

文章编号:1673-2049(2018)05-0128-06

钢筋混凝土空心矩形桥墩振动台试验

申彦利,谷少康

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:通过地震模拟振动台试验研究了钢筋混凝土空心矩形桥墩的抗震性能,以某空心矩形桥墩为原型设计了 2 个具有不同配箍率的空心矩形桥墩模型试件,并对其进行地震模拟振动台试验,选取 El Centro 波、Taft 波和人工兰州波作为地震动激励,分析了各工况荷载下桥墩顶部的加速度响应、动力放大系数和墩顶位移响应等参数;利用大型通用有限元软件 ABAQUS 建立了桥墩有限元模型,将试验采集的加速度和位移响应同有限元计算结果进行对比分析。结果表明:2 个模型试件均具有良好的抗震性能;不同地震波激励作用下,桥墩顶部加速度和位移响应不同;配箍率越高,墩身裂缝分布越密集,裂缝宽度越小;配箍率对加速度和速度响应无显著影响;验证了利用 ABAQUS 软件建立的有限元模型的可行性。

关键词:空心桥墩;振动台试验;有限元模拟;配箍率

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Shake Table Test for Reinforced Concrete Hollow Rectangular Pier

SHEN Yan-li, GU Shao-kang

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: The seismic performance of reinforced concrete hollow rectangular bridge piers was studied by seismic simulation shaking table test. Two hollow rectangular bridge piers with different stirrup rates were designed with a hollow rectangular bridge pier as the prototype. The seismic simulation shaking table test was carried out about the piers, and El Centro wave, Taft wave and Lanzhou wave were selected as the dynamic excitation. The acceleration response of the pier top, the dynamic magnification coefficient and the displacement response at the pier top were analyzed. The finite element model of the pier was established by using the large general finite element software ABAQUS, and the acceleration and displacement vibration responses of the test were compared with the finite element calculation results. The results show that the two model specimens have good seismic performance. Under the action of different seismic waves, the acceleration and the displacement vibration response of the pier are different. The higher the ratio of the stirrup, the more dense the crack distribution is, the smaller the width of the crack is. The stirrup rate has no significant influence on the acceleration and the velocity response, and the finite element model established by using the ABAQUS is feasible.

Key words: hollow pier; shake table test; finite element simulation; stirrup rate

收稿日期:2018-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51378169);河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2016147)

作者简介:申彦利(1977-),男,河北邯郸人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:shenyanli@hebeu.edu.cn。

0 引 言

随着中国基础设施建设的迅猛发展,高耸桥墩的应用越来越广泛,高耸桥墩中空心截面占据了相当大的比重。桥墩是地震作用中整个桥梁系统的主要抗侧力和耗能构件,桥墩的安全与否关系到整个桥梁系统的安全性能,而中国规范中对空心截面桥墩的设计未作明确的规定,在实际设计中多采用实心截面的设计原则,对于空心矩形桥墩缺乏系统的研究,因此研究空心矩形截面桥墩抗震性能就显得特别迫切。

目前国内外对于桥墩的研究以实心截面居多,艾庆华等^[1-2]设计制作了圆形和矩形实心桥墩,并对其进行了振动台试验,对桥墩的抗震性能进行了讨论,验证了基于位移的设计方法可行性;Matthew^[3]根据美国规范制作了足尺圆形截面桥墩,通过振动台试验验证了美国规范的安全性。中国关于空心矩形桥墩的研究大多采用拟静力试验方法。杜修力等^[4]对 12 个矩形空心桥墩进行了拟静力试验,比较了轴压比、配箍率等对桥墩抗震性能的影响,并建立了桥墩截面恢复力曲线关系;蒋丽忠等^[5]对 10 个大比例空心桥墩进行了低周往复试验,讨论了墩高、轴压比等因素对墩柱延性的影响。然而拟静力试验会忽略混凝土应变率对结构抗震性能的影响,不能真实地反映结构在动力荷载作用下的振动响应,国内外对于空心矩形桥墩的振动台试验研究几乎没有,因此通过振动台试验研究地震作用下钢筋混凝土矩形空心桥墩的抗震性能具有十分重要的意义。

