

土遗址加固中木锚杆锚固机理的现场试验研究

张景科^{1,2}, 谌文武^{1,2}, 李最雄², 王旭东², 和法国^{1,2}

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

摘要: 木锚杆锚固机理的研究对于土遗址传统材料与工艺的的科学性挖掘和当今的保护加固具有重大价值。选择代表性的土遗址(交河故城)开展现场锚固测试, 包括锚固性能测试和第一界面层(杆体-浆体)剪应变监测。试验结果表明: ①鉴于杆体的自然选材, 不同杆体的锚固性能差异较大, 但锚固潜力巨大; ②受力状态下, 剪应力沿着界面呈现含峰值非均匀分布; ③荷载逐步增大时, 界面剪应力峰值逐步向末端转移; ④剪胀作用明显, 增强了锚固性能; ⑤兼有拉力型和压力型锚固系统的复合特征。

关键词: 土遗址; 木锚杆; 锚固机理; 界面; 剪应力分布

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)06-1166-06

作者简介: 张景科(1980-), 男, 山东金乡人, 博士, 讲师, 主要从事岩土古遗址保护加固方面的研究与教学工作。

E-mail: zhangjink@lzu.edu.cn.

Field tests on anchorage mechanism of wood bolts for conservation of earthen sites

ZHANG Jing-ke^{1,2}, CHEN Wen-wu^{1,2}, LI Zui-xiong¹, WANG Xu-dong¹, HE Fa-guo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mechanics on Environment and Disaster in Western China, and School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. National Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings, Dunhuang 73620, China)

Abstract: The researches on anchorage mechanism of wood bolts are of great value to the excavation of traditional materials and crafts and the current conservation of earthen sites. Taking a typical earthen site (Jiaohe ruins) as an example, field anchorage tests are carried out, including survey of anchorage performance and monitoring of shear strain on the first interface (bolt vs. grout) of the anchorage system. The test results shows that (1) there are huge differences among wood bolts due to their natural selection, however, the anchorage can afford enough forces; (2) during loading, the shear stress varies non-uniformly with peaks along the interface; (3) with the increase of the load, the peak of shear stress shifts gradually toward the end of bolt; (4) apparent shearing expansion improves anchorage performance; and (5) the anchorage of wood bolts exhibits the features of tension-type and compression-type.

Key words: earthen site; wood bolt; anchorage mechanism; interface distribution of shear stress

0 引言

中国丝绸之路沿线分布有大量土遗址, 类型包括古城、佛寺遗址、陵墓、长城等, 是中国优秀的文化遗产, 保护好, 利用好和传承好这些珍贵的遗产对于提升中国文化软实力具有重大意义^[1]。然而, 受到自然作用和人类活动的影响, 多数土遗址发生了不同程度的破坏, 亟待抢险加固。自20世纪80年代以来, 干旱区半干旱区土遗址开展加固试验和工程实践, 逐渐认识到锚固技术不仅仅满足力学稳定性控制的需求, 还可以较好地遵循文物保护的理念和准则^[2-3]。因此, 锚固材料、工艺及其机理的研究成为土遗址保护加固领域的热点之一^[4]。

已有的土遗址加固试验与实践表明, 对于遗址本体的加固尽量采用传统的工艺和方法, 可以达到“最大兼容、最小干预”的目的^[5]。中国西北地区土遗址如长城烽燧、佛塔、高耸墙体等建造中, 木材作为加筋体起到了重要的作用, 很多西汉时期的木筋体仍保存完好, 至今仍发挥其力学作用^[6-7]。同时, 随着传统工艺科学化研究的深入, 学者们也意识到单纯的金属锚杆和水泥浆体不符合土遗址保护的要求, 开始转向传统竹木锚杆及其二次研发^[8]。在此背景下, 木锚固系统

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108218); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(lzujbky-2010-21)

