

# ケーソン基礎沈設時の周面摩擦力低減のために用いる滑材の性能評価

地盤工学研究室 安中 清貴  
指導教員 豊田 浩史

## 1. はじめに

構造物の基礎工法の1つとしてケーソン基礎がある<sup>1)</sup>。ケーソン基礎は函体を地上で製作し、その底部の土を掘削しながら地中に沈設させる工法である。この基礎工法では、フリクションカットと呼ばれる予掘り部分が設けてあり、函体よりもやや大きめに地盤を掘削する。これにより、函体外周に働く周面摩擦を低減させることが可能となる。しかしながら、地山が不安定な地盤や粘土層が連続する地盤では、函体外周に発生する地盤との摩擦力により、十分な深さまで函体を沈設できないことが経験的に知られている。これらの地盤では、しばしば摩擦低減工法を補助工法として採用するケースがある。摩擦低減工法として、ケーソン外壁と周辺地盤との間に滑材を注入する工法があるが、その滑材としてよく用いられるのがベントナイトスラリーである。ベントナイトは、高い膨潤性を持ち、水に溶くことでとろみのある液体になるため、材料運搬や作業性を考慮した場合に、滑材としての利用価値は高いと考えられている。しかしながら、浸透性の高い地盤では、滑材の逸散による摩擦低減性能低下や、周辺地盤の地下水汚染の問題が考えられる。そこで、これら諸問題に対応できる材料として、本研究では、Fig.1に示す粘性のある液体（ヌメリ成分）と弾性体（グミ状）でできた滑材（比重約1.0、以下、K滑材という）を取り上げる。K滑材は水質汚濁防止法排水基準に準拠しているため、仮に地盤内に拡散したとしても地盤環境に与える影響が少ない安全な物質である。本研究では、K滑材を用いた各種室内試験を行い、摩擦低減工法への適用性を検討した。これらの検討では、性能を評価するための比較対象として、これまで用いられてきたベントナイトスラリー（以下、ベントナイト滑材という）を採用した。また、ケーソン基礎沈設終了後には、グラウト等を注入して、周辺地盤との一体化を図る必要があるため、グラウトを混ぜた場合の摩擦回復性能についても検討を行う。

## 2. 性能評価の概要

摩擦低減工法に要求される性能は、①難浸透性（地盤への吸収され難さ）、②摩擦低減性、③持続性（長距離変位に対して性能劣化がなく、拡散も小さい）、④グラウト混入時の摩擦回復性である。本研究では、①に関する評価方法として、一面せん断試験機を用いた一次元圧密試験を、それ以外については、一面せん断試験をそれぞれ採用した。なお、③の評価に関しては、片振り7mmの強制変位を両方向に与える繰返し一面せん断試験とした。いずれの試験においても、ケーソン函体表面のコンクリート部と土が接触している一要素を模擬した試験である。ただし、試験手順や試験機の構造上、実地盤と構造物の挙動を忠実に再現できているわけではない。

これら性能評価試験をまとめたものをTable1に示す。圧密試験は透水性を考慮して砂試料に対してのみ行った。滑材を用いないケースでは、垂直応力 $\sigma_v$ の大小による圧密沈下量の変化が他のケースと比べて僅かであると予想したため、 $\sigma_v=50\text{kPa}$ の1ケースのみ実施した。滑材を用いたケースでは $\sigma_v$ を表に示す3通りとした。

繰返しせん断試験は、砂と粘土試料に対して行い、滑材の有無に関わらず $\sigma_v$ を表に示す3通りを計画した。ここで、K滑材の摩擦低減効果を促進させるた



Fig.1 K滑材の設置状況

Table1 試験ケース一覧

評価項目	土試料	滑材	垂直応力 $\sigma_v$ (kPa)	試験方法
浸透性	砂	滑材なし	50	圧密試験
		K滑材	10, 50, 200	
		ベントナイト		
摩擦低減性	砂	滑材なし	30, 50, 100	繰返し載荷定圧一面せん断試験
		K滑材		
		ベントナイト		
	粘土	M材	30	
		K滑材+M材		
		K滑材		
摩擦回復性	砂	滑材なし	30, 50, 100	単調載荷定圧一面せん断試験
		K滑材		
		ベントナイト		
	粘土	M材	30	
		K滑材+M材		
		K滑材+グラウト		
砂	ベントナイト+グラウト	30		
	K滑材+M材+グラウト			
	K滑材+M材+グラウト			
粘土	K滑材+グラウト	30		
	ベントナイト+グラウト			
	K滑材+M材+グラウト			

めに、コンクリート表面に塗布する摩擦低減材料(以下、M材という)を併用したケースについても合わせて試験することとした。

摩擦回復性を評価する試験では、実施工を模擬して、グラウトを何らかの方法で滑材に対して注入する処理を行うことが望ましいと考えたが、試験機の構造上これが困難であったため、滑材とグラウトを1:1の体積比となるように事前に混合したものをを用いた。

### 3. 試験方法および供試体作製方法

#### a) 供試体試料および作製方法

ケーソン函体表面のコンクリート部を模擬したモルタル板は、セメントと小名浜砂を重量比で1対3の割合で混合したものに、水を加え、滑材や土と接する部分を型枠用塗装合板上に固定した $\phi 60 \times 20\text{mm}$ の円柱モールド内に打設・気中養生して作製した。モルタル板は、ゴム接着剤を用いて一面せん断試験機の下箱内にせん断面と板表面が揃うように接着・固定した。

本研究で用いた土試料は、福島県いわき市小名浜

で採取した小名浜砂 ( $\rho_s=2.690\text{g/cm}^3$ ,  $e_{\max}=1.049$ ,  $e_{\min}=0.656$ ) と HA カオリン粘土 ( $\rho_s=2.730\text{g/cm}^3$ ) である。両試料の粒径加積曲線を Fig.2 に示す。

