

繰返しせん断による飽和シルト質ローム 地盤の破壊について

大原資生*・山本哲朗**

Failure of Saturated Silty Loam Deposit Subjected to Cyclic Shear

Sukeo O-HARA and Tetsuro YAMAMOTO

Abstract

On the basis of the liquefaction test results, failure of a saturated silty loam deposit during earthquakes is investigated theoretically. First, from the liquefaction test results, it is shown that the silty loam failed when the pore water pressure ratio reached 0.4 to 0.8 by cyclic shear stress, and its failure was essentially similar to liquefaction of sands.

Second the changes of the pore water pressure induced in the deposit by the ground motions (the El Centro earthquake (1940) and the simulated earthquake) are calculated by use of the seismic response analysis, and the change of pore water pressure obtained from the test. Analytical results show the relationship between the ratio of the amplitude of the equivalent sinusoidal acceleration to that of the earthquake accelerations which are required to cause the failure of the deposit, and equivalent number of cycles.

1. 緒 言

著者の一人は飽和粘性土には粘着力が存在するために、繰返しせん断によるその破壊は砂の場合と異なることを明らかにした¹⁾。すなわち、繰返しせん断によって飽和粘土に生じる破壊は間隙水圧の上昇による有効圧の減少によって生じるが、破壊に要する応力比は砂の場合に比してかなり大きいということであった。

しかし、現在でも繰返しせん断によって飽和粘性土に生じる間隙水圧、およびそれによって生じる破壊に及ぼす粘着力の影響は明らかになっていない。また、

そのような粘性土の破壊を定義するまでには至っていない。

本文ではまず、16kPaの粘着力をもつシルト質ロームの液状化実験の結果をのべ、繰返しせん断によってシルト質ロームは液状化に似た破壊を生じることを示した。そして、その破壊ひずみを定義する一つの方法を提案し、破壊時に供試体に生じる間隙水圧比は0.4～0.8であることを示した。

実験には今回、われわれの研究室で試作した、振動台上に固定したケルマン型のせん断箱をもつ単純せん断試験機が用いられた。

次に、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内に生じる間隙水圧の計算を行い、間隙水圧の上昇によって生じる地盤の破壊に

*宇部工業高等専門学校

**工業短期大学部土木工学科

ついて検討した。

地盤内に生じる間隙水圧は、地盤の応答解析において液状化実験から得られたシルト質ロームの間隙水圧蓄積量を用いることによって計算された。

この結果から地盤の破壊が生じる場合の入力地震波の加速度に等価な正弦波加速度の両者の振幅比と等価繰返し回数の関係を求めることができた。

以下に、シルト質ロームの液状化実験およびシルト質ロームからなるモデル地盤の破壊の解析結果をのべる。

2. シルト質ロームの液状化実験

2.1 シルト質ロームの諸性質

実験に用いたシルト質ロームは宇部市の干拓地で採取したものである。これは現地で採取した試料を炉乾燥させた後、0.84mmのふるい通過分として得たものである。

シルト質ロームの物理定数および強度定数は次のとおりである。 $G_s=2.586$, $D_{max}=0.84\text{mm}$, $D_{50}=0.027\text{mm}$, $w_L=55.9\%$, $w_p=32.1\%$, $I_p=23.8$, $\phi_{cu}=22.1^\circ$, $c_{cu}=16\text{kPa}$ (間隙比 $e=1.262$ の時), ϕ_{cu} , c_{cu} は静的三軸試験から求めた。

2.2 実験装置

今回試作した実験装置はFig. 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動的単純せん断試

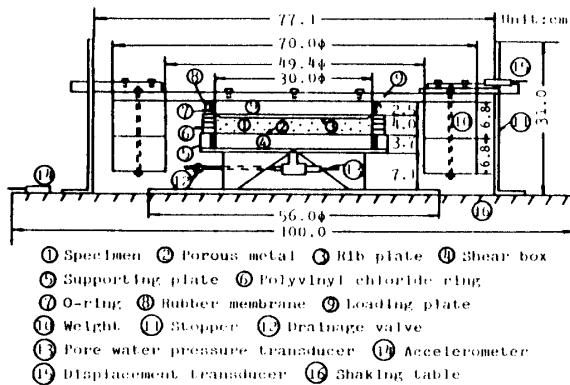


Fig. 1 Experimental Apparatus

験機は、これまでの実験^{2),3)}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圧密によって作ることができるように、従来のものより、大きい鉛直圧を加えることができるように作られた。

今回の実験では、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、このように

従来のものより大きい鉛直圧を得るためには、今回の実験では、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。一枚の鉛製重錘の質量は約140kgである。

また、このように鉛製の重錘を載荷板⑨に吊すようにしたのは、供試体に加えられる繰返しせん断力はこれらの重錘および載荷板に生じる慣性力によって作られるので、その重心の高さを下げ、振動中に生じるロッキング振動をできる限り小さくするためである。

圧密後の供試体の直径は30cm、高さは約4cmとした。

厚さ1mmのゴムスリーブに包まれた供試体の周囲には、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膨れ出すことが防止され、せん断変形はかなり自由に生じることになる。

振動中、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。

実験中には、振動台の加速度、供試体に発生する間隙水圧およびせん断変位振幅が、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)で測定された。

