

# 定ひずみ速度繰返し三軸試験による粘性土と砂質土の動的強度について

兵動正幸<sup>1</sup>・四宮圭三<sup>2</sup>・安福規之<sup>3</sup>・村田秀一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

<sup>2</sup>正会員 工博 日本国土開発(株)名古屋支店

<sup>3</sup>正会員 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科

<sup>4</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

本研究は、土の載荷速度依存性に着目して、飽和粘土を主対象に定ひずみ速度繰返し三軸圧縮試験を行い、従来の応力制御式による繰返し三軸試験結果と比較検討を行ったものである。また、ゆるい飽和砂とまさ土についても同様の検討を行った。その結果、定ひずみ速度繰返し三軸試験による実験結果は、特に粘土やひずみ軟化挙動を起こすような緩い砂、あるいは破砕性土であるまさ土などにおいて応力制御試験によるよりも安定した挙動となることが明らかとなった。さらに、定ひずみ速度繰返し試験により、粘土の繰返し強度特性におよぼすひずみ速度の影響について調べた。

**Key Words :** clay, cyclic strength, cyclic triaxial test, masado, loose sand, strain rate controlled test

## 1. ま え が き

粘性土の繰返し三軸試験は、交通荷重による路床土の変形問題<sup>1)~5)</sup>に端を発し、波浪による海洋構造物基礎の安定性の検討<sup>6)~8)</sup>、さらには、地震時挙動の評価<sup>9)~12)</sup>など多岐にわたる問題の中で行われてきた。その中で、繰返し応力の周波数の選定に際しては、それぞれの実際問題に対応した周波数の採用が好ましいとされてきた。一方、粘性土の静的三軸試験においてはせん断過程における供試体内における間隙水圧やひずみの不均一性など要素性の問題も考慮して、できるだけ低い載荷速度のせん断荷重を負荷することが通例となっている<sup>13),14)</sup>。粘土はせん断過程において顕著なひずみ速度依存性を示すことが知られており、これまでに繰返し三軸圧縮試験においても粘土の繰返しせん断挙動におよぼす載荷周波数の影響について、多くの検討が行われてきた<sup>15)~18)</sup>。

ところで、現在一般に用いられている繰返し三軸圧縮試験機のほとんどは、空圧または油圧サーボにより応力制御法による正弦波荷重が与えられるものであり、荷重振幅と周波数が一定を保つように制御されている。この方式によれば、試験中周波数を同一に揃えても繰返し載荷初期と破壊近傍では供試体のひずみ振幅が大きく異なることから、1つの試験中にひずみ速度の変化する実験を行っていることになる。また、荷重振幅の違いによってもひずみ速度の異なる実験結果を得ることになる。こ

のような実験では、例えば実際問題を反映した周波数を採用したものであっても、土供試体に与えるひずみ速度の影響や三軸供試体の非要素性の問題を包含した結果となることが懸念される。

本研究では正規圧密粘土を主対象に、試験中においてひずみ速度を一定とし、かつ荷重振幅を一定に制御した定ひずみ速度繰返し三軸試験を行った。さらに比較のためにまさ土、砂も対象に同様の繰返しせん断試験を行った。得られた実験結果は、正弦波載荷による応力制御繰返し三軸試験結果と比較した。さらに、いくつかの異なるひずみ速度あるいは周波数から成る定ひずみ速度繰返し試験および応力制御繰返し試験結果から、粘土の繰返し強度におよぼすひずみ速度の影響について考察を行った。

## 2. 試料および実験方法

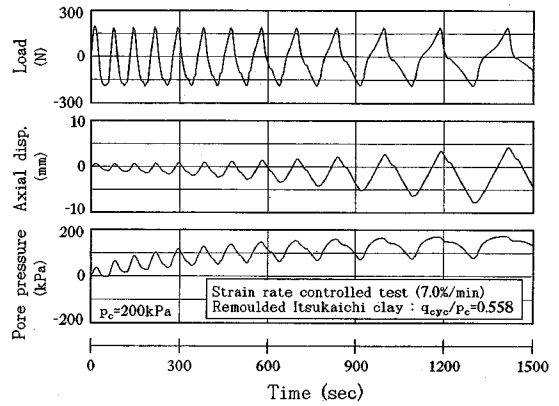
用いた試験装置本体は、通常空圧載荷式繰返し三軸試験機に若干の改良を加えたものであり、軸圧載荷用のエアシリンダー上室を油で満たし、サーボモーターを介して油の出入りにより、エアシリンダーのピストンを作動させる仕組みのもの<sup>19)</sup>である。サーボモーターは、パソコンによりその駆動速度が制御され、さらに三軸室内に取り付けられたロードセルの出力値により、一定荷重振幅が保たれるようコントロールされている。ひずみ

速度はモーターのギア比に応じて任意に設定が可能であり、種々のせん断速度に対応が可能である。実験結果は、まずデータロガーに収録され、試験終了後パソコンにより処理される。

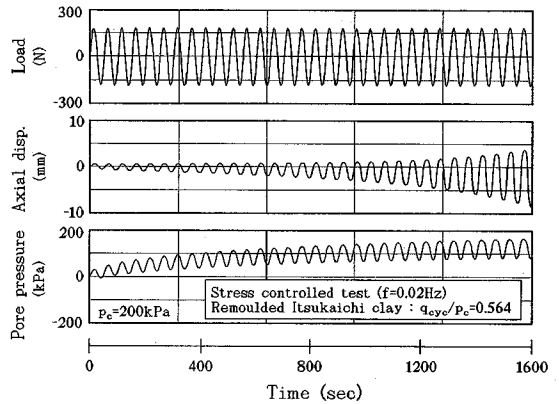
実験に主として用いた試料は、広島市五日市で採取した海成粘土（五日市粘土）<sup>20)</sup>であり、物性値は  $G_s=2.53$ ,  $w_L=124.2\%$ ,  $w_p=51.4\%$ ,  $I_p=72.8$  を示すものであった。これを 260% の含水比状態でスラリー化し、 $420\mu\text{m}$  ふるいで裏ごしを行った後、予圧密容器内で 50kPa まで予圧密を行い、直径 5 cm、高さ 10 cm の供試体として成形し三軸室にセットした。さらに、三軸室において供試体に背圧 100 kPa を与え、B 値 0.96 以上を確認した後 200 kPa の等方応力で 24 時間圧密を行った。繰返し荷重は、供試体に側圧一定で所定の軸荷重振幅となるような繰返し軸荷重をひずみ速度一定の下で加えた。間隙水圧の測定は、下部ペダスタルのポーラスストーンを通じてセル下部に設置した間隙水圧計で行い、排水は供試体側面に巻いたペーパードレーンを通じ、上部ペダスタル側面よりセル外の 2 重管ビュレットへと行った。また、供試体の端面摩擦を軽減するために上部および下部ペダスタルの間にはシリコンを薄く塗布したテフロンシートとメンブレンをはさみ、下部ペダスタル上のメンブレンとテフロンシートには中央部に直径 5 mm の穴をあけポーラスストーンを通して間隙水圧計へと通じた。

