

基于螺栓连接的装配式钢筋混凝土 梁柱节点抗震性能研究

吴东平, 裴明晓, 李成玉

(武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065)

摘要: 为研究装配式混凝土框架节点的抗震性能, 提出一种基于局部钢套筒与混凝土组合结构形式的梁柱节点, 通过螺栓来实现构件间的可靠连接, 对其进行了拟静力试验研究, 在试验研究的基础上通过ABAQUS软件对结构节点在低周往复加载作用下进行数值分析, 并与试验数据进行对比, 验证有限元分析的合理性。并采用所建模型增加影响参数范围, 分析了相同轴压比下梁纵筋配筋率、端板厚度、加劲肋设置以及螺栓数量对试件的刚度、屈服荷载和极限荷载、耗能等性能的影响。研究结果表明: 有限元模拟结果与试验结果吻合较好; 纵筋配筋率增加时, 节点的承载力、刚度显著提高, 但延性和耗能能力降低; 通过设置加劲肋, 节点的极限承载力、延性、等效黏滞阻尼系数均提高; 合理的选择端板厚度, 可以使梁内钢筋、预埋的端板和混凝土协同工作, 增强节点抗震性能; 减少一定数量的螺栓, 构件仍能保持可靠连接。

关键词: 装配式梁柱节点; 抗震性能; 有限元模拟; 参数分析

中图分类号: TU352.11; TU375

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0178-07

Seismic Performance of Prefabricated Reinforced Concrete Beams and Column Joints Based on Bolted Connection

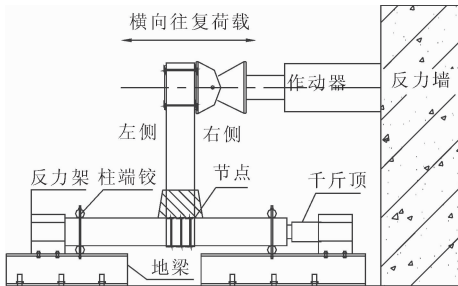
WU Dongping, PEI Mingxiao, LI Chengyu

(School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China)

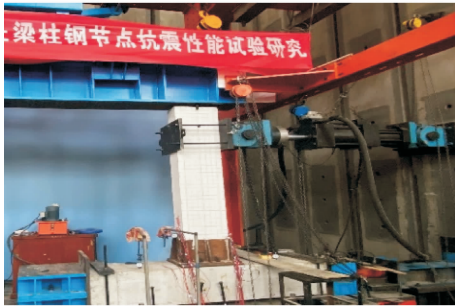
Abstract: In order to analyze the seismic performance of prefabricated concrete frame joints, a beam and column joint based on the combined structure of local steel sleeve and concrete is proposed, and the reliable connection between components is realized by bolts, and the quasi-static test is carried out on the basis of experimental research, and the numerical analysis of structural joints under low cycle reciprocating loading is carried out through ABAQUS software, and compared with the experimental data to verify the rationality of finite element analysis. Then, the established model is used to increase the range of influencing parameters, and the effects of longitudinal reinforcement ratio, end plate thickness, stiffener setting and bolt number on the stiffness, yield load, ultimate load, energy dissipation and other properties of the specimen under the same axial compression ratio are analyzed. The analysis results show that the results of finite element analysis are in good agreement with the experimental results. When the reinforcement ratio of longitudinal reinforcement increases, the bearing capacity and stiffness of the node are significantly increased, but the ductility and energy dissipation capacity are reduced. By setting stiffeners, the ultimate load, ductility and equivalent viscous damping coefficients of the joint are significantly improved. Reasonable selection of end plate thickness can make the steel bar in the beam, the embedded end plate and the concrete work together to enhance the seismic performance of the joint; By reducing a certain number of bolts, the components can still maintain a reliable connection.

