

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201611127

勾缝加固砖砌体墙的抗压性能试验

魏智辉^{1,2}, 潘毅^{1,3}, 邱洪兴⁴, 袁双¹, 王忠凯¹

(1.西南交通大学 土木工程学院,成都 610031;2.中国建筑西南设计研究院有限公司,成都 610081;
3.抗震工程技术四川省重点实验室(西南交通大学),成都 610031;4.东南大学 土木工程学院,南京 210008)

摘要:为研究勾缝加固方法对砌体墙抗压性能的影响及加固效果,根据不同勾缝深度和加固砂浆强度,设计12个勾缝加固砌体构件和3个未加固构件,并对其进行了轴压试验,分析了勾缝深度和加固砂浆强度对加固砌体墙的开裂荷载、破坏荷载、应力-应变曲线和弹性模量的影响。试验及分析结果表明,相比未加固构件,勾缝加固构件的破坏形态和破坏过程相似,但其开裂荷载降低,而破坏荷载和弹性模量提高,提高的幅度与勾缝深度、加固砂浆强度有关,最大达到30%。根据试验数据和理论分析,基于砌体结构设计规范中的公式,提出了考虑勾缝深度和加固砂浆强度影响的勾缝加固砌体墙的抗压强度、应力-应变曲线和弹性模量的计算公式,且公式的计算结果与试验结果吻合较好。因此,勾缝方法可以用于砌体墙的加固,特别是近现代历史建筑。

关键词:砌体墙;抗压性能;勾缝加固;历史建筑;抗压强度;应力-应变曲线;弹性模量

中图分类号: TU362; TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)12-0184-05

Experimental study on compressive behavior of masonry walls strengthened with pointing mortar

WEI Zhihui^{1,2}, PAN Yi^{1,3}, QIU Hongxing⁴, YUAN Shuang¹, WANG Zhongkai¹

(1.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2.China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610081, China;

3.Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province(Southwest Jiaotong University), Chengdu 610031, China;

4.College of Civil engineering, Southeast University, Nanjing 210008, China)

Abstract: To study the effect of pointing mortar on the compressive behavior of masonry walls, according to different depth and strength of the pointing mortar, twelve wall specimens reinforced with pointing mortar and three unreinforced specimens were tested under uniaxial compression. Two test parameters, depth and strength of the pointing mortar, were investigated in terms of their effects on the cracking load, failure load, stress-strain relationship and elastic modulus of the reinforced specimens. Test results show that, compared to the unreinforced specimens, the specimens reinforced with pointing mortar exhibit a decrease in cracking load and an increase in both failure load and elastic modulus. And the increase range depends on the depth and strength of the pointing mortar, in which the largest reaches 30%. The cracking patterns and failure modes are similar for both reinforced and unreinforced specimens tested. Based on the test data and theoretical analysis, according to the formula from the code for design for masonry structures, equations that account for the depth and strength of the pointing mortar are proposed for predicting the compressive strength, stress-strain curve and elastic modulus of the pointed masonry walls. The test results also indicate that pointing can be used as a means of reinforcing masonry walls, especially for the historical buildings.

Keywords: masonry walls; compression performance; pointing mortar; historic buildings; compression strength; stress-strain curve; elastic modulus

中国砌体结构建筑分布广泛,历史悠久,如南京灵谷寺的无梁殿、河北定县的开元寺塔等。鸦片战争之后,受西方建筑的影响,在南京、上海、哈尔滨和天津等地建造了许多以黏土砖作为承重墙的近现代建筑,距今已有百余年历史。部分砌体结构的历史建筑

由于修建年代较早,所采用的砂浆多为石灰砂浆、粘土砂浆和石膏砂浆等,有着砂浆强度较低的共性,导致其承载力不能满足中国现行相关规范的要求,存在安全隐患,如汶川地震中倒塌的彭州市领报修院和通济镇天主教教堂^[1]。

