崩壊斜面は、すべり面を有し、風化粘性土化した降下火砕堆積物であった^{1,2)}。先行降雨によって高含水状態にあった地盤条件と地震動の組み合わせが崩壊のメカニズムと考えられている。被害地域は、同じ条件である中に崩壊の有無が表れており、樹木植生が斜面崩壊に対して何らかの影響を及ぼした可能性がある。

これまでに斜面安定に対する樹木植生の影響は、根系のせん断強度増加³⁾や樹木重量の鉛直応力増加とされている。樹木を有する斜面安定性は、森林地上部荷重の影響を考慮した有限斜面に対する非円弧すべり面安定解析によって森林地上部荷重の斜面安定への影響は比較的小さいことが分かっている⁴⁾。しかし、動的条件で樹木が

地震時に斜面に対して与える影響はよく分かっていない。そこで本研究は、樹木を有する斜面において地震時の応答性と安定性を明らかにするために、線形全応力解析と安全率算定を行った。

2. 樹木を有する斜面の地震時応答性

(1) 線形全応力解析の条件

解析に使用した有限要素メッシュを図-1 に示す。解析で対象とする斜面は、現場を対象としたものではなく、傾斜角 35 度の無限長斜面とする仮想斜面であり、線形地盤とした。地盤のモデル化は、表層（層厚：2 m）、すべり層（層厚：0.5 m）、基盤層（層厚：2.5 m）とした。樹木のモデル化は、直径 0.30 m と 0.70 m の線形はりとした。なお、根系抵抗力の付加的な粘着力は考慮しない。樹木と地盤間の重なる部分のモデル化は、地盤に挿入された一本のはりとして樹木と地盤間の相互作用を考慮している。ここでは、水平方向の応力のみを考慮できるようにし、引き抜けを模擬するような軸方向の摩擦は

考慮していない。地盤の解析メッシュは、縦 0.5 m、横 0.6m の平行四辺形を表層で 8 要素、すべり層で 2 要素、基盤層で 10 要素とした。樹木の解析メッシュは、29 節点、28 要素とした。無限長斜面を模擬するため、側方は循環境界に設定した。すなわち、斜面地表面より同一深度に位置する節点ペアの x 方向、y 方向自由度がそれぞれ同一であると仮定した。メッシュ底面は節点自由度を拘束し、固定境界とした。地盤の諸元は表-1 に、樹木の諸元は表-2 に示す。表層地盤は、固い地盤を想定し、すべり層は緩い地盤を想定した。樹木の固有周期は、片持ち梁を想定して求めたばね係数を用いて計算した。入力波は K-net HKD127 追分 (EW 成分) を用いた。解析の順序としては、まず自重解析を行い、各要素に作用する

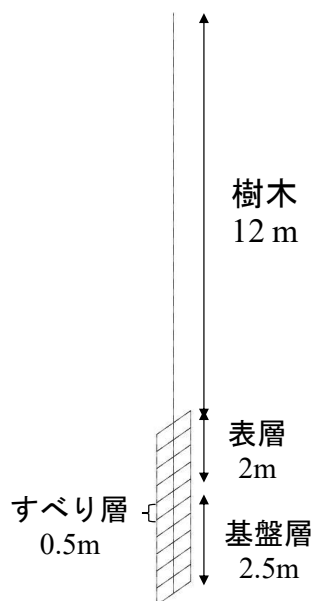


図-1 解析に使用した有限要素メッシュ

表-1 地盤の諸元

項目	表層	すべり層	基盤層 ^{a)}
ポアソン比	0.33	0.33	0.37
湿潤密度 (g/cm ³)	2.0	2.0	2.6
せん断弾性係数 (kN/m ²)	100603	740	1.26×10^7

表-2 樹木の諸元

項目	直径 0.3m	直径 0.7m
ポアソン比	0.33	0.33
密度 (g/cm ³)	0.53	0.53
せん断弾性係数 (kN/m ²)	3.96×10^6	3.96×10^6
固有周期 (s)	1.58	0.68

