

砂土液化及液化后流动特性试验研究

陈育民^{1, 2}, 刘汉龙^{2, 3}, 邵国建⁴, 赵楠^{2, 3}

(1. 河海大学科学研究院, 江苏 南京 210098; 2. 土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学工程力学系, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据流体力学中的绕球定常黏性流动理论, 在振动台试验的基础上, 设计了一套砂土液化及液化后流动特性的试验装置。在振动台模型箱的砂土中埋入可以水平滑动的钢球, 当砂土发生液化时使钢球发生水平运动, 通过测量钢球所受的阻力来反算液化及液化后砂土的表观动力黏度, 进而研究液化及液化后砂土的流动特性。试验中考虑了砂土的初始相对密度、钢球的运动速率、液化后砂土的超孔压比等因素的影响。试验结果表明, 液化及液化后状态下砂土的表观动力黏度随着应变率的增大而减小, 液化砂土呈现出剪切稀化的非牛顿流体特性。随着液化后超孔压比的降低, 表观动力黏度也逐渐增大, 通常随着应变率的增大, 表观动力黏度-超孔压比曲线逐渐变缓。

关键词: 砂土液化; 液化后; 流动特性; 非牛顿流体; 室内试验

中图分类号: TU441.5; X705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)09-1408-06

作者简介: 陈育民(1981-), 男, 安徽潜山人, 博士, 河海大学力学系在站博士后, 主要从事地震液化的试验与理论方面的研究。E-mail: ymchgeo@gmail.com。

Laboratory tests on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand

CHEN Yu-min^{1, 2}, LIU Han-long^{2, 3}, SHAO Guo-jian⁴, ZHAO Nan^{2, 3}

(1. Research Academy of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the theory of dropping ball viscosimeter, the test apparatus of flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand is developed based on the shaking table tests. A steel sphere, embedded in the sand box, can be moved in the horizontal direction when the soil liquefaction occurs. Resistance force and velocity are measured during sphere dragging and apparent viscosity is evaluated. The initial relative density of the deposited sand, the velocity of the sphere and excess pore pressure ratio are the main factors in the tests. The results show that the apparent viscosity of the liquefied and post-liquefied sand decreases with the increase of the strain rate. The liquefied and post-liquefied sand is shear thinning non-Newtonian fluid. The apparent viscosity of the post-liquefied sand increases with the decrease of the excess pore pressure ratio, and the curve slope of the apparent viscosity vs. the excess pore pressure ratio decreases with the increase of the strain rate.

Key words: sand liquefaction; post liquefaction; flow characteristic; non-Newtonian fluid; laboratory test

0 前言

土体的液化是由于孔隙压力的增大和有效应力的减小, 导致土体由固体状态转变为液体状态的行为和过程^[1-2]。根据这个定义可以看出, 饱和砂土在液化状态下会表现出类似于流体的特性。近年来, 将液化状态的砂土视为流体是一种较新的液化研究思路^[3]。人们发现, 引入流体力学的观点, 可以很好地解释包括建筑物的倾斜与下沉、地下管线及排污水槽的上浮、地面侧向大变形等液化场地出现的多种震害现象。

认为液化后砂土具有流体特性的结论首先来自于上世纪九十年代日本学者 Sasaki 等^[4]的振动台试验结

果。Sasaki 等对液化变形发生的机理进行了一系列试验, 得到的主要结论之一就是液化砂土与流体“非常类似”, 可以通过总水力梯度(也称总上浮应力、总水头高度)来控制液化层的变形方向。随后, 一些学者开始针对液化砂土的流动特性开展专门的试验研究, 主要试验方法包括振动台试验、动三轴试验及黏度计

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50825901); 中国地震局地震工程与工程振动部门开放实验室课题(2007A03); 江苏省博士后科研计划项目(0801002C)

