

文章编号:1673-2049(2006)01-0029-05

# 钢管混凝土桁梁受弯试验研究

黄文金<sup>1,2</sup>, 陈宝春<sup>1</sup>

(1. 福州大学 土木建筑工程学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 交通学院, 福建 福州 350002)

**摘要:**针对钢管混凝土桁式受弯构件的整体受力性能,设计并制作了钢管混凝土桁梁试件,进行了四分点对称加载,分析了钢管混凝土桁梁的变形与应变分布模式、破坏模式和承载力等。试验结果表明:钢管混凝土桁梁变形比实腹梁小很多且主要集中于边段;桁梁节点受力复杂,节点承载力是结构承载力的控制因素;弦杆填充混凝土可增大弦杆的径向刚度并约束节点变形,避免发生弦杆钢管塑性失效,从而提高节点承载力。四分点对称荷载作用下,全焊桁梁腹杆实际分担的轴力值小于铰接桁架的计算值,弦杆承受了较大的弯矩;节点破坏前桁梁试件边段腹杆有较明显的剪切变形。

**关键词:**钢管混凝土;桁梁;试验研究;极限承载力;管节点

中图分类号:U528.59 文献标志码:A

## Experimental Research on Concrete-Filled Steel Tube Truss Girder Under Bending

HUANG Wen-jin<sup>1,2</sup>, CHEN Bao-chun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. School of Transportation, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

**Abstract:** In order to make further investigation into the global action of concrete-filled steel tube (CFST) truss girder, experiment of CFST truss girder specimen under symmetrically quarter loading was carried out. Specimen of CFST truss girder was fabricated according to dimensions of stiffening girder and truss arch rib of several built bridges and code for design of steel tube structure. Based on the measured deflection and strain of specimen during experiment, the deformation, strain increasing mode of steel tube, failure mode and load-carrying capacity of joints as well as the whole girder were analyzed. The test result shows that deflection of CFST truss girder is mainly attributed to deformation of shear-bending parts and much smaller than that of solid web girder. The behaviors of joints are complex and its ultimate load capacity will control that of the truss girder. Filled concrete in the chord tubes can increase the member's radial rigidity and keep it from plastic failure thus strengthens the joints. Under the symmetrically quarter loading, axial forces in web members for CFST welding truss girder are commonly less than that of hinged truss, and the chord members are subjected to prominent bending moment. Before the failure of joints, obvious shear deformation among web members can be observed during shearing-bending parts.

**Key words:** concrete-filled steel tube; truss girder; experimental research; ultimate load capacity; tubular joint

收稿日期:2005-12-09

基金项目:国家自然科学基金项目(50578042)

作者简介:黄文金(1975-),男,福建莆田人,福建农林大学讲师,福州大学工学博士研究生,E-mail:wenjinhuang@fzu.edu.cn.

## 0 引言

圆钢管各向同性、截面封闭,由于管薄、回转半径大,对受压受扭均有利。圆钢管外壁圆滑,在风和水力作用下具有较小的阻力系数,表面也难堆积灰尘和水,端部封闭后,内部不易锈蚀,具有较好的防腐性能。它的应用非常广泛,如房屋建筑、桥梁、海洋构造物等<sup>[1]</sup>。在以受弯为主的结构中,为了以较小的钢管截面获得较大的抗弯能力,通常采用桁式结构,然而钢管桁式结构的极限承载力与抗疲劳性能往往以节点控制,为此已对钢管节点受力性能进行了大量的研究<sup>[2-4]</sup>。为了改善钢管桁梁的受力性能,一种切实有效的方法是在弦杆中灌注混凝土,使其成为钢管混凝土桁梁。对钢管混凝土节点的研究结果表明:弦杆管内的混凝土能明显提高节点的承载力和抗疲劳性能<sup>[5-6]</sup>,然而对于钢管混凝土桁梁的整体受力性能还未见有试验研究报道,因此,笔者进行了钢管混凝土桁梁四分点对称加载的试验研究,重点考察其变形与应变、破坏模式和极限承载力。

