

繰返し荷重を受ける砂中の間げき水圧について

行 友 浩

PORE WATER PRESSURE IN SOIL UNDER REPEATED LOADING CONDITION

By *Hiroshi YUKITOMO*

Synopsis

In this report I describe an experimental study of behaviour of pore water pressure for triaxial test on saturated sand under simulated earthquake loading conditions. As this stress condition is one of "constant mean extreme principal stress", at all stages of repeated loading the mean of the major and minor principal stresses is maintained constant. The rate of increasing pore water pressure, therefore, depend on only applied shearing stress. Consequently we can estimate from the rate of increasing pore water pressure about the relation between applied shearing stresses and their number of repetitions to be induced liquefaction.

1. ま え が き

砂の透水性は粘性土にくらべてはるかに大きく、間げき内の水の移動はきわめて容易であるために、飽和砂に対する静的試験において、間げき水圧の残留を問題にすることはほとんどない。しかしながら砂であってもサイクル数の大きい繰返し荷重、振動荷重あるいは衝撃荷重などのように載荷速度の比較的早い荷重を受ける場合には砂中の間げき水の流出はその変形速度に追従せず、過剰間げき水圧を発生する¹⁾。もし非排水状態の比較的ゆるい砂にそのような動的な力が作用すると、体積は収縮する方向に変化しようとし、それにとまって正の間げき水圧を発生する。そのために砂のもつ有効応力が減少し、砂の構造を破壊するとともに変形を増大する。このような現象は砂の流動化とよばれ、たとえば1960年のチリー地震あるいは1964年の新潟地震などにおける構造物基礎の陥没や地盤内からの砂のふきあげなど、地震時の砂地盤における大きな被害の一つとして注目されるべきものである。

近年このような複雑な現象に対する基礎的研究が数多く進められているが、中でも H. B. Seed の研究グループにおける実験的研究は繰返し荷重のもとでの砂あるいは間げき水圧の挙動あるいは流動化現象の機構に関する実験的解明の一端を担っているものである。

本報はこれら H. B. Seed の研究とも関連して、振動三軸試験機を用いて非排水状態の飽和砂に繰返し荷重を与え、その間げき水圧の挙動を実験的に観察し、作用応力あるいは作用応力回数と過剰間げき水圧との関係を調べるとともに、それらの理論的考察に対する実験的裏付けを行なうものである。

2. 研究の目的

飽和した砂において、ある応力のもとでの単位体積当りの土構造の変形量は、単位体積当りの間げき流体の変形量に等しい。しかし水で飽和した砂を排水を許さないでせん断する場合には水の圧縮性が非常に小さいために、体積の変形に抗して間げき水圧を生じる。一般に、微小応力の変化によって発生する間げき水圧

Δu は次式で示されるように等方な応力成分 $\Delta\sigma_m$ とせん断による応力成分 $\Delta\tau$ の和として表わすことができる²⁾。

$$\Delta u = \Delta\sigma_m + \alpha\Delta\tau$$

ただし、 α : せん断にともなうダイラテンシー係数 D と等方応力のもとでの土の圧縮係数 C_s との比 ($=D/C_s$) および $\Delta\sigma_m = 1/2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ 。

地震時に地盤がうける応力は、等方応力よりもむしろせん断応力であり、平均主応力の変化による間げき水圧の発生を無視して考えることができる。そこで飽和砂層に対する地震時の間げき水圧の挙動を調べるためには、せん断応力の変化のみによる間げき水圧の変化を考え、平均主応力が一定の条件、すなわち $\Delta\sigma_m = 0$ のもとで実験することが望ましい。しかしながら静的試験においてさえも $\sigma_m = \text{const.}$ の実験はかなり困難であり、振動試験において、これまでに $\sigma_m = \text{const.}$ の条件で実験された例はない。H. B. Seed らは $\sigma_3 = \text{const.}$ の条件で軸方向圧力のみを周期的に与えて実験し、実験結果の考察において、等方応力成分による間げき水圧の発生量を増減することによって、地震時に地盤がうける応力状態 ($\Delta\sigma_m = 0$) を満足しうものと考えている³⁾。すなわち Fig. 1 はこれまで H. B. Seed らによって行なわれてきた繰返し三軸試験 (A) と本研究における繰返し三軸試験 (B) の応力状態を示したものである。図中、①, ② は繰返しの順番であり、それぞれ (I), (II), (III) の場合に対応している。すなわち各 (A), (B) の試験方法に対する第1回目の作用応力あるいは繰返し応力の状態と第2回目の状態との比較を示すものである。(I), (II) は繰返し応力の方向を両主応力軸 σ_1, σ_3 と土の微小要素を用いて示したもので (III) は (A), (B) 両試験方法におけるモール応力円の違いを示している。これから地震時に地盤内の微小要素に作用する理想的な応力状態を三軸試験によって再現するためには (B) のような応力状態であることが望まれる。本研究においては (B) のような条件を満足するように実験することが主眼であり、そのようにして得られた実験結果を紹介するとともに理論的な考察に対する実験的な裏付けを行なうことを目的としている。

