

文章编号:1673-9469(2008)01-0005-04

梁拱组合体系桥梁的设计实例

李 健,辛克贵,张崇厚,叶祯翔,易桂香
(清华大学 土木工程系,北京 100084)

摘要:根据成都市政公园蝴蝶拱桥的总体设计,论述了该桥的结构设计及有限元计算模型的建立方法,并分析了该桥的静力和动力特性。为蝴蝶拱在梁拱组合体系桥梁中的应用提供有益的参考。

关键词:梁拱组合体系桥;蝴蝶拱桥;桥梁设计;静力和动力分析

中图分类号: U44

文献标识码: A

Design of Beam Arch Combination Bridge

LI Jian, XIN Ke-gui, ZHANG Chong-hou, YE Zhen-xiang, YI Gui-xiang
(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The overall design of Butterfly Arch Bridge (BAB) in municipal park of Chengdu is presented in this paper. The design of structural style and the method of finite element model for this bridge is stated, the static force and dynamic character are also analyzed. The presentations in this paper may provide useful reference for the use of Butterfly Arch in Beam Combination Bridges in future.

Key words: Beam Arch Combination Bridge; Butterfly Arch Bridge; bridge design; static force analysis and dynamic analysis

成都市十陵城市公园北起成洛路,南至成渝高速,西起十洪大道,东至外环路,面积为10km²。根据十陵城市公园规划方案,本文所介绍的3号人行桥是公园正门内的第一座桥,跨越东风渠,规划为一梁拱组合体系的蝴蝶拱桥,该桥具有美观上的对称性,远远望去,犹如一只彩蝶在东风渠上翩翩起舞,故取名为“蝴蝶桥”。

1 总体设计及结构构造

3号桥是一座跨越东风渠的钢结构梁拱组合体系拱桥,拱的跨度为31m,桥面宽度6m,全长33m。桥面顺桥向起拱500mm,起拱形状为圆弧形,拱的形状为抛物线。

1.1 钢管混凝土拱

全桥共有两根钢管混凝土拱,形状为二次抛物线,拱平面与水平面夹角为45°。拱跨度为31m,

在拱平面内矢高为13.214m,拱肋中心线总长度为42 486mm。拱肋横截面为圆形,直径500mm,钢管壁厚16mm,采用Q345C钢材,钢管内部用C40混凝土填充。两拱对称布置共28根吊索。

两拱之间在靠近桥头处用拱间联系梁连接,拱间联系梁为圆形钢管,直径351mm、壁厚16mm。拱与拱间联系梁之间为等强相贯焊接。

1.2 钢箱梁

该桥中桥面系和钢管混凝土拱共同受力。其中桥面系主体为钢箱梁,钢箱梁采用Q235B钢材,梁高700mm,顶板、底板和腹板的厚度均为20mm,顺桥向全长33m,为圆弧形,钢箱梁的顶板、底板和腹板之间的连接均采用等强焊缝;钢箱梁上铺50mm的沥青混凝土铺装层。

1.3 吊索

每根拱上有吊索14根,共有吊索28根,吊索

收稿日期:2007-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50578085),浙江省科技计划项目(2007C31048)

作者简介:李健(1983-),男,湖北省广水市人,硕士生,从事结构工程设计和研究。

顺桥向水平间距 1.6m。吊索与拱、钢箱梁之间通过耳板连接。该桥所采用的吊索为 $\Phi 5 \times 31$ 平行钢丝束。不含 PE 保护层的钢丝束直径为 32mm, 截面积为 $2\,117\text{mm}^2$ 。

2 结构特点和方案分析

2.1 结构传力路径

蝴蝶拱桥的结构特点是: 桥面系铺装于两拱肋之间的钢箱梁上, 钢箱梁在横桥向两端分别由拱肋悬吊, 两拱肋之间在底部用拱间联系梁连接, 以增加桥梁的整体稳定性。整座桥梁的上部结构布置如图 1 所示。

