

(58) 飽和シルト質ローム地盤の繰返しせん断による破壊について

宇部工業高等専門学校 大原資生 山口大学工業短期大学部 ○山本哲朗

1. まえがき 本研究ではまず、粘着力の異なる2種の飽和シルト質ロームの液状化実験を行い、繰返しせん断によって飽和シルト質ロームは液状化に似た破壊を生じ、そのときの応力比に及ぼす粘着力の影響をしらべ、さらに、シルト質ロームからなるモデル地盤を想定し、繰返しせん断によって地盤に生じる間隙水圧の計算を行うことで、地盤の破壊が生じるときの不規則な入力地震波の加速度と、それと等価な正弦波加速度の振幅比と等価繰返し回数との関係を求めている。

2. 実験装置 今回製作した実験装置は図-1に示す。振動台に固定したケルマン型のせん断箱をもつ繰返し単純せん断試験機は、これまでの実験¹⁾で用いたのと同種のものであるが、シルト質ロームの供試体を鉛直圧 50kPa の圧密によって作ることができるように作られた。そのためには、本実験では鋼製載荷板⑨にドーナツ状の鉛製の重錘⑩を供試体の周囲に吊すことで、供試体に鉛直圧を加えた。一枚の重錘の質量は約 140kg である。

厚さ1mmのゴムスリーブに包まれた直径 30cm の供試体の周囲には、塩化ビニール板製のドーナツ状リングが4枚積み重ねられている。リングは厚さ 1cm、内径 30.2cm、外径 35.0cmである。したがって、振動中に供試体が側方に彫れ出すことが防止され、せん断変位はかなり自由に生じることになる。

振動中には、せん断変位が過度に大きくならないように、装置にはストッパー⑪がつけてあり、供試体のせん断ひずみ両振幅は最大で 17%程度に抑えられた。

3. 試料および実験方法 実験に用いた試料は表-1に示す2種類のシルト質ロームである。シルト質ローム(I)は宇部市の干拓地で採取したもので、粘着力(C_{cu})は16kPaである。また、シルト質ローム(II)は松山市伊方町で採取したもので、 C_{cu} は10kPaである。両試料とも炉乾燥させた後、0.84mmのふるいでふるって得たものをを用いた。

実験は次の方法で行った。まず、せん断箱内で鉛直圧 50kPa の圧密によって飽和状態のシルト質ローム供試体を作製した。圧密時間は沈下量測定の結果から 20時間とした。二つのシルト質ローム供試体の間隙比(e)、含水比(w)および飽和度(S_r)は表-2に示す。次に、振動台を駆動して供試体全体に振動数(f)=3Hzで、振幅一定のほぼ正弦波状の加速度を与えて実験を行った。実験中には、排水バルブ⑫は閉じた状態のままである。振動台の加速度、供試体に生じる間隙水圧およびせん断変位振幅はそれぞれ抵抗線ひずみ計式の加速度計(容量:5g)、間隙水圧計(容量:980kPa)および変位計(容量:10mm)で測定し、すべてペン書きオシログラフに記録した。

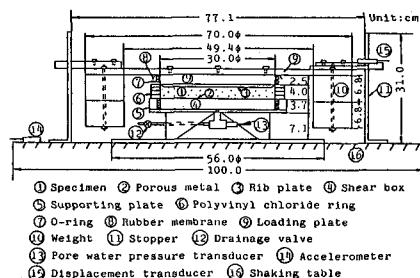


図-1 実験装置

表-1 試料の諸性質

	Silty loam(I)	Silty loam(II)
G_s	2.586	2.939
D_{max} (mm)	0.84	0.84
D_{50} (mm)	0.027	0.025
U_c	11.7	10.0
w_L (%)	55.9	NP
w_p (%)	32.1	27.8
I_p	23.8	-
k_{15} (cm/s)	1.19×10^{-4}	1.41×10^{-4}
ϕ (°)	$\phi_{cu}=22.1$	$\phi_{cu}=25.1$
c (kPa)	$c_{cu}=16$	$c_{cu}=10$
	$\phi=43.9$	$\phi=35.8$
	$c'=0$	$c'=0$
	$(e=1.262)$	$(e=0.870)$

表-2 供試体の間隙比(e)、飽和度(S_r)および含水比(w)

	Silty loam(I)	Silty loam(II)
e	1.419 ± 0.047	0.852 ± 0.038
w (%)	54.3 ± 1.9	28.6 ± 1.6
S_r (%)	97.2 ± 2.6	97.3 ± 1.7

