振動を受ける飽和砂の挙動

(Behavior of Saturated Sand under Vibration)

小 川 正 二* (Shoji Ogawa)
佐 々 木 康 二** (Koji Sasaki)
柴 山 孝 幸*** (Takayuki Shibayama)

キーワード：液状化／間ゲキ圧／支持力／振動／砂
／沈下
IGC： D7/E8

1. ま え が き

地震のような動的外力をうける飽和砂の挙動は砂の密度（間ゲキ比，相対密度）・粒径分布，地下水位の深さ，地質条件，動的外力の状態（地震の強さ，継続時間），土中の初期応力状態などによって異なり，これらの各要因の影響を知るために種々の調査，研究が行なわれている。

特に，室内実験としては

- (i) 飽和砂供試体の各種セン断試験
- (ii) 飽和砂そうの振動実験

が行なわれている。いうまでもなく，前者は土のセン断強さや液状化の発生基準などを定量的にとらえるという利点を持っている。また，後者では主として，砂の動き，砂中に生じる間ゲキ水圧の分布やその時間的な変化を知ることができる。この実験は実際地盤との相似性や土中の応力分布の測定という点に難点を有しているために，動的強さなどを定量的に求めるというよりは動的挙動の定性的な把握ということに目的がおかれている。しかし，Ohara の研究¹⁾のように，砂そうの振動実験から液状化の発生基準を定量的に求めようとする試みもなされている。

いずれにしても，飽和砂の液状化の発生機構などを知るためには前記の二種類の実験により定性的・定量的な研究を行なう必要がある。

また，最近液状化の発生機構の解明の他に，液状化した砂が地中構造物にどのような影響をおよぼすかという問題が新たにとりあげられつつある。

このようなことを考えると，液状化した砂の挙動を含めて振動をうけているときの砂の挙動をさらに究明する必要がある，砂中に構造物を埋設して，構造物に作用する力に関して研究するのが望ましいが，本文では，その前段階として砂のみが振動をうけたときの挙動について述べる。

水平振動をうけている飽和砂中に発生する間ゲキ水圧や砂の挙動については，大原²⁾，陶浪³⁾，尾島・古賀⁴⁾，Yoshimi⁵⁾，Florine & Ivanov⁶⁾，Maslov⁷⁾，土田⁸⁾などの研究があるが，本文では，水平振動あるいは鉛直振動をうける飽和砂の挙動，砂中の間ゲキ水圧，鉛直応力とそれらの関係などについて述べている。

2. 実 験 方 法

実験に用いた水そうは透明なアクリル板で作られており，その大きさは鉛直振動実験では，30×30×50 cm（幅×奥行×高さ）であり，水平振動実験では，90×40×50 cm である。実験装置の概略は 図-1 に示すとおりである。

振動加速度は振動台に取り付けた加速度計で測定し，間ゲキ水圧は受圧面の前面にストレーナーをつけた小型圧力計を砂中に埋設して測定した。

振動中の砂の挙動を知るためには，水は通すが砂粒子を通さない細長い鋼線をつけた直径 3 cm の金網の円板とやはり鋼線をつけたおもりを砂中に埋設した（図-2）。なお，鋼線と砂の摩擦をさけるために，鋼線の周囲はアルミニウム管でシールドした。

また，金網の単位面積当たりの重量は金網に発泡スチロールをつけて，砂が完全液状化状態になったときの懸濁液の単位重量にほぼ等しくした。このことによって，金網は砂の移動に対応して移動しているものとみなすことができる。

