

根系混合土の引張強度特性

山口大学大学院 学 ○伊丹結里

山口大学大学院 正 鈴木素之 山本哲朗

1. はじめに 植生工は、表層土の侵食防止に併せて自然環境の保全・復元効果、周辺景観との調和を目的として用いられている。近年では、地球温暖化防止や維持管理コストの低減などの面からも法面の樹林化が図られている。しかし、斜面表層部の安定性や侵食防止における根系の働きについては必ずしも十分に解明されていない。本研究では、根系の代替材として麻紐を混入した土の割裂引張試験を実施し、根系混合土のせん断強度の増加を引張強度の観点から検討した。

2. 根系混合土の強度評価 これまでに一面せん断試験における土のせん断強度は根系を含むことによって高くなるという結果が得られている。矢田部¹⁾は、根系と見立てた毛糸を混入した土の一面せん断試験結果から、根系を混入することにより、内部摩擦角はほぼ一定のまま、見かけの粘着力が増加することを示している。著者らもまた、図-1 に示すように、根系および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試験結果から同様の傾向があることを確認している。そこで、図-2 に模式的に示すように、クーロンの破壊規準において、破壊線を垂直応力 σ が負の領域まで延長できるものと仮定して、 $\sigma < 0$ の領域で交わる点までの長さを見かけの引張強度 σ_t^* と定義し、根系の混入による σ_t^* の増加量を $\Delta\sigma_t^*$ として算出した。ただし、本来の引張強度 σ_t は図示するように破壊規準線に内接するモール円の直径の左端の値として定義される。ここで σ_t^* は各質量含根率について鈴木²⁾による圧密定圧一面せん断試験により求めた内部摩擦角 ϕ_d と見かけの粘着力 c_d から求めたものである。なお、図-1 に示した c_d の増加は根系を混入することにより引張強度が生じ、それに起因して生じたものと考えた。

3. 割裂引張試験 根系を混入した土の割裂引張試験においては、供試体を写真-1 に示すように軸圧縮速度 1 %/min で圧縮し、割裂引張強度 σ_t を以下の式(1)から算出した。

$$\sigma_t = \frac{4P}{\pi(D_0 + D_f)l} \quad (1)$$

ここに、 P ：割裂破壊荷重、 D_0 ：試験前の供試体の直径、 D_f ：割裂破壊時の供試体の直径($D_f = D_0 - \Delta h$)、 l ：試験前の供試体の長さである。試料は 0.85 mm ふりを通過したまさ土を用い、最適含水比に調整した。根系の代替材として 2 cm に裁断した麻紐を混入した。供試体は直径 60mm、長さ 20 mm の円柱である。試験は根系の質量含根率 C_m を 0 %、1 %、2 %、3 %、4 % の 5 通りに変化させ、各 C_m について 10 回実施した。最大圧縮荷重 P を測定するまで圧縮した。なお、麻紐の混入方向は P の載荷方向の対して垂直になるようにしている。また、供試体の間隙比については、根系を固体相とみなした場合の間隙比 e_r を次の式(2)のように定義した。ここに、 C_v は体積含根率($=V_r/V_s \times 100$)である。

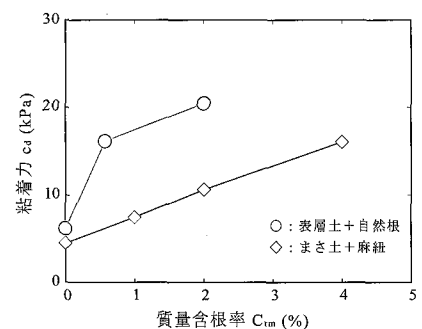
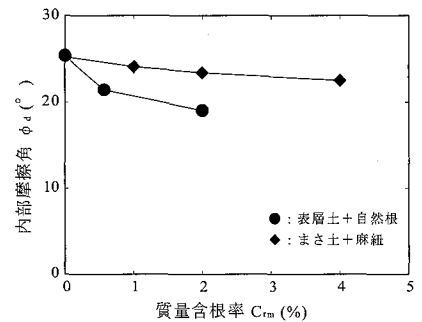


