

钢管混凝土哑铃形拱肋设计刚度取值问题研究

韦建刚, 王加迫, 陈宝春

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 各国规范中对钢管混凝土构件刚度的定义存在着差异, 因此钢管混凝土截面设计刚度取值的不同将对钢管混凝土哑铃形拱内力、变形和稳定等的计算结果产生影响. 本文以一座钢管混凝土哑铃形拱桥的实测资料为基础, 通过对目前钢管混凝土截面刚度计算方法的比较分析, 对钢管混凝土哑铃形拱桥拱肋设计刚度取值提出了一些建议, 可供工程实践参考.

关键词: 拱桥; 哑铃形; 钢管混凝土; 刚度; 计算

中图分类号: U448.2

文献标识码: A

Analysis of rigidity in design for CFST dumbbell - rib arch bridges

WEI Jian - gang, WANG Jia - po, CHEN Bao - chun

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

Abstract: There are some differences in the define of the rigidity of CFST component between the codes of countries it influence the calculation result of internal forces, deformations, stability and self - frequency of CFST dumbbell - rib arch bridge in design. Based on testing results of a real CFST dumbbell - rib arch bridge, the comparative analysis by using different rigidity defines of the CFST component was carried out in this paper. Some useful conclusions were deduced to be help for the design of this type bridges.

Keywords: arch bridge; dumbbell - rib; concrete filled steel tube; rigidity; caculating

钢管混凝土结构在我国桥梁工程中得到了广泛应用, 其拱肋截面形式多样化, 主要有单圆管、哑铃形以及桁式截面等. 文献 [1] 统计跨径 80 m ~ 160 m 的 115 座钢管混凝土拱桥中, 采用哑铃形拱肋的就有 62 座 (不含横哑铃形), 占 53.9%. 可见哑铃形截面在钢管混凝土拱桥中的应用范围很广.

目前我国尚未颁布有关钢管混凝土拱桥的设计规范. 在钢管混凝土拱桥设计过程中, 其截面设计刚度取值多数参照钢管混凝土结构设计规程或规范, 但是这些规程或规范的刚度计算方法各异、计算结果存在较大的差异^[2], 应用于钢管混凝土拱桥设计计算中, 将导致计算结果的差异. 因此, 有必要对钢管混凝土拱桥设计计算的截面刚度取值问题进行研究, 为工程应用和制定钢管混凝土拱桥设计规范服务^[3]. 文献 [4, 5] 对单圆管拱肋刚度取值问题进行了研究并提出了建议, 对于哑铃形拱肋的截面刚度取值问题目前尚未见研究报导. 为此, 本研究以一钢管混凝土哑铃形拱肋拱桥 - 福鼎新桐山大桥为例, 对该桥进行有限元分析, 讨论钢管混凝土哑铃形拱肋截面刚度设计取值对其静、动力计算结果的影响, 为此类桥梁的设计计算提供参考.

1 计算实例

新桐山大桥位于福鼎市, 跨越桐山溪, 连接 104 国道和福鼎市区. 主跨为墩中心距为 75 m 的钢管混凝土下承式系杆拱, 净跨径 70 m, 净矢跨比 1/5. 拱肋采用由两根 $\phi 800 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆钢管混凝土组成

收稿日期: 2006 - 09 - 29

作者简介: 韦建刚 (1971 -), 男, 博士研究生, 副研究员.

基金项目: 福建省重大科技资助项目 (2003F007)

的哑铃形断面, 管内浇注 C40 混凝土 (见图 1).

大桥建成后进行了实桥静载测试, 其中工况 1 按拱顶最大正弯矩、工况 2 按拱脚截面最大负弯矩、工况 3 按四分点截面最大正弯矩分别布载.

