

# 水平往复荷载作用下钢箱提篮拱 弹塑性力学性能研究

王占飞<sup>1</sup>, 谭凌霄<sup>1,2</sup>, 吴佳新<sup>3</sup>, 宋 阳<sup>4</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 江苏中设集团有限公司, 江苏 无锡 214026;  
3. 中铁建工集团第四建设有限公司, 浙江 杭州 310051; 4. 沈阳华博建筑设计有限公司, 辽宁 沈阳 110020)

**摘 要** 目的 探究倾角、矢跨比及宽跨比三个参数对钢箱提篮拱在水平往复荷载作用下力学性能的影响, 为钢提篮拱桥抗震设计提供理论基础。方法 通过改变参数, 建立 54 个钢箱提篮拱有限元模型, 在水平往复荷载作用下进行滞回分析, 研究钢箱提篮拱水平力-位移滞回性能、极限承载力和拱顶横撑内力、变形在不同参数条件下的变化规律。结果 随着拱肋倾斜角度、宽跨比的增加或矢跨比的减小, 结构初期刚度、极限承载能力均有较大提高, 但横撑内力也随之增加, 并会产生局部失稳破坏, 影响结构的承载能力。结论 增加拱肋倾斜角度对钢箱提篮拱横向力学性能有较大改善, 但在设计时应注意横撑内力增加带来的不利影响。

**关键词** 钢提篮拱肋; 力学性能; 水平往复荷载; 倾斜角度; 矢跨比; 宽跨比

中图分类号 TU391

文献标志码 A

**引用格式:**王占飞, 谭凌霄, 吴佳新, 等. 水平往复荷载作用下钢箱提篮拱弹塑性力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(1): 131-140. (WANG Zhanfei, TAN Lingxiao, WU Jiaxin, et al. Research of elastic-plastic mechanical properties of steel basket-handle arch ribs with box-section under horizontal cyclic loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(1): 131-140.)

## Research of Elastic-plastic Mechanical Properties of Steel Basket-handle Arch Ribs with Box-section under Horizontal Cyclic Loading

WANG Zhanfei<sup>1</sup>, TAN Lingxiao<sup>1,2</sup>, WU Jiaxin<sup>3</sup>, SONG Yang<sup>4</sup>

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;  
2. Jiangsu Zhongshe Group Co. Ltd., Wuxi, China, 214026; 3. China Railway Construction Engineering Group No. 4  
Construction Co. Ltd., Hangzhou, China, 310051; 4. Shenyang Huabo Architectural Design Co. Ltd., Shenyang,  
China, 110020)

**Abstract:** The purpose of this paper is to explore the influence of three parameters, inclination angle, rise-span ratio, and width-span ratio on the mechanical properties of steel basket-handle arch ribs with

收稿日期: 2022-10-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51938009)

作者简介: 王占飞(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁抗震及钢桥腐蚀疲劳等方面研究。

box-section under horizontal cyclic loading and provide a theoretical basis for seismic design of steel basket-handle arch bridge. The finite element model of 54 steel basket-handle arch ribs with box-section was established, and the hysteresis analysis was carried out to explore the mechanical properties under different parameters such as ultimate bearing capacity of arch ribs, internal forces and deformation of transverse brace. The results show that with an increase in inclination angle and width-span ratio or with a decrease in rise-span ratio, the initial stiffness and ultimate bearing capacity of the arch ribs increase gradually; however, the internal force of the cross brace also increases and produces local instability and damage, which will affect the bearing capacity of the structure. It was shown that the transverse seismic performance of the steel basket handle arch ribs with box-section can be improved greatly by increasing the inclination angle of arch rib, but it is necessary to pay attention to the adverse effect caused by the increase of internal force of transverse brace.

**Key words:** steel basket-handle arch ribs; mechanical properties; horizontal cyclic loading; leaning angle of arch ribs; rise-span ratio; width-span ratio

钢拱桥因其出色的跨越能力与优美的造型在众多桥型中备受青睐。而钢箱提篮拱桥因拱肋设置了倾角改善了横向稳定性能,在桥梁建设中的应用具有较强的竞争力,被广泛应用<sup>[1-2]</sup>。随着跨度的增加,钢拱桥在竖向荷载作用下,面内和面外的稳定问题尤为突出。Z. Z. Tang 等<sup>[3-4]</sup>通过对钢拱桥有限元模型进行静力弹塑性分析和非线性时程分析,研究了宽厚比、长细比以及材料屈服强度等参数对钢箱梁损伤区长度的影响,并提出了地震损伤区长度的经验公式。Y. L. Guo 等<sup>[5]</sup>研究了钢拱结构在集中荷载作用下的面外弹塑性屈曲强度,并得出几何缺陷和面内加载方式对钢拱结构的面外弹塑性屈曲强度有显著影响。其他学者<sup>[6-8]</sup>利用试验和有限元分析方法,研究了拱肋弯扭耦合、支撑条件、拱上建筑以及拱肋内倾对拱结构稳定承载能力的影响,研究表明,在拱桥设计中不容忽视拱肋弯扭耦合作用对面外稳定承载力的不利影响,拱脚固定、考虑拱上建筑影响以及拱肋内倾能够提高拱桥面内和面外稳定能力,这些研究成果为钢拱桥设计与建设提供了科学理论基础<sup>[9-11]</sup>。

另外,在世界范围内的多次地震中,拱桥出现了不同程度的破坏<sup>[12]</sup>。因此,钢拱桥的抗震性能逐渐引起人们的重视,各国学者在这方面的研究也日益增多<sup>[13-17]</sup>。户东阳

