

(70) 液状化に伴う地盤の流動特性に与える境界条件の影響の検討

建設省土木研究所
建設省土木研究所
建設省千葉国道工事事務所

○松本 秀應
常田 賢一
佐谷 祥一

1. まえがき

地盤の液状化による支持力の低下あるいは浮力の発生は橋梁等の構造物の設計において考慮されているが、傾斜地盤で液状化した場合には地盤が大きく変位（流動）することが指摘されており、この地盤流動の有無及びその影響についても検討することが必要である。著者らは液状化による地盤流動の予測を目的として、流動量を支配する主要な因子を解明するために振動台実験を実施してきた^{1)~3)}。本文では、境界条件として斜面長と表層の不飽和地盤の有無をとりあげ、それらの地盤内部の流動特性と地表面の流動量に与える影響、および流動する地盤内の杭基礎に作用する流動圧の発生特性に関する振動台実験の結果を報告する。

2. 実験の方法

実験には、図-1に示すように表層に不飽和地盤を有し、斜面長が2, 4, 8mのケース9~11と、表層に不飽和地盤を持たない斜面長8mのケース12の4体の模型地盤を用いた。模型地盤は下層より、浅間山砂（平均粒径0.25mm程度）を用い水中落下法により作製したゆるい液状化層（層厚350mm）と、玉砂利（平均粒径7mm程度）により作製した不飽和層（層厚150mm）の2つの層からなり、ケース12は下層の液状化層のみで構成されている。また、傾斜した液状化層を形成するために、模型地盤山側（図では右側）に給水装置、谷側（図では左側）に排水装置を設け、地下水位を勾配5%の状態に調節した。模型地盤の条件を既往の実験ケースも合わせて表-1に示す。

それぞれの模型地盤を所定の入力加速度の2Hzの正弦波により20秒間加振し、模型各部の応答加速度、発生間隙水圧、変位量を計測した。加振は40gal, 60gal, 80gal・・・と段階的に入力加速度を大きくし、地盤に流動が発生し始める状態と、液状化していてもそれ以上変形が進行しない最終変形状態を確認するように実施した。測定機器は図-1に示すように水平方向に1m間隔の計測断面を設けるよう配置しており、以下の結果の整理にあたっては、各測定断面毎の結果を用いた。

また、杭基礎に作用する流動地盤からの流動圧を計測するために、ケース11と12の模型地盤には塩ビパイプ（VU16：外径22mm，肉厚3mm，長さ790mm）を用いた杭模型を、図-1に示す位置に各1本設置した。杭模型には深度方向に5ないし8箇所にはびずみゲージを張り付け、杭の曲げモーメント分布を計測するとともに、杭頭の水平変位を変位計により計測した。なお、杭模型下端は非液状化層（層厚190mm）を貫

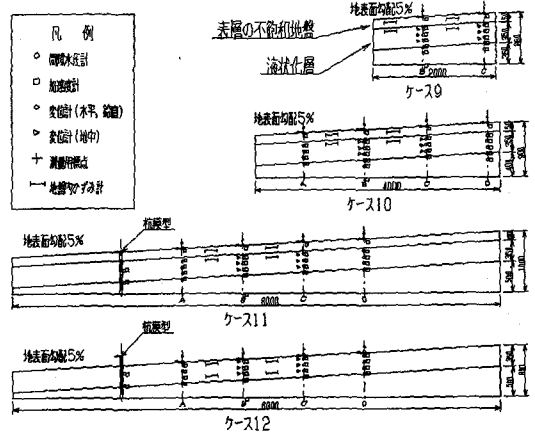


図-1 模型地盤の概要

表-1 模型地盤の条件

ケース	地表面の傾斜度 (%)	液状化層下面の傾斜度 (%)	地盤長 (m)	斜面長 (m)	液状化層厚 (cm)	不飽和地盤厚 (cm)
1	5	0	6	6	70	0~30
2	7.5	0	6	6	35	0~45
3	5	5	6	6	20	0~30
4	5	0	6	6	35	0~30
5	2.5	0	6	6	35	0~15
6	5及び0	0	6	3.2	35	0~16
7	0	5	6	φ1	35~65	0
8	1.5及び0	0	φ2	φ1	25	0~15
9	5	5	2	2	35	15
10	5	5	4	4	35	15
11	5	5	8	8	35	15
12	5	5	8	8	35	0

