

翼缘纵向变厚度工型截面简支梁 承载性能有限元分析

王元清¹, 刘晓玲¹, 刘明², 李文斌², 班慧勇¹, 王玉银³

(1. 清华大学土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 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, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要 目的 研究翼缘纵向变厚度工型截面简支梁的构件受力性能, 为其进一步参数化分析提供依据. 方法 采用有限元软件 ANSYS 对 2 根翼缘纵向变厚度构件和 2 根等厚度对比构件进行模拟, 研究单点加载和两点加载情况下的承载性能, 考虑试验侧向支撑和理想侧向边界条件的影响, 并将模拟结果与试验结果进行对比. 结果 有限元计算结果与试验结果吻合良好, 4 根构件截面均达到密实截面要求, 且翼缘变厚度工型截面梁可以获得更大的强度储备; 理想侧向支撑有利于提高构件的整体承载力, 相比试验侧向支撑模型提高约 5%. 结论 笔者建立的有限元模型能够合理模拟试验条件, 且建议在进一步参数化分析中采用理想侧向支撑边界条件; 纵向变厚度钢板节省用钢量以及本身强度优势, 用于工型截面受弯构件翼缘可以获得更高的强度储备和更大的经济效益.

关键词 翼缘纵向变厚度工型截面简支梁; 纵向变厚度钢板; 有限元; 侧向约束边界

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Finite Element Analysis on Bearing Behavior 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 of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 100084; 2. Product Development, Anshan Iron & Steel, Anshan, China, 114009; 3. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090)

Abstract: The paper studied the bearing capacity and deformation behavior of I-section beam with longitudinally profiled steel plate using the software ANSYS. 4 specimen models were established to study the bearing capacity under single-point loading and two-point loading, including 2 specimens with variable flange thickness, 2 specimens with constant flange thickness. The models con-

收稿日期: 2016-12-16

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, 主要从事钢结构疲劳、断裂和稳定方面研究.

sidering the different lateral restraint condition, and influence of residual stress and geometric imperfection were included. The analyzed results were compared with test results, and the results are in good agreement with each other. It shows that all of the specimens meet the requirement of compact cross section and I-section beam with longitudinally profiled steel plate could get larger strength reserve. Ideal lateral constraint is conducive to bearing capacity with an increment about 5%. The conclusion is that an reasonable finite element model was established and it could be used for further analysis of parameters with the ideal lateral boundary. Longitudinally profiled steel plate could be used as flange components to improve strength reserve and enhance economic performance, and should be proposed in practice.

Key words: I-section beam with longitudinally variable thickness flanges; longitudinally profiled steel plate; finite element analysis; lateral restraint condition

我国钢结构发展迅猛,经过二十多年的发展,已经成为了建筑结构中不可替代的一种形式^[1],同时也广泛使用于工业厂房以及锅炉支架等特殊结构当中,表现出极大的应用和发展空间。发展至今,钢结构构件设计基本上基于最大受力截面,以获得满足承载力要求的合理构件。但是,此种设计方法使得除最大受力截面外其他截面的强度往往得不到充分利用而造成钢材的浪费,因此,需要一种可考虑构件内力变化的新型钢结构构件。基于变厚度轧制技术和自动厚度控制技术,纵向变厚度钢板(Longitudinally Profiled Steel Plate, LP 钢板)的出现,使得这一设想成为可能。纵向变厚度钢板^[2]作为一种可以根据用户需求定制的厚度沿轧制方向连续变化的绿色钢板,即可以根据结构构件服役时承载状况来定制钢板形状及厚度尺寸,具有节省钢材、减轻构件自重的优点,用于特定结构中还可以减少焊缝、提高抗震性能和抗疲劳性能,因此,得到了国内外钢铁生产家和建筑工程行业的青睐^[2]。20 世纪末,纵向变厚度钢板首次生产并运用于船只建造当中^[3],取得了良好的经济效益;随后应用到桥梁建设当中^[4],迄今为止,LP 钢板在桥梁结构中的应用已遍布日本以及欧洲各国,如索姆河大桥、申根大桥以及日本的深沢川大桥等^[2]。纵向变厚度钢板相对于等厚度钢板,由于其特殊的轧制工艺导致初期生产成本较高,但是,工

