

预制混凝土柱与柱型钢连接节点抗震性能有限元分析

王齐毓¹, 郁有升^{1,*}, 陈述刚², 安琦¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 中海发展胶东公司, 青岛 266034)

摘要:为解决预制混凝土柱竖向连接施工难度大、施工质量难以保证的问题,设计了新型预制混凝土柱与柱型钢连接节点。为研究该新型连接节点的抗震性能,采用 ABAQUS 有限元软件建立了 1 个现浇柱节点模型与 13 个预制混凝土柱型钢连接节点模型,研究型钢埋置长度、含钢率及翼缘拼接板厚度对新型节点抗震性能的影响。结果表明:预制混凝土柱与柱型钢连接节点模型与现浇柱节点模型受力性能基本一致;型钢埋置长度在 1.2~3.0 倍型钢截面高度时,埋置长度增大,模型的承载力、耗能能力、刚度和延性性能提高,对刚度退化速率无明显影响;含钢率在 3.41%~5.79%时,随着含钢率的增大,模型的整体抗震能力提高;翼缘拼接板厚度的差异对模型抗震性能影响不大。

关键词:装配式连接;柱与柱型钢连接节点;抗震性能;干式连接;有限元分析

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)05-0012-10

Finite element analysis of the seismic performance of precast concrete column-column steel joints

WANG Qiyu¹, YU Yousheng^{1,*}, CHEN Shugang², AN Qi¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Jiaodong China Shipping Develop Co., Ltd., Qingdao 266034, China)

Abstract: In order to solve the problems that the vertical connection of precast concrete columns is difficult to construct and the quality is difficult to guarantee, a new type of precast concrete column-column steel joint is designed. In order to study the seismic performance of the new joint, ABAQUS finite element software was used to establish one model of cast-in-place column joint and thirteen models of precast concrete column steel joint, and the effects of the embedding length of section steel, the steel ratio and the thickness of the flange splice plate on the seismic performance of the new joint were investigated. The results show that the mechanical performance of the precast concrete column steel joint model is basically the same as that of the cast-in-place column joint model. When the embedding length of section steel is 1.2–3.0 times the section height, the bearing capacity, energy dissipation capacity, stiffness and ductility of the model increase with the increase of the embedding length, and the increase of the embedding length has no obvious effect on the stiffness degradation rate. The overall seismic capability of the model increases with the increase of the steel ratio in the

收稿日期: 2023-12-27

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020QE243)

作者简介: 王齐毓(1998—), 女, 山东烟台人。硕士, 研究方向为钢结构。E-mail: wqysud@163.com。

* 通信作者: 郁有升(1976—), 男, 山东临沂人。博士, 教授, 主要从事钢结构等方面的研究。E-mail: yuyousheng@126.com。

range of 3.41%—5.79%. The difference of flange splice plate thickness has little effect on the seismic performance of the model.

Key words: fabricated connection; column-column steel joint; seismic performance; dry connection; finite element analysis

近年来,随着能源、环境的形势愈发紧张,发展绿色建筑和建筑工业化已成为必然趋势,我国也出台了許多文件^[1-2]鼓励发展绿色建筑和建筑工业化。装配式建筑是指在工厂预制结构构件,运输到施工场地,在施工现场进行组装完成的建筑^[3]。装配式建筑具有施工效率高、建筑构件的质量容易得到保证、生产效率高、对环境友好等优点^[4-9]。在装配式结构设计中,节点连接的可靠性对结构整体有直接影响。因此,合理地选择连接节点的形式对结构设计和施工都具有重要意义。

在已有研究中,根据施工方法,将预制装配式节点连接方式分为湿式连接和干式连接^[10],目前研究主要集中在湿式连接形式,而对于干式连接研究较少。吴成龙与王传贻等^[11-12]提出了一种新型全装配式钢骨混凝土组合柱,并对其进行了参数分析,研究了方钢管板厚度、盖板厚度及加劲板厚度对其受力性能的影响规律,研究结果表明,新型全装配式钢骨混凝土组合柱具有良好的变形能力,盖板厚度是影响其受力性能的主要因素。刘学春等^[13]通过试验与有限元研究了法兰连接的方钢管柱在拉-弯-剪组合作用下 4 个不同厚度法兰板的受力性能,结果表明,法兰板厚度对法兰连接柱的刚度及承载力的影响较大。高润东等^[14]设计了 7 个灌浆缺陷预制混凝土柱,与现浇柱和无缺陷预制混凝土柱对比,研究了套筒灌浆缺陷对混凝土柱钢筋屈服的影响。

本文设计了一种新型预制混凝土柱与柱型钢连接节点,利用 ABAQUS 有限元分析软件对该混凝土柱与柱型钢连接节点进行有限元模拟,研究型钢埋置长度、含钢率和翼缘拼接板厚度对抗震性能的影响,为改进预制混凝土柱与柱型钢连接节点的连接形式提供参考。

1 有限元建模

1.1 节点柱几何参数

预制混凝土柱与柱型钢连接节点由钢筋混凝土上柱、下柱、翼缘拼接板、腹板拼接板、H 型钢、抗剪栓钉以及高强螺栓组成,如图 1 所示。柱总高 4000 mm,在距离柱底 1300 mm 处设置节点,连接的 H 型钢截面为 H500×500×16×30,φ19 抗剪栓钉,10.9 级 M27 高强螺栓,翼缘和腹板拼接板的细部尺寸见图 1,翼缘拼接板厚度为 30 mm,腹板拼接板厚度为 10 mm,螺栓预留孔洞直径为 29 mm。

1.2 材料本构

利用有限元软件 ABAQUS 建立预制混凝土柱与柱型钢连接节点的有限元模型。

1) 混凝土本构。混凝土采用混凝土塑性损伤(CDP)模型模拟预制混凝土柱与柱型钢连接节点在低周往复荷载作用下单轴拉伸或压缩的性能;采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]单轴混凝土材料的压缩和拉伸性能曲线,使用损伤因子模拟混凝土损伤。

