

文章编号: 1000-4750(2012)09-0125-08

钢管混凝土标准桁肋拱面外弹性稳定分析

宋福春¹, 陈宝春²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168; 2. 福州大学土木工程学院, 福州 350002)

摘 要: 以面外失稳的主要影响因素作为构造参数, 对已建的钢管混凝土桁拱进行统计分析, 构建一虚拟拱, 然后参照实际桥例, 建立了既有典型意义、又符合工程实际的标准拱。以标准拱为对象, 进行面外弹性稳定性的参数分析。结果表明: 钢管混凝土桁拱面外稳定性随着拱桥宽跨比增加而增大; 拱顶横撑形式对面外稳定性影响较小; 其他横撑影响较大, 其有利作用从大到小依次为 X 型与米字型、K 型和一字型; 拱肋间横撑的疏密程度(拱肋的自由长度)影响较大; 桁拱的弹性稳定系数随着矢跨比 f/L 的增大呈现先增大后较小的趋势, 在 $f/L=0.2\sim 0.25$ 时达到峰值; 面外长细比越大面外稳定性越差, 面外长细比在 80~140 区间影响较大, 在 140~220 区间影响减弱。最后, 对应用特征值求解拱的面外弹性分支计算方法进行了讨论。结果表明: 计算时应以拱所受压力最大的荷载工况, 且该方法的计算结果不能有效反映几何初始缺陷和横向力对结构真实的面外失稳破坏的影响。

关键词: 钢管混凝土; 桁肋拱; 面外; 弹性稳定; 标准拱

中图分类号: TU391; TU392.5 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.01.0007

ANALYSIS OF OUT-OF-PLANE ELASTIC BUCKLING OF STANDARD CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR TRUSS RIBS ARCH

SONG Fu-chun¹, CHEN Bao-chun²

(1. College of Civil Engineering, Shenyang Jian Zhu University, Shenyang 110168, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Based on the statistical analysis of concrete filled steel tubular (CFST) truss arch bridges, considering the main structure parameters on its out-of-plane buckling, a virtual bridge is built and revised into a standard one by referring to two real bridges. The parameter analyses are conducted on this standard bridge by using the elastic buckling analysis method. The results show that the out-of-plane stability will be improved with the increase of the ratio of the width to span of the bridge and the decrease of the distances of the bracings; the X-shaped bracings have the largest improvement on the out-of-plane stability, followed by K-shaped and straight bracings; the stability becomes worse quickly with the increase of the out-of-plane slenderness from 80 to 140, and then slowly from 140 to 220. Finally, the elastic buckling analysis method by solving the eigenvalue is discussed. Discussion results indicates that the load condition in the calculation should be the case causing the largest compression forces in the arch, and this method can not reflect initial geometric defects and the action of the transverse forces on it.

Key words: concrete filled steel tube (CFST); truss ribs arch; out-of-plane; elastics stability; standard arch

钢管混凝土拱桥的拱肋主要有实体式和桁肋式, 其中桁肋式拱肋的各组成构件以轴向受力为主, 能够充分发挥各构件的受力作用, 适于大跨径桥梁结构。文献[1]中的统计表明, 跨径大于 100m

的钢管混凝土拱桥有 55% 的桥梁采用桁式截面; 跨径大于 200m 的钢管混凝土拱桥有 97% 的桥梁采用桁式截面。可以看出, 桁式拱肋是大跨径钢管混凝土拱桥主要采用的拱肋结构形式。

收稿日期: 2011-01-04; 修改日期: 2011-03-22

通讯作者: 宋福春(1971—), 男, 辽宁辽阳人, 副教授, 博士, 从事组合结构桥梁、车桥耦合振动研究(E-mail: cefcsong@sjzu.edu.cn).

作者简介: 陈宝春(1958—), 男, 福建罗源人, 教授, 博士, 博导, 从事钢管混凝土拱桥、组合结构桥梁研究(E-mail: chenbaochun@fzu.edu.cn).

对于大跨径钢管混凝土拱桥,其面外稳定问题较为突出。迄今为止,对钢管混凝土桁肋拱的面外稳定研究以具体桥梁为主,对于其普遍规律的认识有限。因此,本文根据桁肋拱面外稳定的主要影响因素,建立具有代表性的钢管混凝土标准桁肋拱,并以其为分析对象,作为对目前研究不足的补充。

弹性稳定分析是拱结构稳定分析中最常用、最简单的方法,它也是目前钢管混凝土拱桥设计中常用的计算方法。本文的研究也采用该方法。

1 钢管混凝土标准桁肋拱的建构

1.1 构造原则

标准拱的构造,选取影响面外弹性稳定的主要结构与构造的主要参数,以文献[1]的资料为统计数据来源进行统计分析,以其标准值为基准值建构虚拟拱,然后参考实际工程中跨度相近桥梁的结构进行修正,以构造出既有典型意义、又符合工程实际的标准拱。