さらに、比較のために豊浦砂 ( $G_s=2.46$ ,  $e_{\max}=0.973$ ,  $e_{\min}=0.635$ ) および宇部市で採取したまさ土 ( $G_s=2.62$ ,  $e_{\max}=1.243$ ,  $e_{\min}=0.728$ , 修正強熱減量  $L_{tm}=3.810$ ) についても同様の実験を行った。ここで用いたまさ土は、広島型まさ土と分類されるもの<sup>21)</sup>であり、比較的風化の進んだ活性のない砂質土に分類されるものである。豊浦砂およびまさ土供試体は、空中落下法によりそれぞれ、相対密度  $D_r=50\%$ ,  $D_r=60\%$  になるよう作成した。

本実験で採用した定ひずみ速度繰返し試験の軸ひずみ速度は、五日市粘土については  $0.2\%/min$  と  $7.0\%/min$  であり、豊浦砂とまさ土では  $7.0\%/min$  とした。軸ひずみ速度  $0.2\%/min$  は、本研究で粘土の静的せん断試験において採用したひずみ速度 ( $0.1\%/min$ ) に比較的近いものであり、 $7.0\%/min$  のひずみ速度は周波数  $0.02\text{ Hz}$  での粘土の応力制御試験における初期 5 サイクルあたりまでの平均ひずみ速度に匹敵するものである。比較のために、在来の空圧載荷方式の繰返し三軸試験機により、粘土に対して  $0.02\text{ Hz}$ 、豊浦砂およびまさ土に対して  $0.1\text{ Hz}$  の正弦波載荷の繰返し三軸試験も行った。粘土に対して周波数  $0.02\text{ Hz}$  を選んだ理由は、この周波数が用いた試験機の適用最低周波数であり、周波数が低いほど粘土供試体内の間隙水圧分布がより均一に近づく<sup>18), 23)</sup>と判断されるからである。



(a) 定ひずみ速度試験

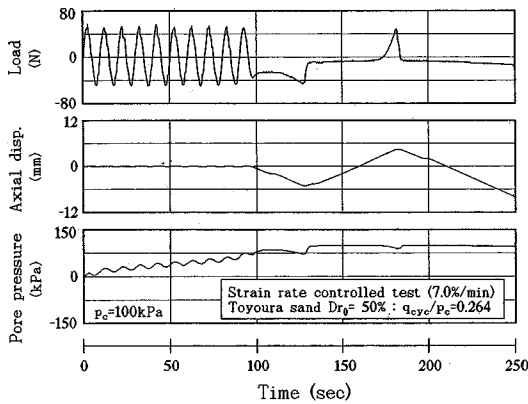


(b) 応力制御試験

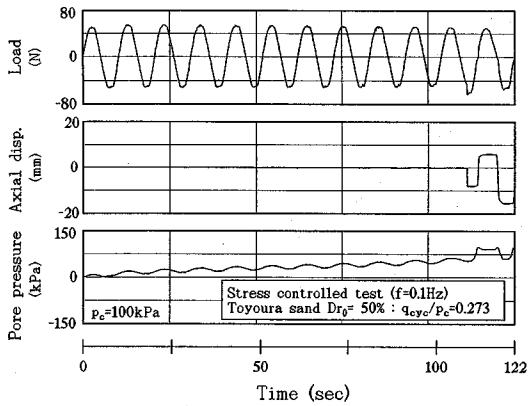
図—1 粘土の繰返し三軸試験結果時刻歴

### 3. 定ひずみ速度および応力制御試験による土の非排水繰返しせん断挙動

粘土について、 $7.0\%/min$  の一定ひずみ速度で行った繰返し三軸試験結果および従来方式の応力制御により  $0.02\text{ Hz}$  の正弦波繰返し荷重を与えた試験から得られたそれぞれの軸荷重、軸変位、間隙水圧の時刻歴を図—1 (a), (b) に掲げる。図中、 $p$  は平均有効主応力であり  $p_c$  は有効圧密応力を意味し、また  $q$  は軸差応力であり  $q_{cyc}$  は繰返し軸差応力を表している。定ひずみ速度試験においては、図—1 (a) に示されるように、軸変位の波形は三角波であり、軸荷重も三角波に近い形状となり、繰返しせん断による 1 サイクル中のひずみ振幅が漸増するにともない周期が次第に長くなる挙動となる。一方、応力制御の試験結果においては、図—1 (b) のように終始一定周期の繰返し挙動を示している。両者による挙動の違いは、特に大ひずみ領域において現れ、この部分において応力制御では載荷初期に比べひずみ速度がかなり大きくなることから間隙水圧の応答が遅れ、結果

