

土楼夯土结构受力变形特性的数值模拟

许永贤, 彭兴黔, 梁兰娣

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以福建永定土楼中的九盛楼(方形)及侨福楼(圆形)为研究对象,采用 ANSYS 有限元软件,对土楼夯土结构建立整体模型,并通过数值模拟对两种典型的土楼进行对比分析.结果表明:夯土墙体的最大应力在材料实测的峰值应力以下,其结构强度符合要求;圆形土楼的位移和应力随厚度均匀分布,夯筑形式更加合理.同时,分析夯土结构的薄弱部位,为土楼的加固和维护提供依据.

关键词: 夯土结构; 福建土楼; 整体模型; 受力变形; 数值分析

中图分类号: TU 361

文献标志码: A

2008 年,福建土楼被列入《世界文化遗产名录》,广泛分布在闽西和闽南的山区^[1],以夯土作为其主要承重结构.在永定县实地调研发现,一些土楼夯土墙体出现错位、沉降甚至坍塌,一些土楼即使局部有加固措施,仍然无法防止整片墙体的变形,由夯土墙体受力变形而导致的土楼荒废、消失的情况与日俱增.国内外虽对夯土结构进行了一定数量的研究^[2-4],但大多集中于夯土构件,很少对夯土建筑的整体性能,及其有限元模型进行研究,也没有针对福建土楼的夯土结构特点分析其受力变形特性.基于此,本文对夯土进行抗压试验,利用调研相关数据,在现有荷载作用下建立整体模型,对两类最为典型的土楼进行数值模拟.

1 基本假定

1) 均匀性假定.假定墙体为均质材料,不考虑环境造成的墙体收缩、含水率变化等影响^[5].

2) 整体性假定.土楼夯土墙体是分层、分段、交错夯筑而成,夯筑时在墙体内放置竹筋、木条等,以增大拉结力,加强夯土墙体的整体性能,建模时可假设每层墙体为一个整体.

3) 底部约束假定.土楼夯土墙体是石基础,夯筑时已采取有效措施以满足石基与夯土间的连接,在此把墙体底部假设为固定端.预留的门洞为大块石板,故假定约束门洞顶部的竖向位移.

4) 墙体厚度均匀假定.土楼夯土墙体厚度随高度增加而递减(主要表现在墙体内部,外部由于阳光等作用,收缩比内部快,墙体略微倾斜),取各层平均厚度为墙体厚度.

2 夯土结构的本构关系

土体的材料特性非常复杂(各向异性、硬化、软化等),姚仰平等^[6]对土的基本特性有综合性的研究,国内外尚无一种本构被公认为可完全描述土的本构关系^[7].现有本构模型基本是学者居于某一因素下提出的,如赵杰等^[8]采用理想弹塑性模型及 Drucker-Prager 屈服准则对土体结构极限承载力进行有限元分析,Bui 等^[9]运用离散和连续的 SHEAR-BEAM 模型分析夯土的动态特性等.

2.1 土楼夯土抗压力学性能

试验土样取自永定县非世遗的民居土楼,选取不同高度的原始夯土块,切割成边长为 70.7 mm 立

收稿日期: 2014-11-17

通信作者: 彭兴黔(1959-),男,教授,博士,主要从事防灾减灾的研究. E-mail:pxq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178196, 51478197); 国家科技支撑计划项目(2014BAK09B01); 福建省科技计划重点项目(2013Y0067); 福建省自然科学基金资助项目(2013J01193)

方体试块,如图 1 所示.采用微机控制电子万能试验机 WDW-100,其最大载荷为 100 kN,试验采用位移控制方式,加载速度为 $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.试验获得的土楼夯土应力-应变曲线的实测部分,如图 2 所示.

