

文章编号:1671-6833(2003)03-0001-05

钢管混凝土梁柱节点受力性能的试验研究

刘立新<sup>1</sup>, 刘家慧<sup>2</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州大学综合设计研究院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 钢筋混凝土梁与钢管混凝土柱节点的受力性能是影响钢管混凝土结构应用的关键问题. 针对某电信枢纽中心的工程实践提出了穿心牛腿+环梁的新型节点构造形式, 依据相似原理进行了静载及反复荷载下节点模型试验研究. 试验研究表明, 该节点传力路线明确, 受力性能较好. 根据试验结果改进后的新型节点已用于工程实践.

**关键词:** 钢管混凝土柱; 钢筋混凝土梁—钢管混凝土柱节点; 环梁; 抗震设计

**中图分类号:** TU 312<sup>+</sup>.1 **文献标识码:** A

0 引言

钢管混凝土结构是将混凝土注入封闭的薄壁钢管形成的组合结构, 一般用作受压构件, 包括中心受压和偏心受压构件. 近十年来, 钢管混凝土在工业厂房、高炉和锅炉构架、送变电构架、公路桥梁以及高层和超高层建筑中得到广泛的应用, 而且发展十分迅速.

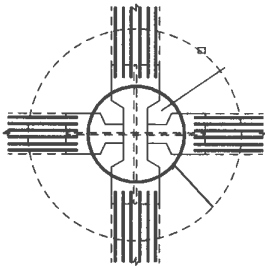
《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS 28:90)对钢管混凝土柱的承载力提出了较完整的计算公式, 并对施工工艺、节点构造等方面

做出了一些规定. 但《规程》只对变宽度梁节点、上下环梁节点及双梁节点等三种节点形式做出了一定的构造措施, 节点形式较少, 对某些新型节点缺乏较充分的试验依据, 难以满足工程实践的需要.

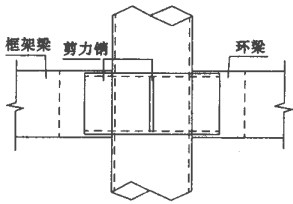
结合某电信枢纽工程提出了一种新型节点构造形式——穿心暗牛腿+环梁, 节点构造如图 1 所示. 该节点采用穿心牛腿承担混凝土梁传来的剪力、弯矩, 同时采用节点环形梁局部加强节点处的受力性能. 混凝土梁内纵筋焊接于外挑工字型钢的上下翼缘(牛腿).



(a) 模型照片



(b) 节点平面示意图



(c) 节点立面图

图 1 节点构造图

Fig. 1 Construction of joint

该节点的传力路线十分明确: 柱端竖向荷载由钢管混凝土柱承担, 楼盖及梁上的弯矩、剪力以及扭矩通过环梁、混凝土梁传至节点处的工字形暗牛腿, 环梁本身也承受楼盖直接传来的弯矩及扭矩. 显然, 牛腿的上下翼缘处的受力更为复杂,

是节点研究的关键, 同时本文也探讨了框架梁内纵筋屈服后剪力的传递性能.

1 试验方案

根据相似原理, 按工程实际尺寸制作 1:3 的

收稿日期:2003-04-25; 修订日期:2003-06-20

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(004041800)

作者简介: 刘立新(1947-), 男, 湖北省汉川市人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事混凝土结构、砌体结构基本理论及工程应用研究.

钢管混凝土柱—钢筋混凝土梁节点试件模型两组 (A、B) 4 个(如表 1 所示),其中 A 组试件为节点上下均为钢管混凝土柱,B 组试件节点以下为钢管

混凝土柱,节点以上为钢筋混凝土柱,主要试验研究内容为静载下及反复荷载作用下梁柱节点的受力性能.