き土層底版に剛結されている。

3. 地盤流動の発生開始加速度

各加振段階における入力加速度振幅と、その加振段階までにおいて発生した斜面中央における地表面の累積水平変位量の関係を図-2に示す。表層に不飽和地盤を有しないケース12では、入力加速度振幅が100galを越えると地盤に有為な変形が発生し始め、表層に不飽和地盤を有するケース9~11では、150galを越えないと地盤には有為な変形は生じていない。これは、液状化地盤にとって不飽和地盤が存在することが有効応力の増加をもたらし、加振中の地盤内のせん断応力比を低下させたことに起因すると考えられる。また、表層に不飽和地盤が存在するケース9~11を比較すると、斜面長が長くなるほど小さな入力加速度から地盤に変形が生じ始めており、加振方向の両端の土層壁が影響を与えにくくなると考えられる斜面長の長い場合に、地盤の変形が生じやすくなるのがわかる。

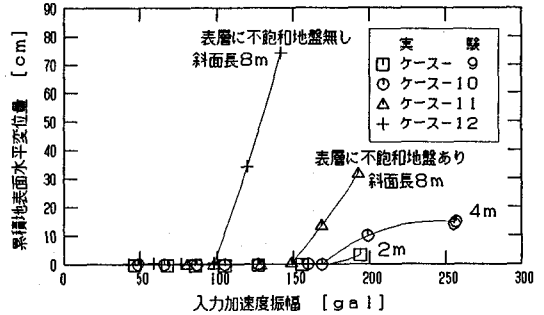


図-2 累積地表面変位の発生特性

4. 地盤の最終変形状況

各ケースの最終加振後において、地盤模型側面に設置しておいたマーカーの変形状況のスケッチを図-3に示す。斜面長が2m, 4mと短いケース9, 10では、谷側(図では左側)の壁近くではマーカーはほぼ直線のままで水平変位量も小さく、山側(図では右側)に向かうにつれて液状化層内でのせん断変形が大きくなり、その結果地表面の水平変位量も大きくなっている。また、さらに斜面山側の壁に近づくにつれて液状化層内でのせん断変形が小さくなり地表面の水平変位量が減少し、地表面水平変位は斜面中央付近で最大となる分布を示す。斜面長が8mと長いケース11でも同様に、斜面左端から山側に向かうにつれて水平変位量が大きくなり、斜面中央付近で地表面水平変位が最大となる傾向は認められるものの、地表面の水平変位よりも液状化層内の水平変位の方が大きくなっており、水平変位量の深度分布に違いが認められる。

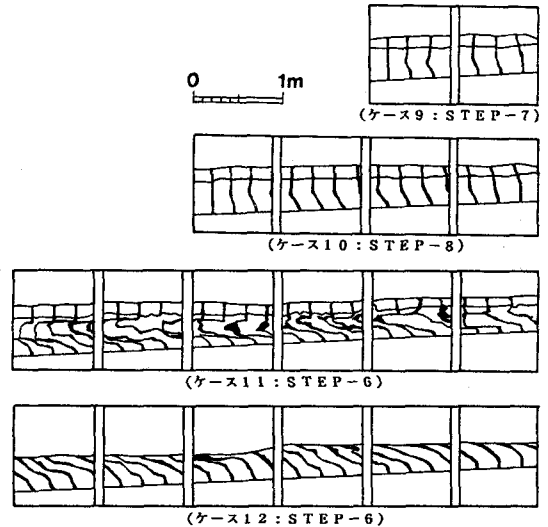


図-3 最終加振後のマーカーの変形状況

一方、表層に不飽和地盤を持たないケース12では、図-2に示したように地表面の水平変位量そのものも斜面長が8mで等しいケース11に比べて2倍程度と大きく、水平変位の深度分布も地表に近づくほど大きくなり、ケース11のように地中部で最大の水平変位を示すような領域は存在しない。また、加振中に地表面が波長2m程度で波打つ現象が認められ、その結果、加振前には直線状の地表面だったものが加振後には2m間隔で山谷が形成された。

5. 流動量と諸要因の関係

既往の実験結果^{1), 2)}から、地盤流動による地表面の水平変位量Dを左右する要因として、①間隙水圧比

がほぼ 1.0 になってからの加振時間 T、②間隙水圧比がほぼ 1.0 になっている液状化層の厚さ H、③地形による初期せん断力の大きさ（ここでは地表面の勾配 θ_s により整理を行う）が考えられている。また、今回の実験から表層の不飽和地盤が地盤の変形を抑制する効果が有ると考えられるため、不飽和地盤の剛性の程度を表す指標として式-1を定義し（図-4参照）、これにより整理を行うことを試みた。ここで、 H_s ：不飽和地盤の厚さ、 γ_t ：不飽和地盤の単位重量、 ϕ ：不飽和地盤の内部摩擦角を示す。

$$\text{剛性指標} = 0.5 \cdot H_s^2 \cdot \gamma_t \cdot \tan \phi \quad (\text{式-1})$$