收稿日期: 2012-09-21

作为土遗址本体的主要锚固措施成为研究的重点。

现代工程中, 木材作为锚杆, 曾在煤矿开采巷道的临时支护中发挥了重要作用^[9], 但随着新型杆材的出现, 逐渐退出历史舞台。受土遗址加固研究历史的限制, 木锚杆锚固基本处于经验型设计与施工阶段^[10]。白蜡杆选材容易, 强度高, 韧性大, 抗弯曲能力强等特点^[11], 成为土遗址本体锚固理想的杆材, 采用 PS-(C+F)浆液也成为共识, 锚固方式为全长黏结型。目前在土遗址加固中, 木锚杆锚固系统设计仍然沿用现行的“平均剪应力”方法^[12], 已有全长黏结式锚杆锚固机理研究表明^[13-16], 该方法有一定的缺陷性。此外, 白蜡杆除材质不同于其他锚杆, 因自然选材其结构非标准是最大特点, 相应的锚固机理比标准杆体构件复杂。因此, 木锚杆锚固机理研究对于传统工艺的科学化与传承、锚固系统的优化具有重大价值。

本文通过现场锚固基本试验, 结合受力过程中界面各点应变变化监测, 研究了木锚杆锚固性能和界面力学分布传递特征, 初步揭示了木锚杆锚固机理。

1 木锚杆锚固系统

目前大面积应用中国西北地区土遗址加固中的木锚杆锚固系统的结构形式与施作工艺如下^[17]:

- (1) 锚固结构形式
- 锚固材料包括杆体和浆液两部分, 结构形式为非预应力全长黏结式, 通过遗址体 - 浆体 - 锚杆 3 个界面的力学作用实现外侧濒危遗址体的稳定。属于被动式锚固系统, 只有外侧被加固遗址体相对于母体的位移, 锚固系统才会发挥作用。
- 杆体长度 0.5~2.0 m, 粗端直径 3~6 cm, 细端直径 2~4 cm。杆体为白蜡杆经过两端切削后制作而成, 一般从白蜡杆的粗端、中部选材, 同时保证所制作的白蜡杆顺直, 无疤痕。孔径 5~7 cm, 斜插角 5°~10°。浆液采用 PS-(C+F) (模数为 3.7~3.8 的硅酸钾溶液与当地粉土、粉煤灰的混合, 水灰比 0.4~0.6, C:F=1)。

- (2) 锚固工艺
- 锚固工艺为: ①采取稳定措施临时支护被锚固遗址体; ②根据濒危遗址体的实际, 采用电钻成孔或人工钻成孔, 成孔过程中密切注意被锚固遗址体的性状, 采取适当的冲击力, 严禁出现遗址体塌落; ③利用注浆泵或人工倾倒等方式进行注浆; ④浆液饱满后立即插入杆体, 粗端在里, 细端在外, 插入过程中要控制锚杆杆体尽量保持在锚孔的中间; ⑤二次补浆及封孔; ⑥锚固部位进行表面处理以与周围遗址体外观兼容。

2 现场锚固试验方案

2.1 仪器设备

锚杆拉拔仪器采用中煤产 LSS50H 型锚杆拉拔仪, 油缸中心孔径 60 mm, 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 应变测量系统 Ver3.0.1 版, 测量范围-20000~20000 $\mu\epsilon$ 。应变片采用中航电测产型号 BF350-3BB (11)-X (电阻值 $350.3\pm0.3\ \Omega$, 灵敏度 $2.10\%\pm1\%$), 可以监测轴向和弦向 2 个方向的应变状态。

2.2 锚固参数

锚固试验系统参数如表 1 所示。

表 1 锚固试验设计参数

Table 1 Design parameters of anchorage tests

编号	粗端直径/mm	细端直径/mm	杆体长度/m	锚固长度/m	锚孔直径/mm	斜插角/(°)
BL1	47	31	1.5	1	70	6
BL2	45	33	1.5	1	70	6

2.3 应变监测系统布设方案

木锚杆长度 1500 mm, 细端作为锚固的起始端, 粗端作为锚固的尾端。从起始端 0~500 mm 作为拉拔试验预留杆体, 500~1500 mm 间隔 200 mm 黏贴 1 个应变片, 共计 6 处应变监测点 (图 1), 用以监测轴向和弦向的应变状态。

