

PEC柱RC剪力墙抗震性能试验及数值模拟方法研究

张永生^{1,2}, 饶纪坤³, 赵广臣^{1,2}, 杨宇焜⁴, 吕李华²

(1. 山西工程技术学院 土木工程系, 山西 阳泉 045000; 2. 山西工程技术学院 矿区生态修复与固废资源化厅市共建山西省重点实验室培育基地, 山西 阳泉 045000; 3. 安徽省建科建设监理有限公司, 安徽 合肥 230000; 4. 上海结奕建筑科技有限公司, 上海 201311)

摘要:为研究部分包覆钢-混凝土组合柱钢筋混凝土剪力墙 (partially encased composite columns-reinforced concrete shear walls, 简称 PEC 柱 RC 剪力墙) 的抗震性能, 设计了 2 种不同连接形式的 PEC 柱 RC 剪力墙进行低周往复加载试验, 对其破坏过程、滞回性能、耗能能力、刚度退化与强度退化等抗震性能进行研究。同时, 建立了有限元模型对其进行模拟研究, 通过试验结果验证了模型的准确性, 并分析了不同混凝土强度等级及不同轴压比下 PEC 柱 RC 剪力墙的抗震性能。研究表明, PEC 柱 RC 剪力墙最终发生剪切破坏, 但均具有较高的延性和耗能能力, 抗震性能优异, 在实际工程应用中 PEC 柱弱轴连接方式也可以较好地满足抗震性能要求。随着混凝土强度的提升, PEC 柱 RC 剪力墙的承载力有所提高, 但延性下降。随着轴压比的增大, PEC 柱 RC 剪力墙的承载力增幅逐渐变小, 实际工程设计中宜把轴压比控制在 0.4 以内。

关键词: PEC 柱 RC 剪力墙; 强轴连接; 弱轴连接; 抗震性能; 有限元分析

中图分类号: TU398⁺.9; P315.9

文献标志码: A

Experimental and numerical simulation study on the seismic performance of PEC column-RC shear walls

ZHANG Yongsheng^{1,2}, RAO Jikun³, ZHAO Guangchen^{1,2}, YANG Yukun⁴, LV Lihua²

(1. Department of Civil Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China; 2. The Cultivation Base of Shanxi Key Laboratory of Mining Area Ecological Restoration and Solid Wastes Utilization, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China; 3. Anhui Jianke Construction Supervision Co., Ltd., Hefei 230000, China; 4. Shanghai Jieyi Construction Technology Co., Ltd., Shanghai 201311, China)

Abstract: To investigate the seismic performance of partially encased composite columns-reinforced concrete shear walls (referred to as PEC column-RC shear walls), two different connection types were designed and subjected to low-cycle reversed loading tests. The study focused on their failure processes, hysteretic behavior, energy dissipation capacity, stiffness degradation, and strength degradation. Additionally, finite element models were developed to simulate their behavior, which were validated against the experimental results. The models were also used to analyze the seismic performance of PEC column-RC shear walls under different concrete strength grades and axial compression ratios. The results indicate that PEC column-RC shear walls ultimately experience shear failure, yet they exhibit high ductility and energy dissipation capacity, demonstrating excellent seismic performance. In practical engineering applications, the weak-axis connection method for PEC columns can effectively meet seismic performance requirements. As the concrete strength increases, the load-bearing capacity of PEC column-RC shear walls improves, although the ductility decreases. With an increase in the axial compression ratio, the rate of increase in load-bearing capacity diminishes. It is recommended to keep the axial compression ratio below 0.4 in practical engineering designs.

收稿日期:2024-07-02; 修回日期:2024-08-06

基金项目:山西省基础研究项目(自由探索类)(202203021222324);山西省高等学校科技创新项目(2021L589)

作者简介:张永生(1978—),男,副教授,硕士,主要从事工程结构抗震减震研究。E-mail:zhangyongsheng@sxit.edu.cn

通信作者:赵广臣(1981—),男,副教授,硕士,主要从事工程结构抗震减震研究。E-mail:jing1028lili@sina.com

Key words: PEC column-RC shear wall; strong-axis connection; weak-axis connection; seismic performance; finite element analysis

0 引言

部分包裹钢-混凝土组合柱 (partially encased composite columns, 简称 PEC 柱) 是一种新型组合结构, 其通过在型钢翼缘内设置剪力连接件, 并浇注混凝土来形成^[1-3]。混凝土明显提高了结构刚度和耐火性, 剪力连接件可有效约束翼缘的局部屈曲, 从而提高 PEC 柱的承载能力、延性和耗能能力^[4-7]。T 形截面的 PEC 柱^[8]、L 形截面的 PEC 柱^[9]、冷弯薄壁型钢 PEC 柱^[10] 和波形腹板 PEC 柱^[11] 均表现出良好的力学性能。

