

# 波纹腹板 H 型钢梁受弯承载力性能研究

张 哲<sup>1</sup>, 李国强<sup>2</sup>, 孙飞飞<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南郑州 450002; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为研究波纹腹板 H 型钢梁的受弯性能, 首先对其进行理论分析, 得出波纹腹板 H 型钢梁的承载力完全由上、下翼缘提供, 腹板不承担弯曲正应力, 并提出受弯承载力的理论计算式。设计完成 2 个试件的受弯承载力试验, 得到了试件的荷载-位移曲线、极限荷载和破坏形态等。试验结果证明了所提出理论分析模型的正确性, 并验证了所提出的承载力计算式是安全合理的。为了进一步验证理论分析模型, 同时支持参数分析, 采用有限元方法对波纹腹板 H 型钢梁的受弯性能进行数值模拟。有限元方法和试验得到极限弯矩等结果较为接近, 试验梁的破坏弯矩超过理论塑性弯矩 20% 以上。通过参数分析可知: 稠密腹板波形及较小的翼缘宽厚比能够提高极限弯矩; 腹板高厚比对极限弯矩无显著影响。

**关键词:** 波纹腹板 H 型钢梁; 受弯承载力; 切线模量; 腹板高厚比; 屈服强度

**中图分类号:** TU357      **文献标志码:** A

## Bending capacity of H-beams with corrugated webs

ZHANG Zhe<sup>1</sup>, LI Guoqiang<sup>2</sup>, SUN Feifei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To analyze the bending performance of H-beams with corrugated webs, the theoretical analysis was conducted firstly. It is believed that the top and bottom flanges provide the total bending capacity without the contribution of web. The theoretical equation was proposed. Then bending tests of two simply supported beams were conducted. The load-deformation curves, ultimate load and failure mode were obtained. The test results verified the correctness of the mechanical model and the equation. To validate the theoretical model and support the parametric study, the finite-element simulation method was adopted to simulate the bending performance of H-beams with corrugated webs. The ultimate bending moments calculated by two methods are very close, both exceeding the plastic moments by 20%. Through the parametric study, the following conclusions are drawn: denser wave profiles and lesser width-thickness ratio of flanges can provide higher ultimate bending moments; the depth-thickness ratio of the web has no significant effect on the ultimate bending moment.

**Keywords:** H-beam with corrugated webs; bending capacity; tangent modulus; depth-thickness ratio of web; yield strength

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAJ01B02), 国家自然科学基金项目(51008284)。

作者简介: 张哲(1977—), 男, 河南南阳人, 工学博士, 讲师。E-mail: zzhe@zzu.edu.cn

通讯作者: 李国强(1963—), 男, 湖南株洲人, 工学博士, 教授。E-mail: gqli@tongji.edu.cn

收稿日期: 2009 年 12 月

## 0 引言

波纹腹板 H 型钢梁(见图 1)能够以较小的腹板厚度获得较高的平面外刚度和屈曲承载力,所以能够有效节约钢材。据统计,波纹腹板 H 型钢梁的腹板用钢量一般仅占总量的 25% 左右,最低可至 4%,腹板高厚比可以达到 600,与现有规格的热轧工字钢梁、热轧 H 型钢梁和焊接 H 型钢梁相比,经济优势非常明显。波纹腹板 H 型钢梁截面更为开展,受弯承载力高,同时,由于波纹腹板 H 型钢梁的局部受压承载力和疲劳强度较高,所以非常适合作为横向受力构件<sup>[1]</sup>。

对波纹腹板 H 型钢力学性能的研究,起始于 20 世纪 50—60 年代对波纹金属板的受力分析;20 世纪 80 年代起,有研究者开始探讨用波纹钢板代替普通 H 型钢梁中的平腹板。日本住友公司最早开发出中间部分波纹腹板 H 型钢<sup>[2]</sup>,中国东北重型机械学院于 1985 年轧制出了全波纹腹板 H 型钢<sup>[3]</sup>。近年来,随着自动焊接技术的发展,焊接的全波纹腹板 H 型钢在欧美国家发展较快,较多地应用于桥梁、大跨度房屋和工业厂房等结构中。在欧洲某些规范中已有关于此类型钢的专项规定,如瑞典轻钢规范<sup>[4]</sup>、Eurocode 3<sup>[5]</sup>等。相比之下我国目前对此类型钢的研究较少<sup>[6]</sup>。