等<sup>[18]</sup>以南广高速铁路一座中承式钢箱提篮拱桥为工程背景,采用 ANSYS 有限元分析软件建立空间有限元模型,对比分析拱肋倾斜角度对结构抗震性能的影响,研究表明,对于大跨度钢箱提篮拱桥,增大拱肋内倾角有利于提高拱结构的侧向刚度,但是在地震作用下也会增加结构内力,降低拱肋的面内极限承载力;隋伟宁等<sup>[19]</sup>建立拱肋内倾角为 $0^\circ$ 、 $4^\circ$ 和 $7^\circ$ 的3座中承式钢箱提篮拱桥有限元模型,利用非线性时程分析的方法,探讨了内倾角变化对其抗震性能的影响,研究表明,在横桥向地震动作用下,结构的位移响应随内倾角的增大而减小、内力响应随着内倾角的增大而增加;在顺桥向地震作用下,随着拱肋向内倾斜,拱桥位移、内力响应逐渐减小,弯矩响应变化不大;Z. F. Wang 等<sup>[20]</sup>以一座上承式钢提篮拱桥为研究背景,建立拱肋内倾角为 $0^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $8^\circ$ 和 $12^\circ$ 的4个拱桥有限元模型,在罕遇地震作用下,进行非线性动力时程分析,研究表明,4座桥梁中,拱肋内倾角为 $0^\circ$ 的拱桥横桥向位移响应最大,内倾角为 $12^\circ$ 的拱桥位移响应最小,随着内倾角的增加,拱肋和拱顶横撑内力增加,在顺桥向内倾角变化对拱桥位移、内力响应影响较小。

综上所述,钢箱提篮拱桥具有较好的横向稳定性能,且横桥向地震响应位移小于普通平行钢箱拱肋的拱桥,但是相应的拱肋以

及横向支撑构件的内力响应增加。鉴于此,为了更好地掌握钢箱提篮拱桥的抗震性能,笔者以钢箱提篮拱为研究对象,在横向水平反复荷载作用下,建立拱结构的三维空间多尺度有限元模型,量化分析拱肋倾斜角度、矢跨比和宽跨比等参数对其力学性能的影响。

1 钢箱提篮拱结构概况

在横向水平荷载作用下,钢箱提篮拱桥

主要的承载构件为拱肋以及拱肋之间横向支撑构件。笔者采用由拱肋、斜撑、横撑三部分构成的钢箱提篮拱作为研究对象,其构造如图 1 所示。图中, $f$  为拱的矢高, $L$  为拱的跨长, $B$  为拱脚处拱肋之间的宽度, $\alpha$  为拱肋倾斜角, $b$  为拱顶处拱肋之间的宽度;拱肋、斜撑和横撑的截面分别为焊接箱型、圆形钢管和槽型钢;拱轴线考虑为二次抛物线形拱轴线。

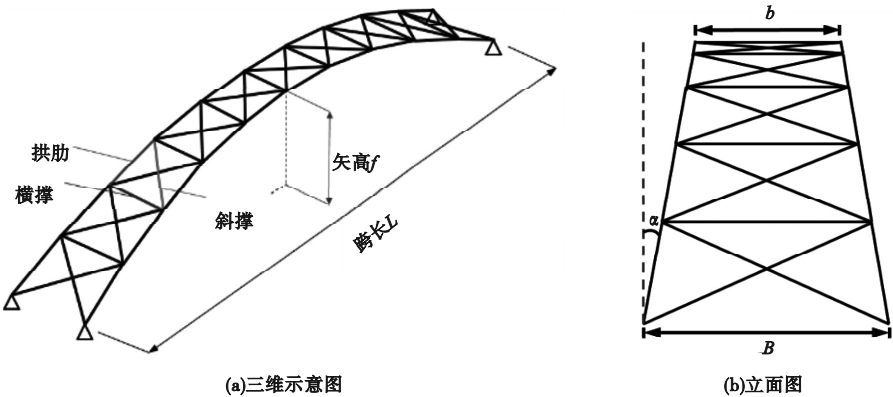


图 1 钢箱提篮拱结构

Fig. 1 The basket handle steel arch ribs structure with box-section

2 选取分析参数

影响钢箱提篮拱力学性能的主要参数有拱肋的矢跨比、拱的宽跨比以及拱肋倾斜角度。矢跨比越小,拱脚处推力及拱肋所受压力越大,宽跨比和内倾角度越大,拱结构的横向稳定性越好。为此,笔者选取矢跨比  $f/L$ 、宽跨比  $b/L$  和拱肋倾斜角度  $\alpha$  三个参数变量,在横向水平往复荷载作用下,探究了三者对钢箱提篮拱结构力学性能的影响规律。综合考虑结构设计、模型数量、拱结构受力特点等因素,钢箱提篮拱的  $f/L$  取值为 0.15、0.20、0.25,  $b/L$  取值为 1/13、1/16、1/19,  $\alpha$  取值为  $0^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $10^\circ$ ,共建立 54 个弹塑性有限元模型。为便于建立模型和对比分析,各模型的拱肋截面尺寸、拱顶横撑截面尺寸以及所对应的斜撑采用相同截面,尺寸如图 2 所示,且  $b$  取 1 m。为了消除提篮拱模型中各位置横撑及斜撑由于拱肋倾斜,长短

