

螺栓拼接钢梁的抗弯性能

童乐为^{1,3}, 牟晓亮¹, 周 锋^{1,3}, 龚 剑², 黄玉林², 王小安²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海建工集团股份有限公司, 上海 200080;
3. 上海装配式建筑技术集成工程技术研究中心, 上海 200011)

摘要: 对具有螺栓拼接的 H 型钢梁进行抗弯性能试验. 考虑了拼接板上不同螺栓数量对节点性能的影响, 研究了拼接节点的破坏特点、抗弯强度和刚度. 研究发现拼接螺栓的初始滑移对节点后续阶段的承载力和刚度产生了明显不利的影响, 拼接截面应变分布不再符合平截面假定; 相比无拼接 H 型钢梁, 翼缘拼接板受力更大, 钢梁挠度更大; 翼缘拼接板先于 H 型钢梁翼缘进入屈服, 但是拼接节点的极限弯矩试验值可达到 H 型钢梁的全截面屈服弯矩的计算值; 螺栓滑移后的拼接节点不能简单地按照刚接处理. 提出了考虑节点转动刚度影响的 H 型钢梁挠度计算方法与公式, 并得到了试验数据的验证.

关键词: H 型钢梁; 螺栓拼接节点; 抗弯试验; 承载力; 刚度
中图分类号: TU974 **文献标志码:** A

Flexural Behavior of Bolt-Spliced Steel Beams

TONG Lewei^{1,3}, MOU Xiaoliang¹, ZHOU Feng^{1,3},
GONG Jian², HUANG Yulin², WANG Xiaohan²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Construction Group Co. Ltd., Shanghai 200080, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Assembly Building Technology Integration, Shanghai 200011, China)

Abstract: Experiments on the bending behavior of H-steel beams with a bolted splice were conducted, in which the influence of the number of bolts in the splice plate on the connection behavior was considered. The failure mode, bending strength, and rigidity of the bolted splice were investigated. It was found that the initial slip of the bolts had an obviously adverse effect on both load-bearing capacity and rigidity at the subsequent stage. The strain distribution at the cross section of the bolted splice did not accord with the plane-section assumption. The force in flange splice plate and the deflection of the beam were larger than those in the H-steel beam without a bolted splice. The flange splice plate yielded earlier than the flange of H-steel beam, but the experimental value of ultimate bending moment of the bolted splice came up

to the calculation value of full-section yield bending moment of the H-steel beam. The bolted splice could not be simply regarded as a rigid joint after the initial slip of bolts took place. The method and formula for calculating the deflection of bolt-spliced H-steel beams, dealing with the influence of rotational rigidity of a bolt splice, were proposed and validated by the experimental data.

Key words: H-steel beams; bolted splices; bending tests; load-bearing capacity; rigidity

近几十年来,随着超高层建筑施工技术的迅猛发展,我国陆续建成了一批超高层建筑,包括金茂大厦、广州西塔、上海环球金融中心、上海中心等^[1]. 上海建工集团通过技术集成,研发出钢柱筒架交替支撑液压爬升整体钢平台模架装备系统(以下简称模架装备),并已成功应用于上海中心大厦、上海北外滩白玉兰广场和上海大中里综合发展项目 T2 主楼等重大工程项目的施工^[2-5].

模架装备由钢平台、筒架支撑、工具式钢柱、脚手架、模板 5 大系统组成. 其中,钢平台系统为模块化设计,采用标准化的钢梁截面和高强度螺栓连接方式,施工应用时可根据建筑几何尺寸需要,拼装钢平台,实现通用性. 钢梁截面均为 H 型钢. 为了满足各种几何尺寸的工程项目施工的需要和连接的方便,钢梁之间采用拼接板,通过高强度螺栓连接形成所需要的长度. 在实际施工中,高强度螺栓连接处的构件表面不做专门的摩擦处理,且不对螺栓施加预拉力,实际上就是高强度螺栓按照普通螺栓的受力方式使用. 两根 H 型钢通过螺栓拼接形成一根梁,在钢平台设计时将该拼接节点视作刚性节点.

有关钢梁的螺栓拼接节点的性能,国内外学者进行了一些研究. 国外学者 Kulak 等^[6]对仅进行腹板拼接的 H 型钢梁进行了试验研究,测量了腹板螺

栓孔在挤压作用下的变形方向,确定了设计中的剪力偏心矩. Sheikh-Ibrahim 等^[7]研究了翼缘采用焊接拼接板或者无拼接、腹板采用高强度螺栓拼接板(螺栓无预拉力)的钢梁剪力和弯矩分别在翼缘拼接板和腹板拼接板中的分配问题. Zygomas 等^[8]对有无高强度螺栓拼接板的 H 型钢梁跨中挠度进行了比较试验. 国内学者的研究主要针对超高层钢结构的钢梁拼接,如李启才等^[9-12]将钢梁高强螺栓拼接节点作为梁柱连接节点的一部分进行试验研究,分析其承载力、耗能能力以及高强螺栓的摩擦系数、拼接板厚度对拼接节点性能的影响,但并没有对单纯钢梁的拼接节点进行研究.

