

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231130001

## 生土砌块墙体平面外受力性能试验研究\*

李子豪<sup>1</sup>, 袁康<sup>1,2</sup>, 刘寅<sup>1</sup>, 景鹏<sup>3</sup>

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832003; 2. 新疆兵团高烈度寒区建筑抗震节能技术工程实验室, 新疆石河子 832003; 3. 新疆建筑设计研究院有限公司, 新疆乌鲁木齐 830001)

**摘要:** 针对生土砌体结构在地震作用下易发生墙体平面外倒塌的问题, 对生土砌体试件和生土砌块墙体试件分别进行了弯曲抗拉性能试验和平面外气囊加载试验, 获取了生土砌体破坏现象和弯曲抗拉强度, 以及墙体平面外破坏模式、承载能力和变形特征等。在此基础上, 通过理论分析得出了生土砌块墙体平面外承载力计算方法, 提出了墙体平面外受力性能各因素的影响规律, 并在相关文献统计数据的基础上分析了边界条件对墙体平面外受力性能的影响。研究表明: 生土砌体弯曲受拉时发生沿跨中1/3范围内水平灰缝开裂的脆性破坏, 其弯曲抗拉强度为0.147 MPa; 生土砌块墙体在承受平面外均布荷载时发生沿底部水平灰缝贯通的弯曲受拉破坏, 其平面外峰值荷载为13.91 kN, 墙体平面外位移随墙体高度的增大而增大且呈线性增长趋势; 墙体平面外开裂荷载和峰值荷载均随高宽比及高厚比的减小而增大, 随竖向荷载及砌体弯曲抗拉强度的增大而增大; 建议实际工程中可采用增强楼盖与生土砌块墙体的连接约束、加强扶壁柱设置的措施来提高生土砌块墙体平面外抗震性能。

**关键词:** 生土砌块墙体; 平面外破坏; 砌体弯曲抗拉强度; 气囊加载试验; 理论分析  
**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0630-13

## Experimental Study on Out-of-plane Mechanical Performance of Rammed Earth Masonry Walls

LI Zihao<sup>1</sup>, YUAN Kang<sup>1,2</sup>, LIU Yin<sup>1</sup>, JING Peng<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy & Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Xinjiang Production & Construction Groups Engineering Laboratory for Seismic and Energy-Saving Building in High Earthquake Intensity and Cold Zone, Shihezi 832003, China; 3. Xinjiang Architectural design institute, Urumqi 830001, China)

**Abstract:** To address the susceptibility of rammed earth masonry structures to out-of-plane wall collapse under earthquakes, flexural tensile test and out-of-plane airbag loading test were conducted on rammed earth masonry specimens and rammed earth block wall specimens, respectively. The failure phenomenon and flexural tensile strength of rammed earth masonry were obtained, along with the walls' out-of-plane failure modes, bearing capacities, and deformation characteristics. Based on this, a calculation method for the out-of-plane bearing capacity of rammed earth block walls was obtained through theoretical analysis. The influence patterns of various factors on out-of-plane mechanical performance were proposed, and the effects of boundary conditions on the performance were analyzed us-

\* 收稿日期:2023-11-30;修回日期:2024-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52368075)、国家重点研发计划课题(2018YFD1100402-03)、新疆建筑设计研究院有限公司重点科研项目(2307)资助

作者简介:李子豪(1999—),男,硕士研究生。主要从事村镇建筑抗震防灾研究。E-mail: lizihao711@163.com

通信作者:袁康(1982—),男,教授,博导,博士。主要从事村镇建筑抗震防灾研究。E-mail: williamyuan1982@163.com

ing statistical data from relevant literature. The results showed that the rammed earth masonry exhibited brittle failure characterized by cracking along the horizontal mortar joint within the middle one-third span range under flexural tension, with a flexural tensile strength of 0.147 MPa. Under out-of-plane uniform loading, the rammed earth masonry wall failed in flexural tension along the bottom horizontal mortar joint, with peak out-of-plane load of 13.91 kN. The out-of-plane displacement increased linearly with the increase of the wall height. The cracking load and peak load increased with the decrease of height-width ratio and height-thickness ratio, and increased with the increase of vertical load and flexural tensile strength of masonry. In practical engineering, it is recommended to improve the out-of-plane seismic performance of rammed earth masonry walls by strengthening the slab-to-wall connection constraints and improving the arrangement of buttress columns.

**Keywords:** rammed earth masonry wall; out-of-plane failure; flexural tensile strength of masonry; air-bag loading test; theoretical analysis

## 0 引言

生土结构凭借其生态环保、便于取材、造价低廉、技术简单、保温隔热等优点广泛分布于我国西部农村地区并仍将长期存在<sup>[1]</sup>。但由于生土结构材料强度低、构件间缺少有效连接、结构整体性差,其在地震作用下受灾情况严重<sup>[2-3]</sup>,震害资料表明,生土结构在历次地震灾害中倒塌现象普遍,是农村地区抗震设防的薄弱环节<sup>[4-7]</sup>。其中,由于现役生土结构水平构件多采用木屋盖,对墙体提供的空间约束刚度较弱,生土砌块墙体平面外承载力较低,在地震作用下墙体平面外倒塌震害屡见不鲜。

近年来,国内外学者对于生土砌块墙体平面外力学性能的相关研究缺失,对砌体结构平面外力学性能的相关研究主要集中于砖砌体墙。在砌体层面,国内外学者较为关注其弯曲抗拉强度及影响因素,王晓初等<sup>[8]</sup>、童丽萍等<sup>[9]</sup>、C. Jayasinghe等<sup>[10]</sup>对不同材料砌块砌体进行了弯曲抗拉试验,得到了砌体受弯破坏特征和弯曲抗拉强度;在明确砌体弯曲受拉性能表现后,对于砌体弯曲抗拉强度计算公式的研究也广受关注,张贝<sup>[11]</sup>、黄榜彪等<sup>[12]</sup>、尚建丽等<sup>[13]</sup>参考已有的砌体弯曲抗拉强度计算公式提出了基于材料特性的计算参数,拓宽了砌体弯曲抗拉强度计算公式使用范围。在墙体层面,李振宝等<sup>[14]</sup>、张永群等<sup>[15]</sup>对不同边界约束条件的砖墙进行了平面外气囊加载试验,得到了砖墙在平面外均布荷载作用下的破坏现象、力—位移关系和变形特征等性能指标;获得墙体平面外破坏形态及性能指标后,针对墙体平面外受力性能影响因素及其规律,李溢<sup>[16]</sup>、杨志明<sup>[17]</sup>、吴加珂<sup>[18]</sup>、H. Derakhshan等<sup>[19]</sup>研究了边界约

束、高厚比、砌体抗压强度及竖向压应力等的影响;M. R. Maheri等<sup>[20]</sup>、M. Godio等<sup>[21]</sup>、P. Wangmo等<sup>[22]</sup>研究了竖向接缝、墙体高厚比和弹性模量的影响。此外,王全凤等<sup>[23]</sup>、陈升平等<sup>[24]</sup>、Y. Lin等<sup>[25]</sup>通过对砌体墙表面贴覆GFRP布、钢纤维水泥砂浆、工程水泥基复合材料等措施提升墙体平面外受力性能。