不同带来的影响,各位置横撑、相应斜撑长细比分别与拱顶处横撑、相应斜撑设置成相同的长细比。各模型具体的跨度、矢高和设计参数如表 1 所示。

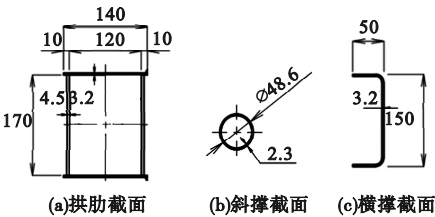


图 2 拱结构相关构件截面尺寸

Fig. 2 The sectional size of arch component

3 建立有限元模型

3.1 单元选取及材料本构关系

笔者利用高精度弹塑性分析软件建立了钢箱提篮拱三维的梁-壳混合单元模型进行滞回分析,因在加载阶段结构将进入塑性状态,构件局部将出现屈曲,所以在容易屈曲的

表1 模型尺寸和设计参数

Table 1 The dimensions and design parameters of mode

模型编号	$f/m$	$L/m$	$f/L$	$\alpha/(^{\circ})$	$b/L$	模型编号	$f/m$	$L/m$	$f/L$	$\alpha/(^{\circ})$	$b/L$
1/13-0.15-0	1.95	13	0.15	0	1/13	1/16-0.20-6	3.20	16	0.20	6	1/16
1/13-0.15-2	1.95	13	0.15	2	1/13	1/16-0.20-8	3.20	16	0.20	8	1/16
1/13-0.15-4	1.95	13	0.15	4	1/13	1/16-0.20-10	3.20	16	0.20	10	1/16
1/13-0.15-6	1.95	13	0.15	6	1/13	1/16-0.25-0	4.00	16	0.25	0	1/16
1/13-0.15-8	1.95	13	0.15	8	1/13	1/16-0.25-2	4.00	16	0.25	2	1/16
1/13-0.15-10	1.95	13	0.15	10	1/13	1/16-0.25-4	4.00	16	0.25	4	1/16
1/13-0.20-0	2.60	13	0.20	0	1/13	1/16-0.25-6	4.00	16	0.25	6	1/16
1/13-0.20-2	2.60	13	0.20	2	1/13	1/16-0.25-8	4.00	16	0.25	8	1/16
1/13-0.20-4	2.60	13	0.20	4	1/13	1/16-0.25-10	4.00	16	0.25	10	1/16
1/13-0.20-6	2.60	13	0.20	6	1/13	1/19-0.15-0	2.85	19	0.15	0	1/19
1/13-0.20-8	2.60	13	0.20	8	1/13	1/19-0.15-2	2.85	19	0.15	2	1/19
1/13-0.20-10	2.60	13	0.20	10	1/13	1/19-0.15-4	2.85	19	0.15	4	1/19
1/13-0.25-0	3.25	13	0.25	0	1/13	1/19-0.15-6	2.85	19	0.15	6	1/19
1/13-0.25-2	3.25	13	0.25	2	1/13	1/19-0.15-8	2.85	19	0.15	8	1/19
1/13-0.25-4	3.25	13	0.25	4	1/13	1/19-0.15-10	2.85	19	0.15	10	1/19
1/13-0.25-6	3.25	13	0.25	6	1/13	1/19-0.20-0	3.80	19	0.20	0	1/19
1/13-0.25-8	3.25	13	0.25	8	1/13	1/19-0.20-2	3.80	19	0.20	2	1/19
1/13-0.25-10	3.25	13	0.25	10	1/13	1/19-0.20-4	3.80	19	0.20	4	1/19
1/16-0.15-0	2.40	16	0.15	0	1/16	1/19-0.20-6	3.80	19	0.20	6	1/19
1/16-0.15-2	2.40	16	0.15	2	1/16	1/19-0.20-8	3.80	19	0.20	8	1/19
1/16-0.15-4	2.40	16	0.15	4	1/16	1/19-0.20-10	3.80	19	0.20	10	1/19
1/16-0.15-6	2.40	16	0.15	6	1/16	1/19-0.25-0	4.00	19	0.25	0	1/19
1/16-0.15-8	2.40	16	0.15	8	1/16	1/19-0.25-2	4.00	19	0.25	2	1/19
1/16-0.15-10	2.40	16	0.15	10	1/16	1/19-0.25-4	4.00	19	0.25	4	1/19
1/16-0.20-0	3.20	16	0.20	0	1/16	1/19-0.25-6	4.00	19	0.25	6	1/19
1/16-0.20-2	3.20	16	0.20	2	1/16	1/19-0.25-8	4.00	19	0.25	8	1/19
1/16-0.20-4	3.20	16	0.20	4	1/16	1/19-0.25-10	4.00	19	0.25	10	1/19

位置:拱脚附近的拱肋及拱顶横撑,采用适应性较好的三维壳单元(S4R)建立,其余位置采用考虑了剪应力和转动惯性的Timoshenko梁单元(B31)建模,梁-壳混合单元接触部分采用Coupling连接,三维模型如图3所示。

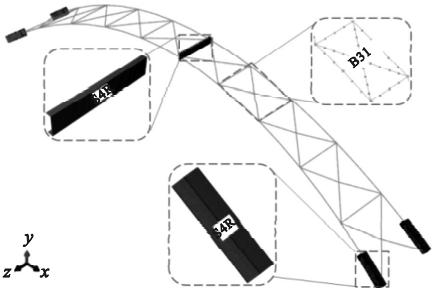


图3 梁-壳混合单元模型

模型各构件钢材材性如表2所示。进入弹塑性后钢材采用考虑包辛格效应的二折线随动强化模型,强化阶段模量取 $E/100$ 。

表2 材料力学性能参数

Table 2 The mechanical properties of material

构件	弹性模量 $E/\text{MPa}$	屈服强度 $\sigma_y/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	密度 $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
拱肋	180 167.7	246.5	0.3	7 800
斜撑	164 406.8	291.0	0.3	7 800
横撑	197 765.4	354.0	0.3	7 800

3.2 边界条件及加载方式

边界条件:约束模型四个拱脚处的纵向 $x$ 、竖向 $y$ 及横向 $z$ 等3个方向的平动位移,释放拱脚处纵向 $R_x$ 、竖向 $R_y$ 及横向 $R_z$ 等3个方向的转动约束。

