

POM-UHPC 加固闽南地区石砌体窗间墙 抗震性能数值分析

彭洋¹, 李飞燕^{2*}, 吴应雄^{3,4}

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学嘉庚学院土木工程学院, 福建 漳州 363105;
3. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 4. 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福建 福州 350108)

摘要: [目的] 针对高宽比大、截面尺寸小而极易在地震中率先破坏的窗间墙, 前期提出采用掺入聚甲醛纤维的超高性能混凝土(POM-UHPC)对其进行点状嵌缝加固(即局部加固)并开展试验研究. 本文进一步研究点状尺寸、点状平面面积和点状位置对石砌体窗间墙抗震性能的影响. [方法] 基于 ABAQUS 有限元软件, 建立加固后石砌体窗间墙的有限元模型并通过试验结果验证模型的可靠性. 对不同的点状尺寸、点状平面面积以及点状位置加固的模型进行数值分析. [结果] 研究表明: 在点状平面面积一定的情况下, 点状尺寸和点状位置对窗间墙抗震性能基本没有影响; 点状的平面面积增大, 峰值荷载提升, 但延性系数下降; 点状之间的距离增大会延缓窗间墙屈服点以及峰值荷载点的出现. [结论] 研究成果可为该新型抗震加固技术提供理论依据.

关键词: 石砌体窗间墙; 点状嵌缝加固; POM-UHPC; 数值分析

中图分类号: TU 363

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)06-1048-09

Numerical analysis of seismic performance for POM-UHPC reinforced stone masonry walls between windows in Southern Fujian

PENG Yang¹, LI Feiyan^{2*}, WU Yingxiong^{3,4}

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. School of Civil Engineering, Xiamen University Tan Kah College, Zhangzhou 363105, China; 3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
4. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou 350108, China)

Abstract: [Objective] For walls between windows with large height-to-width ratios and small cross-sections that are highly vulnerable to seismic damage, we propose a preliminary study related to point-embedded reinforcement, i. e. local reinforcement, using polyoxymethylene fiber-reinforced ultra-high performance concrete (POM-UHPC) and conducting experimental investigations. Furthermore, we examine the effects of patch dimensions, planar area, and distribution patterns on the seismic performance of stone masonry walls between windows. [Methods] Finite element models of reinforced stone masonry walls between windows were developed using ABAQUS to validate the reliability of the model in comparison with experimental results. Numerical analyses were conducted to investigate the effects of patch dimensions, planar area, and distribution patterns on seismic performance. [Results] Research results indicate that, when planar areas of point-like elements remain constant, their patch dimensions and distribution patterns essentially exert no effect on the seismic performance of the wall between windows. Increasing planar areas of point-like elements enhances the peak load, but reduces the ductility coefficient, whereas increasing the distance between the point-like elements

收稿日期: 2025-03-14 录用日期: 2025-07-05

基金项目: 福建省自然科学基金(2023J01036)

*通信作者: lfy24@xujc.com

引文格式: 彭洋, 李飞燕, 吴应雄. POM-UHPC 加固闽南地区石砌体窗间墙抗震性能数值分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(6): 1048-1056.

Citation: PENG Y, LI F Y, WU Y X. Numerical analysis of seismic performance for POM-UHPC reinforced stone masonry walls between windows in Southern Fujian[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(6): 1048-1056. (in Chinese)



delays the occurrence of both the yield point and the peak load point in wall between windows. [Conclusions] Hopefully, our research findings can serve as a theoretical guide for this new seismic reinforcement technology.

Keywords: stone masonry walls between windows; point-embedded reinforcement; POM-UHPC; numerical analysis

福建省沿海地区石砌体房屋数量庞大且具有典型性。这些石砌体房屋大多存在结构体系不合理、用材不规范、墙体砌筑方式不当等问题^[1-3], 导致其抗震性能差, 亟待加固。石墙是石砌体房屋的主要承重和抗侧力构件, 闽南地区特有的干砌甩浆砌筑方式存在石垫片随机分布, 石材受力分布不均^[4]; 砂浆饱满度严重不足, 与石材粘结力较弱等缺点, 降低了墙体的抗剪承载力, 因此石墙是石砌体房屋的抗震薄弱环节, 尤其是高宽比大、截面尺寸小的窗间墙在历次大地震中普遍破坏严重。因此, 对石砌体窗间墙的抗震加固研究具有重要意义。

