

土木研究所資料

砂の繰返しせん断特性試験報告

昭和52年 3 月

建設省土木研究所
動土質研究室

目 次

概 要	1
1. ま え が き	2
2. 三軸試験	3
2-1 試験機の概要	3
2-2 試験方法	6
2-3 試験条件	8
2-4 試験結果	8
2-4-1 試料の性質	8
2-4-2 静的試験	8
2-4-3 動的試験	10
3. 単純せん断試験	20
3-1 試験機の概要	20
3-2 試験方法	21
3-3 供試体の載荷法に関する考察	21
3-4 試験条件	23
3-5 試験結果	23
3-5-1 試料の性質	23
3-5-2 静的試験	23
3-5-3 動的試験	25
4. 考 察	34
4-1 両試験機による試験結果の比較	34
4-2 動的強度の表現	34
5. 結 論	38
6. 参考文献	39

概

要

この試験報告は、地震を念頭においた繰返しせん断力に対する砂の動的特性を調べるために実施した二つの試験結果をまとめたものである。試験機材としては、繰返し三軸試験機及び NGI 型の動的単純せん断試験機によった。試験材料は同じ採取場から採取した山砂であるが、多少物理特性等は異なる。試験目的としては、別途実施してきた水平水浸砂地盤の模型振動実験や水中斜面の模型振動実験を解析することを考慮して非排水繰返しせん断とその後の排水圧縮特性の関係や非排水繰返しせん断特性に及ぼす初期せん断力の影響を明らかにすること等を主目的として設定した。試験の結果として得られた主なものは次のとおりである。

(1) 非排水せん断によって発生した過剰間げき水圧が排水されることによって生ずる圧縮変形は、処女圧縮特性に近い。

(2) 初期せん断力が存在する場合、その後の非排水繰返しせん断力に対する過剰間げき水圧の発生傾向は低下する。一方、初期せん断力方向の塑性ひずみの累積傾向は初期せん断力が大きい方が大きい。このことは、三軸及び単純せん断両方についてあてはまる。

(3) 過剰間げき水圧及び塑性ひずみの累積傾向は、三軸より単純せん断の方が大きい。

なお、この報告の内、三軸試験の主要な部分は当研究室元技官神保広光氏、及び単純せん断試験は東亜建設工業株式会社土質研究室川瀬将氏に実施していただいた。ここに両氏に感謝の意を表するものである。

昭和52年3月

動 土 質 研 究 室

室 長 沢 田 健 吉

古 賀 泰 之

間 三 男

1. ま え が き

地震時における砂地盤の挙動の現われとして液状化現象や沈下現象がある。このような現象を生ずる砂の特性については、ここ 10 数年の間に数多くの研究者によって数種の繰返しせん断試験機を用いた実験的研究がなされており、実験結果に及ぼす種々の影響因子とその影響度について調べられている。それらに対する解明の度合等についてはまちまちであるが、この報告では、種々検討されている要因の内、比較的検討され具合が少ないと思われる次のような項目について実験的検討を行なった結果を報告する。

- (1) 砂の液状化に伴う圧縮特性
- (2) 砂の動的強度に及ぼす初期せん断の影響
- (3) 砂の動的強度に及ぼす試験機型式の影響

これらの因子に着目した元々の背景としては、我々がこれまでに実施してきている大型振動台による各種模型盛土の振動実験がある（これらの模型材料はすべて山砂である）。上記の(1)を考えたのは、水平地盤の液状化及び沈下に関する振動実験における圧縮沈下の考察のためである。上記の(2)を考えたのは、地盤上に築造された盛土内、あるいは盛土下・近傍の地盤内における静的せん断力の影響の考察するためである。この盛土及び盛土周辺の静的応力状態の特徴を水平地盤の場合と比較すると、ここに述べた静的せん断応力の存在以外に水平地盤では K_0 と称される側方土圧の差という現象もあるが、この現象による影響を調べるためには側方圧が制御できる三軸ねじりせん断試験機等の特殊な試験機が必要であり、今回実験的に検討を行なうことはできなかった。次に上記の(3)を考えたのは、模型振動実験や実際の地震のような水平せん断振動が卓越する場合について、三軸試験による結果をどう適用するか、シミュレーションの程度がより直接的である単純せん断試験の結果と結びつけて考察するためである。

以上のような考えから出発して、試料砂は 1 種に設定し、繰返し三軸試験機及び動的単純せん断試験を行なった結果をここにとりまとめた。

表-2.1 三軸装置の概要

供試体寸法	直径 50 mm 高さ 125 mm
軸 圧	最大 35 kg/cm ² (静的軸圧+動的軸圧)
側 圧	最大 10 kg/cm ² (静的側圧+動的側圧)
波 形	軸圧：正弦波, 三角波, 矩形波, 任意波 側圧：正弦波
振 動 数	0.01 Hz ~ 20 Hz
変位ストローク	± 30 mm
位 相 差	正弦波において軸圧と側圧の位相差 0° ~ 360° 制御可能

(3) 供試体

試験供試体としては径 50 mm ϕ × 高さ 125 mm の粘性及び非粘性土を取扱うことができる。非粘性土（砂質土）の供試体を作製する場合は、真ちゅう製の有孔 4 つ割モールド内で供試体を作製し三軸室内で側圧を載荷してから三軸室外のハンドルによりモールドの拘束を解除するという方法をとる。

(4) 試験制御方式及び載荷方式

試験制御方式及び載荷方式は次のとおりである。

なお、軸荷重載荷シリンダー径は供試体径と同じであり、軸荷重と側圧は互いに独立載荷が可能であり、伸長状態も可能である。

(a) 側圧一定軸荷重静的載荷

側 圧：三軸室内の水に側圧タンクを介してコンプレッサーの空気圧をレギュレータにより一定に保って載荷する。

軸荷重：下部台座を速度可変モータにより上昇・下降（0.6 mm/min ~ 6.5 mm/min）又は手動により台座上昇・下降又は上部サーボシリンダーによる載荷（これは(b)で後述）。

(b) 側圧一定軸荷重動的載荷

側 圧：(a)と同じ

軸荷重：上部油圧サーボシリンダーにより、ある静的荷重及び動的荷重を載荷する。動的荷重波形は、規則波（矩形波、三角波、正弦波）、任意波。規則波は、0.01 ~ 20 Hz。任意波は、外部入力端子にアナログ記録を入力することにより可能。規則波の場合、荷重振幅一定（応力制御）、変位振幅一定（ひずみ制御）が可能。

(c) 軸荷重及び側圧動的載荷

側 圧：(a)(b)と同様にコンプレッサー・レギュレータにより一定に保たれた静圧及び油圧サーボシリンダーにより発生する動的圧力を載荷する。動的圧力波形は正弦波。0.01 ~ 20 Hz。

軸荷重：(b)と同じ。

この場合、軸荷重及び側圧を正弦波として、相互の位相を 0 ~ 360° の任意値に設定することが可能である。

(5) 載荷容量

軸荷重及び側圧の載荷性能仕様は次のとおりである。

軸荷重：機械式載荷の場合（台座を上昇・下降する場合）

載荷重容量 2000 Kg (100 Kg / cm^2)

ストローク

サーボシリンダー載荷の場合

載荷重容量 静的載荷重 35 Kg / cm^2

動的載荷量 ± 18 Kg / cm^2

両者の総和 35 Kg / cm^2

ストローク 60 mm

側 圧：静的載荷の場合 (コンプレッサ , レギュレータによる場合)

圧 力 10 kg / cm^2

サーボシリンダー載荷の場合

静的圧力 7 Kg / cm^2

動的圧力 3.5 Kg / cm^2

両者の総和 7 Kg / cm^2

(6) 計測項目及び方法

実験条件設定のためあるいは実験時に計測する項目及び方法は次のとおりである。

① 側 圧：

静的設定時：ブルドン管式圧力計 容量 10 Kg / cm^2 , 直径 16 mm

動的載荷時：半導体ひずみゲージ式圧力計 容量 10 Kg / cm^2

② 軸荷重：

静的・動的載荷時：ひずみゲージ式荷重計 容量 700 Kg (35 Kg / cm^2)

③ 間引き水圧：

静的設定時：ブルドン管式圧力計 容量 2 Kg / cm^2 直径 6.5 mm

静的・動的載荷時：半導体ひずみゲージ式圧力計 容量 10 Kg / cm^2

④ 軸変位：

静的・動的載荷時：差動トランス式変位計 容量 ± 30 mm

⑤ 側変位：

静的・動的載荷時：差動トランス式変位計 容量 ± 3 mm

⑥ 体積変化：

静的載荷時：ビューレット

動的載荷時：差動トランス式変位計 容量 ± 10 mm (± 30 cm^3)

二重セルの両室に等水圧を供給することにより内側セルの変形を抑えると同時に、軸荷重載荷ピストンがセル内に出入する体積分のセル内の水は載荷シリンダー上部の容積補償シリンダーで補正し、供試体の体積変化に伴うセル内への水の出入を変位に直し測定する。

2-2 試験方法

(1) 試料調整法

供試体が小さいことと非排水試験においては飽和を目標としたため、次のように試料を調整した。

(i) ゴムスリーブ内に水を先に張っておいて試料を注ぎ入れる水中セット方式によるので、シルト分が含まれているとシルト分が浮き上がり、均一な供試体が作り難いので、シルト分は水洗したものを用いた。

(ii) 径2mm以上の粒子は取り除いた。

(iii) 試料内の空気を取り除くために、試料は煮沸したものを用いた。

(2) 供試体作製法

まず写真-2.2に示すような台座にゴムスリーブを取り付ける。試料としては乱された状態の砂を用いるので自立性がないために、写真-2.3のようなモールドにより写真-2.4のように取り付ける。次に二重セルの外側のセルのみをセットし木枠で締付け、脱気水（一旦煮沸し急冷したもの）をセル内に入れ、所定の試料をゴムスリーブ内に詰める（写真-2.5）。その後供試体の上部に取り付けるボラストン付きの試料キャップを真空ポンプで吸引させ、すべて脱気水で満たした状態にして、脱気水の中で試料キャップを供試体に取り付け、ゴムスリーブで試料を密封（写真-2.6）した後、セル内の脱気水を排水させ木枠をはずす。次に、内側のセルを取り付け、三軸室の上蓋を取り付け、载荷ビストンを試料キャップに取り付ける。この三軸室を軸荷重载荷シリンダーの真下に移動し、下部台座の高さを調整して、载荷ビストンと载荷シリンダーとが僅かに接触するようにする。又、外側のセル及び内側のセルに水を満たす（写真-2.7）。そして、若干の側圧を加えた状態で試