2) 钢材本构。钢筋、螺栓选用二折线模型^[16];为使各部件充分发挥弹性和弹塑性,H 型钢的本构关系选用简化分析模型的三折线理想应力-应变曲线,即三折线钢材模型^[17]。Q355 钢弹性模量取 2.00×10^5 MPa,泊松比为 0.3,使其在单轴应力下满足 Vo Mises 屈服准则。具体材料参数见表 1。

1.3 单元选取及网格划分

钢筋在结构受力分析中仅考虑其受拉、受压作用,不考虑弯曲作用,因此钢筋骨架采用三维二节点桁架单元(T3D2)模拟。混凝土、H 型钢、钢板以及螺栓均采用六面体 8 节点线性缩减积分格式的三维实体单元(C3D8R)^[18]模拟。螺栓、腹板拼接板和 H 型钢之间的相互作用通过设置接触来实现,钢材与混凝土法向接触为硬接触,切向接触行为采用库伦摩擦模拟,库伦摩擦系数取 0.45。

分析结果的精细程度由网格的大小决定,网格越小结果越精确,为兼顾模拟的精确与效率,节点处采用较为精细的网格划分,其他部分则采用较为稀疏的网格。混凝土柱和钢筋骨架网格大小为 80 mm,拼

接板和 H 型钢为 22 mm, 螺栓为 3 mm。

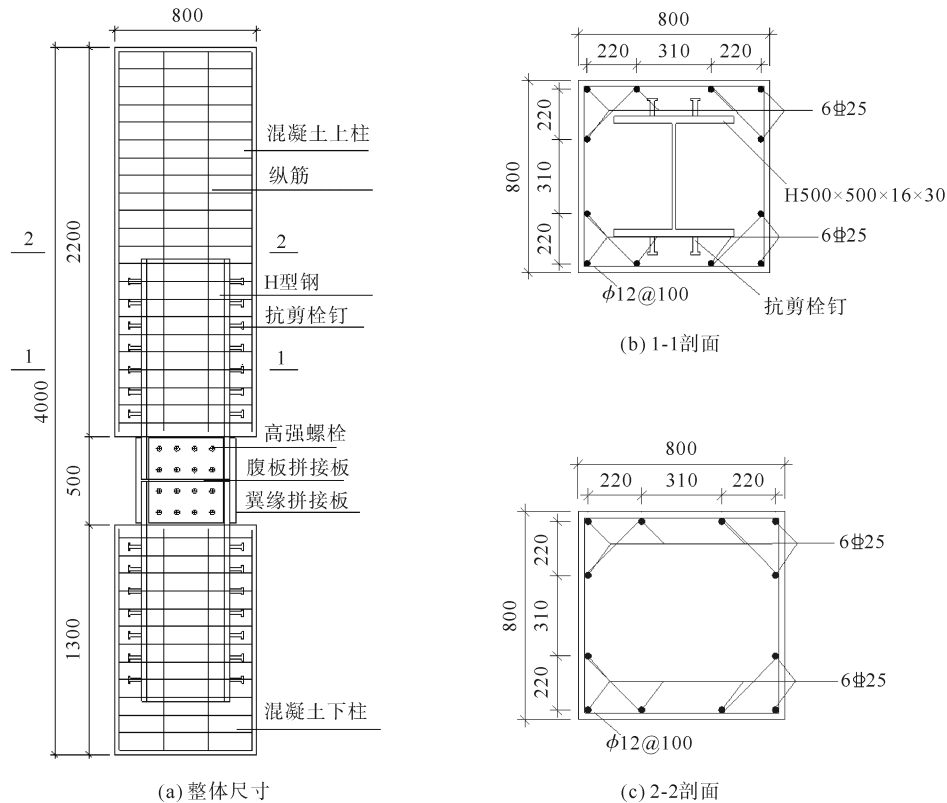


图 1 构件尺寸(单位:mm)

表 1 材料属性

材料名称	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	破坏强度/MPa	屈服应变/ 10^{-2}	极限应变/ 10^{-2}	破坏应变/ 10^{-2}
Q355 钢	370	554	480	0.175	25.00	36
螺栓	980	1100	—	0.480	1.36	—
钢筋	400	600	—	0.200	10.20	—

1.4 加载制度

将柱节点模型底部完全固定,柱顶部截面耦合到其中心点,施加低周往复位移荷载,在柱顶耦合点施加轴向压力。对柱节点进行单调加载,根据荷载位移曲线,采用几何作图法确定柱节点的屈服位移为 15 mm,并以此作为加载依据。

ABAQUS 有限元分析采用位移加载的方式,根据屈服位移的 1/3 进行逐级加载,模型屈服前,每级循环 1 次,到达屈服位移后,每级分析步以屈服位移为增量,每级循环 2 次。加载制度采用等幅和变幅混合控制的加载方式,如图 2 所示。对预制混凝土柱与柱型钢连接节点共设置 5 个分析步,前 3 个分析步,施加螺栓预紧力,后 2 个分析步分别施加轴向力和往复位移荷载。

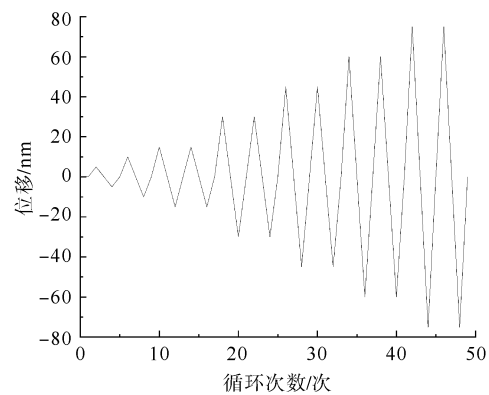


图 2 加载制度

1.5 有限元模型参数设计

为研究预制混凝土柱与柱型钢连接节点在型钢埋置长度、含钢率、翼缘拼接板厚度影响下的抗震性

能,通过 ABAQUS 有限元软件对各部件进行建模。参考《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[19]中柱脚型钢埋置长度不宜小于 2 倍型钢截面高度的要求,设计了 6 个不同型钢埋置长度的构件模型和 5 个不同含钢率的构件模型。依据《钢结构连接节点设计手册》^[20]设计了 4 个不同翼缘拼接板厚度的构件模型。共建立了 1 个现浇钢筋混凝土柱节点模型(XJ)与 13 个不同参数的构件模型,各构件模型的详细参数见表 2。

