

根系を含む表層土の透水・強度特性

PERMEABILITY AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF SURFACE SOIL CONTAINING TREE ROOTS AND ITS SUBSTITUTES

鈴木素之¹・山本哲朗²・西村昌也³

Motoyuki SUZUKI, Tetsuro YAMAMOTO and Masaya NISHIMURA

¹ 山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp

² 山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: tyamamoto@yamaguchi-u.ac.jp

³ 山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

Key Words: vegetation, tree roots, permeability, tensile strength, box shear test

1. 緒論

植生工や植樹が斜面安定に果たす役割として雨水の浸透や侵食の抑制, 急激な乾湿の防止, 根の張り出しによる地盤の補強(緊縛効果, 杭効果)などが指摘されている。一方, 導入した植生が招く問題点としては強風による樹木の揺動に伴う地盤の緩み, 根の侵入に伴う岩盤の亀裂の拡大や風化の進行, 樹木の管理不足による森林の生態系の乱れと森林の荒廃に伴う表土流出などが指摘されている。

根系による地盤の補強効果については現地試験および室内試験において幾つか調べられている。杉山ら¹⁾は原位試験により根の張り方による引張強度特性に差異は認められないことを明らかにした。矢田部ら²⁾は根の代用として毛糸を土供試体に混入した一面せん断試験を実施し, 毛糸の本数が多いほどせん断強度が大きくなる結果を示した。また, 八木ら³⁾は発泡スチロールを用いた一面せん断試験を実施し, せん断強度の増大は内部摩擦角よりもむしろ粘着力の増加に起因していることを示した。その他, 降雨後の植生に生じる土中水分の消失に着目して, 外狩ら⁴⁾は小型土槽を用いた散水実験を実施し, 裸地層では排水および蒸散による土壌乾燥が2ないし3日間で停止するが, 植生を施した層では排水による乾燥が一段落したと判断される2日経過以降も土壌乾燥が進行するという実験結果を示している。既往の研究成果をまとめると, 植生による斜面崩壊に対する予防効果については研究途上の段階であり, 特に樹木根系の成長に伴って土の

透水性とせん断強度がどのように変化するのは必ずしも十分に解明されていない。

本研究では, 樹木根系の成長に伴い土中の根系の含有率が変化することに着目し, 根系を混入させた土に対して変水位透水試験ならびに低圧域での圧密定圧一面せん断試験を実施し, 土の透水性および強度特性に及ぼす根系の影響について検討した。また, 試作した一軸引張試験機により根系の引張強度特性についても検討した。なお, 一連の試験で用いた試料は, 自然斜面で採取した表層土とそれに含まれるツクシハギの根, まさ土とそれに根系の代用材として混入する麻紐およびポリエチレンの3通りの組合せである。

2. 土試料の物理的性質および根系とその代用材の材料特性

本研究で用いた土試料は山口市九田川で採取したツクシハギを含む表層土と宇部市で採取したまさ土である。両試料の土粒子の密度試験, 粒度試験および液・塑性限界試験の結果を表-1に示す。また, 両試料の粒径加積曲線を図-1に示す。実験で取り扱う根系には表層土に含まれるツクシハギ(かさ密度: 1.625 g/cm³)をそのまま用いた。また, 実際の根系には質量・長さ・径など不均一な要素が多く存在するため⁵⁾, 径がほぼ等しく長さが調整可能な麻紐(直径: 1.45 mm)と吸水性のないポリエチレン素材の紐(以下, ポリエチレンと称す, 直径: 2.88 mm)を用

表-1 土試料の物理的性質

	九田川	まさ土
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.666	2.576
平均粒径 D_{50} (mm)	0.023	0.212
細粒含有率 F_c (%)	70.1	36.0
液性限界 w_L (%)	35.1	NP
塑性指数 I_p	10.2	NP
土質分類	ML	SF

