第 33 卷　第 1 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 33　No. 1
2020 年 3 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Mar. 2020

下承式悬链线钢管混凝土拱桥空间稳定性参数敏感性分析

关　伟

(山西省交通规划勘察设计院有限公司,山西 太原　030006)

摘要:为研究下承式悬链线钢管混凝土拱桥空间稳定性及影响该种桥型结构稳定的参数敏感性,以运城市某省道上一座 27+60+27 m 下承式悬链线钢管混凝土拱桥为背景,采用 Midas/Civil 2012 有限元软件对该桥进行建模,在成桥状态及成桥运营状态 2 种工况下对其进行稳定性分析。结果表明,该种桥型拱肋结构存在"面内失稳"和"面外失稳"2 种失稳状态,拱肋面外刚度小于面内刚度,拱肋结构失稳模态首先表现为拱肋面外侧弯失稳。同时选取拱肋间连接形式、拱肋钢管壁厚 t、拱肋单侧吊杆布置数量 n、拱肋管腔混凝土弹性模量 E、拱肋矢跨比 f/L、拱肋拱轴系数 m 等影响结构稳定性的参数进行对比分析,得出影响结构稳定性的敏感参数,可供同类型桥梁在结构稳定性设计时参考借鉴。

关键词:钢管混凝土桥;悬链线拱轴线;空间稳定性;特征值;失稳模态

中图分类号:U442.5+9　文献标志码:A　文章编号:2095-0373(2020)01-0014-06

0　引言

梁拱组合结构梁桥集"梁"与"拱"桥梁受力元素于一体,该桥型结构将梁的弯矩通过梁拱间的吊杆转化为拱的轴向压力,充分发挥了拱的受压性能,能有效降低主梁的弯矩,同时使梁的跨越能力增大,提升桥梁景观效果,在桥梁设计时被广泛采用。结构稳定性是在确定结构开始变得不稳定时的临界荷载和失稳模态,梁拱组合结构梁桥的稳定性与结构形式有密切的关系[1],结构形式不同其结构的刚度分配不同。下承式悬链线钢管混凝土拱桥结构形式属于梁拱组合结构范畴,然而该种桥型结构同样会面临结构稳定性问题,桥梁结构稳定性可分为 2 类,即第一类稳定性和第二类稳定性。第一类稳定为压屈失稳,属有平衡分支点失稳,以小位移线形理论为基础,但在工程中只有最低阶的特征值对结构失稳才具有实际意义,求出最低阶特征值即可求出结构失稳的临界荷载,特征值相应的特征向量即为结构的失稳模态,第一类稳定特征值易于求解,被广泛应用在桥梁结构稳定性设计当中[2-4]。第二类稳定为压溃失稳,属极值点失稳,以大位移非线形理论为基础,由于结构在实际工程当中都存在初始缺陷,考虑结构几何非线性及材料非线性等因素,结构稳定性在实际工程中则表现为第二类稳定性。

研究下承式悬链线钢管混凝土拱桥结构失稳对该种桥型结构的稳定、安全意义重大,本文对下承式悬链线钢管混凝土拱桥实例工程进行第一类稳定性分析,计算结构的失稳模态及稳定系数,并对影响结构稳定性的参数进行对比分析,可供同类型桥梁在结构稳定性设计时参考借鉴。

1　结构有限元模型

运城市某省道上一座 27+60+27 m 下承式悬链线钢管混凝土拱桥,桥梁按左、右幅进行设计,单幅桥宽 16.5 m。上部结构主梁梁高 1.7 m,中跨拱肋矢高 9 m,矢跨比为 1∶6.667,拱肋轴线为悬链线,拱肋截面为哑铃形,拱脚拱座为从主梁桥墩中心线处梁顶面凸起的两条边为曲线的三角形[5],其横桥向宽

收稿日期:2018-11-08　责任编辑:车轩玉　DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20180129
作者简介:关伟(1982—),男,高级工程师,研究方向为桥梁结构与方案设计。E-mail:280681026@qq.com
关伟.下承式悬链线钢管混凝土拱桥空间稳定性参数敏感性分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(1):14-19.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度同主梁梁肋宽度，吊杆采用单索面，两榀拱肋间采用 3 道一字形横撑连接。