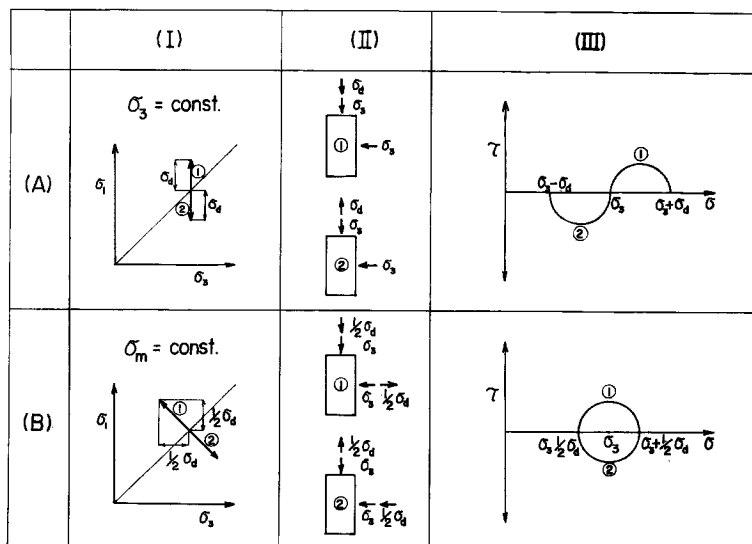


Fig. 1 Stress conditions for triaxial test under simulated earthquake loading conditions.

3. 実験装置、方法および試料

地震時の土の強度や変形に関する力学現象を解明するために数多くの理論的あるいは実験的取扱いがなさ

れているが、その基礎的研究として、しばしば振動三軸試験機が用いられる。振動三軸試験は多くの場合、静的な応力に対して振動圧力を付加する方法がとられるが、実験方法によっては地盤内の微小要素に作用するせん断中の振動応力状態をかなりの範囲にわたってシミュレートすることができる⁴⁾。本研究において用いられた実験装置はこれまで筆者らの振動時の砂の強度、変形挙動に対する研究⁵⁾において用いられたものを一部改良したものであり、軸方向圧力と側圧とを独立にかつ同時に周期的に与えることができることが特徴である。また周期的な圧力波形は正弦波に近いもので、軸方向圧力と側圧との位相差を自由に与えることができるので、本実験において $\sigma_m = \text{const.}$ の条件を満足するために、両振動圧力の位相差を 180° ずらして与えた。すなわち、軸方向圧力が圧縮のとき側圧は引張、軸方向圧力が引張のとき側圧が圧縮になるように与えられるので、試験中の供試体に作用する主応力の方向は繰返したびに逆転する。

装置の改良部は三軸セルの軸圧載荷用ピストンであり、 $\sigma_m = \text{const.}$ の条件を満足するために軸圧載荷用ピストンの径を三軸供試体の径 (35 mm) に等しくし、軸方向圧力が側圧の影響を受けないように考慮した。これは普通の三軸試験において軸方向圧力として主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) を与えるが、本研究では $\sigma_m = 0$ を得るために軸方向圧力と側圧とを互いに独立に与えることのできる方法が必要である。したがって本実験において与えられる軸方向圧力は一つの主応力 σ_1 である。

試料は水で飽和した豊浦の標準砂であり、粒子の比重は 0.264、最大、最小の間げき比はそれぞれ 0.95、0.64 である。Fig. 2 はその粒径加積曲線である。この試料を究ぎ固めることなく、直径 35 mm、高さ 80 mm のゆるい状態の三軸供試体とする。供試体の初期間げき比はほぼ 0.80、従って相対密度は約 50% である。

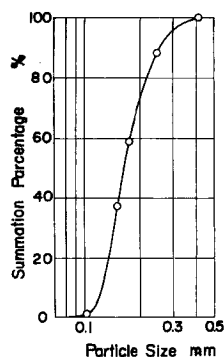


Fig. 2 Grain size distribution curve.

