

既有混凝土梁-耗能段组合节点力学性能试验研究

黄 昆¹, 曾思智^{1,2}, 孙志颖², 胡淑军^{2*}

(1. 江西中煤建设集团有限公司, 南昌 330001; 2. 南昌大学 工程建设学院, 南昌 330031)

摘要: 在既有混凝土框架结构中引入Y形偏心钢支撑, 可得到新型既有混凝土框架-Y形偏心支撑结构, 其具有抗侧刚度大、抗震性能好、震后功能可恢复等特点。其中, 既有混凝土梁-耗能段组合节点(ECB-SL组合节点)是实现新型结构预期性能的关键之一。基于此, 设计4种基于端板连接、U形-侧面连接、U形-角钢螺栓连接、U形-三面连接的ECB-SL组合节点试件, 并进行往复加载试验研究, 得到各节点的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、割线刚度、耗能能力和荷载-应变曲线。结果表明, 基于端板连接、U形-侧面连接、U形-角钢螺栓连接的试件承载能力不足, 且节点破坏均为非预期的锚栓被拔起或混凝土被拉裂。基于U形-三面连接的试件经历了耗能段屈服、耗能段屈曲、既有梁开裂、裂缝发展和耗能段破坏阶段, 其破坏模式、超强系数和塑性转角均与纯短剪切型耗能段的对应值相同, 设计时建议使用。

关键词: 既有混凝土梁; Y形偏心钢支撑; 短剪切型耗能段; 力学性能; 滞回曲线

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0019-10

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20231127001

Experiment Study on the Mechanical Property of a Novel Existing Concrete Beam-Shear Link Composite Connection

HUANG Kun¹, ZENG Sizhi^{1,2}, SUN Zhiying², HU Shujun^{2*}

(1. Zhongmei Engineering Group Ltd., Nanchang 330001, China; 2. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

*Corresponding author: hushujun@ncu.edu.cn

Abstract: By combining an existing concrete frame with a Y-shaped eccentrically steel brace, an innovative existing reinforced concrete-Y-shaped eccentrically steel brace structure with high lateral stiffness, good seismic performance and seismic resilience capacity was developed, and the existing concrete beam-shear link (ECB-SL) composite connection was a key point to achieve the expected seismic performance of the innovative structure. In this paper, specimens with endplate connection, U shape-side plate connection, U shape-angle connection and U shape-three side bolted connection, respectively, were studied by the cyclic loading tests, and the failure modes, hysteresis curves, skeleton curves, secant stiffness, energy dissipation capacity and load-strain curves were investigated. The test results show that the unexpected failure modes of specimens were anchor bolts tension or concrete cracking, so these composite

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(52468025、51908268), 江西省自然科学基金(20224BAB204062), 江西省地质局青年科学技术带头人培养计划项目(2022JXDZKJRC09), 江西省主要学科学术和技术带头人培养项目(20232BCJ23065)

作者简介:

黄 昆(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事建筑结构抗震性能和施工技术方面的研究。E-mail: 122123144@qq.com。

曾思智(1986—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事建筑结构抗震性能和施工技术方面的研究。

通信作者:

胡淑军(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢结构、组合结构和装配式结构抗震性能方面的研究。

E-mail: hushujun@ncu.edu.cn。

connections cannot have enough bearing capacity. Specimen experienced a failure mode of link yielding, link buckling, concrete cracking, crack propagation, and link fracture. The failure mode, overstrength factor and inelastic rotation of the specimen were the same as those of the pure very short shear link, which was recommended in the design of ECB-SL composite connections.

Keywords: existing concrete beam; Y-shaped eccentrically steel brace; very short shear link; mechanical property; hysteresis curve

目前,我国存在较多已建造并使用几十年的钢筋混凝土框架结构。这类结构随着使用时间的延长,可能出现性能劣化和强度下降,或者承载力与抗侧刚度严重不足等问题^[1-3]。另外,部分20世纪建成的混凝土框架结构在设计时未考虑地震作用,但当前国家对部分地区的抗震设防烈度提出了更高要求,即仅按竖向荷载设计且未考虑水平地震作用的混凝土框架结构可能无法满足现在对建筑结构安全性的要求^[4]。

对于既有钢筋混凝土框架结构的加固改造,常用方法包括加大截面加固法、外粘板加固法、外包型钢加固法、置换混凝土加固法、外粘纤维材料加固法等^[5]。然而,上述方法可能存在加固过程繁琐、抗腐蚀性差、用钢量大等缺点,而且不适用于对抗侧刚度和震后功能恢复能力要求较高的既有结构^[6-7]。因此,需进一步有效提高既有混凝土框架结构的抗震性能,以便与当前国家对建筑结构的更高抗震要求相一致^[8-9]。

在既有混凝土结构中设置中心支撑^[10]、偏心支撑^[11]或外附装配式混凝土框架-支撑结构^[12]是提高结构抗侧刚度最简单、有效的方法之一。采用中心支撑加固钢筋混凝土框架可提高结构的承载能力和抗侧刚度,但结构变形能力较差,且钢支撑受压时容易发生屈曲破坏^[13]。将钢支撑更换为屈服约束支撑,可有效提高结构的延性、承载力、抗侧刚度和滞回性能等,但屈服约束支撑构造复杂,且成本过高^[14]。由于偏心支撑结构在遭遇地震作用时,耗能段可耗散输入的能量,并使其他构件免受损伤,震后仅需更换耗能段即可恢复结构功能^[15],因此,如图1a)所示,将偏心支撑引入既有混凝土框架中,可得到一种既有混凝土框架-Y形偏心支撑结构且具有承载力高、抗震性能好和震后功能可恢复等特点。

既有混凝土框架-Y形偏心支撑结构中,既有混凝土梁与耗能段的连接节点力学性能是实现预期结构抗震性能的关键因素之一^[16-18]。YOUSSEF等^[16]在混凝土梁底与耗能段之间通过后锚固螺栓连接,由于节点提前破坏使得耗能段未能发挥出良好的耗能能力;赵宝成等^[17]在耗能段与混凝土梁间分别采用L形钢板连接和槽形板连接,指出采用此种连接的连接节点破坏程度较小,破坏模式较为理想,并提出了节点设计方法;孙国华等^[18]提出了一种连接耗能段与混凝土梁的U形外包钢连接方式,耗能段端板与混凝土梁顶面之间的分离导致滞回曲线劣化,节点耗能能力一般。另外,长度比小于1.0的短

