

带可恢复功能节点的装配式框架结构抗震性能

刘如月^{1,2}, 薛潘荣^{1,2}, 颜桂云^{1,2}

(1.福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118;
2.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要:为实现装配式结构震损后能快速修复以恢复使用功能,提出一种带可恢复功能节点的装配式框架结构体系。利用 ABAQUS 有限元软件对可恢复功能节点进行数值模拟,探讨可恢复功能节点的作用机理,并将可恢复功能节点布置到装配式框架结构中形成可恢复功能装配式框架结构,考察整体结构的受力机理,可更换耗能铰、装配式节点核心区与梁柱部件的失效演化规律。结果表明,节点的失效主要是由于可恢复功能节点在削弱钢板处的损伤累积引起的断裂导致;与现浇混凝土框架及节点加强型现浇混凝土框架相比,可恢复功能装配式框架的承载能力更高、延性更好,通过可更换耗能铰的塑性变形耗散能量大幅度提高了结构的耗能能力,且结构的损伤破坏集中在削弱钢板上,有效地避免了预制梁柱和节点核心区的损伤。震后通过更换损伤耗能元件即可恢复结构的使用功能,实现了损伤可控和震后功能可恢复的抗震设防理念。

关键词:功能可恢复节点;装配式框架;可更换耗能铰;损伤可控;抗震性能

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2020)06-0553-07

Seismic behavior of prefabricated frame structures with earthquake-resilient joints

LIU Ruyue^{1,2}, XUE Panrong^{1,2}, YAN Guiyun^{1,2}

(1. Fujian Provincial Key laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China;
2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To realize the quick repair and earthquake resilience of the prefabricated structure after earthquake, the prefabricated frame structural system with replaceable earthquake-resilient joints was proposed. Numerical simulation was carried out by using ABAQUS to explore the mechanism of the earthquake-resilience joints. The replaceable earthquake-resilient joints were arranged in the assembly frame structure to form an earthquake-resilient frame structure. The mechanical mechanism of the whole structure was investigated, as well as the failure evolution law of the energy-dissipation hinges, the core area of the assembly joint and the framing components. Research results show that the failure of the joints was largely due to the fracture caused by the damage accumulation at the weakened steel plate. Compared with the cast-in-place concrete frame structure and cast-in-place concrete structure with strengthened joints, the earthquake-resilient prefabricated frame structure developed higher bearing capacity and better ductility, and the energy-dissipation capacity of the structure was enhanced greatly by the plastic deformation of the replaceable energy dissipation hinges. The structural damage was concentrated on the weakened steel plates, which effectively helped avoid the damage on the prefabricated beam-columns and core joints, and the seismic performance could be restored by replacing the damaged members. The prefabricated frame structural system with replaceable earthquake-resilient joints achieve the objective of damage controllability and earthquake resilience.

收稿日期: 2020-11-06
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878174); 福建省自然科学基金项目(2019J01778); 福建工程学院科研启动基金(GY-Z0601)
第一作者简介: 刘如月(1991—), 女, 福建漳州人, 讲师, 博士, 研究方向: 工程结构抗震、防灾减灾。

Keywords: earthquake-resilient joint; prefabricated frame structure; replaceable energy-dissipation hinge; damage-controllability; seismic behavior

装配式结构是绿色建筑及建筑工业化领域的重点发展方向,具有提高生产效率、节能环保,减少污染等优点,应用前景广阔。然而,装配式框架结构中梁柱节点及连接部位是抗震薄弱环节,易引起结构的破坏。为改善装配式框架结构的缺点,国内外学者对装配式框架结构的梁柱节点及连接节点进行了一系列改进和创新,并对改进的连接形式进行了大量的理论和试验研究。

