

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231104001

楼板约束对装配式耗能剪力墙受力性能影响研究*

张皓¹, 杨思伟¹, 李宏男^{1,2}, 郭鑫¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究楼板对竖向拼缝干式耗能连接的装配式剪力墙受力性能的影响,建立了三种不同的装配式耗能剪力墙有限元模型,一片未设置楼板的装配式耗能剪力墙试件(PC-0)、两片设置不同形式现浇楼板的装配式剪力墙试件(PC-1、PC-2),其中PC-2试件采用了减小楼板约束的简易构造措施。对上述三个试件进行低周往复加载作用下的受力性能数值模拟分析,初步研究了楼板约束对装配式剪力墙受力性能的影响。并通过采取简易构造措施来减小楼板约束的影响,以提升装配式剪力墙的耗能能力。研究表明:考虑楼板约束后,装配式耗能剪力墙的刚度和承载力有小幅提升,楼板约束会限制阻尼器连接件耗能效率,使部分阻尼器连接件的耗能发挥不充分,导致耗能能力及延性降低;通过构造措施减小了楼板约束的影响进行后,阻尼器连接件的耗能效率提高,导致墙体的耗能能力和延性明显提升,而承载力和刚度则略有降低。楼板约束对装配式耗能墙体受力性能的影响不容忽视,在该类墙体的抗震设计与分析中应予以考虑。

关键词: 装配式剪力墙; 干式耗能连接; 受力性能; 楼板约束; 耗能能力

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0393-12

Study on the Influence of Floor Slab Restraint on the Mechanical Performance of Precast Energy-dissipating Shear Walls

ZHANG Hao¹, YANG Siwei¹, LI Hongnan^{1,2}, GUO Xin¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: This study investigated the influence of floor slab restraints on the mechanical performance of precast shear walls with vertically segmented dry energy-dissipating connections. Three finite element models were developed: one specimen without a floor slab (PC-0), and two specimens with different types of cast-in-place slabs (PC-1, PC-2). A simplified structural measure was implemented in PC-2 to reduce the influence of the slab restraint. Numerical simulations under low-cycle reversed loading were conducted to evaluate the mechanical performance of these specimens and to preliminarily assess the impact of slab restraints. Furthermore, the effectiveness of simplified structural measures in mitigating slab restraints and improving the energy-dissipating capacity of the shear walls was explored. The results showed that the inclusion of slab restraints slightly enhanced the stiffness and bear-

* 收稿日期:2023-11-04;修回日期:2024-02-28

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(52027811)、国家自然科学基金重点项目(51738007)、辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220949)、沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC220171)资助

作者简介: 张皓(1983—),男,教授,博导,博士。主要从事工程结构防灾减灾研究。E-mail:h_zhang@sjzu.edu.cn

通信作者: 杨思伟(1997—),男,硕士研究生。主要从事工程结构防灾减灾研究。E-mail:yang_siw@163.com

ing capacity of the precast energy-dissipating shear walls. However, slab restraints limited the energy dissipation efficiency of the damper connectors, leading to insufficient energy dissipation in some connectors and thus reduced overall energy-dissipating capacity and ductility. When slab restraint was alleviated through structural measures, the energy dissipation efficiency of the damper connectors improved significantly, leading to a notable enhancement in both energy-dissipating capacity and ductility, albeit with a slight reduction in stiffness and load-bearing capacity. The effect of slab restraints on the mechanical performance of precast shear walls is non-negligible and should be considered in seismic design and analysis.

Keywords: precast shear wall; dry energy-dissipating connection; mechanical performance; floor slab restraint; energy-dissipating capacity

0 引言

装配式剪力墙结构具有绿色、低碳、施工便捷、工业化程度高等特点,该类结构的应用能有效推动我国建筑工业化的发展。装配式剪力墙中存在大量水平与竖向接缝,其受力性能主要受到接缝质量的影响。目前,关于装配式剪力墙接缝的连接方法和性能的研究已被广泛关注^[1]。装配式剪力墙的水平缝多采用灌浆套筒、浆锚搭接等湿式连接工法。Y. L. Lu等^[2]、钱稼茹等^[3]对采用灌浆套筒连接的装配式剪力墙开展了试验研究。发现水平接缝采用灌浆套筒连接能有效传递竖向钢筋应力,刚度、耗能能力和延性与现浇试件大致相同。A. Belleri等^[4]设计了一种水平缝采用灌浆套筒连接的剪力墙,并对其进行了试验研究,结果表明:该剪力墙与传统现浇剪力墙的抗震性能基本一致。李刚等^[5]通过试验研究了竖向钢筋浆锚搭接的水平接缝连接性能,结果发现剪力墙的承载力与现浇试件相差不大,受力性能基本相同。大量的试验及理论研究表明,采用该类连接方式的装配式构件的受力性能基本与现浇试件等同,已应用于大量的实际工程中。

装配式剪力墙中的竖向接缝一般以预留钢筋搭接后浇混凝土的湿式连接为主。初明进等^[6]开展了装配式剪力墙中竖向接缝连接性能的试验研究,研究发现采用钢筋搭接后浇混凝土的湿式竖缝连接构造合理、连接可靠,能够保证墙体的受力性能。朱张峰等^[7]通过试验研究了墙体竖向接缝的连接性能。结果表明:采用钢筋搭接后浇混凝土的连接方式后,墙体的受力性能与现浇试件基本相同。大量的研究结果均表明:钢筋搭接后浇混凝土的连接方式可靠,已经在实际工程中得到应用。然而,若竖

缝节点处配筋密集,在预制墙体的装配过程中很可能会出现钢筋碰撞、错位等问题,一定程度上影响结构的施工质量和效率,最终影响其使用性能。而采用金属阻尼器作为连接件的干式连接方式在很大程度上可有效避免上述问题的产生。

袁新禧等^[8]对竖缝采用金属阻尼器连接的预制剪力墙进行试验研究。研究表明:金属阻尼器的剪切变形能提高墙体耗能能力。党隆基^[9]将粘弹性阻尼器作为耗能连接件应用于装配式剪力墙竖缝节点,发现该连接件在提升墙体耗能能力的同时能提高装配效率。张恩严等^[10]开发了一种用于装配式剪力墙竖缝连接的高效耗能阻尼器,该阻尼器利用变形放大原理,在小变形下具有高耗能效率,有效提升了装配式剪力墙的耗能能力。