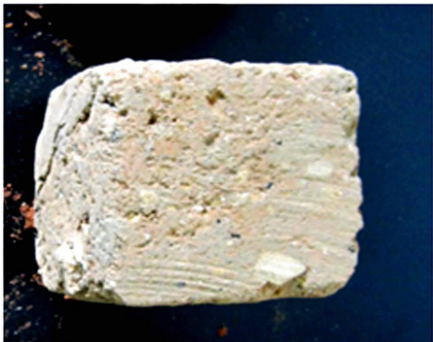


图 1 原状夯土试块

Fig. 1 Original rammed earth block

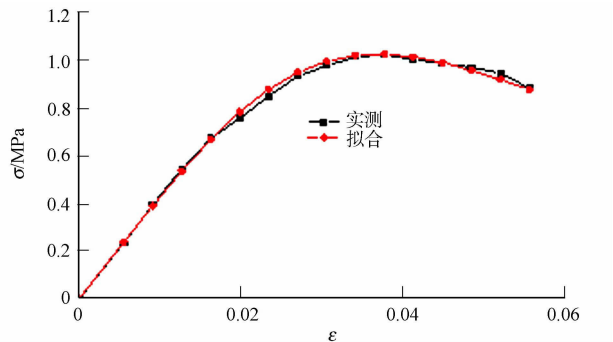


图 2 土楼夯土应力-应变曲线

Fig. 2 Tulou rammed earth stress-strain curve

2.2 土楼夯土本构关系的确定

试验测得其应力-应变曲线与混凝土应力-应变关系曲线非常接近,且考虑到加载方式,可用增量型的非线性弹性本构来表示其本构关系.文献[10]在通过试验获得所需参数进行数值分析后,也提出须考虑土的非线性弹性特性.这里采用改进的 Saenz 公式建立夯土的本构关系模型^[11],即

$$\sigma = \frac{\epsilon}{A + B\epsilon + C\epsilon^2 + D\epsilon^3} \tag{1}$$

式(1)中: A, B, C, D 为待定系数.

A, B, C, D 由以下条件确定:

- 1) 原点处, $\epsilon = 0, \sigma = 0, E_0 = d\sigma/d\epsilon$;
- 2) 峰值点, $\epsilon = \epsilon_0, \sigma = \sigma_0, d\sigma/d\epsilon = 0$;
- 3) 极值点, $\epsilon = \epsilon_u, \sigma = \sigma_u$.

根据式(1),可得到夯土本构方程,即

$$\sigma = \frac{E_0 \epsilon}{1 + (R + \frac{E_0}{E_s} - 2)(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}) - (2R - 1)(\frac{\epsilon}{\epsilon_0})^2 + R(\frac{\epsilon}{\epsilon_0})^3} \tag{2}$$

式(2)中: $R = \frac{E_0(\frac{\sigma_0}{\sigma_u} - 1)}{\frac{E_0}{E_s}(\frac{\epsilon_u}{\epsilon_0} - 1)^2} - \frac{\epsilon_0}{\epsilon_u}$; $E_s = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$; E_0 等参数均由夯土抗压试验取得, $E_0 = 42.5\text{ MPa}$; $\sigma_0 = 1.03$

MPa; $\epsilon_0 = 0.037$; $\sigma_u = 0.876\text{ MPa}$; $\epsilon_u = 0.056$.

将试验参数代入式(2),即得土楼夯土的本构关系,有

$$\sigma = \frac{42.5\epsilon}{1 - 3.55\epsilon + 233.75\epsilon^2 + 6\,712.34\epsilon^3} \tag{3}$$

对比式(3)拟合与实测的土楼夯土应力-应变曲线(图 2),两者吻合得较好.由此可知:改进的 Seanz 公式可作土楼夯土结构的本构关系,该关系能较好地模拟其受力性能.

3 受力变形特性分析

考虑土楼的受力特点、破坏及损伤,采用 Solid 65 单元模拟夯土结构.根据土工试验,夯土密度取为 $1\,740\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.经抗压试验得弹性模量为 81 MPa,泊松比为 0.3,峰值应力 1.0 MPa.采用多线性随动强化材料模型 KINH 及 W-W 五参数破坏准则^[2],开裂、闭合剪力传递系数为 0.075 和 0.5.结合对称性,取其 1/4 模型计算,夯土有限元模型,如图 3 所示.

3.1 土楼模型的尺寸及荷载

现以九盛楼(方形)和侨福楼(圆形)两座典型的土楼为模拟对象,实测尺寸数据,如表 1 所示.九盛楼的纵长为 32.8 m,横长为 33.5 m,侨福楼的直径为 45 m.

