

文章编号:1005-0930(2024)03-0824-015 中图分类号:TU352.1 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2024.03.014

UHPC 石墙嵌缝加固的福建典型石结构 抗震性能模拟与分析

施微丹¹, 施建日², 林环周³, 耿丽⁴,
林婷婷¹, 吴应雄⁵, 王昊⁶

(1.福建船政交通职业学院土木工程学院,福建福州 350007;2.福建省建筑设计研究院有限公司,福建福州 350025;3.中国建筑第四工程局有限公司,广东广州 510630;4.福建省建筑科学研究院有限责任公司,福建福州 350100;5.福州大学土木工程学院,福建福州 350108;6.福建中咨规划设计研究集团有限公司,福建漳州 363005)

摘要:福建沿海地区石结构民宅保有量大,石结构抗震性能较差.石墙是石结构主要的承重及抗侧力构件,超高性能混凝土(UHPC)嵌缝加固石墙可提高石结构的抗震性能.为探究石墙经过 UHPC 嵌缝加固后石结构的整体抗震性能,采用 LS-DYNA 有限元软件分别建立了未加固石墙和 UHPC 嵌缝加固石墙的两种石结构模型,研究石结构地震破坏全过程,分析结构地震响应、破坏机制和抗震性能.研究表明:石结构在地震作用下呈现“竖向倒塌”的破坏模式.在 PGA 为 55gal 和 110gal 的工况下,未加固结构的损伤状态为轻微破坏和整体坍塌;加固后结构的损伤状态分别为基本完好和中等破坏.相比未加固结构,加固后的石结构基本周期略有降低,楼面峰值加速度降低了 21.05%~25.26%;位移角减小了 74.90%~94.50%,加固后石墙开裂得到有效抑制,结构损伤程度有所减小,加固效果明显.

关键词:石结构;石墙;抗震加固;嵌缝加固;UHPC;LS-DYNA;有限元模拟

福建沿海地区石材资源丰富,当地居民就地取材,采用花岗岩石块建造房屋.这种全部构件(包括基础、墙体、柱、梁、楼板及楼梯等)均采用石材砌筑的房屋,称为石结构房屋.福建传统的石墙砌筑工艺多为有垫片干砌甩浆砌筑法,即在下皮整毛石的四角摆放主石垫片后放置上皮整毛石,石墙砌筑后再往灰缝甩满砂浆并塞入副石垫片,砌筑用砂浆多为低强度混合砂浆.福建沿海地区位于我国东部强震活动区,现存石结构民宅数量庞大,其材料特性、结构组成和砌筑方式导致房屋整体性较差,抗震性能差,地震作用下结构易产生较大破坏甚至倒塌,亟需进行抗震加固^[1-2].

收稿日期:2023-12-13;修订日期:2024-03-11

基金项目:福建省建设科技研究开发项目(2023-K-47);福建省教育厅中青年骨干教师教育科研项目(JAT220550)

作者简介:施微丹(1983—),女,硕士,副教授.E-mail:swdfz1216@163.com

通信作者:林环周(1985—),男,硕士,高级工程师.E-mail:181385842@qq.com

石墙是石结构房屋主要的承重及抗侧力构件,因此石结构房屋的抗震性能很大一部分取决于石墙.为提高石结构房屋的抗震性能,学者们从墙体加固入手,采用钢筋混凝土面层^[3]、灌浆^[4]、纤维增强复合材料(FRP)^[5]等方式进行加固,加固后的石墙抗震性能得到提高,但存在施工复杂、造价高等问题,难以大面积推广^[6-7].超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)具有高强度、高韧性、高耐久性、低孔隙率的优点^[8-9],UHPC与石材具有相近的力学性能,如抗压强度高、弹性模量相近,因此二者可共同工作.目前UHPC的配合比已成熟,价格较以往已大幅降低,使得其在结构抗震加固领域的应用更加广泛.已有学者^[10-11]提出采用UHPC进行砌体结构的加固,研究结果表明加固后墙体的开裂荷载、极限承载力、极限变形均有较大幅度的提高.笔者所在课题组提出的采用UHPC嵌缝加固石墙的方法可减少模板、钢筋的使用量,在一定程度上降低了施工成本,试验证明了UHPC嵌缝加固可有效提高石墙的抗震性能^[12],目前已进行了试点工程应用.在加固结构中,破坏通常发生在组合结构的界面处.UHPC与石材能否共同协调变形和承载,优异的界面粘结性能是保证加固效果的关键.已有研究表明,UHPC-石材具有良好的界面粘结抗拉强度,因此UHPC适用于石材的加固.吴应雄等^[9]开展了UHPC-石材界面劈拉和L型剪切试验研究,探讨了界面粗糙度、界面湿度、残余砂浆、界面剂对界面粘结强度的影响,结果表明,UHPC-自然面石材界面粘结抗拉强度在2.60~2.75MPa;在干燥的界面进行刻槽处理且不使用界面剂的情况下,界面粘结强度最大.许立英^[13]通过斜截面抗剪与双面剪切试验研究了UHPC与石材的界面粘结强度,结果表明,POM-UHPC与石材试件斜截面剪切强度与粗糙度呈正相关,其关系为:刻槽>自然界面>光滑界面;在同一界面粗糙度下,与干燥组试件相比,湿润组的粘结强度降低了10%~30%.

目前已有较多学者^[14-16]对砖砌体结构进行抗震加固数值模拟分析,探究了砖砌体结构在地震作用下的倒塌机制和地震响应,但对石结构抗震加固数值模拟研究较少,石结构在地震作用下的抗震性能和破坏机制尚未知,所以对石结构进行地震模拟具有重要意义.笔者采用显式有限元分析软件LS-DYNA对福建沿海地区一栋典型石结构民宅地震作用下破坏过程进行数值模拟与分析,探究了地震作用下石墙UHPC嵌缝加固前、后石结构的地震响应,分析了UHPC加固方式对地震作用下石结构民宅倒塌模式的影响,以期为后续加固石结构民宅提供理论依据和技术支持.