さらに，鉛直振動実験においては，砂中の任意の深さに小型土圧計を埋設して，振動中の鉛直応力の変化を測定した。

実験に用いた砂の物理的性質は 表-1 に示すとおりで

* 新潟大学工学部土木工学科 助教授（長岡市学校町1の2）

** ジェオテクニカル・コンサルタンツ

*** (株)大林組

・この論文に対するディスカッションは，昭和51年7月1日までに投稿下さい。

あり、その粒径加積曲線は 図-3 に示すとおりである。
水そうにこれらの試料をてん充するにあたっては、できるかぎり間ゲキ比が大きく、また、完全飽和状態になるようにするために、水そうに約半分位水を入れておき、あらかじめ十分に湿めさせた試料を水中でかくはんしながら投入して自然に沈降タイ積させた。

なお、鉛直振動実験では、下部にゆるくタイ積した層がある場合の液状化発生を知るために、上・中・下層の間ゲキ比を変化させた。

試料の厚さは 40 cm とし、水圧計は受圧面を水平方向に向けて埋設し、土圧計は受圧面を上向きにして埋設した。

金網やおもりの移動量は鋼線の先端の動きを連続写真撮影して測定した。

3. 振動時の砂の動き

セン断試験機によって飽和した砂供試体に繰返し応力を載荷する液状化実験によると、間ゲキ水圧がある大きくなるか、セン断応力の繰返し回数が増加するなど、ある条件に達しなければ、供試体の変位は増大することはない。また、この種の実験は非排水条件で行なっているために、砂中の水の流れはまったくない。

本実験の場合には、砂層表面まで完全に浸水しており、上載圧力がないので、砂層表面付近では、有効応力

図-2 砂中に埋設した金網とおもり

表-1 試料の物理的性質

試料	最大粒径(mm)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	e_{min}	e_{max}	比重
新潟砂	1.2	0.18	0.39	0.59	1.01	2.75
川砂 1	5.0	0.20	0.60	0.65	0.97	2.70
川砂 2	1.2	0.28	0.47	0.60	0.90	2.65

図-3 実験に用いた砂の粒径加積曲線

が非常に小さく、小さなセン断応力が作用しても容易に砂の変形が生じることになる。したがって、地中のある深さにおける土要素の挙動を知ることを目的とする場合には、Yoshimi⁵⁾ の行なったような実験方法が適しているといえる。しかし、本研究の目的が振動時の砂の挙動を知ることであるので、砂層表面に圧力を加えずに実験を行なっている。この実験では、液状化や砂の挙動への間ゲキ水の上昇流の影響を含むことになるし、鉛直振動を与えた場合には、上下方向に働く慣性力によって生じる砂層の圧縮・膨張の影響も含んでいることになる。したがって、振動時の砂の挙動を知るためには、定性的ではあるが振動実験も有力な手がかりを与えるものといえる。

飽和砂の振動実験では、後述の間ゲキ水圧や鉛直応力の変化からみるとまだ液状化していないと思われるときでも砂層の表面は沈下している。その後、液状化して懸濁状態になり、砂粒子は沈降して砂層は安定化へと進んでゆく。このときに、砂層の挙動は深さによって異なるものと思われるので、図-2 に示ような金網を砂中に埋設して、ある深さごとの砂層の鉛直方向の変位量を測定

した。

金網の変位量が砂の容積変化に対応しているものとすると、任意の深さにある砂層の間ゲキ率が時間間隔 (dt) に dn だけ変化するとすれば近似的に次式が成り立つ。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dL_t}{dt} \cdot \frac{1}{1+e_0} \cdot \frac{1}{L_0} \cdot \left(1 + \frac{dL_t}{L_t}\right) \quad (1)$$

ここに、各記号は次のようである。

L_t : 深さ D_t と D_{t+1} の間の砂層の任意の時間における砂層の厚さ (mm)

L_0 : L_t の振動をうける以前の値 (mm)

dL_t : 時間間隔 dt における L_t の変化量 (L_t が減少するときを正とする) (mm)

e_0 : L_t 層の初期間ゲキ比

この dn/dt は Maslov⁷⁾ がアースダムの振動時の安定性を解析するのに用いたものと同じ意味を持っている。したがって、 $dn/dt > 0$ のときには、間ゲキ率は減少して砂層は圧縮され、 $dn/dt < 0$ のときには、間ゲキ率は増大して、砂層は膨張していることになる。

