

董瑞,景立平,单振东,等.含弱渗透性覆盖层饱和砂土地震液化特性研究[J].地震工程学报,2020,42(4):955-959.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.955

DONG Rui, JING Liping, SHAN Zhendong, et al. Seismic Liquefaction Characteristics of Saturated Sand with a Low Permeable Covering Layer[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 955-959. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.955

含弱渗透性覆盖层饱和砂土地震液化特性研究

董 瑞, 景立平, 单振东, 张 雷, 刘廷俊

(中国地震局工程力学研究所中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对含弱渗透性覆盖层的饱和砂土地基进行一组离心机振动台试验, 并采用 OpenSees 对试验模型进行数值模拟。通过模型试验与数值模拟结果对比讨论 OpenSees 对于饱和砂土地基地震液化模拟的精度; 采用水平方向的 Arias 强度表示传入某一位置的地震动强度, 并以液化时水平方向 Arias 强度作为该土层的抗液化强度; 采用 OpenSees 计算不同地震动输入时饱和砂土的反应, 以此检验 Arias 强度作为抗液化强度的准确性。结果表明, 引起饱和砂土液化所需要的地震动强度随深度增加而增加; 当传入的地震强度达到砂土发生液化所需要的地震强度时, 该层砂土将会发生液化。

关键词: 土工离心机; 振动台试验; 液化; 数值模拟; OpenSees; Arias 强度

中图分类号: TU413

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-0955-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.955

Seismic Liquefaction Characteristics of Saturated Sand with a Low Permeable Covering Layer

DONG Rui, JING Liping, SHAN Zhendong, ZHANG Lei, LIU Tingjun

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: In this paper, a group of centrifuge-shaking table tests were performed for saturated sand with a weak permeable covering layer. OpenSees was used to carry out the numerical simulation on the test model. Experimental and numerical results were compared and discussed. The horizontal Arias Intensity (I_a) was used to measure ground motion intensity. When liquefaction occurred, the horizontal I_a was taken as the anti-liquefaction strength of the soil. The reaction of saturated sand subjected to different earthquake waves was calculated by OpenSees to test the accuracy of I_a as a measure of anti-liquefaction strength. Results showed that ground motion intensity, which can cause liquefaction of saturated sand, increases with increasing depth. When incident seismic intensity reached the requirement for the liquefaction of sand, liquefaction occurred.

Keywords: geotechnical centrifuge; shaking table test; liquefaction; numerical simulation; OpenSees; Arias intensity

收稿日期: 2018-08-03

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2014B03, 2017B10, 2017B14); 国家重点研发计划(2016YFC0800205); 国家自然科学基金项目(51438004)

第一作者简介: 董瑞, 男, 博士研究生, 主要从事地下工程抗震研究。E-mail: mrdongrui@126.com。

0 引言

地震作用下饱和砂土存在发生液化的可能,液化造成的地基失效往往会造成严重的建筑结构震害。砂土液化的研究一直都是岩土工程领域的重要课题。目前对于砂土液化机理的研究主要采取室内试验和数值模拟的方法。国内外很多学者对液化问题进行了大量的室内试验和数值模拟的研究。室内试验主要有 1g 振动台试验和离心机振动台试验。景立平等^[1]基于运动微分方程给出了振动台试验的相似准则,指出 1g 振动台试验结果仅可定性分析而离心机振动台试验结果可以用于定量计算。Taboada-Urtuzua-stegui 等^[2]进行了大量的离心机振动台试验研究了坡角、输入地震动强度及频率对饱和砂土孔压增长、液化深度、加速度分布、侧向位移、永久剪应变、地面沉降的影响。周燕国等^[3]通过离心机振动台试验研究了黏粒含量对砂土液化的影响。Zeghal 等^[4]通过离心机振动台试验研究了弱渗透性覆盖层对砂土液化特性的影响。饱和砂土的数值模拟研究主要集中在砂土循环本构模型和动孔压增长模型。众多学者根据砂土非线性动力响应和剪胀特性提出并发展了边界面模型和多屈服面模型^[4-6]。Martin 和 Finn 等^[7]根据体积相容条件建

立了动孔压的应变模型。Byrne^[8]在 Martin 和 Finn 模型基础上给出了体应变和增量体应变的经验公式。Prevost^[9]根据 Biot 方程提出了考虑两相介质耦合作用 $u-p$ 控制方程。