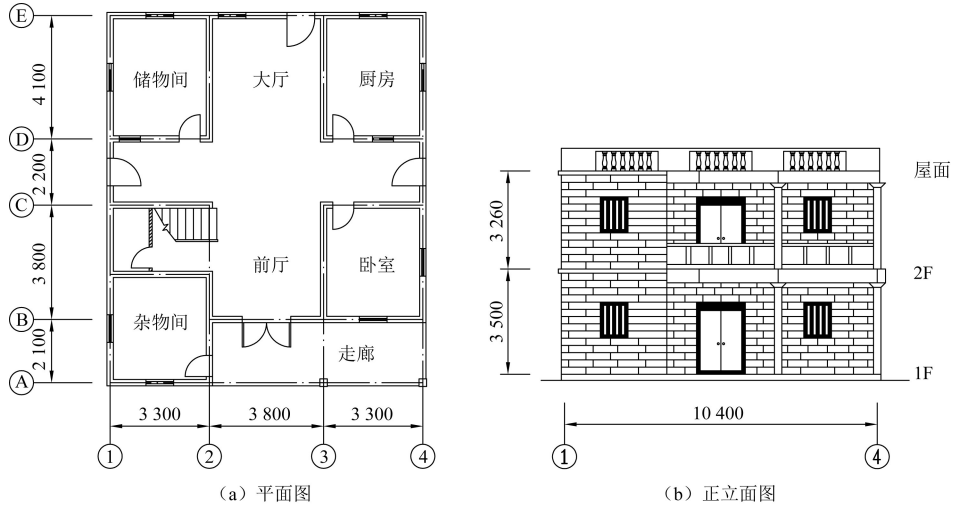
1 有限元模型的建立

1.1 原型房屋概况

数值模拟分析的对象为福建沿海地区一栋典型两层纯石结构民宅,房屋一层层高为3.5m,二层层高为3.26m,房屋平面、立面及实景如图1所示.根据《建筑抗震设计规范》^[17],该地区基本抗震设防烈度大多为7度(0.1g)或7度半(0.15g),设计地震分组为第三组,场地类别为Ⅱ类.

1.2 有限元模型建立

LS-DYNA是目前应用最为广泛的显式非线性动力分析有限元软件,其显式积分算法相较于传统有限元的隐式积分算法更适合模拟地震破坏响应^[18-19].因此采用LS-DYNA对石结构进行数值模拟.



(c) 实景图

图1 两层石结构民宅(单位:mm)

Fig.1 Two story stone structure residential building(unit:mm)

石墙采用分离式建模,将石块和砂浆分别考虑,可真实模拟石块与砂浆之间的裂缝开展和摩擦滑移,如图2所示.为提高计算效率,对石墙和石楼板的模拟可忽略砂浆尺寸,将砂浆尺寸考虑至相邻块体.石结构砌筑所用的整毛石截面尺寸通常为 $210\text{mm}\times 210\text{mm}$,长宽比大多在 $3\sim 5$,建模考虑长宽比为4,截面尺寸通常为 210mm (宽) $\times 210\text{mm}$ (高) \times

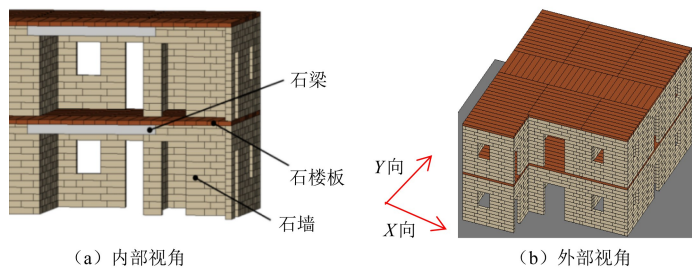


图2 三维模型

Fig.2 Three-dimensional model

840mm(长),砂浆厚度通常为 30mm,建模时将砂浆尺寸考虑至相邻的石块,石块建模尺寸取 225mm×225mm×855mm.石楼板尺寸一般为 140mm(厚度)×360mm(宽度)×3 000mm(跨度),将砂浆厚度考虑至相邻石楼板后,建模尺寸为 140mm×390mm×3 000mm.石梁后期考虑外包型钢加固,此外石柱支撑的外走廊安全性极差,后续加固中将拆除,替换为钢筋混凝土走廊,因此此次模拟不考虑外走廊的建模.

2 有限元模拟参数设置

2.1 花岗岩本构关系

福建沿海盛产花岗岩石材,且其抗压强度较高.选用 Holmquist-Johnson-Cook 模型(简称 H-J-C 模型)对石材进行模拟,H-J-C 模型基于大应变、高应变率和高压效应,可较好模拟岩石这类抗压强度远大于抗拉、抗剪强度材料特性^[20].石材参数由试验获得,见表 1.花岗岩 H-J-C 模型本构参数见表 2^[21].

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

密度/(kg/m ³)	立方体抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2 800	135	8.50	32.51	0.2

表 2 H-J-C 本构参数

Table 2 H-J-C constitutive parameters

$\rho_0/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	f_c/MPa	A	B	C	s_{\max}	G/GPa	T/MPa
2 800	135	0.28	2.5	0.00186	5	32.5	8.5
$P_{\text{crush}}/\text{MPa}$	$P_{\text{lock}}/\text{MPa}$	μ_{crush}	μ_{lock}	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	EF_{\min}
51	1.2	0.00162	0.012	12	25	42	0.01
D_1	D_2	N	FS				
0.04	1	0.79	0.035				

2.2 砂浆和花岗岩的失效准则

砌体结构的破坏主要是由砂浆的破坏引起.砌块之间的砂浆具有粘结作用,可承受一定的拉应力和剪应力,破坏通常为受剪和受拉破坏.砂浆界面的失效准则为

$$F(\sigma, k) = \frac{\sigma^2}{f_t^2} + \frac{\tau^2}{c^2} - \Omega(k) \quad (1)$$

$$\Omega(k) = 1 - k = 1 - \frac{w}{w_c} \quad (2)$$

式中: σ 和 τ 分别为砂浆界面的抗拉强度和抗剪强度; w 和 w_c 分别为当前裂缝的宽度和极限裂缝宽度^[22].

