

Review on Static Performance of Special-Shaped Columns in Assembled Steel Structure Residential Buildings

Jia'nan Li*, Honggang Lei#

School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi
Email: #m17835053997@163.com

Received: Feb. 14th, 2019; accepted: Feb. 28th, 2019; published: Mar. 7th, 2019

Abstract

Concrete special-shaped column system has been widely used in residential buildings in China, and has been followed by specifications. However, the application specifications of steel special-shaped columns have not been comprehensively worked out yet. Based on a large amount of literature, this paper has compared the cross-section forms of the common profiled columns and summarized their respective static properties in current steel structure residential buildings. The results show that the compression performance of the special-shaped columns in the current literature is quite different due to the different cross-section characteristics. The research results of the special-shaped columns at home and abroad are comprehensively analyzed, and the problems to be further studied are put forward. This paper provides references and recommendations for the further research work and design method development of this new type of steel structure, and promotes its application in the field of steel structure engineering in China.

Keywords

Fabricated, Steel Structure Residence, Special-Shaped Column, Stability, Ultimate Bearing Capacity

装配式钢结构住宅中异形柱静力性能的研究评述

李嘉楠*, 雷宏刚#

太原理工大学土木工程学院, 山西 太原
Email: #m17835053997@163.com

*第一作者。

#通讯作者。

收稿日期: 2019年2月14日; 录用日期: 2019年2月28日; 发布日期: 2019年3月7日

摘要

混凝土异形柱体系在我国的住宅建筑中已有广泛的应用, 并有规范遵循, 而钢异形柱的应用规范总结尚未全面, 本文就已有的大量文献资料, 对比总结了目前钢结构住宅中常见异形截面柱的截面形式及各自的静力性能。结果表明, 目前文献中的异形柱的受压性能因截面特性不同而有较大差别。综合分析国内外对异形柱的研究成果, 提出后续具有研究价值的方向。为此类新型钢结构进一步的研究工作及设计方法制定提供参与建议, 同时促进其在我国钢结构工程领域的应用。

关键词

装配式, 钢结构住宅, 异形柱, 稳定, 极限承载力

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了促进建筑业的转型升级、推动新型城镇化发展, 装配式钢结构体系逐渐成为建筑领域的主流趋势[1][2][3], 其中应用热轧 H 型钢和矩形钢管的框架结构体系存在露梁露柱的问题, 不利于居民的生活居住, 受混凝土异形柱规范的启发, 国内外学者先后研究出钢管混凝土柱和钢管混凝土柱的异形柱结构, 结合钢结构和混凝土的各自优势。陈志华, 赵炳[4][5], 周婷[6], 陈宪东, 王小盾[7], 田存[8]等采用有限元分析软件分别对沧州福康家园项目、汶川县映秀镇渔子溪村重建项目、拟建的格调松间南里项目、海航工人宿舍楼项目工程、山东威海卓达小区项目进行静力弹塑性分析, 表明该结构具有良好的延性, 各项参数均达到规范要求, 可应用于实际工程, 发现方钢管混凝土异形柱结构在罕遇地震作用下的表现优于方钢管混凝土单柱结构, 采用钢板剪力墙体系用钢量更少且拥有更好的侧向刚度, 层间位移角减少, 自振周期较小, 抗扭转能力更高。

在钢结构住宅建筑中, 使用由 L 形、T 形、十字形和其他形状的横截面柱和矩形或 T 形横截面梁组成的梁柱结构, 不仅可以解决钢结构住宅建筑室内柱角凸出问题, 而且具有空间利用率高、抗震性能好、施工周期短, 改善资金投入等优势, 在我国许多省市的住宅建筑中已有实际应用, 如徐珂, 程燕立[9]设计钢异形柱 3 层纯框架结构。张莉若[10]介绍了在设计钢结构住宅中, 异形柱结构应用时如何布置和截面选择问题。电算建模时, 根据刚度相等的原则将异形柱化为矩形钢管, 并使用支撑来提高结构的整体刚度。王恒华[11]介绍了江苏某公司职工培训中心项目, 分析设计中常见问题, 指出异形柱作为纵向柱刚度较大, 解决了纵向不利于设置支撑的问题。节点若采用螺栓连接, 更有利于提高装配率。

