

外倾式拱桥稳定性多参数优化研究

Multiple Parameters Optimization for Stability of Extraversive Arch Bridge

陆树荣¹, 柳颖臣²

LU Shu-rong¹, LIU Ying-chen²

1.湖州市交通规划设计院, 浙江 湖州 313000

2.湖州市公路管理处, 浙江 湖州 313000

1.Huzhou Traffic Plan and Design Institute of Zhejiang, Huzhou 313000, Zhejiang, China

2.Huzhou Highway Management of Zhejiang, Huzhou 313000, Zhejiang, China

【摘要】以某外倾式拱桥为工程背景,建立全桥空间有限元计算模型,分4个工况计算了该桥的稳定安全系数,通过改变拱肋外倾角度、拱肋刚度、端横梁刚度以及吊杆布置形式,计算了不同设计参数下结构在“恒载”工况以及“恒载+活载”工况的失稳特征值。结果表明,拱肋的刚度对稳定性起着决定性作用;吊杆的布置形式只改变拱肋的面内刚度,对于面外刚度没有影响。

【Abstract】The full bridge space finite element calculating model is established in terms of a specific project of arch bridge. The stability coefficient for the bridge is calculated under four kinds of working condition. The destabilization characteristic value of structure designed with different parameters is calculated under the working conditions of dead load and the dead load and live load combination by changing the extraversive angle of arch rib, stiffness of arch rib, stiffness of end floor beam and the layout of steeve. The result shows that the stiffness of arch rib plays an decisive part in stability, and the layout of steeve only changes the in-plane stiffness of arch rib and keep the out-plane one unchanged.

【关键词】外倾式拱桥;稳定性;安全系数;设计参数

【Key words】extraversive bridge; stability; safety coefficient; design parameter

中图分类号:U448.22

文献标识码:B

文章编号:1000-033X(2008)08-0063-03

0 引言

外倾式拱桥的显著特点就是外倾式的拱肋。这种桥型由于美观新颖的外形,多被用于建造城市景观桥梁。国内对于拱桥的稳定性作了许多研究,但大多集中于近年来修建较多的内倾式拱肋钢管混凝土提篮拱桥,对于外倾式拱肋的蝴蝶拱桥的稳定性,国内外的研究很少。本文以一座80 m跨径钢箱拱肋蝴蝶拱桥为工程背景,运用空间分析程序对其进行稳定性分析,试图找到稳定系数与各种设计参数(拱肋外倾角度、拱肋刚度、横梁刚度、吊杆布置形式)之间的关系。

和极值点失稳^[2],对应2类分析方法;第1类为线弹性最小特征值屈曲问题,用于确定一个理想弹性结构的理论屈曲强度;第2类为极值点问题,即考虑了结构几何非线性和材料非线性情况下的极限承载力问题。第1类与第2类稳定问题有着良好的相关性,也往往代表着第2类稳定问题的上限,所以工程中通常以第1类稳定问题的计算结果作为设计的依据。线性屈曲^[3]的主要特点是在结构未变形位置建立结构总体弹性刚度阵和几何刚度阵,最后把稳定分析转化为求解矩阵广义特征值问题。在临界载荷下,拱桥结构线性屈曲的平衡方程为

$$K_d + \lambda K_g = 0 \quad (1)$$

式中: K_d ——单元弹性刚度矩阵;

K_g ——单元几何刚度矩阵;

λ ——特征值。

1 稳定性分析的基本理论

结构失稳有2种性质根本不同的形式,即支点失稳^[1]

式(1)在数学上表现为广义特征问题,应用各种迭代方法(如逆向量迭代法、子空间迭代法等)可以很方便地求解。

2 蝴蝶拱桥的动力特性分析

2.1 工程概况

西安市某在建桥梁主跨跨径80 m,桥宽29.5 m,矢跨比为1:3.6。此桥梁拱肋采用钢箱梁变截面拱肋,由跨中的1.5 m×1.8 m(高×宽)渐变至拱脚3.0 m×3.2 m(高×宽);拱肋向外倾斜20°,拱肋的拱脚固结在下部结构中,在加劲梁与拱肋交接处设置钢横梁连接上、下游两侧拱肋,作为加劲梁在两端的支撑结构,同时增强蝴蝶拱结构的横向稳定,钢箱梁由正交异性钢板组成。全桥设置28根吊杆,初始张力为34 t。全桥结构布置如图1所示。

