

自嵌固生土砖砌体剪压复合受力试验研究

王天涯,王毅红[†],吴琴容
(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:为了研究自嵌固生土砖砌体嵌固部位在剪压复合作用下的承载能力,在考虑其承受不同上部竖向荷载的情况下对 18 个自嵌固生土砖砌体试件进行了剪压复合受力试验,探究其受力性能、破坏机理及剪压相关性。试验表明砖体间咬合嵌固可起到销栓作用,表现出较好的抗剪能力。分析总结了砌体剪切、剪压和斜压三类破坏形态产生的主因,提出了自嵌固生土砖砌体剪压复合受力下砌体的抗剪强度计算公式,并与传统主拉应力破坏理论中砌体抗剪强度计算方法进行了对比,发现主拉应力破坏理论计算出的砌体抗剪承载力安全可靠,但较为保守。研究可为自嵌固生土砖砌体力学性能的进一步研究及设计应用提供试验成果及理论依据。

关键词:自嵌固生土砖砌体;抗剪强度;破坏机理;剪压相关性;试验研究
中图分类号:TU361;TU362 **文献标志码:**A

Experimental Study of Interlocking Compressed Earth Block Masonry under Shear-compression Composite Action

WANG Tianya, WANG Yihong[†], WU Qinrong
(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to study the bearing capacity of the occlusal part of interlocking compressed earth block (ICEB) masonry under shear-compression composite action, shear-compression composite test was performed on 18 ICEB masonry specimens under various vertical loads. The mechanical properties, failure mechanism and correlation between compression and shear stress were investigated. The results show that the interlocking of the brick can play a pinning effect, showing a better shear capacity. The main causes of the three types of failure mode of masonry were analyzed and summarized, and shear-compression strength formula was proposed compared with the formula by maximum tensile theory. It is found that the shear strength of the masonry calculated by the maximum tensile stress failure theory is safe and reliable, but conservative. The results of the study can provide the experimental results and theoretical basis for further research and design, as well as the application of the masonry mechanical properties.

Key words: interlocking compressed earth block masonry; shear strength; failure mechanism; correlation of shear-compression; experimental study

* 收稿日期:2018-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478043), National Natural Science Foundation of China(51478043); 陕西省重点研发计划资助项目(2017SF-376), Shaanxi Provincial Key Research and Development Projects (2017SF-376)

作者简介:王天涯(1989—),女,河北石家庄人,长安大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: wangyh@chd.edu.cn

生土结构多指由未经烧焙的原生土建造而成的传统建筑结构形式,主要分为土坯结构和夯土结构两种,具有节能环保、保温隔热等优点,目前多存在于我国西南、西北等村镇地区^[1-2]。自嵌固生土砖是一种以细粒生土为主要原料并可添加少量掺和料,由专用设备一次压制成型的新型生土砖,20世纪90年代末期已开始于亚非等地区使用,至今未传入我国。其可依靠自身外形特征无需砂浆黏结仅仅通过上下砖块间相互嵌固咬合而达到砌筑效果,组成的建筑结构保留了传统生土建筑的优点更兼具施工便捷、工期短、可预制装配化等特点,国外学者已对自嵌固生土砖及其组成的结构进行了相应的研究,Sturm等人^[3]通过试验对自嵌固生土砖及其组成砌体的基本力学特性进行了分析,得到了自嵌固生土砖的抗压、抗折强度以及自嵌固生土砖砌体的破坏特征和受力性能。Sitton等人^[4]制作了异型压制的自嵌固生土砖,在砖的上下两面放置钢板,使其与砖进行良好的嵌固,对其抗压性能进行了研究。Irwani等人^[5]和Riza等人^[6]分析了含水率对自嵌固生土砖耐久性能的影响,Bernadi等人^[7]和Othman等人^[8]进一步研究了在土料中添加细菌对生土砖吸水性的改善效果,研究表明降低生土砖的吸水能力可以提高生土砖的耐久性。在我国,自嵌固砌块目前主要应用于混凝土方面^[9-12],在生土结构中应用尚属空白。同时,由于生土材料的特殊性,目前国内没有针对生土材料及其结构专门的试验方法及技术标准,大多按照我国砌体结构规范^[13]进行计算和研究,而国外在此方面的研究已经日趋完善^[14-16]。基于国外前期研究成果,本文首次引进该新型自嵌固生土砖并对其展开相应研究。