然而, 钢异形柱由于其横截面不对称, 稳定与极限承载力的研究显得至关重要。受国内外学者对钢管[12]或钢管混凝土异形柱[13][14]研究方法和研究思路的启发, 2006 年以来国内学者采用理论分析、有限元模拟和试验研究等研究手段, 对纯钢结构异形柱及其节点的静力性能做了大量工作, 其研究成果为钢结构住宅建筑的产业化和钢异形柱相关规范的制定奠定了理论基础。

2. 钢异形柱的截面形式

迄今为止, 市场中最常见的钢筋混凝土异形柱体系较为成熟[15] [16] [17], 相关设计规程如天津《钢筋混凝土异形柱结构技术规程》(DB 29-16-2003) [18]等已可作为实际工程参考。但与纯钢和组合异形柱相比, 钢筋混凝土异形柱抗震性能和承载力相对较差, 施工环保性逊色, 不符合绿色建筑理念。

开口截面钢柱应运而生, 如图 1 所示, 包括 T 形截面, 十字形截面和 L 形截面。张爱林等人[19]-[25]采用有限元计算理论, 考虑初始缺陷和材料非线性, 在单向和循环加载下, 研究了滞回性能、强度、变形、延性和破坏特征等抗震性能, 并进行了比例模型和等应力模型的拟静力试验, 与分析结果对比验证。发现在罕遇地震下该结构破坏模式为塑性破坏, 可用于强震区。然而, 具有这种截面的异形柱局部稳定性的计算以及梁柱节点和异形柱偏离时的整体受力分析更加复杂, 需要进一步的研究。

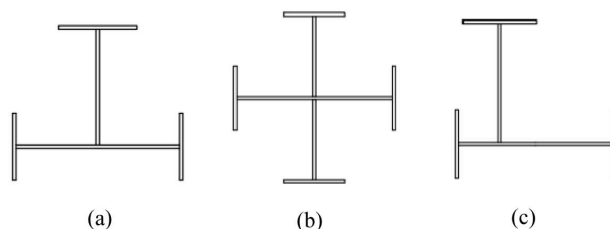


Figure 1. Steel special-shaped columns with thin-walled open section
图 1. 开口截面钢异形柱

2013 年, 王恒华等人提出了如图 2 所示的闭合异形柱[26]及其带 H 型截面梁的端板连接接头。该柱由冷弯槽钢和冷弯方钢管焊接而成, 利用有限元软件得到该接头的力矩 - 旋转曲线[27], 结果表明, 该接头具有较高的初始刚度和极限承载力。2014 年, 如图 3 所示的闭口截面异形柱[28] [29] [30]受到关注, 得出影响 T 形、L 形截面柱承载力的因素和稳定承载力的计算公式, 并指出等截面积的闭口截面异形柱与开口截面异形柱, 前者惯性矩更高, 受力性能更好。

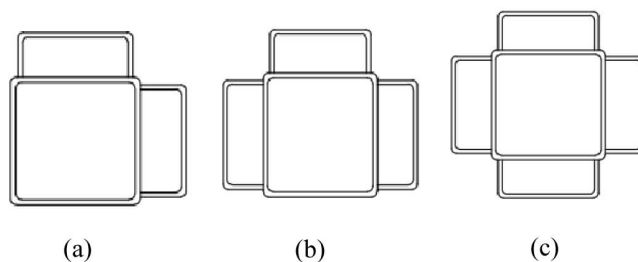


Figure 2. Closed special-shaped columns of cold-formed steel pipe
图 2. 冷弯钢管闭口截面异形柱