采用大型通用软件 ANSYS 进行建模分析. 模型中吊杆和系杆采用 Link10 单元, 其它的用空间梁单元 Beam4 建模, 全桥共 1 236 个节点, 1 778 个单元, 计算模型见图 2

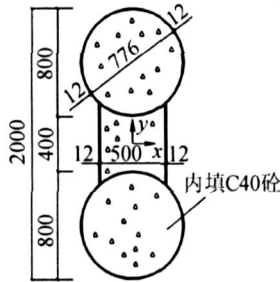


图 1 拱肋截面 (mm)

Fig. 1 Cross - section of arch rib (mm)

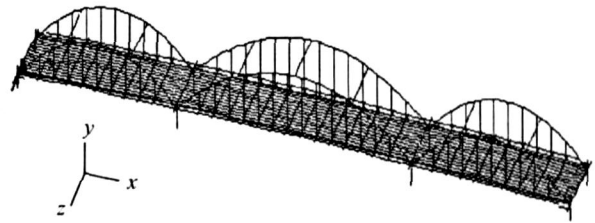


图 2 新桐山大桥有限元模型

Fig. 2 FEM model of Xin - Tongshan bridge

钢管混凝土拱肋截面的刚度计算方法详见各规程^[6-11]. 本研究在进行钢管混凝土哑铃形截面刚度计算时, 根据各个不同的规范 (规程) 的规定, 对截面混凝土 (含腹腔混凝土) 的刚度进行一定的折减 (或不折减) 后与钢管 (含腹板) 截面刚度进行简单叠加. 为统一表达, 符号意义规定如下: EA 为钢管混凝土的抗压刚度; EI 为钢管混凝土的抗弯刚度; E_s 、 E_c 分别为钢材和混凝土的弹性模量; I_s 和 I_c 分别为钢管截面和混凝土截面的惯性矩; A_s 和 A_c 分别为钢管截面和混凝土截面的面积. 按不同规范计算所得的实例钢管混凝土拱肋抗压刚度与抗弯刚度见表 1.

为了讨论拱肋刚度取值对钢管混凝土拱桥静力性能的影响, 本研究采用两种比较方法对有限元模型进行计算, 一是保持截面的抗弯刚度不变, 即取 $EI = E_s I_s + E_c I_c$, 而抗压刚度根据各个规范取值; 二是保持截面抗压刚度不变, 即取 $EA = E_s A_s + E_c A_c$.

表 1 哑铃形截面设计刚度取值

Tab 1 Rigidity in design of dumbbell cross - section

项目	公式		刚度计算结果		
	抗压刚度	抗弯刚度	EA /kN	$E_{\text{箱内}}$ /kN·m ²	$E_{\text{箱外}}$ /kN·m ²
CSCS ^[6]	$EA = E_s A_s + E_c A_c$	$EI = E_s I_s + E_c I_c$	53.28×10^9	17.80×10^9	2.47×10^9
JCJ ^[7]	$E_{SC} = 0.85 [E_s + (1 -) E_c]$	$E_{SC} = 0.85 [E_s + (1 -) E_c]$	36.86×10^9	14.99×10^9	1.79×10^9
DL/T ^[8]	查表	查表	48.94×10^9	19.87×10^9	2.27×10^9
A ISC ^[9]	$EA = E_s A_s + 0.8 E_c A_c$	$EI = E_s I_s + 0.8 E_c I_c$	30.36×10^9	7.91×10^9	1.41×10^9
BS5400 ^[10]	$EA = E_s A_s + E_c A_c$	$EI = E_s I_s + E_c I_c$	53.28×10^9	17.80×10^9	2.47×10^9
A II ^[11]	$EA = E_s A_s + E_c A_c$	$EI = E_s I_s + 0.2 E_c I_c$	53.28×10^9	15.32×10^9	2.20×10^9

2 计算结果分析

2.1 内力

钢管混凝土拱是超静定拱, 所以刚度会对结构内力计算结果产生影响. 在分析中, 取各工况的典型截面的轴力和弯矩作为分析对象, 工况 1 为拱顶截面、工况 2 为拱脚截面、工况 3 为拱肋 $L/4$ 截面. 图 3、4 为各截面内力随着刚度取值不同的变化情况. 从图中可以看出, 抗压刚度取值对拱肋内力的影响很小, 可以忽略不计; 而抗弯刚度取值对轴力计算结果的影响也可以忽略; 仅对弯矩的计算结果有较大的影响.

