

马蹄形断面波形钢腹板支架稳定承载性能研究

吴丽丽^{1,2}, 安丽佩^{1,2*}, 李佳蔚^{1,2}, 孙广强^{1,2}

(1.煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学), 北京 100083;
2.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要:为了研究波形钢腹板支架结构在围岩压力作用下的平面内稳定性能,设计了马蹄形断面波形钢腹板支架的模型试验,分析了支架的稳定承载力、位移与应变发展规律。试验结果表明:支架的最终破坏形态为整体非对称失稳,支架两侧向外变形产生水平位移,右侧水平位移明显大于左侧水平位移;极限荷载时,仅拱顶翼缘和角部腹板进入了塑性阶段。支架的试验结果与有限元分析结果吻合良好,验证了有限元模型的正确性。在此基础上,对波形钢腹板支架的弹塑性屈曲性能进行了有限元参数分析,表明波形钢腹板支架对初始缺陷并不敏感,而腹板高度、腹板厚度及翼缘厚度是弹塑性稳定承载力的敏感参数,影响较大。长细比较小时,对称失稳和反对称失稳均可能发生;长细比较大时,支架会发展反对称失稳;支架的弹塑性屈曲荷载随长细比的增大而降低。有限元计算结果表明,相同边界条件和荷载情况下,波形钢腹板支架的极限稳定承载力是用钢量相同的矿用工字钢支架的2倍以上。

关键词:波形腹板;稳定承载力;马蹄形支架;模型试验;长细比

中图分类号:TU392.4; TU317.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)06-0055-10

Investigation on Stability Behavior of U-shaped Steel Supporting Structure with Corrugated Webs

WU Lili^{1,2}, AN Lipei^{1,2*}, LI Jiawei^{1,2}, SUN Guangqiang^{1,2}

(1.State Key Lab. of Coal Resources and Safe Mining (China Univ. of Mining and Technol.), Beijing 100083, China;
2.School of Mechanics and Civil Eng., China Univ. of Mining and Technol., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to investigate the in-plane stability of steel supporting structure with corrugated webs under the pressure of surrounding rocks, a model experiment was carried out to study the stability behavior, displacement and strain developments of U-shaped steel supporting structure with corrugated webs. The results showed that the ultimate failure mode was global asymmetric buckling, the deformation of the two sides of the support was outward along the radial direction, and the deformation of right side was larger than that of left side. Plastic deformation occurred only in the flange at the crown of the top arc and the web of the corner arc. The finite element model was verified by comparing the experimental results with that of finite element analysis. On this basis, the parametric numeric analysis on elasto-plastic buckling behavior of corrugated steel webs was conducted by finite element method. The results showed that the corrugated steel webs were not sensitive to the initial imperfection, while the web height, the web thickness and the flange thickness were sensitive factors to the bearing capacity of elastic-plastic stability. When the slenderness ratio is small, the symmetric instability or antisymmetric instability may occur. When the slenderness ratio is large, the support will develop the anti-symmetric instability. With the increase of slenderness ratio, the elasto-plastic buckling coefficient k_s increases. Under the same boundary conditions and load conditions, the ultimate stability capacity of the steel support with corrugated webs is more than twice as much as that of the H-shaped steel support for mining with the same weight.

Key words: corrugated web; stability capacity; U-shaped support; model experiment; slenderness ratio

收稿日期:2017-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278488);煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题资助项目(SKLCRSM14KFB05)

作者简介:吴丽丽(1977—),女,副教授,博士生导师,博士。研究方向:钢结构、钢-混凝土组合结构。E-mail: jennywl@163.com

*通信联系人 E-mail: 1659596935@qq.com

中国煤炭资源丰富、产量大,随着开采规模和开采深度的不断加大,软岩支护变得越来越突出,加之软岩因本身的力学性质限制,尤其是初期来压剧烈以及流变性,导致硬岩的常规支护无法适应软岩的变形特点。经国内外学者几十年的艰辛工作,逐渐形成了锚喷、锚网喷、锚喷网架、预应力锚索支护、金属钢架支护、钢筋混凝土支护、料石碇支护、注浆加固等一系列技术。其中金属支架因能较好地支撑软弱围岩且可缩性金属支架还能一定程度上适应围岩的变形,故在20世纪70、80年代得到迅速发展并成为巷道支护的主要形式。

国内外巷道(隧道)金属支架主要采用矿用工字钢或U型钢,矿用工字钢属于刚性金属支架,U型钢属于可缩性金属支架。矿用工字钢能够适应井下复杂多变的载荷状况,承载力高,稳定性好,但由于矿用工字钢的可缩性差,有时不能适应软弱围岩变形情况。U型钢的良好断面形状和几何参数,使型钢搭接后收缩性能良好,使其在主要产煤国家得到了普遍使用,但由于其支护反力有限,有时难以满足支护要求^[1-4]。

波形腹板工型构件由波形钢腹板与平翼缘钢板焊接而成^[5],如图1所示。迄今为止,国内外许多学者对波形腹板工型构件的抗剪性能^[6-8]、抗弯性能^[9-10]、局部承压性能^[11]进行了一系列的理论和试验研究,证明了与平腹板构件相比,波形腹板工型构件具有受力性能优越、用料经济、加工迅速、便于运输等多方面的优点。因此,在门式刚架等轻型建筑钢结构、大型公用建筑结构、大跨度桥梁结构中得到了广泛应用,但其在巷道支护工程中的应用尚处于空白阶段。

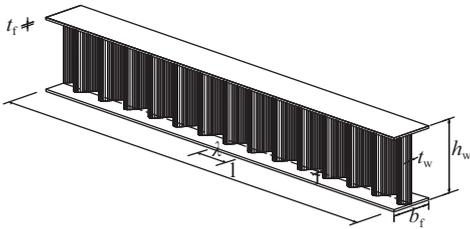


图1 波形腹板工型构件

Fig.1 H-shaped member with corrugated webs

基于软岩大变形特征以及波形腹板工型构件良好性能,本课题组近年来提出了一种新型的支护结构—波形钢腹板金属支架结构^[12]。波形钢腹板金属支架是将波形腹板工型构件弯制成弧形,运至施工现场,采用端板或可缩性节点拼接各个弧段而形成的一种巷道金属支架。波形钢腹板支架作为一种新型的支护形式,具有承载性能良好,施工简单以及因其腹板类似“手风琴”故能适应软岩的大变形等优点,可望在软岩巷道支护中得到应用推广。

