

剪切历史对砂土液化特性影响的模型试验系统

叶 斌, 蒲泰條, 路家峰, 刘 超

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 介绍了一种研究剪切历史对砂土液化特性影响的模型试验系统。通过倾斜模型箱, 利用重力在倾斜方向上的分量给模型试样施加不同大小的预剪切应变。将模型箱恢复至水平状态, 利用小型振动台加振使砂土达到液化状态, 同时通过量测系统采集模型试样内部的超孔隙水压和加速度数据, 对砂土的液化特性进行分析。试验结果表明, 具有剪切历史的砂土在振动过程中超孔隙水压上升幅值更小, 说明剪切历史可以增强模型地基的液化抵抗能力。

关键词: 剪切历史; 砂土; 液化; 模型试验

中图分类号: TU441

文献标志码: A

Model Test System for Studying the Effects of Shear History on Sand Liquefaction Characteristics

YE Bin, PU Shutao, LU Jiafeng, LIU Chao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A model test system was introduced for studying the effects of shear history on sand liquefaction characteristics. First, different levels of pre-shear strains were applied on the model foundation by using the component force of gravity along the tilt direction through tilting the shear box. Then, the sand was liquefied by using a small shaking table, and simultaneously excess pore water pressure and acceleration within the foundation were collected by measurement system to analyze the sand liquefaction characteristics. Test results show that the buildup of excess pore water pressure within the soil with shear history is smaller than that without shear history. In other words, shear history can enhance the liquefaction resistance of sand.

Key words: shear history; sand; liquefaction; model test

致地基丧失承载能力, 从而对建筑物造成严重的危害。因此, 砂土液化一直是岩土工程和地震工程领域的重要研究课题。其中, 砂土液化影响因素分析是砂土液化研究的核心内容。砂土液化受到多种因素的影响, 如粒径、颗粒级配、密度、围压、地震特征以及排水条件等。关于这些常规要素, 由于科研工作者认识较早, 已经开展过深入详细的研究。然而, 影响砂土液化特性的另外一个要素——剪切历史, 长期以来却受到一定程度的忽视, 目前仅有少量学者开展过相关研究工作。Finn 等^[1]通过三轴试验和纯剪试验发现, 在材料、围压、密度、荷载等其他条件完全相同的情况下, 剪切历史会对砂土的液化抵抗能力产生显著影响, 并且这种影响与剪切应变的大小紧密相关。小应变的剪切加载历史会使砂土的液化抵抗能力增强, 而大应变的剪切加载历史则趋向于降低砂土的液化抵抗能力。Ishihara 等^[2-3]通过室内三轴试验结果指出, 剪切历史对砂土液化时超孔隙水压的影响具有方向性, 即具有剪切历史的砂土试样在三轴循环剪切试验中, 在拉伸和压缩两个方向上的超孔隙水压的发展速度不同。与先期剪切应变相反的剪切方向上超孔隙水压发展速度将加快, 而相同方向上超孔隙水压的发展则减缓。

除了室内三轴试验以外, 少量学者通过振动台模型试验研究了剪切历史对砂土液化特性的影响。Seed 等^[4]和苏栋等^[5]通过对砂土模型地基的连续加振试验表明, 模型地基在承受振动荷载作用下产生剪切变形后, 当再次振动时, 模型地基将承受更多的振动次数才发生液化, 说明振动加载产生的剪切历史可以增大砂土的液化抵抗能力。然而, 通过加振的方式无法定量地设定预剪切应变的数值, 因此不能精确地分析剪切历史对砂土液化特性的影响。这是因为由振动台施加的振动荷载与模型地基产生的剪切应变之间并没有直接的对应关系。对于同一种输

砂土液化是建筑震害中的一种常见现象, 可导

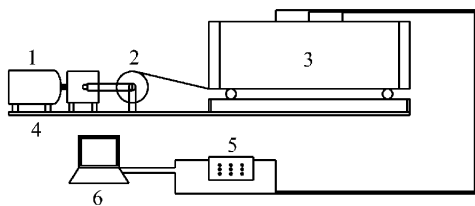
入波,不同的模型试样可能产生不同的剪切应变,而且同一个模型试样内部的不同位置,产生的剪切应变也不相同。

考虑到以往振动台模型试验的这种局限性,本文研制了一种能够精确控制剪切应变值大小的模型试验系统,可以用于定量地研究饱和砂土在剪切历史影响下的液化特性。与以往的试验设备不同,该系统首次采用了一个可调节倾角的剪切模型箱,并在模型箱两侧设置活动挡板,利用重力在倾斜方向上的分力对砂土施加预剪荷载并控制剪切应变的数值,然后通过振动台加振进行砂土的液化试验。

