

文章编号: 1000-1301(2007)03-0047-07

波形钢腹板混凝土箱拱地震响应分析

陈宝春, 吴庆雄, 王远洋

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要:采用时程分析法,对三向地震动作用下的波形钢腹板混凝土箱拱新型结构的地震特性进行分析,通过与混凝土腹板的混凝土箱拱动力特性和地震响应特点的对比,得出该新型拱圈结构具有较优越的抗震性能。同时,把三向地震作用的结果与在两个主方向(纵桥向和横桥向)同时施加地震动的计算结果进行比较,得到竖向地震动对波形板箱拱地震响应的影晌程度。

关键词:拱桥;波形钢腹板;地震响应分析;抗震

中图分类号: P315.952.2;U448.22 **文献标志码:** A

Seismic response analysis of concrete arch bridge with corrugated steel webs

CHEN Baochun, WU Qingxiong, WANG Yuanyang

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The seismic analysis of a new arch structure subjected to three-directional ground motions, which is the reinforced-concrete arch bridge with corrugated steel webs, is carried out by using the time-history analysis method. Comparing with the reinforced-concrete arch bridge with concrete webs, the new arch structure has a better dynamic and seismic performance. Then, the effect of vertical ground motions on the arch bridge with corrugated steel webs is discussed by a comparison of the seismic responses from the three-directional ground motions and the two-directional (transversal and longitudinal direction) ground motions.

Key words: arch bridge; corrugated steel webs; seismic response analysis; earthquake resistant

引言

近年来,我国交通基础设施建设迅速发展,在西部地区兴建了大量桥梁,为了跨越深沟险壑,混凝土拱桥是常采用的桥型,而且跨径也相当大,甚至超过 300m。例如 1996 年建成的广西邕宁邕江大桥,1997 年建成的重庆万州长江大桥,主跨跨径分别达到了 312m 和 420m。

我国大陆地区有许多破坏性地震集中在西部地区,而拱桥又是该地区常见的桥型,因此,选择合理的结构型式,详细地分析拱式桥梁的地震响应,对提出合理的抗震设计方法是十分必要的。波形钢腹板混凝土箱拱是笔者提出的一种新桥型^[1],它用波形钢板代替拱圈中传统的混凝土腹板,可达到减轻自重,减少现浇混凝土的数量,加快施工进度目的,同时,降低对墩台基础的要求,具有更好的综合经济性。本文在文献[1]的思路下,建立波形钢腹板混凝土箱拱空间有限元模型,对其基本动力性能和弹性地震反应进行了计算和分析,并与混凝土箱拱的动力特性和地震响应特点进行对比,为未来该桥型的实际应用提供参考。

收稿日期: 2007-01-13; 修订日期: 2007-03-20

基金项目:福建省重大科技项目(2003F007)

作者简介:陈宝春(1958-),男,教授,博士,主要从事桥梁工程研究。

1 试设计箱拱和计算模型

波形钢腹板混凝土箱拱采用上承式钢筋混凝土箱拱,主跨跨径 420m,净矢高 80m,矢跨比为 1/5,拱轴线系数 $m = 1.64$;拱上立柱共 12 对,高度从 0.93m ~ 59.94m 不等;主梁采用跨度为 30.668m 的预应力混凝土 T 梁,每孔设置 10 片;桥宽 24m。

主拱圈采用波形钢腹板后,主拱圈自重从原设计的 29 730t 减小到 21 597t,全桥自重减轻 17%。而对于拱圈刚度在不计波形板刚度贡献条件下,拱脚截面的纵向抗弯刚度从原桥的 $1.02 \times 10^{10} \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 降低为 $0.945 \times 10^{10} \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,减少了 8%;横向抗弯刚度从 $3.54 \times 10^{10} \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 降低为 $2.23 \times 10^{10} \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,减少了 37%;拱顶截面的纵、横向抗弯刚度分别减少了 10% 和 42%。拱圈截面的具体构造详见文献 [1]。

