

# 双肢 U 形拼合冷弯薄壁型钢箱梁 受弯性能试验

黄 远,周弘昊

(湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘要** 目的 研究双肢 U 形拼合冷弯薄壁型钢箱梁的受弯性能,对现有拼合箱梁受弯承载力计算方法进行评估对比。方法 对 12 根双肢 U 形拼合冷弯薄壁型钢箱梁进行受弯性能试验,通过分析试件破坏模式、荷载-位移曲线、荷载-应变曲线及跨中截面应力分布,考察了螺钉间距及腹板开孔对拼合箱梁破坏模式及受弯承载力的影响,并对中美规范和学者建议的拼合箱梁受弯承载力计算方法进行了验证。结果 增大螺钉间距会略微降低箱梁受弯承载力;腹板开孔比为 0.4 时,拼合箱梁受弯承载力下降很小,当开孔比为 0.7 时,拼合箱梁受弯承载力和延性下降明显。拼合箱梁受弯承载力计算方法中,简单叠加法由于未考虑拼合效应,预测结果偏于保守,而《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)中规定的方法预测结果偏大。结论 双肢 U 形拼合冷弯薄壁型钢箱梁纯弯段破坏模式表现为局部屈曲破坏,腹板开孔较大时会显著降低拼合箱梁受弯承载力,建议实际工程中腹板开孔比不宜大于 0.4;可以采用《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB50018—2002)中有效宽度法计算单肢构件承载力后简单叠加近似得到拼合箱梁受弯承载力。

**关键词** 冷弯薄壁型钢;双肢拼合箱梁;静载试验;腹板开孔;受弯承载力

中图分类号 TU392.5

文献标志码 A

## Experimental Study on Flexural Capacity of Cold-formed Steel Double-limb U Box Beams

HUANG Yuan, ZHOU Honghao

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, China, 410082)

**Abstract:** Built-up sections are widely used in construction industry due to the superior mechanical properties. However, there is little research about cold-formed steel double-limb box beams with web openings on the calculation method of bearing capacity. In this paper, a total of 12 built-up box beams were tested under four-point bending. By analyzing the failure mode, load-displacement

收稿日期:2022-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51890901);湖南省自然科学基金项目(2020JJ2003)

作者简介:黄远(1982—),男,教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构和装配式混凝土结构等方面研究。

curve, load-strain curve and Strain distribution of the specimen, the effects of web opening and screw spacing on the failure mode and flexural performance of the box girder were investigated. The calculation methods of flexural bearing capacity of split box girders proposed by Chinese and American codes and scholars are verified. Results show that the bending capacity of the split box girder can be significantly affected by changing the ratio of flange width to thickness and section height to width. Increasing screw spacing will slightly reduce the bending capacity of box beams. When the hole ratio is 0.4, the flexural bearing capacity of the split box girder decreases little, and when the hole ratio is 0.7, the flexural bearing capacity and ductility of the split box girder decreased significantly. Predicted results of simple superposition method are conservative because the splicing effect is not taken into account. The prediction results of the method specified in "Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings" (JGJ 227—2011) are relatively large. The failure mode of the double-limb U-shaped split cold-formed thin-walled steel box girder is local buckling failure, and the flexural bearing capacity of the split box girder will be significantly reduced when the web opening is large. The effective width method in "Technical code of cold-formed thin-wall steel structures" (GB50018—2002) can be used to calculate the bearing capacity of single-limb members, and then the flexural bearing capacity of the split box girder can be obtained by simple superposition and approximation.

**Key words:** cold-formed steel; double-limbs box beam; static test; web opening; flexural capacity

由冷弯薄壁型钢基本构件组合而成的拼合截面构件被广泛应用于冷弯型钢结构楼盖承重体系中。拼合构件克服了单肢构件因质心和剪心不重合而容易扭转屈曲的问题。同时,为了方便线路、管道系统在构件中穿越,经常在梁腹板中开孔洞,孔洞的存在将影响构件中应力的重分布,影响了构件的屈曲特征和屈曲承载能力。

C. D. Moen 等<sup>[1-3]</sup>针对腹板开孔构件受弯承载力计算方法展开了一系列研究,提出了考虑开孔影响的直接强度法,但该方法仅针对单肢构件。B. Beshara 和 L. S. Serrette<sup>[4-5]</sup>通过试验指出在偏心荷载作用下,拼合箱梁的受弯承载力小于单个构件承载力之和。P. Sultana 等<sup>[6]</sup>提出冷弯薄壁拼合箱梁惯性矩和受弯承载力可以按单个基本构件简单叠加得到。L. Xu 等<sup>[7]</sup>建议在偏心作用下,双肢拼合箱梁受弯承载力应在《北美冷弯型钢规范》(AISI S100—16)规定的单个构件承载力叠加基础上乘以 0.9 的折减系数。石宇等<sup>[8]</sup>对由 C 形和 U 形冷弯薄壁型钢拼合而成的箱梁进行受弯试验研究,指出由于存在拼合效应,拼合箱梁受弯承载