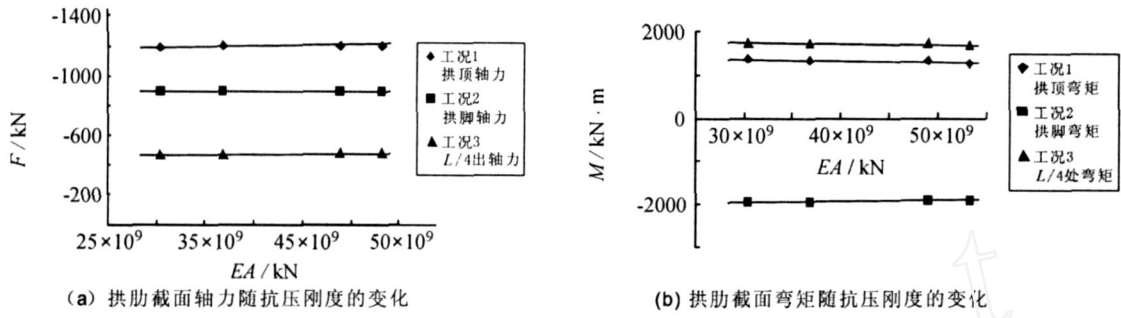


图 3 拱肋内力随抗压刚度的变化

Fig. 3 Internal forces for different compressive rigidities

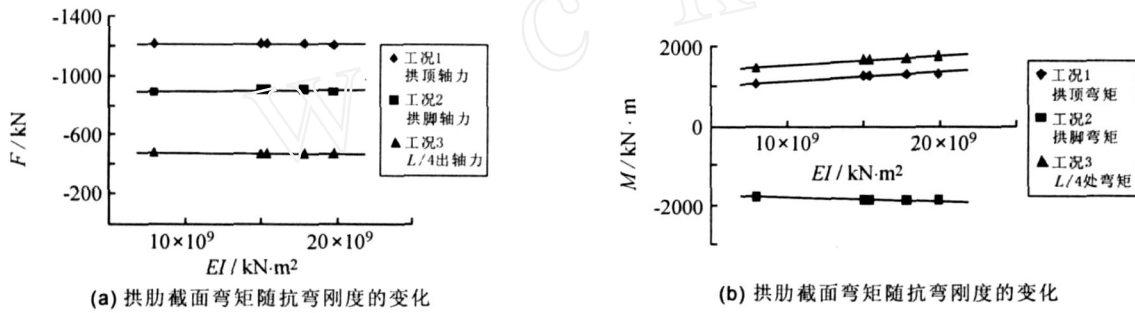


图 4 拱肋内力随抗弯刚度的变化

Fig. 4 Internal forces for different flexural rigidities

2.2 应力

根据文献 [12] 提出的钢管混凝土哑铃形偏心受压短柱极限承载力的修正格构式算法计算各截面上下弦管的内力, 并根据弦管截面钢管与混凝土的刚度分配计算出钢管的纤维应力. 图 5 为拱肋上下缘应力随抗压刚度取值的变化情况. 从图中可以看出, 当保持抗弯刚度不变的前提下, 应力随抗压刚度取值变化的影响较小, 可忽略不计. 图 6 为拱肋上下缘应力随抗弯刚度取值的变化情况. 从图中可以看出, 拱肋截面应力随抗弯刚度取值增大而增大, 以工况 1 中拱顶截面应力变化最大, 其下缘应力增幅为 47.3%; 可见抗弯刚度取值对拱肋截面应力的计算结果有较大的影响.

