

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202004034



圆形福建土楼模态分析

杨志林, 罗漪, 王海峰

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了研究福建土楼的动力特性,运用有限元数值模拟方法,将土楼简化为外部夯土结构、夯土-木构混合结构两种模型,并对模型进行模态分析;研究夯土弹性模量、夯土密度、夯土墙高度、土楼结构平均半径及夯土墙平均厚度等 5 个因素对土楼外部夯土结构自振频率的影响.结果表明:夯土结构自振频率随着夯土弹性模量、夯土墙平均厚度的增加而增加,随着夯土密度、夯土墙高度、土楼结构平均半径的增加而减小;夯土结构自振频率与夯土弹性模量的平方根近似成正比,与夯土密度的平方根及夯土墙高度近似成反比;不同阶自振频率曲线发生重合现象,说明圆形土楼夯土结构可能存在密频现象,也说明材料特性变化对不同阶自振频率的影响基本一致;土楼结构平均半径和夯土的弹性模量的参数敏感性最大,夯土密度的参数敏感性较小.

关键词: 福建土楼;客家土楼;夯土结构;自振频率;动力特性

中图分类号: TU 361

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2021)01-0030-08

Modal Analysis of Circular Fujian Tulou

YANG Zhilin, LUO Yi, WANG Haifeng

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361012, China)

Abstract: Tulou was simplified into two models including external rammed earth structure and rammed earth-timber mixed structure, the finite element simulation method was used to analyze the dynamic modal characteristics of Fujian Tulou models. The influence on natural frequency of external rammed earth structure was studied by 5 factors including the elastic modulus, density of rammed earth, the height, the average radius of structure of Tulou, and the average thickness of the rammed earth wall. The results show that the natural frequency of the structure increases with the increase of the elastic modulus of rammed earth and the thickness of the rammed earth wall, decreases with the increase of the density of rammed earth, height of Tulou, and average radius of structure of Tulou. The natural frequency of rammed earth is approximately proportional to the square root of the elastic modulus of rammed earth, and is inversely proportional to the square root of the density of rammed earth and the height of Tulou. The natural frequency curves of different orders coincide, indicating that there may be dense frequency phenomena in the rammed earth structure of circular Tulou, and the influence of the change of material properties on natural frequencies of different orders was similar. The parameters of the average radius and elastic modulus of rammed earth are the most sensitive, the parameter of rammed earth density is little sensitive.

Keywords: Fujian Tulou; Hakka Tulou; rammed earth structure; natural frequency; dynamic characteristics

福建土楼(以下简称土楼)广泛分布在中国东南部的福建客家地区,是以夹墙板夯筑为墙体、以木料为柱梁等的多层巨型生土建筑.土楼的外围以厚实坚固的夯土墙承重,沿外墙用木构分隔成众多的房

收稿日期: 2020-04-29

通信作者: 罗漪(1976-),女,副教授,博士,主要从事福建土楼的研究. E-mail: luoyi@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878302, 52078225)

间. 沿夯土外墙径向有木横梁, 间距约为 1 m, 直径约为 120 mm, 一端埋入外部夯土墙中, 另一端与内部木梁、木柱形成木构框架. 土楼约 3~5 层, 楼高 11~16 m, 底层墙厚 1~2 m, 顶层厚 0.8~1.6 m, 夯土墙的基础宽达 3 m^[1].

土楼的动力特性包括结构的自振频率、振型等, 是计算抗风、抗震和动荷载响应等动力学分析的基础, 对土楼的研究和保护具有重要意义. 然而, 土楼建筑材料和结构形式不同于普通现代建筑, 外部夯土墙体厚、刚度大, 内部木结构柔, 空间整体性强, 简化为质点体系误差较大, 已有的结构动力特性理论不能直接用于土楼的动力特性分析. 另外, 现有的生土建筑规范, 如 JGJ 161—2008《镇(乡)村建筑抗震技术规程》、GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》(2016 年版)等适用于低矮生土建筑, 而土楼层高、结构高度、开间、进深均超出规范的上限值, 在建筑规模上属于超限生土建筑.