力大于各单肢承载力之和,并提出了抗弯模量折减法用于计算拼合箱梁承载力。Y. L. Li<sup>[9]</sup>研究了 C 形和 U 形拼合箱梁在强、弱轴纯弯曲作用下的受力性能,结果表明,箱梁拼合效应确实存在,但由于 C 形梁和 U 形梁不能同时达到峰值荷载,因此建议拼合箱梁绕强轴弯曲时的弯矩承载力为各构件承载力总和的 90%。L. Wang 等<sup>[10-11]</sup>对 43 根 10 种横截面尺寸和不同孔径的组合箱梁进行了四点弯曲试验研究及有限元分析,结果表明,《北美冷弯型钢规范》(AISI S100—16)<sup>[12]</sup>中直接强度法对于开孔箱梁计算结果偏于保守。

目前,国内外针对冷弯单肢腹板开孔受弯构件研究理论较多<sup>[13-16]</sup>,而对双肢拼合腹板开孔箱梁的研究较少。同时,各国规范<sup>[12,17]</sup>中关于冷弯薄壁型钢受弯构件的设计公式针对的是单肢构件,而对于双肢拼合构件,《北美冷弯型钢规范》(AISI S100—16)建议拼合构件受弯承载力可按单肢构件承载力之和进行叠加。我国现行《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)<sup>[18]</sup>中建议双肢抱合箱型截面梁受弯承

载力可将翼缘厚度叠加后按部分加劲等效成整体箱梁进行计算。石宇等<sup>[8]</sup>指出该方法在拼合箱梁翼缘宽厚比较大时,计算结果将偏于不安全。鉴于上述情况,笔者通过试验探究了双肢 U 形拼合冷弯薄壁型钢箱梁的受弯破坏过程,研究了腹板开孔比和螺钉间距对拼合箱梁受弯性能的影响,同时对《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)和《北美冷弯型钢规范》(AISI S100—16)中关于拼合箱梁受弯承载力计算方法进行验证。结果表明当腹板开孔较大时会显著降低拼合箱梁受弯承载力,采用《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)计算单肢截面承载力后再简单叠加后

得到的预测结果与试验值最为接近。

## 1 试 验

### 1.1 试件设计

双肢 U 形拼合冷弯薄壁型钢箱梁由两根单肢 U 形钢通过自攻螺钉 ST4.8 × 19 连接而成,试件长度  $L = 1600$  mm、试件厚度  $t = 1.5$  mm、翼缘宽度  $B = 50$  mm,试件截面形式如图 1 所示。试件截面尺寸参考《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)中冷弯型钢开洞楼板洞口周围设置的拼合箱型截面梁。共对 12 个试件进行四点弯曲试验,试件参数见表 1。

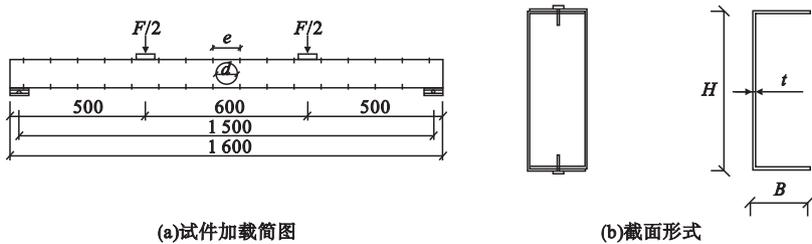


图 1 试件截面和加载形式

Fig. 1 Section form and loading method of the specimen

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameter table

试件编号	腹板高度/mm	开孔直径/mm	螺钉间距/mm	极限荷载/kN
H150D0.0s150	150	0	150	34.65
H150D0.0s300	150	0	300	32.98
H150D0.4s150	150	60	150	33.27
H150D0.4s300	150	60	300	31.80
H150D0.7s150	150	105	150	28.25
H150D0.7s300	150	105	300	27.05
H100D0.0s150	100	0	150	20.05
H100D0.0s300	100	0	300	19.28
H100D0.4s150	100	40	150	19.93
H100D0.4s300	100	40	300	19.10
H100D0.7s150	100	60	150	17.89
H100D0.7s300	100	60	300	17.01