4. 実験結果および考察 4.1 シルト質ロームの液状化に似た破壊ひずみ 図-2はシルト質ローム(I)の実験記録波形の一例を示す。記録線は上から順に水平震度(k_h)で表した振動台の加速度、供試体に生じる間隙水圧(u)およびせん断ひずみ(γ)を表す。記録波形の左上に示す、 σ'_{vo} 、 $\tau/(\sigma'_{vo})_0$ はそれぞれ供試体底面に作用する初期有効鉛直圧、応力比を表す。 τ はせん断応力振幅、また、

$(\sigma'_{vo})_m$ は振動時の載荷板などのロッキングによる鉛直圧の減少を考慮した場合の供試体底面に作用する初期有効鉛直圧である。 τ 、 $(\sigma'_{vo})_m$ はそれぞれ式(1)、(2)で与えられる。

$$\tau = k_n \cdot W/A \quad (1)$$

$$(\sigma'_{vo})_m = \sigma'_{vo} - M \cdot d/2 \cdot l \quad (2)$$

ここで、 W : 供試体、載荷板、重錘、リングの重量和、 A : 供試体の断面積、 d : 供試体の直径、 M : 供試体底面における載荷板、重錘および供試体に作用するモーメントの和、 l : 断面二次モーメント。

図-2からわかるように、加速度の繰返し回数いいかえると、せん断応力の繰返し回数の増加に伴って、シルト質ローム(I)に生じる間隙水圧およびせん断ひずみ振幅は徐々に増加するが、せん断ひずみ両振幅が17%程度となり、供試体に破壊が生じたと考えられる状態となっても間隙水圧は初期有効鉛直圧に等しくはならない。このことはシルト質ローム(II)でも認められた。

このように、繰返しせん断によって間隙水圧が上昇してシルト質ロームの破壊が起こる点は、砂の液状化に似ていると考えられる。なお、繰返しせん断によって両シルト質ロームに生じる間隙水圧比の最大値は0.8程度であった。

次に、図-2のような記録波形から、せん断ひずみ両振幅(γ_s)=5%、10%、15%および17%となったときに供試体底面に作用する有効鉛直圧 σ'_v とせん断応力振幅 τ を求め、その値を $\sigma'_v \sim \tau$ グラフに示す。その一例としてシルト質ローム(I)の $\gamma_s=15\%$ のときの結果を図-3に示す。○印は実験値を示す。図中の線はひずみ15%で供試体に破壊が生じたと考えたときの動的破壊線といえよう。この線から動的な内部摩擦角 $\phi_d=19.3^\circ$ 、動的な粘着力 $C_d=3\text{kPa}$ が得られる。

同ように他の γ_s で求めた ϕ_d および C_d を γ_s との関係で示すと、図-4の曲線が得られる。この図から動的な粘着力が最大となるときの γ_s は15%であることがわかり、 $\gamma_s=15\%$ で全動的粘着力が動員されたと考えられる。結局、シルト質ローム(I)の動的強度定数は、 $\gamma_s=15\%$ のときに $\phi_d=19.3^\circ$ 、 $C_d=3\text{kPa}$ となる。

同ような方法によって、シルト質ローム(II)の動的粘着力が最大となるときの γ_s も、ほぼ15%であることがわかった。 $\gamma_s=15\%$ におけるシルト質ローム(II)の動的強度定数は $\phi_d=17.3^\circ$ 、 $C_d=2\text{kPa}$ であった。なお、二つのシルト質ロームの動的な内部摩擦角は、表-1の静的な値 ϕ' の約0.5倍であった。

上記の実験結果から、本文ではシルト質ロームの液状化に似た破壊時のせん断ひずみ両振幅 γ_s は15%に決めた。

4.2 シルト質ロームの破壊時の応力比 図-5はシルト質ローム(I)、(II)について、 $\gamma_s=15\%$ (破壊時)を生じるまで

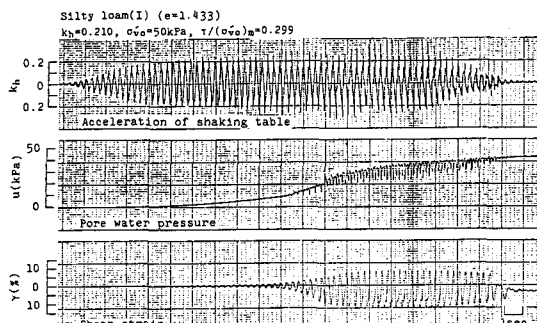


図-2 実験記録波形の一例(シルト質ローム(I))