2.3 実験方法

前にのべたように本実験では、せん断箱内で圧密によって作製した供試体について実験を行った。飽和状態の供試体は次の方法で作製された。まず、所要量の試料をはかり、含水比(w)が約80%のスラリー状の試料を作り、一昼夜放置した。その後、試料を約30分間、真空度約76cmHgのセル室に入れて脱気を行った。

その後、せん断箱の下端に固定したゴムスリーブ内に少量の脱気水を入れておき、気泡が入らないように注意しながら、脱気した試料を水中に流し込んで詰めた。次に、排水バルブ⑫を開けた状態で、試料に加える荷重を段階的に増して圧密を行った。最終的には鋼製載荷板⑨および鉛製重錘⑩を供試体表面にのせて、供試体表面に50kPaの鉛直圧を作用させた。この状態での圧密時間は沈下量測定の結果から20時間とした。

以上の方法で作製したシルト質ローム供試体の間隙比(e) $=1.419 \pm 0.047$, 含水比(w) $=54.3 \pm 1.9\%$, 飽和度(S_r) $=97.4 \pm 2.6\%$ であった。本実験装置では正確に間隙圧係数B値は求めることができない。しかし、10kPaの鉛直圧で圧密した供試体に、非排水状態で40kPaの鉛直圧を増加させた時、間隙水圧の増加量は、有効鉛直圧の増加量の0.99倍以上となった。このことと

物理試験から得られた供試体の飽和度がほぼ100%であることから、シルト質ローム供試体は、ほぼ飽和状態にあると判断した。

液状化実験は次の方法で行った。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振動実験を行った。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をそれぞれの変換器で測定し、すべてペン書きオシログラフに記録した。

2.4 液状化に似た破壊の定義

Fig. 2は実験記録波形の代表的な例を示す。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、間隙水圧(u)およびせん断ひずみ(γ)を表す。

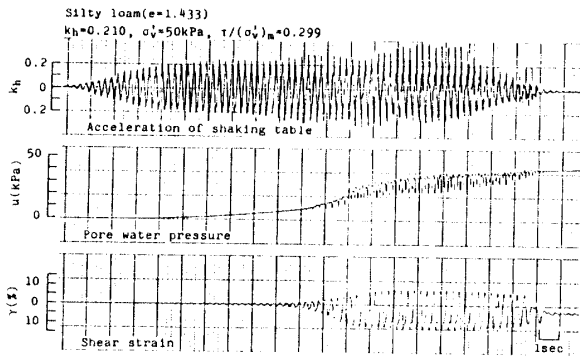


Fig. 2 Typical experimental record

記録波形の左上に示す、 σ'_v 、 $\tau/(\sigma'_v)_m$ はそれぞれ供試体底面に作用する有効鉛直圧、応力比を表す。 τ はせん断応力振幅、また $(\sigma'_v)_m$ 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有効鉛直圧である。 τ 、 $(\sigma'_v)_m$ はそれぞれ式(1)、(2)で与えられる。

$$\tau = \frac{k_h \cdot W}{A} \quad (1)$$

$$(\sigma'_v)_m = \sigma'_v - \frac{M \cdot d}{2I} \quad (2)$$

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、I：断面二次モーメント。

Fig. 2の記録波形からわかるように、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有効鉛直圧に等しくならない。後でのべるように、この実験では繰返しせん断によって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。さらに、繰返し三軸試験機を用いた液状化実験によっても、シルト質ロームに生じる間隙水圧比の最大値は約0.8であるとの結果が得られた。このように砂の液状化破壊と違って、繰返しせん断を受けたシルト質ロームの破壊では間隙水圧比は1.0とはならない。

以上のべたようにシルト質ロームの破壊時の間隙水圧比は1.0に達しないのは、粘着力の存在のために土粒子が完全にバラバラとなり、間隙水の中に懸濁した状態とはならないためと考えられる。

次に、シルト質ロームの液状化に似た破壊時のひずみを求めてみる。

そのために、Fig. 2のような記録波形から、まずせん断ひずみ両振幅(γ_D)=8%、10%、15%および17%となったときの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 σ'_v - τ グラフ上に示す。その一例をFig. 3に示す。このようなグラフから得ら

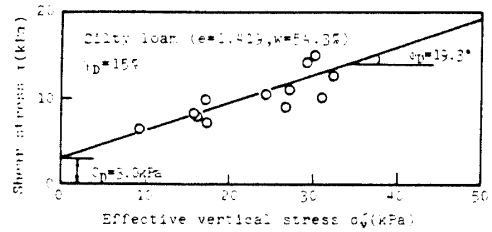


Fig. 3 Relationship between shear stress τ and effective vertical stress σ'_v at shear strain double amplitude $\gamma_D = 15\%$

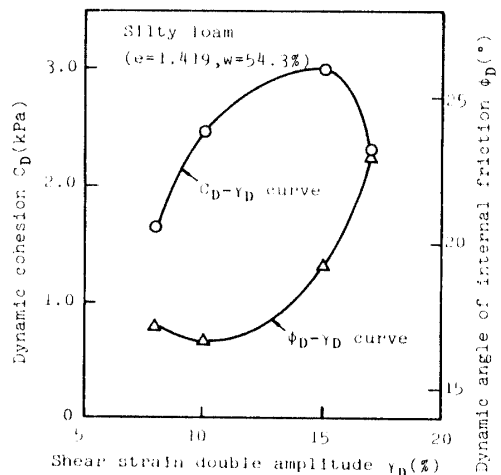


Fig. 4 Dynamic angle of internal friction and cohesion at each shear strain double amplitude obtained from dynamic rupture line