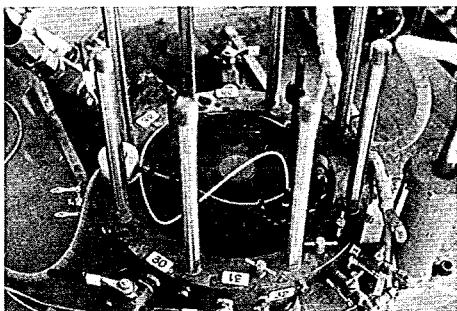


写真-2.2

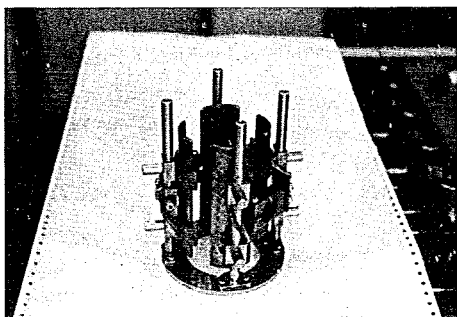


写真-2.3

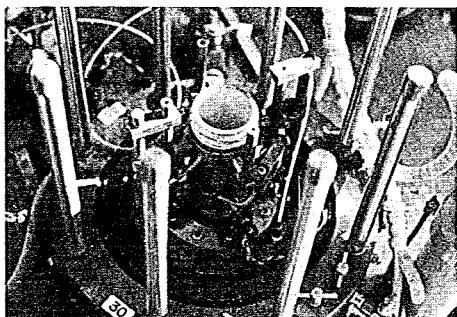


写真-2.4

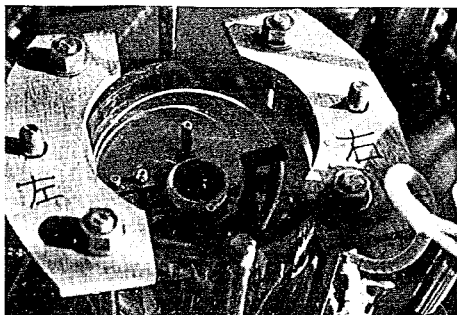


写真-2.5

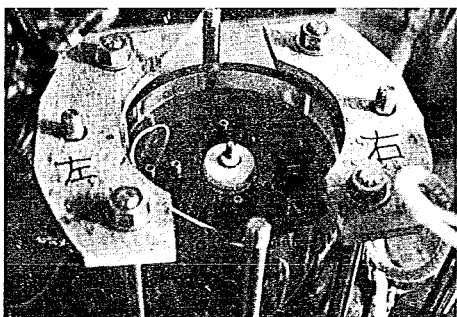


写真-2.6

料成形用モールドを三軸室外のハンドルにより開かせる。

以上で供試体の作成は終了し、圧密排水試験又は圧密非排水試験に入るわけであるが、その前に供試体の飽和度をチェックする。そのために、供試体から流出するすべての水回路を閉じて非排水状態にし、又、軸方向の変位がないよう軸荷重載荷シリンダーの位置を固定して、供試体に側圧 σ_s を加えて、それに対して発生する間げき水圧 u の値を求め、 $B = u / \sigma_s$ の値により飽和度を判定する。完全飽和であれば $B = 1$ となり、供試体内に空気が残存すると $B < 1$ となるが、この試験では $B > 0.9$ であれば飽和度がまずまず高いとして以後の実験を行なった。この場合、バックブレッジャーとして 1 kg/cm^2 を

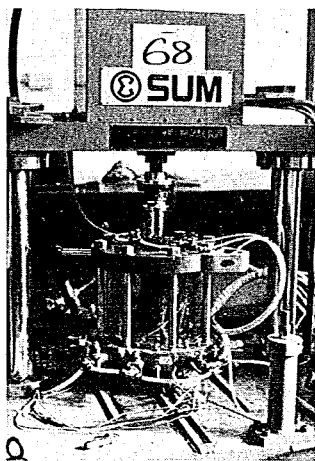


写真-2.7

加えた。

また、初期応力状態の設定は排水状態で行なうが、この排水量はビューレットで読取った。この排水量と供試体作製時の間げき比から、試験時の初期間げき比を求める。

2-3 試験条件

三軸試験機により、静的圧縮試験、静的せん断試験、動的せん断試験を実施した。動的試験のほとんどは、側圧一定の下に軸荷重を正弦的に繰返し載荷したものである。圧密応力条件は、等方、異方応力状態、繰返しせん断時の排水条件は、排水・非排水状態とした。密度条件は、密、中位の2種、側圧は0.5, 1.0 Kg/cm²の2種とした。但し、それらのすべての組合せについて実験を行なったわけではない。

2-4 試験結果

2-4-1 試料の性質

試験に用いた試料は千葉県富津市近郊の浅間山から採取したもので山砂である。この試料の性質を表-2.2に示す。表中 e_{max} はロート法により、 e_{min} はモールドを横からハンマーで叩く方法によって求めた。

表-2.2

Gs	D ₈₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	U _c	e_{max}	e_{min}
2.711	0.370	0.180	2.06	1.017	0.565

2-4-2 静的試験

静的試験として、いくつかの初期間げき比の供試体についての圧縮試験及び軸圧縮せん断試験を行なった。圧縮試験は側圧及び軸荷重をごくわずかず段階的に増加させ、そのときの体積変化をビューレットにより測定した。この装置の場合、側圧載荷機構と軸荷重載荷機構が独立なので、両者の比が設定した値から大にはばにずれないように留意した。応力条件としては、等方圧縮を主とし、一部比較のために主応力比 $K_c (= \sigma_1 / \sigma_3)$ 一定圧縮も行なった。図-2.2に間げき比 $e \sim$ 平均主応力 σ_m の関係を示す。この図によりごく限られた間げき比、主応力比における結果ではあるが、主応力比が一定であれば、 $e \sim \sigma_m$ の関係は主応力比に無関係な（すなわち等方圧縮の場合に等しい）圧縮特性を示す。いくつかの初期間げき比の供試体について等方応力状態で圧縮特性を調べた結果を図-2.3に示す。このように、砂の場合には粘性土の場合と異なり、ある一定の先行圧密荷重なるものは存在せず、異なった初期間げき比から出発したものは、互いに平行に近い圧縮特性を示す。すなわち、砂の場合にはその骨格構造は粘性土に比し強く、単なる圧縮によつては砂粒子間相互の大きな移動（構造の変化）は生ぜず、圧縮特性は初期間げき比に大きく依

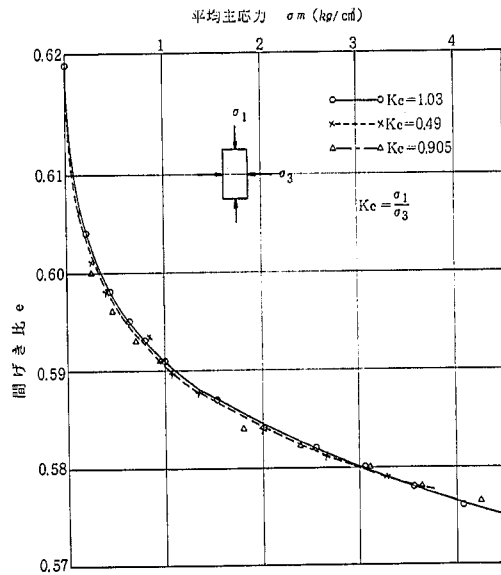


図 - 2.2 圧縮特性に及ぼす主応力比の影響

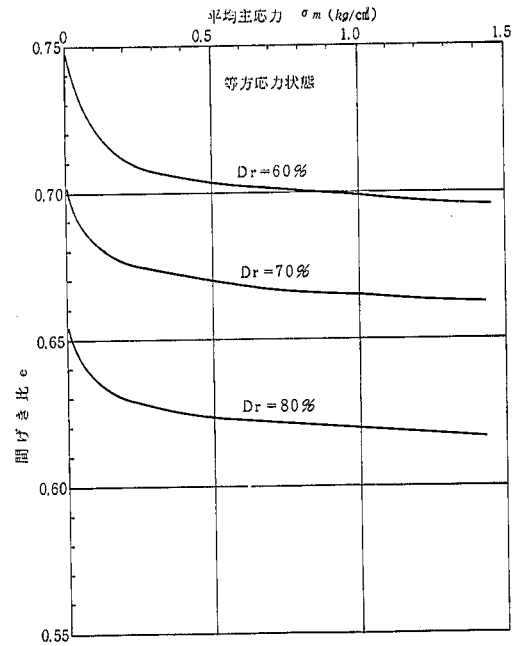


図 - 2.3 砂の等方圧縮特性

存することになる。

次に、側圧一定の下での排水軸圧縮せん断試験結果を図-2.4に示す。ここで、出発点において軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3 < 0$ となっている理由は次のとおりである。この装置では、軸荷重載荷シリンダー径=供試体径である。載荷に先立って、側圧、軸荷重=0の状態では軸荷重シリンダーを固定する。次に側圧を所定の値まで排水状態で載荷する。これに対して、軸荷重シリンダーが固定されていることにより軸荷重が反力として発生するが、この値は一般に側圧よりも小さい。この図では、この時点では軸ひずみ=0としてまとめたために出発点で $\sigma_1 - \sigma_3 < 0$ となっているのである。すなわち、この試験方法では、圧縮せん断に先立って、若干伸長状態にあったことになる。この試験結果では、軸差応力は顕著なピークを示さず強度は定めにくい。この試験結果から強度を推定して強度定数を定めたところ、 $c=0$ 、 $\phi=37.2^\circ$ となった。

2-4-3 動的試験

今回の試験で注目した項目は、まえがきで述べたとおり、(1)砂の液状化に伴う圧縮特性、(2)砂の動的強度に及ぼす初期せん断の影響であり、それぞれについて項目別に試験結果をまとめる。

(1) 砂の液状化に伴う圧縮特性

飽和砂の非排水くり返しせん断により過剰間げき水圧が内部的に蓄積され有効拘束圧は減少するが、完全液状化に至る前にせん断を中止し排水状態にすると、当然のことではあるが間げき水は一部流出し圧縮され有効拘束圧は初期の値に戻る。このような試験をいくつかの等方圧密状態の供試体について実施した。この結果の例を図-2.5に示す。図-2.3に示した静的圧縮試験との比較から、部分的液状化後の排水圧縮特性は、通常の静的圧縮特性とほぼ等しいことが分る。詳細に見れば、初期液状化に至る前に排水させた場合には、静的圧縮特性よりやや小さいようであるが、ビューレットによる測定誤差の影響もあるかもしれない。

