

飽和粘性土の動力学的性質について

新潟大学 工学部 正員 小川 正二
同 大学院 学生員 ○柴山 孝幸
同 学生 山口 晴幸

1. まえがき

砂質土の動的性質については多くの研究がなされている。特に、液状化についての室内せん断試験による研究は多く、ある程度以上のシルト分を含む土では液状化は生じないと言われている。しかし実際には十勝沖地震に見られるようにシルト分を多く含む粘性土でも砂の流動化に似た現象が見られている。一方急速載荷によれば砂質土では破壊に到るまでの載荷時間が $1 \sim 10^{-3}$ 秒間ではその圧縮強さの変化はほとんどなく、粘性土の場合には土の飽和度にも関係するが圧縮強さは約 2 倍まで増加することが言われている¹⁾。このようなことを考えると地震時の粘性土の圧縮強さは静的試験の約 2 倍位になると考えることもできる。しかしながら繰り返し荷重を受けると土の軟化のために繰り返し載荷回数とともにその圧縮強さが低下することがある。したがって地震時には載荷速度の増大による強度増加と繰り返し載荷による強度低下の相互関係によって圧縮強さが静的試験より低下することが考えられる。したがって、地震時の粘性土の挙動を知るための研究も行なわれなければならない。

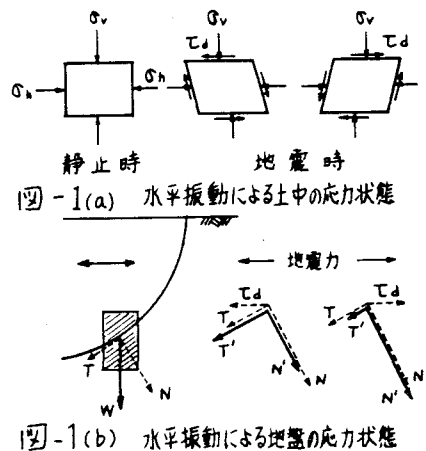
一般に地震が水平にのみに作用する時の土中の応力状態は図-1(a) に示されるようになり鉛直応力は一定であると考えている。室内実験もこのような状態を満足することを理想としているが、斜面や地盤の破壊面上の応力状態は震度法で考えると図-1(b) のようになる。この場合には鉛直応力及びせん断応力両方が同時に変化することになり、この場合の土要素の応力状態は動的三軸試験機でも再現することができる。著者らは動的三軸試験機を用いて飽和したシルト質ローム土に繰り返し荷重を載荷した時の破壊強さ、動的等価弾性定数減衰定数等の変化を調べたのでここに報告する。

2. 実験方法

試料土は $L.L = 48.5\%$ $P.L = 23.8\%$ $G_s = 2.66$ $W_{opt} = 26\%$ $D_{10} = 0.018\text{ mm}$ $D_{30} = 0.020\text{ mm}$ $D_{60} = 0.022\text{ mm}$ であり三角座標による分類ではシルト質ロームになる。この試料土を用いて十分に飽和された供試体を作成するために、含水比約 65% の懸濁状にした試料土を特殊圧密装置（直径 5.0 cm、高さ 5 cm）で気泡が混入しないように注意して圧密した。なお、圧密圧力は 1.0 kg/cm^2 とし、圧密が完了した後に直径 5.0 cm 高さ 12.5 cm の円筒供試体を作成した。この状態での供試体の平均含水比は約 38% であった。

試験に用いた三軸試験機についてはすでに報告されている²⁾ のでここでは記述を省略する。

試験は圧密非排水状態で行ない、圧密圧力は $1.2, 4.5 \text{ kg/cm}^2$ とした。圧密の完了した供試体につ



いて、実験時には等方圧を 1 kg/cm^2 あるいは 2 kg/cm^2 だけ増大させる。この時にほとんど増加圧に等しい間ゲキ水圧が発生する。また過圧密の影響も知るために、任意の大きさのバックフレッシャーを加えて過圧密比 $O.C.R.=1, 2.5$ とした。このようにして準備された供試体に一定大きさの軸差応力 σ_d を一軸的に繰り返し載荷した。

