

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.03.013

# 冷弯薄壁三次卷边槽钢轴压开孔立柱承载力研究

尹凌峰<sup>1</sup>, 徐正林<sup>2</sup>, 黄慧<sup>1</sup>, 洪党平<sup>3</sup>, 唐敢<sup>1</sup>

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096;

2. 南京六维物流自动化设备工程有限公司, 南京 210019; 3. 江西省建筑设计研究总院, 南昌 330046)

**摘要:**对冷弯薄壁三次卷边槽钢轴压开孔短柱进行试验研究, 并采用有限元软件 ANSYS 进行计算, 对比分析了 ANSYS、中国规范和北美规范的计算结果以及开孔对立柱承载能力的影响。研究表明:冷弯薄壁三次卷边槽钢轴压开孔立柱的破坏模式均出现畸变屈曲;中国规范有效截面法间接计入了畸变屈曲的影响,与北美规范计算结果吻合良好;开孔明显降低了立柱的承载能力,且变化规律与工程中常规轴心受压构件不符,对于冷弯薄壁三次卷边槽钢承载力的开孔折减在设计中应予以足够的重视,其开孔折减系数对于文中截面可取为  $K = 2.41 \times 10^{-5} \lambda^2 - 3.78 \times 10^{-3} \lambda + 9.59 \times 10^{-2}$ 。

**关键词:**冷弯薄壁三次卷边槽钢;开孔立柱;短柱试验;轴向承载力;畸变屈曲

**中图分类号:**TU394 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)03-0081-07

## Analysis of Axial Bearing Capacity of Three Times Cold-formed Thin-walled Lipped Channel Column with Holes

Yin Lingfeng<sup>1</sup>, Xu Zhenglin<sup>2</sup>, Huang Hui<sup>1</sup>, Hong Dangping<sup>3</sup>, Tang Gan<sup>1</sup>

(1. Key laboratory of concrete and pre-stressed concrete structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Jiangsu Nova Logistics System Co., Ltd, Nanjing 210019, P. R. China; 3. Jiangxi Province Architectural Design & Research General Institute System, Nanchang 330046 Jiangxi, P. R. China)

**Abstract:** Axial bearing capacity of three times cold-formed thin-walled lipped channel short column with holes was studied and calculated by finite element software ANSYS. The comparative analysis was carried out to the ANSYS, Chinese code and North America code to make out the influence of hole on the bearing capacity of the column. The results show that distortional buckling appears in the failure mode of axial compression column. Effective width method in Chinese code indirectly considers the impact of distortional buckling, and it has a good agreement with the results of North America code. Holes obviously decrease the axial bearing capacity of the column, and the variation is not according with conventional axial compression member. Opening reduction to the carrying capacity of three times cold-formed thin-walled lipped channel should be emphasised in design. Reduction factor can be taken as  $K = 2.41 \times 10^{-5} \lambda^2 - 3.78 \times 10^{-3} \lambda + 9.59 \times 10^{-2}$  to cross-section of the article.

**Key words:** three times cold-formed thin-walled lipped channel; column with holes; the experiment of short column; axial bearing capacity; distortional buckling

收稿日期:2012-10-15

基金项目:国家自然科学基金(51008067);江苏省六大大人才高峰资助项目(2010-JZ-007)

作者简介:尹凌峰(1974-),男,博士,副教授,主要从事钢结构和大跨空间结构非线性力学性能研究,(E-mail)eking@seu.edu.cn。

受压的冷弯薄壁卷边槽钢有 3 种基本屈曲模式:整体屈曲、局部屈曲和畸变屈曲,在理想状态下,这 3 种屈曲均属于分叉失稳问题,但屈曲波长和屈曲后性能有所不同<sup>[1-2]</sup>。近年来,板件变得越来越薄,截面形状也越来越复杂,使得畸变屈曲在某些情况下成为控制因素,同时,构件的屈曲模式从单一变为复杂,表现为局部屈曲、畸变屈曲与整体屈曲相关作用,构件屈曲时呈现 2 种以上的屈曲特征。