考虑实验室加载设备等因素的影响,本研究以某工程桥墩为原型,设计制作 2 个缩尺比例为 1:8 的钢筋混凝土空心矩形桥墩模型试件,2 个桥墩均具有较高的配箍率,在河北工程大学振动台上进行试验,研究它们的破坏形态以及抗震性能,并用大型通用有限元软件 ABAQUS 建立空心矩形桥墩有限元模型,通过将计算值和试验值进行对比分析,验证了有限元模型的可行性。

1 桥墩振动台试验

1.1 试件设计

本试验桥墩的原型高度为 11.5 m,综合考虑实验室振动台性能以及实验室场地条件等因素,试验取几何相似比为 1:8,根据模型设计的一致相似律原理^[6],利用相似表达式,求出本试验中其他相似比,主要相似比见表 1。

表 1 相似比
Tab. 1 Similarity Ratio

参数	相似关系	相似比
长度 l_r	$l_r=l_m/l_p$	0.125
弹性模量 E_r	$E_r=E_m/E_p$	0.780
等效密度 $\bar{\rho}_r$	$\bar{\rho}_r=\frac{m_m+m_a+m_{om}}{l_r^3(m_p+m_{op})}$	6.220
应力 σ_r	$\sigma_r=E_r$	0.780
应变 r_r	$r_r=l_r$	0.125
时间 t_r	$t_r=\sqrt{l_r^2\bar{\rho}_r/E_r}$	0.353
速度 v_r	$v_r=\sqrt{E_r/\bar{\rho}_r}$	0.354
加速度 a_r	$a_r=E_r/(l_r\bar{\rho}_r)$	1.000
频率 ω_r	$\omega_r=\sqrt{E_r/l_r^2\bar{\rho}_r}$	2.830

注: l_m,l_p 分别为模型结构与原型结构长度; E_m,E_p 分别为模型结构与原型结构弹性模量; m_m 为模型质量; m_a 为模型中设置的人工质量; m_{om} 为模型中活载和非结构构件的模拟质量; m_{op} 为原型中活载和非结构构件的质量; m_p 为原型结构构件的质量。

1.2 模型概况

本试验主要研究矩形空心桥墩抗震性能,模型严格按照相似比制作了 2 个桥墩模型,模型高度均为 1.44 m,采用不同的配箍率,且配箍率均为高配箍率,墩柱模型混凝土强度等级为 C20,纵向钢筋为 $\phi 8$,箍筋采用直径为 4 mm 的镀锌铁丝;模型底座采用同等强度的混凝土,纵筋采用 $\phi 16$,箍筋采用 $\phi 8$ 。模型试件参数见表 2,墩柱配筋及尺寸如图 1 所示。

表 2 桥墩试件详细参数
Tab. 2 Parameters of Pier Specimens

试件 编号	墩高/ mm	轴压比	纵向钢筋		横向钢筋	
			直径/mm	配箍率/%	直径/mm	体积配箍率/%
M1	1 440	0.1	8	2.7	4	4.0
M2	1 440	0.1	8	2.7	4	2.0

1.3 配重箱设计及配重

本试验采用人工质量模型模拟上部结构自重以及活载,由重为 200 kg 的配重箱及 3 300 kg 内置铁块来实现。配重箱由 5 mm 厚的 Q235 钢板焊接而成,其尺寸为 1 000 mm \times 1 000 mm \times 700 mm。配重箱内部焊接一个尺寸为 300 mm \times 250 mm \times 230 mm 的矩形套筒,便于实现配重箱与混凝土墩柱顶部预埋螺栓的固定连接,配重箱的焊缝处均采用角钢加固,内部在加载方向焊接 2 块钢板,钢板高度与套筒相同,以增强其刚度。

