

P13 樹木根系の力学的評価

建設省 土木研究所 ○横田 弘一

杉原 忠弘

笹原 克夫

中村 良光

1. まえがき

近年、住民の環境に対する意識の向上から景観面を考慮にいたれた緑化併用の斜面崩壊防止工法が急傾斜地においてもおこなわれている。現在の緑化工法は使用草木種が限定されているため周囲の景観との差異が生じている例もあり、斜面上の既存樹木を残した斜面補強工法はこれを補う質の高い緑地が保全される手法である。この手法では斜面安定の検討に加えて、樹木の力学的安定評価を検討する必要があるが、まだ樹木の力学的評価は明らかになっていない。本研究では、樹木根系の補強効果に関する既往の文献を整理・検討し、樹木の風力などの外力に対する安定性を力学的に評価する手法を検討したのでここに報告する。

2. 根系の補強効果の評価手法

樹木の力学的評価手法として、地上部情報から任意層（想定破壊面）での根系情報（根系量、根系形状、伸長方向など）を把握できる根系のモデリングをおこない、根系の補強機構に従って補強効果の検討をおこなった。

2.1 根系のモデリング

根系の分布形態が樹種特性だけではなく、生育基盤にも影響を受けるので、この要因をモデリングに反映させて、

- ①根系を伸長方向から分類し、形状を設定する。
- ②根系全体のボリュームの把握をする。
- ③根系の深度方向の分布状況を設定する。

の手順で根系のモデリングをおこなった。

2.1.1 根系の分類と形状の設定

根系は同一樹種でも、生長過程、生育基盤などによって形態が異なり、一括した分類が難しい。そこで、

モデリングが容易であることから伸長方向での分類（主根・鉛直方向 水平根・水平方向 斜出根・斜め下方向）をおこなった。根系の分岐形態は樹幹根元部より主根が出現し、その主根より土壌条件によって水平根、斜出根が出現することとした（図-1）。さらに側根（水平根、斜出根）の分岐については根系分布調査などでは主根からの分岐よりも多いことがいわれているがここでは2次側根の分岐は考えなかった。表-1に根系別の形状仮定を示す。

2.1.2 全根系量の設定

根系量の設定に関しては相対生長の考え方を適用し、樹木の地上部と地下部の重量比（T/R率）は樹齢、土壌状況によらずほぼ一定の割合を示す（相対生長率 $h=1$ ）という仮定を基に、地上部重量より根

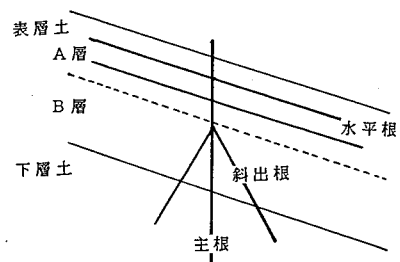


図-1 モデリングによる根系分布模式図

系量を決めた。地上部重量について

表-1 根系別形状の假定

は地上部を構成している葉部、幹部、枝部のうち全体に占める割合の少ない葉

	伸長方向	土層構造との関係	根系の通減率について	根系の直径	方位方向での分布
主根	鉛直方向に伸長する	表層土(土層層位A, B)及び下層土中に存在する	土壌密度(表層土, 下層土)の違いで差異をもつ	樹幹の根元直径に従う	
側根	水平根	表層土(土層層位A層)中に存在する	土壌密度(表層土, 下層土)の違いで差異をもつ	樹幹の形態と根系直径通減率から求める	一様な分布をする
	斜出根	表層土(土層層位B層)及び下層土中にも減少して存在する	土壌密度(表層土, 下層土)の違いで差異をもつ	樹幹の形態と根系直径通減率から求める	一様な分布をする

