

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.03.023

既有石结构民宅外走廊重建置换的加固分析

施微丹¹, 吴繁超², 林婷婷¹, 金捷³, 吴应雄⁴

(1. 福建船政交通职业学院 土木工程学院, 福建 福州 350007;

2. 福州外语外贸学院 智能建造学院, 福建 福州 350202;

3. 福建省建设工程造价管理总站, 福建 福州 350001;

4. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要:福建省既有石结构房屋保有量大,石结构房屋由石墙、石柱、石梁和石楼板这四种石构件堆砌组成,结构抗震性能极差。石结构房屋通常设有外走廊,外走廊相对于其他部位较为独立,在地震中和其他环境振动下极易倒塌。在既有石结构房屋未进行抗震加固前,为确保外走廊安全,提出拆除外走廊石构件,采用钢筋混凝土(RC)结构重建置换的加固方法。设计与分析表明:应当尽可能地增大RC构件的刚度,以减少地震作用下石结构房屋的侧向位移;RC构件与相邻的石构件应可靠连接。外走廊RC构件重建置换的加固方法可为类似石结构民宅加固提供参考。

关键词: 石结构;外走廊;石柱;石梁;石楼板;置换加固

中图分类号: TU363

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)03—0147—07

Reinforcement Analysis of Reconstruction and Replacement of Outer Corridor of Existing Stone Structure Residential Buildings

SHI Weidan¹, WU Fanchao², LIN Tingting¹, JIN Jie³, WU Yingxiong⁴

(1. College of Civil Engineering, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou, Fujian 350007, China;

2. College of Intelligent Construction, Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou, Fujian 350202, China;

3. Construction Engineering Cost Management General Station in Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350001, China;

4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: There are a large number of existing stone structure houses in Fujian Province. Stone structure houses are composed of four stone components: stone wall, stone column, stone beam and stone floor slab, and the seismic performance of the structure is very poor. Stone structure houses are usually equipped with external corridors, which are relatively independent from other parts and are easy to collapse under earthquake and other environmental vibration. In order to ensure the safety of the outer corridor before the seismic reinforcement of the existing stone structure buildings, a reinforcement method of removing the stone components of the outer corridor and using reinforced concrete (RC) structure reconstruction and replacement is proposed. The design and analysis show that the stiffness of RC members should be increased as much as possible to reduce the lateral displacement of stone structure buildings under earthquake; RC members shall be reliably connected with adjacent stone members. The reinforcement method of reconstruction and replacement of RC members in the outer corridor can provide a reference for the reinforcement of similar stone structure residential buildings.

Keywords: stone structure; outer corridor; stone; stone beam; stone floor slab; replacement reinforcement

收稿日期:2022-02-26

修稿日期:2022-04-04

基金项目:住建部科技开发研究项目(K20221251);福建省住建厅科技开发研究项目(2022-K-117; 2022-K-118)

作者简介:施微丹(1983—),女,硕士,副教授,主要从事工程结构抗震与减隔震研究工作。E-mail:swdfz1216@163.com

通讯作者:吴应雄(1969—),男,博士,教授,主要从事工程结构抗震与减隔震研究工作。E-mail:wyyxf2006@fzu.edu.cn

福建沿海地区石材资源丰富,20 世纪 60 年代至 90 年代末民宅大多数采用石材建造,石材为当地盛产的强度较高的无风化花岗岩。据调查统计,目前福建省石砌体房屋超过 80 万栋,主要为民宅,大多分布于闽南地区,即泉州、漳州、厦门等地^[1]。闽南地区石砌体房屋的突出特点是:(1)房屋以石墙承重,不仅墙体用石材,基础、梁、板、柱构件都用石材制作,故称为石结构房屋^[2];(2)石墙由粗料石(即整毛石)砌筑而成,所谓整毛石指的是经过工人

