RBMw を用いたスギ・ヒノキ人工林の水平根による補強強度の推定

島田博匡*1)

1) 三重県林業研究所 Mie Prefecture Forestry Research Institute

摘要: 森林斜面において表層崩壊防止機能を高めるための森林施業を効果的に実施するには、水平根による補強強度を適切に評価することが重要である。近年、欧州などで適用事例が増加している RBMw を用いて、スギ・ヒノキ人工林の水平根による補強強度の推定を試みた。スギとヒノキの水平根に対する根引き抜き試験を行い、引き抜き抵抗力、引き抜き変位量を測定した。その結果を用いて RBMw 解析に使用するパラメータを算出し、水平根分布データに対してモデルを適用することで補強強度を推定した。推定値はスギ人工林 6.0 kN/m²、ヒノキ人工林 6.8 kN/m² であり、従来法である Wu モデルによる推定値の 43%、46% であった。今後は実測値との比較検証を行う必要がある。

キーワード: 根系分布, 根直径, 引き抜き試験, 表層崩壊, 変位量, ワイブル生存関数

SHIMADA, Hiromasa: **Estimation of lateral root reinforcement in sugi [*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don] and hinoki [*Chamaecyparis obtusa* (Siebold et Zucc.) Endl.] plantations using a root bundle model with Weibull survival function.**

Abstract: To effectively implement forest management designed to enhance the shallow landslide prevention function on forest slopes, it is important to correctly evaluate lateral root reinforcement. In this study, I estimated the lateral root reinforcement of sugi and hinoki plantations using a RBMw. Root pullout tests were conducted on lateral roots, and pullout force and displacement were measured. The results obtained were used to calculate parameters adopted for the RBMw, and root reinforcement was estimated by applying the model to the lateral root distribution data. Using this approach, estimated values of 6.0 and 6.8 kN/m² were obtained for the sugi and hinoki plantations, respectively, which were 43% and 46% of the values estimated using the conventional (Wu model) method. It is necessary to verify the results with actual measurements.

Key words: root distribution, root diameter, pullout test, shallow landslide, displacement, Weibull survival function

1. はじめに

森林斜面において樹木根系は表層崩壊防止に寄与しており、間伐などの森林施業を適切に行うことでその機能を維持、向上させることができる^{1,6,7)}。樹木根系による表層崩壊防止機能を正確に評価することは、表層崩壊が発生しにくい森林への誘導を目指す上で、効果的な森林施業の時期や方法の検討、優先的に行うべき場所の選定において重要である。

表層崩壊時には崩壊すべり面に土のせん断抵抗力が発生し、これに付加される粘着力増強分が樹木根系による補強強度とされる¹⁾。補強強度は根の軸力により発揮され、すべり面底面の鉛直根・斜出根が底面を越えて伸長することによる杭効果、すべり面側面の水平根が互いに絡み合ってネット状に発達するネット効果に分けられる¹⁾。近年では鉛直根による杭効果よりも、水平根によるネット効果の役割が大きい可能性が示されており^{1,6,7)}、そのため、水平根による補強強度に着目し、この効果を定量化する研究が行われている。

補強強度の定量化では、水平根の引き抜き試験により根直径と引き抜き抵抗力の関係式を求め、これを水平根分布調査から得られた直径階別の根本数データに適用し、すべての根

による引き抜き抵抗力の総和を補強強度とする Wu ら¹⁴⁾による方法（以下、Wu モデル）が広く使用されてきた^{1,6,7)}。しかし、この方法ではすべての根が同時に破断するという仮定に基づくが、実際には同じ直径の根でも、それぞれの根で引き抜き抵抗力が最大となる変位量が異なることから Wu モデルは過大評価をもたらすことが示されている^{1,3,8,9,10)}。これを受け、近年では、根は弱いものから順に切れると仮定し、根の引き抜き変位量を考慮して補強強度を求める試みが行われるようになった^{3,9,11)}。中でも RBMw (Root Bundle Model with Weibull survival function)⁹⁾は、数学的定式化が単純で数値モデルへの組み込みも容易、かつ良好な推定値が得られることから、欧州を中心に各地で複数の樹種に対して適用されるようになってきた^{2,12,13)}。わが国においても RBMw の適用により適切な補強強度の定量的評価が可能になると考えられるが、これまでに Yamase らによる兵庫県のスギ (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don)¹⁶⁾とコナラ (*Quercus serrata* Murray)¹⁷⁾への適用事例があるのみである。また、これらでは一部のパラメータで計算プログラムの初期値が使用されており、適用するパラメータについて検討の余地がある。そのため、さらに生育条件が異なる他地域や他樹種に対

