

大型渡槽桩土相互作用振动台试验研究

李勇泉^{a,b}, 王义重^{a,b}, 傅旭东^{a,b}, 杜斌^c

(武汉大学 a. 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, b. 土木建筑学院, c. 设计研究院, 武汉 430072)

摘要: 为了对南水北调中线工程中的洺河大型渡槽下部结构型式及优化设计各备选方案进行初步的评估, 总结其地震反应的规律, 获得必要的动力反应设计参数, 分别对等长桩、不等长桩以及旋喷加固等长桩进行了振动台试验研究。根据所得试验数据, 对等长桩和不等长桩 2 种不同设计方案下的动力反应特性进行了分析, 对使用旋喷加固方法对桩基动力反应的影响进行了初步的判断, 并对试验中使用的木-橡胶模型箱进行了评估。试验结果表明: 采用长短桩设计方案比不等长桩更具优越性; 使用旋喷加固方法能在一定程度上提高桩基动力反应的安全性; 试验中所使用的木-橡胶模型箱在土的边界模拟上是合理和可行的。

关键词: 桩土相互作用; 振动台; 不等长桩; 模型箱; 旋喷加固; 地震

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)03-0057-06

Shaking Table Test on Soil-pile Interaction of Large Aqueducts

LI Yong-quan^{a,b}, WANG Yi-zhong^{a,b}, FU Xu-dong^{a,b}, DU Bin^c

(a. Key Laboratory of Geotechnical and Structural Engineering safety of Hubei Province, Wuhan University,

b. College of Civil and Architecture Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China,

c. Institute of Design, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Shaking table tests were carried out for Minghe River Aqueduct in South-to-North Water Diversion Central Line Project. Based on the data of the tests, dynamic response characteristics were analyzed for two different design alternatives, which were equal length pile foundation and Unequal length pile foundation. The effect was initially estimated on the dynamic response of pile foundation when circle spray reinforcement was used. And wood-rubber model box was objectively evaluated in the tests. It is shown that unequal length pile design alternative is more appropriate than equal length pile. Moreover, circle spray reinforcement can improve the behavior of dynamic response of pile foundation and wood-rubber model box is rational and feasible.

Key words: soil-pile interaction; shaking table; unequal length pile; model box; circle spray reinforcement; earthquakes

为了能为桩-土-结构相互作用分析提供有意义的指导性参数和反应规律, 长期以来人们一直致力于其相互作用的试验研究。桩-土-结构相互作用研究的试验方法主要有现场测试、振动台试验和

离心机试验^[1-5]。

从本质上来说, 以原型结构为对象的现场试验本是试验研究的最佳方法, 但它受到诸如地震难以捕捉、成本大等诸多条件限制。而实验室试验的低

收稿日期: 2009-11-21

基金项目: 南水北调工程建设重大关键技术研究及应用专项基金(JGZXJJ2005-30); “十一五”国家科技支撑重大项目(2006BAB04A05)

作者简介: 李勇泉(1977-), 男, 博士生, 主要从事地基与基础研究, (E-mail)liyongquan7197213@126.com。

傅旭东(联系人), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)xdfu@whu.edu.cn。

成本性、可控制性和可重复性等优点已越来越受到人们的重视,特别是振动台试验,应用得越来越广泛,尤其是近年来,使用振动台试验在分析桩-土-结构动力相互作用,在诸多难点方面都有所突破,取得了较为丰硕的研究成果^[6-13]。

洛河渡槽工程是南水北调中线工程上的一级建筑物,为了保证渡槽的抗震安全,获得渡槽下部结构型式及优化设计的 3 种基础备选方案的动力反应特性及参数,总结其在地震作用下的动力反应规律,给结构优化设计提供实验、实践性参考和指导,在专项基金的支持下,分别对等长桩、不等长桩、旋喷加固等长桩 3 种方案进行了振动台试验。