带框架柱的钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 剪力墙是由具有良好抗震延性的型钢混凝土柱和具有良好承载力和侧向刚度的 RC 剪力墙组合而成的^[12-13]。WANG 等^[14] 研究了短肢剪力墙的抗震性能, 包括破坏现象、破坏机理、承载力、延性和耗能特性。CAO 等^[15] 在短肢剪力墙上进行了一系列试验, 研究结果表明, 与传统的钢筋混凝土剪力墙试件相比, 嵌入在结构内的隐蔽支撑具有更好的强度和变形能力。DAN 等^[16] 和陈涛等^[17] 对不同形状和方法的嵌入式钢 (实腹板) 的抗震性能进行了对比研究, 结果表明加入钢筋后剪力墙的抗剪能力、变形能力和耗能能力明显提高。

到目前为止, 已有大量关于 PEC 构件、节点及结构等的研究, 并建立了相对全面的设计规范, 也出现了一些关于 PEC 柱-钢板剪力墙^[18-19] 的研究, 然而对于 PEC 柱 RC 剪力墙的研究仍然较少。PEC 柱的存在可以改善 RC 剪力墙面内受压区的性能^[20], 由于 PEC 柱的 H 型钢骨应用于空间结构中不可避免地出现强轴和弱轴 2 种连接方式, 现阶段国内外对于弱轴连接的 PEC 柱 RC 剪力墙结构研究较少。

为此, 本文设计了 2 个 PEC 柱 RC 剪力墙试件, 分别采用强轴连接与弱轴连接方式, 研究了其破坏模式、延性、刚度退化、承载力退化和耗能能力等抗震性能, 并深入探讨了不同混凝土强度和轴压比等因素对 PEC 柱 RC 剪力墙抗震性能的影响规律, 以期对 PEC 柱 RC 剪力墙的进一步优化设计与推广应用提供支撑。

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验所设计 PEC 柱 RC 剪力墙均采用 Q355B 钢, 高宽比为 1.2, 宽厚比为 11, 设计轴压比为 0.4。为了加强 PEC 柱与墙身之间的相互作用, 并使水平钢筋与 PEC 柱之间的连接不采用焊接, 采取 T 形钢连接件。试件设置了加载梁和地梁, 总高度为 2500 mm, 墙身高度为 1500 mm, PEC 柱长度为 2495 mm, 型钢截面宽度为 110 mm, 截面高度为 110 mm, 翼缘宽度为 8 mm, 腹板高度为 6 mm, 采用钢板焊接成 H 型钢柱, 柱底焊接了一块 200 mm×120 mm×5 mm 的钢板。PEC 柱系杆为 C 形钢筋, 焊接在型钢翼缘上, 墙身钢筋和 PEC 柱中系杆钢筋采用同样直径的 HRB400 级热轧带肋钢筋, 墙身钢筋和 PEC 柱中系杆之间的间隔都是 100 mm, 混凝土保护层为 20 mm, 构造图如图 1 所示。

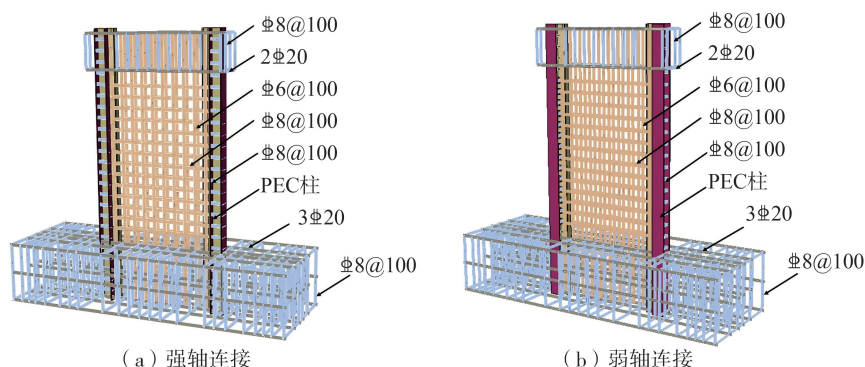


图 1 PEC 柱 RC 剪力墙构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the PEC column-RC shear walls construction

1.2 材性试验

PEC 柱 RC 剪力墙试件均采用 C50 商品混凝土,根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[21]测试,依据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》^[22]测定钢材的材料性能,混凝土的实测立方体抗压强度及钢材强度分别如表 1、表 2 所示,混凝土破坏形态及钢材断裂试样分别如图 2、图 3 所示。

表 1 混凝土强度值

Table 1 Material properties of concrete

编号	抗压强度 f_{cu} /MPa		弹性模量 E_c /GPa
	试验值	均值	
1-1	75.56		
1-2	72.89	68.22	39.9
1-3	56.22		

表 2 钢材材料性能

Table 2 Material properties of steel

强度等级	厚度 t /mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 E /MPa
Q355B	6	356.9	488.9	233 630
	8	352.8	487.4	227 092