综上,目前对于砖砌体墙平面外受力性能的研究主要集中于砌体弯曲抗拉强度、墙体平面外受力破坏模式、影响因素和加固措施等方面,由于生土砌块墙体和砖砌体墙均是由砌块经粘结材料砌筑而成,砖砌体墙平面外力学性能的研究方法具有借鉴意义,但生土砌块墙和砖砌体墙的砌筑材料、砌块材料不同,且生土建筑多为单层硬山搁檩屋盖砌体结构,屋盖对墙体顶部拉结作用十分薄弱,其边界约束为顶部视为承受竖向荷载的自由端,底部可视为固定端的单边约束,而砖砌体墙与屋盖连接可视为铰接,墙体边界约束条件为顶部和底部均有水平约束的两边约束,生土砌块墙平面外破坏模式和受力性能有待进一步研究阐释。针对上述问题,本文通过对生土砌体进行沿通缝弯曲抗拉性能试验,得到其破坏特征和弯曲抗拉强度值,提出生土砌体弯曲抗拉强度计算公式参数建议值;进一步对生土砌块墙体进行平面外气囊加载试验,得到墙体平面外破坏模式、承载能力和变形特征等;同时基于典型生土墙体平面外边界约束条件及试验现象,建立生土砌块墙体平面外力学计算模型,得到墙体平面外承载力计算公式,并对比国内外其他学者提出的不同边界约束条件下墙体平面外承载力计算方法,分析边界约束条件对生土砌块墙体平面外破坏模式和承载力的影响,对生土砌块墙结构抗平面外倒塌提出工程建议。

# 1 生土砌体弯曲抗拉试验

## 1.1 试验设计

### 1.1.1 试件设计及材料性能

针对“一”字型生土砌块墙体在承受平面外均布荷载作用时通常发生沿水平灰缝的通缝破坏的现象<sup>[26]</sup>,本文参考《砌体基本力学性能试验方法标准》<sup>[27]</sup>(GB/T 50129-2011),设计并制作1组沿通缝弯曲抗拉的生土砌体试件,每个试件由16块机制生土砖制成,具体尺寸和边界条件如图1所示。

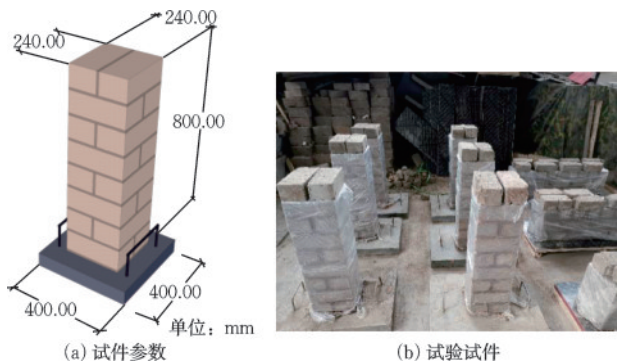


图1 生土砌体试件

Fig.1 Rammed earth masonry specimens

试件砌块及泥浆所用生土取自新疆石河子市郊区的黄黏土。考虑到生土砌块强度受制作工艺的影响较大,为降低试验结果离散性、提高生产效率,本次试验所用砌块为机制生土砌块,生土砌块尺寸为240 mm×115 mm×90 mm,泥浆试块尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,其抗压强度分别为2.41、2.14 MPa。

### 1.1.2 试验方案及加载制度

生土砌体弯曲抗拉试验在石河子大学结构实验室进行,试验方案依据《砌体基本力学性能试验方法标准》<sup>[27]</sup>(GB/T 50129-2011)中简支梁三等分点竖向集中荷载等速加载方法设计,考虑到生土砌体自重较大且砌筑泥浆强度较低,试件在平放过程中无法克服其自重,易导致砌体试件在试验前发生沿水平通缝的弯曲抗拉破坏,故本次试验采用竖放试件并通过理论分析消除重力影响的方式进行<sup>[28]</sup>。加载装置根据实验室条件自行设计,采用量程为500 kN的水平千斤顶施加集中荷载、直径为50 mm的圆管支架模拟支座约束,加载装置如图2所示。试验采用匀速加载,使试件在3~5 min内破坏,当试件可观察到全截面贯通裂缝,试验即宣告结束。

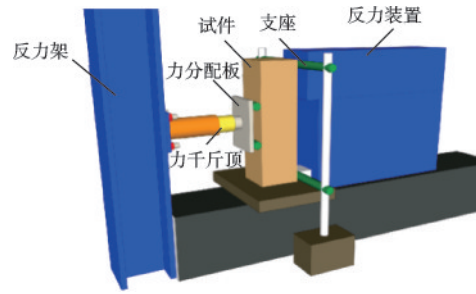


图2 试验加载装置

Fig.2 Test loading device

## 1.2 试验现象及结果分析

### 1.2.1 试验现象

生土砌体通缝弯曲抗拉试件破坏现象如图3所示,砌体试件的破坏现象基本相同,裂缝产生于纯受弯段最上处灰缝,裂缝发展迅速且形态单一,呈现沿通缝截面断裂的受弯破坏现象。加载初期,试件处于弹性状态,试件无明显变化,如图3(a)所示;加载至0.6~0.8 kN时,受拉侧灰缝受力,试件上部第三皮砖至第四皮砖的灰缝处首先出现细小裂缝,如图3(b)所示;加载至1 kN时,原有细小裂缝不断延伸且有沿通缝贯通趋势;加载至破坏荷载时,灰

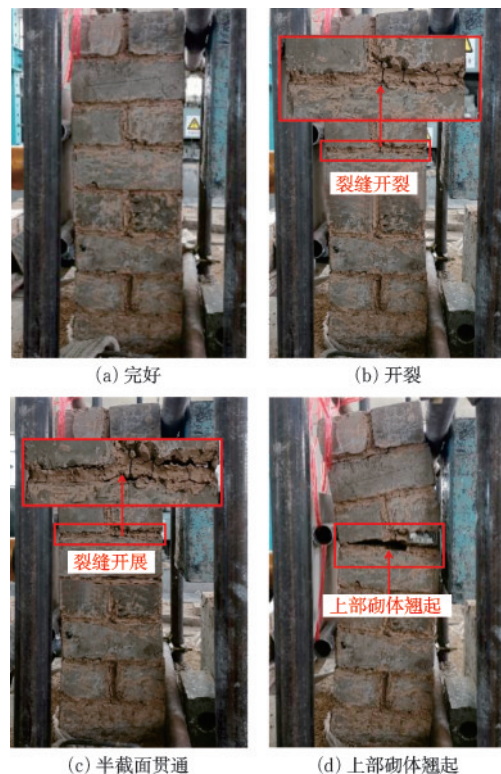


图3 生土砌体通缝试件局部破坏形态

Fig.3 Partial failure patterns of rammed earth masonry specimens with through joint

缝裂缝半截面贯通,裂缝宽度扩展至1 mm,可透光,此时试件已破坏,裂缝上部砌体轻微翘起,如图3(c)所示;继续加载,已有裂缝不断延伸至全截面,裂缝不断拓宽,上部砌体继续翘起,可观察到试件受拉侧纵截面明显变形,如图3(d)所示。

### 1.2.2 试验结果分析

以竖放方式进行试验改变了生土砌体受力状态,砌体自重对弯曲抗拉强度的影响不可忽略,不能直接采用规范<sup>[27]</sup>中提供的计算公式获得砌体弯曲抗

拉强度,故本文对生土砌体受力状态进行分析后,得到了消除生土砌体自重影响的弯曲抗拉强度计算公式,见式(1),试验结果见表1,由表1可知6个生土砌体试件弯曲抗拉强度平均值为0.147 MPa。

$$f_{tm} = \frac{Pl}{bh^2} - \frac{G_x}{bh} \quad (1)$$

式中, $f_{tm}$ 为砌体通缝弯曲抗拉强度; $P$ 为试件弯曲抗拉破坏荷载; $G_x$ 为砌体自重产生的竖向压力; $b$ 为试件截面宽度; $h$ 为试件的截面高度; $l$ 为抗弯试件的计算跨度。

表1 生土砌体沿通缝截面的弯曲抗拉强度

Table 1 Flexural tensile strength of rammed earth masonry along through joint cross-section

试件编号	截面宽度 $b/mm$	截面高度 $h/mm$	跨度 $l/mm$	截面面积/ $mm^2$	抗弯模量/ $mm^3$	破坏荷载 $P/kN$	抗拉强度 $f_{tm}/MPa$
TF-1	238	240	708	57 120	2 284 800	3.08	0.154
TF-2	240	241	709	57 840	2 323 240	2.77	0.141
TF-3	239	240	710	57 360	2 294 400	2.46	0.127
TF-4	237	239	711	56 643	2 256 280	3.08	0.162
TF-5	239	240	708	57 360	2 294 400	2.46	0.127
TF-6	239	241	708	57 599	2 313 560	3.39	0.173
平均值							0.147
标准差							0.019
变异系数							0.129

