

# 碎石填芯钢管桩加固液化土的土压力分析

牛琪瑛<sup>1,2</sup>, 王菁悦<sup>2</sup>, 汤黄俊<sup>2</sup>

(1. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室和黄土地区公路建设与养护技术山西省重点实验室 山西 太原 030006;

2. 太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为了研究碎石填芯钢管桩加固液化土地基的效果, 制备碎石桩、钢管桩、碎石钢管复合桩及碎石填芯桩加固液化土四种模型, 通过振动台试验, 分析四种模型在振动过程中不同埋深处的超静孔隙水压力和土压力时程曲线, 研究不同加固模型在不同埋深处超静孔隙水压力、土压力变化规律, 得出碎石桩排水效果最为明显, 在加固模型中起到排水通道、消散孔隙水压力的作用; 钢管桩加固土体抑制土压力突变, 提高地基土的整体强度; 碎石桩与钢管桩复合加固不仅有效的抵抗土体液化、而且提高复合地基承载能力; 碎石填芯钢管桩一桩起到两桩作用, 除了起到降低孔隙水压力作用, 还从土压力变化, 说明增强复合地基土体的整体强度, 提高地基的水平承载能力。

**关键字:** 碎石填芯钢管桩加固; 振动台; 超静孔隙水压力; 土压力; 液化土

**中图分类号:** TU473.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)05-0630-05

## Study on earth pressure distribution of liquescent sand foundation reinforced by gravel filling the core steel tube pile

NIU Qiying<sup>1, 2</sup>, WANG Jingyue<sup>2</sup>, TANG Huangjun<sup>2</sup>

(1. Shanxi Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China.)

**Abstract:** In order to study the effect of liquescent sand foundation reinforced by gravel filling the core steel tube pile, four models, such as gravel pile, steel tube pile gravel pile and steel pipe pile composite and gravel filling the core steel tube pile composite reinforcement, were prepared by this paper which simulated seismic load to conduct shaking table test. Excess pore water pressure time curve in different depth and earth pressure time curve in different depth were sorted out in the four models. Analyzing the excess pore water pressure time curve variation of different reinforcement models in different depth, the drainage effect of gravel pile is such as most obvious. Gravel pile is the main drainage channel in the model, which plays a major role in dissipating excess pore water pressure. Steel tube pile reinforced not only inhibits the soil pressure mutations, but also improves the horizontal shear force of foundation soil as a whole. making use of gravel pile and steel pipe pile composite reinforcement can effectively resist soil liquefaction and improve foundation bearing capacity. Taking the place of two kinds of piles, gravel filling steel tube pile not only reduces a certain number of pore water pressures to improve soil pressure and strengthen soil body strength, but also improves horizontal bearing capacity of foundation.

**Key words:** gravel filling the core steel tube pile reinforcement; shaking table; excess pore water pressure; earth pressure; liquescent sand

五十多年来, 砂土、粉土液化及其加固已成为国内外岩土工程界广泛研究的课题。从 1936 年 Casagrande<sup>[1]</sup>最早用“临界孔隙比”的概念试图解释砂土液化开始, 到 1971 年 Seed<sup>[2]</sup>和 Idriss<sup>[3]</sup>提出液化判别的“简化方法”, 再到 1975 年 Martin 和 Finn<sup>[4]</sup>提出振动孔隙水压力模型, 国外学者对其做了大量的研究工作。我国学者的研究始于上世纪 60 年代, 汪文韶<sup>[5]</sup>给出了振动孔隙水压力与砂土的性状、排水条件等之间的关系, 提出了初始剪应力对液化的影响, 开辟了我国砂土液化的研究领域。牛琪瑛等

<sup>[6-7]</sup>进行了桩体加固液化砂土振动台试验研究, 证实了碎石桩孔隙水压力消散明显, 而水泥土桩模型桩间土孔隙水压力几乎没有变化, 并且宏观可见桩间土出现不同程度的液化现象, 由此提出实际工程中采用水泥土桩加固液化土需谨慎。国内外学者从不同角度采用不同方法进行了一些液化土的桩体分析工作, 但大多数是在静力条件进行的, 现行的桩基抗震设计在很大程度上依赖于静力条件下的理论和经验, 对地震下桩——液化土相互作用机制问题的理解还不够, 其方法本身缺乏理论根据, 也存