综上所述,以上研究均未考虑楼板约束对墙体受力性能的影响,但在实际工程中,楼板约束对剪力墙受力性能的影响不容忽视。S. Shen等^[11]对设置楼板的装配式剪力墙展开了受力性能试验研究,并与不设置楼板的墙体试件进行对比,发现楼板会使预制墙体刚度增大,但延性和变形能力会大幅下降,很大程度影响墙体的受力性能。文献[12]中本文作者提出了一种采用软钢阻尼器作为干式连接件的装配式耗能剪力墙,软钢阻尼器连接件设置在预制墙体的竖缝节点,开展了墙体受力性能试验研究,发现所提出的装配式耗能剪力墙具有良好的受力性能,有效提升了装配式墙体的耗能能力。但受到试件数量、时间、成本、场地等多方面限制,未考虑楼板约束的影响。对于这种装配式耗能剪力墙,楼板约束会直接影响竖缝节点耗能元件的耗能工作效率,进而影响墙体的受力性能。因此,本文在试验研究的基础上,通过数值模拟方法进一步研究了楼板约束对所提出的装配式耗能剪力墙受力性

能的影响,深入分析了楼板约束对耗能连接件工作状态的影响,为该类墙体的设计与应用提供理论参考。

1 试件设计

首先,设计了3个全尺寸装配式耗能剪力墙试件,其中包括1个不考虑楼板约束的试件PC-0,考虑楼板约束的试件PC-1和采用了减少楼板约束构造措施的试件PC-2。墙体竖向接缝采用阻尼器连接件与预制墙体竖缝两侧预埋件焊接。墙体高度3500 mm,长度2540 mm,厚度200 mm。其中PC-1和PC-2中楼板设置于墙高2800 mm处,墙体两侧楼板平面尺寸分别为2540 mm×400 mm。墙体纵向分布钢筋采用C10@200 mm,水平分布钢筋为

C8@200 mm。墙体拉结筋采用A6@400 mm,暗柱纵向受力钢筋为4C12 mm,暗柱箍筋为A8@150 mm。PC-1和PC-2中楼板的分布钢筋采用C8@100 mm双层配筋,试件详细尺寸及配筋见如图1~3所示。

阻尼器连接件采用8 mm厚Q235软钢板。每个试件均沿竖缝布置四组共8个连接件,每组阻尼器连接件间距850 mm。阻尼器连接件尺寸如图4所示。

为了验证阻尼器连接件的可行性与适用性,采用OpenSees中TwoNodeLink单元和ABAQUS中的壳单元分别建立阻尼器连接件有限元模型,将模拟结果进行对比,结果如图5所示。从图5(a)应力云图可以看出,阻尼器中间容易产生剪切变形,耗

