

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201612103

翼缘纵向变厚度工型截面梁变形性能试验

王元清¹, 刘晓玲¹, 刘 明², 李文斌², 班慧勇¹, 王玉银³

(1. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室(清华大学), 北京 100084;
2. 鞍钢股份产品发展部, 辽宁 鞍山 114009; 3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 为研究翼缘纵向变厚度工型截面简支梁的变形性能, 对 2 根翼缘纵向变厚度工型截面梁与 2 根等厚度梁进行静力加载对比试验, 同时采用有限元软件 ANSYS 进行数值模拟. 变厚度梁翼缘材料为 Q345GJC 等级纵向变厚度钢板, 加载方式包括单点加载和两点加载. 试验结果表明: 试件均发生明显的板件局部屈曲; 采用翼缘纵向变厚度工型截面简支梁, 不仅可以在保证承载力情况下大大减少用钢量, 而且可以获得更大的强度储备; 也可以达到密实截面的变形要求, 满足塑性设计要求. 有限元结果与试验结果吻合良好. 该试验结果可为翼缘纵向变厚度工型截面钢梁的塑性变形设计提供依据.

关键词: 翼缘纵向变厚度工型截面简支梁; 纵向变厚度钢板; 变形性能; 密实截面; 试验研究

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)12-0024-08

Experimental study on deformation performance of I-section beam with longitudinally variable thickness flanges

WANG Yuanqing¹, LIU Xiaoling¹, LIU Ming², LI Wenbin², BAN Huiyong¹, WANG Yuyin³

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability (Tsinghua University), Ministry of Education, Beijing 100084, China;
2. Product Development Department, Anshan Iron & Steel, Anshan 114009, Liaoning, China;
3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To study the deformation performance of I-section beam with longitudinally variable thickness flanges, 2 welded I-section variable thickness steel beams and 2 normal beams under static loading were conducted, and corresponding numerical simulation was performed using the ANSYS. The special material of the flanges was longitudinally profiled steel plates of Q345GJC, and single point loading and two point loading were adopted respectively. All of the four specimens occurred local buckling when the lateral displacement was constrained. The results show that the beam could not only ensure the bearing capacity with less steel but also safety margin, and also can meet the deformation requirements of compact cross section, compared with the beam with uniform thickness. The finite element results are in good agreement with the test results. The test results can be used for the plastic design of I-section beam with longitudinally variable thickness flanges.

Keywords: I-section beam with longitudinally variable thickness flanges; longitudinally profiled steel plate; deformation performance; compact cross section; experimental investigation

中国钢结构发展迅速, 在民用建筑、工业厂房以及特种结构当中扮演着极为重要的角色. 为了实现合理经济的结构优化设计, 众多研究人员从结构体系和材料性能入手进行了深入的研究^[1]. 由于钢结构构件内部内力分布不均匀, 基于最大受力截面设计的等厚度等截面构件是不合理的, 因此, 基于单个构件截面的优化设计即是一种简单有效的实现途径. 为了满足设计强度要求并减少用钢量, 常采用变截面构件, 即通过截面尺寸变化实现沿构件长度(跨度)方向上截面设计力矩与采用需求力矩大值相同. 现阶段, 国内外研究和应用较多的是截面高度

和宽度变化的构件, 前者主要运用于轻型门式钢架钢梁、吊车梁以及悬臂式雨棚结构当中; 后者用于钢框架结构跨度较大的受弯构件当中^[2]. 近年来, 纵向变厚度钢板的出现, 为变截面构件的实现提供了新的方法. 由于钢板自身形式的变革, 大大节省了加工安装费用, 使其适用范围更广, 设计更加灵活.

纵向变厚度钢板(longitudinally profiled steel plate, 简称 LP 钢板)^[3-4]厚度沿轧制方向连续变化, 用户可根据需求定制各种厚度变化形式和范围, 并且在日本和欧洲诸国的造船及桥梁结构中获得大量应用. LP 钢板几何尺寸变化以及轧制工艺的特殊性, 使得各个厚度处材料性能不同于传统等厚度钢板^[5]. 材料性能以及厚度变化导致的构件各截面惯性矩及强度的不同极大的影响构件受力性能, 需要进行深入研究. 国外学者对 LP 钢板的研究开始于

收稿日期: 2016-12-19
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51038006)
作者简介: 王元清(1963—), 男, 教授, 博士生导师
通信作者: 刘晓玲, liuxiaoling950718@163.com

20 世纪 80 年代^[3],文献[5-6]对 LP 钢板材料性能进行试验,得到强度随厚度增加非线性下降的规律;文献[7-8]对使用 LP 钢板构件的极限承载力及受压翼缘局部稳定问题进行了试验研究,建议在桥梁结构主梁翼缘中使用 LP 钢板;文献[9]采用有限元模拟的方法对三边简支边界条件下单楔形 LP 钢板的受力性能进行分析,研究其应力分布情况;文献[10]对考虑初始缺陷的 LP 钢板作翼缘的工字形截面梁的受力性能进行了模拟分析,分析了板件宽厚比变化对极限强度的影响;文献[11-12]采用翼缘增厚型节点(使用 LP 钢板)与普通节点和翼缘增强型节点的对比试验,对比塑性变形能力;文献[13-15]对在柱脚使用 LP 钢板的箱型柱进行了循环加载试验,研究厚度变化率及变化长度对抗震性能的影响.目前,国外研究主要由日本学者进行,试验研究较少,多为有限元分析,且缺少有关受弯构件变形性能的研究.中国有关 LP 钢板的研究仍处于起步阶段,限制了 LP 钢板的应用与推广.