1 模型设计与制作

1.1 结构模型的设计与制作

桩-土-水相互动力作用的振动台试验研究一直以来是一个难题。鉴于洛河属于季节性河流,可不考虑水流的影响^[14]。试验选取了桩长适中,下伏弱风化岩层变化剧烈的洛河渡槽 5 号墩下群桩基础为代表性基础。根据不同工况,选用不同的上部结构的质量模型,其中空槽工况考虑的原型质量为渡槽质量,中槽过水原型质量为渡槽质量+1 槽水质量,边槽过水原型质量为渡槽质量+2 槽水质量,全

槽过水的原型质量为渡槽质量+3 槽水质量,见表 1。土体的受力非线性特性很难完全用模型代替原型,试验的指导思想是根据分析要求,尽量满足几何条件的相似,并根据动力计算原理对上部结构作相应的简化^[7,15]。渡槽的质量以及槽中水的质量用铁块模拟。在模拟支座时,采用 2 mm 厚橡胶块,上下分别与模型渡槽质量(铁块)和模型盖梁粘接或用其它易于拆卸的螺钉方式固定。模型的基桩、承台、渡槽墩以及盖梁均用有机玻璃材料制作。

试验中采用加速度计和应变片测量渡槽下部结构的动力响应以及土体表面的动力响应。在桩周布置压力盒测试桩土界面的接触压力。加速度计、应变片以及压力盒布置到岩层变化处,兼顾上密下疏和平均,如图 1 所示(图中左边为长短桩方案,右边为等长桩方案)。

表 1 工况及铁块设计参数

模型编号	工况	原型质量/t	模型质量/kg	模型尺寸 (长×宽×高)/mm
1	空槽	4 906	4.67	154×60×65
2	中槽过水	6 491	6.18	165×60×80
3	边槽过水	8 076	7.58	180×60×90
4	全槽过水	9 662	9.20	205×60×96

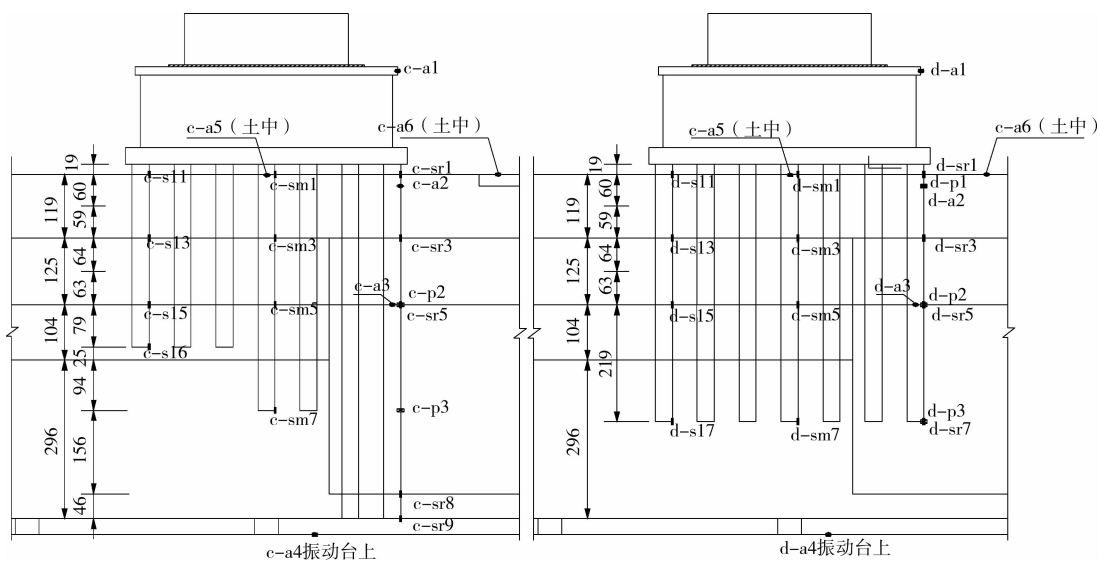


图 1 模型测点布置

1.2 模型箱及土体模型的设计与制作

模型箱是一个人工的边界,为了减小“模型箱”效应,减小人工边界对土体变形的限制以及波的反射和散射,有必要通过专门的试验保证土体的自由剪切变形和边界上波的自由扩散。由于土体本身材

