

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201906155

钢-混凝土组合巨型框架柱抗震研究进展

曹万林¹, 武海鹏^{1,2}, 周建龙³

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083;
3. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200011)

摘要:为促进钢-混凝土组合柱在超高层巨型框架结构中应用,在简要介绍采用钢-混凝土组合巨型柱的巨型框架结构基础上,从型钢混凝土巨型柱和钢管混凝土巨型柱两个方面综述了钢-混凝土组合巨型柱抗震关键技术研究及应用,指出了该类钢-混凝土组合巨型柱若干有待深化研究的技术问题.分析表明:巨型框架结构是一种受力性能优越的高效抗震体系,中国已建成和在建的标志性超高层建筑大多采用了钢-混凝土组合巨型柱框架结构,相关研究主要集中在弹塑性有限元分析和模拟地震振动台方面;复杂截面钢-混凝土组合巨型柱,经合理设计后具有较好的抗震性能,具有普适性的受力性能理论计算方法及合理抗震构造是亟待深化研究的关键技术问题.

关键词: 组合结构; 巨型框架; 钢-混凝土组合巨型柱; 抗震性能; 试验研究

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0001-12

Review on seismic technology progress of steel-concrete composite mega frame column

CAO Wanlin¹, WU Haipeng^{1,2}, ZHOU Jianlong³

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;
3. East China Architectural Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200011, China)

Abstract: To promote the application of steel-concrete composite columns in mega column structures of super high-rise buildings, the key seismic technology and application of steel reinforced concrete (SRC) and concrete filled steel tube (CFT) columns are reviewed on the basis of a brief introduction of the mega frame structure with steel-concrete composite mega columns. Several technical issues on the steel-concrete composite mega columns that need to be further investigated are proposed. Research shows that the mega frame structure is an effective anti-seismic system, with perfect mechanical property. The finished and ongoing super high-rise buildings mostly utilize the mega frame structure with steel-concrete composite mega columns in China. Related studies mostly focus on elastic-plastic analysis and shaking table test. The complex cross-sectional steel-concrete composite mega columns have good seismic performance after reasonable design. The related mechanical behavior theoretical calculation method with universality and the reasonable structural constructions are the key technical issues that urgently need to be further studied.

Keywords: composite structure; mega frame structure; steel-concrete composite mega columns; seismic performance; experimental research

截止2019年5月,据世界高层建筑与都市人居学会^[1]按建筑高度统计,已建成或封顶的世界前100的超高层建筑中,中国占据54座,在建的世界前100的超高层建筑中,中国占据了56座.中国已成为世界上高层和超高层建筑发展最快的国家.

大型标志性建筑,结构高度越来越高,建筑平面和立面布置也较复杂,超高超限,给结构设计带来空前挑战.中国地震多发,且高层建筑大多位于京津

冀、长三角、珠三角等地震区,特别是北京(0.20g, 8度区)、天津(0.15g, 7度半区)等地区为高烈度区,使超高层建筑结构体系抗震设计成为关键技术问题.

全国工程勘察设计大师丁洁民等^[2]统计表明,超高层建筑主要采用框架-核心筒、框筒-核心筒、巨型框架-核心筒和巨型框架-核心筒-巨型支撑4种抗侧力体系,且其适用高度依次增大.周建龙等^[3]对超高层建筑结构体系的经济性研究表明,为使结构获得最大的抗侧效率,应尽可能使结构布置支撑化、周边化、巨型化和伸臂桁架化.因此,巨型框架结构成为一种高效抗侧力体系.

收稿日期: 2019-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(51808014)

作者简介: 曹万林(1954—),男,教授,博士生导师

通信作者: 武海鹏,15201227267@163.com

中国已建成或封顶的代表性高楼大多采用了巨型框架结构体系. 主体结构高度超过 500 m 的超高层建筑, 包括上海中心大厦^[4-5]、深圳平安金融中心^[6-7]、天津 117 大厦^[8]、广州周大福金融中心(广州东塔)^[9]、天津周大福金融中心^[10] 和北京中国尊大厦^[11], 除天津周大福金融中心采用了框筒-核心筒结构体系外, 其余建筑结构体系均包含了巨型框架结构体系.

巨型柱作为巨型框架结构的关键竖向受力构件, 承担了较多的竖向荷载, 一般采用型钢混凝土柱或钢管混凝土柱, 其截面面积较大(几平方米到数十平方米), 截面形状易受建筑造型影响而不规则, 为解决大

体积混凝土问题并提高钢材对混凝土的约束效果, 截面构造较为复杂. 图 1 给出了上述典型超高层建筑中应用的钢-混凝土组合巨型柱, 图 1(a) 为上海中心大厦采用的矩形截面型钢混凝土柱(17 m²), 其型钢为异形截面; 图 1(b) 为深圳平安金融中心采用的接近于矩形的五边形截面型钢混凝土柱(19 m²), 其型钢也为异形截面; 图 1(c) 为天津 117 大厦采用的六边形多腔体钢管混凝土柱(45 m²); 图 1(d) 为广州东塔采用的矩形截面多腔钢管混凝土柱(21 m²); 图 1(e) 为天津周大福金融中心上部楼层采用的异形截面型钢混凝土角柱(7 m²); 图 1(f) 为北京中国尊大厦采用的八边形多腔钢管混凝土柱(62 m²).

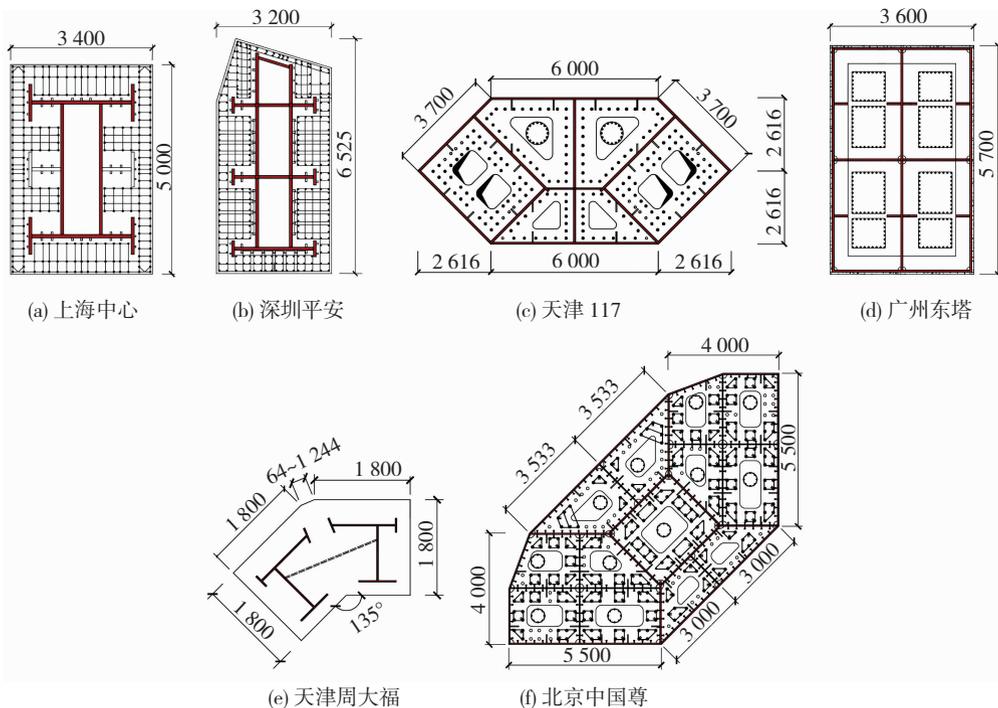


图 1 巨型柱截面示意(mm)

Fig. 1 Cross-sectional schematic diagram of mega column (mm)

本文将对钢-混凝土巨型组合柱框架结构进行简要介绍, 综述钢-混凝土组合巨型柱抗震研究进展与应用.

1 巨型组合柱框架结构

巨型框架结构是巨型结构的一种^[12], 其概念产生于 20 世纪 60 年代末, 它由作为主结构的巨型框架和作为次结构的楼层框架组成, 主结构为主要抗侧力体系, 次结构起辅助作用, 并将承担的楼面荷载传递到主结构. 与传统结构相比, 巨型框架结构打破了以楼层为单元的建筑格局, 具有更大的结构布置灵活性和更好的结构性能. 在建筑造型方面, 空间布置灵活, 可提供较好的建筑使用空间和采光条件; 在结构方面, 主次结构受力明确, 充分发挥了不同材料的性能, 结构整体抗侧刚度较大, 可满足超高层建筑

抗震、抗风性能的要求; 在施工方面, 可快速施工, 经济效益好^[13].

中国地震多发, 大多数地区位于地震区, 截止 2019 年 5 月, 中国在建或已建成的 300 m 以上超高层建筑^[1], 22.2% 分布在 6 度区(0.05 g), 58.6% 分布在 7 度区(0.10 g), 5.8% 分布在 7 度半区(0.15 g), 13.4% 分布在 8 度及以上区. 可见, 抗震设计已成为超高层建筑结构设计的重要方面.