目前对波形钢腹板支架完成了一些研究工作如:1)对波形腹板支架结构的截面形式进行了比选,确立了支架结构的简化力学计算模型^[13]。2)通过对波形腹板工型构件、U型钢和矿用工字钢构件稳定承载力的比较表明,波形腹板构件的轴压稳定承载力较高,用钢量较省,具有良好的经济效益^[14]。3)以马蹄形断面的支架形式为例,对波形腹板支架结构的弹性屈曲性能进行了分析,讨论了构件截面各参数,如波形腹板的波幅 f 、波长 λ 、腹板的高度 h_w 、腹板的厚度 t_w 、翼缘的宽度 b_f 和厚度 t_f 等截面参数(如图1所示)对其屈曲荷载的影响^[15];4)提出两种适用于软岩支护的新型波形钢腹板可缩性节点构造,主要涉及螺栓连接和套筒楔子连接等两种形式的可缩性节点,在总结试验研究的结果的基础上提出了关于波形钢腹板可缩性节点的初步设计步骤和改进建议^[16]。

根据前期的数值分析结果,作者设计了马蹄形断面波形钢腹板支架的1:2缩尺模型试验,测试了该支架的承载能力、变形规律等,并开展了试验支架的有限元屈曲分析,将试验结果与有限元结果进行对比,验证有限元模型的正确性;在此基础上,对支架进行了弹塑性屈曲性能的参数分析,讨论了截面尺寸参数、长细比及几何缺陷等因素对弹塑性稳定承载力的影响,进一步研究了弹塑性稳定承载力与长细比的关系;与此同时,对用钢量相同的波形腹板支架与矿用工字钢支架的承载力进行了对比分析。

1 波形钢腹板支架模型试验

设计制作了一榀马蹄形波形钢腹板支架稳定承载力的试验模型,试验设计保证支架不发生面外失稳,支架的大断面尺寸参考国内某马蹄形隧道实际工程,由于该隧道工程尺寸较大,加载设备和场地条件不能达到足尺试验的要求,故采用1:2模型试验,将支架断面尺寸和构件截面尺寸均缩小为原型的1/2。模型试验影响参数有:应力 σ (N/mm²)、应变 ε 、变形 d (mm)、集中荷载 P (kN)、弹性模量 E (N/mm²)、波形腹板工字钢各个截面参数、马蹄形各段圆弧半径等。模型所用材料和原型完全相同,即相似常数 $C_E = C_\sigma = 1$,试验所用模型构件几何尺寸为原型1/2,即几何相似常数 $C_L = C_R = 1$ 。根据相似准则可知: $C_\sigma = C_E = 1$,即模型上所测得的应力值等于原形上对应处的应力值; $C_d = C_L$,即模型上的变形 d 仅为原型实际变形的1/2; $C_P = C_E \times C_L^2 = 1 \times 2^2 = 4$,即模型上所加集中荷载为原型荷载的1/4。

1.1 试件设计

1.1.1 支架试件断面尺寸

马蹄形支架由顶部圆弧,侧部圆弧,角部圆弧和

底部圆弧等几部分组成,各段圆弧之间通过节点板和高强度螺栓连接。试件的各段圆弧半径均为原型的1/2,缩尺后,马蹄形支架试件跨度 $L=6\text{ m}$,高度 $H=4.75\text{ m}$,各圆弧半径分别为: $R_1=3.0\text{ m}$, $R_2=7.0\text{ m}$, $R_3=1.0\text{ m}$, $R_4=11.0\text{ m}$,各段圆弧对应的圆心角分别为 $\alpha_1=180^\circ$, $\alpha_2=5.29^\circ$, $\alpha_3=73.32^\circ$, $\alpha_4=22.78^\circ$,如图2所示。

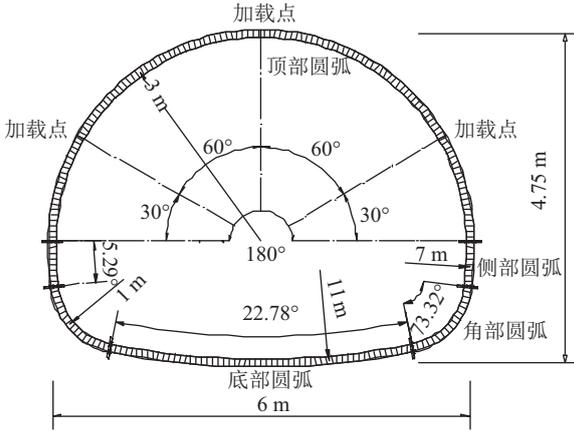


图2 支架试件断面示意图

Fig.2 Diagram of the section of the support specimen

1.1.2 波形腹板工字钢截面尺寸

以12号矿用工字钢支架为基准进行设计,12号工字钢基本参数为:高度 $h=120\text{ mm}$,翼缘宽度 $b=95\text{ mm}$,翼缘平均厚度 $t=15.3\text{ mm}$,腹板厚度 $d=11\text{ mm}$,12号矿用工字钢截面面积 $A=39.7\text{ cm}^2$ 。按照用钢量基本相等的原则确定波形腹板工字钢的截面参数,最终选定的波形腹板工字钢原型的截面面积 $A_1=37.7\text{ cm}^2$ 。波形钢腹板支架原型的截面尺寸为:腹板高 $h'_w=220\text{ mm}$,腹板厚度 $t'_w=3\text{ mm}$,翼缘宽度 $b'_f=150\text{ mm}$,翼缘厚度 $t'_f=10\text{ mm}$,波形腹板波幅 $f'=20\text{ mm}$,波长 $\lambda'=150\text{ mm}$ 。然后将截面尺寸缩小为原型的1/2进行模型试验,缩尺后,所有尺寸均为原型的1/2。

1.2 试验装置及加载方案

1.2.1 试验加载方式

试验在浙江中隧桥波形钢腹板有限公司工厂内进行,由于现场条件所限,采用3台16 t手动千斤顶进行三点加载,加工了两樯五角星形钢支架作为加载反力架,同时作为试件的面外支撑构件以防止试件发生平面外失稳。试验时,将马蹄形试件夹在两樯五角星形支架之间,将千斤顶固定在连接这两樯五角星形支架的梁上进行加载,加载装置如图3所示。

由于试验构件尺寸大,试验现场在钢结构加工厂,限于条件,仅能采用手动加载,将加载点取为3个。3个加载点分别位于上部圆弧顶点处及其左右偏移 60° 处(如图3所示)。为了将千斤顶集中荷载转化为局部均布荷载,在3个加载点及底部圆弧处设置

