

琉球大学学術リポジトリ

砂と鋼材の摩擦特性に及ぼす粒径と粗度の影響

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-13 キーワード (Ja): 砂, 杭, 摩擦, 粒径, 粗度 キーワード (En): sand, pile, friction, particle size, roughness 作成者: 新城, 俊也, 小宮, 康明, 永吉, 功治, 国吉, 真文 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/3572

砂と鋼材の摩擦特性に及ぼす粒径と粗度の影響

新城俊也^{1*}, 小宮康明¹, 永吉功治², 国吉真文¹

¹琉球大学農学部生産環境学科, ²鹿児島大学大学院連合農学研究科

Effects of Particle Size and Roughness on Interface Behavior of Sand and Steel

Toshiya SHINJO^{1*}, Yasuaki KOMIYA¹, Koji NAGAYOSHI² and Masafumi KUNYOSHI¹

¹Department of Environmental Sciences and Technology, Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus,

²Graduate student, The United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University

Abstract: In this paper the relationship between particle size and roughness of steel was examined in order to clarify the sand - steel interface behavior. The friction tests were carried out on steel plates and glass beads. It was found that R_{\max}/D_{50} , a ratio of particle size (D_{50}) and roughness (R_{\max}) of steel, had significant influence on the friction angle of steel-glass bead. Friction angle increases in the increasing R_{\max}/D_{50} and is remained to constant value in the range of $R_{\max}/D_{50} > 0.4$. Friction angle of sand-steel in the range of $R_{\max}/D_{50} > 0.4$ coincides with the internal friction angle of sand in critical state.

キーワード：砂, 杭, 摩擦, 粒径, 粗度

Key words: sand, pile, friction, particle size, roughness

緒 言

杭の支持力を求めるためには、杭の先端支持力だけでなく杭の周面摩擦力についても把握することが重要である。杭の周面摩擦力を適切に評価するためには、土と杭材との摩擦特性を明らかにする必要がある。

土と鋼材との摩擦特性は土の種類や鋼材の表面粗さなど土と鋼材との接触面の状態に大きく影響され、粒子形状が角張るほどあるいは鋼材の表面粗さが粗くなるほど土と鋼材との摩擦係数は増加する¹⁾。一方、土と鋼材の摩擦角は土の内部摩擦角を上回ることはなく²⁾、その上限値はピーク時の内部摩擦角あるいは限界状態の内部摩擦角とされている³⁾⁴⁾。また、土と鋼材との摩擦係数は、鋼材の表面粗さと土の粒径の比に関係することが示されている⁵⁾。

本研究では、砂と鋼材との摩擦挙動に及ぼす砂粒子の粒径および鋼材の表面粗さの影響を明らかにするために、ガラスビーズを用いて粒径と鋼材の表面粗さを変えて摩擦試験を行った。ガラスビーズは、ほぼ球状に近い単一粒径のものを数種類選び、それらと数種類の鋼材の表面粗さの関係から摩擦係数に及ぼす粒径と粗度の関係を検討した。

実験装置

実験には、下せん断箱固定、上せん断箱可動タイプの三笠

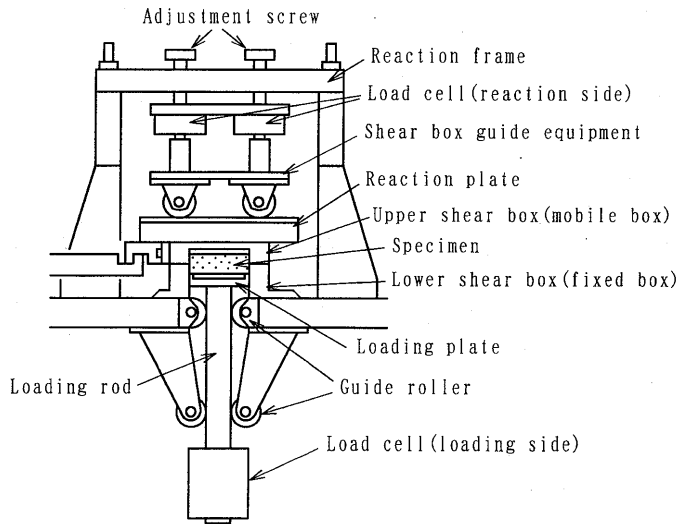
式一面せん断試験装置を用いた。この試験装置では、下せん断箱内壁と供試体との間に摩擦力が発生するために、せん断面に作用する垂直応力を精度良く測定することが困難であることから、本研究では、Fig.1-a に示すように一面せん断試験装置のローラー付き上せん断箱ガイド装置と上方反力枠との間にロードセルを設置し、ロードセルの値からせん断面上での垂直応力を直接的に測定できるように改良した。せん断面上の垂直応力はロードセルから検出された反力に、上せん断箱、反力板およびガイド装置の総重量を加算し、それらの値から決定した。なお、反力測定用ロードセルは上せん断箱ガイド装置の前後のローラーの位置にそれぞれ1個ずつ設置することで、せん断中の上せん断箱の回転を最小限に抑えた。鋼材との摩擦試験では、Fig.1-b に示すように、上せん断箱の代わりに表面粗さの異なる鋼材を取り付けてある⁶⁾。