料特性比较复杂,完全准确的模拟土地边界条件是很困难的^[16-17]。试验采用的模型箱型式是圆筒形柔性容器以及层状剪切变形土箱的有机结合,即用柔性的橡胶来连接木框架,从而达到上述目的,见图 2。

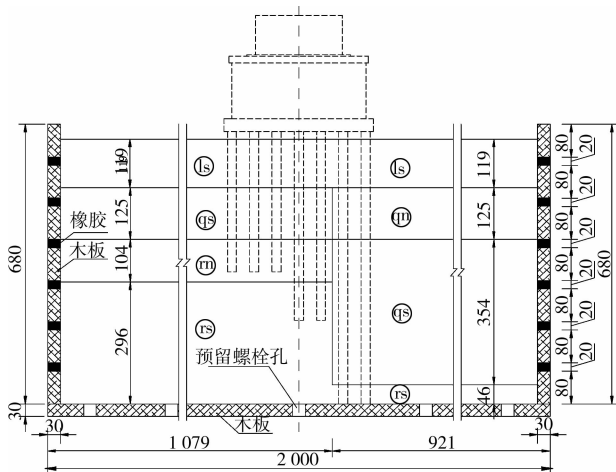


图 2 土体分层及模型箱剖面图

根据 5 号墩下基础的地质情况,使用多种材料,

包括用合适的粘土、碎石土以及石膏:砂:水:柠檬酸按适当配比,混合而成的材料来模拟相应的地基土^[6]。模拟弱风化岩的石膏块经过一定时间的养护、干燥、获得适当的强度。土材料还需根据图 2 所示分层铺填、夯实。卵石层的灌浆通过在相应的模型材料中加入适量石膏、水,拌和形成混合材料来模拟,模型地基土相关目标参数见表 2。

1.3 地震动输入选取

进行动力特性分析时,对其每种工况均采用 0.1 g 加速度进行扫频。在时程分析中,只考虑其中的第 4 工况,而在地震动输入方面,根据场地条件,选取了 Taft 波和 Chichi 波,以及一条根据该场地生成的人工波来进行输入。试验时,单向输入振动激励,从台面输入 3 种地震波。

表 2 模型地基土目标参数表

土层代号	原型地基土	模型材料	混合比例	E/MPa
ls	卵石	粘土	—	1.28
ls-g	卵石(灌浆)	粘土:石膏	1:5	2.56
qn	强风化泥岩	碎石土	—	17.93
qs	强风化砂岩	碎石土	—	14.35
rn	弱风化砂岩	石膏:砂:水:柠檬酸	1:2:0.5:0.05	466.28
rs	弱风化泥岩	石膏:砂:水:柠檬酸	1:1:0.5:0.05	570.30

抗震设计分 2 阶段进行,即多遇地震和罕遇地震作用下的时程分析^[18]。但是由于振动台设备的限制,只能进行多遇地震和设防地震的试验,罕遇地震试验通过有限元计算来模拟^[16],模型调整后的加速度峰值,应根据设防烈度而定,试验按设防烈度 7 度计算,试验时每组地震波连续输入 3 次,模型加载峰值见表 3。有限元模拟中,桩土作用采用的是非线性弹簧—阻尼器,不考虑阻尼的影响,地基土力学参数见表 4,渡槽下部结构抗震有限元模型(长短

桩)见图 3。

表 3 最大加速度峰值表

设防烈度	7 度	
	调整后的加速度峰值/gal	模型加载峰值/gal
多遇地震	35	206
设防地震	107	629
罕遇地震	220	1 294

表 4 地基土物理力学参数

土层代号	重度/ ($\gamma \cdot \text{kN}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	剪切波速 $C_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	大位移抗力 修正系数	抗力系数 $m/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-4})$
ls	卵石	21.1	35.7	0.47	200	0.7
ls-g	水下卵石	23.0	35.7	0.47	200	0.7
qn	强风化泥岩	25.0	500	0.34	350	0.8
qs	强风化砂岩	26.0	400	0.33	340	0.8
rn	弱风化砂岩	26.4	13 000	0.31	1 370	1.0
rs	弱风化泥岩	25.5	15 900	0.17	1 632	1.0