れる動的破壊線から動的な内部摩擦角 ϕ_D 、動的な粘着力 c_D を求め、それらと γ_D の関係を示したのが、Fig. 4の2つの曲線である。この図から動的な粘着力が最大となる時の γ_D は15%であることがわかり、 $\gamma_D=15\%$ で全動的粘着力が動員されたと考えられる。結局、シルト質ロームの動的強度定数として、 $\gamma_D=15\%$ のときの ϕ_D 、 c_D の値、すなわちFig. 4では $\phi_D=19.3^\circ$ 、 $c_D=3\text{kPa}$ が得られた。

同様に、 $c_{cu}=10\text{kPa}$ をもつ他のシルト質ロームの場合でも動的な粘着力が最大となる時の γ_D はほぼ15%であった。

したがって、われわれ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_D は15%と定義した。

Fig. 5は $\gamma_D=15\%$ (破壊時)を生じる応力比 $\tau/(\sigma_v')_m$ とその時までの繰返し回数 n_{15} の関係を示す。

Fig. 6は $\gamma_D=15\%$ を生じた時の供試体内の間隙水圧比 $(u/\sigma_v')_{15}$ と応力比 $\tau/(\sigma_v')_m$ の関係を示す。この図か

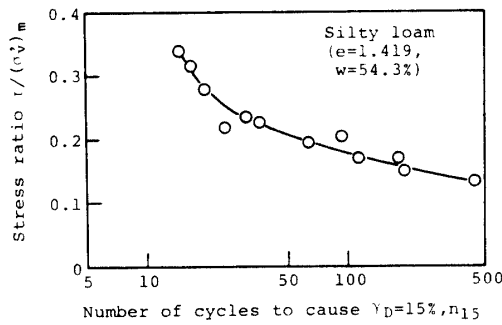


Fig. 5 Relationship between number of cycles to cause $\gamma_D=15\%$, n_{15} and stress ratio $\tau/(\sigma_v')_m$ (shaking table test)

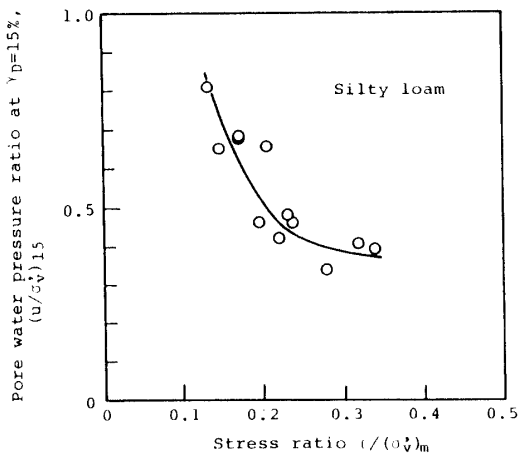


Fig. 6 Relationship between pore water pressure ratio at $\gamma_D=15\%$, $(u/\sigma_v')_{15}$ and stress ratio $\tau/(\sigma_v')_m$

らわかるように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ときは小さい。

以上のべた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。

2.5 間隙水圧蓄積量 u_m

シルト質ロームのモデル地盤に生じる間隙水圧は以下の方法によって計算された。

Fig. 7は振動台実験で得られたシルト質ローム供試

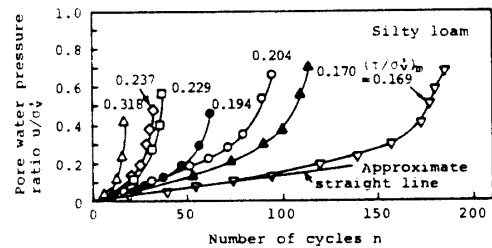


Fig. 7 Pore water pressure buildup curves obtained from shaking table test

体に生じる間隙水圧比 u/σ_v' と繰返し回数 n の関係を示す。後の解析でのべるように地震時の継続時間を20秒とすると、モデル地盤に生じるせん断応力の半周期の繰返し回数はほぼ50回であることを考慮して、Fig. 7の $u/\sigma_v' \sim n$ の関係をjいて間隙水圧蓄積量を求めた。まず、一例としてFig. 7中の応力比 $\tau/(\sigma_v')_m=0.169$ の $u/\sigma_v' \sim n$ 曲線が示すように、 $n=25$ 回までの u/σ_v' と n の関係は直線で近似することができる。このようにして得られた直線の勾配 $(u/\sigma_v')/n$ と応力比 τ/σ_v' の関係はFig. 8のようになった。本振動台実験では $\tau/(\sigma_v')_m = \tau/\sigma_v'$ であるので、図中の応力比は τ/σ_v' で示した。

Fig. 8の直線は式(3)で示され、間隙水圧蓄積量 u_m を

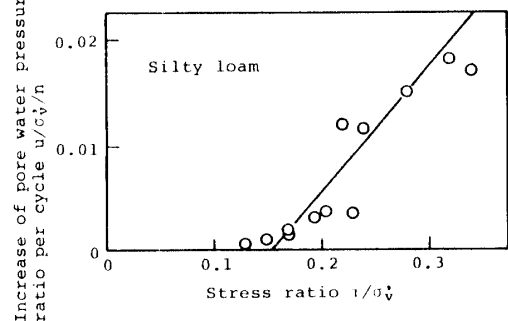


Fig. 8 Relationship between increase of pore water pressure ratio per cycle, $u/\sigma_v'/n$ and stress ratio τ/σ_v' obtained from the pore water pressure buildup curves

