

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.161



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



木梁-夯土界面粘结滑移性能及其计算方法

陈明杰^a, 罗漪^{a,b}, 郑双杰^{a,b}, 杨志林^a, 丁楠^a

(华侨大学 a. 土木工程学院; b. 福建省智慧基础设施与监测重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要:福建土楼中夯土与木梁的界面性能是二者能够共同工作的基础,而木梁与夯土界面的粘结滑移关系是其界面性能的综合反映。为探讨木梁夯土界面的粘结滑移性能,进行了8个木梁-夯土节点试件的拉拔模型试验,考虑竖向压力、木梁伸入长度和木梁表面粗糙度对其粘结力组成、极限荷载等的影响,对木梁-夯土界面进行有限元建模分析,并提出粘结力的计算方法。结果表明:夯土与木梁的界面破坏形态包括木梁的拔出破坏和夯土的开裂破坏,此类界面的粘结滑移曲线可以分为线性上升段、滑移过渡段和摩擦残余段3个阶段;有限元模拟表明,连接器弹簧能够很好地表达木梁-夯土墙界面性能;木梁-夯土界面粘结力包括胶结力、木梁与夯土接触面的摩擦力和基质吸力,随着滑移的不断进行,胶结力不断失效趋近于零,摩擦残余段只存在摩擦力与基质吸力。

关键词:福建土楼;木梁;夯土;粘结滑移;模型试验;有限元模拟

中图分类号: TU361 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)02-0184-11

Bond slip performance and calculation method of rammed earth-timber interface

CHEN Mingjie^a, LUO Yi^{a,b}, ZHENG Shuangjie^{a,b}, YANG Zhilin^a, DING Nan^a

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory for Intelligent Infrastructure and Monitoring of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, P. R. China)

Abstract: The interface performance of rammed earth and timber beam of Fujian Tulou buildings determines the interaction of the two, and the bond slip relationship of rammed earth and wooden beam is a comprehensive reflection of the interfacial performance. In order to investigate the bond-slip performance of rammed earth-timber beam joints, eight pull-out tests of rammed earth-timber beam joint specimens were conducted. The test parameters included the vertical load, the timber beam penetration length, and surface roughness. The influences of these parameters on the maximum load and the composition of the bonding force were analyzed. The interface between timber beam and rammed earth was modeled and analyzed by finite element method, and the calculation method of bonding force was put forward. The results show that

收稿日期: 2021-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(51878302, 52078225, 51808235); 中央高校基本科研业务费(ZQN-813)

作者简介: 陈明杰(1996-), 主要从事福建土楼抗震研究, E-mail: mingjiechen@stu.hqu.edu.cn。

罗漪(通信作者), 教授, E-mail: luoyi@hqu.edu.cn。

Received: 2021-05-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51878302, 52078225, 51808235); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. ZQN-813)

Author brief: CHEN Mingjie (1996-), main research interest: seismic resistance of Fujian Tulou, E-mail: mingjiechen@stu.hqu.edu.cn.

LUO Yi (corresponding author), professor, E-mail: luoyi@hqu.edu.cn.

the interface failure modes of rammed earth and timber beam include pull-out failure of timber beam and cracking failure of rammed earth. The bond slip curve of such interfaces can be divided into three stages, including the linear ascending stage, the slip transition stage and the residual friction stage; the finite element simulation shows that the connector spring can well represent the interface performance of rammed earth-timber beam joints; the bonding force at the interface between timber beam and rammed earth includes the cementation force, the friction force between timber beam and the contact surface of rammed earth, and the matrix suction of soil. With continuous sliding, the cementation force keeps failing and approaches zero, and only the friction force and matrix suction exist in the friction residual section.

Keywords: Fujian Tulou; timber beam; rammed earth; bond slip; model test; finite element simulation

福建土楼凭借宏伟的建筑形式、巧夺天工的建造技艺于 2008 年申遗成功,成为中国建筑文化宝库中的珍贵财富。福建土楼属于土-木混合结构,绝大多数有 3~4 层,占地面积可达 4 000~5 000 m²[1]。而福建土楼分布最多的地区——漳州、龙岩位于政和一海丰断裂带。该地区地震频发,1971 年到 2020 年 9 月,该断裂带发生了震级大于等于 4.0 的地震 17 次,震级大于等于 5.0 的地震两次[2]。如此大型而有文化价值的建筑坐落在地震频发的地区,其抗震性能值得探究。

潘毅等[3-4]对长宁和尼泊尔震后房屋进行了调研与结构抗震性能分析,认为木结构的梁柱在地震作用下易挤压墙体,致使墙体开裂、倒塌。郑山锁等[5]研究发现,木构架和土墙在地震中存在相对运动趋势,木构与土墙节点发生相对移动,从而引起结构破坏。学者们研究发现,木梁和夯土两种不同材料的连接处,即节点部分为抗震的薄弱部分。对于木梁-夯土节点(图 1),对其界面性能的研究有助于明确这种组合结构节点在地震中的共同工作机理。



图 1 木梁-夯土节点

Fig. 1 Rammed earth-timber joint

目前,对 FRP 与混凝土界面、钢与混凝土界面研究较多[6-8],而针对木材或土材料相关的界面性能研究相对较少。Jaaranen 等[9]研究了木材与混凝土界面的性能,测定了不同木材与混凝土之间的动摩

擦与静摩擦,结果表明,摩擦力对其界面存在影响。Lorenzis 等[10]对 CFRP-胶合木界面进行了拉拔试验与模拟,表明破坏方式包括木材的纵向劈裂以及 CFRP 杆的拔出。A 等[11]对木材和钢筋进行了拉拔试验,得到不同荷载水平下钢筋沿着锚固长度的应变分布曲线,并建立了木材-钢筋的粘结应力-滑移模型。Bui 等[12]对嵌入夯土的钢钉进行了试验,并使用混凝土的塑性损伤模型进行模拟,指出了界面上摩擦参数的合理取值。芦苇等[13]分析了土遗址楠竹锚固界面的粘结力变化情况,通过现场拉拔试验建立了三线型粘结滑移模型,并用 ANSYS 中非线性弹簧单元进行界面机理的有限元模拟,但楠竹尺寸相比木梁较小,无法直接运用到木梁-夯土界面中。上述研究为木梁-夯土界面性能的试验与模拟探索提供了借鉴。