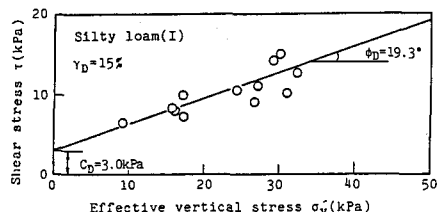


図-3 せん断応力 τ と有効鉛直圧 σ'_v の関係(シルト質ローム(I))

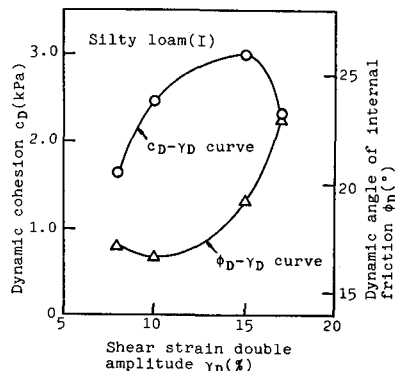


図-4 各せん断ひずみ両振幅 γ_s における動的内部摩擦角 ϕ_d と動的粘着力 C_d 。(シルト質ローム(I))

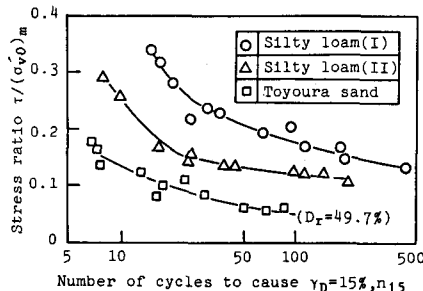


図-5 $\gamma_s=15\%$ 生じるまでの繰返し回数 n_s と応力比 $\tau/(\sigma'_{vo})_m$ の関係

の繰返し回数 n_{1s} とそのときの応力比 $\tau/(\sigma'_{v0})_m$ の関係を示す。同図には豊浦砂の結果も示す。この図から、シルト質ローム(I)、(II)の破壊に要する応力比は、それぞれ砂の場合の約3倍、2倍大きいことがわかる。

図-6はシルト質ローム(I)、(II)の $\gamma_w=15\%$ のときの間隙水圧比 $(u/\sigma'_{v0})_{15}$ と応力比 $\tau/(\sigma'_{v0})_m$ の関係を示す。この図からわかるように、二つのシルト質ロームの破壊時の間隙水圧比は0.4～0.8であり、それは応力比が大きいたまは小さい。このことは繰返しせん断によるシルト質ロームの破壊には、間隙水圧の上昇による有効圧の減少とせん断応力の大きさが関与することを示している。

5. 繰返しせん断によるシルト質ロームモデル地盤の破壊の解析

5.1 解析用モデル地盤および入力地震波 解析には実

験で用いたシルト質ローム(I)からなるモデル地盤を用いた。このシルト質ロームの諸定数は実験結果にもとづいて決めた。すなわち、飽和単位重量 $\gamma_{sat}=16.37\text{kN/m}^3$ 、せん断弾性係数 $G=1.18\times 10^4\text{kPa}$ 、透水係数 $k=8.76\times 10^{-7}\text{m/s}$ 。地盤厚は20mで、地下水位は地盤表面に一致していると考えた。

圧密試験から求めたシルト質ローム(I)の透水係数 k は $8.76\times 10^{-7}\text{m/s}$ で非常に小さいので、解析では繰返しせん断中に生じる間隙水圧の消散は無視した。

入力地震波はEl Centro波(1940)、模擬地震波および一定振幅の正弦波加加速度である。すべての入力波の継続時間は20秒とした。なお、模擬地震波の最大加加速度振幅が 1.0m/s^2 の場合の加加速度波形は図-7に示す。

5.2 モデル地盤に生じる間隙水圧の計算方法 地盤内のせん断応力は地盤を集中質量系モデルに置きかえて得られた、運動方程式(3)がNewmarkの β 法を用いて求められた²⁾。

$$[M] \ddot{u}(t) + [C] \dot{u}(t) + [K] u(t) = -[M] \ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ：それぞれ質量・減衰・剛性マトリックス、 u ：地動の変位ベクトル、 $\ddot{u}_g$ ：地動加加速度ベクトル、 t ：時間。減衰マトリックス $[C]$ は $[C] = h \cdot \omega_s \cdot [M] + h / \omega_s \cdot [K]$ で与えた。ここで、 h 、 ω_s はそれぞれ地盤の減衰定数、第一次固有円振動数である。

