

# 合肥新桥国际机场航站楼箱形曲梁模型承载性能

王元清<sup>1</sup>, 刘莉媛<sup>1,3</sup>, 丁大益<sup>2</sup>, 石永久<sup>1</sup>, 章伟松<sup>4</sup>

- (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. 中国五洲工程设计有限公司, 北京 100053; 3. 北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045;  
4. 浙江精工钢构有限公司, 浙江 绍兴 312030)

**摘要:** 为得到合肥新桥国际机场航站楼钢结构屋盖中箱型曲梁构件的承载性能, 以箱型曲梁部分为重点研究对象, 采用千斤顶单拉加载的方式, 进行了3个箱型曲梁模型的试验研究; 试验测定了箱型曲梁模型宏观的荷载位移曲线、面外位移以及各关键位置的应变情况, 得到了箱型曲梁构件预期的破坏形态和破坏模式, 并建立了试验构件的有限元模型, 将试验结果与有限元计算结果进行了对比和分析; 通过3个试验构件不同形式的面外支撑, 检验了支撑的效果; 通过施加不同大小的初始缺陷, 分析了初始缺陷对于转换节点构件承载性能的影响。结果表明: 有限元计算有效地模拟了试验构件的承载性能, 试验和有限元结果吻合较好, 证明了设计的合理性和安全性。

**关键词:** 箱型曲梁; 模型; 承载性能

中图分类号: TU 391

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)09-1323-12

## Bearing Behavior of the Curved Box-girder Models of Hefei Xinqiao International Airport Terminal

WANG Yuan-qing<sup>1</sup>, LIU Li-yuan<sup>1,3</sup>, DING Da-yi<sup>2</sup>, SHI Yong-jiu<sup>1</sup>, ZHANG Wei-song<sup>4</sup>

- (1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. CNGC Wuzhou Engineering Design and Research Institute, Beijing 100053, China;  
3. Beijing Institute of Architecture Design, Beijing 100045, China;  
4. Zhejiang Jingong Steel Building CO., LTD, Shaoxing 312030, Zhejiang, China)

**Abstract:** To get the bearing behaviors of the curved girders, three model experiments were carried out under tensile force by way of a single jack. The load-displacement curve, out-plane displacement were measured, as well as the strain at the concerning positions. Target curves and expected failure mode of the experiment components were obtained. Finite element models were established. The bearing behaviors of the curved girders were simulated and the results of experiments and FEM were compared. By different types of out-plane supporters, different effects were obtained. The effects of different initial defects applied on the models were analyzed as well. The results show that the experiment results and FEM results agree well, and the design is reasonable and safe.

**Key words:** curved box-girder; scale model; bearing behavior; experiment

收稿日期: 2012-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51038006).

作者简介: 王元清(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事钢结构方面的研究, E-mail: wangyq@mail.tsinghua.edu.cn.

## 1 工程概况

### 1.1 工程简况

随着合肥市城市的进一步发展,合肥骆岗机场已从过去的“郊外机场”变为“城区机场”,2006年国家民航总局最终推荐新桥场址,距市中心31.8 km,命名为合肥新桥国际机场<sup>[1-2]</sup>.合肥新桥国际机场航站楼长806 m,最大宽度159 m,总建筑面积104 800 m<sup>2</sup>.机场鸟瞰图如图1所示,现场效果如图2所示.本工程建筑结构安全等级为一级,抗震设防烈度为7度,建筑场地类别为II类,基本风压0.4 kN/m<sup>2</sup>.



图1 合肥新桥国际机场鸟瞰图

Fig. 1 Aerial view of Hefei Xinqiao International Airport



图2 合肥新桥国际机场现场效果图

Fig. 2 Construction site of Hefei Airport Terminal

### 1.2 设计方案介绍

航站楼沿纵向设置4道伸缩缝,将整个结构划分为5个温度区段,结构分区示意图如图3所示.1、5区为钢框架结构,2、3、4区为预应力混凝土框架结构,通过钢管混凝土柱与屋盖相连,屋盖结构均采用钢结构,屋盖结构各区之间不设缝而形成一整体,通过一定数量的滑动支座来抵抗屋盖的变形.

屋面结构由多榀刚架组成,径向布置呈扇形排列,中间部位由一、二层伸上的多根钢管混凝土柱支撑,形成钢框架.刚架梁中间大跨度区采用倒三角形立体钢桁架,延伸到两侧转换成箱型截面,结构平

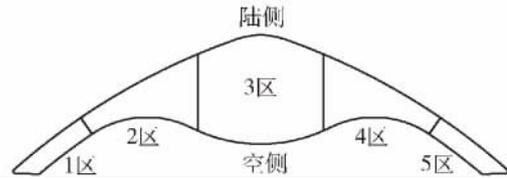


图3 航站楼结构分区示意图

Fig. 3 Parts of the structure

面刚度的分配表现为横向大、纵向较弱.

以3区为例,为满足必要的结构纵向刚度,3区屋盖沿柱顶设置了3道纵向联系平面桁架,两端转换为立体桁架.另设置多条纵向联系系杆,并设置了纵向水平支撑,水平支撑采用 $\phi 15.2$ 镀锌钢绞线.由于3区陆侧有4道联系廊桥穿出墙体联系到高架桥和栈桥上,使得柱间纵向联系梁不连续,为平衡陆侧柱列的纵向刚度,设置了2道柱间支撑,采用 $\phi 5 \times 61$ (双层PE)钢缆索.3区框架采用立体桁架与箱形梁结合形式的刚架,其结构构件组成示意图如图4所示.大跨度刚架由箱形斜柱、大曲率箱形构件<sup>[3-4]</sup>、渐变箱形梁、转换节点与倒三角形立体桁架组成.

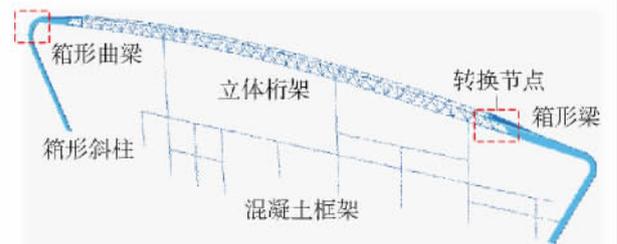


图4 3区GJ3-6刚架结构构件组成示意图

Fig. 4 Frame components of part 3

## 2 试验方案

### 2.1 试验模型的选取

对于合肥新桥机场这种新型的大跨钢结构,同很多大型复杂钢结构一样<sup>[5-11]</sup>,需要对其关键部分进行系统的研究与分析,这对于该机场项目的安全性与可靠性将起到重要的作用.箱形曲梁<sup>[12-13]</sup>是连接柱和桁架梁的关键节点,因此,针对箱形曲梁构件,统计了整个航站楼中此种构件的截面形式、尺寸、板厚等,并进行多方案设计优化<sup>[14-15]</sup>,从中选取了3种有代表性的曲梁作为试验模型,分别为:

XQL-1: GJ3-6空侧曲梁节点.此节点圆弧半径为3 000 mm,是整个结构中最常见的尺寸,具有较强的普遍性.

