

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202006044



# 福建土楼混合结构抗震性能的 数值模拟分析

陈雪琦, 罗漪, 胡红松, 彭兴黔

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 研究福建土楼外部夯土墙和内部木构架对土楼整体抗震性能的贡献,探讨方形和圆形土楼抗震性能的差异.采用有限元数值模拟方法,选取与福建土楼地质条件相近的两组天然地震波(EL Centro 波和 Taft 波)和一组人工地震波,以圆形土楼承启楼和方形土楼世泽楼为例进行分析.分别对外部夯土墙和夯土-木构架混合结构进行计算,得到在地震作用下的应力、层间相对位移、层间位移角、木结构承受的水平地震剪力等性能指标.结果表明:地震力主要是由夯土墙的惯性力引起的,夯土墙占水平地震总剪力的 97.4%;圆形土楼的应力和应变比方形土楼更均匀,空间整体性更好.

**关键词:** 福建土楼; 抗震性能; 夯土墙; 木构架; 空间整体性

中图分类号: TU 361

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2021)02-0165-07

## Numerical Simulation Analysis on Seismic Performance of Fujian Tulou Mixed Structure

CHEN Xueqi, LUO Yi, HU Hongsong, PENG Xinqian

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

**Abstract:** The contribution of external rammed earth wall and internal timber frame of Fujian Tulou to the overall seismic performance of Tulou was studied, and the difference in seismic performance of square and round Tulous was discussed. Using the finite element numerical simulation method, two natural earthquake waves (EL Centro wave and Taft wave) and one artificial earthquake wave were selected, which was similar to the geological conditions of Fujian Tulou. The round Chengqi Tulou and square Shize Tulou were analyzed. Calculating the external rammed earth wall and rammed earth-timber frame mixed structure separately, the performance indexes including stress, interlayer relative displacement, layer displacement angle and timber frame horizontal shear force were obtained. The results show that the seismic force is mainly caused by the inertial force of rammed earth wall, which accounts for 97.4% of the total horizontal seismic shear force. The stress and strain of the round Tulou is more uniform than the square Tulou, and the spatial integrity of the round one is much better.

**Keywords:** Fujian Tulou; seismic performance; rammed earth wall; timber frame; spatial integrity

福建土楼广泛分布在中国东南部的福建客家地区,是以未经焙烧的黏土、砂和石灰为主要原料,以

收稿日期: 2020-06-24

通信作者: 罗漪(1976-),女,副教授,博士,主要从事福建土楼性能评价、修复性保护的研究. E-mail: luoyi@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878302);福建省自然科学基金资助项目(2019J06016);华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18013086006)

夹墙板夯筑为土外墙,以木料为柱梁等构架的多层巨型生土建筑<sup>[1]</sup>. 福建土楼的外部是厚重的夯土墙体,内部是木构架分隔的空间(形成众多房间以供民居). 一般认为,福建土楼的外部夯土墙是主要的承重结构,承受大部分水平力. 土楼的内部是较柔的木构架,主要承受竖向力,承受小部分水平力. 许多学者对土楼在地震作用下的反应进行了研究. 叶俊捷等<sup>[2]</sup>采用数值模拟方法,分析圆形土楼夯土结构在静载下的受力和变形. 寇晨等<sup>[3]</sup>通过圆形土楼庚庆楼的 1 : 15 拟静力缩尺试验,绘制土楼的滞回曲线以分析其耗能能力. 许永贤等<sup>[4]</sup>以九盛楼和侨福楼为方形土楼和圆形土楼的代表,对土楼夯土结构进行数值模拟. 刘晨曦<sup>[5]</sup>以九盛楼为原型,结合不同墙厚的方形土楼的拟静力进行缩尺试验和数值分析. 王安宁<sup>[6]</sup>通过对方形土楼和圆形土楼的夯土墙体结构在三向地震波作用下进行数值模拟,从墙厚等角度分析方形土楼和圆形土楼的抗震性能. 文献[7-8]以圆形土楼如升楼和方形土楼庆福楼的 1 : 20 缩尺振动台模型为研究对象,研究圆形土楼在 9 组不同的加速度峰值作用下的位移和加速度反应,以及土楼的开裂和破坏过程. 上述相关研究都是对土楼外部的夯土墙体进行分析的,忽略了土楼内部木构架的影响,但土楼是外部夯土墙和内部木构架共同承重的混合结构,应分析判断内部木构架对土楼的整体受力和抗震的影响.