実験方法

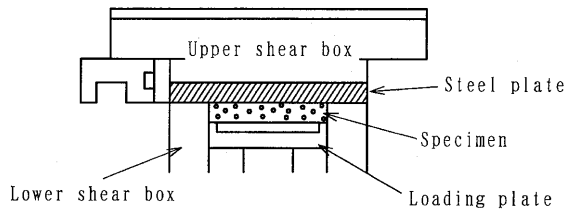
1. 試料および鋼材

ガラスビーズは、5段階の異なる粒度のものを用いており、それらの平均粒径は $D_{50}=0.07\text{mm}$, 0.16mm , 0.2mm , 0.4mm , 0.6mm である。また、豊浦砂についても粒径と粗度の関係を調べた。豊浦砂の平均粒径 D_{50} は 0.17mm である。ガラスビーズと豊浦砂の物理的性質と粒度分布をTable 1とFig.2に示す。

*Corresponding author (E-mail:shinjot@agr.u-ryukyu.ac.jp)



a) Improve loading system



b) Set up steel for friction test

Fig. 1. Direct shear box apparatus.

Table 1. Physical properties of samples.

Sample	Glass bead					Toyoura sand
	①	②	③	④	⑤	
Mean grain size D_{50} (mm)	0.07	0.16	0.2	0.4	0.6	0.17
Density of soil particles ρ_s (g/cm ³)			2.49			2.64
Maximum void ratio e_{max}	0.84	0.78	0.77	0.75	0.75	0.98
Minimum void ratio e_{min}	0.61	0.58	0.58	0.58	0.58	0.60

鋼材は、長さ100mm、幅80mm、厚さ10mmのステンレス鋼である。ここでは、鋼材の表面粗さは基準長さ0.8mmにおける凹凸の最大高さ R_{max} (JIS B 0601-1982)で評価した。使用した鋼材の表面は、ブラストにより $R_{max}=5\mu m$ から $100\mu m$ の範囲で10段階に粗面加工を施してある。

2. 試験方法

ガラスビーズと豊浦砂のせん断特性を調べるために、5種類のガラスビーズおよび豊浦砂について一面せん断試験を実施した。供試体の寸法は、直径6cm、高さ2cmである。ガラスビーズに対しては、供試体の相対密度 Dr が約70%になるように、乾燥状態で空中落下法($D_{50}=0.6, 0.4mm$)あるいはタッピング法($D_{50}=0.2, 0.16, 0.07mm$)により下せん断箱に詰めた。豊浦砂に対しては、供試体の相対密度が $Dr=50$

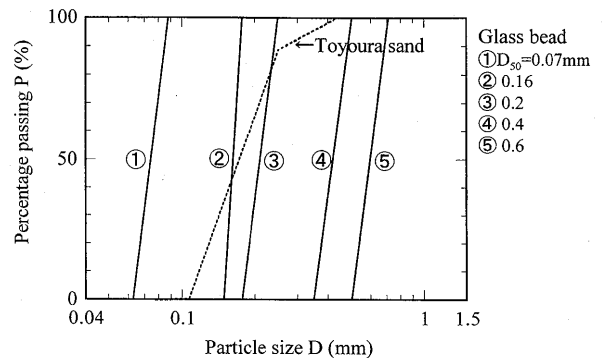


Fig. 2. Grading curves of samples.

