

文章编号:1000-582X(2008)03-0349-06

# 钢管混凝土斜柱抗剪环-环梁节点抗震性能试验

傅剑平<sup>1</sup>,程思聪<sup>1</sup>,黄宗瑜<sup>2</sup>,方长建<sup>2</sup>,张 兰<sup>3</sup>,马良璇<sup>1</sup>,

(1. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400030;2. 中国建筑西南设计研究院,四川成都 610081;

3. 四川广播电视集团,四川成都 610041)

**摘 要:**为满足建筑造型中设置钢管混凝土斜柱的要求,在结构中形成了钢管混凝土斜柱与环梁相交的抗剪环-环梁节点。检验这种斜柱抗剪环-环梁节点的抗震性能,进行了 2 个 2/3 缩尺比例的钢管混凝土斜柱抗剪环-环梁梁柱组合体的低周反复加载试验。试验结果表明,通过对环梁的合理配筋构造,即使试件最终破坏发生在环梁内,仍能够使组合体具有足够的变形能力和耗能能力;由于钢管混凝土斜柱与环梁节点承载能力相对独立,即使环梁最终发生破坏,对钢管混凝土斜柱的纵向承载力也不致造成较大影响。

**关键词:**钢管混凝土斜柱;抗剪环-环梁节点;抗震性能;变形能力;耗能能力

中图分类号:TU317.1;TU317.2

文献标志码:A

## Study on Seismic Behavior of Declining Steel Tube Confined Concrete Column Shear Ring-ring Beam Joint in Cyclic Loading

FU Jian-ping<sup>1</sup>, CHENG Si-cong<sup>1</sup>, HUANG Zong-yu<sup>2</sup>, FANG Chang-jian<sup>2</sup>,  
ZHANG Lan<sup>3</sup>, MA Liang-xuan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. China Southwest Architectural Design and Research Institute, Chengdu 610081, P. R. China;

3. Sichuan Broadcasting Group, Chengdu 610041, P. R. China)

**Abstract:** To meet the requirement of architectural image, it is necessary to build the declining column of steel tube and confined concrete. As a consequence, shear ring-ring beam joint is formed at the intersection of declining column and ring beam. 2/3 scale model of the combination of declining column and ring beam was used to test the anti-seismic performance of this joint under cyclic loading. The experimental results indicate that the combination with reasonable design has sufficient deformation and energy dissipation capacity even if the wreck occurred on the ring beam. Due to the independent loading capacity of declining column and the ring beam joint, the wreck on the ring beam joint does not have significant influence on the longitudinal loading capacity of the declining column.

**Key words:** declining column of steel tube and confined concrete; shear ring-ring beam joint; anti-seismic behavior; deformation capacity; energy dissipation capacity

钢管混凝土斜柱抗剪环-环梁节点因施工简便、相对造价较低等优点,成为近几年在实际工程中应用较为广泛的一种新型钢管混凝土柱与混凝土梁相连接的节点形式。经过试验研究以及国内近 30

幢高层建筑的工程实践,目前取得了一定的工程设计经验,但在中国的设计标准中,目前尚未有抗剪环-环梁节点的相关设计规定。

四川广播电视中心大厦为框架-核心筒结构,

收稿日期:2007-12-01

作者简介:傅剑平(1953-),男,重庆大学教授,主要从事钢筋混凝土结构研究,(Tel)023-65127665;

(E-mail)tmxydw@cqu.edu.cn。

主楼地下 2 层、地上 31 层,经设计方中国建筑西南设计研究院研究,其核心筒采用钢筋混凝土结构,周边框架则采用钢管混凝土柱、钢筋混凝土楼盖结构。为了满足建筑造型的要求,结构周边框架中有一部分由地面延伸至结构顶部呈最大 75° 倾斜的钢管混凝土柱,这样便形成了钢筋混凝土梁、板与钢管混凝土斜柱相交的节点,经设计方研究决定采用抗剪环-环梁节点连接方案。由于在目前已收集到的有关钢管混凝土柱抗剪环-环梁节点的试验资料与实际工程项目中,还未曾发现进行过斜柱抗剪环-环梁节点的试验研究与实际工程,为获得钢管混凝土斜柱抗剪环-环梁节点抗震性能及其在水平反复作用下的破坏形态,在建设方的资助下,完成了 2 个按实际工程 2/3 比例缩尺、环梁采取不同配筋构造方式的钢管混凝土斜柱抗剪环-环梁节点的低周反复加载试验。