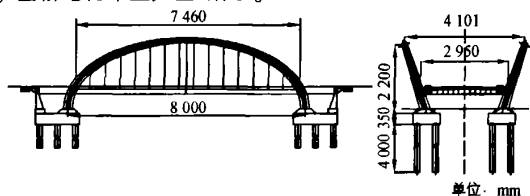


图1 拱桥结构

2.2 有限元仿真模型的建立

为了分析该桥的稳定性,采用有限元程序ANSYS对该桥进行结构分析计算。变截面拱肋及拱肋横梁采用空间梁单元(BEAM189)进行模拟,钢箱梁运用梁格法采用空间梁单元(BEAM44)进行模拟,吊杆采用只受拉空间杆单元(LINK10)模拟。计算所需的材料常数根据桥梁设计规范确定,几何常数根据桥梁设计图纸确定。有限元模型如图2所示。

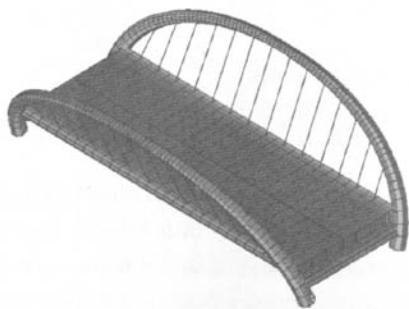


图2 有限元模型

2.3 动力特性分析

表1为结构前10阶自振频率及其对应振型。前10阶主要振型如图3~图8所示。由表1及图3~图8可得出如下几点。

(1) 该钢管蝴蝶拱桥前10阶主要振动有拱梁面外振动、拱梁面内振动、拱肋面外振动和拱梁扭转振动等4种形式,前2阶均为面外振动,且共有7阶为面外振动,说明拱肋的面外刚度相对面内和扭转刚度要小。

(2) 由于拱肋采用钢箱梁变截面拱肋,与其他钢管混

表1 结构前10阶自振频率及其对应振型

阶次	频率/Hz	振型特征
1	1.622	拱肋单波正对称侧弯
2	1.700	拱肋单波反对称侧弯
3	2.516	拱梁同向正对称竖弯
4	3.453	主梁反对称扭转
5	3.454	拱梁同向反对称竖弯
6	4.016	拱肋双波反对称侧弯
7	4.080	拱肋双波正对称侧弯
8	4.190	拱肋双波反对称侧弯+主梁反对称扭转
9	4.349	拱肋双波反对称侧弯+主梁正对称扭转
10	5.433	拱肋双波反对称侧弯+主梁正对称竖弯

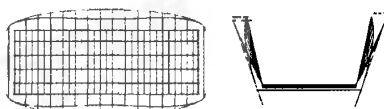


图3 拱肋单波正对称侧弯($f=1.622$ Hz)

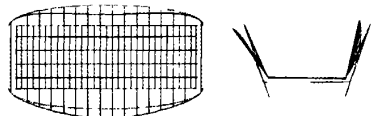


图4 拱肋单波反对称侧弯($f=1.700$ Hz)

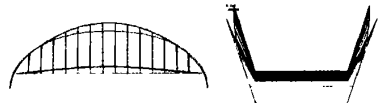


图5 拱梁同向正对称竖弯($f=2.516$ Hz)



图6 主梁反对称扭转($f=3.453$ Hz)

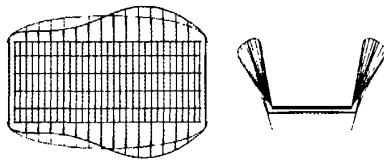


图7 拱肋双波正对称侧弯($f=4.080$ Hz)



