

振動による飽和砂の液化に対する載荷重の影響について

山口大学工学部 正員 大原資生

学生員 鈴木直孝

1. 緒言 飽和したゆるい砂層が振動によって液化するという現象は最近では新潟地震、アラスカ地震の際に大規模に生じ、大きな被害をひきおこしたことは衆知のとこである。

この現象については H.B. Seed らの研究をはじめとして多くの研究がなされているが、その実験的研究の方法としては Seed さんが行った動的単純せん断試験による方法や動的三軸試験による方法が主として用いられている。その理由はこれらの試験機を用いることによって供試体に作用する有効応力や動的せん断力および供試体のせん断変位等を簡単に、また確実に規制して実験を行なうことができるからである。この方法と別に振動台上の砂箱の中に飽和砂をうめて振動を与えて液化を生じさせる方法があるが、この方法は砂層自体を一つの微小な砂地盤のモデルと考え、振動による砂層の深さ方向の応答や間隙水圧分布等を把握できるという利点があるかわりに、前者の方法にくらべて砂層の有効応力の規制が困難であるという欠点がある。わかれこれこの点について飽和砂層の表面に空気圧による上載荷重を加えるという特殊な方法を用いて砂層の有効応力を規制できるようにして振動台による砂層の液化現象に関する実験を行なった。その方法および結果についてのべる。

2. 試料 この実験では平均粒径の異なる二種類の砂が用いられた。これらの諸常数および粒度分布は表-1、図-1 に示す。この二種類の砂を砂箱につめて飽和砂を作るには次のような方法をとった。まずあらかじめ計算した砂の間隙比量に相当する水を入れた砂箱に、バケットに入れた約 250 kg の砂をフレーンにより砂箱上約 30 cm の高さに吊上げ、下の方を用いて静かに水中に落としこんで。

このようにしてつめられた砂の間隙比は細砂で 0.86、粗砂で 0.82 であつた。

表-1 実験砂の諸常数

	細砂(豊浦砂)	粗砂(新宮砂)
平均粒径 D_{50}	0.23 mm	0.85 mm
均等係数	1.44	1.35
最大間隙比	1.06	0.89
最小間隙比	0.68	0.56
内部摩擦角	$42^\circ (e=0.85 \text{ のとき})$	$36^\circ (e=0.82 \text{ のとき})$
透水係数	$1.2 \times 10^{-2} \text{ cm/s } (e=0.8)$	$6.9 \times 10^{-2} \text{ cm/s } (e=0.78)$
土粒子の比重	2.63	2.64

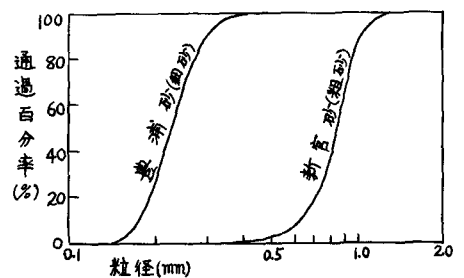


図-1 粒度分布

3. 実験装置 振動台は載荷面積 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ で許容塔載荷重は 500 kg である。振動台の振動数と振幅は振動中に連続的に変化できる。今回の実験では振動数は 4 cps で実験を行ない、所定の加速度は振幅を変化させることによって与える。砂箱は内寸が幅、長さ、深さが $58 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ の鋼板製で、振動方向に直角の一側壁の中央部の深さ 5 cm, 15 cm, 25 cm の位置に間隙水圧測定のための圧力計がとりつけてある。この圧力計はもともと土圧計として使用しているもので、受圧面のたわみ量を電気抵抗線ひずみゲージによって測定する型のもので受圧面の直径は 5 cm である。この受圧面の前に

卓鏡製のフィルターを付けて砂尺の両側水圧のみを測定するようにして使用した。また、砂箱の振動方向に平行な側壁の中心線より深さ15mmの位置に排水孔を設けて、砂尺に載荷重が加わったときに生じる両側水圧を測いた。

