

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.021

基于弱化连接构造的全现浇混凝土外墙拟静力试验研究

马梓翔¹, 种 迅¹, 沈 毅², 蒋 庆¹, 史佩然¹, 周 安¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省高速地产集团有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘 要:针对填充外墙与剪力墙全现浇结构刚度过大问题,文章研究弱化连接构造对全现浇混凝土外墙抗震性能的影响,并开展了 3 个缩尺试件的拟静力试验,其中 2 个分别采用 PVC 拉缝和挤塑板条弱化连接,1 个为纯剪力墙对比试件。研究表明:2 种弱化连接构造均不同程度地改变剪力墙结构的破坏形态,其中 PVC 拉缝弱化连接的延性性能要优于挤塑板条的试件;内含挤塑板的现浇填充墙增加了试件的峰值承载力,其中 PVC 拉缝和挤塑板条弱化连接试件的峰值荷载是纯剪力墙的 2.6、3.6 倍;内含挤塑板的现浇填充墙降低了试件的变形性能;内含挤塑板的现浇填充墙增大了试件的初始刚度,其中 PVC 拉缝试件的初始刚度最大,且刚度退化也最为明显。

关键词:剪力墙结构;现浇填充墙;弱化连接;拟静力试验;抗震性能

中图分类号:TU973.16 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)07-0996-06

Pseudo-static test on fully cast-in-place concrete exterior wall based on weakly connected structure

MA Zixiang¹, CHONG Xun¹, SHEN Yi², JIANG Qing¹, SHI Peiran¹, ZHOU An¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Gaosu Real Estate Group Co., Ltd., Hefei 230001, China)

Abstract: In view of the overlarge stiffness of fully cast-in-place concrete infill wall and shear wall, the influence of weakly connected structure on the seismic performance of fully cast-in-place concrete exterior wall is studied. The pseudo-static test on three scaled specimens was conducted, two of which were weakly connected by polyvinyl chloride(PVC) tensile joints and extruded slats, respectively, and one served as a pure shear wall control specimen. The results show that the two kinds of weakly connected structures can change the failure forms of shear wall structures in varying degrees, and the ductility of PVC tensile joint specimen is better than that of extruded slat specimen. The cast-in-place infill wall with extruded slats increases the peak load capacity of the specimen, and the peak load of the PVC tensile joint and extruded slat specimens is 2.6 times and 3.6 times that of pure shear wall specimen. The cast-in-place infill wall with extruded slats reduces the deformation performance of the specimen. The cast-in-place infill wall with extruded slats increases the initial stiffness of the specimen, while that with the PVC tensile joints has the largest initial stiffness and the most obvious stiffness degradation.

Key words: shear wall structure; cast-in-place infill wall; weak connection; pseudo-static test; seismic performance

收稿日期:2023-05-09;修回日期:2023-06-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178472)

作者简介:马梓翔(1996—),男,安徽亳州人,合肥工业大学硕士生;

种 迅(1978—),女,河北辛集人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师;

蒋 庆(1984—),男,安徽怀远人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师;

周 安(1964—),男,安徽绩溪人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:1988800056@hfut.edu.cn.

0 引言

近些年来,随着城市化建设的不断发展,许多高层民用住宅项目大量涌现,伴随高消耗、高污染、低效率等问题日益突出,加快发展建筑工业化是建筑业转型升级的必由之路^[1]。通过引用现浇混凝土填充墙替代传统砌体填充墙,且填充墙和剪力墙一起浇筑,同时为了减重以及降低混凝土填充墙的刚度,采用挤塑板进行填充,本项目将上述结构体系称为“全现浇混凝土外墙体系”。相比于传统的砌体填充墙,全现浇混凝土外墙可有效避免渗水、开裂等问题,同时可以提高施工质量、缩短施工工期。