目前,国内外针对砌体结构历史建筑的加固做了一些研究。王亭等^[2]和许清风等^[3]分别针对天津和上海某历史建筑的砌体墙,采用钢筋网水泥砂浆抹面的加固方法,对其力学性能进行了研究;杜东升

收稿日期:2016-11-26

基金项目:国家自然科学基金(51408500,51178045)

作者简介:魏智辉(1985—),男,工程师;

潘毅(1977—),男,副教授,博士生导师

通信作者:潘毅,panyi@home.swjtu.edu.cn

等^[4]针对某老旧砌体房屋,采用外套预制钢筋混凝土墙板加固,并进行了缩尺模型的振动台试验研究;郑东润^[5]结合某历史建筑的加固工程,采用有限元数值模拟方法,分析了采用钢架和混凝土衬墙加固原砌体墙的受力情况;魏智辉等^[6]针对安庆市某基督教堂的文保项目,采用增设圈梁和支撑、黏钢板以及砌砖拱圈的方法对教堂进行了加固;Antonio 等^[7]和 Vincenzo 等^[8]分别针对砌体拱门和建筑,研究采用纤维复合材料对砌体结构进行加固,并通过试验和有限元分析,证明了该方法的有效性.上述方法尽管可以有效提高砌体结构的承载力,但都在不同程度上改变了原历史建筑的外观,破坏了原有的历史风貌,不符合文物保护单位“修旧如旧”,不改变原状的原则.虽然实际加固中,有干硬性砂浆捻实砌体墙的做法^[6,9],但缺乏试验研究、理论分析和计算依据.

为此,本文根据优秀历史建筑的保护原则^[10],提出勾缝加固砌体墙的方法(即剔除墙体一定深度的原砂浆,代以加固砂浆),通过 15 个试件的轴压试验,研究勾缝加固砌体墙的抗压性能,为砌体结构历史建筑的加固提供借鉴.

1 试验概况

1.1 试验设计

为模拟历史建筑的实际情况,勾缝加固前的试件选用低强度砂浆和低强度实心粘土砖,砖的尺寸为 240 mm×115 mm×53 mm.按照 GB/T 50129—2011《砌体基本力学性能试验方法标准》^[11]的规定,试件尺寸为 240 mm×370 mm×720 mm,如图 1 所示.由同一工匠采用一顺一丁的方式砌筑,灰缝厚度为 10 mm,并预留砖和砂浆试块做材性试验.为了便于试件的勾缝施工,试件的顶部用钢板和钢拉杆施加一定的压力.受压试验的时候,撤去钢板和钢拉杆.

表 2 砖和砂浆抗压强度

Tab.2 Compressive strength of masonry and mortar

砖和砂浆	试块编号										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
砖	8.32	8.10	8.32	7.16	9.80	9.51	8.85	8.03	7.49	7.85	8.34
原砂浆	0.71	0.89	1.20	0.81	1.10	1.19	—	—	—	—	0.98
M6	5.42	6.48	6.13	6.17	5.81	5.69	—	—	—	—	5.95
M8	8.19	7.91	7.82	8.01	8.08	7.89	—	—	—	—	7.98

1.3 试验方法

试验在 2 000 kN 液压试验机上进行,加载装置和测点布置见图 2.采取物理对中,分级施加荷载,每级荷载约为预估破坏荷载值的 10%,在 1.0~1.5 min 内匀速加载完毕,并持载约 1.5 min,同时记录相应的应变值,再施加下级荷载.临近预估破坏荷载的 80%时,每级荷载增量适当减小.当液压试验机的表盘指针明显回摆,即认

墙体勾缝完成后,先用刷子清除松散的砂浆,然后用清水清洗,并保湿了 3 h,最后压入加固砂浆.勾缝加固的效果主要和勾缝深度和加固砂浆强度相关.根据历史建筑加固工程的实际情况,采用墙体双面勾缝,勾缝深度 b_2 分别选取 20、40 和 60 mm,勾缝加固砂浆分别选取为 M6、M8.试验共设计 5 组试件,每组 3 个,共计 15 个试件,如表 1 所示.其中 KY1 组为未勾缝加固的试件.