由结构稳定理论可知,影响钢管混凝土桁拱面外稳定的主要参数有:1)结构形式,截面类型;2)桥梁跨径;3)宽跨比;4)矢跨比;5)拱肋面外长细比;6)拱肋面内长细比;7)拱肋截面宽高比;8)拱轴线形;9)横撑形式;10)拱肋材料强度、截面尺寸等。统计分析主要是确定每一参数的最小值、最大值、平均值和标准差。

1.2 统计分析 with 虚拟拱的建构

1.2.1 结构形式与主要参数

钢管混凝土拱桥结构体系非常丰富,文献[1]提出以车承形式与结构受力特征相结合的分类方法,即上承式、有推力中承式、无推力中承式、拱梁组合体系、下承式刚架系杆拱和其他形式。统计分析表明,在钢管混凝土桁肋拱桥中,上承式与其他类型的数量均不多,仅占总数的6.2%和3.7%,因此不具有典型性,本文不考虑。在应用较多的中下承式桥中,下承式拱梁组合桥是拱与梁共同受力的结构,与其他以拱受力为主的结构面外稳定性能有较大的不同(如吊杆的非保向力影响较大等),跨径也不大,面外稳定问题不突出,且拱肋以桁式截面的也较少(仅占6.2%),因此,本文也不考虑。

有推力中承式拱、刚架系杆中承式拱和刚架系杆下承式拱是钢管混凝土桁拱中应用最多的三种结构形式,分别占总数的46.9%,27.1%和9.9%(总计83.9%)。这三种结构,虽然面内受力性能有较大的不同但其面外稳定性能相近,均可以视为固结于

墩台的组拼拱^[2]。因此,本文结构参数统计时取这三种结构,标准拱构造时,则考虑有推力中承式拱。

桁式拱肋的截面,根据弦杆数量和弦杆之间的横向联接构造,可分为四肢式、横哑铃型桁式、两管桁式、混合桁式、三管桁式、六管桁式等。从图1可知,四肢桁式和四肢横哑铃形桁式应用最多,分别占总数的43.0%和39.2%(共65座,占总数的82.2%)。横哑铃型截面中缀板及其腹腔内混凝土对在面内拱肋刚度和承载力能发挥一定的作用,然而对于面外的受力,如同竖哑铃形拱肋的面内受力一样,因其处于中性轴附近,对承载力和刚度的贡献很小^[3]。因此,本文将这两种截面合并在一起考虑,称之为四肢截面,在标准拱构造时,采用四肢桁式。以下进行参数统计分析时,均以这34座四肢桁式拱桥为数据源。

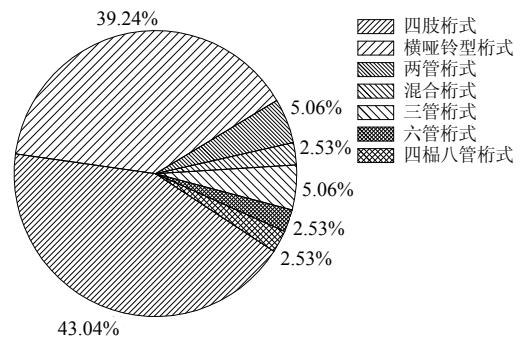


图1 桁肋截面类型分布图

Fig.1 Variation of number of section type

对四肢桁肋拱桥的跨径等结构与构件的参数进行统计分析的结果,见表1。

表1 结构形式主要统计参数

Table 1 Statistical parameters of Structures

编号	参数	平均值	方差
1	跨径 L/m	199.5	69.35
2	矢跨比 f/L	0.21	0.026
3	宽跨比 B/L	0.118	0.08

桁式截面能够充分发挥钢管混凝土的性能,其跨度区间为52m到460m,变化范围较大。其平均值为199.5m。拱桥的矢跨比主要介于0.20到0.25之间,占桥梁总数的75.4%。见图2。

从图3的拱轴线形统计可知,拱轴线以悬链线和抛物线为主,悬链线更多一些,因为大部分结构的恒载并非均布荷载,且采用悬链线还可通过拱轴系数的调整来改善结构的受力。考虑到桁拱发生面外失稳的主要控制因素是拱肋轴力,拱轴线影响较小,因此,标准拱采用拱轴系数 $m=1$ 的悬链线(也就是抛物线)。