许多学者对土楼内部木构架的影响进行了研究. 李衡<sup>[9]</sup>对圆形土楼和方形土楼进行数值模拟,研究土楼在地震下的响应. 丁楠<sup>[10]</sup>对圆形土楼中木梁与夯土墙的连接部分进行了局部的试验分析和数值模拟,比较圆形土楼中木梁与夯土墙的铰接和固接两种连接形式,验证木梁-夯土墙的不同连接方式对结构抗震有不同的影响. 该研究只对圆形土楼在一种地震波下进行分析且该波所取持时过短,所得结论或待进一步研究. 何明明<sup>[11]</sup>以侨福楼为原型,对圆形土楼的整体结构、夯土墙结构和木构架在单调和往复位移加载下进行数值分析和理论计算. 该研究按照底部剪力法计算水平地震作用,然而,土楼为巨型生土建筑,土楼内部存在大开口的柔性木结构楼板,不符合用底部剪力法计算水平地震作用的前提条件,因此,得出夯土墙体和木构架之间协同工作的结论不合理.

本文以圆形土楼承启楼和方形土楼世泽楼为原型建立模型,在两组自然地震波(EL Centro 波和 Taft 波)和一组人工地震波的作用下,对比只有外部夯土墙和夯土-木构架混合结构两种不同类型的结构模型. 据此,研究夯土墙和木结构对土楼整体抗震性能的影响及贡献,分析夯土-木构架混合结构在多遇、设防及罕遇地震下的响应,对比方形土楼和圆形土楼抗震性能的差异.

# 1 土楼中木构架的影响

以圆形土楼承启楼和方形土楼世泽楼为原型,建立只有外部夯土墙和夯土-木构架混合结构两种有限元模型,比较在地震作用下两种结构的响应,以探究木构架的作用.

## 1.1 模型建立

1.1.1 基本假设 1) 假定夯土材料为均质材料,具有各向同性. 不考虑夯土内掺杂的稻草等;同时,假定夯土墙体各部位的含水率和收缩变形相同,不考虑建造过程中土楼方位、曝光率及风向对夯土墙体受力性能的影响.

2) 假定夯土墙为一个连续整体. 在实际建造过程中,用版筑法分层分段夯筑土墙,每一版土墙通常分 4 层或 5 层夯筑,且上、下层每一版都必须交错夯筑,不能出现通缝,从而确保夯土墙体的整体性.

3) 假定夯土墙厚度均匀. 在实际建造过程中,墙体有收分. 相比于土楼原本的厚度,收分程度较小,在分析时不予考虑,取底层和顶层的平均厚度为夯土墙厚度.

4) 假定节点连接简化. 在实际土楼中,木梁与木柱之间采用榫卯连接;木梁部分插入夯土墙中. 根据文献[12]中现场测试结果分析得知,木结构之间的连接非常类似于固定端的条件. 故在分析时,木梁与木柱之间采用固结,并简化为刚性节点;木梁与墙体之间采用绑定连接,不考虑部分梁的插入情况.

5) 假定边界条件为夯土墙底部与地面固结,顶部自由. 在实际情况下,木构架直接放置在础石上,视作木构架底部与基础铰接.

1.1.2 土楼尺寸及单元类型 承启楼外径约为 62.6 m,共 4 层,夯土墙总高度为 12.4 m,1 层夯土墙平均厚度约为 1.4 m,4 层的夯土墙平均厚度约为 1.0 m. 模拟时,夯土墙厚度为平均厚度 1.2 m. 木柱将整个土楼分为 72 个开间. 世泽楼楼宽为 29.6 m(11 个开间),长为 37.8 m(12 个开间),共 4 层,夯土

墙总高度为 12.5 m, 夯土墙平均厚度为 1.05 m.

