

# 琉球大学学術リポジトリ

## 石灰質砂と鋼材の摩擦特性に及ぼす水分の影響

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): 石灰質砂, 摩擦係数, 鋼材, 水分, 極性 キーワード (En): Calcareous sand, Frictional coefficient, Steel plate, Water, Polarity 作成者: 瀬戸内, 秀規, 新城, 俊也, Setouchi, Hideki, Shinjo, Toshiya メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/3648">http://hdl.handle.net/20.500.12000/3648</a>

## 石灰質砂と鋼材の摩擦特性に及ぼす水分の影響

瀬戸内秀規\*・新城俊也\*\*

Hideki SETOUCHI and Toshiya SHINJO : The effect of water on frictional characteristics between calcareous sands and a steel plate

キーワード：石灰質砂，摩擦係数，鋼材，水分，極性

**Key words** : Calcareous sand, Frictional coefficient, Steel plate, Water, Polarity

### Summary

The frictional characteristics between calcareous sands and the steel plate with the smooth surface were investigated experimentally. The tests were also performed on Toyoura sand and Kunigami-maji having clay minerals for the comparison of their frictional characteristics. Test results revealed that the frictional coefficients of dry calcareous sands were variations but the frictional coefficients of wet calcareous sands indicated the constant value. It was found, the frictional characteristics of sands soaked in the non-polar fluid were similar to the frictional characteristics of dry sands. The frictional characteristics of wet Toyoura sand showed the stick-slip phenomenon. No consistent relationship was found between the polarity of water and its effectiveness as a lubricant of clay minerals.

### 緒言

摩擦は、土木・建築・農業工学その他の建設工学の分野において多大の恩恵を与えている。しかしながら、摩擦現象の本質は分かっていないことが多く、ある物体とある物体を摩擦した時、その摩擦抵抗、磨耗量、表面損傷の程度を定量的かつ正確に予測することは不可能とされている<sup>1)</sup>。固体表面は大気中ではもちろんのこと高真空中においても吸着分子、不純物、酸化層などの表面皮膜で覆われている。したがって、大気中でできるだけ清浄にした表面間で測定された乾燥摩擦係数にはこれらの表面皮膜の影響が含まれる。金属の場合、摩擦係数は接触面の形状、表面の状態、接触条件と油膜の存否等によって極端に異なり、摩擦係数ゼロの場合から真空中清浄面における摩擦係数は無限大となる場合がある。また、Horn and Deere<sup>2)</sup> は非常に滑らかな面を持つ鉋物間の摩擦において、水の極性分子が表面皮膜を乱すことで摩擦係数が増加することを実験的に示している。以上のことは、摩擦の研究においては物理学的・化学的に基礎から研究を進めていく必要性を示唆するものである。摩擦に及ぼす諸因子の影響を一義的に規定することや、原因と結果を同定することは困難と思われる。摩擦に関する研究は数多く残されていると言えよう。

本報告は、土と鋼材の摩擦特性を明らかにすることを目的とする。土と鋼材の摩擦特性を把握することは、鋼杭基礎や鋼矢板などの土木構造物に見られるように土や構造物の支持力を評価する上で重要である。土木構造物

\* 琉球大学農学部生産環境学科

\*\* 琉球大学農学部生産環境学科

で対象とする地盤は地下水面下あるいは海水面下の地盤が多いため、水分が土と鋼材の摩擦特性に与える影響を明らかにしておく必要がある。本研究は、一面せん断試験装置を利用して、沖縄地方に分布する石灰質砂を中心に乾燥状態および湿潤状態の供試土についてそれぞれ鋼材との摩擦試験を実施しそれらの摩擦特性を比較検討した。

## 試験装置

試験は、三笠式一面せん断試験装置を用いた (Fig. 1)。供試土と鋼材の摩擦試験では、上せん断箱の代わりに長辺100mm、短辺80mm、厚み10mmの摩擦用鋼材を準備し、この鋼材を一定速度で水平に移動させた。摩擦用鋼材はステンレス製であり、鋼材の表面粗さは  $R_{max}=4\mu\text{m}$  程度で非常に滑らかである。供試体は下せん断箱内に作製されるが、試験中供試体の体積変化に伴って供試土とせん断箱内面に周面摩擦力が生じる。この周面摩擦力の作用方向により摩擦面上の垂直力は増減するため、摩擦面上の垂直力はガイド装置と反力枠間に固定された2つのロードセルにて直接測定した。

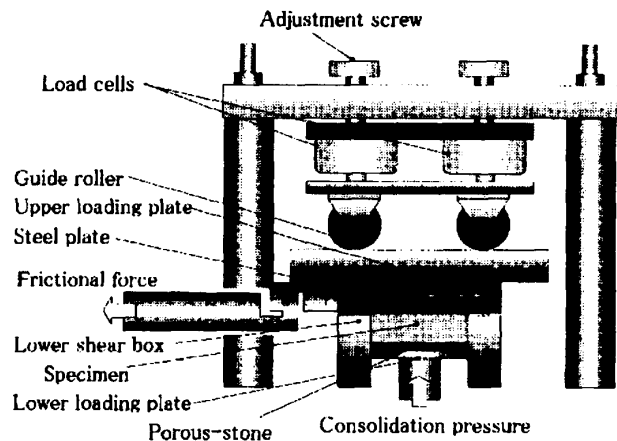


Fig. 1 Illustration of Mikasa's direct shear apparatus

## 試験方法

試料は、さんご礁海域の海底から採取した2種類の石灰質砂 A と石灰質砂 B および琉球石灰岩層の岩塊をクラッシャーで碎屑した砕砂である。石灰質砂 A, B および砕砂は、炭酸カルシウムを主成分としその含有量はいずれも90%以上である。また石灰質砂の摩擦特性と比較するために豊浦標準砂および粘土鉱物からなる国頭マージについても石灰質砂と同様の試験を実施した。豊浦標準砂はけい酸を90%以上含有する。国頭マージはけい酸、アルミナ、酸化鉄を主成分とする粘性土である<sup>3)</sup>。粒度分布および土粒子密度  $\rho_s$  を Fig. 2 にそれぞれ示す。