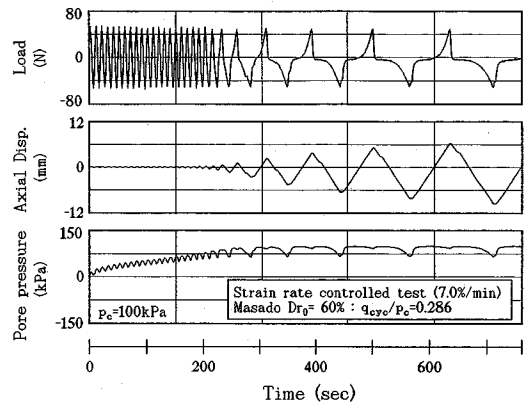


(a) 定ひずみ速度試験

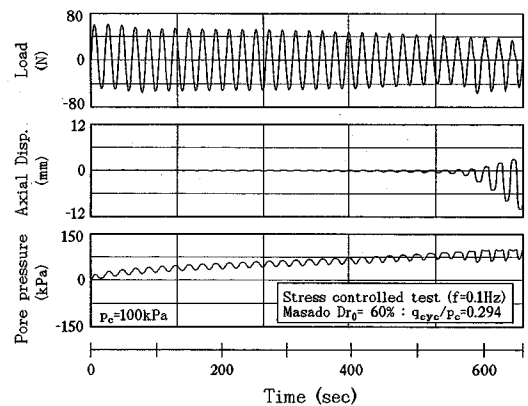


(b) 応力制御試験

図-2 豊浦砂 ( $D_r=50\%$ ) の繰返し三軸試験結果時刻歴



(a) 定ひずみ速度試験



(b) 応力制御試験

図-3 まさ土の繰返し三軸試験結果時刻歴

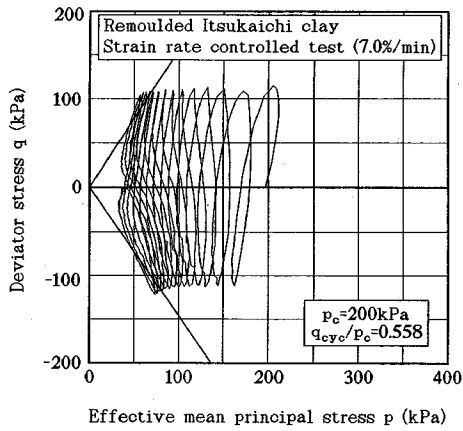
として定ひずみ速度試験の方が大きな間隙水圧の発生を得ていることがわかる。この様子は、後に掲げる有効応力経路図と対応させるとより明瞭に見ることができる。

図-2 (a), (b), 図-3 (a), (b) は、それぞれ同様に比較した場合の豊浦砂およびまさ土の実験結果である。豊浦砂においては、一般的に非排水繰返しせん断試験において、載荷速度の影響はないと言われてきた。しかしながら、ゆる詰めめの砂では、特に伸張側でひずみ軟化挙動を伴う<sup>22)</sup>ことから、応力制御の試験で全せん断過程を追跡することが困難になってくる場合がある。その結果が図-2 (b) において現れており、ひずみが急増する付近で荷重振幅が一定とはならず波形に乱れが生じる結果となっている。図-2 (a) の定ひずみ速度試験においては、液状化に近づきひずみが急増したことにより、1 サイクルの周期も急増し特異な波形となっているが、伸張側でのひずみ軟化挙動にもうまく追従し、荷重振幅もほぼ一定に保つことが可能となっていることがわかる。

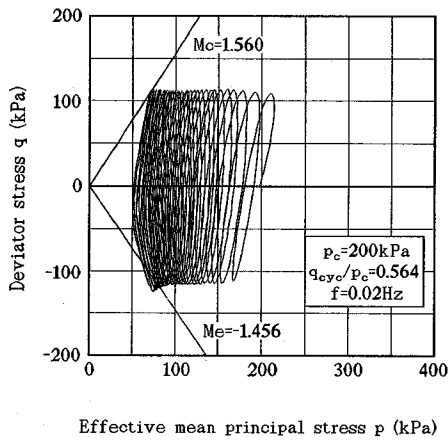
まさ土に関する実験結果は図-3 に示される通りであ

る。まさ土は粒子が脆弱で破砕性に富み、繰返しせん断過程においても粒子破砕を伴うクリープ的な変形挙動が生じるものと考えられる。その結果、応力制御試験においては、規定された周期内の載荷時間では抵抗力を完全に発揮することができず、図-3 (b) に示されるように、ひずみの増加と共に軸荷重が次第に縮小する挙動となって現れている。一方定ひずみ速度試験においては、図-3 (a) のように軸荷重振幅を一定に保った試験が可能となっている。以上のように、定ひずみ速度繰返し試験においては、ひずみの増大に伴い周期も増加する挙動を示したが、これは振動台実験などで見られる飽和砂の液状化挙動のような、間隙水圧上昇に伴う長周期化の挙動と類似しており、定ひずみ速度載荷は地震時などの現実の土の挙動に近いものではないかと想像される。

図-4 (a), (b) に、図-1 の実験結果に対応する定ひずみ速度試験と応力制御試験のそれぞれから得られた粘土の有効応力経路を示す。図中にひずみ速度 0.1% /min で行った静的非排水三軸圧縮・伸張試験から得られた破壊線 (限界状態線) も示している。なお、繰返し



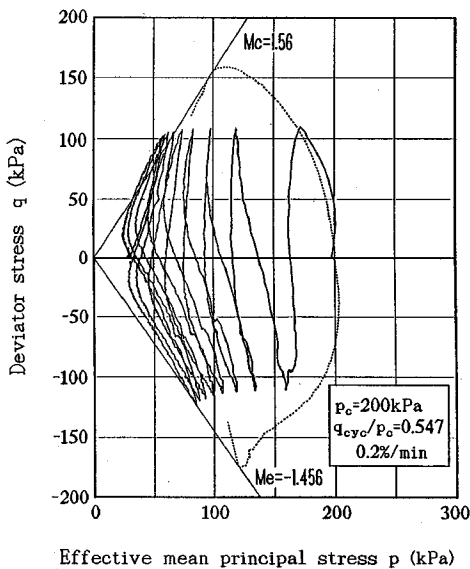
(a) 定ひずみ速度試験



Effective mean principal stress p (kPa)

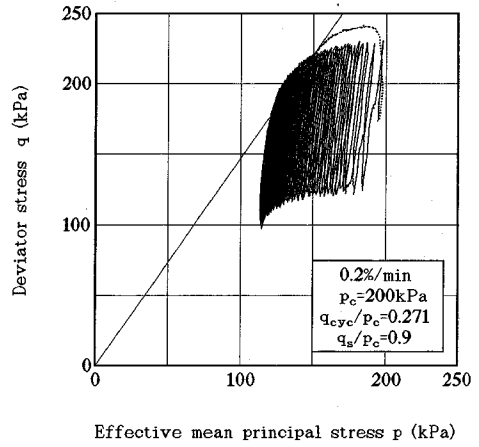
(b) 応力制御試験

図-4 粘土の繰返し有効応力経路



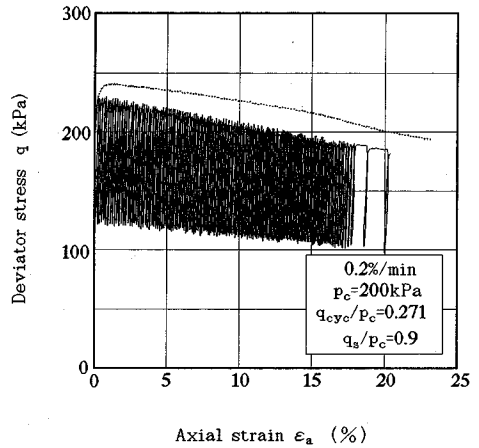
Effective mean principal stress p (kPa)

