

## 直接せん断試験による固化処理土と帯鋼補強材間のせん断特性の検討

Consideration on Shear Strength Mobilized between Strip-Reinforcement and Cement Treated Soil  
Using Direct Shear Test

藤井 雅規	Masanori FUJII	(山口大学大学院理工学研究科)
鈴木 素之	Motoyuki SUZUKI	(山口大学大学評価室)
田坂 行雄	Yukio TASAKA	(宇部興産株)
米田 修	Osamu YONEDA	(宇部興産株)
杉山 洋介	Yosuke SUGIYAMA	(基礎地盤コンサルタンツ株)
志村 直紀	Naoki SHIMURA	(ヒロセ株)

補強土壁工法では、盛土材として不適とされる粘性土やシルトの場合、セメント系固化材で固化処理をして用いられるケースがある。これは、近年現場発生土で良質な土質材料の入手が困難なためである。固化処理土における補強メカニズムを解明する上で、補強材と処理土との間のせん断特性を検討するための一面せん断試験を行った。実験では、せん断箱の下箱側を補強材である鋼材に置き換え、上箱に厚さ 1cm、直径 6cm の土供試体を載せ、所定の圧密応力で鋼材に密着させて行った。本文では、固化処理の有無、平滑およびリブ付鋼材の違いがせん断特性に及ぼす影響について考察した。結果の一つとして、リブ付鋼材を用いることにより、せん断強さが上昇することが分かった。

キーワード：補強土、固化処理土、直接せん断試験 せん断特性

(IGC : D10)

## 1. はじめに

補強土壁工法とは補強盛土の一つであり、特に法面は鉛直に近く、壁面工、補強材および盛土材からなる土留め構造物である。補強メカニズムは壁面工に作用する土圧力に対して盛土内に敷設した引張り補強材の引抜き抵抗力によって釣りを保ち、土留め壁としての効果を発揮させるものである。補強土壁工法の盛土材には、摩擦抵抗を十分に見込める砂質土系の土質材料が選定されるが、近年、そうした材料の大量入手が困難になっている。そこで、盛土材として細粒分含有率の高い土に対してセメント系固化材により土質改良された現場発生土が利用されている<sup>1)4)</sup>。しかし、現状では帯鋼補強土壁工法は固化処理土の特性を考慮した設計体系になっていない。しかも検討の中心となる従来の引抜き試験では、処理土中の全長にわたって均一な引抜き抵抗が発生しているか否か、補強材延長での応力状態がどのようになっているかは不明である。そこで、本研究では、補強材と処理土の間のせん断特性を、直接せん断試験のような、せん断面の明確な応力状態のもとで把握するため、一面せん断試験機を用いて補強材の種類、圧密応力の大きさ、载荷方法、せん断速度等が異なる条件で、鋼材と処理土のせん断特性について検討した。本論文では、その結果と考察について記述する。

## 2. 土と異種材料の摩擦特性に関する既往の研究

表-1に土と鋼材の間の摩擦特性に関する既往の研究<sup>5)~9)</sup>を示す。

Uesugi et al.<sup>10)</sup>により、摩擦境界面付近で観測される砂鋼材間の摩擦における砂粒子の挙動については以下のことが示されている。

- ① 摩擦抵抗力のピーク時以前では、砂粒子の流動はほとんど見られない。境界が粗い面では、砂粒子は滑動・回転・上昇・下降などの挙動をみせる。境界が滑らかな面では大きな変形もなく砂塊として変形する。
- ② せん断域は、砂と鋼がスライドしている間に粗面に沿って生じる。もし、境界面が滑らかであれば、せん断域は発生しない。
- ③ スライド変位量は、鋼とアルミフレーム底部との相対的な変位量として定められる。

なお、この変位量には、正味の境界面のスライド量と、砂部の粗面に沿ったせん断域のゆがみ量が含まれている。このとき、境界面が滑らかであれば、底フレーム部に対する鋼の相対的な変位量はほぼ正味の境界面のスライド量に等しくなる。

一般には、Potyondy<sup>11)</sup>により、土と異種材料が接触して滑るときにせん断応力  $\tau$  は、土の粘着力  $c$  および内部摩擦角  $\phi$  とそれぞれの材料間の係数を用いてクーロンの摩擦則の式で表されることが示されている。

表-1 土と鋼材の間の摩擦特性に関する既往の研究

検討項目	試料	装置	主な知見	文献
表面粗さ	砂	単純せん断	砂の種類および鋼材の表面粗さは摩擦係数に影響を及ぼす	上杉ら <sup>5)</sup> (1985)
	粘土	三軸スライスせん断	接触面摩擦角は表面粗さのみではなく材質にも影響される	内田ら <sup>6)</sup> (1999)
	粘土	一面せん断	粘土-鋼材間の摩擦抵抗は鋼材の表面粗さの影響を受ける	椿原ら <sup>7)</sup> (1988)
平均粒径	砂	単純せん断	垂直応力と砂の平均粒径は摩擦係数に影響を及ぼさない	上杉ら <sup>5)</sup> (1985)
	砂	リングせん断	降伏時の摩擦係数は、砂の初期平均粒径が小さくなると増大する傾向がある	澤田ら <sup>8)</sup> (1999)
圧密応力	粘土	一面せん断	粘土-鋼材間の摩擦抵抗は粘土の圧密応力の影響を受ける	椿原ら <sup>7)</sup> (1988)
せん断速度	粘土	一面せん断	せん断速度が10倍になると粘土のせん断強度は10%増となる	椿原ら <sup>9)</sup> (1990)
その他	粘土	—	粘土のせん断強さおよび摩擦抵抗に関して、一面せん断型は単純せん断型よりも高い強度を与える	椿原ら <sup>9)</sup> (1990)

