流動する液状化層上の不飽和層からの土圧の評価

三井住友建設 正会員 ○高橋 直樹,津田 和夏希,渕山 美怜

港湾空港技術研究所 正会員 森川 嘉之,高橋 英紀

関東学院大学 フェロー会員 東畑 郁生

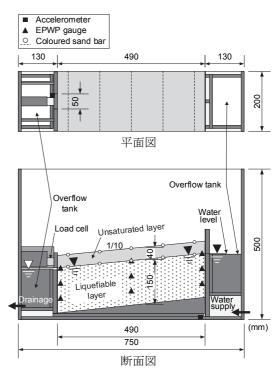
1. はじめに

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 ^{1),2)}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い.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ため,今回,遠心模型実験を実施して検討した.

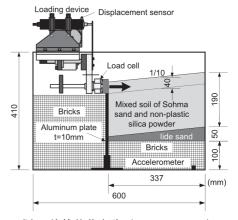
2. 遠心模型実験の概要

実験は、港湾空港技術研究所所有の遠心模型実験装置 3 を用い、 50 80 の遠心加速度で実物との縮尺比を 1 50 として実施した. 模型概略と計測器配置を図-1 に示す。図-1(a)に示す動的載荷実験は、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 m/s², EP-D2: 2 77 m/s²)実施した.一方、図-1(b)に示す静的載荷実験は、同一条件で 2 ケース(EP-S1、EP-S2)実施した.

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、下流端に配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て実現した. 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、地盤の透水性を下げて水圧の消散を遅らせる方法 4/0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 ($D_{50}=0.35$ mm, $U_{c}=1.6$) に非塑性のシリカパウダー ($D_{50}=0.05$ mm)を重量比で 7:3 となるように混ぜた試料を用いた. 入力波は正弦



(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)

波であり、実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. 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. 載荷は 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. 計測項目は,載荷板の水平変位と荷重である.

キーワード 液状化,側方流動,土圧

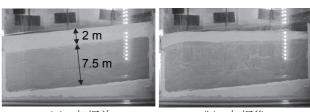
連絡先 〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1 三井住友建設㈱ 技術研究所 TEL 04-7140-5200

3. 実験結果と考察

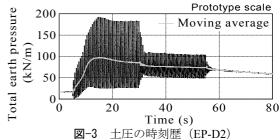
以降の実験結果の数値は、実物スケールで示す。図-2は、EP-D2における加振前後の模型地盤を示したものである。加振前の地下水位が 1/10 の勾配で傾斜しており、地層構成は層厚 7.5 m の液状化層とその上の層厚 2 m の不飽和層であることが確認できる。加振後の模型地盤をみると、流動した不飽和層が下流端の壁でせき止められ、地表面が高さ 2.5 m の受圧板の上端と同じになるまで隆起している。一方、上流側の地表面は、上流からの地盤材料の供給がないため沈下している。なお、模型地盤の中央付近にある間隙水圧計の計測結果から求めた過剰間隙水圧比は 1 に達していたため、この地盤の変状は液状化に伴う側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-3 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たので,土圧は不飽和層厚を 2.5 m として算出した.図-4 は,この結果をもとに不飽和層からの土圧と入力加速度の関係を整理して示したものである.実験値は加振時の最大・最小値を○で,移動平均値を●で示している.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.道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 5)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 δ は φ/3 とした.実験値はこの計算値よりも小さい値であった.

図-5 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



(a) 加振前 (b) 加振後 図-2 模型地盤の状況 (EP-D2)



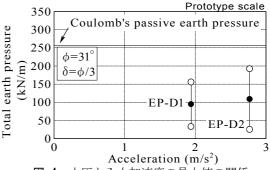
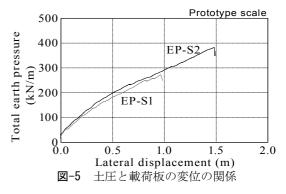


図-4 土圧と入力加速度の最大値の関係



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.本実験での土圧は,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.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192kN/mよりも大きいものと考えられる.

4. おわりに

遠心模型実験の結果から、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ことを示した.静的載荷実験では受働土圧を評価するまでには至らなかったが、今 後、試料を変えて同様の実験を行い、さらに検討を進める予定である.

謝辞:本研究は、港湾空港技術研究所・三井住友建設の共同研究として実施いたしました. ご協力をいただいた共同研究メンバーの方々に感謝の意を表します.

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) 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. 4) 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. 5) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編,2017.