供試土 ( $\phi=60\text{mm}$ , 層厚20mm) は炉乾燥させた乾燥土を下せん断箱内に空中落下法で充填した。下せん断箱内に土を充填した後、次に示す3種の状態の供試体 1) 乾燥状態の供試体 2) 乾燥土に注水し湿潤させた供試体 3) 乾燥土に無極性の液体四塩化炭素を浸した供試体を作製し、それぞれ鋼材との摩擦試験を実施した。加圧板側からの圧密圧力  $\sigma_v$  は0.1~0.7MPa の範囲である。下せん断箱上端面と鋼材との隙間は0.5mm に設定した。せん断速度0.5mm/min で、圧密圧力一定の簡易定圧せん断 (摩擦) 試験<sup>4)</sup>を行った。

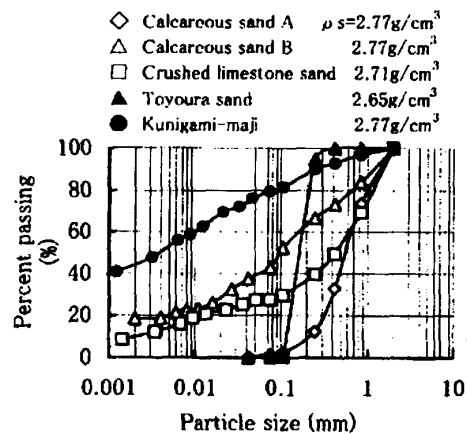


Fig. 2 Grain-size distribution curve

試験結果

1. 乾燥した石灰質砂の摩擦特性

Fig. 3に乾燥した石灰質砂 A の摩擦係数 $\mu$  (=せん断応力 $\tau$ /摩擦面上の垂直応力 $\sigma_n$ ) をせん断変位 D との関係で示す。摩擦係数はいったんピークの値を示しその後減少し0.35程度の値を示すものと、ピーク値を示しその後減少することなく0.6程度の値を示すものが見られる。クーロンの摩擦則によると2物体間に働く摩擦力はその面に作用する垂直力に比例し、摩擦係数は垂直力の大きさに係らず一定となる。しかしながら、本試験の摩擦係数は各試験 ( $\sigma_c = 0.1 \sim 0.7\text{MPa}$ ) でそれぞればらついている。また、Fig. 4は、圧密圧力を $\sigma_c = 0.5\text{MPa}$ と一定として同一試験条件で実施した乾燥石灰質砂 A の4回の試験結果である。同一試験条件でも摩擦係数の値はそれぞればらついている。

Fig. 5は、Fig. 3, 4で得られたせん断変位  $D=8\text{mm}$  時の摩擦係数 $\mu$ とその時の試験装置周辺の相対湿度の関係である。相対湿度が上昇すると摩擦係数は大きくなる傾向にある。このことは、大気中の水分が乾燥した石灰質砂と鋼材の摩擦特性に変化を与える一つの大きな要因であることを示唆している。

2. 密度および水分が石灰質砂の摩擦特性に及ぼす影響

石灰質砂の摩擦特性に対する水分の影響を直接確認することおよび密度の影響を調べることを目的に、石灰質砂 A を用いて緩詰めおよび密詰めで作製した供試体について以下に示す試験を実施した。

- ・ 圧密圧力 $\sigma_c = 0.4\text{MPa}$
- ・ 試験開始時からせん断変位  $D=5\text{mm}$  まで供試体は乾燥状態。
- ・ せん断変位  $D=5\text{mm}$  に達した時に試験を継続しながら供試体を注水により湿潤させる。

Fig. 6に摩擦係数 $\mu$ および鉛直変位 $\Delta H$ をせん断変位 D との関係で示す。乾燥状態 (せん断変位  $D=0 \sim 5\text{mm}$ ) の摩擦係数は、緩詰め、密詰めともに0.35~0.4の値を示している。摩擦

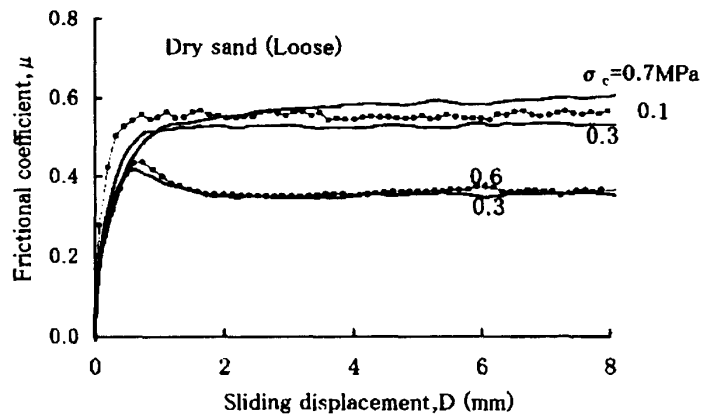


Fig. 3 The relationship between frictional coefficient and sliding displacement for dry calcareous sand A

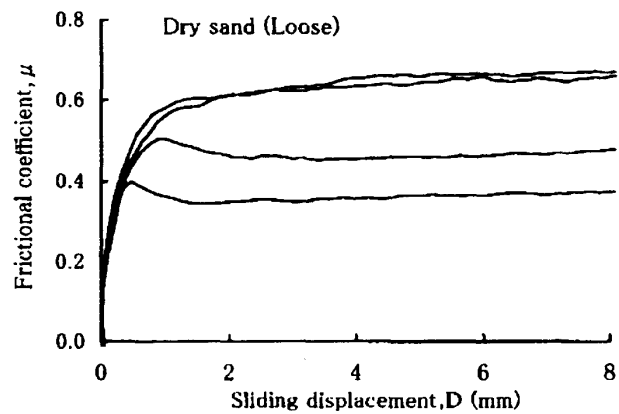


Fig. 4 The relationship between frictional coefficient and sliding displacement for dry calcareous sand A under consolidation pressure 0.5MPa