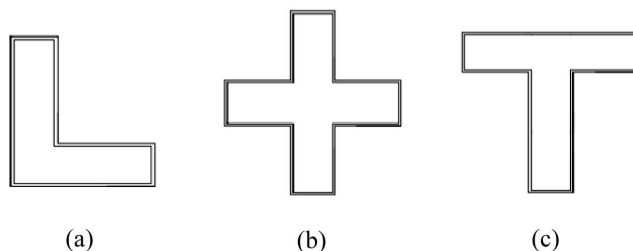


Figure 3. Section forms of closed special-shaped columns
图 3. 闭口截面异形柱截面形式

2012年,王萌,樊江[31]等使用箱形柱和T形柱焊接成一个新型的L形钢柱,如图4所示。通过非线性屈曲分析得出结论,与H形钢柱相比,L形钢异形柱的承载能力降低了33.33%,在实际工程中,适用于承载力要求较低的低、多层建筑和低震区建筑。新型L形钢异形柱承载能力比L形钢柱高32.86%,在实际工程中,适用于承载力要求较高的多、小高层建筑以及高震区建筑。2018年,麻建锁等[32]人对上述的新型L形异形柱进行了轴心受压条件下的有限元计算,证明在用钢量相同的条件下,新型钢异形柱承载能力、稳定性有很大的提高,通过外包轻质混凝土形成预制构件,可以广泛应用于装配式多层建筑中。但在钢异形柱改进截面中确定截面几何性质更加困难,其复杂的屈曲模态以及可能发生的畸变屈曲都对钢异形柱的稳定有至关重要的影响。因此,只有对改进截面钢异形柱的抗压性能进行系统研究,才可能将其推广应用。

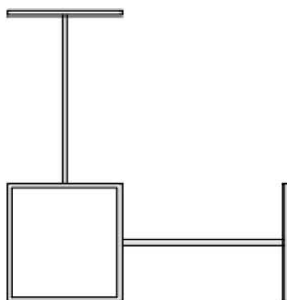


Figure 4. New section form of L-shaped steel columns
图4. 新型L形钢异形柱截面形式

可见,国内研究人员对极具优势的钢异形柱在钢结构住宅中的应用前景十分看好,对多种新型截面形式分析主要集中在影响其稳定性与承载力的因素上,开口异形柱和方钢管混凝土组合柱的相关研究相对完备,规范或规程中记载了承载力方法,然而,对其他横截面异形柱,仅限于研究单个试件的压缩或抗震性能,不够全面和系统,不足以直接应用于工程实践。

3. 钢异形柱静力性能研究进展

3.1. 强度

在目前的《钢结构设计规范》(GB50017-2017)[33]中,第7.1条给出了十字形柱和T形柱的设计计算公式,但是,规范没有给出L形柱的截面塑性发展系数。由于异形柱截面在弯矩作用平面内的双轴不对称性,研究其截面特征具有重要的理论和实际意义。

《轻型钢结构住宅技术规程》(JGJ209-2010)[34]在附录中给出L形异形柱截面几何特性数据表和强度计算公式(公式1)。王明贵,储德文[35]介绍了表格数据的计算过程,并研究了这种带翼缘的L形截面柱的力学性能,结果发现,带翼缘的L形截面柱比不带翼缘的角形截面柱具有更好的抗扭性能。高树栋,贾凤苏[36]等通过对异形柱M-N相关性和塑性发展系数的分析,提出异形截面柱的轴力与弯矩的相关系数及其截面的塑性发展系数的建议值,并修正其强度计算公式(公式2)。以上公式及各符号的含义详见表1。

3.2. 整体稳定性

钢结构中受压构件的稳定问题是影响结构安全性的重要因素,钢构件往往未达到极限承载力前就发生稳定破坏,因此,有必要研究异形柱在钢异形柱应用中的整体稳定性公式。

Table 1. Research results of strength calculation formula for steel special-shaped columns
表 1. 钢异形柱强度计算公式研究成果

