

1. はじめに 平成 16 年に新潟県中越地震が発生した。とくに、寺野、東竹沢地区では土砂災害が大きかった。地すべりのタイプは、「再活動型」よりも「初生型」が多かったとの見方がある。再活動型地すべりのすべり面は主に粘性土である。これは、地すべり土がシルト質～砂質土であるためである。地震動によって誘因される地すべりのメカニズムは未解明であり、急速載荷条件下で大変形状態までせん断される時の砂質土の強度特性の解明が必要である。本研究では、これまでに実施したせん断変位速度を、0.1～20 mm/min の範囲で変化させたリングせん断試験結果をまとめて、砂質土と粘性土に現れるせん断速度効果について考察した。

2. 砂質土に対するリングせん断試験方法の検討

2.1 試料の物理的性質 用いた試料は宇部まさ土および豊浦砂であり、この 2 試料は破碎性の有無の観点から選んだ試料である。表-1 に本試料とともに中越地震で発生した地すべり土の物理特性を示し、図-1 には粒径加積曲線を示す。宇部まさ土については原粒度と粒度調整試料(0.85mm アンダー)を示しており、リングせん断試験には粒度調整試料を用いた。

2.2 試験方法 供試体寸法は内径 6 cm, 外径 10 cm, 高さ 2 cm の環状である。間隙水圧の影響を除くために乾燥試料を使用した。供試体の鉛直方向の乾燥密度が一様になるよう 3 層に分けて、各層一定の突固めにより作製し、供試体上面を均した。宇部まさ土の場合 $D_{r0}=15\%$, 豊浦砂の場合 $D_{r0}=30\%$ 程度に設定している。両試料とも $\Delta D_{r0}=6\%$, $\Delta w_0=0.6\%$ が認められるが、ばらつきは比較的小さく、均質供試体が作製できているといえる。また、圧密過程においては、所定の圧密応力 σ_c で一次元圧密し、乾燥砂では即時沈下が起こり圧縮が終了するため、載荷時間は一律 60 min に設定した。圧密後、上・下部リングの隙間 d , せん断変位速度 δ を設定後、直ちに定圧定速せん断試験を実施した。また、リングせん断試験を行う際の留意点として、供試体上面と載荷板の間に滑りが生じると、供試体のせん断応力 τ の損失や

表-1 砂質土試料の物理特性

試料名	ρ_s (g/cm^3)	D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	U_c	U_c'	F_{sand} (%)	F_{silt} (%)	F_{clay} (%)	F_c (%)
宇部まさ土	2.621	9.50	1.680	23.6	5.6	49.2	4.4	5.1	9.5
	2.583	0.85	0.220	86.2	3.5	68.2	18.3	13.5	31.8
豊浦砂	2.639	0.85	0.150	2.1	1.0	89.8	4.6	5.6	10.2
寺野	2.616	2.00	0.164	2.1	0.9	89.7	5.7	3.2	8.9
楢木	2.630	0.85	0.291	83.7	26.4	86.2	3.6	10.2	13.8
東竹沢 A	2.588	14.3	1.190	49.0	1.5	51.9	15.0	3.1	18.1
東竹沢 B	2.592	8.60	1.210	12.9	3.2	80.1	6.2	1.9	8.1
横渡 A	2.352	2.00	0.144	29.0	1.4	63.3	27.8	8.9	36.7
横渡 B	2.490	2.00	0.078	14.3	2.6	52.3	39.0	8.6	47.6