表 2 参数设计

构件编号	型钢埋置长度/mm	型钢截面尺寸/mm	型钢含钢率%	翼缘拼接板厚/mm	混凝土柱高度/mm
XJ	—	—	—	—	4000
BASE	1000	H500×500×16×30	5.79	30	4000
ZP-1	1000	H500×500×16×30	5.79	28	4000
ZP-2	1000	H500×500×16×30	5.79	32	4000
ZP-3	1000	H500×500×16×30	5.79	35	4000
ZP-4	1200	H500×500×16×30	5.79	30	4000
ZP-5	800	H500×500×16×30	5.79	30	4000
ZP-6	600	H500×500×16×30	5.79	30	4000
ZP-7	1000	H450×450×16×30	5.19	30	4000
ZP-8	1000	H400×400×16×30	4.60	30	4000
ZP-9	1000	H350×350×16×30	4.01	30	4000
ZP-10	1000	H300×300×16×30	3.41	30	4000
ZP-11	1200	H500×500×16×30	5.79	30	4300
ZP-12	1500	H500×500×16×30	5.79	30	4300

2 有限元试验验证

为了验证建模方法的准确性,对文献[21]中螺栓端板连接的装配式钢筋混凝土柱 PC-2 试件进行 ABAQUS 有限元建模验证,有限元计算结果见图 3。原试验与有限元的破坏模式见图 3(a)(b),对比后发现,破坏大部分都发生在上下柱之间,破坏形态基本相同;骨架曲线对比如图 3(c)所示,与原文献中试验的骨架曲线基本吻合,模拟的最大水平推力均小于试验值,原因是实际试验时作动器所施加的水平往复荷载作用于柱顶侧面,作用中心点相比模拟时往复荷载作用于柱顶距离柱-柱的节点处更近,且力矩更小。

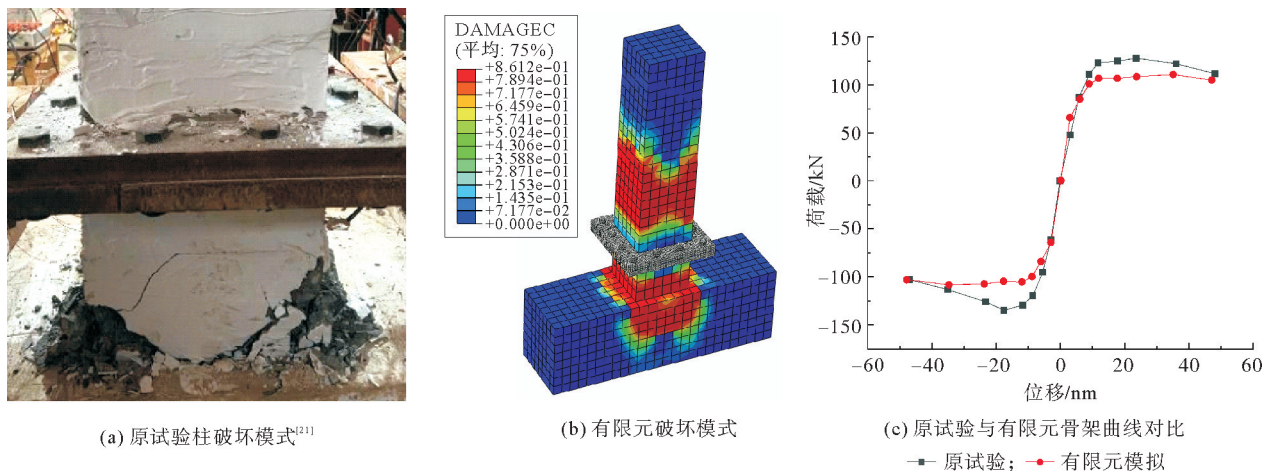


图 3 原试验与有限元计算结果对比

3 有限元参数分析

3.1 现浇混凝土柱与预制柱对比

根据上述建模过程对现浇柱节点与预制混凝土柱与柱型钢连接节点建模,并施加低周往复位移荷载,得到两者的破坏形态、滞回曲线和骨架曲线对比图,如图 4 所示。由图 4(a)—(d)可知:两者破坏形态基本相同,现浇柱节点与预制混凝土柱与柱型钢连接节点的混凝土均在距柱底 800 mm 的范围内发生破坏,钢筋屈服。将 2 个节点的滞回曲线、骨架曲线进行对比,如图 4(e)(f)所示,2 个节点的滞回曲线基本重合,两者的骨架曲线发展趋势相同,现浇柱节点的峰值荷载平均数值为 405.30 kN,预制混凝土柱与柱型钢连接节点的峰值荷载平均数值为 377.46 kN,两者相差 7%。加载末期现浇柱节点相比预制混凝土柱与柱型钢连接节点承载力下降趋势加快,原因是预制混凝土柱与柱型钢连接节点处采用 H 型钢连接,相比传统现浇柱而言混凝土与型钢共同承担轴力,因此现浇柱节点承载力下降更快。总体来说预制混凝土柱与柱型钢连接节点满足“等同现浇”的设计原则。