丁洁民等^[2]对中国高度超过 250 m 的超高层建筑所采用的结构体系进行了统计(截至 2018 年底), 见图 2, 认为巨型框架结构体系可较好的适应建筑高度屡创新高需求, 适用于高度 300 m 以上的超高层建筑.

超高层建筑体量庞大, 巨型框架结构构件尺度巨大, 通常采用钢-混凝土组合构件, 已远超出传统

工程经验的范畴,其抗震性能的优劣是工程师们关注的核心技术问题.特别是近年来大地震频发,使得大型复杂超高层等重大工程的抗震安全问题成为研究热点.国内外学者对钢-混凝土巨型组合柱框架结构进行了一定的研究,主要如下.

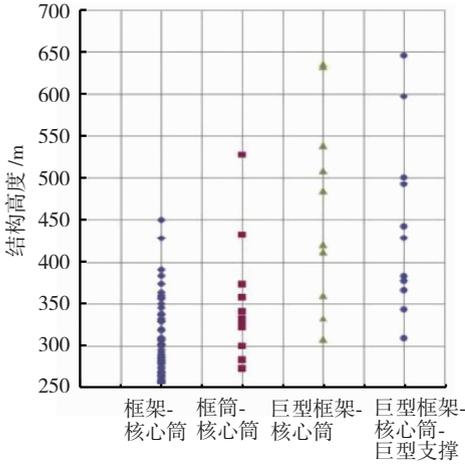


图 2 各结构体系在超高层建筑中应用分布^[2]

Fig. 2 Distribution of each structural system in super high-rise buildings^[2]

1.1 弹塑性有限元分析方面

邹响等^[14](2006)采用 ANSYS 软件建立了上海环球金融中心巨型框架结构分析模型,进行了弹塑性时程分析,并与试验进行了对比. Fan 等^[15](2009)采用 ANSYS 软件建立了台北 101 大厦巨型框架结构分析模型,分析了结构的抗震性能,表明,其巨型框架结构具有良好的抗震性能. Lu 等^[16-17](2011-2013)采用 MSC. Marc 软件建立了上海中心大厦结构分析模型,研究了巨型框架结构在特大地震作用下的倒塌模式. 蒋欢军等^[5](2011)采用 ABAQUS 软件建立了上海中心大厦分析模型,分析了不同烈度地震作用下的结构响应. Poon 等^[18](2011)采用 Perform3D 软件对上海中心大厦巨型框架结构进行了弹塑性时程分析,并评估了其抗震性能目标. 丁洁民等^[19](2011)采用 ANSYS 软件分析了上海中心大厦巨型柱与伸臂桁架、环带桁架连接节点的受力性能,并提出了简化计算公式. 陆新征等^[20](2013)建立了上海中心大厦二维非线性简化分析模型,并与三维有限元模型分析结果进行了对比. 赵宪忠等^[21](2013)采用试验与有限元分析的方法,研究了上海中心大厦巨型柱与伸臂桁架、环带桁架节点的力学性能,并建立了简化计算模型. 马爽^[22](2012)基于天津市某超高层建筑,采用 Midas 软件建立了有限元分析模型,分析了核心筒与巨型柱面积比、巨型柱布置方式、环带桁架布置对其受力性能的影响. 张万开^[23](2013)基于某超高层建筑巨型支撑框架结构,研究了支撑沿结构全高布置和半

高布置对结构抗震性能的影响及其倒塌模式.

由于超高层巨型框架结构复杂,在有限元建模及分析中均进行了一定的简化,重点对结构关键部分(结构底部、薄弱层、巨型柱构件等)进行精细化有限元建模.针对核心筒剪力墙的受力特点,有限元软件中大多采用分层壳单元进行模拟,模拟结果与振动台试验结果符合较好.巨型支撑多为钢构件,其弹塑性分析一般采用杆单元纤维模型,例如 ABAQUS 软件中的 B31 梁单元、MSC. Marc 中的 78 号梁单元等.巨型柱由于截面尺寸巨大、构造密集,各组成部件间相互作用复杂,根据所研究的问题和目的不同,可采用不同的建模方式.空间实体单元数量巨大,收敛性较差且计算成本较高,一般不被采用;上海中心大厦巨型柱中,陆天天等^[24](2011)采用壳单元与梁单元组合的方式模拟, Lu 等^[16](2011)采用分层壳单元模拟,陆新征等^[20](2013)提出了基于分层壳单元的巨型柱简化模型;上海环球金融中心大厦巨型柱中,邹响等^[14](2006)分段采用不同单元进行模拟,41 层以下巨型柱采用实体单元,41~43 层巨型柱采用厚板壳单元过渡,43 层以上采用梁柱单元.

综上所述,现有的通用有限元软件提供了丰富的超高层巨型框架结构及构件建模方法,为了获得良好的计算精度,其关键是材料本构关系的确定和合理的建模简化,例如如何考虑复杂截面钢管混凝土的约束效应等.

1.2 模拟地震振动台试验方面

超高层建筑超高超限,超限审查是结构方案设计中的重要内容,为寻找结构薄弱环节、验证计算模型准确性,大多需进行模拟地震振动台试验研究.

吕西林等^[25](2004)进行了上海环球金融中心大厦巨型框架结构 1/50 缩尺模型的模拟地震振动台试验,表明,该结构体系设计合理,满足中国抗震设防要求.田春雨等^[26](2011)进行了上海中心大厦巨型框架结构模拟地震振动台试验,结果表明,其基本达到了设计要求的抗震性能目标.张宏等^[27](2015)基于天津 117 大厦,进行了缩尺模型的模拟地震振动台试验研究,得到了巨型框架结构从 7.5 度小震到 8 度大震作用下的动力响应.

上述模拟地震振动台试验模型,除满足基本相似理论外,还进行了相应的简化.巨型柱中相对较小的栓钉、加劲肋、温度钢筋等部件一般按照等强度原则转化为型钢或直接忽略.研究表明,工程应用的巨型柱经合理设计后,在试验中表现出良好的抗震性能,在规范规定的弹塑性位移角内未出现主要竖向受力构件的破坏.尽管模拟地震振动台试验是评估

巨型框架结构抗震性能和验证理论计算方法的重要途径,但其经济成本较高。随着非线性分析手段的进步及模拟地震振动台试验结果的积累,巨型框架结构弹塑性分析方法将会进一步完善。

2 钢-混凝土组合巨型框架柱

巨型框架结构中钢-混凝土组合巨型柱一般布置在建筑平面的角部,通过伸臂桁架与核心筒连接,在弯矩作用下,巨型柱一侧受压、一侧受拉,提高了结构刚度,使得结构侧移减小并使伸臂以下核心筒弯矩减小。为进一步提高结构刚度,使所有巨型柱均参与抗倾覆力矩,在设置伸臂的楼层设置环带桁架,形成加强层。在巨型柱之间还设置有巨型支撑,使巨型框架部分承担的水平剪力和倾覆力矩进一步提高。例如,上海中心大厦在小震作用和风荷载作用下,巨型框架部分在 X 向和 Y 向承担的水平剪力在 50% ~ 60%,倾覆力矩在 76% 左右^[28],北京中国尊大厦该两数值分别为 40% ~ 50%、67%^[29],这是巨型框架结构区别于框架-核心筒结构的重要特点。因此,巨型柱作为关键竖向构件,承担了较多的竖向荷载、倾覆力矩以及底部楼层剪力,巨型柱受力性能的优劣对整个巨型框架结构的抗震性能至关重要。

巨型框架中巨型柱构件尺度较大,其截面面积可达几平方米到几十平方米,可采用钢筋混凝土巨型柱、型钢混凝土巨型柱、钢管混凝土巨型柱、钢巨型柱等多种类型,其中型钢混凝土(SRC)巨型柱和钢管混凝土(CFT)巨型柱应用最多,因为其可充分发挥钢材和混凝土的力学性能,承载力高、刚度大、延性好,且施工方便。

巨型柱由于截面面积巨大,有时为满足建筑外形的需要,将其设计为异形截面,同时为了更好的约束混凝土,SRC 柱中型钢较均匀的分散在柱截面中,呈现出较复杂的截面构造布置形式,CFT 柱较多的设计为多腔体的形式。基于以上认识,曹万林等^[30-33]提出了截面形状由三角形、四边形、圆形组合,截面构造由型钢柱、钢管混凝土柱、钢筋混凝土柱组合,截面材料由型钢、混凝土组合的多重组合异形柱。

2.1 SRC 巨型柱

2.1.1 截面形式

SRC 巨型柱型钢布置形式可分为:分离式、格构式、实腹式、实腹分腔式^[34]。分离式 SRC 柱仅在混凝土中包裹几个单独的型钢,用以提高巨型柱在相应方向的承载力,施工方法简单,但含钢率较低,延性一般。格构式 SRC 柱通常在截面角部布置型钢,型钢之间通过缀板或缀条连接,形成格构式钢骨架,