1 设计原理

1.1 系统概况

本系统由可调节倾角的剪切模型箱、小型振动台和量测系统组成。图1为模型试验系统示意图。



1—动力装置;2—曲柄滑块机构;3—模型箱;4—加振装置;
5—量测系统;6—计算机

图1 模型试验系统

Fig.1 Model test system

该系统的工作流程如下:首先,在模型箱内装样至指定高度并使砂土达到饱和状态;然后,调节模型箱的倾角,使砂土具有不同预剪值;最后,通过小型振动台加振使饱和砂土达到液化状态,同时在加振过程中通过量测系统采集模型地基的液化参数,包括加速度和超孔隙水压力。

1.2 剪切模型箱

1.2.1 模型箱尺寸

考虑到振动台的尺寸、性能及其工作要求,剪切模型箱尺寸取为 $980\text{ mm} \times 245\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)。模型箱三视图及实物照片分别如图2和3所示。

1.2.2 模型箱材料

在保证模型箱刚度和强度的前提下,基于尽可能减小模型箱自重的原则,模型箱框架采用有机透明玻璃制成,壁厚 10 mm 。

1.2.3 模型箱结构

目前常用的模型箱大致有三种^[6]:刚性模型箱、

圆筒型柔性模型箱和叠层模型箱。考虑到可行性和经济性等多方面因素,本系统的模型箱采用刚性模型箱。模型箱两侧安装活动挡板,挡板下部固定(可转动),上部可移动最大位移约 20 mm 。挡板与框架间的接缝设置尽量小,然后贴橡胶膜止水。整个模型箱上部采用外包铁皮进行加固。设计简图如图4所示。

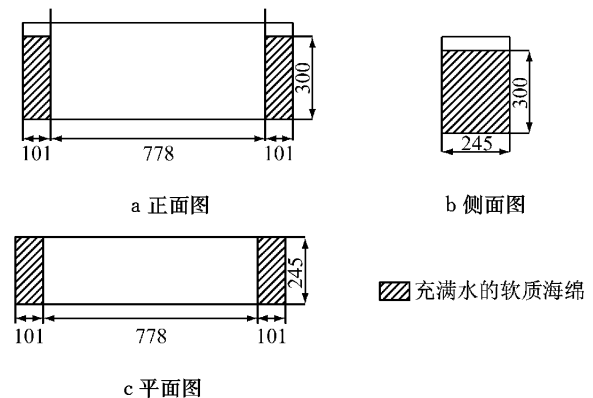


图2 剪切模型箱三视图(单位:mm)

Fig.2 Three views of shear model box (unit: mm)

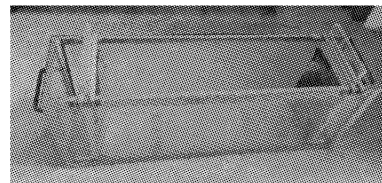


图3 剪切模型箱实物照片

Fig.3 Photo of shear model box

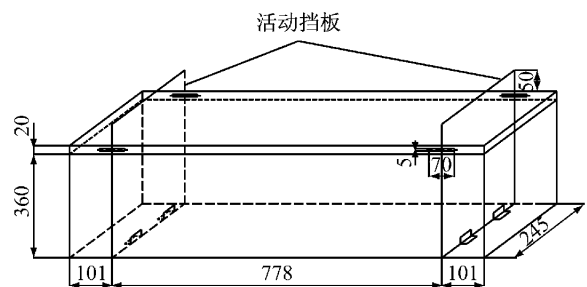


图4 剪切模型箱设计图(单位:mm)

Fig.4 Design diagram of shear model box (unit: mm)

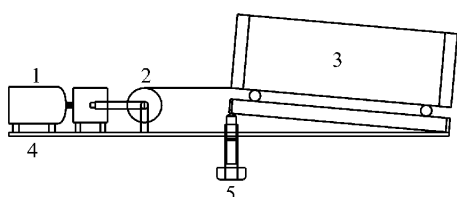
由于模型箱容积有限,可能导致模型地基无法具备自由地基的边界条件,给试验带来困难并影响试验结果可靠性。为此,在箱壁内侧粘贴硬质海绵以减少侧壁对振动波的反射。

为了实现水平预剪功能,模型箱采用了特殊的边界设计,即水平振动方向的边界挡板设计为活动挡板,使受力倾斜,以达到使模型地基产生剪切变形的目的。活动挡板的下部与模型箱铰接,可以旋转但不发生水平位移。

