

ヒノキ根系のせん断抵抗力補強に関する実験的検討

岡田康彦 (森林総研)・黒川潮 (森林総研関西支所)

要旨：胸高直径 62.1mm，根元直径 80.9mm の 17 年生のヒノキを供試木に，縦 1m，横 1m，深さ 0.5m の大型のせん断装置を用いて，現地斜面にて直接せん断実験を実施した。傾斜が約 32 度のマサ土を母材とする山地斜面において，供試木の周囲を掘削し，ステンレス製のせん断箱を組み立てる方式で，厚さが平均 0.417m のせん断試験供試体を作成した。手動式の油圧ポンプによりせん断力を載荷し，140mm 強のせん断変位を与えた。また，せん断試験終了後，根系を掘り出すことにより，せん断面に位置した根の本数と太さを調べた。静的にせん断力を載荷したところ，10.1kN の最大せん断抵抗力が計測された。マサ土の内部摩擦角は約 36 度であることから，土のみが発揮するせん断抵抗力は 5.9kN と見積もることができる。両者の差は 4.2kN となり，これが根系によるせん断抵抗力増分と推定でき，この値は土自体のせん断抵抗力の 71%にも相等する結果となった。また，引き抜き抵抗力調査より推定した根によるせん断抵抗力の増分は 5.5kN となり，せん断試験より直接的に推定した値はこれの 76%程度となった。

キーワード：樹木根系，せん断抵抗力補強，大型直接せん断実験

Abstract : A large scale in-situ direct shear experiment on a specimen containing tree-roots of a Japanese cypress was conducted on a slope, in which a diameter at breast height of the tree was 62.1 mm, length, width, depth of the shear box were 1 m, 1m, and 0.5m, respectively. The slope was underlain by weathered granites. A steel-made shear box was set up by digging the trenches around the tree on the slope with a gradient about 32 degrees. By pushing the shear box downslope with a manually-controlled oil pumping system, a 140 mm of shear displacement was given to the specimen. After the shear experiment, numbers and diameters of the tree-roots at the slip surface were measured. The maximum shear resistance of 10.1 kN was mobilised under the static shear displacement. As the internal friction angle of the weathered granites being 36 degrees, the possible shear resistance only due to the soils would be 5.9 kN. With that, it was estimated 4.2 kN (= 10.1 - 5.9 kN) was the proportion of the shear resistance by the tree-roots themselves, and this was as much as about 71 % of the shear resistance of the soils.

Keywords : tree-roots, shear resistance-reinforcement, large-scale direct shear experiment

I はじめに

森林の持つ公益的機能のうち最も重要なものの一つとして，樹木根系による斜面崩壊抑止機能がある。これは，樹木の根系がせん断抵抗力を補強することにより発揮される機能と考えられ，特にスギに対する各種試験結果を基に，斜面安定解析における樹木根系による粘着力増強成分として整理されている (1)。しかし，これらの評価は，主に根の引き抜き抵抗力試験を基にしたものが多く，つまり間接的にせん断抵抗力補強を調べたものである。一方，直接的にせん断試験を実施して樹木根系のせん断抵抗力補強程度を調べたものは少なく，水平地盤において，根系を含む 1m 四方の土砂を対象に直接せん断実験が実施された例 (2) が知られている程度である。この研究では，根系を含む供試体を対象にした直接せん断試験が実施されているものの，造成されたあくまで水平の地盤を対象にしており，斜面崩壊が発生し得るような実山

地斜面における樹木を対象としたものではない。

そこで，大型せん断装置を用いて実山地斜面のヒノキを対象に直接せん断実験を実施して，樹木根系のせん断抵抗力補強を実験的に検討した。本報ではこの結果を報告する。

II 直接せん断実験の概要

実山地斜面での大型せん断実験に用いたせん断箱は，縦・横 1m，深さ 0.5m である。実山地斜面の勾配は幅広く分布する。一方，せん断実験装置については，せん断を与える面の勾配を一つに決定して設計を進める必要がある。斜面崩壊は 30~35 度程度で発生個数が多くなるという結果例 (3)，ならびに，斜面崩壊を研究対象とした大型の斜面模型の勾配が 32 度に設定されている例がある (4) ことなどを考慮して，当該せん断装置は 32 度傾斜で直接せん断を行う仕様に決定した。なお，鋼鉄製の