%程度になるように乾燥状態でタッピング法により下せん断箱に詰めた。なお、豊浦砂では供試体作成後下せん断箱の下方から水を注入して湿潤させた。

鋼材との摩擦試験は、せん断試験と同じ5種類のガラスビーズと豊浦砂についてそれぞれの粗度に対して実施した。供試体の寸法は、直径6cm、高さ1cmで、供試体の作成方法はせん断試験と同じである。

せん断試験および摩擦試験は、せん断面上の垂直応力を一定に保つ定圧試験を実施した。作用させた垂直応力 σ_N は、ガラスビーズに対しては $\sigma_N=100kPa$ 、豊浦砂に対しては

$\sigma_N=300\text{kPa}$ である。両試験とも所定の垂直応力で5分ほど圧密させた後、せん断箱の間隙あるいは鋼材と下せん断箱との隙間は、各々の試料の平均粒径 D_{50} を考慮して0.1mm から0.6mmの範囲で設定した。せん断は、せん断変位速度 0.5mm/min のもとで行い、せん断変位をせん断試験では8mm、摩擦試験では25mmまでそれぞれ与えた。

Table 2に、実施した摩擦試験の実験条件を示す。

Table 2. List of friction tests.

Sample	Mean grain size	Relative density	Steel plate roughness	
	D_{50} (mm)			D_r (%)
Glass bead ①	0.07	60~70	10, 30, 50, 80, 100	
	②			0.16
	③			0.2
	④			0.4
	⑤			0.6
Toyoura sand	0.17	48~50	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100	

実験結果および考察

1. せん断試験結果

Figure 3は、5種類の粒径のガラスビーズのせん断試験結果をせん断応力比 τ/σ_N —せん断変位 D 関係および垂直変位 ΔH —せん断変位 D 関係で示したものである。せん断応力比 τ/σ_N は、いずれの粒径においてもピークを示し、その後せん断変位の増加とともに減少して応力比一定の定常状態に達している。せん断応力比 τ/σ_N —せん断変位 D 関係は、ガラスビーズの粒径に関わらずほぼ同程度の関係を示している。一方、垂直変位 ΔH —せん断変位 D 関係は、せん断開始後わずかに体積収縮した後直ちに体積膨張に転じ、その後せん断変位の増加とともに徐々に膨張し体積一定の限界状態に達している。体積膨張傾向は、ガラスビーズの粒径が大きくなるほど著しくなっている。なお、せん断応力比から求めた内部摩擦角は、ピーク時で $\phi_P=36.8^\circ$ 、限界状態で $\phi_{CV}=24^\circ$ である。

Figure 4は、豊浦砂の相対密度 $D_r=50\%$ のゆる詰めに対するせん断試験の結果を示したものである。せん断応力比 τ/σ_N —せん断変位 D 関係は明確なピークを示さずに定常状態に至っている。一方、垂直変位 ΔH —せん断変位 D 関係は、せん断開始後体積収縮を示し、その後せん断変位の増加とともに徐々に膨張し体積一定の限界状態に達している。なお、定常状態のせん断応力比から求めた限界状態の内部摩擦角は、 $\phi_{CV}=33^\circ$ である。

2. 鋼材の摩擦試験結果

Figure 5は、ガラスビーズの平均粒径 D_{50} ごとの摩擦試験結果を鋼材粗度 $R_{\max}=30\mu\text{m}$ について示したものである。せん断応力比 τ/σ_N は、いずれの粒径においてもせん断開始後急激に増加しピークを示した後、わずかに減少してほぼ応力比一定の定常状態に達している。ピーク時および定常状態におけるせん断応力比の値は、粒径が大きくなるほど減少し

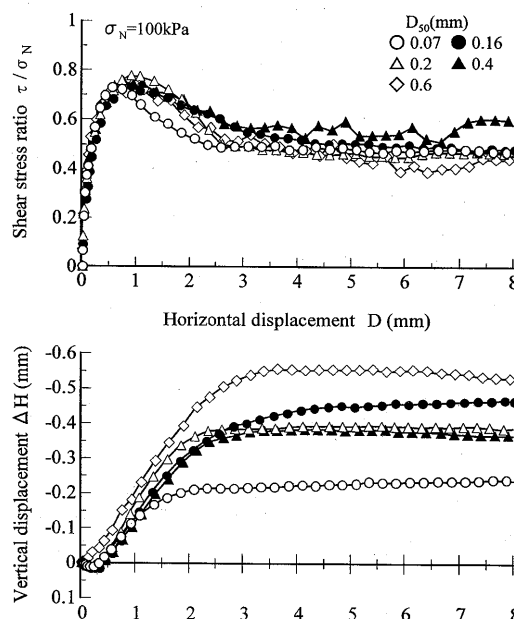


Fig. 3. Results of shear tests of glass beads.