繰返しせん断によって地盤内に生じる間隙水圧は、次のようにして求めた。地盤内の各深さのせん断応力がゼロクロスする(繰返し回数 $n=1$) までの時間(半周期に相当する)とその間のせん断応力の最大値を求める。次に、このせん断応力 τ を式(4)に代入して間隙水圧蓄積量 u_w を求める。この u_w が $n=1$ のときに地盤に生じる間隙水圧となる。 $n=2$ 以後についても同ような計算を行った。

$$u_w / \sigma'_{v0} = (-0.009 + 0.060 \tau / \sigma'_{v0}) \cdot n \quad (4)$$

(ただし、 $\tau / \sigma'_{v0} > 0.15$)

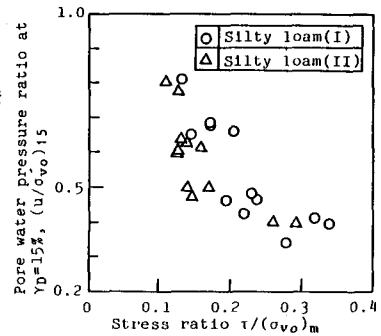


図-6 $\gamma_w=15\%$ のときの間隙水圧比 $(u/\sigma'_{v0})_{15}$ と応力比 $\tau/(\sigma'_{v0})_m$ の関係

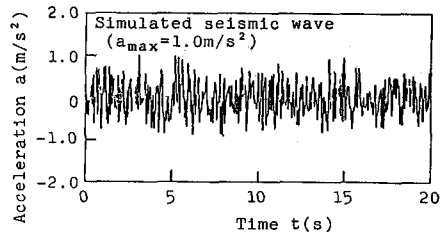


図-7 模擬地震波の加加速度波形

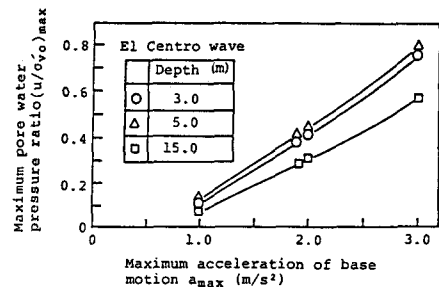


図-8 シルト質モデル地盤に生じる最大間隙水圧比と入力波の最大加加速度振幅の関係(エルセントロ波)

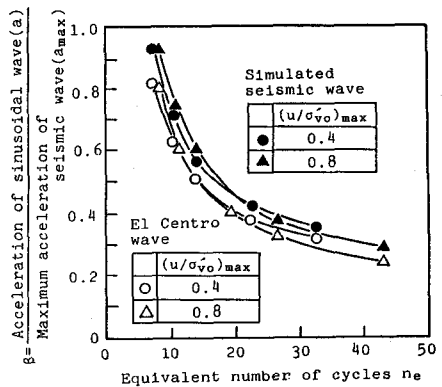


図-9 β と等価繰返し回数 n_e の関係

式(4)は振動台を用いた液状化実験から得られた、シルト質ローム(I)の間隙水圧上昇量と繰返し回数の関係から求められた。

5.3 不規則な地震波によるモデル地盤の破壊 先にのべた実験結果を考慮して、モデル地盤の繰返しせん断による破壊は、間隙水圧比が0.4~0.8のときに生じると考えた。

図-8は入力波がエルセントロ波の場合の加速度振幅の最大値 a_{max} と地盤内の間隙水圧がもっとも大きくなる、深さ(Z)=5mにおける間隙水圧比の最大値 $(u/\sigma'_{vo})_{max}$ の関係を示す。同図には $Z=3, 15m$ の結果も示されている。図から、エルセントロ波が入力波の場合には、 $Z=5m$ における $(u/\sigma'_{vo})_{max}$ が0.4および0.8となるとききの a_{max} はそれぞれ $1.9m/s^2$ 、 $3.0m/s^2$ であることがよみとれる。同ように、模擬地震波では $Z=5m$ における $(u/\sigma'_{vo})_{max}$ が0.4および0.8となるとききの a_{max} はそれぞれ $1.7m/s^2$ 、 $2.6m/s^2$ と求めることができた。