在波纹腹板 H 型钢梁的受弯性能研究方面,Elgaaly 等<sup>[7]</sup>进行了 6 根波纹腹板 H 型钢梁受弯试验和大量有限元分析,认为腹板对受弯承载力的贡献较少,可以忽略。Chan 等<sup>[8]</sup>用有限元方法研究了腹板波纹对梁屈曲性能的影响,认为竖向波纹腹板梁比水平波纹腹板梁及平腹板梁承载力更高。Johnson 等<sup>[9]</sup>研究了梁的整体弯曲性能及受压翼缘局部屈曲,认为翼缘的局部屈曲对梁的受弯性能有显著影响。Abbas 等<sup>[10-12]</sup>采用试验及有限元方法,研究了波纹腹板 H 型钢梁的弯曲性能,认为梁的弯曲不能单独按照传统的理论进行求解,还需要对翼缘的横向弯曲进行分析,并提出了相应的求解方法。Jiho 等<sup>[13]</sup>给出了波纹腹板 H 型钢截面剪切中心和翘曲常数的求解方法,对所提出的弯扭屈曲承载力的计算方法进行了有限元验证。欧洲规范 Eurocode 3 在计算波纹腹板 H 型钢梁受弯承载力时,分别考虑了翼缘的横向弯曲和侧向扭转的影响。郭彦林等<sup>[6]</sup>提出了波折腹板工形构件翼缘稳定性简化模型,探讨了翼缘弹性屈曲应力与翼缘名义宽厚比、腹板波形的关系,认为基于翼缘屈曲时可能出现的 2 种屈曲模态,分别解释了其发生机理并给出了相应的临界荷载计算式。

上述研究成果中仅文献 [7] 进行了梁受弯承载

力试验研究,但试验构件仅在纯弯段采用波纹腹板,剪跨段采用了加劲肋加固的平腹板,与实际使用情况尚存在一定差异。因此有必要进行波纹腹板 H 型钢梁的受弯承载力试验研究,对理论分析模型进行验证。同时,为进一步验证理论分析模型,并对波纹腹板 H 型钢梁进行参数分析,本文采用有限元软件 ANSYS 对其受弯性能进行分析。

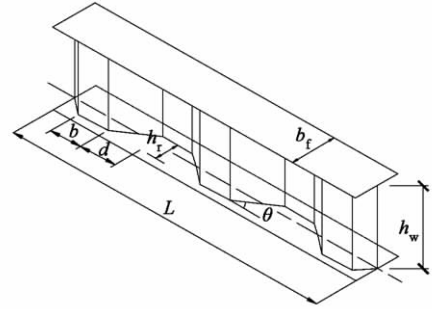


图 1 波纹腹板 H 型钢梁示意图

Fig. 1 Schematic diagram for H-beams with corrugated webs

## 1 波纹腹板 H 型钢梁受弯承载力理论分析

波纹腹板 H 型钢梁的理论受力模型与平腹板钢梁有显著区别(如图 2 所示),可以总结为以下 4 个方面<sup>[11]</sup>: ①由于“折叠效应”,波纹腹板上基本无弯曲正应力分布;②竖向剪力  $V_y$  完全由腹板承担,且均匀分布;③由于腹板的波纹形状,腹板与翼缘之间的剪力流将在翼缘中形成附加横向弯矩,因此翼缘存在附加应力;④在面外弯矩  $M_y$  作用下,腹板不产生正应力和剪应力,弯矩完全由翼缘承担。

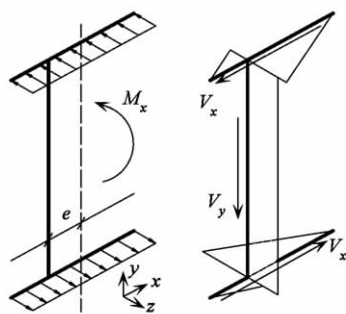
波纹腹板 H 型钢梁在竖向荷载作用下,弹性范围内,上下翼缘的应力呈直线分布。当上、下翼缘最外边缘纤维达到屈服强度后,塑性区逐渐向内发展,由于翼缘厚度相对较薄,所以很快达到全截面塑性状态,屈服弯矩和塑性极限弯矩相差很小。随后,随着翼缘钢材的强化,承载力会有所提高,达到极限弯矩后钢梁承载力下降直至破坏。为计算方便,可取翼缘的塑性弯矩作为截面的受弯承载力,即:

$$M_u = b_f t_f f_y h \quad (1)$$

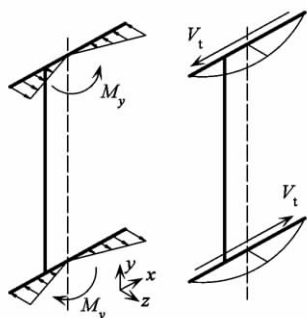
式中:  $M_u$  为受弯承载力;  $b_f$  为翼缘宽度;  $t_f$  为翼缘厚度;  $f_y$  为翼缘材料的屈服强度;  $h$  为上下翼缘的形心距离。式(1)概念明确、形式简单,下面将分别通过试验和有限元方法对其进行验证。

## 2 试验方案

设计 2 个波纹腹板 H 型钢梁试件,试件腹板尺



(a) 面内弯矩作用下应力分布



(b) 面外弯矩作用下应力分布

图2 波纹腹板 H 型钢梁的理论力学模型

Fig.2 Theoretical mechanical model of H-beams with corrugated webs

寸 500 mm × 3 mm, 翼缘尺寸 150 mm × 10 mm。腹板波形尺寸为: 波高  $h_w = 38$  mm, 波纹水平段宽度  $b = 64$  mm, 倾斜段水平投影长度  $d = 23.5$  mm(见图 1)。经试验验证, 该波形腹板剪切屈服强度可以达到材料的剪切屈服强度<sup>[14]</sup>。试件钢材设计采用 Q235 级钢, 实测腹板屈服强度  $f_{wy} = 260$  MPa, 翼缘屈服强度  $f_{fy} = 265$  MPa。腹板与翼缘之间采用单面角焊缝, 焊接方法为 CO<sub>2</sub> 气体保护焊, 焊丝为 0.8 mm。试件的基本参数见表 1, 其中,  $l_1$  和  $l_2$  分别为剪跨段和纯弯段长度,  $I_x$  为截面惯性矩。

表 1 受弯试件基本参数

Table 1 Parameters of bending test members

试件 编号	$b_f \times t_f /$ mm	$h_w \times t_w /$ mm	$l_1 /$ m	$l_2 /$ m	$f_{fy} /$ MPa	$I_x /$ cm <sup>4</sup>
GJ7	150 × 10	500 × 3	1.5	1.0	265	19 507
GJ8	150 × 10	500 × 3	2.0	1.0	265	19 507

试验设计为简支梁两点对称加载, 试验装置如图 3 所示。为了防止梁发生水平侧向扭转变形, 在梁跨中设置侧向支撑, 试件位于侧向支撑的两夹肢之间, 在夹肢与试件之间填塞 PTFE(聚四氟乙烯)板, PTFE 板上涂抹黄油, 保证试件在竖直方向自由移动。在剪跨段中截面, 试件上、下翼缘贴单向应变片, 腹板的不同高度贴三向应变花。在纯弯段跨中截面, 试件上、下翼缘及腹板的不同高度贴单向应变

片, 腹板应变片均单侧布置。7 个位移计 D1 ~ D7 分别测量试件的跨中位移, 支座的水平位移、竖向位移和梁端转角。

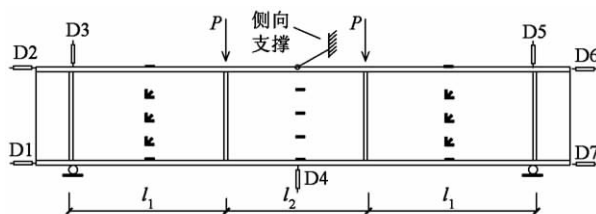


图3 受弯试验装置简图

Fig.3 Bending test setup

试验过程中首先预加载至  $0.1P_u$  ( $P_u$  为试件的预估极限荷载), 卸载后正式加载, 每 10 kN 一级, 分级加载到  $0.4P_u$ , 然后连续加载, 每分钟加载 10 kN, 每秒采样 1 次, 当试验曲线明显进入下降段后, 终止加载。试验在同济大学建筑工程系实验室完成, 所采用加载设备最大压力可达 1 000 kN。位移的测量采用 YHD2100 型位移传感器, 其最大量程为 10 cm, 荷载和位移的采集均由 DH3815 型静态应变测试系统完成。通过数据采集和控制系统对试件的荷载-挠度曲线进行监测。