4. 実験結果と考察

Fig. 3 は本実験において記録された間げき水圧 n 、変位 δ 、軸方向圧力 σ_1 、および側圧 σ_3 の一例を示している。一連の実験において繰返し周期は 2 サイクル/sec. 試験前の圧密圧力は $\sigma_1 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の等方圧力である。与えられた繰返し圧力の振巾は Fig. 4 に示されるように、主応力差にしてはほぼ $0.35 \sim 0.45 \text{ kg/cm}^2$ の範囲である。それぞれの圧力振巾を与えたときに供試体内の間げき水圧の上昇によって破壊に至るまでの応力経路を示したものが Fig. 5 である。小さく与えられた数字は繰返しの回数 (順位) を示す。各実験において左図は全応力で表示された繰返しの作用応力状態を表わし、右図はそれを有効応力によって表示したものである。(a) は理論的に考えられる応力経路で、有効応力で表示した場合、繰返し回数を増すごとに間げき水圧は Δu ずつ増加し、モール応力円は破壊線に達する。この点を破壊した回数 N_f と定める。(b) ~ (f) は本実験において得られた Fig. 4 の各試料に対する応力経路である。なお図中の破壊線は筆者らがこれまでに行った乾燥した同じ試料に対する振動三軸試験において得られた静的な破壊線である。Fig. 6 は周期的に変動している間げき水圧の平均値をプロットしたものである。Fig. 7

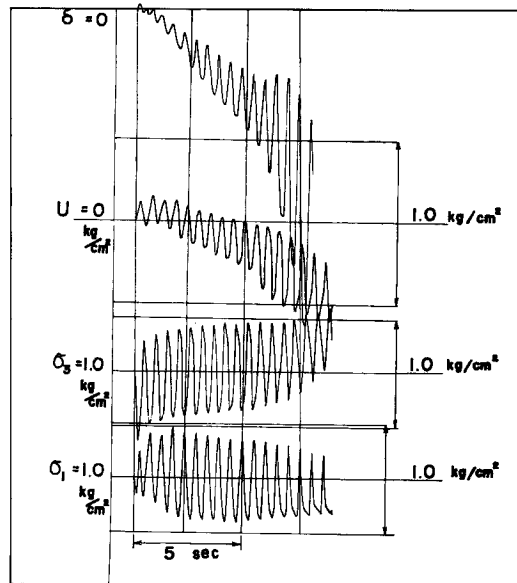


Fig. 3 Example of experimental record under repeated loading condition.

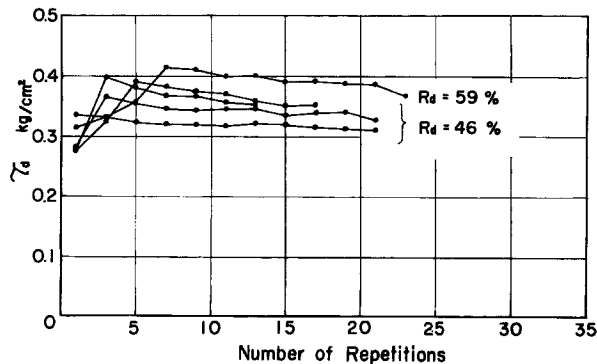


Fig. 4 Amplitude of applied stress during repeated triaxial test.

はそれぞれの試料に対する変位振巾を示している。また **Figs. 6** および **7** における矢印はモール応力円が破壊線に達したときの繰返し回数 N_f を示しているが、両図における間げき水圧あるいは変位振巾が急激に増加する点の繰返し回数は N_f よりも数回後にあらわれており、実際に試験中の供試体の状態を観察しても N_f ではまだ完全な初期の状態を保っているが、 N_f の数回後になってあたかも三軸供試体のゴムスリーブ内が水で満たされているような異常が観察された。すなわち砂の流動化は繰返し作用応力が破壊線に達したときと定めるよりも、その後数回の応力を作用したとき、すなわち間げき水圧が急に上昇した点を定める方が適当であるように思える。**Fig. 8** は破壊時の主応力差振巾とそのときの繰返し回数との関係をプロットしたもので、相対密度 R_d をパラメータにとった。ただし実線はモール円が破壊線に達したときを流動化と定め、その点を連ねたもので、破線は間げき水圧が急激に上昇する点の主応力差振巾と繰返し回数とのプロットを連ねたものである。なお実線も破線も直線ではなく、ある主応力差振巾に漸近する。**Fig. 9** は平均の間げき水圧の場合 Δu_m を与えた軸差応力 τ_d によって無次元化し、繰返し回数に対してプロットしたものであるが、繰返し回数に関係なくほぼ一定であることがわかる。すなわち作用応力を繰返し与えるた