5.4 モデル地盤が破壊を生じるまでの等価繰返し回数

5.3で得られた地盤が破壊を生じるとききの不規則な地震波の最大加速度振幅 a_{max} に対して所定の大きさの一定加速度振幅 a をもつ正弦波を入力波とし、地盤に生じる間隙水圧を計算した。正弦波の周期は振動台実験の場合と同じ0.33秒とした。二つの入力波の加速度振幅の比 $\beta = a/a_{max}$ とする。

図-9は $Z=5m$ の $(u/\sigma'_{vo})_{max}$ が0.4あるいは0.8となり、地盤に破壊が生じるまでの等価繰返し回数 n_e と β の値の関係を示す。この図からわかるように、 β の値が同じ場合には、 n_e の値は模擬地震波に対して得られた n_e の値の方がエルセントロ波に対して得られた n_e の値よりもやや大きい。さらに、 β と n_e の関係は破壊時の間隙水圧比 $(u/\sigma'_{vo})_{max}$ の大きさにはほとんど依存しないようである。

図-10は地盤の破壊が生じるとききの応力比 τ/σ'_{vo} とそのときまでの等価繰返し回数 n_e の関係の実験値および計算値を示したものである。この図から振動台実験から得られた、飽和シルト質ロームの破壊を生じるとききの応力比とそれまでの繰返し回数 n_e の関係は、モデル地盤の破壊に対する本解析結果とかなりよく一致することがわかる。そこで、図-10から、地盤が破壊を生じるとききの不規則な入力波を、種々の加速度振幅をもつ等価な正弦波におきかえた場合に地盤が破壊を生じるまでの等価繰返し回数 n_e を求めた。その結果は表-3にまとめられた。地震波の伝播径路にあたる地盤の影響を受けていない入力波として作成した模擬地震波の結果では、たとえば $\beta=0.65$ とした場合、地盤に生じる間隙水圧比が0.4および0.8に達するまでの等価繰返し回数 n_e はそれぞれ11.5回、13回と求めることができる。

6. 結論 本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

1) 繰返しせん断を受けるシルト質ロームは液状化に似た破壊を生じ、そのときの間隙水圧比は0.4~0.8であった。また、シルト質ローム(I) ($C_{cu}=16kPa$) およびシルト質ローム(II) ($C_{cu}=10kPa$) の破壊を生じる応力比は砂のそれより約3倍、2倍大きい。

2) シルト質ロームのモデル地盤が破壊を生じるとききの模擬地震波の加速度振幅の最大値の0.65倍の加速度振幅をもつ正弦波が入力波の場合、地盤に生じる間隙水圧比が0.4、0.8となるまでの等価繰返し回数はそれぞれ11.5回、13回と求めることができた。

終りに、本実験および計算を行うに当って助力を得た卒論生、岡田義成、住田賢二両君に謝意を表する。

参考文献 1) O-hara, S. et al.: Pore Pressure Developed in Saturated Sand Subjected to Cyclic Shear Stress Under Partial Drainage Conditions, Soils and Foundations, Vol.25, No.2, 1985

2) 山本他: 液状化対策としてのグラベルパイル、土と基礎、Vol.33, No.12, 1985

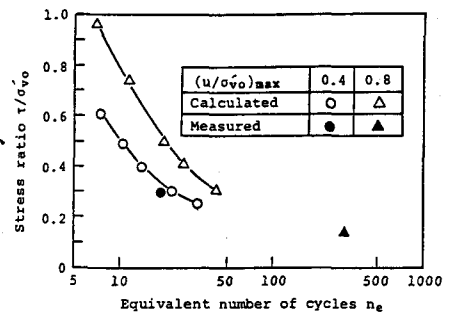


図-10 等価繰返し回数 n_e と応力比 τ/σ'_{vo} の関係

表-3 等価繰返し回数 n_e

	Equivalent number of cycles n_e			
	El Centro wave		Simulated seismic wave	
$(u/\sigma'_{vo})_{max}$	0.4	0.8	0.4	0.8
0.80	7.5	8.5	9.0	10.0
0.65	10.0	10.5	11.5	13.0
0.60	11.5	11.5	12.5	14.0
0.50	14.5	14.0	16.5	17.0
0.40	20.5	19.5	24.0	24.5