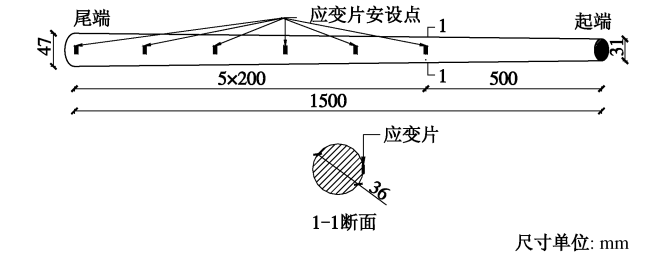


图 1 木锚杆应变监测布置图

Fig. 1 Layout of strain monitoring of wood bolt

2.4 试验地点与试验步骤

试验地点选择在丝绸之路重镇——交河故城崖体中下部, 土体为第四系冲积而成的粉质黏土, 天然密度 1.65 g/cm³, 天然含水率 0.34%, 级配不良, 抗压强度 4.38 MPa, 抗拉强度 0.25 MPa。由于自然白蜡杆材的尺寸非标准, 力学性能与岩土体差异巨大等特点, 试验步骤不能严格按照 (CECS22:90)《土层锚杆设计与施工规范》中锚杆基本试验要求进行, 这也是木锚固系统不同于其他筋体锚固系统之处, 但在试验步骤上仍参考了上述标准。

3 试验结果与分析

3.1 BL1 锚固系统

- (1) 试验过程
- 根据已有的研究成果和实践经验, 预估承载力为 $P=30\text{ kN}$, 第一循环按照 $10\%P\rightarrow 30\%P\rightarrow 50\%P\rightarrow$

30% $P \rightarrow 10\%P$ 的顺序进行加卸载。当加荷至初始荷载10% P (3 kN) 过程中,发现加压非常轻松,而且压力上升非常缓慢,位移量为12.157 mm;当加荷至30% P (9 kN) 进程中,无法到达稳定荷载,孔口浆体发生破裂,而且杆体轴向位移量急剧增加,锚杆被拔出。

(2) 试验结果与分析

试验现象表明锚固系统失效发生在杆体-浆体界面,机制为界面脱黏后在外荷载下发生滑动而拔出。从拉拔过程中可以看出,杆体-浆液界面经历了弹性变形—塑性变形—脱黏—滑动等过程,其他界面处于弹性变形阶段。本锚固系统极限抗拔荷载小于9 kN。

图2反映了杆体 $L=0.4, 0.8, 1.0$ m (加载端为 $L=0$ m, 以下类同) 处在加载进程中轴向拉应变变化值的变化特征,在加荷至3 kN的过程中, $L=0.4, 1.0$ m处在加荷的起始出现拉应变的增加,随后基本保持恒值, $L=1.0$ m处的拉应变值小于 $L=0.4$ m处的拉应变值; $L=0.8$ m处在加荷的起始出现拉应变减小的现象,随后也基本保持恒值。在加荷至5 kN的过程中,杆体 $L=0.4, 0.8$ m处基本保持恒值, $L=1.0$ m处在加荷中突然增大,超过 $L=0.4$ m处的应变值。

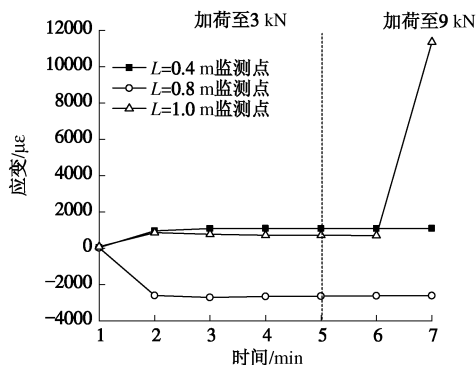


图2 BL1 轴向应变监测点时程曲线

Fig. 2 Monitoring curves of axial strain of BL1

图3反映了杆体 $L=0.4, 0.6, 0.8$ m处在加载进程中弦向拉应变值的变化特征,在加荷至3 kN的过程中, $L=0.6, 0.8$ m处在加荷的起始出现压应变的增加,随后基本保持恒值, $L=0.6$ m处的压应变小于 $L=0.8$ m处的压应变; $L=0.4$ m处在加荷的起始出现压应变的增加,随后也基本保持恒值。在加荷至5 kN的过程中, $L=0.4, 0.8$ m处基本保持恒值, $L=0.6$ m处在加荷中突然转变为拉应变,并呈现递增趋势。

