

# 水平・上下両加振による構造物基礎周辺地盤の液状化

後藤尚男・北浦 勝・岡村達哉

## SAND LIQUEFACTION IN THE VICINITY OF STRUCTURAL FOUNDATION UNDER HORIZONTAL AND VERTICAL SHAKINGS

By Hisao GOTO, Masaru KITAJIMA and Tatsuya OKAMURA

### Synopsis

This study deals with experiments on the liquefaction of soft surface layers and the settlements of a rigid structural foundation and the surface layers caused by the liquefaction, under horizontal and vertical shakings. Two directional motion has been achieved by making use of a shaking table and a small vibration generator.

It is shown that under two directional shaking the liquefaction and the settlement of the structural foundation are not always caused in proportion to the excess pore water pressure, notwithstanding the excess pore water pressure under two directional shaking is greater than that under horizontal shaking. However, in some cases there are test data which mean the settlement under two directional shaking is greater than that under horizontal shaking.

On the basis of these results, the phase lag and the excitation frequency ratio are also discussed between the horizontal and the vertical motions of two directional shaking.

### 1. ま え が き

構造物基礎を地盤中に根入れしようとする場合、その地盤は地震時に液状化しないことが望ましいが、実際には液状化の恐れのある軟弱な地盤を建設地点としなければならない場合も生じよう。そのためには地盤を液状化しないように改良するか、液状化が少々発生しても構造物にはほとんど支障がないように工夫を加えるかなどの対策が講じられねばならない<sup>1)</sup>。そしてそのためにはまず液状化した地盤の挙動や、地盤液状化時の構造物基礎の破壊状況などを十分に把握しておく必要がある。

一方、地盤や構造物基礎への入力としての地震動は従来より鉛直下方からの水平動が重視されている。これは一つには震源から地表面に到達するまでにP波の減衰はS波のそれより大きいので、S波（厳密にはSH波）の振幅の方が大きくなる場合が多いこと、またいま一つには地震時の構造物の応答計算においては、その水平変形量が微小であると仮定されてきたために、上下動の水平変形に対する影響は無視できると考えられていたこと、などによるものと思われる。しかるに近年観測されている直下型地震における記録から、上下動の大きさは水平動と比較して必ずしも軽視できるほどには小さくないこと、上下動の卓越周期と構造物の固有周期との関係、および上下動と構造物の振動との位相差によっては水平動のみを考える場合よりも、上下動も同時に作用していると考えられる場合の方が応答は大きくなる場合のあること、などが指摘されている<sup>2)</sup>。

このような上下地震動と地盤の液状化との関係についてはすでに河上らによって検討が加えられており、上下動のみが作用しても過剰間隙水圧の発生が見られ、上下動が液状化や砂層上の構造物の沈下あるいは破壊の原因となりうるということが明らかにされている<sup>3)</sup>。また水平動と構造物基礎周辺地盤の液状化についてもす

でいくつかの研究が実施され、成果が得られつつある<sup>4-6)</sup>。ところで構造物の沈下については主として軟弱粘土層が対象とされてきたが、構造物の長大化・重量化に伴って、従来はあまり問題とならなかった砂層の圧縮にも注目が払われ始めている<sup>7)</sup>。この種の研究においては構造物の重量によって地盤中に生じる歪によって引き起こされる沈下が対象となっており、地震力などの動的外力と構造物の沈下については今後とも解明されねばならない課題として残されている。

このように構造物基礎周辺地盤の液状化やそれに伴う構造物基礎、地盤の沈下などに関する研究は水平単独加振または上下単独加振を対象としたものであり、水平・上下同時加振時に注目した研究は Pyke らの論文<sup>8)</sup>を除くとほとんど見当たらない。Pyke らの論文では水平2方向、上下1方向に可動する振動台による加振実験の結果を基に、乾燥砂地盤の沈下について論じているが、飽和湿潤砂地盤や液状化などについては述べられていない。

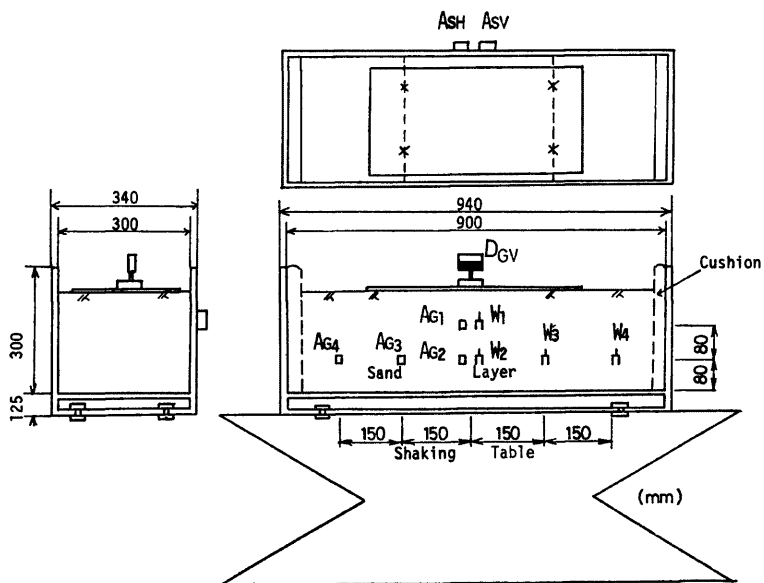
以上のような観点から、本研究は振動台と起振機とを同時に作動させることにより、上下動をも含めた地震動が構造物基礎周辺地盤の液状化や、それに伴う構造物の破壊、とくに沈下におよぼす影響を模型実験を通じて検討したものである。

