

基于数值模拟的绥宁县民族风雨桥 静载试验研究

李伟¹, 吕毅刚²

(1.邵阳县农村公路管理所, 湖南 邵阳 422100; 2.长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 风雨桥为侗族建筑“三宝”之一。桥梁结构静载试验是对各类桥梁施工质量进行控制与评定的重要方法。文中对绥宁县民族风雨桥进行有限元数值模拟和现场静载试验,通过对挠度和应变试验结果的分析处理,对该桥整体工作性能与承载能力作出了科学评价。

关键词: 桥梁; 风雨桥; 数值模拟; 静载试验; 承载能力

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)04-0169-06

风雨桥是贵州、广西和湖南等地独特的建筑,为侗族建筑“三宝”之一,是侗族人民引以自豪的一种民族建筑物。其桥面由长廊和亭阁组合而成,长廊上建有 3 或 5 层四角形或八角形桥亭。桥的长廊为过道,两旁铺设长凳,供来往行人休息且能避风雨。桥梁上的亭阁既美观,又增加了桥梁自身重量,增强了其抵抗山洪冲击的能力。

为了适应旅游业的发展,并与周边环境相协调,湖南省绥宁县县城新建了一座民族风雨桥。为验证该桥设计方案的合理性及施工质量,确保桥梁处于

良好营运状态,并为桥梁管养单位建立桥梁健康档案提供必要的实测数据资料,采用有限元软件对该桥进行数值模拟,结合现场静载试验,对其整体受力性能和承载能力作出评价。

1 工程概况

绥宁县民族风雨桥上跨巫水河,上部结构采用 21 m+2×40 m+21 m 装配式预应力砼连续箱梁、先简支后结构连续体系,全桥长 123.36 m,桥面上布置风雨廊(见图 1)。

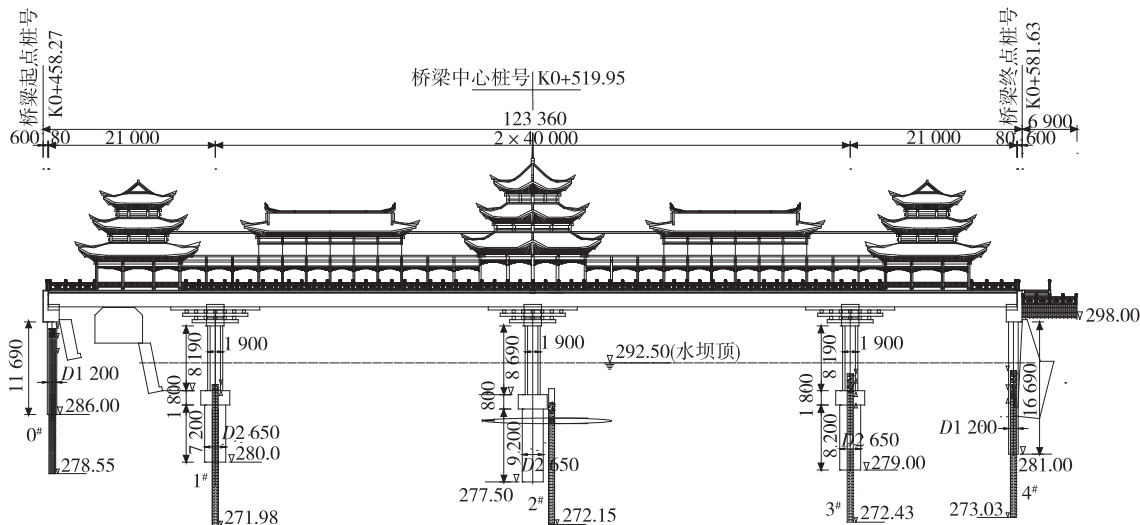


图 1 绥宁县民族风雨桥立面布置(单位:高程为 m,其他为 mm)

全桥平面位于直线上,桥面纵坡均为平坡,横坡为双向 0.5%。主梁采用 C50 砼,横向由 5 片单箱单室箱梁组成,每片箱梁单独预制,采用现浇湿接头的方法施工。箱梁高 2.02 m,边主梁外悬臂长 1.50

m;边梁与次边梁间现浇湿接缝宽度为 0.30 m,次边梁与中梁间现浇湿接缝宽度为 1.20 m。下部结构采用柱式墩台、钻孔灌注桩基础。桥面宽度为 15.6 m,桥面铺装为 FYT-2 防水层+6 cm 装饰层。荷