自嵌固生土砖结构砌筑无需砂浆,在水平地震作用下主要依靠砖块间自嵌固咬合部位抵抗荷载。为了研究该种生土砖自嵌固部位的承载能力,本文在考虑其承受不同上部竖向荷载的情况下对18个自嵌固生土砖砌体进行了剪压复合受力试验,分析其受力性能、破坏机理及剪压相关性,并提出自嵌固生土砖砌体的抗剪强度计算公式。

1 试验概况

试验用自嵌固生土砖由黄土、水泥和麦秸按照质量比为1:0.045:0.002的拌和土料采用YF1-40型专业压砖机一次压制成型。其中黄土取自西安市长安区地铁施工工地,水泥强度等级为32.5 MPa,麦秸长度为1~2 cm,经测定拌和土料最优含水率为

18.3%。考虑到我国砌体墙体的普遍厚度,并参考常用混凝土小型空心砌块尺寸,确定自嵌固生土砖尺寸为240 mm×120 mm×90 mm(长×宽×高),中部对称分布的空心孔洞直径为40 mm,单面凸起和凹进高度均为10 mm,具体外形见图1。砌体试件尺寸为240 mm×120 mm×270 mm(长×宽×高),由3块自嵌固生土砖上下垒砌而成,砖块间连接依靠其自身外形特征的凸口和凹槽直接嵌固。试件制作无须砂浆,垒砌完成后可直接进行试验。试验用砌体试件抗压强度平均值 f 为0.96 MPa。

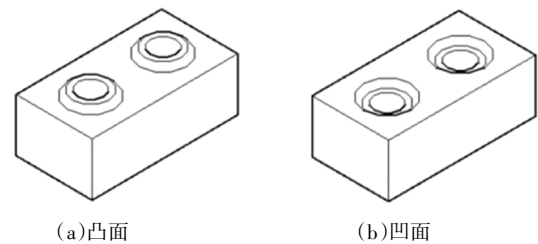


图1 自嵌固生土砖外形

Fig.1 Shape of interlocking compressed earth block

试验设计按照于砌体顶部施加不同的竖向荷载分为6组,每组3个试件,共18个试件。砌体试件上部施加的竖向压力按照具体房屋真实受力时不同高度墙体底部砖块所受竖向荷载进行设计,单块自嵌固生土砖重约3.3 kg,假设房屋高度为3 m,屋架采用木屋架,通过计算可得到每组试件上部应施加的竖向力大小,各组试件编号及施加的竖向压力见表1。其中KJ1的上部竖向荷载为一层房屋墙体自承重情况;KJ2为同时考虑一层房屋墙体与屋盖承重的情况;KJ3为二层房屋墙体自承重情况;KJ4为同时考虑二层房屋墙体与屋盖承重的情况。为进一步确定剪压相关性,KJ5和KJ6两组为补充试件,其施加的上部荷载可近似等同于三层房屋的墙体自承重和墙体屋盖同时承重情况。

表1 各组试件竖向压力

Tab.1 Vertical pressure of each group of specimens

试件编号	KJ1	KJ2	KJ3	KJ4	KJ5	KJ6
竖向压力/kN	1	2	4	6	9	12

自嵌固生土砖砌体的剪压复合受力试验在长安大学结构与抗震实验室进行,试验试件顶面和底面采用粉土找平,确保加载面及底面平整。试验采用由MAS-500 kN压力机、5 t手摇式千斤顶和拉压力传感器组成的加荷系统,试验装置如图2所示。

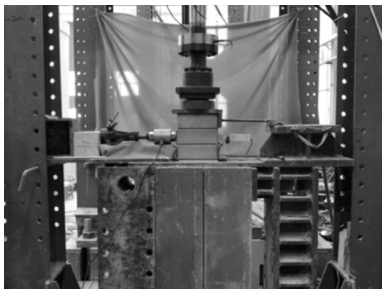


图2 试验装置
Fig.2 Test setup

2 试验过程及破坏形态

试验开始时,首先由竖向压力机对试件顶部施加竖向荷载,待竖向荷载基本稳定后,由水平千斤顶对试件中间砖块施加水平荷载,拉压力传感器放置于千斤顶前端和试件中间砖块之间,以便在试验过程中采集千斤顶施加的水平剪力,在整个加载过程中保持竖向荷载的恒定.为避免冲击荷载,千斤顶摇动尽量保持稳定匀速,水平荷载加载采用力控制,随时观测拉压力传感器测得的数据,控制水平荷载每级增长 0.2 kN.