收稿日期: 2008-06-19

试验^[5]等。

Miyajima 等^[6-8]利用小型振动台对液化场地的流动特性进行了试验研究。试验时, 在砂土中埋设一个球体, 通过监测球体在运动过程中产生的位移和所受的力, 来反算出液化砂土的黏度。试验结果表明, 当超孔压比达到 1.0 时, 液化砂层的特性如同黏性流体。Tamate 和 Towhata^[5,9-10]在振动台模型箱中埋设圆柱状的钢管进行试验, 钢管被固定在穿过模型箱的两条平行轨道上, 通过马达带动轨道使得钢管在砂层中发生水平运动。在试验过程中, 监测钢管受到的拖拽力与发生的位移之间的关系, 并根据这种关系与液化土的应力 - 应变关系的相似性, 来研究液化后土体的流动性状。Nishimura 等^[11]采用三轴扭剪试验来研究液化土的流动特性。具体方法是, 首先试样在 100 kPa 的围压下固结, 然后再利用提高反压的办法使得有效围压降到 10, 20 或 30 kPa, 以低围压下的土体状态来近似模拟土体的液化, 试验发现液化砂土的剪应力 - 剪应变率关系“不同于普通的牛顿黏性流体”。陈育民等^[12]分析了液化大变形试验中砂土的流动特性, 发现砂土在液化状态下的表观动力黏度随着剪应变率的增大而减小, 是一种剪切稀化非牛顿流体。

目前, 有关液化及液化后砂土流动特性的研究成果尚不多, 关于液化砂土属于何种流体类型也颇受争议, 急需开展更多的试验研究。本文在总结前人试验经验和教训的基础上, 开发了一套液化及液化后砂土流动特性的试验装置和试验方法, 并开展了相关的试验, 为液化及液化后砂土流动特性研究提供了试验支持。

1 试验情况

1.1 试验原理

本文开发的试验装置的试验原理为低雷诺数均匀来流绕圆球的定常黏性流动问题。图 1 所示, 当半径为 r 的光滑圆球在拉力 T 作用下以速度 v 在均匀的无限宽广的流体中运动时, 若速度不大 (低雷诺数), 球也很小, 在流体中不产生涡流的情况下, 球在流体中所受到的阻力为

$$T = F = 6\pi\eta vr, \quad (1)$$

式中, η 为流体的表观动力黏度。通过试验中对拉力 T 和球体运动速度 v 的监测, 可以通过式 (1) 计算流体的表观动力黏度。

应变率的计算采用牛顿流体的空间绕球流动理论中球体发生的最大应变率, 利用公式 (2) 得到

$$\dot{\gamma} = \frac{3v}{2r}。 \quad (2)$$

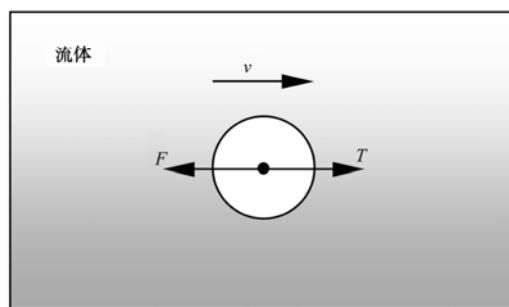


图 1 绕球体的均匀流动

Fig. 1 Uniform flows around sphere

1.2 试验装置

图 2 为本文试验装置的示意图。在振动台模型箱中架设一个水平轨道, 钢球可以在这个轨道上进行水平运动。模型箱内壁安放了一些定滑轮, 钢丝绳穿过这些滑轮与钢球连接。试验中采用一个可正反转的马达来拖动模型箱右上侧的两根钢丝绳, 带动钢球在水平轨道上发生往返运动。另外, 马达配备了无级调速装置, 可以实现 0~8 r/min 的转速。

振动台的模型箱中埋设孔压传感器以判断振动时砂土的液化状态, 在钢丝绳上利用位移传感器和拉力传感器来测定钢球的运动速度和受力情况。

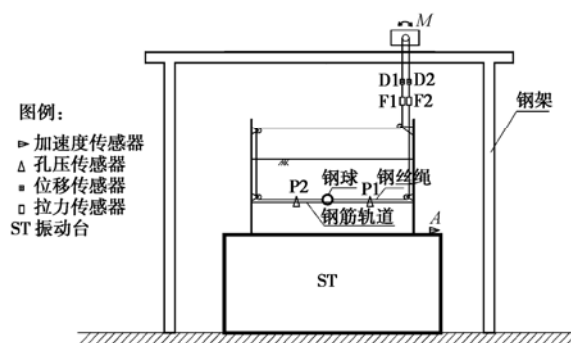


图 2 振动台拖球试验装置示意图

Fig. 2 Sketch of sphere pulling shaking table test

本文的试验装置是在总结归纳已有的试验手段的基础上提出的, 与已有的试验相比, 具有以下几个特点:

- (1) 采用了两套滑轮系统, 能够让钢球进行双向的运动, 可以进行平行试验, 从而提高试验效率;
- (2) 采用水平向拖球运动, 可以避免砂土在不同深度的液化不均匀对试验的影响;
- (3) 利用球体作为运动对象, 可以避免 Towhata 拖管试验^[10]中边界效应的影响;
- (4) 振动方向与球体运动方向垂直, 可以避免球体惯性力对试验的影响。