砂供試体は、 $\phi 60 \times 20\text{mm}$ の円柱モールド内で砂試料を細径の突き棒で締め固める動的湿潤締固法(初期含水比  $w_i=5\%$ , 初期相対密度  $D_{ri}=67\%$ )で作製した。

粘土供試体は、蒸留水を加えてスラリー状にしたものを一次元圧密円筒容器内に入れ、1時間真空脱気した後、圧密圧力  $120\text{kPa}$  で24時間圧密させてできた土塊をカッターリングと円柱モールドを用いて $\phi 60 \times 20\text{mm}$ の円柱状に切り出し・成形して作製した。

砂供試体を用いた試験ケースでは、上下せん断箱を固定した箱内に、締固めた砂が入った円柱モールドを載せて、 $\phi 60\text{mm}$ の試料押し出し棒を用いて、なるべく乱れが生じないようにゆっくりと砂試料を押し下げる方法で設置した。一方で、粘土供試体の場合は、先に上箱内に試料押し出し棒を用いて粘土試料を収め、供試体の設置高さを調整した後、下箱を被せる方法で設置した。この方法により、粘土試料とモルタル板の間に閉じこめられる空気を取り除くことができる。

K滑材を用いる試験では、ヌメリ成分とグミを良く攪拌し、ばらつきを極力減らしたもの約15gを土とモルタル板の間に設置した (Fig.1)。せん断箱内の滑材の初期高さは約5mm程度である。

M材を用いる試験では、へらを用いてM材をモルタル板上に薄く塗り広げ、3時間以上放置して乾燥している状態を確認して試験に供した。

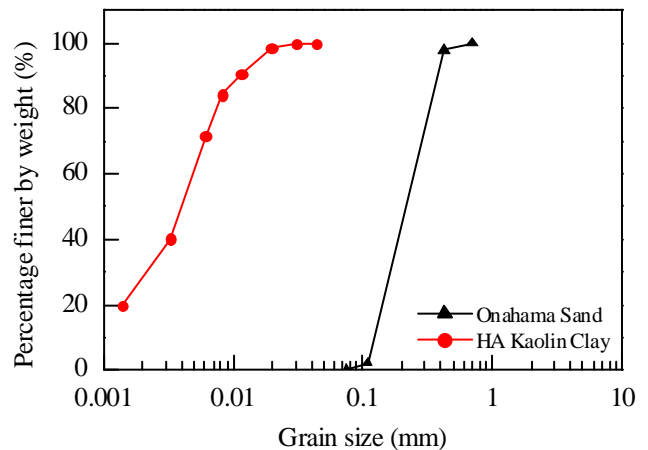


Fig.2 土試料の粒径加積曲線

比較対象として用いたベントナイト滑材は、 $1\text{m}^3$  当たり、ベントナイト 150kg、水 940 リットルの割合で配合したものを混合・攪拌して作製した。混合した滑材は、 $20^\circ\text{C}$ 一定の恒温室内で一時間養生し、膨潤反応が安定した状態のものを試験に供した。使用した滑材質量および初期高さはK滑材と同様である。

摩擦回復試験で滑材と混合したグラウトは、 $1\text{m}^3$  当たり、高炉セメント B 種 500kg、水 827 リットル、ベントナイト 35kg の割合で配合したものを混合・攪拌して作製した。なお、試験時間の短縮を目的として、せん断箱内で所定の圧密応力を载荷した状態で 24 時間気中養生したものを試験に供した。

#### b) 試験方法および試験条件

本研究で用いた試験装置は、下部せん断箱（モルタル板）を鉛直力測定用ロードセル（平行平板型）の上に設置して、上部せん断箱内の土および滑材に、供試体上部に置いたキャップを介して、電動モーターでジャッキを移動させ、鉛直力を伝える方式である。鉛直変位およびせん断変位は変位計で、せん断力は荷重計でそれぞれ計測した。

試験では、試験精度の向上、再現性の確保および労力削減を目的に、フィードバック自動制御システムを採用した。これにより、計測と制御を自動で行うことができる。なお、データサンプリング間隔は、圧密過程を 10 秒、せん断過程を 3 秒とした。

圧密試験は、上下せん断箱を連結した状態で毎分約  $0.01\text{mm}$  の速度で垂直応力を制御した。この試験では、垂直変位が定常状態に達した段階で試験を終了した。ちなみに、上下せん断箱間からの滑材の漏出はいずれのケースにおいても確認されなかった。

単調载荷一面せん断試験は、圧密試験と同様の方法で予備圧密を行った後、上下せん断箱間に  $0.2\text{mm}$  の隙間を設けて、再度圧密試験（以下、本圧密という）を行い、毎分約  $1.0\text{mm}$  の速度でせん断力を载荷した。せん断時の鉛直力は、定圧条件を満足するように自動制御した。この試験では、予備圧密過程が 24 時間、本圧密過程が 5 時間を上限とした。また、せん断過程ではせん断変位が  $7\text{mm}$  に達した段階で試験を終了した。

繰返し载荷一面せん断試験は、本圧密終了後にせん断力伝達用の载荷軸とせん断力を測定するための荷重計およびせん断箱を剛結させ、毎分約  $1.0\text{mm}$  の速度で  $+7\text{mm}\sim-7\text{mm}$  の強制変位を与える方法で繰返しせん断力を载荷した。また、せん断時の鉛直力は前述の方法と同様の制御方法である。この試験の圧密終了条件については前述と同様であるが、せん断過程においては、せん断応力が定常状態に達した段階または試験時間を勘案して適宜試験終了の判断を行った。