この実験では砂箱内に作る砂尺の有効圧を規制するために砂尺の表面に載荷重を加えることを考えた。その方法は次のとおりである。

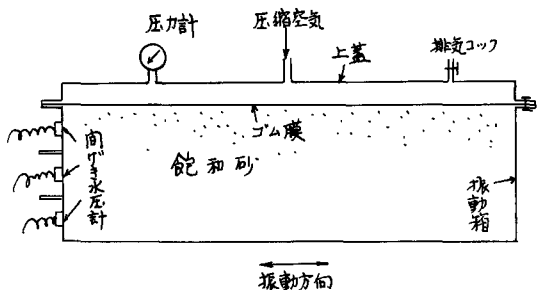


図-2 振動砂箱

砂箱の上縁まで飽和砂が詰められたら、その上に厚さ1mmのやわらかいゴム膜をしき、周囲にゴムパッキンをあて、

上から蓋をかぶせて砂箱とボルトで緊結する。ゴム膜と蓋との間に圧縮空気を送りこむ。その空気圧によって砂尺に載荷重が加えられる。図-2はその概略図である。

振動台の加速度および両側水圧変化はすべてひずみ計を通して電磁オシロに同時に記録される。

4. 実験方法 前述のように、所定の空気圧によって載荷する。このとき、砂尺内には過剰両側水圧が発生する。そこで排水孔を開いてこの過剰両側水圧がなくなるまで、すなわち各深さの両側水圧の値がその深さの静水圧に等しくなるまで砂尺内の両側水を排水する。この排水量は測定された応力による両側水圧の減少量の計算に用いられた。

圧密が完了し所定の有効圧が載荷された後に振動台が駆動された。そのときの加速度の与え方は次の2通りとし、各載荷重ごとに実験が行われた。

- (1). 砂尺に与える加速度を一定の増加速度(この実験では0.057 g/s)で増加していき、砂尺が変化した時点で加速度の増加をやめ、その後はそのまゝの加速度で20秒間振動を継続する。
- (2). 砂尺にあらかじめ定めた一定値の加速度の振動を変化がおこるまで継続して加え、変化がおこった後20秒間は振動を継続する。

すなわち(1)の実験は変化を生じる振動加速度と有効圧との関係をしらべるために行われたもので、(2)の実験では(1)の実験によって確定した変化を生じる加速度の80%、60%、40%の加速度の振動を与えた場合に変化をおこすまでに何秒間かかるかという継続時間がしらべられた。

5. 実験結果およびその考察 図3はこの実験のオシログラフの記録の例を示したものである。

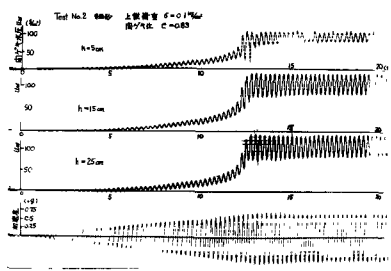


図3(a) 実験記録

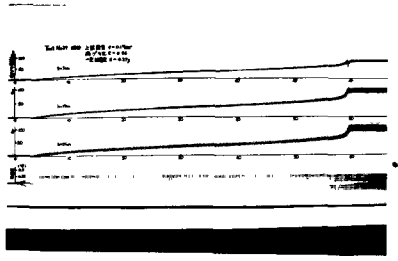


図3(b) 実験記録

図3(a), (b)はそれぞれ前述の(1)および(2)の実験で得られたものである。これらの記録のそれぞれの

記録線は上から順に深さ5, 15, 25cmの深さの間の水圧変化および振動台の加速度を示している。

図3(4)では振動台の加速度の増大にともなって砂層の間の水圧および水圧振幅が増大していくが、ある加速度に達すると間げき水圧の急速な増大がみられる。この際に液化が生じたと判断できる。

図3(5)では振動台の加速度一定の状態で振動を継続しているにもか、かわらず砂層の間の水圧はほぼ一定の速度で上昇を続け、その後、ある時刻に急速な間げき水圧の増大、すなわち液化が生じることが認められる。これらの記録を解析して液化の生じる加速度、液化現象の生じる直前の間げき水圧および液化を生じるに必要な加速度と振動継続時間の関係等と求めた。

