

基于 BIM 模型的装配式建筑混凝土梁柱墙连接节点稳定性分析

Stability Analysis of Concrete Beam Column Wall Connection Nodes in Prefabricated Building based on BIM Model

陈 军¹, 房朝君¹, 柯凌云¹, 李松波²

(1. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310063;

2. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 装配式混凝土建筑结构复杂, 在设计梁柱墙连接节点稳定性模型时, 若未考虑钢骨和混凝土之间的粘结滑移情况, 会导致模型模拟效果不佳。为此, 基于 BIM 进行装配式建筑混凝土梁柱墙连接节点稳定性分析。拆分装配式建筑构件, 建立 BIM 模型构件库, 计算出各类构件的抗弯承载力和剪力参数; 依据梁柱墙连接节点上螺栓的使用情况, 计算出连接节点承载力等相关参数; 将 BIM 技术与 Revit 软件结合, 输入构件库内的构件参数以及连接节点参数, 获得各构件模型并组成为整体 BIM 模型, 分析装配式建筑混凝土梁柱墙连接节点稳定性。结果表明: 建立的模型效果好, 混凝土梁柱墙连接节点稳定性模拟误差低于 1%, 考虑到了钢骨和混凝土之间的粘结滑移情况, 极限荷载下模拟节点稳定的性能得到了提高, 增加了稳定性。

关键词: 装配式建筑; 混凝土; 连接节点; 稳定性; BIM 模型

中图分类号: TU375 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0087-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.016

CHEN Jun¹, FANG Chaojun¹, KE Lingyun¹, LI Songbo²

(1. The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310063, China;

2. China Construction Seventh Engineering Division Corp., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The structure of prefabricated concrete buildings is complex, and when designing the stability model of beam column wall connection nodes, the bond slip between steel and concrete was not considered, resulting in poor simulation performance of the model. For this purpose, stability analysis of prefabricated concrete beam column wall connection nodes is carried out based on BIM models. Split prefabricated building components, establish a BIM model component library, and calculate the bending capacity and shear parameters of various components. Based on the usage of bolts on the connection nodes of beams, columns, and walls, calculate the relevant parameters such as the bearing capacity of the connection nodes. Combining BIM technology with Revit software, inputting component parameters and connection node parameters from the component library, obtaining various component models and assembling them into an overall BIM model, analyzing the stability of concrete beam column wall connection nodes in prefabricated buildings. The results show that the model established in this article has good performance, with a simulation error of less than 1% for the stability of concrete beam column wall connection nodes. Considering the bond slip between steel and concrete, the stability performance of the simulated nodes under ultimate load has been improved, thereby enhancing stability.

Keywords: prefabricated construction; concrete; connect nodes; stability; BIM model

建筑结构

0 引言

装配式建筑混凝土梁柱墙连接节点是近年来出现的一种新型结构形式,该结构形式具有结构自重轻、构造简单、抗震性能良好等优点。但混凝土梁柱墙连接节点在承受初荷载作用时可能因为混凝土的温度裂缝存在不均匀沉降,对装配式建筑结构安全性会造成较大影响。通过建立混凝土梁柱墙连接节点的稳定性模型,可以在不增加节点整体强度的前提下,计算出相应数量节点出现开裂时节点内力的变化特性,保障施工安全。

在装配式混凝土建筑节点性能研究中,范夕森等^[1]研究了角钢连接的装配式混凝土梁柱节点塑性阶段力学性能,得到了节点的荷载-位移滞回曲线,分析了角钢的弹性阶段力学性能;宓竹锟等^[2]则研究了焊钉群-胶结混合连接的钢-混凝土组合梁稳定性,考察了焊钉群间距对组合梁受力性能的影响,改进了钢-混凝土组合梁抗弯承载力计算过程;胡习兵等^[3]研究了型钢连接装配式混凝土梁柱节点的力学性能,设计了节点总耗能的简化计算式;戎贤等^[4]对钢节点板连接的装配式混凝土梁柱中节点抗震性能进行了分析研究,改善装配式混凝土梁柱节点的破坏形态和滞回性能;郭震等^[5]研究了插接装配式混凝土梁柱节点的抗震性能,说明插接式节点能够具有良好的抗震性能;万馨等^[6]对钢板混凝土组合剪力墙-钢梁节点稳定性进行了有限元分析,得到节点的转动刚度增加,耗能能力显著提高的结论;丁克伟等^[7]对装配式混凝土梁柱节点的抗震性能进行了研究,表明5.6级和8.8级螺栓连接的半刚性梁柱节点均具有良好的抗震性。但在设计其梁柱墙连接节点稳定性模型时,未考虑钢骨和混凝土之间的粘结滑移情况,计算抗弯和抗剪承载力不够准确,导致模型模拟误差较大。