加载方式:先在模型各横撑位置以节点

Fig. 3 The beam-shell mixed element model

荷载的形式施加恒定的竖直荷载,然后在拱顶位置以位移的形式进行水平往复加载,如图 4 所示。施加竖直荷载,根据以往研究结果<sup>[3]</sup>,以拱脚处拱肋截面产生 0.15 倍屈服轴力为标准,计算得到的相应竖直荷载并均匀地施加在各节点上(见图 4(a))。水平往复

荷载是以屈服位移  $\delta_y$  为基准,往复递增  $0.5\delta_y$  的形式在拱顶位置施加位移荷载(见图 4(b))。其中,水平屈服位移  $\delta_y$  是拱脚处拱肋截面腹板应力达到钢材屈服强度时拱顶产生的横向位移。

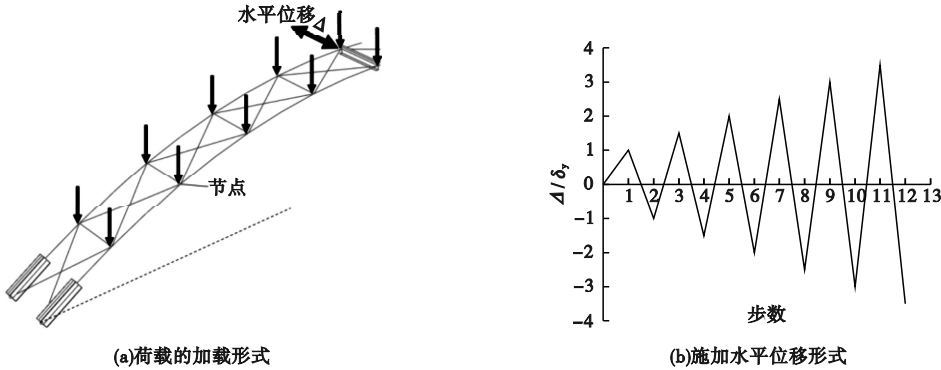


图 4 加载方式

Fig. 4 The loading pattern

3.3 验证模型有效性

为验证梁-壳混合单元模型建模方法的合理性及分析结果的有效性,笔者以文献

[17]中试验试件为基础,建立与试验试件尺寸、材料等相同的有限元模型并进行分析,模拟结果与试验结果对比如图 5 所示。

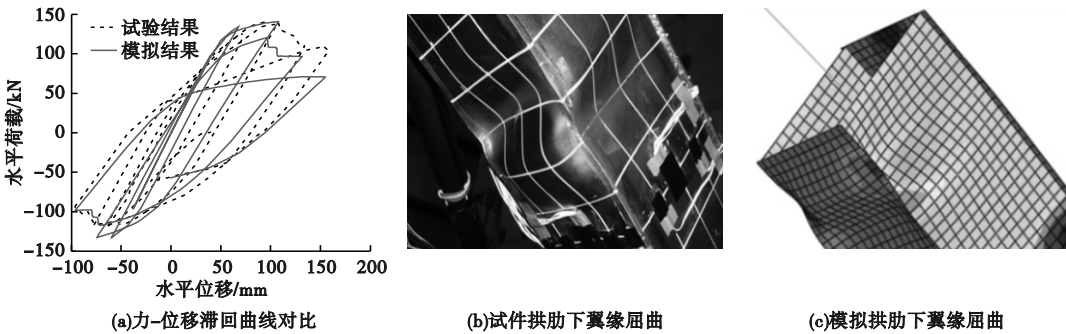


图 5 模拟结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between the simulation and test results

由图 5(a)可知,有限元分析得到的滞回曲线与试验结果无论是刚度变化、还是极限承载能力等均吻合较好。由图 5(b)和图 5(c)可知,有限元分析也较好地跟踪了试件达到最大承载力后,拱脚附近拱肋发生局部屈曲变形的现象。由此可知,本研究采用的梁-壳混合单元模型的建模方法、单元类型的选取、材料本构参数设置、边界条件等是

合理有效的,分析结果具有较高的精度。

4 钢箱提篮拱力学性能量化分析

4.1 水平力-水平位移滞回性能

横向水平往复荷载作用下,以  $1/13-0.20-0$ 、 $1/13-0.20-4$  和  $1/13-0.20-8$  钢箱提篮拱为例,得到拱脚水平反力-拱顶水平位移滞回曲线如图 6 所示。



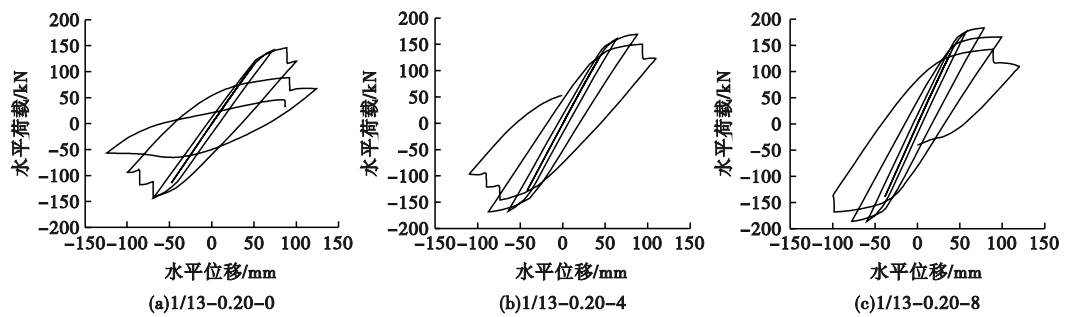


图6 水平力-位移滞回曲线

Fig. 6 The horizontal force-displacement hysteretic curves

由图6可知, $b/L=1/13$ 、 $f/L=0.2$ 、 $\alpha$ 分别为 $0^\circ$ 、 $4^\circ$ 和 $8^\circ$ 的3个钢箱提篮拱,在屈服前结构处于弹性阶段,卸载向反方向加载未出现残余位移。之后随着位移的增加,达到屈服位移后,荷载的增加速度变缓,荷载为0时,钢箱提篮拱均出现不同程度的残余位移。滞回加载到第3圈,3个提篮拱分别达到了最大承载力145.98 kN、169.01 kN和