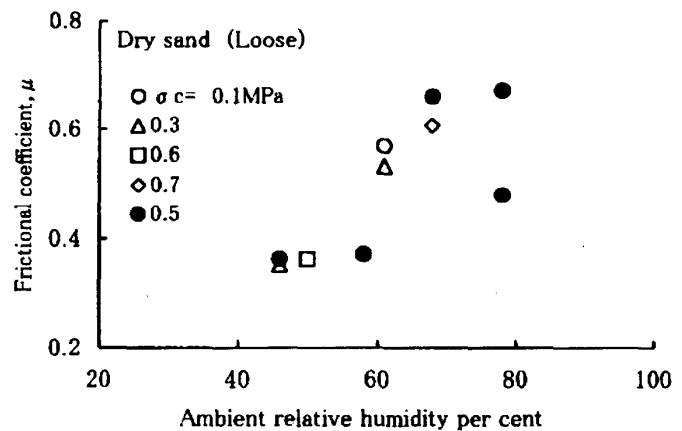


Fig. 5 The relationship between frictional coefficient ( $D=8\text{mm}$ ) and the ambient relative humidity for dry calcareous sand A

係数は、緩詰めと密詰めで有意な差はない。また、落合等はガラスビーズ、豊浦砂および Quiou 砂を用いた鋼材との摩擦試験で、相対密度が摩擦抵抗角に及ぼす影響は見られないことを報告している<sup>5)</sup>。注水後（せん断変位 D=5mm）摩擦係数は緩詰め、密詰めとも極端に増加しその後は徐々に増加を続けている。緩詰めと密詰めの摩擦係数は、せん断変位 D=20mm 時で同じ値を示している。一方、鉛直変位は緩詰めの方が密詰めより大きな体積収縮を示すが、注水後緩詰め、密詰めともに極端な体積収縮が生じている。石灰質砂と鋼材の摩擦係数に与える影響は、密度の違いによる影響より水分の影響の方が顕著である。

3. 湿潤状態における石灰質砂の摩擦特性

Fig. 7に湿潤状態の石灰質砂 A の摩擦係数  $\mu$  とせん断変位 D の関係を示す。図中に各試験時の試験装置周辺の相対湿度 R. H を記した。摩擦係数は各試験 ( $\sigma_c = 0.1 \sim 0.7 \text{MPa}$ ) においてせん断変位 D=1mm 付近でピークを示した後 0.5~0.6 の値を維持している。Fig. 8にせん断変位 D=8mm におけるせん断応力と垂直応力  $\sigma_n$  の関係を示す。せん断応力は垂直応力と直線関係にあり、次式に示すクーロンの摩擦則に従う。

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\tau$  : せん断応力,  $\mu$  : 摩擦係数 (一定),  $\sigma_n$  : 摩擦面上の垂直応力。

なお、摩擦係数  $\mu$  は 0.55 であった。

4. 摩擦特性に与える水の極性分子の影響

石灰質砂 A を無極性の四塩化炭素で浸して試験を実施した。Fig. 9に摩擦係数  $\mu$  とせん断変位 D の関係を、Fig. 10に摩擦係数  $\mu$  と相対湿度 R. H の関係を示す。四塩化炭素で浸した石灰質砂 A の摩擦特性は、Fig. 3,5で示した乾燥状態の摩擦特性と類似している。一方、湿潤砂の摩擦特性は、乾燥砂および四塩化炭素で浸した砂の摩擦特性と明らかに異なる。このことは、水分子の有極性が摩擦特性になんらかの影響を与えているものと推察される。Horn and Deere<sup>2)</sup> は石英塊同士を非常に

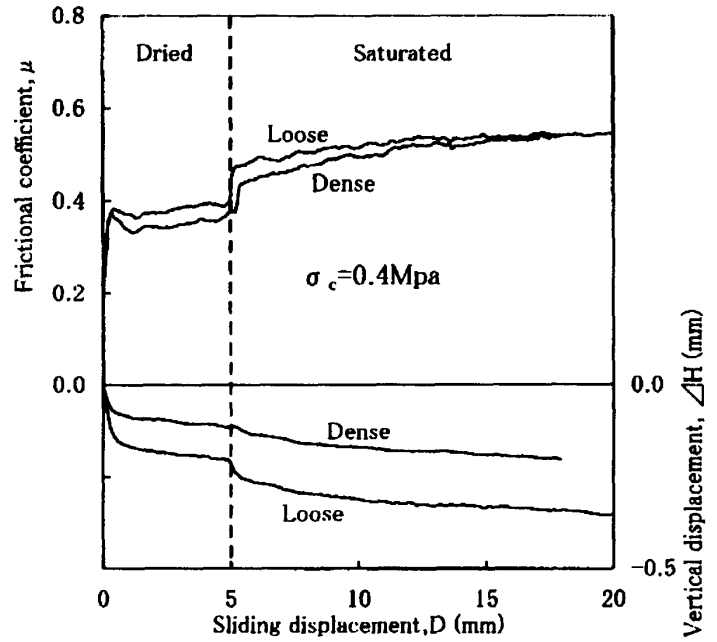


Fig. 6 The influence of water on the friction developed between calcareous sand A and steel plate