1.4 荷载工况及测点布置

试验选用 El Centro 波、Taft 波、人工兰州波为振动台面激励,其持续时间压缩为原波形时间长度的 35.3%。为了测量桥墩动力特性参数,在每级

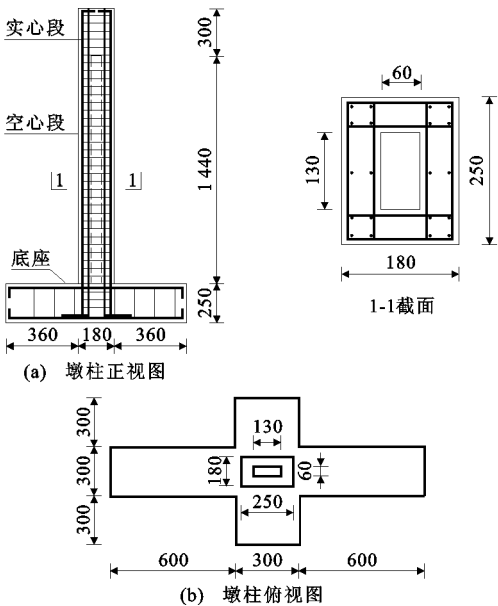


图 1 桥墩配筋及尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Reinforcement and Dimensions of Pier (Unit:mm)

工况前后,均采用峰值为 $0.035g$ (g 为重力加速度) 的白噪声对桥墩模型进行扫描。试验荷载工况根据设计选定,可根据试验实际情况适当增加加载工况,荷载工况如表 3 所示。本试验采集系统为东华动态信号采集分析系统。在桥墩底座和墩顶各布置一个加速度和速度传感器,用于记录模型试件的加速度和速度响应。

2 试验结果

2.1 试验现象

M1 和 M2 试件的试验现象见表 4。在完成试验设计的工况加载后,对 M2 试件增加了烈度为 $1.2g$ 的地震作用,M2 试件底部仍没有明显混凝土剥落,竖向承载力未丧失。由于 M1 试件具有较高的配箍率,对混凝土具有较好地约束作用,M1 试件裂缝间距相对 M2 试件较小。M1 与 M2 在加载方向裂缝数量较少,与加载方向垂直的一侧裂缝数量较多,由于在浇筑桥墩模型时,模板在垂直度方面存在一定误差,因而桥墩试件有稍微倾斜,故一侧混凝土受拉而产生较多开裂裂缝;在受压一侧,振动过程中产生的裂缝可能由于受压而闭合,因而相对较少。试验后试件裂缝分布如图 2 所示。

2.2 加速度和位移响应

M1 和 M2 试件墩顶加速度极值如图 3 所示。从图 3 可以看出:M1 和 M2 墩顶加速度反应整体呈增加趋势,在相同工况作用下,El Centro 波加速度反应极值最大,Taft 波和人工兰州波无明显差别。M1

表 3 试验荷载工况
Tab. 3 Test Load Conditions

工况编号	台面输入峰值加速度	输入地震波
1	$0.035g$	白噪声 1
2	$0.250g$	El Centro 波
3	$0.250g$	Taft 波
4	$0.250g$	人工兰州波
5	$0.035g$	白噪声
6	$0.500g$	El Centro 波
7	$0.500g$	Taft 波
8	$0.500g$	人工兰州波
9	$0.035g$	白噪声 2
10	$0.750g$	El Centro 波
11	$0.750g$	Taft 波
12	$0.750g$	人工兰州波
13	$0.035g$	白噪声 3
14	$1.000g$	El Centro 波
15	$1.000g$	Taft 波
16	$1.000g$	人工兰州波
17	$0.035g$	白噪声 4
18	$1.200g$	El Centro 波
19	$1.200g$	Taft 波
20	$1.200g$	人工兰州波
21	$0.035g$	白噪声 5

