

ピークおよび残留状態に着目した砂と鋼材の摩擦特性

Internal friction of sand along steel surface up to an interfacial critical state

安福規之*・落合英俊**・賀来貴彦***

Noriyuki YASUFUKU, Hidetoshi OCHIAI and Takahiko KAKU

*正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**フェロー会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

***正会員 工修 関大林組

Friction between soil and construction materials is of major significance in soil-structure interaction problem including retaining structures, deep foundation, earth reinforcement and so on. The purpose of this study is to indicate a realistic view of interface shear mechanism between sand and solid surface over a wide shear deformation region from pre-peak to post-peak state. A ring shear apparatus was used to evaluate the interface behaviour between sand and steel up to an interfacial critical state. Glass beads and silica-based sand having a different mean particle size were sheared along the steels with various surface roughness at a given normal stress.

Key Words : internal friction angle, interaction between sand and steel, surface roughness, large deformation

1. はじめに

近年、杭の支持力評価に際し、性能規定型の設計法が注目されている。性能を規定するための変形量に着目した多段階設計法を考えると¹⁾、ピーク状態から残留状態に至る広範なせん断変形をカバーした地盤材料と構造材料の摩擦特性の把握は、支持力算定の精度を高める上で重要となる。例えば、杭の周面摩擦力を地盤材料と構造材料との異種材料間の境界面摩擦問題として捉えると、地盤材料と構造材料の摩擦特性の把握は、精度のよい支持力評価を行う上で大変重要である。異種材料間の相互作用に関する研究は、これまでに数多く行われてきており、多くの成果が報告されている^{2)~9)}。その中で、地盤材料と構造材料間での摩擦力の発現には、大きく二つのパターン、すなわち異種材料間の滑り摩擦によるものと境界面付近の地盤内滑り摩擦によるものの存在が知られている。このため、地盤内部のせん断特性と関係づけてその摩擦特性を把握することの大切さが指摘されている⁹⁾。

本研究では、杭の周面摩擦力など境界面摩擦問題を異種材料間の相互作用問題として捉え、ピーク状態から残留状態にいたるせん断変形に着目した砂と鋼材の摩擦特性について検討する。その中で、試料の平均粒径と鋼材の表面粗さに注目し、両者の相関関係を表す相対粗さがせん断変形に伴う摩擦特性を評価する上で有効であることを示す。なお、残留状態にいたる大きなせん断変形までの摩擦特性を把握することを目的とするため、原理的に無限大の変位

を与えることの可能なリングせん断型試験装置を試作し、用いている。

2. 摩擦特性に影響する要因の分類

図1に示すように、砂と鋼材の摩擦特性に及ぼす影響要因には、表面粗さや錆の状態などの「鋼材の特性」、粒径、粒子の堅さ、粒子形状などの「砂粒子の特性」、含水状態、密度、粒度分布などの「砂の状態」等、様々なものがあげられる。鋼材の表面粗さと材料の粒径は境界面付近の地盤の変形挙動や摩擦特性に密接に関係していると考えられる。また、この中で粒子の堅さは、鋼材の摩擦特性に影響を及ぼす材料の破碎性を評価する指標のひとつと考えられている¹⁰⁾。

本研究では、これらの影響要因の中で、特に試料の平均粒径、鋼材の表面粗さに着目して砂と鋼材の

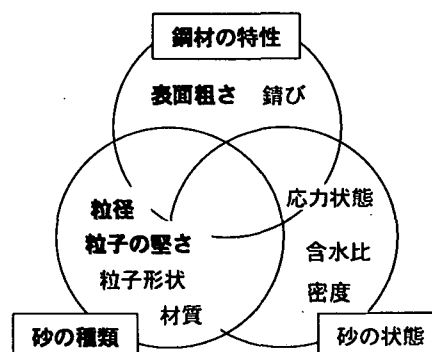


図-1 砂と鋼材の摩擦特性に影響する要因

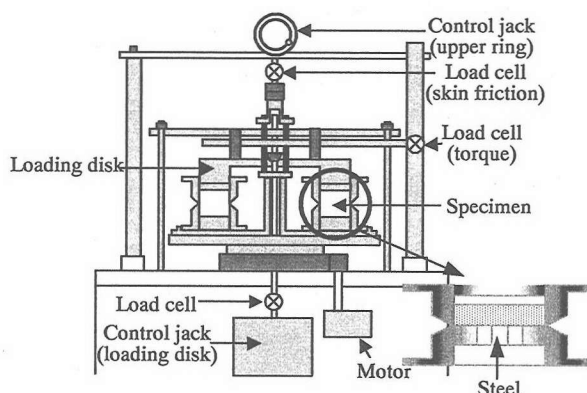


図2 リングせん断試験装置の概略図

摩擦特性の検討を行った。破碎性の違いが摩擦特性に及ぼす影響についてはここでは触れない。

3. リングせん断試験の概要

3. 1 装置の概要

本研究では、原理的には、連続したせん断面に無限大のせん断変位を与えることができ、大変形までの摩擦特性の把握に適しているリングせん断型試験装置を用いて、砂と鋼材の摩擦試験を行った。図-2にリングせん断型試験装置の概略図を示す。

鉛直圧は载荷盤コントロールジャッキにより制御された载荷圧が载荷盤を介し、供試体に負荷されるシステムとなっている。ダイレイタンシーなどにより発生する供試体とリングとの摩擦力は周面摩擦用ロードセル(図中：Load cell(skin friction))で計測されるので、それらの差によってせん断面に作用する垂直応力を算定することができる。上部リングがトルク用ロードセル(図中：Load cell(torque))に固定されていて、せん断力は下部リングの回転により発揮される。回転は変位制御で、正転・逆転が可能である。半径方向に応力分布が一様と仮定すると、トルク力 T より平均的なせん断応力 τ は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (1)$$

