

# 水平・上下両加振時の構造物基礎周辺地盤の液状化に関する一考察

京都大学工学部 正員 後藤 尚男  
 京都大学工学部 正員 北浦 勝  
 佐藤 工業 岡村 達哉

## 1. まえがき

構造物基礎周辺地盤の液状化対策としてはパイロフローテーション工法などによって地盤を改良することがまず第一義的に考えられるべきであろうが、場合によっては万一地盤が液状化してもそれによって生ずる被害を最小限に食い止める工夫を構造物に施すことも必要であろう。その対策のためにはまず液状化した地盤によって引き起こされる構造物基礎の破壊状況を十分に把握しておくことが望まれる。ところで地盤の液状化に關与する地震入力としては従来鉛直下方からの水平動が重視されてきたが、液状化に伴う構造物基礎の破壊、特に沈下や倒塌には同時に作用している地震の上下動成分をも考慮する必要があるのではないかと予想される。このような観点から本研究は、振動台と起振機とを同時にあるいは単独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沈下及ぼす影響を実験を通じて検討したものである。なお広い意味での液状化と考えられる、乾燥砂における層間力の減少による流動化や、それによる構造物の沈下についても同時に実験を実施し、飽和湿潤砂地盤における結果との差について言及した。

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略は図-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松平式振動試験機(付藤精機製, 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250kg)である。この振動台の上に振動方向長さ940mm, 振動直角方向長さ340mm, 高さ425mm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240mm, 湿潤砂では220mm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り, 水平・上下同時加振は砂槽上の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5.6kg, 最大加振力22kg)を取り付け, 水平動を振動台で, 上下動を起振機でそれぞれ与えた。起振機と振動台は連動されるに至っていない。なお振動台の上載荷重が制限されており, 小型起振機しか搭載できなかったため, 砂槽と振動台の間に弾性定数の異なる6種類のゴムを次々と取り付け, 砂槽-ゴム系の共振を制御して起振機による出力不足を補った。

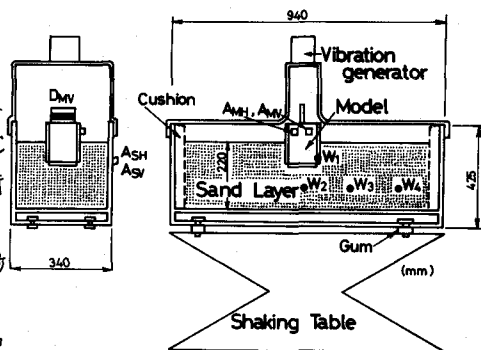


図-1 実験概要図(飽和湿潤砂, 基礎模型あり, 同時加振の場合)

使用した砂は野洲川産の川砂を2mmのフルイに通したもの(比重2.63, 均等係数3.6)であり, 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が広がるように, 上加振実験ごとに砂層中の砂をスコップで十分振り返してゆる詰めの状態とし, 加振前の砂層がほぼ一定となるようにした。また湿潤砂の場合には水量を加減して水面が砂層表面と一致するようにし, できるだけ飽和湿潤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1.64g/cm<sup>3</sup>, 湿潤砂で1.93g/cm<sup>3</sup>となった。他の諸数値を表-1に示す。

表-1 砂層の状態

	乾燥砂	湿潤砂
含水比 (%)	0.7	30.3
初期間隙比	0.60~0.65	0.79~0.84
相対密度 (%)	約60	約30

砂層に根入れした構造物基礎模型は重さ約5.6kgの100mm×100mm

なる正方形断面を有する高さ 150 mm の鋼製の剛体で、根入れ長は約 8 cm である。模型には沈下量測定のためのコンタクトレス変位計の標的 DMV, 水平および上下の応答加速度測定のための加速度計 AMH, AMV, 湿潤砂層においては模型側壁に水圧計 W1 をそれぞれ取り付けた。その結果模型の比重は 2.86 となった。地盤中には水圧分布を調べるための水圧計 W2~W4 を図-1 に示すように同一深さに埋設した。また模型を根入れしない実験においては砂層表面の沈下の時間曲線を知るために砂層表面上に薄い鋼板を置き、その上に変位計の標的 DGV と設置した。このとき砂層中の加速度分布を知るために水圧計とほぼ同じ位置に加速度計 Ag1~Ag4 も埋設した。砂層側壁には構造物への入力測定用の水平・上下両方向の加速度計 ASH, ASV を設置した。

