

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.02.006



土遗址用变径木锚杆锚固机理数值模拟研究

黄军朋¹, 张景科¹, 王南¹, 李卷强¹, 郭青林^{2,3}, 赵林毅^{2,3}

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室; 土木工程与力学学院, 兰州 730000;
2. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200; 3. 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心, 甘肃 敦煌 736200)

摘要:基于室内拉拔试验的物理模型,利用 FLAC^{3D} 建立变径木锚杆拉拔数值计算模型,分析了变径木锚杆锚固系统的荷载传递规律、界面剪应力分布和传递规律、浆体土体应力场和位移场,并通过数值试验研究锚孔直径、锚杆直径和锚固长度对锚固效果的影响。研究表明:数值试验结果与室内拉拔试验结果较为吻合,证明数值模拟木锚杆拉拔过程的可行性和科学性;木锚杆浆体界面剪应力沿锚固段分布不均,主要集中在锚固段顶端和末端的 0.1 m 范围内,末端界面剪应力呈增大的趋势与其变径的结构特征有关,其变径的特点在一定程度上提高了木锚杆的抗拔力;变径木锚杆同时具有拉力型和压力型锚杆的特征,径向具有剪胀作用;锚固影响因素中锚孔直径、锚固长度对木锚杆抗拔力影响显著,而锚杆直径对其影响相对较小;提出了木锚杆极限抗拔力计算公式。

关键词:土遗址;锚杆;锚固机理;数值模拟;参数分析

中图分类号:TU432 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)02-0032-08

Numerical simulation of anchoring mechanism for wood bolt with the variable diameter used in earthen sites

Huang Junpeng¹, Zhang Jingke¹, Wang Nan¹, Li Juanqiang¹, Guo Qinglin^{2,3}, Zhao Linyi^{2,3}

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment with the Ministry of Education in Western China; School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China; 2. Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, Gansu, P. R. China; 3. National Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings and Earthen Sites, Dunhuang 736200, Gansu, P. R. China)

Abstract: Based on the physical model of laboratory pull-out test, a numerical calculation model of wood bolt with the variable diameter was established by means of FLAC3D. The load transfer mechanism, the interfacial shear stress distribution, the stress field and displacement field of slurry were analyzed. The influence of anchor hole diameter, anchor diameter and anchorage length on anchoring effect were studied by

收稿日期:2017-05-26

基金项目:国家自然科学基金(51578272);中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2016-br02);甘肃省基础研究创新群体(2014GS03574)

作者简介:黄军朋(1990-),男,主要从事古遗址保护加固研究,E-mail:huangjp15@lzu.edu.cn。

张景科(通信作者),男,副教授,博士(后),E-mail:zhangjink@lzu.edu.cn。

Received:2017-05-26

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51578272); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. lzujbky-2016-br02); Innovative Group of Basic Research in Gansu Province (No. 2014GS03574)

Author brief: Huang Junpeng (1990-), main research interest: conservation of cultural heritage, E-mail: huangjp15@lzu.edu.cn.

Zhang Jingke (correspondence author), associate professor, PhD, E-mail: zhangjink@lzu.edu.cn.

the numerical simulation experiment. The results show that Q-S curve from numerical simulation is in agreement with that from laboratory pull-out test, which proves that the numerical simulation on wooden bolt pull-out process is feasible and scientific. The interfacial shear stress distribution along wood bolt with the variable diameter is uneven, and shear stress mainly concentrates among the distance of 0.1m at the top and the end of anchorage section. Structural characteristics of bolt leads to the increasing trend of shear stress near the anchor end. Furthermore, it strengthens the anchor capacity of wood bolt with comparison to regular bolt. The wood bolt with the variable diameter has the characteristics of tension-type and pressure-type bolt, and radial dilation is another feature. Compared with anchor diameter which has little impact on anchor capacity, the anchor hole diameter and anchorage length have significant influence on the pullout capacity. The formula for the ultimate pullout capacity for wood bolt with the variable diameter is proposed.

Keywords: earthen sites; bolts; anchoring mechanism; numerical simulation; parameter analysis

锚固技术是解决土遗址变形开裂病害的主要方法之一。土遗址加固工程中,锚固杆材先后出现过薄壁钢管^[1]、白蜡杆^[2]、楠竹^[3]、楠竹加筋复合锚杆^[4]等。多年实践证明,金属杆材及水泥系锚固浆液与遗址体的兼容性较差,不符合中国文物保护的理念和原则。基于传统材料与工艺的科学挖掘,作为西北干旱半干旱地区夯筑土遗址中常用的加筋体,天然木材成为较理想的锚固杆材。

