

建設省 土木研究所 正員 ○ 沢田健吉
 “ “ “ 古賀泰之
 “ 相武国道工事事務所 “ 熊崎光吉

1. まえがき

地下水面以下にあるゆるい砂質地盤は、地震動により液状化し支持力を失い構造物に種々の被害を与えることがある。支持力の低下に伴って液状化に伴う地盤の沈下は構造物に損傷を与える原因となる。ここでは、振動による砂層の液状化及び沈下現象を連続的にとらえることを目的として大型模型砂層の振動実験を実施したので、その結果を報告する。

2. 実験概要

実験砂層は、千葉県浅間山から採取した山砂 ($D_{60} = 0.370 \text{ mm}$, $U_c = 2.06$, $e_{\max} = 1.02$, $e_{\min} = 0.57$) を、加振方向長さ 8 m 、奥行 2 m 、深さ 5 m の鉄製砂箱内に、層厚約 4 m に詰め、下方から表面まで繰返して水浸させて作った。実験は、このようにほぼ均一な砂層を初期密度を変えて3回、その他に模型物体を埋設したものを3回実施した。加振方法はいずれも水平正弦波加振で、台加速度をほぼ一定(目標値 20 gal)にして共振曲線を求める共振実験と、一定振動数で台加速度を大きくして液状化現象を生起させる液状化実験とを行なった。数段階の液状化実験が終了すると砂箱から水と砂を排出し、再び次の実験のための砂層を築造した。実験時に計測した項目は、台加速度・砂層加速度・間げき水圧・沈下量等であった。

3. 実験結果

図-1に液状化実験の際の加速度、間げき水圧、沈下量の測定結果の1例を示す。この場合、砂層加速度は台加速度が増大するにつれてそれ以上の比率で増加し、一旦ピークに達した後急低下し再び増加するという複雑な性状を示している。これには、砂層の剛性の変化による砂層の振動数応答特性の変化が一因として考えられる。また、過剰間げき水圧がある限界より増加すると有効拘束圧の低下による砂層の變形性の増大が生じその結果として砂層加速度の増大現象が生ずるが、過剰間げき水圧がさらに増加するとその層及びその層より深い部分の層のせん断強度が低下して下方からの振動を上方に伝え難くなり砂層加速度の急低下現象が生ずるというメカニズムも考えられる。次に、過剰間げき水圧の鉛直分布性状と沈下過程を比べて興味深い事は、例えば $0 \sim 40 \text{ sec}$ 間は底面から 1 m の位置における間げき水圧勾配は下向きまで間げき水は下層に流入する傾向にあるにもかかわらず、この間にもかなり沈下が進行している。これは、砂層が完全に飽和してしまつたために過剰間げき水圧の発生により、(間げき中の気泡が圧縮されたためと)考えられる。このことは、加振終了後に砂層表面の水面が数 cm 低下し、その後再びもとの位置まで回復していることが観察されたことから裏付けられるよう。

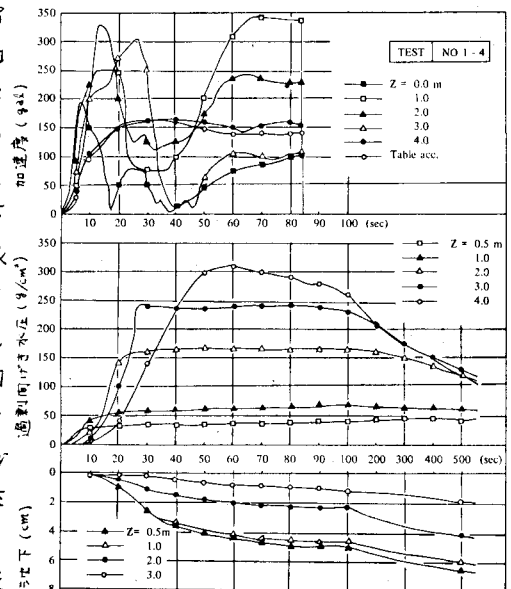


図-1 液状化実験例

4 考 察

上述した砂層の液状化・沈下過程を次のような仮定の下に解析することを試みた。

- (1) 砂層の振動等動を1次元等価ものとする。
- (2) 砂層の圧縮変形は、間げき水の流出と間げき中の空気の圧縮によって生ずる。このとき、空気は間げき水と一緒に流れる。
- (3) 過剰間げき水圧は繰返しせん断により内部的に発生する。
- (4) 間げき水の流れには、平均的な間げき水圧分布に基いたダルシー則が適用される。

