

损伤可控的梁柱节点受力机理分析

赖秋兰^{1*}, 刘富盛², 胡艳³, 王仁平⁴, 郭志坚⁵

1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118
2. 福建省长汀县第一建筑工程有限公司, 福建 龙岩 366399
3. 福建中闽城投建筑工程有限公司, 福建 南平 354299
4. 厦门鸿润源建设集团有限公司, 福建 厦门 361010
5. 中铁十五局集团有限公司, 上海 200070

摘要 : 提出一种由带悬臂梁钢柱、普通钢梁及耗能钢制铰组成的损伤可控梁柱节点。利用 ABAQUS 建立损伤可控梁柱节点有限元模型, 研究低周往复荷载作用下该梁柱节点的受力机理, 明确其极限状态和破坏模式。研究表明: 滑移板的滑移行为可减轻梁柱构件的损伤发展, 节点的损伤主要集中控制在耗能钢制铰翼缘部分, 梁柱主体构件始终保持弹性状态; 滑移板构造设计对节点的承载能力及破坏模式有着重要影响, 且节点的损伤可控特性为震后快速修复的实现提供较大可能性。

关键词 : 损伤可控梁柱节点; 耗能钢制铰; 有限元模型; 滑移行为; 机理分析

Mechanism Analysis Of The Damage-Controllable Beam-To-Column Joint

Lai Qiulan¹, Liu Fusheng², Hu Yan³, Wang Renping⁴, Guo Zhijian⁵

1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118
2. Fujian Changting County First Construction Engineering Co., Ltd., Longyan, Fujian 366399
3. Fujian Zhongmincheng Investment Construction Engineering Co., Ltd., Nanping, Fujian 354299
4. Xiamen Hongrunyuan Construction Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361010
5. China Railway 15th Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200070

Abstract : A damage-controllable beam-to-column joint was proposed, which consisted of steel column with cantilever beam, ordinary steel beam and energy dissipation steel hinge. In this paper, a numerical model was established through ABAQUS, the bearing mechanism was analyzed and the ultimate state and failure mode were clarified. Results showed that the slippage behavior could reduce the damage development, the damage was controlled in the flange segment of the steel hinge, while the beam and column members remained in the elastic state. The design of the sliding plate has great influence on the bearing capacity and failure mode, and the controllable damage characteristics provides a greater possibility for the realization of rapid repair after earthquakes.

Key words : damage-controllable beam-to-column joint; energy dissipation steel hinge; numerical model; slippage behavior; mechanism analysis

传统焊接形式的钢框架结构在地震作用下易发生节点连接处的脆性破坏, 导致结构产生过大塑性变形或引起结构失效^[1], 震后修复难、费用高。

在结构中设置可更换构件是改善装配式钢结构震后可修复性的有效途径^[2]。Oh 等^[3]提出一种可更换的带缝钢板阻尼器并进行试验研究, 结果表明, 该阻尼器具有良好的耗能能力, 有利于塑性变形集中控制, 且震后易于更换; 吴京等^[4]提出一种可更换屈曲约束保险丝的钢梁, 在节点削弱钢板部分包裹约束盖板防止发生屈曲, 充分发挥削弱钢板力学性能; Zhang 和 Jiang 等^[5-6]研究了考虑螺栓布置方式、削弱盖板和连接板不同形式的预制钢梁柱连接节点的受力性能, 表明此类节点具有良好的耗能能力, 只需更换削弱盖板便可实现结构修复; 门进杰等^[7]对通过研究证实端板-螺栓连接可更换耗能梁的滞回曲线饱满, 具有良好的变形能力和耗能能力, 可实现震后可更换; 程小卫等^[8]对带可更换脚部件的装配式 RC 剪力墙进行数值研究, 结果表明可更换脚部件的承载力对装配式 RC 墙的压弯承载力、刚度和滞回特征影响较大, 合理设计的可更换脚部件有利于实现剪力墙损伤可控。

本文提出一种损伤可控的梁柱节点, 主要由带悬臂梁段钢柱、普通钢梁和耗能钢制铰组成, 各部件均为工厂预制, 现场通过高强螺栓连接。该节点通过削弱的耗能钢制铰来控制节点塑性铰位置, 避免预制梁、柱发生塑性损伤, 以期震后通过更换受损元件即可恢复原有使用功能。通过 ABAQUS 开展数值模拟分析, 研究受力全过程中节点内力分布及变形发展规律, 明确节点极限状态和破坏模式。

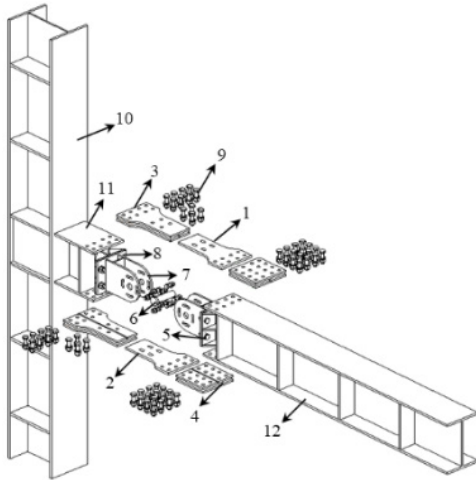
基金项目: 福建省建设厅科技研究开发计划项目 (2022-K-301)

