

钢管混凝土异形柱及相关梁柱节点构造研究综述

叶全喜^{1,2}, 郝放¹, 薛炳勇¹, 李桐栋^{1,3}, 朱林¹, 刘立悦¹

(1. 河北水利电力学院土木工程系, 河北沧州 061001; 2. 清华大学土木系, 北京 100084;
3. 河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室, 河北沧州 061001)

摘要:为了解决钢管混凝土异形柱及相关梁柱节点构造创新不足的问题,以异形柱的发展改进历程为研究背景,指出钢管混凝土异形柱的优势所在。依据增强外钢管对内部混凝土的约束作用和增加柱肢单元内各钢板稳定性2种思想,将钢管混凝土异形柱分为带约束拉杆或加劲肋的钢管混凝土异形柱、多腔式钢管混凝土异形柱、缀材连接的钢管混凝土异形柱4种类型,对异形柱本身构造改进方面的研究进行综述;按传力构件与柱肢钢管的相对位置,将钢管混凝土异形柱的梁柱节点分为传力构件在钢管内部式和传力构件在钢管外部式2种类型,对相关梁柱节点构造创新方面的研究进行综述。同时,剖析了以上两方面研究现状的不足,指出今后钢管混凝土异型柱及其梁柱节点需要进一步深入研究的关键问题。

关键词: 钢管混凝土(CFST)异形柱; 约束拉杆; 多腔式; H型钢单元柱; 穿心螺栓; 内隔板

中图分类号: TU 391

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2021)09-1083-12

doi: 10.11936/bjutxb2020100010

Review on Configurations of Concrete-filled Steel Tubular (CFST) Special-shaped Columns and Corresponding Beam-Column Joints

YE Quanxi^{1,2}, HAO Fang¹, XUE Bingyong¹, LI Tongdong^{1,3}, ZHU Lin¹, LIU Liyue¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, Hebei, China;

2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Hebei Key Laboratory of Geotechnical Engineering Safety and Deformation Control, Cangzhou 061001, Hebei, China)

Abstract: To solve the problems of insufficient structural innovation of concrete-filled steel tubular (CFST) special-shaped columns and corresponding beam-column joints, the process of development and improvement of the special-shaped column was taken as the research background, and the advantages CFST special-shaped column were pointed out. According to the two ideas of strengthening the restraint effect that the external steel tube applied to internal concrete, and increasing the stability of steel plates inside column limb unit, the CFST special-shaped columns were divided into 4 types with binding bars or stiffener ribs, multi-cell, and lacing members, and then the structural improvements of the 3 types of special-shaped columns were summarized. According to the relative position between the force transfer member and the steel tube of the column limb, the joints between the CFST special-shaped columns and beams were divided into 2 types with the force transfer member in the steel tube, and the force transfer component outside the steel tube. Moreover, the deficiencies of the CFST special-shaped column and the

收稿日期: 2020-10-23

基金项目: 河北省高等学校科学研究计划青年拔尖人才资助项目(BJ2018062); 河北省高等学校科学研究计划资助项目(ZC2016142)

作者简介: 叶全喜(1984—),男,讲师,主要从事预应力钢结构、装配式钢结构方面的研究, E-mail: yequanxi45@163.com

通信作者: 李桐栋(1966—),男,副教授,主要从事力学与结构工程方面的研究, E-mail: litongdong1966@163.com

corresponding beam-column joint were analyzed, and that the key problems need to be further investigated was addressed.

Key words: concrete-filled steel tubular (CFST) special-shaped column; binding bar; multi-cell; H-beam unit column; though bolt; inner diaphragm

异形柱作为传统矩形柱的变形形式,通常截面有T字形、L字形、十字形等多种形式,其柱肢厚度与内墙厚相近,可以做到藏柱于墙,从而有效避免室内出现阳角、柱楞,改善房间的布置效果,提高空间利用率。异形柱按构造组成的不同,可分为钢筋混凝土异形柱、钢筋混凝土异形柱、纯钢板异形柱、钢管混凝土(concrete-filled steel tubular, CFST)异形柱4种类型。

钢筋混凝土异形柱是最早被大量使用的一种形式,具有尺寸选取灵活、施工制作简单等优点,其设计理念与钢筋混凝土短肢剪力墙相似,通过减小墙肢截面的长宽比,便可由钢筋混凝土短肢剪力墙得到钢筋混凝土异型柱^[1]。钢筋混凝土异形柱是针对钢筋混凝土异形柱承载力偏低、轴压比限值严格、延性较小等缺点的改进形式,其构造通常采用钢筋混凝土异形柱内置型钢钢筋的形式,通过钢筋与钢筋混凝土的协同作用,使柱子具有很高的整体承载力、刚度及耐久性。但当各柱肢截面较窄时,混凝土对钢筋的包裹厚度较小,钢筋与混凝土的协同工作很难得到保证,受力过程中混凝土保护层往往过早脱落,从而严重影响其承载能力。与钢筋混凝土异形柱相比,钢筋混凝土异形柱的承载能力、延性和变形性能都有明显提高,但其梁柱节点仍需较多的钢筋来增加其抗剪能力,其构造复杂、施工困难、力学性能受混凝土影响较大^[2-6],而且应用钢筋混凝土异形柱时,施工工期仍受混凝土强度的限制。纯钢板异形柱具有工厂加工便捷、现场安装施工迅速、无混凝土工期限制等优点,其主要构造形式有开口式和闭口式2种。其中,开口式主要采用以H型钢^[7-9]或方钢管为中心^[10],腹板焊接T型钢的方式,其力学性能受自身稳定性的影响较大,且梁柱连接时需要在柱肢相对梁翼缘的位置焊接尺寸较大的水平隔板保证荷载的有效传递及节点域的稳定,而较大的水平隔板会造成室内凸角明显,影响建筑美观性;闭口式主要采用冷弯方钢管为中心,柱面焊接冷弯槽钢的方式^[11-13],这种构造形式的异形柱受冷弯钢管角部圆弧的影响会漏出柱角,给后期的室内装修及布局造成很大困难。

钢管混凝土异形柱是以上3种类型异形柱的综合改进形式,其外部的钢管通常由数块钢板整体焊

接形成箱形截面,内部浇筑混凝土。钢管混凝土异形柱的工作机理主要包括外钢管对内部混凝土的约束作用及二者之间的黏结作用两方面,按柱顶荷载作用方式不同主要可分为轴压和压弯2种作用情况。1)大量轴压试验^[14-16]研究表明,轴压作用下钢管混凝土异形柱对内部混凝土的约束作用主要集中在柱子角部,各柱肢中部的约束最弱,几乎为零,柱肢短边对核心混凝土的约束明显高于长边,并且柱肢长边比其短边更容易发生局部稳定问题;黏结作用能直接影响外钢管与内部混凝土的协调变形能力,但当钢管与混凝土共同受荷时,黏结作用对钢管混凝土异形柱的轴压性能影响较小^[17]。2)压弯试验及数值模拟分析表明^[18-19],压弯作用下柱肢受压区的外钢管对内部混凝土的约束作用与轴压作用时相似,主要集中在柱肢角部,且随着偏心距的增大而减小;在受拉区,外钢管对内部混凝土的约束作用非常小,黏结作用与轴压作用时相似。此外,钢管混凝土异形柱对应的梁柱节点构造选择性也较多,可参照文献[20]推荐的传统钢管混凝土柱与钢梁连接节点的构造形式选取。

