

京都大学防災研究所 正員 柴田 徹
 京都大学防災研究所 正員 行友 浩

目的と方法

従来、種々の方法で行なわれている土の動力学的性質に関する基礎的研究の一環として、新しく試作された振動三軸圧縮試験機を用いた一連の実験結果をもとにして定性的な考察を加えるものである。この試験機は、地盤内の微小要素に作用する応力状態を実験室内でかなりの範囲までシミュレートできるので、従来の振動三軸試験で問題となっていた強度の決定に対するあいまいさをとりのぞくことができる。すなわち、従来の振動三軸圧縮試験のように軸方向圧力のみ、あるいは側圧のみを振動させた場合には、すべり面に作用する合成振動応力の方向がそのすべり面と一致しないために破壊面の決定があいまいとなる。図-1はそのような場合の応力-ひずみ図を模式的に示したもので、動的強度は図のようにある範囲をもった値で示さざるをえないが、本研究では軸方向圧力と側圧とを同時に振動させながら実験し、解析にあたっては主応力比を用いているので破壊面の決定を明確にすることができるのである。

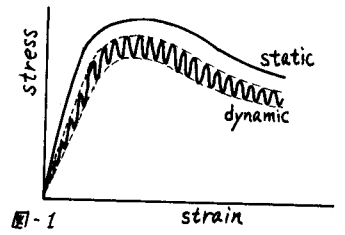


図-1

図-2はモル登力内を用いて振動三軸・排水せん断試験の応力状態を表示したもので、図-2(a)および図-2(b)は従来の振動三軸試験に対するものである。图中、 45° の傾きをもつ実線は試験中の振動圧力平均値の応力経路を示し、 θ なる角度は土のモビライズされた内部摩擦角 φ_{mo}' と $\tan \theta = \sin \varphi_{mo}'$ によって関係つけられる。したがって原点を通過する θ の傾きをもつ実線はせん断の進行とともに破壊線に近づく。また图中、矢印は合成振動応力の作用方向と大きさを示し、 $(\sigma_3)_d$ は側圧振中、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ は軸方向圧力振中を表わす。

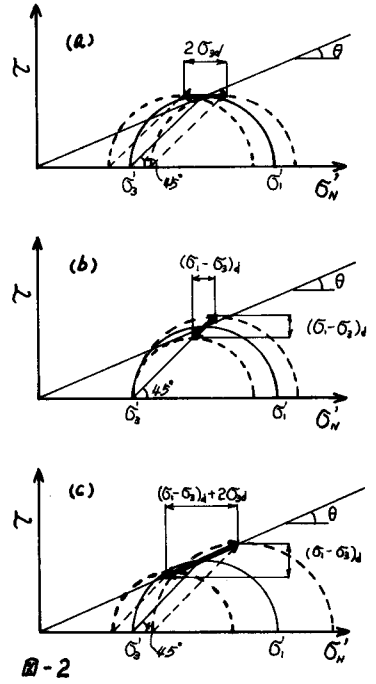


図-2

図-2(a)は側圧のみを振動させながら軸方向圧力を静的に増加して破壊に至らしめる場合で、合成振動応力の方向は横軸に平行である。図-2(b)は一定の静的側圧のもとで軸方向圧力のみを振動させながら軸方向圧力を増加して破壊に至らしめる場合で、合成振動応力の方向は横軸に対して 45° の傾きをなしている。いずれの場合もせん断中の合成振動応力の方向はモビライズされた内部摩擦角 φ_{mo}' と一致しないために、単一の動的せん断強度を定めることが困難である。

図-2(c)は本研究における振動三軸圧縮試験の応力状態を示している。すなわち、軸方向圧力と側圧とを同時に周期的に変化させながら三軸試験を行なうもので、せん断中の合成振動応力の傾きをモビライズされた内部摩擦角 φ_{mo}' に一致せしめるために、両方の振動