结构采用 Midas Civil 2012 有限元分析软件进行建模，X、Y、Z 轴分别对应桥梁纵桥向、竖桥向、横桥向方向。主梁按连续梁结构图式进行约束，拱脚在主梁桥墩中心线主梁顶面处固结，拱肋间横向连接分别与两榀拱肋固结，吊杆与拱肋及主梁分别固结。全桥共划分 490 个单元，235 个节点，结构有限元模型见图 1。

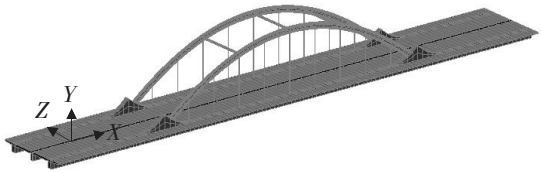

图 1　结构有限元模型图

2　结构空间稳定性分析

取桥梁成桥状态及成桥运营状态 2 种工况对结构进行第一类稳定性分析，分别计算结构稳定系数及失稳模态特征。其中，工况一：成桥阶段结构自重＋二期恒载；工况二：成桥阶段结构自重＋二期恒载＋车道荷载。工况二车道荷载按全桥布置均布荷载 10.5 kN/m，主梁中跨跨中布置集中力 360 kN 对主梁进行加载[6]。结构前 10 阶稳定系数及失稳模态特征见表 1，由于结构在工况一、工况二荷载作用下前 10 阶失稳模态特征表现相同，只图示工况二荷载作用下结构 1～5 阶、10 阶失稳模态见图 2。

表 1　结构稳定系数及失稳模态特征

失稳阶次	工况一		工况二	
	稳定系数	失稳模态特征	稳定系数	失稳模态特征
1	5.176	拱肋面外同向侧弯失稳	5.158	拱肋面外同向侧弯失稳
2	6.967	拱肋面外竖向扭转失稳	6.932	拱肋面外竖向扭转失稳
3	10.206	拱肋面外纵向扭转失稳	10.144	拱肋面外纵向扭转失稳
4	13.779	拱肋面外反向扭转失稳	13.687	拱肋面外反向扭转失稳
5	14.374	拱肋面外同向扭转失稳	14.276	拱肋面外同向扭转失稳
6	15.82	拱肋面外反向侧弯失稳	15.713	拱肋面外反向侧弯失稳
7	18.657	拱肋面外同向翘曲失稳	18.524	拱肋面外同向翘曲失稳
8	23.787	拱肋面外反向翘曲失稳	23.608	拱肋面外反向翘曲失稳
9	24.43	拱肋面外横向扭转失稳	24.246	拱肋面外横向扭转失稳
10	24.886	拱肋面内竖向弯曲失稳	24.694	拱肋面内竖向弯曲失稳

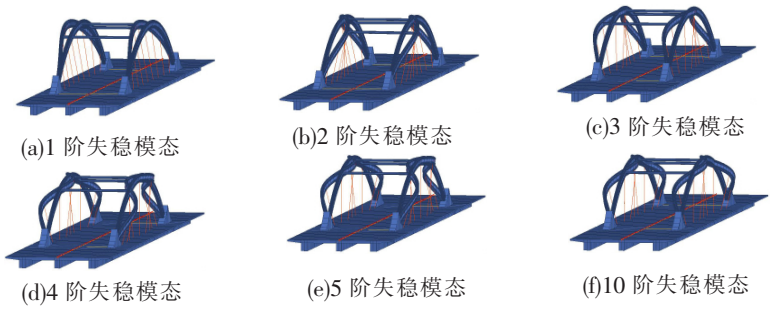
(a)1 阶失稳模态
(b)2 阶失稳模态
(c)3 阶失稳模态
(d)4 阶失稳模态
(e)5 阶失稳模态
(f)10 阶失稳模态