## 1 试验概况

钢管混凝土桁梁试件为N型节点的Pratt桁梁,钢管桁梁的设计参数参照《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中有关钢管构造的要求取值。桁梁试件全长为3 008 mm,计算跨径为2 880 mm,高为488 mm,宽为222 mm,桁梁跨度与高度比值为13,弦杆与腹杆交角为55°,腹杆间隙为18 mm,见图1(a),图1中英文字母代表节点编号。两片平面桁梁通过平联管连接形成空间结构,沿梁跨方向平联的中心间距为180 mm,见图1(b)。弦杆钢管采用 $\Phi 89 \times 1.8$ 的20<sup>#</sup>有缝管,径厚比值为49.4;腹杆采用 $\Phi 48 \times 1.5$ 的20<sup>#</sup>无缝管,径厚比值为32;腹杆与弦杆管径比值为0.54;上平联钢管采用 $\Phi 60 \times 1.6$ 的20<sup>#</sup>无缝管,径厚比值为37.5,见图1(c)。桁梁试件两端下平联采用 $\Phi 108 \times 7.0$ 的有缝钢管,见图1(d),端部下平联作为桁梁试件的支承点。钢材实测极限抗拉强度为533.3 MPa,条件屈服强度为428 MPa,弹性模量为209 GPa,泊松比为0.259。

上、下弦杆和端部下平联钢管内填充C40混凝土。上弦杆两端均设有封头盖板,先在一端焊上,同时将另一端的端部下平联对准下弦杆轴线开洞以备新拌混凝土通过。浇灌混凝土时,将桁梁竖立,从未焊盖板的上弦杆杆端和端部下平联开口处灌入混凝土,用 $\Phi 50$ 插入式振捣棒伸入钢管内振捣,同时在

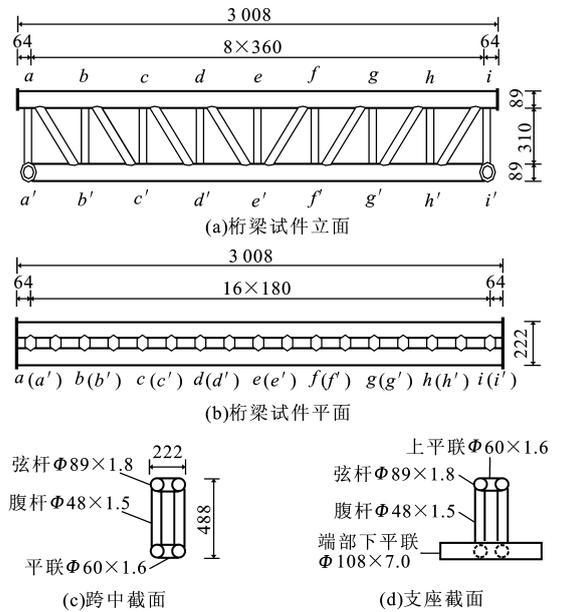


图1 桁梁试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Sizes of Truss Girder Specimen (Unit:mm)

试件的管壁外部用振捣棒和木锤侧振。等混凝土硬化收缩后将杆端混凝土磨平,在上弦杆杆端焊上封头盖板,并对端部下平联开洞处进行补焊。实测混凝土标准试块抗压强度为46.5 MPa。

桁梁试件置于两个钢筋混凝土台座上,其两端的下平联与台座上的摩擦板直接接触,并绕端部下平联支承点可以转动。试验加载设备为油压千斤顶,千斤顶置于试件跨中上方,通过分配梁对桁梁试件进行四分点对称加载。测量桁梁试件挠度的百分表分别置于桁梁试件 $l/4$ 、 $l/2$ 与支座处,见图2(a),图2中钢管外壁上的短黑线为应变片。测量桁梁试件节点处钢管应变的应变片布置于腹杆接头和弦杆节点处,测量杆件轴向应变的应变片布置于杆件中截面。为了减小局部加载及节点偏心对节点c处弦杆应变片的影响,将测量节点c的上弦杆应变片布置于节段bc中间,如图2(a)所示。本文将桁梁试件支座截面至 $l/4$ 截面[节点 $a(a')$ 至节点 $c(c')$ 之间]称为边段, $l/4$ 截面至 $l/2$ 截面[节点 $c(c')$ 至节点 $e(e')$ 之间]称为中段,边段和中段各包含两个节段。各测点应变片沿钢管圆周对称布置,其中弦杆应变片间隔90°、腹杆间隔180°,见图2(b),圆心角0°和180°的应变片分别为钢管上缘和下缘的应变片。

