

装配整体式钢筋混凝土框架梁柱中节点 抗震性能有限元分析

高修建¹, 种昕达², 李楠³, 李东桥⁴

1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142

2. 天津大学, 天津 300072

3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142

4. 天津大学, 天津 300072

摘 要 : 为分析装配整体式钢筋混凝土梁柱中节点的抗震性能, 开展了考虑不同节点装配形式的钢筋混凝土梁柱中节点的有限元分析。首先采用 Abaqus 有限元分析软件建立了 2 种不同装配形式的梁柱中节点模型, 随后对比了节点形式对塑性损伤、滞回性能和耗能能力的影响。结果表明: 装配整体式梁柱中节点符合“强柱弱梁”思想, 结构设计合理。型钢中节点的极限承载和极限变形明显优于原型中节点, 节点内置型钢明显提高了节点的抗震性能。

关 键 词 : 装配整体式结构; 钢筋混凝土梁柱中节点; 有限元分析; 抗震性能

Finite Element Analysis of Seismic Performance of Middle Beam-Column Joints in Assembled Monolithic Reinforced Concrete Frame

Gao Xiujian¹, Zhong Xinda², Li Nan³, Li Dongqiao⁴

1. China Railway Design Group Corporation Limited, Tianjin 300142

2. Tianjin University, Tianjin 300072

3. China Railway Design Group Corporation Limited, Tianjin 300142

4. Tianjin University, Tianjin 300072

Abstract : In order to analyze the seismic performance of the middle beam-column joints of assembled monolithic reinforced concrete frame, a finite element analysis was conducted on the reinforced concrete middle beam-column joints, considering different joint assembly forms. Firstly, the Abaqus FEA software was employed to establish two types of middle beam-column joints with different assembly forms. Subsequently, the effects of joint forms on plastic damage, hysteretic behavior, and energy dissipation capacity were compared. The results show that the middle beam-column joints conform to the concept of strong columns and weak beams, indicating a reasonable structural design. The ultimate bearing capacity and ultimate deformation of the steel cross-shaped joints are significantly better than those of the prototype cross-shaped joints. The built-in steel in the joints can significantly improve the seismic performance of the joints.

Keywords : assembled monolithic structure; middle beam-column joints of reinforced concrete; finite element analysis (FEA); seismic performance

引言

装配式结构在抗震性能方面的表现一直是工程界和学术界关注的焦点。梁柱节点作为结构体系中的关键部位, 其抗震性能直接影响到整体结构的稳定性和安全性。因此, 对装配整体式钢筋混凝土梁柱中节点的抗震性能进行深入研究, 不仅具有重要的理论价值, 还对实际工程应用具有指导意义。

抗震性能是衡量建筑结构安全性的重要指标。装配整体式钢筋混凝土结构作为一种新型的结构形式, 其梁柱节点的抗震性能与传统现浇结构存在显著差异。近年来, 国内外学者对装配式结构的抗震性能进行了大量研究, 但针对梁柱节点这一关键部位的研究尚不够深入。在 20 世纪 90 年代, 国外学者进行了一系列装配式混凝土结构抗震试验和数值模拟研究, 其中 Restrepo 等^[1,2] 针对装配整体式 RC 混凝土框架梁柱节点进行了拟静力低周往复加载试验。接着, 国内众多学者也对采用不同梁柱连接形式和梁筋连接锚固方式的后浇整体式框架节点抗震性能进行了试验研究和有限元分析^[3-7]。结果表明, 该类节点的连接可靠, 具有良好的整体性能和抗震性能。

然而, 目前的研究多集中于单一连接方式的抗震性能评估, 缺乏对不同连接方式下梁柱节点抗震性能的全面比较和分析。本研究旨

在通过有限元分析，全面评估装配整体式钢筋混凝土梁柱中节点的抗震性能。研究内容包括：不同连接方式下梁柱节点的抗震性能比较、节点的破坏机理及失效模式分析、节点抗震性能评估。通过本研究，旨在揭示装配式整体式钢筋混凝土梁柱中节点的抗震性能特点，为装配式结构的抗震设计提供理论依据和技术支持，促进装配式结构在地震多发区的广泛应用。