## 2. 実験装置および実験方法

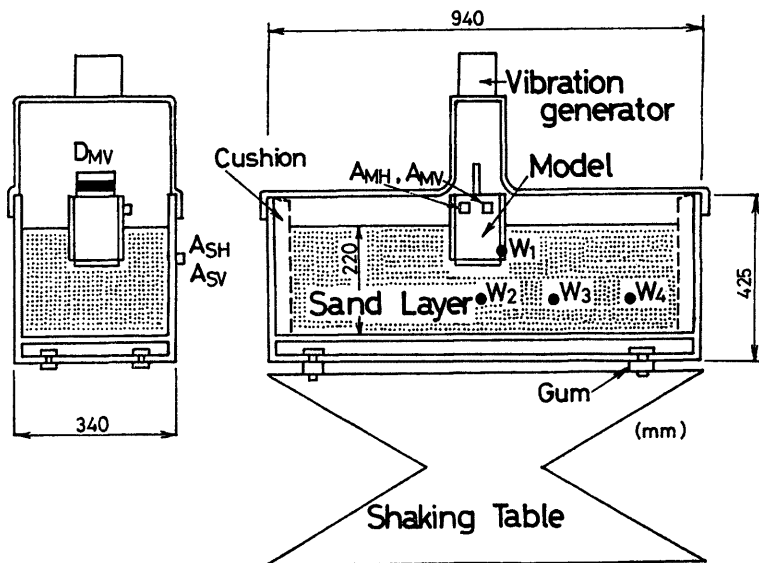
実験見取図の概略と模型の諸元は **Fig. 1** に示す通りである。振動台は水平または上下単独加振可能な扁平式振動試験機（京都大学工学部設置、伊藤精機製、UBC-10A 型、カムまたは不平衡質量型駆動方式、標準最大上載荷重 250 kg）である。この振動台の上に振動方向長さ 940 mm、振動直角方向長さ 340 mm、高さ 425 mm のアクリライト製の砂槽を設置し、その中に乾燥砂では厚さ 240 mm、湿潤砂では 220 mm の砂層を作り模型地盤とした。水平または上下単独加振は振動台によって振動を与えた。水平・上下同時加振時には砂槽の上に鋼製の起振機取付台を介して小型起振機（不平衡質量型、自重 5.6 kg、加振振動数領域 2.5 Hz~25 Hz、最大加振力 22 kg）を取り付け、水平動を振動台で、また上下動を起振機でそれぞれ与えた（振動台と起振機とは連動されるには至っていない）。なお同時加振時には砂槽と振動台の間に弾性定数の異なる 6 種類の防振ゴムを次々と取り付け、砂槽—防振ゴム系の共振を利用することによって起振機の出力不足を補った。これは振動台の上載荷重が制限されているので、小型起振機しか登載できなかったことによる。

使用した砂は滋賀県野洲川産の川砂を 2 mm のフルイに通したもの（比重 2.63、均等係数 3.6）であり、その粒径加積曲線 (**Fig. 2**) は豊浦、相馬両標準砂のほぼ中間にあつて、比較的液状化しやすい粒度分布である。砂層を作るに当たっては、土中の間隙比ができるだけ大きくなるように、すなわち地盤が超軟弱となるように心掛け、1 加振実験終了ごとに砂槽中の砂をスコップで十分掘り返してゆる詰めめ地盤とし、加振前の砂厚がほぼ一定となるようにした。また湿潤砂においては水量を加減することにより水面が砂層表面と一致するようにし、できる限り飽和砂層に近い状態とした。その結果砂の単位体積重量は乾燥砂で 1.64 g/cm<sup>3</sup>、湿潤砂で 1.93 g/cm<sup>3</sup>、使用砂量 0.07 m<sup>3</sup> となった。他の諸数値を **Table 1** に示す。なお水平加振方向に垂直な砂槽壁面にはその内側に厚さ約 30 mm のウレタンフォームを張り付け、境界面による波動の反射の影響を軽減するようにした。

構造物基礎が根入れされている場合と根入れされていない場合の地盤の沈下量を比較するために、最初に砂層のみの加振実験を実施した。砂層表面の沈下の時間的変化を知るために、**Fig. 1 (a)** に示すように砂層上に薄い鋼板 (450 mm×250 mm×1 mm) を載せ、その上に変位計 (西独ツインマー製、光学式コンタクトレス精密振動測定器、100型、最大 100 mm) の標的  $D_{GV}$  を設置した。このとき砂層中の加速度分布を調べるために乾燥砂の場合には水平方向に感ずる加速度計  $A_{GH}$ 、上下方向に感ずる加速度計  $A_{GV}$  (いずれも共和電業製、ストレーンゲージ非接着型、AS-5C、最大 ±5 g) を、砂層中央部で砂層底部から 80 mm の地点に埋めた。また湿潤砂の場合には水平方向に感ずる加速度計  $A_{G1} \sim A_{G4}$  を図に示すように埋めた。



(a) Wet sand layer without the model embedded, one directional shaking.



(b) Wet sand layer with the model embedded, two directional shaking.

Fig. 1. General view of experiments.

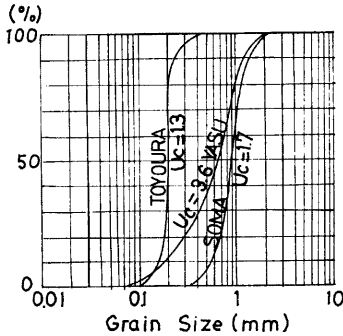


Fig. 2. Grain-size distribution curves.

Table 1. State of sand layer.

State of Sand Layer	Dry	Wet
Specific Gravity	2.63	
Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.64	1.93
Water Content (%)	0.7	30.3
Initial Void Ratio	0.60~0.65	0.79~0.84
Grain Size (mm)	0.07~2.0	
Uniformity Coefficient	3.6	
Relative Density (%)	60	30

なお埋設加速度計はその周囲に発泡スチロールを接着し、全体として地盤の単位体積重量と等しくなるように、すなわち地盤と一体となって運動するように工夫した。湿潤砂地盤においては、間隙水圧の分布や液状化の伝播過程を知るために水圧計  $W_1 \sim W_4$  (豊田工機製、半導体小型圧力変換器、PMS-5M型、最大  $\pm 0.5 \text{ kg/cm}^2$ ) を同図のように埋め込んだ。また砂層への入力を知るために、模型に取り付けたものと同一の加速度計  $A_{SH}$  (水平方向)、 $A_{SV}$  (上下方向) とを砂槽側壁に取り付けた。

