

# 可拆卸 RCS 框架结构抗震性能研究

蔡建国<sup>1</sup>, 李 桅<sup>2</sup>

(1. 江西国经建设投资有限公司, 江西 樟树 331200; 2. 温州大学 建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:**可拆卸钢筋混凝土柱-钢梁(reinforced concrete column-steel beam, RCS)组合框架由钢筋混凝土柱、钢梁和可拆卸连接件组成,梁柱节点采用螺栓抗剪连接件连接,既可实现构件拆卸回收利用又能保证力的有效传递。然而,目前可拆卸 RCS 框架结构抗震性能尚不明确,亟需开展可拆卸 RCS 框架结构抗震性能研究。为此,已有研究的非可拆卸常规 RCS 框架结构拟静力试验,采用有限元软件 ABAQUS 建立有限元模型,通过破坏模式、滞回曲线、骨架曲线及累计耗能等方面对比了有限元计算结果与试验结果,可以有效验证数值模拟的准确性。借助相同有限元分析方法,建立了采用新型可拆卸连接方式的 RCS 框架有限元模型,深入研究了在不同节点连接方式下的 RCS 框架试件的抗震性能,包括受力传递路径、应力云图、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、延性与耗能等性能,并分析了框架结构实现可拆卸的可行性。结果表明:新型可拆卸节点连接方式可以将塑性铰控制在远端梁端核心区,有效保护节点核心区,提高了极限承载力、刚度;滞回曲线更加饱满,减缓强度和刚度退化速率,大幅提升框架耗能能力。采用新型可拆卸节点连接方式的试件可以有效保证传力路径的连续性,且其各项抗震性能指标明显优于传统 RCS 框架结构。研究成果及结论为可拆卸 RCS 框架结构的抗震设计提供有力的设计参考和数据支撑。

**关键词:**可拆卸节点;RCS 框架结构;破坏模式;抗震性能;数值分析

**中图分类号:**TU398+.2; P315.9

**文献标志码:**A

## Seismic performance of demountable RCS frame structure

CAI Jianguo<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Guojing Construction Investment Co., Ltd., Zhangshu 331200, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** The demountable reinforced concrete column-steel beam (RCS) combined frame consists of reinforced concrete columns, steel beams and demountable connectors. The beam-column joints are connected by bolted shear-resistant connectors, which can realize the disassembly of components for recycling and ensure the effective transfer of forces. However, the seismic performance of demountable RCS frame structure is still unclear, and there is an urgent need to conduct out research on the seismic performance of demountable RCS frame structure. To this end, for the proposed static test of non-demountable conventional RCS frame structure carried out by the team in the early stage, this paper adopts the finite element software ABAQUS to establish a finite element model, and compares the finite element calculation results with the test results through the damage modes, hysteresis curves, skeleton curves, and the cumulative energy dissipation, etc., to effectively verify the accuracy of the numerical simulation. With the help of the same finite element analysis method, a finite element model of the RCS frame with the new demountable connection was established, and the seismic performance of the RCS frame specimens under different node connections was studied in depth, including the force transfer paths, stress maps, hysteresis curves, skeleton

收稿日期:2023-11-15; 修回日期:2023-12-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51308419);浙江省自然科学基金公益项目(LGF22E080004)

作者简介:蔡建国(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事建筑工程管理研究。E-mail:453967392@qq.com

通信作者:李 桅(1981—),男,副教授,博士,主要从事装配式结构抗震研究。E-mail:liweiwaini521@163.com

curves, stiffness degradation, ductility, and energy dissipation, etc., and the feasibility of realizing the demountability of the frame structure is also analyzed. The results show that: the new demountable joints connection can control the plastic hinge in the region of the distal beam section, effectively protect the joints core area, and improve the ultimate load carrying capacity and stiffness. The hysteresis curve is fuller, slowing down the degradation rate of the load carrying capacity and stiffness, and greatly improving the frame's energy consumption capacity. The specimens with the new demountable joints connection can effectively ensure the continuity of the force transmission path, and its seismic performance indexes are significantly better than the traditional RCS frame structure. The research results and conclusions of this paper can provide a powerful design reference and data support for the seismic design of demountable RCS frame structures.

**Key words:** demountable joints; RCS frame structure; failure mode; seismic performance; numerical analysis

## 0 引言

钢筋混凝土柱-钢梁(reinforced concrete column-steel beam, RCS)框架结构体系因能更好地满足中高层建筑和大型框架建筑的功能要求而受到国内外学者的广泛关注。该系统结合了混凝土柱和钢梁的优点,相较于普通钢框架结构,具有自重轻、施工速度快、成本低、良好的稳定性和耐久性等显著特点,因此具有更为广阔的应用前景。在装配式 RCS 组合框架结构体系中,钢筋混凝土柱、钢梁与组合楼板均为设计成熟的构件,但由于梁柱连接区域复杂的细部构造,其设计没有具体规范明确要求。预制装配式节点<sup>[1-4]</sup>关系到整个结构体系的受力性能,是装配式结构体系的薄弱环节,同样也是装配式结构研究的重点和结构整体性能研究的前提。

已有许多学者对这种结构体系的抗震性能进行了研究并得到了重要的指导结论,为工程实践和理论研究提供了依据。回顾现有文献[5-10],RCS 节点的连接方式主要为“梁贯通式”或“柱贯通式”,但目前研究提出的“梁贯通式”和“柱贯通式”RCS 节点均难以拆卸和更换,影响结构体系在整个全生命周期内的价值,从而实现建筑结构的可持续发展。

在此背景下,人们对可拆卸连接结构性能进行了广泛的研究。针对可拆卸混凝土的力学性能,肖建庄等<sup>[11-12]</sup>提出了一种新型可拆卸混凝土框架节点,该节点能避免节点区域产生塑性铰,试验结果表明,该节点具有良好的延性。为了进一步考虑框架结构的可拆卸性和抗震性能,针对提出的一种基于榫卯连接概念的7组可拆卸混凝土梁柱节点进行了拟静力试验。结果表明:所有节点均具有良好的抗震性能,再生混凝土梁柱节点的抗震性能略低于普通混凝土梁柱节点,可拆卸混凝土结构具有良好的延性。伍云天等<sup>[13]</sup>对2个大比例 RCS 组合框架子结构试件进行了拟静力试验研究。研究表明:合理设计的 RCS 组合框架结构具有良好的强度、侧移延性和变形能力。门进杰等<sup>[14-17]</sup>通过开展 RCS 组合框架结构拟静力试验,通过精细化有限元模拟并加上理论分析,深入研究了装配式 RCS 组合结构的受力机理和抗震性能。

综上所述,多数研究主要集中于常规不可拆卸 RCS 节点所组成的框架,而对可拆卸 RCS 节点所组成的框架结构抗震性能研究较少。因此,为了理解可拆卸 RCS 框架结构的受力机理,有必要对其荷载传递路径和抗震性能进行研究。借助已有研究<sup>[18]</sup>的一榀1/3缩尺不可拆卸 RCS 框架拟静力试验进行模拟验证,再采用有限元软件 ABAQUS 分析可拆卸节点连接方式对 RCS 框架结构抗震性能的影响并提出改进意见,为可拆卸组合式 RCS 框架结构的应用以及后续研究奠定了一定的基础。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

选取了钢筋混凝土柱-钢梁组合框架结构<sup>[18]</sup>中的一榀单层单跨框架,设计了1个1/3缩尺比例的钢筋混凝土柱-钢梁组合框架 RCS-0 试件。试件整体高为1500 mm,跨度为2200 mm,其中柱的截面尺寸为300 mm×300 mm,地梁的截面尺寸为400 mm×350 mm,钢梁的截面尺寸为100 mm×60 mm×5 mm×7 mm,钢板箍采用300 mm×300 mm×5 mm的方钢管,在其侧面开孔,方便钢梁一部分穿过并与混凝土柱一起现浇固定。试件中各部件尺寸及框架整体配筋见图1。