注:  $H$  为腹板高度;  $D$  为开孔比;  $s$  为螺钉间距。

笔者选取开孔比  $d/H$  为 0.4 和 0.7, 螺钉间距为 150 mm 和 300 mm, 进而研究不同参数对拼合箱梁受弯性能的影响。为了防止试件加载时发生局部屈曲, 在加载点和支座处箱梁内部分别设置了 U60 × 50 × 1.5 的加劲肋, 外部设置了型号为 C100 × 50 × 1.5 × 12 的加劲肋。

钢材材性试验根据《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)<sup>[19]</sup> 的规定, 从 U 形构件腹板平行于轧制方向切取 3 个板状试件进行拉伸试验。钢材的屈服强度为 284 MPa, 极限强度为 355 MPa, 断后伸长率为 38%, 弹性模量为  $2.0 \times 10^5$  MPa。

### 1.2 试件装置及测点布置

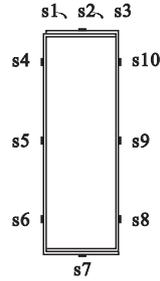
试验装置如图 2(a) 所示。采用 10 t 液压千斤顶进行加载, 通过工字型钢分配梁将

荷载均匀分配到箱梁加载点处,加载点间距 600 mm,试件两端简支。同时为了防止试件发生平面外屈曲,在加载点附近设置三脚架夹具(见图 2(b))。正式加载时采用分级加载制度,每级荷载取为预估最大荷载的 20%,每一级加载完成后持荷 2 min,进行数据采集及观测。当荷载下降到最大荷载的 85%时,为安全考虑,停止加载。

在箱梁跨中底部中心位置设置 1 号位移计 D1,用来测量拼合箱梁跨中竖向位移。试件应变片布置如图 2(c)所示,在试件上翼缘跨中沿长度方向布置 3 个应变片,应变片间距 150 mm,其中 s2 号应变片位于跨中截面正上方翼缘表面;两侧腹板沿高度方向对称布置 6 个应变片,下翼缘跨中布置 1 个应变片,所有数据的采集由静态电阻应变箱完成。



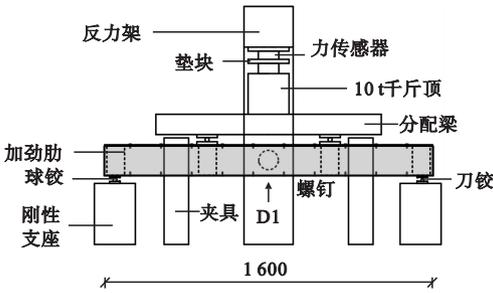
(b)试验加载现场



(c)应变片布置

图 2 试验装置及量测布置

Fig. 2 Test set-up and measuring arrangement

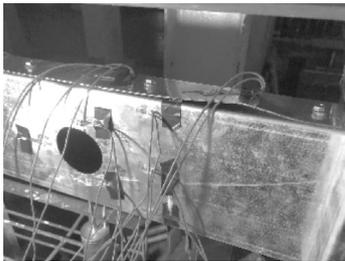


(a)试验装置示意图

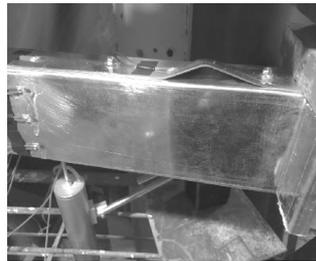
## 2 结果与分析

### 2.1 试验现象

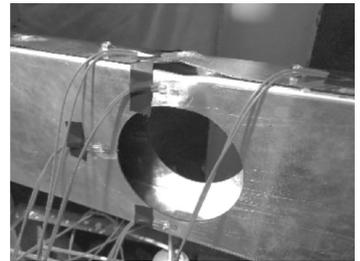
试验结果表明,腹板开孔尺寸对试件的破坏模式影响较大,不同开孔尺寸下试件典型破坏模式如图 3 所示。所有试件都发生平面内受弯破坏,破坏模式表现为翼缘与腹板发生局部屈曲而破坏,所有试件破坏时螺钉保持完好。



(a)翼缘局部屈曲(H150D0.0)



(b)翼缘局部屈曲(H150D0.4)



(c)翼缘腹板局部屈曲(H150D0.7)

图 3 试件破坏特征

Fig. 3 Failure modes of specimens

对于未开孔和开孔比为 0.4 的试件,当加载到极限荷载 70% 左右时,试件纯弯段靠近加载点处的翼缘出现局部屈曲,继续加载至极限荷载的 80% 左右时,跨中开孔上方腹板处出现局部屈曲。当达到极限荷载时,靠近加载点处翼缘局部屈曲变形突然增大,试

