

# 流動する液状化層上の不飽和層からの土圧に関する研究

Study on earth pressure for unsaturated surface layer by the lateral flow due to liquefaction

技術研究所 高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI  
 技術研究所 湊山 美怜 MISATO FUCHIYAMA  
 土木設計部 津田 和夏希 WAKAKI TSUDA

液状化に伴う側方流動を抑制するため、筆者らは深層混合処理工法で造成した改良杭を、あらゆる方向から見て存在するように配置した流動閉塞杭と称する対策工法を提案した。流動閉塞杭は、杭頭部を浅層改良と一体化することで杭頭部の回転を拘束し、水平力に対して抵抗する機構を採用している。その構造設計を合理的に行うためには、浅層改良と改良杭に作用する流動力を適切に評価する必要がある。現実的には、液状化層の上に不飽和層が存在することが多く、道路橋示方書・同解説V耐震設計編では、兵庫県南部地震での被災事例の解析結果をもとに、この不飽和層からの土圧を常時の受働土圧で算定することになっている。しかしながら、これを実際に評価した研究例は見当たらない。そこで今回、遠心模型実験を実施してこの土圧について検討した。その結果、流動する液状化層上の不飽和層からの土圧は、受働土圧よりも小さいことを確認した。

キーワード：液状化，側方流動，土圧，遠心模型実験

In this research, the authors proposed the irregularly displaced DM piles to prevent lateral flow in various directions. The design method of this structure proposed that the pile head of DM piles were fixed to the shallow mixing layer. In order to design that structure reasonably, appropriate evaluation of the lateral load acting on the piles and the shallow mixing caused by lateral flow is required. It is prescribed by Specifications for Highway Bridges -Part V Seismic Design- that the earth pressure of the unsaturated layer around the ground surface shall be considered equal to passive earth pressure when lateral flow due to liquefaction occurred. This is based on the results of the analysis against the damage of the bridge on the coastal landfill ground due to the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. In this present study, centrifuge model tests were conducted to investigate the earth pressure of the unsaturated layer caused by lateral flow due to liquefaction. The results of the model tests indicated that its earth pressure was smaller than the passive earth pressure.

**Key Words:** Liquefaction, Lateral Flow, Earth Pressure, Centrifuge Model Test

## 1. はじめに

液状化に伴う側方流動を防止する根本的な方法は、液状化の発生を防止することである。しかし、対策範囲が広域に及ぶ場合にはその対策に大きな費用が必要となるため、筆者らは側方流動を抑制する合理的な対策方法が必要と考えている。

このような対策方法として、筆者らは深層混合処理工法で造成した改良杭を、あらゆる方向から見て存在するように配置した流動閉塞杭<sup>1,2)</sup>と称する対策工法を提案した。流動閉塞杭は、構造的には改良杭下端を非液状化層に杭径程度以上根入れさせ、杭頭部は表層改良と一体

化させることでその回転を拘束し、水平力に抵抗する機構を採用している。したがって、その構造設計を合理的に行うためには、浅層改良と改良杭に作用する流動力を適切に評価する必要がある。実際の地盤では、液状化層の上に非液状化層である不飽和層が存在することが多い。道路橋示方書・同解説V耐震設計編<sup>3)</sup>では、流動する液状化層上に非液状化層がある場合、この土層からの土圧は常時の受働土圧で算定することになっている。これは、平成7年兵庫県南部地震の際、臨海埋立地盤上の橋の被災事例に関する解析結果等を基に決められたものである。しかし、この不飽和層からの土圧を実際に評価した研究例は見当たらない。そこで今回、この不飽和層