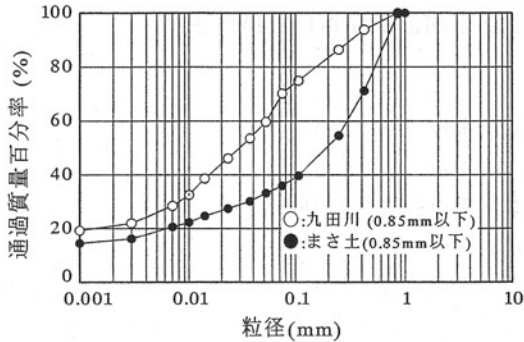


図-1 土試料の粒径加積曲線

いた。なお、根には吸水する部分としない部分があり、ポリエチレンは根系の非吸水の部分モデル化するものとして利用した。麻紐およびポリエチレンの密度はそれぞれ 1.419 g/cm³ および 0.94~0.96 g/cm³ である。なお、本文では土に含まれる根および代用材の含有率として著者ら⁹⁾が定義した質量含根率 $C_{rm} = (m_r/m_s) \times 100$ (%)、(ただし、 m_s , m_r : 土粒子および根系の質量)を用いた。

3. 根系混合土の透水性

(1) 締固めたまさ土の透水試験

ポリエチレンを混入した締固め土に対して変水位透水試験(JIS A 1218)を実施した。試料は 0.85 mm 通過分のまさ土であり、初期含水比は最適含水比付近に調整した。供試体は高さ 12.7 cm、内径 10 cm であり、締固め法(A-a法)により作製した。供試体は透水試験前に透水円筒の中で真空ポンプにより脱気された。混入するポリエチレンの C_{rm} は 0%, 0.5%, 1%, 2%, 3% の 5 通りに変化させ、供試体内に均一に混入した。図-2 に供試体の C_{rm} と透水係数 k の関係を示す。 k は C_{rm} の増加とともに減少しており、特に k は $C_{rm}=0 \sim 0.5\%$ の範囲において著しく減少し、 $C_{rm}=1 \sim 3\%$ の範囲ではわずかに減少している。この原因として吸水性のないポリエチレンが締固めにより水平方向(透水方向に対して垂直方向)に配置された結果、遮断効果が働き、水の流れの経路が複雑に変化したため、透水性が

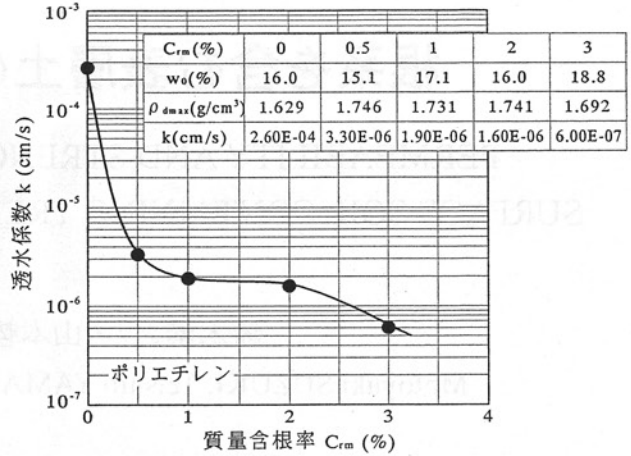


図-2 最適含水比に調整した試料の透水係数と質量含根率の関係

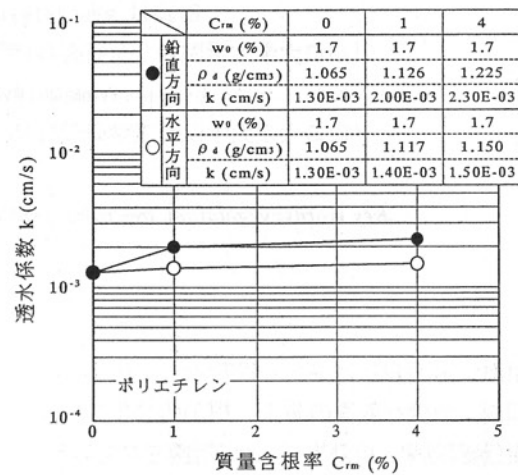
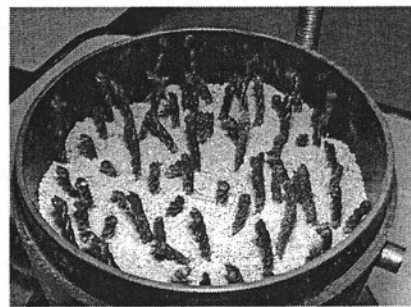
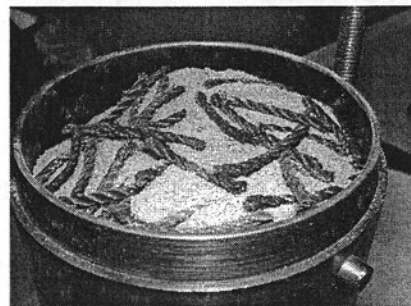


