

(62) 液状化による飽和砂地盤の沈下特性に関する模型実験とその有効応力解析

大林組技術研究所 ○松田 隆
後藤 洋三

1. まえがき

液状化による地盤あるいは構造物の変状の原因としては、支持力低下、地盤と構造物との間に生じる密度的なアンバランス、それに地盤自体の永久変形などが挙げられる。また、変状は震動時のみならず震動停止後においても観測されており、その挙動は非常に複雑で、未解明な点がおおいのが現状と思われる。

そこで、液状化による地盤および構造物の変状特性を把握することを目的に、その第一段階として液状化地盤の沈下性状に注目した振動台実験を実施した。この実験の特徴は、過剰間隙水圧と地盤沈下量との経時的な関係を明確にするため、地中の地盤沈下量を時刻歴で計測していることである。この報告は、動的な沈下計測手法をはじめとする実験方法とその結果を述べ、さらに、実験を模擬した有効応力解析の一例を示すものである。

2. 実験方法

2.1 模型地盤作製方法

2mm以下に粒度調整された山砂を用い、せん断土槽内に模型地盤を作製した。試料砂の物理定数を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。模型飽和地盤の作製方法は以下に示す過程で構成される。

- ①土砂投入 → ②圧力水噴射による土粒子攪はん → ③振動台加振による混在気泡の逸脱 → ④余剰水の排水と土砂の沈降

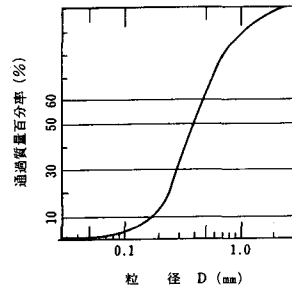


図-1 砂の粒径加積曲線

表-1 模型地盤材料

平均粒径 D_{50}	0.40mm
10%粒径 D_{10}	0.17mm
60%粒径 D_{60}	0.48mm
均等係数 U_c	2.82
最小間隙比 e_{min}	0.608
最大間隙比 e_{max}	0.989

この方法によって作製された今回の模型地盤の平均的な単位体積重量は 1.91t/m^3 、相対密度は32%であった。

2.2 入力波と実験ケース

液状化実験での入力波は正弦波とした。加振振動数は模型地盤の非液状化時の共振振動数より低いことを条件に2Hzとし、波数Nは液状化強度算定に用いられる繰り返し回数を参考にN=20とした。実験ケースは入力加速度振巾をパラメーターとし27~174galの範囲で設定した。このとき、各入力ケースにおいて上述の方法を用い処女地盤を

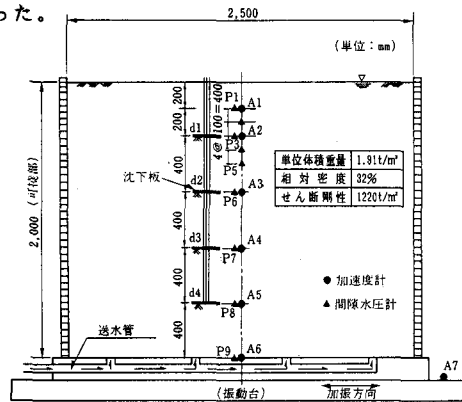


図-2 せん断土槽と計器配置

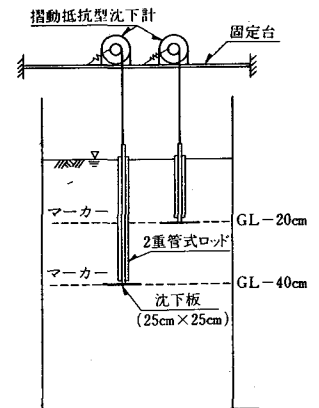


図-3 沈下計測システム

作製することによって入力段階間の履歴の影響をなくした。

2.3 計測項目

計測項目は加速度、間隙水圧と沈下で、図-2に示すように砂層中の深度方向に関する分布が把握できるように測点を配置した。地表面の沈下に関しては最終沈下のみである。地中沈下計測は地盤の上下方向の変位に追従する沈下板の運動をロッドが伝達し、摺動抵抗型の沈下計で動的に感知するシステムである

