

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201606008



圆形土楼夯土结构性能的数值模拟

叶俊捷, 彭兴黔, 施维娟

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用数值模拟方法,以福建龙岩的振成楼、承启楼等经典圆形土楼为原型,建立圆形土楼夯土结构模型,对土楼夯土墙体在静力荷载作用下的结构承载性能进行分析,通过改变土楼各尺寸参数,分析不同土楼夯土结构模型的受力及变形特征,得出影响受力变形规律特征的主要因素.结果表明:不论是在墙厚、直径还是墙高模拟中,应力、位移都不是单调变化的,有合理的取值区间.

关键词: 夯土结构; 圆形土楼; 承载性能; 变形特征; 结构参数; 数值模拟

中图分类号: TU 361

文献标志码: A

文章编号:1000-5013(2016)06-0698-04

Numerical Simulation of Circular Tulou Rammed Earth Structure Performance

YE Junjie, PENG Xingqian, SHI Weijuan

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

Abstract: By the numerical simulation method, taking the classic circular Tulou (rammed earth building) in Longyan, Fujian, such as Zhencheng Tulou, Chengqi Tulou, the circular Tulou structure model was established. the bearing capacity of Tulou wall was investigated under the static loads. the stress and deformation characteristics of different Tulou structure models were studied for the parameters of various sizes of Tulou, the main factors influencing the stress deformation characteristics were obtained. The results show that for different wall thicknesses, diameters and heights, the stress and displacement do not change monotonously, and it has a reasonable value range.

Keywords: rammed earth structures; circular Tulou; load-carrying properties; deformation characteristics; structural parameters; numerical simulation

福建土楼作为我国历史文化的一张名片,具有极高的历史、政治、艺术、旅游、科学和文化价值^[1]. 在众多土楼群中,各个土楼的尺寸参数都各不相同,导致结构性能也不同,这也是导致其在长期相同的环境作用下所受到的损坏不相同的重要原因之一. 合理的尺寸能够提高土楼结构性能,也使得有些土楼能够遗留百年,而有些土楼只能拆除或翻建. 为了探究影响土楼结构性能的主要尺寸参数,得出圆形土楼最合理的尺寸,采用有限元软件进行数值分析^[2]. 采集振成楼、承启楼等具有代表性的圆形土楼的相关尺寸参数,对这些数据进行统计分析,采用数理统计的方法,计算它们的均值,建立模型. 所建立的模型更具有普遍性,更能客观地反映各项参数的变化对土楼带来的影响,更能探究土楼的结构性能随着各参数改变的变化,利于分析土楼的结构可靠性^[3-4]. 本文对圆形土楼的结构性能进行数值模拟.

收稿日期: 2016-01-20

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: 国家科技支撑计划项目(2014BAK09B01);国家自然科学基金资助项目(51178196, 51478197);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);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(2014 年度)

1 有限元模型的建立

1.1 几何模型的描述

为了能更客观、规律地将模拟结果反映到土楼上，模拟尺寸为振成楼、如升楼、承启楼、侨福楼等圆形土楼的实际尺寸，包括外部直径 D 、墙高 h 、每层墙厚 d 。使用 SPSS 软件进行数据统计，以偏度-峰度检验法及 W 检验法^[5] 作为标准，选取平均值进行数值模拟。模拟结果如下：直径 D 为 42 m；均匀墙厚 d 为 1 m；层高 h 为 4.2 m；门的尺寸为 1.5 m×2.0 m；窗户的尺寸为 0.6 m×0.6 m。

1.2 本构模型的建立

考虑基于 ABAQUS 提供的两种划分方式^[6-7] 的缺陷，根据实际比较，圆形土楼夯土结构的几何模型，如图 1 所示。由于圆形土楼的特殊结构，为使圆形土楼模型能获得较高的精度，模型最终选取二次六面体单元，即采用结构化或扫掠的网格划分技术，得到的网格较为规则。网格划分结果，如图 2 所示。