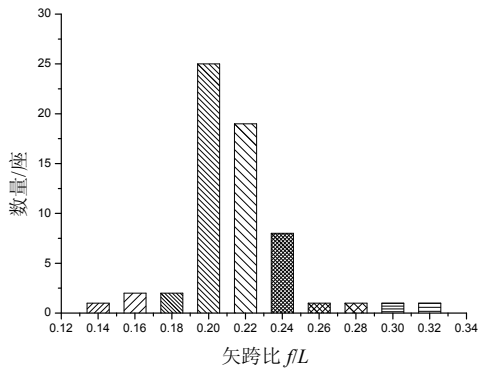


图 2 不同矢跨比桁肋拱桥数量

Fig.2 Variation of number of rise to span ratio

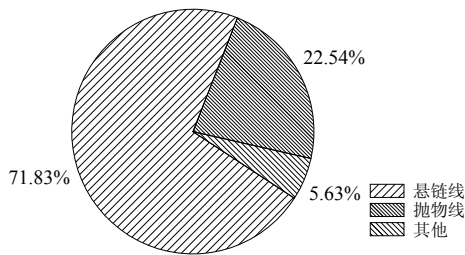


图 3 不同拱轴线形桁肋拱桥数量

Fig.3 Variation of number of arch axial line type

1.2.2 主拱构造的主要参数

拱桥结构毕竟是面内受力为主的结构，拱肋的面内长细比变化范围较小，介于 32~52 之间。而面外长细比则相对较大，处于 90~245 之间，其值受结构形式影响较大。面外长细比的定义为 $\lambda_y = 0.5S/r_y$ ，其中 S 为拱轴线长度； r_y 为拱肋横向回转半径。在构造标准拱时可通过拱肋面内长细比、面外长细比和拱肋截面的高宽比确定拱肋的截面形式，见表 2。

表 2 主拱统计参数

Table 2 Statistical parameters of main arch ribs

编号	参数	平均值	方差
1	拱肋面外长细比	158.7	35.83
2	拱肋面内长细比	36.6	6.16
3	拱肋截面宽高比	0.535	0.0943

拱肋钢管多数采用 Q345 类钢材或 16Mnq 钢，占总量的 88.9%；管内混凝土主要采用 C50，占总量的 79.2%，其次是 C40，占总量的 16.7%。所以标准拱拱肋钢管取 Q345，管内混凝土取 C50。

拱肋弦杆钢管的直径和壁厚与桥梁跨径、车道荷载有着密切的关系，图 4 为弦管直径与桥梁跨径之间的关系曲线。根据最小二乘法，采用二阶多项式拟合方程为 $y = 261.57424 + 3.33676x - 0.00272x^2$ 。如图 5 所示，拱肋钢管壁厚多采用偶数，且变化范围较大，介于 8~22 之间。

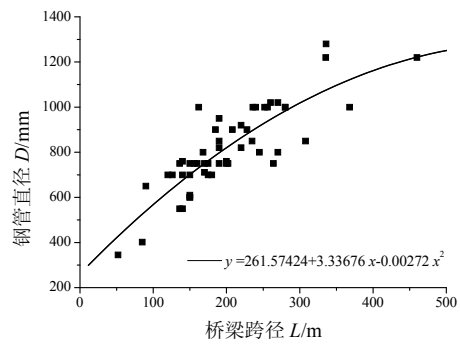


图 4 弦管直径与跨径的关系

Fig.4 Relationship of span and diameter of chord tube

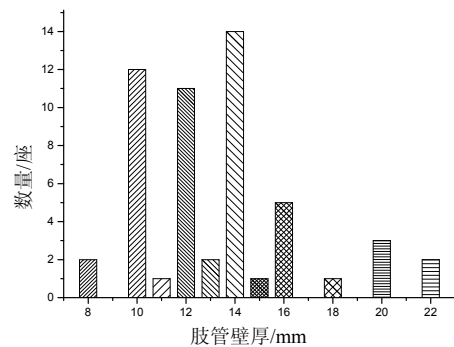


图 5 不同弦管壁厚桥梁的数量

Fig.5 Variation of number of chord wall thickness

1.2.3 拱肋横撑构造

钢管混凝土桁肋拱桥拱肋间的横撑绝大多数采用空钢管桁架。形式多种多样。标准拱构造时间采用较为常用的拱顶一字撑、其他位置 K 型撑的形式。这也符合双肋拱面外稳定性的优化结果^[4-5]。

1.3 桥例修正

根据钢管混凝土桁肋拱桥统计分析的结果，取用统计平均值得到钢管混凝土虚拟拱，并参照与其跨径相近的重庆市合川嘉陵江大桥^[6]和重庆市酉阳县细沙河特大桥^[7]，确定钢管混凝土标准桁肋拱。

重庆市合川嘉陵江大桥主桥为 58m+130m+200m+130m+58m 的五跨中承式有推力的钢管混凝土拱，重力式桥墩(台)。主拱肋拱轴线形为悬链线，拱轴系数为 1.60，净矢跨比为 1/4，净跨径为 200m，净矢高为 50m。拱肋高 3.5m，宽 2.0m，弦杆为 $\phi 760 \times 13\text{mm}$ 、内灌 C50 混凝土的钢管混凝土。

