ササ植生が斜面表層土の安定性に及ぼす効果[†]

山田 哲 司* 武 田 一 夫**
岡 村 昭 彦** 伊 藤 隆 広**

Effect of Dwarf Bamboo for Stability of a Slope Surface

by

Tetsuji YAMADA*, Kazuo TAKEDA**, Akihiko OKAMURA**
and Takahiro ITOH**

In order to study the effect of dwarf bamboo for the stability of a slope surface, a series of laboratory tests were conducted with an intensive field investigation on the slope slid by the earthquake. As a result of shear tests, it was considered that the effect by the rhizome of dwarf bamboo is quite similar to that of geotextile. Using the parameters obtained from the tension test of rhizome, the field investigation and the earthquake record, the slope stability was evaluated by the safety factor which was given as a function of tensile force of the rhizome per unit slope length. In this analysis, it was shown that the factors were less than 1.0 during the earthquake while they exceeded 1.2 under the static condition, so that the results supported the sliding slope.

Key words: Dwarf bamboo, Rhizome, Slope stability, Earthquake, Safety factor, Field investigation, Direct shear test, Tension test

1 緒 言

これからの道路づくりには、災害を起こさない、緑化して景観に優れた、低コストの法面保護工が求められている。著者らは寒冷地の切土法面を対象に、自生のミヤコザサと凍上抑制法枠を使った法面保護工を提案してきた。¹⁾ 寒冷地において、ササが斜面の安定性をもたらす機能には、リター層（落葉、落枝層）の断熱効果が斜面の凍上量を抑制して凍上害を防ぐなど熱環境の形成以外にも、表土を保持する地下茎の力学的特性が挙げられる。この力学特性を調べるため、原位置引っ張り試験によるササ地下茎を含む土塊（ササブロックとよぶ）の抵抗圧力調査²⁾や、根系を含むまき土の一面せん断試験が行われてきた。³⁾ しかし、ササに覆われた斜面（ササ斜面とよぶ）を常時の条件下で調べても安定性の検証は難しく、ササの力学特性から斜面の安定性を論じたものは少ない。

そこで、著者らは、地震で崩壊したササ斜面に注目し、ササ斜面の特性と安定性を定量的に評価することを目的に、現地調査と室内試験を実施して、結果を用いてササ植生による斜面表層土の安定解析を行った。

2 ササ斜面の現地調査

2・1 調査概要

現地調査は、地震で崩壊したササ斜面の測量調査および植生構造と土質構造の調査からなる。調査地は、北海道広尾郡大樹町美成の一般国道 336 号沿いにある自然のササ斜面である。この斜面は、全長約 1km、斜面長 40～70m、勾配約 40°、南東向きである。地元民の話や航空写真から判断して、1993 年 1 月 15 日に発生した釧路

沖地震 (M7.8) によるとみられる崩壊が、斜面の 5 カ所で発生している。その内の 1 つを Fig. 1 に示した。測量調査は、その外周に沿った基盤岩上の 13 点と中央部の 5 点で光波測量を実施し、層厚を適宜測定した。また、植生構造と土質構造の調査は、崩壊斜面の上部と下部の右横約 10m 離れた場所に、1m²の採取地 2 ヶ所（各々を採取地 1、採取地 2 とよぶ）を設定して行った。採取地を斜面に垂直に深さ 50～70cm の基盤層（泥岩）まで正方形に掘削してササを採取し、Table I に示す項目を調査した。掘削後、採取地の斜面に向かって上下左右の断面で、ササ地下茎の直径と深さを測定し、深さ毎の地下茎の断面積を求めるとともに、採取地 1 で土を採取し、柱状図、湿潤密度分布、含水比分布を調べた。後述する一面せん断試験用ササブロックは、採取地 2 の近傍で採取した。

2・2 調査結果

Fig. 1 に示す崩壊斜面の測量結果を Table II に示し

Fig. 1. Slope slid by the earthquake.