なお、以上のようにして調べた液状化に伴う圧縮特性を砂層の液状化・沈下解析に用いて良好な結果が得られることは、既に報告した¹⁾。

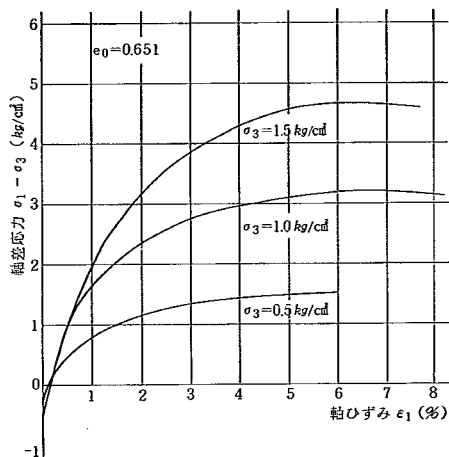


図-2.4 砂の排水せん断試験

(2) 砂の動的強度に及ぼす初期せん断の影響

動的強度というものがどういふものかは、おそらくまだ一義的に定義されたものとはなっていないと思われる(若干の考察を4-2において行なう)。よく用いられる液状化強度というものにもいくつかの定義(用法)がある。しかし、基本的には定振幅応力で載荷したときに規定されたあるひずみ振幅を生ずるか、それを誘起する過剰間げき水圧が急増・乱れ等の性状を示すまでの載荷回数との関係で表現される。この場合、破壊を規定するものはひずみであろうが、一方過剰間げき水圧がそれを引き起こす主たる原因として作用しているため、どちらから繰返し載荷に対する供試体の挙動を見て行ってもそれほど大きな強度評価の違いはない。

又、液状化強度を求める試験は通常動的せん断応力が最大となる面に静的な初期せん断応力が加わっていないために、強度を表現する応力が動的せん断応力のみでなされ理解しやすいものとなっている。しかし、一般に初期せん断応力の加わった状態での繰返しせん断試験結果は後述するように液状化試験の場合のようにひずみと過剰間げき水圧とが必ずしも対応して破壊基準にならない。又、三軸の場合、初期せん断応力の有無は異方圧密、等方圧密に対応し、そのような状態からそれぞれに付加される動的応力の等価性の基準は明らかではない。

そこで、この試験報告をまとめるにあたっては次のようにした。

まず、等方圧密非排水繰返しせん断と異方圧密非排水繰返しせん断に対する供試体の軸ひずみと過剰間げき水圧の特性を述べる。

次に、上の特性を別の面から理解するために実施した排水繰返しせん断に対する供試体の軸ひずみと体積ひずみの特性を述べる。

最後に、繰返しせん断特性に及ぼす圧密応力状態、すなわち初期せん断応力状態の影響について考察する。

後の説明で明らかになるが、今回の試験では必ずしもひずみが破壊と見なされるような大ひずみまで試験を行っていない。したがって、この供試体について動的強度がいくらという表現には

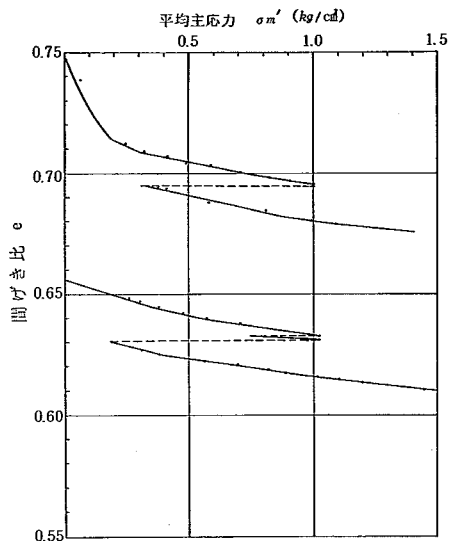


図-2.5 非排水繰返しせん断後の圧縮特性例

なっている。動的強度に影響すると思われるひずみの特性、過剰間げき水圧の特性について示している。

(i) まず、非排水繰返しせん断時の過剰間げき水圧、軸ひずみの変化の典型的な例を図-2.6, 2.7 に示す。これらの図及び他の結果から見て次のような特徴が見出される。

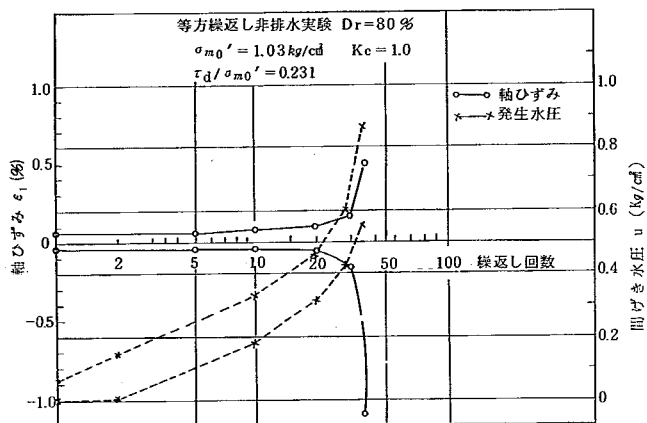


図-2.6 非排水繰返しせん断時のひずみ、間げき水圧 (等方圧密)

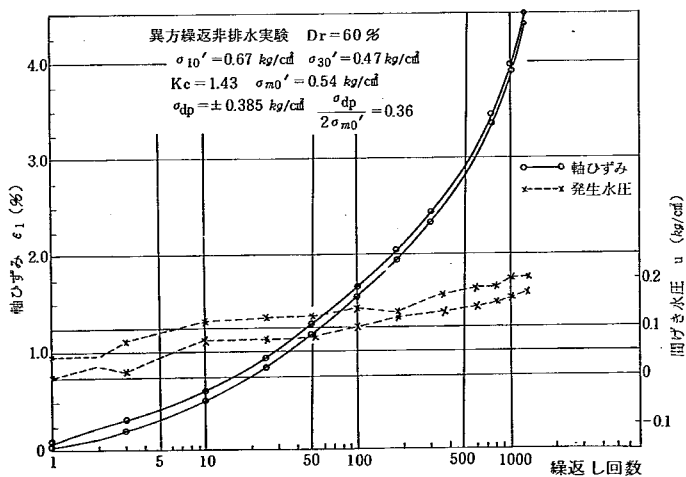


図-2.7 非排水繰返しせん断時の軸ひずみ、間げき水圧 (異方圧密)

等方圧密非排水せん断の場合、過剰間げき水圧は平均的に増加してゆくが、ひずみはある時点まではほぼ定常状態を保ち、過剰間げき水圧がある限界値に達するとひずみ振幅は急増し液状化する。

異方圧密非排水せん断の場合、過剰間げき水圧は第1波に若干発生するが、その後余り増減を示さない。一方ひずみは第1波で急増した後、比較的ゆるやかではあるが、定常的に増加を続け、液状化のような drastic な変形は示さない。等方圧密から出発した非排水くり返しせん断が上に述べたような液状化現象を生じ、その後のくり返しせん断により、最終的に過剰間げき水圧が初期の有効側圧にほぼ等しい値に達し、有効応力が0、すなわち完全液状化という現象を示すことは周知のことからであるが、一方、異方圧密から出発した非排水繰返しせん断によって過剰間げき水圧が余り上昇しない機構は後に考察するが、発生過剰間げき水圧が初期有効側圧にまで達しないであろうことは次のように理解できよう。すなわち、異方圧密状態により供試体内部には、せん断応力が既に存在する。この供試体に対する外圧が変化せずに内部的に過剰間げき水圧が増加すれば供試体内部の応力を表わすモールの応力円は原点に向って移動し破壊基準線に接する。このときの過剰間げき水圧が側圧よりも小さいことは当然である。すなわち、異方圧密状態では、内部に存在する静的せん断応力のために過剰間げき水圧が十分上昇し切らない内に破壊が生ずることになる。

すなわち、等方圧密の場合、過剰間げき水圧の上昇が顕著な特徴であり、異方圧密の場合、ひずみの増加が注目すべき点である。

等方圧密の場合、過剰間げき水圧の上昇の様子をその平均値で表わしていくつかの実験結果をまとめたものが図-2.8である。過剰間げき水圧 u は側圧 σ_{30}' で除して無次元化している。

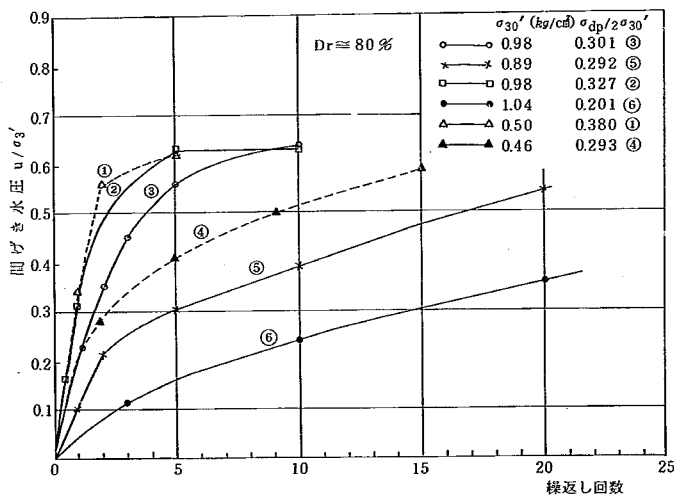


図-2.8 非排水繰返しせん断時の間げき水圧 (等方圧密)

動的応力振幅が小さいときには、過剰間げき水圧の平均的な上昇のパターンは比較的一様であるが、動的応力振幅が大きいときには、荷重の初期に上昇傾向が著しく、その後はゆるやかになる。この図によっても動的応力振幅が大きいほど過剰間げき水圧の上昇傾向が大きいことが分るが、改めて、10波の荷重によって生ずる過剰間げき水圧を動的応力振幅と比較したものが図-2.9である。なお、この横軸にとった応力比 $\sigma_{dp}/2\sigma'_{30}$ は液状化試験の整理のときによく用いられる応力比で、三軸供試体の45°面に作用する動的せん断応力の振幅とその面に作用する垂直応力の比を表わしている。そしてこの面は動的せん断応力及び応力比が最大となる面である。

