

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.05.013

粘钢加固单块石板条抗弯性能试验与施工工艺研究

耿丽¹, 苏婧昀², 余明扬³, 刘佳欣², 吴应雄²

(1. 福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福建 福州 350108;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

3. 泉州城市规划设计集团有限公司, 福建 泉州 360000)

摘要: 福建闽南地区石砌体房屋楼板所采用的花岗岩石板条抗弯性能弱, 易产生脆断。为探究在石板条底面采用粘钢加固技术的加固效果, 选取典型尺寸的4块粘贴钢板加固的石板条开展受弯性能试验, 并采用1块不加固的石板条作为对比试件。研究在100 mm宽度的钢板条件下, 钢板不同厚度(3 mm和5 mm)对石板条受弯性能的影响。试验结果表明: 通过在石板条底面采用粘钢加固, 可将其破坏形式改变为具有挠曲变形特征的延性破坏, 可显著提升石板条抗弯性能, 极限荷载提升了55.56%~60.00% (厚3 mm)和102.96%~105.04% (厚5 mm), 且随着钢板厚度增大, 加固效果更显著, 可完全满足民居使用荷载和防脆断要求。基于试验结果, 提出了设置临时支撑及胶粘剂硬化养护等施工关键措施, 可确保石楼板加固安全可靠。

关键词: 石结构; 石板条; 粘钢; 抗弯加固; 受弯性能; 施工工艺

中图分类号: TU363

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0092-06

Bending Resistance Test and Construction Technology of Reinforced Stone Floor With Viscous Steel

GENG Li¹, SU Jingyun², YU Mingyang³, LIU Jiaxin², WU Yingxiong²

(1. Fujian Province Architecture and Building Research Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

3. Quanzhou Urban Planning and Design Group Co., Ltd., Quanzhou, Fujian 360000, China)

Abstract: Granite stone slabs commonly used in floor systems of stone masonry houses in the Minnan region of Fujian exhibit poor flexural performance and are prone to brittle fracture. To investigate the effectiveness of steel plate bonding reinforcement applied to the bottom surface of stone slabs, four strengthened specimens with bonded steel plates and one unstrengthened control specimen were tested under flexural loading. This work examined the influence of steel plate thickness (3 mm and 5 mm) under a constant plate width of 100 mm. Based on the experimental results, specific construction measures were proposed to ensure the quality of steel-plate bonded strengthening. The results indicate that bonding steel plates to the bottom surface of stone slabs effectively transformed brittle fracture into ductile failure characterized by flexural deformation, and significantly enhanced flexural performance. The ultimate load increased by 55.56%~60.00% for 3 mm plates and 102.96%~105.04% for 5 mm plates compared with the control specimen. Furthermore, greater steel plate thickness led to more pronounced strengthening effects, fully satisfying residential service load requirements and preventing brittle fracture. In addition, key construction measures, including temporary supports and adhesive curing, were recommended to ensure safe and reliable strengthening of stone slab floors.

Keywords: stone structure; stone slab; steel plate; flexural strengthening; flexural behavior; construction technology

收稿日期: 2025-06-03

修稿日期: 2025-07-14

基金项目: 福建省建设科技研究开发项目(2025-K-18)

作者简介: 耿丽(1986—), 女, 高级工程师, 一级注册结构工程师, 主要从事结构检测鉴定与加固研究工作。E-mail: 307240684@qq.com

通讯作者: 吴应雄(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构抗震、减震和砌体结构抗震加固研究工作。E-mail: wyxfz2006@163.com

福建闽南沿海地区大量石砌体结构民宅,石砌体结构主要分为石混结构和石结构,其中石结构的主要构件由石墙、石柱、石梁、石板条、石阳台和石楼梯等组成。由于石材抗拉强度低,脆性易断裂的特点^[1-3],不宜应用于受弯构件中,福建省曾发生多起石板脆断断裂事故,造成人员和财产损失^[4]。

石结构中的受弯构件主要为石梁和石板,为提高其抗弯承载能力和改善其破坏形态,相关领域学者提出不同加固技术并展开试验和理论研究以及工程应用研究。对于石梁构件的加固,邱锦华等^[5]通过对CFRP筋增强板加固石梁的有限元分析,得出CFRP筋增强板可以有效改善石梁的破坏形态。李梁峰^[6]用角钢-PET带和外包钢加固石梁并指出该方法可以提高石梁抗弯承载力和改善其变形能力。