应变片、百分表读数采用IMP数据系统采集,并通过手持智能应变数据采集仪测读千斤顶油压荷载。试验的加载制度为:弹性范围内每级荷载为计算极限荷载的1/10,当桁梁试件荷载-挠度曲线进入非线性阶段后每级荷载约为计算极限荷载的

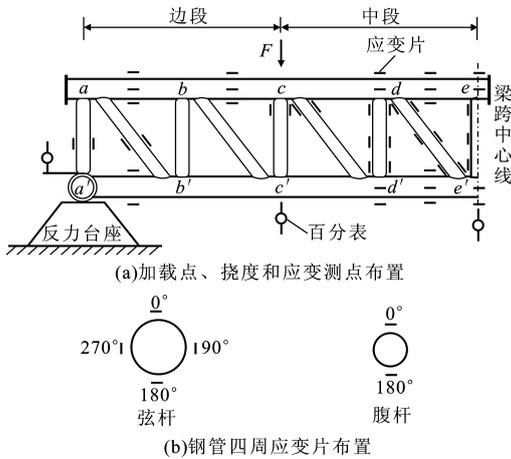


图 2 测点布置

Fig. 2 Measuring Points Arrangement

1/20, 每级荷载的持荷时间约为 2 min。

## 2 桁梁整体受力分析

桁梁试件的荷载-挠度关系见图 3, 它大致可由弹性段 OA、弹塑性段 AB、接头开裂段 BC 和接头失效段 CD、DE 五段组成。图 3 中  $F$  为  $l/4$  截面的千斤顶荷载,  $U_m$  为跨中挠度。

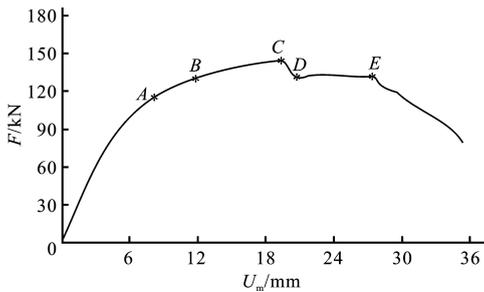


图 3 荷载-挠度关系

Fig. 3 Relation of Load and Deflection

在四分点对称荷载作用下, 桁梁试件左、右半跨变形和破坏的发展过程相同, 以左半跨为例, 从加载开始, 曲线以较大的斜率接近直线上升, 至 A 点时荷载  $F$  达到 110 kN, 钢管应变最大出现在边段的腹杆  $ab'$  的节点  $a$  上, 应变达到  $2.437 \times 10^{-6}$ , 钢管开始屈服, OA 为弹性段。此后, 曲线进入变形明显增长的非线性阶段, 斜率不断减小, 至 B 点时荷载为 130 kN, 节点  $a$  的受拉接头在弦杆钢管冠点处开裂, 但桁梁试件还可继续加载, 曲线斜率未出现明显转折。至 C 点时, 荷载达到峰值 142.5 kN, 将此荷载值作为该试件的极限荷载值。曲线 AC 为非线性增长段。

图 4 为桁梁试件中段的弦杆和腹杆钢管荷载-应变关系。由图 4 可知: 荷载达到峰值 142.5 kN 时, 中段的弦杆和腹杆钢管应变仍都处于弹性阶段,

桁梁试件中段的弦杆钢管最大应变为  $1.301 \times 10^{-6}$ , 最小应变为  $661 \times 10^{-6}$ , 远小于钢材实测屈服应变  $2.550 \times 10^{-6}$ , 其平均轴向应变(上、下缘应变平均值)随荷载增大基本呈线性增长。与同一节段上的弦杆相比, 腹杆应变更小, 尤其是受拉斜腹杆  $de'$  和受压直腹杆  $ee'$  应变均不超过  $50 \times 10^{-6}$ 。在桁梁试件边段节点破坏前, 其中段的弦杆和腹杆钢管应变不但数值很小, 而且始终处于线性变化范围内。图 3 中荷载-挠度关系曲线在荷载达到峰值荷载前的 AC 段具有明显的非线性, 即在节点破坏前变形已经进入了非线性阶段, 由此可见: 桁梁试件中段的应变变化模式与实腹梁的明显不同。