本文拟对钢管混凝土异形柱及相应梁柱节点的研究现状进行综述,分析其存在的不足之处,指出今后需要进一步深入研究的关键问题。

1 钢管混凝土异形柱及相应梁柱节点研究现状

目前,国内外学者对钢管混凝土异形柱及相应梁柱节点的研究主要集中在异形柱本身的构造改进和相应梁柱节点的构造创新两方面。

1.1 钢管混凝土异形柱构造改进方面

钢管混凝土异形柱是由普通钢管混凝土柱演变而来,其设计原理与钢管混凝土柱基本相似^[20]。普通钢管混凝土异形柱截面形式主要有如图1所示3种形式,目前的研究主要集中在T形和L形2种形式。文献[21]对T形和L形普通钢管混凝土异形柱的力学性能进行试验研究,考虑剪跨比、轴压比、钢板厚度、混凝土强度等级对其抗剪、延性和极限承载力的影响。研究表明:外钢管对内部混凝土的约束作用主要集中在各阳角处,阴角处钢板与混凝土容

易出现脱离现象,中部依靠钢板的抗弯刚度约束混凝土外凸变形的效果不理想. 柱子在侧向荷载作用下,受压一侧钢板在双向应力及内部混凝土向外膨胀作用下,很容易在屈服前发生向外鼓曲,甚至鼓曲部位出现混凝土压碎现象.

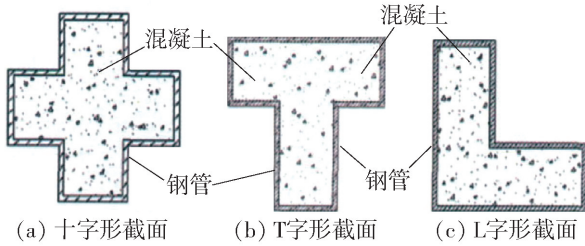


图1 普通钢管混凝土异形柱

Fig. 1 Common combination box-shaped steel plate special-shaped columns

针对普通钢管混凝土异形柱过早发生局部屈曲以及阴角处钢管和混凝土脱离的问题,学者们以增强钢管与混凝土协调工作和增强钢管对混凝土的约束作用、减小柱内单元尺寸以增加单元内各钢板稳定性2种思想为基础,提出诸多改进措施.

1.1.1 增强钢管对内部混凝土的约束作用

这种思想的改进措施主要有带约束拉杆或加劲肋的钢管混凝土异形柱2种形式.

蔡健团队提出沿钢板添加具有约束钢板外凸变形作用的水平拉杆的改进措施,并对方形、矩形、T形和L形截面形式的柱子进行试验及理论分析,给出不同截面形式时柱子的本构关系^[22-27]. 其研究表明:约束拉杆可以改变钢管的屈曲模态,延迟钢管的局部屈曲,进而改善柱子中部钢管对核心混凝土的约束作用,提高钢管混凝土轴压短柱的承载力和延性. 改进后的构造如图2所示.

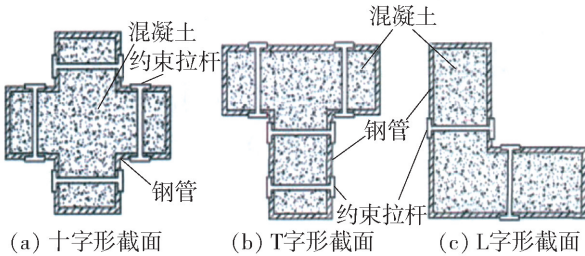


图2 带约束拉杆钢管混凝土异形柱

Fig. 2 CFST special-shaped columns with binding bars

王玉银等^[28]提出在异形钢管内部焊接钢筋加劲肋的构造措施,并对普通钢管混凝土异形柱、带钢筋加劲肋的钢管混凝土异形柱、钢筋混凝土柱的压弯滞回性能进行对比试验研究. 结果表明:钢筋加

劲肋能有效限制钢板中央和阴角处位移,保证钢管和混凝土共同工作;相比其他2种柱,设置钢筋加劲肋的试件具有更好的初始刚度承载力和延性. 改进后的异形柱构造如图3所示.

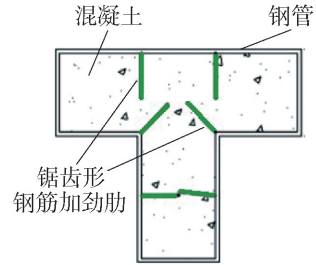


图3 带加劲肋的钢管混凝土异形柱

Fig. 3 CFST special-shaped columns with stiffening ribs

Zheng等^[29]对带角钢加劲肋的钢管混凝土异形柱的轴压性能进行有限元模拟,并参照EC4对其参数分析结果进行评价,最终给出新的设计方法,有限元分析模型如图4所示.

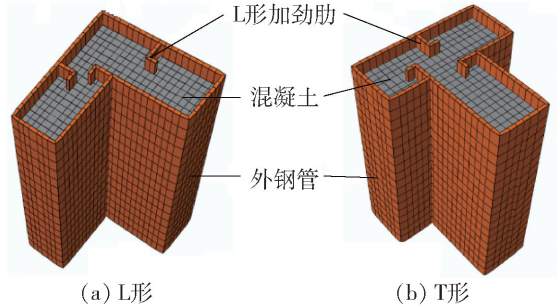


图4 带角钢加劲肋的钢管混凝土异形柱

Fig. 4 CFST special-shaped columns with angle steel stiffener

Xu等^[30]对带8个钢筋加劲的T形钢管混凝土异形柱进行轴压试验,并给出该异形柱稳定承载力的设计计算公式. 结果表明:钢筋加劲肋可以很好地限制钢管角部的变形,增强钢管与混凝土的协调工作能力及柱子整体的承载力和延性性能,柱子构造如图5所示.

1.1.2 增加柱肢单元内各钢板稳定性

这种思想主要通过减小柱内单元尺寸来实现,改进措施主要有多腔式钢管混凝土异形柱、缀材连接的钢管混凝土异形柱2种形式.

郝际平等^[31]提出一种以多腔式一字型钢管混凝土柱为基本单元组成各种截面形式的钢管混凝土异形柱,单元柱及连接方式构造见图6.