### 3. 乾燥砂における水平または上下単独加振時の沈下

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り返し回数としては多過ぎるが、数回、数十回の地震を想定するとこれぐらいの回数に存す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、従ってある加振振動数と加振振幅を持つ正弦波入力に対する最終沈下量が知れること、などから一応上記の値とした。図-3 は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 ASH と AMH, AMV, DMV の振幅-時間曲線の包絡線を示したものである。なお DMV 曲線の右

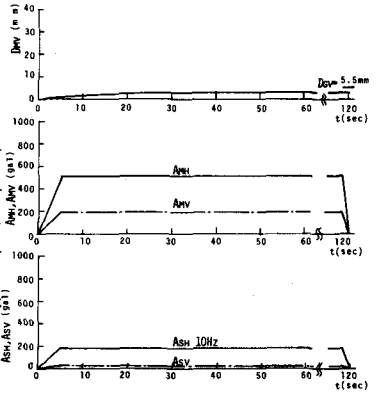
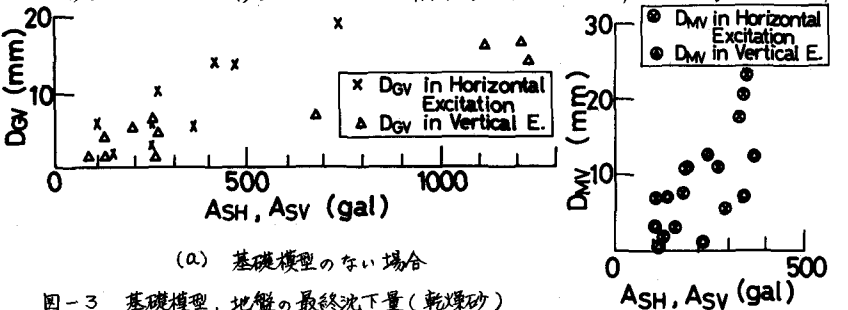


図-3 水平加振時の入力と応答の時間曲線(乾燥砂模型用)

端に示した値は地盤の最終沈下量を表す。応答としての AMH は入力 ASH の約 2.9 倍に達しており、AMV も ASH よりもはるかに大きくなっている。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。DMV の時間曲線から、模型の沈下は土の間隙比の比較的大きい加振初期にほとんど生じてしまうことがわかる。模型の最終沈下量は地盤のそれの約半方であるが、これは模型の重量により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。

以上のような実験を入力の加振振動数や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直したものが図-3 である。同図(a)は模型が根入れされていない場合の地盤の最終沈下量 Dgv と水平または上下入力レベル ASH または ASV の関係を表わしている。同図(b)は同じく模型が根入れされている場合の模型の最終沈下量 Dmv を表わしている。両図から、①加振方向(水平あるいは上下)にかかわらず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、②土のせん断変形量の違いなどに基づくものと考えられるが、水平加振時の方が上下加振時よりも沈下量は大きいこと、③しかし上下加振でも 1 g を超えると沈下量は大きくなり、水平入力レベルの 400 gal に相当する沈下が生じていること(図(a))、④模型の根入れされている場合の地表面付近の応答倍率が模型の根入れされていない場合のそれよりも大きいからであると考えられるが、DMV の方が模型の根入れされていない場合の Dgv より大きいこと、がわかる。実験は加振振動数を約 2.5 Hz 以下で種々に変えて実施したが、沈下量には明らかな振動数特性は認められなかった。従って実験結果にバラツキがある理由の一つは、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