せん断箱の総重量は3.2kNである。

せん断力は、斜面の上流側から下流側へせん断箱を押すことにより与えた。手動式の油圧ポンプ（载荷最大荷重：100kN）を用いることとし、油圧シリンダとせん断箱の間に押接型のロードセル（最大荷重：100kN）を挟在させることにより、せん断力を計測した。各変位計測には、最大変位が200mmの変位計を3台用いた。1台は、せん断力を与える油圧ピストンの反力をとるためにせん断装置の上流側に設置した鉄板の変位を計測するものとした。2台目および3台目については、せん断箱の左右2側面に設置し、斜面傾斜方向のせん断変位を計測した。

根系を含む供試体の現地大型直接せん断実験は、長野県の国有林内で実施した。実験現場は、17年生のヒノキ人工林で胸高直径が55～85mm程度に分布しており、供試木の周囲の傾斜は32度程度であった。周囲木の間隔は約1.8m程度に調整されていた。選定した供試木の胸高直径は62.1mm、根元直径は80.9mm、高さは4.91mであった。せん断実験終了後、地表より上部の重量を計測したところ136Nになった。

実験現場周辺の地質は、風化が進行した花崗岩（マサ土）で、平均粒径は1.3mmを示した（図-1）。100mLの採土円筒を用いたサンプリングによると、採取時の自然含水単位体積重量は14.5kN/m³、絶乾時の単位体積重量は10.3kN/m³となった。供試体のせん断面は深さ0.4mを設定したが、実際の斜面表面は凹凸があり、平均すると約0.417mとなった。このため、根系を含む供試体の体積は0.417m³となり、根系の体積とその重量を無視すると、供試体の推定重量は6.4kNとなる。

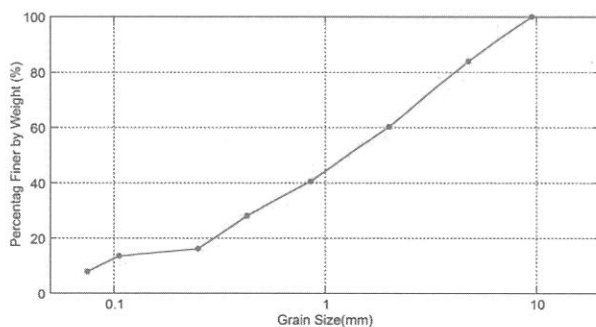


図-1. 風化花崗岩（マサ土）の粒径加積曲線

Fig. 1. A grain size distribution curve of weathered granites

III 根によるせん断力補強強度の算出手法

根によるせん断力補強強度は、次の式で推定される(1)。

$$\Delta S = P_0 \times (\cos \beta \cdot \tan \phi + \sin \beta)$$

ここで、 ΔS (N) : 根による補強強度、 P_0 (N) : 根の最大

引き抜き抵抗力、 β : せん断面と根の角度、 ϕ : 土の内部摩擦角である。また、

$$\beta = \tan^{-1}(bB)$$

であり、 b (cm⁻¹) : 根の変形係数、 B (cm) : 最大せん断抵抗力が発揮されたせん断変位の1/2である。さらに、

$$b = 0.2262 - 0.0715 \times (Ar/A) - 0.0016 \times D$$

ここで、 Ar : せん断面内に存在する根の断面積の合計、 A : せん断面の面積、 D (mm) : 根の直径である。

せん断面に位置する根について直径、最大の引き抜き抵抗力(N)を算出するとともに、最大のせん断抵抗力が発揮されたせん断変位が求めれば、以上の式により根によるせん断抵抗力の補強強度が算出される。



図-2. 樹木根系を含む大型直接せん断試験用の供試体の作成状況

Fig. 2. Setting-up of the shear box of the large-scale in-situ direct shear apparatus in a preparation of the specimen with tree-roots

III 実験結果

実山地斜面における大型の直接せん断実験は、供試木の周囲土砂を掘り出し、せん断箱を設置しつつせん断面が32度になるように調整して実施した（図-2）。32度

傾斜のせん断面にかかる重量は、斜面垂直成分と斜面傾斜成分に分けられる。前者は、供試体重量プラスせん断箱重量の合計の斜面垂直成分として 8.1kN、後者は斜面傾斜成分として 5.1kN と近似した。