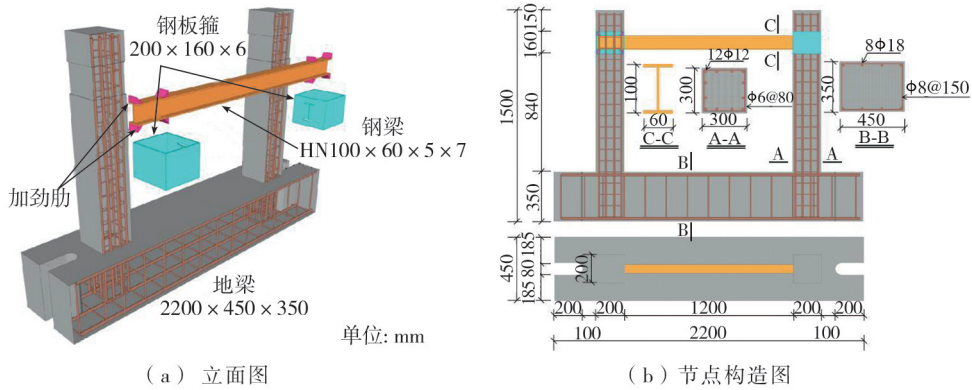


图 1 试件 RCS-0 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of RCS-0 specimen

试件采用直径分别为 6、8、12 mm 的 HRB400 钢筋以及厚度为 5、7 mm 的 Q235 钢材,根据 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》<sup>[19]</sup> 规范的要求进行材性拉伸试验。钢材的基本力学性能参数如表 1 所示,通过圆柱体抗压试验测得混凝土抗压强度平均值。

表 1 钢筋和钢材力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel bars and steel

钢材	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈服应变/( $\times 10^{-3}$ )
φ 6	201	453	613	2.21
φ 8	205	459	572	2.36
φ 12	200	463	572	2.30
钢板(5 mm)	202	288	376	2.43
钢板(7 mm)	199	333	421	2.77

### 1.2 试验方案及加载制度

试验整体加载装置如图 2 所示,包括刚性钢架、MTS 液压伺服作动器、竖向液压千斤顶、分配梁和地锚螺栓等。框架试件拟静力试验分为两步:①通过液压千斤顶施加竖向轴力在分配梁上,再传递给框架柱顶以实现控制轴压比并保持恒定;②在柱两端外侧施加拟静力往复水平荷载。根据 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》<sup>[20]</sup> 的要求,采用位移控制加载制度。此外,柱端加载位移值以层间位移角的倍数为级差进行控制加载并循环 3 次,加载制度如图 2(b) 所示。当试件水平荷载降至峰值荷载的 85% 或者试件出现显著破坏可能导致试验不能继续进行,需停止加载。

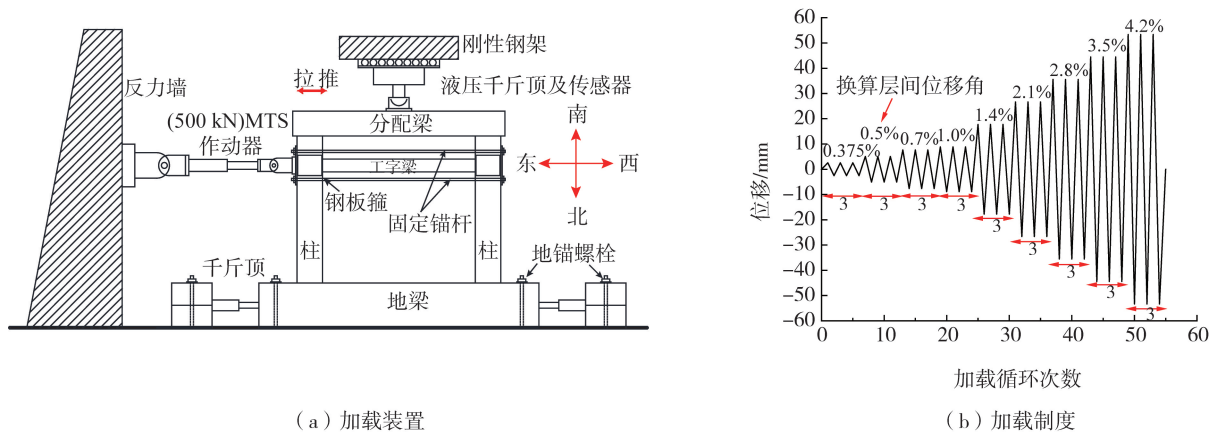


图 2 加载装置及加载制度

Fig. 2 Loading device and loading system

## 2 有限元模型验证

### 2.1 材料本构与约束

采用 ABAQUS 有限元软件对既有 RCS 框架试验<sup>[18]</sup>进行数值模拟验证,建立 RCS 框架有限元模型,如图 3 所示。有限元模型中的混凝土本构采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[21]</sup>中的拉压本构关系,并根据 ABAQUS 中的 CDP 塑性损伤模型进行损伤计算。钢筋和其他钢材均采用理想弹塑性本构模型,具体输入的本构模型参数根据实测值确定。混凝土柱、基础梁、钢梁均采用 C3D8R 实体单元,纵筋、箍筋采用 T3D2 三维两节点桁架单元。

在基础梁底部及四周采用完全固定,约束  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  这 3 个方向上的位移与转动即 6 个自由度,框架柱顶部施加竖向均布荷载 7.450 8 MPa 可满足框架试验柱顶 0.2 的轴压比,在柱端施加水平荷载,如图 3 所示。混凝土柱与基础梁采用“tie”(绑定)连接,采用“Embedded Region”(内置区域)命令将钢筋笼嵌入相应的混凝土构件中,使两者协同受力变形。钢板箍与混凝土柱表面设置为绑定约束,其余面面接触设置为摩擦接触。

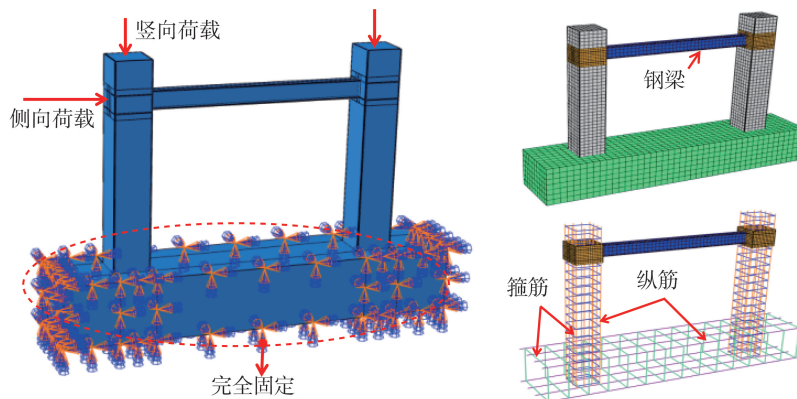


图 3 有限元模型建立

Fig. 3 Finite element model establishment

### 2.2 数值模拟与试验结果对比

对比试验与数值模型的破坏形态如图 4 所示,有限元模型在加载完成时,柱底端部因累计损伤导致混凝土压碎剥落而引起结构的失效破坏,柱端出现塑性铰,钢梁出现部分变形。这与试验中 RCS-0 框架的最终破坏模式是较为吻合的。

