

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2023.01.008

# 土坯力学性能及受压本构模型研究

兰官奇<sup>1</sup>, 李晓光<sup>2</sup>, 张 坤<sup>1</sup>, 王毅红<sup>2</sup>, 朱熹育<sup>1</sup>

(1. 西安石油大学 土木工程学院, 西安 710065; 2. 长安大学 西安市城镇低碳建设重点实验室, 西安 710061)

**摘要:**为获取传统土坯受压应力-应变特性,确定其数学表达式,针对湿制法和干打法制作的土坯开展了单轴抗压试验和三点抗折试验。分别从抗压、抗折强度、破坏机理以及应力-应变关系等方面分析了两类土坯的力学性能。结果表明,普通砌墙砖的抗压及抗折试验方法均适用于传统土坯,干打土坯的抗压强度为湿制土坯的 3 倍,抗折强度为湿制土坯的 1.3 倍,但湿制土坯的断裂能为干打土坯的 2.5 倍。受压初期,干打土坯的应力-应变曲线存在因土料压密而导致的下凹段,而湿制土坯未表现出该特性。基于两类土坯单轴受压状态下的应力-应变曲线特征,提出了土坯单轴受压本构模型,该本构模型与试验数据吻合较好,可用于土坯砌体结构的数值模拟研究。

**关键词:**生土材料;土坯;制作工艺;力学性能;本构模型

中图分类号: TU361

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)01-076-08

## Mechanical properties and compression constitutive models of adobe

LAN Guanqi<sup>1</sup>, LI Xiaoguang<sup>2</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, WANG Yihong<sup>2</sup>, ZHU Xiyu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, P. R. China; 2. Key Laboratory of Low-carbon Urban Construction of Xi'an, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China)

**Abstract:** To obtain the mechanical properties and stress-strain characteristics of traditional adobe and determine the mathematical expression of its variation relationship, a series of uniaxial compression tests and three-point bending tests were performed for molded adobe and compacted adobe. The mechanical properties of the two kinds of adobe were analyzed and compared by the compressive strength, flexural strength, failure mechanism, and stress-strain relationship. The results show that the test method for compression and bending of bricks can be applied to adobe. The compressive strength and flexural strength of compacted adobe are 3 times and 1.3 times of molded adobe, respectively, but the breaking energy of molded adobe is about 2.5 times higher than that of compacted adobe. In the early stage of compression, the stress-strain curve of compacted adobe has a concave section due to compaction of earth material, while this phenomenon has not been observed in molded adobe. The uniaxial compression constitutive model was proposed according to the stress-strain characteristics. This model shows a good correlation with the

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102282504); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022JQ-301); 陕西省重点研发计划资助项目(2022GY-431)。

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102282504), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2022JQ-301), the Key Research and Development Program of Shaanxi (2022GY-431).

作者简介: 兰官奇(1991—), 男, 博士, 主要从事生态建材研发和建筑抗震加固研究, (E-mail) langq@xsyu.edu.cn。

通信作者: 李晓光, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) gxlee@chd.edu.cn。

experimental data and may be applied to the numerical analysis of adobe structure.

**Keywords:** earth materials; adobe; manufacturing process; mechanical property; constitutive models

土坯是由生土材料经简单加工塑型制成的一种无需烧制的建筑砌块,曾被广泛应用于我国传统民居的修建<sup>[1-2]</sup>。与新型建筑砌块相比土坯虽在力学性能和耐久性方面存在缺陷,但在经济性、地区适应性和环保性能方面拥有较大优势<sup>[3]</sup>。随着可持续发展战略的不断推进和“30·60”双碳战略的提出,这种古老的绿色建材再次焕发出新的生命力<sup>[4-6]</sup>。