作者	强度计算公式	备注
王明贵 储德文	$\sigma = \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{I_x} y \pm \frac{M_y}{I_y} x \pm \frac{B_\omega}{I_\omega} \omega_s \quad (1a)$ $\tau = \frac{V_x S_y}{I_y t} + \frac{V_y S_x}{I_x t} + \frac{M_\omega S_\omega}{I_\omega t} + \frac{M_k t}{I_k} \quad (1b)$	<p>N 为柱轴向力, M_x、M_y 为绕柱截面形心主坐标轴 x、y 的弯矩, V_x、V_y 为柱截面形心主坐标轴 x、y 方向的剪力, B_ω 为弯曲扭转双力矩, $M_z = M_k + M_\omega$ 为扭矩,</p> <p>S_x、S_y 为截面静矩, I_x、I_y 为截面轴惯性矩, I_ω 为翘曲常数, I_k 为扭转常数, S_ω 为扇性静矩, ω_s 为扇性坐标</p>
高树栋 贾凤苏	$\frac{N}{A} \pm \frac{M_x + M_x^y + V_x e_y}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y + M_y^x + V_y e_x}{\gamma_y W_{ny}} \leq f \quad (2)$	<p>M_x^y 为 M_y 在 x 方向产生的附加弯矩, V_x、V_y 分别为 x、y 方向的梁端剪力, e_x、e_y 分别为异形柱截面 y、z 方向剪力与形心距离的投影, γ_x、γ_y 取值采用建议值</p>

王明贵等[37] [38] [39] [40]提出由普通热轧 H 型钢和 T 型钢焊接成 L 形柱, 利用弹性薄壁柱理论推导出任意开口截面柱弯扭屈曲方程(公式 3), 得到了理想直柱轴向压缩的稳定承载力公式, 推导出了 L 形柱换算长细比的公式(公式 4), 查“规范”b 类截面稳定系数 φ , 得到 $\varphi-\lambda$ 曲线(图 a)。对 L 形截面钢柱进行了缺陷性分析, 得到了 L 形截面柱轴向压缩的实用设计公式(公式 5), 利用梁柱理论和叠加原理, 得到了 L 形柱压弯组合实用设计的计算公式(公式 6)。指出钢柱具有边缘约束构件的能力, 其承载能力高于具有相同横截面面积的 H 型钢, 抗扭性能优于等截面面积的角钢。公式及各符号的含义详见表 2。并通过有限元分析和几组 L 形柱轴心和偏心受压承载力试验验证, 结果如表 3 所示。

Table 2. Research results of calculation formula for integral stability of steel special-shaped columns
表 2. 钢异形柱整体稳定计算公式研究成果

作者	整体稳定性计算公式	备注
王明贵 张莉若	$(P_x - P)(P_y - P) \left[i_0^2 (P_\omega - P) + 2(\beta_y M_x + \beta_x M_y) \right] - (P_x - P)(M_x + P y_0)^2 - (P_y - P)(M_y + P x_0)^2 = 0 \quad (3)$	<p>$P_\omega = \varphi_\omega A f_y$、$i_0$、$\beta_x$、$\beta_y$ 为不对称截面常数</p>
王明贵 王晓瑜	$\lambda_{\text{等}} = \sqrt{\frac{3(I_x + I_y)}{2A i_0^2 \cos(\theta + 120^\circ)}} \times \frac{1}{\sqrt{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5}} \quad (4)$ $\frac{N}{\varphi A} \leq f \quad (5)$	<p>$\lambda_{\text{等}}$ 为柱换算长细比, A 为构件截面面积, I_x、I_y 为截面轴惯性矩, L 形截面柱轴心受压的稳定系数, 根据换算长细比按 b 类截面确定</p>
张莉若 王明贵	$\frac{N}{\varphi A} + \frac{\beta_x M_x}{\varphi_{bx} W_x} + \frac{\beta_y M_y}{\varphi_{by} W_y} - \frac{2(\beta_y M_x + \beta_x M_y)}{i_0^2 \varphi A} \leq f \quad (6)$	<p>β_{bx}、β_{by} 为等效弯矩系数, 按现行钢规取值, φ_{bx}、φ_{by} 分别为 x、y 轴的稳定系数</p>