许多学者针对生土结构的动力特性进行了研究, 文献[2-4]通过缩尺模型振动台试验, 认为加载前试验模型的自振频率最大, 由于结构损伤的累积, 每次加载后, 结构的自振频率均降低. Delgadillo 等^[5]通过足尺模型试验, 发现夯土墙的自振频率随着夯土墙内部温度的增加而减小, 环境温度与夯土墙内部平均温度变化存在时差, 环境湿度和夯土墙内部湿度与夯土墙的自振频率之间的关系不明显. 文献[6-7]通过有限元数值模拟, 发现普通方形生土建筑的一阶振型为长边沿垂直于长边方向的水平振动. Gomes 等^[8]通过数值模拟认为当内部隔墙厚度小于外墙时, 内隔墙的刚度小于外墙刚度, 结构的一阶振型为内隔墙的水平振动, 但一阶振型的振型参与质量很小, 一阶振型为局部振动. Bui 等^[9]通过现场实测, 获得了生土结构的一阶频率和振型, 但是忽略了其他各种因素对结构频率的影响^[10]. 上述研究针对低矮的生土结构, 层高为 1~2 层, 而福建土楼是巨型多层生土墙与木构的混合结构, 需要进一步确认生土结构动力特性分析结果的适用性.

针对土楼的动力特性研究, 李衡^[11]通过数值模拟和模型试验的方法, 对缩尺模型进行了模态分析, 没有对实际结构进行模态分析. 王安宁^[12]用数值模拟方法计算了在两种弹性模量取值和 4 种墙体平均厚度情况下, 福建土楼的前 5 阶自振频率, 结果表明: 夯土的弹性模量小的土楼, 夯土结构刚度小, 自振频率也小; 随着墙体厚度的增加, 土楼夯土结构的刚度不断增加, 各阶自振频率也不断地增加. 生土结构自振频率随着结构尺寸、材料参数的变化规律, 有待进一步探索研究.

土楼以方形和圆形为主, 圆形居多, 圆形土楼主要有 3 类: 内通廊式、单元式和特殊形式圆楼^[1]. 本文以内通廊式圆形土楼为研究对象, 对其进行模态分析.

1 夯土结构模型与夯土-木构混合结构模型的对比

为了研究圆形福建土楼的动力特性, 以福建省龙岩市永定县的承启楼为原型进行模态分析, 承启楼一层平均墙体厚度为 1.4 m, 底层平均墙体厚度为 0.8 m, 取夯土墙体平均厚度为 1.2 m; 夯土墙高度为 12.4 m; 墙体外侧直径为 63.6 m. 承启楼尺寸测绘图, 如图 1 所示.

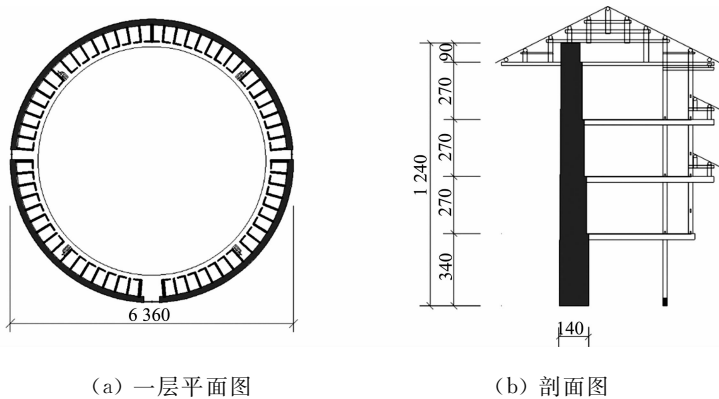


图 1 承启楼尺寸测绘图(单位: cm)

Fig. 1 Chengqi Lou dimensional drawing diagram (unit: cm)

1.1 有限元模型

圆形土楼的夯土结构被简化为等厚的圆柱壳, 柱壳厚度为墙体的平均厚度, 柱壳的高度为墙体的实

际高度,夯土材料的密度为 $1\,624\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量为 $130.67\text{ MPa}^{[13-14]}$,泊松比为 0.30 ;木结构的材料密度为 $506\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量为 $8\,177.06\text{ MPa}$,泊松比为 $0.37^{[15-16]}$.夯土结构和夯土-木构混合结构的有限元模型,如图 2 所示.

