

振動時における飽和砂の強度特性

柴 田 徹・行 友 浩

STRENGTH CHARACTERISTICS OF SATURATED SAND UNDER OSCILLATORY LOADING CONDITIONS

By *Toru SHIBATA and Hiroshi YUKITOMO*

Synopsis

Test data to compare the behaviour of saturated sand under drained triaxial oscillatory loading conditions with that observed in the static triaxial compression tests are presented. The samples having a relative density of 87% are tested at the amplitude of confining pressure of 0.1, 0.2 and 0.3 kg/cm². The amplitude of axial pressures is controlled so that the angle between the normal stress and the resultant oscillating pressure is in accord with the mobilized internal friction, **Fig. 5**. It is concluded that the internal friction in the terms of effective stress of saturated sand under oscillatory loading conditions decreases with the increasing value of the amplitude of confining pressure, **Fig. 9**. The test program also showed that frequency effects, within the range from 0.5 to 12 cps, are small.

1. ま え が き

土の力学的性質は、力を静的に加えた場合と動的に加えた場合とでは一般に異なる。急速な荷重を加えたときは、緩速な荷重に比べて材料の弾性係数は増し、破壊強度も増大することが多い。また、振動数の大きい振動応力に加えた場合にも、小さい振動数の場合に比べて弾性係数は大きくなることが多い。

このような動的荷重を受ける2, 3の例をあげると、80 km/hr の速度で走っている自動車により、路床路盤の土は約 0.01 sec の時間内で荷重を受けることが判明している。また周期 0.1~1 sec の地震力が加わってきたとすると、荷重がゼロから最大になるまでの時間は 0.025~0.25 sec くらいであるから、この程度の急速荷重を受けたときの材料の性質を用いて、耐震設計を行なうのが合理的であるといわれている¹⁾。

ところで土の動的性質を調べるためには、応力やひずみをきわめて急速に与えるか、または振動的に与える試験法が用いられ、これらを動的試験 (Dynamic test) という。この動的試験はさらに急速試験 (Transient test) と振動試験 (Vibratory test) に大別される²⁾。振動試験は土に対する振動の効果を試験するもので、これには供試体は静止していて、応力を振動的に加える試験 (Vibratory loading test) と、供試体そのものに振動を与えて、これに単調なひずみを与える試験 (Loading test during vibration) とがある。そして対象とする動的問題の種類に応じて試験法も選択されるが、たとえば地震時における挙動を問題にするときには、振動中の材料に振動的な力を加えねばならないので、これら両試験を適当に組み合わせたものを採用する必要がある。

この報文では、飽和砂に対して両試験を組み合わせた試験による結果を述べているが、このように複雑な試験法を採用したゆえには、動態時の砂の強度が静態時の値に比較して低下するというほとんど定説化した現象に対して、見掛けの強度は減少しても真の強度は不変であるという主張もなされているので³⁾、まずそれらを確認しようとするのである。

2. 研究の目的

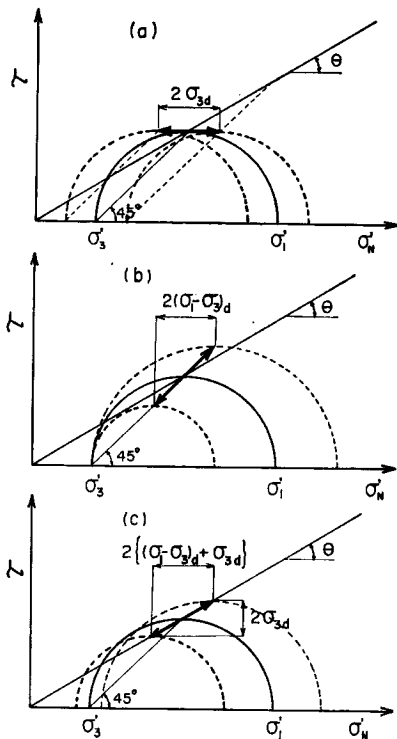


Fig. 1 Mohr's stress circles under oscillatory loading conditions;

- (a) $(\sigma_1 - \sigma_3)_d = 0$, $\sigma_{3d} \neq 0$,
- (b) $(\sigma_1 - \sigma_3)_d \neq 0$, $\sigma_{3d} = 0$,
- (c) $(\sigma_1 - \sigma_3)_d \neq 0$, $\sigma_{3d} \neq 0$.