Table 3. Comparison and summary of calculation and test results of L-shaped steel columns with thin-walled open section
表 3. L 形开口截面钢异形柱计算与试验结果对比汇总

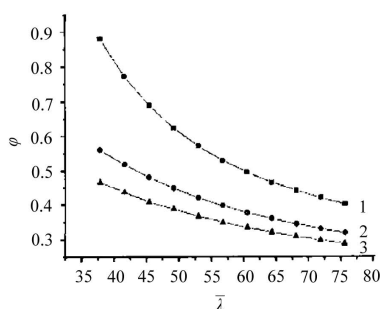
柱长 (m)	换算长细比	查 b 类曲线 φ 值	双向偏心距	计算长度系数 μ_x 、 μ_y 、 μ_z	等效弯矩系数 β_{bx} 、 β_{by}	实用公式计算值 (kN)	实验值 (kN)	误差
1	39.91	0.899	$e_x = e_y = 0$	1	1	943.932	1160	18.63%
2	73.35	0.730	$e_x = e_y = 0$	1	1	766.485	1195	35.86%
3	98.23	0.566	$e_x = e_y = 0$	1	1	594.289	702	15.34%
2	71.94	0.732	$e_x = e_y = 20$	1	1	742.36	1165	36.28%
2	71.94	0.732	$e_x = e_y = 20$	1	1	742.36	879	15.54%
3	89.57	0.571	$e_x = e_y = 20$	1	1	612	800	23.50%
3	89.57	0.571	$e_x = e_y = 20$	1	1	612	820	25.37%

栗增欣, 郭成喜[41]考虑了不同长细比, 初始弯曲和翘曲约束的影响, 采用有限元软件 ANSYS 计算 L 形柱轴心受压时的极限荷载, 总结出 φ 曲线的简便计算公式(公式 7), 并获得 $\varphi-\bar{\lambda}$ 曲线(图 b)。

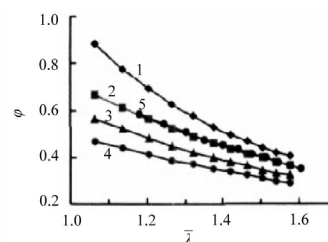
$$(1-\varphi)(1-\bar{\lambda}^2) = 0.116\bar{\lambda} \quad (7)$$

屠永清, 杨明[42]等考虑到非弹性和初始缺陷, 利用有限元法对 L 形截面钢异形柱轴压构件进行了特征值屈曲分析和非线性屈曲分析, 通过与临界力的理论值和相关文献试验值进行比较, 并将分析结果与规范柱子曲线进行比较(图 c), 验证了计算方法的可行性。杨理添[43]对改进的 L 形截面钢异形柱进行了屈曲分析, 并与 L 形截面钢异形柱的承载能力进行了比较。验证了轴心受压稳定承载力计算式的正确性, 做出了 L 形截面钢异形柱的稳定性曲线并与规范中给定的 b、c 类稳定性曲线进行了比较(图 d), 成果如表 4。

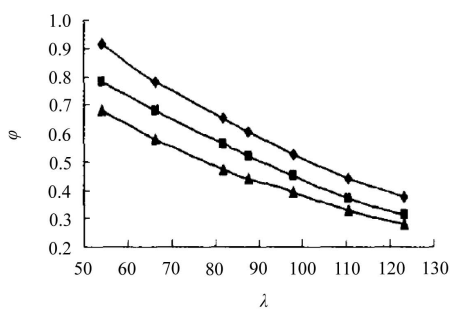
Table 4. $\varphi-\bar{\lambda}$ curve comparison and summary of L-shaped steel columns with thin-walled open section
表 4. L 形开口截面钢异形柱 $\varphi-\bar{\lambda}$ 曲线对比



