

文章编号:1671-8879(2015)05-0082-07

复式钢管混凝土柱-钢梁节点受力 机理及承载力

张玉芬¹,赵均海²,张冬芳²

(1. 北方工业大学 土木工程学院,北京 100144; 2. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:为研究新型复式钢管混凝土柱-钢梁连接节点的力学性能,采用模型试验与有限元分析相结合的方法得到了钢梁翼缘受拉模型,通过分析竖向肋板和锚固腹板的传力机理,得到了竖向肋板与锚固腹板连接构造参数对节点受力性能的影响,提出了该新型节点设计改进建议,根据钢梁翼缘受拉模型推导出梁端极限承载力计算公式,并将计算结果与反复荷载试验得到的承载力进行了比较。研究表明:翼缘传来的拉力主要依靠竖向肋板和锚固腹板进行传递,可忽略钢管和核心混凝土的贡献;该新型节点能可靠地传递梁端弯矩、轴力和剪力,符合节点更强、整体性好的设计原则;理论计算与模型试验所得结构承载力的误差在 2.16%~4.14% 的范围内,证明了该模型适用性,但计算值偏保守;研究成果可为该新型节点今后的工程应用提供依据。

关键词:结构工程;新型复式钢管混凝土节点;竖向肋板;锚固腹板;承载力

中图分类号:TU398.9; TU317.1 **文献标志码:**A

Force transference mechanism and bearing capacity of connection between composite CFST column and steel beam

ZHANG Yu-fen¹, ZHAO Jun-hai², ZHANG Dong-fang²

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the mechanical behaviors of the new type of connection between composite concrete filled steel tube (CFST) column and steel beam, the model of tensile beam flange was obtained according to the analysis of experiment and finite element method (FEM). Through analyzing force transference mechanism of vertical stiffener and anchorage plate, the influence of connection configuration parameters on joints bearing capacity was investigated, and some advices were proposed to improve the joint mechanical behaviors. Theoretical formula for calculation of the load-bearing capability of this joint was derived from the model of tensile beam flange and the calculation results were compared with the experimental results. The results show that the tensile force from girder flange is mainly transferred by vertical stiffener and anchorage plate, without considering the contribution of the steel tubes and concrete. This new type of joint

收稿日期:2015-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51478004);北方工业大学长城学者后备人才资助项目(XN130)

作者简介:张玉芬(1977-),女,辽宁岫岩人,北方工业大学副教授,长安大学工学博士,清华大学博士后,E-mail:yf23227@163.com。

with good force transference can easily achieve the anti-seismic design principle, namely strong column-weak beam and strong joint-weak member. The error between experimental results and theoretical calculation results ranges from 2.16% to 4.14%, which proves this model basically correct but conservative. The research results can provide basis for further research of this new type of joint and application in practice. 1 tab, 10 figs, 16 refs.

Key words: structural engineering; composite CFST joint; vertical stiffener; anchorage plate; bearing capacity

0 引 言

复式钢管混凝土是在普通钢管混凝土结构上发展起来的,在方钢管混凝土中加入同心圆钢管共同约束混凝土,能发挥圆钢管约束性能好从而提高结构承载力的优点,同时兼有方钢管柱外形整洁美观、节点构造简单、便于施工等优点^[1-3]。此外,复式钢管混凝土结构具有很好的耐火性能和较高的防倒塌能力^[4-5],可应用于高层、超高层建筑及桥梁工程中。

但是要使复式钢管混凝土结构得到更快的发展,必须保证其梁柱节点问题得到解决^[6]。目前国内关于复式钢管混凝土节点的相关文献报道很少。文献[7-8]研究了复式钢管混凝土结构与 RC 梁节点的连接型式,提出了一种复式钢管混凝土柱与 RC 梁的连接形式——外钢管不连通环梁节点;关于复式钢管混凝土柱与钢梁的连接,由于柱有内外两层钢管,传统的方钢管混凝土柱与钢梁刚性连接节点形式如内隔板节点、外隔板节点和隔板贯通节点^[9]不适用于复式钢管混凝土结构,因此复式钢管混凝土与钢梁连接多借鉴方钢管混凝土其他钢梁节点的研究成果。文献[10]对方钢管混凝土柱与 H 钢梁外肋环板节点的 3 个十字型足尺试件进行了拟静力试验,结果表明,外肋环板节点构造措施简单合理,具有较好的抗震性能。文献[11]以外肋环板节点梁翼缘受拉模型为对象,分析了节点的受力传力机理,并基于屈服线理论,推导出梁翼缘受拉模型屈服承载力计算式。关于此类外肋环板节点,文献[12-13]对复式钢管混凝土外肋环板节点进行了 6 个十字型梁柱组合体的低周反复荷载试验,试件主要变化参数选为竖向肋板的外伸长度和锚固腹板有无加肋,外钢管壁厚及轴压比。本文在此试验基础上,选取了合理材料本构关系、破坏准则,建立了有限元模型,总结分析该新型节点的构造形式、受力