圆形土楼承启楼和方形土楼世泽楼中的木梁木柱直径为 0.2 m, 土楼模型包括外部夯土墙结构和夯土-木构架混合结构, 如图 1 所示. 外部夯土墙单元为 C3D20R, 即三维、20 节点、6 面体、二次减缩积分实体单元. 内部木结构均采用 B32, 即 3 节点 2 次空间梁单元(Timoshenko).

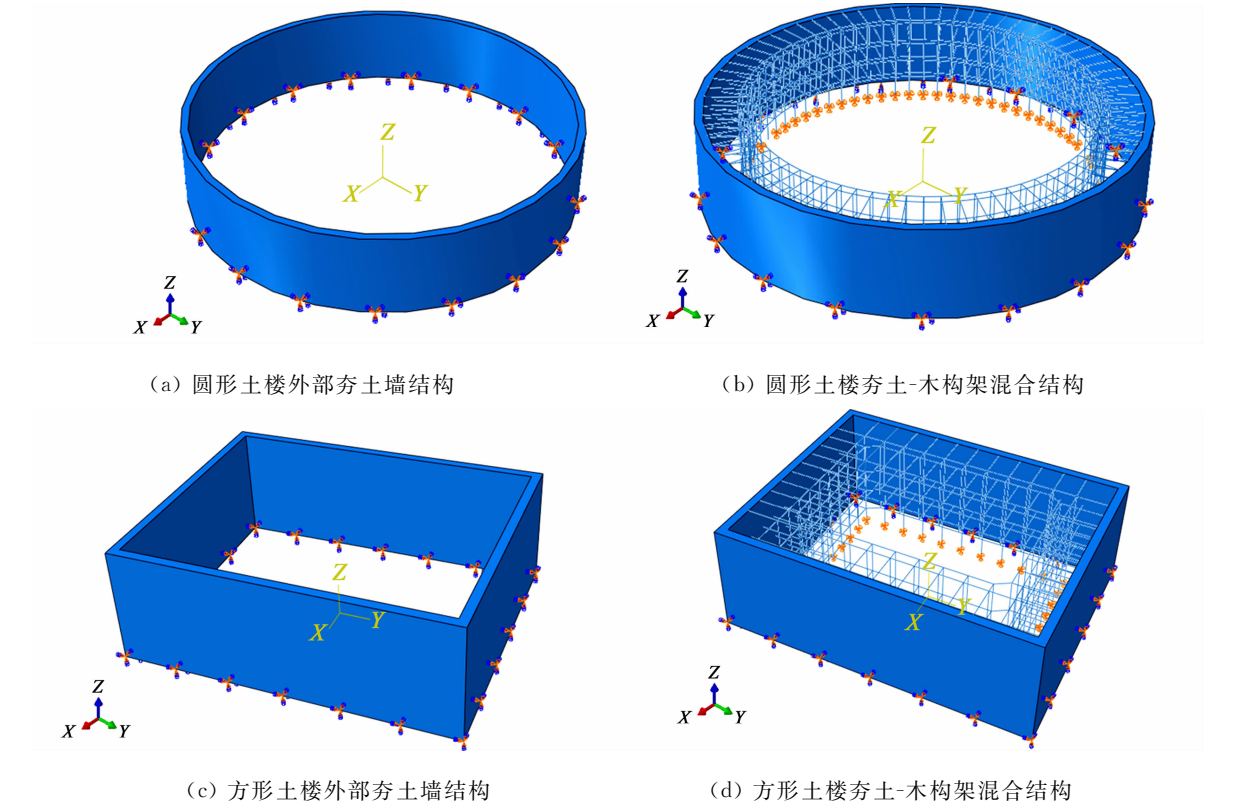


图 1 土楼模型  
Fig. 1 Tulou models

1.1.3 材料参数 1) 夯土材料. 本构模型选用摩尔-库伦模型; 夯土材料的密度为  $1\,624\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 弹性模量为  $130.67\text{ MPa}$ ; 泊松比为  $0.3$ ; 内摩擦角为  $39^\circ$ ; 粘聚力为  $410\text{ kPa}$ <sup>[2]</sup>.

2) 木材材料. 土楼内部木结构大多采用杉木; 杉木材料的顺纹抗拉强度为  $77.17\text{ MPa}$ ; 顺纹抗压强度为  $26.08\text{ MPa}$ ; 顺纹抗拉弹性模量为  $8\,177.06\text{ MPa}$ ; 杉木的密度为  $500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 杉木在弹性阶段和塑性阶段的材料参数见文献<sup>[10]</sup>.

