

62 根系が土質強度に与える影響の含水率依存性 (1)

— 模擬根を挿入した標準砂によるモデル実験 —

東京大学農学部 ○加藤 尚子

執印 康裕

鈴木 雅一

太田 猛彦

1.はじめに

森林地斜面の表層崩壊現象において樹木根系の補強効果は森林土壌のせん断強度に関わる重要な要素である。従来より樹木根系の補強効果については様々な研究が行われてきており、補強効果は根系の本数、太さ、進入角度の他に土壌の水分状態によっても変わることが指摘されているが、それらの補強効果について実験的に調べた例は少ない。特に水分状態については、降雨により含水率が高くなった土壌中で根系の補強効果がどの程度期待できるのかを定量的に把握することは防災計画に重要なことであり、今までの飽和・不飽和の区別よりも詳しく水分状態を制御した実験を行い、水分状態の変化が根系を含む土壌の強度定数（粘着力 c と内部摩擦角 ϕ ）に対してどのように影響するかを理解することが必要となる。しかし、今までは試料中のサクションを正確かつ簡単に制御することができる適当な試験機がなかったことも理由となり、そのような実験は行われていない。昨年度の発表ではそれらの条件を満たすせん断試験機を新たに開発し、その試験機と従来の試験機との比較を行った結果について報告した。今回は、その試験機により試料の水分状態が根系のせん断補強効果にどのような影響を及ぼすかを模擬根として竹ぐしを用いたモデル実験により調べた。この結果より、根系の土質強度補強効果の水分状態依存性が明らかになった。また、竹ぐしの本数・長さとしせん断強度の関係についても新たな結果が得られたので報告する。

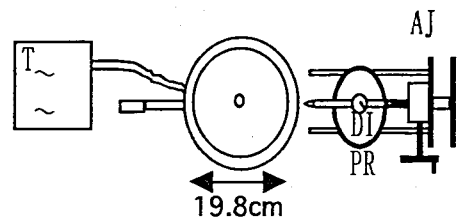
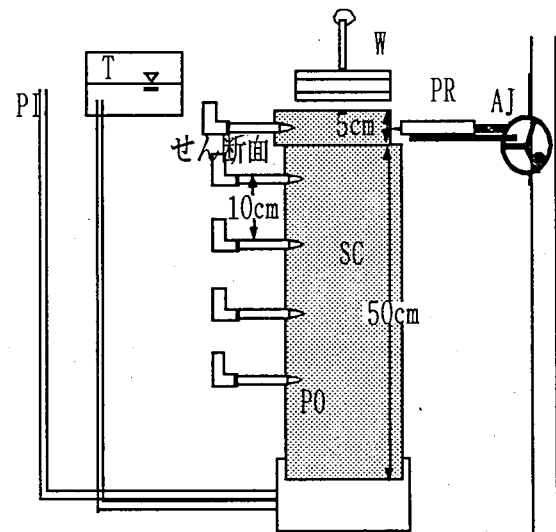
2.試験機の概要

本研究で開発したせん断試験機本体は内径19.8cmの塩ビパイプから成り、長さ50cmの砂柱の上に10cmもしくは5cmの可動部分を載せた構造になっている（図-1）。せん断荷重はジャッキで可動部を押して与え、その抵抗力をジャッキの先端につけたブルーピングリングで測定する。垂直荷重はせん断試料に鉛盤を載せる直接荷重方式である。

3.実験内容

3.1実験方法

本研究では試料として豊浦標準砂を用い、根系の入った土壌を想定したモデル実験においては模擬根として市販の竹ぐし（ $\phi 3\text{mm}$ ）を用いた。試



- | | |
|------------------|-------------|
| PO; ポーラスカップ | SC; 砂柱 |
| W; 垂直荷重用おもり (鉛板) | T; タンク |
| AJ; アクションジャッキ | P; ポンプ |
| PR; ブルーピングリング | DI; ダイアルゲージ |
| PI; ピエゾメーター | |

図-1 せん断試験装置

表-1 実験内容

試料	実験項目	竹ぐしの長さ	竹ぐしの本数	サクシオン (ψ)
砂のみ	サクシオン (ψ)			0,10,20,30,40,50,Dry
砂+模擬根 (竹ぐし)	(1)サクシオン (ψ)	10cm	24本	0,10,20,30,40,50,Dry
	(2)本数	10cm	0~40本	30
	(3)長さ	5,10,24cm	24本	30