全现浇混凝土外墙体系优势明显,但也存在一定的劣势。由于现浇混凝土填充墙与结构墙形成刚性连接,导致其建筑主体的刚度发生改变,一旦出现地震作用可能会造成结构受损,情况严重时将直接影响建筑使用寿命^[2]。因此为避免地震作用下对剪力墙结构的不利影响,在建筑施工中常在填充墙与剪力墙位置处采用弱化连接构造,此构造方式是通过隔断非结构构件与结构墙的相互作用,并且在接缝位置采用弱化材料进行填充^[3-5],以此来改善全现浇混凝土填充墙对剪力墙结构刚性约束的影响。

本文研究弱化连接构造对全现浇外墙在地震作用下的破坏模式和损伤机理,设计1个不含填充墙的剪力墙试件和2个分别采用挤塑板条与PVC结构拉缝弱化连接的全现浇混凝土外墙试件,并根据试验结果评估2种弱化连接构造的损伤机制和试件的承载能力、延性性能和刚度退化等规律。

1 弱化连接构造

为了使现浇混凝土填充墙出现塑性铰区域,以及全现浇混凝土外墙具有良好的塑性变形能力,本研究分别设置2种方案,以此研究弱化连接构造对全现浇混凝土外墙的抗震性能影响。弱化连接全现浇混凝土外墙示意图如图1所示。

在填充墙与剪力墙之间设置全截面PVC拉缝进行弱化连接,PVC拉缝分布在底部、顶部以及两侧范围内,简称全截面拉缝。该种PVC的弹性模量约3 000 MPa。

与全截面拉缝构造相似,改变填充墙与剪力墙之间的隔断材料及尺寸大小,采用部分截面挤塑板条进行弱化连接,简称部分截面拉缝。该种

挤塑板条的弹性模量约10 MPa。

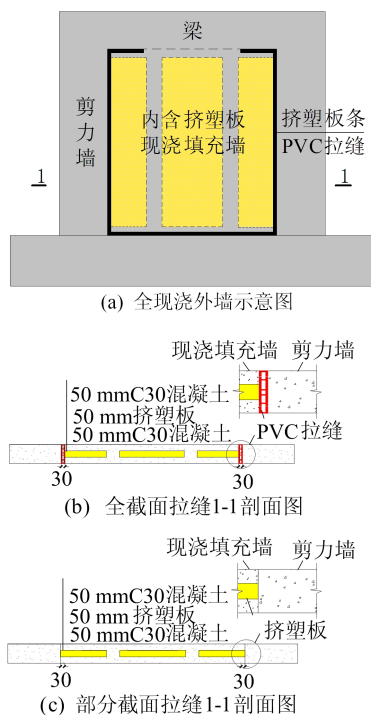


图1 弱化连接全现浇混凝土外墙示意图

2 试验试件

2.1 试件尺寸及材料性能

从结构抗震设计角度出发^[6],以“强剪弱弯”为原则^[7],选取工程项目上的局部全现浇混凝土外墙为研究对象,设计3个缩尺试件,其中1个不含填充墙的剪力墙结构,其余2个含填充墙的剪力墙结构,试件参数见表1所列,试件尺寸及钢筋构造如图2所示。

表1 试件参数

试件编号	剪力墙长/mm	填充墙长/mm	墙体厚度/mm	设计轴压比	拼缝处理
K-1	400		150	0.2	
Q-1	400	1 400	150	0.2	PVC拉缝
Q-2	400	1 400	150	0.2	挤塑板条

对预留尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的混凝土试块,按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)相关规定^[8]进行测试,实测混凝土立方体抗压强度平均值为36.4 MPa,经计算可得,混凝土的轴心抗压强度为24.3 MPa,弹性模量为 3.02×10^4 N/mm²。同时对预留4种型号3根钢筋按照《钢筋混凝土用钢第2部分:热轧带肋钢筋》(GB/T 1499.2—2018)相关规定^[9],对其进行材性测量。4种钢筋材料性能见表2所列。