因此,本文结合爬升整体钢平台模架装备的工程应用,对 H 型钢梁高强度螺栓拼接板节点进行试验研究,分析其抗弯承载力和刚度性能.

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验共设计了 2 个具有高强度螺栓拼接板节点的 H 型钢梁试件,均采用 HN400×200×8×13 型钢、8 mm 厚拼接板和 8.8 级 M22 高强度螺栓(板上螺栓孔直径 23 mm),型钢和拼接板均为 Q345B 钢材. 2 个试件的区别在于腹板拼接螺栓数目不同,节点参数详见表 1. 钢梁试件以及拼接节点的几何尺寸详见图 1.

表 1 螺栓拼接节点参数

Tab. 1 Parameters of bolt-spliced joints

试件编号	高强螺栓规格	钢梁拼接一侧的螺栓数量			拼接板厚度/mm	
		上翼缘	下翼缘	腹板	腹板	翼缘
J1	8.8 级 M22	6	6	8	8	8
J2	8.8 级 M22	6	6	4	8	8

本试验的钢梁拼接按照等强度和等抗弯刚度相等设计,其中,等抗弯刚度是指拼接截面的惯性矩 I_p 不小于被拼接 H 型钢梁本身的截面惯性矩 I .

1.2 钢材力学性能试验

本文针对 H 型钢的翼缘和腹板以及拼接板,进行了 3 种情况的 Q345B 钢材力学性能试验. 试样均为板材,按照有关标准进行加工和拉伸试验^[13-14],试验结果的平均值如表 2 所示.

1.3 加载及测试方案

如图 2~4 所示,两个钢梁试件均采用两端简支、四点对称单调加载. 为防止试验过程中钢梁整体侧向弯扭失稳,采用了侧向支撑.

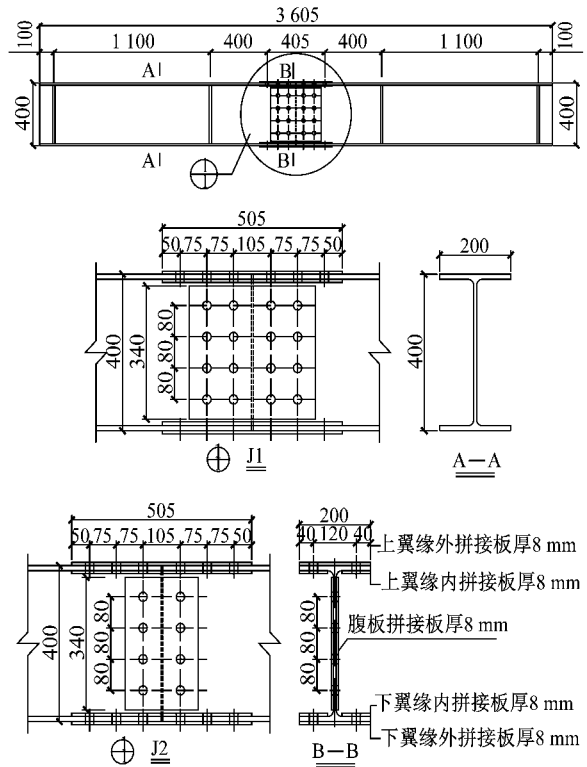


图 1 试件及螺栓拼接节点尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimension of specimens and bolted splice (unit:mm)

表 2 Q345B 钢材力学性能试验结果

Tab. 2 Test results of mechanical performance of steel Q345B

试样编号	取样位置	屈服强度 f_y /MPa	屈服应变 $\epsilon_y/10^{-6}$	极限强度 f_u /MPa	伸长率 $\delta_{10}/\%$
M8	拼接板	342	1 660	560	24.1
MH8	型钢腹板	328	1 592	493	20.8
MH13	型钢翼缘	300	1 456	510	25.7

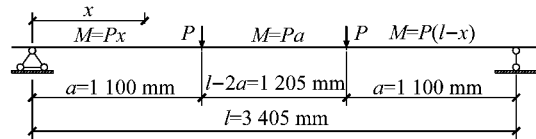


图 2 试件加载图式

Fig. 2 Loading pattern of specimens

按照《钢结构设计规范》(GB20017—2003)^[15],预估节点承载力 $P=265$ kN. 试验先预加载 60 kN, 大约为预估荷载的 20%, 观察应变片及位移计读数无异常后进行正式加载.

试验中采用位移计、应变片来测量钢梁及其拼接部位的位移、应变. 两个试件的位移计及应变片的布置完全相同,具体布置如图 5 所示,其中 1—1 和 3—3 为 H 型钢梁截面,2—2 为拼接板截面.