ここで、 r_o ：供試体外径、 r_i ：供試体内径である。供試体寸法は、リングの周面摩擦の影響や半径方向のひずみの不均一性をできるだけ軽減できるように、外径 300mm、内径 200mm、高さ 40mm とした。せん断中のダイレイタンシー変化は、垂直変位計を用いて载荷盤の高さの変化を計測することにより検出された。

3. 2 試験方法

(1) 用いた試料

表 1 豊浦砂の物理的性質

	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	D_{50} (mm)	U_c	σ_{sf} (MPa)
Toyoura sand	2.64	0.99	0.606	0.16	1.6	100

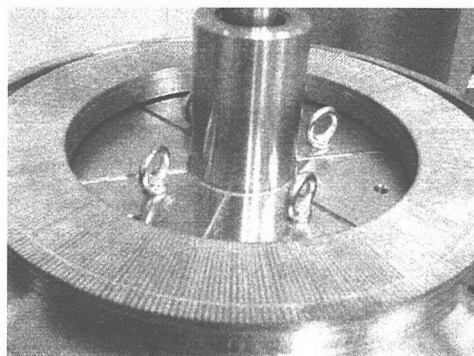


図3 溝を入れた鋼材の写真

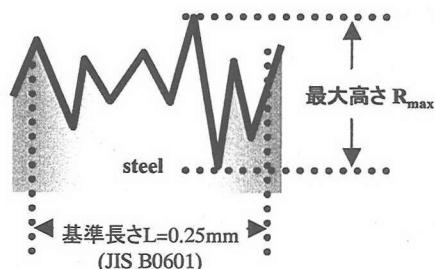


図4 表面粗さの評価法

本研究では、豊浦砂とガラスビーズを用いた。豊浦砂は山口県豊浦郡で採取されたもので、わが国におけるシリカ系の標準的な砂として知られている。主に、石英、長石から構成される。また、化学的に安定で硬度 6~7 と非常に硬い結晶構造をもち、角張の少ない粒子形状のため、10MPa を超えるような応力下でなければ顕著な粒子破碎は生じない¹¹⁾。表 1 に、豊浦砂の物理的性質を示す。表中の σ_{sf} は、平均粒径 D_{50} の単粒子破碎強度の平均値を与えており、実験に用いた豊浦砂の場合、 $\sigma_{sf} \approx 100\text{MPa}$ である。

ガラスビーズは、粒子形状が球形の人工材料である。摩擦特性に及ぼす平均粒径の影響を検討するため、ガラスビーズを粒度調整し、粒度分布が相似で平均粒径のみが異なる試料を作成した。用いたガラスビーズは、いずれも均等係数 $U_c=1.5$ とし、平均粒径 D_{50} は小さい順から 0.17, 0.31, 0.57mm とした。なお、平均粒径 0.57mm の単粒子破碎強度は概ね 600MPa である。

(2) 試験条件および手順

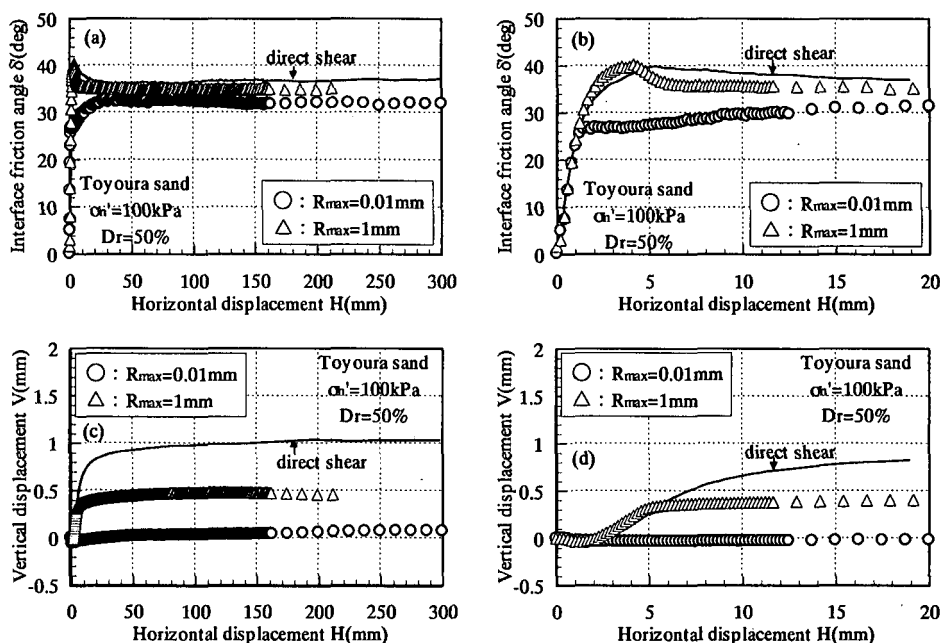


図5 豊浦砂と鋼材の摩擦試験における代表的な摩擦角—鉛直変位—水平変位関係 (Dr=50%の場合)

試験条件は、供試体中心半径 250mm における変位速度を 3.0mm/min, 上下リング間の隙間を 0.15mm とし、隙間からの試料漏れを防ぐためにリング内周に Skirt を設けた。Skirt は厚さ 0.1mm の OHP フィルムをメンディングテープで上部リングに固定したものである。なお、0.15mm の隙間は上部リングを押し上げることにより保たれた。砂と鋼材の摩擦試験では、せん断箱の下半分に厚さ 20mm の鋼材を設置して実験を行った。図3はその様子を示した写真である。鋼材は、機械工作用機械によってせん断方向に垂直に溝をいれたもので、その表面粗さは JIS B0601 に基づき、基準長さ $L=0.25\text{mm}$ における最大高さ $R_{\max}$ を用いて評価する(図4参照)。本研究で用いた鋼材は $R_{\max}=0.01, 0.1, 0.25, 0.5, 1\text{mm}$ に調節したものである。試験は垂直応力 $\sigma'_n=100\text{kPa}$ を主体とし、50-300kPa の範囲で実施された。また相対密度 Dr は、 $Dr=50\%$ を主体とし、20%-80%の範囲とした。