程实例研究表明其可提高综合效益,降低结构的全寿命周期成本^[5]。由于其发展时间较短,几位日本学者虽然对有关纵向变厚度钢板材料性能^[6]、板件受力性能^[7-8]、构件初始缺陷测定^[9-10]、梁端变厚度节点^[2]以及桥梁柱脚变厚度构件抗震性能^[11-13]进行了部分研究,但是目前相关生产标准和设计规范并不完善,尤其国内有关 LP 钢板的研究还是空白,极大程度限制了纵向变厚度钢板的应用与发展^[2]。

在工型截面梁翼缘使用纵向变厚度钢板,仍通过最大内力设计最大受力截面,但可使得梁构件沿跨度方向各个截面的设计力矩与构件内力分布更加接近,此种工型截面梁称为翼缘纵向变厚度工型截面梁。由于翼缘厚度变化,其截面惯性矩沿跨度方向连续变化,使得其刚度不同于等厚度梁,承载性能尤其是变形性能存在较大差异。因此,笔者通过运用通用有限元软件 ANSYS 对 2 根翼缘纵向变厚度工型截面简支梁和 2 根翼缘等厚度构件的承载性能进行了有限元分析,分别考虑单点加载和两点加载两种情况,最后通过将有限元分析计算结果与试验结果进行对比,验证了所建模型的正确性。

1 有限元建模

1.1 模型几何参数

根据构件受力情况的不同,分为单点加载

构件(BS)和两点加载构件(BD). 基于两种受力情况下构件内力分布不同,可将翼缘纵向变厚度工型截面简支梁设计为图1(a)和(b)所示的两种形式(试件T-BS-1、T-BD-1);为与其性能形成对比,设置翼缘等厚度对比构件(试件T-BS-2、T-BD-2). 所有构件全长 $L=6\,000\text{ mm}$,跨度 $L_s=5\,600\text{ mm}$,两点加载构件纯弯段长度 $L_b=2\,000\text{ mm}$,截面高度 $H=500\text{ mm}$,宽度 $B=200\text{ mm}$,腹板厚度 $t_w=$

12 mm,变化参数为翼缘厚度(包括厚度变化率). 其他具体参数如表1所示. 其中, t_{f0} 为翼缘最小厚度; t_f 为翼缘最大厚度; α 为翼缘厚度变化率; H_{\max} 为腹板最大高度; H_{\min} 为腹板最小高度; t_w 为腹板厚度;用钢量按为 $7\,850\text{ kg/m}^3$ 计算. 构件模型旨在模拟足尺构件,为避免构件发生局部屈曲,且考虑纵向变厚度钢板的生产规格,板件宽厚比均较大.

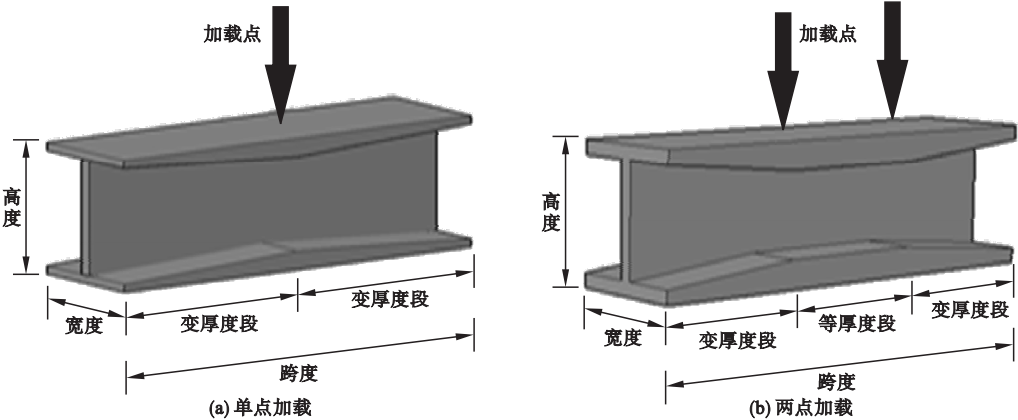


图1 两种加载情况下翼缘纵向变厚度工型截面简支梁示意图

Fig. 1 Sketch maps of I-section beam with longitudinally variable thickness flanges under two kinds of load