* 作者简介: 赖秋兰 (1995-) 女, 广西南宁, 汉族, 硕士, 主要从事工程结构抗震、装配式结构等研究。

一、损伤可控梁柱节点的有限元模型

(一) 构造组成

图1给出了损伤可控的梁柱节点的构造示意图, 主要包含带悬臂梁的钢柱、普通钢梁及耗能钢制铰构成; 耗能钢制铰包括上下翼缘连接盖板、滑移板、L型板、耳板及端板。



1 - 上滑移板; 2 - 下滑移板; 3 - 上翼缘连接盖板; 4 - 下翼缘连接盖板; 5 - L型板; 6 - 销轴; 7 - 耳板; 8 - 端板; 9 - 高强螺栓; 10 - 钢柱; 11 - 悬臂钢梁; 12 - 普通钢梁
图1 损伤可控梁柱节点

(二) 有限元模型建立

本文采用 ABAQUS 建立图1所示的损伤可控梁柱节点的有限元分析模型。预制钢柱高2740 mm, 截面为 HM400×300×10×16, 悬臂梁长350 mm, 普通梁长2675 mm, 梁截面均为 HM350×250×9×14; 耗能钢制铰长为450 mm, 翼缘连接盖板及滑移板削弱宽度均为160 mm, 滑移板厚度对齐梁翼缘厚度为14 mm厚, 翼缘连接盖板厚度为12 mm。

钢材的本构模型采用双折线随动强化模型, 除滑移板选用 Q235 钢材外 (屈服强度为284MPa), 其余部件均选用 Q355 钢材 (屈服强度为394MPa)。

(三) 单元选取和网格划分

钢柱、悬臂钢梁、普通钢梁以及钢质耗能连接均采用八节点缩减积分三维实体单元 (C3D8R)。为考虑有限元模拟的计算精度和分析效率, 对模型进行不同网格大小划分, 其中耗能钢制铰, 预制梁端与钢制铰的连接部位处的网格采用较小的网格单元 (20mm), 其他部件采用较大的网格单元 (50mm)。

(四) 相互作用及边界条件

钢梁、钢柱与加劲肋、加强板中的焊接连接在模型中均采用绑定接触设置; 翼缘部分盖板与梁、矩形盖板与滑移板, 腹板部分 L型板与腹板、L型板与端板的螺栓拼接简化成绑定接触; 其余板与板之间、板与螺栓面之间、螺栓杆与孔壁之间的接触采用面面接触设置, 接触属性为法向接触采用硬接触, 切向接触采用“罚”接触; 钢板间的摩擦系数为0.4、螺栓面与钢板间的摩擦系数为0.4。销轴部分通过组合连接器中的铰进行模拟, 以实现销轴连接。柱底和梁端均为铰接, 柱顶面处施加竖向荷载, 轴压比为0.3。

二、有限元模型验证及受力机理分析

(一) 模型验证

图3给出了损伤可控梁柱节点拟静力试验得到的滞回曲线与数值模拟结果的对比。可知, 数值模拟得到的滞回曲线与试验结果吻合良好, 在加载初期, 节点处于弹性状态, 有限元模拟曲线和试验曲线一样呈线性增长; 随着位移增大, 滑移板与翼缘连接盖板发生相对滑移, 曲线出现明显平台段; 位移继续增加, 螺栓与滑移板螺栓孔壁发生挤压变形, 节点承载力有所上升。本节所建立的有限元分析模型具有较高的可靠性, 可进一步用于该节点受力求全过程中的力学机理分析。

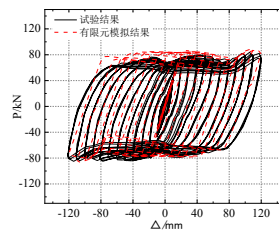


图3 滞回曲线对比分析

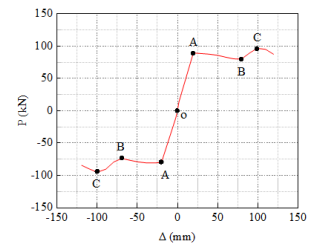


图4 P-Δ 骨架曲线

(二) 节点的工作机理分析

图4为损伤可控梁柱节点的荷载-位移骨架曲线, 按 A、B、C 三个性能特征点对其受力求全过程中的力学行为进行分析。图中, A 点为节点滑移板与翼缘连接盖板发生初始滑移的点; B 点为滑移板螺栓与孔壁开始发生挤压接触的点; C 点为节点极限承载力 P_{\max} 对应点。下面将结合数值模拟结果分析不同性能特征点下梁柱构件应力分布、耗能钢制铰应力分布及塑性变形发展情况。