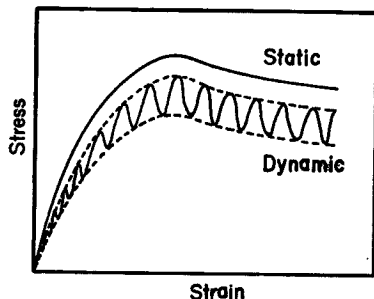


Fig. 2 Schematic stress-strain curves for both static and dynamic tests

3. 試験装置, 方法, 試料

装置の概略は付録に記述するが、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、そこから発生する振動水圧によって静的な応力に振動圧力が加えられるようになっている。すなわち、静的試験

土の動態時の挙動を調べるために、通常、振動三軸圧縮試験機がよく用いられる。そして、この試験機には種々のタイプがあるが、代表的な試験法としてはつぎの3種が考えられる。すなわち、Fig. 1 (a) に示すように、側圧 σ_3 を振動的に変化させながら、主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を増加して破壊にいたらしめるもの、Fig. 1 (b) のように σ_3 は一定に保ちながら $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を振動的に変化させて破壊を生じさせるもの、および Fig. 1 (c) に描くように、 σ_3 と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の両方を振動的に変化させるものである。Fig. 1 は排水せん断に対するものであり、それぞれの場合の合成振動応力の大きさと方向は、図中に矢印で示したとおりである。ただし図中 θ なる角度は、土のモビライズされた内部摩擦角を ϕ'_{m0} とすれば、 $\tan \theta = \sin \phi'_{m0}$ によって ϕ'_{m0} と関係づけられる。また Fig. 1 (c) に示した σ_3 と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の両方を振動させる場合には、合成振動応力の方向は σ_3 と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の組み合わせ方により、 $0^\circ \sim 45^\circ$ の範囲で任意に選ぶことができる。

さてこれらの振動三軸圧縮試験機により、土の強度を求めるために応力～ひずみ曲線やベクトル曲線を描くと、例えば Fig. 2 の模式図のごとく、応力がある巾をもった値となるので動態時の強度を求める際に不都合を生じている。Fig. 3 は後述の試料と同一のものをを用い、 σ_3 を変化または $(\sigma_1 - \sigma_3)$ をそれぞれ単独に変化させた場合の破壊点を矢印によって示しているが、これらはいずれもある巾をもっているため、動態時の破壊線の決定が困難であることがわかる。

そこでこの研究では、Fig. 1 (c) に示したように、合成振動応力の方向を常に θ と一致せしめる操作を行なうことにした。これは、モビライズされた ϕ'_{m0} によってきまる土塊内の面上に、その面にたてた垂線と ϕ'_{m0} の傾きで合成振動応力が作用することと同義である。したがってこの試験の利点は、動態時の応力～ひずみ曲線において、応力を有効主応力比 σ_1'/σ_3' に置き換えれば、静態時のものと同様に、振巾をもたない曲線が描かれるので、動的強度の決定を容易にすることができる。

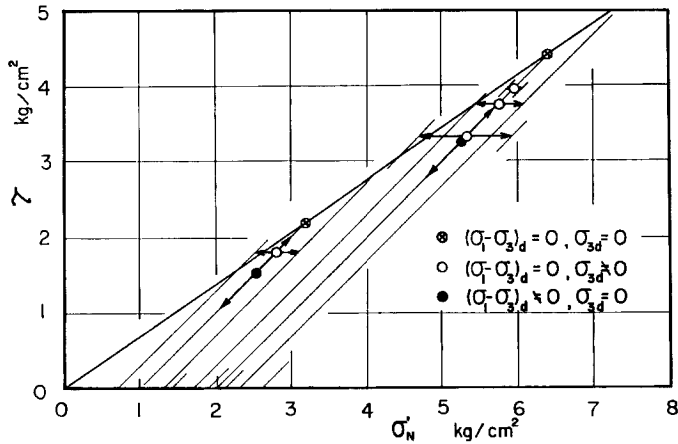


Fig. 3 Directions and magnitudes of resultant stresses under various oscillatory loading conditions