现有土坯房屋修缮和新型生土砌块的研发离不开传统土坯力学性能研究。国内外研究主要集中在通过物理、化学、力学等改性手段提升其力学和耐久性能,针对传统土坯力学性能的研究相对较少。Morel 等<sup>[7]</sup>通过单砖抗压试验、双砖叠压试验以及三点抗折试验测试了土坯的力学特性,分析了几何形状、尺寸、制造工艺和土料物理参数对土坯抗压强度的影响。该研究虽然发现制作工艺对土坯力学性能存在较大影响,但未作深入探讨。Silveira 等<sup>[8]</sup>将土坯加工成立方体试件和圆柱体试件,分别进行了单轴压缩试验和劈裂试验,建立了不同试验方法下土坯强度的折算关系。Mansour 等<sup>[9]</sup>研究了压制生土基砌块体积密度、孔隙率、压实功之间的关联规律,建立了抗压强度、弹性模量与砌块密度之间的关系。陶忠等<sup>[10]</sup>对云南地区现有房屋中的土坯强度进行测试,由于土坯尺寸差异显著,试验结果离散性较大。随着生土材料相关研究的不断深入,生土材料本构关系成为学者们关心的热点问题,由于起步较晚,已建立的本构模型存在诸多缺陷。Adorni 等<sup>[11]</sup>对高厚比大于 1 的生土块材进行压缩试验,通过对实验数据的拟合得到了生土块材的受压本构关系表达式。但该表达式只能反映生土块材压缩应力-应变曲线的上升段的变化趋势。Illampas 等<sup>[12]</sup>采用分段函数描述生土块材单轴受压状态下的应力-应变特性,所提出本构方程在分段点处不连续。赵成等<sup>[13]</sup>通过对生土块材单轴受压应力-应变曲线的上升段进行简化,采用有理式建立了生土块材单轴受压本构模型。仲继清等<sup>[5]</sup>基于大量立方体生土基块材的单轴受压试验,得到了生土基材料单轴受压应力-应变曲线的特征点,选用分段函数对曲线进行了描述。我国的传统土坯按照其制作工艺大致可分为湿制土坯(又称“土坯”)和干打土坯(又称“土墼”)。湿制土坯是将生土加水合成含水率接近塑限的泥,挤压至木模具,去模成型;干打土坯是将接近最优含水率潮湿生土填入木框内夯打成型。成型方式的不同导致两类土坯的力学性能也存在较大差异。

目前,我国尚未针对生土基砌块颁布相应的基本力学性能试验方法,已有研究大多参照烧结普通砖和混凝土砌块的力学性能试验方法。同时,传统土坯不同于烧结砖和水泥基砌块,表现出一定的塑性性质,对于高厚比较小的土坯可能出现因“环箍效应”约束过大而无法测得抗压强度的情况。因此,为了准确地获取土坯力学参数,除单轴抗压实验外,往往辅以三点抗折试验对其力学性能进行评价。为了获取我国传统土坯应力-应变特性,确定变化规律的数学表达式,研究采用传统工艺制作湿制土坯和干打土坯,通过半砖叠压试验和三点抗折试验对土坯进行测试,研究两类土坯的力学性能,分析土坯单轴受压状态下的应力-应变特性,提出土坯的单轴受压本构模型。

## 1 试验概况

### 1.1 材料

试验分别选取陕南地区黄土(EM-1)及关中地区黄土(EM-2)作为制坯土料。根据《土工试验规程》(SL237—1999)<sup>[14]</sup>分别测定了 2 个地区土料的颗粒级配、液塑限、最优含水率和最大干密度,如表 1 所示。湿制土坯中掺入质量比为 1% 的稻草,稻草长度为 7~10 cm,干打土坯未加入掺合料。

## 1.2 土坯制作

选取尺寸为 310 mm×150 mm×100 mm 的湿制土坯和尺寸为 370 mm×240 mm×60 mm 的干打土坯进行试验。其中,湿制土坯是将含水率为 24±2% 的土料在坯模内湿塑成型;干打土坯是将含水率接近最优含水率(18.5%)的土料填入坯模内人工夯筑成型。由于含水率对生土块材的强度影响显著<sup>[15-16]</sup>,成型土坯置于室内养护 28 d,待土坯含水率基本维持恒定后进行试验(养护温度为 25±5℃,相对湿度为 60%)。采用与土坯相同工艺制作边长为 100 mm 的立方体试件,与土坯同条件养护后测试其抗压强度。

表 1 土的物理参数

Table 1 Physical parameters of soil

参数	编号		
	EM-1	EM-2	
土料级配/%	黏粒	17.6	25.2
	粉粒	38.5	30.7
	砂粒	36.1	41.2
	巨粒	7.8	2.9
液限/%	33.6	38.9	
塑限/%	17.2	21.7	
最优含水率/%	18.2	19.5	
最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.93	1.87	