表 4 M1 和 M2 试件的试验现象

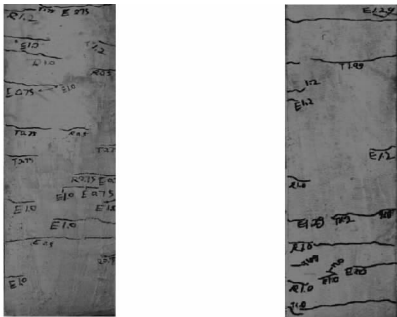
Tab. 4 Experimental Phenomena of M1 and M2

荷载工况	试验现象
$0.25g$	M1 和 M2 均有轻微振动,无肉眼可见裂缝产生。
$0.50g$	M1 和 M2 均振动明显,M1 试件下部产生第 1 条裂缝,并且裂缝贯通,墩柱与底座连接处产生较宽裂缝,墩柱有轻微拔出现象。
$0.75g$	M1 和 M2 均有从底座拔出现象,振动强度增强,有新裂缝产生,M2 原贯通裂缝宽度增加。
$1.00g$	M1 和 M2 从底座拔出现象明显,原裂缝继续延长,有新裂缝产生,桥墩柱试件根部混凝土开始剥落,M1 柱帽产生较宽裂缝。
$1.20g$	M1 和 M2 振动剧烈,柱帽损伤严重,裂缝数量明显增多,但试件均具有竖向承载力。

和 M2 试件相比较加速度极值相差不大。试件的位移响应时程由速度传感器采集数据积分求得,墩顶位移极值如图 4 所示。由图 4 可知,M1 和 M2 试件顶部位移反应随加速度峰值的增加而逐步增大,3 条地震波之间,相同工况作用下,人工兰州波顶部位移反应极值最小,其他 2 条波位移极值交替上升无明显规律可寻。M1 和 M2 位移极值相差不大。

