

文章编号: 1000-7598 (2011) 09-2709-06

穿越断层隧道振动台模型试验研究

方 林, 蒋树屏, 林 志, 王芳其

(重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

摘 要: 以西藏某复杂隧道工程为背景, 开展了穿越断层隧道振动台模型试验研究。从试验模型相似比、模型箱设计和边界处理、模型制作、测点布置及地震波加载等方面, 详细地介绍了试验方案。试验重点观察在地震作用下穿越断层隧道动力响应规律及特征。试验结果分析表明, 穿越断层隧道和均质围岩隧道地震动力响应规律有相似之处, 随着地震波的向上传播, 岩土体地震响应增大; 断层处衬砌破坏严重; 断层对地震波在岩土体内的传播有一定影响。

关 键 词: 断层; 隧道; 振动台; 模型试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Shaking table model test study of tunnel through fault

FANG Lin, JIANG Shu-ping, LIN Zhi, WANG Fang-qi

(Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Based on the background of a complex tunnel constructed in Tibet, a large-scale shaking table test is accomplished to study the seismic responses of the tunnel through fault. The paper introduces the test including the decision of model similarity ratio, the design of model box and the treatment of boundary, the making of model, the layout of monitored points and the input scheme of seismic wave and so on. The test focuses on the rule and character of the dynamic response of the tunnel through fault. From the test, it is concluded that there are some similarities in seismic response between the tunnel through fault and the tunnel through homogeneous rock. With seismic wave upward propagating, seismic response of rock and soil is increasing and the tunnel lining in fault is damaged severely. There is a certain influence on seismic wave propagation because of fault.

Key words: fault; tunnel; shaking table; model test

1 引 言

“5.12”汶川大地震后, 大量的震害调查显示, 隧道具有良好的抵御地震破坏的能力, 但穿越断层破碎带隧道则极易遭受地震破坏。此外, 隧道对于保证道路畅通有着举足轻重的作用, 如果沿线隧道出现坍塌而丧失功能, 这对于争分夺秒的灾后救援无疑是致命的。而目前国内已开展的隧道振动台模型试验大都模拟的是连续均质岩体, 尚未针对隧道穿越断层的情况进行过试验研究。鉴于此, 笔者依托西藏某重大隧道工程, 开展了穿越断层隧道模型试验研究, 本文就具体的试验方案作了深入的讨论, 并分析了试验数据和断层处隧道衬砌的破坏方式。

2 试验概况

试验依托的隧道工程位于青藏高原东南部的喜

马拉雅山脉与横断山脉的交接处, 发育有众多大断裂。其中, 有一条次生断层从隧道进口附近通过, 另有其他 6 条断层穿过该隧道, 地质条件极其复杂。

隧址区地震活动强烈, 设计建议本项目工程场地的地震基本烈度为Ⅷ度。

试验模拟对象为隧道进口段 110 m 的范围, 最大埋深为 47.5 m。模拟的断层宽度为 10 m, 倾角为 45°, 走向与隧道轴线垂直。试验的主要目的是: 分析地震作用下穿越断层隧道动力响应规律及特征, 观察其破坏方式, 为后续的隧道抗减震研究奠定基础。

本次试验在重庆交通科研设计院结构动力国家重点实验室进行, 采用大型高性能三轴向地震模拟试验台阵系统, 由一个固定台和一个移动台组成, 该系统国内惟一, 配套的数据采集和振动测试分析系统也非常先进 (见图 1)。

收稿日期: 2010-01-05

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51078324); 重庆市自然科学基金 (No. 2009BB6226)。

第一作者简介: 方林, 男, 1981 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地下工程的抗减震研究。E-mail: fanglin0717@126.com

