

山口大学工学部 正員 大泉賢生
○学生員 鈴岡直彦

1. まえがき

振動台を用いた飽和砂層の液状化の実験は、砂層自体を1つの縮小された砂地盤のモデルと考えることができ、振動による砂層の深さ方向の応答を把握することができ液状化の解析には有効である。しかし、三軸試験機のように砂層に対する拘束圧、即ち、砂層の応力状態の規制が困難であるのが欠点であった。筆者らはこの点を改良し、特殊な方法により飽和砂層表面に空気圧による上載荷重を加え、砂層に正弦状の振動を与えることにより、砂層内に誘起される間ゲキ水圧の挙動、及び振動加速度を調べ飽和砂層の液状化現象を解析した。空気圧による上載荷重は0～2 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 程度までかけることができるが今回の実験ではモデル砂層の振動特性を考慮して0～0.3 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ までの載荷重による実験を行った。その結果、振動によって励起されるせん断力 τ と砂層の有効拘束圧 σ_v' の比 $\frac{\tau}{\sigma_v'}$ が液状化の解析に有効な因子になることを確認した。

2. 実験概要

2.1 実験に用いた砂

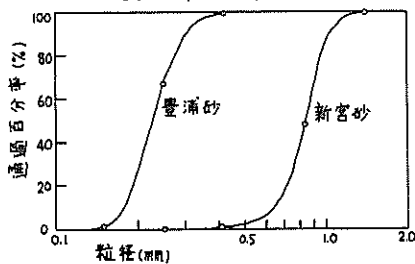
実験に用いた砂は、豊浦標準砂(細砂)と新宮砂(粗砂)の2種類である。これらの砂の諸常数と粒径分布は表-1と図-1に示す。

この2種類の砂を砂箱に詰め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ゲキ量に相当する水を満たした砂箱にバケットに入れた約250 kg の砂をクレーンにより砂箱上約30 cm の高さに吊上げ、そこから水中に静かに落し、できるだけ均一な砂層ができるように詰めた。このようにして詰めた砂の間ゲキ比は、粗砂で0.86、細砂で0.83であった。

表-1. 実験砂の諸常数

	豊浦砂	新宮砂
土粒子比重	2.63	2.64
平均径 D_{50}	0.23 mm	0.85 mm
均等係数	1.44	1.35
最大間ゲキ比	1.06	0.89
最小 "	0.68	0.56
内部マツ角	42° ($e=0.85 \text{ at } \sigma_v=1.2 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{kg}$)	36° ($e=0.82 \text{ at } \sigma_v=6.9 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{kg}$)
透水係数	$1.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ($e=0.80$)	$6.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ($e=0.78$)

図-1 試料の粒径分布



2.2 実験装置と測定器

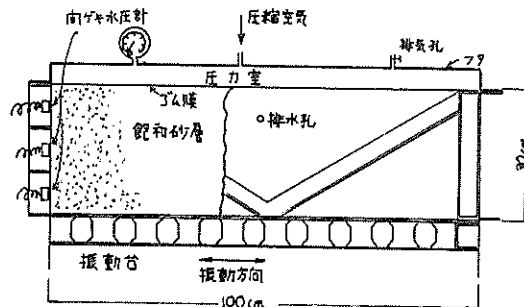
振動台は載荷面積 $1\text{m} \times 1\text{m}$ で許容載荷重量は500 kg である。振動台の振動数と振幅は振動中に連続的に変化できるが、今回の実験では振動数4cps(周期1/4 sec)で実験を行い、所定の加速度は振幅を変化させることによって与えた。

砂箱は内寸法が幅、長さ、深さが58 $\text{cm} \times 100\text{cm} \times 30\text{cm}$ の鋼製のもので、振動方向に直角な一側壁の中

中央部の深さが5cm, 15cm, 25cmの位置に同ゲキ水圧測定のためのpressure cellが取付けられている。また砂箱には載荷に砂層内に発生する過剰水圧を抜くための排水孔が設けられている。砂箱は振動台と一体に運動するようにボルトで繋結されている。

図-2 砂箱及び載荷装置の概略

載荷装置は砂層にいっぱいになり均一になつた飽和砂層にゴム膜(厚さ1mm)を敷きその上に砂箱と同じ面積をもつ鋼製のフタを乗せ、砂箱とフタのフランジをボルトで結合し、ゴム膜とフタの間にコンプレッサーにより圧縮空気を封入し、その空気圧で砂層に拘束圧を与えるものである。図-2に砂箱及び載荷装置の略図を示す。



水圧測定のためのpressure cellには土圧測定のための土圧計を用い、その頭部に真鍮製のフィルターを取付け、水圧のみが測定できるようにした。土圧計は直径が5cmのダイアフラム型のもので容量は1kgである。