では、側圧 σ_3 を一定に保ちながら軸圧 ($\sigma_1 - \sigma_3$) を増加せしめて破壊に導くことが多いが、動的試験の場合には側圧と軸圧の圧力振巾をそれぞれ $\pm \sigma_{3d}$ と $\pm (\sigma_1 - \sigma_3)a$ だけ単独または同時に与えながら破壊させることができる。

振動圧の波形は正弦波に近いトロコイド波で、 σ_{3d} と $(\sigma_1 - \sigma_3)a$ の周期は等しく、位相差はゼロである。そして軸圧、軸圧振巾、側圧、側圧振巾および変位振巾はロードセル、気圧計、差動変位計を介してビジュグラフに記録した。なお変位量および体積変化量はそれぞれダイヤルゲージとビューレットによって読みとることにした。

供試体は直径 35 mm、高さ 80 mm の円柱形であり、せん断は長軸方向の変位速度を 0.016 mm/sec とする定変位方式で行なった。

試料は Fig. 4 のような粒度配合をもつものを用い、その粒子比重は 2.66 である。そして試験前の供試体の間げき比は 0.49、相対密度は 87% である。

さてこの試験では、側圧と軸圧を振動的に変化せしめた場合に、合成された振動力の方向が、Fig. 5 に矢印で示すように、 θ すなわちモビライズされた内部摩擦角 φ'_{m0} に一致するように調節されるわけである。そのためにせん断過程中的側圧 σ_3 と主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ならびにそれらの圧力振巾 σ_{3d} 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)a$ の関係

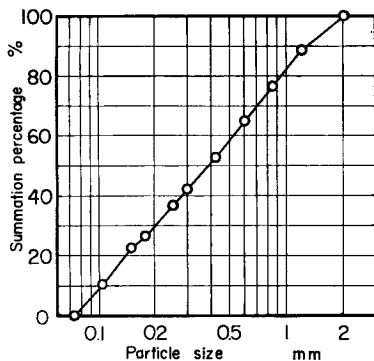


Fig. 4 Grain size distribution curve

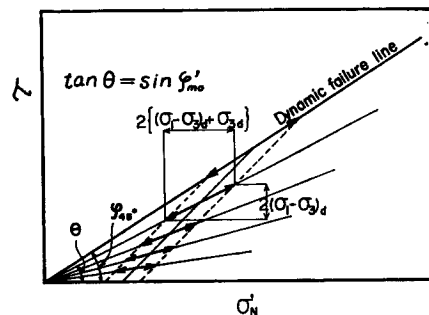


Fig. 5 Direction and magnitude of resultant oscillating stress during shear

を Fig. 1 (c) と Fig. 5 を参照して求めると、幾何学的に

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

が容易に導かれる。したがっていま $\sigma_3 = \text{const.}$, $\sigma_{3d} = \text{const.}$ とすれば、加えた主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の変化量に応じて $(\sigma_1 - \sigma_3)a$ をきめることができる。

4. 実験結果と考察

Fig. 5 で説明したように、この実験では、合成された振動力の方向が常にモビライズされている内部摩擦角 φ'_{m0} に等しくなるように載荷されるので、振動時でも有効主応力比 σ'_1/σ'_3 は変動せずに滑らかな曲線にそって増減を示すことになる。ゆえに応力～ひずみ曲線は、Fig. 6 のように $\sigma'_1/\sigma'_3 \sim \epsilon_1$ 関係にて描くと好都合であるが、いずれも排水せん断試験であるから σ'_1/σ'_3 の最大値は主応力差の最大値に一致している。

