

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.03.012



夯土-水硬石灰与石英砂浆液-木锚杆锚固系统性能

张景科¹, 陈鹏飞¹, 谌文武¹, 李最雄², 王南¹, 张帅¹

(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 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:运用室内物理模型试验和原位试验,对基于水硬石灰与石英砂浆液的木锚杆锚固系统在夯土介质中进行了拉拔测试与杆体-浆体界面应变监测,研究了该锚固系统的锚固性能与破坏模式、杆体-浆体界面剪应变分布与传递特征。试验结果表明,该锚固系统50 cm锚固长度可以提供30~45 kN(室内)与16.2~19 kN(现场)的极限锚固力;锚固系统具有较强的延性;在加载进程中杆体-浆体界面的应力分布与传递特征具有单峰值或双峰值分布、界面应力向锚固末端传递、压应力出现在锚固段中末端等特征,表现出复杂的受力特性。研究表明,该锚固系统在结构形式和力学性能上适合于夯筑土遗址加固,并与遗址体具有较好的兼容性。

关键词:夯筑土遗址;锚杆;水硬石灰;石英砂浆液;极限锚固力;界面力学行为

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)03-0086-08

Anchor performance of wood bolt fully grouted by natural hydraulic lime and quartz sand slurry

Zhang Jingke¹, Chen Pengfei¹, Chen Wenwu¹, Li Zuixiong², Wang Nan¹, Zhang Shuai¹

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

Abstract: physical model and field experiments which consists of pullout test and strain monitoring on bolt-grout interface were conducted on wood bolts fully grouted by natural hydraulic lime and quartz sand slurry in rammed earth to study anchor capacity, failure mode, shear stress distribution and transfer along the bolt-grout interface. Experimental results shows that ultimate anchor force in laboratory (30 kN~45 kN) is larger than that in field (16.2kN~19kN). Anchor system has strong ductility. In the process of loading, single-peak or double-peak stress distributes along bolt-grout interface and interfacial stress transfers toward anchor end, meanwhile, compressive stress mainly emerges at middle-end of anchor segment. With considerably physical and mechanical compatibility to rammed earth, the anchor system is suitable to conserve rammed earth heritages.

Key words: rammed earth construction; bolts; natural hydraulic lime and quartz sand slurry; ultimate anchor capacity; interfacial mechanical behavior

收稿日期:2014-12-12

基金项目:国家自然科学基金(51108218);国家科技支撑计划(2014BAK16B02)

作者简介:张景科(1980-),男,副教授,博士,主要从事古遗址保护加固研究,(E-mail)zhangjink@lzu.edu.cn.

Received:2014-12-12

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51108218); National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(No. 2014BAK16B02)

Author brief: Zhang Jingke (1980-), PhD, associate professor, main research interest: conservation of cultural heritage, (E-mail) zhangjink@lzu.edu.cn.

土建筑作为人类文明史上最古老的建筑形式,一直延续到今天,是人地和谐共处的典范^[1]。其中,夯筑是最为普遍的建造工艺,相应的夯筑土遗址广泛分布于世界各地。但保存较好的主要分布于干旱半干旱环境中,如非洲、中东、中亚等。中国西北地区广泛分布的长城及附属建筑物(战国秦、汉、明)、古城与佛寺遗址等^[2]是典型的代表。这些遗址承载着丰富的文物信息,其保护加固对于传统文化的保护与传承具有重要意义。

中国自上世纪90年代开展夯筑土遗址保护加固研究以来,基于“最大兼容、最小干预、不改变原状”的保护理念^[3],全长黏结型锚固技术成为夯筑土遗址本体力学稳定性控制的核心措施之一^[4]。在杆体类型上先后出现了金属锚杆-水泥砂浆锚固系统^[2]、竹木-PS-(C+F)锚固系统^[5]、楠竹加筋复合锚杆-水泥砂浆锚固系统^[6]、土工长丝-改性泥浆锚固系统^[7]等。随着研究的深入,意识到金属锚杆和水泥系浆液对于遗址本体的保护性破坏作用^[3],转向在物理、力学、水理等性能上更加兼容的锚固系统。总体上,夯筑土遗址锚固技术处于探索与初步应用阶段,距离规范化应用还很远。

