

文章编号: 0451-0712(2006)04-0120-04

中图分类号: U448.22; U442.55

文献标识码: A

大跨径钢管混凝土拱桥的稳定与振动

彭 卫¹, 张新军²

(1. 金华职业技术学院 金华市 321017; 2. 浙江工业大学建筑工程学院 杭州市 310014)

摘 要: 通过理论研究和数值计算, 详细分析了大跨径钢管混凝土双肋拱桥的侧倾稳定性和地震响应。首先, 根据双肋拱桥结构在竖向均布荷载作用下的侧倾稳定临界力的近似解析解, 讨论了横撑设置、横撑刚度等因素对稳定性的影响。其次, 基于多点激振理论和拟静力位移概念, 介绍了拱桥结构的动力特点和地震动作用下的响应, 并讨论了行波效应的影响。分析表明, 地震行波作用对大跨径拱桥影响很大, 横撑设置对稳定性敏感。

关键词: 拱桥; 稳定性; 地震反应; 行波效应; 钢管混凝土

近十几年来, 大跨径钢管混凝土拱桥在公路和城市桥梁中得到了普遍的应用, 跨径超过 200 m 的有几十座, 使得大跨径拱桥稳定和抗震问题以及地震行波效应的研究日益显得重要。组拼拱的侧倾临界荷载在很大程度上取决于撑架的刚度和布置方式, 横撑的布置既要满足桥梁使用阶段和施工各阶段的稳定性要求, 又要满足美观和净空的需要。虽然采用有限元法和计算机程序求组拼拱的侧倾临界荷载并不困难, 但是对于结构工程师来说, 从物理概念上了解撑架效应将有助于在设计中考虑如何提高组拼拱的侧倾稳定性。国内外对大跨径斜拉桥、悬索桥在地震行波作用下的研究开展较多, 对拱桥则少见。现行规范对大跨径钢管混凝土拱桥的抗震性能尚无明确的规定, 说明这类桥梁的地震反应性能的研究还有许多工作要做。本文以几座大跨径中承式钢管混凝土拱桥为研究对象, 详细分析其稳定性及影响因素、动力特性和地震反应性能。

1 双肋拱桥侧倾临界荷载的近似解析解

以径向荷载作用下的双肋组拼圆弧拱为研究对

象。拱侧倾后, 空间坐标系 x 轴拱向拱肋侧向, y 轴为径向, z 轴沿拱肋切向, 三个方向的线位移和角位移分别是 u, v, w 和 β, γ, θ 。则几何方程和物理方程分别为式(1)和式(2):

$$\left. \begin{aligned} K_y &= \frac{\theta}{R} - \frac{dv}{ds^2}, \\ K_z &= \frac{d\theta}{ds} + \frac{1}{R} \frac{du}{ds} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} EJ_y K_y &= M_\eta, \\ GJ_d K_z - (EJ_\omega K_z)' &= M_\zeta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: K_y, K_z 为绕 y 轴的侧向挠曲率和绕 z 轴的扭曲率; M_η, M_ζ 为绕 y 轴的弯矩和绕 z 轴的扭矩; EJ_y, GJ_d, EJ_ω 为拱肋的侧向弯曲刚度、扭转刚度和翘曲刚度。

拱侧倾后, 拱肋的总体变形能 U 等于侧向弯曲变形能 U_η 与扭转变形能 U_ζ 之和, 即:

$$U = U_\eta + U_\zeta = \frac{1}{2} \int_s M_\eta K_y ds + \frac{1}{2} \int_s M_\zeta K_z ds \quad (3)$$

在组拼拱中, 由于横撑的抗弯刚度远大于拱肋的侧向抗弯刚度, 所以当发生侧倾时, 横撑将迫使拱肋发生局部挠曲。先求出一个节间的局部弯曲变形

收稿日期: 2005-12-12

辆应限载、限速通行。

若大桥需通行大型设备及工程车辆, 必须进行加固。

参考文献:

[1] JTG D60-2004, 公路桥涵设计通用规范[S].

