

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.04.008

钢管混凝土抛物线空腹拱平面内轴压稳定性能研究

陈立旗^{a,b}, 袁波^{a,b*}

(贵州大学 a.贵州大学空间结构研究中心 b.贵州省结构工程重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要:采取理论推导和数值模拟相结合的方式,对钢管混凝土抛物线空腹拱的平面内稳定性能进行深入研究。首先,使用有限元软件建立钢管混凝土抛物线圆管拱模型,与实验进行对比,证明建模方法的正确性;然后,推导出钢管混凝土抛物线空腹拱的换算长细比,研究空腹拱的位移发展趋势、对轴力发展趋势和弯矩发展趋势探讨变化情况;最后,根据有限元计算结果,使用考虑矢跨比的稳定系数修正公式,发现修正公式与有限元结果吻合度较好,能够用于指导工程设计。

关键词:钢管混凝土空腹拱;平面内稳定;换算长细比;有限元;稳定系数

中图分类号:TU393.3;U448.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2021)04-0045-06

In-plane Axial Compression Stability of Concrete-filled Steel Tubular Parabola Vierendeel Arch

CHEN Liqi^{a,b}, YUAN Bo^{a,b*}

(a. Research Center of Space Structures;

b. Guizhou Key Laboratory of Structure Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: The study mainly investigated the in-plane stability of concrete-filled steel tubular parabola Vierendeel arch by adopting methods of theoretical derivation and numerical simulation. Firstly, the finite element software was used to establish the model of concrete-filled steel tubular circular arch, which was compared with the experiment to prove the correctness of the modeling method. What's more, the equivalent slenderness ratio of parabola vierendeel arch was deduced, and the development trend of displacement, axial force and bending moment of Vierendeel arch was studied. Finally, according to the finite element calculation results, the modified formula of stability factor considering rise span ratio was used. It was found that the modified formula was in good agreement with the finite element results, and can be used to guide the engineering design.

Keywords: concrete-filled steel tubular Vierendeel arch; in-plane stability; the slenderness ratio; the finite element; stability coefficient

0 引言

钢管混凝土拱桥由于施工方便、跨越能力强以及经济合理等特点,在中等或大跨度桥梁中被广泛使用^[1]。与钢筋混凝土拱桥^[2]相比,钢管混凝土拱桥不仅具有良好的抗压和抗震性能,而且钢管可以作为模板浇筑混凝土,消除了复杂的模板工艺。与钢拱桥^[3]相比,钢管混凝土拱桥的拱肋刚度明显增加,钢管的局部屈曲性能得到改善,用钢量也显著降低。

我国于 2013 年颁布的《钢管混凝土拱桥技术

规范》^[4]采用等效柱法来计算钢管混凝土拱的平面内稳定承载能力,规范中给出了钢管混凝土桁拱和圆管拱的计算方法。但在实际生活中,发现有一种在钢管混凝土桁拱^[5]的结构形式上取消斜腹杆的拱结构(本文称为钢管混凝土空腹拱),比如兰州新区纬七路湖滨大桥。而钢管混凝土空腹拱在规范中的设计方法不完善,需要引起特别注意。

目前,钢管混凝土构件强度设计方法的研究主要集中在钢管混凝土柱^[6,7]上,而钢管混凝土拱^[8]平面内强度的研究成果相当有限。胡清等^[9]对钢

收稿日期:2021-09-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51168010)。

作者简介:陈立旗(1997—),男,湖南常德人,硕士研究生,研究方向:钢混组合结构。*通信作者:袁波(1974—),男,四川遂宁人,教授,博士,研究方向:组合结构研究。

管混凝土拱进行了全跨五点对称集中荷载试验,结果表明,钢管混凝土拱的承载力随着矢跨比的降低而显著降低,当荷载达到承载力的 80% 时,外钢管对核心混凝土具有显著的约束作用。Pi 等^[10]研究了钢管混凝土圆弧拱的面内屈曲性能,得到了面内强度设计方法。韦建刚等^[11]在利用双重非线性有限元分析的基础上,采用等效柱法的研究,提出了考虑矢跨比和初始缺陷的修正公式。吴欣荣等^[12]以美国钢结构协会推荐的稳定公式为基础,进行参数化分析,提出修正规范后的稳定公式。