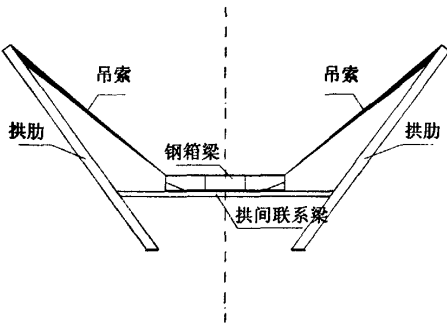


图1 蝴蝶拱桥结构布置简图

Fig.1 Arrangement of Butterfly Arch

该桥为梁拱组合体系桥, 钢管混凝土拱肋和钢箱梁共同承受桥面荷载, 全桥结构的计算模型为拱肋、吊索、钢箱梁和拱间联系梁, 采用的参数为: 主拱采用二次抛物线, 在拱肋平面内矢跨比为 $f/L = 1/2.296$, 拱肋底部与基础之间为刚性连接, 拱肋与钢箱梁之间用吊索连接, 钢箱梁在桥头处与基础之间铰接。

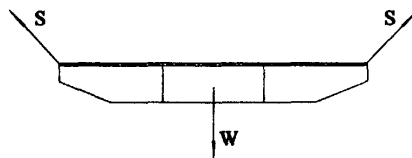
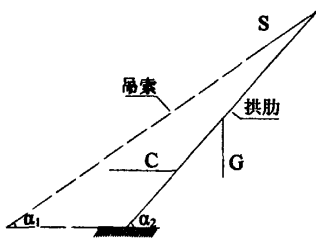


图2 拱肋和钢箱梁的受力体系

Fig.2 Applied force system of arched rib and steel box girder

拱肋和钢箱梁的受力体系如图 2 所示。拱肋受到吊索拉力合力 S , 拱肋自重 G 和拱间联系梁拉力 C 的作用; 钢箱梁受到吊索拉力 S 、自重和施工荷载的作用, 考虑施工荷载为 0.2 倍的满布人群荷载, 自重和施工荷载的作用合计为 W 。

为了使拱肋尽可能少受平面外弯矩, 应使力 S 和力 G 在拱肋根部所产生的合力矩尽量小(由于力 C 距离拱肋根部的距离很近, 故对拱肋根部的平面外力矩的贡献可忽略不计), 因此要求钢箱梁和拱肋的自重必须满足一定的关系, 同时要求吊索的拉力的合力 S 指向桥梁内侧, 若设 S 的延长线与水平面所成的锐角为 α_1 , 拱肋平面与水平面的夹角为 α_2 , 则首先需满足 $\alpha_1 < \alpha_2$, 另外, 若假设拱肋根部的平面外弯矩为零, 则可以得出如下关系:

$$S \sin(\alpha_2 - \alpha_1) = \frac{1}{2} G \cos \alpha_2$$

$$2S \cos \alpha_1 = W$$

由以上两式可得

$$W \sin(\alpha_2 - \alpha_1) = G \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \quad (1)$$

蝴蝶拱桥的设计中, 应使拱肋和钢箱梁的自重尽可能满足或接近满足式(1)。该桥中 α_1 在 38° 到 42° 之间, $\alpha_2 = 45^\circ$, 满足 $\alpha_1 < \alpha_2$ 。同时, 根据 Midas/Civil 显示的结果, W 和 G 的关系也近似满足式(1)。

2.2 结构方案分析

该桥为一种特殊的梁拱组合体系桥梁, 蝴蝶拱的应用, 使该桥的结构新颖、外形美观, 由于拱肋和钢箱梁的重量搭配适当, 使蝴蝶拱克服了受力上的缺陷, 具有和普通竖向拱相似的受力特性。

蝴蝶拱肋是全桥主要的承重构件, 承受大约三分之二的人群荷载, 同时起到了增大桥梁刚度

的作用;钢箱梁为辅助承重构件,承受大约三分之一的人群荷载,同时平衡拱肋由于自重产生的平面外弯矩以及减小拱肋的竖向位移;吊索连接拱肋和钢箱梁,使之相互配合、相互平衡,共同承受人群荷载,同时也可以通过调节吊索的预应力来改善结构的受力状态;拱间联系梁连接两侧拱肋,增加了全桥的稳定性。