[2] JTG B01-2003, 公路工程技术标准[S].

[3] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[4] JTJ071-98, 公路工程质量检验评定标准[S].

[5] 交通部公路科学研究所. 公路桥梁承载能力评定规程 (2003 年 4 月征求意见稿).

能和横撑变形能,然后将它们在节间长度 d 范围内分摊,最后在全拱长 s 上积分,可得拱肋局部弯曲变形能和横撑变形能如下:

$$U'_y + U_{by} = \frac{3EJ_{by}}{bd} \eta_1 \cdot \frac{1}{R} \left(\frac{2\pi}{\alpha} \right)^2 \cdot \frac{\alpha}{2} \cdot c_2^2 \quad (4)$$

式中: U'_y 、 U_{by} 为拱肋局部变形能、横撑变形能; $\eta_1 = \frac{1}{1 + J_{by}d/2J_yb}$; EJ_{by} 为横撑的侧向抗弯刚度; b 、 d 为拱肋的间距和横撑的间距。

外力势能为:

$$V = \frac{q}{2} \int_0^\alpha \left(\frac{du}{d\phi} \right)^2 d\phi \quad (5)$$

按Ritz法的概念,拱侧倾后其空间弯扭平衡状态的标志是总势能 Π 具有极值,即:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial c_i} = 0 \quad (6)$$

$\Pi = U + V + U'_y + U_{by}$,为系统的总势能; c_i 为假定位移函数中的参数。

取侧倾位移函数为:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= c_1 \left(1 - \cos \frac{2\pi\phi}{\alpha} \right) \\ u &= c_2 \left(1 - \cos \frac{2\pi\phi}{\alpha} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),并令 c_1 、 c_2 前的系数行列式为零,可得侧倾临界荷载表达式:

$$q_{cr} = \frac{6}{R} \cdot \frac{EJ_{by}/(bd)}{1 + J_{by}d/(2J_yb)} + \frac{EJ_y}{R^3} \left(\frac{2\pi}{\alpha} \right)^2 \cdot \frac{1 + 2(\lambda - 1) \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right)^2 + 3 \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right)^4}{1 + 3\lambda \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right)^2} \quad (8)$$

式中: $\lambda = \frac{EJ_y}{GJ_d}$

式(8)中的前一项反映了横撑的刚度与间距 J_{by} 的影响。减少横撑间距以及增大横撑刚度都有利于提高双肋拱的侧倾稳定性。横撑的刚度影响与拱肋的侧向抗弯刚度大小有关,并且横撑的设置并不是间距无限小为最好,更重要的是影响到拱肋的失稳模态。

2 横撑的设置与稳定性分析

为了从定量上说明横撑设置对大跨径钢管混凝土双肋拱桥稳定性的影响,这里以6座桥例进行空间有限元分析,桥梁概况见表1,横撑设置情况见表2,主要工况的稳定系数见表3。

表1 拱桥桥例概况

桥名	跨径 m	矢跨比	桥宽 m	肋间距 m	设计荷载
南海三山西大桥	200	1/4.5	28.0	17.2	汽车-20级,挂车-100
千岛湖南浦大桥	330	1/5.5	16.0	13.0	汽车-20级,挂车-100
广州丫髻沙大桥	344	1/4.5	36.0	35.95	汽车-超20级,挂车-120
广西三岸邕江大桥	274	1/5	32.8	20.4	汽车-超20级,挂车-120
浙江三门健跳大桥	245	1/5	22.8	17.4	汽车-20级,挂车-100
钱塘江四桥	196	1/4	30.6	29.4	汽车-20级,挂车-100

表2 横撑设置情况

桥名	拱肋长 m	宽跨比	横撑设置	横撑间距 m
南海三山西大桥	220	28/200	9条平行横撑	22.0
千岛湖南浦大桥	363	16/330	13道K撑	22.7
广州丫髻沙大桥	378.4	36/344	6组米字撑, 2组K撑	25.2
广西三岸邕江大桥	301.4	32.8/274	8道格构撑	27.4
浙江三门健跳大桥	269.5	22.8/245	7道格构横撑	27.0
钱塘江四桥	215.6	30.6/196	7道格构横撑	27.0