5.1 液化の発生条件 ゆるい砂層は振動をうけてせん断変形を生じる際にゲイレンシーの影響を

うけ、間げき減少の傾向を生じ、そのため間げき水圧が上昇する。間げき水圧の上昇は有効圧の減少となり砂層のせん断強度は減少する。そしてついに砂層のせん断強度が地震による砂層の励起せん断力に等しくなったときに液化が生じるのであらうと考える。そこで液化が生じる直前の条件としては次式を考えることができる。

$$\tau_d = (\bar{\sigma}_v - u_w) \tan \phi \quad (1)$$

すなわち、 τ_d は振動によって砂層中に生じるせん断力で、 $\bar{\sigma}_v$ は砂層に加わっている有効圧、 u_w は間げき水圧、 ϕ は砂の内部摩擦角である。

この実験では、 τ_d は振動台の加速度に比例すると考えられるので、図3に示した記録から液化直前の間げき水圧値(液化直前の水圧振幅の中心の示す値) u_w を求め、そのときの震度 a と $(\bar{\sigma}_v - u_w)$ の関係を求めたのが図4である。両者の間にはほぼ直線的な関係があることがわかり、液化の条件として(1)式が成立つことを裏付けているものと考えられる。なお、図4の測定値は砂層の深さ5, 15, 25cmの点の値をすべてプロットしたものである。

三軸によれば細砂、粗砂の内部摩擦角はそれぞれ 42° 、 36° である。粘着力は両砂ともほとんどない。

図4の結果から(1)式を用いて砂箱内の砂層に生じる τ_d と震度 a との関係を求めると

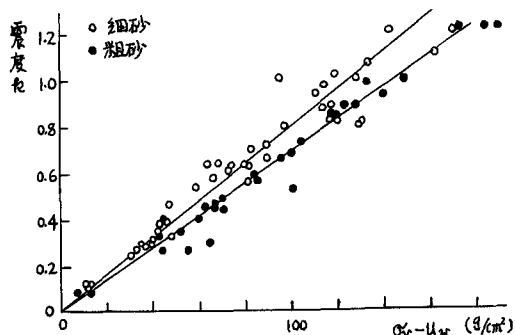


図-4 液化直前の有効圧と震度の関係

細砂
 $\Delta \sigma = 0.3 \text{ kg/cm}^2$
 $\bullet \sigma = 0.2$
 $\circ \sigma = 0.1$

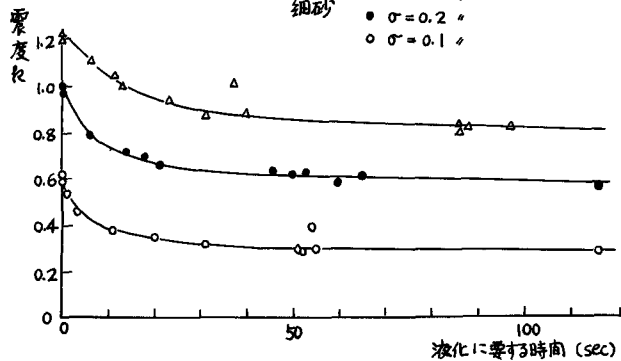


図-5(a) 液化に要する時間と震度の関係(細砂)

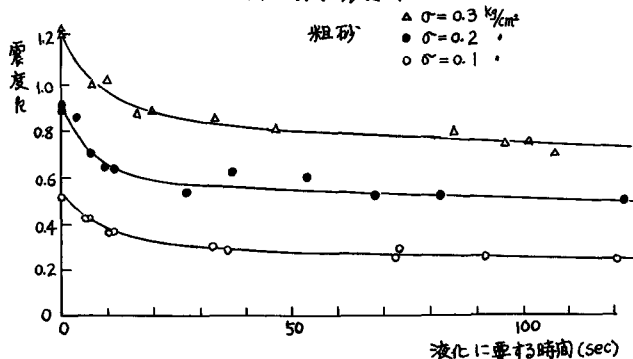


図-5(b) 液化に要する時間と震度の関係(粗砂)

次式とする。

$$\left. \begin{array}{l} \text{細砂: } T_d = 115 k (\text{g/cm}^2) \\ \text{粗砂: } T_d = 106 k (\text{g/cm}^2) \end{array} \right\} (2)$$