(1)

ここに、 $f_c$  および  $f_\phi$  は土の粒度分布，含水比，摩擦面に作用する垂直応力，材料の表面粗さに関する係数， $f_c c = c_a$ （土と鋼材の付着力）， $f_\phi \phi = \delta$ （土と鋼材の摩擦角）である。そのなかで、粘土は  $f_c$  が0.50， $f_\phi$  が0.25（鋼材が滑らかな場合）もしくは0.50（鋼材表面が粗い場合）を与えれば良いことを提案した。

### 3. 直接せん断試験

#### 3.1 直接せん断試験装置の概略

図-1に本研究で用いた試験装置の模式図を示す。また、写真-1に一面せん断試験装置を示す。本装置は①せん断箱、②補強材、③ペロフラムシリンダー、④せん断力载荷装置、⑤垂直変位とせん断変位を測定する変位計から構成される。

①せん断箱 せん断箱は直径6 cm，高さ2 cmを標準とする供試体を納める内面の滑らかな金属製の箱であり，上下に二分され，上箱の可動箱が下箱の固定箱に対して平行に移動でき，上下箱間に所定のすき間を設定できる機構を有している。本試験では，せん断箱の下箱に補強材と見立てた平滑またはリブ付鋼材を設置する。供試体は直径6 cm，高さ1 cmのものを上箱に納め，せん断面を試料と鋼材の境界に設定する（図-1参照）。

②補強材 補強材には，平滑またはリブ付鋼材を用いた（写真-2，図-2参照）。供試体に対して十分な大きいものを下箱に取り付けた。せん断時には下箱が可動箱となる。

③ペロフラムシリンダー ペロフラムシリンダーにより，土試料に载荷板より所定の鉛直力  $F_v$  を加える。 $F_v$  はロードセルによって計測され，データロガーに記録される。

④せん断力载荷装置 せん断面に所定のせん断力  $F_H$  を加える装置である。 $F_H$  はロードセルによって計測され，データロガーに記録される。

⑤変位計 せん断変位  $D$ ，鉛直変位  $v$  は電気式変位計で計測され，データロガーに記録される。

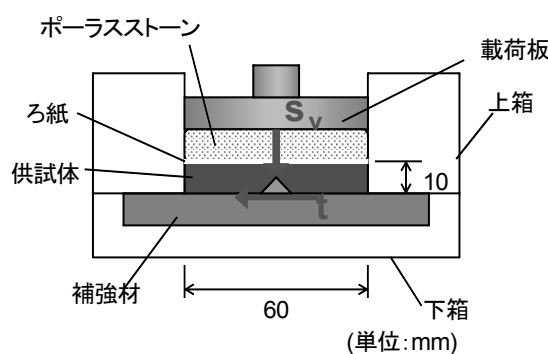


図-1 一面せん断試験装置模式図

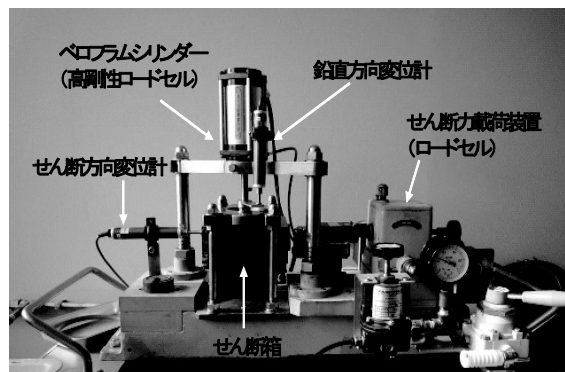


写真-1 一面せん断試験装置

#### 3.2 供試体作成方法および試験手順

本試験の試験手順を以下に示す。

① 表-2に試料土の物理的性質を示す。試料土を所定の初期含水比  $w_0$  に調整するため加水し，所定の固化材添加量  $Q_c$  を粉体の状態で添加し，攪拌する。なお，初期含水比  $w_0$  は液性限界とした。

② 下箱に補強材となる鋼材（平滑またはリブ付）を設置する。

- ③ 供試体を以下の2通りの方法 (a法, b法) で作製した。  
 a法: 直径6 cm, 高さ1 cm のカッターリングに土試料を詰め, せん断箱内に投入した。鉛直圧力の载荷により鋼材と供試体を密着させた。  
 b法: 含水比調整した試料を初期高さ1 cm となるように, せん断箱内で詰めた。  
 ④ 供試体上面にろ紙およびポーラスストーンを設置する。  
 ⑤ バロフラムシリンダーにより所定の圧密応力  $\sigma_c$  を加える。  
 ⑥ 未処理土の場合, 圧密終了を確認した後 (圧密の打ち切り時間を3t 法により決定), 直ちにせん断を開始する。固化処理土の場合, 所定の養生時間  $T_c$  の後に, せん断を開始する。いずれの条件でも, 初期の  $\sigma_v$  を一定とした条件でせん断試験を行う。  
 ⑦ D が7.2 mmに達したら試験を終了とする。