目前, 石墙的加固思路主要有加固面层和提高灰缝抗剪强度两种。国内外的学者基于上述加固思路, 开展了一系列积极的探索。针对石墙面层进行加固应用最广泛的是钢筋网水泥砂浆面层加固法和钢筋混凝土面层加固法。刘文定^[5]通过试验研究表明这两种方法能显著提高石墙的抗剪承载力, 改善石墙的延性和刚度。徐天航等^[6]在砂浆中掺入质量比例为 0.3% 的纤维素醚用于改善石材和砂浆界面的粘结性和抗垂挂性, 试验结果表明采用钢筋网改性砂浆加固后的石墙抗剪承载力提高了约 50%~160%。通过提高灰缝抗剪强度进行加固的方法主要有压力灌浆法和嵌缝加固法。施养杭等^[7]采用压力灌浆法对闽南地区干砌甩浆砌筑石墙进行抗震加固, 试验研究表明该方法可以提升石墙灰缝砂浆饱满率, 从而提升石墙的抗剪强度。Muras^[8]采用苯乙烯-丁二烯乳胶(SBR 乳胶)对石砌体墙进行压力灌浆加固, 试验结果表明 SBR 乳胶可以有效填补灰缝中的裂缝和孔洞, 从而提高石墙的整体性、承载力和抗震性能。郭子雄等^[9]提出对闽南地区条石砌筑石墙进行嵌缝加固, 其中新砌石墙采用钢筋-聚合物砂浆嵌缝加固, 损伤石墙采用聚合物砂浆和剪力键进行加固。基于试验结果表明加固后墙体的整体性和抗震能力有明显改善, 开裂荷载明显提高, 抗剪承载力也有一定程度提高。上述加固方法或施工繁琐、或影响建筑原始风貌、或减少使用空间、或耐久性不足。为此, 需要开展新型加固技术的研究, 达到简单、经济和耐久的加固效果。新材料、新技术的发展必将为石墙的抗震加固提供更多的技术支撑。福州大学石结构研究团队提出将超高性能混凝土(UHPC)应用于既有石砌体房屋的抗震加固, 同时加入聚甲醛纤维

(POM)替代钢纤维从而提高混凝土的韧性, 减少其对混凝土工作性能的影响。前期研究表明, POM-UHPC 面层加固法容易出现加固面层与石墙剥离的现象, 且 POM-UHPC 用量多, 不够经济^[10]。POM-UHPC 全缝嵌缝加固法能显著提升干砌甩浆石砌体墙灰缝的抗剪强度^[11]和石墙整体的抗震性能^[12], 该方法的研究逐步成熟。然而在实际工程应用中发现, 当对干砌甩浆石墙进行大范围掏缝的时候往往碰到因受力而难以取出的石垫片, 若强行取出, 会影响加固过程中墙体的稳定性, 造成施工困难, 因此亟需对该加固法进行改进。为此课题组创新性地提出点状嵌缝加固法(即局部加固), 该方法灵活选择石辅垫片较为松动的地方进行掏缝, 降低施工难度, 经济效益更好。前期拟静力试验研究表明 POM-UHPC 点状嵌缝加固后的石砌体窗间墙的抗剪承载力显著提升, 耗能能力也略有提升^[10]。

受限于试验条件, 无法进一步开展相关参数的试验研究。因此, 本文基于前期试验研究结果, 利用有限元软件 ABAQUS 开展 POM-UHPC 点状嵌缝加固石砌体窗间墙抗震性能数值模拟分析, 以点状尺寸、点状平面面积(下文均用“面积”表示)、点状位置作为研究参数, 分析不同影响因素对石砌体窗间墙抗震性能的影响。研究成果可为该新型抗震加固技术提供理论依据。

1 UHPC 加固闽南地区石砌体窗间墙抗震性能试验研究

1.1 试验概况

课题组前期开展了 POM-UHPC 点状嵌缝加固干砌甩浆石砌体窗间墙的拟静力试验研究。一共制作了 2 个试件, 其中一个为未加固试件作为基准试件, 一个为点状嵌缝加固试件。未加固试件由条石、当地低强度黏土混合砂浆砌筑而成, 条石尺寸为 840 mm×210 mm×210 mm, 灰缝厚度控制在 30 mm 左右。点状嵌缝加固试件的灰缝每侧各布置两点, 位置随机, 每点尺寸(长×深)为 150 mm×70 mm, 竖向灰缝每侧布置一点, 每点尺寸(长×深)为 100 mm×50 mm。点状嵌缝加固试件图以及示意图分别如图 1 和 2 所示。试验时试件通过荷载分配梁施 0.4 MPa(对应两层石砌体房屋)的竖向荷载。试件参数如表 1 所示。



图 1 点状嵌缝加固试件

Fig. 1 Specimen for point reinforcement

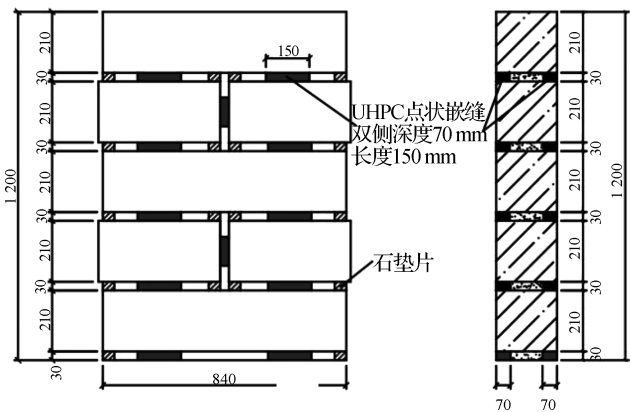


图 2 模型点状嵌缝加固(单位:mm)

Fig. 2 The model point reinforcement (unit:mm)

表 1 试件参数

Tab 1 Specimen parameters

试件编号	试件尺寸	加固方式	加固说明	竖向压应力/MPa
SMW1	840 mm × 210 mm × 1 200 mm	未加固	—	0.4
SMW2	840 mm × 210 mm × 1 200 mm	双面点状嵌缝加固	点状尺寸 150 mm × 70 mm (宽度 × 深度)	0.4