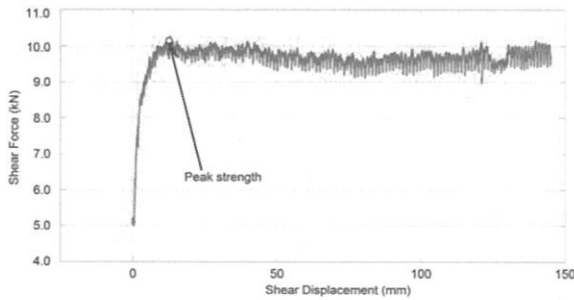


図-3. 大型直接せん断試験で計測されたせん断力とせん断変位の関係

Fig. 3. Shear stress – shear displacement relationship in the large-scale in-situ direct shear experiment



図-4. せん断実験終了後、クレーン車で供試体を吊り上げながら根株を掘り出している状況

Fig. 4. Tree-roots grubbing works when a crane hung the tree stump

油圧ポンプによりせん断力を载荷した際のせん断力-せん断変位関係を示す(図-3)。なお、先述の通り油圧ポンプにより力を加える前であっても、供試体およびせん断箱の自重により約5.1kNのせん断力が32度傾斜方向に加わっていることを考慮し、ロードセル計測値に5.1kNを上乗せした値をせん断力として表している。また、せん断変位値は、せん断箱の左右両側に設置した2つの変位計計測値の平均値として表示した。せん断変位が12.8mmで最大のせん断力(約10.1kN)を示した。その後は、平均的には9.5kN程度とほぼ落ちついた結果となった。なお、12.8mmで最大のせん断抵抗力が計測されたことから、先述のB値は0.64cmとなる。

せん断実験終了後、せん断箱を外し、供試体をクレーン車で徐々に吊り上げながら根株をほりだした(図-4)。140mm強のせん断変位を供試体に与えたものの、深さが0.4m強のせん断面位置の根は切断されておらず連続していた。大方の土砂を除去した後、根株を研究所に持ち帰り、根の分布調査を行った。実斜面で木が生えていた状態と同じになるよう木柵を用いて根株を吊る方法を採用した。深さ0.4m強に位置した根の太さを調べるため、傾斜32度のせん断面位置にある根にマークをつけ(図-5)、ノギスで太さを実測した。



図-5. 深さ0.4m強のせん断面に位置した根のマーク付け調査の様子

Fig. 5. Marking tree roots that were at the shear surface in the direct shear experiment

傾斜32度、深さ0.4m強のせん断面に対し、根の位置した場所と番号を図-6に示す。また、図中の根の番号は任意に割り振ったものであり、この番号に対応して根の太さを表-1にまとめた。

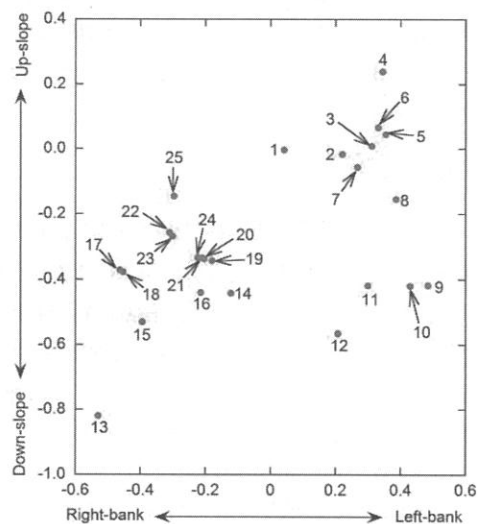


図-6. せん断面上における根の番号と位置

Fig. 6. Numbers and positions of the roots that were at the shear surface

表-1. せん断面に位置した根の直径および抵抗力
Table 1. Diameters and resistances of tree roots that were at shear surface