Keywords: prefabricated beam and column joints; seismic performance; finite element simulation; parametric analysis

为梁端加载处的水平位移, L 为梁加载点到柱中心点有效长度), $L = 1\ 900\ \text{mm}$ 。加载制度如图 3 所示。当试件承载力下降到极限承载力的 85% 以下^[11]或者构件发生严重破坏, 试验结束。试验规定作动器推为“正”, 拉为“负”。



(a) 加载装置示意



(b) 加载现场

图 2 试验加载装置与现场

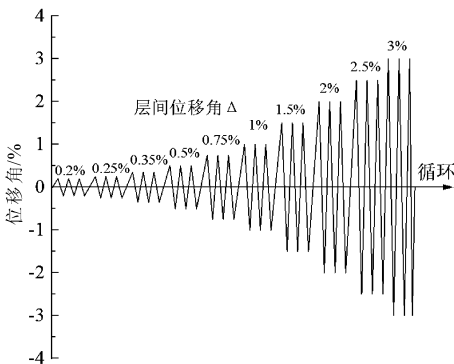


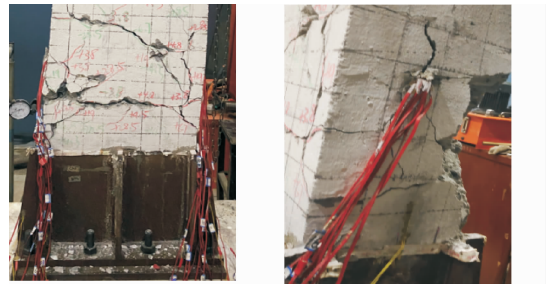
图 3 试验加载制度

2 试验现象及破坏形态

当水平位移加载到 +3.8 mm 的第二次循环过程中, 梁右端靠近钢套外端混凝土梁出现第一条横向受弯直裂缝, 裂缝可闭合。试件屈服时, 梁左右部位出现弯曲斜裂缝, 向钢套筒方向延伸, 继而形成交叉斜裂缝, 节点进入弹塑性阶段。随着位移继续加载, 斜裂缝在梁侧中部发展为一条贯通主裂缝, 裂缝上下延伸与混凝土梁纵筋交汇形成顺筋裂缝, 顺筋

裂缝沿着纵筋快速发展, 主裂缝中部混凝土表面开始加快剥落。加载到 $\pm 57\ \text{mm}$ 的第一次循环加载过程中, 承载力开始下降, 其中在负向加载到 $-56.2\ \text{mm}$ 时, 承载力下降到极限荷载的 85% 以下, 停止试验。

由图 4 各节点的最终破坏形态可以看出, 由于节点核心区有钢套筒作用, 使得梁端塑性铰外移, 这主要是由于在节点拼装时, 预制梁端部钢套筒作用, 对梁柱结合面也有一定的增强作用; 并且节点处端板厚度较大, 刚性更大, 因此, 在节点受力过程中, 端板几乎没有变形, 主要由混凝土梁承担; 整个试验过程中, 柱内钢筋处于弹性状态, 柱没有产生裂缝; 试验结束后, 对试件进行拆除, 观察发现高强螺栓几乎没有变形, 说明高强螺栓满足承载力要求, 保证了梁柱之间的可靠连接。



(a) 试件JD1梁端裂缝分布 (b) 试件JD1梁端右侧混凝土剥落

图 4 试件破坏形态

3 有限元分析

3.1 模型建立

本文采用 ABAQUS 有限元软件对节点进行模拟分析。混凝土和钢构件采用 C3D8R 实体单元, 钢筋采用 T3D2 桁架单元, 有限元分析模型如图 5 所示。

通常钢筋采用双折线弹塑性模型, 但是该模型并不能很好地反应包兴格 (Bauschinger) 效应。因此, 本文采用方自虎等^[12]提出的改进钢筋滞回本构模型, 并调用钢筋材料子程序在 ABAQUS 中模拟滞回曲线的“捏拢”现象。混凝土本构关系曲线及损伤因子的计算参考《混凝土结构设计规范》^[13] (GB 50010—2010), 钢材的本构关系采用双线性随动强化模型, 泊松比取 0.3。钢材的屈服强度和极限强度通过材性试验确定, 取值见表 3。为了保证模拟出节点的受力性能的正确性, 在建立有限元模型时, 构件之间的接触采取“面面接触”, 法向为“硬”接触; 切向为“罚”接触, 摩擦系数为 0.4^[14]; 因为钢板