用专业工具粗加工的长条石(俗语称条石),条石截面宽度和高度约为 210 mm,长度不一,通常约为高度的 2 倍~5 倍,石墙砌筑砂浆主要为人工自拌的低强度红黏土砂浆,采用有垫片干砌后甩浆砌筑方法^[3-4];(3)民宅多数为一至三层,平面布局较为统一。开间方向通常三至四跨,俗称“三关张”、“四关张”。为实现房外活动、遮阳防雨的建筑功能,通常在房屋的南边设置外走廊,外走廊是民宅的主要出入口。福建闽南地区典型石结构民宅如图 1 所示。



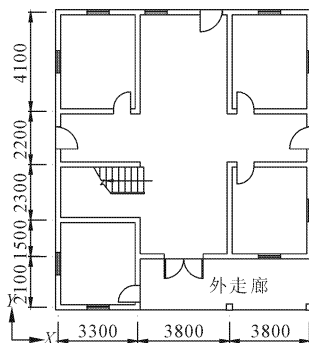
(a) 单层“三关张”



(b) 两层“四关张”



(c) 三层“三关张”



(d) 典型带外走廊“三关张”(单位: mm)

图 1 闽南典型石结构民宅图

石材为脆性材质,石构件自身抗弯、抗拉和抗剪能力较差,受荷后呈脆性破坏。我国相关规范已明确规定严禁采用石板、石梁及独立料石柱作为结构承重构件^[5-7]。2009 年泉州南安市一幢民宅的三层悬挑石阳台板断裂,如图 2 所示。福建闽南地区既有石结构民宅主要分布在村镇地区,多数按当地工匠的经验建造,未考虑抗震设防。在可预见的未来几十年的时间内,既有石结构民宅大部分仍在使用中,随着经济的发展与抗震设计标准的提高,人们愈加重视其安全性。

从上世纪 80 年代起国内外有关学者就开展了石结构房屋抗震加固的研究,主要关注石构件的加固,即石墙、石梁、石楼板的加固,对石结构房屋整体和局部进行抗震加固的研究较少。石墙目前的加固方法主要有钢筋网片水泥砂浆面层加固法、钢筋混



图 2 民宅石阳台断裂

凝土夹板墙加固法、纤维增强复合材料(FRP)加固法等。徐天航等^[8]采用钢筋网片改性砂浆加固条石干砌石墙,对其进行了低周水平往复加载试验,试验结果表明该方法加固石墙面层能显著提高石墙的受剪承载力和耗能能力。刘文定^[9]对 3 片钢筋混

土面层加固的石墙做了静力试验研究,试验结果表明采用夹板墙加固后的石墙抗剪承载能力可提高3倍以上,提高砂浆强度或者增大面层厚度可提高加固效果。

石梁、石楼板的加固方法主要有外加面层加固法、外包(粘)型钢加固法以及增设支点法。张楠^[10]自配具有一定抗垂挂性能和界面粘结性能的改性砂浆,在石楼板受拉区配置钢筋网片,对加固后的石楼板进行分级加载试验,试验表明石楼板呈现延性弯曲破坏的特征,受弯承载力显著提高。邬伟进^[11]对4根石梁试件进行抗弯试验并用有限元软件进行分析,结果表明外包型钢石梁加载后呈现延性破坏。

