

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	抜根試験機による根-土接触面のせん断試験およびモデル化
Title(English)	Shear Tests and Modeling of Root-Soil Contact Interface by Using Novel Pullout Test
著者(和文)	友部 遼, 藤澤 和謙, 村上 章
Authors(English)	Haruka Tomobe, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami
出典(和文)	農業農村工学会論文集, Vol. 84, pp. I_223-I_232
Citation(English)	Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering, Vol. 84, pp. I_223-I_232
発行日 / Pub. date	2016, 12

抜根試験機による根-土接触面のせん断試験およびモデル化

友部 遼 藤澤和謙 村上 章

京都大学大学院農学研究科, 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

要 旨

根混じり土の挙動を理解・予測することは、作物の倒伏や植物根の地盤強度への影響を理解する上で重要である。本論文では、根混じり土の力学挙動の理解・予測を目指し、新たに開発した室内抜根試験機により根-土接触面のせん断挙動特性の把握を試みた。試験は既存の摩擦試験結果との比較を目的にまず鉄-ケイ砂に対して行い、その後、引抜き材料のみをバルサに変更して強度係数の変化を調べた上で、オオムギ根-水田土に対して抜根試験を実施した。得られた強度定数により接触力学に基づくモデル化を適用した。結果として、いずれの試験においても境界面のせん断強度を測定し Coulomb の破壊基準が良好に適用できた。また、接触力学に基づく定式化によりピーク強度に至るまでのせん断挙動特性を表現できた。以上より、根-土接触面せん断挙動特性の把握とその簡単なモデル化を達成した。

キーワード：根-土接触面，せん断挙動特性，抜根試験，根混じり土，倒伏，斜面安定，接触力学

1. 緒言

食料と水の安定的な供給は農学分野の最重要課題の一つであるが、この課題を克服し続けることは容易ではない。喫緊の課題として、IPCC 第 4 次レポートにおいていくつかの警告がなされているように、今後、強い熱帯低気圧の活動度が増加する可能性が高く、食料の確保の観点から農作物生産への影響が危惧されている。水資源の維持管理の観点からは、ほとんどの陸域で継続的な高温・熱波の頻度が増加する可能性が非常に高く、水需要の増加が懸念される (IPCC, 2009)。

食料の確保に関わる課題の一つとして、農作物の倒伏の予測・防止は極めて重要な課題である。倒伏は、地上部が変形すること起因する Stem lodging (茎がたわむ、または折れることによる倒伏) と、地下部の変形に起因する Root lodging に分類される (Berry et al., 2004)。Stem lodging に関して、近年では水稻の育種において、稈の機械的強度に着目した育種が行われ (大川・石原, 1992, 1997)、長稈かつ強稈であり Stem lodging に強い耐性を有する水稻品種「リーフスター」が 2006 年に育成されたが、地上部の強度の増加や大型化により、地下部に変形が生じる Root lodging が憂慮される (農業・食品産業技術総合研究機構, 2015)。Root lodging は根と土の入り混じる領域 (以下、「根混じり土」と称する) に変状が生じる不可逆な力学現象である。そのため、一度の発生でその後の生育、収量や機械作業効率に悪影響を及ぼす (Berry et al., 2004)。Root lodging は根の表現型のみならず土の状態にも強く影響を受けるため、これまで根の分布形状と土の状態量をパラメータとした経験的モデルが提案された (Berry et al., 2003)。しかし、根混じり

土の力学挙動の理解と予測は、未だ Root lodging の精緻な予測評価が可能な水準に至っていない (Berry et al., 2004)。

一方、農作物から人工斜面や自然斜面に目を向けると、根混じり土の力学挙動はそれらの安定性に関わる問題となる。根による斜面の保護・補強効果の有無と程度に関しては、これまでに多くの研究がある。従来、斜面の補強に微繊維を用いるジオテキスタイル工の補強効果が評価された (例えば、阿部・北本, 1990 ; Tang et al., 2010 ; Hejazi et al., 2012) が、植物根もジオテキスタイルと同様に微繊維として土に対するせん断補強効果を発揮すると考えられ、その定量化が行われてきた (Docker and Hubble, 2008 ; 阿部ら, 2004 ; 北原, 2010)。しかし、現在においても、植生や植物根が斜面の安定性に及ぼす影響を精密に評価できていないという課題がある。

根混じり土に関する未解明な課題として、根-土接触面のせん断挙動特性が挙げられる。根混じり土は、力学的挙動の観点から、根、土、および根-土接触面の 3 領域に分けることができる。土の力学挙動については、これまで土質力学分野において多くの研究がなされ、解明が進んだ結果、弾塑性構成則の記述から応用段階へと至った。しかし、根の力学挙動、および根-土接触面のせん断挙動特性に関する研究は少なく、特に根の存在する地表付近の低拘束圧条件下において、根-土接触面がどのような挙動を示すのかは明らかでない。著者らは、根混じり土の力学挙動を本質的に解明するには、根-土接触面のせん断挙動特性を明らかにすることが不可欠であると考えた。

根の分布する低拘束圧下において、根-土接触面のせん断挙動特性を試験的に把握することが本論文の目的である。このために開発した室内抜根試験機の説明を行い、その試

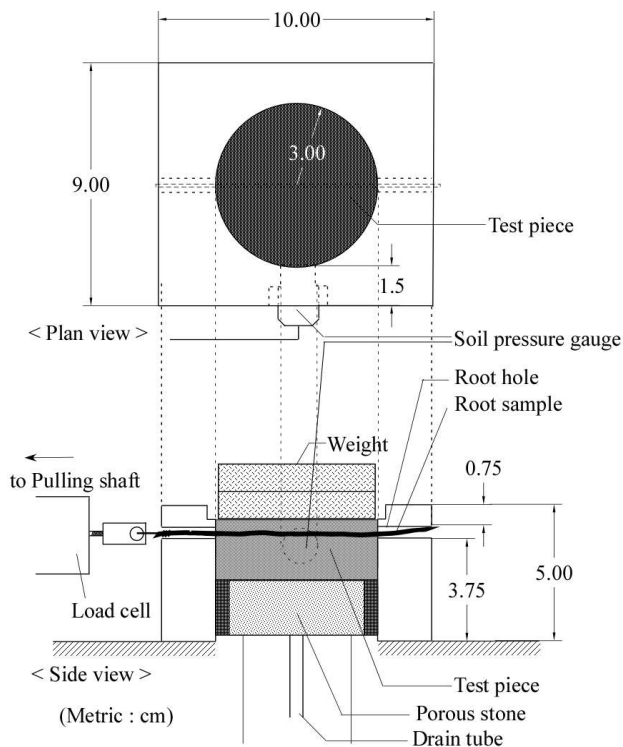


Fig. 1 抜根試験機
Pull-out test

Table 1 試験ケースおよび材料組み合わせ
Experimental cases for different materials

Experimental cases	Pull-out material	Soil
Case 1	Steel	Silica sand
Case 2	Balsa	Silica sand
Case 3	Barley root	Paddy soil