重庆市酉阳县细沙河特大桥为净跨 190m 中承式钢管混凝土拱桥，拱轴线形为悬链线，拱轴系数为 1.347，净矢跨比为 1/4.5。桥面总宽 24.5m，拱肋中心间距 26.6m。拱肋高 4.0m，宽 2.1m，钢管为 $\phi 850 \times 14\text{mm}$ ，内灌 C50 微膨胀混凝土。弦杆通过横向缀板和竖向两根 $\phi 400 \times 10\text{mm}$ 腹管连接而构成钢管混凝土桁架。

1.4 标准拱结构与主要构造

参照两座实际桥例，对虚拟拱进行调整，虚拟拱与调整后的标准拱主要结构参数见表 3。

标准拱为计算跨径 200m 的中承式钢管混凝土桁肋拱，矢高 40m， $f/l=0.2$ ；拱轴线形：悬链线， $m=1$ ；拱肋截面高跨比 1/50，拱肋高 4.0m，宽 2.18m，即宽高比 0.55。拱肋钢管直径为 810mm，壁厚 14mm；腹杆采用直径 400mm，壁厚 10mm；平联采用 610mm，壁厚 10mm，平联间距为 1.75m。具体见图 6。拱肋腹杆和平联的布置见图 7。拱肋横断面如图 8 所示。横撑钢管均采用空钢管组成，横撑主管尺寸为 400mm，壁厚 10mm；次管采用

210mm，壁厚 8mm。所有钢管均采用 Q345，混凝土采用 C50。标准拱总体布置见图 6。

表 3 结构形式主要统计参数

参数名称	虚拟拱	实例	标准拱
跨径/m	199.5	200/190	200
矢跨比 f/L	0.21	0.25/0.22	0.2
拱轴线形	71.8%悬链线	悬链线($m=1.6/1.347$)	悬链线($m=1$)
拱肋宽高比	0.535	0.57/0.5	0.55
弦管	拟合方程*	$\phi 760 \times 13 / \phi 850 \times 14$	$\phi 810 \times 14$
腹杆		$\phi 351 \times 10 / \phi 400 \times 10$	$\phi 400 \times 10$
平联		缀板/ $\phi 400 \times 10$	$\phi 610 \times 10$
横撑形式		一字型/K 撑(米字撑)	K 撑(拱顶一字撑)

*拟合方程见图 4。

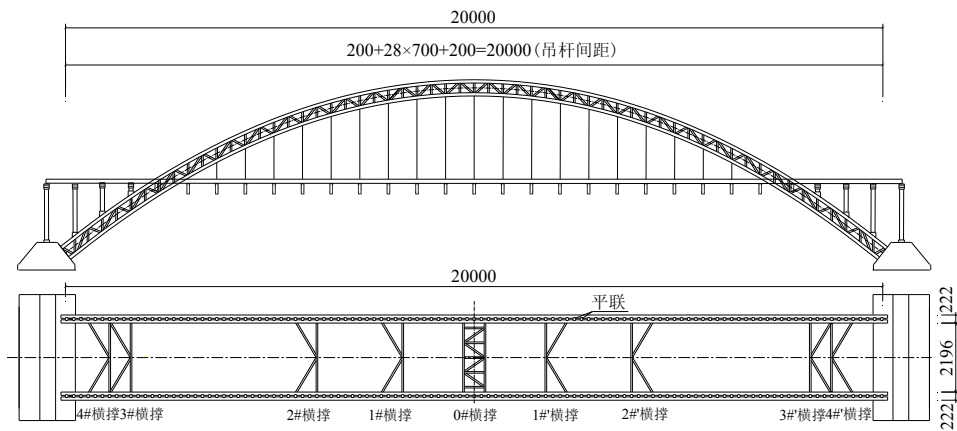


图 6 标准拱总体布置图 /mm

Fig.6 Layout of general plan of Standard arch

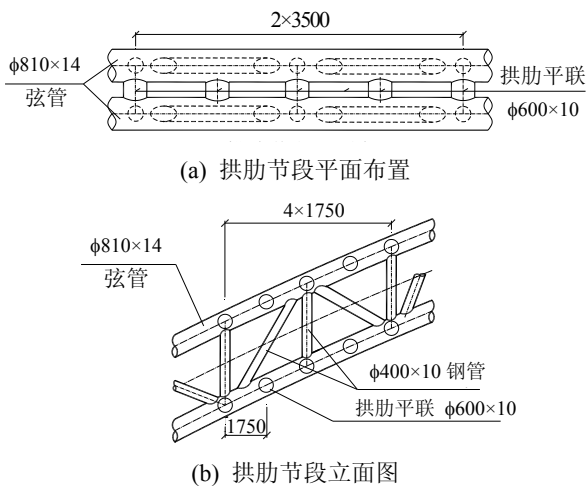


图 7 拱肋节段布置图

Fig.7 Layout of segment of arch rib

立柱采用钢管混凝土结构，钢管为 $\phi 1000\text{mm} \times 16\text{mm}$ ，内填 C50 混凝土。吊杆由 $109 \times 7\text{mm}$ 的镀锌高强钢丝组成，两端为镦头锚。吊杆或立柱间距为 7m。桥面系的受力以横梁为主，以纵梁为辅。横梁