#### 4. 浸透性能の検討

圧密試験の試験結果を Fig.3 に示す。圧密に時間を要するという事は、滑材が土に浸透しにくいことを意味する。Fig.3 より、垂直応力が小さい場合は、K 滑材が砂に浸透されにくく、垂直応力が大きい場合は、K 滑材はベントナイト滑材と同程度浸透してしまうことがわかる。これは、グミ状の弾性体が圧力でつぶれることに起因したものと考えられる。

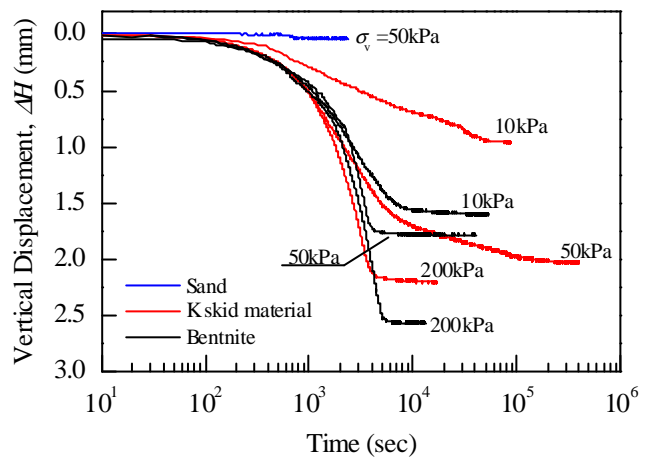


Fig.3 圧密試験結果

#### 5. 摩擦低減性能の検討

繰返しせん断試験の結果を以下に示す。なお、本稿には紙面の都合上、代表的なもののみを掲載する。

砂試料に対する垂直応力  $50\text{kPa}$  の繰返しせん断試験の結果を Fig.4～Fig.7 に示す。Fig.4 は繰返し回数 1 サイクル目におけるせん断応力ーせん断変位の関係を、Fig.5 は 25 サイクル目におけるせん断応力ーせん断変位の関係を、Fig.6 はせん断応力の時刻歴を、Fig.7 は垂直変位の時刻歴をまとめたものである。

Fig.4 では、滑材未使用のケースより小さいせん断応力をとったベントナイト滑材より、K 滑材はさらに小さい値をとっている。また Fig.5 では、ベントナイト滑材は、滑材未使用時のケースと重なり区別がつかないが、K 滑材は他の2つのケースより小さいせん断応力となっている。Fig.6 を見ると、ベントナイト滑材は、すぐにせん断応力が増加しているが、K 滑材はせん断応力の増加が緩やかで、一定値に達するまでに時間を要している。Fig.7 の鉛直変位は、滑材や試料の漏れに起因すると思われる。かなりの繰返し回数になるまで、K 滑材の変位がベントナイトに比べ小さく、滑材の漏れが少ないことがわかる。

粘土試料に対する垂直応力 30kPa の繰返しせん断試験の結果を Fig.8~Fig.11 に示す。Fig.8 は繰返し回数 1 サイクル目におけるせん断応力-せん断変位の関係を、Fig.9 は 25 サイクル目におけるせん断応力

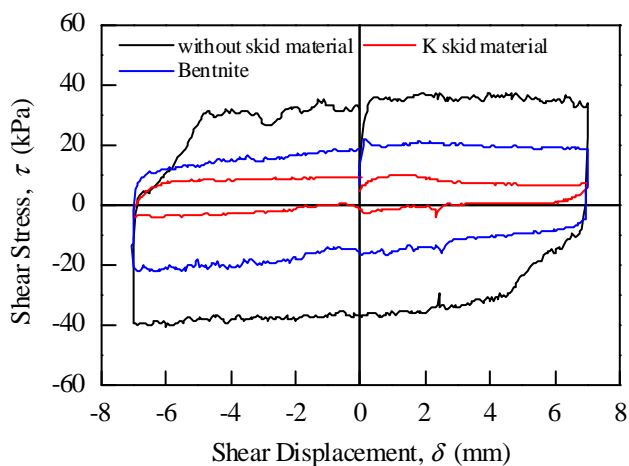


Fig.4 繰返し荷重 1 サイクル目におけるせん断応力-せん断変位関係 (砂試料,  $\sigma_v=50\text{kPa}$ )

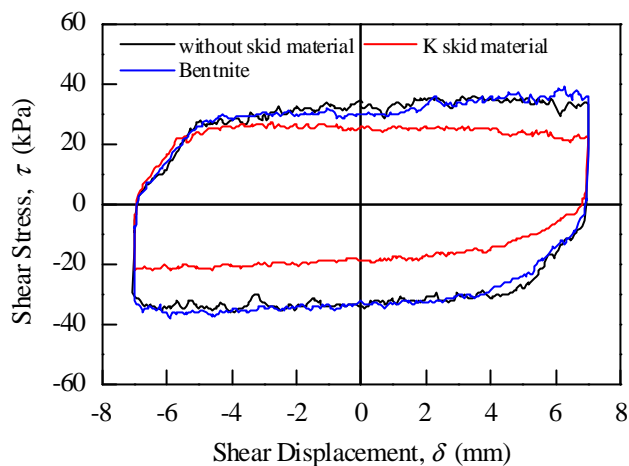


Fig.5 繰返し荷重 25 サイクル目におけるせん断応力-せん断変位関係 (砂試料,  $\sigma_v=50\text{kPa}$ )

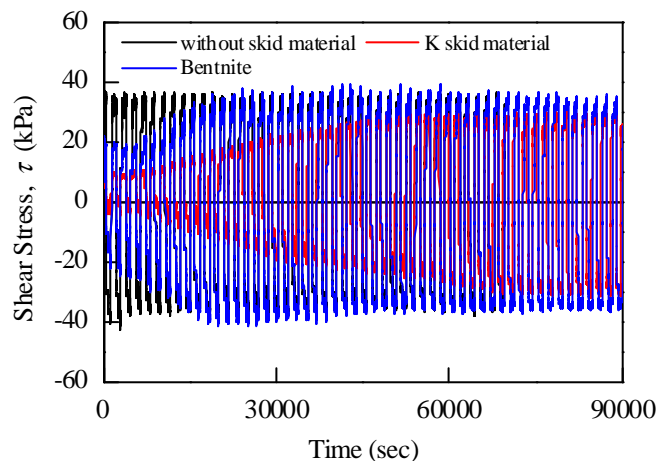


Fig.6 せん断応力の時刻歴 (砂試料,  $\sigma_v=50\text{kPa}$ )