(図-3)。沈下板の重量はそれ自体の重量の影響をなくすため、砂の単位体積重量にバランスさせている。また、地中沈下量を伝達するロッドは、土粒子から隔離するとともにロッド自体の変形を防ぐため、鋼製二重管式の構造とした。

3. 実験結果

3.1 応答加速度と過剰間隙水圧

図-4に加速度、過剰間隙水圧および沈下量の最大値分布を示す。過剰間隙水圧分布図から、27gal 入力では全層とも液状化に至っていないが、僅か5gal増大させた32gal 入力で砂層の約2/5 すなわちGL-80cm 以浅にあたる広い領域が液状化していること、また、179galの大きな入力によっても深い部分の砂層は完全な液状化には至らないことなどがわかる。加速度分布図から、32gal 以下の入力では上層ほど大きな応答を示すのに対し、液状化に至らせる大きな入力時には非液状化層で最大応答を示していることがわかる。

3.2 地盤沈下量

(1) 最大値分布

図-4の沈下分布図から、非液状化時と液状化時とでは沈下性状に大きな相違がみられる。すなわち、全層とも液状化しなかった27gal 入力の場合、地表面沈下量は3mm 以下と小さく、しかも地中に向いながら減少傾向を示している。これに対して液状化した場合、地表面からGL-40cm の領域において全砂層厚2mの1~2%に相当する約25~40mmの沈下量を示していることがわかる。ただし、液状化に至っていない深い領域での沈下量は比較的小さい。

さらに特徴的なことは、このような大きな沈下は液状化層の下部である第2層(GL-80~40cm)から生じていることである。各層上下両端の沈下量の差で表わされる相対変位は第2層において12~32mmあり、この相対変位と層厚400mm から算定される第2層の鉛直ひずみは3~7%となる。

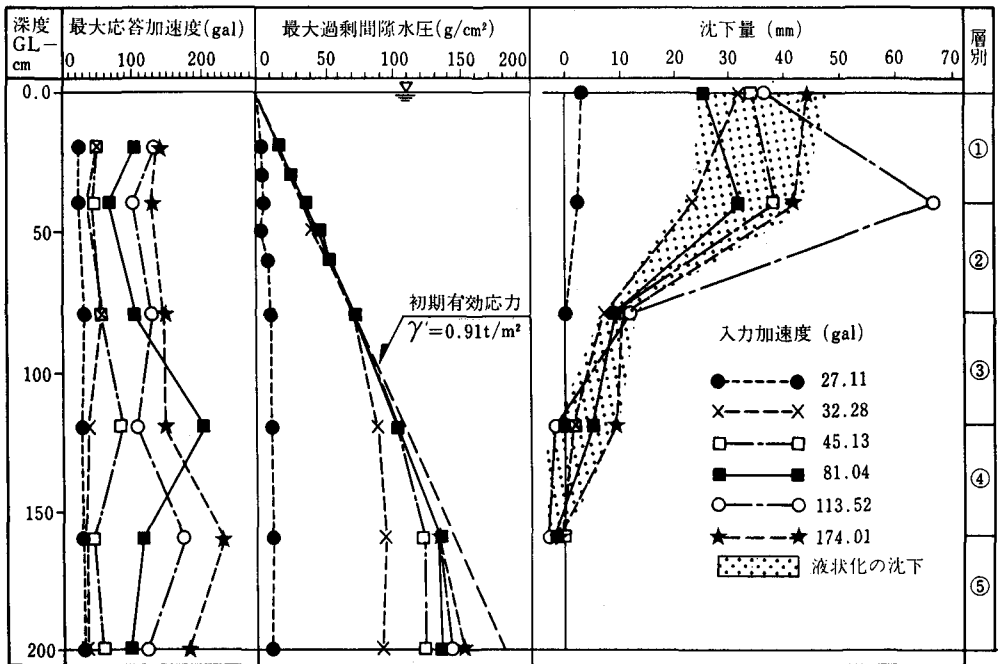


図-4 最大加速度・過剰間隙水圧・沈下量の分布

(2) 経時変化

図-5に32gal および113gal入力時の沈下量と過剰間隙水圧の経時変化を示す。32gal 入力時の場合、大きな沈下量を示したGL-40cm 位置 d1 に注目すると、加振中と過剰間隙水圧の消散中とで沈下速度は異なるが、それぞれの期間に生じる沈下量はほぼ等しい。すなわち、最終沈下量24mmの約半分に当たる11mmは過剰間隙水圧消散中に生じている。113gal入力時の場合、やはり d1 に注目すると、間隙水圧の急上昇と共に加振開始直後の約1秒間に最大値の半分に当たる量が一気に沈下し、その後の加振中および過剰間隙水圧の消散中にかけてゆるやかな速度で沈下は進行していく。