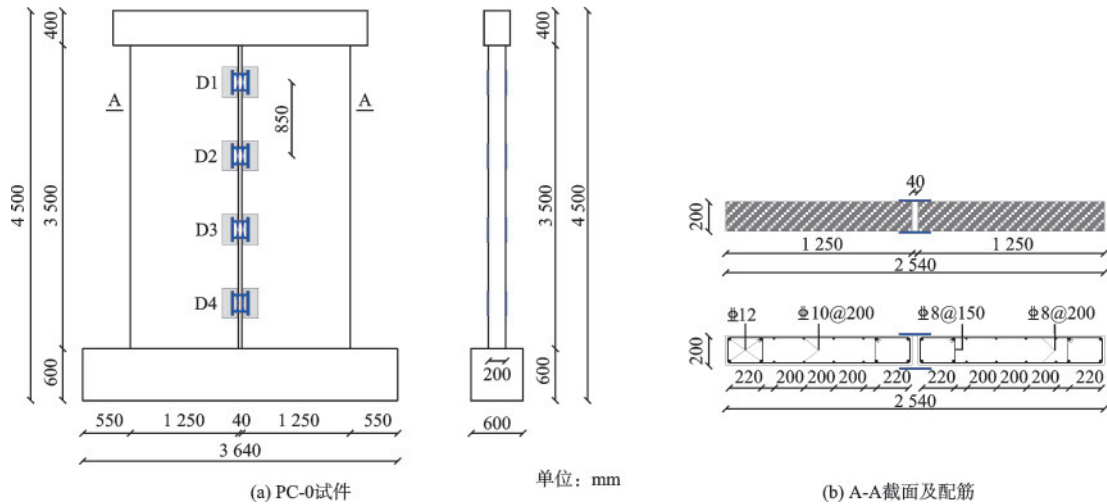


图1 PC-0试件尺寸配筋

Fig.1 Dimensions and reinforcement details of PC-0 specimens

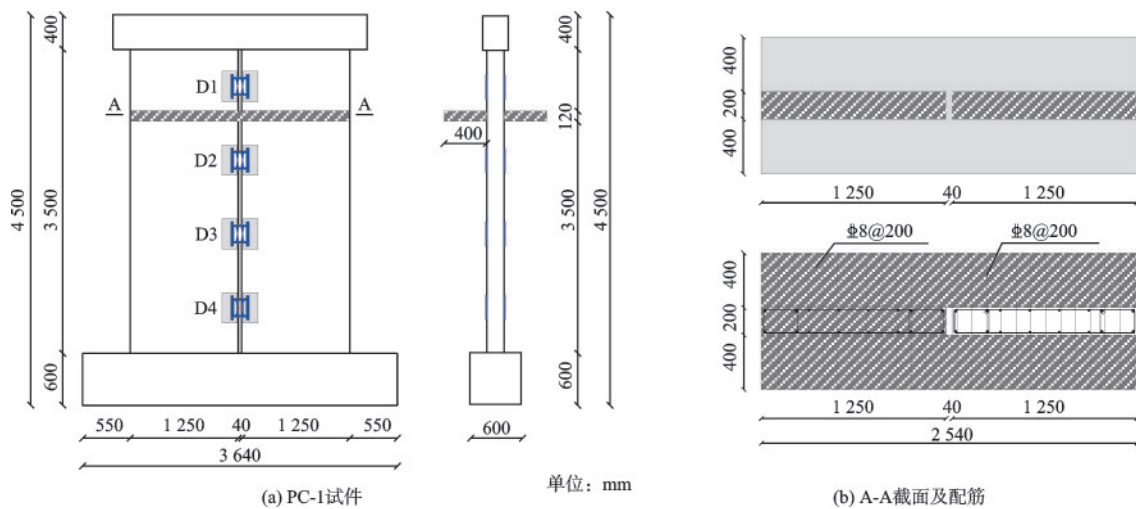


图2 PC-1试件尺寸配筋

Fig.2 Dimensions and reinforcement details of PC-1 specimens

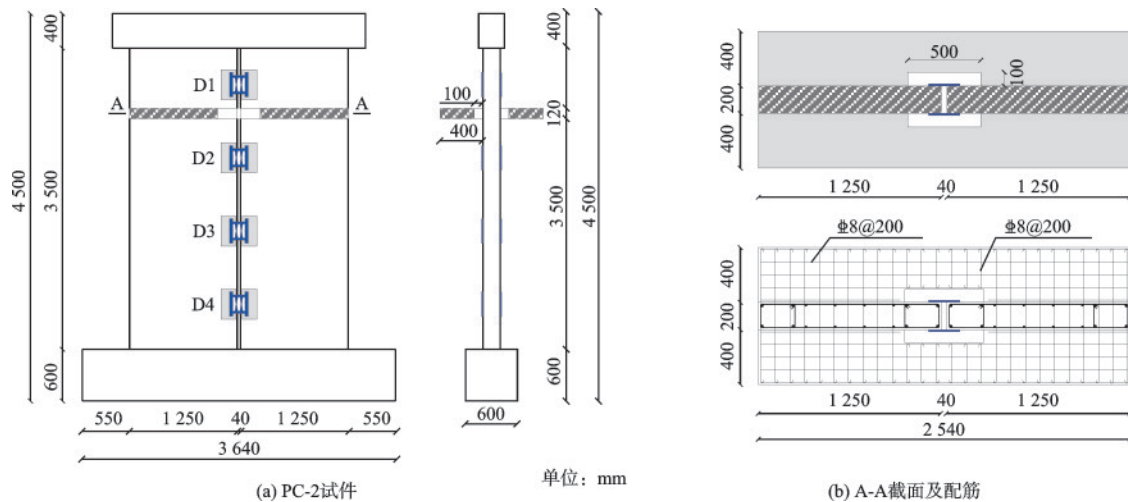


图3 PC-2试件尺寸配筋

Fig.3 Dimensions and reinforcement details of PC-2 specimens

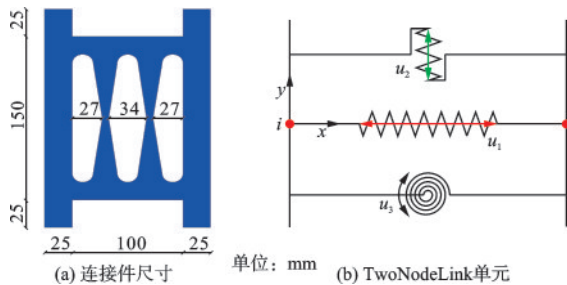


图4 耗能连接件

Fig.4 Energy-dissipating connectors

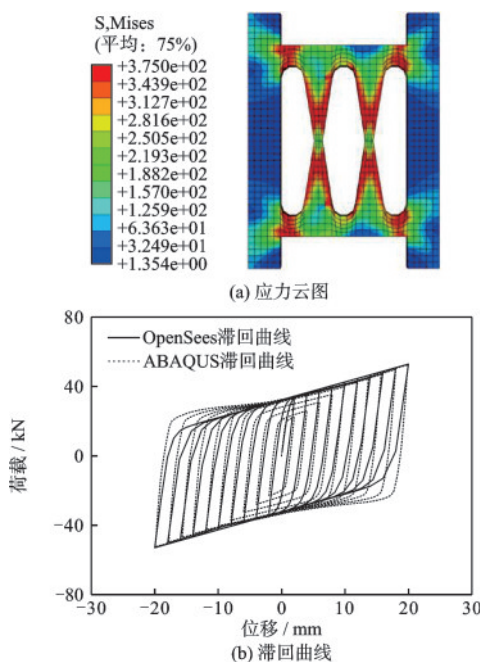


图5 阻尼器连接件模拟结果

Fig.5 Simulation results of damper connectors

散能量;所得滞回曲线如图5(b)所示,非常饱满,两者均具有良好的耗能能力。

2 模型建立

考虑到OpenSees软件在后处理方面的功能缺陷,为了准确得到PC-1和PC-2楼板和墙体的应力分布情况,本文同时用OpenSees和ABAQUS有限元软件建立了三个试件的有限元模型。混凝土和钢筋的主要力学性能见表1、表2。

表1 混凝土力学性能

Table 1 Mechanical properties of concrete

混凝土强度	E_s /MPa	F_c /MPa	F_t /MPa
C40	32 500	19.1	1.71

注: E_s 为弹性模量; f_c 为混凝土抗压强度; f_t 为混凝土抗拉强度

表2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel

名称	型号	E_s /MPa	f_y /MPa	f_u /MPa
纵向钢筋	HRB400	2.1×10^5	400	540
横向钢筋	HRB400	2.1×10^5	400	540
箍筋	HPB300	2.1×10^5	300	420
连接件	Q235	2.1×10^5	330	450

注: E_s 为弹性模量; f_y 为屈服强度; f_u 为抗拉强度

2.1 OpenSees有限元模型

对于OpenSees模型,混凝土采用考虑损伤和弥散开裂的PlateFromPlaneStress材料模型。其应力-应变曲线如图6所示。钢筋采用Uniaxial Material Reinforcing Steel材料模型,该模型可以模拟钢材在低周往复荷载作用下的受力性能,能较好地反映钢筋的屈服和破坏,如图7所示。

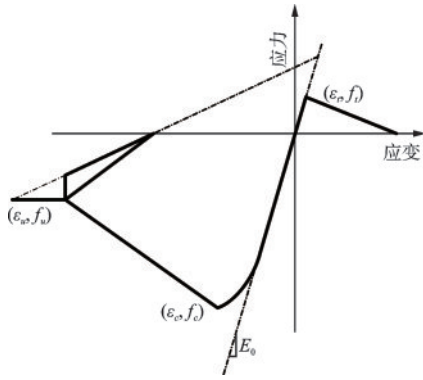


图6 混凝土本构模型

Fig.6 Constitutive model of concrete

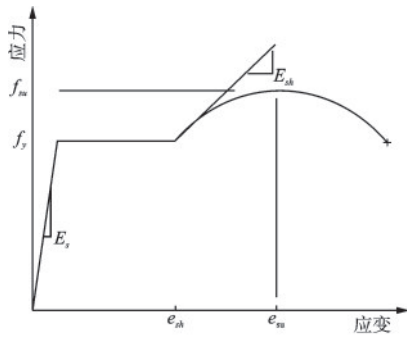


图7 钢筋本构模型

Fig.7 Constitutive model of reinforcement

墙体采用分层壳单元(ShellNLDKGQ)^[13-14]建模,边缘约束构件中纵向受力筋采用Truss单元建模,阻尼器连接件采用Bouc-Wen模型通过TwoNodeLink单元模拟(图4)。以PC-0为例,图8给出了试件的OpenSees有限元模型。

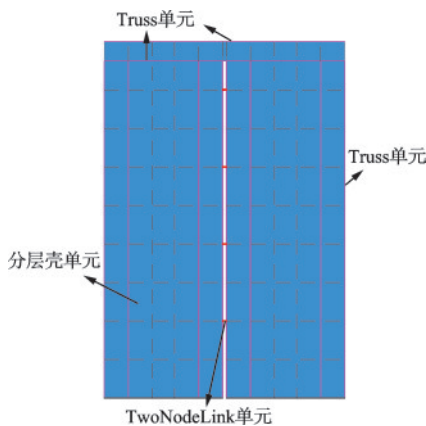


图8 OpenSees有限元模型(PC-0)