* 連絡先著者 (Corresponding author) : 〒515-2602 三重県津市白山町二本木 3769-1 E-mail : shimah03@pref.mie.lg.jp

しても RBMw を適用し、パラメータ特性や補強強度推定での適用の可否を明らかにする必要がある。そこで、本研究では国内の主要造林樹種であるスギとヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* (Siebold et Zucc.) Endl.) を対象として、三重県内の人工林で根引き抜き試験、水平根分布調査を行った結果に RBMw を適用し、両樹種のパラメータ特性を明らかにするとともに水平根による補強強度の推定を試みた。

2. 試験地と方法

2.1 試験地

三重県津市白山町川口地内の 54 年生スギ人工林 (以下、スギ林)、48 年生ヒノキ人工林 (以下、ヒノキ林) を試験地とした (林齢は 2020 年時)。両試験地間は直線距離で約 250 m 離れており、年平均気温は 13.8°C⁵⁾、年間降水量は 1,735.8 mm⁵⁾である。両試験地ともに地質は花崗閃緑岩、土質は砂質土、土壌型は適潤性褐色森林土 (偏乾亜型) B_D(d) である。スギ林の標高は 260 m、傾斜 30°、ヒノキ林はそれぞれ 230 m、24.6°であり、ともに斜面中部の南向き斜面に位置している。また、スギ林の立木密度は 1,225 本/ha、平均樹高 24.2 m、平均胸高直径 (地上高 1.2 m) 31.2 cm、ヒノキ林はそれぞれ 1,022 本/ha、17.9 m、26.3 cm であった。両試験地ともに、植栽時の植栽密度、実生苗か挿し木苗であるかの種別は不明である。スギ林での間伐履歴は不明であるが、少なくとも 20 年以上は間伐が行われていない。ヒノキ林では 36 年生時に間伐が行われた。スギ林の土壌 0~10 cm 深の容積重は 1.02 g/cm³、孔隙率 62%、20~30 cm 深ではそれぞれ 1.15 g/cm³、57% であった。ヒノキ林の 0~10 cm 深では 0.91 g/cm³、65%、20~30 cm 深では 1.08 g/cm³、59% であった。

2.2 試験方法

2.2.1 根引き抜き試験

スギ林で 5 本 (胸高直径 27.3~39.9 cm)、ヒノキ林で 3 本 (同 28.8~29.7 cm) の立木を対象木として選定した。周辺立木の干渉を極力小さくするために、対象木には周辺立木から概ね水平距離 3 m 以上離れた立木を選定した。2020 年 4~5 月、対象木の樹幹から 100 cm 程度離れた位置に鉛直断面を設けた深さ約 30 cm の溝を円環状に掘削し、断面に露出した元口直径 (以下、根直径) 1 mm 以上の根を対象に引き抜き試験を行った。断面位置における根直径 (mm) をデジタルノギスあるいは直径巻尺で測定した後に試験に供し、各対象木からスギで 5~13 本 (計 43 本、1.4~52.0 mm)、ヒノキで 15~24 本 (計 54 本、1.5~47.5 mm) の根を引き抜いた。試験は基本的に直近の降雨から 1 日以上経過した自然含水状態で行うこととし、対象木から遠心方向に伸長する根の元口部を特殊な鉋で掴むか、ステンレスワイヤースリング (ϕ 1.5~4 mm) を巻き付け、これにデジタルフォースゲージ (ZTA-DPU-5000N または ZTA-DPU-20kN、ともにイマダ社製) のロードセルを取り付けた。ロードセルは手動ウインチから伸ばしたワイヤーロープに連結し、根を真っ直ぐ引き