図-3 低密度に調整した供試体の透水係数と質量含根率の関係



(a) 鉛直方向に配置した供試体



(b) 水平方向に配置した供試体

写真-1 根系の混入方向を変化させた供試体

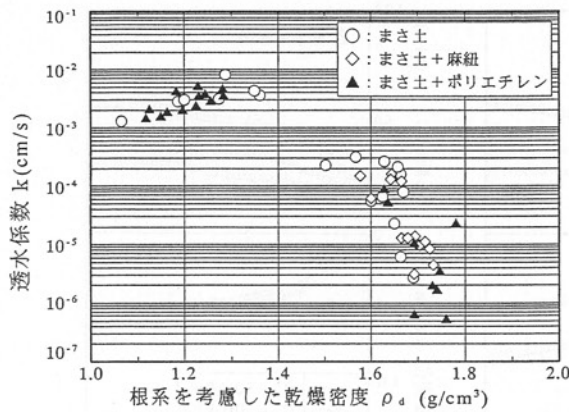


図-4 麻紐・ポリエチレンを混入した乾燥密度と透水係数の関係

低下したと考えられる。また、透水係数が元々低いのは締め固めによって乾燥密度が高いことと細粒分の移動による供試体下部での目詰まりの可能性が理由として考えられる。

(2) 低密度状態におけるまさ土の透水試験

上記(1)では供試体の密度が高く実地盤以上に締め固められていた可能性が考えられる。そこで、本節では供試体密度が低い状態での根系の影響について検討した。また、細粒分の目詰まりの影響を除くため、試料は0.075mmふるいで細粒分をカットした試料(0.075mm<粒径≤0.85mm)を乾燥させて使用した。供試体は自然落下法により作製した。混入するポリエチレンは鉛直方向および水平方向にそれぞれ均一に配置した(写真-1)。また、 C_m は0%、1%、4%の3通りに変化させた。図-3に供試体の k と C_m の関係を示す。これより、混入方向による透水係数の有意な変化はみられず、工学的に影響がないと考えられる。また、水平方向では、(1)で述べたような k の低下は現れなかった。しかし、両供試体とも k の変化量は比較的小さく、根の配置方向が土の透水性に大きな影響を与えたとはいえない。

次に、上述の吸水性のないポリエチレンを用いた試験結果に加えて吸水性のある麻紐を用いた試験結果⁹⁾を踏まえて、根系部分を考慮した乾燥密度 ρ_d と透水係数 k の関係を図-4に示す。ここで、 ρ_d は根系部分を土粒子部分と同じ固相とみなした場合の乾燥密度である。これより、 ρ_d が1.2g/cm³付近においては、 k の変化は小さく、 k のオーダーの変化はみられない。 ρ_d が1.5~1.8g/cm³の範囲では ρ_d の低下に伴い k は著しく増加している。また、 C_m などの試験条件による差異はみられず、主に ρ_d によって k が変化しているといえる。