文中采用混凝土腹板的钢筋混凝土箱拱简称为“混凝土箱拱”,而笔者提出的采用波形钢腹板的钢筋混凝土箱拱简称为“波形板箱拱”。

借助大型有限元结构分析通用软件 ANSYS 建立混凝土箱拱和波形板箱拱的空间有限元模型,见图 1。拱圈腹板和顶底板均采用矩形平壳单元模拟,通过截面的等刚度原则计入劲性骨架主弦钢管及钢筋的效应。为了简化模型并且模拟波形钢板的折叠效应,将波形钢腹板等效成正交各向异性平板单元,顺桥向等效弹性模量 E_x 按文献 [1] 的公式确定。拱上立柱、盖梁以及主梁概化为 43 种不同属性空间梁单元,拱顶横梁通过设置不计重量的刚臂单元与主拱圈连接,桥面铺装层及人行道板等结构的重量折算入主梁中,没有考虑铺装层对主梁刚度的贡献。两端拱脚采用固定边界条件,主梁各跨间采用铰结 [2]。



图 1 波形板箱拱计算模型

Fig 1 Analytical model for arch bridge with corrugated steel webs

2 结构基本动力特性

混凝土箱拱和波形板箱拱的自振频率、振型特征、振型贡献率见表 1,主要振型图见图 2。

无论是混凝土箱拱还是波形板箱拱,都是面外一阶振动比面内一阶振动先出现。面外一阶对称振动的基频分别为 0.222Hz 和 0.190Hz,振型贡献率均为 83%。面外一阶反对称侧弯的基频分别为 0.393Hz 和 0.329Hz,振型贡献率非常小。波形板箱拱的面外一阶对称或反对称侧弯基频都比混凝土箱拱小约 14%。

表 1 自振频率、振型特征和振型贡献率

Table 1 Natural vibration frequencies, mode shapes and effective mass ratios

阶数	混凝土箱拱				阶数	波形板箱拱				
	频率 /Hz	振型贡献率 /%				频率 /Hz	振型贡献率 /%			振型特征
		x	y	z			x	y	z	
1	0.222			83	1	0.190			83	一阶对称侧弯
2	0.378	53			2	0.329			6	一阶反对称侧弯
3	0.393			4	4	0.368	50			一阶反对称竖弯
7	0.698		2		7	0.678		2		一阶对称竖弯
15	1.199	17			15	1.126	16			
17	1.235			4	16	1.156			6	
22	1.318		68		19	1.244		65		
23	1.414	28			23	1.368	33			
27	1.541		8		27	1.524		13		
32	1.751		21		30	1.631		19		
累计贡献率 /%		98	97	91	累计贡献率 /%		99	99	95	

注: x 表示纵桥向, y 表示竖向, z 表示横桥向。

对于面内振型,混凝土箱拱与波形板箱拱的一阶竖弯振型均为拱桥特有的反对称振型,自振频率均为 0.368Hz,振型贡献率为 53% 和 50%。一阶对称竖弯振型的基频分别为 0.698Hz 和 0.678Hz,波形板箱拱的

面内一阶对称竖弯基频比混凝土箱拱降低了仅 3%。这说明波形板箱拱试设计中保证了纵向刚度,使面内自振频率基本保持不变。

从表 1 还可以看出,面内一阶对称竖弯振型直到第 7 阶才出现,且竖向振型的累计贡献率收敛较慢,前 21 阶振型的累计贡献率不超过 2%。如果要达到累积贡献率 90% 以上的要求^[3],混凝土箱拱和波形板箱拱分别需取前 32 阶和 30 阶。同时,波形板箱拱与混凝土箱拱前 32 阶都未出现扭转振型,表明拱圈整体刚度和抗扭性能都是较好的。