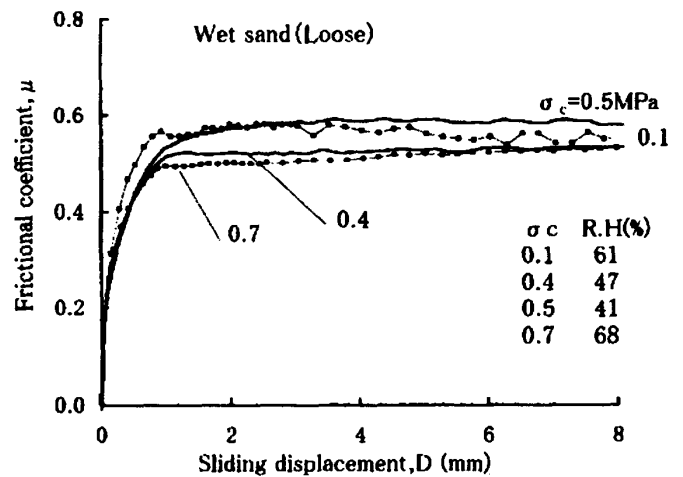


Fig. 7 The relationship between frictional coefficient and sliding displacement for wet calcareous sand A

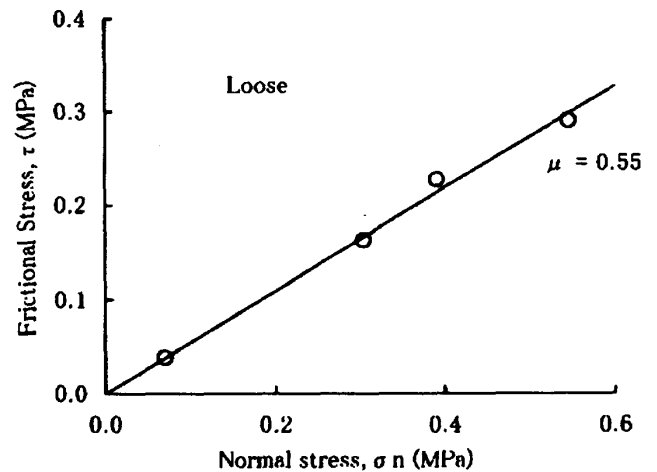


Fig. 8 The relationship between frictional stress and normal stress for wet calcareous sand A

滑らかな面上で摩擦し、乾燥した面での摩擦係数より水分を含ませた面での摩擦係数の方が大きくなる結果を示している。この原因の一つとして、Horn and Deere は Hardy and Hardy の提案<sup>6)</sup>、Menter の研究<sup>7)</sup> および Bowden and Tabor の論証<sup>8)</sup> を受けて、水の極性分子が摩擦面の吸着膜分子の配向を乱すためだと論じている。Horn and Deere の考えを本試験に適用すると、乾燥砂と湿潤砂の摩擦特性が異なる原因の一つとして、摩擦面に介入する水分子が鋼材表面の吸着膜分子の配向を乱すことが考えられる。

石灰質砂 B および砕砂について乾燥状態、四塩化炭素で浸した状態および湿潤状態でそれぞれ試験を行った。その結果を Fig. 11 (a) (b) (c) および Fig. 12 (a) (b) (c) に、摩擦係数  $\mu$  とせん断変位  $D$  の関係でそれぞれ示す。石灰質砂 B および砕砂の摩擦特性は石灰質砂 A と同様の傾向を示している。すなわち、乾燥状態と四塩化炭素で浸した状態の摩擦係数は各試験 ( $\sigma_c = 0.1 \sim 0.7 \text{MPa}$ ) でばらつき、湿潤状態の摩擦係数とせん断変位の関係は各試験 ( $\sigma_c = 0.1 \sim 0.7 \text{MPa}$ ) ではほぼ一致する。

5. 繰返し载荷による石灰質砂の摩擦特性

乾燥した石灰質砂 A に前進方向および後退方向の交番载荷を与え、繰返しせん断における摩擦特性を調べた。前進後退を1サイクルとして10回の繰返し载荷を行った。1サイクルのせん断変位は16mm である。Fig. 13 (a), (b) に、摩擦係数  $\mu$  とせん断変位  $D$  の関係および摩擦係数  $\mu$  と繰返し回数  $N$  の関係をそれぞれ示す。摩擦係数はせん断繰返し回数が4回目までにおいて著しく増加しており、せん断繰返し回数が6回目以降では摩擦係数はほぼ一定となる。摩擦係数が増加するのは、繰返しの増加に伴い鋼材摩擦面の吸着膜が砂粒子によって破壊され、砂と吸着膜との摩擦現象から砂と実鋼材表面との摩擦現象に移行するためと推察される。

湿潤砂についての試験結果を同様の関係で Fig. 14 (a), (b) に示す。1サイクルのせん断変位は60mm で、繰返し回数は8回である。摩擦係数は1サイクル目から8サイクル目にかけてほぼ一定の値を示している。湿潤砂の場合は、繰返し回数の増加に伴う摩擦係数の増加は見られない。

6. 豊浦標準砂の摩擦特性

Fig. 15 (a) (b) (c) に、豊浦標準砂における乾燥状態、四塩化炭素で浸した状態および湿潤状態の摩擦係

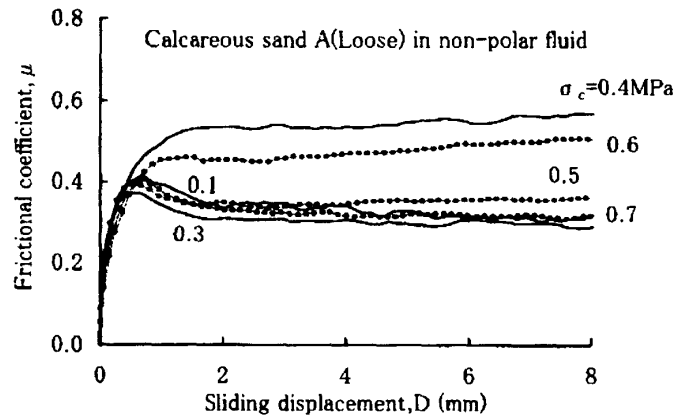


Fig. 9 The relationship between frictional coefficient and sliding displacement for calcareous sand A in non-polar fluid (Carbon tetrachloride)