1.2 试验结果

2 个试件的滞回曲线和骨架曲线分别如图 3 和 4 所

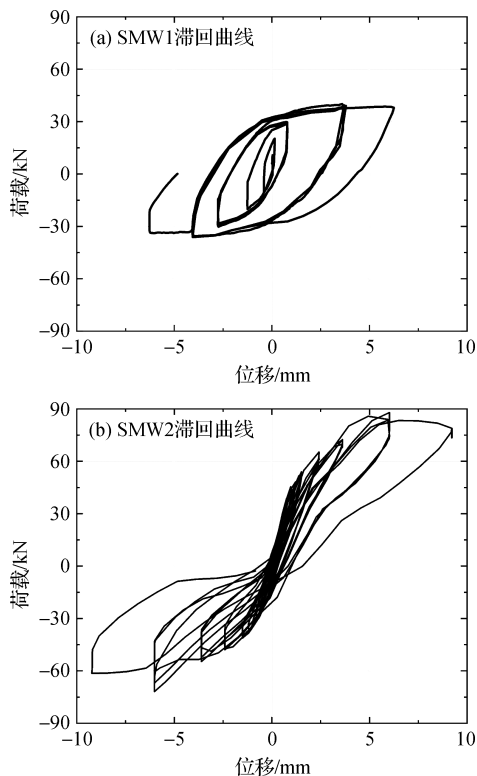


图 3 滞回曲线

Fig. 3 Hysteresis curves

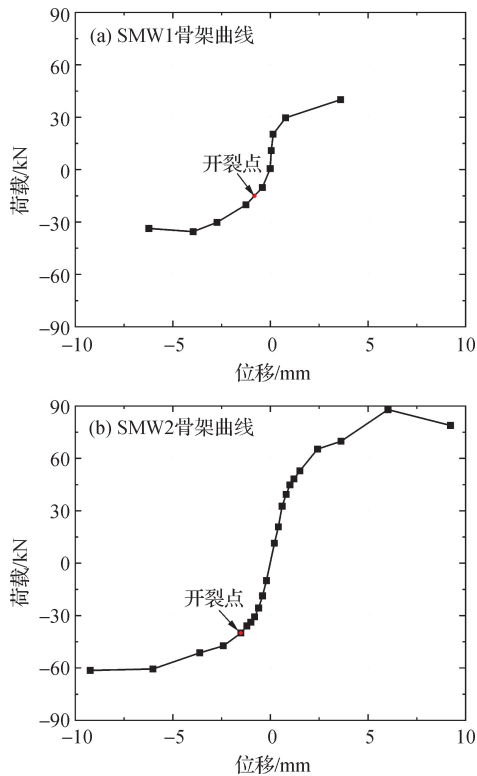


图 4 骨架曲线

Fig. 4 Skeleton curves

示,骨架曲线特征点以及滞回耗能如表 2 所示. 试验结果表明,点状嵌缝加固试件较未加固试件表现出显著的力学性能改善,其开裂荷载与峰值荷载分别达到未加固试件的 2.67 倍和 2.20 倍,总体滞回耗能略大于未加固试件,约为未加固试件的 1.077 倍. 因此, POM-UHPC 点状嵌缝加固后的石砌体窗间墙抗剪承载力显著提升,耗能能力也略有提升.

表 2 骨架曲线特征点和滞回耗能

Tab. 2 Skeleton curve characteristic points and hysteresis energy dissipation

试件	P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	P_{max}/kN	$E_h/(kN \cdot mm)$
SMW1	-15	-0.74	40.03	1 928.98
SMW2	-40	-1.51	87.92	2 076.55

注: P_{cr} 为试件的开裂荷载; Δ_{cr} 为试件开裂对应的位移; P_{max} 为试件的峰值荷载; E_h 为滞回耗能.

2 有限元模型

2.1 模型概况

有限元模型包括顶梁、地梁和石砌体墙 3 部分. 模型尺寸如图 5 所示,石砌体墙采用分离式建模. 砌筑石材选用条石,砌筑砂浆采用低强度的黏土混合砂浆,加固材料采用 POM-UHPC,顶梁和地梁均使用 C40 混凝土浇筑.

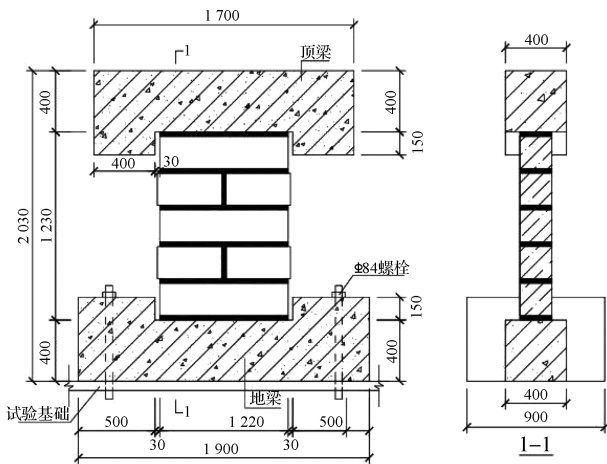


图 5 模型尺寸(单位:mm)

Fig. 5 The size of the model(unit:mm)

2.2 材料本构

1) 石材本构关系

基于石材材性试验与文献[13]研究成果,确定石

材基本力学参数为:密度 $2\ 800\ kg/m^3$,弹性模量 $45\ GPa$,泊松比 0.2 . 试验观察表明,石砌体窗间墙试件的破坏模式主要表现为灰缝开裂及滑移,而条石砌块本体未出现强度失效特征. 鉴于上述破坏机制,为提高数值模拟效率,本研究对条石砌块采用线弹性本构模型,其单轴受压应力-应变关系可表述为:

$$\begin{cases} \sigma_c = E_{sc}\epsilon_c, & \epsilon_c \leq \epsilon_{c0}, \\ \sigma_c = 0, & \epsilon_c > \epsilon_{c0}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_{sc} 为条石受压弹性模量, σ_c 和 ϵ_c 分别为条石的压应力和压应变.