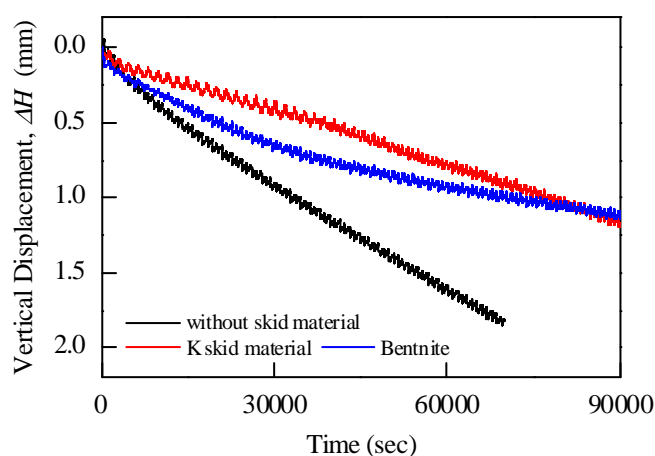


Fig.7 垂直変位の時刻歴 (砂試料,  $\sigma_v=50\text{kPa}$ )

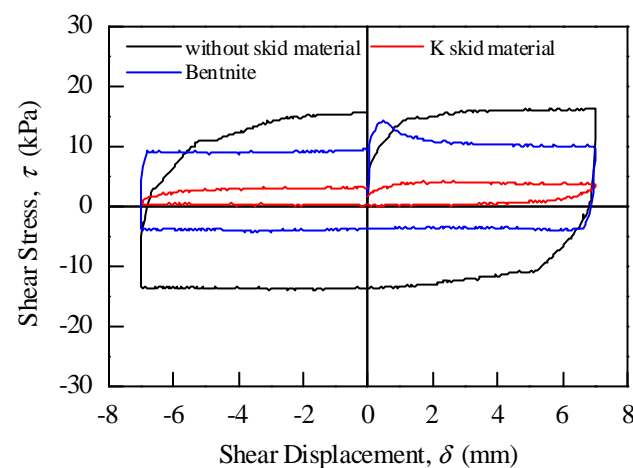


Fig.8 繰返し荷重 1 サイクル目におけるせん断応力-せん断変位関係 (粘土試料,  $\sigma_v=30\text{kPa}$ )

せん断変位の関係を、Fig.10 はせん断応力の時刻歴を、Fig.11 は垂直変位の時刻歴をまとめたものである。Fig.8 では、K 滑材が最も小さいせん断応力の値を示している。Fig.9 では、K 滑材は大きな値をと

り滑材未使用のケースの値に近づいているが、ベントナイトは1サイクル目とあまり値が変わらず、小さいせん断応力を保っている。Fig.10を見ると、K滑材のせん断応力は初期には小さいが、その後少し

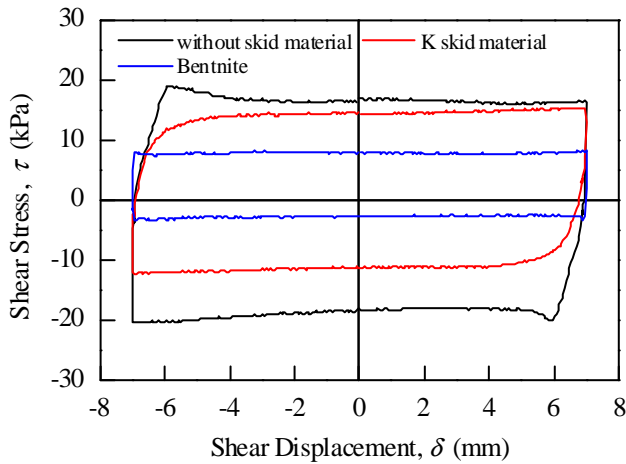


Fig.9 繰返し载荷 25 サイクル目におけるせん断応力-せん断変位関係 (粘土試料,  $\sigma_v=30\text{kPa}$ )

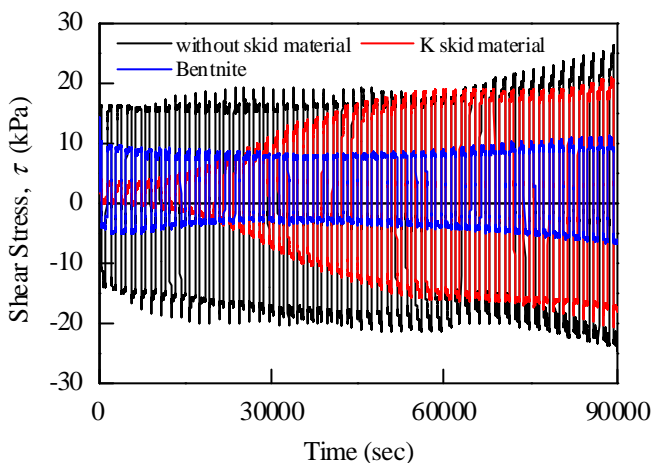


Fig.10 せん断応力の時刻歴 (粘土試料,  $\sigma_v=30\text{kPa}$ )

