

文章编号:1671-1637(2008)02-0034-06

钢管混凝土拱桥拱肋刚度设计取值分析

韦建刚,陈宝春

(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350002)

摘要:为了解析式钢管混凝土拱桥弦管设计刚度对拱桥受力性能计算结果的影响,以一座钢管混凝土多肢桁式拱桥为实例,建立了有限元模型,进行了弦管截面设计刚度取值的参数分析,在对已建钢管混凝土桁式拱桥的截面构成进行调查的基础上,提出了桁式拱桥截面设计刚度取值建议,即根据不同的计算要求,混凝土截面刚度折减系数取1.0或0.4。分析结果显示,按照该建议,截面的内力计算值为实测值的1.2~1.5倍,变形计算值为实测值的1.5~1.9倍。可见,此取值建议可以保证桁式钢管混凝土拱桥的设计具有一定的安全储备。

关键词:桥梁工程;钢管混凝土拱桥;拱肋;设计刚度

中图分类号:U442.5 **文献标识码:**A

Analysis on rib rigidity of concrete filled steel tubular arch bridge

Wei Jian-gang, Chen Bao-chun

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: In order to study the effect of tube rigidity on the mechanical character of truss CFST (concrete filled steel tubular) arch bridge, a true arch bridge was taken as sample, and the parameter analysis for the rigidity was carried out by using finite element model. Based on the investigation of section composition for arch rib, a suggestion was presented to calculate tube rigidity, in which the rigidity reduced factor of concrete was adopted as 1.0 or 0.4 for different calculation demands. Analysis result indicates that for internal force, the rate of calculation value to reality value is between 1.2 and 1.5, for deformation the rate is between 1.5 and 1.9. So, the suggestion can secure some safety reserve for the design of truss CFST arch bridge. 4 tabs, 14 figs, 14 refs.

Key words: bridge engineering; concrete filled steel tubular arch bridge; arch rib; design rigidity

Author resume: Wei Jian-gang (1971-), male, PhD, associate researcher, +86-591-87892620, weijg@fzu.edu.cn.

0 引言

钢管混凝土结构在中国桥梁工程中得到了广泛应用,作为一种组合结构,钢管混凝土设计刚度的取值会对应力、变形、稳定性以及动力特性的计算结果产生影响;同时钢管混凝土拱桥大多为超静定结构,刚度的变化对内力的计算结果也会产生影响,因此,钢管混凝土拱桥截面设计刚度该如何确定是桥梁设

计过程中一个比较重要而又急待解决的问题^[1]。

钢管混凝土拱桥拱肋截面形式主要有单圆管、哑铃形以及桁式截面等^[2]。文献[3-4]针对国内外钢管混凝土设计规范或规程中对于截面刚度计算中的差异进行了比较;文献[5-6]则对刚度取值变化对钢管混凝土单圆管拱桥静、动力性能计算结果的影响进行了分析;文献[7]进一步分析了其对哑铃形钢管混凝土拱桥的影响,并给出了设计刚度取值建议。

收稿日期:2007-10-21

基金项目:福建省重大科技项目(2003F007);福建省科技厅项目(JA07014)

作者简介:韦建刚(1971-),男,广西上思人,福州大学副研究员,博士,从事桥梁工程研究。

研究发现,由于单圆管与哑铃形(以下统称实体肋拱)同为实体截面,因此,刚度取值的影响十分相似,但目前尚缺乏对桁式拱桥刚度取值的分析。

当跨径较大时,桁式截面是钢管混凝土拱桥拱肋截面的主要形式,在文献[2]统计的钢管混凝土拱桥中,跨径超过 160 m 的全部为桁式拱肋。由于桁式拱肋的截面刚度与各弦杆的自身刚度和弦杆的位置几何尺寸有关,因此,其单根弦杆刚度的取值对拱桥静、动力性能计算结果影响的规律可能与实体拱肋截面有所不同。