注:为便于分析,1组米字撑按2组K撑计算横撑间距。

表3 稳定系数

工 况	三岸邕江 大桥	健跳大桥	三山西 大桥	千岛湖 大桥
空钢管双铰拱	6.00	6.07	2.20	
体系转化为无铰拱	12.36	5.41	7.40	
灌注上弦混凝土	4.00	4.00	4.90	
拱肋自重+桥道恒载	4.60	5.63		5.27
恒载+活载+风力	3.76	5.54		4.85

从表1~表3可以看出,对于宽跨比较小的拱桥(如千岛湖南浦大桥)或刚度较小的平行横撑(如南海三山西大桥),横撑间距要小一点。刚度较大的米字撑对提高拱肋的侧倾稳定性作用明显。

下面进一步以浙江三门健跳大桥的稳定性计算结果来说明横撑的布置方式对主拱肋的稳定系数以及失稳模态的影响。该桥主拱长245 m,拱轴线为二次抛物线,每条拱肋由4根直径为800 mm的钢管组成,并由缀板和缀条构成一高4.4 m、宽1.9 m的断面,桥梁全宽22.8 m。桥型布置见图1所示。从表4计算结果可以看出:

(1)在拱顶弯矩影响线反弯点附近布置横撑对稳定安全度贡献最大;

