

## 空心钢管混凝土拱桥截面设计参数影响分析

廖万辉<sup>1,2</sup>, 岳亚超<sup>2</sup>, 颜东煌<sup>2</sup>, 许红胜<sup>2</sup>

(1. 贵州省公路工程集团有限公司第三分公司, 贵州 贵阳 550008; 2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**结合某特大钢管拱桥设计优化方案,基于建模—试设计—一体化联合分析方法,利用规范 CECS 254—2009《空心钢管混凝土结构技术规程》,针对空心钢管混凝土空心率和钢管截面壁厚的设计参数,通过计算稳定承载力验算系数,进行系统的影响性分析。研究表明:在钢管外径为 1 360 mm 时,空心率对稳定承载力验算系数的影响曲线斜率随空心率的增大而增大,其对构件承载能力影响较为显著;而稳定承载力验算系数随钢管壁厚的增大呈线性减小,斜率随钢管壁厚的增大变化不明显,其对构件承载能力的影响相对较小。

**关键词:**钢管混凝土拱桥; 空心钢管混凝土; 截面设计参数; 稳定承载力验算系数

**中图分类号:** U442

**文献标志码:** A

钢管混凝土构件具有承载力高、抗震性能好、自重轻、抗冲击性能优越等优点,随着交通事业的发展,钢管混凝土拱桥已经在中国得到了广泛的应用。近 20 年来中国修建的跨径 50 m 以上的钢管混凝土拱桥超

过 250 座,目前跨径大于 400 m 的有 7 座。钢管混凝土根据成型方式的不同,可分为实心钢管混凝土和空心钢管混凝土,与实心钢管混凝土相比,空心钢管混凝土具有节约混凝土、减轻自重、便于运输和施工等优

的增长,加劲梁的竖向位移随之非线性增大使得主缆松弛,这时悬索桥由于主缆重力刚度迅速下降而引发静风失稳。

(2) 四塔三跨悬索桥多跨效应明显,悬索桥侧弯和扭转约束效应明显,非线性静风失稳主要表现为竖向弯扭失稳,与一般的双塔单跨悬索桥侧向弯扭屈曲和扭转失稳不同。

(3) 该文四塔三跨悬索桥由于主缆和吊杆结构纤细,作用在其上面的风荷载小,对悬索桥的非线性静风稳定性影响较小。

#### 参考文献:

- [1] BOONYAPINYO V, YAMADA H, MIYATA T. Wind-induced Nonlinear Lateral-Torsional Buckling of Cable-Stayed Bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(2): 486—506.
- [2] 程进, 江见鲸, 肖汝诚, 等. 大跨度桥梁空气静力失稳机理研究[J]. 土木工程学报, 2002(1): 35—39.
- [3] 李渊, 杨詠昕, 郭增伟, 等. 大跨径三塔双主跨斜拉桥非线性风致静力失稳分析[J]. 结构工程师, 2012, 28(1): 87—

93.

- [4] 沈锐利, 侯康, 张新. 三塔四跨悬索桥合理结构布置形式研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 101—106.
- [5] 李翠娟, 李永乐, 强士中. 交叉吊索对超大跨 CFRP 主缆悬索桥静风失稳的抑制作用[J]. 振动与冲击, 2016, 35(17): 177—184.
- [6] 张玉琢, 刘海卿, 马凯. 大跨径悬索桥静风稳定性研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 258—262.
- [7] 同济大学. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/3360—01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [8] 管青海. 大跨加劲梁人行悬索桥风致稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [9] 李文杰. 大跨径悬索桥静风稳定性分析[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [10] 管青海, 周燕, 李加武, 等. 主跨 420 m 人行悬索桥非线性静风稳定影响参数分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 155—160.
- [11] 罗建辉, 陈政清, 刘光栋. 大跨度缆索承重桥梁非线性静风扭转失稳机理的研究[J]. 工程力学, 2007(S2): 145—154.