部は無視し、幹部+枝部を「胸高直径部断面積×樹高×単位体積重量」という円柱形状として表した。

2. 1. 3 根系の分布状況の設定

① 主根の分布状況

主根の深度方向での断面直径は通減式から、変数を図-2のようにおくと、

表層部 $D_n = DH \times P^{(n/DH)}$ n : z方向の表層深度

下層土部 $D_{nn} = DD \times PP^{(nn/DD)}$ nn : z方向の下層土深度

となる。これらの直径通減式から、深度方向の主根の体積変化は、(1), (1)' 式で表せる。

$0 \leq x \leq Z'$ (表層の鉛直深) のとき

$$VM(x) = \int_0^x (DH \times P^{(x/DH)}) dx \dots (1)$$

$Z' < x$ のとき

$$VM(x) = \int_0^{Z'} (DH \times P^{(z/DH)}) dx + \int_{Z'}^x (DD \times PP^{((x-Z)/DD)}) dx \dots (1)'$$

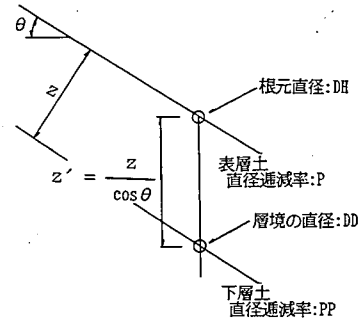


図-2 主根形状モデル

② 側根の分布状況

阿部は根系分布調査の結果より、ワイブル分布関数を使って根系分布の数量化モデルの試みをおこなっている¹⁾。ワイブル分布関数とは形状パラメータm, 尺度パラメータα, 位置パラメータγの3つのパラメータで表せる指数分布関数の一種である。

$$f(z) = \frac{m}{\alpha} (z - \gamma)^{m-1} \exp \{ - (z - \gamma)^{m/\alpha} \} \dots (2)$$

これらの3パラメータを求め、根系分布に適応させたのが(3)式である。

$$f(z) = \frac{m}{\alpha} z^{m-1} \exp \{ - z^{m/\alpha} \} \dots (3)$$

但し、 $\gamma = 0$, $m = 2.0 / \log(Z_{max}/X_0)$, $\alpha = X_0^m$, $X_0 = 3.522 \cdot Z_{max} - 10.799$

この根系分布関数を側根の分布状況に使うと深さz~z+n(cm)までの土層中の根系量を求めると、

$$VO(z) = \int_z^{z+n} f^n(z) dz \times VO \dots (4)$$

となる。

但し、z: 地表部より垂直方向の深さ, VO: 全側根量

2. 2 根系の補強機構

従来の根系の補強機構に関する実験では根系そのものを供試体として使えず、根系を供試体として使った場合でも、現地での検証を考えたときその整合性の点で疑問が残る。このためここでは補強土

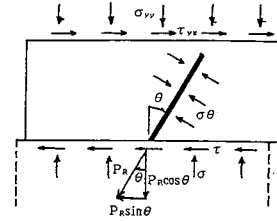
工法で使われている補強材の補強力発生機構 (Jewellのモデル) を用いて根系の補強機構を考えていく。Jewellは図-3に示すような補強された砂の一面せん断試験をおこない、補強材の入っている砂のせん断強度の増加のメカニズムと、せん断強度増加量の予測の方法を明らかにしようとした。実験結果より補強された砂のせん断強度は、無補強時のせん断強度よりも、(5)式だけ増加した。

$$\tau_{EXT} = \frac{P_R}{A_s} \cdot (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi) \quad \dots (5)$$

但し、 τ_{EXT} : 補強材による増加せん断応力

P_R : せん断面の位置で補強材に発生した

A_s : せん断面の面積 引張り力



このとき補強材に発生する引張り力 P_R は、周囲の土のひずみ 図-3 補強された砂の直接せん断試験に起因する力の作用によって発生した引張り力で、これを上載圧 σ_{yy} よりこれを導いた。

3. 樹木の転倒計算

風力による樹木倒伏に対する抵抗力を求めた引き倒し試験での樹木形状データを使って検討した根系の力学的評価手法を検証する。樹木形状データと実験結果を表-2に示す。表-2のうち、試験木NO.2について検討をおこなった。試験木NO.2のモデル根系形状は、表-3, 図-4となる。