図-5 定ひずみ速度試験 (軸ひずみ速度 0.2%/min) による粘土の繰返し有効応力経路



Effective mean principal stress p (kPa)

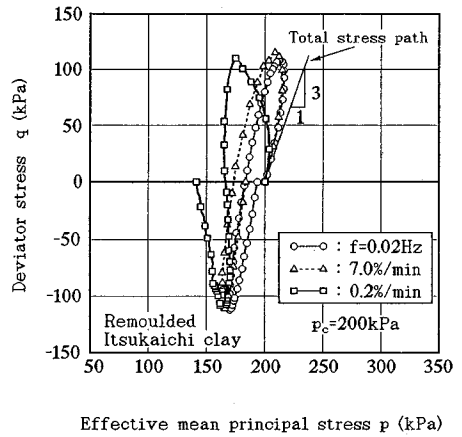
(a) 有効応力経路



Axial strain  $\epsilon_a$  (%)

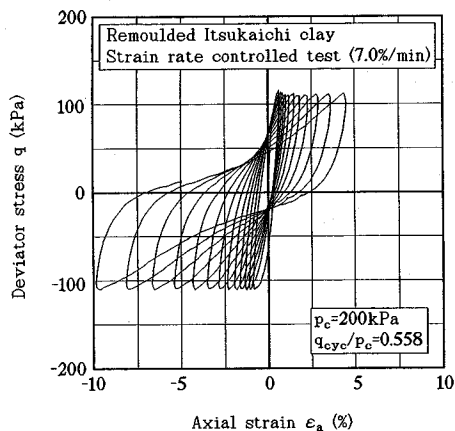
(b) 軸差応力・軸ひずみ関係

図-6 異方圧密粘土の定ひずみ速度繰返し三軸試験結果

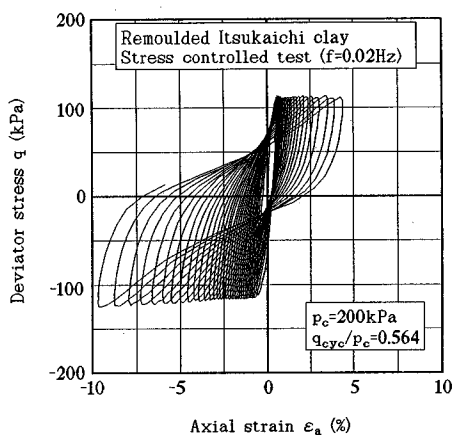


Effective mean principal stress p (kPa)

図-7 粘土の各試験による1サイクル目の有効応力経路の比較

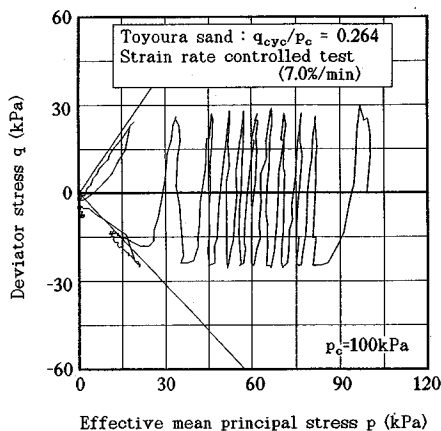


(a) 定ひずみ速度試験

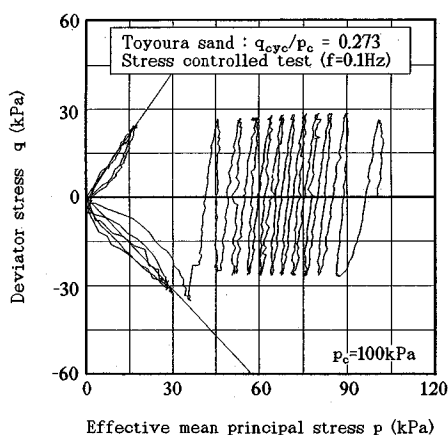


(b) 応力制御試験

図—8 粘土の軸差応力・軸ひずみ関係



(a) 定ひずみ速度試験



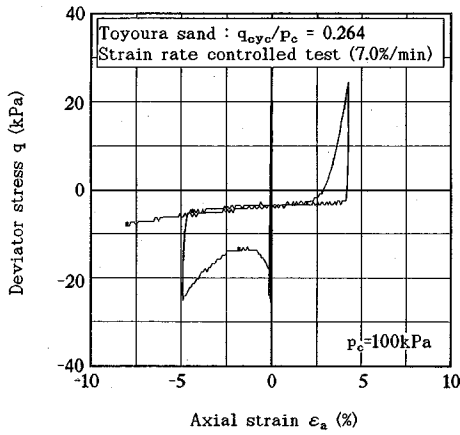
(b) 応力制御試験

図—9 豊浦砂の繰返し有効応力経路

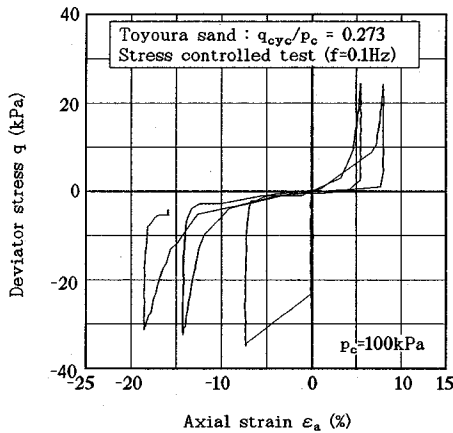
および単調載荷の両試験共に軸ひずみの発達に伴う応力算定のための断面積補正を施している。両試験結果の比較から、応力制御繰返し試験による有効応力経路は、繰返しせん断初期から破壊付近に至るまで比較的鉛直に立ち上がった形の経路を描いており、最終的に有効応力も約25%程度を残したまま、定状な曲線を描いている。一方、定ひずみ速度繰返し試験から得られた有効応力経路は、破壊近傍に至ると中央部が左側に膨らんだ形状となり、最終的により大きな間隙水圧の発生を見ている。このような違いが生じる原因として、応力制御試験においては、周波数0.02 Hzというかなり長周期の載荷であるにも拘らず、破壊付近の大変形状態では載荷速度が大きくなり、間隙水圧の応答に遅れが生じているからと考えられる。