目前,冷弯薄壁型钢轴压构件设计方法主要有 2 种:一是有效截面法;一是直接强度法<sup>[3]</sup>。中国现行规范《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)<sup>[4]</sup>(简称中国规范)采用有效截面法,有效截面法假定由部分有效截面承受外力,构件的整体承载力计算时应取截面的有效部分计算,如何确定有效截面成为冷弯型钢受压构件设计的关键问题,中国规范详细给出了加劲板件、部分加劲板件和非加劲板件的有效宽厚比的计算公式。有效截面法本身是按构件发生局部屈曲时推导所得,其他国家规范中有将畸变屈曲弹性屈曲应力乘以折减系数  $\gamma$  后纳入局部屈曲相同的计算方法计算有效截面<sup>[5]</sup>。北美规范 NAS2004<sup>[6]</sup>(简称北美规范)的直接强度法不采用有效截面及其几何性质,而直接利用构件的全截面及其几何性质,以受压构件为例,先采用有限条法确定板件间的相关关系,确定板件的弹性局部屈曲应力  $\sigma_{cr1}$  和弹性畸变屈曲应力  $\sigma_{crd}$ ,从而计算出构件弹性局部屈曲荷载  $P_{cr1} = A\sigma_{cr1}$  和弹性畸变屈曲荷载  $P_{crd} = A\sigma_{crd}$ ,结合未考虑局部屈曲和畸变屈曲的弹塑性极限荷载  $P_u$ ,最终得到构件的极限承载力。目前,直接强度法也被纳入了澳洲冷成型钢结构设计规范<sup>[1]</sup>。

多孔的冷弯薄壁三次卷边槽钢应用越来越广泛,目前主要应用于货架立柱,开孔与截面异型成为影响货架立柱性能的重要因素。孔洞的存在改变了原无孔立柱的受力性能,而开孔形式的多样性给数值分析及理论研究带来了很大的困难。文献[7-8]对货架开孔短柱进行了试验研究,并参数化分析了不同开孔形状及尺寸对立柱承载力的影响,分析结果表明六角形孔洞对立柱承载力的削弱最大。文献[9]对开孔和不开孔冷弯薄壁槽钢立柱的局部屈曲和畸变屈曲进行了研究,并对不同开孔进行了参数化研究,提出了考虑局部屈曲和畸变屈曲的等效模量计算方法,采用有限元进行了验证。文献[10]采用试验研究和有限元参数分析相结合的方法,对目

前中国常用的高层货架立柱的稳定性能进行了研究。分析了构件的长度、壁厚、再卷边宽度、腹板加劲肋高度、孔洞、缺陷等对其屈曲模式和极限承载力的影响。文献[11]在有限元分析的基础上对货架立柱截面形状进行了相关优化设计,设定优化目标来分析合理截面。文献[12-13]对卷边槽钢进行了试验研究,发现立柱的失稳呈现畸变与整体相关屈曲,且畸变屈曲的半波长适中,大于局部屈曲但小于整体屈曲的半波长,并建议设计中考虑不同屈曲模式之间相关屈曲的作用。目前,规范的设计公式未明确计入开孔对货架立柱承载力的影响,在现有冷弯薄壁型钢截面设计方法的基础上,如何考虑三次卷边槽形截面的特点成为研究立柱承载力的关键。

本文针对冷弯薄壁三次卷边槽钢轴压开孔短柱进行试验研究,并采用大型通用有限元软件 ANSYS 进行计算,对比分析 ANSYS、中国规范和北美规范的计算结果以及开孔对立柱承载能力的影响。

## 1 短柱试验

### 1.1 试验简介

试验目的是研究冷弯薄壁三次卷边槽钢轴心受压短柱的屈曲形态和极限承载能力以及开孔对其受力的影响。试验立柱高度为 375 mm 的 Z90×70×2.0 短柱,材料为 Q235,分为开孔和不开孔 2 组,每组 3 个试件,短柱开孔及立柱截面形式见图 1。材料根据 FEM<sup>[14]</sup>关于短柱试验选材的相关规定进行选取,试件材性试验结果为:屈服强度 244 MPa,极限强度 338 MPa,弹性模量  $E = 2.0 \times 10^5$  MPa。