收稿日期: 2021—07—12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51878073)

作者简介: 廖万辉, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: 496961855@qq.com

点。空心钢管混凝土空心率为空心面积与钢管所围面积之比,是影响空心钢管混凝土工作性能的重要因素,其横截面如图 1 所示。近些年来,钢管混凝土拱桥在施工过程中管内浇筑混凝土存在严重的安全风险,且截面的承载能力并未得到充分发挥,故该文以某特大钢管拱桥设计优化方案为例,以规范 CECS 254—2009《空心钢管混凝土结构技术规程》为依据,用稳定承载力验算系数来反映截面承载力的大小,其值越大,结构安全性越低。当其值小于 1 时,结构处于安全状态,等于 1 时,结构处于承载能力极限状态,大于 1 时,结构处于破坏状态。

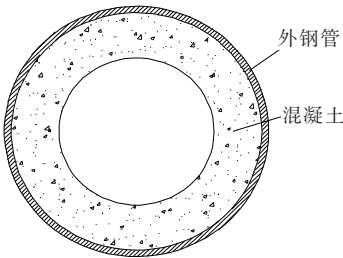


图 1 空心钢管混凝土截面

1 工程概况

某特大钢管拱桥设计优化方案为一座计算跨径为 482 m 的上承式钢管混凝土变截面桁架拱桥,拱轴线采用悬链线,拱轴系数  $m=1.6$ ,矢高  $h=96.4$  m,矢跨比  $f=1/5$ 。主拱圈采用等宽变高度空间桁架结构,肋间设置横联和米撑,拱脚接头采用竖向可转动的铰接方式,由于此桥正处于设计阶段,因此建模时主拱圈截面设计参数参考大小井特大桥,其上、下弦拱肋钢管外径为 1 360 mm,拱肋上弦管自拱脚至拱顶壁厚分别为 35、28、32 mm;拱肋下弦管自拱脚至拱顶壁厚分别为 35、32、28 mm,拱脚采用 Q390D 钢,其余部分均采用 Q345D 钢,管内灌注 C60 自密实微膨胀混凝土(表 1)。初步设计采用空心率为 0.5 的空心钢管混凝土进行计算。

2 计算分析

2.1 原截面下稳定承载力验算系数的计算

参考文献《装配式空心钢管混凝土拱桥可行性研究》中利用 SAP 2000 计算空心钢管混凝土拱桥内力的方法,算得不同空心率和钢管壁厚下的内力值,以此为基础在主拱圈不同位置处选择 5 个截面,分别计算

稳定承载力验算系数。其中原截面下空心钢管混凝土的拱内力值如表 2 所示。

表 1 主拱圈节段壁厚

拱肋节段编号	上弦壁厚/mm	下弦壁厚/mm	主拱肋材质
1	35	35	Q390D
2	35	35	
3	35	35	
4	35	35	
5	28	32	
6	28	32	Q345D
7	28	32	
8	32	32	
9	32	32	
10	32	28	
11	32	28	
12	32	28	
13	32	28	
14	32	28	
合龙段	32	28	

表 2 拱内力

截面位置	弦杆位置	横向弯矩/ (kN·m)	纵向弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN
拱顶	上弦	−167.86	446.44	−18 444.49
	下弦	−174.11	98.46	−19 017.52
3/8	上弦	−570.49	−721.70	−23 139.46
	下弦	−548.60	−111.64	−19 717.34
1/4	上弦	441.26	−2 794.23	−25 111.21
	下弦	104.37	401.21	−21 156.54
1/8	上弦	1 394.30	−249.00	−24 833.67
	下弦	1 235.76	201.00	−26 709.22
拱脚	上弦	忽略不计	忽略不计	−17 834.87
	下弦	忽略不计	忽略不计	−42 135.12

最不利荷载组合作用下,分别取拱顶、3/8、1/4、1/8 和拱脚 5 个不同截面进行计算,其中每个截面的相关参数如表 3 所示。

由表 2 不同位置拱内力值可知:拱顶、3/8、1/4 和 1/8 处截面均为偏心受压构件,拱脚处所受弯矩较小,偏心距可忽略不计,近似看作轴心受压构件进行验算,其他空心率和钢管壁厚下的内力值也如此。根据规范 CECS 254—2009《空心钢管混凝土结构技术规程》中

表 3 截面参数

截面 编号	截面位置	钢管直 径/mm	钢管壁 厚/mm	钢管 强度	混凝土强 度等级
①	拱顶上弦	1 360	32	Q345D	C60
②	3/8 上弦	1 360	32	Q345D	C60
③	1/4 上弦	1 360	28	Q345D	C60
④	1/8 下弦	1 360	35	Q390D	C60
⑤	拱脚下弦	1 360	35	Q390D	C60

