

液化砂土流动效应的振动台试验研究

张鑫磊¹, 王志华^{1,2}, 许振巍¹, 吕丛¹

(1. 南京工业大学 城市地下空间研究中心, 江苏 南京 210009; 2. 南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 采用振动台激励使饱和砂土发生液化, 并侧向拖拽埋入砂土中的铝管, 模拟液化土体与管体相对运动以分析液化砂土流动的力学效应。引入流体力学理论与方法, 推导出以拉力反算表观黏度的表达式以及液化土体作为流体对管壁作用的黏滞剪切力。分析和比较了振时拖动、振后拖动下土体的流体性质及其流动效应的率相关性和孔压相关性, 探讨了砂土密实度对土体流动效应的影响。结果表明, 土体初始密实度与液化后土体的表观黏度正相关; 液化土体的表观黏度以及因流动产生的黏滞剪切力与孔压反相关; 液化砂土流动产生的黏滞剪切力具有强烈的率相关性。针对可液化场地中的结构抗震分析, 应考虑土-结构率相关相互作用。

关键词: 液化砂土; 流动效应; 黏滞剪切力; 率相关性; 表观黏度

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)08-2347-06

Shaking table tests on flow effects of liquefied sands

ZHANG Xin-lei¹, WANG Zhi-hua^{1,2}, XU Zhen-wei¹, LÜ Cong¹

(1. Research Center of Urban Underground Space, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 210009, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 210009, China)

Abstract: A series of shaking table tests on the saturated sands are conducted. The embedded aluminous tube in the sands is pulled laterally to simulate relative motion between liquefied sands and tube. The theories and methods of fluid mechanics are introduced to analyze the mechanical effects induced by the flows of liquefied sands. The real-time apparent viscosity of liquefied soils and the viscous shear force acting on the tube wall are calculated according to the measured pulling force. Fluid characteristics and flow effects of the liquefied soils are analyzed. For the soils during shaking and after shaking, their flow effects are rate-dependent and dependent on the excess pore water pressure. The influences of initial relative density on the flow effects are also discussed. The experimental results show that apparent viscosity of the liquefied sands is positively correlated with their initial relative density. The apparent viscosity and the viscous shear forces acting on the tube wall are negative correlated with the excess pore water pressure in the soils. Furthermore, the viscous shear forces acting on the tube wall are strongly rate-dependent. Therefore, the rate-dependent soil-structure interaction is suggested to be considered for the seismic analysis of structures in the liquefiable site.

Keywords: liquefied sands; flow effects; viscous shear force; rate-dependent; apparent viscosity

1 引言

地震作用下无黏性土地基发生液化是导致建筑物破坏的重要原因之一。饱和无黏性土或稍具黏性的土在地震作用下, 孔压上升使土颗粒处于悬浮状态, 抗剪强度与刚度几乎为 0, 此即液化现象^[1]。

对液化后土体的研究可以分为固体力学方法和流体力学方法两个方向。前者假定土体在液化前、

后都保持固体状态, 从传统的土体应力-应变关系方面考虑液化后土体力学行为^[2-3]; 后者是将液化状态的土体视为流体, 应用流体力学方法分析液化土体的力学行为^[4-6]。基于流体力学方法的土体液化分析在大变形预测方面有明显优势, 已越来越受到重视^[7-8]。Sasaki 等^[9]进行了一系列振动台试验后认为, 液化的砂土发生大位移的过程和流体流动很相似; Prevost 等^[10]提出, 将液化砂土地基当黏性液体来处

收稿日期: 2014-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51378257); 江苏省自然科学基金项目(No. BK2011802)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51378257) and Natural Science Foundation of Jiangsu (BK2011802).

