

繰返しせん断方向が粘土層・砂層の沈下特性に及ぼす影響

松田博¹・山本智一²・櫻谷慶治³

¹正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²学生会員 山口大学大学院理工学研究科社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 工修 日本道路公団北陸支社敦賀管理事務所 (〒914-0014 福井県敦賀市井川17号字稻荷藪8-1)

多軸単純せん断試験装置を用いて、豊浦砂とカオリン粘土について種々の载荷パターンでの実験を行い、繰返しせん断方向が粘土層および砂層の沈下特性に及ぼす影響を調べた。その結果、繰返しせん断方向を一方とした通常の繰返し単純せん断試験とGyratory shear testでの結果を比較すると、粘土、砂いずれにおいても繰返しせん断中の有効応力減少にはせん断方向が影響すること、また砂層の沈下は液状化に至る前の状態においては繰返しせん断中の有効応力減少により評価できることがわかった。

Key Words : earthquake, settlement, clay, effective stress, consolidation, sand

1. まえがき

地震時の地盤の挙動は加速度の方向に依存して変化するが、加速度の方向は一定ではないために、地盤内で生じる繰返しせん断も多方向に生じる。図-1は兵庫県南部地震において測定された加速度波形をもとに得た地盤内のせん断ひずみの履歴曲線を示したものであるが、明らかにせん断ひずみの方向性は一様ではない。このような繰返しせん断方向が砂地盤の沈下に及ぼす影響に関しては、Pyke 等¹⁾は水平直角2方向から繰返し载荷を同時に行ったときに生じる沈下は、各方向からそれぞれ独立に繰返し载荷を行って得られる沈下の和に等しいということを示した。一方、Nagase 等²⁾は繰返しせん断後に生じる砂層の沈下に及ぼす载荷の方向性の影響は無いと述べており、Pyke 等¹⁾の結果と異なっており、その

相違についての明確な原因についても明らかにされていない。一方、粘性土に関する研究はほとんど行われていないために未だ明らかにされていない点も多い。そこで、本研究においては多方向繰返し単純せん断試験機を用いて、粘土層および砂層の地震によって生じる沈下特性に及ぼす地震動の方向性の影響を検討したので報告する。

2. 試験装置及び実験方法

用いた装置は多軸単純せん断試験機³⁾である。この装置は水平直角2方向から独立して繰返し単純せん断を行うことが可能である。供試体の直径は75mm、高さは20mmであって、供試体の側面はゴムスリーブで覆われ、その外側はアクリルリングを積み重ねることによって、せん断変形に対しては自由であるが横方向の膨張は拘束される。水平2方向からのせん断力は電気油圧サーボシステムによって与えた。そのため任意の波形の入力が可能である。また、鉛直応力は空気圧サーボシステムによって与えた。

用いた試料は粘土と砂であり、粘土試料としてはカオリンを、また砂試料としては豊浦砂を用いた。両試料の物理特性を表-1に示す。

粘土については含水比を約80%、砂については相対密度を約70%に調整した飽和試料を作成し、いずれも圧密圧力49kPaで予圧密した後、定体積条件の下で繰

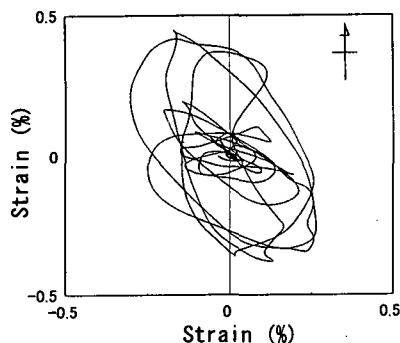


図-1 兵庫県南部地震でのひずみ履歴

表-1 試料の物理特性

カオリン	豊浦砂
$\rho_s=2.490$ (g/cm ³)	$\rho_s=2.626$ (g/cm ³)
$w_L=44.3$ (%)	$e_{max}=1.003$
$I_p=14.5$	$e_{min}=0.642$
$w_p=29.8$ (%)	