構造物基礎が根入れされている場合の概略図が Fig. 1 (b) であり、供試した構造物基礎模型は重さ約 5.6 kg の正方形断面 (100 mm × 100 mm) を有する高さ 150 mm の鋼製の剛体で、約 80 mm 根入れさせた。このような模型実験でもっとも問題となるのは力学的相似律であるが、構造物基礎のように地盤が関与する場合にはその取り扱いが大変困難である。そこで本実験では特定の原型を考えることはしなかったが、構造物の接地圧を砂の単位体積重量と基礎の幅との積で除した値が実際の構造物基礎のそれとほぼ近い値となるよう模型諸元を定めた。基礎模型上面には変位計の標的  $D_{MV}$ 、側面には応答の絶対加速度を測定するための加速度計  $A_{MH}$  (水平方向)、 $A_{MV}$  (上下方向)、側面および底面には基礎模型に作用する振動土圧を測定するためにアクリライト製の土圧計取付板を介して土圧計を取り付けた。ただし土圧計の値は出力が小さかったこともあって SN 比が悪く、十分解析するまでに至らなかった。湿潤砂を対象とするときには基礎模型側面に水圧計  $W_1$  を、その直下に  $W_2$ 、基礎模型から離れた地盤に  $W_3$ 、 $W_4$  をそれぞれ設置した (Fig. 1 (b))。種々のピックアップなどを取り付けた結果基礎模型の比重は 2.26 となった。

なお液状化の発生程度などを知る一つの手掛りとして、砂層表面下 60 mm、140 mm の位置に 2 個のピンポン球を埋めた。また加振終了後に地盤および基礎模型の最終沈下量をメジャーにて測定した。

### 3. 一方向加振実験

#### 3.1 乾燥砂の特性

乾燥砂の場合加振継続時間は 120 秒とした。これを加振回数に直すと加振振動数 3.3 Hz でも 400 回となり、1 回当りの地震による繰返し回数としては多過ぎるが、数回、数十回の地震を想定した場合の繰返し回数としてはこれぐらいになるものと予想されること、またこの程度加振すると沈下量の増加はほとんど見られず、従ってある入力に対する最終沈下量が知れること、などから一応 120 秒とした。

Fig. 3 は構造物基礎模型が根入れされている場合の水平単一加振時における入力の水平加速度  $A_{SH}$  と基礎模型の水平および上下加速度  $A_{MH}$ 、 $A_{MV}$ 、基礎模型の沈下量  $D_{MV}$  の振幅-時間曲線の包絡線を示したものである。なお  $D_{MV}$  曲線の右端に示した値  $D_{GV}$  は地盤の最終沈下量を表わす。入力は 10 Hz、176

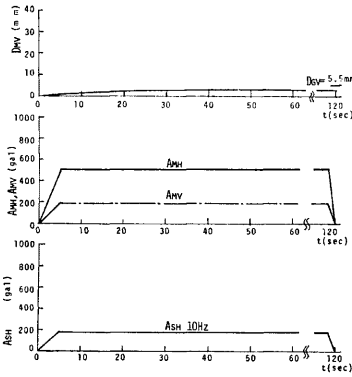


Fig. 3. Envelopes of time histories of settlement of the model  $D_{MV}$ , response accelerations of the model  $A_{MH}$ ,  $A_{MV}$  and input acceleration  $A_{SH}$ , dry sand, horizontal shaking.

gal である。応答としての  $A_{MH}$  は入力との 2.9 倍に達しているが、 $A_{MV}$  も  $A_{SH}$  と同じぐらいの大きさになっている。このことは基礎模型がロッキング振動しつつ沈下していることを表わしている。 $D_{MV}$  の時間曲線から、基礎模型の沈下は土の間隙比の比較的大きい加振初期の間にはほとんど生じてしまうことがわかる。基礎模型の最終沈下量は地盤のその約半分であるが、これは基礎模型の重量により基礎模型直下の地盤の初期圧密が大きいこと、しかも根入れ分だけ砂層厚さが小さいこと、などによるのであろうと考えられる。なお上下単独加振における  $D_{MV}$  曲線の時間的变化もこの場合とほぼ同様であった。今後このような時間的变化を模式化し、構造物の地震応答計算に取り入れていく予定である。この曲線を軌道（パラスト）の沈下—時間曲線と比較すると、パラストの場合は時間の経過とともに本来の圧密沈下に代わって、パラストが両側へ広がることによる沈下が生じるので、 $D_{MV}$  曲線とはその時間的变化の様子が少し異なっている。

以上のような実験を、入力の加振振動数や加速度振幅（入力レベル）を種々に変えて実施したが、最終沈下量と入力レベルのみに注目して整理し直したものが Fig. 4 である。同図 (a) は基礎模型が根入れされていない場合の地盤の最終沈下量  $D_{GV}$  と水平または上下入力レベル  $A_{SH}$  または  $A_{SV}$  の関係を表わしている。また同図 (b) は同じく基礎模型の根入れされている場合の基礎模型の沈下量  $D_{MV}$  について表わしている。両図において共通に言えることは入力レベルの増加とともに沈下量も増加する傾向にあることである。実験結果にバラツキがある一つの理由は、実験ごとに初期間隙比を一定に制御できなかったからであろうと予想される。また  $D_{MV}$ ,  $D_{GV}$  ともに水平加振時よりも上下加振時の方が小さい。これは上下加振においても振動により土の間隙は縮小されるが、水平加振時ほどには砂層にせん断変形が生じ、土粒子がより低位の間隙に落ち込むという沈下に直接結びつく現象が少ないからであろうと考えられる。しかし同図 (a)

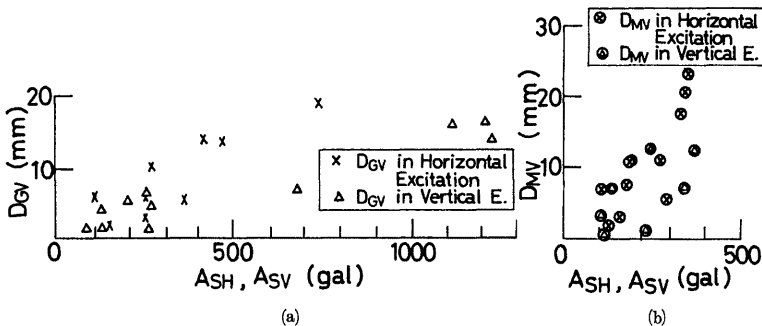


Fig. 4. Relation between final settlement and input levels  $A_{SH}$ ,  $A_{SV}$ , dry sand.