番号	直径 (mm)	推定される最大の引き抜き抵抗力 (N)	せん断抵抗力の補強分 (N)
1	3.4	125.7	108.0
2	6.8	513.4	439.5
3	1.3	17.9	15.4
4	2.3	56.9	48.9
5	6.2	425.6	364.6
6	1.4	20.8	17.9
7	0.8	6.7	5.7
8	2.2	52.0	44.7
9	3.1	104.2	89.6
10	3.8	157.6	135.3
11	2.7	78.7	67.7
12	1.4	20.8	17.9
13	10.6	1264.3	1078.0
14	2.9	91.0	78.2
15	3.3	118.3	101.7
16	6.6	483.2	413.8
17	2.3	56.9	48.9
18	2.4	62.0	53.3
19	8	714.1	610.6
20	10.6	1264.3	1078.0
21	4.9	264.0	226.5
22	4.6	232.2	199.3
23	2.3	56.9	48.9
24	4.4	212.2	182.1
25	2.1	47.3	40.7

根の最大引き抜き抵抗力(PF_{max})は、根系の直径のべき乗に比例することが知られている (1)。当該せん断実験を実施した場所の近傍でトレンチを掘り、発見したヒノキの根の太さを計測した後、人力で引き抜き抵抗力試験を実施した。その結果、

$$P_0 = 10.49 \times D^{2.03}$$

と整理できた。直接せん断実験終了後に計測した根の直径をそれぞれこの式に代入して最大の引き抜き抵抗力値を算出した (表-1)。また、マサ土の攪乱試料を対象にリング型せん断試験を実施したところ、内部摩擦角は36度、粘着力成分はほぼゼロとなったことから、せん断抵抗力とせん断面の垂直荷重とは下の関係になる。

$$Tf = N \times \tan \phi$$

ここで、 Tf : せん断破壊時のせん断抵抗力、 N : せん断面にかかる垂直荷重である。

今回の直接せん断実験における垂直荷重 8.1kN を代入すると、土自体のせん断抵抗力は約 5.9kN と推定される。

図-3で供試体が発揮した最大のせん断抵抗力は 10.1kN であり、両者の差の 4.2kN (=10.1-5.9kN) が根によるせん断抵抗力の補強分と推定される。この値は土自体のせん断抵抗力 5.9kN の 71% に相等する結果となった。

根の引き抜き抵抗力より推定したせん断抵抗力の補強分 (表-1) の合算値は 5.5kN である。根を含む供試体を直接的にせん断して算出した補強強度の推定値 4.2kN は、この値の 76% になった。このことは、深さ 0.4m 強でせん断されている際、根の全てが抵抗力を発揮しているわけではなく、大きな荷重を負担している根から、負担の少ない根が存在していることを示唆していると考えられる。

V 終わりに

・樹木根系によるせん断抵抗力の補強を定量的に評価することを目的に、従来その困難性のために実施されることの無かった実山地斜面における根系を含む土砂を対象にした大型の直接せん断実験 (縦 1m, 横 1m, 深さ 0.4m 強, せん断面の傾斜 32 度) を実施した。風化花崗岩 (マサ土) の地質からなる国有林内のヒノキを供試木に選定し、手動式の油圧ポンプによりせん断力を載荷する方法により、体積 0.4m³ 強の供試体を 140mm 強せん断した。

・せん断変位が 12.8mm 時点で約 10.1kN の最大せん断力が計測された。なお、リング型せん断試験機を用いて攪乱試料の内部摩擦角を計測したところ 36 度となり、土のせん断抵抗力は 5.9kN と推定された。このことから、両者の差の 4.2kN (=10.1-5.9kN) が、根によるせん断抵抗力の補強分と推定され、この値は土自体のせん断抵抗力の 71% に相等する結果となった。

・根の引き抜き抵抗力試験を基に推定したせん断抵抗力の補強強度は 5.5kN となり、直接せん断試験より推定された強度はこれの 76% という結果になった。

引用文献

- (1) 阿部和時 (1997) 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価に関する研究, 森林総合研究所研究報告, 373:105-181.
- (2) 阿部和時 (2004) 間伐が森林の表層崩壊防止機能に及ぼす評価手法の開発, 日本地すべり学会誌, 41 (3) :9-19.
- (3) 國生剛治・石澤友浩・長谷裕樹・山本祐美加 (2009) 2008 年岩手・宮城内陸地震における斜面崩壊の要因分析, 第 44 回地盤工学研究発表会, 1433-1434.
- (4) OKURA Y, KITAHARA H, OCHIAI H, SAMMORI T, KAWANAMI A (2002) Landslide fluidization process by flume experiments, Engineering Geology, 66:65-78.