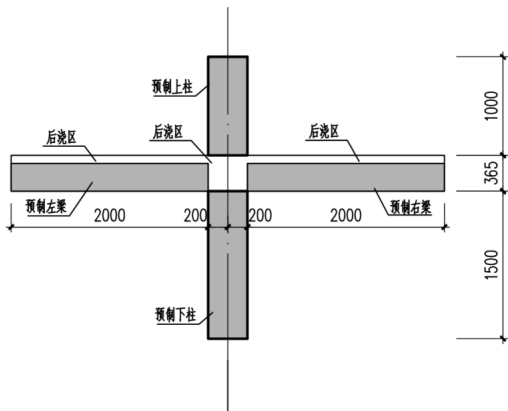
一、数值模拟

(一) 建立有限元计算模型

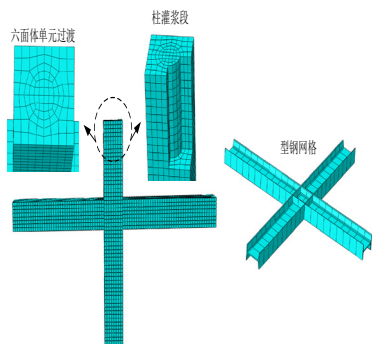
计算模型分为原型试件和型钢试件，利用 Abaqus 有限元分析软件建立了2种不同装配形式的梁柱中节点模型，计算模型参数见表1。框架柱采用离心法工艺，后期灌芯；预制梁顶部预留80mm叠合层后浇。梁混凝土等级 C40，柱及后浇段等级 C50，柱灌浆段柱芯等级 C55。节点基本尺寸如图1所示。计算模型采用自适应网格过渡技术，如图2所示。

表1 模型参数

模型	试件	尺寸/mm	柱高(跨度)	做法区别
原型试件	柱	400*400	上柱1 m; 下柱1.5 m	梁柱构件在核心区钢筋通长、混凝土现浇
	梁	300*380	左右梁段各2 m	
型钢试件	柱	400*400	上柱1 m; 下柱1.5 m	相比原型试件增设型钢加强区
	梁	300*380	左右梁段各2 m	



> 图1 梁柱中节点基本尺寸



> 图2 梁柱中节点有限元网格划分

(二) 本构模型及相互作用

模型中混凝土的基本力学参数见表2。采用 Abaqus 内嵌的塑性损伤模型 (CDP)^[8] 模拟混凝土在弹塑性工作状态下的力学行

为。钢筋采用双折线模型。钢筋与混凝土间采用 Embedded 方式进行耦合。Embedded 方法使钢筋在混凝土的约束下能传递加载力，有效模拟材料间的协同工作机制。

表2 不同等级混凝土性能参数

混凝土强度等级	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比
C40	2400	32.5	0.2
C50	2400	34.5	0.2
C55	2400	35.5	0.2

(三) 加载方式和边界条件

模型加载分别模拟恒载工况和地震工况，设定了2个分析步。

分析步1：用于模拟柱端轴压的施加。模型中柱端轴压比设定为0.4，满足 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》^[9] 中规定的框架柱轴压比限值的要求。

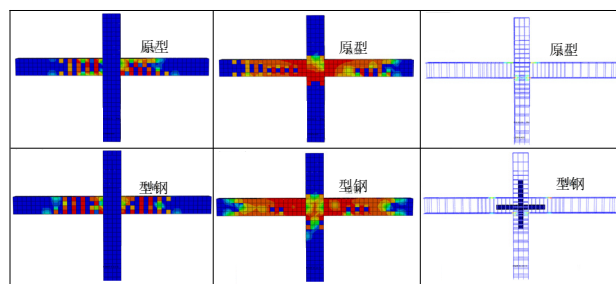
分析步2：用于模拟低周往复荷载的施加。此次计算模型采用梁左右端部竖向位移加载方式模拟地震作用。

边界条件的设置，模型中柱底及柱顶部采用固定铰支座约束，左右柱端通过约束位移并释放转角的方式模拟滑动铰支座。

二、模拟结果和讨论

图3 (a-b) 给出了原型梁柱中节点，以及型钢中节点的非线性响应云图，节点损伤总体分为两个阶段，①梁端截面首先出现损伤，随加载历程损伤逐渐积累，梁端损伤范围扩大，发展至节点核心区边缘。②损伤范围进一步扩大，损伤由梁端向节点核心区扩散，并在节点核心区发展。

在加载初始阶段，梁柱节点损伤首先出现在梁端部位，相同时刻下原型梁柱中节点和型钢中节点的损伤发展区域和规律趋于一致，可见两种梁柱节点的初始刚度区别不大，混凝土在弹性工作范围内节点的力学性能相似。进一步说明了本计算模型符合“强柱弱梁”的设计原则，框架柱保持弹性状态。但是随着荷载的逐级增大，梁柱节点的损伤程度和损伤范围都呈现明显的增大，损伤区域逐渐向节点核心区扩散，并在框架柱中开始发展。重要