Fig.8 OpenSees finite element model (PC-0)

2.2 ABAQUS有限元模型

图9给出了PC-0的ABAQUS有限元模型。混

凝土材料模型选用混凝土损伤塑性模型(CDP),材料应力-应变关系选用《混凝土结构设计规范》^[15]中的建议。钢材采用理想弹塑性模型,应力-应变曲线为双折线强化模型。

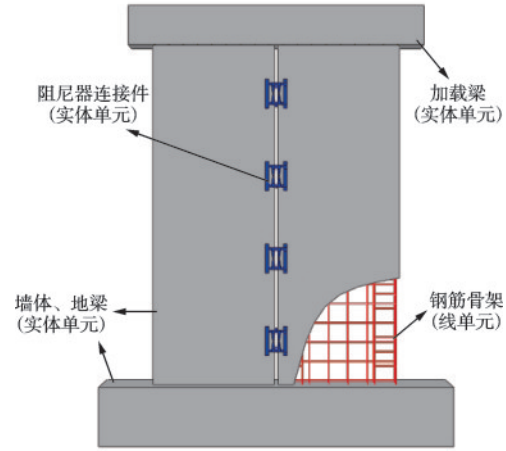


图9 ABAQUS有限元模型(PC-0)

Fig.9 ABAQUS finite element model (PC-0)

凝土和阻尼器连接件均采用C3D8R三维实体单元;钢筋采用T3D2桁架单元,通过Embedded嵌入到混凝土单元中。

2.3 模拟结果对比

本章3.1节为ABAQUS模拟结果,3.2~3.7节为OpenSees模拟结果。首先,按轴压比0.2在加载梁顶部施加均布荷载,再沿水平向施位移荷载,加载步位移增量为5 mm,每级循环2次,如图10所示。图11给出了三个试件的OpenSees和ABAQUS模拟的荷载-位移骨架曲线对比。可以看出,OpenSees和ABAQUS模拟得到的荷载-位移骨架曲线趋势基本一致,极限荷载相差不大,差值在5%以内,关键点的荷载值见表3。

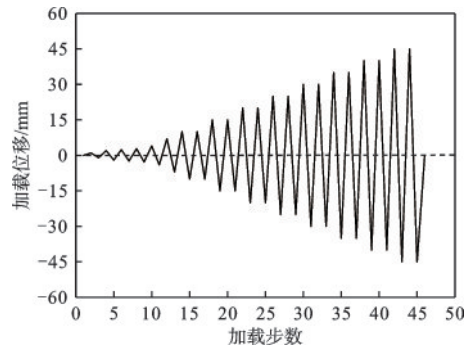


图10 加载制度

Fig.10 Loading protocol

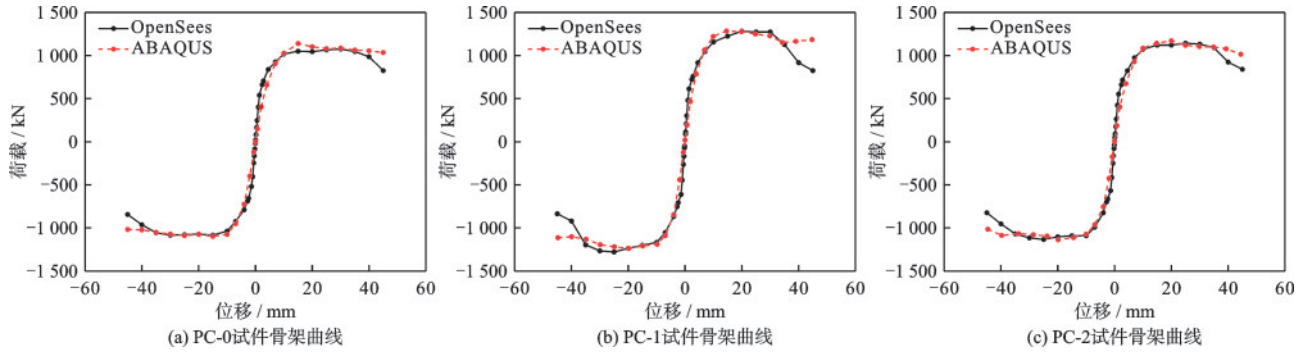


图 11 各试件骨架曲线对比

Fig.11 Comparison of skeleton curves for each specimen

表 3 关键点荷载值对比

Table 3 Comparison of key load values

试件编号	屈服荷载/kN		极限荷载/kN	
	ABAQUS	OpenSees	ABAQUS	OpenSees
PC-0	951.53	803.19	1 118.39	1 079.26
PC-1	1 067.12	906.43	1 245.23	1 264.17
PC-2	966.22	813.65	1 148.43	1 132.78

3 受力性能分析

3.1 墙体应力分布

图 12、13 分别给出了 ABAQUS 中各试件混凝土

和钢筋的应力分布。PC-0 混凝土最大应力主要出现在竖缝右侧底部,钢筋最大主应力主要出现在墙体左侧暗柱和墙体下部位置。与 PC-0 相比,由于 PC-1 受到楼板约束的影响,因此墙体的应力分布明显不同,混凝土最大应力主要出现在墙-板竖缝结合处,该处附近的钢筋应力也明显偏大,破坏程度更严重^[16-17]。采取减小楼板约束的构造措施后,PC-2 混凝土和钢筋应力分布与 PC-0 更为接近,板缝位置的混凝土和钢筋应力显著降低,板缝处应力集中现象明显减小。对竖缝处楼板做适当开缝处理能在一定程度上降低楼板约束对墙体的影响。