表1 试验构件实际尺寸及用钢量

Table 1 Actual sizes and steel dosage of specimens

编号	翼缘			腹板		用钢量/t
	t_{f0}/mm	t_f/mm	$\alpha/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$	H_{\max}/mm	H_{\min}/mm	
T-BS-1	15.5	32.0	5.89	469.0	436.5	0.732
T-BS-2	23.5	23.5	0	450.0	450.0	0.732
T-BD-1	13.0	23.5	5.83	477.0	460.5	0.669
T-BD-2	23.5	23.5	0	454.5	454.5	0.732

1.2 有限元建模

笔者采用 ANSYS 进行模拟分析,考虑构件主体与支座垫板;模型单元采用无中间节点的8节点3D 实体单元 SOLID185 模拟,每个节点仅有 x 、 y 、 z 三个方向的平动自由度^[14]. 虽然采用 SOLID185 单元与常用于受弯构件模拟的 SHELL181 单元相比,模型计算量较大,但是实体单元比壳单元简单得多,且可以更好地模拟翼缘的厚度变化带来的影

响. 构件主体与支座垫板之间,通过一致网格划分,合并相同位置节点实现位移耦合,模拟其与翼缘之间的一致运动关系.

考虑到计算精度、时间以及截面残余应力的输入,工字形截面翼缘外伸段沿板件宽度方向划分为8个单元,腹板沿板件高度方向划分为20个单元,沿梁纵轴线长度方向的单元尺寸为50 mm,加载点及跨中易出现局部屈曲变形的范围内细化网格为25 mm,板

件厚度方向均划分两层单元.多次试算说明,有限元模型的网格划分已经满足精度要求.

笔者模拟单点加载和两点加载两种情况,并且在集中荷载和支座处设置加劲肋.模型边界条件模拟简支梁,分别约束两块支座垫板支座处 x 、 y 、 z 方向和 x 、 y 方向位移.为模拟和试验相同的支座条件,约束梁端加劲肋两侧各 100 mm 范围内的水平位移模拟夹支边界条件^[15].为了更好地模拟荷载-位移曲线下降段采用位移加载方式.

为了防止构件发生侧向失稳,试验中采用长度为 4 m 的侧向支撑板约束构件上翼缘

的侧向位移,支撑板与构件之间存在 5 mm 左右的安装间隙,但是由于在构件加载过程中构件侧向变形后与侧向支撑板接触产生摩擦,影响构件实测荷载.为了更好地与试验结果进行对比,笔者通过点-面接触单元对试验实际侧向支撑装置进行模拟(见图 2).考虑钢材摩擦面抗滑移系数取 0.5^[16],图 2(a)中,侧向支撑板为上下两面固支,为显示清晰,未显示其边界条件;并对理想侧向支撑边界条件(仅约束构件上翼缘侧向水平位移)模型进行模拟,如图 2(b)所示.