3 结构静力分析与计算

3.1 计算模型

计算采用 MIDAS/Civil 程序建立桥梁的空间模型,整体坐标轴定义为:顺桥向为 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖直高度方向为 Z 轴。异型钢箱梁按照箱梁截面不同部位,离散为不同厚度的薄壁板单元 Plate 单元,钢管混凝土拱离散为梁单元 Beam 单元,吊索离散为只受拉桁架单元 Truss 单元,拱底部与桥台之间设为固结,钢箱梁与桥台之间设为铰接,拱桥空间计算模型见图 3。

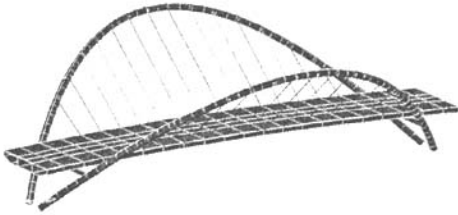


图3 蝴蝶桥有限元计算模型

Fig. 3 Element model of Butterfly Bridge

3.2 荷载

计算中的永久荷载为自重荷载,由程序自动计算;基本可变荷载为人群荷载,取 5.0kN/m^2 的均布荷载;其他可变荷载有风荷载和温度荷载,风荷载按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004)计算后,加载到计算模型的各单元上,温度荷载取整体升温温差为 12.3°C ,整体降温温差为 -30.9°C 。偶然荷载主要为地震荷载。

3.3 静力计算结果

对各种荷载进行组合按允许应力法计算桥体各部分最大应力,得到在各种组合工况下钢管混凝土拱的最大应力为 122MPa ,钢箱梁上的最大应力为 87MPa ,吊索最大内力为 154kN ,应力满足设计要求。对各种荷载进行组合按正常使用极限状态计

算桥体各部分最大位移,得到各种组合工况下钢管混凝土拱的最大位移为向下 113mm ,钢箱梁上的最大位移为向下 48mm ,位移满足设计要求。

4 结构动力分析与计算

4.1 桥梁自震特性分析

运用 MIDAS/Civil 程序进行全桥特征值分析,得到桥梁的空间自振频率和振动模态。限于篇幅原因,仅列出前 10 阶振型的自振频率见表 1。其中有代表性的振型示意图见图 4。

从表 1 和图 4 中可以看出,第 6 阶振型为桥面系的竖向振型,对应自振频率为 4.995Hz ,大于行人舒适度要求的 3Hz ,满足要求。

4.2 地震分析

根据地勘报告,桥梁所在场地为 II 类场地。在选择地震波时,采用 El Centro 波和 Hollywood 波以及北京人工波等三种地震波对该桥进行时程分析。在进行时程分析时,要求选择的地震波的反应谱与设计采用的反应谱在统计意义上相符,并采用小震的地震波峰值加速度。因此,需要对选取的地震波进行调幅。根据《建筑抗震设计规范》,成都地区抗震设防烈度为 VII 度,设计基本地震加速度值为 $0.10g$,其时程分析所用多遇地震峰值加速度为 35cm/s^2 。由波形图可知,El Centro 波、Hollywood 波及北京人工波的最大加速度分别为: $0.3569g$, $0.05923g$, $0.07138g$ 。故其调幅系数分别为: 0.100 , 0.603 , 0.500 。

表 1 结构自振频率与振型

Tab. 1 Natural frequency and of vibration and models

阶数	频率(Hz)	振型
1	0.950	拱的反对称侧弯振型
2	1.304	拱的正对称侧弯振型
3	1.796	桥面扭转振型
4	2.824	拱的扭转振型
5	3.226	拱的面内弯曲振型
6	4.995	桥面的竖向弯曲振型
7	5.403	拱与桥面耦合振型
8	5.783	拱与桥面耦合振型
9	5.848	拱与桥面耦合振型
10	6.789	拱与桥面耦合振型