对于石板条构件的加固,其主要有底面和顶面加固两类。当允许在石板顶面施工,则采用钢筋混凝土面层加固技术;当石板不允许在顶面施工,则只能在底面受拉区加固。《福建省石砌体结构加固技术规程》^[7]提出了钢筋网水泥砂浆面层方法加固石砌体构件。郭子雄等^[8]进行钢筋网改性砂浆加固石楼板受弯性能试验,得出加固试件的受弯承载力和弯曲变形能力均有显著提高。叶勇等^[9]通过试验研究发现利用预制CFRP筋增强板加固石楼板,能让石板条的破坏形态由脆性断裂转变为延性良好的弯曲破坏,石板条的受弯承载力和变形能力得到显著提高。周天^[10]进行高强钢丝网UHPC加固既有石楼板抗弯性能试验研究,结果表明,有效提高了石板抗弯承载能力。张丰宇^[11]开展了粘贴钢板加固石板条的抗弯性能试验,试验表明,石板条的抗弯性能显著提高。

上述加固方案均使得石材受弯构件的抗弯性能有不同程度的提高,但都存在施工较为复杂、不容易实施的问题,相较而言,粘贴钢板加固石板条施工较为方便、且施工质量有保障。基于前期已完成的粘钢预试验,发现粘钢加固石楼板少有研究和应用,且采用钢板粘贴加固时无需全截面宽度满铺石板条,对于通常宽度为360 mm石板条,仅需80 mm~120 mm的钢板粘贴加固即可满足要求^[11]。因此,本文进一步开展粘钢加固石板条的抗弯性能试验,研究两种较薄厚度(宽度100 mm,厚度分别为3 mm和5 mm)的钢板对石楼板抗弯性能的影响,并基于试验结果,对粘钢加固施工工艺流程进行详细分析和总结,创新性地提出采用设置支撑及胶粘剂硬化养护等关键措施,确保粘钢加固技术有效实施。成果可为石板条楼板的加固技术的应用提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 石板试件

试验所选取的试件均来自福建惠安县既有石结构房屋拆除下来的一批石板。闽南地区石板条长度通常为1 800 mm~3 900 mm,宽度通常处于330 mm~360 mm,厚度120 mm~150 mm,石板表面凹凸为 ± 15 mm,属于粗料石。民宅石楼板实例如图1。



图1 石结构民宅房屋石板

根据试验要求选取长度和厚度相近的5块石板条,其中4块为底面粘贴钢板加固试件,另有1块不加固试件作为对比,尺寸见表1。试验材料的基本性能分别按照ASTM D3967—16^[12]和ASTM C170/C170M—17^[13]的设计进行测试,得出石材的弹性模量37.20 GPa,平均抗劈裂强度7.51 Pa,平均抗压强度118.42 MPa。

1.1.2 加固钢板

本文研究目的为探究两种较薄厚度(宽度100 mm,厚度分别为3 mm和5 mm)钢板对石板条承载能力、破坏形态、变形性能等的影响。钢板型号为Q235钢,根据《混凝土结构加固设计规范》^[14](GB50367—2013)钢板粘贴长度宜延伸至支座边缘,石板条尺寸为净跨2 800 mm、宽360 mm、厚140 mm,加固时取钢板粘贴长度均为2 800 mm,并采用M12化学螺栓进行锚固,螺栓间距500 mm,共6个,化学锚栓采用8.8级,M12级锚栓极限拉力为51.10 kN。试验所用钢板屈服强度为240 MPa,抗拉强度为380 MPa,弹性模量为206 GPa。粘钢胶的抗拉强度为37.10 MPa,弹性模量6.83 GPa,抗压强度81.31 MPa,正粘接强度4.70 MPa。各试件的加固设计参数列于表1,试件构造及尺寸如图2所示。

1.2 试验方法

1.2.1 加固步骤

本次试验制作粘贴钢板加固石板条的基本步骤如下:①石板放置在试验室地坪上,首先用角磨机将粘贴钢板位置打磨平整,钢板宽度为100 mm;②对

表 1 石板条加固参数 单位:mm

试件编号	石板条尺寸 长(L)×宽(B)×高(H)	钢板尺寸	
		厚度	宽度
S-1	2998×348×143	—	—
S-2	3092×362×142	3	100
S-3	3106×363×137	3	100
S-4	3218×356×135	5	100
S-5	3086×362×140	5	100