本文利用 OpenSees 有限元程序,采用材料库中基于 Yang 等^[10]提出的砂土液化本构模型 PD-MY 材料(Pressure Dependent Multi Yield Material)对两组含弱渗透性覆盖层的不同渗透系数饱和砂土离心机振动台试验进行了模拟,检验了数值计算的精度;依据能量角度分析了地震动输入及砂土渗透系数对于砂土地震液化特性的影响。

1 试验模型

1.1 模型材料

为探究渗透系数对饱和砂土液化特性的影响,试验模型材料选择福建标准砂作为试验材料,制模采用落雨法控制砂土相对密实度为 45%;弱渗透性覆盖层选用便于制模且渗透系数较小的 400 目硅砂粉,采用质量控制方法在饱和后的砂土表面浇灌硅砂粉浆液并静置固结,以此保证覆盖层致密满足上部弱渗透性排水条件。本次试验离心加速度为 50g,故选择黏度为 50 cst 的甲基硅油作为流体材料以满足渗透系数的相似比。试验用土的物理力学参数列于表 1。

表 1 试验用土物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

材料	内摩擦角/(°)	比重	最大孔隙比	最小孔隙比	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
硅砂粉	-	2.65	-	-	9.06×10^{-6}
福建标准砂	31.4	2.64	0.96	0.61	3.08×10^{-3}

1.2 模型尺寸及传感器布置

试验选用层状叠环式剪切模型箱,模型箱尺寸为 0.73 m×0.33 m×0.42 m。砂土层厚度为 300 mm,弱渗透性覆盖层厚度为 20 mm。模型尺寸及传感器位置图见图 1。

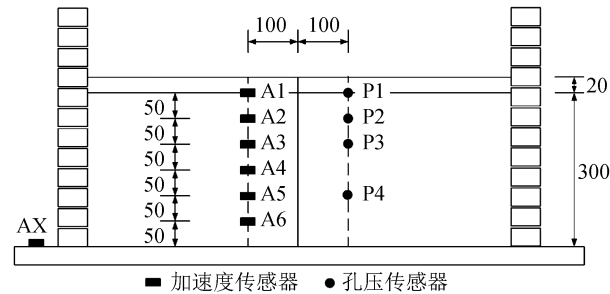


图 1 模型尺寸及传感器位置

Fig.1 Model size and position of sensors

1.3 加载方案

离心机开机过程离心加速度提升速度控制为 2g/min,以此保证开机过程中模型稳定不发生破坏。El-Centro 波作为加载波形,地震波按加速度幅值 0.2g 和 0.5g 分两级加载,每级荷载均在超静孔压消散完毕后施加。

2 数值计算模型

2.1 材料本构模型参数选取

OpenSees 材料库中的 PDMY 材料可以用于计算饱和砂土在循环荷载作用下的变形,屈服面为主应力空间内嵌套在一起多个类似 D-P 准则的圆锥面,采用非关联流动法则;单元库中的 quad 单元为基于 Biot 理论的 $u-p$ 形式四节点四边形单元,节点共有 3 个自由度(两个表示位移的自由度,第三个自

由度对时间的一阶导数表示孔压)。参考 OpenSees 用户手册^[11]中给出的 PDMY 材料参数取值。计算模型参数列于表 2。

表 2 计算模型参数		
Table 2 Parameters of computational model		
参数	取值	
	硅砂粉	福建标准砂
密度/(t·m ⁻³)	2.23	1.91
剪切模量/kPa	1.3×10 ⁵	3.21×10 ⁴
体积模量/kPa	3.9×10 ⁵	1.5×10 ⁵
内摩擦角/(°)	32	31.4
峰值八面体剪应变	0.1	0.1
参考围压/kPa	80	80
压力系数	0.5	0.5
膨胀角/(°)	26.5	27
孔压参数 <i>c</i>	0.1	0.1
剪胀参数 <i>d</i> ₁	0.1	0
剪胀参数 <i>d</i> ₂	0.5	0
液化参数 <i>l</i> ₁ /kPa	10	10
液化参数 <i>l</i> ₂	0.015	0.015
液化参数 <i>l</i> ₃	1	1