3. 交番応力を受ける飽和粘性土の挙動

前述のような方法で行なった実験結果の一例を図-2に示す。これらの結果をみると、軸ヒズミ、間ゲキ水圧の載荷回数による変化は飽和砂の場合とほぼ同様な傾向を示し、ある載荷回数に達すると軸ヒズミが急激に増大することがわかる。しかし軸ヒズミの増大し始める点は砂の場合のように軸差応力が低下し始める点でなく、それよりかなり前になっている。これは粘性土の有する粘着力によるせん断抵抗の影響と思われる。また、間ゲキ水圧の最大値も拘束圧に等しくなっていない。これも砂のように完全な液状化状態になり得ないことにもよると思われるが、間ゲキ水圧の遅れや測定法にも問題があると思われる。

実験を始める前の飽和度はほぼ $S_r=100\%$ であったが、上記のことを考えると実験結果を有効応力によって整理するためにはなお検討の余地があるので、ここでは全応力を用いて粘性土の挙動を述べる。

このように間ゲキ水圧や軸差応力の変化からは砂の初期液状化に相当する状態を得

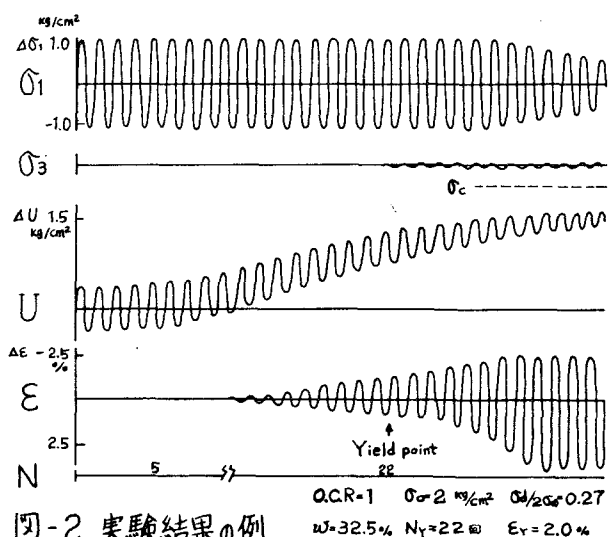


図-2 実験結果の例

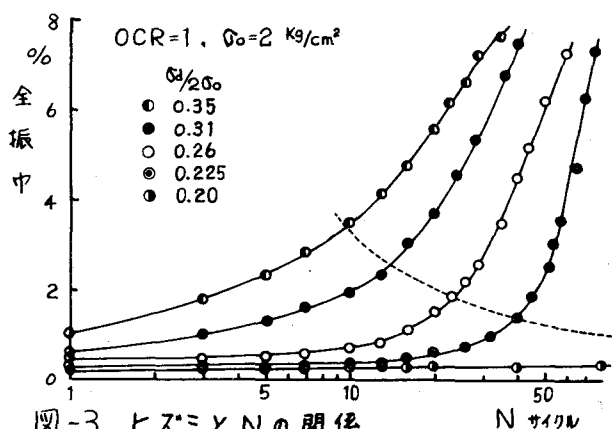


図-3 ヒズミとNの関係

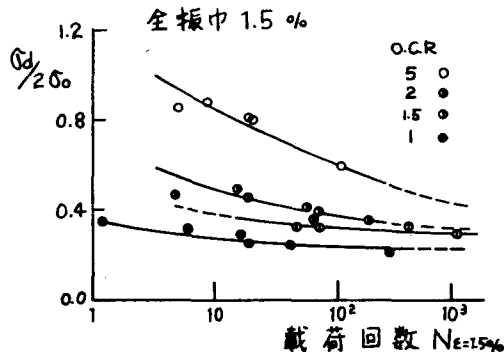


図-4(a) $\sigma_d/2\sigma_0$ と $N_{\epsilon=1.5\%}$ の関係

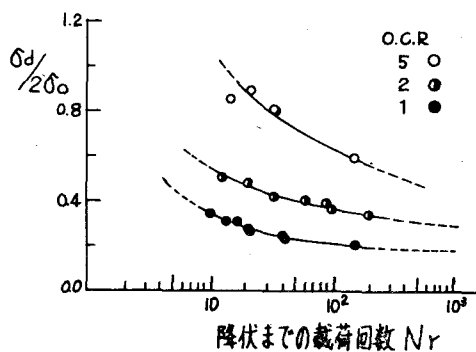


図-4(b) $\sigma_d/2\sigma_0$ と N_r の関係

られなかったがヒズミ振幅が急激に増大する点（図-3の破線部分）があり、この点は飽和粘性土の降伏点で、飽和砂の初期液状化に相当するものと考えることができる。