收稿日期: 2015-03-09

修改稿日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51408393); 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室和山西省重点实验室开放课题资助(KLTTLR-Y13-3);

作者简介: 牛琪瑛 (1957-), 女, 教授, 主要从事土的工程性质与地基处理方面的研究。E-mail: niu.qiying@163.com

在很多不合理的地方. 因此, 通过模拟地震条件下桩基础加固液化土层各种模型振动台试验, 探讨影响不同桩基础加固液化土的一些关键因素具有重要的意义.

目前, 碎石桩加固液化土方面已经做了大量的研究工作, 以碎石桩在砂土内会形成良好的排水通道被认为是加固液化土最有效的方法, 钢管桩加固土体具有提高复合地基承载力, 增强地基水平抗剪强度等优点在地基处理中大量应用. 通过振动台试验, 分析不同加固模型在振动过程中超静孔隙水压力和土压力的变化, 对比其抗液化特性, 研究新型桩体—碎石填芯钢管桩, 既要满足消散孔隙水压力又同时增加地基整体竖向承载力. 验证其在实际工程中用于加固液化土是完全可行.

1 试验仪器

振动台, 主要由 SC-0808 液体静压水平滑台、SA2-8 功率放大器和 DY-1000 振动台体组成. 振动台加速度输出值为 0.51 g, 频率为 8.74 Hz, 振动台设定振动时间为 1 min.

土压力盒, 型号为 DZ-I, 由丹东市三达仪器厂生产, 用于测量土压力.

孔隙水压力计, 型号为 DYS-3, 由丹东市三达仪器厂生产, 用于测量超静孔隙水压力.

试验用材料为有机玻璃的矩形模型箱[11-10], 外边缘尺寸为 550 mm×400 mm×750 mm, 壁厚 1 cm, 质量密度 1.21 g/cm<sup>3</sup>, 用防水强力胶粘结各面有机玻璃并做套箍加固处理. 为了满足试验振动和砂土固结排水过程中的排水条件, 在两侧箱体长边侧壁上设置直径 3 mm、间隔 50 mm 的孔洞, 孔洞用棉线穿过, 使溢出的水能引流到指定位置.

通过几种材料试验, 反复比较, 在模型箱内壁粘设柔性材料——泡沫塑料来吸收侧向边界的波以模拟土边界, 防止在动力试验中, 边界对土体变形的限制以及波的反射和散射都将对试验结果造成影响, 即“模型箱效应”, 本次试验在振动方向垂直箱体两侧壁铺垫一层厚度为 12.5 mm 海绵, 减弱边界反射波造成的信号干扰及减小边界条件对试验数据的不利影响. 试验箱底铺设粗的土工布, 防止土体随箱体水平方向的位移. 试验箱在箱体四个侧壁的横纵方向上控制间隔 5 cm 均匀钻孔, 孔径 1 mm, 满足箱内模型土体在自重作用下固结及

振动过程中的排水条件.

试验用土选择细砂, 采自太原市南中环桥西边, 汾河西岸某个住宅小区的施工现场, 指标见表 1.

表 1 试验砂土颗粒组成  
Tab.1 Grain composition of sand sample

颗粒级配/%				
>1/ mm	0.25~1/ mm	0.15~0.25/ mm	0.075~0.15/ mm	<0.075/ mm
2.2	40	34.6	12	11.2

试验制备四种土体模型分别为碎石桩加固、钢管桩加固、碎石和钢管桩复合加固、碎石填芯钢管桩加固地基模型.

碎石填芯钢管桩在钢管桩身打孔, 孔间距为 8cm, 对穿打孔, 碎石填芯桩的制备与装土同步进行, 需在桩体下部放置一块厚纱布. 碎石桩、钢管桩、碎石填芯钢管桩在地基模型中均布置 9 根桩, 采用正方形布桩,, 碎石和钢管桩复合加固地基模型中钢管桩共 5 根, 正方形的中间布置 1 根, 其余 4 根布置在 4 个角落; 碎石桩共 4 根, 布置在钢管桩的中间, 桩体布置如图 1 所示.