からの土圧について遠心模型実験を実施して検討した。

## 2. 遠心模型実験の概要

### (1) 実験装置と実験ケース

実験は、港湾空港技術研究所所有の遠心模型実験装置<sup>4)</sup>を用い、50 gの遠心加速度で実物との縮尺比を1/50として実施した。

図-1は、実験模型の概略を示したものである。図-1(a)に示す動的載荷実験は、側方流動に伴う液状化層上の不飽和層からの土圧を評価することを目的としたものである。模型地盤の上流端と下流端の越流水槽は、地下水位に合わせて所定の高さに設置されている。本実験は、最大入力加速度の違いにより2ケース（実物スケール EP-D1:  $1.94 \text{ m/s}^2$  , EP-D2:  $2.77 \text{ m/s}^2$ ）実施した。一方、図-1(b)に示す静的載荷実験は、この不飽和層の受働土圧を評価することを目的としたものであり、同一条件で2ケース（EP-S1, EP-S2）実施した。

### (2) 模型地盤の作製方法及び地下水位の調整方法

動的載荷実験については、地盤の勾配は1/10であり、液状化により不飽和層が下流側に流動するようにした。傾斜した地下水位は、上流端から所定の量の間隙流体を常に供給し、下流端に設置した越流水槽から溢れてきた間隙流体を土槽外へ排出し続けることにより実現した。一般に、遠心模型実験では遠心加速度に応じて粘度を調整した溶液を間隙流体として用いることが多い。本実験では模型地盤の流動性を高めるため、間隙流体に脱気水を用いた。その代わりに、地盤の透水性を下げ水圧の消散を遅らせる方法<sup>5)</sup>を採用した。目標相対密度を50%として空中落下法で作製した模型地盤の材料には、相馬硅砂5号 ( $D_{50}=0.35 \text{ mm}$ ,  $U_c=1.6$ ) に非塑性のシリカパウダー ( $D_{50}=0.05 \text{ mm}$ ) を重量比で7:3となるように混ぜた試料を用いた。

一方、静的載荷実験の地盤材料および模型地盤の勾配は動的載荷実験と同一であり、模型地盤の奥行も同様に200 mmである。

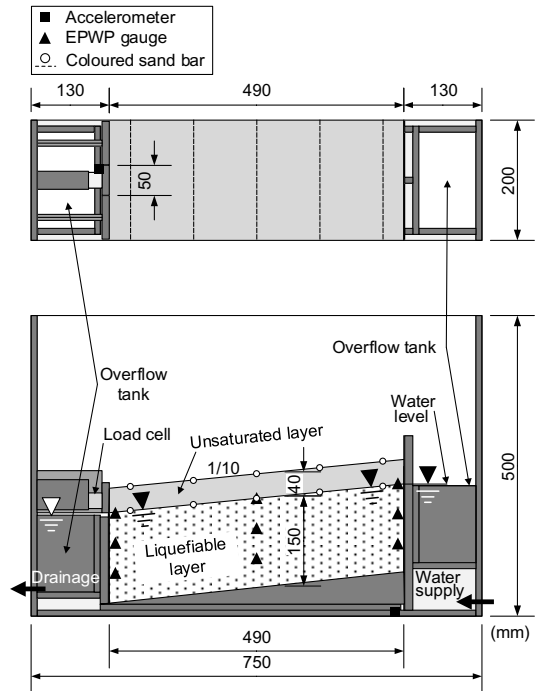
### (3) 計測項目

動的載荷実験については、間隙水圧計を用いて水圧を計測するとともに、地表ならびに液状化層と不飽和層との境界に色砂を配置して地盤の変位を計測した。不飽和層からの土圧は、一辺50 mmの正方形の受圧板で計測した荷重から求めた。