系统主要参数和技术指标见表 1。本次模型试验使用的是该台阵系统中的固定台。



图 1 三轴向地震模拟试验台阵
Fig.1 Triaxial shaking table system

表 1 地震模拟振动台系统主要参数
Table 1 Main parameters of shaking table system

技术参数	固定台	移动台
台面尺寸/m×m	3×6	3×6
最大试件重量/Ton	35	35
最大抗倾覆力矩/kN·m	700	700
最大回转力矩/kN·m	350	350
工作频率范围/Hz	0.1~50	0.1~50
X 方向可移动距离/m	0.0	2.0~20.0
最大位移/mm	X 向	±150
	Y 向	±150
	Z 向	±150
最大速度/(mm/s)	X 向	±800
	Y 向	±800
	Z 向	±600
最大加速度/g	X 向	±1.0
	Y 向	±1.0
	Z 向	±1.0

3 模型相似比的确定

很多试验研究表明^[1-4]，由于土性状的复杂性，在进行动力模型试验时完全满足相似定理是很难做到的，可以通过近似相似的方法，根据试验目的及主要因素来确定相似关系。此外，在现有试验条件下，采用人工质量方法来模拟岩土体的重力效应是相当困难的，因此，本次试验采用重力失真模型。

综合考虑振动台台面尺寸、承载力及边界效应影响范围等因素^[5]，确定模型相似比如表 2 所示。

4 模型箱设计及边界处理

本次试验用模型箱在设计时考虑了以下因素^[5]：
①结构牢固，以免箱体在激振过程中失稳破坏；
②边界条件明确；③模型箱自振频率尽量偏离模型土频率，以免发生共振现象；④模型箱尺寸应与试验振动台尺寸相匹配。

表 2 模型相似关系及相似比
Table 2 Similarity relations and ratios of physical parameters

物理量	相似关系	相似比
长度/m	C_L	1/40
密度/ kN/m^3	C_ρ	1/1
弹性模量/MPa	C_E	1/20
泊松比	无因次	1/1
应力/kPa	$C_\sigma = C_E C_\epsilon$	1/40
应变	$C_\epsilon = C_L C_\rho C_E^{-1}$	1/2
时间/s	$C_t = C_L (C_E / C_\rho)^{1/2}$	1/8.944
加速度/g	$C_a = C_L^{-1} (C_E / C_\rho)$	1/0.5
位移/mm	$C_u = C_L$	1/40
速度/mm/s	$C_v = (C_E / C_\rho)^{1/2}$	1/4.472
频率/Hz	$C_f = C_L^{-1} (C_E / C_\rho)^{1/2}$	1/0.112

模型箱整体为长方体结构，箱体主要骨架采用矩形专用型钢和 7 号等边角钢焊接而成，四周侧壁及底部用 5 mm 厚钢板固定。在模型箱底部型钢上预留一些螺栓孔，螺栓孔的位置与振动台上螺栓孔的位置吻合，当模型箱吊装到振动台台面上时，可通过若干螺栓固定。做成后的模型箱高为 2.45 m，沿隧道纵向长度为 3.00 m，横向宽度为 2.70 m。

地下结构模型试验所研究的土体毕竟是有限的，将处于半无限域中的土体进行有限化，这就涉及到人工边界处理的问题，很多学者也对此做过深入研究^[7-8]。当土体和模型箱箱壁光滑接触时，接触面对土体影响很小；当模型箱箱壁变得很粗糙时，会对土体的振动产生较大的影响，影响试验结果的准确性。因此，在对模型箱边界进行处理时，应该尽可能使其箱壁光滑，减小试验误差。而在箱底则摊铺一层碎石，以增大其摩阻力，防止激振时土体与模型箱底部发生相对滑移。

为了尽可能模拟地震时土体在半无限域中的变形和弹性恢复能力，在箱壁四周设置了一层聚苯乙烯泡沫板，在其他参数相同的条件下，泡沫板质量越轻越好。先根据三维黏弹性人工边界方程确定边界物理参数——刚度和阻尼，通过这些参数选择合适范围的聚苯乙烯泡沫板。对于聚苯乙烯泡沫材料，可使用 Soong^[9]建立的等效刚度和等效阻尼模型，通过试验方法测定其等效刚度 k_d 和等效阻尼 c_d 。

$$c_d = \frac{G''V}{\omega h^2}, k_d = \frac{G'V}{h^2} \tag{1}$$

式中： G' 为聚苯乙烯泡沫材料储存剪切模量； G'' 为损耗剪切模量； h 为聚苯乙烯泡沫板的厚度； V 为体积； ω 为模型箱及土体的自振频率。

由此确定试验用聚苯乙烯泡沫板的厚度为 22.5 cm。

5 围岩相似材料及模型的制作

经过大量的配比试验,最终选择石膏、 BaSO_4 、石英砂、氧化锌、甘油和水作为围岩相似材料,衬砌的相似材料为素石膏和水,钢筋用直径为 0.4 mm 的细钢丝来模拟。