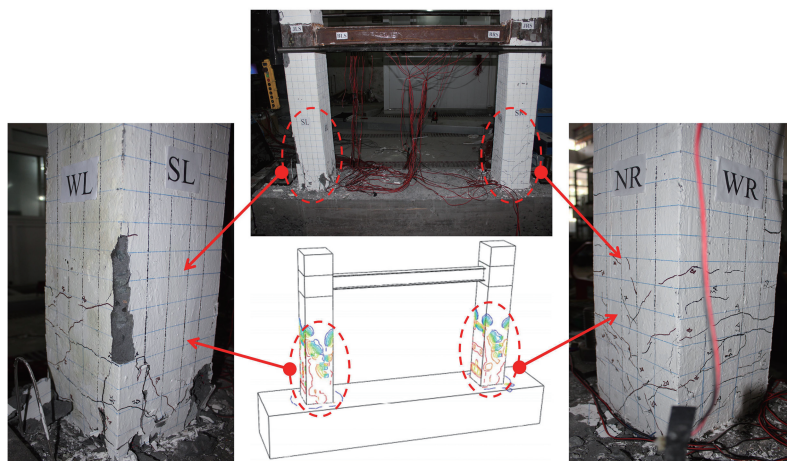


图 4 有限元分析与试验结果破坏模式对比

Fig. 4 Comparison of failure models between finite element analysis and test results

试件 RCS-0 的滞回曲线骨架曲线与能量耗散曲线如图 5 所示。由图可知,在加载初期,有限元模拟得到的框架柱端荷载-位移曲线与试验结果吻合良好,特别是在弹性阶段和弹塑性的初始阶段,滞回环基本重合;而在弹塑性阶段的后期,数值模拟的结果偏大一些,不过误差在 10% 以内,极限荷载低于试验结果。两

者滞回曲线包络面积相差不大,从整体上分析,试验与数值模拟的滞回曲线吻合较好。试验中混凝土承载力下降是由焊缝裂纹的扩展和混凝土剥落引起的,而有限元模型中梁柱连接采用理想的绑定“tie”连接,无法模拟混凝土剥落,因此有限元结果得到的骨架曲线并没有明显的下降段,但从骨架曲线的整体来看,试验与有限元结果基本吻合。

试件 RCS-0 的试验与有限元结果的累计耗能曲线如图 5 所示,层间位移角在 0.07%~0.21% 之间时,有限元模拟的累计耗能高于试验结果,而随着位移荷载的加大,有限元计算值均低于试验结果。当层间位移角达到 33.25 mm,即层间位移角 0.35% 时,有限元模型计算的累计耗能低于试验结果的 8.70%,仍在误差的 10% 的范围内,上述结果表明本文所建立的有限元模型具备有效性和准确性。

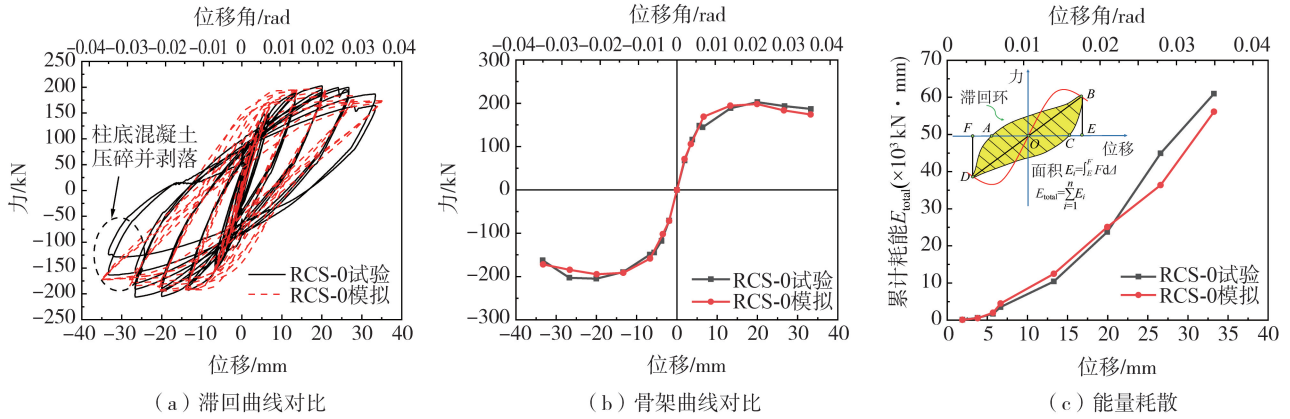


图 5 试件 RCS-0 的滞回曲线、骨架曲线与能量耗散曲线

Fig. 5 Hysteresis curves, skeleton curves and energy dissipation curves of RCS-0 specimen

### 3 可拆卸 RCS 框架抗震性能

#### 3.1 节点连接方式及传力路径

3 个 RCS 框架试件包括 1 个常规 RCS 框架和 2 个可拆卸 RCS 框架结构,框架节点连接方式见图 6,具体连接件尺寸及规格可以参考文献[17]。此外,图 6 中给出了 3 种 RCS 框架结构在受力状态下荷载的传递路径,图中  $T$  为拉力,  $N$  为压力,  $V$  为剪力,  $M$  为传递弯矩。

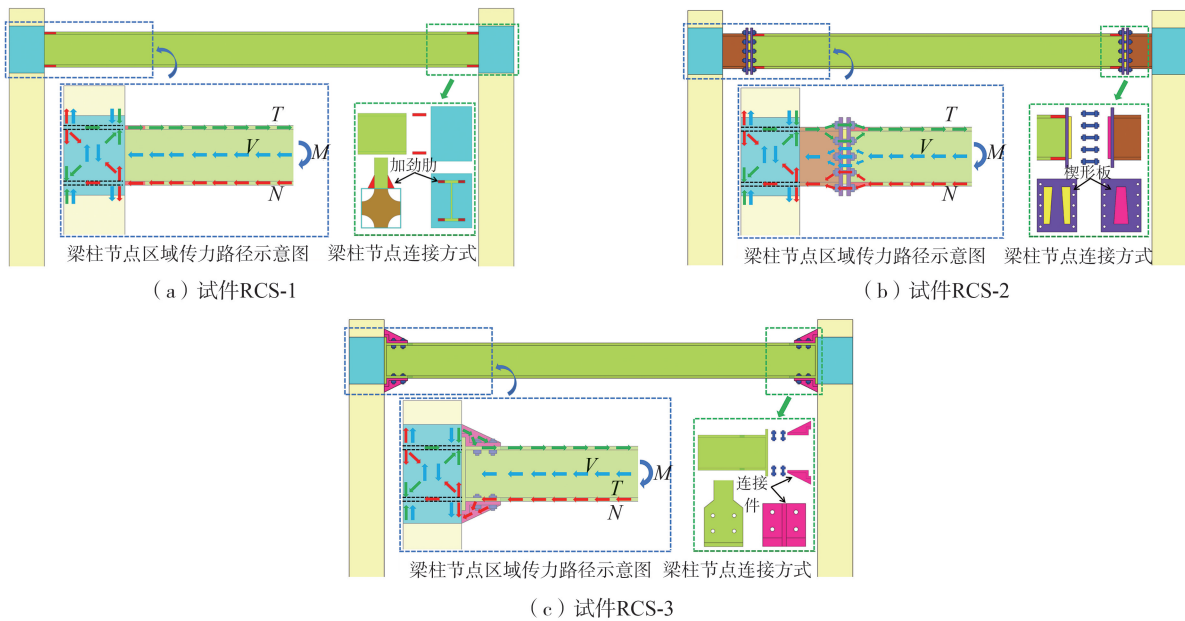


图 6 试件 RCS 中节点连接方式及荷载传递路径

Fig. 6 Joints connection mode and load transfer path of RCS specimen

#### 3.2 有限元模型建立

根据 LI 等<sup>[22]</sup>开展的新型可拆卸 RCS 梁柱节点试验为原型,选取 RCS 平面框架中的单层单跨子结构为

研究对象,原型结构层高 4.5 m,梁跨 6.6 m,建立了一榀单层单跨新型装配式可拆卸 RCS 框架结构,柱顶轴压比为 0.2。采用 ABAQUS 有限元软件对 3 个 RCS 框架试件进行有限元模拟,如图 7 所示。钢筋网采用 T3D2 桁架单元,试件 RCS-3 梁柱连接区域的加劲肋采用 C3D10 四面体单元,混凝土柱、钢梁、基础梁与部分连接件均采用 C3D8R 实体单元建模分析。