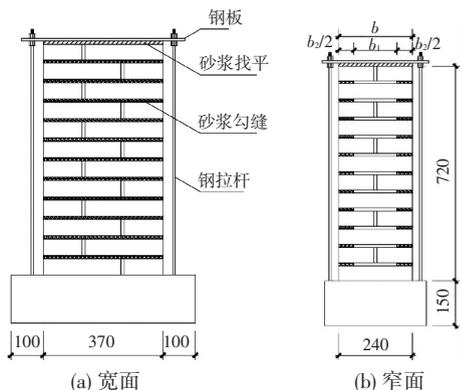


图 1 试件几何尺寸 (mm)

Fig.1 Size and characteristics of specimens (mm)

表 1 试件编号及加固情况

Tab.1 Numbers and reinforcement situation of specimens

组号	构件数量	勾缝加固情况	
		勾缝加固砂浆	勾缝深度/mm
KY1	3	—	—
KY2	3	M6	20
KY3	3	M6	40
KY4	3	M6	60
KY5	3	M8	40

1.2 材料力学性能

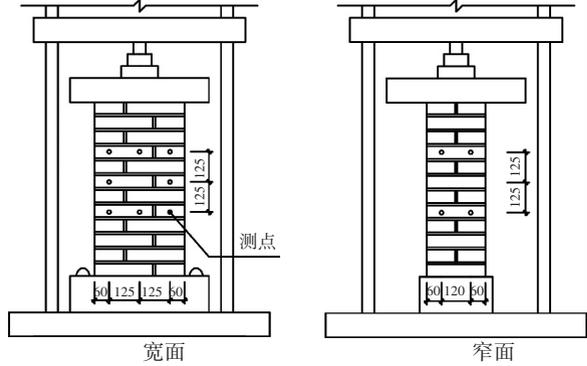
按照 GB/T 2542—2012《砌墙砖试验方法》^[12]的规定,实测砖的抗压强度平均值为 8.34 MPa.根据 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[13]的要求,将每种砂浆各制作了 2 组,共 6 个试块进行抗压试验,其抗压强度见表 2.

为试件破坏,其最大荷载读数即为该试件的破坏荷载值.

试验中,主要测量试件的开裂荷载、破坏荷载和竖向应变.为准确测量构件的竖向变形,在构件宽面和窄面都布置了测点,采用高精度位移传感器 (LVDT) 测量,通过动态应变采集系统完成,见图 2.试验按照 GB/T 50129—2011《砌体基本力学性能试验方法标准》的规定进行测量.



(a) 加载装置



(b) 测点布置

图 2 试验装置

Fig.2 Test facilities

2 试验结果与分析

2.1 试件的破坏特征

勾缝加固砌体构件轴心受压过程与未加固的普通烧结黏土砖类似,按照裂缝的出现、发展和构件的最终破坏,大致可以分为 3 个阶段:弹性受力阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。

第一阶段:从开始加载到第一条裂缝出现。对于未加固的 KY1 组试件,裂缝一般首先在宽面出现,开裂荷载约为破坏荷载的 75%;而对于加固后的 KY2~KY5 组试件,由于原砂浆和加固砂浆易造成砌体受压不均匀,裂缝多在窄面开始出现,且勾缝深度越深,窄面首先开裂的现象就越明显。KY2~5 组试件开裂荷载较 KY1 低,约为破坏荷载的 40%~60%。该阶段构件基本处于弹性受力阶段,在持荷阶

段,裂缝没有发展。

第二阶段:随着荷载的增加,裂缝不断发展。构件的宽面和窄面都陆续出现裂缝,且裂缝宽度不断扩展。当荷载达到破坏荷载的 80%~90%时,几条主裂缝逐渐连接起来,形成贯穿几匹砖的竖向裂缝。由于液压试验机两端钢板的约束作用,竖向裂缝多出现在构件中部,且形成裂缝中间大、两端小的现象。该阶段构件进入弹塑性阶段,在持荷阶段,裂缝继续变长加宽。