4. 砂と鋼材の摩擦挙動

4.1 摩擦角—鉛直変位—水平変位関係

図5(a)-(d)は、 $\sigma'_n=100\text{kPa}$, $Dr=50\%$ の条件下での豊浦砂と鋼材の摩擦試験結果における摩擦角 δ' —鉛直変位 V —水平変位 H 関係を示したものである。ここで、摩擦角 δ はクーロンの摩擦則 ($\tau=\sigma'_n \tan \delta'$) に基づき次式で求めている。

$$\delta' = \tan^{-1}(\tau/\sigma'_n) \cdots \cdots (2)$$

ここに、 τ : せん断応力、 σ'_n : 垂直応力である。

また、定圧試験における鉛直変位 V の挙動は、体積変化に対応している。図(a), (b)は摩擦角 δ' —水平変位 H 関係を、図(c), (d)は鉛直変位 V —水平変位 H 関係を示しており、図(b), (d)はそれぞれ図(a), (c)のせん断変位 $H=20\text{mm}$ までを拡大した図である。図中の○は表面粗さ $R_{\max}=0.01\text{mm}$ の滑らかな鋼材を用いた場合、△は表面粗さ $R_{\max}=1\text{mm}$ の粗い鋼材を用いた場合のプロットである。また、地盤材料と構造材料間での摩擦力が発現するには、材料間の滑り摩擦による物と地盤内滑り摩擦によるものがあることが知られており、砂と鋼材の摩擦特性は砂のせん断特性と関係づけて検討する必要がある。そのため、豊浦砂のせん断試験結果におけるせん断抵抗角 ϕ' —鉛直変位 V —水平変位 H 関係も図中に黒線で示している。ここで、砂のせん断抵抗角 ϕ' はクーロンの破壊規準 ($\tau=\sigma'_n \tan \phi'$) より求めている。

滑らかな鋼材 ($R_{\max}=0.01\text{mm}$) を用いた場合の摩擦角 δ' の挙動は、せん断初期に線形的に増加し、せん断変位 $H=1\sim 2\text{mm}$ 程度で折れ曲がり示した後、徐々に増加して一定の値に収束する。折れ曲がりまでの摩擦角 δ' の増加する傾きは、砂のせん断挙動におけるせん断抵抗角 ϕ' の発現される挙動とほぼ同じである。このことから、摩擦角 δ' が折れ曲がり示すまでの変位は砂のせん断変形によるもので、折れ曲がり示す変位で砂と鋼材の境界面で滑りが生じたと考えられる。また、鉛直変位 V の挙動を見ると、滑らかな鋼材を用いた場合は、砂のせん断や粗い鋼材を用いた場合に比べてほとんど変化していないことが分かる。粗い鋼材 ($R_{\max}=1\text{mm}$) を用いた場合の摩