表-2 「立木の引き倒し試験」の実験結果

試験木番号	樹種	樹高 m	胸高直径 cm	根元直径 cm	枝下高 m	樹冠長 m	枝張り m	斜面		引張り方向	引張り点直径 cm	引張り高 m	風心高 m	根張り		折れ高 m	最大抵抗力 ton	引張りモーメント ton-m	最大風速 m/s	備考
								傾斜角	傾斜方向					長さm	深さm					
1	スギ	10.3	14	16	6.0	4.3	3.0	40°	N50° W	N63° W	8	7.2	7.4	1.5	0.5	0.076	0.547	15.0	根返り	
2	〃	15.6	22	27	5.6	10.0	3.0	〃	〃	N57° W	14	7.9	8.9	3.5	0.5	0.401	3.166	22.7	〃	
3	〃	15.0	18	21	8.0	7.0	2.0	〃	〃	N55° W	11	9.6	10.3	2.4	〃	0.189	1.184	22.8	〃	
6	〃	15.2	20	26	5.2	10.0	3.8	45°	N45° W	N55° W	13	8.3	8.5	〃	〃	根元	0.263	2.185	16.3	幹折れ
7	〃	17.7	19	24	4.0	15.0	3.6	〃	〃	N59° W	13	6.6	9.0	1.7	1.0	0.243	1.634	13.3	根返り	
8	〃	16.8	21	25	3.8	13.0	4.6	〃	〃	N52° W	15	8.5	8.1	1.7	〃	0.299	2.539	13.9	〃	

表-3 モデル根系の形状

主	表層中の主根長 L_1	62 cm
	下層土中の主根長 L_2	23 cm
	根元直径 D_1	27 cm
根	表層と下層土境界で根元直径 D_0	16 cm
	表層 遞減率	0.8
	下層土 遞減率	0.03
側	表層 遞減率	0.93
	下層土 遞減率	0.03
	根	水平根 地上部8cmから25.7° 每方向に 14本出現
根	水平根 地上部16cmから11.6° 每方向に31本出現	
	斜出根 地上部21cmから40.0° 每方向に 9本出現	

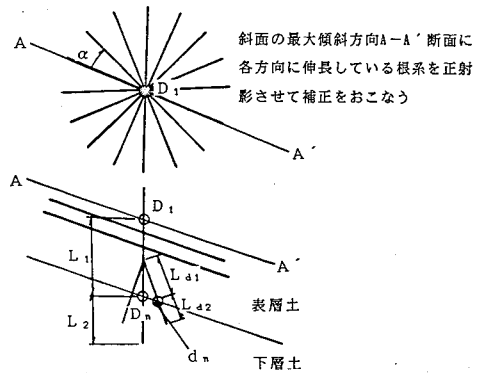


図-4 根系モデル

計算の簡略化のため、3次元表現のモデル根系を A-A' 面に補正し、樹木根元部を中心に表層厚 $Z = 47\text{cm}$ を半径とした円弧状に転倒するときの計算を次に示す。

転倒時における滑動土塊周縁部での根系の補強力を Jewell 式 (5) の変形式から求める。この際の根系に作用する引張り力 P_R は、周縁部における根系の引き抜き抵抗力 (引き抜き試験式 (6)) と、許容引張り力 (根系の破断試験式 (7)) のうちの小さい引張り耐力をもちいた。

引き抜き抵抗力の式²⁾ $\log_{10} q = 1.246 \log_{10} d + 0.493$ (6)

但し、 q : 引き抜き抵抗力(kgf) d : 抜根の直径(mm)

許容引張り力の式³⁾ $P = 5.149 \cdot D^{1.572}$ (7)

但し、 P : 最大荷重(kgf) D : 根系試料の直径(mm)