对于夯筑土遗址本体而言,基于近年来“传统建筑材料与工艺的科学性挖掘”的研究,开始从夯筑土遗址建造智慧中寻找更为兼容性的锚固材料。在此背景下,天然木材作为中国西北地区夯筑土遗址建造中常用的加筋体,被视为较为理想的锚固杆材。近年来,基于大地湾遗址地面材料的科学认知^[8],研发出传统的水硬石灰改性材料。欧洲学者^[9-11]研究表明,水硬石灰改性土与夯筑土遗址具有较好的物理力学性能和水理兼容性。因此,尝试将其引入到夯筑土遗址锚固浆液中。石英砂作为惰性材料,可以有效提高浆体的物理力学性能,进而增强界面抗剪性能,成为浆液的理想掺料。室内试验^[12-13]表明,基于水硬石灰和石英砂的浆液(结石体)性能适于土遗址修复加固。鉴于此,基于水硬石灰与石英砂浆液的木锚杆锚固系统工作性能和机理研究对于夯筑土遗址新型锚固技术的研发和推广具有重要意义。

由于天然取材的木锚杆具有形状和表面形态不规则、通长变径、横纹与顺纹强度差异等^[14]特点,加之浆材也区别于水泥砂浆,初步研究^[6]表明相应的锚固机理与其他岩土工程领域广泛应用的钢筋、GFRP、钢绞线等标准规则杆材基于水泥砂浆或树脂浆液的锚固系统具有极大不同。后者^[15-18]在剪滞模型、剪应力传递与分布等锚固理论在实践应用获得了较好的印

证。但木锚杆锚固系统目前还未探索出较好的理论依据。在其他岩土锚固领域,对于不规则杆体的锚固系统(如缺陷锚杆、膨胀锚杆等)研究表明^[19-21],相应的破坏模式、剪滞模型、界面应力分布与传递等特征区别于规则杆体。因此,室内和现场试验成为揭示其锚固性能与机理的重要手段。

选择夯筑土遗址中水硬石灰与石英砂为主材的浆液、天然产白腊杆为锚杆组成的全长黏结型锚固系统作为研究对象,通过室内物理模型试验和遗址现场原位测试,查明锚固系统的破坏模式、宏观锚固性能、杆体-浆体界面工作性能等,进而初步揭示该锚固系统的锚固机制和适用性。

1 试验方案

1.1 室内试验

1.1.1 试验材料 包括硬质PVC管、夯土、水硬石灰、石英砂、白腊杆、应变片及相应的粘贴连接材料等。其中,夯土由坍塌遗址土经粉碎过筛后在PVC管中夯筑而成,夯筑工艺是通过遗址体形制测绘和室内击实试验综合确定,并力求其物理力学性能与现场试验遗址土体相近(表1)。水硬石灰由国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心中试基地生产;石英砂(400目;硬度:7;相对密度:2.65 g/cm³)和白腊杆购自兰州当地建材市场;应变片及相应的辅材购自陕西汉中中航电测仪器股份有限公司;水来自实验室自来水龙头,水质符合饮用水标准。

1.1.2 试验装备 室内试验装备是在借鉴全长黏结型金属锚杆和GFRP锚杆室内试验系统的基础上^[22-23]专门研发的(图1、图2)。首先,根据现场试验遗址土体的物理力学性能,基于击实试验成果,确定室内夯筑工艺。然后,采用预留中间锚孔的方式在PVC管内进行夯筑,夯筑完毕后在实验室内放置至干透。随后,将安设有应变监测系统的白腊杆(粗端放置孔底)放置于预留孔的中心,采用重力注浆的方式向孔内灌注拌合好的浆液,养护时间90 d(截止拉拔日期)。

拉拔试验时,安装锚杆拉拔仪和应变采集系统。拉拔仪采用北京海创产HCYL-60锚杆综合参数测定仪,油缸工作行程120 mm,测量范围0~500 kN;应变采集采用东华测试产DH3816静态应变测试系统(Ver3.0.1版本),测量范围-20 000~20 000 $\mu\epsilon$;应变片采用中航电测产型号BQ120-60AA(电阻值120.8 \pm 0.1 Ω ,灵敏度2.14 \pm 1%),应变片布设位置详见图2。

表 1 室内模拟夯土和遗址现场夯土的物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical parameters of rammed earth at laboratory and in site

夯土	土性	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\omega/\%$	E/MPa	c/kN	$\varphi/(\text{°})$
室内	粉土	1.52	7.55	16.03	26.5	38.3
现场	粉土	1.49	6.32	15.84	25.7	37.4