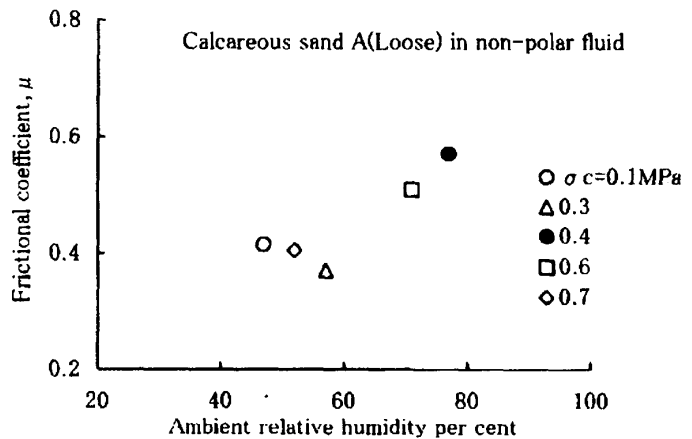
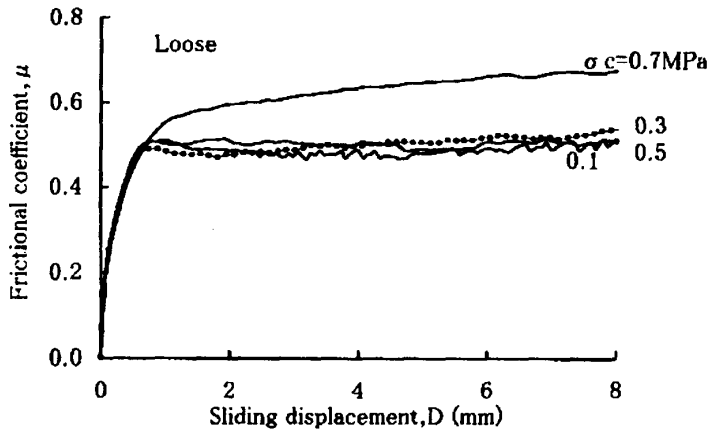
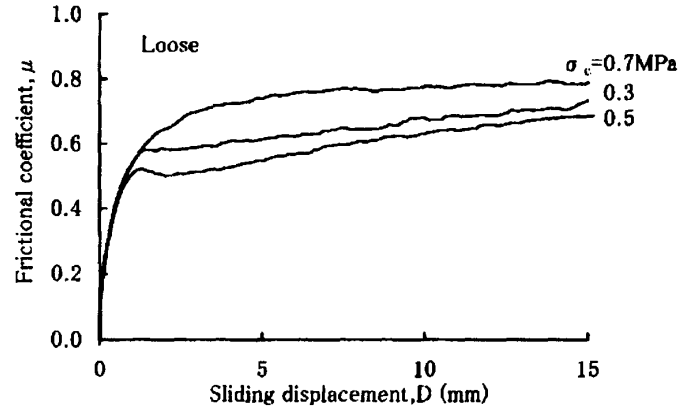


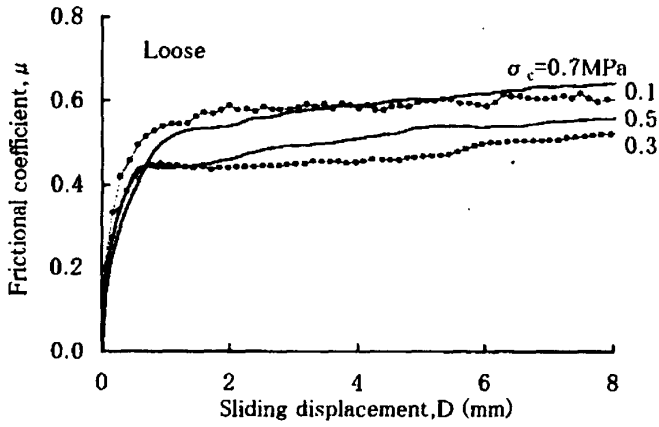
Fig. 10 The relationship between frictional coefficient and the ambient relative humidity for calcareous sand A in non-polar fluid (Carbon tetrachloride)