笔者就木梁-夯土界面的粘结滑移性能开展研究,以夯土竖向压力、木梁伸入长度和木梁粗糙度为参数,设计了 8 个木梁-夯土节点试件,进行拉拔加载试验,得到了界面的力和位移曲线。根据试验结果,分析 3 个参数对于界面粘结性能的影响并进行数值模拟分析,解析粘结力的组成及其在粘结滑移过程中的变化情况,提出粘结力的计算式。

1 粘结滑移试验

1.1 试件设计及制作

根据土楼实际结构木梁伸入长度为夯土墙厚度的 2/3[14]及土楼不同层高的受力分析,确定木梁粗糙度、夯土竖向压力和木梁伸入长度 3 个试验参数及其取值,设计 8 个木梁-夯土墙节点拉拔试件,见表 1。粗糙度用砂纸打磨数目来确定,“粗糙”的表面使用的砂纸目数为 24 目;“光滑”的表面使用的砂纸打磨目数为 60 目。

表 1 试件参数表

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	粗糙程度	夯土竖向压力/kN	木梁伸入长度/mm
L1	粗糙	10	600
L2	粗糙	10	750
L3	粗糙	20	600
L4	粗糙	20	750
L5	光滑	10	600
L6	光滑	10	750
L7	光滑	20	600
L8	光滑	20	750

土楼木梁实际间隔为 300 mm,夯土墙的厚度为 1 000 mm 左右,选定夯土试件的尺寸为长×宽×高=1 000 mm×300 mm×300 mm,木梁直径为 100 mm,具体尺寸见图 2。

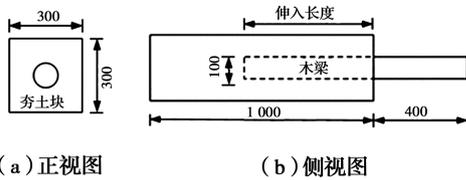


图 2 木梁-夯土节点试件尺寸

Fig. 2 Specimen size of rammed earth-timber joint

试件整体如图 3(c)所示,包括 3 部分:夯土、木梁和钢模具。其中钢模具采用厚度为 5 mm 的钢板,钢板之间使用螺栓连接,见图 3(b)。钢模具主要有两个功能:夯筑时作为成型的模板;加载时提供侧向约束。试件夯筑前,先将钢模具安装于底板上,再把土料铺放到钢模具内,每次大约铺放 150 mm 的高度,夯筑铁锤(图 3(a))“回”字型夯筑 4 遍,这一层土料高度下降到铺放高度 2/3 左右,即可达到夯筑的要求。木梁在夯筑过程中放入夯土中,并伸入预定距离,使用水平尺确保木梁在夯筑时水平。最后把红土放满模具,夯筑后再铺夯土,反复进行,直到夯土块的高度达到 300 mm。夯筑完成时需要卸下钢模具,在自然养护条件下放置 3 个月,见图 3(d),以便夯土强度形成,并与木梁更好地粘结。待试件加载时,再组装约束钢模具。为预估试件的极限荷载,设置预试验,即试加载一个与 L1 同尺寸的试件。因此,实际制作 9 个试件。

1.2 试件材料

1.2.1 夯土 夯土材料按照福建龙岩地区红土:砂:水=3:1:1的比例调制后放入钢模具中夯筑。参考土体的无侧限抗压强度测试方法^[15],制作 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 的夯土立方块,见图 4。

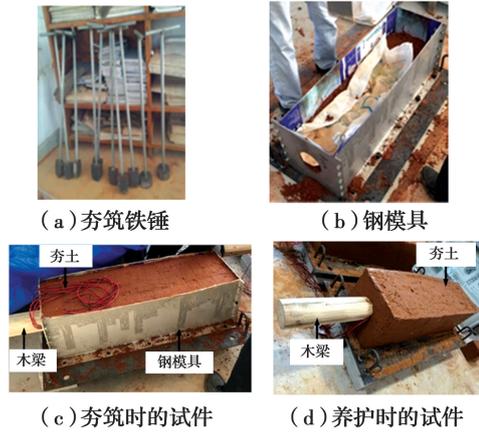


图 3 试件的制作与养护

Fig. 3 Preparation and maintenance of specimens

测试得到其抗压强度分别为 1.08、1.18、1.15 MPa,夯土抗压强度平均值取 1.14 MPa。

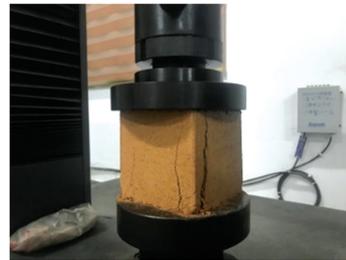


图 4 土体无侧限抗压强度测试试验

Fig. 4 Unconfined compressive strength test of rammed earth

1.2.2 木材 木梁采用福建杉木,在夯筑时埋入夯土,试验时其顺纹方向受拉,如图 5 所示。测定木材顺纹抗压强度、顺纹抗拉强度和顺纹弹性模量^[16-18](试样尺寸为 30 mm×20 mm×20 mm),试验结果见表 2。

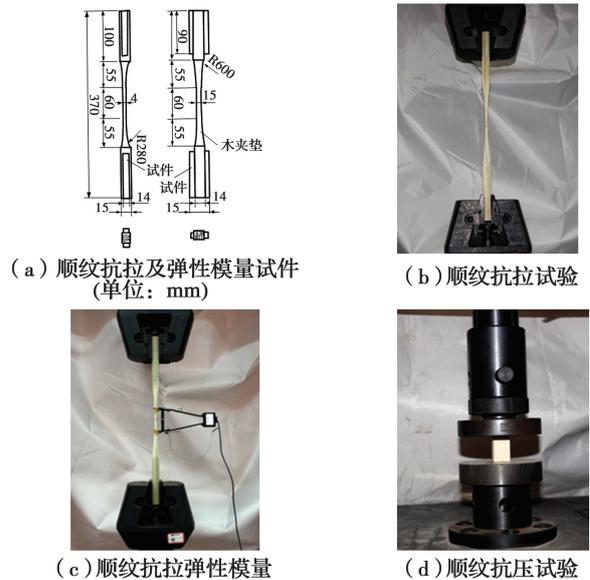


图 5 木材顺纹材料性能试验

Fig. 5 Property test of timber grain lining material

表2 木材顺纹方向的材料试验结果

Table 2 Material test results of timber along grain direction

测试次数	σ_t /MPa	σ_c /MPa	E_t /MPa
第1次	79.00	25.93	9 042.92
第2次	77.33	25.83	8 039.71
第3次	75.17	26.48	7 448.55
平均值	77.17	26.08	8 177.06