根据试件上部施加竖向压力不同,自嵌固生土砖砌体的剪压复合受力破坏形态大致可分为三类.

剪切破坏:此类破坏发生于 KJ1 和 KJ2 两组试件.试验时,竖向压力加载完成,开始施加水平荷载,试件初期处于弹性阶段,没有裂缝产生,随着水平剪力的逐渐增大,试件中部受剪砖靠近和远离加载端自嵌固孔洞位置依次出现裂缝,之后裂缝逐渐变宽延伸直至竖向贯通砖块被推出.受剪砖和下部砖凸口部位被剪坏脱落,上部砖块略微翘起,上下砖块未出现明显裂缝.图 3 为该两组试件的破坏形态.

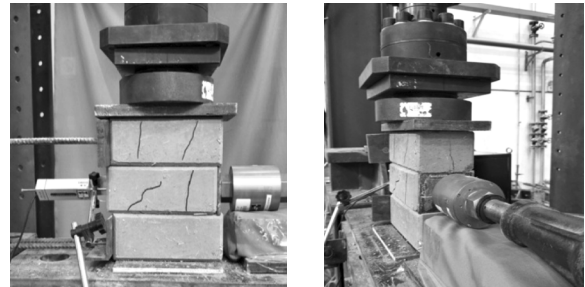


(a)受剪砖被推出 (b)凸口被剪坏
图3 剪切破坏形态

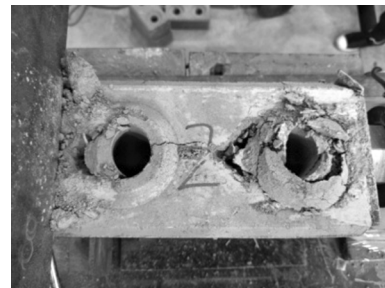
Fig.3 Shear cut failure mode

剪压破坏:此类破坏发生于 KJ3 和 KJ4 的两组试件.此类破坏前期与剪切类破坏相似,水平荷载施加后中部砖块受剪孔洞位置首先出现裂缝,随着水平荷载的增大,裂缝变宽竖向贯通并延伸至试件

上下部砖孔洞部位,之后水平荷载达到极限,受剪砖被推出,砖块凸口被剪坏,部分试件加载面上部砖明显开裂破坏.由于竖向荷载的作用,上部砖块始终与中间砖块紧密贴合,未出现上部砖块翘起的现象.图 4 为该两组试件的破坏形态.



(a)受剪砖被推出 (b)上部砖块破坏



(c)凸口被剪坏

图4 剪压破坏形态

Fig.4 Shear and compression failure mode

斜压破坏:此类破坏发生于 KJ5 和 KJ6 两组试件.试验开始时一次性稳定加载至竖向荷载设定值并保持荷载恒定,此时试件上部砖块出现细微裂缝,之后水平荷载开始施加.中间砖块在水平剪力作用下孔洞位置出现裂缝并竖向贯通,随后下部砖块孔洞位置出现裂缝.由于水平加载端放置的小钢板面积略小于受剪试块,随着水平荷载的增大,中间砖块加载端小钢板被整体压进砖内,受剪砖很难被推出,受剪端上下砖块出现竖向贯通裂缝,各试块凸口基本未被剪坏.图 5 为该两组试件的破坏形态.



(a)受剪砖难被推出 (b)受剪面被压入



(c)凸口未被剪坏

图 5 斜压破坏形态

Fig.5 Baroclinic failure mode

3 试验结果与破坏机理

3.1 试验结果

自嵌固生土砖砌体剪压复合受力试验结果见表 2, 表中, σ_0 为不同竖向荷载作用下的砌体正应力, N_{kv} 为砌体试件在水平荷载作用下的开裂荷载, N_v 为砌体试件的极限剪力, $N_{v,m}$ 为同组试件的极限剪力平均值, $f_{v,m}$ 为各组试件的抗剪强度平均值. 各试件的抗剪强度 f_v 按照公式(1)计算. 其中 KJ1-1 试件由于在试验时未在加载端放置分配荷载的小钢板, 传感器头部直接作用在受剪砖块上, 受剪面积过小, 随着水平剪力的逐渐增大, 受剪面出现了明显应力集中的现象, 受力端破坏并被压入中间试块孔洞内, 未出现剪切试验现象, 试验失败, 故在计算平均抗剪强度时不考虑此试件.