### 3 有限元分析

为了进一步验证理论分析模型, 并支持参数分析, 采用有限元软件 ANSYS 进行了波纹腹板 H 型钢梁受弯性能的有限元分析。模型中, 翼缘、腹板和加劲肋的单元类型采用 4 结点壳单元 SHELL181, 材料选用双折线弹塑性模型, 弹性模量  $E$  取为  $2.06 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>, 切线模量取为  $0.01E$ 。板件的几何尺寸和材料的强度按照材性试验的实际结果取值。经反复试算, 腹板的水平和倾斜板带沿高度划分为 20 个单元, 沿跨度方向划分为 3 个单元。翼缘与腹板相交的区域内, 单元划分与腹板相互对应。在梁支座及试验荷载位置布置加劲肋, 并在梁上翼缘施加竖向荷载。同时, 在两端支座截面设置约束, 使支座截面可以自由翘曲, 但不能转动, 且不能侧向移动。在梁的跨中设置侧向约束, 防止发生侧向位移。按照第 1 特征值屈曲模态施加缺陷, 然后启动程序中的非线性静力分析模块, 分析中同时考虑材料非线性和几何非线性。采用自动荷载步, 并控制最小荷载步以保证足够的精度。

### 4 试验现象及结果分析

#### 4.1 试验现象

试件 GJ7 在加载的初始阶段荷载-挠度曲线呈线

性,当翼缘弯曲应力达到材料屈服强度的1.2倍左右时,荷载-挠度曲线开始呈现较明显非线性特征,可以明显观察到梁端转角增速加快。当接近破坏荷载时,在纯弯段内,可以观察到梁受压翼缘出现了局部鼓曲现象,随着荷载逐渐加大,这种现象更加明显。同时,可以观察到侧向支撑的两个夹肢有逐渐分离的趋势,说明夹肢受到了梁面外扭转变形的压力。当弯矩达到275 kN·m时,受压翼缘发生波浪形的鼓曲,并造成了腹板的局部变形。随即承载力迅速下降,试件破坏。试件 GJ7 破坏形态如图 4a 所示,破坏发生在纯弯段,破坏形态为受压翼缘板屈曲后产生上下交错的波浪变形。

试件 GJ8 的破坏形态为纯弯段受压翼缘的局部受压向下凹曲,呈现局部屈曲的特征(图 4b)。由于试件变形过大,导致试验设施无法继续工作,所以破坏未能充分发展。但是可以观察到破坏发生在翼缘自由外伸宽度较大的一侧,说明波形腹板对该部位的翼缘约束较弱。

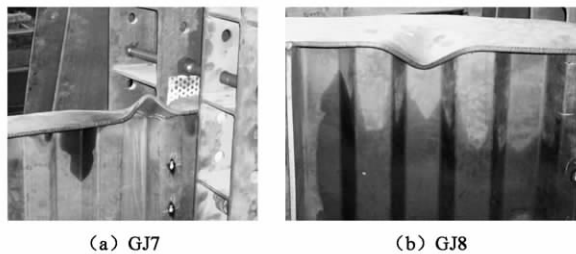


图 4 试件 GJ7 和 GJ8 受弯试验破坏形态  
Fig. 4 Failure modes of GJ7 and GJ8

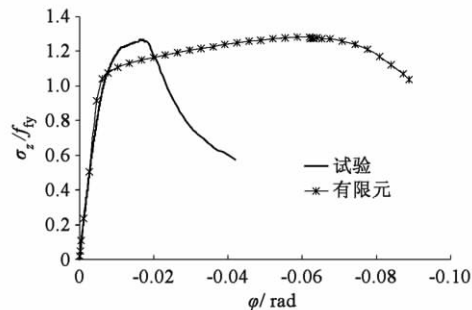
#### 4.2 翼缘应力-梁端转角关系曲线

图 5 为试件跨中截面翼缘应力比与梁端转角关系曲线,图中横坐标为试件的梁端转角  $\varphi$ ,取为跨中挠度与梁跨度一半的比值,纵坐标为翼缘的弯曲应力  $\sigma_z$  与翼缘屈服强度  $f_{fy}$  的比值,简称为应力比。为对比方便,将有限元结果同时绘制在图中。