图 2 混凝土标准试块破坏形态图

Fig. 2 Failure pattern of standard concrete test blocks

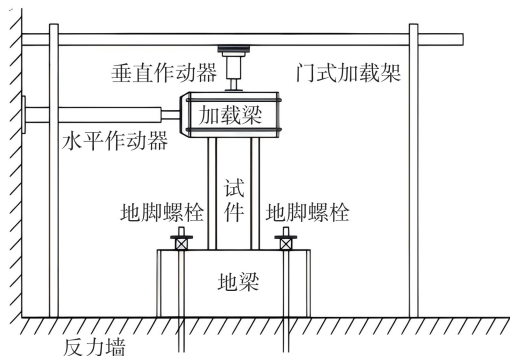


图 3 钢材断裂试样

Fig. 3 Steel fracture sample

1.3 加载制度

本次试验通过在梁的上端中心位置设置竖向千斤顶对试件施加竖向轴压力。使用 U 形架将加载梁箍紧,形成刚性加载横梁,水平作动器通过高强螺栓与横向相连并施加荷载,基础梁在宽度方向与地面用 8 根地脚螺栓连接,试件加载约束装置和现场布置如图 4 所示。



(a) 加载示意图



(b) 加载实景

图 4 试验加载装置图

Fig. 4 Diagram of the test loading device

按照 JGJ 101—2015《建筑抗震试验方法规程》^[23],试验中水平荷载的加载方式采用位移控制,加载制度如图 5 所示。当试件承载力降至峰值荷载的 85%以下,或位移角超过 1/25 时,将停止加载并结束试验。

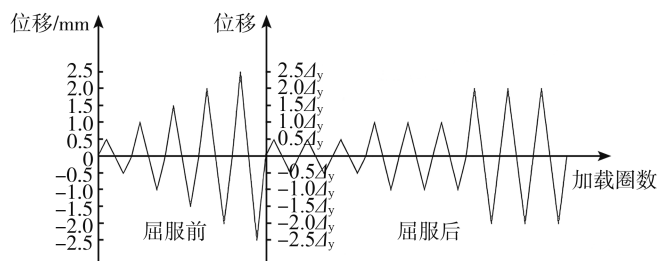


图5 试件加载制度

Fig.5 Specimen loading system

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

强轴连接试件在竖向荷载与预加载施加阶段无明显变化,无裂缝出现。加载至 1.5 mm 时,试件正面左侧墙体混凝土出现斜向裂缝,从边柱中下部延伸;加载至 12 mm 时,墙体上斜裂缝继续扩展,数量增加,试件两侧钢板翼缘底部屈服,因此,以此级位移对应的位移 Δ_y 作为屈服位移继续进行加载。

2.5 倍 Δ_y 加载过程中,左边腔混凝土脱落,右侧边腔角部混凝土压碎,试件承载力下降。继续加载,混凝土墙体底部出现大块混凝土被压溃的现象,承载力下降至峰值承载力的 85% 以下,加载结束。破坏过程如图 6 所示。

弱轴连接试件在竖向荷载与预加载施加阶段无明显变化,无裂缝出现。加载至 1.5 mm 时试件发出“嘶啦”声,加载完毕后,试件正面左侧墙体混凝土出现斜向下裂缝;加载至 10 mm 时,试件下部形成多处交叉型斜裂缝,主要是两侧边柱上部向墙体底部延伸,此时试件两侧钢板翼缘底部屈服,因此,以此级位移对应的位移作为屈服位移 Δ_y 继续进行加载。

2.5 倍 Δ_y 加载过程中,东侧边柱与墙体连接处混凝土剥落,内部型钢发生屈曲。墙体西侧上部与东侧下部间出现贯通裂缝,且东侧下部裂缝宽度明显增大,混凝土部分脱落,承载力略有下降。3 倍 Δ_y 加载过程中,东侧边柱底部混凝土大块剥落,型钢外露;相邻处墙体剥落混凝土增加,露出部分钢筋,试件型钢边翼缘发生严重屈曲,承载力降至峰值承载力的 85% 以下,停止加载。破坏过程如图 7 所示。