表 2 砌体剪压复合受力试验结果

Tab.2 Test results of masonry under shear-compression composite action

试件编号	σ_0 /MPa	N_{kv} /kN	N_v /kN	$N_{v,m}$ /kN	$f_{v,m}$ /MPa
KJ1-1	0.035	1.20	1.37	3.2	0.056
KJ1-2	0.035	2.52	3.28	3.2	0.056
KJ1-3	0.035	2.64	3.12	3.2	0.056
KJ2-1	0.069	3.85	4.62	4.69	0.081
KJ2-2	0.069	3.65	4.59	4.69	0.081
KJ2-3	0.069	3.94	4.87	4.69	0.081
KJ3-1	0.139	6.08	6.82	7.30	0.127
KJ3-2	0.139	5.57	7.04	7.30	0.127
KJ3-3	0.139	5.62	8.03	7.30	0.127
KJ4-1	0.208	5.29	9.46	9.37	0.163
KJ4-2	0.208	6.21	9.65	9.37	0.163
KJ4-3	0.208	7.61	9.01	9.37	0.163
KJ5-1	0.313	8.53	10.29	10.69	0.186
KJ5-2	0.313	8.60	11.69	10.69	0.186
KJ5-3	0.313	8.89	10.1	10.69	0.186
KJ6-1	0.417	7.52	10.31	13.26	0.230
KJ6-2	0.417	7.32	16.42	13.26	0.230
KJ6-3	0.417	7.87	13.06	13.26	0.230

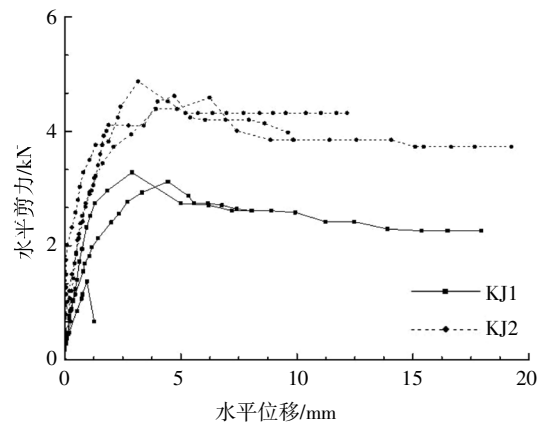
$$f_v = \frac{N_v}{2A} \tag{1}$$

式中: A 为砌体单面受剪面积, 本文砌体剪压复合受力试验时受剪砖上下面同时承受剪力作用, 故自嵌固生土砖砌体的受剪面积按照 2 倍的单面受剪面积计算.

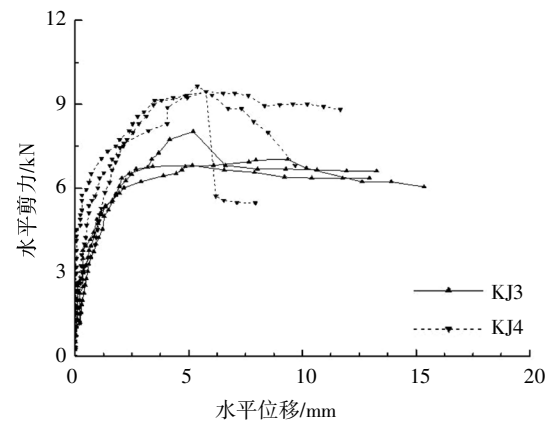
3.2 破坏机理分析

自嵌固生土砖砌体剪压复合受力试验的荷载-位移曲线见图 6, 其中荷载为通过传感器采集的作用于试件中间砖块的水平剪力, 位移为试件受剪砖的水平位移. 结合表 2 和图 6 可以看出各组试件所能承受的水平剪力与施加的竖向荷载成正相关关系, 试件开裂荷载、抗剪强度均随着竖向正压力的增大而增大. 前四组试件荷载-位移曲线变化趋势较为相同, 试件破坏到达极限剪力后, 其强度并没有大幅度降低, 而是随水平位移的增加降低极为缓慢或基本保持恒定; 后两组试件水平剪力到达极限破坏后其抗剪能力急速下降.