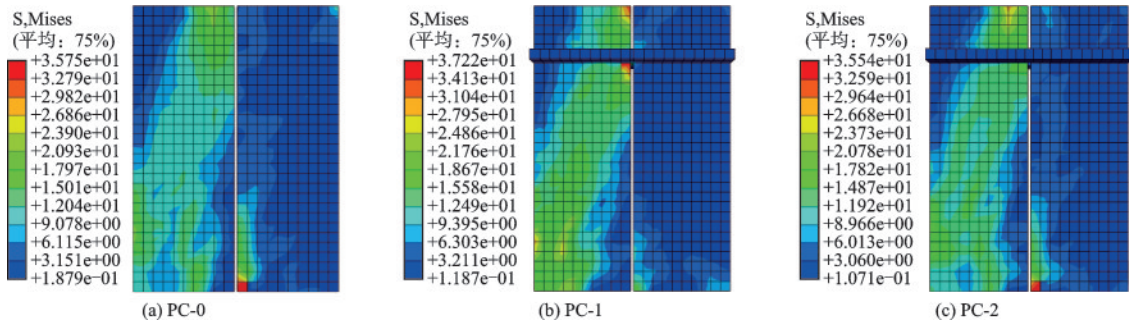


图 12 各试件混凝土应力分布

Fig.12 Concrete stress distribution in each specimen

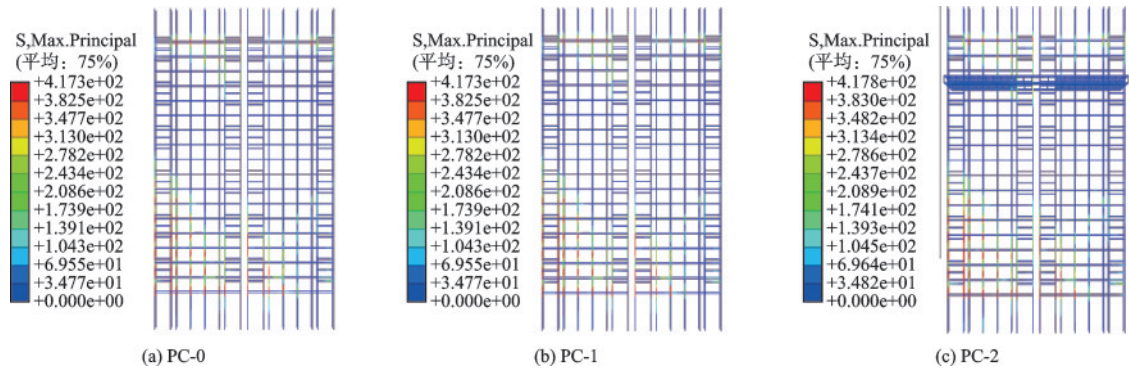


图 13 各试件钢筋应力分布

Fig.13 Reinforcement stress distribution in each specimen

3.2 滞回曲线

图 14 为各试件的滞回曲线。可以看出,由于受到楼板约束的影响,PC-1 滞回环的捏拢现象更严重

重,滞回环面积明显低于 PC-0 和 PC-2,达到极限承载力之后承载力的退化速度明显加快^[18]。与 PC-1 相比,PC-2 滞回环的形状更接近 PC-0,滞回环面积增加,刚度、承载力和变形也都与 PC-0 更相似。

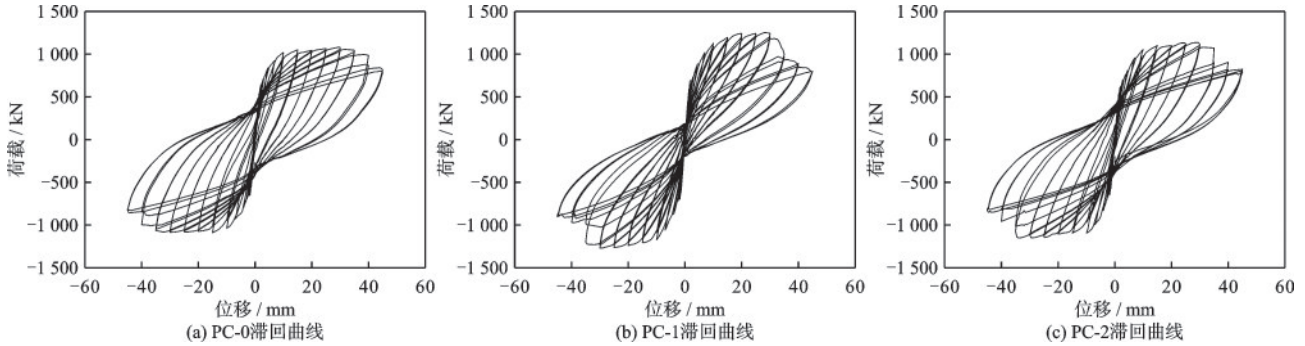


图 14 滞回曲线

Fig.14 Hysteresis curves

3.3 骨架曲线

图 15 给出了各试件的骨架曲线对比情况,关键点的荷载值列于表 4。PC-0、PC-1 和 PC-2 极限承载力分别为 1 079.26、1 264.17、1 132.78 kN。与 PC-0 相比,PC-1 和 PC-2 的极限荷载分别提高了 17.13% 和 4.96%,可以看出,楼板约束会在一定程度上提高墙体承载力。采用开缝构造措施后,与 PC-1 比,PC-2 的承载力虽有所降低,但仍在 PC-0 之上。

3.4 刚度退化

PC-0、PC-1 和 PC-2 刚度退化曲线如图 16 所示,刚度退化趋势大致相同。PC-0、PC-1 和 PC-2 的初始刚度分别为 411.04、464.39、426.27 kN/mm。可以看出,楼板约束对墙体的初始刚度有一定影响。与 PC-0 相比,受楼板约束影响的 PC-1 初始刚度提高了 12.98%;与 PC-1 相比,采用开缝构造措施的 PC-2 刚度降低了 8.21%,但仍高于 PC-0。

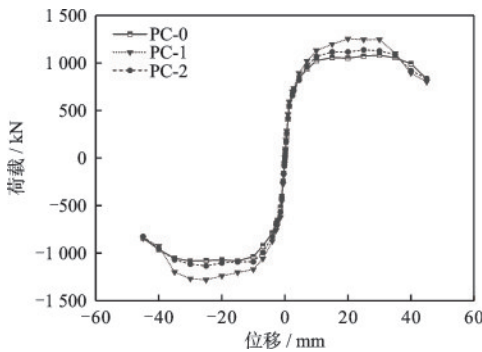


图 15 骨架曲线

Fig.15 Skeleton curves

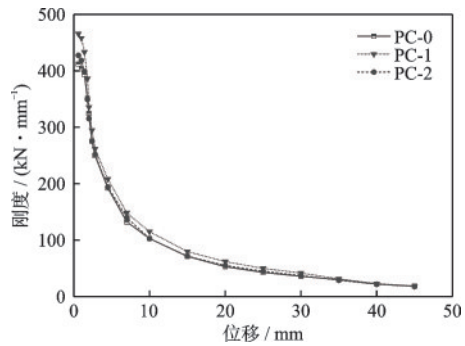


图 16 刚度退化曲线

Fig.16 Stiffness degradation curves

表 4 骨架曲线特征点参数

Table.4 Characteristic parameters of skeleton curves

试件编号	屈服荷载	极限荷载
PC-0	803.19	1 079.26
PC-1	906.43	1 264.17
PC-2	813.65	1 132.78

3.5 延性

构件的延性一般是通过位移延性系数来衡量的。位移延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, 其中 Δ_u 为极限位移, Δ_y 为屈服位移^[19-22]。