与えるものである。振動台実験の供試体の応力状態は後でのべるモデル地盤のそれに近いので、地盤内の間隙水圧の計算には式(3)が用いられた。

$$u_m/\sigma_v' = (-0.018 + 0.119\tau/\sigma_v') \cdot n \quad (3)$$

(ただし、 $\tau/\sigma_v' > 0.154$)

Fig. 9は振動台実験で用いたのと同じシルト質ロー

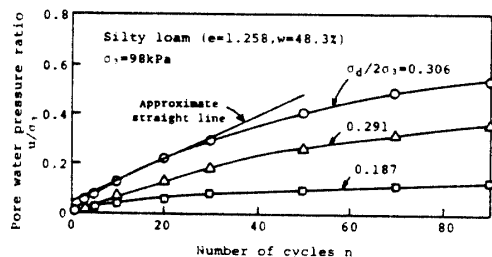


Fig. 9 Pore water pressure buildup curves obtained from cyclic triaxial test

ムの繰返し三軸実験から得られた間隙水圧上昇曲線の一例を示す。図中、 σ_3 、 σ_d はそれぞれ側圧、軸差応力を示す。繰返し三軸試験に用いた供試体はあらかじめ圧密容器内で鉛直圧50kPaの下で圧密によって作製されたものである。繰返し三軸試験装置および方法は別の論文⁴⁾に詳しいので、ここでは省略する。

Fig. 9に示すような実験曲線に対して $n = 25$ 回までを直線で近似することで間隙水圧蓄積量 u_m を求めた。その結果、繰返し三軸試験から求めた u_m は式(4)で与えられた。

$$u_m/\sigma_3 = (-0.031 + 0.131\sigma_d/2\sigma_3) \cdot n \quad (4)$$

(ただし、 $\sigma_d/2\sigma_3 > 0.195$)

ところで三軸供試体には等方応力が作用するが、この振動台実験での供試体の応力状態は K_0 状態であり、二つの実験では供試体に作用する応力状態が異なる。そこで、三軸試験から得られた式(4)は式(5)を用いて三軸供試体の応力状態を K_0 状態に変換する。式(5)中の静止土圧係数 K_0 はBrookerの式(6)で与えられる。

$$\sigma_3 = (1 + 2K_0) \cdot \sigma_v'/3 \quad (5)$$

$$K_0 = 0.95 - \sin\phi' \quad (6)$$

ここで、 ϕ' : 内部摩擦角

静的三軸実験で得られたシルト質ロームの $\phi' = 41.3^\circ$ を式(6)に代入し、式(7)が得られる。

$$\sigma_3 = 0.529\sigma_v' \quad (7)$$

式(7)を式(4)に代入し、三軸供試体の応力状態を振動台実験のそれに交換した場合の繰返し三軸実験から得られた間隙水圧蓄積量 u_m の式(8)が得られた。

$$u_m/\sigma_v' = (-0.016 + 0.131\tau/\sigma_v') \cdot n \quad (8)$$

(ただし、 $\tau/\sigma_v' > 0.124$)

Fig. 10はそれぞれ式(3)、(8)で示す振動台実験および繰返し三軸実験から得られた、 u_m/σ_v' の計算値を示す。応力比 τ/σ_v' は0.2、0.3および0.4とした。この図からわかるように $\tau/\sigma_v' = 0.2, 0.3, 0.4$ の場合、振動台実験から得た u_m/σ_v' の値は繰返し三軸実験から得た値の0.56倍、0.77倍、0.83倍であるが、 τ/σ_v' が大きくなるにしたがって二つの実験で得た u_m/σ_v' の値は近くなる。

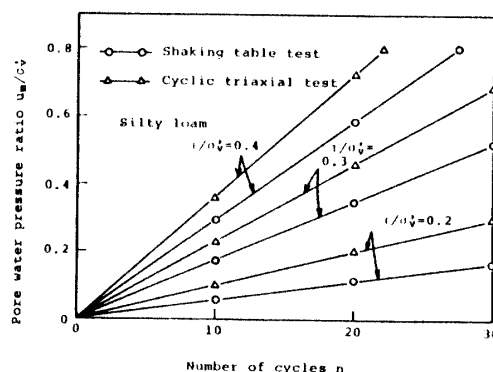


Fig. 10 Pore water pressure buildup curves of silty loam obtained from shaking table test and cyclic triaxial test

3. 繰返しせん断によるシルト質ロームのモデル地盤の破壊の解析

3.1 解析用モデル地盤および入力地震波

解析に用いたシルト質ロームからなるモデル地盤およびシルト質ロームの諸定数はFig. 11に示す。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。

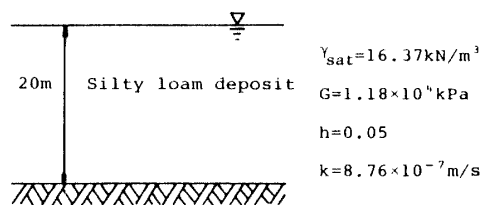


Fig. 11 Silty loam deposit used in this analysis

圧密試験から求めたシルト質ロームの透水係数 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地盤に生じる間隙水圧の消散は無視した。