1.1.4 加载过程 土楼建筑群位于福建省东南部, 其场地分类大多为 II 级和 III 级. 根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[13]</sup> 的规定, 选择 3 组地震波进行分析, 即两组自然地地震波(EL Centro 波和 Taft 波)和一组人工地震波(上海人工地震波 2)<sup>[14-15]</sup>. 人工波的地震波时间间隔为  $0.01\text{ s}$ , 自然地地震波的时间间隔为  $0.02\text{ s}$ . 由于福建龙岩地区设防烈度为 7 度, 因此, 分别选用  $0.035g, 0.100g, 0.220g$  的峰值对应于实际地震的 7 度多遇、设防及罕遇地震.

选择结构 5~10 倍的基本周期为地震波的计算时长<sup>[16]</sup>, 即计算时长为  $10\text{ s}$ . 在土楼模型中输入三向地震动时, 需要对输入的地震动进行比例调整, 一般选择  $1.00:0.85:0.65(X:Y:Z)$  的比例.

1.2 响应分析

1.2.1 塑性应力响应 多遇地震下土楼塑性应力图, 如图 2 所示. 图 2 中:  $\sigma$  为应力. 由图 2 可知: 在土楼中, 木结构的存在使得塑性应力集中的区域从外部夯土墙体转移至木结构内部节点处. 原本容易出现塑性应力集中的夯土墙的受力变得均匀, 大幅减小了夯土墙的受力, 保护夯土结构. 相比外部夯土墙结构的损坏, 内部木构架的损害更易于维修和替换. 同时, 木构架的存在为结构增加一道抗震防线, 符合抗震概念设计, 利于结构抗震.

1.2.2 位移响应 圆形土楼、方形土楼各层层间相对位移及层间位移角, 分别如表 1, 2 所示. 表 1, 2 中:  $\Delta s$  为相对位移;  $\omega$  为层间位移角.