载等级为人群荷载 3.5 kN/m^2 。0[#]、4[#]桥台位置设置 80 型伸缩缝。

2 静载试验方案

2.1 试验工况

(1) 工况一:第 1 跨(0[#]台~1[#]墩)最大正弯矩,横桥向对称布载,控制截面见图 2 中 2-2 截面。

(2) 工况二:第 2 跨(1[#]墩~2[#]墩)最大正弯矩,横桥向对称布载,控制截面见图 2 中 4-4 截面。

(3) 工况三:距 1[#]墩 1 m 位置最大负弯矩,横桥向对称布载,控制截面见图 2 中 6-6 截面。

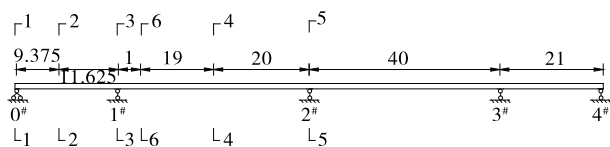


图 2 绥宁县民族风雨桥测试断面(单位:m)

2.2 数值模拟分析

为方便现场试验,在该桥还未进行桥面装饰层、栏杆与风雨廊施工前进行静载试验,这部分效应按照内力等效的原则转换成活载加以补偿。数值模拟分析中采用 MIDAS/Civil 的梁单元建立有限元模型(见图 3)。

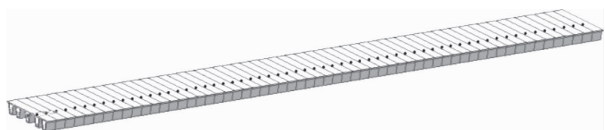


图 3 绥宁县民族风雨桥有限元模型

由于车辆在该桥上不能行驶,为模拟桥梁的受力情况,采用水箱进行加载。各控制截面的弯矩影响线见图 4。各工况下的试验效率系数控制在 0.95~1.05。

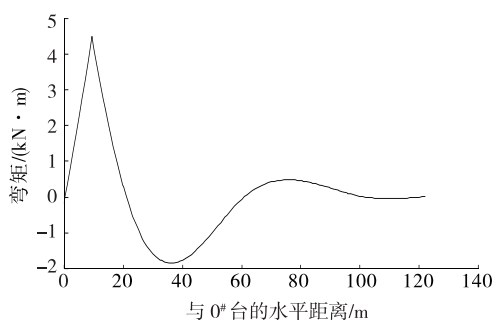
2.3 测点布置

(1) 挠度测点布置。以图 2 中 1-1~4-4 截面作为挠度测试截面,采用百分表在箱梁底对测试截面的挠度进行测试。其中:2-2、4-4 截面各布置 5 个挠度测点,编号分别为 1~5;1-1、3-3 截面各布置 1 个挠度测点,测点编号为 3(见图 5)。

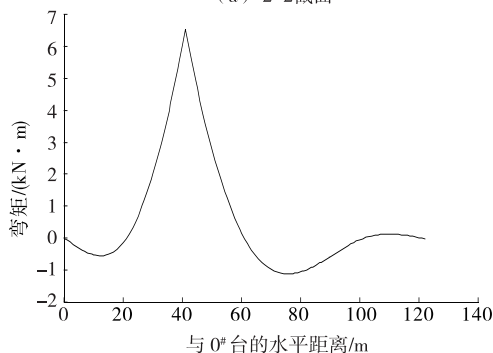
(2) 应变测点布置。以图 2 中 2-2、4-4、6-6 截面作为应变测试截面,粘贴外贴式电阻式应变片,采用静态数据采集系统进行测试。每个截面各布置 5 个应变测点,编号分别为 1~5(见图 6)。

2.4 加载方案

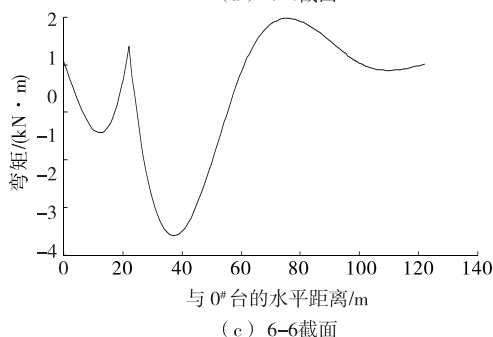
为了获取结构试验荷载与变位的相关曲线,并防止结构意外损伤,对控制截面试验荷载分 4 级加