表 1 模型试验等效荷载设计值及主要等效尺寸参数

Tab. 1 Equivalent design value and equivalent size of test model

项目	原形结构	试验模型(1:3)
层高 $h/\text{m}$	4.6	1.534
柱直径 $d/\text{mm}$	1 200	400
柱钢管(16Mn 钢)壁厚 $t/\text{mm}$	22	7.5
柱混凝土强度等级	C60	C60
梁跨度 $l_0/\text{mm}$	9 000/12 300	3 000/4 100
梁截面尺寸/ $\text{mm}$	纵向 $500\times 800$ ;横向 $606\times 100\ 0$	纵向 $166\times 266$ ;横向 $200\times 333$
梁混凝土强度等级	C30	C30

图 2 为试验加载体系示意图,静载试验时  $N_1$  与  $N_2$  同步单向作用静载,反复荷载下试验研究中, $N_1,N_2$  为一对同步上下反复作用力.

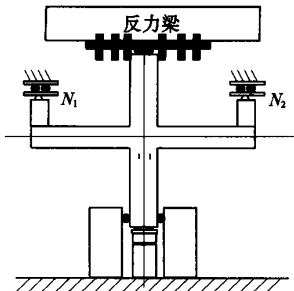


图 2 试验加载体系示意图

Fig. 2 Loading graph of test model

根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)采用荷载—位移双控制的加载制度(如图 3 所示).即首先施加轴向荷载,并在以后加载过程中保持(定轴力,大小为设计荷载);试件屈服前,采用荷载控制,并按预计屈服荷载的 30%为级差分级加载,并在接近开裂及屈服荷载前适当减少级差进行加载;试件屈服后采用变形控制.屈服位移取梁内纵筋屈服时的试件位移,并以该位移值的整数倍为级差进行加载控制;试件屈服后每级荷载反复三次.主要量测内容有梁与柱端部位移、钢管应变、框架梁及环梁内纵筋与箍筋应变、外加荷载及反力等.

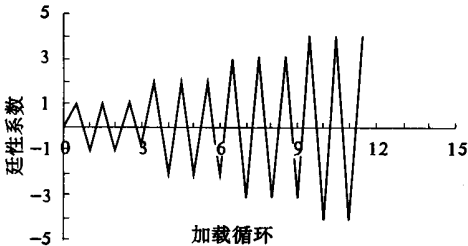


图 3 加载制度

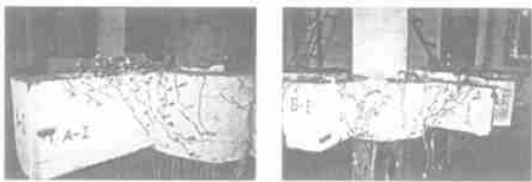
Fig. 3 Loading rule of test model

2 静载下的试验研究

2.1 试件的破坏形态

试验中所有试件节点核心处在整个加载过程中均不发生破坏,柱端应变较小,B 组试件柱端也不产生裂缝,破坏集中在框架梁端部.说明工程设计满足混凝土结构设计规范所要求的强柱弱梁的基本设计原则.

试件 A—I 在恒定轴力 1 500 kN 作用下,梁端荷载  $N_1$  加载至 75 kN 时,框架梁与环梁交界处受拉区出现弯曲裂缝(见图 4),此时截面相应的开裂弯矩  $M=51.30\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,而试件的设计弯矩为  $84.74\text{ kN}\cdot\text{m}$ .当加载至  $N_1=87.5\text{ kN}$  时,框架梁顶面出现第二条垂直裂缝,裂缝宽度  $0.05\text{ mm}$ ,而且裂缝逐渐转化为弯剪斜裂缝,且发展较快;加载至  $N_1=125\text{ kN}$  时,斜裂缝发展、延伸至环梁上;加载至  $N_1=175\text{ kN}$  时,斜裂缝长度、宽度急剧增加.加载至  $N_1=212.5\text{ kN}$  时,纵向钢筋屈服,斜裂缝发展十分充分,环梁处的斜裂缝基本延伸至试件底部及环梁处,使得梁端挠度增加明显.当  $N_1=229.8\text{ kN}$  时,试件梁端由于试件的斜裂缝发展过于充分,而发生纵筋弯曲屈服后的弯曲剪切破坏,试件的实际破坏弯矩为  $145.56\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,远大于设计弯矩.