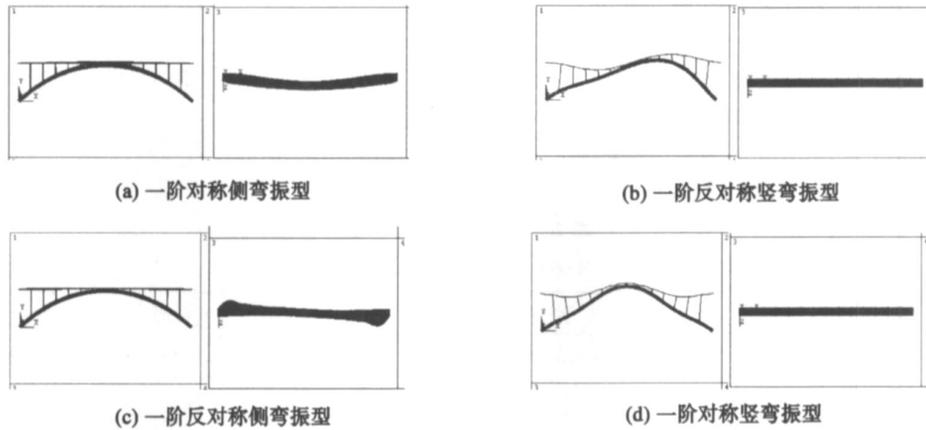


图 2 主要振型图

Fig 2 Main mode shapes

3 结构地震响应特性

3.1 地震响应分析的计算参数

本文采用动态时程分析方法进行地震响应时程分析。积分方法采用常加速度法,时间步长 Δt 取 0.02s,持续时间为 10s。阻尼矩阵采用 Rayleigh 阻尼模型,结构阻尼比取 0.03 且不考虑主要振型的阻尼比偏离此值的影响^[4]。假定各结构都处于弹性阶段,初期条件为桥梁恒载作用下的内力状态^[5]。

鉴于本文的研究目的是对波形板箱拱这一新型结构地震响应特性进行初步探讨,输入地震波仅考虑了 E1Centro 波(南北向)。实际分析时根据重庆万州大桥所处位置的地震设防标准对 E1Centro 波进行调整^[6],使得 E1Centro 波的最大加速度值与桥位处位置地震烈度 7 度相吻合^[2],经调幅后加速度峰值为 $0.981m/s^2$ 。

关于地震作用方向,通过对 600m 跨径钢筋混凝土拱桥地震响应分析表明,大跨径拱桥应同时考虑 3 个方向地震动的影响^[7,8]。因此,本文把地震波动同时施加于三向(横桥向、纵桥向、竖向),分析了波形板箱拱与混凝土箱拱横桥向、纵桥向的地震特性。其中,竖向地震动分量取水平分量的 1/2。

另外,把三向地震作用的结果与在两个主方向(纵桥向和横桥向)同时施加地震动的计算结果进行比较,讨论竖向地震动对混凝土箱拱和波形板箱拱地震响应的影响程度。

3.2 三向地震作用下横桥向特性

三向地震动作用下的横桥向,混凝土箱拱和波形板箱拱的主要截面(拱脚和拱顶)内力时程图表示于图 3~图 5。其中,弯矩、轴力等内力是在求出拱圈截面的应力分布和板单元的内力后,根据力学公式求得的。主拱圈横桥向受力是以横向弯矩为主,引起的扭矩也较大,这与拱桥的抗震特性相符^[9~12]。

由于自重的减小与刚度的下降,三向地震动作用下波形板箱拱产生的内力比混凝土箱拱小。表 2 表示了各主要截面的内力峰值。对于拱脚截面,波形板箱拱的最大弯矩、最大横向剪力和最大扭矩仅为混凝土箱拱的 0.59 倍、0.62 倍和 0.60 倍。因此,由于采用波形钢腹板使拱圈自重减小,拱圈质量减轻降低了结构的横向受力,使横桥向的内力减少了约 40%,表明采用波形钢腹板能较大程度提高拱桥的横桥向抗震性能。