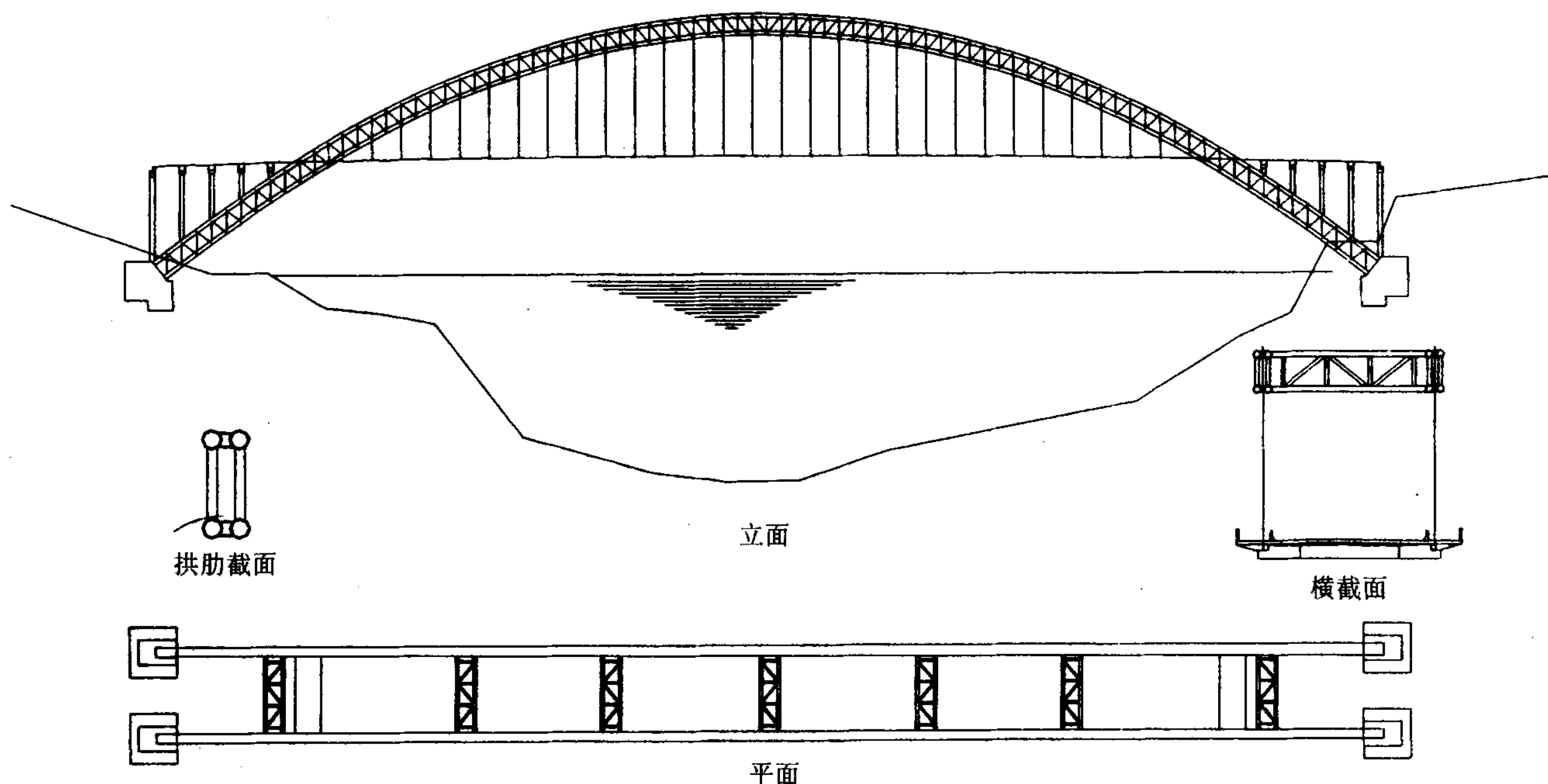


图 1 桥型布置

表 4 横撑布置对稳定系数的影响

序号	横撑位置	稳定系数
1		2.61
2		4.94
3		4.92
4		9.29
5		5.65
6		14.3

(2)在布置了上述两道横撑后,再在拱顶位置布置一道横梁,可显著改善拱肋的面外稳定性。

3 动力特性和抗震分析

3.1 多点激振动力平衡方程

桥梁结构在各支承处受到地面运动的作用,其运动方程为:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_s \\ \ddot{y}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & C_{sb} \\ C_{sb}^T & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_s \\ \dot{y}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & K_{sb} \\ K_{sb}^T & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_s \\ y_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式中: \ddot{y}_s 、 \dot{y}_s 、 y_s 为非支承处自由度的绝对加速度、速度、位移向量; M_s 、 C_s 、 K_s 为非支承处自由度的质量、阻尼、刚度矩阵; \ddot{y}_b 、 \dot{y}_b 、 y_b 为支承处自由度的绝对加速度、速度、位移向量; M_b 、 C_b 、 K_b 为支承处自由度的质量、阻尼、刚度矩阵; F_b 为支承反力。

基于拟静力位移的概念,多点激振下的总结构反应位移可分离为动力反应位移和拟静力位移,可表示为:

$$y = \begin{Bmatrix} y_s \\ y_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_s^d \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} y_s^s \\ y_b \end{Bmatrix} \quad (10)$$

对于给定地面运动位移 y_b , y_s^s 可由下式求得:

$$y_s^s = -K_s^{-1} K_{sb} y_b = R y_b \quad (11)$$

式中: R 为拟静力位移影响矩阵。

忽略由于支承运动速度为 \dot{y}_b 产生的阻尼力,则式(1)可简化为:

$$M_s \ddot{u}_s^d + C_s \dot{u}_s^d + K_s u_s^d = -M_s R \dot{y}_b \quad (12)$$

由于结构是非线性的, C_s 、 K_s 、 R 均是时间的函数,为了便于分析,式(12)用增量的形式给出:

$$M_s \Delta \ddot{u}_s^d + C_s \Delta \dot{u}_s^d + K_s \Delta u_s^d = -M_s R \Delta \dot{y}_b = \Delta p(t) \quad (13)$$

由式(13)采用逐步积分法可求出节点的动力位移及加速度增量,节点的总位移为节点的动力位移与拟静力位移之和。每一步单元内力是动力位移量引起的内力与拟静力位移引起的内力之和。