刘林林等^[32]提出一种多室式T型钢管混凝土异形柱,构造如图7所示. 徐礼华等^[33]、杜国锋等^[34]提出一种内浇混凝土、外围由2个矩形钢管

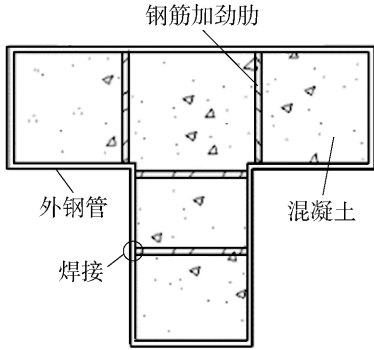


图5 带钢筋加劲肋的钢管混凝土异形柱

Fig. 5 CFST special-shaped columns with reinforcement stiffener

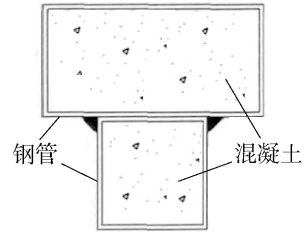


图8 T形钢管混凝土异形柱

Fig. 8 CFST T-shaped column

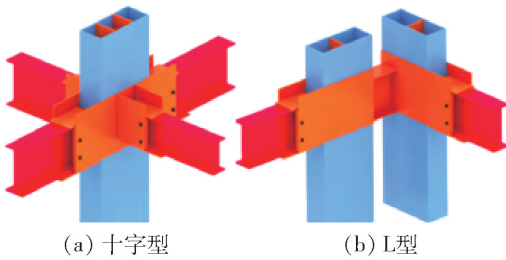


图6 多腔钢管混凝土柱

Fig. 6 Multi-core CFST column

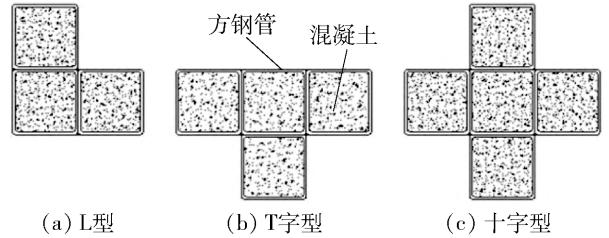


图9 方钢管钢管混凝土异形柱

Fig. 9 CFST special-shaped column with square steel tubular

焊接而成的T形钢管混凝土异形柱,其构造见图8.李泉等^[35]提出一种由多个方钢管作为基础单元构件,通过焊接组成T形、L形及十字形外钢管,内部浇筑混凝土的钢管混凝土异形柱,其构造如图9所示.

双层钢板且中间浇筑混凝土的形式,进而与方钢管形成整体截面为十字型、T形、L形的柱束结构.研究表明:双层钢板间浇筑混凝土形式的异形柱以外钢板局部鼓曲为主,缀材或钢板连接的形式以缀材或钢板屈曲破坏为主.L形的柱束结构如图10所示.

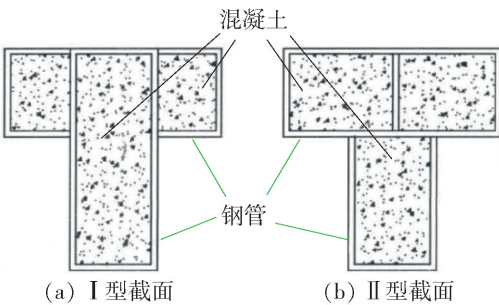


图7 T形多室式钢管混凝土异形柱

Fig. 7 Multi-cell CFST T-shaped column

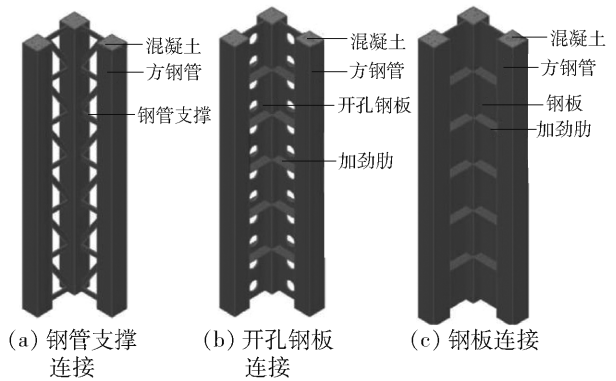


图10 3种L形钢管混凝土柱束

Fig. 10 Three L-shaped CFST columns

这几种构造形式都是以实腹柱为研究对象,在柱内形成多腔,并且柱子的阴角处均有贯通的钢板,从而增加了外钢管对混凝土的约束作用.

赵宇铮等^[41]提出一种由方钢管支撑连接的格构式L形宽肢钢管混凝土异形柱,其构造如图11所示,用方钢管支撑连接各方钢管混凝土柱角部,形成整体截面为L形的柱束结构.试验研究表明:该异形柱在压弯荷载作用下,方钢管支撑的连接处受剪破坏,焊缝断裂.

陈志华等^[36-37]、Zhou等^[38-39]、Xiong等^[40]提出缀材连接的钢管混凝土异形柱,缀材可采用钢条、钢板或钢管支撑.构造形式为:各方钢管混凝土柱中部连接钢条、钢板,其中采用单层钢板时可开孔,也可采用

这2种构造方式都是以格构式柱束为研究对象,其端部的热轧方钢管自身尺寸较小且具有很高的稳定性,通过缀材连接后形成刚度更大的异形柱束结构.

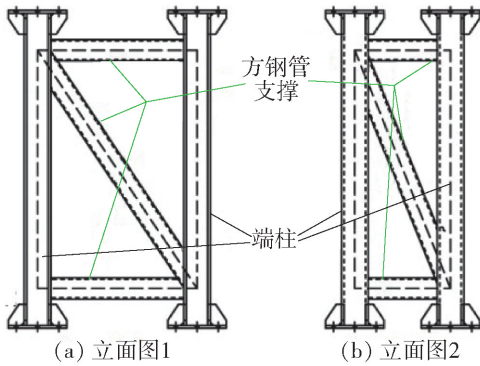


图 11 L形宽肢钢管混凝土异形柱

Fig. 11 Wide flange L-shaped CFST special-shaped columns

1.2 相应梁柱节点构造创新方面

钢管混凝土异形柱的梁柱节点构造与钢管混凝土柱-钢梁节点相似,但由于异形柱的柱肢宽度很小,通常为 200 mm 左右,因此当其梁柱节点采用传统内隔板连接构造时,内隔板的焊接施工困难且不利于混凝土浇筑,采用外环板连接构造时,其用钢量及尺寸均较大,影响建筑美观的问题仍无法避免。

在确保荷载能很好地传递到节点核心区而又避免出现上述问题的前提下,钢管混凝土异形柱的梁柱节点构造可借鉴国内外学者对钢管混凝土柱-钢梁节点的研究改进方案. 按传力构件与柱肢钢管的相对位置,改进的节点可分为:

1) 传力构件在钢管内部式,这种节点主要有穿心式连接(梁贯通式^[42-43]、穿心螺栓式^[44-45]、穿心板式^[46-47]、穿心螺栓与穿心板混用式^[48])、内锚式连接^[49]、半内隔板式连接^[50]、内隔板(单边不焊接)-栓钉式连接^[51]等形式。