図-1 質量含根率の変化に伴う粘着力、内部摩擦角の変化

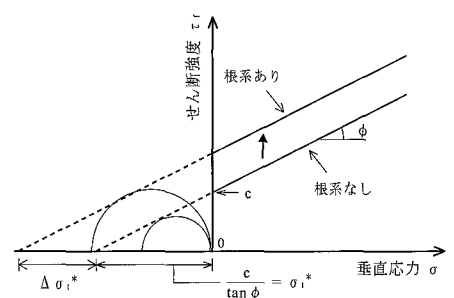


図-2 引張強度と粘着力の関係

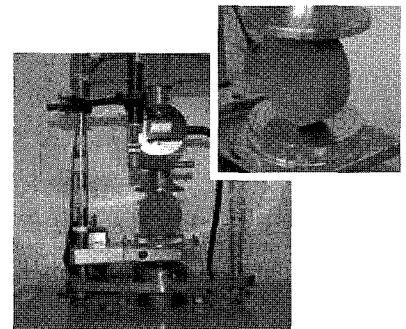


写真-1 割裂引張試験の状況

$$e_r = \frac{V_v}{V_s + V_r} = \frac{e}{1 + C_{rv}/100} \quad (2)$$

4. 試験結果と考察 図-3に $C_{rm}=0, 1, 2, 3, 4\%$ の場合における割裂引張試験における軸変位 Δh と軸圧縮力 P の関係を示す。 $C_{rm}=0\%$ の場合、 P はピークに達するとすぐに低下しているのに対して、 $C_{rm}=1\sim4\%$ の場合、 P はピークに達した後も残留している。これは根系を混入することにより、ピーク値は増加し、土と根系との間に摩擦抵抗が生じ、「粘り」がでたことにより土の脆性的挙動が改善されたと考えられる。 P の残留量については、根系の混入量には大きく影響せず、各 C_{rm} においても一定の傾向はみられなかった。これは供試体の成形状況や根系の配置などの違いによるものと考えられる。ここで、 C_{rm} と根系混合供試体の σ_t の関係を図-4に示す。図中の直線は各 C_{rm} における σ_t の平均値を最小二乗法でフィッティングしたものである。各 C_{rm} において σ_t にはばらつきがあるものの、その平均値は C_{rm} が増すごとに直線的に増加する傾向にある。 σ_t のばらつきの原因として、根系を混入させた土の不均一性によることが考えられる。図-5に先に定義した e_r と σ_t の関係を示す。これより、 e_r が小さくなると、ばらつきは大きいものの、 σ_t が増加する傾向が見られる。ただし、現時点のデータから直ちに供試体の間隙比が引張強度に直接影響を及ぼしているとは断定できない。最後に、図-6に図-4に示した σ_t の平均値、 σ_t^* および C_{rm} の三者の関係を示す。 σ_t^* もまた C_{rm} の増加に伴って直線的に増加している。しかし、各 C_{rm} において σ_t^* は σ_t の平均値よりもはるかに大きく、図-2における σ_t^* の仮定の妥当性を今後検証する必要がある。以上、 σ_t^* と σ_t の増加量を直接比較することはできないが、両試験とも根系を混入することにより引張強度が発生し、根系の含有量が増すごとに引張強度が大きくなり、その結果として土のせん断強度を増加させると考えられる。

5. まとめ 本研究では、根系を混入させた土に対して割裂引張試験を実施して、割裂引張強度と質量含根率の関係を検討した。

- (1) 根系を含むと軸圧縮力はピーク強度に達した後も残留し「粘り」が生じ、土の引張強度における脆性的挙動が改善された。
- (2) 根系を混入することにより割裂引張強度は増加する。また、根系を固体とみなしたときの間隙比が小さくなると割裂引張強度は大きくなる。そして、質量含根率が高くなるにつれて割裂引張強度は増加する。一面せん断試験結果から算定した見かけの引張強度も同様の傾向を示した。
- (3) 根系を含む土のせん断強度の増加は見かけの粘着力の増加によるものであり、見かけの粘着力の増分は引張強度増分に起因するものと考えられる。