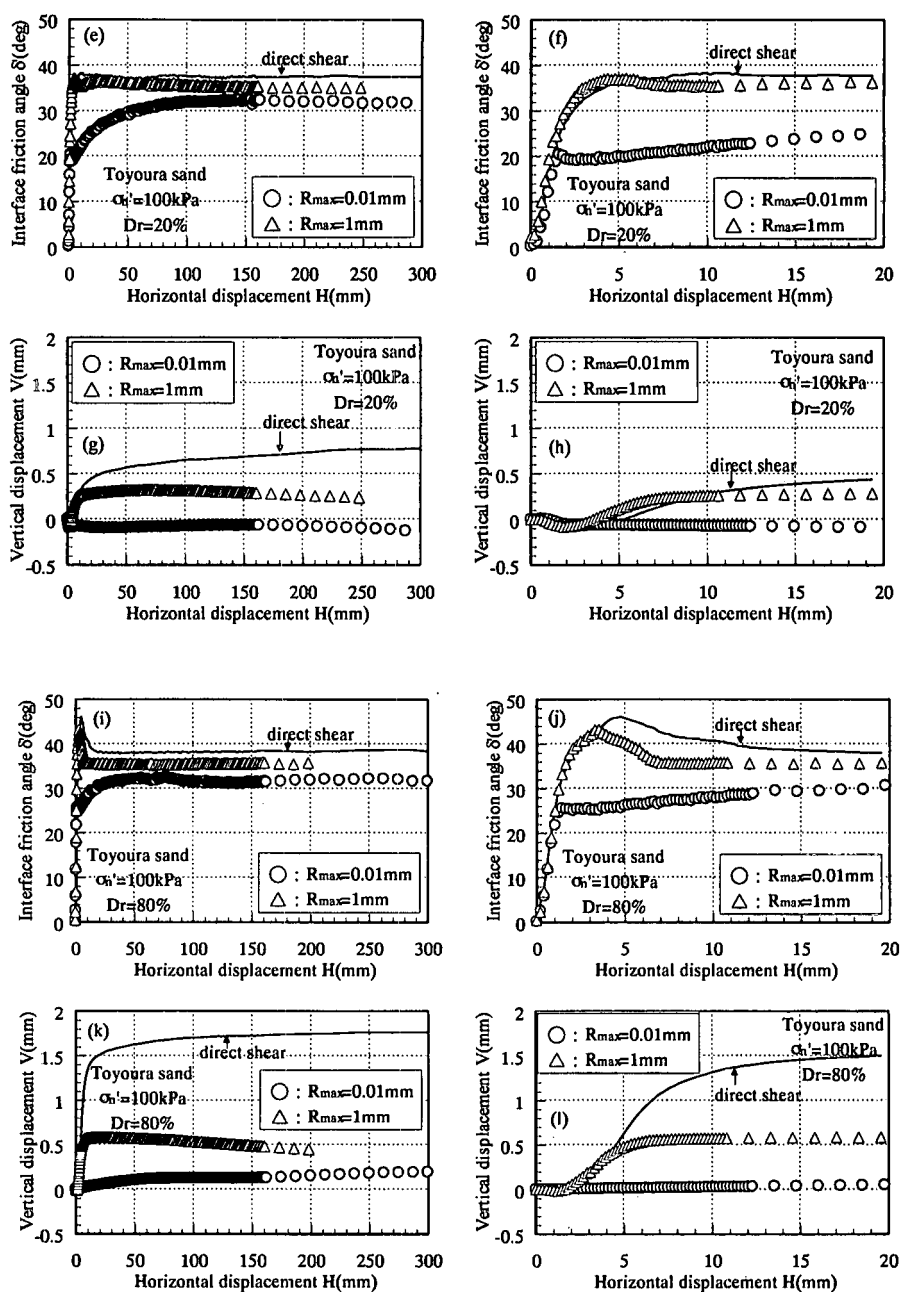


図6 豊浦砂と鋼材の摩擦試験における代表的な摩擦角—鉛直変位—水平変位関係 (Dr=20% と 80%の場合)

摩擦角 δ の挙動は、せん断初期に線形的に増加し最大値を示した後、軟化して一定の値に残留している。この挙動は、砂のせん断試験結果におけるせん断抵抗角 ϕ' の挙動と類似している。一方、鉛直変位 V の挙動を見ると、せん断初期に若干体積圧縮した後大きく膨張し、その後ほぼ一定となっている。この粗い鋼材を用いた場合の体積変化の挙動も、砂のせん断試験結果における体積変化の挙動と少なくとも δ が最大値を示す水平変位までは類似している。また、最終的な鉛直変位 V は、砂のせん断試験における最大の鉛直変位 V の1/2程度であった。これは、供試体の肉厚が半分であることが大きな要因であると考えられる。図(b), (d)を対応させてみると、摩擦角が

最大値を示す点辺りで、鉛直変位の傾きが最も急になっていることも分かる。

また、同様の試験を相対密度20%と80%の豊浦砂についても行っているが、図6の結果からもわかるように鋼材の粗さに着目した摩擦特性については相対密度50%の結果と同様の傾向にあることが確認できる。

4. 2すべりのメカニズムに関する考察

図7は、図5における、滑らかな鋼材を用いた場合の砂と鋼材の摩擦試験結果を模式的にまとめたものである。せん断初期の摩擦角の挙動が折れ曲がりを示す点を H_y とすると、せん断開始から H_y までの

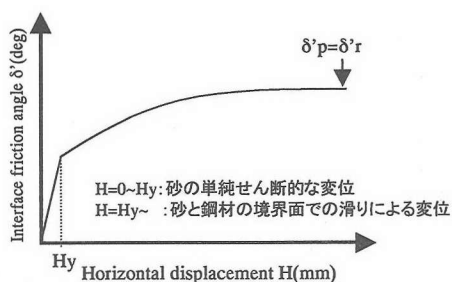


図 7 滑らかな鋼材を用いた場合の摩擦角—水平関係の概念図

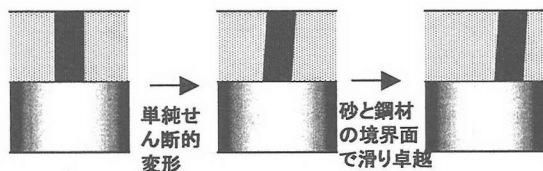


図 8 砂と滑らかな鋼材の接触面近傍の模式図

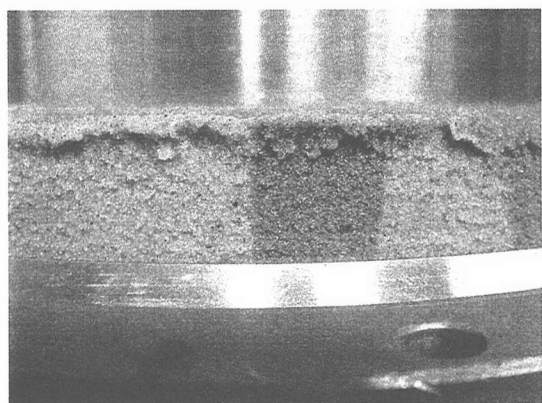


写真 1 水平変位 100mm での境界面の様子 (滑らかな鋼材の場合)

変位は、砂のせん断変形によるものであり、 H_y で砂と鋼材の境界面で明確な滑りが生じはじめると考えられる。最大の摩擦角を δ'_p 、残留時の摩擦角を δ'_r とすると、滑らかな鋼材を用いた場合は、大変形時における残留状態で、最大の摩擦角を示すことから、 $\delta'_p = \delta'_r$ となる。図 8 は、滑らかな鋼材を用いた場合の、砂と鋼材の摩擦面状態を表した模式図である。また、写真 1 は、色砂を用いて行った豊浦砂と滑らかな鋼材の摩擦試験における、水平変位 $H=100\text{mm}$ での境界面の様子を写したものである。この写真において、境界面近傍の地盤内にすべり面は見られない。このことは、先に言及したように滑らかな鋼材を用いた場合、砂と鋼材の境界面でのすべりが支配的であることを表していると思われる。

図 9 は、図 5 における、粗い鋼材を用いた場合の砂と鋼材の摩擦試験結果を模式的にまとめたものである。最大の摩擦角を δ'_p 、そのときの変位を H_p 、残