图 1 桩和传感器平面位置图  
Fig.1 The pile and sensor location schematic plan

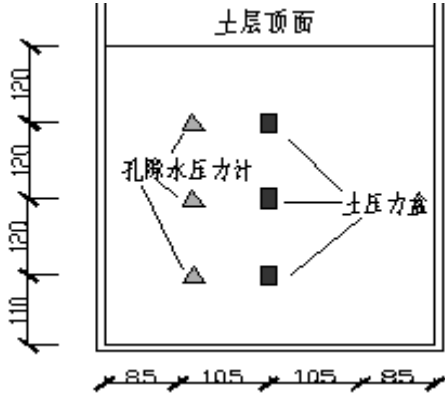


图 2 传感器埋设剖面示意图  
Fig.2 Sectional schematic of sensors buried

制备地基模型主要包括埋设传感器和装填试验用砂两方面工作. 砂土分 9 层装填, 底层 5 cm,

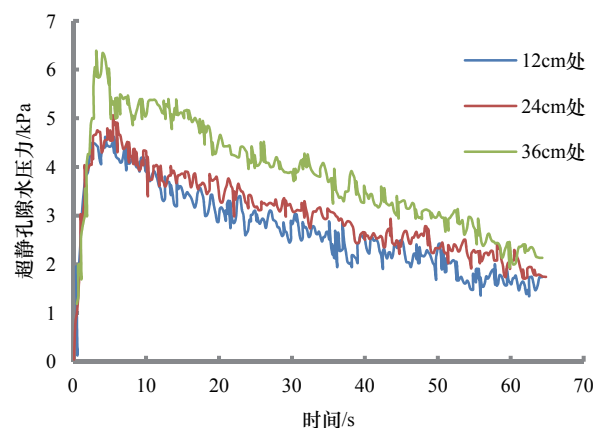
其余8层均是6 cm.传感器的埋设位置分别为12 cm、24 cm和36 cm,埋设与装箱同时进行,并且应注意在埋设时,振动方向与孔隙水压力计的埋设方向平行,振动方向与土压力盒的面部垂直,传感器的固定同时也应该注意,其埋设位置如图2所示.

## 2 试验结果分析

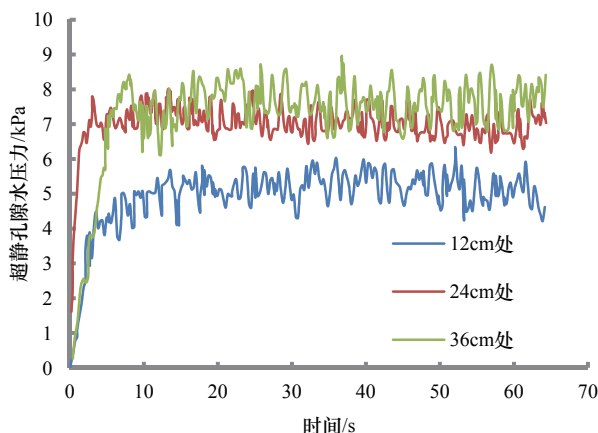
制作完成四种土体模型后,注水到模型箱内,使土体饱和度达到80%以上,经过48 h静置后,水平地震动力单向输入,也就是土体做一维方向上的纯剪切运动.武汉地震研究所提供了地震动力波型,振动台设定1 min的振动时间,可以更好的了解在振动过程中液化土的现象及内部参数的变化情况.

### 2.1 不同模型加固的超静孔隙水压力变化

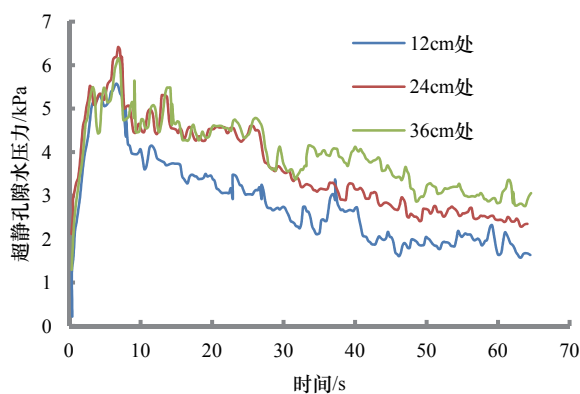
原始数据由孔隙水压力计测得后,不同模型加固的不同埋深处的孔隙水压力时程曲线可整理得到,如图3.