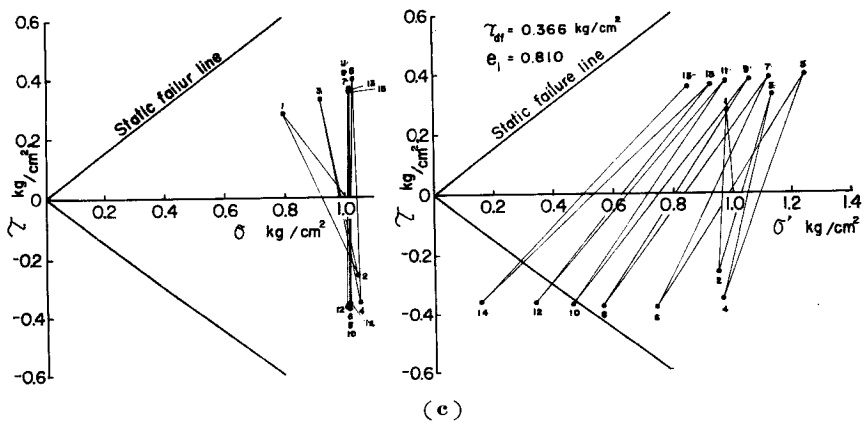
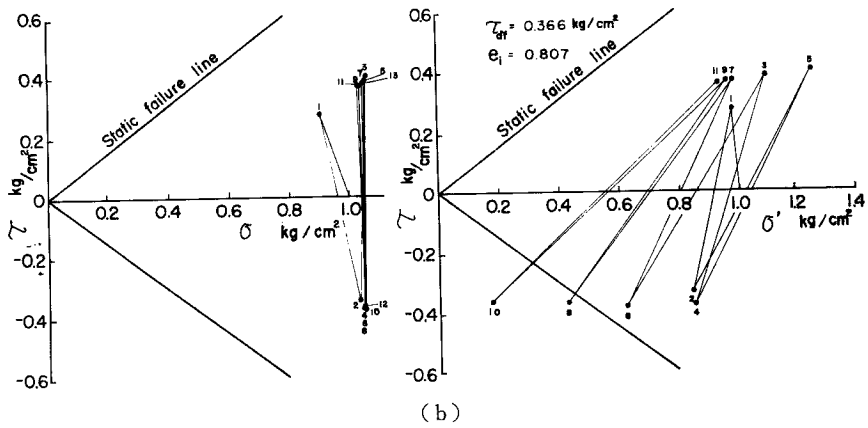
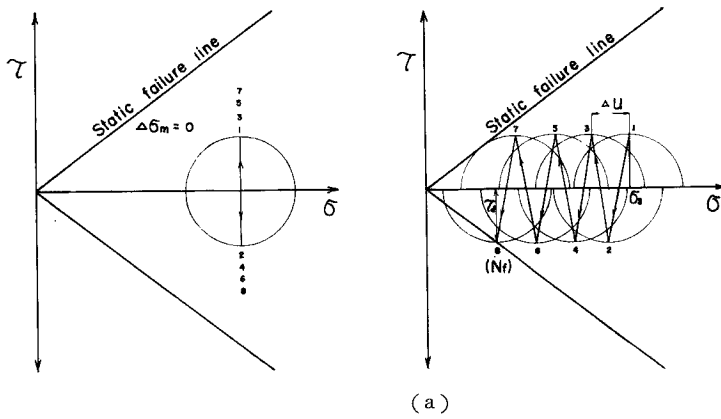


Fig. 5 Examples of stress path under repeated loading condition.