以上のことから、根系混入土の透水性は質量含根率の影響に比べて乾燥密度の影響が相対的に大きく、また、

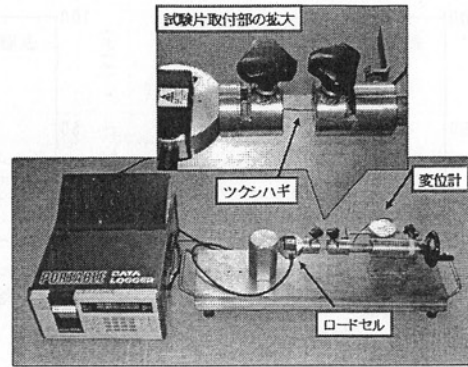


写真-2 試作引張試験機

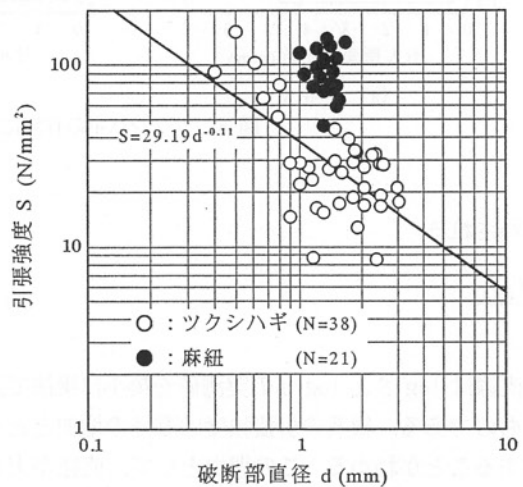


図-5 根系の引張強度と破断部直径

低密度状態における土の透水性は根系の混入方向によってほとんど影響を受けないようである。

4. 根系および代用材の引張強度特性

土が根系により補強されている場合、根系に引張力が作用していると考えられる。そこで、根系の引張強度を求めることを目的に引張試験機を試作した(写真-2)。引張力は500Nのロードセル、変位は電気式変位計を用いて測定し、データロガーによりデータを収録した。根系の試験片を取付ける装着部は引張する際にすべりが生じないように噛み合わせ状に加工している。実験では、長さ5~6cmに調整した根系の試験片の両端を装着部に取り付けて試験片の長軸方向に引張させた。 $d_f=1$ mm以下の場合には装着部にクッション材となる布をはさみ、試験片の潰れや切断を防いだ。

引張試験機を用いて表層土に含まれるツクシハギ(N=38個)および麻紐(N=21個)の引張力 P と変位 δ を測定した。図-5は根系の引張強度 S と破断部直径 d の両対数表示の関係を示す。ここで引張強度 S は破断時の最大引張力 P_{max} を破断した根の断面積 A_f で除したものであり、式(1)のよ