以上から、微小時間間隔 Δt 間の砂層内の過剰間げき水圧及び間げき比の変化 Δu , Δe は次式で表わされる。

$$\Delta u = B \cdot f \left(\frac{\tau_d}{\sigma'_{vc}}, e, k_o \right) \cdot \sigma'_{v0} \cdot \frac{\Delta t}{T} + \frac{B}{C} \cdot \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta e = -(1-B)(1+e)C \cdot f \left(\frac{\tau_d}{\sigma'_{vc}}, e, k_o \right) \cdot \sigma'_{v0} \cdot \frac{\Delta t}{T} + B(1+e) \cdot \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \cdot \Delta t \quad (2)$$

ここに、 B ：間げき圧係数、 C ：砂の圧縮係数、 f ：繰返しせん断による間げき水圧発生関数（後述）、 τ_d ：繰返しせん断応力、 σ'_{vc} ：間げき水圧発生関数に用いる有効上載圧、 e ：間げき比、 k_o ：水平静止土圧係数、 σ'_{v0} ：初期有効上載圧、 T ：振動の1周期、 k ：透水係数、 γ_w ：水の単位体積重量、 z ：表面からの深度

f の意味は次のとおりである。飽和・非排水条件の場合に、1サイクル載荷すると、式(1)(2)において、 $B=1$ 、 $k=0$ 、 $\Delta t=T$ を代入して式を得る。

$$\Delta u = f \cdot \sigma'_{v0}, \quad \Delta e = 0 \quad (3)$$

したがって、 $f \cdot \sigma'_{v0}$ は、上のような条件下で1サイクルあたりに発生する過剰間げき水圧を表す。この関係および f の関数形は、これまで報告されているいくつかの非排水繰返しせん断試験等の結果を参考にしたものである。この f の具体的な特性は次のような仮定・方法に基いて求めた。

- (a) 繰返し水平せん断を受ける地盤内の過剰間げき水圧の増分は、繰返しせん断による増分と、側方変位が拘束されていることによる側圧増加による増分との和である¹⁾。この考えに基き次式を得る。

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} = f_1 \left(\frac{3}{1+2k_o} \cdot \frac{\tau_d}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (4) \quad \text{ここに、} f_1 \text{ は等方圧密繰返し三軸試験により求まる。}$$

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} = f_1 \left(\frac{\sigma_d}{2\sigma'_{v0}} \right) \quad (5) \quad \sigma'_{v0} : \text{初期有効側圧}, \sigma_d : \text{繰返し軸圧}$$

- (b) f_1 は通常の液状化実験の整理法である $\sigma_d/2\sigma'_{v0} \sim n_L$ 関係図から平均的な関係を次式により推定する²⁾。

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} = \left(1 - \frac{\sigma_d}{2\sigma'_{v0}} \cdot \frac{1}{\sin \phi_L} \right) / n_L \quad (6) \quad \begin{array}{l} \phi_L : \text{初期液状化時にモビライズされる内部摩擦角} \\ n_L : \text{初期液状化を生ずる載荷回数} \end{array}$$

この $\sigma_d/2\sigma'_{v0} \sim n_L$ 関係として、この実験に用いた砂についての平均的な関係を用い、また、液状化を生ずる応力比が相対密度に比例することを用いて、地盤内での間げき水圧発生関数 f を推定したものが図2である。

- (5) 式(4)に含まれる砂の圧縮係数 C は、飽和砂について非排水繰返しせん断によって過剰間げき水圧が発生した後の排水再圧縮過程から求める（これは必ず圧縮曲線にはほぼ等しい）。

- (6) 過剰間げき水圧発生関数 f によって、過剰間げき水圧が初期液状化までに達するまでは、 $\sigma'_{vc} = \sigma'_{v0}$ 、それ以上では、 $\sigma'_{vc} = \sigma'_v$ （ σ'_v ：その時点の有効上載圧）とする。

- (7) 砂層内のせん断応力は次の方法により算定した。砂層の振動を1次元のモードと仮定し、測定加速度振幅から変位振幅を求め、これからせん断ひずみ分布を求める。台加速度レベルが大きくなると砂層上部の加速度が低下しこの方法ではせん断ひずみは算定し難いが、ここでは強度低下がないものとして台加速度レベルに

応じた標準せん断ひずみ分布を設定する。次に、砂の微小ひずみにおけるせん断弾性係数に対する Richart の実験式²⁾にひずみレベルによる低減効果⁴⁾をとりいれたせん断弾性係数を、上述した標準せん断ひずみ分布に乗じてせん断応力分布を算定する。初期液状化を越前過剰間げき水圧が生じた場合には、このせん断応力を破壊包絡線(内部摩擦角を ϕ_k とする)に接する形で低減させる。