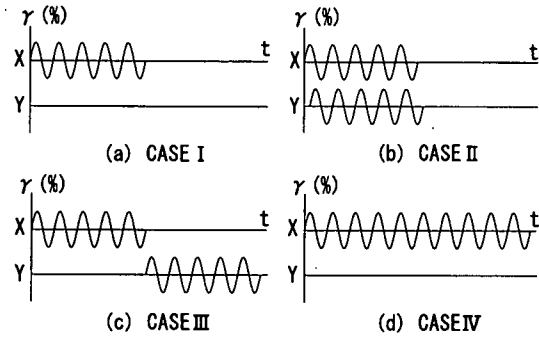


図-2 繰返しせん断方法

返しせん断試験を行なった。繰返しせん断後は圧密圧力49kPaで再圧密を行ない沈下量を測定した。

繰返しせん断の波形はサイン波である。また、繰返しせん断方向の相違の影響を明確にするために以下に示す4ケースの荷重方法によって実験を行った。
Case I ; X方向から所定の回数(n)のサイン波形のせん断ひずみを荷重(Uni-)。

Case II ; X, Y両方向から位相差(θ)を与えて所定の回数のサイン波形せん断ひずみを荷重(Multi)。($\theta=90^\circ$ のとき特にGyratory shearと呼ぶ。)

Case III ; X方向から所定の回数(n)のサイン波形のせん断ひずみの荷重を行った後、Y方向からも同回数のサイン波形せん断ひずみを荷重(Y after X)。

Case IV ; X方向からnの2倍($n' = 2 \times n$)の回数のサイン波形せん断ひずみを荷重。

以上の各ケースでのせん断パターンを図-2に示す。このうち粘土に対してはCASE I, II, IIIを適用し、繰返し回数nは200回とした。またCase IIにおいては位相差を $\theta=90^\circ$ 、および $\theta=45^\circ$ として実験を行なった。砂に対してはCase I~IVを適用し、繰返し回数nは5回あるいは100回として実験を行なった。この場合位相差は $\theta=90^\circ$ のみとした。

いずれの実験においても繰返しせん断の周期は2秒とし、ひずみ振幅は0.1%~1.0%の間で変化させた。

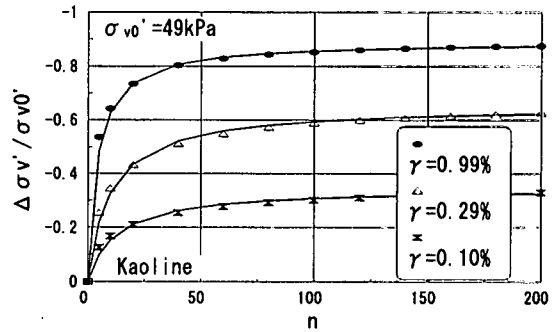


図-3 繰返しせん断による有効応力減少

また、ひずみ振幅の定義としてはCase I, IVの一方方向荷重の場合では、片振幅の大きさを供試体高さで除した値をせん断ひずみ γ とし、Case II, Case IIIの多方向荷重では、供試体下面(上面は固定)中心の軌跡において、静止位置から軌跡の最遠点までの距離を供試体高さで除した値をせん断ひずみ γ' とした。

3. 試験結果

(1) 多方向繰返しせん断試験(カオリン)

正規圧密状態にある飽和粘土が地震等により攪乱されると過剰間隙水圧の発生により有効応力が減少する。図-3はCase Iすなわち一方方向せん断について繰返し回数を200回とした時の繰返しせん断中の有効応力減少過程を示したものである。図中 $\Delta \sigma_v'$ は有効応力変化量であり、 σ_{vo}' は圧密圧力である。すでに、 $\Delta \sigma_v' / \sigma_{vo}'$ と繰返し回数nの間には次式の関係があることが示されている¹⁾。