与混凝土之间不会产生较大的滑移,因此两者之间采用 tie 命令;钢筋采用“embedded”的方式嵌入混凝土中。模型的边界条件与试验相同,固定柱左端 X, Y, Z 方向的平动位移以及柱右端 X, Z 方向的平动位移,为避免平面外失稳,限制梁端的 X 向位移。

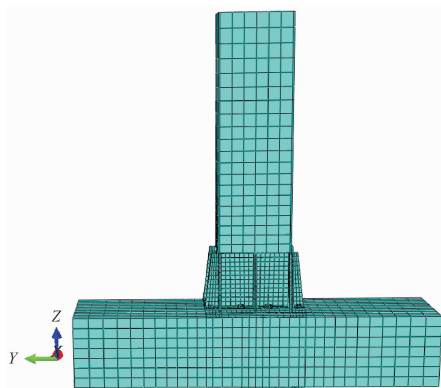


图 5 试件模型

3.2 有限元分析结果与试验对比

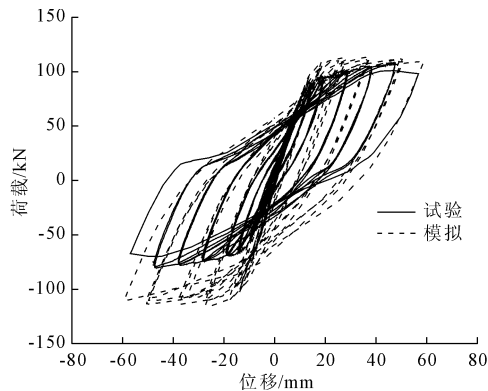
为了验证有限元模型的合理性,将试验结果与有限元进行对比分析。由图 6 的曲线比较和分析可知:有限元模拟条件比较理想化,实际试验条件受到各种因素影响,因此模拟的曲线比较对称。混凝土梁以受压为主,我们可以选取模拟节点的正向加载数据与试验进行比较。由表 4 可知,在正向加载下,滞回曲线和骨架曲线与试验结果基本一致,构件的屈服荷载、极限承载力和屈服位移、极限位移与模拟分析结果的误差在 17% 以内。因此,在允许误差范围内,所提出的有限元建模方法具有一定的可行性,能够反应节点的力学性能;图 7 为有限元模拟与试验破坏形态的对比,从试验现场图中可知,试验中构件在外伸梁端与节点套筒附近混凝土发生破坏,从有限元后处理云图可知,外伸梁端与节点钢套筒附近混凝土受压塑性变形超过 0.95,混凝土已经失效,两者的破坏形态基本吻合。可以进一步模拟不同参数下对节点的力学性能影响。

造成模拟结果与试验结果差异的原因:1) 未考虑在试验过程中产生的微小位移变化;2) 试验构件的钢筋发生黏结滑移,在数值模拟时没有充分考虑;3) 有限元接触的设置,构件初始缺陷等;4) 加载后期混凝土塑性损伤无法恢复,造成试验的骨架曲线不对称。

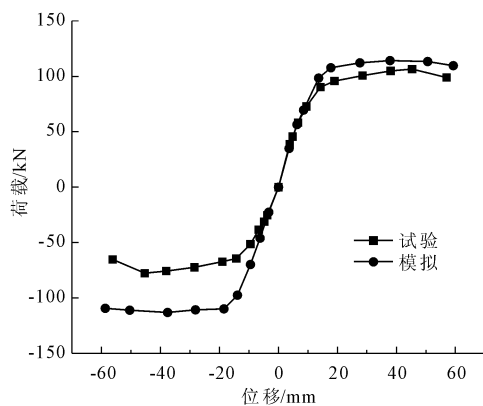
3.3 参数化分析

利用 3.1 节中试件 JD1 建立的有限元模型,进一步研究端板厚度、加劲肋、配筋率及螺栓数量对节

点抗震性能的影响。M1 为 JD1 的基准模型,模型影响参数如表 5 所示。



(a) JD1 滞回曲线对比



(b) JD1 骨架曲线对比

图 6 JD1 曲线对比

表 4 试验与模拟力学性能对比

编号	对比	屈服荷载		峰值荷载	
		P_y/kN	Δ_y/mm	P_{max}/kN	Δ_{max}/mm
JD1	试验	90.41	14.92	106.63	45.32
	模拟	104.58	16.51	114.17	37.83
	误差/%	15.67	10.66	7.07	16.53