剪切型耗能段与普通剪切型耗能段相比,具有更高的刚度、延性、受剪承载力和耗能能力^[19]。将短剪切型耗能段用于既有混凝土框架结构时,如图1b)所示,ECB-SL组合节点需要具有更高的承载力。

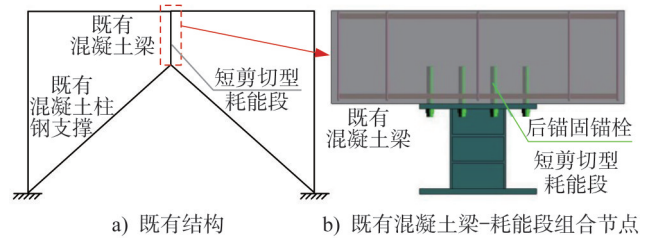


图1 既有混凝土框架-Y形偏心支撑结构

Fig. 1 A novel existing reinforced concrete frame-Y shaped eccentrically steel brace structure

基于此,本文提出4种采用后锚固锚栓的既有混凝土梁-耗能段(existing concrete beam-shear link, ECB-SL)组合节点,包括端板连接、U形-侧面连接、U形-角钢螺栓连接、U形-三面连接。分别设计上述4个ECB-SL组合节点试件,并进行低周往复试验研究,得到其破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、割线刚度、耗能能力和荷载-应变曲线等。对比不同节点的力学性能,给出相应节点的设计建议,为该种节点在既有混凝土框架-Y形偏心支撑结构中的应用提供理论基础。

1 试验研究

1.1 设计方法

1.1.1 短剪切型耗能段

短剪切型耗能段的塑性剪力 V_p 可表示为^[19]:

$$V_p = f_{yw} h_w t_w \quad (1)$$

式中: f_{yw} 为腹板屈服剪应力(取实测值); h_w 、 t_w 分别为腹板高度、厚度。

耗能段屈服剪力确定后,可得到腹板的面积和厚度,且翼缘尺寸、加劲肋间距和加劲肋厚度需满足规范要求^[4]。由于短剪切型耗能段的长度比不超过1.0,因此可得其长度 e 为^[20]:

$$e \leq \frac{M_p}{V_p} \quad (2)$$

式中: M_p 、 V_p 分别为塑性弯矩、塑性剪力。

在得到短剪切型耗能段的截面尺寸后,可计算其极限受剪承载力 V_u ^[21]:

$$V_u = 0.58f_{uw}h_w t_w + (3f_{uw}b_t t_i^2 + 1.8f_{uw}b_t t_s^2)/e \quad (3)$$

式中： f_{uw} 为腹板极限剪应力； b_t 、 t_i 分别为翼缘宽度、厚度； t_s 为加劲肋厚度。

耗能段极限剪力 V_u 与端弯矩 M_u 关系为^[20]：

$$M_u = \frac{1}{2} V_u e \quad (4)$$

在明确短剪切型耗能段极限承载力后，可进行 ECB-SL 节点连接处后锚固螺栓设计。

1.1.2 后锚固锚栓

ECB-SL 组合节点连接处承受剪力和弯矩共同作用。《混凝土结构后锚固技术规程》(JGJ 145—2013)^[22] 中明确了后锚固锚栓的剪力和弯矩计算方法。

(1) 剪力

当 ECB-SL 组合节点处的剪力由后锚固锚栓共同承担时，各后锚固锚栓剪力 V_s 需小于其受剪承载力设计值 $V_{Rd,s}$ ，具体表示为：

$$V_s = \frac{V_u}{n} \leq V_{Rd,s} \quad (5)$$

$$V_{Rd,s} = V_{Rd,c} / \gamma_{Rs,V} \quad (6)$$

$$V_{Rd,c} = 0.5A_s f_{stk} \quad (7)$$

式中： n 为后锚固锚栓数量； $V_{Rd,c}$ 为锚栓受剪承载力标准值； $\gamma_{Rs,V}$ 为锚栓受剪承载力分项系数； A_s 为锚栓面积； f_{stk} 为锚栓极限强度标准值。

(2) 弯矩

由于耗能段不产生轴力，各锚栓仅承担弯矩产生的轴向拉力。离中和轴最远的锚栓所受拉力 N_{S1} 需小于其受拉承载力设计值 $N_{Rd,s}$ ，具体表示为：

$$N_{S1} = \frac{M y_1}{\sum y_i^2} \leq N_{Rd,s} \quad (8)$$

$$N_{Rd,s} = N_{Rd,c} / \gamma_{Rs,N} \quad (9)$$

$$N_{Rd,c} = A_s f_{stk} \quad (10)$$

式中： M 为锚栓弯矩； y_1 、 y_i 分别为离中和轴最远锚栓、第 i 排锚栓至形心轴的垂直距离； $N_{Rd,c}$ 为锚栓受拉承载力标准值； $\gamma_{Rs,N}$ 为锚栓受拉承载力分项系数。

(3) 拉剪复合受力

当后锚固锚栓同时承受由剪力和弯矩产生的拉力作用时，需进行拉剪复合承载力验算：

$$\left(\frac{N_s}{N_{Rd,s}} \right)^2 + \left(\frac{V_s}{V_{Rd,s}} \right)^2 \leq 1 \quad (11)$$

式中： N_s 为锚栓拉力。

(4) 锚栓锚固深度

后锚固锚栓的埋置深度是影响其承载力和破坏模式的主要因素之一。为避免发生混凝土锥体破坏，后锚固锚栓的有效埋深 h_{ef} 可表示为^[22]：

$$h_{ef} = \frac{\alpha_{setup} N_{Ru}}{\pi d \tau_{Ru}} \quad (12)$$

式中： d 为锚栓直径； α_{setup} 为抗拉系数，取 0.7； τ_{Ru} 为锚栓黏结强度； N_{Ru} 为锚栓极限抗拉承载力。

1.2 试件模型

基于 1.1 节 ECB-SL 组合节点设计方法，设计 4 个考虑不同连接形式的试件模型 ECB-SL-1~ECB-SL-4，分别为 2 端板连接、U 形-侧面连接、U 形-角钢螺栓连接和 U 形-三面连接，如图 2 所示。各构件参数如下：