在我国桥梁抗震设计规范中,不同方向的地面运动所引起的内力应考虑下列组合,按最不利

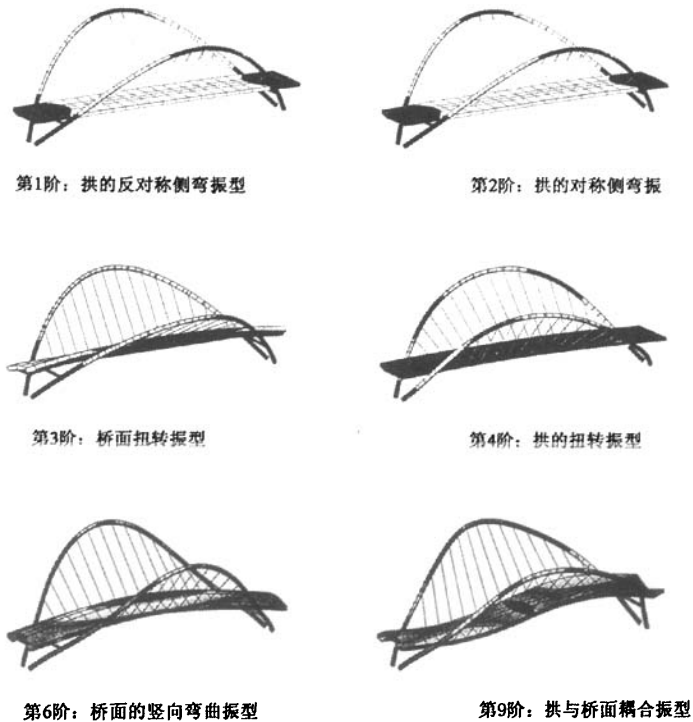


图4 有代表性的振型示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of representative models

结果进行抗震设计:① 纵桥向;② 横桥向;③ 纵桥向+竖向;④ 横桥向+竖向(其中竖向加速度值取 $1/2-2/3$ 纵桥向加速度值)。根据规范,本文采用 MIDAS 软件,计算了一维的两个方向,二维的两种组合,以及三维的组合:纵桥向+横桥向+竖向(竖向取 $1/2$ 纵桥向加速度值),作为地震波输入,进行结构的地震响应分析。

采用有限元软件 MIDAS/Civil 进行桥梁的整体地震分析,分析结果主要为地震作用下桥梁的应力情况以及位移情况。在分析过程中,位移均以指向坐标轴正方向为正。

通过对三组地震波的一维、二维以及三维输入后的计算结果进行比较,得出如下结果:考虑自重和预应力作用时,在 Hollywood 波作用下,该桥的局部出现较大的应力,最大应力值约为 82MPa,位置在拱肋中部,与设计采用的 Q345 钢材的设计值相比,安全系数达 3.5,完全满足安全性能和使用性能的要求。

5 结论

成都市政公园蝴蝶拱桥为一梁拱组合体系拱

桥,蝴蝶拱的应用使该桥结构形式新颖,造型优美,为拱桥家族中增添了新的一员。本桥为一种特殊的梁拱组合体系桥,要使蝴蝶拱克服受力上的缺陷,必须处理好两个问题:一是拱肋与水平面的夹角以及吊索于水平面夹角的关系;二是拱肋和钢箱梁的重量和刚度分配问题。

参考文献:

- [1] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,1992.
- [2] 戴公连,李德建. 桥梁空间结构分析方法与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [4] 周和林. 广东省中山市蝴蝶拱桥空间模型计算分析[J]. 四川建筑科学研究,2004,30(3):31-32.
- [5] 郭静,童丽萍. 空间组合桥梁体系的动力特性分析[J]. 世界地震工程,2002,18(4):163-166.
- [6] 李国豪. 工程结构抗震动力学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980.
- [7] 项海帆,刘光栋. 拱结构的稳定与振动[M]. 北京:人民交通出版社,1991.