本文旨在研究钢管混凝土空腹无铰拱在全跨竖向均布荷载下的平面内弹塑性屈曲性能和强度。利用软件建立有限元模型,建模过程中考虑几何非线性和材料非线性的影响。将有限元结果与现有规范设计公式进行对比,评价稳定公式的安全性。在此基础上,使用考虑矢跨比的修正系数公式,检测修正公式与有限元结果的吻合效果。

1 结构形式及有限元建模

1.1 结构形式

钢管混凝土空腹拱采用钢管,按照一定间隔连接上下两根钢管混凝土而成,且腹杆的轴线垂直于拱轴线。腹杆与 2 根弦杆采用焊接的方式连接,如图 1 所示。其中: L 为拱的跨度; f 为拱的矢高; S 为拱轴线弧长; L_c 为节段长度; D 为弦杆的直径; t 为弦杆的壁厚; d 为腹杆的直径; t_0 为腹杆的壁厚; H 为截面的高度。

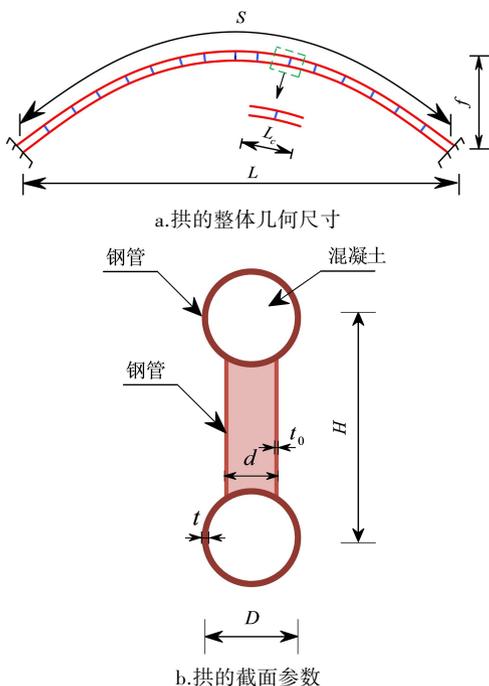


图 1 拱的相关参数

根据陈宝春等^[13]对已建钢管混凝土拱桥参数的统计分析,本文在混凝土强度等级为 C50、钢管强度等级为 Q345 的情况下,当跨度 $L=120$ m 时,对矢跨比在 $1/9, 1/6, 1/5$ 和 $1/4.5$, 换算长细比在 $60 \sim 150$ 和含钢率为 $4\% \sim 12\%$ 的钢管混凝土抛物线空腹无铰拱进行平面内承载能力分析。

1.2 建立有限元模型

1.2.1 选择单元类型及边界条件

在建模过程中,对于钢管混凝土空腹拱,为了精确地计算出结果,钢管混凝土拱肋和腹杆均采用 B31 型 Timoshenko 梁单元。假设钢管和混凝土之间黏结良好,不发生相对滑移,在相邻节点间建立 2 根梁单元,这 2 根梁的节点是相同的,分别定义钢管和混凝土的几何、材料特性。在建模中对钢管混凝土空腹拱的侧向变形进行限制,防止发生平面外失稳。

1.2.2 选择材料本构

在进行有限元建模时,有限元中钢管的本构模型采用韩林海^[14]提出的五段式模型即弹性阶段(oa)、弹塑性阶段(ab)、塑性阶段(bc)、强化阶段(cd)和二次塑流阶段(de)。混凝土的本构模型采用韩林海^[14]提出的核心混凝土非线性应力应变模型,该模型充分考虑约束效应系数影响。

