

梁斌,张海,姚新强,等.传统农居砌体抗剪性能试验研究[J].地震工程学报,2020,42(4):856-861.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.856

LIANG Bin, ZHANG Hai, YAO Xinqiang, et al. Experimental Study on the Shear Behavior of Masonry Structures of Traditional Rural Buildings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 856-861. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.856

传统农居砌体抗剪性能试验研究

梁斌¹, 张海^{1,2}, 姚新强³, 高武平³, 陈贺¹

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市土木建筑结构防护与
加固重点实验室, 天津 300384; 3. 天津市地震局, 天津 300201)

摘要: 砖砌体结构是农村传统农居建筑的主要结构形式,如何精确评价其抗震能力具有重要的研究意义。目前既有传统农居中,20世纪80、90年代砖砌体结构仍是其重要的组成部分。为研究既有传统砖砌体结构的抗剪性能,首先对水泥砂浆、白灰砂浆、炉渣砂浆、黄泥砂浆4种典型砂浆开展抗压强度试验;然后对4种典型砂浆砌筑的砌体进行沿通缝抗剪强度试验,通过与传统老旧红砖砌体抗剪强度的平均值和公式值进行对比,对砌体抗剪强度计算公式进行修正后得到修正公式;最后对比修正值、标准值和设计值,对传统农居进行准确的砖砌体抗剪强度评估。本研究主要为传统农居砖砌体结构的抗震性能评估、抗震加固以及抗震设计提供技术支持与科学依据。

关键词: 抗剪性能; 传统农居; 砖砌体; 修正公式; 通缝截面抗剪试验

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-0856-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.856

Experimental Study on the Shear Behavior of Masonry Structures of Traditional Rural Buildings

LIANG Bin¹, ZHANG Hai^{1,2}, YAO Xinqiang³, GAO Wuping³, CHEN He¹

(1. College of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin 300384, China;

3. Earthquake Agency of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China)

Abstract: Brick masonry structure is the main structural form of traditional rural buildings. Hence, the accurate evaluation of its seismic capacity is of important research significance. In this study, a compressive strength test was first carried out on four typical mortars (cement, lime, slag, and mud) to examine the shear performance of brick masonry structures. Second, a shear strength test along mortar joints was carried out on a brick masonry structure built with the four mortars. A modified formula of the masonry shear strength was obtained by comparing the aver-

收稿日期: 2019-09-05

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYBJC21700); 天津市科技支撑计划重点项目(17YFZCSF01140); 国家自然科学基金(41772123)

第一作者简介: 梁斌(1989-),男,河北沧州人,硕士,主要研究方向为防灾减灾工程及防护工程。E-mail:18842629437@163.com。

通信作者: 张海(1977-),男,河北邢台人,博士,教授,主要从事工程波动理论、城市综合防灾减灾等研究。

E-mail: zhanghai@tju.edu.cn.

age and formula values of the shear strength of traditional old red brick masonry structures. Finally, an accurate shear strength evaluation of brick masonry structures was carried out by comparing modified, standard, and design values. In this research, technical support and scientific basis for seismic performance evaluation, seismic strengthening, and seismic design of traditional rural brick masonry structures are mainly provided.

Keywords: shear behavior; traditional rural building; brick masonry; modified formula; test of shear strength along mortar joints

0 引言

通过对农村民居建筑抗震性能调研发现,2010 年后的农村新建房屋不断减少,大部分既有房屋为 20 世纪 90 年代与 21 世纪 00 年代建造,同时存在相当一部分 20 世纪 70、80 年代的房屋^[1-2]。传统农村民居抗震能力要远低于城市,大量的抗震能力研究和实际震害已经证明了这一点^[3]。这部分既有农居,尤其是传统农居,其材料老化,腐蚀严重,几乎没有抗震措施,导致其抗震能力严重下降^[4]。为实现到 2020 年,我国建(构)筑物基本具备综合抗御 6.0 级左右(相当于各地区地震基本烈度)地震的能力,大中城市和经济发达地区的防震减灾能力达到中等发达国家水平的整体目标^[5],对既有农居建筑进行抗震性能评价和研究迫在眉睫。