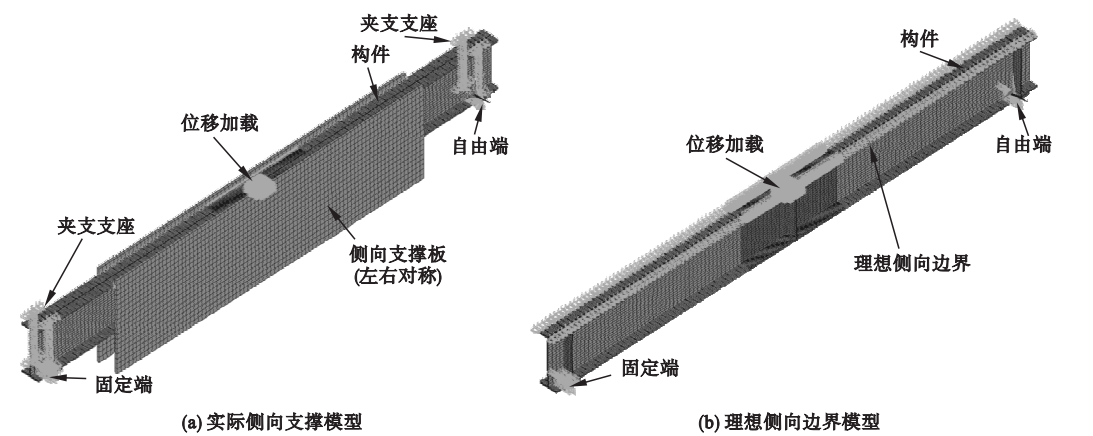


图 2 有限元模型约束条件与荷载条件

Fig. 2 Boundary and loading conditions of FEM model

1.3 材料性能定义

纵向变厚度钢板的材料性能由于其厚度变化不同于等厚度钢板,强度随厚度增加而降低,呈现出明显的变化规律^[17],但是应力-应变曲线形式及弹性模量与等厚度板无区别.因此,有限元模型采用实测材性数据,并在未测不同厚度处采取线性插值方法确定,分为 200 mm 每段输入翼缘板材性,试验构件材料性能如表 2 所示,其中,LP1 为单楔形变厚度钢板,用于试件 T-BS-1 翼缘;LP2 为梯形变厚度钢板,用于试件 T-BD-1 翼缘;P1 和 P2 为用于等厚度翼缘和腹板的普通钢板; f_y 和 f_u 分别为钢材屈服强度和抗拉强度.模型中具体采用多线性随动强化模型 KINH 材料模型,并通过 8 个数据

点输入材性,当实际应变值超过输入曲线的终点时,假定为理想弹塑性材料行为^[15].弹性模量和泊松比分别为 206 000 MPa 和 0.3.

表 2 试验板件材料性能

Table 2 Mechanical properties of flexural test plates

钢板编号	厚度/mm	f_y /MPa	f_u /MPa
LP1	16	543	653
	20	502	621
	30	464	601
LP2	16	472	634
	20	457	621
	24	444	609
P1	12	489	636
P2	24	405	526

1.4 几何初始缺陷

对结构构件来说,由于制造误差和施工质量的原因,几何初始缺陷难以避免.有限元模型采用表3所示试验实测几何初始缺陷.

表3 构件实测几何初始缺陷

Table 3 Measured geometric initial imperfection of specimens

构件编号	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	$H_{\min}/473$

可见满足《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205—2001)的规定.参考目前的构件稳定分析中建立有几何初始缺陷的方法^[18-19],笔者首先建立无侧向约束的理想构件模型,并对其进行特征值屈曲分析,采用一阶屈曲模态对节点坐标进行更新,试件几何缺陷幅值与一阶屈曲模态中翼缘和腹板最大鼓凸点的

位移值的比值为形状缩放比例.

1.5 残余应力模型

由于构件截面残余应力会使结构构件提前屈服,刚度降低,因此,笔者模型残余应力分布根据班慧勇等人^[20]研究总结得到的高强钢焊接构件工字形横截面残余应力统一分布模型确定.需要注意的是上述残余应力模型中残余压应力数值与翼缘宽厚比和腹板高厚比有关,但是通过试算表明采用最大受力截面尺寸定义残余应力分布对分析结果影响较小.

2 有限元计算结果分析及验证

2.1 破坏形态对比

有限元模型分析结果得到破坏形态分别为加载点附近翼缘和腹板局部屈曲(T-BS-1和T-BS-2)和加载点、纯弯段上翼缘和腹板局部屈曲(T-BD-1和T-BD-2),如图3所示,可见与试验所得破坏形态基本一致.随着荷载的不断增加,局部屈曲越来越明显.