孙岩波^[1]、赵斌^[2]和陈适才等^[3]发现装配式混凝土框架节点与其现浇节点均为梁端塑性铰破坏,可达到与现浇混凝土类似的抗震性能。潘鹏等^[4]研究了后张无粘结预应力干式装配梁柱节点在往复荷载作用下的承载能力、初始刚度、损伤控制及变形能力等性能。李祚华^[5]、吴从晓^[6]、赵均海^[7]、操礼林等^[8]分别提出了几种不同形式的新型预制装配式梁柱节点,研究表明新型预制装配式具有较好的承载力、变形能力、延性及耗能性能。姜子钦等^[9]提出震后可更换的装配式中柱节点耗能装置,研究表明两种节点都具有良好的延性、耗能及承载能力。李哲明等^[10]通过研究发现装配式混凝土金属消能减震连接体系的抗震性能优于普通预制装配式框架结构; Nzabonimpa 等^[11]认为采用钢和混凝土填充板机械连接的框架结构可以替代传统的整体式现浇混凝土框架。Ghayeb 等^[12]发现由钢板、钢管和钢连接器连接的混合节点能够有效地将塑性铰移到连接区之外,具有较好的抗震性能; Nakaki 等^[13]利用节点中的低屈服点高耗能合金连接杆塑性变形消耗能量,保护主体构件受损害。Morgen 等^[14]通过在节点中增设摩擦型阻尼器提高结构的耗能能力; Song 等^[15]提出带有腹板摩擦装置的自复位混凝土梁柱新型连接方式,该节点能够减轻结构损伤,减小残余变形能力。Aninthaneni 等^[16]对带有端板连接的框架结构滞回性能进行了研究,该连接方式可做刚性弯矩连接且预制混凝土框架的拆卸。

上述研究均表明新型装配式梁柱节点在往复荷载作用下具有与现浇节点相当的抗震性能,提高了装配式框架结构的抗震性能。但目前对于梁柱节点的往复弯曲耗能机理和结构失效机理等研究较少。为满足装配式框架结构震后功能可恢复

的性能目标,需对装配式结构在地震作用下的工作机理、承载能力、耗能性能和失效模式等进行研究,在满足结构承载能力的情况下,控制结构的损伤分布,使损伤集中预期的部件中,避免主体结构损伤,保证结构的可恢复性。基于此,本研究提出一种带可恢复功能节点的装配式框架结构体系,以装配式梁柱节点作为可更换的耗能部件实现结构的耗能性能和功能可恢复性。通过对可恢复功能节点进行数值分析,探讨节点的作用机理;对带可恢复功能节点的可恢复功能装配式框架、现浇混凝土框架及一个节点加强型混凝土框架进行对比分析,进一步考察可恢复功能装配式框架结构的抗震性能。

1 可恢复功能节点及其框架结构体系

可恢复功能节点主要由带削弱型约束钢板的可更换耗能铰、钢套筒约束的节点核心区 and 预制梁柱结构等构成,如图 1 所示。其中,可更换耗能铰由削弱型约束钢板、高强钢腹板、销轴等部件组成,削弱型约束钢板屈服后可更换铰绕销轴转动;削弱型约束钢板由削弱钢板、约束套筒等组成。将可更换耗能铰布置到装配式框架结构中,形成可恢复功能装配式框架结构,如图 2 所示。该结构将薄弱环节从节点核心区外移至可更换耗能铰上,强震后损伤和破坏集中在耗能铰的削弱型约束钢板上,实现结构损伤可控,避免主体结构失效。震后仅需更换削弱型约束钢板就可快速恢复结构的使用功能,满足可恢复功能装配式框架结构的设计要求。