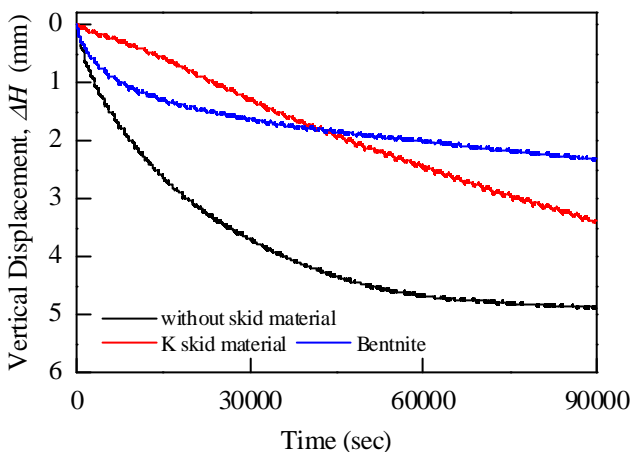


Fig.11 垂直変位の時刻歴 (粘土試料,  $\sigma_v=30\text{kPa}$ )

ずつ上昇していくのが分かる。一方、ベントナイト滑材は、せん断応力の増加はあまり見られず、一定値を保っている。Fig.11の鉛直変位は、初めのうちはベントナイトに比べK滑材の変位が小さいが、途中で変位が逆転しているため、長期的に見ればベントナイトの漏れが少ないと言える。

繰返しせん断試験で得られた結果から、繰返し数の増加にともない、摩擦(せん断応力)も大きくなっているのが分かる。そこで、繰返し回数1サイクル目、15サイクル目、25サイクル目、最終回においてそれぞれの摩擦係数を求め、比較・検討を行った。この最終回とは、1サイクル分のデータが取れた最終サイクルを指す。また、粘土試料に対するベントナイト滑材については繰返し回数が多いため、繰返し回数50回目の強度を追加している。粘土試料のせん断応力-垂直応力の関係をFig.12, 13に示す。

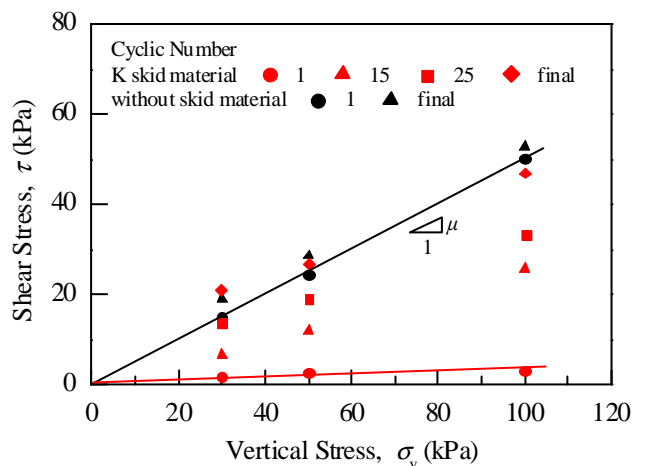


Fig.12 K滑材を用いたケースのせん断応力-垂直応力関係 (粘土試料)

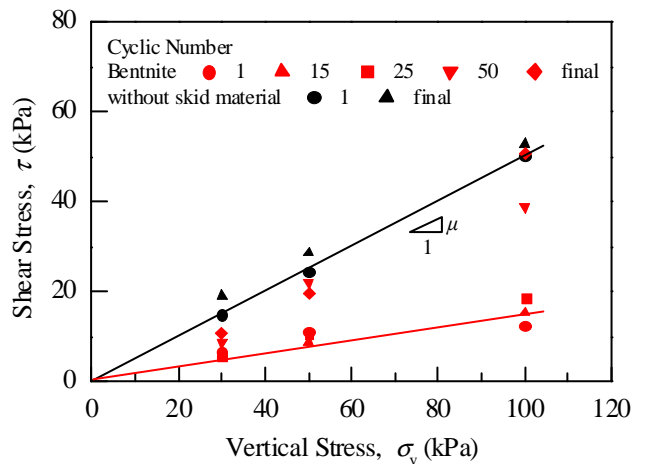


Fig.13 ベントナイト滑材を用いたケースのせん断応力-垂直応力関係 (粘土試料)

Fig.12, 13 より, K 滑材, ベントナイト滑材ともに, 繰返し回数が増えるごとに摩擦係数  $\mu$  が大きくなっていることがわかる. また, 垂直応力によらず, ほぼ一定の傾き (摩擦係数) であることが分かる.

繰返し数から求めたせん断距離を横軸に, Fig.12, 13 により求めた摩擦係数を縦軸にとった摩擦係数-せん断距離の関係を Fig.14 に示す. Fig.14 より, 粘土試料に対して K 滑材は初め摩擦係数が小さいが, すぐに上昇している. 一方ベントナイト滑材は, 長時間小さい摩擦係数を保っている. つまり, K 滑材は, ベントナイト滑材に比べ, 持続性に劣ると言える. K 滑材の初期摩擦低減効果が大きいのは, 圧密に時間がかかることでもわかるように, 液体に近い状態で滑材が残っているからであろう. K 滑材の摩擦低減効果の持続性がないのは, 滑材および粘土試料の漏れ方にあると思われる.