通过对结果进行分析得到了不同试件的屈服位移、极限位移以及相应的位移延性系数,见表 5。

可以看出,受到楼板约束的影响后,墙体的延性明显降低^[23-24]。PC-0、PC-1和PC-2的延性系数分别为10.26、7.45和8.79。与PC-0相比,PC-1的延性系数降低了27.39%。采用楼板局部开缝的构造措施后,PC-2的延性有提高。与PC-1相比,PC-2的延性系数增加了17.99%,延性明显得到改善。

表5 位移延性系数

Table 5 Displacement ductility coefficients

试件编号	$\Delta y / \text{mm}$	$\Delta u / \text{mm}$	μ
PC-0	4.11	42.24	10.26
PC-1	4.68	34.85	7.45
PC-2	4.38	38.55	8.79

3.6 耗能能力

图17给出了各试件的累积耗能曲线对比情况。可以明显看出楼板约束对墙体耗能能力的影响。PC-0、PC-1和PC-2的累积耗能分别为555.82、362.40、494.08 kJ。与PC-0相比,受到楼板约束的PC-1累积耗能降低了34.80%。采用楼板局部开缝措施后,墙体的耗能能力得以更充分的发挥。与PC-1相比,PC-2累积耗能提升了36.34%,耗能提升效果非常明显。

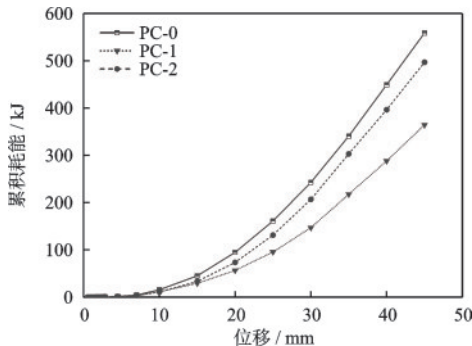


图17 累积耗能曲线

Fig.17 Cumulative energy dissipation curves

各试件等效粘滞阻尼系数如图18所示。各试件等效黏滞阻尼系数的变化趋势与累积耗能的变化趋势较为相似^[25-26],处于0~0.3范围内。PC-0最高,PC-2次之,受楼板约束影响的PC-1最低。

3.7 阻尼器连接件耗能

为了更深入的分析楼板约束对所提出的装配式耗能剪力墙耗能能力的影响,对每个试件中的阻

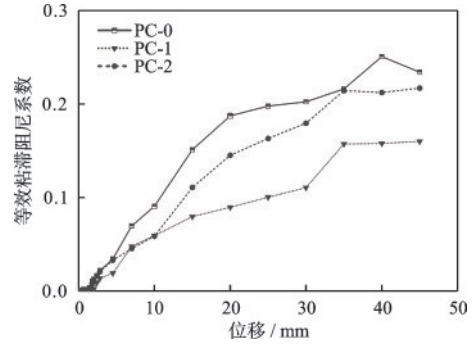


图18 等效粘滞阻尼系数

Fig.18 Equivalent viscous damping ratio

尼器连接件参与耗能情况进行了系统性分析。图19为阻尼器连接件在各个关键点的累积耗能,它反映了阻尼器连接件在各阶段的耗能水准,滞回环面积越大,阻尼器连接件发挥的耗能水平越高。可以看出,阻尼器连接件累积耗能随着加载位移的增加而增大。整个加载过程中,PC-0、PC-1和PC-2的阻尼器连接件累积耗能分别为57.33、16.01、43.09 kJ。由于PC-1受到了楼板约束的影响,从屈服点、极限点加载至破坏点时,PC-1中阻尼器连接件的累积耗能分别为0.81、6.79、16.01 kJ。与PC-0中连接件耗能相比,分别降低了3.36%、70.40%和72.07%。采取构造措施后,PC-2中阻尼器连接件累积耗能提升,阻尼器连接件在屈服、极限和破坏三个阶段的累积耗能分别为0.82、15.57、43.09 kJ。与PC-1相比,分别提高了1.20%、147.32%和169.14%。

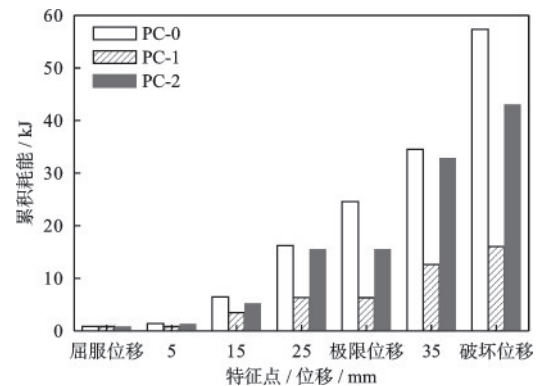


图19 阻尼器连接件累积耗能

Fig.19 Cumulative energy dissipation of damper connectors

图20给出了阻尼器连接件在各阶段的耗能占比,是阻尼器连接件累积耗能与墙体总累积耗能(即墙体滞回曲线包围的面积之和)的比值。该比值反应了阻尼器连接件在墙体中的耗能情况,耗能占比越高,表明阻尼器连接件在该墙体中的耗能效

果越好,反之则越差。耗能占比随着加载位移的增大而减小,由于PC-1中阻尼器连接件累积耗能较低,因此耗能占比亦较低。PC-2墙体累积耗能相比于PC-0较低,阻尼器连接件虽然也有一定程度降低,但是降幅相比于墙体耗能降幅稍小,因此PC-2阻尼器连接件耗能占比稍有提升。加载到屈服点时,各墙体阻尼器连接件耗能占比分别为63.74%、67.8%和63.90%。加载初期,试件的耗能主要由连接件提供。加载到极限点时,各试件阻尼器连接件耗能占比分别为14.07%、9.73%和18.66%,耗能占比逐渐下降。当加载到破坏点时,各试件中阻尼器连接件耗能占比分别为12.31%、7.08%和13.58%。

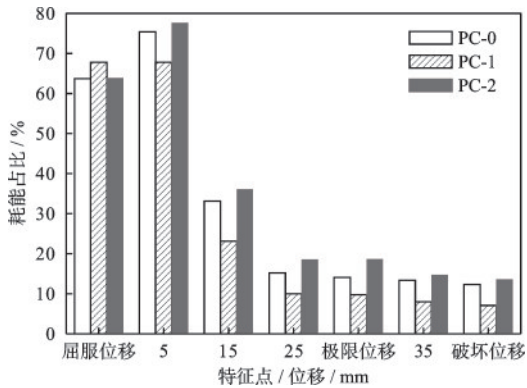


图20 阻尼器连接件耗能占比

Fig.20 Energy dissipation proportion of damper connectors

按照图3中阻尼器连接件的编号设置在图21中依次给出了PC-0、PC-1和PC-2各组阻尼器连接件的滞回曲线。由PC-0可以看出,同一试件中四组阻尼器连接件耗能水平差异较大,四组阻尼器连接件耗能水平从上到下依次减小,其中D1耗能最好,D4耗能最弱,主要原因是墙体上部水平位移较大,因此阻尼器连接件两侧相对变形增强,滞回环面积增加,耗能水平较好。值得注意的是,由于PC-1考虑了楼板约束的影响,因此靠近楼板的D1和D2受到楼板的限制,无法发挥剪切变形,导致滞回曲线滞回环面积明显减小,耗能水平大幅降低。采取开缝构造措施后,PC-2中各阻尼器连接件的发展趋势逐渐恢复到接近PC-0的水平,证明对楼板开缝能较好地改善楼板约束的影响,提高阻尼器连接件的工作效率。