地盤のせん断弾性係数 G は次のようにして決めた。振動台実験によって得られたシルト質ローム ($e = 1.419$) の平均有効拘束圧 $\sigma_v' = 26 \text{kPa}$ 、 $1/2\gamma_D = 1.5 \times 10^{-4}$ における G の値は 16.9MPa であった (Fig. 12)。このシルト質ロームの G の値はRichartらの粘性土の G を求める

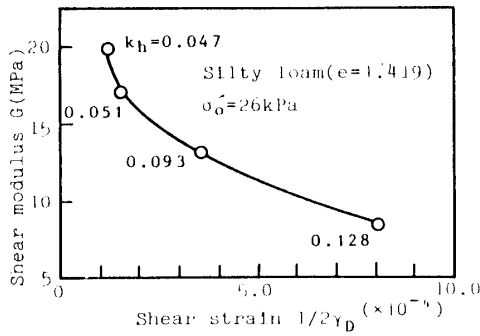


Fig. 12 Relationship between shear modulus G and shear strain $1/2\gamma_0$ of silty loam obtained from shaking table test

実験式(9)⁵⁾から得られた $G=16.7\text{MPa}$ とかなりよく一致することがわかった。

$$G = \frac{3300(2.97 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_0)^{1/2} \quad (\text{kPa}) \quad (9)$$

そこで、モデル地盤のGは式(9)から得られた、深さ5 mの $G=1.18 \times 10^4 \text{kPa}$ を用いた。なお、後の地盤の応答解析のところでのべるように深さ5 mの位置の応力比はもっとも大きくなる。

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速度である。入力波の継続時間は20秒とした。El Centro波および模擬地震波の最大加速度振幅を 1.0m/s^2 にした場合の加速度波形は、それぞれFig. 13, Fig. 14に示す。

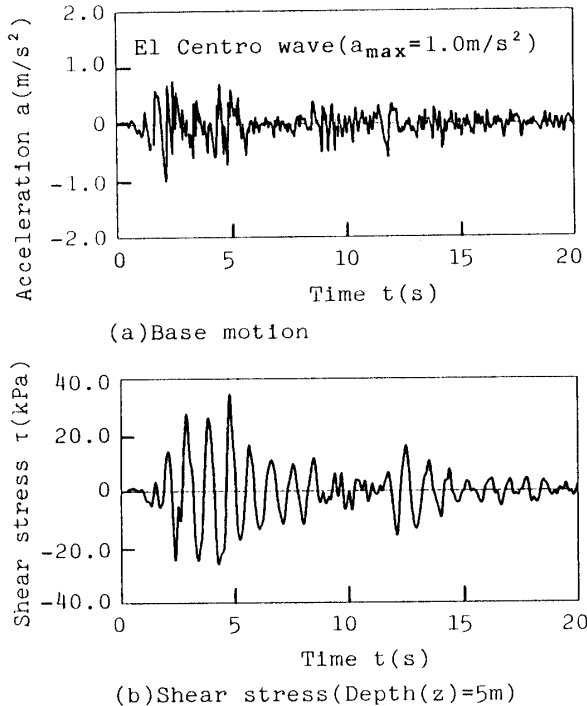


Fig. 13 Base motion and time histories of shear stress of the deposit (El Centro wave with $a_{\max}=1.0\text{m/s}^2$)

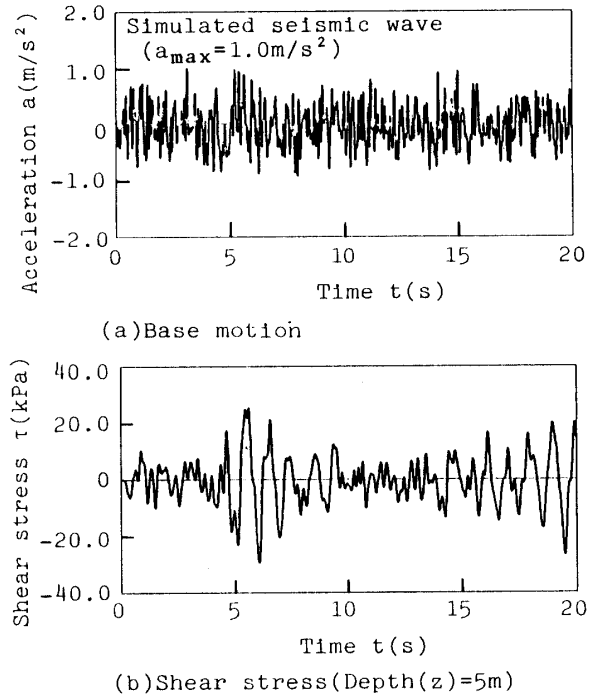


Fig. 14 Base motion and time histories of shear stress of the deposit (simulated seismic wave with $a_{\max}=1.0\text{m/s}^2$)

3.2 地盤内の間隙水圧の計算方法

今回の計算では非排水状態で地盤の間隙水圧は上昇するので、地盤の水平方向の間隙水圧は同じであるから、地盤は深さ方向のみに1 m間隔に分割して各深さにおける間隙水圧の計算を行った。

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る、運動方程式(10)を用いて応答解析から求めた。すなわち、運動方程式はNewmarkの β 法で解かれた。数値計算の時間きざみは0.005秒とした。

$$[M] \cdot \ddot{u}(t) + [C] \cdot \dot{u}(t) + [K] \cdot u(t) = - [M] \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (10)$$