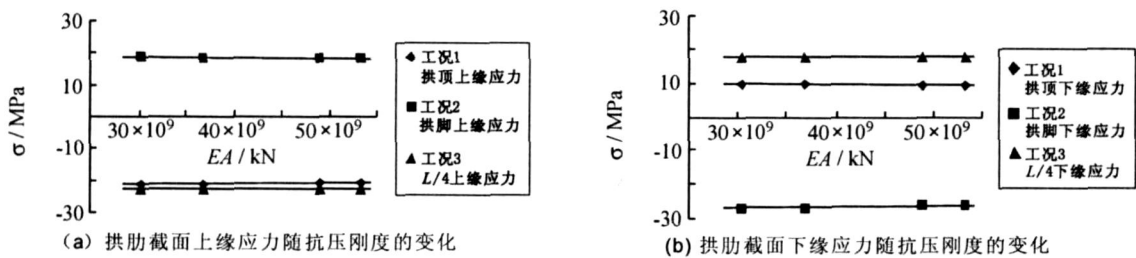


图 5 拱肋上下缘应力随抗压刚度的变化

Fig. 5 Stresses for different compressive rigidities

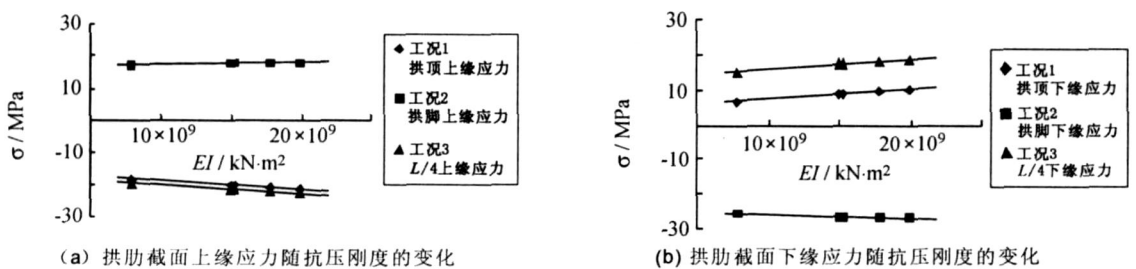


图 6 拱肋上下缘应力随抗弯刚度的变化

Fig. 6 Stresses for different flexural rigidities

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引起的下挠. 所以, 无论是拱肋截面抗压刚度或抗弯刚度的减小, 均会引起拱的挠度的增大. 拱肋变形随着刚度取值不同而变化曲线图详见图 7、图 8. 从图中可以看出, 拱肋的位移均随着刚度取值的增大而减小, 在抗压刚度增大的情况下, 拱肋位移在工况 1 中的减幅最大为 21.4%; 而随着抗弯刚度取值的增大, 拱肋位移减小幅度为 72.6% ~ 105.0%.

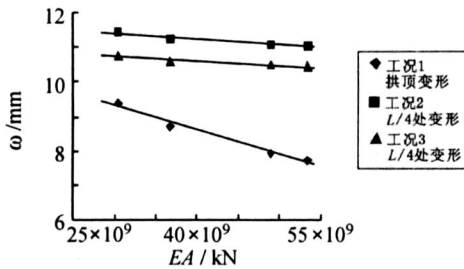


图 7 拱肋挠度随抗压刚度的变化

Fig. 7 Deflection for different compressive rigidities

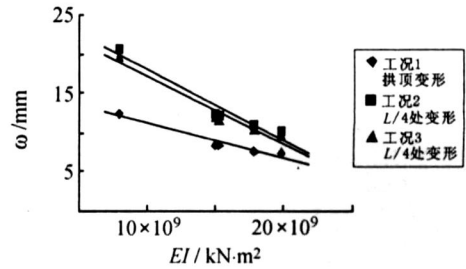


图 8 拱肋挠度随抗弯刚度的变化

Fig. 8 Deflection for different flexural rigidities

2.4 弹性屈曲临界荷载

从计算结果可知, 刚度取值的变化对屈曲模态不会产生影响, 均为面外失稳, 因此在本小节的抗弯刚度取面外刚度进行分析. 图 9、10 为在各个工况下, 弹性屈曲系数随刚度的变化情况. 从图中可以看出, 抗压刚度对弹性屈曲临界荷载的计算结果有一点影响, 但影响极小, 可忽略不计; 面外抗弯刚度对拱的弹性屈曲临界荷载有很大的影响.