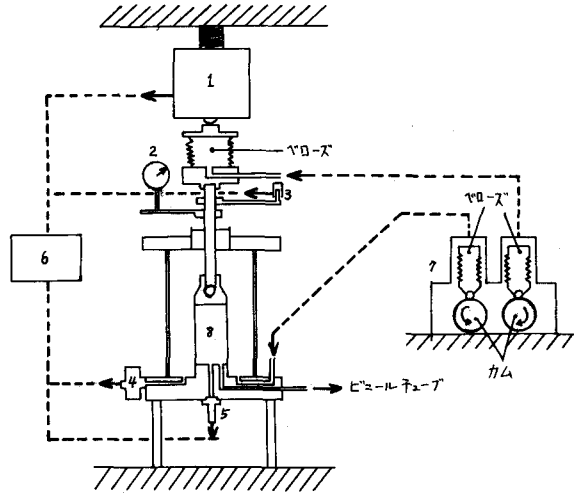
圧力を制御する。図-2(c)を得るためにはせん断過程中の側圧 σ_3 と軸方向圧力 σ_1 にせよの圧力振中 σ_{3d} , $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ が

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_d}{\sigma_{3d}}$$

の関係を満足するように実験操作を行えばよいので、一定側圧 σ_3 および一定側圧振中 σ_{3d} のもとで、定変位方式によって軸方向圧力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を増加すると同時に軸方向圧力振中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ を増加する。

実験装置と試料

装置の概略は図-3に示すが、その機構は通常の三軸圧縮試験機に振動圧力発生装置をとりつけたもので、そこから発生する振動水圧によって静的な圧力に振動圧力が付加される。振動圧力発生装置はカムとベローズからなり、カムの機械的な上下運動をそれに接するベローズを介して水圧に変換し、静的な軸方向圧力と側圧に対して振動圧力をそれぞれ独立に加えることができる。またカム内柱を用いているので軸方向圧力振中の大きさと振動数はかなりの範囲にわたって連続的に増減でき、歯車のかみ合わせによって軸方向振動圧力と側方振動圧力の位相差を変えることができ、振動圧力の波形は正弦波に近いトロコイド波であり、せん断試験に加える圧力振中の大きさは電磁オシログラフ



- 1; ロットセル(軸方向圧力および側方圧力振中用), 2; ギヤルゲージ
- 3; 差動変位計, 4; 圧力計(側圧および側方振中用)
- 5; 圧力計(間隙空気振中用), 6; 動的圧力計・電磁オシログラフ
- 7; 振動圧力発生装置, 8; 供試体

図-3

を見ながら制御する。供試体軸方向変位量の平均値はギヤルゲージにより読みとり、軸方向変位振中は差動変位計を介して電磁オシログラフに記録する。また刻々に進行する供試体の体積変化量の平均値は、排水孔に細い硬質の透明ビニールチューブを接続し、チューブ内の標滴着色水の移動量を読みとることによって求めた。なお筒けき空気圧振中を高感度圧力計を介して測定することにより、振動空気圧の影響を確かめた。

試料は豊浦の乾燥標準砂を用い、これを突き固めて直径35mm、高さ80mmの内柱形供試体とした。試料の比重は2.64、最小筒けき比0.640、最大筒けき比0.949である。

実験結果と考察

ここでは一連の乾燥標準砂の振動三軸圧縮試験結果をもとに動態時の砂の強度、変形特性について静的挙動と対比しながら考察する。全試験を通じて側圧 σ_3 は 1.0 kg/cm^2 とし、変位制御による破壊試験を行なった。振動数 f および振動圧力振中が動態時の砂の強度に与える影響を調べるためには、 $0.56, 5.0, 12.2 \text{ cps}$, 側方圧力振中 σ_{3d} は $0.3, 1.0 \text{ kg/cm}^2$ に変化させた。また砂の挙動は筒けき比の大小によって大きく支配されるので、密な砂とゆるい砂に対して同様の実験を行なった。この実験では、前述の $\sigma_1 - \sigma_3 / \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_3)_d / \sigma_{3d}$ が成立するように振動圧力振中を制御するので、せん断中の合成振動応力の作用方向は土のモビライズされる内部摩擦角 ϕ_{mo}' に一致し、したがって応力-