ここで、 $[M]$: 質量マトリックス, $[C]$: 減衰マトリックス, $[K]$: 剛性マトリックス, u : 地盤の変化ベクトル, \ddot{u}_g : 地動加速度ベクトル, t : 時間。

減衰マトリックス $[C]$ は $[C]=h \cdot \omega_1 \cdot [M] + h / \omega_1 \cdot [K]$ で与えた。ここで、 h は地盤の減衰定数で、0.05とした。 ω_1 は地盤の第一次固有円振動数で、本解析の地盤では $\omega_1=6.59\text{rad/s}$ 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。

まず、入力波がエルセントロ波および模擬地震波の場合には、地盤内の各深さのせん断応力がゼロクロス

する ($n = 1$) 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 $n = 1$ のせん断応力を式(1)に代入して得られる間隙水圧蓄積量 u_m が $n = 1$ で地盤に生じる間隙水圧となる。同ように、次にせん断応力がゼロクロスする ($n = 2$) までの時間とせん断応力の最大値を求める。このせん断応力を式(1)に代入して間隙水圧を求め、それを $n = 1$ の間隙水圧に加えて $n = 2$ の間隙水圧を得る。 $n = 3$ 以後の間隙水圧も同ような計算を繰返して得られた。

$$u_m / \sigma_v' = (-0.009 + 0.060 \tau / \sigma_v') \cdot n \quad (11)$$

(ただし、 $\tau / \sigma_v' > 0.15$)

式(11)は間隙水圧蓄積量 u_m がせん断応力の半周期の繰返し回数毎に与えられる式となっている。したがって、式(11)から求まる u_m は式(3)の u_m の1/2の値となる。

なお、入力波が正弦波加速度の場合には、せん断応力の1周期毎に間隙水圧が計算されるので、計算には式(3)が用いられた。

4. 解析結果および考察

4.1 不規則な地震波による地盤の破壊

先にのべたように振動台実験によってシルト質ロームは液状化に似た破壊を生じ、その時の間隙水圧比は0.4~0.8であった。ここでは、この実験結果を考慮し、シルト質ロームからなるモデル地盤の繰返しせん断による破壊も間隙水圧比が0.4~0.8の場合に生じると仮定した。

まず、地盤の間隙水圧比が0.4および0.8となり、地盤の破壊が生じる時の入力波の最大の加速度振幅 a_{max} を求めることにした。

Fig. 13, Fig. 14は入力波がそれぞれエルセントロ波、模擬地震波の場合の地盤内の深さ5mに生じるせん断応力の時刻歴と入力加速度波形を示す。二つの入力加速度の振幅の最大値 a_{max} は 1.0 m/s^2 である。Fig. 15は二つの入力波に対する時間 ($t = 20$ 秒) における地盤内の間隙水圧比の深さ方向の分布を示す。この図からわかるように間隙水圧は深さ ($z = 5$ m) で最も大きくなるが、これは地盤内の応力比が $z = 5$ m で最大となるためである。

Fig. 16(a), Fig. 16(b)は入力波がそれぞれエルセントロ波、模擬地震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最も大きくなる、深さ ($z = 5$ m) における間隙水圧比の最大値 $(u/\sigma_v')_{max}$ の関係を示す。同図には $z = 3, 15$ mの両者の関係も示されている。Fig. 16(a)からエルセントロ波が入力波の場合、 $z = 5$ mに

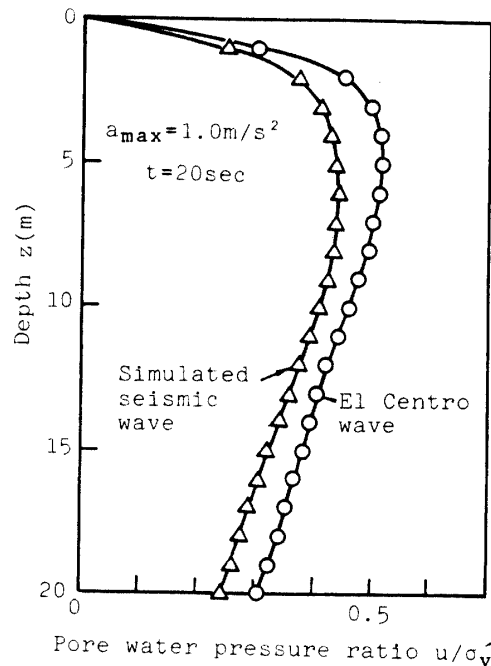


Fig. 15 Vertical distributions of pore water pressure ratio u/σ_v'

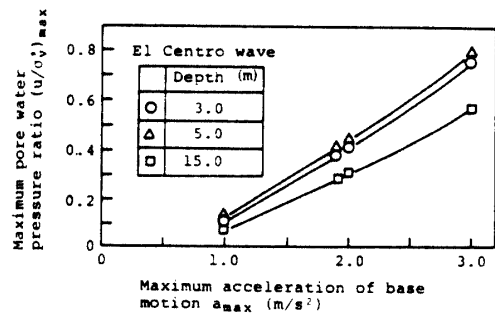


Fig. 16(a) Relationship between maximum pore water pressure ratio $(u/\sigma_v')_{max}$ induced in the deposit and maximum acceleration of base motion a_{max} at depth ($z = 3, 5, 15$ m (El Centro wave))