図—5には、さらに低いひずみ速度0.2%/minによる定ひずみ速度繰返し試験結果を掲げた。図—4(b)のひずみ速度7.0%/minの結果に比べ有効応力経路は最

終状態で、さらに左に膨らんだ曲線となって、静的破壊線とほぼ接する形で定常ループを描いている様子が観察できる。図中にひずみ速度0.1%/minの静的非排水三軸試験による静的有効応力経路を点線で描いているが、静的有効応力経路は繰返しせん断時の1サイクル目の経路と比較的近いものとなっている様子が認められる。さらに、ひずみ速度0.2%/minによる定ひずみ速度繰返し試験を初期軸差応力比 $q_s/p_c=0.9$ の異方圧密供試体についても行った。図—6(a)、(b)にその結果の有効応力経路と軸差応力・軸ひずみ関係をそれぞれ示した。図中0.1%/minのひずみ速度による単調載荷試験も点線で併記されている。両図において、繰返し1サイクル目において、繰返しおよび単調載荷の両試験結果はほぼ一致しており、次第に軟化を生じて破壊に至る挙動も対応していることが観察できる。これらのことから、0.2%/minの定ひずみ速度繰返しせん断試験による挙動は、静的な繰返しによる挙動と判断され、これを

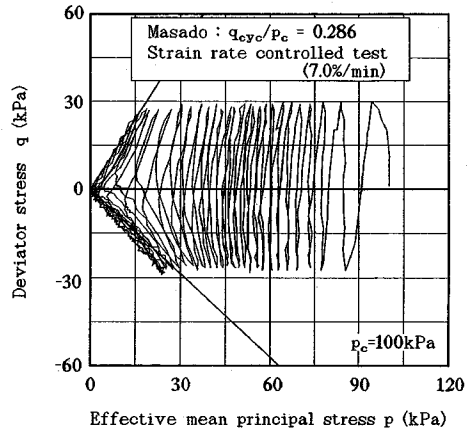


(a) 定ひずみ速度試験

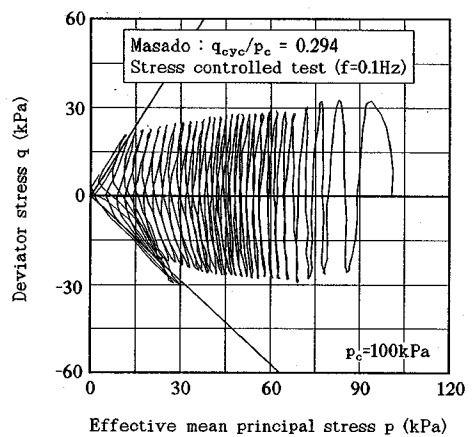


(b) 応力制御試験

図—10 豊浦砂の軸差応力・軸ひずみ関係



(a) 定ひずみ速度試験



(b) 応力制御試験

図—11 まさ土の繰返し有効応力経路

基準として以下の繰返しせん断挙動における載荷速度の影響を議論することが可能と考えられる。

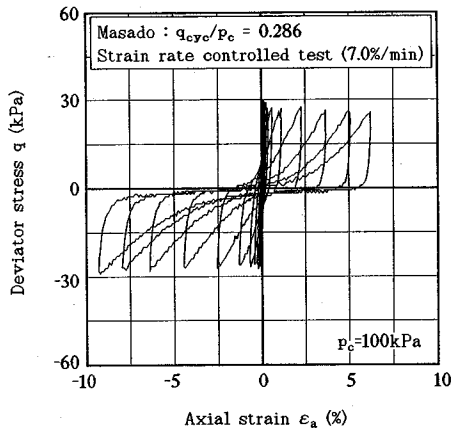
図—7は、0.02 Hzの応力制御試験ならびに7.0%/minと0.2%/minの定ひずみ速度試験による載荷1サイクル目の有効応力経路を比較したものである。1サイクル目においては、0.02 Hzと7.0%/minの結果にさほどの違いは認められないが、0.2%/minの結果は他と顕著に異なり、有効応力経路が最も左に位置しており、間隙水圧が最も大きく生じた結果と言える。

図—8 (a), (b)は、定ひずみ速度および応力制御両試験による粘土の軸差応力・軸ひずみ関係をそれぞれ描いたものである。両者の結果にさほどの違いは認められないが、いずれの場合にも繰返しせん断に伴う初期の小さな変形から大変形に至るまで、連続的になめらかに遷移するヒステリシス曲線を描く様子が観察できる。

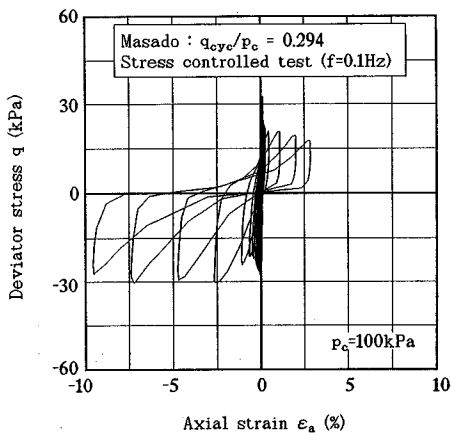
図—9, 図—10は、同様の試験により行った豊浦砂の有効応力経路と軸差応力・軸ひずみ関係をそれぞれ描い

たものである。図—9 (a) および図—10 (a)には、定ひずみ速度試験結果が、図—9 (b), 図—10 (b)には応力制御試験結果がそれぞれ描かれている。いずれの結果からも、ある回数の繰返しせん断の後急激な軸ひずみの増加を伴い液状化に至る、ゆる詰砂特有の挙動が観察できる。特に伸張側では、破壊付近において顕著なひずみ軟化挙動が生じていることがわかる。両試験結果を比較すると、このひずみ軟化挙動を、定ひずみ速度試験ではうまく表すことができているが、応力制御試験では軟化挙動に追従することができず、さらに破壊付近での波形に乱れが生じ、応力振幅を一定に制御できない結果となって現れている。