图8 拱肋双波反对称侧弯+主梁正对称竖弯($f=5.433$ Hz)

土拱桥相比,其基频大大提高,说明拱肋刚度较大。

(3) 1阶、3阶、4阶振动频率变化较大,说明结构的面外刚度明显小于面内刚度,而面内刚度又明显小于抗扭刚度。此类桥梁更容易发生面外失稳。

(4) 综合考虑以上因素,因拱肋刚度对于结构的整体振动频率都有较大提高,该蝴蝶拱桥的稳定性应当还是能够满足要求的。

3 蝴蝶拱桥稳定性分析

3.1 荷载工况

对于该工程背景桥梁来说,其面内刚度较大,1阶失稳模态全部都属于面外失稳^[4]。在计算中考虑裸拱及成桥后运营阶段的稳定性,稳定计算按以下几种可能的不利工况进行。

- (1) 裸拱在恒载作用下。
- (2) 成桥状态恒载作用下。
- (3) 成桥状态恒载+城市A级活载作用下。
- (4) 成桥状态恒载+上游侧满布活载作用下。

3.2 稳定性分析结果

分别在4种工况下对模型进行线弹性稳定性分析。4种工况下模型的最低阶稳定性安全系数见表2。4种工况下模型的最低阶失稳模态如图9所示。

表2 4种工况下模型的最低阶稳定性安全系数

	工况1	工况2	工况3	工况4
1阶失稳特征值	151.253	47.104	35.400	40.174
1阶失稳模态描述	面外对称侧倾失稳			

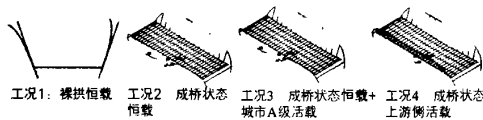


图9 4种工况下模型的最低阶失稳模态

由表2及图9可知,各工况所有1阶失稳模态均为面外对称侧倾失稳,且前几阶失稳模态均为面外失稳^[5],说明这种外倾式拱肋面内刚度可以得到保证,决定其失稳的是拱肋的面外刚度。成桥以后的稳定系数较在裸拱时有了明显下降,从151.253变到了47.104;在活荷载作用下稳定系数变化不是很大,从47.104变到了35.400。可见活载对桥梁稳定性的影响不是主要,主要的是桥梁本身的结构与自重。

4 各设计参数对稳定性的影响

4.1 拱肋外倾角度的影响

蝴蝶拱桥的拱肋外倾角度是重要的设计参数。它不仅影响全桥的景观效果,而且对结构的横向稳定性起着重要作用。背景工程桥梁外倾角度采用20°,并以20°为中心,分别取14°、17°、20°、23°、26°、29°的外倾角度对全桥恒载工况以及恒载+活载工况进行稳定性分析。计算结果如表3所示。

表3 不同拱肋外倾角对应的失稳特征值

拱肋外倾角度/(°)	1阶失稳特征值						
	恒载工况	14	17	20	23	26	29
特征值	47.311	47.242	47.104	46.370	45.959	45.358	
特征值	恒载+活载工况	35.810	35.642	35.400	34.778	34.301	33.668

由表3可以看出:随着拱肋外倾角度增大,结构1阶失稳特征值相应降低,但由于该桥设计整体刚度大,拱肋的刚度对稳定性起了决定性的作用,拱肋的外倾角度引起的稳定性

能的降低不是很明显(从14°~29°,1阶失稳特征值降低了6%)。

4.2 拱肋刚度的影响

拱肋刚度 EI 由所选钢材的类型以及设计拱肋截面的表面积所决定,以原设计拱肋刚度为基准,分别将拱肋刚度提高1.2倍、1.4倍、1.6倍、1.8倍、2.0倍对全桥进行线性屈曲分析,计算得到的失稳特征值如表4所示。

表4 不同拱肋刚度对应的失稳特征值

拱肋刚度		EI	$1.2EI$	$1.4EI$	$1.6EI$	$1.8EI$	$2.0EI$
		1阶失稳特征值	恒载	47.104	56.258	65.362	74.419
	恒载+活载	35.400	42.248	49.055	55.822	62.550	69.241