2) 传力构件在钢管外部式,主要有加劲肋式连接(外贴 T 型加劲肋式^[52]、三角形或梯形加劲板式连接^[53-54])、外套筒式连接^[55]等形式。

1.2.1 传力构件在外钢管内部式连接

Azizinamini 等^[42]提出一种梁贯通的钢管混凝土节点,见图 12,并初步提出梁贯穿节点的初步设计方法,未考虑柱轴向荷载对连接的影响。

Elremaily 等^[43]对 7 个梁贯通钢管混凝土比例试样进行试验研究,试验结果表明,该连接形式满足“强柱弱梁”要求,具有较好的塑性承载力和延性,破坏形式包括柱破坏、梁破坏、节点域破坏。

郑龙等^[44]对钢管混凝土柱-钢梁穿心螺栓外伸端板式节点进行单调加载试验研究,节点形式如图 13 所示,试验研究了该种节点的破坏变形、承载能

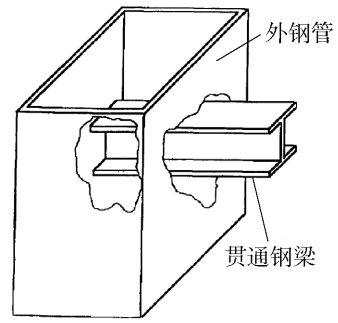


图 12 梁贯通式节点

Fig. 12 Beam through joint

力等性能. 试验结果表明:节点的抗连续倒塌能力高于抗弯能力,节点破坏分为梁机制阶段、混合机制阶段、悬链线机制阶段及破坏阶段。

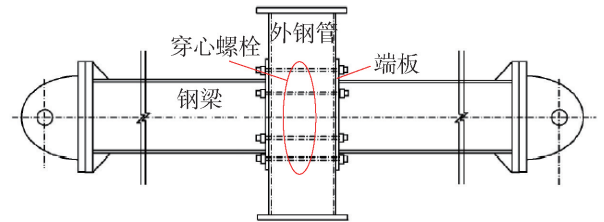


图 13 穿心螺栓-端板式节点

Fig. 13 Through bolt-end plate joint

杨松森等^[45]提出一种装配式外套筒加强型梁柱连接节点,其构造如图 14 所示. 该节点的单调及低周往复加载试验表明:该节点的初始转动刚度随加载位移的增大而减小,节点具有很好的变形及耗能能力。

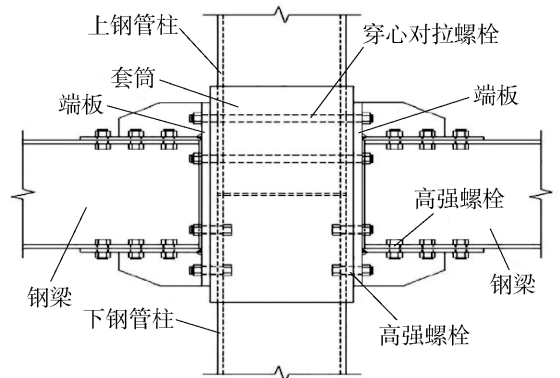


图 14 套筒-外伸端板组件梁柱连接节点构造

Fig. 14 Construction of beam-to-column connection Joints for outer sheath-extended endplate components

徐礼华^[46]等提出一种双侧板贯穿式方钢管混凝土柱-钢梁节点,对 6 组共 17 个十字形节点进行试验研究,节点形式如图 15 所示. 结果表明:穿心板的长度影响塑性铰的位置,双侧贯穿节点可以减

小上翼缘与钢管的应力梯度. 该节点的强度、延性等受力性能都较好.

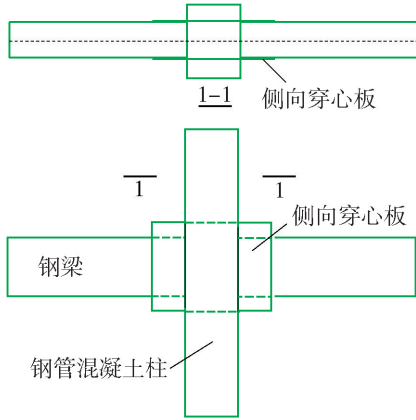


图 15 双侧板贯穿式节点

Fig. 15 Double side plates through joint

Torabian 等^[47]提出一种柱对角穿心板式梁柱连接节点,构造如图 16 所示,并对其抗震性能进行了拟静力试验分析.

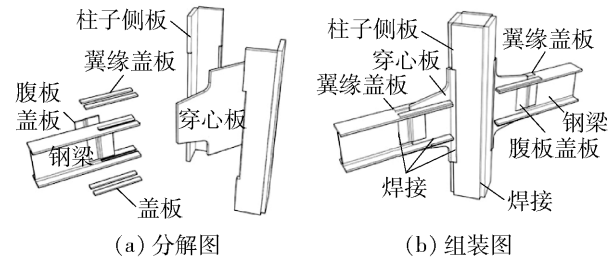


图 16 柱对角穿心板节点

Fig. 16 Column diagonal through plate joint

Ding 等^[48]提出一种穿心板与穿心螺栓混合使用的钢管混凝土柱-钢梁节点,并对其进行单调及低周往复的滞回加载试验,研究该节点的破坏模式、刚度、强度及耗能性能,节点构造如图 17 所示.

Choi^[49]提出一种内锚式钢管混凝土柱-钢梁节点. 在该节点柱内平行于钢梁上翼缘位置采用十字板、平行于下翼缘位置采用水平 T 形加劲板或在平行于腹板位置布置带螺钉的竖向板,以完成荷载由梁端向柱内部的传递. 节点构造如图 18 所示.

Kim 等^[50]以槽钢内焊接半内隔板的形式作为基础构件组成外钢管,从而有效解决传统钢管柱焊接内隔板困难的问题. 对该钢管混凝土柱-节点进行静力拉伸试验,节点构造如图 19 所示.

王先铁^[51]针对方钢管混凝土内隔板式节点应用中存在的问题提出穿芯高强螺栓-端板、隔板单边贯通柱壁板、节点域设置锚固 T 形件、隔板单边不焊但设置圆柱头栓钉等多种形式的节点,对 8 组

