

根系を含む表層土の透水性と強度特性

鈴木 素之 (社会建設工学科)
 山本 哲朗 (社会建設工学科)
 枇杷 雄介 (社会建設工学専攻)
 西村 昌也 (社会建設工学専攻)

Permeability and strength characteristic of surface soil containing roots

Motoyuki SUZUKI (Department of Civil and Environmental Engineering)
 Tetsuro YAMAMOTO (Department of Civil and Environmental Engineering)
 Yusuke BIWA (Graduate school of Civil and Environmental Engineering)
 Masaya NISHIMURA (Graduate school of Civil and Environmental Engineering)

This paper describes permeability and shear strength characteristics of a surface soil containing tree roots. In this study, Tsukushihagi and Twine were used as tree roots and its alternatives, respectively. Tensile strength of tree roots was measured using a newly developed tension test apparatus. Also, falling head permeability and direct box shear tests were performed on specimen prepared with soil samples mixed with the tree roots or the alternatives. Main conclusions are as follows. 1) The tensile strength increased with an increase in diameter of tree roots. 2) The coefficient of permeability seems to be not changed by mass content of tree roots. 3) Whereas the internal friction angle of soil containing tree roots is almost constant, the apparent cohesion increased with increasing the mass content of tree roots.

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

1. はじめに

植生工は、表層土の侵食防止と併せて周辺景観・環境との調和を目的として、道路法面をはじめとした種々の人工斜面において行われている。近年では地球温暖化の防止や維持管理コストの低減などの観点から法面において多種の樹木を導入し、早期に多様性の高い樹木主体の群落に誘導することが求められている。斜面への樹木の導入によって得られる効果には雨水の浸透・侵食防止、急激な乾湿繰返しの防止、根系による緊縛効果や杭効果などが挙げられる。一方、問題点として風による揺動に伴う地盤の緩み、根の侵入による地盤の物理的風化の促進、樹木の導入方法や管理方法による急斜面での不安定化などの指摘がある。

これまでの根系による土の補強効果に関する研究成果から、以下のことが明らかになっている。根系の力学的な作用に関する研究のうち、実際の根系を用いた

原位置試験として、杉山ら¹⁾は根の張り方によって深根型、中間型、浅根型の3タイプに樹木根系を分類し、14種の樹種に対して引張試験を実施し、根の張り方によって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。また、福永・山寺²⁾は自然斜面で実生苗木植栽によって導入されたスギの根系分布を調査し、根の断面積を深さ毎に積算すると、深度1~1.5m程で全断面積の95%に達するという結果を得た。八木ら^{3,4)}は不攪乱まさ土に対して低拘束圧下での原位置大型一面せん断試験を実施し、根系を含む効果はせん断強度のみの増加に帰着し、根系を含む時の最大応力は含まない時と比べて変位の大きなところで生じるという結論を得た。國眼ら⁵⁾は根株を残して伐採後、根を残して根株を引き上げる実験を実施し、引抜き強度と根元の断面積には比例関係があることを示している。

一方、根の代替材を用いた室内試験として、矢田部ら⁶⁾は毛糸を土供試体に混入した一面せん断試験を実

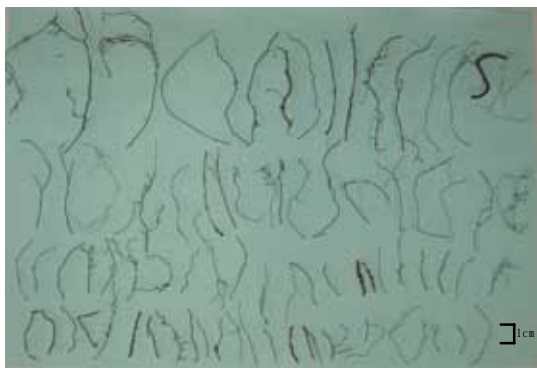


Photo.1 Roots contained in Kudagawa silt

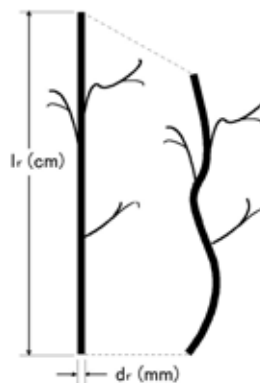


Fig.2 Length and diameter of root

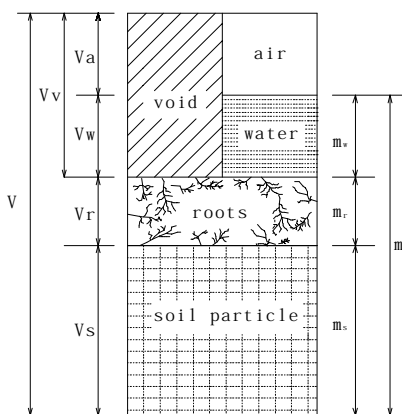


Fig.1 Model of soil consisting on soil particle, roots, water and air

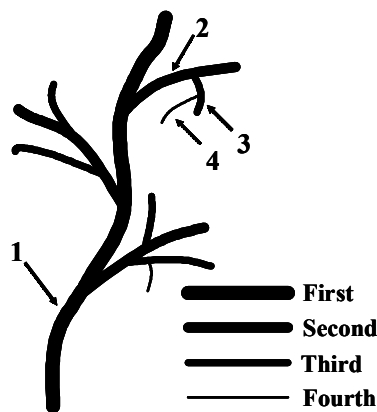


Fig.3 Branch of root

施し、補強効果はせん断強度の増加であり、毛糸の本数が多いほどせん断強度は大きくなる結果を得ている。八木ら⁷⁾は発泡スチロールを用いて密づめ状態と緩づめ状態の2通りの供試体を作製して一面せん断試験を行い、補強効果は内部摩擦角には関係なく、粘着力の増加として現れること、密づめ状態の方が緩づめ状態よりもせん断強度の増加量が大きいことを明らかにした。これに関連して、根系による斜面崩壊の抑制メカニズムは地盤の緊縛効果と杭効果として捉えることができ、Waldron⁸⁾は根によるせん断抵抗の補強メカニズムとして根を含んだ土のせん断強度が粘着力の増加に起因すると説明している。