第一作者简介: 张鑫磊, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: zxl201409@163.com

通讯作者: 王志华, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 主要从事土力学与地震工程方面的教学和研究工作。E-mail: wzhnjut@163.com

理, 其永久水平位移在横截面上看大约是双曲线形状; Towhata 等^[11]做了一系列振动台拖管试验来研究液化砂土地基的反应, 通过拉力反算得到了液化砂土的表观黏度; 国内陈育民等^[12]基于振动台拖球试验, 认为液化土体为剪切稀化非牛顿流体且土体的表观黏度随孔压比的降低而逐渐增大; 王志华等^[13]通过大型振动台试验, 基于流体力学方法, 研究了饱和砂土在孔压增长过程中表观动力黏度的变化规律。

以上工作都是利用试验研究液化土体的流体性质, 证实了将液化土体作为流体考虑的可行性, 但并未涉及具有流体特性的液化土体的流动效应问题。基于此, 本文利用小型振动台模型试验系统设计并完成了液化砂土中拖管试验, 分析了管-土相对运动下液化土体对管壁的作用效应, 讨论了液化土体流动效应及其主要特征, 分析了砂土初始密实度对液化土体流动效应的影响。

2 试验概况

2.1 试验装置

试验在南京工业大学岩土工程研究所自行设计和研制的小型土箱振动台试验系统上进行。小型振动台最大承重 240 kg, 最大加速度 1.2g; 配套的小型剪切型模型土箱内部尺寸为 60 cm(长)×40 cm(宽)×50 cm(高), 容积为 0.12 m³。层状剪切型土箱由 12 层铝制框架叠合而成, 每层框架厚 42 mm, 土箱总高度约为 500 mm。

小振动台受制于其尺寸的局限, 有必要考虑其边界效应的影响。王炳辉等^[14]对试验系统性能进行了测试, 结果表明, 该土箱可较理想地减弱边界的散射和反射效应。

管-土相对运动由拖动预埋入土体中的铝管实现。用于拖拽管体的电机为无极可变速电机, 电机通过一个转速控制器实现不同速率拖拽以满足试验要求。电机可以产生的拖拽速度为 0~1.1 cm/s, 电机通过牵引绳与推拉力计相连, 该推拉力计量程为 -600~600 N, 最小分度值 0.1 N。试验所用拖绳要求很高, 必须强度大且伸长率小, 本试验所用拖绳通过试验测得其伸长率为 5%, 极限拉力为 2 500 N, 符合试验的要求。

2.2 土样的制备

试验采用南京细砂, 其不均匀系数 $C_u=2.31$, 曲率系数 $C_c=1.07$, 特征粒径 $d_{50}=0.16$ mm。颗粒分析结果如图 1 所示。土体颗粒密度 $\rho_s=2.72$ g/cm³, 最大孔隙比 $e_{\max}=1.15$, 最小孔隙比 $e_{\min}=0.62$ 。

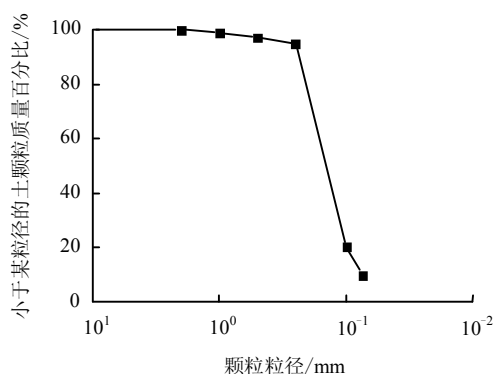


图1 试验细砂颗粒级配曲线

Fig.1 Grain composition of fine sands

采用水沉法制备饱和砂土, 先在模型箱里注入一定量的纯水, 然后将砂从空中均匀地自由洒落, 当砂土表层出现不均匀的情况时, 及时对砂层表面进行平整, 以保证土层的均匀性。此外, 每次操作控制水面高度在砂面以上 10 cm 左右, 以保证制备的土样饱和。砂土层成型后, 上面留有一定的水以充分使砂土饱和, 避免里面留有空气, 成层砂土总厚度为 40 cm。静置饱和一段时间后, 在砂层表面覆盖一层黏性土, 模拟上覆土层, 土层厚约 5 cm, 制样完成后, 再静置 24 h 后进行试验。

2.3 传感器的埋设

本试验利用的传感器主要有孔压计和土压力计。孔压计采用水压法进行标定; 土压力计为圆形, 直径为 1.5 cm, 采用物重法标定。为了测量管体拖拽过程中孔压的变化情况, 将两个孔压计分别埋设在管体正下方和同一水平面上土箱的中间位置。如图 2 所示。试验采用的拖管为 $\phi 2.5$ cm×25 cm 的铝管, 土压力计粘贴于管壁中间位置, 感应面正对拖拽方向。