注) 竹ぐしの長さ5,10,24cmはせん断面下にそれぞれ0,5,19cm入っている。

料の詰め方は水中落下方式とし、試料の水分状態のコントロールは砂柱の下から連結したタンクの上げ下げによって行う方法をとった。そのときの土壌中の水分状態はせん断試験機本体に側面から入れたテンシオメーター用ポラスカップにつないだ水マノメーターを用いて試料中の各深さのサクシオンを測定した。また、竹ぐしを入れる場合にはせん断容器上面まで標準砂を詰めた飽和状態で挿入した後、目的のサクシオンとなるように水分状態の制御を行った。

3.2 実験項目

実験はまず竹ぐしが入っていない標準砂のみでサクシオンの変化によるせん断強度のちがいを調べた。

次に模擬根(竹ぐし)を入れたものでは

- (1)サクシオンの変化によるせん断強度のちがい
- (2)竹ぐしの本数によるちがい
- (3)竹ぐしの長さによるちがい

について実験を行い結果を比較した。それぞれ与えた実験条件を表-1に示す。

実験回数はサクシオンによるちがいを比較したものについては各サクシオンで垂直荷重を4段階に変えて4~6回試験をした。また、竹ぐしの本数・長さの比較ではサクシオン、垂直荷重ともに同じ条件でそれぞれ1回ずつ試験をした。

4. 結果と考察

4.1 実験結果

標準砂のみの試料について水分状態を変えてせん断試験を行った。その結果各サクシオンごとに得られた粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ とサクシオンとの関係を図-2.b),c)1.に示す。また、豊浦標準砂の水分特性曲線を図-2.a)に示す。これより、標準砂のせん断強度定数のうち粘着力 c は水分特性曲線で体積含水率が低下しはじめる限界毛管水頭 (ϕ_{cr}) と同じ $\phi = -30\text{cm}$ で最大となる上に凸の分布となり、一方内部摩擦角 ϕ は

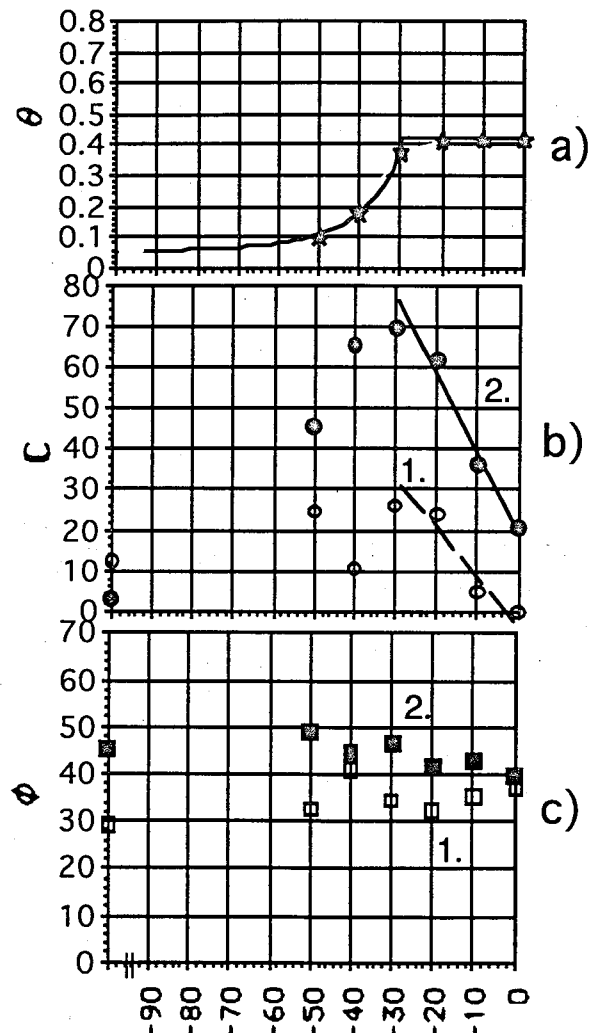


図-2

Suction
サクシオンとa.体積含水率、b.粘着力、
c.内部摩擦角の関係

a); ☆ 実測値

—— Brooks & Corey 式により算定

b); ○ 砂のみ ● モデル24本

c); □ 砂のみ ■ モデル24本

サクシヨンによらずほぼ一定の値をとることがわかった。

竹ぐしを入れた場合のサクシヨンと粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の関係は図-2.b), c) 2. の様になり、この場合も砂のみと同様、粘着力 c は $\phi = -30\text{cm}$ で最大となる上に凸の分布となり、内部摩擦角 ϕ はサクシヨンによらずほぼ一定であった。しかし、竹ぐしを入れたことにより c 、 ϕ ともに増加しており、 c についてはその増加量 Δc も乾燥と飽和で小さく、 ϕ 付近で最大となる傾向がみられた。