由表4可知:拱肋的刚度对整体稳定性有巨大的贡献。随着拱肋刚度的提高,结构1阶失稳特征值变化较大,当拱肋刚度提高到原来的2.0倍时,1阶失稳特征值提高了95%。

4.3 横梁刚度的影响

蝴蝶拱桥只在拱桥处有1道横梁用以增强两拱肋间的横向联系、提高整体稳定性。横梁的刚度对全桥的稳定性有一定影响,以设计横梁刚度为基准,分别将横梁刚度提高1.2倍、1.4倍、1.6倍、1.8倍、2.0倍对全桥进行线性屈曲分析,计算得到的失稳特征值如表5所示。

表5 不同横梁刚度对应的失稳特征值

横梁刚度		EI	$1.2EI$	$1.4EI$	$1.6EI$	$1.8EI$	$2.0EI$
		1阶失稳特征值	恒载	47.104	47.174	47.231	47.278
	恒载+活载	35.400	35.443	35.481	35.513	35.568	35.616

由表5可知:随着端横梁刚度的增加,对结构整体稳定性的贡献不大,主要是因为这种蝴蝶拱桥不同于拱顶带横撑的提篮拱桥,提篮拱桥的横撑与 K 撑可以很好地与拱肋形成框架结构,提高结构整体稳定性。蝴蝶拱桥只在拱肋拱脚附近设1道横梁,无法限制拱顶的横向位移,故此对抵抗结构的侧向失稳贡献不大。

4.4 吊杆布置形式的影响

不同的吊杆布置形式对单片拱肋面内刚度有所影响,但对于结构面外刚度的影响不大。采用如图10所示的3种形式布置吊杆并进行相应的全桥稳定性分析。计算结果见表6、表7。由表6、表7可知:斜吊杆与网状斜吊杆提高的只是拱肋的面内刚度,查找最低阶拱肋面内失稳特征值可以看出,



图10 吊杆布置形式

表6 不同吊杆布置形式对应的失稳特征值

	1阶失稳特征值		失稳模态描述
	恒载工况	恒载+活载工况	
竖直吊杆	47.104	35.400	面外对称侧倾失稳
斜吊杆1	45.974	34.705	面外对称侧倾失稳
斜吊杆2	43.217	32.432	面外对称侧倾失稳

(下转第68页)

即挂篮拆除后、混凝土浇筑前后、合龙束张拉后、劲性骨架锁定解除后、其余预应力束张拉后,另外对边跨合龙时增加边跨现浇段支架卸落、合龙吊架及模板拆除及临时固结解除后的工程情况进行监测,以便及时掌握主梁在以上情况下的变形情况,防止意外事故的发生,确保施工安全。

(4) 由于梁体温度滞后于环境温度,合龙时间宜适当滞后于当日最低温度的时间,使混凝土在结硬和养生过程中始终处于升温受压状态,以防混凝土裂缝的出现。

(5) 为消除日照对合龙段的影响,合龙前在悬臂梁上部采取草袋覆盖防晒及浇水降温措施,使梁上、下的温度差趋于最小,以减小悬臂段的挠度。

(6) 劲性骨架锁定和合龙段混凝土浇筑必须迅速完成,同时做好合龙前的各项施工准备工作。

(7) 合龙前对梁体上的施工临时荷载进行认真清理,合理堆放,以免影响悬臂梁的挠度。

(8) 边跨合龙时,在两悬臂端均进行配重,以减小由于不平衡而产生的挠度及内力变化。在施加配重过程中进行跟踪监测,以便及时掌握主梁悬臂端的挠度变化,配重施加结束后,及时焊接锁定合龙段的劲性骨架。配重在合龙段混凝土浇筑过程中同步卸载。