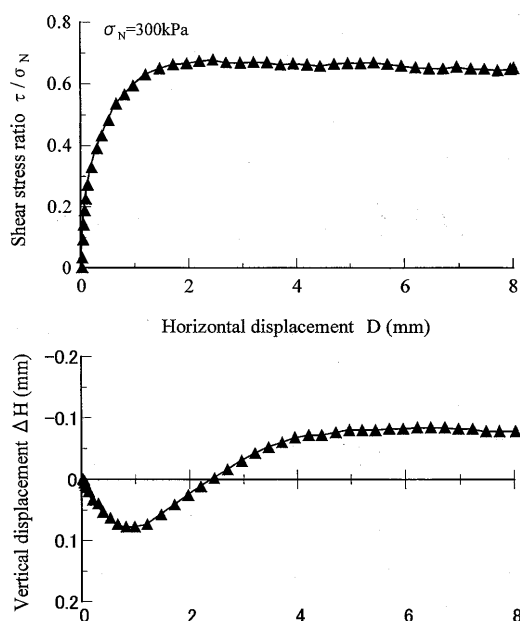


Fig. 4. Result of shear test of Toyoura sand.

ている。一方、垂直変位 ΔH は、せん断開始後体積収縮のみを示している。

Figure 6は、平均粒径 $D_{50}=0.16\text{mm}$ のガラスビーズに対する鋼材との摩擦試験の結果を粗度ごとに示したものである。せん断応力比 τ/σ_N は、いずれの粗度においてもせん断開始後急激に増加しピークを示した後、せん断変位の増加とともに減少しほぼ応力比一定の定常状態に達している。ピーク時および定常状態におけるせん断応力比の値は、鋼材粗度の増加に伴って増大している。一方、垂直変位 ΔH は、せん断変位の増加とともに体積収縮を示しているが、粗度が増加するほど体積収縮は減少している。

Figure 7は、豊浦砂と鋼材との摩擦試験の結果を鋼材粗度 $R_{\max}=10, 30, 50, 80, 100\mu\text{m}$ について示したものであ

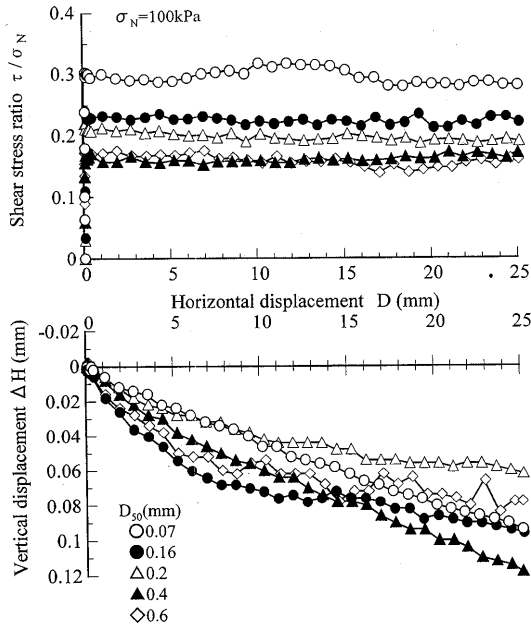


Fig. 5. Results of friction tests between glass bead and steel ($R_{max}=30 \mu m$).

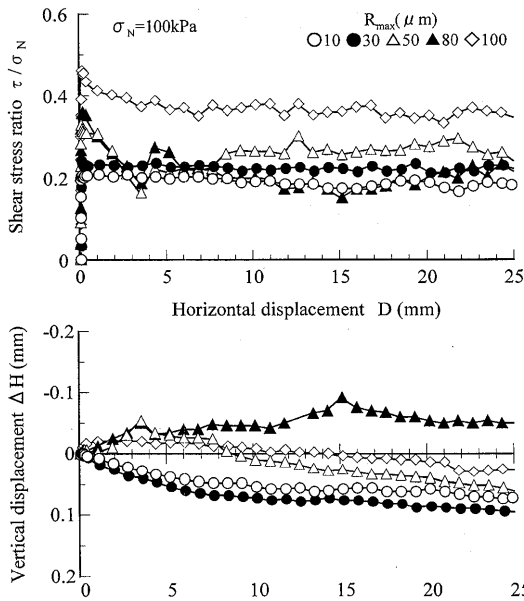


Fig. 6. Effect of roughness on friction tests of glass bead ($D_{50}=0.16mm$).