注: σ_t 为木梁顺纹抗拉强度; σ_c 为木梁顺纹抗压强度; E_t 为木梁顺纹弹性模量。

1.3 试件加载

图6为加载时的现场图片。竖向压力通过竖向作动器施加,试件上部放置厚钢板以便竖向压力均匀施加在试件上。拉拔力由水平作动器提供,预先在木梁上钻孔,通过夹具与作动器连接,以便施加拉拔力。试验前根据木梁位移确定水平作动器的位置,使用水平尺保证水平作动器水平,并用滑轮在加载全过程拉住水平作动器,确保其与木梁保持在同一轴线。



图6 加载过程

Fig. 6 Loading process

试件的加载装置见图7。由于试件高度较低,受限于反力墙上的限位孔高度,需要把试件放置在预制钢架上。通过地锚螺栓把钢架、钢模具的底板及地面进行锚固;拉拔方向的两个限位装置进一步提供平面内约束;使用螺栓穿过木梁伸出侧端部的开孔与夹具固定;位移计1和位移计3分别沿着拉拔方向放置于钢模具的前后;位移计2放置于钢架一侧。位移计设置目的是校正木梁相对夯土块的位移,评估夯土块、钢架在平面内可能产生的位移对试验结果的影响。

预试验采用力控制加载方式,初始加载值为5 kN,荷载逐级增加1 kN。观察木梁拔出现象及位移计变化,当位移增幅较大、木梁接近滑移时,适当减小力的增加幅值至木梁产生滑移,记录极限荷载值。

正式试验参照建筑抗震试验规程^[19]进行加载,

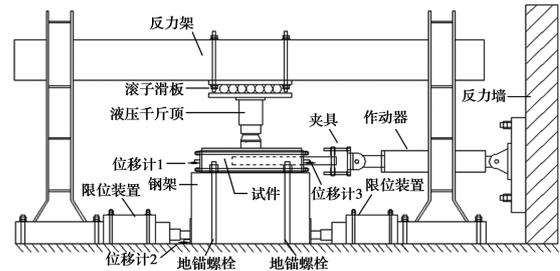


图7 加载装置示意图

Fig. 7 Schematic representation of loading device

采用力和位移混合加载的方式。先采用力加载方式,施加预试验得到的预计极限荷载的40%,之后每级荷载按预计极限荷载的20%增加,为保证加载后试件变形稳定,每级加载后需持荷5 min以上;达到预计极限荷载后采用位移控制加载至位移为110 mm。

1.4 测点布置

如图8所示,在木梁表面开V型槽,沿拉拔方向放置应变片,以木梁埋入与伸出位置交界处为0位置,埋入方向为正方向。埋置深度为600 mm的木梁在0、200、400、600 mm这4个位置放置应变片。埋置深度为750 mm的木梁在0、200、400、750 mm这4个位置放置应变片。每个位置左右各放一个应变片,以便测量木梁在加载时的应变变化情况。

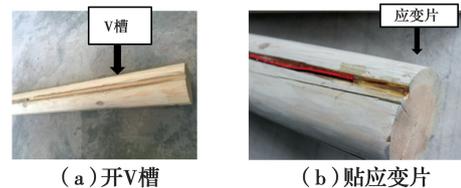


图8 木梁应变片布置图

Fig. 8 Layout of strain gage for timber

2 模型试验结果

2.1 试验破坏形态

如图9所示,试验中主要破坏模式包括木梁拔出破坏和夯土开裂破坏。

试验的8个试件均发生木梁的拔出破坏。加载初期,木梁端的位移缓慢增大,力和位移的关系基本呈线性。随着位移的增加,木梁产生滑移并随着荷载的增大而增大。当达到力的峰值点后,荷载逐渐下降,最终趋于稳定。此时整段木梁滑移,最终发生拔出破坏。

夯土在加载过程中出现横向和纵向两种裂缝开

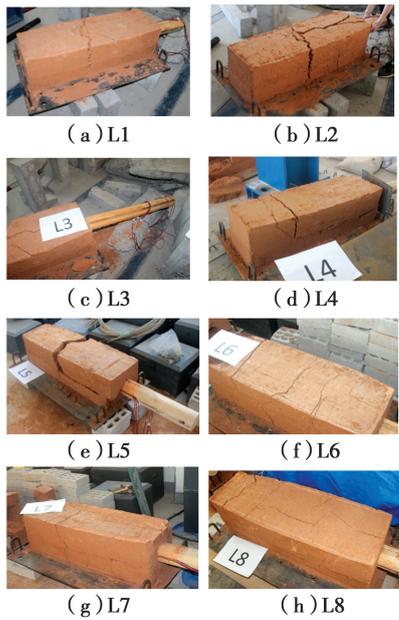


图 9 试件的破坏形态

Fig. 9 Damage forms of specimens

裂破坏。在试验的 8 个试件中均出现垂直于木梁伸入方向的横向裂缝。在木梁滑移发展过程中,木梁伸入位置端部的夯土界面承受最大的拉力,当超过夯土的抗拉强度后,夯土截面出现横向裂缝,发生破坏。最大拉力截面随着滑移的进行而转移,所以,横向裂缝是伴随着滑移的进行而阶段性发生的,如试件 L6 明显出现多段横向裂缝。