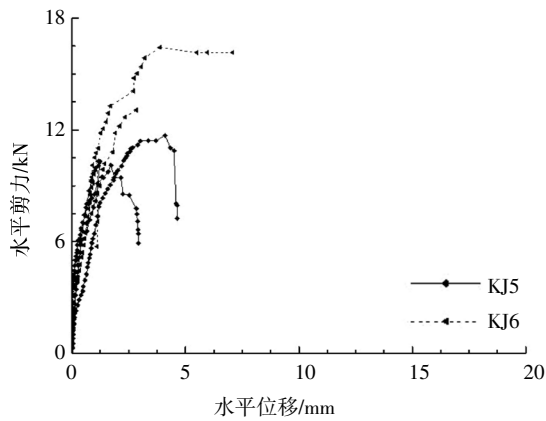
从受力平衡角度对自嵌固生土砖砌体在剪压复合作用下的受力情况进行分析, 如图 7 所示. 将试件中部受剪砖块假设为一个质点, 由于砖块自身质量占整体受力比重较小, 在试件进行整体受力分析时忽略不计.



(a) KJ1、KJ2 试件



(b) KJ3、KJ4 试件



(c)KJ5、KJ6 试件

图6 荷载-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves

图7中, N_c 为试件上部承受的竖向荷载, N_c' 为竖向荷载产生的竖向反力, F_{cs} 为竖向荷载在水平方向产生的中间砖与上下两块砖之间的摩擦力, F_v 为受剪砖上部凸口与下部凹槽在水平剪力下产生的挤压抗力. 根据摩擦定律, 受剪砖块能否被推出主要取决于 N_v 与 F_v 和 F_{cs} 合力的大小, 见式(2)(3).

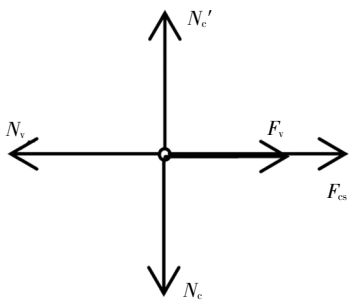


图7 受剪砖受力分析

Fig.7 Force analysis of sheared brick

$$\begin{cases} N_v > F_v + F_{cs} & (2) \\ N_v \leq F_v + F_{cs} & (3) \end{cases}$$

由于生土材料摩擦系数一定, F_{cs} 与 N_c 成正比例关系. 自嵌固生土砖凸口和凹槽的挤压抗力 F_v 随着 N_v 增大到一定程度后, F_v 达到极限, 之后随着千斤顶继续施力, 中间砖凸口和凹槽由于水平挤压作用被剪坏而逐渐丧失其承载能力. 在 KJ1 和 KJ2 组试件试验中, 由于竖向压力较小, 砖块间贴合不紧密, F_{cs} 较小, 当 F_v 随 N_v 增大而达到极限逐渐减小后, F_v 和 F_{cs} 合力明显小于水平剪力值(式(2)), 此两组试件的破坏主要因为水平剪力的作用, 故随着水平荷载的增大, 受剪砖块可被轻松推出. 在 KJ3 和 KJ4 两组试件试验中, F_{cs} 较前两组变大, F_v 到达极限试件开裂降低后, 为保持竖向荷载恒定, 试件竖

向位移变大, 砖块间贴合紧密, N_v 依旧大于 F_v 和 F_{cs} 的合力(式(2)), 受剪试块可被推出, 此两组试件破坏产生的原因是竖向压力和水平剪力的复合作用. 在 KJ5 和 KJ6 两组试件试验中, N_c 较大, F_{cs} 较大, 由于试件自身抗压强度原因, 在水平剪力尚未施加时上部砖块已出现细微裂缝, 水平荷载作用后, 试件中间砖受剪端截面承载能力不足, 直接被水平荷载压裂, N_v 逐渐增大, 受剪端破坏的部分被压进孔洞内, N_v 达到极限, 试件破坏, 而此时水平剪力尚未达到 F_v 和 F_{cs} 二力之和(式(3)), 故受剪砖未被推出, 此两组试件的破坏主要是因为竖向压力的作用.