る。せん断応力比 τ/σ_N は、せん断開始後急増してピークを示した後、わずかに減少し試験終了までには定常状態に至っている。ピークに達するまでのせん断応力比は鋼材粗度の増加に伴い増大するが、粗度 $R_{max}=50 \mu m$ 以上ではその増加割合は減少しほぼ一致している。一方、垂直変位は、せん断変位の増加とともに体積収縮を示すが、粗度が増加するとせん断開始後での体積膨張傾向が著しくなる。

砂と鋼材との摩擦発生機構を調べるために、Figure 6 に示したガラスビーズの摩擦試験の結果をせん断変位 1mm まで拡大したものを Figure 8 に示してある。せん断応力比 τ/σ_N —せん断変位 D 関係は、ピークに達した後一定値に移行している。そのピーク値は粗度の増加とともに増大してい

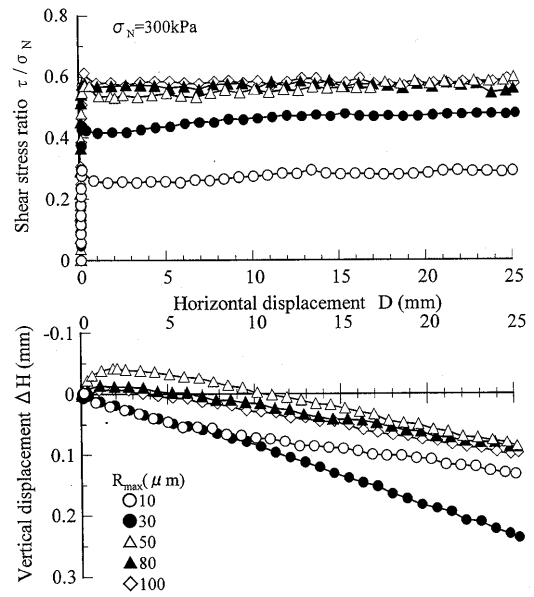


Fig. 7. Results of friction tests between Toyoura sand and steel.

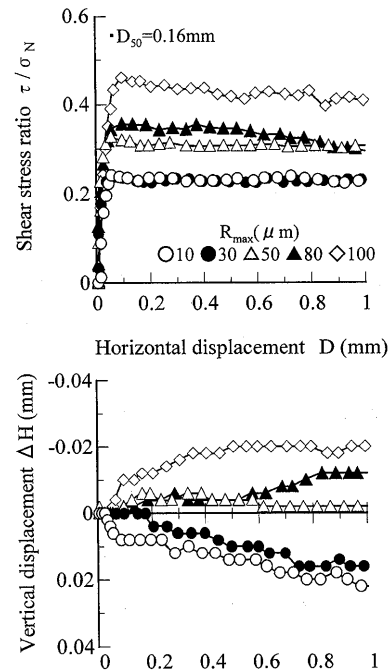


Fig. 8. Interface behavior between glass bead and steel.

るが、ピークに達するまでのそれぞれの τ/σ_N —D 関係はほぼ一致している。このことは、砂が直ちに鋼材表面上をすべり出すのではなく、砂粒子相互にせん断変位が生じ、そのせん断変位を生じさせるのに必要なせん断応力が接触面における摩擦力を上回るにより鋼材表面上にすべりが発生することを示している¹⁾。すべり発生時の摩擦力は、粒径一定のもとでは鋼材粗度の増加とともに増大しており、摩擦力は粒径と鋼材粗度との噛み合いの程度に支配されていることがわかる。一方、垂直変位は、粗度が粗くなると体積収縮から体積膨張に移行しているが、せん断試験での体積変化と比較するとほぼ一定であり、すべり発生後においては体積一定の限界状態にあるとみなせる。

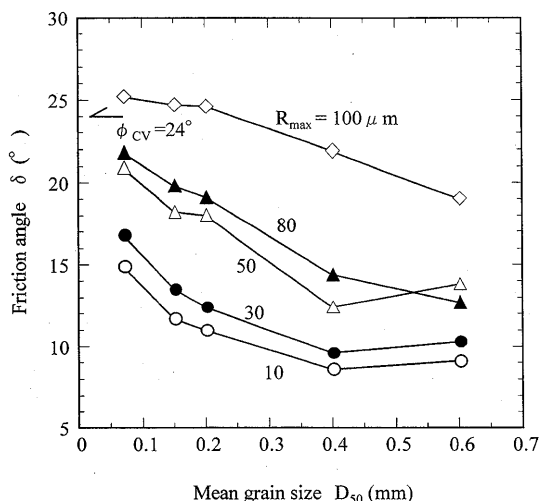


Fig. 9. Relationship between friction angle and mean grain size (Glass bead).