抗剪强度是评价农居砌体结构抗震性能的基本强度指标,砌体抗剪能力直接反映了结构的可靠度^[6-7],因此对传统民居砌体结构开展抗剪性能试验具有重要意义。由于老旧红砖与砂浆的老化腐蚀,传统农居砌体结构的抗压强度、抗剪强度严重下降,采用现行国家规范规程对其进行计算并不能够完全真实地反映其抗剪强度。基于此,本文通过老旧砌体沿通缝抗剪强度试验得出每种砌体的抗剪强度值和破坏特征,并根据不同砂浆的抗剪强度试验数据,采用最小二乘法对其进行修正;对比老旧红砖砌体抗剪强度实验值、标准值、设计值以及修正值,为既有传

统农居的抗震性能评估提供技术支持与科学依据。

1 砂浆抗压强度试验

我国传统农村砌体房屋常用砂浆包括水泥砂浆、白灰砂浆、泥浆、炉渣砂浆等^[8]。根据实际调查发现,这 4 种砂浆在农村具有很好的代表性。根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70-2009)^[9]相关规定和农居建造施工实际情况,对水泥砂浆、白灰砂浆、炉渣砂浆、泥浆 4 种标准砂浆试块进行抗压强度试验。试验采用标准立方体试块,尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。表 1 列出了 4 种标准砂浆试块的基本信息,表 2 列出了每种试块的抗压强度最大值以及根据抗压强度平均值给出的抗压强度等级。由表 2 可知,本文选择的 4 种农居常用砂浆中 1∶3 水泥砂浆强度最高,为 M25,1∶5 炉渣砂浆的强度最低,为 M0.2。

表 1 标准试块参数

Table 1 Parameters of standard test blocks			
标准试块 类型	配比	材料	数量 (块)
水泥砂浆	1∶3	普通硅酸盐水泥、中砂	3
	1∶5		3
白灰砂浆	1∶3	白灰、中砂	3
	1∶5		3
炉渣砂浆	1∶3	炉渣、中砂	3
	1∶5		3
泥浆	泥浆	粉质黏土	3

表 2 标准砂浆试块抗压强度测定

Table 2 Compressive strength measurements of standard mortar test blocks						
试块类型	配比	试块一	试块二	试块三	平均值	抗压强度等级
水泥砂浆	1∶3	25.79	26.67	24.41	25.26	M25
	1∶5	8.38	7.88	8.21	8.16	M8
白灰砂浆	1∶3	0.59	0.56	0.51	0.55	M0.5
	1∶5	0.25	0.23	0.26	0.25	M0.25
炉渣砂浆	1∶3	0.27	0.34	0.29	0.3	M0.3
	1∶5	0.2	0.2	0.24	0.21	M0.2
泥浆	泥浆	0.24	0.33	0.36	0.31	M0.3

2 砌体沿通缝抗剪试验

为研究不同砂浆老旧砌体的抗剪强度,采用 20 世纪 80 年代老旧红砖作为砌筑试块,水泥砂浆、白灰砂浆、炉渣砂浆、黄泥砂浆为砌筑砂浆,采用砂浆为 1∶3、

1∶5 的配合比砌筑了尺寸为 365 mm×240 mm×179 mm 的抗剪试件(图 1)。共制作了 7 组试件,每组试件 9 个,共 63 个。编号原则为:水泥砂浆(SN-1:5、SN-1:3),白灰砂浆(BH-1:5、BH-1:3),炉渣砂浆(LZ-1:5、LZ-1:3),黄泥砂浆(HN),具体列于表 3。

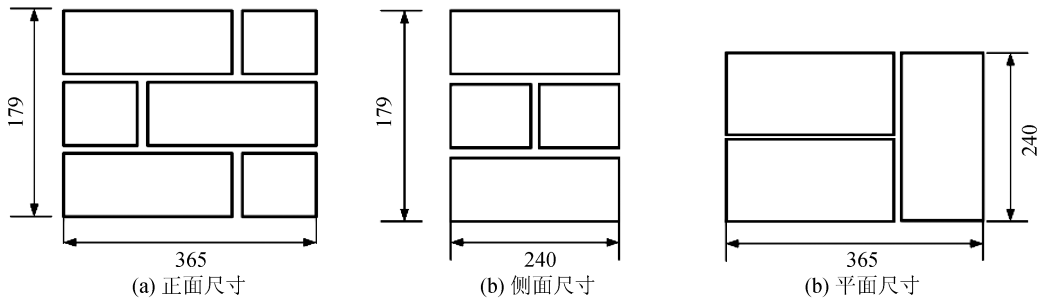


图 1 试件尺寸(单位:mm)
Fig.1 Specimen size (Unit:mm)