在加载过程中,出现沿着木梁伸入方向发展的纵向裂缝。在木梁拔出过程中,木梁与夯土的界面逐渐产生径向裂缝,并向夯土表面扩展,当其穿透夯土后,夯土出现纵向裂缝。产生纵向裂缝的原因是在木梁拔出的时候,因其表面不光滑而引起夯土的膨胀,并在径向方向沿着夯土最少的两边发展。如在试件 L2、L3、L8 木梁中轴线上部的夯土出现纵向裂缝;在试件 L4、L5、L7 木梁两侧的夯土出现纵向裂缝。

2.2 力与位移曲线

图 10 为 8 个木梁-夯土界面粘结滑移试验的拉拔力-滑移关系曲线。其中,试件 L1 加载到滑移值为 20 mm 时,木梁与钢模板发生刮擦,导致曲线下降段的荷载先增加后减小,出现不同于其他试件的变化趋势。但此时试件 L1 已经超过峰值点进入稳定滑移段,极限荷载、峰值滑移与滑动摩擦力的分析不受影响。

表 3 为木梁-夯土界面粘结滑移试验结果。极限荷载即为试验中出现的最大荷载;其对应的位移

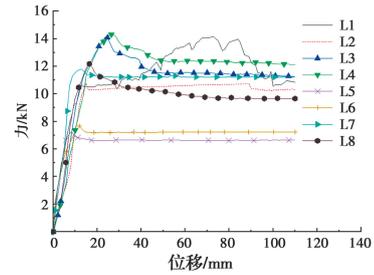


图 10 拉拔力-滑移关系曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of all specimens

值为峰值滑移;滑动摩擦力取试验平滑段的受力。试件参数采用正交设计的试验方法,故每一个参数有 4 个试件对比,采用平均值进行分析比较。由表 3 可知,夯土竖向压力从 10 kN 上升到 20 kN,极限荷载平均提高 47.4%,峰值滑移平均提高 64.4%;木梁伸入长度从 600 mm 提高至 750 mm,极限荷载平均提高 3.5%,峰值滑移平均提高 15.9%;木梁表面由光滑变为粗糙,其极限荷载平均提高 23%,峰值滑移平均提高 36.6%。

表 3 木梁与夯土墙的粘结滑移试验结果

Table 3 Bond slip test results of timber beams and rammed earth walls

试件编号	极限荷载/kN	峰值滑移/mm	滑动摩擦力/kN
L1	10.52	13.2	9.41
L2	10.75	15.3	10.51
L3	14.08	24.82	11.22
L4	14.32	26.34	12.15
L5	7.17	8.37	6.65
L6	7.67	11.56	7.22
L7	11.76	12.98	11.23
L8	12.15	16.47	9.66

由试验结果可知:在 3 个参数中,夯土竖向压力对界面粘结滑移性能的影响最大,此值由节点上方夯土墙的自重决定;在试验参数范围内,木梁的伸入长度对界面性能影响相对较小,但还需要更多试验的验证;而提高木梁粗糙度能有效提高木梁-夯土墙界面的极限荷载。

2.3 界面应力分布

图 11 为相同时刻下(即拉力相同时)木梁不同位置的应变情况。可以看出,随着埋入深度的增加,木梁的应变数值下降。当埋深以 200 mm 的增量从 0 mm 增加到 600 mm 时,木梁伸入长度为 600 mm

的试件 L1、L3、L5 和 L7 应变逐段平均减小 39.1%、20.8%、28.9%。当埋深从 0 mm 增加到 200、400、750 mm 时,木梁伸入长度为 750 mm 的试件 L2、L4、L6 和 L8 应变逐段平均减小 44.9%、23.8%、22.4%。应变逐段减小的原因是木梁通过界面将拉拔力传递到

夯土中,并且随着埋深的增加,传递至夯土的力不断增加。如果埋深足够大,理论上会出现埋置浅的位置达到其粘结力极限值,埋置深的位置受力极小,甚至为零,在力和位移曲线上体现为极限荷载能够保持一段滑移距离,试验中未见此情况。