## 1.3 试验方法及试件分组

参考我国《砌墙砖试验方法》GB/T 2542—2012<sup>[17]</sup>对两类传统土坯的单轴抗压强度和抗折强度进行测试,每组 10 个,共 40 个试件。抗压试验采用连续均匀的加载方式,加载速率为 0.2kN/min,当荷载下降至峰值荷载 80%时结束试验。抗折试验为三点加载,以 50 N/min 的速率匀速加载至土坯断裂。

## 1.4 破坏形态

抗压试验中,湿制土坯试件初始裂缝出现在两砖接触面,试件在受压过程中发出清脆响声;破坏时,试件压缩变形及横向变形均较大,但由于稻草的拉结作用,表层并未发生大面积剥落,如图 1(a)所示。干打土坯试件初始裂缝出现在试件侧棱处。破坏时,试件压缩变形较小,试件侧面发生鼓出并伴有大量表皮剥落,如图 1(b)所示。

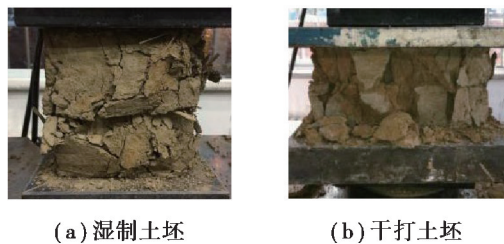
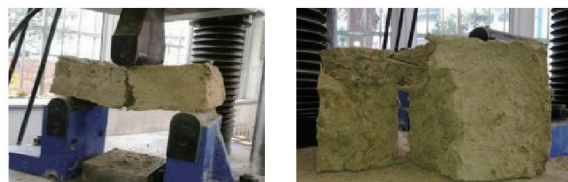


图 1 土坯单轴受压破坏形态

Fig. 1 Uniaxial compression failure mode of adobe

湿制土坯抗折破坏形态如图 2(a)所示,加载至 85%峰值荷载时,试件中下部产生裂缝并迅速延伸至加载点,开裂过程伴有稻草拉断声。达到峰值荷载后,试件中部裂缝已贯穿整个截面,但由于稻草拉结,土坯仍未发生脆断。观察试件破坏断面图 2(b),可以发现断面下部稻草已全被拉断,但断面上部仍有稻草相连。干打土坯的抗折破坏形态呈现出明显的脆性,当荷载达到最大值时,试件中部迅速产生裂缝,土坯发生脆断,如图 3 所示。与湿制土坯相比干打土坯的破坏断面相对平整。



(a) 破坏形态 (b) 破坏断面

图 2 湿制土坯抗折破坏形态及破坏断面

Fig. 2 Bending failure mode and destroyed section of molded adobe



(a) 破坏形态 (b) 破坏断面

图 3 干打土坯抗折破坏形态及破坏断面

Fig. 3 Bending failure mode and destroyed section of compacted adobe

## 2 试验结果分析

由于生土材料的不均匀性,两类传统土坯的抗压强度及抗折强度离散性均较大。为排除强度异常值对试验结果产生较大影响,采用 Grubbs 检验法<sup>[18]</sup>将所得土坯强度中的异常值进行剔除。剔除异常值后两类土坯的抗压强度均值、抗折强度均值及其变异系数如表 2 所示。

表 2 试验结果

Table 2 Test results		MPa
制作工艺	抗压强度	抗折强度
湿制	0.74[8.7]	0.37[4.1]
干打	2.33[18.2]	0.49[4.6]