1.2.3 初始缺陷的引入

初始缺陷是为了考虑结构在施工过程中,由于安装等原因造成的不可避免的误差。几何初始缺陷对钢管混凝土结构的承载能力具有明显影响^[14-16],建模中采用一致缺陷法来模拟几何初始缺陷对钢管混凝土结构承载能力的影响,且初始缺陷幅值为 $S/1\ 000$ (S 为拱轴线长度)。

1.3 模型的验证

钢管混凝土空腹拱是采用钢管连接 2 根钢管混凝土单圆拱而成的拱结构,因此只要验证钢管混凝土单圆拱的正确性。吴欣荣等^[17]在哈尔滨工业大学结构实验室进行了钢管混凝土抛物线拱的面内稳定试验。其中模型的拱肋跨度为 9 m,钢管截面尺寸为 $\phi 159$ mm \times 4.5 mm,选用矢跨比为 $1/6$ 和 $1/9$ 来研究其面内承载能力。根据试验结果,钢材屈服强度为 376.2 MPa,弹性模量为 2.04×10^5 MPa,泊松比为 0.29;混凝土强度平均值为 41.6 MPa,弹性模量为 3.13×10^4 MPa。由图 2 可知,试验得到稳定承载力与有限元模拟出来的稳定承载力吻合度较好,在 $1/9$ 的矢跨比时两者相差 1.75%,在矢跨比为 $1/6$ 时两者相差为 8.33%。因此,采用本文提及的建模思路,能模拟钢管混凝土抛物线空腹拱的面内承载能力。

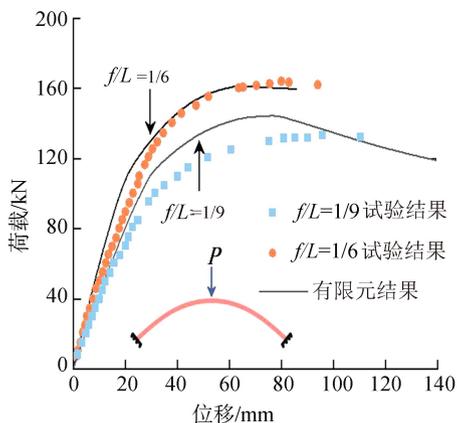


图 2 拱顶处荷载位移曲线

2 换算长细比

何海玉等^[18-19]推导过平板管连接圆钢拱的换算长细比。在每一个节段间,由于腹杆垂直于拱肋,所以当节段 L_c 较小时,可近视将拱肋视为直线段,则其在单位剪力作用下的弯矩图如图 3 所示。

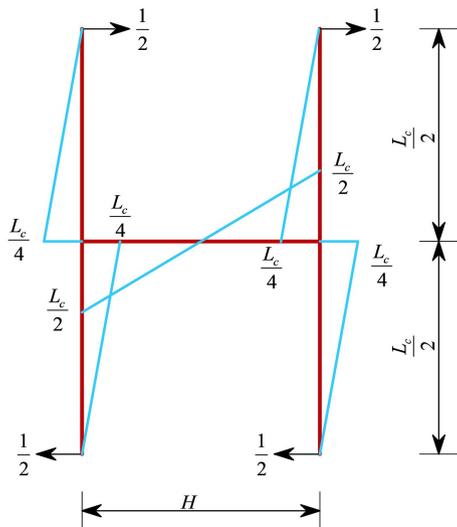


图 3 纯剪力作用下弯矩分布

位移 δ 为:

$$\delta = \frac{L_c^3}{24(EI)_{sc}} + \frac{HL_c^2}{12E_s I_s} \quad (1)$$

式中: $(EI)_{sc} = E_s I_s + E_c I_c$; E_c 为核心混凝土弹性模量; I_s 为钢管的惯性矩; I_c 为核心混凝土的惯性矩; E_s 为钢管弹性模量。

单位剪切角 γ 为:

$$\gamma = \frac{\delta}{L_c} = \frac{L_c^2}{24(EI)_{sc}} + \frac{HL_c}{12E_s I_s} \quad (2)$$