【参考文献】 1) 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。
2) 鈴木素之，山本哲朗，西村昌也：根系を含む表層土の透水・強度特性，第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.35-40，2006。
3) 土木学会編：土木材料実験指導書 平成13年度改訂版，pp.95-97，2001。

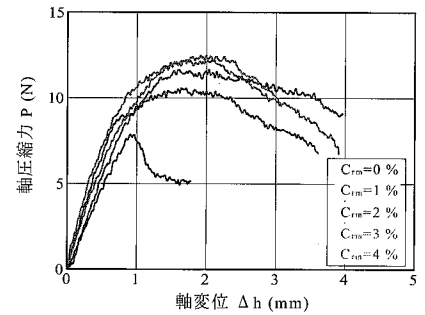


図-3 質量含根率が異なる場合の軸変位と軸圧縮力の関係

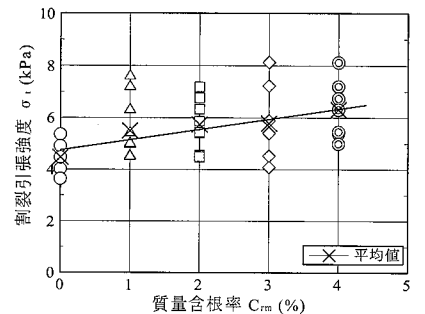


図-4 質量含根率と割裂引張強度の関係

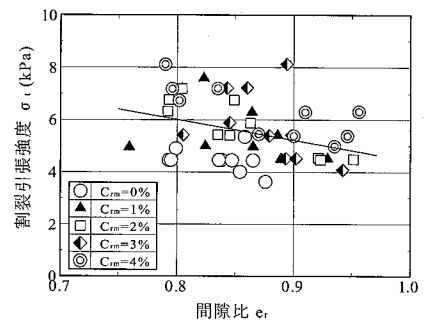


図-5 供試体の間隙比と割裂引張強度の関係

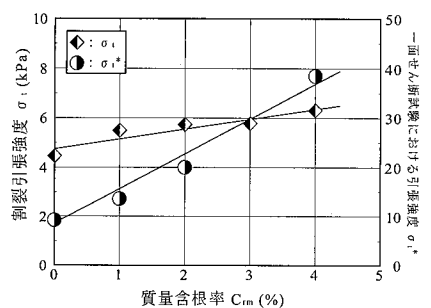


図-6 割裂引張強度と一面せん断強度での見かけの引張強度の関係

タイヤチップと砂の混合材の単調せん断特性

山口大学大学院	学生会員	○河田慎治朗
山口大学大学院	正会員	兵動正幸
山口大学大学院	学生会員	金和寛
山口大学大学院	正会員	中田幸男
山口大学大学院	正会員	吉本憲正
港湾空港技術研究所	ハザリカヘマンタ	

1. はじめに 現在, 日本では車社会の発達に伴い廃タイヤが毎年約一億本発生しており, そのリサイクル化が検討されている. 日本の廃タイヤリサイクル率は約 88%と高いが, 主な用途は燃料として使用されていることから, 二酸化炭素や焼却灰が大量に発生する結果となっている. 近年, タイヤを細かく裁断し, タイヤチップとして地盤材料に利用することが検討されている¹⁾. 本研究は, 砂にタイヤチップを混合したコンポジット材料²⁾の力学的特性を明らかにすることを目的とした. すなわち, タイヤチップと相馬珪砂を種々の配合割合で混合し, その配合割合と拘束圧の違いに着目して三軸圧縮試験を行い, タイヤチップ混合砂のせん断特性を調べた.