XQL-2: M-1轴空侧曲梁节点.此节点中弯曲部分由2段圆弧组成,含有此结构中最小的圆弧半

径,且此节点曲梁部分为箱形截面,箱型柱为梯形截面,梁为矩形截面,中间圆弧部分截面由梯形逐渐过渡为矩形,是较为复杂的节点形式。

XQL-3: GJ3-6 陆侧曲梁节点。此节点圆弧半径最大,弧长最长,是整个结构中最大的曲梁节点。

本实验 3 个构件由于其实际尺寸大小不同,加上实验室设备要求的限制,其中, M-1 轴侧曲梁节点尺寸较小,采用足尺试验; GJ3-6 陆侧、GJ3-6 空侧原型尺寸较大,采用 1:2 缩尺试验。

### 2.2 试验目的

通过对单榀刚架模型的有限元计算分析以及局部模型有限元分析,发现曲梁为明显的抗弯构件,内侧板件应力水平较高<sup>[16]</sup>。通过本次试验以期达到如下主要目的:

- 1) 针对 GJ3-6 两端及 M-1 轴曲梁构件在竖向集中荷载作用下进行试验,使构件尽可能的接近实际的受弯作用,以研究该曲梁的抗弯性能与极限承载力,检验连接处的各薄弱部位并验证整体稳定与局部稳定的安全性。
- 2) 3 个试验构件面外支撑情况分别为无支撑(XQL-1)、全截面支撑(XQL-2)和仅支撑截面上翼缘(XQL-3)。通过试验测定不同支撑方式对于构件面外稳定的约束情况。
- 3) 通过试验中测定的应力、变形数据,验证有限元模型的准确性,为节点的进一步优化提供参考。
- 4) 验证曲梁的安全性与合理性,试验中的破坏现象可为实际工程设计与施工提供借鉴作用。

### 2.3 箱形曲梁试验模型

构件初始加工由安徽合肥长江精工钢结构(集团)股份有限公司完成,所有曲梁构件精确按照设计加工,除曲梁构件外,还设计加工了构件及千斤顶底座等辅助构件。XQL-1、XQL-2、XQL-3 的试验模型及组装如图 5~7 所示。

### 2.4 试验装置及加载制度

根据有限元计算结果,选取 150 t 拉力千斤顶加载,加载制度为:首先加至设计荷载水平,卸载,再加载至构件达到极限承载力直至破坏。

## 3 箱形曲梁试验结果分析

### 3.1 材性试验结果

箱形曲梁试件中,Q345 板材共有 6 种,钢材材性见表 1。

对钢材材性试验结果(图 8),采用三折线模型进行拟合。以 PA-25 材性试件为例,拟合方式为:

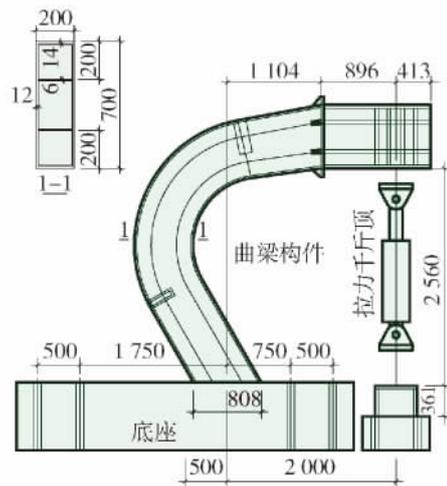


图 5 XQL-1 曲梁节点试验

Fig. 5 Test component of XQL-1

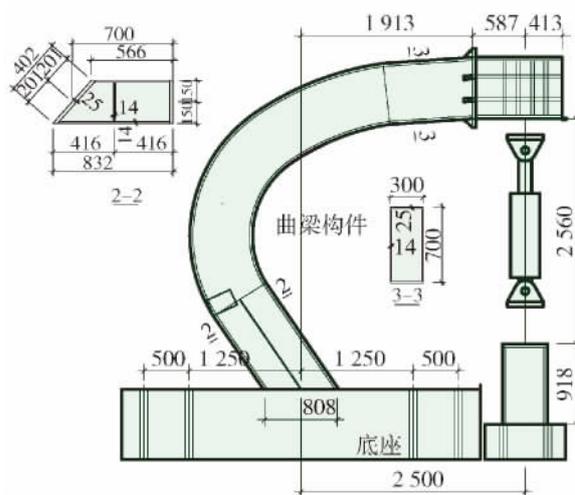


图 6 XQL-2 曲梁节点试验

Fig. 6 Test component of XQL-2

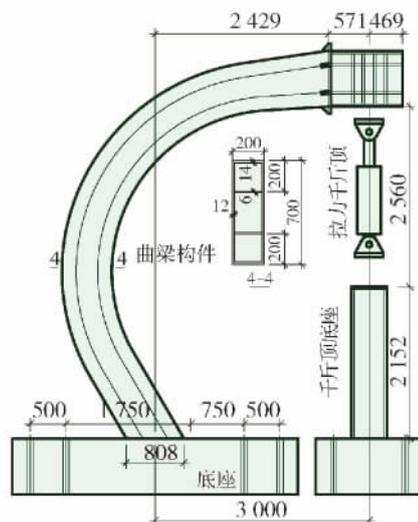


图 7 XQL-3 曲梁节点试验

Fig. 7 Test component of XQL-3

弹性段坐标为(屈服应变  $\varepsilon_y$ , 屈服应力  $f_y$ ), 屈服平台末端坐标为(屈服末端应变  $\varepsilon_{st}$ , 屈服应力  $f_y$ ), 强

化段末端坐标为(极限应变  $\varepsilon_u$ , 极限应力  $f_u$ ), 如图9所示. 各材性试件数据见表1.