4个承压支座,顶部承压支座水平设置,如图3所示。其中下支座长 3.6 m ,上支座长 1 m ,另外2个承压支座长 0.5 m ,选用弧度、型号与支架相同,厚 10 mm 的钢板做承压面板,承压面板焊接在 20 mm 厚承压底板上。

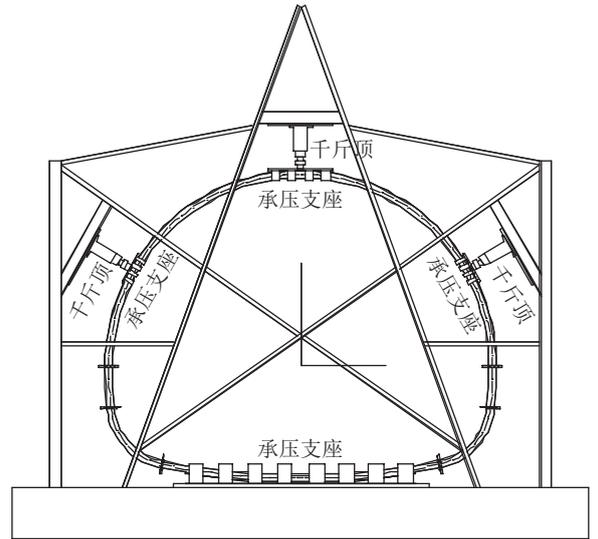


图3 加载装置示意图

Fig.3 Diagram of the the loading device

加载时,各加载点荷载采用依次轮流加载方式并分级稳压。试件承载能力分为10~15级,逐级施加荷载。每级加载 $2\sim 3\text{ kN}$,稳压 $1\sim 2\text{ min}$,待试件变形趋于稳定后,记录测试数据,再加下一级荷载,直到支架丧失稳定性而失去承载能力。

1.2.2 测点布置

为观测波形钢腹板支架构件的局部屈曲,分别在数值分析得出的8个危险截面(A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 、 D)处的外翼缘及内翼缘表面粘贴应变片以测量翼缘轴向应变,在剪力较大的角部圆弧 C_2 截面腹板处粘贴应变花以测量腹板剪应变。另外,在支架拱顶处、顶部圆弧与侧部圆弧连接处布置了3个位移计(D_1 、 D_2 、 D_3)量测支架竖向和水平位移,测点布置图如图4所示。

1.3 测试结果及分析

1.3.1 失稳形态

现场条件所限,整个试验过程中采用手动加载,故很难做到各个加载点荷载同步施加,在试验中采取先对左侧和顶部加载点进行加载,后对右侧加载点进行加载的方式,依次逐步加载,在加载过程中每个荷载步、每个加载点的荷载增量尽量基本一致,支架在加载过程中偏向一方,呈现非对称变形,支架两侧向外变形产生水平位移,支架两侧的水平位移不相等,以右侧水平位移为主。支架未发生局部屈曲,失稳形态为支架整体非对称失稳。

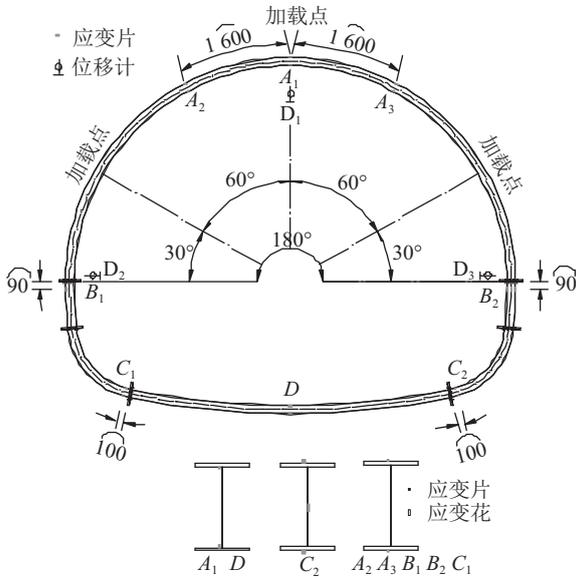


图 4 测点布置图

Fig.4 Layout of the measuring points

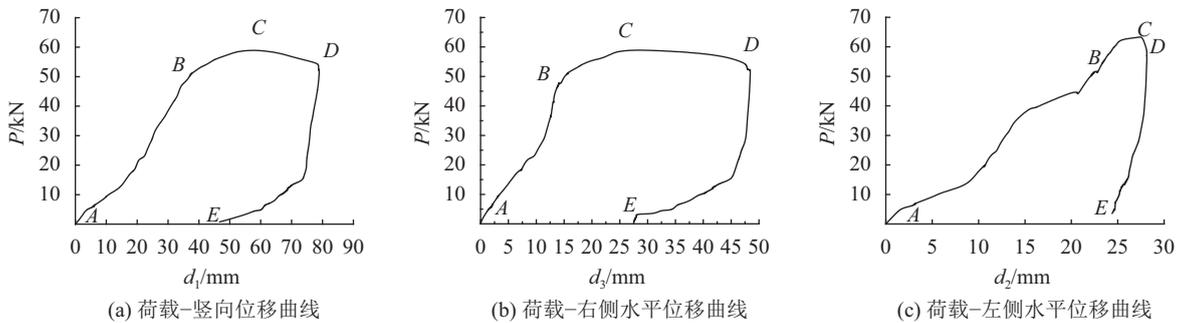


图 5 荷载-位移曲线

Fig.5 Curves of load-displacement

降, 支架逐渐趋于失稳状态。此阶段竖向位移和右侧水平位移增量较大, 而左侧水平位移增量很小, 使得荷载达到 59.1 kN (P_u) 时, 两侧水平位移基本相等。

③CD段: 下降阶段, 荷载随位移增加不断降低, 支架整体进入失稳状态, 荷载降低到 54.6 kN 后, 因支架整体大变形停止加载。此阶段竖向位移和右侧水平位移增量较大, 而左侧水平位移几乎不变, 使得荷载下降到达到 54.6 kN 时, 右侧水平位移明显大于左侧水平位移。

④DE段: 卸载阶段, 卸载后支架弹性变形部分有所恢复。

从试验结果可以看出, 波形钢腹板支架具有较好的稳定承载性能, 缩尺 1/2 后, 马蹄形波形钢腹板支架的承载力达到 29.6 kN (单个千斤顶的荷载), 即按照相似比计算, 支架原型的承载力为 118.4 kN。