(a) 2-2截面



(b) 4-4截面



(c) 6-6截面

图 4 各控制截面的弯矩影响线

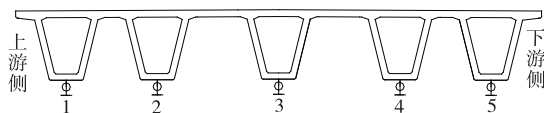


图 5 挠度测点布置

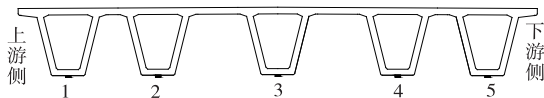


图 6 应变测点布置

载和 2 次卸载。各试验工况的加载方案如下:

(1) 工况一采用 4 个水箱,水箱的分级见表 1,加载布置见图 7。

(2) 工况二采用 4 个水箱,水箱的分级见表 2,加载布置见图 8。

(3) 工况三采用 12 个水箱,水箱的分级见表 3,加载布置见图 9。

表 1 工况一荷载分级

	分级	荷载编号	均布荷载值/(kN·m ⁻²)	荷载值/kN	加载布置
加载	第 1 级	P1	8	480	水箱 1、水箱 2 加载
	第 2 级	P2	8	480	水箱 1、水箱 2 加载
	第 3 级	P3	8	480	水箱 3、水箱 4 加载
	第 4 级	P4	8	480	水箱 3、水箱 4 加载
卸载	第 1 级	P3~P4			水箱 3、水箱 4 卸载
	第 2 级	P1~P2			水箱 1、水箱 2 卸载

表 2 工况二荷载分级

	分级	荷载编号	均布荷载值/(kN·m ⁻²)	荷载值/kN	加载布置
加载	第 1 级	P1	8.33	499.8	水箱 5、水箱 6 加载
	第 2 级	P2	8.33	499.8	水箱 5、水箱 6 加载
	第 3 级	P3	8.33	499.8	水箱 7、水箱 8 加载
	第 4 级	P4	8.33	499.8	水箱 7、水箱 8 加载
卸载	第 1 级	P3~P4			水箱 7、水箱 8 卸载
	第 2 级	P1~P2			水箱 5、水箱 6 卸载

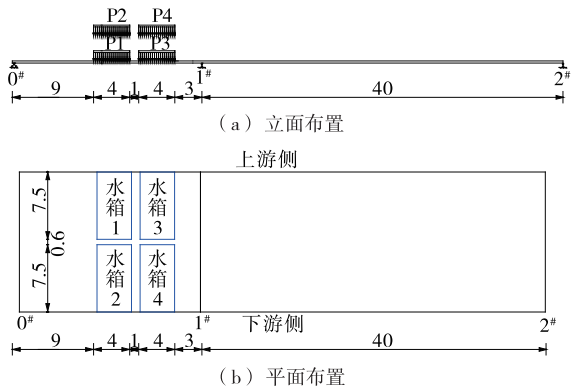


图 7 工况一加载布置(单位:m)

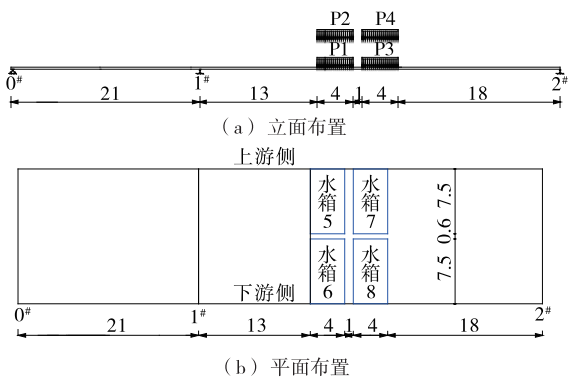


图 8 工况二加载布置(单位:m)