本文通过对 2 根 LP 钢板作翼缘的焊接工型截面梁和 2 根等厚度钢板作翼缘的焊接工型截面梁进行变形性能试验研究,探究简支边界条件下翼缘厚度变化和不同内力分布对应的厚度变化形式(单点加载和两点加载)对构件变形性能的影响,着重研究构件荷载-位移关系.将试验结果与 ANSYS 分析结果进行对比,验证有限元模型的正确性,为进一步参数化分析和变形设计提供依据.

1 试验概况

1.1 试件设计

翼缘纵向变厚度工型截面梁采用 LP 钢板作翼缘,根据梁的内力分布,设计翼缘厚度形状,单点加载和两点加载情况下翼缘纵向变厚度工型截面简支

梁见图 1.

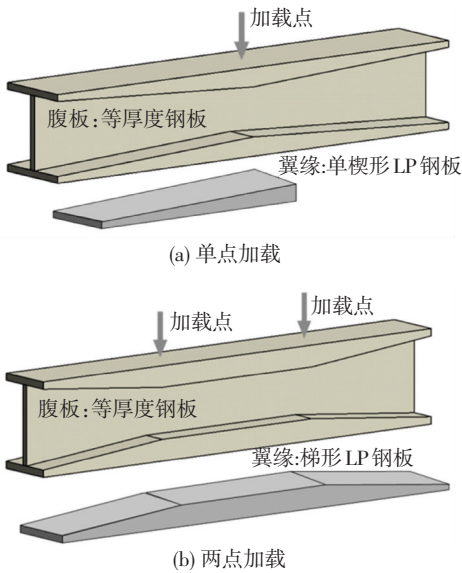


图 1 翼缘纵向变厚度工型截面简支梁示意
Fig.1 Diagram of I-section beams with LP flanges

试件为 2 根翼缘纵向变厚度工型截面梁(BS-1、BD-1)与 2 根等厚度工型截面梁(BS-2、BD-2):BS-1(两块单楔形 LP 板对称焊接翼缘)和 BS-2 在跨中施加集中荷载,用钢量基本相同,BS-1 跨中截面全截面屈服荷载提高 37.88%;BD-1(梯形 LP 板翼缘)和 BD-2 施加两点对称集中荷载,最大受力截面尺寸相同,BD-1 用钢量节省 9.59 %.试件编号及实测尺寸如表 1 所示,其中, L 为试件的实际长度,取上下翼缘测量长度的平均值; L_0 为梁跨度; L_b 为两点加载纯弯段长度; B 为翼缘宽度,取试件纵向 5 个测量结果的平均值; H 为截面高度,取左、右两端测量结果的平均值; t 为板件厚度,取 5 个测量结果的平均值; α 为翼缘厚度变化率.为保证加载过程中支座夹持稳固,在梁跨度方向上两端各增加 200 mm 延伸段;在支座及加载点处设置加劲肋,厚度均为 12 mm.

表 1 构件实测尺寸及用钢量

编号	L/mm	L_0/mm	L_b/mm	翼缘				腹板			钢量/ t
				B/mm	$t_{\min}/\text{mm}$	$t_{\max}/\text{mm}$	$\alpha/(\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_{\max}/\text{mm}$	$H_{\min}/\text{mm}$	t_w/mm	
BS-1	6 005.0	5 599.5	—	202.5	15.5	32.0	5.89	469.0	436.5	12.0	0.732
BS-2	6 002.0	5 601.0	—	201.5	23.5	23.5	0	450.0	450.0	12.0	0.732
BD-1	5 997.5	5 600.5	2 001.5	201.5	13.0	23.5	5.83	477.0	460.5	12.0	0.669
BD-2	6 000.5	5 600.5	2 000.5	201.5	23.5	23.5	0	454.5	454.5	12.0	0.740

1.2 试验材料

试验所用材料为鞍钢生产的 Q345GJC 等级纵向变厚度钢板及相同等级的等厚度钢板,其中所用变厚度钢板见图 1.根据 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》和 GB/T 2975—1998《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》中的相关规定,

在清华大学结构实验室内进行常温拉伸试验,为了解 LP 钢板板件性能随厚度变化趋势并确定强度范围,取 3 个代表厚度沿垂直于轧制方向取样(试件本身厚度变化可忽略),每组取 3~4 个试件,试验结果见表 2.LP1 为试件 BS-1 翼缘钢板,LP2 为试件 BD-1 翼缘钢板,P1、P2 分别为腹板钢板和等厚度翼

缘钢板,其中, E 为弹性模量, f_y 为屈服强度, f_u 为抗拉强度;由于试件采用 80 mm 标距非比例试样,由 GB/T 17600.1—1998《钢的伸长率换算》换算得到比例试样断后伸长率 A 。可以看出,LP 钢板不同厚度处强度不同,随着厚度增加而减小,且强度高于同等厚度等厚度钢板;部分试验值超过 YB 4104—2000《高层建筑结构用钢板》的规定范围。

表 2 钢板拉伸试验结果
Tab.2 Tensile test results of steel plates

钢板 编号	厚度/ mm	E / MPa	f_y / MPa	f_u / MPa	A /%
LP1 (BS-1 翼缘钢板)	16	209 950	543	653	25.0
	20	204 750	502	621	26.0
	30	208 970	464	601	28.0
LP2 (BD-1 翼缘钢板)	16	207 015	472	634	26.0
	20	203 810	457	621	29.0
	24	194 790	444	609	29.0
P1	12	205 495	489	636	28.5
P2	24	207 885	405	526	29.5
规范限值	6~16	206 000	≥ 345	490~610	≥ 22
	>16~35		345~455		