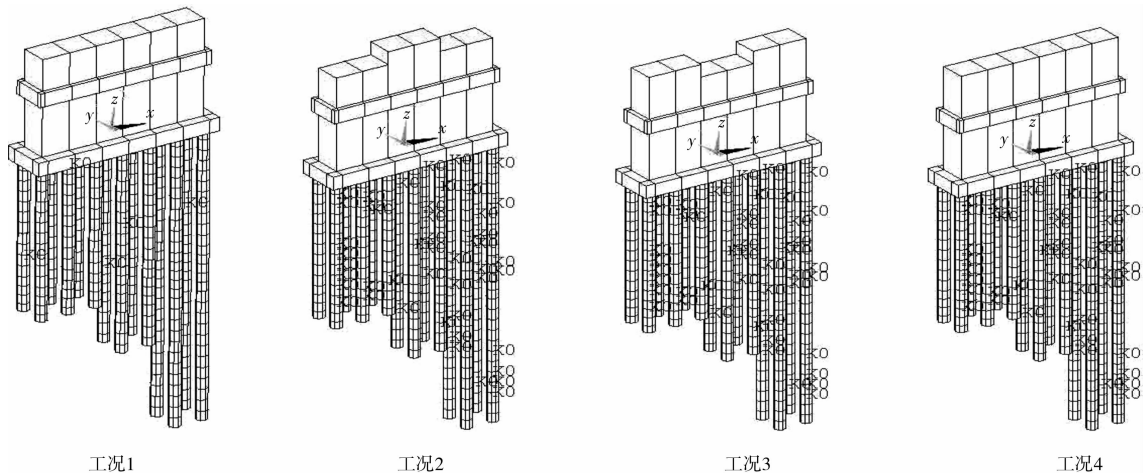


图 3 渡槽下部结构有限元模型

2 实验结果与分析

2.1 模型动力特性

1)从表 5 结果可以看出,长短桩方案和等长桩方案的试验频率比较接近,对应工况的频率相差在 7%~13%左右。试验的结果与数值模拟计算的结果比较吻合,其误差在 10%以内。

表 5 各试验的频率结果

桩方案	工况 1		工况 2		工况 3		工况 4	
	模型频率/Hz	原型频率/Hz	模型频率/Hz	原型频率/Hz	模型频率/Hz	原型频率/Hz	模型频率/Hz	原型频率/Hz
长短桩	50.00	1.26	49.11	1.28	48.50	1.29	47.58	1.28
等长桩	43.26	1.46	44.01	1.43	44.50	1.41	44.01	1.38

3)通过对模型箱的 1~16 Hz 的倍频扫频,获得的木—橡皮结构的模型箱的基频为 5.6 Hz。远离了桩土结构的基频,在这个范围内,不会对结构的地震动反应产生明显的影响,图 4 是埋设于模型箱中间以及靠近模型箱边缘(地震输入方向)的 2 个加速度计 d-a5 和 d-a6 的时程反应,包括多遇地震动和设防地震动输入,从中可以看出,2 个加速度计的反应比较接近。对于其它实验工况(除旋喷体加固方案以外),也有类似的结果。由此也可推断,实验采用的模型箱是合理的,不会对实验产生明显得不利影响。图 4 中输入的地震波为 Taft 波,等长桩工况,多遇地震分析。

2.2 时程实验结果

在时程分析中,只考虑其中的第 4 工况以及计算中用到的 3 种地震波输入。由于试验时程曲线众多,囿于篇幅,仅列举部分,见表 6(仅为多遇地震情况, Taft 波输入)。

1)试验结果显示,对于任何一种试验方案,加速度计的反应从下到上,其频率和幅值都在发生有规律的变化,频率逐渐趋近于较低频率为主,幅值逐渐

2)从试验的结果来看,随上部荷载的变化,结构的频率几乎没有变化,在长短桩方案中呈现窄幅的波动,而在等长桩方案中这呈现小幅递减的规律。总体来看,试验测得的模型的动力特性基本能够满足验证计算的作用,并且其呈现的规律性也类似于计算的结果。