† 原稿受理 平成 11 年 4 月 9 日 Received Apr. 9, 1999

* 正 会 員 (株) 鴻池組技術研究所 〒 554-0002 大阪市此花区伝法, Konoike Construction Co. Ltd., Konohana-ku, Osaka, 554-0002

** (株) 鴻池組技術研究所 〒 554-0002 大阪市此花区伝法, Konoike Construction Co. Ltd., Konohana-ku, Osaka, 554-0002

た、崩壊形態は、円弧すべりよりむしろ斜面表層を形成するササ層の表層すべりになっていた。

Table I のササ植生の構造調査結果によると、この斜面のササの特徴は、秆丈と葉面積が一般に大きく、生育環境が森林地区と類似したものであった。地下茎は、総延長が採取地 1 で 115.6m、同 2 で 60.5m あり、一部を除いて大部分が地表面から深さ 30cm までの範囲に分布していた。上下左右断面（幅 1m 当たり）で測定したササ地下茎の総断面積は $2.95 \sim 9.68\text{cm}^2$ であった。

斜面の土質構造は、地表面から深さ 25cm までは有機物混じり粘土、25～30cm は有機物混じり砂、30～47cm は礫混じり粘土、47～57cm は強風化泥岩、57cm 以深が基盤の泥岩からなっていた。土の湿潤密度分布は概ね $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ であった。含水比は上部粘性土で 100～180% と最も大きく、砂で 50% と最も小さく、基盤上の強風化泥岩で 90% と砂層より大きかった。

3 室内試験

調査地で採取したササブロックについて、ササ地下茎の引っ張り試験および一面せん断試験を行うとともに、ササブロックから地下茎を取り除いた土についても一面せん断試験を実施した。

3・1 試験概要

3・1・1 地下茎の引っ張り試験 地下茎の断面形状は、円形もしくはだ円形で太いものほどだ円形を示すものが多かった。平均直径（長径と短径の平均）は 2～7mm の範囲にあり、平均 4.5mm であった。これらの中から平均直径が偏らないように試料を選んだ。引っ張り試験用の供試体は、採取後湿潤状態で保管し、細根（直径 2mm 以下）を除去した後、長さ約 200mm に切断し、両端の表面を紙やすりで削って、内径 10mm のステンレス製パイプにエポキシ系樹脂で固定して作製した。引っ張り試験では、変位速度約 $1\text{mm}/\text{sec}$ で地下茎が破断するまで変位を与え続け、変位量と引っ張り応力との関係を測定した。

3・1・2 ササブロックの一面せん断試験 一面せん断試験装置は、ジオテキスタイルの引き抜き試験用に開発されたものである（Fig. 2）。装置内のせん断箱の寸法は、 $31.6\text{cm} \times 31.6\text{cm}$ （断面積 1000cm^2 ） $\times$ 高さ 14cm（上箱＝下箱＝7cm）である。試験方法は、試験装置の構造から、せん断面に一定の垂直応力を加えて非排水条件下でせん断を行う「急速せん断試験」である。垂直荷重は 10、20、39、59、78kPa の 5 段階、せん断速度は $2.0\text{mm}/\text{min}$ とした。

ササブロック供試体は、原位置で乱さないように採取したササブロック（約 $35\text{cm} \times 35\text{cm} \times$ 厚さ 20～30cm）を、室内でせん断箱に無理なく入る大きさ（約 $30 \times 30\text{cm} \times$ 厚さ 14～15cm）に整形した。試験前の供試体を、Fig. 3 に示した。ササブロックとせん断箱の隙間は、砂を突き棒で突きながら充填した。所定の垂直荷重を載せ、供試体の圧縮が収まるまで（10～15 分）放置した後せん断を開始した。せん断応力がピークに達するのを確認するか、または変位量が 80mm に達するまで供試体

をせん断し、変位量とせん断応力との関係を求めた。

3・1・3 土の一面せん断試験 表層土の強度に及ぼす地下茎の影響を調べるため、ササブロックから地下茎を取り除いた土を自然含水状態とブロックの密度 $1\text{g}/\text{cm}^3$ で直径 6cm、高さ 2cm に締め固め、非排水条件下で在来型試験機⁴⁾を用いて一面せん断試験を行った。

Table I. Investigation results of dwarf bamboo in area 1m^2 of the spot.