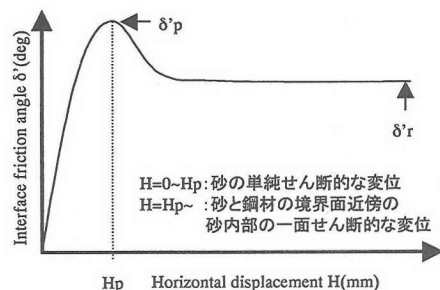


図 9 粗い鋼材を用いた場合の摩擦角—水平関係の概念図

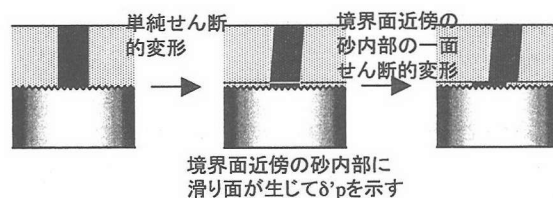


図 10 砂と粗い鋼材の接触面近傍の模式図

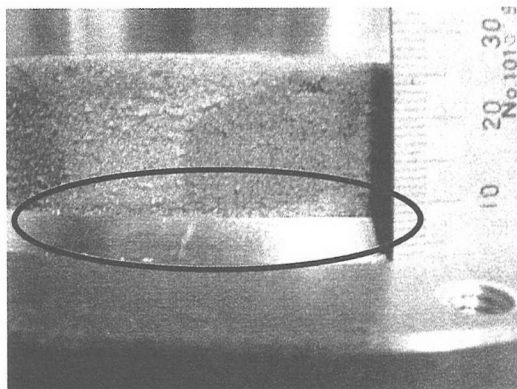


写真 2 水平変位 100mm での境界面の様子 (粗い鋼材の場合)

留時の摩擦角を δ'_r とすると、せん断開始から H_p までの砂内部の変形は、単純せん断的であり、 H_p で砂と鋼材の境界面近傍の砂内部にせん断面が生じ、その後は砂内部で一面せん断的な変位が卓越するものと思われる。図 10 に、粗い鋼材を用いた場合の、砂と鋼材の摩擦面の状態を表した模式図を示す。写真 2 は色砂を用いて行った豊浦砂と粗い鋼材の摩擦試験における、水平変位 $H=100\text{mm}$ での境界面の様子を写したものである。図 10 で示したような、境界面近傍の地盤内部にすべり面が生じていることが確認できる。

以上の結果から、相対的に表面が粗い鋼材を用いた場合の摩擦角 δ' の発現には砂内部でのダイレイタシー挙動が深くかかわっており、これは、鉛直変位 V -水平変位 H 関係における傾きが最も急になる変位で、最大摩擦角 δ'_p をむかえていることから想定できる。

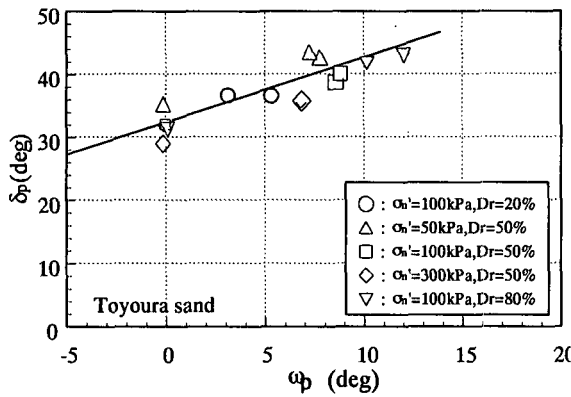


図 11 最大摩擦角 δ'_p とダイレイタンシー角 ω'_p との関係

図 11 は、豊浦砂と鋼材の摩擦試験結果における最大摩擦角 δ'_p と、その時のダイレイタンシー角 ω'_p との関係を示したものである。ここで、ダイレイタンシー角は次式より求めている。

$$\omega'_p = \tan^{-1}(dV/dH)$$

この図より、最大摩擦角 δ'_p は、試験条件の違いにかかわらずダイレイタンシー角 ω'_p と一義的な関係にあることが知れる。このことは、砂と鋼材の摩擦試験における δ'_p と ω'_p の関係においても、通常の砂のせん断におけるダイレイタンシー特性に関する一般的な考え方が同様に適用可能であることを示す。

4. 3 摩擦角に及ぼす相対密度の影響

図 12 は、最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r に着目して、それぞれの値と試料の相対密度 Dr との関係を示したものである。図(a)は、相対的に滑らかな鋼材 ($R_{max}=0.01mm$) を用いた場合の結果である。ここでは、最大摩擦角 δ'_p と残留摩擦角 δ'_r は等しい値を示すため、両点をあわせて白丸 (○) で示している。滑らかな鋼材を用いた場合、最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r は、相対密度 Dr によらず一定の値を示している。図(b)は、相対的に粗い鋼材 ($R_{max}=1mm$) を用いた場合の結果である。最大摩擦角 δ'_p を白丸 (○) で、残留摩擦角 δ'_r を黒丸 (●) で示している。この図より、最大摩擦角 δ'_p は相対密度 Dr が小さいときほど、小さな値を示しており、すべり面の接触が切れやすいことを示唆する。一方、残留摩擦角 δ'_r は、相対密度 Dr によらず一定値を示す。また、この特性は R_{max} に依存しない傾向を示している。

5. 摩擦角に及ぼす平均粒径と表面粗さの影響

地盤材料と構造材料の摩擦には、地盤の特性と構造材料の特性が相互に関係していると考えられる。

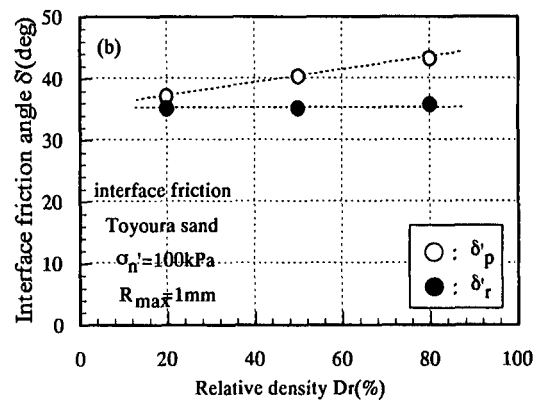
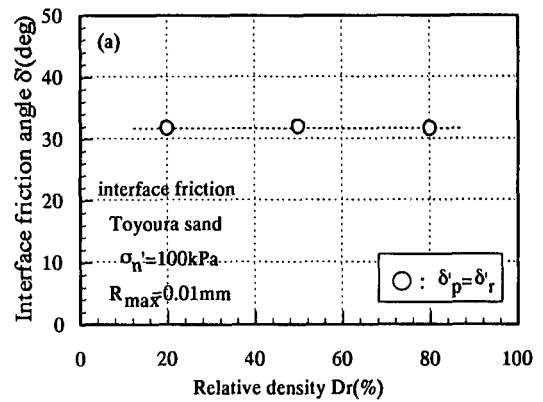