図-4, 5 は鉛直振動をうけているときの川砂 2 の dn/dt と振動時間 (t) との関係を 2 種類の加速度 (α) について示したものであり、図-6 は水平振動をうけているときの新潟砂の dn/dt と振動時間との関係を示している。同じような傾向が川砂 1 についてもみられた。

振動時の砂の挙動を検討するのには、砂中の各深さににおけるセン断応力と対応させるのが望ましいが、その値を直接測定することは難しいので、ここでは、振動台で測定した加速度との関係で述べる。

一般に、加速度の小さいときには、 dn/dt は深さに関係なく常に正であり、その値は表面に近いほど大きい。すなわち、砂層は圧縮されるのみで、その量は表面ほど大きい。しかし、ある程度密になると、その加速度ではもは

図-4 加速度の小さい場合の dn/dt の時間変化 (鉛直振動)

図-5 加速度の大きい場合の dn/dt の時間変化 (鉛直振動)

図-6 水平振動をうけたときの dn/dt の時間変化

や砂層は圧縮されない。なお、この場合には、砂の液状化は確認されていない。

一方、加速度の大きいときには、深い部分では、 dn/dt は正で、この部分の砂層は圧縮されているが、表面近くでは、振動の初期には dn/dt は負になり、その後、正になって、その値が次第に小さくなっている。すなわち、浅いところでは、砂層は振動の初期に膨張していることになる。これは振動の開始と同時に、深いところの砂層が急激に圧縮されることとそれに応じて間ゲキ水の上昇速度が大になり、動水傾度が臨界動水傾度 (i_c)

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2)$$

になって、砂はクイック・サンド状態 (完全液状化状態) になり、それ以上の動水傾度になろうとすると砂粒子は浮き上げられて砂層は膨張するためと考えられる。特に、上層部では、間ゲキ水の上昇速度が大きいために、膨張しやすい。

このように下層が圧縮され、上層が膨張するときには、その境界付近に水だけの層がみられる。いわゆる Maslov⁷⁾ によっていわれているグラウンド・ブレイクであ

図-7 グランド・ブレイクの発生状況

る。

グラント・ブレイクは水平振動、鉛直振動いずれの実験の場合にも生じるが、特に、水平振動をうけるときにはグラント・ブレイクが生じると、その上部と下部では、別々の振動を生じ、しかも、その形は図-7のように、中央部で深く、両端で浅い、上に凹となっている。このようなグラント・ブレイクの発生は間ゲキ水の上昇速度（逆にいえば、砂層の圧縮速度）と水そうの壁面の拘束の影響をうけるためと思われる。実際地盤においても、新潟地区のように、比較的しまっている砂丘の間に軟弱なチュウ積層が存在する場合には、液状化が生じると、軟弱な層中にグラント・ブレイクが生じ、上部層と下部層の振動の状態が異なったものになることが予想される。したがって、このような砂層中にクイが打設されていると、クイに働く外力は上部と下部とでは異なる方向に作用することが考えられる。このことは、液状化した砂の中にあるクイの挙動を調べた鹿籠ら⁹⁾の実験からも想像されることである。

また、実験時には、振動方向に直角な側壁面では、壁面に沿って噴砂・噴水がみられたが、振動方向では、壁面に沿った噴砂・噴水はみられず、壁面より幾分か離れた位置より中心部までの範囲で噴砂・噴水が生じている。後者の現象は振動方向の壁面の変位が生じないので、砂の変形も壁面部とそれ以外のところで異なっているためと考えられる。このことは畠山ら¹⁰⁾が堅い基盤に囲まれた軟弱な地盤の表面の変位や横波の伝播は一様でなく、堅い基盤の傾斜面と軟弱地盤の地表面の交点よりかなり離れた点で極大値を生じると述べていることから剛な壁面の存在の影響によるものであると考えられる。