### 1 试验方案及试件设计

#### 1.1 试验加载方案

试验在重庆大学大型结构试验室进行,所采取的试验加载方案是由千斤顶向试件柱顶施加定轴

力,由两纵梁外端斜向放置的作动器施加低周反复荷载,试件的加载装置见图 1。

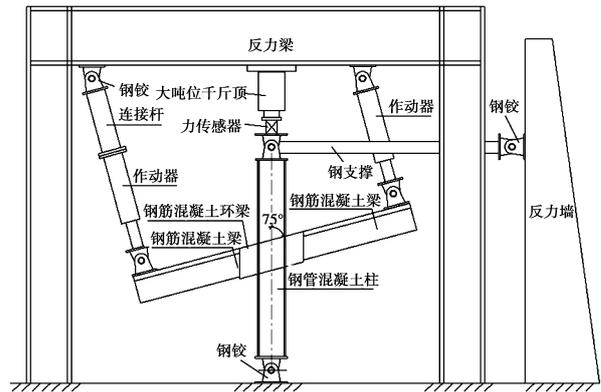


图 1 试件加载装置

#### 1.2 试件设计

本次试验的第一个试件 GJ-2 参考《钢管混凝土结构与施工规程》第二次征求意见稿及其它有关文献资料<sup>[1-2]</sup>的要求进行设计;第二个试件 GJ-6 则在参考了 GJ-2 试验结果的基础上对配筋方式进行了一定的改进和调整。试件详细尺寸见图 2。各试件的基本数据见表 1。

表 1 各试件的基本数据

试件名称	实测钢管内混 凝土强度/MPa	实测环梁混 凝土强度/MPa	环梁上 部配筋	环梁下 部配筋	环梁 配箍	纵梁上 部配筋	纵梁下 部配筋	纵梁 配箍
GJ-2	58.2	44.0	7 $\Phi$ 16	6 $\Phi$ 16	$\Phi$ 6.5 @ 60	10 $\Phi$ 16	8 $\Phi$ 16	$\Phi$ 6.5 @ 60
GJ-6	59.7	40.7	7 $\Phi$ 16	6 $\Phi$ 16	$\Phi$ 6.5 @ 60	8 $\Phi$ 16	6 $\Phi$ 16	$\Phi$ 6.5 @ 60

说明:1)“ $\Phi$ ”代表Ⅲ级钢筋, $\Phi$  16 钢筋实测强度为 488 MPa;“ $\phi$ ”代表 I 级钢筋, $\phi$  6.5 钢筋实测强度为 326 MPa;

2)环梁、纵梁配箍均为四肢箍,腰筋、拉结筋等;

3)钢管外直径为 450 mm,管壁厚 8 mm,材料为 Q345;

4)实测混凝土强度为 3 个与试件同条件养护的 150 mm  $\times$  150 mm  $\times$  150 mm 立方体试块在试验当天测得的立方强度平均值。

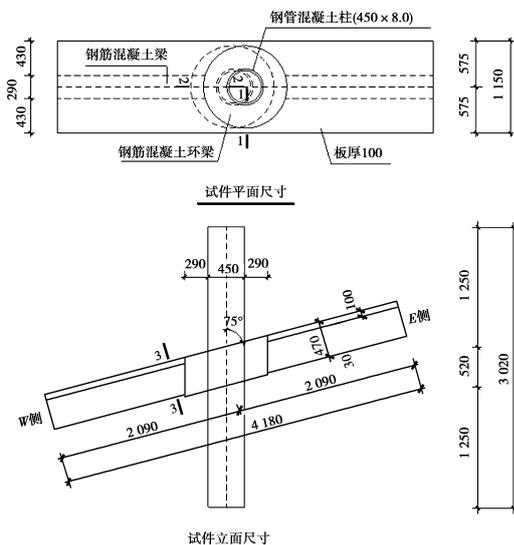


图 2 试件尺寸简图(单位:mm)