振動台の加速度は振動台の振幅計と振動台に取付けた加速度計より測定した。測定量はすべてヒズミ計を通して、電磁オンログラフに連続的に記録される。

2.3 実験方法

2.1で述べたように砂箱に砂を詰め終った後、フタを乗せ空気圧により載荷する。このとき、砂層内には過剰水圧が発生するが、この過剰水圧が砂粒後の静水圧と等しくなるまで砂層内の水を排水する。この圧密過程が完了した後、このとき砂層の同ゲキ比は細砂で0.85、粗砂で0.82 相対密度はそれぞれ57%, 21%であった。砂層には所定の有効拘束圧が与えられる。砂層に与える上載荷重は0.1%, 0.2%, 0.3%とし、また参考のため上載荷重を加えない実験も行、た。所定の有効拘束圧が載荷された後、振動数4 cpsで振動するが、加速度の与え方は次の2通りとした。

- (1) 砂層に0.057g/sec(9:重力加速度)のスピードで漸増加速度を与え、砂層が液化した時点で増加を止めその後一定加速度で振動を20 sec程度続行する方法。
- (2) 砂層にあらかじめ決められた一定値の加速度を与え、液化が起るまで振動を継続し、その後20 sec程度振動を続行する方法。

以上の2通りの実験から拘束圧を与えた飽和砂層の動的挙動を追跡した。

3. 実験結果並びに考察

図-3は粗砂と細砂の加速度を増加させた場合の記録の1例である。加速度を増加させるにしたがって同ゲキ水圧は徐々に増加し、ゆるい砂層が振動によるダイレイタンスの影響を受け体積減少の傾向にあり、同ゲキ水圧の増加となって現れる。加速度が細砂で0.56g、粗砂で0.48g程になると同ゲキ水圧は急激に上昇し、その後はほぼ一定になる。この同ゲキ水圧が急激に上昇する過程で砂層の骨格構

・ 造は振動によって励起されるせん断

力のため破壊され一時的に砂粒子が水中に浮遊した状態になり、その後砂が沈殿する過程となると考えられる。細砂、粗砂とも同じ傾向にあるが細砂の方が間ゲキ水圧上昇時の振幅が小さいのは、砂粒子間の間ゲキ量が粗砂より小さいため砂層内の水の動きが小さいためと思われる。