2. 試料および供試体作製方法 本研究では粒度調整した珪砂と最大粒径 2 mm のタイヤチップを乾燥体積比により 5 種類の配合割合で混合させ, 初期含水比 10% でモールド内で 1 層ずつ五層に分けて鉄製のランマーにより所定のエネルギーで突固め作成した. ここでは突固め効果とタイヤチップの配合割合の関係を調べるため, 2 種類の突き固めエネルギー ($E_c=51\text{kJ/m}^3$, 166kJ/m^3) により供試体を作製した. エネルギーは次式により求めた.

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (1)$$

ここに, W_R : ランマー重量, H : 落下高さ, V : 供試体体積, N_L : 層数, N_B : 1 層ごとの突固め回数である. それぞれの混合試料の物性値を表-1 に, それぞれのエネルギーで作製した各供試体の初期間隙比と砂含有率 sf の関係を図-1 に示す. ここで砂含有率 sf の値は 0~1.0 で示され, 0 ではその供試体がタイヤチップ単体で構成されている事, 1.0 では砂単体で構成されている事を示している. 図より, sf の値に関らず砂とタイヤチップの混合材においては突固めエネルギーの違いによる供試体の初期間隙比への影響が生じている事が分かる. タイヤチップ含有率が増加しタイヤチップ単体の $sf=0$ になると, 初期間隙比の差がほとんど見られないことがわかる. これらの試料に対して等方圧縮除荷試験および排水および非排水三軸圧縮試験を行った.

3. 等方圧縮除荷試験結果 図-2 に各混合試料の三軸等方圧縮除荷試験の結果を示す. 砂単体の $sf=1.0$ では, この範囲の応力変化では間隙比の変化はほとんどみられないが, タイヤチップ含有量が増加し砂含有率 sf が減少するにつれ, 载荷による間隙比の減少はより顕著になり, 大きな圧縮性を示す結果となっている. 図中, 砂含有率 $sf=0\sim0.7$ では除荷終了時に変形が残っており塑性体的な挙動を示しており, タイヤチップの配合割合が大きいほど大きな圧縮性を示すことが分かる.

4. 排水及び非排水三軸圧縮試験

①排水せん断挙動 排水三軸試験から得られた軸差応力・軸ひずみ・体積ひずみ関係を図-3 に示した. 高エネルギーの突固めにおいて砂単体の $sf=1.0$ ではせん断初期段階で軸差応力にピークが現れ, その後ひずみ軟化挙動を示し, また, 体積ひずみには正のダイレイタンシーが生じているが, タイヤチップ単体の $sf=0$ においては軸差応力は軸ひずみの増加に対し, 線形的に増加を続けているのが特徴的である. また, 体積ひずみも終始圧縮側に増加しており, $\varepsilon \neq 20\%$ においても $sf=0.7\sim0.9$ 以外は定常状態には至っていない. さらに, いずれの配合試料においても初期剛性が低く, タイヤチップ単体と同様な硬化挙動を示すが, $sf=0.7\sim0.9$ では最終的に砂と同程度の強度となっている. また低エネルギーの場合は高エネルギーと比較し $sf=0.7$ 以

表-1 各配合割合の物性値

Sand fraction	$\rho_s (\text{g/cm}^3)$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$D_{50} (\text{mm})$	U_c
1.0	2.645	1.077	0.680	0.380	1.680
0.7	2.197	1.338	0.780	0.430	1.800
0.5	1.898	1.552	0.920	0.450	1.920
0.3	1.599	1.840	1.176	0.500	2.320
0.0	1.150	2.318	1.600	0.650	2.727

表-2 各エネルギーの突固め回数

$E_c (\text{kJ/m}^3)$	各層の突き固め回数					総計	落下高さ(m)	ランマー重量(kN)
	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目			
166	14	20	29	38	50	151	0.1844	0.00116
51	4	7	10	13	16	50		