目前,土遗址加固中木锚杆主要为天然白蜡杆,区别于其他岩土锚固领域中规则、均质、顺直的金属杆材,其具有通长变径、表面形态不均一、近似圆台状、强度各向异性等特点。由于土遗址用木锚杆本身结构变径的特殊性,其剪应力传递与分布规律、破坏形式等锚固特性不同于其他岩土锚固领域中钢筋、钢绞线等标准规则杆体。对于标准规则锚杆研究较为深入,如 Phillips^[5]提出剪应力按指数分布;蒋忠信^[6]提出剪应力按三参数高斯曲线分布;张季如等^[7]提出剪应力按双曲函数分布等。以上锚固理论在实践中均已得到印证。而土遗址中变径木锚杆锚固机制的研究远滞后于工程应用,在实际应用中多采用剪应力均匀分布的理想形式设计,这与试验结果不符^[8]。因此,有必要对土遗址用变径木锚杆的力学传递机制、界面剪应力分布规律和锚固效果的影响因素等进行更为深入的研究。

夯筑土遗址具有夯筑分层的土体结构致使土体力学特征不均一,土遗址建造具有明显的地域特征,在遗址本体上进行锚固试验不符合土遗址保护的观念,以上问题极大地制约土遗址锚固机理的研究。此外,室内外拉拔试验受界面应变测试元件限制,实验值较为离散。然而,数值方法在锚固机制及锚固效果研究方面具有显著的优势。在锚固机制研究方

面,战玉宝等^[9]、庞有师等^[10]采用有限元法,李英勇等^[11]、叶红等^[12]采用有限差分法模拟研究锚索锚固段剪应力分布和传递规律并进行锚固参数分析;在锚固效果研究方面,贾金青等^[13]、林杭等^[14]、Murphy等^[15]运用FLAC^{3D}分别模拟研究锚索支护深基坑、边坡、矿井等锚固工程的锚固效果,王连国等^[16]采用有限元法模拟锚注支护对深部软岩巷道的锚固效果。以上数值模拟研究主要是标准规则杆材的锚固机制及其应用于基坑、边坡、矿井、巷道等工程,而对土遗址加固领域中变径杆材数值模拟研究还是空白。

鉴于此,本文基于前期室内试验物理模型的研究成果^[8],利用FLAC^{3D}模拟研究变径木锚杆锚固系统的锚固性能、界面力学传递规律,并对室内试验结果与数值模拟计算结果进行对比和分析,进而研究锚孔直径、锚杆直径和锚固长度对变径木锚杆锚固效果的影响。

1 锚固试验案例简介

室内拉拔试验的基本步骤是:坍塌遗址土粉碎后经过过筛后,根据室内夯筑工艺在PVC管内采用预留锚孔的方式进行分层夯筑,夯筑完成后在实验室内养护至干透。在木锚杆上安设应变片,采用重力式灌浆的方式安装锚杆,养护90 d,从而制作锚固试样(图1)。拉拔前,进行锚杆拉拔设备安装,以定量获取木锚杆拉拔过程中的荷载-位移关系。依据《干燥类土遗址保护加固工程设计规范》(WW/T 0038—2012)中锚杆试验要求进行拉拔试验(图2),室内物理模型拉拔试验及其结果详细介绍参见文献[8]。该试验原理是:PVC管固定试样,拉拔实验时锚具安置在木锚杆顶端,拉拔力通过木锚杆传递给

浆体、土体,而液压油缸产生反作用力通过护层钢板传递到土体。随着拉拔力的增大,木锚杆产生位移,通过锚杆综合参数测定仪来记录荷载与位移的关系,其结果可用于对本次数值模拟试验结果的验证。



图 1 室内试验模型制作过程

Fig. 1 The manufacturing process of modeled system at laboratory



图 2 室内拉拔试验

Fig. 2 Laboratory pull-out test

2 变径木锚杆锚固机理的数值模拟

2.1 计算模型建立及参数

锚固体的计算模型选取层高 0.1 m、半径 14.5 cm、共 5 层夯土(夯层 1~5)的圆柱体,木锚杆布置在模型的中心(图 3)。模型由 11 040 个单元,13 034 个节点组成,变径木锚杆采用实体单元模拟,直径由上至下线性增大,锚固长度 0.5 m。夯土采用 8 个节点的六面体单元模拟,网格划分以锚固体为中心向四周呈放射状由密变疏(图 4)。孔口到锚固末端为 z 轴负方向,孔口位置为坐标原点。夯层 1 上部为内半径 4.5 cm、外半径 14.5 cm、高 2 cm 的圆形护层钢板。计算模型的边界条件为底部和侧面均施加法向约束(图 3)。