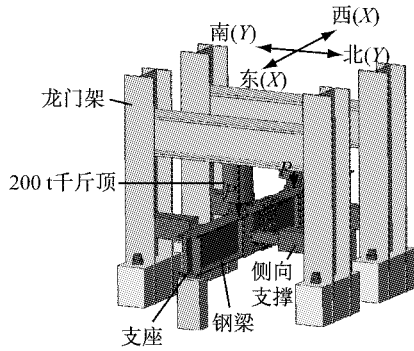


图 3 试验加载装置
Fig. 3 Test setup

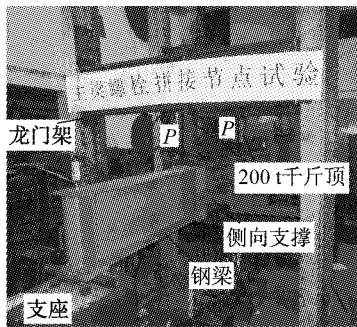


图 4 试验现场
Fig. 4 Testing site

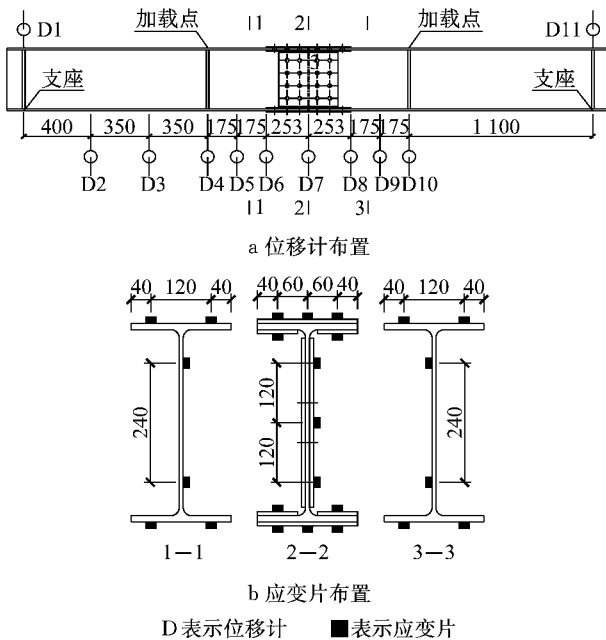


图 5 位移计和应变片布置(单位:mm)

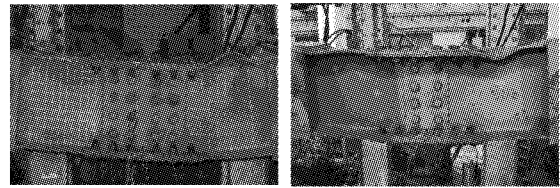
Fig. 5 Arrangement of displacement meters and strain gauges(unit:mm)

2 试验结果和分析

2.1 拼接钢梁破坏模式分析

两个拼接钢梁试件在荷载作用下的最终破坏模

式相同,均为纯弯段非拼接处钢梁上翼缘受压屈曲,随后试件丧失承载力,破坏形态如图 6 所示。



a 试件 J1 b 试件 J2

图 6 试件受弯破坏模式

Fig. 6 Bending failure of specimens

2.2 拼接钢梁荷载-挠度曲线

图 7 给出了试件 J1 和 J2 跨中截面 2—2 在加载过程中的荷载-跨中挠度曲线,可见两个试件的曲线走势基本一致.该曲线基本上可分为 6 个阶段:①摩擦传力的线弹性阶段(虽然没有对螺栓施加预拉力,但仍有一定的摩擦力);②螺栓滑移阶段,此时螺栓所受剪力大于板间摩擦力而突然产生滑移;③螺栓抗剪、承压传力的线弹性阶段;④拼接节点屈服阶段,此时下翼缘外拼接板屈服,拼接节点进入屈服,而钢梁仍处于弹性阶段,荷载-跨中挠度曲线开始表现出非线性特征;⑤钢梁弹塑性阶段,此时钢梁的上、下翼缘均屈服,挠度的增长速度明显大于荷载的增长速度,拼接钢梁的刚度明显降低,荷载-跨中挠度曲线出现明显的弯折且非线性显著;⑥钢梁屈曲及破坏阶段,此时钢梁上翼缘受压屈曲,荷载增加不大,但钢梁挠度迅速地增加,最终丧失承载力。