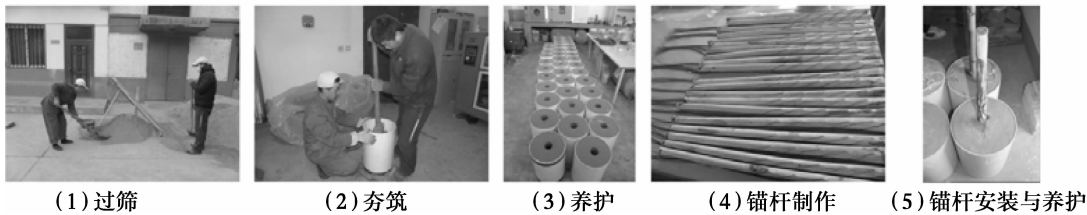


图 1 室内试验模型制作过程

Fig 1 The manufacturing process of modeled system at laboratory

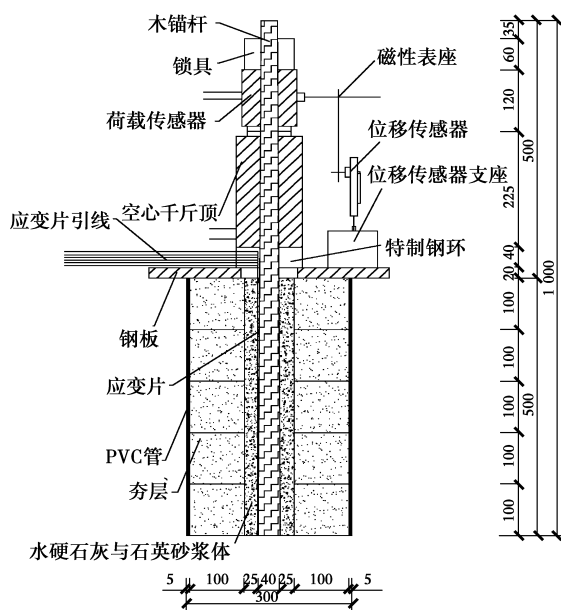


图 2 室内锚固试验装备结构剖面图

Fig 2 Setup structure of laboratory anchoring experiment

1.2 现场试验

1.2.1 试验地点 选择甘肃省武威市古浪县圆墩墩段

长城开展现场试验,该段长城建造于明代,建造工艺为夯筑,夯层厚度为 10 cm,遗址土体基本物理力学性能见表 1。

1.2.2 试验材料与装备 除试验用水来至当地居民外,其他材料均同室内。锚固系统的安装包括成孔、注浆、插锚(粗端在内)、补浆、养护(50 d)等步骤。锚固试验开展时,进行锚杆拉拔设备和应变采集系统的安装。锚杆拉拔仪和应变采集系统,均与室内试验设备相同。

1.3 锚固参数与拉拔步骤

室内试验和现场试验的锚固系统参数见表 2。

试验步骤基于《干燥类土遗址保护加固工程设计规范》(WW/T 0038—2012),并参照《土层锚杆设计与施工规范》(CECS:22—90)和《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)中相关锚杆试验要求。首先,对 M3 进行了单级加载获取极限锚固力,为后续基本试验奠定基础;其余锚固系统均按照基本试验的要求循环加卸荷载拉拔。

表 2 锚固试验参数表

Table 2 Anchor parameters for laboratory and field tests

试验类型	编号	锚固长度/cm	孔径/mm	杆径(起始/末端)/mm	浆材	水灰比	灌浆方式
室内试验	M1	50	90	30/58	水硬石灰、石英砂	水硬石灰:石英砂=1:1;水:浆材=0.33	垂直重力灌浆
室内试验	M2	50	90	33/58	水硬石灰、石英砂	水硬石灰:石英砂=1:1;水:浆材=0.33	垂直重力灌浆
室内试验	M3	50	90	32/52	水硬石灰、石英砂	水硬石灰:石英砂=1:1;水:浆材=0.33	垂直重力灌浆
室内试验	M4	50	90	30/60	水硬石灰、石英砂	水硬石灰:石英砂=1:1;水:浆材=0.33	垂直重力灌浆
现场试验	F1	50	90	26/46	水硬石灰、石英砂	水硬石灰:石英砂=1:1;水:浆材=0.33	斜孔(8°)重力灌浆
现场试验	F2	50	90	27/38	水硬石灰、石英砂	水硬石灰:石英砂=1:1;水:浆材=0.33	斜孔(8°)重力灌浆
现场试验	F3	50	90	30/45	水硬石灰、石英砂	水硬石灰:石英砂=1:1;水:浆材=0.33	斜孔(8°)重力灌浆