### 1.3 生土砌体弯曲抗拉强度计算公式

通过前期试验可知,生土砌体沿通缝破坏的弯曲抗拉强度和砌筑泥浆抗压强度平均值分别为0.147、2.14 MPa。由试验现象可知泥浆粘结强度是砌体弯曲抗拉强度的决定性因素,且生土砌体和普通砖砌体破坏形态相似,可借鉴《砌体结构设计》<sup>[26]</sup>(GB 50003—2011)规范中普通砖砌体强度计算公式进行生土砌体沿通缝弯曲抗拉强度计算,见式(2)。

$$f_{tm,m} = k_4 \sqrt{f_2} \quad (2)$$

式中, $f_{tm,m}$ 为砌体弯曲抗拉强度平均值,MPa; $f_2$ 为泥浆抗压强度试验平均值,MPa;弯曲抗拉强度计算参数 $k_4$ 表示与泥浆粘结能力、施工水平、砌块尺寸等不易确定的影响因素。

鉴于泥浆材性与砂浆存在较大差异,本文应用最小二乘法对前期试验所得生土泥浆试块抗压强度值和6个生土砌体弯曲抗拉强度值进行回归分析,得到适用于生土砌体的弯曲抗拉强度计算参数 $k_4$ 取为0.1。

为验证生土砌体弯曲抗拉强度修正公式的适用性,选取李聪<sup>[29]</sup>试验进行验证,将其试验所获得的生土泥浆砌块抗压强度平均值代入本文提出的生土砌体弯曲抗拉强度计算公式,得出其生土砌体弯曲抗拉强度计算值为0.104 MPa,与其试验值的误差为2.26%,说明本文提出的生土砌体弯曲抗拉强度修正公式可用于生土砌体弯曲抗拉强度计算。

## 2 生土砌块墙体平面外力学性能试验

### 2.1 试件设计

基于村镇典型生土结构多为单层房屋,墙体砌筑于毛石基础上,屋盖类型多为搁檩木屋盖且对墙体顶部拉结薄弱的构造特点,设计并制作了1个缩尺比例为1:2.5的生土砌块墙试件,如图4、图5所示,墙体试件几何尺寸为1 700 mm×1 100 mm×240 mm,墙体砌筑于长3 100 mm,高、宽均为400 mm的钢筋混凝土梁上,混凝土等级为C35。墙体竖向力参考《建筑结构荷载规范》<sup>[30]</sup>(GB50009—2012),草泥覆面木屋盖自重恒荷载取

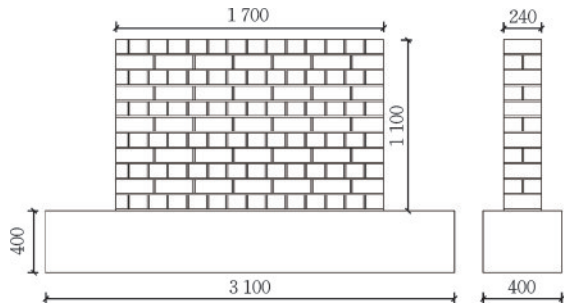


图4 试件示意

Fig.4 Schematic diagram of specimen

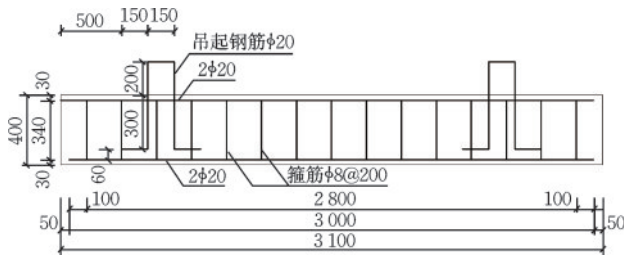


图5 地梁配筋

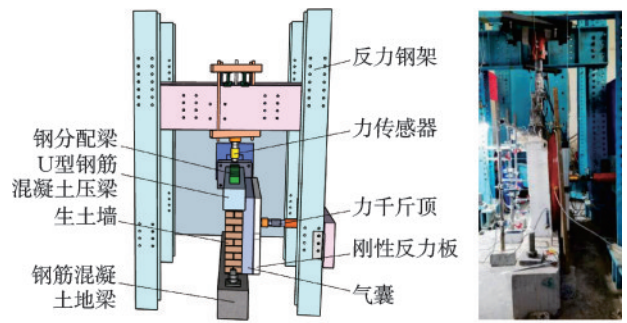
Fig.5 Reinforcement details of ground beam

为  $28 \text{ kN/m}^2$ , 活荷载取石河子市雪荷载为  $0.7 \text{ kN/m}^2$ , 将屋面恒荷载和活荷载组合后并分配至墙体约为  $0.1 \text{ MPa}$ , 扣除上部压梁及钢分配梁自重后施加竖向集中力为  $38.2 \text{ kN}$ 。试件采用人工一顺一丁式砌筑, 砌筑泥浆材料与生土砌块一致。

## 2.2 加载及数采方案

采用平面外气囊加载试验进行生土砌块墙体平面外受力性能研究, 其中竖向采用力千斤顶施加集中荷载并通过钢分配梁转化为线荷载, 并通过在竖向千斤顶上设置滚轴以实现试验过程中竖向荷载始终保持垂直于试件的目的; 水平方向通过量程为  $0.4 \text{ MPa}$  气囊逐级充气的方式施加均布荷载, 具体方式为在反力架安装力千斤顶, 通过置于气囊表面的刚性反力板施加均布面荷载, 试验方案如图6所示。

本次试验加载分为两步, 首先对墙体试件施加恒定竖向荷载, 再在试件平面外方向施加水平荷载。水平加载制度采用单调变幅加载, 以墙体试件顶部沿长度方向  $1/2$  处位移为控制条件。正式加载前, 使气囊充气对试件进行顶部位移至  $0.1 \text{ mm}$  的预加载以保证气囊表面均匀接触试件表面。在  $0 \sim 20 \text{ mm}$ , 以  $0.5 \text{ mm}$  为步长加载; 在  $20 \sim 40 \text{ mm}$ , 以  $1 \text{ mm}$  为步长加载; 在  $40 \sim 60 \text{ mm}$ , 以  $2 \text{ mm}$  为步长加载每级加载结束后墙体持荷  $2 \text{ min}$  以稳定气压。试验时, 当墙体平面外承载力下降至峰值荷载的  $85\%$



(a) 试验加载示意

(b) 现场加载

图6 试验装置

Fig.6 Test setup

或发生其他使试验不能进行的情况时停止加载, 结束试验。

试验量测项目主要包括墙体平面外位移和平面外水平荷载, 其中, 平面外水平荷载由安装于水平千斤顶上的  $500 \text{ kN}$  力传感器测得, 如图6(a)所示, 平面外位移由布置于试件受压侧的位移计测得, 位移计  $1 \sim 3$ 、 $9 \sim 11$  分别测量墙体左、右两侧上、中、下三个不同位置的平面外变形情况, 位移计  $4 \sim 8$  分别测量试件中部沿高度方向四等分点处的平面外变形情况, 位移计  $1$  和  $9$  形成对照以观测试件左右两侧平面外变形是否一致。布置百分表于地梁以监控底座是否发生平面外滑移。所有数据由东华  $\text{DH3800}$  型分布式信号测试分析系统采集, 采样频率  $10 \text{ Hz}$ 。位移计、百分表测点布置如图7所示。