図-4(a), 4(b)は図-3から得られたヒズミ振幅が1.5%に達するまでの載荷回数 $N_{\epsilon=1.5}$ と $\sigma_d/2\sigma_0$ との関係及びヒズミ振幅が急増するまでの載荷回数 N_y と $\sigma_d/2\sigma_0$ との関係を示すものである。これらの図より1.5%ヒズミを生じるに要する応力、降伏状態を生ずるに要する応力とも載荷回数が少ない時には過圧密比の大なるほど大きく、過圧密比による差は N が大になると次第に小さくなることわかる。すなわち、載荷回数 N が大きくなると次第に過圧密の影響が失われてゆくことがわかる。特に、このことは降伏点応力を比較したときに顕著である。

図-5は繰り返し応力載荷中に測定した応力とヒズミの関係より求めたヒステリシスカーフの例であり $N=1, 50, 70, 90$ の場合を示すものである。 $N=50$ までは図-3に示される降伏点以下の場合に相当し、 $N=70, 90$ は降伏点を越えて載荷した場合である。このように降伏状態に達するまでは、ほぼバイリニャーモデルで表わされる形を示すが、降伏状態を過ぎると、もはやバイリニャー

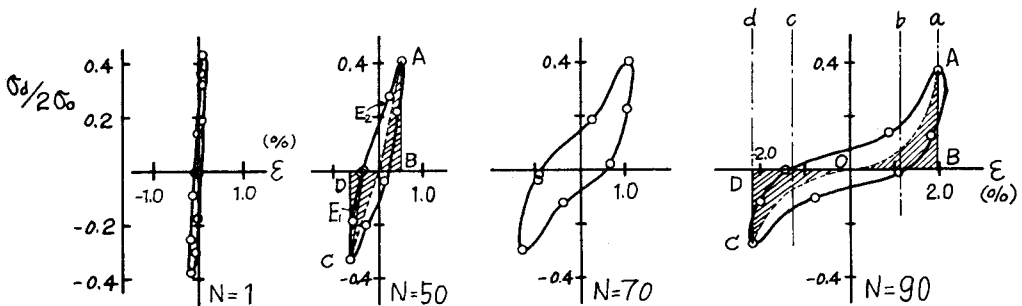


図-5 ヒステリシスカーフの例

モデルで変形挙動を表わすことはむずかしくなる。すなわち、 $N=90$ の例でみられるように $b-c$ 範囲のヒズミに対しては軟化現象のためにほとんど土の抵抗力は失われているが、過去に受けたことのない $a-b$ あるいは $c-d$ 範囲のヒズミに対してはせん断抵抗が残存していることがわかる。このような現象は長池³⁾の飽和砂の実験においても見られている。

4. 弾性定数と減衰定数

土をバイリニャーモデルで考えれば、図-5のヒステリシスカーフより、弾性定数 E_1, E_2 は破線の勾配として簡単に求めることができる。しかしここでは、Silver ら⁴⁾によって提案されている剛性率と同じように等価弾性定数 E_{eq} （図-5の $N=50$ の場合の直線 $A-C$ の勾配）について検討する。また $N=90$ のような場合にも直線 $A-C$ の勾配をとることにした。また Jacobsen⁵⁾の方法によって等価履歴減衰定数を次式より求めた。