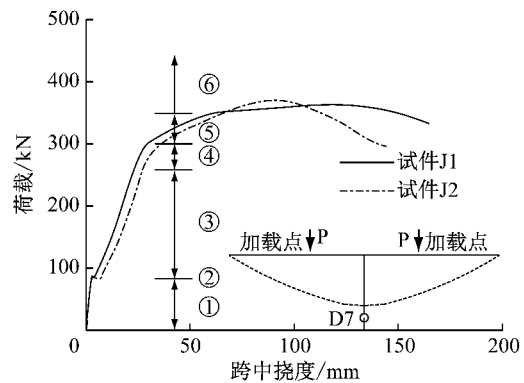


图 7 试件荷载-跨中挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curves of specimens

2.3 拼接钢梁应变分布及荷载-应变曲线

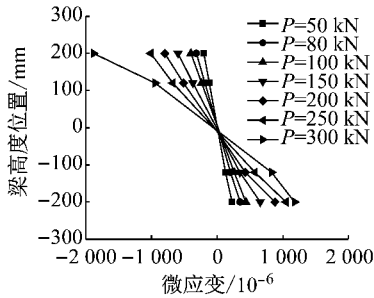
图 8 为试件 J1 和 J2 在 1—1 截面(H 型钢)上的应变分布情况,由图 8 可见,对于处于纯弯段的 1—1 截面,实测应变分布符合平截面假定,且中和轴位于截面的形心处。

图 9 为 2—2 截面(拼接板)的应变分布情况,可知:当 $P < 80$ kN 时,即螺栓滑移前,截面上的应变

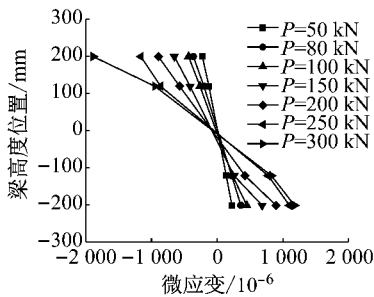
分布基本符合平截面假定,且中和轴位于截面形心处;当 $P=80\text{ kN}$ 时,螺栓产生滑移,接触关系发生变化,中和轴上移至梁高 $h=120\text{ mm}$ 处;当 $P>80\text{ kN}$ 时,截面上的应变分布不再符合平截面假定,并且随着荷载的增加,腹板应变增加很小,主要靠上、

下翼缘拼接板传力。

图 10 为试件 J1 和 J2 在 3—3 截面(H 型钢)上的应变分布情况,可见 3—3 截面的应变分布情况和 1—1 截面基本相同,应变分布符合平截面假定,且中和轴位于截面的形心处。

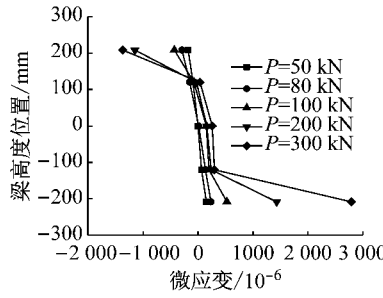


a 试件 J1

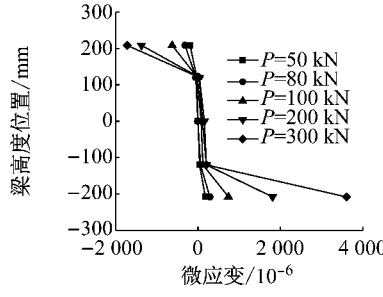


b 试件 J2

图 8 试件 1—1 截面应变分布
Fig. 8 Strain distribution of Section 1—1

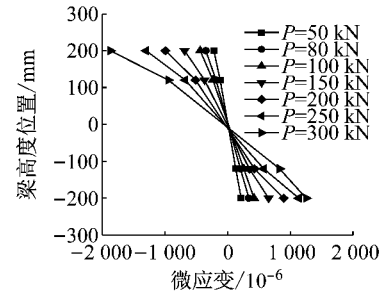


a 试件 J1

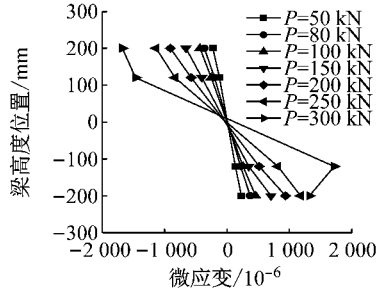


b 试件 J2

图 9 试件 2—2 截面应变分布
Fig. 9 Strain distribution of Section 2—2



a 试件 J1



b 试件 J2

图 10 试件 3—3 截面应变分布
Fig. 10 Strain distribution of Section 3—3

2.4 拼接钢梁承载力分析

根据实测的 H 型钢截面尺寸及材性数据, H 型钢梁的边缘屈服弯矩 $M_{B,e}$ 及全截面塑性弯矩 $M_{B,p}$ 计算值如表 3 所示。

根据试验现象(图 7),当荷载 $P=80\text{ kN}$ 时,试件 J1 和 J2 节点区螺栓出现滑移,此时作用弯矩为 $88\text{ kN}\cdot\text{m}$,将此弯矩定义为节点的滑移弯矩 M_s 。