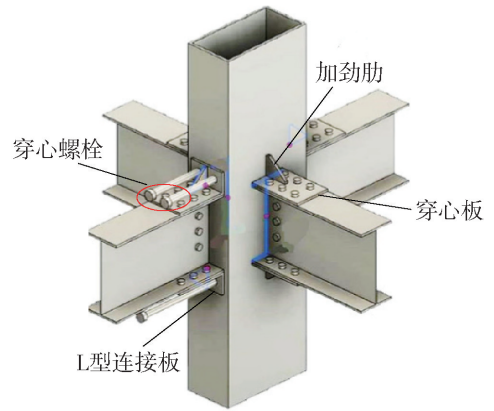


图 17 混合穿心节点构造

Fig. 17 Structure of hybrid through joint

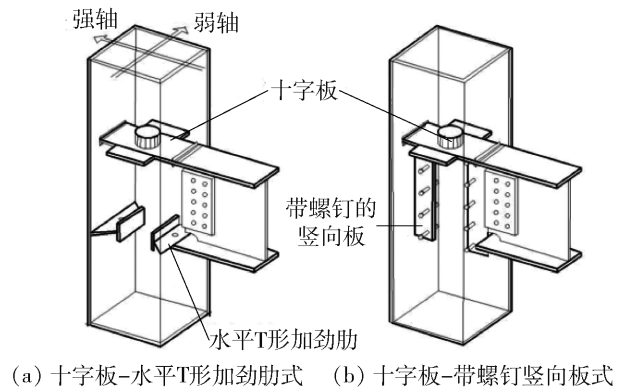


图 18 内锚固式节点

Fig. 18 Specimens of internal anchor type joint

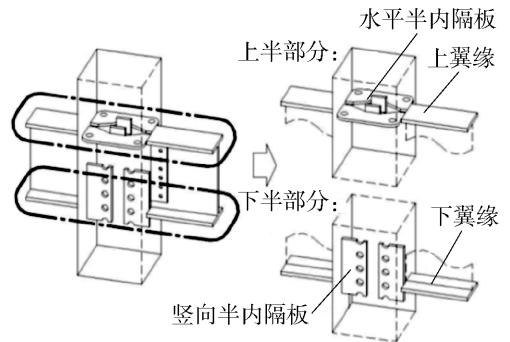


图 19 半内隔板式连接节点

Fig. 19 Semi inner diaphragm joints

共 24 个节点进行低周反复荷载的拟静力试验,对这一系列节点的滞回性能、破坏模式、强度及刚度退化等力学性能进行分析.

1.2.2 传力构件在外钢管外部式连接

Shin 等^[52]对采用 T 形加劲肋的钢管混凝土梁柱节点进行试验研究,节点构造如图 20 所示. 结果表明:T 形加劲肋可以很好地传递外荷载,试件的延性能力超过了 AISC 抗震规范中特殊弯矩框架连接

的要求.

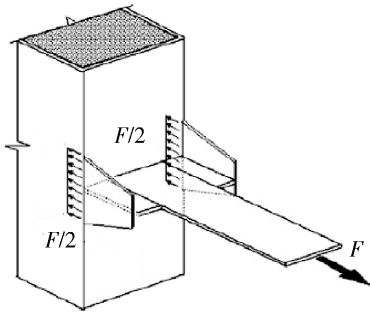


图20 T形加劲肋节点
Fig. 20 T-stiffener joint

郭志鹏^[53]提出外焊三角形加劲的带Z字形悬臂梁段和削弱梁段的方钢管柱-H型钢梁柱节点,并对该节点的抗震性能进行滞回加载试验研究,结果表明:三角形加劲肋可以有效地传递外荷载到柱子两侧翼缘,节点整体构造如图21所示.



图21 三角形加劲肋节点
Fig. 21 Triangular stiffener joint

Liu等^[54]通过拟静力试验对比分析了梯形外贴加劲板式T字形钢管混凝土柱-钢梁节点与隔板贯通式T字形钢管混凝土柱-钢梁节点的传力模式、失效模式及抗震性能.

马荣全等^[55]对格构式及实腹式异形柱的梁柱节点采用外焊三角加劲肋、梯形加劲肋的形式,将外荷载传递到柱肢腹板上,并对节点进行了拟静力试验研究,节点构造如图22所示.

2 钢管混凝土异形柱及相应节点研究现状分析

2.1 钢管混凝土异形柱及相应梁柱节点的研究方法

1) 钢管混凝土异形柱的研究以轴压、压弯性能为主,主要研究柱子在轴向及侧向荷载作用下钢管与内部混凝土的相互作用机制及协调变形能力.

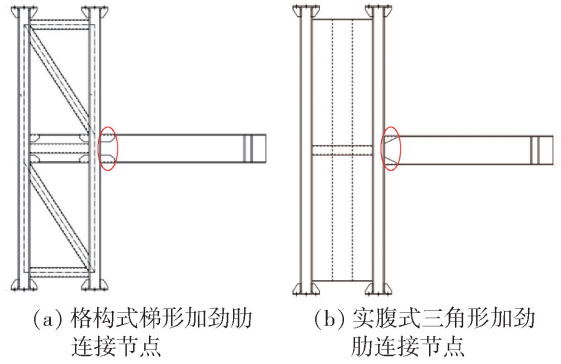


图22 2种外焊加劲肋节点
Fig. 22 Two kinds of externally welded stiffener joints

2) 钢管混凝土异形柱相应梁柱节点的试验研究主要以拟静力的单调加载、低周往复滞回加载2种方式进行.其中单调加载主要研究节点的初始刚度、加载过程、延性、承载力等性能;滞回加载主要考察节点的耗能、刚度退化等抗震性能.

2种情况的试验研究中,柱子两端基本按铰接处理,柱端的试验连接装置成为模拟此边界条件的关键所在.目前大多数试验均以刀铰装置来模拟铰接边界条件,但当构件发生较大转动变形时,刀铰往往不能有效控制柱端,容易发生安全事故.铰接柱靴装置与柱端、千斤顶加载端连接便捷,安全可靠,可以防止柱端平面外失稳,实现柱端加载平面内的铰接功能,但其造价较高.铰接柱靴的构造如图23所示.



图23 铰接柱靴
Fig. 23 Hinged column base

2.2 钢管混凝土异形柱及相应节点的优点

1) 截面尺寸选取灵活. 钢管混凝土异形柱的外部箱形钢管可由数块钢板焊接而成,截面尺寸可根据自身需求灵活选取.

2) 承载力高. 外围钢板焊接成的箱形钢柱可为内部混凝土提供一定套箍作用,约束核心混凝土的横向变形,进而提高混凝土的承载能力,增强结构的延性.

3) 梁柱节点构造简单、施工方便、构造形式选

择性多. 与钢梁相连接时,可借鉴国内外学者对钢管混凝土柱-钢梁节点的研究改进方案,采用适合的构造方式.

4) 施工工期短. 外围箱形钢管可以独立承载,因此柱内混凝土浇筑完成便可继续施工,进而缩短施工周期.

2.3 钢管混凝土异形柱及相应节点的不足之处

1) 外部钢管与混凝土协调工作方面. 尽管很多学者已经就此问题提出一些改进措施,但目前仍存在问题:采用的约束拉杆通常为高强螺栓,沿柱高布置时所需数量很大,柱子整体造价提高;采用焊接加劲肋时,由于加劲肋的焊接无法实现工厂机械化,人工焊接的工艺要求高且造价过大;采用缀条(钢板)连接的格构式(实腹式)异形柱,各端柱截面宽度往往大于中间缀材的厚度,室内装修时需要大量封板,这些均会大幅度增加结构造价.

2) 外部钢管构造组成方面. 目前外部钢管均由数块钢板焊接而成,其内部还要焊接大量的加劲肋. 这样大量的焊接工作不仅会改变箱型钢管的初始受力状态,使其具有较大的初始缺陷,而且会产生较大的残余应力. 文献[56]研究表明残余应力及初始缺陷均会严重影响结构的承载能力及抗震性能.