注:水灰比通过浆体流动性试验确定。

2 试验结果

2.1 宏观锚固性能

从最终破坏状况(图 3)可知,室内锚固系统的失效模式表现为:M1 与 M2 表现为 PVC 管破裂,M3 与 M4 表现为锚杆杆体断裂;现场锚固系统的失效模式均表现为杆体拔出。室内试验系统破坏后孔口浆体破裂,夯土体内出现以杆体为中心的放射状裂隙,试验完毕解剖 M1 和 M3 后发现土体和浆体结合非常牢固;原位试验系统孔口浆体破碎,但未出现浆体位移或土体裂隙的迹象。

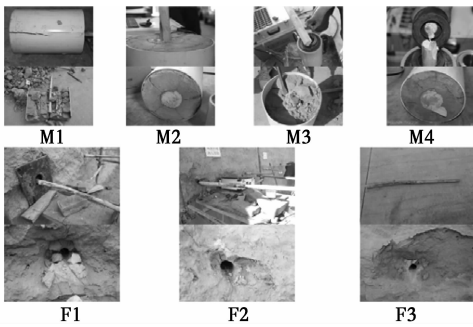


图 3 锚固系统失效模式

Fig 3 Failure mode of anchor systems

由图 4 可知,室内试验极限锚固力为 30~45 kN,数据具有一定的离散性,假定白蜡杆杆体为理想的圆台体,基于细端和粗端的直径,计算出相应的界面平均剪应力处于 0.42~0.65 MPa,平均界面剪应力为 0.52 MPa;现场试验极限锚固力为 16.2~19 kN,同室内同样的假定,相应的界面平均剪应力为 0.31~0.34 MPa,最终白蜡杆浆体平均界面剪应力为 0.32 MPa。显然,室内试验平均界面剪应力结果是现场试验结果的 1.62 倍。

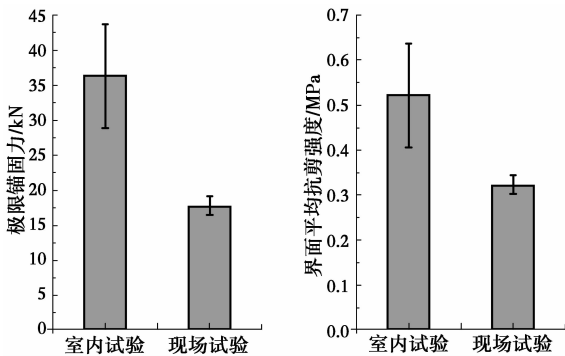


图 4 锚固拉拔试验成果

Fig 4 Experimental result from pullout tests

2.2 室内试验

2.2.1 荷载-位移关系 M3 锚固系统是通过单级加载方式对本锚固系统极限锚固力有初步的掌握,作为后续锚固基本试验的极限锚固力依据。由图 5 可知,

循环加卸荷载方式下锚固系统均表现为锚固力达到峰值后即刻破坏,曲线的斜率初始阶段大于后期,M1 与 M4 表现出比 M2 与 M3 更好的延性。而图 6 进一步表明,各锚固系统的最终弹性位移不超过 5 mm,而最大塑性位移均超过 50 mm,充分说明了该锚固系统的强延性特征。