见图 3;实腹式 SRC 柱通常在其截面布置一个完整的型钢,可以是热轧的也可以是钢板焊接的,合肥恒大中心(图 4(a))、大连绿地中心(图 4(b))、武汉绿地中心(图 4(c))等超高层建筑均采用了这种 SRC 柱;实腹分腔式 SRC 柱型钢一般由钢板焊接而成,具有钢板围成的独立腔体,也是超高层建筑采用较多的形式,例如上海中心大厦(图 1(a))、深圳平安金融中心(图 1(b))、合肥宝能中心(图 5(a))、大连绿地中心(图 5(b))等。

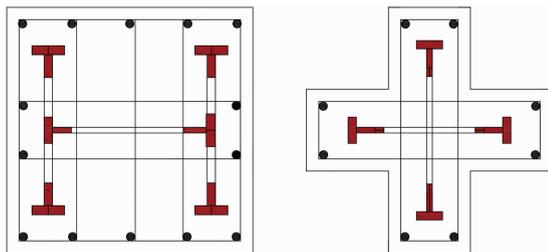


图 3 格构式 SRC 柱截面

Fig. 3 Cross-section of latticed SRC column

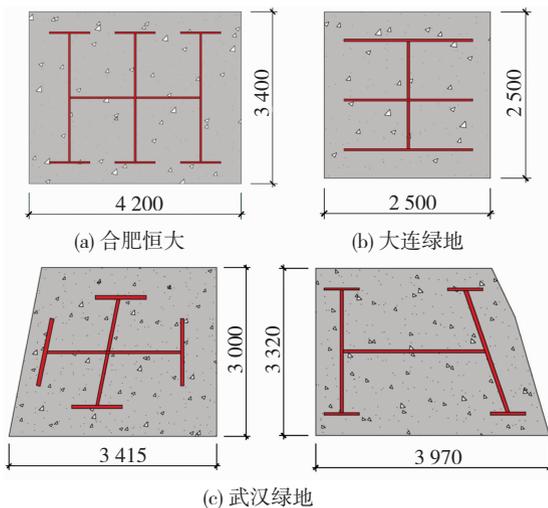


图 4 实腹式 SRC 巨型柱截面(mm)

Fig. 4 Cross-section of solid web SRC mega column (mm)

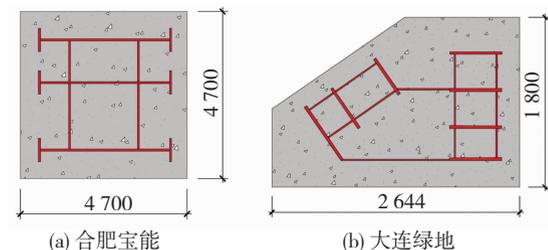


图 5 实腹分腔式 SRC 巨型柱截面(mm)

Fig. 5 Cross-section of solid web SRC mega column with multi-cavity (mm)

2.1.2 研究现状

国内外学者对常规截面的型钢混凝土柱已有较多研究,相关成果被写入 JGJ 138—2016《组合结构设计规范》^[35]、ACI - 318^[36]、AISC - LRFD^[37]、EC4^[38]、AIJ^[39] 规程等。关于较大尺度的 SRC 巨型柱研究相对尚少。

曹万林等^[40-42] (2004-2007)对乒乓球拍形型钢混凝土异形截面柱进行了试验研究和理论分析,该柱应用于北京财富中心一期写字楼,试件截面及照片见图 6,研究表明,该类异形截面柱经合理抗震设计后,仍可具有良好的抗震性能,其中截面形式、钢筋和钢骨的配置是主要影响因素。

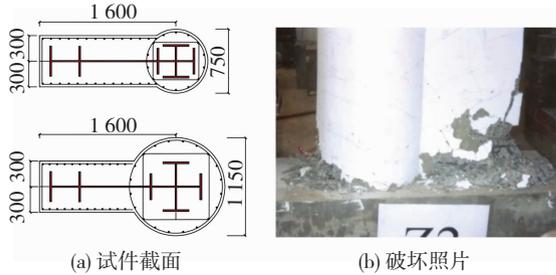


图 6 乒乓球拍形 SRC 巨型柱

Fig. 6 SRC mega column with table tennis bat shape

崔大光等^[43] (2007)利用 ETABS 截面设计器对某超高层建筑型钢混凝土巨型柱截面进行了双向偏心受压校核分析,给出了等效平面相关曲线法的校核结果,对比了考虑型钢作用及不考虑型钢作用两种情况对巨型柱受力性能的影响. 杜义欣等^[44] (2011)对某工程复杂截面型钢混凝土巨型柱进行了缩尺模型压弯性能试验研究,柱截面见图 7,研究表明,巨型柱在压弯状态下基本满足平截面假定,型钢间可靠的连接能提高构件的延性. 陆新征等^[45] (2011)为研究 SRC 巨型柱弹塑性受力特点,采用 MSC. Marc 软件建立了巨型柱精细化有限元模型,提出了简化巨型柱建模途径. 彭肇才等^[46] (2011)对深圳平安金融中心某巨型柱关键节点进行了小震和中震下的弹塑性分析,指导了工程设计. 包联进等^[47] (2014)对空腹式(也称为分离式)SRC 巨型柱在实际工程中的应用问题进行了总结,改进了某超高层建筑型钢布置形式,满足结构承载力条件下提高了施工性和经济性. 吴兵等^[48] (2017)以沈阳宝能金融中心 T1 塔楼项目为背景,对比分析了超大截面矩形钢管混凝土柱和型钢混凝土柱的力学性能. 肖从真等^[49-50] (2017)对分散型钢混凝土柱(见图 8)进行了压弯性能试验和低周反复荷载试验研究,分析了其抗震性能和受力机理,提出了承载力和刚度设计方法。

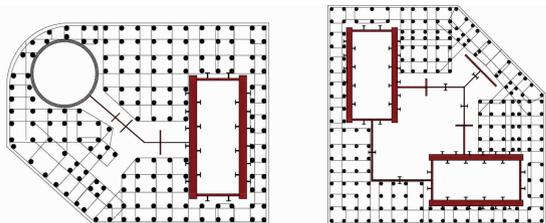


图 7 某复杂异形截面 SRC 柱

Fig. 7 SRC mega column with complex special shape

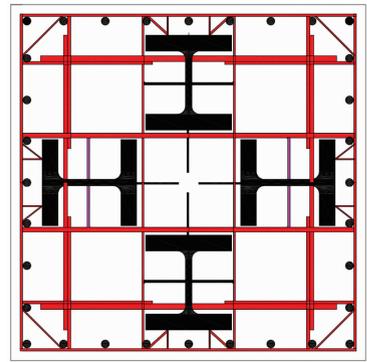


图 8 分散型钢混凝土柱

Fig. 8 SRC mega column with separate shape steel

2.1.3 概念设计

巨型框架结构中巨型柱拥有特殊重要的地位,一旦在大震下出现局部破坏将造成无法挽回的损失. 要确保大震下不出现破坏,目前工程界尚无完全精确的计算手段,一般通过计算分析附之概念设计和构造措施来加以保证,其中,提高延性是最关键的措施之一。

巨型 SRC 柱由于截面尺寸巨大,其设计方法与常规 SRC 柱有一定区别,其设计主要包括截面形状、截面面积、含钢率、材料强度、型钢型式等方面。

巨型 SRC 柱截面形状一般由建筑方案决定,由于巨型柱角部布置方案,受建筑外立面影响易出现截面切角,设计中应注意避免出现截面尖锐的外凸或内凹,研究表明,截面各方向尺寸越近,其承载力、延性较好。

巨型柱的截面面积、含钢率、材料强度共同定量决定了截面的承载力和刚度,设计人员倾向于减小结构截面面积以获得较大的建筑使用面积,同时采用较高的含钢率和材料强度;当含钢率较低时,钢筋对混凝土脆性改善有限,此时 SRC 柱的性质接近于普通钢筋混凝土柱,当含钢率较高时,可充分发挥 SRC 柱承载力高、延性好的特点,但过高的含钢率可能会使型钢布置困难、混凝土不易浇筑,并影响经济性指标;《组合结构设计规范》^[35] 建议的含钢率范围为 4% ~ 15%, AISC - LRFD 规范^[37] 建议的范围为 4% ~ 20%, AIJ 规范^[39] 建议的最大值为 13.3%, EC4 规范^[38] 对混凝土 C20 ~ C60、钢材 Q345 时建议的最大值为 13.3% ~ 35.3%. 钢材可依据需要选用 Q345、Q390、Q420,工程中也有 Q460 的工程实践,混凝土强度一般不超过 C70 以防止脆性破坏,材料强度选择中并非一定要选择较高强度,因为巨型柱截面不仅受承载力控制,还受刚度控制. 例如设计中上海中心大厦巨型柱截面由刚度需求决定,综合经济性指标选择 4% ~ 5% 的含钢率, Q345、Q390 钢材, C70 混凝土。

型钢布置型式对巨型 SRC 柱受力性能有较大影响. 分离式布置由于各型钢之间无直接联系, 通过钢筋和混凝土间接联系, 传力路径复杂, 混凝土易在型钢处发生劈裂破坏; 格构式布置各型钢之间通过缀板联系, 传力不直接, 在缀板处应力集中, 且施工定位难度大、焊接工程量大; 实腹式布置和实腹分腔式布置形成了钢板围成的半封闭或全封闭区域, 可较好的约束核心混凝土, 提高了巨型柱的承载力和延性, 且钢骨可工厂预制现场分段拼接, 减小了吊装和焊接工作量, 是超高层巨型框架柱常用的型钢布置型式.