为此,本文将以一座钢管混凝土多肢桁式拱桥为实例,进行弦管截面刚度取值对受力性能计算结果影响的分析,并进行已建钢管混凝土桁式拱桥的截面构成调查,在此基础上提出桁式拱桥截面设计刚度取值建议,结合单圆管和哑铃形拱肋刚度建议取值^[5-7],在简便、易用、安全等原则基础上提出钢管混凝土拱肋截面设计刚度取值建议。

1 实体肋拱计算刚度取值

钢管混凝土构件常见的刚度计算方法见表 1^[8-13]。表中的符号意义为:EA 为钢管混凝土的抗压刚度;EI 为钢管混凝土的抗弯刚度;Es、Ec 分别为钢材和混凝土的弹性模量;Is 和 Ic 分别为钢管截面和混凝土截面的惯性矩;As、Ac 分别为钢管截面和混凝土截面的面积;为含钢率;Esc 为钢管混凝土构件的弹性模量。

表 1 计算方法

Tab. 1 Calculation methods

规范	抗压刚度	抗弯刚度
CECS ^[8]	$EA = E_s A_s + E_c A_c$	$EI = E_s I_s + E_c I_c$
JCJ ^[9]	$E_{sc} = 0.85 [E_s + (1 -) E_c]$	$E_{sc} = 0.85 [E_s + (1 -) E_c]$
DL/ T ^[10]	查表	查表
LRFD ^[11]	$EA = E_s A_s + 0.8 E_c A_c$	$EI = E_s I_s + 0.8 E_c I_c$
BS ^[12]	$EA = E_s A_s + E_c A_c$	$EI = E_s I_s + E_c I_c$
AIJ ^[13]	$EA = E_s A_s + E_c A_c$	$EI = E_s I_s + 0.2 E_c I_c$

中国规程 JCJ 提出的钢管混凝土构件弹性模量的计算方法是对钢管和混凝土的相加值进行折减;DL/ T 是通过复杂的计算后提供的表格进行计算,当钢管混凝土构件的含钢率较大时,会出现所计算的钢管混凝土构件的刚度比空钢管构件的刚度还小的不合理现象^[14]。除中国的 JCJ 和 DL/ T 外,大部分规程对钢管混凝土构件刚度的计算,是由截面的钢管刚度与混凝土刚度相加而成,其中对混凝土的刚度有考虑折减的,也有不折减的。考虑折减的,折

减系数也不尽相同,如果用式(1)表示,主要的差异体现在 $A_s、I_s$ 的取值上

$$\begin{cases} EA = E_s A_s + A E_c A_c \\ EI = E_s I_s + I E_c I_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A_s、I_s$ 分别为抗压刚度和抗弯刚度计算中混凝土刚度的折减系数。

在进行钢管混凝土拱桥拱肋截面为单圆管与哑铃形等实体截面的刚度计算取值时,考虑采用式(1),主要的任务是确定在不同计算中的 $A_s、I_s$ 值。文献[5-7]通过对实例的分析,基于刚度取值的影响规律以及安全、简便的原则,提出了钢管混凝土实体拱肋截面设计刚度取值建议。在进行内力、应力以及动力特性计算时,截面刚度计算中 $A_s、I_s$ 均为 1,不折减;在进行弹性屈曲和变形计算时,截面刚度计算中 $A_s、I_s$ 均为 0.4。

2 桁式肋拱实例分析

2.1 桥例简介

石潭溪大桥为一中承式钢管混凝土桁拱,净跨为 136 m,净矢跨比为 1/5,桥面净宽为 - 9 m + 2 × 1.5 m,1997 年竣工时进行了静载测试。测试工况 1 为近拱脚处截面最大负弯矩;工况 2 为 L/4 处截面最大正弯矩(L 为桥梁跨度);工况 3 为近拱顶处截面最大正弯矩。有限元采用空间梁单元进行建模,将拱肋弦管的混凝土和钢管作为一个单元模拟,吊杆采用杆单元模拟,桥面采用梁格法建模,全桥共有 1 271 个节点,2 636 个单元,拱座处三向固结。图 1 为该桥的有限元模型。