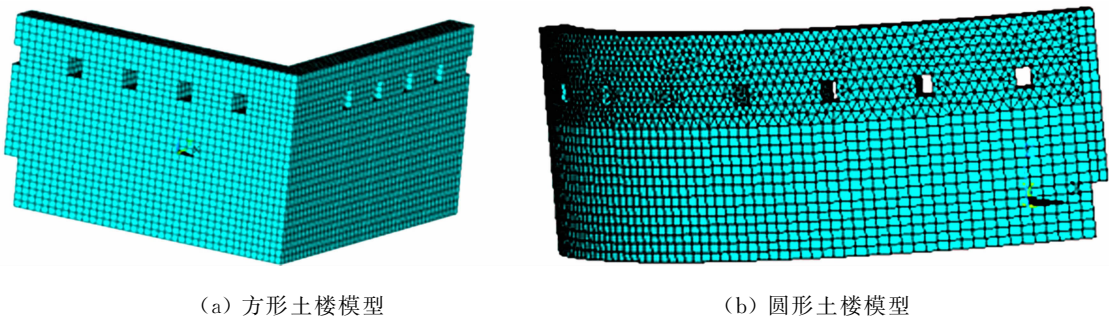


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

土楼主要承受的荷载包括夯土墙、木构件和瓦片的重度,以及楼面的荷载(此处未考虑风荷载作用).夯土的重度根据实测取为 $17.052\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,木构件的重度取 $5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$.屋面面积按坡度 $4.5:10$ 计算,屋面荷载采用 $1.214\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,楼面活荷载根据规范取值^[12].结合永定土楼相关材料的实测尺寸和数量,得到九盛楼和侨福楼各层荷载,如表 2 所示.

3.2 九盛楼受力变形特性

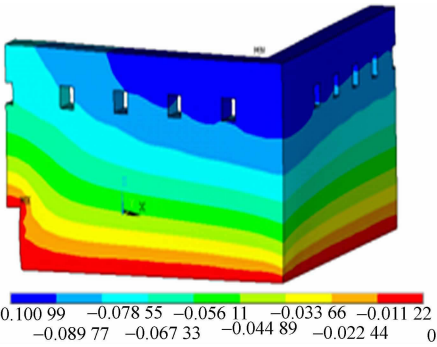
计算表明:方形九盛楼的 1/4 模型在荷载作用下, X,Y,Z 方向的最大位移分别为 $2.59,-2.57,-10.10\text{ mm}$.结合模型的尺寸,夯土墙相对变形最大的是竖向位移(即 Z 方向),如图 4(a)所示.从总位移云图可以看出:在土楼顶部的纵横墙交界处,具有较大的相对位移,且同一高度的位移以墙交界处为轴心成对称发散式缩小,如图 4(b)所示.

表 1 土楼模型的尺寸

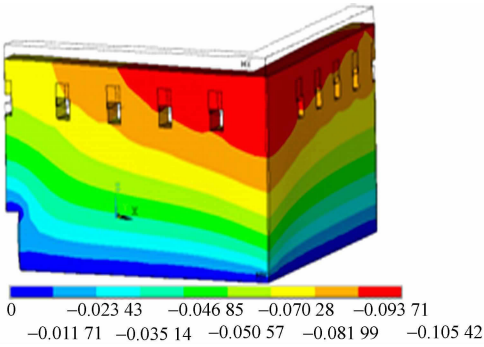
Tab. 1 Size of the Tulou model		m		
土楼	类型	一层墙高(厚)	二层墙高(厚)	三层墙高(厚)
九盛楼	方形	3.4(1.4)	2.8(1.2)	3.0(1.0)
侨福楼	圆形	3.6(1.3)	2.7(1.0)	3.0(0.7)

表 2 土楼模型的各层荷载

Tab. 2 Each layer load of the Tulou		model in each storey			MN
土楼		二层荷载	三层荷载	屋盖荷载	
九盛楼		2.068	1.022	1.291	
侨福楼		3.594	1.836	1.139	



(a) Z 方向



(b) 总位移

图 4 方形土楼模型的位移

Fig. 4 Displacement of the square Tulou model

受力方面,方形土楼在 X 方向的应力总体为受压状态,但横墙、门洞一带均出现拉应力,如图 5(a) 所示. Y 方向仍以受压为主,但纵墙上出现拉应力,特别是窗洞上部一带,如图 5(b)所示. Z 方向上最大压应力在纵横墙交界处,其值为 0.263 MPa ,小于材料峰值强度,如图 5(c)所示.