初期せん断応力を算定する。その後、水平方向に地震動を入力することで地震応答解析を行った。

(2) 応答加速度の比較

解析では、底面、すべり層下端、上端、地表面、樹木上端の加速度時刻歴を出力した。まず、入力に対する出力応答を比較する。樹木なし地盤の地表面最大応答加速度は入力波の 3.6 倍、直径 0.3m 樹木地盤の樹木最大応答加速度は入力波の 5.2 倍、直径 0.7m 樹木地盤の樹木最大応答加速度は入力波の 13.5 倍となった。樹木を有する斜面の応答加速度は、樹木なし地盤よりも増幅している。

次に、加速度時刻歴を応答加速度スペクトルで整理する (図-2)。樹木なし地盤の地表面とすべり上面では、周期 0.3 s にピークがある。直径 0.3 m 樹木地盤では、樹木の上端で、0.15 s、0.3 s、0.8 s の周期にピークがある。樹木-地盤系の応答は、地盤の応答周期と 2 倍以上離れており、樹木加速度は大きく増幅せず、斜面に対する樹木影響は見られない。一方、直径 0.7 m 樹木地盤では、樹木の上端で 0.45 s の周期にピークがある。樹木-地盤系の応答は、地盤の応答周期と近いので樹木の応答加速度は大きく増幅した。増幅した樹木の振動によって生じた周期が地盤に表れている。よって樹木-地盤系の応答と地盤の応答が合致する特定の条件で、樹木振動は増幅され、斜面に大きな影響を与える可能性が示された。

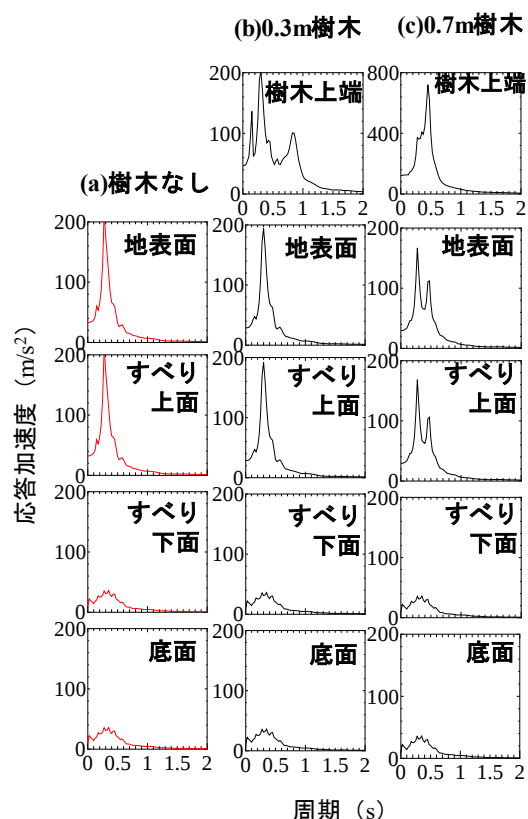


図-2 応答加速度スペクトルの比較 (減衰 : 0.05s) :

(a) 樹木なし, (b) 直径 0.3m 樹木, (c) 直径 0.7m 樹木

3. 樹木を有する斜面の安定性

(1) 無限長斜面の安定性評価式

安全率は、今井⁹⁾の安定性評価式をもとに、水平震度および樹木を考慮して検討する(図-3)。地下水面とすべり面の距離 h (m)、地下水面上の土壌の単位体積重量を γ (kN/m³)、地下水面より下方の土壌の飽和単位体積重量を γ_{sat} (kN/m³)、水の単位体積重量を γ_w (kN/m³)、深さを D (m)、斜面長を L (m)、幅を B (m)、樹木の斜面上の重量を P (kN/m²)、傾斜角を θ (degree) とする。土被り圧と水圧は、以下のように表せる。

$$\sigma = \gamma_i(D-h) + \gamma_{sat} \cdot h + P/B \cdot L \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$u = \gamma_w \cdot h \quad (2)$$