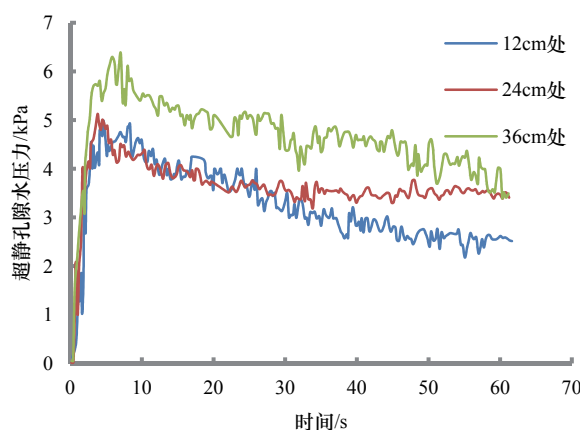
(a)碎石桩加固地基模型



(b)钢管桩加固地基模型



(c)碎石和钢管桩复合加固地基模型



(d)碎石填芯加固地基模型

图3 不同模型加固不同埋深处超静孔隙水压力时程曲线

Fig.3 Excess pore water pressure time curve in improved soil by different ways in different depth

由图3可知,碎石桩不同埋深处的超静孔隙水压力在振动台开始加载后都快速增大,随后出现了快速回落;钢管桩12 cm的孔隙水压力曲线总体保持上升趋势,但是在上升的速度不断变化,24 cm的超静孔隙水压力曲线开始上升速度极快,而后曲线基本保持水平上下小幅度波动;而在很短的时间内,碎石桩与钢管桩复合加固地基模型不同埋深处超静孔隙水压力先上升到峰值,而后开始减小,3.8 kPa、5.8 kPa和5.5 kPa分别为埋深12 cm、24 cm、36 cm处的峰值,碎石填芯钢管桩埋深12 cm、24 cm、36 cm处的超静孔隙水压力走势大体与碎石桩与钢管桩复合加固相似,都是在振动开始后迅速达到了最大值,缓慢的降低后基本保持不变.

### 2.2 超静孔隙水压力沿埋深变化

四种加固模型不同埋深处超静孔隙水压力峰值与振动荷载作用60 s时超静孔隙水压力值整理后可得对比曲线,见图4和图5.

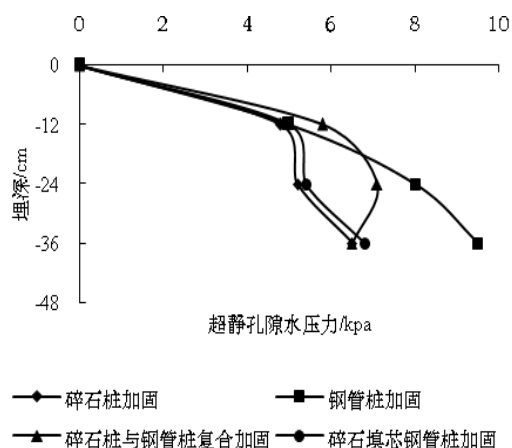


图 4 超静孔隙水压力峰值对比曲线  
Fig.4 Contrast curve of pore water pressure peak

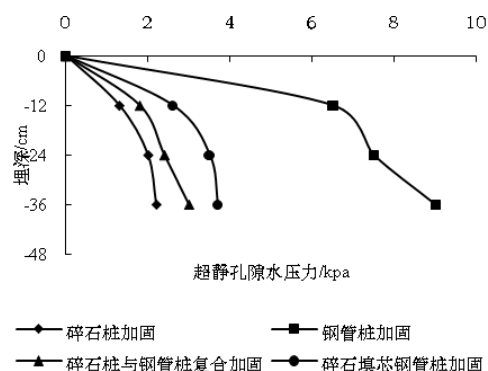


图 5 60 s 时超静孔隙水压力对比曲线  
Fig.5 Contrast curve of excess pore water pressure value in 60 s