从应变时程曲线和沿杆体应变分布 (图4, 5) 的特征及分析,可以得知:①在轴向拉拔荷载作用下,锚固段不同深度点的界面剪应力不是均一的,基本具有距离起始端处比远离起始端处的剪应力值大的特征,即存在剪应力传递的特点。锚杆经历了弹性阶段—塑性阶段—黏滑阶段等变形过程,具体表现在各点应变值增长—恒定的过程。在黏滑过程中残余剪应力

存在,而不是完全的脱黏。 $L=1.0$ m处点监测最迟出现拉应力增长足以说明随着荷载的增加剪应力从锚固段起端逐渐传递向末端的特点。此外局部点轴向会出现压应力的特点,这与杆体非直线、轴向受力方向与杆体有偏差有关。②在轴向拉拔荷载作用下,各监测点弦向应力也是随着加荷的进程呈现增加—恒定的特征。即在受力过程中,弦向应力可表现为拉应力或压应力,主要为压应力,说明界面会出现剪胀现象。在同一荷载下,各点的弦向应力也具有极大的差异,受杆体表面形态差异,没有明显规律性。

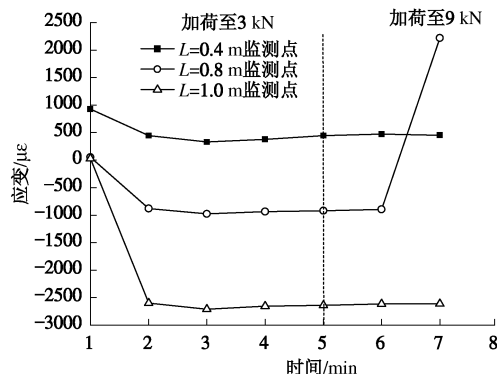


图3 BL1 杆体切应变监测点时程曲线

Fig. 3 Monitoring curves of tangential strain of BL1

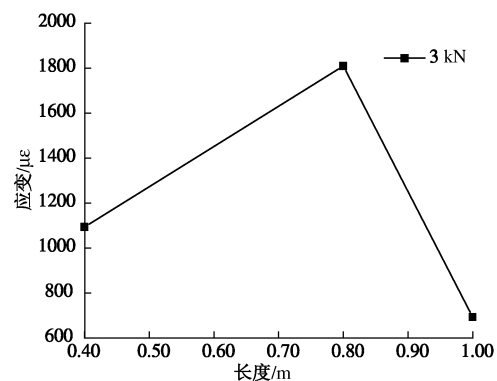


图4 稳定荷载下 BL1 轴向应变 - 长度曲线

Fig. 4 Monitoring curves of axial strain of BL1 under stable load

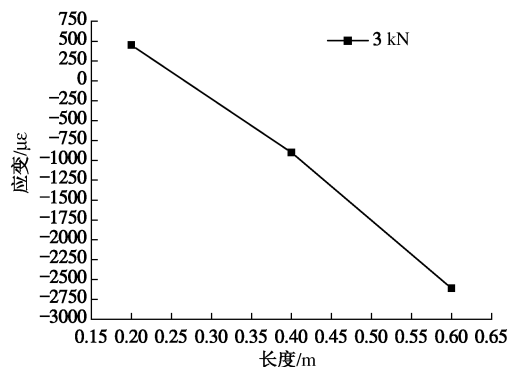


图5 稳定荷载下 BL1 切向应变 - 长度曲线

Fig. 5 Monitoring curves of tangential strain of BL1 under stable load

3.2 BL2 锚固系统

(1) 试验过程

根据 BL1 的试验成果, 预估极限锚固力 10 kN, 经历了 2 个循环荷载进程后, 锚固系统在拉拔荷载 7 kN 时处于正常受力状态, 在随后加载采用了单级加荷方式, 每级增量 10 kN, 当加载至 100 kN 时, 因空心千斤顶达到最大量程无法继续加荷而结束试验。值得注意的是, 在 90 kN 荷载下仍可以获得稳定的位移值。