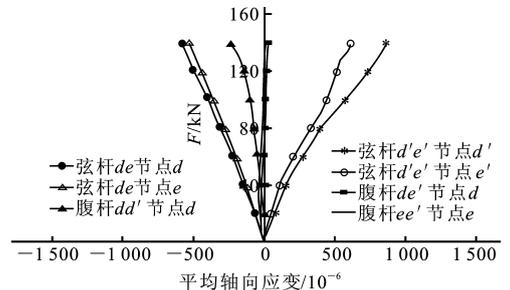


图 4 中段弦杆和腹杆钢管的荷载-应变关系

Fig. 4 Relation of Load and Strain for Steel Tubes of Middle Part

在四分点对称荷载作用下, 桁梁试件变形很小且主要集中于边段, 节点破坏前各级荷载作用下其沿梁跨方向的挠度曲线见图 5。接头破坏前, 桁梁试件边段的腹杆可见剪切错动现象, 弦杆略显弯曲, 但中段的弦杆和腹杆变形都很小。桁梁试件的挠度曲线在加载初期即区别于实腹式梁, 尤其是当桁梁试件进入非线性阶段后区别更明显, 挠度曲线沿梁跨方向大致表现为三折线的模式。

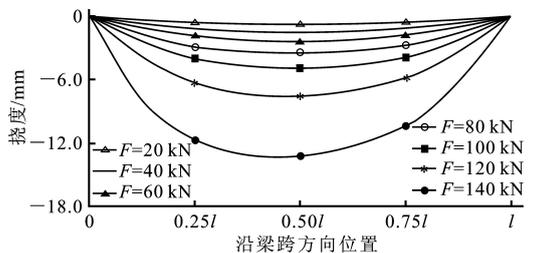


图 5 桁梁试件的挠度

Fig. 5 Deflection of Truss Girder Specimen

峰值荷载(图 3 中 C 点)所对应的跨中挠度为 19.64 mm, 是计算跨径的 1/146.6; 当第二个受拉接头破坏时, 桁梁试件承载力由峰值荷载 142.5 kN 降至 131.3 kN, 减少了 7.8%, 跨中挠度达到 27.5 mm 时为计算跨径的 1/104.7。钢管混凝土实

腹梁(圆形和哑铃形截面)跨中变形超过梁跨的 $1/20$ 时,荷载-挠度关系曲线仍处于上升趋势<sup>[7-8]</sup>。钢管混凝土桁梁变形明显小于实腹梁,其主要原因:一是桁式截面的抗弯刚度较实腹式截面的大;二是桁梁试件节点破坏先于整体破坏发生,各杆件尤其是弦杆远未达到构件的极限承载能力;三是变形主要集中于边段而中段的变形很小。

在峰值荷载之后,荷载-挠度关系曲线并不像一般受弯构件一样出现平滑的下降段,而是随着节点 $a$ 裂缝的不断开展,曲线出现了一个急速下降段,至 $D$ 点时节点 $a$ 的受拉接头完全失效,此后荷载基本维持在 $130.7\text{ kN}$ 左右,但变形迅速增大,节点 $a$ 的受压接头逐渐外鼓。在跨中挠度迅速增加的同时,另一个节点 $b$ 的受拉接头也出现裂纹且不断发展,至 $E$ 点时,节点 $b$ 的受拉接头完全破坏,边段只由接头处局部屈曲的受压腹杆 $aa'$ 和 $bb'$ 及弦杆抵抗剪切变形,桁梁试件迅速卸载,试验终止。此时,桁梁左、右半跨的边段都连续出现两个节点(左半跨为节点 $a$ 和 $b$ ,右半跨为节点 $h$ 和 $i$ )破坏。由此可见,钢管混凝土桁梁受弯与钢管桁梁相似,节点破坏仍是结构极限承载力的控制因素。

### 3 节点破坏模式和节点承载力分析

当荷载-挠度关系曲线(图3)进入 $B$ 点时,节点 $a$ 处弦杆钢管冠点开始出现裂缝,裂缝沿受拉腹杆 $ab'$ (斜腹杆)四周发展,受压腹杆 $aa'$ (直腹杆)在接头处也发生局部屈曲,见图6(a);至荷载-挠度关系曲线的 $C$ 点时,节点 $b$ 也发生受拉腹杆 $bc'$ 开裂,边段可见较明显的腹杆剪切变形和弦杆弯曲,见图6(b);剖开弦杆钢管后,上、下弦杆管内混凝土基本保持完好,见图6(c)、(d)。

