

某站改工程 80.0m 跨梁拱组合结构计算分析

葛 征

(中铁第一勘察设计院集团有限公司桥隧处, 陕西 西安 710043)

摘 要:梁拱组合结构无论是在应用还是在理论研究方面都还在不断的发展过程中,以某站改工程 80.0 m 跨梁拱组合桥的相关计算分析内容作为重点展开研究,针对梁拱组合结构的主要构件:主梁、拱肋及吊杆,采用常规的仿真分析技术,力图从分析结果中发现此类特殊结构桥梁特有的受力性能,供同行参考。

关键词:梁拱组合;结构分析;屈曲分析

中图分类号:U443

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)03-0391-06

梁拱组合桥结构轻盈,气势雄伟,钢管壁可以涂成各种色彩,近年来在城市桥梁中得到了广泛的应用。随着我国社会主义现代化建设的突飞猛进,桥梁建设日新月异,梁拱组合桥现已跻身大跨度桥梁的建设行列,从跨河、跨江进入了跨海的桥梁建设方案中。这也充分说明了梁拱组合结构桥的巨大优越性及其发展潜力。由于此类结构桥型在我国仍处发展阶段,至今尚无具体的设计和施工规范,其结构设计、计算理论也不成熟。本文从某铁路站改工程 80.0 m 梁拱组合结构具体设计计算分析出发,简要的分析论述该种桥型结构的受力特性。

1. 拱肋计算与分析

一般公路大跨度梁拱组合结构设计为柔性系梁刚性拱,铁路桥梁相较公路桥梁而言,规范上对结构

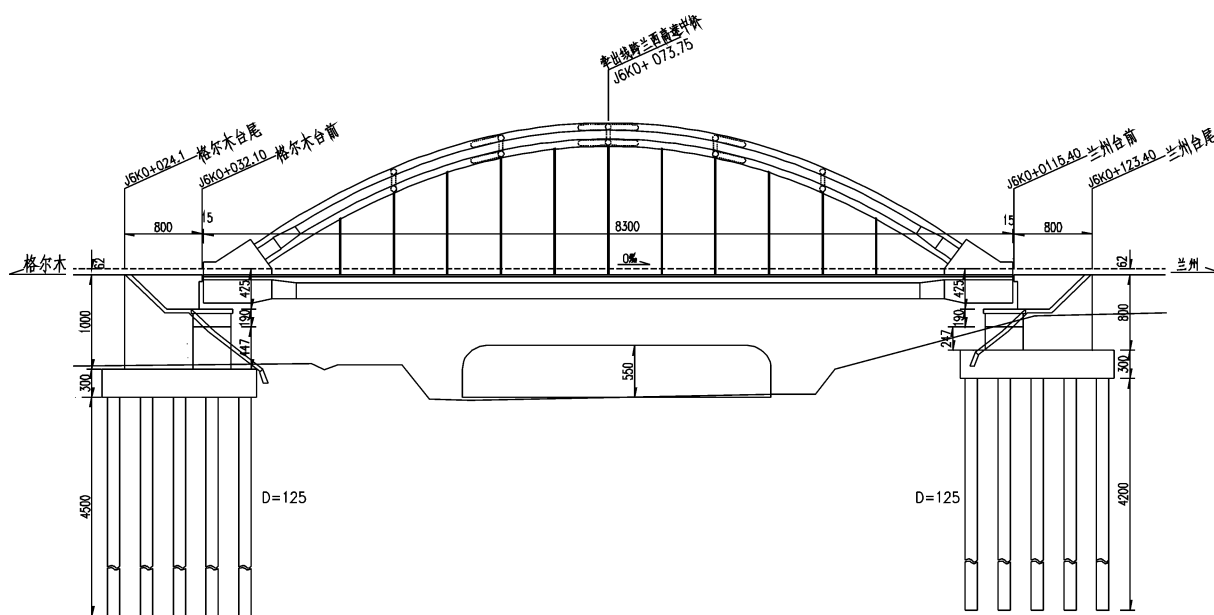


图1 系杆拱立面布置(单位:cm)

Fig. 1 Elevation layout of tied arch bridge (Unit: cm)