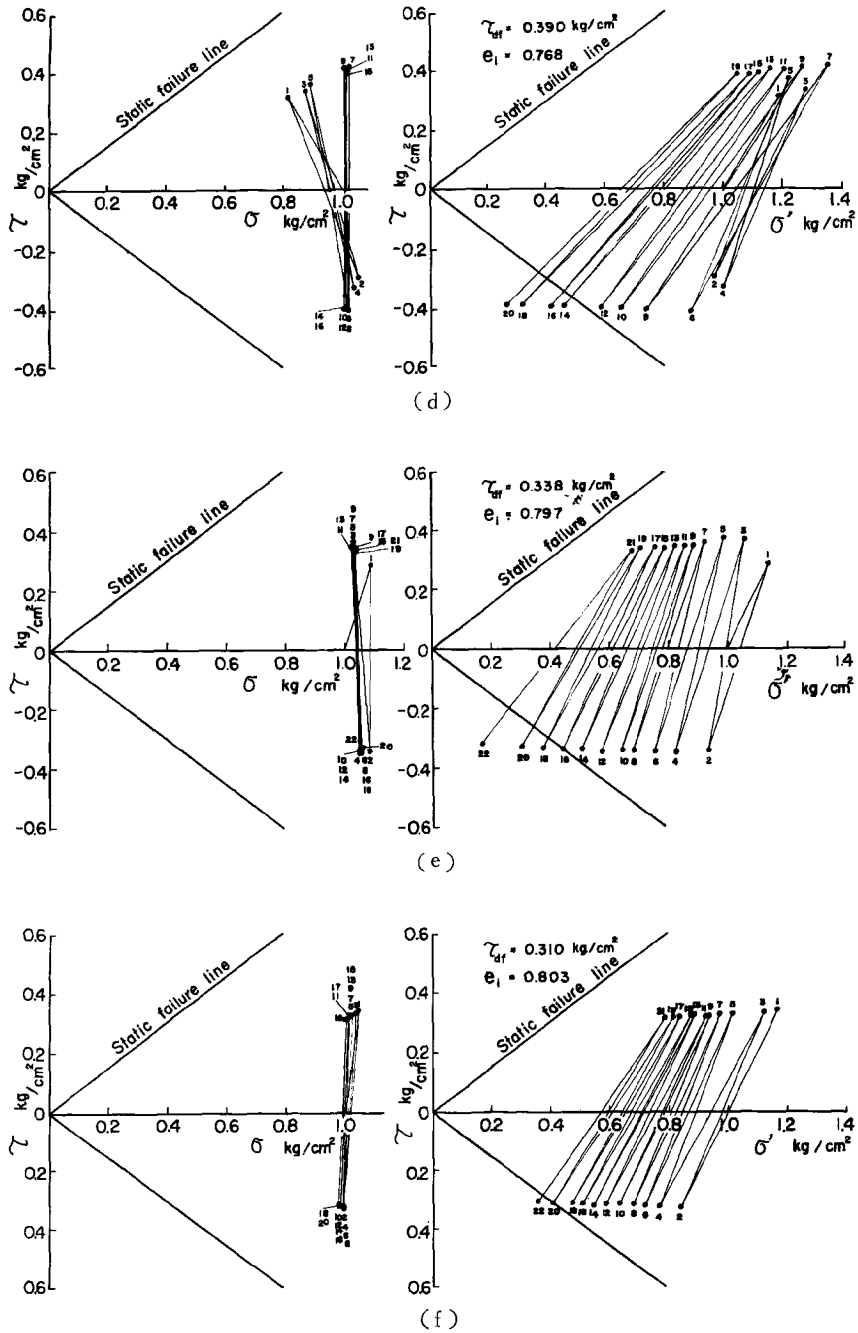


Fig. 5 Examples of stress path under repeated loading condition.

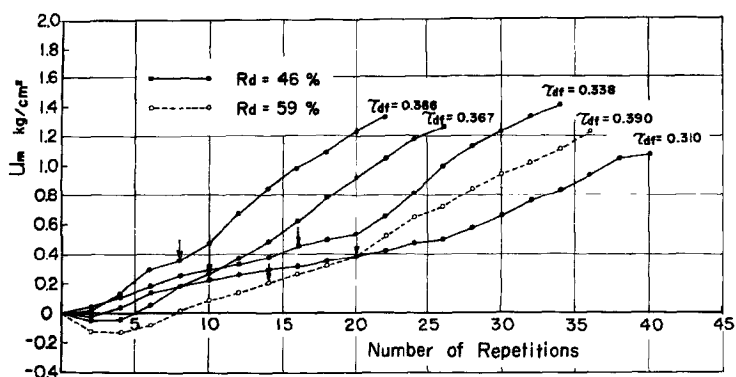


Fig. 6 Relationship between mean value of pore water pressure and number of repetitions.