この他に根系の様々な作用に関する研究に関して、外狩ら⁹⁾は降雨後の植生根系に生じる土中水分の消失に着目して小型土槽を用いた散水実験を実施し、裸地槽では排水および蒸散による土壌乾燥は2,3日で進行しなくなるが、植生を施した槽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。

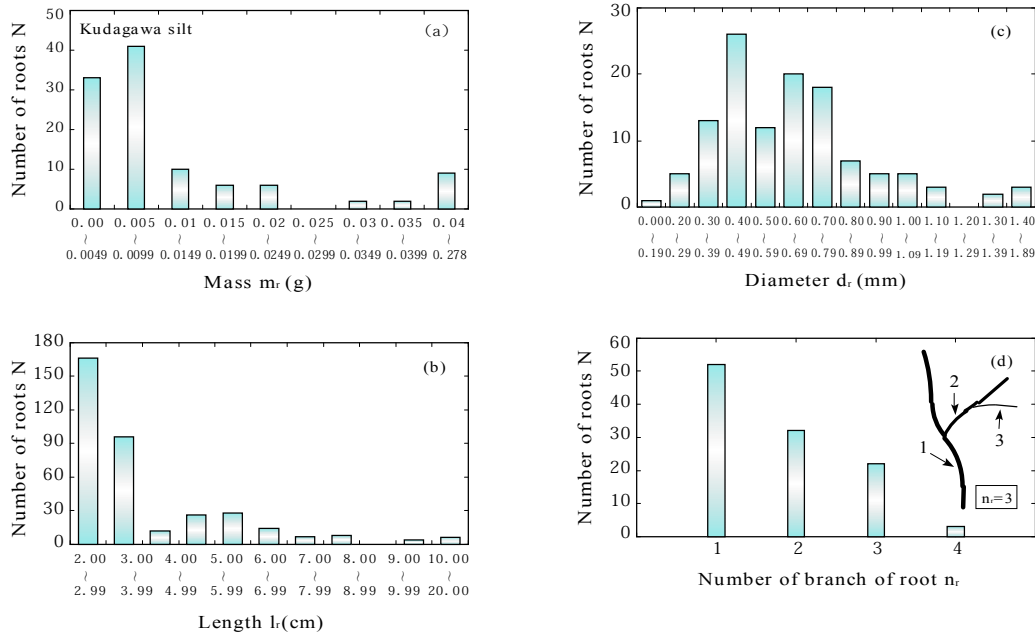
根系に関する既往の研究成果は以上のとおりである

が、樹木根系の成長に伴って土のせん断強度、圧縮性、透水性がどのように変化するのかは必ずしも十分に解明されていない。

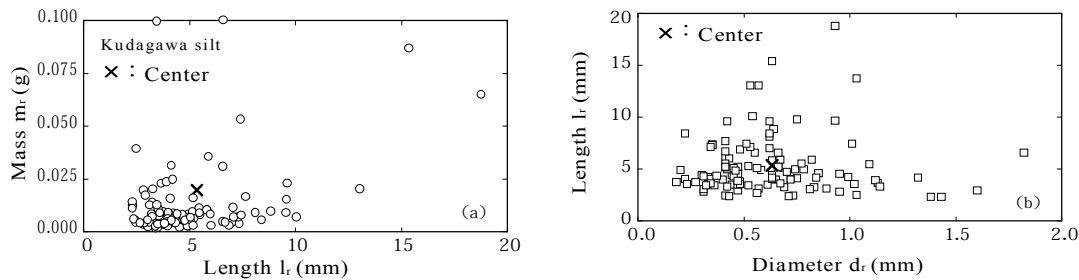
本文では、山口市九田川にある自然斜面において根系を含む表層土を採取し、その表層土に含まれるツクシハギの根系の質量・形状を調べるとともに、その含根率を基に根系を混入させた表層土と根系の代替材として麻紐を混入させたまさ土に対して、低圧域での一面せん断試験を実施した。また、段階載荷による圧密試験により根系を含む土の圧縮性について、また試作した一軸引張試験機により根系の引張強度特性について検討した。さらに、根系を含む土の透水性に関して、根系の代替材として麻紐とポリエチレンをまさ土に混入させて透水試験を実施し、土の透水性に及ぼす根系の影響を検討した。

2. 根系を考慮した土の4相モデル

本研究で用いた表層土試料(山口市九田川で採取)に含まれる根系を Photo.1 に示す。写真には根長が2 cm 以上のものを示している。通常、土は土粒子、間隙水、