表 3 砌体沿通缝抗剪强度试验方案

Table 3	Test scheme of shear strength of masonry along horizontal bed joints			
	砂浆种类			
配合比	水泥砂浆	白灰砂浆	炉渣砂浆	黄泥砂浆
1∶5	9	9	9	9
1∶3	9	9	9	9

试验加载装置如图 2 所示。试验在2 000 kN压力试验机上采用 500 kN 液压千斤顶进行,试验机下的压板上撒满薄沙并放置 2 cm 厚的钢板,将抗剪试件立放在压板上,试件的中心线应与千斤顶轴线重合。试验时,在试件顶面中间块砖承压处放置 2 cm 厚的钢板,使上部传来的荷载均匀分布在试件加载面上。

采用匀速连续加荷方法以避免冲击,加荷速度按试件在 1~3 min 破坏进行控制。当有一个受剪面被剪坏时即认为试件破坏,并记录破坏荷载值和



图 2 加载示意图
Fig.2 Loading diagram

试件破坏特征。

3 试验结果及分析

宏观破坏特征分为双剪破坏、单剪破坏和砌块破坏,如图 3 所示。

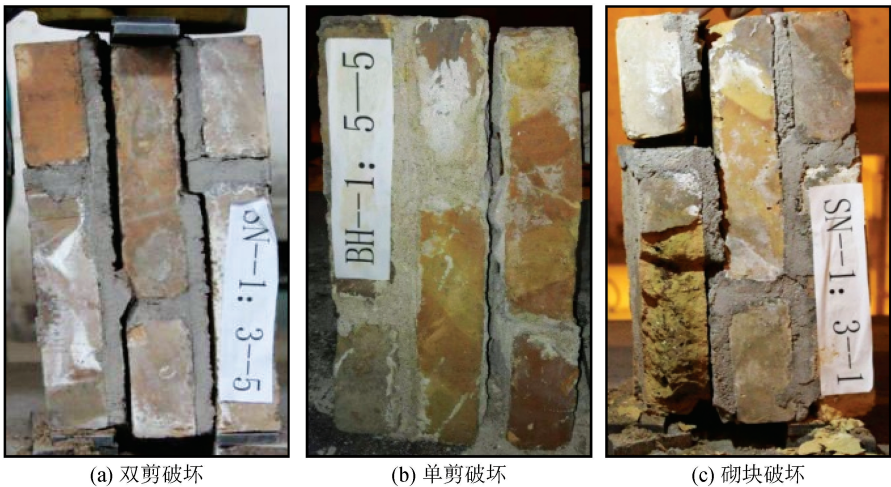


图 3 砌体破坏示意图
Fig.3 Schematic diagram of masonry failure

根据《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T50129-2011)^[10]规定,单个试件沿通缝截面的抗剪强度 $f_{v,i}$ 按下式计算,其结果取值应精确至 0.01 N/mm²:

$$f_{v,i}=\frac{N_v}{2A}$$

(1)

式中: $f_{v,i}$ 为试件沿通缝截面的抗剪强度(N/mm²); N_v 为试件的抗剪破坏荷载值(N); A 为试件的一个受剪面的面积(mm²)。

表 4 4 种不同材料砂浆砌体抗剪强度测定值与公式值

Table 4 Measured values and formula values of shear strength of mortar masonry with four different materials

试件编号	平均值/MPa	公式值/MPa	双剪破坏/%	单剪破坏/%	红砖破坏/%
SN-1:5	0.41	0.367	0	66.7	33.3
SN-1:3	0.52	0.633	0	55.5	45.5
BH-1:5	0.016	0.063	33.3	66.7	0
BH-1:3	0.026	0.093	55.5	45.5	0
LZ-1:5	0.018	0.057	45.5	55.5	0
LZ-1:3	0.019	0.068	55.5	45.5	0
HN	0.014	0.07	77.8	22.2	0