次に竹ぐしの本数とせん断補強効果関係を図-3に示す。せん断補強効果は砂のみの場合を基準としたせん断強度の増加分である。この図よりせん断強度補強効果は竹ぐしの本数密度が小さい場合には本数に比例して増加するが、ある程度以上の本数密度になると竹ぐしの本数が増えても変わらないということがわかる。

最後に竹ぐしの長さ別のせん断応力の比較を図-4に示す。この図よりせん断応力は竹ぐしの長さが長いほど大きい傾向が見られたが、竹ぐしがせん断面に達していないものについては補強効果がみられないことがわかる。

4.2 モデル式を用いた考察

以上の実験結果を根系が引き抜かれるときに根に生じる軸力を考えたモデル式を用いて考察を加える。土のせん断強度はMohr-Coulombの破壊基準より

$$\begin{aligned}\tau &= c + \sigma' \tan \phi \\ &= c + (\sigma - \chi U_w) \tan \phi \\ &= c - \chi U_w \tan \phi + \sigma \tan \phi \quad \dots (1)\end{aligned}$$

ここで、 σ' ; 垂直応力 (有効応力)

σ ; 全応力

χ ; 飽和で1、乾燥で0となる飽和度の関数

$-U_w$; 間隙水圧 (=サクシヨン ϕ)

と表される。また、根系の効果は従来のモデル式より根が引き抜けながら効果を発揮する場合に根に生じる軸力を T とすると、

$$\begin{aligned}T &= \pi D L K \sigma' \\ &= \pi D L K (\sigma - \chi U_w)\end{aligned}$$

ここで、 D ; 根の太さ

L ; せん断面下の根の長さ

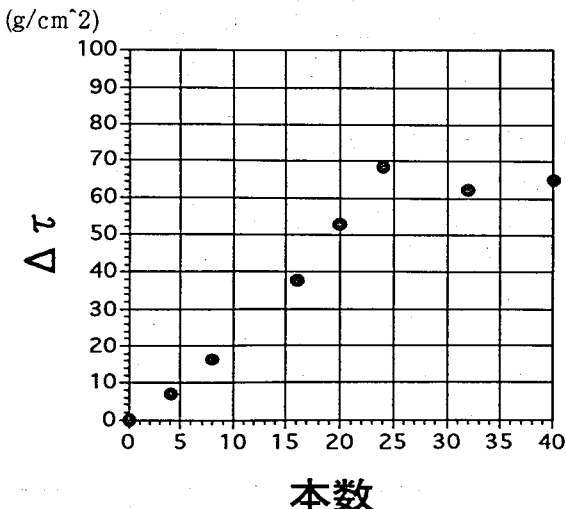


図-3 竹ぐしの本数と補強効果の関係

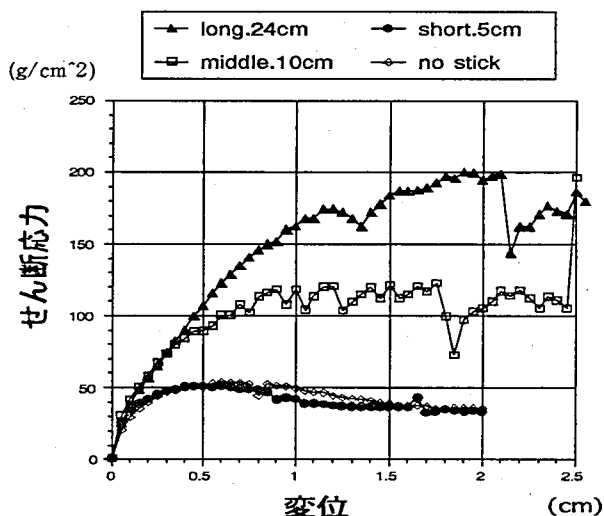


図-4 竹ぐしの長さによるせん断応力のちがい
(竹ぐし24本、せん断容器の厚さ c cm)