Figs.4 Mass, length, diameter and number of branch of root



Figs.5 Distribution of mass, length and diameter of root

空気や蒸気などの間隙空気の3相から成り立っている。本研究では根を含む土を取り扱う上で、Fig.1に示すような、従来の土の3相モデルに新たに根系を加えた土の4相モデルを提案する。これより、含水比 w_r は式(1)のように表される。ここで、 m_s および m_r はそれぞれ土粒子および根系の質量である。

$$w_r = \frac{m_w}{m_s + m_r} \times 100 (\%) \quad (1)$$

また、含根率を質量および体積に関してそれぞれ整理するため、まず質量含根率 C_m を次の式(2)のように定義する。

$$C_m = \frac{m_r}{m_s} \times 100 (\%) \quad (2)$$

式(1)は C_m と含水比 w を用いて次の式(3)のように書き

換えられる。

$$w_r = \frac{w}{1 + C_m / 100} (\%) \quad (3)$$

w_r は土のみの含水比 w と質量含根率 C_m によっても表される。今回用いた自然乾燥した根系は形状を保ちうる程度のわずかな水分を保持していると考えられる。また、これ以上乾燥させると、根は切れ切れの状態になる。なお、自然状態において根系は生育に必要な水分を保持し、また周辺の土から水分を吸い上げている。今回は単純化して考えたため根に含まれる水分を考慮していない。しかし、せん断等に伴って根系からの排水あるいは吸水があれば、力学的挙動を左右する土の含水比が変化し、また根系自体もその水分量によって引張強度特性が変化すると想像される。このことは今後の検討すべき課題であると考えている。

次に、体積含根率 C_v は次の式(4)のように表される。また、間隙比 e_r は C_v を用いて式(5)のように表される。

ここで、 V_v 、 V_s および V_r はそれぞれ間隙、土粒子および根系の体積である。

$$C_{rv} = \frac{V_r}{V_s} \times 100 (\%) \quad (4)$$

$$e_r = \frac{V_v}{V_s + V_r} = \frac{e}{1 + C_{rv}/100} \quad (5)$$

一方、 C_{rv} と C_{rm} の関係は ρ_s と ρ_r を用いて式(6)のようにも表される。ここで、 ρ_s および ρ_r とはそれぞれ土粒子および根系の密度である。なお、今回用いた根系の密度は $\rho_r=1.625 \text{ g/cm}^3$ である。

$$C_{rv} = \frac{V_r}{V_s} \times 100 (\%) = \frac{m_r \cdot \rho_s}{m_s \cdot \rho_r} \times 100 (\%) = C_{rm} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_r} \quad (6)$$

3. 根の分布

根系を含む表層土の全質量を測定し、0.85 mmふるいを通して礫や根系を除去した。根系は水洗し、自然乾燥した後に乾燥質量 m_r を測定した。また、根系一本ずつの乾燥質量 m_r (g)、ノギスを用いて、Fig.2およびFig.3に示すように長さ l_r 、径 d_r 、根の最大次数 n_r を測定した。根の次数は根の分岐形状から決定するもので、主幹だけの根を“次数1”、主幹から枝分かれして側幹が生えているものを“次数2”、その側幹からさらに枝分かれしているものを“次数3”とし、それ以降順次分岐するごとに次数を上げていく。

Figs.4(a)~(d)にそれぞれ根の本数 N と m_r 、 l_r 、 d_r および n_r の関係を示す。(a) N - m_r 関係において2 cm以上の根系の全本数109本中のうち0~0.01 gのクラスの N が74本を占める。0.01~0.278 gの各クラスではいずれも10本以下となっている。(b) N - l_r 関係では、0.00~0.99 cmのクラスにある N が166本となり最も多く、その次に1.00~1.99 cmのクラスで $N=96$ 本となった。その範囲外のクラスでは $N=30$ 本以下となった。しかし、4.00~4.99 cmのクラスでは $N=28$ 本ある。(c) N - d_r 関係では、 $d_r=0.40$ ~ 0.49 mmのクラスで最大の $N=26$ 本となった。次に多いのは0.60~0.69 mmのクラスで $N=20$ 本である。全体的な特徴として $N=10$ 本以上あるのが0.30~0.79 mmに集中している。最後に、(d) N - n_r 関係では、 $n_r=1$ のものが52本となり最大となった。最大次数が $n_r=1$ より1つずつ増えるにつれて、根の本数は $N=52$ 、32、22、3本となり次第に減る結果となった。また、Figs.5に示すのは質量、長さおよび径の散布図である。(l_r, m_r)の座標の中心を求めると