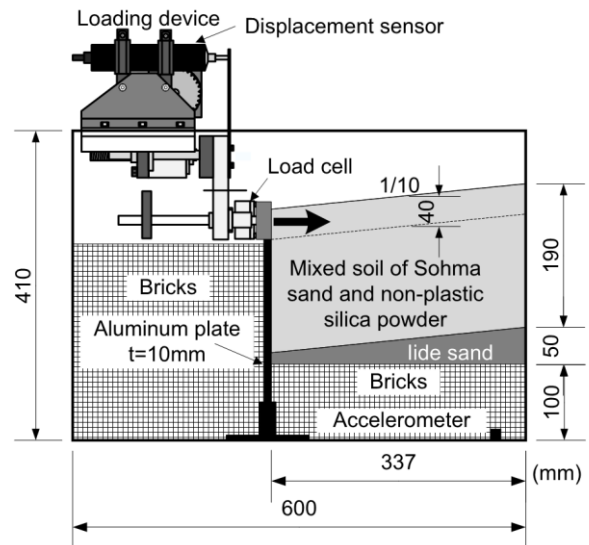
一方、静的載荷実験の計測項目は、載荷板の水平変位と荷重である。

### (4) 載荷方法

動的載荷実験の入力波は図-2に示す正弦波であり、実



(a) 動的載荷実験 (EP-D1, EP-D2)



(b) 静的載荷実験 (EP-S1, EP-S2)

図-1 模型概略図 (模型スケール)

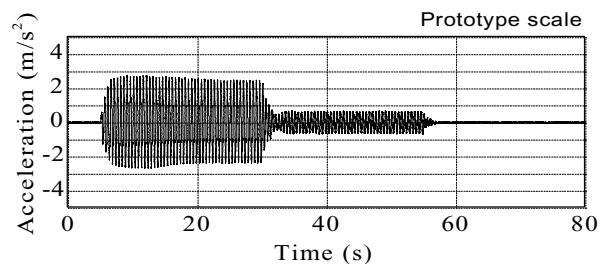


図-2 入力波 (EP-D2)

物スケールで周波数が2Hz、最大振幅での継続時間が25秒である。なお、側方流動を持続させるために最大振幅での加振の後、振幅を最大値の1/3にして25秒間さらに加振を継続した。

一方、静的載荷実験は3.54 mm/minの変位制御で行い、載荷開始時に地表面から深度40 mmまでの模型地盤を高さ50 mmの載荷板で水平に押し始めた。

### 3. 遠心模型実験の結果

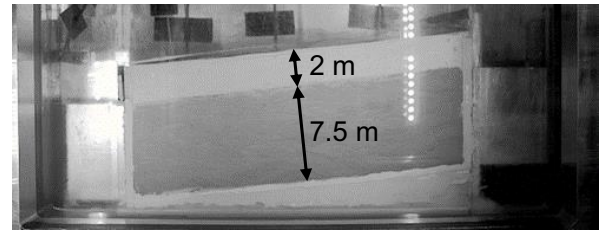
本章では、動的載荷実験および静的載荷実験の結果を示す。実験結果の数値は、実物スケールである。

#### (1) 動的載荷実験結果

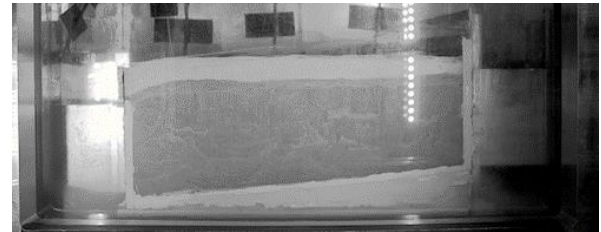
図-3は、EP-D2における加振前後の模型地盤を示したものである。加振前の地下水位が1/10の勾配で傾斜しており、地層構成は層厚7.5 mの液状化層とその上の層厚2 mの不飽和層であることが確認できる。加振後の模型地盤をみると、流動した不飽和層が下流側の壁でせき止められ、地表面が高さ2.5mの受圧板の上端と同じになるまで隆起している。一方、上流側の地表面は、上流からの地盤材料の供給がないため沈下している。色砂で計測した平均側方流動量を図-4に示す。液状化層上部の側方流動量は、地盤の中間付近において最大値を示す分布となっている。一方、地表面のそれは、上流に向かって小さくなっている。両者の分布の違いから、液状化層が不飽和層の下を滑るように流動していることがわかる。なお、地盤中間部よりも上流側の地表面の側方流動量が負値となっているのは、前述した下流端・上流端の境界条件に起因して地盤が反時計周りに移動したためである。