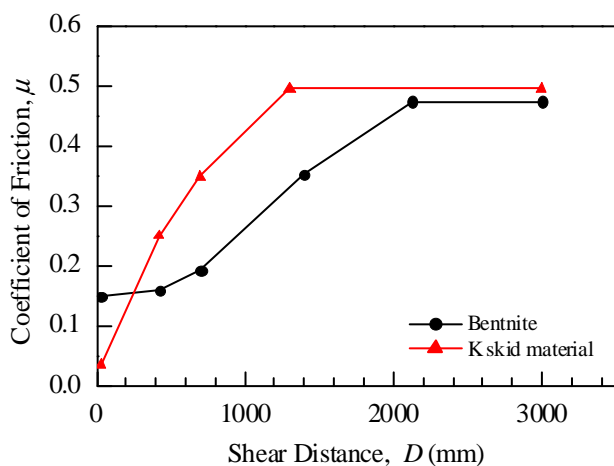


Fig.14 摩擦係数-せん断距離関係 (粘土試料)

Fig.15, 16 に, それぞれ K 滑材とベントナイト滑材の漏れの写真を示す. Fig.15 から柔らかくなった粘土試料が次々出てきている様子が見える. これは, K 滑材のヌメリ成分により, 粘土が柔らかくなってどんどん漏れてきていると思われる. 一方で, ベントナイト滑材の場合の漏れ方は, Fig.16 から液体というより, スライスされたような薄片が削り取られるようにして漏れていく. このため, 持続効果が大きいと考えられる. しかしながら, 実際の挙動を考えると, 滑材が同じ土の面にずっと存在するのではなく, 沈設して行くにつれて, 新しい土の面と接触するようになる. このような, ヌメリ成分による粘

土の軟弱化は, 1 つの指標ではあるが, 完全に実挙動と対応しているわけではない.

砂試料におけるせん断応力-垂直応力の関係を Fig.17, 18 に示す. 砂試料では垂直応力が 50kPa 以



Fig.15 K 滑材と粘土試料の漏出状況



Fig.16 ベントナイト滑材と粘土試料の漏出状況

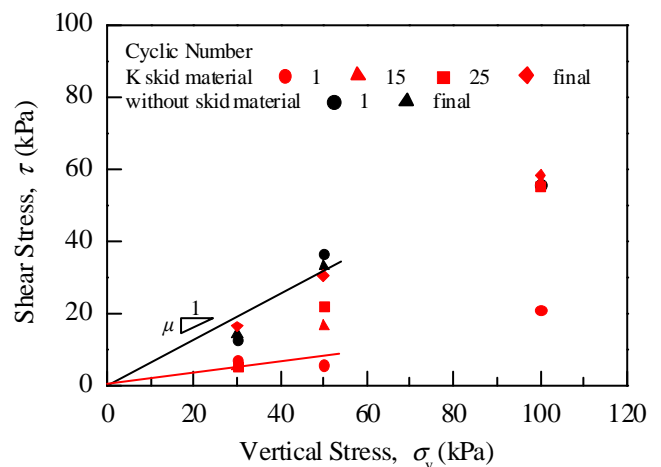


Fig.17 K 滑材を用いたケースのせん断応力-垂直応力関係 (砂試料)

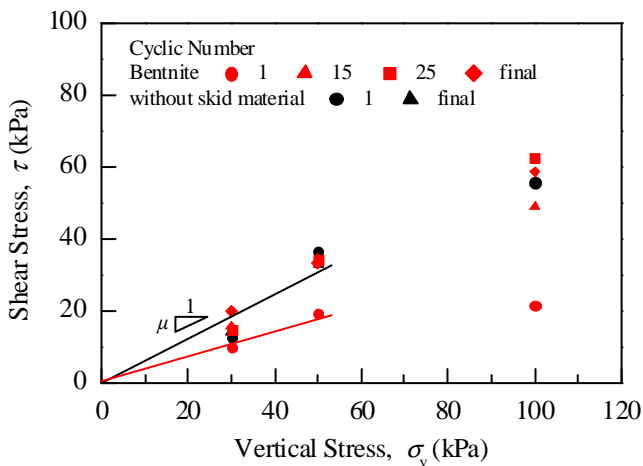
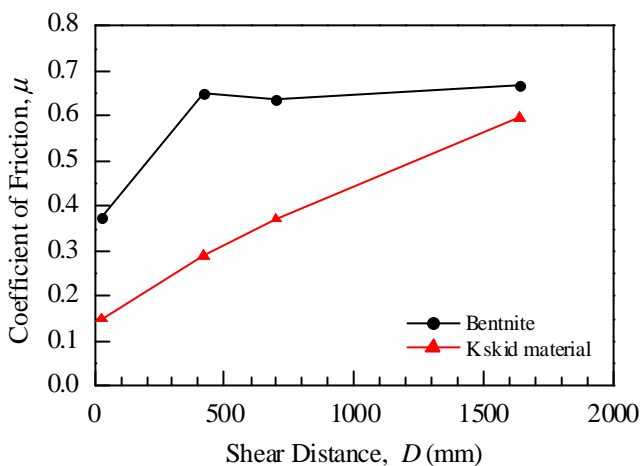


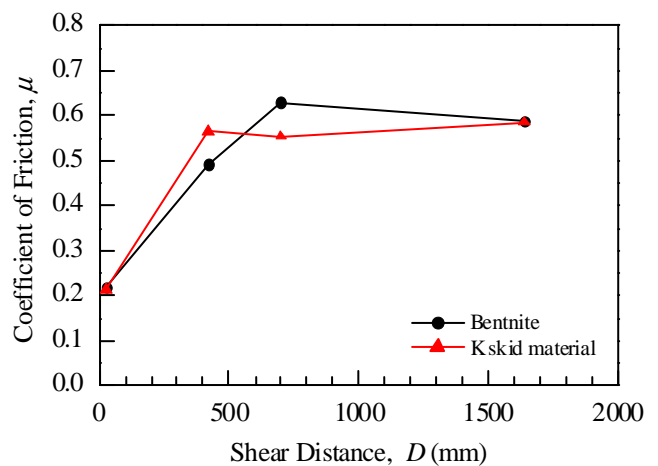
Fig.18 ベントナイトを用いたケースのせん断応力-垂直応力関係 (砂試料)

下と 100kPa で異なる特徴が見られたため、50kPa 以下と 100kPa の 2 つに分けて摩擦係数を求めた。両図より、K 滑材、ベントナイト滑材ともに垂直応力 50kPa 以下では繰返し数が増えるごとに摩擦係数が大きくなっていることがわかる。一方垂直応力 100kPa ではせん断回数が少ない段階で大きなせん断応力を取り、滑材の効果があまり持続しないことがわかる。