采用 LS-DYNA 的绑定脱粘接触算法,通过设定法向失效力值和切向失效力值模拟砂浆的拉应力和剪应力,当应力超过失效力值时接触失效,砂浆破坏,此时该接触变为通过摩擦力传递剪应力,与石墙拟静力试验中砂浆粘结破坏后转为摩擦耗能的阶段对应.参照文献[23]报道的黏土混合砂浆的力学性能,将未加固模型切向接触失效力值设置为 0.29MPa.石墙两侧采用 UHPC 嵌缝加固,嵌缝深度为 25mm,根据文献[24]提出的嵌缝

加固后砂浆抗剪强度换算公式计算,将切向接触失效应力设置为 0.83MPa.砂浆抗拉强度极低,所以法向失效应力取为 0MPa;摩擦系数取为 0.70^[25].

材料的失效破坏通过 *MAT_ADD_EROSION 关键字定义.当单元达到失效应力条件即失效,不再参与计算和结构作用.花岗岩等效失效应力取为 35MPa^[14].

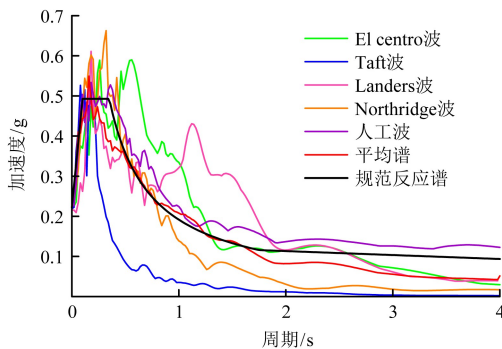


图3 地震波加速度反应谱

Fig.3 Acceleration response spectrum of seismic waves

2.3 地震波的选择和输入

根据石结构民宅所在地区的抗震设防烈度、场地类型和设计基本地震加速度值,选取 2 条 II 类场地天然波 (Taft 波、Landers 波)、2 条 III 类场地天然波 (El Centro 波、Northridge 波) 和 1 条 II 类场地人工波 (厦门同安波),在结构 Y 向 (即结构主轴方向)、X 向双向输入于刚性地面从而带动整个模型震动,地震波持续时间为 10s.将 5 条地震波加速度峰值调幅至相应设防烈度对应值,分别为 55gal、110gal、150gal.各条地震波加速度反应谱如图 3 所示,地震波反应平均谱和规范反应谱的误差不超过 $\pm 20\%$ ^[17],表明选取的地震波合理.

3 有限元模型验证

笔者所在课题组对 UHPC 加固既有石墙的抗震性能进行了相关研究,开展了拟静力试验等工作^[12].为验证花岗岩本构、黏土混合砂浆失效应力等参数与模型建立的准确性,通过 LS-DYNA 建立了与拟静力试验尺寸相同的石墙有限元模型^[12],对未加固、加固后的石墙拟静力试验进行数值模拟,对比分析试验和模拟结果.

3.1 试验概况

试验所用的整毛石尺寸为 210mm (宽度) \times 210mm (高度) \times 840mm (长度),实测抗压强度平均值 f_c 为 152MPa,墙体灰缝厚度约为 30mm.既有石结构房屋的砂浆强度较低,故试验采用低强度黏土混合砂浆进行砌筑,砂浆配合比为水泥:黏土:砂:水 = 1.0:4.0:8.0:3.34,实测砂浆试块抗压强度平均值 f_c 为 2.54MPa,砂浆弹性模量平均值 E 为 2.312GPa.

UHPC 通常掺入钢纤维,但掺入后其流动性较差,难以在墙面上进行人工抹压和挤压施工,因此改为掺入有机纤维 (POM),POM 纤维与混凝土具有良好的相容性,相比钢纤维其流动性更好,形成了 POM-UHPC.试验用 UHPC 水胶比为 0.14;POM 纤维直径为 0.2mm,长度为 12mm,长径比为 60;经现场人工抹压施工对比,当 POM 纤维体积掺量为 2% 时,施工和易性较好,UHPC 配合比见表 3.UHPC 实测抗压强度平均值 f_c 为 101MPa,弹性模量平均值 E 为 41GPa,抗折强度平均值 f_f 为 11.80MPa,极限拉应变平均值 ε 为 1.03%,满足工程应用需求.

考虑石材表面凹凸不平、石墙灰缝掏缝操作不易及加固成本等因素,加固方案选用 UHPC 双面嵌缝加固,嵌缝深度为 25mm.试件编号和参数见表 4,试件工况如图 4 所示.