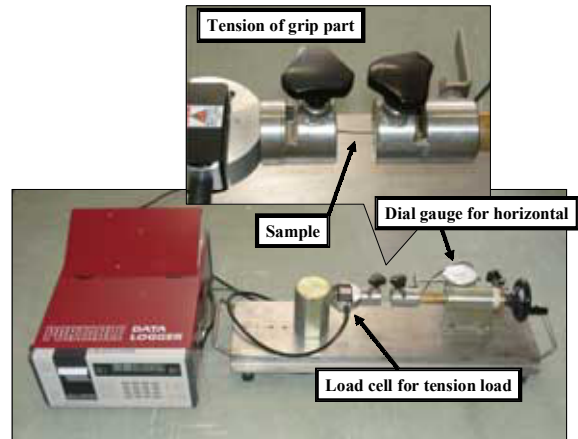


Photo.2 Tension test apparatus

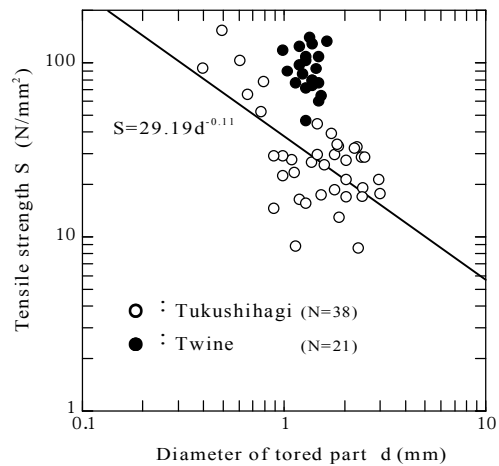


Fig.6 Tensile strength and part diameter of tored part in roots

(5.33, 0.02)となった。また、(d_r , l_r)の座標の中心を求めると(0.63, 5.33)となった。

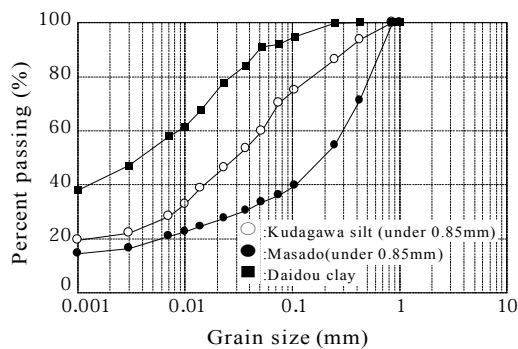
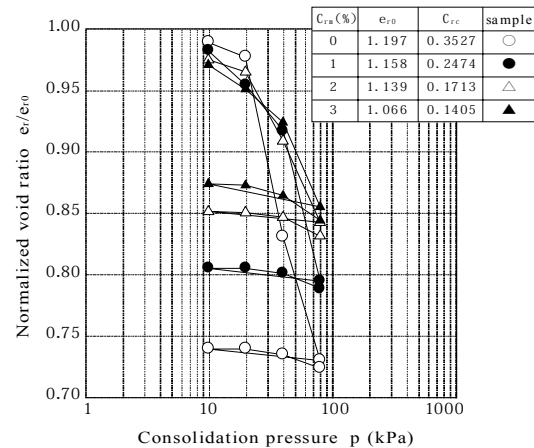
4. 根系の引張試験

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。根系の引張強度を求めことを目的に引張試験機を試作した(Photo.2)。引張力は500 N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っ張る際に生じるすべりを防ぐように噛み合わせ状に加工した。根系試料を5~6 cmに調整して裁断し、根系の試験片の両端を装着部で挟んで引っ張る。 $d_r=1$ mm以下の場合には装着部に布をはさみ、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)および後述する麻紐($N=21$ 個)の引張力 $P(N)$

Table 1 Physical properties of soil samples used

Soil sample	Kudagawa silt	Masado	Daidou clay
ρ_s (g/cm ³)	2.666	2.576	2.580
D ₅₀ (mm)	0.023	0.212	0.004
F _c (%)	70.1	36.0	91.1
w _L (%)	35.1	—	70.7
w _p (%)	24.9	—	22.9
I _p	10.2	—	47.8
Soil classification	ML	SF	CH

**Photo.3** Twine used in this study**Fig.7** Grading curve of soil samples used**Fig.8** Relationship between normalized void ratio and consolidation pressure

と変位 δ (mm)を測定した。Fig.6 は根系の引張強度 S (N/mm²)と破断部直径 d (mm)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} (N)を破断した根の断面積 A_r (mm²)で除したものであり、式(7)のように表わされる。

$$S = \frac{P_{max}}{A_r} \quad (7)$$

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 10~40 N/mm²、麻紐の引張強度は 70~100 N/mm² の範囲に多く分布していた。

5. 試料の物理的性質

根系を含む表層土およびまさ土を 0.85 mm ふるいに

通過させて小礫や根系を除去したものに対して、土粒子の密度試験、粒度試験および液・塑性限界試験を実施した。Table 1 にこれらの結果を、Fig.7 に粒径加積曲線を示す。なお、まさ土については縮固め試験(A-a法)を実施し、最大乾燥密度は 1.674 g/cm³、最適含水比は 17.3%である。

6. 一次元圧密挙動

根系を含む土の圧縮性を調べるために、Photo.3 に示すように、根系の代替材である麻紐をまさ土に混入させて 78.5 kPa 以下の低拘束圧下で段階荷重による圧密試験(JIS A 1217)¹⁰を実施した。質量含根率の変化によって圧縮指数の変化を試みた。ここでは根系の体積を考慮した間隙比 e_r を用いて、根系を含む土の圧縮指数 C_{rc} を次の式(8)のように定義する。

$$C_{rc} = \frac{e_{r0} - e_r}{\log p/p_0} \quad (8)$$

また、 e_r は式(5)および式(6)より次の式(9)ように変形

される。

$$e_r = \frac{e}{1 + \frac{C_{rm} \cdot \rho_s}{100 \rho_r}} \quad (9)$$

Fig.8に質量含根率 $C_{rm}=0\%$, 1% , 2% , 3% の場合における初期間隙比 e_0 で正規化した間隙比と圧密圧力の関係を示す。質量含根率が増すと圧縮指数が小さくなる。この原因として根系と土による摩擦効果により混合土自体の圧縮性を小さくしたものと考えられる。

7. 含根率を変化させた土の透水性

7.1 根系の代替材として麻紐をまさ土に混入した透水試験

根系を含む土の透水性を調べるため、変水位透水試験 (JISA 1218) ¹⁰⁾ を実施した。供試体は透水円筒 (高さ 12.73 cm, 内径 10 cm) を用いて締固めにより作製した。供試体の飽和度を高めるため、真空ポンプを用いて真空圧を 80.0 kPa 以上に保ち約 3 時間放置後、通水し飽和度を高めた。試験結果は温度 15°C における透水係数を意味する。試料は 0.85 mm ふるいを通過させたまさ土を用いた。また、まさ土に混入させる代替材として吸水性のある麻紐 ($d_f=2.20$ mm) を用いた。混入率は 2.1 で定義した質量含根率 C_{rm} を $C_{rm}=0\%$, 1% と変化した。