繰返し回数から求めたせん断距離を横軸に、Fig.17, 18 により求めた摩擦係数を縦軸にとった摩擦係数-せん断距離の関係を Fig.19 に示す。a 図より、垂直応力が小さい (50kPa 以下) 砂試料に対して K 滑材は、ベントナイト滑材より低い摩擦係数を維持していることがわかる。一方で b 図を見ると、垂直応力が大きい (100kPa) 砂試料に対して K 滑材とベントナイト滑材との間にあまり差はない。つまり、



(a) 垂直応力 50kPa 以下のケース



(b) 垂直応力 100kPa のケース

Fig.19 摩擦係数-せん断距離関係 (砂試料)

低垂直応力下で、摩擦低減性と持続性に優れるが、高垂直応力下では、ベントナイト滑材とほとんど差が無くなってしまふ。これは、K 滑材中のグミ状のものがつぶされてしまうかどうかによって挙動に違いが出ていると考えられる。

## 6. M 材を併用することによる摩擦低減性能の検討

M 材をモルタル面に塗布することにより、さらなる摩擦低減効果が見られるかに対しての試験結果を Fig.20~Fig.23 に示す。Fig.20, 21 は供試体に砂を用いたケース、Fig.22, 23 は粘土を用いたケースの結果である。Fig.20, 22 より、滑材を用いず、M 材のみ塗布した場合は、M 材の効果が出ていない。これは、用いたモルタル面が元々ある程度滑らかであったことも考えられる。しかしながら、M 材を K 滑材と併用すると、Fig.21, 23 のように、K 滑材のみよ

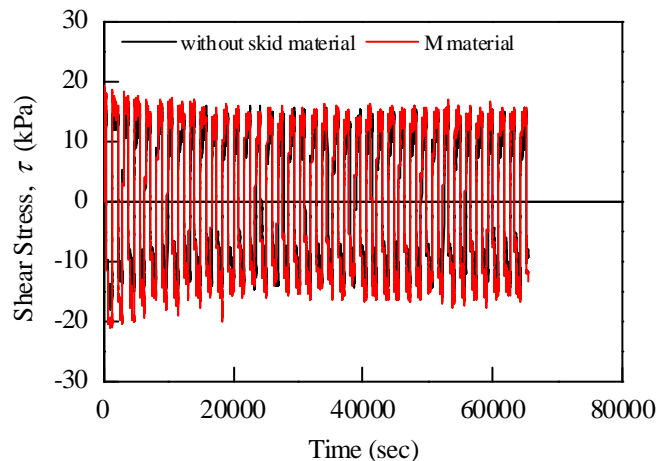


Fig.20 砂試料のせん断応力時刻歴 (M材,  $\sigma_v=30\text{kPa}$ , 比較対象: 滑剤なしのケース)

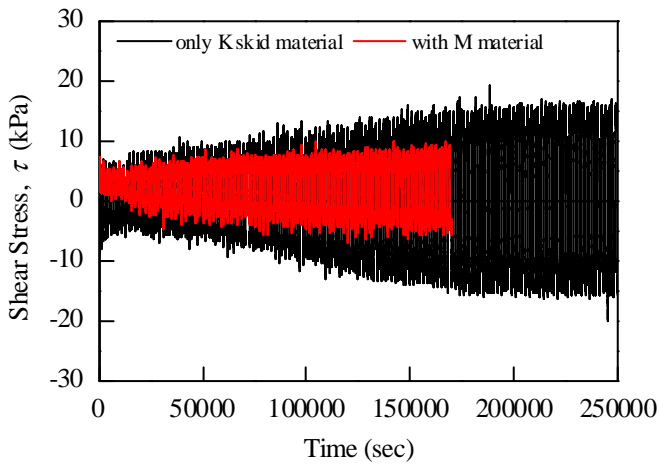


Fig.21 砂試料のせん断応力時刻歴 (K 滑剤と M 材,  $\sigma_v=30\text{kPa}$ , 比較対象: K 滑剤のみのケース)

りさらに低いせん断応力を取っている。詳細なメカニズムは不明であるが、K 滑材は、M 材を塗布されたモルタル面をよりスムーズに動ける可能性がある。ただし、値としては小さいため、試験精度や再現性の問題も考える必要がある。

## 7. 摩擦回復性能の検討

摩擦回復試験の試験結果を Fig.24 に示す。図より、K 滑材、ベントナイト滑材ともに、砂試料、粘土試料のどちらに対しても、滑材無しの場合に比べ高い強度を示している。ただし、K 滑材は砂試料の場合に比べ粘土試料の場合は強度回復が小さい。また、K 滑材と M 材を併用した場合、M 材無しのケースとほぼ同じ値を取っており、M 材による摩擦回復への影響は小さいようである。

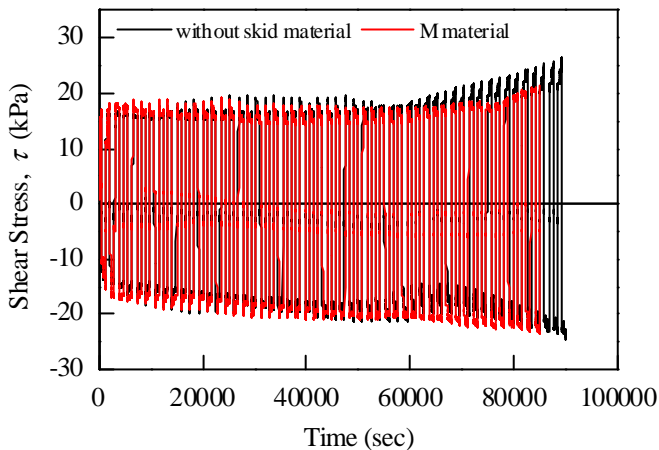


Fig.22 粘土試料のせん断応力時刻歴 (M 材,  $\sigma_v=30\text{kPa}$ , 比較対象: 滑剤なしのケース)

