

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.002



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



新型浆锚连接方钢管混凝土拼接柱抗震性能 试验研究

郑立文^{1,2}, 李智³, 赵亮³, 胡少伟^{1,2}, 李景浩^{1,2}, 齐浩^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 郑州大学水利与交通工程学院, 郑州 450001;
3. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036)

摘要: 为进一步提高用于钢-混凝土组合结构的柱构件的装配效率, 并改善其抗震性能, 降低生产成本, 提出一种新型浆锚连接方钢管混凝土拼接柱设计方法。通过对缩尺比例为 2 的 5 个拼接柱构件和 1 个整浇柱构件开展拟静力试验, 获得不同配筋率、配筋形式和柱-柱节点拼接部位的新型拼接柱的抗震性能。试验结果表明: 新型拼接柱构件在低周期反复荷载下的破坏过程及其形态与整浇柱构件相似, 其滞回曲线饱满, 耗能能力、抗承载力退化和抵抗变形(刚度)能力均比整浇柱构件更加优良, 特别是将柱-柱节点拼接部位设于柱间反弯点区域的 P 类型构件变形能力最佳, 证明了该新型拼接柱设计方法的科学性, 并对提高钢-混凝土组合框架结构的整体抗震性能具有应用潜力。

关键词: 钢管混凝土柱; 浆锚连接; 拼接部位; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)01-0152-15

Experimental study on seismic performance of a novel concrete-filled square steel tubular spliced columns with grouting anchor connections

ZHENG Liwen^{1,2}, LI Zhi³, ZHAO Liang³, HU Shaowei^{1,2}, LI Jinghao^{1,2}, QI Hao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China; 3. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, P. R. China)

Abstract: A novel design method for concrete-filled square steel tubular spliced columns with grouting anchor connections is proposed in this paper to increase the assembly efficiency, improve the seismic performance and reduce production cost of the column members in the steel-concrete composite structures. The seismic

收稿日期: 2023-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(52130901); 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jscx-gksbX0013); 重庆市自然科学基金创新群体科学基金(cstc2020jcyj-cxttX0003)

作者简介: 郑立文(1997-), 男, 主要从事钢-混凝土组合结构研究, E-mail: 13996551467@163.com。

胡少伟(通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: hushaowei@zzu.edu.cn。

Received: 2023-09-26

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52130901); Chongqing Special Key Project for Technological Innovation and Application Development (No. cstc2019jscx-gksbX0013); Innovation Group Science Foundation of the Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2020jcyj-cxttX0003)

Author brief: ZHENG Liwen (1997-), main research interest: steel-concrete composite structures, E-mail: 13996551467@163.com.

HU Shaowei (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: hushaowei@zzu.edu.cn.

performances of novel spliced columns with different reinforcement ratios, reinforcement configurations and column-column joint positions were tested via quasi-static loading test on five spliced columns and one monolithic cast column with a scale ratio of 2. The results showed that the failure modes and processes of the novel spliced column members under low cyclic loading are similar to those of the reference member. The hysteretic curves of the novel spliced columns are full, and the energy dissipation capacity, load bearing capacity degradation and stiffness were advantageous than those of the reference column member. In particular, the P-type members with the column-column joint located in the column inflection point area had better ductility and deformation capacity under the seismic effect. The test results identify that the novel spliced columns designed method proposed is scientific and has application potential to improve the overall seismic performance of the steel-concrete composite frame structures.

Keywords: steel tube concrete column; grouting anchor connection; joint position; quasi-static test; seismic performance

与传统现浇整体式建筑相比,装配式建筑具有高性能、高效率的优点^[1-3]。钢-混组合结构^[4-8]能同时发挥混凝土和钢结构各自的优势,是未来结构工程发展的重要趋势^[9]。装配式柱构件作为钢-混组合结构的重要组成部分,对其抗震性能的研究具有重要意义^[10]。

近年来,学者们提出了不同的装配柱构件形式,并开展其抗震性能试验。Uy等^[11]提出了一种适用于钢-混组合结构中柱构件的可拆卸连接件,并基于ABAQUS验证了该连接的可行性。Xu等^[12]采用一种带灌浆套筒连接的预制RC/ECC柱来提高钢-混柱构件的抗震性能,结果表明,该预制柱构架混凝土组合柱具有更好的耗能能力和抗损伤能力。武立伟等^[13]提出一种套筒灌浆连接的装配式圆钢管混凝土柱,并对其进行受压性能研究,结果表明套筒灌浆连接可用于轴压和偏压条件,其承载力可用极限平衡理论计算。杜永峰等^[14]提出一种新型组合节点连接PC柱,通过对1根整浇构件和2根预制构件进行拟静力试验,证实该新型节点的预制柱的滞回性能和整浇柱相当。魏博^[15]提出了一种采用黄铜摩擦耗能器和角钢作为耗能件,再通过高强度螺栓连接的预制柱,并提出预制柱的恢复力模型,该成果可为柱-柱节点的进一步研究提供理论基础。

对现有组合结构中柱构件的研究主要集中在合理装配构造上,但在实际应用中普遍存在构造复杂的问题^[16]。笔者提出一种新型浆锚连接方钢管混凝土拼接柱(见图1)并研究其抗震性能,对缩尺比例为2的5根新型拼接柱构件和1根整浇柱构件进行低周往复加载的拟静力试验,研究了拼接柱节点形式、拼接纵筋配筋率和配筋形式对新型拼接柱构件的抗震性能的影响。

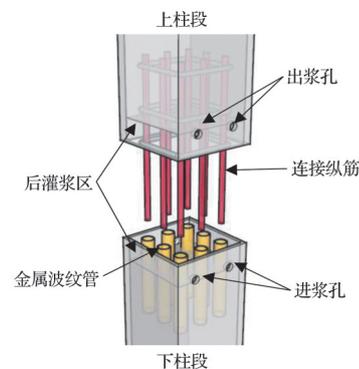


图1 拼接柱构造详图

Fig. 1 Detail diagram for the structure of the novel spliced column

1 试验概况

1.1 试验设计

设计并制作了1根整浇柱和5根浆锚连接方钢管混凝土装配柱构件,其缩尺比例均为2。构件几何尺寸及构造细节如图2所示,装配式柱构件分为Z类型和P类型两种,整浇柱CFST和Z类型构件使用混凝土现浇基础作为固定底座,P类型构件使用螺栓底板连接柱脚作为柱子边界固定方式^[17]。所有试件截面尺寸均为200 mm×200 mm×10 mm,构件总高为1 800 mm。Z类型构件底座几何尺寸为700 mm×720 mm×1 500 mm,计算柱高为1 000 mm,P类型试件计算高度为1 500 mm,所有拼接柱构件的主要参数详见表1。新型拼接柱构件用钢管Q235普通热轧钢制成的成品方钢管^[18]。柱-柱节点钢筋采用HRB400级热轧带肋钢筋,其材性指标根据《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[19]测得,详见表2。浇筑用混凝土使用C50等级的商品混凝土,依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[20]