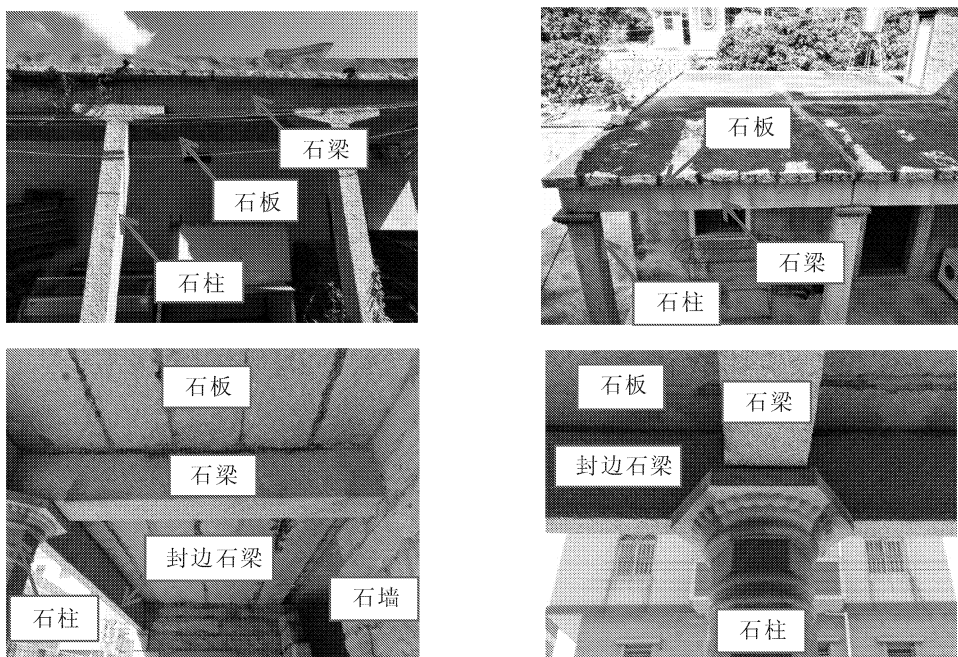


图3 外走廊石构件实物解析图

1 有限元分析

1.1 模型单元划分

采用成熟的有限元软件 LS-DYNA 对石结构房屋进行地震模拟分析,采用等比例的分离式三维建模和 SOLID 164 实体单元,模拟采用显式动力分析方法,模型忽略砂浆的几何尺寸,石块间采用 LS-DYNA 的绑定脱粘接触代替砂浆作用。石墙所用石块尺寸为:宽度 210 mm,高度 210 mm,长度 840 mm,墙体连接接搓形式分为 L 形连接与 T 形连接。石楼板单条尺寸为:宽度 390 mm,厚度 140 mm。选择 HJC 本构模型模拟花岗岩材料,并考虑材料失效条件。对于单元网格的划分采用结构化网格划分将单元划分为六面体单元,计算单元大小为 130 mm ×

石结构房屋外走廊由石墙、石柱、石梁、石板这四种石构件组成,如图 3 所示。石梁直接搁置在石柱上,一般无粘结材料^[12],在正常的使用中,由于环境振动等因素作用下可能引起石柱移位,造成严重安全问题。在地震下石柱与石梁交接节点处位移较大,易发生石柱移位,石梁石板掉落的情况^[13]。外走廊是民宅的主要出入口,地震中走廊相比石结构其他部位率先倒塌,属石结构房屋中抗震最为薄弱的部位。

考虑到钢筋混凝土结构安全可靠,技术成熟,抗震性能较好,因此提出将外走廊石构件全部置换为钢筋混凝土(RC)构件。

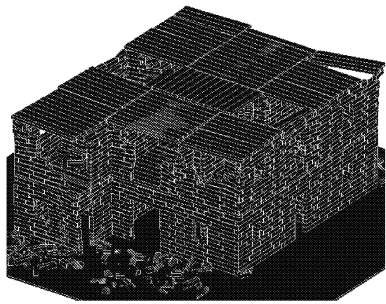
130 mm × 130 mm。采用 Lagrange 算法对模型进行求解,最终通过 LS-PREPOST 对结果进行可视化输出。地震波选用 El Centro 南北波,考虑到分析的模型均为分离式三维实体模型,单元和接触数量庞大,为简化非线性分析计算工作量,因此仅考虑沿结构单向输入。