抜けるように、根の伸長方向と反対方向に位置する周囲の立木 (不動点) を選んで滑車を取り付け、これにワイヤーロープをかけて手動ウインチを動かすことで根を引き抜き、抵抗力 (N) を測定した。この際、引き抜き速度のばらつきに伴う誤差の発生を最小限にするために、根が破断するか完全に引き抜けるまで一定速度 (約 25 mm/min) で引っ張った。測定された根 1 本の引き抜きに要する最大抵抗力値を引き抜き抵抗力とした。また、引き抜き試験の際、スギ 37 本、ヒノキ 42 本の根に対して、デジタルフォースゲージの表示器に示された抵抗力を同時に映し込みながら、根やロードセル付近の動きを固定したビデオカメラで撮影し、これを画像解析することで変位量を求めた^{16, 17)}。試験開始時点と最大引き抜き抵抗力時点間の移動距離を引き抜き変位量 (mm) とした。

2020 年 6~8 月、根直径と根長の関係を明らかにするために、スギで根直径 13.2~34.0 mm の 7 本、ヒノキで 15.0~29.0 mm の 7 本の根を元口部から根端部まで完全に掘り取り、根の長さ (mm) を測定した。

2.2.2 水平根分布調査

2020 年 12 月、スギ林内、ヒノキ林内の各 3 地点 (以下、断面 1、断面 2、断面 3) に長さ 1 m、深さ 1 m の土壌断面 (断面積 1 m²) を掘削し、断面に露出した直径 1 mm 以上のすべてのスギあるいはヒノキの根の位置と直径を記録した。根の本数は 1 mm 間隔の直径階別に集計した (1 mm 階は 1~1.5 mm、2 mm 階は 1.6~2.5 mm、3 mm 階は 2.6~3.5 mm、など)。土壌断面の位置は土中の根が最も疎となる立木間の中央位置とし^{6, 7)}、土壌断面の中心から最短立木までの水平距離は、断面 1、2、3 の順にスギ林で 1.3 m、1.3 m、1.7 m、ヒノキ林で 1.5 m、1.1 m、1.8 m であった。

2.3 水平根による補強強度の推定

本研究では RBMw⁹⁾を用いて補強強度を推定した。RBMw は同一の根直径階における各根の力学特性のばらつきを考慮するためにワイブル生存関数を組み込んだモデルであり、ワイブルパラメータのほか、根直径を変数とする引き抜き抵抗力、根長、ヤング率のべき乗式のパラメータ値を入力する必要がある。(1) 式で示す水平根による補強強度 $F_{\text{tot}}(\Delta\chi)$ は、変位量 $\Delta\chi$ を変数とする関数であり、(2) 式の標準化引き抜き変位量 $\Delta\chi^*$ に従うワイブル生存関数 S を乗じて得られた各根の変位量の変化に伴う抵抗力 F を合計して得られる。

$$F_{\text{tot}}(\Delta\chi) = \sum_{i=1}^N F(\phi, \Delta\chi) S(\Delta\chi_i^*) \quad (1)$$

ここで、 N は全根数、 ϕ は根直径、 i は直径階である。

$$S(\Delta\chi^*) = \exp \left[- \left(\frac{\Delta\chi^*}{\lambda^*} \right)^\omega \right] \quad (2)$$

ここで、 ω はワイブルシェイプファクタ、 λ はワイブルスケールファクタである。モデルの詳細は schwarz ら⁹⁾に示されている。

パラメータ値の取得では、根引き抜き試験から得られた根直径と引き抜き抵抗力 (F_{max}) の関係をべき乗式で帰帰し、(3) 式に当てはめた¹⁶⁾。

$$F_{\max} = A_0 \phi^a = \alpha \phi^b \quad (3)$$

ここで、 α は抵抗力シェイプファクタ ($=b-2$)、 A_0 は抵抗力スケールファクタ ($=a \times 4/\pi$)。 a 、 b は図-1 から読み取った。このとき、既存研究の成果⁷⁾を参考に、地表面から深さ 1 m 程度までであれば根の引き抜き抵抗力に深度による差はないと仮定し、樹種ごとにすべての測定値を一つの式に当てはめた。ただし、根の引き抜き抵抗力と深度との関係については今後明らかにしなければならない課題である。