图 2　工况二结构失稳模态图

从表 1 可以看出，在工况一、工况二荷载作用下，结构失稳模态首先表现为拱肋面外侧弯失稳（从图 2(a)可以看出），工况二较工况一稳定系数小，其 1 阶稳定系数为 5.158。而拱肋面内失稳则出现在第 10 阶，失稳模态表现为拱肋面内竖向弯曲失稳（从图 2(f)可以看出），其 10 阶稳定系数为 24.694，拱肋面内失稳稳定系数约为面外失稳的 4.8 倍，对于下承式悬链线钢管混凝土拱桥结构的主拱弹性整体稳定系数大于 4.0 满足规范要求[7]。由于桥梁自重荷载、二期荷载、活载通过吊杆将力传递给拱肋，拱肋实际上为

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

压弯构件,拱肋面外刚度要小于面内刚度,所以拱肋的1阶失稳模态表现为拱肋面外侧弯失稳,这在设计中应给予重视,这也是该种桥型结构的一个特性。

拱肋面外失稳拱肋间横向连接对两榀拱肋协同工作起到了有益的作用,当桥面结构具有良好的整体性时,其横向刚度大于拱肋横向刚度,就拱肋构件而言,传力构件吊杆对拱肋的作用就成了外力系,吊杆对拱肋的作用属于非保向力系[8-9],拱肋面外侧弯吊杆倾斜,吊杆水平分力使拱肋恢复位置,对拱肋的稳定起到了有益作用。

3 结构空间稳定性参数敏感性分析

从拱肋间横向连接形式、拱肋钢管壁厚 t、拱肋单侧吊杆布置数量 n、拱肋管腔混凝土弹性模量 E、拱肋矢跨比 f/L、拱肋拱轴系数 m 等方面对下承式悬链线钢管混凝土拱桥结构拱肋稳定系数进行计算,分别计算结构在工况二荷载作用下结构的前10阶稳定系数。

3.1 拱肋间横向连接形式

考虑桥面净空高度要求,横向连接均匀布置于两榀拱肋间,横撑形式分别为一字形、K形、X形,一字形、X形横撑分别设置3道,K形横撑设置4道,拱肋间横向连接布置及结构稳定系数计算结果见图3、图4。

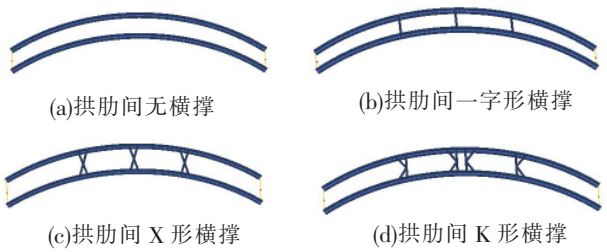

图3 拱肋间横向连接布置图

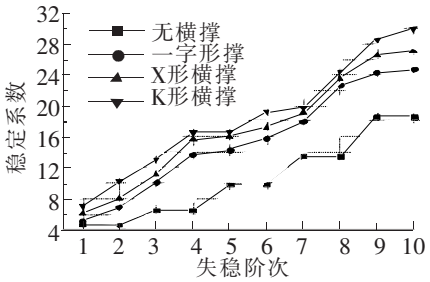

图4 不同横向连接结构稳定系数

从图4可以看出,拱肋间无横向连接结构各阶稳定系数为最小,拱肋间设置K形横撑结构各阶稳定系数最大,结构同阶稳定系数均呈增大趋势。拱肋间设置K形横撑较无横撑结构1阶、10阶稳定系数分别增加50.4%、61.4%。拱肋间横向连接形式对结构的稳定性影响明显,拱肋间设置横向连接实则限制拱肋连接节点的弯扭变形,缩短拱肋间的自由长度,提高结构的抗变形能力,所以在设计当中拱肋间横向连接应均匀布置,K形、X形横撑应优先考虑采用。