1.2 两种石结构模型建模分析

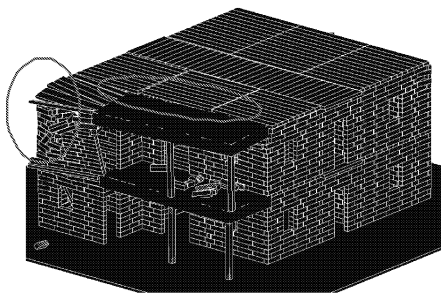
建立了典型闽南地区两种石结构模型进行对比分析,平面布置见图 1(d),层高为 3 500 mm。两种石结构模型即:(1)两层不带石构件外走廊的石结构;(2)两层带 RC 结构外走廊的石结构,其中 RC 结构外走廊的结构构件等信息为:混凝土强度等级为 C30,板厚为 130 mm,梁截面为 300 mm × 500 mm,柱截面为 400 mm × 400 mm。闽南地区抗震设

防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 $0.15g$ 。模型 1 考虑石构件外走廊仅用两根石柱支撑石楼板和石梁,地震动作用下地震加速度峰值较小时 ($55gal$) 走廊即独立倒塌^[14],建模时进行简化,模型中不设置石构件外走廊,这样不影响计算精度;模型 2 则为带 RC 结构外走廊的石结构。

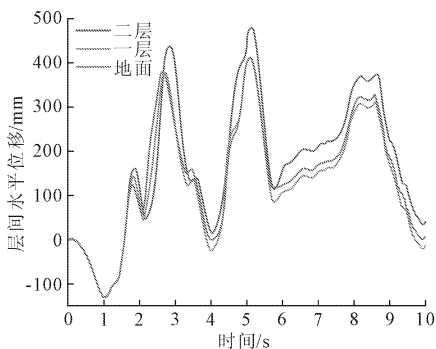
在地震加速度峰值为 $0.1g$ 作用下,模型 1 和模型 2 的破坏形态见图 4(a)、图 4(b),图 4(a)可见二层外墙发生了面外倒塌,部分内墙也发生了面外倒塌,进而引发了二层部分石楼板的砸落。二层多数墙体出现较明显开裂,裂缝宽度较大,一层部分墙体也出现裂缝。图 4(c)给出了结构的位移时程曲线,可见在 $5.1s$ 时,二层层间位移达到 $76mm$,层间位移角为 $1/92$,超过严重倒塌破坏的位移角限值,说明结构此时已处于倒塌状态,但是一层层间位移仅为 $7mm$,层间位移角为 $1/500$,损伤较小^[15]。



(a) 模型1破坏形态(不带石构件外走廊)



(b) 模型2破坏形态(带RC外走廊)



(c) 模型1层间水平位移时程曲线

图 4 石结构有限元分析图

图 4(b)可见二层房屋角落处部分洞口边石墙脱落,石墙上方的石板错位较严重,说明结构此时已处于倒塌状态。二层外走廊 RC 楼板与石墙连接处有轻微翘曲,但房屋整体侧向水平位移被抑制,可见外走廊石构件置换为 RC 构件能减小结构的水平位移。

从以上有限元分析结果可得,外走廊重建置换的条件下,为提高石结构抗侧移能力,应当尽可能地增大外走廊 RC 构件的刚度,即增大 RC 构件的截面尺寸,并适当提高 RC 构件配筋率,同时确保 RC 构件与石结构的连接构造可靠。

2 外走廊重建置换

2.1 石结构外走廊结构布置

典型石结构外走廊结构布置如图 5 所示,走廊共 2 跨,长度分别为 b_1 和 b_2 ,与相邻室内房间的开间相同,宽度 L 通常为 $1\ 500\text{ mm} \sim 2\ 700\text{ mm}$ 。

室内石板跨度一般由建筑的开间或进深决定,大约在 $3\ 000\text{ mm} \sim 4\ 000\text{ mm}$ 之间。单块条石板宽度约为 $300\text{ mm} \sim 360\text{ mm}$,厚度约为 $120\text{ mm} \sim 150\text{ mm}$ 。石楼板灰缝间采用低强度砂浆粘结,石楼板两端直接搁置在石墙或石梁上,受限于石材开采的天然尺寸,因此常出现支撑长度不足的情况,其受力模型为两端简支的铰接板^[16]。室外走廊石板与室内石板的布置方向通常有两种:(1)条石板沿 X 向布置;(2)条石板沿 Y 向布置,见图 5(a)、图 5(b)。