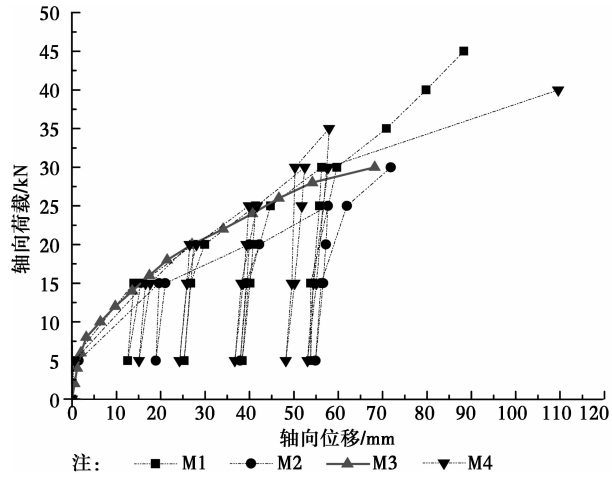


图 5 荷载-位移曲线

Fig 5 Curves of load and displacement

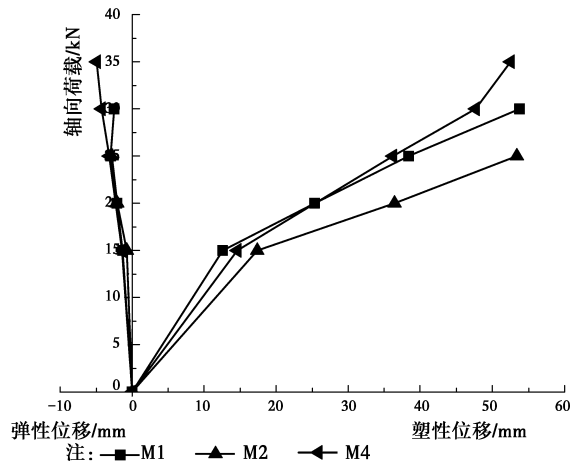


图 6 弹塑性位移分布曲线

Fig 6 Elastic and plastic displacement distribution curves

2.2.2 界面应变分布与荷载传递特征 受技术水平的制约,即使采用了防水涂层和平行两个电阻片布设,电阻式应变片在潮湿环境中仍容易损坏,严重制约锚固系统界面应变监测。研究中同样遇到了隐埋应变片失效的困境。M1 锚固系统试验结果(图 7(a))表明杆体-浆体界面 $L=0.2$ m 处应变值高于 $L=0.3$ m 处;M2 锚固系统试验结果(图 7(b))表明杆体-浆体界面 $L=0.2$ m 与 $L=0.5$ m 处出现了界面压应变现象;M3 锚固系统试验结果(图 7(c))表明在低荷载(2 kN)作用下,应力沿着杆体界面分布近于平直线,锚固末端几乎没有发生应变,随着荷载的增加,各监测点应变值随之增大,沿界面分布曲线变化为单峰值的抛

90

http://qks.cqu.edu.cn

土木建筑与环境工程

第 37 卷

物线形(峰值出现在 $L=0.1$ m),但在锚固段的中末端($L=0.3$ m 和 $L=0.4$ m)出现了拉应变向压应变的演化现象,此外,10 kN 及更大荷载水平下,由于锚固端部发生脱黏, $L=0$ m 处的应变值已不是界面真实

的应变值;M4 锚固系统试验结果(图 7(d))表明具有同 M3 类似的界面应变分布特征,不同之处在于仅锚固末端出现的压应变现象,峰值出现在 $L=0.2$ m 处。

图 7 不同荷载下杆体-浆体界面应变分布图

Fig 7 Strain distribution curves for bolt-grout interface under various loads

2.3 现场试验

2.3.1 荷载-位移关系 锚固系统均表现为锚固力达到峰值后即刻破坏,曲线的斜率初始阶段大于后期,其中最终的变形量均超过 90 mm(图 8)。由图 9 可知,各锚固系统的最终弹性位移不超过 5 mm,而最终塑性位移超过 45 mm,充分表明了该锚固系统较强的延性特征。

2.3.2 界面应变分布与荷载传递特征 原位试验环境较室内试验恶劣,电阻式应变片更容易受到损坏。从有限的数据分析可知:F1 锚固系统(图 10(a))杆体-浆体界面表现出 3 kN 与 9 kN 荷载水平下 $L=0.4$ m 处为压应变,且锚固末端 $L=0.5$ m 处轴向拉应变值大于其他有效监测点,随着荷载的增加,各监测点应变值随着增大,12 kN 荷载水平下 $L=0.4$ m 处转变为轴向拉应变;F2 锚固系统(图 10(b))杆体-浆体界

面表现出双峰值应变分布曲线特征,峰值点出现在 $L=0.2$ m 与 $L=0.4$ m 处,随着荷载的增加,各监测点应变值随着增大,其中低荷载水平下 $L=0.3$ m 处出现压应变;F3 锚固系统(图 10(c))杆体-浆体界面表现

图 8 荷载-位移曲线

Fig 8 Curves of load and displacement

出随着荷载的增加,各监测点应变值随着增大,监测点应变值大小顺序为: $L=0.1\text{ m}>L=0.2\text{ m}>L=0.4\text{ m}$,其中低荷载水平下 $L=0.4\text{ m}$ 处出现压应变。