传统的砌体砌筑由砂浆黏结而完成, 在承受竖向压力和水平剪力共同作用时, 其抗剪承载力由水平灰缝的砂浆强度和竖向压力所产生的水平摩擦力大小决定. 本文砌体试件垒砌时没有用到砂浆, 但其自嵌固构造的凸口和凹槽可近似等同于传统砌体中砂浆的作用. 试件在剪压复合受力作用下, 当凸口和凹槽的强度不足以抵抗砌体受到的水平剪力时, 剪切面将出现相对水平滑移, 此时, 自嵌固构造部分的销栓作用和受剪面上的竖向压力产生的摩擦力共同抵抗剪切面的水平剪力. 随着水平荷载的持续增大, 剪切面的水平滑移不断增大, 最终试块凸口部位被剪断, 而此时竖向压力产生的摩擦力不足以抵抗剪切面的水平剪力, 最终砌体试件破坏.

4 剪压相关性分析

4.1 理论背景

众多研究结果表明, 砌体截面上作用的垂直正应力 σ_0 是影响砌体抗剪强度的一个不可忽略的重要因素^[17-20]. 关于砌体抗剪强度的计算, 目前存在且应用较多的有主拉应力破坏理论和库仑理论^[21]. 主拉应力破坏理论认为, 当主拉应力超过砌体抗主拉应力强度, 即 $\sigma_1 \geq f_{t0}$ (f_{t0} 表示砌体截面上无垂直荷载时沿阶梯型截面的抗剪强度)时, 砌体发生剪切破坏. 库仑理论认为砌体的抗剪强度可根据砌体的摩擦系数 μ' 计算得到. 其表达式为:

$$\text{主拉应力破坏理论: } f_v \leq f_{t0} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2}\right)} \quad (4)$$

$$\text{库仑理论: } f_v = f_{t0} + \mu' \sigma_0 \quad (5)$$

式中: f_v 为砌体抗剪强度; f_{t0} 为砌体截面上无垂直荷

载时沿阶梯型截面的抗剪强度; σ_0 为砌体截面上作用的垂直正应力; μ' 为砌体的摩擦系数.

4.2 剪压相关性分析

以本文各组自嵌固生土砖砌体试件的竖向正应力与抗压强度的比值 σ_0/f_m 为 x 轴,砌体的抗剪强度与抗压强度的比值 $f_{v,m}/f_m$ 为 y 轴绘制出砌体试件在剪压复合作用下的试验结果,并对其进行拟合分析进一步得到试验结果的回归曲线,如图 8 所示.

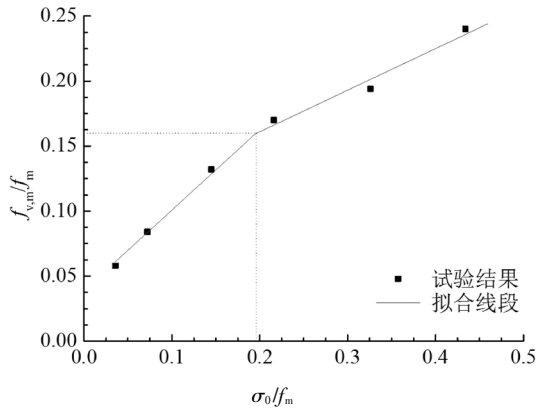


图 8 剪压相关性曲线

Fig.8 Shear stress correlation curves

根据回归分析,得到拟合曲线为分段函数,代入纵横坐标即可得到自嵌固生土砖砌体在剪压复合受力下的抗剪强度平均值计算公式,见式(6)(7).

$$f_{v,m} = 0.037 + 0.618\sigma_0, 0 < \frac{\sigma_0}{f_m} \leq 0.196 \quad (6)$$

$$f_{v,m} = 0.093 + 0.32\sigma_0, 0.196 < \frac{\sigma_0}{f_m} \leq 0.46 \quad (7)$$

式中: $f_{v,m}$ 为砌体在剪压复合受力下的抗剪强度; σ_0 为砌体初始(上部不承受竖向荷载时)抗剪强度; f_m 为砌体抗压强度.