3.3 侨福楼受力变形特性

圆形侨福楼的 1/4 模型在荷载作用下, X,Y,Z 方向的最大位移分别为 $-3.89,-3.70,-11.25\text{ mm}$,夯土墙的主要变形还是竖向位移(即 Z 方向),如图 6(a)所示.总位移云图表明:圆形土楼的顶部仍然具有较大的位移,但与方形土楼相比,其同一高度的位移基本相同,位移大小明显沿竖向均匀分布,越向上位移越大,如图 6(b)所示.由图 6(b)可知:门洞附近墙体的位移分层线整体上扬(即同一高度的位移相对较小),而从竖向上看,其位移仍然层次分明.

圆形土楼在 X 方向的应力总体为受压状态,如图 7(a)所示. Y 方向上的应力与方形土楼类似,在圆

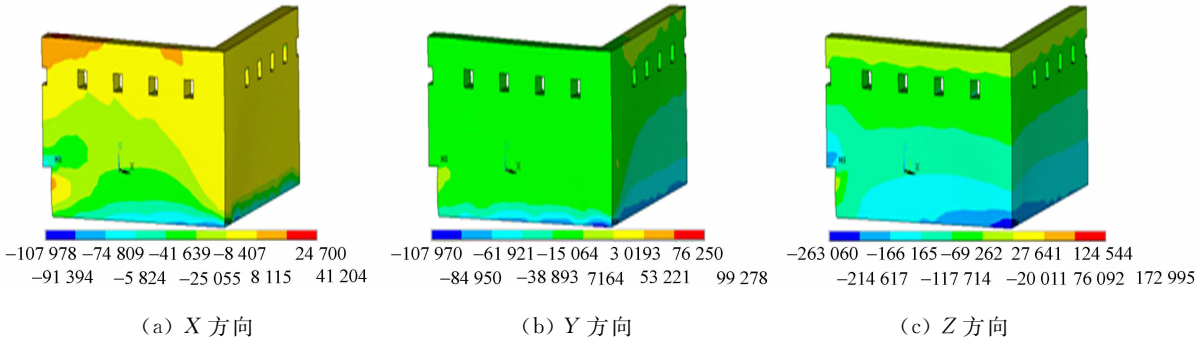


图 5 方形土楼模型的应力

Fig. 5 Stress of the square Tulou model

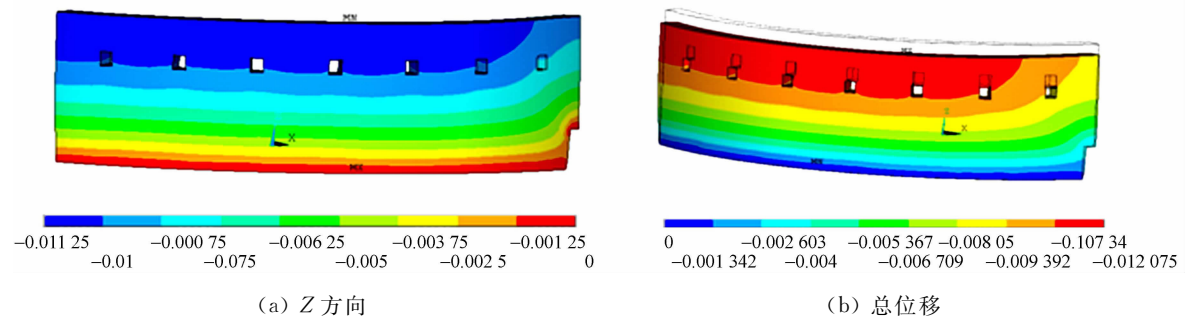


图 6 圆形土楼模型的位移

Fig. 6 Displacement of the circular Tulou model

形土楼的门、窗洞一带有明显拉应力,如图 7(b)所示. 模型 Z 方向整体受压力,最大应力出现在底部且值为 0.304 MPa,小于材料峰值强度,如图 7(c)所示. 与其位移图相似,土楼 Z 方向应力沿竖向分层分布,越向下应力越大. 另外,窗洞下部同一高度的应力略有不同(分层线成波浪状),门洞上部应力相对较大,而门侧应力较小.