其单轴受拉应力-应变关系可表述为:

$$\begin{cases} \sigma_t = E_{st}\epsilon_t, & \epsilon_t \leq f_{st}/E_s, \\ \sigma_t = 0, & \epsilon_t > f_{st}/E_s, \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_{st} 为条石受拉弹性模量,取 $E_{st} = E_{sc}$, f_{st} 为条石抗拉强度值.

2) 砂浆本构关系

黏土混合砂浆的本构模型研究尚缺乏系统性成果,相关研究表明^[14-16],黏土混合砂浆单轴应力-应变响应与混凝土呈现显著相似性特征. 基于这一力学相似性,本研究选取 Desayi 等^[17]提出的经典模型构建其本构关系,黏土混合砂浆单轴受压应力-应变方程可表述为:

$$\sigma_c = \frac{E_{p0}\epsilon}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{p0}}\right)^2}, \quad (3)$$

式中: σ_c 为砂浆压应力, E_{p0} 为砂浆初始弹性模量, ϵ_{p0} 为砂浆的峰值应变,取 $\epsilon_{p0} = \frac{2f_p}{E_{p0}}$; f_p 为砂浆的轴心抗压强度.

黏土混合砂浆的单轴受拉应力-应变关系曲线的上升段采用线弹性模型来描述,下降段采用 Hiberborg 提出的单直线下降式来描述,黏土混合砂浆的单轴受拉应力-应变关系可表述为:

$$\begin{cases} \sigma_t = E_p\epsilon, & \epsilon \leq \epsilon_{tp0}, \\ \sigma_t = E_p \left[\epsilon_{tp0} - \frac{(\epsilon - \epsilon_{tp0})}{3} \right], & \epsilon_{tp0} < \epsilon \leq \epsilon_{tpu}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_t 为砂浆受拉应力, ϵ 为砂浆受拉应变, ϵ_{tp0} 为砂浆单轴受拉峰值应力对应的应变; ϵ_{tpu} 为砂浆单轴受拉极限应变,取 $\epsilon_{tpu} = 4\epsilon_{tp0}$.

黏土混合砂浆的塑性参数采用混凝土损伤塑性模型(CDP)定义材料的属性参数. 模型中砂浆相关参数的设置如表 3 所示.

3) POM-UHPC 本构关系

本文参考单波^[18]、吴有明^[19]和沈涛^[20]的研究结果,确定 POM-UHPC 的受压应力-应变关系:

表 3 砂浆损伤塑性参数设置

Tab. 3 Mortar damage plastic parameter setting

参数名称	取值
Ψ	30°
ϵ_0	0.1
f_{b0}/f_{c0}	1.16
K_C	0.666 7
μ	0.000 5

$$\begin{cases} y = ax + (6 - 5a)x^5 + (4a - 5)x^6, \\ 0 \leq x \leq 1, \\ y = \frac{x}{\alpha(x - 1)^2 + x}, 1 < x, \end{cases} \quad (5)$$

式中： $x = \epsilon/\epsilon_{pr}$, $y = \sigma/f_{pr}$, $a = E_0/E_p$, ϵ_{pr} 为棱柱体抗压强度对应的峰值应变； f_{pr} 为棱柱体抗压强度。

POM-UHPC 的受拉应力-应变关系采用张哲等^[21]通过单轴拉伸试验得到的双线型受拉本构模型：

$$\sigma(\epsilon) = \begin{cases} \frac{f_{ct}}{\epsilon_{ca}}\epsilon, & 0 \leq \epsilon < \epsilon_{ca}, \\ f_{ct}, & \epsilon_{ca} < \epsilon \leq \epsilon_{cp}, \end{cases} \quad (6)$$

式中： f_{ct} 为拉伸强度， ϵ_{ca} 为线性偏离初裂应变， ϵ_{cp} 为极限应变。

POM-UHPC 相关塑性参数如表 4 所示。

表 4 POM-UHPC 损伤塑性参数设置

Tab. 4 POM-UHPC damage plastic parameter setting

参数名称	取值
Ψ	36.31°
ϵ_0	0.1
f_{b0}/f_{c0}	1.16
K_C	0.666 7
μ	0.000 5

POM-UHPC 泊松比取 0.2。

对于 POM-UHPC 部件的建立和嵌入，为了避免出现接触太多导致模型不收敛，在建立灰缝砂浆部件后对其按照实际嵌缝深度进行分割，随后分别赋予灰缝砂浆和 POM-UHPC 材料属性。