表1 箱形曲梁钢材材料性能

Table 1 Material properties

试件编号	试件板厚/mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_u$ /MPa	$\varepsilon_y$	$\varepsilon_{st}$	$\varepsilon_u$
PA-40-20	20	391.493	579.631	0.001881	0.012235	0.162645
PA-25	25	339.656	524.706	0.001672	0.017503	0.163813
PA-14	14	407.300	566.419	0.001959	0.021203	0.166896
PA-12	12	376.610	558.531	0.001809	0.017610	0.159427
PA-8	8	398.382	545.574	0.001912	0.021804	0.162963
PA-6	6	442.982	567.605	0.002085	0.022657	0.099636

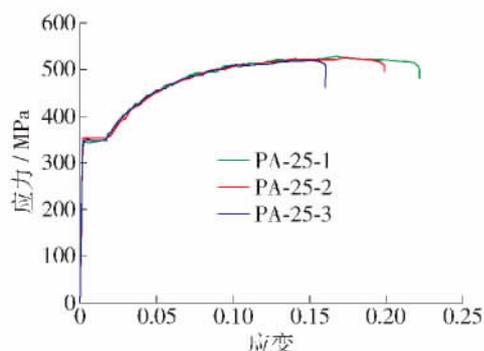


图8 PA-25 钢材材料性能曲线

Fig. 8 Material property curve of PA-25

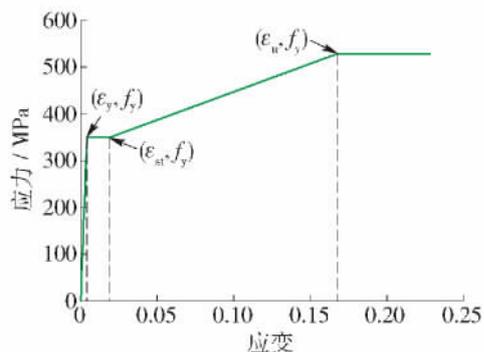


图9 钢材材性拟合三折线模型

Fig. 9 Tri linear model of material property curve

### 3.2 测点布置

测点布置原则为监测最大内力截面,并关注多截面应变分布,监测面外位移及分布,监测加载端及内力最大截面竖向及水平位移,监测构件底端转角. XQL-1 位移计、导杆引伸仪、倾角仪及应变片布置如图10所示. 构件 XQL-2 面外位移计测点位置为5个,分别对应5个关键界面,其他位移与应变片测点布置及命名原则均与 XQL-1 相同. 构件 XQL-3 位移与应变片测点布置及命名原则均与 XQL-2 相同.

应变测点的命名原则为:第1个数字表示关键截面号;第2个字母表示位置,西侧应变花 W (west),东侧应变花 E (east),上面 T (top),下面 B (bottom),内侧 I (inside),外侧 O (outside),水平关键截面以上用 T、B,以下用 I、O;第3个数字为编号,翼缘应变片由东往西为1、2、3,腹板应变花由外往内为1—9,每个应变花中半径方向为较小编号. 例如:4-W-5表示4号截面西侧第2个应变花第2个通道. 另外,关键截面之间翼缘上单向应变片编号为:两关键截面号-位置. 例如:34-T表示3、4关键截面之间上翼缘位置.

### 3.3 XQL-1 试验结果

#### 3.3.1 试验现象

试验加载情况如图11所示. 首先是预加载,拉力千斤顶加载至10 t后卸载,荷载施加完成过程中未出现明显变形和声响. 再次加载时,当千斤顶荷载加至40 t时构件面外位移已超过2 cm,并逐渐增大,且构件本身发生一定的扭转,如图12所示. 千斤顶荷载加至48.36 t时构件达到极限承载力,而后荷载逐渐下降. 由于受到加载设备千斤顶面外位移的限制,未加载至构件完全破坏.

#### 3.3.2 试验结果及分析

加载端千斤顶竖向位移、水平位移曲线如图13所示. 设计荷载应力水平的等效千斤顶荷载为10 t,从图13中可以看出,此时构件仍处在弹性阶段. 加载至构件承载力下降段后卸载,卸载刚度与加载刚度十分接近. 构件极限承载力为48.3 t.

曲梁弧线最外端竖向位移、水平位移曲线如图14所示. 从图14中可以看出,弧线最外端竖向水平位移均较小,竖向位移方向为向上,水平位移朝向为千斤顶方向,且水平位移大于竖向位移.

从上往下多处面外位移如图15所示. 与直观

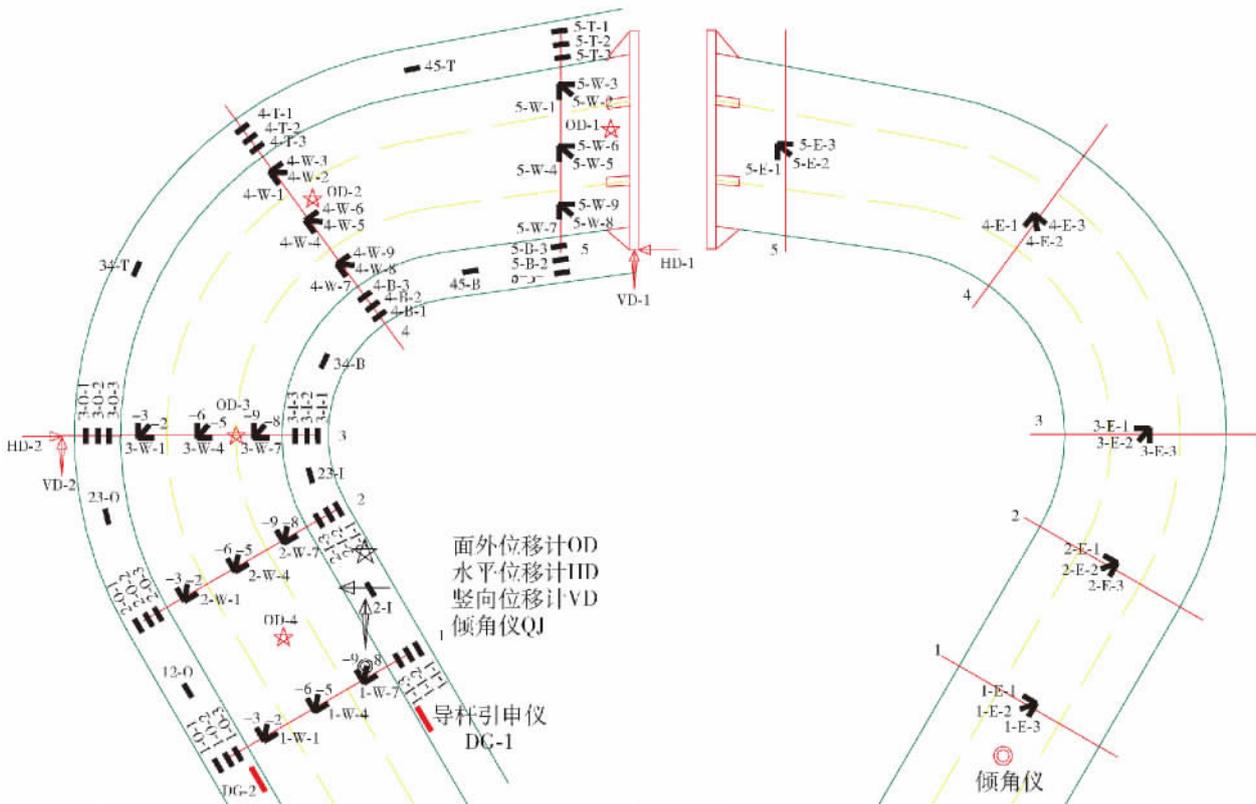


图 10 曲梁节点试验测点布置(西、东两侧)