在无楼板约束的PC-0中,耗能连接件的工作效率较高,均能发挥出较强的水平。PC-0的总耗能为555.82 kJ,阻尼器连接件D1至D4的累积耗能分别

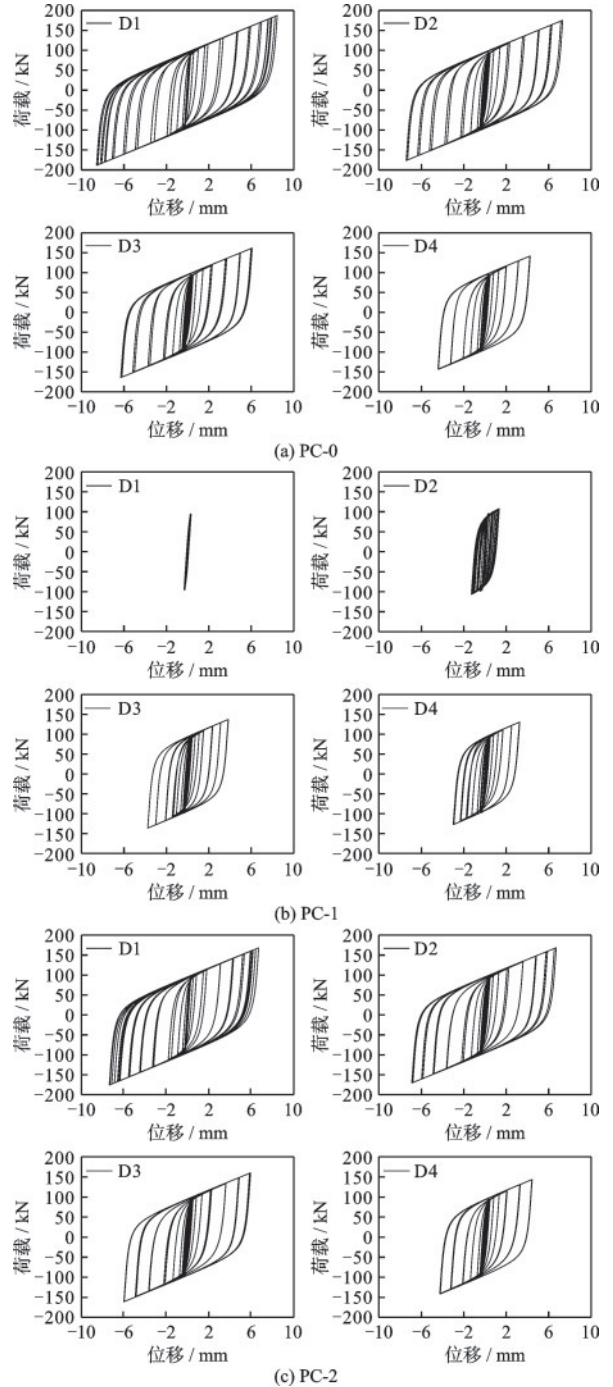


图21 各试件中阻尼器连接件滞回曲线

Fig.21 Hysteresis curves of damper connectors for each specimen

为20.86、16.81、12.29、7.36 kJ,分别占墙体总耗能的4.48%、3.61%、2.64%和1.58%,总计耗能57.33 kJ,占比12.31%。

由于受到楼板约束的影响,PC-1中耗能连接件的性能发挥的均不够充分,PC-1的总耗能为362.40 kJ,D1至D4的耗能分别为0.30、2.46、7.84、5.41 kJ,占墙体总耗能的0.13%、1.09%、3.47%和

2.39%, 总计耗能 16.01kJ, 占比 7.08%。尤其值得关注的是靠近楼板的连接件 D1 和 D2, 与 PC-0 中 D1 和 D2 相比, 耗能分别降低了 98.56% 和 85.21%。D3 和 D4 的耗能也有明显减小, 楼板约束对阻尼器连接件的工作状态影响显著。

采取减小楼板约束的构造措施后, PC-2 中耗能连接件的耗能得到明显改善。PC-2 的总耗能为 494.08 kJ, 阻尼器连接件 D1 至 D4 的累积耗能分别为 14.65、12.52、9.74、6.18 kJ, 分别占墙体总耗能的 4.62%、3.98%、3.07% 和 1.95%, 阻尼器连接件总计参与耗能 43.09 kJ, 占比 13.58%。可以看出, 采用构造措施后, 连接件的耗能占比与 PC-1 相比大幅提升, 耗能能力恢复到接近 PC-0 的水平。主要原因为开缝减轻了楼板对两侧墙肢的限制, 使阻尼器连接件能产生剪切变形, 滞回环面积增加, 耗能能力增强。

4 结 论

本文通过数值模拟研究了楼板约束对所提出的装配式耗能剪力墙受力性能的影响, 并提出一种减小楼板约束的简易构造措施, 使阻尼器连接件的耗能能力得以充分发挥, 从而提高墙体的受力性能, 为该类墙体的设计与应用提供理论参考, 得出以下主要结论:

(1) 考虑楼板约束时, 节点处应力集中现象明显, 装配式耗能剪力墙的刚度和承载力有小幅提升, 耗能能力及延性明显降低。与 PC-0 相比, 考虑楼板约束时 PC-1 的耗能和延性分别降低了 34.80% 和 27.39%。同时楼板会限制竖缝变形, 使阻尼器连接件的耗能能力无法充分发挥, 导致墙体的耗能能力降低。值得关注的是, 受楼板约束的影响, 靠近楼板的两组阻尼器连接件的耗能能力分别降低了 98.56% 和 85.21%, 一定程度上影响了墙体的耗能和受力性能。

(2) 在 PC-2 墙体中采用了所提出的楼板开缝构造措施后, 节点处应力集中现象得到明显改善, 墙体在刚度和承载力没有出现大幅减小的情况下, 耗能能力和延性均得到明显提升。与 PC-1 相比, PC-2 的累积耗能和延性分别提升了 36.34% 和 17.99%; 同时, 阻尼器连接件的耗能也均得到改善。与 PC-1 相比, 阻尼器连接件的总累积耗能增加了 1.69 倍, 与楼板最近的两组连接件的耗能分别提高