次に異方圧密の場合、軸ひずみの増加の様子をそのピーク値で表わしていくつかの実験結果をまとめたものが図-2.10

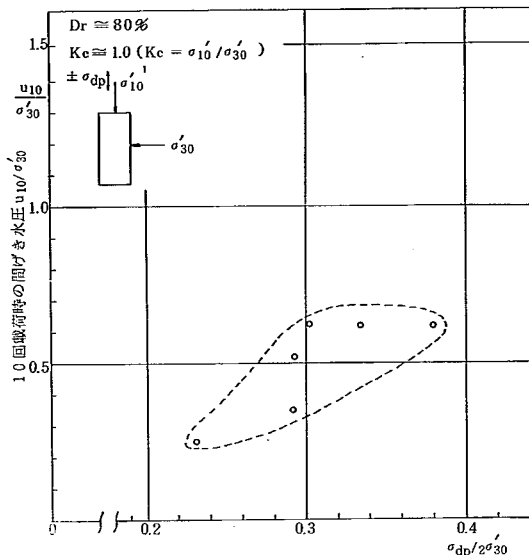


図-2.9 間げき水圧と応力比の関係

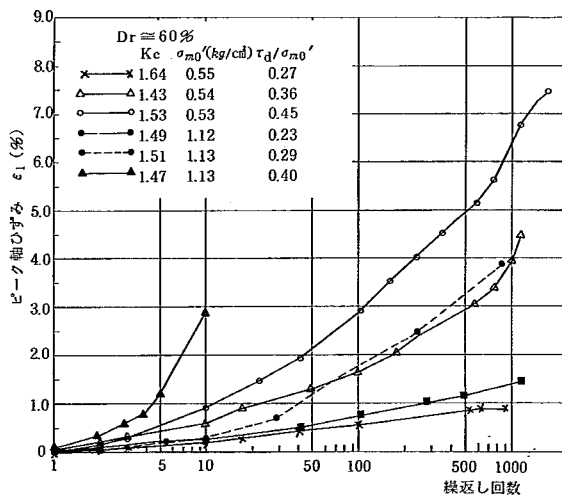


図-2.10 非排水繰返しせん断時の軸ひずみ (異方圧密 $Kc \approx 1.5$)

~12である。動的
 応力振幅が小さいと
 きには、軸ひずみの
 平均的な増加のパタ
 ーンは繰返し回数の
 対数に対してほぼ一
 様であるが、動的応
 力振幅が大きいとき
 には繰返し回数とと
 もに次第に加速され
 るようになる。この
 ようなひずみの累積
 傾向が、圧密応力比
 K_c とどのような関
 係があるかを調べる
 ときに、図-2.9

に示した応力比
 $\sigma_{dp}/2\sigma_{30}'$ に相
 当するものとして何をと
 るべきかは問題となる点であ
 るが、結局ここでは静的及
 び動的せん断応力が最大と
 なる45°面を考えこの面で
 の有効垂直応力 σ_N' に対す
 る動的せん断応力の振幅
 $\tau_d = \sigma_{dp}/2$ の比でもっ
 てまとめてみた。その結果
 が図-2.13である。こ
 の場合、10回の载荷によ
 って生じた軸ひずみと応力
 比を比較している。この応
 力比が動的外乱の基準値と
 しての物理的意味をもつも
 のとすれば、圧密応力比

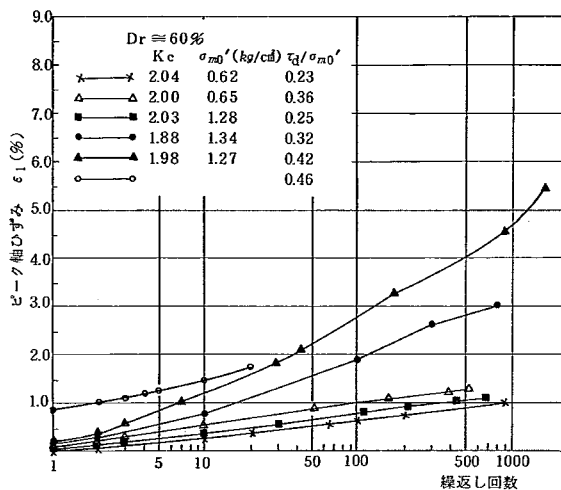


図-2.11 非排水繰返しせん断時の軸ひずみ (異方圧密 $K_c \approx 2$)

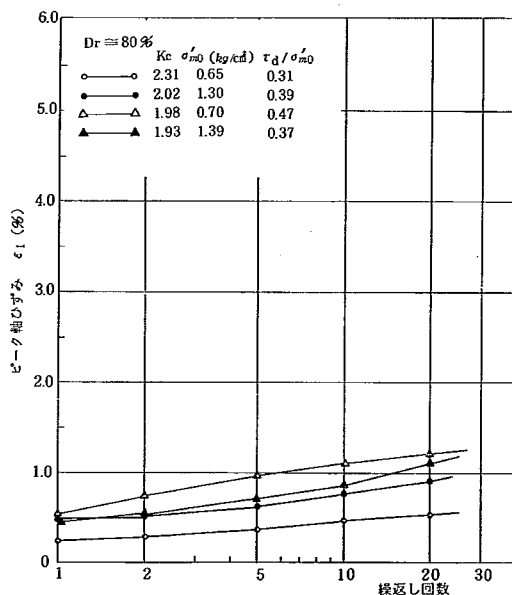


図-2.12 非排水繰返しせん断時の軸ひずみ (異方圧密 $K_c \approx 2$)

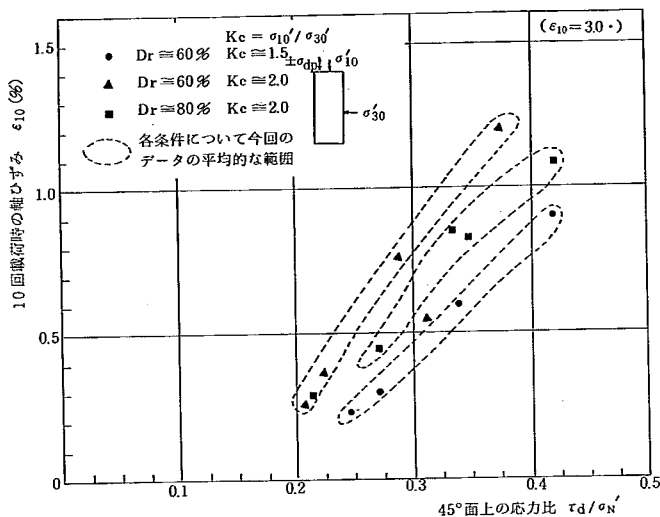


図 - 2.13 軸ひずみと応力比の関係

Kc が大きいほど、同じ動的外乱に対して生ずる軸ひずみは大きいことになる。そしてこの傾向は相対密度が大きいほど小さい。

(ii) (i)で述べた等方圧密状態と異方圧密状態の非排水せん断挙動の違いは興味深いものであるが、この機構を理解するためにそれぞれの状態について排水繰返しせん断を実施した。この場合の軸ひずみ、体積ひずみの変化の典型的な例を図-2.14, 15に示す。これらの図及び他の結果のピーク値をまとめた図-2.16, 17から次のような特徴が見出される。

等方圧密排水せん断の場合、軸ひずみは繰返し载荷の初期を除いてほとんど増加しないが体積ひずみは平均的に増加（圧縮を正とする）してゆく。

異方圧密排水せん断の場合、軸ひずみは繰返し载荷とともに漸増するが、体積ひずみは初期を除いてほとんど変化しない。

これらのことは、まさしく、非排水繰返しせん断によって得られた両応力状態の差と対応するものであり、現象的には矛盾がない。

(iii) (i)(ii)で述べた両現象は互に同じ現象の裏表であるが、ここでそのような現象が生ずる原因は次のように考えられる。排水状態で一方向静的排水せん断をした場合のせん断応力～体積ひずみ関係を説明的に描けば図-2.18 のようになる。すなわち、軸差応力の増加に伴い、体積は圧縮