図-5はこれまでに実施してきた実験結果¹⁾⁻³⁾も含め、単位液状化時間、単位液状化層厚に対する流動量 $D / (T \cdot H)$ と、地表面の勾配 θ_s の関係について整理を行ったものである。同図から、地表面の勾配が大きくなるにつれて $D / (T \cdot H)$ が増加し、不飽和地盤の剛性指標が大きくなるにつれて $D / (T \cdot H)$ が減少する傾向があることがわかる。

6. 流動地盤から杭に作用する流動圧

ケース12において、地盤中に設置しておいた杭模型（図-6参照）の曲げモーメントの時刻歴の例を図-7に示す。A/D変換装置の入力容量をオーバーしてしまい、加振中に波形の頭が切れてしまっている部分があるが、加振開始後7秒程度までと加振終了時には計測範囲内に戻っている。そのため、加振開始後7秒を越えてからの計測結果を除いて結果の整理、考察を行う。

図-8は、杭の曲げモーメントの深度分布の時間的な変化を整理した結果であり、図中の破線は液状化層の上面と下面の位置を示している。これより、加振開始後5秒頃から杭の曲げモーメントに変化が認められ、地表部分でモーメントが零、液状化層下面で最大のモーメントとなる分布を示していることがわかる。なお、8秒を越えるあたりからは杭下部のモーメントが正確に計測されていないため、深度分布が直線的な頭打ちの状態に作図されている。図-9は、図-8のモーメント分布を2回微分（差分を取る）することにより、流動地盤が杭に作用する土圧の深度分布を推定した結果である。加振開始後9秒以降では、モーメントの計測の不備から杭下部において土圧が零となってしまうが、液状化層の上部で正の土圧（地盤の流動方向に杭を押そうとする方向）が、また、液状化層の下層及び非液状化層からは負の土圧（杭の変形を地盤が支持する方向）が作用していることが読み取れる。

また、杭周辺の地表水平変位が40cm程発生しているのに対して、杭頭の変位は10cm程度と小さく、杭周辺を地盤がすり抜けていることがわかる。杭に作用する土圧についても、周辺地盤と杭との相対変位に比例するような発生特性ではなく、地盤と杭の相対速度に比例するような傾向を示し、地盤の流動速度が減少する加振終了間際には、曲げモーメントの減少（土圧の減少を意味する）傾向が図-7より読み取れる。その

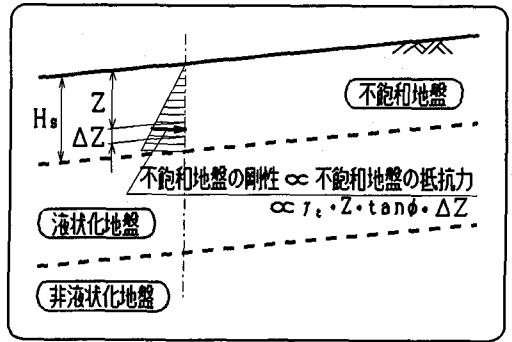


図-4 剛性指標の概念図

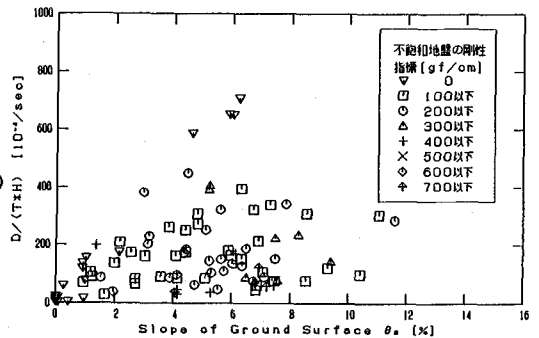


図-5 $D / (T \cdot H)$ と θ_s の関係

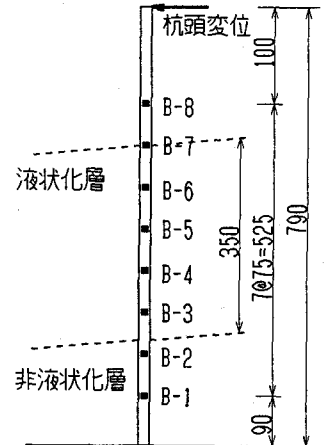


図-6 杭模型の概要

ため、液状化により流動する地盤から構造物への作用力を検討する際のモデルとしては、構造物と地盤の間をバネで接続するような状態ではなく、粘性流体的な地盤からの抗力的な状態を想定した方がよいことが示唆される。