Fig.9 に透水試験結果および締固め曲線を示す。これより、 C_{rm} を増加させても透水係数の変化はほとんどないことがわかる。また、間隙比はほぼ一定であるため、麻紐を混入したことによる透水性の効果が表れていないといえる。この原因として、締固め密度がいずれも高く、たかだか $C_{rm}=1\%$ 程度では麻紐混入の影響が現れなかったと考えられる。

7.2 根系の代替材としてポリエチレンをまさ土に混入した透水試験

7.1 で行った場合と同様の試験を根系の代替材として、Photo.4 に示すように、吸水性の無いポリエチレン素材の紐 (以下、ポリエチレンと称する) を用いて行った。ポリエチレンの径は 2.88 mm, 密度は $\rho_r=0.94\sim 0.96$ g/cm³ である ¹¹⁾。混入率は C_{rm} を $C_{rm}=0\%$, 0.5% , 1% , 2% , 3% と変化させて、供試体の含水比は最適含水比付近に調整した。

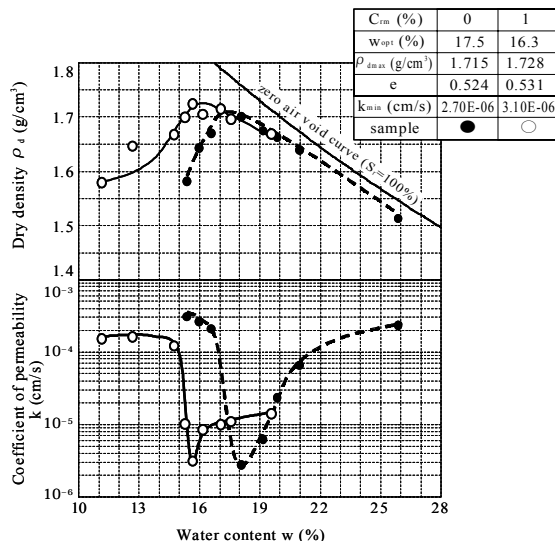


Fig.9 Relationship between water content, dry density and coefficient of permeability



Photo.4 Polyethylene used in this study

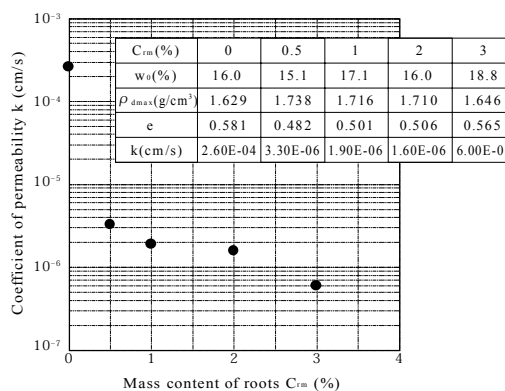
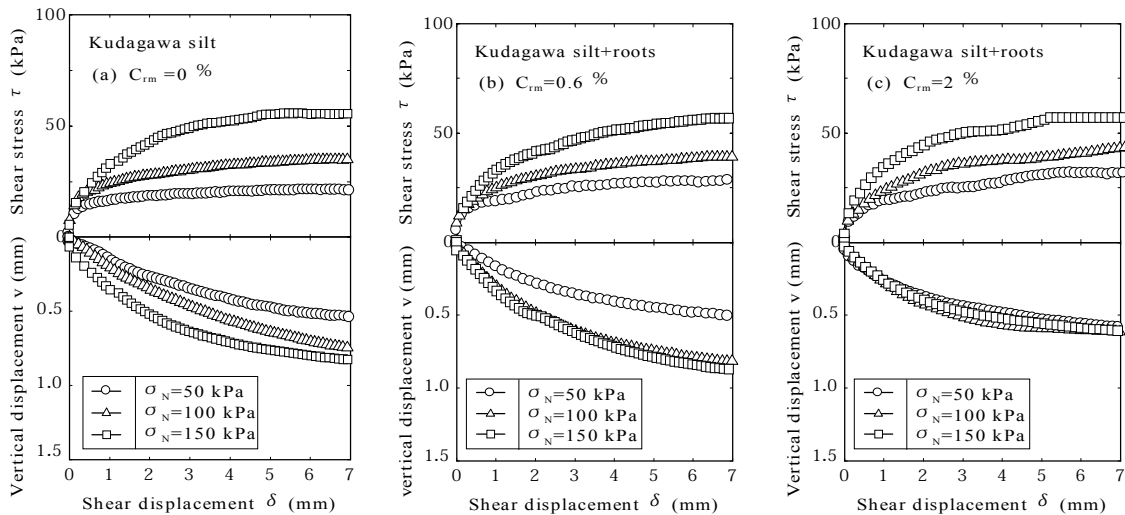


Fig.10 Relationship between coefficients of permeability and mass content of roots

Fig.10 にポリエチレンを用いた供試体の初期条件および透水係数の結果を示す。間隙比はほぼ一定の下において C_{rm} の増加とともに透水係数は減少していることがわかる。特に $C_{rm}=0\%$ から $C_{rm}=0.5\%$ に増加するときの透水係数のオーダーは著しく減少し、以降は漸次