试件 GJ-2 环梁截面上、下配筋分别取纵梁截面上、下配筋的 70% 和 75%;试件 GJ-6 环梁截面上、下配筋分别取纵梁截面上、下配筋的 87.5% 和 100%,并且在环梁中增设斜拉筋及加强筋。环梁箍筋直径、间距及肢数与纵梁配置相同。两试件的现浇板厚均为 100 mm,配置直径 8 mm 的 HPB235 双层双向钢筋网。试件 GJ-2 及试件 GJ-6 的截面尺寸及配筋分别见图 3-4。

试件 GJ-2、GJ-6 试验过程中柱顶施加 1 000 kN 恒定轴力。试验初期梁端加载按力控制,纵梁纵筋或环梁环筋屈服后按纵梁外端屈服位移的倍数控制加载,每一控制位移下循环两周,直至试件破坏。

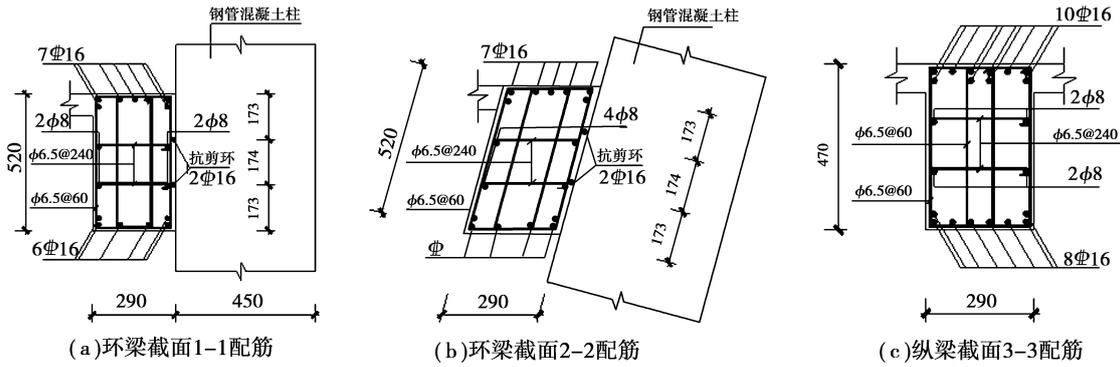


图3 试件GJ-2截面配筋详图(单位:mm)

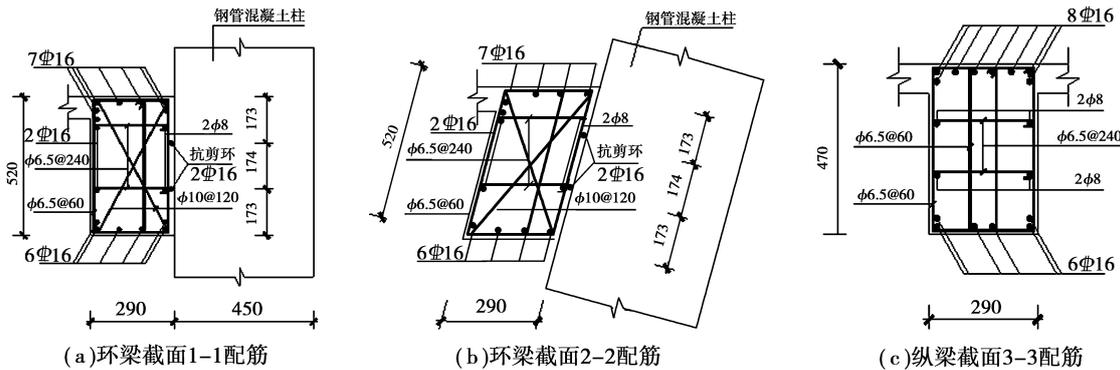


图4 试件GJ-6截面配筋详图(单位:mm)

## 2 试验结果分析

表2给出了2个试件的纵梁实测最大弯曲承载力  $P_u^i$  与设计弯曲承载力  $P_u^c$  (材料强度按实测值计算)的比值、节点的破坏形态以及承载力下降到峰值承载力85%时的位移延性系数  $\mu_\Delta$  等。

表2 各试件承载力、延性及破坏形态

试件名称	$P_u^i$ /kN		$P_u^c$ /kN		$P_u^i/P_u^c$		$\mu_\Delta$	层间位移角	破坏形态
	E侧	W侧	E侧	W侧	E侧	W侧			
GJ-2235	225	243	243	243	0.97	0.93	2.15	1/32	环梁下部 混凝土压溃
GJ-6	256	272	194	194	1.32	1.40	3.26	1/19	环梁下部 混凝土压溃