$$\Delta \sigma_v' / \sigma_{vo}' = n / (\alpha + \beta \cdot n) \quad (1)$$

ここに、 α および β は係数であって、それぞれひずみ振幅 γ との間に次式の関係がある。

$$\alpha = A \cdot \gamma^m \quad (2)$$

$$\beta = \gamma / (B + C \cdot \gamma) \quad (3)$$

ここにA, m, B, Cは定数である。これらは、一方方向荷重に対しては適用可能であることが確認されている¹⁾が、多方向せん断に対しては明確にされていない。そこで繰返しせん断の荷重パターンごと(Case I, Case II : $\theta=90^\circ$ (=Gyratory shear), Case II : $\theta=45^\circ$ とした場合)に(1)~(3)式を適用した。その結果それぞれのケースに対して $A=4.22, 4.31, 3.35, m=-1.14, -0.76, -1.08, B=-0.09, -0.09, -0.09, C=1.07, 1.23, 1.13$ が得られた。

それぞれのCaseについて有効応力減少量と γ の関係を整理したものが図-4である。図-4には各

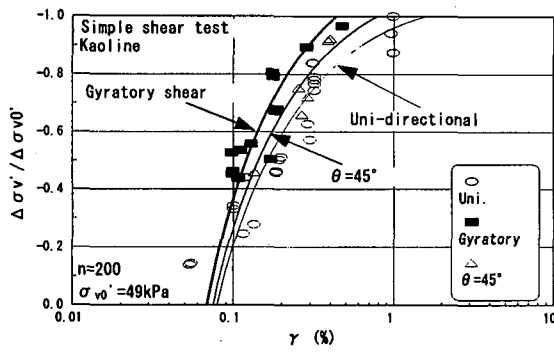


図-4 $\Delta\sigma'_v / \Delta\sigma'_{v0}$ と γ の関係

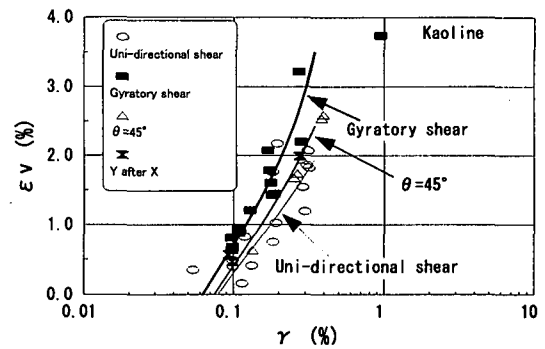


図-6 ε_v と γ の関係

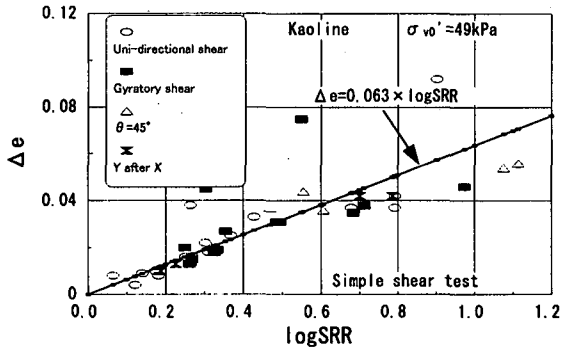


図-5 Δe と SRR の関係

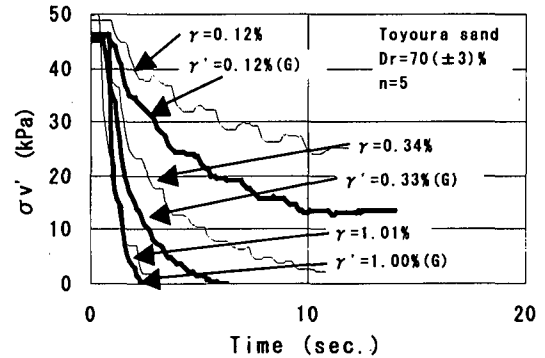


図-7 繰返しせん断による有効応力減少

Case についての結果を示しており、同図から繰返しせん断方向の相違は有効応力減少に影響を及ぼすことがわかる。すなわち振幅が等しいとき、位相差が大きいほど有効応力減少量が大きくなっている。また、同図には式(1)～(3)による計算結果も示しているが、いずれのCaseに対しても計算結果と実測値はよく一致していることがわかる。