轴向荷载的加载由上下厚 30 mm 的垫板进行,受压垫板在长度上相对于立柱截面的尺寸分别向外延伸各 10 mm。采用螺栓将底板或顶板固接于受压垫板上,且垫板上含有能固接球支撑的缺口。试验采用球承来模拟两端铰接,短柱两端的底板分别与 30 mm 厚垫板通过螺栓连接,试件加载装置如图 2。应变片和侧向位移计均布置在试件中央高度截面上,2 组试件的位移计布置位置相同,如图 3 所示。试验时首先对试件进行几何及物理对中,以确保试件为轴心受压,然后采用分级加载直至试件破坏。

### 1.2 试件结果及其分析

试件破坏模式均表现为局部与畸变的相关屈曲,且最大变形在试件中央高度附近,短柱试验过程中的破坏特征主要表现为:加载前期,不开孔短柱构件无明显的变形,当荷载快接近试件破坏前,截面出

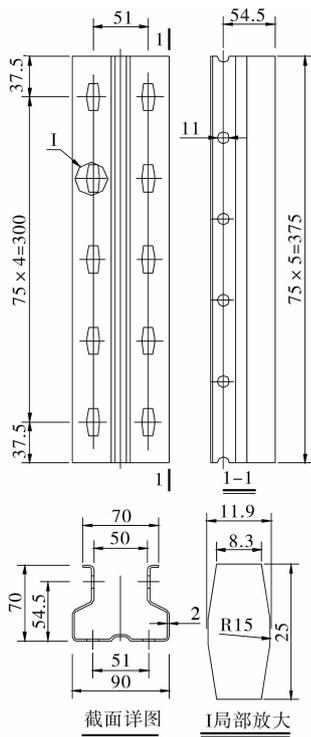


图 1 立柱截面及开孔形式

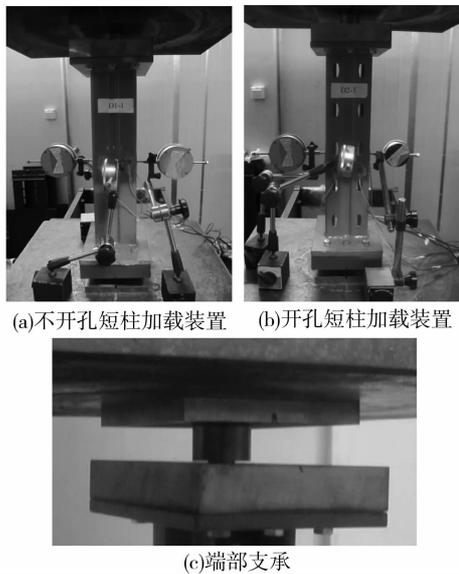


图 2 短柱加载装置

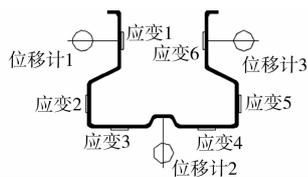


图 3 位移及应变布置图

(图 4),不开孔立柱的破坏模式一致,表现为翼缘畸变屈曲起主导作用,腹板局部屈曲不明显;开孔短柱的破坏形态与不开孔短柱基本相同(图 5),但开孔短柱的腹板局部屈曲与不开孔立柱相比更为明显,腹板外鼓显著(图 5),表现为很明显的局部与畸变的相关屈曲。