由表 4 可以看出试件破坏特征,其中仅采用水泥砂浆的砌体产生了砖破坏的现象。水泥砂浆 1:3 砌体的红砖破坏比例为 45.5%,水泥砂浆 1:5 砌体的砌块破坏比例为 33.3%,然而前者的平均抗剪强度为 0.52 MPa,后者的抗剪强度平均值为 0.41 MPa,前者较后者仅提高了 26.8%。由表 2 可知,1:3 水泥砂浆与 1:5 水泥砂浆的抗压强度等级分别是 M25 与 M8,均高于红砖的抗压强度等级 M7.5。由砌体沿通缝抗剪强度试验可以看出,由于砌体的砂浆抗压强度等级高于红砖砌块,红砖砌体的薄弱点由砂浆勾缝处转移到红砖砌块处,因此砌体试件在试验过程中产生红砖破裂的现象。因此随着砂浆抗压强度的增加,砌体的抗剪强度增加,但当砂浆抗压强度高于砌块时,随着抗剪强度薄弱点的转移,再次增加砂浆强度对砌体抗剪强度的增加不明显。

由表 4 可见,4 种不同材料砂浆的竖向灰缝抗剪强度中最强的是水泥砂浆,分别为 0.41 MPa 与 0.52 MPa,约是其他三种砂浆砌体的 29.3~37.14 倍;白灰砂浆,炉渣砂浆、黄泥砂浆的抗剪强度依次减弱,但相差不多;竖向灰缝砂浆抗剪强度最弱的是黄泥砂浆,为 0.014 MPa。水泥砂浆的砌体抗剪强度平均值与公式值基本吻合。白灰砂浆 1:5、白灰砂浆 1:3、炉渣砂浆 1:5、炉渣砂浆 1:3、黄泥砂浆的砌体抗剪强度平均值明显低于公式值 69%~80%。

由图 4、图 5 可知,4 种不同配比砂浆砌体的抗剪强度变化趋势与其抗压强度的变化趋势基本吻合,即随着砂浆抗压强度的减小,砌体的沿通缝抗剪强度也同样有变小的趋势。由图 5 可知,砌体抗剪

根据《砌体结构设计规范》(GB50003-2011)^[9],砌体沿通缝截面抗剪强度应按下式计算:

$$f_{v,m}=k_5\sqrt{f_2}$$

(2)