将图 4 与图 5 对比分析, 碎石桩加固地基中孔隙水压力消散最为明显, 60 s 时孔隙水压力比孔隙水压力峰值减小了约 4 kPa. 碎石填芯桩的孔隙水压力在整个过程中大约减小了 2 kPa, 随着碎石的排水通道作用, 有效的降低土体中孔隙水压力, 也明显有效地抑制了土体的液化. 而钢管桩加固地基模型的孔隙水压力峰值和 60 s 时孔隙水压力值没有太大变化. 说明钢管桩不能消散土体的孔隙水压力, 抑制土体液化的作用并不明显. 钢管桩与碎石桩复合加固地基模型因为有碎石桩的参与, 超静孔隙水压力消散明显, 而碎石桩在振动后成为了排水通道, 有效的降低了土体中孔隙水压力. 试验中土体产生了剪切应变, 随着水的排出, 土体液化, 土的振动造成孔隙水压力的变化.

### 2.3 碎石填芯钢管桩加固模型的土压力变化

土体在振动过程中的应变通过土压力盒测量到, 土压力值经过计算机换算得到. 不同埋深处土压力时程曲线见图 6.

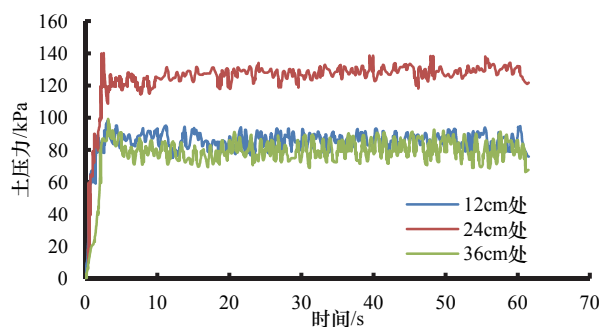


图 6 碎石填芯钢管桩加固方式下埋深处土压力时程曲线  
Fig.6 Earth pressure time curve in improved soil by gravel filling the core steel tube pilein different depth

由图 6 可知, 碎石填芯钢管桩浅层 12 cm 的土压力振动后出现了两次小幅度的波动, 随后土压力一直在 85 kPa 上下波动, 24 cm 的孔隙水压力峰值过后土压力值出现回落但是幅度较小, 随后土压力慢慢的波动增大, 36 cm 的土压力曲线在振动结束时, 土压力一直在 80 kPa 上下波动. 说明碎石填芯钢管桩能够将土体一部分水排出, 但是效果没有碎石桩明显. 土压力是加固后土体振动变化的, 是土的变形造成土压力的变化.

### 2.4 土压力沿埋深变化

四种地基模型不同埋深处除土压力峰值及 60 s 时土压力值对比曲线可由土压力时程曲线整理得出, 见图 7 和图 8.