挡板与模型箱间的接缝由软质橡胶材料密封,以防止内部砂土流出。挡板外部与模型箱之间的空间由充满水的软质海绵填充,保证模型箱中的土样始终处于饱和状态。

1.3 振动加载装置

振动加载采用同济大学开发的小型水平单向振动台装置^[7]。该装置可实现频率 0.5~3.0 Hz, 振幅 20~60 mm 的正弦加载。在振动台一端留有螺杆孔洞,通过千斤顶顶升螺杆支架可将振动台的加载基座一端支起,实现倾斜剪切模型箱的目的。通过控制顶升高高度可以控制剪切应变的大小,如图 5 所示。



1—动力装置;2—曲柄滑块机构;3—模型箱;
4—加振装置;5—螺杆支架

图5 螺杆支架顶升示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the jacking method using screw bracket

1.4 量测系统

量测系统由传感器和数据采集装置构成。传感器埋设于模型地基内部,可输出电压信号;数据采集装置可精确采集并自动记录试验数据,实时绘制试验曲线,从而反映砂土液化过程中的加速度和孔隙水压力数据。

试验所用加速度传感器设计量程为 0.5g,输出电荷信号,灵敏度达到 $10 \text{ pC} \cdot \text{ms}^{-2}$ 。孔压传感器输出惠斯通电桥信号,平均灵敏度 $12 \mu\text{e} \cdot \text{kPa}^{-1}$ 。加速度和孔压大小由多通道数据采集仪进行采集。该数据采集仪最大采样频率 50 kHz,能很好地满足系统对数据采集精度的要求。

2 试验应用验证

为了验证系统的可靠性,进行了试验验证。试验试样采用福建省厦门市艾思欧标准砂厂生产的中国 ISO 标准砂,试样物理参数及粒径分布曲线如表 1 和图 6 所示。

表1 试样物理参数

Tab.1 Physical parameters of the testing sample

土粒比重	最大孔隙比	最小孔隙比
2.64	0.814	0.471

进行模型试验的砂土试样长为 778 mm, 宽为 245 mm, 高为 300 mm。制样采用水中落砂的方法,分三次落砂控制试样落高及相对密度。装样结束后试样的相对密度为 32.5%,模型箱示意图及实物图分别如图 7 和 8 所示。

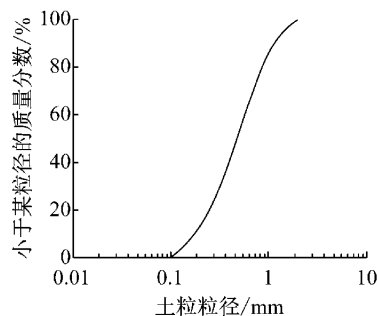


图6 试样的颗粒级配曲线

Fig. 6 Particle size distribution curve of the sample

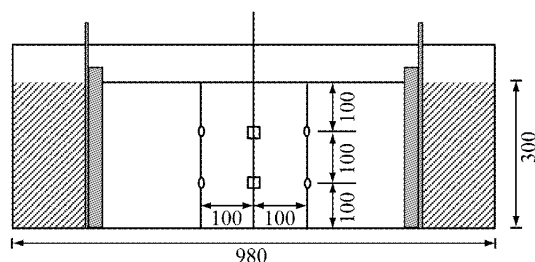


图7 模型试样示意图(单位:mm)

Fig. 7 Schematic diagram of the prepared sample (unit: mm)

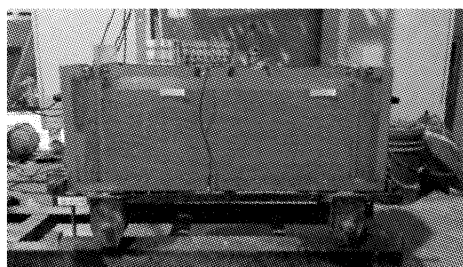


图8 模型试样实物图

Fig. 8 Photo of the prepared sample

试验主要研究了无剪切历史的模型地基和具有不同大小剪切历史的模型地基的液化特性。试验过程中控制剪切历史作为唯一变量因素,其余参数保持一致。首先,去除活动挡板两侧用于固定活动挡板位置的螺栓组件,然后用千斤顶缓慢将模型箱的一端抬升至一定高度,同时旋转活动挡板,使模型地基产生相应的剪切应变。本文进行了四组试验,每组试验通过不同的模型箱顶升高度和挡板旋转角度产生不同大小的预剪切应变值,如表 2 所示。