(2) 试验结果与分析

图 6 反映了拉拔试验的荷载 - 位移曲线和弹塑性位移, 可以看出, 在第一循环进程中, 木锚杆产生的位移量高达 68 mm, 而在后续循环的进程中木锚杆产生的位移量极小。绝大多数位移量均发生在第一循环进程中。图 7 反映了在拉拔进程中, 弹性位移量相对于塑性位移量较小。这种现象说明木锚杆系统在低荷载下完成弹性变形状态而进入塑性变形状态, 即出现蠕变现象。

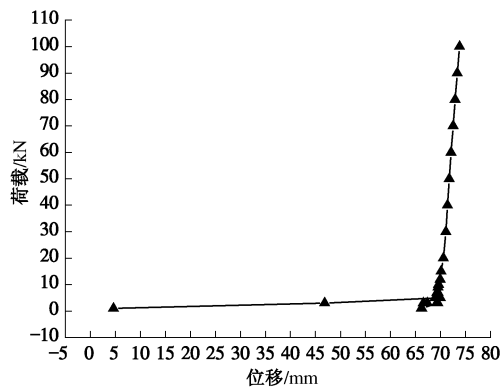


图 6 BL2 $Q-S$ 曲线

Fig. 6 $Q-S$ curves of BL2

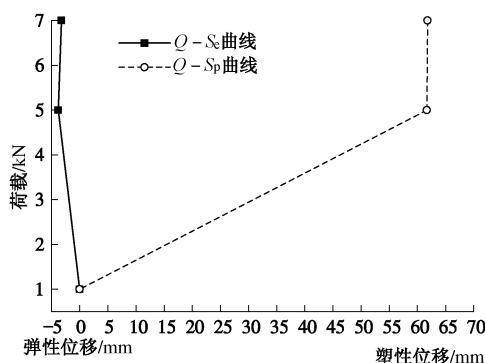


图 7 BL2 $Q-S_e$ 、 $Q-S_p$ 曲线

Fig. 7 $Q-S_e$ and $Q-S_p$ curves of BL2

图 8 反映了木锚杆各测点随受力进程的轴向应变变化特征, 可以看出: ① $L=0$ m 处的测点一直处于受压状态, 在第一、二循环进程中, 出现受压波动但具有增大的趋势, 在后续的单级加荷进程中, 测点处于受压波动但具有减小的趋势。这与拉拔测试系统直接相关, 因为无法完全保证拉拔力与杆体的轴向完全吻

合, 造成在杆体的起端出现受压状态, 但随着拉力的增加, 这种受压状态会减弱。② $L=0.2, 0.4, 0.8, 1.0$ m 的测点在受力进程中均处于轴向受拉状态, 除了 $L=1.0$ m 测点外, 其余测点在起始加荷过程中有局部波动外, 后续基本处于稳定变形状态; $L=1.0$ m 测点在受力进程中总体处于应变增加的趋势, 但变化进程与加荷进程具有较高的吻合, 即加载时应变增加, 卸载应变减小的特点。③ $L=0.6$ m 测点一直处于受压状态, 而且压应变值基本稳定不变。以上各测点在受力进程中的应变变化特征说明了木锚杆锚固系统受力不均, 在极小荷载下完成弹性变形后, 木锚杆和浆体界面即步入黏滞状态, 界面局部出现压应力与杆体非直线、轴向受力方向与杆体有偏差有关。④ 从前文分析可知, 杆体 - 浆体界面的黏结力较小, 但界面的摩阻力非常大, 加之杆体粗端在里细端在外 (杆体直径不均) 的特点, 木锚杆系统也具有压力型和拉力型复合类型的锚固系统特点, 进而增加了木锚杆系统的性能。