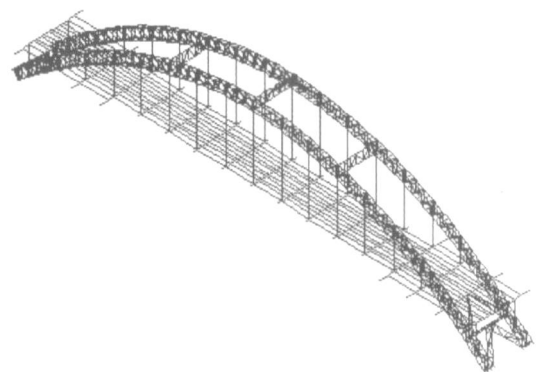


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

在下文的分析中,弦管均指桁式截面中的单圆管肢管,拱肋则指由弦管组成的整体截面,刚度均为弦管刚度。本文为了讨论刚度取值对钢管混凝土桁式拱桥受力计算的影响,将按实桥静载测试时的 3 个工况对有限元模型进行加载,并根据不同规范的刚度取

值进行有限元计算。一种是保持抗压刚度取 $EA = E_s A_s + E_c A_c$ 不变的前提下,根据各个规范计算抗弯刚度;另一种是保持抗弯刚度取 $EI = E_s I_s + E_c I_c$ 不变的前提下,抗压刚度根据不同规范取值,见表 2。

表 2 桥例刚度

Tab. 2 Bridge rigidities

规范	$EA_s / 10^9 \text{ kN}$	$EI_s / (10^9 \text{ kN} \cdot \text{m}^2)$
CECS ^[8]	10.08	0.23
JCJ ^[9]	8.69	0.16
DL/T ^[10]	9.22	0.22
LRFD ^[11]	5.72	0.21
BS ^[12]	10.08	0.23
AII ^[13]	10.08	0.13

2.2 内力与应力

对于超静定钢管混凝土拱桥,截面刚度取值的变化将影响结构的静力计算结果。在以下分析中,取各工况的最不利截面的内力作为分析对象:工况 1 取拱脚截面的内力,工况 2 取 $L/4$ 截面处的内力,工况 3 为拱顶截面处内力。

图 2(a)、3(a)为拱肋上弦管轴力随抗弯刚度和抗压刚度变化的趋势,可以看出,无论是抗弯刚度还是抗压刚度取值变化对弦管轴力的影响都很小。然而,从图 2(b)、3(b)弦管弯矩计算结果看,它明显受到弦杆刚度(包括抗压刚度和抗弯刚度)的影响,弦杆弯矩随抗弯刚度取值的增大而增大,随抗压刚度取值的增大而减小。当抗弯刚度增大 81.0%,弦管弯矩计算结果增大 89.2%;而当抗压刚度增大 76.0%,则弦管弯矩减小 79.9%。

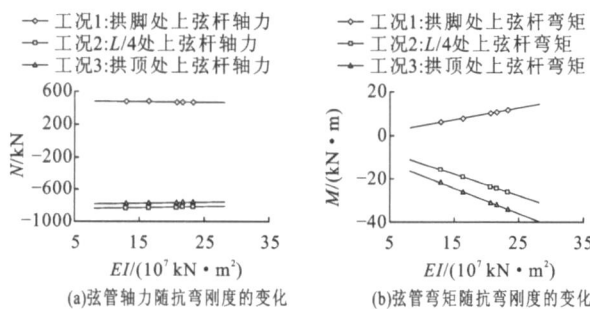
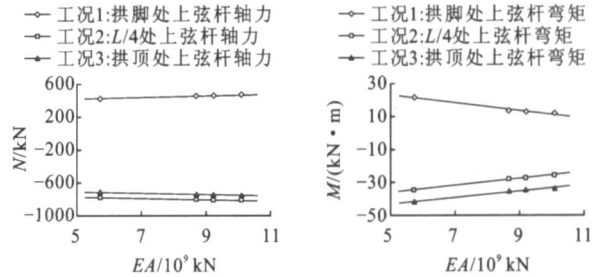