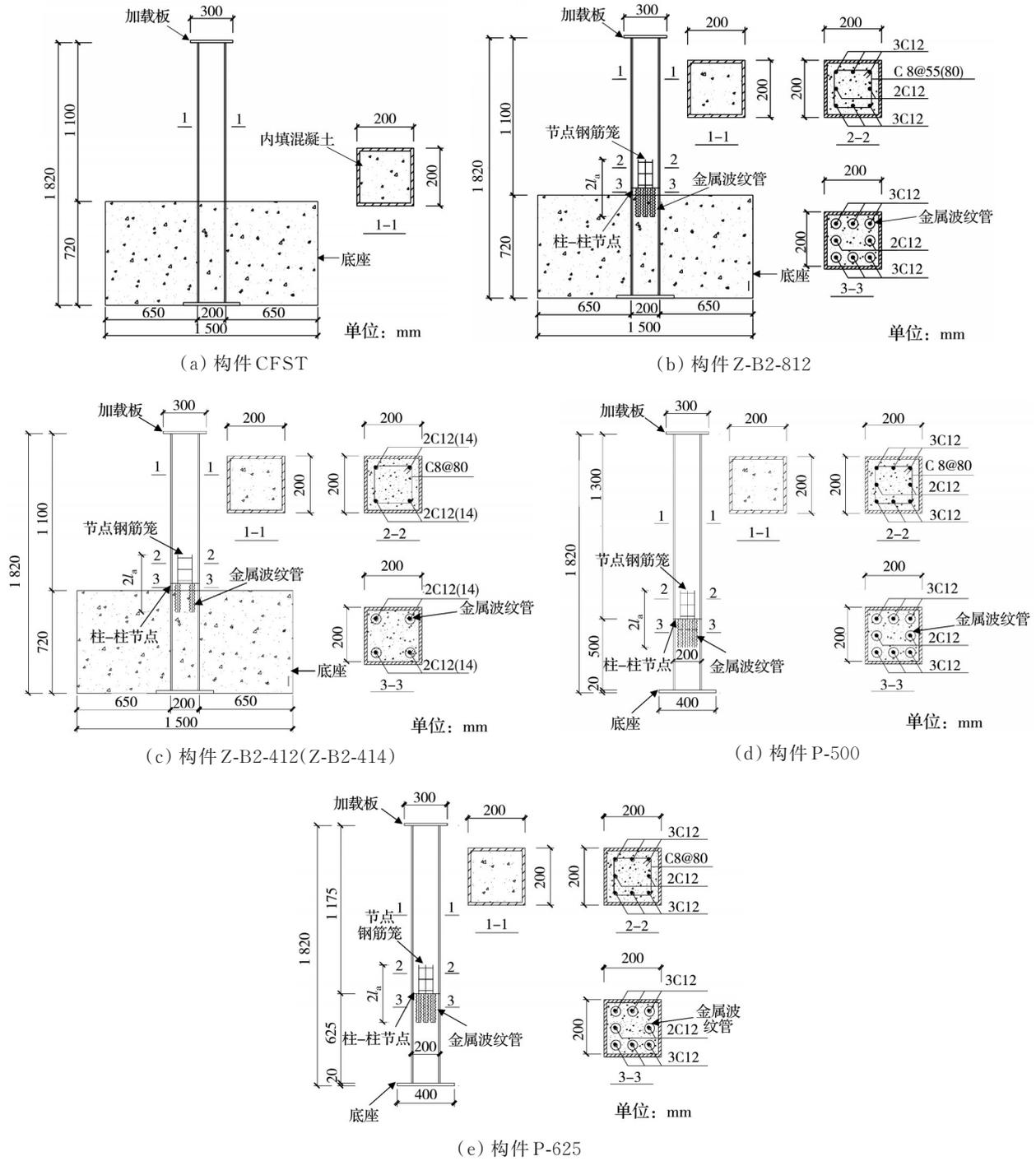


图 2 构件几何尺寸及构造细节

Fig. 2 Geometric size and construction for the test members

表 1 试验柱构件主要设计参数

Table 1 Main parameters for test column members

试件编号	$S \times t \times L$	l_a	n	$\rho_s / \%$	连接纵筋布置	连接箍筋布置
CFST	200 mm × 10 mm × 1 100 mm		0.24			
Z-B2-812	200 mm × 10 mm × 1 100 mm	200	0.24	2.79	8C12	C8@80
Z-B2-412	200 mm × 10 mm × 1 100 mm	200	0.24	1.40	4C12	C8@80
Z-B2-414	200 mm × 10 mm × 1 100 mm	200	0.24	1.90	4C14	C8@80
P-500	200 mm × 10 mm × 1 500 mm	200	0.24	2.79	8C12	C8@80
P-625	200 mm × 10 mm × 1 500 mm	200	0.24	2.79	8C12	C8@80

注: S, t, L 分别为方钢管边长、壁厚和试件长度; l_a 为连接纵筋锚固长度; n 为试件轴压比; 装配构件编号中 B 表示连接纵筋锚固长度为 200 mm, 数字 2 表示轴压比为 0.24, 数字 812、412 和 414 分别表示连接纵筋布置形式为 C12 × 8、C12 × 4 和 C14 × 4; ρ_s 为节点纵筋配筋率。

测得其立方体抗压强度和轴心抗压强度分别为 65.83、34.97 MPa。灌浆料采用自配高性能水泥基灌浆料^[21],其抗压强度为 70.2 MPa。

表 2 试验用钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel for testing

钢材种类	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /MPa	$\epsilon_y/10^{-6}$
C8	415.0	615.0	1.84×10^5	2 259.9
C12	446.7	621.7	1.93×10^5	2 318.4
C14	453.3	641.6	1.95×10^5	2 320.7
钢管	311.2	451.2	1.90×10^5	1 636.9

注: f_y 为屈服强度; f_u 为极限强度; E_s 为弹性模量; ϵ_y 为屈服应变。

1.2 试件制作

拼接柱构件的制作过程分为以下步骤:

构件制作第 1 步:加工钢筋笼。将加工好的钢筋根据设计要求进行绑扎,形成笼状结构。钢筋笼成品图如图 3(b)所示。

构件制作第 2 步:波纹管处理。将波纹管预先绑扎,然后使用堵头封口。波纹管处理如图 3(c)所示。

构件制作第 3 步:对方钢管进行切割、开孔,预制上、下柱段分别焊接竖向加载顶板和柱脚底板,如图 3(d)、(e)所示。

构件制作第 4 步:浇筑混凝土、养护。对预制上、下柱段分别固定钢筋笼和波纹管,然后进行混凝土浇筑,待混凝土养护至标准强度后进行装配,如图 3(f)、(g)所示。

拼接柱上、下柱段制作完成后,现场拼装关键施工流程如图 3(h)~(n)所示^[22],主要步骤包括:吊装前对拼接柱预制段结合面混凝土进行人工凿毛处理至露出粗骨料;下柱段就位,将预先配置好的灌浆料注入波纹管内;上柱段吊装调直就位;预制上柱段与下柱段进行拼装,钢筋笼确保了纵筋插入波纹管后的精准就位,待节点区纵筋插入注浆波纹管后,对接完成;预制柱端结合面外钢管焊接;由下柱段进浆口灌浆至上柱段所有出浆孔均有浆液流出,灌浆结束。与传统拼接柱相比,该新型拼接柱具有预制制作工艺简单、减少用材(如大孔径波纹管缩短了钢筋发挥强度所需的最小锚固长度)和施



图 3 柱构件拼装流程示意图

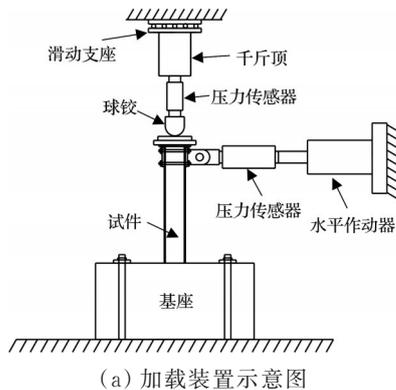
Fig. 3 Diagram of assembly process for tested column members

工方便的优势。

1.3 加载及测点布置

新型拼接柱构件的低周反复加载试验的加载系统如图 4 所示。该加载系统包括:1)200 t 竖向千斤顶,其推拉量程为 2 000 kN;2)200 t 水平千斤顶,其推拉量程为 1 000 kN;3)辅助装置,采用锚杆和辅助千斤顶固定底座,保证基础与反力地板锚固良好。水平加载点高程设计为距地梁顶面 1 000 mm 处,按位移控制加载水平荷载,位移角为 0.5%、1.0% 时,进行单次循环;位移角为 1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、4.0%、6.0%、8.0% 和 10.0% 时,每个加载层级进行 2 次循环(具体加载制度见图 5)。直到试件水平荷载低于峰值承载力的 85% 或者构件发生不可恢复的显著变形,将不再加载,视为试验结束^[23]。

试验加载过程中主要测量内容包括:1)荷载量



(b) Z 类型拼接柱试验现场加载图



(c) P 类型拼接柱试验现场加载图

图 4 试验加载装置及现场试验图

Fig. 4 Diagrams for the loading device and the in-situ test

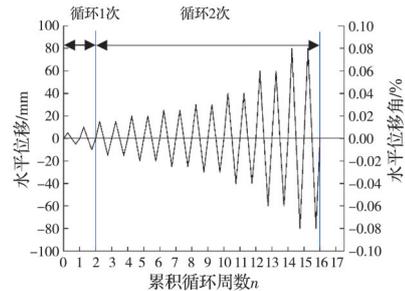


图 5 加载制度

Fig. 5 Loading system

测。将压力传感器布置在水平和竖向作动器上,分别测量水平荷载和竖向荷载。2)位移量测。用布设在柱顶加载端、柱脚两侧的位移计来测量加载点位移、柱脚曲率和焊缝附近钢管剪切变形^[24]。3)方钢管柱脚区应变量测。分别在柱子塑性铰区受弯面布置应变片、受剪面布置应变花进行应变量测(应变片粘贴位置见图 6、图 7)。通过数据测试系统记录上述测量数据。

2 试验结果及其分析

2.1 试验现象及破坏形态

各构件的典型破坏形态依次见图 8~图 13,由试验结果可知,所有柱构件均经历了弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段的破坏过程^[25-26]。