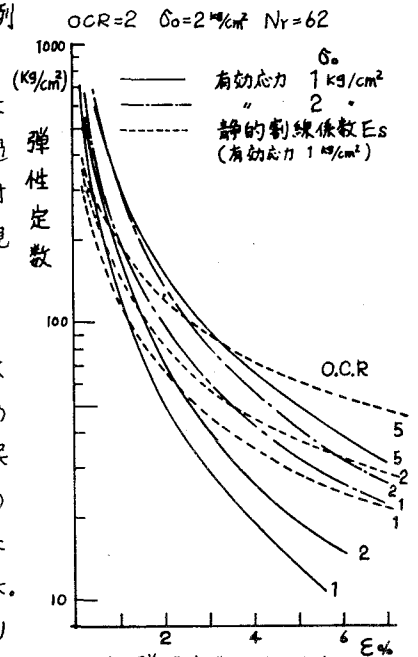


図-6 弾性定数のヒズミ変化

$$\bar{n}_{eg} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}$$

ここで、 ΔW :履歴曲線で囲まれる部分の面積であり、 W : $\triangle ABO$ の面積+ $\triangle CDO$ の面積である。 $N=90$ のような場合には、 W としては斜線部で囲まれる部分の面積を考えている。

図-6は E_{eg} と繰り返し応力載荷中のヒズミ振幅との関係を示すものである。図-6より等価弾性定数 E_{eg} はヒズミの大きさに依存しており、軸差応力の大きさにはあまり関係していない。また E_{eg} は過圧密比が大きくなると大になる。さらに静的試験の割線弾性定数

E_s と比較すると、ほぼ降伏状態に達するまでは E_{eg} が E_s よりも大きい、この状態を越えると $E_s > E_{eg}$ となる。また図-7は $O.C.R.=1$ の場合の等価履歴減衰定数 $\bar{n}_{eg}$ とヒズミ振幅との関係を示すものである。 $\bar{n}_{eg}$ はヒズミ振幅の大なるほど大きくなるが、かなりのバラツキがあり一定の曲線で表わすことはできない、しかし、ほぼ図示する範囲にあり、 $\bar{n}_{eg}=15 \sim 25\%$ 位であると考えられる。 $\bar{n}_{eg}$ の値は $O.C.R.$ が異なる場合でもほぼ同じような範囲にあることがわかった。

5. まとめ

三軸試験による飽和粘性土の動的性質に関する実験結果を全応力表示した場合について述べたが、これらより次のようなことがいえる。

- (1) 飽和粘性土の場合にも、砂の初期液状化のようにヒズミ振幅が急増する現象がみられ、 $\sigma_d/2\sigma_0$ と N_d との関係を描くと図-4(b)のようになり、砂の液状化の発生基準と同じような曲線を得ることができる。
- (2) 等価弾性定数 E_{eg} はヒズミ振幅に依存するが、軸差応力によってはあまり変化がない、また過圧密比、初期拘束圧の大なるほど大きくなる。
- (3) $\bar{n}_{eg}$ はヒズミ振幅の大なるほど大きくなるが、かなりのバラツキがあり、 σ_d との関係は明白ではない、また過圧密比が異なってもあまり変化せず、ほぼ $\bar{n}_{eg}=15 \sim 25\%$ の範囲にある。

これらの実験の結果やその解析については十分とはいえないが、一応の傾向を知ることができた。今後はさらに詳細な実験を行ない、十分に検討を進めるつもりである。また、間ゲキ水圧の測定結果を検討し、有効応力表示による諸性質についても考察を行なうつもりである。

参考文献

- 1) Shimming, B.B., Hass, H.J. and Saxe, H.C. 1966 "Study of Dynamic and Static Failure Envelopes," Proc. ASCE, Vol. 92, NO. SM2.
- 2) 小川正二 1970 "飽和砂の振動三軸試験について" 第25回年度学術講演会, 土木学会 PP 453~456
- 3) 長池政彦 1969 "動的応答センサ応力を受ける飽和砂の液状化現象" 東北大学修士論文
- 4) Silver, M.L. and Seed, H.B. 1971 "Deformation Characteristics of Sands under Cyclic Loading" Proc. ASCE, Vol. 97, NO. SM.8.
- 5) Jacobsen, L.S. "Damping in Composite Structures" Proc. 2nd WCEE PP 1029~1044