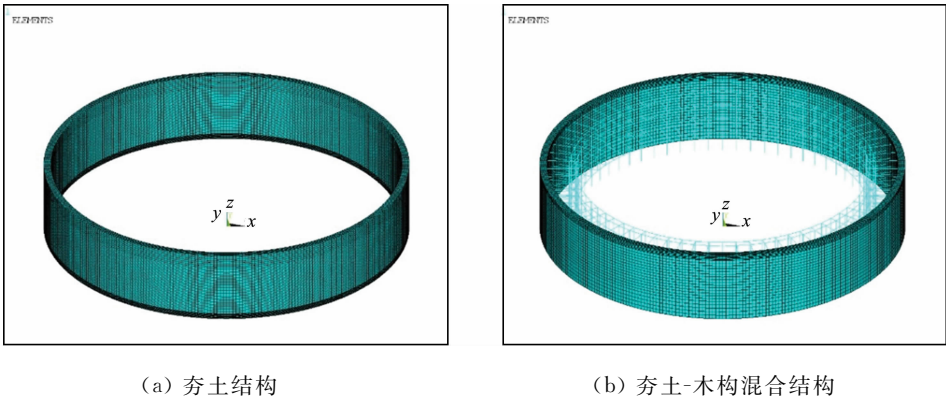


图 2 有限元模型图

Fig. 2 Finite element model diagram

夯土墙选用 Solid 185 单元,这是一种空间 8 节点 6 面体实体单元;木结构选取 Beam 188 单元,这是一种空间两节点梁单元;木结构之间的榫卯连接简化为刚接.夯土-木构混合结构中,木结构与夯土结构通过共用相接触位置节点的方式连接;在边界条件中,将夯土结构的边界条件设置为底部固支,顶部自由,将木结构的边界条件设置为底层木柱底端固支.

1.2 模态分析结果对比

夯土结构模型与夯土-木构混合结构模型的前 10 阶自振频率,如表 1 所示.表 1 中: ω 为自振频率; η 为相对差异.由表 1 可知:圆形土楼中可能存在重频或密频现象.

表 1 夯土模型与夯土-木构混合结构模型的前 10 阶自振频率

Tab. 1 TOP 10 natural vibration frequencies of rammed earth struture model and rammed earth-wood mixed structure model

参数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
ω (夯土结构模型)/Hz	0.937	0.937	0.939	0.939	1.020	1.020	1.022	1.022	1.174	1.174
ω (夯土-木构混合模型)/Hz	1.031	1.031	1.071	1.071	1.082	1.082	1.210	1.210	1.211	1.211
$\eta/\%$	9.10	9.10	12.30	12.30	5.73	5.73	15.50	15.50	3.10	3.10

图 3~5 分别为夯土结构模型与夯土-木构混合结构模型的第 1~3 阶振型的对比.由图 5 可知:夯土-木构混合结构模型中木构受夯土结构的约束,振型均为木结构随着夯土结构做横向(径向)振动,尽管数值模拟中两种模型前 10 阶的振型相对差异最大值为 15.5% ,但两种模型自振频率的绝对差异在

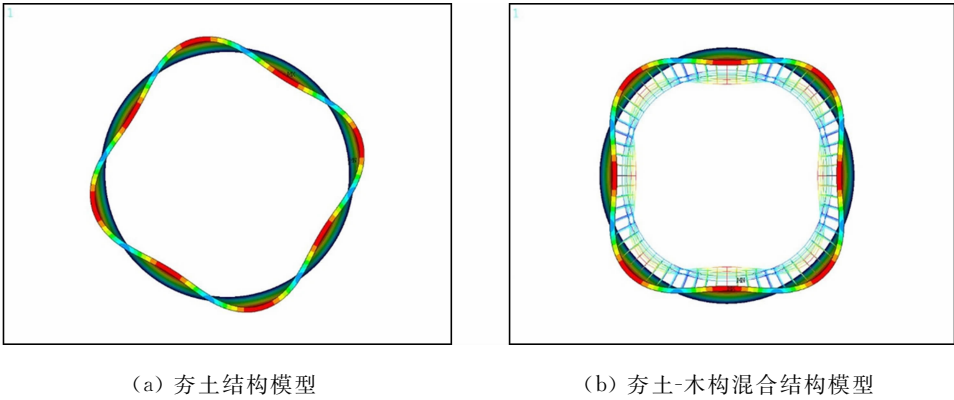


图 3 夯土结构模型与夯土-木构混合结构模型 1 阶振型对比

Fig. 3 Comparison of 1st modal shape between rammed earth structure model and rammed earth-wood mixed structure model

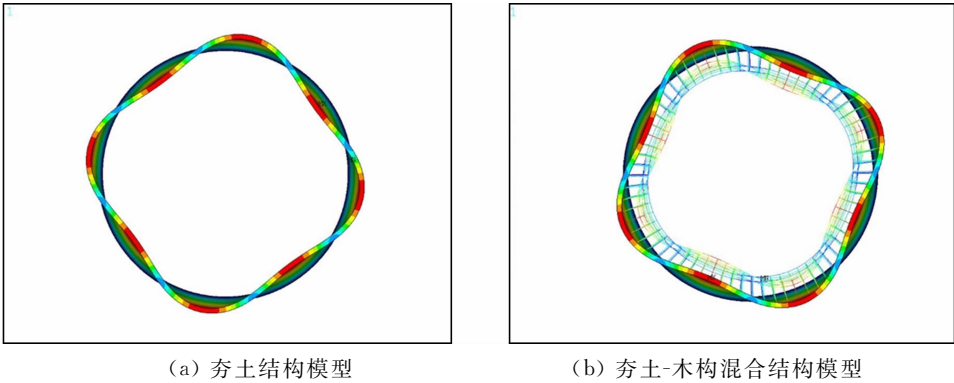


图 4 夯土结构模型与夯土-木混合结构模型 2 阶振型对比

Fig. 4 Comparison of 2nd mode shapes between rammed earth structure model and rammed earth-wood mixed structure model