在层间位移角 θ 较小时,柱构件处在弹性阶段。此时柱顶水平力 P 比较小, $P-\Delta$ (Δ 为柱端水平位移)曲线呈现出接近线性的形态,残余变形微小,钢管壁表面没有局部屈曲,装配柱灌浆孔也未观察到明显变化。

当加载到屈服荷载时,柱构件开始进入弹塑性阶段, $P-\Delta$ 曲线出现明显拐点,荷载增速减缓。当位移角为 1.5% 时,所有构件距柱底 200 mm 范围内已发生不同程度屈服,构件的刚度开始下降,但肉眼未能观察到柱脚明显的变形。

当构件经历弹塑性阶段以后,随着持续加荷,柱脚区钢管塑性变形不断累积,各柱构件在受压侧开始出现轻微鼓曲,并在反向加载时被拉平。随着位移进一步增加,鼓曲加重,柱底钢管与混凝土界面分离,钢管对内部混凝土的约束作用减弱,竖向轴力一部分向核心混凝土转移。加载后期,构件内部混凝土在反复荷载的作用下被进一步压溃,构件承载能力迅速下降,最终因构件持荷能力下降至 85% 以下或钢管焊缝开裂而停止加载。

2.1.1 整浇构件 CFST

整浇构件 CFST 的应变发展及典型破坏过程如图 8 所示。在加载位移角达到 1.5% 之前,构件处于弹性阶段;在加载到 1.5% 时,柱脚西侧应变超

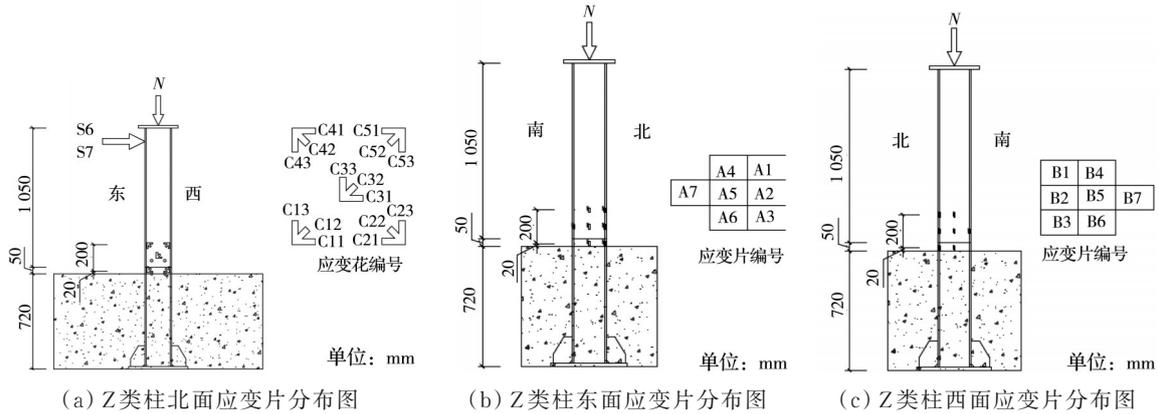


图 6 Z 类柱应变片分布图

Fig. 6 Distribution of strain gauges on Z-type columns

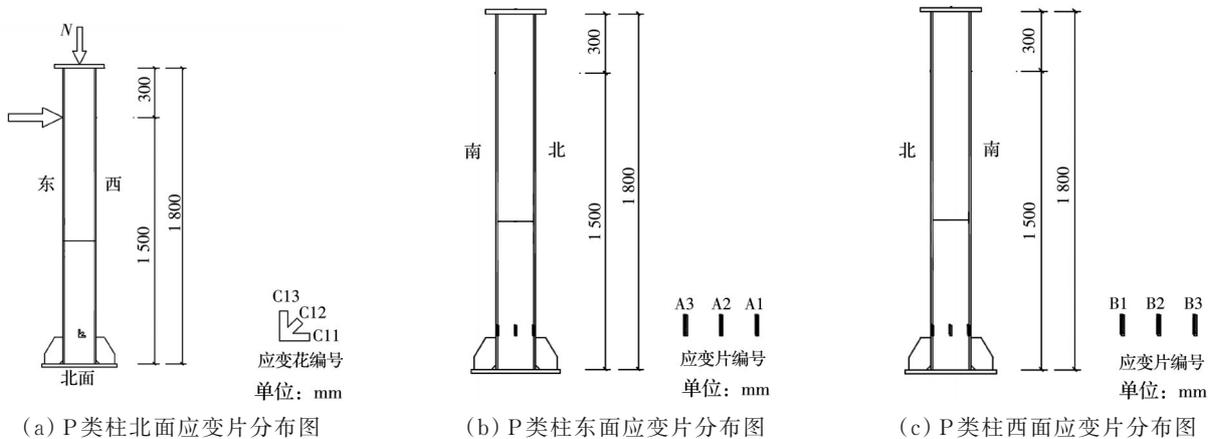


图 7 P 类柱应变片分布图

Fig. 7 Distribution of strain gauges on P-type columns

过屈服应变,构件进入塑性阶段,构件的正向水平荷载均值为 171.8 kN,负向水平荷载均值为 -190.5 kN;加载至 2.5% 时,柱脚 200 mm 内全部屈服,此时正向和负向水平荷载均值分别为 214.5、-220.5 kN。位移角达到 3.0% 时,混凝土和钢管开始发生黏结退化,产生明显的残余变形,柱脚西侧出现轻微鼓曲;位移角为 4.0% 时,滞回曲线开始出现下降段;位移角为 6.0% 时,柱脚钢管外凸加剧,并伴随混凝土被压溃的声响,构件水平承载力下降至其峰值的 85% 以下,试验加载结束。

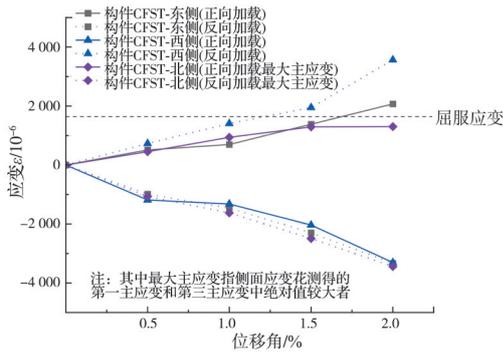
2.1.2 Z 类型构件

构件 Z-B2-812 的应变发展及典型破坏过程如图 9 所示。南侧灌浆口在 1.5% 位移角下开始出现裂纹,此时对应的正反向水平荷载值基本相等,为 195.91 kN,钢管塑性区由角部沿柱高和两侧进一步发展;位移角为 2.5% 时,柱脚 220 mm 范围内的钢管东、西两侧已经全部屈服;位移角为 3.0% 时,构件的承载力退化现象加剧;位移角为 4.0% 时,出现水平荷载下降、柱构件焊缝开裂、构件鼓曲现象加大等构件破坏现象;位移角达到 6.0% 时,柱脚鼓

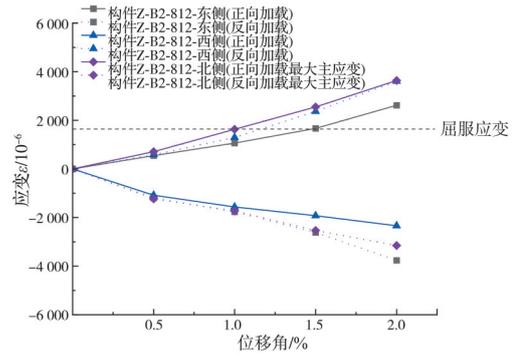
曲范围和深度进一步增大,内部灌浆料被压溃,柱脚西侧严重鼓曲,承载力下降至其峰值的 85% 以下,试验加载结束。

构件 Z-B2-412 的应变发展及典型破坏过程如图 10 所示。在位移角达到 3.0% 以前,构件发展过程与构件 Z-B2-812 无异;在位移角为 3.0% 时,混凝土在反复荷载作用下损伤积累,微裂纹连通,灌浆料开始出现宏观裂缝,柱脚开始出现鼓曲;位移角为 4.0% 时,灌浆口严重变形并开裂;位移角为 6.0% 时,柱底外鼓现象加剧,灌浆口混凝土被压溃;当位移角达到 8.0% 时,柱脚底部整体出现典型的“灯笼状”破坏形态,焊缝发生开裂,试验加载结束。