- (a) Settlement of the ground  $D_{GV}$  without the model embedded.
- (b) Settlement of the model  $D_{MV}$ .

からわかるように、上下加振でも入力レベルが  $1g$  を越えると  $D_{GV}$  はかなり大きくなり、水平入力レベルの約  $400 \text{ gal}$  に相当する沈下が生じている。実験時には、このとき砂層の全表面から砂煙がもうもうと立ち上っていた。

次に同図 (a) と (b) を比較すると、水平単独、上下単独のいずれの加振においても同一入力レベルでは地盤中に基礎模型の根入れされている図 (b) の方が沈下量は大きくなる傾向にある。これは基礎模型頂部付近の応答倍率の方が、模型の根入れされていない場合の地表面付近のそれより大きく、地盤のせん断変形、従って沈下の発生しやすい状況にあるからであろうと考えられる。

以上の実験は加振振動数を  $30 \text{ Hz}$  以下で種々に変えて実施したが、水平加振時には  $D_{GV}$ 、 $D_{MV}$  ともに明らかな振動数特性は認められなかった。上下加振時の約  $15 \text{ Hz}$  以上の振動数領域では、 $1g$  以上の入力に対しては大きな沈下が見られたが、数百  $\text{gal}$  の大きさの加速度に対しては沈下はほとんど生じず、沈下には加速度の他に入力の変位振幅なども関与しているように思われる。

なお湿潤砂の項でも述べるが、地盤の液状化が見られる飽和湿潤砂の場合には、乾燥砂の場合よりもはるかに大きな沈下量が生じた。

### 3.2 湿潤砂の特性

湿潤砂の場合は加振継続時間を60秒とした。これは最初に実施した乾燥砂の実験で、加振後約30秒を過ぎると沈下はほとんど進行しないこと（最初の30秒の沈下量に対するその次の30秒の沈下量は1割以下である）、湿潤砂の場合にもほぼ同様のことがいえること、などからである。従って加振時間は乾燥砂の場合の半分であるが、乾燥砂においては加振時間が60秒を越えると沈下量の増加の割合がさらに低下することから、3.1で得られた値は加振時間60秒の結果とみなし、湿潤砂における結果と比較してもほぼ妥当であると考えられる。

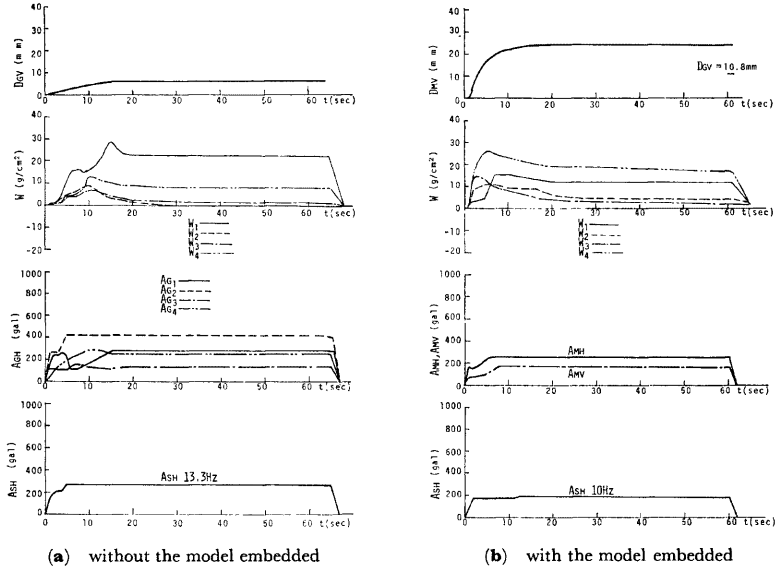


Fig. 5. Envelopes of time histories of settlement, excess pore water pressure  $W_1 \sim W_4$ , response accelerations and input acceleration  $ASh$ , wet sand, horizontal shaking.

基礎模型が根入れされていない場合の水平単独加振時における入力加速度  $A_{SH}$  と地盤中の加速度  $A_{Gi}$  ( $i=1\sim 4$ )、過剰間隙水圧  $W_i$  ( $i=1\sim 4$ )、および地盤の沈下量  $D_{GV}$  の振幅-時間曲線の包絡線を図示したものが Fig. 5 (a) である。 $W_2\sim W_4$  がピークとなる時刻は後述の基礎模型が根入れされている同図 (b) の場合ほどにはずれておらず、地盤がほぼ一様にせん断変形していることがうかがえる。 $W_2\sim W_4$  よりも浅い位置の過剰間隙水圧  $W_1$  にはピークが2個見られるが、最初のピークが他の  $W_i$  のそれよりも早い時刻に現われていることから、まず  $W_1$  において液状化(必ずしも完全液状化を意味しない)が生じ、それが次第により深い地盤へと広がっていると考えてよいであろう。また2番目のピークやその後続く大きな値が  $W_2\sim W_4$  が減少し始めてから現われていることから、より深い地盤の液状化の沈静化に伴う上昇浸透流によって  $W_1$  においては液状化が引き続き生じているのであろうと考えられる。 $W_i$  と  $A_{Gi}$  の時間的変化について見ると、 $W_2\sim W_4$  (同一深さにある)の中ではもっとも液状化度の低い  $W_2$  における加速度  $A_{G2}$  がもっとも大きいこと、地盤の振動モードを考慮すると、本来ならもっとも大きな値を示すはずの  $A_{G1}$  がその付近の液状化の程度が高いために必ずしも大きくないこと、などがわかる。なお地盤の沈下曲線の時間的変化の様子は乾燥砂における  $D_{MV}$  曲線とほぼ同様であるが、沈下の増加率の大きい時間は加振後の10数秒までであり、またそれは過剰間隙水圧がピークとなって減少し始めるまでの時間とも対応している。