(a) A—I (b) B—I

图 4 静载下试件的裂缝图

Fig. 4 Failure modes under static loads

2.2 框架梁的荷载—挠度曲线分析

框架梁在受力过程中,其变形基本上与普通钢筋混凝土试件相同(见图5)。以B—Ⅱ试件为例描述如下:

(1) 开始加荷时,因为荷载尚小截面未开裂,试件表现为弹性变形特征,挠度较小。从荷载—挠度曲线看,挠度增长近似为直线。

(2) 当荷载达到75kN时,在试件拉区出现第一条裂缝。此时,试件挠度突变,随即便稳定,其增长速度较前一阶段快。因为受拉区部分混凝土退出工作,钢筋应变亦有突变现象。此时试件变形虽然表现为曲线特征,但总的说来,变形较为稳定,试件持荷亦很稳定。继续加荷后,钢筋混凝土应变进一步增加,裂缝条数增多。

(3) 当钢筋应变逐步增大到一定阶段时,即会表现出塑性变形特征,挠度曲线增长更快,裂缝增长亦加快,这就标志着试件已进入钢筋流塑阶段。从实测情况看,试件从第二阶段到第三阶段的过渡较为平缓。

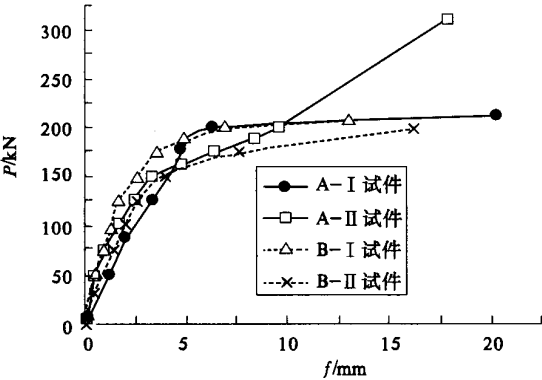


图5 静载下梁端荷载—挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curve under static loads

从框架梁的荷载挠度曲线分析可见,试件初期受力性能较为稳定,但后期挠度增加较大。

表2 静载下试件试验结果表

Tab. 2 Test results under static loads

项目	A—Ⅰ	A—Ⅱ	B—Ⅰ	B—Ⅱ
开裂荷载/kN	75.00	40.14	40.00	32.00
屈服荷载/kN	212.50	204.70	173.50	168.20
设计荷载/kN	145.20	119.30	94.11	91.58
破坏荷载/(kN)	229.80	309.68	208.33	198.25
开裂弯矩/(kN·m)	51.38	23.68	20.80	17.44
屈服弯矩/(kN·m)	145.60	120.77	90.22	91.67
设计弯矩/(kN·m)	84.74	64.37	53.59	39.74
破坏弯矩/(kN·m)	145.60	182.71	108.33	108.05

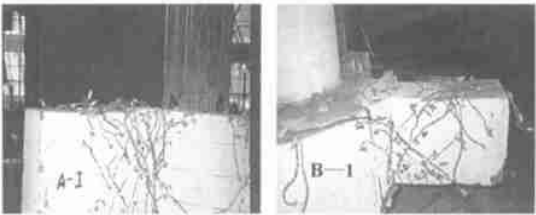
由表2可知,从试件的破坏形态来看,所有试件框架节点核心区域均不发生破坏,柱端甚至不开裂,试件的破坏均源于框架梁端部的剪切破坏。

且均为纵向钢筋先行屈服的弯曲剪切破坏。最大弯矩设计值  $M_0$  和最大剪力设计值  $V_0$  满足设计承载力要求,静载下框架梁端首先出现裂缝,而且开裂荷载较高,接近设计荷载,试件的极限承载力接近或超过设计荷载的200%,这说明试件承载力设计满足要求,并具有较大的抗弯承载潜力。