3.2 拱肋钢管壁厚 t

采用图1中模型,拱肋横向连接为一字形,拱肋钢管外径保持不变,分别取拱肋钢管壁厚 $t=0.02$ m、0.03 m、0.04 m、0.05 m 计算结构稳定系数,拱肋截面图及结构稳定系数计算结果见图5、图6。

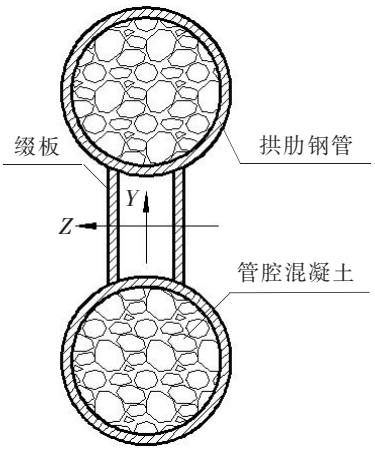

图5 拱肋截面图

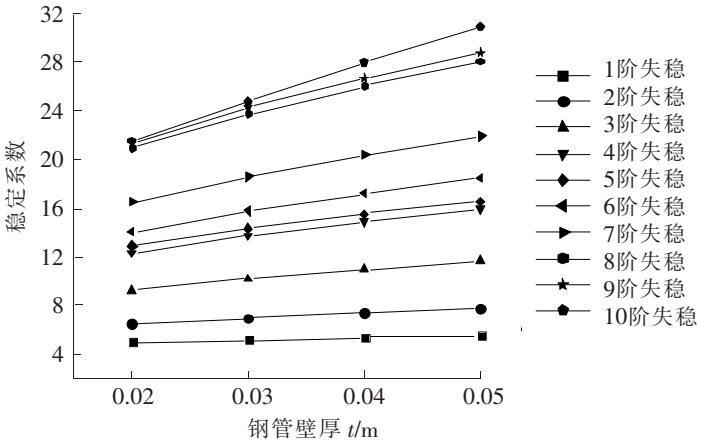

图6 不同钢管壁厚结构稳定系数

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在钢管混凝土构件受压时,拱肋钢管对管腔混凝土起紧箍作用,使管腔混凝土受压强度得以提高,增加钢管壁厚,实际上是提高拱肋构件的含钢率 a_s 及约束效应系数标准值 ξ。拱肋构件含钢率 $a_s=A_s/A_c$,而约束效应系数标准值 $\xi=(A_s\times f_y/A_c\times f_{ck})$[10]。

拱肋为一空间结构,就图 5 中钢管坐标系而言,拱肋钢管壁厚的增加使拱肋截面的 I_x、I_y、I_z 惯性矩增加,结构的抗扭刚度、侧向抗弯刚度、竖向抗弯刚度得以提高。从图 6 可以看出,随着钢管壁厚的增加结构稳定系数均呈增大趋势,拱肋钢管壁厚 0.05 m 较壁厚 0.02 m 结构 1 阶、10 阶稳定系数分别增加 12%、43.7%,拱肋钢管壁厚对结构稳定性影响明显,拱肋壁厚增加对结构的稳定性起到有益作用。但在设计选取拱肋钢管壁厚参数时,应注意钢管壁厚增加会导致拱肋用钢数量的增加,拱肋钢管壁厚 0.05 m 较壁厚 0.02 m 用钢量增加 24.9 t,增加工程造价,同时也会增加钢管施工难度。

3.3　拱肋单侧吊杆布置数量 n

采用图 1 中模型,拱肋单侧吊杆布置数量分别取 7、9、11、13,吊杆按中跨跨中对称布置,即吊杆间距分别为 7 m、6 m、5 m、4 m,结构稳定系数计算结果见图 7。从图 7 可以看出,随着拱肋单侧吊杆布置数量的增加各阶结构稳定系数呈增大趋势,拱肋单侧吊杆数量 13 较数量 7 结构 1 阶、10 阶稳定系数分别增加 1.4%、3.2%,拱肋单侧吊杆布置数量对结构的稳定性影响不明显。