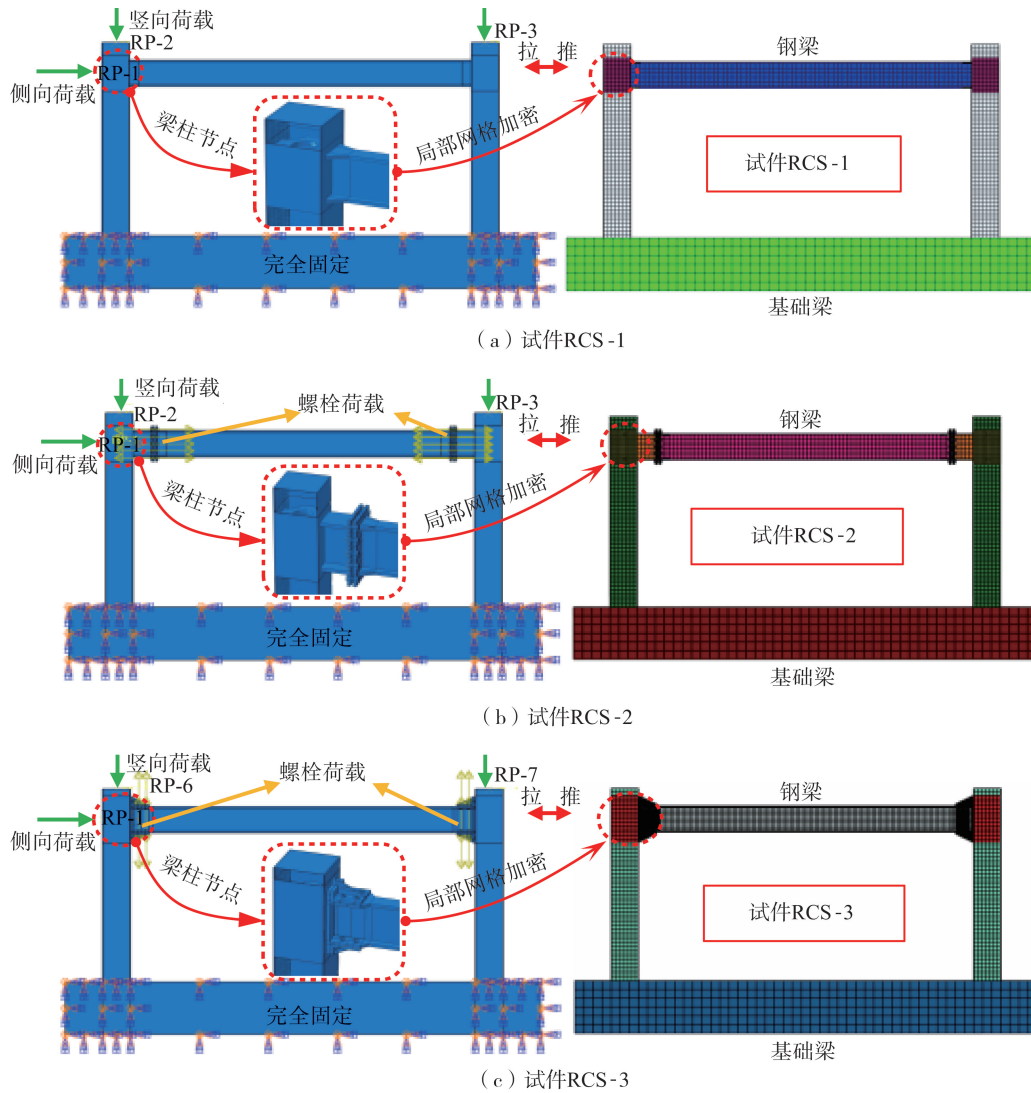


图 7 RCS 框架试件的有限元模型

Fig. 7 Finite element model of RCS frame specimens

试件中各构件尺寸及材料属性:钢梁规格HN300 mm×100 mm×10 mm×20 mm,钢板箍的截面尺寸为 300 mm×300 mm×10 mm,钢材均采用 Q235 型号。混凝土柱截面为300 mm×300 mm,长2 200 mm,基础梁为矩形截面 600 mm×600 mm,长5 100 mm,混凝土设计强度为 C40,抗压、抗拉强度分别为 26.8、2.39 MPa,弹性模量为 32000 MPa。其中混凝土柱内置有 12 根直径为14 mm的 HRB400 纵筋与直径为6 mm,间距为100 mm的箍筋。试件 RCS-2 和 RCS-3 的梁和柱连接处均采用 8.8 级 M20 型号高强螺栓连接。上述构件涉及的钢材、钢筋和螺栓的材料属性见表 2。

表 2 钢材、钢筋和螺栓的材料属性

Table 2 Material properties of steel, steel bars and bolts

材料等级	取样位置	弹性模量/GPa	$f_y$ /MPa	$\varepsilon_y$	$f_u$ /MPa	$\varepsilon_u$
Q235	梁腹板与钢板	198	308.30	0.00 206	450.50	0.159
	梁翼缘与加劲肋	205	254.50	0.00 217	423.20	0.161
HRB400	纵筋	196	479.30	0.00 213	631.20	0.153
HPB300	箍筋	201	342.70	0.00 221	487.60	0.196
8.8	高强螺栓	200	780.00	0.00 202	900.00	0.136

图 7 表明了 3 个框架试件的不同梁柱节点连接形式。试件 RCS-1 的 H 型钢梁与混凝土柱通过钢板箍焊接连接,实现刚性连接,可传递弯矩。混凝土柱内设置水平加劲板可提高节点抗弯能力和刚度,梁侧加焊加劲肋可提高钢梁与钢板箍之间的焊接强度;试件 RCS-2 的钢筋混凝土柱通过钢板箍、外伸梁、端板和高强螺栓与钢梁连接,借助两块端板之间的卡槽和螺栓传递梁端剪力;试件 RCS-3 的钢筋混凝土柱采用钢板箍与加劲肋与钢梁连接固定,实现框架在水平荷载作用下的受力传递。其中连接件及细部构造尺寸见文献[22]。

试件 RCS-1、RCS-2 和 RCS-3 框架有限元模型中的接触包括基础梁与柱底、钢梁与钢板箍、钢板箍与混凝土柱、加劲肋与钢梁、钢筋笼与混凝土等。其中基础梁与柱底、钢板箍与混凝土柱采用绑定约束,钢筋笼与内部加劲肋采用内置区域的命令嵌入混凝土内,其余均设置为“面面”接触,接触法线方向为“硬接触”并允许接触后分离,切线方向为“罚摩擦”且摩擦系数设置为 0.3。

柱顶及柱端加载点采用耦合方式将参考点与柱表面进行约束,并在参考点上施加荷载,基础梁在底部及四周限制 X、Y、Z 这 3 个方向的平动及转动共 6 个自由度,如图 7 所示。整个加载过程共分为 4 个分析步,初始分析步施加基础梁的完全固定边界条件,第 1 个分析步先采用“Bolt Load”对高强螺栓施加预紧力 120 kN,第 2 个分析步设置为螺栓固定在当前长度,第 3 个分析步在柱顶施加轴压,并在柱端开始施加水平位移往复加载。加载制度依据 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》<sup>[20]</sup>,加载位移值以层间位移角的倍数为级差进行控制加载并循环 3 次,加载制度如表 3 所示。