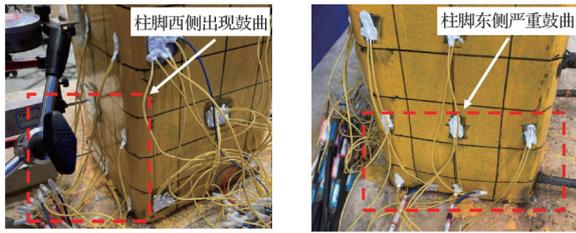
构件 Z-B2-414 的应变发展及典型破坏过程如图 11 所示。在位移角达到 1.5% 时,柱脚开始进入塑性阶段,并有轻微鼓曲出现,这表明柱脚底部混凝土已受压膨胀,不断与外包钢管相互作用,钢管受剪面应力逐渐增加以发挥其约束作用;位移角为 2.0% 时,荷载-位移曲线开始趋向水平发展;位移角为 2.5% 时,距柱底 60 mm 高度处发生屈曲外凸,



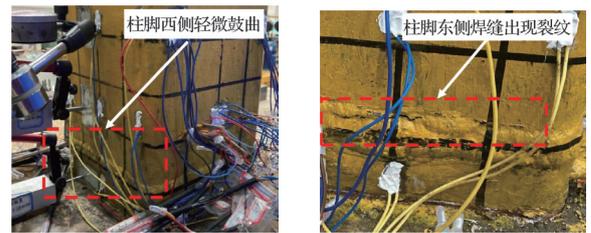
(a) 构件CFST柱脚应变发展



(a) 构件Z-B2-812柱脚应变发展



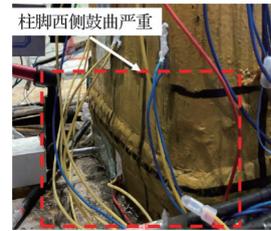
(b)位移角3.0%第1次循环 (c)位移角6.0%第1次循环



(b)位移角2.5%第1次循环 (c)位移角4.0%第2次循环



(d)位移角8.0%第1次循环



(d)位移角6.0%第1次循环

图 8 构件CFST应变发展及典型破坏过程

Fig. 8 The strain development process and featuring failing process of member CFST

图 9 构件Z-B2-812应变发展及典型破坏过程

Fig. 9 The strain development process and featuring failing process of member Z-B2-812

6~150 mm 范围内出现“凹陷”;位移角达到 3.0% 时,柱脚西侧焊缝受拉撕裂,构件荷载骤降,加载结束。

2.1.3 P 类型构件

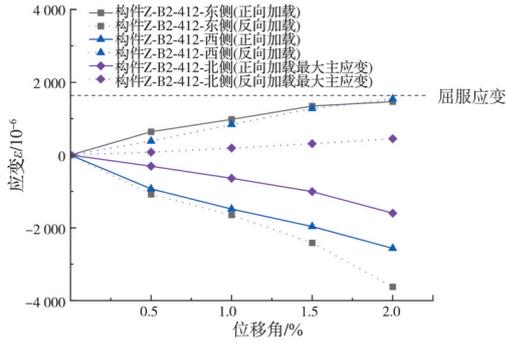
构件 P-500 的应变发展及典型破坏过程如图 12 所示。在位移角达到 1.0% 以前,处于弹性工作状态;位移角为 1.0% 时,柱脚开始进入弹塑性阶段,此时对应的水平荷载为 119.26、-108.82 kN;位移角达到 2.5% 时,横向和竖向应变继续增加,塑性区连通,柱脚已全截面屈服;位移角达到 3.0% 和 4.0% 时,构件发生鼓曲,承载力明显下降,开始步入破坏阶段;位移角进一步增大至 5.0% 时,构件鼓曲加剧,屈服范围不断扩大,但相较于上一级加载承载力下降程度不大;当进一步增荷至 6.0% 时,构件节点区凸出,产生显著“折角”,柱脚鼓曲严重,此时水平荷载为 93.77 kN,至此加载结束。

构件 P-625 的应变发展及典型破坏过程如图 13 所示。在位移角达到 1.5% 之前处于弹性阶段;位移角达到 2.0% 时,构件开始屈服,并最终在位移角

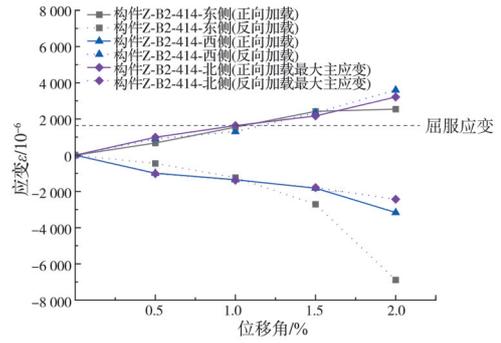
为 2.5% 时全截面屈服;继续加载至 3.0% 和 4.0% 时,构件出现鼓曲,表明开始进入破坏阶段;后续加载 5.0% 和 6.0% 时的破坏形态与构件 P-500 无异。

2.2 滞回曲线

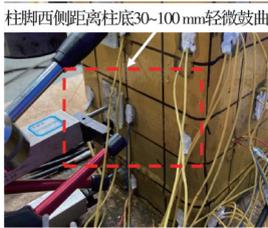
在试验过程中,P 类型构件由于柱顶水平位移较大,而受限顶部水平导轨的跟动范围和跟动效果,P 类型构件在进行 6% 位移角加载时,柱顶竖向作动器发生倾斜并与垂直方向呈现出夹角 α ,如图 14 所示。以构件 P-500 为例,试验时柱顶施加的轴力 N 为 728 kN,构件 P-500 柱顶位移为 90 mm,水平导轨实际跟动距离 L 为 82 mm,竖向作动器导轨至球铰转动中心长度为 1.18 m,计算得轴力对应的偏移角 α 为 0.39°,轴力竖向分量 N_N 为 727.98 kN,约占轴力的 99.997%,故而认为柱顶竖向力维持恒定,轴力水平分量 F_N 为 4.94 kN,此时水平荷载实测值为 100.95 kN,轴力水平分量占实测值的 4.89%,因而需要对水平荷载测量值做出相应的修正。具体修正方式为:将竖向作动器轴力水平分量



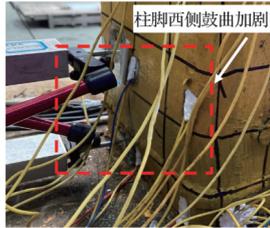
(a) 构件 Z-B2-412 柱脚应变发展



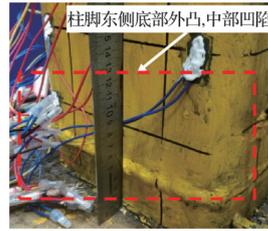
(a) 构件 Z-B2-414 柱脚应变发展



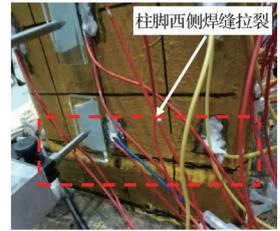
(b) 位移角 2.5% 第 1 次循环



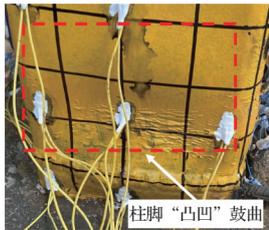
(c) 位移角 4.0% 第 1 次循环



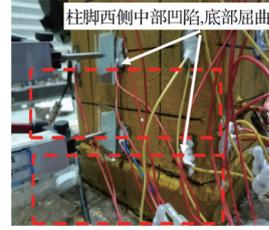
(b) 位移角 2.5% 第 1 次循环



(c) 位移角 3.0% 第 1 次循环



(d) 位移角 8.0% 第 1 次循环



(d) 位移角 3.0% 第 1 次循环

图 10 构件 Z-B2-412 应变发展及典型破坏过程

Fig. 10 The strain development process and featuring failing process of member Z-B2-412

图 11 构件 Z-B2-414 应变发展及典型破坏过程

Fig. 11 The strain development process and featuring failing process of member Z-B2-414

与水平荷载测量值叠加。

在上述分析基础上还需要考虑水平导轨摩擦力的影响。导轨摩擦力需要在全部构件的水平荷载测量值中扣除,具体扣除方式为:将所有水平作动器测点测量值与导轨摩擦力矢量相加,最终结果即为真实的水平荷载。最终呈现荷载结果均为处理后的结果。

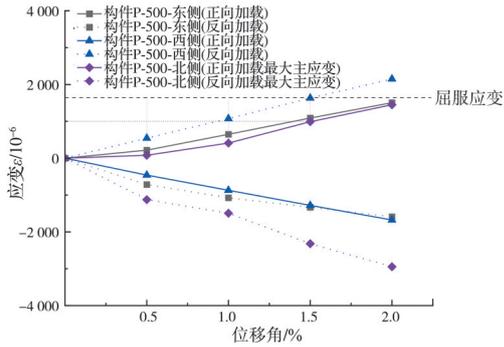
各试验构件的滞回曲线(P-Δ曲线)如图 15 所示。由图 15 可知,加载初期各柱构件均处于弹性工作阶段,卸载后变形恢复,滞回环不明显,随着加载位移增大和位移循环,卸载后开始产生一定的残余变形,滞回环逐渐饱满,加载、卸载刚度逐渐退化。总体上看,试验柱构件的滞回曲线均表现为饱满的梭形,表明柱构件具有良好的耗能能力^[27]。构件 Z-B2-812 在反向位移加载至 40 mm(6% 位移角时)左右时,节点焊缝开裂,构件发生突然破坏而退出工作,但仍可见其具有非常优越的变形能力。不同配筋率的构件 Z-B2-812、Z-B2-412 和 Z-B2-414 在弹性