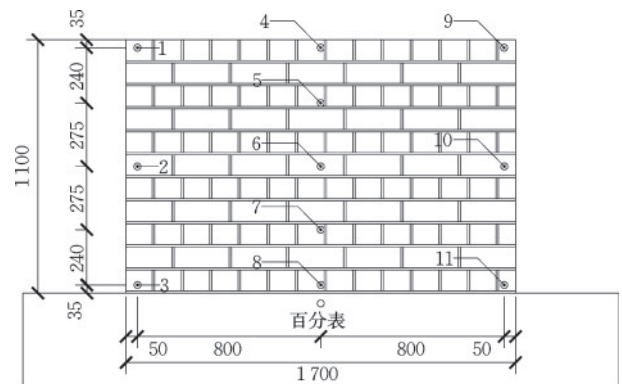


图7 位移计测点布置示意

Fig.7 Layout of displacement meter measurement points

## 2.3 试验现象

生土砌块墙体在承受平面外均布荷载时其破坏形态为底部水平裂缝贯通的弯曲受拉破坏, 大致可分为弹性阶段、开裂阶段、屈服阶段和破坏阶段。

墙体顶部侧移较小时,荷载—位移曲线近似一条斜直线,墙体可观测到的区域无裂缝,与砌体弯曲受拉试验加载初期的现象一致,此阶段墙体处于弹性阶段。

墙体顶部侧移加载至7~11 mm时,墙体正面出现沿灰缝延伸的微小竖向裂缝且在中部对称分布,其原因是气囊在充气时中部首先鼓起,气囊四角与墙体接触不紧密,墙体中部承受了气囊较多的压力(图8(a)),此阶段墙体处于开裂阶段,平面外荷载为峰值荷载的72.6%。

当侧移加载至为13.5 mm时,力—位移曲线达到屈服点,曲线斜率有较为明显的下降变化,可在墙体右侧面(气囊充气侧)中下部观察到微小水平通缝,墙体表现出微弯曲现象,墙体整体轻微倾斜,说明生土砌块墙在承受平面外均布荷载时出现了中部弯折现象(图8(b)),此现象与砌体弯曲抗拉试验现象一致,均发生沿水平通缝开裂的受弯破坏;随着荷载的持续增大,墙体倾斜程度变大,墙底水平通缝宽度增大,墙角轻微翘起,同时墙体观测面底部泥浆灰缝被轻微压碎,与砌体弯曲受拉时裂缝形态单一且迅速发展的现象基本一致;当侧移增加至31 mm时,墙体右侧底部裂缝增长至12 cm,裂缝最宽处为4 mm,此阶段墙体处于屈服阶段,平面外荷载达到峰值荷载。



图8 试件破坏图

Fig.8 Failure of specimens

当侧移达到50 mm时,此时墙体处于破坏阶段,墙体平面外承载力下降至峰值荷载的85%,墙体侧面底部裂缝宽度为11 mm,裂缝长度为20.5 cm(图8(c)),试验结束。

## 2.4 试验结果分析

### 2.4.1 墙体平面外承载力和变形能力

为进一步分析评价生土砌块墙体平面外承载力和变形能力,本文结合课题组前期墙体平面内拟静力试验研究成果<sup>[31]</sup>,对比了墙体平面外与平面内的受力变形差异,试件各阶段荷载、位移实测数据以及荷载—位移曲线如图9、表2所示。其中屈服点采用能量等值法确定<sup>[32]</sup>,峰值点和破坏点分别为平面外荷载最大时对应的荷载及位移和荷载下降至最大荷载的85%时对应的荷载及位移。

由图9、表2可知:

(1) 墙体试件平面外承载能力低于平面内承载能力。墙体平面外峰值荷载为13.91 kN,而生土砌块墙体在平面内低周往复水平荷载下的峰值荷载为36.9 kN,是平面外峰值荷载的3倍,表明生土砌块墙平面外承载能力相对较弱。

(2) 墙体试件屈服前平面外变形能力较差,屈服后较好。墙体平面外开裂位移与屈服位移相近,峰值位移约为屈服位移的两倍,说明墙体开裂后在较小位移变量内就达到屈服状态,屈服后墙体在其自重及竖向荷载作用下仍能有一定的平面外变形能力。

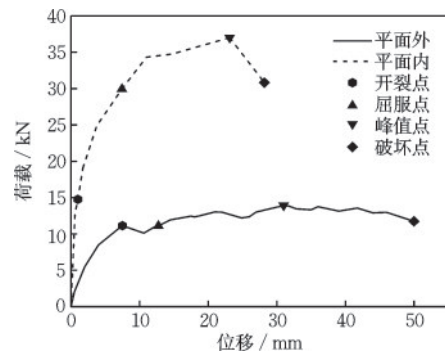


图9 试件荷载—位移曲线

Fig.9 Load-displacement curves of specimens

表2 特征点荷载和位移

Table 2 Load and displacement of characteristic points

试验类型	荷载/kN				位移/mm			
	开裂	屈服	峰值	破坏	开裂	屈服	峰值	破坏
平面外	10.84	11.13	13.91	11.74	7.55	12.74	31.0	50.08
平面内	14.76	29.94	36.9	30.82	1	7.42	23.12	28.19

(3) 墙体平面外开裂荷载与破坏荷载数值接近,开裂前平面外荷载增长较快,而墙体开裂后平面外荷载小幅增加。其原因是生土砌块墙体受平面外均布荷载时泥浆层较生土砌块更为薄弱,当其所受内力超过弯曲抗拉强度后,泥浆层迅速开裂,开裂后墙体依靠自重以及竖向荷载产生的轴压力所形成破坏面的摩擦力为墙体提供了较泥浆开裂前更高的平面外承载力。

(4) 平面外水平荷载一位移曲线总体表现为波动上升及下降,并且主要两个变化点集中在屈服前和峰值荷载前,其原因是试验过程中为保持顶部荷载恒定,当墙体倾斜、竖向荷载加大时墙体泥浆灰缝已经产生裂缝,对千斤顶进行微泄压处理会使已经开裂的裂缝闭合,最终导致平面外荷载记录出现波动。

#### 2.4.2 平面外变形特征

图 10 展示了墙体试件在中部不同高度和顶部不同位置的平面外位移,其中位移计 D4~D8 分别为生土砌块墙中部 1.1、0.825、0.55、0.275、0 m 高度处的平面外位移,位移计 D1、D4 和 D9 分别为墙体顶部左、中、右三点的平面外位移。

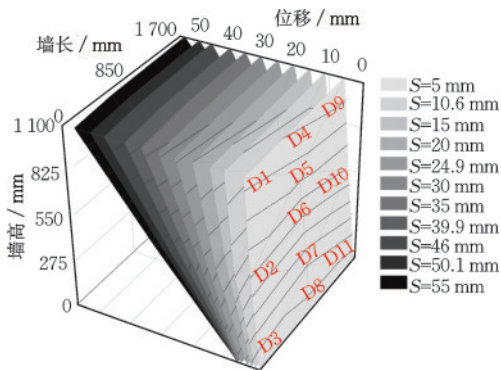


图 10 墙体平面外位移  
Fig.10 Out-of-plane displacement of wall

对比三个墙体试件中部不同高度,以及顶部不同位置的平面外位移发现:

(1) 试件的平面外位移随墙体高度的增大而近似线性增大,加载初期,可观察到墙体中部位移略大于墙体顶部和底部位移,整体呈弯曲变形特征,这是因为气囊在初始充气鼓胀的过程中中部率先鼓起,存在一定的荷载不均匀现象,使得墙体中部变形大于墙体顶部和底部变形。

(2) 在整个试验过程中,平面外位移最大处为墙体顶部,说明墙体在承受平面外均布荷载作用时发生整体变形,裂缝沿底部薄弱面延伸,裂缝以上

墙体仍为一个整体;墙体顶部左、中、右三点的平面外位移基本接近,从左至右略有增长,这是因为气囊充气口位于墙体右侧,在墙体宽度方向上右侧气压高于左侧,墙体右侧平面外变形也略高于左侧。