表 3 加载制度

Table 3 Loading system

级数	加载方式	加载侧向位移/mm	循环次数	层间位移角/%
1		4.90	3	0.2
2		9.80	3	0.4
3		14.70	3	0.6
4	位移加载	17.15	3	0.7
5		34.30	3	1.4
6		51.45	3	2.1
7		68.60	3	2.8
8		85.75	3	3.5

### 3.3 计算结果分析

#### 3.3.1 应力云图

各试件的有限元模型中混凝土柱构件在达到 3.5%层间位移时的受压及受拉损伤的破坏模式,如图 8 所示。对比各混凝土柱的拉压损伤云图可知,常规 RCS 框架柱的混凝土受压损伤区域集中在柱底及钢板箍交叉部位;可拆卸 RCS 框架柱(试件 RCS-2、RCS-3)的混凝土受压损伤区域集中于柱底和钢板箍下部相接的混凝土部位,并且受压损伤区域较常规 RCS 框架扩大并向框架柱中部延伸。将有限元模型的受拉损伤视为裂缝开展,受拉损伤图表明 3 个 RCS 框架试件的柱底及钢板箍交接部位均出现交叉斜裂缝,裂缝沿柱中部扩展,而可拆卸 RCS 框架试件因混凝土受拉损伤产生的斜裂缝破坏更为显著。

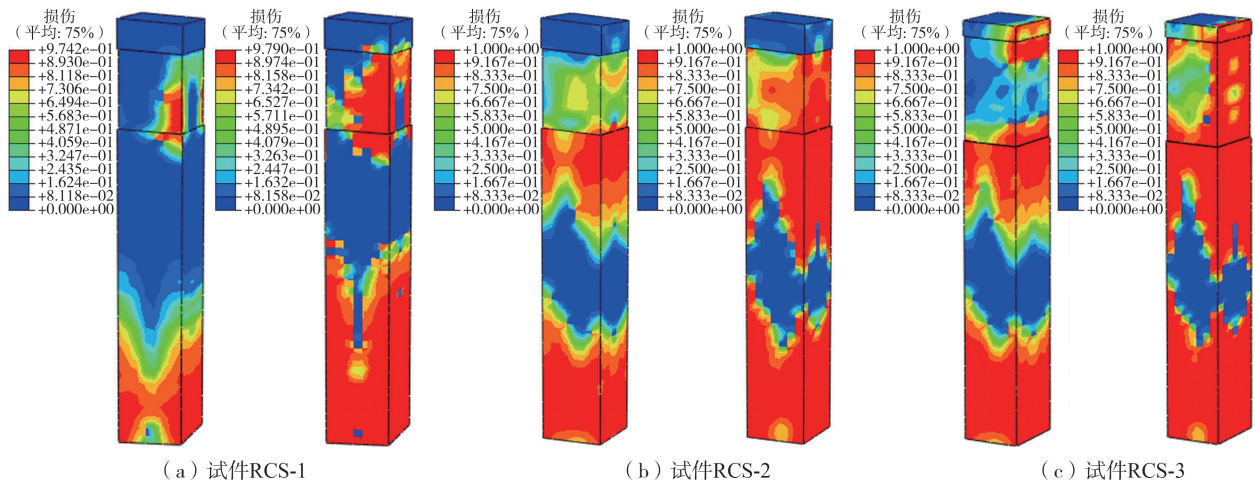


图 8 混凝土柱拉压损伤云图

Fig. 8 Tensile and compressive damage cloud diagram of concrete columns

图 9~图 11 为各试件中钢板箍、钢梁及螺栓等连接件构件的 Mises 等效应力云图。常规 RCS 框架试件的钢板箍存在明显的应力集中现象,最大应力为 442.24 MPa,出现在钢板交接区域,说明该区域钢板已经产生塑性变形,而对于 2 个可拆卸 RCS 试件的钢板箍出现最大应力分别为 241.80、289.40 MPa,结果表明钢材

并未发生屈服。图 10 标注了各钢梁出现的最大 Mises 等效应力及 PEEQ 塑性应变,可以看出常规 RCS 框架试件的钢梁并未达到屈服强度,而可拆卸 RCS 试件的钢梁均出现应力集中且已经发生屈服。试件 RCS-2 钢梁应力及应变集中在柱端外伸梁与端板交接部位,最大应力为 390.80 MPa,应变为 0.111 2,这说明钢梁翼缘已经进入塑性变形阶段,但并未发生破坏,端板之间连接的螺栓同样达到屈服强度。试件 RCS-3 钢梁应力及应变集中在梁端翼缘上下连接件与柱端钢板箍对接部位,最大应力为 599.80 MPa,应变为 0.344 0,结果表明该区域已经发生较大塑性变形并破坏,但连接件与钢梁之间的螺栓并未出现屈曲现象。如图 11 所示,常规 RCS 框架与可拆卸 RCS 框架试件的屈服模式均呈现出柱底纵筋达到屈服应变,然后梁端先屈服,再接着是可拆卸连接件区域进入屈服状态。

结合上述分析,对比常规 RCS 框架试件在水平往复荷载作用下的应力分布规律,可以发现可拆卸 RCS 试件 RCS-2 和 RCS-3 可将应力及变形集中控制在中部长梁构件部位,这不仅能有效降低钢梁及焊接焊缝撕裂的脆性破坏现象,还能保证 RCS 框架在震后的可拆卸功能的有效实施。

