

文章编号:1671-1637(2014)05-0019-10

## 混合设计的高性能钢梁抗弯性能试验

段 兰,唐友明,王春生,王继明

(长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**采用两点加载的方式,对3片混合设计的高性能HPS 485W工字钢梁进行抗弯性能试验,分析了截面几何参数对试验梁抗弯承载力、弹塑性变形和破坏形态的影响。结合跨中单点加载的试验结果,对比分析了不同加载方式对试验梁抗弯承载力的影响,建立了能够准确模拟试验梁抗弯过程的有限元模型,在非厚实截面范围内对混合设计的高性能钢模型梁进行了关键参数的数值分析。分析结果表明:对两点加载的试验梁,抗弯破坏形态为纯弯段区出现受压翼缘与受压区腹板的局部屈曲;随着翼缘宽厚比的降低,钢梁的塑性转动能力明显提高;随着腹板高厚比的增加,钢梁的抗弯强度和延性均会降低;对相同几何尺寸的模型梁,加载方式改变时,钢梁的抗弯过程相似,但控制钢梁失效的破坏形态不同;对混合设计的钢梁,建议腹板与翼缘材料强度等级差不大于2个强度等级。

**关键词:**高性能钢梁;混合设计;抗弯试验;有限元分析;抗弯强度;延性

**中图分类号:**U448.36

**文献标志码:**A

## Bending behavior test of hybrid high performance steel beam

DUAN Lan, TANG You-ming, WANG Chun-sheng, WANG Ji-ming

(Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University,  
Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Bending behavior tests were conducted for 3 hybrid high performance HPS 485W I-shape steel beams with the method of two-point loading. The influences of cross profile geometric parameters on bending capacity, elastic and plastic deformations, and failure mode of test beam were analyzed. Considering the test results under midspan one-point loading, the influences of different loading methods on bending capacity of test beam were analyzed. Finite element models were established to accurately simulate bending procedures of test beams. Parameter analysis was conducted for hybrid high performance steel beams under the condition of non-compact cross profile. Analysis result shows that the failure modes of two-point loading test beams are local bucklings at both compressive flange and compressive web in pure bending field. The plastic rotation capacity of steel beam increases obviously with the decrease of flange width to thickness ratio. The bending capacity and ductility decrease with the increase of web height to thickness ratio. For beams with same dimension, the bending procedures are similar when adopting different loading methods, but the buckling modes marking the failure of beam are different. It is suggested for hybrid steel beam that the steel grade of web should be not beyond two grades lower than the strength grade of flange. 5 tabs, 18 figs, 18 refs.

**Key words:** high performance steel beam; hybrid design; bending test; finite element analysis;

收稿日期:2014-04-20

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0121);霍英东青年教师基金项目(101078);交通运输部科技项目(2011 318 494 890)

作者简介:段 兰(1985-),女,陕西乾县人,长安大学讲师,工学博士,从事钢桥与组合结构桥梁研究。

bending capacity; ductility

**Author resume:** DUAN Lan (1985-), female, lecturer, PhD, +86-29-82334830, DL0310DL@163.com.

## 0 引 言

随着钢材生产工艺的进步,可以生产出材料综合性能优越的高性能钢(HPS)。HPS 具有强度高、可焊性好、韧性高、耐候等特点,这些优越的材料特性实现了高性能钢桥的结构优势<sup>[1-3]</sup>;高强度提高了主梁的承载能力,实现了结构设计的轻巧简洁,增大了结构的跨越能力;提高的可焊性降低了氢致开裂的机率,降低了预热温度,在保证焊接质量的前提下节约了钢桥的制造成本;较低的韧脆转变温度扩大了高性能钢桥的应用范围,高性能钢桥可服役于温度更低的严寒地区,降低了钢桥低温脆断的机率;优良的韧性提高了桥梁构件耐受疲劳裂纹的能力,为结构的安全检测与加固争取了时间,提高了结构的安全度。目前,美国的 40 多个州已建设了约 250 座高性能钢桥,这些处于正常使用阶段的高性能钢桥体现了上述结构优势,证明了高性能钢桥的全寿命周期经济性<sup>[4]</sup>。目前,高性能钢已被纳入美国 AASHTO 桥梁设计规范。21 世纪的桥梁设计不仅重视结构的安全耐久性和全寿命经济性,而且更加强调降低对不可再生资源的消耗,提倡工业和建筑废料的回收再利用。高性能钢桥的建设符合可持续工程和绿色工程的新概念,是钢桥的重要发展方向。

为了推广高性能钢桥的安全建设,各国学者致力于开展关于高性能钢梁的研究工作。Earls 等对高性能钢工字钢梁抗弯性能进行了有限元参数分析,研究了模型梁的破坏形态,提出了新的侧向支撑布置形式,分析了翼缘和腹板纤细程度与截面转动能力之间的关系,采用调整后的侧向支撑形式,不仅将模型梁的转动能力提高了 2 倍多,而且在一定程度上减小了屈曲模态的耦合现象<sup>[5-7]</sup>;Salem 以高性能钢 HPS 690W 工字钢梁为研究对象,对 5 片高性能钢试验梁展开了抗弯试验研究,测量了试验梁翼缘和腹板的残余应力和几何初始缺陷,建立了残余应力分布模型和几何初始缺陷分布模型,并探讨了 AASHTO LRFD 对 HPS 690W 的适用性<sup>[8]</sup>;Barth 等对高强度工字钢梁在跨中采用单点加载,进行了抗弯试验研究<sup>[9-10]</sup>,试验梁的翼缘和腹板均采用 ASTM A572 Grade 50,翼缘和腹板的实际屈服强

度分别为 427、485 MPa,试验后发现试验梁的破坏形态包含了翼缘局部屈曲、腹板局部屈曲和侧向扭转屈曲等相互作用;中国铁道科学研究院对用国产新型 500 MPa 级高性能钢(Q500qE)设计的高强度工字钢梁进行了极限承载力研究,试验结果表明高性能钢 Q500qE 钢梁可按照 500 MPa 屈服强度进行设计<sup>[11-12]</sup>;长安大学针对系列高强度、高性能钢 Q420、Q500 和 HPS 485W 开展了高强度、高性能钢梁和钢-混凝土组合梁受力性能研究,已完成混合设计的高性能钢梁抗弯试验研究,试验梁的翼缘采用国产高性能钢 HPS 485W,而腹板采用强度等级较低的传统钢材(如 Q235、Q345),分析了高性能钢梁的抗弯承载力、弹塑性变形,捕捉并分析了试验梁屈曲的发展过程与位置<sup>[13-15]</sup>。