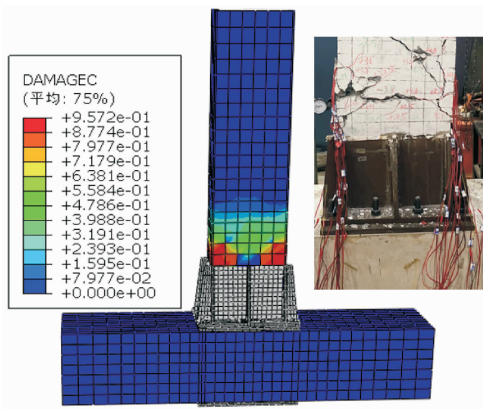


图 7 有限元与试验破坏形态对比

表 5 有限元模型影响主要参数

模型编号	端板厚度/mm	螺栓数量	钢筋直径/mm	加劲肋厚度/mm	轴压比
M1	20	10	18	14	0.4
M2	20	10	20	14	0.4
M3	20	10	22	14	0.4
M4	16	10	18	14	0.4
M5	12	10	18	14	0.4
M6	20	10	18	8	0.4
M7	20	10	18	—	0.4
M8	20	6	18	14	0.4

图 8 为不同参数下节点模型的有限元分析结果。由图可知,有限元分析显示了梁纵筋配筋率、端板厚度、加劲肋厚度及螺栓数量对节点模型滞回性能的影响规律。滞回曲线都呈现出相似的弓形,但都出现了轻微的“捏缩”现象,节点的滞回曲线比较饱满,说明了构件结构都具有良好抗震性能。

由图 9、图 10 及表 6 可知,纵筋配筋率、端板厚度以及加劲肋的设置改变对节点模型抗震性能的影响如下:

(1) 随着梁纵筋配筋率的提高,节点承载能力

显著提高,节点初始刚度增大,梁纵筋配筋率为 1.29% 和 1.56% 时的节点极限承载力较 1.05% 时分别提高 18.00% 和 35.58%,表明提高梁纵筋配筋率可以提高节点的极限承载力。

(2) 根据 20 mm 厚端板的试件 M1 和 16 mm 厚端板的试件 M4 可知:在加载过程中,当两个试件端板的屈服承载力大于梁纵筋的屈服承载力时,梁内纵筋屈服,而端板始终处于弹性状态,梁端塑性铰发生在钢套筒附近,梁端塑性铰外移。端板厚度提高,可以使节点刚度提高,延性系数增大,耗能增大,但对节点极限承载力提高不大。

(3) 根据 16 mm 厚端板的试件 M4 和 12 mm 厚端板的试件 M5 可知:在加载过程中,当端板的屈服承载力略大于梁纵筋的屈服承载力时,梁内纵筋首先屈服,然后端板发生屈服;端板产生了一定的塑性变形。例如 12 mm 厚端板的试件 M5,加载初期模型 M5 的骨架曲线与模型 M4 的相近;但是加载后期试件 M5 的端板和混凝土梁协同受力,再加上梁端钢套筒作用,使混凝土梁局部形成钢混结构,从而使试件承载力提高;连接端板也产生了一定的塑性变形,从而起到了辅助耗能的作用。