阶段具有大致相同的承载力^[28]。进入塑性阶段后,构件 Z-B2-812 在每一循环加载时的峰值荷载均高于 Z-B2-412,表明提高配筋率有助于提高构件的承载水平。构件 Z-B2-414 在加载到峰值点以后,由于焊缝质量问题使得试验提前终止,因此,滞回环包络面积较其他构件小,但因内部“波纹管-纵筋”连接的存在防止了脆性破坏的发生。

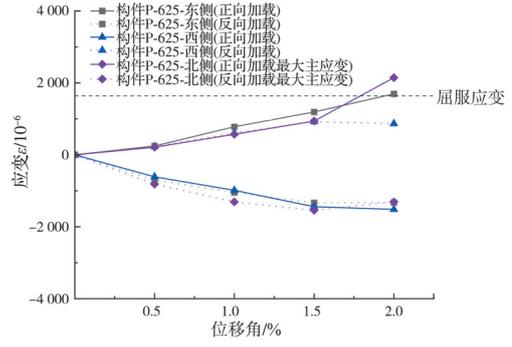
对比 P 类型构件 P-500 和 P-625 的滞回曲线,发现两者变化规律相似,均表现出和钢管混凝土柱相当的良好耗能能力。整体来讲,构件 P-500 的承载力略小于构件 P-625,前者比后者的承载力减少了 4.26%,表明增加柱-柱拼装部位与柱底距离,对提升构件整体承载力有利。

2.3 骨架曲线

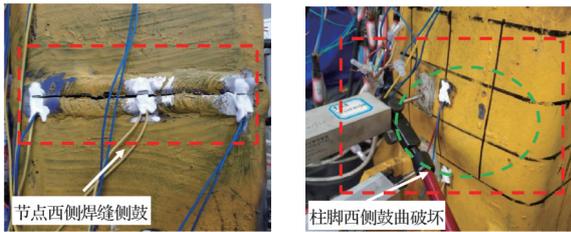
按照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[29]规定方法确定骨架曲线(图 16)和骨架曲线特征点(表 3)。



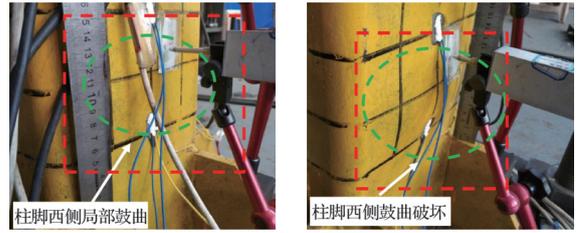
(a) 构件 P-500 柱脚应变发展



(a) 构件 P-625 柱脚应变发展



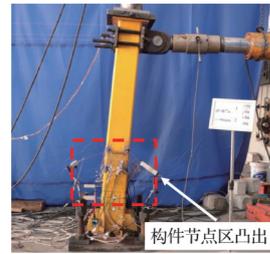
(b)位移角 5.0% 第 2 次循环 (c)位移角 6.0% 第 1 次循环



(b)位移角 5.0% 第 1 次循环 (c)位移角 6.0% 第 1 次循环



(d) 构件整体破坏



(d) 构件整体破坏

图 12 构件 P-500 应变发展及典型破坏过程

Fig. 12 The strain development process and featuring failing process of member P-500

由图 16 可知,柱构件骨架曲线发展规律与滞回曲线一致,经历弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段。Z 类型拼接柱的骨架曲线上升段斜率较整浇柱 CFST 更大,这是由于内置钢筋笼和外钢管对核心混凝土具有约束作用并承担了部分竖向荷载,从而延缓了混凝土开裂,提高了柱构件整体刚度。P 类型构件的骨架曲线上升段斜率则明显缓于构件 CFST,这是由于 P 类型构件柱身较 Z 类型构件长且节点拼装部位设在柱中反弯点附近处,该处弯矩水平低,因此相同加载位移下,其承受荷载水平低。

由构件 Z-B2-812、Z-B2-412 和 Z-B2-414 骨架曲线对比可知,提高配筋率有助于增大水平承载力。四角配筋构件 Z-B2-414 在加载初期表现出较高承载力和刚度,但焊缝质量导致过早结束。

P 类型构件 (P-500) 与 Z 类型构件 (Z-B2-812) 相比,前者骨架曲线明显缓于后者,且变形能力远优于后者,表明长细比对骨架曲线发展影响很大。P 类型构件节点拼装部位设在柱中反弯点,该处弯

图 13 构件 P-625 应变发展及典型破坏过程

Fig. 13 The strain development process and featuring failing process of member P-625

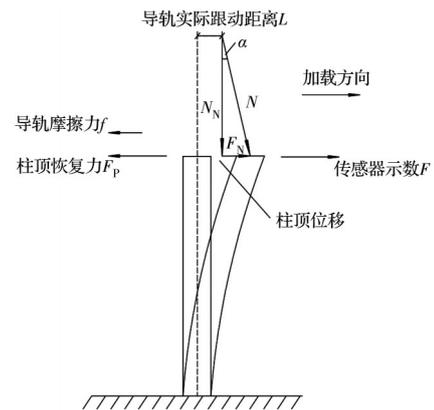


图 14 轴力水平分力示意图

Fig. 14 The schematic of lateral component in axial load

矩水平低,因此构件的节点均能保持完好。该结果也证实了新型柱节点连接部位设计于反弯点处的可行性。由构件 P-500 和 P-625 骨架曲线可知,改变节点拼装部位对拼接柱构件的影响很小。这是因为 P 类型构件的节点拼装部位均位于反弯点附近,且位于塑性铰破坏区域之外,因此在该区域改变拼