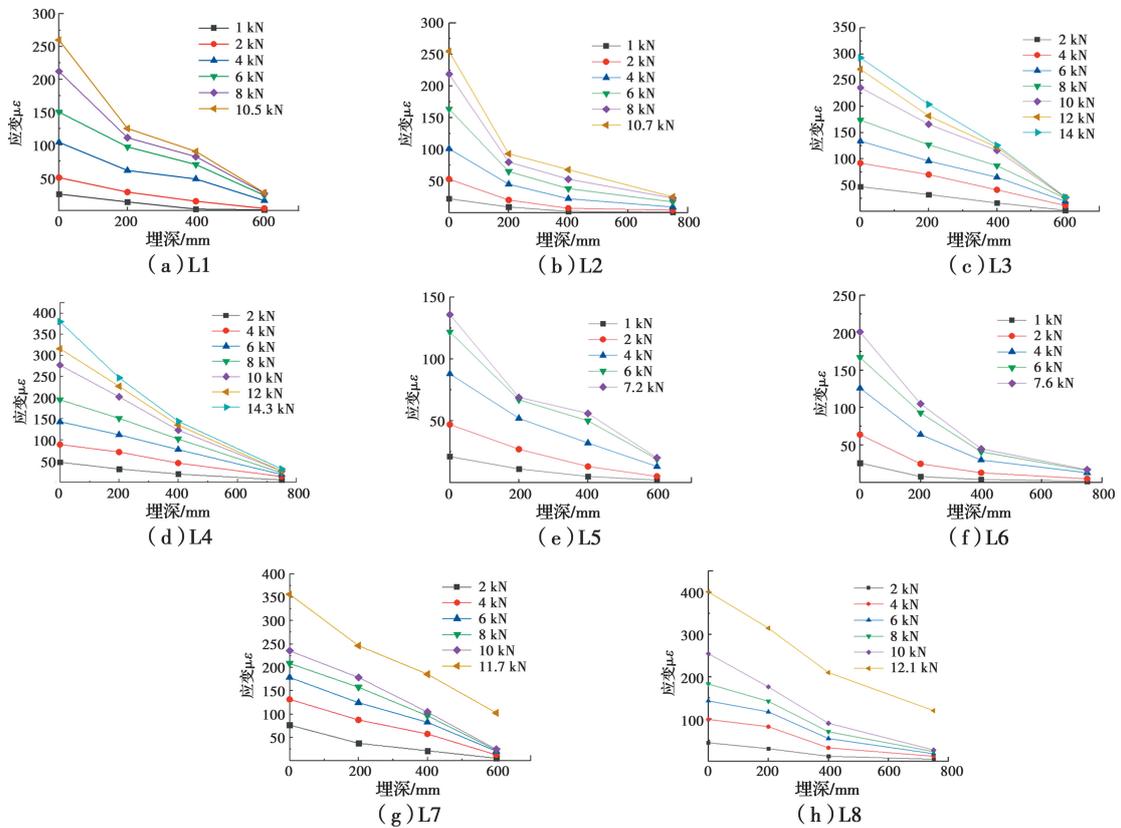


图 11 木梁应变-埋深关系曲线

Fig. 11 Strain-load relation curve of timber

3 有限元模拟分析

3.1 有限元模型

3.1.1 几何模型与网格划分 采用 ABAQUS 软件建立模型。模型由钢模具、上钢板、夯土块和木梁 4 部分组成。其中,木梁和夯土块的尺寸如图 12 所示,上钢板长×宽×厚度为 1 000 mm×300 mm×20 mm,钢模具的厚度为 5 mm。

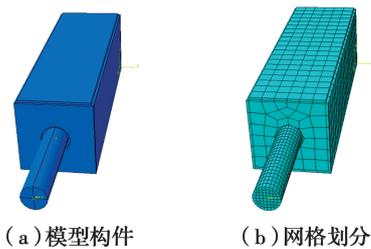


图 12 试件模型图

Fig. 12 Specimen model

3.1.2 材料定义与求解设置 由于土的复杂性,目前还没有一种能够覆盖土所有特性的模型。现有模型都是基于土的某些特性而提出的。在 ABAQUS 中建立弹性与塑性本构模型,弹性模型定义夯土的弹性模量以及泊松比, Mohr-Coulomb 模型主要适用于在单调荷载下的颗粒状材料,参数简单明确,适用于本文中土的模型。根据相关夯土材料性能的测试^[20],输入夯土材料参数,见表 4、表 5。

表 4 弹性参数

Table 4 Elastic parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比
夯土	81	0.25
木材	8 177	0.4
钢材	210 000	0.3

表 5 塑性参数

Table 5 Plastic parameters

材料	摩擦角/(°)	膨胀角/(°)	黏聚力/MPa	塑性应变
夯土	45	15	0.174	0

在木梁-夯土墙界面粘结滑移试验中,木材主要受到顺纹方向的拉力,最大承受拉力为 14.32 kN,则最大拉应力为 1.8 MPa,远低于木材的抗拉强度 77.17 MPa。木材在整个加载过程中处于弹性阶段,故选择弹性材料模型。

钢模具与上钢板的弹性模量比生土和木材大 3 个数量级,计算变形忽略不计,按照弹性材料模拟。

分析步采用 Static General 静力求解器,对耦合了端部截面的参考点创建场变量输出,以便观测其力和位移情况。

3.1.3 相互作用与边界条件 夯土与钢模具的接触使用“硬接触”的正向模型和无摩擦的切向模型。上部厚钢板与夯土进行绑定设置,没有相对运动。建立一个参考点,与木梁伸出段前端进行耦合,通过查看参考点的力和位移曲线来验证模型的正确性。

木梁-夯土界面行为是单向的滑移行为,采用 ABAQUS 中的笛卡儿连接器进行模拟。假设只发生木梁的滑动,没有旋转,从而定义笛卡儿连接器的平移属性。连接器的界面特性定义类似弹簧属性,赋予其试验中每个弹簧沿木梁发生滑移方向的力和位移曲线。选中木梁和夯土接触的节点,各建立 set 集,使用 python 编写的脚本在 set 集合中对应的两种材料之间建立特征线,如图 13 所示。然后把力与位移的关系属性赋予每个连接器。值得注意的是,连接器的数量要足够密集,木梁才能均匀地从界面传力到夯土上,不至于应力集中。

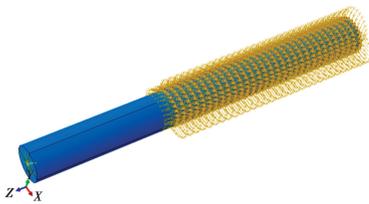


图 13 界面连接器

Fig. 13 Interfacial connector

如图 14 所示,对钢模具的下表面进行端部固定边界条件定义,约束 6 个自由度。在木梁端部的参考点施加 60 mm 的位移荷载,能够覆盖粘结滑移的 3 个阶段,模拟在木梁-夯土墙界面粘结滑移试验中

的受力全过程。施加竖向荷载于上钢板,模拟上部压力作用。

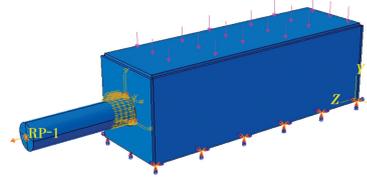
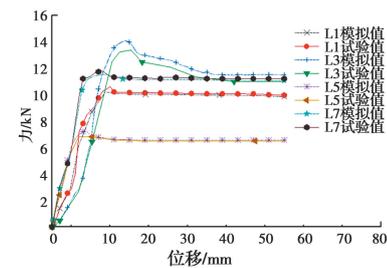


图 14 荷载与边界

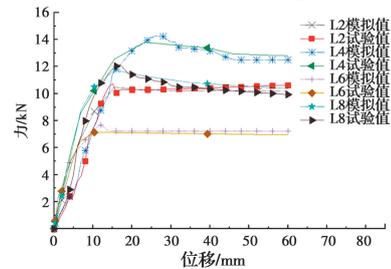
Fig. 14 Load and boundary

3.2 模拟分析结果

3.2.1 力和位移曲线 如图 15 所示,对 8 个试件的试验过程进行模拟,得到计算拉拔力和位移关系曲线,并与试验测试结果比较。从两个试件的力和位移曲线来看,模拟与试验的曲线走向基本相同,具有线性上升段、滑移过渡段和摩擦残余段。计算与试验曲线的极限荷载和滑动摩擦力较吻合,峰值滑移存在差异,但总体变化趋势相符,如表 6 所示。