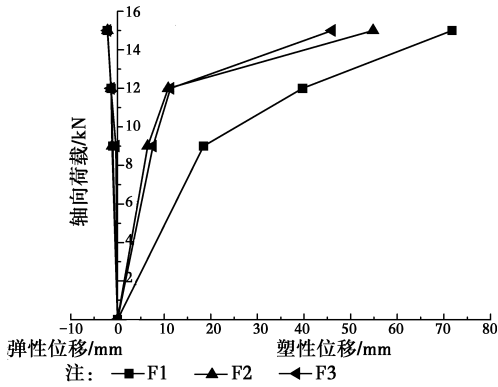
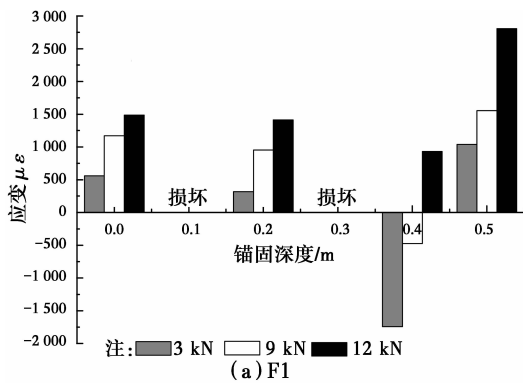
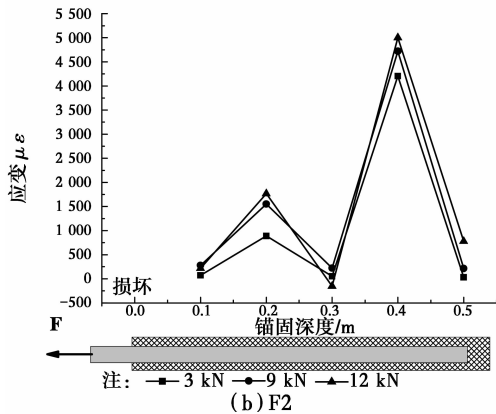


图 9 弹塑性位移分布曲线

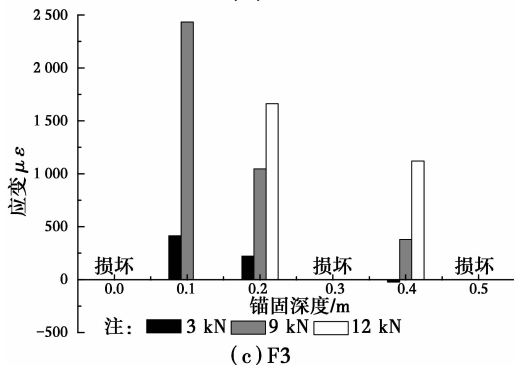
Fig 9 Elastic and plastic displacement distribution curves



(a) F1



(b) F2



(c) F3

图 10 不同荷载下杆体-浆体界面应变分布图

Fig 10 Strain distribution curves for bolt-grout interface under various loads

3 讨论

相对于现场试验,室内物理模拟试验具有养护条件理想、垂直灌浆效果优于斜孔灌浆、试验条件可控等优点^[24-25],相应的锚固力和界面平均剪应力较高。就室内试验而言,PVC 破裂及夯土中放射状的裂隙均表明拉拔过程中在夯筑土体内产生了较强的剪胀作用。室内物理模拟试验中,考虑到锚固系统外的侧限作用和试验成本,采用硬质 PVC 对锚固体进行径向加固作用,M1 和 M2 表现出的 PVC 管破裂说明提供侧限强度不足,与实际锚固系统外近似半无限空间体有差异。试验中孔口承压钢板的存在,对锚固系统有约束左右,锚固系统土体的锥形破坏就难以发生,最终导致试验情况和锚固系统实际工作性能存在一定的差异。后续研究中应根据实际土体提供最大侧压力和空间效应来进行模型试验设计。比如,为提高侧限强度采用高强钢制管,为消除承压钢板对锚固系统周围土体的约束,加大试验模型的尺寸,改进加载系统,进而有效增加模型试验与锚固系统实际工作性能的相似度。