183.08 kN,之后随着位移的增加,承载力下降。与1/13-0.20-0钢箱提篮拱相比,模型1/13-0.20-8的滞回环更为饱满。

为了进一步探明钢箱提篮拱在加载过程中的受力状态,以模型1/13-0.20-4为例,提取拱脚附近拱肋及拱顶横撑的应力分布及变形情况(见图7)进行说明。

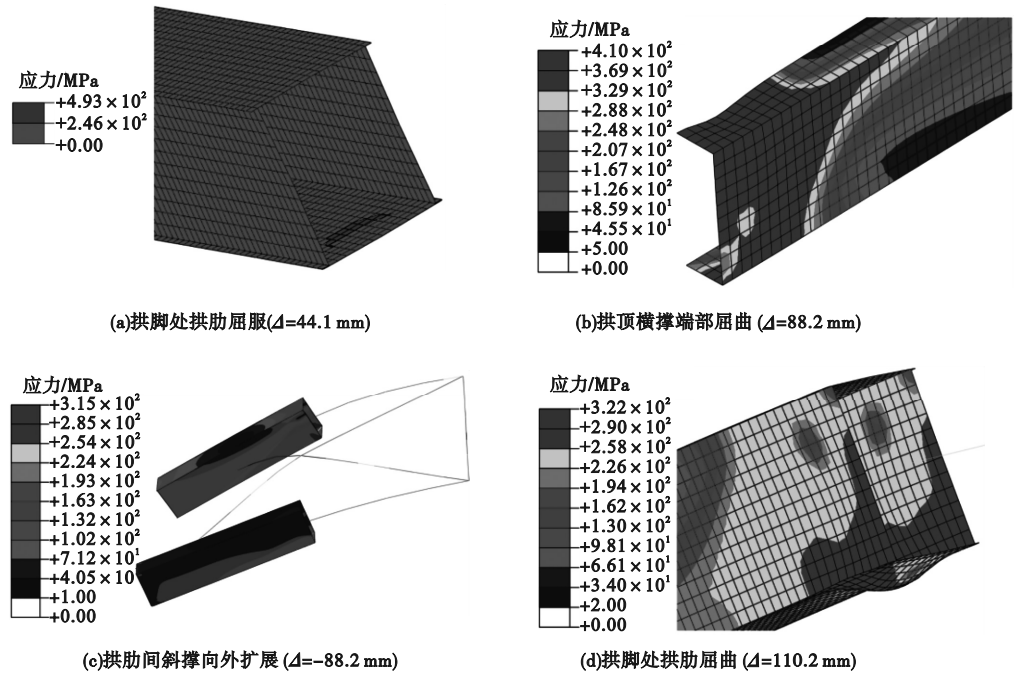


图7 应力分布与变形

Fig. 7 The stress distribution and deformation

(1) 第一次滞回加载过程中,当 $\Delta$ 为 $1.0\delta_y=44.1\text{ mm}$ 时,在远离加载点侧拱脚处拱肋下翼缘应力超过屈服应力(见图7(a)),表明拱肋屈服。

(2) 第三次滞回加载过程中,当 $\Delta$ 为 $2.0\delta_y=88.2\text{ mm}$ 时,钢箱提篮拱达到极限承载力 $F_{H,\max}=169.01\text{ kN}$ ,且此时拱顶横撑端部翼缘发生屈曲,应力超过400 MPa

(见图7(b))。卸载后反向加载,当位移加载逐渐接近 $-2.0\delta_y$ 时,拱脚处拱肋间的斜撑开始向外扩展,应力超过300 MPa,出现失稳破坏(见图7(c))。

(3)第四次滞回加载过程中,当位移加载至 $2.5\delta_y$ 时,远离加载点侧拱脚处拱肋下翼缘发生屈曲,此时应力已超过300 MPa(见图7(d))。当位移反向加载至 $-2.5\delta_y$ 时,加载点侧拱肋的拱脚处相继出现局部失稳。

4.2 各设计参数对钢箱提篮拱弹塑性力学性能的影响

为便于分析,将各模型水平力-位移滞回曲线以骨架曲线(骨架曲线为模型滞回曲

线,每一级加载峰值点的连线)的形式进行整理。选取6个模型水平力-位移骨架曲线为一组,每组曲线的 $b/L$ 和 $f/L$ 为固定值, $\alpha$ 选取 $0^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $8^\circ$ 和 $10^\circ$ ,放在同一个坐标系内进行比较,所有模型得到的水平力-位移骨架曲线如图8所示。由图8可以看出,随着钢箱提篮拱倾角的增加,结构初期刚度呈上升趋势,承载能力也有所提高,达到最大承载力后,随着倾角的增加,承载力下降的速度变缓。随着宽跨比的增加或矢跨比的减小,钢箱提篮拱初期刚度、极限承载力有较大提高。所有模型水平极限承载力汇总见于表3。