4. 振動時に砂層内に発生する間ゲキ水圧

振動時に飽和砂層内に発生する間ゲキ水圧を模式的に示すと図-8 のようになり、1サイクル中の最大間ゲキ水圧 (u_d) は

$$u_d = u_{dv} + u_{ds}$$

となる。

u_{dv} は振動によって生じるセン断応力の変動によって生じるものと考えられ、 u_{ds} は砂層の圧縮、それによつて間ゲキ水の上昇によって生じる間ゲキ水圧と土要素

図-8 振動中の間ゲキ水圧の変化の模式図

がセン断応力を周期的にうけるために蓄積される間ゲキ水圧の和であると考えられる。また、鉛直振動をうける場合には、振動時の拘束応力の変化によつても u_{dv} は変化する。

図-9, 10 は鉛直振動、水平振動をうける時の間ゲキ水圧の時間的変化を示すものである。いずれの場合にも、 u_{ds} は振動時間とともに増大し、液状化の発生している場合には、ある振動時間を経ると、一定となり、その後次第に減少する。液状化した層の間ゲキ水圧のこのような変化は Yoshimi⁵⁾ や尾島⁴⁾ の実験でも確かめられている。

振動時の1サイクル中の間ゲキ水圧の変化を詳細に調べると、鉛直振動を受ける場合には、土要素に働く応力の変化は主として拘束圧力の変化であるために、 u_{dv} は

図-9 間ゲキ水圧 (u_{dv} , u_{ds}) の時間変化 (鉛直振動) 図-10 間ゲキ水圧 (u_{ds}) の時間変化 (水平振動)

図-11 砂の変形と砂中の間ゲキ水圧

振動加速度の大きさに対応している。一方、水平振動をうける場合には、変形の大きさは異なるが、砂層の任意の深さにおける振動方向の壁面部と中心部の砂は図-11のような変形を生じるものと考えられる。すなわち、壁面部では水平方向の圧縮・引張りが生じる。このときの u_{dv} は加速度の変化に応じて変化する。これに対し中心部の砂は交番せん断応力をうけた変形となる。したがって、この場合の u_{dv} の波形は振動加速度の周期の2倍の周期を有するものとなる。壁面部と中心部の間では、二つの形の変形が合わさったような u_{dv} の波形を示すことになる。

図-12 は振動方向の壁面より 15 cm 離れた位置で測定した間ゲキ水圧の変化を模式的に示してあるが、 u_{ds} の小さなときには、上記のような間ゲキ水圧の変化がみられる。しかし、壁面近くでも液状化状態に達する寸前には、振動加速度の周期の2倍の周期で間ゲキ水圧が変動し、その後、完全液状化状態になると、再び振動周期に対応して変動する。このような完全液状化に達するまでの間ゲキ水圧の変化は三軸試験機で飽和した砂供試体に交番荷重を載荷したときに、供試体中に発生する間ゲキ水

図-12 壁面より 15 cm の点における間ゲキ水圧の変化 (水平振動)

図-13 間ゲキ水圧 (u_d) の鉛直分布 (水平振動) 図-14 間ゲキ水圧 (u_d) の鉛直分布 (鉛直振動)

圧の変化と類似しており、砂その振動実験でもダイレイタンシーに基因する間ゲキ水圧の変化の生じることを示している。

図-13 は砂層が水平振動をうけたときの u_d の鉛直分布を示したものである。図-10 において、 u_d が一定となったときの値は砂の水中重量を r_{sub} とすると、図-12 の点線で示した $u_{dt} = r_{sub} \cdot D_t$ (D_t は表面からの深さ) にほぼ等しくなる。一方、鉛直振動をうけるときの全間ゲキ水圧 u_d の鉛直分布は図-14 のようになる。図中に示した点線は飽和砂の単位重量を r_t 、振動加速度を α 、重力の加速度を g 、水の単位重量を r_w としたときに、

$$\left\{ r_t \left(1 + \frac{\alpha}{g} \right) - r_w \right\} D = \left(r_{sub} + r_t \cdot \frac{\alpha}{g} \right) D$$