2.2 有限元网格及边界条件

离心机振动台试验中输入的地震波为垂直入射的剪切波,可以简化为一维问题进行计算。在 OpenSees 中建立单列四边形单元的二维平面应变模型进行简化分析。有限元模型见图 2。有限元模型尺寸为试验模型的原型尺寸 0.5 m×16 m,有限元单元网格尺寸为 0.5 m×0.5 m。计算区域上部 1 m 厚度覆盖层为饱和硅砂粉,下部 15 m 厚度土层为饱和砂土。

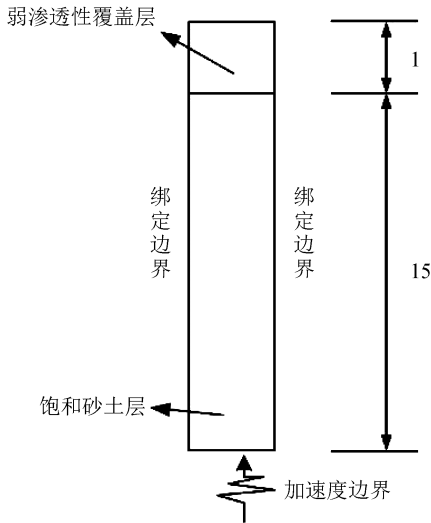


图 2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

计算模型底部采用加速度边界输入地震动模拟振动台的输入条件,侧边界采用绑定边界(两侧边界

节点位移协调)模拟叠环式剪切模型箱侧边界条件,模型仅在表面设置自由排水边界。

3 试验结果与模拟结果分析

3.1 有限元计算精度验证

分别采用试验过程中在底板采集到的加速度记录作为底部输入加速度进行数值模拟。数值模拟计算结果与试验采集结果见图 3 和图 4。对于底部输入 0.2*g* 工况数值模拟得到的液化深度略大于试验结果。产生这一结果的原因之一是由于数值模型未考虑饱和砂土液化时产生排水通道使砂土的渗透性增大;而另一个原因是由于模型制作时不可避免的不均匀性以及初始自重固结过程使得底部砂土密实度略大于设计密实度。表层砂土试验测得的孔压比未达到 1,从而与数值模拟结果有较大误差。这是因为试验过程对于孔压计位置不能准确测量,并且孔压比对于上覆初始有效应力十分敏感,因此表层的孔压比实测值会存在很大误差。总体而言,采用 OpenSees 中的 PDMY 材料可以用于模拟饱和砂土在地震作用下的液化现象并具有一定的精度。

3.2 输入地震动对饱和砂土的影响

Arias^[12]给出 Arias Intensity 用于计算地震动的强度,其表达式为:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt \tag{1}$$

式中:*a*(*t*)是*t*时刻的加速度,*t*是时间;*a*(*t*)*dt*为单位质量的土受到惯性力的冲量,*a*(*t*)与*g*的比值为考虑地震动幅值的地震系数,因此 Arias Intensity 表示考虑地震动幅值修正后惯性力对单位质量土的冲量和。土在 SV 波作用时单元体受动应力的示意图见图 5,根据 X 方向的平衡条件可以得到:

$$\rho a(t) dx dy = - \frac{\partial \tau}{\partial y} dy dx \tag{2}$$

式中:*ρ*是密度;*a*是加速度;*τ*是剪应力。因此在 SV 波作用时水平方向的 Arias Intensity 可以用于计算土单元体受到的剪应力作用。

采用 3.1 节中相同的有限元模型,分别输入幅值为 0.2*g* 和 0.5*g* 的 El-Centro 波和 Kobe 波作为底部输入进行有限元数值模拟。对不同深度得到的加速度进行积分,得到该层砂土在液化时的 Arias Intensity,计算结果见图 6。计算结果表明:砂土发生液化所需要的地震动强度随深度增加而增加;不同地震动输入时,当传入的地震动强度达到饱和砂土液化所需要的振动强度时该处饱和砂土将发生液化。