一定加速度の場合、ほぼ等しい

水圧振幅で直線的に増加し、ある時

間が経過した後間ゲキ水圧が急激に増大し、その後ほぼ一定値を保ち前に述べたと同じ状態になる。

上に述べたことから、加速度によって励起される

砂層中のせん断力 τ と砂の強度 $\tau = (\sigma_v - u_w) \tan \phi$

(σ_v :初期有効拘束圧, $\sigma_v = \sigma + \gamma_{sat} h$, σ :上載荷重,

u_w :間ゲキ水圧) が等しくなったとき砂層は液化され

ると考えられる。しかしながら、現在の所、この

励起せん断力を測定する有効な方法がな

いので、筆者らは間ゲキ水圧の記録から

間ゲキ水圧が急激に上昇する直前の平均

間ゲキ水圧 $\bar{u}_w$ を用いてせん断力 τ を推定し

た。即ち、 $\tau_d = (\sigma_v - \bar{u}_w) \tan \phi$ として求ま

る。ここで、 $\bar{u}_w$ は震度 k により異なるから

実験データより $k \sim (\sigma_v - \bar{u}_w)$ の関係をプ

ロットすると図-4のようになる。 k と $(\sigma_v - \bar{u}_w)$

はほぼ比例し、これより τ_d と k の関係を

実験的に求めると、

粗砂: $\tau_d = 115 \cdot k (\frac{\%}{cm^2})$ $FEI \phi = 42^\circ$

粗砂: $\tau_d = 106 \cdot k (\%)$ $\phi = 36^\circ$

となり、 τ_d は粗砂、粗砂ともほぼ等しい。

次に上載荷重と液化に要する時間との

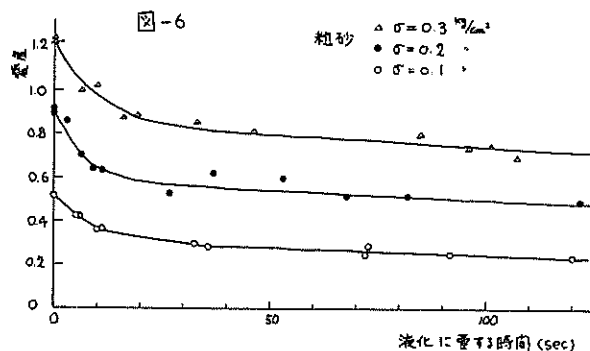
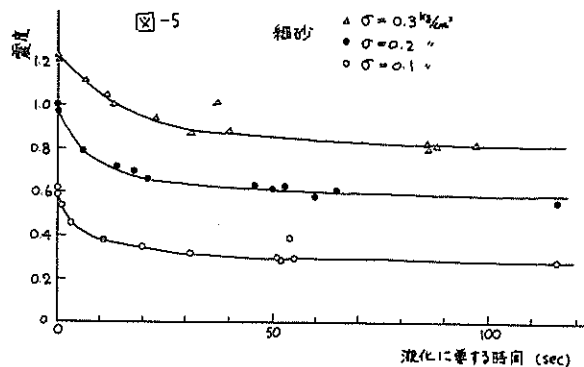
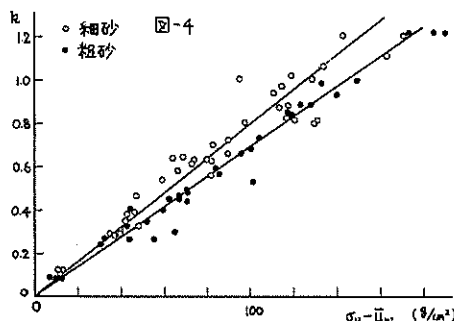
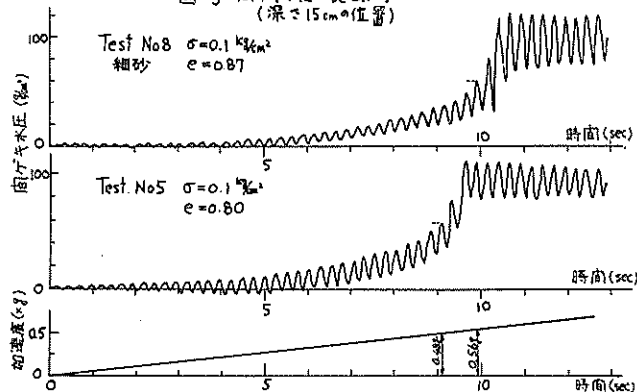
関係をプロットして見ると図-5、図-6がえら

れた。これを見ると砂層の液化化が次の

要素に大きく支配されることがわかった。

(1) 砂層に作用する上載荷重 σ

図-3 間ゲキ水圧の記録例
(深さ15cm位置)



即ち、初期有効拘束圧 σ_v

(2) 砂層に作用する加速度(震度 k)、

即ち、励起せん断力 τ

(3) 振動の継続時間 t

したがって、砂層の液状化は、初期有効拘束圧の大きい程、また、励起せん断力の大きい程、更に振動継続時間の長い程起易いという結果がえられ、これは H.B. Seed の指摘したことに一致している。

更に、励起せん断力 τ と初期有効拘束圧 σ_v との比と時間 t の関係をプロットし図-5、図-6 を重ねると図-7、図-8 のようになり、ほぼ一致する。即ち、砂層の液状化は τ/σ_v によって 1 つの指標をもちうるという実験的結果をえた。

細砂と粗砂について限界の τ/σ_v の値を求めると、ほぼ次のようになる。

細砂 $\tau/\sigma_v = 0.30$

粗砂 $\tau/\sigma_v = 0.25$

4 結論

砂層に拘束圧を与え、応力状態を把握しながら行なった今回の実験から次のことがいえる。

(1) 振動により砂層に与えられる励起せん断力は、ほぼ振動加速度に比例し、細砂、粗砂ともほぼ等しい。

(2) 砂層の液状化には次の 3 要素が支配的要素をもつことが確かめられた。

① 初期有効拘束圧 σ_v 、② 励起せん断力 τ 、③ 振動の継続時間 t

とくに、液化に要する時間は τ/σ_v によって決まり、砂層の液化に対して τ/σ_v が定量的に解析しうる 1 つの指標であることがわかった。

(3) 今回の実験より細砂の方が粗砂より限界の τ/σ_v が大きく、液化されにくいことがわかったが、限界の τ/σ_v が砂層の間隙比や強度特性などにいかに影響されるかを判断するのは今回の実験だけでは困難であり今後の研究が要される。

5 参考文献

Seed, H.B., & Lee, K.L.: Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading, Proc. ASCE Vol. 92, SM6 Nov. 1966

柴田 徹・行反浩: 飽和砂の繰返し載荷による液状化現象の研究, 土木学会論文報告集, NO. 180, 1970-8.

図-7

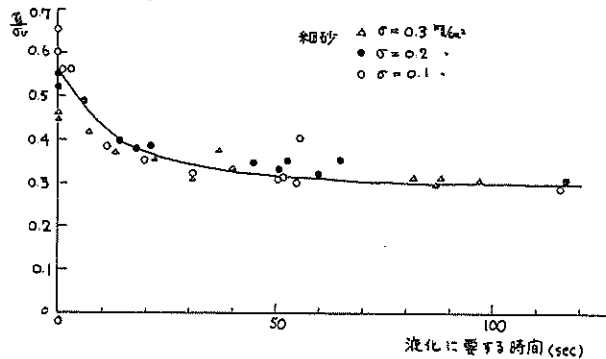


図-8