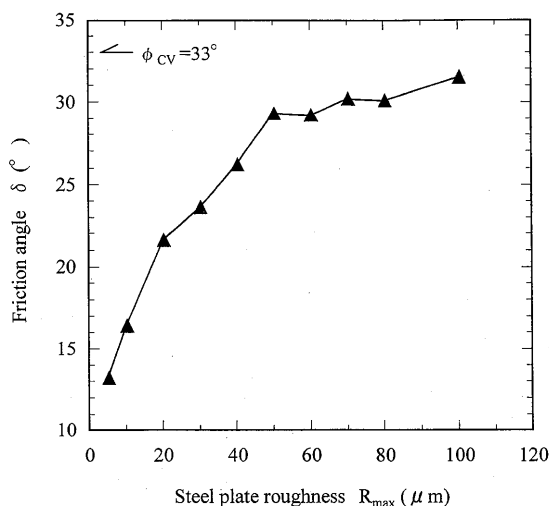


Fig. 11. Relationship between friction angle and steel plate roughness (Toyoura sand).

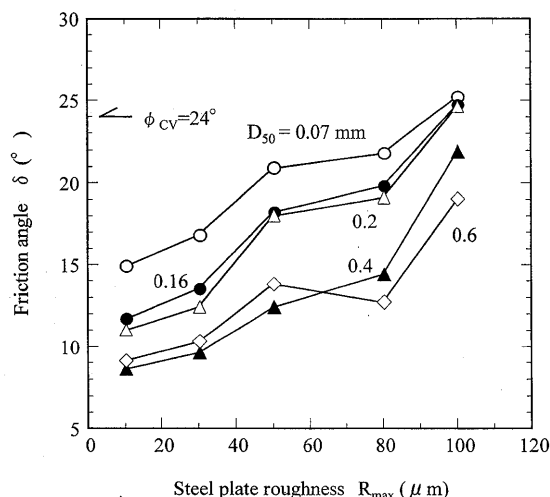


Fig. 10. Relationship between friction angle and steel plate roughness (Glass bead).

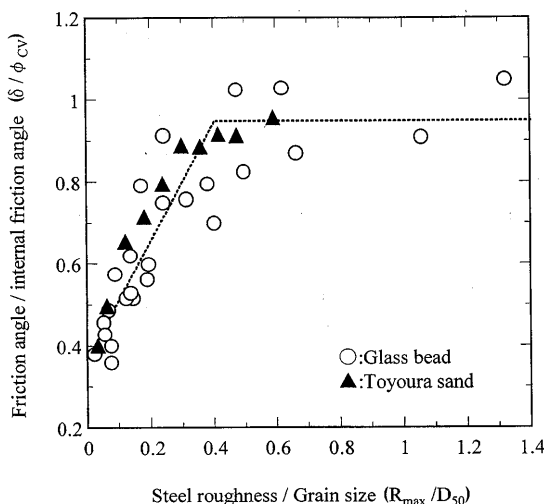


Fig. 12. Relationship between normalized friction angle and normalized roughness.

3. 鋼材との摩擦角に及ぼす粒径および粗度の影響

Figure 9は、ガラスビーズと鋼材との摩擦角をピーク時のせん断応力比から求め、鋼材との摩擦角 δ と平均粒径 D_{50} の関係を鋼材粗度ごとに示したものである。いずれの粗度に対しても摩擦角 δ は、同一の粗度においては平均粒径が大きくなるほど減少しており、その減少傾向は、鋼材粗度が $R_{max}=80\mu\text{m}$ と $100\mu\text{m}$ では平均粒径の増加とともに減少するが、鋼材粗度が $R_{max}=10\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ では平均粒径 $D_{50}=0.4\text{mm}$ 以上ではほぼ一定値を示している。