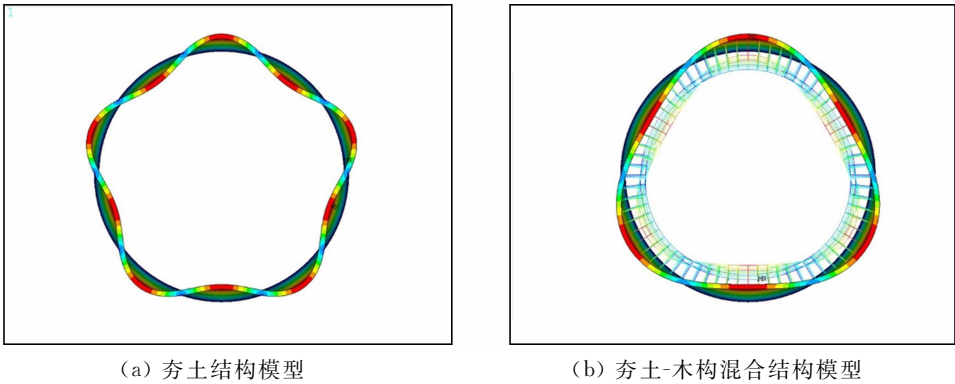


图 5 夯土结构模型与夯土-木构混合结构模型 3 阶振型对比

Fig. 5 Comparison of 3rd mode shapes between rammed earth structure model and rammed earth-wood mixed structure model

0.2 Hz 以内;虽然两种模型的 3 阶振型存在差异,但夯土-木构混合结构模型中存在的振型,夯土结构模型中均存在相应的相似振型.因此,可以用夯土模型探索圆形土楼自振频率随着结构材料参数、尺寸参数变化的规律.

2 参数变化对圆形土楼自振频率的影响

2.1 参数的确定

结构的自振频率主要由结构的刚度和质量决定,影响夯土结构刚度的参数主要有:夯土的弹性模量(E)、土楼结构平均半径(R)、夯土墙平均厚度(b)和夯土墙高度(H),影响夯土结构质量的参数主要为夯土密度(ρ).故选取夯土的弹性模量和密度、土楼结构平均半径、夯土墙高度和夯土墙平均厚度 5 个参数,分析参数变化对土楼自振频率的影响.

部分圆形福建土楼结构尺寸统计表,如表 2 所示.表 2 中: r 为外径; h 为底层墙体厚度.

表 2 部分圆形福建土楼结构尺寸统计表

Tab. 2 Statistical tab of partial circular Fujian Tulou structure size

楼名	r/m	h/m	H/m	楼名	r/m	h/m	H/m
承启楼	63.6	1.5	12.4	振昌楼	33.0	1.20	11.5
瑞云楼	35.0	1.2	11.2	和昌楼	33.0	1.20	12.3
裕昌楼	48.0	1.2	11.1	东升楼	29.5	1.00	13.0
春贵楼	48.0	1.0	11.5	晓春楼	48.0	1.00	11.0
怀远楼	42.0	1.2	13.4	永庆楼	46.0	1.00	11.0
裕兴楼	34.0	0.9	11.0	顺裕楼	74.1	1.60	15.0
花萼楼	47.0	2.0	11.9	新彩楼	59.4	0.85	13.6

叶俊捷等^[14]测得圆形土楼夯土密度为 $1\,624\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 夯土弹性模量为 130.67 MPa , 泊松比为 0.3 ; Bui 等^[9]在生土结构试验中测得的夯土密度为 $1\,950\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 夯土弹性模量为 500 MPa ; Silva 等^[17]在生土结构实验中测得的夯土密度为 $1\,723\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 夯土弹性模量平均值为 462.2 MPa . 因此, 土楼数值模拟中参数的取值范围确定如下: 夯土弹性模量为 $25\sim1\,296\text{ MPa}$; 夯土密度为 $100\sim4\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 土楼结构平均半径为 $10\sim60\text{ m}$; 夯土墙高度为 $10\sim18\text{ m}$; 夯土墙平均厚度为 $0.5\sim2.5\text{ m}$.