1.3.3 波形钢腹板支架应变分析

试验前在支架各段圆弧翼缘上均粘贴了应变片以测量该截面的翼缘轴向应变。应变较大截面的应

1.3.2 荷载-位移曲线

以 3 个加载点荷载的竖向分量总合 P 为纵坐标, 分别以支架拱顶处位移 d_1 (对应 D_1)、顶部圆弧与左侧侧部圆弧连接处位移 d_2 (对应 D_2)、顶部圆弧与右侧侧部圆弧连接处位移 d_3 (对应 D_3) 为横坐标, 绘制各个位移测点的荷载-位移曲线, 如图 5 所示。

支架变形可分成 AB、BC、CD 与 DE 4 个阶段, 不同阶段的具体变化特征如下:

①AB段: 近似弹性阶段, 荷载区间 0~51 kN ($0.85P_u$, P_u 为极限荷载), 这一阶段随着荷载增加位移持续增长, 整个支架被压扁, 支架两侧向外变形产生水平位移, 支架处于整体稳定状态。此阶段支架左侧水平位移大于右侧水平位移。

②BC段: 近似强化阶段, 荷载区间 51~59.1 kN (P_u), 这一阶段荷载缓慢上升, 位移增长加快, 荷载-位移曲线呈现较明显的非线性性质, 斜率较 AB 段下

变随荷载变化曲线如图 6 所示。图中内翼缘是靠近支架中心的翼缘, 外翼缘在支架外侧部分。

从图 6 中曲线可以看出, 仅顶部圆弧 A_1 截面和底部圆弧 D 截面处于外翼缘受压, 内翼缘受拉的受力状态, 其余截面均为外翼缘受拉, 内翼缘受压。所有截面中, 仅顶部圆弧的 A_1 点处部分截面进入了塑性阶段, 这是由于该截面位于拱顶加载处, 局部压力较大造成的。其它截面应变较小, 均未进入塑性阶段, 这表明支架发生失稳时大部分截面并未发生强度破坏, 而是由于变形较大而发生整体失稳破坏。侧面圆弧 B_2 截面的应变明显大于除 A_1 截面外的其它截面。

波形腹板工字钢的截面剪力主要由波形腹板承担, 故测量了剪力较大的角部圆弧 C_2 截面的腹板剪应变, 剪应变 γ 随荷载的变化曲线如图 7 所示。

从图 7 可知, 随着荷载增加, 腹板剪应变基本呈直线上升, 接近极限荷载 P_u 时, 随着荷载增加, 剪应变急速增加, 腹板达到钢材的剪切屈服强度。

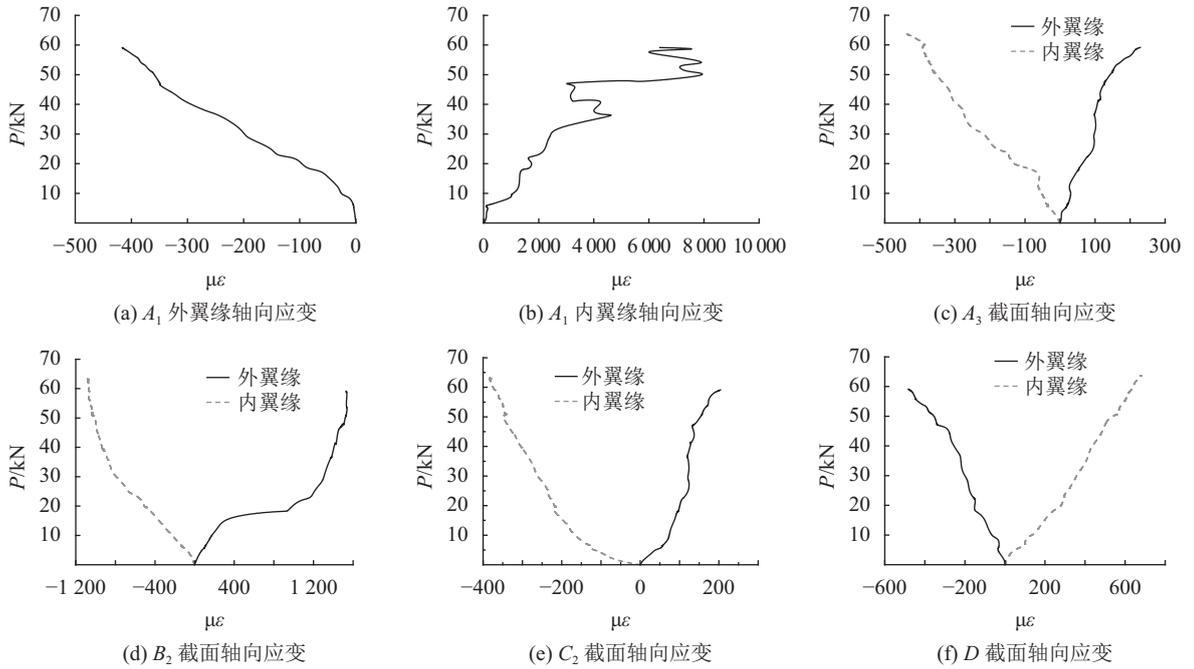


图6 荷载-轴向应变曲线

Fig.6 Curves of load-axial strain

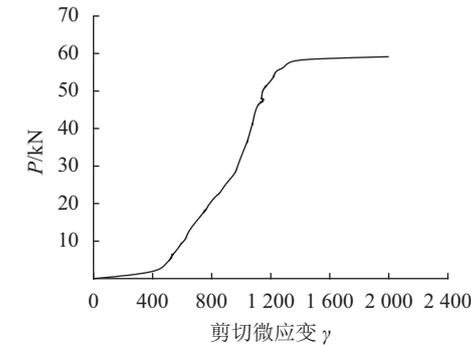


图7 荷载-剪应变曲线

Fig.7 Curves of shear strain-load

2 试验与有限元计算结果的对比

采用ANSYS建立上述模型试验支架的有限元模型,施加与试验相同的约束条件和加载方式,分析波形钢腹板支架的稳定承载性能,并与试验结果进行对比。其中有限元分析开展的是考虑材料弹塑性和几何非线性变形在内的非线性稳定分析。一般来说,做非线性稳定分析时,第1步先进行结构的弹性屈曲分析,获得结构的初始屈曲形态,第2步将一阶屈曲形态乘上初始缺陷幅值再加到该结构上,进一步加载直至结构变形过大,无法继续承载,计算不收敛,宣告结构失稳。