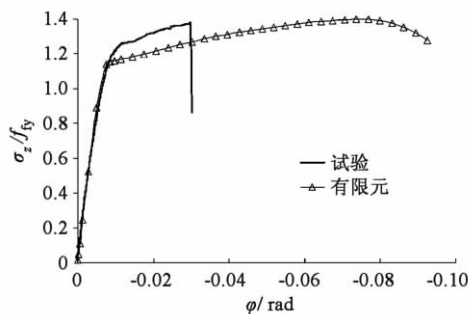
由图 5 可以看出,有限元方法得到的翼缘极限应力比与试验结果较为接近,翼缘的极限应力均超过了材料屈服强度的 20% 以上,而且初始刚度与试验值也几乎一致。但有限元方法得到的  $\sigma_z/f_{fy}-\varphi$  曲线显示试件具有较好的塑性性能,这主要是由于有限元方法对约束的施加更为理想,而试验过程中侧向支撑对钢梁的约束有限,钢梁的破坏一定程度上受到梁整体失稳因素的影响。

#### 4.3 截面正应力分布

为了验证波纹腹板 H 型钢梁的理论分析模型,以试件 GJ7 为例,将跨中截面的正应力的实测数据绘制于图 6 中。从图 6 可以看到,随着荷载的发展,无论是试验还是有限元方法得到的数据,都证明了

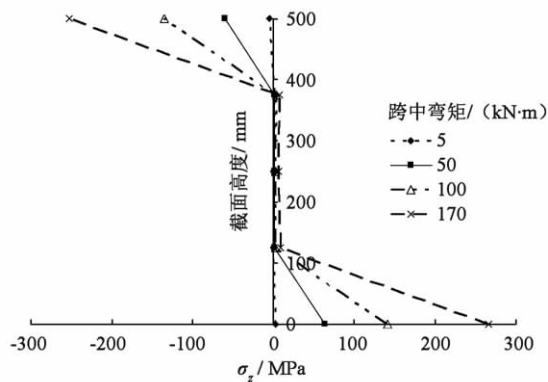


(a) GJ7

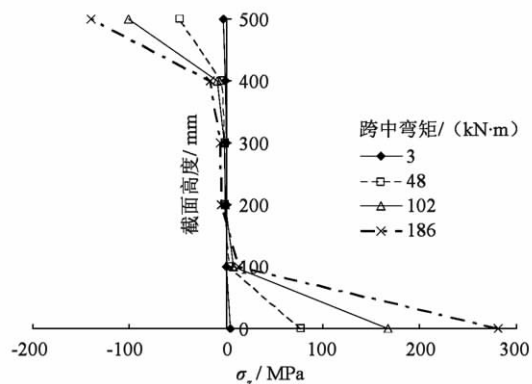


(b) GJ8

图 5 试件跨中截面翼缘应力比-梁端转角试验曲线  
Fig. 5  $\sigma_z/f_{fy}-\varphi$  curves of specimen GJ7 and GJ8



(a) 试验结果



(b) 有限元分析

图 6 试件 GJ7 截面正应力发展分布  
Fig. 6 Section normal stress distribution and development of GJ7

在竖向荷载作用下波纹腹板几乎不产生任何正应力作用的推断。

#### 4.4 有限元分析结果

由图 5 和图 6 可以看出,有限元方法得到的试件承载力和截面应力分布情况与试验结果非常接近。图 7 为有限元方法得到的试件破坏形态,与试验现象也非常吻合。因此,可以认为所采用的有限元方法能够作为试验分析方法的补充手段,同时也可以用来进行更深入的参数分析。

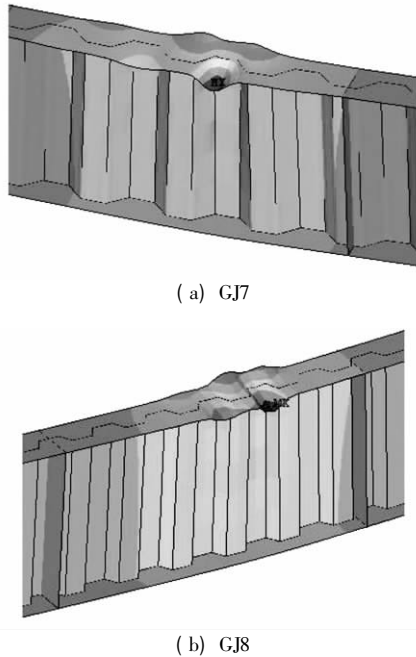


图 7 试件 GJ7 和 GJ8 受弯试验破坏形态有限元模拟  
Fig. 7 Failure modes of GJ7 and GJ8 from FEM

#### 4.5 承载力分析比较

将式(1)计算得到的塑性弯矩  $M_u$ 、极限弯矩试验结果  $M_t$  和有限元分析结果  $M_{FEM}$  列于表 2。可以看到,试验和有限元得到的极限弯矩都大于理论塑性