1.3 初始缺陷测定

为了使有限元模型更加接近实际试件,在试验开始前采用文献[16—17]中的方法分别测量整体几何初始缺陷和局部几何初始缺陷,具体测量结果如表 3 所示,符号含义同前。本文均匀选取 7 个点或者截面进行测量,前者取偏离两端截面中心相连所成纵轴线方向距离的最大值,后者取偏离翼缘和腹板

理论平面距离的最大值。可见,几何初始缺陷满足 GB 50205—2001《钢结构工程施工质量验收规范》的要求(翼缘板垂直度 $\leq B/100$ 且不应大于 3,腹板 $\leq H_w/200$,整体弯曲矢高 $\leq L/100$ 且不应大于 10 mm)。

表 3 构件几何初始缺陷
Tab.3 Geometric initial imperfection of specimens

编号	整体几何初始缺陷		局部几何初始缺陷	
	弱轴方向	强轴方向	翼缘	腹板
BS-1	$L/2\ 042$	$L/5\ 089$	$B/500$	$H_{\min}/297$
BS-2	$L/1\ 730$	$L/1\ 478$	$B/396$	$H_{\min}/792$
BD-1	$L/1\ 964$	$L/1\ 817$	$B/396$	$H_{\min}/305$
BD-2	$L/1\ 613$	$L/3\ 509$	$B/524$	$H_{\min}/473$

1.4 试验加载方案

试验在清华大学结构试验室 500 t 试验机上进行,采用两个 150 t MTS 千斤顶协同控制加载,见图 2(a)。BD-1 和 BD-2 加载时采用分配梁平均分配力于对称两点,并在分配梁与试件上翼缘接触处放置滚轴,以防止摩擦力限制梁的变形。为了避免构件发生侧向整体失稳,采用如图 2(b)所示的侧向支撑装置,约束构件上翼缘的侧向位移。为构件与设备安装方便以及减少摩擦影响,侧向支撑装置与构件之间设置 10 mm 以内的空隙。由于设备限制,侧向支撑装置长度为 3 400 mm,用于约束试件跨中对称部分。支座采用夹支支座,如图 2(b)所示,构件与支座底板接触处设置滚轴,使梁在主平面内可以自由转动,同时限制端部截面扭转变形。

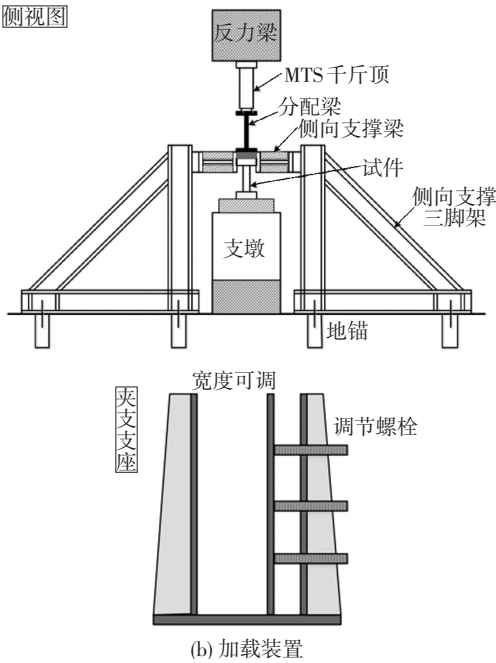
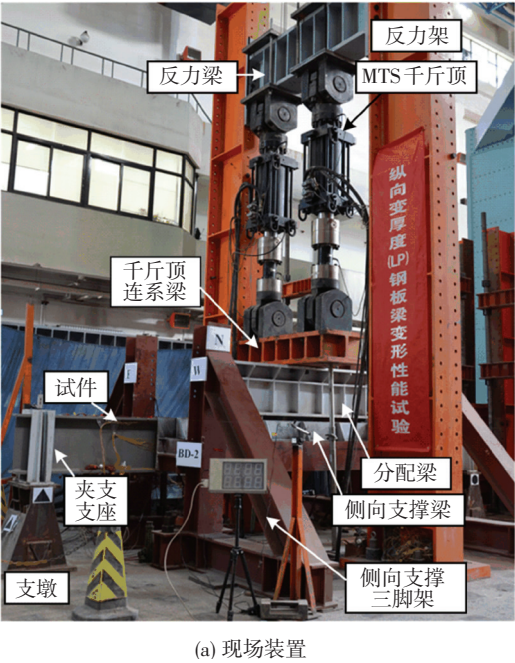


图 2 试验加载装置
Fig.2 Diagram of experimental setup

正式加载前通过施加预估承载力的 5%~10%,以消除试验装置之间以及装置与试件之间的空隙,并检查测点和通道.加载过程中采用 IMP 数据采集系统记录实时荷载、应变以及位移数据,并由计算机直接记录.为研究试验构件的变形性能,本文试件按照 GB 50017—201X《钢结构设计规程》(报批稿)建议的 S1 级塑性截面进行设计,板件宽厚比满足 S1 级截面要求,即可达全截面塑性,保证塑性铰具有塑性设计要求的转动能力,且在转动过程中承载力不降低.因此,本文在构件出现明显局部屈曲时停止加载,均取停止加载点变形为极限变形,对应荷载为极限荷载.