与普通强度钢梁相比,由于高性能钢强度高,高性能钢梁的截面可设计得更加纤细,从而发挥高强度优势。由于采用较纤细的截面形式,高性能钢梁的稳定问题更加突出,故需确定适用于高性能钢梁的尺寸设计范围。本文以国产高性能钢 HPS 485W 为研究对象,采用两点加载的方式,对 3 片高性能钢梁进行抗弯试验,分析了试验梁的抗弯过程与纯弯段的破坏形态。然后,以试验结果为校核依据,采用有限元软件 ANSYS 建立能够准确模拟高性能钢试验梁抗弯性能和破坏形态的有限元模型。最后,对影响高性能钢梁抗弯性能的关键参数进行计算分析,包括翼缘宽厚比、腹板高厚比和材料匹配效应,研究高性能钢梁合理的截面设计范围,提出高性能钢梁的设计建议,为中国建立高性能钢桥设计规范提供研究基础。

## 1 高性能钢梁的抗弯性能试验

基于混合设计的概念,设计并加工了 3 片高性能钢抗弯试验梁,在有效的侧向约束条件下,采用两点加载的方式进行加载,详细分析试验梁的抗弯行为和破坏形态。

### 1.1 混合设计的概念

混合设计指根据结构受力情况配置不同型号的钢材,提高了材料利用率,实现了结构的最优化设计<sup>[16]</sup>。与全截面采用 HPS 485W 的高性能钢梁相比,混合设计的高性能钢梁体现了很好的经济性。

例如,美国宾夕法尼亚州的 Ford 桥是一座采用焊接钢板主梁的三跨连续梁桥,基于混合设计的概念,在负弯矩区使用了 HPS 485W,而在其他区域采用强度较低的 50W 钢(名义屈服强度为 345 MPa)。这种混合设计使桥梁用钢量减少了 20%,并且使主梁截面可以采用同一高度而不需加大中支点处的梁高,避免了变化的腹板厚度,从而避免了成本高的纵向腹板栓接。

本文研究的工字钢梁翼缘板采用高性能钢

HPS 485W,腹板采用传统桥梁钢 Q345。混合设计和等强设计工字钢梁的抗弯过程见图 1、2<sup>[17-18]</sup>。图 1、2 中, $b_f$ 、 $t_f$  分别为翼缘的宽度和厚度; $h_w$ 、 $t_w$  分别为腹板的高度和厚度; $\sigma_{yf}$ 、 $\sigma_{yw}$  分别为翼缘和腹板的屈服强度; $\sigma_y$  为等强翼缘和腹板的屈服强度。对比图 1、2 可知,在抗弯过程中,混合钢梁的低强度腹板外侧首先屈服,随后高强翼缘逐渐屈服,而等强钢梁的翼缘最外侧纤维首先屈服,继而翼缘完全屈服,屈服区域逐渐向腹板发展。

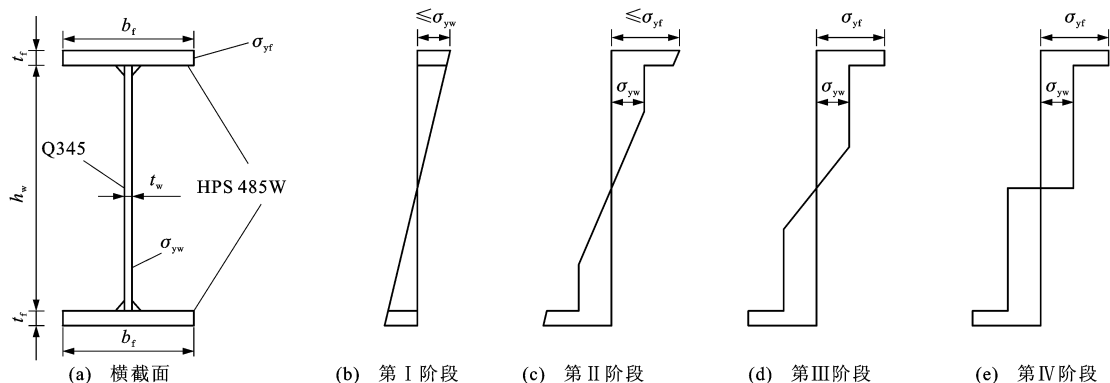


图 1 混合钢梁横截面应力分布

Fig. 1 Stress distribution of hybrid steel beam cross profile

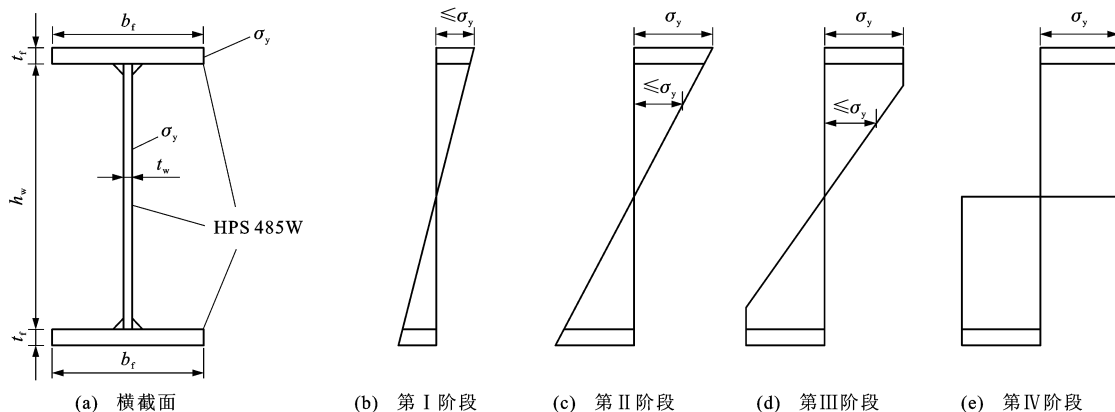


图 2 等强钢梁横截面应力分布

Fig. 2 Stress distribution of homogenous strength steel beam cross profile

## 1.2 试验过程

考虑影响高性能钢梁抗弯性能的关键几何参数(翼缘宽厚比效应和腹板高厚比效应等),设计并制造了 3 片试验梁。采用两点加载的方式进行试验加载,重点研究高性能钢梁的抗弯承载能力和纯弯段的受力性能,加载间距为 0.6 m。试验梁的翼缘均采用国产高性能钢 HPS 485W,而腹板采用强度较低的传统桥梁用钢 Q345,加劲肋采用 Q235,试验梁的几何尺寸、加载与约束位置分别见表 1、图 3。

为了防止侧倾失稳的过早发生,在跨中、距跨中一倍梁高附近以及支点附近共设置了 5 个侧向约

表 1 抗弯试验梁实际尺寸

Tab. 1 Actual dimensions of bending specimens mm

编号	梁长	$b_f$	$t_f$	$h_w$	$t_w$
1	3 300	130	13.2	280	7.5
2	3 300	220	13.2	280	7.5
3	3 300	130	13.2	350	7.5