さて Fig. 6 (a), (b), (c) は側圧 σ_3 を 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm² の3種類に変えたときの試験結果であって、静的・動的試験の応力～ひずみおよび体積変化～ひずみ曲線を示している。そしてこれらの図より、各側圧に共通していえることは、主応力比の最大値 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ は側圧の振巾 σ_{3d} が大きくなるほど低下すること、および体積変化には静的・動的試験間に規則的に顕著な差が見出せないことである。体積ひずみ $\Delta V/V$ はせん断初期のひずみ ϵ_1 が小さい部分で僅かに収縮（マイナス符号）するが、それ以後は膨張（プラス符号）に転じているので、従来しばしば慣用されてきた見方によれば限界間げき比以下の密な状態でせん断したことになる。しかし側圧一定の三軸排水せん断試験では、平均有効主応力 σ'_m がせん断の進行とともに増加するので、限界間げき比を議論する場合には、ダイレイタンス効果を区別して解析する必要がある。

また透水係数が大きい砂を排水しうる状態にしておいても、急速に載荷が行なわれると完全な排水状態とはならず、過剰間げき水圧が残留する可能性のあることが Seed らによって注目されている。今回の実験によれば、Fig. 6 にみられたように動態時の体積変化に規則的な差がなかったため、別途に残留間げき水圧の有無を調べてみたが、間げき水圧計の指示はほとんどゼロであった。

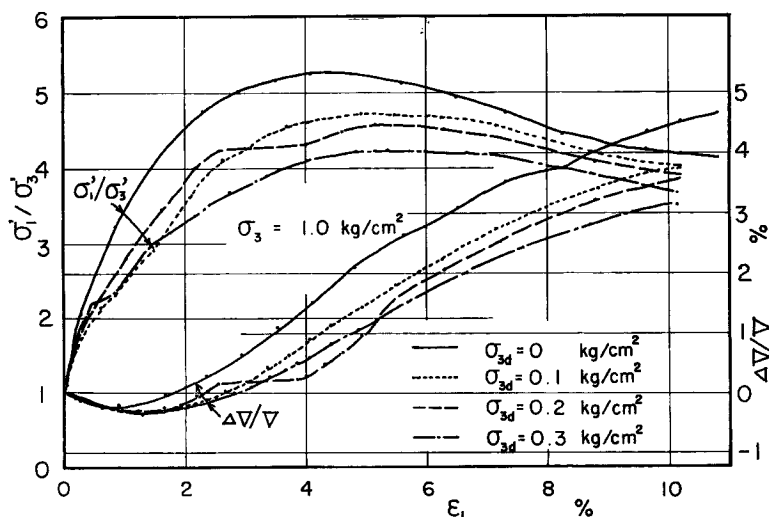
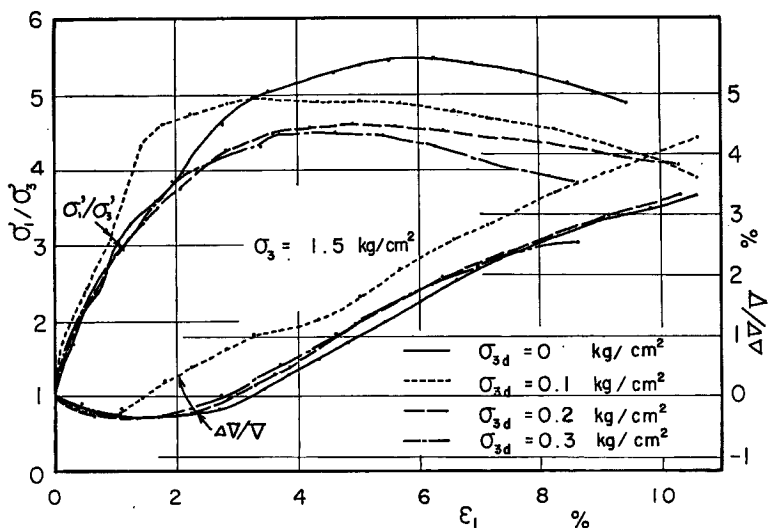
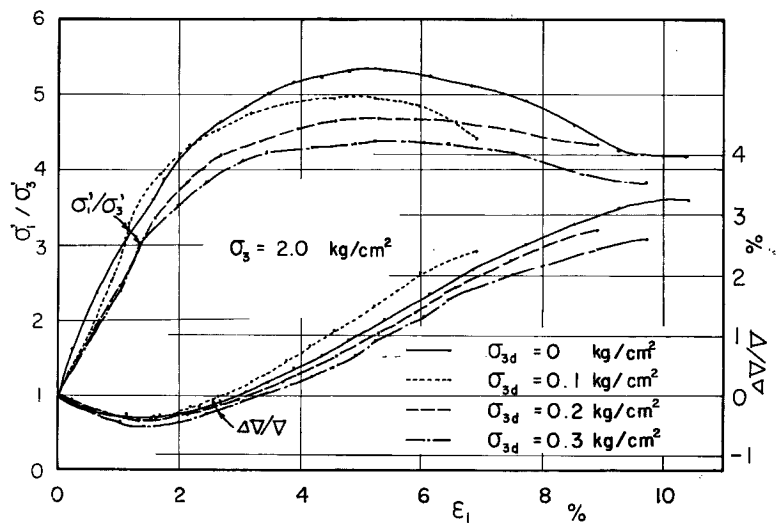