(a) 基礎模型のない場合

図-3 基礎模型、地盤の最終沈下量(乾燥砂)

(b) 基礎模型のある場合

同図(a)は模型が根入れされていない場合の地盤の最終沈下量 Dgv と水平または上下入力レベル ASH または ASV の関係を表わしている。同図(b)は同じく模型が根入れされている場合の模型の最終沈下量 Dmv を表わしている。両図から、①加振方向(水平あるいは上下)にかかわらず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、②土のせん断変形量の違いなどに基づくものと考えられるが、水平加振時の方が上下加振時よりも沈下量は大きいこと、③しかし上下加振でも 1 g を超えると沈下量は大きくなり、水平入力レベルの 400 gal に相当する沈下が生じていること(図(a))、④模型の根入れされている場合の地表面付近の応答倍率が模型の根入れされていない場合のそれよりも大きいからであると考えられるが、DMV の方が模型の根入れされていない場合の Dgv より大きいこと、がわかる。実験は加振振動数を約 2.5 Hz 以下で種々に変えて実施したが、沈下量には明らかな振動数特性は認められなかった。従って実験結果にバラツキがある理由の一つは、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。

#### 4. 湿潤砂における水平または上下単独加振時の沈下

水平単独加振時における  $ASH$  と  $AMH$ ,  $AMV$ ,  $W_i$ ,  $DMV$  の振幅-時間曲線を示したものが図-4である。図より、①過剰間隙水圧  $W_i$  曲線より、加振数秒後にまず模型周辺地盤の水圧  $W_3$  がピークとなり、続いて模型直下の  $W_2$ ,  $W_3$  よりもさらに模型から離れた  $W_4$ , 模型側壁の  $W_1$  がピークとなること、つまり液状化は模型周辺地盤でまず始まり、順次模型直下<sup>(1)</sup>に及ぶこと、②  $DMV$  の沈下は加振開始直後から始まるが、 $W_2$  等がピークとなるとき激増すること、③地盤が液状化すると、模型と地盤の比重差により  $DMV$  の最終沈下量は  $D_{GV}$  のそれの倍近い値となること、④  $AMH$  や  $AMV$  は地盤の液状化を反映して加振初期に一時的に減少していること、などがわかる。このうち①は、周辺地盤より大きい応答応位を示す模型が周辺地盤に大きなせん断変形を起こさせること、周辺地盤では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、つまりせん断応力と垂直応力の比が比較的大きいこと、④は地盤の液状化により地盤から模型への外力の伝達が小さくなること、地盤の軟化により模型-地盤系の固有振動数が低下し、模型が単位地層計の質量のような挙動をすること、から説明されよう。

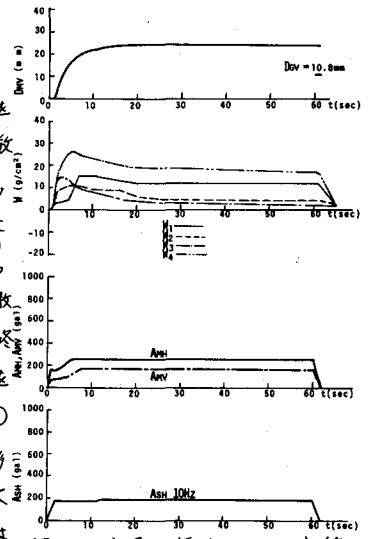
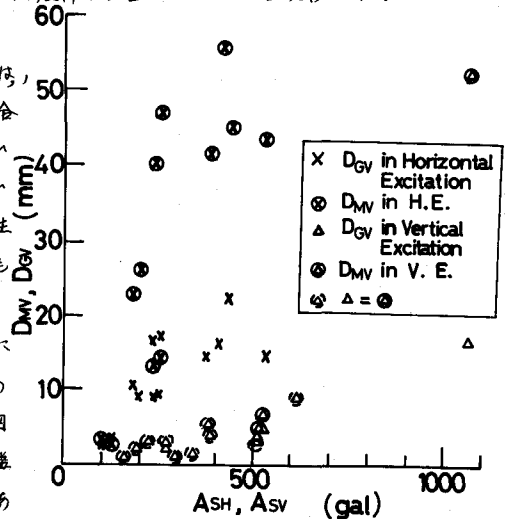