束,从而保证试验梁塑性阶段受力性能的测试。在试验梁上布置分配横梁,荷载由千斤顶通过分配横梁传递至试验梁,试验装置见图 4。抗弯试验开始之前,对试验梁进行若干次预加载,检查试验装置各部分正常工作,然后进行正式加载。在初始加载阶

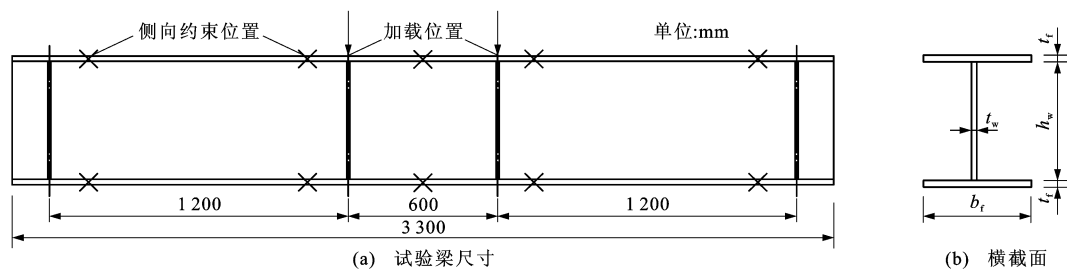


图3 钢梁加载试验

Fig. 3 Loading test of steel beam



图4 试验装置

Fig. 4 Testing device

段,试验梁的弯矩增长与梁端转角增长呈线性关系,此时受力最大的纯弯段翼缘与腹板均未屈服,试验梁处于全截面弹性阶段。随着荷载的继续增加,纯弯段的受压区低强腹板达到屈服应力,随后高强翼缘逐渐屈服,弯矩( $M$ )逐渐增长达到塑性弯矩( $M_p$ ),此时试验梁的荷载与挠度曲线斜率有所下降。当 $M > M_p$ 之后,随着荷载的缓慢增长,试验梁的非弹性变形显著增加,弯矩-转角曲线趋于平缓发展,直到达到极限承载能力( $M_u$ )。达到 $M_u$ 以后,试验梁缓慢卸载,该阶段跨中挠度依然不断增加。当弯矩卸载再次达到 $M_p$ 时,试验梁发生局部屈曲破坏,随后人为卸载。试验后,观察到3片试验梁的典型破坏形态均为纯弯段受压翼缘和受压区腹板的局部屈曲。

### 1.3 试验结果分析

基于试验梁的弯矩-转角曲线,对比分析1号和2号试验梁的抗弯过程。图5(a)中的纵坐标为试验梁纯弯段的弯矩与塑性弯矩之比( $M/M_p$ ),横坐标为梁端平均转角与塑性转角之比( $\theta/\theta_p$ );图5(b)中的纵坐标为试验梁的荷载( $F$ ),横坐标为跨中挠度( $\Delta$ )。

由图5可知,对翼缘宽厚比较小的1号试验梁,试验梁在全截面屈服之后具有明显的非弹性变形能力。而对翼缘宽厚比较大的2号试验梁,因为较大的翼缘宽厚比促使非弹性阶段受压翼缘局部屈曲的

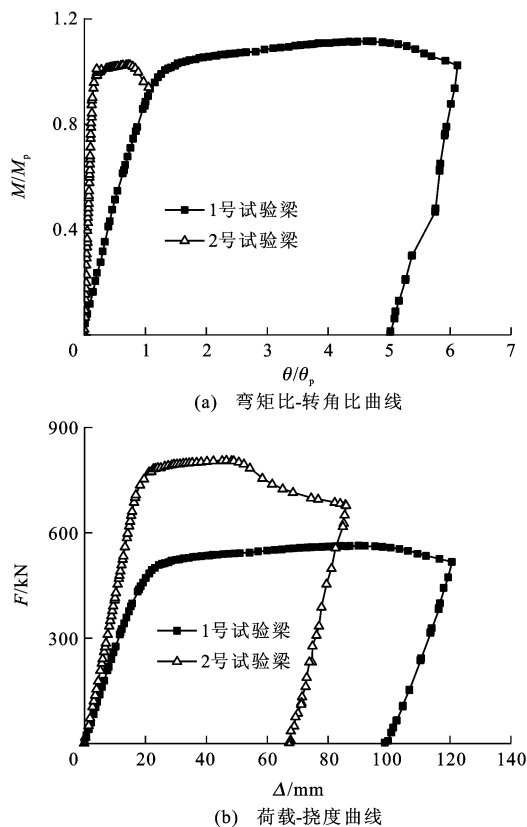


图5 1号和2号试验梁的抗弯过程

Fig. 5 Bending procedures of test beams 1 and 2

形成,翼缘的局部屈曲促使试验梁的破坏,故2号试验梁的非弹性变形较小。可见,随着翼缘宽厚比的增大,在 $M > M_p$ 阶段,工字钢梁的非弹性变形显著减小,试验梁的转动能力降低。对两加载点之间的纯弯段,随着受压翼缘局部屈曲的不断发展,试验梁的截面抗弯刚度有所降低,从而促使了试验梁的破坏与卸载。在有效的侧向约束条件下,1号和2号试验梁的塑性充分发展,试验后观察到纯弯段区域的受压翼缘和受压区腹板均出现明显的局部屈曲。

试验后,观察1号和2号试验梁的受压翼缘局部屈曲形态。由图6可知,1号试验梁纯弯段的西南(SW)侧上翼缘出现下凹的屈曲半波,屈曲波幅为2.4 cm;东南侧(SE)上翼缘向南侧倾,向南侧倾的

最大距离为 5 mm,该点距跨中 15 cm;东北侧(NE)翼缘发生轻微的上凸屈曲变形,向上凸出最大位移为 4 mm;西北侧(NW)翼缘向北侧倾,向北最大侧倾位移为 1 cm。由图 7 可知,2 号试验梁纯弯段的南侧受压翼缘出现上凸的屈曲半波,上凸幅值为 10 mm;北侧受压翼缘出现下凹的屈曲半波,下凹幅值为 10.4 mm。对比破坏形态可知,翼缘宽厚比较大的 2 号试验梁翼缘局部屈曲变形更加显著。