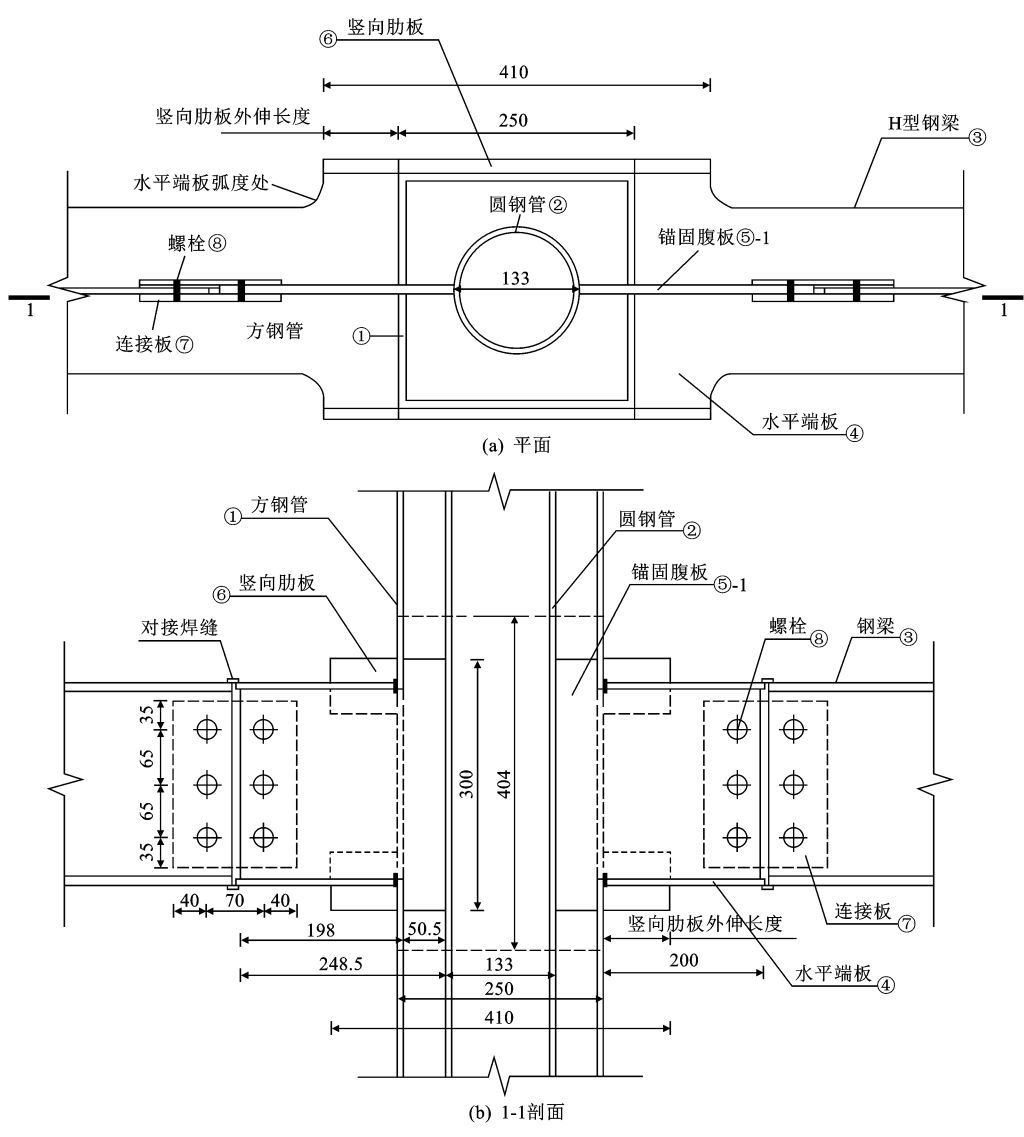
特点和传力机制,采用钢梁翼缘受拉模型,对节点极限承载力进行了分析。

1 复式钢管混凝土柱-钢梁节点的构造形式及特点

复式钢管混凝土柱与 H 型钢梁连接的外肋环板节点的构造见下页图 1,在钢梁端设与柱等宽的水平端板,将柱两侧的加强环板改为平贴于柱侧的竖向肋板,竖向肋板伸出部分与水平端板焊接;同时,借鉴方钢管混凝土柱与钢梁锚定式连接节点^[14],针对内外双层钢管的特点,在内外钢管间正对钢梁腹板处焊接锚固腹板,埋于混凝土中,其伸出外钢管的部分与钢梁腹板栓焊在一起。锚固腹板与水平端板连接以协助承受钢梁翼缘传来的拉力。梁翼缘与加宽的水平端板采用全熔透坡口对接焊缝连接,截面过渡处为避免应力集中采用弧度过渡处理。锚固腹板⑤在内外钢管间上下贯通,并高于钢梁腹板高度,故锚固腹板可以选择不加肋(即图 1 中⑤-1 为不加肋锚固腹板)和加肋这 2 种形式,加肋试件的水平端板开槽与锚固腹板双面角焊,节点处外钢管与钢梁采用斜向三角形肋板连接。节点试件有限元分析模型如下页图 2 所示^[15]。

2 节点受拉模型建立及传力机理分析