図 12 最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r と相対密度 Dr との関係 (豊浦砂の場合)

ここでは、地盤材料の特性として平均粒径、鋼材の特性として表面粗さに着目し、それぞれが摩擦特性に及ぼす影響について検討した。

5. 1 摩擦角に及ぼす平均粒径の影響

摩擦角に及ぼす、砂の平均粒径の影響を検討するため、粒度調整したガラスビーズを用いて鋼材との摩擦試験を行った。

図 13 は、ガラスビーズと鋼材の摩擦試験から最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r を求め、それぞれの値と試料の平均粒径 D_{50} の関係を示したものである。なお、いずれの試験結果も垂直応力は 100kPa、 $Dr=50\%$ の条件のものである。図(a)は、相対的に滑らかな鋼材 ($R_{max}=0.01mm$) を用いた場合の結果である。ここでは、最大摩擦角 δ'_p と残留摩擦角 δ'_r は等しい値を示すため、両点をあわせて白丸 (○) で示している。滑らかな鋼材 ($R_{max}=0.01mm$) を用いた場合、平均粒径 D_{50} が大きいときほど、最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r は小さな値を示す傾向が伺える。これは、土粒子の材質と粒度分布が同じであれば、 D_{50} が大きくなる程、すべりやすくなることを示す。図(b)は、相対的に粗い鋼材 ($R_{max}=0.5mm$) を用いた場合の結果である。最大摩擦角 δ'_p を白丸 (○) で、残留摩擦角 δ'_r を黒丸 (●) で示している。この図より、最大摩擦角 δ'_p は相対密度 Dr が小さいときほど、小さな値を示しており、すべり面の接触が切れやすいことを示唆する。一方、残留摩擦角 δ'_r は、相対密度 Dr によらず一定値を示す。また、この特性は R_{max} に依存しない傾向を示している。

角 δ_r を黒丸（●）で示しているが、この場合 D_{50} の影響の現れ方が異なっている。これらの図から、 δ_p および δ_r と平均粒径の関係に鋼材の表面粗さが深くかかわっていることが読みとれる。

5. 2 摩擦角に及ぼす鋼材表面粗さの影響

図 14 は、 $\sigma'_n=100\text{kPa}$ 、 $Dr=50\%$ における豊浦砂と鋼材の摩擦試験結果、図 15 は、 $\sigma'_n=100\text{kPa}$ 、 $Dr=50\%$ におけるガラスビーズと鋼材の摩擦試験結果における摩擦角と鋼材の表面粗さ R_{max} の関係を示したものである。各図には、最大摩擦角 δ'_p を白丸（○）で、残留摩擦角 δ'_r を黒丸（●）で示している。なお、 δ'_p と δ'_r が一致する場合には、黒丸で表現している。いずれの条件においても、鋼材の表面が相対的に粗になるほど、最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r ともに増加し、ある値に収束する傾向を示す。これから、砂と鋼材の摩擦角には、鋼材の表面粗さ R_{max} が強く影響していると判断される。

5. 3 相対粗さに着目した砂と鋼材の摩擦角特性

砂と鋼材の摩擦特性には、試料の平均粒径 D_{50} と鋼材の表面粗さ R_{max} が密接にかかわっており、平均粒径 D_{50} と表面粗さ R_{max} の相互関係を表す指標として相対粗さ R_{max}/D_{50} が定義され、その有効性が確認されてきている⁶⁾。ここでも、相対粗さ R_{max}/D_{50} に

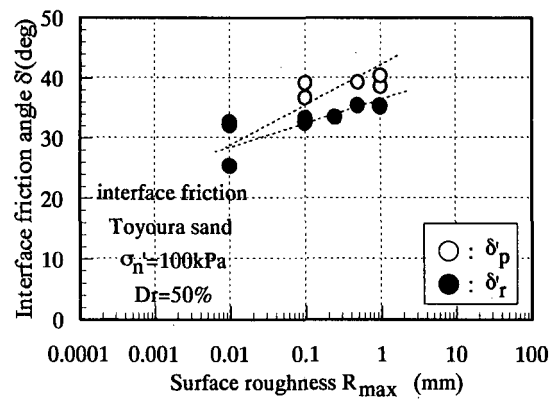


図 14 最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r と表面粗さの関係（豊浦砂のケース）

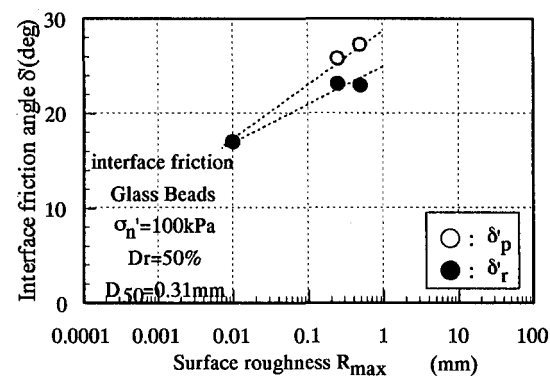


図 15 最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r と表面粗さの関係（ガラスビーズのケース）