2.1 试验支架的有限元建模

支架的断面尺寸及截面尺寸均与试验支架相同。支架的翼缘、腹板、连接端板均采用SHELL181单

元模拟。假设钢材为理想弹塑性,其弹性模量 $E_s = 206 \text{ GPa}$,泊松比为 $\nu = 0.3$,屈服强度采用钢材材性试验的实测值 $f_y = 289 \text{ MPa}$,支架的有限元模型如图8所示。

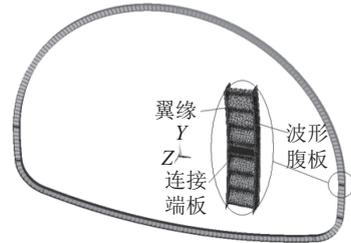


图8 波形钢腹板支架的有限元模型

Fig.8 FEM model of the steel support with corrugated webs

2.2 有限元计算结果与试验结果的对比

在底部圆弧与角部圆弧的两个连接处施加约束,约束该截面上节点的3个方向自由度 UX 、 UY 、 UZ 。在与模型试验相同的加载点,施加3个集中荷载后,进行特征值屈曲分析,然后添加材料非线性和 $S/500$ 的初始缺陷,进行非线性屈曲分析,其中, S 表示封闭支架的计算弧长度,取变形起止点间拱轴线弧长度的一半,具体取值方法如下:

对于马蹄形支架,根据有限元分析所得马蹄形断面波形钢腹板支架的一阶失稳模态,支架变形主要发生在顶部圆弧和侧面圆弧上,角部圆弧的变形非常小,故可以认为支架失稳的起始点位于左侧侧面圆弧与左侧角部圆弧的交点,终点位于右侧侧面圆弧与右侧角部圆弧的交点,即图2所示的半径为 R_2 的侧面圆

弧和半径为 R_3 的角部圆弧的2个交点 B_1 、 B_2 ,故:

$$S = (L_{R_1} + 2L_{R_2})/2 = L_{R_1}/2 + L_{R_2} \quad (1)$$

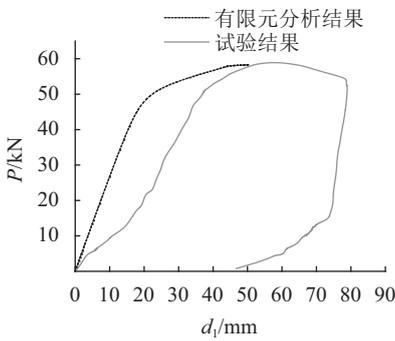
式中, L_{R_1} 为顶部圆弧(半径为 R_1)的圆弧长度, L_{R_2} 为侧部圆弧(半径为 R_2)的圆弧长度,为单个侧部圆弧的长度。

在侧面圆弧和顶部圆弧的圆心角保持不变,顶部圆弧半径 R_1 与侧部圆弧半径 R_2 之比保持3:7不变的情况

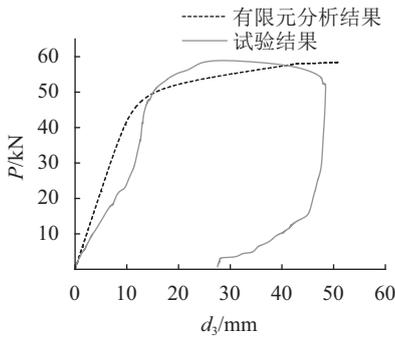
表 1 波形钢腹板支架有限元分析与试验结果对比

Tab.1 Comparison of the results between test and FEA

类别	破坏形态	承载力 P_m /kN	最大竖向位移/mm	最大水平位移/mm
试验结果	非对称失稳	29.6	79	48
有限元分析结果	非对称失稳	29.2	51	51



(a) 荷载-竖向位移曲线



(b) 荷载-右侧水平位移曲线

图 9 支架试验与有限元分析所得荷载-位移曲线对比

Fig.9 Comparison of load-displacement curves between the test and FEA

图9给出了支架部分荷载-位移曲线与有限元计算值的对比,图9(a)、(b)可以看出,有限元分析结果与试验结果吻合较好:支架呈现非对称变形;二者的稳定承载力很接近。由于试验采用手动加载,未能做到各个加载点荷载同步施加,导致试验结果与有限元分析结果存在一定的差异,总体来说,有限元结果与试验结果基本吻合。

3 支架弹塑性屈曲性能的参数分析

鉴于上述支架的试验与有限元结果基本吻合,

下,计算弧长度 S 可以仅仅用顶部圆弧的半径 R_1 表示:

$$S = 1.8R_1 \quad (2)$$

将分析结果与试验结果进行对比,如表1和图9所示。表1中承载力 P_m 为失稳时3个加载点荷载的平均值,最大竖向位移为失稳时支架拱顶处竖向位移,最大水平位移为失稳时顶部圆弧与右侧侧部圆弧连接处水平位移。

下文进一步展开支架的有限元模型参数分析,在考虑几何非线性与材料强度的限制下,研究支架平面内弹塑性稳定承载力与支架截面尺寸参数、长细比和几何缺陷的关系。实际支架受到围岩压力作用,为了简化计算(简化依据见文献[13]),这部分对有限元模型主要施加静水压力作用。

波形钢腹板支架的长细比:

$$\lambda_x = S/i_x \quad (3)$$

式中, i_x 为构件截面对主轴 x 的回转半径, S 为含义同第2.2节所述。由式(3)可以得出,波形钢腹板支架的长细比既可以通过改变计算弧长度 S 改变长细比,也可以通过改变截面回转半径 i_x 来改变长细比,截面的回转半径主要与腹板高度,翼缘厚度,腹板厚度有关,下文将分别研究改变计算弧长度 S 和截面主要参数对支架屈曲性能的影响。

将已完成工作中特征值屈曲分析中得到的屈曲荷载和一阶屈曲模态分别作为非线性屈曲分析中所需施加荷载的参考标准和初始缺陷的施加依据。假设采用的钢材为理想弹塑性材料,屈服强度为 $f_y=345$ MPa,弹性模量 $E_s=206$ GPa,泊松比 $\nu=0.3$ 。