#### 4. 試験結果

##### 4.1 試験ケース

表-3に試験ケースおよび試験結果を示す。土試料はシルト (川上シルト) および粘性土 (美東粘性土) を使用した。固化材は一般軟弱土用セメント系固化材 (以下, 固化材と称す) を使用した。試験ケースは2種類の供試体作製法を用い, 固化材添加量  $Q_c$  としては, 川上シルトの場合  $Q_c=50 \text{ kg/m}^3$ , 美東粘性土の場合,  $Q_c=60, 80 \text{ kg/m}^3$ とした。養生時間  $T_c$  としては, 未処理土の場合は30分, 処理土の場合は1~3日とした。せん断速度  $\dot{D}$  は0.02, 0.2 mm/min と変化させた。遅延载荷時間  $\Delta T$  は1, 2, 3日とし,  $\sigma_c$  は50~300 kPaの間で変化させた。遅延载荷時間  $\Delta T$  とは供試体設置から  $\sigma_c$  を载荷するまでの時間を意味している。

##### 4.2 未処理土および処理土のせん断挙動

###### 4.2.1 平滑補強材のせん断挙動

図-3, 図-4にそれぞれ未処理土および処理土の  $\tau \sim v \sim D$  関係を示す。補強材は平滑補強材を用いている。試料土は川上シルトである。未処理土の場合, せん断応力がピークを示した後は, ほとんど低下しないまま定常状態に落ち着いている。一方, 処理土の場合, せん断応力がピークに達すると急激に減少し, ピーク値からおよそ半分の値で定常状態になる傾向が見られる。未処理土と比較すると処理土の方がピーク値 (せん断強さ  $\tau_f$ ) は非常に高くなっていることが分かる。鉛直変位については, ひずみ軟化挙動を示したケースでは, せん断応力の急減を境に収縮から膨張に転じている。

図-5, 図-6に美東粘性土の固化処理の有無別の  $\tau \sim v \sim D$  関係を示す。未処理土の場合, 川上シルトと同様な挙動であり, ピーク後は定常状態になっている。処理土の場合も,  $\sigma_v=150 \text{ kPa}$ の時の挙動がそれ以外と比べて異なり, ひずみ軟化挙動を示している。

表-2 試料土の物理的性質

試料名	川上シルト	美東粘性土
自然含水比 (%)	22.2	27.5
土粒子の密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	2.6	2.8
礫分 (%)	8.0	2.4
砂分 (%)	39.1	29.0
シルト分 (%)	38.9	38.1
粘土分 (%)	14.0	30.5
細粒分含有率 (%)	52.9	68.6
液性限界 (%)	43.5	45.0
土質分類	シルト [ML]	粘土 [CH]

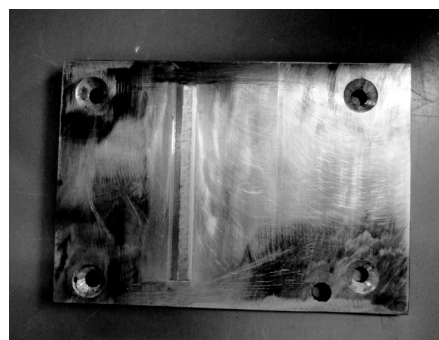
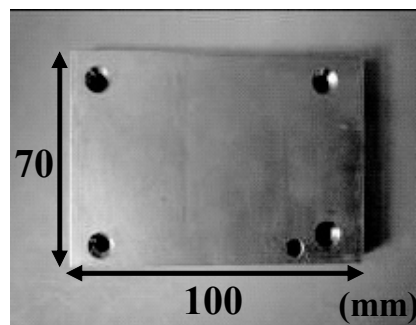


写真-2 下箱設置用の補強材 (上: 平滑, 下: リブ付)

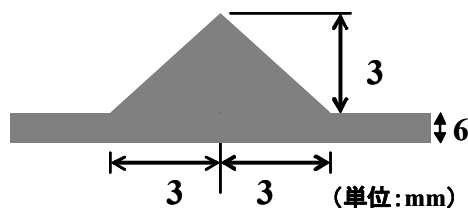


図-2 リブ付補強材のリブの寸法

###### 4.2.2 リブ付補強材のせん断挙動

図-7, 図-8にそれぞれ未処理土および処理土で, リブ付補強材を用いた場合の  $\tau \sim v \sim D$  関係を示す。試料土は川上シルトである。平滑補強材のケースと同様に, 固化処理を施すことによって, せん断強さは大幅に上昇している。未処理, 処理土ともに  $\tau \sim D$  関係は, 単調増加を示している。また, 処理土の場合, 鉛直変位については, ひずみ硬化挙動を示すものの, 収縮から膨張側に変化している。