3 反复荷载下的试验研究

3.1 破坏形态

如图6所示,试件A—Ⅰ发生较典型的弯曲剪切破坏:在恒定的轴向压力作用下,荷载控制阶段,  $N_1=50$  kN时,梁端出现垂直裂缝,并随加载的继续逐渐形成弯剪裂缝,而且裂缝大致分布于距梁端一定长度范围内。位移控制阶段,随着循环次数的增加,正反两方向的弯剪裂缝(剪切斜裂缝)明显发展。当加载到第1个循环的第3个加载周期时,斜裂缝延伸至环梁,第3次加载循环完成后,梁上正反两方向的弯剪裂缝、剪切斜裂缝相互交叉成X状,试件变形刚度产较大程度的衰减,荷载也相应发生明显衰减。



(a) A—Ⅰ (b) B—Ⅰ

图6 反复荷载下试件的裂缝图

Fig. 6 Failure modes under repeated loading

第二加载等级的第一次正向加载 ( $P_{21}$ ) 时,由于变形的增加,荷载也明显增大,但梁端主要裂缝只在原有裂缝基础上迅速发展,弯剪裂缝突然发展成宽而长的对角斜裂缝,穿过梁中部而相贯通,同时在主对角裂缝的两侧产生大致平行的约呈45°的斜裂缝,试件端部连同环梁产生一定的撕裂现象,表现出明显的不稳定性。试件破坏较为突然,试件也随之失去承载能力,试件延性相对较差。这说明钢筋配置相对于横向钢筋过多,而造成试件缺乏足够延性以抵抗强烈地震的作用。当然,这也与甲方提供的梁端弯矩、剪力分别取自不同荷载效应组合情况下的有关,因为在试件屈服弯矩一定的情况下这实际上减少了框架梁的作用长度(剪跨),从而夸大了梁端剪力的作用效应。

3.2 反复荷载下试件的滞回性能

纵筋屈服之前,试件虽然已经出现裂缝和混

混凝土的塑性变形,但总体变形不大,加载曲线的斜率变化小,卸载后的残余应变也极小,正反加卸载各一次所构成的滞回环不明显;纵筋屈服以后,随着反复加载位移幅值的增大以及循环次数的增多,混凝土受拉裂缝不断开展、延伸,钢筋的拉应变与混凝土的压应变逐渐积累增大,总变形持续增加,但承载力变化不大.反复荷载下试件的承载力试验结果如表 3 所示.

表 3 反复荷载下试件的承载力试验结果

Tab.3 Test results under repeated loading

项目	A-I	A-II	B-I	B-II
设计剪力/kN	145.20	119.30	94.11	91.58
最大剪力/kN	299.00	175.18	314.65	329.78
极限剪力/kN	187.06	134.27	187.06	199.83
开裂弯矩/(kN·m)	53.20	27.15	26.15	30.34
屈服弯矩/(kN·m)	140.67	79.26	164.56	181.38
设计弯矩/(kN·m)	102.90	64.80	49.20	50.30
最大弯矩/(kN·m)	211.99	95.12	164.56	181.38
极限弯矩/(kN·m)	132.63	72.91	97.83	109.91

每一次加载过程中,曲线的斜率随荷载的增大而减小,且减小的程度加快;比较各次同向加载曲线,后次的曲线斜率比前次曲线斜率逐渐减小,说明反复荷载下试件的刚度在不断退化.

刚开始卸载时曲线较陡,恢复变形很小,荷载减小后曲线趋向平缓,恢复变形逐渐加快.曲线的斜率随反复加卸载次数而减小,表明试件卸载刚度的退化.全部卸载后,试件均有残余变形,并随反复加载位移幅值的增大及循环次数的增加而不断积累增大.

由图 7 和图 8 可知,由于试件均发生的弯曲剪切斜压破坏,加载等级较少;试件的滞回环较瘦,捏缩现象不明显,故抗震性能需进一步提高.