试验得出新型复式钢管混凝土节点破坏形式为钢梁破坏和焊缝破坏 2 种,未发生节点域破坏。大多数抗弯节点同时承受剪力和抵抗弯矩,梁端弯矩可转化为力偶,通过拉压作用于上下翼缘。该复式钢管混凝土节点传力构件由端板、竖向肋板和锚固腹板组成,节点区的剪力则依靠外钢管壁、节点区核心混凝土及锚固腹板共同传递;钢梁翼缘所受拉力通过端板焊缝传递给竖向肋板,再传到外钢管腹板,然后通过锚固腹板将荷载传递给节点核心区。



单位: mm

图 1 节点试件构造
Fig. 1 Details of connection

2.1 受拉模型及竖向肋板机理分析

竖向肋板是构成该节点的重要构件,正是由于它的存在,有效地降低了节点的应力集中,调整了梁端塑性铰形成的位置,在钢梁中部产生了明显的塑性铰,从而降低了节点域破坏的可能性。下页图 3 为试验得到的试件西梁端荷载-位移骨架曲线。可以看出,随着竖向肋板外伸段长度的增加,节点 SBJ2-2 的承载力和刚度均比节点 SBJ2-1 的大。试验中竖向肋板外伸较长的试件的破坏形态发生了明显变化,竖向肋板伸长能有效保护节点核心区。下页图 4 为试件 SBJ1-1 和 SBJ1-2 破坏形态对比。可以看出,尽管试件破坏均开始于水平端板弧形变截面处,但是竖向肋板伸出 80 mm 的试件因塑性铰离梁柱交界处较近,致使交界处部分钢管柱壁撕裂;而竖向肋板伸出 120 mm 的试件因塑性铰外移,梁柱交界处完