注:[]中为变异系数,单位:%。

### 2.1 土坯抗压性能

从表 2 可以看出,干打土坯的单轴抗压强度均值高达 2.33 MPa,约为湿制土坯单轴抗压强度均值的 3 倍。湿制土坯在制作过程中所采用土料的含水率远高于干打土坯所用土料,导致成型后的湿制土坯在养护过程中丧失更多水分,土坯内部形成多孔结构,密实度较差;干打土坯制作过程中的夯实工序提高了土坯整体密实度和土坯的强度。通过对两类土坯的密度进行测量,得到湿制土坯的平均密度为 1.51 g/cm<sup>3</sup>,干打土坯的平均密度为 1.69 g/cm<sup>3</sup>。此外,稻草的掺入也对湿制土坯的抗压强度产生了负面影响,稻草中空的结构进一步降低了土坯的密度,导致湿制土坯强度较低。文献[19]表明在湿制土坯中掺入质量比 15% 的麦秸秆(长度为 5 cm)后土坯的单轴抗压强度降低了 40%。表 2 显示湿制土坯抗压强度的变异系数远小于干打土坯。干打土坯采用人工夯实,难以保证每块土坯具有相对统一的夯实度,导致干打土坯的抗压强度离散性较大。

### 2.2 土坯抗折性能

砌体在轴向压力作用下发生破坏时,砌体中的块材没有达到抗压承载力,由于竖向裂缝贯通导致砌体破

坏,块材的破坏状态更接近于受折<sup>[20]</sup>。因此,土坯的抗折性能对于抗压强度的发挥至关重要。可以看出,干打土坯的平均抗折强度为湿制土坯的 1.3 倍。定义土坯受折时其荷载-挠度曲线下方所包含的面积为土坯的断裂能,如图 4 所示,得到湿制土坯抗折试件的平均断裂能为 1 310 N/m,而干打土坯抗折试件的平均断裂能仅为 534 N/m。相较于干打土坯,湿制土坯的抗折强度虽然较低,但通过断裂能评价两者的抗折性能可以发现,湿制土坯在受折断裂过程中消耗了更多的能量。这是由于湿制土坯在受折过程中的抗力主要由土料间的粘聚力、稻草和土料间的粘结力及稻草的拉力 3 部分组成,开裂前抗力主要为土料间的粘聚力,当裂缝产生后,缝隙间的稻草逐渐被拉断或拔出,上述过程消耗了大量的能量。而干打土坯在受折过程中仅靠土料间的粘聚力提供抗力,一旦产生裂缝,土坯即被折断,耗能效果较差。

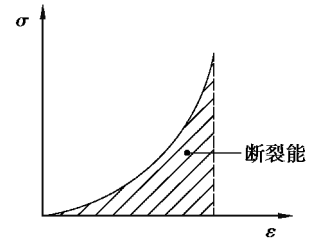


图 4 断裂能示意图  
Fig. 4 Fracture energy

折压比是材料抗折强度与抗压强度的比值,被广泛用于描述材料抗压强度和抗折强度的关系。经计算得到湿制土坯的折压比为 0.46,干打土坯的折压比为 0.20,这是由于稻草的掺入极大地改善了湿制土坯的抗裂性能。同时,两类土坯尺寸的差异也是造成这种差异的原因之一。

2.3 应力-应变曲线及破坏机理分析

两类土坯的平均应力-应变曲线如图 5 所示。值得注意的是,受荷初期湿制土坯的应力-应变曲线与干打土坯存在明显区别,湿制土坯在压力作用下并未发生明显的“固结”现象。由于制作湿制土坯所用土料含水量较高,土坯在养护过程中大量失水导致其内部留下孔隙,土孔隙中的少量水分由于毛细作用汇集于较大颗粒的接触点处,溶于水中的矿物颗粒随着水量的进一步丧失逐渐浓缩沉淀为胶结物,增强了土颗粒间的抗滑移能力,阻止了土料因自重产生的压密,使土坯内部形成了以较大土颗粒为骨架的架空结构。在加载初始阶段(见图 6(a)),湿制土坯的承载力主要为土体骨架的结构力,由于架空结构的相对稳定,应力随应变的增长呈线性变化。湿制土坯应力-应变曲线的线性段位于其受压承载力的 5%~80%。荷载接近土坯最大承载力时(见图 6(b)),土体的架空结构逐渐破坏,溃散成土颗粒,土坯的变形逐渐增大,曲线的斜率逐渐减小。达到极限荷载后,土体的架构特性基本丧失,土颗粒重新分布,应力随应变增大迅速减小(见图 6(c))。