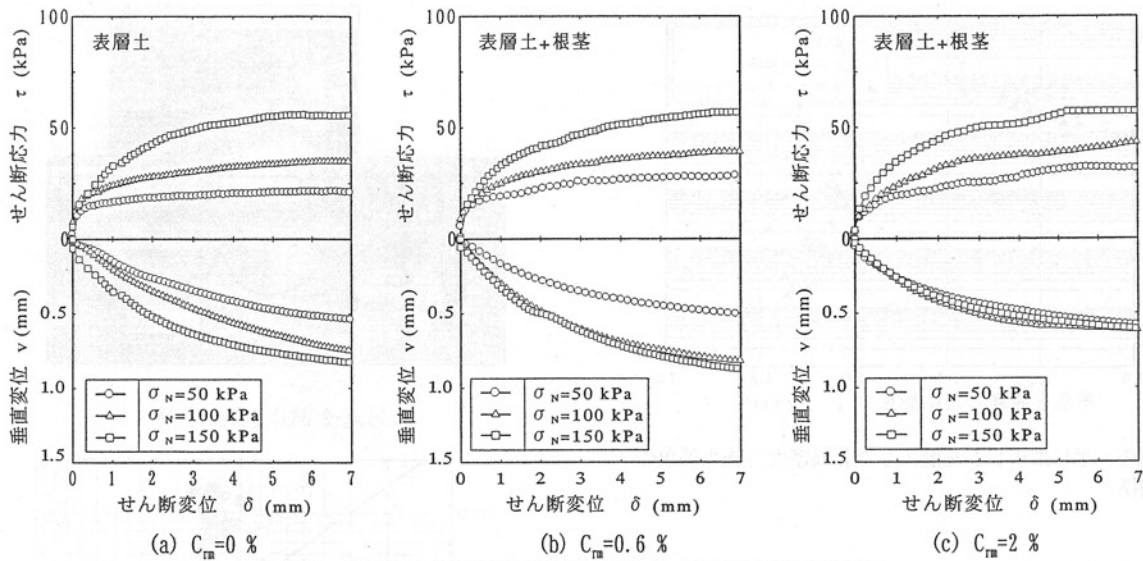


図-6 ツクシハギの有無による表層土の一面せん断挙動の差異

うに表わされる。

$$S = \frac{P_{max}}{A_f} \quad (1)$$

図中の直線は $\log S$ と $\log d$ の実測値を最小自乗法で近似したものである。根系の引張強度は直径の増加とともに低下することがわかる。この理由として、直径が大きい根系ほど、内部の繊維の不均質性の影響が現れると考えられる。またツクシハギの引張強度は $10 \sim 40 \text{ N/mm}^2$ 、麻紐の引張強度は $70 \sim 100 \text{ N/mm}^2$ の範囲に多く分布していた。破断部の直径はツクシハギの場合 $0.4 \sim 3 \text{ mm}$ 、麻紐の場合 $1.0 \sim 1.7 \text{ mm}$ の範囲でばらつきがみられる。麻紐の破断前の直径は 1.45 mm 程度であるが、破断後は引張りにより多少変化したものと考えられる。

5. 根系混合土の一面せん断強度特性

(1) ツクシハギを混入した表層土の一面せん断挙動

表層土に対して圧密定圧一面せん断試験 (JGS 0561-2000) を行った。圧密圧力 $\sigma_c = 50, 100, 150 \text{ kPa}$ の3通りとして各 σ_c の下で圧密した後 (圧密時間は3t法で決定)、供試体は水浸状態としせん断速度 0.02 mm/min でせん断した。供試体は 0.85 mm ふるい通過分の試料を用いて締め固め法により作製した。供試体に含まれる根系の質量含根率は $C_m = 0.6\%$ の場合と $C_m = 2\%$ の場合の2通りとした。なお、ツクシハギの実際の質量含根率は 0.6% であったため⁹⁾、試験における C_m はこれを参考にして決定した。ただし、根系の混入率と植物の成長度との相関は現時点では考慮しておらず、供試体の作製が困難となる混入率から質量含根率の上限値を決定した。

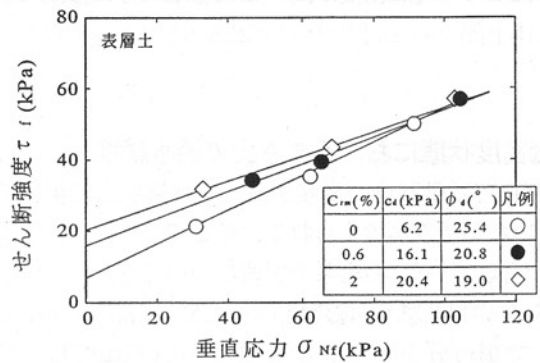


図-7 表層土における垂直応力とせん断強度の関係

図-6 に根を含まない場合 ($C_m = 0\%$) と根を含む場合 ($C_m = 0.6\%, 2\%$) のせん断応力 τ とせん断変位 δ の関係を示している。各 τ - δ 曲線は垂直応力 σ_N の大きさに順に並んでいる。 $\sigma_N = 50 \text{ kPa}$ の場合、 τ は $\delta = 3 \text{ mm}$ 以降においてほぼ一定の値をとっている。 $\sigma_N = 100 \text{ kPa}$ および 150 kPa の場合にはそれぞれ $\delta = 6.0 \text{ mm}$ および 5.5 mm 以降において τ は定常状態に達している。根を含む場合の τ - δ の挙動をみると、 $\sigma_N = 50 \text{ kPa}$ の場合は $\delta = 5.8 \text{ mm}$ のときに τ のピークを迎え、それ以降は定常状態に達している。 $\sigma_N = 100 \text{ kPa}$ および 150 kPa の場合はともに $\delta = 7 \text{ mm}$ を迎えても τ は単調増加し続ける結果となった。