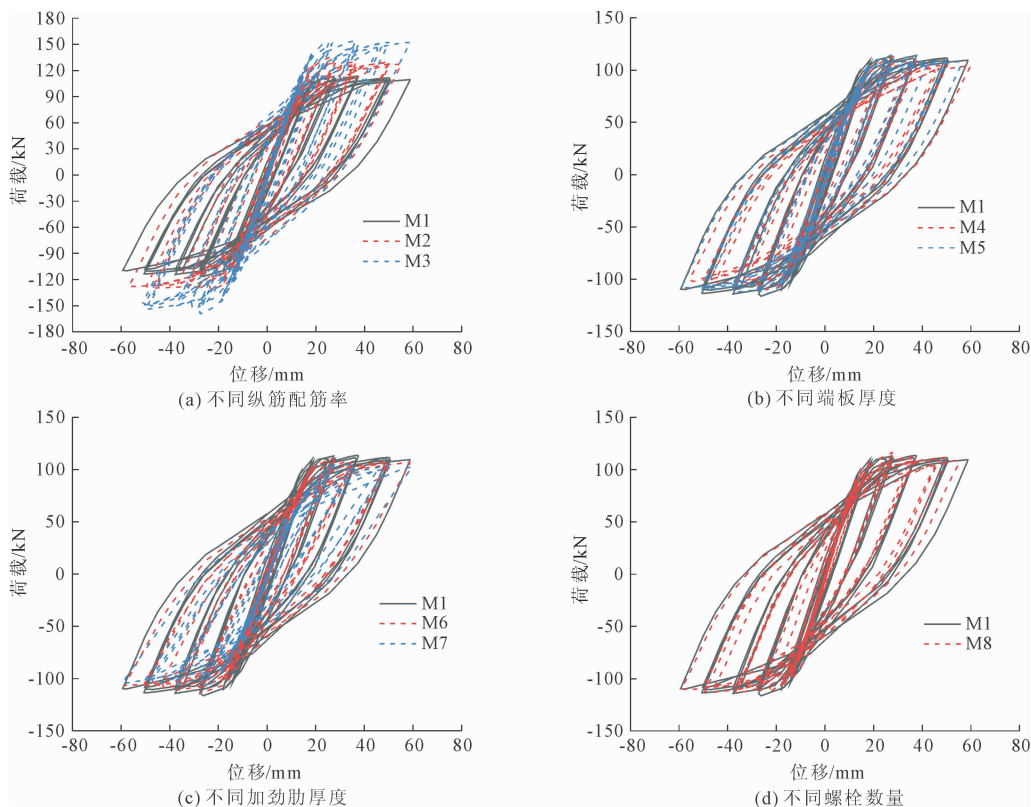


图 8 不同影响参数下滞回曲线对比

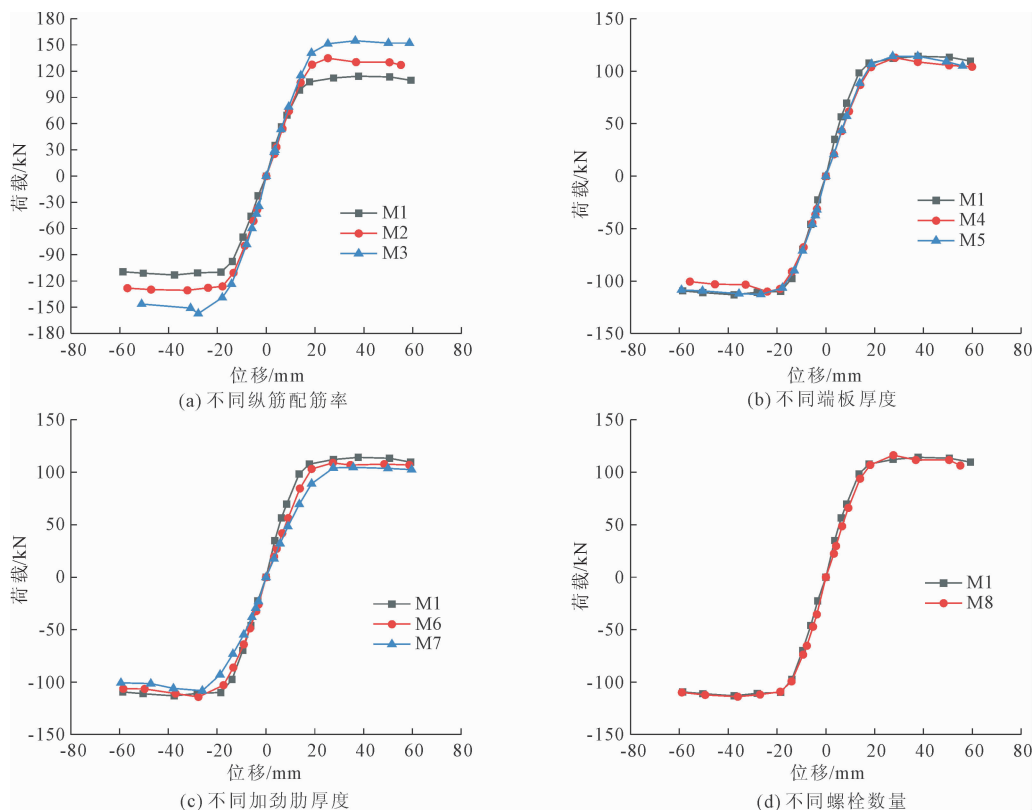


图 9 不同影响参数下骨架曲线对比

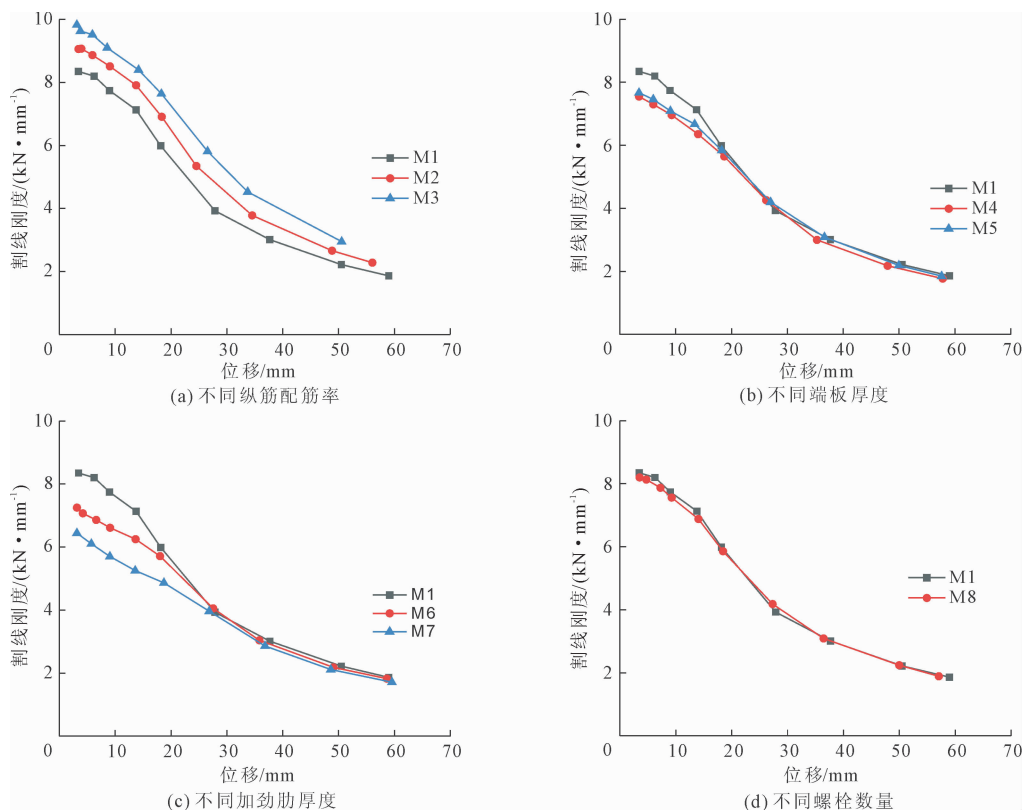


图 10 不同影响参数下刚度退化曲线对比

(4) 14 mm 厚加劲肋的试件 M1 和 8 mm 厚加劲肋的试件 M6 较无加劲肋试件 M7, 初始刚度分别提高了 29.72% 和 11.99%, 极限荷载提高了 8.03% 和 4.08%, 位移延性提高了 36.50% 和 14.07%。表明设置加劲肋可有效抑制端板翘曲变形, 并且加劲肋厚度增加, 可以提高节点刚度和极限承载力。

(5) 根据试件 M1 和试件 M8 可知: 通过去除中部四个螺栓情况下, 模型 M1 和模型 M8 骨架曲线几乎无变化, 说明在满足梁抗弯承载力情况下, 减少一定的螺栓数量, 依然可以保证节点的可靠连接。

(6) 各试件的位移延性系数 μ 均大于 2.63, 高于普通钢筋混凝土结构的位移延性系数限值 (≥ 2)^[15], 所以各试件均能满足抗震设计规范要求, 表现出良好的延性。