可以看出自嵌固生土砖砌体的抗剪强度平均值与竖向正应力在公式各段内呈线性正相关关系.公式格式符合库仑理论的砌体抗剪强度计算公式模式,均为 $f_{v,m} = \alpha f_{v,0} + \mu\sigma$.根据相关系数位置对应,可近似认为当自嵌固生土砖砌体上部不承受竖向荷载时,即 $\sigma_0 = 0$ 时,砌体的初始抗剪强度 $f_{v,0} = 0.037$ MPa,即自嵌固砖凸口和凹槽直接嵌固部位的抗剪强度为 0.037 MPa.分别按照本文提出的和传统主拉应力破坏理论的抗剪强度计算方法对文中 6 组不同正应力下的自嵌固生土砖砌体抗剪强度进行对比计算,结果见表 3.

表 3 抗剪强度对比计算

Tab.3 Comparison of shear strength

σ_0 /MPa	本文结果/MPa	主拉应力/MPa	本文结果/主拉应力
0.035	0.059	0.052	1.14
0.069	0.080	0.063	1.27
0.139	0.123	0.081	1.52
0.208	0.160	0.095	1.68
0.313	0.193	0.114	1.70
0.417	0.226	0.130	1.75

可以看出按照本文提出的自嵌固生土砖砌体抗剪强度公式计算的结果要大于传统主拉应力破坏理论计算出的砌体抗剪强度,且随着竖向正应力的增大,抗剪强度差距越加明显.这说明采用主拉应力破坏理论计算出的砌体抗剪承载力虽然安全可靠,但是较为保守.综上所述,建议自嵌固生土砖砌体在剪压复合受力下的抗剪强度应按照式(6)(7)进行计算.

5 结论

1)设计了一种模拟自嵌固生土砖砌体剪压复合受力的试验装置,并通过 6 组不同竖向荷载下的砌体剪压复合受力试验得到对应试件的荷载-位移曲线,试验结果可靠,说明此装置可应用于砌体剪压复合受力试验,且试验方法简单易懂,可操作性强,具有推广标准化应用的前景.

2)自嵌固生土砖砌体的凸口和凹槽可代替砂浆,在砌体承受水平荷载时,砖体间上下咬合嵌固起到销栓作用,咬合部位表现出较好的抗剪能力.

3)自嵌固生土砖砌体在剪压复合受力试验下按照施加竖向正应力的不同分为三类破坏形态.对试验结果进行破坏机理分析,得到三类破坏产生的主要原因分别是承受水平剪力、剪压共同作用、承受竖向压力.

4)自嵌固生土砖砌体剪压复合受力下的抗剪强度与其竖向正应力线性正相关.通过对试验数据回归分析,提出自嵌固生土砖砌体剪压复合受力下的抗剪强度计算公式,并与传统主拉应力破坏理论的抗剪强度计算方法进行了对比,表明主拉应力破坏理论计算出的砌体抗剪承载力安全可靠,但是较为保守.建议自嵌固生土砖砌体剪压复合受力下的抗剪强度按照本文公式进行计算.