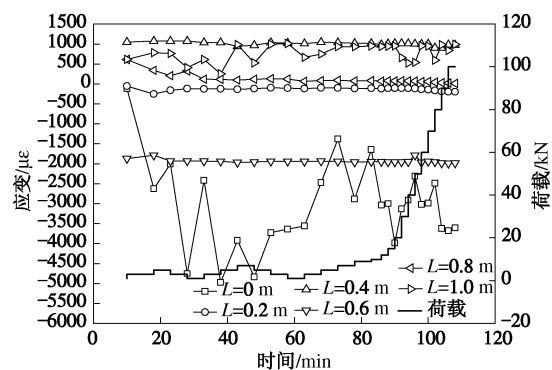


图 8 BL2 各测点轴向应变 - 时间曲线

Fig. 8 Monitoring curves of axial strain of BL2

图 9 反映了各测点随受力进程的切向应变变化特征, 除 $L=0$ m 处测点处于受拉状态下, 其余各测点均处于受压状态, 而且随着轴向拉力的增加, 受压程度缓慢地增加。说明在杆体 - 浆体界面脱黏后, 在界面处出现了剪胀作用, 而这种作用无疑增加了锚固系统的锚固力。对于 $L=0$ m 处测点, 因轴向受压, 相应切向会出现受拉状态。

图 10 反映了不同加载作用下轴向应变随杆长的变化特征, 可以看出: ① 沿着锚固长度应变是变化的, 即锚杆受力过程中, 杆体剪应力不是均等的; ② 剪应力的峰值不在起端, 而在 $L=0.4$ m 处; 除 $L=0$ m 处测点在不同荷载下应变值变化较大外, 其他测点变化不大。以上现象说明杆体 - 浆体界面完成弹性变形步入黏滑状态后, 各点的受力变化幅度较小, 进而揭示了在较大荷载作用下木锚杆锚固系统出现全长受力的状态; 没有出现峰值的转移现象, 表明随着轴向荷载的增加, 界面全面受力, 剪胀作用也在增强。

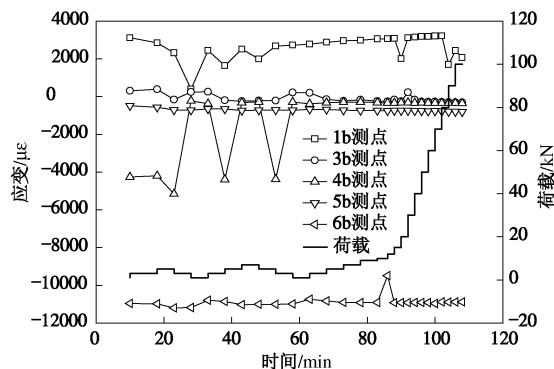


图9 BL2 各测点弦向应变-时间曲线

Fig. 9 Monitoring curves of tangential strain of BL2

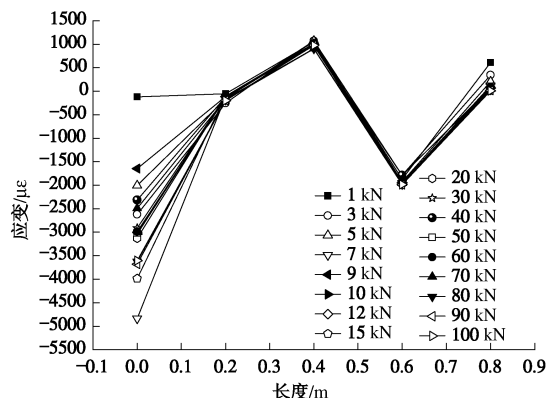


图10 各级荷载下 BL2 轴向应变-长度曲线

Fig. 10 Monitoring curves of axial strain of BL2 under different loads

图 11 反映了不同加载作用下弦向应变随杆长的变化特征,可以看出:①弦向压力沿着杆长也是不均匀的, $L=0$ m 处测点出现拉应力,前文已经做过分析;②随着荷载的增加,杆体内部各点的压应力值在增加,即界面的弦向压应力在增加,实质是剪胀作用在增强;③末端 $L=1.0$ m 处测点的压应力较大,说明应力已传递到末端,同时与杆体的不均匀也有极大的关系。