第三阶段:荷载继续增加,构件被破坏。裂缝迅速扩展,构件中部向外鼓出,被裂缝分割为多个小立柱而压溃或丧失稳定。勾缝加固 KY2~KY5 组构件的破坏荷载均大于未加固的 KY1 组构件,且破坏荷载随勾缝深度而提高。但由于 KY5 组试件与 KY3 组试件勾缝深度相同,加固砂浆的强度相差不大,故两试件破坏荷载基本相当。五组试件中部分典型破坏形态见图 3。



(a) KY1-1

(b) KY2-2

(c) KY3-3

(d) KY4-2

(e) KY5-3

图 3 五组试件典型破坏形态

Fig.3 Typical failure patterns of five specimens

2.2 抗压强度

各组构件的开裂荷载平均值 \bar{P}_{cr} 、破坏荷载平均值 \bar{P}_u 和计算得到的截面平均抗压强度 $f_{m,t}$ 见表 3。 $\bar{P}_{u,KYi}$ 为第 i 组构件的破坏荷载平均值。

由表 3 可见:1) 加固后试件的开裂荷载比未加固的试件有所降低,且加固程度越高,开裂荷载降低越多。主要是由于勾缝加固施工过程中,加固砂浆与砖之间不可避免存在一定的空隙,导致试验加载初

期只有原砂浆和砖块受力,加固砂浆存在应力滞后的现象,降低了其开裂荷载;2) 加固后试件的极限荷载均比未加固试件有所提高,且加固程度越高,破坏荷载提高越多。主要是由于加固砂浆强度较原砂浆高,且加固砂浆对原砂浆起到一定约束作用,提高了原砂浆的极限承载力。加载后期,加固砂浆、原砂浆与砖块共同承担荷载,且勾缝深度越深,加固砂浆、原砂浆和砖块协同性越好,其破坏荷载就提高越明显。

GB 5003—2011《砌体结构设计规范》采用公式(1)计算各类砌体的抗压强度平均值 f_m :

$$f_m = k_1 f_1^\alpha (1 + 0.07 f_2) k_2 \quad (1)$$

式中: f_1 为砌块抗压强度平均值; f_2 为砂浆抗压强度平均值; α 为砌块类别影响系数; k_1 为砌体类别影响系数; k_2 为砂浆强度对砌体抗压强度影响系数。

表 3 抗压试件的试验结果

Tab.3 Test results of compressive specimens

组号	$\bar{P}_{cr}/$ kN	$\bar{P}_u/$ kN	$\frac{\bar{P}_{cr}}{\bar{P}_u}$	$\frac{\bar{P}_{u,KYi}-\bar{P}_{u,KY1}}{\bar{P}_{u,KY1}} \Big/ \%$	$f_{m,i}/$ MPa
KY1	170.00	225.00	0.76	0	2.53
KY2	140.00	230.00	0.61	2.22	2.59
KY3	138.00	251.00	0.55	11.56	2.83
KY4	125.00	294.00	0.41	30.67	3.31
KY5	150.00	250.00	0.60	11.11	2.81

勾缝加固砌体墙的砂浆由原砂浆和加固砂浆两部分组成,加固砂浆对原砂浆有一定的约束作用,使原砂浆的抗压强度有一定提高;而由于加固砂浆与砖存在空隙,且在实际加固工程中,墙体很难完全卸载,加固砂浆有一定的应变滞后,造成其抗压强度不能充分发挥,其实际强度有一定折减。因此,本文提出勾缝加固砌体墙的砂浆强度 f_2 的计算公式为

$$f_2 = \varphi_1 f_{2,o} \frac{b_1}{b} + \varphi_2 f_{2,s} \frac{b_2}{b} \quad (2)$$