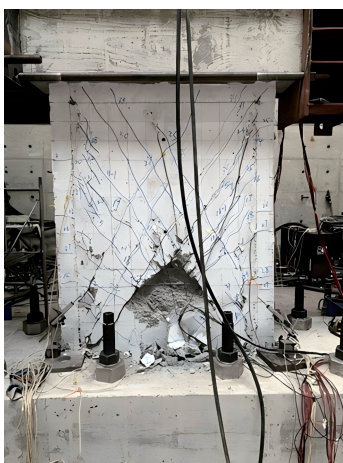


图6 强轴连接 PEC 柱 RC 剪力墙破坏形态

Fig.6 Failure modes of PEC column-RC shear walls connected by the strong axis

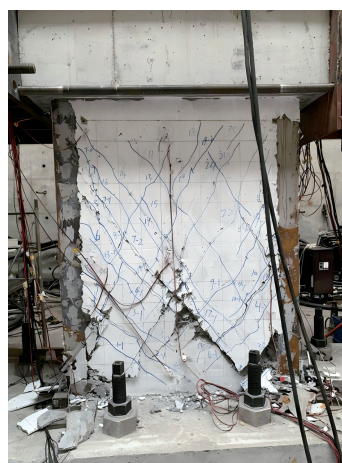


图7 弱轴连接 PEC 柱 RC 剪力墙破坏形态

Fig.7 Failure mode of PEC column-RC shear walls connected by the weak axis

2.2 滞回曲线及骨架曲线

试验记录了低周往复加载下试件的荷载值和位移值,将每一级第 1 次循环加载的荷载-位移曲线的峰值点连接形成骨架曲线。其中,强轴连接试件的荷载-位移滞回曲线与骨架曲线分别如图 8(a)、(b) 所示,弱轴连接试件的荷载-位移滞回曲线与骨架曲线分别如图 9(a)、(b) 所示。

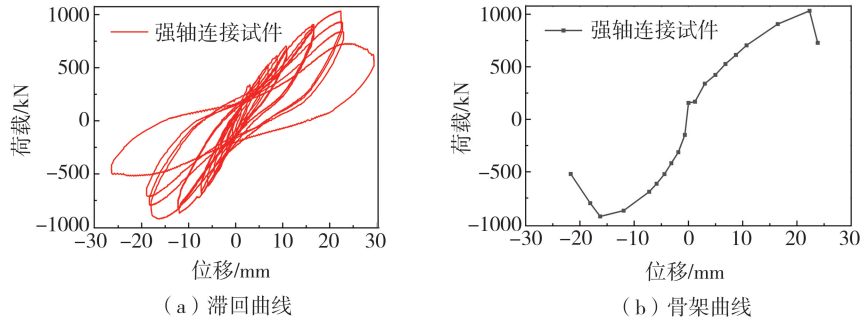


图 8 强轴连接试件滞回曲线及骨架曲线

Fig. 8 Hysteretic curves and skeleton curves of specimens connected by the strong axis

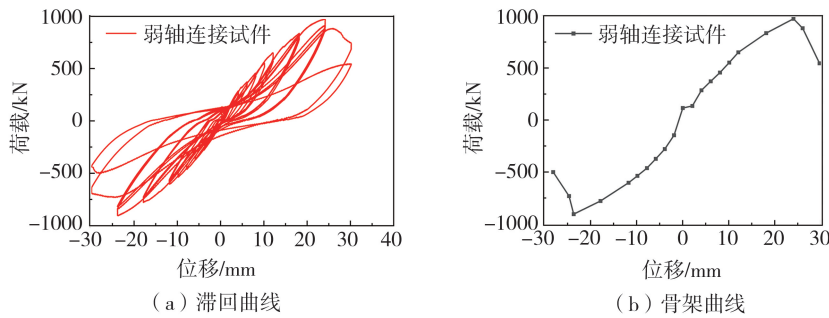


图 9 弱轴连接试件滞回曲线及骨架曲线

Fig. 9 Hysteretic curves and skeleton curves of specimens connected by the weak axis

由图 8、图 9 可知,试件采用强轴连接和弱轴连接时滞回曲线均呈现弓形且表现出捏缩效应,这说明试件受到了不同程度的滑移影响。相较于强轴连接试件,弱轴连接试件的滞回曲线捏缩现象更严重,滞回环面积更小,强轴连接试件承载力与延性明显高于弱轴连接试件。

在墙体混凝土未开裂时,试件荷载-位移曲线大致保持线性,且滞回环面积小,试件的残余变形和损伤程度较轻。随着加载进入中期,荷载-位移曲线开始出现非线性变化,试件逐步转入弹塑性阶段,滞回环面积也随之增大,试件的损伤逐步增加。加载后期阶段,墙体的裂缝不断加宽,混凝土开始碎裂并脱落,露出内部钢筋,滞回环面积再次增大,残余变形也随之加剧,钢筋与混凝土间的滑移使得结构的捏缩效应更为明显,试件的损伤程度急剧恶化,最终导致试件破坏。然而,在 RC 剪力墙与 PEC 柱的接触部分及其底部,展现出较强的塑形变形能力与承压能力,有助于最大限度地保证整个结构的变形性能。

2.3 耗能能力

在实际的工程结构中,结构的耗能性能可以用等效黏滞阻尼系数和累计耗能进行表征。按照图 10 与式(1)计算得到其等效黏滞阻尼系数 h_e ,试件的等效黏滞阻尼系数如图 11 所示。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{(S_{ABC} + S_{CDA})}{(S_{OBE} + S_{ODF})} \tag{1}$$