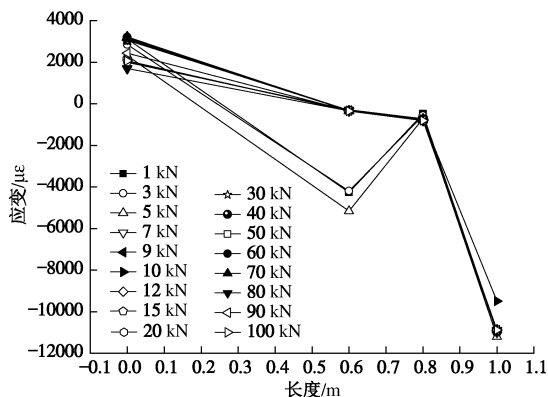


图11 各级荷载下 BL2 弦向应变-长度曲线

Fig. 11 Monitoring curves of tangential strain of BL2 under different loads

4 讨 论

4.1 试验结果对比分析

(1)平行试验表明木锚杆锚固系统失效于杆体-浆体界面,以杆体拔出的形式出现。

(2)受杆体规格、灌浆质量的影响,相应的锚固力差异较大;BL-2 锚固系统锚固力之所以如此大,究其原因,灌浆质量优于 BL-1,此外杆体的粗细段直径差别较小,加之粗端在孔的底部,吸收浆液中的水分发生膨胀,加大了锚固末端杆体的直径,造成该锚固系统不仅仅是受拉传力机制,在末端存在受压传力机制,这无疑增强了锚固性能;由此可知只要保证灌浆质量和杆体的规格,木锚固系统可以提供非常大的锚固力,这也是古代加木构件土遗址仍稳定至今的科学性所在。

(3)界面剪应变沿着锚固深度表现含有单峰值先增后减的变化趋势,即最大剪应变在距离孔口一定距离的位置,在受力过程中界面出现剪胀作用。

(4)锚固系统具有非常强大的延性,虽然界面弹性变形量较小,但可以承受较大的塑性变形;从加荷到破坏,宏观现象和监测数据均表明杆体-浆体界面经历了弹性变形-塑性变形-脱黏-黏滑-破坏等力学过程。

4.2 土遗址中木材的锚固作用

从以上试验结果分析与讨论可知,木材-浆体-土体锚固系统可以提供较为理想的锚固力。扩展至土遗址建造中添加的木筋体,不同于锚固系统之处,在于其在建造过程中直接埋入,杆体被土体直接包裹,随着时间的推移,土体自身固结作用,杆体周围土体越来越密实,相应杆体与土体之间的黏结力和握裹力越大,其界面黏结作用远大于试验木锚杆系统,因此杆材对于遗址体的稳定起到了巨大的作用,这也是具有木材构件的土遗址体保存状态远好于无木构件土遗址原因之一。

5 结 论

(1)中国干旱区半干旱区土遗址建造中,木材作为加筋体在稳定性控制方面作用突出,对遗址体保存至今贡献巨大。

(2)木锚杆锚固现场试验表明,在确保注浆质量的前提下,木锚固系统在土遗址加固中可以提供较大的锚固力,表现出显著的延性特征,与周围介质相容性强。

(3)木锚杆在受力进程中,界面剪应力沿着锚固深度不均匀分布,峰值出现在距孔口一定距离处,随着荷载的增加,界面剪应力向末端发生传递;锚固系统和界面各监测点均表现出弹性-塑性-黏滑的受力变形过程;在受力过程中,界面发生剪胀作用,增强了界面的黏结力。

(4)受杆体结构特征的影响,沿着界面局部出现

轴向压应力现象,这是不同于标准型杆体之处,造成木锚杆具有拉力型和压力型复合特征的锚固系统,也造就了其锚固性能优越。

(5) 由研究成果推及至土遗址中的木构件,其锚固力学性能更好,充分体现了传统工艺的科学性。

参考文献:

- [1] 孙满利, 王旭东, 李最雄. 西北地区土遗址病害[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, **46**(6): 41 - 45. (SUN Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong. Issues concerning earthen sites in Northwest China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010, **46**(6): 41 - 45. (in Chinese))
- [2] 李最雄, 张虎元, 王旭东. 古代土建筑遗址的加固研究[J]. 敦煌研究, 1995(3): 1 - 17. (LI Zui-xiong, ZHANG Hu-yuan, WANG Xu-dong. Research on the conservation of ancient architectural sites[J]. Dunhuang Research, 1995(3): 1 - 17. (in Chinese))
- [3] 黄克忠. 岩土文物建筑的保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (HUANG Ke-zhong. Protection on culture heritage made of rock and soil[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))
- [4] 黄克忠. 走向二十一世纪的中国文物科技保护[J]. 敦煌研究, 2000(1): 5 - 9. (HUANG Ke-zhong. Technology protection of cultural relics in the following 21st[J]. Dunhuang Research, 2000(1): 5 - 9. (in Chinese))
- [5] 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 Xu-dong. 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))
- [6] 陆地. 《历史性木结构保存原则》解读[J]. 建筑学报, 2007(2): 86 - 88. (LU Di. Analysis on principle of historic timber structure[J]. Journal of Architecture, 2007(2): 86 - 88. (in Chinese))
- [7] 张虎元, 赵天宇, 王旭东. 中国古代土工建造方法[J]. 敦煌研究, 2008(5): 81 - 90. (ZHANG Hu-yuan, ZHAO Tian-yu, WANG Xu-dong. Construction methods of Chinese ancient civil engineering[J]. Dunhuang Research, 2008(5): 81 - 90. (in Chinese))
- [8] 孙满利. 土遗址保护研究现状与发展[J]. 文物保护与考古科学, 2007, **19**(4): 64 - 69. (SUN Man-li. Research status and development of the conservation of earthen sites[J]. Science of Conservation and Archeology, 2007, **19**(4): 64 - 69. (in Chinese))
- [9] 寇建新, 刘旭东, 巨峰, 等. 木锚杆控制综采面破碎顶板的机理及工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2008, **36**(3): 31 - 34. (KOU Jian-xin, LIU Xu-dong, JU Feng, et al. Mechanism and project practices on broken roof control with wood bolt in fully mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2008, **36**(3): 31 - 34. (in Chinese))
- [10] 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 Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong, et al. Study on immature earthen sites reinforced with wood anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2156 - 2159. (in Chinese))
- [11] 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 Jun-liang, SHEN De-jun, HONG Ke-cheng, et al. Analysis on the anatomy character and wood properties of Fraxinus Rhynchophylla Hance[J]. Journal of Jilin Forest University, 1996, **12**(1): 43 - 46. (in Chinese))
- [12] 苏自约. 岩土锚固技术的新发展与工程实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (SU Zi-yue. New development and engineering practice of geotechnical anchorage[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [13] BENMOKRANE B, ZHANG B, CHENNOUF A. Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications[J]. Construction and Building Materials, 2000, **14**(3): 157 - 170.
- [14] MARTIN B, HADJ-HASSEN F, TIJANI M. A new experimental and analytical study of fully grouted rockbolts[J]. 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, 2011: 211 - 242.
- [15] 曾宪明, 李世民, 陆卫国, 等. 制约锚固类结构发展应用的若干问题概论[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊1): 57 - 62. (ZENG Xian-ming, LI Shi-min, LU Wei-guo, et al. Problems on development and application of anchorage structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 57 - 62. (in Chinese))
- [16] 朱训国, 杨庆. 全长注浆岩石锚杆中性点影响因素分析研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3386 - 3392. (ZHU Xun-guo, YANG Qin. Analyzing and studying factors for determining neutral point position of fully grouted rock bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3386 - 3392. (in Chinese))
- [17] 李最雄, 孙满利, 王旭东. 交河故城保护加固技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (LI Zui-xiong, SUN Man-li, WANG Xu-dong. Protection and conservation technology of Jiaohe ancient city[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))