表 3 UHPC 配合比

Table 3 UHPC mix ratio

水泥	硅灰	石灰石粉	石英砂	POM 纤维	减水剂	水
580	193.30	515.60	725.70	28.20	20	245

注:单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

表 4 试件参数

Table 4 Specimen parameter

试件编号	加固方式	嵌缝深度/mm
SMW-W	未加固	/
SMW-J	双面 UHPC 嵌缝加固	25

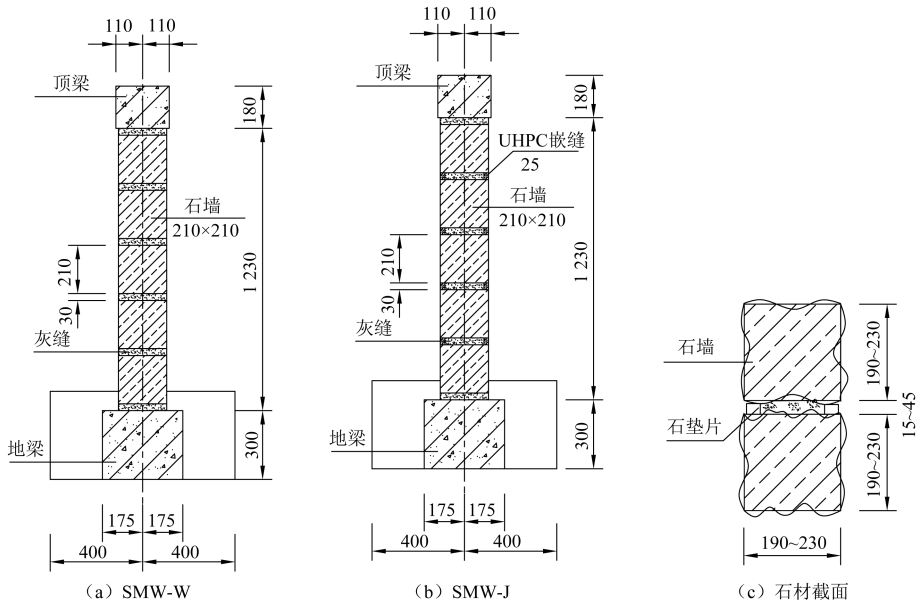


图 4 试件工况(单位:mm)

Fig.4 Specimen condition(unit:mm)

福建沿海地区现有石结构墙体的高宽比主要在 0.5~1.0,所以石墙试件尺寸取 2 160mm (长度) \times 1 200mm(高度) \times 210mm(厚度),试件尺寸如图 5 所示.

UHPC 嵌缝加固施工过程如图 6 所示,加固施工工艺对加固效果的影响明显,施工时应注意以下要点:(1)由于施工时的气温将影响 UHPC 的搅拌时间和凝结时间,因此调配 UHPC 和人工抹压时应考虑气温的影响;(2)应确保嵌缝的深度达到加固要求;(3)灰缝处石材上、下表面应处理到位,以保证 UHPC 与石材的粘结良好;(4)按规定进行人工养护.

试验装置如图 7 所示,试验采用平面内水平力循环往复加载的方式,水平力的加载采用荷载-位移混合控制的加载体系,以预估开裂荷载的 50%为初始加载值进行力控制加载,每级荷载循环 1 次,每级增量为 10kN.当墙体初裂后转为位移控制的加载方式进行加

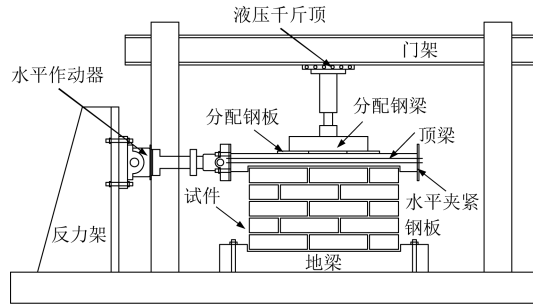


图7 加载装置

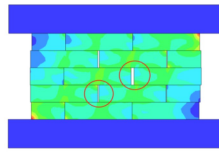
Fig.7 Loading device

3.2 模型参数验证

未加固的石墙破坏形态如图8所示,加固后的石墙破坏形态如图9所示,对比结果表明,石墙拟静力有限元模拟的破坏形态与试验吻合较好.滞回曲线、骨架曲线对比如图10、图11所示,拟静力试验中未加固石墙的开裂荷载为60kN,加固后石墙的开裂荷载为300kN,开裂荷载提高了400%;未加固石墙的峰值荷载为146kN,加固后石墙的峰值荷载为458kN,峰值荷载提升了214%,表明UHPC嵌缝加固可推迟墙体裂缝的出现,显著提升墙体的抗剪承载力.有限元模拟骨架曲线与试验骨架曲线变化规律基本一致,吻合度较高,误差小于15%.综上,试验与模拟结果吻合较好,本次模型建立准确.