3.3 箍筋的滞回性能分析

箍筋的主要作用首先是承受剪力,并改善试件的抗剪性能;其次是与箍筋形成一个骨架,一方面可以有效防止纵筋的侧向屈曲,另一方面可有效约束核心区混凝土,从而改善核心区的受力性能.由图 9 可知,反复荷载下构件 A-II 加载初期弯剪斜裂缝(或剪切斜裂缝)延伸至箍筋位置之前,箍筋作用不明显,应变值较低.但随着循环次数的增加,由于突然形成数条较大的对角斜裂缝,箍筋应变迅速增大并屈服,同时由于箍筋的屈服使得其对核心混凝土的约束作用迅速下降,试件的抗剪承载力迅速下降,试件发生的脆性破坏.试验中其他试件的箍筋受力性能与此类似.

箍筋应变在加载初期,应变值很小,甚至可能受压,只有在斜裂缝形成后才起作用,其主要作用

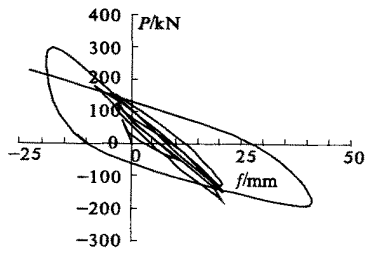


图 7 构件 A-I 滞回曲线

Fig.7 Load-deflection curves for model A-I

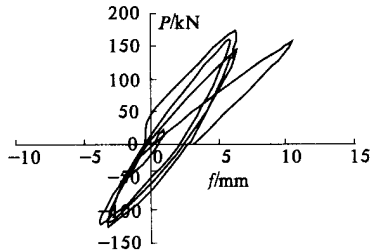


图 8 构件 B-I 滞回曲线

Fig.8 Load-deflection curves for model B-I

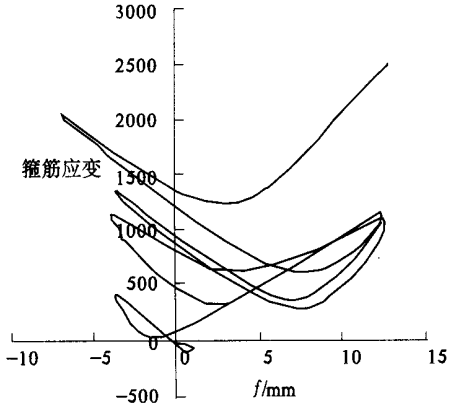


图 9 构件 A-II 的箍筋应变滞回曲线

Fig.9 Strain curves of stirrups for model A-II

是在横穿潜在破坏性斜裂缝处传递横向剪力.但反复荷载作用下,箍筋对核心混凝土的约束作用也十分重要,这一方面能有效提高塑性铰区域的转动能力,同时由于其对核心区混凝土的约束作用,可有效提高裂缝处骨料间的咬合作用,因此当箍筋屈服后,与其相交的斜裂缝将开始变宽而不受约束,使得试件抗剪强度中骨料咬合作用这一重要组成部分失去效用,试件抗剪强度迅速下降.因此为保证试件的延性,在试件的抗弯承载力全部耗尽之前保证箍筋不屈服十分重要.

A、B 两组构件在反复荷载作用下钢筋混凝土梁内纵筋发生屈服,这说明构件设计满足规范所要求的强剪弱弯的抗震要求.但是所有构件在  $2\Delta_u$  位移幅值下的第一次循环时,大部分梁内箍筋均已屈服,进而造成节点处梁端混凝土压碎,产

生较明显的弯曲剪切破坏,构件延性相对较差.这说明梁端箍筋用量不足,梁端塑性铰的发展不充分,其转动能力十分有限,因此为改善节点处钢筋混凝土梁的塑性变形能力,有必要加大钢筋混凝土梁端的箍筋用量,以提高结构的抗震能力.