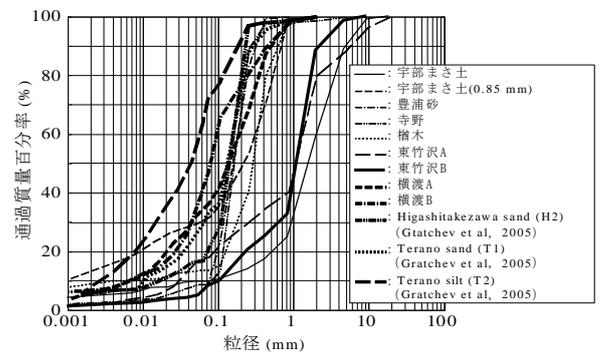


図-1 土試料の粒径加積曲線

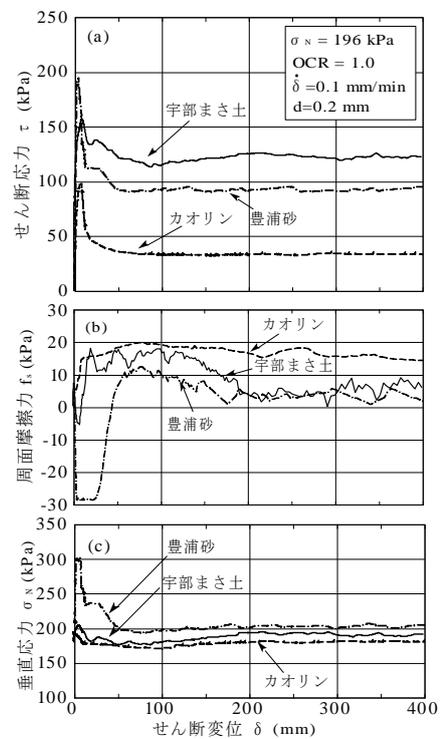


図-2 宇部まさ土、豊浦砂、カオリンのリングせん断挙動

せん断変位 δ の過小評価になるので、載荷板に6枚のエッジを埋込み、滑りを防いだ。

2.3 砂質土のリングせん断挙動

図-2(a)~(c)に宇部まさ土、豊浦砂、カオリンのせん断挙動を示す。カオリンの場合、 τ はピーク値から大きく低下して、 $\delta=100$ mm 以降においてほぼ一定になる。宇部まさ土の場合、 τ のピーク値からの低下量は小さく、 $\delta=200$ mm に達するまで τ の変動がみられ、 $\delta=200$ mm 以降においてほぼ一定となっている。豊浦砂の場合、 τ はピーク値から大きく低下して $\delta=100$ mm まで τ の減少がみられ、 $\delta=100$ mm 以降ではほぼ一定となっている。

3. 粘性土と砂質土に現れるせん断速度効果

3.1 砂質土におけるせん断速度効果

図-3 は既往の研究データと以前行った試験結果に基づき、応力比 (τ_r / σ_N) を $\delta = 0.02$ mm/min のときの応力比 (τ_r / σ_N)_{0.02} で正規化した応力比と対数表示の δ の関係について整理したものである。図中のカオリン、島尻泥岩、山口県油谷町より採取した地すべり粘土の油谷 A, B, C, D に関しては表-2 に物理的性質を示す。図-4 には応力比とせん断速度の関係におけるカオリンを用いた典型的な結果を示す。カオリンの場合、ピーク時の応力比はせん断速度の増加に対してほぼ一定であるが、その領域において残留時の応力比は直線的に増加している。対数表示の速度増加に対する残留状態の応力比の増加率を速度効果係数として定義した。その他の結果を総合すると、応力比は試料によって δ の増加に対して増加・一定・減少するものがある。また、粘土含有率 F_{clay} および塑性指数 I_p の小さい試料は増加傾向は小さいようである。 δ の影響度を検討するため、 F_{clay} と速度効果係数 α' の関係を図-5 に示す。全体的に F_{clay} が高い試料ほど、 α' は大きい傾向にある。また、データに多少のばらつきがみられるが、両者の間に相関が認められる。 F_{clay} が 23 % 以下の“乱れせん断”モードを示す領域では α' は 0.01~0.02 と小さく、 F_{clay} が 43 % 以上の“すべりせん断”モードを示す領域では α' は 0.2~0.6 となる。 F_{clay} が高い領域では、 α' は含有粘土鉱物の種類に依存するものと考えられる。両者の中間である“過渡的せん断”モードでは α' は 0.2~0.3 となっている。

3.2 宇部まさ土と豊浦砂におけるせん断速度効果

図-6(a), (b)に宇部まさ土におけるピーク時応力比 (τ / σ_N)_p および定常状態応力比 (τ / σ_N)_{ss} と対数表示のせん断変位角速度 θ の関係を示す。(a)の緩詰め ($D_{r0}=15.2 \sim 16.9$ %) の場合には θ の変化

- ★: Happsburgh Till, $w_L=22\%$, $I_r=10$, $CF=14\%$
- : Cowden Till, $w_L=34\%$, $I_r=16$, $CF=28\%$
- ◆: London Clay, $w_L=82\%$, $I_r=49$, $CF=60\%$
- : Kaolin, $w_L=72\%$, $I_r=36$, $CF=82\%$
- Lemos et al.(1985), $\sigma_N=100 \sim 500$ kPa
- ☆: 岡田ら(1988), $\sigma_N=49 \sim 294$ kPa
- ◇○: 矢田部ら(1991), $\sigma_N=49 \sim 294$ kPa
- : 中村ら(1978), $\sigma_N=55.9$ kPa
- △▽: Scheffler et al.(1981), $\sigma_N=100, 1000$ kPa
- ◎: 鈴木ら(2000), $\sigma_N=98 \sim 392$ kPa
- : カオリン B, $\sigma_N=196$ kPa
- ◆: 島尻泥岩, $\sigma_N=196$ kPa
- ▲▽◎: 油谷 A, B, C, D, $\sigma_N=196$ kPa