图 2 弦管内力随抗弯刚度变化的趋势

Fig. 2 Changing tendencies of inner forces for tube with flexural rigidity

图 4 为各工况下拱肋上弦管上缘应力和下弦管下缘应力随抗弯刚度的变化趋势,图 5 为应力计算结果随抗压刚度的变化趋势。从图 4、5 可以发现,应力的计算结果均随抗弯刚度的增大而增大,随抗压刚度的增大而减小。而其中以工况 1 的变化幅度

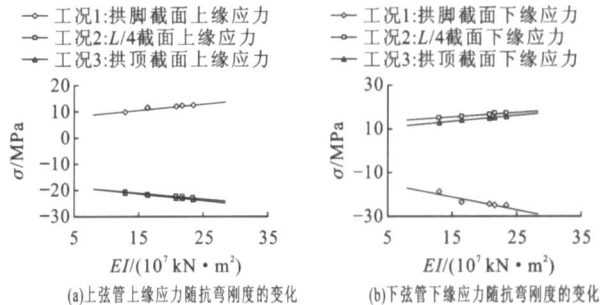


(a)弦管轴力随抗压刚度的变化

(b)弦管弯矩随抗压刚度的变化

图 3 弦管内力随抗压刚度变化的趋势

Fig. 3 Changing tendencies of inner forces for tube with compressive rigidity

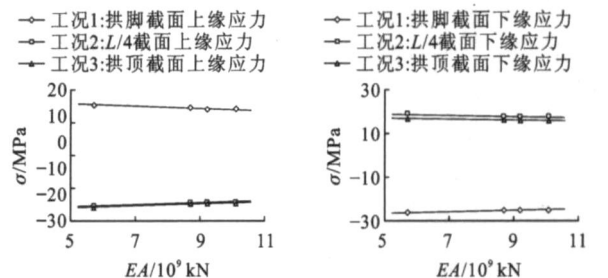


(a)上弦管上缘应力随抗弯刚度的变化

(b)下弦管下缘应力随抗弯刚度的变化

图 4 拱肋应力随抗弯刚度变化的趋势

Fig. 4 Changing tendencies of rib stresses with flexural rigidity



(a)上弦管上缘应力随抗压刚度的变化

(b)下弦管下缘应力随抗压刚度的变化

图 5 拱肋应力随抗压刚度变化的趋势

Fig. 5 Changing tendencies of rib stresses with compressive rigidity

最大:当抗弯刚度增大 81%时,上缘应力的增幅达到 28%,下缘应力增幅为 34%;当抗压刚度增大 76%时,拱肋上缘应力减幅为 12%,拱肋下缘应力减幅为 8%。显然,抗弯刚度的取值对弦管应力计算结果的影响要比抗压刚度大得多。

2.3 变形

对于钢管混凝土拱而言,在荷载作用下拱肋主要承受轴力和弯矩作用,因此,拱的变形可分为两部分:一部分为拱在弯矩作用下的变形,另一部分为拱由于弹性压缩使拱轴线缩短而引起的下挠。可见,拱肋截面抗压刚度与抗弯刚度的变化,均会引起拱肋计算挠度的变化。钢管混凝土桁式拱桥拱肋变形随着刚度变化的曲线见图 6、7。可以看出,在保持抗压刚度不变的情况下,弦管抗弯刚度取值增大

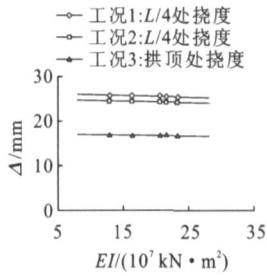


图 6 拱肋挠度随抗弯刚度的变化趋势

Fig. 6 Changing tendencies of rib deflections with flexural rigidity

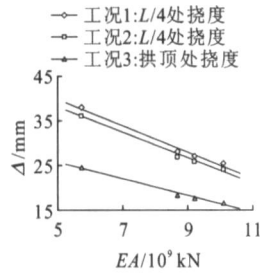


图 7 拱肋挠度随抗压刚度的变化趋势

Fig. 7 Changing tendencies of rib deflections with compressive rigidity

81.0%时,引起拱肋挠度的变化仅为 1.2%~1.4%;而当抗压刚度增大 76.0%时,拱肋挠度减小幅度为 47.5%~50.4%。显然,弦管抗压刚度取值对变形的影响要大于抗弯刚度。