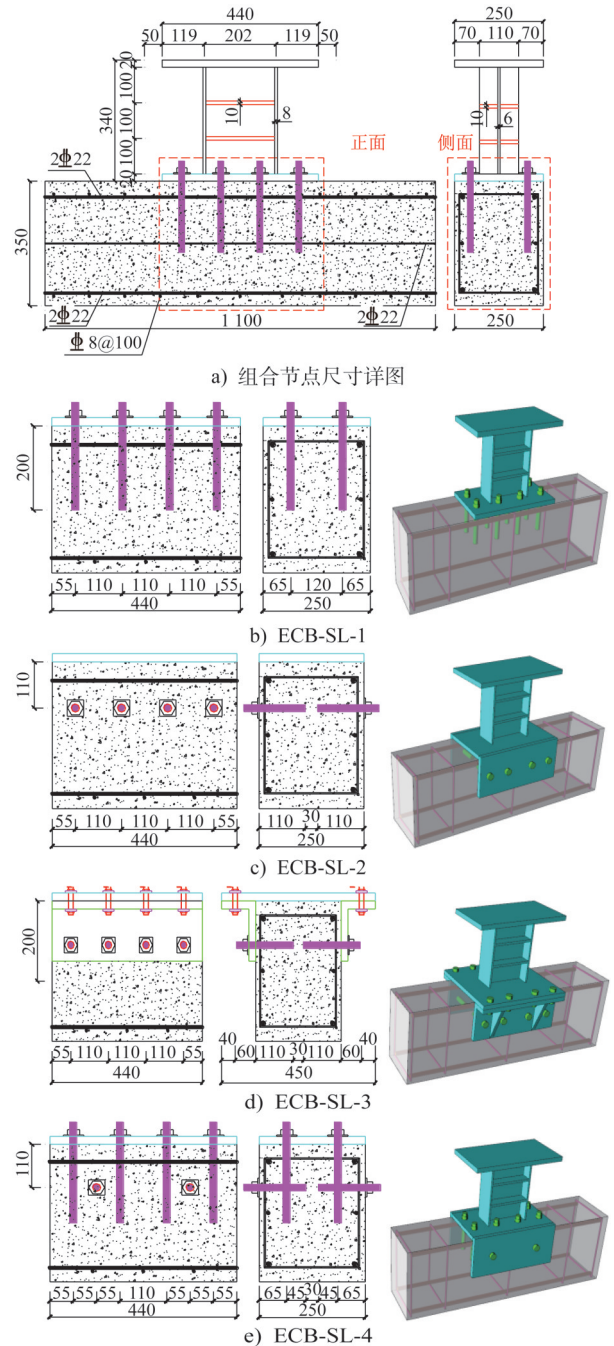


图 2 ECB-SL 组合节点试件构造(单位: mm)

Fig. 2 Details of the ECB-SL connection specimens (unit: mm)

(1) 短剪切型耗能段

各试验模型中,短剪切型耗能段截面尺寸均为 H210 mm×110 mm×6 mm×8 mm,长度为 300 mm,长度比为 0.87,材质为 Q355B。加劲肋双侧布置,加劲肋间距为 100 mm,加劲肋厚度为 10 mm。

(2) 既有混凝土梁

各模型中混凝土梁截面尺寸均为 1 100 mm×250 mm×350 mm(长度×宽度×高度),混凝土等级为 C40。梁上、下均布置 2 根直径为 22 mm 的纵向钢筋;中间布置 2 根直径为 12 mm 的纵向构造钢筋;箍筋直径均为 8 mm,间距均为 100 mm。钢筋等级均为 HRB400 级。

(3) 组合节点

如图 2b)~e)所示,试件 ECB-SL-1 中,在耗能段端板处设置 8 个后锚固锚栓;试件 ECB-SL-2 中,梁两侧各设置 4 个后锚固锚栓;试件 ECB-SL-3 中,既有混凝土梁侧面角钢均设置 4 个后锚固锚栓,并与耗能段端板采用螺栓连接;试件 ECB-SL-4 中,U 型钢正面设置 8 个后锚固锚栓,两侧各设置 2 个后锚固锚栓。另外,上述节点中后锚固锚栓直径为 22 mm,正面锚固深度为 200 mm,侧面锚固深度为 110 mm。

1.3 材料性能

耗能段和既有混凝土梁材性试件制作时,随机抽取厚度为 6 mm、8 mm 和 10 mm 的 Q355B 钢板,以及直径为 8 mm、12 mm 和 22 mm 的 HRB400 钢筋;制作 3 个边长为 150 mm 的立方体试块,在标准养护 28 d 后进行抗压强度试验。各试件材料性能如表 1 所示。

表 1 材料力学参数

Table 1 Mechanical properties of materials

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	抗压强度平均值/MPa
6 mm 钢板	359	539	203	22.5	—
8 mm 钢板	356	542	205	21.9	—
10 mm 钢板	358	535	207	22.4	—
8 mm 钢筋	435	598	—	24.7	—
12 mm 钢筋	434	595	—	26.3	—
22 mm 钢筋	430	589	—	26.0	—
C40 混凝土	—	—	—	—	19.79

1.4 加载装置与制度

本次试验在南昌大学结构实验室内完成。加载装置如图 3 所示,主要包括水平作动器、水平加载梁、底梁、上垫钢梁、下垫钢梁、限制侧移的反力架、立柱、既有混凝土梁、短剪切形耗能段等。其中,底梁固定在地面上,并与立柱、加载梁、反力架形成一套加载系统后,在加载梁一端与作动器连接,由此施加水平往复荷载。在加载梁和底梁间,由上至下分别设置上垫钢、耗能段、既有混凝土梁、下垫梁,由此可对 ECB-SL 组合节点的力学性能进行研究。另外,水平作动器最大输出荷载为 1 000 kN,最大位移为 600 mm。

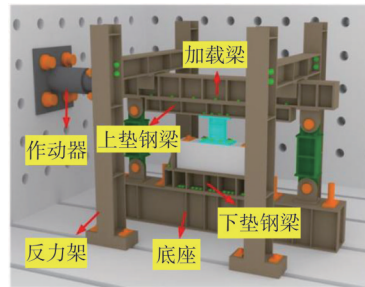


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading setup

采用位移加载方式对各试件进行研究。首先,基于“屈服弯矩法”确定各试件的屈服位移 Δ_y ^[20];随后,采用屈服位移倍数增大的方式持续加载,每级循环 1 圈,如图 4 所示。当试件发生破坏或承载力下降至最大值的 85% 后,停止加载。