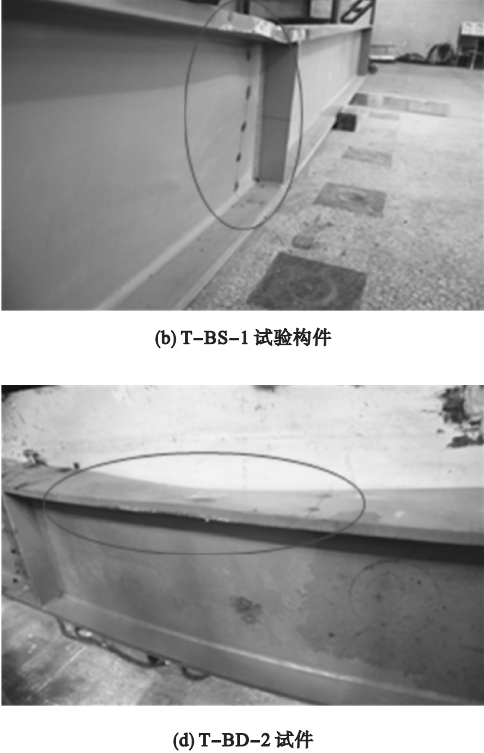
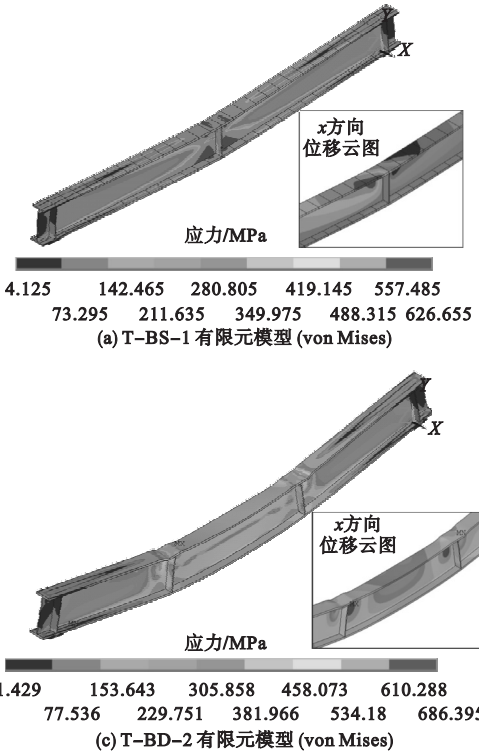


图3 试验与有限元破坏形态对比

Fig.3 Comparison of failure modes(test and FEM)

2.2 荷载-位移曲线对比

图4为T-BS-1和T-BD-1两根根构件试验与有限元分析荷载-位移结果曲线对比.可以看出,试验所得曲线与模拟实际侧向支撑板的有限元计算结果二者吻合良好.在变形较大的后期(挠度大于100 mm),曲线出现偏差主要是因为构件与侧向支撑之间

的摩擦力不稳定导致,但是各个位移处荷载值相差最大不超过8.75%.

由于试验设备限制,试验曲线并未出现明显下降段,因此通过有限元软件对荷载-位移全过程曲线进行模拟(见图5).理想侧向边界模型和模拟侧向支撑板模型基本条件均一致,仅变化侧向约束施加方式.

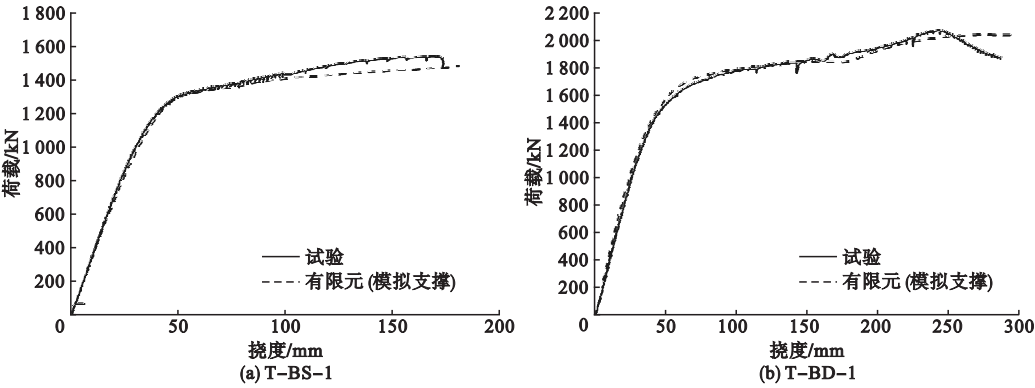


图4 试验与有限元荷载位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of load-displacement curve(test and FEM)

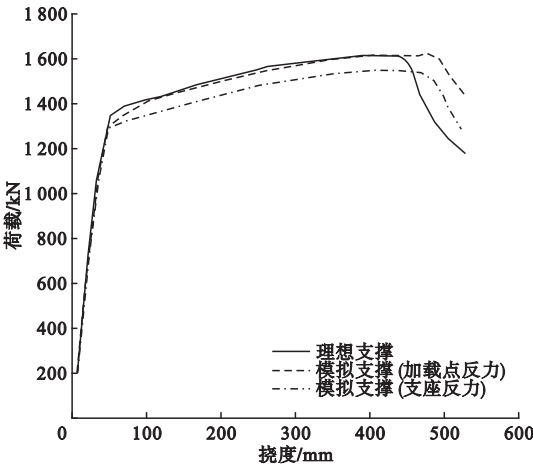


图5 不同侧向约束条件下荷载位移全曲线对比(T-BS-1)