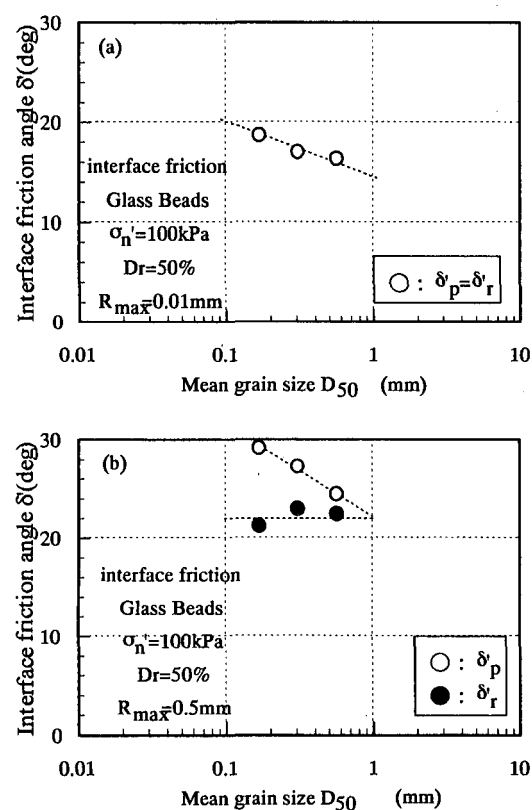


図 13 最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r と平均粒径との関係（ガラスビーズのケース）

着目した砂と鋼材の摩擦特性について言及するが、残留時とピーク時の特性を比較しながら、摩擦特性に関する考察を加えた例は少ない。

(1) 摩擦角 δ' —相対粗さ R_{max}/D_{50} 特性

図 16 は、豊浦砂と鋼材の摩擦試験における、摩擦角 δ' と相対粗さ R_{max}/D_{50} の関係を示したものである。最大摩擦角 δ'_p を白丸（○）で、残留摩擦角 δ'_r を黒丸（●）で示している。相対粗さが 0.01~1 の範囲において、相対粗さが大きくなるとともに、最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r はいずれも徐々に大きな値を示す。この領域を遷移的な相対粗さの領域と呼ぶこととする。相対粗さが 1 以上では、最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r ともにほぼ一定の値を示す。この領域は相対的に十分に粗い、粗な状態と見ることができる。

図 17 は、ガラスビーズと鋼材の摩擦試験における、摩擦角 δ' と相対粗さ R_{max}/D_{50} の関係を示したものである。ガラスビーズを用いた場合においても、豊浦砂の場合と同様の傾向が得られており、 R_{max}/D_{50} が広範なせん断変形領域で砂と鋼材の摩擦角を評価する上でも、有効であることを示す。

(2) δ'_p/ϕ' —相対粗さ特性

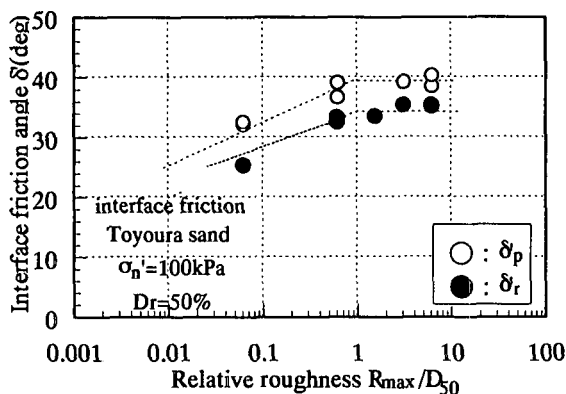


図 16 最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r と相対粗さの関係（豊浦砂のケース）

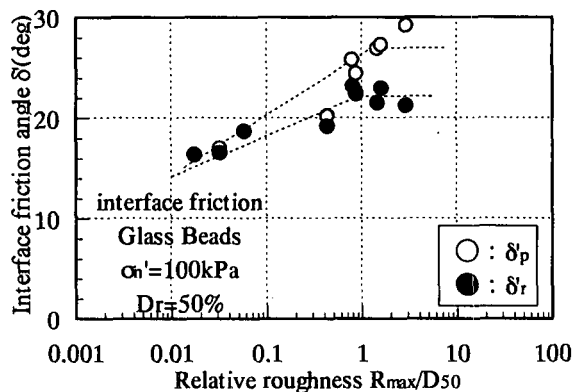


図 17 最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r と相対粗さの関係（ガラスビーズのケース）