换算长度系数 μ 为:

$$\mu = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 (EI)_{sc}}{l_x^2} \left(\frac{L_c^2}{24(EI)_{sc}} + \frac{HL_c}{12E_s I_s} \right)} \quad (3)$$

式中: l_x 为拱肋有效长度,对于无铰拱 $l_x = 0.36S$ 。换算长细比 λ_{ox} 为:

$$\lambda_{ox} = u \lambda_x \quad (4)$$

式中: λ_x 为钢管混凝土空腹拱绕虚轴的长细比。

3 拱肋位移

图 4 为钢管混凝土抛物线空腹拱在受力过程中的下弦位移变化。从图 4 中可知,在全跨竖向均布荷载作用下,弦管的向上和向下的最大位移均出现四分点位置。设拱肋到达极限荷载状态时均布荷载大小为 q_u ,当均布荷载 q 为 $0.15 q_u, 0.3 q_u, 0.45 q_u$ 和 $0.6 q_u$ 时,拱肋向下的最大位移分别为 1.87, 3.64, 5.36 和 7.9 cm。钢管混凝土空腹拱在加载初期,位移随荷载的增加呈现线性增长,此时弦杆并未出现塑性。随着荷载的增加,在相同荷载增量情况下,结构的最大竖向位移显著增加,当均布荷载分别为 $0.75 q_u$ 和 $0.9 q_u$ 时,拱肋的最大竖向位移分别为 15.23 cm 和 30.35 cm,位移已呈现非线性增长。均布荷载达到 q_u 时,拱肋刚度下降较大,此时拱肋失稳破坏。当 q 下降到 $0.98 q_u$ 时,拱肋的竖向最大位移是极限状态的 1.25 倍,钢管混凝土空腹拱已经不能继续承受荷载。

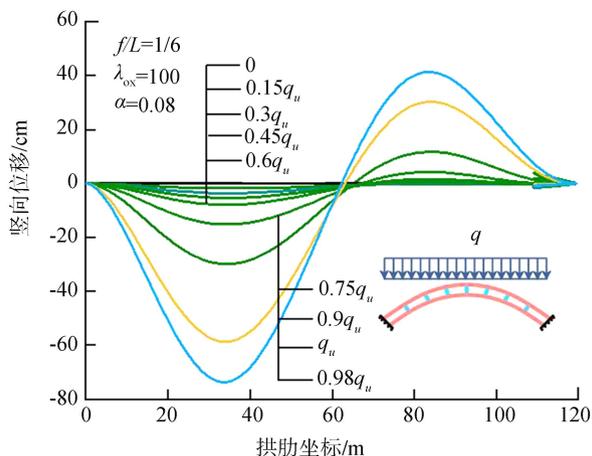


图 4 拱肋下弦位移发展图

4 拱肋内力分析

图 5 和 6 为钢管混凝土空腹拱在矢跨比为 1/6、换算长细比为 100 和含钢率为 0.08 时的截面轴力和弯矩变化图。从图中可以分析出,轴向力和弯矩沿拱的跨度呈现不均匀分布,并随着荷载的增加,拱肋弯矩呈现非线性增长,且对截面轴力的分布形式产生一定影响,轴力分布变得更“陡”。轴力在拱脚处最大,在跨中最小,故拱脚处为钢管混凝土空腹拱的轴力控制截面。