### 2.1 斜柱环梁节点的宏观受力分析

在外荷载作用下,环梁斜裂缝主要由以下两方面的原因形成:一方面,如果以环梁与钢管柱的界面作为纵梁的固端,环梁则作为纵梁根部的水平加腋部分,纵梁根部在弯矩和剪力的共同作用下,在纵梁两侧环梁部位产生的拉应力将形成环梁内的斜向发展裂缝;另一方面,如果将环梁作为纵梁的锚固端,纵梁端形成的弯矩将使环梁受扭,在这一扭矩作用下与纵梁相交的环梁两侧也将产生斜向发展的裂缝,这一斜裂缝的方向与上述环梁作为纵梁水平加腋部分在弯矩和剪力作用下产生的斜裂缝方向基本

一致。因此,环梁受到弯矩、剪力和扭矩的共同作用将不可避免地出现斜裂缝(见图5)。根据直柱抗剪环-环梁节点的试验结果<sup>[1-4]</sup>以及此次斜柱抗剪



图5 环梁内斜裂缝发展图

环-环梁节点试验结果,随着纵梁外端反复荷载的逐步增长,环梁受到的弯矩、剪力和扭矩逐渐变大,环梁表面斜裂缝不断增多、加宽,并分别沿斜向逐渐向环梁底部和顶部发展,形成环梁侧面的网状裂缝(见图5)。此后,环梁的整体刚度不断下降,并最终导致与纵梁相交的环梁底部混凝土被压溃(见图6,由于环梁顶面与板整浇,最终混凝土压溃均发生在环梁底部)。这种破坏形态是该环梁节点的最主要破坏形态之一<sup>[1-5]</sup>(见图7)。因此,采取有效的措施制约与纵梁连接部位环梁中斜裂缝的开展,是保证环梁节点具有足够承载能力和延性的关键。

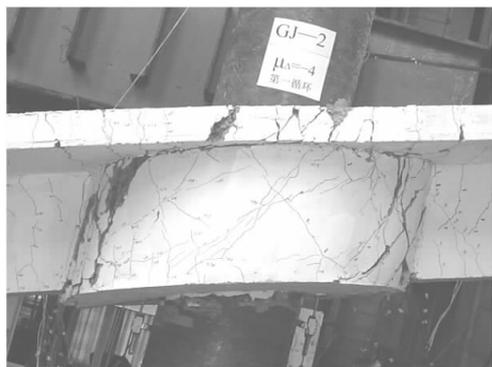


图 6 试件最终破坏形态



(a) 直柱环梁节点单调加载试验



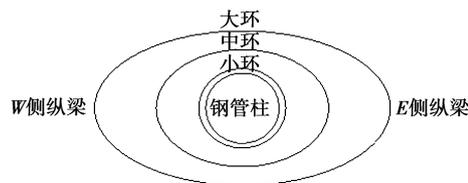
(b) 斜柱环梁节点低周反复加载试验 (GJ-6)

图 7 环梁节点裂缝分布及最终破坏形态

## 2.2 环梁环筋的受力分析

通过对试件 GJ-2 不同受力阶段环梁环筋应变大小及分布结果进行分析后发现,在同一级荷载下,由于弯、剪、扭作用,环梁斜裂缝的开口端不断加宽,导致环梁上、下部位环筋由小环到大环受力逐渐增大。与各环筋的受力相对应,从小环到大环沿纵梁方向变形亦逐渐增大(见图 8)。环筋不能形成整体而共同受力对限制环梁斜裂缝开口端的张开是非常不利的,这导致了环梁斜裂缝的过度开展、增大了环梁的总体变形、降低了环梁的整体刚度。为保证环梁顶部及底部的内外环筋协同受力,制约斜裂缝开口端的发展,文献[2]在单调加载的试件中采取了在环梁截面的上部设置附加箍筋的方法(见图 9),对提供环筋的整体受力性能和限制环梁斜裂缝的发展起到了较好的作用,但这种设置附加箍筋的作法给施工增加了不小的难度。