表 3 工况三荷载分级

	分级	荷载编号	均布荷载值/(kN·m ⁻²)	荷载值/kN	加载布置
加载	第 1 级	P1、P2	16.00	1 920.0	水箱 1~水箱 4 加载
	第 2 级	P3、P4	16.67	2 000.4	水箱 5~水箱 8 加载
	第 3 级	P5	16.67	1 000.2	水箱 9、水箱 10 加载
	第 4 级	P6	16.67	1 000.2	水箱 11、水箱 12 加载
卸载	第 1 级	P4~P6			水箱 7~水箱 12 卸载
	第 2 级	P1~P3			水箱 1~水箱 6 卸载

3 试验结果与分析

在各试验工况下逐级加载到最大荷载,然后卸

载至零荷载,并进行数据采集。数据采集只记录了第 2、4 级加载与第 2 次卸载的数据。挠度和应变分别以向下、受拉为正。

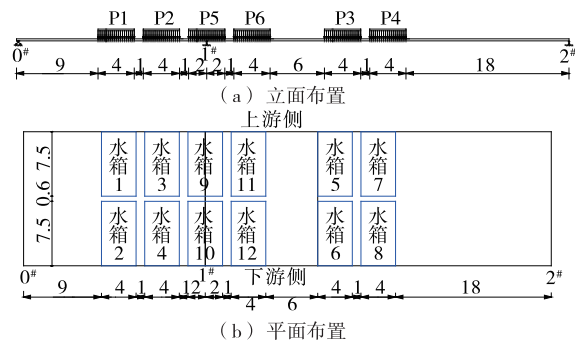


图9 工况三加载布置(单位:m)

3.1 工况一测试结果与分析

(1) 挠度。工况一下各测试断面挠度测试结果见表4。该工况下各测点的挠度校验系数与相对残余变位最大值分别为0.77、0.07,满足规范要求。在工况一第2、4级荷载作用下,2-2截面的弹性变位实测值与理论值的变化规律较吻合(见图10)。

表4 工况一下挠度测试结果 mm

测试断面	测点编号	各级荷载下的弹性变位		残余变位 (卸载)
		第2级	第4级	
2-2 截面	1	0.64	1.09	0.02
	2	0.74	1.14	0.05
	3	0.98	1.52	0.05
	4	0.73	1.20	0.06
	5	0.71	1.04	0.08
4-4 截面	1	-0.50	-0.98	-0.06
	2	-0.52	-1.03	-0.06
	3	-0.66	-1.24	-0.08
	4	-0.53	-1.05	-0.06
	5	-0.48	-0.94	-0.04

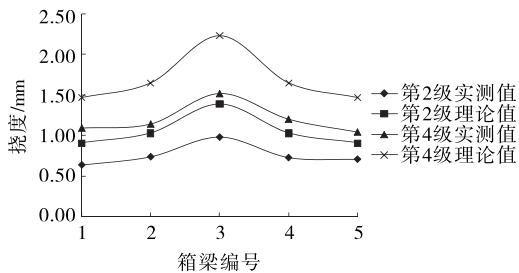


图10 工况一下2-2截面弹性变位对比

(2) 应变。工况一下各测试断面应变测试结果见表5。该工况下各测点的应变校验系数与相对残余应变最大值分别为0.78、0.13,满足规范要

求。在工况一第2、4级荷载作用下,2-2截面的弹性应变实测值与理论值的变化规律较吻合(见图11)。

表5 工况一下应变测试结果 $\mu\epsilon$

测试断面	测点编号	各级荷载下的弹性应变		残余应变 (卸载)
		第2级	第4级	
2-2 截面	1	25	34	3
	2	24	36	0
	3	37	55	5
	4	28	41	4
	5	22	34	2
4-4 截面	1	-3	-5	0
	2	-3	-6	0
	3	-6	-10	-1
	4	-4	-8	-1
	5	-3	-5	0
6-6 截面	1	-6	-11	0
	2	-9	-16	-2
	3	-12	-21	-2
	4	-7	-13	0
	5	-6	-11	-1

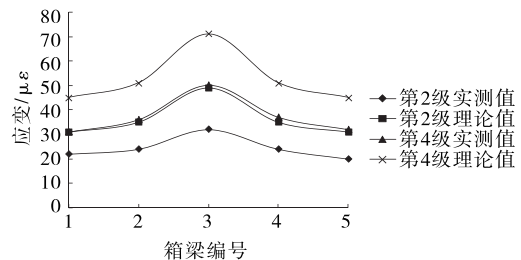


图11 工况一下2-2截面弹性应变对比

3.2 工况二测试结果与分析

(1) 挠度。工况二下各测试断面挠度测试结果见表6。该工况下各测点的挠度校验系数与相对残余变位最大值分别为0.76、0.10,满足规范要求。在工况二第2、4级荷载作用下,4-4截面的弹性变位实测值与理论值的变化规律较吻合(见图12)。