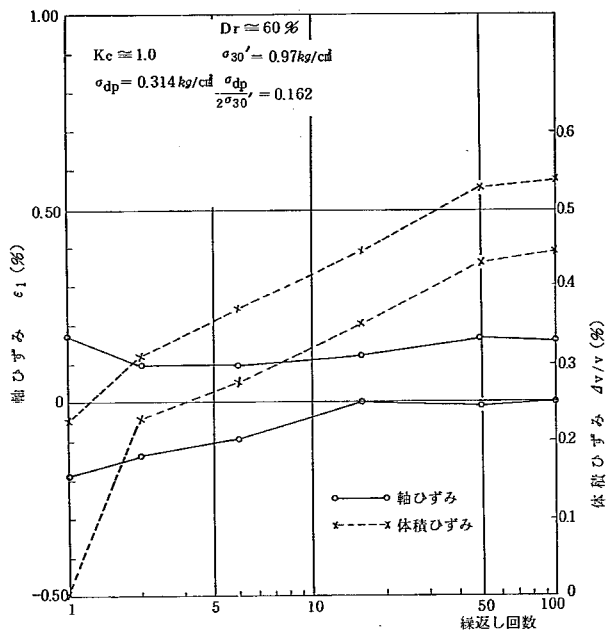


図 - 2.14 排水繰返しせん断時の軸ひずみ，体積ひずみ例（等方圧密）

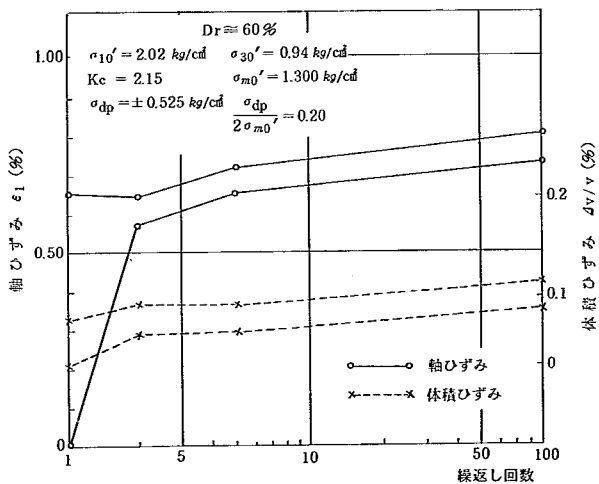


図 - 2.15 排水繰返しせん断時の軸ひずみ，体積ひずみ例（異方圧密）

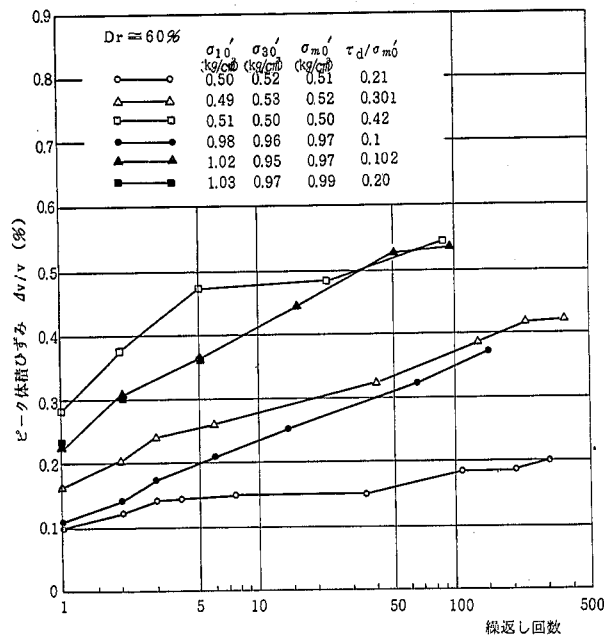


図-2.16 排水繰返しせん断時の体積ひずみ（等方圧密）

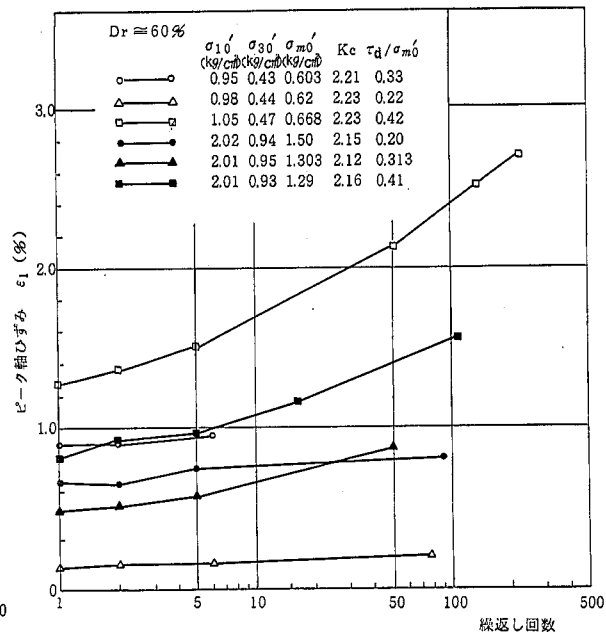


図-2.17 排水繰返しせん断時の軸ひずみ（異方圧密 Kc ≈ 2）

するが、この圧縮現象の原因は平均主応力の増加と軸差応力に基くダイラタンシー現象である。前者の効果が常に圧縮をもたらすことは自明であるが、その効果は応力レベルが増大するにつれ低下する。後者はゆるい供試体であっても軸差応力がある限界に達すると膨脹現象に転じ、両者の和としての現象も膨脹に向うようになる。このことから推定すれば、異方圧密された供試体では、それ以降の平均主応力の増大による圧縮傾向は小さい上に、ダイラタンシー現象が大きく圧縮現象を生ずる領域からはずれる傾向にあることになろう。

また初期の軸差応力により、せん断ひずみに対して圧縮傾向を示す空げきの多くが圧縮をしてしまい、それ以降のせん断に対して圧縮を示す空げきが少なくなるとも考えられる。

このようにして、異方圧密供試体に対する排水繰返しせん断がもたらす体積ひずみが小さいことが理解されると思われる。但しより物性に忠実な理解をするためには種々の計測を綿密にした数多くの繰返しせん断試験を実施する必要があると思われるが、今回の試験ではそこまで至らなかった。

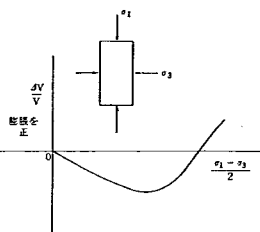


図 - 2.18 排水せん断時の体積変化説明図

3. 単純せん断試験

3-1 単純せん断試験装置の概要

この単純せん断試験装置は、東亜建設工業㈱所有のものである。その特徴は、NGI 型単純せん断試験機において用いられているピアノ線で補強したゴムスリーブを用いて供試体の側方変位を拘束するという点にある。そのような基本的特徴に加えて、このように拘束された供試体に対してセル内においてさらに側圧を加えるようになっている。又、油圧サーボ機構により繰返しせん断力を加えるようになっている。

供試体は直径 70 mm、高さ 27 mm である。補強ゴムスリーブは 0.2 mm ϕ のピアノ線を 0.5 mm ピッチで巻いて補強した厚さ約 0.5 mm のゴムスリーブである（写真-3.1）。このピアノ線により供試体の側方変位が拘束されるが、せん断は自由であるとされている。

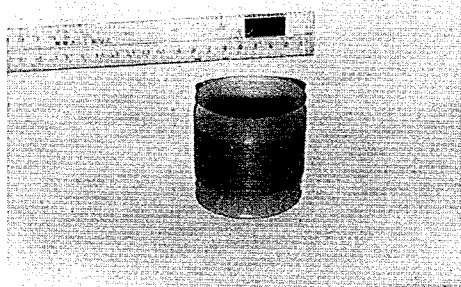


写真-3.1 補強ゴムスリーブ

この型式の試験装置では元来側圧を加えず、供試体に作用する側圧は上載圧 σ_v に対する側方変位を抑える反力として $K_0 \sigma_v$ (K_0 : 静止土圧係数) が生ずるものと考えられるものであるから、原理的には側圧を外部から加える必要はないのであるが、液状化試験のように供試体内部の水圧が上昇するとベDESTALのゴムスリーブ取付位置のところに水が流れ込み供試体の体積が一定に保てないという欠点がある。この装置ではこのことを防止するために供試体をセル内に入れ上載圧と等しい側圧を加えている。又、このことにより供試体の水平土圧状態は変わらないものとしている。このことに対しては後に考察を加える。

繰返しせん断力として 0.0 ~ 10 HZ の正弦波、矩形波、三角波を与えることができる。このせん断力のセル部分での摩擦については摩擦力を測定し実験後に補正するようになっている。

試験装置の中心部の概略を図-3.1 により示す。

この装置では従来(b)の方法を用いた液状化試験が行われてきたが、これは既に4-1で述べたように(a)の方法の場合には、ゴムスリーブのワイヤー部とOリングの間に拘束されていない部分があり、過剰間げき水圧の増加とともにその部分の内外圧の差により、この部分が膨脹したり、水が漏れたりするため、それを防止するために(b)の方法をとってきている。それでは、(a)の場合に拘束されていないゴムスリーブの部分の存在が、発生過剰間げき水圧のあるレベルまで無視しうるものかどうかを確かめるために、改めて(a)(b)の方法により比較実験を実施した。応力条件は次のとおりである。

(a)：軸圧 $\sigma_v = 1 \text{ kg/cm}^2$ 、側圧 $\sigma_c = 0$

(b)：軸圧 $\sigma_v = 1 \text{ kg/cm}^2$ 、側圧 $\sigma_c = 1 \text{ kg/cm}^2$

初期間げき比 e_0 及び動的せん断応力 τ_d ができるだけ一定になるようにして実施した動的せん断試験の間げき水圧変化は図-3.2に示すとおりであった。この図から、明らかに载荷の初期から(b)の方が発生間げき水圧は大きい。静的な载荷による圧縮のために非排水せん断開始時の間げき比は平均的には(b)の方が小さくなっているから、せん断開始時の間げき比が同一であれば、この差はさらに大きくなったと思われる。このように、一見平均拘束圧が大きいと思われる(b)の方が間げき水圧発生量が大きくなったことは既に述べたことから明らかなように拘束されていない部分のゴ

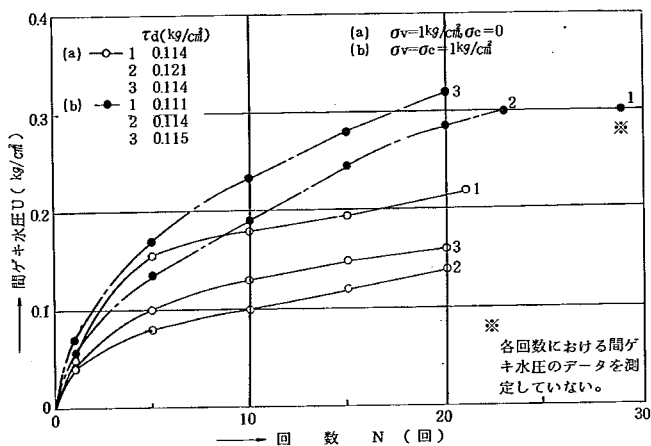


図-3.2 間げき水圧に及ぼす側圧 σ_c の影響

395

ムスリーブの膨脹に基くもので、その影響は載荷の初期から無視しえないことが分った。

(ii) それでは、非排水くり返しせん断試験の特性上、側圧は加えなければならないことになったが、次の問題はこの側圧 σ_c が供試体の水平応力 σ_h をどのように変化させるかという点である。これについては、供試体内部に試みに小型荷重計 ($\phi 14\text{mm}$) を入れて側圧による内部水平土圧の変化等を測定した結果に基き平均的には側圧が軸圧以下の範囲においては供試体内部の水平土圧は余り変化しないと考えた。

以上のような考察により、液状化試験は軸圧に等しい側圧を加えて行なう、又、それにより水平応力の初期値は平均的には $K_0 \sigma_v$ であるとする。

3-4 試験条件

単純せん断試験機により、静的せん断試験、動的せん断試験を実施した。動的せん断試験は、排水静的せん断応力が 0 又は有の状態、非排水繰返しせん断したものである。動的せん断応力は、一定値の場合と、2 種の値を順序を変えて組合せた場合とがある。密度条件は、密、中位の 2 種、上載圧及び側圧はともに 1.0kg/cm^2 である。これらのすべての組合せについて実験を行なったわけではないことは三軸試験の場合と同様である。

3-5 試験結果

3-5-1 試料の性質

試料は三軸試験の場合と同じく浅間山砂であるが、採取場所・時期とも若干異なるため、諸定数は一致しているわけではない。表-3.1 に試料の性質を示す。 $e_{\max}$ はロート法、 $e_{\min}$ も p 8 で述べた方法に近い方法で求めた。p 8 の表-2.2 と比べてやや均等係数が大きいこと、 $e_{\max}$ の値にかなり差があることになる。 $e_{\max}$ の求め方は、共にロートを用いるものではほぼ同一の方法であるにもかかわらずこれだけの差があることは、粒度分布のわずかな差がその原因かもしれない。

表-3.1

Gs	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	U_c	$e_{\max}$	$e_{\min}$
2.719	0.36	0.14	2.57	0.900	0.547

3-5-2 静的試験

飽和砂の密度 2 条件について、静的に圧密排水せん断試験 (OD 試験) 及び圧密非排水せん断試験 (CU 試験) を応力制御方式により行なった。この実験によって得られた応力～ひずみ関係、応力径路図及び内部摩擦角等を図-3.3, 表-3.2 に示す。応力制御せん断を行なった場合、各応力段階においてクリープがかなりの間継続し停止の判定が難しいことと、最大せん断抵抗を示した後の土の応力～ひずみ関係が測定できないという欠点がある。今回は各応力段階で 5～15 分間