木锚杆-浆体界面(接触面 1)和浆体-土体界面(接触面 2)采用 FLAC^{3D} 中的接触面(Interface)单元

来模拟,Interface 单元可以用来模拟木锚杆、浆体以及夯筑土体之间界面的错动滑移、分离。

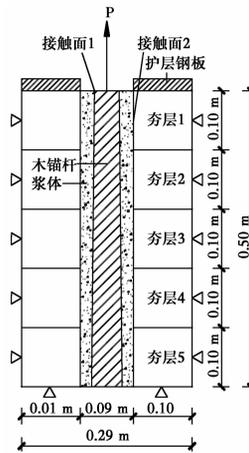


图 3 模型及边界条件

Fig. 3 Boundary condition of entity model

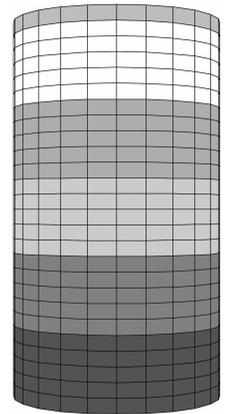


图 4 网格划分

Fig. 4 Mesh of geometry

选择文献[8]中 M3 木锚杆锚固系统作为研究对象,室内拉拔试验对 M3 锚固系统进行单级 2 kN 加载以获取极限抗拔力。M3 杆长 1 m,锚固长度 0.5 m,起始端半径 1.6 cm,末端半径 2.6 cm。由于木锚杆天然结构变径的特殊性,其直径变化非线性,按理想条件假定直径线性变化,则锚固长度 0.5 m 时,锚固段顶端半径 2.1 cm,末端半径 2.6 cm。锚固浆体为基于水硬石灰和石英砂的浆液,水硬石灰、石英砂按照质量 1:1 配比,水灰比为 0.33。由于遗址土具有夯筑分层的性质,遗址土表层土风化程度不同,土样颗粒不均匀,底层夯筑次数多于顶层,均致使同一遗址土不同夯层土样的物理力学性质有差异^[17],总体上是下部夯土强度高于上部夯土强度。实测 M3 锚固系统材料的物理力学参数见表 1,界面力学参数见表 2。

表 1 材料的物理力学参数^[8,18]

Table 1 Physico-mechanical parameters of materials

材料类型	E/MPa	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	ν	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
夯层 1	16.03	15.11	0.30	26.50	36.6
夯层 2	16.07	15.14	0.30	26.53	37.2
夯层 3	16.14	15.25	0.29	26.58	37.5
夯层 4	16.22	15.30	0.28	26.62	38.0
夯层 5	16.27	15.37	0.28	26.65	38.3
浆体	30.00	15.30	0.30	600.00	32.0
木锚杆 M3	1 579.00	7.18	0.46		

表 2 界面力学参数

Table 2 Interfacial mechanical parameters

接触面	$ks/(Pa \cdot m^{-1})$	$kn/(Pa \cdot m^{-1})$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	σ_t/MPa
接触面 1	6.579×10^{10}	6.579×10^{10}	500.0	24.0	0.5
接触面 2	2.500×10^8	2.500×10^8	212.0	30.0	0.4

2.2 屈服破坏准则

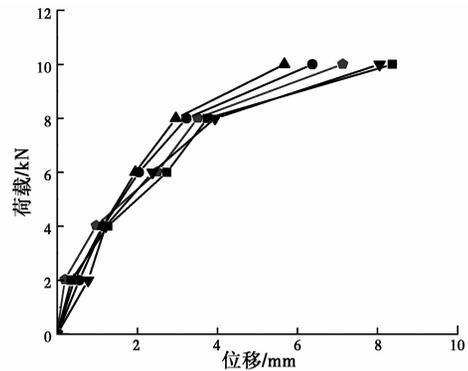
采用目前岩土工程中应用最为广泛的非关联流动剪切屈服 Mohr-Coulomb 准则,其表达式为^[19]

$$f = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi - c \cos \varphi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta_\sigma + \frac{\sin \theta_\sigma \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right) = 0$$

式中: I_1 、 J_2 分别为应力张量第 1 不变量和应力偏量第 2 不变量; θ_σ 为应力罗德角; c 、 φ 分别为粘聚力和内摩擦角。

2.3 数值模拟结果分析

2.3.1 与室内拉拔试验结果比较 室内拉拔试验中 M3 锚固系统在荷载 $P=10$ kN 时,按照《干燥类土遗址保护加固工程设计规范》(WW/T 0038—2012)中锚杆破坏准则即发生塑性破坏。室内试验木锚杆锚固系统表现出低弹性、高塑性的特点,具有极强的延性^[8]。室内共进行 4 组试样(平行试样 1、平行试样 2、平行试样 3、M3)拉拔试验,天然取材的平行试样 1、平行试样 2、平行试样 3 木锚杆顶端半径(R_1)和末端半径(R_2)均不同于 M3 木锚杆顶端和末端半径。图 5 为 4 组室内拉拔试验与 M3 锚固系统数值模拟试验的荷载-位移关系对比曲线,可见, M3 锚固系统模拟试验结果与室内拉拔试验结果较为吻合,证明数值模拟方法的可行性和科学性。模拟试验最大位移稍小于 M3 锚固系统室内拉拔试验最大位移,两者相差 10.94%,这可能是由于模拟试验中假设木锚杆线性变径而室内拉拔试验中木锚杆为非线性变形以及木锚杆本身材料产生弹性变形所引起。模拟试验最大位移与平行试样 1、平行试样 2、平行试样 3 锚固系统室内拉拔试验最大位移分别相差 20.66%、29.53%、32.22%,这主要是由于木锚杆天然取材,平行试样 1、平行试样 2、平行试样 3 木锚杆顶端和末端半径均不同于模拟试验 M3 木锚杆顶端和末端半径所造成,且杆体半径变化越大,最大位移与模拟试验最大位移相差越大。当荷载 $P \leq 6$ kN 时,锚固段处于弹性变形阶段,位移随着荷载的增大近似线性增长。随着荷载继续增大,锚固界面产生塑性变形,进而锚杆发生滑移破坏达到极限抗拔力,木锚杆锚固作用失效。