基于此,考虑钢骨和混凝土之间的粘结滑移情况,将混凝土与钢骨之间的粘结力作为计算参数,确定梁的抗弯和抗剪承载力。将BIM技术与Revit软件结合,输入构件库内的构件参数以及连接节点参数,构建连接节点稳定性BIM模型。利用该模型分析装配式建筑混凝土梁柱墙连接节点稳定性。

1 模型设计

1.1 建立装配式建筑BIM模型构件库

由于装配式建筑结构复杂,在建立梁柱墙连接节点模型过程中,应该约束混凝土梁柱墙的尺寸,尽可能使其符合模数化的要求。同时考虑到对于不同的建筑施工阶段,对模型的细度有不同的要求。模型太简单,模拟效果不理想,模型过于静止,可能会造成资源浪费,还会使得建模软件运行障碍,影响工作进度。因此在混凝土梁柱墙连接节点稳定性分析上,将模型精度设置为LOD200。

在建立装配式建筑构件库时,将构件拆分并编码,构件拆分为4个,分别是梁、梁宽、梁高和梁净跨。在构件库设计阶段,以四个构件结构信息作为基础,增加纵筋信息和箍筋信息,根据构件结构信息创建构件的族样板,主要输入的参数信息是前四个信息,将后面两个结构信息作为附加信息,完成构件库的设计。

对梁柱墙连接节点稳定性的分析,需要确定梁的抗弯和抗剪承载力。因此,在构件库中,考虑钢骨和混凝土之间的粘结滑移情况,计算出梁截面的抗弯承载力和混凝土构件剪力,公式^[8-9]如下:

$$K_u = f_u S_a h_0 \left(1 - \frac{s'_a}{h_0} \right) \quad (1)$$

$$F_a = \rho_a f_v q z F_b + \alpha_v (1 - \beta_0) c_0 f_c q h \quad (2)$$

$$F_v = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{L}{h} \right)^2 + 1} - \frac{L}{h} \quad (3)$$

式中: K_u 为梁截面抗弯承载力; F_v 为混凝土构件剪力; f_u 为混凝土与钢骨之间的粘结力; f_c 为混凝土抗压强度; S_a 为受拉钢筋的截面积; F_b 为构件粘结承载力; h 为构件截面高度; h_0 为截面有效高度; s'_a 为梁截面受压区边缘到钢筋中心线的距离; F_a 为梁构件斜截面受剪承载力; f_v 为梁配筋的抗拉强度; c_0 为混凝土强度降低系数; q 为截面宽度; ρ_a 为箍筋面积配箍率; α_v 为构件受剪承载力系数; z 为上、下钢筋合力点之间的距离; L 为净跨度; β_0 为混凝土与箍筋承载力比值。经过上述计算,在装配式建筑构件库建立的基础上,确定梁构件的部分参数。在梁

柱墙连接节点稳定性模型的设计上, 不仅需要梁构件参数, 还需要梁柱墙连接节点的相关参数。

1.2 计算梁柱墙连接节点参数

在梁柱墙连接节点的设计上, 螺栓抗拉承载力能够反映连接节点的稳定性, 其计算公式为:

$$N_t = \frac{\pi d^2 m_1}{4} \quad (4)$$

$$N_v = \min(N_v^a, N_v^b) \quad (5)$$

式中: m_1 为螺栓的承压力; N_t 为螺栓抗拉承载力; N_v 为螺栓的抗剪承载力; d 为螺栓端距离。基于以上公式计算与梁柱相连的螺栓抗剪承载力和对拉螺栓的抗剪承载力, 计算公式^[10]如下:

$$N_{v1}^a = n_v \frac{\pi d^2 m_1}{4} \quad (6)$$

$$N_{v1}^b = d \sum t m_1 \quad (7)$$

式中: n_v 为螺栓个数; t 为螺栓屈服承载力。通过以上公式能够确定梁柱墙连接节点高强螺栓与对拉螺栓的个数和受力情况^[11-12]。在此基础上, 计算节点域。计算公式如下:

$$t_w \geq \frac{h_b + h_c}{90} \quad (8)$$

$$\frac{M_{v1} + M_{v2}}{V_p} \leq \frac{4f_s}{3\eta} \quad (9)$$

式中: t_w 为柱腹板厚度; η 为抗震调整系数; V_p 为节点域体积; f_s 为抗剪强度; h_b 和 h_c 为梁、柱翼缘厚度中间点距离; M_{v1} 和 M_{v2} 为两侧梁的弯矩。将梁柱墙连接节点参数与装配式建筑的构件参数相结合, 创建连接节点的稳定性模型。

1.3 创建 BIM 模型

将 BIM 技术与 Revit 软件相结合创建连接节点稳定性模型。首先确定每个梁柱墙连接节点的螺栓数, 按照连接节点的轴线选择构件, 并提取相应的承载力信息, 完成连接节点上螺栓的布置, 得到一个螺栓排数的列表, 列表中每一个子列表表示一个轴线上的节点螺栓排数。其次, 在得到列表后, 将所有排数信息输入给所有的梁柱, 完成梁的端板设置。

布置螺栓和垫板位置, 完成构件模型的绘制。之后, 将绘制的构件模型按照装配式建筑的实际结构位置安装构件。至此完成混凝土梁柱墙连接节点

的自动建模。

2 试验研究

2.1 试验准备

以某地区的建筑工程为例, 利用 BIM 模型对该装配式建筑梁柱墙连接节点进行分析。利用 BIM 模型构建试验建筑框架, 如图 1 所示。

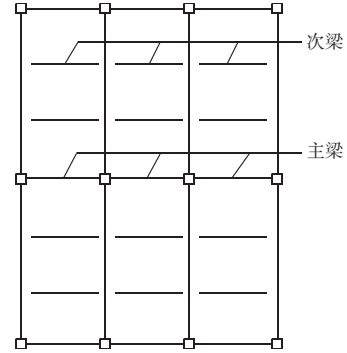


图 1 试验建筑框架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental building framework

基于上述建筑结构, 确定建筑的梁柱墙参数及节点材料, 采用不同参数的三种主梁试件作为试验对象。具体内容见表 1。

表 1 梁柱墙参数及节点材料

| Table 1 Parameters and node materials of beam column wall | | | |
|---|---------|---------|-----------|
| 试件 | 配箍率 | 轴力/N | 混凝土强度/MPa |
| X1 | 0.016 9 | 253 421 | 35.031 |
| X2 | 0.011 3 | 253 421 | 32.412 |
| X3 | 0.007 2 | 203 962 | 30.629 |

在试验中, 对三种试验试件施加荷载, 采用 3ds max 模型、Maya 模型、本文所提模型 3 个不同模型设计方法进行模拟和对比分析。为保证试验的公平公正, 试验试件的梁、柱尺寸一致, 加载荷载主要是柱顶位移荷载。