図—11, 図—12はまさ土について、定ひずみ速度試験ならびに応力制御試験を行って得られた有効応力経路および軸差応力・軸ひずみ関係をそれぞれ示したものである。まさ土においては、両試験による結果の違いは明確であり、応力制御試験では、ひずみの増加と共に次第



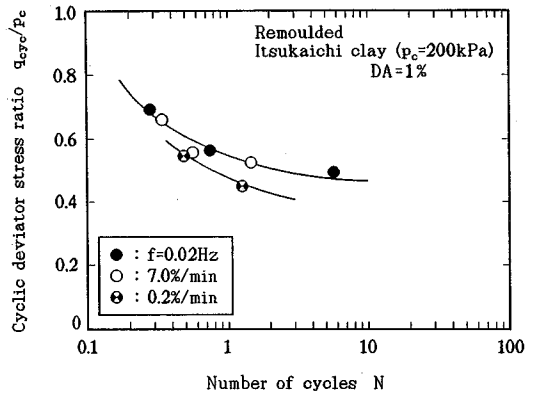
(a) 定ひずみ速度試験



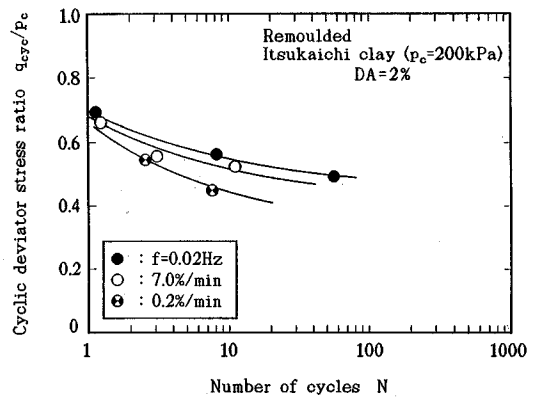
(b) 応力制御試験

図—12 まさ土の軸差応力・軸ひずみ関係

に波形がすばみ、特に圧縮側でその傾向が顕著に現れているのがわかる。これは、脆弱なまさ土粒子の破碎を伴う時間依存の変形に対し、応力制御による一定周期の載荷では、復元力が十分に発揮できていないことによるものと考えられ、そのために圧縮側のひずみの発達が抑制される結果となっている。また、応力制御試験では、破壊時に伸張側で逆に振幅が増大するなど一定荷重振幅の制御ができていないのに対し、定ひずみ速度試験では荷重振幅は一定のまま、各サイクルの挙動がなめらかに推移していく様子が観察される。以上の結果から、粘土、ゆるい砂、まさ土などひずみ速度依存性を有する試料に対しては、より安定した繰返しせん断挙動を得るという観点からは、定ひずみ速度繰返し試験の方が応力制御繰返し試験よりも優れているといえる。



図—13 粘土の各試験による軸ひずみ両振幅  $DA=1\%$  に至るに必要な軸差応力比・繰返し回数関係

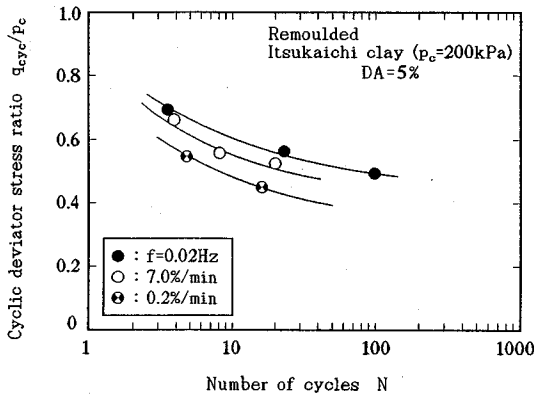


図—14 粘土の各試験による軸ひずみ両振幅  $DA=2\%$  に至るに必要な軸差応力比・繰返し回数関係

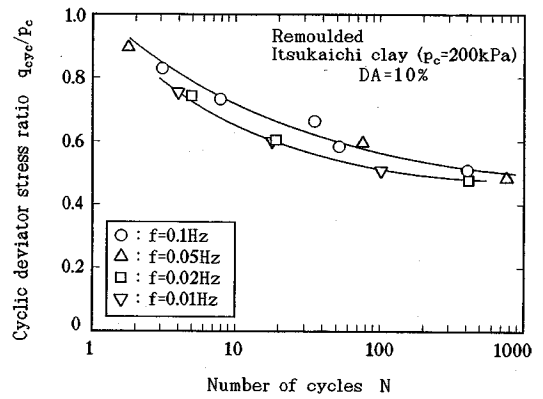
#### 4. 定ひずみ速度および応力制御試験による土の非排水繰返しせん断強度特性

粘土に対する載荷速度の影響を調べるために、2種類のひずみ速度 0.2%/min と 7.0%/min による定ひずみ速度繰返し試験および周波数 0.02 Hz での応力制御繰返しせん断試験結果から、軸ひずみ両振幅  $DA=1, 2, 5, 10\%$  のそれぞれに至るに必要な繰返し軸差応力比  $q_{cyc}/p_c$  と繰返し回数  $N$  の関係を取りまとめ、図—13～図—16に掲げた。まず、図—13において、 $DA=1\%$  に至るまでは周波数 0.02 Hz と 7.0%/min の載荷速度が近いことから、両者の軸差応力比・繰返し回数関係はほぼ等しく現れる結果となっている。しかしながら、低速の 0.2%/min の定ひずみ速度試験結果による曲線がより低い位置に現れており、粘土はひずみ振幅 1% 以下の比較的小さなひずみレベルにおいてもひずみ速度の影響を受けることがわかる。