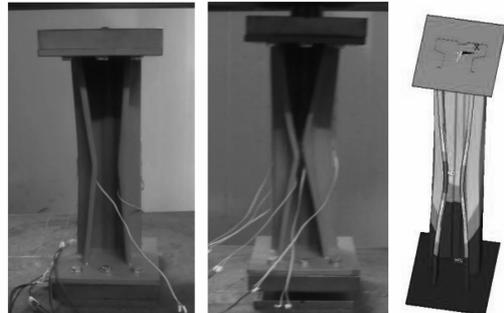


图 4 不开孔短柱的破坏形式

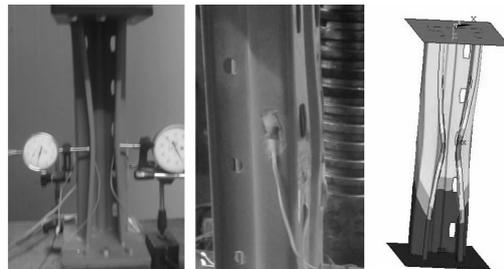


图 5 开孔短柱的破坏形式

试验实测的荷载-位移曲线如图 6、图 7 所示,由图可知:随着荷载的增大,翼缘处位移随之增大,在加载后期,翼缘变形急剧加大,承载力有一定的提高,表明畸变屈曲具有一定的后屈曲强度;加载前期,开孔及不开孔短柱腹板处变形均较小,加载后期,开孔短柱较不开孔短柱腹板变形明显增大,这是由于腹板开孔较大,有效面积减少较多,从而使得腹板局部应力及变形增加,同时翼缘畸变屈曲使得腹板承担更多的荷载,从而加剧了腹板的局部屈曲。

极限承载力列于表 1 中,表中结果显示开孔并没有明显降低短柱的平均承载能力,二者极限承载力平均值相同,但开孔短柱的下限值与不开孔短柱相比降低了 4.3%,开孔短柱的下限值比其上限值降低了 7.3%。这是由于开孔增加了受压短柱的差异性。结合试验破坏特征发现,开孔未明显影响短柱的破坏形式,短柱的破坏是由于翼缘先发生畸变屈曲从而导致腹板承担更多的荷载,腹板发生局部屈曲,最终由于翼缘畸变屈曲与腹板局部屈曲的共同作用而导致短柱丧失承载能力。

现畸变屈曲现象,两翼缘出现内缩,随着试件畸变位移迅速增大,翼缘先破坏,最后导致整个构件破坏

表 1 试验与有限元分析极限承载力比较

短柱类型	试件编号	试验结果			ANSYS 计算结果		$P_{uf}/P_{ut}$
		破坏模式	极限承载力 $P_{ut}/\text{kN}$	均值 $P_{ut}/\text{kN}$	破坏模式	极限承载力 $P_{uf}/\text{kN}$	
不开孔	bkk-1	D+L	156.6	156.8	D+L	133.4	0.851
	bkk-2	D+L	156.8				
	bkk-3	D+L	156.8				
开孔	kk-1	D+L	158.8	156.8	D+L	126.1	0.804
	kk-2	D+L	161.7				
	kk-3	D+L	149.9				

注:破坏模式中 D 表示畸变屈曲, L 表示局部屈曲。

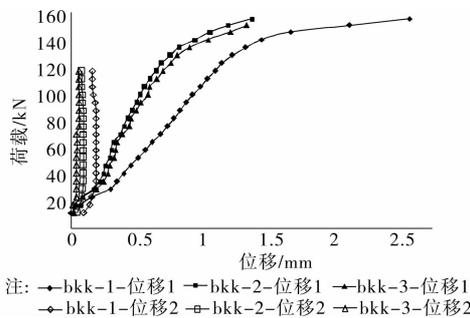


图 6 不开孔短柱荷载-位移曲线

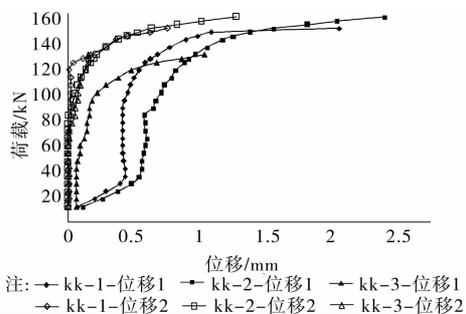


图 7 开孔短柱荷载-位移曲线

采用有限元软件 ANSYS 中的壳单元 (Shell143) 对试验进行了模拟。有限元分析时,模拟了试件两端的封板,运用一致缺陷模态法来考虑立柱的初始缺陷(1/1 000),非线性屈曲分析过程中考虑了几何和材料的双重非线性,不考虑冷弯作用引起的材料屈服点提高以及考虑残余应力的影响。分析所得破坏模式及承载力与试验结果的对比分别见图 4、图 5 和表 1。结果表明:有限元分析所得破坏模式与试验结果完全一致,有限元计算值与试验所得不开孔及开孔短柱极限承载力相比偏小,分别为 14.9%、19.6%,因为 ANSYS 分析时没有考虑冷弯效应及残余应力的影响,中国规范<sup>[4]</sup>仅对强度问题采用考虑冷弯效应的强度设计值,对于稳定问题不