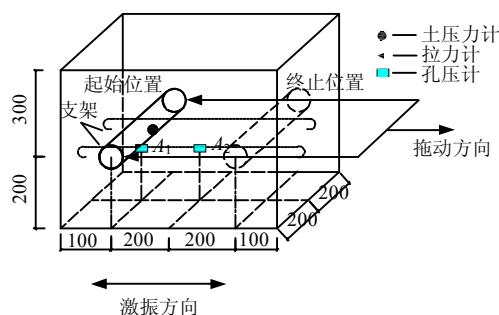


图2 试验装置简图(单位: mm)

Fig.2 Diagram of experimental installation (units: mm)

2.4 试验工况

试验设计了 3 个拖拽速度和两种拖拽方式。拖

拽速度 v 分别为 5、7、11 mm/s; 两种拖拽形式分别为振时拖动和振后拖动。振时拖动表示振动和拖拽同时进行同时结束, 此过程中砂土受激不久便处于并保持液化状态; 振后拖动表示先振动, 待砂土液化后停止振动的同时开始拖动管体, 此过程孔压不断消散。试验中的土体液化以实测孔压比达到 1 或接近 1 来判断。试验输入频率为 4 Hz 的正弦波, 加速度峰值为 0.16g。试验工况见表 1。

表 1 试验工况

Table 1 Experiment conditions

工况编号	拖拽形式	砂土密实度 /%	拖拽速度 U /(mm/s)
1	振时拖动	32.3	5
2	振时拖动	33.9	7
3	振时拖动	33.5	11
4	振时拖动	48.6	11
5	振时拖动	65.5	11
6	振后拖动	34.2	5
7	振后拖动	33.3	7
8	振后拖动	32.4	11

3 拖管受力分析

无论是振时拖动还是振后拖动,在一定转速电机拖动下的管体将保持匀速运动,而且整个管体在运动过程中无水平面的转动。管-土相对匀速运动过程中,假定土体均匀,管体与支架间无摩擦力。

假定作用于管壁上的荷载分为两类,如图3所示。一类为作用方向与运动方向相反的侧向土压力 e_d ,无论管土是否存在相对运动,侧向土压力都存在,其大小与竖向有效应力成正比;另一类则是由液化土体的黏滞性引起的黏滞剪切力,作用于管体表面切向方向并伴随管-土相对运动而产生。

由于拖管埋深较浅而且管体直径与土层厚度比值为 1:16, 故假设管壁土压力在迎土面管壁沿深度近似均匀分布 (见图 3), 则根据管体直径、长度, 由土压力测得数据按下式计算土压力合力为

$$E_d = DLe_d \quad (1)$$

式中: E_d 为管壁土压力合力; e_d 为土压力计测量值; L 为管体长度; D 为管体直径。

管-土相对运动时,土体作用于管体上的黏滞剪应力方向为管壁切线方向,其大小假定为迎土面半周处处相等(见图3)。考虑水平向的平衡方程,利用极坐标:

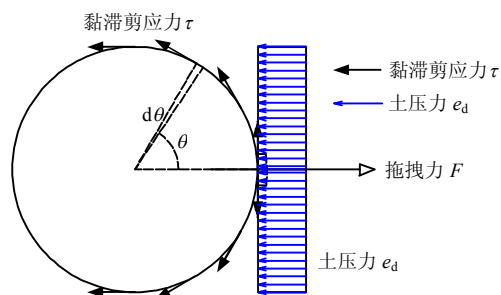


图 3 管壁受力分析

Fig.3 Analysis of forces on tube wall

$$2\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{D}{\gamma} L\tau \sin\theta d\theta + DL e_d = F \quad (2)$$