件随之丧失承载力。试件跨中处局部屈曲发展缓慢,试件破坏状态是加载点处的翼缘出现局部屈曲变形较大而丧失承载力。

对于开孔比为 0.7 的试件,当荷载达到极限荷载 70% 左右时,试件纯弯段靠近加载点处的翼缘首先出现局部屈曲,继续加载至

最大荷载的 80% 左右时, 试件跨中翼缘和开孔上方腹板出现局部屈曲, 表现为翼缘凸起和开孔上方腹板外扩。继续增大荷载, 试件跨中翼缘和腹板变形逐渐增大, 当达到最大荷载时, 试件跨中翼缘和孔洞上方腹板屈曲变形突然增大, 同时荷载迅速下降, 试件丧失承载力, 破坏呈脆性趋势。试件的最终破坏

状态表现为跨中处翼缘和腹板发生局部屈曲破坏。

### 2.2 荷载-位移曲线

双肢 U 形拼合冷弯薄壁箱梁荷载-位移曲线如图 4 所示。位移测量点为试件跨中截面下翼缘中心处。

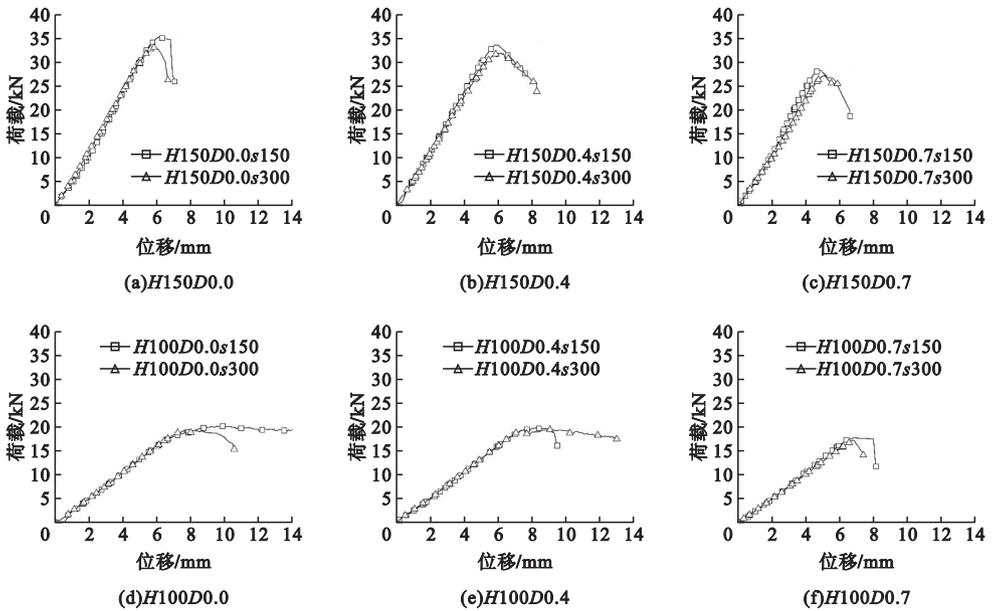


图 4 试件荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of specimens

由图 4 可以看出, 螺钉间距由 150 mm 增大到 300 mm 时, 荷载-位移曲线斜率基本一致, 改变螺钉间距对拼合箱梁初始刚度影响较小。加载初期, 荷载-位移曲线呈线性关系增加, 试件处于弹性变形阶段, 拼合后的箱梁在螺钉约束下能共同变形承受外力。随着荷载增加, 试件上翼缘处出现局部屈曲, 试件整体刚度下降, 荷载-位移曲线出现非线性段。继续加载到最大荷载后, 上翼缘和腹板局部屈曲变形突然增大, 试件丧失承载能力, 荷载迅速下降。试件 H100D0.0s150 和 H100D0.4s300 在达到极限荷载后荷载下降缓慢, 这是因为实际加载过程中达到最大荷载后没有继续加压, 导致试件破坏时塑性变形发展缓慢, 荷载-位移曲线比较平滑。

各试件极限承载力随螺钉间距变化关系

如图 5 所示。从图中可以得出, 腹板高度为 150 mm 的试件, 螺钉间距由 150 mm 增加到 300 mm 时, 开孔比为 0、0.4 和 0.7 时极限承