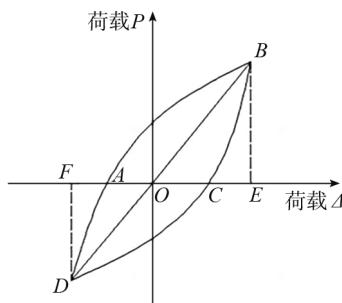


图 10 等效黏滞阻尼系数 h_e 计算示意图

Fig. 10 Schematic diagram for calculating the equivalent viscous damping coefficient h_e

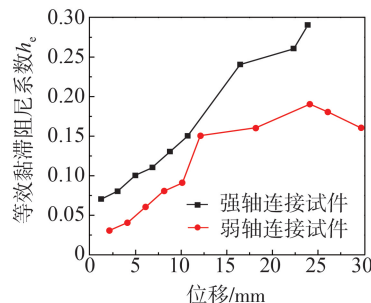


图 11 等效黏滞阻尼系数 h_e

Fig. 11 Equivalent viscous damping coefficient h_e

由图 11 可知,试件达到破坏时,PEC 柱 RC 剪力墙的 h_e 不减反增,说明达到极限承载力之后,PEC 柱 RC 剪力墙组合结构的承载力下降缓慢,滞回曲线的形状转向为饱满的梭形,试件仍然具有良好的耗能能力。弱轴连接试件的 h_e 明显小于强轴连接试件,表明采取弱轴连接方式时 PEC 柱 RC 剪力墙的耗能能力明显下降,这是因为其 PEC 边柱受力方向与型钢翼缘厚度方向一致,无法充分发挥材料力学性能。

2.4 刚度退化

本文依据 JGJ 101—2015《建筑抗震试验方法规程》^[23] 中的割线刚度法,分析了这 2 个试件的刚度退化现象,割线刚度 K 计算方法如式(2)所示:

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (2)$$

式中: F_i 为第 i 次荷载峰值; X_i 为第 i 次位移峰值。

刚度计算结果如图 12 所示。

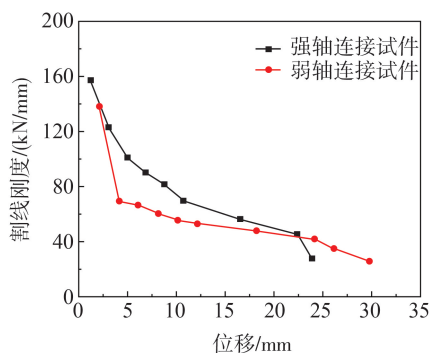


图 12 刚度退化

Fig. 12 Rigidity degradation

试件在受力初期保持弹性,但一旦裂缝形成,其刚度便迅速退化;在循环荷载的影响下,试件的损伤逐渐累积,而荷载增加的速度远慢于位移的增长,导致刚度退化的速度有所放缓;到加载末期,试件的刚度显著降低,这表明其损伤程度较为严重。

2.5 强度退化

在结构位移保持不变的条件下,结构承载力随循环加载次数的增加逐步减少,这一现象被称为强度退化。强度退化的程度可以通过强度退化系数 η 进行量化,其表达式为

$$\eta = \frac{P_j^i}{P_j^{i-1}} \quad (3)$$

式中: P_j^{i-1} 为位移荷载幅值为 Δ_j 时第 $i-1$ 次循环的峰值点荷载值; P_j^i 为位移荷载幅值为 Δ_j 时第 i 次循环的峰值点荷载值。强度退化曲线如图 13 所示。

由图 13 可知,2 个试件的强度退化系数 η 比较接近,达到屈服位移前变化幅度较大,此时试件承载力仍处于上升阶段;达到屈服位移后在每一位移级多次循环的作用下变化幅度很小,主要集中在 0.6~1.2 之间,说明 PEC 柱与 RC 剪力墙的连接形式对其强度退化系数 η 影响较小。即使越过极限承载力后仍然变化不大,表明 PEC 柱 RC 剪力墙组合结构具有良好的抗损伤能力。

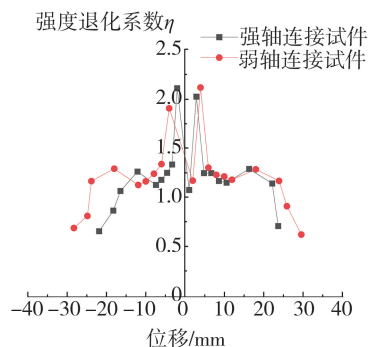


图 13 强度退化

Fig. 13 Strength degradation

3 PEC 柱 RC 剪力墙有限元分析

3.1 有限元模型建立

以 PEC 柱 RC 剪力墙强轴连接试件为例,采用有限元软件 ABAQUS 分析 PEC 柱 RC 剪力墙在拟静力加载下的破坏过程,结合各组件的几何类型、受力等因素,钢筋和连杆使用了二节点三维桁架单元 T3D2,而混