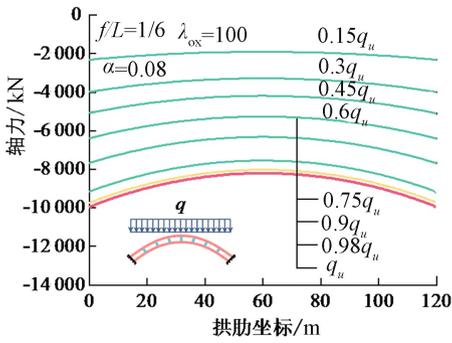


图 5 拱肋轴力发展

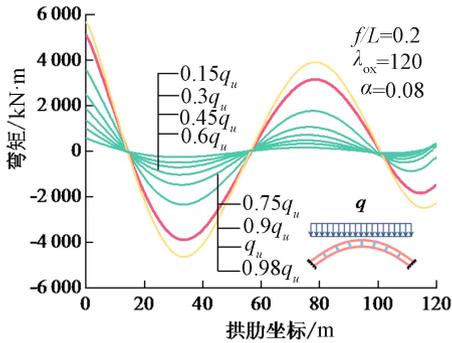


图 6 拱肋弯矩发展

5 钢管混凝土空腹拱平面内稳定设计方法

5.1 有限元结果与规范进行对比

《钢管混凝土拱桥技术规程》^[4] (GB50923—2013) 由福州大学主持编写, 综合考虑多种因素的影响, 在 2013 年开始在全国范围内推行。其在计算稳定系数时采用等效柱法将钢管混凝土拱等效为钢管混凝土柱。

稳定系数 φ 为:

$$\varphi = \begin{cases} 0.658 \lambda_n^2 & \lambda_n \leq 1.5 \\ 0.877 / \lambda_n^2 & \lambda_n > 1.5 \end{cases} \quad (5)$$

正则长细比 λ_n 为:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_{ox}}{\pi} \sqrt{\frac{f_{ck} A_c (1 + \sqrt{\xi} + \xi)}{(EA)_{sc}}} \quad (6)$$

式中: $(EA)_{sc} = E_s A_s + E_c A_c$, 其中: A_s 为截面中钢管面积; A_c 为混凝土面积; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准; ξ 为混凝土约束系数。

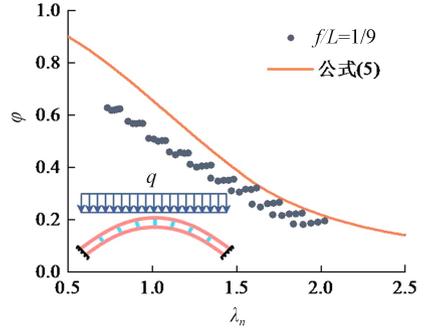
由有限元软件计算出钢管混凝土空腹拱极限承载力下的最大轴力 N_{ac} , 然后采用式 (7) 和 (8) 计算稳定系数 φ 和轴心抗压承载力 N_y :

$$\varphi = \frac{N_{ac}}{N_y} \quad (7)$$

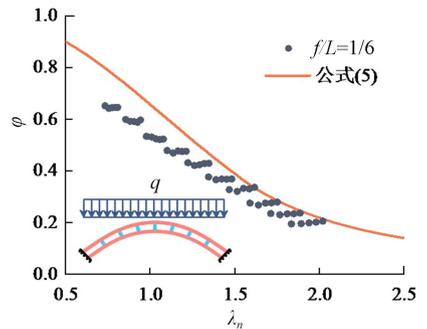
$$N_y = 2A_c f_{ck} (1 + \sqrt{\xi} + \xi) \quad (8)$$

其中公式 (7) 中的 N_{ac} 为采用弧长法计算钢管混凝土空腹拱在极限状态下的最大轴力^[12]。

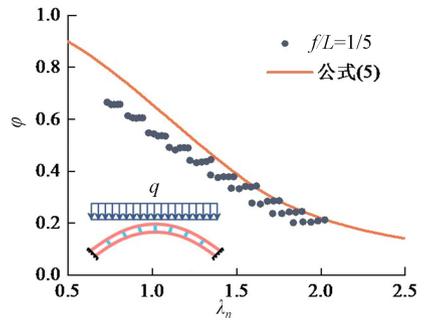
从图 7 中可以分析出, 根据有限元软件计算出来的稳定系数大部分位于承载公式下方, 最大偏差为 29.1%。虽然规范中的稳定系数公式可预测钢管混凝土抛物线空腹拱的承载能力, 但不够准确, 需要采用较为准确的预测公式。