式中: $f_{2,o}$ 为原砂浆抗压强度平均值; $f_{2,s}$ 为加固砂浆抗压强度平均值; φ_1 为考虑约束作用后,原砂浆强度提高系数; φ_2 为考虑应变滞后,加固砂浆强度的折减系数,建议取 0.9; b_2 为墙体的勾缝深度; b 为墙体的厚度; b_1 为墙体的未勾缝深度, $b_1 = b - b_2$ 。

φ_1 和约束作用的强弱成正比,它随着加固程度的提高逐渐增大。根据抗压试验结果, φ_1 的计算公式为

$$\varphi_1 = \begin{cases} 1.2, & \text{当 } f_{2,o} \frac{b_1}{b} + f_{2,s} \frac{b_2}{b} \geq 4f_{2,o}; \\ 1.0, & \text{当 } f_{2,o} \frac{b_1}{b} + f_{2,s} \frac{b_2}{b} < 4f_{2,o}. \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1)~(3),可以求得勾缝加固砌体墙的抗压强度平均值 $f_{m,c}$,并与试验值 $f_{m,i}$ 比较,见表 4。如果采用的是水泥砂浆,式(1)还需考虑 0.9 的折减系数;当砂浆是复合砂浆时,则可以不必考虑折减。本文提出公式的计算值与试验值吻合较好,且计算值整体趋于保守,工程应用上偏于安全。

表 4 抗压强度试验值与计算值的比较

Tab.4 Comparison between test values and calculated values of compressive strength

组号	$f_{m,i}/$ MPa	$f_{m,c}/$ MPa	$\frac{f_{m,i}-f_{m,c}}{f_{m,i}} \Big/ \%$
KY1	2.53	2.38	5.80
KY2	2.59	2.57	0.74
KY3	2.83	2.73	3.40
KY4	3.31	2.91	12.02
KY5	2.81	2.73	2.71

2.3 应力-应变曲线

考虑到砌体试验数据的离散性,根据每组试验数据的平均值,分别绘制了 KY1~KY5 由试验得到的平均应力-应变曲线,见图 4。由于受试验设备的限制,本次试验未能测得应力-应变曲线的下降段。加载初期,应力-应变关系近似为线弹性的斜直线;构件开裂后,随着荷载的增加,应变比应力的增加快,应力-应变曲线进入弹塑性阶段。同一应变下,加固构件的应力均大于未加固构件,且勾缝越深、加固砂浆强度越大的构件,其应力越大。

国内外学者对砌体结构的本构关系做了大量的研究^[14-17],但由于砌体本身的特性,迄今为止没有统一的本构关系计算方法。经过与试验数据的比较,本文根据文献[14]提出的砌体本构关系来模拟勾缝加固砌体的应力-应变曲线,令:

$$\varepsilon = -\frac{n}{\xi} \ln \left(1 - \frac{\sigma}{nf_m} \right) \quad (4)$$

式中: σ 和 ε 为压应力和压应变; ξ 为弹性特征值,可由试验给出,与 $\sqrt{f_m}$ 正相关; n 为待定常数。

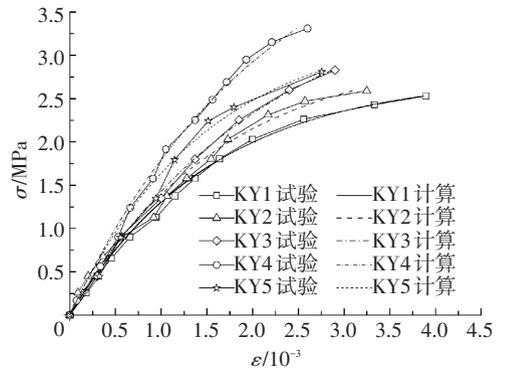


图 4 受压试件的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of compressive specimens

通过对试验数据进行拟合,可以得到 ξ 和 n 取值,见表 5。采用表 5 参数,由式(4)计算可得各组试件的应力-应变曲线,见图 4。 ξ 和 n 随勾缝深度的加大和加固砂浆强度的提高而逐渐增大。