3) 外部钢管间的连接构造方面. 外部钢管作为竖向连接构件,其连接节点的刚度及抗震性能对整体结构至关重要. 采用传统高空焊接的方式可以实现连接刚度的设计,但现场高空焊接施工困难,焊接质量难以保证. 目前对外部钢管间连接的构造创新研究还很少,文献[57-58]提出采用高强螺栓、带内套筒的柱座法兰实现上下相邻钢管的连接方式. 但采用柱座法兰连接时,钢管柱所需法兰盘较大,影响室内布局,且高强螺栓连接内套筒与箱形钢管时的施工操作非常困难.

4) 相应节点构造创新方面. 目前针对钢管混凝土柱-钢梁节点采用传统内隔板连接构造及外环板连接构造出现的各种问题进行的节点构造改进研究有很多,但是普通钢管混凝土柱截面长宽比均小于2,组合箱形钢板异形柱的各柱肢长宽比通常在2~4,其截面相对复杂很多,现有关于节点构造的改进措施能直接应用于钢管混凝土异形柱梁柱节点的还很少.

5) 钢管混凝土异形柱的防火、防锈方面. 由于钢管混凝土异形柱的外钢管基本采用普通钢材,锈蚀、过火都将严重影响钢管混凝土异形柱的力学性

能,尽管目前对普通钢材的防火、防锈处理方式已有多形式,但都无法从根本上解决问题.

3 钢管混凝土异形柱及相应梁柱节点仍需深入研究的关键问题

综合目前国内外学者的研究情况,钢管混凝土异形柱仍需深入研究的关键问题有如下几个方面:

1) 提高钢管混凝土异形柱的整体协调变形能力. 钢管混凝土异形柱的外部箱形钢管与内部混凝土间的摩擦力很小,在很小的层间位移角下,二者就会脱离. 目前提出的设置高强螺栓为约束拉杆、采用加劲肋、采用缀条(钢板)连接的格构式(实腹式)异形柱等改善协调变形的构造措施均会很大程度上增加结构造价,严重制约箱形钢板异形柱的应用推广,因此创新构造、提高箱形钢板异形柱的整体协调变形能力是今后需要继续深入研究的一个方面.

2) 创新出焊接量少、易加工、低造价的外部箱形钢管构造组成方式. 外部箱形钢管及其内部横隔板、加劲肋的整体焊接量较大,由此带来的造价提高在所难免;此外由于异形柱中箱形钢管的截面尺寸较小,通常为200 mm,与内隔墙等宽,当在其内部焊接加劲肋时,施工难度较大. 例如笔者提出的一种利用热轧H型钢作为组装单元柱的装配式H型钢箱形组合异形柱,该柱可通过H型钢单元柱间的锁钩紧密连接,并且充分利用热轧H型钢自身的局部稳定性以及腹板充当横隔板的构造优势来避免大量的焊接工作,大幅简化制作工艺、降低制作成本. 该类型异形柱可形成L形、T形、十字形等形状,锁钩浇注在混凝土中还能起到栓钉的作用,防止箱形钢管与混凝土脱离. 这种易装配、易加工、低造价、少焊接量的构造形式也是箱形钢板异形柱今后需要深入研究的一个方面.

3) 创新相邻外部钢管的连接方式. 现有研究中主要借鉴传统钢管混凝土柱的连接方式,以单层法兰连接、多层柱中连接2种方式为主. 但由于钢管混凝土异形柱截面相对复杂,采用单层法兰连接时,需要设置较大的法兰盘及较多的高强螺栓来抵消抗弯剪作用,其构造复杂、造价较高. 采用多层柱中连接时,将连接点设置在柱中的反弯点处,可仅考虑连接的剪切作用. 但通常这种连接方式中高强螺栓的拧紧施工困难,连接的紧密程度难以保障. 文献[59]基于传统高强度螺栓提出的由限制螺母位置的三角盒和传统高强度螺栓组成单边连接方式,可有效避免传统高强螺栓拧紧困难的问题. 此外,

目前关于环槽铆钉的研究已有很多,环槽铆钉具有连接方便、单边操作简单等优点,也可有效解决上述高强螺栓拧紧困难的问题。这种简化连接施工工艺、创新连接构造的方式也是今后需要继续深入研究的一个方面。

4) 创新钢管混凝土异形柱梁柱节点的构造方式。由于钢管混凝土异形柱的柱肢长宽较大、截面构造相对复杂,因此如何在现有钢管混凝土柱-钢梁节点的各种改进研究方案基础上,创新出造价低、施工便捷、传力明确的适用于钢管混凝土异形柱的新型节点构造是今后需要继续深入研究的一个方面。

5) 创新不同种类材料在外钢管构造中的应用。使用防锈、防火材料制作外套管,可以从根本上解决普通钢材的锈蚀、不防火缺陷。目前,关于不锈钢铝合金、复合钢、耐火耐候钢等材料在结构中的应用研究已趋于成熟,这些具备特殊性能的材料都能很好应用在建筑结构中,这些新材料在外钢管构造中的应用也是今后需要继续深入研究的一个方面。

6) 创新装配式钢结构中钢管混凝土异形柱的设计与应用。近年以来,以全寿命周期绿色建筑为基本理念的装配式钢结构发展迅速。钢管混凝土异形柱可以作为工业化装配式钢结构的组成构件,将异形柱的各个优点带入装配式钢结构中,能够丰富装配式钢结构(特别是住宅)的选型设计。但是目前钢管混凝土异形柱在装配式钢结构中的研究应用还比较少,其在装配式钢结构中的设计与应用也是今后需要深入研究的一个方面。

总之,钢管混凝土异形柱不仅具有承担竖向荷载、提供水平抗侧刚度、避免室内出现阳角、改善房间布置效果、提高空间利用率、梁柱节点构造可选择性多等优点,其构造形式及受力特征也符合以全寿命周期绿色建筑为基本理念的装配式钢结构设计要求。因此,创新研发出整体变形协调性好、焊接量少、造价低、传力明确、易装配的柱子及其梁柱节点构造的前景良好,且必将为今后钢结构的发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 天津大学. 混凝土异形柱结构技术规程: JGJ 149—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [2] 陈宗平, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 型钢混凝土异形柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 53-61.
- CHEN Z P, XUE J Y, ZHAO H T, et al. Experimental

research on seismic behavior of steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 53-61. (in Chinese)