2.2 CFT 巨型柱

2.2.1 截面形式

钢管混凝土充分利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互组合作用, 充分发挥两种材料的优点, 即不仅使混凝土的塑性和韧性性能大幅提高, 而且可以避免或延缓钢管发生局部屈曲, 从而使钢管混凝土具有承载力高、塑性韧性好、经济效果好、施工方便等优点.

钢管混凝土巨型柱按照截面形状可分为常规截面 CFT 巨型柱和异形截面 CFT 巨型柱. 常规截面 CFT 巨型柱其截面面积较大, 内部一般布置有竖向加劲肋、环向加劲肋、栓钉、钢筋笼等构造, 海口塔、武汉中心采用了该类 CFT 巨型柱, 见图 9. 尽管常规截面 CFT 巨型柱与普通尺度的圆形或方形截面巨型柱形状相似, 但由于其截面尺寸巨大、构造复杂, 其受力性能也有一定的差异.

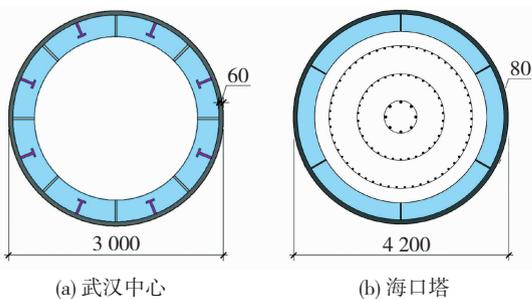


图 9 常规截面 CFT 巨型柱 (mm)

Fig. 9 CFT mega column with normal cross-section (mm)

巨型框架结构中, 有时因建筑设计需要, CFT 巨型柱被设计为不规则异形截面, 天津 117 大厦、北京中国尊大厦采用了该类 CFT 巨型柱, 见图 1(c)、(f).

2.2.2 研究现状

受限于加载设备等原因, 较大尺度的 CFT 巨型柱试验及理论研究相对较少. 李红明等^[51] (2011) 建立了巨型钢管混凝土框架结构柱等效简化模型. 范重等^[52] (2014) 介绍了巨型方钢管混凝土柱正截面与斜截面承载力的计算方法以及巨型方钢管混凝土柱试验, 给出了施工阶段验算实例. 杨蔚彪等^[53]

(2015) 基于北京中国尊大厦, 通过有限元分析及 1/12 缩尺模型试验对异形截面多腔钢管混凝土分叉节点从构造和受力性能等方面进行了专门研究. 张元植等^[54-56] (2016-2018) 完成了设分配梁传力构造的巨型钢管混凝土柱轴压系列试验, 对比分析了破坏形态、极限承载力、分配梁应变分布规律, 并进行了数值模拟. 徐礼华等^[57-58] (2017-2019) 进行了多边多腔钢管自密实高强混凝土短柱试件的轴心受压和偏心受压性能试验研究, 考虑了混凝土强度、钢管壁厚、钢筋笼、偏心率等参数对其受力性能的影响. 韩林海等^[59-61] (2016-2018) 基于某超高层建筑进行了六边形截面钢管混凝土柱轴心受压、纯弯、压弯性能试验, 并进行了有限元分析. 姚攀峰^[62] 通过理论推导得到了多腔钢管钢筋混凝土短柱轴压承载力实用计算方法.

曹万林及团队进行了相对较多的异形截面 CFT 巨型柱受力性能研究. 结合北京财富二期办公楼超高层建筑, 进行了乒乓球拍形 CFT 巨型柱抗震性能试验研究^[63] (2012), 其截面形状由圆形和矩形组合而成, 研究了不同水平力作用方向、不同截面构造下的抗震性能, 提出了设计方法, 见图 10.

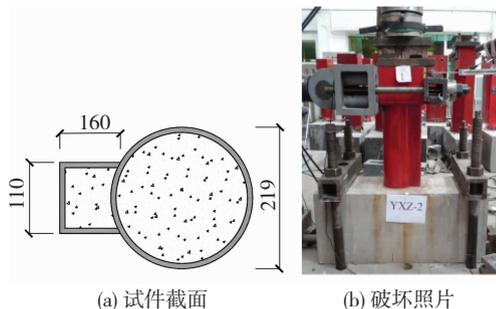


图 10 乒乓球拍形 CFT 巨型柱

Fig. 10 CFT mega column with table tennis bat shape

结合天津 117 大厦超高层建筑, 进行了六边形六腔体钢管混凝土巨型柱受压性能和抗震性能试验研究^[64-69] (2012-2016), 结合大连国贸中心大厦超高层建筑, 进行了五边形四腔体钢管混凝土巨型柱受压性能和抗震性能试验研究^[70-76] (2014-2019), 研究成果为工程中巨型柱设计提供了依据, 部分试验见图 11.

结合北京中国尊大厦超高层建筑, 进行了异形截面多腔钢管混凝土巨型分叉柱受压性能和抗震性能试验研究^[77-87] (2016-2018), 部分试验见图 12.

研究表明: 合理设计的常规截面和异形截面钢管混凝土巨型柱抗震性能良好, 竖向加劲肋、水平加劲肋、分腔构造、内置型钢或钢管、角部腔体贴焊角钢等构造措施均可改善其受力性能.