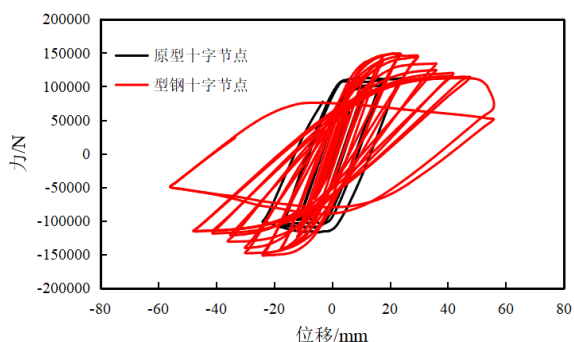


(a) 混凝土损伤开始阶段 (b) 混凝土损伤发展阶段 (c) 钢筋塑性云图

> 图3 原型中节点与型钢中节点非线性响应的对比

的是,在此阶段原型梁柱中节点和型钢中节点的损伤分布规律出现了较为明显的区别。原型梁柱中节点在核心区的损伤发展主要集中在下部,并且在靠近核心区下部的框架柱中损伤也有一定程度的发展。总体上,核心区损伤的范围和峰值也相比型钢中节点高。型钢中节点在核心区的损伤扩散较为均匀,这是由于内置型钢加大了节点刚度,协调钢筋混凝土共同变形,将局部受力改善为整体均匀受力。

从图3(c)可以看到,对于钢筋塑性分布,原型节点的钢筋塑性主要集中在核心区梁端纵筋,而核心区添加型钢后,相较于原型节点,梁端钢筋塑性出现于远离节点的型钢末端区域,表明添加型钢后,梁端塑性较将外移,符合“强节点弱构件”的结构设计概念,更有利于结构抗震。可见节点内置型钢后可明显提高节点的抗震性能。



> 图4 原型中节点与型钢中节点的滞回曲线

从图4可以看出型钢节点的极限承载力和极限变形明显优于原型节点,承载力提高幅度约为25%。型钢节点的滞回曲线更为饱满,滞回曲线线性态介于混凝土结构和钢结构之间,延性耗能能力明显优于原型节点。因此内置型钢的中节点其抗震性能明显优于原型中节点。

三、结论及建议

(1) 从模型的损伤发展及损伤分布上看,型钢中节点的在核心区的损伤扩散较为均匀,原型梁柱中节点在核心区的损伤发展主要集中在下部。装配整体式梁柱中节点符合强柱弱梁思想,且节点核心区并未出现显著剪切破坏,结构设计合理。

(2) 型钢中节点的极限承载和极限变形明显优于原型中节点。型钢节点的滞回曲线更为饱满,滞回曲线线性态介于混凝土结构和钢结构之间,延性耗能能力明显优于原型中节点。

(3) 相比于原型中节点,型钢中节点的钢筋塑性分布出现了外移,添加型钢后,梁端塑性较外移,符合“强节点弱构件”的结构设计概念,更有利于结构抗震。

(4) 为获得更好的抗震性能和延性耗能能力,可在设计装配整体式框架结构时考虑在节点核心区设置型钢。结合本文分析,型钢梁肢对塑性铰位置有直接影响,可结合设计性能化要求确定长度;型钢柱肢对节点损伤影响有限,可在保证锚固长度的基础上适当优化肢长。

参考文献

[1] Resreepo Jose I, Park Robert, Buchanan Andrew H, et al. Tests on connections of earthquake resisting precast reinforced concrete perimeter frames of buildings [J]. PCI Journal, 1995(4): 44-60.

[2] Ertas o, Ozturan T, Ozden S, et al. Ductile connections in precast concrete moment resisting frames [J]. PCI Journal, 2006(3): 6676.

[3] 田春雨, 颜锋, 高杰, 等. 100mPC 技术平台力学试验研究项目研究报告 [R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2012: 59-113.

[4] 陈适才, 闫维明, 王文杰, 等. 大型预制混凝土结构梁柱叠合板中节点抗震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 60-67.

[5] 李楠, 张季超, 楚先锋, 等. 预制混凝土结构后浇整体式梁柱节点抗震性能试验研究 [J]. 工程力学, 2009, 26(增刊1): 41-44.

[6] 邢国华, 刘伯权, 牛荻涛. 钢筋混凝土框架中节点受剪承载力计算的修正软化拉压杆模型 [J]. 工程力学, 2013, 30(08): 60-66.

[7] 崔燕伟, 刘晶波, 费毕刚. 基于有限元分析的钢筋混凝土梁柱节点斜压杆受力机理研究 [J]. 工程建设标准化, 2021(S1): 56-64.

[8] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of engineering mechanics, 1998, 124(8): 892-900.

[9] GB 50011-2010. 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.