模型地盤の中央付近に埋設した間隙水圧計の計測結果から求めた過剰間隙水圧比の時刻歴を図-5に示す。なお、過剰間隙水圧比が1を超えているのは、水圧計の沈下や地盤の変状に伴う土被りの変化は考慮せず、過剰間隙水圧を初期の有効土被り圧で除して算出したためである。過剰間隙水圧比が加振開始後およそ7秒で1を超えて変曲点に達し、地盤は完全液状化に至ったと考えられる。その後、過剰間隙水圧は加振中に消散していないことから、前述した地盤の変状は液状化に伴う側方流動によるものといえる。

EP-D2における不飽和層からの土圧合力（Total earth pressure：以降、土圧と称す）の時刻歴を移動平均の結果と併せて図-6に示す。前述したように、下流端の地表面が受圧板の上端まで隆起していた。そこで、土圧は受圧板で計測した荷重をもとに、実スケールにおいて高さ2.5 m、単位幅あたりの面に作用する荷重を算定したものととした。加振前の土圧は遠心載荷に伴う静止土圧であ



(a) 加振前



(b) 加振後

図-3 模型地盤の状況（EP-D2）

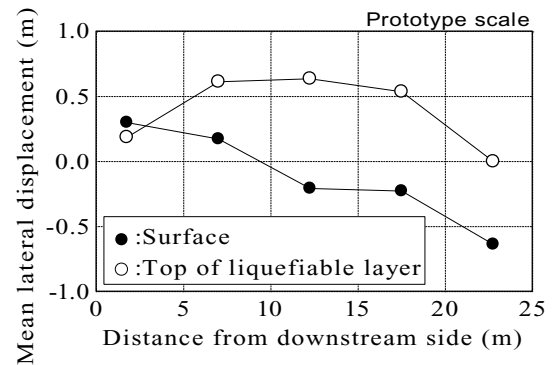


図-4 平均側方流動量（EP-D2）

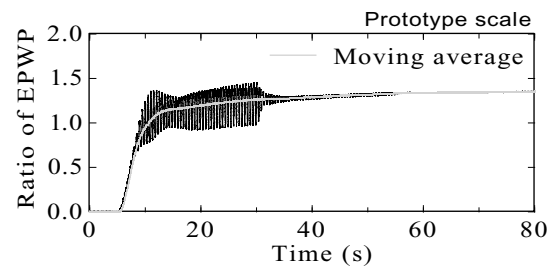


図-5 過剰間隙水圧比の時刻歴（EP-D2）

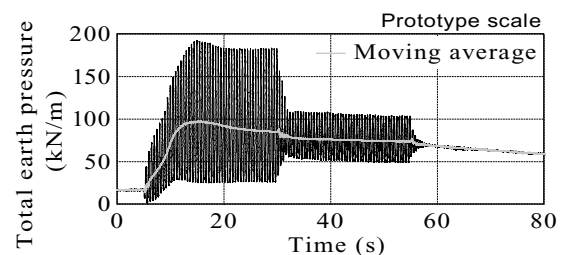


図-6 土圧の時刻歴（EP-D2）

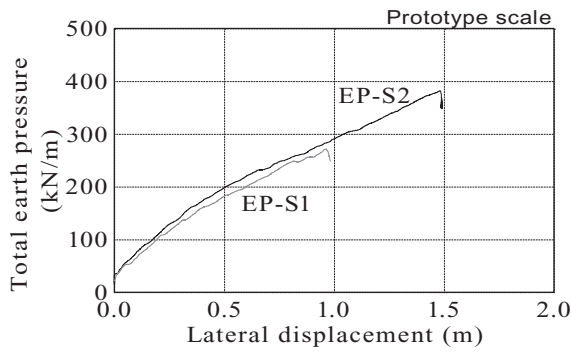


図-7 土圧と載荷板の変位の関係

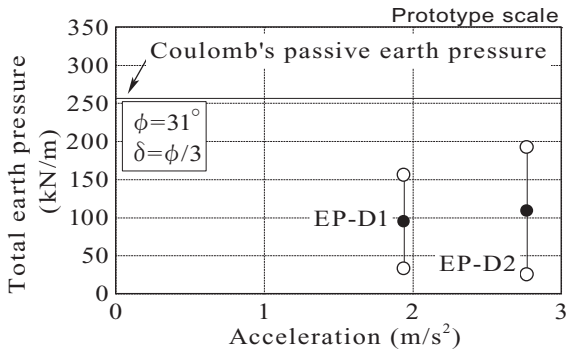


図-8 土圧と入力加速度の関係

り、その値は 16 kN/m であった。移動平均の結果をみると、加振時の土圧が最大となった時刻は、地盤が完全液化に至った時刻よりもわずかに遅く、加振開始後10秒程度である。不飽和層からの土圧は、液化化により側方流動量が增大する過程で最大値に至ったと推察される。

(2) 静的載荷実験の結果

図-7は、静的載荷実験から得られた土圧と載荷板の変位の関係を示したものである。なお、EP-S1 では載荷装置の不具合により、水平変位が約 1 m で載荷を終了した。混合試料の圧縮性が高いため、局所的な圧縮破壊が進行して明確な受働破壊が生じなかった。

4. 考察

図-6に示した土圧の時刻歴の結果から、不飽和層からの土圧の最大・最小値 (○) および移動平均値 (●) を求めて、入力加速度との関係を示したものが図-8である。入力加速度の増加に伴い、加振に伴う土圧の変動が大きくなり、土圧の移動平均値が多少大きくなる傾向が認められた。加振時の土圧の最大値は 192kN/m であった。図-7に示した静的載荷実験の結果では、200kN/m よりも大きな領域で変位の増大に伴い線形的に増加していることがわかる。したがって、受働土圧に相当する値は、少なくとも加振時の土圧の最大値よりも大きいものと考えられる。