3.2 有限元模型与动力特性

这里选取表 1 中的 4 座钢管混凝土拱桥进行数据计算。在进行空间有限元分析时,将单片主拱肋的几根钢管作为一梁单元处理。横撑、立柱、横梁采用梁单元,吊杆、系杆等用杆单元模拟,桥面板用板单元模拟。桥面在与拱肋相交处设有伸缩缝,因此建模时应将此处断开,用主从约束关系仿真。

桥梁结构动力特性是进行桥梁动力分析的基本资料,因此将4座钢管混凝土拱桥前8阶的自振频率列于表5。

表 5 自振频率 Hz

桥 名	1	2	3	4	5	6	7	8
千岛湖南浦大桥	0.298	0.542	0.659	0.885	1.149	1.295		
广州丫髻沙大桥	0.288	0.383	0.539	0.552	0.631	0.688	0.697	0.786
广西三岸邕江大桥	0.297	0.479	0.489	0.552	0.667	0.786	0.832	0.885
浙江三门健跳大桥	0.299	0.679	0.859	0.951	1.347	1.630	1.668	1.683

从表5的计算结果以及振型分析中可以发现:
(1)一阶自振频率基本相等,且振型均为面外侧移,说明此类桥梁跨径大,横向刚度相对较弱。
(2)高阶振型的振动特性受结构形式、杆件之间连接方式、支承条件等的影响而有所不同。当主拱圈较弱、两肋之间联系不强时,如淳安南浦大桥,二阶振型为面外双波反对称偏移;对于采用密集“米”撑的双肋拱桥,横向挠曲刚度和扭转刚度很大,如丫髻沙大桥,二阶振型为半波竖向挠曲,此时出平面的振动出现较迟。

3.3 地震反应与行波效应

在大跨径拱桥的地震反应中,行波效应的影响是最受关注的,它将产生由于拱脚相对位移引起的拟静力作用以及激发起对称振型对地震反应做贡献,从而使地震反应增大,文献[7,8]表明:

- (1)考虑行波效应后,拱脚的弯矩反应一般增大30%到一倍多;
- (2)考虑行波效应后,各典型截面的横向位移减小,而竖向位移增大;
- (3)在同步激振的状态下,由于只有反对称振型作用,因此拱顶弯矩为零,在非同步激振的条件下,对称振型同样起作用,拱顶内力发生变化;
- (4)当基本周期较小、拱的刚度较大时,在行波效应的反应中拟静力位移起控制作用,随着基本周期的增大和拱结构柔性的增大,第二对称振型将占主导地位。

4 结语

- (1)实际的大跨径钢管混凝土拱桥的拱轴线形式一般不是圆弧形而是抛物线或悬链线,桥梁荷载也是铅垂向的。在铅垂荷载作用下的抛物线拱,其曲率及轴向压力均沿拱轴变化,致使其侧倾平衡微分方程带有变系数,而只能用数值方法求临界荷载的近似解。文献[1]表明,矢跨比较小的拱,用圆弧拱代替抛物线拱来计算侧倾临界荷载是足够精确的。
- (2)双肋拱的横撑间距和刚度是影响其侧倾稳

- 定性的主要参数。横撑间距的设置既要满足拱桥在施工阶段和运营阶段的稳定性要求,又要满足美观与视觉的需要。对于宽跨比在1/20左右的双肋拱桥,横撑间距约为22 m,对于宽跨比在1/10左右的双肋拱桥,横撑间距可为27 m。
- (3)横撑的设置位置对失稳模态有直接的影响。当在拱顶设置一道横撑后,失稳形式会从两侧的两个正弦半波变为一侧的一个正弦半波。当只在拱脚附近设置横撑时,两条拱肋会各自以一个正弦半波向相反的方向侧倾。
- (4)虽然行波效应对斜拉桥结构有利,但行波地震作用对大跨径中承式钢管混凝土双肋拱桥的影响很大,特别是拱脚位于河流两岸,而两岸场地地质条件不同时,工程设计中应予以足够的重视。
- (5)大跨径钢管混凝土双肋拱桥的振动特性受主拱肋的横向刚度和肋间横撑的影响较大,可通过改变肋间横撑的布置方式和横撑刚度来提高拱桥的动力稳定性。
- (6)拱脚截面在地震作用下是危险截面,在注意拱脚的同时,还应加强拱顶截面的配筋。