## 3 理论分析

### 3.1 平面外受力计算模型及分析

生土砌块墙体平面外承载力主要受材料强度和周边约束情况影响,针对生土建筑多为单层硬山搁檩屋盖砌体结构,屋盖对墙体顶部拉结作用十分薄弱的实际情况,截取生土砌块墙体中部单元体进行分析时,忽略墙肢顶部约束,墙体计算单元受力分析模型只考虑屋盖对于墙顶的竖向压力,其顶部视为承受竖向荷载的自由端,底部可视为固定端,平面外受力模型如图 11(a)所示。

从试验结果发现生土砌块墙体在平面外均布荷载作用下发生底部通缝破坏,开裂前,生土砌块墙体平面外承载力主要来源于泥浆与砌块的粘结能力、墙体自重及竖向荷载作用,对墙体开裂前弹性阶段的应力状态分析,如图 11(b)所示,图中假设拉应力为正、压应力为负,截面最大拉应力处为墙体底面,开裂后,生土砌块墙底面失去粘结力,平面外承载力是由墙体自重以及竖向荷载产生的轴压力形成的破坏面摩擦力提供。

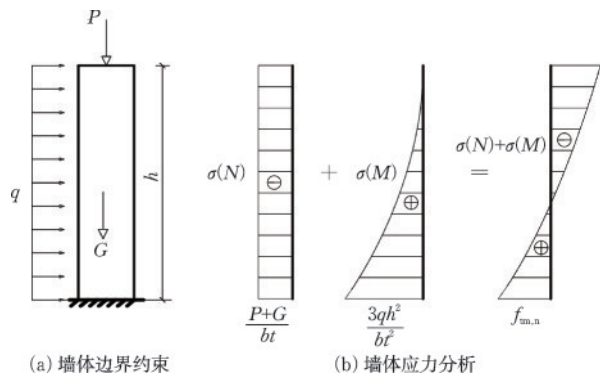


图 11 生土砌块墙体平面外约束及应力分析

Fig.11 Out-of-plane constraints and stress analysis of rammed earth masonry wall

#### (1) 墙体开裂前受力分析

设墙体宽、高、厚分别为  $b$ 、 $h$ 、 $t$ ,平面外均布荷载为  $q$ ,竖向荷载为  $P$ ,墙体自重为  $G$ 。墙体开裂前,墙体处于弹性阶段,其计算模型如图 12(a)所示。墙体任意截面的最大正应力表达式即式(3):

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{W} - \frac{N(x)}{A} \quad (3)$$

式中,  $M(x)$  和  $N(x)$  分别为墙体高度为  $x$  时的弯矩和轴力;  $W$  和  $A$  分别为墙体横截面的截面抵抗矩和面积。

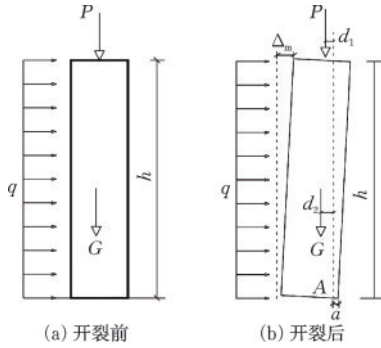


图12 生土砌块墙体平面外计算模型

Fig.12 Out-of-plane calculation model of rammed earth masonry wall

由于生土砌块墙截面最大拉应力的位置为墙体底面, 开裂位置  $x_{cr}$  为零, 将墙体尺寸参数及荷载条件代入式(3)可得到墙体截面最大拉应力计算公式(4)。

$$\sigma(x) = \frac{3qh^2}{bt^2} - \frac{P+G}{bt} \quad (4)$$

当墙体即将开裂时, 生土砌块墙体底面最大拉应力为生土砌体沿通缝破坏的弯曲抗拉强度  $f_{tm,m}$ , 即式(5)。将式(5)代入式(4), 即可得到生土砌块墙体开裂均布荷载  $q_{cr}$ , 如式(6)所示。

$$\sigma(x) = f_{tm,m} \quad (5)$$

$$q_{cr} = \frac{(P+G+bt f_{tm,m})t}{3h^2} \quad (6)$$

## (2) 墙体开裂后受力分析

生土砌块墙体泥浆灰缝较生土砌块更脆弱, 且墙体内力最大处为底面, 因此最薄弱位置为墙体底面与地梁间的泥浆灰缝层。当墙体底部开裂后, 其余墙体可视为一个整体, 其受力模式如图12(b)所示,  $A$  点为墙底旋转点中心,  $a$  为墙体底面受压侧泥浆和砌块被压碎的水平范围。

对  $A$  点取矩, 可得到式(7), 其中,  $d_1$  和  $d_2$  分别为重力荷载  $P$ 、墙体自重  $G$  与  $A$  点的水平距离, 可由几何关系得到, 如式(8)、式(9)所示。

$$M_q = Pd_1 + Gd_2 \quad (7)$$

$$d_1 = t - \frac{t \cos \theta}{2} - \Delta_m - \frac{a}{2} \quad (8)$$

$$d_2 = t + \frac{t \tan \theta \sin \theta}{2} - \frac{\Delta_m + a}{2} - \frac{t}{2 \cos \theta} \quad (9)$$

$$a = \frac{G+P}{f_c b} \quad (10)$$

式中,  $f_c$  为泥浆抗压强度;  $\theta$  为墙体底部裂缝角度;  $\Delta_m$  为墙顶平面外位移。

将墙体尺寸参数、荷载条件及式(8)、式(9)代入式(7)可得生土砌块墙体平面外均布荷载  $q$  和墙体顶部平面外位移  $\Delta_m$  的关系式, 即式(11)、式(12)。

$$q = \frac{2G}{h^2} \left( t + \frac{t \tan \theta \sin \theta}{2} - \frac{\Delta_m + a}{2} - \frac{t}{2 \cos \theta} \right) + \frac{2P}{h^2} \left( t - \frac{t \cos \theta + 2\Delta_m + a}{2} \right) \quad (11)$$

$$\Delta_m = \frac{2G}{2P+G} + \left( t + \frac{t \tan \theta \sin \theta - a}{2} - \frac{t}{2 \cos \theta} \right) + \frac{2P}{2P+G} \left( t - \frac{t \cos \theta + a}{2} \right) - \frac{qh^2}{2P+G} \quad (12)$$

式(6)和式(11)均为墙体沿高度方向的均布荷载, 当墙体即将开裂且并未产生倾角时, 即  $\Delta_m$  和  $\theta$  均为零时, 此时墙体平面外荷载达到最大值, 可按式(13)计算墙体平面外承载力。

$$q_{max} = (G+P) \frac{t-a}{h^2} \quad (13)$$

为验证上述计算公式的有效性, 将上述计算结果与试验结果进行对比。为便于比较, 将均布荷载换算为生土砌块墙体平面外集中荷载  $F$ , 通过式(6)和式(13)计算出开裂荷载和峰值荷载分别为 7.86、9.92 kN, 相较于试验值分别低 27.49%、28.68%, 这是由于墙体开裂倾斜后, 竖向千斤顶加载方向与墙体中性轴出现少许偏差, 施加的竖向荷载产生与平面外荷载相反的水平分力所致。

## 3.2 平面外承载力影响因素分析

为分析实际工程中生土砌块墙体平面外承载力各因素的影响规律, 根据经验选取单层房屋墙体高宽比、高厚比、竖向荷载及砌体弯曲抗拉强度作为主要变量, 设计相同高度墙体的不同工况进行对比。一般房屋高度约为 2 800 mm, 采用 1:2.5 缩尺比例还原原型后的墙体高度为 2 750 mm, 墙体宽度分别取 5 100、4 250、3 400 mm, 墙体厚度分别取 600、450、300 mm, 计算所得高厚比、高宽比见表 3。在其他条件不变的情况下, 将各工况墙体宽度、墙体厚度、竖向荷载和砌体弯曲抗拉强度带入式(6)、(13)分别计算墙体平面外开裂荷载和峰值荷载, 结果见表 3、图 13 及图 14。