对于间隙接头的空心管结构,腹杆与弦杆管径比 $\beta$ 小于中值时( $\beta < 0.6$ ),接头失效模式一般为弦杆表面塑性失效(A模式),弦杆与受压腹杆连接处压陷而与受拉腹杆连接处鼓曲;当管径比 $\beta$ 为中值时( $\beta = 0.6 \sim 0.8$ ),弦杆表面经常出现冲剪失效(B模式)。与空心管结构不同,钢管混凝土桁梁试件管径比 $\beta$ 为 $0.54$ 小于中值,由于弦杆钢管填充混凝土,试件边段的节点破坏为弦杆钢管冲剪失效,因此接头的失效模式为B模式而不是A模式。

由于受节点的影响,腹杆接头与中截面的钢管应变变化有一定的差别,同时在接头开裂至完全失效过程中,腹杆接头应变波动很大而腹杆中截面相对较稳定,因此本文中通过腹杆中截面的平均轴向

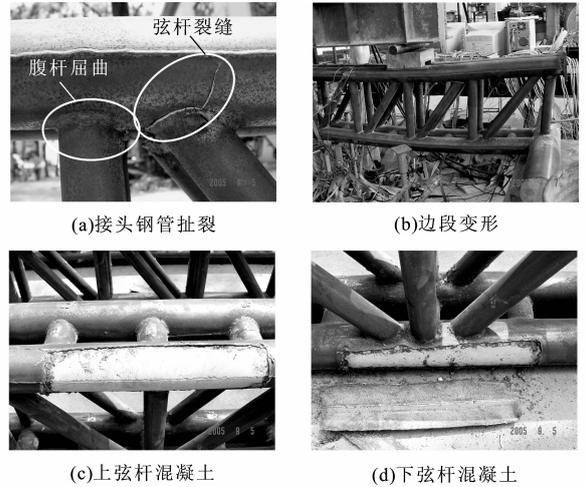


图6 桁梁试件破坏模式

Fig. 6 Failure Modes of Truss Girder Specimen

应变计算腹杆的换算轴力 $F_1$ ,并以腹杆的换算轴力作为节点的支杆轴力。当 $l/4$ 截面荷载 $F$ 增加到 $110\text{ kN}$ 时,即荷载-挠度关系曲线到达 $A$ 点时,受拉腹杆 $ab'$ 节点 $a$ 处的应变最大,节点 $a$ 处钢管开始屈服;当 $l/4$ 截面荷载 $F$ 增加到 $130\text{ kN}$ 时,即荷载-挠度关系曲线到达 $B$ 点时,受拉腹杆 $ab'$ 节点 $a$ 处的弦杆钢管开始开裂。若分别以实测的钢材屈服强度和极限抗拉强度分别计算荷载-挠度关系曲线上 $A$ 、 $B$ 点的节点强度,并忽略腹杆面内弯矩的影响,则按文献[9]中计算的冲剪承载力 $F_2$ 和按文献[10]中计算的塑性失效承载力 $F_3$ ,以及按铰接桁架模型计算的杆件轴力 $F_4$ 见表1,其中,铰接桁架模型假定所有的节点均为铰接且节点偏心距为零。如表1所示,桁梁试件实际节点破坏为弦杆钢管冲剪失效,塑性失效承载力 $F_3$ 仅为腹杆换算轴力 $F_1$ 的 $1/4$ ,铰接桁架腹杆轴力 $F_4$ 比 $F_1$ 小约 $1/3$ ,而按文献[9]中计算的空钢管冲剪承载力 $F_2$ 与 $F_1$ 则非常接近。

考虑到桁梁试件腹杆除了承受轴力外还承受有弯矩,受拉接头的实际应力要比受拉腹杆中截面的平均轴向应力要大,因此,钢管混凝土桁梁试件受拉接头的节点强度远大于空钢管节点发生弦杆钢管表面塑性失效时的承载力。按铰接桁架模型进行简化计算时,节点腹杆轴力计算值与受拉腹杆中截面的实际轴力值有较大的误差。对于钢管混凝土桁梁,节点冲剪承载力应采用空钢管的冲剪承载力进行验算,但同时还应考虑腹杆弯矩的影响。由此可见,桁梁试件弦杆填充混凝土后既增加弦杆的抗压和抗弯刚度也增加了弦杆的径向刚度,填充混凝土可以约束节点变形和增大节点强度,弦杆本身还可以分担部分剪力,进而提高了桁梁试件的整体承载力。