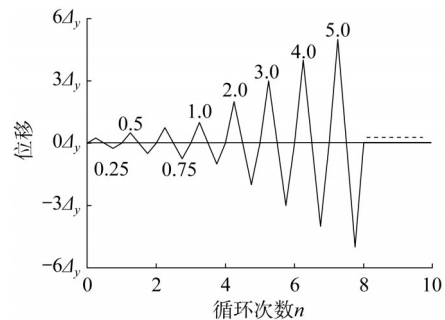


图 4 试验加载制度

Fig. 4 Test loading system

1.5 量测方法

加载过程中,各试件在不同位移下的荷载值可通过作动器读取,位移和应变测量如图 5 所示。

(1) 位移测量

为使短剪切型耗能段和既有混凝土梁的加载位移值同步,需在耗能段上端板右侧分别设置水平、竖向位移计 LV1、LV2。

(2) 应变测量

如图 5 所示,为获取短剪切型耗能段和既有混凝土

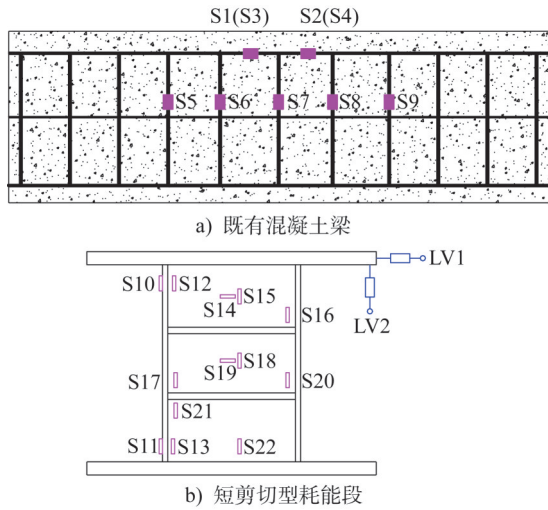


图5 应变测点布置

Fig. 5 Layout of strain measurement points

梁中各关键截面处的应变值,分别在既有混凝土梁上设置测点 S1~S9,在耗能段上设置测点 S10~S22,以判断各截面是否发生屈服或破坏。

2 试验现象及破坏状态

2.1 试件 ECB-SL-1

对试件 ECB-SL-1 进行往复加载试验,得到其破坏模式如图 6 所示,主要包括:耗能段屈服、耗能段屈曲、既有混凝土梁开裂、耗能段端板分离、混凝土被拉裂和后锚固锚栓被拔起。



图6 试件 ECB-SL-1 破坏模式

Fig. 6 Failure modes of specimen ECB-SL-1

加载初期,试件由弹性状态进入屈服状态,屈服位移 Δ_y 约为 4.95 mm,如图 6a) 所示。当加载位移为 19.90 mm ($4\Delta_y$) 时,耗能段腹板和翼缘均出现屈曲现象,与相同截面的短剪切型耗能段屈曲现象基本相同^[20],如图 6b) 所示。尽管此时梁侧面出现了多条宽度不明显的斜裂缝,

但端板连接组合节点仍可为耗能段提供足够的承载力。随后,加载位移继续增大使得既有梁侧面中间后锚固锚栓区域出现更多的竖向裂缝和斜裂缝,并逐渐向锚栓间发展,如图 6c) 所示。当加载位移为 29.70 mm ($6\Delta_y$) 时,最大裂缝长度与锚栓长度接近,约为 200 mm,此时耗能段端板与既有梁分离,表明后锚固锚栓已开始松动,如图 6d) 所示。同时,耗能段端板旁的混凝土也出现拉裂现象,如图 6e) 所示。当加载至正向 34.65 mm 时,后锚固锚栓明显被拔起,耗能段端板发生弯曲,如图 6f) 所示。此时,试件达到极限状态。

2.2 试件 ECB-SL-2

在往复荷载作用下,试件 ECB-SL-2 的破坏模式如图 7 所示,主要包括耗能段屈服、耗能段屈曲、既有梁开裂、混凝土鼓起、混凝土裂缝发展和混凝土被拉裂。

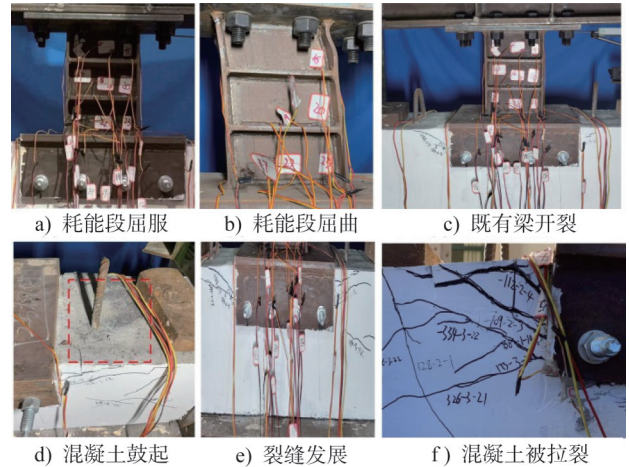


图7 试件 ECB-SL-2 破坏模式

Fig. 7 Failure modes of specimen ECB-SL-2

加载初期,试件逐渐进入屈服状态,屈服位移 Δ_y 为 5.03 mm,如图 7a) 所示。当加载位移为 20.12 mm 时,耗能段腹板和翼缘也都出现了屈曲现象,与试件 ECB-SL-1 基本相同,如图 7b) 所示;U 型钢两侧混凝土出现多条斜裂缝,并由端部锚栓向梁表面发展,随后加载中裂缝逐渐增多且宽度增大,如图 7c) 所示。受梁侧面裂缝的影响,U 型钢旁的梁表面出现鼓起现象,说明后锚固锚栓已松动,如图 7d) 所示。之后加载过程中,U 型钢两侧裂缝继续增多,如图 7e) 所示。当加载位移为 40.24 mm 时,U 型钢端部混凝土出现明显拉裂现象,且无法继续承载,如图 7f) 所示。耗能段未发生破坏,但节点丧失承载力,停止加载。