外走廊和相邻室内石板布置方式通常有四种,分别为:(1)室内外石板均沿 X 向布置,见图 5(c);(2)室内石板 Y 向布置,室外石板 X 向布置,见图 5(d);(3)室内石板 X 向布置,室外石板 Y 向布置,见图 5(e);(4)室内外石板均沿 Y 向布置,见图 5(f)。以下将上述四种布置方式分别称为 XX 型、 YX 型、 XY 型、 YY 型石板。室外石板沿条石板的长向搁置在石墙或石梁上。

与石梁垂直的封边石梁受力小,宽度小于石梁。石梁与封边石梁搁置在石柱上。闽南石结构民宅石柱通常采用料石柱砌筑,石柱截面较小,通常边长为 $200\text{ mm} \sim 300\text{ mm}$ 。

2.2 石结构 RC 外走廊结构布置与连接

石结构 RC 外走廊构件布置见图 6(a)。B_a 楼板四周支座为石墙与 RC 梁,其受力类似于两邻边固定两邻边简支板。B_b 楼板四周支座为石墙与 RC 梁,其受力类似于三边固定、一边简支或自由端的板。这时楼板与常规 RC 结构的楼板相比支座嵌固条件不同。

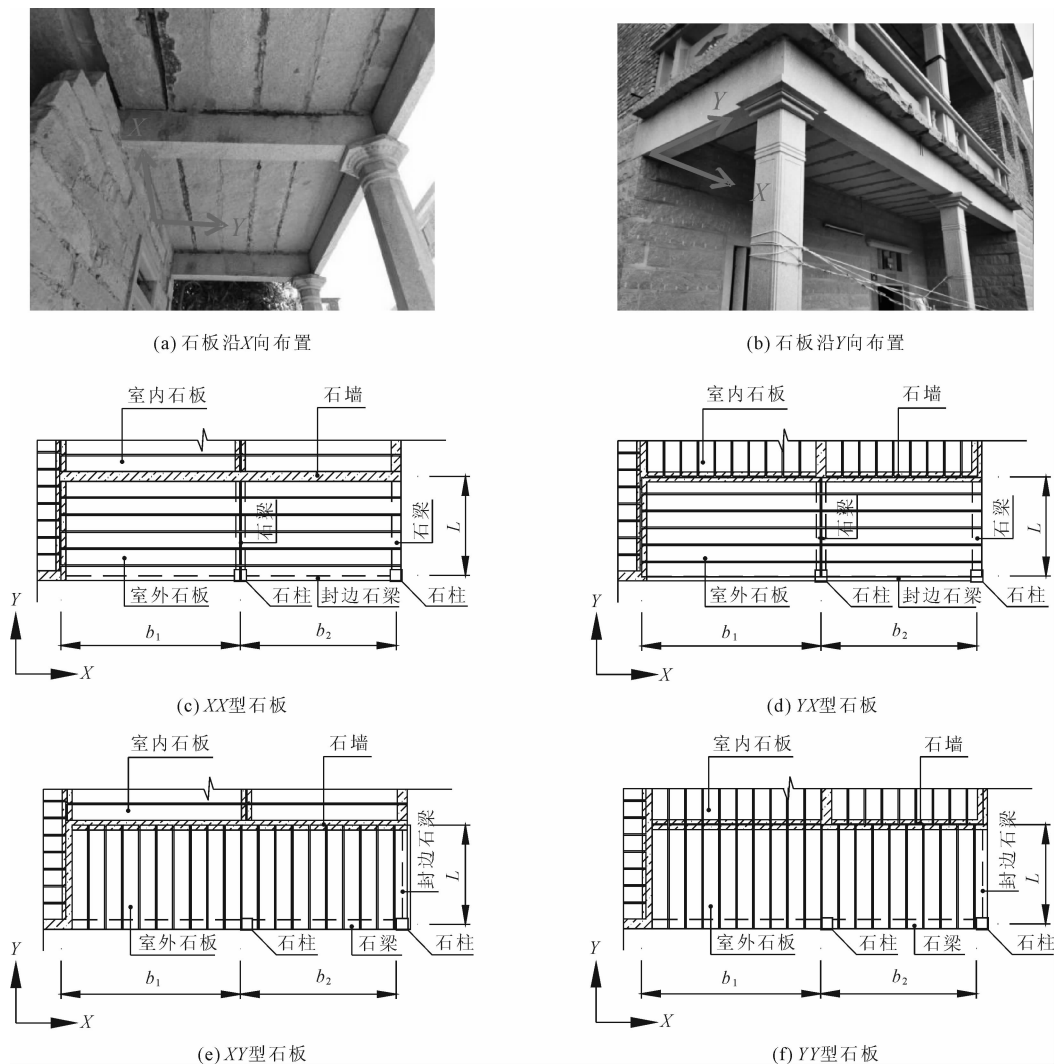


图5 石结构外走廊结构布置图

RC梁、RC板与石墙采取如下连接方法:

(1) RC梁与石墙的连接。见图6(b), RC梁 L_a 一端支座为石墙,另一端支座为RC柱。因此其一侧钢筋可直接锚入石墙中,锚入长度应不小于 $10d$,另一侧钢筋锚入RC柱中,按照相关规范设计与施工。

(2) RC板与石墙或石板的连接。针对室外石板、室内石板的布置形式和方向,RC板应与石墙或相邻石板进行有效连接。楼板伸入石墙的长度根据原石板布置的方向分为两种,即楼板伸至石墙边,不进入石墙(部分XX型),见图7(a);伸入一半墙宽的长度(XY型、YX型、YY型、部分XX型),见图7(b)、图7(c)。楼板板底受力钢筋锚入石构件不小于 $10d$ (d 为楼板底部受力钢筋直径)。