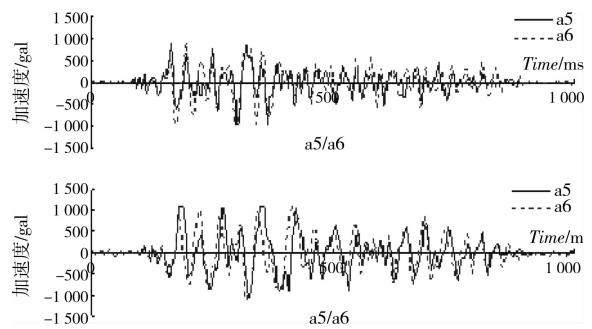


图 4 模型箱中间和边缘的加速度反应

增大。这一方面反映了岩土材料的滤波作用,另一方面则反映了岩层对振动幅值的放大作用。

2)考虑到下部结构与桩周土体在试验中的接触差异,加速度计埋设位置的差异,以及振动台的信号差异,长短桩方案在接近的地震动输入情况下的加速度反应时程较等长桩方案甚至稍小,说明长短桩方案下的渡槽下部结构在动力性能方面与原来的等长桩方案并没有太大的区别甚至更加优越,如果结合节约材料以及静力反应方面的考虑,长短桩方案则更具优势,这和数值模拟结果显示的规律是相符

的。3 种方案中,旋喷体加固等长桩方案的结构反应较等长桩并没有得到明显程度上的提升,仔细分析,这主要是由于试验前,模型土体旋喷体加固材料—石膏的凝期太短,弹性模量较低造成的,进行方

案间比较的意义可能不大。不过,从图 5 土面加速度反应时程曲线仍可以看出,模拟旋喷体加固改变了土体的动力反应,a5 与 a6 反应的同步性有所降低。

表 6 加速度时程实验结果

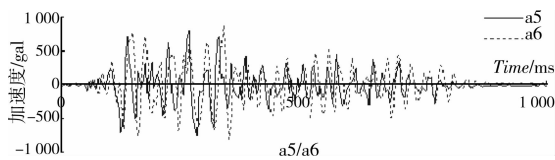
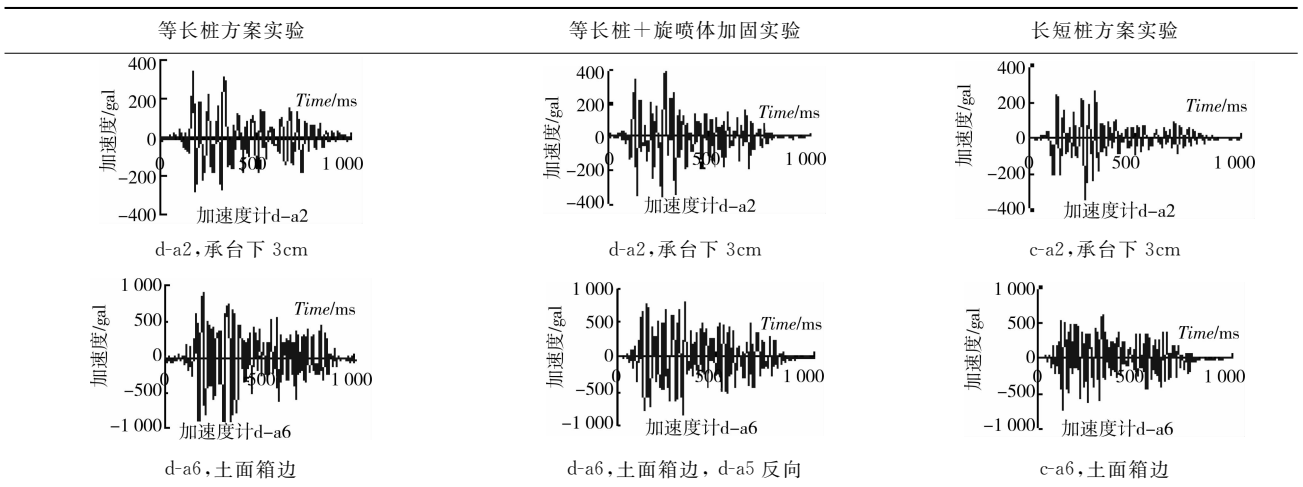