参考文献

- [1] 王毅红,仲继清,石以霞,等. 国外生土结构研究综述[J]. 土木工程学报,2015,48(6):81—88.
WANG Y H,ZHONG J Q,SHI Y X,*et al.* Review of overseas research on raw-soil structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2015,48(6):81—88. (In Chinese)
- [2] 王毅红,梁榭,张项英,等. 我国生土结构研究综述[J]. 土木工程学报,2015,48(5):98—107.
WANG Y H,LIANG J,ZHANG X Y,*et al.* Review of raw-soil structure in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2015,48(5):98—107. (In Chinese)
- [3] STURM T,RAMOS L F,LOURENCO P B. Characterization of dry-stack interlocking compressed earth block [J]. Materials and Structures,2015,48:3059—3074.
- [4] SITTON J D,ZEINALI Y,HEIDARIAN W H,*et al.* Effect of mix design on compressed earth block strength [J]. Construction and Building Materials 2018,158(15):124—131.
- [5] IRWAN J M,ZAMER M M, OTHMAN N. A review on interlocking compressed earth blocks (ICEB)with addition of bacteria [C]//MATEC Web Conferences. Melaka:EDP Sciences,2016,47:01017.
- [6] RIZA F V,RAHMAN I A,ZAIDI A M A. A brief review of compressed stabilized earth brick (CSEB) [C]// International Conference on Science and Social Research. Kuala Lumpur:IEEE,2010:999—1004.
- [7] BERNADI D,DEJONG J T,MONTROYA B M,*et al.* Bio-bricks: Biologically cemented sandstone bricks [J]. Journal of Construction and Building Material,2014,55:462—469.
- [8] OTHMAN N,IRWAN J M,ZAMER M M,*et al.* Acclimatization process of ureolytic bacteria (UB) with soil condition for interlocking compressed earth block (ICEB) in improving compressive strength properties [J]. Advanced Science Letters,2017,23(5):4341—4343.
- [9] 马宏旺,张冬冬,陈龙珠. 无砂浆自嵌固砌体墙体抗震性能分析[J]. 自然灾害学报,2014,23(2):205—213.
MA H W,ZHANG D D,CHEN L Z. Seismic performance analysis of interlocking mortarless masonry walls [J]. Journal of Natural Disasters. 2014,23(2):205—213. (In Chinese)
- [10] 马宏旺,张冬冬,马泽,等. 无砂浆自嵌固砌体结构体系及抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(S1):453—459.
MA H W,ZHANG D D,MA Z,*et al.* The mortar-free interlocking block masonry system and seismic analysis of walls [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics. 2014,34(S1):453—459. (In Chinese)
- [11] 吴方伯,任焕青,刘彪,等. 新型混凝土横孔空心砌块砌体受压性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(11):25—32.
- WU F B,REN H Q,LIU B,*et al.* Research on the compression behavior of the new horizontal-hole hollow concrete block masonry [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2015,42(11):25—32. (In Chinese)
- [12] 黄靓,许仲远,高翔. 开槽砌块灌孔砌体的抗剪性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(9):54—59.
HUANG L,XU Z Y,GAO X. Research on the shear-resistance behaviors of grouted slotted block masonry [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2014,41(9):54—59. (In Chinese)
- [13] GB 50003—2011 砌体结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:36—37.
GB 50003—2011 Code of design of masonry structures [S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2011:36—37. (In Chinese)
- [14] WALKER P J. New Mexico adobe and rammed earth building code [S]. New Mexico: Authority of State of New Mexico,1991:33—43.
- [15] ZHAO D J,ZHANG Y,LU J L. Research on construction of rammed earth buildings [J]. Advanced Materials Research,2011,243:934—937.
- [16] NZS 4297—1998 Engineering Design of Earth Buildings [S]. New Zealand:Standards New Zealand,1998:40—43.
- [17] 吕伟荣,施楚贤,刘桂秋. 剪压复合作用下砌体的静力与抗震抗剪强度[J]. 工程力学,2008,25(4):158—164.
LÜ W R,SHI C X,LIU G Q. Static and seismic shear strength of masonry under shear-compression loading [J]. Engineering Mechanics,2008,25(4):158—164. (In Chinese)
- [18] 蔡勇. 基于最小耗能原理的砌体抗剪强度统一模式 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2007,38(5):993—999.
CAI Y. Masonry shear strength uniform model based on the least energy consumption principle [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2007,38(5):993—999. (In Chinese)
- [19] 蔡勇,施楚贤,马超林,等. 砌体在剪-压作用下抗剪强度研究[J]. 建筑结构学报,2004,25(5):118—123.
CAI Y,SHI C X,MA C L,*et al.* Study of the masonry shear strength under shear-compression action [J]. Journal of Building Structures,2004,25(5):118—123. (In Chinese)
- [20] 骆万康,朱希诚,廖春盛. 砌体抗剪强度研究的回顾与新的计算方法[J]. 重庆建筑大学学报,1995,17(4):41—49.
LUO W K,ZHU X C,LIAO C S. A review on the study on shear strength of masonry and a new calculating method [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,1995,17(4):41—49. (In Chinese)
- [21] 施楚贤. 砌体结构理论与设计 [M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2003:73—76.
SHI C X. Theory and design of masonry structure [M]. 2nd ed. Beijing:China Architecture & Building Press,2003:73—76. (In Chinese)