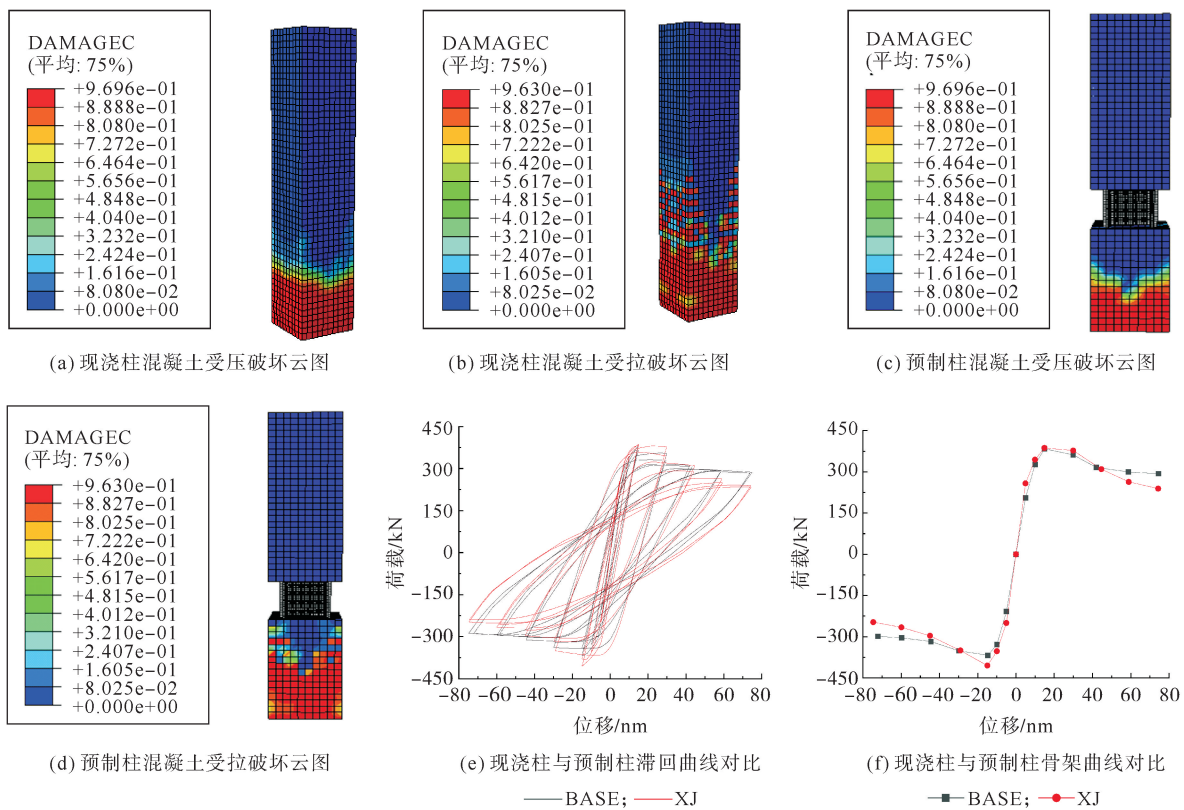


图 4 现浇柱与预制柱模拟结果对比

3.2 破坏现象

预制混凝土柱与柱型钢连接节点在恒定轴力及低周往复位移加载下的破坏形态以模型 BASE 为例,结果如图 5 所示。节点在循环荷载加载到屈服位移时,未发生明显的塑性变形,最大应力出现在节点连接处 H 型钢左侧下方螺栓孔处,此时模型处于弹性阶段。当循环荷载加载到 2 倍屈服位移时,连接节点处应力进一步发展,但仍未达到 H 型钢屈服强度。当循环荷载加载到 3 倍屈服位移时,最大应力为 370.3 MPa,达到型钢屈服强度,最大应力出现在 H 型钢节点连接处中心左侧,无明显的塑性变形且翼缘拼接板和腹板拼接板未屈服。当循环荷载加载到 5 倍屈服位移时,应力更进一步发展,最大应力达到 372.5 MPa,连接节点处未发生破坏,但混凝土下柱被破坏,下柱受力钢筋屈服,表明型钢连接节点能够实现力的可靠传递。