ひずみ図の応力を有効主応力比 (σ'_1/σ'_3) にとることによって静態時の応力-ひずみ図と同様に一本の曲線で表示することができた。

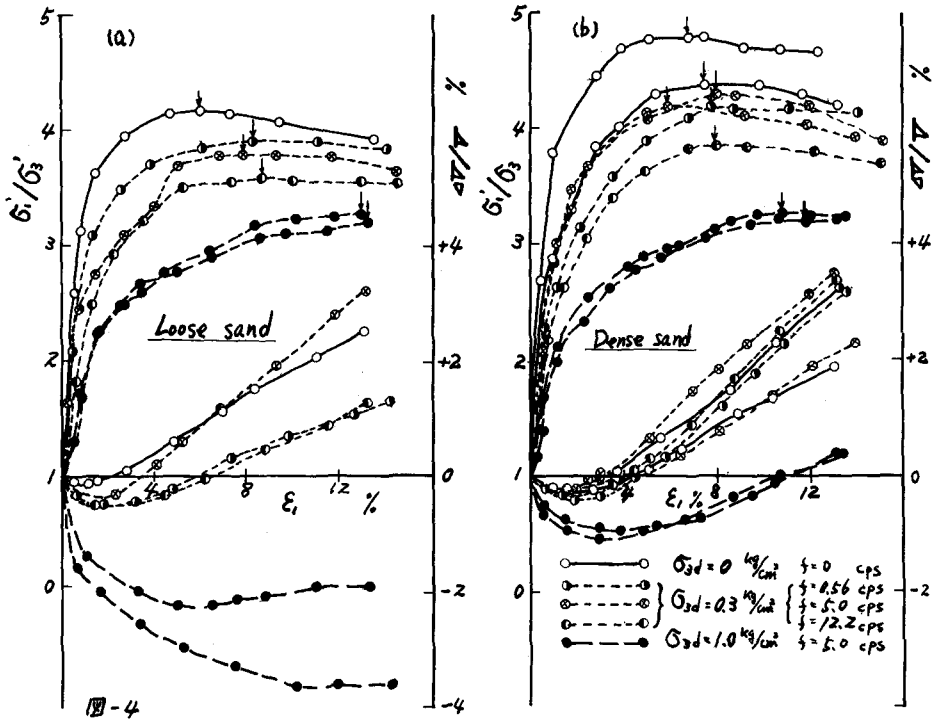
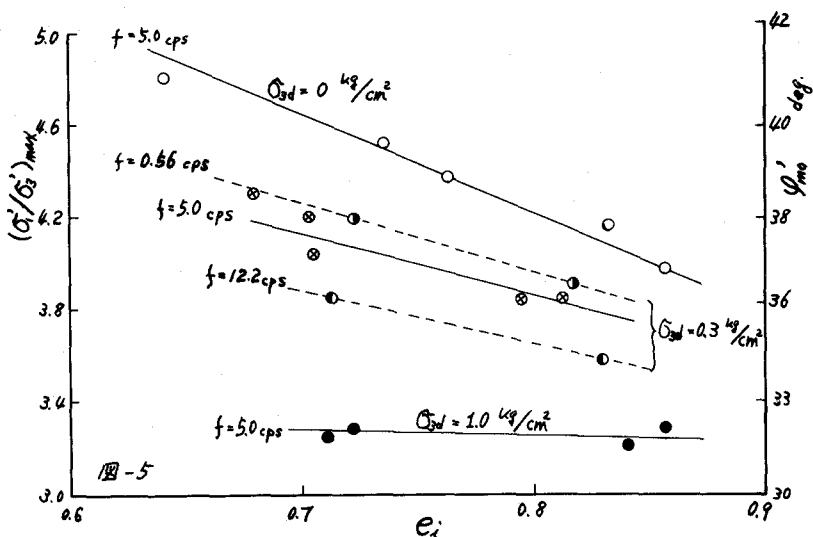


図-4

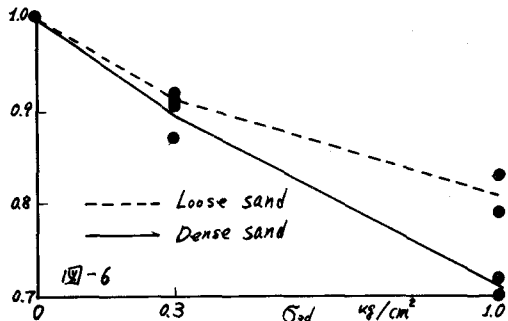
図-4は各種振動諸元に対する応力-ひずみ図および体積変化量-ひずみ図を示している。図-4(a)、図-4(b)はそれぞれ小密な砂(初期間げき比 $\epsilon_1 = 0.704 \sim 0.735$)、中密な砂 ($\epsilon_1 = 0.795 \sim 0.857$) に対して表示したものである。この図から側圧振中の増大とともに最大主応力比 (σ'_1/σ'_3)_{max} の低下する状態がみられ、同時に最大主ひずみ ϵ_{1f} (図中の矢印) の増大がみられる。また体積変化量 $\Delta V/V$ は同じ密度で比較すると側圧振中が大きいほど体積膨張量が少なく、このことは非排水(気)状態における間げき水(気)圧の一時的な上昇を意味している。