で表わされる間ゲキ水圧であり、実験による u_d がこの線上あるいはその上にある範囲では完全液状化状態にあることを示している。

u_d が図-12, 13 において点線より上にあるのは液状化層内にある間ゲキ水圧計が考えている点より沈下しているか、間ゲキ水の上昇流による水圧の増加があるためと思われる。

5. 砂中に埋設したおもりの振動時の沈下

地震時に地中構造物が沈下したり、浮上したりすることは過去の被害調査に多く報告されている¹¹⁾。これは振動による地盤の支持力の低下あるいは砂地盤の液状化のために生じることである。

振動時の土のせん断抵抗は Mogami & Kubo¹²⁾ の研究によると、振動をうける乾燥砂では、加速度が 200～400 gal になるとそのせん断抵抗力が急激に低下することが示されている。また、Barkan¹³⁾ は鉛直振動をうけている飽和砂中に鋼球を埋設して、その沈下量から砂の粘性抵抗を求め、振動時の地盤の性質の変化に関する研究を行なっている。

著者らも、振動時の砂の挙動を知るために、砂中に鋼

製のおもりを埋設してその沈下の様子を観測した。

図-15 は深さ 5, 15, 25, 35 cm に埋設した図-2 に示したような重さ 13.2 gr (接地圧 $P=7.0 \text{ gr/cm}^2$) のおもりの沈下 (S)—時間 (t) 曲線の一例を示すものである。

図-16 は水平振動をうけているときのおもりの沈下—時間曲線であり、深さ 10 cm に重さ 10.7, 19.0, 25.4, 33.8 gr (接地圧 $P=5.7, 10.1, 13.5, 17.9 \text{ gr/cm}^2$) のおもりを埋設したときの新潟砂と川砂 1 に関するものである。

これらの図から明らかなように、表層付近のおもりはほぼ振動を加えると同時に振動時間に比例して沈下し、その沈下量はおもりの重さに対応している。しかし、深層部でのおもりの沈下量は非常に小さく、この付近での砂の支持力の低下は少ないものといえる。また、ある時間に達すると、おもりは急激に沈下量を増すが、これはおもりがグランド・ブレイク層に入ったためと考えられる。

液状化した層の粘性抵抗を知るために、おもりを同体積の球と仮定し、おもりの沈下量と時間との関係がストークスの法則に従っているものと仮定して、振動時の砂の動粘性係数を求めた一例を示すと表-2 のようになる。この表から、砂層が完全液状化状態になったときには、200～350 ポアーズの動粘性係数を有する液体と同じ程度の抵抗を示すことになり、これは水のみの動粘性係数よりはかなり大きい。

図-17 は水平振動をうける砂の挙動への振動方向の壁面の影響を知るために、壁面から異なる距離で深さ 10

図-15 おもりの沈下量 (S) と振動時間の関係 (鉛直振動)

図-16 おもりの沈下量 (S) と振動時間の関係 (鉛直振動)

表-2 液状化状態にある砂の動粘性係数

鉛直振動の場合 (川砂 2)			水平振動の場合 (新潟砂)		
加速度 (g)	間ゲキ比	動粘性係数 (ポアーズ)	加速度 (g)	間ゲキ比	動粘性係数 (ポアーズ)
0.74	0.85	3.5×10^2	0.27	0.90	2.1×10^2
0.60	0.85	6.7×10^2	0.25	0.90	3.3×10^2
0.45	0.85	4.9×10^2	0.25	0.90	1.7×10^2
0.44	0.85	3.6×10^2	0.21	0.90	3.3×10^2