各根の根長 (L) は、根長調査から得られた根直径と根長の関係を式 (4) に当てはめた。

$$L = L_0 \phi^\gamma \quad (4)$$

ここで、 γ は根長シェイプファクタ、 L_0 は根長スケールファクタである。

ヤング率 (E) と根直径の関係は (5) 式で示される。

$$E = E_0 \phi^\beta \quad (5)$$

ここで、 β はヤング率シェイプファクタ、 E_0 はヤング率スケールファクタである。これらのパラメータは引き抜き試験で測定された引き抜き変位量と引き抜き抵抗力、根長調査で測定された根長のパラメータから逆算して求めた^{9, 16)}。弾性低減率 r は 0.3~0.5 とされているが⁹⁾、本研究では 0.5^{16, 17)} としてヤング率を逆算した。なお、弾性低減率 r と E_0 の積は一定であることから、弾性低減率 r は E_0 のみに影響し、RBMw で算出される補強強度や変位量には影響しない。

(2) 式で示すワイブル生存関数の ω と λ は Schwarz ら⁹⁾の方法で算出した。標準化引き抜き変位量は引き抜き変位量の実測値を、べき乗式による根直径からの同推定値で除した値である。

得られたパラメータ値を RBMw に組み込み、これを水平根分布調査で得られた各断面の直径階別の根本数 (本/m²) に適用して、断面毎に土壌断面あたり水平根による補強強度 (kN/m²) を求めた。計算には Schwarz⁹⁾による RBMw の R コード (以下、R コード)¹⁰⁾を用いたが、R コードでは λ が 1 に固定 (ワイブル生存関数式で λ を省略) されていたため、 λ に任意の値を入力できるように改良して使用した。なお、ワイブル生存関数の当てはめの際、 λ 、 ω をともに推定したもの (以下、最適モデル) に加えて、 λ を初期値 1 に固定して ω のみを推定したもの (以下、 λ 固定モデル) を求めて、それぞれのモデルによる補強強度を推定し、 λ を 1 に固定することによる ω や補強強度の推定への影響を検討した。また、Yamase ら^{16, 17)}はワイブルパラメータを R コードの初期値 $\lambda=1$ 、 $\omega=11$ (以下、初期値モデル) としているが、この場合の補強強度推定値への影響についても検討した。

補強強度の RBMw の推定値と従来法の推定値を比較するために、Wu モデル (6) 式でも補強強度 (C_{root}) を計算した。

$$C_{\text{root}} = \sum F_i N_i \quad (6)$$

ここで、 F_i は直径階 i の引き抜き抵抗力、 N_i は直径階 i の根数を示す。なお、Wu モデルによる計算についても RBMw の R コードに含まれている。

なお、べき乗式、ワイブル生存関数の当てはめには Graphpad Prism version 8.4.3、RBMw には R version 4.0.4 を使用した。

3. 結果

3.1 RBMw に使用するパラメータ

図-1 に根直径と引き抜き抵抗力の関係をべき乗式で回帰した結果を示す。両樹種ともに根直径が太いほど引き抜き抵抗力は大きい傾向があり、べき乗式のパラメータはスギでは $\alpha=-0.75$ ($=1.25-2$)、 $A_0=60.57$ ($=47.55 \times 4/\pi$)、ヒノキでは $\alpha=-0.50$ ($=1.50-2$)、 $A_0=43.36$ ($=34.04 \times 4/\pi$) となった (表-1)。シェイプファクタはスギよりもヒノキの方が大きく、同じ根直径ではヒノキの引き抜き抵抗力の方が大きい傾向がみられた。スギでは本研究と同様に根直径 30 mm 以上のデータを含む Yamase ら¹⁶⁾ (根直径 42.8 mm までを含む) のべき乗式と比較したところ、本研究の引き抜き抵抗力は根直径 15 mm 程度までは Yamase らと同程度であるが、それ以上では小さくなり、その差は根直径が太いほど広がる傾向がみられた。ヒノキでは本研究と比較可能な太い根直径のデータを含む既存研究がみられなかった。