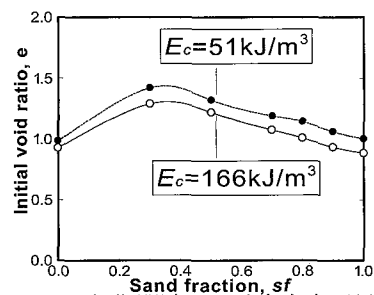


図-1 初期間隙比と砂含有率関係

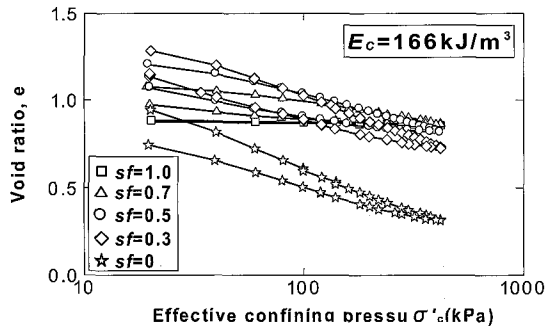


図-2 等方圧縮除荷試験結果

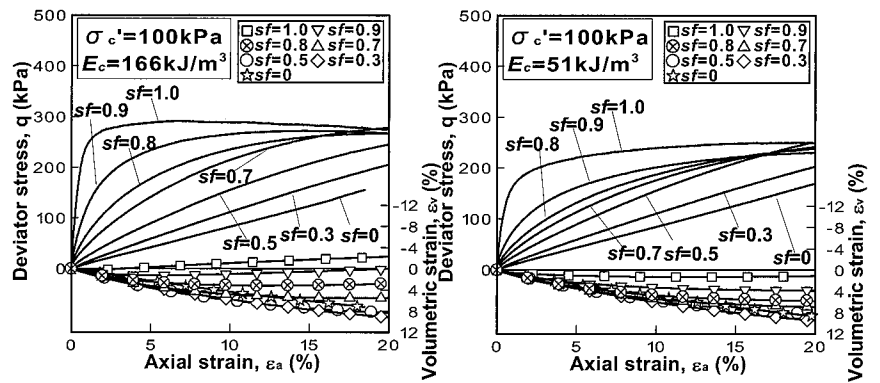
上では $\varepsilon_a=20\%$ における軸差応力が小さくなっている。また、図-4 にせん断抵抗角、セカントアングルと拘束圧の関係を示す。 sf の増加に伴い軸差応力及びセカントアングルの増加が認められる。またタイヤチップを含んでいる場合、セカントアングルは有効拘束圧の増加に伴い低下する傾向を示している。

②非排水せん断挙動 非排水三軸試験より得られた混合土の軸差応力・軸ひずみ関係および有効応力経路をそれぞれ図-5 および図-6 に示す。図-5 より、高い突固めエネルギーで締固めた砂単体 ($sf=1.0$) に比べタイヤチップの混入により強度は大幅に低下し、 $sf=0.7$ 以下においては、タイヤチップ単体に至るまではほぼ同様の挙動をとる様子が認められる。一方、低いエネルギーでの締固め試料においては砂単体 ($sf=1.0$) では、ピークを示した後軟化挙動となる典型的な緩い砂の挙動をとるが、タイヤチップの混入により、終始硬化のみの挙動となる。タイヤチップ単体においては、ひずみの増加に伴い、強度が線形的に増加する挙動を示している。砂配合率の増加に伴い初期剛性は増加するが、残留強度は低下する傾向を示す。これらの現象を考察するために、図-6 の有効応力経路を考察した。いずれの締固めエネルギーにおいても、 $sf=0$ のタイヤチップ単体は、わずかに圧縮性を示すものの有効応力の変化がほとんど生じないのに対し、砂単体 $sf=1.0$ においては、顕著な膨張または収縮傾向を示している。さらに砂含有率 sf の増加に対し、収縮挙動はより顕著になるが、ゴムまたは砂単体の挙動とは離れていく性状を示す。 $sf=0.7$ においてはタイヤチップが砂骨格の一部を破壊し砂の剛性及び強度を弱める働きをしていると推察される。