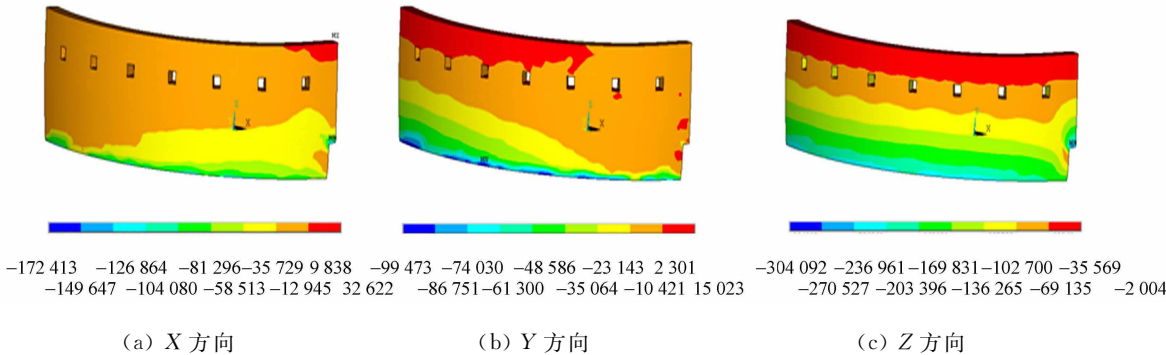


图 7 圆形土楼模型的应力

Fig. 7 Stress of the circular Tulou model

4 结论

- 1) 根据夯土抗压试验获得应力应变曲线,结合改进的 Saenz 公式得到土楼夯土的本构关系.
- 2) 方形土楼位移和应力各处差别较大,而圆形土楼位移和应力沿竖向分层分布,在环向形成相对均匀的制约,结合土楼实际厚度随高度的变化,认为圆形土楼材料利用率更高.
- 3) 土楼竖向最大应力(0.263,0.304 MPa)小于材料峰值应力,结构强度满足要求.
- 4) 门、窗洞口一带出现应力集中,表现为拉应力或同一高度压应力相对减轻. 土楼纵横墙交界处、门洞侧部和窗洞上部等为其薄弱部位. 随着年代的积累、夯土材料力学性能的改变及荷载持续作用,将产生不同程度的拉压裂缝(调研已验证),及时采取相应的加固保护措施.

参考文献：

[1] 花长城,彭兴黔,吴仁伟,等. 福建土楼夯土墙风驱雨侵蚀损伤预测研究[J]. 自然资源学报,2012,27(6):1068-1074.

[2] 阿肯江·托乎提,元国庆. 基于 Solid 65 和 Solid 45 有限单元的素夯土墙体数值建模及计算分析[J]. 新疆大学学报:自然科学版,2008,25(4):492-498.

[3] MANIATIDIS V,WALKER P. Structural capacity of rammed earth in compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2008,20(3):230-238.

[4] CIANCIO D,GIBBINGS J. Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples[J]. Construction and Building Materials,2012,28(1):294-304.

[5] 张琰鑫,童丽萍. 夯土住宅结构性能分析及加固方法[J]. 世界地震工程,2012,28(2):72-78.

[6] 姚仰平,张丙印,朱俊高. 土的基本特性、本构关系及数值模拟研究综述[J]. 土木工程学报,2012,45(3):127-150.

[7] BUI Q B,MOREL J C. Assessing the anisotropy of rammed earth[J]. Construction and Building Materials,2009,23(9):3005-3011.

[8] 赵杰,邵龙潭. 土体结构极限承载力的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增刊 1):183-189.

[9] BUI Q B,HANS S,MOREL J C,et al. First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings[J]. Engineering Structures,2011,33(12):3690-3695.

[10] NOWAMOOZ H,CHAZALLON C. Finite element modelling of a rammed earth wall[J]. Construction and Building Materials,2011,25(4):2112-2121.

[11] 赵成,阿肯江·托乎提,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(7):123-126.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:14-17.

Numerical Simulation of Tulou Rammed Earth
Structure Deformation Characteristics

XU Yong-xian, PENG Xing-qian, LIANG Lan-di

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Using the finite element software ANSYS, the overall structure models of the Tulou rammed earth square Tulou of Jiu-sheng and Circular Tulou of Qiao-fu in Yongding County were established and simulated numerically. The simulation results show that the maximum stress of rammed earth wall is under the measured stress peak of the material, its structural strength meets the performance requirements; in circular Tulou, the distribution of stress and displacement vary uniformly with the thickness of wall, indicating that the circular form is more reasonable. The weak parts of the Tulou rammed earth structure are point out, to strengthen and maintain of the Tulou.

Keywords: rammed earth structures; Fujian Tulou; overall model; mechanical deformation; numerical analysis

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)