過剰間隙水圧消散中における地盤沈下現象に注目してみる。図-5から、 $t=11\sim 46\text{sec}$ にあたる過剰間隙水圧消散過程での d1 地点の沈下量は一定の勾配をもって進展していることがわかる。この勾配を沈下速度 V_c とし、ほぼ直線的に過剰間隙水圧が減少している区間の水圧と時刻の関係を過剰間隙水圧消散速度 V_d とする。図-6に各加振ケースにおける V_d と V_c の関係を示すが、バラツキはあるものの両者はほぼ比例関係にあるとみられる。本来、各入力ケースで地盤条件が全く同様なら V_d と V_c はそれぞれ一定になるが、地盤形成過程の若干の差がこのような $V_d \sim V_c$ の勾配となって現われたと思われる。

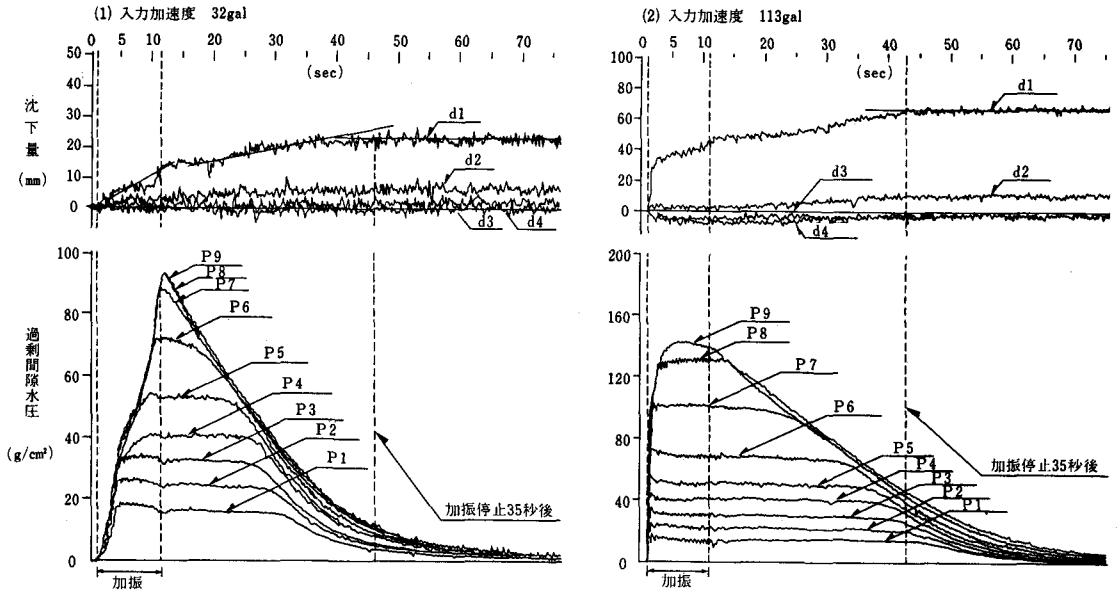


図-5 過剰間隙水圧と沈下量の経時変化

4. 有効応力解析例

4.1 解析手法

解析に用いたプログラムは弾塑性有効応力FEM 解析 "DIANA-J"である。間隙水圧上昇に関してはEndochronic 理論(Densificationモデル)を使用し、降伏条件に関してはDrucker-Prager則に従うものとした。Densification モデル固有の係数については文献2)を参照し、パラメータスタディーの形式で表-3に示すとうり決定した。また、土質定数の内、せん断剛性に関しては拘束圧の0.5 乗に比例すると仮定したうえで、解析モデルの固有値が共振振動数4.48Hzに