- [3] 薛李哲, 张小峰, 郭增玉, 等. 钢管混凝土 T 形截面短柱力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1): 1-5.
- XUE L Z, ZHANG X F, GUO Z Y, et al. Experimental study on the mechanical property of steel reinforced concrete short columns of T-shaped cross-section [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1): 1-5. (in Chinese)
- [4] 吴佳杰. 钢管混凝土 L 形截面柱在底周反复荷载作用的试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.
- WU J J. Study of the L-shaped cross-section steel reinforced concrete column in the low cyclic loading tests [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009. (in Chinese)
- [5] 李辉. 钢管混凝土 L 形截面短柱抗震性能的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- LI H. Experimental research on the seismic performance of L-shaped cross section on steel concrete short columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] 苏益声, 陈宗平, 廖良平. 钢管混凝土 L 形柱抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(1): 63-68.
- SU Y S, CHEN Z P, LIAO L P. Lab research on seismic behavior of steel reinforced concrete L-shaped column[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2009, 41(1): 63-68. (in Chinese)
- [7] 张爱林, 于劲, 徐敏, 等. 低周反复荷载作用下十字形截面钢异形柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 11-19.
- ZHANG A L, YU J, XU M, et al. Experimental research on steel specially shaped columns with cruciform section under cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 11-19. (in Chinese)
- [8] 张爱林, 于劲, 徐敏, 等. 低周反复荷载作用下 T 形截面钢异形柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 20-28.
- ZHANG A L, YU J, XU M, et al. Experimental research on steel specially shaped columns with T-section under cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 20-28. (in Chinese)
- [9] 于劲. 钢异形柱结构体系抗震性能的理论分析与试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- YU J. Theoretical and experimental research on seismic behavior of steel structure system with specially shaped columns [D]. Beijing: Beijing University of Technology,

2010. (in Chinese)
- [10] 王萌, 樊江, 焦义. 钢异形柱 L 形截面的受力分析与改进方案[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(10): 2482-2486.
WANG M, FAN J, JIAO Y. The mechanical behavior analysis and improvement scheme of L shaped steel columns [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(10): 2482-2486. (in Chinese)
- [11] 徐利丽. T 形闭口截面轴压钢柱整体稳定性及其计算方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
XU L L. Study on stability of T-shape closed section steel column and its calculation under axial compression[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [12] 陈鑫. T 形钢箱异形柱稳定承载力有限元分析及研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
CHEN Xin. FEA and research for stable capacity of special shaped T-box column[D]. Kunming: Kunming University of Science And Technology, 2015. (in Chinese)
- [13] 蔡孝龙. 单轴对称 L 形闭口截面轴压钢柱稳定性及计算方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
CAI X L. Study on stability and calculation method of uniaxial symmetry L-shape closed section steel column under axial load[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] XIONG Q, CHEN Z, ZHANG W, et al. Compressive behavior and design of L-shaped columns fabricated using concrete-filled steel tubes[J]. Engineering Structures, 2017, 152: 758-770.
- [15] REN Q X, HAN L H, LAM D, et al. Experiments on special-shaped CFST stub columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 98: 123-133.
- [16] WANG F C, HAN L H, LI W. Analytical behavior of special-shaped CFST stub columns under axial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 129: 404-417.
- [17] ZUO Z L, CAI J, CHEN Q J, et al. Performance of T-shaped CFST stub columns with binding bars under axial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 129: 183-196.
- [18] WANG R, HAN L H, NIE J G, et al. Flexural performance of rectangular CFST members [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 79: 154-165.
- [19] LIU X G, LIU J P, YANG Y L, et al. Resistance of special-shaped concrete-filled steel tube columns under compression and bending [J/OL]. Journal of Constructional Steel Research, 2020 [2020-12-23]. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106038>.
- [20] 同济大学. 2004 矩形钢管混凝土结构技术规程: CECS 159[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [21] 王丹, 吕西林. T 形、L 形钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 39-44.
WANG D, LÜ X L. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled steel T-section and L-section columns[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 39-44. (in Chinese)
- [22] 何振强, 蔡健, 陈星. 带约束拉杆方形钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(8): 49-53.
HE Z Q, CAI J, CHEN X. Investigation of behavior of square CFT stub columns with binding bars under axial loads[J]. Building Structure, 2006, 36(8): 49-53. (in Chinese)
- [23] 龙越凌, 蔡健. 带约束拉杆 L 形钢管混凝土短柱轴压性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报, 2006, 34(11): 87-92.
LONG Y L, CAI J. Experimental investigation into axial compressive behavior of L-shape concrete-filled steel tubular stub columns with binding bars [J]. Journal of South China University of Technology, 2006, 34(11): 87-92. (in Chinese)
- [24] 何振强, 蔡健. 带约束拉杆方形钢管混凝土偏压短柱的试验研究[J]. 华南理工大学学报, 2006, 34(2): 107-111.
HE Z Q, CAI J. Experimental investigation into square CFT stub columns with binding bars under eccentric loads [J]. Journal of South China University of Technology, 2006, 34(2): 107-111. (in Chinese)
- [25] 蔡健, 何振强. 带约束拉杆方形钢管混凝土的本构关系[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 145-150.
CAI J, HE Z Q. Constitutive relationship of square CFT with binding bars[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 145-150. (in Chinese)
- [26] ZUO Z L, CAI J, YANG C, et al. Axial load behavior of L-shaped CFT stub columns with binding bars [J]. Engineering Structures, 2012, 37: 88-98.
- [27] ZUO Z L, CAI J, YANG C, et al. Eccentric load behavior of L-shaped CFT stub columns with binding bars [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 105-118.
- [28] 王玉银, 杨远龙, 张素梅, 等. T 形截面钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊 1): 355-359.
WANG Y Y, YANG Y L, ZHANG S M, et al. Experimental research on seismic behavior of T-shaped concrete-filled steel tube columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 31(suppl 1): 355-359. (in Chinese)