2.4 弹性一类稳定系数

图 8、9 是各种工况下拱的一类稳定系数随抗弯刚度和抗压刚度的变化曲线,可以看出,桁式拱的稳定系数与弦管抗压刚度、抗弯刚度成线性增长的关系,且变化趋势不随加载工况的改变而改变。当抗弯刚度增大 81%时,各种工况下模型的稳定系数增大约为 5%;当抗压刚度增大 76%时,各种工况下稳定系数增大约为 44%。显然,抗压刚度取值对桁式拱桥的稳定性影响要比抗弯刚度大得多。

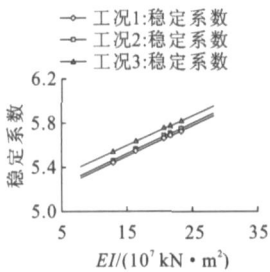


图 8 稳定系数随抗弯刚度的变化趋势

Fig. 8 Changing tendencies of stability coefficients with flexural rigidity

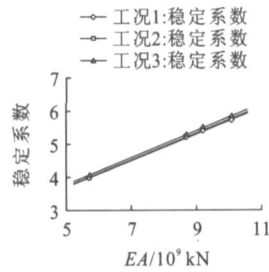


图 9 稳定系数随抗压刚度的变化趋势

Fig. 9 Changing tendencies of stability coefficients with compressive rigidity

2.5 振型与频率

当保持抗压刚度不变,抗弯刚度根据各个规范取值时,石潭溪大桥的前五阶振型分别为:一阶振型为拱肋面外对称;二阶振型为桥面系面外对称;三阶振型为拱肋面外反对称;四阶振型为拱肋面内反对称;五阶振型为拱肋和桥面系耦合面内弯扭。各阶振型出现的顺序没有发生变化,振型见图 10。从各振型出现的先后顺序可以看出,相对于面内刚度,拱桥的面外刚度较小。

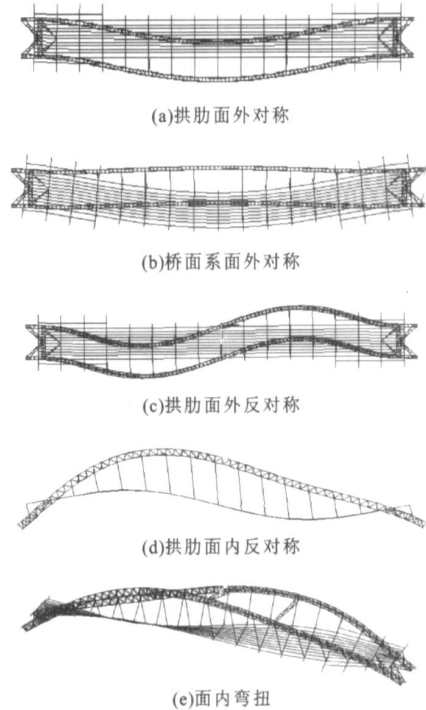


图 10 有限元模型前五阶振型

Fig. 10 Five vibration modes of finite element model

当保持抗弯刚度不变,抗压刚度按各规范取值时,石潭溪大桥的前五阶振型基本保持不变。仅当抗压刚度按 AISC^[11]取值时,对拱桥面内刚度的削减程度要比面外来得大,导致第三阶振型和第四阶振型出现的先后顺序对调。