在荷载作用下,钢梁拼接区的下翼缘外拼接板首先屈服,此时对应的弯矩定义为节点屈服弯矩 M_y 。试件 J1 和 J2 的节点屈服弯矩分别为: $M_{y1}=275\text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{y2}=237\text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{y2}/M_{y1}=0.862$ 。试件 J2 的节点屈服弯矩比试件 J1 低,其原因为 J1 和 J2 的腹板一侧分别采用两列和一系列螺栓,在相同的荷载作用下,后者腹板拼接板分配弯矩比前者少,因此

后者翼缘拼接板承担弯矩比前者多,会首先进入屈服。

虽然本试验的钢梁拼接按照相等的抗弯刚度设计,但是由表 3 可知, $M_y < M_{B,e}$, 即钢梁拼接节点区比钢梁先屈服,其原因是拼接区螺栓与螺栓孔之间存在间隙。当 $M=M_s$ 时,翼缘拼接螺栓受力大先产生滑移,消除间隙,此时腹板拼接螺栓还未完全消除间隙,因此增加的荷载由翼缘承担。显然,钢梁拼接处的截面受力不符合平截面假定,弯矩在翼缘与腹板之间的分配不按照它们惯性矩的比值分配,翼缘分配的弯矩增大,而 H 型钢梁的截面受力仍旧符合平截面假定。因此,在相同的荷载作用下,翼缘拼接板受力更大,拼接节点区首先屈服。

表 3 拼接节点抗弯承载力试验结果

Tab. 3 Test results of bending capacity of bolted splice

试件编号	$M_s/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{B,e}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{B,p}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_s/M_{B,e}$	$M_y/M_{B,e}$	M_u/M_y	$M_u/M_{B,p}$
J1	88	275	405	343	407	0.26	0.80	1.47	1.00
J2	88	237	413	343	407	0.26	0.69	1.74	1.01

试件 J1 和 J2 最终丧失承载力时均发生了钢梁非拼接段的上翼缘受压屈曲,两个试件的极限弯矩分别为 $M_{ul}=405\text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{u2}=413\text{ kN}\cdot\text{m}$,如表 3 所示.两个试件的极限弯矩基本相等,且与钢梁全截面屈服弯矩 $M_{B,p}$ 基本相等.

2.5 拼接钢梁刚度分析

在工程设计中,图 1 所示的 H 型钢梁螺栓拼接通常按照刚接处理,即拼接钢梁可视为没有拼接的钢梁.因此,图 2 所示荷载方式的钢梁在弹性阶段的理论挠度曲线可由式(1)计算.

$$f_1(x, M) = \begin{cases} \frac{1}{EI}(-\frac{M}{6a}x^3 + C_1x + D_1) & 0 \leq x < a \\ \frac{1}{EI}(-\frac{M}{2a}ax^2 + C_2x + D_2) & a \leq x \leq l-a \\ \frac{1}{EI}(\frac{M}{6a}x^3 - \frac{M}{2a}lx^2 + C_3x + D_3) & l-a < x \leq l \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C_1 = \frac{M}{3a}l^2 - \frac{M}{2}a - (\frac{M}{3a} + \frac{M}{6l})(l-a)^2 + \frac{Ma^2}{6l}$;
 $D_1 = 0$; $C_2 = \frac{M}{3a}l^2 - (\frac{M}{3a} + \frac{M}{6l})(l-a)^2 + \frac{Ma^2}{6l}$; $D_2 = -\frac{M}{6}a^2$;
 $C_3 = \frac{M}{3a}l^2 + (\frac{M}{6a} - \frac{M}{6l})(l-a)^2 + \frac{Ma^2}{6l}$; $D_3 = (\frac{M}{6} - \frac{Ml}{6a})(l-a)^2 - \frac{Ma^2}{6l}$.

图 11 为试件 J1 和 J2 在加载过程中,钢梁的理论计算挠度曲线与实测数据的对比.当荷载 $P < 80\text{ kN}$ 时,即螺栓滑移之前,钢梁的实测挠度与理论计算挠度基本相同,表明螺栓拼接节点可视为刚接,钢梁可按照公式(1)计算挠度.当荷载 $P > 80\text{ kN}$,拼接螺栓滑移之后,钢梁实测挠度逐渐大于理论计算挠度,计算误差越来越大.例如,当荷载 $P = 100\text{ kN}$ 和 200 kN 时,试件 J1 跨中挠度的实测值与理论计算值之比分别为 2.30 和 2.99,试件 J2 的情况分别为 2.97 和 3.67,表明拼接节点达不到刚接,用于没有拼接节点的梁的理论计算挠度公式(1)已不适用,需要提出新的方法来计算螺栓拼接钢梁的挠度.

根据试件 J1 和 J2 各个位移计测得的数据分析,当 $M \leq M_{B,e}$ 时,各测点的荷载-挠度曲线的基本形式如图 12 所示.