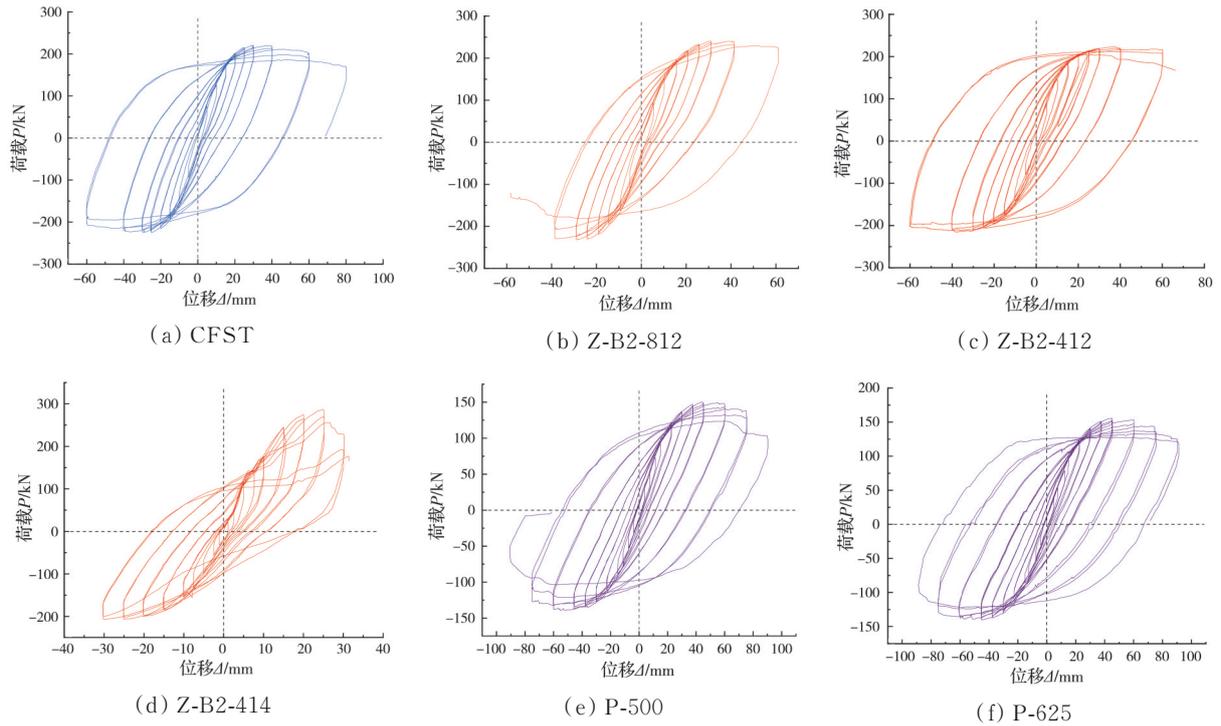


图 15 试验构件滞回曲线

Fig. 15 Hysteretic curves for test members

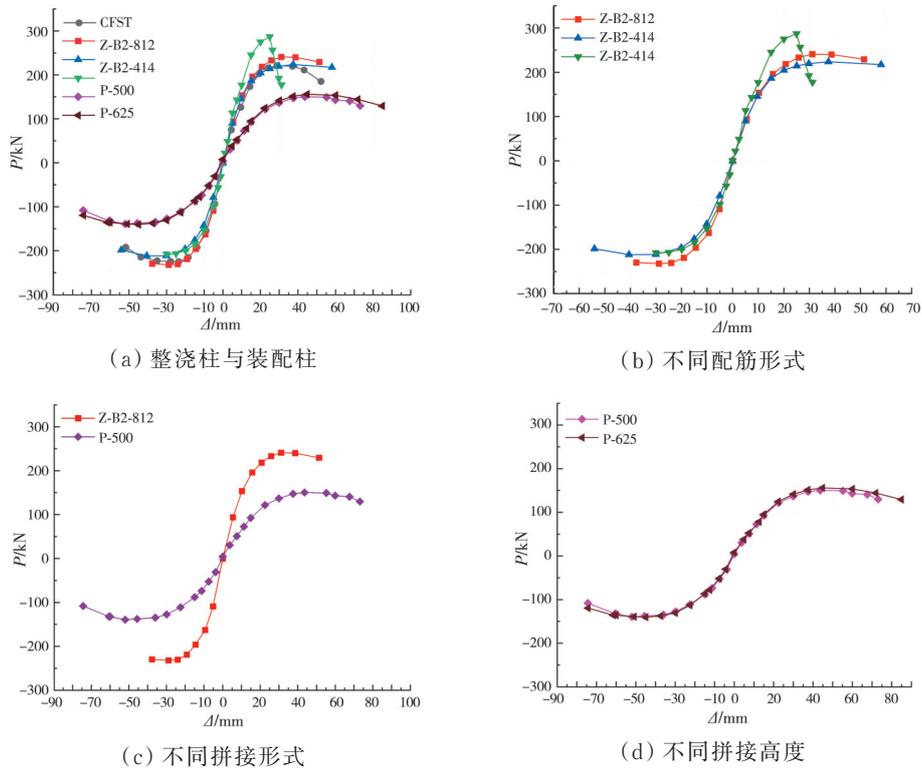


图 16 测试构件骨架曲线

Fig. 16 Skeleton curves for test members

装部位效果有限。

2.4 耗能性能

装配式构件的耗能性能可用累积滞回耗能 E_d 和等效黏滞阻尼系数 ξ_{eq} 来评估^[30], 试验柱构件的耗能性能指标发展规律见图 17。

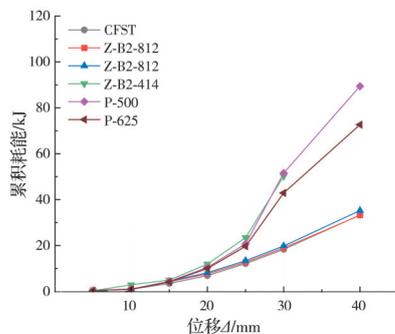
2.4.1 累积滞回耗能

荷载-位移滞回曲线中累积耗能为每个滞回环的能量叠加, 由图 17(a)可知, 在加载到 20 mm 位移前, 所有构件的累积滞回耗能大致相等。在位移达到 20 mm 后, P 类型构件(P-500 和 P-625)的累积滞

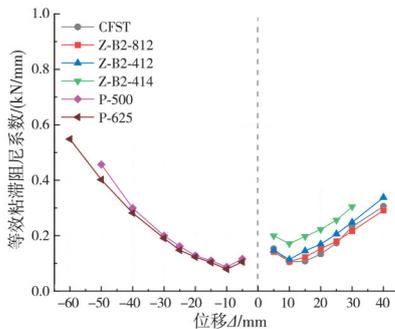
表 3 骨架曲线特征点
Table 3 Featuring points for skeleton curves

试件编号	加载方向	屈服点		峰值荷载点		破坏点		u
		F_y/kN	Δ_y/mm	F_p/kN	Δ_p/mm	F_u/kN	Δ_u/mm	
CFST	正向	194.68	18.12	220.64	28.79	184.95	52.27	2.88
	反向	195.15	14.28	225.09	23.51	192.03	51.61	3.61
Z-B2-812	正向	207.85	18.34	240.90	30.08	229.35	51.38	2.80
	反向	197.57	14.77	232.06	30.06	229.50	37.69	2.55
Z-B2-412	正向	192.62	16.76	223.64	37.48	217.25	58.06	3.46
	反向	182.58	16.65	211.64	40.54	198.49	54.07	3.25
Z-B2-414	正向	257.48	17.16	286.98	24.98	192.22	29.84	1.74
	反向	175.53	13.49	207.40	30.00	207.40	30.00	2.22
P-500	正向	133.12	28.15	150.28	43.66	129.76	73.09	2.60
	反向	123.06	27.88	139.47	51.98	118.55	68.42	2.45
P-625	正向	141.41	30.25	155.92	44.86	132.53	81.97	2.71
	反向	129.52	30.10	140.40	44.89	119.59	74.25	2.47

注: F_y 、 F_p 、 F_u 分别为试件屈服点、峰值点和破坏点荷载; Δ_y 、 Δ_p 、 Δ_u 分别为对应位移; u 为延性系数。



(a) 总滞回耗能



(b) 等效黏滞阻尼系数

图 17 构件耗能性能

Fig. 17 Energy dissipation performance for test members

回耗能随加载位移级别迅速增大,并远高于CFST和Z类型构件。在各级加载位移下,整浇柱构件CFST的累积滞回耗能均为最低水平,表明本文提出的新型拼接柱具有高于普通整浇柱的抗震耗能能力。

以上结论在等效黏滞阻尼系数中也可得到验证。由图17(b)可见,在同一加载位移级别下,等效黏滞阻尼系数的大小关系为CFST<Z-B2-412<Z-B2-812<Z-B2-414<P-625<P-500。该试验结果再

次证实了该新型拼接柱提高了现有整浇柱的抗震耗能能力,特别是将柱-柱节点设于反弯点处的P类型拼接柱构件更具有广泛应用于装配式框架结构的潜力。

2.4.2 能量耗散系数

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[29]规定方法,采用各构件在每级加载位移下的第1次循环时的能量耗散系数 E_d 来定量评价试验构件的能量耗散能力,具体见表4。

由表4可知,各试验柱构件的能量耗散系数基本与加载位移级别呈正相关关系。当加载位移比较小($\theta \leq 1.50\%$)时,构件Z-B2-414的能量耗散系数最高,但由于该构件过快结束试验,因此其能量耗散系数随后快速下降。CFST和Z类型构件Z-B2-812、Z-B2-412的能量耗散系数处于同一水平,相差不大,大小关系为Z-B2-414>Z-B2-812 \approx CFST,表明Z类型拼接柱设计具有不弱于普通整浇柱构件的能量耗散能力。P类型柱构件P-500和P-625的能量耗散系数相近,两者均具有良好的耗能能力^[31]。

2.5 承载力退化

由滞回曲线结果可知,各构件均发生了不同程度的承载力退化现象。采用式(1)计算承载力退化系数 λ 来定量描述构件在各级循环加载中的累积损伤发展,具体结果见表5。

$$\lambda_i = \frac{F_i^j}{F_{i-1}^j} \quad (1)$$

式中: λ_i 为第*i*次循环时的承载力退化系数; F_i^j 为构件第*j*级加载下第*i*次循环的最大荷载值; F_{i-1}^j 为构件第*j*级加载下第*i-1*次循环的最大荷载值。

由表5可知,各构件在加载位移级别较低($\theta <$

表 4 试验构件能量耗散系数

Table 4 Energy dissipation coefficients for test members

试件编号	能量耗散系数 E_d						
	$\theta=0.50\%$	$\theta=1.00\%$	$\theta=1.50\%$	$\theta=2.00\%$	$\theta=2.50\%$	$\theta=3.00\%$	$\theta=4.00\%$
CFST	0.96	0.66	0.68	0.84	1.09	1.46	1.92
Z-B2-812	0.89	0.67	0.77	0.96	1.13	1.36	1.83
Z-B2-412	0.92	0.72	0.91	1.07	1.29	1.56	2.12
Z-B2-414	1.25	1.08	1.24	0.97	0.87	0.71	
P-500	0.73	0.55	0.69	0.80	1.02	1.25	1.88
P-625	0.66	0.50	0.65	0.77	0.93	1.20	1.77