1.5 试验量测方案

本次试验主要测量内容包括:1) 构件变形性能评价曲线:荷载位移曲线,弯矩转角曲线;2) 沿腹板高度方向应变分布;3) 沿构件跨度方向上翼缘应变分布.试件荷载通过千斤顶力传感器进行测定,构件测点布置如图 3 所示.单点加载构件,布置 11 个位

移计,编号 D1~D11,如图 3(a)所示,D1 测量构件跨中下翼缘竖向位移,D2 和 D3 测量构件四分之一跨度处下翼缘竖向位移,D4 和 D7 分别测量构件两端上翼缘水平位移,D5 和 D8 分别测量构件两端下翼缘水平位移,D6 和 D9 分别测量两端支座处竖向沉降;此外,由于侧向支撑梁仅可约束梁中部 3 400 mm,因此在侧向约束南北两侧 10 mm 位置设置位移计 D10 和 D11,测量上翼缘侧向约束外侧侧向位移,检验侧向约束的作用;共布置 58 个应变片,其中,截面 1 和截面 2 分别距离跨中 150 mm,距加载头外侧 50 mm,为局部屈曲最可能发生的截面,截面 2~7 之间 500 mm 等距分布,截面 7 距离支座 150 mm,以测定沿翼缘厚度变化方向上应变分布,见图 3(c).两点加载测点布置与单点加载相近,将位移计 D2 和 D3 调整得到加载点下方,见图(b);因为纯弯段内力分布相同,仅选择跨中截面布置应变片,共 54 个应变片.

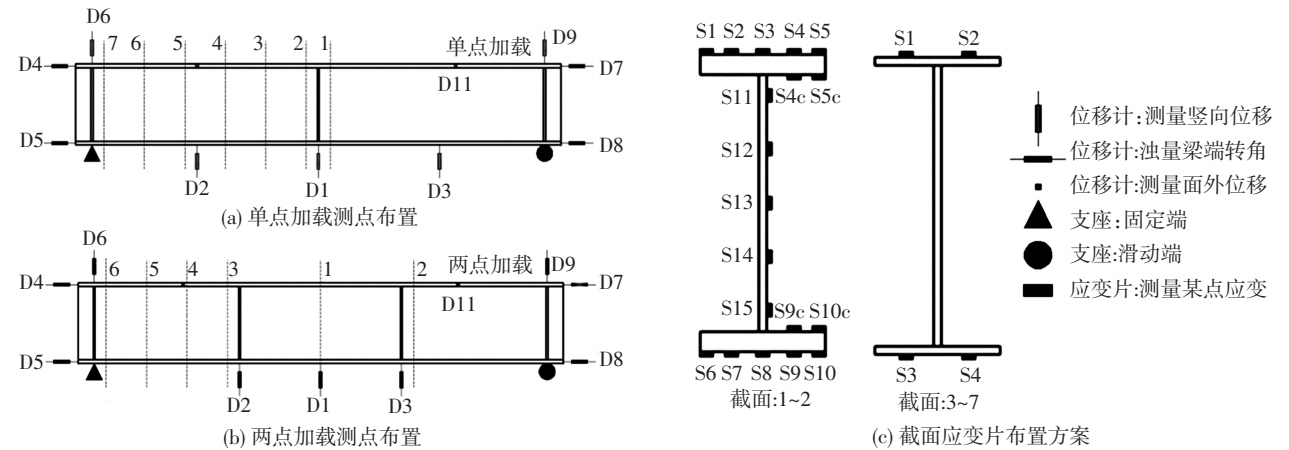


图 3 试件测点布置

Fig.3 Arrangement of testing points

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

图 4(a)为全部构件的破坏形态,可以看出 4 根构件在平面外均有一定程度的扭转,但由于侧向支撑的约束未发生整体失稳.4 根构件均发生明显的板件局部屈曲,如图 4 所示.BS-1 加载点北侧(固定端一侧)上翼缘发生明显屈曲,伴随腹板鼓突,同时下翼缘跨中焊缝出现约 10 mm 长裂纹,如若继续加载,下翼缘焊缝裂纹将扩展至下翼缘断裂.主要原因是焊缝焊接质量较差,实际运用中,如采用单楔形 LP 钢板焊接翼缘应采用全熔透等强焊缝并保证焊缝质量,也可直接采用双向变厚度 LP 钢板.BS-2 同样在加载点北侧发生明显局部屈曲,屈曲现象较 BS-1 更加明显.BD-1 在北侧加载点外侧上翼缘和腹板发生局部屈曲,BD-2 跨中上翼缘出现局部屈曲现象.

2.2 荷载-位移曲线

根据构件下翼缘跨中位移计数据和试验加载点总荷载整理得到构件跨中下翼缘竖向位移和总荷载的关系曲线见图 5,水平线代表构件根据实测材料性能数据计算得到的全截面塑性荷载(全截面屈服荷载).根据构件梁端位移计数据和试验加载点总荷载可以得到弯矩-梁端转角关系曲线,基本形状和规律与图 5 相同,篇幅限制不再列出.可以看出,曲线较为平稳且屈服后承载力持续上升,图 5(b)中曲线波动是由于加载设备的不稳定性导致,图 5(c)曲线由于北侧加载点附近板件明显屈曲表现出明显下降段,曲线整体表现出类似于 Q345 钢材本构曲线相同的强化特性,且试件实际承载力均超过全截面塑性荷载.

由于不同构件实测材料力学性能和几何尺寸不同,尤其是变厚度构件刚度与等厚度构件完全不同,为了更好说明构件的荷载-位移关系相对于构件本

身性能的关系,将荷载 P 和位移 Δ 均转化为无量纲量.其中,标准化荷载 $= P/P_p$, 标准化位移 $= \Delta/\Delta_p$, P_p 为理论计算得到的全截面屈服荷载, Δ_p 为假定刚度

与初始刚度相同计算得到的塑性位移,其中翼缘纵向变厚度构件位移采用文献[18-19]中的理论公式进行计算.