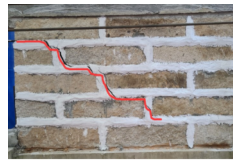


(a) 试验

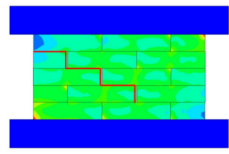


(b) 有限元模拟

图8 未加固石墙破坏形态对比
Fig.8 Comparison of failure patterns of unreinforced stone walls

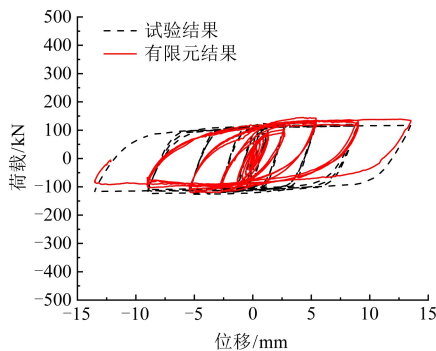


(a) 试验

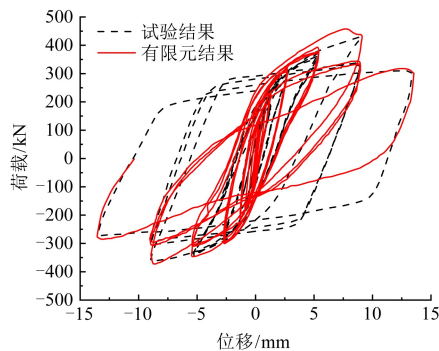


(b) 模拟

图9 加固后石墙破坏形态对比
Fig.9 Comparison of failure patterns of reinforced stone walls



(a) 未加固结构



(b) 加固后结构

图10 滞回曲线对比

Fig.10 Comparison of hysteresis curve

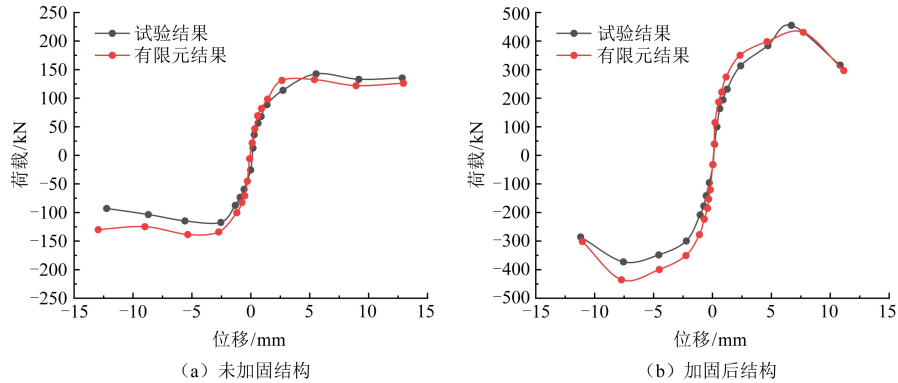


图 11 骨架曲线对比

Fig.11 Comparison of skeleton curve

4 计算结果及对比分析

4.1 模态分析

由模态分析可求得结构的各阶频率和振型等动力特性数据.加固前后结构前三阶振型如图 12、图 13 所示,前三阶周期见表 5.两个模型的前三阶振型基本一致,第 1 阶振型为沿 Y 方向的平动,第 2 阶振型为沿 X 方向的平动,第 3 阶振型为扭转振型.相较于未加固结构,加固后结构的基本周期、第 2 阶振型周期分别降低了 9.2% 和 20.4%,表明加固后结构的刚度略有提高.

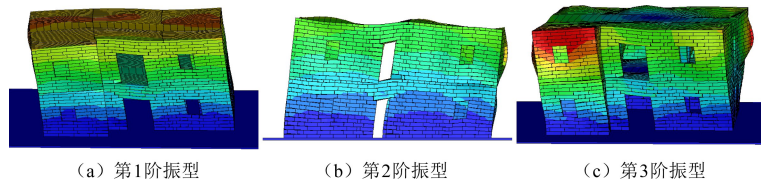


图 12 未加固结构振型

Fig.12 Vibration mode of unreinforced structure

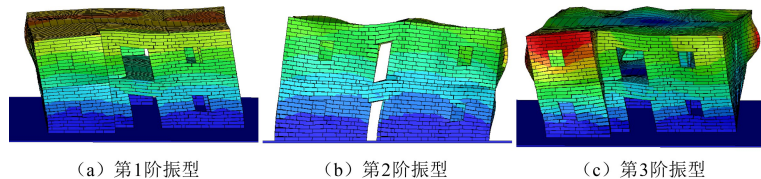


图 13 加固后结构振型

Fig.13 Structural vibration mode after reinforcement

4.2 破坏形态分析

为描述结构损伤状态,总结归纳相关研究文献和规范^[26-28]后,将石结构的破坏程度划分为 5 个等级,并给出了相应的层间位移角限值及破坏现象(表 6).对结构损伤与倒塌

判定均采用该指标。

石结构在 5 条地震波作用下破坏模式基本一致,结构破坏形态选取较为典型 El-Centro 波进行分析。

在 $PGA = 55gal$ 工况下,结构处于弹性阶段,结构基本保持完好,仅少量石墙出现轻微开裂,裂缝较小,未见明显裂缝发展。

表 5 各模型前三阶周期

Table 5 First three cycles of each model

阶数	未加固/s	加固后/s
1	0.087	0.079
2	0.049	0.039
3	0.044	0.035

表 6 层间位移角限值

Table 6 Limit values of inter-story drift ratio

破坏程度	层间位移角限值	破坏现象
轻微破坏	1/2 500	墙体出现轻微开裂
中等破坏	1/700	裂缝继续发展,宽度加大
严重破坏	1/330	形成“X”形裂缝和阶梯形裂缝
倒塌破坏	1/130	部分墙体出现面外破坏和倒塌
整体坍塌	/	整体结构发生倒塌,结构变为一片废墟

在 $PGA = 110gal$ 工况下,加固前、后石墙破坏对比如图 14 所示。未加固结构中,二层开窗洞墙体首先出现阶梯形裂缝并迅速延伸发展,墙体发生面外破坏,随后一层开窗洞墙体出现明显的“X”形裂缝,部分开洞墙体发生面内破坏,结构为倒塌破坏。加固后结构裂缝出现时间有所延缓,裂缝宽度显著减小,石墙面外倒塌破坏得到了有效抑制。

在 $PGA = 150gal$ 工况下,未加固结构中部分墙体先出现面外倒塌,二层石楼板失去支撑掉落砸向一层石楼板,石梁受拉断裂,而后一层墙体被压垮,最终结构整体坍塌,石结构在地震作用下呈现“竖向倒塌”的破坏模式。加固后石墙面外破坏有所减轻,仅一层少数石墙出现面外倒塌,二层墙体破坏较轻且未出现面外倒塌,石楼板未掉落,加固前、后石楼板破坏对比如图 15 所示。加固后结构由整体坍塌变为倒塌破坏,相较于未加固结构,加固措施可有效抑制石楼板的掉落,从而抑制结构的整体坍塌破坏。

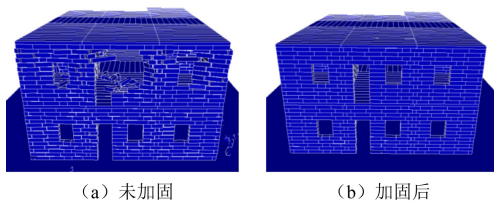


图 14 石墙破坏对比($PGA = 110gal$)
Fig.14 Stone wall damage comparison
($PGA = 110gal$)

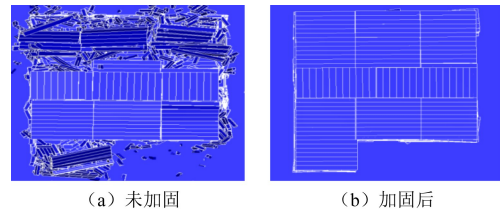


图 15 石楼板破坏对比($PGA = 150gal$)
Fig.15 Stone floor damage comparison
($PGA = 150gal$)