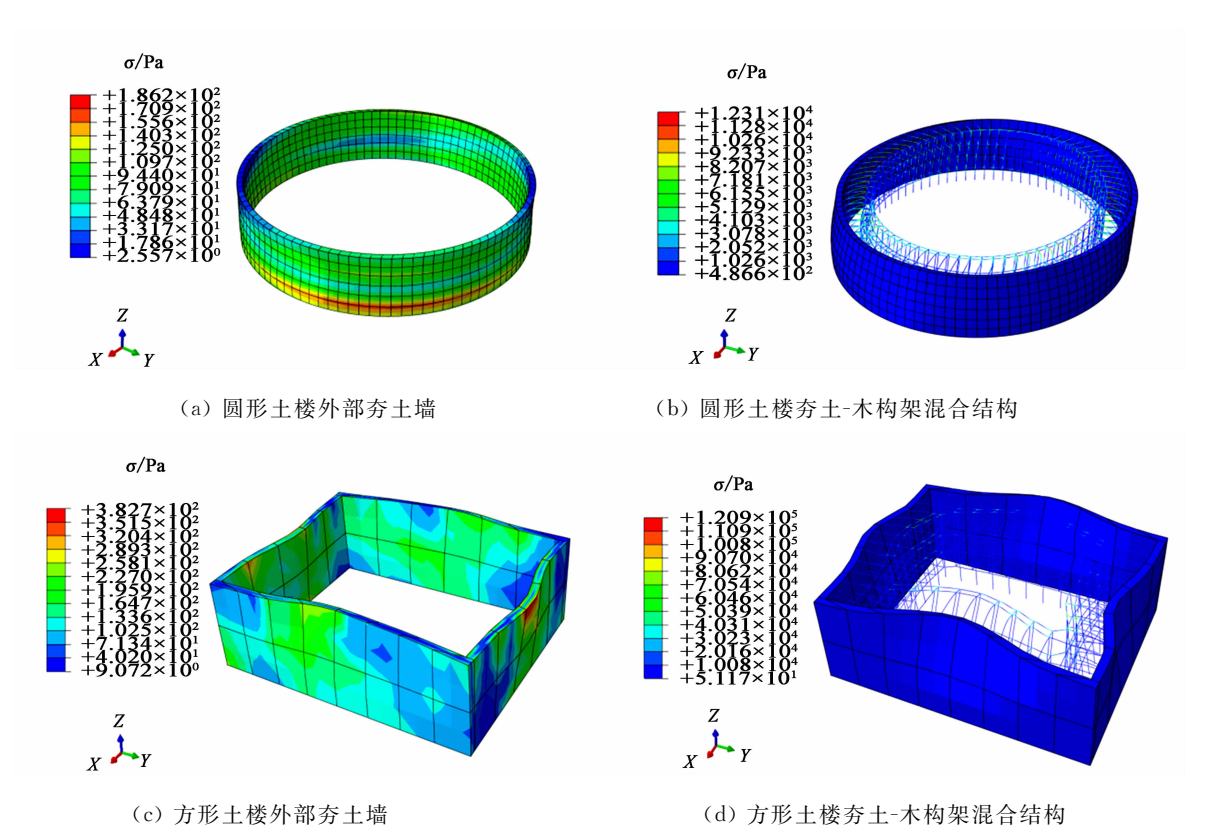


图 2 多遇地震下土楼塑性应力图

Fig. 2 Plastic stress diagrams of Tulou under frequent earthquakes

由表 1,2 可知:木结构的增加对结构的相对位移影响不大,方形土楼各层相对位移和层间位移角基本没有太大的变化.

表 1 圆形土楼各层层间相对位移及层间位移角

Tab. 1 Each interlayer relative displacement and displacement angle of round Tulou

工况	类型	$\Delta s/\text{mm}$				$\Delta w$			
		1 层	2 层	3 层	4 层	1 层	2 层	3 层	4 层
多遇地震	夯土墙	0.19	0.19	0.18	0.18	1/19 474	1/14 211	1/15 000	1/18 333
设防地震		1.55	1.52	1.51	1.50	1/2 387	1/1 776	1/1 788	1/2 200
罕遇地震		7.52	7.35	7.33	7.28	1/492	1/367	1/368	1/453
多遇地震	夯土-木构架混合结构	0.13	0.12	0.10	0.08	1/28 461	1/22 500	1/27 000	1/41 250
设防地震		1.55	1.52	1.38	1.27	1/2 387	1/1 776	1/1 956	1/2 598
罕遇地震		7.52	7.35	7.32	7.27	1/492	1/367	1/369	1/454

表 2 方形土楼各层层间相对位移及层间位移角

Tab. 2 Each interlayer relative displacement and displacement angle of square Tulou

工况	类型	$\Delta s/\text{mm}$				$\Delta w$			
		1 层	2 层	3 层	4 层	1 层	2 层	3 层	4 层
多遇地震	夯土墙	0.26	0.25	0.26	0.26	1/13 846	1/10 800	1/10 385	1/13 462
设防地震		2.12	2.08	2.12	2.12	1/1 698	1/1 298	1/1 274	1/1 651
罕遇地震		10.29	10.21	10.29	10.29	1/350	1/264	1/262	1/340
多遇地震	夯土-木构架混合结构	0.26	0.25	2.26	0.26	1/13 846	1/10 800	1/10 385	1/13 462
设防地震		2.12	2.08	2.12	2.12	1/1 698	1/1 298	1/1 274	1/1 651
罕遇地震		10.29	10.21	10.29	10.29	1/350	1/264	1/262	1/340

多遇地震的变形验算主要是对较柔的结构和高层建筑的变形加以限制,以免导致非结构构件在地震荷载作用下发生破坏.罕遇地震变形验算是为了避免结构发生倒塌.在多遇及设防地震下,土楼外部夯土墙质量大、刚度强,各层的层间位移角都在规范限值内.在多遇及罕遇地震下,圆形土楼的最大层间位移角发生在第 2 层,方形土楼的最大层间位移角发生在第 3 层,这可能是结构的薄弱层,在罕遇地震

作用下可能发生剪切破坏.