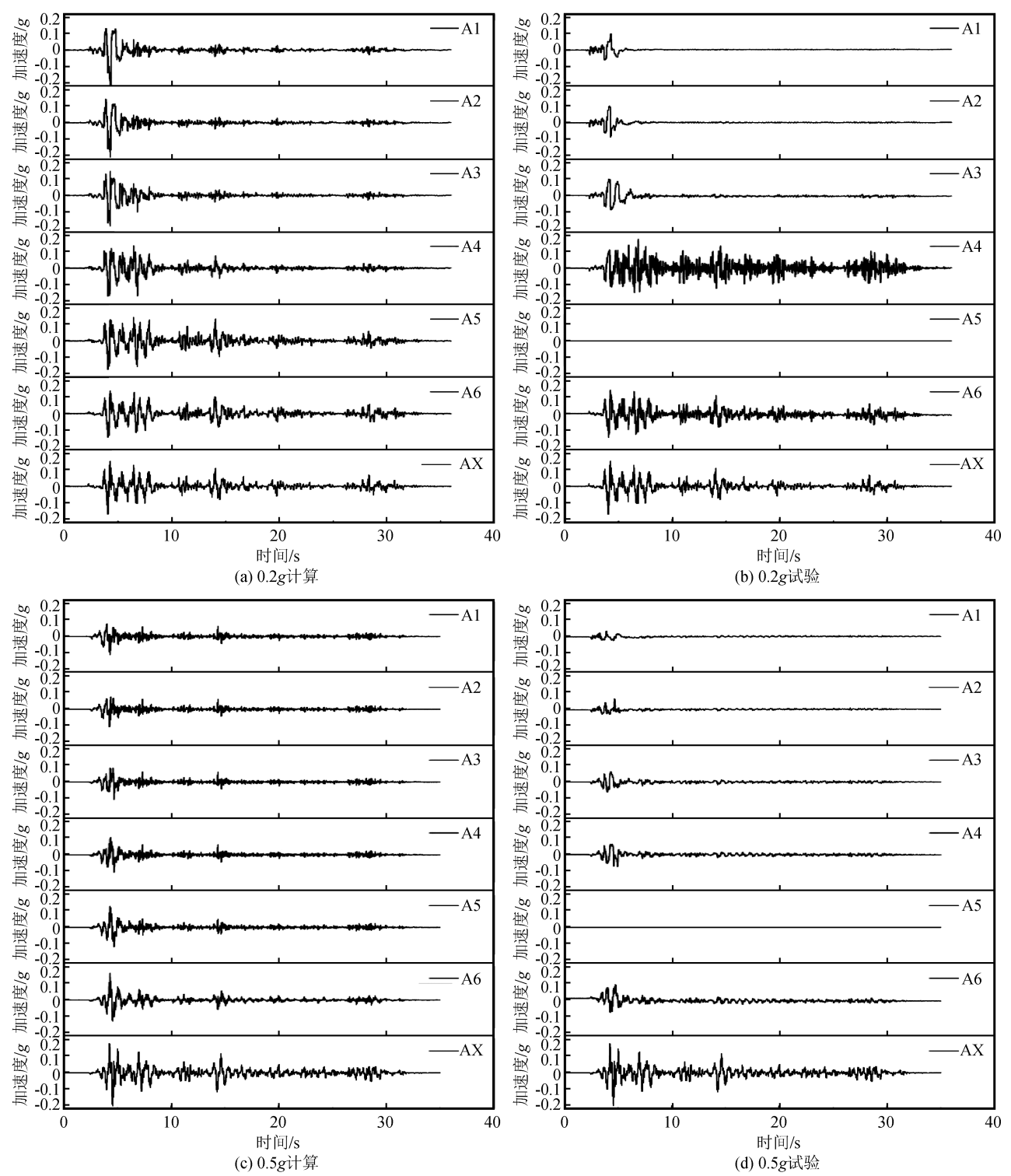


图 3 加速度
Fig.3 Acceleration

4 结论

本文针对含有弱渗透性覆盖层的饱和砂土的离心机振动台试验,依托 OpenSees 有限元软件进行了数值模拟。对比了数值模拟结果和试验结果,分

析了不同深度饱和砂土发生液化所需要地震强度,得到了如下主要结论:

- (1) OpenSees 中的 PDMY 材料可以用于饱和砂土的地震反应分析,模拟结果具有一定的准确性。
- (2) 饱和砂土地震过程中水平向 Arias Intensity