4.3 结构地震响应分析

4.3.1 楼层水平位移 楼层水平位移曲线可反映结构在地震作用下的往复运动,直观地呈现各楼层水平位移值的变化,评估结构的损伤状态及判定整体坍塌破坏的时间。在

PGA = 55gal 工况下, 楼层水平位移曲线几乎重叠, 未见明显分离, 层间位移值极小, 结构保持完好. 如图 16(a) 所示, 在 PGA = 110gal 工况下, 未加固结构楼层水平位移曲线出现分离, 结构出现倒塌破坏; 加固后二层的层间位移值大大减小. 如图 16(b) 所示, 在 PGA = 150gal 工况下, 未加固结构的各楼层位移曲线在 5.8s 后出现明显发散, 此时结构整体坍塌. 加固后各楼层水平位移曲线在 5.1s 开始出现分离, 结构开始出现较大破坏. 对比未加固结构, 在 PGA = 150gal 工况下石墙嵌缝加固可有效减轻结构破坏程度, 防止结构整体坍塌.

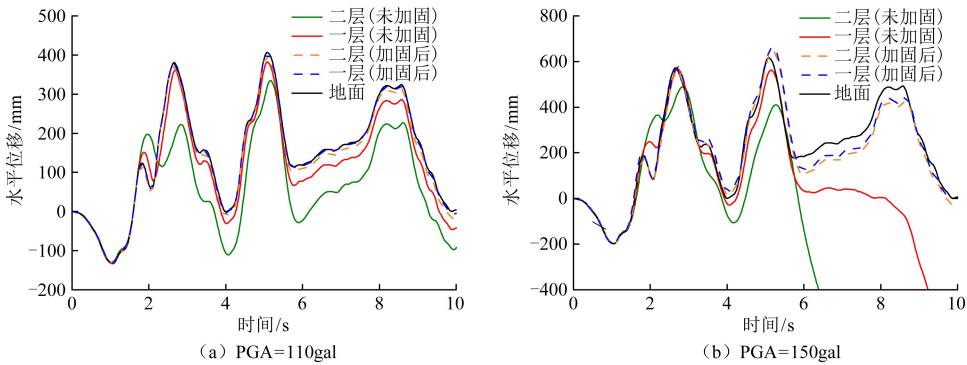


图 16 水平位移曲线 (El-centro 波)

Fig.16 Horizontal displacement curve (El centro wave)

4.3.2 层间位移角 在 PGA = 55gal 工况下, 未加固结构平均层间位移角仅为 1/2 800, 结构轻微破坏; 加固后结构基本完好, 加固前后对比效果不够明显, 故层间位移角不在表 7 中列出. 表 7 为加固前、后结构在各地震波下的层间水平位移和层间位移角, 在 PGA = 150gal 工况下, 未加固结构模型已整体坍塌, 变为一片废墟, 所以不再给出其层间水平位移值. 从表 7 的数据可以计算出: 在 PGA = 110gal 工况下, 加固后结构一层平均层间位移值减小了 74.90%, 二层平均层间位移值减小了 94.50%. 在 PGA = 150gal 工况下, 未加固结构层间位移角均超过 1/150, 结构整体坍塌; 加固后结构绝大多数为中等破坏, 层间位移角均不超过 1/150. 综上, 石墙 UHPC 嵌缝加固可有效减小结构的层间位移角, 防止结构发生整体坍塌.

表 7 层间位移角

Table 7 Inter-story drift ratio

地震波	层数	PGA/gal	$\Delta u_w/mm$	$\Delta u_j/mm$	$(\Delta u_w - \Delta u_j)/\Delta u_w$	h/mm	$\Delta u_w/h$	$\Delta u_j/h$
El-centro 波	一层	110	45	12	73.40%	3 500	1/78	1/292
	一层	150	×	55	/	3500	/	/
	二层	110	141	8	94.40%	3260	1/23	1/408
	二层	150	×	19	/	3 260	/	/
Taft 波	一层	110	37	10	73%	3 500	1/95	1/350
	一层	150	×	49	/	3 500	/	/
	二层	110	113	9	92%	3 260	1/29	1/362
	二层	150	×	26	/	3 260	/	/

续表 7

地震波	层数	PGA/gal	$\Delta u_w/mm$	$\Delta u_j/mm$	$(\Delta u_w - \Delta u_j)/\Delta u_w$	h/mm	$\Delta u_w/h$	$\Delta u_j/h$
Landers 波	一层	110	29	6	79.30%	3 500	1/121	1/583
	一层	150	×	37	/	3 500	/	/
	二层	110	102	5	95.10%	3 260	1/32	1/652
	二层	150	×	16	/	3 260	/	/
Northridge 波	一层	110	53	10	71.10%	3 500	1/66	1/350
	一层	150	×	73	/	3 500	/	/
	二层	110	167	8	95.20%	3 260	1/20	1/408
	二层	150	×	33	/	3 260	/	/
人工波	一层	110	40	9	77.50%	3 500	1/88	1/389
	一层	150	×	43	/	3 500	/	/
	二层	110	144	6	95.80%	3 260	1/23	1/543
	二层	150	×	21	/	3 260	/	/

注: Δu_w 表示未加固结构层间位移; Δu_j 表示加固后结构层间位移; h 表示楼层层高;“×”表示该工况下结构发生整体坍塌;“/”表示没有该工况。

4.3.3 楼面峰值加速度 楼面峰值加速度为各层楼面在输入基底地震加速度全时程内加速度的最大值.通过楼面峰值加速度除以地面峰值加速度得到动力放大系数,动力放大系数值接近 1,表明楼面峰值加速度与地面峰值加速度接近,结构损伤小;动力放大系数值大于 1,表明结构对基底地震加速度的放大效果明显。