2.2 参数变化对夯土结构模型自振频率的影响

圆形土楼的夯土结构厚度变化被忽略后, 圆形土楼夯土结构在外形上类似于等厚的悬臂圆柱壳; 同时, 通过数值模拟的试验发现, 在参数变化的范围内, 夯土结构和夯土-木构混合结构前 7 阶振型沿高度方向的半波数均为 1. 因此, 将计算结果仅按周向波数进行分类比较是合理的. 一方面, 在轴向波数一定的情况下, 周向波数可以唯一确定一个振型; 另一方面, 圆柱壳的自振频率与振型的轴向波数和周向波数有关^[18].

夯土结构自振频率随着夯土弹性模量的变化规律, 如图 6 所示. 图 6 中: n 为周向波数. 由图 6 可知: 夯土结构模型的自振频率随着夯土弹性模量的增大而增大, 近似与夯土弹性模量的平方根成正比.

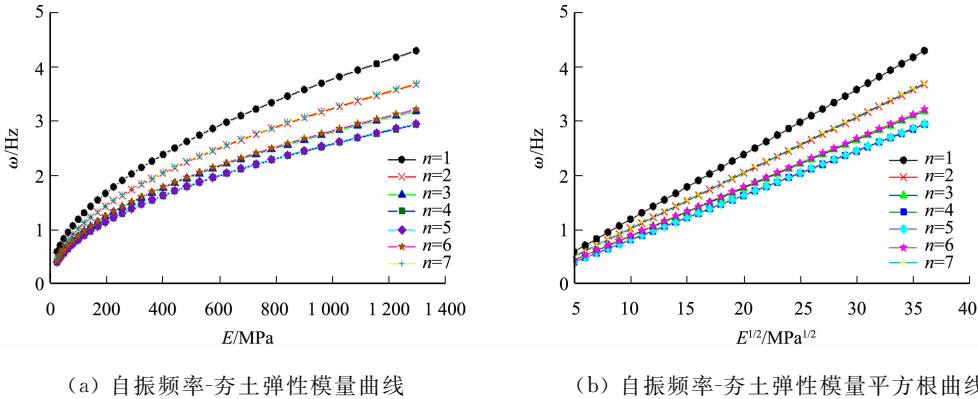


图 6 夯土结构自振频率随着夯土弹性模量的变化规律
Fig. 6 Relationship between natural vibration frequency of rammed earth structure and elastic modulus of rammed earth

夯土结构自振频率随着夯土密度的变化规律, 如图 7 所示. 由图 7 可知: 夯土结构的自振频率随着夯土的密度的增加而减小, 近似与夯土密度的平方根成反比.

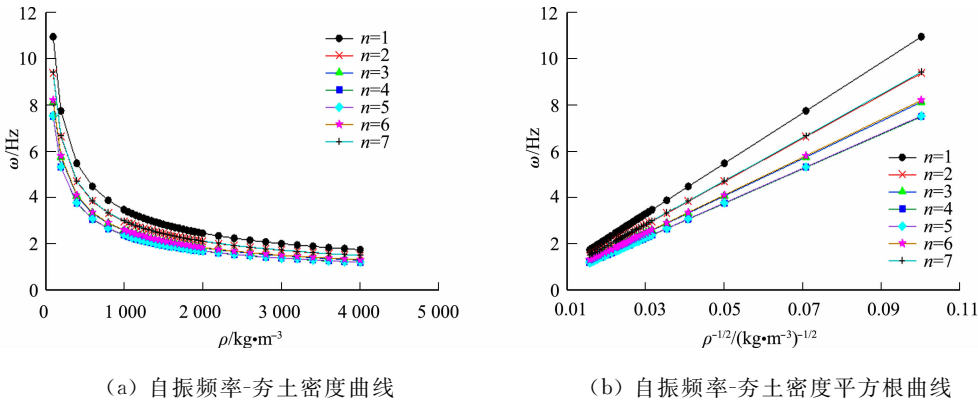
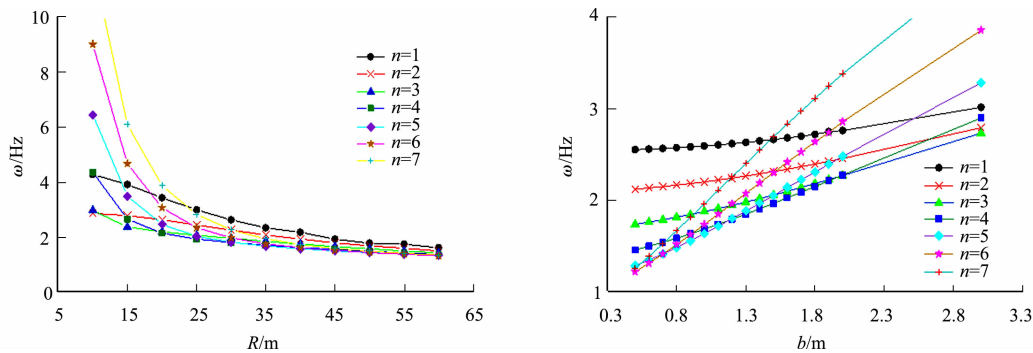


