

(69) 液状化に伴う盛土周辺地盤の流動特性に関する検討

(株)熊谷組技術研究所 ○森 利弘
 建設省土木研究所 佐々木康 常田賢一
 松本秀應
 建設省千葉県国道工事事務所 佐谷祥一

1. はじめに

盛土周辺のような地表面形状が大きく変化する境界部においては、地震時地盤の液状化に伴い地盤の側方流動が生じる場合がある(図-1)。液状化に伴う地盤の側方流動に関して、これまでに流動の発生メカニズムあるいは流動量の予測という観点から振動台実験等が行われているが、傾斜地盤に関するものが多く、地形変化部に関しては十分な解明が行われていない。本報は、このような地表面形状が大きく変化する境界部の地盤流動特性について検討を加えるために、地表面に偏荷重(盛土荷重)を加えたモデルに関する小型模型実験を行い、続いて液状化層を流体と見なした簡易解析法による解析を行ったのでその結果について報告する。

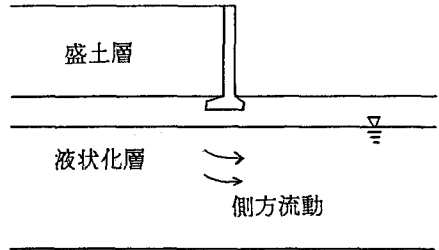


図-1 地表面形状が大きく変化する境界部の液状化

2. 小型模型実験

2.1 実験装置と地盤特性

実験に用いた装置を図-2に示す。この装置の特徴は、土槽の底部に設置したドレーン層に送水し土槽内の地盤をボイリング状態とし、極緩い飽和地盤を簡単に作成することができることである。また、土槽は板ばねで支持されており、土槽の側面に打撃を加えることにより地盤に液状化を生じさせる構造となっている。実験に用いた砂は豊浦標準砂であり、本装置により作成した地盤特性を表-1に示す。

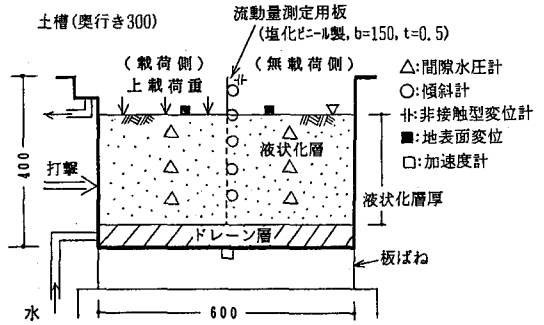


図-2 実験装置(液状化層厚240mm, 単位:mm)

2.2 実験方法

実験はボイリングにより作成した地盤の地表面の片側に盛土(偏荷重)を想定した上載荷重を加え、土槽の側面に打撃を加えることにより地盤を液状化させて行った。上載荷重には水及び鉛散弾を入れたビニール袋を用いた。地盤及び上載荷重に関する実験条件を表-2に示す。

測定項目は図-2に示しているように地盤流動量、間隙水圧、土槽加速度及び地表面変位である。地盤流動量の測定は土槽の中央に設置した塩ビ板の水平変位量を非接触型変位計を用いて行った。また、深さ方向の地盤流動分布を見るために塩ビ板に超小型の加速度計を用いた傾斜計を取り付け、塩ビ板の傾斜角から水平変位量を求め

表-1 ボイリングにより作成した地盤の特性

間隙比 e	相対密度 $D_r(\%)$	飽和単位体積重量 $\gamma_{sat}(gf/cm^3)$
0.842	36	1.89

表-2 実験条件

実験No.	液状化層厚(mm)	上載荷重(gf/cm^2)	実験回数
1-1	240	0	3
1-2	240	3.3	3
1-3	240	5.0	3
1-4	240	8.3	3
1-5	240	11.7	3
2-1	160	0	2
2-2	160	3.3	3
2-3	160	5.0	3
2-4	160	8.3	3
2-5	160	11.7	3

た。塩ビ板の下端はピン支持としている。

2.3 実験結果

上載荷重を加えていない場合における実験結果として、間隙水圧の時刻歴結果を図-3に示す。図中に示した横軸（時間軸）の2秒時に土槽の側面に打撃を加えている。図に見られるように打撃とほぼ同時に過剰間隙水圧は有効上載荷重（土被り圧より算出）に達していることから、土槽全体にわたり完全液状化していることが判る。また、過剰間隙水圧は土槽の最深部から上部へとほぼ一次関数的に消散し、地表面に近い位置ほど完全液状化状態の継続時間は長くなっている。上載荷重を加えた場合における時刻歴結果の一例として、実験ケース1-4における結果を図-4に示す。同じく時間軸の2秒時に土槽の側面に打撃を加えている。間隙水圧の時刻歴について見ると無載荷側の過剰間隙水圧は上載荷重を加えていない場合と同様に打撃と同時に有効上載荷重に達し、無載荷側では完全液状化している。一方、載荷側では過剰間隙水圧は有効上載荷重（土被り圧+上載荷重として算出）より小さく、過剰間隙水圧比は上載荷重の増加に伴い小さくなる傾向にあった。地盤の変位について見ると、載荷側における地表面は打撃直後から沈下し始め、それに伴って境界部に設置した塩ビ板頭部は徐々に無載荷側へ変位している。このように土槽への打撃後、過剰間隙水圧の消