験機を用いた試験から根-土接触面のせん断挙動特性を明らかにする。本論文の構成は次のようである。第2章において、抜根試験機、試験材料、試験方法について説明を行う。第3章にて得られた試験結果を示した後、第4章では根-土接触面のせん断挙動特性について考察するとともに、接触力学の観点からモデル化を行う。第5章では第3, 4章で得られた知見をまとめ、結論を述べる。

2. 抜根試験

土中から根や繊維を引抜く試験は、様々な目的で行われ、その目的から以下の2つに大別できる。一つは、山林や圃場を対象として根の引抜き挙動を調べることを目的とした試験である(阿部, 1991; 名越・田邊, 2001)。他方は、ジオテキスタイル等による土構造物の補強効果を推定することを目的として実施された、土中のジオテキスタイルや繊維の引抜き試験である(Luo et al., 2000; 清田ら, 2009)。先行研究では、根の引抜き抵抗力和根の太さとの関係が把握され、根または人工的な繊維が引張応力を負担すること

によって土構造物の補強効果が見込めることが示され、さらに電子顕微鏡を用いた観察により、繊維を含んだ土の微小構造が解明された(Hejazi et al., 2012)。しかし、実際の根が分布する低拘束圧領域において、根と土の接触面に着目して、そこでのせん断挙動特性(例えば、垂直応力とせん断応力との関係)を定量的に評価した研究は少ない。根-土接触面上のせん断挙動のモデル化では、試験的にその挙動を把握する必要がある、そのために実施した抜根試験について、開発した試験機、試験に用いた材料、試験方法を解説する。

2.1 抜根試験機

Fig. 1に抜根試験機の概要を示す。直径6 cm、厚さが約2 cmの土供試体に根を貫通させ、供試体上部から圧力をかけた状態で根を引抜くときに必要な力を測定する。この引抜き抵抗力から、根-土接触面におけるせん断応力を算出し、変位(すべり)との関係を求める。Fig. 1に示すように、土供試体は高さ5.0 cm、幅10.0 cm、奥行き9.0 cmのステンレス製の容器に設置される。その容器の側面には、直径5 mmの小さな穴があり、その穴を通して、根を土供試体に貫通させる。根の左端はロードセルに麻紐によって結び付けられ、試験時には0.1 mm/minの速度で図中の左方向に引き抜かれる。その時に、ロードセルに記録される荷重が根の引抜き抵抗力となる。本試験では、第4章で述べる根-土接触面におけるせん断挙動特性をモデル化するために、供試体の側方に土圧計(定格容量50 kPa)を設置し、試験中に土内部の応力状態を測定した。これは、根の表面に作用する垂直応力を算定するためである。

2.2 試験材料と試験ケース

引抜き材料には鉄釘、バルサ、オオムギ根、土試料には7号硅砂、水田土を用い、これらを組み合わせた3ケースについて試験を実施した。試験ケースの一覧をTable 1に示す。ケース1は引抜き材料に直径3 mmの鉄釘、土試料に硅砂を用いた試験であり、既往の鉄-ケイ砂摩擦試験結果(例えば、Uesugi and Kishida, 1986a, 1986b)の比較を行う目的で実施した。ケース2では、土試料はケース1と同じ硅砂であるが、引抜き材料をより柔軟である有機材料(直径3 mmのバルサ)に変更した。ケース2では、ケース1との比較から、有機材料と土の接触面におけるせん断挙動特性の違いが調べられる。ケース3は、実際の圃場を想定し、引抜き材料にオオムギ根、土試料に水田土を用いたものである。オオムギ根と水田土は、京都大学大学院農学研究科附属京都農場から採取した。7号硅砂と水田土の土粒子密度はそれぞれ2.67 g/cm³、2.76 g/cm³であった。水田土の粒径加積曲線はFig. 2に示す通りであり、液性限界、塑性限界、塑性指数は順に48.3%、35.4%、13.1となり、地盤材料の工学的分類(JGS 0051)(地盤工学会「土質試験-基本と手引き」改訂編集WG, 2010)より「粒径幅の広い礫まじり細粒分質砂」に分類された。また、水田土は、現地から採取された土の2 mmふるい通過試料を供試土とし、含水

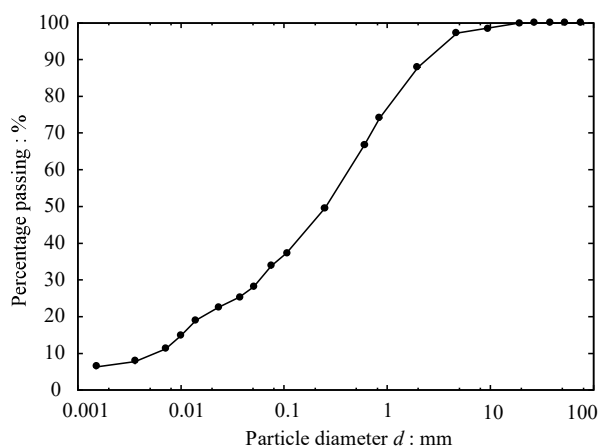


Fig. 2 水田土の粒径加積曲線

Particle size distribution curve of paddy soil

比試験を行った上で乾燥を防ぐため密封し保管した。100 mL サンプラーを用いて、現地土のサンプリングを行った結果、現地の湿潤密度と乾燥密度はそれぞれ 1.28 g/cm^3 , 0.97 g/cm^3 であり、ケース 3 では各供試体にこの密度と現地含水比 (31.5 %) を再現して試験を実施した。

2.3 試験方法

抜根試験は、以下の試験手順で行う。

1. ケース 1 と 2 では自然乾燥状態の硅砂を用い、試験後に含水比を測定する。ケース 3 では、水田土の含水比を約 31.5 % に調整する。
2. 試験容器の側面に土圧計をセッティングする。ゼロ点補正を行い、供試土充填時から土圧の計測を行うため、この時点でデータ収集を開始する。
3. 引抜き材料の準備を行う。ケース 1 の鉄釘に関しては購入時のまま、ケース 2 のバルサに関しては長さ 10 mm 程度に切断し、材料両端の直径を 2 回ずつ計測し、それらの平均値を平均直径とした。いずれも一端を細麻紐で縛り、細麻紐の另一端をロードセルに接続された金具に縛ることで固定する。ケース 3 のオオムギ根は、根の付いた株を水洗いし (Fig. 3)、根のうち長さ 10 mm 以上で 1 次側根の可能な限り少ない根を供試根に選ぶ。特に種子根は分岐が多いため避ける。なお、供試根は 1 次側根を全てそぎ落とす。その後、乾燥を避けるため、水中において根を軽く引きながら株元よりカッターナイフで切断し、湿らせたティッシュペーパーで切り口付近を保護する。ティッシュペーパーを巻いた上から供試根を細麻紐で縛り (Fig. 4)、細麻紐の另一端をロードセルに接続された金具に縛るにより固定する。供試根の一端を抜根穴に通し、以降、霧吹きにより根表面の乾燥を防ぐ。
4. ケース 1 と 2 の硅砂、ケース 3 の水田土を試験容器に充填し、引抜き材料を貫通させる。水田土については、現地湿潤密度 (約 1.28 g/cm^3) となるようにせん断箱に充填を行う。具体的な手順としては、試験容器側面の穴の高さまで、数回に分けて供試土を満たした後、