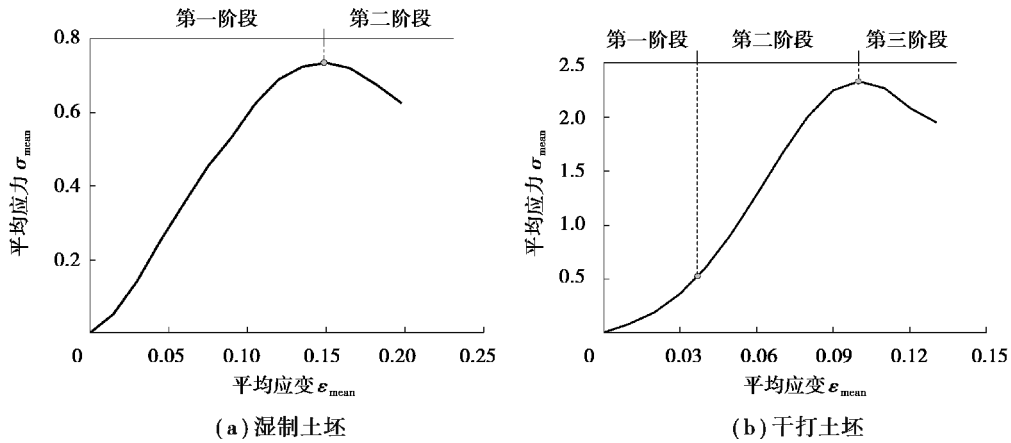
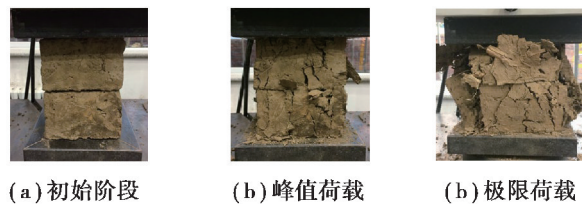


图 5 平均应力-应变曲线

Fig. 5 The mean stress-strain characteristic curve



(a) 初始阶段 (b) 峰值荷载 (c) 极限荷载

图 6 湿制土坯试件破坏过程

Fig. 6 Failure process of molded adobe

可以看出,干打土坯单轴受压下的应力-应变曲线可以分为 3 个阶段。开始加载时,土坯表面的突起和颗粒被逐渐压平,直至承压板与试件紧密接触。加载初期,土坯在压力和承压板横向约束的作用下产生了“固结”效应,土颗粒在荷载的作用下重新分布,将土坯中原有的孔隙和裂缝填实(见图 7(a)),直至土坯内部达到一个相对稳定的状态。该阶段土坯发生了较大的竖向变形,应力-应变曲线呈非线性变化。第 2 阶段,由于土坯内部结构相对稳定,随着荷载增加,应力随应变呈线性递增。对于干打土坯,其应力-应变曲线的线性段位于其受压承载力的 30%~80%。荷载接近土坯最大承载力时,土坯内部裂缝逐渐贯通,滑动面产生,曲线的斜率逐渐减小(见图 7(b))。达到峰值荷载后,土体沿滑动面迅速滑移,土坯丧失承载能力,应力随应变增大迅速减小,去除外层剥落的土块后,试件芯柱呈现出“沙漏”状,芯柱内部也被多条竖向裂缝贯穿(见图 7(c))。



图 7 干打土坯试件破坏过程

Fig. 7 Failure process of compacted adobe

### 2.4 单轴受压本构模型

采用 Weibull 函数反映土坯的非线性压缩性能。通过对比本构方程所对应的可决系数  $R^2$  确定最佳拟合曲线。同时,为了保证本构模型的有效性,提出的方程需满足以下要求:1)拟合曲线需经过坐标轴原点;2)拟合曲线需经过(1,1)点;3)拟合方程的一阶导数在其应变比变化范围内连续。

满足以上要求的拟合曲线通过 MATLAB 的标准优化程序计算得到,式(1)和式(2)分别为湿制土坯和干打土坯对应的压缩本构方程。

$$\bar{\sigma} = 2 \times \bar{\epsilon} \times (1/2)^{\bar{\epsilon}^3}, \tag{1}$$

$$\bar{\sigma} = 1.8 \times \bar{\epsilon}^{1.5} \times (1/1.8)^{\bar{\epsilon}^{2.5}}, \tag{2}$$