次に基礎模型が根入れされている場合の水平単独加振時における入力加速度  $A_{SH}$  と基礎模型の水平応答絶対加速度  $A_{MH}$ 、同じく上下加速度  $A_{MV}$ 、過剰間隙水圧  $W_i$  ( $i=1\sim 4$ )、および基礎模型の沈下量  $D_{MV}$  の振幅-時間曲線の包絡線を図示したものが Fig. 5 (b) である。 $W_i$  の時間曲線より、加振後数秒後にまず  $W_3$  (基礎模型より少し離れた地点の過剰間隙水圧) がピークとなること、続いて  $W_2$  (基礎模型直下)、 $W_4$  ( $W_3$  点よりもさらに基礎模型から離れた地点)、 $W_1$  (基礎模型の側壁で、 $W_2$  などより浅い地点) が次々とピークになり、その後徐々に減少していくことがわかる。このことはすでに指摘されているように液状化は構造物基礎周辺地盤でまず始まり、順次基礎模型直下や基礎模型より遠方におよぶこと、浅い地点では、より深い地盤の液状化の沈静化に伴う上昇浸透流によって液状化が引き続き生じていることを表わしている<sup>4),5)</sup>。周辺地盤でまず液状化が生ずるのは、周辺地盤より大きい応答変位を呈する基礎模型が周辺地盤に大きなせん断変形を起こさせること、基礎模型直下ほどには鉛直方向の垂直応力が大きくないこと、つまり周辺地盤におけるせん断応力と垂直応力の比が比較的大きいことによるものと考えられる。なお  $W_4$  の値が大きいのは、 $W_4$  がもっとも砂槽壁に近いため壁による影響ではないかと推測される。

沈下の時間曲線を見ると、沈下は加振開始直後から始まるが、 $W_2$  などがピークとなると急激増し、加振後数秒で最終沈下量の90%以上の値に達している。基礎模型と地盤の比重の差によるものと考えられるが、基礎模型の最終沈下量は地盤のそれ ( $D_{GV}$ ) の倍近い値となっている。この点は乾燥砂の場合 (Fig. 3) と全く逆になっており、地盤が液状化した場合の構造物基礎の被害の甚大さが示唆されているように思われる。

$A_{MH}$  や  $A_{MV}$  は  $A_{SH}$  がほぼ一定であるにもかかわらず加振初期で一時的に減少しているが、これは地盤の液状化により地盤から構造物基礎への外力の伝達量が小さくなること、地盤の軟化により構造物基礎-地盤系の固有振動数が非常に低下し、構造物基礎が変位地震計の質量のような挙動を呈することの相乗作用によるものと考えられる。

以上のような実験を入力パラメータ(振動数やレベル)を種々に変えて実施し、乾燥砂における Fig. 4 と同じように最終沈下量と入力レベルの関係として図示したものが Fig. 6 である。図には上下単独加振の結果も図示してある。なお (b) の記号の説明のうち最終に記してある記号は、上下単独加振時において基礎模型の沈下量と地盤の沈下量が等しい場合を表わしている。図から乾燥砂における場合と同様、基礎模型の有無にかかわらず、また加振方向(水平あるいは上下)にかかわらず入力レベル ( $A_{SB}$ ,  $A_{SP}$ ) が高くなるにつれて基礎模型の最終沈下量  $D_{MV}$ 、地盤の最終沈下量  $D_{GV}$  ともに大きくなる傾向が認められる。また乾燥砂の場合と同様、基礎模型の有無にかかわらず水平加振時における  $D_{MV}$ ,  $D_{GV}$  の方が上下加振時に

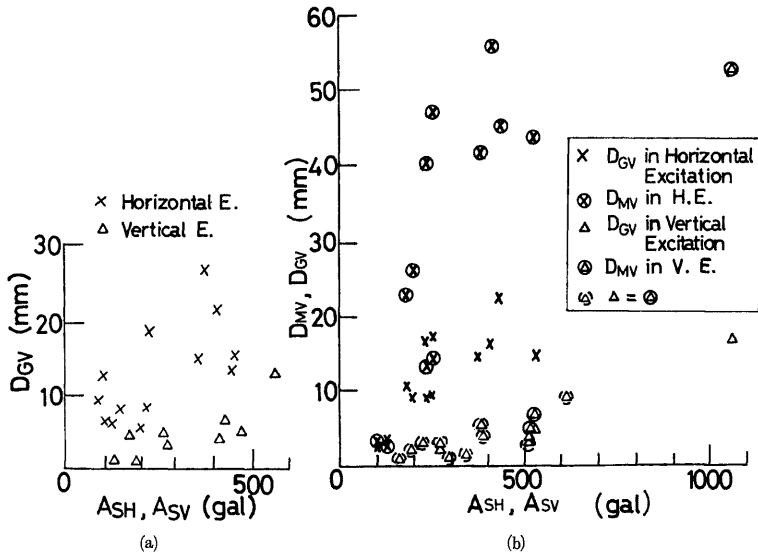


Fig. 6. Relation between final settlement and input levels  $A_{SH}$ ,  $A_{SV}$ , wet sand.

(a) Settlement of the ground  $D_{GV}$  without the model embedded.

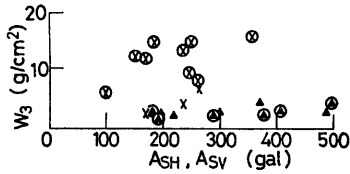
(b) Settlements of the model  $D_{MV}$  and the ground  $D_{GV}$  with the model embedded.