2.3 单元类型和网格划分

对于条石、POM-UHPC 以及黏土混合砂浆均采用八节点六面体线性缩减积分单元(C3D8R)进行模拟。对于顶梁、地梁及石材，在建模过程中分别建立成刚体或者弹性材料，对于此类于模型中非核心区域的

材料，为提高计算效率，单元近似全局尺寸取较大值 150 mm(梁)以及 84 mm(条石)，对于砂浆以及 POM-UHPC 模型核心区域，单元近似全局尺寸取较小值 30 mm，通过对不同材料的针对性网格划分，在模型计算结果有较高精确性的前提下提高计算效率，网格划分后各模型单元数量均在 3 000 左右。

模型网格划分如图 6 所示。

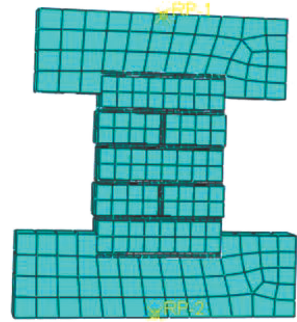


图 6 模型网格划分
Fig. 6 Model meshing

2.4 相互作用及边界条件

石墙竖向灰缝与石材之间的接触仅设置法向“硬”接触；对于水平灰缝与条石接触界面：法向接触行为采用“硬”接触模型，砂浆-石材界面采用基于表面的粘性行为(Cohesive)的牵引力-分离模型来模拟。该模型主要分为线弹性阶段和粘性损伤阶段，损伤阶段的力学特性通过接触属性中损伤准则来模拟。

1) 粘结滑移本构关系

王兰^[13]进行了大量的灰缝水平往复加载试验，通过对试验数据的拟合与分析，给出了灰缝法向弹性刚度和切向弹性刚度的计算公式：

$$K_m = 13.918f_m + 30.713, \quad (7)$$

$$K_{tt} = 109.428\sigma + 4.978f_m + 200.611. \quad (8)$$

考虑到法向弹性刚度对灰缝的粘结破坏无影响，本文取 $K_m = 0$ ；两个方向的切向弹性刚度取值相同，即 $K_{tt} = K_{ss}$ 。

2) 损伤准则

粘聚力行为采用最大名义应力准则，考虑到水平接触面存在粘聚力行为和损伤，接触面间的滑动变形较小，主面并非光滑且粘性行为与有限滑移不能同时存在，因此采用小滑移接触。

3) 边界条件

模型的顶部为自由端，底部完全固定。石墙与加载顶梁和底梁之间的水平灰缝采用较高强度等级混

凝土铺设,墙顶部和底部水平灰缝与顶梁、地梁和石墙之间采用 TIE 方式进行连接,目的是为了防止石墙与顶梁和地梁之间发生滑移破坏.

2.5 分析步和荷载设置

设置两个分析步来分别模拟竖向加载和水平方向加载. 第一个分析步施加竖向荷载,第二个分析步施加水平荷载. 竖向荷载施加在顶梁上,水平循环往复荷载施加在顶梁上面耦合点处.

加载幅值的采用参考蒋利学等^[22]的研究成果,加载制度如图 7 所示.

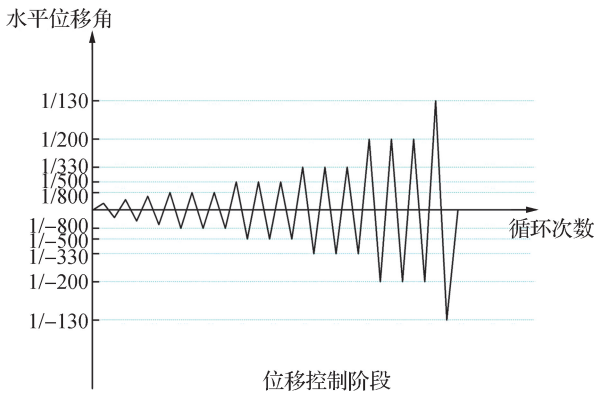


图 7 水平荷载加载制度

Fig. 7 The horizontal load loading system

3 模型验证

将加固试件的有限元模型数值分析结果与试验结果进行对照,来验证有限元模型的可靠性.

图 8 为点状嵌缝加固试件模拟和试验对比图. 由图 8(a)可知,点状嵌缝加固窗间墙模型的滞回曲线与试验试件的吻合效果较好,从图 8(b)看出模拟曲线与试验曲线的正向位移段在峰值荷载以前的发展趋势十分吻合,模拟的塑性发展段的荷载略低于试验荷载,峰值荷载的模拟值与试验值相对误差仅为 10.4%,峰值荷载对应位移的模拟值与试验值相对误差仅为 0.5%;负向位移段在弹性阶段与试验曲线十分吻合,塑性阶段试验荷载相较于模拟荷载存在较大的误差,试验值小于模拟值. 其原因可能是试验时,经过正向加载之后,墙体内部已经出现损伤,因此在负向加载的时候荷载相较于正向加载的荷载更低,而通过 ABAQUS 模拟正负向加载的差异比较困难,因此出现了负向模拟值与试验值误差较大的情况.

综上所述,点状嵌缝加固峰值荷载的模拟值与试

验值总体吻合较好,该有限元模型可用于 POM-UHPC 加固干砌甩浆石砌体窗间墙的抗震性能数值分析.