Fig. 6 (a) Stress-strain and volume change-strain curves for $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

Fig. 6 (b) Stress-strain and volume change-strain curves for $\sigma_3=1.5 \text{ kg/cm}^2$ Fig. 6 (c) Stress-strain and volume change-strain curves for $\sigma_3=2.0 \text{ kg/cm}^2$

排水せん断試験に対するいま一つの問題は表面エネルギー補正に関するものである。補正法は種々提案されているが、ここでは適用の簡単な Bishop 法を用いることにした。応力～ひずみ曲線のピーク値のみでなく全域に対してこの方法を適用してエネルギー補正した結果の一例を Fig. 7 に示す。この図によればエネルギー補正をしてもなお $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 値は σ_{3d} の増加とともに低下する傾向のあることがわかる。ゆえに定性的な傾向は不変であるので以下の解析ではエネルギー補正をしない値を用いることにする。

Fig. 8 は $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 値に対する Mohr 応力円の包絡線を示したもので、側圧振巾 σ_{3d} をパラメーターにとれば $\tau \sim \sigma'_N$ 座標の原点を通る直線群がえられること、およびそれらの直線の傾斜、すなわち内部摩

擦角 φ' は σ_{3d} の増加とともに小さくなることが明らかである。Fig. 9 は $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ または φ' を σ_{3d} に対してプロットしたもので、測定値の範囲ならびに平均値で示してある。この例によれば、静態時の $\varphi'_s = 43.2^\circ$ であったものが、動態時の $\sigma_{3d} = 0.3 \text{ kg/cm}^2$ に対して $\varphi'_d = 38.9^\circ$ と約 4 度の減少をみている。

この報文では、動態時の強度低下を三軸側圧 σ_{3d} に対して調べたが、Fig. 5 にも説明したように、合成した振動応力の大きさはせん断の進行とともに増加している。したがって σ_{3d} は便宜上のパラメーターであることを断っておかねばならない。また従来行なわれた研究の多くは、土の強度低下を振動加速度と結びつけて取り扱っていたが、この実験では変位振巾のもっとも大きい供試体上端においても振動加速度は $10^{-3}g$ のオーダーで極めて小さい値であった。

なお振動数による影響を検討するために、振動数を 0.5~12 cps の範囲で同種の試験を繰り返し行なってみたが、 φ' が σ_{3d} の増加とともに減少する傾向は定性的には変らなかった。