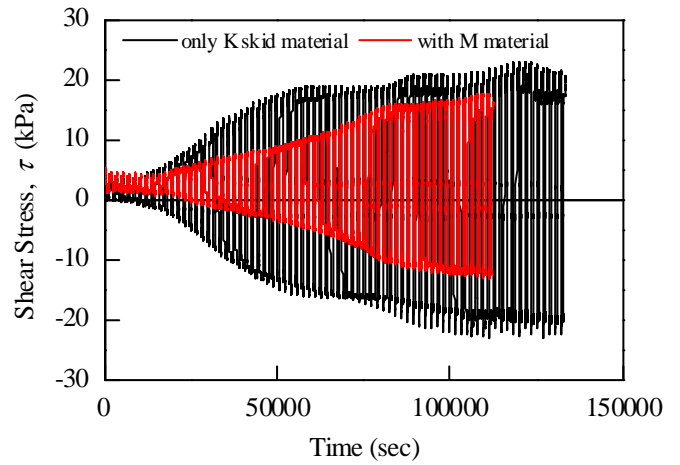
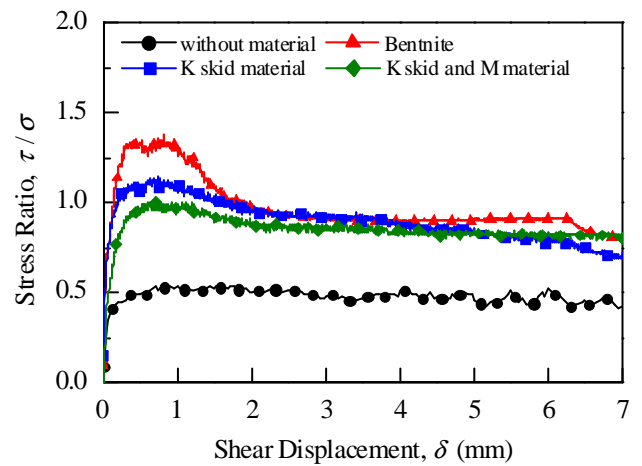
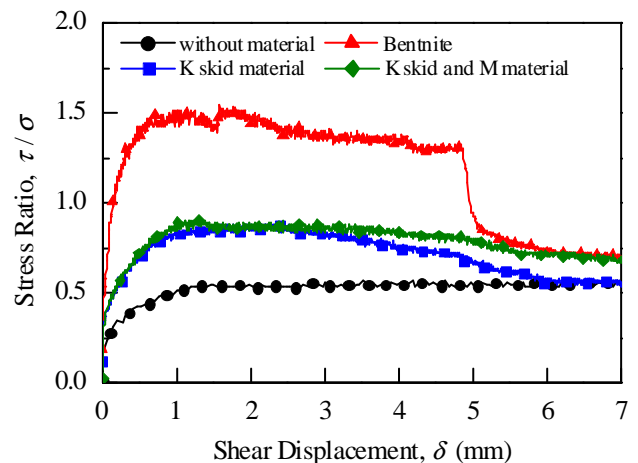


Fig.23 粘土試料のせん断応力時刻歴 (K 滑剤と M 材,  $\sigma_v=30\text{kPa}$ , 比較対象: K 滑剤のみのケース)



(a) 砂試料のケース



(b) 粘土試料のケース

Fig.24 グラウトを混入したケースの応力比-せん断変位関係

試験後の観察により、K 滑材の場合、グラウトとモルタルは、はがれていないようであった。ベント



ナイト滑材の場合、一部グラウトがモルタルからはがれ取れたりして、グラウトとモルタルの境界面ですべったかどうかは不明確であった。ベントナイト滑材のグラウトは、脆性的な固まり方（強度はあまりないが、パリパリ割れてしまう）をしていたのに対し、K滑材のグラウトは、延性的（ねっとりと貼り付いている感じ）であった。

この強度は、グラウトと土の破壊形態に大きく依存している。そこで、「モルタルとグラウトははがれない」として考えてみる。粘土試料の場合は、グラウトは粘土にほとんど染み込まないが、砂試料の場合は、グラウトの砂への染み込みが見られる。したがって、砂試料の場合は、砂とグラウトの摩擦だけでなく、砂粒子の固結も含んだ複雑な破壊をするため、ピーク後の残留強度が、モルタルと砂との摩擦より大きくなっていると考えられる。一方、粘土試料の場合は、粘土とグラウトとの摩擦しか発揮されないため、粘土とモルタルの摩擦と近いものになったと考えられる。

## 8. 結論

本研究からベントナイト滑材と比較した場合のK滑材の性能について、以下の知見が得られた。

- ①低拘束圧下で地盤に浸透しにくい。
- ②初期の摩擦低減効果に優れる。
- ③低拘束圧の砂地盤に対し持続力に優れる。
- ④粘土地盤に対し持続力に劣る。
- ⑤M材は単体で使用すると摩擦低減効果を得られないが、K滑材と併用することで摩擦低減効果が高まる。
- ⑥グラウトの混入により、滑材を用いない場合より高い強度まで回復する。ただし、粘土地盤に対しては、強度回復は小さい。また、この強度回復に、M材の影響は小さい。

以上より、K滑材はベントナイト滑材に劣らない性質を持っているが、特に、K滑材は10m以浅の砂地盤に対して高い潤滑性能を発揮することができる結論付けられる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、長岡技術科学大学地盤工学研究室研究補助員の高田晋氏より、実験の方法や論文のまとめ方についてご指導をいただきました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土質工学会，ケーソン工法の調査・設計から施工まで，1985。