Fig. 3 供試したオオムギ株

The plant body of barley



Fig. 4 供試したオオムギ根

A root of barley

引抜き材料を穴に通して試験容器を貫通させる。この後、引抜き材料の上から供試土を再度充填することで、土供試体に引抜き材料が貫通した状態となる。供試土の充填を終えた後、供試体上面をソイルナイフにより水平に整える。供試体上面にアクリル板を載せ、その上に円盤形の金属製のおもりを所定の枚数だけ載せる。この際、一度載荷したおもりは試験終了まで持ち上げない。また、載荷した後、おもり表面が水平であることを水平器により確認し、水平でない場合は供試土を取り出し、2.-4.の手順を繰り返す。

5. 載荷後、硅砂の場合は 5 分程度、水田土の場合は 20 分程度、鉛直変位が収まるまで時間を経過させる。
6. 約 0.1 mm/min で抜根を開始し、およそ 1 時間をかけて 6 mm 以上引抜き、その際の水平土圧 (kPa)、引抜き抵抗力 (N)、水平変位 (mm) を経時的に計測する。
7. 土を乱し、同じ根を用いて、相異なる 4 通り以上の拘束圧の下で再度 1.-6.を行う。ただし、ムギ・ダイズ等の一年生植物根を供試する場合、繰り返す試験による根の損傷を可能な限り避けるため、垂直応力は最大で 50 kPa 程度、試験回数は 5 回以下とする。この値は材料組み合わせに依存するため、事前に予備試験を行い、許容拘束圧と許容繰返し回数を確認した。

試験結果の整理のため、引抜き材と土の接触面での垂直応力 σ とせん断応力 τ を算定する。本試験においては、根が十分に細くかつ 1 本であるため、土圧分布は根の存在しない状態に近似できると仮定した。供試体内部に一樣な水平土圧が発生していると仮定できるため、側面に 1 つの土圧計を設置した。低拘束圧試験であること、および柔軟な材料であるオオムギ根は試験スケールに対して十分に直径が小さいことから、材料の変形量は無視できると仮定した。以上の仮定と計測された圧力から、接触面に作用する垂直

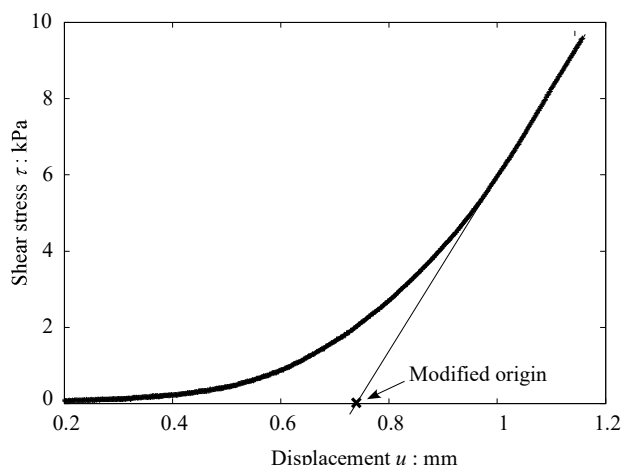


Fig. 5 修正原点の決定方法
A method to decide modified origin

応力 σ は次式により計算できる。

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (1)$$

ここに、 σ_1 は鉛直載荷圧、 σ_3 は土圧計により計測された水平土圧を表し、式(1)の導出については付録に記載する。せん断応力 τ については、測定された引抜き抵抗 S を引抜き材料と土の接触面積で除し

$$\tau = \frac{S}{2\pi rL} \quad (2)$$

と算定する。ここに、 r と L はそれぞれ引抜き材料の半径と土との接触長さである。

なお、せん断応力と引抜き変位の関係を描く場合、引抜き材料とロードセルの間を麻紐にて接続しているため、Fig. 5に示すように変位-せん断応力曲線の初期の部分に下に凸となる変曲点が生じる。この場合は、一軸圧縮試験(JIS A 1216)と同様の方法により原点の修正を行う。すなわち、変曲点以降の直線部分を延長し、横軸との交点を変位の修正原点とする(Fig. 5参照)。

3. 結果と考察

3.1 鉄-ケイ砂抜根試験結果(ケース1)

試験から得られた変位-せん断応力関係をFig. 6に示す。ピーク強度に至るまでの傾きは一定である一方で、ピーク強度付近からピーク強度以降にかけてはせん断応力が振動しつつ減少した。ピーク強度は、概ね変位量0.5 mm - 1.5 mmの間でみられ、ピーク強度に達した直後から急激にせん断応力が減少する傾向が見られた。せん断応力の減少の程度は垂直応力により異なったが、ピーク応力と比較し概ね20% - 50%減少した。垂直応力-せん断変形係数関係はFig. 7となり、せん断変形係数が垂直応力に比例することが示唆された。また、垂直応力-せん断応力関係はFig. 8のようになった。垂直応力と最大せん断応力との間に強い正の相関関係が確認された。回帰直線の切片は0 kPaを示し、傾きは0.28となった。傾きは摩擦係数に相当するものである

ため、本試験結果は垂直応力0 kPa - 60 kPaにおける鉄-ケイ砂境界面における摩擦係数が0.28であることを示した。鉄-ケイ砂抜根試験によって得られた摩擦係数は、先行研究(例えば、Uesugi and Kishida, 1986a, 1986b)における値と同程度またはやや小さい値となった。

3.2 バルサ-ケイ砂抜根試験結果(ケース2)

変位-せん断応力関係をFig. 9に示す。ピーク強度に至るまでの傾きは一定であった。うち垂直応力が48.6 kPaの試験および36.4 kPaの試験においては、ピーク強度に達する以前に急激なせん断応力の減少が起こり、その後せん断応力減少以前とほぼ同じ傾きで再度せん断応力の上昇が確認された。ピーク強度付近からピーク強度以降にかけては、せん断応力が振動しつつ減少した。ピーク強度と比較し、概ね50%以上のせん断応力の減少が確認された。これは、鉄-ケイ砂試験におけるせん断応力の減少程度と比較して、より著しいものであった。垂直応力-せん断変形係数関係はFig. 10となり、せん断変形係数が垂直応力に比例することが示唆された。ピーク強度は、概ね変位量1.0 mm - 6.0 mmの間でみられ、ピーク強度に達した後に0.5 mm - 1.0 mm程度はピーク強度を保った後、せん断応力が減少する傾向が見られた。垂直応力-せん断応力関係はFig. 11となった。垂直応力と最大せん断応力との間に強い正の相関が見られた。回帰直線の切片は1.81 kPaを示し、摩擦係数を示す傾きは0.93となった。本試験結果は垂直応力0 kPa - 50 kPaにおけるバルサ-ケイ砂境界面における摩擦係数が0.93、粘着力が1.81 kPaであることを示した。