図-7に図-6で示したせん断強度とそのときの垂直応力の関係を示す。 $C_m = 0\%$ の場合、粘着力は $c_f = 6.2 \text{ kPa}$ 、内部摩擦角は $\phi_f = 25.4^\circ$ 、 $C_m = 0.6\%$ の場合には $c_f = 16.1 \text{ kPa}$ 、 $\phi_f = 20.8^\circ$ 、 $C_m = 2\%$ の場合には $c_f = 20.4 \text{ kPa}$ 、 $\phi_f = 19.0^\circ$ である。この結果から根を混入させると、見掛けの粘着力が増す一方、内部摩擦角は若干減少するようである。ここで、 C_m が 0% から 2% に増加したときのせん断強度の増分 $\Delta \tau_f$ は、 $\sigma_N = 50 \text{ kPa}$ のとき $\Delta \tau_f = 10.7 \text{ kPa}$ であるの

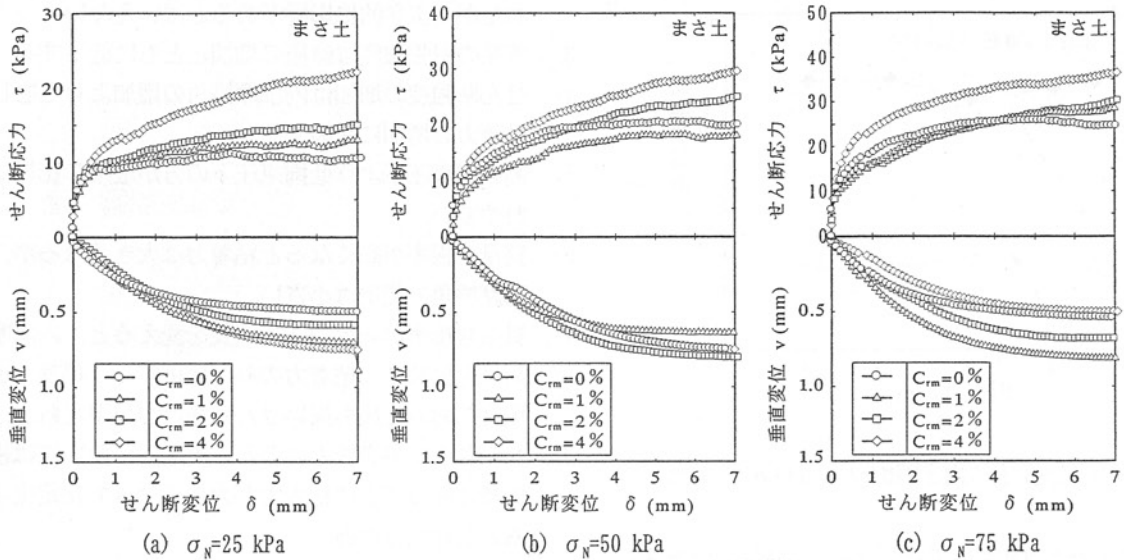


図-8 麻紐を混入したまさ土の一面せん断挙動

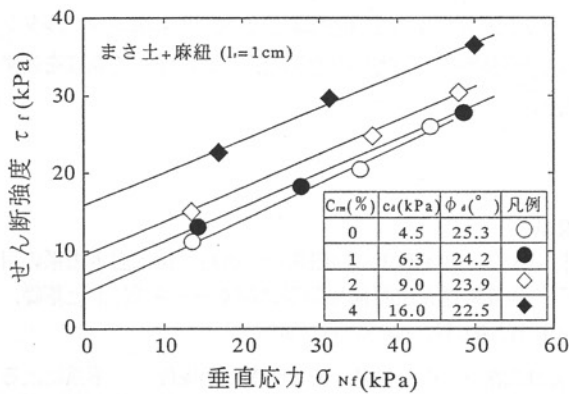


図-9 質量含根率を変化させた場合の垂直応力とせん断強度の関係

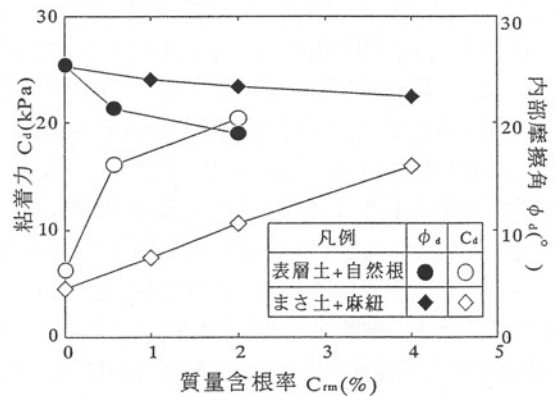


図-10 質量含根率の変化に伴う内部摩擦角および粘着力の変化

に対して、 $\sigma_N=150$ kPa の時 $\Delta \tau=1.2$ kPa である。これにより低拘束圧下の方がせん断強度増分より大きく、根の影響が顕著に現れるといえる。また、質量含根率を増すごとに内部摩擦角が減少した事実はこのためである。