表 5 构件承载力退化系数

Tab 5 Degradation coefficient of bearing capacity for test members

试件编号	λ_i					
	$\theta=1.50\%$	$\theta=2.00\%$	$\theta=2.50\%$	$\theta=3.00\%$	$\theta=4.00\%$	
CFST	0.97	0.98	0.92	0.95	0.97	
Z-B2-812	0.99	0.97	0.99	0.96	0.92	
Z-B2-412	0.99	0.98	0.98	0.97	0.99	
Z-B2-414	0.95	0.97	0.93	0.93		
P-500	0.99	0.99	0.97	0.85	0.84	
P-625	0.96	0.95	0.99	0.98	0.94	

2.50%)时,承载力未发生明显退化。当加载位移角 $\theta>2.50\%$ 时,除了构件P-500在 $\theta\geq 3.00\%$ 时承载力退化为84%水平以上,其余构件的承载力系数均不小于0.92,表明新型拼装柱具有良好的抗承载力退化能力。

2.6 刚度退化

装配式构件刚度是度量装配式构件抵抗变形能力的指标,从侧面反映了装配式构件抵抗地震变形能力。依据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)中提供的方法(见式(2))计算割线刚度 K 来研究试验构件在拟静力试验中的刚度变化,计算结果详见图18。

$$K_j = \frac{|+F_j| + |-F_j|}{|+\Delta y_j| + |-\Delta y_j|} \quad (2)$$

式中: $+F_j$ 和 $-F_j$ 分别为第 j 次循环下正负向水平最大荷载, $+\Delta y_j$ 和 $-\Delta y_j$ 分别为对应的位值。

由图18可知,各试验构件的刚度退化规律相

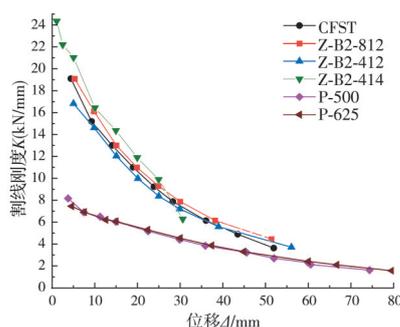


图 18 刚度退化曲线

Fig. 18 Stiffness degradation curves for test members

似,即位移达到30 mm之前,构件刚度迅速退化,随后刚度随加载位移缓慢退化。CFST和Z类型构件的刚度处于同一水平,在同一加载位移级别下,刚度大小关系为 $Z-B2-414>Z-B2-812>Z-B2-412>CFST$,表明Z类型拼接柱设计提高了普通整浇柱构件的抵抗地震变形能力,并远大于P类型柱构件,构件P-500和P-625的刚度大致相等,其中P-625略大于P-500。

2.7 控制参数对拼接柱构件性能的影响

总体而言,采用“波纹管-纵筋”注浆浆锚连接的Z类拼接柱构件相较于整浇柱构件CFST具有更高的极限承载力、抵抗承载力退化和抵抗变形的能力,耗能能力也有所提升,未发生脆性破坏,验证了拼接柱设计方法的合理性。

2.7.1 配筋率的影响

在相同轴压比下,构件Z-B2-414相较于Z-B2-412纵筋配筋率从1.40%增加到1.90%,构件极限承载力提升13.58%,初始刚度也有所提升,说明提升配筋率有利于提升构件极限承载力和初始刚度。但构件Z-B2-414因焊缝质量问题提前开裂,构件塑性性能未能完全发挥,故表现出较低延性。

2.7.2 配筋形式的影响

对比Z类柱构件试验结果可知,四角配筋形式(Z-B2-414)相较于8根纵筋配筋形式(Z-B2-812)构件极限承载力提升了4.53%,对构件承载力改善作用更加明显,初始刚度也更大,其原因在于方钢管混凝土柱的外钢管约束主要作用在内部混凝土四

角和核心,因此,四角配筋形式更符合钢管-混凝土协同作用的受力机理。不同的配筋形式对各构件的延性影响较大,并呈现出构件延性与极限承载力呈负相关的特征。

2.7.3 柱-柱节点拼接位置的影响

对比构件 P-500 和 P-625 可知,节点装配部位从距离底面 500 mm 提升至 625 mm 后,后者的极限承载力和延性比前者分别提高了 4.26% 和 4.23%,说明提升节点装配部位有利于提高装配柱的承载力和延性,该结果也证实了新型柱节点连接部位设计于反弯点处的可行性。不同节点拼接位置对构件耗能性能、承载力退化和刚度影响不明显。

3 拼接柱设计步骤

新型钢管混凝土拼接柱的连接方式为“波纹管-纵筋”注浆浆锚连接。采用波纹管的主要作用有两点:一是替代传统套筒-浆锚连接的钢制构造精密的套筒,大孔径波纹管增加了施工的便捷性;二是波纹管缩短钢筋发挥强度所需的最小锚固长度,有益于节省材料。柱-柱节点钢筋笼的主要作用也可概括为两点:其一是连接上下柱,实现构件拼装;其二是加强钢管混凝土装配柱的拼接部位,避免仅采用后注浆-施焊连接方式引发脆性破坏。该浆锚连接方钢管混凝土拼接柱设计步骤与建议如下:

1) 根据实际工程条件以及相应规范确定钢管混凝土的基本尺寸(钢管截面、壁厚)和材料(钢材、混凝土)。矩形钢管混凝土构件的截面最小边尺寸不宜小于 200 mm,钢管壁厚不宜小于 4 mm,截面高宽比不宜大于 2;混凝土强度等级不宜低于 C30;钢筋建议采用 HRB335 级和 HRB400 级,不宜过高。

2) 基于确定的钢管截面尺寸,以波纹管的构造要求及截面纵筋配筋率限制要求,确定预埋波纹管的数量和连接纵筋根数。波纹管公称内径不宜小于 30 mm,波纹管之间的间距不宜小于 60 mm;矩形截面纵筋不得少于 4 根,且选配钢筋尽可能根数少而粗,直径不宜小于 12 mm,且应沿周边均匀布置。

3) 根据《混凝土结构设计标准(2024 年版)》(GB/T 50010—2010)第 8.3 节受拉钢筋的锚固长度计算公式确定预制上柱段纵筋锚固长度,见图 19 中 PART-I。

4) 基于波纹管和纵筋的孔径比(D/d)确定预制下柱段参与金属波纹管-浆锚连接纵筋的锚固长度,见图 19 中 PART-II,建议选用最低限值即可。在孔径比 $D/d=2\sim 3$ 的限制内,当 $D/d=2$ 时,外伸纵筋锚固长度取值为 $l_a=15d$;当 $D/d=3$ 时,外伸纵筋锚固长度取值为 $l_a=10d$;当 D/d 的值介于 $2\sim 3$

时,外伸纵筋锚固长度 l_a 在 15、10 d 之间线性插入取值^[32]。

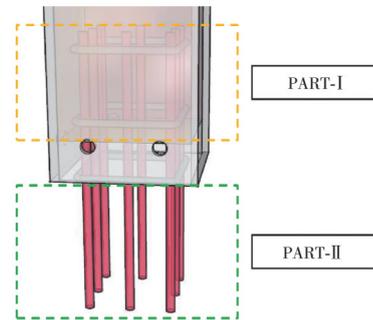


图 19 节点纵筋锚固示意图

Fig. 19 Schematic diagram of anchorage of joint longitudinal reinforcement

5) 根据受拉钢筋锚固长度确定波纹管的长度。

6) 根据混凝土强度,选用强度高于柱身混凝土、流动性能高、微膨胀型水泥基灌浆料,避免薄弱节点区提前发生局部压溃破坏。

7) 计算确定辅助装置耳板、连接板、螺栓,要保证满足施工要求。

8) 分别在柱端口南、北两侧受剪面预制灌浆孔和排气孔,避免弯矩作用较强的受力面应力集中产生破坏。

4 结论

提出了 Z 类型和 P 类型两种新型波纹管浆锚连接方钢管拼接柱,通过开展拟静力试验研究了配筋率、配筋形式和拼接部位对其抗震性能的影响,对拼接柱的具体设计步骤进行了总结,得到以下主要结论:

1) 该新型拼接柱构件和整浇柱构件的拟静力荷载破坏过程与形态基本一致。Z 类型和 P 类型两种拼接柱设计极大降低了柱构件的破坏程度。整浇柱构件破坏时塑性区钢板受压鼓曲、混凝土压溃;Z 类型拼接柱柱脚钢板轻微鼓曲、柱-柱节点灌浆孔内灌浆料压碎和节点焊缝撕裂破坏;P 类型柱构件节点未发生损坏。