## 2 土楼的地震模拟

### 2.1 应力

圆形土楼和方形土楼在多遇、设防及罕遇地震下的应力响应,如图 3 所示.由图 3 可知:随着地震波峰值的增大,圆形土楼和方形土楼所受到应力均显著增大.同一地震波峰值下,圆形土楼所受应力均比方形土楼小.在小震、中震和大震下,圆形土楼最大应力分别为方形土楼最大应力的 10.2%,42.3%和 44.2%.整个结构中,不论是圆形土楼还是方形土楼,外部夯土墙所受应力均小于内部木结构.

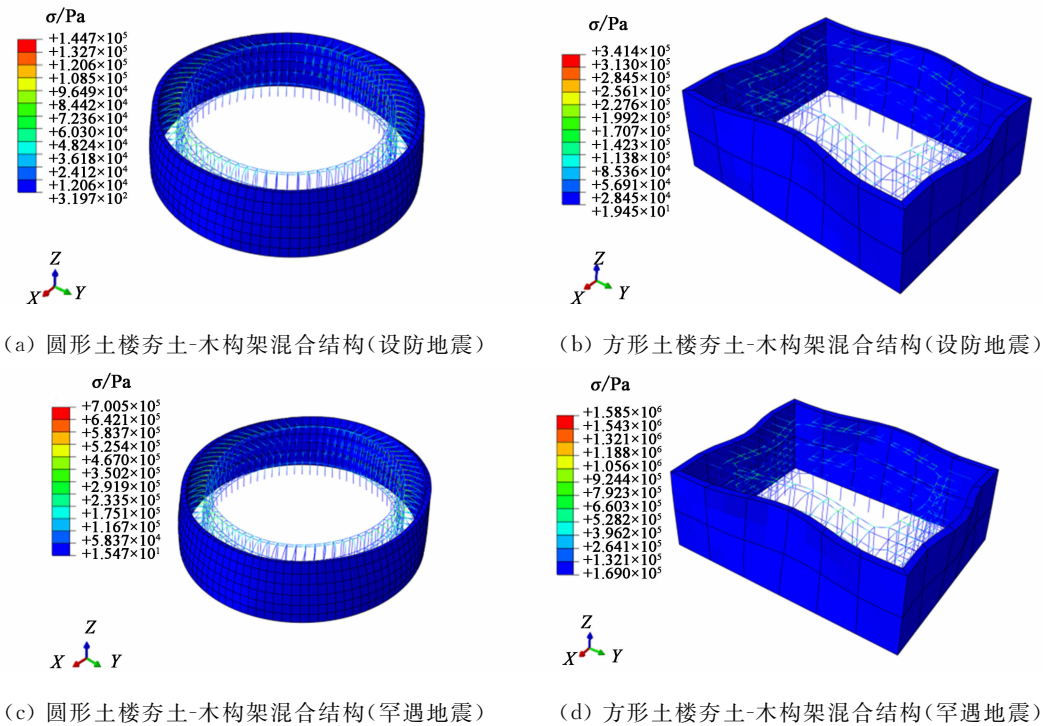


图 3 土楼塑性应力图

Fig. 3 Plastic stress diagrams of Tulou

土楼最大应力的比较,如图 4 所示.图 4 中: $\sigma_{\max}$  为最大应力; $a$  为加速度.由图 4 可知:随着地震波峰值的增加,圆形土楼与方形土楼之间的应力差异显著增大;在大震下,圆方形土楼的差距达到最大.

### 2.2 层间剪力

土楼层间剪力的比较,如图 5 所示.图 5 中: $F_N$  为层间剪力; $N$  为层数.由图 5 可知:随着地震波峰值的增加,土楼各层层间剪力随之增大;圆形土楼的层间剪力均小于方形土楼,但相差不大;同一地震波峰值下,土楼各层层间剪力差值随着土楼层数的增加而递减.