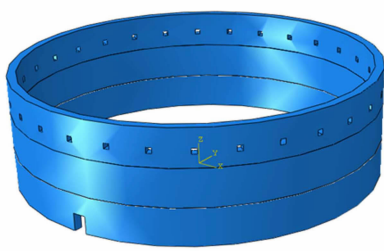


图 1 圆形土楼夯土结构的几何模型

Fig.1 Geometry model of circular Tulou structure rammed earth structure



图 2 土楼夯土结构模型的网格划分

Fig.2 Meshing of Tulou structure rammed earth structure

通过对比岩土中各种弹塑性本构模型^[8-9]、夯土材料参数及实验数据，联用 ABAQUS 中的弹性模型^[10]与塑性模型中的 Mohr-Coulomb 模型，结合前期夯土材料试验数据，拟合成适用于土楼夯土材料的弹塑性本构模型。在 ABAQUS 在分析计算时，采用连续光滑的椭圆函数代替传统的 Mohr-Coulomb 的尖角六边形函数，即

$$G = \sqrt{(\epsilon c_0 \tan \Psi)^2 + (R_{mw} q)^2} - p \tan \Psi. \tag{1}$$

式(1)中： Ψ 为剪胀角； c_0 为初始粘聚力，即未产生塑性变形前的粘聚力； ϵ 为控制子午面上的形状及函数渐近线间相似度的偏心率。

假设 $R_{mw}(\Theta, e, \varphi)$ 为控制 G 在 π 平面上的形状，即

$$R_{mw} = \frac{4(1 - e^2) \cos^2 \Theta + (2e - 1)^2}{2(1 - e^2) \cos^2 \Theta + (2e - 1) \sqrt{4(1 - e^2)(\cos \Theta)^2 + 5e^2 - 4e}} \cdot R_{mc}(\frac{\pi}{3}, \varphi). \tag{2}$$

式(2)中： e 是 π 平面上的偏心率，即

$$e = \frac{3 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi}. \tag{3}$$

通过计算， e 使屈服面与塑性势面在 π 平面上的受拉及受压角点相切， e 的大小根据所拟用的塑性势面取值，但必须符合 $0.5 \leq e \leq 1$ 。

2 试验方案选取

为了能够全面了解土楼参数对土楼结构性能的影响，选取如下 3 个对土楼结构性能影响的参数。

1) 变墙厚对比。土楼墙体作为主要的承重结构，对土楼整体的结构性能有着不可忽略的影响。此方案探究在不改变其余参数的情况下，改变墙体厚度，对土楼夯土墙的整体结构受力变形性能的影响。

2) 变直径对比。由于圆形土楼的直径大小不一，通过改变土楼的直径大小，探究土楼直径的取值除了根据风水及土楼楼主实际的用地需求外，还要根据土楼结构的受力影响。

3) 变墙高对比。过高的墙体导致土楼在受力过程中产生失稳破坏，并且土楼自身的墙体就有一定的倾斜程度，故不能忽略土楼墙体高度的影响。此方案研究改变土楼墙体高度的大小，对土楼夯土墙结

构受力变形性能的影响.

3 参数变化对结构性能的影响

通过对土楼原状土的夯土材料参数分析,根据土工试验,夯土墙密度取 $1\,624\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;弹性模量为 130.67 MPa ;泊松比为 0.3 ;内摩擦角为 39° ;粘聚力为 410 kPa .在施加荷载时,按照木梁与夯土墙体接触面积加载,并针对不同模拟试验方案,分别施加土楼实际荷载或极限荷载.

3.1 变墙厚对比数值模拟结果

在保持土楼夯土墙体直径(42 m)、墙体高度(12.6 m)为常数的情况下,变化墙体厚度.按照墙体厚度由小到大的模型为 $A\sim G(0.7\sim 1.3\text{ m}$,梯度为 0.1).分析不同墙体厚度下,土楼夯土结构模型的极限状态.不同墙体厚度模型变化曲线,如图 3 所示.图 3 中: σ 为应力; s 为位移.