待预剪切位置稳定后缓缓降低千斤顶,使模型

表2 剪切模型箱顶升高度和挡板旋转角度

Tab.2 Jacking height of shear model box and rotation angle of slide boards

项目	试验组号			
	1	2	3	4
预剪切应变/%	0	1	2	3
高度值/mm	0	17	34	51
挡板旋转角度/(°)	0	0.6	1.1	1.7

箱缓慢恢复至初始水平状态,同时对活动挡板施加一个恒定较小的作用力,使活动挡板向初始位置回转。待模型箱回到初始状态时停止,用螺栓组件固定活动挡板位置。最后打开数据采集开关开始采集数据,设定采样频率 500 Hz,启动振动台进行循环加载液化试验,待液化发生并排水结束后停止振动加载并保存采集数据。

试验中在振动基座上测得的加速度时程曲线(输入振动)如图 9 所示。

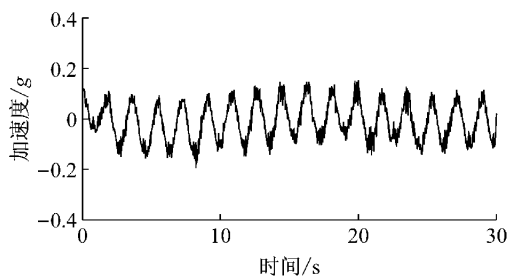


图9 加速度时程曲线

Fig.9 Time history curve of the measured acceleration

图 10 显示了不同预剪条件下距模型箱底部 200 mm 处测得的试样内部超孔隙水压的时程曲线。从图 10 可以看出,有预剪的试样达到液化时的超孔隙水压峰值要小于无预剪试样,说明预剪过后的试样较难液化。再比较不同预剪值之间的超孔隙水压值,

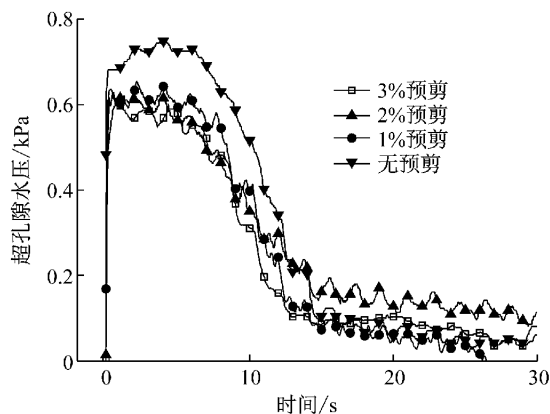


图10 超孔隙水压力时程曲线(距离底部 200 mm)

Fig.10 Time history curves of the measured excess pore water pressures (200 mm from the bottom)

可以看出,预剪值越大的试样达到液化时的超孔隙水压越小,说明土体的液化抵抗能力有随着预剪值的增大而增强的趋势。

3 结论

(1) 该模型试验系统主要由剪切模型箱、小型振动台和量测系统组成。剪切模型箱在箱壁粘贴硬质海绵来减少侧壁对振动波的反射,减少了边界效应。该模型试验系统的量测系统配置能很好地满足系统对数据采集精度的要求。

(2) 通过倾斜模型箱,利用重力在倾斜方向上的分量来施加剪切荷载,并通过控制模型箱一端的抬升高度和侧壁活动挡板的旋转角度,可以精确控制剪切应变的大小,因此可对剪切历史的影响进行定量分析。

(3) 通过对具有不同程度剪切历史的砂土试样进行振动液化试验发现,由于剪切历史的作用,试样在剪切加载过程中的峰值孔压随剪切历史的增大而降低,说明在模型试验中剪切历史有助于增大砂土的液化抵抗能力。

参考文献:

- [1] Finn W D L, Bransby P L, Pickering D J. Effects of strain history on liquefaction of sands [J]. Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(6): 1917.
- [2] Ishihara K, Okada S. Effects of stress history on cyclic behavior of sand[J]. Soils and Foundations, 1978, 18(4): 31.
- [3] Ishihara K, Okada S. Effects of large preshearing on cyclic behavior of sand[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(3): 109.
- [4] Seed H B, Chan C K, Mori K. Influence of seismic history on liquefaction of sands [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(4): 257.
- [5] 苏栋, 李相崧. 地震历史对砂土抗液化性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1815.
SU Dong, LI Xiangsong. Centrifuge investigation on effect of seismic history on resistance of sand to liquefaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1815.
- [6] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 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.
WU Xiaoping, SUN Limin, HU Shide, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(7): 781.
- [7] 黄雨, 李光辉. 液化砂土流态运动模型试验系统的研制及应用[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 700.
HUANG Yu, LI Guanghui. Development and application of a model test system for liquefaction-induced sand flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 700.