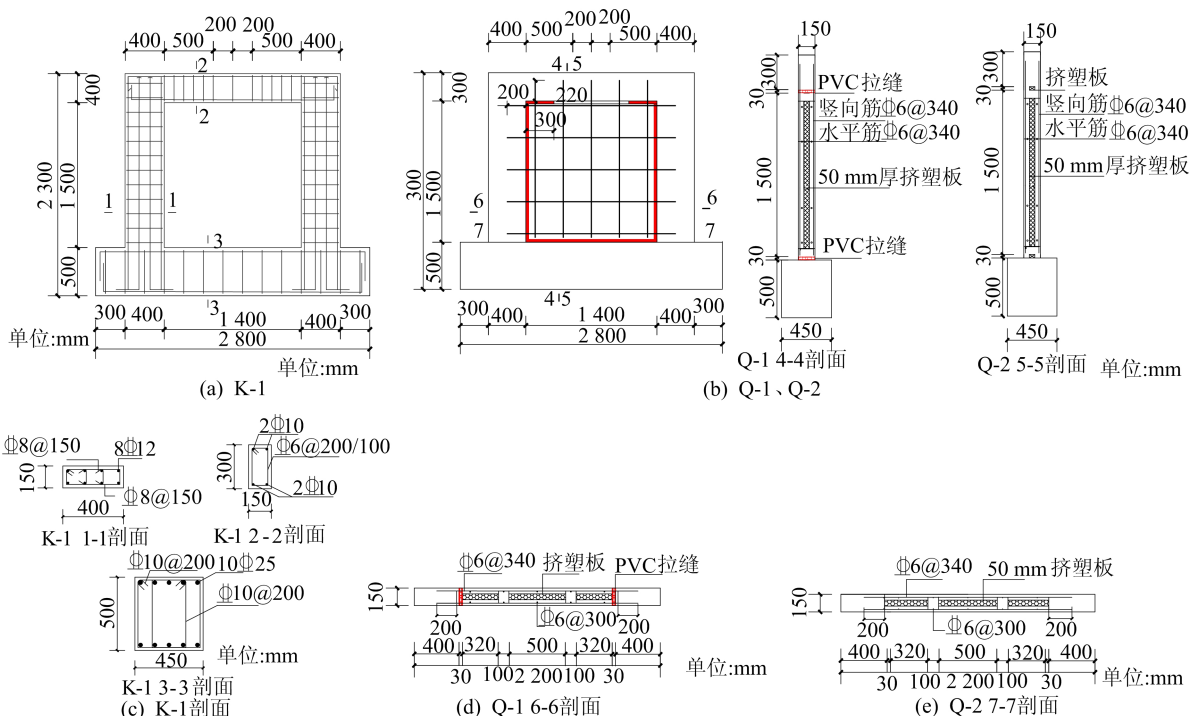


图 2 试件尺寸及钢筋分布图

表 2 钢筋材料性能

钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	弹性模量/(N/mm ²)
6	405	578	13.2	2.01×10 ⁵
8	420	591	23.8	2.02×10 ⁵
10	448	603	21.9	2.01×10 ⁵
12	469	612	24.2	2.02×10 ⁵

2.2 试验装置

试验加载装置如图 3 所示。

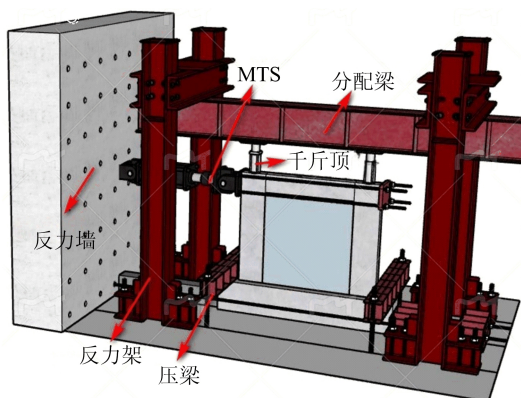


图 3 试验加载装置图

在循环往复试验中,为防止试验过程中仪器与试件相互滑移,使用压梁将试件固定在地槽中,采用水平拉杆和千斤顶将地梁两端固定。作用试件的水平荷载由 100 t 的 MTS 伺服系统和反力