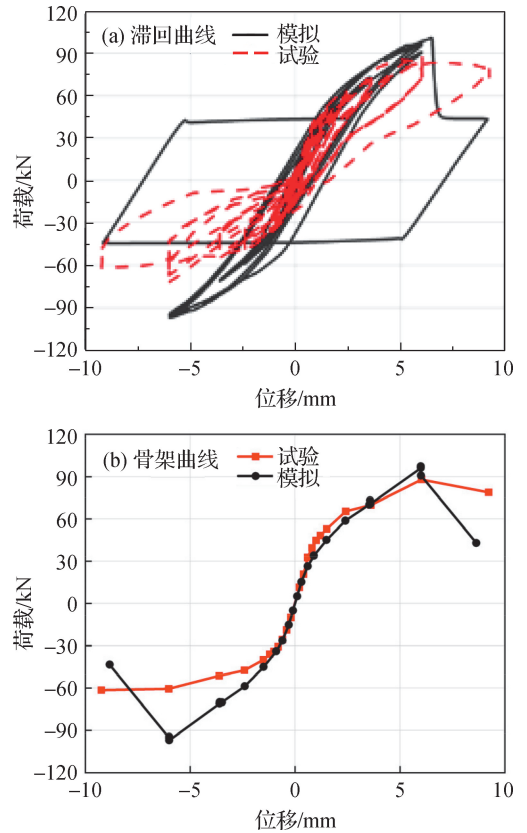


图 8 点状嵌缝加固试件模拟与试验对比图

Fig. 8 Comparison of simulation and experimental results for point-reinforced specimens

4 参数分析

4.1 模型参数

为了分析 POM-UHPC 点状嵌缝加固尺寸、加固面积以及加固位置对石砌体窗间墙抗震性能的影响,建立 4 个窗间墙模型,模型所受竖向荷载与试验建立的试件相同,均为 0.4 MPa(对应两层石砌体房屋),模型编号和参数详情如表 5 所示.

4.2 有限元分析

4.2.1 滞回曲线

提取各个模型顶面中心点沿水平加载方向的位移和反力数据,绘制滞回曲线如图 9 所示.

由图 9 可以看出,各个模型呈现比较明显的“S”形,在达到峰值荷载之后,荷载下降都比较快,且最后各加固模型的荷载值相差不大,说明各模型破坏程度

表 5 模型编号以及参数
Tab. 5 The model number and parameters

模型编号	模型尺寸	高宽比	点状嵌缝加固尺寸	备注
SMWF1	1 200 mm×840 mm×210 mm	1.43	150 mm×70 mm(宽度×深度)	基准试件
SMWF2	1 200 mm×840 mm×210 mm	1.43	200 mm×70 mm(宽度×深度)	加固点状平面面积不同
SMWF3	1 200 mm×840 mm×210 mm	1.43	210 mm×50 mm(宽度×深度)	加固点状尺寸不同
SMWF4	1 200 mm×840 mm×210 mm	1.43	150 mm×70 mm(宽度×深度)	加固点状位置不同

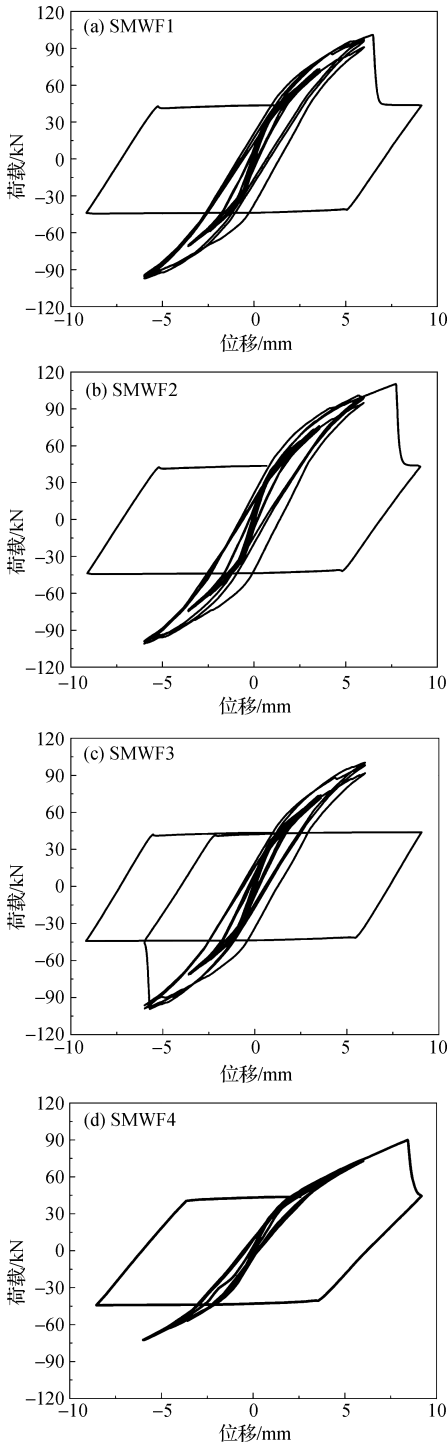


图 9 滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic loops

比较高,破坏时 POM-UHPC 与条石脱粘,POM-UHPC 与条石的连接具有比较明显的脆性特征.