(a) L1、L3、L5和L7比较



(b) L2、L4、L6和L8比较

图 15 拉拔力-滑移关系曲线比较

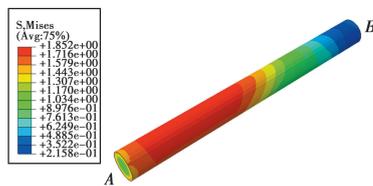
Fig. 15 Comparison of load-displacement curves

3.2.2 木梁粘结滑移 图 16(a)是木梁拉拔方向的应力分布情况,A 端为木梁远离夯土的一端,位置记为 0 mm。8 个试件的木梁沿伸入方向的应力变化如图 16(b)所示,木梁在起始位置(A 端)的应力最大,这是因为此端为加载端,出现应力集中,导致应力偏大。随后出现平缓段,为木梁伸出夯土段。当夯土与木梁接触后,应力发生变化,且随着伸入距离的不断增大,应力逐渐降低,最终在木梁伸入端部(B 端)下降至最小。

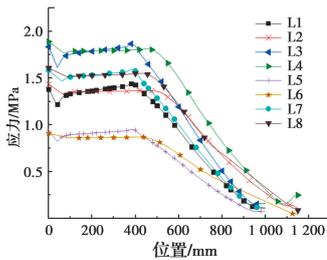
表 6 试件模拟和试验结果比较

Table 6 Comparison of specimen simulation and test results

试件 编号	极限荷载			峰值滑移			滑动摩擦力		
	试验/kN	模拟/kN	相对误差/%	试验/kN	模拟/kN	相对误差/%	试验/kN	模拟/kN	相对误差/%
L1	10.52	10.22	-2.9	13.2	13.77	4.3	9.41	9.86	4.8
L2	10.75	10.47	-2.6	15.3	15.5	1.3	10.51	10.20	-2.9
L3	14.08	13.39	-5.2	24.82	20.38	-21.7	11.22	11.02	-1.8
L4	14.32	13.80	-3.6	26.34	23.23	-11.8	12.15	12.81	5.4
L5	7.17	6.83	-5.0	8.37	6.86	-22.0	6.65	6.64	-0.2
L6	7.67	7.14	-6.9	11.56	10.31	-10.8	7.22	6.95	-3.7
L7	11.76	11.56	-1.7	12.98	13.88	6.9	11.23	11.10	-1.2
L8	12.15	11.74	-3.4	16.47	15.51	-5.8	9.66	10.39	-7.6



(a) L3试件木梁应力分布



(b) 木梁沿伸入方向的应力变化

图 16 试件木梁的应力分布

Fig. 16 Stress distribution of wood beam of specimens

为探究局部的粘结滑移情况,任选一个试件上的木梁进行分析。图 17 为 L3 试件木梁沿拉拔方向不同位置的应力随位移荷载的变化情况。可以看出,局部的粘结滑移曲线与整体粘结滑移曲线走势吻合,都存在线性上升段、滑移过渡段和摩擦残余段,满足木梁-夯土界面受力的变化规律。

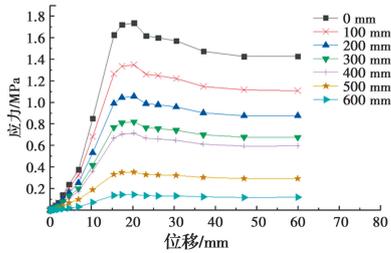
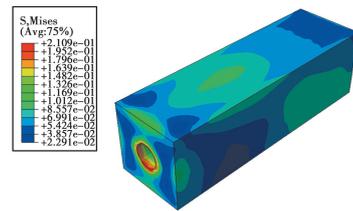


图 17 L3 试件木梁的不同位置的应力-位移图

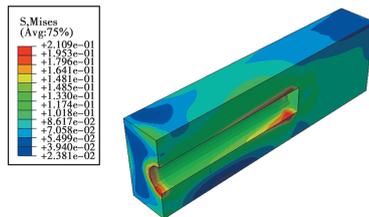
Fig. 17 Stress-displacement diagram of wood beam of L3 specimen at different positions

3.2.3 夯土应力应变 图 18 是试件 L3 的夯土整

体与内部应力图,可以看到,夯土在木梁伸入起始位置和木梁伸入端部位置的应力相对其他地方的应力较大,达到 211 kPa,说明这两个地方较易发生破坏。试验中,木梁伸入起始位置容易发生径向裂缝而最终导致出现纵向裂缝;木梁伸入端部位置会发生夯土的横向裂缝。模拟结果与木梁-夯土界面粘结滑移试验的破坏形态较吻合。



(a) 整体应力图



(b) 内部应力图

图 18 试件夯土应力图

Fig. 18 Stress diagram of rammed earth

4 粘结力计算方法

4.1 界面粘结力组成

木梁和夯土这两种不同性能的材料共同工作的基础是材料界面存在着粘结力。荷载较小时,夯土与木梁共同变形,但随着荷载的逐渐增加,木梁伸入部分发生轴向变形,夯土对木梁的轴向变形产生约束作用,两者的交界面产生剪切效应,该效应为夯土-木梁的粘结力。

钢筋以及 FRP 与混凝土的粘结力包括胶结力、

机械咬合力和摩擦阻力^[21-22]。而因木梁表面无肋,同光圆钢筋一般,木梁-夯土界面机械咬合力几乎为零。除此之外,木梁-夯土界面还存在着基质吸力。故木梁-夯土界面粘结力主要由 3 部分组成:胶结力、表面摩擦力和基质吸力。

4.1.1 胶结力 在加载初期,胶结力起主要作用。试验采用的福建红土本身含有较高比例的黏土,经过 3 个月的养护后,夯土与木梁表面有效粘结在一起。胶结力在木梁滑移的过程中逐步消失,直到下降为零。

随着拔出力的逐渐增大,胶结力破坏,木梁有滑移的趋势,木梁与夯土之间的摩擦力开始发挥作用。待荷载达到最大静摩擦时,界面承载力开始下降,此时达到极限荷载值,胶结力快速下降,界面完全依靠滑动摩擦力起作用。