考虑冷弯效应且不考虑开孔的影响,对于该短柱,中国规范计算结果为 120.6 kN,与表 1 中的 ANSYS 计算结果相比小 9.6%。采用该有限元模型及分析方法能够比较有效地模拟此类冷弯薄壁三次卷边槽钢轴压柱的破坏特征并得到用于设计的极限承载力。

## 2 有限元分析与规范计算结果的对比分析

### 2.1 概述

中国规范详细给出了加劲板件、部分加劲板件和非加劲板件的有效宽厚比的计算公式,其中关于轴心受压构件的稳定性计算公式只采用了一条整体屈曲系数  $\varphi$  曲线,它的制定是以试验为基础,试件包括方管、冷弯槽钢、卷边槽钢和卷边角钢(未包括本文研究的多孔三次卷边槽钢),共 164 根,以此作出回归分析<sup>[15]</sup>。

北美规范中直接强度法分有 2 类计算方法<sup>[6]</sup>。一类是考虑局部屈曲与整体屈曲相关作用的极限承载力计算方法;另一类是考虑畸变屈曲与整体屈曲相关作用的极限承载力计算方法。轴心受压构件的公式简要介绍如下:

整体屈曲系数  $\varphi$ : 当  $\bar{\lambda} \leq 1.5$  时,  $\varphi = (0.658)^{\bar{\lambda}^2}$ ,

当  $\bar{\lambda} > 1.5$  时,  $\varphi = \frac{(0.877)}{\bar{\lambda}^2}$ , 式中,  $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$ ,  $\sigma_{cr}$  为

构件发生整体屈曲时的最小弹性屈曲应力。

考虑局部屈曲后的轴心受压构件:

当  $\lambda_1 \leq 0.776$  时,  $P_1 = P_u = \varphi A f_y$  (1)

当  $\lambda_1 > 0.776$  时,

$P_1 = \left(\frac{P_{cr1}}{P_u}\right)^{0.4} [1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr1}}{P_u}\right)^{0.4}] P_u$  (2)

式中:  $P_1$  为构件极限承载力;  $P_{cr1}$  为构件弹性局部屈曲荷载;  $\lambda_1 = \sqrt{\frac{P_u}{P_{cr1}}}$ ;  $P_u$  为构件整体屈曲荷载;  $f_y$  为

材料屈服强度。

考虑畸变屈曲后的轴心受压构件:

$$\text{当 } \lambda_d \leq 0.561 \text{ 时, } P_d = P_u = \varphi A f_y \quad (3)$$

当  $\lambda_d > 0.561$  时,

$$P_d = \left(\frac{p_{\text{crd}}}{p_u}\right)^{0.6} [1 - 0.25 \left(\frac{p_{\text{crd}}}{p_u}\right)^{0.6}] P_u \quad (4)$$

式中:  $P_d$  为构件极限承载力;  $P_{\text{crd}}$  为构件弹性畸变

屈曲荷载;  $\lambda_d = \sqrt{\frac{p_u}{p_{\text{crd}}}}$ 。

压力设计值  $p = \min(p_1, p_d)$

应用上述公式时,先用有限样条法确定截面考虑了板件间相关关系的弹性局部屈曲应力  $\sigma_{\text{crl}}$  和弹性畸变屈曲应力  $\sigma_{\text{crd}}$ , 算出受压构件的弹性局部屈曲荷载  $P_{\text{crl}}$  和畸变屈曲荷载  $P_{\text{crd}}$ , 北美规范中给出了有限样条程序 CUFSM 用于计算  $\sigma_{\text{crl}}$  和  $\sigma_{\text{crd}}$ 。