図-17 おもりの沈下への壁面の影響

cm に埋設した同一重さのおもりの最終沈下量を示すもので、水そうの中央部の沈下量が大きく、液状化層は壁面付近より中央部の方が深層まで達していることがわかる。この形は 3. で述べたグラウンド・ブレイクの形と類似しており、液状化層の深さは周囲に堅い地盤が存在するときには、その境界部からの距離によって異なることが考えられる。また、グラウンド・ブレイクが生じたときの砂層の振動形状と液状化層の動粘性係数を考えると、液状化層を貫通して設けられたクイのような構造物への液状化層の影響としては砂層を水のように抵抗の非常に小さいものとしては考えることはできず、かなり大きな抵抗を有し、しかも、液状化していない層と異なる振動をするので、鹿籠ら⁹⁾の実験にみられるように構造物にはかなり大きな応力の発生することが考えられる。

6. 振動時の鉛直応力

水平振動実験では、土要素に作用する外力は水平方向のせん断応力のみであるから鉛直応力は変化しないが、鉛直振動実験では、振動加速度を α とすると、鉛直応力は $\sigma_d = \gamma_t \cdot D \cdot (\alpha/g)$ だけ変化することになる。実測によるとほぼこの関係が成り立って、振動による鉛直応力は深さに応じて変化し、 u_d の鉛直分布の傾向とは異なっている。これは u_d が砂層の圧縮・膨張や間ゲキ水の上昇流の影響をうけるのに対し、 σ_d は考えている深さより上にある飽和砂の重量のみの影響をうけているためである。振動時の砂層の支持力の変化は有効鉛直応力の変化に対応することになるので、振動による鉛直応力の変化を検討してみる。

図-18 間ゲキ水圧 (u_d) と全有効鉛直応力 ($\bar{\sigma}_v$) の時間変化 (鉛直振動)

図-19 全有効鉛直応力 ($\bar{\sigma}_v$) とおもりの沈下速度の時間変化 (鉛直振動)

振動時の動的な有効鉛直応力 ($\bar{\sigma}_d$) は

$$\bar{\sigma}_d = \sigma_d - u_d$$

であり、振動前の静的な有効鉛直応力 ($\bar{\sigma}_s$) は鉛直応力を σ_s 、静的間ゲキ水圧を u_s とすると

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_s &= \sigma_s - u_s \\ &= (\gamma_t - \gamma_w) D = \gamma_{sub} \cdot D \end{aligned}$$

となるから、全有効鉛直応力 ($\bar{\sigma}_v$) は両者の和となる。

$$\bar{\sigma}_v = \bar{\sigma}_d + \bar{\sigma}_s$$

図-18 は u_d , $\bar{\sigma}_v$ の時間的な変化を示しており、 u_d が時間的に一定の値を示す範囲では $\bar{\sigma}_v$ もほぼゼロとなり、完全液状化状態にあることが明白にされている。

支持力の変化をおもりの沈下と有効鉛直応力の変化から知るために、任意の深さに埋設したおもりが時間とともに沈下したとき、その位置に対応する $\bar{\sigma}_v$ を内そう法で求めて、 $\bar{\sigma}_v$ およびおもりの沈下速度 (ds/dt) と振動時間との関係を描くと、図-19 のようになり、両者の関係はよく対応している。すなわち、間ゲキ水圧の上昇のために鉛直有効応力が低下すると砂の支持力も低下しておもりの沈下速度は大きくなり、鉛直有効応力が回復して増大すると砂の支持力も回復して、おもりの沈下速度は減少してゼロに近づいている。

7. 下部にゆるい砂層があるときの挙動

下部にゆるい層のある砂層に鉛直振動を与えたときの間ゲキ水圧、有効鉛直応力の時間的な変化は 図-20, 21 のようになる。振動前の各層の間ゲキ比は 図-20 に併記してある。図-20 には、ほぼ同じ大きさの加速度をうけている均一な間ゲキ比での実験による u_d を点線で示しており、下部にゆるい砂層があるとその部分の間ゲキ水圧は均一層の場合よりかなり高いことがわかる。