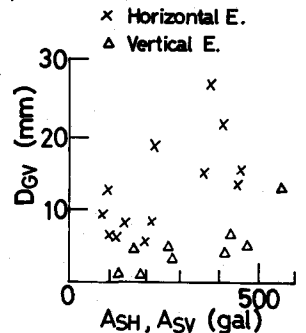
図-4 水平加振時の入力と応答の時間曲線(湿潤砂, 基礎模型あり)

なお図示していないが模型が根入れされていない場合には、 $W_2 \sim W_4$  がピークとなる時刻が模型が根入れされている場合ほどにはずれおらず、地盤がほぼ一様にせん断変形していること、 $W_1$  のピークがより深い位置の  $W_2 \sim W_4$  よりも早い時刻に現われていることから、まず  $W_1$  において液状化が生じ、それが次第に深い地盤へと拡がっていること、などもわかった。

以上のような実験結果を、最終沈下量と入力レベルのみに注目して図示したものが図-5である。この図から乾燥砂の場合とほぼ同様のことを指摘しうるが(図-3, ただし同図説明中の④を除く)、さらに①沈下量そのものは模型、地盤ともに乾燥砂時より大きいこと、特に水平加振時に顕著であること、②水平加振においては  $DMV$  が  $D_{GV}$  のほぼ倍になっていること(図(a))、③地盤の最終沈下量は模型の有無にかかわらずほぼ似かよった大きさであること(図(a), (b))、④上下加振では1層以上の場合を除き模型は地盤とほぼ一体となって沈下していること(図(a))、がわかる。このうち①は、乾燥砂においても流動化現象は存するが、数百 gal 程度ではそれによるせん断強度の低下があまり顕著でないこと、しかし湿潤砂ではこの程度の入力でもその低下が著しいこと、から説明されよう。②は、模型と液状化時の土の比重差が反映された結果であり、乾燥砂の場合とは沈下量の大小が逆になっている。③は以下のように考えられる。模型が根入れされている場合の地表面付近の応答倍率が根入れされていない場合のそれよりも大きいので、前者の方が液状化の程度が高く、従って模型周辺地盤の沈下量も大きいはずである。ところで液状化は砂



(a) 基礎模型のある場合



(b) 基礎模型のない場合

図-5 最終沈下量(湿潤砂)

層の広い領域に伝播されるので、模型周辺地盤の沈下は十分発達せず、他の領域のそれに近づくので、後者の差が許す範囲内であろうと考えられる。

図-5の $W_3$ のピーク値と入力レベルASH, ASVの関係について表わしたものが

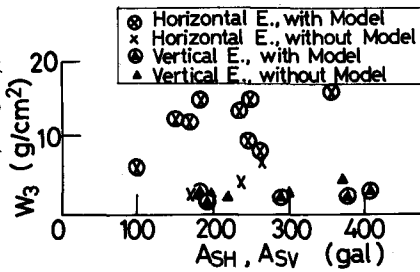


図-6 過剰間隙水圧 $W_3$ と入力レベルASHまたはASVの関係

図-6である。上下加振においても $W_3$ の上昇は見られるが、水平加振時には顕著でなく、従って液状化の程度もあまり高くない。また水平加振においては模型の根入れされている場合の方がいない場合よりも大きく出ることとして、これらが図-5に反映されているものと考えられる。

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図-7であり、入力レベルはほぼ200 galである。乾燥砂の場合とは異なり、地盤もしくは模型-地盤系の固有振動数に近い10 Hz付近にピークが見られる。