4.1.2 表面摩擦力 表面摩擦力在加载的全过程都起作用。界面达到极限滑移荷载时,静摩擦达到最大值,木梁开始滑移,此时主要受滑动摩擦力影响。

夯土所受的竖向压力提供摩擦力的正应力。对夯土施加竖向压力时,夯土有向周围膨胀的趋势,但受到钢模具的约束,相当于钢模具对夯土施加压力,使得夯土处于三向受压状态。在这种情况下,夯土对木梁的压力为表面摩擦力提供正应力。

4.1.3 基质吸力 夯土属于非饱和土的范畴,存在非饱和土吸力,表现为基质吸力。通常使用土-水特征曲线(SWCC)来表达含水率与基质吸力的关系^[23]。SWCC 曲线呈“S”型,在含水率较低的情况下,含水率对基质吸力的影响较大。在放置过程中,夯土含水率逐步下降,基质吸力快速上升。在后期,夯土含水率测试值最小达 2.9%^[24],其对基质吸力的影响不容忽视。

4.2 粘结滑移关系

所有试件的力和位移曲线都具有统一的形状特征,可分为线性上升段、滑移过渡段和摩擦残余段 3 部分,如图 19 所示。第 I 部分,曲线呈线性增长,胶结力缓慢降低;第 II 部分,出现明显的非线性行为,胶结力快速降低,当达到最大静摩擦后,粘结力开始下降;第 III 部分,木梁完全滑移,胶结力完全消失,界面存在滑动摩擦力与基质吸力,曲线斜率趋近于零,粘结力达到稳定。

4.3 粘结力计算式

基于试验及数值模拟的分析,木梁-夯土墙的粘

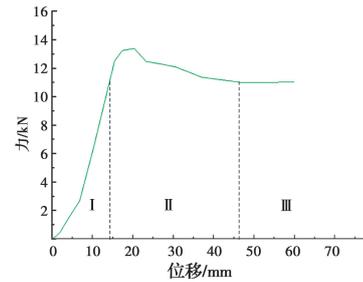


图 19 L3 试件的 3 段式力-位移曲线

Fig. 19 Three-stage force-displacement curve of specimen L3

结力 F_{uls} 用式(1)表示。

$$F_{uls} = F_0 + F_N + F_{(w)} \quad (1)$$

式中: F_0 为部分胶结力; F_N 为表面摩擦力; $F_{(w)}$ 为基质吸力。

部分胶结力 F_0 在达到极限滑移荷载之后逐渐消失为零,其数值为每个试件的极限荷载与摩擦残余段荷载的差值。

根据 Vanapalli 等的研究^[25],表面摩擦力 F_N 和基质吸力 $F_{(w)}$ 构成摩擦残余段,可分别表示为

$$\begin{cases} F_N = \sigma_v \pi d L \tan \delta \\ F_{(w)} = (u_a - u_w) (S^k) (\tan \delta') \pi d L \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_v 为压应力,即夯土竖向压力对界面施加的压应力; δ 为界面摩擦角; $u_a - u_w$ 为基质吸力,其值通过测得含水率并对照 SWCC 曲线得到; S^k 为有效概率,土的饱和程度和含水率有关; δ' 为有效表面摩擦角,为夯土内摩擦角的 1/3~2/3; $\pi d L$ 为木梁的表面积,其中 d 为木梁直径, L 为木梁伸入长度。

使用前述有限元模型,木梁和夯土界面接触使用“硬接触”的正向模型和摩擦的切向模型,施加 10、20 kN 的竖向荷载,探究木梁的伸入长度为 600、750 mm 时的摩擦力以及摩擦系数的关系,见图 20。在其他因素不变的情况下,摩擦系数和摩擦力是线性关系。通过图 20 与表 3 的数值对比,确定试件的粗糙摩擦系数为 0.6、光滑摩擦系数为 0.1,摩擦系数与摩擦力见表 7。

表 7 竖向压力提供的摩擦力数值

Table 7 Friction value provided by vertical pressure

伸入长度/mm	摩擦系数	F_N/kN	
		$T_N=10$ kN	$T_N=20$ kN
600	0.6	2.89	5.71
750	0.6	3.60	7.16
600	0.1	0.54	1.1
750	0.1	0.67	1.36

注: F_N 为表面摩擦力; T_N 为夯土竖向压力。

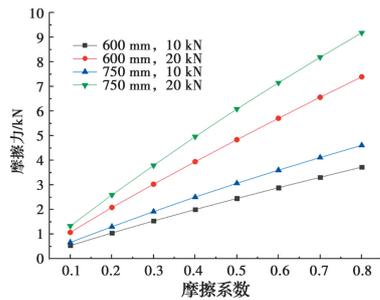


图20 摩擦系数与摩擦力的关系

Fig. 20 Relation between coefficient of friction and friction

在摩擦残余段, F_N 和 $F_{(w)}$ 共同起作用, 基质吸力 $F_{(w)}$ 可表示为摩擦残余段荷载与表面摩擦力 F_N 的差值。试件粘结力 F_{uls} 的各组成部分见表 8。

表 8 试件各部分界面力组成

Table 8 Interface force composition of each part of the specimens

试件编号	F_0 /kN	F_N /kN	$F_{(w)}$ /kN
L1	1.11	2.89	6.52
L2	0.24	5.71	4.80
L3	2.86	3.60	7.62
L4	2.17	7.16	4.99
L5	0.52	0.54	6.11
L6	0.45	1.10	6.12
L7	0.53	0.67	10.56
L8	2.49	1.36	8.30

注: F_0 为部分胶结力; F_N 为表面摩擦力; $F_{(w)}$ 为基质吸力。

5 结论

1) 试验试件发生木梁拔出破坏和夯土开裂破坏。木梁拔出破坏在 8 个试件中均有发生。夯土发生开裂破坏时, 横向裂缝出现在木梁伸入端部位置, 并随滑移的增加而阶段性发生; 纵向裂缝出现在木梁中轴线上部和木梁两侧的夯土上。