根直径と根長の関係について、両樹種ともに根直径が太いほど根長は長くなり、パラメータ値はスギで $\gamma=1.52$ 、 $L_0=39.81$ ($L=39.81 \phi^{1.52}$, $n=7$, $R^2=0.96$, $p<0.001$)、ヒノキでは $\gamma=2.71$ 、 $L_0=1.04$ ($L=1.04 \phi^{2.71}$, $n=7$, $R^2=0.62$, $p<0.05$) であった (表-1)。

図-2 には根直径と引き抜き変位量の関係をべき乗式で回帰した結果を示す。スギ、ヒノキともにシェイプファクタは 1 以下であり、根直径が太いほど引き抜き変位量も大きいのが徐々に頭打ちになった。ヒノキはスギと比較して根直径 10 mm 以下での立ち上がり大きいのが、それ以上では頭打ち傾向が強かった。引き抜き変位量、引き抜き抵抗力、根長のパラメータから逆算したヤング率のべき乗式のパラメータはスギで $\beta=0.24$ 、 $E_0=220.21$ 、ヒノキで $\beta=1.91$ 、 $E_0=2.35$ であった (表-1)。

ワイブル生存関数を標準化引き抜き変位量に当てはめてワイブルパラメータを求めた結果を図-3 に示す。スギの最適モ

図-1 根直径と引き抜き抵抗力の関係

Fig. 1 Relationship between root diameter and pullout force

表-1 RBMw による解析に使用したパラメータ

Table 1 Parameters used for RBMw applied in this study

記号	名称	パラメータ値	
		スギ	ヒノキ
α	抵抗ラシエプファクタ	-0.75	-0.50
β	ヤングラシエプファクタ	0.24	1.91
γ	根長ラシエプファクタ	1.52	2.71
A_0	抵抗ラスケールファクタ	60.57	43.36
E_0	ヤングラスケールファクタ	220.21	2.35
L_0	根長スケールファクタ	39.81	1.04
r	弾性低減係数	0.5	0.5
λ	ワイブルスケールファクタ	1.11	1.09
ω	ワイブルラシエプファクタ	2.57	2.15

図-2 根直径と引き抜き変位量の関係

Fig. 2 Relationship between root diameter and pullout displacement

デルでは $\lambda = 1.11$, $\omega = 2.57$, λ 固定モデルでは $\lambda = 1$, $\omega = 2.69$, ヒノキの最適モデルで $\lambda = 1.09$, $\omega = 2.15$, λ 固定モデルでは $\lambda = 1$, $\omega = 2.38$ であった。スギ、ヒノキのいずれでも λ 固定モデルは最適モデルよりもわずかに生存確率が低下する傾向がみられた。初期値モデルは標準化引き抜き変位量 1 前後で急激に生存確率が変化する曲線となった。

3.2 水平根の本数

水平根分布調査で、スギ林の断面 2 で 80 cm 以深、断面 3 で 35 cm 以深、ヒノキ林の断面 2 で 80 cm 以深に C 層（母材層）がみられた。土壌深層ほど根は減少し、特にヒノキ林では 60 cm 以深の根はわずかであった。図-4 に土壌断面に現れた直径階別の根本数を断面毎に示す。スギ林では 73~103 本の根があり、平均直径は 2.0~2.8 mm であった。ヒノキ林では 80~136 本、2.0~2.5 mm であった。直径 16 mm 以上の根はスギ林の断面 2 で 2 本みられたのみであり、いずれの断面でも大部分が 5 mm 以下でピークは 1 mm 階にあった。

3.3 水平根による補強強度の推定値

図-5 に根の直径階別本数データに RBMw を適用して得られた変位量に伴う補強強度の変化を断面毎に示す。RBMw の最適モデルでのスギ林の最大補強強度は 3.8~7.1 kN/m² で平均 6.0 kN/m²、これらは Wu モデルと比較して 38.5~46.4%、平均 42.5% であった。ヒノキ林では 5.4~9.5 kN/m²、平均 6.8 kN/m²、Wu モデルの 45.4~46.8%、平均 46.1% であった。ピーク時の変位量は、スギ林は平均 27.7 mm、ヒノキ林が 40.7 mm で、ヒノキ林の方が大きかった。 λ 固定モデル