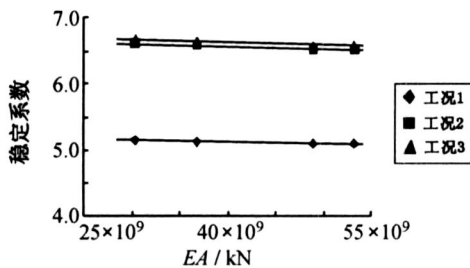


图 9 稳定系数随抗压刚度的变化

Fig. 9 Stability factor for different compressive rigidities

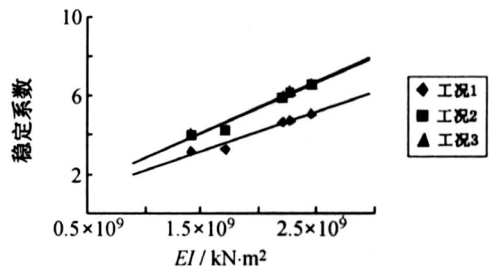


图 10 稳定系数随抗弯刚度的变化

Fig. 10 Stability factor for different flexural rigidities

2.5 动力特性

桥梁结构的动力特性是其动力性能分析的重要参数, 它包括自振频率、振型等, 与结构的组成体系、刚度、质量分布以及支承条件等有关. 它对于正确地进行桥梁的抗震设计、车振分析及抗风稳定性分析等都有着重要的意义.

为了研究刚度取值对钢管混凝土哑铃形拱桥的动力性能的影响, 提取四种不同振型 (拱肋面外一阶对称和一阶反对称、拱肋面内一阶反对称和一阶对称) 在各种刚度取值的情况下的频率, 并比较各个振型频率随刚度取值不同的变化幅度, 详见表 2. 图 11 和图 12 为各阶振型频率随刚度取值不同的变化情况.

表 2 各阶振型频率随刚度取值的变化幅度情况

Tab 2 Vary amplitude of fundamental frequency for different rigidity

截面刚度变化幅度	面外振型		面内振型	
	面外一阶对称	面外一阶反对称	面内一阶反对称	面内一阶对称
抗压刚度 (76%)	0.0%	0.1%	0.0%	4.9%
面内抗弯刚度 (151%)			40.7%	24.2%
面外抗弯刚度 (75%)	24.2%	26.7%		

从表 2 及图 11、12 可以看出, 哑铃形截面抗压刚度的取值对拱桥面内外振型的频率计算结果影响不大, 但随抗弯刚度取值的增大而增大, 影响也不是太大.