(9) 合龙段混凝土未达到设计强度的80%之前,禁止在跨中范围内堆放重物或行走施工机具,以防人为原因造成合龙段混凝土开裂。

(10) 墩梁临时锚团的释放须做到缓慢均衡,确保结构的稳定与安全。解除前、后测量各梁段的高程,以便对解除过程中各梁段的高程变化进行监控,如出现异常情况,应立即停止作业,查明原因,确保施工安全。

(11) 因边跨合龙段处于边跨现浇段与T构悬臂端之间,在夏季日照和温度的影响下,两者存在较大的挠度差异,边跨现浇段因处于刚度较大的落地支架上,高程变化很小,基本处于稳定状态。而主梁悬臂端却存在上下挠度变化,同时产生一定的竖向力。因此在边跨合龙施工过程中应加强悬臂梁的防晒和浇水工作,同时应在接近最大悬臂时加强温度与挠度变化的观测,必要时对劲性骨架的抗剪强度、边跨支架的承载力及变形作进一步的验算,确保合龙段的施工质量与安全^[3]。

(12) 为避免边跨合龙段混凝土承受过大的拉应力,在边跨现浇段梁底与底模之间铺垫1块黄油钢板,以减少边跨梁与底模支架之间的滑动摩擦,防止合龙段混凝土开裂。

2 结语

日东高速公路京杭运河特大桥的施工实践证明,本文所采用的合龙施工方法和控制措施是科学的、合理的,在同类桥梁的施工和监理中可以借鉴。

参考文献:

[1] 温庆杰,叶见曙.新旧混凝土梁横向拼接的收缩徐变效应[J].中国公路学报,2007,20(4):53-57.
 [2] 周绪红,吕忠达,狄 谨,等.大跨径简支转连续箱梁桥的线形观测与控制[J].中国公路学报,2007,20(3):54-59.
 [3] 周勇军,赵小星,宋一凡,等.连续梁桥模态分析与试验[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(3):57-61.

收稿日期:2008-02-23

[责任编辑:张宗涛]

(上接第65页)

表7 不同吊杆布置形式对应的最低阶面内失稳特征值

	最低阶面内失稳特征值	失稳阶次	失稳模态描述
竖直吊杆	144.951	8阶	面内反对称失稳
斜吊杆1	198.913	11阶	面内反对称失稳
斜吊杆2	204.956	11阶	面内对称失稳

采用斜吊杆结构的最低阶面内失稳特征值远远大于竖直吊杆。但吊杆的布置形式对拱肋的面外刚度没有贡献,并且由于采用斜吊杆后吊杆数目增加,增加了结构自重,使得1阶失稳特征值有所降低。

4 结语

通过对工程背景桥梁进行有限元特征值屈曲分析,可以得到以下结论。

(1) 该桥在成桥后各工况下的稳定系数在35.400~47.104之间,说明该桥刚度较大,在成桥运营阶段的稳定安全性是有保证的。

(2) 所有失稳模态均为面外失稳,说明该类桥型的面外

刚度要小于面内刚度。吊杆的布置形式改变的只是拱肋的面内刚度,对于侧向的稳定性没有贡献。

(3) 拱肋外倾角度的变化对结构侧向稳定性影响不大。

(4) 拱肋刚度的提高对于结构稳定性有着巨大的改善,当拱肋刚度提高到原来的2.0倍时,结构的1阶失稳特征值提高95%。端横梁的刚度对结构的稳定性影响不大。

参考文献:

[1] 李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道工业出版社,1992.
 [2] 樊启武,钱永久,黄道全.江大桥稳定分析[J].世界桥梁,2007,35(2):42-44.
 [3] 韩 艳,陈政清.茅草街大桥动力特性有限元模拟与分析[J].公路,2003,48(3):66-70.
 [4] 邱文亮,黄才良,邓安泰.钢管混凝土拱桥拱肋侧倾角对稳定性影响的研究[J].公路交通科技,2004,21(4):53-55.
 [5] 项贻强,杨万里,潘仁泉,等.拱索体系加固的刚架拱架荷载横向分布[J].中国公路学报,2007,20(4):91-95.

收稿日期:2008-02-23

[责任编辑:张宗涛]