有効鉛直応力の変化をみると、このように下部にゆるい砂層があると、かなり深いところまで、完全液状化に近い状態になることが明らかである。また、その時間的

図-20 深さによって間ゲキ比の異なるときの
間ゲキ水圧の時間変化 (鉛直振動)

図-21 深さによって間ゲキ比の異なるときの
全有効鉛直応力の時間変化 (鉛直振動)

な変化を詳細にみれば、下部および中間部にゆるい層があると、その部分が最初に液状化し、液状化層が次第に上部に広がってゆくことがわかる。したがって、実際地盤においても中間部にゆるい砂層があるときには、この部分で最初に液状化が生じ、それが表層部に移動していくといえる。

8. む す び

以上に述べた実験および考察の結果をまとめると次のようになる。

(1) 水平振動実験、鉛直振動実験いずれの場合にも、振動の初期に砂層は圧縮され、砂中に間ゲキ水圧が発生する。この間ゲキ水圧が逸散するため間ゲキ水の上昇流が生じ、上部の砂層が膨張し、砂中にはグラント・ブレイクの発生することがある。この場合には、グラント・ブレイクの発生した上部と下部の砂が別の振動をしていることが観測された。

(2) 振動時の間ゲキ水圧 (u_d) は

$$u_d = u_{dv} + u_{ds}$$

で表わされ、砂層が液状化すると u_{dv} , u_{ds} ともほぼ一定値となる。また、初期液状化と考えられる状態になると、三軸試験などの室内セン断試験にみられるように

u_{dv} にへこみがみられる。

(3) 鉛直振動を受けているときの地中の鉛直応力は $\tau_i \cdot (\alpha/g) D$ だけ増加する。このときの有効鉛直応力を求めると、その時間的な変化は砂の沈下や間ゲキ水圧の時間的な変化とよく対応しており、振動時の砂の支持力の低下は発生する間ゲキ水圧の変化から知ることができる。

(4) 均一な間ゲキ比の砂層の場合、液状化した領域は表層より下層に発達するが、下部および中間部にゆるい層があると初めにこれらの領域で液状化が生じ、その後、液状化領域は表層へと移行してゆく。ただ、いずれの場合にも液状化領域の発達は急速に広がるが、その回復にはかなりの時間を必要とする。

(5) 振動時のグラント・ブレイクの発生状況、おもりの沈下状態より、液状化領域の深さや形は、その振動方向壁面の影響をかなりうけている。したがって、新潟のように、古砂丘の間に軟弱なタイ積層のあるような地盤構造の場合には、これらの影響を無視することはできないであろう。

(6) 砂中に埋設したおもりの沈下速度から液状化した層の動粘性係数を求めると 200~350 ポアーズとなる。このことと、グラント・ブレイクの生じたときの上・下層の振動のズレを考えると、液状化した層がクイなどの基礎構造物に与える力は無視することはできないといえる。

この報告は東北大学土木工学科および新潟大学土木工学科で行なった実験の結果をまとめたものである。ここに、ご指導・ご助言をいただいた東北大学教授河上房義先生、同助教授柳沢栄司先生に深じんの謝意を表します。また、実験および資料整理に協力いただいた新潟大学卒業生の橋本和夫君 (現石川島播磨重工) に感謝の意を表します。

記 号 説 明

D, D_i, D_{i+1} = 表面からの深さ (cm)

e = 間ゲキ比

e_0 = 初期間ゲキ比

f = 振動数 (Hz)

G_s = 土粒子の比重

g = 重力の加速度

i_c = 臨界動水傾度

$L_i = D_i$ と D_{i+1} の間の砂層の厚さ (mm)

$L_0 = L_i$ の初期値 (mm)