表-3 直接せん断試験の試験結果

試験番号	試料土	固化材 添加量 Qc (kg/m <sup>3</sup> )	補強材 種類	遅延載荷 時間 ΔT(day)	圧密応力 σc (kPa)	圧密養生 時間 Tc	せん断 速度 D (mm/min)	最大せん断応力時		粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 φ (°)		
								せん断強さ τr (kPa)	鉛直応力 σvr (kPa)				
K-1	川上 シルト	0	平滑	0	50	30分	0.2	20.4	43.6	3.7	22.6		
K-2					100			40.6	93.8				
K-3					150			70.9	158.0				
K-4					300			121.3	290.7				
K-5			リップ付		50			72.3	70.9	33.8	29.7		
K-6					100			112.8	130.7				
K-7					150			124.6	180.8				
K-8			平滑		50			0	150	1日	0.02	147.4	184.5
K-9		200		236.1		259.5							
K-10		250		257.6		310.3							
K-11		100		121.4		120.0							
K-12		150		183.8		192.8	37.5		37.6				
K-13		200		234.8		253.6							
K-14		300		315.2		369.0							
K-15		100		18.0		0.0	-	-					
K-16		200		47.8		0.0							
K-17		300		53.1		0.0							
K-18		リップ付		50		126.2	129.9	29.6	39.0				
K-19				100		226.0	218.0						
K-20			150	246.7	282.7								
K-21		平滑	50	0	100	3日	0.2	170.4	140.4	19.2	42.6		
K-22					150			166.9	182.0				
K-23					200			249.0	263.9				
K-24					300			386.8	390.2				
K-25				1	150			129.8	178.6	60.8	24.7		
K-26					200			207.5	248.2				
K-27					300			211.9	337.5				
K-28					100			87.7	111.9				
K-29		2	200	127.9	209.1	52.9	19.4						
K-30			300	161.9	311.6								
K-31			100	84.5	104.5								
K-32		3	200	113.1	204.2	55.5	15.5						
K-33			300	141.4	310.0								
K-34			100	71.4	110.4								
K-35		0	200	113.6	205.9	36.9	19.0						
K-36			300	140.6	308.6								
M-1	美東 粘性土		0	平滑	0			50	30分	0.2	22.3	44.5	5.96
M-2		100				43.4	98.2						
M-3		150				61.8	150.2						
M-4		60	50			34.2	56.3	0.57	29.9				
M-5			100			45.8	109.6						
M-6			150			137.7	177.2						
M-7		80	200			100.3	214.5	21.8	41.2				
M-8			50			81.4	69.3						
M-9			100			139.1	132.7						
M-10		0	200	264.4	278.2	56.8	41.4						
M-11			50	160.0	120.1								
M-12			100	264.7	224.5								
M-13		60	150	295.8	276.0	52.7	41.7						
M-14			50	225.2	191.4								
M-15			100	296.9	272.3								
M-16		80	150	338.2	319.8	37.7	43.0						
M-17			50	203.7	175.8								
M-18			100	300.4	286.3								
M-19		200	479.6	473.1									

直接せん断試験による固化処理土と帯鋼補強材間のせん断特性の検討

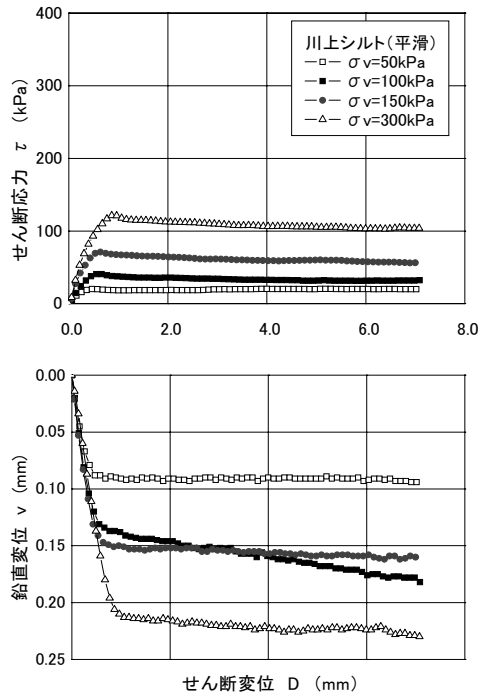


図-3 平滑補強材使用時の未処理土のせん断挙動 (川上シルト)

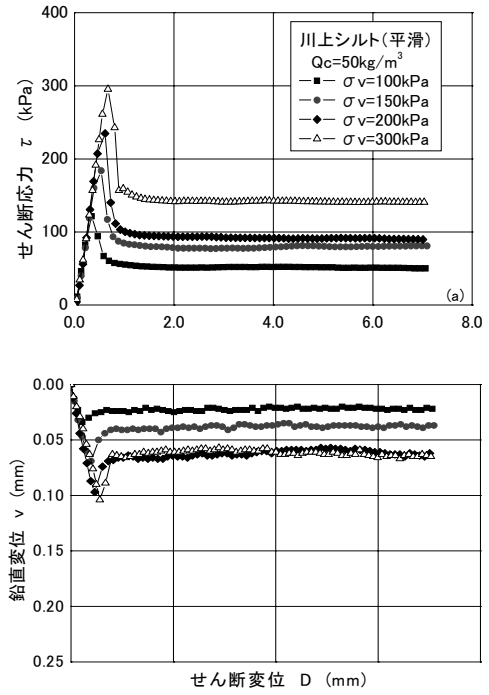


図-4 平滑補強材使用時の処理土のせん断挙動 (川上シルト)