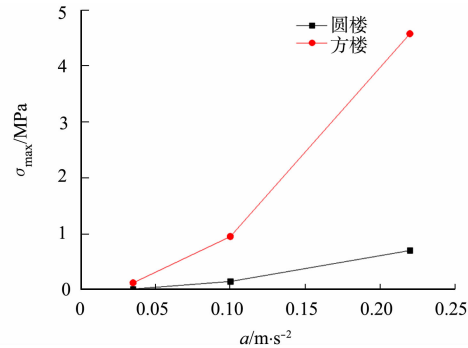


图 4 土楼最大塑性应力的比较

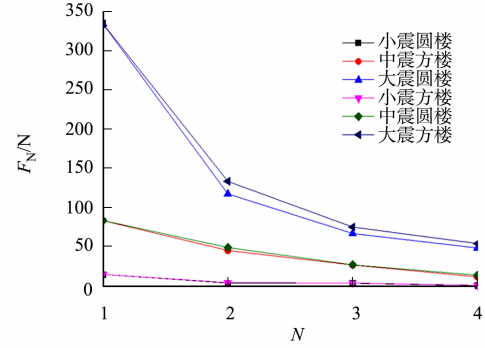


图 5 土楼层间剪力的比较

Fig. 4 Comparison of maximum plastic stress of Tulou      Fig. 5 Comparison of interlayer shear force of Tulou



圆形土楼和方形土楼木结构底层水平剪切力占总剪力的比例分别为 2.61%,2.62%;圆形土楼和方形土楼夯土墙底层水平剪切力占总剪力分别为 97.39%,97.38%.

2.3 层间位移及最大层间位移角

土楼各层层间相对位移的比较,如图 6 所示. 图 6 中: $h$  为土楼层高. 由图 6 可知:在多遇、设防及罕遇地震下,方形土楼的层间相对位移均大于圆形土楼的层间相对位移;在小震和中震下,圆形土楼和方形土楼的层间位移角都非常小,远小于规范限值.

2.4 加速度

多遇地震下土楼顶部和底部的加速度时程曲线,如图 7 所示. 由图 7 可知:在同一地震波峰值下,圆形土楼底部的加速度小于方形土楼底部的加速度,加速度峰值一般出现在土楼夯土墙顶部;地震波存在明显的放大效应,土楼顶部加速度远大于底部的加速度,但也都小于多遇地震下地震波的峰值 0.035g. 然而,在实际情况下,土楼中存在隔减震机制,土楼顶部的加速度会更小.

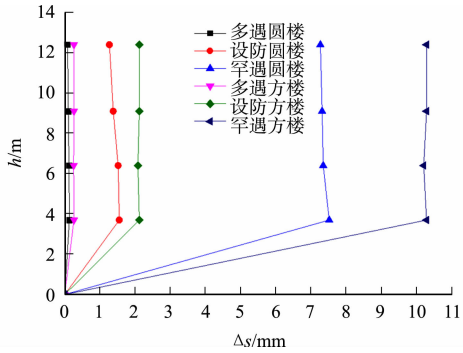


图 6 土楼各层层间相对位移比较  
Fig. 6 Comparison of each interlayer relative displacement of Tulou

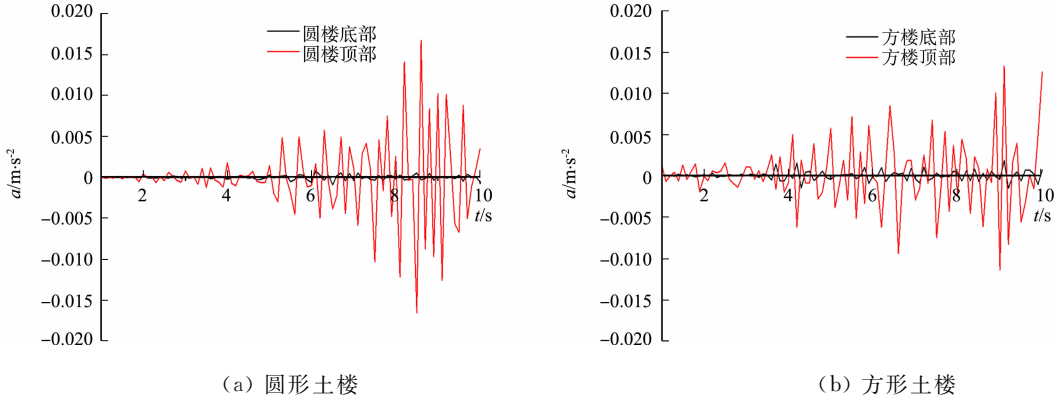


图 7 多遇地震下土楼顶部和底部的加速度时程曲线

Fig. 7 Acceleration time-history curves of top and bottom of Tulou under frequent earthquakes

综上所述,圆形土楼对 3 条地震波的响应大小依次为人工波>EL Centro 波>Taft 波;方形土楼对 3 条地震波的响应大小依次为:Taft 波>人工波>EL Centro 波. 圆形土楼和方形土楼在不同地震波下响应不同.