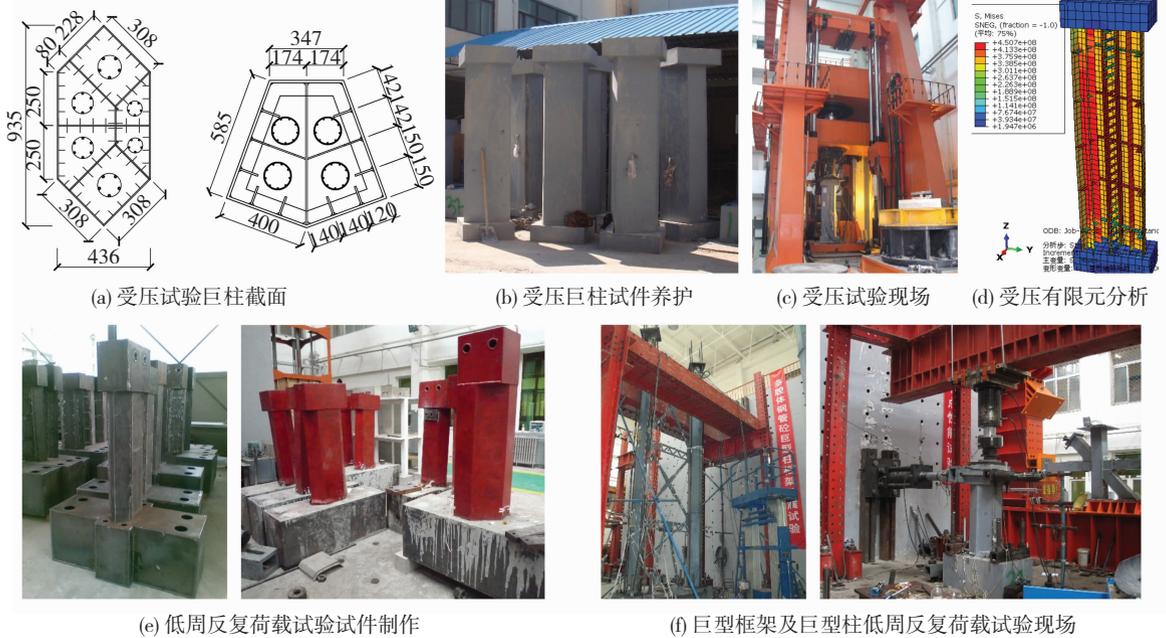


图 11 六边形、五边形多腔 CFT 巨型柱

Fig. 11 Hexagonal and pentagonal CFT mega column with multiple cavities

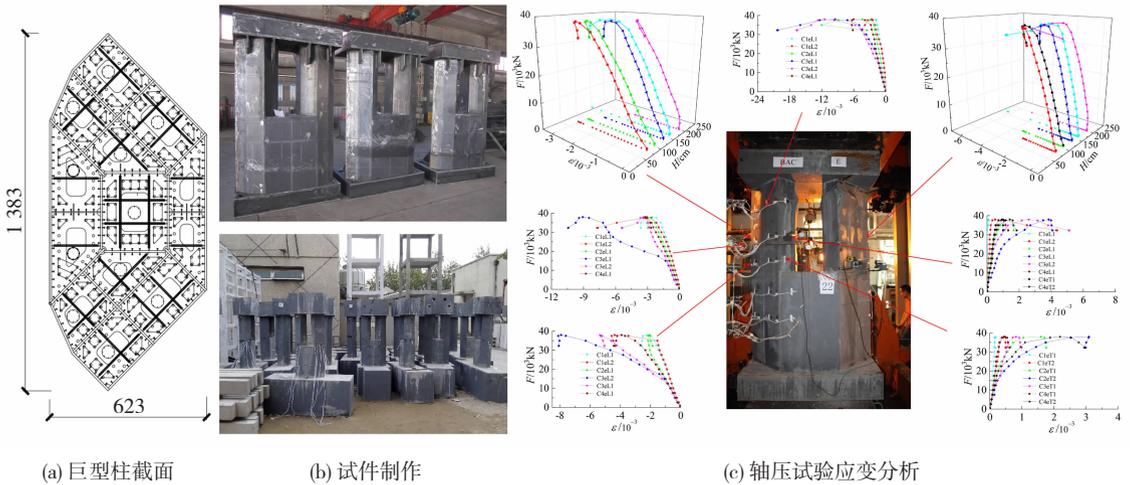


图 12 异形截面多腔钢管混凝土巨型分叉柱

Fig. 12 Special-shaped bifurcated CFT mega column with multiple cavities

但同时也需注意到,由于缩尺比例较大,巨型柱原型与试验模型之间可能存在一定的尺寸效应,该方面的研究尚少.另一方面,由于巨型柱一般来源于工程,具有特异性的特点,即每一个工程中巨型柱都有一定差异,因此,研究巨型柱截面形状由简到繁、截面构造由少到多、截面形式由规则到不规则时,巨型柱力学性能的变化规律,具有更好的普遍性意义,同时也可作为弹塑性理论分析提供数据支撑.

2.2.3 部分试验结果

为更好地了解异形截面钢管混凝土柱的抗震性能,图 13 给出了部分典型试件的荷载 F - 位移角 θ 滞回曲线,其中图 13(a)^[63]为乒乓球拍形 CFT 柱,编号 YXZG-1,1/7 缩尺,含钢率 12.35%,加载点至基础顶面距离 745 mm,名义剪跨比 2.5(按照截面最大宽度计算),轴压比 0.4,主要钢板屈服强度

289 MPa,混凝土标准立方体抗压强度 53.1 MPa;图 13(b)^[66]为六边形 CFT 柱,编号 CZ-1,1/25 缩尺,含钢率 6.2%,加载点至基础顶面距离 1125 mm,名义剪跨比 2.5,轴压比 0.4,主要钢板屈服强度 310 MPa,混凝土标准立方体抗压强度 43.2 MPa;图 13(c)^[75]为五边形 CFT 柱,编号 PCFT-NX,1/7.5 缩尺,含钢率 11.56%,加载点至基础顶面距离 1250 mm,名义剪跨比 2.73,轴压比 0.25,主要钢板屈服强度 451 MPa,混凝土标准立方体抗压强度 53.2 MPa;图 13(d)^[82]为八边形 CFT 柱,编号 CFT-1,1/30 缩尺,含钢率 7.54%,加载点至基础顶面距离 1070 mm,名义剪跨比 2.33,轴压比 0.30,主要钢板屈服强度 342 MPa,混凝土标准立方体抗压强度 44.0 MPa;图 13(e)^[85]为 CFT 分叉柱,编号 CFTC1-X,1/30 缩尺,含钢率 9.97%,加载点至基础顶面距

离 1 070 mm, 名义剪跨比 2.33, 轴压比 0.54, 主要钢板屈服强度 342 MPa, 混凝土标准立方体抗压强度 45.4 MPa.

由图 13 可见, 各试件的滞回曲线较为饱满,

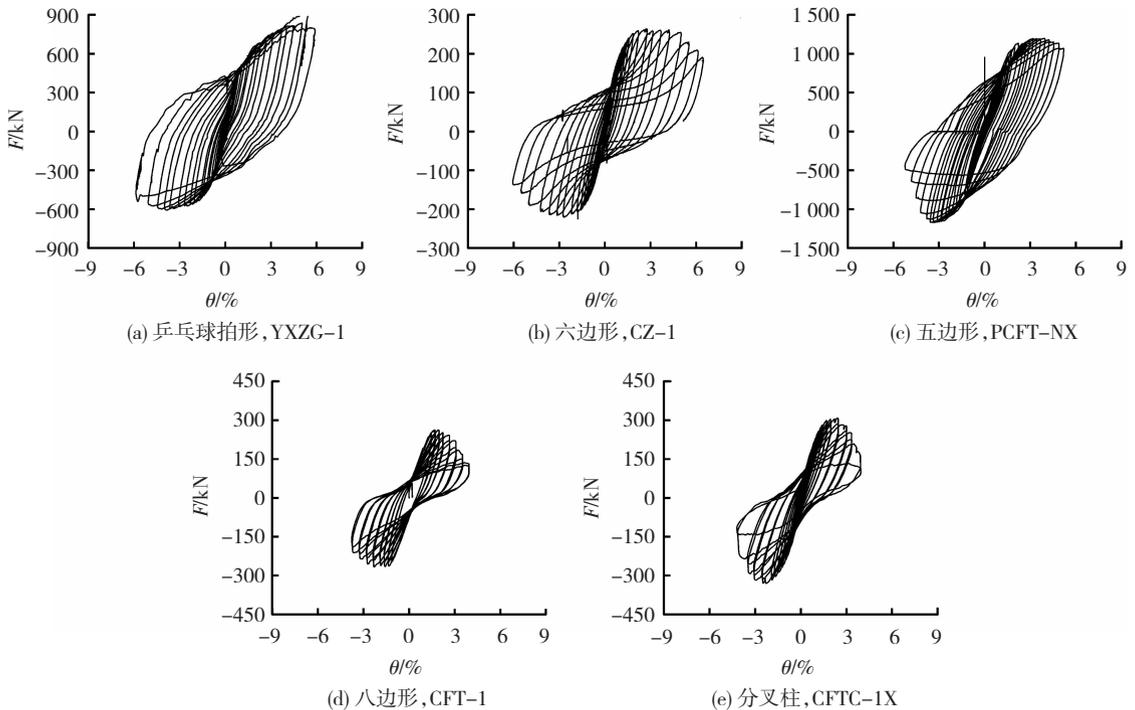


图 13 部分滞回曲线

Fig. 13 Parts of hysteretic curves

2.2.4 设计及研究建议

对于受压为主巨型 CFT 框架柱, 其截面形状宜均衡, 即截面各方向的回转半径应接近, 截面边数不宜超过 6; 以受弯为主的异形截面多腔钢管混凝土柱, 其截面最大回转半径与最小回转半径之比宜小于 2.

由钢板围成的腔体不宜过大, 腔体形状宜为较规则的四边形, 腔体边长不宜大于 1.5 m, 超过时应采用加劲肋减小钢板自由长度、配置钢筋笼减小混凝土收缩及温度应力的影响.

便于施工的部分竖向钢板不连续构造对巨型柱抗震性能有较大影响, 工程中应尽量避免; 角部贴焊角钢和角部腔体内置圆钢管构造对提高抗震性能作用明显, 工程设计可采用.

尽管国内外学者进行了一定数量的巨型框架柱试验研究, 但样本数量仍然较少. 具有普适性的复杂截面钢-混凝土组合巨型框架柱承载力计算方法及合理构造问题仍需结合更多的试验及数值分析进行深入研究.

3 结论与展望

巨型框架结构体系是一种受力性能优越的高效抗震体系, 合理设计的 SRC 巨型柱和 CFT 巨型柱均具有良好的抗震性能, 但随着建筑高度的不断增加,

峰值荷载对应位移角均超过了 2%, 破坏位移角最大可达 6%, 表现出了良好的弹塑性变形能力及延性, 抗震性能较好. 各试件的破坏均发生在柱根部截面, 表现为受压区混凝土压碎、受拉区钢板撕裂.

对其受力性能也提出了更高要求. 作者认为尚有以下问题有待深入研究与完善: 1) 巨型框架结构抗震性能优化设计及材料本构层次的弹塑性有限元分析方法研究仍具有必要性; 2) SRC 巨型柱及 CFT 巨型柱中, 各组成部件之间的相互作用机理定量评价方法仍不完善; 3) 复杂截面 SRC 巨型柱及 CFT 巨型柱承载力计算方法、构造措施设计仍需结合更多的试验及理论深化研究.

参考文献

- [1] 世界高层建筑与都市人居学会. CTBUH 全球高层建筑数据库 (摩天大楼中心) [EB/OL]. [2019-05-15]. <http://www.skyscrapercenter.com>
Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Global tall building database of the CTBUH [EB/OL]. [2019-05-15]. <http://www.skyscrapercenter.com>
- [2] 丁洁民, 吴宏磊, 赵昕. 我国高度 250m 以上超高层建筑结构现状与分析进展[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 1
DING Jiemin, WU Honglei, ZHAO Xin. Current situation and discussion of structural design for super high-rise buildings above 250m in China[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 1. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.03.002
- [3] 周建龙, 包联进, 钱鹏. 超高层结构设计的经济性及相关问题的研究[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 13
ZHOU Jianlong, BAO Lianjin, QIAN Peng. Study on the economy of structural design of super-tall buildings and relevant issues[J].

- Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 13. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2014. 04. ST12
- [4] 丁洁民,巢斯,赵昕,等. 上海中心大厦结构分析中若干关键问题[J]. 建筑结构学报,2010,31(6):122
DING Jiemin, CHAO Si, ZHAO Xin, et al. Critical issues of structural analysis for the Shanghai Center project[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 122. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-2168. 2014. 10. 004
- [5] 蒋欢军,和留生,吕西林,等. 上海中心大厦抗震性能分析和振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(11):55
JIANG Huanjun, HE Liusheng, LYU Xilin, et al. Analysis of seismic performance and shaking table tests of the Shanghai Tower [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 55. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2011. 11. 017
- [6] 傅学恰,吴国勤,黄用军,等. 平安金融中心结构设计研究综述[J]. 建筑结构,2012,42(4):21
FU Xueyi, WU Guoqin, HUANG Yongjun, et al. Research on structural design of Pingan Financial Centre [J]. Building Structure, 2012, 42(4): 21. DOI: 10. 19701/j. jzjg. 2012. 04. 002
- [7] 傅学恰,余卫江,孙璨,等. 深圳平安金融中心重力荷载作用下长期变形分析与控制[J]. 建筑结构学报,2014,35(1):41
FU Xueyi, YU Weijiang, SUN Can, et al. Analysis and control on long-term deformation caused by gravity of the Shenzhen Pingan Finance Center [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(1): 41. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2014. 01. 006
- [8] 刘鹏,殷超,李旭宇,等. 天津高银 117 大厦结构体系设计研究[J]. 建筑结构,2012,42(3):1
LIU Peng, YIN Chao, LI Xuyu, et al. Structural system design and study of Tianjin Goldin 117 mega tower [J]. Building Structures, 2012, 42(3): 1. DOI:10. 19701/j. jzjg. 2012. 03. 001
- [9] 赵宏,雷强,侯胜利,等. 八柱巨型结构在广州东塔超限设计中的工程应用[J]. 建筑结构,2012,42(10):1
ZHAO Hong, LEI Qiang, HOU Shengli, et al. Engineering application of 8 columns mega frame-core wall system in Guangzhou East Tower [J]. Building Structures, 2012, 42(10): 1. DOI: 10. 19701/j. jzjg. 2012. 10. 001
- [10] 汪大绥,周健,王荣,等. 天津周大福金融中心塔楼结构设计[J]. 建筑钢结构进展,2017,19(5):1
WANG Dasui, ZHOU Jian, WANG Rong, et al. Structural design of Tianjin CFT Finance Center Tower [J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(5): 1. DOI: 10. 13969/j. cnki. cn31-1893. 2017. 05. 001
- [11] 刘鹏,殷超,程煜,等. 北京 CBD 核心区 Z15 地块中国尊大楼结构设计和研究[J]. 建筑结构,2014,44(24):1
LIU Peng, YIN Chao, CHENG Yu, et al. Structural design and research of Beijing CBD Core Area Z15 plot China Zun Tower [J]. Building Structures, 2014, 44(24): 1. DOI: 10. 19701/j. jzjg. 2014. 24. 001
- [12] 李君,张耀春. 超高层结构的新体系-巨型结构[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1997,30(6):21
LI Jun, ZHANG Yaochun. Super structure-A new system of super high-rise structure [J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 1997, 30(6): 21
- [13] 张耀春,张文元. 超高层巨型钢结构体系的研究与应用[J]. 建筑钢结构进展,2005,7(2):19
ZHANG Yaochun, ZHANG Wenyuan. The study and application of mega steel structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(2): 19
- [14] 邹响,吕西林,钱江. 上海环球金融中心大厦结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(6):74
ZOU Yun, LYU Xilin, QIAN Jiang. Study on seismic behavior of Shanghai World Financial Center Tower [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(6): 74. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2006. 06. 009
- [15] FAN Hong, LI Q S, TUAN A Y, et al. Seismic analysis of the World's Tallest Building [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(5):1206. DOI:10. 1016/j. jcsr. 2008. 10. 005
- [16] LU Xiao, LU Xinzheng, ZHANG Wankai, et al. Collapse simulation of a super high-rise building subjected to extremely strong earthquakes [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(10): 2549. DOI: 10. 1007/s11431-011-4548-0
- [17] 卢啸. 超高巨柱-核心筒-伸臂结构地震灾变及抗震性能研究[D]. 北京:清华大学,2013
LU Xiao. Study on the collapse simulation and seismic performance of super tall mega column-core tube-outtrigger buildings [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013
- [18] POON D, HSIAO L, ZHU Y, et al. Non-linear time history analysis for the performance based design of Shanghai Tower [C]// Structures Congress. Las Vegas: ASCE, 2011: 541
- [19] 丁洁民,李九鹏,何志军. 上海中心大厦巨型框架关键节点设计研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(7):31
DING Jiemin, LI Jiupeng, HE Zhijun. Research on key joints design of mega frame of the Shanghai Tower [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 31. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2011. 07. 006
- [20] 陆新征,卢啸,李梦珂,等. 上海中心大厦结构抗震分析简化模型及地震耗能分析[J]. 建筑结构学报,2013,34(7):1
LU Xinzheng, LU Xiao, LI Mengke, et al. Study on simplified modeling and energy dissipation distribution of the Shanghai Tower [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 1. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2013. 07. 003
- [21] 赵宪忠,王斌,陈以一,等. 上海中心大厦伸臂桁架与巨柱和核心筒连接的静力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(2):20
ZHAO Xianzhong, WANG bin, CHEN Yiyi, et al. Monotonic static on outrigger truss and its connection with mega column and core tube of the Shanghai Tower [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 20. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2013. 02. 004
- [22] 马爽. 稀柱巨型框架-核心筒结构抗震性能研究[D]. 天津:天津大学,2012
MA Shuang. Study on seismic performance of mega frame-core wall structure with sparse huge-columns [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012
- [23] 张万开. 某超高层巨型支撑框架-核心筒结构地震倒塌研究[D]. 北京:清华大学,2013
ZHANG Wankai. Study on the earthquake-induced collapse of a super-tall mega-braced frame-core tube building [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013
- [24] 陆天天,赵昕,丁洁民,等. 上海中心大厦结构整体稳定性分析及巨型柱计算长度研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(7):8
LU Tiantian, ZHAO Xin, DING Jiemin, et al. Stability analysis of the Shanghai Tower and research on effective length of super column [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 8. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2011. 07. 003
- [25] 吕西林,邹响,卢文胜,等. 上海环球金融中心大厦结构模型振动台抗震试验[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(3):57
LYU Xilin, ZOU Yun, LU Wensheng, et al. Experimental study on