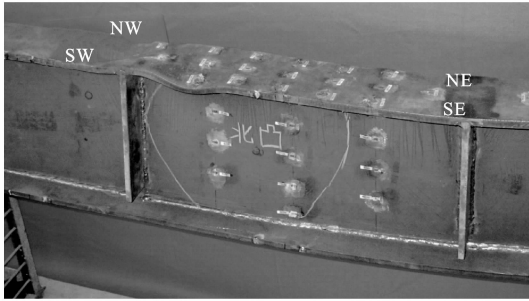


图 6 1 号试验梁破坏形态

Fig. 6 Failure mode of test beam 1

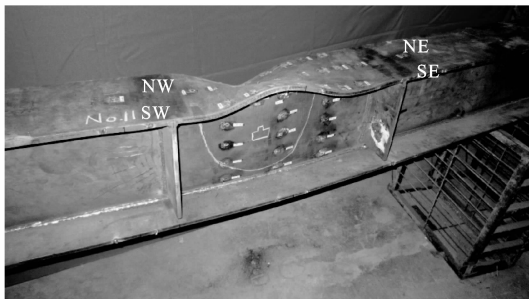
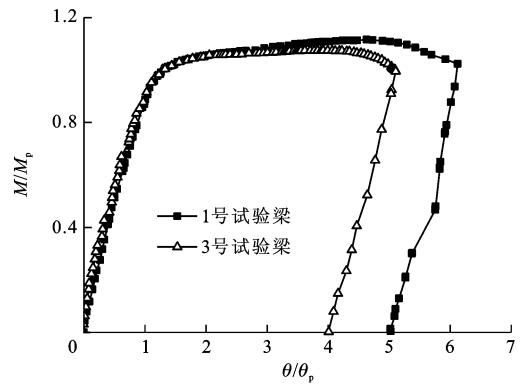


图 7 2 号试验梁破坏形态

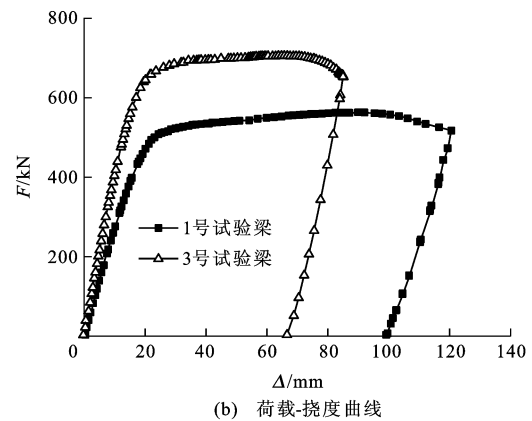
Fig. 7 Failure mode of test beam 2

对比 1 号和 3 号试验梁的试验结果,分析腹板高厚比效应对试验梁抗弯强度和延性的影响。由图 8 可知,高性能钢梁的转动能力随着腹板高厚比的增大而减小。在试验梁抗弯过程中,腹板的面外变形随着荷载的增加不断增大,接近极限弯矩时,往往观察到纯弯段受压区翼缘的局部屈曲。由于翼缘的屈曲减小了试验梁截面的抗弯刚度,继而由腹板的轴向力来提供抗力。在卸载阶段的后期,试验梁往往发生腹板局部屈曲,此时整个受压翼缘向下弯曲到腹板中,降低了上下翼缘的刚度和截面的惯性矩。

在试验过程中,将试验梁沿东西方向放置。为了分析腹板局部屈曲的发展,对 1 号和 3 号试验梁,距跨中 150 mm 的东西两侧截面处,在腹板南北两侧同一位置布置应变测点 SW4~SW8,其中测点 SW4 和 SW5 位于受压区腹板,测点 SW6 位于腹板高度中心处,测点 SW7 和 SW8 位于受拉区腹板。



(a) 弯矩比-转角比曲线



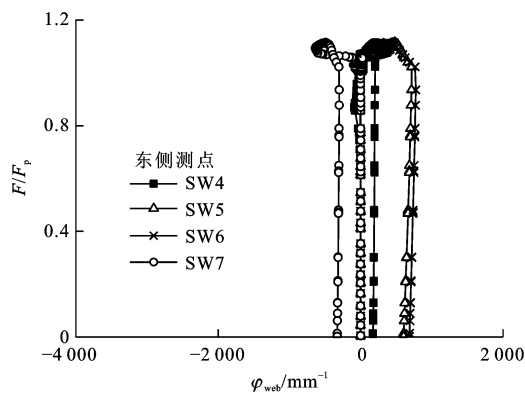
(b) 荷载-挠度曲线

图 8 1 号和 3 号试验梁抗弯过程

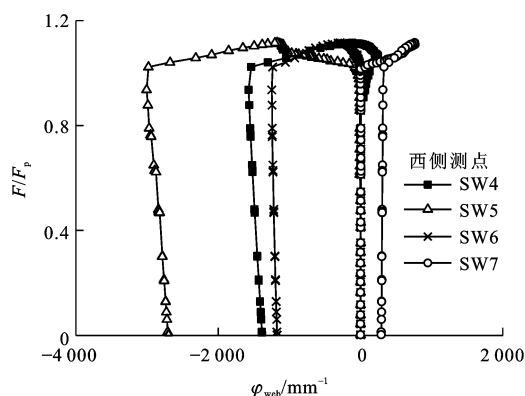
Fig. 8 Bending procedures of test beams 1 and 3

图 9、10 给出了试验过程中的腹板荷载比-局部曲率曲线。图 9、10 中,  $F_p$  为钢梁达到塑性弯矩时对应的荷载;  $\varphi_{web}$  为腹板的局部屈曲曲率,等于南侧应变减去北侧应变之差除以腹板厚度,其绝对值的大小反映了腹板屈曲程度的大小,  $\varphi_{web}$  为正值表示腹板向南凸,  $\varphi_{web}$  为负值表示腹板向北凸。由图 9 可知, 1 号梁东侧截面腹板曲率在整个受力过程中很小,腹板没有明显的局部屈曲变形。当  $F/F_p > 1$  时,西侧截面的受压区(SW5 测点处)曲率快速增长,曲率为负,说明该处出现向北的局部屈曲。由图 10 可知,当  $F/F_p > 1$  时,3 号梁的西侧受压区腹板曲率(测点 SW5 和 SW6)快速增长,曲率为负,说明西侧腹板发生向北的局部屈曲变形。与西侧腹板曲率相比,东侧腹板的曲率相对较小,表明西侧腹板屈曲变形相对显著。随着人为卸载,腹板的各曲率测点数值减小。

结合前期已完成的试验结果,与本文的 2 号试验梁进行对比,分析加载方式对试验梁抗弯性能的影响,试验梁尺寸见表 2,2 片试验梁采用相同的几何尺寸和钢材,但前期完成的试验梁采用跨中单点加载,可以模拟连续梁中支点负弯矩区的受力性能,本文 2 号试验梁采用两点加载的方式,重点研究纯