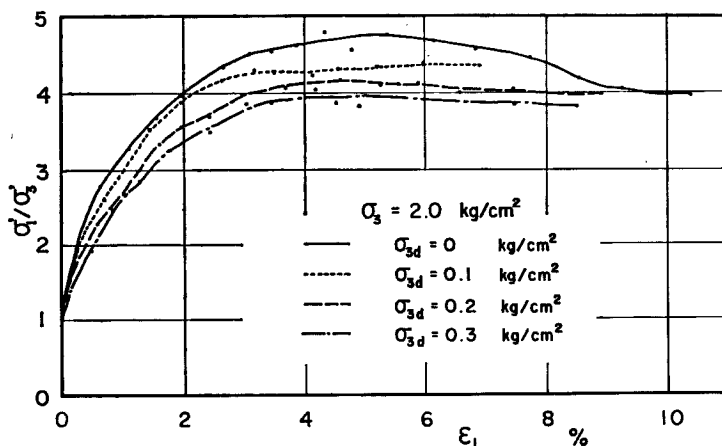


Fig. 7 Examples of stress-strain curves corrected by the surface energy concept

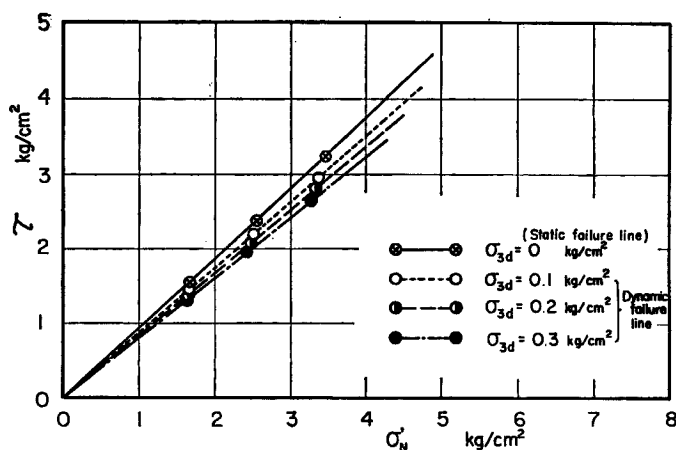


Fig. 8 Mohr's failure envelopes for static and dynamic tests

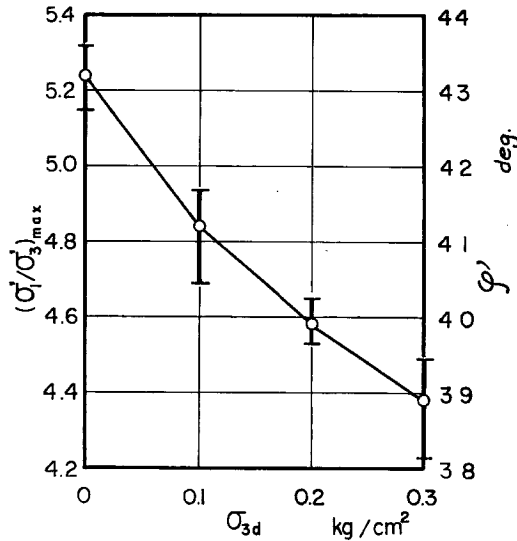


Fig. 9 Relationship between $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ or ϕ' and amplitude of confining pressure σ_{3d}