收稿日期:2012-02-21 修改稿日期:2013-05-05

作者简介:葛 征(1978-),男,陕西武功人,工程师,主要从事桥梁方面研究。

刚度要求更高,故本桥设计为刚性系梁刚性拱。横桥向设两幅拱肋,拱肋轴线线形采用二次抛物线,拱轴线理论方程: $y = \frac{4f}{L^2}x(L-x)$, 其中计算跨度 $L=80.0$ m, 矢跨比 $f/L=1/5$, 计算矢高 $f=16$ m。

1.1 拱肋截面的确定

钢管混凝土拱肋属复合材料,在结构计算中采用等截面、等刚度代换。

压缩和拉伸刚度为: $EA=E_aA_a+E_cA_c$ (1)

弯曲刚度为: $EI=E_aI_a+E_cI_c$ (2)

式中, A_a 、 I_a 分别为钢管横截面的面积和对其重心轴的惯性矩; A_c 、 I_c 分别为钢管内混凝土横截面的面积和对其重心轴的惯性矩; E_a 、 E_c 分别为钢材和混凝土的弹性模量。

根据设计经验,拱肋截面拟定了三个方案,见表1。

拱肋主要承受轴力,按钢筋混凝土构件进行强度及应力检算。在计算中把钢管混凝土折算成相应的钢筋混凝土,没有考虑钢管的套箍作用,沿用钢筋混凝土结构的设计理论,使设计简洁明了。

截面强度检算:
$$\sigma_c = \frac{N}{A_0} + \frac{\eta M}{W_0} \quad (3)$$

经过截面验算,上述方案计算结果见表2。

通过验算结果,方案I及方案II的混凝土压应力及钢筋应力均超限,不满足规范要求,拱肋截面选择方案III,哑铃型截面。除吊杆中心两侧共1.5 m范围和拱脚预埋段部分缀板间填筑C50微膨胀混凝土外,缀板间其余位置空置。同时,根据结构不同部位的受力情况,在上、下弦管及钢缀板内侧设置相应加劲构件。

1.2 拱肋稳定性分析

拱以面内受力为主,分支屈曲从空间形态上可分为面内分支屈曲和面外分支屈曲^[1]。

1.2.1 拱肋平面内稳定性分析

该项分析是把拱肋换算为相当长度的压杆,按承受最大水平推力的中心受压杆件进行检算,其计算长度 L_0 按下式计算:

$$L_0 = \pi \sqrt{\frac{8f}{KL}} \cdot L \quad (4)$$

其中: L 为拱的跨度; f 为拱的矢高; K 值按规范中表5.2.13取值^[3]。

1.2.2 拱肋平面外稳定性分析

用横撑联系起来的拱肋,横向刚度是以整个结构按立体空腹桁架的工作来确定,用横撑联系的肋拱稳定计算是一个比单独肋拱的计算更为复杂,采用近似的计算方法,即将它当做长度等于拱轴长度的平面空腹桁架来分析,采用拱跨度1/4点处的纵向力作为这个平面桁架的弦杆中的压力。

临界力按铁摩辛柯的组合杆件公式计算:

$$N_{cr} = a_0 \frac{\pi^2 EI}{l_a^2} \quad (5)$$

$$a_0 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI}{l_a^2} \left(\frac{ah}{12EI_p} + \frac{a}{26EI_n} \cdot \frac{1}{1-\beta} \right)} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{N_{cr} a^2}{2\pi^2 EI_n} \quad (7)$$

表1 拱肋标准截面

Tab.1 Standard section of the arch rib

项目	方案I	方案II	方案III
弦管直径/mm	850	900	850
弦管壁厚/mm	18	20	18
弦管数量/根	2	2	2
拱肋高度/mm	2 200	2 200	2 500
缀板高度/mm	650	550	830
缀板厚度/mm	18	20	18
缀板数量/片	2	2	2
缀板外距/mm	500	500	500

表2 主力作用下拱肋截面验算结果

Tab.2 Main calculation results of rib section under main forces

项目	方案I	方案II	方案III
混凝土容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	25	25	25
混凝土弹性模量/MPa	3.55E+04	3.55E+04	3.55E+04
钢弹性模量/MPa	2.10E+05	2.10E+05	2.10E+05
截面受力特征	大偏心	大偏心	小偏心
混凝土压应力 σ_c /MPa	23.3	20.8	12.2
钢筋压应力 σ_g /MPa	232	207	
钢筋拉应力 σ_g /MPa	158.2	140.2	

其中: a 、 h 为节间长度及弦杆轴线间的距离; I_p 、 I_n 为横撑和弦杆对竖轴的惯性矩; l_a 为拱轴线长度^[3].