2.3 试件 ECB-SL-3

由于试件 ECB-SL-3 与 ECB-SL-2 的后锚固锚栓布置方式相同,故其试验现象和破坏模式也基本相同,如图 8 所示。

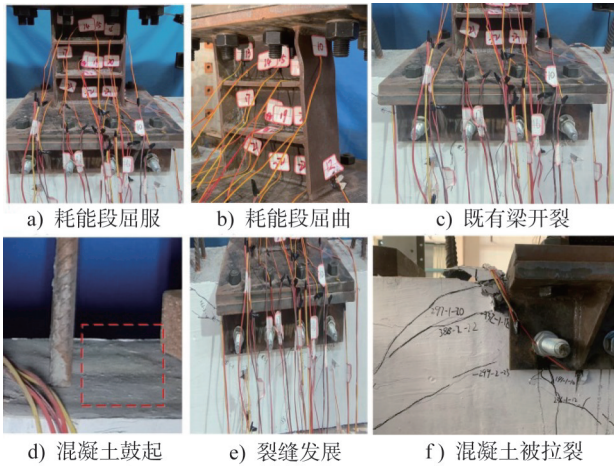


图8 试件ECB-SL-3破坏模式

Fig. 8 Failure modes of specimen ECB-SL-3

加载初期,试件发生屈服,相应屈服位移为5.07 mm,如图8a)所示。当加载位移为20.28 mm时,耗能段腹板和翼缘也都出现屈曲,与试件ECB-SL-1、ECB-SL-2相同,如图8b)所示。此时,U型钢两侧和底部混凝土都出现裂缝。其中,两侧主要为斜裂缝并向梁表面发展,底部在后锚固锚栓处主要为竖向裂缝,如图8c)所示。随后加载中,由于梁侧面裂缝宽度逐渐增大,U型钢旁的梁表面也出现轻微鼓起现象,即后锚固锚栓已松动,如图8d)所示。当加载位移为40.56 mm时,裂缝明显变长且宽度增大,如图8e)所示;U型钢端部侧面和顶部混凝土出现明显拉裂现象,节点无法继续承受荷载并发生破坏,如图8f)所示。

2.4 试件ECB-SL-4

往复荷载作用下,在U型钢三面设置后锚固螺栓的试件ECB-SL-4的破坏模式主要包括耗能段屈服、耗能段屈曲、既有梁开裂、裂缝发展和耗能段破坏,如图9所示。

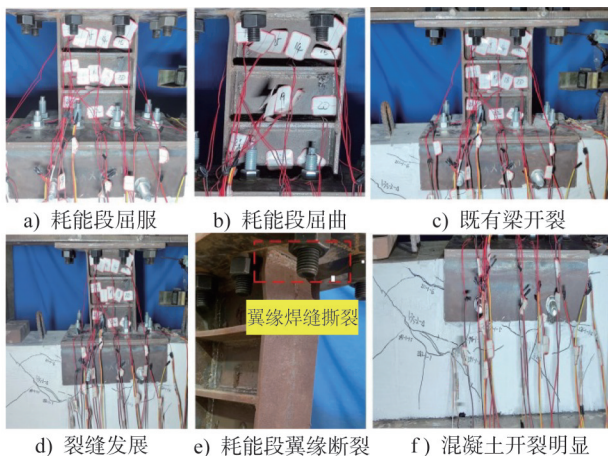


图9 试件ECB-SL-4破坏模式

Fig. 9 Failure mode of specimen ECB-SL-4

加载初期,试件进入屈服状态,对应位移为4.85 mm,如图9a)所示。当加载位移为19.40 mm时,耗能段翼缘和

腹板均出现屈曲现象,与上述各试件均相同,如图9b)所示。此时,U型钢两侧和底部出现几条微小裂缝,如图9c)所示。位移继续增大,U型钢两侧和底部的裂缝进一步向发展,但最大宽度为0.3 mm,如图9d)所示。当加载位移为43.65 mm时,耗能段翼缘断裂,如图9e)所示,停止加载。此时,U型钢附近裂缝进一步发展,如图9f)所示,但未出现混凝土被拉裂的现象,既有梁表面也未发生鼓起,即后锚固锚栓未被拔起,组合节点仍能承载且未完全发生破坏。

3 试验结果

3.1 滞回曲线

图10为各试件的滞回曲线,将其与纯短剪切型耗能段试件VSSL-1的滞回曲线进行对比,VSSL-1截面信息如1.2节中耗能段所述^[20]。由图可知,各试件在各加载步的承载力和刚度均与试件VSSL-1的相应值无明显差异,且各试件滞回曲线较为饱满,即通过耗能段加固既有混凝土梁可有效提高其耗能能力。

试件ECB-SL-1中采用端板连接的节点承载力较弱,当位移为34.65 mm时后锚固锚栓明显被拔起,所对应荷载为421.24 kN。采用U形-侧面连接、U形-角钢螺栓连接的试件ECB-SL-2、ECB-SL-3在整个加载过程中的破坏模式基本相同,且组合节点均在达到8倍屈服位移(约40 mm)时发生破坏,所对应的荷载分别为433.23 kN、432.15 kN。基于U形-三面连接的试件ECB-SL-4中,组合节点具有足够的承载力,其极限位移和承载力均与试件VSSL-1相同。另外,如表2所示,试件塑性转角为0.11~0.15 rad,大于规范建议值0.08 rad;试件超强系数为1.81~1.85,大于规范建议值1.50^[4]。

3.2 骨架曲线

图11为各试件的骨架曲线。各曲线在弹性、弹塑性和塑性阶段的趋势基本相同,且沿中心轴对称,即往复荷载下试件性能稳定。基于表2可知,试件ECB-SL-1、ECB-SL-2、ECB-SL-3、ECB-SL-4的最大荷载分别为421.24 kN、433.23 kN、432.15 kN、444.24 kN,最大位移分别为34.65 mm、40.24 mm、40.56 mm、44.73 mm,即试件ECB-SL-1~ECB-SL-3中所设计的组合节点无法为耗能段提供足够承载力,建议采用试件ECB-SL-4中的U形-三面连接。

3.3 割线刚度

割线刚度可反映试件的刚度退化过程,其表达式为^[20]:

$$K_s = \frac{|F_{i,max}| + |-F_{i,min}|}{|D_{i,max}| + |-D_{i,min}|} \quad (13)$$