Item	Spot 1	Spot 2
Dry weight of dwarf bamboo above the ground, g	704	593
Avg. area of leaf, cm^2/leaf	67.8	67.1
Hight of culm, cm	90	130
Culm density, number/ m^2	178	163
Dry weight of dwarf bamboo under the ground, g	1547	576
Total length of rhizome, m	115.6	60.5
Dry weight of rhizome, g	1278	536
Volume of rhizome, cm^3	1750	980
Dry weight of feeder root, g	269	40
Volume of feeder root, cm^3	980	199
Max. depth of rhizome, cm	45	63
TSA(Left)*, cm^2	9.68	9.06
(Right), cm^2	4.96	8.46
(Upper), cm^2	6.15	5.31
(Lower), cm^2	2.95	4.80

TSA : Total Sectional Area of rhizome in each section

Table II. Investigation results of sliding slopes.

Item	Measured
Slope length, m	33
Slope width, m	45
Direction, ° *	135
Area S, m^2	1,041
Avg. gradient α , °	40
Avg. thickness of surface layer H, m	0.6

* : Direction from the north in clockwise

Fig. 2. Schematic drawing of apparatus for direct shear test.

Fig. 3. Cross section of block sample with rhizome (Before shear test).

3・2 室内試験結果

3・2・1 地下茎引っ張り試験の結果 試験は地下茎端部のステンレスパイプ部分で破断したものを除き、パイプ間で破断した53例を有効な結果とした。測定結果から、地下茎破断時の引っ張り荷重を断面積で除して引っ張り強さを求め、引っ張り強さと地下茎の断面積との関係をFig. 4に示した。両者の間に明確な相関は認められなかったが、断面積0.15cm²以下の地下茎では、引っ張り強さは10MPa～34MPaと3倍以上の開きがあった。これに対して、断面積0.20cm²以上では、引っ張り強さは10MPa近傍の値で、ほぼ一定値を示した。

3・2・2 ササブロックおよび土の一面せん断試験結果 一面せん断試験は、異なる荷重で5例行った。せん断応力と垂直応力との関係は、Fig. 5に示すように、ほぼ直線関係にある。Fig. 5から求めた強度定数を、Table IIIにまとめた。ササブロックの強度は、地下茎を含まない土試料に比べて、粘着力、内部摩擦角ともに大きくなった。

Table IIIには、砂に短繊維を混合した繊維混合土の中型三軸圧縮試験による強度定数⁵⁾を併記した。繊維を混合すると、粘着力がほぼゼロである砂においても見かけ上の粘着力が生じている。ササブロックでは構成する土質が粘性土であることから繊維混合土にみられるような顕著な強度定数の増加はないが、地下茎が混合繊維と同様の補強効果をもたらしたとみることができる。

4 ササ植生の安定性評価

1993年1月15日に発生した釧路沖地震は、現地の南西約25kmにある広尾町役場（北海道広尾郡広尾町）での測定記録⁶⁾から、南北方向および東西方向に328galの水平加速度、上下方向に203galの垂直加速度を当該斜面に与え、ササ斜面の崩壊をもたらした。この斜面を対象に、地震観測値、調査結果や試験結果を用いて安定解析を行い、ササ斜面の安定性評価を試みた。

4・1 安定解析の方法

現地調査の結果から、崩壊斜面はすべり層厚が薄く崩壊長さが長い一体化した表層すべりの形態を示している。すべり面がほぼ直線であることから、Fig. 6に示す一定の傾斜面に沿うすべりモデルを考えて安定計算を行った。

すべりモデルは、崩壊性地質条件に応じた法面勾配の決定方法を参考に⁷⁾、地震力を考慮するとともにササ地下茎の引っ張り力が崩壊斜面周囲に発揮されて、すべり土塊に抵抗しているものを考えた。これから、ササ地下茎の引っ張り強さ t をパラメーターとする安定計算を次式で行った。安全率 F_s は、

$$F_s = \frac{c \cdot S + (W \cdot \cos \alpha - W \cdot K_h \cdot \sin \alpha) \cdot \tan \phi + T}{W \cdot \sin \alpha + W \cdot K_h \cdot \cos \alpha} \quad (1)$$

$$= \frac{L}{S \cdot H \cdot \eta_t \cdot (\sin \alpha + K_h \cos \alpha)} t + \frac{c + H \cdot \eta_t (\cos \alpha - K_h \sin \alpha) \cdot \tan \phi}{H \cdot \eta_t (\sin \alpha + K_h \cos \alpha)} \quad (1)'$$

で与えられる。用いた数値は、Table I, Table II, Table IVに示す。この内、斜面長さ1mあたりの地下茎断面積

Fig. 4. Relationship between tensile strength of rhizome and sectional area.