由图 3 可知:随着墙体厚度的增大,土楼夯土结构模型的承载能力呈现增大趋势,并且不会引起较大的竖向位移值.但是较大的厚度会引起土楼建造成本的提高,在土楼实际的建造过程中,土楼楼主所选取的土楼墙体厚度也较为合理,不会单一地追求墙体厚度大小,而是从土楼的整体考虑,选取合适的土楼墙体厚度,这也是土楼能够经历悠久历史屹立不倒的原因之一.

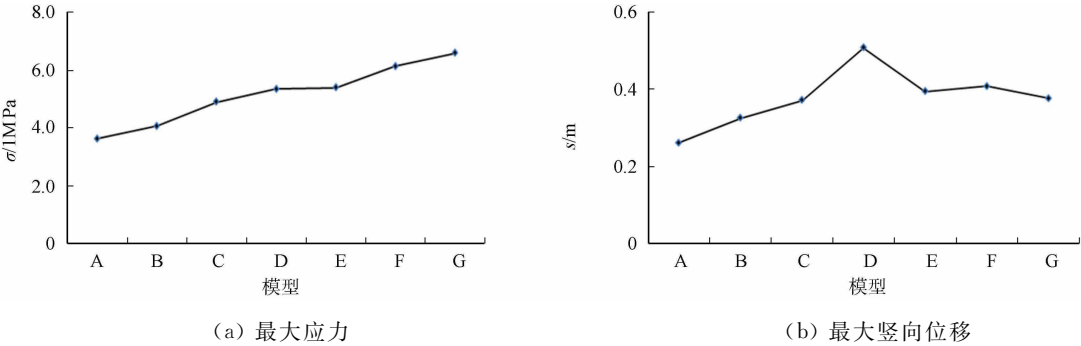


图 3 不同墙体厚度模型变化曲线

Fig. 3 Curve of models with the different wall thicknesses

3.2 变直径对比数值模拟结果

在保持墙体厚度(1 m)、墙体高度(12.6 m)为常数的情况下,改变土楼夯土结构模型的直径,分析不同直径下的极限状态,分析结果如图 4 所示.直径分别由小至大模型编号为 $A\sim F(35.7\sim 46.2\text{ m}$,梯度为 2.1).