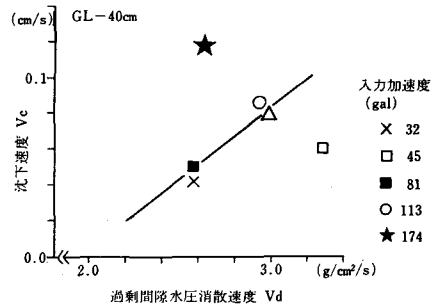


図-6 過剰間隙水圧消散速度と沈下速度との関係

一致するように決定した。透水係数は間隙水圧の消散速度から算定した。モデル形状は模型地盤の水平方向の一様性が実験的に確認されていることから、土柱モデルとし、計測器の配置を考慮し深さ方向11層に分割した。また、今回の解析時間領域は加振中の10秒間のみである。

4.2 解析結果

図-7に81gal 入力時の砂層中央部における過剰間隙水圧と加速度の解析結果を実験値と比較し示す。解析結果のうち過剰間隙水圧に関しては、実験での上昇過程(0~1.3sec)を良好に再現しており、最大水圧値もほぼ一致している。加速度応答は振巾の絶対値の一致がみられるものの、実験結果初期において生じている位相遅れについては表現しきれていない。このとき、実験値の中心軸のずれは計測器の倒れによるものと思われる。また、沈下量に関しては、加振終了時の地表面での実験値17mmに対し、解析結果はその約1/10の1.58mmとなった。これは、この解析で沈下傾向は定性的に実験結果と一致していることから、各層での過剰間隙水圧をより厳密に再現し得るモデルパラメーターを設定することにより、絶対値の一致もみられると思われる。

表-2 解析に用いた諸定数

せん断剛性	121t/m ² (最上層) ↑ 330t/m ² (最下層)
ポアソン比	0.4
透水係数	0.01cm/sec
内部摩擦角	30°
間隙率	46.6%
Densification パラメーター	A=0.02 B=5.3 κ=10

5. おわりに

せん断土槽を用いた飽和砂地盤の液状化実験を実施した結果、次のことがわかった。

- 1) 2m厚の砂層の地表面沈下量は液状化した場合には40mm前後となり、非液状化時での3mmに比し10倍以上の沈下を示す。
- 2) 液状化による大きな地盤沈下は液状化層の下部から生じ、この位置での鉛直ひずみは3~7%であった。

3) 液状化による地盤沈下量

の半分近くは加振中に生じるが、過剰間隙水圧消散中においてもよるやかに沈下は進行していく。

- 4) 過剰間隙水圧の消散速度と沈下速度との間に比例的な相関がみられた。

ただし、これらの沈下量の絶対値は透水係数、体積圧縮係数および地盤密度に大きく影響されるため、定量的な言及に至るためにはさらにデータの蓄積が必要と思われる。

参考文献

- 1) 吉見吉昭：砂地盤の液状化、第4章、pp88~101、技報堂
- 2) Zienkiewicz, Chang, and Hilton: Nonlinear Seismic Response and Liquefaction, IJNANG Vol2, pp381-404
- 3) 石原研而：土質動力学の基礎、第9章、pp236~242、鹿島出版会
- 4) 松田他：飽和砂地盤の液状化実験とその有効応力解析例について、第41回土木学会年次講演会、III-34、

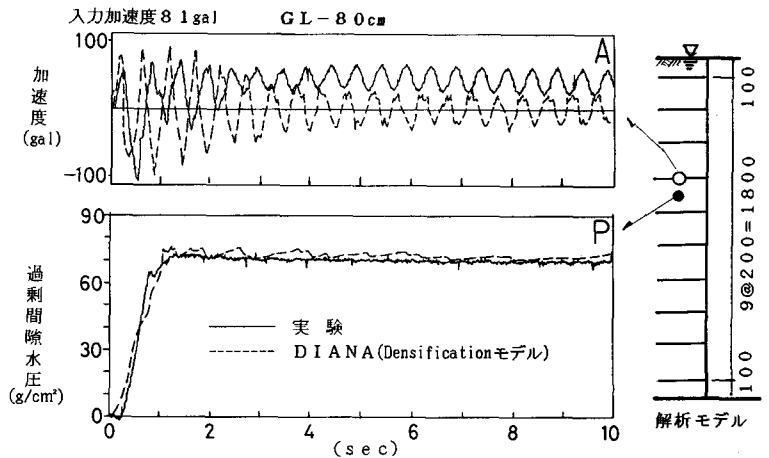


図-7 解析結果と実験結果との比較