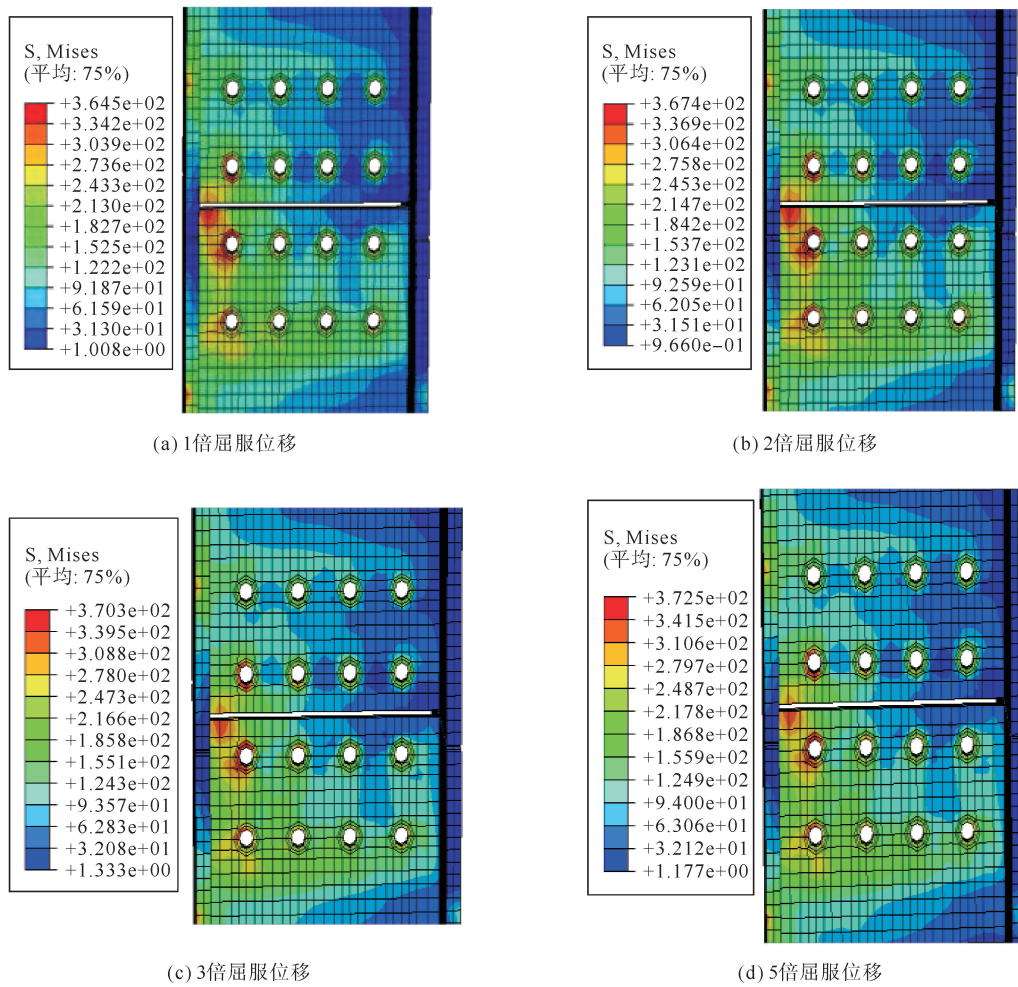


图 5 应力发展云图

3.3 滞回曲线

图 6 为各模型的滞回曲线,由图可知:除模型 ZP-4 和 ZP-12 的滞回曲线为饱满的梭形外,其余节点柱的滞回曲线均呈弓形,所以模型滞回曲线整体比较饱满,反映节点柱的抵抗塑性变形能力比较强,耗能能力较好,且在节点屈服前,滞回曲线的形状较为接近,基本呈线性变化。

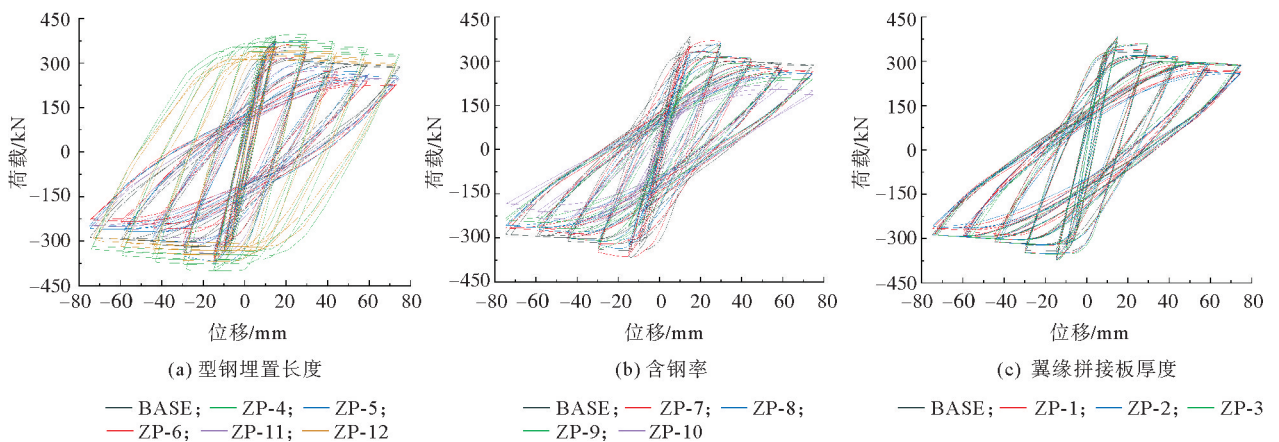


图 6 滞回曲线

对比模型 BASE、ZP-4—ZP-6,对比模型 ZP-11 与 ZP-12,型钢埋置长度越长,滞回曲线越饱满,耗能能力越强。对比模型 BASE、ZP-7—ZP-10,型钢截面尺寸越大,滞回曲线越饱满,表明含钢率越大,其耗能

能力越好。模型 BASE、ZP-1、ZP-2 与 ZP-3 的滞回曲线形状基本相同。

3.4 骨架曲线

骨架曲线能较直观地反映模型在低周往复荷载下的荷载-位移关系,各模型骨架曲线均呈 S 形,表明模型在低周往复位移加载下都经历了弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段 3 个阶段。各模型的骨架曲线见图 7,采用等效能量法^[22]确定骨架曲线的屈服点、峰值荷载点、破坏点的特征点荷载及相应位移延性系数 μ ,取各模型正负加载方向的特征值均值,并列于表 3 中。

对比模型 BASE、ZP-4—ZP-6,对比模型 ZP-11、ZP-12 的骨架曲线(图 7(a))可知,型钢埋置长度越长,其极限承载力就越大,其中模型 ZP-4 比模型 ZP-6 的极限承载力提高了 7%;型钢埋置长度越长,其承载力下降的速率越低,这是由于混凝土柱中型钢埋置长度越长,型钢所分担的轴力增大,模型整体的承载力增大。由图 7(b)可知,含钢率越大的模型,其初始刚度与承载力越大,模型 BASE 的峰值承载力相比模型 ZP-7 提高了 3%,模型 ZP-7 的峰值承载力相比模型 ZP-8 提高了 2%,模型 ZP-8 的极限承载力相比模型 ZP-9 提高了 4%,模型 ZP-9 的峰值承载力相比模型 ZP-10 提高了 37%。模型 BASE、ZP-1、ZP-2 与 ZP-3 的骨架曲线(图 7(c))基本重叠,表现出相近的承载力水平与变形能力,说明翼缘拼接板厚度差异对骨架曲线无显著影响,这是由于模型在加载过程中连接模块处绝大部分的塑性变形被 H 型钢承担所致。