表 5 各组试件 ξ 和 n 的取值

Tab.5 The values of ξ and n for each group of specimens

组号	ξ	n
KY1	$460 \times \sqrt{f_m}$	1.0
KY2	$450 \times \sqrt{f_m}$	1.1
KY3	$375 \times \sqrt{f_m}$	1.2
KY4	$360 \times \sqrt{f_m}$	1.3
KY5	$390 \times \sqrt{f_m}$	1.2

2.4 弹性模量

砌体结构的应力-应变曲线上任意点切线的正切,即该点应力增量与应变增量的比值,称为该点的切线弹性模量;该点与坐标原点连成的割线的正切,称为割线弹性模量。大量试验表明,弹性模量与砌体

抗压强度 f_m 成正比^[18]. GB 50003—2011《砌体结构设计规范》规定,取应力 σ 等于 $0.4f_m$ 时的割线弹性模量为该试件的弹性模量.根据式(4)可得出:

$$E_c = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_{0.4}}{\varepsilon_{0.4}} = \frac{0.4f_m}{\xi} = 0.78\xi f_m \quad (5)$$

根据表 5,未加固的构件 ξ 取 $460\sqrt{f_m}$,加固的构件 ξ 取平均值 $400\sqrt{f_m}$,则式(5)可写成:

$$E_c = \begin{cases} 370f_m\sqrt{f_m}, & \text{未加固构件;} \\ 320f_m\sqrt{f_m}, & \text{加固构件.} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可求得勾缝加固砌体墙的计算弹性模量 E_c ,并与试验得到的弹性模量 E_t 进行比较,见表 6. f_m 可由式(1)~(3)计算.式(6)的模型计算值与试验值吻合较好,且计算值比试验值偏小.

表 6 弹性模量试验值与计算值的比较

Tab.6 Comparison between test values and calculated values of elastic modulus

组号	$0.4f_m/$ MPa	$\varepsilon_{0.4}/$ 10^{-3}	$E_t/$ MPa	$E_c/$ MPa	$\left \frac{E_t - E_c}{E_t} \right / \%$
KY1	1.01	0.698	1 447	1 361	5.9
KY2	1.02	0.701	1 455	1 360	6.5
KY3	1.13	0.654	1 728	1 491	13.7
KY4	1.31	0.675	1 940	1 639	15.4
KY5	1.12	0.702	1 595	1 491	6.5

3 结 论

1) 勾缝加固后的砌体构件破坏荷载比未加固的砌体构件均有提高,提高幅度与勾缝深度、加固砂浆强度有关,最大的达到 30%,而破坏形态和过程类似.

2) 基于砌体结构设计规范公式,考虑勾缝深度和加固砂浆强度影响,提出了勾缝加固砌体抗压强度的计算公式,其计算值与试验值吻合较好.

3) 根据试验结果,通过修正文献[14]公式中的系数,提出了勾缝加固砌体的应力-应变曲线计算公式,其计算曲线与试验曲线吻合较好.但 ξ 和 n 的取值将需要更多试验来进一步校准.

4) 勾缝加固后的砌体构件比未加固的砌体构件的弹性模量都有不同程度的提高,但开裂荷载均有所降低,并给出了勾缝加固后的弹性模量计算公式,其计算值与试验值吻合较好.

参考文献

[1] 潘毅,王超,季晨龙,等.汶川地震中砖石结构古建筑的震害调查与分析[J].四川建筑科学研究.2012,38(6):156-159.
PAN Yi, WANG Chao, JI Chenlong, et al. Seismic damage investigation and analysis of chinese ancient masonry buildings in Wenchuan earthquake [J]. Sichuan Building Science. 2012,38(6):156-159.

[2] 王亭,姜忻良,李茂鋈.历史风貌建筑砖砌体加固试验及模拟计算分析[J].工程力学,2012,29(增刊1):92-96.
WANG Ting, JIANG Xinliang, LI Maoyun. Reinforcement experiment and simulation analysis on brick masonry historical buildings[J]. Engineering Mechanics, 2012,29(S1):92-96.