表-4 根系の補強効果

根系NO	根系の引張り力 P	根系と断面垂線がなす角度 θ	せん断抵抗力 R
1	627 kgf	- 9.8°	250 kgf
2	1248	-19.9	253
3	839	-14.8	254
4	2051 kgf	0°	1184 kgf
5	1010	14.8	822
6	1724	19.9	1523
7	732	9.8	511

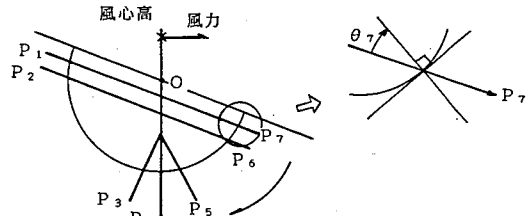


図-5 根系の補強効果

表-4の結果をもとに滑動土塊の転倒を検討する。転倒の計算には土塊を細片に分割して細片に作用する力の釣合を考える分割法の手法を用いた。計算では飽和時の土塊単位体積重量 γ_t を 1.80 t/m^3 、土壌定数を $c = 0.1 \text{ t/m}^2$ 、 $\phi = 30^\circ$ とおいた。また、地上部(樹木)重量による上載荷重は測定データなどから推定して、単位面積あたり 0.23 t/m^2 とした。

表-5 土塊の転倒解析

分割片NO.	分割幅 b m	分割高 h m	底辺 z m	傾角 θ°	土塊重量 w t	上載荷重 q · z t	総重量 W t	$W \cos \theta \cdot \tan \phi$	$W \sin \theta$
①	0.11		0.32	70.0	0.033	0	0.033	0.007	0.031
②	0.10	0.61	0.13	42.0	0.061	0.030	0.091	0.039	0.061
③	〃	0.60	0.12	26.6	0.060	0.030	0.090	0.046	0.040
④	〃	0.52	0.10	13.5	0.052	0.030	0.082	0.046	0.019
⑤	〃	0.47	0.10	1.1	0.047	0.030	0.077	0.044	0.001
⑥	〃	0.44	0.10	-10.8	0.045	0.030	0.075	0.043	-0.014
⑦	〃	0.351	0.10	-24.2	0.036	0.030	0.066	0.035	-0.027
⑧	0.12		0.16	-40.4	0.023	0.037	0.060	0.026	-0.039
Σ			1.13		0.357	0.217	0.574	0.286	0.072

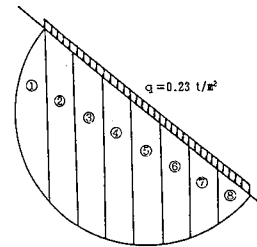


図-6 土塊転倒の計算図

表-5の結果より転倒に作用するモーメント M_T 、転倒に抵抗するモーメント M_R はそれぞれ 0.034 tm/m 、 2.456 tm/m となり、その差 2.422 tm/m が試験木NO.2の転倒しない限界のモーメントであるという結果がでた。この計算結果は単位幅当りのモーメントなので実験結果の限界モーメントを双方の土塊体積の比で補正し、補正実験値と比較した(体積比2.31)。補正の結果、補正実験値は 1.371 tm/m となり、計算結果は補正実験値の約2倍の値となった。

4. 今後の課題

本根系の力学的評価手法の精度を高めるためには、根系のモデル化で仮定した事項のうち、土層構造と根系形状の関係の仮定事項を明確にし、樹木の生育基盤に起因する根系分布の差異の要因を取り込んだモデリングをおこなっていくことが必要となってくる。

参考文献及び引用文献

- 1) 阿部和時ほか: 林地の崩壊斜面における根系分布の実態(Ⅱ)-立地条件による比較-, S61 砂防学会
- 2) 塚本良則: 樹木根系の崩壊抑止効果に関する研究, 東京農工大学農学部演習林報告, 第23号, '86
- 3) 陶山正憲ほか: 治山用緑化樹種の根系強度について, 緑化工技術, 第13巻 第2号, '88