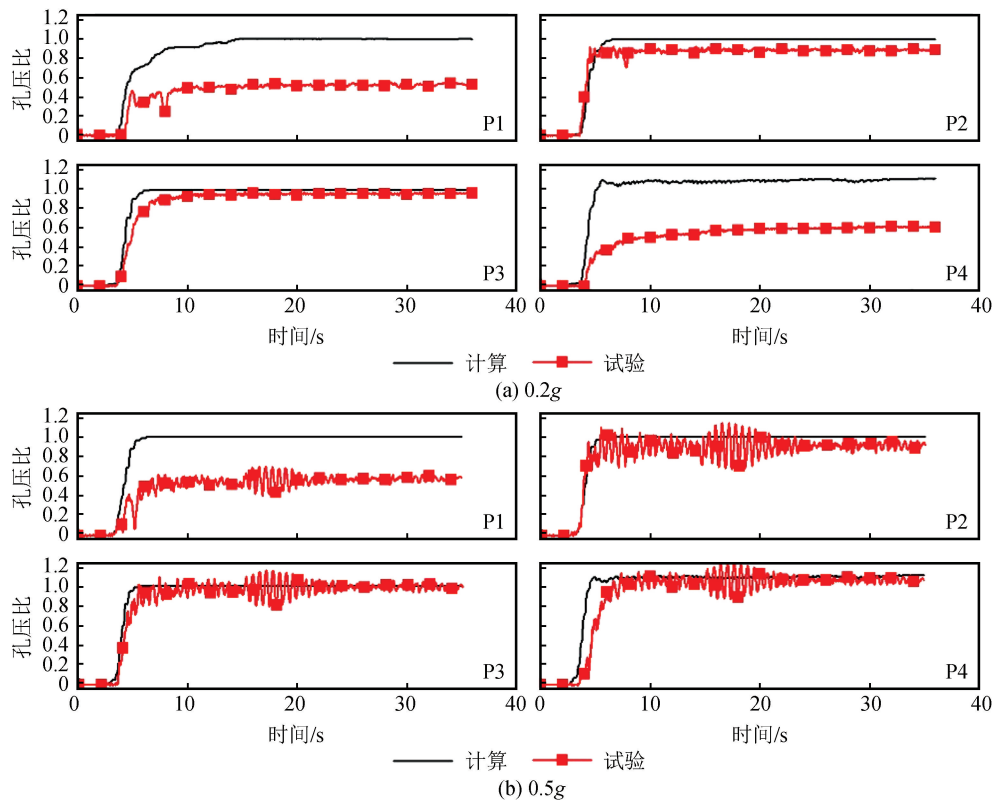


图 4 超静孔压比

Fig.4 Excess pore pressure ratio

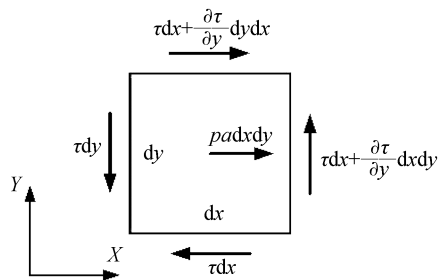


图 5 剪切作用下土单元体动应力示意图

Fig.5 Dynamic stress diagram for soil unit under shear wave

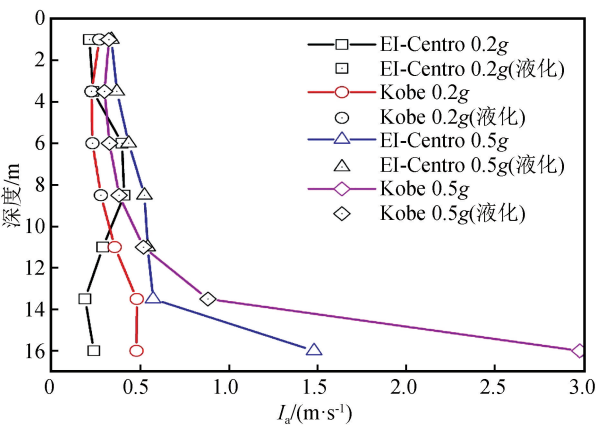


图 6 不同深度的液化 Arias Intensity

Fig.6 The liquefaction Arias Intensity at different depths

可以反应土单元体受到的动剪应力作用,通过液化时的 Arias Intensity 可以建立地震动作用与饱和砂土抗液化能力的关系,并用于砂土液化风险评价。

(3) 砂土发生液化所需要的地震动 Arias Intensity 随深度增加而增加;不同地震动输入时,当传入的地震动强度达到饱和砂土液化所需要的振动强度时该处饱和砂土将发生液化。

参考文献(References)

[1] 景立平,姚运生,郑志华.饱和粉土液化特性的大型振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动,2007,27(6):160-165.
JING Liping, YAO Yunsheng, ZHENG Zhihua, et al. Large Scale Shaking Table Test Study on Liquefaction of Saturated Silty Soil[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2007,27(6):160-165.