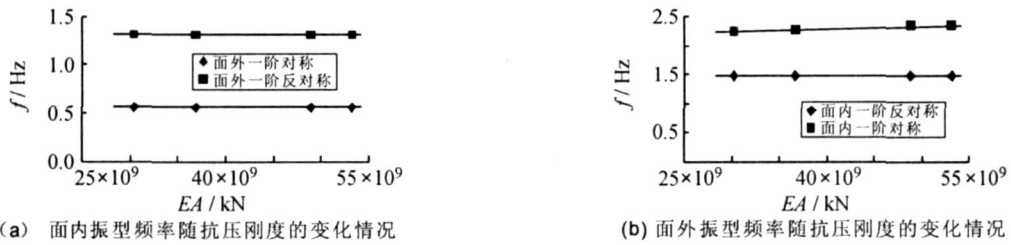


图 11 各阶频率随抗压刚度的变化情况

Fig. 11 Fundamental frequency for different compressive rigidity

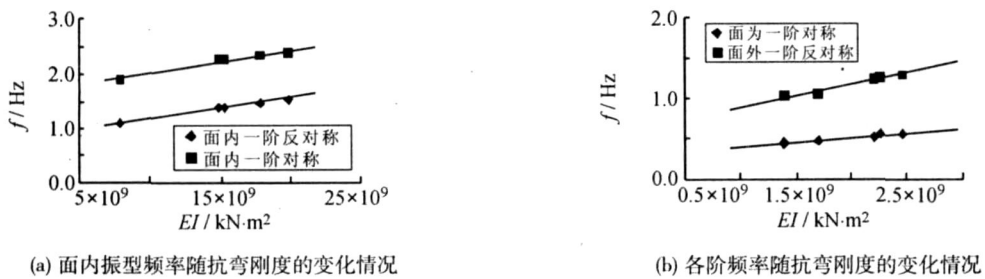


图 12 各阶频率随抗弯刚度的变化情况

Fig. 12 Fundamental frequency for different flexural rigidity

3 刚度取值建议

将本研究的分析结果同文献 [4, 5] 的结论相比较, 由于钢管混凝土单圆形截面和哑铃形都是实心截面, 在有限元建模过程中都将整个拱肋简化为单一截面进行计算, 所以两者受刚度取值的影响基本相同.

文献 [4, 5] 对单圆管拱肋拱桥截面刚度取值问题进行分析后建议: 进行内力、应力和自振频率计算时拱肋截面的刚度取值采用钢管与混凝土刚度的直接迭加, 即 $EA = E_s A_s + E_c A_c$, $EI = E_s I_s + E_c I_c$; 在进行变形及弹性屈曲系数计算时考虑对刚度的折减, 即 $EA = E_s A_s + 0.4 E_c A_c$, $EI = E_s I_s + 0.4 E_c I_c$. 从对哑铃形钢管混凝土拱肋的分析看出, 拱肋截面刚度取值的影响与单圆管拱肋基本一致, 基于简便的原则, 建议在进行哑铃形钢管混凝土拱桥计算时, 拱肋截面设计刚度取值采用与单元管拱肋相同的形式.

为了验证对钢管混凝土哑铃形拱肋截面刚度的取值方法是否合理, 根据建议的计算方法取值, 对新桐山大桥有限元模型进行计算, 并同实桥测试结果进行对比.

表 3 应力计算值与实测值对照表

Tab 3 Stress comparison of calculation and test

截面	工况 1			工况 2			工况 3			
	MPa	MPa	/	MPa	MPa	/	MPa	MPa	/	
1	上	- 1. 236	3. 090	- 2. 500	6. 798	11. 536	1. 697	7. 004	10. 506	1. 500
	下	- 8. 652	- 13. 184	1. 524	- 10. 300	- 15. 244	1. 480	- 8. 446	- 13. 596	1. 610
2	上	- 16. 068	- 17. 304	1. 077	- 11. 536	- 14. 626	1. 268	- 12. 360	- 12. 772	1. 033
	下	3. 502	3. 914	1. 118	7. 004	9. 476	1. 353	4. 532	8. 446	1. 864
3	上	9. 270	8. 858	0. 956	- 7. 416	- 8. 240	1. 111	- 8. 446	- 8. 240	0. 976
	下	- 15. 656	- 20. 806	1. 329	3. 708	3. 296	0. 889	2. 266	3. 914	1. 727
4	上	- 15. 862	- 16. 892	1. 065	14. 420	17. 304	1. 200	14. 008	17. 098	1. 221
	下	3. 090	3. 502	1. 133	- 15. 656	- 22. 660	1. 447	- 14. 626	- 21. 836	1. 493
5	上	- 1. 442	2. 678	- 1. 857	- 17. 510	- 25. 750	1. 471	- 16. 892	- 25. 750	1. 524
	下	- 7. 622	- 12. 772	1. 676	11. 124	19. 158	1. 722	10. 300	19. 570	1. 900