1.2.3 拱肋特征值屈曲分析及横撑布置形式的选择

拱肋的稳定性分析是确定拱肋尺寸及横撑布置形式的主要依据,通过有限元计算软件 midas 进行空间建模,对拱肋进行特征值屈曲分析,结构模型见图 2.

在拱肋和横撑结构尺寸确定的情况下,影响拱肋稳定性的主要因素就是横撑的布置形式,我们分别考虑了五种横撑布置形式,以确定横撑的最优布置形式.各种情况下计算结果见表 3.

表 3 横撑布置形式及结构最小屈曲因子
Tab.3 Brace layout form and the minimum buckling factor of the structure

编号	横撑布置形式	结构最小屈曲因子
No. 1	+ + + +	4.05
No. 2	K + + + + K	4.58
No. 3	+ K + + K +	4.23
No. 4	K + + * + + K	5.00
No. 5	+ K + * + K +	7.68

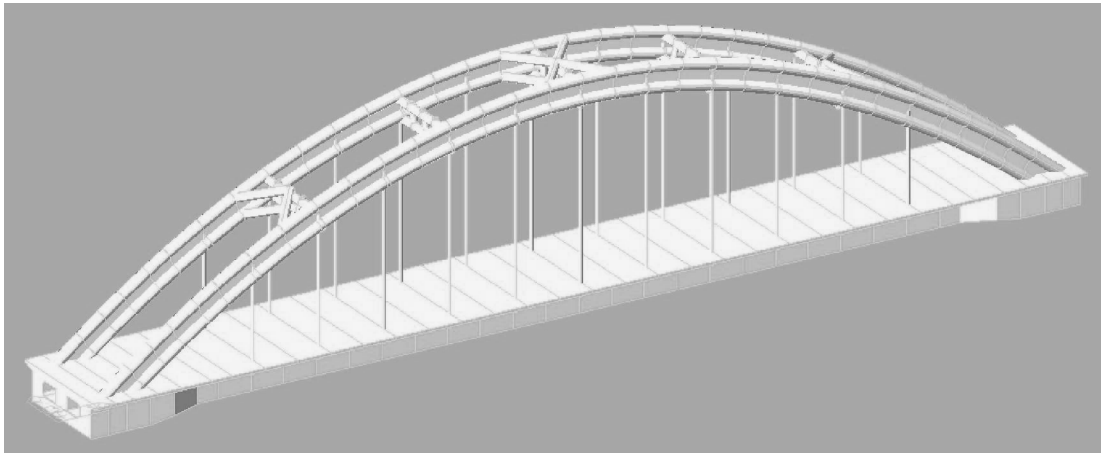


图 2 结构模型图
Fig.2 Structure model chart

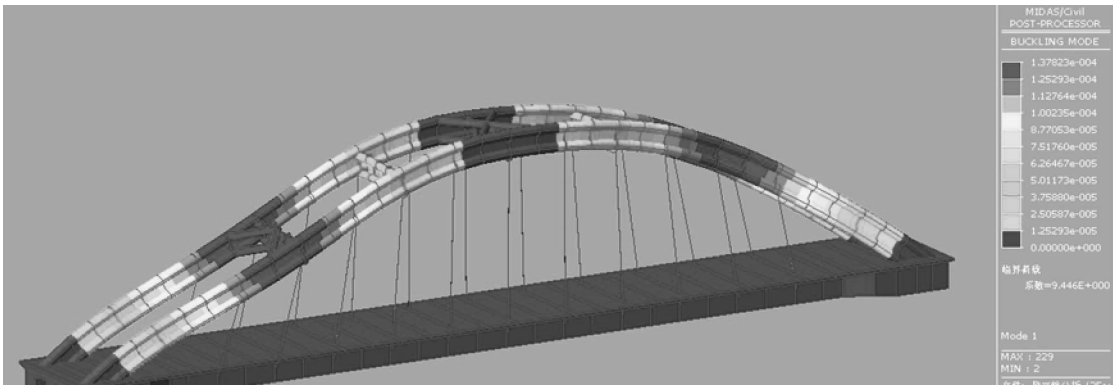


图 3 结构特征值屈曲分析图示
Fig.3 Characteristic value and buckling analysis of the structure