理论上白腊杆抗拉强度远大于锚固系统的极限拉拔力,杆体发生断裂是因为白腊杆天然取材,杆体并非理想的顺直呈圆台状,试验观察断裂处往往为杆体的弯折处或局部直径突变处,诱发应力集中现象,从而导致断裂。这也为土遗址锚固设计中选材提出更高的要求。现场试验表明,从实践的角度而言,锚固系统的破坏模式为杆体-浆体界面失效。换言之,锚固系统中浆体-土体界面的抗剪性能是高于杆体-浆体界面的。该特征确保了后期干预措施(木锚杆锚固土遗址)与建造时期(原有木筋体隐埋遗址体内)所发挥的作用相似,从而形成物理结构与力学意义的兼容。值得一提的是,土遗址木锚杆锚固系统没有自由端和锚固段之分,裂隙内外两侧的锚孔均通长灌浆,没有锚具。因此,锚固后的土遗址实际受力传递方向应为土体-浆体-杆体,与其他岩土工程的锚固系统恰相反。究其本质,通过全长黏结性锚固措施,形成加筋体的作用

已有研究表明^[5],类似条件下木锚杆基于 PS-F 浆液、PS-(C+F)浆液及 PS-C 浆液的锚固系统现场试验极限锚固力分别为 6.70、6.47 和 6.27 kN/m。而本研究基于水硬石灰石英砂浆液的木锚杆锚固系统 50 cm 锚固长度极限锚固力高达 17.73 kN,表现出优越

的锚固性能。此外,本锚固系统具有强延性特征,充分表明了杆体-浆体-夯土体介质系统力学性能的协调性和容许变形潜力。该特性在现今土遗址保存现状中得到佐证,即具有木筋体的土遗址保存规模和稳定性明显优于无加筋体的土遗址,甘肃汉代与明代长城墙体和烽燧、居延遗址、新疆杂哈烽燧遗址等是最好的例证。

显然,本锚固系统界面应力分布特征和应力传递特征与其他全长黏结型金属锚杆或 GFRP 锚杆的特征^[17-18, 23]相比,规律性不足。综合室内与现场试验界面应变监测成果,大致可以看到如下特征:低荷载水平下界面应力分布曲线较为平直,表现为向锚固末端衰减;随着荷载的增加,各监测点应变值增大,出现单峰值或双峰值曲线的特征;呈现出荷载向锚固末端的传递进程。轴向压应变多出现于锚固的中后部,尤其锚固末端,该现象是压力型锚杆具有的典型特征。必须认识到白腊杆杆体类圆台形的特征,而且粗端处于锚孔的底部,从结构形式上具有拉力型和压力型锚杆的特点。

4 结论

1)锚固系统 50 cm 锚固长度可以提供 30~45 kN(室内)与 16.2~19 kN(现场)的锚固力。室内试验破坏模式为由剪胀诱发 PVC 管破裂或杆体断裂,现场试验破坏模式为杆体拔出。

2)锚固系统表现出低弹性高塑性的变形特征,具有极强的延性,实际起到加筋结构的效果,在物理力学性能上与夯筑土遗址具有较好的兼容性;

3)界面应变分布具有单峰值或多峰值分布特征,随着拉拔力增加界面应力向锚固末端转移,轴向压应变出现在锚固中末端等特征,说明了本锚固系统兼有拉力型和压力型全长黏结型锚固系统的特点。

4)综合分析表明本锚固系统适合于夯筑土遗址加固;由于室内模型试验相似度的局限性和应变片性能的影响,现有的研究数据具有一定的局限性,建议继续深入研究界面应力分布与传递机理。

参考文献:

[1] Erica A, Hubert G, Mary H. Terra literature review: an overview of research in earthen architecture conservation [R]. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2008.

[2] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京:科学出版社,

2010:17-21.

Li Z X. Conservation of ancient sites along the Silk Road [M]. Beijing: Science Press, 2010: 17-21. (in Chinese)

[3] 王旭东. 土建筑遗址保护理念探索与实践-以交河故城保护为例[J]. 敦煌研究, 2010(6):5-9.

Wang X D. Philosophy and practice of conservation of earthen architecture sites: A case study of the Jiaohe ancient site in Xinjiang [J]. Dunhuang Research, 2010(6):5-9. (in Chinese)

[4] 孙满利. 土遗址保护研究现状与进展[J]. 文物保护与考古科学, 2007, 19(4):64-69.

Sun M L. Research status and development of the conservation of earthen sites [J]. Science of Conservation and Archeology, 2007, 19(4):64-69. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 张景科. 全长粘结型锚杆锚固土遗址机理研究[D]. 兰州:兰州大学, 2012:155-158.

Zhang J K. Research on the anchoring mechanism of full-length grouted bolts in earthen sites [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012:155-158. (in Chinese)

[7] 毛筱霏,赵冬,陈平. 土工长丝锚固理论与试验研究[J]. 力学与实践, 2008, 30(2): 74-77.