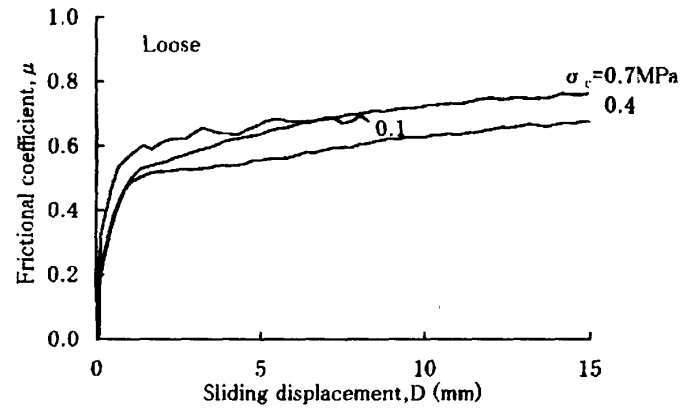
(a) Dry calcareous sand B



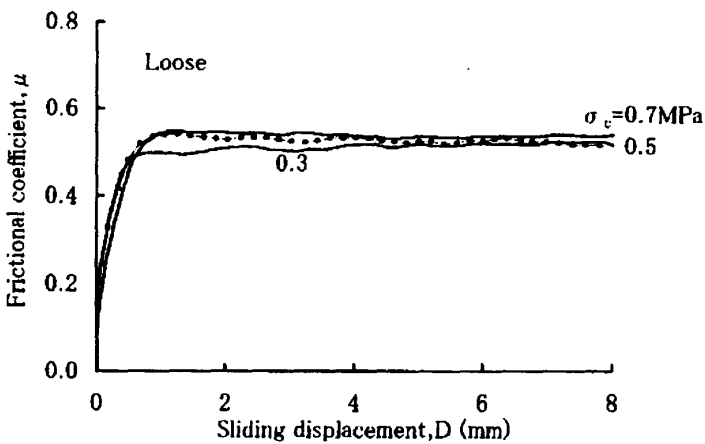
(a) Dry crushed limestone sand



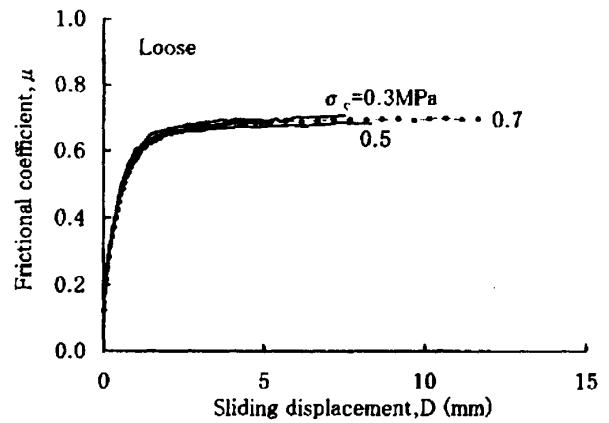
(b) Calcareous sand B in non-polar fluid (Carbon tetrachloride)



(b) Crushed limestone sand in non-polar fluid (Carbon tetrachloride)



(c) Wet calcareous sand B

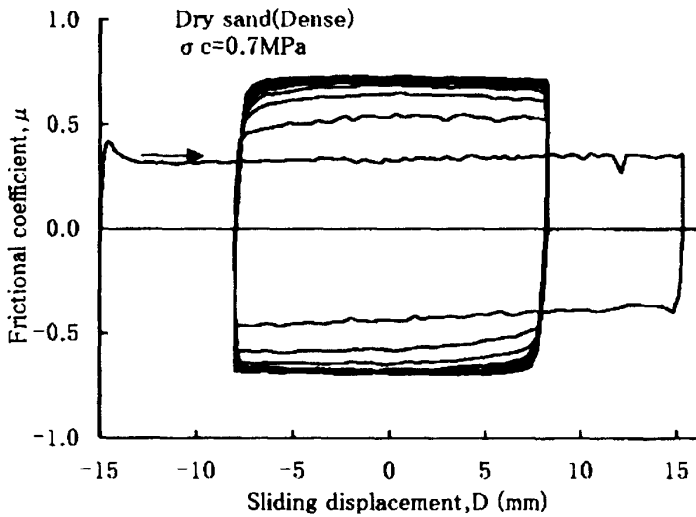


(c) Wet crushed limestone sand

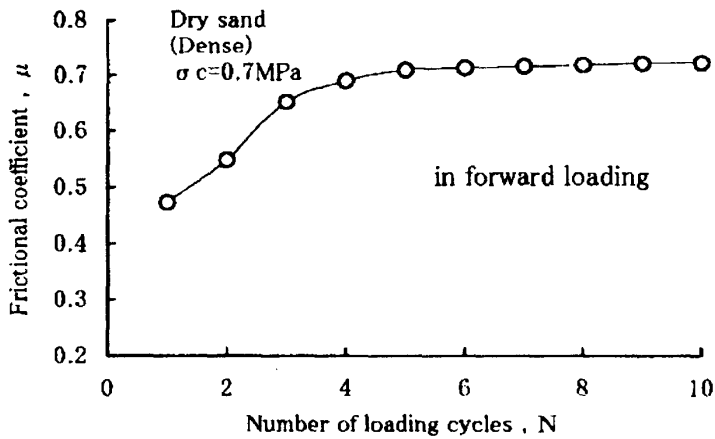
Fig. 11 The relationships between frictional coefficient and sliding displacement for calcareous sand B

Fig. 12 The relationships between frictional coefficient and sliding displacement for crushed limestone sand

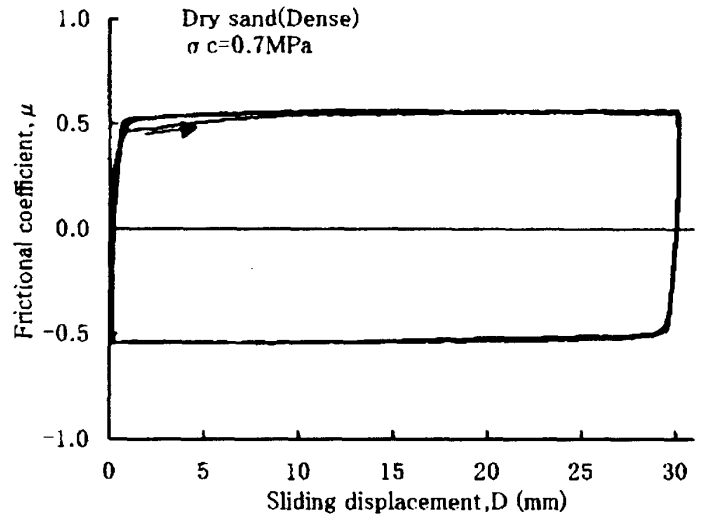
数 $\mu$ とせん断変位  $D$  の関係をそれぞれ示す。湿潤状態の場合、各試験で程度の差はあるが、鋼材に対して供試土が付着と滑りを周期的に繰り返すスティック・スリップ現象が生じている。一般に、スティック・スリップは動摩擦係数が静摩擦係数より小さい時に起こり、付着状態では鋼材に与えているせん断力と供試土と鋼材間の摩擦力が釣り合っており静摩擦係数の限界値に達した時点で鋼材に与えているせん断力がうち勝って供試土と鋼材間で滑りが生じる現象とされている<sup>1,9)</sup>。一方、四塩化炭素で浸した砂では乾燥砂と同様にスティック・スリップは生じていない。