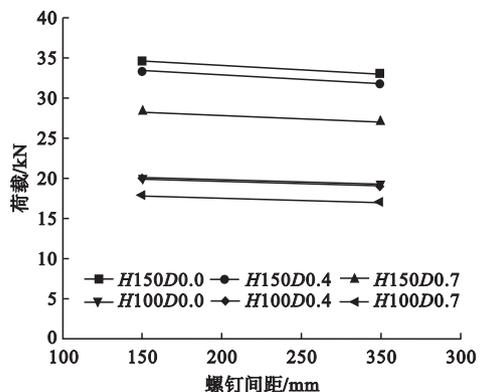


图 5 不同螺钉间距极限承载力对比

Fig. 5 Comparison of ultimate bearing capacity with different screw spacing

承载力分别下降了4.8%、4.4%和4.2%;腹板高度为100 mm的试件,螺钉间距由150 mm增加到300 mm时,开孔比为0、0.4和0.7时极限承载力分别下降了3.8%、4.2%和4.9%。拼合箱梁的破坏模式表现为上翼缘发生局部屈曲而分离,增大螺钉间距导致拼合箱梁的拼合效应减弱,在上翼缘达到屈服荷载后由于螺钉的约束作用减弱,使得拼合后的承载力略微降低。

各试件极限承载力随腹板开孔比变化关系如图6所示。从图中可以得出,腹板高度为150 mm的试件,当螺钉间距为150 mm时,开孔比为0.4和0.7的试件与未开孔试件相比,极限承载力下降了1%和18%;当螺钉间距为300 mm时,极限承载力下降了0%和18%。腹板高度为100 mm的试件,当螺钉间距为150 mm时,开孔比为0.4和0.7的试件与未开孔试件相比,极限承载力下降了1%和11%;螺钉间距为300 mm时,极限承载力下降了1%和12%。由此可知,对于双肢拼合腹板开孔冷弯箱梁,当开孔比为0.4时,腹板开孔对箱梁极限承载影响很小,可以忽略;当开孔比为0.7时,孔洞的存在会明显降低箱梁极限承载力。同时,对于腹板开孔比为0.7的试件,极限荷载对应的峰值位移明显低于未开孔试件,呈脆性破坏趋势,腹板开孔较大时会降低拼合箱梁的延性。

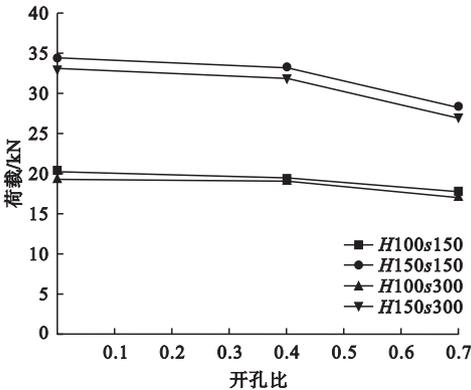


图6 不同开孔比下极限承载力对比

Fig. 6 Comparison of ultimate bearing capacity with different opening ratios

### 2.3 荷载-应变曲线

腹板高度为150 mm的试件荷载-应变曲线如图7所示。应变片s2位于受压上翼缘,应变片s4位于腹板受压侧,应变片s5位于腹板形心轴上,应变片s6位于腹板受拉侧,应变片s7位于下翼缘。