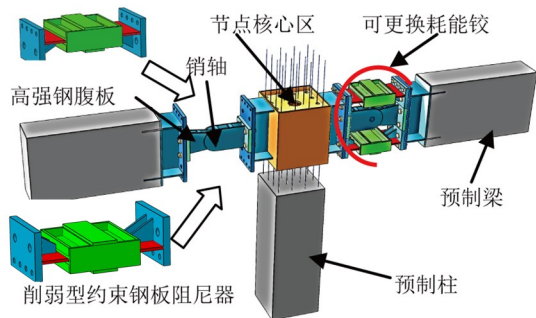


图 1 可恢复功能节点

Fig.1 Resilient prefabricated joint

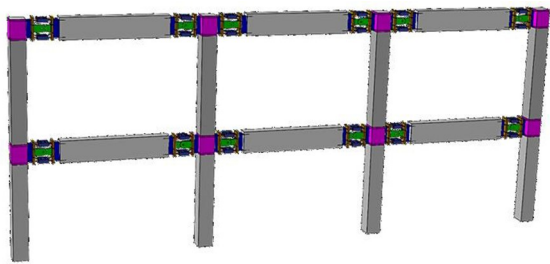


图 2 可恢复功能装配式框架结构体系
Fig.2 Structural system of the resilient prefabricated frame

2 可恢复功能节点工作机理分析

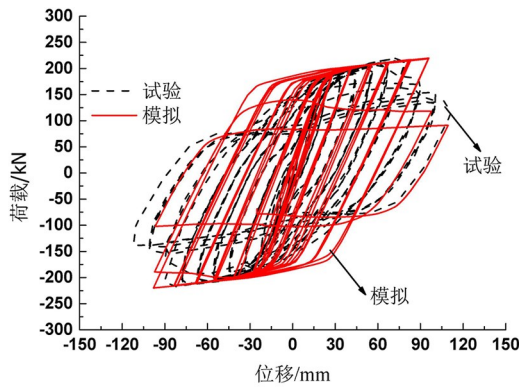
2.1 可恢复功能节点有限元模型

以文献[17]中可恢复功能节点的试验模型为原型,建立节点的有限元分析模型。模型中混凝土、端板和约束套筒采用三维实体单元(C3D8R)模拟;钢筋用桁架单元(T3D2)模拟;削弱钢板、核心区外包钢管和连接段型钢梁采用壳单元(S4R)模拟。核心区混凝土与钢套筒之间采用面-面“硬接触”模拟钢管套筒与混凝土法线方向的接触,采用库伦摩擦模型模拟钢管与混凝土之间的切向的接触,摩擦系数取为0.6。有限元模型边界条件根据试验边界条件设置,在上柱顶端施加恒定的均布荷载来模拟试验中的轴压力,按试验加载制度施加水平力。

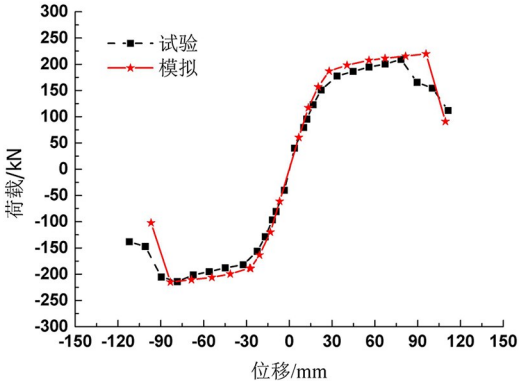
钢筋本构采用双折线本构模型,其中 E_s 、 f_y 、 f_u 分别表示钢材弹性刚度、屈服强度、极限强度。钢材屈服后刚度取 $0.01 E_s$,当钢材达到极限强度后应力不再增加。钢材本构选用的二次塑流模型,并考虑可更换耗能铰削弱钢板中钢材在往复荷载作用下的损伤退化。采用 ABAQUS 自带的混凝土损伤模型来模拟混凝土的力学性能,采用韩林海^[18]的应力-应变关系模型来模拟核心区混凝土。

2.2 装配式节点有限元模型可靠性验证

基于文献[17]中可恢复功能节点的试验研究结果验证有限元分析模型及数值分析方法的可靠性。图 3 给出了有限元分析得到的滞回曲线和骨架曲线与试验结果对比,由图 3 可知,有限元模拟结果与试验结果的滞回曲线和骨架曲线都基本吻合,说明有限元模型建模及数值分析方法具有一定的准确性,可作为后续分析的基础。