- [29] ZHENG Y Q, ZENG S X. Design of L-shaped and T-shaped concrete-filled steel tubular stub columns under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2020, 207: 1-15.
- [30] XU C Z, YANG Y L, TANG X, et al. Experimental research on static behavior of stiffened T-shaped concrete-filled steel tubular stubs subjected to concentric axial loading [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2019, 19(2): 591-602.
- [31] 郝际平, 孙晓岭, 薛强, 等. 绿色装配式钢结构建筑体系研究与应用[J]. *工程力学*, 2017, 34(1): 1-13.
HAO J P, SUN X L, XUE Q, et al. Research and applications of prefabricated steel structure building systems[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(1): 1-13. (in Chinese)
- [32] 刘林林, 屠永清, 叶英华. 多室式钢管混凝土 T 形短柱轴压性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2011, 44(10): 9-16.
LIU L L, TU Y Q, YE Y H. Experimental study of the properties of axially loaded multi-cell T-shaped concrete-filled steel tubular stub columns [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(10): 9-16. (in Chinese)
- [33] 徐礼华, 徐浩然, 杜国锋, 等. 组合 T 形截面钢管混凝土构件抗剪性能试验研究 [J]. *工程力学*, 2009, 26(12): 141-149.
XU L H, XU H R, DU G F, et al. Experimental study on shear resistance performance of composite T-section concrete-filled steel tubular members [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 26(12): 141-149. (in Chinese)
- [34] 杜国锋, 徐礼华, 徐浩然, 等. 钢管混凝土组合 T 形短柱轴压力学性能研究 [J]. *西安建筑科技大学学报 (自然科学版)*, 2008, 40(4): 549-555.
DU G F, XU L H, XU H R, et al. Study on behavior of composite T-shaped concrete filled steel tubular short columns under axial compression [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 40(4): 549-555. (in Chinese)
- [35] 李泉, 周学军, 李国强, 等. T 形方钢管混凝土组合异形柱偏压性能试验研究 [J/OL]. *土木与环境工程学报*, 2020 [2021-01-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20200317.1816.008.html>.
LI Q, ZHOU X J, LI G Q, et al. Experimental study on the behavior of special T-shaped composite columns with concrete-filled square steel tubulars under eccentric loads [J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020 [2021-01-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20200317.1816.008.html>.
- [36] 陈志华, 李振宇, 荣彬, 等. L 形截面方钢管混凝土组合异形柱轴压承载力试验 [J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2006, 39(11): 1275-1282.
CHEN Z H, LI Z Y, RONG B. Research on axial compression stability of L-shaped column composed of concrete-filled square steel tubes [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2006, 39(11): 1275-1282. (in Chinese)
- [37] 陈志华, 荣彬. L 形方钢管混凝土组合异形柱的轴压稳定性研究 [J]. *建筑结构*, 2009, 39(6): 39-42.
CHEN Z H, RONG B. Research on axial compression stability of L-shaped column composed of concrete-filled square steel tubes [J]. *Structural Engineering*, 2009, 39(6): 39-42. (in Chinese)
- [38] ZHOU T, CHEN Z H, LIU H B. Seismic behavior of special shaped column composed of concrete filled steel tubes [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 75: 131-141.
- [39] ZHOU T, CHEN Z H, LIU H B. Experimental study of slender LCFST columns connected by steel linking plates [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 75: 131-141.
- [40] XIONG Q Q, CHEN Z H, KANG J F, et al. Experimental and finite element study on seismic performance of the LCFSTD columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 127: 231-241.
- [41] 赵宇铮, 班慧勇, 王元清, 等. 高层钢结构住宅 L 形宽肢组合异形柱抗震性能研究 [J]. *四川建筑科学研究*, 2017, 43(3): 116-121.
ZHAO Y Z, BAN H Y, WANG Y Q, et al. Investigation on seismic behavior of wide flange L-shaped composite columns for high-rise steel structural buildings [J]. *Sichuan Building Science*, 2017, 43(3): 116-121. (in Chinese)
- [42] AZIZINAMINI A, SHEKAR Y. Design of through beam connections detail for circular composite columns [J]. *Engineering Structures*, 1995, 17(3): 209-213.
- [43] ELREMAILY A, AZIZINAMINI A. Experimental behavior of steel beam to CFT column connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57(10): 1099-1119.
- [44] 郑龙, 王文达, 李华伟, 等. 钢管混凝土柱-钢梁穿心螺栓外伸端板式节点抗连续倒塌性能研究 [J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(11): 140-149.
ZHENG L, WANG W D, LI H W, et al. Research on performance of CFST column to steel beam joint with through bolts-extended endplate against progressive collapse [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(11): 140-149. (in Chinese)
- [45] 杨松森, 王燕, 马强强. 装配式外套筒-加强式外伸端板组件梁柱连接节点抗震性能试验研究 [J]. *土木工程*

- 程学报, 2017, 50(11): 76-86.
- YANG S S, WANG Y, MA Q Q. Experimental study on seismic behavior of prefabricated outer sleeve-overhang plate joint between column and beam [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50 (11): 76-86. (in Chinese)
- [46] 徐礼华, 童敏. 方钢管混凝土柱-钢梁双侧板贯穿式节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 49-57.
- XU L H, TONG M. Experimental study on the seismic behavior of the dual vertical diaphragms through joint connection between concrete-filled square steel tubular column and steel beam [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 49-57. (in Chinese)
- [47] TORABIAN S, MIRGHADERI S R, KESHAVARAI F. Moment-connection between I-beam and built-up square column by a diagonal through plate [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70(2): 385-401.
- [48] DING C T, PAN X B, BAI Y, et al. Prefabricated connection for steel beam and concrete-filled steel tube column [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162(11): 1-13.
- [49] CHOI S M. A study on seismic performance for CFT square column-to-beam connections reinforced with asymmetric lower diaphragms [J]. Journal of Korean Society of Steel Construction, 2003, 15(5): 579-589.
- [50] KIM S H, CHOI S M. Tensile strength and concrete cone failure in CFT connection with internal diaphragms [J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17(2): 643-652.
- [51] 王先铁. 新型方钢管混凝土柱-钢梁节点性能研究及抗震设计对策[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- WANG X T. Behavior research and aseismic design criterion on new type connections of concrete-filled square tubular column and steel beam [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)
- [52] SHIN K J, KIM Y J. Seismic behavior of composite concrete-filled tube column-to-beam moment connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(1): 118-127.
- [53] 郭志鹏. Z字型悬臂梁拼接装配式钢框架抗震性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- GUO Z P. Seismic behavior of prefabricated steel frame with Z-type cantilever beam splices [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [54] LIU J, YANG Y, ZHOU X. Experimental investigation of special-shaped concrete-filled steel tubular column to steel beam connections under cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2017, 151: 68-84.
- [55] 马荣全, 班慧勇, 赵宇铮, 等. 宽肢组合异形柱-钢梁节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 105-113.
- MA R Q, BAN H Y, ZHAO Y Z, et al. Experimental study on seismic behavior of steel beam to wide flange specially shaped composite column connections [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 105-113. (in Chinese)
- [56] 李伦, 严仁军, 湛伟, 等. 焊接初始缺陷对腹板开孔梁极限承载力的影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 44(2): 326-329.
- LI L, YAN R J, SHEN W, et al. Influence of initial welding imperfections on the ultimate bearing capacity of plate girders with perforated web [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2020, 44(2): 326-329. (in Chinese)
- [57] 张艳霞, 郑明召, 黄威振, 等. 箱形柱内套筒式全螺栓拼接节点试验数值模拟[J]. 钢结构研究进展, 2018, 20(4): 34-45.
- ZHANG Y X, ZHENG M Z, HUANG W Z, et al. Analytical study on full-bolted box-section all-bolted column connection with inner sleeve [J]. Progress in Steel Building Structures, 2018, 20(4): 34-45. (in Chinese)
- [58] 张艳霞, 黄威振, 郑明召, 等. 箱形柱内套筒式全螺栓拼接节点拟静力试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 47(5): 37-44.
- ZHANG Y X, HUANG W Z, ZHENG M Z, et al. Quasi-static experimental research on box-section all-bolted column connection with inner sleeve [J]. Industrial Construction, 2019, 47(5): 37-44. (in Chinese)
- [59] 班慧勇, 孔思宇, 谢崇峰. 新型高强度螺栓单边连接应变松弛及抗剪性能研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(7): 146-161.
- BAN H Y, KONG S Y, XIE C F, et al. Strain relaxation and shear performance of a novel high-strength blind bolted connection [J]. Industrial Construction, 2019, 49(7): 146-161. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)