Figs.11 Shear behavior of Kudagawa silt

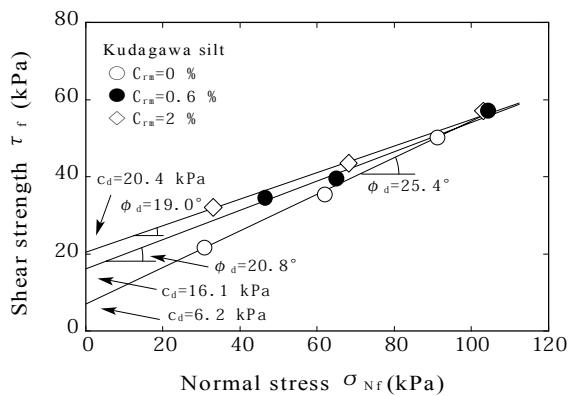


Fig.12 Relationship between normal stress and shear strength

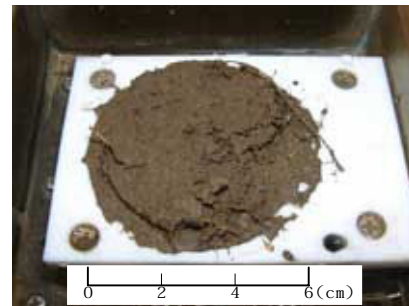


Photo.5 Specimen after testing (Kudagawa silt + roots)

減少していった。この原因について現時点では明確にすることはできないが、7.1で考察した理由と同様に、透水性が低いのは供試体の乾燥密度が全体的に高すぎることが主因であると考えられる。

8. 根系を含む表層土およびまさ土の強度特性

8.1 表層土の一面せん断挙動

上記の表層土に対して圧密定圧一面せん断試験(JGS 0561-2000)¹⁰⁾を行った。圧密圧力 $\sigma_c = 50, 100, 150$ 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固め法により作製した。供試体に含まれる根系の質量を現場の C_{rm} 値である0.6%にした場合と $C_{rm} = 2\%$ の場合の2ケースとした。

Figs.11にそれぞれ根を含まない場合($C_{rm} = 0\%$)と根を

含む場合($C_{rm} = 0.6\%, 2\%$)のせん断応力 τ とせん断変位 δ の関係を示す。各 $\tau - \delta$ 曲線は垂直応力 σ_N の大きさの順に並んでいる。 $\sigma_N = 50$ kPaの場合、 τ は $\delta = 3$ mm以降においてほぼ一定の値をとっている。 $\sigma_N = 100$ kPaおよび150 kPaの場合にはそれぞれ $\delta = 6.0$ 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 $\tau - \delta$ の挙動をみると、 $\sigma_N = 50$ kPaの場合には $\delta = 5.8$ 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。 $\sigma_N = 100$ kPaおよび150 kPaの場合にはともに $\delta = 7$ mmを迎えても τ は単調増加し続ける結果となった。これは根の混入による脆性的な性質の改善と考えられる。

Fig.12にFigs.11に示したせん断強度とそのときの垂直応力の関係を示す。 $C_{rm} = 0\%$ の場合、粘着力は $c_d = 6.2$ kPa、内部摩擦角は $\phi_d = 25.4^\circ$ 、 $C_{rm} = 0.6\%$ の場合には粘着力は $c_d = 16.1$ kPa、内部摩擦角は $\phi_d = 20.8^\circ$ 、 $C_{rm} = 2\%$ の場合には粘着力は $c_d = 20.4$ kPa、内部摩擦角は $\phi_d = 19.0^\circ$ 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

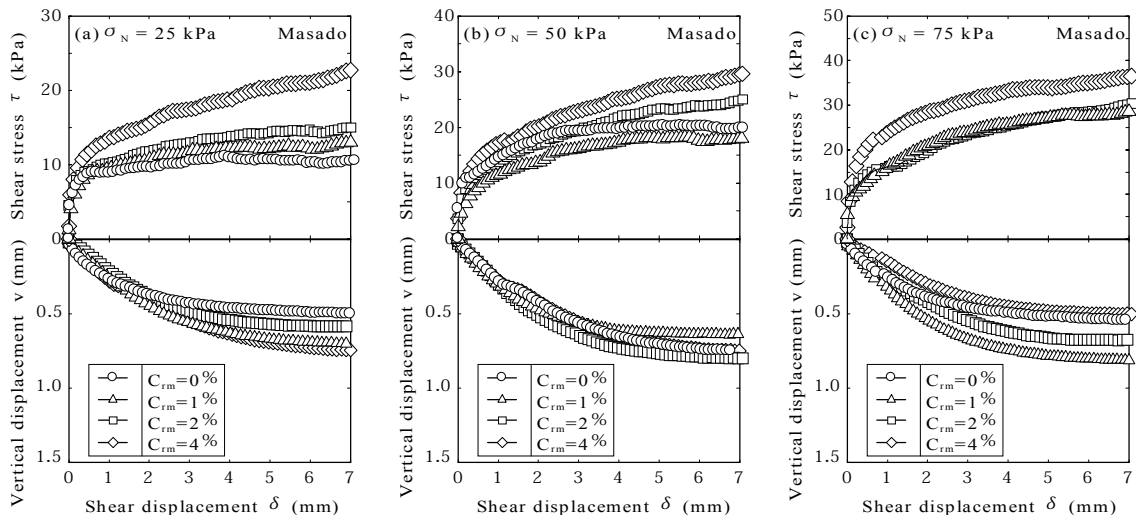


Fig.13 Shear stress behavior of Masado

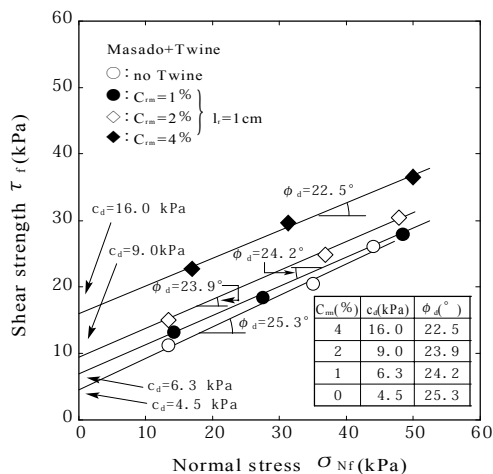


Fig.14 Relationship between normal stress and shear strength

少するようである。ここで $C_{rm}=0\%$ と 2% におけるせん断強度の増分 $\Delta\tau_f$ をみると、 $\sigma_N=50\text{ kPa}$ のときに $\Delta\tau_f=10.7\text{ kPa}$ の増加に対して、 $\sigma_N=150\text{ kPa}$ のときには僅かに $\Delta\tau_f=1.2\text{ kPa}$ である。これより低拘束圧下の方がせん断強度増分が大きく、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。Photo.5 は自然根を混入させた供試体の試験後のせん断面を示している。