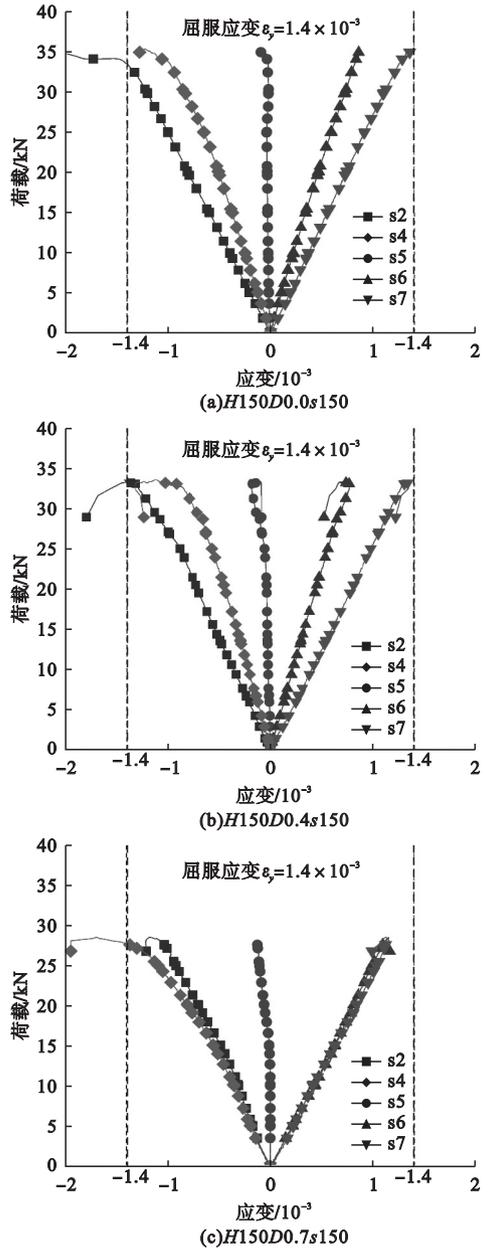


图7 试件荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves of specimens

从图7可以看出,对于试件H150D0.0和H150D0.4,加载初期,试件处于弹性阶段,荷载-应变曲线呈线性增长,距离中性轴

越远的应变片应变越大。根据试件材性试验结果可知, 当应变达到  $1.4 \times 10^{-3}$  左右时, 材料达到屈服; 加载过程中试件上翼缘率先达到屈服, 对应的应变片 s2 应变曲线斜率发生变化, 应变迅速增加。继续加载, 应变片 s2 荷载-应变曲线接近于水平, 试件达到极限荷载进入破坏阶段, 而受拉区腹板和翼缘在加载过程中未发生屈曲, 应变片 s6 和 s7 荷载-应变曲线基本保持线性变化。

对于试件 H150D0.7, 应变变化相较于未开孔试件有所区别, 由于开孔较大导致跨中腹板受力面积较小, 应力集中明显, 所以在加载过程中, 腹板上方应变片 s4 应变增量大于上翼缘应变片 s2。随着荷载继续增加, 腹板开孔上方率先出现屈服, 应变片 s2 斜率发

生变化, 荷载-应变曲线接近水平, 试件进入破坏阶段。受拉区腹板和翼缘应变片 s6 和 s7 的荷载-应变曲线保持线性变化。

### 2.4 截面应变分布

图 8 为 6 组典型试件在不同加载时期截面高度不同位置应力分布图, 图中纵坐标表示应变片距离中性轴的距离, 以受压区为正。荷载分别取  $P_{max}/3$ 、 $2P_{max}/3$  和  $P_{max}$ , 其中  $P_{max}$  为试件极限承载力。从图中可以得出, 对于未开孔试件和开孔比为 0.4 的试件, 各点应变连线基本保持在一条直线上, 拼合后的截面基本满足平截面假定; 对于开孔比为 0.7 的试件, 因腹板开孔较大导致腹板边缘应力集中明显, 出现腹板处应变大于翼缘应变的情况, 难以满足平截面假定。

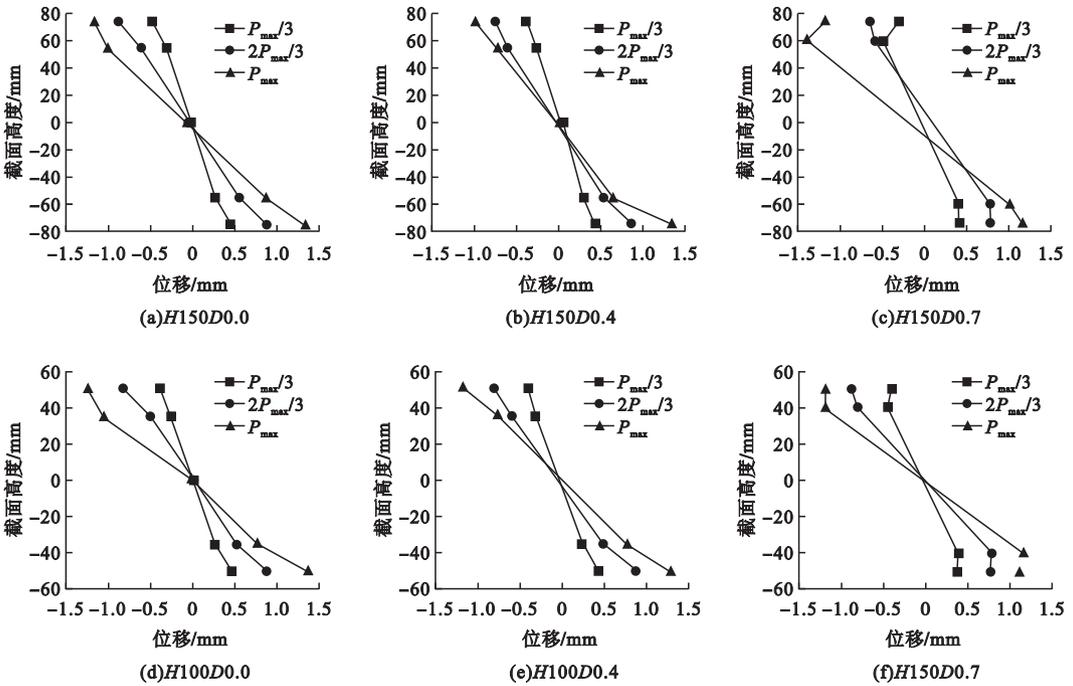


图 8 试件跨中截面应变分布图

Fig. 8 Strain distribution diagram of specimen mid-span section

## 3 拼合箱梁承载力计算方法

图 9 为不同计算方法下拼合箱梁受弯承载力结果对比。方法一: 按照《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB50018—2002) 计算两单肢构件受弯承载力, 然后简单叠加得到拼