对于断层的合理模拟是模型制作的重点。根据地勘报告中断层的力学参数,通过配比试验确定断层的相似材料与一般围岩相同,但配合比是不同的。断层和围岩的接触面则使用石英砂、 BaSO_4 和机油作为相似材料,以模拟地震时断层上下盘的位移。

因为选择了石膏作为围岩及衬砌相似材料,而石膏受空气湿度及温度的影响非常明显,特别是湿度,不同的天气条件下,测出的石膏试件物理参数差异很大。为了避免这种情况,严格控制石膏试件的养护条件,尽量做到在相同环境条件下测试,对于养护好的试件,会涂刷一薄层清漆进行保护。此外,不同批次和型号的相似材料,物理参数也会存在较大的误差,因此,必须在试验中进行有效控制。

考虑到木模遇水变形大,且不利于循环利用,衬砌采用钢模浇筑。为此,特地制作了一套钢模,内侧设置 3 个楔形体,外侧设套箍,以方便拆卸。实物如图 2 所示。



图2 衬砌浇筑钢模

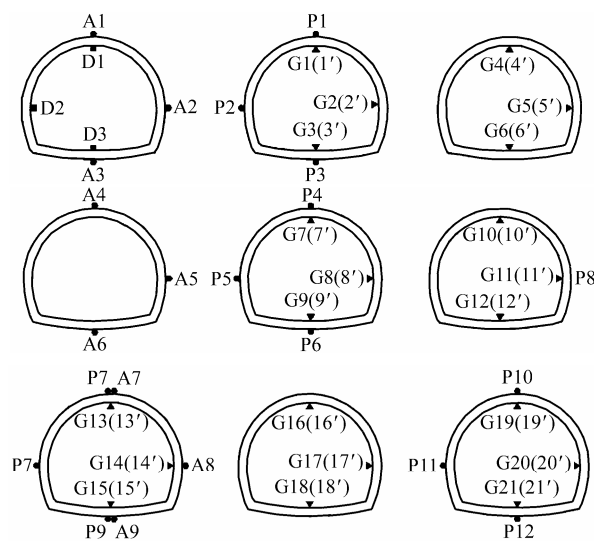
Fig.2 Steel formwork of lining model making

6 测试元件及测点布置

因为本次试验模拟的对象为穿越断层隧道的洞口段部分,所以洞口及断层段衬砌为观察的重点。鉴于汶川地震中,很多隧道洞口边坡破坏严重,试验将洞口仰坡同样作为重点研究对象,仰坡角度取 45° 临界值。

采集的数据包括激振过程中衬砌结构的加速度、应变和位移值、围岩与衬砌结构间的接触压力值、洞口边坡的加速度值以及隧道正上方地表的加速度和位移值^[10]。选用的传感器有:BY-3 型微型电阻应变式土压力计、电阻应变传感器,CA-YD-152 型压电式加速度传感器和位移传感器。

将衬砌结构划分为 9 个典型观测断面,每个观测断面有针对性的布置传感器,另在洞口仰坡和地表布置了加速度及位移传感器(见图 3)。



图例:●加速度计(A)●土压力盒(P)▲应变片(G)■位移计(D)

图3 振动台模型试验测点布置

Fig.3 Arrangement of sensors at shaking table testing model

模型共布置 15 个加速度计、42 片应变片、11 个土压力盒、9 个位移计,并在洞口布置了一台 MotionXtra HG-LE 高速摄像机,用于捕捉洞口衬砌的破坏情况。此外,还在洞口仰坡、断层段衬砌及洞口进尺 25 cm 处安装了 3 个高分辨率摄像头,用以记录振动时的裂纹发展。