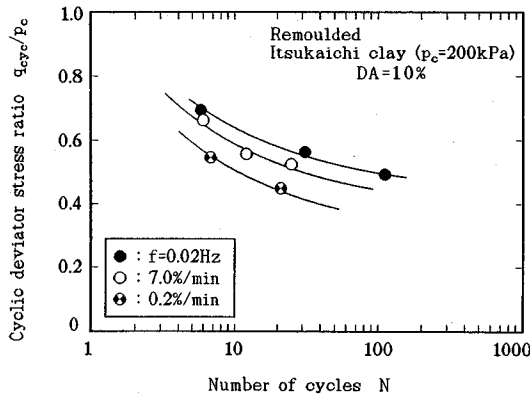
図—14においては、 $DA=2\%$  に至るに必要な軸差応



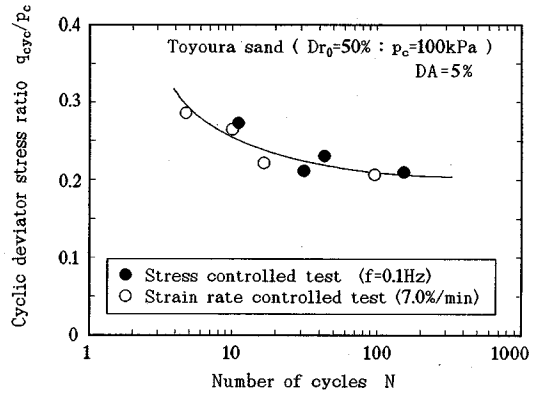
図—15 粘土の各試験による軸ひずみ両振幅  $DA=5\%$  に至るに必要な軸差応力比・繰返し回数の関係



図—17 粘土の軸ひずみ両振幅  $DA=10\%$  に至るに必要な軸差応力比・繰返し回数の関係におよぼす周波数の影響

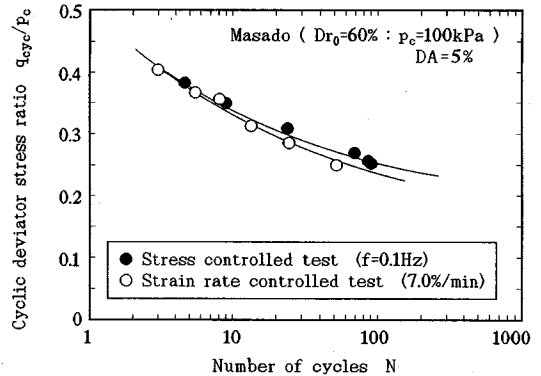


図—16 粘土の各試験による軸ひずみ両振幅  $DA=10\%$  に至るに必要な軸差応力比・繰返し回数の関係



図—18 豊浦砂の各試験による軸ひずみ両振幅  $DA=5\%$  に至るに必要な軸差応力比・繰返し回数の関係

力比・繰返し回数関係が示されているが、0.02 Hz と 7.0%/min の結果に幾分の差が見られ、0.02 Hz の応力制御試験結果の方がより高い位置に来ていることが認められる。これは、応力制御試験ではひずみの増大に伴い実質的にひずみ速度が増加するため、定ひずみ速度試験より高速の载荷となった結果が現れたものと考えられる。図—15 の  $DA=5\%$ 、図—16 の  $DA=10\%$  を生じるに必要な軸差応力比・繰返し回数関係に至っては、それぞれの試験結果による差がさらに開き、ひずみ速度が低いものほど曲線は低い位置に現れている。初期に等価なひずみ速度となるように設定した 0.02 Hz の応力制御試験と 7.0%/min の定ひずみ速度試験の両結果においてさえも、このような違いが生じることは注目すべきことである。以上のような所定のひずみ振幅に至るに必要な繰返し軸差応力比・繰返し回数関係をそれぞれのひずみレベルに対する繰返し強度と呼ぶことにすると、いずれのひずみレベルに対しても、粘土の繰返し強度はひずみ速度の影響を受けるという結論が導かれる。



図—19 まさ土の各試験による軸ひずみ両振幅  $DA=5\%$  に至るに必要な軸差応力比・繰返し回数の関係

図—17 には、以前筆者ら<sup>18)</sup>が同じ粘土に対して行った、異なる周波数载荷による応力制御繰返し試験結果から得られた軸ひずみ両振幅  $DA=10\%$  に至るに必要な軸差応力比・繰返し回数関係を示す。試験機の性能上、



0.1~0.02 Hz の範囲における結果ではあるが、周波数のより高いグループ (0.05 Hz, 0.1 Hz) と低いグループ (0.01 Hz, 0.02 Hz) の間に差が現れており、周波数が高いグループの方が繰返しせん断強度が大きくなる傾向が認められる。このように、本実験よりもさらに高い載荷速度の領域においても載荷速度依存性が認められた。

図-18 は豊浦砂について、図-19 はまさ土について、軸ひずみ両振幅  $DA=5\%$  に至るに必要な軸差応力比・繰返し回数関係をそれぞれ示したものである。両図において、0.1 Hz の応力制御試験と 7.0%/min の定ひずみ速度試験による結果がそれぞれプロットされている。応力比・繰返し回数関係は、豊浦砂については試験法の違いにかかわらず概ね一本の曲線で表されるが、まさ土の場合定ひずみ速度試験の方が応力制御試験に比べ若干低めに位置する曲線で表されるようである。

以上の結果は、載荷速度という観点から見たものであり、応力制御試験と定ひずみ速度試験の一般的性能比較を行ったものではない。周波数を一定とした問題に対応するには応力制御試験の方がむしろ妥当であると考えられる。しかし、本研究で対象としたような載荷速度に対し敏感な試料に対して、より正確な挙動を追跡する場合に定ひずみ速度繰返し試験の有効性が認められたものと判断される。

## 5. 結 論

軸ひずみ速度を一定とし、かつ荷重振幅を一定に制御した定ひずみ速度繰返し三軸圧縮試験を、主として粘土を対象に行った。また、ゆる詰め砂およびまさ土に対しても同様の試験を行った。得られた実験結果は従来の応力制御法による繰返し三軸試験結果と対比し、検討を行った。本研究により得られた知見を要約すると以下の通りである。

- 1) 粘土の繰返し三軸試験において、応力制御方式では載荷開始時と破壊近傍では、ひずみ速度が大きく異なることから、初期に等価なひずみ速度を設定した試験結果を比較した場合、応力制御試験の方が定ひずみ速度試験に比べ、低い間隙水圧の応答となった。
- 2) ゆるい飽和砂の繰返し三軸試験においては、伸張側でひずみ軟化挙動を伴うが、応力制御試験ではこの挙動に追従できないのに対し、定ひずみ速度繰返し試験ではうまく対応が可能である。
- 3) 破砕性のまさ土の繰返しせん断挙動においては、一定周期の応力制御方式では荷重がひずみ振幅の増加と共に次第にすばみを生じ、荷重振幅を一定に保つことが困難であったのに対し、定ひずみ試験では終始一定振幅の繰返し試験が可能であった。