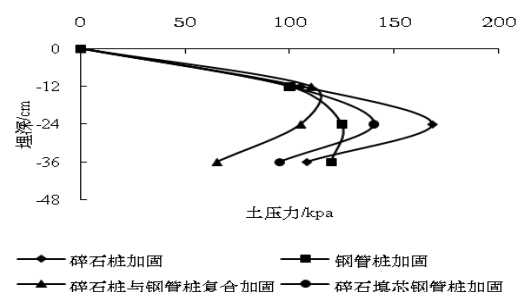


图 7 土压力峰值对比曲线  
Fig.7 Contrast curve of earth pressure peak

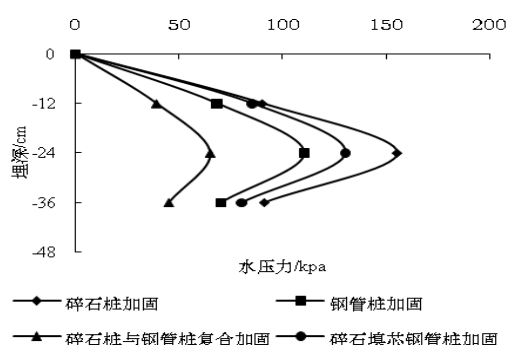


图 8 60 s 时土压力对比曲线  
Fig.8 Contrast curve of earth pressure value in 60 s

从图7总体来看,碎石桩加固土压力大于碎石填芯钢管桩,其次是钢管桩加固地基,土压力最小的是碎石与钢管桩复合加固地基.由图8可见,不同埋深处,碎石桩加固地基的土压力仍然是四条曲线中最大的.碎石桩与碎石填芯钢管桩加固的土压力峰值和60s土压力值没有太大的变化.碎石与钢管桩复合加固地基的60s土压力与其他三种加固方式相比,明显减小.表明振动过程中,刚性桩体并没有增大或者减小土压力的值.而碎石参与的桩体加固模型在振动中随着孔隙水排出,使得土体变密,强度增强.

### 3 结论

对四种不同加固模型,整理超静孔隙水压力及土压力曲线,对比得出如下结论:

(1) 钢管桩加固地基并不能有效的消散土体的孔隙水压力.钢管桩与碎石桩复合加固液化土模孔隙水压力因为有碎石桩的参与,超静孔隙水压力消散明显,抑制土体液化趋势.碎石的排水作用,使得碎石填芯桩具有了碎石桩的抗液化效果.

(2) 由每组土压力时程曲线图可见,浅层和深层的土压力较小,中层最大.但碎石桩有时在地震水平荷载作用中,中层发生错动,影响碎石排水.碎石填芯桩外部的钢管避免了此情况,提高了桩体的水平抗剪性能,保证了内部碎石稳定.

(3) 在同一埋深土压力由小到大排列分别是:钢管桩与碎石桩复合加固、钢管桩加固、碎石填芯桩加固、碎石桩加固.说明碎石在排水的同时,也使得土体强度增大.

(4) 在试验过程中,碎石填芯桩显现出降低孔隙水压力,提高土体强度等特点.说明碎石填芯钢管桩不仅提高地基整体的竖向承载力,也增加地基水平抗剪性能,更能有效的抑制土体的液化.因此实际工程可选择其加固方式.

### 参考文献 References

[1] CASAGRANDE A. Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills[J]. Journal

of the Boston Society of Civil Engineers, 1936, 23(1): 257-276.

[2] SEED H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1979, 105(GT2): 201-225.

[3] YOUNG T L, IDRIS I M, RONALD D, et al. Liquefaction resistance of soils[R]. Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 2001, (10): 817-833.

[4] GOHL W, FINN W. Seismic response of single piles in shake table studies[C]//Proc. 5th Canadian Conf Earthquake Eng, Ottawa, 1987: 435-443.

[5] 汪闻韶. 土液化特性中的几点发现[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(3): 55-63.

WANG Wenshao. Some Findings in soil liquefaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(3): 55-63.

[6] 牛琪瑛, 徐增杰. 水泥土桩复合地基的抗液化研究[J]. 工程力学, 2009, 26(增.1): 67-71.

NIU Qiyang, XU Zengjie. Research on liquefaction resistance of composite subgrade for soil-cement columns [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(sup.1): 67-71.

[7] 牛琪瑛, 史文祥, 闫卫泽, 等. 碎石桩加固液化砂土孔隙水压力变化[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 175-177.

NIU Qiyang, SHI Wenxiang, YAN Weize, et al. Pore water pressure changes of liquefiable sand soil reinforced by gravel pile[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(3): 175-177.

[8] 黄春霞, 张鸿儒, 隋志龙. 大型叠层剪切变形模型箱的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2128-2134. HUANG Chunxia, ZHANG Hongru, SUI Zhilong. Development of large-scale laminar shear model box[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2128-2134.

[9] 史晓军, 陈隽, 李杰. 层状双向剪切模型箱的设计及振动台试验验证[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 254-261.

SHI Xiaojun, CHEN Jun, LI Ji. Design and verification of dual-direction shear laminar box for shaking table test[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 254-261.

[10] 伍小平, 孙利民, 胡世德. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30(7): 781-785.

WU Xiaoping, SUN Shimin, HU Shide. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(7): 781-785.

(编辑 沈波)