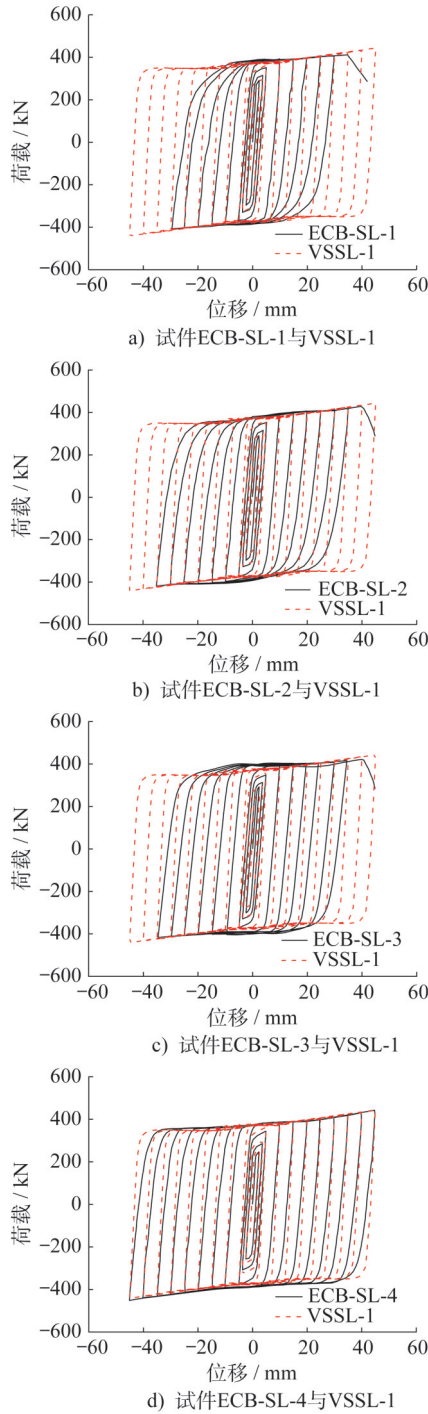


图10 各试件滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curves of specimens

式中： $F_{i,max}$ 、 $D_{i,max}$ 、 $F_{i,min}$ 、 $D_{i,min}$ 分别为第*i*次加载时的最大正轴力、最大正位移、最大负轴力和最大负位移。

图12为各试件割线刚度曲线，随着加载位移的增加，割线刚度逐渐减小，与图11中骨架曲线的刚度变化规律相同。另外，加载初期，相同位移下各试件割线刚度值无明显差异，但试件ECB-SL-1、ECB-SL-2、ECB-SL-3由于节点破坏而提前退出工作，仅试件ECB-SL-4在极限荷载下仍能形成可靠连接。

表2 各试件力学性能

Table 2 Mechanical properties of specimens

试件编号	极限承载力/kN	塑性剪力/kN	超强系数	极限位移/mm	塑性转角/rad
VSSL-1	445.09	240.34	1.85	45.27	0.15
ECB-SL-1	421.41	240.34	1.75	34.65	0.11
ECB-SL-2	433.23	240.34	1.80	40.24	0.13
ECB-SL-3	432.15	240.34	1.80	40.56	0.13
ECB-SL-4	444.24	240.34	1.85	44.73	0.15

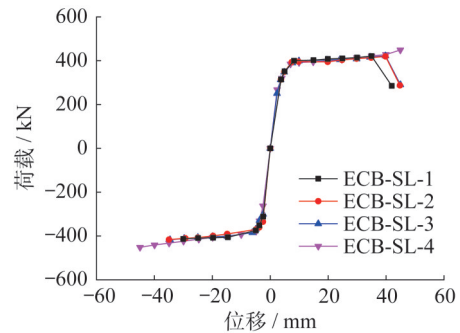


图11 各试件骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of specimens

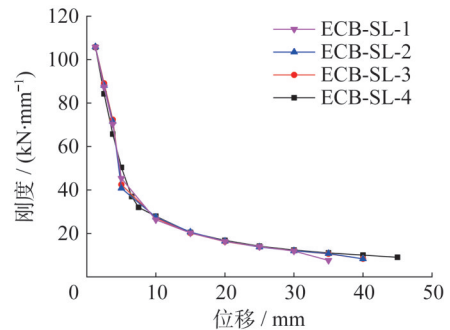


图12 各试件割线刚度曲线

Fig. 12 Secant stiffness curves of specimens

3.4 耗能能力

图13为各ECB-SL组合节点的耗能值。随着位移逐渐增加，各试件的滞回面积和耗能值也逐渐增大。由于试件ECB-SL-1、ECB-SL-2、ECB-SL-3分别在位移为7倍、8倍、8倍的屈服位移加载步中发生破坏，未形成闭合加载圈，故忽略该加载步的耗能值。各试件最大位移所对应的耗能值分别为396.96 J、437.75 J、435.19 J和660.82 J，表明组合节点的连接形式和承载力是影响试件耗能能力的重要因素之一。

3.5 等效黏滞阻尼系数

图14为各ECB-SL组合节点的等效黏滞阻尼系数。等效黏滞阻尼系数是评价试件耗能能力的重要参数之

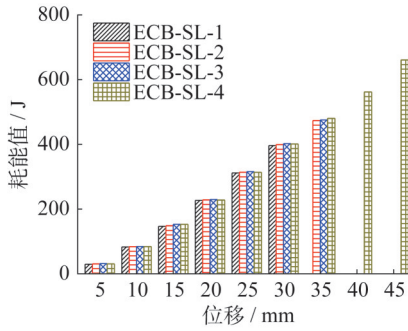


图13 各试件耗能能力

Fig. 13 Energy dissipation capacity of specimens

一^[20]。加载初期,试件 ECB-SL-1~ECB-SL-4 的等效黏滞阻尼系数较小,处于弹性状态;随着位移的增加,试件耗能段逐渐进入弹塑性状态,等效黏滞阻尼系数呈先逐渐增大后减小的趋势。试件 ECB-SL-4 在不同加载位移下的等效黏滞阻尼系数和延性均最大,表明其具有最强的耗能能力,即节点可为耗能段提供可靠连接。