在加载完成后, 利用计算机软件输出实际梁柱墙连接节点柱端剪力的变化曲线与模拟的变化曲线, 统计出各个模型设计方法的模拟误差, 对比分析方法性能。

2.2 连接节点弯曲模量模拟试验结果与分析

试件抗弯曲能力主要体现为弯曲模量。在施加荷载的情况下, 如果试件具有较大的弯曲模量, 即使承受较大的弯曲应力, 也不会出现弯曲破坏, 表现出更好的抗弯性能。

选择表 1 中配箍率、轴力、混凝土强度最低的试

建筑结构

件 X3 作为模拟试验对象, 基于弯曲模量指标利用三种模型进行弯曲模拟试验, 测试连接节点的抗弯能力。弯曲模拟试验结果如图 2 所示。

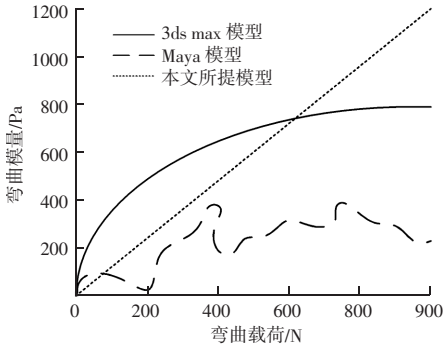


图 2 弯曲模拟试验结果

Fig. 2 Results of the bending simulation tests

在弯曲荷载持续施加的情况下, 采用 3ds max 模型得到的弯曲模量最大值仅为 800 Pa, 虽然在弯曲荷载为 200 N 前, 弯曲模量较大, 但随着弯曲荷载增强, 弯曲模量增长缓慢; 利用 Maya 模型得到的弯曲模量变化没有规律, 稳定性较差; 利用本文所提模型得到的弯曲模量最大值为 1 200 Pa, 且与弯曲荷载呈明显且稳定的正相关分布。试验结果显示利用本文所提模型模拟设计的梁柱试件弹性模量较大, 抗弯曲能力强, 具有良好的稳定性。

2.3 模拟连接节点柱端剪力试验结果与分析

对梁柱墙连接节点施加荷载, 加载程序如图 3 所示。在加载完成后, 采用不同的模型设计方法进行模拟, 结果如图 4 所示。

梁柱墙连接节点在荷载作用下产生了明显的捏缩效应。本文所提模型与另外两组模型相比, 模拟结果与实际情况的差距较小, 位移量基本一致。综上所述, 本文的梁柱墙连接节点稳定性模型对荷载作用下的连接节点模拟效果更好。

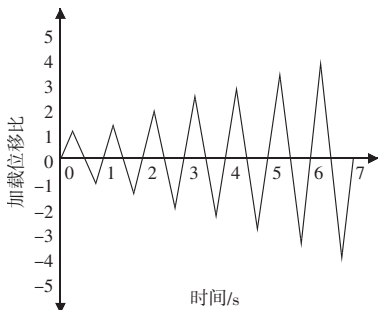
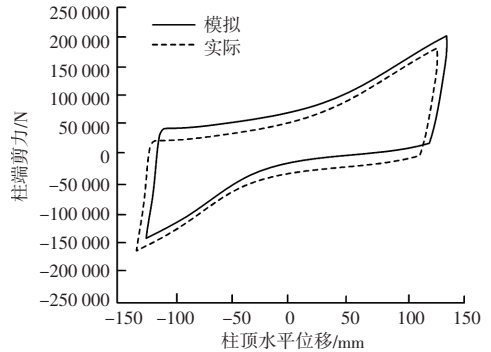
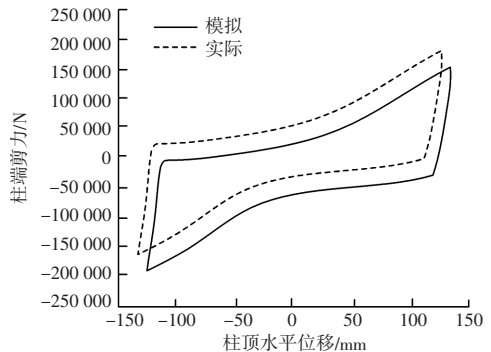


图 3 试件加载程序

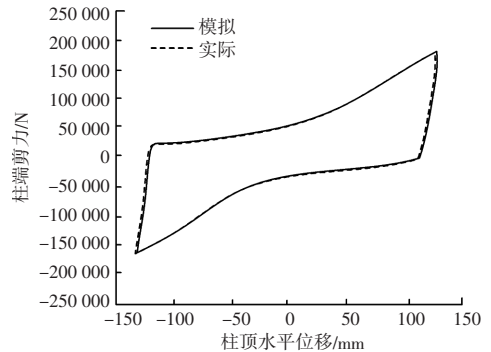
Fig. 3 Test piece loading program



(a) 3ds max 模型



(b) Maya 模型



(c) 本文所提模型

图 4 梁柱墙连接节点荷载模拟试验结果
Fig. 4 Load simulation test results of beam column wall connection nodes