[3] 许清风,江欢成,朱雷,等.钢筋网水泥砂浆加固旧砖墙的试验研究[J].土木工程学报,2009,42(4):77-84.
XU Qingfeng, JIANG Huancheng, ZHU Lei, et al. Experiment study of old brick masonry wall strengthened with steel-meshed cement mortar [J]. Engineering Mechanics, 2009, 42(4):77-84.

[4] 杜东升,苗启松,梁羽,等.老旧砌体房屋加固及顶部加层隔震的理论分析及振动台试验[J].土木工程学报,2013,46(8):45-53.
DU Dongsheng, MIAO Qisong, LIANG Yu, et al. Theoretical analysis and shaking table tests of old masonry structure reinforced by external frames with added stories on the top using seismic isolation technology [J]. Engineering Mechanics, 2013,46(8):45-53.

[5] 郑东润.某历史建筑砖墙加固后的力学性能分析[D].天津:天津大学建筑工程学院,2013.
DENG Dongrun. Mechanical analysis on one strengthened historical masonry wall [D]. Tianjin: School of civil engineering of Tianjin University, 2013.

[6] 魏智辉,潘毅,邱洪兴,等.安庆市某基督教堂加固改造设计方案[J].土木建筑与环境工程,2011,33(增刊1):209-211.
WEI Zhihui, PAN Yi, QIU Hongxing, et al. Reinforcement and reconstruction design of a christ church in Anqing city [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(S1):209-211.

[7] ANTONIO B, PAOLO C, GIULIO C, et al. Strengthening of brick masonry arches with externally bonded steel reinforced composites [J]. Journal of Composites for Construction, 2009,13(6):468-475.

[8] VINCENZO G, GIANLUCA L, GIANCARLO M, et al. Simulations of FRP reinforcement in masonry panels and application to a historic facade [J]. Engineering Structures, 2014, 75(15):604-618.

[9] 叶军,张志国,杨志福.砖砌体强度加固的案例[J].建筑施工技术,2003(2):20-23.
YE Jun, ZHANG Zhiguo, YANG Zhongfu. Case of intensity strengthen for brick sitting [J]. Building Construction Technology, 2003(2):20-23.

[10] 王永维,罗苓隆,吴体,等.优秀历史建筑保护的基本原则[J].四川建筑科学研究.2010,36(3):1-4.
WANG Yongwei, LUO Qinlong, WU Ti, et al. The basic principles of the protection of excellent historical buildings [J]. Sichuan Building Science. 2010,36(3):1-4.

[11] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T 50129—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Standard for test method of basic mechanics properties of masonry: GB/T 50129—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[12] 砌墙砖试验方法:GB/T 2542—2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
Test methods for wall bricks: GB/T 2542—2012 [S]. Beijing: China Standards Press, 2013

[13] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
Standard for test method of basic properties of construction mortar: JGJ/T 70—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[14] 施楚贤.砌体结构[M].第2版.北京:中国建筑工业出版社,2008:18-20.
SHI Chuxian. Masonry structures [M] 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008:18-20.

[15] POWELL B, HODGKINSON H R. Determination of stress-strain relationship of brickwork [M]. London: British Ceramic Research Association in Stoke on Trent, 1976:136-149.

[16] 王庆霖,白国良,王宗哲.砌体结构[M].北京:中国建筑工业出版社,1995:35-36.
WANG Qinglin, BAI Guoliang, WANG Zongzhe. Masonry structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1995:35-36.

[17] 杨伟军,施楚贤.砌体受压本构关系研究成果的述评[J].四川建筑科学研究,1999(3):52-55.
YANG Weijun, SHI Chuxian. Comment on research achievements of constitutive relationship of compressive brickwork [J]. Sichuan Building Science. 1999,25(3):52-55.

[18] 施楚贤.砌体的受压弹性模量[M].长沙:湖南大学出版社,1989:116-122.
SHI Chuxian. Compressive elastic modulus of masonry [M]. Changsha: Hunan University Press, 1989:116-122. (编辑 赵丽莹)