1.3 试验用砂

试验采用南京市六合区马鞍镇平山林场的风化

砂, 参照以往试验中用砂的情况^[6-7, 10], 对现场取来的砂样进行筛分处理, 去掉了粒径大于 0.5 mm 的土粒, 筛分后试验用砂的颗粒级配曲线见图 3 所示, 根据土的分类可知, 试验用砂属于级配不良的细砂。

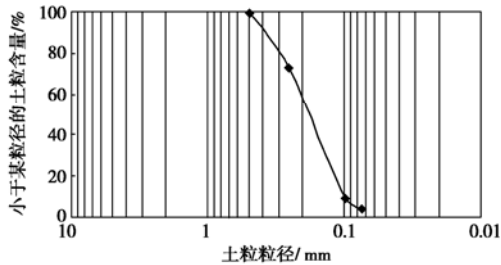


图 3 筛分后试验砂土的颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain size distribution for sieved sand

1.4 试验步骤

- (1) 采用“水中砂雨法”进行砂样制备, 并在预定深度处埋设钢球、钢丝绳和孔压传感器。装样完成后, 让砂土在饱和状态下固结一段时间。
- (2) 砂土固结完成后把模型箱抬至振动台台面, 用螺栓固定。
- (3) 将钢丝绳与拉力传感器、位移传感器相连接, 最后连接到电机的出轴上, 将传感器的数据线与数据采集系统连接, 并仔细检查确保连接无误。
- (4) 先启动数据采集系统进行数据采集, 后启动振动台, 在振动过程中观察孔隙水压力的变化情况, 达到预定状态时启动电机开始拉动钢球运动, 钢球完成一定位移 (约 20 cm) 后要及时关闭电机并使之反转, 使钢球向相反的方向运动。注意到, 在砂土的振动台试验中, 孔压的上升速度很快 (如图 4 所示), 因此本文对不同超孔压比的研究针对的是初始液化后的超孔压的消散过程。

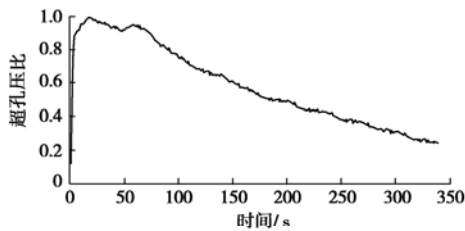


图 4 试验中超孔压比的时程曲线

Fig. 4 Time history of excess pore pressure ratio in tests

- (5) 电机运行时通过马达调速器调节电机转速以获得不同的钢球运动速度, 观察数据采集系统中拉力的变化曲线, 待拉力值稳定后方可进入下一级转速。
- (6) 试验结束时先停止振动台运动, 后关闭数据采集系统, 拆除传感器, 最后将模型箱卸下, 倒出砂土并将模型箱清洗晾干。

1.5 试验工况

试验共进行了 5 组, 见表 1 所示, 试验中主要考虑了砂样相对密度、钢球直径、超孔压比的影响, 同时通过不同转速的电机与不同直径的钢球配合, 可以获得不同的钢球运动速率。试验中考虑的主要影响因素包括:

- (1) 试样固结后相对密度 $D_r = 37\%, 44\%, 47\%$;
- (2) 钢球直径 $a = 20, 40, 60\text{ mm}$;
- (3) 超孔压比 $r_u = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$;
- (4) 电机转速 $n = 2.4, 4.8, 7.2\text{ r/min}$ 。

表 1 液化砂土流动特性试验方案

Table 1 Test schemes for flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand

试验编号	固结相对密度 /%	拉球直径 /mm
#1	37.4	20
#2	46.8	20
#3	43.6	20
#4	37.2	60
#5	38.5	40

2 试验成果

2.1 试验阻力的考虑

本文设计的试验装置较复杂, 试验过程中拉力传感器的数值并不是钢球在运动过程中的受力值, 而是包含了一些试验装置本身的摩擦, 主要包括: ①钢丝绳与滑轮之间的摩擦阻力; ②钢丝绳在砂土中受到的摩擦阻力; ③钢丝绳与电机出轴之间的摩擦阻力等。为了减小试验中误差的影响, 一方面在试验前在滑轮、钢丝绳上涂抹润滑油以减少相互作用时产生的阻力, 另一方面需要定量的测量出阻力值的大小, 本文采用的是“空拉”的方法, 即在不安放钢球的情况下进行了拖动试验, 记录拖动过程中的阻力值 (如图 5 所示), 认为测出来的阻力值就是试验装置的摩擦力, 且在其他的试验中保持不变。