Fig. 5. Relationship between shear stress and normal stress.

Table III. Strength parameters.

Samples	Cohesion (kPa)	Angle of internal friction (degree)
Soil block with rhizome	8.63	32.0
Soil block without rhizome	2.65	30.1
Siliceous sand	0.00	34.3
Siliceous sand (reinforced by textile 0.2% in weight)	21.6	40.9
Siliceous sand (reinforced by textile 0.4% in weight)	53.9	42.7

Table IV. Values used for the analysis of slope stability.

Parameter	Value
Unit weight of sliding slope γ_t , kN/m ³	9.5
Tensile force of rhizome per unit slope length t , kN/m	5.8~20.3
Broken length around the sliding slope L , m	73.1
Cohesion at the sliding surface c , kPa	2.35
Internal friction angle at the sliding surface ϕ , °	27.5
Ratio of horizontal seismic acceleration to the gravity, K_h	0.335

Fig. 6. Analysis model for slope stability.

Fig. 7. Relationship between safety factor and tensile force of rhizome per unit slope length.

の合計は、Table I に示す採取地 1 の 4 断面の平均値 5.9cm^2 とした。ササ地下茎の引っ張り試験結果から引っ張り強さは $10 \sim 34\text{MPa}$ であるので、この 5.9cm^2 を用いて、斜面長さ 1m に発揮される引っ張り強さ t を $5.8 \sim 20.3\text{kN/m}$ と算定した。崩壊斜面周囲の破断長 L は、地下茎の破断が確認された斜面の上部と側部について測量で得られた長さの合計とした。なお、すべり面の強度定数は、すべり面と想定される強風化泥岩層に含まれる粘性土の一面せん断試験を行い、Table IV に示す粘着力と内部摩擦角を用いた。

4.2 安定解析の結果と考察

Fig. 7 に、安全率 F_s と地下茎の引っ張り強さ t との関係を示した。これらの直線は、式 (1) を式 (1)' のように書き換えると安全率が t の関数で表わされ、引っ張り試

験の測定から得られた t の範囲を太線で示した。常時においては、地下茎の存在に関わらず安全率が 1.2 以上の値となり、表層斜面の安定は保たれている。しかし、地震時においては、安全率は t の多くの範囲で 1 を下廻り、危険な状態になる。特に、地震時の太線範囲の安全率は、ササの引っ張り強さによって 1.0 前後の微妙な値になっている。長さ 1km のササ斜面の数カ所で崩壊がみられたことを考えると、実際の斜面においても室内試験時と同等の地下茎の引っ張り力が発揮され、斜面崩壊の現象を反映していることになる。

5 結 言

ササ斜面の植生構造・土質構造や地震による崩壊斜面の調査をもとに、地下茎の引っ張り試験・ササブロックの一面せん断試験を行い、ササ斜面の力学的安定性の定量的評価を試みた。その結果、地震によって崩壊した斜面安定解析から、ササ地下茎の引っ張り力が、斜面表層の安定に効果のあることが認められた。また、ササブロックの一面せん断試験により、ササブロックと繊維混合補強土の強度特性を比較した結果、ササ地下茎が繊維混合補強土と同様の補強効果をもたらすことが示された。

最後に、本研究を遂行するにあたり、一面せん断試験装置の提供と、多大なご指導を頂いた関西大学土木工学科西田一彦教授ならびに西形達明助教授に対して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 武田一夫, 岡村昭彦, 中澤重一, 材料, **47**, 132 (1998).
- 2) 荻住 昇, Bamboo Journal, **4**, 167 (1987).
- 3) 八木則男, 二神 治, 榎明 潔, 大塚俊二, 西丸庸一, 小堀慈久, 第 28 回土質工学研究発表会, 2117 (1993).
- 4) 土質工学会編, 土質試験法 (第 2 回改訂版), 431 (1979) 土質工学会.
- 5) 三木博史, 田島健司, 増井 仁, 川西順次, 西村 淳, 第 32 回土質工学研究発表会, 2595 (1997).
- 6) 強震観測事業推進連絡会議編, 強震速報 No.41, p.5 (1993) 科学技術庁防災科学技術研究所.
- 7) 地盤工学会編, “切土法面の調査・設計から施工まで (地盤工学実務シリーズ 5)”, 4 章 (1998) 地盤工学会.