特征值屈曲分析属于线性分析,它能够预测临界失稳力的大致所在,作为非线性屈曲分析的初步评估作用是非常有用的,可以帮助我们确定合理的构造尺寸及结构布置.根据计算结果,第五种横撑布置形式为最佳选择,结构最小屈曲因子为 7.68.

2 吊杆计算与分析

全跨共设 11 对吊杆,吊杆纵向关于梁跨中心线对称布置;吊杆横向中心距 6.8 m,纵向距离 5.5 m.吊杆张拉端位于拱肋上缘.吊杆拟采用 PES·ECW(FD)7-73 或 PES·ECW(FD)7-85 双层 HDPE 低应力全防腐环氧喷涂平行钢丝绳索体.可根据吊杆破断力安全系数来确定.

PES • ECW(FD)7-73 环氧喷涂高强钢丝索体破断张力:

$$N_{cr} = 73 \frac{\pi d^2}{4} \times 1\,670 = 73 \times \frac{\pi \times 7^2}{4} \times 1\,670 = 4\,691\,647\text{ N} = 4\,691.647\text{ kN} \quad (8)$$

PES • ECW(FD)7-85 环氧喷涂高强钢丝索体破断张力:

$$N_{cr} = 85 \frac{\pi d^2}{4} \times 1\,670 = 85 \times \frac{\pi \times 7^2}{4} \times 1\,670 = 5\,462\,876\text{ N} = 5\,462.876\text{ kN} \quad (9)$$

各吊杆在荷载作用下最大张力及破断安全系数见表4.

通过计算分析发现,吊杆截面的大小由受力确定,与吊杆间距、桥宽及活载等级有关,而与桥的跨径无关.吊杆破断力安全系数一般按容许应力法设计,取值为2.5~3.0,本桥吊杆破断力安全系数计算值按不小于4.0设计.

吊杆作为承受疲劳荷载作用的构件,规范规定应检算钢筋应力幅.本桥吊杆应力幅按光面钢丝考虑,应力幅限值为150 MPa^[3].荷载幅值为活载的最大最小代数差,不考虑冲击影响.各吊杆应力幅见表5.

吊杆在整个梁拱组合体系中起着传递构件荷载的作用.合理布置吊杆间距,可减少主梁的弯矩,使恒载大部分转换成拱的轴力.吊杆的张力分级加载及加载顺序对成桥状态拱肋及主梁内力影响很大,设计中可反复调整,使梁拱中的恒载内力达到期望状态,在施工过程中亦可以通过合理地控制以达到优化的目标,最终使成桥状态达到满意的内力结果.

表4 吊杆最大张力及破断安全系数

Tab. 4 The maximum stressing force and rupturable safety factor for suspender

编号	主力/kN	主力+附加力/kN	PES • ECW(FD)7-73 环氧喷涂高强钢丝索体破断安全系数	PES • ECW(FD)7-73 环氧喷涂高强钢丝索体破断安全系数
No. 1	2 528.5/2	2 575.9/2	3.64	4.24
No. 2	2 421.2/2	2 457.5/2	3.82	4.45
No. 3	2 200.7/2	2 231.1/2	4.21	4.90
No. 4	2 466.4/2	2 493.6/2	3.76	4.38
No. 5	2 213.4/2	2 239.2/2	4.19	4.88
No. 6	1 991.3/2	2 016.5/2	4.65	5.42