8.2 根系の代替材として麻紐を混入したまさ土の一面せん断挙動

根系の影響を検討する上で、実際に含まれる根系には3. で述べたように長さや質量、径などに不均一性がある。この影響を除去して定量的に根の効果調べる

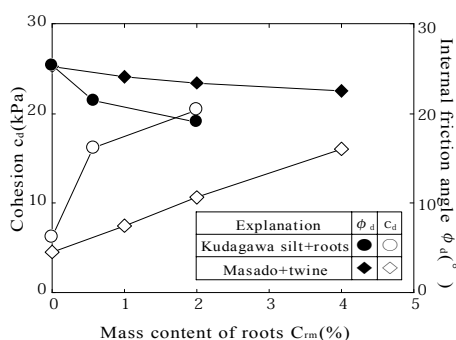


Fig.15 Relationship between mass content of roots, cohesion and internal friction angle

ため、それに代替する材料として径がほぼ等しく ($d_r=1.45\text{ mm}$)、長さが調整可能な麻紐を選定した。なお、麻紐の密度は $\rho_r=1.419\text{ g/cm}^3$ である。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 ふるいを通過させたまさ土である。 $\alpha=25, 50, 75\text{ kPa}$ 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質量含根率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 ($\rho_d=1.187\text{ g/cm}^3$) 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。

まず麻紐の質量含根率の C_{rm} の影響を調べるため、 $C_{rm}=0\%, 1\%, 2\%, 4\%$ の4通りに変化させた。Figs.13(a)~(c)にそれぞれ $\sigma_N=25, 50, 75\text{ kPa}$ の場合の τ と δ の関係を示す。各 σ_N の下で $\tau-\delta$ 曲線は C_{rm} の大きさの順に並んでいる。 $C_{rm}=0\%$ の場合、 τ は $\delta=2.5\text{ mm}$ 以降においてほぼ一定の値をとっている。 $C_{rm}=1\%, 2\%$,

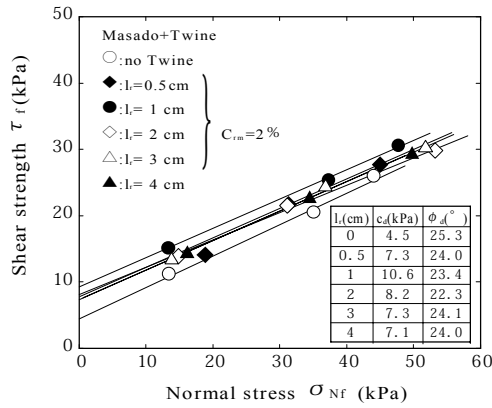


Fig.16 Relationship between normal stress and shear strength

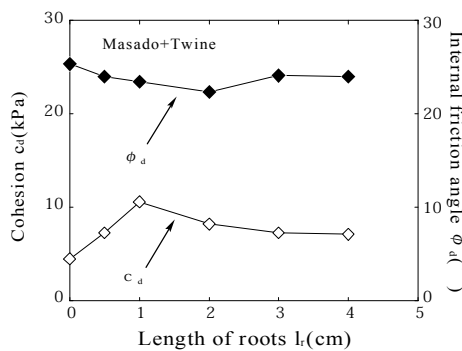


Fig.17 Relationship between length of roots, cohesion and internal friction angle

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_{rm} が増すにつれて δ の増加に対する τ の増加の割合が大きくなる。Fig.14に垂直応力とせん断強度の関係を示す。 $C_{rm}=0\%$ の場合、 $c_d=4.5$ kPa、 $\phi_d=25.3^\circ$ 、 $C_{rm}=1\%$ の場合には $c_d=6.3$ kPa、 $\phi_d=24.2^\circ$ 、 $C_{rm}=2\%$ の場合には $c_d=9.0$ kPa、 $\phi_d=23.9^\circ$ 、 $C_{rm}=4\%$ の場合には $c_d=16.0$ kPa、 $\phi_d=22.5^\circ$ である。また、Fig.15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_{rm} が増すごとに c_d は直線的に増加するが、 ϕ_d はほぼ一定か、あるいは若干減少するようである。

次に麻紐の長さ l_r の影響を検討した。麻紐の C_{rm} を一律2%にして、麻紐の長さ l_r を0.5, 1, 2, 3, 4 cmとして供試体を作製した。Fig.16にその結果を示す。 $l_r=1$ cmの場合が最も強度定数が高い。これはせん断面において麻紐に付着する土の部分が他の麻紐の長さ比べて多く、土の捕捉・拘束効果がより高く発揮されたものと考えられる。また、Fig.17に示すように、 $l_r=2, 3, 4$ cmと増加するにつれて c_d が減少する傾向がある。なお、 C_{rm} を変えた場合と同様に根長 l_r を変えた場合も ϕ_d に大きな変化はみられない。Photo.6は麻紐を混入させた供試体の試験後のせん断面を示す。