以上のような方法で、実験時の台加速度変化に対して過剰間げき水圧及び沈下量の微小時間ごとの変化を求め、さらに全過程の時間経過を算定した例を図-3に示す。なお、この計算では初期飽和度 $S_{r0}=0.85$ 、 $\phi_k=26^\circ$ 、 $k=0.01 \text{ cm/sec}$ とした。図-1と図-3とを比較すると砂層

下部($Z=3.0, 4.0 \text{ m}$)の過剰間げき水圧の増加が若干遅く算定されるが、全体的な沈下の性状はほぼ一致する。過剰間げき水圧の変化について実験結果と計算結果とが深さによって若干異なる性状を示している原因としてはいろいろ考えられるが、手法上の種々の仮定は別として、砂層のせん断ひずみの推定上の誤差や前線部の移動による締固めの影響等も一因として挙げられる。さらに、他の実験例についてこれまでに得られた計算沈下量と実験沈下量とを比較したものが図-4である。この結果から見ると、種々の誤差要因が相殺している可能性もあるが、両者はかなりよく一致するといえる。

5. あとがき

大型模型砂層の移動実験結果について、いくつかの仮定の下に沈下解析を行ったところ、これまでのいくつかの計算例については、現時点では満足すべき結果を得た。この手法を現地の砂地盤に適用する場合、この実験では直接・間接的に求めることのできた砂層の密度及びせん断応力の推定を合理的に行うことが重要なことである。また、この手法の前提としたいくつかの仮定の検討と、用いた力学定数値の普遍性の検討が今後の大きな課題である。最後に、本実験を共同研究として行なった科学技術庁国立防災科学技術センター耐震実験室、建設省関東技術事務所及び土木研究所土質研究室の方々の御協力に感謝いたします。

(参考文献) 1) Ishihara, K. and Li, S.: Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test, Soils & Foundations, Vol. 12, No. 2, 1972, 2) 柴田信久: 飽和砂の液状化現象, 第16回土質工学シンポジウム, 1971, 3) Richart, F.E., & others: Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Inc., 1970, 4) Hardin, B.O. and Drnevich, V. P.: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, ASCE, SM7, 1972

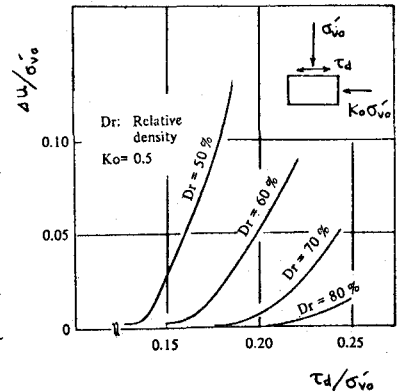


図-2 過剰間げき水圧発生特性

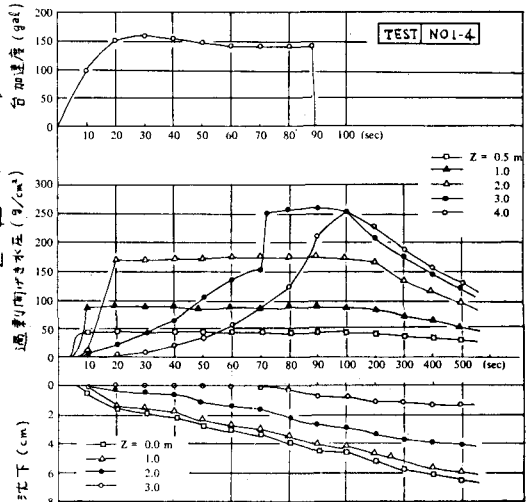


図-3 過剰間げき水圧・沈下計算例

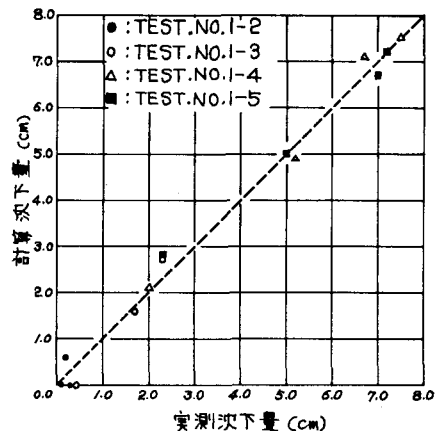


図-4 実験値と計算値の比較