の時間をおくことを原則とした。

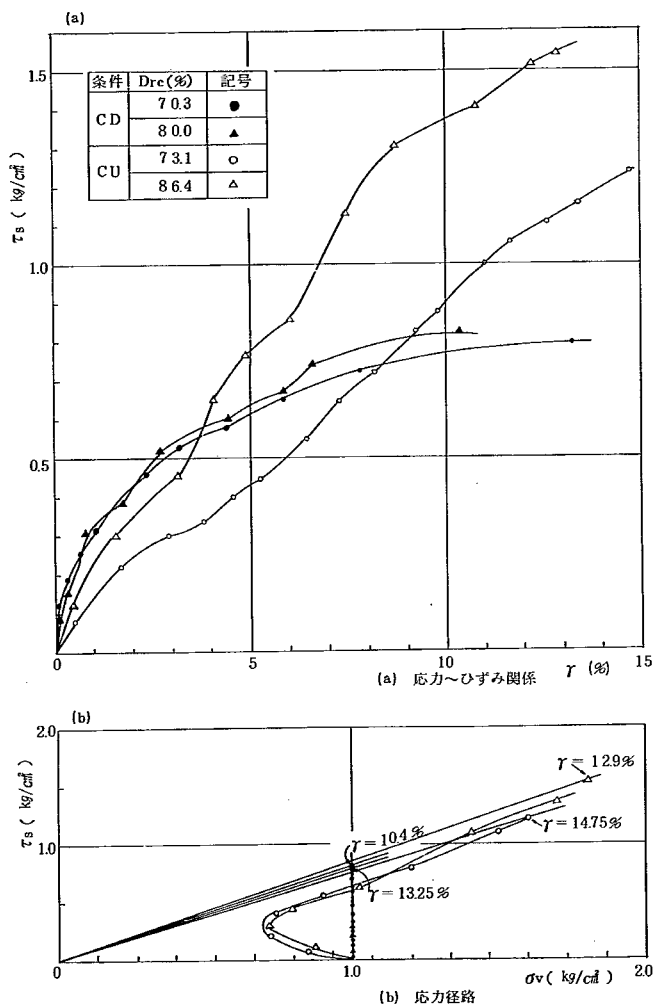


図 - 3.3 静的せん断特性

- (a) 応力～ひずみ関係
(b) 応力経路

表-3.2 静的せん断試験の結果

試験	D_{rc} (%)	$\phi' (^\circ)$	τ (kg/cm ²)	r_f (%)
CD	70.3	38.2	0.794	13.25
	80	39.6	0.826	10.40
GU	73.1	37.3	1.237	14.75
	86.4	40.5	1.542	12.91

3-5-3 動的試験

この動的試験で注目した項目は、(1)砂の液状化に伴う圧縮特性、(2)砂の動的強度に及ぼす初期せん断の影響、(3)定常繰返しせん断試験の不規則せん断への適用性、(4)繰返しせん断時の剛性率 G であり、それぞれについて項目別に試験結果をまとめる。

(1) 砂の液状化に伴う圧縮特性

これは、先に述べた3-4-3(1)と同様の意味をもつものであるが、ここでは図-2.5に示したような平均主応力の値が必ずしも明確ではないので、同趣旨の図として生じた過剰間げき水圧とその排水に伴う間げき比変化とを直接に比較し図-3.4に示す。この図から、密度、初期せん断の条件が同じであれば、過

剰間げき水圧の大きいほど間げき比変化が大きい、初期せん断が作用していてその値が大きいほど間げき比変化が小さい、初期間げき比が大きいと間げき比変化が若干大きいことがわかる。

(2) 砂の動的強度に及ぼす

初期せん断の影響

いくつかの典型的な実験記録の例を図-3.5に示す。

図-3.5(a)は、初期せん断のない場合の例であり、間げき水圧がなめらかにほぼ一様に上昇を示し、せん断ひずみは初期位置に関して偏らず微小振幅を示している。図-3.5(b)は、初期せん断のある場合

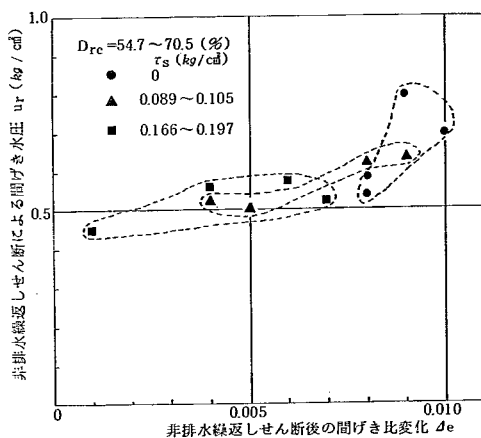


図-3.4(a) 非排水繰返しせん断による間げき水圧と間げき比変化

の例であり、間げき水は载荷初期に著しく増加を示すが、その後増加の度合は低下し、ある上限に達したままほとんど増加しないものもある。またこの場合の間げき水圧には振幅がある。一方、せん断ひずみはある振幅を示しながら、次第に累積してゆく。これらの基本的特性は三軸試験の場合の等方圧密と初期せん断0、異方圧密と初期せん断有と対応させれば全く同様の現象である。

他の例も含めて、過剰間げき水圧の平均的变化及び累積せん断ひずみの平均的变化を

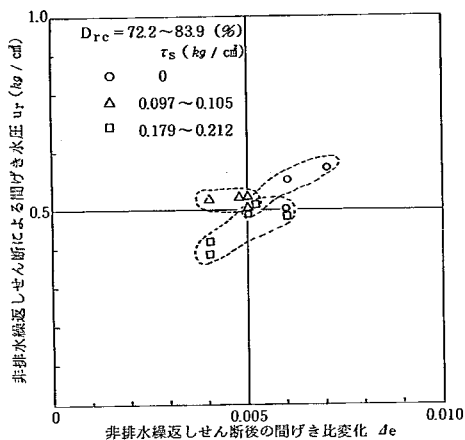


図 - 3.4 (b) 非排水繰返しせん断による間げき水圧と間げき水圧変化

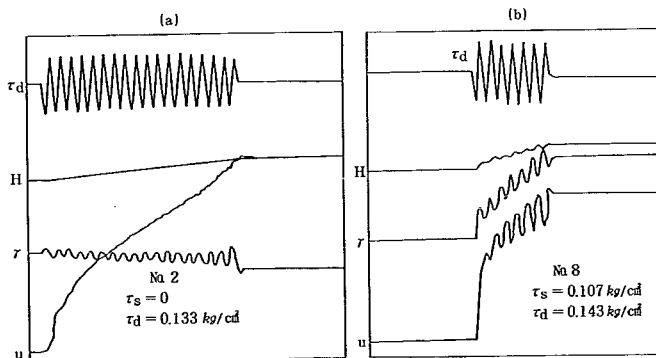


図 - 3.5 実験記録の例

図-3.6~1.1 に示す。次に、10 波の載荷によって生ずる過剰間げき水圧及びせん断ひずみの動的せん断応力との関係を図-3.12, 3.13 に示す。水圧及び応力はどちらも上載圧で除して無次元化してある。図-3.12~3.13 によりせん断ひずみは同じ動的せん断応力が作用する場

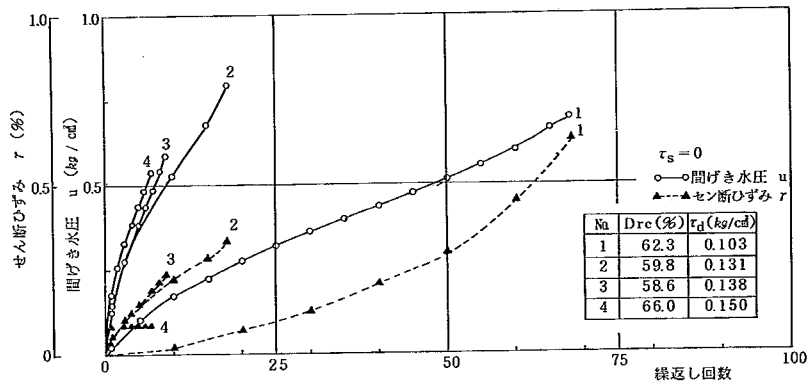


図-3.6 非排水繰返しせん断による間げき水圧とせん断ひずみ

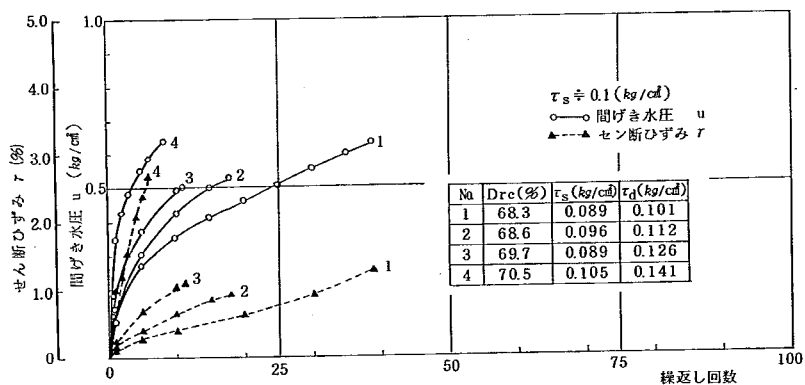


図-3.7 非排水繰返しせん断による間げき水圧とせん断ひずみ

合、初期せん断応力の大きいほど大きいことが分る。又、密度が大きいとひずみは小さくなる。間
 げき水圧については、図-3.12 では傾向がつかみにくい。初期せん断応力が作用する場合の間
 げき水圧の性状は図-3.7~11 に示したが、初期せん断応力のない場合と異なり、繰返し載荷

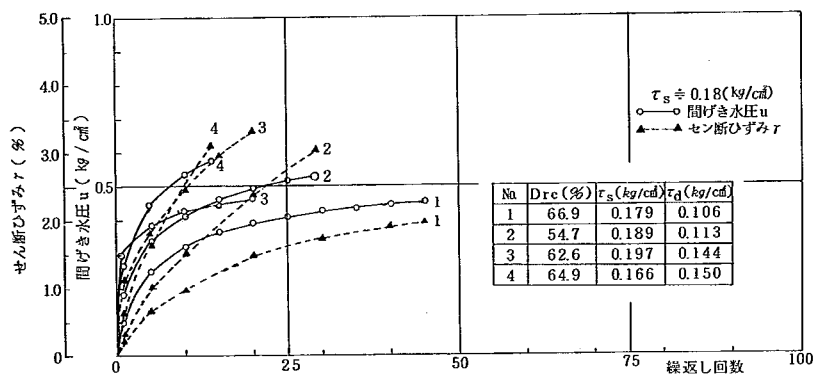


図-3.8 非排水繰返しせん断による間げき水圧とせん断ひずみ

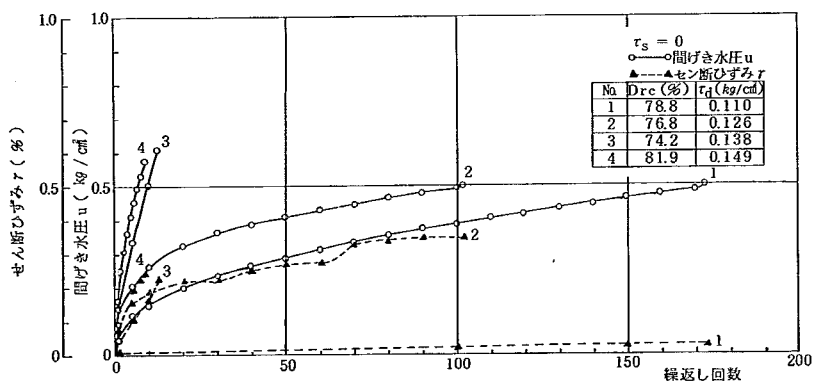


図-3.9 非排水繰返しせん断による間げき水圧とせん断ひずみ

とともに一様に増加するのではなく、载荷とともに増加傾向が低下するのであるから、初期せん断応力の存在による間げき水圧特性は、载荷回数の多いところで見え方が著しいものとなろうが、一方ここでは別の見方として、増加傾向がほぼ一様になるところで载荷一波あたりの増加量で間げき