凝土和型钢则采用了八节点三维实体的六面体线性减缩积分单元 C3D8R。应用结构化网格划分技术,每个单元的尺寸都定为 100 mm,如图 14 所示。

模拟混凝土时采用混凝土塑性损伤模型 (concrete damaged plasticity, CDP),并依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[24] 计算了混凝土在受压和受拉状态下的应力应变本构关系及损伤因子,具体参数如图 15 所示。此模型中膨胀角设为 35° ,流动势偏心率为 0.15,黏度参数设为 0.0015,双轴与单轴的初始屈服强度比为 1.16,拉压子午面第二应力不变量的比值 K_c 为 0.6667。钢筋和型钢在模拟中均采用双线性应力应变关系模型。钢材的屈服强度、弹性模量按实测值采用,泊松比则取为 0.3,而混凝土的受拉强度、抗压强度及弹性模量亦按实测值计算,泊松比取为 0.2。

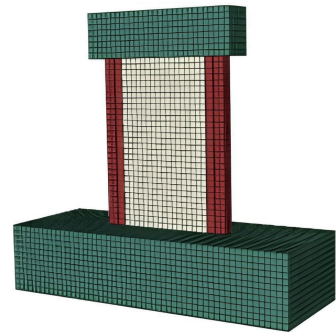


图 14 有限元模型及网格划分

Fig. 14 Finite element model and mesh division

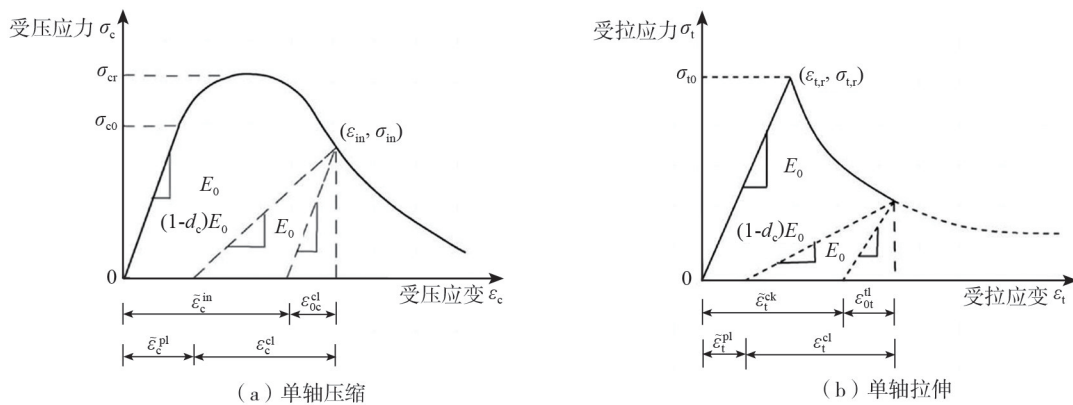


图 15 CDP 模型中混凝土的应力应变关系

Fig. 15 Stress-strain relationship of concrete in the CDP model

在有限元模型中,混凝土与型钢之间设置面与面接触,切向接触采用库仑摩擦,摩擦系数设定为 0.5;法向接触采用硬接触,确保翼缘可以向外脱离但不能向内渗透。此外,连杆的上下两端与钢柱翼缘绑定,而纵筋两端则与端板绑定,并全部嵌入混凝土中。

3.2 数值模拟与试验结果对比

试验和有限元模拟的骨架曲线对比如图 16 所示。选取的计算模型能准确地模拟 PEC 柱 RC 剪力墙的整个受力过程,承载力相差在 5% 以内,弹性阶段刚度差别不大,适用性较好。

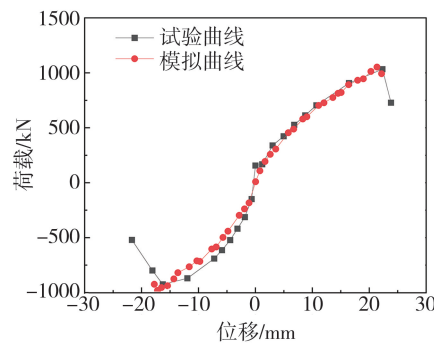


图 16 骨架曲线对比

Fig. 16 Comparison of skeleton curve

3.3 混凝土强度影响分析

为了研究不同混凝土强度对 PEC 柱 RC 剪力墙抗震性能的影响,考虑了混凝土强度级别 C40、C50、C60,分析了不同强度对试件荷载-位移曲线的影响规律,如图 17 所示。混凝土强度由 C40 变化到 C60 时,试件承载力呈线性增加,但是延性会有所降低,原因是混凝土强度的提高会使得混凝土的延性降低,在后期破坏时更容易被压溃,表现为构件承载力下降,延性降低。