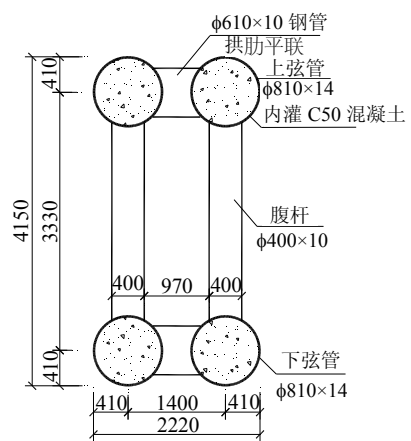


图 8 拱肋节段布置图

Fig.8 Cross section of segment of arch rib

采用 50 号预应力混凝土，截面尺寸为 $800\text{mm} \times 1600\text{mm}$ 。

拱肋间距是影响桁肋拱面外稳定性的一个主要因素，由于统计资料中这方面的资料较少，取桥

面宽度为4车道,拱肋中心间距为19.18m。

弦管的具体构造和尺寸见图7。

2 标准拱有限元模型

2.1 计算方法与有限元模型

采用通用有限元软件 ANSYS 建立拱结构模型。拱肋中的弦管、管内混凝土、平联、腹杆以及横撑、拱上立柱、吊杆横梁均采用 Timoshenko 梁单元 BEAM188;桥面系纵、横梁采用空间梁单元 BEAM4;吊杆、系杆采用空间杆单元 LINK10。

钢管混凝土弦杆采用双单元共用相同节点模拟,即采用梁单元(beam188)分别模拟钢管和混凝土,并假定二者完全粘结,无相对滑移和变形,在节点处位移耦合。具体见参考文献[8]。

有限元计算中不考虑施工过程中加载历史对结构面外弹性稳定的影响,视结构一次成桥,各构件单元同时承载。

标准拱共有4051个单元,1570个节点。

假定所有结构构件始终保持线弹性,且无局部杆件先于整体失效。考虑恒载、活载同步增长,按式(1)采用求特征值的方法^[9]求出最小的特征值为结构的弹性稳定系数 φ 。

$$([K] + \varphi([K_1] + [K_2]))\{\psi\} = 0 \quad (1)$$

在标准拱面外弹性稳定系数计算中,活载取全跨满布的最不利工况(关于稳定计算中加载方式的讨论,见4.1节)。

2.2 计算结果分析

分别建立文献[6]的嘉陵江大桥和文献[7]的细沙河大桥的有限元模型,进行弹性稳定分析。两座拱桥的失稳模态均为面外失稳,计算结果见表4。可以看到,弹性稳定系数计算结果与参考文献几乎相同,表明本文的计算方法是可行的。

表4 有限元模型计算结果对比

Table 4 Comparison of calculation results of FEA models

序号	桥梁	计算结果		φ/φ'
		本文 φ	参考文献[6-7] φ'	
1	嘉陵江大桥	4.59	4.55	1.009
2	细沙河特大桥	6.12	6.01	1.018

标准拱的弹性稳定系数为6.669,失稳模态见图9。可以看到,标准拱以及两座参考拱桥的失稳模态均为面外失稳。这也反映出大跨桁拱横向刚度相对较弱,面外失稳是其主要的失稳形式。拱肋间无横撑的开口区域横向刚度较小,发生较大的空间弯扭变形,而有横撑联系的区域横向变形则相对

较小。

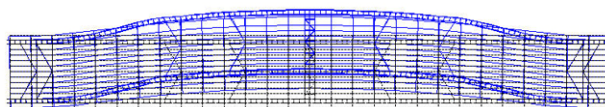


图9 标准拱失稳模态

Fig.9 Unstability mode of standard arch bridge

3 弹性稳定参数分析

在标准拱计算结果的基础上,通过参数变化,对钢管混凝土桁拱的面外稳定特性进行分析。参数的变化范围取自1.2节中的统计数值。将这些拱称为参数拱。

3.1 宽跨比

宽跨比是指拱肋外侧距离 B 与跨径 L 的比值。为减少开口区位置及大小的影响,将标准拱调整为4个K型撑均匀布置。参数分析中拱肋截面不变,改变两拱肋之间的间距,得到桥面宽度为2车道、3车道、4车道、5车道和6车道的模型拱。其宽跨比分别为1/17.1、1/13.0、1/10.4、1/8.7和1/7.5。实际上,随着车道数的增加,拱肋截面也要加大。这样对于不同宽跨比的桁拱,拱肋的临界轴力有一定差别,将导致不同宽跨比的弹性稳定结果不好比较。因此,本文采用相同截面,其结果仅说明其变化趋势。计算结果如图10所示,随着拱桥宽跨比的增大,结构面外弹性稳定性逐渐增大。