了 47.83 倍和 4.09 倍, 耗能能力与无楼板约束的墙体更接近。

参考文献:

- [1] 李爱群, 王维, 贾洪, 等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构抗震性能研究进展(I): 接缝性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5): 600-605.
Li A Q, Wang W, Jia H, et al. Research progress on seismic performance of precast reinforced concrete shear wall structures (I): joint performance study[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(5): 600-605. (in Chinese)
- [2] Lu Y L, Jiang L Y, Lin F. Seismic performance of precast concrete shear wall using grouted sleeve connections for section steels reinforced at wall ends[J]. Structures, 2023, 57: 105068.
- [3] 钱稼茹, 杨新科, 秦珩, 等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 51-59.
Qian J R, Yang X K, Qin H, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with various methods of vertical reinforcement splicing[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 51-59. (in Chinese)
- [4] Belleri A, Riva P. Seismic performance and retrofit of precast concrete grouted sleeve connections [J]. PCI Journal, 2012, 57(1): 97-109.
- [5] 李刚, 黄小坤, 刘瑄, 等. 底部预留后浇区钢筋搭接的装配整体式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 193-200.
Li G, Huang X K, Liu X, et al. Experimental study on seismic performance of assembled monolithic shear wall with steel laps at the bottom reserved for the back casting zone [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 193-200. (in Chinese)
- [6] 初明进, 刘继良, 侯建群, 等. 带竖向接缝的预制混凝土空心模剪力墙受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 84-92.
Chu M J, Liu J L, Hou J Q, et al. Experimental study on bending performance of precast concrete hollow mould shear wall with vertical joints [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 84-92. (in Chinese)
- [7] 朱张峰, 郭正兴. 考虑竖向与水平接缝的工字形装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 139-148.
Zhu Z F, Guo Z X. Experimental study on seismic performance of I-shaped assembled concrete shear walls considering vertical and horizontal joints [J]. Engineer-

- ing Mechanics, 2019, 36(3):139-148. (in Chinese)
- [8] 袁新禧,潘志宏,李爱群,等.带竖缝及金属阻尼器混凝土剪力墙抗震性能研究[J].土木工程学报,2014,47(增1):118-123.
Yuan X X, Pan Z H, Li A Q, et al. Study on seismic performance of concrete shear walls with vertical joints and metal dampers [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup 1):118-123. (in Chinese)
- [9] 党隆基.竖向耗能接缝装配式剪力墙抗震性能与机理研究[D].南京:东南大学,2021.
Dang L J. Research on seismic performance and mechanism of assembled shear wall with vertical energy-consuming joints[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [10] 张德严,李宏男,李超.装配式剪力墙高效阻尼器耗能连接的简化模型研究与数值分析[J].建筑结构学报,2019,40(10):61-68.
Zhang S Y, Li H N, Li C. Simplified model development and numerical simulation of a high-efficiency energy-dissipating joint for prefabricated concrete shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10):61-68. (in Chinese)
- [11] Shen S, Cui Y, Pan P, et al. Experimental study of RC prefabricated shear walls with shear keys affected by a slotted floor slab[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 32(3):04019013.
- [12] Zhang H, Li H, Chen X, et al. Experimental investigation on the hysteretic behavior of precast concrete walls with energy-dissipated dry connections [J]. Structural Concrete, 2020, 21(6):2836-2853.
- [13] 王丽莎,岑松,解琳琳,等.基于新型大变形平板壳单元的剪力墙模型及其在OpenSees中的应用[J].工程力学,2016,33(3):47-54.
Wang L S, Cen S, Xie L L, et al. Development of a shear wall model based on a new flat shell element for large deformation simulation and application in OpenSees [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(3):47-54. (in Chinese)
- [14] 林旭川,陆新征,缪志伟,等.基于分层壳单元的RC核心筒结构有限元分析和工程应用[J].土木工程学报,2009,42(3):49-54.
Lin X C, Lu X Z, Miao Z W, et al. Finite element analysis and engineering application of RC core-tube structures based on the multi-layer shell elements [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3):49-54. (in Chinese)
- [15] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [16] Abhishek Verma, Sahoo Dipti Ranjan. Influence of composite floor slab on seismic performance of steel plate shear walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 188:107042.
- [17] Choi Hyun-Ki. Experimental study on shear wall with slab and openings[J]. International Journal of Civil Engineering, 2017, 15:451-471.
- [18] 周云,陈章彦,郭阳照,等.新型减震填充墙(板)抗震性能、机理及应用研究进展[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):753-767.
Zhou Y, Chen Z Y, Guo Y Z, et al. Advances on the seismic performance, mechanism and application of innovative damped infilled wall/wallboard [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4):753-767. (in Chinese)
- [19] 王斌,蒋欢军,吕西林.内置钢板钢筋混凝土组合剪力墙数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2014,34(6):705-711.
Wang B, Jiang H J, Lyu X L, et al. Numerical simulation of reinforced concrete composite shear wall with built-in steel plate [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6):705-711. (in Chinese)
- [20] 刘国安,王欣,杨哲,等.HFMRPC面层加固带窗洞口砌体墙抗震性能试验研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(4):752-762,777.
Liu G A, Wang X, Yang Z, et al. Experimental study on seismic performance of HFMRPC facing reinforced masonry walls with window openings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4):752-762,777. (in Chinese)
- [21] 颜欣妍.竖向耗能接缝装配式剪力墙抗震性能研究[D].南京:东南大学,2019.
Yan X Y. Study on seismic behavior of assembled shear wall with vertical energy-consuming joints [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [22] 李敏.带耗能装置开缝剪力墙的设计研究[D].南京:东南大学,2017.
Li M. Design study of open-seam shear walls with energy-consuming devices [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [23] 吴晓龙,李宏男,马荣全,等.设置金属阻尼器的预制装配式剪力墙结构抗震性能分析[J].地震工程与工程振动,2016,36(5):46-54.
Wu X L, Li H N, Ma R Q, et al. Seismic performance of prefabricated shear wall structure with metallic damper [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dy-

- namics, 2016, 36(5):46-54. (in Chinese)
- [24] 邓付元, 纪晓东, 王涛, 等. 带楼板 RC 连梁抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(增):54-58.
Deng F Y, Ji X D, Wang T, et al. Cyclic test on the seismic behavior of RC coupling beams with slabs[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(Sup):54-58. (in Chinese)
- [25] Bing Qu, Bruneau Michel, Lin Chih-Han, et al. Testing of full-scale two-story steel plate shear wall with reduced beam section connections and composite floors [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134: 364-373.
- [26] 方圣恩, 陈小妹. 装配式摩擦-软钢耗能支座设计与性能试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(4):761-767.
Fang S E, Chen X M. Design and performance test of assembled friction-soft steel energy-consuming bearings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4):761-767. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)