おけるそれらの値よりそれぞれ大きい。このことは、過剰間隙水圧  $W_3$  のピーク値と入力レベル  $A_{SH}$ ,  $A_{SV}$  の関係を表わす Fig. 7 から明らかなように上下加振では水平加振時ほどには液状化の程度が高くないこと、Fig. 4 においても述べたように土粒子がより低位の間隙に落ち込むという現象が少ないこと、などから説明されよう。しかし Fig. 6 (b) からわかるように、乾燥砂の場合と同様上下加振でも  $1g$  を越えると沈下量は非常に大きくなり、水平加振における約 300 gal 入力の沈下量に匹敵することがわかる。

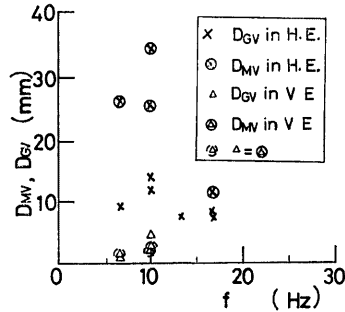
また基礎模型が根入れされている場合 (同図 (b))、水平加振においては基礎模型の最終沈下量  $D_{MV}$  は地盤の最終沈下量  $D_{GV}$  のほぼ倍になっているが、地盤の沈下量は基礎模型が根入れされていない場合 (同図 (a)) とほぼ似かよった値となっている。一方上下加振においては同図 (b) からわかるように、 $1g$  以上の入力を除くと基礎模型は地盤とほとんど一体となって沈下している。これらのことは、水平加振においては液状化の程度が高く、従って基礎模型と地盤の比重差が最終沈下量に反映されていること、上下加振では液状化の程度が低く、従って地盤の支持力の低下が水平加振時ほどには顕著でないので、比重差が沈下量に現われにくいことを表わしている。このことは砂中に埋設したピンポン球の挙動にも見られ、液状化の程度の高い水平加振時に比較的浅い地点に埋設したピンポン球が地表面に浮上していた。なお液状化が深部にまでおよんだ場合には深い地点のピンポン球の浮上も見られた。また上下加振時においても入力レベルが高いときには、浅い地点のピンポン球が浮上した。水平加振においては基礎模型の有無にかかわらず入力レベルが約 300 gal を越えると地盤の沈下量の増加の割合が低下している。このことは構造物基礎模型の沈下量についてもいえ、入力レベルと沈下量は非線形関係にあるといえる。

次に構造物基礎模型、地盤の最終沈下量と加振振動数の関係を表わしたものが Fig. 8 である。入力レベルは必ずしも一定にならなかったで、入力レベルがほぼ 200 gal である結果を抽出し、比例配分すること





**Fig. 7.** Relation between excess pore water pressure  $W_3$  and input levels  $A_{SH}$ ,  $A_{SV}$  ( $\times$ ,  $\otimes$  denote  $W_3$  in horizontal shaking without and with the model embedded, respectively.  $\triangle$ ,  $\oplus$  denote  $W_3$  in vertical shaking without and with the model embedded, respectively.).



**Fig. 8.** Relation between final settlements  $D_{MV}$ ,  $D_{GV}$  and excitation frequency  $f$ , wet sand ( $A_{SH}$  or  $A_{SV}$  is equal to 200 gal.).

によって 200 gal 一定入力に対する沈下量を得た。これによると、乾燥砂の場合とは異なり水平加振において明らかに 10 Hz 付近にピークが現われている。このことは、本実験においては 10 Hz は地盤もしくは構造物基礎模型—地盤系の固有振動数であること、前報<sup>9)</sup>において指摘したように地盤や基礎—地盤系の固有振動数に近い振動数で加振すると地盤のせん断変形が大きく出ることから液状化が起りやすいこと、飽和湿潤砂の場合、とくに基礎模型の沈下は地盤の液状化の程度に大きく依存していること、から説明できる。

以上見てきたように地盤が液状化する場合には構造物基礎の沈下は非常に大きくなるが、前報<sup>9)</sup>において指摘したように一方向への転倒という現象も顕著に生じるので、構造物は乾燥砂におけるよりもはるかに大きな被害を被ることになるものと予想される。

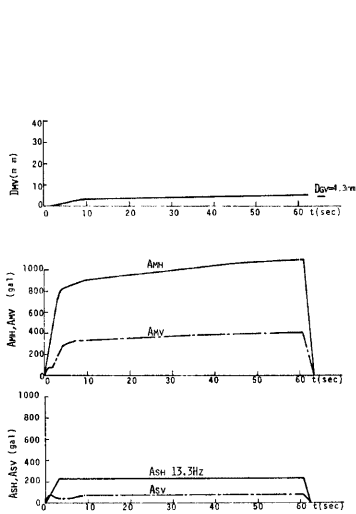
## 4. 二方向加振

### 4.1 乾燥砂の場合

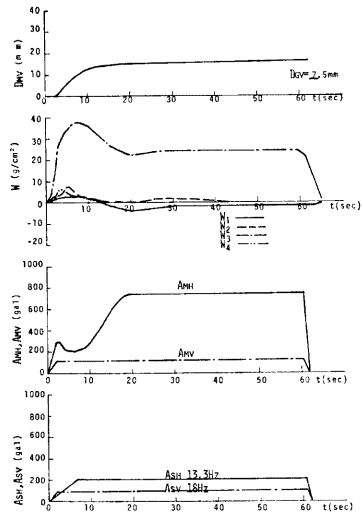
乾燥砂の水平・上下同時加振実験は **Fig. 9** に示す 1 ケースしか行っていないので、結論的なものを引き出すまでには至らなかったが、本ケースにおける沈下量は水平単独加振時のそれと大差なさそうである。この場合上下方向の加速度は 800 gal と小さいが、もし数百 gal 以上の大きな加速度が作用している場合にはその影響で沈下がさらに進行するのではないかと推測される。図中入力はほぼ一定であるのに基礎模型の応答加速度は時間の経過に伴って増加している。これは地盤が徐々に締め固まっていくことのほかに、基礎模型が転倒しつつあることが反映されているのであろうと考えられる。なお Pyke らの論文<sup>8)</sup>によると、同時加振時の地盤の沈下量は水平単独加振時のそれよりも増加する傾向にあるとされている。従って構造物基礎の沈下についても同様のことがいえるものと予想されるが、今後実験的研究を通じて解明されるべき課題として残されている。