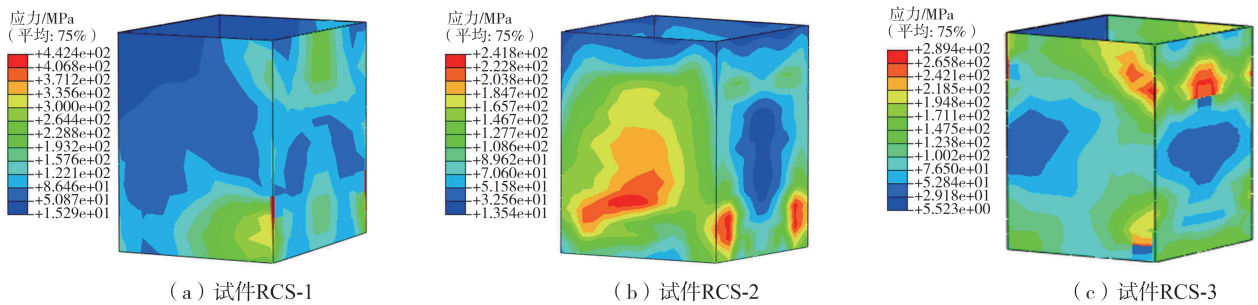


图 9 钢板箍 Mises 等效应力云图

Fig. 9 Cloud diagram of Mises equivalent stress of steel plate hoop

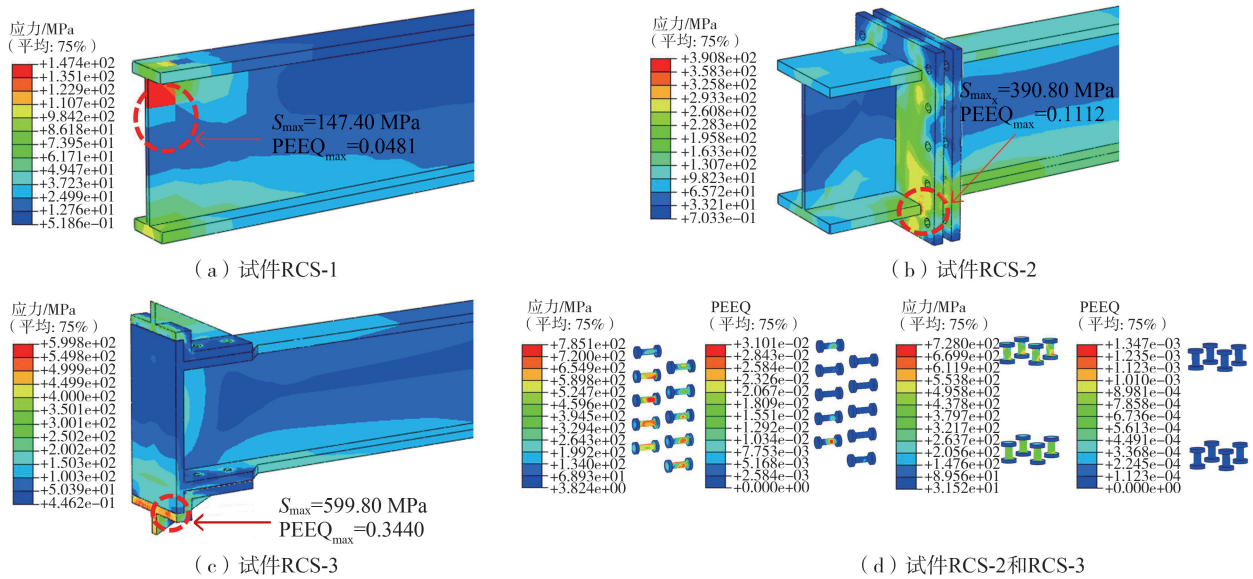


图 10 钢梁及螺栓 Mises 等效应力云图

Fig. 10 Cloud diagram of Mises equivalent stress of steel beam and bolt

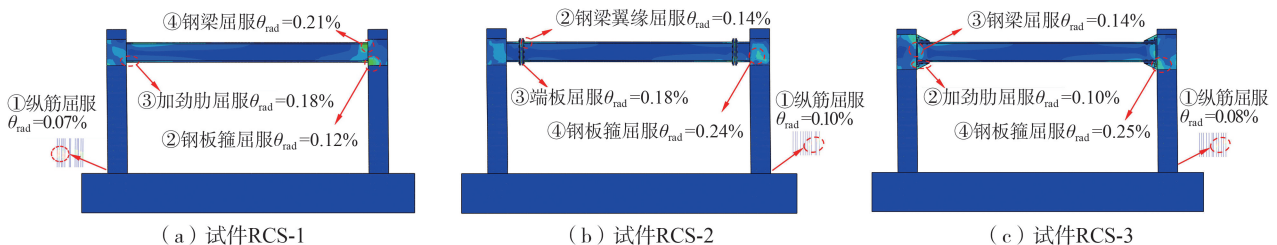


图 11 各 RCS 框架试件的屈服模式

Fig. 11 Yield modes of each RCS frame specimens

### 3.3.2 可拆卸性分析

试件 RCS-2 与 RCS-3 的节点分别采用不同的可拆卸连接方式,而固定连接件均为高强螺栓。在地震荷载作用下框架结构可拆卸性能是否能够满足 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[21]</sup>要求,并达到可拆卸节点设计目的。下面对试件 RCS-2、RCS-3 中高强螺栓在不同层间位移角限值下进行应力及变形分析。

图 12 和图 13 为试件 RCS-2 与 RCS-3 中在层间位移角分别达到 1/550 和 1/30 时,试件中高强螺栓的应力及应变云图。由图可知,试件 RCS-2 层间位移角达到 1/550 时,螺栓群出现最大应变为 0.006,而继续加载至层间位移角为 1/30 时,最大应变达到 0.021;试件 RCS-3 层间位移角达到 1/550 时,螺栓最大应力为 551.07 MPa,应变值为 0,当继续加载至层间位移角 1/30 时,螺栓最大应力上升至 780.25 MPa 达到螺栓屈服荷载,最大应变为 0.001。从上述分析结果可以发现,试件 RCS-2 和试件 RCS-3 在达到弹塑性层间位移角限值后,高强螺栓产生的应变非常小,并不会影响后续试件中螺栓的拆卸,这表明了新型可拆卸梁柱节点具备可拆卸性,在震后可以实现构件拆卸及更换的要求。

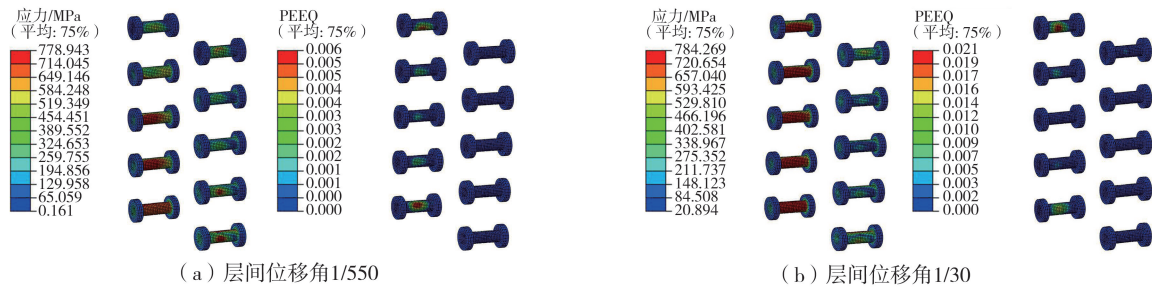


图 12 RCS-2 试件中螺栓在不同层间位移角下的应变和 Mises 应力云图

Fig. 12 Cloud diagram of strain and Mises stress of RCS-2 specimens under different interlayer displacement angles

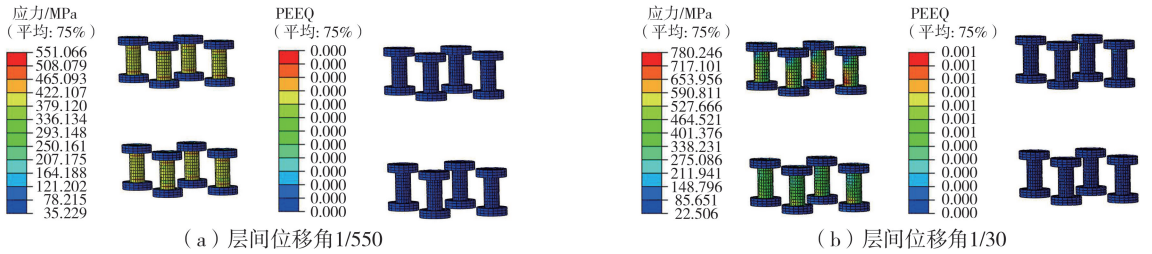


图 13 试件 RCS-3 的螺栓在不同层间位移角下的应力及应变云图

Fig. 13 Cloud diagram of strain and Mises stress of RCS-3 specimens under different interlayer displacement angles

### 3.3.3 滞回性能

图 14 为 3 个框架试件有限元计算结果的荷载-位移滞回曲线。由图可知,3 个试件的滞回曲线整体呈现梭形,这表明试件具有较好的耗能能力。在弹性及弹塑性阶段初期,框架的水平承载力随位移加载大幅增加;当处于弹塑性后期与塑性变形阶段后,水平承载力增幅趋于平缓;当框架出现塑性铰并破坏后,承载力开始下降。可拆卸 RCS 框架试件 RCS-2 和 RCS-3 相较于不可拆卸 RCS 框架试件 RCS-1 的滞回曲线包络面积更大、更加饱满,说明了前 2 个框架的耗能优于后者。