式 (2) 整理得

$$DL\tau + DLe_d = F \quad (3)$$

式中: τ 为管壁上的黏滞剪切力; F 为拖拽力。

由式(3)可知,与拖拽力平衡的力有两个,分别是土压力和黏滞剪切力的水平分力。而根据流体力学理论^[15],运动流体对物体表面的黏滞剪应力为

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (4)$$

式中: η 为动表观黏度; $\dot{\gamma} = \frac{3v}{2D}$ 为土体剪应变率^[16];

v 为管土相对运动速率, 即拖管速度。根据式 (3) 及式 (4) 可以得到土体的动表观黏度表达式为

$$\eta = \frac{2(F - e_d DL)}{3\nu L} \quad (5)$$

4 液化土体流动效应的率相关性

4.1 液化土体性质的率相关性

根据流体力学理论, 液化土体抵抗剪切变形的能力由其表观黏度体现, 而表观黏度与其变形速率相关则是非牛顿流体的典型特征。图 4 为两种拖拽方式下, 依据式 (5) 计算得到的土体表观黏度与拖拽速度的关系。无论哪种拖拽方式, 土体动表观黏度都随着拖拽速度的增大 (拖拽速度与土体剪应变率具有对应关系) 而逐渐降低, 呈现出典型的“剪切稀化”的非牛顿流体特征。此外, 图 4 结果还说明: ①相同的拖拽速度下, 振后拖动土体的动表观黏度要远远大于振时拖动土体的表观黏度; ②以 $v=11 \text{ mm/s}$ 的工况为例, 土体初始密实度越大, 则液化后土体的表观动黏度相对越大。这与 Towhata 等^[11]试验的结论是一致的。表 2 给出了依据式 (5) 反算振时相同速度 ($v=11 \text{ mm/s}$)、不同初始密实

度 D_r (30%、50%、70%) 下的土体表观黏度。

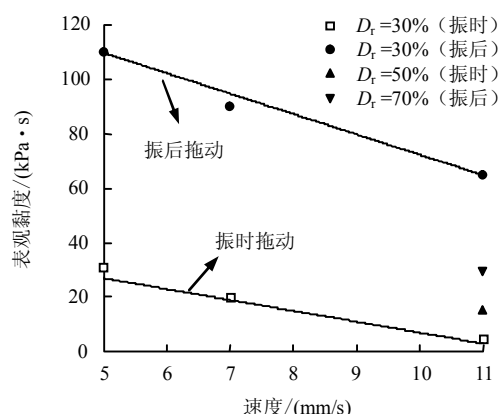


图4 液化砂土的表现黏度随拖管速度的变化
Fig.4 Variation of apparent viscosity of liquefied sands with drag velocity

表2 振时液化砂土的表现黏度($v=11$ mm/s)
Table 2 Apparent viscosity of liquefied sand during shaking ($v=11$ mm/s)

砂土密实度/%	表现黏度/(kPa·s)
≈30	5.2
≈50	15.6
≈70	30.9

4.2 液化土体流动效应的率相关性

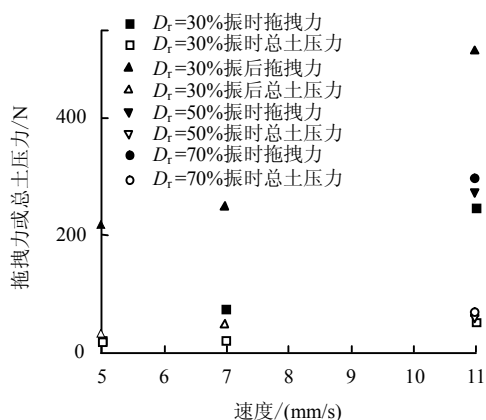
图5给出了不同的拖拽速度下($v=11$ 、7 mm/s)拖拽力、管壁总土压力(土压力合力)及管壁黏滞剪应力的比较结果。

如图5(a)所示,无论是振时还是振后拖动,管体拖拽力与拖动速度正相关性明显。反观管壁上作用的总土压力,其值相对较小,且表现出随拖动速度的增大而小幅增长的趋势。而且,总土压力值在振时拖动和振后拖动情况下的差异也较小。由于管体是在埋入土中的支架上平行拖动,拖动过程中的管体埋深不变化。根据上述总土压力的定义,总土压力由实测 e_d 值计算,而 e_d 主要受竖向有效应力影响,与管-土相对运动速率并无直接联系。因而,上述现象可理解为不同的拖管速度,以及振时或振后拖动等试验条件造成土中孔压反应差异所致。由图5(a)还可看出,在不同初始密实度土体中,以相同速度拖动管体时所需拖拽力随密实度增大而略有增大。