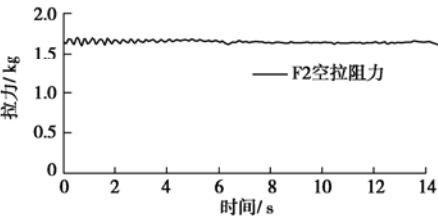


图 5 “空拉”试验的阻力

Fig. 5 Resistance force in no-ball tests

2.2 相对密度的影响

首先分析相对密度对试验结果的影响。采用 #1、#2 和 #3 试验进行对比分析, 这 3 个试验采用的钢球直

径均为 20 mm, 且装样相对密度存在差别。

(1) 对表观动力黏度 - 应变率的影响

图 6 为 3 种初始相对密度下表观动力黏度 - 应变率关系的结果。可以发现, 在超孔压比分别为 0.8, 0.9 和 1.0 三种状态下, 随着相对密度的增加, 在相同的应变率下表观动力黏度均逐渐增大, 尤其在应变率较低时, 表观动力黏度的数值差异较大, 而在应变率较高时差别较小。

初始相对密度增加, 使得砂土颗粒之间的孔隙减小, 在零有效应力状态下, 土 - 水处于悬浮状态, 此时单位体积内的土体颗粒较多, 这种混浊状态的流体抵抗变形的能力较强, 表现为表观动力黏度较大。而在非零有效应力状态, 虽然土 - 水未达到悬浮状态, 但此时超孔压比很高, 有效应力已变得很小, 在同等的有效应力 (即同等的超孔压比) 状态下, 相对密度的增大会提高土体抵抗变形的能力, 因此表观动力黏度也较大。

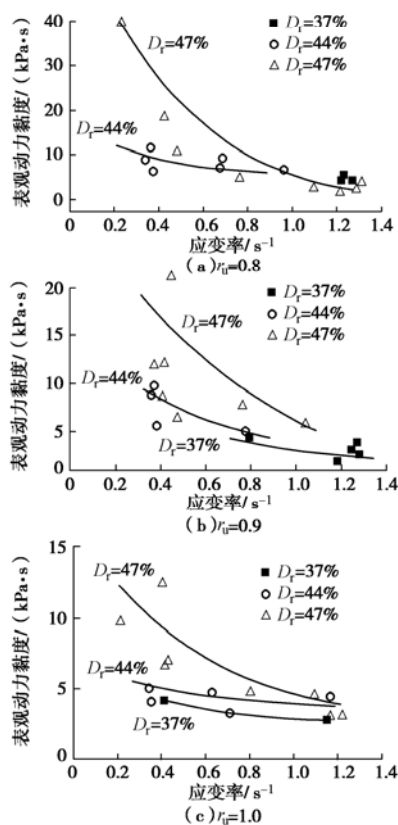


图 6 相对密度对表观动力黏度 - 应变率关系的影响

Fig. 6 Effect of relative density on relationship between apparent viscosity and strain rate

(2) 对表观动力黏度 - 超孔压比的影响

图 7 给出了相同应变率 (分别为 0.4 s^{-1} 和 0.8 s^{-1}) 情况下不同相对密度对表观动力黏度与超孔压比关系

的影响。可以发现, 随着相对密度的提高, 在相同超孔压比下表观动力黏度逐渐增大, 即相对密度较高的曲线位于上方, 且在超孔压比较低时, 相对密度的影响较大。

对于相同的超孔压比, 可以认为土颗粒骨架的应力相同, 随着相对密度的提高, 单位体积内的土颗粒数量增加, 在受到外界扰动时, 土颗粒之间的相互作用会有所增强, 从而提高土体抵抗变形的能力, 表现为土体的表观动力黏度的增加。

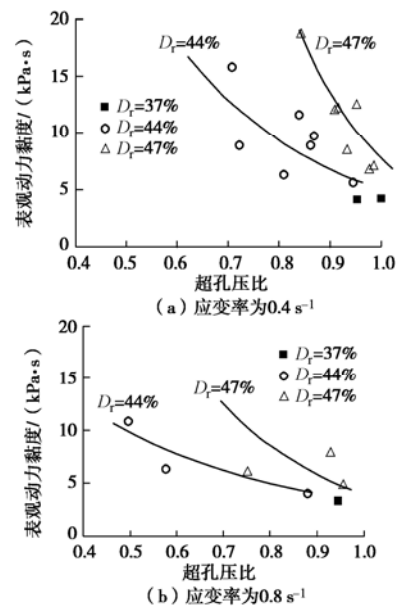


图 7 相对密度对表观动力黏度 - 超孔压比关系的影响

Fig. 7 Effect of relative density on relationship between apparent viscosity and excess pore pressure ratio