Fig. 5 Comparison of load-displacement curve under different lateral constraint(T-BS-1)

由图5可以看出,由于构件板件宽厚比较大,在出现下降段之前呈现明显的弹塑性变形行为,塑性段略有强化;由于构件受压上翼缘受到侧向约束,不会发生侧向失稳,因此,板件过大的局部屈曲导致承载力下降.分析可得,支座反力才是构件所承受的

真实荷载,并且由图5可以看出,理想侧向边界条件下的构件荷载-位移曲线和模拟实际支撑的支座反力-位移曲线变化规律基本一致,曲线平稳.进一步可以得出以下结论:

- (1)构件屈服前整体变形较小,且翼缘也未与侧向支撑板接触,未产生摩擦,因此边界条件对构件屈服之前刚度影响很小;
- (2)理想侧向支撑有利于提高构件的整体承载力,提高约5%;试验条件下的侧向支撑由于在初始阶段与构件之间存在5 mm作用的间隙,允许构件在一定程度上的侧向位移,对构件侧向约束条件较弱且板件局部变形相比更大,因此构件实际承载能力小于理想侧向边界条件约束承载力;
- (3)由于实际建筑工程中,受弯构件常受到楼板的侧向约束,不允许发生侧向位移,因此,理想边界条件模型更适合模拟实际工程受弯构件.

2.3 承载力和延性对比

图6为理想侧向约束条件下四根构件的

荷载-位移全曲线。

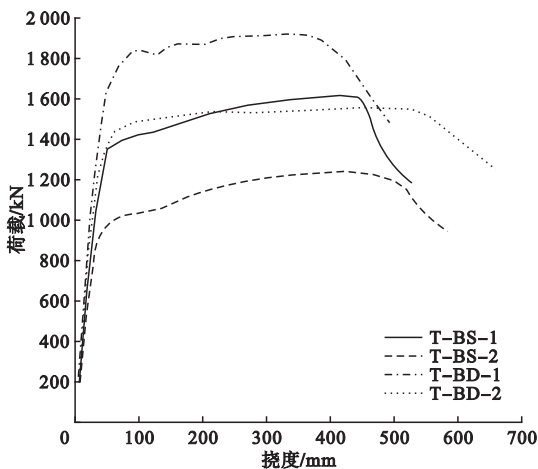


图6 理想侧向约束下四根构件荷载-位移全曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-displacement curve of four specimens under ideal lateral constraint

由图6可见:

(1) T-BS-1 和 T-BS-2 用钢量相同,但是由于采用纵向变厚度钢板作翼缘使得构件最大受力截面惯性矩增大 27.80% 且变厚度翼缘板厚度最大处强度提高 15% 左右,因此,屈服强度提高 34.53%,极限强度提高 30.14%,塑性段延性略有下降;

(2) T-BD-1 比 T-BD-2 用钢量减少 8.61%,但是最大受力截面惯性矩不变,且变厚度翼缘厚度最大处强度提高 10% 左右,因此,屈服强度提高 27.78%,极限强度提高 23.80%,塑性段延性略有下降;

(3) 所有构件截面都达到了密实截面的要求。

3 结 论

(1) 笔者建立的有限元模型能够合理反映试验构件与侧向支撑梁接触与摩擦关系、翼缘厚度变化以及材性变化,引入了几何初始缺陷以及截面残余应力,准确模拟单点和两点加载试验构件的承载能力。

(2) 侧向支撑边界条件形式对构件屈服

前刚度影响很小,考虑实际中楼板的侧向约束作用,建议使用理想侧向边界条件模型进行进一步的参数分析。

(3) 由于纵向变厚度钢板节省用钢量以及本身强度高于等厚度钢板的优势,使得翼缘纵向变厚度工型截面梁相比等厚度工型截面梁不仅可以大大节省用钢量,而且具有更大的承载能力,仍可达到密实截面要求,推荐在工程中推广和使用。