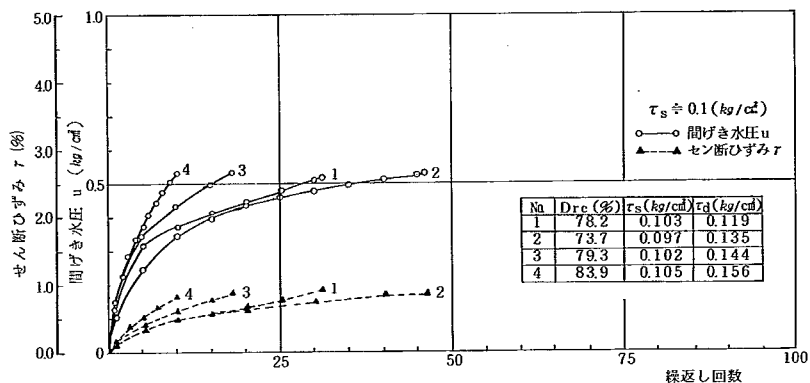


図-3.10 非排水繰返しせん断による間げき水圧とせん断ひずみ

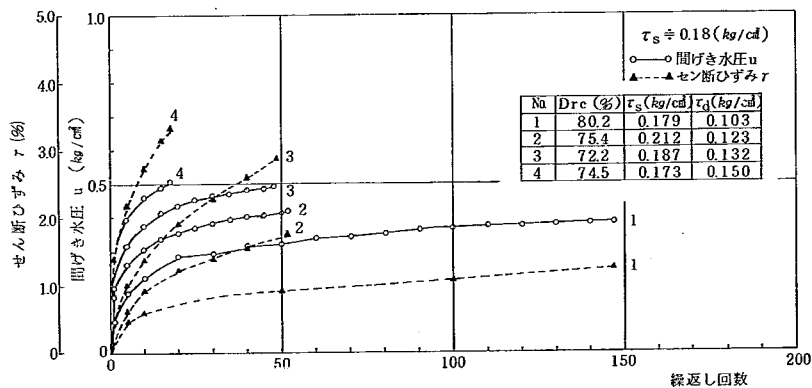


図-3.11 非排水繰返しせん断による間げき水圧とせん断ひずみ

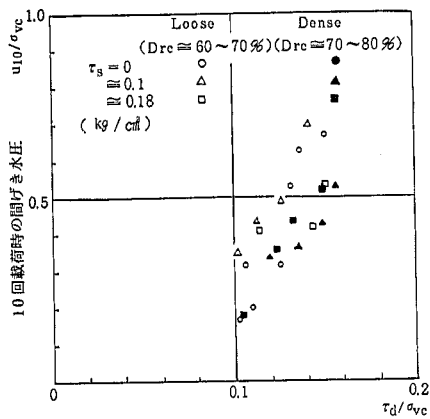


図-3.12 間げき水圧と応力比

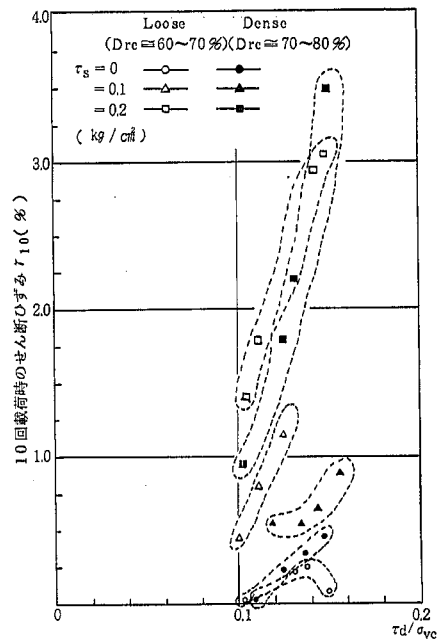


図-3.13 せん断ひずみと応力比の関係

水圧特性を調べた。その図が、図-3.14 である。この図により、初期せん断応力の加わっている場合に過剰間げき水圧の発生傾向が小さいことが分る。

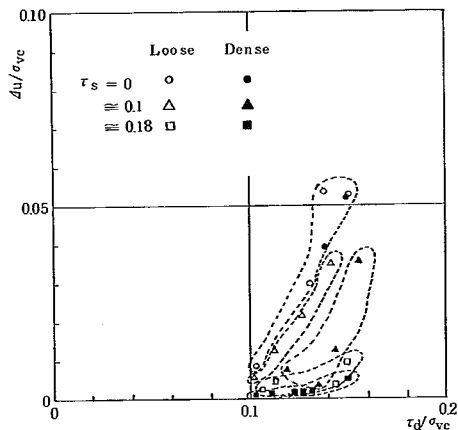


図-3.14 平均的な間げき水圧の増加傾向と応力比の関係

(3) 定常繰返しせん断試験結果の不規則せん断への適用性

ここでは、不規則せん断時における間げき水圧等の挙動の予測に関する極く予備的な検討として、2種類の動的せん断応力の組合せの順序を変えた繰返しせん断試験を行なった。動的応力条件としては、動的せん断応力 τ_{d1} 、 τ_{d2} をそれぞれ5波ずつ加える載荷回数と間げき水圧及びひずみの関係を図-3.15, 16に示す。これから次のようにいえる。初期せん断応力のないときには、最初に大きな動的せん断応力を載荷した方が最終的な間げき水圧は大きくなる。初期せん断の存在する場合には、最終値で見るとその差は必ずしも明らかではないが、先に大きな動的せん断応力を加えて次に小さな動的せん断応力を載荷した場合の間げき水圧の発生量は非常に少ない、又、それほど極端ではないが、大きい動的せん断応力も後から載荷した場合には間げき水圧の発生量は少ない。この傾向はひずみについてもいえる。現在これ以上の解析はできないが、少なくとも単に定常繰返しせん断に対する間げき水圧、ひずみの発生特性を求めても、それらの順序による(応力又はひずみ履歴)影響を調べなくては地震のような不規則波に対する適用は困難である。

(4) 繰返しせん断時の剛性率

これまでに述べてきた動的試験のそれぞれについて、動的応力振幅及びひずみ振幅から繰返しせん断時の剛性率を求めてきた。これにより初期せん断のない場合には、過剰間げき水圧の増加とと

もに剛性率が次第に低下するが、初期せん断応力のある場合には剛性率はそれほど低下しない、又、剛性率の大きさは初期せん断応力の有無にはあまり影響を受けないこと等が分った。なお、例えば、ひずみ振幅 $\gamma \approx 10^{-3}$ で $G \approx 100 \text{ kg/cm}^2$ 程度の値である。この値は、これまでに報告されている値よりかなり小さい。この理由については今後検討の必要があるが、せん断力载荷部のガタが原因の一つとして考えられる。

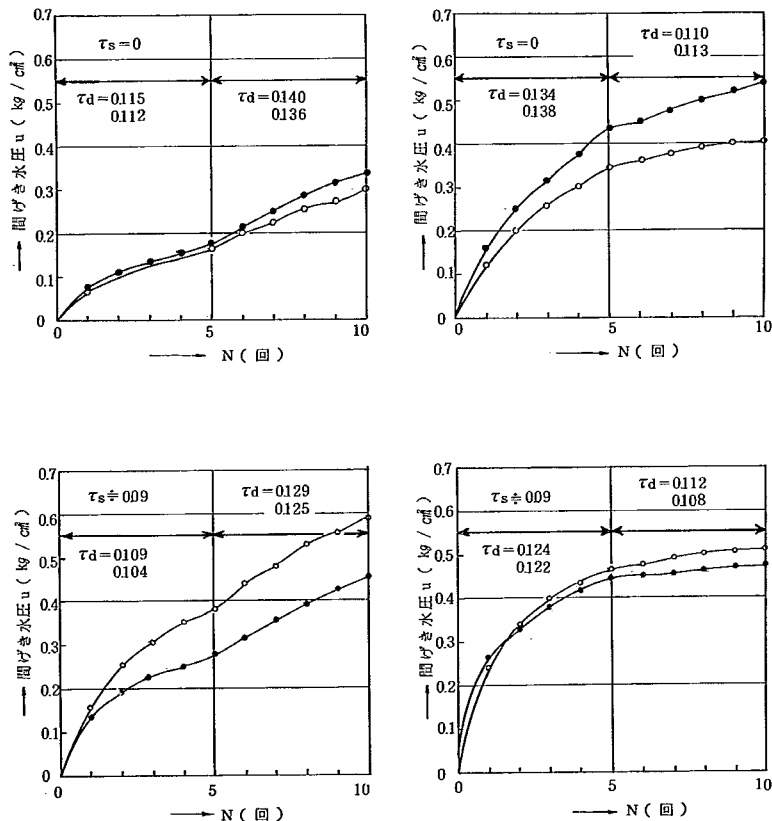


図-3.15 2種の動的応力による間げき水圧

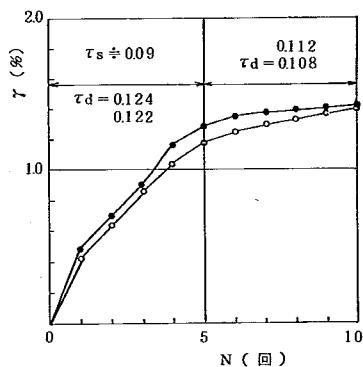
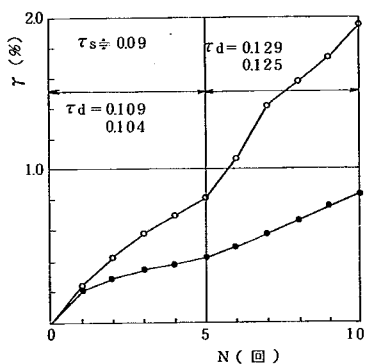
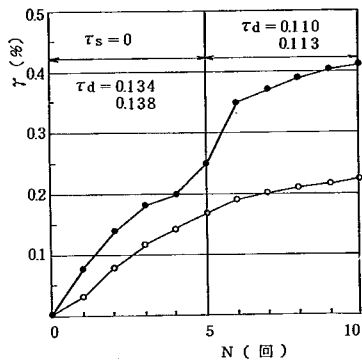
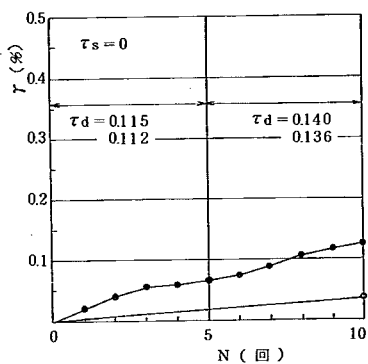