式中: $f_{v,m}$ 为砌体抗剪强度平均值; k_5 为砌块类别相关参数,取 0.125; f_2 为砂浆抗压强度平均值。

根据式(1)分别计算水泥砂浆、白灰砂浆、炉渣砂浆、黄泥砂浆 4 种砂浆烧结普通砖砌体沿通缝截面的抗剪强度试验值,根据式(2)计算其公式值(表 4)。

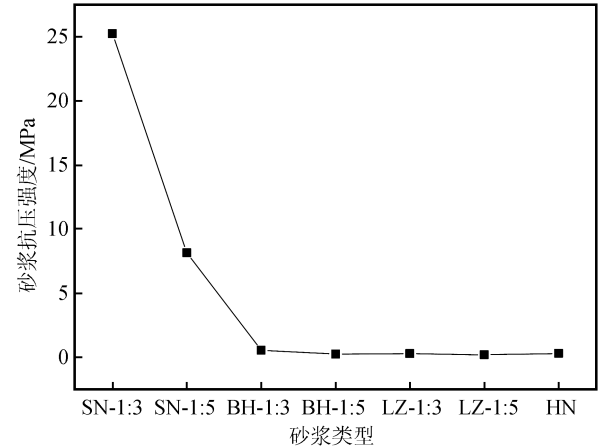


图 4 砂浆抗压强度趋势图

Fig.4 Trend of compressive strength of mortar

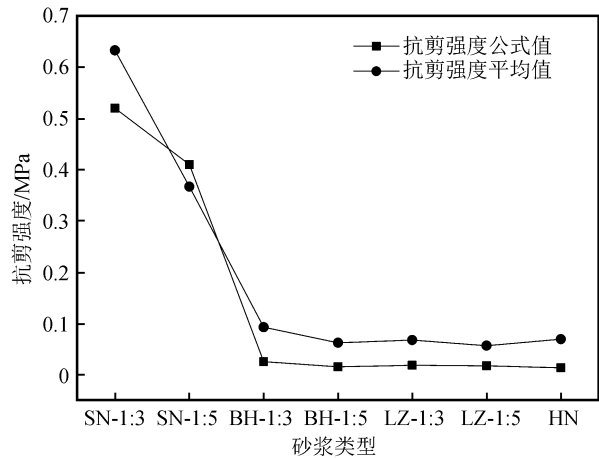


图 5 砌体抗剪强度公式值与平均值比较图

Fig.5 Comparison between formula and average values of shear strength of masonry

强度平均值与公式值之间存在较大差异,仅采用式(2)的计算结果不能准确表示当前建筑的抗剪强度,因此需对式(2)进行修正。

4 抗剪强度公式修正

根据表 4 可知,水泥砂浆配合比 1 : 5 抗剪强度试验值比按式(2)计算出的公式值高 12%,虽然不存在抗震性能的安全隐患,但是相对成本也增加了;水泥砂浆配合比 1 : 3 抗剪强度试验平均值比公式值低 21.7%,因此采用式(2)公式值存在一定的安全隐患。由式(2)可以看出,砌体抗剪强度主要与块材种类影响系数 k_5 有关,因此需对公式中的系数 k_5 进行修正。对水泥砂浆两种配合比分别修正后的公式如下:

$$f_{v,m1} = 0.143 \sqrt{f_2} \tag{3}$$

$$f_{v,m2} = 0.103 \sqrt{f_2} \tag{4}$$

根据表 4 可知,白灰砂浆配合比 1 : 5 砌体抗剪强度公式计算值是抗压强度平均值的 3.15 倍,白灰砂浆配合比 1 : 3 砌体抗剪强度公式计算值是抗压强度平均值的 3.1 倍,两种配合比抗剪强度平均值与规范公式值相比有较大差距,在评估过程中存在抗震性能评估不准确的安全隐患,因此分别对白灰砂浆两种配合比按式(2)对系数 k_5 进行修正,结果如下:

$$f_{v,m3} = 0.031 \sqrt{f_2} \tag{5}$$

$$f_{v,m4} = 0.035 \sqrt{f_2} \tag{6}$$

根据表 4 可知,炉渣砂浆配合比 1 : 5 砌体抗剪强度试验值比公式计算值低 3.17 倍,炉渣砂浆 1 : 3 砌体抗剪强度试验值比公式值低 3.58 倍,两种配合比抗剪强度平均值与规范公式值相比有较大差距,在评估过程中存在抗震性能评估不准确的安全隐患,因此分别对炉渣砂浆两种配合比按式(2)对系数 k_5 进行修正:

$$f_{v,m5} = 0.038 \sqrt{f_2} \tag{7}$$

$$f_{v,m6} = 0.034 \sqrt{f_2} \tag{8}$$

根据表 4 可知,黄泥砂浆砌体抗剪强度试验值比公式计算值低约 5 倍,很不安全,则按照式(2)对系数 k_5 进行修正:

$$f_{v,m7} = 0.025 \sqrt{f_2} \tag{9}$$

根据文献[11],砌体抗剪强度标准值如下:

$$f_{v,k} = f_{v,m} (1 - 1.645\delta_f) \tag{10}$$

式中: $f_{v,k}$ 为砌体抗剪强度标准值; $f_{v,m}$ 为砌体抗剪强度平均值; δ_f 为砌体抗剪强度变异系数。

砌体抗剪强度设计值 f_v 为:

$$f_v = \frac{f_{v,k}}{\gamma_f} \tag{11}$$

式中: γ_f 为砌体结构的材料性能分项系数,根据本文试验质量可划分为 B 级,本文取 1.6。

根据试验测得不同砂浆不同配合比砂浆砌体的抗剪强度变异系数,将其代入式(10)~(11)求出相应的砌体抗剪强度标准值和设计值,并列于表 5。

表 5 抗剪强度对照
Table 5 Shear strength comparison

砌体名称	SN-1: 5	SN-1: 3	BH-1: 5	BH-1: 3	LZ-1: 5	LZ-1: 3	HN
公式值	0.367	0.663	0.063	0.093	0.057	0.068	0.07
平均值	0.41	0.52	0.016	0.026	0.018	0.019	0.014
修正值	0.409	0.520	0.017	0.027	0.017	0.019	0.014
标准值	0.328	0.375	0.013	0.023	0.012	0.014	0.008
设计值	0.205	0.234	0.008	0.014	0.008	0.009	0.005