斜面に直交方向の土被り圧 σ_n (kN/m²) は、式 (3) のように表す。重量 W は、深さ D (m)、斜面長 L (m)、幅 B (m) のすべり面より上の土塊に、樹木の斜面上の重量 P は対象土塊全体に均等な上載荷重として加算して式 (4) のように、斜面方向への滑動力 τ を式 (5)、せん断抵抗力 S を式 (6) のように定義した。粘着力を C (kN/m²)、樹木根系の付加抵抗力 ΔS (kN/m²)、水平震度は k_h 、鉛直震度は k_v とした。本研究では、水平震度を考慮した。入力加速度は、KiK-net 穂別の観測波を参考に 7 m/s^2 とし、水平震度 k_h は入力加速度を重力加速度で除すことで 0.71 となる。根系の付加抵抗力は、深さ 1 m まで考慮する。

$$\sigma_n = \sigma \cdot \cos \theta \quad (3)$$

$$W = \sigma \cdot B \cdot L \cdot \cos \theta \quad (4)$$

$$\tau = (1+k_v)W \sin \theta + k_h W \cos \theta \quad (5)$$

$$S = C + \{(1+k_v)(\sigma_n - u) \cos \theta - k_h(\sigma_n - u) \sin \theta\} \cdot \tan \phi + \Delta S \quad (6)$$

樹木を考慮するすべり面に関する安全率 F_s は、以下の

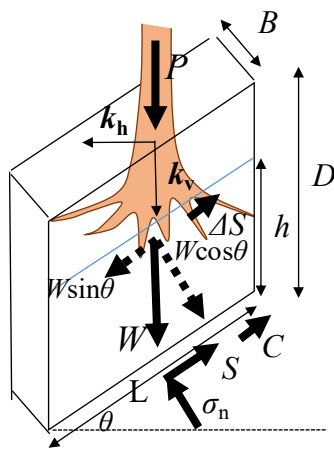


図-3 無限長斜面モデル

ようになる。安全率 F_s は式 (7) のように表す。

$$F_s = \frac{S \cdot BL}{\tau} \quad (7)$$

樹木を考慮しないすべり面に関する安全率 F_s は、樹木重量 P の項を 0 とすると計算できる。

(2) 安全率の比較

地震時斜面安定性に対する樹木の影響を明らかにするために、樹木が分布している斜面を想定した。すべり面深さに対する安全率を求め、樹木の有無による安全率の比較を行う。地盤の諸元を表-3に、想定する樹木の諸元を表-4に示す。

樹木は、直径 0.30 m と 0.70 m の2種類を想定した。現場でも樹木直径が小さいものと大きいものが分布していたためである。地盤の最大深さは 2.5 m 、奥行幅は 1 m 、現場では沢部が帯水していたが、斜面上方での地下水位

表-3 地盤の諸元

項目	単位	値
傾斜角	度	35
内部摩擦角	度	23
粘着力	kN/m ²	10
土の単位体積重量	kN/m ³	17.3
重力加速度	m/s ²	9.81
奥行幅	m	1.0
斜面長	m	0.98

表-4 樹木の諸元

項目	単位	値
樹木直径	m	0.30/0.70
樹木高さ	m	12
密度	t/m ³	0.53
根系抵抗力	kN/m ²	5.0
重力加速度	m/s ²	9.81

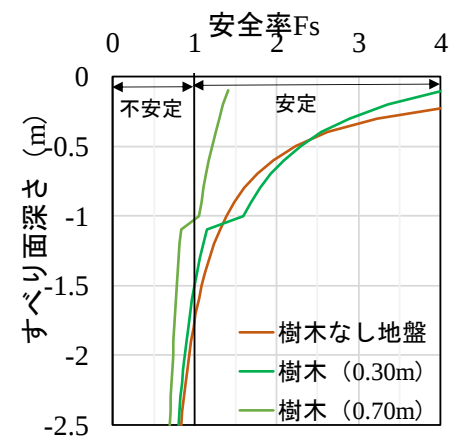


図-4 各ケースにおけるすべり面深さに対する安全率

は低いとし、地下水面は設定しない。内部摩擦角は、降下火砕堆積物の内部摩擦角と N 値の関係式⁷⁾から推定した。地盤の粘着力は、しらすの粘着力を参考にした⁸⁾。根系の抵抗力は今井⁹⁾で与えているものに近い値とした。