4) 粘土の繰返し強度に対する載荷ひずみ速度の影響を調べたところ、ひずみ速度が低い程低い繰返し強度が得られた。

5) 初期に等価なひずみ速度の応力制御試験と定ひずみ速度試験のそれぞれを砂およびまさ土に対し行ったところ、両試験による砂の繰返し強度はほとんど同一であったのに対し、まさ土では若干の違いが現れ、破壊近傍の大ひずみ域で高いひずみ速度となる応力制御試験による方が、若干高目の繰返し強度を示した。

本研究を行うにあたり、実験および結果の整理に尽力頂いた山口大学社会建設工学科技官山本修三氏ならびに (株) 間組技術研究所 (元山口大学大学院) 丸山浩史氏、中央開発 (株) (元山口大学大学院) 河原弘明氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 河上房義, 小川正二: くり返し応力を受けた締固め土の力学的性質, 土木学会論文集, No. 96, pp.8-14, 1963.
- 2) Yamanouchi, T. and Luo, W.K.: A method to relate repeated loading condition upon soil specimen with deformation, *Proc. 2nd Pacific Reg. Conf. Intn'l Road Federation*, Vol.1, 1964.
- 3) Yamanouchi, T. and Yasuhara, K.: Settlement of clay subgrades of low bank roads after opening to traffic, *Proc. 2nd Australia-New Zealand Conf. on Geomechanics*, Vol.1, pp.114-119, 1975.
- 4) Hyde, A. F. L. and Brown, S. F.: The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading, *Geotechnique*, Vol.26, No.1, pp.173-184, 1976.
- 5) Raymond, G. P., Gaskin, P. N. and Addo-Abedi, F. Y.: Repeated compressive loading of Leda clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, No.1, pp.1-10, 1979.
- 6) Andersen, K. H., Kleven, A. and Heien, D.: Cyclic soil data for design of gravity structures, *Proc. ASCE*, Vol.114, No.GT5, pp.517-539, 1988.
- 7) Andersen, K. H. and Lauritzen, R.: Bearing capacity for foundations with cyclic loads, *Proc. ASCE*, Vol.114, No.GT5, pp.540-555, 1988.
- 8) Yasuhara, K., Satoh, K. and Hyodo, M.: Wave induced pore pressure and deformation in seabed clay, *Proc. GEO-COAST91*, pp.667-672, 1991.
- 9) Seed, H. B. and Chan, C. K.: Clay strength under earthquake loading condition, *Proc. ASCE*, Vol.92, No.SM2, pp.53-78, 1966.
- 10) Ishihara, K. and Yasuda, S.: Cyclic strengths of undisturbed cohesive soils of western Tokyo, *Proc. of Int. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading*, pp.57-66, 1980.
- 11) Umehara, Y., Zen, K., Higuchi, Y. and Ohneda, H.: Laboratory tests and in-situ seismic survey on vibratory shear moduli of cohesive soils, *Proc. of 6th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol.1, pp.577-584, 1982.

- 12) 松尾修, 唐沢安秋, 古賀泰之: 粘土の動的強度特性に関する三軸試験報告書, 土木研究所試料, 第2160号, 1985.
- 13) Richardson, A. M. and Whitman, R. V.: Effect of strain-rate upon undrained shear resistance of a saturated remoulded Fat clay, *Geotechnique*, Vol.13, pp.310-324, 1963.
- 14) 森脇武夫, 福島信吾, 吉国洋: 三軸試験における飽和粘土の間隙水圧応答, 土と基礎, Vol.36, No.9, pp.55-60, 1988.
- 15) 松井保, 小原秀夫, 伊藤富雄: 飽和粘土の力学特性に及ぼす動的応力履歴の影響, 土木学会論文集, 第257号, pp.41-51, 1977.
- 16) Matsui, T., Ohara, H. and Ito, T.: Cyclic strength-strain history and shear characteristics of clay, *Proc. ASCE*, Vol.106, No.GT10, pp.1101-1120, 1980.
- 17) Procter, D. C. and Khaffaf, J. H.: Cyclic triaxial tests on remoulded clays, *Proc. ASCE*, Vol.110, No.GT10, pp.1431-1445, 1984.
- 18) 山本陽一, 兵動正幸, 村田秀一, 安福規之, 杉山太宏: 粘土の非排水繰返しせん断特性に及ぼす載荷周波数の影響, 第27回土質工学研究発表会講演概要集, pp.903-906, 1992.
- 19) 兵動正幸, 杉山太宏, 丸山浩史, 河田頼治: 粘土の定ひずみ速度繰返し三軸試験, 第28回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1043-1046, 1993.
- 20) 兵動正幸, 杉山太宏, 山本陽一, 河田頼治: 繰返しせん断を受ける正規圧密および過圧密粘土の間隙水圧とひずみの評価, 土木学会論文集, No.485/Ⅲ, pp.79-88, 1994.
- 21) 村田秀一, 兵動正幸, 安福規之: 風化度に着目した乱さないまさ土の圧縮・せん断特性, 土木学会論文集, No.382/Ⅲ, pp.131-140, 1987.
- 22) Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N. and Murata, H.: Undrained cyclic and monotonic triaxial behaviour of saturated loose sand, *Soils and Foundations*, Vol.34, No.1, pp.19-32, 1994.
- 23) 上野恭宏, ブラダン テージ, 今井五郎: 繰返し載荷を受けた粘土の圧密特性, 第22回地震工学研究発表会講演概要集, pp.1-4, 1993.

(1994.5.6 受付)

## CYCLIC STRENGTHS OF CLAY AND SAND BY STRAIN RATE CONTROLLED CYCLIC TRIAXIAL TEST

Masayuki HYODO, Keizo SHINOMIYA, Noriyuki YASUFUKU  
and Hidekazu MURATA

Strain rate controlled cyclic triaxial test was introduced as a new testing procedure for cyclic shear test on soil in this study. A series of tests was performed on a remoulded marine clay, a loose sand and a decomposed granite soil "Masado". The results were compared with those from the current stress controlled cyclic triaxial tests. More stable behaviour was observed in the strain rate controlled tests especially in clay as a rate dependency material, loose sand behaving strain softening and Masado as a crushable soil comparing with that from the stress controlled tests. Further, the effect of strain rate on cyclic strength of clay was investigated applying the various rate of axial strain.