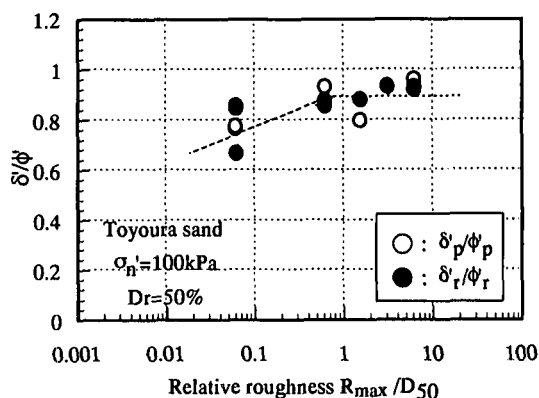


図 18 δ'/ϕ' と相対粗さ R_{max}/D_{50} の関係（豊浦砂のケース）

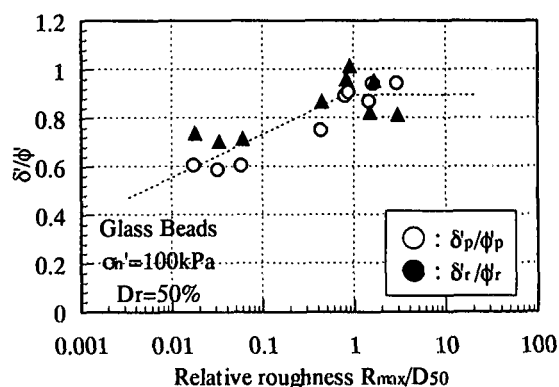


図 19 δ'/ϕ' と相対粗さ R_{max}/D_{50} の関係（ガラスビーズのケース）

図 18 と図 19 は、砂と鋼材の摩擦試験より得られた摩擦角 δ' と砂のせん断試験から得られたせん断抵抗角 ϕ' との比、 δ'/ϕ' と相対粗さ R_{max}/D_{50} の関係を示したものである。最大摩擦角 δ'_p と最大せん断抵抗角 ϕ'_p の比、 δ'_p/ϕ'_p を白丸 (○) で、残留摩擦角 δ'_r と残留せん断抵抗角 ϕ'_r の比、 δ'_r/ϕ'_r を黒丸 (●) で示している。図 18 は豊浦砂を用いた結果、図 19 はガラスビーズを用いた結果である。相対粗さが 0.01~1 の範囲において、相対粗さが大きいときほど δ'/ϕ' は大きな値を示している。相対粗さが 1 以上では、 δ'/ϕ' はほぼ一定の値を示しており、その大きさは 0.9~1.0 程度である。この挙動は、最大時 (δ'_p/ϕ'_p)、残留時 (δ'_r/ϕ'_r) とともに共通しており、ある相対粗さにおけるそれらの大きさに、最大時 (δ'_p/ϕ'_p)、残留時 (δ'_r/ϕ'_r) の違いは顕著には見られない。また、 δ'/ϕ' と相対粗さ R_{max}/D_{50} の関係に、豊浦砂とガラスビーズの材料による違いも見られない。

以上のことから、相対粗さ R_{max}/D_{50} に着目した広範なせん断変形領域における砂と鋼材の摩擦角の発現メカニズムとして次のことが考えられる。つまり、 R_{max}/D_{50} が 0.01 から 1 へと大きくなると共に、砂と鋼材の境界面での純粋なすべりから、境界面近傍に

おける砂内部のせん断によるすべりへと徐々に移行し、相対粗さ R_{max}/D_{50} が 1 を越えると、言い換えると最大表面粗さが平均粒径以上になると、砂と鋼材のすべりよりも砂内部でのせん断によるすべりが支配的になるものと考察される。

6. まとめ

本研究では、粒子破碎の影響を取り除くためにシリカ系の砂と粒度調整したガラスビーズを用いて鋼材との摩擦（相互作用）特性を定圧条件でのリングせん断試験を通して検討した。主要な結果をまとめると以下のようなものである。

1) 砂と鋼材の摩擦特性には鋼材の表面粗さと試料の平均粒径が相互に影響していることを示すと共に、双方の特性を取り入れた上杉らの提案する相対粗さ R_{max}/D_{50} が、降伏時から残留状態に至るまでの広範なせん断変形に着目した摩擦特性を評価する上で有効であることを確認した。

2) 砂と鋼材の摩擦の発現メカニズムの特徴的なものとして、境界面近傍での地盤内部でのせん断変形

が卓越する場合と砂と鋼材の境界面でのすべりが卓越する場合が観察された。また、その境界値が概ね $R_{\max}/D_{50}=1.0$ であることを示した。

3) $R_{\max}/D_{50}>1.0$ の相対的に表面が粗い鋼材を用いた場合、最大摩擦角 δ'_p は相対密度すなわちダイレイタンシー挙動の違いが影響しており、相対密度が大きい時ほど最大摩擦角 δ'_p は大きな値を示した。また、残留状態の摩擦角 δ'_r は、相対密度によらず一定の値を示した。これらの特性は、摩擦角とダイレイタンシー角の一義的な関係により連続的に解釈できることを述べた。

4) 相対粗さ $R_{\max}/D_{50}$ が大きい時ほど摩擦角 δ' は大きくなり、 $R_{\max}/D_{50}=1$ 程度、つまり最大表面粗さが平均粒径以上になると摩擦角 δ' は一定となる。この場合、最大摩擦角 δ'_p 、残留摩擦角 δ'_r は、それぞれ最大せん断抵抗角 ϕ'_p 、 ϕ'_r とほぼ等しいか若干小さな値を示した。

参考文献

- 1) 日下部治：基礎構造物設計法の変遷に思う，土と基礎，Vol.48，No.9，pp.1-3，2000.
- 2) Potyondy, J.G. : Skin Friction Between Various Soils and Construction Materials, Geotechnique, Vol.11, pp.339-353, 1961.
- 3) Yoshimi, Y. and Kishida, H. : Friction Between Sand and Metal Surface, Proc. of 8th ICSMFE, Vol.1, pp.831-834, 1981.
- 4) Yoshimi, Y. and Kishida, H. : A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces, Geot. Test. J., Vol.4, pp.145-152, 1981.
- 5) 岸田英明，上杉守道：高圧下における砂－鋼材間の摩擦と粒子破碎，土と基礎，Vol.32，No.2，pp.51-56，1984.
- 6) Uesugi, M. and Kishida, H. : Frictional Resistance at Yield between Dry Sand and Mild Steel, Soils and Foundations, Vol.26, No.4, pp.139-149, 1986.
- 7) 田中邦博，安福規之，村田秀一，兵動正幸：カーボネイト砂の力学特性とその砂中の杭の周面摩擦特性，土木学会論文集，No.523，III-32，pp.99-109，1995.
- 8) 前田健一，水野大輔，松岡 元：粒状材料と表面粗さの異なる基礎との摩擦特性，第34回地盤工学研究発表会講演集，pp.457-458，1999.
- 9) 安福規之，落合英俊，前田良刀：限界状態摩擦角に着目した場所打ち杭の周面摩擦力算定法，土木学会論文集 No.617，pp.89-100，1999.
- 10) N.Yasufuku and J.M.Kwag : Significance of soil particle fragmentation strength related to soil crushability, Proc. of 11th Asian Regional. Conference, on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.1, pp.149-152, 1999.
- 11) 三浦哲彦，山内豊聡：砂のせん断特性に及ぼす

粒子破碎の影響，土木学会論文集，No.260，pp.109-118，1977.

(2003年4月18日受付)