注: 表中 表示实测应力; 表示计算应力

表 3 应力计算结果同实测应力的比较, 表 4 为有限元挠度计算结果同实测数据的比较. 表中截面 1、2、3、4、5 分别表示拱脚截面、 $L/4$ 截面、 $L/2$ 截面、 $3L/4$ 截面、拱脚截面; “上”、“下” 表示截面上缘应力和下缘应力, $\sigma_{\text{实}}$ 表示实测应力、 $\sigma_{\text{计}}$ 表示计算应力. 从表中可以看出大多数计算应力都在实测应力的 1.2 ~ 1.6 倍, 计算挠度和实测挠度的比值主要分布在 1.5 ~ 2.0 倍, 说明所建议的刚度取值方法不仅合理而且具有一定的安全储备.

表 4 挠度计算值与实测值对照表

Tab 4 Deflection comparison of calculation and test

(mm)

工况	项目	$L/4$	7号吊杆	跨中	8号吊杆	$3L/4$
工况 1		- 0.3	7.9	7.9	7.7	- 0.9
		- 2.7	11.1	11.4	11.0	- 3.2
	/	10.4	1.4	1.4	1.4	3.7
工况 2		9.5	2.1	0.2	- 1.6	- 6.3
		17.4	2.0	- 1.6	- 4.9	- 12.7
	/	1.8	1.0	- 6.8	3.1	2.0
工况 3		8.7	1.6	0.0	- 1.6	- 5.6
		16.5	1.1	- 2.2	- 5.1	- 11.6
	/	1.9	0.7	53.8	3.2	2.1

注: 表中 $\sigma_{\text{实}}$ 表示实测挠度, $\sigma_{\text{计}}$ 表示计算挠度, 表中数据正数为下挠, 负数为上拱

4 结语

以福鼎新桐山大桥 (钢管混凝土哑铃形拱桥) 为背景工程, 建立有限元模型, 进行了钢管混凝土设计刚度取值 (抗压刚度和抗弯刚度) 对哑铃形钢管混凝土拱桥内力、应力、变形、稳定、动力特性等计算结果的影响分析. 研究发现, 刚度取值的影响与单圆管拱肋基本一致, 因此基于简便的原则, 建议在进行哑铃形钢管混凝土拱桥计算时, 拱肋截面设计刚度取值采用与单元管拱肋相同的形式. 通过与实测结果的对比发现, 采用本研究建议的刚度取值合理且具有一定的安全储备.

需要指出, 在钢管混凝土拱桥正常使用极限状态的研究中, 本研究进行的钢管混凝土哑铃形拱桥拱肋刚度计算取值研究仅是初步的, 要提出可以用于规范制订的条文, 还有大量的研究工作有待开展.

参考文献:

- [1] 陈宝春, 杨亚林. 钢管混凝土拱桥应用概况分析 [J]. 世界桥梁, 2006(2): 73 - 77.
- [2] 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(增刊): 544 - 548.
- [3] 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(12): 47 - 57.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 中国工程建设标准化协会标准. CECS28: 90 钢管混凝土结构设计与施工规程 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1990.
- [7] 国家建筑材料工业局标准. JCJ01—89 钢管混凝土结构设计与施工规程 [S]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- [8] 中国电力行业标准. DL/T5085—1999 钢管混凝土组合结构设计规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [9] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]. [s 1]: AISC, 1986.
- [10] British Standards Institute. BS5400, Concrete and composite bridges [S]. [s 1]: BSI, 1979.
- [11] Architectural Institute of Japan (AII). Recommendations for design and construction of concrete filled tubular structures [S]. [s 1]: AII, 1997.
- [12] 韦建刚, 陈宝春, 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形偏心受压短柱极限承载力的修正格构式算法 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 603 - 607.

(责任编辑: 沈 芸)