将各地震动在相同 PGA 条件下的各层楼面峰值加速度取平均值,绘制楼面峰值加速度曲线,如图 17 所示.由于 PGA = 150gal 工况下未加固结构已整体坍塌,在 PGA = 220gal 工况下研究未加固结构的楼面峰值加速度已无意义,因此图 17 中仅显示该工况下加固后结构的数据.在结构产生整体坍塌破坏前,未加固结构二层加速度响应大于一层.当 PGA = 55gal 时,加固后结构各层峰值加速度响应有所提高,这是由于加固后墙体刚度提高,引起结构加速度响应增大.随着地震波加速度值增大,结构各楼层加速度响应随之增大,但动力放大系数均呈减小的趋势,表明加固可有效减小楼层加速度响应,在 PGA 为 110gal 和 150gal 工况下,相比未加固结构,加固后结构的楼面峰值加速度降低了 21.05% ~ 25.26%。

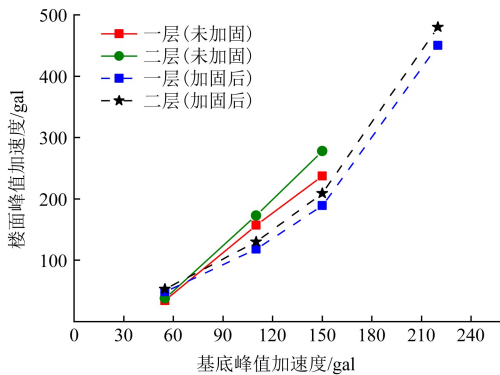


图 17 楼面峰值加速度对比

Fig.17 Floor peak acceleration comparison

5 结论与展望

本文进行了 UHPC 石墙嵌缝加固石结构抗震性能数值模拟表明,UHPC 用于石墙的加固可显著提高石结构的抗震能力,并得到如下结论:

(1) 未加固的两层典型石结构在 PGA = 110gal 的地震动作用下呈倒塌破坏的状态,表明福建沿海地区既有石结构民宅存在严重的地震安全隐患,应重视石结构的地震安

全性;

(2)加固后的石墙开裂得到有效的抑制,延缓了倒塌时间,减轻了结构破坏程度,采用UHPC进行石墙加固可提高既有石结构的抗震性能;

(3)相较于未加固石结构,加固后的石结构基本周期略有降低,表明加固后结构的刚度略有提高.在PGA分别为110gal和150gal工况下,楼面峰值加速度降低了21.05%~25.26%;在PGA=110gal工况下,位移角显著减小,减小了74.90%~94.50%;在PGA=150gal工况下,结构的破坏程度由整体坍塌变为中等破坏;

(4)福建沿海地区既有石结构民宅保有量大,相较于其他加固技术,目前UHPC嵌缝加固施工便捷、质量可控、造价适中,因此可进行大范围地推广应用.

参考文献

- [1] 郭子雄,黄群贤,柴振岭,等.石结构房屋抗震防灾关键技术研究及展望[J].工程抗震与加固改造,2009,31(6):47-51
Guo Zixiong, Huang Qunxian, Chai Zhenling, et al. Study and prospect of disaster prevention technology of stone masonry structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(6):47-51
- [2] 张丰宇,何佰昭,吴志刚,等.粘钢加固既有石楼板抗弯性能试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(5):1262-1277
Zhang Fengyu, He Baizhao, Wu Zhigang, et al. Experimental study on bending behavior of existing stone slab strengthened with steel plate[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(5):1262-1277
- [3] 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
Xu Tianhang, Guo Zixiong, Chai Zhenling, et al. Experimental study on seismic behavior of stone masonry walls strengthened with steel-meshed modified cement mortar[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(12):120-125
- [4] Miranda L, Milosevic J, Bento R. Cyclic behavior of stone masonry walls strengthened by grout injection[J]. Materials & Structures, 2017, 50(1):1-17
- [5] 卢亦焱,黄悦,刘真真,等.角钢-玻璃纤维布复合加固砖柱轴压性能研究[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(3):645-656
Lu Yiyang, Huang Yue, Liu Zhenzhen, et al. Research on masonry columns strengthened with the combination of angle steel and gfrp under axial load[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(3):645-656
- [6] 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
Shi Weidan, Zhang Jing, He Baizhao, et al. A review of the current situation and seismic strengthening methods of existing stone structure buildings in Fujian Province[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2023, 45(4):108-117
- [7] 吴繁超,施微丹,何佰昭,等.福建省既有石砌体房屋整毛石墙体抗震加固研究综述[J].地震研究,2023,46(4):551-561
Wu Fanchao, Shi Weidan, He Baizhao, et al. Review of research on seismic behaviour and retrofitting of stone masonry walls of existing buildings in Fujian Province[J]. Journal of Seismological Research, 2023, 46(4):551-561
- [8] 苏家战,林毅焱,陈宝春,等.混杂钢纤维UHPC单轴拉伸性能的混杂效应分析[J].南昌大学学报(工科版),2019,41(4):358-364
Su Jiazhan, Lin Yijun, Chen Baochun, et al. Hybrid effects of steel fibers on the uniaxial tensile properties of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology Edition), 2019, 41(4):358-364
- [9] 吴应雄,郑新颜,黄伟,等.超高性能混凝土-既有普通混凝土界面粘结性能研究综述[J].材料导报,2023,37(16):144-154
Wu Yingxiong, Zheng Xinyan, Huang Wei, et al. Review of interface bond behavior between ultra-high performance concrete and existing concrete[J]. Materials Reports, 2023, 37(16):144-154