弯矩,且幅度都达到了 20% 以上。因此,以截面塑性弯矩作为波纹腹板 H 型钢梁的受弯承载力设计值是有安全保证的。

表 2 受弯承载力理论与试验结果对比

Table 2 Comparison of bending capacity between theoretical and test results

试件 编号	$M_u /$ (kN·m)	$M_t /$ (kN·m)	$M_{FEM} /$ (kN·m)	$\frac{M_t}{M_u}$
GJ7	203	257	260	1.27
GJ8	203	280	284	1.38

## 5 参数分析

为更深入了解影响波纹腹板 H 型钢梁受弯承载力的因素,本文用有限元方法进行了参数分析。主要考虑的参数包括:材料屈服后切线模量、腹板波形、翼缘宽厚比、翼缘的强度和腹板高厚比等,具体参数及分析得到的极限弯矩见表 3。以试件 GJ7、GJ8 为基本模型,改变部分参数得到 GJ7-1、GJ8-1……GJ7-9、GJ7-10 等计算模型。其中,模型 GJ7-1、GJ8-1 的翼缘切线模量  $E_t = 0$ ,模型 GJ7-2 的翼缘切线模量  $E_t = 0.005E$ ;模型 GJ7-3、GJ7-4 的腹板波形分别采用波形 2 和波形 3(波形 2 中,  $h_r = 50$  mm,  $b = 70$  mm,  $d = 50$  mm;波形 3 中,  $h_r = 30$  mm,  $b = 40$  mm,  $d = 25$  mm);模型 GJ7-5、GJ7-6 的翼缘厚度分别为 12 mm、15 mm;模型 GJ7-7、GJ7-8 翼缘屈服强度分别为 235 MPa、300 MPa;模型 GJ7-9、GJ7-10 腹板高度分别为 750 mm、1 000 mm。

通过分析表 3 数据可以得到:

(1) 如果从材料模型的角度考察,切线模量越小,有限元极限弯矩  $M_{FEM}$  越接近塑性弯矩  $M_u$ ,若采用理想弹塑性材料模型,则两者结果最为接近,这也

表 3 波纹腹板 H 型钢梁参数分析结果

Table 3 Results of parametric study

计算模型	波形	$h_w /$ mm	$t_w /$ mm	$b_f /$ mm	$t_f /$ mm	$f_{fy} /$ MPa	$E_t / E$	$M_u /$ (kN·m)	$M_{FEM} /$ (kN·m)	$\frac{M_{FEM}}{M_u}$
GJ7	1	500	3	150	10	265	0.01	203	260	1.28
GJ8	1	500	3	150	10	265	0.01	203	284	1.40
GJ7-1	1	500	3	150	10	265	0	203	211	1.04
GJ7-2	1	500	3	150	10	265	0.005	203	228	1.12
GJ8-1	1	500	3	150	10	265	0	203	227	1.12
GJ7-3	2	500	3	150	10	265	0.01	203	242	1.19
GJ7-4	3	500	3	150	10	265	0.01	203	291	1.43
GJ7-5	1	500	3	150	12	265	0.01	244	338	1.39
GJ7-6	1	500	3	150	15	265	0.01	307	438	1.43
GJ7-7	1	500	3	150	10	235	0.01	180	250	1.39
GJ7-8	1	500	3	150	10	300	0.01	230	280	1.22
GJ7-9	1	750	3	150	10	265	0.01	302	380	1.27
GJ7-10	1	1 000	3	150	10	265	0.01	401	528	1.31

能够验证文中提出的力学模型的合理性。

(2) 腹板波形对极限弯矩的影响具有以下规律: 波形越稠密, 则  $M_{FEM}/M_u$  越大。这种现象的原因是由于试件最终破坏形态为受压翼缘屈服后的屈曲, 而稠密的波形能够为翼缘提供更强的约束和支撑作用。