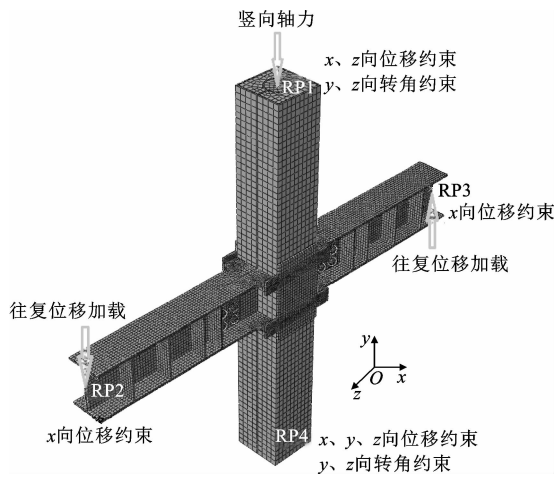


图 2 有限元分析模型
Fig. 2 Finite element model

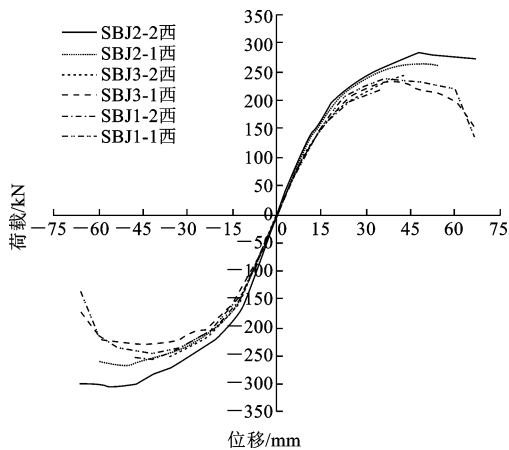


图 3 节点试件西梁端荷载-位移骨架曲线
Fig. 3 Skeleton curves of west beam ends

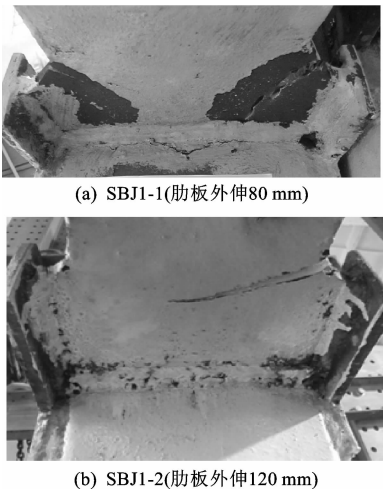


图 4 破坏形态对比
Fig. 4 Comparison of failure modes

好,未发生梁柱交界处撕裂的现象。在具体设计时,竖向肋板外伸段长度要适当,太短则塑性铰靠近核心区,不利于提高节点承载力;太长则浪费钢材,增加了工程造价。根据有限元计算结果,建议竖向肋板外伸段长度取 120~300 mm,厚度取 10 mm 左右。

震害调查得出梁柱连接的破坏大多数发生在梁上下翼缘处^[16],一旦翼缘破坏,节点的抗弯承载力将由用高强螺栓与钢梁腹板相连的剪力连接板来承担,设计通常假定翼缘承受几乎所有的截面抗弯承载力,最终必然导致剪力连接板被拉开,从而造成整个节点的破坏。因此,刚性节点中弯矩是以钢梁翼缘上受拉和受压的形式由梁传给柱,梁翼缘与柱的连接性能对节点的力学性能至关重要,尤其是受拉翼缘与柱连接的构造形式和工作性能,将直接影响整个节点的承载能力。由节点竖向肋板受力和 Mises 应力云图(图 5)可以看出,竖向肋板应力值较大的区域集中在受拉外伸段,受压外伸段的应力值较

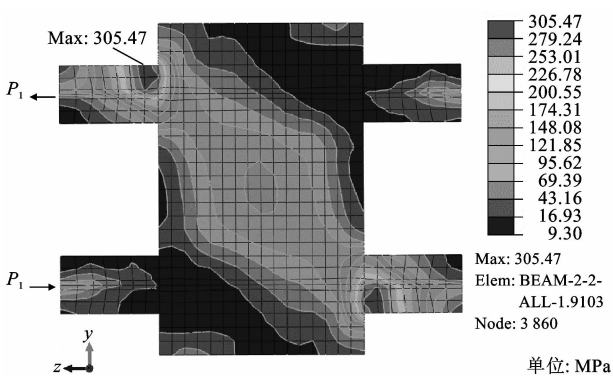


图 5 竖向肋板受力及 Mises 应力
Fig. 5 Free-body and Mises stress of vertical stiffener

小,说明节点弯矩传递中受拉翼缘起很大作用。竖向肋板中心处的应力值较小,仍处于弹性阶段。在每级荷载下,最大应力首先出现在竖向肋板外伸段与方钢管混凝土柱交界处,然后向外逐渐变大。为了简化研究对象,抓住问题关键所在,节点弯矩传递中受拉翼缘的强度满足时受压翼缘也一定满足的原则,采用钢梁翼缘的受拉模型分析节点传力机制及承载力。选取节点梁翼缘受拉模型,如图 6 所示,1 方向为竖向肋板传递的翼缘拉力,如图 5 所示 P_1 ; 2 方向为柱翼缘和锚固腹板承担的水平拉力。由于在复式钢管混凝土中基本都采用薄壁钢管,柱翼缘提供的水平拉力较小;另一方面柱壁钢板在不同的竖向压力下,应力状态会发生很大变化,根据屈服线理论必然会影响柱翼缘承担的水平荷载,从而影响节点的承载力,但是图 3 中轴压比不同的 2 个试件 SBJ1-1 和 SBJ3-1 骨架曲线很相近,故得出柱翼缘在节点传力过程中的作用很小。因此该模型中 2 方向的水平拉力只计算锚固腹板传递的部分。