(a) 滞回曲线对比



(b) 骨架曲线对比

图 3 有限元结果与试验对比

Fig.3 Comparison of numerical results and experiments

2.3 可恢复功能节点工作机理分析

为研究可恢复功能节点的工作机理,结合节点的荷载-位移曲线和加载过程中不同的云图计算结果,对不同性能特征点处节点的应力分布、塑性发展和损伤演化等特性进行分析。

图 4 为可恢复功能节点有限元模拟得到的荷载-位移骨架曲线,将曲线分为 4 个阶段,选取 4 个特征点进行分析,分别为:A 点为可恢复功能节点的梁端混凝土首次开裂;B 点为可更换耗能铰中削弱钢板屈服;C 点为削弱钢板阻尼器内削弱钢板平面外屈曲;D 点为节点失效,可更换耗能铰中钢板的削弱钢板断裂。

图 5 为不同特征点处可更换耗能铰的有限元计算结果,结合试验现象,具体分析如下:

A 点:梁端截面开始出现裂缝,此时的承载力为 118.2 kN,位移为 14.1 mm。应力主要集中在耗能铰削弱钢板的削弱截面处,削弱钢板局部先达到屈服强度,梁中的裂缝主要集中在预埋型钢梁与混凝土交界处,此时钢筋最大应力为 38.4 MPa。

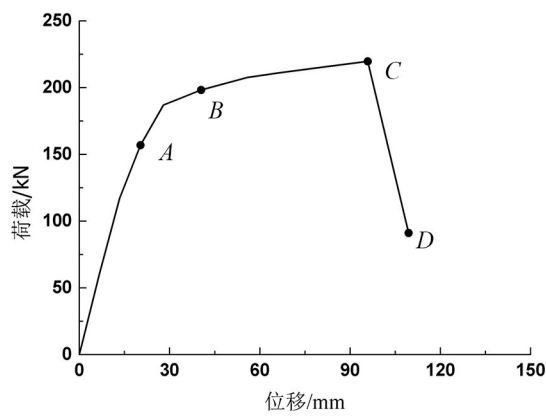


图 4 可恢复功能节点骨架曲线

Fig.4 Skeleton curves of the resilient joint

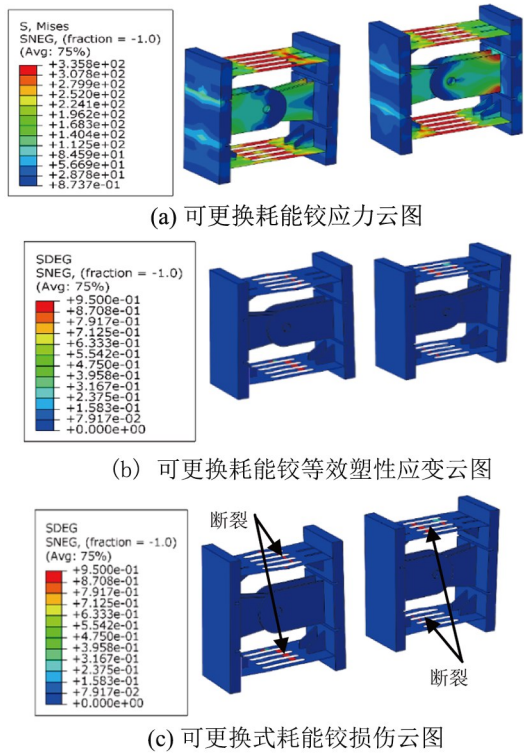


图 5 不同特征点处可更换耗能铰的有限元计算结果
Fig.5 Numerical results of replaceable energy-dissipation hinges at different feature points

B 点: 耗能铰中削弱钢板的削弱截面处全截面屈服, 如图 5(a) 所示。试验中此时梁上混凝土出现了对称裂缝, 节点处梁柱纵筋最大应力为 170 MPa, 钢套筒上应力较小。

C 点: 削弱钢板在截面削弱处进入塑性发展, 开始出现损伤, 受压削弱钢板发生平面外屈曲, 如图 5(b) 所示。节点达到最大承载力 220 kN, 位移为 96 mm。试验过程中梁段混凝土出现贯通裂