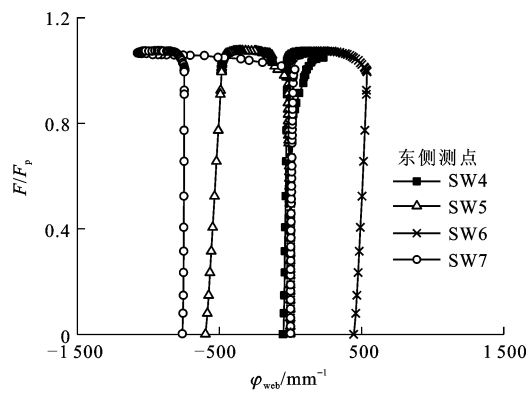
(a) 东侧腹板



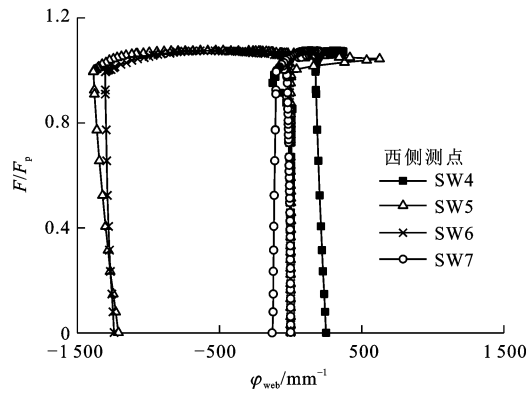
(b) 西侧腹板

图 9 1 号梁腹板荷载比-局部曲率曲线

Fig. 9 Load ratio and local curvature curves of web for beam 1



(a) 东侧腹板



(b) 西侧腹板

图 10 3 号梁腹板荷载比-局部曲率曲线

Fig. 10 Load ratio and local curvature curves of web for beam 3

表 2 不同加载方式的试验梁

Tab. 2 Test beams with different loading methods

试验梁	$b_f/\text{mm}$	$t_f/\text{mm}$	$h_w/\text{mm}$	$t_w/\text{mm}$	梁长/mm	翼缘材料	腹板材料	加载方式
前期试验梁	220	13.2	280	8.4	3 300	HPS 485W	Q345	单点加载
本文 2 号梁	220	13.2	280	8.6	3 300	HPS 485W	Q345	两点加载

弯段钢梁的受力性能。

试验梁的抗弯过程可用弯矩比-转角比曲线表示,见图 11。由试验结果可知,单点加载和两点加载的试验梁总体受力过程相似。对跨中单点加载的试验梁,随着荷载的增加,屈服范围从跨中向两侧逐渐扩展。当翼缘的屈服范围达到一个屈曲波长时,受压翼缘发生局部屈曲,此时试验梁仍然具有承载能力。试验梁发生局部屈曲后导致刚度降低,促使试验梁发生侧倾扭转,导致试验梁卸载。对采用两点加载的纯弯钢梁,随着屈服范围的不断扩展,试验梁弯矩达到塑性弯矩  $M_p$ 。在翼缘初始缺陷的影响下,未支撑段的受压翼缘开始侧向变形,此时试验梁仍然保持承载能力,直到发生局部屈曲,试验梁开始卸载。由试验梁破坏形态可知,单点加载的试验梁的典型破坏形态为跨中加载点附近的受压翼缘和受压区腹板发生局部屈

曲;两点加载的试验梁的典型破坏形态为两加载点之间的纯弯段区出现受压翼缘和受压区腹板的局部屈曲。

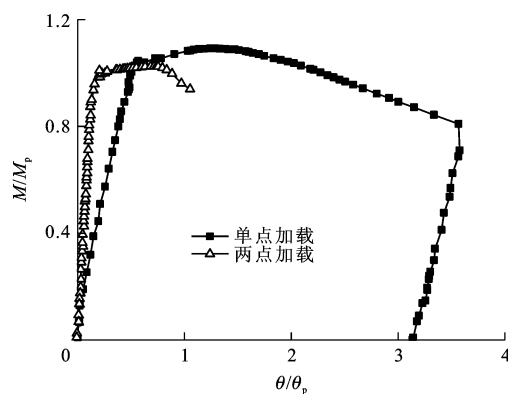


图 11 不同加载方式下试验梁的抗弯过程

Fig. 11 Bending procedures of test beams with different loading methods

2 有限元模型的建立与校核

采用有限元模型程序 ANSYS 建模时,选用壳单元 Shell181 进行钢梁的模拟,考虑钢材真实的材料应力-应变关系曲线、实际的侧向约束条件,并计入残余应力影响,以建立能够有效模拟试验梁抗弯过程和破坏形态的有限元模型。

为了实现有限元对试验梁试验结果的有效模拟,必须合理考虑钢材的本构关系,故在 12 mm 厚的高性能 HPS 485W 钢板上取样,进行拉伸试验,拉伸试样编号依次为 HPS 12-1、HPS 12-2、HPS 12-3,试样形态见图 12。基于 HPS 485W 拉伸试验获得工程应力-应变( $\sigma\epsilon$ )曲线(图 13),将此曲线转换为真实应力-自然应变、真实应力-自然塑性应变曲线,最终确定 HPS 485W 的简化多直线弹塑性等向强化本构模型,见表 3<sup>[13]</sup>。对较低强度的 Q345 腹板,采用双线性等向强化本构模型。Q345 腹板的实际屈服应力为 400 MPa,弹性模量为 206 GPa,切线模量为 2.06 GPa。

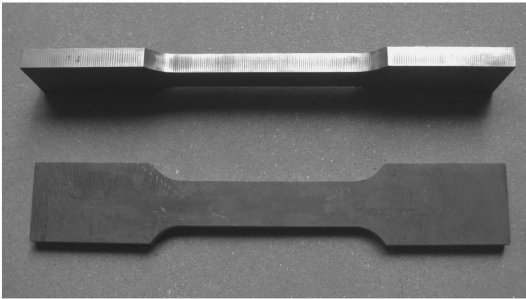


图 12 拉伸试样  
Fig. 12 Tensile specimens

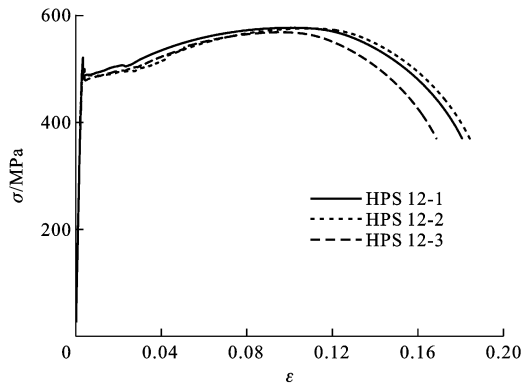


图 13 工程应力-应变曲线  
Fig. 13 Engineering stress and strain curves

本文的试验梁采用火焰切割的方式切割下料,然后焊接制造试验梁。在试验梁的加工制造过程中,由于塑性变形和不均匀冷却,必然在结构中产生残余应力,而残余应力的存在将影响钢梁初始屈服

表 3 高性能钢 HPS 485W 应力-应变取值  
Tab. 3 Stress and strain values for high performance steel HPS 485W