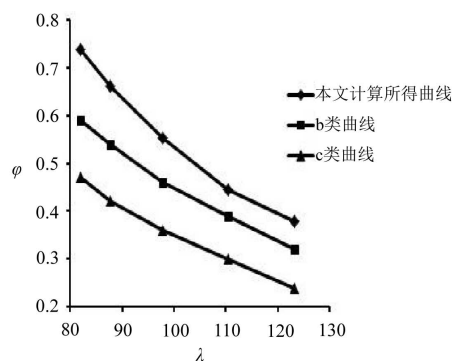
1-本文计算所得曲线; 2-“规范”(GB 50017-2003)中 b 类曲线; 3-“规范”(GB 50017-2003)中 c 类曲线
 图(a)



1-柱 2 由特征值屈曲荷载所得曲线; 2-柱 2 由极限荷载曲线; 3-“规范”中 b 类曲线; 4-“规范”中 c 类曲线; 5-柱极限荷载所得曲线
 图(b)



◆ 本文; ■ b 类; ▲ c 类
 图(c)



图(d)

从表 4 可以看出, L 形截面钢柱的稳定系数比规范中给出的 b 类和 c 类曲线高, 这可能是由于焊接残余应力对构件承载能力的影响没有考虑在内, 因此参考现有钢结构设计规范中的 b 类截面有失准确, 根据上述设计方法得到的异形柱抗压承载力非常保守, 不利于异形柱的推广应用, 还需对大量不同截面尺寸的 L 形柱进行理论研究以及试验验证。

4. 钢异形柱节点静力性能研究进展

节点的性能影响整体结构的刚度和承载力, 关系着钢结构体系的安全应用。目前的研究主要针对如

图 5 所示的开口截面异形柱 - 梁节点的承载能力和抗震性能, 且多数是有限元分析, 试验较少。

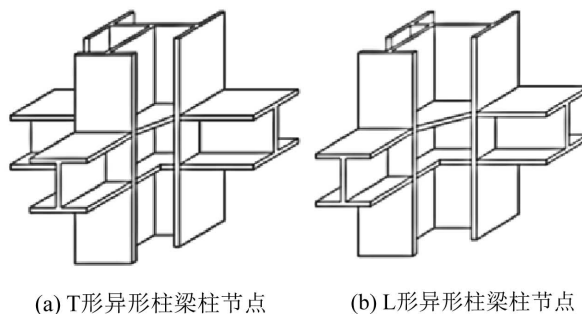


Figure 5. Joint of steel special-shaped column with thin-walled open section
图 5. 开口截面钢异形柱梁柱节点

文献[44]利用 ANSYS 有限元软件分析 T 形钢异形柱框架节点的基本力学性能, 发现栓焊连接的 T 形异形柱节点比全焊的承载力高, 随节点腹板、翼缘厚度的增大, 节点抵抗弯矩的作用也增大, 但是增大的幅度越来越小。节点极限转角也随翼缘厚度逐步增大, 但太大反而制约了节点的转动能力, 随腹板厚度变化不大。

文献[45]研究的 L 形截面钢异形柱框架节点, 节点域腹板比梁先进入塑性变形, 但最终破坏都发生在梁盖板附近的梁翼缘板和梁腹板上, 说明该节点能够满足强节点弱构件的要求。发现随着柱子腹板厚度的增加, 节点的弹性极限承载力也增加, 而柱翼缘板厚度对其几乎无影响, 而节点中柱子腹板厚度与翼缘厚度对节点塑性极限承载力无明显的影响, 这是因为节点塑性极限承载力取决于梁承载能力。延性系数随着柱子的腹板厚度增大而急剧下降, 但是七个节点的静力延性系数均大于 3.0。

从上述文献回顾中可以看出, 对于钢结构异形柱梁柱节点, 开口截面异形柱节点的研究内容较多, 但梁柱翼缘腹板对节点承载力的影响尚未给出定量的公式, 部分学者提出的新型异形柱截面板节点研究也甚少。另外, 关于 L 形和 T 形柱节点的试验研究不足, 难以形成实用的设计方法。