为了便于施工,在试件 GJ-6 以及文献[5]在部分试件靠近纵梁的环梁顶部、底部两层环筋部位分别设置了 5 根直径 12 mm 的 HRB335“订书钉”形径向加强筋,施工时仅需将加强筋直接卡在最内和最外侧的环筋上即可(见图 8)。试验结果表明<sup>[5]</sup>,加强筋能够有效地提高环梁的整体刚度,使试件达到相同位移延性时的裂缝更加细密(见图 10),承载力和延性也有所提高(见图 11、12)。



(a) 未设加强筋时环梁环筋受力变形示意



(b) 增设加强筋后环梁环筋受力变形示意

图 8 环梁加强筋对环筋的整体受力作用示意图

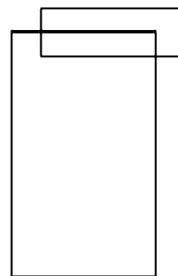


图 9 文献[2]环梁上部附加箍筋图

## 2.3 环梁环筋与纵梁纵筋的比例及破坏形态

根据钢管混凝土斜柱抗剪环-环梁节点的有关资料<sup>[1]</sup>,将试件 GJ-2 的环梁截面上、下环筋配筋量分别取为纵梁截面上、下纵筋配筋量的 70% 和 75%,希望在这一配筋比例的条件形成纵梁梁端先出铰的理想屈服模式,并最终发生纵梁端部混凝土压溃的理想弯曲破坏模式,但是采用这种配筋比例的试件 GJ-2 出现了环梁环筋先屈服的情况,最终与两侧纵梁相交部位的环梁下部混凝土被压溃而发生破坏,破坏时尽管试件的层间位移角较大(大于 1/50),但位移延性系数尚不理想。

为了更有效地加强环梁,在试件 GJ-6 中环梁截面上、下环筋配筋量分别取为纵梁截面上、下纵筋配筋量的 87.5% 和 100%,并采取外环、中环和内环筋按不同方式和比例以加强外侧环筋的配筋尝试。试验结果表明,在配筋量一定的情况下,加强环梁外侧环筋,有助于使环梁内、外环筋的受力趋于同步,对推迟环筋的屈服、限制环梁斜裂缝的开展、加强环梁刚度以及推迟环梁破坏起到一定的有利作用。