(2) 应变。工况二下各测试断面应变测试结果见表7。该工况下各测点的应变校验系数与相对残余应变最大值分别为0.71、0.12,满足规范要求。在工况二第2、4级荷载作用下,4-4截面的弹性应变实测值与理论值的变化规律较吻合(见图13)。

表 6 工况二下挠度测试结果 mm

测试断面	测点编号	各级荷载下的弹性变位		残余变位 (卸载)
		第 2 级	第 4 级	
2—2 截面	1	−0.54	−1.00	−0.04
	2	−0.54	−1.02	−0.12
	3	−0.72	−1.39	−0.08
	4	−0.55	−1.18	−0.05
	5	−0.46	−0.88	−0.06
4—4 截面	1	2.68	5.88	0.07
	2	3.12	6.81	0.06
	3	4.18	8.35	0.25
	4	3.05	6.49	0.09
	5	2.82	6.20	0.10

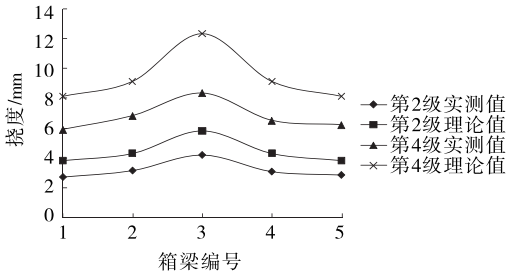


图 12 工况二下 4—4 截面弹性变位对比

表 7 工况二下应变测试结果 $\mu\epsilon$

测试断面	测点编号	各级荷载下的弹性应变		残余应变 (卸载)
		第 2 级	第 4 级	
2—2 截面	1	−12	−22	−2
	2	−12	−24	0
	3	−18	−34	−3
	4	−14	−24	−1
	5	−14	−25	−3
4—4 截面	1	30	64	5
	2	34	73	6
	3	50	99	8
	4	32	64	3
	5	26	59	2
6—6 截面	1	−15	−30	0
	2	−21	−38	−2
	3	−29	−53	−4
	4	−19	−36	−2
	5	−16	−34	−2

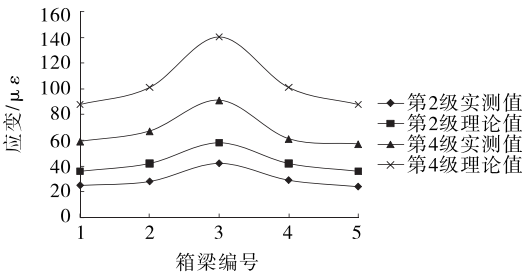


图 13 工况二下 4—4 截面弹性应变对比

3.3 工况三测试结果与分析

(1) 挠度。工况三下各测试断面挠度测试结果见表 8。该工况下各测点的挠度校验系数与相对残余变位最大值分别为 0.74、0.07，满足规范要求。在工况三第 2、4 级荷载作用下，4—4 截面的弹性变位实测值与理论值的变化规律较吻合(见图 14)。

表 8 工况三下挠度测试结果 mm

测试断面	测点编号	各级荷载下的弹性变位		残余变位 (卸载)
		第 2 级	第 4 级	
2—2 截面	1	0.04	−0.25	−0.02
	2	0.05	−0.26	0.00
	3	0.08	−0.33	−0.02
	4	0.05	−0.29	−0.01
	5	0.03	−0.24	0.00
4—4 截面	1	4.48	5.87	0.13
	2	4.80	6.19	0.44
	3	7.48	8.74	0.00
	4	5.16	6.32	0.06
	5	4.73	5.45	0.14