7 加载方案

试验输入的地震波为西藏自治区地震局及中国地震局地球物理研究所针对该隧道工程场地拟合的人工波,分别对应于 50 年超越概率 63%、10%、2%。根据以往经验^[11-16],试验采用多次加载的方式,加载方案考虑单向和组合向加载,如表 3 所示。

表3 振动台试验加载方案

Table 3 Loading scheme of shaking table test		
超越概率/%	输入方向	峰值加速度/g
63	白噪声	
	X 向	0.05
	Y 向	0.05
	Z 向	0.3
	白噪声	
	X 向	0.3
10	Y 向	0.3
	Z 向	0.2
	白噪声	
2	X 向	0.6
	Y 向	0.6
	Z 向	0.4

注: X 向为隧道横断面方向, Y 向为隧道轴线方向, Z 向为竖直向。

8 试验结果分析

本次模型试验测点布置及加载工况较多,限于篇幅,本文只列出对应 10%超越概率下具有代表性测点的记录数据,地震波输入方向为 X 向,其他详细结果另文分析。

图 4~6 为相对于振动台台面输入地震波的衬砌、洞口仰坡和地表加速度时程,其中,衬砌和洞口仰坡测点位于断层的下盘,地表测点位于断层的上盘。

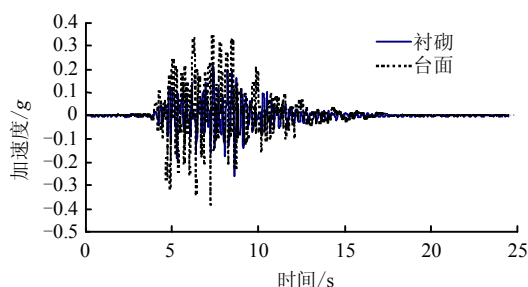


图 4 衬砌与台面加速度时程

Fig.4 Acceleration time history of monitoring points at lining

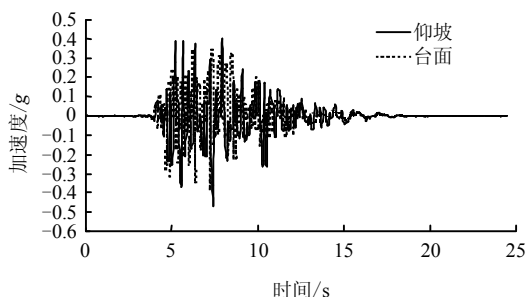


图 5 洞口仰坡与台面加速度时程

Fig.5 Acceleration time history of monitoring points at front slope

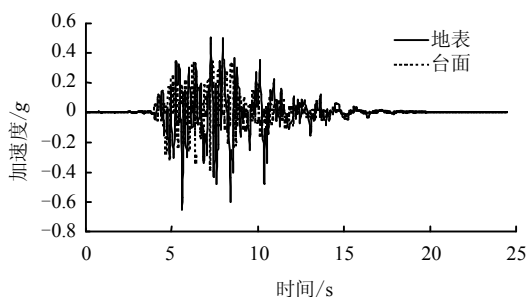


图 6 地表与台面加速度时程

Fig.6 Acceleration time history of monitoring points at surface

此工况下,衬砌测点(见图 4)加速度峰值为 0.26 g,对应时刻为 8.75 s;洞口仰坡测点(见图 5)

加速度峰值为 0.47 g,对应时刻为 7.53 s;地表测点(见图 6)加速度峰值为 0.66 g,对应时刻为 5.74 s。可见,洞口仰坡及坡顶地表对地震输入加速度有明显的放大作用,对应的衬砌结构则有减小的趋势,这在一定程度说明了地下结构本身具有良好的抗震性能。

此外,对比衬砌、洞口仰坡和地表处的加速度记录可发现,前两个测点记录的加速度波形和输入地震波波形趋势比较吻合,而地表测点记录的加速度波形则存在一定的差异。可见,断层对地震波在岩土体内的传播有一定影响。