図-5は再圧密中の間隙比変化量と次式で定義される応力減少比(Stress Reduction Ratio) SRR の関係を示したものである。

$$SRR = 1 / (1 - \Delta\sigma'_v / \sigma'_{v0}) \quad (4)$$

同図より logSRR と間隙比変化量 Δe の間には繰返し載荷方法によらない一義的な関係のあることがわかる。すなわち繰返しせん断中に生じる有効応力減少量が等しければ、その後生じる間隙比変化量は等しいといえる。ここで図-5における直線の傾きを C_{dyn} とすると最終沈下ひずみ ε_v は次式で与えられる。

$$\varepsilon_v = (C_{dyn} / (1 + e_0)) \log SRR \quad (5)$$

今回の実験からは $C_{dyn} = 0.063$ が得られた。すでに有効応力減少量が γ と n の関数として与えられているが、沈下ひずみ ε_v についても C_{dyn} を用いることにより同様な近似が可能である。沈下ひずみとせん断ひずみ振幅の関係について式(5)による計算結果と

実測値を示したものが図-6である。繰返しせん断時に生じる有効応力減少比が、繰返し載荷方向の影響を受けるために、繰返しせん断後の沈下ひずみも繰返しせん断方向の影響を受ける。また、図-6より誤差はあるものの多方向せん断に対しても式(5)の適用が可能である。

以上のことから、繰返しせん断後の粘土層の沈下は繰返しせん断中に生じる有効応力減少量にのみ依存することがわかった。しかし、有効応力減少比は繰返し載荷方向の影響を受けることから、繰返しせん断後に生じる沈下は繰返し載荷方向の影響を受けるといえる。

(2) 多方向繰返しせん断試験(豊浦砂)

図-7は、繰返しせん断中の鉛直有効応力の経時変化を示したものである。同図より繰返し回数の増加とともに有効応力が減少していることがわかる。また、その減少量はひずみ振幅の大きさに大きく依存していること、同一振幅で比較した場合、1方向せん断より Gyrotory shear の方が有効応力減少量が大きいことがわかる。この有効応力減少量をひずみ振幅 γ との関係で整理したものが図-8である。同図において γ が小さいとき、繰返しせん断方向の影響が明瞭に現れている。すなわち、せん断ひずみ振幅

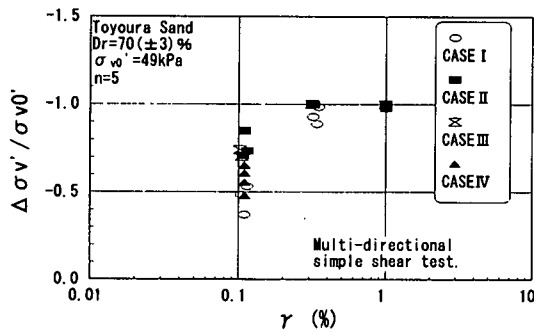


図-8 $\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'$ と γ の関係

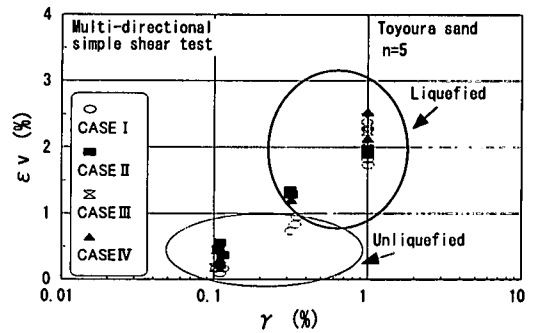


図-10 ε_v と γ の関係 (n=5)