注:●-平行试样1试验曲线($R_1=2.20$ cm、 $R_2=2.90$ cm)
 ▲-平行试样2试验曲线($R_1=2.275$ cm、 $R_2=2.90$ cm)
 ■-平行试样3试验曲线($R_1=2.25$ cm、 $R_2=3.00$ cm)
 ●-M3试验曲线($R_1=2.10$ cm、 $R_2=2.60$ cm) ▲- M3模拟曲线

图 5 荷载-位移关系曲线

Fig. 5 Load displacement curves

2.3.2 界面剪应力分布规律 综合 FLAC^{3D} 数值计算下木锚杆浆体界面剪应力分布云图(图 6)和木锚杆浆体界面剪应力沿锚杆轴向分布图(图 7)可知:剪应力沿锚固段呈不均匀分布,在木锚杆顶端和末端的 0.1 m 范围内量值较大,中部量值相对较小。其剪应力分布不同于其他锚固工程中规则杆体剪应力分布的理论模型^[5-7]。当荷载 $P \leq 6$ kN 时,界面剪应力呈 U 型曲线,在锚杆顶端的量值最大,且沿锚杆轴向向中部呈减小的趋势,在距锚杆锚固体顶端 0.4 m 处剪应力呈增大的趋势,此时锚固界面处于弹性黏结状态。当 6 kN $< P \leq 8$ kN 时,锚固界面进入弹塑性变形阶段,此时锚固界面产生塑性变形,顶端界面剪应力减小为 0,界面剪应力峰值向里端传递,在距锚杆锚固体顶端 0.05 m 处达最大,然后沿锚杆轴向减小,在距锚杆锚固段顶端 0.4 m 处呈增大的趋势。当荷载 $P > 8$ kN 时,锚固段进入滑移破坏阶段,顶端和末端界面剪应力继续增大,而中间锚固段界面剪应力增幅较小。

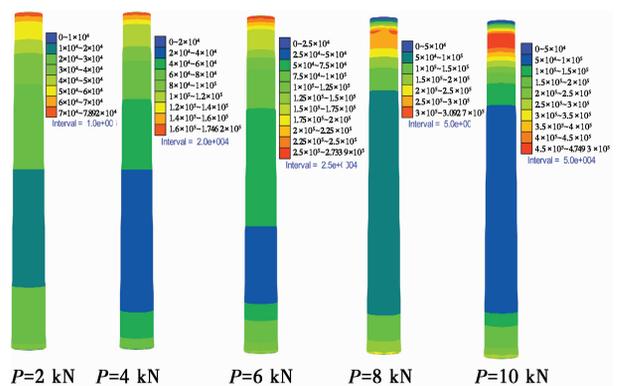


图 6 不同荷载下界面剪应力分布云图

Fig. 6 Distributions of the interfacial shear stress under different loads(unit: Pa)

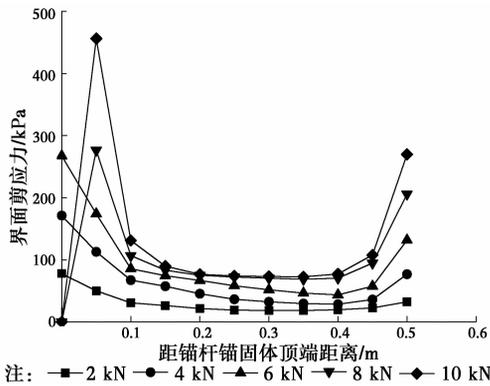


图 7 界面剪应力分布图

Fig. 7 Distributions of the interfacial shear stress

鉴于木锚杆近似圆台状,其顶端直径小于末端直径,随着荷载及位移的增加,变径诱发的剪胀作用愈发明显,在锚杆末端 0.1 m 范围内界面剪应力呈现增大的趋势。当上部界面粘结力不足以抵抗拉拔荷载而发生剪切破坏时,粘结力主要由锚固段末端提供,木锚杆变径的特点在一定程度上提高了锚固系统的抗拔力。

2.3.3 土体浆体应力场、位移场 不同荷载作用下土体浆体的应力云图(图 8)表明:浆体土体所受应力以木锚杆为中心呈轴对称分布;土体上部为压应力区,下部为拉应力区;土体中拉、压应力区分界面($s_{zz}=0$ Pa 等值线)可用一抛物面来描述,且拉拔荷载越大,抛物分界面越靠近锚固段末端。木锚杆受拉时,上部及中下部浆体处于受拉状态;由于木锚杆直径渐大,荷载在木锚杆末端对浆体施加压应力,浆体与周围土体产生剪切抗力,以此提供锚杆所需的承载力,说明变径木锚杆同时具有拉力型和压力型锚杆的特征。