Fig. 10 Measuring points (west and east)

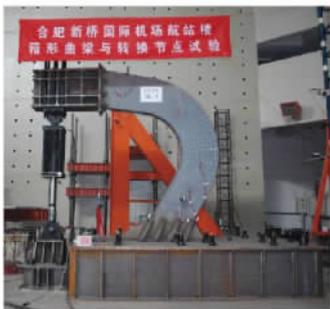


图 11 XQL-1 曲梁节点试验加载照片

Fig. 11 Photo of loading

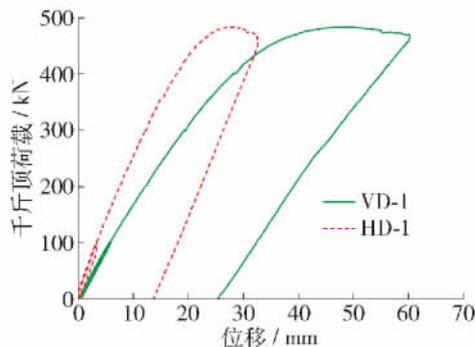


图 13 XQL-1 加载端竖向、水平位移

Fig. 13 Vertical and horizontal displacement of XQL-1 load point

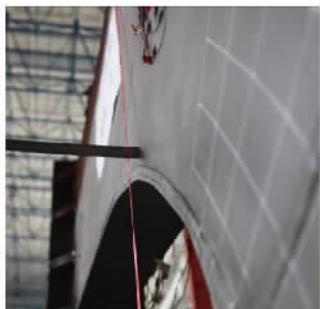


图 12 XQL-1 曲梁节点试验构件面外位移

Fig. 12 Out-plane displacement of XQL-1

观察到的实验现象相同,最上面关键截面 5 的面外位移(OD-1)最大,卸载时已达到 50 mm,其次是关键截面 4(OD-2)。OD-3 面外位移出现了负值,从图 16、图 17 中也可看出,关键截面 3 内翼缘 3-I-1 点应变最大,而关键截面 5 内翼缘 5-B-3 应变最大,说明构件自身发生了 S 型变形,这也和构件加工不够精确造成的初始缺陷有关。OD-4 由于靠近构件根部,面外位移较小,接近于 0。由此可看出,在无面外支撑的情况下,构件较容易发生面外位移。

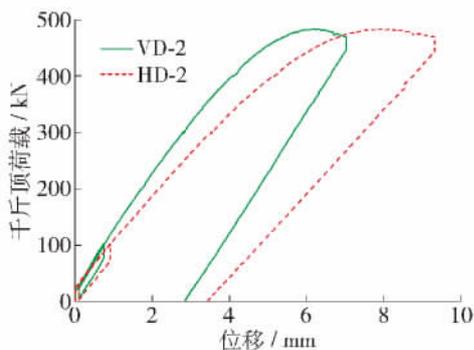


图 14 XQL-1 弧线最外端竖向、水平位移  
Fig. 14 Vertical and horizontal displacement of XQL-1 outer arc end