钢梁翼缘与水平端板的连接焊缝采用全熔透坡口焊缝,即可认为焊缝强度与柱壁母材相同。水平端板与竖向肋板伸出部分、柱翼缘连接焊缝采用双面角焊缝,是节点试件最易出现破坏的部位,直接影响到节点的承载能力和破坏形态。由于试验中出现了此处焊缝破坏形式,故需验算该节点竖向肋板

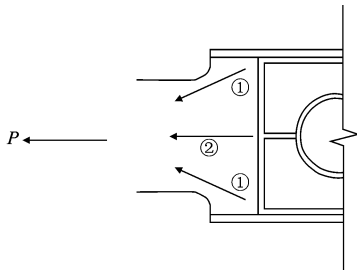


图 6 钢梁翼缘受拉模型
Fig. 6 Tension model of girder flange

与水平端板间的焊缝强度。设水平端板传来的翼缘拉力沿角焊缝均匀分布,故焊缝传递的拉力 P_w 为

$$P_w = 4f_v^w l_{fv} h_{fv} + 2f_t^w l_{ft} h_{ft} \quad (1)$$

式中: h_{fv} , h_{ft} 为角焊缝的焊脚尺寸; l_{fv} , l_{ft} 为角焊缝的实际长度; f_v^w , f_t^w 为角焊缝抗剪和抗拉强度设计值。而钢梁翼缘屈服时翼缘拉力 P_y 为

$$P_y = f_s^y b t \quad (2)$$

式中: t 为钢梁翼缘厚度; b 为钢梁翼缘宽度; f_s^y 为钢梁翼缘的屈服强度。

根据试验中材料参数的选取及角焊缝强度的设计值,得出所有试件均满足 $P_w \gg P_y$,也就是说设计的连接角焊缝可保证母材撕裂或疲劳破坏前不断裂,但是在试验中试件 SBJ3-2 两端及 SBJ1-2 一端仍出现了焊缝断裂的破坏现象,说明在实际梁柱节点焊接中,水平端板与竖向肋板及柱壁连接的角焊缝应保证在拉剪复合应力作用下的焊接质量;必须考虑到现场安装条件受限的实际工况及焊缝中可能存在焊接缺陷等不利影响,应通过各种措施保证焊缝质量、尽量减小焊缝热影响区,以保证节点受力时不要在梁端形成塑性铰之前出现焊缝或母材的破坏。

节点中弯矩是以钢梁翼缘上受拉和受压的形式由梁传给柱,在该新型节点中,翼缘受力直接由水平端板传给竖向肋板和锚固腹板。在保证焊缝质量的前提下,根据静力平衡条件,以钢材的极限强度为依据,计算竖向肋板承担的极限水平拉力,可表示为

$$P_1 = h_s t_s f_s \quad (3)$$

式中: t_s 为竖向肋板的厚度,试验中厚度取 11.5 mm; h_s 为竖向肋板的高度,试验中取 70 mm; f_s 为竖向肋板的极限强度,取 445.8 MPa。

2.2 锚固腹板的工作机理

锚固腹板埋在内外钢管间加混凝土,伸出部分与钢梁腹板连接除了传递节点剪力外也承受钢梁翼缘传来的拉力。根据钢梁锚定式连接节点原理,图 7 所示为锚板竖置节点,钢梁翼缘拉力传递给节点域 T 形件腹板, T 形件翼缘以压力形式将拉力传递给节点域混凝土, T 形件翼缘与柱壁板间形成“冲切锥体”,将压力传递给柱壁^[8]。对于新型复式钢管混凝土节点,由试验测得的数据可以得出,随着梁端荷载的增大、循环次数的增加,锚固腹板可以将承受的拉力传递给内圆钢管,使节点核心区形成一个整体;锚固腹板的作用是将此拉力传递给节点域混凝土和方钢管壁,形成冲切锥体,如图 8 所示,其中 φ 为冲切锥体的顶角, P_2 为锚固腹板传递的翼缘拉力。