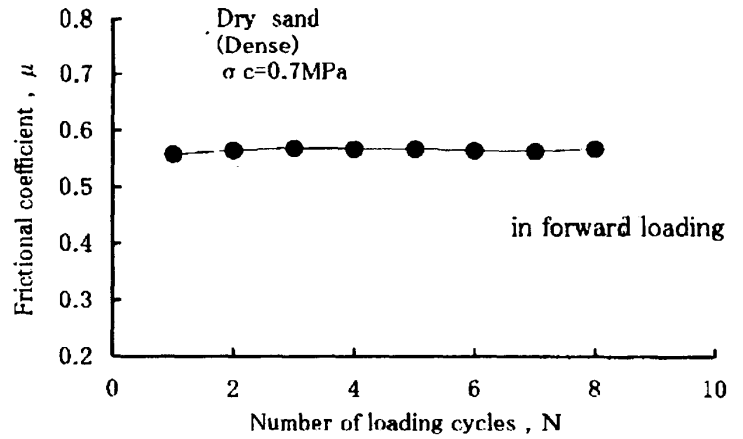
(a) The relationship between frictional coefficient and sliding displacement



(b) The relationship between frictional coefficient and number of loading cycles



(a) The relationship between frictional coefficient and sliding displacement



(b) The relationship between frictional coefficient and number of loading cycles

Fig. 13 The result of cyclic loading test for dry calcareous sand A

Fig. 14 The result of cyclic loading test for wet calcareous sand A



7. 国頭マージの摩擦特性

Fig. 16 (a) (b) (c) に国頭マージにおける乾燥状態、四塩化炭素で浸した状態および湿潤状態の摩擦係数 $\mu$ とせん断変位  $D$  の関係をそれぞれ示す。湿潤状態の摩擦係数は乾燥状態および四塩化炭素で浸された状態の摩擦係数と比べると明らかに小さい。Horn and Deere<sup>2)</sup> は完全な劈開面を持つ雲母同士の摩擦試験および、粉末状の雲母のせん断試験を行い、湿潤状態の摩擦係数および内部摩擦角が乾燥状態のそれらに比べ小さくなることを示している。その理由として次のように述べている。摩擦面には常にひっかきと磨耗が生じ<sup>9)</sup>、磨耗によって生じた格子層鉱物の新しい劈開面間には凝集性が存在する<sup>10)</sup>。このため、摩擦面が液体で浸されていると液体中の分子は新しい劈開面によって吸着され、その結果摩擦力が減じるとしている。