在小震作用下,土楼内全部结构处于弹性状态,构件的承载力和变形满足规范要求;在中震作用下,结构继续保持弹性;在大震作用下,抗震性能较好.

在地震作用下,圆形土楼和方形土楼都比较薄弱的部位是内部木结构的节点;除此之外,圆形土楼和方形土楼底层也较薄弱,大震时可能会出现剪切破坏.

3 结论

- 1) 木结构的存在使得应力较大的区域从外部夯土墙体转移至内部木结构节点处. 木结构的柔性很好地减少了刚性较大的夯土墙在地震作用下应力不均匀的现象. 木结构的增加不仅保护了夯土结构,降低材料的耗能,还实现了整体结构多道抗震防线的抗震概念设计,为土楼的围护和修葺提供便利.
- 2) 与方形土楼相比,圆形土楼可以在各个方向上进行位移协调. 圆形土楼环向轴对称,避免方形土楼拐角部位等薄弱环节. 圆形土楼的荷载传递路径更明确,受力更均匀. 综上所述,圆形土楼的空间整体性更好,抗震性能更好.
- 3) 在地震作用下,土楼的抗震薄弱部位为内部木结构的节点处. 除此之外,土楼底层也较薄弱,大震时,可能出现剪切破坏现象. 针对木结构内部节点的薄弱环节,可以通过对节点进行加固,加强节点的

连接,提高土楼的整体性,从而提高土楼抗震性能.

4) 相较于内部木结构,外部夯土墙的质量和刚度都很大.因此,地震力主要是由外部夯土墙的惯性力引起的.外夯土墙约承受水平地震总剪力的97.4%,内部木结构仅承受水平剪力的2.6%.在研究土楼内部木结构的功能与作用时,可能要从稳定性等方面进行考虑.

5) 由外部夯土墙体和内部木构架组成的土楼是混合结构,也是空间结构体系,其地震分析较为复杂.在地震作用下,开始时,夯土墙体和木构架共同承重和变形,因夯土墙体刚度较大,所以将承受大部分的地震作用;随着夯土墙体的开裂和破坏,地震作用将逐步转移至木构架.在土楼的抗震分析中,需要考虑夯土墙体与木构架的连接情况和各自的刚度变化,进行荷载计算和变形分析,计算夯土墙体和木构架各自对土楼整体抗震所做的贡献.

## 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] 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.
- [3] 寇晨,彭兴黔,谢奕.墙厚对圆形土楼抗震性能的影响[J].青岛理工大学学报,2019,40(6):44-50.
- [4] 许永贤,彭兴黔,梁兰娣.土楼夯土结构受力变形特性的数值模拟[J].华侨大学学报(自然科学版),2015,36(3):327-331. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.03.0327.
- [5] 刘晨曦.福建方形土楼的拟静力试验研究与数值模拟[D].厦门:华侨大学,2018.
- [6] 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.
- [7] 王兴辰,彭兴黔,刘鑫鑫.福建圆形土楼模型振动台试验研究[J].青岛理工大学学报,2017,38(4):23-30. DOI:10.3969/j.issn.1673-4602.2017.04.004.
- [8] 刘鑫鑫.福建土楼整体结构抗震性能的振动台试验研究[D].厦门:华侨大学,2016.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] STANISLAWSKI D. Mechanical response and finite element modeling of Hakka Tulou rammed earth structures [D]. Morgantown: West Virginia University, 2011.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [14] Pacific Earthquake Engineering Research Center. EL centro wave and Taft wave[DB/OL]. [2019-12-01]. <https://peer.berkeley.edu>.
- [15] 中国地震学科数据中心.上海人工地震波 2[DB/OL]. [2019-12-01]. <http://www.seisdmc.ac.cn>.
- [16] 陆新征,蒋庆,缪志伟,等.建筑抗震弹塑性分析[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2015.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)