3.4　拱肋管腔混凝土弹性模量 E

采用图 1 中模型,拱肋管腔混凝土弹性模量分别取 3.45×10^4 MPa、3.55×10^4 MPa、3.60×10^4 MPa、3.65×10^4 MPa,即对应的混凝土强度等级分别为 C50、C55、C60、C65,结构稳定系数计算结果见图 8。从图 8 可以看出,随着拱肋钢管内混凝土弹性模量的增加,各阶结构稳定系数呈增大趋势,拱肋管腔混凝土弹性模量 $E=3.65\times10^4$ MPa 较 $E=3.45\times10^4$ MPa 结构 1 阶、10 阶稳定系数分别增加 0.27%、1.6%,拱肋管腔混凝土弹性模量对结构的稳定性影响不明显。

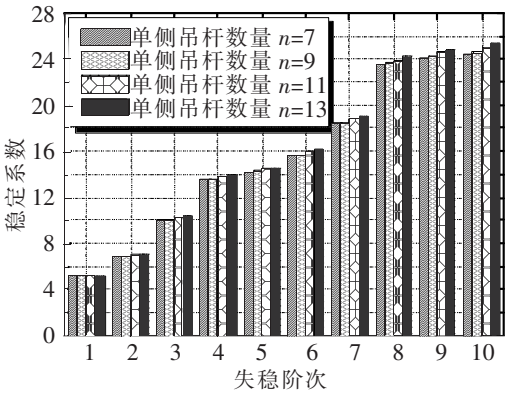

图 7　拱肋单侧不同吊杆数量结构稳定系数

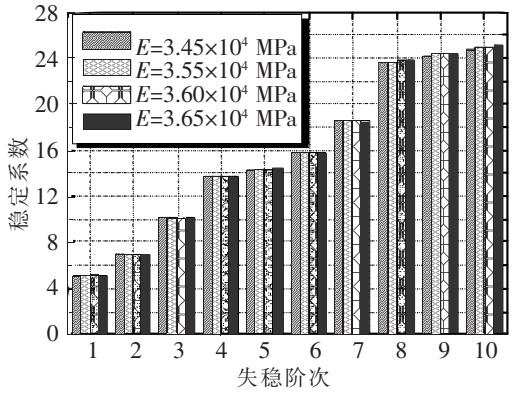

图 8　拱肋管腔混凝土不同弹性模量结构稳定系数

3.5　拱肋矢跨比 f/L

采用图 1 中模型,拱肋横向连接为一字形,中跨跨径 60 m、拱轴线拱轴系数 1.5 保持不变,分别取拱肋矢跨比为 0.13、0.17、0.22、0.28、0.38、0.5,即拱轴线对应的矢高分别为 7.8 m、10.2 m、13.2 m、16.8 m、22.8 m、30 m,计算结构稳定系数,不同拱肋拱轴线纵坐标 y_i 及结构稳定系数计算结果见图 9、图 10。

从图 9 可以看出,随着拱肋拱轴线矢跨比的增大,拱轴线纵坐标呈增大趋势,拱轴线由坦变陡,拱轴跨中增幅明显。从图 10 可以看出,随着拱肋拱轴线矢跨比的增大,当 $f/L\leqslant0.28$ 时,结构各阶稳定系数均呈增大趋势,拱轴线矢跨比 0.28 较矢跨比 0.13 结构 1 阶、10 阶稳定系数分别增加 13.9%、46.3%。当 $f/L>0.28$ 时,结构各阶稳定系数均呈减小趋势,拱轴线矢跨比 0.5 较矢跨比 0.28 结构 1 阶、10 阶稳定系数分别降低 9.6%、15.3%,拱轴线矢跨比对结构的稳定性影响明显。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