石板条进行钻孔, M12 化学螺栓钻底孔直径 11 mm, 钻孔深度 60 mm, 再对石板条表面和孔洞进行清理和清孔; ③采用抹刀将粘钢胶涂抹在钢板表面, 然后将钢板粘贴到预定位置, 保证石板条与钢板紧密贴合, 最后利用化学螺栓对钢板进行锚固; ④在钢板表面施加 5 块铁块压重(铁块重量 25 kg/块), 保证足

够的压力。试验试件加固施工过程如图 3。

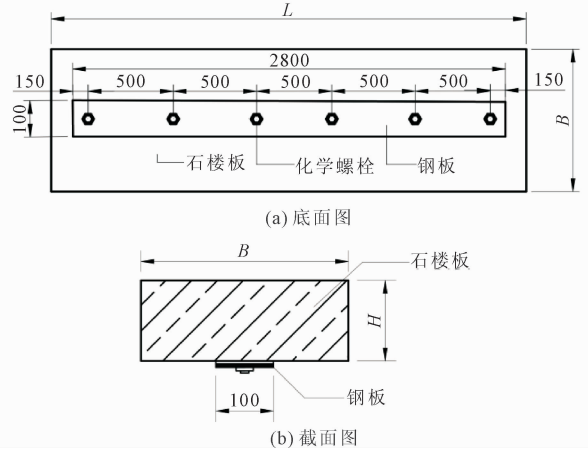


图 2 粘钢石板条构造及几何尺寸(单位:mm)



图 3 试验试件加固施工过程

1.2.2 加载装置及加载制度

试验采用三分点加载, 两个加载点位于各个石板条净跨($l_0 = 2800$ mm)的三等分点处。试验的加载装置由反力架, 千斤顶和分配梁组成, 为了保障试验的安全, 试件下方放置了垫块, 防止石板突然脆断砸向地面, 如图 4 所示。同时, 试件的两端支座均采用了刚滚轴支座, 其中一端为固定铰支座, 另一端为滑动铰支座。试验采用力-位移混合控制加载, 石板开裂前采用荷载控制, 荷载增量为 2 kN, 石板开裂以后转为位移控制加载, 每级位移增量 1 mm 直至脆断破坏, 每级持荷 2 min。

试验测量内容为石板条截面高度方向的应变分布、试件挠度、钢板应变及石板条裂缝发展。在试件跨中、加载点和支座处设置 5 个位移计; 在板侧沿厚度方向设置 9 个应变片; 在板顶与板底的跨中区域布置 2 个应变片; 钢板表面沿长度方向均匀布置 10

个应变片。

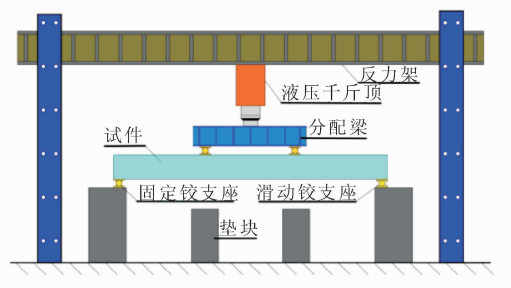


图 4 试验加载装置

2 试验现象及其结果分析

2.1 试验现象及破坏形态

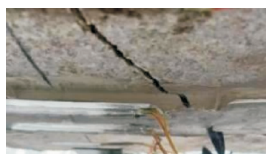
试件 S-1 在加载过程中发生没有任何预兆的断裂, 呈现为脆性破坏。当加载到开裂荷载时, 石板跨中区域产生裂缝并立即贯穿整个截面, 石板断裂截

面与其板面近似垂直,断口较为整齐,表现明显的脆性特征,如图 5 所示。



图 5 破坏形态(S-1)

加固试件 S-2 与 S-3 的破坏过程基本一致,因此以试件 S-3 为例,在试件加载初期,千斤顶施加的载荷与石板跨中挠度二者近似呈线性增长关系,板侧和板面的应变缓慢增大。随着荷载继续增大,石材发出撕裂的声响,裂缝出现于跨中,试件挠度增速随荷载增加显著加快,石板条跨中底部裂缝发展



(a) 板底通长裂缝



(b) 板侧裂缝



(c) 试件断口

图 6 破坏形态(S-3)



图 7 破坏形态(S-4)

粘钢加固试件有显著挠曲变形,与未加固试件相比,改善了石材的脆性特性。粘钢厚度较大试件在加载过程中裂缝更小且发展速度慢,分布更均匀。可以得出粘钢加固技术有效抑制裂缝发展,且加固效果随钢板厚度增大而加强。加固试件的钢板在加载过程未出现明显剥离,因此全长锚固充分发挥钢板抗拉性能,加强石材与钢板的整体协同受力,符合已有相关研究结果^[15]。