墙共同施加,竖向荷载通过反力架、分配梁及竖向千斤顶共同施加。

2.3 加载制度

根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—1996),本次试验采用水平位移控制加载^[10],位移加载制度如图 4 所示。

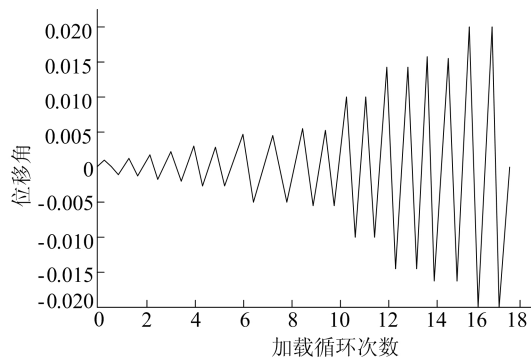


图 4 位移加载制度

根据试验现象判断试件屈服,在屈服之前循环 1 次,屈服之后循环 2 次。当水平荷载下降至峰值的 85% 以下或试件出现混凝土大量剥落且破坏严重时终止试验。

2.4 测量内容

采用 MTS 液压伺服作动器测量试件水平荷载与水平位移;采用采集仪测量试件主要位置的钢筋和混凝土应变数据;记录试验过程的裂缝宽

度以及裂缝发展过程。

3 试验结果及分析

3.1 破坏特征

加载前期 3 个试件并无明显破坏现象,处于弹性阶段,K-1、Q-1 和 Q-2 分别在 θ 为 1/1 000、1/1 500、1/900 时,出现第 1 条弯曲裂缝;当 θ 为 1/6、1/10、1/75 时,K-1、Q-1 和 Q-2 试件到达峰值荷载,分别为 236、625、863 kN,且伴有部分混凝土脱落;此后试件承载力开始下降,最外侧混凝土不断被压溃,纵向钢筋裸露;直至承载力下降至峰值的 85%,试验结束。各个试件最终破坏情况如图 5 所示。

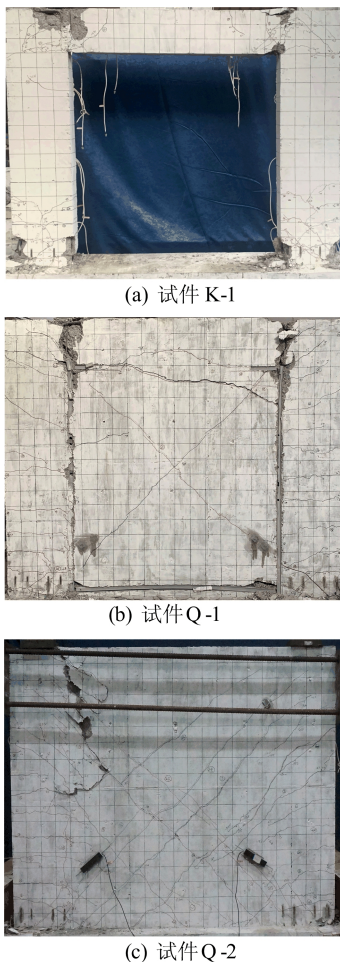


图 5 试件最终破坏情况

K-1 裂缝主要分布在墙肢底部和连梁端部,且裂缝主要以弯曲裂缝和弯剪斜裂缝为主,表现为弯曲破坏;Q-1 在位于墙肢底部出现多条水平弯曲裂缝,裂缝不断发展至受压区位置,并且大约在 800 mm 高的墙肢出现数条斜裂缝,表现为弯剪破坏;Q-2 裂缝主要由墙肢水平弯曲裂缝斜向

发展至填充墙区域,最终沿墙体往下发展的主斜裂缝突然使混凝土保护层剥落,表现为剪切破坏。

K-1 与 Q-1 的破坏模式相似,首先连梁端部形成塑性铰,最后梁端角部混凝土被压碎。说明 PVC 拉缝对剪力墙与填充墙具有分隔作用,提高了剪力墙的抗震性能;Q-1 相较于 Q-2 破坏稳定,说明在分界面处,PVC 拉缝较好地适应了填充墙与剪力墙的变形能力。