3.3 オオムギ根-水田土抜根試験結果(ケース3)

Table 2に各試験における供試体の乾燥密度および含水比を示す。乾燥密度は試験前、含水比は試験後の値である。変位-せん断応力関係をFig. 12に示す。ピーク強度に至るまでの傾きは一定である一方で、ピーク強度付近からピーク強度以降にかけてはせん断応力が振動しつつ減少した。先述の2ケースと比較し、ピーク強度がより長い変位に渡って持続し、ピークが明瞭でないことが確認された。また、せん断応力の減少も先述の2ケースと比較して緩やかであった。垂直応力-せん断変形係数関係はFig. 13となり、せん断変形係数が垂直応力に比例することが示唆された。最終的にせん断応力はピーク強度とほぼ変わらないものから50%程度まで減少するものまでであった。ピーク強度は、概ね変位4.0 mm - 7.0 mmの間でみられ、ピーク強度に達し2.0 mm - 5.0 mm程度はピーク強度を保った後、せん断応力が減少する傾向が見られた。また、垂直応力-せん断応力関係をFig. 14に示す。垂直応力と最大せん断応力との間に強い正の相関が見られた。回帰直線の切片は3.14 kPaであり、傾きは0.60となった。先の2ケースよりも大きな粘着力が確認され、また摩擦係数は鉄-ケイ砂境界面より大きく、バルサ-ケイ砂境界面よりも小さい。

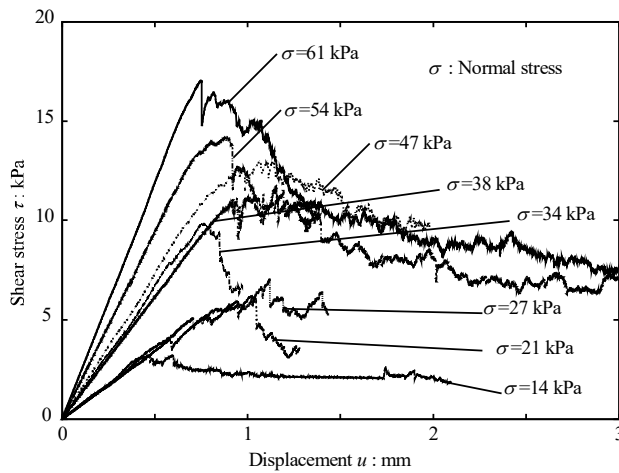


Fig. 6 鉄-ケイ砂試験 変位-せん断応力関係
Displacement versus shear stress from steel-sand interface

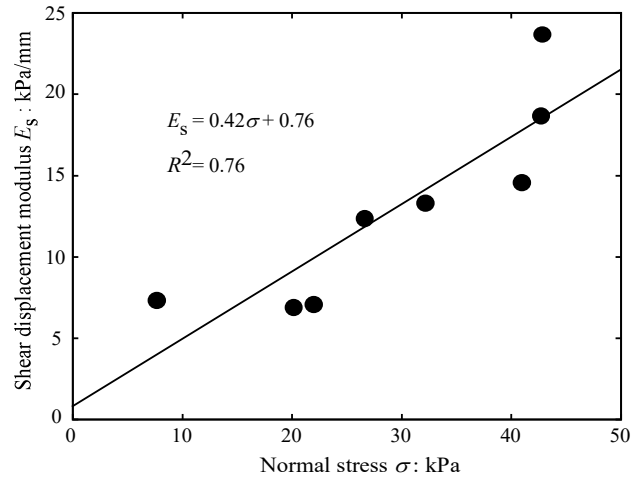


Fig. 7 鉄-ケイ砂試験 E_s -垂直応力関係
Relationship between normal stress and E_s on steel-sand interface

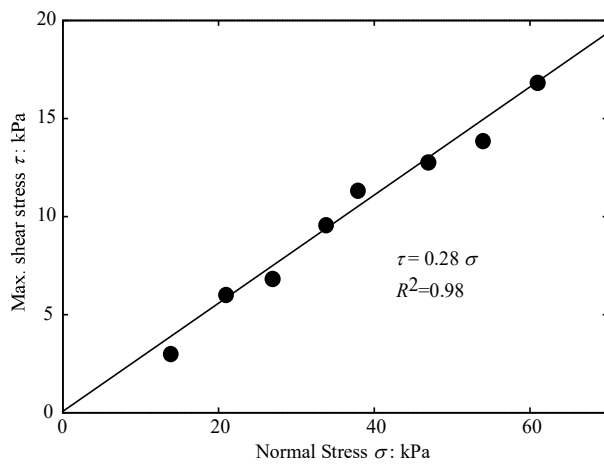


Fig. 8 鉄-ケイ砂試験 垂直応力-せん断応力関係
Relationship between normal stress and shear stress
on steel-sand interface

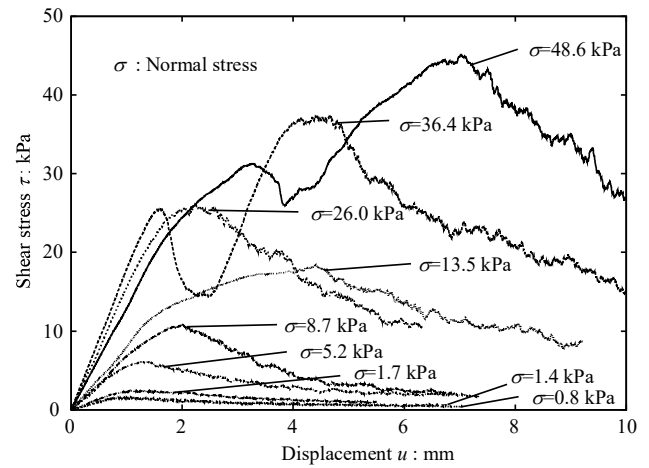


Fig. 9 バルサ-ケイ砂試験 変位-せん断応力関係
Displacement versus shear stress from balsa-sand interface

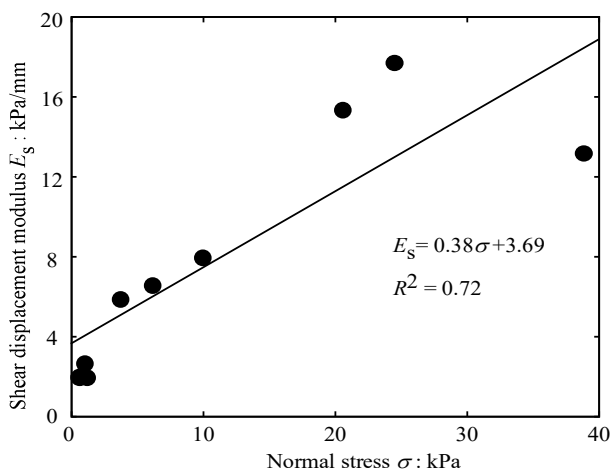


Fig. 10 バルサ-ケイ砂試験 E_s -垂直応力関係
Relationship between normal stress and E_s on balsa-sand interface