5. む す び

新しいタイプの振動三軸圧縮試験機を用いて飽和砂の排水試験を行ない、振動時の砂の強度低下に関する実験結果を報告すると共に、若干の考察を加えた。

従来行なわれていたように、三軸試験の軸圧と側圧をそれぞれ単独に振動的に変化させる方法では、すべり面に作用する振動応力を考えたとき、 $\tau_a/\sigma'_{N,a}$ (ただし τ_a ; すべり面上の動的せん断応力、 $\sigma'_{N,a}$; 動的垂直応力) の値がその時の内部摩擦角 $\tan \phi'$ に等しくはならなかった。すなわち死荷重と活荷重の例えで説明すると、せん断面に作用する死荷重による合力の方向と、活荷重による合力の方向とが異なっていたことになる。このような場合には、破壊点の決定がかなりあいまいにならざるをえない。この研究では、せん断中に側圧の振巾 σ_{3a} は一定に保ち、軸圧の振巾 $(\sigma_1 - \sigma_3)_a$ を調節することによって $\tau_a/\sigma'_{N,a} = \tan \phi'$ の条件を常に満足せしめた。ゆえに破壊を生じていないせん断過程では ϕ'_{mo} をモビライズされた内部摩擦角とすれば $\tau_a/\sigma'_{N,a} = \tan \phi'_{mo}$ が成立していることになる。試験結果の解析法としては、有効主応力比 (σ_1'/σ_3') とひずみの関係を調べ、 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 値を動的強度とすればよい。この試験は排水せん断試験であるから、 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ は主応力差の最大値に一致する。

動的強度に影響を与える因子は多くが考えられるが、ここでは側圧振巾 σ_{3a} に注目してみた。その結果、 σ_{3a} の増加とともに内部摩擦角の低下がみられ、例えば $\sigma_{3a} = 0.3 \text{ kg/cm}^2$ に対して ϕ' は静態時の 43.2° から 38.9° と約4度の減少を示した。

終りにではあるが、卒業研究として実験と資料整理に協力された京都大学工学部学生小林裕司君に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編, “土質工学ハンドブック”, 289 (1965), 技報堂
- 2) 大崎順彦, “土の動的性質とその応用”, 29 (1965), 土質工学会
- 3) 竹下周成・二馬健次郎, “振動時の乾燥砂の強さについて”, 日本地震工学シンポジウム講演集, 67 (1966)

- 4) Seed H. B., and R. Lundgren, "Investigation of the Effect of Transient Loading on the Strength and Deformation Characteristics of Saturated Sands", Proc. A. S. T. M. 54, 1288 (1954)

付録：振動三軸試験装置

Fig. 10 はこの研究に用いた装置の概略図である。振動圧力発生装置⑦とベローズ部分を除けば、通常の静的な三軸試験装置である。おもな部分を図中の番号にしたがって説明すると、①軸圧測定用ロードセル、②軸変位測定用ダイヤルゲージ、③軸方向の変位振巾を測定する差動トランス型変位計、④、⑤側圧および間げき水圧測定用圧力計、⑥各ピックアップからとりだした圧力を増巾する動ひずみ計で、これらをビジュグラフに記録する。振動試験では図に示すようにロードセルと軸圧加圧用ロッドの間にベローズを設け、⑦からの振動圧力がこのベローズと、三軸セル内の液圧にプラスされる。

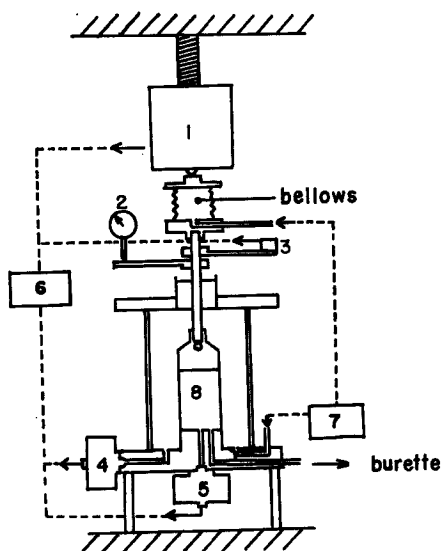


Fig. 10 Oscillatory loading triaxial apparatus

振動圧力発生装置⑦は2つの平行した偏心カム円筒（軸圧振動用と側圧振動用）とその上に接したベローズからなる。カムの偏心量に応じてベローズ内に満たされた水を圧縮し、これが起振源となる。振動数および振動圧力振巾はそれぞれ、カム円筒の回転数およびカムの偏心量によって、連続的に変動させることができる。