図-3 引き抜き試験データに当てはめたワイブル生存関数

Fig. 3 Weibull survival function for the pullout test data

ルの最大補強強度は最適モデルと比較して、両樹種のいずれの断面でもわずかに小さく、スギ林では最適モデルの平均 91.0%、ヒノキ林では平均 94.8% であった。初期値モデルでは、スギ林は最適モデルの平均 113.6% でわずかに大きい程度であったが、ヒノキ林では 133.9% と顕著に大きかった。

4. 考察

4.1 根直径と引き抜き抵抗力の関係

根直径と引き抜き抵抗力の関係を示すパラメータは補強強度の計算で最も重要な因子である。本研究では根直径 50 mm 程度までの試験データからべき乗式を求めた（図-1）。既存研究では引き抜き抵抗力は地形、土質には影響されないとされているが⁷、既存研究の大半は根直径 30 mm 程度までを対象としており^{6,7}、それ以上の根直径でも同様であるか不明である。山瀬ら¹⁵は太い根では木化が進み外側ほど弱い根材の形質になって、根直径が増加しても引き抜き抵抗力がそれほど高まらないため、既存研究のべき乗式では 30 mm 以上の根の引き抜き抵抗力を過大評価する危険性を指摘している。そこで、スギでは直径 42.8 mm までの根を含む Yamase

図-4 土壌断面に現れた直径階別の根本数

Fig. 4 Number of roots per diameter class in a soil trench

図-5 根直径階別分布データに RBMw を適用して得られた変位量の変化に伴う補強強度の変化

Fig. 5 Root reinforcement as a function of displacement computed using a RBMw considering a soil trench

ら¹⁶⁾のべき乗式と比較したところ、根直径が太いほど本研究の方が小さい傾向がみられた(図-1)。太い根では、根系の断面積に対する周囲長の割合が小さいために引張破断強度が土壌との間の周面摩擦力よりも大きくなり、伸長先の直径が小さい破断限界の部分で破断するか⁷⁾、あるいは木化した根材の引張破断強度が弱い部分で破断することが推測され、どの部分で破断するかは土質や根材の状況などに左右されると考えられるが、それらの影響が両者の引き抜き抵抗力の差異をもたらした可能性がある。このことは、同様に図-1や図-2でみられた太い根での引き抜き抵抗力や引き抜き変位量のばらつきの大きさにも関係していると考えられる。また、太い根ほど引き抜き抵抗力が大きく(図-1)、根長が長い(結果3.1)が、太い根では土中で蛇行した長い根が大きい引き抜き抵抗力値に至るまで伸び続けることで引き抜き変位量も大きくなると考えられる。太い根の引き抜き抵抗力については知見が少なく今後さらに検討を要する。根長やヤング率についても、これまでにスギでは Yamase ら¹⁶⁾の例があるのみで、ヒノキでは報告事例が無いことから、調査事例を増やした上

でパラメータの樹種特性を明らかにする必要がある。

4.2 RBMw で求められた水平根による補強強度

水平根分布調査でみられた根の大半は 5 mm 以下であり、16 mm 以上の太い根はスギ林の 2 本のみであった(図-4)。スギ、ヒノキの根は根株付近に大半が集中し、斜面では谷側に分布が偏る傾向があることが報告されていることから⁴⁾、断面から最短立木までの水平距離が短くても、両者の位置関係によって太い根の量が少なくなる場合があると考えられた。また、本研究で RBMw による最適モデルの補強強度はスギ林 3.8~7.1 kN/m²、ヒノキ林 5.4~9.5 kN/m²であった。Wu モデルによる補強強度はスギ林で 8.3~18.5 kN/m²、ヒノキ林で 11.8~20.7 kN/m²であり、木下ら⁶⁾が報告した Wu モデルによるスギ林 2~30 kN/m²、ヒノキ林 3~20 kN/m²の範囲に概ね含まれていた。Yamase ら¹⁶⁾が 49 年生スギ林の立木間中央深さ 30 cm までに分布する直径 5 mm 以上の根を対象に RBMw を適用した結果では、間伐林 15.3~71.0 kN/m²、無間伐林 9.3~27.6 kN/m²であり、これよりも本研究の RBMw で求めたスギ林の補強強度は小さかった。このことには、本研究のスギでは Yamase ら¹⁶⁾よりも引き抜き抵抗力が小さかった(図-1)ことのほか、太い根の本数が少なかった(図-4)ことが関係していると考えられる。太い根の本数について、北原⁷⁾は適期の間伐は太い根系を多くし崩壊防止力を高めるとしており、これまでの間伐回数や間伐率などの履歴の違いが現在の差異に関係している可能性がある。さらに、本研究を行った砂質土壌では表層が乾燥しやすいため、根系は深層の土壌水分を求めて垂直的に発達する事例が示されているが⁴⁾、本試験地では C 層が比較的浅い深度で確認され、有効土層が薄いことから全層で根系が十分に発達できなかったとも考えられる。