表 1 钢管混凝土桁梁受拉接头节点强度计算值比较

Tab. 1 Calculation Values Comparison of Joint Strength Under Tension for CFST Truss Girder

节点钢管 受力形态	1/4 截面荷载 $F/\text{kN}$	受拉腹杆 换算轴力 $F_1/\text{kN}$	冲剪破坏 承载力 <sup>[9]</sup> $F_2/\text{kN}$	塑性失效 承载力 <sup>[10]</sup> $F_3/\text{kN}$	铰接桁架计算 腹杆轴力 $F_4/\text{kN}$	$(F_2 \cdot F_1^{-1})/\%$	$(F_3 \cdot F_1^{-1})/\%$	$(F_4 \cdot F_1^{-1})/\%$
开始屈服	110	98.8	90.9	22.4	67.1	92	23	68
开始开裂	130	111.5	113.2	27.9	79.4	102	25	71

## 4 结 语

(1)弦杆管内混凝土提高了钢管径向刚度,节点的破坏模式从弦杆钢管塑性失效变为冲剪破坏,从而显著提高节点的强度。

(2)钢管混凝土桁梁试件破坏为受拉接头失效,节点强度仍然是其结构整体承载能力的控制因素。

(3)由于采用全焊相贯节点和管内充填有混凝土,钢管混凝土桁梁的弦杆承受了较大的弯矩,节点破坏前弦杆已有较明显的弯曲变形。

(4)钢管混凝土桁梁腹杆按铰接桁架计算的轴力不符合实际,除轴力外腹杆还承受有弯矩,应按实际的全焊结构进行计算。

(5)钢管混凝土桁梁试件变形比实腹梁小很多,且主要集中于边段。桁梁试件中弦杆和腹杆的钢管受力均很小。

## 参考文献:

### References:

- [1] 沃登尼尔 J. 钢管截面的结构应用[M]. 上海:同济大学出版社,2004.  
WARDENIER J. Construction Application of Steel Tubular Section [M]. Shanghai: Tongji University Press,2004.
- [2] 陈以一,陈扬骥. 钢管结构相贯节点的研究现状[J]. 建筑结构,2002,32(7):52-55.  
CHEN Yi-yi, CHEN Yang-ji. Research Actuality of Steel Tubular Structure Joints[J]. Building Construction,2002,32(7):52-55.
- [3] 聂建国,秦 凯,张桂标. 方钢管混凝土内隔板式节点的抗弯承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1):42-49.  
NIE Jian-guo, QIN Kai, ZHANG Gui-biao. Experimental Research and Theoretical Analysis on Flexural Capacity of Connections for Concrete-Filled Steel Square Tubular Columns with Inner Diaphragms[J].

Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(1):42-49.

- [4] 赵均海,郭红香,魏雪英. 圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1):50-54.  
ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Research on Bearing Capacity of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(1):50-54.
- [5] YOSHINAGA S. Experiments on Concrete Filled and Reinforced Tubular K-Joints of Truss Girder [J]. Journal of Constructional Steel Research,2004,60(5):683-689.
- [6] 庞守献. 钢管混凝土梁模型的疲劳试验与分析[J]. 铁道建筑技术,1997,14(3):8-12.  
PANG Shou-xian. Fatigue Experiment and Analysis of Concrete Filled Steel Tubular Model[J]. Railway Construction Technology,1997,14(3):8-12.
- [7] 蔡绍怀. 钢管混凝土抗弯强度的试验研究[J]. 建筑结构,1985,15(3):28-29.  
CAI Shao-huai. Experimental Research on Bending Strength of Concrete Filled Steel Tubular[J]. Building Construction,1985,15(3):28-29.
- [8] 陈宝春,盛 叶,韦建刚. 钢管混凝土哑铃型梁受弯试验研究[J]. 工程力学,2005,22(4):119-125.  
CHEN Bao-chun, SHENG Ye, WEI Jian-gang. Experimental Study of Concrete Filled Steel Tubular Dumbbell-Shaped Beam Under Bending[J]. Engineering Mechanics,2005,22(4):119-125.
- [9] PACKER J A, HENDERSON J E, CAO J J. 空心管结构连接设计指南[M]. 北京:科学出版社,1997.  
PACKER J A, HENDERSON J E, CAO J J. Hollow Tubular Structure Joint Design Guide [M]. Beijing: Science Press,1997.
- [10] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S].  
GB 50017-2003, Steel Structure Design Code[S].