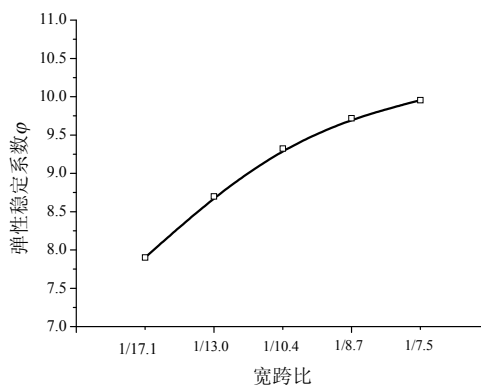


图10 宽跨比-弹性稳定系数关系

Fig.10 Relationship of width to length ratio and elastic stability coefficient

可以看出,宽跨比是影响桁拱桥面外稳定的一个重要影响因素。当然,桥梁宽度通常由通行能力确定。但拱肋的宽跨比与桥梁的宽跨比不尽相同。在桥梁宽度不大时,可通过拱肋外置于人行道外等方法将拱肋间距适当加大,以满足面外稳定的需要。

3.2 横撑布置形式

采用不同的横撑布置形式对桁肋拱桥面外稳定性影响较大，其影响因素较多。表 5 给出不同横撑形式下标准拱的弹性稳定系数。

从表 5 中的计算结果和标准拱的计算可以得出：1) 采用 X 型横撑和米字型横撑的标准拱弹性稳定系数较大，K 型撑次之，一字型撑最小；2) 由于桁式拱肋间的联系均采用桁式横撑，拱顶处的横撑在立面均有较大的抗弯刚度，相当于文献[4]中的立式横撑，能够约束拱顶的扭转和位移。对于拱顶采用不同的横撑，其他位置横撑相同的标准拱，其弹性稳定系数几乎相同；3) 拱肋间横撑的疏密程度(拱肋的自由长度)对拱肋的面外刚度有很大程度的影响。

表 5 不同横撑形式下标准拱弹性稳定系数

Table 5 Variation of elastic stability coefficient of standard arch with different bracing systems

序号	横撑布置形式		稳定系数 φ
	拱顶	其他位置	
1	一字撑	X 型撑(8 根)	11.78
2	一字撑	米字型撑(8 根)	11.80
3	X 型撑	X 型撑(8 根)	11.99
4	米字型撑	米字型撑(8 根)	11.82
5	米字型撑	K 型撑(8 根)	9.32
6	一字撑	一字撑(8 根)	6.59
7	一字撑	K 型撑(4 根)	6.84
8	一字撑	K 型撑(10 根)	17.51
9	一字撑	K 型撑(12 根)	20.11

3.3 矢跨比

矢跨比是拱桥的重要参数，直接影响到拱桥的受力状态。建立参数拱，矢跨比 f/L 分别为 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 和 0.35。图 11 为不同矢跨比拱的稳定系数。可以看到，弹性稳定系数随着矢跨比的增大，呈现先增大后减小的趋势。矢跨比在 0.25 到

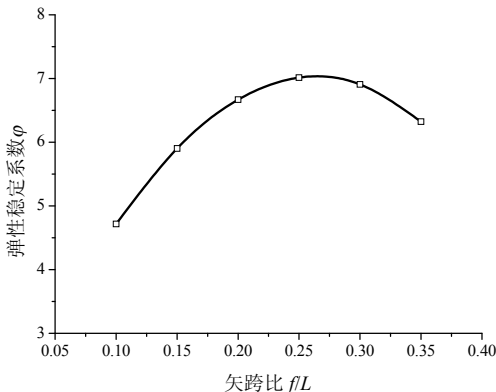


图 11 不同矢跨比拱的弹性稳定系数

Fig.11 Variation of elastic stability coefficient of arch with different rise to span ratio

0.3 之间，面外稳定系数到达了最大值。这是因为在 EI_y (面外抗弯刚度)和跨径 L 相同的情况下，若 f/L 很小，则拱弧虽短，但均布荷载产生的轴力大；反之，若 f/L 很大，则压力虽小，但拱弧较长。当 $f/L=0.2$ 时的稳定系数与其最大值相差不到 8%，综合考虑拱桥建筑高度、立柱高度或吊杆长度、工程造价和施工难易程度等因素，实际上拱桥的矢跨比大多数介于 0.2 到 0.25 之间。

3.4 拱肋面外长细比

由文献[3]可知，拱肋的面外长细比介于 90~220 之间。拱肋面外长细比的变化主要有两种形式：1) 拱肋弦管横向间距的变化；2) 桥梁跨径的改变。对于上承式拱桥，弦管间的横向间距不受限制，可以适当增大以提高拱桥的面外稳定性。而中承式、下承式拱桥的桁肋横向宽度受桥面宽度等因素的制约，拱肋面外长细比的变化更多是由于桥梁跨径变化引起的。针对这两种形式的变化分别进行参数分析。