图 5 旋喷体加固后土面加速度反应对比

3)对于多遇地震和设防地震的输入,各点的加速度反应峰值随输入振动幅值的增大而增大,但并不呈现简单的线型关系。例如长短桩方案下的 Taft 波输入,其 c-a2 加速度计的峰值反应由 348 gal 变化到 736 gal,见表 6、7(表 7 为长短桩方案)。这种非线性的关系主要是由岩土材料的非线性引起的。

在相同的条件下,如长短桩方案,多遇地震,3 种输入地震动引起的加速度幅值反应有一些差别,Taft、Chichi 以及人工波输入的情况在 c-a2 加速度计处的峰值记录分别为 348 gal,320 gal 和 387 gal,但总体而言,这 3 种地震动输入的结果很接近。

4)在同样的计算条件下,得到的相应于加速度计 a2、a4 位置的点 7-2、7-3 点的加速度时程,见表 8。试验中数据采集仪的时间间隔为 3.096 ms,通过时间相似比,大约为 0.067 s,而计算采用的时间步长为 0.02 s,所以在加速度的时程反应上难以直接比较,但从加速度时程反应的整体趋势,以及沿深度的变化规律来看,还是比较接近的。

表 7 a2 加速度时程实验结果

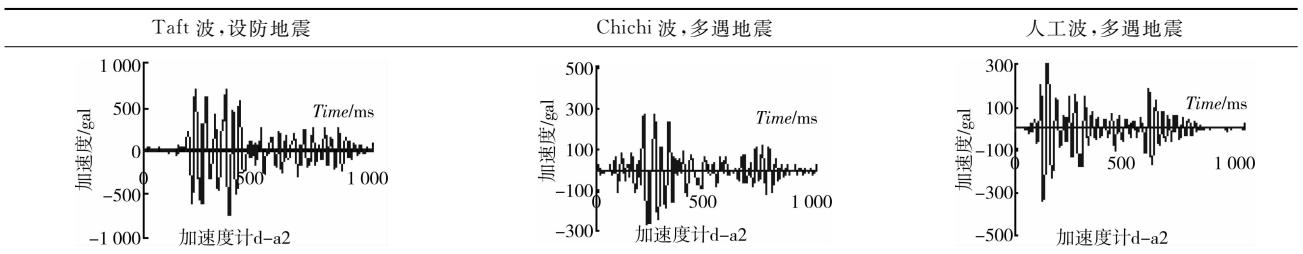
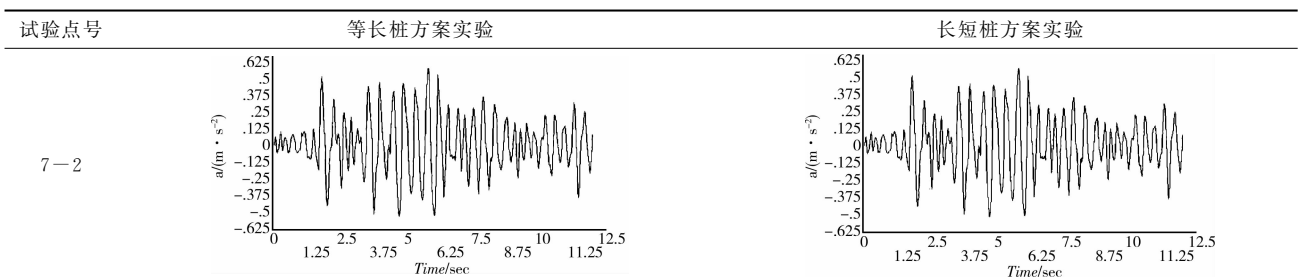
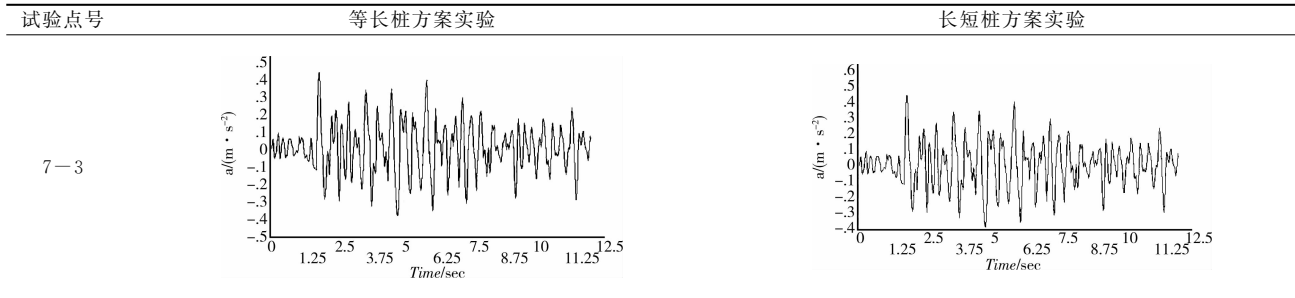