缝, 但梁柱纵筋最大应力为 280.6 MPa, 未达到屈服应力。

D 点: 节点承载力急剧下降到 92.1 kN, 低于最大承载力的 85%, 认为此时节点失效。削弱截面损伤因子达到 0.95, 如图 5(c) 所示, 认为钢板在该处断裂, 对应的失效位移为 110 mm。整个加载过程中梁柱纵筋未达到钢筋屈服应力, 由于耗能铰承载力的下降, 梁柱纵筋的最大应力下降至 185.8 MPa。

上述分析表明, 可恢复功能节点在往复荷载作用下表现出较好的力学性能, 滞回曲线饱满, 节点破坏集中在可更换耗能铰的屈曲约束钢板上, 预制梁柱等主体构件基本无损伤。因此, 通过更换屈曲约束钢板以实现节点的快速修复, 恢复正常的功能具有一定的可行性。

3 可恢复功能装配式框架结构体系抗震性能分析

3.1 可恢复功能装配式框架结构体系

在框架结构中布置可恢复功能节点形成可恢复功能装配式框架结构, 如图 2 所示。结构的薄弱部位从梁柱节点核心区外移至可恢复功能节点的削弱型钢板上, 震后更换钢板即可恢复结构的使用功能, 具有装配简单、损伤可控、可更换等特点。此外, 约束钢套筒对核心节点有一定的加强作用, 实现了“强节点”抗震设计理念。本节中基于有限分析模型计算结果揭示可恢复功能装配式框架结构的工作机理, 包括可更换式耗能铰、节点核心区与梁柱失效演化规律和结构的地震失效机理。

同样基于 ABAQUS 有限元软件, 建立 2 层 3 跨可恢复功能装配式框架结构, 现浇混凝土框架及节点加强的现浇混凝土框架结构。结构的层高为 3 m, 净跨为 4.6 m, 混凝土强度为 C55, 柱截面均为 400 mm×400 mm, 配筋为 12 Φ 22, 梁截面尺寸为 250 mm×550 mm, 配筋信息如表 1 所示。可恢复功能节点构造、几何尺寸与文献[17]的试验中一致。现浇混凝土框架中梁上配置的纵筋直径为 22 mm。节点加强现浇混凝土框架结构仅在节点区用钢套筒进行加强, 套筒的几何尺寸、梁柱配筋均与可恢复装配式节点中一致, 而梁上纵筋焊接到钢套筒上。

表 1 梁截面尺寸与配筋信息

Tab.1 Beam section size and reinforcement information

结构体系	梁配筋
可恢复功能装配式框架结构	上:4 \oplus 18 下:4 \oplus 18
现浇混凝土框架结构	上:4 \oplus 22 下:4 \oplus 22
节点加强型混凝土框架结构	上:4 \oplus 18 下:4 \oplus 18

3.2 体系承载力分析

采用结构基底剪力-顶点位移曲线来表示框架结构整体的抗侧性能,该曲线能够从整体上体现出结构的整体性能变化,间接反映出不同情况下损伤对结构的整体力学性能的影响。图 6 所示 3 种结构体系的基底剪力-顶点位移对比曲线图。