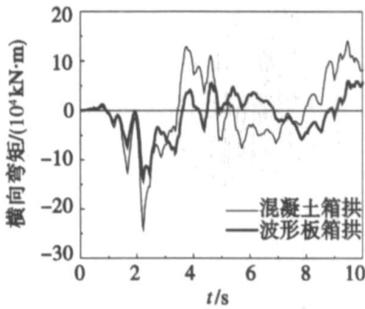


图 3 拱脚截面横向弯矩时程图
Fig.3 Responses of out-of-plane bending moment at springing

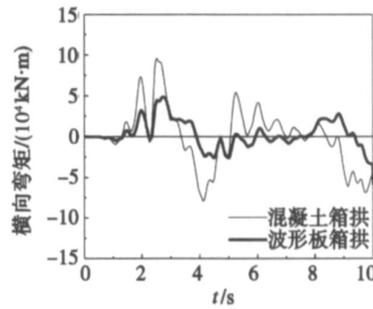


图 4 拱顶截面横向弯矩时程图
Fig.4 Responses of out-of-plane bending moment at crown

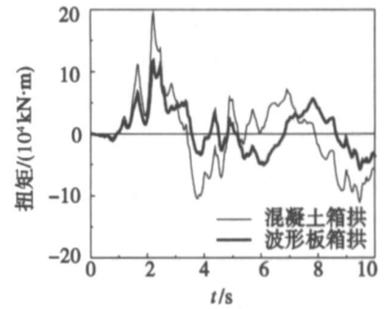


图 5 拱脚截面扭矩时程图
Fig.5 Responses of torsion at springing

表 2 横桥向内力峰值表

Table 2 Maximum out-of-plane internal forces

截面 内力项目	拱脚			1/4截面	拱顶
	横向弯矩 / (kN·m)	横向剪力 / kN	扭矩 / (kN·m)	横向弯矩 / (kN·m)	横向弯矩 / (kN·m)
混凝土箱拱 f_1	-240 402	6 561	195 694	72 005	95 765
波形板箱拱 f_2	-141 109	4 050	117 688	38 176	48 762
比值 f_2/f_1	0.59	0.62	0.60	0.53	0.51

从图 6 表示的拱圈横桥向位移峰值可知, 波形板箱拱拱顶处的最大横向位移为 0.093m, 较混凝土箱拱的 0.078m 大。

3.3 三向地震作用下纵桥向特性

三向地震动作用下的纵桥向(即面内), 混凝土箱拱和波形板箱拱的主要截面(拱脚和拱顶)的内力时程图表示于图 7~图 9。主拱圈纵桥向受力是以轴力和纵向弯矩为主, 这也与拱桥的地震特性相符。