式中: $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{max}}$ 为特征应力; $\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\epsilon_{max}}$ 为特征应变。式(1)和式(2)所对应的可决系数  $R^2$  分别为 0.92 和 0.88,说明所得本构方程可以较为准确地反映湿制土坯和干打土坯单轴受压状态下的应力应变关系,拟合曲线如图 8 所示。

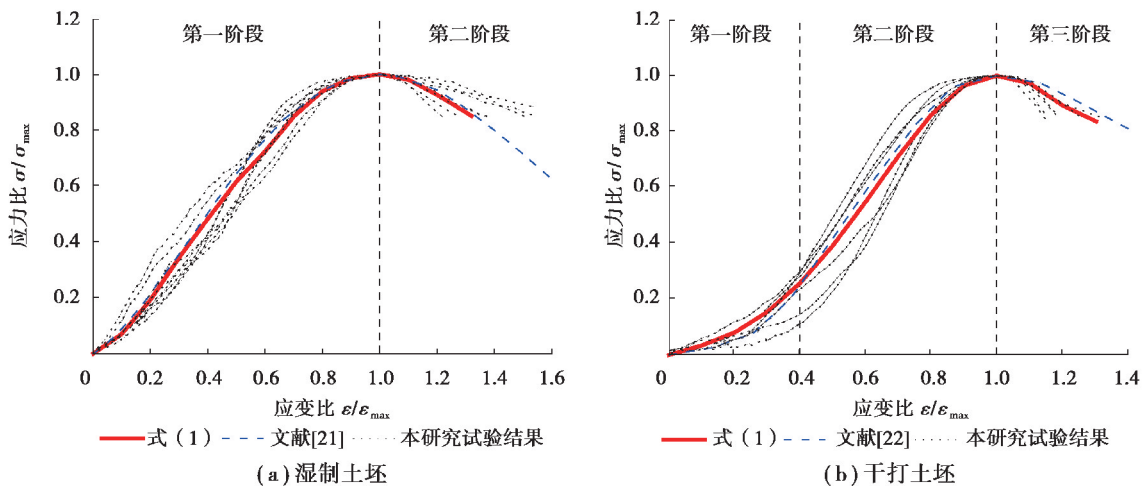


图 8 拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve

为了验证本构模型的有效性,图 8 给出了所提出的本构模型与文献[21]和文献[22]中的试验结果对比图。图 8(a)中的试验数据为边长 100 mm 的立方体生土试块单轴压缩应力-应变特征曲线。该试块内掺入了质量比为 0.5% 的稻草,稻草平均长度为 70 mm,采用湿法制作。可以看出,提出的湿制土坯本构模型与试验数据吻合较好,可以较好地反映湿制生土块材单轴受压的应力-应变特性。图 8(b)中的试验数据为高厚比为 1.13 的圆柱体素土试件在单轴压缩状态下的应力-应变特征曲线,该试件采用机械压制成型,制作工艺与干打土坯类似。可以看出,在峰值应力之前,提出的本构模型与试验数据吻合;在峰值应力之后模型曲线比试验结果的变化梯度更大,在实际计算中采用提出的干打土坯本构模型计算土坯破坏时的结果偏于安全。

### 3 结 论

1)本次制作的干打土坯的抗压强度为湿制土坯的 3 倍,抗折强度为湿制土坯的 1.3 倍。干打土坯在抗压、抗折试验中均表现出明显的脆性破坏现象,而湿制土坯的脆性性质不显著,且在受折破坏过程中,湿制土坯比干打土坯具有更好的耗能能力。

2)干打土坯与湿制土坯的应力-应变特性存在显著差异。干打土坯在受压初期应力-应变曲线存在明显的下凹阶段,而湿制土坯未表现出该特征,其应力峰值点前的应力-应变关系与混凝土材料相近。

3)基于 Weibull 方程建立的土坯单轴受压本构模型,较好地反映了两类土坯单轴受压状态下的应力-应变特性,可用于土坯砌体结构的数值模拟研究。

4)将《砌墙砖试验方法》中砌墙砖抗压及抗折试验方法应用到传统土坯的抗压及抗折试验中,得到稳定的抗压及抗折强度值,说明该试验方法可作为传统土坯抗压及抗折强度试验方法。