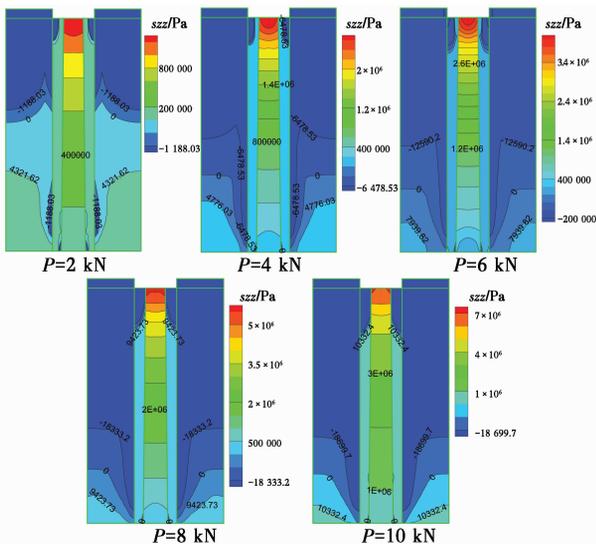


图 8 土体浆体应力云图

Fig. 8 Stress distributions of soil and slurry

不同荷载作用下浆体土体的位移云图(图 9)表明:土体浆体的位移以木锚杆为中心呈轴对称分布,且位移随着荷载的增加而增大。由于液压油缸对上部钢板的作用力传递到上部土体,在土体下部,木锚杆末端直径较大向四周挤压浆体土体,使得土体位移等值线呈抛物线状,即在纵向两端土体位移小于中部土体位移。

2.3.4 剪胀现象 数值模拟结果表明变径木锚杆对浆体土体具有剪胀作用。由图 9 可知:由于木锚杆本身变径的结构特点,锚杆末端直径相对较大,而向四周挤压土体使土体位移增大,土体位移等值线呈抛物线状,在纵向两端位移小于中间位移;越靠近木锚杆浆体土体横向位移越大,径向挤压土体,体现变径木锚杆径向的剪胀作用,这与拉拔试验中剪胀作用导致 PVC 管破裂一致^[8]。

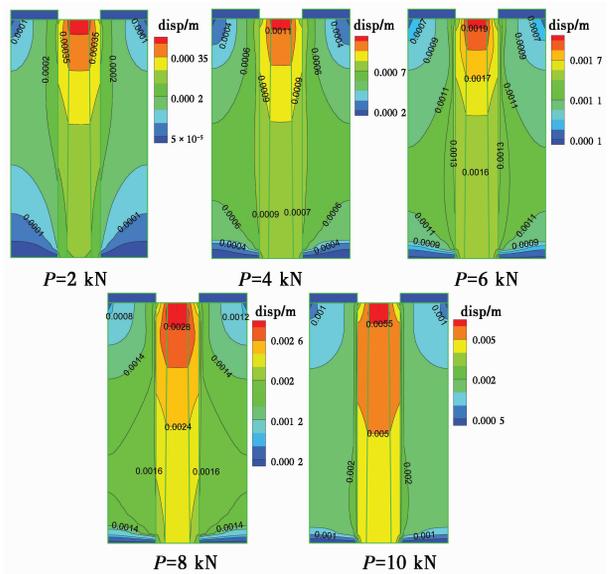


图 9 土体浆体位移云图

Fig. 9 Displacement distributions of soil and slurry

3 锚固参数分析

木锚杆极限抗拔力是土遗址锚固研究的基础。变径木锚杆锚固作用机理复杂,影响锚固效果的因素较多,其中木锚杆锚固系统本身的结构特征是影响锚固效果的主要因素。

3.1 锚孔直径

锚固长度 0.5 m,锚孔直径 $\phi=9,10,11,12$ cm 数值模型的荷载位-移曲线(图 10)表明:木锚杆顶端的位移随着荷载的增大而增加,当荷载 $P < 8$ kN 时,各孔径的位移相差较小,当荷载 $P \geq 8$ kN 时,各孔径的位移相差较大。锚固体的抗拔力随着锚孔直径的增加而提高。