## 2.4 环梁截面内设置斜拉筋的作用

由于与纵梁相交部位环梁斜裂缝的恶性发展是导致环梁发生破坏的最重要因素,应当采取有效的

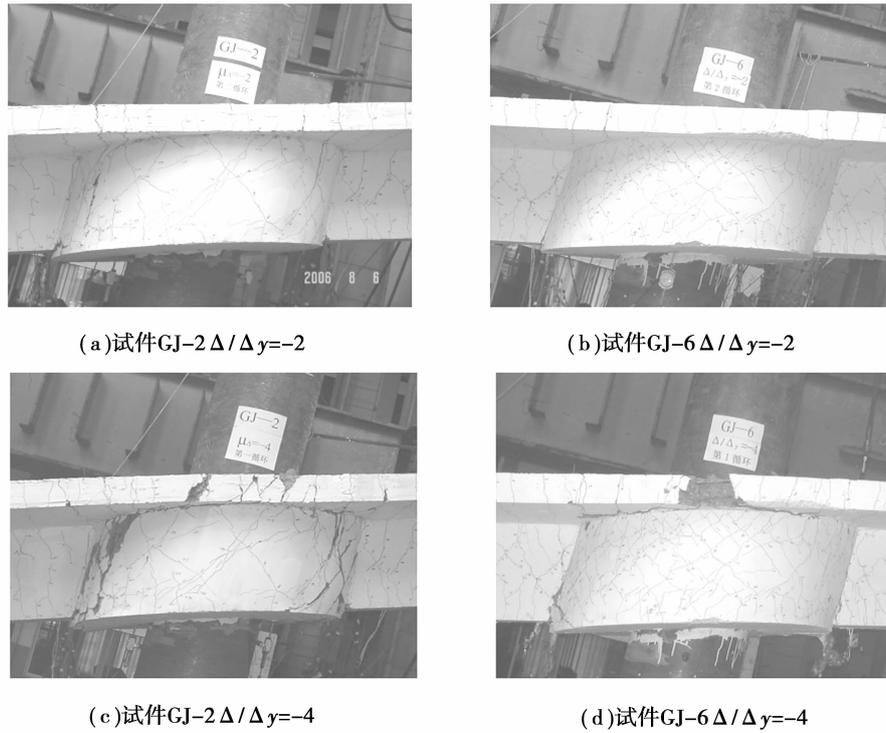


图10 试件达相同位移延性时的裂缝分布

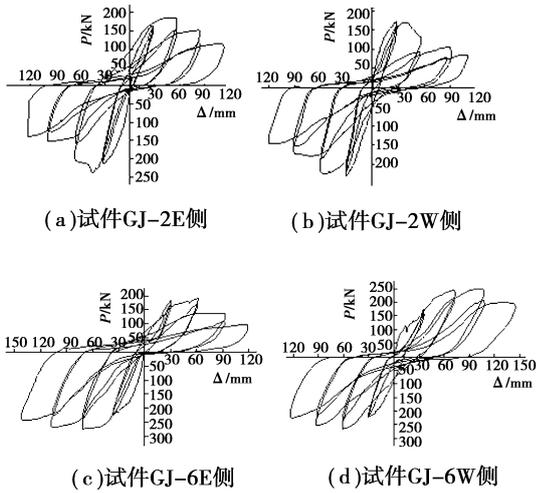


图11 试件纵梁梁端P-Δ曲线

环梁配筋方式限制斜裂缝的发展,因此在试件 GJ - 6 中尝试采用了受力明确的配筋构造方案,即在环梁截面中每间隔一排箍筋位置沿箍筋的对角方向各增加 1 根直径 12 mm 的 HPB235 斜向拉筋,如图 13 所示。试验结果表明,增加斜拉筋对延缓斜裂缝的出现以及限制斜裂缝的发展起到了显著的作用(图 10(b)、(d)),即使试件 GJ - 2 纵梁的配筋比 GJ - 6 大,由于 GJ - 6 环梁环筋屈服以及下部混凝土的压溃推迟发生,使得 GJ - 6 表现出了更高的承载力,而且试件的延性也有所提高(图 11(c)、(d))。

### 2.5 对环梁内复合箍筋配置方式的分析

根据梁内箍筋抗剪和抗扭的不同受力机理,复

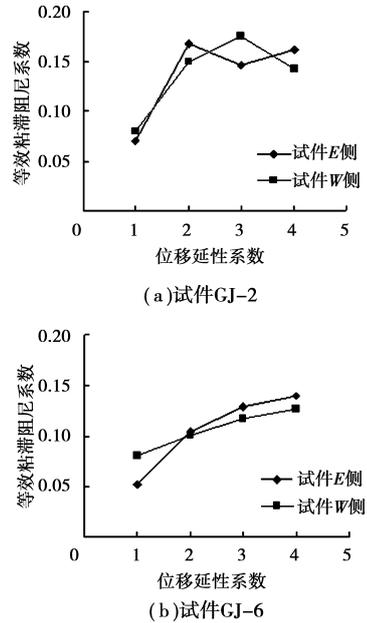


图12 试件  $h_{eq} - \mu_{\Delta}$  图

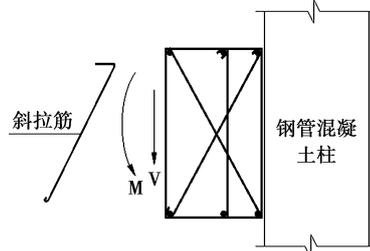


图13 环梁箍筋平面内斜向拉筋的布置方式

合箍筋配置方式在受剪和受扭时所起的作用并不完全相同。当梁主要受剪力作用时,图 14(a)所示的四肢箍都能起到限制斜裂缝的发展和提高梁抗剪承载力的作用。但是当梁以受扭矩作用为主时,图 14(a)所示环梁截面中部的两肢箍筋就不能很好起到限制斜裂缝的发展和提高抗扭承载力的作用了。由于环梁受力的特殊性,其斜裂缝主要以外侧表面发展较宽,因此,图 14(a)所示的复合箍筋的布置形式(GJ-2 采取的布置方式)尚有进一步改进的可能。在试件 GJ-6 中以及文献[5]在 4 个单调加载的试件中将复合箍筋的布置改为如图 14(b)所示的形式,以便更有效地发挥这种内箍布置形式对限制环梁外侧斜裂缝和抵抗环梁所受扭矩的积极作用。从试件 GJ-6 的试验结果来看,其斜裂缝发展明显缓慢,同级荷载时裂缝细密了很多,试件的承载力和变形能力有了明显改善,表明这种复合箍筋的布置方式在限制环梁外侧斜裂缝的发展方面起到了一定的作用。