表3 生土砌块墙体足尺模型工况

Table 3 Full-scale model conditions of rammed earth masonry walls

编号	墙体尺寸/mm	竖向荷载/kN	高厚比	高宽比	砌体弯曲抗拉强度/MPa	开裂荷载/kN	峰值荷载/kN
W-1	4 250×2 750×600	255	4.58	0.647	0.146	53.92	75.08
W-2	5 100×2 750×600	255	4.58	0.539	0.146	60.99	79.72
W-3	3 400×2 750×600	255	4.58	0.809	0.146	46.84	70.43
W-4	4 250×2 750×450	255	6.11	0.647	0.146	45.08	51.09
W-5	4 250×2 750×300	255	9.17	0.647	0.146	36.23	30.15
W-6	4 250×2 750×600	382.5	4.58	0.647	0.146	63.19	98.49
W-7	4 250×2 750×600	127.5	4.58	0.647	0.146	44.65	50.38
W-8	4 250×2 750×600	255	4.58	0.647	0.153	55.22	75.55
W-9	4 250×2 750×600	255	4.58	0.647	0.159	56.33	75.94

注:表中开裂荷载和峰值荷载均为集中力,集中力 $F=qh$ ,其中 $q$ 为均布荷载, $h$ 为生土砌块墙体高度

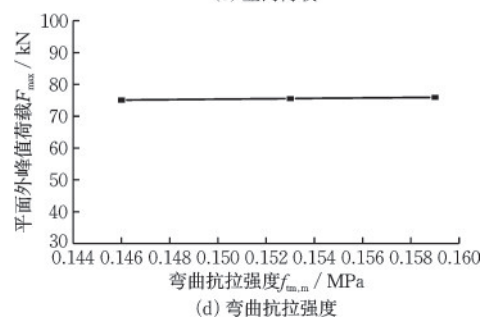
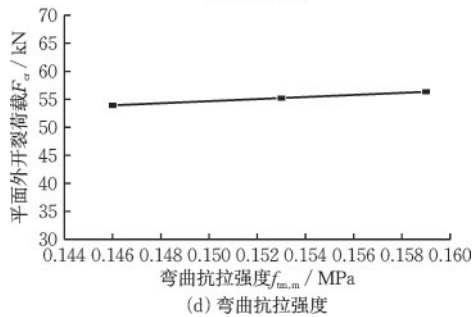
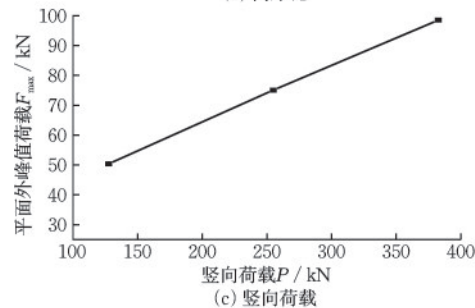
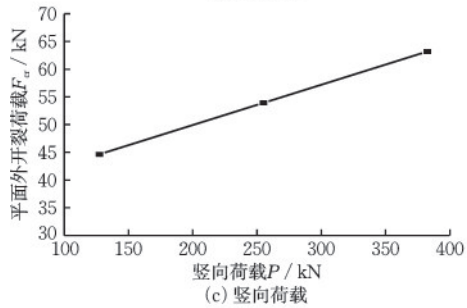
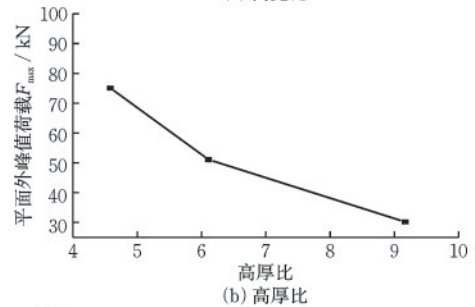
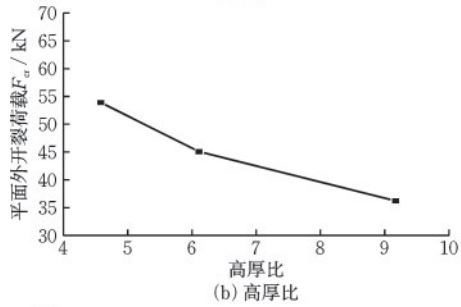
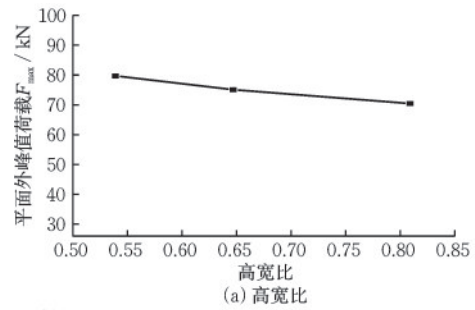
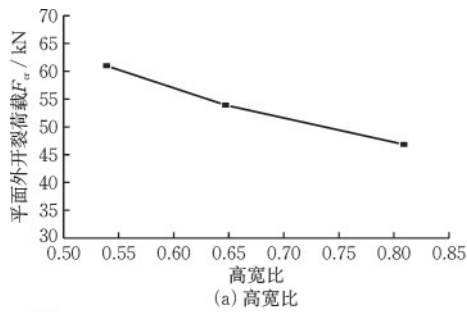


图13 墙体平面外开裂荷载影响因素

图14 墙体平面外峰值荷载影响因素

Fig.13 Influencing factors of out-of-plane cracking load for wall

Fig.14 Influencing factors of out-of-plane peak load for wall

由表3、图13及图14可知,在一定范围内,墙体平面外开裂荷载和峰值荷载均随高宽比及高厚比的减小而增大,随竖向荷载及砌体弯曲抗拉强度的增大而增大;竖向荷载、高厚比、高宽比对生土砌块墙体平面外峰值荷载影响较大,砌体弯曲抗拉强度因生土材料自身强度较低,其对平面外荷载影响相对较小。

#### 4 边界条件对破坏模式和承载力的影响

边界约束条件对墙体平面外破坏模式及承载力有较大影响,针对生土墙平面外承载力较低的问题,可通过改变约束条件来提高其承载力。为此,本文以现有不同约束条件砖砌体平面外性能试验带入生土材料信息后来实现对不同约束条件下生土墙体的平面外受力性能分析。对典型文献[14, 15, 19, 34]数据进行统计分析,试验信息见表4,其中李振宝等<sup>[14]</sup>、H. Derakhshan等<sup>[19]</sup>、张永群等<sup>[15]</sup>考虑了实际工程中砌体结构的构造特点,墙体砌筑在毛石基础上,墙顶分别采用竖向荷载约束的“一”字型砖墙(图15(a))、墙顶两侧设置角钢形成固定支

座和竖向荷载约束的两边约束砖墙(图15(b))以及墙顶带楼盖和竖向荷载约束、墙体两侧设置正交横墙的四边约束砖墙(图15(c))。

#### 4.1 不同约束条件破坏模式

为分析不同边界约束条件的砌块墙体承受平面外均布荷载时的破坏模式,选取李振宝等<sup>[14]</sup>、H. Derakhshan等<sup>[19]</sup>、张永群等<sup>[15]</sup>等具有底部水平约束,其余三边约束条件不同的砖墙进行平面外破坏模式对比分析,其中本文生土砌块墙体的边界约束条件(图11(a))与李振宝文章中砖墙相同,两者均发生底部水平裂缝贯通的弯曲受拉破坏(图16(a)),H. Derakhshan砖墙由于顶部为固定约束,中上部为变形最大处,产生水平裂缝后开裂成两段(图16(b)),张永群砖墙则为四边约束墙,其既有双向弯曲破坏的“Y”型裂缝,又有单向弯曲破坏导致贯穿墙体的水平裂缝(图16(c))。