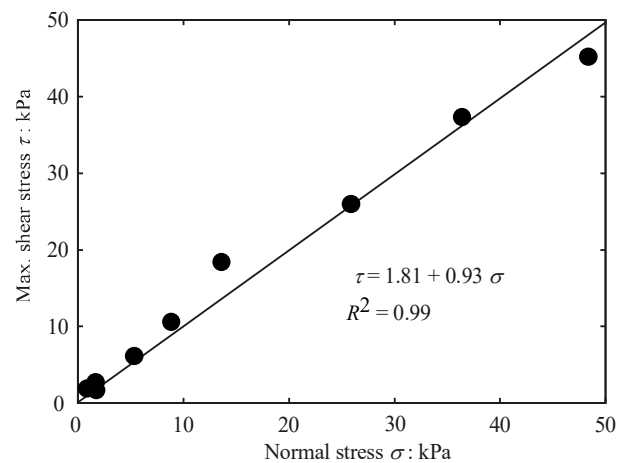


Fig. 11 バルサ-ケイ砂試験 垂直応力-せん断応力関係
Relationship between normal stress and shear stress
on balsa-sand interface

Table 2 供試体の乾燥密度および含水比
Dry density and water content of test pieces

	Original	Vertical stress			
		1.7 kPa	3.6 kPa	6.1 kPa	8.3 kPa
Dry density : g/cm ³	0.97	0.96	0.97	0.96	0.98
Water content : %	31.5	32.4	30.8	33.1	29.9

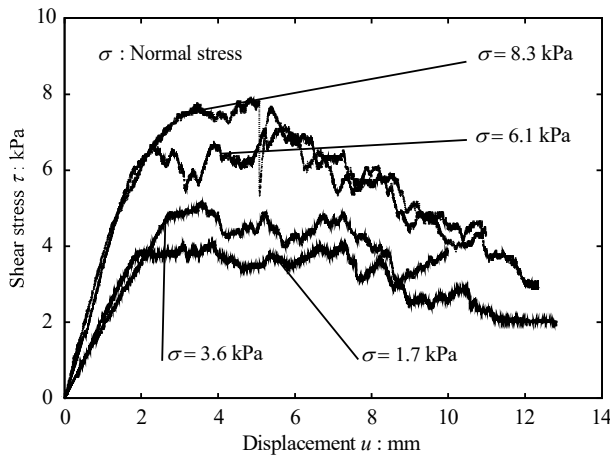


Fig. 12 オオムギ根-水田土試験 変位-せん断応力関係
Displacement versus shear stress from
barley root-paddy soil interface

4. 接触力学による試験結果の解釈およびモデル化

根混じり土の挙動を予測するためには、本試験結果により得られた根-土接触面における変位-せん断応力関係をモデル化する必要がある。これまで、異種材料間の接触面における変位-せん断応力関係をモデル化する代表的な手段として、接触力学により弾塑性論のアナロジーを用いた定式化が行われてきた（例えば、Wriggers, 2006）。接触力学において、典型的な接触面の摩擦は **Fig. 15** に示されるようになる。接触面での変位 u が小さい場合、せん断応力は変位とともに直線的に増加するが、変位がある大きになると降伏点に至り、せん断応力はそれ以上増加しなくなる。変位を低下させた場合は、直線的にせん断応力が減少し、再び変位を増加させるとせん断応力は上述と同様の変化を示す。この変位とせん断応力の関係は、弾塑性体の応力-ひずみ関係と類似する。そのため、接触面の変位-せん断応力関係においても、弾塑性の考え方を導入したモデル化が進展している。せん断応力が変位と比例する領域の挙動は弾性圧着（接触面が圧着し、すべりが微小である状態）と呼ばれ、その領域での変位を弾性変位 u^e と呼ぶ。一方、降伏応力をむかえ一定のせん断応力を保ちながら変位が増加する挙動は塑性すべり（接触面を境にすべりが生じている状態）と呼ばれ、そこでの変位を塑性変位 u^p と呼ぶ。また、降伏状態を規定する関数はすべり基準と呼ばれ、接触面のせん断強度に対応するものである。以上の考え方から、接触面の変位 u は弾性変位 u^e と塑性変位 u^p に分解できる。

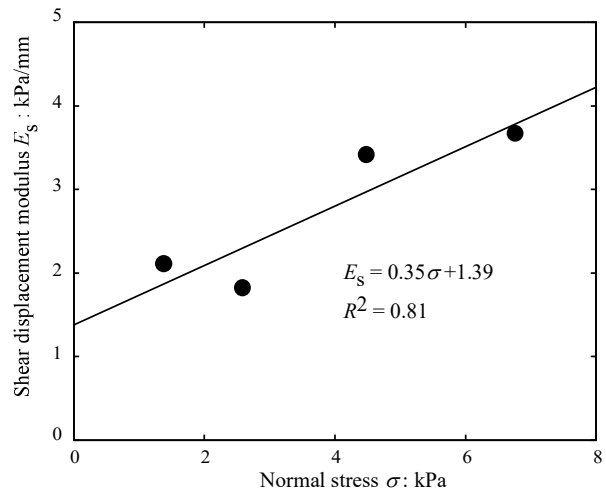


Fig. 13 オオムギ根-水田土試験 E_s -垂直応力関係
Relationship between normal stress and E_s on
barley root-paddy soil interface

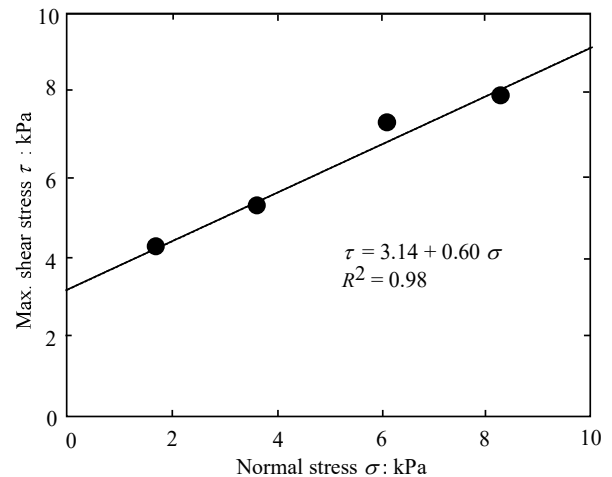


Fig. 14 オオムギ根-水田土試験 垂直応力-せん断応力関係
Relationship between normal stress and shear stress
on barley root-paddy soil interface

$$u = u^e + u^p \quad (3)$$

Fig. 15 に試験結果を解釈した一例を挙げる。この試験結果では、変位が約 2 mm 以下の領域が弾性領域となり、それ以上の変位において塑性すべりが生じている。

4.1 弾性圧着の試験結果およびモデル化

前章の試験結果から一般性のあるモデルを示すため、以下ではせん断変位とせん断応力を接触面上の二次元ベクトルとしてボールド体で表現する。

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

前章の試験結果は、せん断応力が降伏応力より小さい領域においては変位とせん断応力は概ね比例関係にあることを示した。そのため、せん断応力 $\boldsymbol{\tau}$ はせん断弾性係数テンソル