2.3 动力放大系数

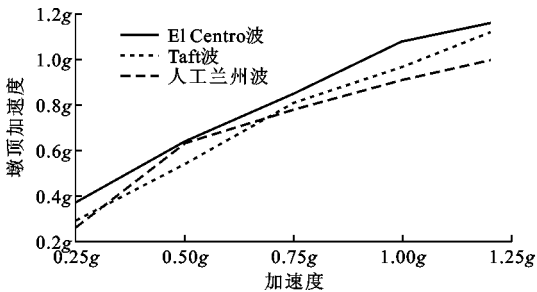
动力放大系数为试件绝对加速度反应的最大值



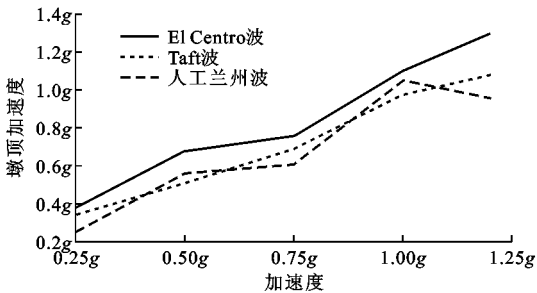
(a) M1裂缝分布 (b) M2裂缝分布

图 2 震后裂缝分布

Fig. 2 Fracture Distribution After Earthquake



(a) M1墩顶加速度极值



(b) M2墩顶加速度极值

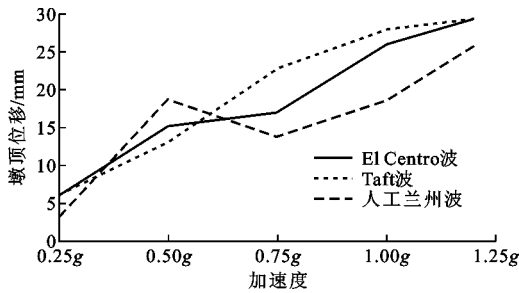
图 3 M1 和 M2 试件墩顶加速度极值

Fig. 3 Maximum Acceleration at Top of M1 and M2

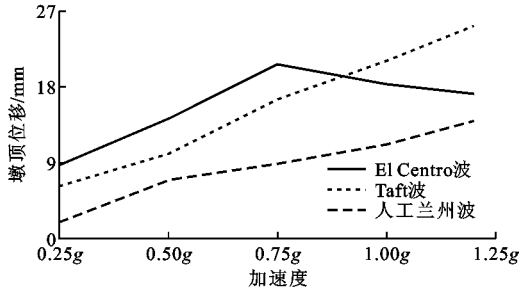
与输入地震动加速度的最大值之比,不同峰值加速度作用下动力放大系数如图 5 所示。从图 5 可以看出:M1 和 M2 动力放大系数随输入峰值加速度的不断增加呈递减趋势,动力放大系数在相同峰值加速度作用下,按照 El Centro 波、Taft 波和人工兰州波的顺序依次降低,其中人工兰州波的最小,El Centro 波的最大。

3 ABAQUS 有限元模型结果与试验结果对比

随着计算机硬件和软件的高速发展,有限元数值模拟软件也有了长足的发展,具有代表性的软件有 ABAQUS,ANSYS 等。ABAQUS 能够驾驭非常庞大的高度非线性问题,具有种类丰富、可模拟任意几何形状的单元模型,并拥有各种类型的材料模



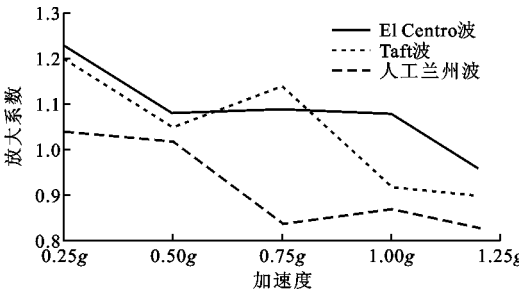
(a) M1墩顶位移极值



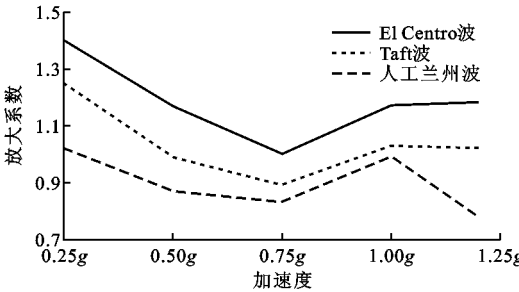
(b) M2墩顶位移极值

图 4 M1 和 M2 墩顶位移极值

Fig. 4 Displacement Extremum at Top of M1 and M2



(a) M1动力放大系数



(b) M2动力放大系数

图 5 M1 和 M2 在不同峰值加速度作用下的动力放大系数
Fig. 5 Dynamic Magnification Factor of M1 and M2 Under Different Peak Ground Accelerations

型,可以模拟各种典型工程材料,例如钢筋、钢筋混凝土等,而且具有强大的计算功能和广泛的模拟能力^[7-11]。ABAQUS 无论对于简单的线弹性问题,还是由不同材料、不同接触条件组合而成的非线性动力问题,均可以计算得到令人满意的结果^[12]。

3.1 模型建立

本文基于大型通用有限元软件 ABAQUS 建立

了 M1 和 M2 试件的有限元模型,混凝土采用塑性损伤模型,单元类型为实体单元,钢筋采用桁架单元,输入与试验相同的地震波,并将地震波按照试验时间相似比进行压缩;在模型底部添加固定约束,释放 x 方向约束,添加加速度荷载。ABAQUS 有限元模型以及网格划分如图 6 所示。