参数	应力/MPa	应变
屈服强度 $\sigma_y$	485.26	0.002 545
强化强度 $\sigma_{st}$	493.71	0.011 110
极限强度 $\sigma_u$	632.60	0.096 818
破断强度 $\sigma_r$	707.83	0.163 930

阶段的受力性能。为了考虑残余应力的影响,在有限元模拟时,采用 Salem 提出的工字钢试验梁残余应力分布模型(图 14),该残余应力分布模型是针对采用火焰切割加工方式制作的钢梁,适用于本文的模型分析<sup>[8]</sup>。

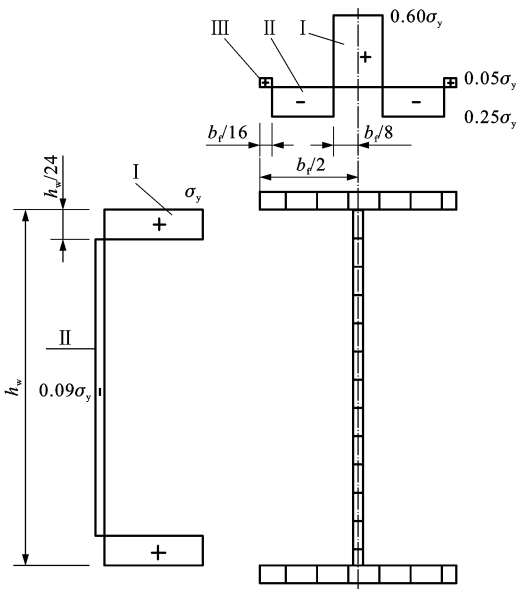


图 14 残余应力分布模型  
Fig. 14 Residual stress distribution model

试验过程中,在跨中、跨中两侧一倍梁高处及支座附近共设 5 个侧向约束,在试验梁的上下翼缘和支撑之间预留 2 mm 间隙。当试验梁发生侧向位移时,该初始间隙减小,直到试验梁的翼缘与侧向约束装置接触。在试验梁与侧向约束装置的接触面处采用了光滑的四氟滑板,以减少两者之间的摩擦力。随着试验梁进一步的侧向变形,侧向约束装置与试验梁的上下翼缘直接接触,抵抗试验梁上下翼缘的面外荷载。对侧向支撑装置,可采用弹簧单元(COMBIN14)模拟。

综合考虑上述要点,建立有限元模型,以 1 号试验梁的试验结果为例,进行有限元模型校核。图 15 给出了 1 号试验梁的试验结果与有限元计算结果的对比。由图 15 可知,有限元模型能够有效模拟试验梁的抗弯过程,仅在试验梁的卸载阶段,有限元计算

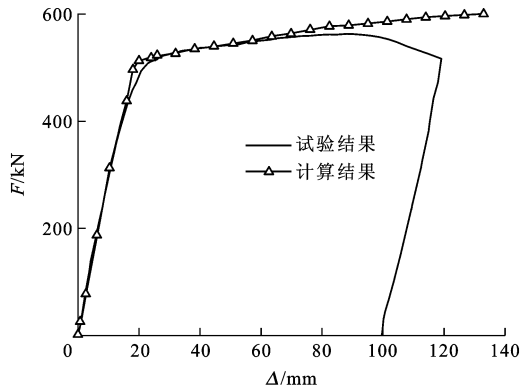


图 15 1 号梁荷载-挠度曲线

Fig. 15 Load and deformation curves of beam 1

结果与试验结果偏差较大,这是因为试验梁此时的塑性充分发展,试验梁中出现了塑性铰,导致承载力下降,而有限元模型在简化的材料本构关系和理想的侧向约束下依然具有承载能力。

### 3 高性能钢梁有限元参数分析

美国 AASHTO LRFD 桥梁设计规范将工字钢梁按照翼缘通用宽厚比( $\lambda_f = (b_f/2t_f) \cdot (\sigma_{yf}/E)^{0.5}$ )和腹板通用高厚比( $\lambda_w = (h_w/t_w) \cdot (\sigma_{yw}/E)^{0.5}$ )分为厚实截面、非厚实截面和纤细截面,其中  $E$  为钢材弹性模量。对于厚实截面,翼缘和腹板的截面尺寸满足  $\lambda_f \leq 0.38$  和  $\lambda_w \leq 3.76$ ;对非厚实截面,翼缘和腹板的截面尺寸满足  $0.38 < \lambda_f \leq 0.56, 3.76 < \lambda_w \leq 5.70$ , 且  $9.35\lambda_f + \lambda_w \leq 6.25$ ;对纤细截面,翼缘和腹板的截面尺寸满足  $\lambda_f > 0.56$  或  $\lambda_w > 5.70$ 。实际桥梁工程中,腹板一般高而薄,基本上介于厚实截面与非厚实截面之间。采用校核后的有限元模型,扩大尺寸范围进行变参数分析,在非厚实截面范围内进行数值计算,分析各参数对高性能钢梁抗弯性能的影响规律。

#### 3.1 翼缘宽厚比

模型梁的翼缘均采用 HPS 485W,腹板均采用 Q420,仅改变模型梁的翼缘厚度,对翼缘通用宽厚比( $\lambda_f$ )进行变参数分析,模型梁的几何尺寸见表 4。由表 4 可知,模型梁的腹板采用厚实腹板( $\lambda_w = 2.83$ ),翼缘在厚实与非厚实翼缘范围内改变。

有限元模型计算结果见图 16。随着模型梁的  $\lambda_f$  从 0.50 递减到 0.25,模型梁的抗弯强度增加,且非弹性阶转动能力逐渐增加。通过数值计算结果发现,当  $\lambda_f > 0.45$  时,模型梁的抗弯强度和延性主要由受压翼缘的局部屈曲控制;当  $0.200 < \lambda_f < 0.382$  时,模型梁的破坏形态为受压翼缘的局部屈曲和受压区腹板的屈曲,腹板的屈曲程度随着  $\lambda_f$  减小而更

表 4 考虑翼缘尺寸效应的模型梁几何尺寸

Tab. 4 Model beam dimensions considering flange dimension effect

编号	净跨/mm	$b_f$ /mm	$t_f$ /mm	$h_w$ /mm	$t_w$ /mm	$\lambda_f$	$\lambda_w$
F-1	7 100	250	12.63	675	10.77	0.500	2.83
F-2	7 100	250	14.03	675	10.77	0.450	2.83
F-3	7 100	250	16.53	675	10.77	0.382	2.83
F-4	7 100	250	18.04	675	10.77	0.350	2.83
F-5	8 100	250	21.05	675	10.77	0.300	2.83
F-6	9 100	250	25.26	675	10.77	0.250	2.83