2.2 荷载-跨中挠度关系及受弯承载力

试件 S-1、S-3 和 S-4 的荷载-跨中挠度关系曲线如图 8 所示,主要试件试验数据汇总于表 2。未加固石板条试件 S-1 的荷载-挠度曲线基本为线性,在开裂后迅速失去承载能力,挠曲变形较小仅为净跨 l_0 的 1/741,表现出明显的脆性特征。而加固的构件在开裂前跨中荷载与挠度大致呈现线性增长,

成为贯通裂缝,跨中粘钢胶出现剥裂,板侧竖向次生裂缝增多。同时主裂缝随着荷载增加不断向板顶受压区延伸,次裂缝则趋于稳定。纯弯段钢板破坏前未出现明显剥离,但已达到屈服状态。试件最终破坏时跨中挠度可达计算跨度的 1/54,表现出延性特征,如图 6 所示。

试件 S-4 与 S-5 破坏过程高度类似,以试件 S-4 为例,石板跨中荷载与挠度在加载初期整体呈线性关系,随着荷载增大,跨中板底附近产生初始裂缝,其发展宽度约 0.4 mm,高度约 22 mm。开裂后,试件跨中挠度增长加快,且过程中试件跨中及附件开始出现细微裂缝,板侧竖向裂缝增加,并沿着板厚向板顶受压区延伸,钢板与石板之间未发生明显剥离现象。随着加载的继续,主裂缝贯通石板,纯弯段钢板屈服,且受压区石材被压溃(如图 7),此时已充分发挥了钢板的抗拉强度。

在开裂后挠度-弯矩曲线均保持了一段较长的锯齿状变化,在此过程中,每次荷载骤降均对应石板条新裂缝产生或原裂缝发展,当石材开裂退出工作,荷载由钢板通过形变去承担增加的荷载。其中,3 mm 粘钢加固试件 S-3 达到开裂荷载时弯矩骤降,降幅约 24%,且其在开裂后保留部分承载力,总体上低于开裂时;而 5 mm 粘钢加固试件 S-4 在达到开裂荷载后瞬间承载力下降约 8%,承载力保留更多,且其在开裂后的极限弯矩大于开裂弯矩。

注意到,S-3 试件其极限变形范围约为净跨 l_0 的 1/55,而 S-4 试件为 1/70,这是因为 5 mm 钢板加固的情况下,试件能承受更大的荷载,这使得试件在还未达到其所能承受的极限变形时,钢板即因过大荷载和石板条脱粘,进而试件破坏,极限挠度反而略低于 3 mm 加固试件。

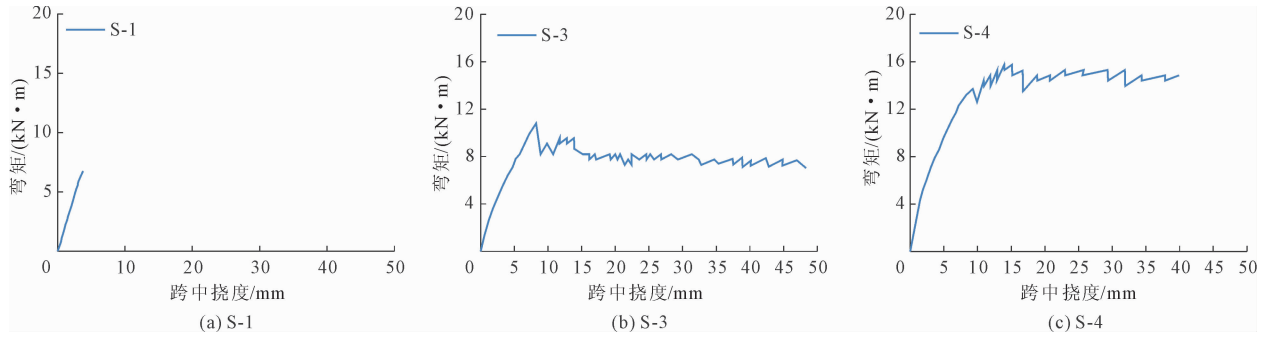


图 8 荷载-挠度关系曲线

表 2 主要试件试验结果

试件编号	$M_{cr}/(kN \cdot m)$	δ_{cr}/mm	$a_{cr}/\%$	$M_{max}/(kN \cdot m)$	δ_u/mm	δ_{max}/mm	$a_{max}/\%$	δ_u/l_0	m_d
S-1	6.75	3.78	—	6.75	3.78	3.78	—	1/741	—
S-2	10.56	8.15	55.56	10.56	51.04	8.15	55.56	1/55	1
S-3	10.80	8.23	60.00	10.80	51.37	8.23	60.00	1/54	1
S-4	13.70	9.29	102.96	15.70	39.89	39.89	132.59	1/70	4.30
S-5	13.84	9.33	105.04	15.94	40.06	40.06	136.15	1/70	4.29