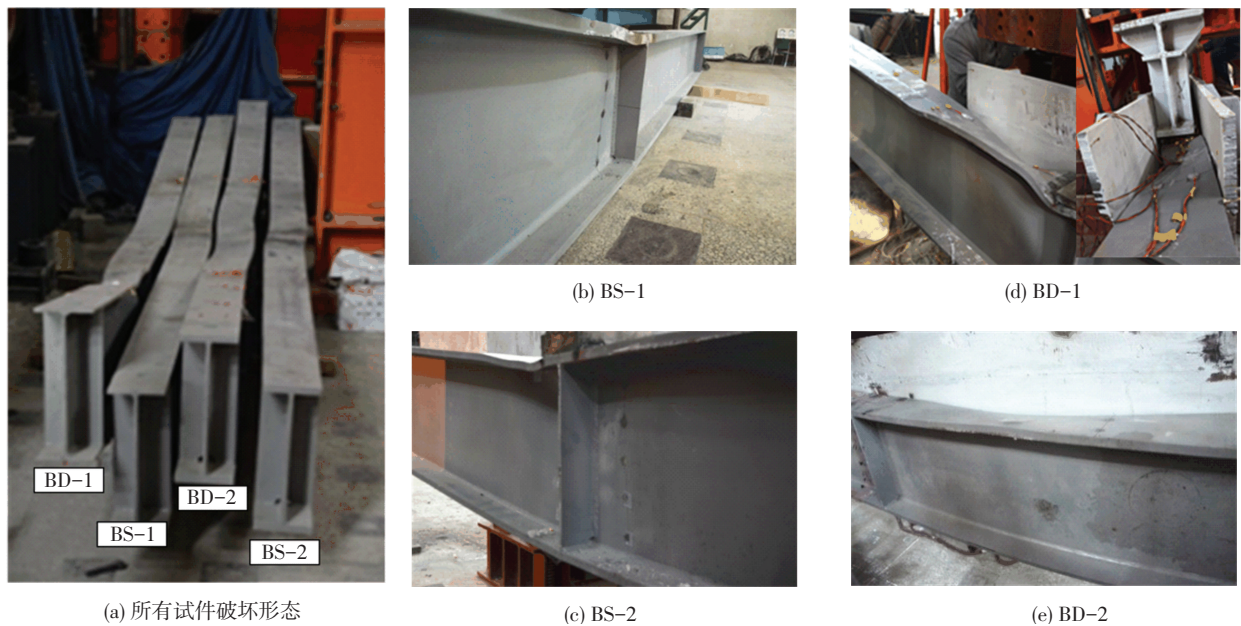


图 4 试件破坏形态
Fig.4 Failure modes

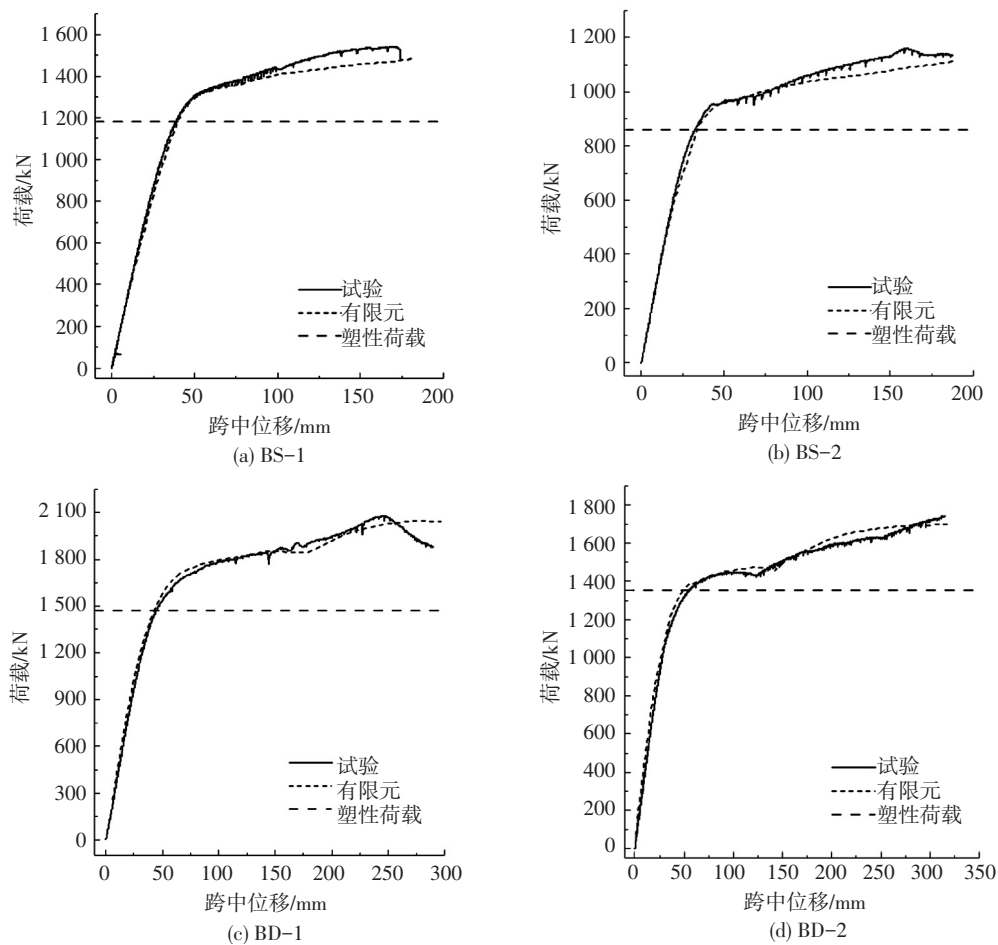


图 5 构件荷载-位移曲线
Fig.5 Load-displacement curves of specimens

汇总 4 根构件极限承载力及变形性能如表 4 所示,其中 P_u 、 Δ_u 分别为极限荷载与对应极限位移, $\Delta_{\frac{1}{4}u}(N)$ 、 $\Delta_{\frac{1}{4}u}(S)$ 分别为构件北端和南端跨度 1/4 (或加载点) 处极限位移.可以看出:1) 所有构件均达到了全截面屈服荷载,BS-1 的极限承载力比相同用钢量的 BS-2 提高了 35.41 %;BD-1 的极限承载力比相同最大受力截面的 BD-2 提高了 19.13 %.前者极限强度增加主要是因为最大受力截面惯性矩的增加(翼缘厚度增加)和材料实际强度的提高,而后者主要是材料强度提高的影响.2) 翼缘纵向变厚度构件 P_u/P_p 值与等厚度构件相比,单点加载基本不变,两点加载提高 10%,可认为选用 LP 钢板作翼缘,在保证构件最大受力截面几何尺寸及强度不变的情况下,可保证构件承载力.综上,采用翼缘纵向变厚度工型截面简支梁可获得不低于等厚度梁的极限强度.

延性在结构抗震设计中是一个非常重要的指标,通常使用延性系数来表示,本文采用位移延性系数 $R_\Delta=\Delta_u/\Delta_p$ 作为构件延性的宏观表达.由表 4 可以看出,所有构件跨中竖向位移均达到了塑性位移,且位移延性系数 R_Δ 均达到 5 倍以上.试验终止时刻变厚度构件延性相对较差,单点加载和两点加载情况下,相比等厚度构件位移延性系数 R_Δ 降低 22.47% 和 26.63%.

表 4 构件极限荷载及变形能力

Tab.4 The ultimate load and deformation capacity

编号	P_u/kN	$\frac{P_u}{P_p}$	Δ_u/mm	$\frac{\Delta_u}{\Delta_p}$	$\Delta_{\frac{1}{4}u}(N)/\text{mm}$	$\Delta_{\frac{1}{4}u}(S)/\text{mm}$
BS-1	1 542.262	1.304	169.184	5.735	96.519	100.428