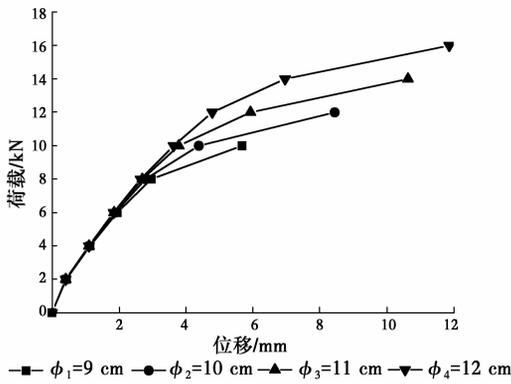


图 10 不同锚孔直径荷载位移曲线

Fig. 10 Load displacement curves of different anchor hole diameters

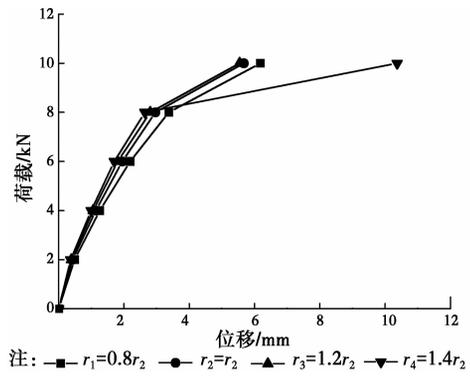


图 12 不同锚杆直径荷载-位移曲线

Fig. 12 Load displacement curves of different anchor diameters

不同锚孔直径界面剪应力分布图(图 11)表明: 1)界面剪应力呈不均匀分布,木锚杆两端界面剪应力显著大于中部界面剪应力,末端界面剪应力增大主要是木锚杆本身变径的结构特征所引起。2)在荷载一定时,界面剪应力与锚孔直径密切相关。锚孔直径越小,剪应力峰值越大;锚孔直径越大,剪应力峰值越小,剪应力分布曲线越平缓。

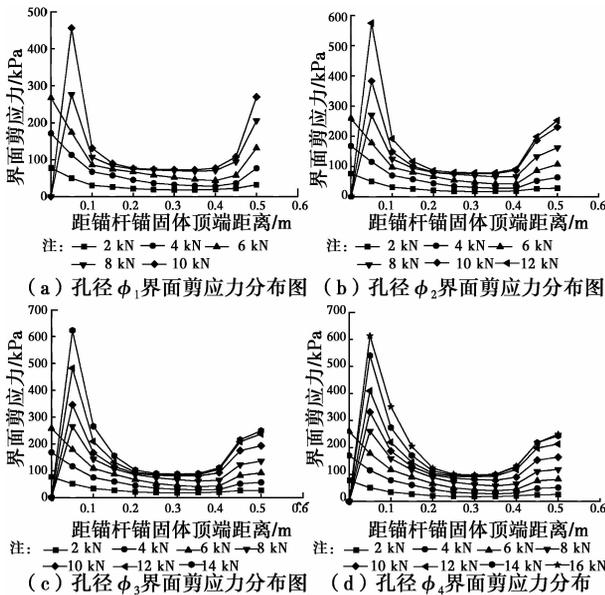


图 11 不同孔径界面剪应力分布图

Fig. 11 Distributions of the interfacial shear stress under different anchor hole diameters

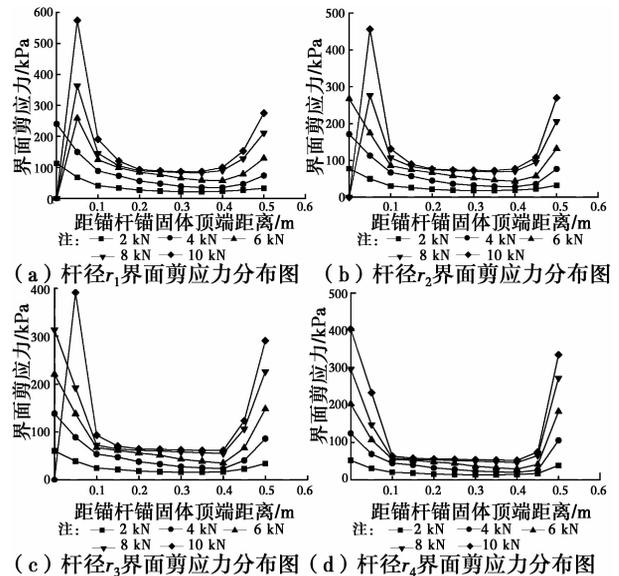


图 13 不同杆径界面剪应力分布图

Fig. 13 Distributions of the interfacial shear stress under different anchor diameters

3.2 锚杆直径

以木锚杆 M3 的直径为基础,分别扩大或者缩小 0.2 倍锚杆直径时数值模型的荷载-位移曲线(图 12)表明:不同杆径木锚杆的极限抗拔力均为 10 kN,增大或者缩小杆径对抗拔力提高较小。在同一荷载下,杆径越小,锚杆顶端位移越大,但是杆径 r_4 在破坏时的位移显著大于其他杆径破坏时的位移。

3.3 锚固长度

锚固长度为 $h_1=0.6h_3$ 、 $h_2=0.8h_3$ 、 $h_3=0.5m$ 和 $h_4=1.2h_3$ 时数值模型的荷载-位移曲线(图 14)表明:在同一荷载作用下,木锚杆顶端的位移随锚固长度增大而减小。木锚杆抗拔力随着锚固长度的增大而提高。因此,对于土遗址中小体量危岩体的加固,适当增加锚固长度可以有效提高抗拔力。