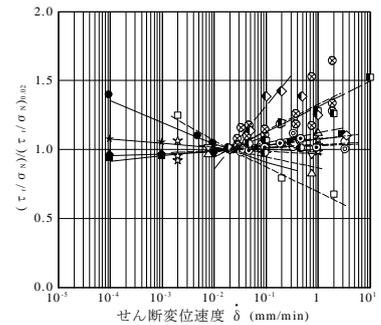


図-3 様々な粘性土のせん断速度効果

表-2 粘性土の物理特性

土試料	採取地点	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	F_{clay} (%)	A
カオリンB	岡山	2.618	62.0	40.2	21.8	35.3	2
島尻泥岩	沖縄	2.586	91.4	30.0	61.4	55.5	1.45
油谷A	山口	2.606	89.0	35.9	53.1	87.0	0.67
油谷B	山口	2.592	43.3	23.4	19.9	32.0	0.8
油谷C	山口	2.519	49.0	20.4	28.6	34.5	1.04
油谷D	山口	2.554	44.7	17.8	26.9	47.3	0.702

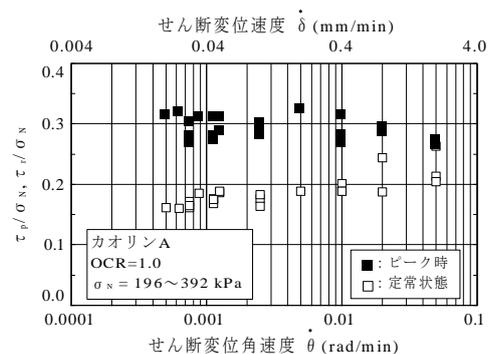


図-4 ピークおよび残留状態応力比とせん断速度の関係
(正規圧密カオリン粘土の結果)

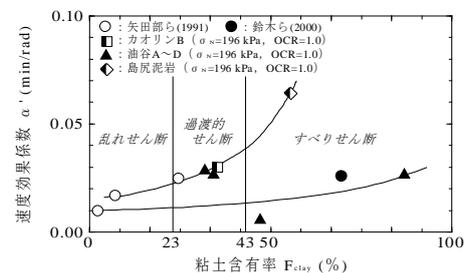


図-5 速度効果係数と粘土含有率の関係

にかかわらず $(\tau/\sigma_N)_p$, $(\tau/\sigma_N)_{ss}$ ともに多少のばらつきはあるものの、 θ の変化による影響はあまり見受けられない。(b)の密詰め ($D_{r0}=90.8\sim 93.1\%$) の場合には、 $(\tau/\sigma_N)_p$, $(\tau/\sigma_N)_{ss}$ ともにデータにばらつきがあり、 θ の変化に対して一定の傾向はみられなかった。図-7(a), (b)に豊浦砂における θ と $(\tau/\sigma_N)_p$, $(\tau/\sigma_N)_{ss}$ 関係を示す。(a)の緩詰め ($D_{r0}=32.5\sim 36.9\%$) の場合、 θ の増加に伴い $(\tau/\sigma_N)_p$ が減少する傾向がみられる。また $(\tau/\sigma_N)_{ss}$ においては θ の増加に対し値の変動はあまりみられず一定の結果が得られた。(b)の密詰め ($D_{r0}=92.6\sim 94.5\%$) の場合、緩詰め同様に θ の増加に伴い $(\tau/\sigma_N)_p$ が減少する傾向がみられる。また、 $(\tau/\sigma_N)_{ss}$ においても $(\tau/\sigma_N)_p$ と同様に、多少データにばらつきはあるものの、 θ の増加に伴い減少するような傾向がみられた。