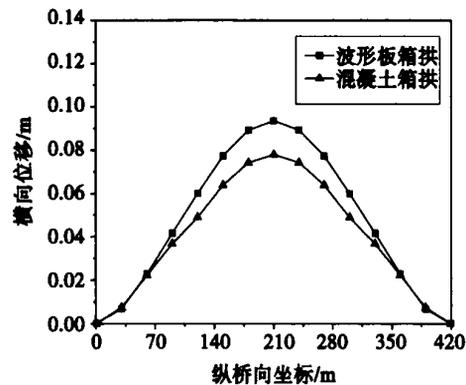


图 6 拱圈横向位移峰值

Fig 6 Maximum out-of-plane displacements of arch rib

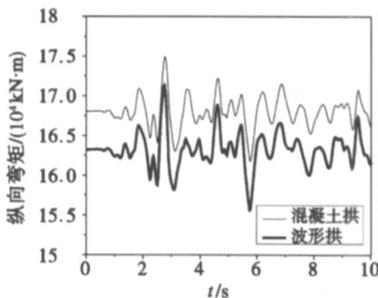


图 7 拱顶截面纵向弯矩时程图
Fig.7 Responses of in-plane bending moment at crown

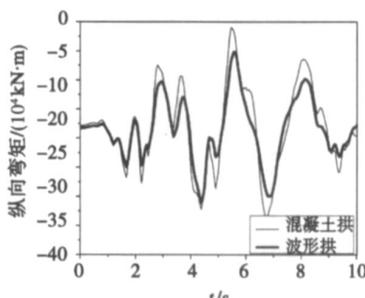


图 8 拱脚截面纵向弯矩时程图
Fig.8 Responses of in-plane bending moment at springing

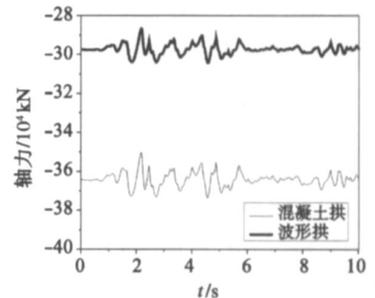


图 9 拱脚截面轴力时程图
Fig.9 Responses of axial force at springing

各主要截面纵桥向内力峰值示于表 3。主拱圈最大弯矩发生在拱脚处, 波形板箱拱的最大弯矩为混凝土箱拱的 0.90 倍; 轴力和竖向剪力最大响应值也出现在拱脚截面, 波形板箱拱的轴力或竖向剪力为混凝土箱拱的 0.81 倍。因此, 三向地震作用下的纵桥向, 波形腹板箱拱主要截面的内力比混凝土箱拱减小约 10%

~20%,没有上一小节中横向内力减小 40%来得显著。这是因为与原混凝土箱拱相比,波形钢腹板箱拱面内抗弯刚度的降低远小于面外抗弯刚度的降低。

表 3 纵桥向内力峰值表

Table 3 Maximum in-plane internal forces

截面	拱脚			1/4截面	拱顶
	纵向弯矩 / (kN·m)	竖向剪力 / kN	轴向力 / kN	纵向弯矩 / (kN·m)	纵向弯矩 / (kN·m)
混凝土 f_1	-347 363	8 515	-378 172	-94 710	176 110
波形板 f_2	-313 866	6 884	-307 914	-69 993	170 165
比值 f_2/f_1	0.90	0.81	0.81	0.74	0.97

图 10 表示拱圈纵桥向和竖向的位移峰值。可以看出,波形钢腹板箱拱和混凝土箱拱的纵桥向和竖向位移峰值差别不大。

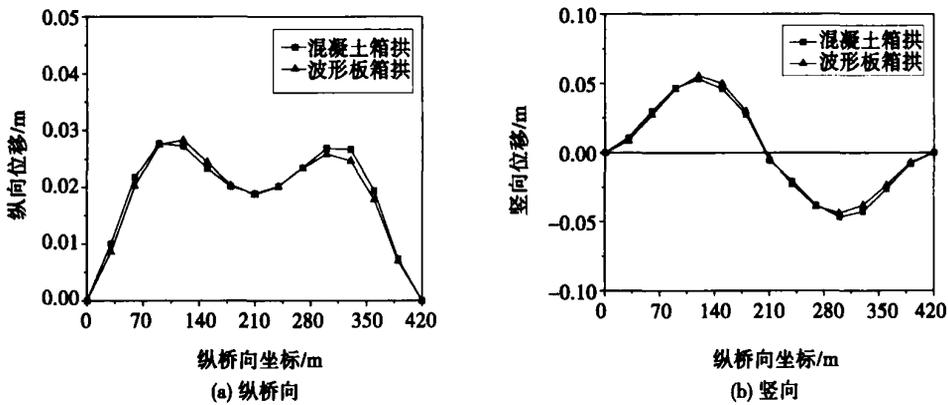


图 10 拱圈面内位移峰值

Fig 10 Maximum in-plane displacements of arch rib

3.4 竖向地震动的影响

为了讨论竖向地震动对该桥的影响,进行了在 2 个主方向(纵桥向和横桥向)同时施加地震动的计算,与三向地震作用下的计算结果进行比较。

计算表明,竖向地震动对拱圈横向内力(面外弯矩、扭矩及横向剪力)的影响可忽略不计,而对拱圈的轴力、纵向弯矩、竖向剪力以及竖向位移有一定的影响。所以,下面仅进行竖向地震动对拱圈纵桥向的影响分析。图 11~图 13 示出了波形板箱拱在两向与三向地震动作用下拱脚截面轴力和纵向弯矩的时程图。表 4 表示了混凝土箱拱和波形板箱拱主要截面的纵桥向内力峰值。