通过以上节点的构造处理,可以确保RC构件与石结构的连接构造可靠。

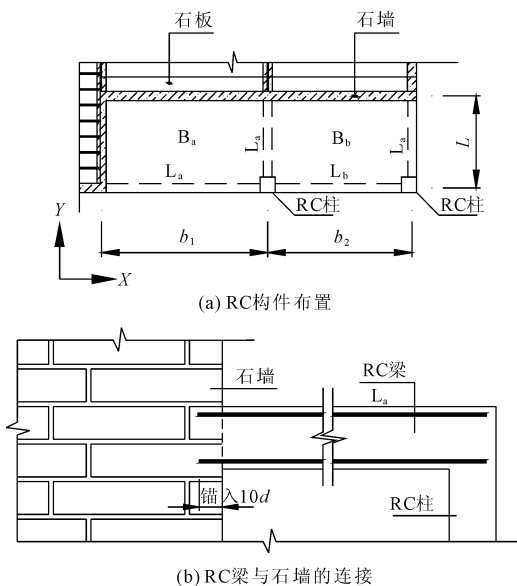


图6 钢筋混凝土外走廊结构布置图

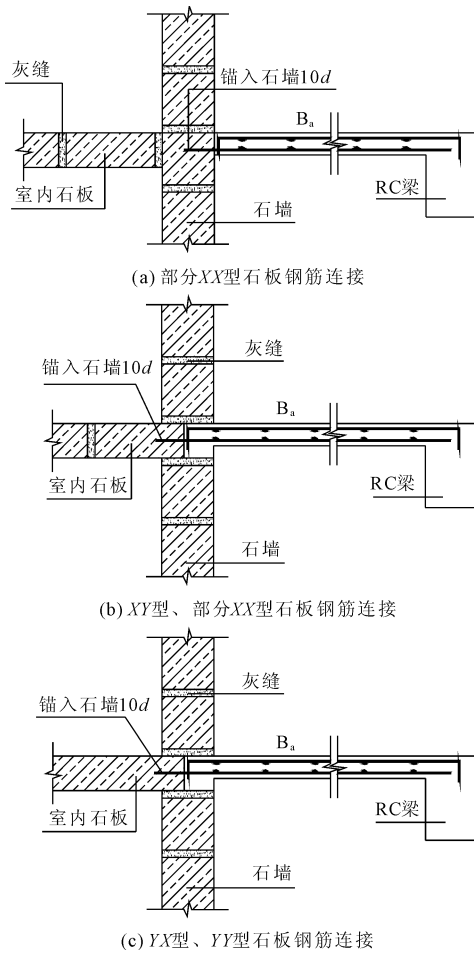


图 7 RC 板与石墙连接构造图

2.3 石结构 RC 外走廊置换加固施工

综上,石结构外走廊重建置换过程中 RC 构件置换不应扰动原有的石结构,重点是 RC 构件与石结构的连接可靠问题。施工工序如下:外走廊石墙、石板、石梁临时支撑→拆除外走廊石构件→RC 柱及其基础施工→支设梁板模板→RC 梁受力钢筋锚入相邻石墙→绑扎 RC 梁钢筋骨架→RC 板钢筋锚入相邻石构件中→绑扎 RC 板钢筋→RC 梁板混凝土浇筑→养护→卸下临时支撑。

3 工程应用

石结构房屋外走廊采用 RC 结构重建置换的加固方法已进行了试点工作,如图 8 所示。图中试点民宅位于福建省平潭综合试验区,抗震设防烈度为 7 度,民宅建于 20 世纪 80 年代,为两层带外走廊纯石结构,层高为 3 500 mm。外走廊处石楼板厚度为 140 mm,石梁截面尺寸为 250 mm × 450 mm,原石柱截面尺寸为 210 mm × 210 mm。采用外走廊重建置换加固,RC 构件混凝土强度等级为 C30,RC 板跨度

为 2 100 mm,板厚为 130 mm;RC 梁跨度为 4 200 mm,截面为 300 mm × 500 mm;RC 柱截面为 400 mm × 400 mm。RC 构件均适当加大了配筋率。实践表明,重建置换加固的混凝土工程量少,施工便捷,工期短,造价不高,施工过程不影响试点民宅居民正常生活,深受群众的肯定。

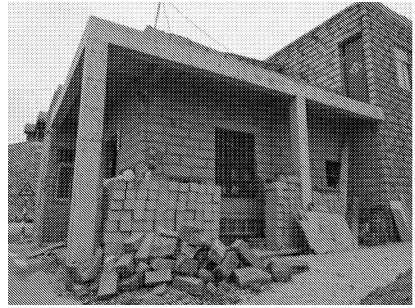
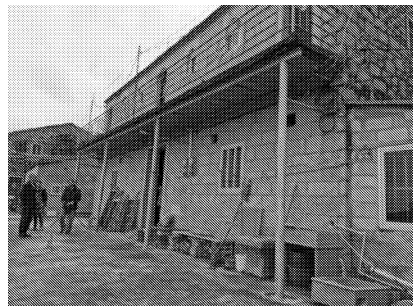


图 8 外走廊重建置换图

需要说明的是:福建闽南地区部分石结构房屋外走廊兼阳台当宽度较小时,采用悬臂石板的建造方式,目前当地政府要求进行加固,加固通常有两种做法:增设钢梁、钢柱支撑,见图 9(a);设置新增 RC 梁柱抵紧悬臂石板端部,见图 9(b)。