- Shanghai World Financial Center[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2004, 24(3): 57. DOI: 10.13197/j.eeev.2004.03.008
- [26] 田春雨, 张宏, 肖从真, 等. 上海中心大厦模型振动台试验研究[J]. *建筑结构*, 2011, 41(11): 47
TIAN Chunyu, ZHANG Hong, XIAO Congzhen, et al. Experimental research on shaking table test of Shanghai Center Tower[J]. *Building Structure*, 2011, 41(11): 47. DOI: 10.19701/j.jzjg.2011.11.010
- [27] 张宏, 田春雨, 肖从真, 等. 天津高银 117 大厦巨型支撑框架-核心筒结构模型振动台试验研究[J]. *建筑结构*, 2015, 45(22): 1
ZHANG Hong, TIAN Chunyun, XIAO Congzhen, et al. Shaking table test research on model of mega braced frame-core wall structure for Tianjin Goldin 117 Tower[J]. *Building Structure*, 2015, 45(22): 1. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.22.001
- [28] 宋腾添玛沙帝结构师事务所, 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司. 上海中心大厦项目结构超限审查会送审报告[R]. 上海: 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 2009
Thornton Tomasetti Inc., Tongji Architectural Design (Group) Co. Ltd. Inspection report on the high-rise building expert panel review of Shanghai Tower project[R]. Shanghai: Tongji Architectural Design (Group) Co. Ltd., 2009
- [29] 奥雅纳工程顾问. 北京朝阳区 CBD 核心区 Z15 地块项目“中国尊”超限高层建筑工程抗震设防审查专项报告[R]. 北京: 奥雅纳工程顾问, 2013
Arup Group. Special report on the seismic fortification inspection of high-rise building of “China Zun”, Chao Yang CBD district Z15 project, Beijing[R]. Beijing: Arup Group, 2013
- [30] 曹万林, 张建伟, 王敏, 等. 型钢-钢管混凝土异形柱: ZL200620158789.4[P]. 2007-12-12
- [31] 曹万林, 彭斌, 张建伟. 多腔钢管混凝土叠合柱及其制作方法: ZL201010152439.8[P]. 2012-07-04
- [32] 张建伟, 胡建华, 曹万林, 等. 一种带钢筋笼多腔体钢管混凝土柱及实施方法: ZL201410019499.0[P]. 2016-08-17
- [33] 曹万林, 殷飞, 董宏英, 等. 异形截面多腔钢管内置圆管混凝土组合巨型柱及作法: ZL201510112733.9[P]. 2017-06-16
- [34] 颜家胜, 石建光, 王卫锋. 型钢布置形式对型钢混凝土巨型柱性能的影响研究[C]//第 24 届全国结构工程学术会议论文集(第 I 册). 厦门: 工程力学, 2015: 440
YAN Jiasheng, SHI Jianguang, WANG Weifeng. Study on behaviors of steel reinforced concrete mega columns with different steel layouts[C]//Papers Collection of the 24th National Academic Conference on Structural Engineering (I). Xiamen: Engineering Mechanics, 2015: 440
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of composite structures: JGJ 138—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016
- [36] American Concrete Institute. Building code requirement for structural concrete and commentary: ACI 318-14[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014
- [37] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor design specification: AISC-LRFD—1999[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1999
- [38] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures; Part 1-1: General rules for buildings; EN 1994-1-1: 2004[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004
- [39] Architectural Institute of Japan. Standard for structure calculation of steel reinforced concrete structures[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2001
- [40] 曹万林, 樊太, 张维斌, 等. 钢管混凝土异形截面柱抗震性能试验及分析[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(1): 20
CAO Wanlin, FAN Tai, ZHANG Weibin, et al. Test and analysis of the seismic performance of SRC columns of irregular sections[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(1): 20. DOI: 10.15951/j.tmgcx.2007.01.005
- [41] 曹万林, 樊太, 张维斌, 等. 异形截面钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *世界地震工程*, 2004, 20(2): 64
CAO Wanlin, FAN Tai, ZHANG Weibin, et al. Experimental research on seismic behavior of special-shaped SRC columns[J]. *World Earthquake Engineering*, 2004, 20(2): 64
- [42] 樊太, 曹万林, 张维斌. 钢管混凝土异形柱正截面承载力及延性计算分析[J]. *世界地震工程*, 2004, 20(1): 133
FAN Tai, CAO Wanlin, ZHANG Weibin. Calculation and analysis on flexural strength and ductility of special-shaped SRC columns[J]. *World Earthquake Engineering*, 2004, 20(1): 133
- [43] 崔大光, 孙飞飞, 李国强, 等. 巨型型钢混凝土柱双向偏心受压校核分析方法[J]. *力学季刊*, 2007, 28(2): 340
CUI Daguang, SUN Feifei, LI Guoqiang, et al. A check analysis method for steel reinforced concrete mega-column under biaxial eccentricity loading[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2007, 28(2): 340. DOI: 10.15959/j.cnki.0254-0053.2007.02.025
- [44] 杜义欣, 田春雨, 肖从真, 等. 某工程复杂截面型钢混凝土巨型柱压弯性能试验[J]. *建筑结构*, 2011, 41(11): 53
DU Yixin, TIAN Chunyun, XIAO Congzhen, et al. Experimental study on seismic behavior of complexity SRC compression-bending members[J]. *Building Structure*, 2011, 41(11): 53. DOI: 10.19701/j.jzjg.2011.11.011
- [45] 陆新征, 张万开, 卢啸, 等. 超级巨柱的弹塑性受力特性及其简化模型[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2011, 27(3): 409
LU Xinzhen, ZHANG Wankai, LU Xiao, et al. Elastic-plastic mechanical behavior of detailed finite element model and simplified model of mega-columns[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2011, 27(3): 409
- [46] 彭肇才, 黄用军. 平安金融中心巨型结构节点分析与设计[J]. *广东土木与建筑*, 2011(6): 39
PENG Zhao'ai, HUANG Yongjun. The analysis and design of mega structure joints in Pingan Finance Center[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2011(6): 39. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2011.06.002
- [47] 包联进, 陈建兴, 钱鹏, 等. 空腹式型钢 SRC 巨柱在超高层结构中应用探讨[J]. *建筑结构*, 2014, 44(增刊 1): 269
BAO Lianjin, CHEN Jianxing, QIAN Peng, et al. Discussion on the application of SRC mega column with open-web structural steel in super high-rise buildings[J]. *Building Structure*, 2014, 44(S1): 269
- [48] 吴兵, 傅学怡, 孟美莉, 等. 沈阳宝能金融中心超大截面矩形钢管混凝土柱结构设计[J]. *建筑结构*, 2017, 47(5): 15
WU Bing, FU Xueyi, MENG Meili, et al. Structural design on super-large concrete-filled rectangular steel tube columns of Shenyang Baoneng Financial Hub[J]. *Building Structure*, 2017, 47(5): 15. DOI: 10.19701/j.jzjg.2017.05.003
- [49] XIAO Congzhen, DENG Fei, CHEN Tao, et al. Experimental

- study on concrete-encased composite columns with separate steel sections[J]. *Steel and Composite Structures*, 2017, 23(4): 483
- [50] 邓飞,肖从真,陈涛,等. 分散型钢混凝土组合柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(4): 62
DENG Fei, XIAO Congzhen, CHEN Tao, et al. Experimental study on seismic performance of isolated steel reinforced concrete composite columns[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(4): 62. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2017. 04. 008
- [51] 李红明,唐柏鉴,王治均. 巨型钢管混凝土框架结构柱模型等效简化理论分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2011, 37(5): 1
LI Hongming, TANG Baijian, WANG Zhijun. Theoretical analysis of the equivalent simplification model about mega column of steel tube concrete mega-frame structure[J]. *Sichuan Building Science*, 2011, 37(5): 1
- [52] 范重,仕帅,赵长军. 超高层建筑巨型钢管混凝土柱性能研究[J]. *施工技术*, 2014, 43(14): 11
FAN Zhong, SHI Shuai, ZHAO Changjun. Study on the behavior of giant concrete filled tubular columns in super high-rise buildings[J]. *Construction Technology*, 2014, 43(14): 11. DOI: 10.7672/sjgs2014140011
- [53] 杨蔚彪,宫贞超,常为华,等. 中国尊大厦巨型柱分叉节点性能研究[J]. *建筑结构*, 2015, 45(18): 6
YANG Weibiao, GONG Zhenchao, CHANG Weihua, et al. Performance study on branching node of mega column in China Zun Tower[J]. *Building Structure*, 2015, 45(18): 6. DOI: 10.19701/j. jzjg. 2015. 18. 002
- [54] 张元植,罗金辉,李元齐,等. 巨型钢管混凝土柱分配梁构造下竖向荷载传递机理研究(II): 数值分析[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(12): 16
ZHANG Yuanzhi, LUO Jinhui, LI Yuanqi, et al. Compression load transfer mechanism of distributive beam detailings in large-section CFT columns (II): Numerical simulation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(12): 16. DOI: 10.15951/j. tmgcxb. 2016. 12. 003
- [55] 罗金辉,刘匀,张元植,等. 设分配梁巨型钢管混凝土柱轴压承载性能试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(9): 1201
LUO Jinhui, LIU Yun, ZHANG Yuanzhi, et al. Experimental investigation on behavior of giant concrete-filled steel tubular columns with distributive beam under axial compression [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(9): 1201. DOI: 10.11908/j. issn. 0253-374x. 2018. 09. 007
- [56] 张元植. 设传力措施的巨型方钢管混凝土柱抗震性能有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(11): 20
ZHANG Yuanzhi. Finite element analysis on seismic performance of giant CFRT columns with load-transfer details [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(11): 20. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2018. 11. 003
- [57] 徐礼华,徐鹏,侯玉杰,等. 多边多腔钢管自密实高强混凝土短柱轴心受压性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(1): 37
XU Lihua, XU Peng, HOU Yujie, et al. Experimental study on axial compression behavior of short polygonal multi-cell and self-compacting high-strength CFST columns [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(1): 37. DOI: 10.15951/j. tmgcxb. 2017. 01. 005
- [58] 徐礼华,宋杨,刘素梅,等. 多腔式多边形钢管混凝土柱偏心受压承载力研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(4): 135
XU Lihua, SONG Yang, LIU Sumei, et al. Study on the eccentric compressive bearing capacity of polygonal multi-cell concrete filled steel tubular columns[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(4): 135. DOI: 10.6052/j. issn. 1000-4750. 2018. 02. 0090
- [59] HAN Linhai, HOU Chuanchuan, XU Wu. Seismic performance of concrete-encased column base for hexagonal concrete-filled steel tube: Numerical study [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 149: 225. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2018. 07. 006
- [60] XU Wu, HAN Linhai, LI Wei. Performance of hexagonal CFST members under axial compression and bending [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 123: 162. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2016. 04. 026
- [61] XU Wu, HAN Linhai, LI Wei. Seismic performance of concrete-encased column base for hexagonal concrete-filled steel tube: experimental study [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 121: 352. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2016. 02. 003
- [62] 姚攀峰. 多腔钢管钢筋混凝土短柱轴压承载力实用计算方法[J]. *建筑结构*, 2017, 47(增刊2): 255
YAO Panfeng. A practical method for calculating axial bearing capacity of multi-cell RCFST short column [J]. *Building Structure*, 2017, 47(S2): 255. DOI: 10.19701/j. jzjg. 2017. s2. 049
- [63] 彭斌. 异形截面多腔钢管混凝土巨型柱框架抗震试验与理论研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012
PENG Bin. Experimental and theoretical study on seismic performance of frame with special-shaped multi-cell CFST mega columns [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012
- [64] 曹万林,彭斌,王智慧,等. 底部加强型多腔钢管混凝土巨型柱抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2012, 32(2): 120
CAO Wanlin, PENG Bin, WANG Zhihui, et al. Experimental research on seismic behavior of bottom strengthened multi-cell CFST mega-columns [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2012, 32(2): 120. DOI: 10.13197/j. eeev. 2012. 02. 020
- [65] 曹万林,王智慧,彭斌,等. 腔内带钢筋笼多腔钢管混凝土巨型柱轴压性能试验研究[J]. *结构工程师*, 2012, 28(3): 135
CAO Wanlin, WANG Zhihui, PENG Bin, et al. Experimental study on axial compression performance of multi-cell CFST mega-columns with steel reinforcement cage inside [J]. *Structural Engineers*, 2012, 28(3): 135. DOI: 10.15935/j. cnki. jggcs. 2012. 03. 021
- [66] 彭斌,曹万林,王智慧,等. 不同方向水平力下多腔钢管混凝土巨型柱抗震性能研究[J]. *世界地震工程*, 2012, 28(2): 90
PENG Bin, CAO Wanlin, WANG Zhihui, et al. Research on seismic behavior of multi-cell CFST mega-columns under horizontal forces in different directions [J]. *World Earthquake Engineering*, 2012, 28(2): 90
- [67] 彭斌,曹万林,王智慧,等. 多腔钢管混凝土柱巨型框架抗震性能试验研究[J]. *结构工程师*, 2012, 28(3): 128
PENG Bin, CAO Wanlin, WANG Zhihui, et al. Experimental research on seismic behavior of mega-frame with multi-cell CFST columns [J]. *Structural Engineers*, 2012, 28(3): 128. DOI: 10.15935/j. cnki. jggcs. 2012. 03. 020
- [68] 曹万林,武海鹏,张建伟,等. 轴压及轴拉作用下异形截面多腔钢管混凝土巨型柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(增刊1): 199
CAO Wanlin, WU Haipeng, ZHANG Jianwei, et al. Experimental study on seismic behavior of special-shaped CFT mega column with multiple cavities under axial compressive force and tensile force [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(S1): 199. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2015. S1. 031