图 12 中, f_{s1} 和 f_{s2} 分别为钢梁拼接节点螺栓滑移开始和结束时各测点的挠度, f_y 为下翼缘外拼接板屈服时,也就是节点屈服时各测点的挠度.由图 12 可见,当外加弯矩 $M \leq M_{B,e}$ 时,荷载-挠度曲线基本分为 4 段:① $M < M_s$ 时,节点处于螺栓摩擦面传力

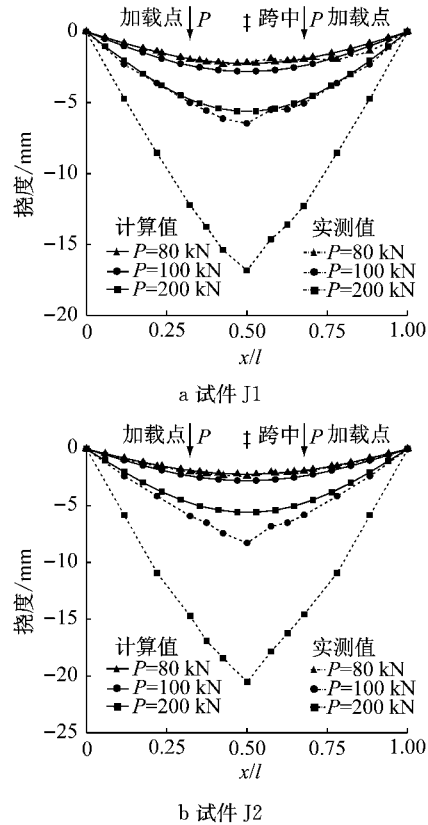


图 11 公式(1)理论计算挠度与实测数据对比

Fig. 11 Comparison of deflections between theoretical calculation and experiment

阶段.② $M = M_s$ 时,节点区螺栓产生滑移,荷载几乎没有增加,但钢梁挠度快速增加.③ $M_s < M \leq M_y$ 时,节点区螺栓滑移结束,螺栓进入抗剪、承压传力阶段,且拼接两侧钢梁上翼缘接触顶紧,接触关系发生变化,拼接节点的抗弯刚度减小.在该阶段,钢梁及拼接板基本处于弹性阶段,荷载-挠度曲线呈线性特征.④ $M \geq M_y$ 时,下翼缘外拼接板屈服,拼接节点屈服,拼接节点的抗弯刚度进一步减小.

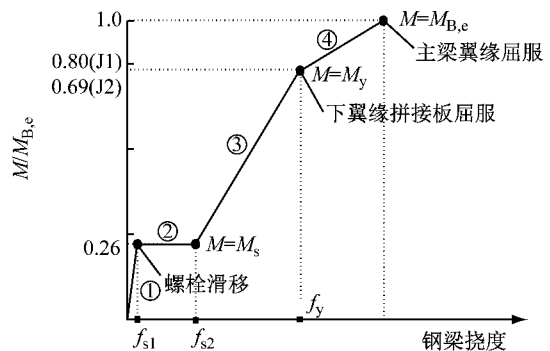


图 12 $M \leq M_{B,e}$ 时螺栓拼接钢梁的荷载-挠度曲线

Fig. 12 Load-deflection curve of bolt-spliced steel beams when $M \leq M_{B,e}$

为了提出螺栓拼接钢梁在弹性阶段的挠度计算

公式,本文引入转动弹簧来模拟具有螺栓拼接节点的钢梁抗弯刚度,如图 13 所示,图中 K 为弹簧的转动刚度.在荷载作用下,钢梁的挠度由两部分构成:①仅由拼接节点转动引起的钢梁挠度;②拼接节点无转动时钢梁产生的挠度.

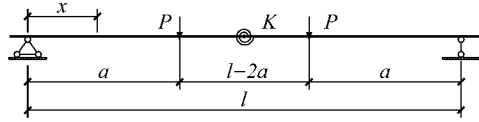


图 13 螺栓拼接试件的抗弯刚度理论计算模型
Fig. 13 Theoretical model for bending rigidity of bolt-spliced specimens

如图 14 所示,在节点弯矩 M 作用下,仅由节点转动引起的钢梁挠度可由式(2)计算.