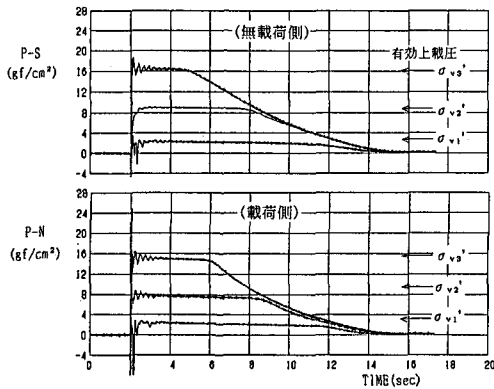


図-3 間隙水圧の時刻歴結果(実験No. 1-1, 上載荷重なし)

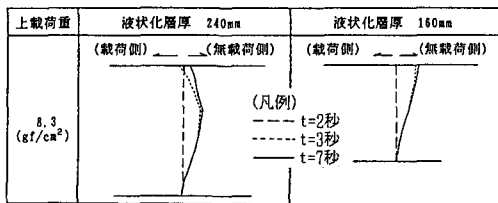
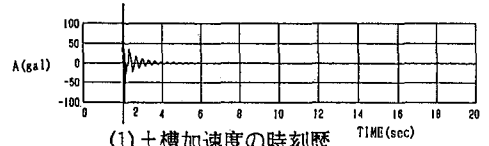
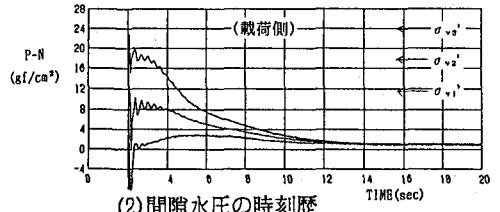
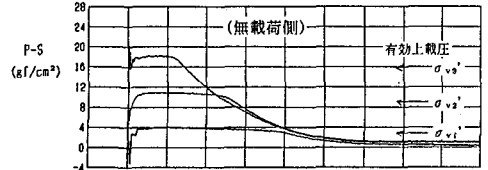


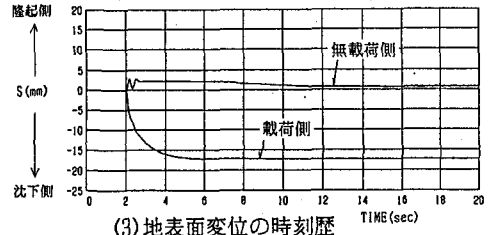
図-5 地盤流動量の深度分布形状



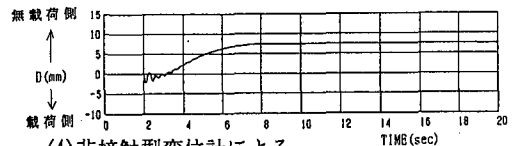
(1) 土槽加速度の時刻歴



(2) 間隙水圧の時刻歴

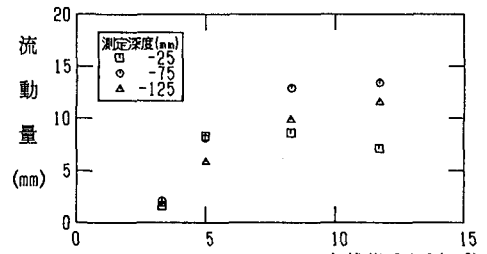


(3) 地表面変位の時刻歴

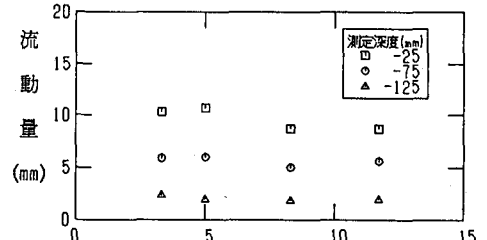


(4) 非接触型変位計による塩ビ板頭部の水平変位の時刻歴

図-4 時刻歴結果(実験No. 1-4: 上載荷重あり)



(1) 液状化層厚240mm 上載荷重 (gf/cm²)