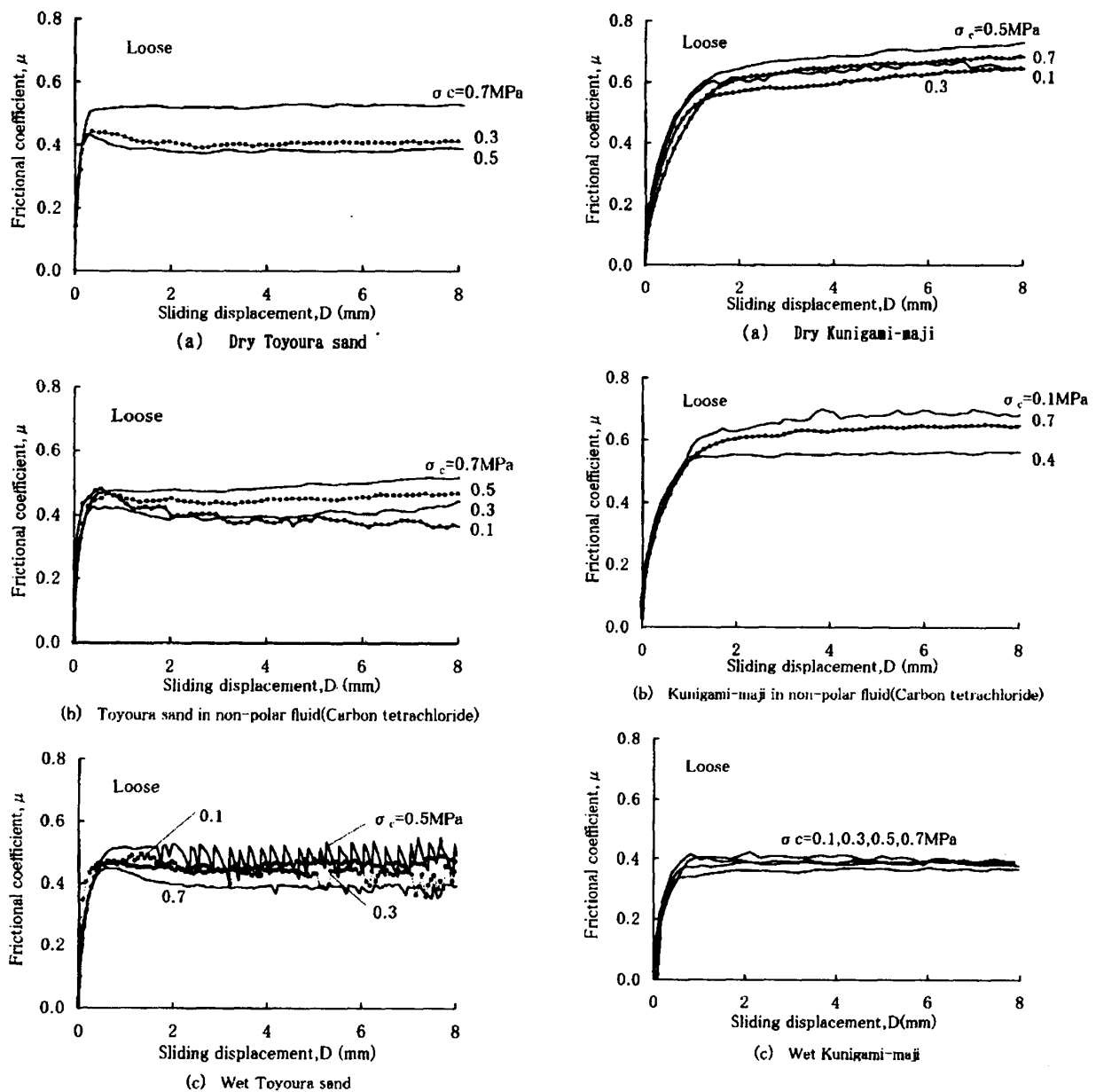


Fig. 15 The relationship between frictional coefficient and sliding displacement for Toyoura sand

Fig. 16 The relationships between frictional coefficient and sliding displacement for Kunigami-maji

8. 湿潤土の摩擦係数

Fig. 17に、湿潤状態における石灰質砂 B、砕砂、豊浦標準砂および国頭マージのせん断応力 $\tau$ と垂直応力 $\sigma_n$ の関係をまとめて示す。なお、豊浦標準砂のせん断応力は、スティック・スリップ現象のため、直接求めることができない。図中のせん断応力は平均値をとって求めた。湿潤土におけるせん断応力と垂直応力の関係は、いずれの土も(1)式に示したクーロンの摩擦則に従う。摩擦係数 $\mu$ を図中にそれぞれ示す。

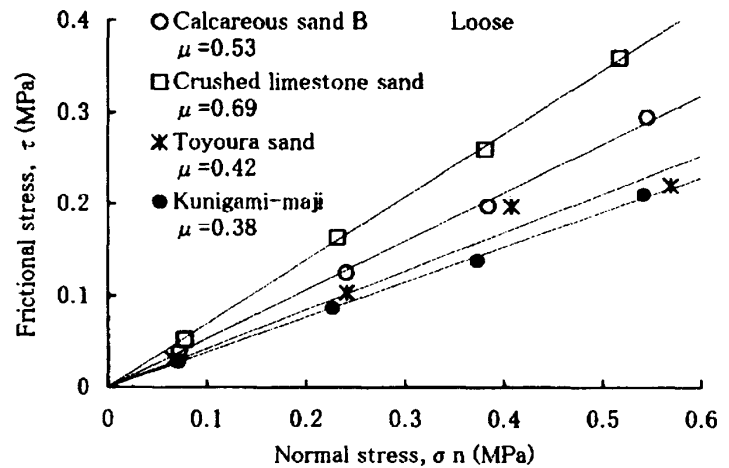


Fig. 17 The relationships between frictional stress and normal stress for wet soils

摘 要

乾燥状態および湿潤状態の石灰質砂について鋼材との摩擦試験を実施した。その結果、摩擦特性は乾燥砂と湿潤砂では異なることが分かった。得られた主な結果を豊浦標準砂および国頭マージの結果と併せて以下に示す。

- (1) 乾燥土および無極性の四塩化炭素で浸した土の摩擦係数は各試験 ( $\sigma_c = 0.1 \sim 0.7 \text{ MPa}$ ) でばらつき、石灰質砂の摩擦係数は相対湿度の上昇に伴い増加する。
- (2) 乾燥した石灰質砂の大変形時の摩擦係数は大きな値を示す。その原因は、せん断変位の増加に伴い砂と鋼材表面吸着膜の摩擦現象から砂と実鋼材表面の摩擦現象に移行するためだと推察される。
- (3) 湿潤状態の豊浦標準砂では、スティック・スリップ現象が確認された。
- (4) 湿潤状態の国頭マージの摩擦係数は、乾燥状態の摩擦係数に比べ小さい値を示す。
- (5) 湿潤土におけるせん断応力と垂直応力の関係はクーロンの摩擦則に従う。
- (6) 土と鋼材の摩擦に関する研究においては、水分の影響を考慮する必要がある。

引用文献

- 1) 山本・兼田：トライボロジー，理工学社，1999.
- 2) Horn and Deere, 1962. "Frictional characteristics of minerals. " *Geotechnique*, Volume 12, pp319-335.
- 3) 宮城調勝：沖縄地方の特殊土の理工学的性質と盛土材料への適用に関する研究，博士論文，平成4年，16-17.
- 4) 地盤工学会：土質試験の方法と解説—第一回改訂版—，p. 563~600，2000.
- 5) 賀来，落合，安福，大嶺，中島：粒度分布に着目した粒状材料と鋼材の大変形における摩擦特性，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，第1分冊，pp. A436-437，2001,3
- 6) Hardy, W. B. and J. K. Hardy, 1919. "Note on static friction and on the lubrication properties of certain chemical substances. " *Philosophical Magazine*, 6th Series, 38 : 223 : 32-48.
- 7) Menter, J. W., 1951. "A study of boundary lubricant films by electron diffractions. " *Brit. J. Appl. Physics Supplement No. 1*, pp. 52-53.
- 8) Bowden, F. P. and D. Tabor, 1956. "Friction and lubrication. " Wiley, New York.
- 9) Bowden, F. P. and D. Tabor, 1950. "The friction and lubrication of solids. " Clarendon Press, Oxford.
- 10) Finch, G. I., 1951. "The boundary layer. " *British J. Appl. Physics, Supplement No. 1*, pp. 34-35.