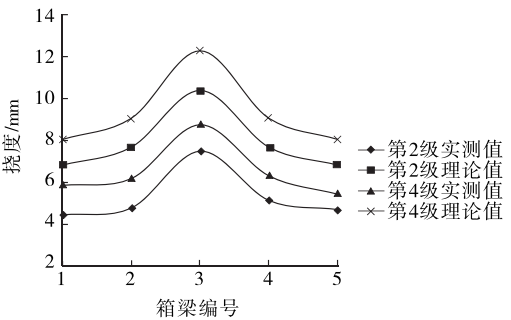


图 14 工况三下 4—4 截面弹性变位对比

(2) 应变。工况三下各测试断面应变测试结果见表 9。该工况下各测点的应变校验系数与相对残余应变最大值分别为 0.73、0.17，满足规范要求。在工况三第 2、4 级荷载作用下，6—6 截面的弹性应变

实测值与理论值的变化规律较吻合(见图15)。

表9 工况三下应变测试结果

测试断面	测点编号	各级荷载下的弹性应变		残余应变 (卸载)
		第2级	第4级	
2—2 截面	1	10	3	0
	2	11	3	0
	3	16	6	1
	4	12	3	0
	5	10	3	0
4—4 截面	1	52	65	3
	2	60	69	3
	3	92	105	6
	4	62	71	2
	5	57	64	0
6—6 截面	1	-43	-52	-2
	2	-51	-61	0
	3	-66	-83	-2
	4	-50	-60	-4
	5	-40	-52	-2

4 结语

桥梁静载试验是一项复杂而细致的工作,其试验方法的科学性、操作的准确性与判断的合理性确保了桥梁结构的质量安全。根据绥宁县民族风雨桥

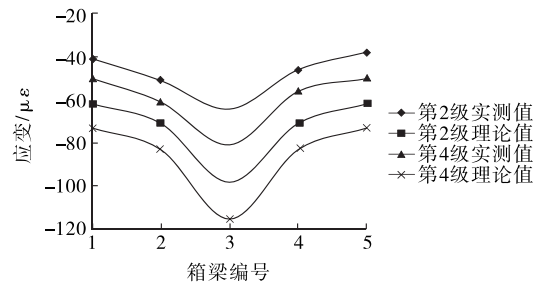


图15 工况三下6—6截面弹性应变对比

数值模拟分析与静载试验结果,在各静载试验工况下,其挠度校验系数和应变校验系数最大值分别为0.77、0.78,且残余变形较小,表明其强度、刚度满足设计要求,处于良好的弹性工作状态,结构在设计荷载作用下的受力性能满足设计要求。

参考文献:

- [1] 蒋响元,李伟,丁加明.湖南风雨桥之浅探[J].湖南交通科技,2010,36(4).
- [2] 刘洪波.侗族风雨桥建筑营造技艺及其文化来源探析[J].西安建筑科技大学学报:社会科学版,2016,35(2).
- [3] 马俊.昆明东风路立交桥动载试验分析[J].公路交通科技,2004,21(3).
- [4] 张文基,刘喜元,岳建平.新建桥梁的静载试验方法研究[J].测绘通报,2002(7).
- [5] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].

收稿日期:2017-04-17

(上接第168页)

长沙:湖南大学,2012.

- [2] 张新培.钢筋混凝土抗震结构非线性分析[M].北京:科学出版社,2003.
- [3] FEMA-356,Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings[S].
- [4] GB 50111—2006,铁路工程抗震设计规范[S].
- [5] 夏修身,李建中,管仲国,等.斜拉桥桥塔非线性抗震性能研究[J].中国公路学报,2016,29(3).
- [6] 陈星辉,芮伟国.双菱形连塔斜拉桥动力特性分析[J].中外公路,2010,30(5).
- [7] 刘文浩.大跨度连续刚构桥的弹塑性地震反应分析[D].长沙:长沙理工大学,2008.
- [8] 刘津成,徐略勤,陈亮.长挑臂宽主梁斜拉桥地震响应及抗震分析[J].中外公路,2016,36(5).

- [9] 王平.大跨度矮塔斜拉桥地震响应分析[D].长沙:长沙理工大学,2011.
- [10] 刘孟云.铁路矮塔斜拉桥地震反应分析[D].兰州:兰州交通大学,2010.
- [11] 王美.红枫湖大桥成桥后索力调整及调整顺序的优化[D].大连:大连理工大学,2005.
- [12] Kunnath S K, Erduran E, Chai Y H, et al. Effect of near-fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(3).
- [13] 彪仿俊,阎晓铭,陈志强,等.动力弹塑性时程分析的方法及其应用[J].深圳土木与建筑,2006(1).
- [14] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2000.

收稿日期:2017-02-21