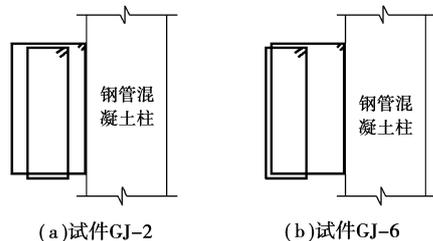


图 14 复合箍筋布置形式

### 3 结 论

1) 根据倾斜  $75^\circ$  的钢管混凝土斜柱抗剪环-环梁节点的低周反复加载试验表明,在其它条件相同时,斜柱环梁节点的宏观传力机理、环梁两侧的裂缝开展形式、环筋及箍筋的受力特征以及节点最终破坏形态等与直柱环梁节点没有明显区别,两者的承载能力及延性也基本相同。

2) 环梁受到弯矩、剪力和扭矩的共同作用将不可避免地出现斜裂缝,在研究的环梁与纵梁相对截面尺寸范围内,采取有效的构造措施限制环梁内斜裂缝的发展是保证环梁节点具有足够承载力和延性的关键。

3) 经对比不同环梁配筋构造方案的试验结果表明,只要环梁的配筋构造措施合理,就能够保证纵梁端弯矩、剪力和扭矩的有效传递。

4) 在试件环梁与纵梁相对截面尺寸及环梁环筋与纵梁纵筋的配筋比例条件下,尽管试件最终破坏发生在环梁内,但根据文献[6]框-筒结构的非线

性动力反应分析结果,试件破坏时的延性能够达到整体结构对节点的延性需求。若在环梁内辅以提出的配筋构造方案,可以有效缩小环梁环筋达到屈服与纵梁纵筋屈服时的荷载差值,可以使部分环梁环筋与纵梁纵筋同时达到屈服,环梁的受力性能得到明显的改善。

5) 由于环梁节点的环梁发生破坏时,基本不会影响钢管混凝土斜柱纵向承载能力,又由于环梁不会从钢管柱上发生滑脱式破坏(环梁与钢管柱的竖向直剪试验结果详见文献[5]),因此在整体结构中不致因环梁的失效对整体结构的纵向承载力带来更大的不利影响。

### 参考文献:

- [1] 周栋梁,钱稼茹,方小丹,等. 环梁连接的 RC 梁-钢管混凝土柱框架试验研究[J]. 土木工程学报,2004,37(5):7-15.  
ZHOU DONG-LIANG, QIAN JIA-RU, FANG XIAO-DAN, et al. Experimental study on a RC beam-STCC column frame with RC ring beam connectors[J]. China Civil Engineering Journal,2004,37(5):7-15.
- [2] 李少云,方小丹,杨润强. 广州市翠湖山庄工程钢管混凝土柱节点足尺静载试验研究[J]. 土木工程学报,2001,34(6):11-16.  
LI SHAO-YUN, FANG XIAO-DAN, YANG RUN-QIANG. A static test on joint between STCC column and encircle-beam[J]. China Civil Engineering Journal,2001,34(6):11-16.
- [3] 钱稼茹,周栋梁,方小丹. 钢管混凝土柱-RC 环梁节点及其应用[J]. 建筑结构,2003,33(9):60-62.  
QIAN JIA-RU, ZHOU DONG-LIANG, FANG XIAO-DAN. Research and application of steel tube confined concrete column-RC ring beam joint[J]. Building Structure,2003,33(9):60-62.
- [4] 方小丹,李少云,钱稼茹,等. 钢管混凝土柱-环梁节点抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报,2002,23(6):10-18.  
FANG XIAO-DAN, LI SHAO-YUN, QIAN JIA-RU, et al. Experimental research on seismic behavior of concrete filled steel tubular column-ring beam joint under cyclic loading[J]. Journal of Building Structures,2002,23(6):10-18.
- [5] 重庆大学土木工程学院,中国建筑西南设计研究院. 四川广电中心主楼钢管混凝土斜柱环梁节点试验研究报告[R]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2006.
- [6] 陈文科. 基于非线性动力分析的八度区一级框-剪和框-筒结构抗震规定研究[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2007.

(编辑 侯 湘)