前述したように、道路橋示方書・同解説V耐震設計編<sup>3)</sup>では、液状化層上の不飽和層からの土圧は常時の受働土圧で算定することになっている。図-8にはクーロンの土圧理論に基づいて算出した受働土圧も示している。内部摩擦角は混合試料を用いて実施した三軸圧縮試験 (CD 試験) から求め、壁面摩擦角  $\delta$  は  $\phi/3$  とした。実験値は、クーロンの土圧論に基づいて算出した受働土圧よりも小さい値であるといえる。

5. まとめ

本研究では、液状化に伴い流動する表層付近の不飽和層からの土圧を評価することを目的として遠心模型実験を実施した。

以下に、得られた知見をまとめる。

- ① 入力加速度の増加に伴い、加振に伴う土圧の変動が大きくなり、土圧の移動平均値が多少大きくなる傾向が認められた。
- ② 流動する液状化層上の不飽和層からの土圧は、クーロンの土圧論に基づいて算出した受働土圧よりも小さい値であった。

謝辞：本研究は、平成27年から実施中の（国研）港湾空港技術研究所と三井住友建設（株）による共同研究として実施しました。東京大学名誉教授東畑郁生先生には多くのご助言を戴くとともに、細部にわたりご指導戴きました。共同研究者のみならず、多くの関係各位にご助力頂きましたことを深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Takahashi, H., Takahashi, N., Morikawa, Y., Towhata, I. and Takano, D. : Efficacy of pile-type improvement against lateral flow of liquefied ground, Geotechnique, Vol. 66, Issue 8, pp. 617-626, 2016.
- 2) 森川嘉之, 高橋英紀, 津田和夏希, 高橋直樹, 戸村豪治, 東畑郁生 : 杭式改良体による液状化地盤の側方流動抑制工法の開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1326, 2016.
- 3) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2017.
- 4) 北詰昌樹 : 新遠心装置の開発と研究への適用, 港湾技研資料, No.812, pp.1-35, 1995.
- 5) Takahashi, H., Sassa, S. and Morikawa, Y. : Centrifuge modelling of earthquake-induced submarine landslide and its gravity flow transition, Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Perth, pp.1009-1015, 2014.