试验中得到锚固腹板加肋试件 SBJ1-2、SBJ2-2 较试件 SBJ1-1、SBJ2-1 的初始刚度和极限承载力明

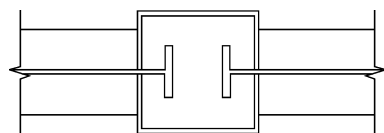


图 7 方钢管混凝土锚板竖置节点

Fig. 7 Connections with anchorages for concrete-filled square steel tubes

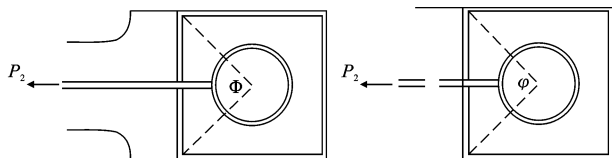


图 8 复式钢管混凝土节点锚固腹板受力

Fig. 8 Free-body of anchorage plate

显提高,如图 3 所示。锚固腹板加肋后试件的承载力平均提高了 17%,主要原因是肋的存在使水平端板、锚固腹板和竖向肋板的整体协同工作得到了增强,加肋试件传递翼缘拉力更直接。另外,试验得到加肋试件的破坏模式,如图 10 所示,柱壁在加肋处发生应力集中导致局部撕裂,而梁柱交界处因肋的存在桩子外钢管不会开裂。将应力集中现象转移至远离节点核心区位置,故加肋可以明显保护节点核心区。由于加肋板有效地降低了梁柱连接处的应力,减少应力集中,明显地增强梁柱交界处这个“薄弱环节”的抗弯抗剪能力,从而使整个结构不至于在节点核心区发生破坏,因此提高了整个节点的极限承载力。

图 10 为有限元分析得到的锚固腹板加肋和不加肋 2 种情况的 Mises 应力。由图可以看出,锚固腹板应力值较大的范围均在节点核心区以外,而核心区因混凝土的存在,使得锚固腹板和混凝土的应力值均较小,处于弹性范围内。说明由于冲切锥体的存在(图 8),使节点核心区类似于固定端效应,因此,冲切锥体承担钢梁传来的翼缘拉力 P_2 由锚固腹板伸出外钢管部分决定。根据有限元分析,认为



图 9 试件 SBJ2-1 加肋处钢管局部撕裂

Fig. 9 Partial tear of the column flange from the rib

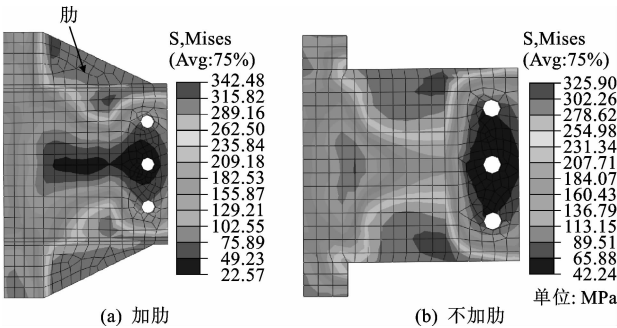


图 10 锚固腹板的 Mises 应力
Fig. 10 Mises stress of anchorage plate

加肋的锚固腹板传力主要通过这个三角肋区域,忽略混凝土及钢管腹板的贡献,得到翼缘拉力 P_2 为

$$P_2 = h_m t_m f_m \quad (4)$$

式中: t_m 为锚固腹板的厚度,试验中厚度取 7 mm; h_m 为锚固腹板肋的高度,试验取 80 mm; f_m 为锚固腹板的极限强度,取 481.7 MPa。

对于不加肋的试件,根据有限元得到的锚固腹板应力分布认为其传递翼缘拉力减半。由式(4)及有限元分析结果可以看出,锚固腹板承担的翼缘拉力与肋的高度成正比,但肋高取决于楼层地面的处理空间,如果选择混凝土板和钢梁的组合梁时,肋高可以适当取高;对于锚固腹板的厚度,在试验中为 7 mm,但已发生肋板平面外弯曲微折现象,故锚固腹板厚度不能太薄,虽然受拉翼缘可以满足使用,但是受压一侧会发生褶皱现象。