Figure 10は、摩擦角 δ と鋼材粗度 R_{max} の関係を平均粒径ごとに示してある。摩擦角 δ は、いずれの粒径においても粗度が増加するほど増大している。その増加傾向は、平均粒径に関わらずほぼ同程度である。

なお、Fig. 9および10には、ガラスビーズの限界状態の内部摩擦角 ϕ_{cv} の値も示してあるが、鋼材粗度 $R_{max}=100\mu\text{m}$ では平均粒径 $D_{50}=0.2\text{mm}$ 以下においては摩擦角 δ はガラスビーズの限界状態の内部摩擦角 ϕ_{cv} とほぼ一致している。

Figure 11は、豊浦砂と鋼材との摩擦角 δ および鋼材粗度 R_{max} の関係を示したものである。鋼材との摩擦角 δ は、鋼材

粗度の増加とともに図中に示した限界状態の内部摩擦角 ϕ_{cv} の値にまで増大している。その増加傾向は、鋼材粗度 $R_{max}=50\mu\text{m}$ までは粗度の増加に対する摩擦角の増大も著しいが、 $R_{max}=50\mu\text{m}$ 以上では摩擦角はほぼ一定値を示している。このことは、粗度の増加に対する砂と鋼材との摩擦角の増加には限界があることを示している。

鋼材との摩擦角に及ぼす粗度と粒径の関係を検討するために、摩擦角を限界状態の内部摩擦角で除した摩擦角比 δ / ϕ_{cv} と粗度を平均粒径で除した粒径比 R_{max} / D_{50} の関係をFig. 12に示してある。ガラスビーズの結果にはばらつきがみられるが、 δ / ϕ_{cv} は $R_{max} / D_{50}=0.4$ 付近までは増加し、それ以上ではほぼ一定値を示している。この $\delta / \phi_{cv}-R_{max} / D_{50}$ の関係は、豊浦砂においてもほぼ同じであり、ガラスビーズによる粒径と粗度の関係は砂においても共通した関係にあることを示している。

砂と鋼材との摩擦角は $R_{max} / D_{50}=0.4$ 付近まで増加していることから、摩擦角は、粒径の大きさや鋼材表面粗さの両方の影響を受け、粒径と鋼材表面の噛み合わせに大きく依存することを示している。一方、 $R_{max} / D_{50}=0.4$ 以上では、砂と鋼

材の摩擦角は一定であり, δ/ϕ_{cv} はほぼ1に近い値を示している. このことは, 砂と鋼材との摩擦機構が, R_{max}/D_{50} の増加により砂-鋼材の摩擦関係から砂-砂のせん断関係に移行することを示している. しかも, そのときの摩擦角は, 砂-砂のピーク時の内部摩擦角ではなく, 限界状態の内部摩擦角に対応していることがわかる.

要 約

砂と鋼材との摩擦特性に及ぼす粒径と粗度の影響を明らかにするために, 一面せん断試験装置を用いて種々の粒径のガラスビーズおよび豊浦砂と鋼材の粗度を変えた摩擦試験を実施した. 得られた主な結果を以下に示す.

- 1) 砂と鋼材の摩擦力は, 粒径と粗度の両方の影響を受けており粗度と粒径の比である R_{max}/D_{50} に大きく依存している.
- 2) 砂と鋼材の摩擦角は, R_{max}/D_{50} が増加するとともに増大するが $R_{max}/D_{50}=0.4$ 以上ではほぼ一定値を示す.
- 3) そのときの鋼材との摩擦角は, 砂のピーク時の内部摩擦角ではなく限界状態の内部摩擦角に対応している.

文 献

- 1) Uesugi, M. and Kishida, H. 1986. Influential factors of friction between steel and dry sand, *Soils and Foundation*, 26 (2): 33-46.
- 2) Potyondy, J.G. 1961. Skin friction between various soils and construction materials. *Geotechnique*, 2 (4):339-353.
- 3) Yosimi, Y. and Kishida, H. 1981. Friction between sand and metal surface. Proc. *10th ICSMFE*. 1: 831-834.
- 4) Uesugi, M. and Kishida, H.1986: Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel, *Soils and Foundation*, 26 (4): 139-149.
- 5) 新城俊也, 瀬戸内秀規. 2001. さんご礁石灰質堆積物の鋼材との摩擦特性. *土と基礎*, 49(8) 4-7.