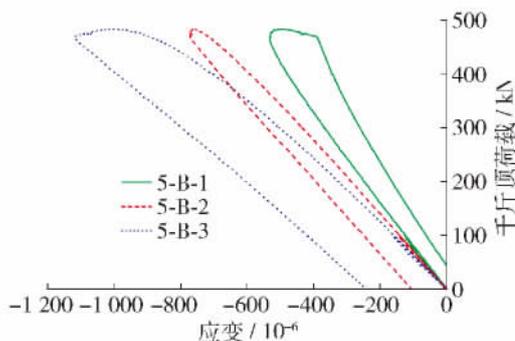


图 17 XQL-1 关键截面 5 内翼缘应变  
Fig. 17 Strain of section 5 inside flange points

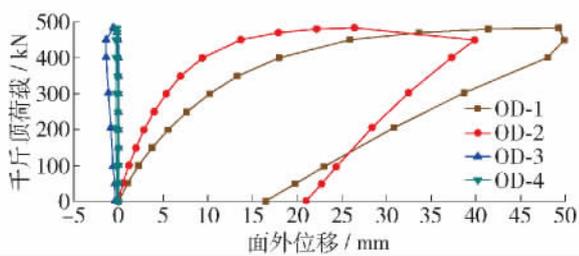


图 15 XQL-1 面外位移  
Fig. 15 Out-of-plane displacements of XQL-1

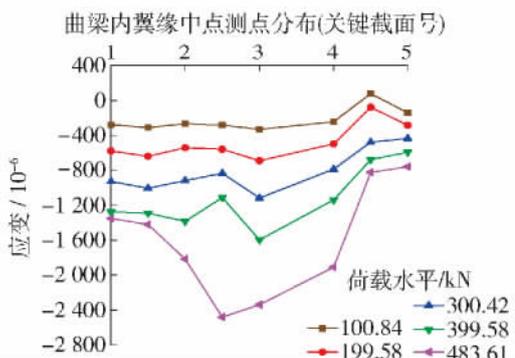


图 18 XQL-1 内翼缘应变分布  
Fig. 18 Strain distribution of inside flange points

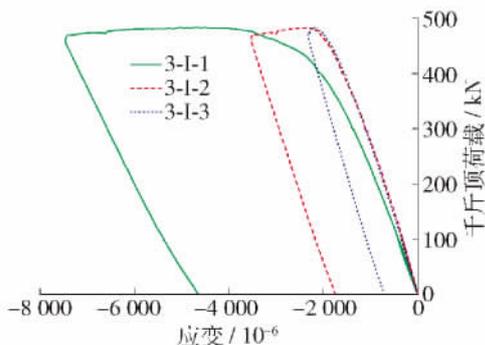


图 16 XQL-1 关键截面 3 内翼缘应变  
Fig. 16 Strain of section 3 inside flange points

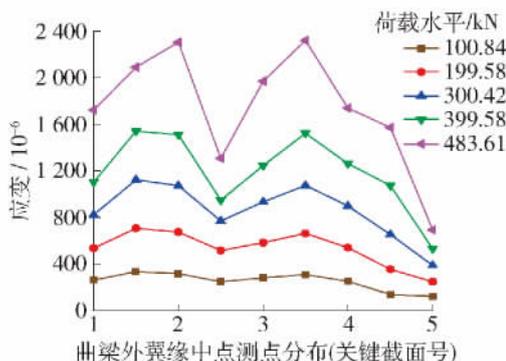


图 19 XQL-1 外翼缘应变分布  
Fig. 19 Strain distribution of outside flange points

试验中对构件多个关键截面多处位置进行了应变测量,下面针对较关键的箱形截面上下翼缘处应变随着荷载的变化结果进行整理和分析.图 18、图 19 分别为 XQL-1 内、外翼缘中点测点应变分布,由试验结果可看出,受压内翼缘在 2、3 关键截面之间应变最大,受拉外翼缘在 2、3、4 截面应变均较大,荷载较大时 2、3 截面间测点应变增加不明显,这可能是由应变片与构件粘结不牢局部脱开造成的.

### 3.4 XQL-2 试验结果

#### 3.4.1 试验现象

试验加载情况如图 20 所示,面外支撑为约束整

个截面面外位移,如图 21 所示.首先是预加载,拉力千斤顶加载至 10 t 后卸载,荷载施加完成过程中未出现明显变形和声响;再次加载时,当千斤顶荷载加至 10 t 左右发出第 1 次声响;从 10 t 之后,加载至 12 t 的过程中,此段时间内声响连续出现;荷载为 34.6 t 时又出现声响,推测是钢板焊缝逐渐开裂;荷载为 61 t、72 t 时有巨大声响;当荷载加至极限荷载逐渐下降后,69 t 时又出现巨大声响,此时外观上已明显看到钢板的鼓屈现象,如图 22 所示.



图 20 XQL-2 构件加载照片  
Fig. 20 Photo of loading



图 21 XQL-2 构件面外支撑  
Fig. 21 Out-plane supporter



图 22 XQL-2 构件鼓屈现象  
Fig. 22 Failure phenomena

### 3. 4. 2 试验结果及分析

加载端千斤顶竖向位移、水平位移曲线如图 23 所示. 设计荷载应力水平的等效千斤顶荷载为 10 t. 构件极限承载力为 73.5 t.

曲梁弧线最外端竖向位移、水平位移曲线如图 24 所示. 从图 24 中可以看出, 弧线最外端竖向水平位移均较小, 竖向位移方向为向上, 水平位移为朝向千斤顶方向, 且水平位移大于竖向位移. 加载至构件承载力下降段后卸载, 卸载刚度与加载刚度十分接近.

从上往下多处面外位移如图 25 所示. 与直观观察到的实验现象相同, 最上面关键截面 4(OD-2) 至关键截面 1(OD-5) 面外位移逐渐减小, 而关键截面 5 面外位移(OD-1) 由于受到面外支撑的约束,

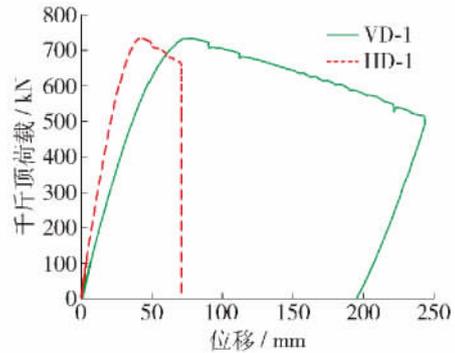


图 23 XQL-2 加载端竖向、水平位移  
Fig. 23 Vertical and horizontal displacement of XQL-2 load point

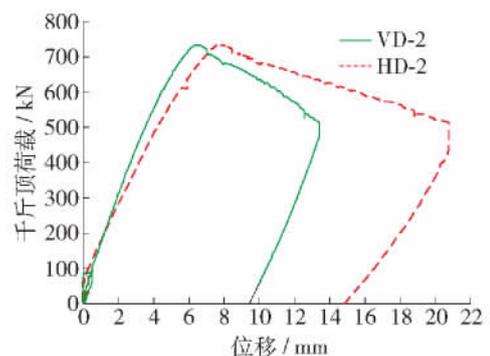


图 24 XQL-2 弧线最外端竖向、水平位移  
Fig. 24 Vertical and horizontal displacement of XQL-2 outer arc end

加载过程中并未产生较大位移. 由此可看出, 在面外支撑完全约束整个截面面外位移的情况下, 构件不易发生面外位移. 另外, 关键截面 2 后期面外位移 OD-4 相对较大, 这是由构件在此部位发生鼓屈造成的.

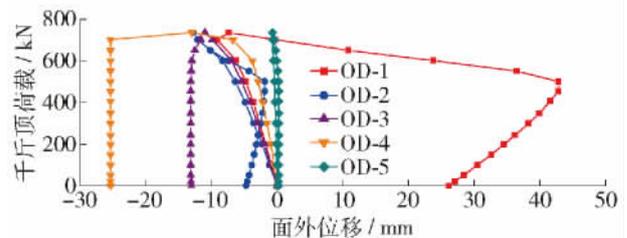


图 25 XQL-2 面外位移  
Fig. 25 Out-plane displacements of XQL-2

试验中对构件多个关键截面多处位置进行了应变测量, 下面针对较关键的箱形截面上下翼缘处应变随着荷载的变化结果进行整理和分析. 图 26、图 27 分别为 XQL-2 内、外翼缘中点测点应变分布, 由试验结果可以看出, 受压内翼缘在 2、3 关键截面应