3.1 初始缺陷影响

虽然本文研究的封闭断面波形钢腹板支架的矢跨比大于0.5,1阶屈曲模态总是显示为反对称失稳,但如果在计算时添加一定幅值的对称缺陷,则支架也有可能发生对称的弹塑性失稳,因此首先给支架施加缺陷幅值相同而缺陷模式不同的初始缺陷,分析不同缺陷模式对波形钢腹板支架弹塑性稳定承载力的影响。

对长细比为60、100、140、180的马蹄形断面波形钢腹板支架施加 $2S/500$ 的对称缺陷和反对称缺陷,其中 S 为前文所述的封闭支架的计算弧长度,将两种失稳模态下的弹塑性稳定承载力进行对比,计算出其差值百分率如图10所示。

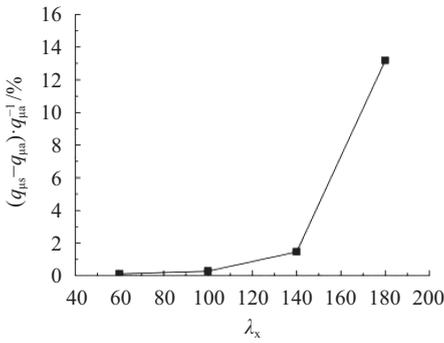


图10 对称和反对称缺陷下的弹塑性稳定承载力对比

Fig.10 Comparison of the elasto-plastic stability capacity under symmetrical defect and antisymmetric defect

图10中, q_{us} 为对称缺陷模式下发生对称失稳的极限荷载, q_{ua} 为反对称缺陷模式下发生反对称失稳的极限荷载, 二者之间的差值随着长细比的增大而增大, 此外, 当长细比小于140时, 二者差值不到2%; 当长细比大于140时, 二者差值随着长细比的增加而显著增加, 当长细比达到180时, 二者差值达到13.2%。由此说明, 当长细比较小时, 由于施加的缺陷模式不同, 对称失稳和反对称失稳均可能发生, 但反对称失稳的稳定承载力略低于对称失稳的稳定承载力; 而当长细比较大时, 由于支架的正对称初始缺陷幅值很难达到足以使支架发生对称失稳的程度, 支架必然会发展反对称失稳, 对称模式的缺陷对支架的失稳模态影响不大, 因此选择对支架施加反对称的初始缺陷模式。

由图10可以看出初始缺陷对长细比大的支架影响更大, 因此采用长细比高达180的马蹄形断面波形

钢腹板支架来研究缺陷幅值对波形钢腹板支架稳定承载力的影响, 如图11所示。结果表明: 随着反对称缺陷幅值的增大, 支架的稳定承载力有所下降, 但并不明显, 故波形钢腹板支架对初始缺陷并不敏感, 在分析时应该考虑较大的初始缺陷, 结合图11中缺陷幅值与支架稳定承载力的关系曲线, 本文取初始几何缺陷 $v_0 = 2S/500$, 从而有效地考虑初始缺陷的影响。

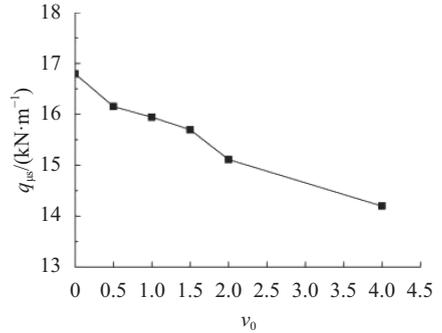


图11 缺陷幅值对波形钢腹板支架承载力的影响

Fig.11 Influence of defect amplitude on capacity of supports

3.2 截面尺寸参数分析

以第1.1节中波形腹板支架模型试验中试件原型尺寸为基础, 依次变化截面参数, 即波形腹板高度 h_w 、波形腹板厚度 t_w 、波形腹板波幅 f 、波形腹板波长 λ 、翼缘宽度 b_f 、翼缘厚度 t_f , 研究随着各参数的变化波形钢腹板支架的弹塑性稳定承载力 q_u 的变化情况, 如图12所示。根据第3.1节的结论, 此处添加的初始缺陷为一阶模态的 $2S/500$ 。

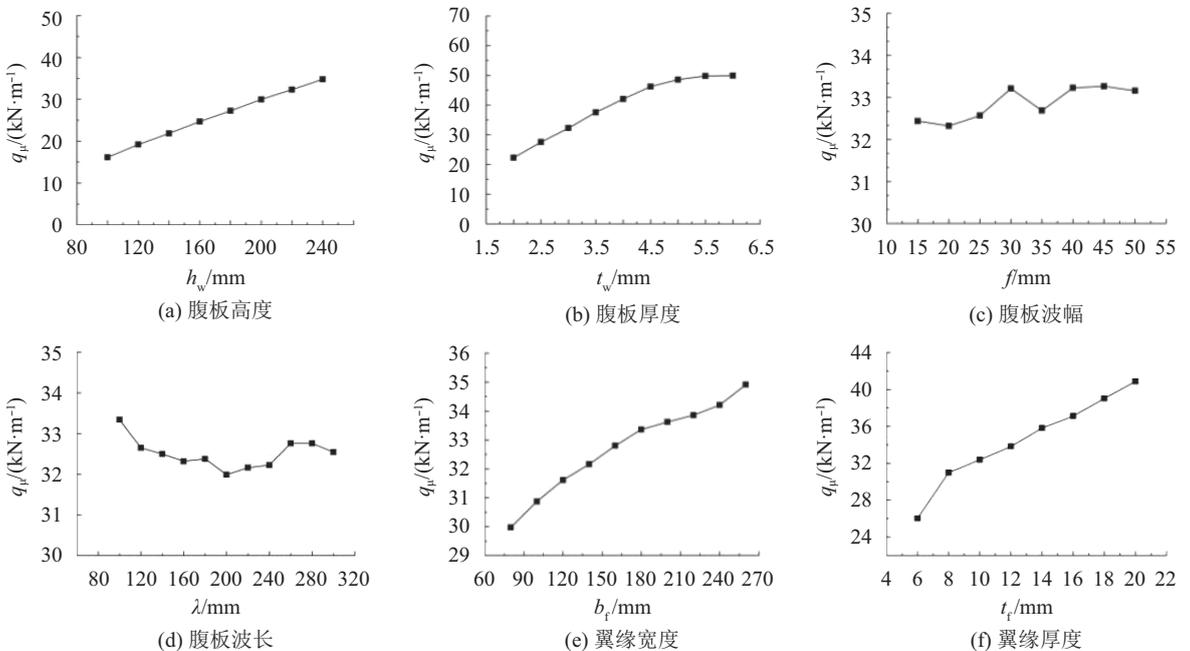


图12 弹塑性稳定承载力与截面尺寸参数关系

Fig.12 Relationship between elasto-plastic stability capacity and sectional parameters