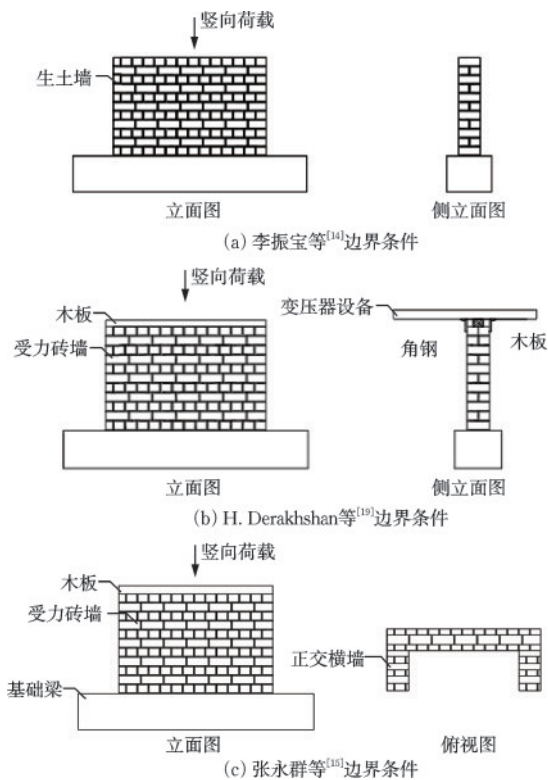
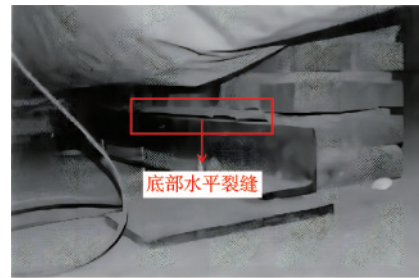


图15 墙体不同边界约束条件

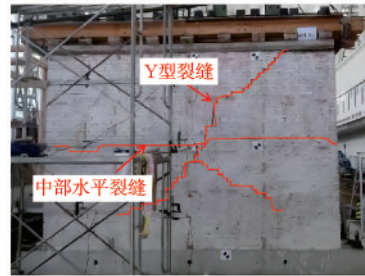
Fig.15 Different boundary constraints of walls



(a) 李振宝破坏模式<sup>[14]</sup>



(b) Derakhshan破坏模式<sup>[19]</sup>



(c) 张永群破坏模式<sup>[15]</sup>

图16 不同边界条件的墙体破坏模式

Fig.16 Failure modes of walls under different boundary conditions

综上可知,墙体边界约束条件对其平面外破坏模式影响较大,当墙体为顶部和底部两边约束时,其发生单向弯曲破坏,顶部约束强度可改变水平裂缝产生部位;当墙体为四边约束时,其破坏模式与砌体填充墙<sup>[33]</sup>相似,均发生双向弯曲破坏,裂缝形态表现为斜向裂缝和水平裂缝。

#### 4.2 不同边界条件承载力

选取张永群等<sup>[15]</sup>、H. Derakhshan 等<sup>[19,34]</sup>所提出的墙体平面外承载力计算公式与本文提出的计算公式进行对比,其平面外承载力计算模型为假定墙体中部开裂两段后刚性摇摆的计算模型<sup>[34]</sup>(图 17),假定生土墙体在上述约束条件下亦符合上述计算模型要求,将本文生土砌块墙体的几何参数和材料强度带入平面外承载力公式进行计算,不同约束条件下的试验模型信息、承载力计算公式、墙体受力模式见表 4。

由表 4 可知,楼盖和正交横墙对砌块墙体的约束作用,可以改变墙体破坏模式、增强其平面外承载力。将本文试验墙体几何参数、泥浆抗压强度和竖向荷载带入文献<sup>[15, 19, 34]</sup>提出的墙体平面外承载力计算公式,其结果分别为 26.86、69.01、143.45 kN,而本文提出的平面外承载力公式计算结果为 9.92 kN。由计算结果可知,当墙体顶部约束采用柔性连接木楼盖的文献<sup>[19]</sup>和角钢约束刚性连接木楼盖文献<sup>[34]</sup>,墙体平面外承载力相较本文分别提高了约 1.7 倍和 6 倍,说明加强墙顶与楼盖的拉结可以有效提高墙体平面外承载力;此外,文

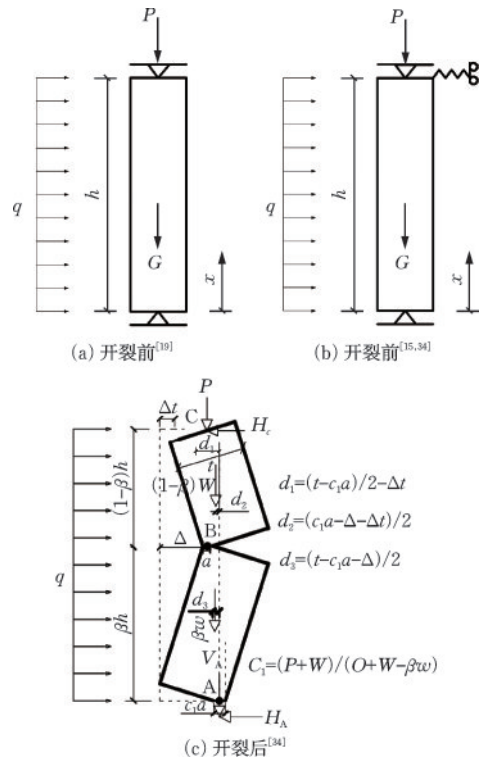


图 17 假定墙体平面外受力开裂后刚性摇摆计算模型  
Fig.17 Rigid rocking calculation model of wall after assumed cracking under out-of-plane loading

献<sup>[15]</sup>相较文献<sup>[19]</sup>在有楼盖约束的基础上,进一步设置正交约束横墙,墙体平面外承载力提高了 5.34 倍,说明加强正交横墙的设置可以大幅的提高砌块墙体平面外承载力。

综上可知,采取加强楼盖拉结、边框约束以及设置正交横墙等措施改变墙体的边界约束条件,可有效提高砌块墙体的平面外承载力。因此,建议在

表 4 不同约束条件砌块墙体平面外力学性能试验对比

Table 4 Experimental comparison of out-of-plane mechanical properties of masonry walls under different constraints

数据来源	墙体构造做法	边界约束条件	平面外承载力计算公式	墙体受力模式
本文	墙顶竖向荷载约束	顶部自由、底部固定	$F_{\max} = (G + P) \frac{t - a}{h}$	单向弯曲
H. Derakhshan 等 <sup>[19]</sup>	墙顶采用木楼盖、竖向荷载约束	顶部柔性连接、底部铰接	$F_{\max} = \left( 83 - \frac{0.0016h}{f_j} \left( \frac{\psi^2 + \psi + 0.33}{\psi + 0.5} \right) \frac{t_n}{t} \right) \times 53 \times 10^{-6} t t_n (1 + 2\psi)$	单向弯曲
H. Derakhshan 等 <sup>[34]</sup>	墙顶采用两侧设置角钢固定木楼盖、竖向荷载约束	顶部刚性连接、底部铰接	$F_{\max} = \left( 83 - \frac{0.0017h}{f_j} \left( \psi + \frac{(1-\beta)(2\psi+2-\beta)}{2(1-\beta)+(2-\beta)\psi} \right) \frac{t_n}{t} \right) \times 0.001h \times l \times \omega_{\max}$	单向弯曲
张永群等 <sup>[15]</sup>	墙顶采用木楼盖和竖向荷载约束、墙体两侧设正交横墙	顶部柔性连接、侧向约束、底部铰接	$F_{\max} = \frac{\alpha(1 + 1.59\psi)Mt}{0.27\rho^2h}$	双向弯曲

实际生土结构工程中可以采用增强楼盖与生土砌块墙体的连接约束、加强构造柱或扶壁柱设置、减小房屋开间尺寸等措施来提高生土砌块墙体平面外抗震性能。

## 5 结 论

(1) 生土砌体弯曲抗拉强度可以采用竖放试件的方式来测定,生土砌体弯曲受拉时多发生沿试件跨中1/3范围内的泥浆灰缝开裂的脆性破坏,裂缝形态单一、断面平整,可采用公式 $f_{tm,m} = k_4 \sqrt{f_2}$ 进行生土砌体弯曲抗拉强度计算,弯曲抗拉强度计算参数 $k_4$ 取0.1。