图 11、12 为各阶振型的频率随抗弯刚度和抗压刚度取值的变化趋势。可以看出,抗弯刚度对各个振型频率的影响很小,可以忽略不计。而当抗弯刚度保持不变,抗压刚度增大 76.0%时,以拱肋振动为主的振型的自振频率增幅为 20.1%~23.2%,拱桥面内弯扭振型的频率增大 11.0%,而以桥面系振动为主的振型(桥面系一阶面外对称)的自振频率增幅仅有 0.6%。由此可见,抗弯刚度的取值变化对

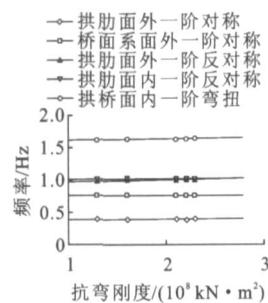


图 11 频率随抗弯刚度的变化

Fig. 11 Changing tendencies of frequencies with flexural rigidity

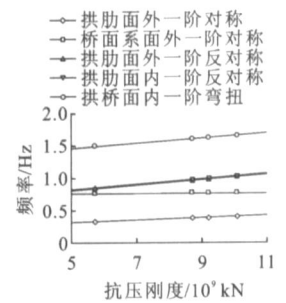


图 12 频率随抗压刚度的变化

Fig. 12 Changing tendencies of frequencies with compressive rigidity

基频计算的影响可以忽略不计;而抗压刚度的取值对拱肋振动为主的振型的频率影响最大,对弯扭为主的振型的频率影响次之,而对桥面系的动力特性的影响最小,可以忽略,但从影响幅度来说也不大。

3 计算结果分析及建议

3.1 桁式拱肋刚度构成分析

图 13 为对文献[2]给出的 66 座钢管混凝土桁式拱桥拱肋弦管管径和拱肋截面高度比值统计结果。一般来说,跨径为 80~300 m 的钢管混凝土桁式拱桥的拱肋截面高度应该在 1.8~6.0 m 之间。从图 13 中可以看出,当拱肋截面高度小于 4.0 m 时,弦管管径与拱肋截面高度的比值主要分布在 20%~30%之间;而当截面高度在 4.0~6.0 m 时,弦管管径与拱肋截面高度的比值主要在 15%~25%之间;截面高度大于 6.0 m 时,弦管管径与拱肋截面高度的比值主要分布在 10%左右。由此可见,单肢弦管在桁式拱肋截面中所占面积较小。钢管混凝土桁式拱肋的截面惯性矩计算式为

$$I = \sum_{i=1}^m (I_{sc}^i + a_i^2 A_{sc}^i) \quad (2)$$

式中: A_{sc}^i 为弦管的截面积; I_{sc}^i 为弦管的截面惯性矩; a_i 为弦管中心到中性轴的距离; m 为弦管肢数。

图 14 为弦管自身的惯性矩与拱肋截面的惯性矩的比值随桥梁跨径的分布趋势。可以看出,在多

数桁式钢管混凝土拱桥中,弦管自身的抗弯刚度与拱肋整体抗弯刚度的比值大多小于 4%,且随着桥梁跨径的增大呈减小的趋势,钢管混凝土桁式拱肋主要是通过增大上、下弦管之间的距离来增大拱肋的抗弯刚度。

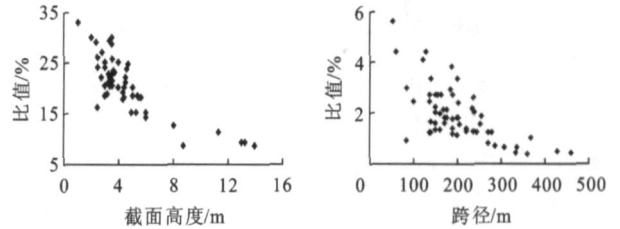


图 13 管径与拱肋高度的比值 图 14 弦管抗弯刚度与截面抗弯刚度的比值
Fig. 13 Ratio of tube diameter to height of arch rib Fig. 14 Ratio of tube flexural rigidity to section flexural rigidity