### 4.2 湿潤砂の場合

同時加振時における入力や沈下などの時間曲線を示したものが **Fig. 10** である。入力の水平加速度  $A_{SH}$  は水平単独加振時の **Fig. 5(b)** の場合とはほぼ同様であるが、過剰間隙水圧  $W_3$  が非常に大きく出ているのが特徴である。しかしその割には基礎模型の沈下量  $D_{MV}$  は大きくない。また基礎模型の応答加速度  $A_{MH}$  には、**Fig. 5(b)** にも見られたように加振初期に一時的に減少が見られ、地盤の液状化が反映されている。過剰間隙水圧の挙動を見ると、**Fig. 10** では基礎模型側壁の  $W_1$  に負圧が発生している。他のケースでは



**Fig. 9.** Envelopes of time histories of settlement of the model  $D_{MV}$ , response accelerations of the model  $A_{MH}$ ,  $A_{MV}$  and input accelerations  $A_{SH}$ ,  $A_{SV}$ , dry sand, two directional shaking.



**Fig. 10.** Envelopes of time histories of settlement of the model  $D_{MV}$ , excess pore water pressure  $W_1 \sim W_4$ , response accelerations of the model  $A_{MH}$ ,  $A_{MV}$  and input accelerations  $A_{SH}$ ,  $A_{SV}$ , wet sand, two directional shaking.

基礎模型直下の  $W_2$  にも負圧が見られるが、基礎周辺地盤の  $W_3$ ,  $W_4$  には見られない。このことからこの現象は加振中に水圧計の埋設深さが浅くなったのではなく、基礎直下付近では基礎の重量により砂層が密な状態となっているので、セン断変形が起る場合には一時的に非排水状態になり、ダイレイタンスにより土粒子が再配列する過程で間隙水が静水圧よりも小さい力、あるいは引張力を受けているのであろうと考えられる。しかし実験によっては負圧を生じていない場合もあり、繰り返し外力によって基礎模型直下付近では土粒子がかなり複雑な挙動をしていることが窺える。なおこの現象は水圧単独加振時にもよく見られた。

ところで水平単独加振時には見られず、同時加振時にもみ見られた現象に過剰間隙水圧の時間曲線のうなりがあった。これは振動台による水平動の振動数と起振機による上下動の振動数がわずかに異なることによって生じたものであるが、模型の応答加速度や沈下曲線にはほとんど見られなかった。

**Fig. 10** において、過剰間隙水圧  $W_3$  が大きく出ている割には基礎模型の沈下量が大きくないと述べたが、このことを調べるために入力の水圧加速度  $A_{SH}$  と基礎模型と地盤の最終沈下量  $D_{MV}$ ,  $D_{GV}$  の関係、および  $A_{SH}$  と  $W_3$  の関係について調べたものが **Fig. 11**, **12** である。なお両図には水平単独加振時の結果も図示してある。これらの結果は、水平の加振振動数はもとより入力の上下加速度  $A_{SV}$  の大きさなどがまちまちである。**Fig. 12** から同時加振時の方が  $W_3$  は大きく出ること、それにもかかわらず **Fig. 11** から沈下は必ずしもそれほど顕著とはいき切れないことがわかる。この理由は以下のように考えられる。上下動によっても間隙水に圧縮力に加わるが、砂層の密度は上下動の加わるごとに徐々に増すので、間隙水中の圧縮力は次々と蓄積されることになる。すなわち水平動による地盤のセン断変形に伴う水圧の他に、上下動による分も加わって過剰間隙水圧は上昇していく。一方、水平加振の場合と異なる点であるが、砂層の密度

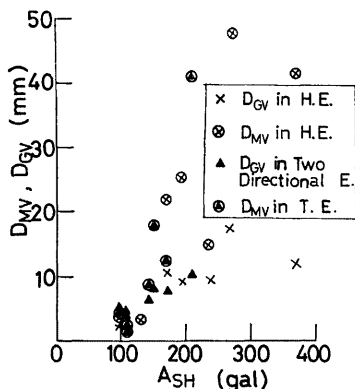


Fig. 11. Relation between final settlements  $D_{MV}$ ,  $D_{GV}$  with the model embedded and input level  $A_{SH}$ , wet sand.

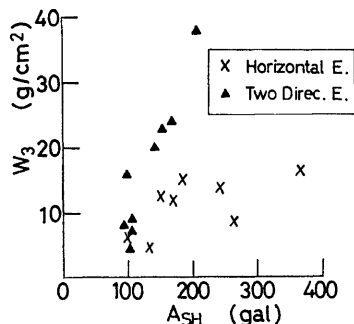


Fig. 12. Relation between excess pore water pressure  $W_3$ , and input level  $A_{SH}$ , wet sand.

が時間とともに増すことはある深さにおける土の鉛直方向の垂直応力が増すことを意味するので、過剰間隙水圧の増加にもかかわらず液状化には結びつかず、従って液状化時に急増する構造物基礎の沈下も十分に進行しない。

なお Fig. 11 において、たとえば  $A_{SH}$  が 200 gal に近い実験結果では同時加振時の  $D_{MV}$  の方が水平単独加振時よりはるかに大きな値となっており、上下動の影響の大きい場合のあることが注目される。

同時加振時における地盤と構造物基礎の沈下量が水平単独加振時のそれより大または小となる原因として次の 5 項目について検討する。

- 上下動と水平動の各振動数および両者の位相差に基づいて、セン断面が時間的に変化する事。
- 同じく振動数と位相差に基づいて、基礎に作用する力の方向が時間的に変化する事。
- 上下動により砂層が上昇するとき、上下動のない場合よりも鉛直方向の垂直応力が減少し、セン断抵抗力が低下すること。
- c. の場合と逆で、砂層が下降するとき、セン断抵抗力が増加すること。
- 本実験からも明らかになったことであるが、砂層が上昇するとき砂層の間隙比はほとんど変化しないが、下降するとき間隙比は減少すること。