表 8 加速度时程计算结果



续表 8



说明:多遇地震情况,输入 Taft 波。

3 结语

该文对洛河渡槽的下部结构优化进行了桩土相互作用振动台试验。研究得出以下主要结论:

1) 试验中,提出了木-橡胶模型箱,这种模型箱结合了常用的柔性容器和层状剪切变形土箱的优点,能够更加准确的模拟土体的边界条件,并且造价相对较低,亦具有一定的可重复利用价值。

2) 从试验的结果来看,静力分析部分提出的长短桩方案在动力特性方面仍然具有一定的优越性,不仅能够相对减小下部结构乃至整个渡槽结构的动力反应,而且能够在各个桩位均化加速度等动力反应,充分利用材料的承载能力,而且结合一定的布桩情况,可以节约材料,取得较好的经济与安全方面的综合效益。

3) 等长桩旋喷体加固方案,由于缺乏相应的实测和试验资料,其试验结果只能作出定性的参考。结果显示,旋喷体加固方案也具有一定的均化动力反应的作用,较原来的等长桩方案在安全性方面有一定的提高。

4) 在 3 种不同的地震动输入下,有限元计算的 Taft 波、Chichi 波输入下的结果较为接近,这与试验的结果是吻合的,但是在人工波的计算与试验结果之间有一定的差距,产生这种差距的原因一方面与材料的相似比不能完全满足有关,另一方面与试验中的桩土结合情况有关,此外,生成的人工波的特性也是一个至关重要的因素,这些还有待于进一步的研究。

参考文献:

[1] 周林聪,陈龙珠,宫必宁. 地下结构地震模拟振动台试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(2):182-187.
ZHOU LIN-CONG, CHEN LONG-ZHU, GONG BI-NING. Shaking table tests for the seismic simulation of underground structure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(2): 182-

187.

- [2] 来弘鹏,谢永利,杨晓华. 公路隧道衬砌断面型式模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(6):740-744.
LAI HONG-PENG, XIE YONG-LI, YANG XIAO-HUA. Model test study on sectional form of highway tunnel lining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 740-744.
- [3] SHI X J, WU H Y, CHEN J, et al. Design of laminar shear box with openings for shaking table test and experimental verification[C]//International Symposium on Innovation and Sustainability of Structures in Civil Engineering, ISSS'2007: Vo1. 2, Shanghai, China: 798-806.
- [4] 于玉贞,李荣建,吕禾,等. 铜质模型桩加固边坡的动力离心试验[J]. 水文地质工程地质,2008,35(5):41-44.
YU YU-ZHEN, LI RONG-JIAN, LV HE, et al. Dynamic centrifuge test of slope reinforced with copper model piles [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(5): 41-44.
- [5] 苏栋,李相崧. 可液化土中单桩地震响应的离心机试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(4):423-427.
SU DONG, LI XIANG-SONG. Centrifuge investigation on seismic response of single pile in liquefiable soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 423-427.
- [6] BARDET J P, IDRIS I M, ROURKE T D O, et al. North America-Japan Workshop on the Geotechnical Aspects of the Kobe, Loma Prieta and Northridge Earthquakes [M]. Department of Civil Engineering, University of Southern California, February, 1997, 38-43.
- [7] YAO S, KOBAYASHI K, YOSHIDA N, et al. Interactive behavior of soil-pile-superstructure system in transient state to liquefaction by means of large shake table tests [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24: 397-409.