针对不同加固面积的 SMWF1 和 SMWF2,加固面积更大的 SMWF2 峰值荷载明显更大,滞回曲线形状比较一致.说明加大加固点状平面面积可以提高窗间墙模型的承载力.针对相同加固点状平面面积,点状尺寸不一样的 SMWF1 和 SMWF3,两者峰值荷载以及滞回曲线的形状都比较一致,但是 SMWF3 进入塑性段是在负向位移的时候,说明点状的尺寸可能会影响模型进入塑性段的时刻.针对不同加固位置,加固点状平面面积以及尺寸相同的 SMWF1 和 SMWF4 (加固点状位置见图 10),两者的峰值荷载相差不大,滞回曲线的形状有点差异,SMWF4 的捏缩相较于 SMWF1 的捏缩更明显.说明点状嵌缝加固的点状嵌缝的位置对滞回曲线的捏缩有一定的影响.

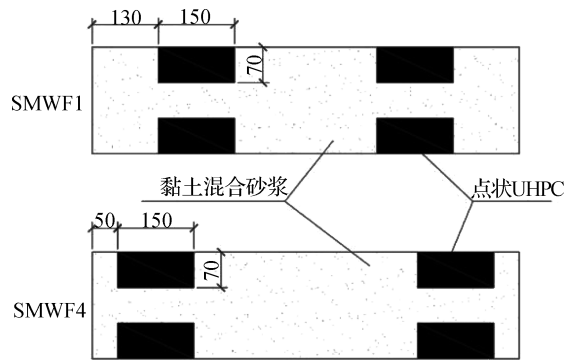


图 10 点状嵌缝加固示意图(单位:mm)

Fig. 10 Schematic diagram of point reinforcement (unit:mm)

4.2.2 骨架曲线

图 11 为 4 个点状嵌缝加固模型的骨架曲线.

从图 11 可以看出,SMWF1、SMWF2 和 SMWF3 的线弹性阶段十分一致,SMWF2 由于加固面积最大,峰值荷载也最大.塑性发展阶段,SMWF1、SMWF2、SMWF3 和 SMWF4 的后期承载力十分接近.4 个点状嵌缝加固模型在达到峰值荷载之后,承载力都迅速下降.

表 6 为各点状嵌缝加固模型骨架曲线特征点取

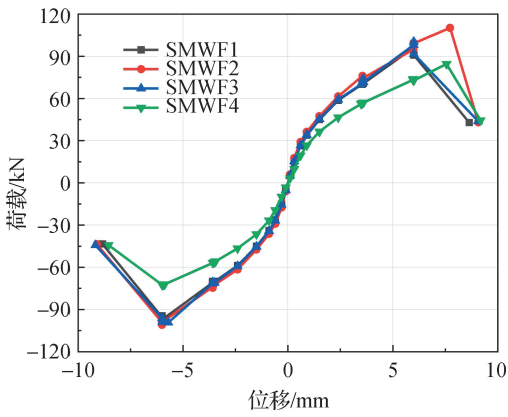


图 11 骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves

值汇总,表中各值均为正负向的平均值.由表 6 可以看出,在其他条件相同的情况下,针对 SMWF1 和 SMWF2,点状嵌缝加固面积越大,模型的屈服位移、屈服荷载、峰值荷载、峰值荷载对应的位移和极限位移均越大;针对 SMWF1 和 SMWF3,改变点状嵌缝加固的尺寸而不改变面积以及位置,对于骨架曲线的各个特征点基本没有影响.针对 SMWF1 和 SMWF4,可以发现,改变点状嵌缝加固的位置,会改变模型屈服点处以及峰值荷载点出现的时刻,两点状嵌缝加固之间的距离变大,会延缓屈服点以及峰值荷载点的出现,但是屈服荷载以及峰值荷载均有所降低,下降幅度约为 13%.另外,各模型的延性系数十分接近,只有 SMWF2 和 SMWF4 的延性系数小于 2.2,表明加固面积以及点状嵌缝加固之间的距离对窗间墙模型的延性有较小程度的影响.

表 6 骨架曲线特征点

Tab. 6 Characteristic points of skeleton curve

模型编号	F_y / kN	Δ_y / mm	F_m / kN	Δ_m / mm	Δ_u / mm	μ
SMWF1	65.5	2.95	97.15	5.99	6.71	2.27
SMWF2	77.3	3.68	110.10	7.73	8.06	2.19
SMWF3	66.2	2.96	100.20	5.99	6.82	2.30
SMWF4	57.4	3.66	84.50	7.55	8.02	2.19

注: F_y 、 Δ_y 分别为屈服荷载及屈服位移,按割线刚度法取值; F_m 、 Δ_m 分别为峰值荷载及对应位移; Δ_u 为极限位移,取荷载下降到峰值荷载的 85% 时所对应的位移; $\mu = \Delta_u/\Delta_y$.

4.2.3 刚度退化曲线

图 12 为 4 个点状嵌缝加固模型的刚度退化曲线,

K 为《建筑抗震试验规程》^[23] 中规定的割线刚度.从图 12 可以看出,SMWF2 的初始刚度比 SMWF1 大,表明增大点状嵌缝加固面积可以有效地提高窗间墙的刚度;SMWF1 和 SMWF3 的刚度退化曲线基本重合,表明改变点状尺寸对窗间墙模型的刚度基本没有影响;SMWF4 的初始刚度较 SMWF1 的初始刚度更小,说明点状嵌缝加固的位置对窗间墙模型的刚度有一定程度的影响.当模型的加载位移超过极限位移时,各个模型的刚度比较接近,这是因为加固的 POM-UHPC 与条石脱粘,不再承受荷载,符合试验的实际情况.