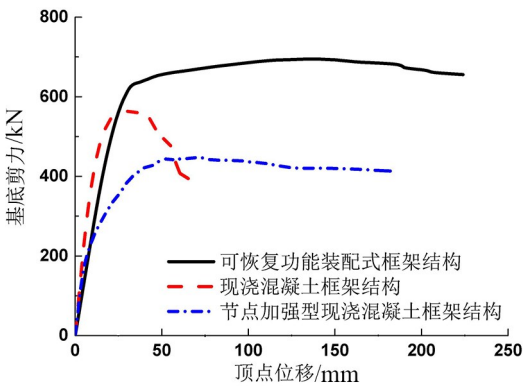


图 6 框架结构体系承载能力曲线

Fig.6 Bearing capacity curves of the frame structural system

对比图 6 中现浇混凝土框架结构与可恢复功能装配式框架结构曲线可以发现:现浇混凝土框架结构在前期曲线上升速度较快,初始刚度高于可恢复装配式框架结构;现浇混凝土框架结构屈服时的位移为 21 mm,基底剪力为 547.2 kN;可恢复功能装配式框架结构屈服时位移为 33.8 mm,基底剪力为 631.6 kN。现浇混凝土框架结构峰值点对应的位移和基底建立分别为 32.7 mm 和 563.8 kN,随后承载力开始下降,结构失效时位移为 48.4 mm,基底剪力为 479.23 kN;可恢复功能装配式框架结构峰值点时的位移为 139.4 mm,基底剪力为 694.9 kN,随后承载力开始下降,结构失效时位移达到 201.8 mm,基底剪力为 666.4 kN。结果表明,现浇混凝土框架结构初始刚度高于可恢复功能框架结构,说明现浇混凝土框架结构的整体性能

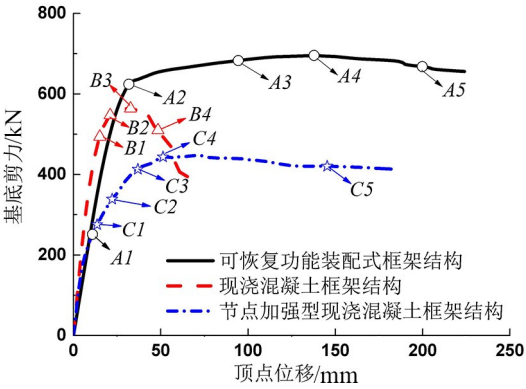
好;但可恢复功能装配式框架结构的屈服位移、屈服承载力,极限位移、极限承载力都明显高于现浇混凝土框架结构。

对比图 6 中节点加强混凝土框架结构与可恢复功能装配式框架结构的基底剪力-顶点位移曲线可知:加载前期节点加强型混凝土框架结构与可恢复功能框架结构基底剪力-顶点位移曲线几乎重合,由于梁端混凝土较早出现损伤,混凝土构件强度发生退化,基底剪力-顶点位移曲线上升减缓,导致节点加强现浇混凝土框架结构达到屈服时基底剪力为 414.3 kN,位移为 37.4 mm;承载力达到峰值时,基底剪力为 443.6 kN,位移为 51.9 mm;随后承载力开始下降,结构失效时位移达到 148 mm,基底剪力为 420 kN。结果表明,现浇混凝土框架结构与可恢复功能框架结构前期有相当的初始刚度;节点加强型现浇框架结构梁端较早出现了塑性损伤,导致结构承载力过早开始下降,而可恢复功能装配式框架结构在可更换耗能铰进入塑性后强度并未发生退化,加载后期可恢复功能装配式框架结构承载能力高于节点加强型现浇混凝土框架结构。此外,可恢复功能装配式框架结构的极限承载力和极限位移都明显高于节点加强型现浇混凝土框架结构。

3.3 结构失效顺序分析

可恢复功能装配式框架结构的将结构塑性损伤集中在可更换耗能铰的削弱钢板处,削弱钢板率先发生进入塑性消耗能量,具有损伤可控的特点。约束钢套筒对节点核心区有一定的加强作用,对结构体系的失效顺序产生一定的影响。为验证可恢复功能装配式框架结构具备更优的失效顺序,将其与现浇混凝土框架结构与节点加强型现浇混凝土框架结构的失效顺序进行对比,如图 7 所示。

由图 7 可知,现浇混凝土框架结构较早屈服,且屈服之后很快就达到了峰值承载力,随后由于节点的剪切破坏结构发生失效;节点加强型现浇混凝土框架结构的屈服位移与可恢复功能装配式框架节较为接近,但节点加强型混凝土框架结构梁端钢筋较早屈服,在梁端形成塑性铰,核心区由于钢套筒的保护作用未发生破坏,失效模式为梁端塑性破坏;可恢复功能装配式框架结构把塑性损伤控制在可更换耗能较中的削弱钢板上,结构屈服较晚,屈服后承载力仍保持上升趋势,说明可更换耗能较有效提高了结构的承载能力;由于钢