2.3 超孔压比的影响

为了分析不同超孔压比状态下表观动力黏度与应变率的关系, 本节选用#1、#4 和#5 试验数据, 这 3 次试验采用的相对密度相差不大 (37.4%, 37.2% 和 38.5%), 因此可以认为是相同初始相对密度下的试验结果。图 8 为这 3 次试验中不同超孔压比下表观动力黏度随应变率的变化关系。从图中可以看出, 砂土在完全液化状态下 (超孔压比为 1.0) 以及液化后状态 (超孔压比小于 1) 的阶段, 表观动力黏度均随着应变率的增大而减小, 呈现剪切稀化的特性。同时, 随着超孔压比的降低, 在相同应变率下表观动力黏度的数值逐渐增大, 即表观动力黏度 - 应变率曲线逐渐变陡。所以可以认为, 砂土在“液化”状态与“液化后”状态之间不是一种突变过程, 而是一种渐变的过程, 对于“液化”与“液化后”状态的区分, 只是人们为了研究的方便人为做出的, 而实际上两者是同一个过程的两个阶段。

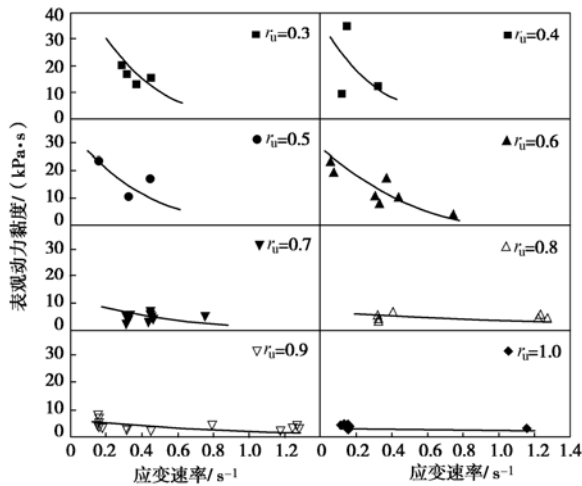


图8 超孔压比对表观动力黏度 - 应变率关系的影响

Fig. 8 Effect of excess pore pressure ratio on relationship between apparent viscosity and strain rate

2.4 应变率的影响

为了分析应变率对表观动力黏度 - 超孔压比关系的影响, 采用#1、#4和#5三组试验数据, 对近似相同应变率情况下的表观动力黏度 - 超孔压比关系作了整理, 见图9所示。可以发现, 在试验中所进行的各种应变率下, 表观动力黏度均随着超孔压比的提高而逐渐减小。同时, 随着应变率的增大, 相同超孔压比状态下的表观动力黏度数值也减小, 表现为表观动力黏度 - 超孔压比曲线随着应变率的增大逐渐变缓。

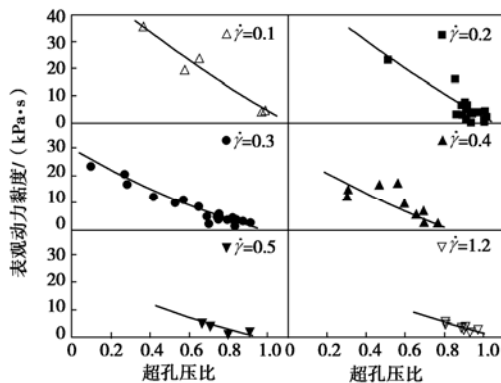


图9 应变率对表观动力黏度 - 超孔压比关系的影响

Fig. 9 Effect of strain rate on relationship between apparent viscosity and excess pore pressure ratio

3 结 论

本文根据流体力学原理, 在总结前人试验装置的基础上, 设计了一套可以研究液化及液化后砂土流动状态的试验装置和试验方法。通过多次试验发现, 该装置能够完成预定的试验目标, 试验结果可靠, 且试验装置具有试验效率高、振动干扰少的优点, 可以为

后续的研究提供参考。试验取得的成果如下:

(1) 液化及液化后砂土的表观动力黏度随着应变率的增大而减小, 呈现出剪切稀化的非牛顿流体特性, 进一步证实了液化砂土是非牛顿流体的重要结论。

(2) 相对密度对试验结果的影响很大, 随着相对密度的提高, 在相同应变率下, 表观动力黏度 - 超孔压比曲线逐渐升高; 在相同超孔压比状态下, 表观动力黏度 - 应变率曲线也逐渐升高。

(3) 表观动力黏度随着应变率的增大而减小, 表现出剪切稀化的特性。这种特性在不同的超孔压比状态下均存在, 只是随着液化后超孔压比的降低, 表观动力黏度 - 应变率曲线逐渐变陡, 这种过渡也说明砂土从传统意义上的“液化”到“液化后”不是突变的过程, 而是渐变的过程。

(4) 表观动力黏度随着超孔压比的升高而降低, 而应变率对这种关系也存在影响。随着应变率的增大, 表观动力黏度 - 超孔压比曲线逐渐变缓, 表明液化及液化后砂土作为一种非牛顿流体, 应该考虑应变率的变化对其表观动力黏度的影响。

参考文献:

- [1] 刘汉龙. 土动力学与岩土地震工程[C]// 第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003: 56 - 68. (LIU Han-long. Soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[C]// Proceedings of the 9th Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 56 - 68. (in Chinese))
- [2] The Committee of Soil Dynamics of Geotechnical Engineering Division. Definition of terms related to liquefaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1978, **104**(GT9): 1197 - 1120.
- [3] 陈育民, 周云东. 基于流体力学方法的砂土液化后研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, **35**(4): 418 - 421. (CHEN Yu-min, ZHOU Yun-dong. Advance in sand postliquefaction research based on fluid mechanics method[J]. Journal of Hohai University, 2007, **35**(4): 418 - 421. (in Chinese))
- [4] SASAKI Y, TOWHATA I, TOKIDA K I, YAMADA K, MATSUMOTO H, TAMARI Y. Mechanism of permanent displacement of ground caused by seismic liquefaction[J]. Soils and Foundations, 1992, **32**(3): 79 - 96.
- [5] TOWHATA I, VARGAS-MONGE W, ORENSE R P, YAO M. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake

- Engineering, 1999, **18**: 347 - 361.
- [6] 宮島昌克, 北浦滕, 北野豊. 液化状態の程度による地盤物性値の變化に關する實驗[C]// 日本土木學會第49回年次學術演講會, 1994: 548 - 549. (MIYAJIMA M, KITAURA M, KITANO Y. Model tests on variation of soil properties with the extent of liquefaction[C]// Proceeding of the Annual Conference of JSCE, 1994: 548 - 549. (in Japanese))
- [7] 宮島昌克, 長谷川正道, 北浦滕, 等. 液化状態に伴う側方流動が地中構造物に及ぼす影響に關する實驗的研究[C]// 日本第九屆地震岩土工程研討會, 1994: 1363 - 1368. (MIYAJIMA M, HASEGAWA M, KITAURA M, et al. Experimental study on effects of liquefaction-induced lateral spreading on buried structures[C]// Proceeding of Ninth Japan Earthquake Engineering Symposium, 1994: 1363 - 1368. (in Japanese))
- [8] MIYAJIMA M, KITAURA M, KOIKE T, HASEGAWA M. Experimental study on characteristics of liquefied ground flow[C]// The First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rotterdam, A A Balkema, 1995: 969 - 974.
- [9] TAMATE S, TOWHATA I. Numerical simulation of ground flow caused by seismic liquefaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, **18**: 473 - 485.
- [10] TOWHATA I, VARGAS-MONGE W, ORENSE R P, YAO M. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embeded in sandy liquefied subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, **18**: 347 - 361.
- [11] NISHIMURA S, TOWHATA I, HONDA T. Laboratory shear tests on viscous nature of liquefied sand[J]. Soils and Foundations, 2002, **42**(4): 89 - 98.
- [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 on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(9): 1139 - 1143. (in Chinese))

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于1979年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办,国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续5版确认为核心期刊,并在建筑类核心期刊中排列首位;本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊),并被评为“百种中国杰出学术期刊”;本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录,并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索;本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊,大16开,双栏排版,160页,每月中旬出版,定价25元/期,全年300元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548,国内统一刊号 CN32 - 1124/TU,国内发行代号 28 - 62,国外发行代号 MO0520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购,也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址:(210024)南京虎踞关34号《岩土工程学报》编辑部;联系电话:(025)85829534,85829553;传真:(025)85829555;E-mail:ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)