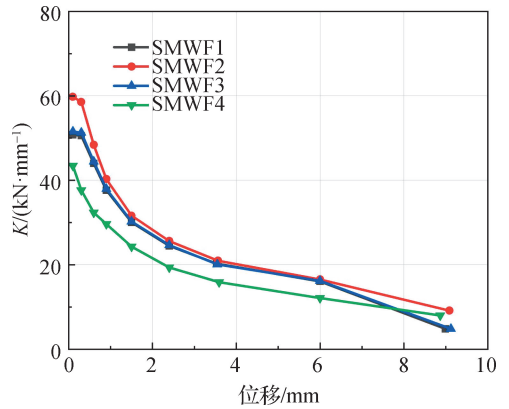


图 12 刚度退化曲线

Fig. 12 Stiffness degradation curves

5 结 论

基于以上分析,可以得到以下结论:

1) 利用 ABAQUS 建立的分离式精细化模型对于模拟 POM-UHPC 点状嵌缝加固石砌体窗间墙在低周往复荷载作用下的破坏形态、滞回特性以及刚度退化等情况具有一定的可靠性.

2) POM-UHPC 点状嵌缝加固的面积越大,墙体的初始刚度和抗剪承载力越大,墙体的延性有所下降.具体表现为点状嵌缝加固面积增大 33.3% 时,窗间墙的峰值荷载提升约为 13.3%,延性系数下降约为 3.52%.

3) POM-UHPC 点状嵌缝加固点之间的距离增大可以延缓墙体屈服点以及极限荷载点的出现.

4) 在 POM-UHPC 点状嵌缝加固面积一定的条件下,改变点状 POM-UHPC 的尺寸对于墙体的抗剪承载力以及刚度退化情况基本没有影响.改变加固位置对墙体的抗剪承载力影响不大,加固点之间的距离有可能会对刚度退化有一定的影响.

参考文献:

- [1] 李飞燕,吴应雄,杨振仲.福建省既有石砌体民宅抗震加固研究综述[J].地震工程与工程振动,2023,43(5):76-89.
- [2] 福建省住房和城乡建设厅. DBJT13-264-2017福建省石砌体结构加固技术规程[S].福州:福建省建筑科学研究院,2017.
- [3] 施微丹,张静,何佰昭,等.福建省既有石结构房屋现状及抗震加固方法综述[J].工程抗震与加固改造,2023,45(4):108-117.
- [4] 刘阳,郭子雄,杨勇,等.闽南地区农村住宅安全性现状及防灾建议[J].华侨大学学报(自然科学版),2007,28(1):63-67.
- [5] 刘文定.“夹板墙”加固干砌甩浆石墙抗震性能研究[D].福州:福州大学,2018.
- [6] 徐天航,郭子雄,柴振岭,等.钢筋网片改性砂浆加固石砌体墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(12):120-125.
- [7] 施养杭,余建星,华建兵.石粉灌浆石砌体的抗震抗剪强度及其应用研究[J].世界地震工程,2004(1):29-34.
- [8] MURAT M M. Experimental behavior of injected geopolymer grout using styrene-butadiene latex for the repair and strengthening of masonry walls [J]. Advances in Structural Engineering,2021,24(11):2484-2499.
- [9] 郭子雄,柴振岭,胡奕东,等.嵌缝加固条石砌筑石墙抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2010,43(S1):136-141.
- [10] 朱晨禹. UHPC 加固整毛石砌体窗间墙抗震性能研究[D].厦门:厦门大学,2023.
- [11] 张钊. UHPC 加固既有整毛石墙体灰缝抗剪性能试验研究[D].福州:福州大学,2023.
- [12] 朱远浩. UHPC 加固既有干砌甩浆石墙抗震性能试验研究[D].福州:福州大学,2023.
- [13] 王兰.石墙灰缝抗震性能和力学计算模型研究[D].泉州:华侨大学,2019.
- [14] 王英,闫凯,徐国洲,等.钢筋网水泥砂浆面层加固砖墙受剪承载力分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013(1):6.
- [15] 刘桂秋,施楚贤,刘一彪.砌体及砌体材料弹性模量取值的研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(4):4.
- [16] 徐国洲.钢筋网水泥砂浆面层加固砖墙受剪承载力计算方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [17] DESAYI P, IYENGAR K T, REDDY T S. Equation for stress-strain curve of concrete confined in circular steel spiral[J]. Matériaux et Construction,1978,11(5):339-345.
- [18] 单波.活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D].长沙:湖南大学,2002.
- [19] 吴有明.活性粉末混凝土(RPC)受压应力—应变全曲线研究[D].广州:广州大学,2012.
- [20] 沈涛.活性粉末混凝土单轴受压本构关系及结构设计参数研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [21] 张哲,邵旭东,李文光,等.超高性能混凝土轴拉性能试验[J].中国公路学报,2015,28(8):50-58.
- [22] 蒋利学,王卓琳,张富文.多层砌体结构的损坏程度与层间位移角限值[J].建筑结构学报,2018,39(S2):263-270.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.

(责任编辑:汪 军)