表5 吊杆应力幅

Tab. 5 Stress ranges of the suspenders

编号	活 载			吊杆面积/mm ²	应力幅值/MPa
	T_{\max}/kN	T_{\min}/kN	$T_{\max} - T_{\min}/\text{kN}$		
No. 1	535.426/2	-2.941/2	538.367/2.5	2 809.369 2	76.7
No. 2	577.888/2	-2.393/2	580.281/2.5		82.6
No. 3	596.597/2	-2.026/2	598.623/2.5		85.2
No. 4	603.724/2	-1.811/2	605.535/2.5		86.2
No. 5	604.997/2	-1.696/2	606.693/2.5		86.4
No. 6	603.051/2	-1.640/2	604.691/2.5		86.1

3 梁拱组合静力计算与分析

3.1 主梁构造尺寸

主梁既承受拱肋传递的拉力,又承受恒载及活载分配的弯矩,按全预应力混凝土构件计算.根据规范要求,主梁不出现拉应力,强度安全系数大于2.0,抗裂安全系数大于1.2^[4].主梁跨中横截面见图4,主梁纵向预应力布置见图5.

3.2 梁拱组合静力计算与分析

箱梁划分为34个单元,拱肋划分为32个单元,吊杆划分为11个单元,全部结构共划分为77个单元,所有单元均按梁单元建立模型.结构分析软件采用西南交通大学编制平面结构有限元结构分析软件BSAS程序.计算过程中考虑荷载包括:结构自重、预应力、施工临时荷载、中活载、温度力等,并考虑了施工过程中混凝土的收缩、徐变引起的内力变化以及对预应力损失的影响.按照最不利组合进行检算,主要结果见表6^[2-4].

通过计算分析,梁拱组合结构体系,系梁的刚度对拱肋弯矩及全桥的刚度影响很大,一般对公路桥梁而言可采用柔性系梁,用以平衡拱肋的水平推力,对于铁路桥梁而言可采用刚性系梁,提高全桥的整体刚度.

4 结 语

梁拱组合体系结构设计多样,设计者可根据具体桥梁的孔跨布置调整拱肋矢跨比、拱肋高度、主梁高度及吊杆间距,使得结构设计趋于合理. 通过对该结构的计算分析,得出以下几个观点,敬请同行批评指正.

(1)梁、拱刚度比. 对于活载比重较大,对桥梁刚度要求较高的铁路桥梁,在线路高程容许的条件下尽量保证主梁高度,而对于恒载比重较大的公路桥梁,则应根据结构和美观要求综合考虑确定合理的梁拱刚度比.

(2)合理的吊杆间距及张拉力. 吊杆的作用使得主梁跨度减小的同时将部分结构自重和外荷载效应传递至拱肋,梁拱组成一个有效的抗力体系. 吊杆间距对主梁高度影响很大,合理调整吊杆张拉力,使梁拱中的恒载内力趋于设计期望值,因此,设计中应根据主梁高度合理布置吊杆间距及张拉力.

(3)拱肋屈曲安全性. 影响拱肋面外屈曲特性的因素较多,主要有钢管直径和壁厚、吊杆间距及横撑布置形式. 其中钢管截面尺寸和横撑布置为主要控制因素. 布置横撑时应根据梁拱设计情况和屈曲模态选择横撑的合理布置形式,有效提高拱肋的屈曲安全系数.

参考文献 References

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
CHEN Bao-chun. Steel Tube Concrete Arch Bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [2] 铁建设[2005]285 新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
Railway Construction[2005]285 Interim design provisions for a new 200 km/h mixed passenger and freight railway [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [3] TB 10002. 1-2005 铁路桥涵设计基本规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
TB 10002. 1-2005 Fundamental code for design on railway bridge and culvert[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [4] TB 10002. 3-2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
TB 10002. 3-2005 Code for design on reinforced and prestressed concrete structure of railway bridge and culvert. [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.

Calculation analysis of an 80 m girder- arch combination bridge in the hub reconstruction

GE Zheng

(China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The application or theory research of the girder-arch combination bridge is still under progress. The article takes the calculation analysis of a 80 m girder-arch combination bridge in the hub reconstruction as study object, for the main components of the girder-arch combination bridge such as the main girder, the arch and the suspenders, the general simulation technology is used, with an aim to find the unique mechanical behaviors of this kind of special bridge, and this could be references for bridge engineers.

Key words: girder-arch combination bridge; structure analysis; buckling analysis