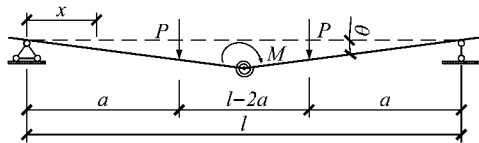


图 14 仅由螺栓拼接节点转动引起的试件挠度
Fig. 14 Deflection of specimens only due to rotation of bolted splice

$$f_z(x, M) = \begin{cases} \frac{M}{K} \frac{1}{2} x & x \leq \frac{l}{2} \\ \frac{M}{K} \frac{1}{2} (l-x) & x > \frac{l}{2} \end{cases} \quad (2)$$

拼接节点无转动时的钢梁挠度仍由式(1)计算.因此,计入拼接节点转动的钢梁挠度计算为

$$f_k(x, M) = f_t(x, M) + f_z(x, M) \quad (3)$$

进一步考虑节点滑移以及节点抗弯刚度的变化,则拼接钢梁在弹性阶段(拼接节点屈服之前)的最终挠度可按照公式(4)进行修正计算.

$$f(x, M) = \begin{cases} f_k(x, M) & 0 < M \leq M_s \\ f_k(x, M - M_s) + f_{s2} & M_s < M \leq M_y \end{cases} \quad (4)$$

在试验过程中,已测得试件 J1 和 J2 在不同荷载作用下的挠度,因此根据公式(4)可反推得到试件 J1 和 J2 钢梁拼接节点在不同荷载阶段的转动刚度 K_{J1} 、 K_{J2} ,如表 4 所示.

表 4 螺栓拼接节点的转动刚度 K

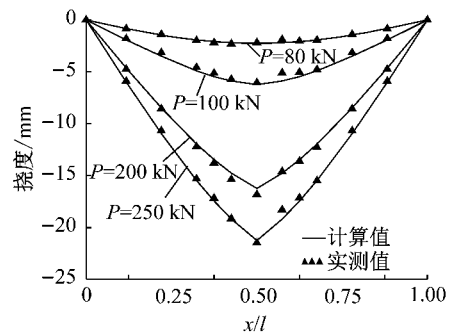
Tab. 4 Rotational rigidity of bolted splice

弯矩范围	$K_{J1}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)	$K_{J2}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)	K_{J2}/K_{J1}
$M < M_s$	$+\infty$	$+\infty$	
$M_s \leq M < M_y$	12 500	10 300	0.79

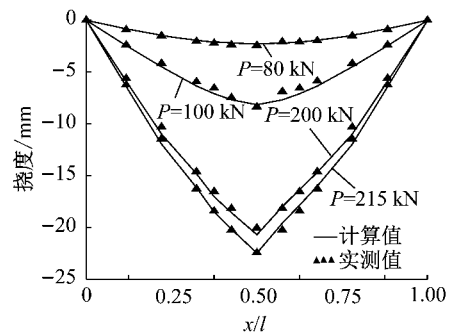
由表 4 可知:当 $M < M_s$ 时,节点区螺栓未滑移,节点可按刚接处理,拼接螺栓及数量对钢梁的抗弯刚度没有什么影响;当 $M_s \leq M < M_y$,由于螺栓滑移

后接触关系发生变化,节点的抗弯刚度降低,因此不能按刚接处理,且试件 J2 的抗弯刚度比试件 J1 的抗弯刚度低 20%左右,说明减少腹板拼接螺栓数量会降低拼接节点的抗弯刚度.

将表 4 的节点转动刚度代入公式(2),最终由公式(4)来计算拼接钢梁在节点屈服之前的弹性阶段的实际挠度.图 15 为公式(4)的计算挠度曲线与实测数据的对比,可见两者吻合良好,验证了公式(4)的可靠性.



a 试件 J1



b 试件 J2

图 15 公式(4)理论计算与试验实测数据对比

Fig. 15 Comparison of deflections between theoretical calculation and experiment

3 结论

(1) 拼接钢梁在整个加载过程中的力学行为依次呈现出以下特性:钢梁和节点的弹性阶段,节点螺栓滑移的非承载阶段,钢梁和节点恢复承载力的弹性阶段,节点处受拉翼缘拼接板屈服阶段,钢梁弹塑性阶段,钢梁受压翼缘屈曲破坏阶段.

(2) 拼接节点进入屈服时的弯矩试验值明显小于钢梁边缘屈服的弯矩理论计算值,前者为后者的 69% ~ 80%,但是,拼接节点最终破坏时的极限弯矩试验值可达到钢梁全截面屈服弯矩的理论计算值.拼接节点破坏时的极限弯矩试验值为其进入屈服时的弯矩试验值的 1.47~1.74 倍.