由表 5 可知,修正后 4 种不同砂浆沿通缝抗剪性能的修正值与试验平均值基本吻合,修正后的公式可以准确评价传统砖砌体结构的沿通缝抗剪强度;同时,水泥砂浆砌体的抗剪强度是白灰砂浆的 2~2.6 倍,白灰砂浆、炉渣砂浆、泥浆的砌体抗剪强度在 0.025~0.15 MPa 间,相对现有规范要求较低。由图 6 可知,传统砌体的修正值相对于标准值以及设计值较大,既有传统砖砌体农居建筑能够满足设计要求。综合对照传统砖砌体沿通缝抗剪强度的公式值、平均值、修正值、标准值和设计值可知(图

7),通过规范公式所得的公式值对既有房屋的评价过高,存在部分房屋抗震性能估计过高的安全隐患。

5 结论及建议

(1) 从 4 种砂浆传统旧砖的砌体沿通缝抗剪强度试验可以看出,两种水泥砂浆的抗剪强度最高分别为 0.41 MPa 和 0.52 MPa,是白灰砂浆、炉渣砂浆、泥浆砌体的 2~3 倍。通过提高砂浆的抗压强度可以提高传统砖砌体结构的抗震性能。

(2) 4 种砂浆的砌体抗剪性能修正系数与原规

范相比较均有所降低,原规范修正系数为 0.15,水泥砂浆 1 : 3 与 1 : 5 修正系数分别是 0.143、0.103,白灰砂浆 1 : 3 与 1 : 5 分别为 0.031、0.035,炉渣砂浆 1 : 3 与 1 : 5 分别为 0.038、0.034,黄泥砂浆为 0.025。黄泥砂浆砌体结构抗剪性能最低,修正系数最小。

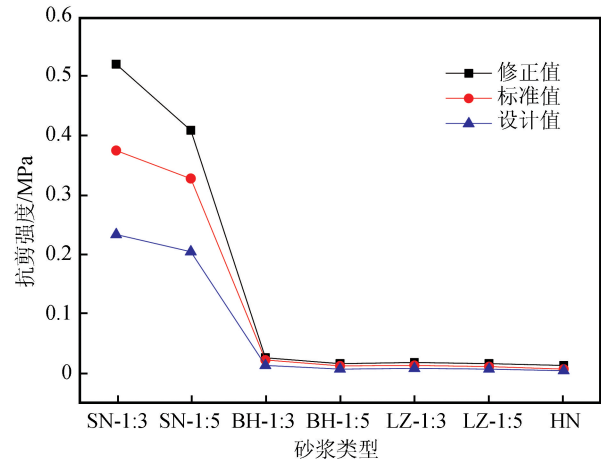


图 6 修正值、标准值、设计值对照图

Fig.6 Comparison of correction value, standard value, and design value

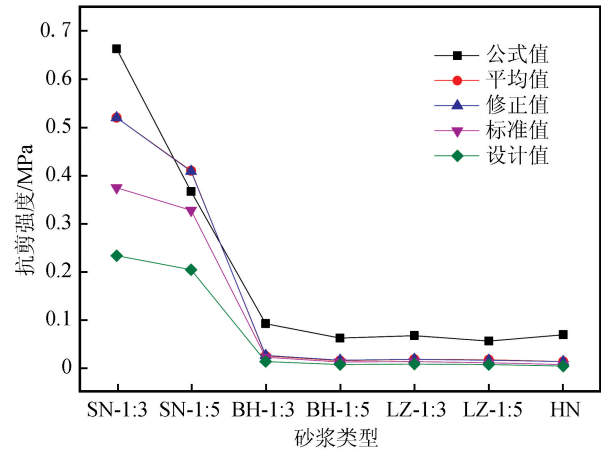


图 7 综合对照图

Fig.7 Comprehensive comparison chart

(3) 传统农居砖砌体结构的抗剪性能与砂浆强度有关,随着砂浆抗压强度的增加砖砌体的沿通缝抗剪强度不断增加。当砂浆强度高于砌块强度时,再次增加砂浆抗压强度,砖砌体结构的抗剪薄弱点转移到砌块,砖砌体的抗剪强度增加不是很明显。

(4) 砌体沿通缝抗剪试验的测定值是公式值的 69%~80%。根据规范值评估传统农居的抗剪强度相对较大,存在一定的安全隐患。通过对规范公式

进行修正后的修正值能够准确评价既有传统建筑的抗剪强度,为传统农居建筑抗剪强度评估提供科学依据与技术支持。

参考文献(References)

[1] 姚新强,孙柏涛,陈宇坤,等.天津农居抗震性能调查与分析[J].建筑结构,2019,49(16):108-111.
YAO Xinqiang,SUN Baitao,CHEN Yukun,et al.Investigation and Analysis on Seismic Performance of Rural Residences in Tianjin[J].Building Structure,2019,49(16):108-111.