#### 参考文献:

- [1] Varum H, Tarque N, Silveira D, et al. Structural behaviour and retrofitting of adobe masonry buildings[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2014: 37-45.
- [2] Holliday L, Ramseyer C, Reyes M, et al. Building with compressed earth block within the building code[J]. Journal of Architectural Engineering, 2016, 22(3): 04016007.
- [3] Olukoya Obafemi A P, Kurt S. Environmental impacts of adobe as a building material: the north cyprus traditional building case[J]. Case Studies in Construction Materials, 2016, 4: 32-41.
- [4] Illampas R, Ioannou I, Charmpis D C. Overview of the pathology, repair and strengthening of adobe structures[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2013, 7(2): 165-188.
- [5] 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)
- [6] Niroumand H, Álvarez J A B, Saaly M. Investigation of earth building and earth architecture according to interest and involvement levels in various countries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57:1390-1397.
- [7] Morel J C, Pkla A, Walker P. Compressive strength testing of compressed earth blocks[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(2): 303-309.
- [8] Silveira D, Varum H, Costa A. Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40(3):719-728.
- [9] 王毅红. 生土坯及生土坯砌体受力性能的试验研究. 砌体结构与墙体材料—基本理论和工程应用—2005 年全国砌体结构基本理论与工程应用学术会议论文集[C]//中国工程建设标准化协会砌体结构专业委员会, 2005.  
Wang Y H. Experimental studies on the bearing performance of adobe block and adobe masonry. masonry structure and wall material—basic theory and engineering application—national symposium on basic theory and engineering application of masonry structure in 2005 [C] // Branch of Masonry Structures, China Association for Engineering Construction Standardization, 2005. (in Chinese)
- [10] 陶忠, 潘兴庆, 潘文, 等. 云南农村民居土坯墙单块土坯力学特性试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(1): 99-104.  
Tao Z, Pan X Q, Pan W, et al. Mechanics characteristics of adobe of rural houses in Yunnan province[J]. Earthquake

- Resistant Engineering and Retrofitting, 2008,30(1): 99-104. (in Chinese)
- [11] Adorni E, Coisson E, Ferretti D. In situ characterization of archaeological adobe bricks[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40(7):1-9.
- [12] Illampas R, Ioannou I, Charmpis D C. Adobe bricks under compression: experimental investigation and derivation of stress-strain equation[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53(4):83-90.
- [13] 赵成, 阿肯江·托呼提, 陈嘉, 等. 改性土体材料单轴受压本构关系研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2010, 27(1): 123-126.
- Zhao C, Akenjiang T H T, Chen J, et al. Researches on modified raw-soil materials constitutive relation subject to uniaxial compression[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2010, 27(1):123-126. (in Chinese)
- [14] 土工试验规程:SL237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- SL237—1999 Specification of soil test:SL237—1999[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese)
- [15] Beckett C, Ciancio D. Effect of compaction water content on the strength of cement-stabilized rammed earth materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(5): 583-590.
- [16] Bui Q B, Morel J C, Hans S, et al. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54(11):163-169.
- [17] 砌墙砖试验方法:GB/T2542—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Test methods for wall bricks:GB/T2542—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese)
- [18] 数据的统计处理和解释-正态样本离群值的判断和处理:GB/T4883—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Statistical interpretation of data-detection and treatment of outliers in the normal sample: GB/T4883—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [19] 外力·艾比不拉, 阿肯江·托呼提, 卡米力·外力. 植物纤维单块土坯抗压试验研究[J]. 建筑科学, 2012, 28(5): 61-64.
- Vali A B B L, Akenjiang T H T, Vali K M L. Experimental research on compressive strength of straw fiber adobe [J]. Building Science, 2012, 28(5):61-64. (in Chinese)
- [20] Lima S A, Varum H, Sales A, et al. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35(10):829-837.
- [21] Zhang Y C, Wang Y H, Zhao N N, et al. Experimental and stress-strain equation investigation on compressive strength of raw and modified soil in loess plateau[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2681038.
- [22] Parisi F, Asprone D, Fenu L, et al. Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers[J]. Composite Structures, 2015, 122:300-307.

(编辑 陈移峰)