1. 耗能钢制铰应力分布

图5为各个特征点时刻耗能钢制铰 Mises 应力分布云图。由图可知, 耗能铰整体受力较为对称, 主要集中在耗能铰翼缘部分。从 O 点到 A 点, 节点处于弹性状态, 耗能铰中经削弱的翼缘连接盖板与滑移板未发生滑移, 最大应力分布在削弱最大截面处; 在 A 点到 B 点过程中, 翼缘连接盖板与滑移板间发生滑移, 在 B 点处螺栓与滑移板孔壁挤压接触, 最大应力分布在滑移板孔壁处, 达到钢材的屈服强度 (284MPa); 至 C 点时, 由于螺栓与滑移板孔壁的持续挤压, 导致滑移板孔壁区域最大应力值不断增加, 并达到极限强度 (391MPa)。

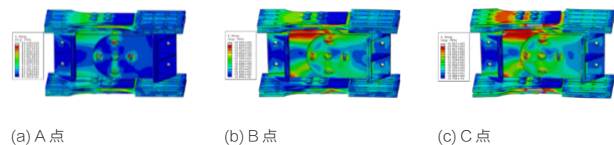


图5 耗能钢制铰 Mises 应力云图

2. 梁柱应力分布

图6为梁柱构件在各个特征点时 Mises 应力云图。由图可知, 从滑移板与翼缘连接盖板发生滑移到螺栓挤压阶段, 梁柱应力最大数值从231.1MPa增加至260.54MPa, 增长幅度相对较小, 主要是由于滑移板与翼缘连接盖板的相对滑移改善了节点的应力演化; 当螺栓与滑移板发生挤压后, 节点承载力上升至极限, 梁柱应力最大值增大至361.94MPa, 但并未发生屈服 (梁柱钢材选用

Q355钢,其屈服强度为391MPa),由此表明在节点加载过程中,节点梁柱构件始终保持弹性状态。

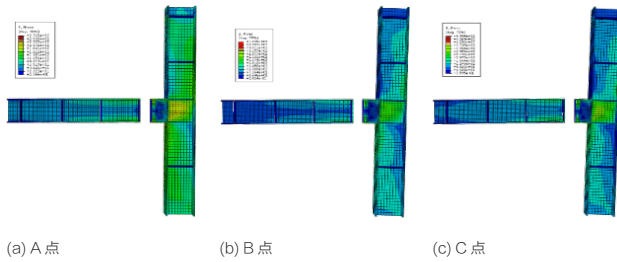


图7 节点梁柱应力云图

三、结论

本文提出了一种损伤可控梁柱节点,并基于数值模拟分析结

果对其全受力过程下的力学机理进行分析,得到以下结论:

(1) 数值模拟得到的滞回曲线和破坏模态与试验结果均吻合良好,验证了数值模型中材料本构、单元选取、网格划分、接触关系及边界条件设置的合理性。

(2) 损伤可控梁柱节点在受力全过程中主要经历滑移板滑移、螺栓挤压及滑移板塑性破坏三个阶段,滑移板滑移行为对节点的承载能力及破坏模式有着重要影响。

(3) 本文所提的节点在受力全过程中破坏主要集中于耗能钢制铰翼缘连接盖板和滑移板,梁柱主体构件均处于弹性状态,实现损伤集中控制,有利于节点震后快速修复。

参考文献

- [1] Miller D K. Lessons learned from the Northridge earthquake [J]. Engineering structures, 1998, 20(4-6): 249-260.
- [2] 陈以一, 贺修樟, 柯珂, 陈越时. 可更换损伤元结构的特征与关键技术 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(02): 1-10.
- [3] Oh SH, Kim YJ, Ryu HS. Seismic performance of steel structures with slit dampers [J]. Engineering Structures. 2009, 31(9): 1997-2008.
- [4] 谢鲁齐, 吴京, 章锦洋等. 可更换耗能连接力学机理及变形性能研究 [J]. 工程力学, 2020, 37(06): 186-195.
- [5] Jiang Z, Yang X, Dou C, et al. Seismic performance of prefabricated corrugated web beam-column joint with replaceable cover plates [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(5): 1161-1174.
- [6] 姜子钦, 牛子尧, 张爱林等. 翼缘盖板外置型可恢复功能装配式钢框架抗震性能试验研究 [J/OL]. 建筑结构学报 : 1-15 [2023-02-19].
- [7] 门进杰, 张智勇, 熊礼全等. 采用端板螺栓连接的可更换耗能梁抗震及可更换性能试验研究 [J/OL]. 工程力学 : 1-13 [2023-03-09].
- [8] 董晓微, 程小卫, 李易等. 带可更换脚部件装配式剪力墙压弯数值研究 [J/OL]. 工程力学 : 1-10 [2023-03-09].