从上面的分析可知,桁式拱肋截面抗压刚度由各弦杆的抗压刚度相加而成;抗弯刚度则由两部分相加而成,一部分是弦管抗弯刚度,另一部分是弦管抗压刚度与弦杆中心与中性轴距离平方的乘积。从工程实际调查结果来看,第二部分是截面抗弯刚度的主要部分,而且,跨径越大其影响也越大,因此,对于桁式拱肋来说,钢管混凝土弦杆的抗压刚度取值不仅影响到截面的抗压刚度,而且影响到截面的抗弯刚度。桁式拱肋截面刚度的这一特性,使得弦杆刚度取值对计算结果的影响与单圆管拱肋的刚度取值对计算结果的影响表现出差异性,见表 3。

表 3 影响规律对比

Tab.3 Comparison of effect rules

拱肋形式		受力特性计算结果分析					
		内力	应力	变形	一类稳定	振型顺序	自振频率
实体拱肋 ^[5-7]	抗压刚度增大	可忽略	可忽略	可忽略	可忽略	可忽略	可忽略
	抗弯刚度增大	轴力可忽略,弯矩增大	增大	减小	增大	可忽略	可忽略
桁式拱肋	抗压刚度增大	轴力可忽略,弦杆弯矩减小	可忽略	减小	增大	变化过大引起顺序改变	可忽略
	抗弯刚度增大	轴力可忽略,弦杆弯矩增大	增大	可忽略	可忽略	可忽略	可忽略

从表 3 可以看出,桁式拱肋弦管刚度取值变化对内力、应力和自振频率的影响与单圆管拱肋相似,但对变形与一类稳定系数的影响则相反。对于单圆管拱肋来说,单圆管抗压刚度(也就是截面的抗压刚度)取值的变化对结构受力的影响很小;而对于桁拱来说,弦杆抗压刚度取值增大导致了截面抗弯刚度的增大,使得对结构受力计算结果的影响与单圆管拱抗弯刚度的影响效果相似,但桁式拱肋中弦管的抗弯刚度随着截面高度的增大在截面抗弯刚度中的贡献下降,导致其对结构计算结果的影响下降,除了对弦杆的受力有影响外,其对结构整体受力的影响

都可以忽略不计,这与单圆管拱肋相反。

3.2 桁式拱肋截面刚度设计计算取值建议

分析表明,桁式拱肋弦管刚度取值对内力、应力及自振频率的影响规律与实体拱肋基本相同,但由于抗压刚度的增大引起弦杆弯矩的减小,因此,基于安全的原则,建议在进行钢管混凝土桁式拱桥内力、应力及自振频率计算时,弦管刚度取值采用

$$EA = E_s A_s + 0.4 E_c A_c$$

$$EI = E_s I_s + E_c I_c$$

而进行变形及一类稳定计算时,弦杆抗弯刚度取值的影响较小,可以忽略,基于与实体拱肋取值的

一致性,建议取

$$EI = E_s I_s + 0.4 E_c I_c$$

但抗压刚度取值对变形与稳定计算结果的影响较大,应采用较小的抗压刚度取值,计算结果才偏于安全,因此,建议进行此类计算时,抗压刚度取值采用

$$EA = E_s A_s + 0.4 E_c A_c$$

按照上述刚度取值建议计算的石潭溪大桥内力、变形结果与实桥测试结果进行了对比,各个典型截面的内力计算结果主要分布在实测值的 1.2 ~ 1.5 倍之间,而主要截面的变形计算结果大多数分布在实测变形的 1.5 ~ 1.9 倍之间,因此,设计刚度按照上述方法取值可以保证桁式钢管混凝土拱桥的设计方案具有一定的安全储备。

3.3 钢管混凝土拱肋截面刚度设计计算取值建议

综合本文的分析结果和文献[5-7]的结论,钢管混凝土拱桥拱肋截面设计刚度取值建议按式(1)计算,具体计算时的混凝土截面刚度折减系数见表 4。

表 4 刚度折减系数

Tab.4 Rigidity reduced factors

计算内容	钢管混凝土拱肋形式			
	单圆管及哑铃形		桁式	
	A	I	A	I
内力、应力、动力特性	1.0	1.0	0.4	1.0
弹性屈曲与变形	0.4	0.4	0.4	0.4