- [69] WU Haipeng, CAO Wanlin, QIAO Qiyun, et al. Uniaxial compressive constitutive relationship of concrete confined by special-shaped steel tube coupled with multiple cavities [J]. *Materials*, 2016, 9(2): 86. DOI: 10.3390/ma9020086
- [70] 王立长, 曹万林, 徐萌萌, 等. 五边形截面钢管混凝土巨型柱受压性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(1): 77
WANG Lichang, CAO Wanlin, XU Mengmeng, et al. Experimental research on compression behavior of pentagonal cross-section CFST mega-columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(1): 77. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2014. 01. 011
- [71] 曹万林, 徐萌萌, 董宏英, 等. 不同构造五边形钢管混凝土巨型柱轴压性能计算分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(6): 99
CAO Wanlin, XU Mengmeng, DONG Hongying, et al. Analysis on axial compression behavior of pentagonal CFST mega columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(6): 99. DOI: 10.6052/j. issn. 1000-4750. 2013. 11. 1111
- [72] 曹万林, 徐萌萌, 武海鹏, 等. 五边形钢管混凝土巨型柱偏压性能计算分析[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(1): 114
CAO Wanlin, XU Mengmeng, WU Haipeng, et al. Calculation analysis of eccentric compression behavior of pentagonal CFST mega columns [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(1): 114. DOI: 10.13577/j. jnd. 2015. 0115
- [73] 武海鹏, 曹万林, 董宏英, 等. 异形截面多腔钢管混凝土柱轴压承载力计算方法研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(9): 126
WU Haipeng, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Bearing capacity calculation method for special-shaped CFST columns coupled with multiple cavities under axial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(9): 126. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2016. 09. 016
- [74] WU Haipeng, QIAO Qiyun, CAO Wanlin, et al. Axial compressive behavior of special-shaped concrete filled tube mega column coupled with multiple cavities [J]. *Steel and Composite Structures*, 2017, 23(6): 633. DOI: 10.12989/scs. 2017. 23. 6. 633
- [75] WU Haipeng, CAO Wanlin. Seismic performance of pentagonal concrete-filled steel tube mega columns with different bottom constructions [J]. *Structure Design of Tall and Special Buildings*, 2019, 28(10): e1613. DOI: 10.1002/ta. 1613
- [76] 曹万林, 陈相家, 武海鹏, 等. 不同构造异形截面多腔钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *结构工程师*, 2016, 32(2): 132
CAO Wanlin, CHEN Xiangjia, WU Haipeng, et al. Seismic behavior of special shaped section multi-cell CFST mega-columns with different constructional details [J]. *Structural Engineers*, 2016, 32(2): 132. DOI: 10.15935/j. cnki. jggcs. 2016. 02. 021
- [77] 乔崎云, 李翔宇, 曹万林, 等. 异型截面多腔钢管混凝土分叉柱抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(2): 1
QIAO Qiyun, LI Xiangyu, CAO Wanlin, et al. Study on seismic behavior of complex cross-section multi-cell CFST bifurcated-columns [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(2): 1. DOI: 10.13197/j. eeev. 2016. 02. 1. qiaoqy. 001
- [78] 杨光, 曹万林, 董宏英, 等. 异形截面多腔钢管混凝土巨型分叉柱轴压应变试验分析[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(6): 138
YANG Guang, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Compressive strain test analysis of special-shaped multi-cell mega-bifurcated concrete filled steel tubular columns [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(6): 138. DOI: 10.13577/j. jnd. 2016. 0617
- [79] 杨光, 曹万林, 董宏英, 等. 异形截面多腔钢管混凝土巨型分叉柱轴压性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(5): 57
YANG Guang, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Compressive behavior of specially-shaped multi-cell mega-bifurcated concrete filled steel tubular columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(5): 57. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2016. 05. 007
- [80] QIAO Qiyun, WU Haipeng, CAO Wanlin, et al. Seismic behavior of bifurcated concrete filled steel tube columns with a multi-cavity structure [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2017, 19(8): 6222. DOI: 10.21595/jve. 2017. 18893
- [81] 乔崎云, 梁旭, 曹万林, 等. 多腔钢管混凝土分叉柱力学性能有限元分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(12): 75
QIAO Qiyun, LIANG Xu, CAO Wanlin, et al. FEM analysis on multi-cell CFST bifurcated columns [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(12): 75. DOI: 10.11918/j. issn. 0367-6234. 201705141
- [82] 殷飞, 董宏英, 曹万林, 等. 不同构造多腔钢管混凝土巨型柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(3): 67
YIN Fei, DONG Hongying, CAO Wanlin, et al. Seismic behavior of special-shaped multi-cell concrete-filled steel tubular mega-columns with different constructions [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(3): 67. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2018. 03. 009
- [83] 杨光, 曹万林, 董宏英, 等. 巨型钢管混凝土分叉柱节点压弯性能试验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(1): 88
YANG Guang, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Experimental study on the bifurcated columns joint of mega-CFST under eccentric load [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, 44(1): 88
- [84] 武海鹏, 乔崎云, 曹万林, 等. 轴拉下异形截面多腔钢管混凝土巨型分叉柱抗震性能试验[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(7): 84
WU Haipeng, QIAO Qiyun, CAO Wanlin, et al. Seismic behavior of special-shaped CFT mega bifurcate column coupled with multiple cavities under axial tensile force [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(7): 84. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2018. 07. 010
- [85] 武海鹏, 乔崎云, 曹万林, 等. 不同构造异形截面多腔钢管混凝土分叉柱抗震性能试验[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(6): 23
WU Haipeng, QIAO Qiyun, CAO Wanlin, et al. Experimental study on seismic behavior of special-shaped CFT bifurcate columns with multiple cavities and different cross-sectional constructions [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(6): 23. DOI: 10.15951/j. tmgxb. 2018. 06. 003
- [86] 武海鹏, 曹万林, 董宏英, 等. 不同加载方向异形截面多腔钢管混凝土分叉柱抗震性能试验[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(18): 78
WU Haipeng, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Seismic behavior tests on special-shaped CFT mega bifurcate columns coupled with multiple cavities under different direction horizontal loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(18): 78. DOI: 10.13465/j. cnki. jvs. 2018. 18. 011
- [87] 殷飞, 薛素铎, 曹万林, 等. 异形多腔钢管混凝土柱往复轴压性能试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(12): 94
YIN Fei, XUE Suduo, CAO Wanlin, et al. Hysteretic behavior of special-shaped multi-cell concrete-filled steel tube under axial compression [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(12): 94. DOI: 10.11918/j. issn. 0367-6234. 201902094