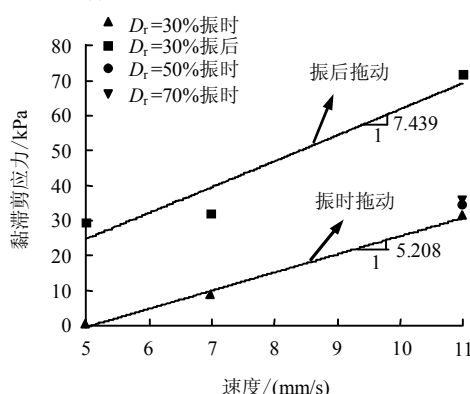
综合式(3)和图5(a)的试验结果可以看出,管壁上作用的总土压力远小于管体拖拽力。因而,管体运动需要克服的主要是管-土相对运动导致土体作用于管壁上的黏滞剪切力,且黏滞剪切力与拖拽速度密切相关。如图5(b)所示。倘以近似正比关系定性描述,振后拖动时产生的黏滞剪切力依拖动速度的增长率(直线斜率)较振时拖动大。这是因为,

振时拖动意味着土体维持液化状态,而振后拖动是在液化后孔压消散过程中进行。显然,振后拖动时的土体表观黏度较振时拖动大,故而导致振后黏滞剪切力依拖动速度的增长率大。

根据以上现象可推断,对于可液化场地中的地下结构物,若场地土体发生液化,则地下结构与土体间的相互作用与结构-土相对运动速度相关。土体对地下结构的作用效应不宜仅考虑传统的侧向土压力,还应考虑土-结构相对运动速率的影响。



(a) 拖拽力、总土压力随拖管速度的变化



(b) 黏滞剪应力随拖管速度的变化

图5 拖拽力、总土压力和黏滞剪应力随拖管速度的变化
Fig.5 Variation of drag force, resultant force of earth pressure and viscous shear stress with drag velocity

5 液化土体流动效应的孔压相关性

5.1 液化土体性质的孔压相关性

从上述液化土体流动效应的率相关性讨论中可知,无论是液化土体性质还是管-土相对运动中表现的黏滞剪切力效应,在振时和振后工况中均呈现出较大的差异,其原因可由图6加以解释和说明。图6(a)为工况3振时拖动测点 A_2 得到的孔压比-时程和据式(5)推算的表现黏度-时程曲线图。这里,将振时拖动土体的表现黏度整个时程粗略分为3个阶段:第I阶段激振开始后土体孔压比迅速上升至

最高点, 土体接近液化或已液化阶段。该阶段土体的表观黏度很小。第 II 阶段, 管体被拖动, 伴随对土体造成严重扰动, 土体孔压出现下降阶段 (管体迎向 A_2 测点位置)。该阶段的土体表观黏度随孔压下降呈现典型增长态势。当管体处于 A_2 测点正上方时, 土体孔压比下降至最低点 0.3。之后, 管体背向 A_2 测点运动, 土体表观黏度发展进入第 III 阶段。此阶段中, 激振复使土体孔压累积, 表观黏度逐渐下降, 直至孔压比接近于 1, 土体表观黏度趋于稳定。由此可见, 在整个拖管过程中, 土体孔压和表观黏度有着很好的对应关系。土体孔压上升, 则其表观黏度降低; 反之, 土体表观黏度将增加。事实上, 这一规律性认识在以往的研究中也得到证实^[11-13]。这说明土体液化或接近液化时, 除了具有一些典型的流体特征 (如率相关、剪切稀化等) 外, 由于液化土体特殊的散粒两相结构, 其表现出的流体性质还具有显著的孔压相关性。