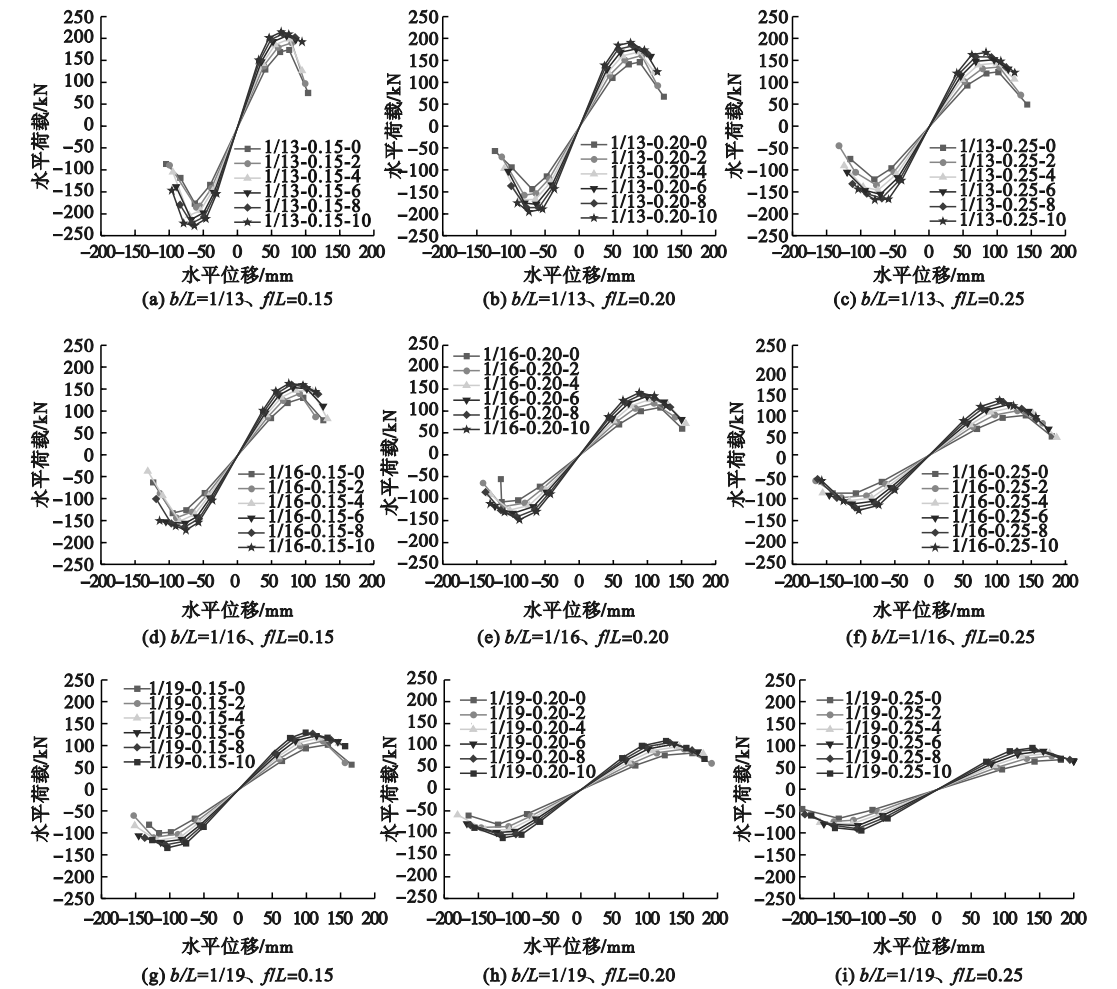


图8 钢箱提篮拱横向水平力-位移骨架曲线

Fig. 8 The lateral horizontal force-displacement skeleton curves of steel basket-handle arch ribs with box-section

表3 拱结构极限承载力  $F_H$

Table 3 The ultimate bearing capacity  $F_H$  of arch structure

$b/L$	$f/L$	极限承载力/kN					
		$\alpha=0^\circ$	$\alpha=2^\circ$	$\alpha=4^\circ$	$\alpha=6^\circ$	$\alpha=8^\circ$	$\alpha=10^\circ$
1/13	0.15	173.94	189.81	198.88	205.82	210.34	214.79
	0.20	145.98	161.09	169.01	176.01	183.08	190.33
	0.25	123.51	134.49	143.59	151.49	158.08	167.85
1/16	0.15	130.30	139.92	146.90	153.52	160.03	162.62
	0.20	108.11	117.46	125.64	133.12	137.55	141.67
	0.25	90.34	100.45	108.72	114.65	119.83	124.84
1/19	0.15	101.82	110.39	116.74	122.43	127.05	129.92
	0.20	82.49	91.57	97.55	103.32	106.55	110.83
	0.25	67.52	76.02	81.95	86.97	89.97	94.33

4.3 倾角对拱顶横撑内力与变形的影响

提篮拱达到极限承载力时,拱顶横撑会出现局部失稳变形(见图7(b))。为此,笔者主要研究  $b/L=1/13, f/L=0.20$  时,  $\alpha$  分

别为  $0^\circ、2^\circ、4^\circ、6^\circ、8^\circ、10^\circ$  的模型,拱顶横撑达到最大压缩变形时应力分布及变形如图9所示,相应拱顶横撑轴力-位移滞回曲线如图10所示。