规定,圆形截面空心钢管混凝土偏心受压承载力验算按式(1)~(2)计算。

(1) 当  $\frac{N}{\varphi A_{h0}} \geq 0.2f_h$  时:

$$\frac{N}{\varphi N_0} + \frac{\beta_m M}{1.07 M_0 \left(1 - 0.4 \frac{N}{N_E}\right)} \leq 1 \tag{1}$$

(2) 当  $\frac{N}{\varphi A_{h0}} < 0.2f_h$  时:

$$\frac{N}{1.4\varphi N_0} + \frac{\beta_m M}{M_0 \left(1 - 0.4 \frac{N}{N_E}\right)} \leq 1 \tag{2}$$

式中: $N_0$  为轴心受压承载力; $N_E$  为欧拉临界力; $M_0$  为截面受弯承载力设计值; $N$  为轴心压力设计值; $M$  为轴心压力设计值; $\varphi$  为轴心受压构件稳定系数; $A_{h0}$  为空心钢管混凝土构件的组合截面面积; $f_h$  为空心钢管混凝土的组合抗压强度设计值; $\beta_m$  为弯矩等效系数。

假设构件的计算长度为 15 m,根据规范中规定的公式,算得承载力设计值如表 4 所示,其中拱脚处由于弯矩很小,其偏心距近似为零,可看作轴心受压构件进行分析。通过计算可知,5 个截面均满足承载力要求,但通过与内力相比,其材料性能利用率相对较低,造成成本过高,材料浪费。

表 4 承载力设计值

截面 编号	受压承载力/ ( $10^3$ kN)	受弯承载力/ ( $10^3$ kN·m)	稳定承载力 验算系数
①	52.81	18.92	0.376
②	52.81	18.92	0.488
③	49.66	17.15	0.665
④	58.36	21.91	0.515
⑤	58.36	21.91	—

2.2 改变空心率稳定承载力验算系数变化规律分析

现对空心钢管混凝土截面合理性进行分析,首先在保证钢管外径和钢管壁厚不变的条件下内部空心率逐渐增加,利用已算得的拱内力值,计算其对稳定承载力验算系数的影响,根据规范计算可得其规律如图 2 所示。

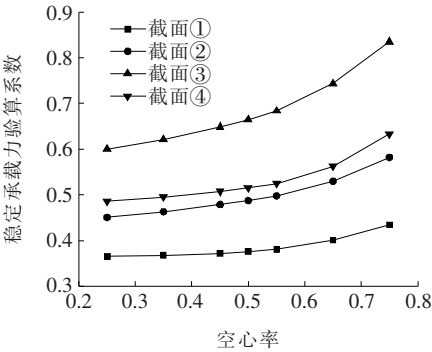


图 2 空心率影响图

通过计算,得到 4 个截面的斜率变化情况如表 5 所示,其值随空心率的增大显著增大,说明空心率对稳定承载力验算系数影响较为显著,当空心率为 0.6 时,稳定承载力验算系数受空心率影响曲线斜率开始发生明显变化,因此建议在进行截面设计时空心率取 0.6 以下,此时稳定承载力验算系数变化较为平缓。通过验算,所选取 5 个截面在空心率变化范围内均满足承载力要求。

表 5 曲线斜率变化

空心率	各截面斜率变化值			
	①	②	③	④
0.35	0.026	0.123	0.213	0.094
0.45	0.037	0.154	0.272	0.124
0.50	0.084	0.180	0.325	0.153
0.55	0.098	0.206	0.373	0.182
0.65	0.199	0.320	0.601	0.381
0.75	0.336	0.524	0.916	0.709

2.3 改变壁厚稳定承载力验算系数变化规律分析

保持空心率和钢管外径不变,逐渐减小钢管壁厚,分析其对稳定承载力验算系数的影响,根据规范 CECS 254—2009《空心钢管混凝土结构技术规程》,计算结果如图 3 所示。结果显示:在保持空心率不变的情况下,4 个截面的稳定承载力验算系数均与钢管壁厚大致呈一次线性变化,钢管壁厚对承载力影响较小。不同位置截面在钢管壁厚验算范围内均满足承载力要求。