参考文献:

[1] 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.
[2] 赖泉水,等.三山西大桥主桥设计简介[J].桥梁建设,1995,(4).
[3] 徐升桥,任为东,李艳明.丫髻沙大桥主桥设计[J].桥梁建设,2000,(3).
[4] 彭卫.健跳大桥技术设计[J].桥梁建设,2000,(3).
[5] 孙炳楠,等.浙江省淳安县南浦大桥整桥稳定试验与研究[R].浙江大学,2001.
[6] 广西交通规划设计院.三岸邕江大桥设计[Z].1998.
[7] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997.
[8] 郑史雄,周述华,丁桂保.大跨度钢管混凝土拱桥的地震反应性能[J].西南交通大学学报,1999,34(3).
[9] 项均帆.大跨度斜拉桥行波效应分析[J].上海:同济大学学报,1983,(2).

文章编号: 0451-0712(2006)04-0124-05

中图分类号: U443.33

文献标识码: B

钢纤维混凝土桥面抗裂性能及 设计和施工技术

王钧利

(长安大学公路学院公路桥梁与隧道陕西省重点实验室 西安市 710064)

摘 要: 基于混凝土断裂力学的基本理论,通过分析钢纤维的阻裂作用和增强效果,对钢纤维混凝土的抗裂度和裂缝宽度的计算模式进行探讨,提出了相应的公式。通过对已建钢纤维混凝土桥面长期使用性状的分析,对钢纤维混凝土桥面设计中的钢纤维类型、用量、剪力筋的设置及施工工艺等提出了具体要求。通过力学性能和使用性能综合比较,铣削型钢纤维是最佳选择;钢纤维用量的体积比宜为 0.6%~1.0%;施工时选择适宜的水灰比和振捣器具。

关键词: 桥梁工程; 钢纤维混凝土桥面; 断裂力学; 抗裂性能; 钢纤维用量; 施工工艺

水泥混凝土桥面虽然耐久性好、养护费用少,但普通水泥混凝土桥面开裂翻修的实例屡见不鲜。钢纤维的掺入,在理论上可以数倍提高水泥混凝土桥面的寿命,我国从 20 世纪 80 年代就开始修建钢纤维混凝土桥面,但一直未有大规模的使用。其原因一方面是由于水泥混凝土桥面施工控制难度大;另一方面因掺加钢纤维而使成本较高,决策者对其能否达到理想寿命没有信心。

钢纤维混凝土是在普通混凝土中随机掺入乱向分布的短钢纤维所形成的一种新型的多相复合材料。这些乱向分布的短纤维主要作用在于阻碍混凝土内部微裂缝和宏观裂缝的发生与发展,显著地提高了混凝土的抗拉强度及由主拉应力控制的抗弯强度、抗剪强度。钢纤维混凝土较好的韧性及控制裂缝的能力,弥补了混凝土的不足,成为混凝土良好的改性材料。钢纤维混凝土在发达国家和发展中国家的

基金项目:西部交通建设科技项目(2002 318 223 29)

收稿日期:2005-11-03

Stability and Vibration of Long Span CFST Arch Bridges

PENG Wei¹, ZHANG Xin-jun²

(1. Jinhua Vocational Technology College, Jinhua 321017, China;

2. College of Architecture & Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The lateral buckling and seismic response of the space arch structure composed of double main arch ribs with transverse braces are analyzed in this paper. First, the elastic critical buckling load of this kind of structures is deduced according to the principle of minimum potential energy, the influences of the space length and the stiffness of bracing beams on the lateral stability of structure are discussed. Secondly, the seismic response behavior is systematically introduced based on the theory of multi-support seismic excitations and the conception of pseudo-static displacement. The numerical results show that the travelling wave effect has significant influence on the long span arch bridge, the arrangement of bracing beams is sensitive to stability.

Key words: arch bridge; stability; seismic response; travelling wave effect; CFST