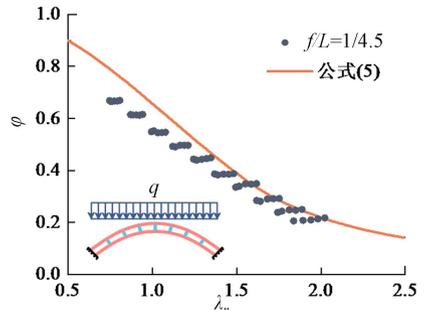
a. 矢跨比 1/9 与规范对比



b. 矢跨比 1/6 与规范对比

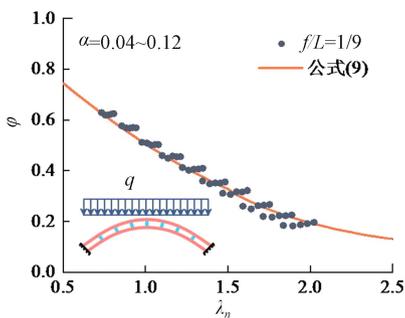


c. 矢跨比 1/5 与规范对比

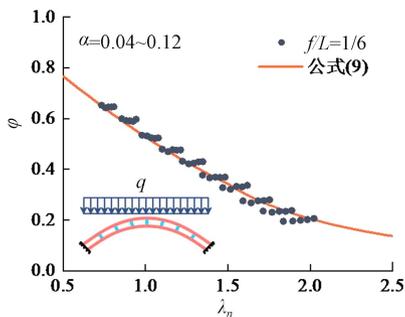


d. 矢跨比 1/4.5 与规范对比

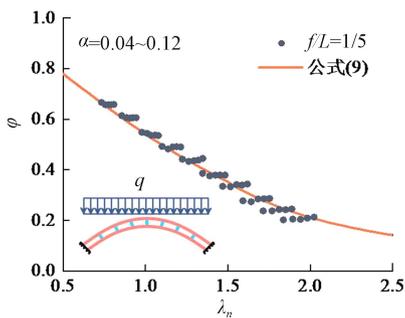
图 7 有限元与规范对比



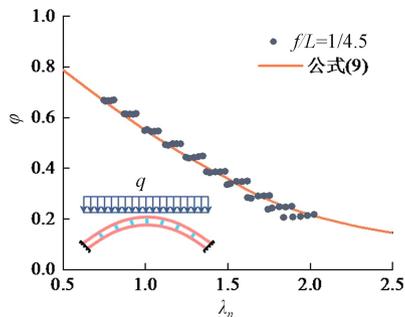
a. 矢跨比 1/9 与修正公式对比



b. 矢跨比 1/6 与修正公式对比



c. 矢跨比 1/5 与修正公式对比



d. 矢跨比 1/4.5 与修正公式对比

图 8 有限元与修正公式对比

5.2 修正规范的平面内稳定承载力设计公式

殷海棠等^[13] 对大长细比抛物线形钢管混凝土的稳定系数提出修正公式,其考虑矢跨比的修正公式为:

$$\varphi = \begin{cases} (0.4 \frac{f}{L} + 0.461) \lambda_n^{(\frac{f}{L} + 1.105)} \lambda_n \leq 1.5 \\ \frac{3.371 (\frac{f}{L} - 0.149)}{(\lambda_n + 0.265 \frac{f}{L} + 0.188)} \lambda_n > 1.5 \end{cases} \quad (9)$$

根据图 8 中的结果可以得出,在矢跨比为 1/9, 1/6, 1/5 和 1/4.5, 含钢率为 4%~12%, 换算长细比为 60~150 的钢管混凝土抛物线空腹拱中,由有限元计算出的结果大部分都位于修正曲线上,计算结果偏差在 10% 以内,吻合效果较好。可用此修正公式来预测钢管混凝土抛物线空腹拱的稳定承载力,且可用来指导工程应用,并为将来进一步研究钢管混凝土抛物线空腹拱平面内轴压稳定承载力提供参考。