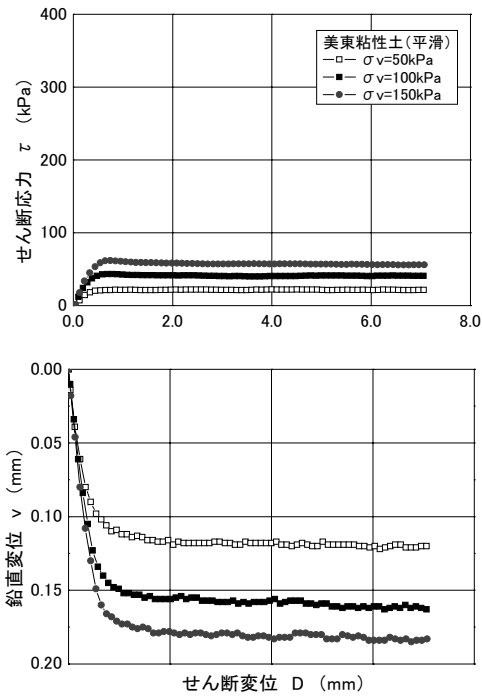


図-5 平滑補強材使用時の未処理土のせん断挙動 (美東粘性土)

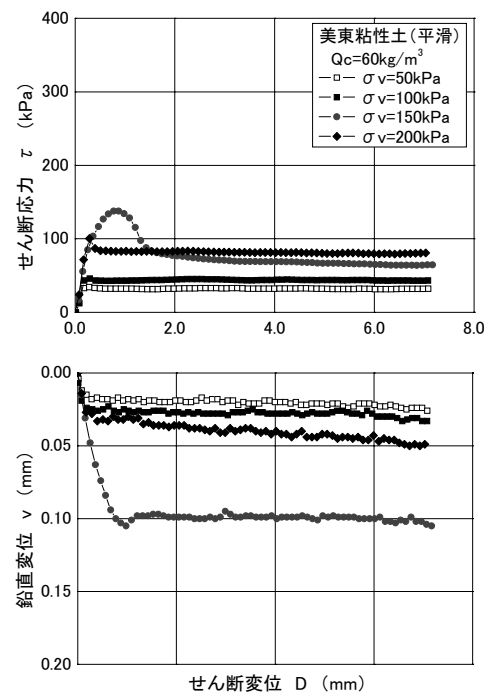


図-6 平滑補強材使用時の処理土のせん断挙動 (美東粘性土)

図-9, 図-10に美東粘性土の固化処理の有無別の  $\tau \sim v \sim D$  関係を示す. 川上シルトと同様に, 未処理土よりも処理土の方がせん断強さは大きく, せん断時の体積変化も似たような挙動を示している. 川上シルトと美東粘性土を比較してみると, 美東粘性土の方が固化処理の効果は小さいことが分かる.

4.2.3 平滑補強材でのせん断強度線

図-11に川上シルトの未処理土と処理土のクーロンの破壊規準線 (以下, 破壊線と称す) を示す. 未処理土に固化処理を施すことで, せん断強さは増加している. これは処理土が圧密されて, 密度が高くなったためと考えられる. その結果, 見かけの粘着力  $c$  だけでなく内部摩擦角  $\phi$  までもが上昇したと考えられる.

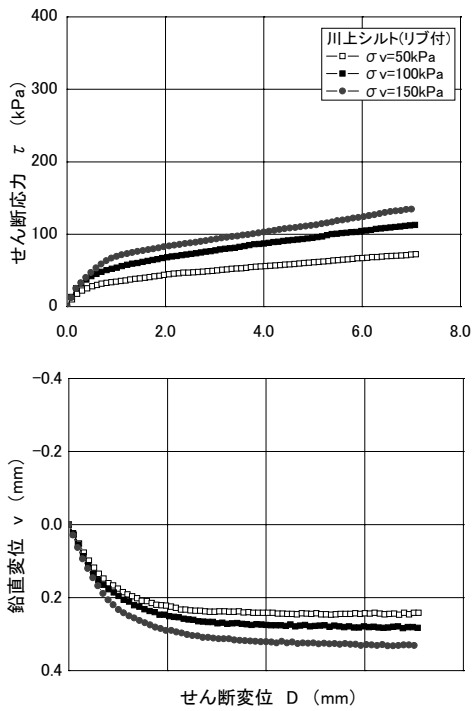


図-7 リブ付補強材使用時の未処理土のせん断挙動 (川上シルト)

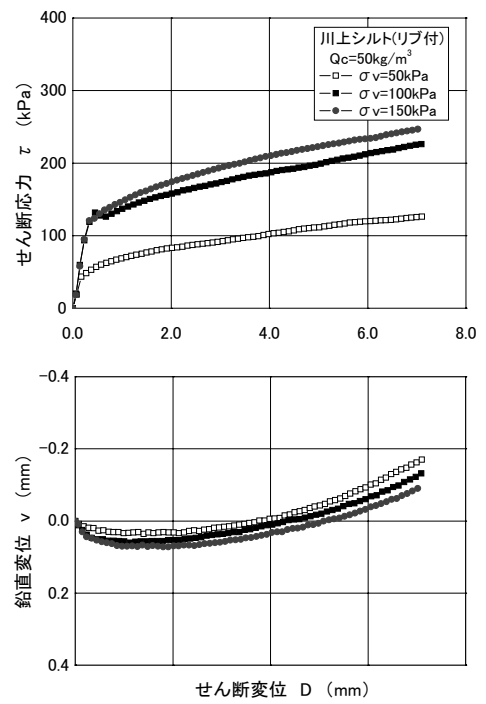


図-8 リブ付補強材使用時の処理土のせん断挙動 (川上シルト)