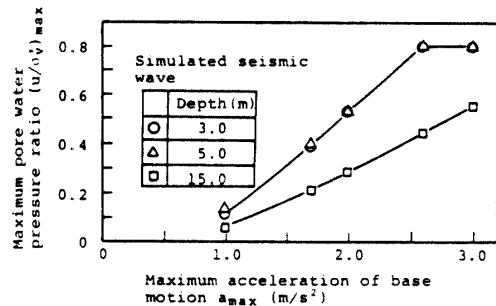


Fig. 16(b) Relationship between maximum pore water pressure ratio $(u/\sigma_v')_{max}$ induced in the deposit and maximum acceleration of base motion a_{max} at depth ($z = 3, 5, 15$ m (Simulated seismic wave))

における $(u/\sigma'_v)_{\max}$ が 0.4 および 0.8 となる時の 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。また, Fig. 16(b) から模擬地震波では, $z = 5\text{m}$ における $(u/\sigma'_v)_{\max}$ が 0.4 および 0.8 となる時の a_{\max} はそれぞれ 1.7m/s^2 , 2.6m/s^2 と求めることができる。

この方法によって得られた a_{\max} は地震動の継続時間 20 秒で地盤の破壊が生じる場合の入力波の加速度振幅を与える。Fig. 17 はそのような加速度振幅をもつ入力波に対する地盤の深さ 5 m の間隙水圧上昇曲線を示す。

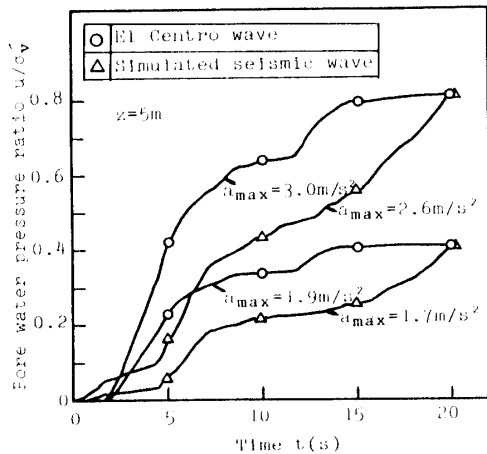


Fig. 17 Pore water pressure buildup curves at failure of the deposit

Fig. 16(a), Fig. 16(b) および Fig. 17 から入力波の違いによって地盤が破壊を生じる時の加速度振幅の大きさ, および地盤に生じる間隙水圧の上昇の様子が違うことがわかる。

4.2 不規則な地震波と等価な正弦波による地盤の破壊と等価繰返し回数

4.1 で得られた地盤が破壊を生じる時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 β は次式で与えた,

$$\beta = a/a_{\max} \quad (12)$$

Fig. 18 は地盤の深さ 5 m の $(u/\sigma'_v)_{\max}$ が 0.4 および 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。

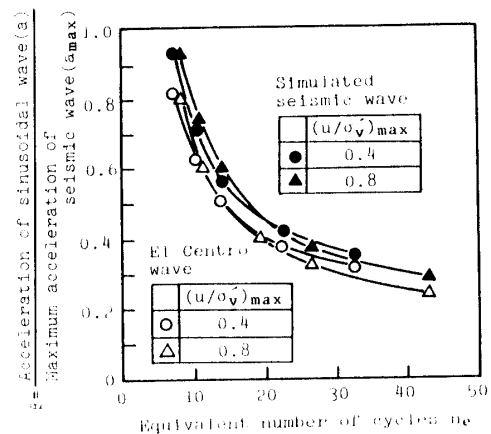


Fig. 18 Relationship between acceleration of sinusoidal wave (a) /maximum acceleration of seismic wave (a_{\max}) , β and equivalent number of cycles n_e

さらに, β と n_e の関係は破壊時の間隙水圧比 $(u/\sigma'_v)_{\max}$ の大きさにはほとんど依存しないようである。このことは次のように考えることができる。 $(u/\sigma'_v)_{\max} = 0.8$ の場合には破壊を生じるに要する正弦波加速度は大きくなり, したがって地盤に生じるせん断応力は大きい, 間隙水圧比が 0.8 となるまでの繰返し回数も大きくなる。

一方, $(u/\sigma'_v)_{\max} = 0.4$ の場合, 正弦波加速度は小さく, したがって地盤に生じるせん断応力は小さく, 間隙水圧比が 0.4 となるまでの繰返し回数も小さい。結局, 地盤に生じるせん断応力の大きさと破壊までに生じる間隙水圧の上昇量が相殺されて, 破壊までの繰返し回数は破壊時の間隙水圧比の設定値に依存しないと考えることができる。

Fig. 19 は地盤の破壊が生じる時の応力比 τ/σ'_v とその時までの等価繰返し回数 n_e の関係を示す。図中, \circ , \triangle は $(u/\sigma'_v)_{\max} = 0.4$ および 0.8 の場合の計算値である。また, \bullet , \blacktriangle は $(u/\sigma'_v)_{\max} = 0.4$ および 0.8 の場合の振動台実験値であるが, これは次のようにして求められた。まず, Fig. 6 から破壊時の間隙水圧比 u_{15}/σ'_v がそれぞれ 0.4, 0.8 の場合の応力比 $\tau/(\sigma'_v)_m$ は 0.30, 0.14 とよみとることができる。次に, Fig. 5 から $\tau/(\sigma'_v)_m = 0.30, 0.14$ の場合の破壊までの繰返し回数を求めると, それぞれ 18 回, 320 回となる。このようにして求めた応力比と繰返し回数の関係をプロットしたのが Fig. 19 の実験値である。