BS-2	1 138.970	1.327	181.167	7.398	98.521	94.759
BD-1	2 078.010	1.414	245.501	7.379	245.501	225.633
BD-2	1 744.293	1.291	315.901	10.057	259.465	253.963

由于加载装置限制,单点加载构件最终跨中位移为 200 mm 左右,两点加载构件最终跨中位移为 300 mm 左右,除 BD-1 外其余构件承载力未出现明显下降段,说明构件实际具有更大变形能力.综上,可以认为试验构件变形能力已达到密实截面的要求.

2.3 荷载-应变曲线

2.3.1 沿截面高度腹板应变分布

根据构件腹板应变片数据和荷载数据整理得到构件在荷载分别为 $P_y/3$ 、 $2P_y/3$ 、 P_y 、 $(P_y+P_p)/2$ 、 P_p 、 $(P_p+P_u)/2$ 、 P_u 时的应变分布 (P_y 、 P_p 、 P_u 分别为屈服荷载、塑性荷载和极限荷载),选取每个构件屈曲明显腹板应变随截面高度分布如图 6 所示,其中,横坐标为应变片所测应变;纵坐标为应变片测点到横截面强轴的距离,单位为 mm.

可以看出构件腹板应变分布随加载过程的变化,屈服荷载前完全为直线,满足平截面假定,达到塑性荷载时直线开始出现弯折,达到极限荷载之前和达到极限荷载时,已不满足平截面假定.

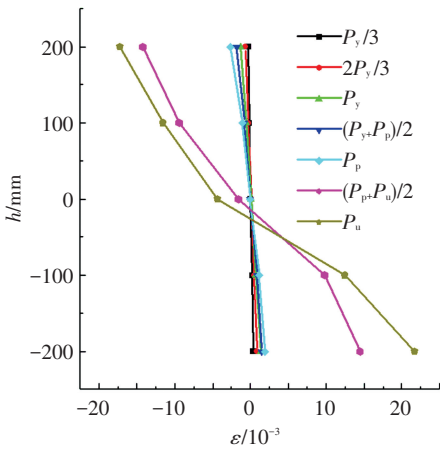


图 6 沿截面高度腹板应变分布 (BS-2)

Fig.6 Web strain distribution along the sectionheight (BS-2)

2.3.2 沿梁跨度方向翼缘应变分布

根据沿梁跨度方向布置的应变片,同样可以整理得到构件在荷载分别为 $P_y/3$ 、 $2P_y/3$ 、 P_y 、 $(P_y+P_p)/2$ 、 P_p 、 $(P_p+P_u)/2$ 、 P_u 时的应变分布,见图 7.其中,横坐标为应变片测点到跨中的距离,单位为 mm;纵坐标为应变片所测应变.

可以看出,沿梁跨度方向翼缘应变随荷载增加的变化过程,当荷载小于屈服荷载之前,应变基本上呈线性分布,随着荷载增加,应变分布脱离线性,单点加载跨中部分和两点加载纯弯段部分,应变极大,形成了明显塑性铰,且发生局部屈曲板件处应变较大.除此之外,由于上翼缘受压导致局部屈曲的存在,使得上下翼缘应变分布并不完全对称.