2) 福建土楼木梁-夯土界面的粘结滑移试验曲线划分为 3 段: 线性上升段、滑移过渡段和摩擦残余段。

3) 使用连接器模拟木梁与夯土界面性能, 模拟与试验的极限滑移荷载和滑动摩擦力较为吻合, 木梁和夯土的应力分布情况满足理论和试验结果, 可作为木梁-夯土界面性能的一种模拟手段。

4) 木梁-夯土界面的粘结力主要由胶结力、木梁与夯土接触面的表面摩擦力和基质吸力组成。基于模型试验与数值模拟结果, 提出反映木梁-夯土界面粘结滑移性能的粘结力计算式, 可为福建土楼及生

土类建筑的设计和研究提供参考。

参考文献:

- [1] COLAFRANCESCHI E, PALLOTTINO E, PORRETTA P. Tulou: The rammed earth dwellings of Fujian (China). Functional, typological and constructive features [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 44: 937-944.
- [2] 许振栋, 杨贵, 林慧卿, 等. 福建政和-海丰断裂带地震活动趋势讨论[J]. 科学技术创新, 2021(2): 21-23. XU Z D, YANG G, LIN H Q, et al. Discussion on the seismicity trend of Zhenghe-Haifeng fault zone in Fujian Province [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(2): 21-23. (in Chinese)
- [3] 潘毅, 王忠凯, 曲哲, 等. 尼泊尔自建 RC 框架结构的抗震能力分析[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 304-312. PAN Y, WANG Z K, QU Z, et al. Seismic performance of owner-built RC frame structures in Nepal [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 304-312. (in Chinese)
- [4] 潘毅, 陈建, 包韵雷, 等. 长宁 6.0 级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(Sup1): 297-306. PAN Y, CHEN J, BAO Y L, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural buildings in Ms 6.0 Changning earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Sup1): 297-306. (in Chinese)
- [5] 郑山锁, 王沛钦, 曾磊, 等. 土木混合承重农房抗震性能初探[J]. 工业建筑, 2008, 38(3): 48-51. ZHENG S S, WANG P Q, ZENG L, et al. Investigation of seismic behavior of earth wall-timber frame structure in rural areas [J]. Industrial Construction, 2008, 38(3): 48-51. (in Chinese)
- [6] LIN H W, FENG P, YANG J Q. Pressure-dependent bond stress-slip model for sand-coated FRP-concrete interface [J]. Composite Structures, 2021, 263: 113719.
- [7] YIN Y S, FAN Y F. Influence of roughness on shear bonding performance of CFRP-concrete interface [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2018, 11(10): 1875.
- [8] MIRANDA M P, MORSCH I B, BRISOTTO D D S, et al. Steel-concrete bond behavior: An experimental and numerical study [J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121918.
- [9] JAARANEN J, FINK G. Frictional behaviour of timber-concrete contact pairs [J]. Construction and Building Materials, 2020, 243: 118273.

- [10] LORENZIS L D, SCIALPI V, TEGOLA A L. Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timber [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2005, 36(4): 279-289.
- [11] A S, ZHOU C D. Pull-out tests on bond behavior between timber and near-surface-mounted steel bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 288: 122974.
- [12] BUI Q B, BUI T T, JAFFRÉ M, et al. Steel nail embedded in rammed earth wall to support vertical loads: An investigation [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117836.
- [13] 芦苇, 李东波, 毛筱霏, 等. 土遗址楠竹锚固界面力学行为与传力机理研究[J]. *固体力学学报*, 2021, 42(5): 501-507.
LU W, LID B, MAO X F, et al. Study on mechanical behavior and force transfer mechanism of bamboo bolt anchor interface in earthen sites[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2021, 42(5): 501-507.
- [14] 梁兰娣. 基于夯土劣化的土楼结构承载力研究[D]. 福建泉州: 华侨大学, 2014.
LIANG L D. Study of earth building structural bearing capacity based on rammed earth degradation [D]. Quanzhou, Fujian: Huaqiao University, 2014. (in Chinese)
- [15] 林俊龙. 福建土楼整体夯土结构轴压承载力的试验研究[D]. 福建泉州: 华侨大学, 2014.
LIN J L. Experimental study on axial bearing capacity of the overall rammed earth structure of Fujian Tulou [D]. Quanzhou, Fujian: Huaqiao University, 2014: 28-31. (in Chinese)
- [16] 木材顺纹抗拉强度试验方法: GB/T 1938—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Method of testing in tensile strength parallel to grain of wood: GB/T 1938-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [17] 木材顺纹抗压强度试验方法: GB/T 1935—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Method of testing in compressive strength parallel to grain of wood: GB/T 1935-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [18] 龚蒙, 徐永吉, 唐海波. 木材顺拉弹性模量测定方法的研究: 加载速度的选择[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 1995(4): 93-96.
GONG M, XU Y J, TANG H B. A study of testing method of measuring wood modulus of elasticity in tension parallel to grain: Determining of loading speed [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 1995(4): 93-96. (in Chinese)
- [19] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [20] 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.
XU Y X, PENG X Q, LIANG L D. Numerical simulation of Tulou rammed earth structure deformation characteristics [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2015, 36(3): 327-331. (in Chinese)
- [21] 房栋. 体外预应力 FRP 筋加固 RC 单向板计算方法[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
FANG D. Calculation method of reinforced concrete one-way slabs externally prestressed with FRP tendons [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017. (in Chinese)
- [22] 刘旭冉. 150 MPa 高性能混凝土与变形钢筋粘结锚固性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
LIU X R. Experimental research on bonding properties between 150 MPa high performance concrete and deformed bars [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [23] ZHAI Q, RAHARDJO H, SATYANAGA A, et al. Estimation of wetting hydraulic conductivity function for unsaturated sandy soil [J]. *Engineering Geology*, 2021, 285: 106034.
- [24] 袁下下. 福建土楼夯土墙材料耐水性能试验研究[D]. 福建泉州: 华侨大学, 2013.
YUAN X X. Experimental study on the material water resistance of the rammed earth wall of Fujian earth building [D]. Quanzhou, Fujian: Huaqiao University, 2013. (in Chinese)
- [25] VANAPALLI S K, TAYLAN Z N. Design of single piles using the mechanics of unsaturated soils [J]. *International Journal of GEOMATE*, 2012, 2(1): 197-204.

(编辑 黄廷)