Mao X F, Zhao D, Chen P. Anchor theory and experimental study of geo-filament bolt [J]. Mechanics and Practice, 2008, 30(2): 74-77. (in Chinese)

[8] 赵林毅,李黎,李最雄,等. 中国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的研究[J]. 无机材料学报, 2011, 26(12): 1327-1334.

Zhao L Y, Li L, Li Z X, et al. Research on two traditional silicate materials in China's ancient building [J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(12): 1327-1334. (in Chinese)

[9] Bui Q B, Morel J C, Venkatarama Reddy B V, et al. Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering [J]. Building and Environment, 2009, 44(5): 912-919.

[10] Bui Q B, Morel J C, Hans S, et al. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth [J]. Construction and Building Materials, 2014, 54(15): 163-169.

[11] Vegas F, Mileto C, Cristini V. Constructive features and

- preservation work of rammed earth architecture: the Islamic tower of Bofilla (Valencia) [J]. *Journal of Architectural Conservation*, 2014, 20(1): 28-42.
- [12] 李黎,赵林毅,王金华,等. 我国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的物理力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10): 2020-2027.
- Li L, Zhao L Y, Wang J H, et al. Research on physical and mechanical characteristics of two traditional silicate materials in Chinese ancient buildings [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(10): 2020-2027. (in Chinese)
- [13] Li Z X, Zhao L Y, Li L. Light weight concrete of Yangshao Period of China: The earliest concrete in the world [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55 (3): 629-639.
- [14] 刘君良,沈德君,洪克城,等. 白蜡木的解剖特征与材质分析[J]. *吉林林学院学报*, 1996, 12(1): 43-46.
- Liu J L, Shen D J, Hong K C, et al. Analysis on the anatomy character and wood properties of *Frasinus Rhychopylla* Hance [J]. *Journal of Jilin Forest University*, 1996, 12(1): 43-46. (in Chinese)
- [15] Zhang B R, Brahim B, Adil C. Prediction of tensile capacity of bonded anchorages for FRP tendons [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2000, 4(2): 39-47.
- [16] 张欣. 全长粘结式锚杆受力特性以及数值仿真试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2008: 161-165.
- Zhang X. Behavior and numerical simulation experiments of full-length bonded bolts [D]. Jinan: Shandong University, 2008: 161-165. (in Chinese)
- [17] Blanco M L, Hadj H F, Tijani M, et al. A new experimental and analytical study of fully grouted rockbolts [C] // 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, 2011, 211-242.
- [18] Ren F F, Yang Z J, Chen J F, et al. An analytical analysis of the full-range behaviour of grouted rockbolts based on a tri-linear bond-slip model [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(3): 361-370.
- [19] 胡建林,张培文. 扩体型锚杆的研制及其抗拔试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(6): 1615-1619.
- Hu J L, Zhang P W. Development of underreamed anchor and experimental study of uplift resistance [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1615-1619. (in Chinese)
- [20] 曾庆义,杨晓阳,杨昌亚. 扩大头锚杆的力学机制和计算方法[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1359-1367.
- Zeng Q Y, Yang X Y, Yang C Y. Mechanical mechanism and calculation method of bit expanded anchor rods [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1359-1367. (in Chinese)
- [21] 邬爱清,韩军,罗超文,等. 单孔复合型锚杆锚固体应力分布特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(2): 247-251.
- Wu A Q, Han J, Luo C W, et al. Research on stress distribution along bolts with single borehole and multiple anchors [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(2): 247-251. (in Chinese)
- [22] Ehab A A, Ehab F E, Brahim B. Tensile capacity of GFRP postinstalled adhesive anchors in concrete [J]. *Journal of Composite for Construction*, 2008, 12(6): 596-607.
- [23] Laura B M, Michel T, Faouzi H. A new analytical solution to the mechanical behaviour of fully grouted rockbolts subjected to pull-out tests [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(2): 749-755.
- [24] Yin J H, Su L J, Cheung R M, et al. The influence of grouting on the pullout resistance of soil nails in compacted completely decomposed granite fill [J]. *Géotechnique*, 2009, 59(2): 103-113.
- [25] Seo H J, Jeong K H, Choi H S, et al. Pullout resistance increase of soil nailing induced by pressurized grouting [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(5): 604-613.

(编辑 胡英奎)