## 2.2 计算结果的对比分析

采用北美规范中给出的有限样条程序 CUFSM 进行计算,得到该截面可能发生的弹性屈曲模式时屈曲应力与半波长度之间的关系曲线如图8所示,图中A点是均匀受压时截面畸变屈曲的最小屈曲应力,对应的半波长度为490 mm;B点是构件畸变弯扭屈曲应力,截面形状改变的同时出现扭转位移;如果构件的实际长度比较长,畸变屈曲的影响会变弱,C点是弯扭屈曲,截面形状未改变,仅出现扭转位移;图中未出现板件局部屈曲,这与该截面满足中

国规范全截面有效的条件相吻合。

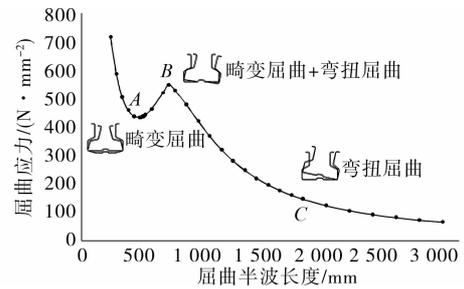


图8 三次卷边槽钢轴心受压屈曲应力与半波长度

试件截面不变,高度分别取为375、750、1500、1800、2400、3000 mm,分为开孔与不开孔2类,立柱两端的约束条件分为:两端铰接,端部截面的翘曲完全受到约束;两端嵌固。立柱的计算结果见表2,根据有限元分析所得破坏形式可以看出:当构件不高时,立柱的屈曲形式表现为明显的畸变屈曲伴随一定的局部屈曲,畸变屈曲的形式主要有内缩、外张及一侧内缩另一侧外张3种;当构件较高时,立柱的屈曲形式表现为畸变屈曲同时伴随一定的整体屈曲。有限元分析的破坏形式变化规律与直接强度法中考虑畸变屈曲影响的变化规律一致,即随着立柱计算长度的增加,畸变对轴压立柱稳定承载力的影响越来越小。

表2 立柱的计算结果

构件高度/ mm	边界条件	开孔形式	长细比			破坏模式	ANSYS	中国规范	北美规范
			$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\lambda_w$		计算结果	计算结果	计算结果
						极限承载力 $P_{\text{ut}}/\text{kN}$	极限承载力 $P_{\text{uc}}/\text{kN}$	极限承载力 $P_{\text{un}}/\text{kN}$	
375	铰接	不开孔	12.0	16.3	15.3	D+L	133.4	120.6	113.9
		开孔	12.0	16.3	15.3	D+L	126.1		
	固接	不开孔	6.0	8.2	12.7	D+L	134.6	121.8	114.3
		开孔	6.0	8.2	12.7	D+L	123.2		
750	铰接	不开孔	24.0	32.6	30.6	D+L	129.3	114.7	110.6
		开孔	24.0	32.6	30.6	D+L	112.2		
	固接	不开孔	12.0	16.3	25.3	D+L	130.7	117.5	112.3
		开孔	12.0	16.3	25.3	D+L	114.5		
1500	铰接	不开孔	47.9	65.2	61.0	D+E	117.1	100.3	97.7
		开孔	47.9	65.2	61.0	D+E	95.4		
	固接	不开孔	24.0	32.6	50.1	D+E	123.2	107.1	104.7
		开孔	24.0	32.6	50.1	D+E	107.3		
1800	铰接	不开孔	57.5	78.3	73.0	D+E	97.0	92.1	90.5
		开孔	57.5	78.3	73.0	D+E	85.2		
	固接	不开孔	28.8	39.1	59.9	D+E	121.0	103.1	100.4
		开孔	28.8	39.1	59.9	D+E	100.8		