注: A1:削弱钢板出现屈服; A2:大部分削弱钢板屈服; A3:二层柱钢筋屈服; A4:削弱钢板面内屈曲; A5:结构失效
B1:首层节点箍筋屈服; B2:首层节点混凝土出现损伤;
B3:二层节点混凝土出现损伤; B4:结构失效
C1:梁端钢筋屈服; C2:二层梁端混凝土出现损伤; C3:首层梁端混凝土出现损伤; C4:梁端混凝土损伤明显; C5:结构失效

图 7 结构的失效顺序

Fig.7 Failure sequence of structures

套筒的约束作用结构到达极限荷载时核心区仍未发生破坏,失效时的位移可达到 201.8 mm,具有较好的变形能力和延性。通过对比分析可知,可恢复功能框架结构的屈服荷载、屈服位移、极限荷载和延性都有明显提高,保证结构仅在可更换耗能铰处发生损伤破坏,失效模式得到了一定的改善。

3.3.1 节点现浇混凝土框架结构失效顺序

基于有限元分析结果可将现浇混凝土框架结构失效顺序为:(1)首层中间节点箍筋屈服,此时抗侧能力上升变得缓慢。(2)首层中间节点出现损伤,结构发生屈服。(3)现浇混凝土框架结构的二层中加节点处的箍筋应力均达到强化阶段,首层中间节点处混凝土出现明显的损伤,二层中间节点也开始出现损伤,此时结构达到极限承载力,节点开始出现剪切破坏。(4)结构进入失效状态,承载力持续下降,最终发生剪切破坏。

对现浇混凝土框架结构而言,损伤主要出现在梁柱节点核心区。作为框架结构重要的传力构件,应对节点核心区进行加强保护,避免其发生破坏,特别是避免产生剪切破坏。

3.3.2 节点加强型混凝土现浇框架结构失效顺序

类似地,节点加强型混凝土现浇框架结构失效顺序为:(1)二层梁端钢筋屈服,此时承载力增加变缓。(2)二层梁端开始出现损伤,随后首层

梁端出现损伤,结构发生屈服。(3)梁端出现明显损伤,且损伤在逐渐累积,结构达到极限承载力。(4)梁端损伤逐渐扩大在梁端形成塑性铰,梁端损伤累积形成机构,结构发生失效。

对于节点加强型现浇混凝土框架结构,由于钢套筒对核心混凝土的有效保护,结构失效时节点核心区并未出现损伤,节点核心区的加强导致破坏模式由节点核心区破坏转换为梁端塑性铰破坏,承载能力得到提升。

3.3.3 可恢复功能装配式框架结构失效顺序分析

同样地,可恢复功能装配式框架结构失效顺序为:(1)当位移加载到 33.8 mm 时,大部分耗能铰中削弱钢板达到屈服,承载能力达到屈服点。(2)继续加载二层节点处钢筋率先屈服。(3)当位移达到 139.4 mm,二层节点核心区钢筋进入应力强化,削弱钢板发生面内屈曲,二层节点核心区出现了轻微损伤,承载力达到峰值点。(4)当位移加载到 201.8 mm 时,可更换耗能铰削弱钢板达到了极限应力,且发生明显的平面内屈曲,此时在二层核心区钢套筒下端混凝土柱上出现了损伤,但损伤并不明显。

综上所述,可恢复功能装配式框架结构中的可更换耗能铰中削弱钢板先发生屈服,利用塑性变形进行耗能,避免了节点核心区出现损伤。由于钢套筒的约束作用,节点核心区端部钢筋屈服前可更换耗能铰已达到较高的塑性水平;可更换耗能铰中削弱钢板出现屈曲,结构承载能力达到峰值点。位移达到 201.8 mm 时,大部分耗能铰的削弱钢板应力达到极限,面内屈曲明显,结构失效。可恢复功能框架结构的失效顺序符合“强柱弱梁,强节点弱构件”的抗震设计要求,把损伤集中在可更换耗能铰,震后更换耗能铰即可恢复原有功能,满足装配式框架结构部件可更换,功能可恢复的性能目标。