(3) 翼缘宽厚比越小,  $M_{FEM}/M_u$  越大。这一点仍然与试件的破坏形态有关, 较小的翼缘宽厚比具有更高的局部屈曲强度。

(4) 翼缘的屈服强度越小,  $M_{FEM}/M_u$  越大。原因仍然在于最终控制破坏的因素是翼缘的屈曲, 所以低屈服点钢材能够更充分地利用材料的强度。

(5) 腹板高厚比对极限弯矩无显著影响。

由于波形越稠密, 梁的极限弯矩越大, 而且从荷载-位移曲线中可以观察到其塑性发展过程更长, 因此选择腹板波形时, 在兼顾经济性的前提下, 应尽可能的选择较稠密的波形。翼缘宽厚比的减小虽然能够提高极限弯矩, 但从经济角度考虑, 仍建议满足承载力和局部稳定的构造要求即可。通过试验和有限元分析可知, 合理的参数能够有效地提高极限弯矩, 但是实际工程设计中, 仍建议保守地取截面塑性弯矩作为波纹腹板 H 型钢梁的设计弯矩, 即:

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \leq f \quad (2)$$

式中:  $\gamma_x$  为截面塑性发展系数, 取为 1.0;  $W_{nx}$  为净截面抵抗矩,  $W_{nx} = b_t t_f h$ ;  $f$  为翼缘钢材强度设计值。

## 6 结论

(1) 波纹腹板 H 型钢梁的受弯承载力主要来自上、下翼缘的贡献。

(2) 波纹腹板 H 型钢筒支梁的受弯试验和有限元分析方法都能够验证波纹腹板 H 型钢梁理论分析模型的正确性。

(3) 稠密的腹板波纹及较小的翼缘宽厚比能够提高梁的极限弯矩。

(4) 波纹腹板 H 型钢梁试验得到的极限弯矩远高于截面的理论分析塑性弯矩, 所以在波纹腹板 H 型钢梁的设计中, 可以保守地采用截面理论分析塑性弯矩作为波纹腹板 H 型钢梁的设计弯矩。

### 参 考 文 献

[1] 张哲, 李国强, 孙飞飞. 波纹腹板 H 型钢研究综述 [J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(6): 41-46. (Zhang Zhe, Li Guoqiang, Sun Feifei. Summary of investigation of the H-beam with trapezoidally corrugated webs [J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(6): 41-46. (in Chinese))

[2] Hamada Masaki, Tanaka Seiichi, Kikuchi Takeshi, et

al. Manufacture and manufacturing roll for H-shaped steel possessing corrugated at middle part of web: Japan, 54107778 [P]. 1981-04-13.

- [3] 曹鸿德, 才志华, 张文志. 波纹腹板 H 型钢梁的热轧工艺: 中国, 86106315A [P]. 1988-03-30.
- [4] Swedish code for light-gauge metal structures [S]. Stockholm, Sweden: Swedish Institute of Steel Construction, 1982.
- [5] BS EN 1993-1-5: 2006 Eurocode 3: design of steel structures: part 1-5: plated structural elements [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation, 2006.
- [6] 郭彦林, 张庆林. 波折腹板工形构件翼缘稳定性研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(4): 64-69. (GUO Yanlin, ZHANG Qinglin. Research on stability behavior of flanges in H-shaped members with corrugated web [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 64-69. (in Chinese))
- [7] Elgaaly M, Seshadri A, Hamilton R W. Bending strength of steel beams with corrugated webs [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(6): 772-782.
- [8] Chan C L, Khalid Y A, Hamouda A M S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(11): 1391-1406.
- [9] Johnson R P, Cafolla J. Local flange buckling in plate girders with corrugated webs [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 1997, 22(2): 148-156.
- [10] Abbas H H, Sause R, Driver R G. Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(8): 806-814.
- [11] Abbas H H, Sause R, Driver R G. Analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane loads [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(3): 347-355.
- [12] Abbas H H, Sause R, Driver R G. Simplified analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane moment and shear [J]. Engineering Structures, 2007, 29(11): 2816-2824.
- [13] Jiho M, Jong-Won Y, Byung H C, et al. Lateral-torsional buckling of I-girder with corrugated webs under uniform bending [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(1): 21-30.
- [14] 李国强, 张哲, 孙飞飞. 波纹腹板 H 型钢梁抗剪承载力 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 709-714. (LI Guoqiang, ZHANG Zhe, SUN Feifei. Shear strength of the H-beam with corrugated webs [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(6): 709-714. (in Chinese))