2.4 节点极限荷载试验结果与分析

采用不同的模型设计方法模拟连接节点的极限荷载情况, 将模拟值与实际荷载值对比, 计算其误差, 测试各个模型的实际水平。试验结果见表 2。

无论是正向还是反向加载, 与其他两种模型相比, 本文所提模型对各个试件的模拟误差均较小, 能够准确模拟不同方向极限荷载。

综上所述, 提出的 BIM 模型的模拟误差小, 效果好, 整体应用水平优于其他常规的模型。

表 2 连接节点极限荷载模拟误差试验结果

Table 2 Experimental results of simulation error for ultimate load of connection nodes

| 试件 | 加载方向 | 误差/% | | |
|----|------|------------|---------|--------|
| | | 3ds max 模型 | Maya 模型 | 本文所提模型 |
| X1 | 正向 | 4.74 | 6.45 | 1.01 |
| | 反向 | 5.55 | 3.69 | 1.19 |
| X2 | 正向 | 5.92 | 6.65 | 0.74 |
| | 反向 | 6.39 | 3.46 | 0.74 |
| X3 | 正向 | 5.32 | 6.84 | 1.05 |
| | 反向 | 5.46 | 2.35 | 0.92 |

3 结束语

通过拆分构件建立 BIM 模型构件库、计算各类构件参数以及依据螺栓使用情况计算连接节点参数等，得到以下结论：

(1) 将混凝土与钢骨之间的粘结力作为计算参数，确定梁的抗弯和抗剪承载力，计算出将钢骨和混凝土之间的粘结滑移情况的结果。

(2) 依据梁柱墙连接节点上螺栓的使用情况，计算出连接节点承载力等相关参数，高效地获得各构件模型并建立了整体 BIM 模型。从而准确地分析装配式建筑混凝土梁柱墙连接节点稳定性，这种结合方式为装配式建筑结构稳定性分析提供了一种新的、有效的技术手段，进一步确保装配式建筑在使用过程中能够承受预期的荷载，减少因连接节点不稳定而导致的结构安全隐患。

参 考 文 献

[1] 范夕森, 张子健, 刘琪, 等. 角钢连接的装配式混凝土梁柱节

点塑性阶段力学性能研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2022, 48 (4): 1-9.

- [2] 宓竹赜, 赵伟, 王万祯. 焊钉群-胶结混合连接的钢-混凝土组合梁试验 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (7): 79-85.
- [3] 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.
- [4] 戎贤, 杨洪渭, 张健新, 等. 钢节点板连接的装配式混凝土梁柱中节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2020, 36 (1): 77-82.
- [5] 郭震, 贾笑岩, 丁嘉慧, 等. 插接装配式混凝土梁柱节点抗震性能 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50 (2): 256-264.
- [6] 万馨, 高铃钰, 陈明, 等. 基于装配式交叉 U 型连接件的钢板混凝土组合剪力墙-钢梁节点性能有限元分析 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (1): 113-122, 132.
- [7] 丁克伟, 陈伟. 装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验和恢复力模型研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2021, 37 (1): 51-60.
- [8] 郭圣祈, 汪梦甫. 等同现浇的装配式钢筋混凝土剪力墙抗弯承载力可靠度分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42 (6): 202-212.
- [9] 丁克伟, 张星辰, 刘运林, 等. 负弯矩作用下含角钢连接件的叠合板组合梁力学性能研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2022, 45 (12): 1643-1648.
- [10] 王旭辰. 新型装配式螺栓连接节点抗震性能研究 [J]. 中国水运: 下半月, 2023 (2): 57-60.
- [11] 刘濠, 洪洁茹, 章梦霞, 等. 结合 BIM 与二维码技术的装配式建筑信息管理方法研究 [J]. 施工技术, 2020, 49 (2): 110-114, 118.
- [12] 蒋琳. 基于 BIM 技术的装配式建筑建模方法探析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42 (1): 171-172.