不管是混凝土箱拱还是波形板箱拱,竖向地震动对拱圈轴力和纵向弯矩有一定的影响,且影响程度也基本相同,均为轴力增大 4%,纵向弯矩增大 10%;而竖向地震动对拱脚处的竖向剪力影响较大,三向地震作用下混凝土箱拱和波形板箱拱的竖向剪力值分别为两向地震作用时的 1.92 倍和 1.71 倍。

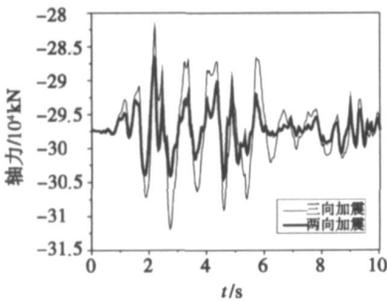


图 11 拱脚截面轴力时程图
Fig. 11 Responses of axial force at springing

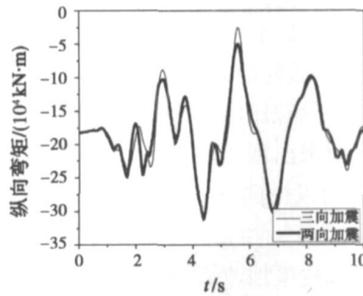


图 12 拱脚截面纵向弯矩时程图
Fig. 12 Responses of in-plane bending moment at springing

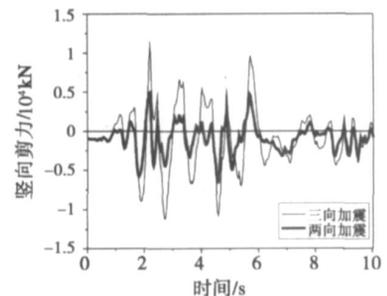


图 13 拱脚截面竖向剪力时程图
Fig. 13 Responses of vertical shear force at springing

图 14 示出了波形板箱拱的拱圈位移峰值,表 5 表示了混凝土箱拱和波形板箱拱位移峰值。由图可知,竖向地震动对拱圈的竖向位移有一定的影响,影响程度约为增大 20%。

同时,在三向地震作用或两向地震作用下,波形板箱拱内力峰值的比值 ($D3/D2$)除拱脚轴力以外,均略小于混凝土箱拱,这说明波形板箱拱对抵抗竖向地震动有一定的作用。

表 4 两向地震和三向地震作用下纵桥向内力峰值表

Table 4 Maximum in-plane internal forces under two-directional and three-directional ground motions

内力	腹板形式	地震动输入	拱脚	1/4	拱顶
轴力	混凝土	两向 (D2)	- 373 564	- 300 849	- 277 361
		三向 (D3)	- 384 048	- 311 934	- 288 657
		$D3/D2$	1. 03	1. 04	1. 04
	波形板	两向 (D2)	- 286 699	- 248 731	- 229 340
		三向 (D3)	- 301 033	- 257 149	- 237 866
		$D3/D2$	1. 05	1. 03	1. 04
纵向弯矩	混凝土	两向 (D2)	- 330 582	- 94 755	171 239
		三向 (D3)	- 335 968	- 108 328	186 224
		$D3/D2$	1. 02	1. 14	1. 09
	波形板	两向 (D2)	- 304 739	- 70 244	175 122
		三向 (D3)	- 310 938	- 78 075	186 029
		$D3/D2$	1. 02	1. 11	1. 06
竖向剪力	混凝土	两向 (D2)	- 8 055	5 459	- 6 911
		三向 (D3)	- 15 487	9 608	- 6 854
		$D3/D2$	1. 92	1. 76	0. 99
	波形板	两向 (D2)	- 6 543	5 132	- 6 043
		三向 (D3)	- 11 178	7 614	- 6 020
		$D3/D2$	1. 71	1. 48	0. 99

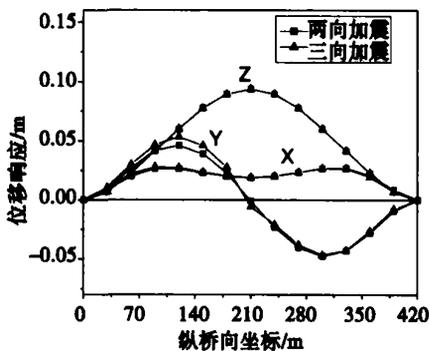


图 14 波形板箱拱拱圈位移峰值

Fig 14 Maximum displacements of arch rib with corrugated steel webs

表 5 两向地震作用和三向地震作用下拱圈位移峰值表

Table 5 Maximum displacements of arch rib under two-directional and three-directional ground motions