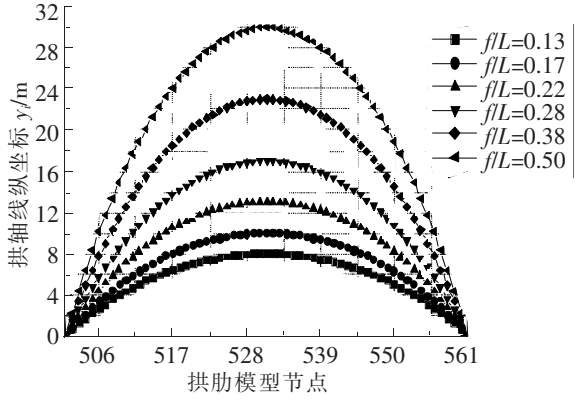

图9 拱轴线纵坐标 y_i 图

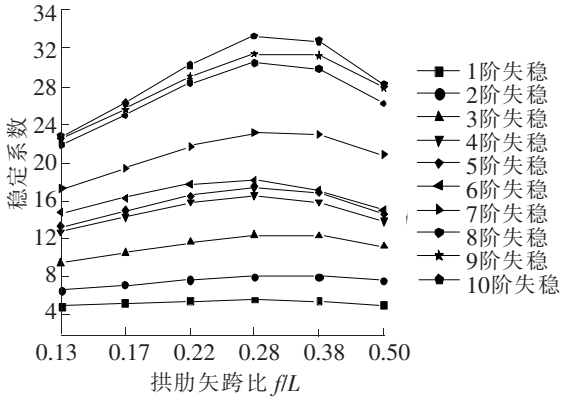

图10 拱肋不同矢跨比结构稳定系数

拱肋结构无论是面内失稳还是面外失稳,当拱轴线临界矢跨比达到0.28时拱肋结构面内、面外屈曲临界荷载可取得理想数值。这是由于在拱肋结构刚度及计算跨径一定的情况下,随着拱轴线矢跨比的增大,拱轴线长度增长,在荷载作用下当拱轴线矢跨比为0.28时,拱轴压力线偏离拱轴线最小,致使拱肋结构承受最大压力,拱肋结构的面内、面外稳定性最好。

3.6 拱肋拱轴系数 m

采用图1中模型,拱肋横向连接为一字形,中跨跨径60 m、拱轴线矢高9 m保持不变,分别取拱肋拱轴系数 m=1.5、2、2.5、3,计算结构稳定系数,不同拱肋拱轴线纵坐标 y_i 及结构稳定系数计算结果见图11、图12。

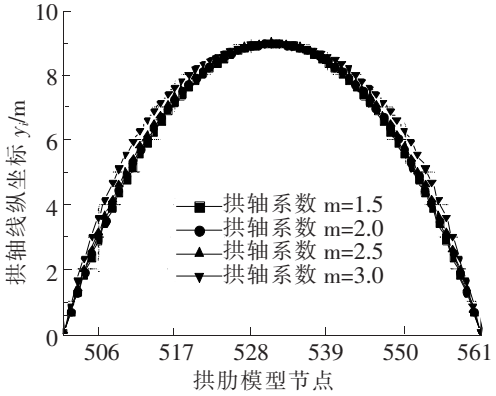

图11 拱轴线纵坐标 y_i 图

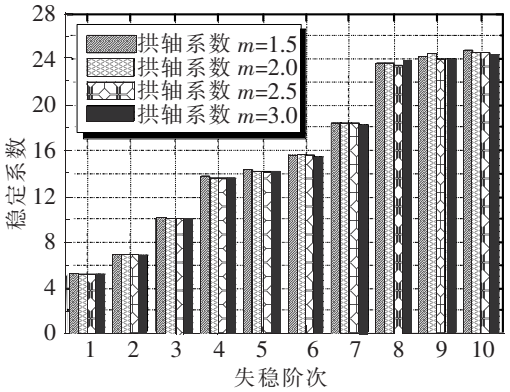

图12 拱肋不同拱轴系数结构稳定系数

从图11可以看出,随着拱肋拱轴系数的增大,拱轴拱顶及拱脚坐标不变,拱轴线纵坐标呈增大趋势,拱轴线四分点纵坐标增幅明显。拱肋拱轴系数 m=3 较拱轴系数 m=1.5 拱肋长度增长22.5 cm。从图12可以看出,随着拱肋拱轴系数的增大,结构稳定系数均呈减小趋势,拱肋拱轴系数 m=3 较拱轴系数 m=1.5 结构1阶、10阶稳定系数分别减小0.33%、0.92%,拱肋拱轴系数对结构的稳定性影响不明显。