3.2 滞回曲线与骨架曲线

滞回曲线和骨架曲线是描述试件抗震性能的重要依据。试件的滞回与骨架曲线分别如图 6、图 7 所示。

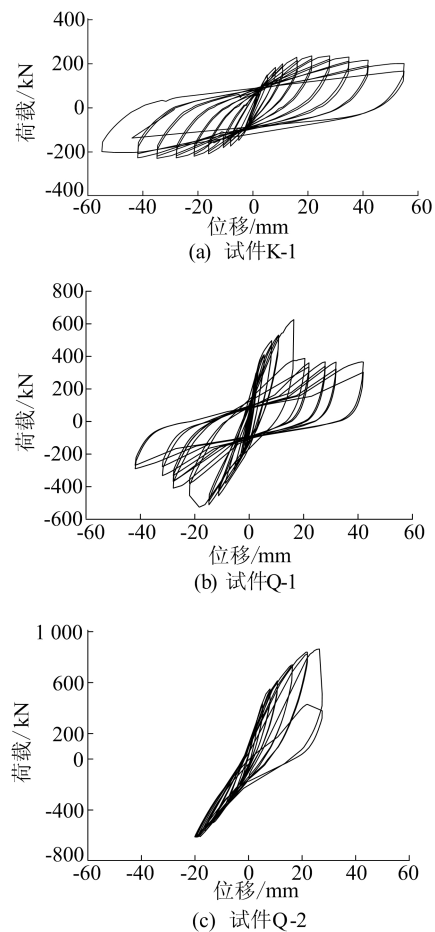


图 6 各个试件滞回曲线

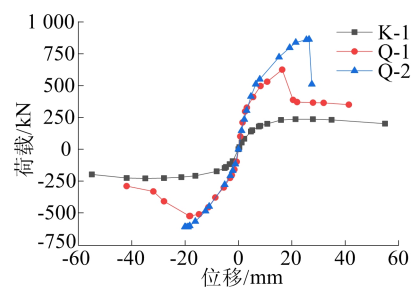


图 7 各个试件骨架曲线

由图 6、图 7 可知:加载初期,试件基本处于线弹性阶段,各个试件的滞回环表现为狭而窄梭形形状,且包裹面积较小,与此同时 Q-1 与 Q-2 的刚度远大于 K1,而 Q-1 与 Q-2 的刚度大小相当;加载中期,各个试件的水平荷载变化速率逐渐放缓,且伴随有刚度减小的趋势,同时滞回环均表现出不同形状, Q-1 滞回环大致呈现为反 S 形分布,相较于 K-1 的弓形分布表现更为饱满,耗能能力进一步增大;加载后期,由于受到试验仪器量程的限制,在反向加载时未能使 Q-2 完全受拉。K-1、Q-1 伴随着试件进一步的破坏,构件承载力表现出不同程度的下降。

3.3 承载力与延性性能

试件主要阶段的特征值见表 3 所列。其中各试件的屈服点按几何作图法确定,极限荷载取峰值荷载的 85%。表 3 中: P_y 、 P_{max} 、 P_u 分别为屈服荷载、峰值荷载、极限荷载; Δ_y 、 Δ_{max} 、 Δ_u 分别为屈服位移、峰

值位移、极限位移; μ 为延性系数,极限位移与屈服位移的比值,即 $\mu = \Delta_u/\Delta_y$; θ_u 为极限位移角,极限位移与试件高度的比值,即 $\theta_u = \Delta_u/h$ 。