5. 结语

在装配式住宅中, 不同形式异形柱静力承载力的研究方面取得了显著的成果, 但局部稳定计算理论尚不成熟、梁柱节点的受力性能关注较少, 没有可以直接应用于钢异形柱结构系统的完整理论, 已完成的试验研究很少, 相关规范(规程)的编制所需的参考数据不足, 有限元方法的研究不能逼真地模拟边界条件, 所得数值分析结论能否实际应用于工程尚且存疑。异形柱结构在促进可持续发展战略和住宅产业化中有很作用, 为了钢异形柱结构在建筑市场中更好地推广应用, 可以从以下几个方面进行深入的研究工作:

1) 已有的钢异形柱研究是以两端简支承受均匀等端弯矩为基础的, 改变约束形式或承受不均匀荷载的情况下进行双向压弯试验, 验证工程实用设计公式的结果可靠性, 或基于此对相关影响系数进行简化修正。其次, 可以分析偏心距增大对钢异形柱的稳定性及承载能力的影响;

2) 对钢异形柱构件、节点和框架进行足尺试验, 研究其应力和变形性能, 采用不同的几何尺寸、构造形式研究每种截面类型异形柱结构静力性能的变化, 并考虑不同加载方式所得的结果;

3) 对异形柱节点试验结果进行理论分析, 得到试验无法直接测量的参数, 进而推导节点设计实用公式, 保证与试验和有限元结果拟合。编制包含梁柱节点与柱脚的构造要求及设计方法在内的相关设计规范, 方便异形柱在今后工程中的应用;

4) 关注焊接变形和焊接残余应力对异形柱受压稳定性能的影响, 进行试验研究, 进一步增强已有研究成果的可靠性和准确性;

5) 采用有限元技术模拟分析时, 合理考虑构件的各种初始缺陷及有限元模型的边界约束形式, 形成满足计算精度要求并符合工程实际的简化分析模型和方法; 开发异形柱结构设计专用软件。