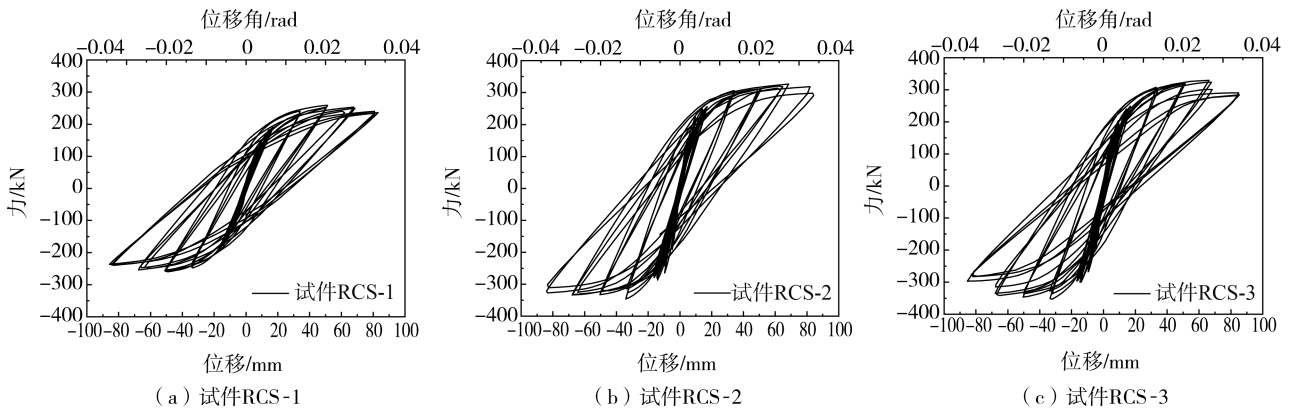


图 14 各试件滞回曲线

Fig. 14 Hysteresis curves of various specimens

### 3.3.4 骨架曲线

试件滞回曲线的包络线,即试件的荷载-位移骨架曲线,可通过连接各位移加载级第1圈的峰值点得到。对3个试件的滞回曲线进行分析处理,得到各试件的骨架曲线如图15所示。结果表明,3个试件的骨架曲线可以分为3个阶段:弹性阶段、屈服强化阶段和退化阶段。部分试件未表现出明显的水平承载力退化阶段。与试件RCS-1相比,试件RCS-2和RCS-3具有较大的初始弹性刚度和更大的水平承载力,而试件RCS-2与RCS-3的承载力没有明显退化,变形更显著,说明这2种可拆卸RCS框架结构表现出良好的延性。这表明钢梁的屈服变形能参与框架的能量耗散。试件RCS-2与RCS-3的侧向承载力远大于试件RCS-1,说明了2种可拆卸梁柱采用高强螺栓连接能提高试件的承载力和整体性能。

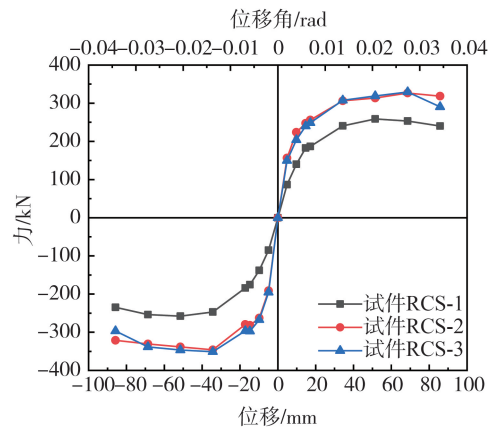


图15 骨架曲线对比

Fig. 15 Comparison of skeleton curves

### 3.3.5 刚度退化和延性

刚度退化曲线对比如图16所示。由图可知,试件RCS-2与RCS-3刚度退化速度较快,而试件RCS-1刚度退化较慢,3个试件刚度退化速度呈现逐渐变缓的趋势,这是因为试件RCS-2从梁端的连接端板的弯曲耗能转变为连接螺栓的摩擦耗能,试件RCS-3由梁端加劲肋的弯曲变形转化为连接螺栓的摩擦耗能。这表明了混凝土柱与钢梁采用螺栓连接增加了RCS框架的初始刚度且改变了试件的力学性能。

试件的延性与累计耗能分析如图17和表4所示。由表4可知,3个试件均在正荷载(推)下的延性系数值低于负荷载(拉)下的延性系数值,而试件RCS-2和RCS-3的延性系数分别要比试件RCS-1高出59.89%、49.57%。

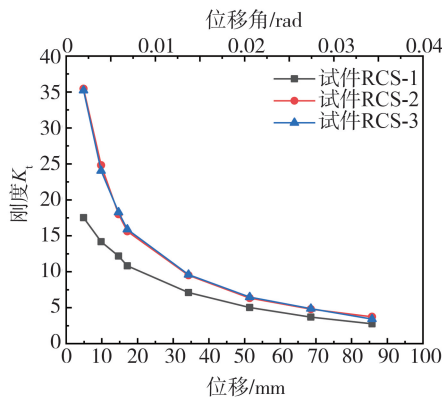


图16 刚度退化曲线对比

Fig. 16 Comparison of stiffness degradation curve

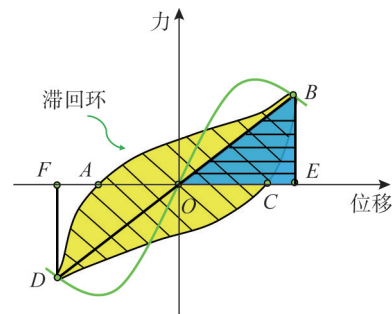


图17 等效黏滞阻尼系数计算简图

Fig. 17 Calculation diagram of equivalent viscous damping coefficients

表4 各RCS框架试件的位移延性系数

Table 4 Displacement ductility coefficients of various RCS frame specimens

试件编号	加载方向	屈服强度 $P_y/kN$	屈服应变 $\delta_y/\%$	极限强度 $P_u/kN$	$0.85P_u/kN$	极限应变 $\delta_u/\%$	$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$	$\mu_{average}$
RCS-1	推	212.79	1.03	258.91	220.07	3.50	3.40	3.49
	拉	-209.51	-0.98	-257.75	-219.09	3.50	3.59	
RCS-2	推	264.51	0.84	326.51	277.53	3.50	4.18	5.58
	拉	-273.46	-0.50	-346.19	-294.26	3.50	6.99	
RCS-3	推	261.46	0.90	329.35	279.95	3.48	3.89	5.22
	拉	-290.29	-0.53	-351.13	-298.46	3.47	6.56	

### 3.3.6 耗能

框架结构的耗能能力可以用等效黏滞阻尼系数  $\xi_e$  表示,该系数是基于阻尼力做功等效原理计算得到,

针对整体试件在加载过程中某个瞬时位移状态下的阻尼比。按照图 17 中滞回曲线的最大滞回换半圈  $ABC$  与横坐标包围面积  $S_1$  与三角形  $OBE$  面积  $S_2$  的比值计算得到。等效黏滞阻尼系数  $\xi_e$  计算公式为

$$\xi_e = \frac{1}{2\pi} \times \frac{S_1}{S_2} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{S_{\text{曲线}OABCO}}{S_{\Delta OBE}} \quad (1)$$

如图 18 和图 19 所示,对比 3 个试件的等效黏滞阻尼系数以及累计耗能曲线可以看出,试件 RCS-2 和 RCS-3 在极限位移加载作用下的累计耗能分别比试件 RCS-1 高出 29.78%、23.54%;试件 RCS-2 和 RCS-3 的等效黏滞阻尼系数相较于试件 RCS-1 分别提高了 8.19%、10.53%。结果表明 2 种新型可拆卸梁柱节点连接方式可以显著提高 RCS 框架结构的耗能性能。