合箱梁承载力, 计算结果用  $M_1$  表示; 方法二: 按照《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规范》(JGJ 227—2011) 中的建议, 当拼合截面翼缘有可靠连接时等效成整体箱梁来计算受弯承载力, 计算结果用  $M_2$  表示; 方法三: 按照《北美冷弯型钢规范》(AISI S100—16)

中直接强度法计算两单肢截面承载力后进行简单叠加得到拼合截面承载力,计算单肢截面时考虑开孔影响,计算结果用  $M_3$  表示,其中单肢截面承载力按照直接强度法进行计算,同时考虑开孔影响<sup>[20]</sup>;方法四:按照石宇等<sup>[5]</sup>针对拼合箱梁提出的折减模量法,计算结果用  $M_4$  表示。

$$M_{nl} = \begin{cases} M_{nl}, & \lambda_1 < 0.776; \\ \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{M_{cr1}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left( \frac{M_{cr1}}{M_{ne}} \right), & \lambda_1 \geq 0.776. \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{cr1}}}. \quad (2)$$

式中:  $M_{nl}$  为局部屈曲极限弯矩;  $M_{ne}$  为整体屈曲极限弯矩;  $M_{cr1}$  局部屈曲临界弯矩,可以根据有限条软件 CUFSM 直接计算得到。

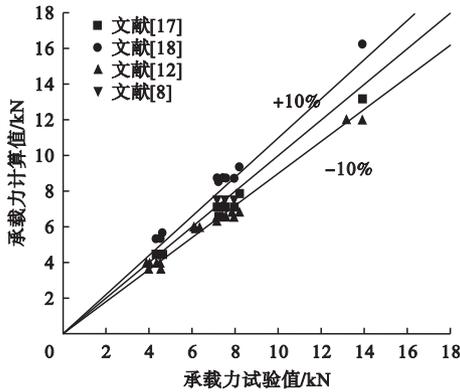


图9 不同计算方法结果与试验值对比

Fig. 9 The results of different calculation methods were compared with the experimental values

所有试验数据来源于文中试验及文献<sup>[10]</sup>。其中方法一没有针对腹板开孔构件受弯承载力的计算方法,由2.2小节试验结果分析可知,当腹板开孔比等于0.4时,腹板开孔对拼合箱梁受弯承载力影响不大,因此对开孔比小于0.4的试件受弯承载力可按照未开孔试件计算。

由图9可以得出,按照方法一计算单肢截面承载力后,再简单叠加得到的预测结果与试验值最为接近,误差在10%以内,平均

值为1.05,标准差为0.03。按照方法三计算单肢截面承载力后简单叠加的方法整体上偏于保守,最大误差接近30%,平均值为1.14,标准差为0.07。两种方法都偏于保守,这是由于两种方法未考虑拼合效应,只是简单的叠加两单肢承载力得到拼合截面承载力。而方法二计算得到拼合箱梁受弯承载力试验结果与预测结果比值平均值为0.85,标准差为0.03,预测值偏大,造成这一误差的原因是上翼缘自攻螺钉并不能完全约束两单肢构件共同变形,方法二翼缘厚度直接叠加计算忽略了两单肢构件上翼缘分离这一影响,导致计算结果偏大。方法四预测结果平均值为0.98,标准差为0.03,但该方法适用于钢材强度介于Q235和Q345之间的箱梁。

## 4 结论

(1)拼合箱梁破坏模式均表现为腹板和翼缘发生局部屈曲而丧失承载力,当开孔比  $d/H$  为0.4时,腹板开孔对箱梁承载力影响很小,承载力降低在5%以内,当开孔比  $d/H$  为0.7时,腹板开孔将导致箱梁受弯性能大幅下降,承载力降低幅度可达18%。

(2)增大螺钉间距会略微降低拼合箱梁受弯承载力,当螺钉间距由150 mm增大到300 mm时,构件承载力下降幅度在5%左右。

(3)未开孔拼合箱梁加载阶段截面应变符合平截面假定,腹板开孔比为0.7的试件因开孔对腹板截面的削弱,会导致加载后期受压腹板应变大于受压翼缘应变情况的出现,难以满足平截面假定。