図-5はいくつかの初期間げき比 ϵ_1 をもつ各試験の最大主応力比 (σ'_1/σ'_3)_{max} を側圧振中 σ'_{3d} と振動数をパラメータとしてプロットしたもので、実測値を結ぶ実線は $f = 5 \text{ cps}$ 、破線は $f = 0.56$ 、 12.2 cps に対応している。静態時の砂の強度は初期間げき比 ϵ_1 の増大とともに減少することがよく知られているが、動態時においても同じ傾向がみられる。そして初期間げき比の減少に伴う動的強度低下の割合は圧力振中の増加とともに増大し、側圧振中 $\sigma'_{3d} = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ においてはいくらも初期間げき比に関係なく強度が低下する。またやはり圧力振中が増大するにつれて密な砂ほど振動の影響を受けて大きく強度を低下する。このことは図-6に示すように動態時の最大主応力比 (σ'_1/σ'_3)_{d,max} と静態時の最大主応力比 (σ'_1/σ'_3)_{s,max} との比を側圧振中 σ'_{3d} に対してプロットすることによって示された。ただし基準となるべき静的強度は動的強度の初期間げき比と同じ間げき比をもつ静的強度を図-5から読みとったものである。また図-5において示されたように振動数が強度に与える影響を

みりとわすかではあるが、振動数の増加に伴って強度が低下している。この実験では振動数の範囲が0~12.2 cpsで、砂の共振振動数よりも小さい範囲で行なわれているので振動数の影響は顕著ではないと思われる。なお図-7は三軸式試体上端における振動加速度 A を各振動諸元をパラメータにレ

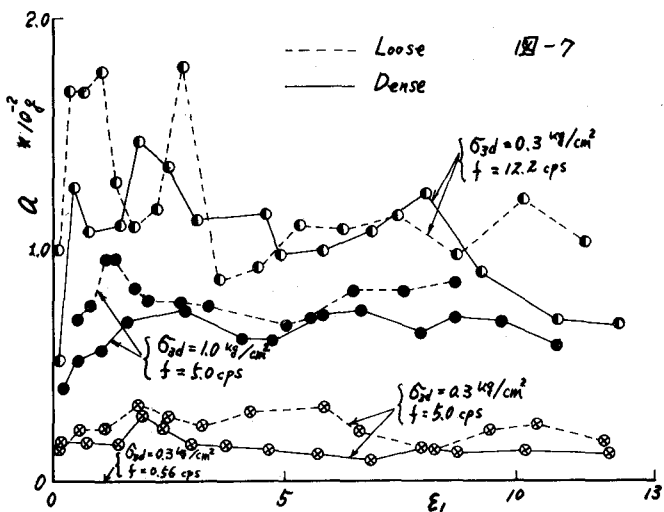


てプロットしたものである。この図からせん断試験中の振動加速度は余り変化がなく、振動数あるいは振動圧力振中の増大とともに A が増大することはわかるが、その絶対値はかなり小さいので、加速度を対象にした考察は現在のところ行なっていない。



むすび

この研究ではせん断中の側圧振中 σ_{3d} は一定に保ち、軸方向圧力振中を調節することによって、全せん断過程を通して $\tau/\sigma_{3d}' = \tan \phi_{mo}'$ (τ ; すべり面上での動的せん断応力, σ_{3d}' ; 動的垂直応力, ϕ_{mo}' ; モーリスされた内部摩擦角) の条件を満足せしめた。ゆえに実験結果の解析には主応力比 (σ_1'/σ_3') を用い、その最大値 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ によって動的強度を決定することが容易である。なお排水(気)状態であるから $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ と $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ のいずれの破壊基準を用いても結果は不変であることも付言したい。



多くの場合、砂の動的強度は振動をうけると低下する現象があるが、慣性力による見掛けの強度低下はあって、真の強度は不変であるという主張もなされている。今回の実験によれば図-5あるいは図-6に示したように振動数あるいは振動圧力振中の増大とともに明らかな強度低下がみられたが、それに及ぼす振動加速度の影響は無視しうる程度のオーダーではないかと思われる。