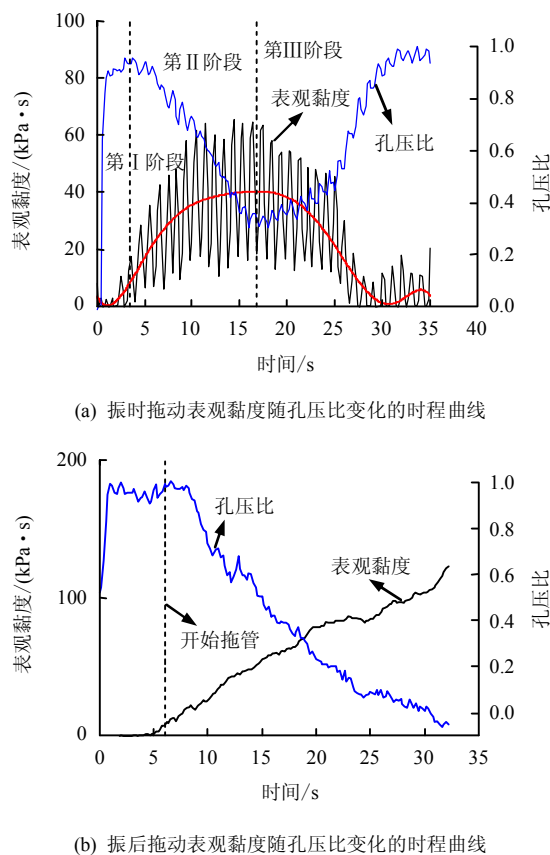


图 6 表观黏度随孔压比变化的时程曲线
Fig.6 Time history of the apparent viscosity and pore pressure ratio

图 6(b)为工况 7 振后拖动时土体的表观黏度及孔压比时程曲线。该工况中, 激振土体致液化后约 6 s 停止激振并实施拖管。整个拖管过程中, 土体

A_2 测点孔压呈现持续下降过程, 据式 (5) 推算的土体表观黏度则相应地持续增长。对比图 6(a)和图 6(b)的孔压下降段还可以发现, 在相同的孔压比条件下 (见表 3), 振后拖管时的土体表观黏度较振时拖动工况的土体表观黏度大。结合前述密实度对土体表观黏度影响的认识可以推测, 振时和振后相同孔压条件下的土体表观黏度差异主要源于振时和振后土体的密实度差异。

表 3 振时、振后砂土的表观黏度($v=7 \text{ mm/s}$)
Table 3 Apparent viscosity of sands during shaking and after shaking ($v=7 \text{ mm/s}$)

孔压比	振时表观黏度/($\text{kPa} \cdot \text{s}$)	振后表观黏度/($\text{kPa} \cdot \text{s}$)
0.8	12.2	24.9
0.6	21.8	48.6
0.4	40.2	58.1

5.2 液化土体流动效应的孔压相关性

由图 6 可知, 振时和振后拖动管体过程中, 土体的表观黏度呈现强烈的孔压相关性。结合式 (4), 在恒定拖动速度, 即恒定剪切速率下土体作用于管壁上的黏滞剪切力也应是和孔压相关的。图 7 分别为工况 3、7 得到的孔压与黏滞剪切力的时程曲线。从图中可以看到, 无论是振时还是振后拖动, 作用于管壁上的黏滞剪切力与土体孔压具有反相关特性。

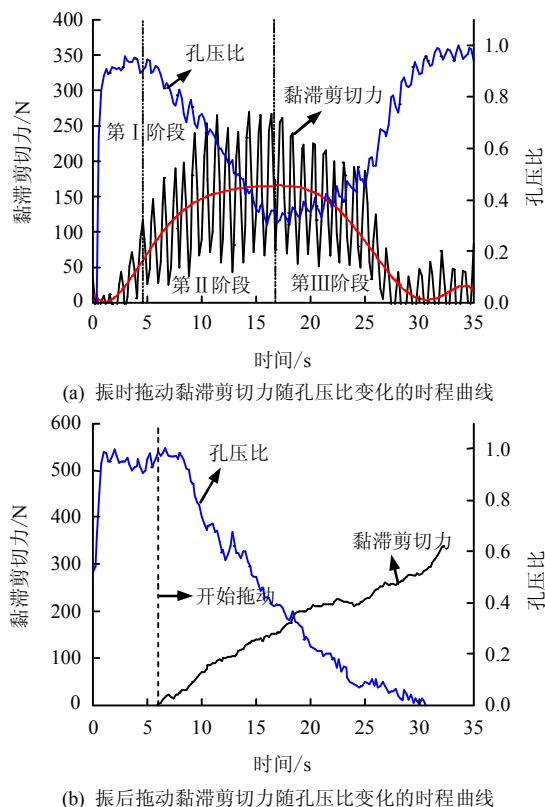


图 7 黏滞剪切力随孔压比变化的时程曲线
Fig.7 Time history of viscous shear stress

and pore pressure ratio

6 结 论

(1) 试验证实了液化砂土具有“剪切稀化”流体特征,即表观黏度随着剪切速率的增大而逐渐降低。土体初始密实度与液化后土体的表观黏度正相关。液化砂土流动产生的黏滞剪切力具有强烈的率相关性。