如图 7 所示,衬砌测点记录的位移峰值为 6.41 mm,对应时刻为 6.48 s,地表测点记录的位移峰值为 7.33 mm,对应的峰值时刻为 4.97 s。受围岩的约束作用,在地震作用下隧道和围岩的变形具有基本相同的趋势。但可能因为断层的存在,周围岩体的不连续性会导致衬砌结构的错断。

如图 8 所示,衬砌仰拱测点记录的土压力峰值为 7.6 kPa,对应时刻为 14.11 s。

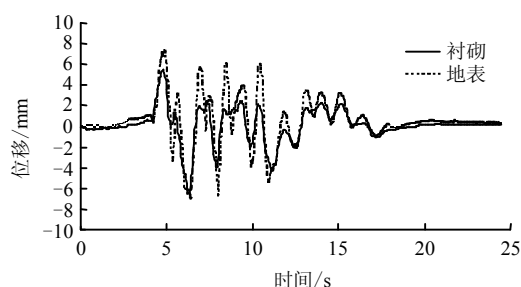


图 7 衬砌与地表位移时程

Fig.7 Displacement time histories of monitoring points at lining and surface

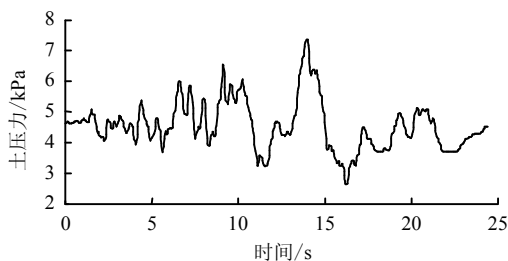


图 8 衬砌动土压力时程

Fig.8 Soil-pressure time history of monitoring points at lining

图 9 是模拟的断层段衬砌破坏情况,从图中可以看出,衬砌右拱腰位置破坏较为严重,左拱腰和仰拱底板位置也出现了纵向裂纹,且贯通该段衬砌,其主要原因是断层上下盘的错动,致使相邻段衬砌

相互挤压所致。图 10 为洞口仰坡破坏情况, 出现的裂纹基本沿坡面水平向和竖直向延伸, 且大多集中在洞室上方, 这与一些实际震害现象是吻合的。

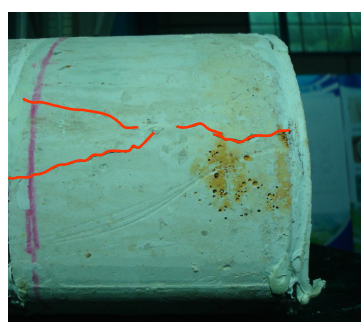
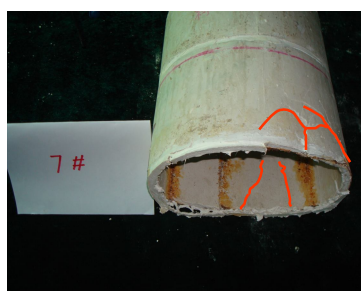


图 9 断层处衬砌破坏
Fig.9 Damaged lining in faults

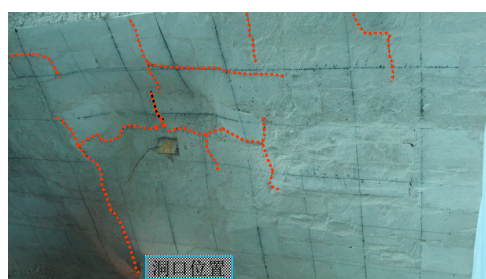


图 10 洞口仰坡处裂纹
Fig.10 Cracks on front slope

9 结 语

本文以西藏某重大隧道工程为依托, 开展了穿越断层隧道振动台模型试验研究, 试验注重细节处理, 在试验方案的设计, 如相似材料的配置、模型箱的设计、模型边界的处理及测试仪器的布置等方面, 做到了有理可循、有据可依。对衬砌、洞口仰坡和地表测点记录的数据以及震害现象分析后发现:

(1) 穿越断层隧道与均质围岩隧道地震动力响应规律有相似的地方, 随着地震波的向上传播, 岩土地震响应增大;