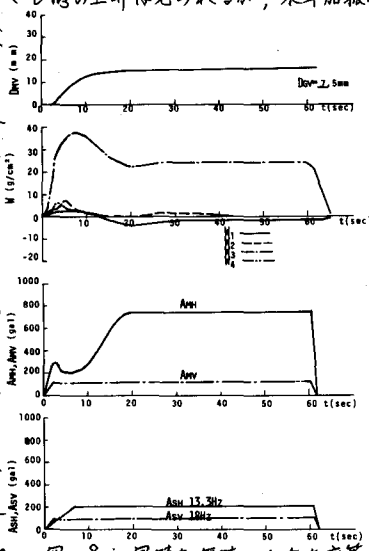


図-8 同時加振時の入力と応答の時間曲線(模型あり)

### 5. 湿潤砂における水平・上下同時加振時の沈下

同時加振時の入力や沈下の時間曲線を示したものが図-8である。ASHは水平単独加振時の図-4の場合とほぼ同様であるが、 $W_3$ 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 $DMV$ は大きくない。このことを調べるためにASHと最終沈下量、ASHと $W_3$ の関係を図示したものが図-9である。両図には水平単独加振の結果も図示してある。両図における加振振動数や上下動の大きさはまちまちである。

両図から、上下動により間隙水に圧縮力が加わり、それが蓄積されるので $W_3$ は増すか(図-10)、砂層の密度も上下動の加わることによって徐々に増すからであろうと考えられるが、 $W_3$ の発生が液状化や沈下に十分結びついていないことがわかる(図-9)。しかし図-9において同時加振時の $DMV$ の方が水平単独加振時のそれよりもはるかに大きな値となっている場合もあり、上下動の影響の大きい場合のあることが注目される。このことには水平動と上下動の加振振動数の比や両者の位相差が関与しているのではないかと推測されるが、本実験では位相差を制御できなかったため、今後本実験で得られた結果をモデル化し、数値実験にて検討を加える予定である。

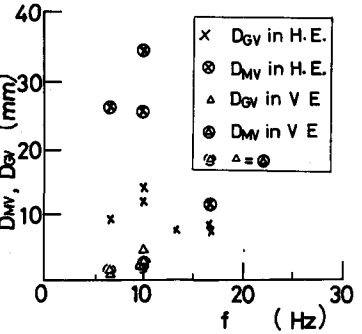


図-7 沈下量の共振曲線

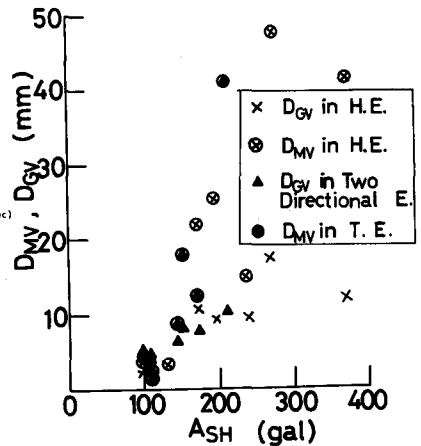


図-9 同時加振時および水平単独加振時の最終沈下量

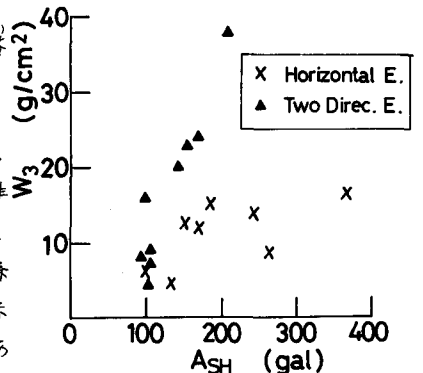


図-10 同時加振時および水平単独加振時の過剰間隙水圧 $W_3$

参考文献 1) たとえば、石原ほか：第10回土質工学研究発表会講演集、時松ほか：左に同じ。