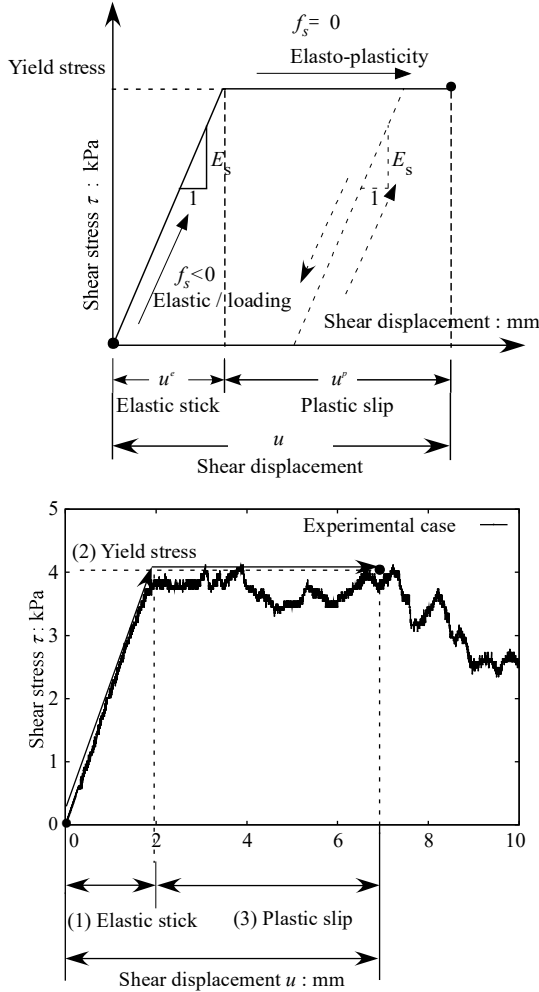


Fig. 15 弾完全塑性モデルによる変位の加算分解
および変位-せん断応力関係

Additive decomposition of displacement and shear stress vs.
displacement by elastic-perfectly plastic model

C を用いて一般的には次のように表現される.

$$\tau = Cu^e \quad (5)$$

ここで, 等方性を仮定すれば式 (5) は試験で求められたせん断変形係数 E_s と単位テンソル I を用いて

$$\tau = E_s I u^e = E_s u^e \quad (6)$$

とできる. 試験結果 (Fig. 7, 10, 13 参照) は, せん断変形係数 E_s が垂直応力 σ に比例することを示しており,

$$E_s = \alpha\sigma + \beta \quad (7)$$

と σ の関数として与えられる. ここに, α と β は材料定数である. 降伏状態を規定するすべり基準は, Fig. 8, 11, 14 に示された結果を受け,

$$f_s = \|\tau\| - c - \sigma \tan \phi = 0 \quad (8)$$

と表すことができる. ここに, c と ϕ は接触面上の粘着力と摩擦角を意味する. $f_s < 0$ では弾性圧着, $f_s = 0$ の状態で塑性すべりが生じる. 視覚的には式 (8) は σ , τ の空間において Fig. 16 に示す円錐形の曲面を表し, 曲面の内部では弾性

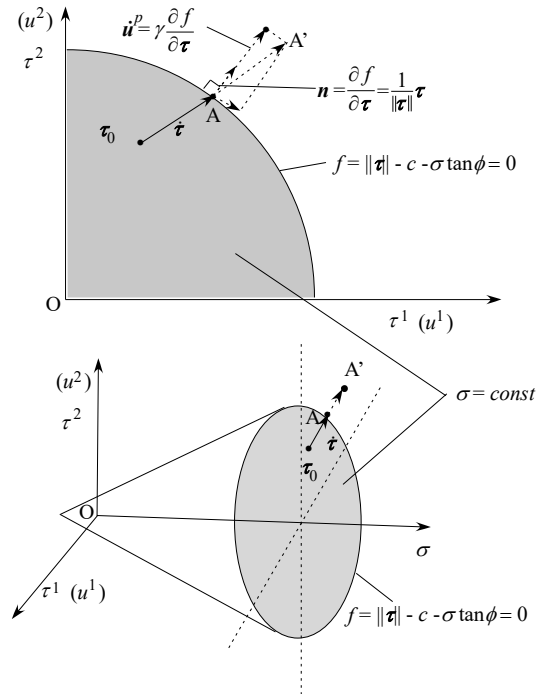


Fig. 16 塑性すべりの計算方法
Computational method of plastic slip

圧着, 曲面上では塑性すべりが生じる応力状態を表す.

4.2 接触面の変位とせん断応力の構成式

式 (3), (6), (8) を用いて, 接触面における変位とせん断応力の構成式を導く. 式 (6) を以下のように速度形で表し,

$$\dot{\tau} = E_s \dot{u}^e \quad (9)$$

時間微分を施した式 (3) を式 (9) に代入すると

$$\dot{\tau} = E_s (\dot{u} - \dot{u}^p) \quad (10)$$

となる. 関連流れ則を仮定すると, 塑性変位速度 $\dot{u}^p$ は

$$\dot{u}^p = \gamma \left(\frac{\partial f_s}{\partial \tau} \right)^T \left(\gamma \frac{1}{\|\tau\|} \tau \right) \quad (11)$$

と与えられる. ここに, γ は塑性変位の大きさを表す係数である. 式 (11) はせん断応力の方向にせん断変位が発生することを意味しており, 関連流れ則はごく自然な仮定であることに言及しておく. 係数 γ を決定するため式 (8) の全微分をとる. 全微分 df_s は塑性すべり状態で常に 0 となるため, 式 (12) が成立する.

$$df_s = \frac{\partial f_s}{\partial \tau} \dot{\tau} + \frac{\partial f_s}{\partial \sigma} \dot{\sigma} = 0 \quad (12)$$

式 (12) に式 (10) と式 (11) を代入すれば,

$$\gamma = \frac{E_s \frac{\partial f_s}{\partial \tau} \dot{u} + \frac{\partial f_s}{\partial \sigma} \dot{\sigma}}{\frac{\partial f_s}{\partial \tau} \left(\frac{\partial f_s}{\partial \tau} \right)^T} \quad (13)$$

が得られ, 弾性接触か塑性すべりが生じるかの判断は係数 γ の正負で行うことができる. ここに, $\dot{\sigma}$ は応力の時間微分である. 式 (13) を代入した式 (11) を式 (10) に戻せば,

$$\dot{\boldsymbol{\tau}} = E_s \left(\mathbf{I} - \frac{\left(\frac{\partial f_s}{\partial \boldsymbol{\tau}} \right)^T \frac{\partial f_s}{\partial \boldsymbol{\tau}}}{\frac{\partial f_s}{\partial \boldsymbol{\tau}} \left(\frac{\partial f_s}{\partial \boldsymbol{\tau}} \right)^T} \right) \dot{\mathbf{u}} - \frac{\frac{\partial f_s}{\partial \sigma} \dot{\sigma} \left(\frac{\partial f_s}{\partial \boldsymbol{\tau}} \right)^T}{\frac{\partial f_s}{\partial \boldsymbol{\tau}} \left(\frac{\partial f_s}{\partial \boldsymbol{\tau}} \right)^T} \quad (\gamma \geq 0) \quad (14a)$$

$$\dot{\boldsymbol{\tau}} = E_s \dot{\mathbf{u}} \quad (\gamma < 0) \quad (14b)$$