4 结论

(1)在下承式悬链线钢管混凝土拱桥结构稳定性设计时应注意拱肋结构存在“面内失稳”及“面外失稳”2种失稳状态,拱肋面外刚度要小于其面内刚度,拱肋面外刚度应予以重视。

(2)拱肋间横向连接形式、拱肋钢管壁厚对结构的稳定性影响敏感,拱肋间横向连接应均匀布置,K形、X形横撑应优先考虑采用,以确保结构的稳定。拱肋钢管壁厚在设计选取拱肋钢管壁厚参数时应注意钢管径厚比 D/t 数值范围应满足规范要求[7]。

(3)拱肋单侧吊杆布置数量及管腔混凝土弹性模量对结构的稳定性影响非常有限,拱肋面内承受荷载时,材料以满足结构承载能力即可。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(4)拱轴线矢跨比对拱肋结构稳定性影响敏感，拱轴线临界矢跨比为 0.28 时拱肋结构面内、面外屈曲临界荷载可取得理想数值，拱轴线矢跨比的选取应综合考虑拱肋结构景观效果、材料用量、内力状态、稳定性而定。

(5)拱轴系数对结构的稳定性影响非常有限，由于拱轴线矢跨比保持不变，拱轴系数增大使拱肋长度变长，拱轴压力线偏离拱轴线有限，致使拱肋结构压力降低不明显，结构稳定性会有所降低。

参　考　文　献

[1]金成棣. 预应力混凝土梁拱组合桥梁[M]. 北京：人民交通出版社，2001.
[2]王晓斌. 钢管混凝土拱桥施工全过程稳定性分析[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2012，25(2)：28-31.
[3]关伟. 外倾式双索面矮塔斜拉桥空间稳定性分析[J]. 山西交通科技，2017(3)：46-48.
[4]韩振勇，刘 毅. 非对称空间蝶型拱桥风撑对稳定性的影响[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2016，29(3)：33-38.
[5]孙树礼. 青藏铁路拉萨河大桥[M]. 北京. 中国铁道出版社，2009.
[6]中交公路规划设计院有限公司. JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京：人民交通出版社，2015.
[7]四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院. JTG/T D65-06-2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S]. 北京：人民交通出版社，2015.
[8]李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京：中国铁道出版社，2002.
[9]项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京：人民交通出版社，2001.
[10]陈宝春，郑皆连. 钢管混凝土拱桥实例集(一)[M]. 北京：人民交通出版社，2002.

The Parametric Sensitivity Analysis on the Spatial Stability of Through Catenary Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge

Guan Wei

(Surveying and Designing Institute of Shanxi Province, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To study the spatial stability of through catenary concrete-filled steel tube arch bridge and the parametric sensitivity influencing the structural stability of this type of bridge, this paper employed Midas/Civil 2012 finite element software to model a through catenary concrete-filled steel tube arch bridge in Yuncheng. The bridge was in completed state and in completed operation. The results show that the bridge arch rib structure has two kinds of instability states: in-plane instability and out-of-plane instability. The out-of-plane stiffness of the arch rib is less than in-plane stiffness. The instability mode of the arch rib structure is first manifested as out-of-plane bending instability of the arch rib. At the same time, the parameters affecting structural stability, such as the connection form between arch ribs, the wall thickness of arch rib steel tube, the number of single-side suspenders, the elastic modulus E of concrete in arch rib cavity, the rise-span ratio f/L of arch rib, and the arch rib-arch axis coefficient m, are compared and analyzed, and the sensitive parameters affecting structural stability are obtained, which can be used for similar bridges in structures.

Key words: beam-arch combination continuous girder bridge; catenary arch axis; spatial stability; eigenvalue; instability mode

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net