(责任编辑 刘存英)

梁拱组合体系桥梁的设计实例

作者: [李健](#), [辛克贵](#), [张崇厚](#), [叶桢翔](#), [易桂香](#), [LI Jian](#), [XIN Ke-gui](#), [ZHANG Chong-hou](#), [YE Zhen-xiang](#), [YU Gui-xiang](#)
作者单位: 清华大学, 土木工程系, 北京, 100084
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2008, 25(1)
被引用次数: 4次

参考文献(7条)

1. [李国豪](#) [桥梁结构稳定与振动](#) 1992
2. [戴公连](#); [李德建](#) [桥梁空间结构分析方法与应用](#) 2001
3. [范立础](#) [桥梁抗震](#) 1997
4. [周和林](#) [广东省中山市蝴蝶拱桥空间模型计算分析](#)[期刊论文]-[四川建筑科学研究](#) 2004(03)
5. [郭静](#); [童丽萍](#) [空间组合桥梁体系的动力特性分析](#)[期刊论文]-[世界地震工程](#) 2002(04)
6. [李国豪](#) [工程结构抗震动力学](#) 1980
7. [项海帆](#); [刘光栋](#) [拱结构的稳定与振动](#) 1991

本文读者也读过(10条)

1. [易云焜](#) [梁拱组合体系设计理论关键问题研究](#)[学位论文]2006
2. [王文清](#). [WANG Wen-qing](#) [梁拱组合体系桥梁的设计与施工](#)[期刊论文]-[工程与建设](#)2007, 21(2)
3. [于淑兰](#) [梁拱组合桥梁结构体系性能分析](#)[学位论文]2003
4. [邹均平](#) [下承式高低拱-梁组合结构桥梁设计及受力性能分析](#)[期刊论文]-[中外公路](#)2009, 29(5)
5. [朱英磊](#). [王国安](#) [红星街桥—连续梁拱组合体系桥的设计简介](#)[期刊论文]-[公路](#)2006(1)
6. [杨忠明](#). [高波](#). [吴艳丽](#). [YANG Zhong-ming](#). [GAO Bo](#). [WU Yan-li](#) [拱梁组合体系桥一类稳定问题探讨](#)[期刊论文]-[桥梁建设](#)2005(1)
7. [李晓琴](#). [李映](#). [LI Xiaoqin](#). [LI Ying](#) [两座拱梁组合体系桥梁设计分析及比较](#)[期刊论文]-[结构工程师](#)2008, 24(6)
8. [施颖](#). [史杰](#). [SHI Ying](#). [SHI Jie](#) [梁拱组合桥梁上部结构空间分析计算研究](#)[期刊论文]-[浙江工业大学学报](#) 2010, 38(5)
9. [罗东东](#). [严爱国](#). [刘振标](#) [大跨度连续刚构柔性拱组合桥式研究](#)[期刊论文]-[铁道科学与工程学报](#)2004, 1(2)
10. [孙树礼](#). [SUN Shuli](#) [连续梁拱组合桥梁设计关键技术对策研究](#)[期刊论文]-[铁道标准设计](#)2005(5)

引证文献(4条)

1. [霍学晋](#). [蒲黔辉](#). [施洲](#) [多拱肋蝶形拱桥的稳定及其影响因素研究](#)[期刊论文]-[公路交通科技](#) 2010(9)
2. [黄海云](#). [张俊平](#). [刘爱荣](#). [赵新生](#) [蝴蝶拱桥外倾非对称拱肋的力学特性研究](#)[期刊论文]-[中外公路](#) 2010(4)
3. [袁明](#). [赵志军](#) [无锡地铁1号线跨锡北运河方案设计](#)[期刊论文]-[铁道标准设计](#) 2011(4)
4. [黄海云](#). [张俊平](#). [刘爱荣](#). [禹奇才](#) [蝴蝶拱桥活载受力行为的试验研究](#)[期刊论文]-[中山大学学报\(自然科学版\)](#) 2010(1)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200801002.aspx