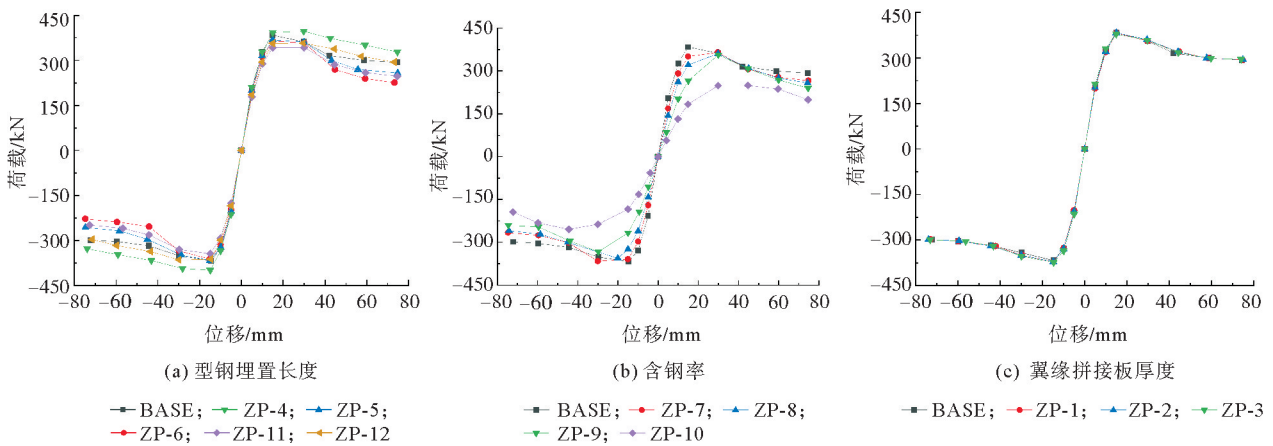


图 7 骨架曲线

表 3 构件特征数据及延性系数

模型编号	Δ_y /mm	P_y /kN	Δ_m /mm	P_m /kN	Δ_u /mm	P_u /kN	μ
BASE	13.07	357.08	14.98	377.46	41.28	330.84	3.17
ZP-1	12.92	354.83	14.94	376.99	45.39	320.45	3.51
ZP-2	12.99	356.83	14.93	377.11	42.05	320.54	3.25
ZP-3	12.61	361.20	14.80	376.27	43.75	319.83	3.47
ZP-4	13.34	369.39	14.91	398.01	66.86	338.30	5.01
ZP-5	13.25	356.84	14.99	376.96	39.62	320.42	2.99
ZP-6	13.35	353.26	14.99	372.17	35.56	316.35	2.66
ZP-7	14.66	349.86	29.85	365.36	43.15	310.56	2.94
ZP-8	16.19	327.62	24.96	358.46	45.19	304.69	2.79
ZP-9	22.14	304.37	29.89	344.39	47.34	292.74	2.15
ZP-10	24.87	222.48	44.57	252.05	67.29	214.24	2.72
ZP-11	13.23	325.02	22.46	343.89	42.07	292.22	3.18
ZP-12	13.74	345.50	29.74	361.19	64.45	307.01	4.70

注: P_y 、 Δ_y 为屈服荷载及其对应的位移; P_m 、 Δ_m 为峰值荷载及其对应的位移; P_u 、 Δ_u 为破坏荷载及其对应的位移,定义水平力下降至峰值荷载的 85% 对应的点为破坏点; μ 为平均位移延性系数。

3.5 延性

采用能量等值法^[22]确定名义屈服荷载对应位移 Δ_y ,水平位移延性系数 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$ 。各模型的位移延性系数见表 3。根据表 3 可知:对比模型 ZP-4、ZP-5、ZP-6 以及模型 BASE 延性系数可知,模型 ZP-4 的延性系数是模型 BASE 的 1.58 倍,模型 BASE 是模型 ZP-5 的 1.06 倍,模型 ZP-5 是模型 ZP-6 的 1.12 倍,对比模型 ZP-11、ZP-12,模型 ZP-12 是模型 ZP-11 的 1.48 倍,表明型钢埋置长度越长,节点的延性系数越大,延性越好;模型 BASE 的延性系数是模型 ZP-7 的 1.08 倍,模型 ZP-7 的延性系数是模型 ZP-8 的 1.05 倍,模型 ZP-8 的延性系数是模型 ZP-9 的 1.30 倍,模型 ZP-9 的延性系数是模型 ZP-10 的 0.79 倍,表明含钢率的降低会导致其延性系数减小,但减小到一定范围会有所反弹;由表 3 可知,不同翼缘拼接板厚度对延性性能影响不大,其延性系数均大于 3,最小值为 3.17,最大值为 3.51,均表现有良好的延性性能。

3.6 耗能

各模型的耗能能力采用每级加载正负方向包围面积的累积值作为耗能指标,各模型在不同位移加载阶段的累积能量耗能系数 E_d 如图 8 所示。根据图 8 可知,加载位移在 0~10 mm 时,模型的累积耗能曲线基本重合,耗能能力均较弱,这是由于节点此时未达到屈服点,模型耗能能力较差。