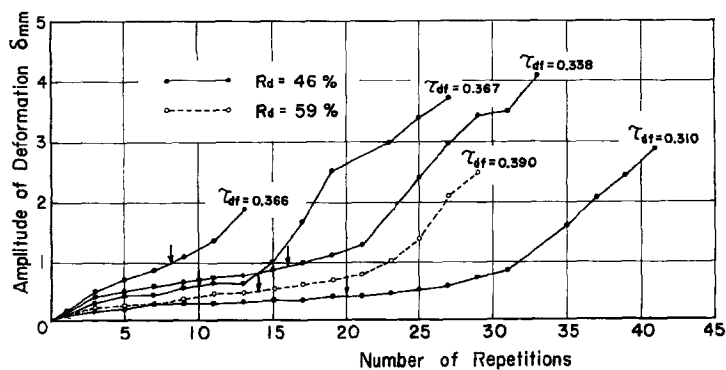


Fig. 7 Relationship between amplitude of deformation and number of repetitions.

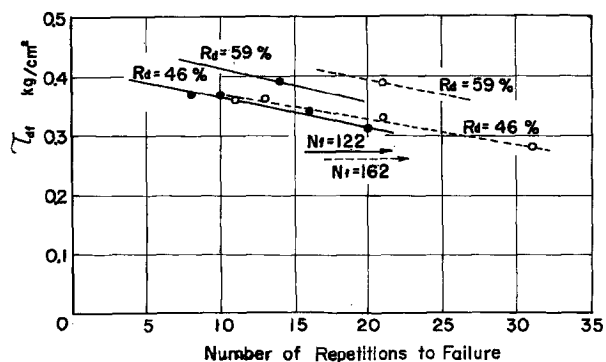


Fig. 8 Number of repetitions to failure versus applied amplitude of shearing stress.

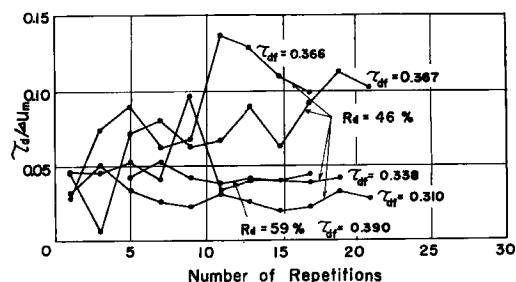


Fig. 9 Rate of increasing pore water pressure versus number of repetitions.

びに発生する間げき水圧はほぼ一定であることを実験によって示したもので、初期の応力状態と一回の作用応力によって発生する間げき水圧の量から流動化を生じるまでの繰返し回数を推定することができる。

5. む す び

これまで実験操作の困難さのために繰返しあるいは振動三軸試験において平均主応力一定の試験は行なわれなかったが、本研究では平均主応力一定 ($\Delta\sigma_m=0$) の条件を満足する繰返し三軸試験を行なうことができた。したがって地盤内微小要素が地震時にうける応力状態をシミュレートした状態で間げき水圧の挙動を観察し、その結果を報告するとともに、流動化の過程に対する理論的考察が実験事実と一致することを説明した。なお実験結果によると、流動化を生じる繰返し応力は供試体の相対密度によってもかわるが、例えば相対密度 $R_d=50\%$ において $\tau_d=0.22 \text{ kg/cm}^2$ 以上であり、同じ相対密度において $\tau_d=0.27 \text{ kg/cm}^2$ で破壊に至る繰返し回数は122回、 $\tau_d=0.37 \text{ kg/cm}^2$ ではほぼ8~10回である。今回の実験では繰返しのサイクル数は2サイクル/sec、圧密圧力 1.0 kg/cm^2 のみに限られ、実験数も少なかったので十分なデータは得られなかったが、今後の研究において、 $\Delta u_m/\tau_d$ と N との関係あるいは $\Delta u_m/\tau_d$ と τ_d/σ_v との関係を十分に調べるつもりである。

なお終りにではあるが、この研究に際し、終始御指導いただいた柴田徹教授に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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, 1954, p. 1288.
- 2) Scott Ronald F.: Principles of Soil Mechanics, Addison-Wesley Publishing Company, INC.
- 3) Seed, H. B. and L. Lee Kenneth: Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading, Proc. A. S. C. E., Vol. 92, SM6, Nov. 1966, pp. 105~134.
- 4) 柴田徹・行友浩: 振動時における飽和砂の強度特性, 京都大学防災研究所年報, 第12号B, 昭43. 3, pp. 89~96.
- 5) 柴田徹・行友浩: 砂の振動三軸試験について, 土木学会第24回年次学術講演集, 第3部, 昭44. 9, pp. 133~136.