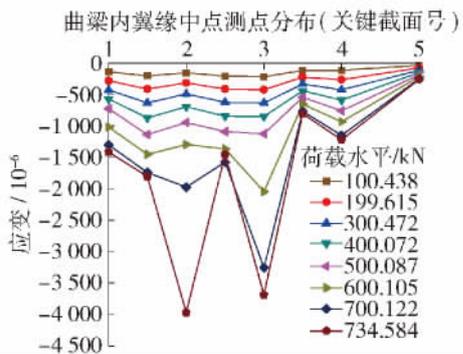


图 26 XQL-2 内翼缘应变分布

Fig. 26 Strain distribution of inside flange points

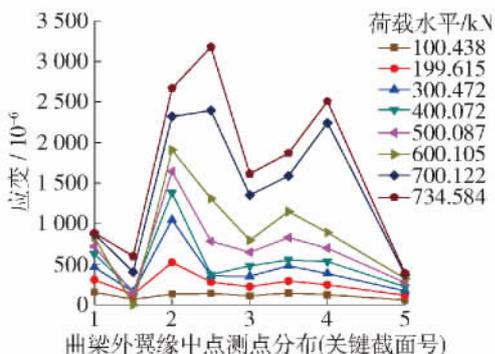


图 27 XQL-2 外翼缘应变分布

Fig. 27 Strain distribution of outside flange points

变较大,受拉外翼缘在 2、3 截面之间应变最大。

### 3.5 XQL-3 试验结果

#### 3.5.1 试验现象

试验加载情况如图 28 所示,面外支撑为约束截面上部面外位移,如图 29 所示。首先是预加载,拉力千斤顶加载至 20 t 后卸载,荷载施加完成过程中未出现明显变形和声响。由于竖向位移受到面外支撑丝杠的限制,未加载至构件完全破坏,此时外观上已明显看到曲梁内翼缘钢板的压屈现象,如图 30 所示。



图 28 XQL-3 构件加载照片

Fig. 28 Photo of loading

#### 3.5.2 试验结果及分析

加载端千斤顶竖向位移、水平位移曲线如图 31



图 29 XQL-3 构件面外支撑

Fig. 29 Out-plane supporter



图 30 XQL-3 构件屈曲现象

Fig. 30 Failure phenomena

所示。设计荷载应力水平的等效千斤顶荷载为 20 t,从图 31 中可以看出,此时构件仍处在弹性阶段。构件极限承载力为 47.2 t。

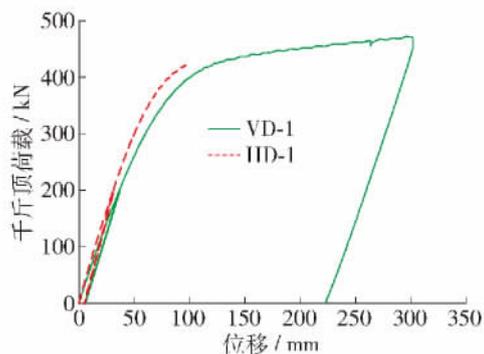


图 31 XQL-3 加载端竖向、水平位移

Fig. 31 Vertical and horizontal displacement of XQL-3 load point

曲梁弧线最外端竖向位移、水平位移如图 32 所示。从图 32 中可以看出,弧线最外端竖向水平位移均较小,竖向位移方向为向上,水平位移为朝向千斤顶方向,且水平位移大于竖向位移。加载至构件承载力下降段后卸载,卸载刚度与加载刚度十分接近。

从上往下多处面外位移如图 33 所示。与直观观察到的实验现象相同,最上面关键截面 5(OD-1)至关键截面 1(OD-5)面外位移逐渐减小,而关键截

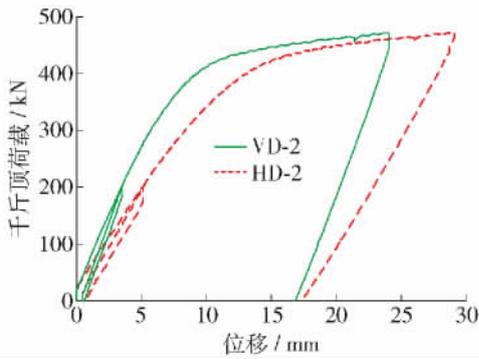


图 32 XQL-3 弧线最外端竖向、水平位移  
Fig. 32 Vertical and horizontal displacement of XQL-3 outer arc end

面 1 面外位移(OD-1) 由于受到面外支撑的约束, 加载过程中并未产生较大位移, 荷载下降段的位移值突变为负值, 可能是位移计采集数据有错误, 并未绘制到图 33 中。由此可以看出, 在面外支撑仅约束截面上翼缘面外位移的情况下, 构件也不易发生面外位移, 图 34 为关键截面 5 上翼缘荷载应变曲线, 可以看出, 对称位置 5-T-1 和 5-T-2 应变十分接近, 也说明了构件未发生扭转变形。

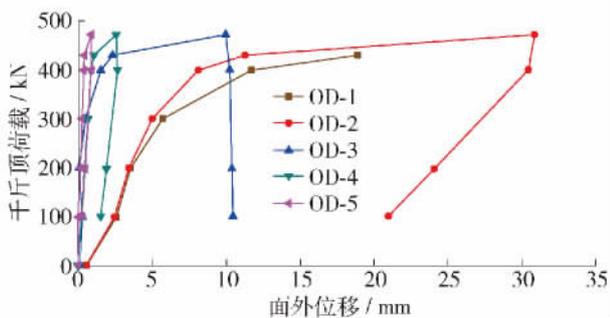


图 33 XQL-3 面外位移  
Fig. 33 Out-plane displacements of XQL-3

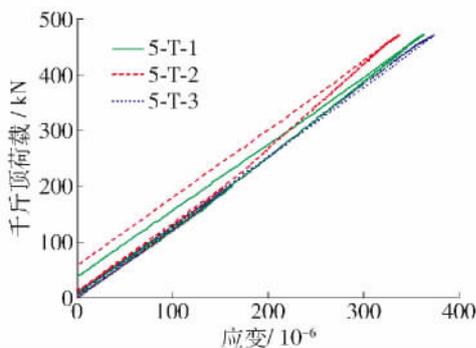


图 34 XQL-3 关键截面 5 上翼缘应变  
Fig. 34 Strain of section 5 top flange points

试验中对构件多个关键截面多处位置进行了应

变测量, 下面针对较关键的箱形截面上下翼缘处应变随着荷载的变化结果进行整理和分析。图 35、图 36 分别为 XQL-3 内、外翼缘中点测点应变分布, 由试验结果可以看出, 受压内翼缘和受拉外翼缘应变均在关键截面 2 达到最大值。