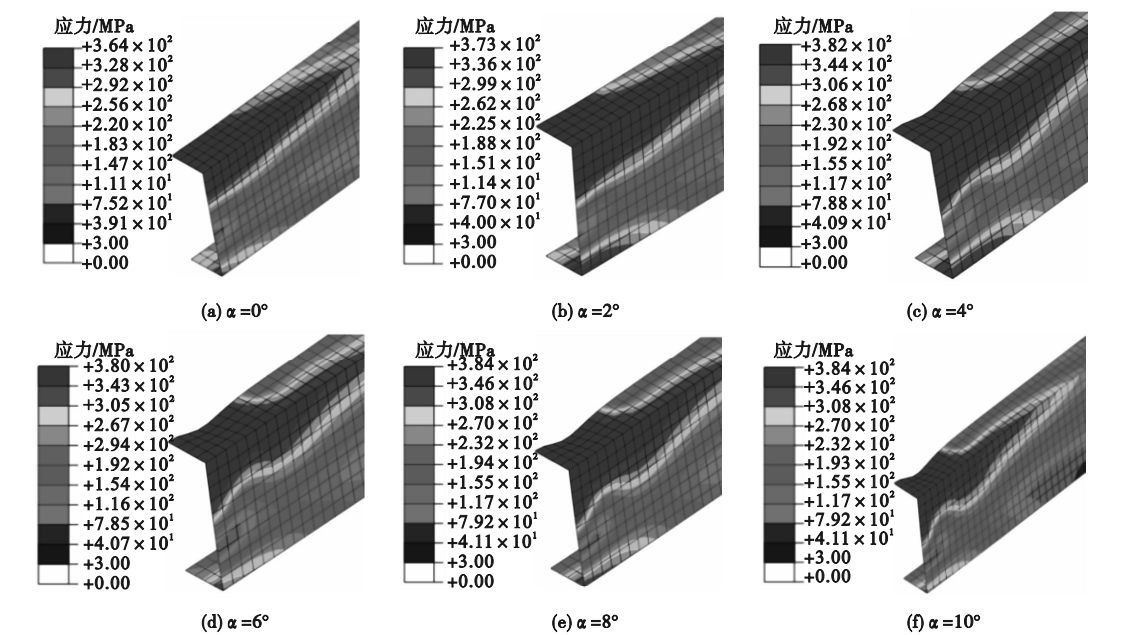


图9 横撑在最大压缩时应力分布与变形

Fig. 9 The stress distribution and deformation of transverse brace with maximum compression

由图9可知,  $\alpha=0^\circ$  时,横撑的最大应力为364 MPa;  $\alpha=2^\circ$  时,横撑的最大应力为373 MPa,均超过了钢材屈服强度354 MPa。表明横撑已经进入弹塑性状态,但未出现可视的屈曲变形。由图10可知,随着轴向相对位

移的增加,横撑从弹性阶段进入到弹塑性阶段,轴力增长的速度变缓。 $\alpha=0^\circ$  时,模型横撑轴力达到了62.73 kN;  $\alpha=2^\circ$  时,模型横撑轴力达到了69.05 kN,压拉基本呈现对称状态,但此时,两钢箱提篮拱已经丧失了承载能力。



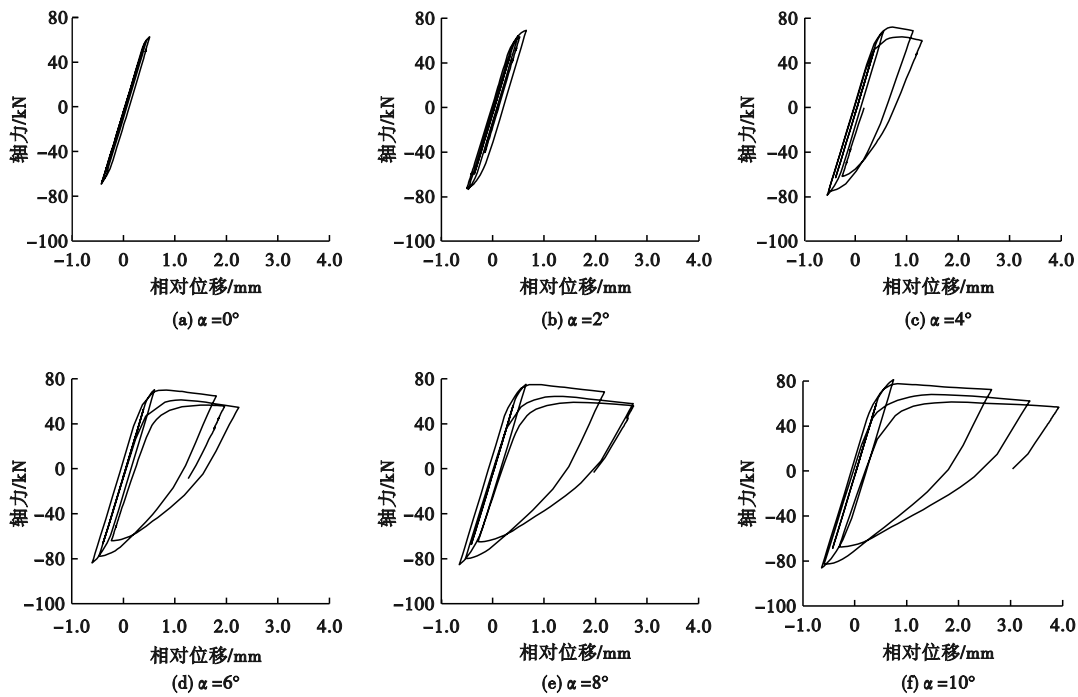


图 10 横撑轴力 - 轴向相对位移滞回曲线

Fig. 10 The axial force-axial relative displacement hysteresis curves of transverse brace

由图 9(c) ~ (f) 可知,横撑上翼缘均发生局部失稳变形,随着  $\alpha$  增加,失稳变形的程度越大。但四个模型横撑最大应力约为 380 MPa,变化不大。由图 10 可知,受拉时横撑大体处于弹性阶段,受压时横撑进入弹塑性,随着位移的增加,轴力缓慢增加。当轴力达到最大值后,横撑发生局部失稳,承载能力减小,并且当横撑第三圈滞回时钢箱提篮拱已经丧失了承载能力。

5 结 论

- (1)采用梁 - 壳混合单元建立的钢箱提篮拱有限元模型,通过与以往试件试验结果对比,具有较高的分析精度,表明模型单元类型选取、材料本构参数设置等是合理有效的。
- (2)随着钢箱提篮拱拱肋倾斜角度的增加,结构初期刚度、极限承载能力均有较大提高,抗震性能得到较大改善;随着拱肋倾斜角度的增大,横撑内力也会随之增加,拱顶横撑会产生局部失稳,影响整个结构的承载能力。