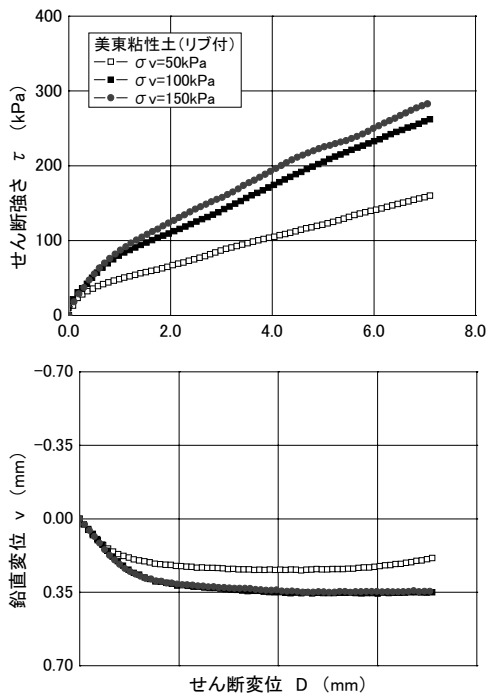


図-9 リブ付補強材使用時の未処理土のせん断挙動 (美東粘性土)

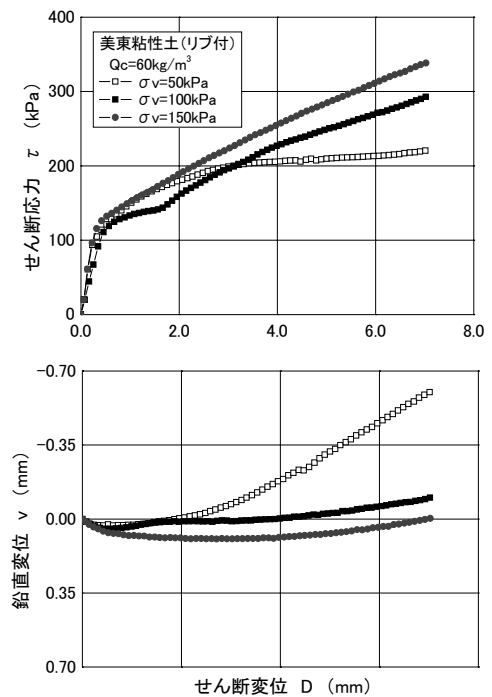


図-10 リブ付補強材使用時の処理土のせん断挙動 (美東粘性土)

図-12に美東粘性土の破壊線を示す。破壊線には固化処理の効果が現れており、 $Q_c$ によって破壊線に差が生じている。図-13に美東粘性土の $Q_c$ と一軸圧縮強さ $q_u$ の関係を示す。 $Q_c$ が少ないと、せん断強さの増加が小さいことがわかる。美東粘性土の場合、 $Q_c=60, 80 \text{ kg/m}^3$ では固化処理の効果が小さいことが、一軸圧縮強さの点からもいえる。

#### 4.2.4 リブ付補強材でのせん断強度線

図-14に川上シルトの未処理土と処理土の破壊線を示す。固化処理を施すことにより、破壊線が上位になり、 $c$ は変わらず、 $\phi$ が増加したことがわかる。

図-15に美東粘性土の破壊線を示す。未処理土と処理土の破壊線はほぼ同じである。この理由として単調増加型の引抜き挙動を示すリブ付補強材使用時のせん断強さがピークに達していなかったためと考えられる。美東粘性土は川上シルトに比べてリブの効果を受けにくい土質である。

直接せん断試験による固化処理土と帯鋼補強材間のせん断特性の検討

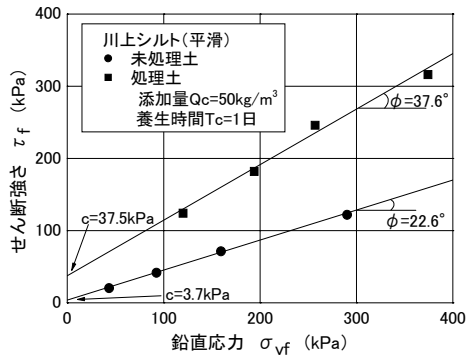


図-11 川上シルトにおける未処理土と処理土の破壊線 (平滑補強材)

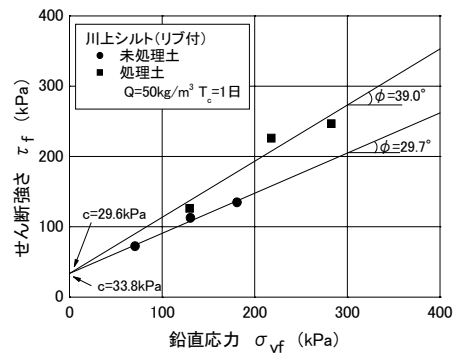


図-14 川上シルトにおける未処理土と処理土の破壊線 (リブ付補強材)