$dL_i = dt$ における L_i の変化量 (mm)

n = 間ゲキ率

$dn = dt$ における間ゲキ率の変化量

p = 加積通過率 (%) (図-3 のみ)

P = おもりの接地圧 (gr/cm²)

S = おもりの沈下量 (mm)

$d_s = dt$ における s の変化量 (mm)

t = 時間 (sec)

$dt = t$ の変化量 (sec)

u_d = 1 サイクル中の最大間ゲキ水圧 (gr/cm²)
 u_{dv} = 1 サイクル中の間ゲキ水圧の半振幅 (gr/cm²)
 $\dot{u}_{ds}$ = 加速度が 0 になっているときの間ゲキ水圧 (gr/cm²)
 u_s = 静的間ゲキ水圧 (静水圧) (gr/cm²)
 $u_{di} = \gamma_{sub} \cdot D_i$
 α = 振動加速度 (g)
 γ_t = 砂の単位体積重量 (gr/cm³)
 γ_w = 水の単位体積重量 (gr/cm³)
 γ_{sub} = 水中重量 ($= \gamma_t - \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w$)
 σ_d = 鉛直振動実験において加速度 α による鉛直応力
 $\bar{\sigma}_d$ = 振動時の有効鉛直応力 ($= \sigma_d - u_d$)
 σ_s = 静止時の鉛直応力
 $\bar{\sigma}_s$ = 静止時の有効鉛直応力 ($= \sigma_s - u_s$)
 $\bar{\sigma}_v$ = 全有効鉛直応力 ($= \bar{\sigma}_d + \bar{\sigma}_s$)

参考文献

- 1) Ohara, S. (1973): "An experimental study on the liquefaction of saturated soil, using shaking table," Technology Reports of the Yamaguchi University, Vol. 1, No. 2, pp. 261-270.
- 2) 大原資生 (1963): 飽和砂の振動圧力について, 「土木学会論文集」, 第 99 号, pp. 1~6.
- 3) 陶浪貞彦 (1967): 飽和砂の振動時性状 (第二報), 「日本建築学会論文報告集」, 第 135 号, pp. 39~44.
- 4) 尾島 勝・古賀泰之 (1971): 飽和砂層の液状化に関する実験的研究, 「土木学会論文報告集」, 第 191 号, pp. 91~102.
- 5) Yoshimi, Y. (1967): "An experimental study of liquefaction of saturated sands," Soils and Foundations, Vol. VII, No. 2, pp. 20-32.
- 6) Florin, V. A. and P. L. Ivanov (1961): "Liquefaction of saturated sandy soils," Proc., 5th ICSMFE, Vol. 1, pp. 107-111.
- 7) Maslov, N. N. (1957): "Questions of seismic stability of submerged sandy foundations and structures," Proc., 4th ICSMFE, Vol. I, pp. 368-372.
- 8) 土田 肇 (1968): 振動により流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力, 「土と基礎」, Vol. 16, No. 5, pp. 3~10.
- 9) 鹿籠雅純・佐藤安一郎・伯野元彦 (1973): 不完全液化砂の地中構造物に及ぼす影響, 「土木学会第 28 回年次学術講演会講演概要集」, 第三部門, pp. 162~163.
- 10) 畠山直隆・芹生正己・大同邦夫 (1966): 基盤の形状が表層地表面の振動に及ぼす影響について, 「土木学会第 21 回年次学術講演会講演概要集」, 第三部門, pp. 93-1~2.
- 11) たとえば「昭和 39 年新潟地震震害調査報告」(1966), 土木学会.
- 12) Mogami, T. and Kubo, K. (1953): "The behavior of soil during vibration," Proc., 3rd ICSMFE, Vol. 1, pp. 152-155.
- 13) Barkar, D. D. (1948): Dynamics of Bases and Foundation, McGraw-Hill, pp. 61-65.

(原稿受付, 1975. 2. 26)