(7) 在相同轴压比下, 纵筋配筋率、端板厚度、加劲肋的设置对结构延性影响显著。各试件的等效黏滞阻尼系数 h_e 均大于 0.2, 普通钢筋混凝土结构通常为 0.1^[16] 左右。因此, 本文所设计试件的节点耗能能力均大于普通钢筋混凝土结构, 此类试件能够满足抗震设计的耗能性能要求。

表 6 各试件特征参数

模型 编号	初始 刚度	屈服点		极值点		破坏点	μ	h_e
	/(kN · m ⁻¹)	P_y /kN	Δ_y /mm	P_{max} /kN	Δ_{max} /mm	Δ_u /mm		
M1	6879	104.58	16.51	114.17	37.83	59.33	3.59	0.25
M2	7636	128.10	19.43	134.72	25.33	55.18	2.85	0.22
M3	8364	143.64	20.43	154.79	36.53	58.70	2.88	0.21
M4	6273	105.11	20.01	112.93	28.44	59.90	3.00	0.24
M5	6303	107.65	19.80	114.23	27.39	56.09	2.83	0.25
M6	5939	103.72	19.64	108.92	27.44	58.77	3.00	0.24
M7	5303	95.91	22.71	104.65	35.83	59.72	2.63	0.20
M8	6702	107.99	19.33	116.13	27.68	55.15	2.85	0.25

注: 表中数值均为正向加载时的计算结果; 其中 h_e 为总的等效黏滞阻尼系数。

4 结 论

通过对设计的梁柱节点构件进行拟静力试验和有限元分析可以得出:

(1) 通过有限元模拟结果与已有试验研究结果进行对比, 有限元骨架曲线和试验曲线基本一致, 能够很好反应其力学性能, 验证了数值模型的合理性, 为后续参数分析提供了依据。

(2) 本文设计的装配式混凝土梁柱节点在梁端外包钢套筒, 可以协同混凝土共同受力, 通过螺栓连

接实现构件间的可靠连接, 同时对节点的抗弯能力和变形能力有一定改善作用。试件破坏时塑性较外移, 节点核心区完好, 说明试件符合“强节点弱构件, 强柱弱梁”的设计原则。

(3) 试件的滞回曲线比较饱满, 随着混凝土梁端位移增加, 刚度退化明显。当节点进入屈服后, 位移增长迅速, 但荷载退化不明显, 骨架曲线没有明显下降, 说明此节点具有良好的承载能力和变形能力。

(4) 提高梁纵筋配筋率, 节点承载能力显著提高, 位移延性系数降低, 刚度退化速率增加。通过设置加劲肋, 节点极限荷载、延性、等效黏滞阻尼系数均显著提高。通过改变端板厚度, 当端板的屈服承载力与纵筋屈服承载力相当时, 可以使端板辅助耗能, 增强节点抗震性能。

参考文献:

- [1] 闫丽娟, 胡锦涛, 代本明, 等. 装配式混凝土框架梁柱节点发展研究[J]. 防灾减灾学报, 2022, 38(2): 9-15.
- [2] 胡习兵, 陈 瑞, 曾裕林, 等. 型钢连接装配式混凝土梁柱节点力学性能研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(11): 8-14.
- [3] Wu Chenglong, Liu Jiming, Tan Wenya. Seismic behavior of composite interior joints of prefabricated H-shaped steel reinforced concrete column-steel beam [J]. Structures, 2020, 23: 558-572.
- [4] Li Shen, Xu Taotao, Ding Shihao, et al. Seismic performance of a new assembled beam-column joint with cantilever beam splicing [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 196: 107432.
- [5] 苗小燕. 装配式混凝土框架结构新型梁柱型钢连接节点研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- [6] 石彩华. 钢板螺栓连接装配式混凝土梁柱节点试验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [7] Aninthaneni P K, Dhakal R P. Analytical and numerical investigation of “dry” jointed precast concrete frame sub-assemblies with steel angle and tube connections [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(9): 4961-4985.
- [8] 黄 炜, 胡高兴. 可恢复预制装配式 RC 梁柱节点抗震性能研究[J]. 工程力学, 2021, 39(12): 165-176, 189.
- [9] 高向玲, 徐龙标, 李 杰, 等. 装配式混凝土梁柱节点试验及受力性能分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 47-52.
- [10] Seismic Provisions for Structural Steel Buildings; ANSI/AISC 341 - 10 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2012.