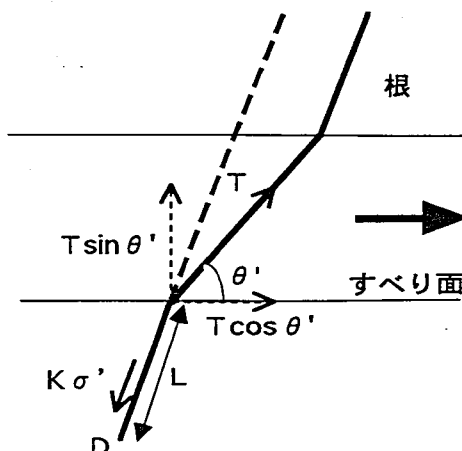


図-5 根にはたらく軸力 T

K ; 土と根の間の摩擦係数、有効応力の関数

と表されるから、根系等により補強された土壌のせん断強度 τ_s は根の本数を N、 θ' をすべり面に対する根の進入角度とすると (図-5)、

$$\begin{aligned}\tau_s &= c + NT \cos \theta' + (NT \sin \theta' + \sigma') \tan \phi \\ &= c - \chi U_w \{ K \pi N D L (\cos \theta' + \sin \theta' \tan \phi) + \tan \phi \} \\ &\quad + \sigma \{ K \pi N D L (\cos \theta' + \sin \theta' \tan \phi) + \tan \phi \} \dots (2)\end{aligned}$$

と表すことができる。

(1)、(2)式によると、砂のみと竹ぐしを入れたものの見かけの粘着力と見かけの内部摩擦角 (傾き) はそれぞれ、

見かけの粘着力 ; $c - \chi U_w \tan \phi \rightarrow c - \chi U_w \{ K \pi N D L (\cos \theta' + \sin \theta' \tan \phi) + \tan \phi \}$

見かけの内部摩擦角 (傾き) ; $\tan \phi \rightarrow K \pi N D L (\cos \theta' + \sin \theta' \tan \phi) + \tan \phi$

のように変わったことになる。これらの式から、含水率が変化することによる見かけの粘着力の変化量は砂のみの場合は $-\chi U_w \tan \phi$ 、竹ぐしを入れたモデル実験の場合は $-\chi U_w \{ K \pi N D L (\cos \theta' + \sin \theta' \tan \phi) + \tan \phi \}$ であり、どちらの場合もサクシジョンのと含水率の関数 $-\chi U_w$ に比例すること示している。特に、標準砂の場合サクシジョン $\phi = -30\text{cm}$ までは含水率は変化しないので (図-2.a))、含水率の関数である χ は一定であり、見かけの粘着力の増加分はサクシジョン ($\phi = U_w$) のみの関数となる。一方、内部摩擦角についても竹ぐしを入れたことにより増加するが、その増加分は含水率にはよらないということをこれらのモデル式は示している。

5.まとめ

引き抜き抵抗のモデル式の応答に対応する実験結果を以下にまとめる。

- ・見かけの粘着力は砂のみも模擬根を入れた場合も含水率とサクシジョンにより変化する。
- ・見かけの粘着力は模擬根を入れると増加するが、増加量も含水率とサクシジョンによる。
- ・見かけの内部摩擦角は含水率によらないが、竹ぐしを入れることにより大きくなる。
- ・竹ぐしの効果は本数に比例する。(本数密度の小さい場合)
- ・竹ぐしのせん断面下の長さがせん断応力に関係する。

しかし、竹ぐしを入れたことによる粘着力の増加分が、 $-\chi U_w = 0$ となる飽和でも見られる点などこのモデル式だけでは説明できないものもあり、アンカー効果やせん断時の体積変化の影響を考慮して改良する余地がある。

参考文献

- <1> 執印・加藤：土壌水分による土質強度特性評価のための新型せん断試験機の開発 (1) - 豊浦標準砂を用いた試験機の評価 -、平成6年度砂防学会研究発表概要集 p.125~128、1994 <2> 加藤・執印：土壌水分による土質強度特性評価のための新型せん断試験機の開発 (2) - 森林土壌を用いた2、3の測定結果と解析 -、平成6年度砂防学会研究発表概要集 p.129~132、1994 <3> 丸井 英明：自然斜面における表層崩壊の研究、京都大学学位論文、1987 <4> 阿部和時・岩元 賢：樹木根系の土壌緊縛力について - 土壌水分の影響 -、98回日林論、601~602、1987、