5. まとめ 種々の配合率から成る砂・タイヤチップ混合土に対し、一連の排水・非排水単調三軸試験を行った。その結果、タイヤチップはひずみ硬化型の軸差応力・軸ひずみ関係を示し、体積ひずみは収縮挙動となった。混合試料については、非排水せん断において、 $sf=0.7$ の場合に最も有効応力が低下する応力経路を示した。また、排水試験では sf が高いほど砂の挙動に近づくことが示された。また排水せん断試験においてはせん断抵抗角はタイヤチップの配合割合が高いほど拘束圧増加に伴いより大きく減少する傾向が見られた。

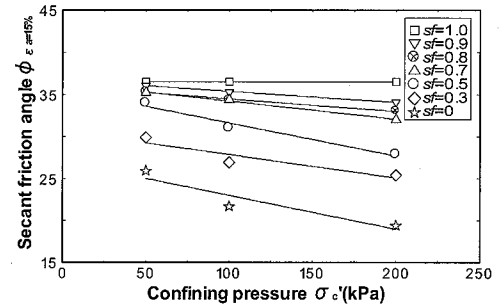
【参考文献】

- 1) 安原一哉：新しい地盤材料の展開，土と基礎，Vol. 54，No. 12，pp. 6-7，2006。
- 2) D. T. Bergado, S. Youwai and A. Rittirong. Strength and deformation characteristics of flat and cubical rubber tyre chip-sand mixtures. (2005). Geotechnique 55, No. 8, 603-606



軸差応力-軸ひずみ，体積ひずみ-軸ひずみ関係

図-3 排水圧縮試験結果



セカントアングル-有効拘束圧関係

図-4 排水圧縮試験結果

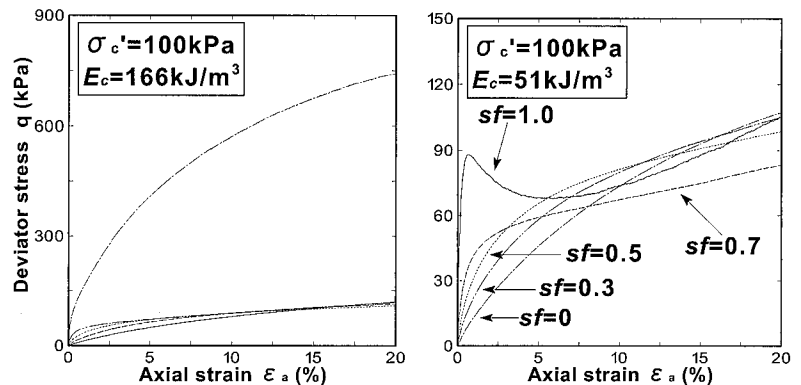


図-5 非排水圧縮試験結果 軸差応力-軸ひずみ関係

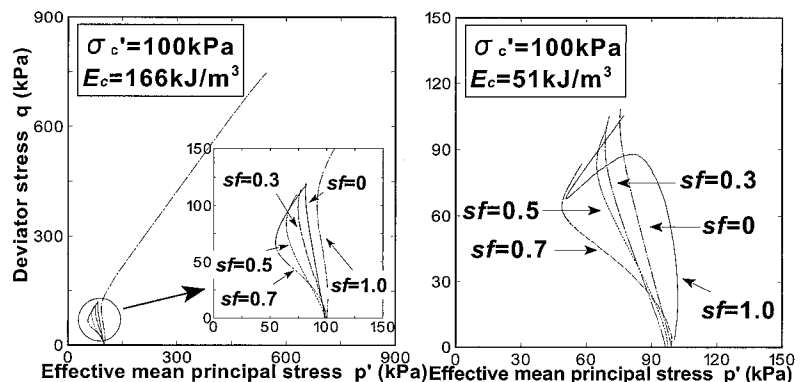


図-6 非排水圧縮試験結果 有効応力経路