まず a についてであるが、セン断面が時間とともに変化してもセン断変形によって生ずる過剰間隙水圧は次々と蓄積されていくものと考えられるので、液状化の程度や沈下は水平単独加振時と変わらないのではないかと推測される。b からは、振動数と位相差の組み合わせ方によって、基礎模型の転倒や沈下は大きく出る場合もあれば小さくなる場合もあるといえそうである。すなわち基礎模型がいずれかの方向へもともと大きく傾いたとき、上下動が基礎模型に下向きの力を与えるように働く場合には、基礎のロッキング振幅が増すことになる。その結果周辺地盤の応答加速度も大きくなるので液状化の程度が増し、沈下が大きくなる。また逆の場合には沈下が小さくなる。c からは、水平単独加振時よりもセン断変形が大きくなり、従って液状化の程度や沈下の増加する可能性が出てくる。d からは逆に減少の可能性が出る。e からは Fig. 11, 12 の説明中で述べたのと同様の理由により、基礎模型の沈下は水平単独加振時よりも小さくなるといえよう。

以上に見たように水平・上下同時加振時の沈下には、5 項目のうち 4 項目 (a ~ d) までが上下動と水平動の各振動数と構造物基礎—地盤系の固有振動数との関係、および両入力間の位相差と関わり合っている。

る。しかし本実験装置では水平動と上下動の位相差を制御できず、従って以上に述べた4項目に対する実験を通じての立証は十分できなかった。この点は今後も検討されるべき研究課題として残されている。

## 5. 結 論

本研究は液状化などの恐れのある軟弱な地盤中に根入れされた構造物基礎の耐震安定性を高めるための基礎的なデータを得るために、振動台と起振機とを作用させることにより、上下動をも含めた地震動が構造物基礎周辺地盤の液状化やそれに伴う破壊、とくに沈下におよぼす影響を模型実験を通じて検討したものである。得られた結果を要約して述べると以下のようである。

(1) 乾燥砂層を水平単独加振した場合の基礎模型、地盤の沈下量は、上下単独加振時におけるそれらの値よりもそれぞれはるかに大きい。しかし上下加振でも  $1g$  を越えると両沈下量ともに大きくなる。

(2) 乾燥砂層中に根入れされた基礎模型の沈下量は地盤の沈下量より小さい。これは基礎模型の重量による基礎模型直下の地盤の初期圧密が大きき、しかも根入れ分だけ砂層厚さが小さいからであろうと考えられる。

(3) 乾燥砂層中に根入れされている基礎模型の沈下量は基礎模型が根入れされていない場合の地盤の沈下量より大きい。基礎模型が根入れされている場合には基礎模型の応答加速度の影響を受けて地盤中の応答加速度、従って地盤のせん断変形が大きくなるが、このことによって地盤の沈下量と基礎模型の沈下量も大きくなるのであろうと考えられる。

(4) 湿潤砂地盤においては水平単独、上下単独のいずれの加振においても液状化現象が見られる。液状化の程度は水平単独加振時の方がはるかに高く、従って基礎模型の沈下量も水平加振時の方がはるかに大きい。

(5) 液状化は基礎周辺地盤でまず始まり、順次基礎直下におよぶこと、このとき基礎の沈下が急増すること、基礎と地盤の比重差によるものと考えられるが、基礎の最終沈下量は地盤のその倍近い値となること、この大小関係は乾燥砂の場合と逆であること、沈下量の大きさ、とくに基礎模型のそれは乾燥砂における場合よりもはるかに大きいことが明らかとなった。

(6) 水平・上下同時加振時の過剰間隙水圧は水平単独加振時のそれより大きい、それが液状化やそれに伴う基礎模型の沈下に十分結びつかない場合が多い。これは上下動によっても過剰間隙水圧が発生するが、砂層の密度も上下動の加わるごとに徐々に増しているからであろうと考えられる。

(7) 同時加振時における基礎模型の沈下量の方が、水平単独加振時のそれより大きい場合もある。このことには入力としての水平動と上下動の振動数と基礎—地盤系の固有振動数との関係、応答と上下動との位相差が関与しているものと推測される。

以上のような成果が得られたが、水平動と上下動の位相差を制御できないこと、振動台と砂槽との間に取り付けた防振ゴムによって砂槽自身がロッキング振動することなどの問題点もあり、今後より改良された実験装置を開発するとともに、電算機による simulation を通じてさらにこの課題を解明していく予定である。

最後に本研究実施にあたり貴重な助言をいただいた本学工学部の亀田弘行助教授、実験遂行に協力していただいた当研究室の大学院学生光家康夫氏に感謝の意を表する次第である。なお本研究の一部は文部省科学研究費補助金(試験研究(2)、奨励研究A)の援助を受けたことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 土田 肇：液状化に対する地盤の耐震設計法の現状と問題点，土と基礎，Vol. 23, No. 6, 1975, pp. 5-10.

- 2) 児玉 豊, 家村浩和：非線形ロッキング振動におよぼす重力および上下動の影響について, 昭和49年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, 1974, pp. I-51-1-2.
- 3) 河上房義, 小川正二, 虎瀬允昭：衝撃を受けた飽和砂中に発生する間隙水圧, 土と基礎, Vol. 13, No. 5, 1970, pp. 3-7.
- 4) 石原研而, 松本計三, 早瀬藤二：振動時の間ゲキ水圧と基礎の支持力についてのモデル実験, 第10回土質工学研究発表会講演集, 1975, pp. 471-474.
- 5) 時松孝次, 桑原文夫, 吉見吉昭, 木村泰昌：構造物近傍における砂の液状化発生条件, 第10回土質工学研究発表会講演集, 1975, pp. 707-710.
- 6) 後藤尚男, 北浦 勝, 正田尋三, 光家康夫：軟弱地盤中に根入れされた構造物基礎の地震応答に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 第18号 B, 1975, pp. 367-376.
- 7) 小泉安則：構造物の沈下に関する諸問題, 土と基礎, Vol. 22, No. 12, 1974, pp. 7-11.
- 8) Pyke, R., H.B., Seed, and C.K., Chan, : Settlement of Sands Under Multidirectional Shaking, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT4, April, 1975, pp. 379-398.