(2) 液状化層厚160mm 上載荷重 (gf/cm²)

図-6 地盤流動量と上載荷重との関係

散時においても境界部では水平方向に地盤が流動し続けている現象が認められる。

深さ方向における地盤流動量の分布形状を図-5に示す。t=7秒（打撃後5秒）における分布形状はほぼ最終形状である。液状化層厚が160mmの場合、地表面において流動量が最大となる三角形形状を示し、これに対し、液状化層厚が240mmの場合、地中において最大となる放物線形状を示している。

また、各測定点における流動時間を調べた結果、地表面に近い位置ほど流動時間は長くなっており、完全液状化している時間と対応していることが判る。

塩ビ板の傾斜から算出した地盤の最終流動量と上載荷重の関係を図-6に示す。液状化層厚が240mmの場合、流動量は上載荷重に対して対数関数的に増加するような傾向を示している。160mmの場合、今回の実験の範囲内では上載荷重が増加しても、流動量はほぼ一定となっている。

地盤の最終流動量と载荷側における地表面沈下量の関係を図-7に示す。地盤の流動量と地表面沈下量には相関が認められ、境界部における流動量を表す一つの指標として、地表面沈下量を用いることができる。

3. 簡易解析法

3.1 流体モデルによる解析方法

液状化に伴う地盤の側方流動に関する解析方法はさまざまな角度から検討されている¹⁾が、本報では模型実験における液状化層を流体と見なし、解析を行う。図-8に模型地盤の解析モデルを示す。用いた主な仮定は次の通りであり、地盤の流動現象を土槽全体を一つの系とした運動方程式（ラグランジュの運動方程式）で表現することを考える。

(i) 液状化地盤は等価な粘性係数を有する流体とする。

(ii) 粘性による摩擦は流動方向である水平方向のみ考慮する。

(iii) 過剰間隙水圧の消散は考慮しない。

载荷側地表面の沈下量を $S(t)$ とし、载荷側における地盤の鉛直変位の深度分布 $w(z)$ を次のように仮定する。

$$w(z) = S(t) \frac{z^2}{H^2} \quad (1)$$

連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

を用いると地盤の水平変位 u は次のように求まる。

$$u(x, z) = -S(t) \frac{2zx}{H^2} \quad (3)$$

同様に、無载荷側においては

$$w(z) = -S(t) \frac{z^2}{H^2}, \quad u(x, z) = -S(t) \frac{2z}{H^2} (2B - x) \quad (4)$$

となり、土槽内の地盤変位は $S(t)$ を用いて表せる。

ラグランジュの運動方程式は一般座標としてこの $S(t)$ を用いることにすれば、次のようになる。なお、外力は作用しないものとする。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{S}} \right) - \frac{\partial K}{\partial S} + \frac{\partial F}{\partial \dot{S}} + \frac{\partial V}{\partial S} = 0 \quad (5)$$

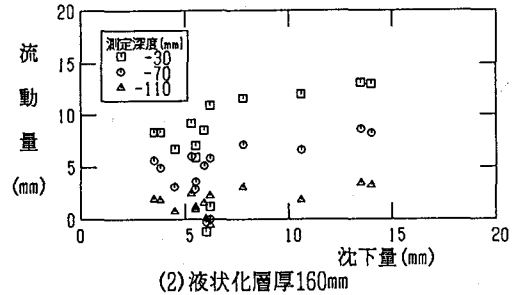
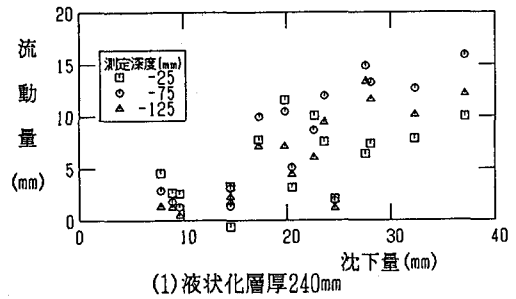


図-7 地盤流動量と载荷側地表面沈下量との関係

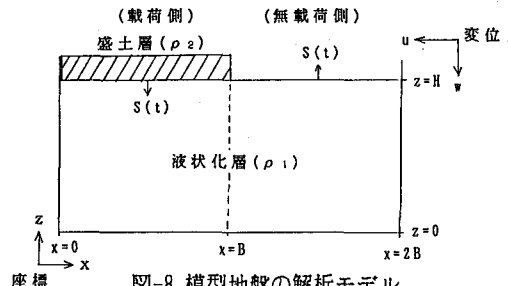


図-8 模型地盤の解析モデル

ここに、K：運動エネルギー、F：散逸関数（単位時間にエネルギーが失われる割合の半分）

V：ポテンシャルエネルギー（位置エネルギー）

土槽全体を一つの系として考えれば、K、F、Vはそれぞれ次のように求められる。

$$K = \frac{1}{2} \rho_2 B h S^2 + \frac{1}{2} \rho_1 \left\{ \int_0^H \int_0^B (w^2 + u^2) dx dz + \int_0^H \int_B^{2B} (w^2 + u^2) dx dz \right\}$$