图 7 夯土结构自振频率随着夯土密度的变化规律
Fig. 7 Relationship between natural vibration frequency of rammed earth structure and density of rammed earth

由图 6, 7 可知: 周向波数不同的 7 条自振频率随着参数的变化曲线只能清晰地看见 4 条, 因为周向波数为 2, 3, 4 的曲线分别与周向波数为 7, 6, 5 的曲线基本重合了. 这是由于虽然振型不同, 但自振频率非常接近, 一方面, 说明圆形土楼夯土结构可能存在密频现象; 另一方面, 说明材料特性变化对不同阶自振频率的影响基本一致.

夯土结构自振频率随着土楼结构平均半径和夯土墙平均厚度的变化规律, 如图 8 所示.



(a) 自振频率-土楼结构平均半径曲线

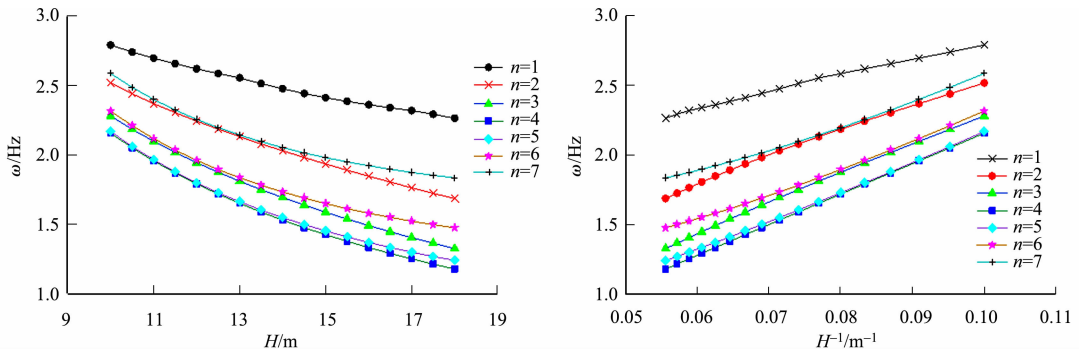
(b) 自振频率-夯土墙平均厚度曲线

图 8 夯土结构自振频率随着土楼结构平均半径和夯土墙平均厚度的变化规律

Fig. 8 Relationship among natural vibration frequency of rammed earth structure, average radius of structure of Tulou and average thickness of rammed earth walls

由图 8(a)可知:夯土结构的自振频率随着结构的土楼结构平均半径 R 增大而减小,且土楼结构平均半径越大,自振频率的变化率越小.由图 8(b)可知:夯土结构的自振频率随着夯土墙平均厚度 b 的增加而增加;不同周向波数对应的自振频率随着夯土墙平均厚度的增大速率不同,周向波数越大,对应的自振频率的变化速率越大.

夯土结构自振频率随着夯土墙高度的变化规律,如图 9 所示.



(a) 自振频率-夯土墙高度曲线

(b) 自振频率-夯土墙高度倒数曲线

图 9 夯土结构自振频率随着土楼夯土墙高度的变化规律

Fig. 9 Relationship between natural vibration frequency of rammed earth structure and height of Tulou

由图 9 可知:夯土结构的自振频率随着夯土墙高度的增加而减小,近似与土楼的高度成反比.

2.3 参数敏感性

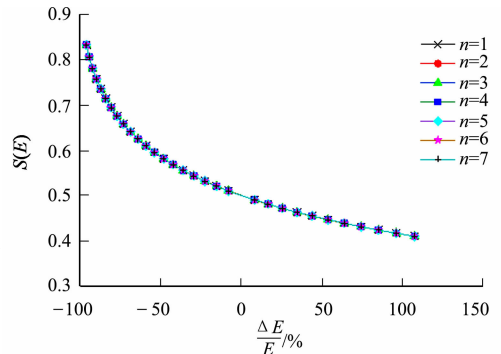
记夯土墙的自振频率为 $\omega(E, \rho, R, b, h)$, 弹性模量的变化率为 $\frac{\Delta E}{E}$, 弹性模量的敏感性定义为

$$S(E) = \frac{\omega(E + \Delta E, \rho, R, b, h) - \omega(E, \rho, R, b, h)}{\omega(E, \rho, R, b, h) \cdot \frac{\Delta E}{E}}. \quad (1)$$

其余参数的敏感性和变化率的定义与此相似.