図-3.16 2種の動的応力によるせん断ひずみ

4. 考 察

4-1 両試験機による試験結果

三軸試験機及び単純せん断試験機による試験結果の比較は一般に必ずしも容易ではない。例えば、液状化試験を対象にして、Seed らは、地震時における水平地盤内の（単純せん断的な）応力状態が、飽和三軸供試体内の 45° 面上に再現できるとして試験を行なったが、²⁾ その後単純せん断試験機による結果はそうではないことが判明した。³⁾ その後、Finn ⁴⁾、石原 ⁵⁾ はそれぞれ異なったアプローチから、液状化強度を表わす応力比として τ_d / σ_{mc}' (τ_d は動的せん断応力の最大値、 σ_{mc}' は平均主応力)をとると両者の関係が比較的統一的に評価しうることを示した。このことは必ずしも、今回扱ったような初期せん断応力が存在する場合に直ちに適用できるものではないと考えられるが当面準用せざるをえない。すなわち、三軸の場合に用いた 45° 面の応力比 τ_d / σ_N' の代りに τ_d / σ_{mc}' 、 $\sigma_{mc}' = (K_c + 2) / 3 \cdot \sigma_{30}'$ を、単純せん断の場合に用いた水平面の応力比 τ_d / σ_{vc} の代りに τ_d / σ_{mc}' 、 $\sigma_{mc}' = (1 + 2 K_0) / 3 \cdot \sigma_{vc}$ を用いて、間げき水圧の発生特性を表わす図-2.9（三軸）と図-3.12（単純せん断）を、又、ひずみの累積特性を表わす図-2.13（三軸）と図-3.13（単純せん断）を比較するのである。比較した図は略するが、このような補正によっても単純せん断の方が間げき水圧、ひずみとも累積傾向が大きいの。

問題点としてはいくつか考えられるが主要なものは次のようなものである。

① 三軸の軸荷重シリンダー径の周囲の摩擦力、これは軸荷重を測定している荷重計が三軸室外供試体上部にあるためこれについては、毎回シリンダーに機械油をさし摩擦力を軽減するようにした。なお、これによって残る摩擦力は大体供試体単位面積あたり 0.05 Kg/cm^2 以下であった。この値は動的応力が小さいときには補正が必要と思われるが、今回はそのような補正は省略している。その後、このような補正を不必要にするために、軸荷重の測定は三軸室内供試体底部で測定をするように換えた。

② 供試体は完全飽和でないために、三軸のように平均主応力が直接的に増減する場合に締固めが生ずる可能性がある。

この他に、三軸と単純せん断の動的せん断応力の変化の仕方の差等も検討を要する項目であろう。

4-2 動的強度の表現

以上、今回の実験結果を繰返しせん断を受けるときの挙動の過程として見てきたが、このままでは地震時の設計のためには使える形ではない。実際に設計をするという観点から、このような実験の結果を整理することを考えてみる。このことは、p 10で若干述べた動的強度に対する考えを整理することにもなる。

対象として盛土等の土構造物及びそれを支持する地盤の内部の土の要素（砂に限らない）を考え

る。すなわち、初期応力状態を固定する。そしてその状態を例えば三軸であれば、主応力 σ_{1c} , σ_{3c} で、単純せん断であれば垂直応力 σ_v , 初期せん断応力 τ_s で表わす。このような応力状態にある土の要素に地震による動的応力が付加されるわけであるが、現実の問題としてはこのような動的応力の付加により生ずるひずみがある限界をこえたときにその土の破壊状態というのであろう。ここに生じひずみ量の出発点は静的応力状態のところであり、それまでのひずみ量は含まれない。破壊基準を三軸について ε_f , 単純せん断について γ_f とする。以下、まず単純せん断の場合について考察を進める。簡単化のために、地震によって生ずる動的せん断応力を定振幅正弦波とする。この振幅を τ_d とする。 τ_d が N 回作用してひずみが γ_f に達した場合に、 N 回載荷に対する動的強度 τ_{fd} をこの場合の動的応力振幅 τ_d とする。このように定めた動的強度は、初期せん断応力 τ_s , 載荷回数 N , 破壊基準 γ_f , 載荷速度 (載荷振動数 f で表わす) の関数である。すなわち、

$$\tau_{fd} = f_n(\tau_s, \gamma_f, N, f)$$

初期せん断のない場合の砂の液化化強度 τ_l も考え方は同じで、上記の場合の $\tau_s = 0$, $\gamma_f =$ ひずみ振幅 γ_p に相当し、かつこれまでのところ液化化強度 τ_l は f には依存しないと言われているから次のようになる。

$$\tau_l = f_n(\gamma_p, N)$$

そして、この液化化強度 τ_l は垂直応力 σ_{vc} に比例するところから、応力比 $\tau_l / \sigma_{vc} = f_n(\gamma_p, N)$ の形で図-4.1 のように整理されている。

上に述べたもう少し一般的な上記の場合にも同様の整理法をとることを考える。動的強度というものが分らない場合には、動的強度の代りとして静的強度をとるであろう。この静的強度は土の種類によって排水強度をとる場合と非排水強度をとる場合がある。この場合、通常いわゆる静的強度は静的応力載荷前からのせん断応力 $= 0$ の状態からの応力でもって表わされていること

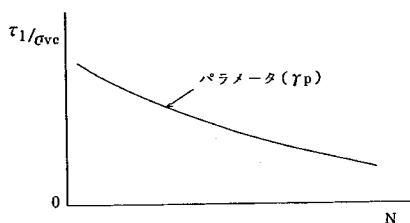
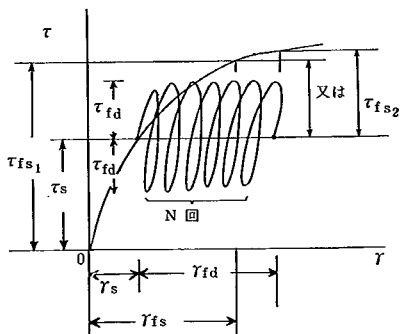


図-4.1 液化化強度の整理法 (その1)

とが通常であろう。別の見方として、既に作用している静的せん断応力を差引いたものを静的強度としたものが上の動的強度に対応するものと見ることもできる。この関係を図-4.2 に示す。いずれにしても、このような動的強度がどちらかの静的強度 (通常の意味の静的強度 τ_{s1} の方が作用している静的せん断応力に関係がないのでなじみやすいであろう) に対して、どの程度の割合かを知ることができれば、現在のように地震時の問題に静的強度を用いている状態より合理的になるであろう。この場合には動的強度を表わす実験結果は図-4.3 のように表わせるであろう。(a) は一般的であり、パラメータとして τ_s , γ_f , f を含む。(b) は一つの推測であるが、このような整



- τ_s : 静的せん断応力
- γ_s : τ_s に対するひずみ
- τ_{fs1} : 静的せん断強度
- γ_{fs} : τ_{fs1} に対する破壊基準ひずみ
- τ_{fs2} : τ_s を差し引いた静的せん断強度
- τ_{fs2} に対する破壊基準ひずみは γ_{fs} 又は $\gamma_s + \gamma_{fd}$
- τ_{fd} : N回載荷に対する動的せん断強度
- γ_{fd} : τ_{fd} に対する破壊基準ひずみ

図-4.2 静的強度及び動的強度の関係説明図

理をすることによりパラメータ τ_s がなくなるかもしれない。図-4.1 に示した液化化強度特性も見方によっては、図-4.3 と同様な意味をもつものを見ることができ。すなわち、応力比の分母の σ_{vc} は砂の排水せん断強度 $\tau_{fs} = \sigma_{vc} \cdot \tan \phi$ の代用となっていると見るのである。すなわち液化化強度を図-4.4 のように表わすのである。このようにすれば、初期せん断の有無に無関係に動的強度を設計に使いやすい形で表わすことができるのではないであろうか。三軸の場合にも原理的には同じであると考えられるので説明は省略する。

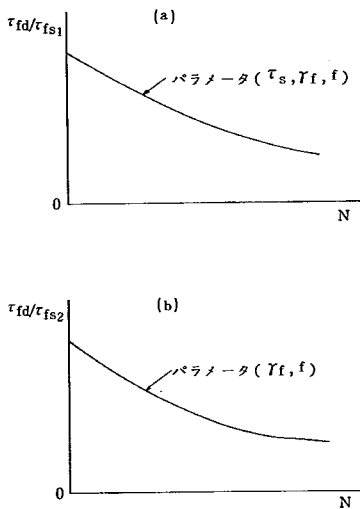


図-4.3 動的強度の整理法

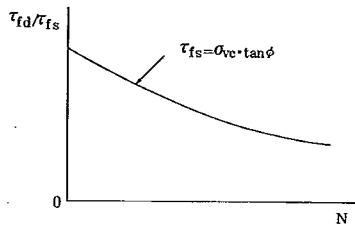


図-4.4 液状化強度の整理法(その2)

5. 結 論

今回の試験により得られた主な知見は、既に各章及び概要においてまとめているのでここでは改めて述べない。今後、この種の問題の解決に必要な項目・方法を述べる。

(1) 単純せん断試験機内の応力状態の詳細な検討、又は中空三軸ねじりせん断のように応力状態の明確な試験機による試験、このような試験機によれば側圧が任意に設定でき、種々の応力状態の特性が調べられる。

(2) 三軸試験において体積変化特性に影響する応力が2次元的(単一すべり面での応力を考える)なものか、3次元的なものかを調べる。

(3) 三軸において、圧縮及び伸長状態の比較

(4) 種々の土について設計に用いられる形での動的強度に関するデータの整備

6. 参 考 文 献

- 1) 古賀泰之, 他: 水浸砂層の液状化沈下現象に関する振動実験, 土木研究所資料第1.063号, 1975年8月
- 2) Seed, H.B. and Lee, K.L. : Liquefaction of Saturated Sand during Cyclic Loading, Jour. of SM, ASCE, Vol. 92, SM6, 1966
- 3) Peacock, W.H. and Seed, H.B. : Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions, Jour. of SM, ASCE, Vol. 94, SM3, 1968
- 4) Finn, W.D.L., Pickering, D.J. and Bransby, P.L. : Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests, Jour. of SM, ASCE, Vol. 97, SM4, 1971
- 5) Ishihara, K. and Li, S. : Soil Liquefaction by Torsional Simple Shear Device, Soils and Foundations, Vol. 12, No.4, 1972