3.3 中越地震地すべり砂におけるせん断速度効果

許容粒径の観点から試料は0.85 mmふるいにより粒度調整したものを試験に用いた。本試験には寺野、東竹沢 A の乾燥砂を用いている。試験条件は、原位置の状態を考慮して密詰めに再現するために、 D_{r0} を約90%に設定し、上下リングの隙間 d に関しては、砂質土における最適隙間の検討よりリングせん断試験においては平均粒径 D_{50} の5~10倍に設定しているため²⁾、寺野 ($D_{50}=0.16$ mm) では $d=0.8$ mm、東竹沢 A ($D_{50}=0.12$ mm) では $d=0.6$ mmとした。また、上記のように寺野、東竹沢地区で起こった地すべりは、それぞれ深さ約30mの深い位置で発生しているため、試験における σ_N を294~490 kPaに設定した。図-8に寺野における ϕ_p , ϕ_{ss} と θ の関係を示す。図における ϕ は異なる垂直応力の下で得られたピークおよび定常状態におけるせん断強さとそのときの垂直応力の関係から直線近似して得られたものである。 θ の増加に伴い ϕ_p は試験結果に多少ばらつきがあるものの減少する傾向がみられた。 ϕ_{ss} においては θ の増加に対しての値の変動はあまりみられずほぼ一定であった。図-9には、東竹沢 A における ϕ_p , ϕ_{ss} と θ の関係を示す。 ϕ_p , ϕ_{ss} ともに θ の影響はあまりみられずほぼ一定という結果が得られた。また、寺野に比べ東竹沢 A の方がピーク時、定常状態ともに高い強度定数を示していることがわかる。

3.4 粘性土と砂質土におけるせん断速度効果の違い

図-10に既往の研究データに本研究の試験結果をプロットした $\tan\phi_r$ および $\tan\phi_{ss}$ と粘土含有率 F_{clay} の関係を示す。 $\tan\phi_r$ と F_{clay} の関係においてデータにばらつきがみられるものの、 $\tan\phi_r$ と F_{clay} の間に傾向があり、本試料は既往の研究データの分布域から逸脱していない。 F_{clay} が増加すると、残留強度および定常状態強度が減少する傾向が見られる。

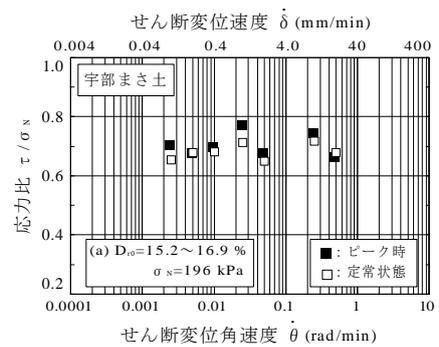


図-6(a) ピーク時、定常状態応力比とせん断速度の関係

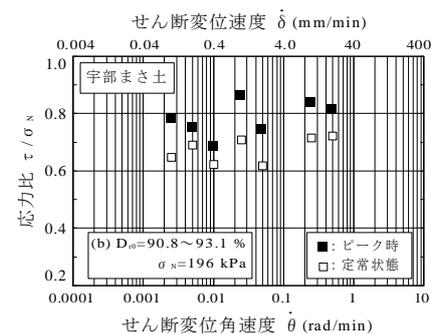


図-6(b) ピーク時、定常状態応力比とせん断速度の関係

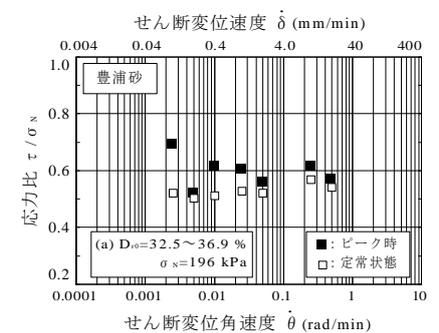


図-7(a) ピーク時、定常状態応力比とせん断速度の関係

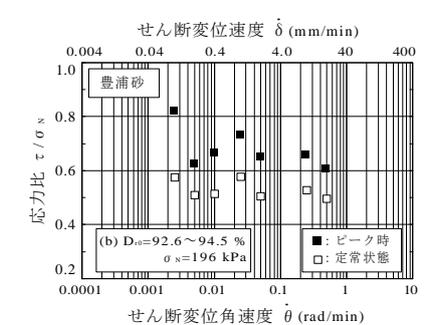


図-7(b) ピーク時、定常状態応力比とせん断速度の関係

図-11に既往の研究データと、これまでに著者が実施した実験から得られた砂質土の $(\tau/\sigma_N)_{ss}$ と δ の関係を示し、砂から粘土にわたる各試料のせん断速度効果について検討する。全体的に粘性土よりも砂質土試料の方が強度が高く発揮されているが、せん断速度の高速域において、粘性土の $(\tau/\sigma_N)_r$ よりも砂質土の $(\tau/\sigma_N)_{ss}$ の方が低い値を示すケースもある。粘性土のせん断速度効果は I_p , F_{clay} に関係しており、粘性のつよい試料ほどせん断速度効果は大きくなる。砂質土のせん断速度効果については、豊浦砂では、 δ の増加に伴い $(\tau/\sigma_N)_{ss}$ が若干減少する傾向がみられる。これは、供試体は収縮後の著しい膨張によって、ピーク強度から定常状態せん断強度に大きく減少していると考えられ、急速せん断によって間隙比の高いゾーンがせん断面付近に形成されたためと考えられる。