图 12 为按两种方式改变标准拱面外长细比的弹性稳定系数变化曲线图。参数拱的拱肋面外长细比分别为 90、120、190 和 220。

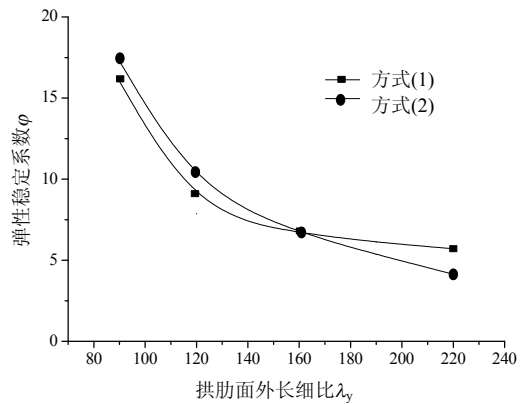


图 12 拱肋面外长细比-弹性稳定系数关系

Fig.12 Relationship between slenderness ratio and elastic stability coefficient

从图 12 中可以看出，两种方式下稳定系数随着面外长细比的增大均呈现减小的趋势。实际工程中，设计者通常选取较小的面内长细比，而面外长细比则变化区间较大。从图 12 中可以看出，看出面外长细比在 80~140 区间变化较快，在 140~220 区间变化较缓。

4 弹性稳定分析中有关问题的讨论

拱结构失稳可分为平衡分支问题和极限荷载问题^[10]。实际结构发生失稳时，往往伴随着较大的

变形和材料的弹塑性,属于第二类问题。要想了解结构失稳时的真实状况,必须进行考虑双重非线性的极限荷载研究。然而目前对于钢管混凝土拱面外稳定的计算,还存在着一些错误的认识,这里拟通过分析予以澄清。

4.1 加载方式

钢管混凝土拱桥实际工程的弹性稳定分析中,存在着活载非对称布载较之满布荷载更不利的认识。

桥面非对称加载(偏载)方式可分为纵向偏载和横向偏载,即纵向偏载为桥面半跨均布荷载;横向偏载为靠近一侧拱肋,半幅桥面布载。对标准拱分别施加纵向偏载和横向偏载,并与仅考虑自重工况的稳定系数进行了比较。计算结果见表6。显然,无论是否考虑自重,全跨满布荷载的加载方式均是最不利的。

表6 不同加载工况下标准拱弹性稳定系数

Table 6 Variation of elastic stability coefficient of standard arch with different loading case

序号	是否考虑自重	加载方式	弹性稳定系数 φ
1	是	满跨均布	6.669
2		纵向偏载	7.084
3		横向偏载	7.088
4		无	7.667
5	否	满跨均布	51.267
6		纵向偏载	76.112
7		横向偏载	85.872

从式(1)的弹性分支失稳的特征值求解方法可知,特征值只与结构的压力水平、刚度(尤其是抗弯刚度)和约束条件有关,而与弯矩无关。偏载虽然可能使拱肋的弯矩加大,对于考虑双重非张性的稳定极限承载力可能不利,但无法在特征值求解中反应出来,而满布荷载所产生的压力最大,因此是最不利的。

4.2 初始几何缺陷

对标准拱分别设置 $L/500$ 、 $L/1000$ 、 $L/2000$ 、 $L/5000$ (L 为计算跨径)的初始几何缺陷,进行结构弹性稳定分析。初始几何缺陷按失稳模态进行设置,具体方法见参考文献[3]。见表7。

从表7计算结果可见,弹性稳定系数几乎不受初始缺陷的影响。这是因为在解特征值中,几何初始缺陷仅相当于结构线形的改变,这种微小的改变显然对结构压力水平影响不大。实际上,采用特征值求解弹性失稳临界荷载时,就是假定了初始缺陷等扰动的影响,但并无法考虑扰动值大小的影

响。也就是说,弹性稳定分析方法不适用于初始几何缺陷对结构稳定性影响的分析。

表7 不同初始缺陷下标准拱的弹性稳定系数

Table 7 Variation of Elastic stability coefficient of standard arch with different initial imperfection

序号	有限元模型	初始缺陷	弹性稳定系数 φ
1	标准拱	0	6.669
2		$L/5000$	6.652
3		$L/2000$	6.652
4		$L/1000$	6.652
5		$L/500$	6.652

4.3 横向力

以标准拱为研究对象,考虑横向力的影响,进行结构弹性稳定分析。横向力的确定方法具体见参考文献[3]。计算结果见表8。

表8 横向力作用下标准拱的弹性稳定系数

Table 8 Variation of elastic stability coefficient of standard arch under lateral force

序号	模型拱桥	横向力	弹性稳定系数 φ
1	标准拱	1倍静风荷载	6.670
2		2倍静风荷载	6.667
3		3倍静风荷载	6.662
4		无	6.669