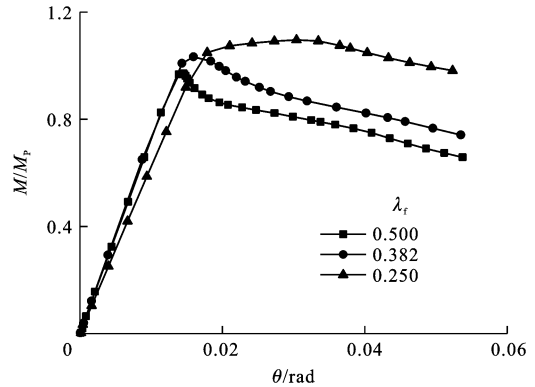


图 16 考虑翼缘尺寸效应的跨中弯矩比-平均转角曲线

Fig. 16 Midspan moment ratio and average rotation curves considering flange dimension effect

加显著;当  $\lambda_f < 0.15$  时,腹板屈曲对模型梁的抗弯强度与延性起到控制作用,此时模型梁失效主要是腹板屈曲导致对受压翼缘的支撑刚度降低,最终导致翼缘屈曲破坏。

#### 3.2 腹板高厚比

模型梁的翼缘均采用 HPS 485W,腹板均采用 Q420,仅改变腹板厚度,对腹板通用高厚比( $\lambda_w$ )进行变参数分析,并参考 AASHTO LRFD 规范进行模型梁设计(表 5)。

表 5 考虑腹板尺寸效应的模型梁几何尺寸

Tab. 5 Model beam dimensions considering web dimension effect

编号	净跨/mm	$b_f$ /mm	$t_f$ /mm	$h_w$ /mm	$t_w$ /mm	$\lambda_f$	$\lambda_w$
W-1	8 100	250	16.53	675	8.063	0.382	3.78
W-2	9 500	250	16.53	675	6.773	0.382	4.50
W-3	11 420	250	16.53	675	5.542	0.382	5.50
W-4	8 100	250	16.53	675	8.063	0.250	3.78
W-5	9 500	250	16.53	675	6.772	0.250	4.50
W-6	11 420	250	16.53	675	5.542	0.250	5.50

有限元计算结果见图 17,当  $\lambda_f$  为 0.382 时,随着  $\lambda_w$  由 2.83 增加至 5.50,模型梁的抗弯强度由  $1.03M_p$  下降至  $M_p$ ,抗弯强度与延性变化比较显著,但是所有模型梁转动能力均远小于 3。由图 17(b)可知,当  $\lambda_f$  为 0.250 时,随着  $\lambda_w$  由 2.83 增



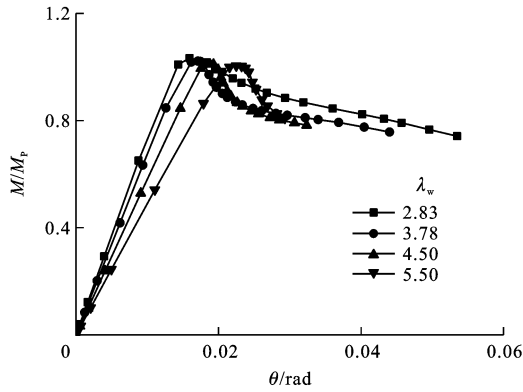
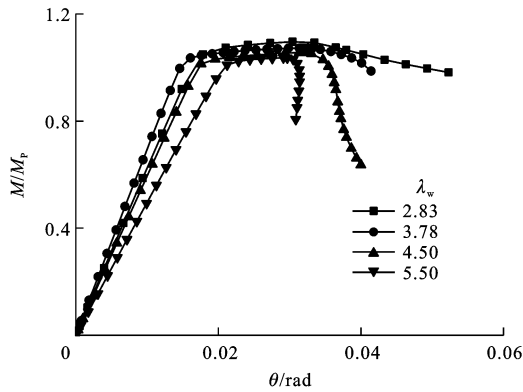
(a)  $\lambda_r$ 为0.382的模型梁(b)  $\lambda_r$ 为0.250的模型梁

图 17 考虑腹板尺寸效应的跨中弯矩比-平均转角曲线

Fig. 17 Midspan moment ratio and average rotation curves considering web dimension effect

加至 5.50, 模型梁的抗弯强度由  $1.10M_p$  下降至  $1.02M_p$ , 可见, 随着腹板高厚比的增加, 模型梁的强度和延性均会降低, 这是因为随着腹板高厚比的增加, 促使腹板较早发生屈曲。一旦腹板开始卸载, 弯矩传递到翼缘, 将由翼缘承受腹板卸载的弯矩。此外, 在腹板屈曲引起的扭转弯矩和侧向力的作用下, 促使受压翼缘发生屈曲。

### 3.3 材料匹配效应的影响

选用模型梁 F-3 和 F-6 的几何尺寸, 将高性能钢 HPS 485W 翼缘与不同强度等级的腹板 (Q420、Q370、Q345 和 Q235) 进行匹配, 研究翼缘与腹板材料的匹配效应对混合梁抗弯强度和延性的影响。模型梁的腹板高厚比值相同 ( $h_w/t_w = 62.675$ ), 但腹板通用高厚比  $\lambda_w$  不同 (从 Q420 到 Q235 依次为 2.83、2.66、2.56、2.12)。有限元模型分析结果见图 18。

由计算结果可知, 对相同几何尺寸的模型梁, 随着腹板材料强度的下降, 模型梁的抗弯承载能力 ( $M/M_p$ ) 增大,  $M > M_p$  阶段的变形能力也增大, 这是由于随着腹板强度的降低,  $\lambda_w$  随之减小, 从而提高了截面的厚实度。对比图 18(a)、(b) 可知, 对翼

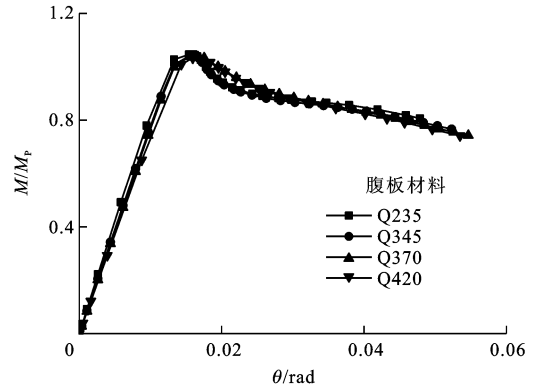
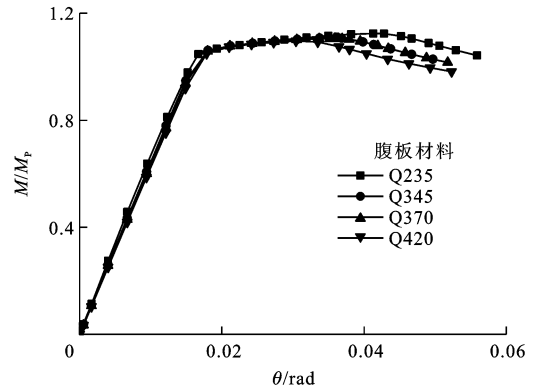
(a)  $\lambda_r$ 为0.382的模型梁(b)  $\lambda_r$ 为0.250的模型梁