5.2 液化の発生に要する振動継続時間

瞬間 次に(2)の実験から得られた載荷重、震度および液化に要する時間の関係を示すと図5のようになる。

図5(a)が細砂、図5(b)が粗砂についての結果である。この結果から砂の液化が(1)砂に作用する有効圧、(載荷重 σ_v 、(2)砂に作用する加速度(震度 k)、あるいは励起せん断力 T_d 、(3)振動の継続時間も 3つの要素に大きく支配されることがわかる。

具体的にいえば飽和砂の液化は有効圧の小さいほど、励起せん断力の大きいほど、振動継続時間の長いほどおこしやすいということになり、この結果はH.B. Seedらの指摘したものと一致する。

図5の結果から図6を作ってみる。縦軸 T_d/σ_v の値を求めるには(2)式の関係を用いる。図6にはいくらかのバラツキはあるが、 σ_v の異なる実験値が一本の線にまぎっており、 T_d/σ_v が液化の発生に関して重要な指標となるということになる。このことは柴田氏らによって指摘されている。図6から液化を生じるに必要な T_d/σ_v の値はとも無限大になるときの値として求め、細砂では0.30、粗砂では0.25とする。この結果は粗砂の方が液化しやすいことを意味する。

5.3 液化に対する間隙比の影響 この実験では砂の間の隙比を大きくかえることが出来なかったが、砂の初期間隙比と液化直前の間隙比水圧との関係を求めると図7のようになる。おおよその傾向としては間隙比の大きい場合が間隙比水圧が小さくおこっており、液化とおこしやすい傾向が見える。このことはゆるい砂では水中単位重量、内部摩擦角が小さいことが原因であらう。

6. 結論 以上の結果から次の結論とする。(1)、地震時の飽和砂の液化には①有効圧 σ_v 、②励起せん断力 T_d 、③振動継続時間も3つの要素が支配的であることが確かめられた。(2)、液化条件は $T_d = (\sigma_v - u_0) \times \tan \phi$ と考えられる。但し u_0 は間隙比水圧、 ϕ は内部摩擦角である。(3)、一定加速度の振動をうけている状態では液化に要する振動継続時間は T_d/σ_v によって決まる。(4)、 T_d/σ_v の値はそれぞれの砂の間隙比や強度特性によって決まるであらう。

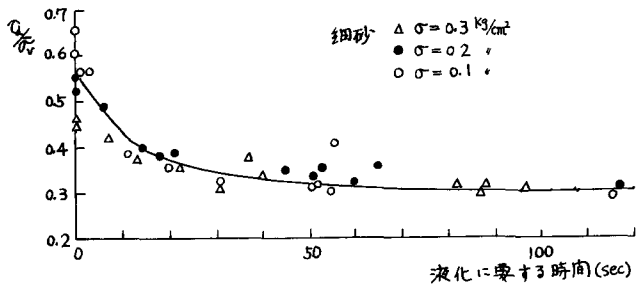


図-6(a) T_d/σ_v と液化に要する時間の関係(細砂)

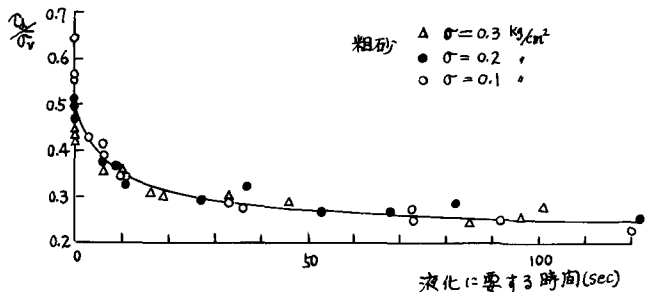


図-6(b) T_d/σ_v と液化に要する時間の関係(粗砂)

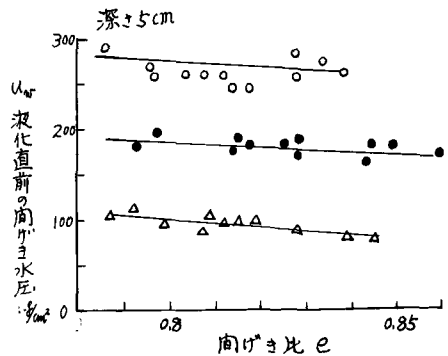


図-7 液化についての間隙比の影響