(3)随着宽跨比的增加或矢跨比的减小,钢箱提篮拱初期刚度、极限承载能力有较大幅度的提高。

参考文献

[ 1 ] 陈宝春,刘君平. 世界拱桥建设与技术发展综述[J]. 交通运输工程学报,2020,20(1):27 - 41.  
(CHEN Baochun,LIU Junping. Review of construction and technology development of arch bridges in the world [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2020, 20 ( 1 ) : 27 - 41. )

[ 2 ] 陈宝春,陈康明,赵秋. 中国钢拱桥发展现状调查与分析[J]. 中外公路,2011,31(2):121 - 127.  
(CHEN Baochun,CHEN Kangming,ZHAO Qiu. Investigation and analysis on the development status of steel arch bridges in China [J]. Journal of China and foreign highway,2011,31 ( 2 ) :121 - 127. )

[ 3 ] TANG Z Z,XIE X,WANG T,et al. Study on FE models in elasto-plastic seismic performance evaluation of steel arch bridge [J]. Journal of constructional steel research,2015,113:209 - 220.

[ 4 ] WANG T, XIE X, SHEN C, et al. Effect of hysteretic constitutive models on elasto-plastic seismic performance evaluation of steel arch bridges [J]. Earthquake and structures,2016,10

(5):1089-1109.

- [5] GUO Y L, ZHAO S Y, PI Y L, et al. An experimental study on out-of-plane inelastic buckling strength of fixed steel arches [J]. Engineering structure, 2015, 98:118-127.
- [6] DOU C, GUO Y L, ZHAO S Y, et al. Experimental investigation into flexural-torsional ultimate resistance of steel circular arches [J]. Journal of structural engineering, 2015, 141(10): 04015006.
- [7] LIU A R, LU H W, FU J Y, et al. Lateral-torsional buckling of fixed circular arches having a thin-walled section under a central concentrated load [J]. Thin-walled structures, 2017, 118:46-55.
- [8] 曹正洲,冯玉涛,沈逢俊.大跨径钢箱提篮拱桥空间稳定性分析[J].桥梁建设,2011(1):43-47.  
(CAO Zhengzhou, FENG Yutao, SHEN Fengjun. Analysis of spatial stability of long span steel box basket handle arch bridge [J]. Bridge construction, 2011(1):43-47.)
- [9] European Committee for Standardization. Design of steel structure part 2: steel bridges [S]. Brussel: European Committee for Standardization, 2006.
- [10] 中华人民共和国交通运输部.公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015 [S].北京,人民交通出版社,2015.  
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.)
- [11] Japan Road Association. Specifications for highway bridges, part II: steel bridge [S]. Tokyo: Maruzen Co. Ltd., 2017.
- [12] 李晓莉,邹雨鹤,王东升.强震下拱式体系桥梁震害特征及抗震研究[J].世界地震工程, 2018, 34(2):33-43.  
(LI Xiaoli, ZOU Yuhe, WANG Dongsheng. Seismic damage characteristics and research of arch bridges under strong earthquake [J]. World earthquake engineering, 2018, 34(2): 33-43.)
- [13] USAMI T, LU Z H, GE H B. Seismic performance evaluation of steel arch bridges against major earthquakes. part 1: dynamic analysis approach [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2004, 33(14):1337-1354.
- [14] 梁正裕,陈艾荣.考虑双非线性影响的大跨度上承式钢拱桥地震响应研究[J].振动与冲击, 2009, 28(11):139-145.  
(LIANG Zhengyu, CHEN Airong. Earthquake response analysis of long span steel deck arch bridge considering effects of elasto-plastic finite displacement [J]. Journal of vibration and shock, 2008, 28(11):139-145.)
- [15] 宋波,易汉斌,周宏宇.考虑行波效应下大跨度钢拱桥的地震反应分析[J].北京工业大学学报, 2011, 37(3):375-380.  
(SONG Bo, YI Hanbin, ZHOU Hongyu. Seismic response analysis for long-span arch bridges under consideration of traveling wave effect [J]. Journal of Beijing university of technology, 2011, 37(3):375-380.)
- [16] USAMI T, SUZUKI M, YOSHIDA S, et al. An application of the strength-related performance verification method to steel double arch-rib structures in cyclic loading [J]. Journal of structural engineering, 2020, 66(A):34-47.
- [17] 谢旭,唐站站,胡欣科,等.纤维模型在钢拱桥抗震设计中的适用性研究[J].中国公路学报, 2015, 28(2):33-42.  
(XIE Xu, TANG Zhanzhan, HU Xinke, et al. Study on applicability of fiber model in seismic design for steel arch bridge [J]. China journal of highway and transport, 2015, 28(2):33-42.)
- [18] 卢东阳,卢三平,何旭辉,等.拱肋内倾角对大跨度钢箱提篮拱桥动力特性及地震响应影响的分析[J].中外公路, 2012, 32(6):137-142.  
(HU Dongyang, LU Sanping, HE Xuhui, et al. Analysis of the influence of arch rib inclination angle on dynamic characteristics and earthquake response of long-span steel box basket-type arch bridge [J]. Journal of China and foreign highway, 2012, 32(6):137-142.)
- [19] 隋伟宁,李航,王占飞,等.内倾角对中承式钢箱提篮拱桥抗震性能影响分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(5):796-804.  
(SUI Weining, LI Hang, WANG Zhanfei, et al. Effect of leaning angle on seismic performance of half-through steel box basket-type arch bridges [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5):796-804.)
- [20] WANG Z F, ZHANG Q, LIU H, et al. Effect of inner lean angle of arch rib on seismic performance of deck steel arch bridge [C]//17th world conference on earthquake engineering (17WCEE). Sendai, Japan: [s. n.], 2020, 2d-0055:1-9.  
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)