图 18 不同材料匹配下的跨中弯矩比与平均转角曲线

Fig. 18 Middle span moment ratio versus average rotation curves with different material matches

缘通用宽厚比较小的模型梁, 腹板强度变化对强度与延性改变更显著。模型梁均采用较高强度的翼缘和较低强度的腹板, 有限元计算过程中, 低强度腹板首先发生屈服, 随着不断加载, 腹板刚度显著减小, 模型梁残余变形较大。因而进行混合钢梁设计时, 翼缘和腹板存在一定的强度匹配范围, 建议腹板与翼缘钢材强度等级差不大于两个强度等级, 从而避免因腹板屈服范围过大引起的不可恢复变形, 即进行混合钢梁设计时, HPS 485W 翼缘与 Q345 或 Q420 腹板的匹配比较合理。

## 4 结 语

本文对国产高性能钢 HPS 485W 混合设计工字钢梁在两点加载的方式下进行了抗弯性能试验研究, 并采用有限元程序 ANSYS 建立了能有效模拟试验梁抗弯过程与破坏形态的模型, 采用校核后的有限元模型, 对混合设计的高性能钢模型梁进行了抗弯性能参数分析。试验研究与有限元分析的主要结论如下。

(1) 两点加载的试样梁的典型破坏形态为两加载点之间的纯弯段区出现受压翼缘和受压区腹板

的局部屈曲,试验梁翼缘和腹板的局部屈曲范围随着翼缘通用宽厚比和腹板通用高厚比的增加而显著增大。

(2)翼缘宽厚比是混合设计高性能钢梁塑性转动能力的主要影响因素。随着翼缘宽厚比的降低,在 $M > M_p$ 阶段,工字钢梁的非弹性变形能力显著提高。这是因为翼缘宽厚比增大,促使非弹性阶段受压翼缘局部屈曲的形成,翼缘的局部屈曲促使试验梁破坏。

(3)高性能钢梁的抗弯强度与转动能力随着腹板高厚比的增大而减小,建议混合设计的高性能钢梁腹板通用宽厚比范围为 $3.78 < \lambda_w < 5.70$ 。

(4)跨中单点加载的试验梁首先发生局部屈曲,然后发生侧倾扭转失稳,试验梁破坏;对两点加载的试验梁,即使在理想的侧向约束下,试验梁未支撑段仍有一定程度的侧倾位移,随后发生局部屈曲,局部屈曲的发生标志着试验梁的破坏。

(5)对混合设计的钢梁,翼缘和腹板存在一定的强度匹配范围,建议腹板与翼缘钢材强度等级差不大于两个强度等级,从而避免因腹板屈服范围过大而引起的不可恢复变形。

## 参 考 文 献 :

## References :

- [1] WANG Chun-sheng, DUAN Lan, ZHU Jing-wei, et al. Innovative research of high performance and sustainable steel bridges[C] // Xiamen University. International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Xiamen: Xiamen University, 2011: 951-956.
- [2] LIU Xiao-gang, FAN Jian-sheng, NIE Jian-guo, et al. Behavior of composite rigid frame bridge under bi-directional seismic excitations[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 62-71.
- [3] 陈华婷,张磊,黄艳.美国高性能钢工字形钢板梁新型截面形式研究[J].世界桥梁,2011(5):35-39.  
CHEN Hua-ting, ZHANG Lei, HUANG Yan. Research of innovative section forms of I-shape high performance steel plate beam in the United States[J]. World Bridges, 2011(5): 35-39. (in Chinese)
- [4] AZIZINAMINI A, BARTH K, DEXTER R, et al. High performance steel: research front—historical account of research activities[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(3): 212-217.
- [5] EARLS C J. On the inelastic failure of high strength steel I-shaped beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 49(1): 1-24.
- [6] EARLS C J. Influence of material effects on structural ductility of compact I-shaped beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(11): 1268-1278.
- [7] EARLS C J, SHAH B J. High performance steel bridge girder compactness[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(5/6/7/8): 859-880.
- [8] SALEM E S. Flexural strength and ductility of highway bridge I-girders fabricated from HPS-100W steel[D]. Bethlehem: Lehigh University, 2004.
- [9] BARTH K E, WHITE D W, MOBB B M. Negative bending resistance of HPS70W girders[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 53(1): 1-31.
- [10] BARTH K E. Moment-rotation characteristics for inelastic design of steel bridges beams and girders[D]. West Lafayette: Purdue University, 1996.
- [11] 田越. 500 MPa 级高性能钢(Q500qE)在铁路钢桥中的应用研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010.  
TIAN Yue. Research on 500 MPa class high performance steel (Q500qE) using in railway steel bridges[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2010. (in Chinese)
- [12] 潘永杰,张玉玲,田越,等. Q500qE 高性能钢工型梁极限承载力研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 16-20.  
PAN Yong-jie, ZHANG Yu-ling, TIAN Yue, et al. Study on the ultimate bearing capacity of I-shaped beam made by high performance steel Q500qE[J]. China Railway Science, 2011, 32(3): 16-20. (in Chinese)
- [13] 段兰. 高性能钢 HPS 485W 力学性能及混合钢梁的抗弯性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
DUAN Lan. Mechanical characteristics of high performance steel HPS 485W and bending behavior study of hybrid girder[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [14] 王春生,段兰,王继明,等. 基于混合设计的高性能钢梁抗弯性能及延性试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 81-89.  
WANG Chun-sheng, DUAN Lan, WANG Ji-ming, et al. Bending behavior and ductility test of high performance steel beam based on hybrid design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 81-89. (in Chinese)
- [15] 段兰,张亮,王春生,等. 高强度工字钢梁抗弯性能试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(6): 52-58.  
DUAN Lan, ZHANG Liang, WANG Chun-sheng, et al. Flexural behavior test of high strength steel I beam[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(6): 52-58. (in Chinese)
- [16] BAN H Y, BRADFORD M A. Flexural behaviour of composite beams with high strength steel[J]. Engineering Structures, 2013(56): 1130-1141.
- [17] VELJKOVIC M, JOHANSSON B. Design of hybrid steel girders[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3/4/5): 535-547.
- [18] 娄廷会. 混合钢梁桥初步研究[J]. 公路工程, 2010, 35(1): 37-41.  
LOU Ting-hui. Preliminary study of hybrid steel girder bridges[J]. Highway Engineering, 2010, 35(1): 37-41. (in Chinese)