续表 2

构件高度/ mm	边界条件	开孔形式	长细比			破坏模式	ANSYS	中国规范	北美规范
			$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\lambda_w$		计算结果	计算结果	计算结果
							极限承载力 $P_{ut}/kN$	极限承载力 $P_{uc}/kN$	极限承载力 $P_{un}/kN$
2 400	铰接	不开孔	76.7	104.3	96.8	D+E	77.2	70.1	72.9
		开孔	76.7	104.3	96.8	D+E	69.0		
	固接	不开孔	38.3	52.2	79.0	D+E	110.1	91.8	90.0
		开孔	38.3	52.2	79.0	D+E	91.4		
3 000	铰接	不开孔	95.8	130.4	120.1	D+E	58.3	49.7	53.6
		开孔	95.8	130.4	120.1	D+E	51.1		
	固接	不开孔	47.9	65.2	97.4	D+E	92.0	76.6	77.9
		开孔	47.9	65.2	97.4	D+E	78.5		

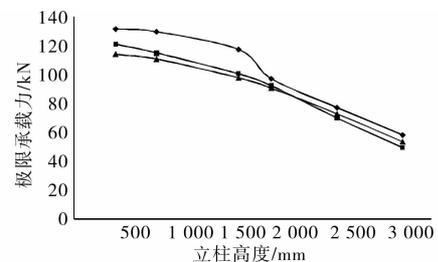
注:1)破坏模式中 D 表示畸变屈曲, L 表示局部屈曲, E 表示整体屈曲;  
2) $\lambda_x, \lambda_y$  分别为对  $x$  轴和  $y$  轴的长细比,  $\lambda_w$  为弯扭屈曲的换算长细比, 三者中加粗的为该构件控制长细比。

表 2 中的中国规范与北美规范的计算结果均为不开孔构件的极限荷载, 因为中国规范根据有效截面计算轴压构件的稳定承载力, 该截面满足中国规范全截面有效的条件, 而北美规范中直接强度法一般采用有限样条法计算受压构件的畸变屈曲荷载, 有限样条法很难考虑开孔对构件屈曲荷载的影响。对于不开孔立柱, 中国规范、北美规范及有限元计算结果的对比见图 9, 结果表明: 规范值均小于有限元计算值, 偏于安全; 构件的破坏模式均出现畸变屈曲现象, 计算中应考虑畸变屈曲对承载能力的影响; 当立柱较短时, 北美规范计算值小于中国规范计算值, 当立柱较高时, 北美规范计算值大于中国规范计算值, 误差范围为  $[-6\%, 7\%]$ , 两者吻合良好。北美规范采用直接强度法, 直观有效地考虑了畸变屈曲对构件承载能力的影响, 而中国规范采用有效截面法, 计算过程中未能体现畸变屈曲的影响, 但其所采用的  $\varphi$  曲线是以试验为基础通过回归分析得到的, 计算结果与北美规范吻合良好。

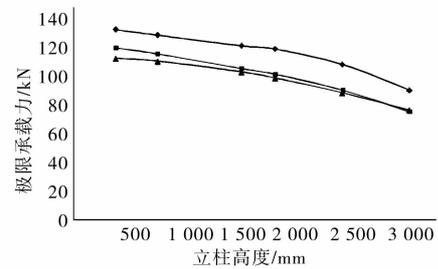
不开孔立柱与开孔立柱的有限元计算结果见表 2, 依据计算结果拟合得到与构件长细比相关的折减系数下限曲线见图 10。拟合曲线时采用对数函数、幂函数和多项式等多种函数进行调试与选定, 最终采用多项式进行计算结果的拟合。拟合得到的开孔折减系数为:

$$K = 2.41 \times 10^{-5} \lambda^2 - 3.78 \times 10^{-3} \lambda + 9.59 \times 10^{-2} \quad (5)$$

式中  $\lambda$  为控制长细比,  $\lambda = \max(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_w)$ ,  $\lambda_x, \lambda_y$  分别为中国规范中<sup>[4]</sup>构件对截面主轴  $x$  轴和  $y$  轴的长细比,  $\lambda_w$  为中国规范<sup>[4]</sup>中构件弯扭屈曲的换算长细比。



(a) 铰接(端部截面的翘曲完全受到约束)