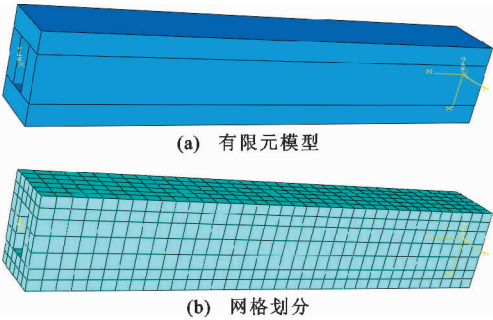


图 6 有限元模型及网格划分

Fig. 6 Finite Element Model and Mesh Division

3.2 墩顶绝对加速度计算值和试验值对比

本文将试验中加速度传感器采集的加速度时程曲线和 ABAQUS 有限元软件计算得到的墩顶加速度时程曲线进行对比,由于篇幅限制,在此列举 M1 和 M2 试件在峰值加速度为 $0.75g$ 的 El Centro 波作用下加速度试验值和计算值的对比结果,见图 7。从图 7 可知,试验值和计算值曲线变化规律基本一致,并且峰值加速度出现的时间也大致相同,试验值略大于计算值,计算值和试验值时程曲线吻合良好。

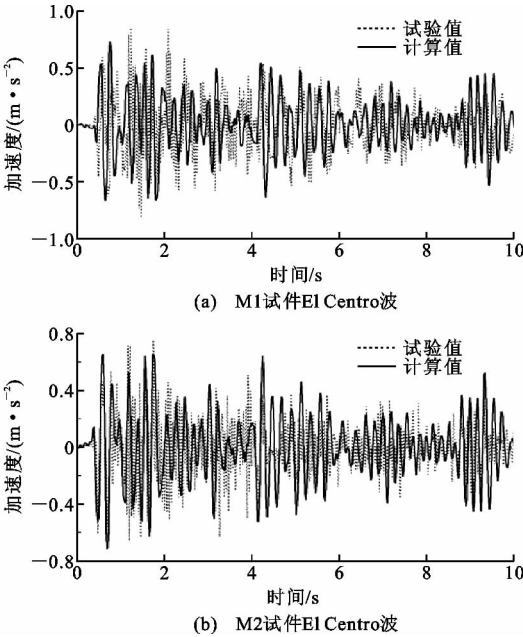


图 7 M1 和 M2 试验值和计算值加速度时程曲线对比
Fig. 7 Comparison of Acceleration Time History Curves
Between Test and Calculated Values of M1 and M2

3.3 墩顶速度计算值和试验值对比

本试验在桥墩试件顶部布置了速度传感器,未布置位移计,位移时程由速度传感器采集数据积分得到,因此本文用速度传感器采集的数据与有限元计算结果进行对比,在此选用 M1 和 M2 试件在峰值加速度为 $0.75g$ 的 El Centro 波作用下速度试验值和计算值进行对比,结果见图 8,从图 8 可以看出:试验值和计算值变化规律一致,由于配重箱的松动,导致试验值略大于计算值,两者峰值出现时间基本一致,相差不大,在允许的范围内,可以接受。

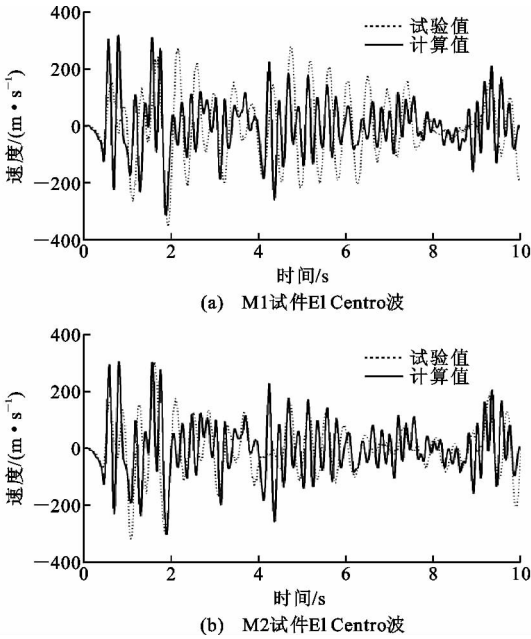


图 8 M1 和 M2 试件试验值和计算值速度时程曲线对比
Fig. 8 Comparison of Velocity Time History Curves
Between Test and Calculated Values of M1 and M2