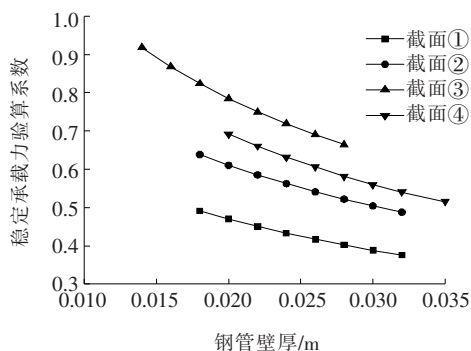


图3 钢管壁厚影响图

## 2.4 空心率和壁厚均改变后稳定承载力验算系数变化规律分析

以截面①为例,对于同一个截面,分别取空心率为0.35、0.5和0.65,逐渐降低钢管壁厚,得到的规律曲线如图4所示。总的来说,无论空心率取何值,稳定承载力验算系数均随壁厚的增加呈线性减小,且空心率越大,曲线斜率越大,钢管壁厚对承载力的影响也越大。

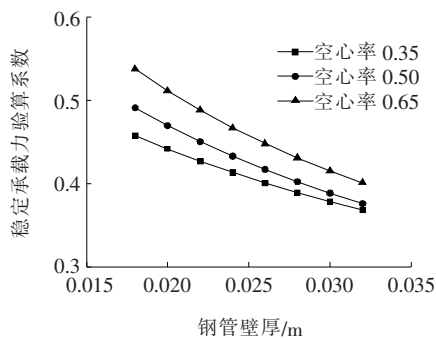


图4 壁厚与空心率双重作用影响图

## 3 结论

(1) 当钢管外径为1 360 mm时,空心率对稳定承载力验算系数的影响曲线斜率变化较为显著,其对承载力影响较大,在进行截面设计时,建议空心率取0.6以下,此时截面安全性受空心率影响较小。

(2) 当钢管外径为1 360 mm时,钢管壁厚对稳定承载力验算系数的影响曲线较为平缓,钢管壁厚对承载力的影响相对不敏感,表明钢管径厚比(含刚率)对

截面承载力影响较小。

(3) 总的来说,当钢管外径为1 360 mm,在进行空心钢管混凝土截面设计时,选择合适的空心率下,减小钢管壁厚从而使材料性能得到充分的发挥,获得最好的经济性。

## 参考文献:

- [1] 王宏伟,陈少杰,周云.圆空心钢管混凝土短柱在轴向压力作用下的可靠性分析[J].土木建筑与环境工程,2018,40(6):98-107.
- [2] 刘斌.混凝土灌注顺序对哑铃型钢管混凝土拱的影响[J].现代交通技术,2008(2):39-42.
- [3] 李亚东,姚昌荣,梁艳.浅论拱桥的技术进步与挑战[J].桥梁建设,2012,42(2):13-20.
- [4] 查晓雄,余敏,黎玉婷,等.实空心钢管混凝土轴压承载力的统一理论和公式[J].建筑钢结构进展,2011,13(1):1-7,42.
- [5] 查晓雄.空心钢管混凝土结构技术规程理解与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [6] 哈尔滨工业大学,山东齐星铁塔科技股份有限公司.空心钢管混凝土结构技术规程:CECS 254—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [7] 张威振,丁发兴,方常靖.空心钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J].中外公路,2018,38(4):136-141.
- [8] 赵昕.离心钢管混凝土偏心受压构件力学性能研究[J].安徽建筑,2020,27(9):87-88,94.
- [9] 杨志坚,韩嘉明,杨军彩,等.空心圆钢管混凝土轴压短柱有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(3):429-438.
- [10] 卓彬,张戎令,宁贵霞,等.空心大小对钢管混凝土轴压力学性能的试验研究[J].建筑科学,2019,35(3):101-106.
- [11] 陈少杰.实、空心钢管混凝土短柱在轴向压力作用下的可靠性分析[D].广州:广州大学,2017.
- [12] 孙小允,李智斌.圆空心钢管混凝土轴压短柱可靠度影响参数及其规律[J].住宅与房地产,2017(3):189.
- [13] 王怀忠.轴向压力作用下空心钢管混凝土桩体空间轴对称问题解析解[J].岩土工程学报,2013,35(S2):763-767.
- [14] 许红胜,何任珂,颜东煌,等.装配式空心钢管混凝土拱桥可行性研究[J].中外公路,2021,41(1):90-96.