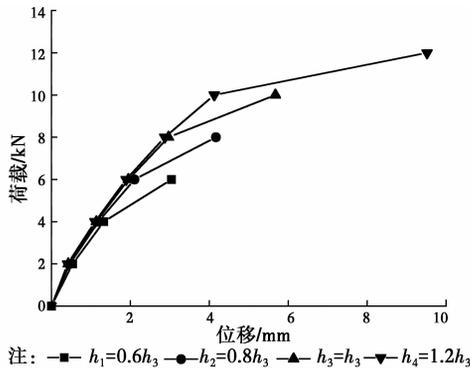


图 14 不同锚固长度荷载-位移曲线

Fig. 14 Load displacement curves of different anchorage lengths

不同锚固长度界面剪应力的分布图(图 15)表明:1)界面剪应力沿着锚杆轴向分布不均,主要集中在木锚杆顶端和末端的 0.1 m 范围内,且顶端界面剪应力大于末端界面剪应力,木锚杆变径的特征引起木锚杆末端界面剪应力呈增大的趋势;2)锚固长度越小,木锚杆末端的直径相对较小,随着荷载的增大,首先达到界面容许粘结力,从而界面剪应力相对较大,越先发生滑移破坏;3)随着荷载及锚固长度的增大,锚固段中部界面剪应力增值较小,剪应力的分布特征没有太大的改变。

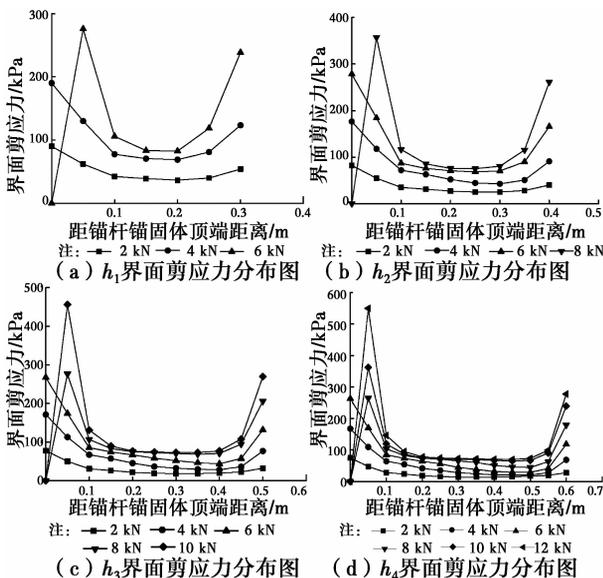


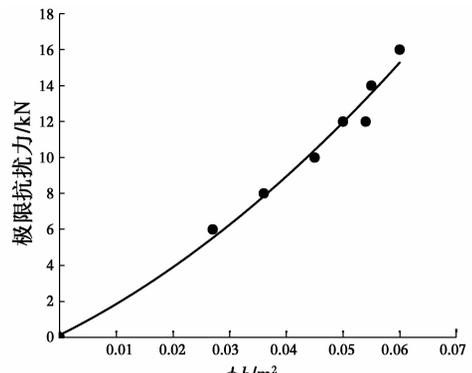
图 15 不同锚固长度界面剪应力分布图

Fig. 15 Distributions of the interfacial shear stress under different anchorage lengths

3.4 极限抗拔力计算

综合锚固参数分析结果可知:木锚杆抗拔力随锚孔直径 ϕ 、锚固长度 h 增大呈线性增长。对极限抗拔力 P_u 与锚孔直径、锚固长度的乘积(ϕh)采用二次多项式拟合(图 16),可得木锚杆锚固系统极限抗拔力计算式为

$$P_u = 1\,593.69(\phi h)^2 + 156.87\phi h$$



注: ● 计算数值 — 拟合曲线($R^2=0.98$)

图 16 极限抗拔力拟合曲线

Fig. 16 Fitted curve for the ultimate pullout capacity

从式中可看出,木锚杆极限抗拔力随着锚孔直径与锚固长度的乘积(ϕh)增加而增大。而实际工程中,锚固长度增加至一定长度后,木锚杆的抗拔力增加甚少。鉴于文物的特殊性,锚孔直径、锚固长度应根据工程实际来选择。

4 结论

1)数值模拟和室内拉拔试验所得的荷载-位移曲线较为吻合,证明 FLAC^{3D}数值模拟方法应用于夯筑土遗址木锚杆锚固系统拉拔的适用性和科学性。

2)木锚杆浆体界面剪应力沿锚固段分布不均,主要集中在锚固段顶端和末端的 0.1 m 范围内,末端界面剪应力呈增大的趋势主要与木锚杆变径的结构特征有关,其变径的特征在一定程度上提高了抗拔力。

3)变径木锚杆同时具有拉力型和压力型锚杆的特征,且其径向具有剪胀作用。

4)模拟试验所考察的 3 个参数中,锚孔直径、锚固长度对木锚杆抗拔力有显著影响,而锚杆直径对抗拔力的影响较小。木锚杆抗拔力随着锚孔直径、锚固长度增加而提高。土遗址中小体量危岩体的加固,适当增加锚固长度可以有效提高抗拔力。综合模拟试验锚固参数分析,提出木锚杆极限抗拔力建议计算公式。

参考文献:

[1] 李最雄,王旭东. 古代土建筑遗址保护加固研究的新进展[J]. 敦煌研究,1997(4):167-172.
LI Z X, WANG X D. The new progress of protection and reinforcement for the ancient earthen architecture site [J]. Dunhuang Research, 1997(4):167-172. (in Chinese)
[2] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京:科学出版社,2010.
LI Z X. Conservation of ancient sites on the Silk Road [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)

- [3] 孙满利,王旭东,李最雄,等. 木质锚杆加固生土遗址研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2156-2159.
SUN M L, WANG X D, LI Z X, et al. Study on immature earthen sites reinforced with wood anchor [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2156-2159. (in Chinese)
- [4] 张虎元,王晓东,王旭东,等. 楠竹加筋复合锚杆内部界面黏结滑移模型[J]. 岩土力学,2011,32(3):789-796.
ZHANG H Y, WANG X D, WANG X D, et al. Bond-slip model for bamboo-steel cable composite anchor [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 789-796. (in Chinese)
- [5] PHILLIPS S H E. Factors affecting the design of anchorages in rock [R]. London: Cementation Research Ltd., 1970:1-10.
- [6] 蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模式[J]. 岩土工程学报,2001,23(6):696-699.
JIANG Z X. A gauss curve model on shear stress along anchoring section of anchoring rope of extensional force type [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 696-699. (in Chinese)
- [7] 张季如,唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报,2002,24(2):188-192.
ZHANG J R, TANG B F. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 188-192. (in Chinese)
- [8] 张景科,陈鹏飞,谌文武,等. 夯土-水硬石灰与石英砂浆液-木锚杆锚固系统性能[J]. 土木建筑与环境工程,2015,37(3):86-93.
ZHANG J K, CHEN P F, CHEN W W, et al. Anchor performance of wood bolt fully grouted by natural hydraulic lime and quartz sand slurry [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(3): 86-93. (in Chinese)
- [9] 战玉宝,毕宣可,尤春安. 预应力锚索锚固段应力分布影响因素分析[J]. 土木工程学报,2007,40(6):49-53.
ZHAN Y B, BI X K, YOU C A. Analysis of factors influencing the stress distribution in prestressed cables [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(6): 49-53. (in Chinese)
- [10] 庞有师,刘汉龙,陈育民. 可回收式锚杆拉拔试验的数值模拟与影响因素分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2009,10(2):170-174.
PANG Y S, LIU H L, CHEN Y M. Numerical simulation of removable anchor pullout test and influence factors [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 10(2): 170-174. (in Chinese)
- [11] 李英勇,张顶立,王松根. 预应力锚索锚固作用机理的数值模拟研究[J]. 岩土力学,2006,27(Sup):921-925.
LI Y Y, ZHANG D L, WANG S G. Research on numerical simulation of anchoring mechanism of prestressed anchor cables [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Sup): 921-925. (in Chinese)
- [12] 叶红,盛建龙,陈燕平. 压力型锚索孔周边岩体应力的数值模拟分析[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(7):115-118.
YE H, SHENG J L, CHEN Y P. Numerical simulation analysis of rock stress surrounding pressure type cable hole [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(7): 115-118. (in Chinese)
- [13] 贾金青,郑卫锋,陈国周. 预应力锚杆柔性支护技术的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(21):3978-3982.
JIA J Q, ZHENG W F, CHEN G Z. Numerical analysis of prestressed anchor flexible retaining method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3978-3982. (in Chinese)
- [14] 林杭,曹平,周正义. FLAC3D模拟全长注浆锚杆的作用效果[J]. 岩土力学,2005,26(Sup):167-170.
LIN H, CAO P, ZHOU Z Y. Simulating effects of wholly grouted anchor rods with FLAC3D [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Sup): 167-170. (in Chinese)
- [15] MURPHY M M, ESTERHUIZEN G S, TULU I B. Lateral reinforcement of fully grouted roof bolts in a FLAC3D simulated coal mine entry [C] //48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association (ARMA), Minneapolis, Minnesota, 2014:1945-1953.
- [16] 王连国,缪协兴,董健涛,等. 深部软岩巷道锚注支护数值模拟研究[J]. 岩土力学,2005,26(6):983-985.
WANG L G, MIAO X X, DONG J T, et al. Numerical simulation research of bolt-grouting support in deep soft roadway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 983-985. (in Chinese)
- [17] 赵海英,李最雄,韩文峰,等. 西北干旱区土遗址的主要病害及成因[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(Sup2):2875-2880.
ZHAO H Y, LI Z X, HAN W F, et al. Main diseases and their causes of earthen ruins in arid region of northwestern China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Sup2): 2875-2880. (in Chinese)
- [18] 张景科,郭青林,李最雄,等. 土遗址锚固机理初探[M]. 兰州:兰州大学出版社,2014.
ZHANG J K, GUO Q L, LI Z X, et al. Preliminary study on anchoring mechanism of earthen sites [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2014. (in Chinese)
- [19] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D (fast Lagrangian analysis of continua in three-dimensions), version2. 1, User's Manual [R]. Minneapolis:Itasca Consulting Group Inc., 2002.