参数的敏感性变化规律,如图 10 所示.由图 10(a), (b)可知:弹性模量敏感性随着弹性模量变化率的增大而减小,密度敏感性随着密度变化率的增大而增大,即弹性模量越大,弹性模量的敏感性越小,密度越大,密度敏感性越大;周向波数不同的 7 条曲线重合为一条曲线,说明不同阶自振频率的弹性模量敏感性相同,密度敏感性也相同.

由图 10(c)~(e)可知:7 条曲线明显不同,说明不同阶



(a) 弹性模量敏感性

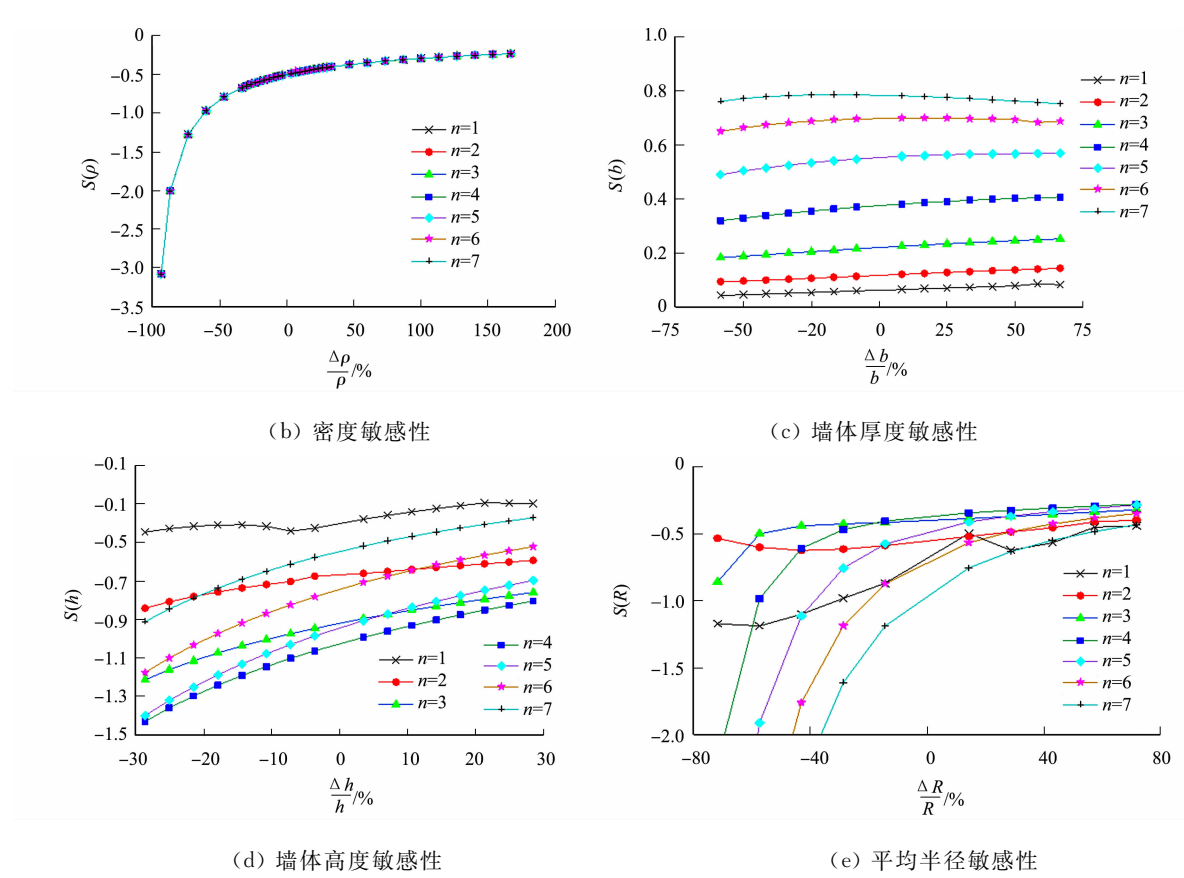


图 10 参数的敏感性变化规律
Fig. 10 Variation of factors sensitivity

自振频率的厚度敏感性、墙体高度敏感性和平均半径敏感性不同,因此,夯土结构的材料特性变化对各阶自振频率的影响相同;夯土结构尺寸变化对夯土结构各阶自振频率的影响不同,即周向波数越多的振型,对应的自振频率受结构尺寸变化的影响就越大。