由表 3 可知:Q-1、Q-2 峰值荷载分别是 K-1 的 2.6、3.6 倍,说明内含挤塑板的填充墙能有效提高剪力墙结构的承载能力,而采用挤塑板条弱化连接的 Q-2 承载能力最大;Q-1 延性系数高于 Q-2,表明采用 PVC 拉缝弱化连接的延性效果表现更为突出。分析其原因主要有位于 Q-1 填充墙与连梁交接的角部位置处形成具有变形能力的塑性铰,从而表现出良好的延性性能; K-1、Q-1 及 Q-2 的极限位移角介于 $1/70 \sim 1/30$ 之间,符合我国《建筑抗震设计规范》^[6]对剪力墙结构在罕遇地震作用下的要求。其中 K-1 极限位移角要大于 Q-1、Q-2,说明内含挤塑板的填充墙阻碍了剪力墙结构的变形能力,其中 Q-1 极限位移角小于 Q-2,说明采用 PVC 拉缝弱化连接的作用最为显著。

表 3 主要阶段特征值

试件 编号	加载 方向	屈服点		峰值点		极限点		μ	θ_u
		P_y/kN	Δ_y/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_y/kN	Δ_y/mm		
K-1	正	183.6	8.18	235.8	27.90	200.5	55.19	6.75	1/3
	反	173.6	8.16	229.2	34.90	194.8	56.56	6.94	1/29
Q-1	正	355.1	7.35	625.6	18.40	531.7	24.83	2.90	1/89
	反	456.7	6.86	525.3	17.39	446.5	21.63	3.38	1/66
Q-2	正	635.6	11.55	863.9	26.47	734.3	26.84	2.32	1/61
	反	483.2	12.22	>611.4	19.73	>519.7	>20.09	>1.64	>1/82

3.4 刚度退化曲线

各个试件的刚度退化曲线如图 8 所示。

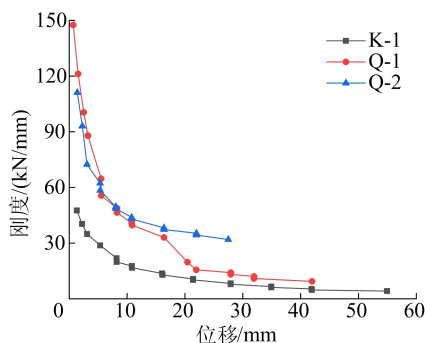


图 8 各个试件刚度退化曲线

由图 8 可知,3 个试件刚度退化曲线走势基本一致,由快速刚度退化过渡到刚度趋于平稳。加载初期, Q-1 与 Q-2 初始刚度分别是 K-1 的 3.1、2.3 倍,说明内含挤塑聚苯板的填充墙对剪力墙结构具有一定的约束作用,且提高了整体抗侧刚

度的能力。加载中期, Q-2 退化速度明显低于 Q-1,这是由于 PVC 拉缝能有效分隔剪力墙与填充墙的相互作用,而挤塑板条分隔的能力不如 PVC 拉缝,使剪力墙与填充墙保持一定的协同工作。加载后期, Q-1 刚度退化曲线接近 K-1,说明填充墙退出与剪力墙结构的整体工作,只有剪力墙结构独自受力,因此 Q-1 的刚度大小接近 K-1。

4 结 论

1) 各个试件的破坏特征不尽相同。纯剪力墙 K-1 与 PVC 拉缝分隔的 Q-1 破坏模式相似,表明在 Q-1 上侧角部能有效地形成塑性铰区域,保证主体结构的安全;而挤塑板条分隔的 Q-2 破坏模式主要以剪切变形为主的脆性破坏。

2) 内含挤塑板的填充墙增加了剪力墙结构的峰值承载力,其中采用 PVC 拉缝与挤塑板条的峰值荷载分别是纯剪力墙的 2.6、3.6 倍。

(下转第 1008 页)