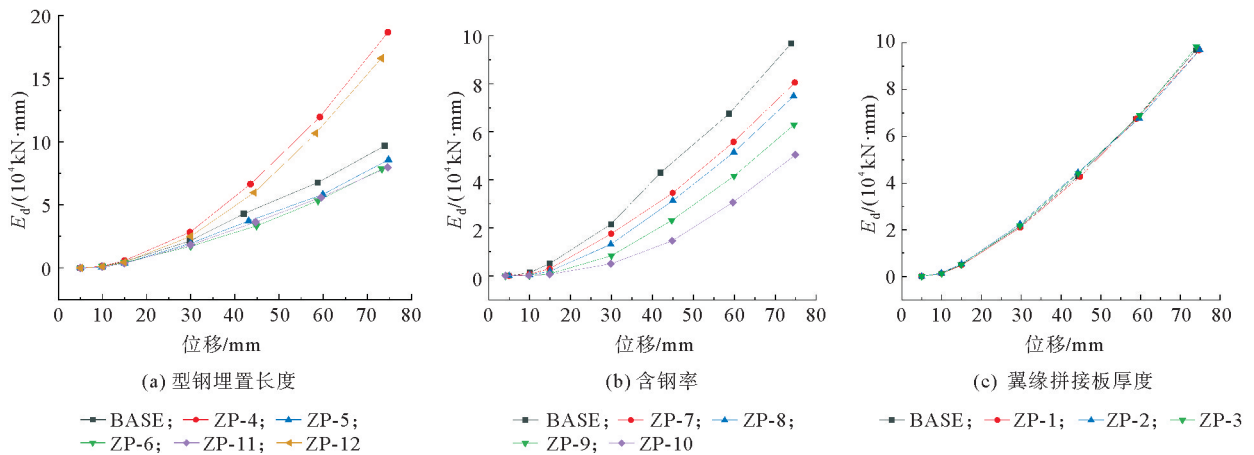


图 8 累积耗能系数

对比模型 BASE、ZP-4、ZP-5 与 ZP-6,对比模型 ZP-11 与 ZP-12 可知,随着埋置长度的增大,模型在相同加载位移时的累积耗能均呈上升趋势,且埋置长度越长,不同位移阶段下的累积耗能越大(图 8(a))。对比模型 BASE、ZP-7—ZP-10 可知,随着柱子含钢率的减小,各模型在同一级加载位移下的累积耗能均减小,这主要是因为截面较小的模型的破坏程度相比截面较大的模型更严重(图 8(b))。对比模型 BASE、ZP-1、ZP-2 与 ZP-3 可知,随着翼缘拼接板厚度的增加,模型的耗能能力略有降低,这是由于随着厚度的增大,拼接板在荷载作用下的变形更为困难,虽然略有降低但影响不大(图 8(c))。

3.7 刚度退化

模型的刚度退化情况采用割线刚度退化来表示,割线刚度的计算公式为

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|}$$

式中: K_i 为模型在第*i*次循环时的加载刚度; F_i 为模型在第*i*次循环时最大荷载值; X_i 为模型在第*i*次循环时最大荷载的相对位移值。

图 9 为各模型刚度退化曲线对比,所有模型刚度均随位移增大而减小,且刚度在加载初期退化较快,加载后期退化减缓并趋于平稳,这表明在不同参数下预制混凝土柱与柱型钢连接节点的抗侧移能力较强。对比模型 BASE、ZP-4—ZP-6,对比模型 ZP-11、ZP-12 可知,型钢埋置长度越长模型的初始刚度越大,但对模型的刚度退化速率无显著影响;对比模型 BASE、ZP-7—ZP-10,随着含钢率的增大,模型的初始刚度也不断增大,且随着模型逐渐屈服,截面尺寸大的模型刚度退化速率加快,这是由于模型失效更严重的原因;

对比模型 BASE、ZP-1—ZP-3,说明翼缘拼接板厚度的增加对模型刚度退化无明显影响。

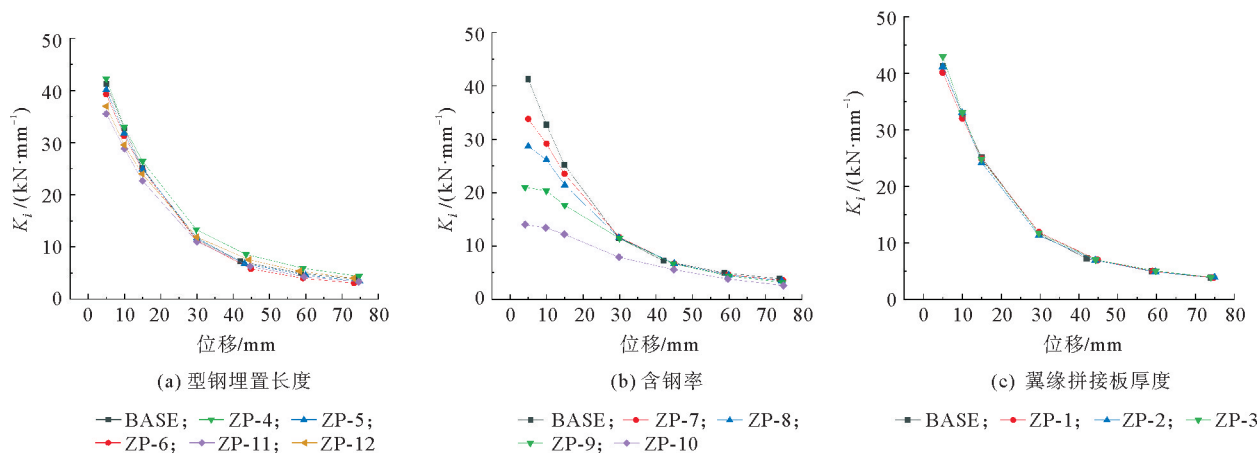


图9 刚度退化

4 结论

通过对新型预制混凝土柱与柱型钢连接节点进行非线性有限元分析,探究型钢埋置长度、含钢率及翼缘拼接板厚度对构件抗震性能的影响,得出以下结论:

1) 设计了预制混凝土柱与柱型钢连接节点,其适用于截面长度大于 800 mm 的预制柱与柱,连接节点能实现节点与构件的连续性,实现力的可靠传递。通过对比分析可知,预制混凝土柱与柱型钢连接节点的受力性能可以做到与现浇柱节点相当。

2) 埋置长度在 1.2~3.0 倍 H 型钢截面高度范围内,增大 H 型钢埋置长度,构件的承载力和耗能能力均有所提高,且型钢埋置长度的增加会使构件的刚度增大,会明显改善节点的延性,但对构件的刚度退化速率无显著影响。

3) 含钢率在 3.41%~5.79%,增大节点柱的含钢率,可以提高构件的承载力,改善节点的延性,显著提高模型的耗能能力,增大柱节点的含钢率还可以减缓刚度退化的速率,增大初始刚度。