从图12(a)和(b)可以看出, 支架的稳定承载力 q_u 随着腹板高度和腹板厚度增加而显著增加, 基本呈线性增长关系, 稳定承载力增幅分别为115.5%和124.2%。由图12(c)和(d)可知, 支架弹塑性稳定承载力随波形腹板波幅和腹板波长的增大而稍有波动, 最大和最小承载力分别仅仅相差3.0%和4.2%, 说明波幅和波长变化对支架的弹塑性稳定承载力影响不大。支架承载力随着翼缘宽度和翼缘厚度增大而增大, 基本均呈线性增长关系, 当翼缘宽度由80 mm增加至260 mm, 稳定承载力增幅仅为16.5%; 当翼缘厚度由6 mm增加至20 mm, 稳定承载力增幅为57.1%, 如图12(e)和(f)所示。由此可得, 对波形钢腹板支架结构而言, 腹板高度、腹板厚度及翼缘厚度对弹塑性稳定承载力影响较大, 是敏感参数。

3.3 长细比的影响规律

目前使用的波浪腹板工形构件腹板尺寸是有一定的构造要求的, CECS290—2011《波浪腹板钢结构应用技术规程》^[17](以下简称“波浪腹板技术规程”)对波浪腹板的尺寸范围做了如下规定:

表 2 支架计算截面的 $L_9(3^4)$ 正交表

Tab.2 Orthogonal table $L_9(3^4)$ of sections of supports

试件编号	因素1波形腹板尺寸分组			因素2腹板高度 h_w /mm	因素3翼缘宽度 b_f /mm	因素4翼缘厚度 t_f /mm
	腹板波幅 f /mm	腹板波长 λ /mm	腹板厚度 t_w /mm			
1	20	150	2	150	120	10
2	30	200	3	150	160	12
3	30	200	4	150	200	16
4	20	150	2	250	160	16
5	30	200	3	250	200	10
6	30	200	4	250	120	12
7	20	150	2	350	200	12
8	30	200	3	350	120	16
9	30	200	4	350	160	10

针对选出的代表性的截面, 通过改变支架的计算弧长度 S 改变长细比的方法得出了各个计算截面在不同长细比下的弹塑性稳定承载力 q_u 与长细比 λ_x 的关系如图13所示。结果表明: 波形钢腹板支架的弹塑性稳定承载力随着长细比的增加而降低, 且承载力随着长细比增加而降低的速度逐渐减缓。

4 波形钢腹板支架与矿用工字钢支架对比分析

本文设计的波形钢腹板支架模型是基于用钢量相同的12号矿用工字钢设计的, 故同时建立1/2缩尺后的12号矿用工字钢支架的有限元模型, 在相同的约束条件和加载方式下, 对比分析矿用工字钢支架与波形钢腹板支架的屈曲性能。

对于波浪腹板工形构件, 其腹板高厚比不能大于 $600\sqrt{235/f_y}$, 腹板厚度不宜小于2 mm, 波浪腹板尺寸宜按照波浪腹板技术规程^[17]中的表3.3.1中的分组取值。

在第3.2节所提及的波形钢腹板支架6个截面参数中, 腹板波幅 f 、腹板波长 λ 、腹板厚度 t_w 对支架屈曲荷载的影响较小, 且波浪腹板技术规程也给出了建议的波浪腹板尺寸分组取值, 即确定了腹板厚度 t_w 也就确定了相应的腹板波幅 f 和腹板波长 λ , 因此可以将腹板波幅 f 、腹板波长 λ 、腹板厚度 t_w 三者归为波形腹板尺寸分组这一个影响因素, 从而将6个因素试验简化为4因素试验。利用正交设计法同时考察波形腹板尺寸分组、腹板高度、翼缘宽度及厚度这4个因素对支架屈曲性能的影响, 相应每种因素对应3水平, 波形腹板尺寸分组分别为波浪腹板技术规程^[17]中的表3.3.1中的分组取值中的第1组、第3组和第5组, 腹板高度 h_w 分别为150、250、350 mm, 翼缘宽度 b_f 分别为120、160、200 mm, 翼缘厚度 t_f 分别为10、12、16 mm, 从而选择出具有代表性的一系列波形腹板工形截面尺寸, 如表2所示。

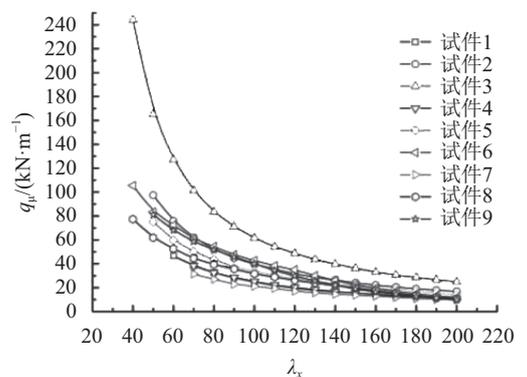


图 13 弹塑性稳定承载力与长细比关系

Fig.13 Relation between elastoplastic stability capacity and the slenderness ratios

工字钢支架同样采用SHELL181单元模拟。支架的断面尺寸与波形钢腹板支架的有限元模型相同。矿用工字钢缩尺1/2之后,翼缘宽度47.5 mm,厚7.5 mm,总高度60 mm,腹板厚5.5 mm。

矿用工字钢支架材料的本构关系、约束方式、加载方式及分析方法与波形钢腹板支架完全相同,将两种支架的有限元分析结果进行对比,如表3所示。表中屈曲荷载为失稳时3个加载点荷载的平均值,最

表3 波形钢腹板支架与矿用工字钢有限元分析结果对比

Tab.3 Comparison of FEA results between steel supports with corrugated webs and with H-shaped steel for mining

支架类别	破坏形态	特征值屈曲荷载/kN	非线性屈曲荷载/kN	最大竖向位移/mm	最大水平位移/mm
矿用工字钢	非对称失稳	37.5	12.5	172	149
波形钢腹板	非对称失稳	204	29.2	51	51

5 结论

通过马蹄型波形钢腹板支架稳定承载力模型试验及有限元参数分析,得出以下主要结论:

1) 支架的最终破坏形态为整体非对称失稳,支架两侧向外变形产生水平位移,右侧水平位移明显大于左侧水平位移;极限荷载时,仅拱顶翼缘和角部腹板进入了塑性阶段。

2) 波形钢腹板支架有限元分析结果与试验结果吻合较好,验证了波形钢腹板支架有限元模型的正确性。

3) 长细比较小时,由于施加的缺陷模式不同,对称失稳和反对称失稳均可能发生;长细比较大时,支架必然会发展反对称失稳。波形钢腹板支架对初始缺陷并不敏感,在分析时应该考虑较大的初始缺陷。

4) 对于马蹄形断面波形钢腹板支架结构,腹板高度 h_w 、腹板厚度 t_w 及翼缘厚度 t_f 等对弹塑性稳定承载力影响较大,是支架的敏感参数。

5) 计算分析表明,波形钢腹板支架的弹塑性稳定承载力随着长细比的增加而降低,且降低的速度逐渐减缓。

6) 通过对相同断面的矿用工字钢支架进行有限元屈曲分析,证明了在用钢量基本相等的情况下,波形钢腹板支架的变形仅矿用工字钢支架的1/3左右,其稳定承载力是矿用工字钢支架的2.3倍左右,稳定承载性能提高显著。

参考文献:

[1] Xue F,Zhang N,Yu X Y,et al.Bearing capacity analyses and optimization of U-shaped steel support under non-uniform load[J].Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014,19(2):6231-6242.
[2] Jiao Y Y,Song L,Wang X Z,et al.Improvement of the U-shaped steel sets for supporting the roadways in loose thick

大竖向位移为失稳时支架拱顶处竖向位移,最大水平位移为失稳时顶部圆弧与右侧侧部圆弧连接处水平位移。

从表3可以看出:支架在保持用钢量基本相同的情况下,波形钢腹板支架结构的变形接近工字钢支架的1/3,而其稳定承载力却是矿用工字钢支架的2.3倍左右,可见波形钢腹板支架的刚度和承载性能显著优于传统的矿用工字钢。

coal seam[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2013,60:19-25.

[3] Liu Jianzhuang,Zhang Nong,Zheng Xigui,et al.Research on buckling failure mechanism of U type steel support loaded deviating longitudinally[J].Journal of China Coal Society, 2011,36(10):1647-1652.[刘建庄,张农,郑西贵,等.U型钢支架偏纵向受力及屈曲破坏分析[J].煤炭学报,2011,36(10):1647-1652.]
[4] Tang Furong,Liu Na,Zheng Xigui.Anti-floor heaven mechanical model and application of closed U-shaped support formed by straight wall and semicircular arch[J].Journal of China Coal Society,2014,39(11):2165-2171.[唐芙蓉,刘娜,郑西贵.直墙半圆拱U型钢封闭支架控底力学模型及应用[J].煤炭学报,2014,39(11):2165-2171.]
[5] Guo Yanlin,Zhang Qinglin,Wang Xiaoan.A theoretical and experimental study of the shear strength of H-shaped members with sinusoidal corrugated webs[J].China Civil Engineering Journal,2010,43(10):43-52.[郭彦林,张庆林,王小安.波浪腹板工形构件抗剪承载力设计理论及实验研究[J].土木工程学报,2010,43(10):43-52.]
[6] Driver R G,Abbas H H,Sause R.Shear behavior of corrugated webs girders[J].Journal of Structural Engineering, 2006,132(2):195-203.
[7] Jiho M,Yi J W,et al.Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs[J].Journal of Constructional Steel Research,2009,65:1198-1205.
[8] Li Lifeng,Hou Lichao,Sun Juncui.Research on shear mechanical property of corrugated steel webs[J].Journal of Hunan University(National Sciences),2015,42(11):56-63.[李立峰,侯立超,孙君翠.波形钢腹板抗剪性能的研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(11):56-63.]
[9] Abbas H H,Sause R,Driver R G.Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads[J].Journal of Engineering Mechanics,2006,133(3):347-355.
[10] Jiho M,Yi J W,Choi B H.Lateral-torsional buckling of I-

- girder with corrugated webs under uniform bending[J]. Thin-Walled Structures,2009,47(1):21–30.
- [11] Guo T,Sause R.Analysis of local elastic shear buckling of trapezoidal corrugated steel webs[J].Journal of Constructional Steel Research,2014,102:59–71.
- [12] Wu L L,Yu Z,Zhang D D.Preliminary study on application of metal members with corrugated webs in the supports of soft rock[J].Applied Mechanics and Materials,2011,90(93): 2380–2388.
- [13] Wu Lili,Li Jiawei,Wei Guihua,et al.A simplified mechanic model of steel support in roadways under actual pressure of surrounding Rock[J].Steel Construction,2014,30(Suppl): 353–360.[吴丽丽,李佳蔚,韦贵华,等.巷道金属支架在实际围岩压力下的简化力学模型分析[J].钢结构,2014,30(增刊):353–360.]
- [14] Wu Lili,Yu Zhen,Xing Ruijiao,et al.A new metal supporting structure with corrugated webs and its mechanical property[J].Journal of China University of Mining & Technology,2014,43(2):227–232.[吴丽丽,余珍,邢瑞蛟,等.新型波形钢腹板支架结构及力学性能分析[J].中国矿业大学学报,2014,43(2):227–232.]
- [15] Wu Lili,Guo Kaifeng,Yu Zhen,et al.Analysis of in-plane elastic buckling properties of new type of supporting steel structure with corrugated webs[J].Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2015,47(6): 9–14.[吴丽丽,郭开凤,余珍,等.新型波形钢腹板支架结构平面内弹性屈曲性能分析[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(6):9–14.]
- [16] Wu Lili,Wang Lin,Guo Kaifeng.Axial loading test on yielding joint of metal supporting structure with corrugated webs [J].Steel Construction.2016,31(Suppl):547–557.[吴丽丽,王琳,郭开凤.波形钢腹板支架可缩性节点轴压试验[J].钢结构,2016,31(增刊):547–557.]
- [17] 波浪腹板钢结构应用技术规程:CECS 290—2011[S].北京:中国计划出版社,2011.

(编辑 黄小川)

引用格式:Wu Lili,An Lippei,Li Jiawei,et al.Investigation on stability behavior of U-shaped steel supporting structure with corrugated webs[J].Advanced Engineering Sciences,2017,49(6):55–64.[吴丽丽,安丽佩,李佳蔚,等.马蹄形断面波形钢腹板支架稳定承载性能研究[J].工程科学与技术,2017,49(6):55–64.]