(3) 拼接节点在螺栓滑移之前,翼缘和腹板拼接板上的应变符合平截面假定,但是滑移之后不再符合平截面假定,弯矩主要由翼缘拼接板承受和传力,腹板传力很少。

(4) 拼接节点的螺栓滑移对钢梁抗弯刚度有较大的影响,当螺栓未滑移时,拼接钢梁整体性好,如同未有螺栓拼接的整根钢梁,拼接节点可视为刚接,但是,当螺栓发生滑移后,钢梁抗弯刚度减小,拼接节点不能按刚接处理,相当于半刚性节点。

(5) 拼接腹板上螺栓数量由双列螺栓减少至单列螺栓,拼接节点的抗弯刚度约有 20% 的降低。

(6) 本文在试验数据分析的基础上,提出了考虑拼接节点转动刚度影响的钢梁挠度理论计算方法和公式,理论计算值与试验值吻合良好。

(7) 在施工现场进行钢平台梁拼接时,建议尽可能对高强度螺栓施加预拉力,充分利用和发挥摩擦力的作用,延迟螺栓滑移的不利影响,从而提高拼接钢梁的抗弯刚度。

参考文献:

- [1] 丁洁民,吴宏磊,赵昕.我国高度 250 m 以上超高层建筑结构现状与分析进展[J].建筑结构学报,2014,35(3):1.
DING Jiemin, WU Honglei, ZHAO Xin. Current situation and discussion of structural design for super high-rise buildings above 250 m in China[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 1.
- [2] 龚剑,余逊克,黄玉林. 钢柱筒架交替支撑式液压爬升整体钢平台模架技术[J]. 建筑施工,2014,36(1):47.
GONG Jian, SHE Xunke, HUANG Yulin. Technology of hydraulic climbing integral steel platform formwork alternately supported by steel columns and cylinder racks[J]. Building Construction, 2014, 36(1): 47.
- [3] 扶新立,李阳,梁颖元,等. 钢柱筒架交替支撑式整体爬升钢平台模架装备技术研究及应用[J]. 建筑施工,2014,36(4):390.
FU Xinli, LI Yang, LIANG Yingyuan, et al. Technical study and application of integral climbing steel platform formwork equipment alternately supported by steel columns and tubular frames [J]. Building Construction, 2014, 36(4): 390.
- [4] 龚剑,朱毅敏,徐磊. 超高层建筑核心筒结构施工中的筒架支撑式液压爬升整体钢平台模架技术[J]. 建筑施工,2014,36(1):33.
GONG Jian, ZHU Yimin, XU Lei. Technology for hydraulic climbing integral steel platform formwork supported by cylinder racks in super tall building's core tube structure construction[J]. Building Construction, 2014, 36(1): 33.
- [5] 王小安,梁颖元,李阳,等. 筒架与筒架交替支撑式液压爬升整体钢平台模架设计计算分析[J]. 建筑施工,2014,36(4):383.
WANG Xiaohan, LIANG Yingyuan, LI Yang, et al. Design calculation and analysis of hydraulic-climbing integral steel platform formwork alternately supported by tow tubular frames [J]. Building Construction, 2014, 36(4): 383.
- [6] KULAK G L, GREEN D L. Design of connectors in web-flange beam or girder splices [J]. Engineering Journal, 1990, 27(2): 41.
- [7] SHEIKH-IBRAHIM F I, FRANK K H. The ultimate strength of symmetric beam bolted splices [J]. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc, 1998, 35(3): 106.
- [8] ZYGOMALAS M, BANIOPOULOS C. Four-plate heb-100 beam splice bolted connections: tests and comments [C] // Proceedings of the Fourth National Conference on Steel Structures. Amsterdam: Connections in Steel Structures, 2002: 287-295.
- [9] 李启才.带悬臂梁段拼接的梁柱连接在循环荷载作用下的破坏机理及抗震设计对策[D].西安:西安建筑科技大学,2003.
LI Qicai. Collapse mechanism and design criterion of steel beam-to column connection with cantilever beam splicing under cyclic load[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
- [10] 李启才,顾强.抗滑移系数对框架中钢梁高强度螺栓拼接性能的影响研究[J].西安科技大学学报,2007,27(1):43.
LI Qicai, GU Qiang. Effect of slipping coefficient on splicing of high-strength bolts on steel beam in moment-resisting frame [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(1): 43.
- [11] 李启才,顾强,刘刚. 拼接板厚度对框架中钢梁高强螺栓拼接性能的影响[J].兰州理工大学学报,2008,34(6): 131.
LI Qicai, GU Qiang, LIU Gang. Influence of thickness of splice plates fixed with high-strength bolts in framed steel beam on its splicing performance[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(6): 131.
- [12] 李启才,刘刚,胡安吉,等. 钢框架中钢梁高强螺栓拼接摩擦耗能的试验研究[J].建筑结构,2011,41(5):78.
LI Qicai, LIU Gang, HU Anji, et al. Experimental study on frictional energy-dissipation behavior of bolted steel beam splicing in rigid frame [J]. Building Structure, 2011, 41(5): 78.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备:GB/T2975—1998[S].北京:中国计划出版社,2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Steel and steel products of test pieces for mechanical testing: GB/T2975—1998[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温拉伸方法:GB/T228.1—2010 [S].北京:中国标准出版社,2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature: GB/T 228. 1—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2010.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计规范:GB 50017—2003 [S].北京:中国计划出版社,2003.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel structures: GB 50017—2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.