4 结 语

在钢管混凝土桁式拱桥的拱肋刚度中,弦管的轴压刚度不仅对截面抗压刚度有影响,而且对截面抗弯刚度影响很大,而弦管的抗弯刚度在截面抗弯刚度中所占的比值较小,这样使得桁式拱肋在计算钢管混凝土弦管的刚度取值的考虑与实体拱肋截面有所不同,因此,钢管混凝土拱桥拱肋截面刚度计算取值还应根据实体拱肋和桁式拱肋分别选用。

在钢管混凝土构件的刚度计算中,多数采用钢管截面刚度与混凝土截面刚度相加形式,其中混凝土截面刚度有采用全截面的,也有进行折减的,建议在钢管混凝土拱肋截面刚度计算取值时采用这一计算方法。本文给出了根据不同截面形式、不同计算内容的截面刚度计算取值建议值,可供工程应用和钢管混凝土拱桥设计规范制定参考。

参考文献:

References :

[1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥计算理论研究进展[J]. 土木工程

学报,2003,36(12):47-57.

Chen Bao-chun. State-of-the-art theory of calculation for concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(12): 47-57. (in Chinese)

[2] 陈宝春,杨亚林. 钢管混凝土拱桥调查与分析[J]. 世界桥梁, 2006,34(2):73-77.

Chen Bao-chun, Yang Ya-lin. Investigation and analysis of concrete-filled steel tube arch bridges[J]. World Bridges, 2006, 34(2): 73-77. (in Chinese)

[3] 王来永,陈宝春,孙 潮. 钢管混凝土设计方法比较[J]. 工程力学,2001,18(增刊):544-548.

Wang Lai-yong, Chen Bao-chun, Sun Chao. Comparison of design methods for CFST[J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(S): 544-548. (in Chinese)

[4] 卢 辉. 世界各国规程钢管混凝土构件抗弯承载力及抗弯刚度的对比[J]. 福建建筑,2005,23(2):127-130.

Lu Hui. Comparison on ultimate flexural bearing capacity and flexural stiffness of concrete filled steel tubes calculated by different design codes[J]. Fujian Architecture & Construction, 2005, 23(2): 127-130. (in Chinese)

[5] 陈宝春,韦建刚. 钢管混凝土(单圆管)拱肋刚度对其动力特性的影响[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(3):105-109.

Chen Bao-chun, Wei Jian-gang. Effect of rigidities of concrete filled steel tubular (single tube) arch rib on its dynamic characteristics[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(3): 105-109. (in Chinese)

[6] 韦建刚,陈宝春,彭桂翰. 钢管混凝土单圆管拱肋刚度取值对静力计算的影响[J]. 公路交通科技,2004,21(11):47-51.

Wei Jian-gang, Chen Bao-chun, Peng Gui-han. Analysis of rigidity of concrete filled steel tubular (single tube) arch[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(11): 47-51. (in Chinese)

[7] 韦建刚,王加迫,陈宝春. 钢管混凝土哑铃形拱肋设计刚度取值问题研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2007,35(4):582-587.

Wei Jian-gang, Wang Jia-po, Chen Bao-chun. Analysis of rigidity in design for CFST dumbbell-rib arch bridges[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2007, 35(4): 582-587. (in Chinese)

[8] CECS 28:90, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].

[9] JCJ 01—89, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].

[10] DL/T 5085—1999, 钢-混凝土组合结构设计规程[S].

[11] LRFD-US-3-12, Load and resistance factor design specification for structural steel buildings[S].

[12] BS5400, British standards part5: concrete and composite bridges[S].

[13] AII 1997, Recommendations for design and construction of concrete filled tubular structures[S].

[14] Chen Bao-chun. Nonlinear characteristics and ultimate load-carrying capacity of concrete filled tubular arch[D]. Kyushu University, 2003.