注: ●—ANSYS □—中国规范 ▲—北美规范

图 9 中国规范、北美规范及有限元计算结果的对比

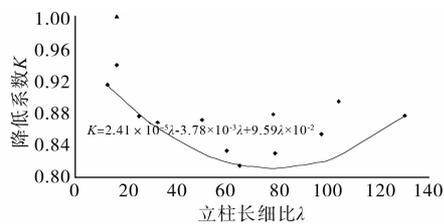


图 10 折减系数下限曲线

上述结果表明: 开孔明显降低了立柱的承载能力; 对于短柱, 折减系数  $K$  接近于立柱最小净截面面积与毛截面面积的比值 0.916; 随着立柱长细比的增加, 开孔对立柱极限荷载的影响更为明显, 当长细比接近 80 时, 折减系数  $K$  达到最小值 0.81; 随着

立柱长细比的进一步增加,开孔对立柱极限荷载的影响有所减弱。因此,对于冷弯薄壁三次卷边槽钢承载力的开孔折减在设计中应予以足够的重视。

### 3 结 论

对冷弯薄壁三次卷边槽钢轴压开孔短柱进行了试验研究,并在此基础上采用大型通用有限元软件 ANSYS 进行计算,对比分析了 ANSYS、中国规范和北美规范的计算结果以及开孔对立柱承载能力的影响,主要结论有:

1)短柱试件破坏模式均表现为局部与畸变的相关屈曲,且最大变形在试件中央高度附近,开孔加剧了腹板的局部屈曲,文中采用的有限元模型及分析方法能够比较有效地模拟此类冷弯薄壁三次卷边槽钢轴压柱的破坏特征及极限承载力。

2)轴心受压立柱的破坏模式均出现畸变屈曲,畸变屈曲的形式主要有内缩、外张及一侧内缩另一侧外张3种,计算中应考虑畸变屈曲对立柱承载能力的影响。

3)北美规范采用直接强度法,直观有效地考虑了畸变屈曲对构件承载能力的影响,中国规范虽采用有效截面法,但其所用的  $\varphi$  曲线是以试验为基础通过回归分析得到的,两者计算结果吻合良好。

4)目前,规范的设计公式未明确计入开孔对立柱承载力的影响,孔洞的存在改变了原无孔立柱的受力性能,在控制长细比 80 附近会较明显降低立柱的承载能力,而对于短柱和长柱,开孔对立柱极限荷载的影响有所减弱。对于冷弯薄壁三次卷边槽钢承载力的开孔折减在设计中应予以足够的重视,其开孔折减系数对于文中截面可取为  $K = 2.41 \times 10^{-5} \lambda^2 - 3.78 \times 10^{-3} \lambda + 9.59 \times 10^{-2}$ 。

#### 参考文献:

[1] Yu W W. Cold-formed steel design [M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2000.  
[2] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2011.

[3] Hancock G J. Cold-formed steel structures [J]. Journal of Constuctional Steel Research, 2003, 59: 473-487.  
[4] 中华人民共和国建设部. GB 50018—2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.  
[5] AS/NZS 4600: 1996 (Australian/New Zealand Standard) Cold-formed steel structures [S]. Jointly Published by Standards Australia and Standards New Zealand, 1996.  
[6] NAS 2004 North American specification for the design of cold-formed steel structural members [S]. American Iron and Steel Institute, Canadian Standards Association, 2004.  
[7] 王鹏. 冷弯薄壁型钢结构货架试验研究及有限元分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
[8] 陆洋. 组装式货架构件及节点性能研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2008.  
[9] 周金将. 冷弯薄壁多孔开口构件的受力性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.  
[10] 邓君宝. 冷弯薄壁开孔货架立柱稳定性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
[11] 姚道壮, 杨建国, 吕志军. 基于 ANSYS Workbench 的货架立柱截面优化设计[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2011, 37(4): 438-441.  
Yao D Z, Yang J G, Lyu Z J. Optimization of steel storage rack column cross-sections based on ANSYS workbench [J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2011, 37(4): 438-441.  
[12] Kwon Y B, Kim B S, Hancock G J. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 278-289.  
[13] Casafont M, Pastor M M, Roure F, et al. An experimental investigation of distortional buckling of steel storage rack columns [J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49 (8): 933-946.  
[14] FEM 10. 2. 02 The design of static steel pallet racking [S].  
[15] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

(编辑 王秀玲)