注: M_{cr} 、 M_{max} 为开裂弯矩以及极限弯矩; δ_{cr} 、 δ_{max} 为开裂弯矩、极限弯矩所对应的跨中挠度; δ_u 为试件的极限变形; a_{cr} 、 a_{max} 分别为开裂弯矩、极限弯矩相对未加固石板条提高的百分比; m_d 为延性系数, $m_d = \delta_{max}/\delta_{cr}$ 。

结合图 8 与表 2 的分析结果可以看出, 钢板能有效抑制跨中石材底部区域的细微裂缝, 显著提高其开裂荷载及挠度。相较于未加固试件 S-1, 加固试件 S-2 和 S-3 的开裂荷载分别提高约 55.56% 和 60.00%, 加固试件 S-4、S-5 的开裂荷载相较于未加固试件 S-1 分别提高约 102.96% 和 105.04%, 可以得出粘钢对裂缝的约束效果随着钢板厚度的增加不断增强。同时, 注意到加固试件 S-4、S-5 的极限弯矩相较于其开裂弯矩也有所提高, 表明在加固厚度为 5 mm 的条件下, 石板条开裂后钢板仍能进一步承受更大的弯矩。

未加固石板试件 S-1 的开裂荷载即为破坏荷载, 而粘钢加固试件在开裂后仍可以承担荷载。试件 S-2 和 S-3 因所用钢板较薄, 承受荷载能力有限, 开裂后其荷载始终未能回升至开裂荷载水平, 但其极限荷载较 S-1 仍提高约 60%; 试件 S-4 和 S-5 在开裂后出现荷载上升阶段, 其极限荷载较 S-1 提高了 130% 以上, 因此, 粘钢加固可改变石板条的破坏形态, 并增强其抗弯性能, 且在相同外载条件下, 钢板厚度 5 mm 的试件比钢板厚度 3 mm 的试件有更高的抗弯刚度, 这与已有成果类似^[16]。

3 粘钢加固石板条施工工艺及要求

已有研究表明, 石楼板能够满足民居正常使用下的载荷要求, 然而石板条的脆断和其在地震下的

脱落问题是石结构房屋加固的重点。石板条底面粘钢加固技术的可靠性已得到试验证明^[11], 但粘钢加固石板条施工技术需要重点关注。本文基于试验研究, 提出了石板条的粘钢加固施工流程, 包括施工准备、石板条和钢板表面处理、钢板粘贴锚固和养护四个主要阶段, 具体施工步骤和要求介绍如下。

(1) 施工准备: 加固施工前, 需要先行布置临时支撑体系, 以防止施工扰动导致石板条开裂或坠落, 如图 9 所示。支撑体系采用 3 根直径不小于 48 mm、顶部可调节的钢立杆来支撑石楼板, 钢立杆底部设立稳固的立杆基础, 左右两根钢立杆与同侧墙体的间距均为 500 mm, 中间设置一根钢立杆。

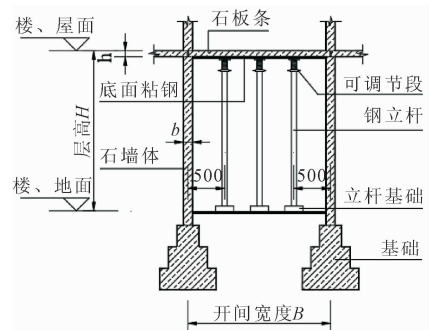


图 9 施工临时支撑示意图(单位:mm)

(2) 石板条表面处理: 采用轻型角磨机对石板条表面进行打磨, 使表面尽可能平整。同时, 应清除

石板条表面的灰尘、原有胶结物等,确保石板条底面干燥,并用粘钢胶找平,以使粘钢胶能充分贴合板面。找平完成后,用冲击钻在石板表面预定锚固位置处钻孔(深度不应小于60 mm),用吹孔器和毛刷清理空洞的灰尘等杂质,并使用化学锚栓植入石板表面孔洞。