参考文献

- [1] 沈祖炎,李元齐. 促进我国建筑钢结构产业发展的几点思考[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(4): 15-21.
(SHEN Zuyan, LI Yuanqi. Discussion on promoting the development of steel building structure industry of China [J]. Process in steel building structure, 2009, 11(4): 15-21.)
- [2] 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.)
- [3] SHINICHI S, RYUJI M, TADASHI O, et al. Steel products for shipbuilding[J]. JFE technical report, 2004, 2: 41-48.
- [4] FUKUMOTO Y, NAGAI M. Steel bridges: new steels and innovative erection methods [J]. Progress in structural engineering and materials, 2000, 2: 34-40.
- [5] OKANO S. High performance steels for bridge construction and examples of their application [J]. Welding international, 2008, 22(11): 746-754.
- [6] RICHTER K, SCHMACKPFEFFER H. Longitudinally profiled plates cut costs [J]. Joining & materials, 2008, 11: 270-273.
- [7] FUKUMOTO Y, TAKAKU T, AOKI T, et al. Innovative use of profiled steel plates for seismic structural performance [J]. Journal of advances in structural engineering, 2005, 8(3): 247-257.
- [8] 永藤壽宮,渡辺望,良川賢斗. 有孔LP鋼板の極限強度解析[R]. 長野工業高等専門学校紀要 48 号, 2014: 1-7.

- (NAGATO T, WATANABE N, YOSHIKAWA K. Ultimate strength analysis of the existence aperture LP steel plates [R]. Summary No. 48 of Nagano industry institute of technology, 2014: 1 - 7.)
- [9] MURAKAMI S, NOBUO N. Ultimate strength evaluation of tapered plate in compression [C]. Proceedings of the 5th International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures. Nagoya: [s. n.], 1997: 133 - 140.
- [10] 熊野拓志, 鈴木康夫, 北原武嗣, 等. テーパー鋼板およびそれを用いた箱桁の初期不整に関する実測と考察[J]. 構造工学論文集, 2009, 55A: 977 - 984.
(TAKUJI K, YASUO S, TAKESHI K, et al. Measurements of initial imperfections of longitudinally profiled steel plates and their applied box cross section [J]. Journal of structural engineering, 2009, 55A: 977 - 984.)
- [11] 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.
- [12] 橋本国太郎, 杉浦邦征, 山口隆司, 等. 幅方向テーパー鋼板を用いた箱型断面鋼製橋脚の耐震性能に関する研究[J]. 土木学会論文集中 A1, 2011, 67(1): 177 - 192.
(KUNITARO H, KUNITOMO S, TAKASHI Y, et al. Study on seismic performance of a box sectional steel pier with transversely profiled plates [J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers A1, 2011, 67(1): 177 - 192.)
- [13] 王星堯. LP 钢板柱抗震性能研究[D]. 中国台北: 台湾科技大学, 2013.
(WANG Xingyao. Steel bridge columns with longitudinally profiled steel plate for seismic resistance [D]. Taipei: China Taiwan University of Science and Technology, 2013.)
- [14] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
(WANG Xinmin. ANSYS numerical analysis of engineering structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.)
- [15] 王元清, 王中兴, 殷福新, 等. 铝合金受弯构件局部稳定性能的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(4): 577 - 583.
(WANG Yuanqing, WANG Zhongxing, YIN Fuxin, et al. Finite element analysis for local buckling behavior of aluminum alloy flexible members [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(4): 577 - 583.)
- [16] 张耀春, 周绪红. 钢结构设计原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
(ZHANG Yaochun, ZHOU Xuhong. Design theory of steel structure [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.)
- [17] 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, 4(32): 17 - 22.
(WANG Yuanqing, LIU Xiaoling, LIU Ming, et al. Experimental research on mechanical properties of longitudinally profiled steel plate [J]. Steel construction, 2017, 4(32): 17 - 22.)
- [18] 班慧勇. 高强度钢材轴心受压构件整体稳定性能与设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
(BAN Huiyong. Research on the overall buckling behavior and design method of high strength steel columns under axial compression [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.)
- [19] 高博. 焊接工字形不锈钢受弯构件变形性能及稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
(GAO Bo. Research on nonlinear deformation and stability of stainless steel flexural members with welded I-sections [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.)
- [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.)