[2] TABOADA-URTUZUÁSTEGUI V M, DOBRY R. Centrifuge Modeling of Earthquake-Induced Lateral Spreading in Sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998,124(12):1195-1206.

[3] 周燕国,梁甜,李永刚,等.含黏粒砂土地液化离心机振动台试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(9):1650-1658.
ZHOU Yanguo, LIANG Tian, LI Yonggang, et al. Dynamic Centrifuge Tests on Liquefaction of Clayey Sand Ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (9): 1650-1658.

(下转第 988 页)

YANG Linde, YANG Chao, JI Qianqian, et al. Shaking Table Test and Numerical Calculation on Subway Station Structures in Soft Soil[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(10): 1135-1140.

[8] 冯士伦, 王建华, 郭金童. 液化土层中桩基抗震性能振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 92-95.

FENG Shilun, WANG Jianhua, GUO Jintong. A Shake Table Test on the Seismic Resistance of Pile Foundation in Liquefied Soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 92-95.

[9] 尚守平, 刘方成, 卢华喜, 杜运兴. 振动台试验模型地基土的设计与试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 199-204.

SHANG Shouping, LIU Fangcheng, LU Huaxi, et al. Design and Experimental Study of a Model Soil used for Shaking Table Test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 199-204.

[10] 王成雷, 王建华, 冯士伦. 土层液化条件下桩土相互作用 p-y 关系分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1500-1505.

WANG Chenglei, WANG Jianhua, FENG Shilun. Analysis on p-y Curves of Soil-pile Interaction in Liquefied Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1500-1505.

[11] 张圆圆. 基于振动台模型试验的单桩动力反应分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.

ZHANG Yuanyuan. The Analysis on Dynamic Response of Single Pipe Based on Shaking Table Model Test[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2013.

[12] 张鑫磊, 王志华, 许振巍, 孙晋晶. 土体液化大位移条件下群桩动力反应振动台模型试验[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 150-156.

ZHANG Xinlei, WANG Zhihua, XU Zhenwei, et al. Shaking Table Model Tests on Dynamic Response of Pile Groups under Liquefaction-induced Large Ground Displacement[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 150-156.

[13] 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 888-895.

ZHAO Dingfeng, RUAN Bin, CHEN Guoxing, et al. Validation of Modified Irregular Loading-unloading Rules based on Davidenkov Skeleton Curve and Its Equivalent Shear Strain Algorithm Implemented in ABAQUS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 888-895.



(上接第 959 页)

[4] WANG Z L, DAFALIAS Y F, SHEN C K. Bounding Surface Hypoplasticity Model for Sand[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(5): 983-1001.

[5] PAPADIMITRIOU A G, BOUCKOVALAS G D, DAFALIAS Y F. Plasticity Model for Sand under Small and Large Cyclic Strains[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 973-983.

[6] ELGAMAL A, YANG Z H, PARRA E, et al. Modeling of Cyclic Mobility in Saturated Cohesionless Soils[J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19(6): 883-905.

[7] MARTIN G B, FINN W D L, SEED H B. Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1975, 101(5): 423-438.

[8] BYRNE P M. A Cyclic Shear-volume Coupling and Pore Pressure Model for Sand[C]//Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake, USA: Missouri University of Science and Technology, 1991: 47-56.

[9] PREVOST J H. Nonlinear Transient Phenomena in Saturated Porous Media[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1982, 30(1): 3-18.

[10] YANG Z H, ELGAMAL A, PARRA E. Computational Model for Cyclic Mobility and Associated Shear Deformation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1119-1127.

[11] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees Command Language Manual [EB/OL]. <http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/>, 2007-07-01.

[12] ARIAS A. A Measure of Earthquake Intensity[M]//Seismic Design for Nuclear Power Plants, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1970: 438-83.