(4)按照《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)计算单肢截面承载力后再简单叠加的方法得到的预测结果与试验值最为接近,但预测结果整体上偏于保守,因为数据有限,《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)建议的方法和折减模量法还需要进一步试验验证。

## 参考文献

- [1] MOEN C D, SCHAFFER B W. Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending [J]. Thin-walled structures, 2009, 47(12):1597-607.
- [2] MOEN C D, SCHAFFER B W. Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes [J]. Engineering structures 2009, 31(12):2812-24.
- [3] SCHAFFER B W. Review: the direct strength method of cold-formed steel member design [J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(7/8):766-78.
- [4] BESHARA B, LAWASON T J. Built-up girder screw connection variation flexural tests [R]. Internal Report, 2002.
- [5] REYNAUD L S. Performance of edge-loaded cold-formed steel built-up box beams [J]. ASCE practice periodical on structural design and construction, 2004, 9(3):170-174.
- [6] SULTANA P. Predictions of flexural behaviour of built-up cold-formed steel sections [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2007.
- [7] XU L, SULTANA P, ZHOU X. Flexural strength of cold-formed steel built-up box sections [J]. Thin-walled structures, 2009, 47(6/7):807-815.
- [8] 石宇, 周绪红, 高婷婷, 等. 双肢拼合冷弯薄壁型钢箱形截面梁受弯性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11):20-28.  
(SHI Yu, ZHOU Xuhong, GAO Tingting, et al. Research on flexural capacity of cold-formed steel double limbs built-up box beams [J]. Journal of building structures, 2015, 36(11):20-28.)
- [9] LI Y L, LI Y Q, SHEN Z Y. Investigation on flexural strength of cold-formed thin-walled steel beams with built-up box section [J]. Thin-walled structures, 2016, 107:66-79.
- [10] WANG L, YOUNG B. Beam tests of cold-formed steel built-up sections with web perforations [J]. Journal of constructional steel research, 2015, 115(11):18-33.
- [11] WANG L, YOUNG B. Design of cold-formed steel built-up sections with web perforations subjected to bending [J]. Thin walled structures, 2017, 120(11):458-469.
- [12] American Iron and Steel Institute (AISI). Specification for the design of cold-formed steel structural members [S]. Washington D C: American Iron and Steel Institute, 2016.
- [13] 李国华, 王权, 董军, 等. 冷弯薄壁型钢轻混凝土组合墙体抗弯性能有限元分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 31(2):218-226.  
(LI Guohua, WANG Quan, DONG Jun, et al. Finite element analysis on flexural behavior of cold-formed thin-wall steel framing walls infilled with lightweight concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science), 2021, 31(2):218-226.)
- [14] 王春刚, 梁润嘉, 张壮南, 等. 腹板开孔复杂卷边冷弯薄壁槽钢受弯构件稳定性试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4):125-134.  
(WANG Chungang, LIANG Runjia, ZHANG Zhuangnan, et al. Experimental investigation on stability behavior of channel flexural members with complex edge stiffeners and web holes [J]. Journal of building structures, 2014, 35(4):125-134.)
- [15] 赵金友, 高攀, 王钧, 等. 腹板开矩形孔复杂卷边冷弯槽钢梁局部屈曲性能及直接强度法研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6):195-204.  
(ZHAO Jinyou, GAO Pan, WANG Jun, et al. Local buckling behavior and direct strength method of cold-formed steel channel beams with web rectangular openings and complex edge stiffeners [J]. Journal of building structures, 2020, 41(6):195-204.)
- [16] 武胜, 魏源. 腹板开孔新型冷弯薄壁构件受弯性能研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(1):29-37.  
(WU Sheng, WEI Yuan. Bending behavior of new cold-formed thin-walled members with web slotting [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science), 2020, 36(1):29-37.)
- [17] 湖北省发展计划委员会. 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.  
(Hubei Provincial Development Planning Commission. Technical code of cold-formed thin-wall steel structures: GB50018—2002 [S]. Beijing: China Planning Press, 2002.)
- [18] 中国建筑标准设计研究院. 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程: JGJ 227—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
(China Building Standard Design and Research Institute. Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings: JGJ 227—2011 [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2011.)
- [19] 中国钢铁工业协会. 金属材料拉伸试验: 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228. 1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
(China Iron and Steel Association. Metallic materials: tensile testing: part 1: method of test at room temperature: GB / T 228. 1—2010 [S] Beijing: Standards Press of China, 2010.)
- [20] MOEN C D, SCHUDLICH A, VONDER HEYDEN A. Experiments on cold-formed steel C-section joists with unstiffened web holes [J]. Journal of structural engineering, 2013, 139(5):695-704.  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)