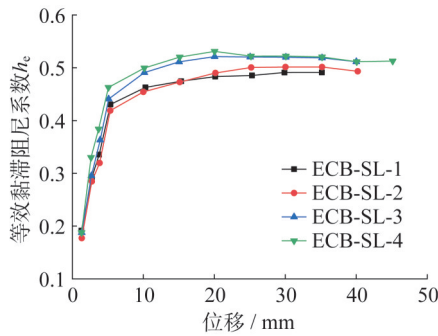


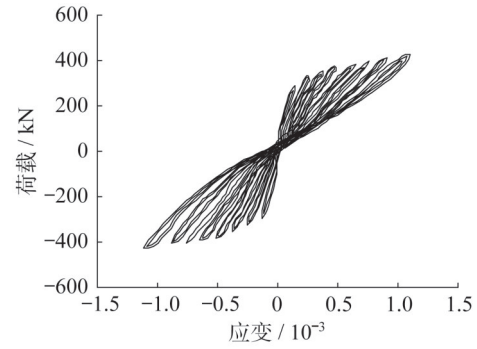
图14 各试件等效黏滞阻尼系数

Fig. 14 Equivalent viscous damping coefficient of specimens

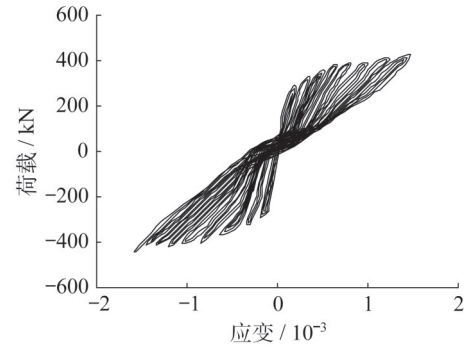
3.6 荷载-应变曲线

为研究 ECB-SL 组合节点在不同加载位移下各关键部件的应变变化规律,选取极限荷载最大的试件 ECB-SL-4 为研究对象。试件中应变测点布置如图 5 所示,提取纵筋测点 S1、箍筋测点 S7、耗能段翼缘测点 S9、耗能段腹板测点 S14 的数据。各应变测点的荷载-应变曲线如图 15 所示。

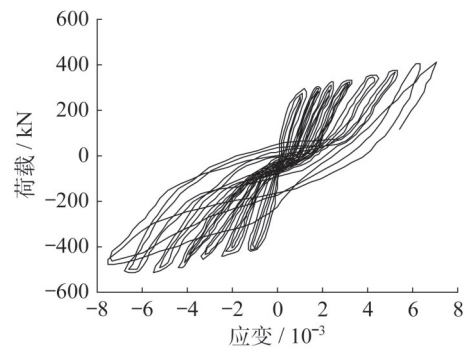
图 15a)为既有混凝土梁中纵筋测点 S1 的荷载-应变曲线,正向和负向最大应变分别为 1.116×10^{-3} 和 1.103×10^{-3} ,小于纵筋屈服应变 2.123×10^{-3} ,说明纵筋始终处于弹性状态。图 15b)为既有混凝土梁中箍筋测点 S7 的荷载-应变曲线,正向和负向最大应变分别为 1.472×10^{-3} 和 1.566×10^{-3} ,小于箍筋的屈服应变 2.156×10^{-3} ,也始终处于弹性且未发生屈服。图 15c)为耗能段腹板测点 S9 的荷载-应变曲线,正向和负向最大应变分别为 7.064×10^{-3} 和 7.339×10^{-3} ,远大于耗能段



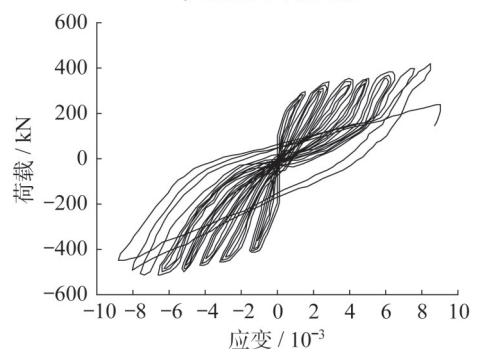
a) 纵筋测点S1



b) 箍筋测点S7



c) 耗能段翼缘测点S9



d) 耗能段腹板测点S14

图15 试件 ECB-SL-4 荷载-应变曲线

Fig. 15 Load-strain curves of specimen ECB-SL-4

翼缘屈服应变 1.736×10^{-3} 。图 15d)为耗能段腹板测点 S14 的荷载-应变曲线,当位移约为 15 mm 时腹板应力超过板件屈服应力,正向和负向最大应变分别为 8.477×10^{-3} 和 8.607×10^{-3} ,远大于耗能段腹板屈服应变 1.768×10^{-3} ,即耗能段腹板与翼缘均进入了弹塑性或塑性状态,与破坏模式中腹板与腹缘的变化趋势相同。

4 结论

本文主要对 ECB-SL 组合节点的力学性能进行了试验研究,可得到以下主要结论:

(1) 试件 ECB-SL-1 经历了耗能段屈服、耗能段屈曲、既有混凝土梁开裂、耗能段端板分离、混凝土被拉裂和锚栓被拔起;试件 ECB-SL-2 和 ECB-SL-3 均经历了耗能段屈服、耗能段屈曲、既有梁开裂、混凝土鼓起、混凝土裂缝发展和混凝土被拉裂,且最终破坏均由组合节点承载力不足引起。

(2) 试件 ECB-SL-4 经历了耗能段屈服、耗能段屈曲、既有梁开裂、裂缝发展和耗能段破坏,与纯耗能段破坏模式基本相同,且既有混凝土梁中混凝土的开裂并未影响组合节点的承载能力。

(3) 不同 ECB-SL 组合节点形式会明显影响节点的承载能力和变形能力。试件的超强系数为 1.81~1.85,大于规范值 1.50;塑性转角为 0.11~0.15 rad,大于规范值 0.08 rad。

(4) 整个加载过程中,各试件中的既有混凝土纵筋和箍筋始终处于弹性状态,但耗能段翼缘和腹板均进入塑性变形状态,即通过耗能段耗散所输入的地震能量。

(5) 相同预埋深度下,基于端板连接、U形-侧面连接、U形-角钢螺栓连接的 ECB-SL 组合节点的承载能力不足,且节点破坏均发生在锚栓被拔起或混凝土被拉裂时,因此设计时建议采用 U形-三面连接。