6 结论

1) 利用有限元软件 ABAQUS 建立钢管混凝土抛物线圆管拱的模型,通过将有限元结果与实验结果相对比,稳定承载能力最大相差为 8.33%。结果表明用本文提及的建模方法可以准确地模拟钢管混凝土抛物线圆管拱的稳定承载力,进而可以正确地模拟钢管混凝土空腹拱稳定承载力。

2) 通过参数分析,对钢管混凝土抛物线空腹拱的位移发展情况、轴力发展情况和弯矩发展情况进行了研究,发现弦管向上和向下的最大位移均出现四分点位置,并且拱脚截面是拱的荷载控制截面。

3) 根据有限元计算的结果,与规范上的稳定系数公式进行对比,结果表明规范中的稳定系数公式不能准确地预测钢管混凝土空腹拱的承载能力。根据有限元结果,使用考虑矢跨比的钢管混凝土抛物线空腹拱在均布荷载下的平面内稳定设计公式,其有限元分析结果基本都位于公式上,吻合程度较好,可为工程提供参考。

参考文献:

[1] 杨绿峰, 郑健, 张伟, 等. 钢管混凝土拱桥极限承载力分析的自适应方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 191-199.
 [2] 张双洋, 赵人达, 占玉林, 等. 收缩徐变对高铁混凝土拱桥变形影响的模型试验研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(12): 102-110.
 [3] 蒋友宝, 尹倩倩, 罗军, 等. 基于承载力拟合的钢拱不利几何缺陷分析[J]. 工程力学, 2019, 36(S1): 203-209.
 [4] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
 [5] LIU C, HU Q, WANG Y, et al. In-plane stability of concrete-filled steel tubular parabolic truss arches[J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(4): 1306-1317.

- [6] 李斌,李广,高春彦.圆钢管混凝土轴压柱承载力的计算分析[J].混凝土,2016(12):15-17.
- [7] 周绪红,闫标,刘界鹏,等.不同长径比圆钢管约束钢筋混凝土柱轴压承载力研究[J].建筑结构学报,2018,39(12):11-21.
- [8] 殷海棠,耿悦,阳环宇,等.大长细比抛物线形钢管混凝土无铰拱平面内稳定性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(S1):444-450.
- [9] HU Q,LIU C,YUAN C,et al.Experimental investigation into in-plane stability of concrete-filled steel tubular parabolic arches under five-point concentrated loads[J].International Journal of Steel Structures,2020,20(6):2038-2050.
- [10] PI Y,LIU C,BRADFORD M A,et al.In-plane strength of concrete-filled steel tubular circular arches[J].Journal of Constructional Steel Research,2012,69(1):77-94.
- [11] 韦建刚,陈宝春,吴庆雄.钢管混凝土纯压拱失稳临界荷载计算的等效柱法[J].计算力学学报,2010,27(4):698-703.
- [12] WU X R,LIU C Y,WANG W,et al.In-plane strength and design of fixed concrete-filled steel tubular parabolic arches[J].Journal of Bridge Engineering,2015,20(12):04015016.
- [13] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50-61.
- [14] 韩林海.钢管混凝土结构理论与实践[M].北京:科学出版社,2016.
- [15] 陈宝春.钢管混凝土拱桥[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [16] 杨阳,邓年春,郭晓.钢管混凝土拱桥大管径拱肋环焊缝焊接数值模拟[J].焊接学报,2020,41(10):79-86.
- [17] LIU C Y,WANG Y Y,WU X R,et al.In-plane stability of fixed concrete-filled steel tubular parabolic arches under combined bending and compression[J].Journal of Bridge Engineering,2016,22(2):04016116.
- [18] 何海玉,袁波,马信欣,等.倒三角形截面板管连接式钢圆弧拱在平面内的稳定承载力研究[J].应用力学学报,2021,38(1):216-224.
- [19] HE H Y,YUAN B,CHEN H N,et al.In-plane failure mechanism and stability bearing capacity design of planar plate-tube-connected circular steel arches[J].Mechanics Based Design of Structures and Machines,2020:1-16.