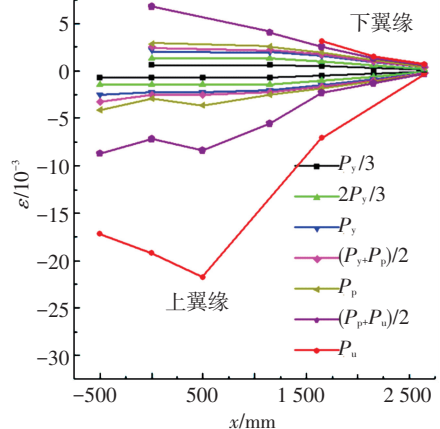


图 7 沿梁跨度方向翼缘应变分布 (BD-1)

Fig.7 Flange strain distribution along beam span (BD-1)

2.4 无约束段面外位移

由侧向支撑外侧布置的位移计测量数据可以看出,由于试件与侧向支撑之间的间隙,使得构件无约束部分在加载过程中并非没有加载面外的位移,且

随加载过程不断变化,但是变化范围很小,基本上在 $\pm 10\text{ mm}$ 范围内,与侧向支撑与构件之间所留间隙范围相同,说明侧向支撑对全构件起到了约束作用,有效防止了整体失稳的发生。

3 有限元验证

3.1 有限元模型

本文采用通用有限元软件 ANSYS 对 4 根试验构件进行数值模拟,模型模拟构件、夹支支座、垫板以及侧向支撑梁,通过点-面接触单元模拟构件上翼缘与侧向支撑板之间的摩擦关系,均采用 SOLID185 实体单元,并采用位移加载,加密跨中网格,见图 8。

由于 LP 钢板强度沿纵向变化,将翼缘划分为长度为 200 mm 的小段,分别输入基于实际数据线性插值得到各段材性数据.采用一阶特征值屈曲模态对理想模型节点坐标进行更新,变化幅值为实测初始缺陷值.残余应力模型采用文献[20]中的统一分布模型,截面残余应力分布见图 8。

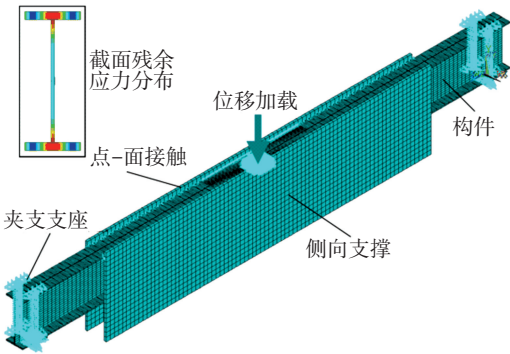


图 8 有限元模型
Fig.8 The finite element model

3.2 与试验结果对比分析

有限元计算得到的荷载-位移关系曲线见图 5,对比承载力结果如表 5 所示,其中 F_{test} 为试验极限承载力, F_{FEA} 为有限元计算得到的试验极限位移 Δ_u 对应承载力。

表 5 试验值与有限元分析结果对比

Tab.5 Comparison between test and FEA results				
编号	Δ_u/mm	$F_{\text{test}}/\text{kN}$	F_{FEA}/kN	相对误差/%
BS-1	169.183	1 542.262	1 481.450	3.94
BS-2	181.167	1 138.970	1 111.510	2.41
BD-1	245.501	2 078.010	2 018.300	2.87
BD-2	315.901	1 744.293	1 695.320	2.81

可以看出,在达到理论塑性荷载前及超过塑性荷载一定范围时,有限元试验结果与试验结果基本一致,但是由于试验中构件变形较大时会发生侧向支撑允许范围内的扭转,并与侧向支撑接触,在构件

继续向下变形的过程中产生摩擦,而且摩擦力随着荷载的增大而增大,且对接触面积十分敏感,因此,曲线强化段模拟略差,但相对误差不超过 5 %。建议在进一步参数化分析中,采用理想侧向约束边界条件。

4 结 论

本文对 2 根翼缘纵向变厚度工型截面梁和 2 根等厚度工型截面梁进行了静力加载试验,研究了单点加载和两点加载情况下翼缘纵向变厚度工型截面简支梁的变形性能,与等厚度梁进行了对比,并采用 ANSYS 进行了数值模拟,获得以下结论:

1) 在有效侧向支撑约束条件下,按照 GB 50017—201X《钢结构设计规范》中 S1 级塑性截面设计的翼缘纵向变厚度工型截面简支梁与等厚度工型截面梁一样,且均在极大变形情况下,发生局部屈曲。

2) 4 根构件均达到了全截面屈服荷载 P_p ,且全截面屈服后进入强化阶段.由于材料强度提高使得翼缘纵向变厚度梁不仅可以在保证承载力的情况下大大减少用钢量,而且可以获得更大的强度储备;在材料强度和最大受力截面相同的情况下,可保证构件承载力不降低。

3) 4 根构件跨中竖向位移均达到了塑性位移,且位移延性系数 R_Δ 均达到 5 倍以上.虽然试验终止时刻翼缘纵向变厚度构件的延性与等厚度梁相比较差,但是也可以达到密实截面的变形要求,满足塑性设计要求。

4) 考虑侧向支撑摩擦的有限元模型与试验曲线吻合良好,但建议在进一步参数分析中使用理想侧向约束。

参考文献

[1] 沈祖炎,温东辉,李元齐. 中国建筑钢结构技术发展现状及展望[J]. 建筑结构, 2009, 39(9): 15-25.
SHEN Zuyan, WEN Donghui, LI Yuanqi. State-of-the-art: Technical progress of steel building structures in China [J]. Building Structure, 2009, 39(9): 15-25.
[2] 姚文聪. 梭形变截面工字形简支钢梁的整体稳定分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
YAO Wencong. Overall stability analysis of tapered simply-supported I-beams[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
[3] 刘晓玲,王元清,王玉银,等. 纵向变厚度(LP)钢板的工程应用和研究进展[J]. 工业建筑 2015, 45(增刊): 1027-1035.
LIU Xiaoling, WANG Yuanqing, WANG Yuyin, et al. Review of structural application and research of longitudinally profiled steel plate (LP steel plate) [J]. Industrial building, 2015, 45(S): 1027-1035.
[4] OKANO S. High performance steels for bridge construction and