反射。灌浆处理后完整性检测为Ⅱ类的桩基,轻微缺陷反射在相应桩基更深位置处呈现。螺杆桩完整性检测成果均满足设计要求,说明联合灌浆技术对于处理螺杆桩断裂缺陷效果显著,修复质量可靠。

5 结 论

(1) 复合地基螺杆桩完整性缺陷主要为施工荷载剪切作用及地基土浸水后水平膨胀作用产生的水平向裂缝,分布位置浅,裂缝与桩周土体联通性良好,裂缝位置上部桩体、桩周土抗施工扰动能力较弱。

(2) “水泥二次灌浆+环氧灌浆”联合灌浆技术充分利用了水泥浆液屈服强度时变特性和环氧浆液良好可灌性,首次水泥灌浆以进浆量为控制标准,在缺陷部位形成塑性封闭加固区,后期以灌浆压力-桩顶抬动为控制标准,保证整个裂缝面充填饱满,在提高桩基完整性处理效果的同时,可有效减少材料浪费,提高处理工效。

(3) 现场试验及完整性检测成果验证了联合灌浆技术相关材料、参数及施工工艺对于螺杆桩裂缝缺陷处理的有效性,可为类似桩基缺陷处理工程提供参考。

参考文献:

- [1] 李延岭. 螺杆桩施工关键技术[J]. 中国水运, 2022, 22(4): 139-141.
- [2] 周俊磊, 张智慧. 铁路路基螺杆桩质量检测技术[J]. 铁道建筑, 2022, 59(9): 93-95, 105.
- [3] 成孝玉. 基于螺杆桩的高铁梁场软土地基加固技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(1): 139-142.
- [4] 陶美祥. 螺杆桩前截法施工工艺优化[J]. 施工技术, 2017, 46(19): 19-20.
- [5] 张 璐. 高铁螺杆群桩复合地基特征研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [6] 高 强. 通新高速铁路工程螺杆桩的设计与施工工艺[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [7] 李海周. 螺杆灌注桩的受力机理分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.
- [8] 王中文, 陈儒发. 钻孔灌注桩超深度缺陷压注混凝土处理技术与应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2): 197-204.
- [9] 刘宏伟, 伊永成. 桩基质量缺陷处理技术研究与应用[J]. 施工技术, 2012, 41(S1): 38-41.
- [10] 陈亚东, 王安汀, 蔡江东, 等. 螺杆桩细观工作机理离散元数值模拟[J]. 施工技术, 2017, 46(24): 68-70, 75.
- [11] 符 平, 赵卫全, 张金接. 非水反应型材料灌浆堵漏模型研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 35(8): 1509-1516.
- [12] 符 平, 杨晓东. 时变性水泥浆液在粗糙随机裂隙中的扩散规律研究[J]. 铁道建筑技术, 2011(9): 38-42.
- [13] 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范: SL/T 62—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [14] 李 凯, 王丽娟, 邢占清, 等. 风机基础大体积混凝土裂缝加固措施研究[J]. 施工技术, 2018, 47(S4): 270-272.
- [15] 周建华, 赵卫全, 张金接, 等. 复合灌浆技术在风机锚栓基础加固处理中应用研究[C]//2018 水库大坝坝化学灌浆研究与实践学术研讨会. 丹江口, 2018.
- [16] 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [11] 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [12] 方自虎, 甄 翌, 李向鹏. 钢筋混凝土结构的钢筋滞回模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(7): 613-619.
- [13] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [14] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [15] 彭 忠, 戴绍斌, 刘记雄, 等. T形钢管混凝土组合柱-钢筋混凝土梁外伸端板连接节点抗震性能试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(4): 70-77.
- [16] 许成祥, 邱英伟, 简齐安, 等. 方钢管混凝土柱-H型不等高钢梁框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(14): 48-55.

(上接第 184 页)