あとがき 今後は、実験から得られた知見に基づいて、実務的な指標を用いた実地盤での流動量、および杭基礎等への影響の簡易算定法について検討を進める予定である。なお本研究の実施に際しては、建設省総合技術開発プロジェクト地表変状情報の処理システムの開発分科会（分科会長：片山）の方々にご指導を頂いたが、ここに厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 佐々木, 松本, 佐谷: 液状化にともなう地盤流動に関する振動台実験, 第24回土質工学研究発表会
- 2) 松本, 常田, 佐谷: 液状化による地盤流動に関する模型実験, 第25回土質工学研究発表会
- 3) Y. Sasaki, K. Tokida, H. Matsumoto, S. Saya: Experimental Study on Lateral Flow of Ground Induced by Soil Liquefaction, 第8回日本地震工学シンポジウム, 1990.12

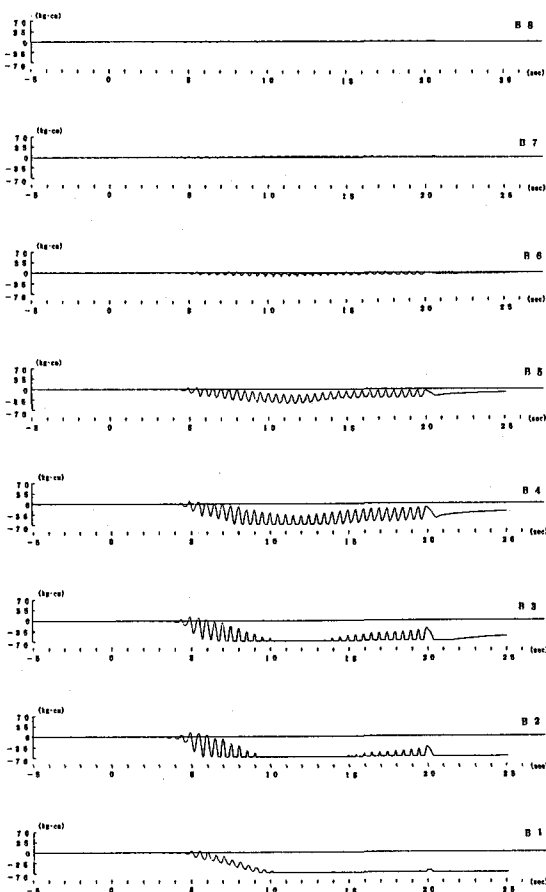


図-7 杭の曲げモーメントの時刻歴 (ケ-12:STEP-5)

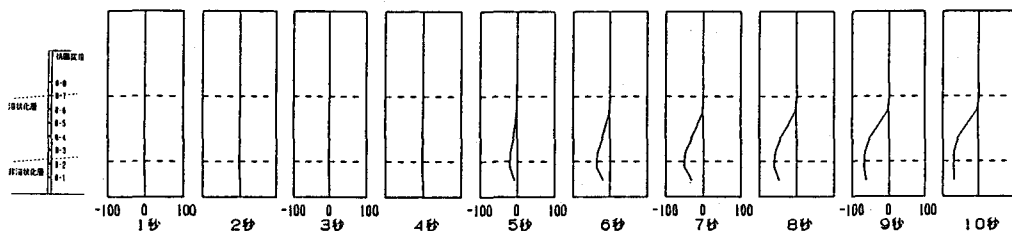


図-8 杭の曲げモーメントの深度分布の時間的な変化 (ケ-12:STEP-5) (単位: kgf-cm)

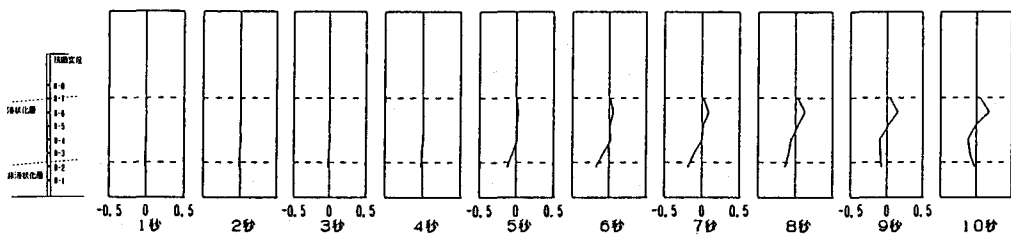


図-9 杭に作用する土圧の深度分布の時間的な変化 (ケ-12:STEP-5) (単位: kgf/cm²)