- examples of their application [J]. Welding International, 2008, 22 (11): 746-754.
- [5] 王元清, 刘晓玲, 刘明, 等. 纵向变厚度钢板力学性能试验研究 [J]. 钢结构, 2017, 32(4): 16-21.
- WANG Yuanqing, LIU Xiaoling, LIU Ming, et al. Experimental research of mechanical properties of longitudinally profiled steel plate [J]. Steel Structure, 2017, 32(4): 16-21.
- [6] RICHTER K, SCHMACKPFEFFER H. Longitudinally profiled plates cut costs [J]. Joining & Materials, 2008, 11: 270-273.
- [7] MURAKAMI S, NOBUO N. Ultimate strength evaluation of tapered plate in compression [C]//Proc. 5th International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures. Nagoya: [s.n.], 1997: 133-140.
- [8] 村上茂之, 西村宣男, 堀田毅. 自由突出テーパプレート の圧縮強度 [J]. 構造工学論文集, 1997, 34: 107-116.
- MURAKAMI S, NISHIMURA N, HOTTA T. Ultimate strength of outstanding tapered plates in compression [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 34: 107-116.
- [9] 村山峻一郎, 大谷礼央, 永藤壽宮. LP 鋼板における力学的挙動特性について: 中部支部研究発表会 I-031 [R]. [S.l.]: 日本土木学会, 2009.
- [10] 松野健太, 永藤壽宮. 初期不整を有する LP 鋼板の I 形断面における挙動特性: 中部支部研究発表会 I-019 [R]. [S.l.]: 日本土木学会, 2012.
- [11] 井川大裕, 坂井悠佑, 吹田啓一郎, 等. 変厚鋼板の材料特性と柱梁接合部試験体について: 変厚鋼板を梁フランジに用いた増厚梁端接合部の塑性変形能力 その 1: 学術講演梗概集 22527 [R]. 関東: 日本建築学会, 2011.
- IKAWA D, SAKAI Y, SUITA K, et al. Plastic deformation capacity of moment frame connection with the thickness of beam flanges increased near the connection region Part 1-Mechanical properties of steel plate with variable thickness: Collection of Academic Dissertation 22527 [R]. Kanto: Architectural Institute of Japan, 2011.
- [12] 井川大裕, 坂井悠佑, 吹田啓一郎, 等. 柱梁接合部の載荷実験: 変厚鋼板を梁フランジに用いた増厚梁端接合部の塑性変形能力 その 2: 学術講演梗概集 22527 [R]. 関東: 日本建築学会, 2011.
- IKAWA D, SAKAI Y, SUITA K, et al. Plastic deformation capacity of moment frame connection with the thickness of beam flanges increased near the connection region Part 2-Loading test of beam to column connection: Collection of Academic Dissertation 22528 [R]. Kanto: Architectural Institute of Japan, 2011.
- [13] AOKI T, TAKAKU T, FUKUMOTO Y, et al. Experimental investigation for seismic performance of framed structures having longitudinally profiled plates [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(7): 875-881.
- [14] FUKUMOTO Y, UENOYA M, NAKAMURA M, et al. Cyclic performance of stiffened square box columns with thickness tapered plates [J]. Journal of Steel and Structures, 2003, 3(2): 107-115.
- [15] 王星堯. LP 鋼板柱耐震行為之研究 [D]. 台北: 國立台灣科技大學, 2013.
- WANG Xingyao. Steel bridge columns with longitudinally profiled steel plate for seismic resistance [D]. Taipei: National Taiwan University of Science and Technology, 2013.
- [16] 施刚, 班慧勇, 石永久, 等. 结构构件整体几何初始缺陷测量方法: CN102288081A [P]. 2011-12-21.
- SHI Gang, BAN Huiyong, SHI Yongjiu, et al. Overall geometric imperfection measuring method of structure members: CN102288081A [P]. 2011-12-21.
- [17] 王元清, 袁焕鑫, 石永久. 一种连续量测结构构件局部几何初始缺陷的装置: CN103063172A [P]. 2013-04-24.
- WANG Yuanqing, YUAN huanxin, SHI yongjiu. A device for local geometric imperfection measurement of structure members: CN103063172A [P]. 2013-04-24.
- [18] 王元清, 刘晓玲, 王玉银, 等. 单点加载翼缘纵向变厚度工型截面简支梁变形解析解法 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2016, 32(4): 577-583.
- WANG Yuanqing, LIU Xiaoling, WANG Yuyin, et al. Theoretical deformation solution of I-section beam with longitudinally variable thickness flanges under single point loading [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(4): 577-583.
- [19] 王元清, 刘晓玲, 王玉银, 等. 两点加载翼缘纵向变厚度工型截面简支梁变形的解析解法 [J]. 应用力学学报, 2016, 33(6): 976-981.
- WANG Yuanqing, LIU Xiaoling, WANG Yuyin, et al. Theoretical deformation solution of I-section beam with longitudinally variable thickness flanges under two point loading [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(6): 976-981.
- [20] 班慧勇, 施刚, 石永久. 高强钢焊接构件工字形横截面残余应力试验及同一分部模型研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(8): 83-91.
- BAN Huiyong, SHI Gang, SHI Yongjiu. Experimental and unified model investigations on residual stress within high strength steel welded I-sections [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 83-91.

(编辑 赵丽莹)