(2) 饱和可液化土体的特殊散粒二相结构决定液化土体的流体性质与孔压相关。液化土体的表观黏度以及因流动产生的黏滞剪切力与孔压反相关。

(3) 液化土体对管壁作用的黏滞剪切力为管-土相对运动需克服的主要荷载,且其率相关性显著。推及液化土-结构体系的地震反应分析,应考虑土-结构率相关相互作用。

参 考 文 献

- [1] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
CHEN Guo-xing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [2] YASUDA S, YOSHIDA N, MASUDAT, et al. Stress strain relationship of liquefaction sands[M]. ISHIHARA. Earthquake Geotechnical Engineering. Rotterdam: Balkema, 1995: 811—816.
- [3] 孙奇, 董全杨, 蔡袁强, 等. 偏应力比和应力主轴偏转角同时变化下饱和砂土变形特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2263—2269.
SUN Qi, DONG Quan-yang, CAI Yuan-qiang, et al. Deformation of fully saturated sand under simultaneous variations of deviatoric stress ratio and principal stress rotational angle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(8): 2263—2269.
- [4] TOWHATA I, SASAKI Y, TOKIDA K I, et al. Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(3): 97—116.
- [5] UZUOKA R, YASHIMA A, KAWAKAMI T, et al. Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading[J]. **Computers and Geotechnics**, 1998, 22(3/4): 243—282.
- [6] NISHIMURA S, TOWHATA I, HONDA T. Laboratory shear tests on viscous nature of liquefied sand[J]. **Soils and Foundations**, 2002, 42(4): 89—98.
- [7] 陈育民, 高星, 刘汉龙. 砂土液化流动变形的简化方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1567—1572.
CHEN Yu-min, GAO Xing, LIU Han-long. Simplified method of flow deformation induced by liquefied sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1567—1572.
- [8] 刘汉龙, 陈育民. 动扭剪试验中砂土液化后流动特性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1537—1541.
LIU Han-long, CHEN Yu-min. Analysis of flow characteristics of dynamic torsional tests on post liquefied sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1537—1541.
- [9] SASAKI Y, TOWHATA I, TOKIDA K, et al. Mechanism of permanent displacement of ground caused by seismic liquefaction[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(3): 79—96.
- [10] PREVOST J H, KEANE C M. Shear stress-strain curve generation from simple material parameters[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 116(8): 1255—1263.
- [11] TOWHATA I, VARGAS-MONGE M, ORENSE R P, et al. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil[C]//Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV. California: ASCE, 2008.
- [12] 陈育民, 刘汉龙, 周云东. 液化及液化后砂土的流动特性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1139—1143.
CHEN Yu-min, LIU Han-long, ZHOU Yun-dong. Analysis of flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1139—1143.
- [13] 王志华, 周恩全, 陈国兴. 孔压增长后的饱和砂土流体特征及其孔压相关性[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 528—532.
WANG Zhi-hua, ZHOU En-quan, CHEN Guo-xing. Fluid characteristics dependent on excess pore water pressure of saturated sand after growth of pore pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(3): 528—532.
- [14] 王炳辉, 陈国兴, 王志华. 基于 WFI 动三轴试验仪的小型土箱振动台试验系统研制[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(2): 155—161.
WANG Bing-hui, CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua. Development in small soil box shaking table test system based on WFI triaxial test apparatus[J]. **Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2011, 31(2): 155—161.
- [15] 张鸣远. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
ZHANG Ming-yuan. Fluid mechanics[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2010.
- [16] 陈育民, 刘汉龙, 邵建国. 砂土液化及液化后流动特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1408—1412.
CHEN Yu-min, LIU Han-long, SHAO Jian-guo. Laboratory tests on flow characteristics of liquefied and

post-liquefied sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(9): 1408—1412.