2) 新型拼接柱构件的滞回曲线饱满,与整浇柱构件相似,并无捏缩现象,表明该新型拼柱构件的滞回性能至少和整浇柱构件在同一水平。

3) 骨架曲线结果表明 Z 类型拼接柱的水平承载力水平高于整浇柱构件;P 类型柱构件保存了拼接柱的负荷能力,表现出最优的变形能力。

4) 耗能能力、承载力退化和刚度退化结果表明新型拼接柱构件具有高于普通整浇柱构件的抗震性能与抵抗变形能力,验证了将柱-柱节点拼接部位设在柱间反弯点区域的可行性,新型拼接柱设计方

法在提升钢-混凝土组合框架结构的整体抗震性能领域具有理想的应用潜力和前景。

参考文献

- [1] 范幸义,张勇一.装配式建筑[M].重庆:重庆大学出版社,2017.
FAN X Y, ZHANG Y Y. Prefabricated building [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2017. (in Chinese)
- [2] 聂诗东,叶曦雨,王辉,等.低屈强比高强钢箱形柱抗震性能试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(6):29-37.
NIE S D, YE X Y, WANG H, et al. Experimental analysis on seismic behavior of low yield ratio high strength steel box-section column [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 29-37. (in Chinese)
- [3] 薛伟辰,杨新磊,王蕴,等.六层两跨现浇柱预制梁框架抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2008,29(6):25-32.
XUE W C, YANG X L, WANG Y, et al. Experimental study on seismic behavior of six-story two-bay frame with precast beams and cast-in-place columns [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(6): 25-32. (in Chinese)
- [4] 曹万林,武海鹏,周建龙.钢-混凝土组合巨型框架柱抗震研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(12):1-12.
CAO W L, WU H P, ZHOU J L. Review on seismic technology progress of steel-concrete composite mega frame column [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(12): 1-12. (in Chinese)
- [5] 卫星,肖林,温宗意,等.钢混组合结构桥梁2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(Sup1):107-119.
WEI X, XIAO L, WEN Z Y, et al. State-of-the-art review of steel-concrete composite bridges in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup1): 107-119. (in Chinese)
- [6] 程睿,张继东,胥兴,等.方钢管混凝土柱与U形钢组合梁分离式内隔板节点抗震性能试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(6):47-58.
CHENG R, ZHANG J D, XU X, et al. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular column to U-shaped steel-concrete composite beam joints with separated internal diaphragm [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 47-58. (in Chinese)
- [7] 赵立东,曹万林,阚文亮,等.不同构造复式钢管混凝土足尺柱抗震性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(12):35-45.
ZHAO L D, CAO W L, KAN W L, et al. Experimental study on the seismic behavior of large-scale double-skin concrete-filled steel tube columns with different constructions [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(12): 35-45. (in Chinese)
- [8] 胡少伟.钢-混凝土组合结构[M].郑州:黄河水利出版社,2005.
HU S W. Composite structures of steel and concrete[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2005. (in Chinese)
- [9] MIRZA O, UY B. Behaviour of composite beam - column flush end-plate connections subjected to low-probability, high-consequence loading [J]. Engineering Structures, 2011, 33(2): 647-662.
- [10] 赵亮.浆锚链接方钢管混凝土装配柱抗震性能研究[D].重庆:重庆大学,2022:1-2.
ZHAO L. Seismic performance of square concrete-filled steel tubular assembly columns connected by grout anchors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 1-2. (in Chinese)
- [11] UY B, PATEL V, LI D X, et al. Behaviour and design of connections for demountable steel and composite structures [J]. Structures, 2017, 9: 1-12.
- [12] XU L, PAN J L, CAI J M. Seismic performance of precast RC and RC/ECC composite columns with grouted sleeve connections [J]. Engineering Structures, 2019, 188: 104-110.
- [13] 武立伟,李欣洪,苏幼坡,等.装配式圆钢管混凝土柱受压性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(Sup1):207-213.
WU L W, LI X H, SU Y P, et al. Experimental study on compressive behavior of assembled concrete-filled circular steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(Sup1): 207-213. (in Chinese)
- [14] 杜永峰,李虎,韩博,等.钢-混凝土组合节点连接PC柱抗震性能影响参数分析[J].工程力学,2020,37(6):110-121,154.
DU Y F, LI H, HAN B, et al. Analysis of influential factors on the seismic behavior of PC columns connected by steel-concrete composite joints [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(6): 110-121, 154. (in Chinese)
- [15] 魏博.新型预制装配柱-柱连接节点抗震性能及设计方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020:13-16.
WEI B. Study on seismic performance and design method of new prefabricated column-to-column connection joints [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020: 13-16. (in Chinese)
- [16] 余远桃.震损可更换装配式组合柱合理构造和抗震性能试验研究[D].福建泉州:华侨大学,2018.
YU Y T. Experimental study on reasonable detailing and seismic behavior of replaceable composite columns [D]. Quanzhou, Fujian: Huaqiao University, 2018. (in

- Chinese)
- [17] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese)
- [18] 组合结构通用规范: GB 55004—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
General code for composite structures: GB 55004—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [19] 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Metallic materials - tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [20] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for test method of physical and mechanical properties on concrete: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [21] 郭家旭, 胡少伟, 齐浩, 等. 考虑灌浆料龄期的钢筋-金属波纹管浆锚连接锚固性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(2): 108-116.
GUO J X, HU S W, QI H, et al. Experimental study on anchorage property of rebar-metallic bellows slurry anchor connection considering grout age [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(2): 108-116. (in Chinese)
- [22] 郝际平, 黄育琪, 薛强, 等. 一种采用环形连接件的多腔钢管混凝土柱组合柱及拼接方法: CN106013608A [P]. 2016-10-12.
HAO J P, HUANG Y Q, XUE Q, et al. Multi-cavity concrete-filled steel pipe combination column adopting annular connecting piece and splicing method: CN106013608A [P]. 2016-10-12. (in Chinese)
- [23] 冯冬颖, 汪承志. 圆钢管混凝土柱低周反复加载试验研究[J]. 水运工程, 2019(2): 132-137, 176.
FENG D Y, WANG C Z. Experimental study on low cycle cyclic loading of circular steel tube concrete column [J]. Port & Waterway Engineering, 2019(2): 132-137, 176. (in Chinese)
- [24] 卢文胜, 李斌, 曹文清, 等. 结构低周反复加载试验方法浅谈[J]. 结构工程师, 2011, 27(Sup1): 15-21.
LU W S, LI B, CAO W Q, et al. Discussion on low cycle repeated loading test method of structure [J]. Structural Engineers, 2011, 27(Sup1): 15-21. (in Chinese)
- [25] 王成刚. 方钢管再生混凝土柱偏心受压及抗震性能试验与理论研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018: 25-26.
WANG C G. Experimental and analytical study on eccentric compression and seismic behavior of recycled aggregate concrete filled square steel tube long columns [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018: 25-26. (in Chinese)
- [26] 马华, 张泽伟, 李振宝, 等. 承压状态下网状箍筋约束 PC 管桩抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(12): 160-166.
MA H, ZHANG Z W, LI Z B, et al. Seismic performance of prestressed concrete pipe piles with meshed stirrup subjected to axial compression force [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(12): 160-166. (in Chinese)
- [27] 胡红松, 林康, 刘阳, 等. 方钢管混凝土中钢管和混凝土抗压强度研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 161-168.
HU H S, LIN K, LIU Y, et al. Study on compressive strength of steel tube and concrete in square CFT columns [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 161-168. (in Chinese)
- [28] 邓宗才, 贺少锋, 姚军锁. 配筋UHPC柱的抗震性能及影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 51-61.
DENG Z C, HE S F, YAO J S. Analysis of seismic behavior and influencing factors of reinforced UHPC columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(4): 51-61. (in Chinese)
- [29] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [30] 刘杰. 不同节点连接形式的装配式框架结构抗震分析及优化设计[D]. 山东 青岛: 山东科技大学, 2019: 13-14.
LIU J. Assembled frame jointes with different joint connections seismic analysis and optimum design of structures [D]. Qingdao, Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2019: 13-14. (in Chinese)
- [31] 刘亚双, 李振宝, 马华, 等. 新型CFST柱-RC梁节点抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(8): 20-29.
LIU Y S, LI Z B, MA H, et al. Experimental study on seismic performance of a new type of CFST column-RC beam joint [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8): 20-29. (in Chinese)
- [32] 陈俊. 预制混凝土底层柱抗震性能试验研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
CHEN J. Experimental research and analysis on seismic performance of precast concrete bottom column [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)