腹板形式	地震动输入	纵向位移 /m	竖向位移 /m	横向位移 /m
混凝土	两向 (D2)	0. 027	0. 048	0. 078
	三向 (D3)	0. 028	0. 056	0. 078
	$D3/D2$	1. 04	1. 17	1. 00
波形板	两向 (D2)	0. 026	0. 046	0. 093
	三向 (D3)	0. 027	0. 053	0. 093
	$D3/D2$	1. 04	1. 15	1. 00

4 结论

本文对 420m 波形钢腹板混凝土拱桥试设计的弹性抗震响应分析的主要结论如下:

(1)与混凝土箱拱结构相比,由于波形钢腹板的采用,拱圈自重减轻和面外抗弯刚度较大幅度的降低,波形板箱拱的面外对称或反对称侧弯的基频都比混凝土箱拱降低了约 14%,但面内对称或反对称侧弯的基频变化不大。另外,波形板箱拱前 35 阶都未出现拱圈的扭转振型,拱圈整体刚度好,抗扭性能较好。

(2)在三向地震动作用下,横桥向受力以横向弯矩和扭矩为主,采用了波形钢腹板后横桥向内力比混凝土箱拱减少了约 40%;纵桥向受力以纵向弯矩和轴力为主,波形板箱拱的地震内力比混凝土箱拱减小约 10%~20%。说明采用波形钢腹板后较大程度地改善拱桥的水平抗震性能,降低了横桥向内力。

(3)竖向地震动对横桥向内力、横桥向位移和纵桥向位移的影响可以忽略,而对拱的轴力、纵向弯矩、竖向剪力以及竖向位移有一定的影响。同时,波形板箱拱对抵抗竖向地震动有一定的作用。

本文对波形钢腹板箱拱地震响应的分析是初步的,结论是在假设各支承点一致激励,以及结构在整个地

震作用下处于弹性阶段而得出的,大跨度桥梁地震响应分析中的多点激励、行波效应以及非线性行为对该新型结构抗震性能的影响,还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 陈宝春,王远洋,黄脚维.波形钢腹板混凝土拱桥新桥型构思[J].世界桥梁,2006(4):10-14.
- [2] 四川省交通厅,四川省公路规划勘察设计研究院,四川公路桥梁建设集团有限公司.万县长江公路大桥技术总结[M].成都:电子科技大学出版社,2001.
- [3] Mario Paz.结构动力学——理论与计算[M].北京:地震出版社,1993.
- [4] 谢旭,编著.桥梁结构地震响应分析与抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [5] Ren WX, Obata M. Elastic-plastic seismic behavior of long span cable-stayed bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE 1999, 4(3): 194 - 203.
- [6] 交通部公路规划设计院.公路工程抗震设计规范(JTJ-89)[S].
- [7] 王加迫,陈宝春.600m跨径钢筋混凝土拱桥地震响应分析[J].中外公路,2006,26(4):111-114.
- [8] 赵灿晖,周志祥.多维地震激励作用下大跨度钢管混凝土提篮拱桥的随机响应[J].地震工程与工程振动,2005,25(3):87-92.
- [9] 范立础,胡世德,叶爱君.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [10] 刘玉擎,郭彦林.钢管拱桥在大地震作用下的非线性反应分析[J].地震工程与工程振动,2003,23(1):44-49.
- [11] Wu Q, Yoshimura M, Takahashi K, et al. Nonlinear Seismic analysis of the Second Saikai Bridge-concrete filled tubular (CFT) arch bridge [J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 163 - 182.
- [12] 徐艳,胡世德.钢管混凝土拱桥弹性动力稳定性性能研究[J].地震工程与工程振动,2006,26(4):162-167.

www.cnki.net