4 结论

1)可恢复功能节点的滞回曲线和骨架曲线的数值分析结果与试验结果基本吻合,承载力和刚度差值均在 5%之内。可恢复功能装配式框架结构首先在可更换耗能铰中削弱钢板处发生屈服,塑性发展较快,最后节由于削弱截面发生断裂导致引起节点失效,而梁柱钢筋均未屈服,体现了可恢复功能节点的塑性可控。

2)提出可恢复功能装配式框架结构形式,把可恢复功能节点布置到装配式框架结构中,在震后仅需更换节点中的削弱型约束钢板即可恢复装配式框架结构的使用功能。

3)相比现浇混凝土框架结构和节点加强型现浇混凝土框架结构,可恢复功能装配式框架结构有更高的承载能力和延性,刚度退化较晚。结

构中可更换耗能率先发生屈服,在加载后期节点核心区才出现轻微塑性损伤,符合“强柱弱梁,强节点弱构件”的抗震设计要求。可恢复功能装配式框架结构把塑性集中在削弱钢板上,震后更换耗能较即可实现可恢复功能装配式框架结构重新投入使用,实现了损伤可控的抗震理念和装配式框架结构部件可更换,功能可恢复的性能目标。

参考文献:

- [1] 孙岩波,李晨光,杨旭. 装配式混凝土框架结构梁-板-柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 23-26.
- [2] 赵斌,吕西林,刘海峰. 预制高强混凝土结构后浇整体式梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 22-28.
- [3] 陈适才,闫维明,王文明,等. 大型预制混凝土结构梁-柱-叠合板边节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 60-67.
- [4] 潘鹏,王海深,郭海山,等. 后张无黏结预应力干式连接梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 46-55.
- [5] 李祚华,彭志涵,齐一鹤,等. 装配式 RC 梁柱塑性可控钢质节点抗震性能足尺试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(10): 43-50.
- [6] 吴从晓,赖伟山,周云,等. 新型预制装配式消能减震混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程报, 2015, 48(9): 23-30.
- [7] 赵均海,胡壹,张冬芳,等. 装配式式钢管混凝土柱-钢梁框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(8): 88-96.
- [8] 操礼林,郭良梦,于国军,等. 新型外筒式梁柱装配节点的抗震性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(6): 1399-1410.
- [9] 姜子钦,杨晓峰,张爱林,等. 可恢复功能装配式中柱节点耗能装置试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 15-23.
- [10] 李哲明,吴从晓,黄青青,等. 装配式混凝土金属消能减震连接体系抗震性能分析研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(3): 679-687.
- [11] NZABONIMPA J, HONG W, KIM J. Experimental and non-linear numerical investigation of the novel detachable mechanical joints with laminated plates for composite precast beam-column joint [J]. Composite Structures, 2018, 185: 286-303.
- [12] GHAVEBH H, RAZAK H, RAMLI SULONG N. Seismic performance of innovative hybrid precast reinforced concrete beam-to-column connections [J]. Engineering Structures 2020(202): 109 886.
- [13] NAKAKI S, ENGLEKIRK R, PLAHEHN J. Ductile connectors for a precast concrete frame [J]. PCI Journal, 1994, 39(5): 46-59.
- [14] MORGEN B, KURAMA Y. A friction damper for post-tensioned precast concrete beam-to-column joints[C]//13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004: 3189.
- [15] SONG L, GUO T, CAO Z. Seismic response of self-centering prestressed concrete moment resisting frames with web friction devices[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 71: 151-162.
- [16] ANINTHANENI P, DHAKAL R, MARSHALL J, et al. Nonlinear cyclic behavior of precast concrete frame sub-assemblies with “dry” end plate connection[J]. Structures, 2018, 14: 124-136.
- [17] 薛潘荣. 可恢复功能装配式混凝土节点及其框架结构抗震性能研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2020.
- [18] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016.