另外,本文仅对 4 种连接进行了试验研究,后续还需开展不同连接的有限元参数化分析和理论研究,以得到不同连接的最合理设计方法,由此保证 4 种连接均满足组合节点承载力要求。

参考文献:

- [1] 史先进.防屈曲支撑在高层混凝土框架结构抗震加固中的应用[J].建筑钢结构进展,2016,18(4):61-68.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.04.010.
SHI Xianjin. Application of buckling restrained braces in seismic retrofitting of high-rise concrete frames [J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18 (4) : 61-68. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.04.010. (in Chinese)
- [2] 杨泽堃,方圣恩,吴应雄,等.外贴 FRP 加固 RC 短梁抗弯承载力公式[J].南昌大学学报(工科版),2023,45(3):254-260.DOI:10.13764/j.cnki.ncdg.2023.03.009.
YANG Zekun, FANG Sheng'en, WU Yingxiong, et al. Ultimate flexural formula of RC short beams strengthened by externally bonded FRP sheets [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2023, 45(3) : 254-260. DOI: 10.13764/j.cnki.ncdg.2023.03.009. (in Chinese)
- [3] 石圆圆,陈岩,张蕾,等.既有建筑钢筋混凝土结构的加固设计与抗震性能分析[J].工程抗震与加固改造,2023,45(5):

170-180. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2023.05.021.

- SHI Yuanyuan, CHEN Yan, ZHANG Lei, et al. Reinforcement design and seismic performance analysis of existing steel-reinforced concrete structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2023, 45(5) : 170-180. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2023.05.021. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].2016版.北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010 [S]. 2016 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Strengthening Concrete Structure: GB 50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [6] 徐毅豪,李亮,袁卫宁.高效消能支撑在既有框架结构加固工程中的应用[J].工程抗震与加固改造,2020,42(1):126-131. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2020.01.018.
XU Yihao, LI Liang, YUAN Weining. Application of high efficiency energy dissipation brace in reinforcement of existing frame structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42 (1) : 126-131. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2020.01.018. (in Chinese)
- [7] JAVIDAN M M, ASSEFA J D, KIM J K. Seismic retrofit of low-rise structures using rotational viscoelastic dampers [J]. Structures, 2023, 58: 105403. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105403.
- [8] 鲁松,李爱群,徐文希.既有混凝土结构抗震性能提升技术的研究与应用[J].建筑结构,2020,50(24):48-55. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.24.008.
LU Song, LI Aiqun, XU Wenxi. Research and application of seismic performance improvement technology for existing concrete structures [J]. Building Structure, 2020, 50(24) : 48-55. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.24.008. (in Chinese)
- [9] BRUSCHI E, QUAGLINI V. Assessment of a novel hysteretic friction damper for the seismic retrofit of reinforced concrete frame structures [J]. Structures, 2022, 46: 793-811. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.10.113.
- [10] 董志骞,李钢,刘一赫,等.低延性中心支撑钢框架结构振动台试验[J].建筑结构学报,2020,41(6):21-29. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0902.
DONG Zhiqian, LI Gang, LIU Yihe, et al. Shaking table test

- on low-ductility concentrically braced steel frames[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(6): 21-29. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0902. (in Chinese)
- [11] 胡淑军,熊悦辰,王湛. 偏心支撑结构体系的研究进展及展望[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(2): 1-14. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.02.001.
HU Shujun, XIONG Yuechen, WANG Zhan. Research status review on eccentrically braced frames [J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(2): 1-14. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.02.001. (in Chinese)
- [12] CAO X Y, FENG D C, WU G, et al. Experimental and theoretical investigations of the existing reinforced concrete frames retrofitted with the novel external SC-PBSPC BRBF sub-structures [J]. Engineering Structures, 2022, 256: 113982. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.113982.
- [13] YAGHOUBSHAHI M, IMANPOUR A. An overview of HSS brace fracture in steel concentrically braced frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 185: 106845. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106845.
- [14] SUTCU F, TAKEUCHI T, MATSUI R. Seismic retrofit design method for RC buildings using buckling-restrained braces and steel frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 304-313. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.05.023.
- [15] HU S J, ZENG S Z, ZHOU Q, et al. Mechanism and seismic performance of a novel precast concrete beam-to-very short shear link joint; Experimental and numerical simulation [J]. Structures, 2023, 56: 104938. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.104938.
- [16] YOUSSEF M A, GHAFARZADEH H, NEHDI M. Seismic performance of RC frames with concentric internal steel bracing [J]. Engineering Structures, 2007, 29(7): 1561-1568. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.08.027.
- [17] 赵宝成,于安林,王军良,等. 内填Y形钢支撑加固多层钢筋混凝土框架结构滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8): 107-118. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.08.013.
ZHAO Baocheng, YU Anlin, WANG Junliang, et al. Experimental investigation of hysteretic behavior of RC frames filled with Y-steel brace [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8): 107-118. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.08.013. (in Chinese)
- [18] 孙国华,邵寅,于安林,等. 耗能梁段与带楼板RC框架梁连接节点的滞回性能研究[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 47-55, 63.
SUN Guohua, SHAO Yin, YU Anlin, et al. Hysteretic behavior of the connection between RC frame beam with floor and energy dissipation link [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 47-55, 63. (in Chinese)
- [19] 胡淑军,熊进刚,王湛. 短剪切型耗能梁段的力学性能及其影响因素研究[J]. 工程力学, 2018, 35(8): 144-153. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.0306.
HU Shujun, XIONG Jingang, WANG Zhan. Study of mechanical properties and its influence factors for short shear links [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(8): 144-153. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.0306. (in Chinese)
- [20] 曾思智,张波,刘超,等. 短剪切型耗能段的力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(11): 72-81. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2023.11.009.
ZENG Sizhi, ZHANG Bo, LIU Chao, et al. Experimental study of the mechanical property for very short shear link [J]. Building Science, 2023, 39(11): 72-81. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2023.11.009. (in Chinese)
- [21] HU S J, XIONG J G, ZHOU Q, et al. Analytical and numerical investigation of overstrength factors for very short shear links in EBFs [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(11): 4473-4482. DOI: 10.1007/s12205-018-1479-3.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构后锚固技术规范: JGJ 145—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Post-Installed Fastenings in Concrete Structures: JGJ 145—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)