(下转第 68 页)

- [11] HILL R. Acceleration waves in solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1962, 10:1-16.
- [12] MOGI K. Experimental rock mechanics [M]. London, UK: Taylor & Francis Group, 2007, 3: 522-528.
- [13] MOGI K. Effect of the intermediate principal stress on rock failure[J]. Journal of Geophysical Research, 1967, 72(20): 5117-5131.
- [14] OKU H, HAIMSON B, SONG S R. True triaxial strength and deformability of the siltstone overlying the Chenlungpu fault (Chi-Chi earthquake) Taiwan [J]. Geophysical Letters, 2007, 34: 306-315.
- [15] HILL R. The mathematical theory of plasticity[M]. Oxford Engineering Science Series, Oxford, London, 1961.
- [16] LADE P V, DUNCAN J M. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil [J]. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1975, 101: 1037-1053.
- [17] MATSUOKA H, T NAKAI. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses [J]. Proc. Japan Soc. Civil Engrg., 1974, 1037-1053.
- [18] PERRIN G, LEBLOND J B. Rudnicki and Rice's analysis of strain localization revisited [J]. Journal of Applied Mechanics, 1993, 60: 842-846.
- [19] FOSSUM F A, FREDRICH J T. Cap plasticity models and compactive and dilatant pre-failure deformation [J]. Journal of Applied Mechanics, 2000, 60: 612-619.
- [20] RUDNICKI J W. Localized failure in brittle rock. In: Shao, J. F., Burlion, N. (Eds.) Thermo-Hydromechanical and Chemical Coupling in Geomaterials and Applications [C] // Proceedings of the 3rd International Symposium GeoProc. 2008, Wiley: 25-40.
- [21] ISSEN K A. The influence of constitutive models on localization conditions for porous rock [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69: 1891-1906.
- [22] LADE P V, WANG Q. Analysis of shear banding in true triaxial tests on sand [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127 (8): 762-768.
- [23] OLSSON W A. Theoretical and experimental investigation of compaction bands [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 7219-7228.
- [24] OLSSON W A, HOLCOMB D J. Compaction localization in porous rock [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27 (21): 3537-3540.

(编辑 王秀玲)

(上接第 62 页)

- [8] SU D. Centrifuge investigation on responses of sand deposit and sand-pile system under multi-directional earthquake loading [D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2005.
- [9] KNAPPET J A, MADABHUSHI S P G. Modelling of liquefaction-induced instability in pile groups [J]. Geotechnical Special Publication, 2006, 145: 255-267.
- [10] WANG H B, LI D Y. Experimental study of dynamic damage of an arch dam [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(3): 347-366.
- [11] 范书立. 混凝土重力坝的动力模型破坏试验及可靠性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [12] 朱长安, 高波, 索然绪. 强震区隧道洞口段振动台模型试验研究 [J]. 现代隧道技术, 2008, 45(1): 48-52.
HU CHAN-AN, GAO BO, SUO RAN-XU. Shaking table test for portal section of a tunnel in high-intensity seismic region [J]. Modern Tunnel Technology, 2008, 45 (1): 48-52.
- [13] 冯士伦, 王建华. 海洋平台桩基的振动台模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3229-3234.
- FENG SHI-LUN, WANG JIAN-HUA. Shake table model test on pile foundation of offshore platforms [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3229-3234.
- [14] JTJ 004-89 公路工程抗震设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [15] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- [16] 李培振. 结构—地基动力相互作用体系的振动台试验及计算模拟分析 [D]. 上海: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2002.
- [17] PRASAD S K, TOWHATA I. Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering [J]. Current Science, 2004, 87(10): 1398-1404
- [18] GB 50011-2001 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001

(编辑 胡英奎)