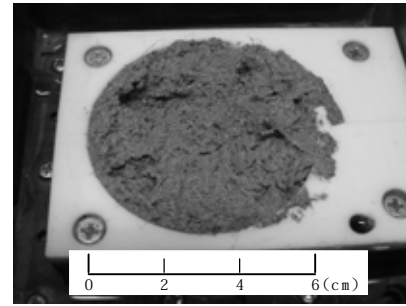


Photo.6 Specimen after testing (Masado+ Twine)

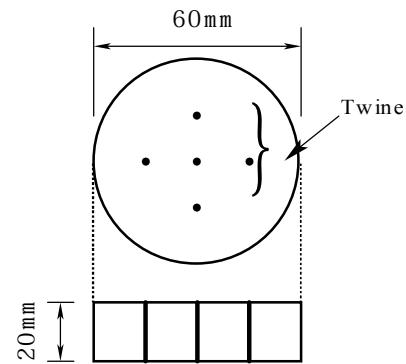


Fig.18 Schematic diagram of Twine installed in specimen

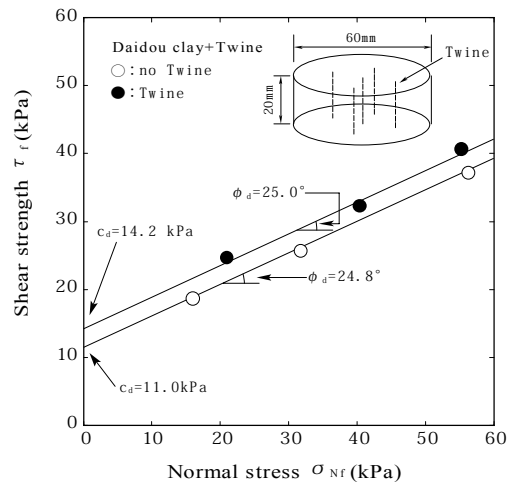


Fig.19 Relationship between normal stress and shear strength

8. 3 杭状に麻紐を挿入させた大道粘土の一面せん断挙動

粘性土に対する根系の杭効果を調べる目的で行った試験結果について述べる。試料はスラリー状の大道粘土(物性値は Table 1, Fig.7 に示す)を鉛直圧密応力 $p=9.8 \rightarrow 19.6 \rightarrow 49.0$ kPaのように段階荷重して予圧密したものを用いた。Fig.18のように、麻紐を供試体内に設置した大道粘土に対して圧密定圧一面せん断試験

(JGS 0561-2000)¹⁰⁾を行い、麻紐の有無による強度差を調べた。なお、 $\sigma_c = 25, 50, 75$ kPa の下で各々圧密した後(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。Fig.19に垂直応力とせん断強度の関係を示す。麻紐無しの場合、 $c_d=11.0$ kPa, $\phi_d=24.8^\circ$, 麻紐有りの場合には $c_d=14.2$ kPa, $\phi_d=25.0^\circ$ となった。麻紐を杭状に設置することにより、 c_d は3.2 kPa増加し、 ϕ_d はほぼ一定か、あるいは若干増加するようである。この理由として、せん断面において麻紐がせん断方向に逆向きの抵抗を発揮したことが考えられる。すなわち、粘土に対する杭効果が働いた結果といえる。

9. 結論

本文では、自然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替材を混入したまさ土や大道粘土に対する各諸試験を実施し、根系を含む土の圧縮性、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) 根系の引張強度は直径の増加とともに低下する。
- 2) 質量含根率が増すごとに圧縮指数は大きくなる。
- 3) 根系およびその代替材を混入した土試料の透水試験結果から、含根率の変化に対して透水係数の変化は小さいようである。透水供試体の乾燥密度が全体的に高いためと考えられる
- 4) 麻紐を混入させることにより、せん断強度が現れるせん断変位は大きくなり、脆性的性質が改善される。
- 5) 補強効果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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 根系による杭効果は内部摩擦角の増加よりもむしろ粘着力の増加をもたらす。
- 10) 6)~9)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。

引用・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) 福永健司, 山寺喜成: 山地斜面におけるスギ植栽木の根系分布に関する調査研究, 第24回日本緑化工学会研究発表会要旨集, pp.100-103, 1993.
- 3) 八木則夫, 二神 治, 塩田耕司, 榎 明潔, 大塚俊二: 根系による土の補強効果, 第45回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp. 458-459, 1993.
- 4) 八木則男, 榎 明潔, 矢田部龍一, 岡山 孝: 根系を含むまさ土のせん断特性, 第22回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1515-1516, 1987.
- 5) 國眼 定, 小橋澄台, 水山高久, 中井卓巳, 松田勝己: 斜面における植生の地盤防災に対する役割, 第37回地すべり学会研究発表講演集 pp. 423-424, 1998.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Waldron, L.J.: The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil, Soil Science Society of American Journal, Vol.41, pp.843-849, 1977.
- 9) 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.
- 10) (社)地盤工学会編: 土質試験の方法と解説—第一回改訂版—, 2000.
- 11) 高木鋼業株式会社: ロープの一般的な特性.
- 12) 木全卓, 伊藤優香: 植生基盤としての廃棄発泡プラスチック破砕片混合土の透水性・保水性, 第40回地盤工学研究発表講演集, pp.705-706, 2005.
- 13) 大塚 悟, 沖村 孝, 矢田部龍一, 毛利栄征: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測, 土と基礎 Vol. 51, No. 9, pp. 46-51, 2003.

(平成17年12月27日受理)