基金项目

国家自然科学基金(51578357)资助。

参考文献

- [1] 叶之皓. 我国装配式钢结构住宅现状及对策研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [2] 刘玮龙. 轻钢装配式住宅的设计与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.
- [3] 鲁力齐. 一种新型的第一类高层钢结构住宅体系的试验研究及可行性分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [4] 陈志华, 赵炳震, 李斌, 等. 矩形钢管混凝土组合异形柱框架-支撑体系静力弹塑性分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 152-157.
- [5] 陈志华. 方钢管混凝土组合异形柱框架-支撑结构体系工程应用关键技术研究[C]//全国现代结构工程学术研讨会学术委员会. 第十七届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2017: 34-41.
- [6] 周婷, 陈志华, 刘红波, 等. 汶川县映秀镇方钢管混凝土异形柱结构抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(4): 145-150.
- [7] 陈宪东, 王小盾. 不同抗侧力构件下矩形钢管混凝土组合异形柱结构力学性能对比[C]//全国现代结构工程学术研讨会学术委员会. 第十七届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2017: 962-965.
- [8] 田存. 方钢管混凝土组合异形柱住宅体系工程应用研究[D]: [硕士学位论文]. 河北工程大学, 2017.
- [9] 徐珂, 程燕立, 王雷. 钢结构住宅设计的几点总结[J]. 建筑结构, 2005(2): 24-27.
- [10] 张莉若. 钢异形柱在钢结构住宅工程中的应用[C]//中国钢结构协会. 2006 钢结构学术年会论文集. 武汉: 中国钢结构协会, 2006: 1245-1253.
- [11] 王恒华, 曹发恒. 居住建筑异形柱钢结构设计初探[C]//中国钢结构协会. 第七届全国现代结构工程学术研讨会. 杭州: 中国钢结构协会, 2007: 1349-1353.
- [12] 陈志华, 林昊, 王小盾. 装配式组合异形柱住宅体系研究综述[C]//中国建筑金属结构协会. 装配式钢结构建筑技术研究及应用. 北京: 中国建筑金属结构协会, 2017: 322-330.
- [13] 陈绍基. 钢管混凝土异形柱延性性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [14] 赵丽平. 关于钢管混凝土异形柱若干问题的研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2005.
- [15] 王丹, 黄承逵, 刘明, 等. 异形柱双偏压构件正截面承载力试验及设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(5): 37-42.
- [16] 曹万林, 胡国振, 崔立长, 等. 钢筋混凝土带暗柱异形柱抗震性能试验及分析[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 16-20, 26.
- [17] 王丹. 钢筋混凝土框架异形柱设计理论研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [18] 天津大学. 混凝土异形柱结构技术规程[S].
- [19] 潘振军. 十字形钢柱的抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [20] 潘振军, 陈少杰. 十字型截面改进钢异型柱模拟结果与分析[J]. 四川建材, 2013(6): 78-80.
- [21] 张爱林, 杨明, 于劲, 等. 低周反复荷载作用下 L 形截面钢异形柱框架抗震性能试验研究[Z]. 武汉, 2012.
- [22] 于劲, 张爱林, 刘会军, 等. 十字形截面钢异形柱的抗震性能和板件宽厚比限值研究[J]. 工业建筑, 2010(3): 116-123.
- [23] 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(2): 11-19.
- [24] 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(2): 20-28.
- [25] 张爱林, 徐敏, 于劲, 等. 十字形钢异形截面压弯构件的滞回性能研究[J]. 钢结构, 2009(2): 9-11.
- [26] Wang, H.H., Wang, X.Y., Liu, Y.Q., *et al.* (2013) Study on Mechanical Performance of the End-Plate Connection Joint between H-Section Beam and Closed Specially-Shaped Column. *Applied Mechanics and Materials*, **2156**, 724-731. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.328.724>
- [27] 柳杨青, 王恒华, 蔡建国, 等. 闭口截面异形柱轴心受压稳定系数[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(5): 923-928.
- [28] 陈鑫. T 形钢箱异形柱稳定承载力有限元分析及研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [29] 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]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- [30] 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]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- [31] 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(10): 2482-2486.
- [32] 麻建锁, 麻海栋. 新型 L 型截面钢异形柱轴压性能研究[J]. 住宅产业, 2018(Z1): 65-68.
- [33] 钢结构设计规范[S].
- [34] 中国建筑科学研究院, 清华大学, 同济大学, 等. 轻型钢结构住宅技术规程[S].
- [35] 王明贵, 储德文. L 形钢异形柱的截面几何特性[Z]. 201318.
- [36] 高树栋, 贾凤苏, 王巍, 等. 钢结构住宅中异型柱的力学性能研究[J]. 钢结构, 2007(8): 79-84.
- [37] 王明贵, 张莉若, 谭世友. 钢异形柱弯扭相关屈曲研究[J]. 钢结构, 2006(4): 35-37.
- [38] 王明贵, 王晓瑜, 陈章华. 钢异形柱轴心受压承载力实用计算研究[J]. 钢结构, 2007(6): 44-47.
- [39] 张莉若, 赵爽, 王明贵, 等. 钢异形柱压弯组合实用计算研究[J]. 钢结构, 2008(7): 39-41.
- [40] 王明贵, 赵爽. L 形截面钢柱稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2010(S2): 258-262.
- [41] 栗增欣, 郭成喜. 轴心受压 L 形柱的有限元非线性分析[J]. 钢结构, 2008(5): 11-13.
- [42] 屠永清, 杨明, 刘林林. 基于有限元法的 L 形轴压钢柱屈曲分析[J]. 钢结构, 2009(6): 40-43.
- [43] 杨理添. 钢异形柱稳定性及动力分析研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [44] 张爱林, 刘昱旺, 于劲, 等. 单调荷载下钢异形柱(T 形)框架节点的力学性能研究[J]. 钢结构, 2009(2): 15-19.
- [45] 蒋诗莹. L 形钢异形柱框架梁柱节点的力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org