RBMw で求められた最適モデルの補強強度は Wu モデルに対してスギ林で 38.5~46.4%、平均 42.5%、ヒノキ林で 45.4~46.8%、46.1%であった。本研究と同様に RBMw を用いた事例では、スギ林¹⁶⁾の初期値モデルの事例で 44~59%、オウシュウトウヒの引き抜き試験データからシミュレーションした事例では 40%であった⁹⁾。RBMw 以外では、掛谷ら³⁾がスギ林で引き抜き抵抗力と変位量の実測データをもとに行ったシミュレーションでは根の伸長方向と逆方向に引き抜いた場合に 29~45% (平均 37%) であった。これらの結果は本研究と概ね同様の結果であり、変位量を考慮した推定値は、変位量を考慮せずにすべての根が同時に切れるとして最大引き抜き抵抗力の総和を求める Wu モデルの 50%以下になると考えられる。なお、佐藤ら⁸⁾がハンノキ類やストローブパインに対する原位置一面せん断試験で求めた土塊の補強強度実測値は、根引き抜き試験の結果を Wu モデルに適用して推定した補強強度の 35~53%であったことから、後述のようにワイブル生存関数パラメータに注意する必要があるものの RBMw は実測値に近い推定値が得られている可能性がある。今後、RBMw についても原位置一面せん断試験などで測定

した実測値との比較検証を行う必要がある。

RBMw のパラメータのうちワイブル生存関数について既存研究では扱いが様々に異なっていた。ワイブル生存関数の λ , ω をともに計算したものでは, schwarz ら⁹⁾のオウシュウトウヒの例では λ が 1 であった。ナンヨウアブラギリ²⁾, スコツパイン¹³⁾の事例でもおおむね 1 付近であり, そのためワイブル生存関数の当てはめにおいて, λ を 1 に固定して ω のみを計算したオウシュウトウヒの事例もある¹²⁾。R コード¹⁰⁾でも初期値は λ が 1 に固定され, ω のみを入力するようになっていた (λ 固定モデル)。また, Yamase ら^{16, 17)}は, ワイブル生存関数のパラメータを計算せず, $\lambda = 1$, $\omega = 11$ の R コード初期値を用いている (初期値モデル)。本研究において λ 固定モデルの補強強度は, スギ林で最適モデルの 91.0%, ヒノキ林で 94.8%と 10%以内の差であったが, 初期値モデルでは, 113.6%, 133.9%となり, ヒノキ林では 30%以上過大になった。 ω の値が高いことは, 根の力学特性がより均質であることを示し, 補強強度の推定値が高くなって Wu モデルでの推定値に近づくことになる⁹⁾。既存研究では ω は 2 前後であることが多いため^{2, 9, 12, 13)}, ω を 11 とする初期値モデルを使用することは過大評価につながりやすいと考えられる。 λ 固定モデルについても, λ を 1 に固定することでワイブル生存関数のパラメータ計算過程は簡略化されないで, ω , λ とともに最適値を求めて最適モデルで補強強度の推定を行うことが望ましいと考えられる。