(2) 因为地震时断层上下盘相互位移, 导致断

层处衬砌破坏严重, 拱部和底板出现纵向贯通裂缝, 给隧道结构安全带来严重隐患, 很可能出现塌方致使交通中断;

(3) 断层对地震波在岩土体内的传播规律有一定影响, 主要是因为断层破碎带岩性与周围岩体存在差异, 但地震波传播方向与断层走向及倾角的关系可能也是影响的重要因素之一, 应进一步研究。

(4) 隧道洞口仰坡出现较多裂纹, 且集中在洞室上方, 因此, 对于高烈度地震区隧道应做好边仰坡的抗震措施。

参 考 文 献

- [1] 尚守平, 刘方成, 卢华喜, 等. 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 Shou-ping, LIU Fang-cheng, LU Hua-xi, 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.
- [2] 楼梦麟, 王文剑, 马恒春, 等. 土-桩-结构相互作用体系的振动台模型试验[J]. 同济大学学报, 2001, 29(7): 763—768.
LOU Meng-lin, WANG Wen-jian, MA Heng-chun, et al. Study on soil-pile-structure interaction system by shaking table model test[J]. *Journal of Tongji University*, 2001, 29(7): 763—768.
- [3] 陶连金, 王沛霖, 边金. 典型地铁车站结构振动台模型试验[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(9): 798—801.
TAO Lian-jin, WANG Pei-lin, BIAN Jin. A shaking table method on the representative subway station structure[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(9): 798—801.
- [4] 陈国兴, 庄海洋, 杜修力, 等. 土-地铁车站结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 171—176.
CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang, DU Xiu-li, et al. Analysis of large-scale shaking table test of dynamic soil-subway station interaction[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(2): 171—176.
- [5] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 1—8.
LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similarity technique for dynamic structural model test[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, 40(1): 1—8.

- [6] 杨林德, 季倩倩, 郑永来, 等. 地铁车站结构振动台试验中模型箱设计的研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 75—78.
YANG Lin-de, JI Qian-qian, ZHENG Yong-lai, et al. Study on design of test box in shaking table test for subway station structure in soft soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 75—78.
- [7] 楼梦麟, 王文剑, 朱彤, 等. 土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 30—36.
LOU Meng-lin, WANG Wen-jian, ZHU Tong, et al. Soil lateral boundary effect in shaking table model test of soil-structure system[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000, 20(4): 30—36.
- [8] 陈清军, 赵云峰, 王汉东, 等. 振动台模型试验中地基土域的数值模拟[J]. 力学季刊, 2002, 23(3): 407—411.
CHEN Qing-jun, ZHAO Yun-feng, WANG Han-dong, et al. Numerical simulation for soil domain in shaking table model test[J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 2002, 23(3): 407—411.
- [9] 吴波, 李惠. 建筑结构被动控制的理论与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
- [10] 杨林德, 季倩倩, 杨超, 等. 地铁车站结构振动台试验中传感器位置的优选[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 619—623.
YANG Lin-de, JI Qian-qian, YANG Chao, et al. Optimization of positions of sensors in shaking table test for subway station structure in soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 619—623.
- [11] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
- [12] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998.
- [13] 庄海洋. 土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006.
- [14] 徐志英, 施善云. 土与地下结构动力相互作用的大型振动台试验与计算[J]. 岩土工程学报, 1993, (4): 1—7.
XU Zhi-ying, SHI Shan-yun. Large-sized shaking table test and calculation for soil-substructure dynamic interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, (4): 1—7.
- [15] 左熹, 陈国兴, 王志华, 等. 近远场地震动作用下地铁车站结构地基液化效应的振动台试验[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3733—3740.
ZUO Xi, CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, et al. Shaking table test on ground liquefaction effect of soil-metro station structure under near-and-far field ground motions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3733—3740.
- [16] 蒋良滩, 姚令侃, 吴伟, 等. 传递函数分析在边坡振动台模型试验的应用探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1368—1374.
JIANG Liang-wei, YAO Ling-kan, WU Wei, et al. Transfer function analysis of earthquake simulation shaking table model test of side slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1368—1374.