4) 本文采用统一的支护方案,从位移和支护力 2 个方面对支护系统进行综合评价,但能否基于围岩稳定安全系数来反推不同工况的最佳支护形式有待进一步的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 王生俊,贾学民,韩文峰,等. 高速公路下伏采空区剩余沉降量 FLAC~(3D) 计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 147-152.
- [2] 王华玲. 下伏采空区公路隧道结构安全稳定性评价及处治措施研究[J]. 公路, 2020, 65(2): 308-315.
- [3] 郭庆彪,郭广礼,吕鑫,等. 高速公路下伏采空区安全深度的数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 193-200.
- [4] 符亚鹏,姚志刚,方勇,等. 隧道开挖对下伏水平薄煤层采空区地层的扰动及衬砌受荷特征[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 117-125.
- [5] LIU X Y, DI G P. Experimental study of damage variable law of bridge and tunnel with underlying goaf during expressway[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243/244/245/246/247/248/249: 3062-3066.
- [6] 余涛,张乾,张尚达,等. 穿采空区巷道围岩特性分析及稳定性控制[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 909-917.
- [7] 方勇,符亚鹏,周超月,等. 公路隧道下穿双层采空区开挖过程模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2247-2257.
- [8] 杨志浩,方勇,杨斌,等. 公路隧道下穿倾斜煤层采空区室内开挖模型试验[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 974-981, 1055.
- [9] 苟德明,田娇,李佳佳,等. 高速公路隧道下伏小煤窑采空区洞内注浆处治技术[J]. 林业工程学报, 2018, 3(5): 142-149.
- [10] 李建旺,冯仕文,周喻. 隧道下穿采空区施工围岩灾变演化

的力学机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(2): 543-554.

- [11] TANG Z Q, YANG S Q, XU G, et al. Disaster-causing mechanism and risk area classification method for composite disasters of gas explosion and coal spontaneous combustion in deep coal mining with narrow coal pillars[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 132: 182-188.
- [12] YAN Q, QIN S F. High containing fly ash grouting material performance test of large channel underlying goaf[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 353/354/355/356: 1271-1276.
- [13] XUE J H, WANG H P, ZHOU W, et al. Experimental research on overlying strata movement and fracture evolution in pillarless stress-relief mining [J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2015, 2(1): 38-45.
- [14] 宁宇,徐卫亚,郑文棠,等. 白鹤滩水电站拱坝及坝肩加固效果分析及整体安全度评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1890-1898.
- [15] 苏凯,崔金鹏,张智敏. 隧洞施工开挖过程初次支护时机选择方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(8): 3075-3082.
- [16] 苏永华,刘少峰,王凯旋,等. 基于收敛-约束原理的地下结构稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2002-2009.
- [17] 赵昌杰,饶军应,熊鹏,等. 基于特征曲线法的围岩-支护系统安全性分析[J]. 水利规划与设计, 2022(11): 158-167.
- [18] 冶金部建筑研究总院. 锚杆喷射混凝土支护技术规范: GB 50086—2001[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001: 24.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1000 页)

3) 内含挤塑板的填充墙降低了剪力墙结构的延性性能,其中采用 PVC 拉缝的延性性能比挤塑板条更为显著。

4) 内含挤塑板的填充墙增加了剪力墙结构的初始刚度,其中采用 PVC 拉缝的初始刚度最大,且刚度退化也最为明显。

[参 考 文 献]

- [1] 孙军,杨泓斌,蔡晋,等. 新型建筑工业化解决方案: SSGF 高质量建造体系研究[J]. 建筑经济, 2019, 40(2): 11-16.
- [2] 张相超,赵永强,王小平,等. 填充墙对装配式剪力墙抗侧刚度影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(2): 42-47.
- [3] 周剑,田春雨,王俊,等. 带现浇混凝土填充墙的剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8): 86-99.
- [4] 周晓洁,李忠献,续丹丹,等. 柔性连接填充墙框架结构抗震

性能试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(2): 155-166.

- [5] 张微敬,闫怡雯,钱稼茹,等. 底部放置聚苯板的预制剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 16-24.
- [6] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 20-25.
- [7] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 186-188.
- [8] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 10-18.
- [9] 中国钢铁工业协会. 钢筋混凝土用钢第 2 部分: 热轧带肋钢筋: GB/T 1499. 2—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 8-13.
- [10] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101—1996[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996: 51-55.

(责任编辑 吴 亮)