5. おわりに

スギ林, ヒノキ林の水平根による補強強度は RBMw を用いることで, 従来法の Wu モデルに比べて 43~46%程度, 補強強度が小さく見積もられた。RBMw のパラメータ取得には, Wu モデルでの推定と比べて根引き抜き試験の際の変位量測定と根長調査が加わるため, より労力と時間を要する。今後, RBMw を用いて表層崩壊防止機能の定量的評価を進めるためには, 根系分布データのみから補強強度を推定できるようにパラメータを一般化することが望まれる。そのため, 異なる樹種, 地形, 土質, 施業条件などで実測データを蓄積し, パラメータ特性を明らかにする必要がある。

謝辞: 調査, 解析でご指導を賜った兵庫県立農林水産技術総合センターの山瀬敬太郎氏, 藤堂千景氏に感謝申し上げます。

引用文献

- 阿部和時 (2018) 表層崩壊. 中村太士・菊沢喜八郎編, 森林科学シリーズ 3 森林と災害. 共立出版, pp. 78-106.
- Giadrossich, F., Cohen, D., Schwarz, M., Seddaiu, G., Contran, N., Lubino, M., Valdés-Rodríguez, O. A., Niedda, M. (2016) Modeling bio-engineering traits of *Jatropha curcas* L. Ecological Engineering, 89: 40-48.
- 掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂 泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時 (2018) 樹木の根の引き抜き抵抗力による表層崩壊防止機能の評価方法に関する研究. 砂防学会誌, 71(3): 3-11.
- 荻住 昇 (2010) 最新樹木根系図説総論. 誠文堂新光社, 937pp.
- 気象庁. “平年値メッシュデータ(メッシュ平年値 2010)”. 国土交通省国土数値情報ダウンロードサービス. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02.html> (参照: 2016 年 5 月 2 日).
- 木下篤彦・坂井佑介・大野亮一・田畑三郎・川島正照・山崎孝成 (2013) スギ・ヒノキ林における水平根が発揮する抵抗力の検討. 砂防学会誌, 65 (5): 11-20.
- 北原 曜 (2010) 森林根系の崩壊防止機能. 水利科学, 311: 11-37.
- 佐藤 創・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行 (2013) 原位置一面せん断試験による樹木根系の崩壊抵抗力と引き抜き抵抗力の比較. 砂防学会誌, 66(4): 15-20.
- Schwarz, M., Giadrossich, F., Cohen, D. (2013) Modeling root reinforcement using a root failure Weibull survival function. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17: 4367-4377.
- Schwarz, M. ”RBMw R code”. Bern University of Applied Science. <http://www.ecorisq.org/openFTP/Schwarz.zip> (参照: 2021 年 2 月 4 日)
- 土田海斗・平松晋也・林 直希 (2021) 時間変化を考慮した樹木根系の崩壊抑制機能の適正評価に関する一考察. 砂防学会誌, 73(6): 12-18.
- Vergani, C., Schwarz, M., Soldati, M., Corda, A., Giadrossich, F., Chiaradia, E. A., Morando, P., Bassanelli, C. (2016) Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland. Catena, 143: 275-288.
- Vergani, C., Werlen, M., Conedera, M., Cohen, D., Schwarz, M. (2017) Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine (*Pinus sylvestris*) protection forest. For. Ecol. Manag., 400: 339-352.
- Wu, T.H., McKinnell, W.P., Swanston, D.N. (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Can. Geoth. J., 16: 19-33.
- 山瀬敬太郎・藤堂千景・矢倉資喜・平野恭弘 (2017) 斜面地におけるコナラ (*Quercus serrata* Murray) の根系分布と引き抜き抵抗力. 日本緑化工学会誌, 43(1): 133-137.
- Yamase, K., Tanikawa, T., Dannoura, M., Todo, C., Yamamoto, T., Ikeno, H., Ohashi, M., Aono, K., Doi, R., Hirano, Y. (2019) Estimating slope stability by lateral root reinforcement in thinned and unthinned stands of *Cryptomeria japonica* using ground-penetrating radar. Catena, 183: 104227.
- Yamase, K., Todo, C., Torii, N., Tanikawa, T., Yamamoto, T., Ikeno, H., Ohashi, M., Dannoura, M., Hirano, Y. (2021) Dynamics of soil reinforcement by roots in a regenerating coppice stand of *Quercus serrata* and effects on slope stability. Ecological Engineering, 162: 106169.

(2021年6月22日受理)