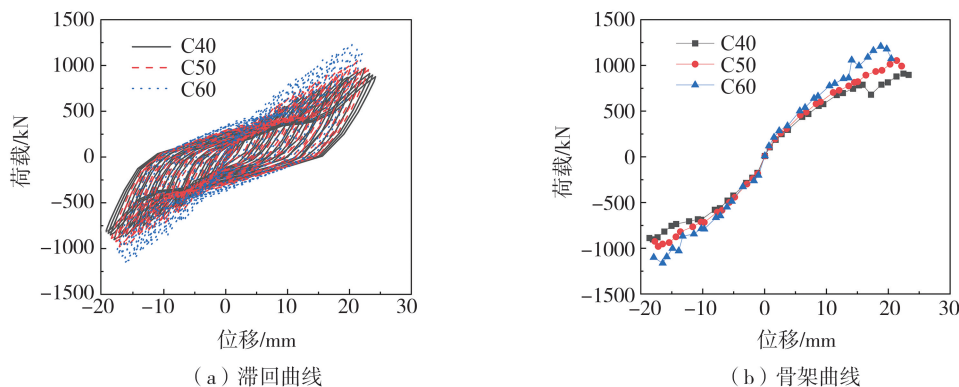


图 17 不同混凝土强度下试件的荷载-位移曲线对比

Fig. 17 Comparison of load-displacement curves of specimens under different concrete strengths

3.4 轴压比影响分析

为探究轴压比对 PEC 柱 RC 剪力墙抗震性能的影响,基于试验数据模拟分析了轴压比为 0.2、0.3、0.4、0.5 时的荷载-位移曲线,结果如图 18 所示。结果表明,提高轴压比可以有效增强试件的承载能力。当轴压比从 0.2 增至 0.4 时,试件的峰值承载力可增长 8.83%;但当轴压比超过 0.4 后,峰值承载力增长趋于稳定。因此,为充分利用 PEC 柱 RC 剪力墙的结构性能,建议将轴压比控制在 0.4 或以下。

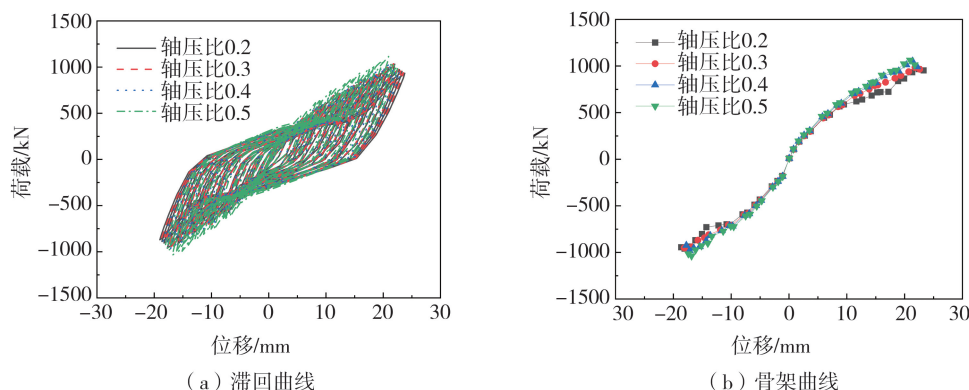


图 18 不同轴压比下试件的荷载-位移曲线对比

Fig. 18 Comparison of load-displacement curves of specimens under different axial compression ratios

4 结论

基于 PEC 柱 RC 剪力墙的试验与有限元参数结果分析,得出了以下结论:

1) 不同构造的 PEC 柱 RC 剪力墙均出现对角斜裂缝,最终发生剪切破坏,但均表现出良好的耗能能力与抗损伤能力。

2) PEC 柱 RC 剪力墙采用弱轴连接时承载力下降不超过 5%,说明在实际工程应用中 PEC 柱弱轴连接方式也可以较好地满足抗震性能要求。

3) PEC 柱 RC 剪力墙承载力随着混凝土强度提升而增大,但延性有所降低。随着轴压比的增大,PEC 柱 RC 剪力墙的承载力增幅逐渐减小,建议其轴压比宜控制在 0.4 以内。

参考文献:

- [1] 沈文聪, 方有珍, 吴鹏飞, 等. 摩擦耗能部分复位 PEC 柱组合框架抗震性能模拟分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(6): 211-221. SHEN Wencong, FANG Youzhen, WU Pengfei, et al. Simulation analysis on seismic performance of PEC column composite frame with partial restoring friction damped connection[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(6): 211-221. (in Chinese)
- [2] WANG J F, HU P F, LIU Y, et al. Axial compressive behavior of the PEC slender columns with lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 211: 108206.
- [3] 方有珍, 顾强, 万财知, 等. 大尺度新型卷边 PEC 柱-钢梁 T 形件摩擦耗能型连接中节点抗震试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(2): 125-133.