4 环梁的受力分析

该工程结构采用穿心暗牛腿+环梁的新型节点形式,节点处梁端剪力传递体系合理可靠,概念清晰.穿心暗牛腿由组合“工”形钢板组成,钢筋混凝土梁内纵筋直接焊接于暗牛腿的上下翼缘钢板上,在纵筋屈服以前其传递剪力的方式十分可靠.但一旦纵筋屈服,梁端转动急剧增加,牛腿将随即发生转动,甚至带动钢管撕裂混凝土造成鼓出破坏.但由于环梁对节点区域内核心混凝土的有效约束作用,较充分地发挥混凝土的抗压性能,从而改善了节点区的受力性能.

试验结果表明,整个受力过程中环梁纵筋应变较小,环梁上的裂缝多为框架梁弯剪斜裂缝的延伸,因此其主要作用是对节点处的有效约束.但由于环梁承担梁(板)端负弯矩,而环梁承受弯矩实际上转化为环梁上下部的受拉、受压,故建议将环梁内辐射状钢筋焊接于柱端钢管上,以提供可靠锚固条件来保证环梁内负弯矩的合理传递.

5 主要结论

(1) 梁端最大弯矩设计值  $M_u$  和最大剪力设计值  $V_u$  满足设计承载力要求,静载下框架梁端首先出现裂缝,而且开裂荷载较高,并接近设计荷载,试件的极限承载力接近或超过设计荷载的200%,这说明试件承载力设计满足要求,并具有

较大的承载潜力.

(2) 试件框架节点区域均未发生破坏,柱端甚至未开裂,试件均发生梁端的弯曲剪切破坏,说明框架节点设计满足强柱弱梁、强剪弱弯及强节点等主要设计原则,试件节点是安全可靠的,设计方法可行的,符合设计要求.

(3) 试件均发生弯曲剪切破坏,加载等级较少.为进一步提高试件耗散与吸收地震能量的能力,试件应当采取一定的改进措施,如适当降低纵筋的配筋率、增加横向钢筋用量等措施,以提高试件(结构)抗震性能.

(4) 该工程结构采用穿心暗牛腿+环梁的新型节点形式,剪力传递体系合理可靠,概念清晰;环梁对节点区域内核心混凝土的有效约束作用,改善了节点区的受力性能.但穿心暗牛腿加大了节点构造的复杂性,施工制作难度较大,有必要进行进一步简化设计.

参考文献:

[1] 钟善同.钢管混凝土结构[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1994.  
[2] 方小丹,李少云,陈爱君.新型钢管混凝土柱节点的试验研究[J].建筑结构学报,1999,20(5):2~15.  
[3] 阎胜奎,周展开,许淑芳,等.钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁、板节点空间受力试验研究[J].西北建筑工程学院学报,1999,16(1):20~26.  
[4] 欧瑾,黄伟淳,韩晓健.新型钢管混凝土柱框架节点低周反复荷载试验研究[J].地震工程与工程振动,1999,19(4):13~21.  
[5] 刘立新,蔡耀东,陈萌,等.钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁的受剪承载力分析及设计建议[J].郑州工业大学学报,1998,19(2):1~8.

Experiment Research on a New Type of Steel Tube Confined Concrete Joint

LIU Li-xin<sup>1</sup>, LIU Jia-hui<sup>2</sup>

(1.College of Civil Engineering,Zhengzhou University,Zhengzhou 450002,China; 2.Research and Design Association of Building of Zhengzhou University,Zhengzhou 450002,China)

**Abstract:** The performance of reinforced concrete beam and steel tube confined concrete joint is vital to popularize steel tube confined concrete in China. A new type of steel tube confined concrete joint is put forward to solve the difficulty in application of highrise buildings and it is tested and researched under monotone and reverse load. The results show that the new type joint performs well and is reliable to capacity.

**Key words:** steel tube confined concrete column; reinforced concrete beam and steel tube confined concrete joint; reinforced concrete ring beam; seismic design