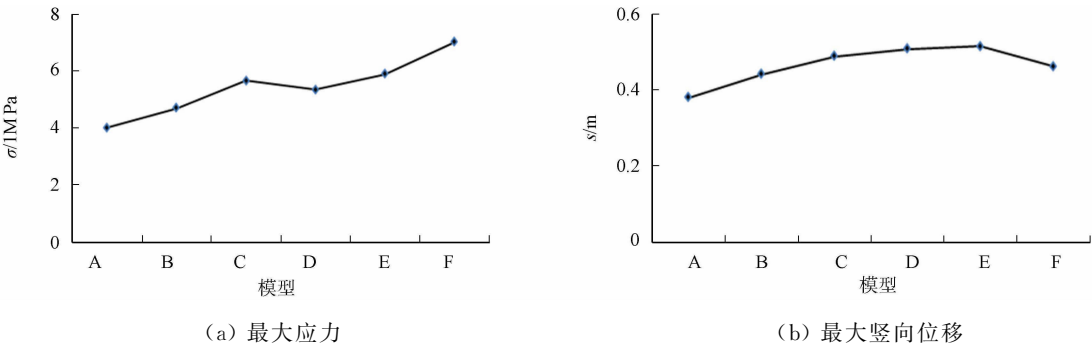


图 4 不同直径模型变化曲线

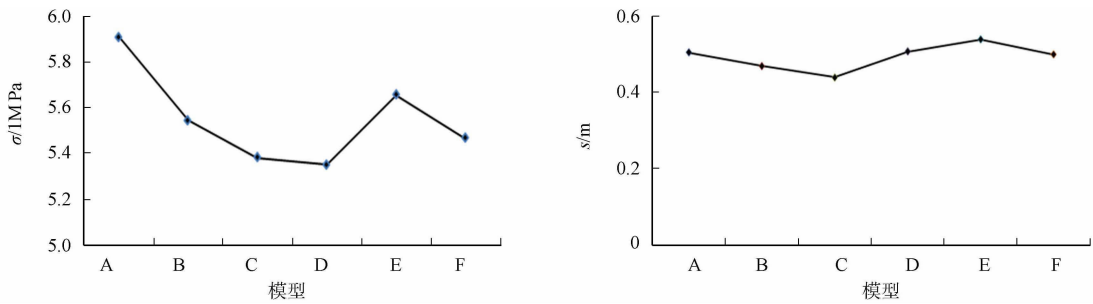
Fig. 4 Curve of models with the different diameters

由图 4 可知:直径较大的 F 模型,承载力较大,且极限状态的位移值反而减小,说明增大直径可以提高土楼的整体性,从而提高土楼的整体承载能力,且极限状态下的竖向位移值不会有明显的增大.在实际土楼群中,直径更大的土楼结构承受能力更大,也直观地体现出历史悠久的土楼一般都是直径较大的原因.

3.3 变墙高数对比数值模拟结果

在保持土楼夯土墙体直径(42 m)、墙体厚度(1 m)为常数的情况下,变化墙体高度.按照墙体高度

由小到大，模型为 A~F(8.82~15.12 m，梯度为 1.26)。分析不同墙体高度下，土楼夯土结构模型的极限状态。不同墙体高度模型变化曲线，如图 5 所示。



(a) 最大应力 (b) 最大竖向位移

图 5 不同墙体高度模型最大应力变化曲线

Fig. 5 Curve of maximum stress with different wall heights

由图 5 可知：针对给定的其他土楼尺寸参数，土楼有一个较为合理的土楼墙体高度，在此高度下，承载能力不会太低，且极限状态下的位移也不是最大。位移是应变的累加，当高度为 13.86 m 时，位移最大，但由于应变不是最大，所以应力不大。因此，土楼在选取高度时，不能一味地追求空间开阔，或者为了能有足够大的承载能力而降低墙体高度，应该从多方面考虑，采取科学的方式选取土楼墙体高度。

4 结论

1) 采用数据统计处理得到的模型尺寸，得出的模拟结果更具有普遍性和代表性。

2) 通过夯土材料的试验数据，结合改进 Mohr-Coulomb 模型的函数，并将其与 ABAQUS 中的弹性模型联用得到土楼夯土的本构模型。

3) 模型的最大应力和最大竖向位移随着结构直径、墙体厚度和高度有明显的变化，所以在土楼实际尺寸的选取应该要有更科学的方法，合理的尺寸参数能使土楼的结构性能及材料使用达到最优，从而节约成本及人力。但由于模型较简单，缺少木结构的协调机理，无法更具体表现出实际中各参数对土楼结构性能带来的影响。

参考文献：

[1] 黄汉民. 福建土楼[J]. 福建建筑, 2001(71): 27-28.

[2] 吴仁伟, 彭兴黔. 圆形土楼屋盖风荷载的数值模拟分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 427-432.

[3] LUO Yangjun, KANG Zhan, LI A. Structural reliability assessment based on probability and convex set mixed model [J]. Computers and Structures, 2009, 87(21): 1408-1415.

[4] 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.

[5] 俞钟行. W 检验法程序[J]. 物探化探计算技术, 1989, 11(3): 267-270.

[6] 阿肯江·托呼提, 亓国庆. 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.

[7] 朱向荣, 王金昌. ABAQUS 软件中部分土模型简介及其工程应用[J]. 岩石力学, 2004, 25(增刊 1): 144-148.

[8] 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.

[9] 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(7): 123-126.

[10] 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.

(责任编辑：陈志贤 英文审校：方德平)