注:1倍静风荷载为风速50m/s作用下结构产生的横向力。

横向力是造成拱的面外失稳破坏的主要因素。然而,从表8可以看出横向力对结构的弹性稳定系数的影响极小,这也是由于采用求特征值的方法求解的局限造成的,因为在这个方法中弹性失稳荷载主要与压力水平有关,而横向力对结构压力的影响很小,所以弹性分支稳定荷载计算结果影响很小。文献[3]中,在1倍静风荷载作用下,考虑双重非线性结构的极限荷载下降8%~40%。因此,求解特征值得出的弹性失稳荷载不能考虑横向力对拱面外失稳的作用。

5 结论

本文以现有的钢管混凝土桁拱统计资料为基础,选取影响面外弹性稳定的主要结构与构造的主要参数,进行统计分析,以其标准值为基准值,然后参考实际工程中跨度相近桥梁的结构进行修正,构造出既有典型意义、又符合工程实际的标准拱。是进行桁拱桥面外稳定性研究的基础。

研究表明,钢管混凝土桁拱面外稳定性随着拱桥宽跨比的增大;横撑对其面外稳定性的有利影响,X型横撑和米字型横撑最大,K型撑次之,一字型撑最小;拱顶横撑的形式的影响较小;拱肋间

横撑的疏密程度(拱肋的自由长度)影响较大。

桁拱的弹性稳定系数随着矢跨比的增大呈现先增大后较小的趋势, $f/L=0.2\sim 0.25$ 时达到峰值; 面外长细越大面外稳定性越差, 面外长细比在 80~140 区间影响较大, 在 140~220 区间影响减弱。

应用特征值求解拱的面外稳定系数时, 应以拱所受压力最大的荷载工况。同时, 该方法的计算结果不能有效反映几何初始缺陷和横向力对结构真实的面外失稳破坏的影响。

参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 第 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Chen Baochun. Concrete filled steel tubular arch bridges [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 赖泉水, 张靖, 傅韵芳, 魏立新. 三山西大桥主桥设计简介[J]. 桥梁建设, 1995(4): 11—15.
Lai Quanshui, Zhang Jing, Fu Yunfang, Wei Lixin. Introduction of main span design of San Shanxi bridge [J]. Bridge Construction, 1995(4): 11—15. (in Chinese)
- [3] 宋福春. 钢管混凝土桁肋拱桥面外稳定性研究[D]. 福州: 福州大学, 2009.
Song Fuchun. Research on the out-of-plane stability of CFST truss ribs arches [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2009. (in Chinese)
- [4] 项海帆, 刘光栋. 拱的稳定与振动[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
Xiang Haifan, Liu Guangdong. The stability and vibrate of arch [M]. Beijing: China Communications Press, 1991. (in Chinese)
- [5] Ronald D Ziemian. Guide to stability design criteria for metal structures (6th) [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- [6] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(一)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
Chen Baochun. Examples of concrete filled steel tubular arch bridges (No.1) [M]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese)
- [7] 宋先进, 陈老伍. 细沙河特大桥中承式钢管混凝土拱桥结构设计与创新[J]. 桥梁建设, 2006(6): 40—43.
Song Xianjin, Chen Laowu. The structure design and innovations of Xisha river large-span half-through CFST arch bridges [J]. Bridge Construction, 2006(6): 40—43. (in Chinese)
- [8] 韦建刚, 陈宝春. 钢管混凝土拱材料非线性有限元分析方法[J]. 福州大学学报, 2004, 32(3): 344—348.
Wei Jiangan, Chen Baochun. Finite element methods for analysis on material nonlinearity of concrete-filled steel tubular arch [J]. Journal of Fuzhou University, 2004, 32(3): 344—348. (in Chinese)
- [9] Bathe K J. Finite element procedures [M]. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, Inc, 1996.
- [10] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
Li Guohao. Stability and vibrate of bridge structures [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [19] Tada H, Paris P C, Irwin G R. The stress analysis of cracks handbook [M]. New York: ASME Press, 2000: 125—141.
- [20] CEB-FIP MC 90. CEB-FIP Model Code 1990 [S]. London: Thomas Telford House, 1993.
- [21] Dugdale D. Yielding of steel sheets containing slits [J]. Journal of the Mechanics and Physics Solids, 1960(8): 100—108.
- [22] Barenblatt G. The mathematical theory of equilibrium crack in the brittle fracture [J]. Advances in Applied Mechanics, 1962(7): 55—129.
- [23] Wang W, Hsu C T T, Blackmore D. Generalized formulation for strip yielding model with variable cohesion and its analytical solutions [J]. International Journal of Solids and Structures, 2000(37): 7533—7546.
- [24] Ghaemmaghami A, Ghaemian M. Large-scale testing on specific fracture energy determination of dam concrete [J]. International Journal of Fracture, 2006(141): 247—254.

(上接第 116 页)