3 结论

- 1) 采用夯土结构模型与夯土-木构混合结构模型两种方式,分别对圆形福建土楼进行动力特性分析。夯土-木构混合结构中木构受夯土结构的约束,振型均为木结构随着夯土结构做横向(径向)振动,振型基本一致,自振频率相近。
考虑到夯土结构在整个土楼混合结构中的质量和刚度占 90% 以上,后续可通过研究夯土结构模型的模态特征研究圆形土楼的模态特征。
- 2) 圆形土楼的夯土结构类似于悬臂圆柱壳,结构的自振频率与周向波数相关,将计算结果按照周向波数分类进行比较。圆形土楼的自振频率随着夯土弹性模量、夯土墙平均厚度的增大而增大,随着夯土密度、土楼结构平均半径、夯土墙高度的增大而减小。自振频率与弹性模量平方根近似成正比;与材料密度平方根及夯土墙高度近似成反比关系。
- 3) 不同阶自振频率随着参数的变化曲线有规律地重合,主要是因为虽然振型不同,但自振频率非常接近,一方面说明圆形土楼夯土结构可能存在密频现象;另一方面说明材料特性变化对不同阶自振频率的影响基本一致。
- 4) 按照振动周向波数分类,分析影响土楼动力特性的各参数的敏感性。各阶自振频率的夯土的弹性模量和密度敏感性是一致的,不同阶自振频率的土楼结构平均半径、墙体平均厚度、夯土墙高度 3 个参数的敏感性不同,周向波数越多,自振频率越大,参数的敏感性越大。
- 5) 土楼的动力特性是计算抗风、抗震和动荷载响应等动力学分析的基础,对土楼的研究和保护具有重要意义。今后将进一步进行土楼的动力特性的测试和模态识别的研究。

参考文献:

- [1] 黄汉民,陈立慕. 福建土楼建筑[M]. 福州:福建科学技术出版社,2012.
- [2] ZHOU Tiegang,LIU Bo. Experimental study on the shaking table tests of a modern inner-reinforced rammed earth structure[J]. Construction and Building Materials,2019,203:567-578. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.070.
- [3] 宋崇阳. 生土结构农房抗震试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
- [4] 吴英. 新疆木构架土坯墙结构房屋抗震性能试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
- [5] DELGADILLO R,GIACOMO Z,RUBEN B,*et al.* Study of the environmental influence on the dynamic behavior of adobe walls: Preliminary test in laboratory specimens[C]//International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. [S. l.]:Springer,2017:758-769. DOI:10.1007/978-3-319-67443-8_67.
- [6] BARROS R,HUGO R,VARUM H,*et al.* Seismic analysis of a portuguese vernacular building[J]. Journal of Architectural Engineering,2017,24(1):05017010. 1-05017010. 11. DOI:10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000258.
- [7] 徐颖. 新型夯土房屋材料基本力学性能试验与结构性能分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2012.
- [8] GOMES M I,MARIO L,de BRITO J. Seismic resistance of earth construction in Portugal[J]. Engineering Structures,2011,33(3):932-941. DOI:10.1016/j.engstruct.2010.12.014.
- [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. DOI:10.1016/j.engstruct.2011.08.004.
- [10] European Committee for Standardization. Design of structures for earthquake resistance: part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings; EN 1998-1: 2004[S]. London:[s. n.],2004.
- [11] 李衡. 土楼的土与木组合结构抗震性能研究[D]. 厦门:华侨大学,2017.
- [12] 王安宁. 福建土楼夯土结构抗震性能的数值研究[D]. 厦门:华侨大学,2015.
- [13] 何明明. 土楼的土木结构协同机理与整体承载性能研究[D]. 厦门:华侨大学,2019.
- [14] 叶俊捷,彭兴黔,施维娟. 圆形土楼夯土结构性能的数值模拟[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2016,37(6):698-701. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201606008.
- [15] 丁楠. 福建土楼木梁-夯土墙界面性能研究[D]. 厦门:华侨大学,2018.
- [16] 栾力文. 传统木结构节点区摩擦耗能机理及力学模型化有限元研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2014.
- [17] SILVA R A,NUNO M,OLIVEIRA D V,*et al.* Evaluating the seismic behaviour of rammed earth buildings from Portugal: From simple tools to advanced approaches[J]. Engineering Structures,2018,157:144-156. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.12.021.
- [18] 邢誉峰,刘波. 板壳自由振动的精确解[M]. 北京:科学出版社,2015.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)