で表される変位とせん断応力の構成関係を得る．式 (14a) の f_s に式 (8) を代入した結果を示す．

$$\dot{\boldsymbol{\tau}} = E_s \left(\mathbf{I} - \frac{1}{\|\boldsymbol{\tau}\|^2} \boldsymbol{\tau} \otimes \boldsymbol{\tau} \right) \dot{\mathbf{u}} - \frac{\dot{\sigma} \tan \phi}{\|\boldsymbol{\tau}\|^2} \boldsymbol{\tau} \quad (\gamma \geq 0) \quad (15)$$

Fig. 16 に垂直応力が一定のまません断応力が増加した場合のひずみ計算の一例を示す． $\boldsymbol{\tau}$ において釣り合いが成立している状態から， $\dot{\boldsymbol{\tau}}$ だけ応力増分が生じ応力状態が A' へ移ろうとした場合，応力状態は降伏曲面上の A に留まり，式 (7)，式 (9) から弾性圧着分の変位が，式 (14a) より，A における法線ベクトル方向に塑性すべり増分が計算される．本定式化を試験結果に適用したフィッティングパラメータおよびフィッティング結果は，それぞれ **Table 3** および **Fig. 17 – Fig. 19** の通りである．ピークに至る領域で，概ね良好に変位-せん断応力を表現した．

5. 結論

抜根試験結果から，本試験により境界面の変位-せん断応力関係を捉えることができた．いずれの試験結果においても，せん断初期にはせん断応力が変位に比例した一方で，ピーク強度を経過後に減少し，ピーク強度の 50 % 以下にまで減少したのも確認された．また，いずれの材料の組み合わせにおいても，境界面のピーク強度と境界面にかかる垂直応力は，強い正の相関を示すことが確認された．このことから，根-土接触面においては Coulomb の破壊条件が適用可能であり，またそのパラメータであるみかけの粘着力 c (kPa) と内部摩擦角 ϕ (deg.) は根-土の組み合わせに依存することも示された．粘着力はオオムギ根-水田土 > パルサ-ケイ砂 > 鉄-ケイ砂の順となり，内部摩擦角はパルサ-ケイ砂 > オオムギ根-水田土 > 鉄-ケイ砂の順となった．また，本試験により低拘束圧条件下であっても根-土接触面において Coulomb の破壊条件の適用が極めて良好であったことは，根-土接触のせん断強度を本試験により精度よく予測できることを示した．本結果により，今後，根-土接触面のセ

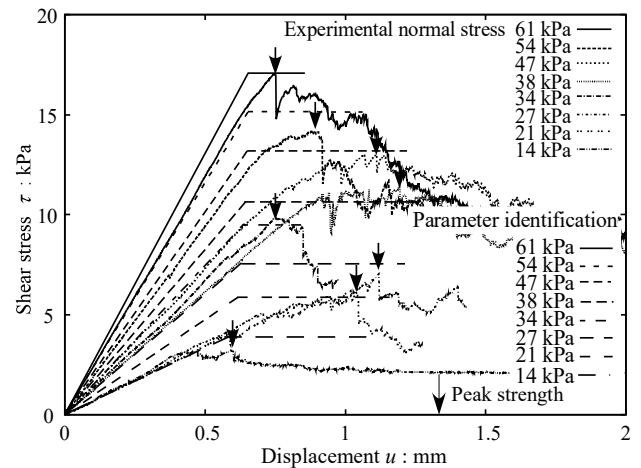


Fig. 17 鉄-ケイ砂試験 フィッティング結果
Fitting of steel-sand tests

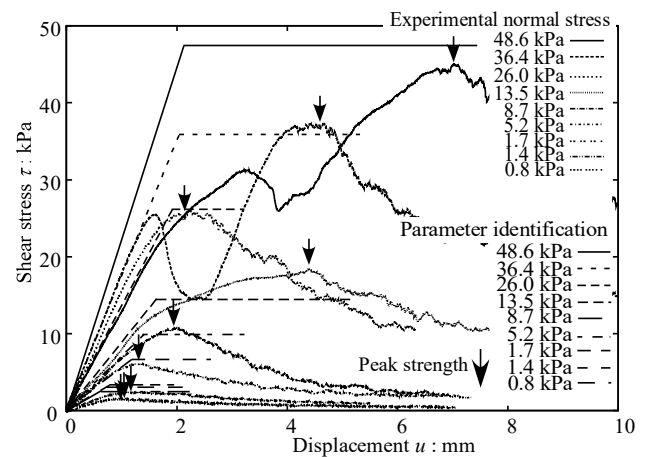


Fig. 18 パルサ-ケイ砂試験 フィッティング結果
Fitting of balsa-sand tests

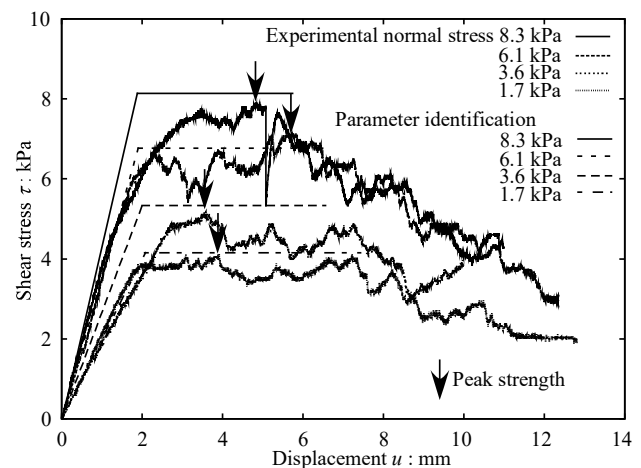


Fig. 19 オオムギ根-水田土試験 フィッティング結果
Fitting of barley root-paddy soil tests

Table 3 フィッティングパラメーター一覧

Fit parameters of each cases

	α	β	c (kPa)	ϕ (deg.)
Case 1	0.42	0.76	0.00	15.6
Case 2	0.38	3.69	1.81	41.9
Case 3	0.35	1.39	3.14	30.9