(2) 单层硬山搁檩屋盖无约束生土砌块墙体在平面外均布荷载下的破坏形态为底部水平裂缝贯通的单向弯曲受拉破坏,其平面外峰值荷载为13.91 kN,且开裂荷载与峰值荷载相差较小;墙体沿高度及宽度方向位移均呈线性变化,平面外位移最大处为墙体顶部。

(3) 基于单层硬山搁檩屋盖下无约束生土砌块墙的破坏模式,建立了生土砌块墙悬臂杆计算模型,获得了墙体平面外最大承载力计算式。分析表明,在一定范围内,墙体平面外承载力随高宽比、高厚比的减小而增大,随竖向压应力、砌体弯曲抗拉强度的增大而增大。

(4) 通过对不同边界约束条件的砌块墙体破坏模式和平面外承载力对比分析,墙体顶部和侧向约束可使墙体裂缝发展更充分、平面外承载力更高,建议可采用增强楼盖与生土砌块墙体的连接约束、加强构造柱或扶壁柱设置、减小房屋开间尺寸等措施来提高生土砌块墙体平面外抗震性能。

## 参考文献:

- [1] 王毅红,梁捷,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)
- [2] 侯世伟,高广亮,张皓,等.螺旋锚复合基础对村镇生土建筑抗震性能影响研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(4):778-786,796.  
Hou S W, Gao G L, Zhang H, et al. Influence of

screw anchor composite foundation on seismic performance of rural raw earth buildings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 778-786,796. (in Chinese)

- [3] 吴珍云,章熙海,李佳,等.江苏农居建筑结构特征及抗震性能分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(4):753-762.  
Wu Z Y, Zhang X H, Li J, et al. Analysis of structural characteristics of rural residential buildings and its aseismic performance in Jiangsu Province [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 753-762. (in Chinese)
- [4] 刘军,谭明,宋立军,等.2017年5月11日新疆塔什库尔干 $M_s$ 5.5地震震害特征分析[J].震灾防御技术,2019,14(1):231-238.  
Liu J, Tan M, Song L J, et al. Analysis on the disaster characteristics of the 2017 Taxkorgan  $M_s$ 5.5 earthquake in Xinjiang [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2019, 14(1): 231-238. (in Chinese)
- [5] 周洋,明小娜,卢永坤,等.2018年9月8日云南墨江 $M$ 5.9地震震害综述[J].华北地震科学,2020,38(1):14-20.  
Zhou Y, Ming X N, Lu Y K, et al. Summary of earthquake damage of Yunnan Mojiang  $M$ 5.9 earthquake on September 8, 2018 [J]. North China Earthquake Sciences, 2020, 38(1): 14-20. (in Chinese)
- [6] 张原硕,杨健强,代博洋,等.2020年云南巧家5.0级地震烈度评定及房屋震害特征[J].地震地磁观测与研究,2020,41(3):209-215.  
Zhang Y S, Yang J Q, Dai B Y, et al. Intensity assessment and characteristics of building's damage in the afflicted area of 2020 Qiaojia  $M_s$ 5.0 earthquake in Yunnan [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2020, 41(3):209-215. (in Chinese)
- [7] 王龙,李小军,杨理臣,等.青海玛多7.4级地震发震断裂特性及工程震害成因分析[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(5):1219-1228.  
Wang L, Li X J, Yang L C, et al. Earthquake damage characteristics of the Maduo  $M_s$ 7.4 earthquake in Qinghai Province [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(5): 1219-1228.
- [8] 王晓初,徐春一,逯彪,等.改性生土坯砌体抗剪及弯曲抗拉性能试验研究[C]//第十六届全国现代结构工程学术研讨会论文集.沈阳:沈阳建筑大学土木工程学院,2016:1663-1669.  
Wang X C, Xu C Y, Lu B, et al. Experimental study on shear and bending tensile properties of modified raw

- adobe masonry [C] // Proceedings of the 16th national academic symposium on modern structural engineering. Shenyang: School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, 2016: 1663-1669. (in Chinese)
- [9] 童丽萍, 贺萍, 赵红垒, 等. 黄河淤泥承重砖砌体结构抗弯性能的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2005(11): 47-49.  
Tong L P, He P, Zhao H L, et al. Experimental study on flexural performance of silt bearing brick masonry structure in Yellow River[J]. New Building Materials, 2005(11): 47-49. (in Chinese)
- [10] Jayasinghe C, Mallaarachchi R S. Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials [J]. Materials and Design, 2009, 30(9): 3859-3868.
- [11] 张贝. 矩形孔页岩砖砌体剪压复合受力及抗弯性能研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2017.  
Zhang B. Study on the properties of shear compression composite and bending for rectangular holes shale brick masonry [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] 黄榜彪, 张贝, 廖天权, 等. 酒精废醪液矩形孔烧结页岩砖砌体抗弯试验[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 561-567.  
Huang B B, Zhang B, Liao T Q, et al. Bending test of waste liquor of alcohol sintered shale rectangular porous brick masonry[J]. Journal of Henan Polytechnic University( Natural Science), 2016, 35(4): 561-567. (in Chinese)
- [13] 尚建丽, 范飞飞, 雷艳春, 等. 夹芯节能墙砌体抗弯性能的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(1): 1-4.  
Shang J L, Fan F F, Lei Y C, et al. Experimental research on resistance of sandwich energy-saving wall masonry[J]. New Building Materials, 2009, 36(1): 1-4. (in Chinese)
- [14] 李振宝, 陈东华, 杜晓霞等. 砖墙在面外荷载作用下力一位移关系研究[C]//新型砌体结构体系与墙体材料—工程应用. 北京: 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 2010: 357-362  
Li Z B, Cheng D H, Du X X, et al. Study on the force-displacement relationship of brick walls under out-of-plane loads [C]//New Masonry Structure System and Wall Materials—Engineering Application. Beijing: Beijing Key Laboratory of Engineering Seismic Resistance and Structural Diagnosis, Beijing University of Technology, 2010: 357-362. (in Chinese)
- [15] 张永群, 蒋利学, 王卓琳. 历史建筑砌体结构的砖墙平面外受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 177-190.  
Zhang Y Q, Jiang L X, Wang Z L. Out-of-plane behavior of brick wall of historical masonry structures [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11): 177-190. (in Chinese)
- [16] 李谧. 基于严格匀质化的砌体平面外受力性能分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.  
Li M. Masonry under different masonry methods based on the rigid homogenization model [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] 杨志明. 砌体结构墙体抗平面外及抗侧—抗压承载能力的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
Yang Z M. The Research on resistance to the out-of-plane and the lateral compressive bearing capacity of masonry structure walls [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [18] 吴加珂. 框-墙连接和砌块嵌固对填充墙平面外性能影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
Wu J K. Influence of frame-wall connection and block embedment on out-of-plane performance of filled wall [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [19] Derakhshan H, Griffith M C, Ingham J M. Out-of-plane behavior of one-way spanning unreinforced masonry walls [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(4): 409-417.
- [20] Maheri M R, Najafgholipour M A, Rajabi A R. The influence of mortar head joints on the in-plane and out-of-plane seismic strength of brick masonry walls [J]. Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering, 2011, 35(C1): 63-79.
- [21] Godio M, Beyer K. Trilinear model for the out-of-plane seismic assessment of vertically spanning unreinforced masonry walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(12): 04019159.
- [22] Wangmo P, Shrestha K C, Miyamoto M. Assessment of out-of-plane behavior of rammed earth walls by pull-down tests [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2019, 13(2): 273-287.
- [23] 王全凤, 陈凡, 黄奕辉, 等. GFRP加固带壁柱砖墙平面外受荷性能试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2007(2): 182-187.  
Wang Q F, Cheng F, Huang Y H, et al. Experimental research on out-of-plane performance capacity of gfrp strengthened brick walls with pil aster [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2007(2): 182-187. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)

(下转第 696 页)