4 结 语

- (1) M1 和 M2 模型试件在输入试验所设计的地震波后有裂缝产生,并且均存在刚度退化现象,但最终均未丧失竖向承载力,抗震性能良好。
- (2) M1 和 M2 模型试件的顶部加速度响应和顶部位移响应随着输入峰值加速度的增加而增大;相同工况作用下, M1 和 M2 模型试件 El Centro 波加速度响应值最大,人工兰州波位移响应值最小。
- (3) 通过将计算和试验得到的加速度和速度数据进行对比,发现计算值和试验值存在一定误差,但是整体模拟较好,两者时程曲线吻合较好,证明了有限元模型的可行性。

参考文献:

References:

[1] 艾庆华,李宏男,王东升,等. 基于位移设计的钢筋混

- 凝土桥墩抗震性能试验研究(Ⅱ):振动台试验[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(3):39-46.
- AI Qing-hua, LI Hong-nan, WANG Dong-sheng, et al. Experimental Evaluation of Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Piers Designed on the Basis of Displacement(Ⅱ): Shaking Table Test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2008,28(3):39-46.
- [2] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- YE Ai-jun, GUAN Zhong-guo. Seismic Design of Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [3] MATTHEW J S. A Full-scale, Single-column Bridge Bent Tested by Shake-table Excitation[R]. Berkeley: PEER,2015.
- [4] 杜修力,陈明琪,韩强. 钢筋混凝土空心桥墩抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击,2011,30(11):254-259.
- DU Xiu-li, CHEN Ming-qi, HAN Qiang. Experimental Evaluation of Seismic Performance of Reinforced Concrete Hollow Bridge Columns[J]. Journal of Vibration and Shock,2011,30(11):254-259.
- [5] 蒋丽忠,邵光强,王辉,等. 高速铁路圆端形空心桥墩抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2014,31(3):72-82.
- JIANG Li-zhong, SHAO Guang-qiang, WANG Hui, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Hollow Piers with Rounded Rectangular Cross Section in High-speed Railways[J]. Engineering Mechanics,2014,31(3):72-82.
- [6] 张敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动,1997,17(2):52-58.
- ZHANG Min-zheng. Study on Similitude Laws for Shaking Table Tests[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,1997,17(2):52-58.
- [7] 姬振豫. 正交设计的方法与理论[M]. 香港:世界科技出版社,2001.
- JI Zhen-yu. Theory and Practice of Orthogonal Design [M]. Hongkong: World Scientific Publishing,2001.
- [8] 王东升,岳茂光,李晓莉,等. 高墩桥梁抗震时程分析输入地震波选择[J]. 土木工程学报,2013,46(增1):208-213.
- WANG Dong-sheng, YUE Mao-guang, LI Xiao-li, et al. Selections of Real Ground Motions in Seismic History Analysis for Bridges with High Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2013,46(S1):208-213.
- [9] SAIIDI M, ITANI A, JOHNSON N, et al. Shake Table Response of Bridge Columns[J]. Earthquake Resistant Engineering Structures IV,2003,72:69-78.
- [10] 王欢. 配筋率对高速铁路圆端形实心桥墩地震响应影响研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
- WANG Huan. Influence of Reinforcement Ratio on Seismic Response of Round-ended Bridge Piers in High Speed Railway [D]. Changsha: Central South University,2014.
- [11] 周赞. 剪跨比对高速铁路圆端形实心桥墩地震响应的影响[D]. 长沙:中南大学,2014.
- ZHOU Zan. The Influence of Shear-span Ration on the Seismic Response of Round-ended Solid Piers in High Speed Rail [D]. Changsha: Central South University,2014.
- [12] 王玉钊,傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- WANG Yu-zhuo, FU Chuan-guo. ABAQUS Structural Engineering Analysis and Example Explanation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.