$$F = \frac{1}{2} \eta \left\{ \int_0^H \int_0^B \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \right)^2 dx dz + \int_0^H \int_B^{2B} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \right)^2 dx dz \right\} \quad (6)$$

$$V = -\rho_2 B h g S + \frac{1}{2} B \rho_1 g \{ (H-S)^2 + (H+S)^2 - 2HS \}$$

ここに、 η ：液状化地盤の等価粘性係数、 g ：重力加速度、 h ：盛土高さ

これらを代入すると(5)式は $S(t)$ に関する振動方程式（二階の線型微分方程式）となり、実験結果に適合する一般解は次のような形で求まる。

$$S(t) = A e^{-at} - C e^{-ct} + \frac{\rho_2 h}{2 \rho_1} \quad (7)$$

ここに、 A, C, a, c は定数である。

解析解である(7)式を概念的に図示すると図-9に示すようになり、沈下量 $S(t)$ は $\rho_2 h / 2 \rho_1$ に漸近し、中間の挙動は粘性係数に依存する形となっている。

3.2 実験結果との比較

載荷側地表面沈下量に関して、図-9に示した解析結果と図-4(3)に示した実験結果を比較して見ると、形状が一致しており、(7)式で示した解析解の妥当性が窺える。

実験結果に適合するような液状化地盤の等価粘性係数の推定を行った。シミュレーションは沈下量を最終沈下量で無次元化して行った。その結果、粘性係数は上載荷重にあまり関係なく、 10^4 (g/cm/s)程度となり、水の粘性係数(10^{-3} (g/cm/s)程度、水温20℃)に比べるとかなり大きくなった。この理由には、過剰間隙水圧の消散を考慮していないことが主原因と考えられ、現実には液状化している範囲が時間とともに変化していることを解析に取り入れる必要があると考えている。

載荷側地表面の最終沈下量について実験結果と比較すると図-10のようになる。解析に基づく沈下量は上載荷重に対して単調増加する形となる。液状化層厚240mmの実験結果の場合には解析結果と比較的一致しているが、160mmの場合には異なる傾向を示している。

4. まとめ

この検討により、(1)地盤の流動は、打撃入力後すなわち過剰間隙水圧の消散時まで流動し続けていること(2)地表面形状が大きく変化する境界部における流動特性は上載荷重及び液状化層厚の影響を受けることが確認でき、(3)液状化層を等価な粘性係数を有する流体と見なし、流動の量を解析的に推定する方法を提案した。なお今後、解析解に含まれる仮定(ハ)による影響を再度吟味する必要があると考える。

本報は著者の一人が部外研究員として建設省土木研究所において行った研究の一部をまとめたものである。

【参考文献】

- (1)例えば溜、東畑、常田：液状化による地盤永久変位の模型実験と解析、第8回日本地震工学シンポジウム、1990
- (2)常田、松本、佐谷、森：液状化に伴う盛土周辺地盤の流動特性に関する模型実験、土木学会第46回年次学術講演会（投稿中）

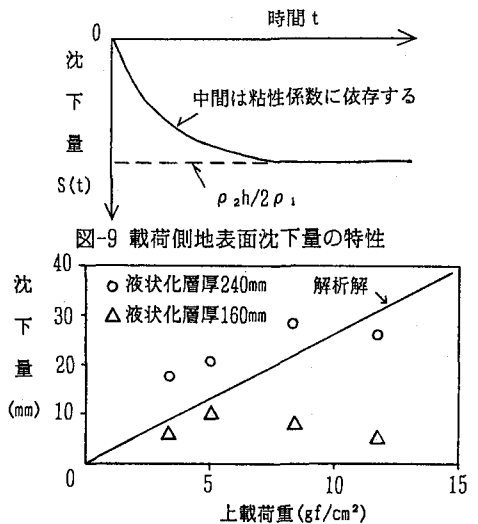


図-9 載荷側地表面沈下量の特長

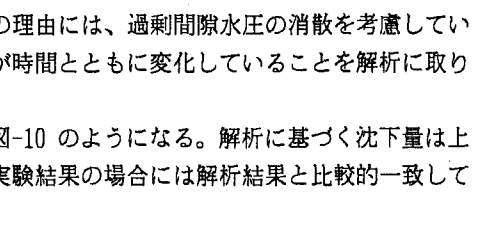


図-10 実験結果との比較（載荷側地表面沈下量）