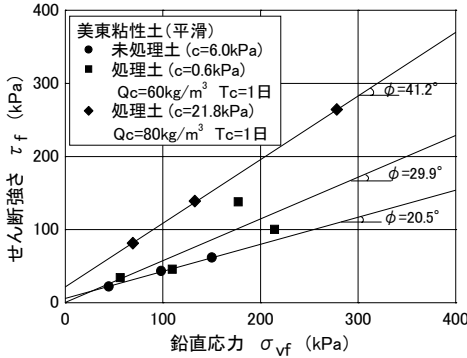


図-12 美東粘性土における未処理土と処理土の破壊線 (平滑補強材)

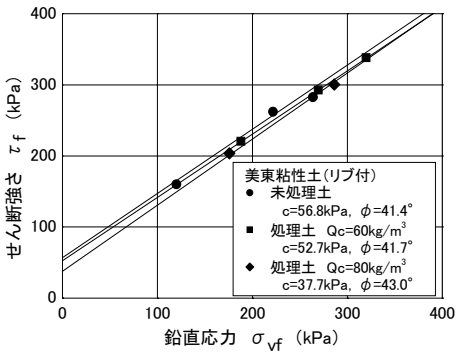


図-15 美東粘性土における未処理土と処理土の破壊線 (リブ付補強材)

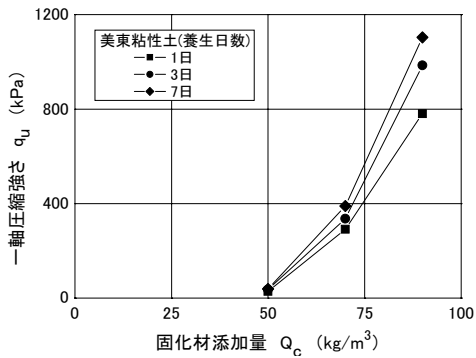


図-13 固化材添加量と一軸圧縮強さの関係

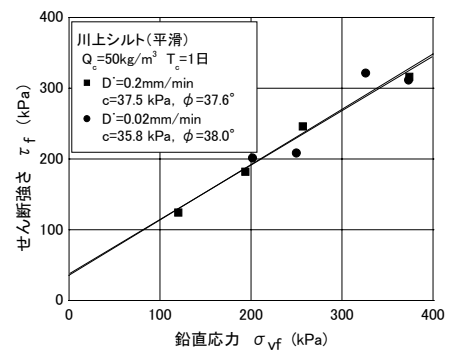


図-16 せん断速度の異なる条件の破壊線

4.2.5 せん断速度の影響

図-16に、せん断速度の異なる条件での処理土の $\tau_f$ とその時の鉛直応力 $\sigma_{vf}$ に対するクーロンの破壊線を示す。せん断速度 $D$ は0.02, 0.2 mm/minの2通りで行った。同図から、 $\tau_f$ に $D$ の大きさによる差異は見られなかった。この原因としては、処理土の透水性が下がるが、この範囲においてはせん断速度の影響は小さいとみてよい。

4.2.6 圧密後の無載荷条件による影響

図-17に圧密養生後、同じ鉛直応力をかけたまません断した圧密養生試験と鉛直応力を除荷してせん断を行う圧密養生後除荷試験の結果を示している。試験結果より、圧密養生後に除荷した試験ではせん断強さが圧密養生試験の見かけの粘着力付近にあることから、処理土と鋼材の間のせん断強さはクーロンの破壊規準に従うものと考えられる。

4.2.7 遅延載荷の影響

図-18に、1日間養生で $\Delta T$ が異なる条件下での破壊線を示す。 $\Delta T$ は供試体をせん断箱に設置してから、 $\sigma_c$ を載荷するまでの時間とした。すなわち、 $\Delta T=0$ 日は供試体設置後に圧密を開始すること、 $\Delta T=1$ 日は供試体設置後に1日間、無載荷条件で養生させてから、せん断前に $\sigma_c$ を載荷することを意味している。試験結果より、 $\Delta T=1$ 日は $\Delta T=0$ 日に比べて $\tau_f$ が低下している。これは圧密をせずに養生したために、鋼材との付着力が低下した可能性が考えられる。

図-19に、3日間養生で $\Delta T$ が異なる条件下での破壊線を示す。図-20に遅延載荷試験のイメージ図を示す。こちらも図-18の結果と同様、 $\tau_f$ が低下している。また、遅延載荷時間がいくらであろうと、強度低下にあまり差は見られない。すなわち、供試体設置後直ちに圧密応力を載荷させないと、後から $\sigma_c$ を載荷しても鋼材との付着力が低下した可能性が考えられる。