- FANG Youzhen, GU Qiang, WAN Caizhi, et al. Test study on seismic performance of large-size interior joint between innovative PEC column-steel beam with frictional energy-dissipation t-stub connection[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(2): 125-133. (in Chinese)
- [4] ZHAN X X, QIN Z W, LI J, et al. Global stability of axially loaded partially encased composite column with L-shaped section[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 200: 107671.
- [5] WANG W, CAI H L, BAI C Y, et al. Seismic performance of partially encased concrete composite columns with corrugated web[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 77: 107481.
- [6] SONG Y C, WANG R P, LI J. Local and post-local buckling behavior of welded steel shapes in partially encased composite columns[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 108: 93-108.
- [7] LI C H, LIU X C, ZHANG A L, et al. Axial compressive strength of concrete encased extended T-shaped steel composite columns with less reinforcement[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 82: 108207.
- [8] 陶书庆. T形、L形截面部分包覆钢-混凝土组合短柱受压性能与设计方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
TAO Shuqing. Research on compression behavior of t-shaped & l-shaped partially encased concrete composite stub columns[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [9] 覃祚威, 李慧, 韩栋, 等. L形 PEC 柱的箱型支撑节点构造优化及性能分析[J/OL]. *钢结构(中英文)*, 2024: 1-11[2024-11-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1609.tf.20240409.1211.002.html>.
QIN Zuwei, LI Hui, HAN Dong, et al. Structure and performance analysis of box-type support joint of L-shaped partially coated steel-concrete composite column[J/OL]. *Steel Construction(Chinese & English)*, 2024: 1-11[2024-11-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1609.tf.20240409.1211.002.html>. (in Chinese)
- [10] 方有珍, 陆承铎, 马吉, 等. 新型卷边钢板组合截面 PEC 柱(弱轴)滞回性能足尺试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(1): 24-33.
FANG Youzhen, LU Chengduo, MA Ji, et al. Experimental study on hysteretic behaviors of PEC columns(weak axis) fabricated with crimping thin-walled built-up section by full scale[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(1): 24-33. (in Chinese)
- [11] 王威, 陈乐乐, 苏三庆, 等. 波形腹板部分包覆组合柱强轴偏心受压试验分析[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(5): 252-263.
WANG Wei, CHEN Lele, SU Sanqing, et al. Eccentric compression test and analysis of partially encased composite columns strong axis with corrugated webs[J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(5): 252-263. (in Chinese)
- [12] 白国良, 白涌滔, 李红星, 等. 大型火电厂分散剪力墙-SRC 框排架结构抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(6): 74-80, 87.
BAI Guoliang, BAI Yongtao, Li Hongxing, et al. Experimental study on aseismic behavior of scattered shear wall-src frame-bent structure in large-scale thermal power plant[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(6): 74-80, 87. (in Chinese)
- [13] 卢荣, 蔡新江, 田石柱. SRC 异形十字边框柱-RC 剪力墙抗震性能分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(1): 114-118, 152.
LU Rong, CAI Xinjiang, TIAN Shizhu. Analysis of seismic properties of RC shear wall with SRC specially-shaped cross columns frame[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(1): 114-118, 152. (in Chinese)
- [14] WANG W, WANG Y, LU Z. Experimental study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete composite shear wall[J]. *Engineering Structures*, 2018, 160: 281-292.
- [15] CAO W L, ZHANG J W, XUE S D, et al. Seismic performance of RC coupled short-pier shear walls with concealed bracing[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2006, 9(4): 577-589.
- [16] DAN D, FABIAN A, STOIAN V. Theoretical and experimental study on composite steel-concrete shear walls with vertical steel encased profiles[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(5): 800-813.
- [17] 陈涛, 肖从真, 田春雨, 等. 高轴压比钢-混凝土组合剪力墙压弯性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(6): 1-7.
CHEN Tao, XIAO Congzhen, TIAN Chunyu, et al. Experimental study of the compression-bending behavior of composite shear walls of high axial compression ratios[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(6): 1-7. (in Chinese)
- [18] YIN Z Z, ZHANG H, YANG W W. Study on seismic performance and damage analysis of steel plate shear wall with partially encased composite (PEC) columns[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(5): 907.
- [19] YU J G, YU H S, FENG X T, et al. Behaviour of steel plate shear walls with different types of partially-encased H-section columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 170: 106123.
- [20] 曹亚楠. 带 PEC 柱的组合剪力墙抗震性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
CAO Yanan. Experimental study on seismic performance of composite shear walls with PEC columns [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020. (in Chinese)
- [21] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [22] GB/T 228.1—2021 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, 2021.
GB/T 228.1—2021 Metallic materials-Tensile testing-part 1: Method of test at room temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [23] JGJ 101—2015 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
JGJ 101—2015 Specifying of testing methods for earthquake resistant building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [24] 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)