Fig. 19 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時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。

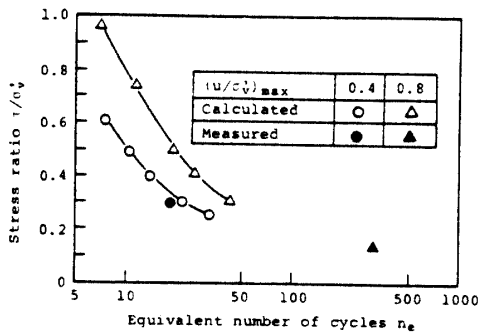


Fig. 19 Relationship between equivalent number of cycles n_e and stress ratio τ/σ_v'

このように不規則な繰返しせん断によるモデル地盤の破壊の検討において、入力波として不規則な地震波とそれに等価な一定加速度振幅をもつ正弦波を用いることができることが示された。そこで、Fig. 18から地盤が破壊を生じる時の入力地震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。

Table 1 Equivalent number of cycles n_e

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

その結果はTable 1にまとめられた。この表からわかるように $\beta=0.4$ の場合の模擬地震波に対する n_e は、エルセントロ波に対する n_e よりも4~5回大きい、また、 $\beta=0.8$ の場合には、模擬地震波に対する n_e は、エルセントロ波に対する n_e よりも1~2回大きい。

通常、エルセントロ波のような既往の地震波は程度の差はあるが、その伝播径路あたる地盤の影響を受けていると考えられる。本解析ではそのような地盤の影響を受けていない入力波として作製した模擬地震波を用いた場合についても以上の検討を行ったわけである。したがって、繰返しせん断によるシルト質ローム地盤の液状化に似た破壊の検討に用いる等価な正弦波の加速度振幅および繰返し回数としては、Table 1の模擬地震波に対する β と n_e の値を用いればよいことを提案する。

砂地盤の液状化の検討では、繰返しせん断応力とし

ては地盤内に生じる不規則なせん断応力の最大値の0.65倍にとられることが多い⁶⁾。本解析で用いたシルト質ローム地盤の液状化に似た破壊において $\beta=0.65$ 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はそれぞれ11.5回、13回と求めることができた。

5. 結 論

以上のべたように本文では、まず粘着力をもつ飽和シルト質ロームの液状化実験を行った。次に、シルト質ロームからなるモデル地盤を想定し、実験結果にもとづいて繰返しせん断によって地盤に生じる間隙水圧を計算し、地盤の破壊を生じる不規則な地震波と等価な一定振幅の正弦波の加速度振幅の大きさおよび等価繰返し回数の関係を調べた。

得られた結論を要約すると次のとおりである。

1) 繰返しせん断を受けるシルト質ローム(粘着力=16kPa)は液状化に似た破壊を生じ、その時の間隙水圧比は0.4~0.8であった。

2) 応力比が0.3~0.4の範囲において、振動台実験から得られたシルト質ロームの間隙水圧蓄積量は、繰返し三軸実験から得られた値の約8割であった。

3) 繰返しせん断によってモデル地盤に生じる間隙水圧比が0.4となる時のエルセントロ波および模擬地震波の加速度振幅の最大値 a_{max} はそれぞれ1.9m/s²、1.7m/s²であった。また、間隙水圧比が0.8となる場合のエルセントロ波および模擬地震波の a_{max} はそれぞれ3.0m/s²、2.6m/s²であった。

4) シルト質ロームが破壊を生じる時の応力比と繰返し回数の関係の実験値は、シルト質ローム地盤に正弦波の加速度を入力した場合の解析から得られた両者の関係とかなりよく一致した。

5) 3)で得られたモデル地盤が破壊を生じる時のエルセントロ波および模擬地震波の加速度振幅とそれと等価な正弦波の加速度振幅の比および地盤の破壊までの繰返し回数の関係を求めることができた。

たとえば、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、地盤の間隙水圧比が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回となった。

終りに、本実験および計算を行うに当たって助力を得た本学々生岡田義成、住田賢二両君に謝意を表する。

なお、計算は山口大学情報処理センターACOS-850により行った。

参 考 文 献

- 1) 大原資生, 松田 博: 飽和粘土の動的強度, 土木学会論文報告集, 第274号, pp.69-78, 1978.
- 2) 大原資生, 山本哲朗: 振動台による砂の液状化試験について, 土と基礎, Vol. 29, No. 4, pp.33-38, 1981.
- 3) O-hara, S., Kotsubo, S. and Yamamoto, T.: Pore Pressure Developed in Saturated Sand Subjected to Cyclic Shear Stress Under Partial-Drainage Conditions, Soils and Foundations, Vol. 25, No. 2, pp.45-56, 1985.
- 4) 大原資生, 山本哲朗: 動的三軸による液状化試験におけるゴム膜貫入量の影響について, 土質工学会論文報告集, Vol. 22, No. 1, pp.127-135, 1982.
- 5) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1976.
- 6) Seed, H. B.: Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT2, pp. 201-255, 1979.

(昭和62年4月13日受理)