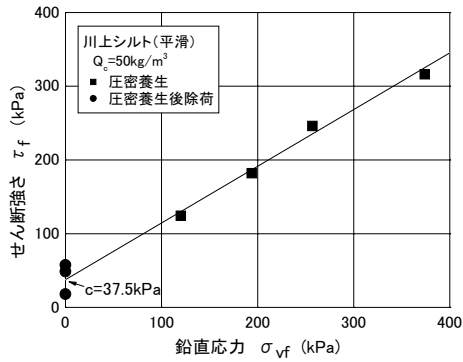


図-17 圧密養生後の鉛直応力の異なる条件の破壊線

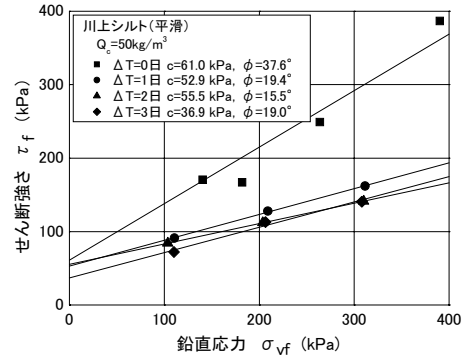


図-19 遅延載荷時間の異なる条件の破壊線 (3日養生)

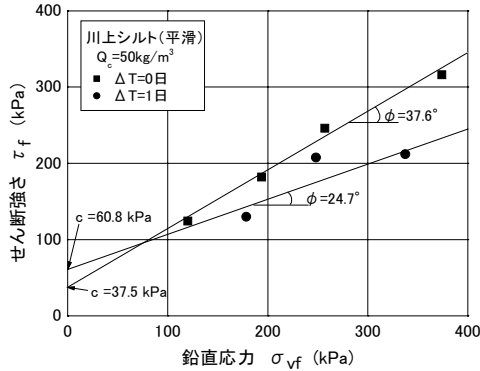


図-18 遅延載荷時間の異なる条件の破壊線 (1日養生)

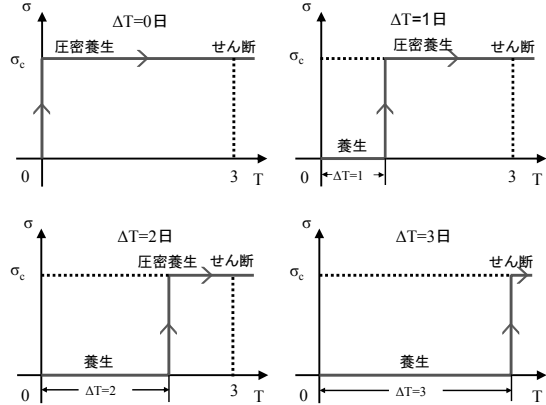


図-20 遅延載荷試験のイメージ図 (3日養生)

5. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1 未処理土に固化処理を施すことで、処理土と鋼材の間のせん断強さ自体は増加することがわかった。試料土、固化材添加量、補強材の種類によって固化処理の効果に差が生じる。リブ付補強材使用時の美東粘性土の破壊線を比較すると、差はないように見えるが、同じ圧密応力のもとでせん断強さを比較すると処理土の方がせん断強さは大きい。
- 2 リブ付補強材の効果により、見かけの粘着力と内部摩擦角の増加がみられた。
- 3 今回、試料土による固化処理土ではせん断強さの大半は摩擦性材料としての力学的性質が卓越していた。
- 4 処理後、一定の時間をあけてから鉛直応力を載荷してもせん断強さは増加しない。

参考文献

- 1) 上澤充, 井上和美, 田畑秀典, 長友重典: 改良土を盛土材料に用いたテールアルメのストリップ引抜き試験報告, 第30回土質工学研究発表会, pp.2369-2370, 1995.
- 2) 熊田哲規, 高尾浩司郎, 大谷義則, 渡辺恵二: 土質安定処理土における帯製帯状補強材の引抜き試験, 第33回地盤工学研究発表会, pp.2337-2338, 1998.
- 3) 小川憲保, 川口一男, 天野正道, 岡野実: テールア

ルメ壁面の変位計測(その3)盛土材が軽量盛土材, 改良土の場合, 第28回土質工学研究発表会, pp.2763-2764, 1993.

- 4) 佐野研二, 小川憲保, 後藤年芳: セメント系固化材で改良した焼却汚泥灰のテールアルメ盛土材への適用, 第31回地盤工学研究発表会, pp.2397-2398, 1996.
- 5) 上杉守道, 岸田英明, 長野太郎: 砂-鋼材間の摩擦に影響を与える諸要因, 第20回土質工学研究発表会, pp.377-378, 1985.
- 6) 内田浩平, 落合英俊, 林重徳, 梅崎健夫, 三倉義教: 粘土と鋼材の摩擦特性, 第28回土質工学研究発表会, pp.1429-1430, 1993.
- 7) 椿原康則, 岸田英明, 上杉守道: 粘土-鋼材間の摩擦挙動, 第23回土質工学研究発表会, pp.609-610, 1988.
- 8) 澤田繁治, 落合英俊, 安福規之, 大野司郎: リングせん断試験における砂と鋼材の摩擦特性, 第34回地盤工学研究発表会, pp.1429-1430, 1999.
- 9) 椿原康則, 内山祐一郎, 岸田英明: 粘土-鋼材間の摩擦挙動に及ぼす試験装置の影響, 第25回土質工学研究発表会, pp.705-706, 1990.
- 10) Uesugi, M., Kishida, H. and Tsubakihara, Y.: Behavior of sand particles in sand-steel friction, Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.107-108, 1988.
- 11) Potyondy, J.G.: Skin friction between various soils and construction materials, Geotechnique, Vol.11, No.4, pp.339-353, 1961.

(2010年6月28日受付)