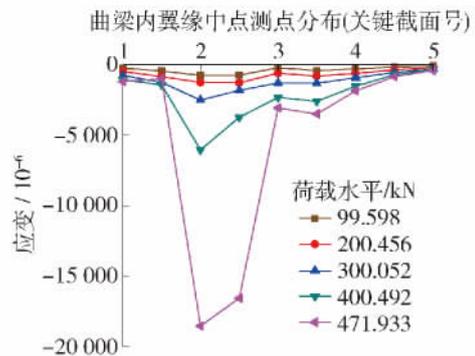


图 35 XQL-3 内翼缘应变分布  
Fig. 35 Strain distribution of inside flange points

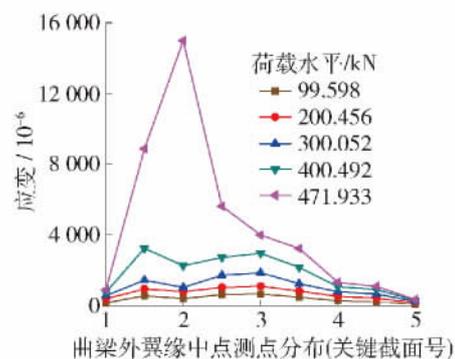


图 36 XQL-3 外翼缘应变分布  
Fig. 36 Strain distribution of outside flange points

#### 4 与有限元分析结果比较

依据实际工程或缩尺后的试验构件、加载辅助构件尺寸和板厚, 采用 ABAQUS 有限元软件, 建立 XQL-1、XQL-2 和 XQL-3 的有限元模型。模型采用 4 节点壳单元 (S4R), 钢材材性本构关系选用三折线模型, 不同板厚、圆管外径和壁厚的钢材均依据实际各种板材、管材材性试验结果进行计算, 即屈服应变、屈服平台末端应变及极限承载力、极限承载力应变均按照材性试验结果选取, 有限元计算结果如下:

##### 4.1 XQL-1 结果

由于构件 XQL-1 在加工制作过程中出现了明显的面外变形, 经测定加载点距原轴线位置偏移 20 mm, 有限元计算中得到该模型的第 1 阶屈曲模式为加载端部的面外变形, 因此, 按照第 1 阶模式的变形, 施加 20 mm 的初始缺陷。有限元模型破坏形态

以及与试验的变形对比如图 37、图 38 所示。有限元计算结果与试验结果对比如图 39 所示,有限元模型弹性段刚度计算结果与试验结果相比偏大,若不考虑初始缺陷,有限元计算得到的极限承载力较试验结果偏大 42.4%,但若考虑初始缺陷,有限元模型的极限承载力有明显降低,比试验极限承载力高 14.7%,更接近试验结果。由此可见,构件加工的初始缺陷以及加载中由初始缺陷导致的面外和扭转变形,会导致构件刚度和承载力明显下降,实际工程中要尽量保证加工精度,设置面外位移保证避免扭转的发生。

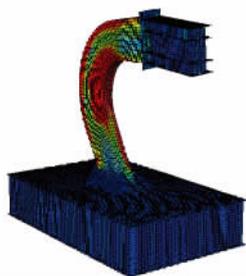


图 37 XQL-1 有限元破坏形态

Fig. 37 XQL-1 finite element model failure mode



图 38 试验构件面外位移

Fig. 38 Out-plane displacement of test component

#### 4.2 XQL-2 结果

构件 XQL-2 外观上未发现明显的面外位移初始缺陷,且试验中约束了构件面外位移,有限元计算中得到其第 2 阶屈曲模态为两腹板面外鼓屈变形,因此,按照第 2 阶模态的变形,施加等价于腹板板厚 14 mm 的初始缺陷。有限元模型整体、局部破坏形态以及与试验的变形对比见图 40、41。有限元计算结果与试验结果对比如图 42 所示。有限元模型试验结果相比较,前期刚度非常吻合,若不考虑初始缺陷,有限元计算得到的极限承载力偏大 5.01%,若考虑初始缺陷,有限元模型的极限承载力有所降低,比试验极限承载力高 0.8%,十分接近试验结果。

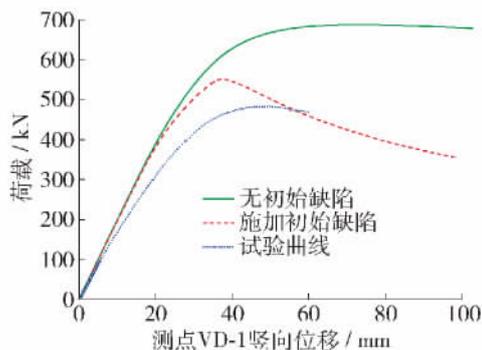


图 39 XQL-1 试验有限元对比

Fig. 39 XQL-1 load displacement curve comparison of FEM and test results

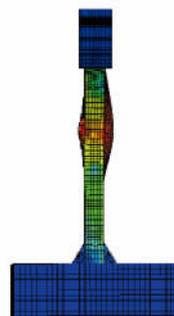


图 40 XQL-2 有限元模型破坏形态

Fig. 40 XQL-2 finite element model failure mode



图 41 试验构件鼓屈现象

Fig. 41 Buckling of test component

#### 4.3 XQL-3 结果

构件 XQL-3 外观上未发现明显的面外位移初始缺陷,且试验中约束了构件面外位移,有限元计算中得到该模型的第 4 阶屈曲模态为曲梁中部箱形截面翼缘的局部变形,按照第 4 阶模态的变形,施加等价于腹板板厚 14 mm 的初始缺陷。有限元模型破坏形态以及与试验的变形对比如图 43、44 所示。有限元计算结果与试验结果对比如图 45 所示。有限元模型试验结果相比较,前期刚度非常吻合,若不考虑初始缺陷,有限元计算得到的极限承载力偏大

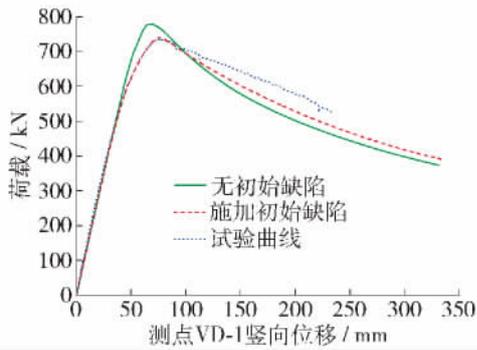


图 42 XQL-2 试验有限元对比

Fig. 42 XQL-2 load displacement curve comparison of FEM and test results

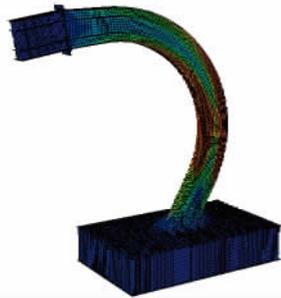


图 43 XQL-3 有限元模型破坏形态

Fig. 43 XQL-2 finite element model failure mode



图 44 构件屈曲

Fig. 44 Buckling of test component

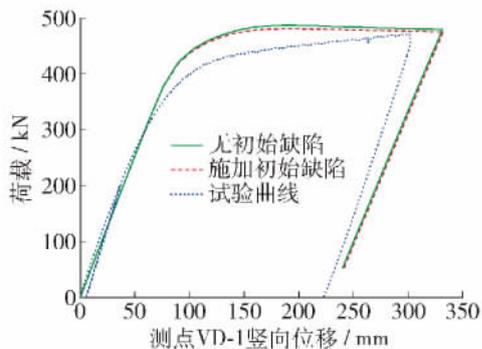


图 45 XQL-3 试验有限元对比

Fig. 45 XQL-3 load displacement curve comparison of FEM and test results

3.3% 若考虑初始缺陷,有限元模型的极限承载力有所降低,比试验极限承载力高 2.0%,十分接近试验结果. 试验与有限元结果具体数值对比见表 2.