4) 在翼缘拼接板厚度为 28~35 mm 时,增大型钢翼缘拼接板厚度对新型预制混凝土柱与柱型钢连接节点的极限承载能力、延性、刚度退化能力无明显影响,但翼缘拼接板厚度增大会导致其耗能能力略有降低。

参考文献(References):

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见[A/OL]. (2016-09-27)[2023-11-21]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5120699.htm.
General Office of the State Council of the People's Republic of China. Guideline of the General Office of the State Council on vigorously developing prefabricated buildings[A/OL]. (2016-09-27)[2023-11-21]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5120699.htm.
- [2] GB/T 51231—2016, 装配式混凝土建筑技术标准[S].
GB/T 51231—2016, Technical standard for assembled buildings with concrete structure[S].
- [3] YANG H, LV Y J, HE Y F, et al. Research and prospect on the present situation of assembled buildings in China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 242(6): 062083.
- [4] BOYD N, KHALFAN M M A, MAQSOOD T. Off-site construction of apartment buildings[J]. Journal of Architectural Engineering, 2013, 19: 51-57.
- [5] BADIR Y F, KADIR M R A, HASHIM A H. Industrialized building systems construction in Malaysia[J]. Journal of Architectural Engineering, 2002, 8: 19-23.
- [6] KASPERZYK C, KIM M K, BRILAKISA I. Automated re-prefabrication system for buildings using robotics[J]. Automation in Construction, 2017, 83: 184-195.

- [7] ANNAN C D, YOUSSEF M A, EL-NAGGAR M H. Effect of directly welded stringer-to-beam connections on the analysis and design of modular steel building floors[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2009, 12: 373-383.
- [8] LACEY A W, CHEN W, HAO H, et al. Structural response of modular buildings: An overview[J]. *Building Engineering*, 2018, 16: 1-26.
- [9] 孙业珍. 我国预制装配式建筑的现状与发展[J]. *工程与建设*, 2022, 36(2): 285-286.
SUN Yezhen. Present situation and development of prefabricated buildings in China[J]. *Engineering and Construction*, 2022, 36(2): 285-286.
- [10] 卫碧洋. 新型装配整体式柱的抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
WEI Biyang. Experimental study on seismic behavior of the new assembly monolithic columns[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [11] 吴成龙, 王传贻, 王其辉, 等. 新型全装配式钢骨混凝土组合柱抗震性能研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52(13): 15-20.
WU Chenglong, WANG Chuanyi, WANG Qihui, et al. Study on seismic performances of a new fully assembled steel-reinforced concrete composite column[J]. *Building Structure*, 2022, 52(13): 15-20.
- [12] 王传贻, 刘继明, 吴成龙, 等. 预制装配式钢骨混凝土组合柱抗震性能[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(4): 310-317.
WANG Chuanyi, LIU Jiming, WU Chenglong, et al. Seismic performances of prefabricated steel-reinforced concrete composite column[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2021, 40(4): 310-317.
- [13] 刘学春, 和心宁, 张爱林, 等. 拉-弯-剪组合作用下法兰连接方钢管柱受力性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(6): 69-80.
LIU Xuechun, HE Xinning, ZHANG Ailin, et al. Bearing performance of bolted-flange connection of square steel tubular column under tension-bend-shearing combination[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(6): 69-80.
- [14] 高润东, 李向民, 肖顺, 等. 套筒灌浆缺陷对预制混凝土柱钢筋屈服特征的影响研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52(13): 21-25.
GAO Rundong, LI Xiangmin, XIAO Shun, et al. Study on influence of sleeve grouting defects on rebar yield characteristics of precast concrete column[J]. *Building Structure*, 2022, 52(13): 21-25.
- [15] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for design of concrete structures[S].
- [16] 方鄂龙, 郁有升. “互”形节点钢框架抗震性能的有限元分析[J]. *结构工程师*, 2023, 39(1): 79-90.
FANG Yunlong, YU Yousheng. Finite element analysis of seismic behavior of steel frame with “HU” joints[J]. *Structural Engineers*, 2023, 39(1): 79-90.
- [17] 徐培蓁, 陈超, 杨雷, 等. 盖板式外加强环圆钢管柱-H形钢梁节点抗震性能的有限元分析[J]. *建筑钢结构进展*, 2021, 23(2): 14-21.
XU Peizhen, CHEN Chao, YANG Lei, et al. Finite element analysis on the seismic behavior of circular steel tubular column to H-shaped steel beam joint with cover-plate externally strengthened ring[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2021, 23(2): 14-21.
- [18] 黄世晖, 舒恺, 朱云祥, 等. 预制柱高强度螺栓法兰连接节点抗震性能试验研究[J]. *建筑科学*, 2023, 39(7): 64-71.
HUANG Shixuan, SHU Kai, ZHU Yunxiang, et al. Experimental study on seismic behavior of precast column joint with high strength bolts and flanges[J]. *Building Science*, 2023, 39(7): 64-71.
- [19] JGJ 138—2016, 组合结构设计规范[S].
JGJ 138—2016, Code for design of composite structure[S].
- [20] 李星荣, 秦斌. 钢结构连接节点设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
LI Xingrong, QIN Bin. Steel structure connection node design manual[M]. Beijing: Chinese Architecture & Building Press, 2019.
- [21] 刘谨宁. 高强螺栓-端板连接装配式钢筋混凝土柱抗震性能研究[D]. 荆州: 长江大学, 2022.
LIU Jinning. Seismic performances of high-strength bolt-end plate connection assembled reinforced concrete column[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2022.
- [22] 赵立东, 曹万林, 刘亦斌, 等. 不同腔体构造圆钢管混凝土短柱抗震性能试验[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(5): 96-104.
ZHAO Lidong, CAO Wanlin, LIU Yibin, et al. Experiment on seismic behavior of circular concrete-filled steel tubular stub columns with different constructions[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(5): 96-104.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)