(3) 钢板表面处理:应按设计尺寸对钢板进行切割,并在预定位置钻取锚栓孔和注胶孔。用角磨机对钢板粘合面进行除锈并打磨糙化。钢板表面应擦拭干净,同时需做防锈处理,在表面处理工作完成后进行涂装底漆,再覆涂中间漆和面漆,以防止侵蚀磨损并起到装饰美观作用。

(4) 配置粘钢胶:在进行钢板粘贴前,需先配置粘钢胶。粘钢胶分为A胶和B胶两组份,将A、B两组份按2:1倒入容器内,按同方向完全搅拌均匀,通过观察色泽确保两组份完全融合。混合完成后的1 h内,必须完成所用涂胶和粘贴操作。

(5) 钢板粘贴锚固:粘钢胶配置完成后,用抹刀将粘钢胶均匀涂抹在石板条及钢板表面,要求中间厚边缘薄,然后将钢板贴于预定的位置。用专用滚子或刮刀用力滚压或刮平,使胶粘剂从板的两侧挤出,排尽板缝之间的气泡,保证石材表面与钢板紧密接触。最后利用化学螺栓将钢板锚紧,并利用钢支撑来保持压力,以防钢板因未粘结牢固而脱落。

(6) 养护:粘钢加固技术施工结束后要严格遵循胶粘剂说明书要求的温湿度条件进行养护。粘贴完成后的24 h内,必须用钢支撑来保持压力,严禁任何扰动。粘贴完成后72 h,胶体已达到设计强度,石板条和钢板开始较好地进行协同受力,可拆除临时支撑,此时加固体系开始正式起效并承受荷载。

4 结论

(1) 粘钢加固技术可以将石板条的破坏形式转变为具有明显挠曲变形预兆的延性破坏。经粘钢加固的石板条破坏时的跨中挠度从未加固的4 mm提高到40 mm以上。

(2) 粘钢加固技术能显著增强石板条的抗弯承载能力,可满足民居使用荷载和防脆断要求。粘贴钢板厚度为3 mm的石板条,加固后极限荷载相较于未加固石板条提升了55.56%~60.00%;粘贴钢板厚度为5 mm的石板条,加固后极限荷载相较于未加固石板条提升了102.96%~105.04%,提升效果显著大于粘钢厚度3 mm的石板条。

(3) 钢板与被加固石板条之间的锚固及粘结性能良好。试验过程中二者并没有发生相对滑移和明

显剥离,表明钢板与石板条之间具有良好的协同工作性能。

(4) 提出了粘钢加固施工流程,着重提出了加固施工时应设置临时支撑及胶粘剂硬化养护等关键措施,确保石楼板加固施工安全可靠,可为该技术在传统石结构房屋加固中的应用提供参考和依据。

参考文献:

- [1] Hola J, Sadowski L, Nowacki A. Analysis of the causes of cracks in marble slabs in a large-surface floor of a representative commercial facility[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97:1-9.
- [2] 施微丹,吴繁超,林婷婷,等.既有石结构民宅外走廊重建置换的加固分析[J].水利与建筑工程学报, 2022, 20(3):147-153.
- [3] 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.
- [4] 李飞燕,吴应雄.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, 2022, 41(3):189-197.
- [5] 邱锦华,苗伟,郭子雄,等.CFRP筋复合增强板加固石梁受力性能有限元分析[J].华侨大学学报(自然科学版), 2022, 43(4):432-439.
- [6] 李梁峰.外包钢加固石梁试验研究和理论分析[J].建筑结构, 2017, 47(21):100-104.
- [7] 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.
- [8] 郭子雄,王兰,柴振岭,等.钢筋网改性砂浆加固石楼板受弯性能试验研究[J].建筑结构学报, 2011, 32(3):69-74.
- [9] 叶勇,苗伟,郭子雄,等.预制CFRP筋增强板加固素石板条受弯性能试验研究[J].中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(2):589-598.
- [10] 周天.高强钢丝网UHPC加固既有石楼板抗弯性能试验研究[D].福州:福州大学, 2022.
- [11] 张丰宇.CFRP板和钢板加固既有石楼板抗弯性能试验研究[D].福州:福州大学, 2022.
- [12] Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens: ASTM D3967—16[S]. USA, 2016.
- [13] Standard test method for compressive strength of dimension stone: ASTM C170/C170M—17[S]. USA, 2017.
- [14] 混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S].北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [15] 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.
- [16] 叶勇.表层嵌埋预应力CFRP筋组合石梁/板受弯性能研究[D].泉州:华侨大学, 2014.