(2) 麻紐を混入したまさ土の一面せん断挙動

根系の代用材として麻紐を混入したまさ土に対して圧密定圧一面せん断試験を行った。試料は 0.85 mm ふるいを通させたまさ土である。 $\sigma_c=25, 50, 75$ kPa の下で各々圧密した後、供試体は水浸状態としせん断速度 0.2 mm/min でせん断した。土試料の含水比は最適含水比付近に調整し、それに麻紐の質量を所定の C_m になるように計量して混入した。供試体を所定の乾燥密度 ($\rho_d=1.187$ g/cm³) にするため、直径 6 cm、高さ 2 cm のカッターリングにおいて試料を 3 層に分けて締固めた。その際、供試体内で根の分布が均一になるように注意した。

まず麻紐の C_m の影響を調べるために、 $C_m=0, 1, 2, 4\%$ の 4 通りに変化させた。図-8 にそれぞれ $\sigma_N=25, 50, 75$ kPa

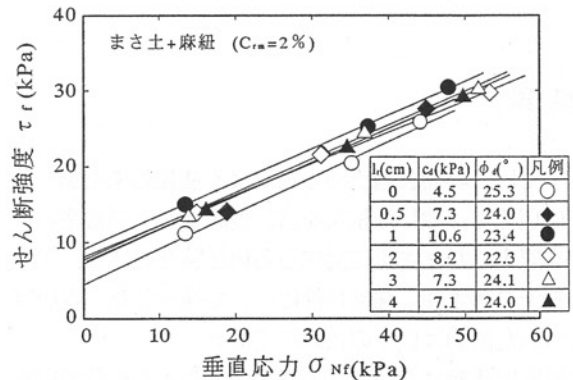


図-11 根長を変化させた場合の垂直応力とせん断強度の関係

の場合の τ と δ の関係を示す。各 σ_N の下で τ - δ 曲線は C_m の大きさの順に並んでいる。 $C_m=0\%$ の場合、 τ は $\delta=2.5$ mm 以降においてほぼ一定の値をとっている。 $C_m=1, 2, 4\%$ の場合には $\delta=7$ mm を迎えても τ は単調増加し続ける。 C_m が増すにつれて δ の増加に対する τ の増加の度