[2] 姚新强,孙柏涛,刘芳,等.天津农居抗震能力分布研究[J].自然灾害学报,2017,26(6):32-38.
YAO Xinqiang,SUN Baitao,LIU Fang,et al.Study on Distribution of Seismic Capacity of Tianjin Rural Residence[J].Journal of Natural Disasters,2017,26(6):32-38.

[3] 曹颖,姚新强,李龙飞,等.天津近代典型砖木结构建筑基于安全鉴定的抗震性能评价[J].地震工程学报,2019,41(4):880-886.
CAO Ying,YAO Xinqiang,LI Longfei,et al.Seismic Performance Evaluation of Typical Modern Brick-Wood Structures in Tianjin Based on Safety Assessment[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(4):880-886.

[4] 姚新强.天津农居易损性与抗震能力分布研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2016.
YAO Xinqiang.Analysis of Tianjin Rural Residential Vulnerability and Seismic Capacity Distribution[D].Harbin:Institute of Engineering Mechanics,China Earthquake Administration,2016.

[5] 国家地震局.国家防震减灾规划(2006—2020 年),(2007-10-31) [2012-12-9]. http://news.xinhuanet.com/politics/2007-10/31/content_6982785.htm.
National Seismological Bureau.National Plan for Earthquake Preparedness and Disaster Reduction (2006—2020) (2007-10-31) [2012-12-9]. http://news.xinhuanet.com/politics/2007-10/31/content_6982785.htm.

[6] DA PORTO F,GUIDI G,GARBIN E,et al.In-plane Behavior of Clay Masonry Walls:Experimental Testing and Finite-Element Modeling[J].Journal of Structural Engineering,2010,136(11):1379-1392.

[7] TOMAŽEVIČ M.Shear Resistance of Masonry Walls and Eurocode 6:Shear Versus Tensile Strength of Masonry[J].Materials and Structures,2009,42(7):889-907.

[8] 姚新强,孙柏涛,王明振,等.我国农村典型砖砌体墙片拟静力试验研究[J].工程力学,2017,34(6):198-209.
YAO Xinqiang,SUN Baitao,WANG Mingzhen,et al.Study on the Pseudo-static Tests of Typical Brick Masonry Walls in Rural China[J].Engineering Mechanics,2017,34(6):198-209.

[9] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T70-2009[S].北京:中国建筑工业出版社,1991.

Waveform Inversion[J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(4):1186-1197.

[13] 冯建刚,蒋长胜,韩立波,等.甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J].地震学报,2012,34(5):646-658,727.
FENG Jiangang,JIANG Changsheng,HAN Libo,et al.Analysis on the Monitoring Capability of Seismic Networks and Completeness of Earthquake Catalogues in Gansu Region[J].Acta Seismologica Sinica,2012,34(5):646-658,727.

[14] WALDHAUSER F.A Double-Difference Earthquake Location Algorithm:Method and Application to the Northern Hayward Fault,California[J].Bulletin of the Seismological Society of America,2000,90(6):1353-1368.

[15] 王恩惠,张广伟,谢卓娟,等.盐城地区小震精定位及构造意义[J].地球物理学进展,2020,35(2):461-466.
WANG Enhui,ZHANG Guangwei,XIE Zhuojuan,et al.Precise Relocation of Small Ear Thquakes in the Yancheng Area and Asso Ciated Tectonic Implications[J].Progress in Geophysics,2020,35(2):461-466.



(上接第 861 页)

Standard for Test Method of Performance on Building Mortar:JGJ/T70-2009[S].Beijing:China Architecture & Building Press,1991.

[10] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T50129-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Standard for Test Method of Basic Mechanics Properties of Masonry:GB/T50129-2011[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2011.

[11] 砌体结构设计规范:GB50003-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Code for Design of Masonry Structures:GB50003-2011[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2012.