3 节点承载力计算及比较

节点往复荷载试验中各试件节点域应变片的应变实测值均较小(均在钢材屈服应变值的一半以下),即当试件受外荷载作用达到最大承载能力而破坏时,节点域除了发生局部钢管壁撕裂外基本完好;

而有限元分析也表明在轴压比很小的情况下,试件最终破坏时节点内填混凝土整体应力水平较低,且分布区域相对较小,因此屈服机制将节点核心区视为受均布荷载的固端梁。说明该新型节点的设计符合节点更强、整体性好的设计原则。钢梁翼缘传来的拉力主要依靠竖向肋板和锚固腹板传递,钢梁在水平端板弧度处即竖向肋板外伸的顶点处产生明显的塑性铰。忽略钢管翼缘和混凝土对节点承载力的贡献,采用静力平衡推导了的抗拉承载力计算公式。假定节点抗弯承载力由节点域的抗拉承载力决定,将节点域的抗拉承载力乘以抗力的中心间距得到节点的抗弯承载力。在梁端集中荷载作用下,梁端弯矩可转化为力偶,通过拉压作用于上下翼缘,认定受压翼缘的轴力与受拉翼缘相等,所以得出破坏时梁端极限荷载值 P' 为

$$P' = Ph_s / l_m \quad (5)$$

式中: l_m 为梁端集中力作用点距塑性铰的距离; $P = 2P_1 + P_2$,为钢梁翼缘极限拉力。

试验中节点 SBJ3-2 水平端板与竖向肋板连接焊缝发生破坏,从而使加载无法继续进行,未达到极限荷载。另外 SBJ3-1 在不同轴压比下得出的节点性能与 SBJ1-1 基本相同,节点极限承载力计算结果与试验数据对比如表 1 所示。由表中数据可以看出,计算得到的静力条件下梁端极限承载力与反复荷载试验下得到的承载力非常相近,计算结果比试验得出承载力误差为 2.16%~4.14% 的范围内。因为静力条件下忽略了钢管和核心混凝土对节点承载力的贡献,而反复荷载作用下由于强度和刚度的退化,梁端承载力必然比静力作用下的承载力低,故二者得出的极限承载力相差不大,也说明了选用钢梁翼缘受拉模型适用于计算该新型复式钢管混凝土节点的极限承载力,但计算值偏保守。

表 1 理论与试验值的比较

Tab. 1 Comparison between test results and calculated strengths					
试件编号	塑性铰位置 l_m /mm	钢梁翼缘极限拉力 P 计算公式	梁端极限荷载计算值/kN	试验梁端极限荷载平均值/kN	误差/%
SBJ1-1	900	$P = 2h_s t_s f_s + \frac{1}{2} h_m t_m f_m$	231.2	238.3	2.98
SBJ1-2	860		241.9	251.1	3.66
SBJ2-1	900	$P = 2h_s t_s f_s + h_m t_m f_m$	267.7	273.6	2.16
SBJ2-2	860		280.1	292.2	4.14

4 结 语

(1)通过试验和有限元分析得出了新型复式钢管混凝土钢梁节点的梁翼缘受拉模型,钢梁翼缘传来的拉力主要依靠竖向肋板和锚固腹板传递,忽略钢管和核心混凝土对节点承载力的贡献。分析了竖向肋板和锚固腹板的传力机理,得到竖向肋板与锚

固腹板连接构造参数对节点性能的影响,提出了该新型节点设计改进建议。

(2)基于静力条件推导出了基于钢梁翼缘受拉模型梁端极限承载力的计算公式,并将计算结果与反复荷载试验得到的承载力进行了比较,证明了该模型适用性,但计算值偏保守。

(3)本文研究成果可为复式钢管混凝土钢梁节

点今后的工程应用提供依据,下一步应进行复式钢管混凝土钢梁节点承载力的静力试验,以验证理论公式的正确性提供有力数据,以便于对该类型节点的力学性能进行更加完善地分析。

参考文献:

References:

- [1] 蔡绍怀,焦占拴. 复式钢管混凝土柱的基本性能和承载力计算[J]. 建筑结构学报,1997,18(6):20-25.
CAI Shao-huai, JIAO Zhan-shuan. Behavior and ultimate load analysis of multibarrel tube-confined concrete columns [J]. Journal of Building Structures, 1997,18(6):20-25. (in Chinese)
- [2] Zhang Y F, Zhao J H, Yuan W F. Study on compressive bearing capacity of concrete filled square steel tube column reinforced by circular steel tube inside [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2013,19(6):787-795.
- [3] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
CAI Shao-huai. Modern steel tube confined concrete structures[M]. Beijing:China Communications Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 张玉芬. 复式钢管混凝土轴压性能及节点抗震试验研究[D]. 西安:长安大学,2010.
ZHANG Yu-fen. Study on axial compressive behavior of the composite CFST and seismic research on RC beam-column connections [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [5] 裴万吉. 复式钢管混凝土柱力学性能研究[D]. 西安:长安大学,2005.
PEI Wan-ji. Research on mechanical performance of multibarrel tube-confined concrete columns [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [6] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土 T、Y 型节点受压性能试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(5):48-52.
LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Behavior of concrete filled rectangular steel tube T-joints and Y-joints under compression [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(5):48-52. (in Chinese)
- [7] 张玉芬,张冬芳,赵均海. 复式钢管混凝土柱与 H 钢梁连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(9):40-48.
ZHANG Yu-fen, ZHANG Dong-fang, ZHAO Jun-hai. Experimental study on seismic behavior of connection between composite CFST column and H-shaped steel beam[J]. Journal of Building Structures, 2013,34(9):40-48. (in Chinese)
- [8] Zhang Y F, Zhao J H, Cai C S. Seismic behavior of ring beam joints between concrete-filled twin steel tubes columns and reinforced concrete beams[J]. Engineering Structures, 2012,39(6):1-10.
- [9] 张玉芬,王育平,赵均海. 复式钢管混凝土外钢管不连
- 通环梁节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012,45(6):90-100.
ZHANG Yu-fen, WANG Yu-ping, ZHAO Jun-hai. Experimental study on seismic behavior of ring beam joint with discontinuous outer tube outside composite CFST column [J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(6):90-100. (in Chinese)
- [10] 苗纪奎. 方钢管混凝土柱与 H 钢梁的外肋环板节点研究[D]. 天津:天津大学,2004.
MIAO Ji-kui. Study on vertical stiffener joint of concrete-filled square steel tubular column with H-shaped steel beam [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
- [11] 陈志华,苗纪奎. 方钢管混凝土柱-H 型钢梁外肋环板节点研究[J]. 工业建筑,2005,35(10):61-63.
CHEN Zhi-hua, MIAO Ji-kui. Study on vertical stiffener joint between concrete-filled steel square tubular column and H-steel beam [J]. Industrial Construction, 2005,35(10):61-63. (in Chinese)
- [12] 张玉芬,张冬芳,赵均海. 复式钢管混凝土柱与 H 钢梁连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013,34(9):40-48.
ZHANG Yu-fen, ZHANG Dong-fang, ZHAO Jun-hai. Experimental study on seismic behavior of connection between composite CFST column and H-shaped steel beam [J]. Journal of Building Structures, 2013,34(9):40-48. (in Chinese)
- [13] Zhang Y F, Zhang D F. Experimental study on seismic behaviour of the connection between concrete-filled twin steel tubes column and steel beam [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2015,19(3):347-365.
- [14] 王先铁,郝际平,王丰平,等. 锚定式方钢管混凝土柱与钢梁节点抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2007,27(5):95-102.
WANG Xian-tie, HAO Ji-ping, WANG Feng-ping, et al. Experimental studies on seismic behaviors of connections with anchorages for concrete-filled square steel tubes [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007,27(5):95-102. (in Chinese)
- [15] 张冬芳,赵均海,张玉芬,等. 复式钢管混凝土柱-钢梁节点的抗震性能有限元分析[J]. 世界地震工程, 2013,29(1):49-59.
ZHANG Dong-fang, ZHAO Jun-hai, ZHANG Yu-fen, et al. Finite element analysis of seismic performance of composite concrete-filled steel tube column-steel beam connection [J]. World Earthquake Engineering, 2013,29(1):49-59. (in Chinese)
- [16] 吴楠. 北岭地震和阪神地震后美日型钢框架节点设计的改进[J]. 黑龙江科技信息,2008(6):199.
WU Nan. Improvement of joint design of steel frame in America and Japan after Northridge earthquake and Osaka-Kobe earthquake [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008(6):199. (in Chinese)