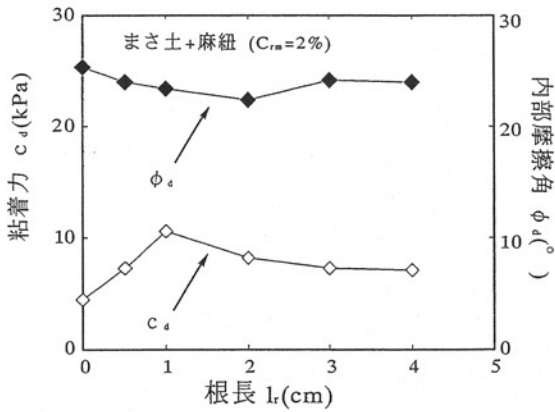


図-12 根長の変化に伴う内部摩擦角および粘着力の変化

合いが大きくなる。図-9に垂直応力とせん断強度の関係を示す。 $C_m=0\%$ の場合、 $c_f=4.5$ kPa、 $\phi_f=25.3^\circ$ 、 $C_m=1\%$ の場合には $c_f=6.3$ kPa、 $\phi_f=24.2^\circ$ 、 $C_m=2\%$ の場合には $c_f=9.0$ kPa、 $\phi_f=23.9^\circ$ 、 $C_m=4\%$ の場合には $c_f=16.0$ kPa、 $\phi_f=22.5^\circ$ である。また、図-10に示すように、表層土に自然根が混入した結果を含めて、 C_m が増すごとに c_f は直線的に増加するが、 ϕ_f はほぼ一定あるいは若干減少するようである。

最後に、麻紐の長さ L_r が強度定数に及ぼす影響について検討した。麻紐の C_m を2%に一定した条件下で L_r を0.5、1、2、3、4 cmと5通りに変化させて供試体を作製した。図-11にこのときの破壊線と強度定数を示している。 $L_r=1$ cmの場合のせん断強度が最も高い。また、図-12に示すように、 $L_r=2, 3, 4$ cmと増加するにつれて c_f が減少する傾向がある。また、 C_m を変えた場合と同様に根長 L_r を変えた場合も ϕ_f に大きな変化はみられない。

6. 結論

本文では、斜面表層土の根系による補強効果を調べるために現場で採取した根系を含む表層土および根系の代用材を混入したまさ土に対する各種試験を実施し、根系を含む土の透水性、強度特性について検討した。本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 低密度状態において土の透水性に与える根系の影響はほとんど無いようである。
- 2) 根系の混入方向により透水係数の若干の違いはみら

れたが、工学的に影響があるとはいえない。

- 3) 根系の引張強度は直径の増加とともに低下する。
- 4) せん断強度の増加は内部摩擦角の増加よりもむしろ粘着力の増加に起因する。
- 5) 高い拘束圧下より低拘束圧下の方が根系の影響は現れやすい。
- 6) 質量含根率が高くなると粘着力は大きくなるが、内部摩擦角の変化は小さい。
- 7) 質量含根率が一定の下で根長を変えると、内部摩擦角は変化せず、粘着力のみが変化する。根長1 cmの場合において最も高いせん断強度が発現された。
- 8) 4)~7)の結果をまとめると、表層部においては根の成長に伴って主に粘着力が大きくなって安定化するものと考えられる。

謝辞：本研究室元大学院生 枇杷雄介氏(現 JR東海コンサルタンツ株)には実験等でご助力いただいた。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 杉山太宏, 大塚泰洋, 福田耕司, 赤石 勝: 樹木根系の引張り強度特性と法面補強効果に関する一考察, 土と基礎, Vol. 51, No. 11, pp. 53-55, 2003.
- 2) 矢田部龍一, 八木則男, 榎 明潔, 大塚俊二: 根系による土の補強効果, 第26回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 1625-1626, 1991.
- 3) 八木則男, 榎 明潔, 矢田部龍一, 大塚俊二, 牛尾 充: 根系による砂質土の補強機構と強度特性, 第27回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 1865-1866, 1992.
- 4) 外狩麻子, 村石 尚: 植生工のwater-uptake効果に関する実験的研究, 第32回地盤工学研究発表講演集, pp. 1861-1862, 1997.
- 5) 鈴木素之, 山本哲朗, 枇杷雄介: 根系による斜面表層土の補強効果について, 第6回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 97-102, 2005.
- 6) 鈴木素之, 山本哲朗, 枇杷雄介, 西村昌也: 根系を含む表層土の透水性と強度特性, 山口大学工学部研究報告, Vol. 56, No. 2, pp. 21-30, 2006.

(2006. 5. 19 受付)