表 2 箱形曲梁试验有限元对比  
Table 2 Comparison of FEM and test results

构件	试验值/kN	有限元值/kN		考虑初始缺陷试验有限元对比/%
		无初始缺陷	施加初始缺陷	
XQL-1	483.614	688.711	554.757	14.7
XQL-2	734.584	771.354	740.79	0.8
XQL-3	471.933	487.454	481.47	2.0

### 5 结论

1) 针对各箱形曲梁节点试验构件,通过试验验证可知,设计荷载下构件仍处于弹性阶段,曲梁的设计是合理安全的.

2) 箱形曲梁端部需要加面外支撑,支撑约束整个截面或仅约束上翼缘,对于限制构件的面外位移效果相同,因此,实际工程中面外支撑构件仅约束箱形曲梁上部是安全的.

3) 箱形曲梁构件由于其特殊的几何形状,相比直线构件而言存在着初始的几何缺陷,在荷载作用下呈压弯受力状态,弯矩最大位置会发生内翼缘或腹板的压屈破坏,进而会导致焊缝开裂等问题,因此,曲梁节点处焊接质量十分重要.

4) 箱形曲梁构件的有限元模型可以较好地模拟试验加载情况,通过分析模型的初始缺陷可以看出,由于加工造成的初始缺陷也会对其承载力和破坏形式有一定的影响.

### 参考文献:

[1] 王元清,刘莉媛,丁大益,等. 合肥新桥国际机场航站楼钢结构节点性能研究[J]. 施工技术,2010,39(增刊1): 320-323  
WANG Yuan-qing, LIU Li-yuan, DING Da-yi, et al. Analysis of bearing behavior for key connections of Hefei Xinqiao international airport terminal steel structure [J]. Construction Technology, 2010, 39( Suppl 1): 320-323. (in Chinese)

[2] 王元清,刘莉媛,丁大益,等. 合肥新桥国际机场柱计算长度及曲梁参数分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版,2011,27(3): 474-479.  
WANG Yuan-qing, LIU Li-yuan, DING Da-yi, et al. Column effective length factor and girder parametric

- analysis for the components of xinqiao international airport terminal [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011, 27(3): 474-479. (in Chinese)
- [3] LUO Q Z, LI Q S. Shear lag of thin-walled curved box girder bridges [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(10): 1111-1114.
- [4] CHOI B H, YOO C H, ASCE F. Strength of stiffened flanges in horizontally curved box girders [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(2): 167-176.
- [5] 范重, 彭翼, 王喆, 等. 国家体育场主结构扭曲箱形构件设计研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(2): 97-111.  
FAN Zhong, PENG Yi, WANG Zhe, et al. Design and research of twisted box-sections of the main structure for the National Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(2): 97-111. (in Chinese)
- [6] 钱稼茹, 赵作周, 彭明英, 等. 国家体育场扭曲箱形构件抗弯试验 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(2): 112-119.  
QIAN Jia-ru, ZHAO Zuo-zhou, PENG Ming-ying, et al. Experiments on flexural behavior of steel twisted box-section members of the National Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(2): 112-119. (in Chinese)
- [7] 冯阳, 覃阳, 甘明, 等. 北京 2008 奥运会国家体育馆主体结构设计 [J]. 建筑结构, 2008, 38(1): 6-11.  
FENG Yang, QIN Yang, GAN Ming, et al. Design of main structure in national indoor stadium of Beijing 2008 olympic games [J]. Building Structure, 2008, 38(1): 6-11. (in Chinese)
- [8] 王元清, 刘莉媛, 丁大益, 等. 大跨结构箱形曲梁承载性能的影响因素分析 [J]. 建筑科学, 2011, 27(5): 1-5, 31.  
WANG Yuan-qing, LIU Li-yuan, DING Da-yi, et al. Parametric analysis of bearing behavior for curved box-girders of large span steel structure [J]. Building Science, 2011, 27(5): 1-5, 31. (in Chinese)
- [9] 李桢章, 梁志, 李恺平, 等. 广州新白云国际机场航站楼钢结构设计 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23(5): 78-83.  
LI Zhen-zhang, LIANG Zhi, LI Kai-ping, et al. The steel structure design of the terminal building in Guangzhou New Baiyun International Airport [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(5): 78-83. (in Chinese)
- [10] 张顺强, 杨琦, 陶晞暝. 西安咸阳国际机场航站楼屋盖钢结构设计 [J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(2): 52-58.  
ZHANG Shun-qiang, YANG Qi, TAO Xi-ming. Structural design of the steel roof for hub building of Xi'an Xianyang International Airport [J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(2): 52-58. (in Chinese)
- [11] 胡建丽. 国家体育场(鸟巢)工程设计及运行中若干问题的体会 [J]. 暖通空调, 2010, 40(2): 43-46.  
HU Jian-li. Design and operating experience of the National Stadium [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2010, 40(2): 43-46. (in Chinese)
- [12] KANG Y J, YOO C H. Thin-walled curved beams I: formulation of nonlinear equations [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 129(10): 2073-2101.
- [13] DONG J, SAUSE R. Finite element analysis of curved steel girders with tubular flanges [J]. Engineering Structures, 2010, 32(1): 319-327.
- [14] 徐艳秋, 许克宾, 王丽. 薄壁弯梁桥空间有限元分析 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 58-62.  
XU Yan-qiu, XU Ke-bin, WANG Li. Analysis of thin-walled curved-box beam bridge using 3D FEM [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 58-62. (in Chinese)
- [15] 童根树, 许强. 工字形截面圆弧曲梁的非线性理论 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 1-7.  
TONG Gen-shu, XU Qiang. Nonlinear theory for round curving beams with I-sections [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 1-7. (in Chinese)
- [16] WANG Yuan-qing, LIU Li-yuan, DING Da-yi, et al. Finite element analysis of bearing behavior for the curved box-girders of Hefei Xinqiao International Airport Terminal [C] // Proceeding of the 11th International Symposium on Structural Engineering. Guangzhou [s. n.], 2010: 376-381.

(责任编辑 刘 潇)