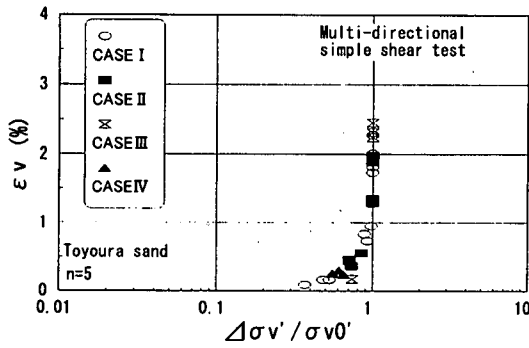


図-9 ε_v と $\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'$ の関係

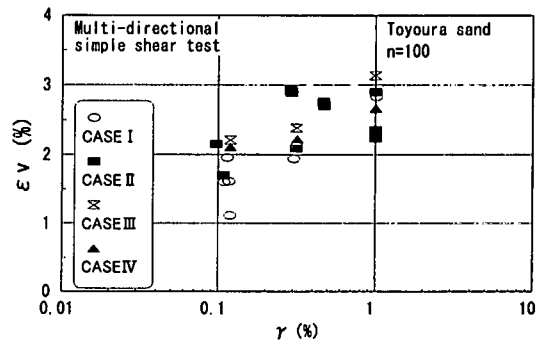


図-11 ε_v と γ の関係 (n=100)

が等しいとき、有効応力減少量は Case II と Case III が最も大きく、次に Case IV、そして Case I の順に小さくなっている。また Case II と Case III については有効応力減少量の相違は見られない。

一方、せん断ひずみ振幅が大きい場合には、繰返しせん断中に液状化によって鉛直有効応力は 0 となるため $\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'$ の値はせん断方法に関わらず 1 となり、せん断方向の影響を明らかにすることができない。そこで、繰返しせん断後の再圧密時に測定した沈下ひずみを、 $\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'$ との関係で整理したものが図-9 である。同図より繰返しせん断後に生じる沈下ひずみは、せん断方法に関わらず繰返しせん断中に生じる有効応力減少量に依存しているといえる。

図-10、図-11 は ε_v と γ の関係を示したものである。図-10 においては、図-9 において $\Delta\sigma_v'/\sigma_{v0}'$ の値が 1 となった場合を Liquefied と示している。同図より、液状化の発生の有無に関わらず γ が大きいほど生じる沈下ひずみも大きくなっており、Nagase 等¹⁾と同様の結果になっている。また γ が大きく、かつ繰返し回数が多い場合は攪乱の影響が著しくなり、繰返しせん断方向の影響は見られない。

5. 結論

繰返しせん断方向が粘土および砂の沈下に与える影響を調べるため、4 ケースの载荷パターンについて繰返しせん断を行なった。その結果以下のことが明らかになった。

- (i) 粘土層、砂層いずれにおいても繰返しせん断中の有効応力減少には繰返しせん断方向が影響する。
- (ii) 粘土層の繰返しせん断後の沈下は、繰返しせん断中の有効応力減少量にのみ依存する。
- (iii) 砂層の沈下の大きさは、繰返し载荷方向の影響を受けるが、液状化前もしくは液状化初期の状態においては繰返しせん断中の有効応力減少により評価できる。

参考文献

- 1) Nagase H. and Ishihara K.: Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 1, pp. 65-76, 1988.
- 2) Pyke R., Seed H. B. and Chan C. K.: Settlement of sands under multidirectional shaking, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 101, No. GT4, pp. 379-398, 1975.
- 3) 松田博, 櫻谷慶治, 市村太郎, 山本智一: 飽和粘土の強度特性に及ぼす繰返しせん断の方向性に関する研究, 第 35 回地盤工学研究発表会, 1182, pp. 2299-2300, 2000.
- 4) 松田博, 柳楽英希: 繰返しせん断によって生じる飽和粘土の有効応力減少と再圧密沈下特性, *土木学会論文集*, No. 659, III-52, pp. 63-97, 2000. 9.