4. まとめ 粘性土と砂質土に対して0.1~20 mm/minの範囲でせん断速度を変化させたリングせん断試験結果に基づいて、土の強度定数に及ぼすせん断速度効果の検討を行った結果をまとめると、①粘土含有率が大きい粘性土試料ほど、せん断速度の増加に伴う残留強度の増加の度合いは大きくなる。②砂質土において、初期相対密度を低く設定したものに比べ、高く設定した方がピーク強度は高く、また、ピーク強度から定常状態強度への強度低下が大きい。③高塑性粘性土のせん断強度はせん断速度の高速域において増加する傾向を示すが、砂質土のせん断強度は相対密度等の条件によって減少するケースがある。④中越地震における地すべり砂では、せん断速度によらず定常状態強度は一定の傾向を示した。⑤砂質土と粘性土の強度を比較すると全体的に砂質土の方が高いが、試料によっては粘性土が砂質土の強度を上回るものもある。また、粘土含有率が高いものほど、定常状態強度および残留強度は小さくなる傾向にある。

謝辞：本研究の一部は科研費・基盤研究(C)（研究課題番号：23560591，代表者：鈴木素之）の助成を受けて実施した。ここに記して関係各位に謝意を表す次第である。

[参考文献] 1) 国土交通省 河川局：新潟県中越地震地すべり災害

<http://www.mlit.go.jp/river/index/saigai.html>, 2004.

2) プラダンテージ，本郷隆夫，水上純一：土の一面せん断試験に関する検討課題，直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム発表論文集，pp.12-21，1995.

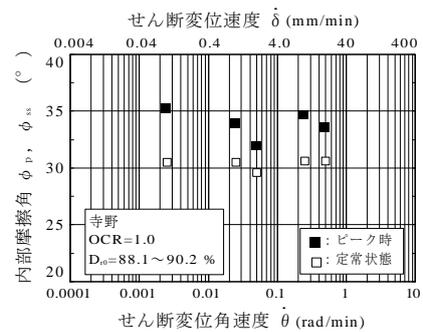


図-8 寺野のピーク時、定常状態内部摩擦角とせん断速度の関係

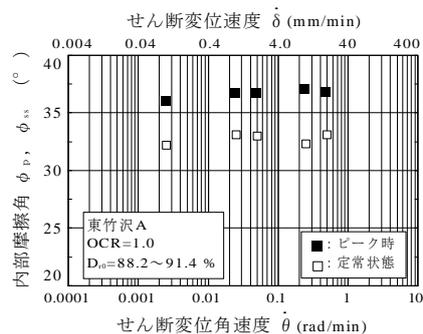


図-9 東竹沢 A のピーク時、定常状態内部摩擦角とせん断速度の関係

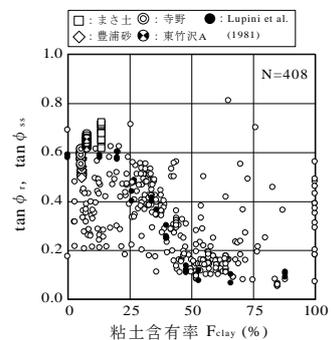


図-10 粘土含有率と $\tan\phi_r$, $\tan\phi_{ss}$ の関係

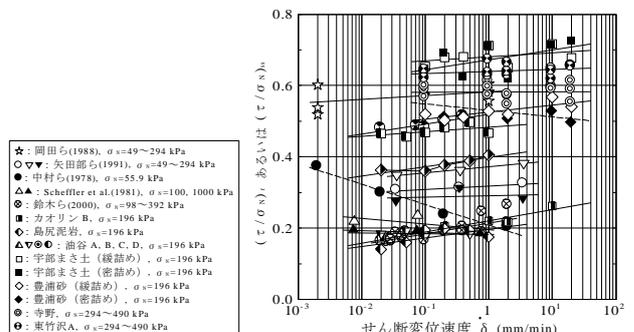


図-11 様々な土のせん断強度に現れるせん断速度効果