- [10] Peng B, Wei S, Long L, et al. Experimental investigation on the performance of historical squat masonry walls strengthened by UHPC and reinforced polymer mortar layers[J]. Applied Sciences, 2019, 9(10):2096
- [11] Zhimei J, Jun Y, Hao S. Mechanical response of masonry structure strengthened with ultra-high performance concrete (UHPC): A comparative analysis for different strengthening tactics[J]. Frontiers in Materials, 2023, 10:1289225
- [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, 2022
- Zhu Yuanhao. Experimental study on seismic performance of existing stone masonry wall strengthened by UHPC[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2022
- [13] 许立英. POM-UHPC 组成优化及其加固石墙体抗震性能试验研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023
- Xu Liying. The composition optimization of POM-UHPC and experimental study on seismic performance for reinforced stone wall[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023
- [14] 李 佳. 基于数值模拟的砌体结构倒塌影响因素分析及抗倒塌措施初探[D]. 重庆: 重庆大学, 2013
- Li Jia. The collapsed factors analysis of masonry structures and preliminary exploration about anti-collapse based numerical simulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013
- [15] 缪志伟, 杨冬梅, 马栋梁, 等. 基于数值模拟的村镇典型砌体结构地震抗倒塌性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(3):506-515
- Miao Zhiwei, Yang Dongmei, Ma Dongliang, et al. Analysis on seismic collapse resistance performance of typical rural masonry structures based on numerical simulation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(3):506-515
- [16] 閻东东, 陈 曦, 李文峰, 等. 地震作用下砌体结构倒塌数值模拟应用[J]. 建筑结构, 2016, 46(17):88-92
- Ge Dongdong, Chen Xi, Li Wenfeng, et al. Application of progressive-collapse numerical simulation of masonry structures under earthquake action[J]. Building Structure, 2016, 46(17):88-92
- [17] GB 50011—2010(2016 年版). 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
- Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 (2016 edition)[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016
- [18] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- Bai Jinze. Theoretical basis and example analysis of LS-DYNA3D[M]. Beijing: Science Press, 2005
- [19] 吴 冲, 戴君武, 彭 卿, 等. 地震作用下空间网格结构倒塌模式分析[J]. 地震研究, 2020, 43(3):508-516+602
- Wu Chong, Dai Junwu, Peng Qing, et al. Analysis of collapse pattern of spatial grid structure under the influence of the earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3):508-516+602
- [20] LS-DYNA Theoretical manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003
- [21] 毕程程. 华山花岗岩 HJC 本构参数标定及爆破损伤数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019
- Bi Chengcheng. Calibration of HJC constitutive parameters of Huashan granite and its blasting damage numerical simulation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019
- [22] Bakeer T. Collapse analysis of masonry structures under earthquake actions[D]. Dresden, Germany: Technische Universität Dresden, 2009
- [23] 王 兰. 石墙灰缝抗震性能和力学计算模型研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2019
- Wang Lan. Experimental and numerical investigation on seismic performance of stone masonry joints under cyclic lateral loads[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2019
- [24] 柴振岭, 郭子雄, 胡奕东, 等. 干砌甩浆砌石墙通缝抗剪强度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, (增 2):340-344
- Chai Zhenling, Guo Zixiong, Hu Yidong, et al. Experimental study on shear strength of mortar joint of dry-laid stone masonry walls[J]. Journal of Building Structures, 2010, (S2):340-344
- [25] 张 岩, 刘沛允, 秦 宇, 等. 砌体单片墙结构的平面内静力与动力性能分析[J]. 应用力学学报, 2018, 35(6):1273-1279+1420
- Zhang Yan, Liu Peiyun, Qin Yu, et al. Analysis on static and dynamic mechanical properties of masonry panel under in-plane loading[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(6):1273-1279+1420
- [26] 朱伯龙, 吴明舜, 余安东. 砖石及钢筋混凝土框架房屋的变形状态[J]. 结构工程师, 1987, (1):47-51+59
- Zhu Bolong, Wu Mingshun, Yu Andong. The deformation state of brick and reinforced concrete frame houses[J]. Structural Engineer, 1987, (1):47-51+59
- [27] Ruiz-Garcia J, Miranda E. Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(9):1237-1258

[28] 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(增2):263-270

Jiang Lixue, Wang Zhuolin, Zhang Fuwen. Damage degree and inter story drift angle limit of multi-story masonry structures[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S2): 263-270

Seismic Performance Simulation and Analysis of Fujian Typical Stone Structure Reinforced by UHPC Stone Wallinfilled Joints

SHI Weidan¹, SHI Jianri², LIN Huanzhou³, GENG Li⁴,
LING Tingting¹, WU Yingxiong⁵, WANG Hao⁶

(1.College of Civil Engineering, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China; 2.Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd, Fuzhou 350025, China; 3.China Construction Fourth Engineering Division Corp.Ltd, Guangzhou 510630, China; 4.Fujian Academy of Building Research Co Ltd, Fuzhou 350100, China; 5. College of Civil Engineering of Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 6.Fujian CIECC Planning & Design Research Group Co., Ltd, Zhangzhou 363005, China)

Abstract

In the coastal regions of Fujian, there are a large number of residential buildings constructed from stone, and they exhibit poor seismic resilience. Stone walls are the main load-bearing and lateral force resistant components of stone structures. Strengthening stone walls with UHPC infilled joints can improve the seismic performance of stone structures. To explore the overall seismic performance of stone structures after UHPC infilled joints, this study utilized the LS-DYNA finite element software to establish two distinct models of stone structures: one without reinforcement and another reinforced with UHPC infilled joints. The research aimed to investigate the complete seismic failure process, analyzed the seismic response, failure mechanisms, and performance of the structures. Findings reveal that the stone structure exhibits a “vertical collapse” failure mode under seismic action. For PGA of 55 gal and 110 gal, the unreinforced structures exhibited minor to complete collapse, whereas the reinforced structures showed conditions ranging from minor damage to moderate destruction. Compared with the unreinforced structure, the fundamental period of the reinforced stone structure is slightly reduced, the peak acceleration of floor has decreased by 21.05% to 25.26%, and the displacement angle was reduced by 74.90% to 94.50%. The infilled joints reinforcement effectively curtailed stone wall cracking, mitigated structural damage, and significantly enhanced reinforcement effectiveness.

Keywords: stone structure; stone wall; seismic reinforcement; infilled joints reinforcement; UHPC; LS-DYNA; finite element simulation