ん断強度は本試験法により予測が可能であることが示唆された。一方、ピーク強度経過後の変位-せん断応力関係の理解へ向けては課題が残された。フィッティング結果に関しては、試験開始からピーク強度近傍までの挙動を概ね良好に表現できたが、試験においてはピーク強度付近のせん断変形係数の緩やかな低下が確認されていたものの、本定式化ではモデルの特性上表現ができなかった。より詳細に挙動を記述するために、構成モデルを高度化する必要性があると考え。また、大変形時の挙動を表現する上で、ピーク強度以降のひずみ軟化挙動の表現が課題として残された。今後、本論文により得られた知見を倒伏の回避や斜面防災へ応用するためには、異なるサクシオン、多様な根-土の組み合わせにおける根-土接触面のせん断挙動特性を把握することや、大変形時の根-土接触面のせん断挙動特性をより精緻に理解することに加え、土と根の力学挙動や境界形状を踏まえた根混じり土の力学挙動を把握することが必要と考える。

謝辞： 本学農学専攻作物学研究室の白岩立彦教授に供試材料をご提供頂きました。ご厚意に心より深謝申し上げます。

付録 境界面における垂直応力の導出

境界面における垂直応力の導出は以下の手順で行う。はじめに、鉛直載荷応力と水平土圧から境界面にかかる平均垂直応力を求める。

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (A1)$$

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (A2)$$

$$\sigma = \frac{1}{2\pi rL} \int_A \sigma \mathbf{n} \cdot \mathbf{n} dA \quad (A3)$$

ここに、 σ_1 は鉛直載荷圧、 σ_3 は土圧計により計測された水平土圧、 σ は供試体内部のコーシー応力テンソル、 $\mathbf{n}$ は根-土接触面における単位法線ベクトル、 σ は平均垂直応力、 r 、 L はそれぞれ根の平均半径とせん断箱内に入る部分の長さであり、 π は円周率、 A は引抜き材料のうちせん断箱貫入部の表面積である。式(A3)に式(A1)、式(A2)を代入して、式(A4)を得る。

$$\frac{1}{2\pi rL} \int_A \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix} dA \quad (A4)$$

式(A4)を計算し、式(A5)を得る。

$$\frac{1}{2\pi rL} \int_A (\sigma_1 \sin^2\theta + \sigma_3 \cos^2\theta) dA \quad (A5)$$

断面は半径 r の円であり、長さは L であることから、式(A6)を得る。

$$\frac{1}{2\pi rL} \int_0^{2\pi} (\sigma_1 + (\sigma_3 - \sigma_1) \cos^2\theta) L r d\theta \quad (A6)$$

式(A6)を計算し、式(1)を得る。

引用文献

- 阿部 裕, 北本幸義 (1990) : ジオグリッド補強盛土の挙動と安定解析, 土質工学会論文報告集, **30**(3), 185-196.
- 阿部和時 (1991) : 根系の引き抜き抵抗力によるせん断補強強度の推定, 日本緑化工学会誌, **16**(4), 37-45.
- 阿部和時, 黒川 潮, 竹内美次 (2004) : 間伐が森林の持つ表層崩壊防止機能に及ぼす評価手法の開発, 日本地すべり学会誌, **41**(3), 225-235.
- Berry, P.M., Sterling, M., Baker, C.J., Spink, J. and Sparkes, D.L. (2003) : A calibrated model of wheat lodging compared with field measurements, *Agr. Forest Meteorol.*, **119**, 167-180.
- Berry, P.M., Sterling, M., Spink, J.H., Baker, C.J., Sylvester-Bradley, R., Mooney, S.J., Tams, A.R. and Ennos, A.R. (2004) : Understanding and reducing Lodging in cereals, *Adv. Agron.*, **84**, 217-271.
- Docker, B.B. and Hubble, T.C.T. (2008) : Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species, *Geomorphology*, **100**(3-4), 401-418.
- Hejazi, S.M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S.M. and Zadhoush, A. (2012) : A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers, *Constr. Build. Mater.*, **30**, 100-116.
- IPCC (気候変動に関する政府間パネル) (2009) : IPCC 地球温暖化第四次レポート, 文部科学省, 経済産業省, 気象庁, 環境省訳, 中央法規, p.13.
- 地盤工学会「土質試験—基本と手引き—」改定編集 WG (2010) : 土質試験—基本と手引き— (第二回改訂版), 地盤工学会.
- 北原 曜 (2010) : 森林根系の崩壊防止機能, 水利科学, **311**, 11-37.
- 清田 隆, 相馬亮一, Munoz, H., 黒田哲也, 太田準一郎, 原田道幸, 龍岡文夫 (2009) : 盛土の引張り補強材としてのジオセルの引き抜き特性, ジオシンセティックス論文集, **24**, 75-82.
- Luo, S.Q., Tan, S.A. and Yong, K.Y. (2000) : Pull-out resistance mechanism of a soil nail reinforcement in dilative soils, *Soils Found.*, **40**(1), 47-56.
- 名越時秀, 田邊 猛 (2001) : 水稻の湛水土壌中条播直播栽培における株の押し倒し抵抗値と引き抜き抵抗値との関係, 東京農大農学集報, **46**(2), 88-93.
- 農業・食品産業技術総合研究機構 (2015) (参照 2015.5.12) : リーフスター, (オンライン), 入手先<<https://www.naro.affrc.go.jp/patent/breed/0100/0107/001579/index.html>>
- 大川泰一郎, 石原 邦 (1992) : 水稻の耐倒伏性に関与する稈の物理的性質の品種間差異, 日作紀, **61**(3), 419-425.
- 大川泰一郎, 石原 邦 (1997) : 水稻における稈基部の挫折強度形成の遺伝的特徴—コシヒカリと中国 117 号との交配 F₁~F₃を用いて—, 日作紀, **66**(4), 603-609.
- Tang, C.-S., Shi, B. and Zhao, L.-Z. (2010) : Interfacial shear strength of fiber reinforced soil, *Geotext. Geomembranes*, **28**, 54-62.

- Uesugi, M. and Kishida, H. (1986a) : Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel, *Soils Found.*, **26**(4), 139-149.
- Uesugi, M. and Kishida, H. (1986b) : Influential factors of friction between steel and dry sands, *Soils Found.*, **26**(2), 33-46.
- Wriggers, P. (2006) : *Computational contact mechanics, second edition*, Springer, 69-93.

Shear Tests and Modeling of Root-Soil Contact Interface by Using Novel Pullout Test

TOMOBE Haruka, FUJISAWA Kazunori and MURAKAMI Akira

Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, JAPAN

Abstract

Rooted soils can prevent plants from lodging by supporting the above-ground parts of the plants in cultivated land areas. They can also enhance the stability of natural slopes and soil structures. Understanding the fundamental mechanical behavior of the root-soil interface is necessary for predicting the behavior of rooted soils. To this end, an apparatus for measuring the shear strength on the root-soil interface was developed and applied to three combinations of root-soil materials, namely, steel-silica sand, balsa-silica sand, and barley root-paddy soil. The test results have revealed that the Coulomb criterion is well applicable to the interfacial shear strength in the above three combinations. The results are interpreted in terms of contact mechanics and the modeling of the interfacial shear behavior provides a constitutive equation to describe the relationship between the shear stress and the displacement on the root-soil interface.

Key words : Root-soil interface, Shear behavior, Pull-out tests, Rooted soil, Lodging, Slope stability, Contact mechanics