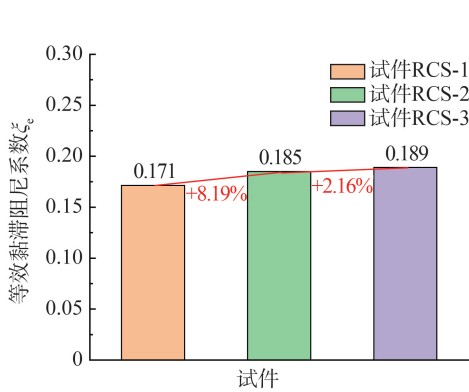


图 18 等效黏滞阻尼系数对比

Fig. 18 Comparison of equivalent viscous damping coefficients

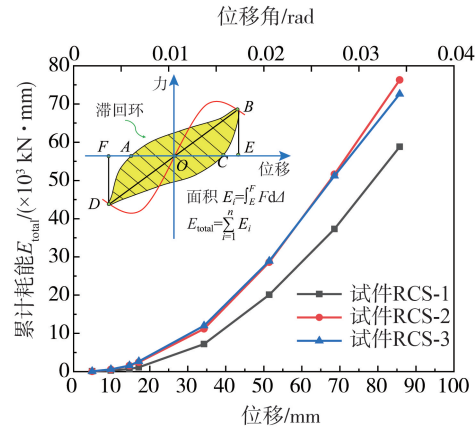


图 19 累计耗能曲线对比

Fig. 19 Comparison of cumulative energy dissipation curves

## 4 结论

通过对比 RCS 框架试验与有限元模拟结果,验证了有限元模型的有效性。基于验证的有限元建模技术及分析方法对可拆卸装配式 RCS 组合框架进行了水平往复荷载下的抗震性能分析,得到以下结论:

1) 相较于试件 RCS-1, RCS-2 和 RCS-3 采用了新型的可拆卸连接措施,可以实现塑性铰外移,将应力和应变集中在远端梁截面区域,有效保护了节点核心区域。

2) 新型可拆卸节点构造提高了整体框架结构极限承载力、刚度;滞回曲线更加饱满,减缓强度和刚度退化速率,有效保证传力路径的连续性,且其各项抗震性能指标明显优于传统 RCS 框架结构。

3) 与不可拆卸 RCS-1 框架试件相比, 2 个可拆卸 RCS 框架试件的延性与累计耗能分别提高了 59.89%、49.57% 和 29.78%、23.54%, 表明了新的节点构造能大幅提升框架耗能能力。

4) 在试件 RCS-1、RCS-2 和 RCS-3 的屈服模式中均出现柱底纵筋最先进入屈服状态, 这表明了在后续的研究中更应该考虑材料等级的适配性。

5) 可拆卸 RCS 框架试件不仅在抗震性能方面优于现浇 RCS 框架, 而且易于拆卸与装配, 降低框架结构拆除难度, 可显著减少建筑结构拆除产生的建筑垃圾。

## 参考文献:

- [1] 韦俊, 郑东东, 郭宏超, 等. 带悬臂拼接段装配式梁柱节点抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(2): 155-163.  
WEI Jun, ZHENG Dongdong, GUO Hongchao, et al. Study on seismic performance of prefabricated beam-column joint with cantilevered splicing sections[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(2): 155-163. (in Chinese)
- [2] 何文福, 康嘉志, 刘文燕, 等. 装配整体式黏滞阻尼器减震框架试验及参数分析研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(2): 103-112.  
HE Wenfu, KANG Jiazhi, LIU Wenyan, et al. Test and parameter analysis of precast monolithic frame with a viscous damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(2): 103-112. (in Chinese)
- [3] 李慎, 李容容, 李晓蕾, 等. 带悬臂梁段连接的装配式梁柱节点拟静力试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 239-249.  
LI Shen, LI Rongrong, LI Xiaolei, et al. Quasi-static experimental study on assembled beam-column joints with cantilever beam connections[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 239-249. (in Chinese)

- [4] 王斌, 霍光, 李藤, 等. T形型钢混凝土柱-钢梁节点滞回特性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(6): 114-123.  
WANG Bin, HUO Guang, LI Teng, et al. Study on hysteretic behavior of T shaped joints composed by SRC column-steel beam[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(6): 114-123. (in Chinese)
- [5] SHEIKH T M, DEIERLEIN G G, YURA J A, et al. Beam-column moment connections for composite frames: Part 1[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(11): 2858-2876.
- [6] ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete. Guidelines for design of joints between steel beams and reinforced concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(8): 2330-2357.
- [7] YANG Y B, CHEN B X, ZENG W Z, et al. Utilization of completely recycled fine aggregate for preparation of lightweight concrete partition panels[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2021, 15(1): 32.
- [8] DEIERLEIN G G, SHEIKH T M, YURA J A, et al. Beam-column moment connections for composite frames: Part 2[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(11): 2877-2896.
- [9] MEN J J, ZHANG Y R, GUO Z F, et al. Experimental research on seismic behavior of a composite RCS frame[J]. Steel and Composite Structures, 2015, 18(4): 971-983.
- [10] 潘秀珍, 陈仕伟, 李皓, 等. RC框架-轻钢增强混合结构的新型外箍式箱型柱节点抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(6): 94-104.  
PAN Xiuzhen, CHEN Shiwei, LI Hao, et al. Research on seismic performance of a new type of external hoop box column joint of RC frame-light steel mixed structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(6): 94-104. (in Chinese)
- [11] XIAO J Z, DING T, ZHANG Q T. Structural behavior of a new moment-resisting DfD concrete connection[J]. Engineering Structures, 2017, 132: 1-13.
- [12] DING T, XIAO J Z, CHEN E C, et al. Experimental study of the seismic performance of concrete beam-column frame joints with DfD connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(4): 04020036.
- [13] 伍云天, 明亮, 肖岩, 等. 装配式钢梁-预制柱组合框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(9): 66-71.  
WU Yuntian, MING Liang, XIAO Yan, et al. Experimental study on seismic behavior of assembled steel beam-PC column composite frames[J]. Building Structure, 2013, 43(9): 66-71. (in Chinese)
- [14] 门进杰, 胡俊, 王秋维, 等. 基于 OpenSees 的 RCS 组合框架结构抗震性能模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(5): 649-655, 662.  
MEN Jinjie, HU Jun, WANG Qiuwei, et al. Simulation and analysis on seismic performance of RCS frame using OpenSees[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(5): 649-655, 662. (in Chinese)
- [15] 门进杰, 周婷婷, 张雅融, 等. 钢筋混凝土柱-钢梁组合框架结构基于性能的抗震设计方法和量化指标[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊2): 28-34.  
MEN Jinjie, ZHOU Tingting, ZHANG Yarong, et al. Performance-based seismic design method and quantified performance index of RCS composite frame structure[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(Sup. 2): 28-34. (in Chinese)
- [16] 门进杰, 熊礼全, 雷梦珂, 等. 楼板对钢筋混凝土柱-钢梁空间组合体抗震性能影响研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 69-77, 87.  
MEN Jinjie, XIONG Liqun, LEI Mengke, et al. Seismic performance of reinforced concrete column-steel beam subassemblies considering effect of RC slab[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 69-77, 87. (in Chinese)
- [17] 门进杰, 霍文武, 兰涛, 等. 带可更换构件的 RCS 混合框架结构受力特性及抗震设计方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 42-52.  
MEN Jinjie, HUO Wenwu, LAN Tao, et al. Mechanical behavior and seismic design method of RCS hybrid frame structure with replaceable components[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6): 42-52. (in Chinese)
- [18] LI W, XIONG J G, WU L J, et al. Experimental study and numerical analysis on seismic behavior of composite RCS frames[J]. Structural Concrete, 2020, 21(5): 2044-2065.
- [19] GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
GB/T 228.1—2010 Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [20] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
JGJ/T 101—2015 Specification for seismic test of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [21] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [22] LI W, YE H, WANG Q, et al. Experimental study on the seismic performance of demountable RCS joints[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49: 104082.