樹木の有無によるすべり面深さに対する安全率の変化を比較する(図-4)。直径の小さい樹木(0.30 m)は、根系抵抗力が作用しない深さ 1 m 以深にすべり面が生じる場合、樹木なし地盤よりも安全率は小さくなった。直径の大きい樹木(0.70 m)は、どの深さにすべり面が生じて、樹木なし地盤よりも安全率が小さくなった。直径が大きくなると、樹木の重量も大きくなり、土かぶり圧は増加する。斜面下方向のせん断応力に加算されるため、樹木なし地盤よりも斜面安定に対して不安定方向に作用する可能性が示された。

4. まとめ

本研究は、樹木を有する斜面の地震時応答性と地震時安定性について明らかにすることを目的に、線形全応力解析と安全率の算定を行った。線形全応力解析の結果、地盤の応答周期と樹木-地盤系の応答周期が近いときに、樹木の応答加速度は増幅し、地盤に対する樹木影響がみられた。今後、影響が大きくなる条件を整理することが課題である。安全率算定の結果、直径の大きい樹木を含む斜面では、すべり面深さが比較的浅い条件で斜面は不安定になることが分かった。安全率算定においても、斜面安定に対して樹木の影響が大きく生じる条件がある可能性を示すことができた。

謝辞：本研究は、京都大学防災研究所共同研究(2019H-02)、京都大学教育研究振興財団助成、防災研究協会研究助成の支援を受けて行った。また、防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net 強震記録を使用しました。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 千木良雅弘, 田近淳, 石丸聡: 2018 年胆振東部地震による降下火砕物の崩壊: 特に火砕物の風化状況について, 京都大学防災研究所年報, 第 62 号 B, pp. 348-356, 2019.
- 2) 王功輝, 古谷元, 渡部直喜, 土井一生, 馬寧: 平成 30 年北海道胆振東部地震による土砂災害の特徴, 京都大学防災研究所年報, 第 62 号 A, pp.48-56, 2019.
- 3) 阿部和時: 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究, 森林総研研報, No.373, pp. 105-181, 1997.
- 4) 久保田哲也, 大村寛, 奥村武信, 多田泰之, プレム・ブラサド・パウデル: 異なる林相及び森林伐採状況における樹木地上荷重の斜面安定に及ぼす影響, 日本地すべり学会誌, 41(3), pp. 273-281, 2004.
- 5) 吉中龍之進, 岩田直樹, 佐々木猛: 大型構造物基盤岩盤の地震挙動における複合降伏モデルの適用性, 土木学会論文集 C (地圏工学) 68(3), 451-465, 2012.
- 6) 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, 34-52, 2008.
- 7) 八木一善, 三浦清一: 破砕性火山灰地盤の力学特性の評価, 土木学会論文集 757 (III66), 221-234, 2004.
- 8) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 2000.

(Received September 6, 2020)
(Accepted,)

SEISMIC RESPONSE AND STABILITY OF SLOPES WITH TREES DURING EARTHQUAKE

Yoshikazu TANAKA, Manta NAKAMURA, Kyohei UEDA and Ryosuke UZUOKA

On the slope that collapsed in the 2018 Hok

kaido Eastern Iburi Earthquake, a slope failure accompanied by standing trees was confirmed from the middle of the hill, leaving a ridge. Trees were distributed in the remaining part of the ridge and the collapsed part. Trees may have affected the collapse. In previous studies, it has been known that trees contribute to slope stability depending on the root system and weight. However, the effect of trees on slopes during an earthquake is not well understood. Therefore, this study assumed the slope with a tree in order to clarify the response and stability on the slope at the time of earthquake. The linear total stress analysis was performed, and the safety factor was calculated by the simple method. As the result of the analysis, the response period on the ground surface of the ground without tree is 3.6 times that of the input wave. When the response period of the tree-soil system is close to the response period of the ground, the response acceleration of the tree is amplified to 13.5 times the input wave. It was suggested that the slope during earthquakes may have some conditions affected by tree.