(a) 增设钢梁、钢柱支撑



(b) 设置 RC 梁柱

图 9 悬臂石楼板加固图

4 结论

(1) 增大外走廊 RC 构件的刚度,可抑制地震作用下石结构整体房屋的侧向位移。增大 RC 构件的截面尺寸的同时,适当增大 RC 构件配筋率。

(2) 确保 RC 构件与石结构的节点连接构造可靠。新增 RC 梁、板受力钢筋按照要求锚入石墙和 RC 构件中,保证新增的 RC 构件和已有的石结构构件协同受力。

(3) 重建置换加固方法未改变民宅使用功能,不扰动原结构,施工便捷,造价不高。加固后的 RC 结构与原石结构协同工作,形成类似于新型组合结构,起到提高石结构受力性能和抗震性能的作用,保证了既有石结构民宅的继续服役能力和结构安全。

参考文献:

[1] 周天,朱远浩,郑亮,等.既有石结构房屋石楼板加固技术分析[J].大众标准化,2022(3):39-41.

[2] 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):47-51,68.

[3] 王慧芳.干砌甩浆石砌体抗压加固试验研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(5):187-191.

[4] 江道镛.福建省镇(乡)村石砌体结构房屋抗震性能分析及加固处理研究[J].工程抗震与加固改造,2020,42(3):157-163,14.

[5] 镇(乡)村建筑抗震技术规程:JGJ 161—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[6] 福建省石砌体结构加固技术规程:DBJ/T13—264—

2017[S].福州:福建省住房和城乡建设厅,2017.

[7] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010.[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 张楠.底部钢筋网改性砂浆层加固石楼板抗弯性能试验研究[D].厦门:华侨大学,2011.

[11] 邬伟进.外粘型钢加固石梁抗弯性能研究[J].工程抗震与加固改造,2018,40(2):122-127.

[12] 叶勇,苗伟,郭子雄,等.预制 CFRP 筋增强板加固素石板受弯性能试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(2):589-598.

[13] 洪海春,石玉成,刘拓,等.芦山地震古建筑震害调查与分析[J].地震工程与工程振动,2014,34(1):147-155.

[14] 林行超.闽南地区典型石结构房屋抗震加固数值模拟与分析[D].福州:福州大学,2022.

[15] 蒋利学,蒋璐,李向民,等.无筋砌体结构多层住宅振动台试验与抗震性能评估[J].建筑结构学报,2021,42(8):25-35.

[16] 刘翔.预制 CFRP 筋增强板加固石楼板受弯性能及设计方法研究[D].厦门:华侨大学,2020.

(上接第 27 页)

[18] 黄鑫,庞建勇,黄金坤,等.聚丙烯纤维混凝土强度正交试验研究[J].硅酸盐通报,2019,38(4):1183-1190.

[19] 段明翰,覃源,许增光,等.聚丙烯纤维对混凝土损伤渗透特性的影响[J].复合材料学报,2021,38(10):3474-3483.

[20] 徐礼华,梅国栋,黄乐,等.钢-聚丙烯混杂纤维混凝土轴心受拉应力-应变关系研究[J].土木工程学报,2014,47(7):35-45.

[21] 高丹盈,赵亮平,陈刚.高温中纤维纳米混凝土单轴受压应力-应变关系[J].土木工程学报,2017,50(9):46-58.

[22] 李黎,李宗利,高丹盈,等.高温对钢纤维-聚乙烯醇纤维-CaCO₃晶须多尺度纤维/水泥复合材料弯曲性能和微观结构的影响[J].复合材料学报,2021,38

(7):2326-2335.

[23] 李艺,张爽.干湿循环作用下混杂纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(6):895-898,903.

[24] 李黎,曹明莉,冯嘉琪.纤维增强水泥基复合材料的纤维混杂效应研究进展[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(4):843-853.

[25] 普通混凝土配合比设计规程:JGJ/55—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

[26] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[27] 赵小明,李奥阳,乔宏霞,等.纤维混凝土抗冻性能及损伤劣化模型研究[J].硅酸盐通报,2020,39(10):3196-3202.