

文章编号: 1007-2993(2026)03-0436-07

浸水前后膨胀土边坡锚杆拉拔试验土体变形分析

武晓文^{1,2} 吴跃东^{1,2} 刘 坚^{1,2} 张文慧^{1,2} 孙传明^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098)

【摘要】 锚杆锚固失效主要表现为锚固体与周围土体产生相对位移, 当应用在膨胀土边坡时, 锚杆加固对膨胀土的湿化膨胀的影响尚不清楚。为此, 开展室内膨胀土边坡锚杆拉拔试验, 并通过人工浸水方式模拟河道蓄水, 利用 GeoPIV8 软件分析土体单元浸水前后实际的变形矢量图, 研究锚杆在拉拔过程中的锚杆-土体变形规律。试验结果表明: 越靠近锚固体顶端, 锚固体在拉拔过程中对周边土体的影响范围越大, 并沿着锚固体长度方向向内逐渐变小; 浸水后边坡膨胀变形表现为埋深越浅的土体膨胀变形量越大; 浸水后拉拔试验过程中锚固体对周围土体的影响范围呈现先增后减趋势, 相对于浸水前试验, 在阶段一其影响范围约为浸水前影响范围的 4.4 倍, 至阶段二其影响范围约为浸水前影响范围的 1.25 倍, 后逐步减小, 至阶段三其影响范围约减至浸水前影响范围的 40%。

【关键词】 膨胀土边坡; 锚杆; 拉拔试验; 边坡支护

【中图分类号】 TU443; TU411

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0144

Soil deformation analysis of expansive soil slope bolt pull-out test before and after soaking

WU Xiaowen^{1,2} WU Yuedong^{1,2} LIU Jian^{1,2} ZHANG Wenhui^{1,2} SUN Chuanming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

【Abstract】 The failure of bolt anchorage is mainly manifested as the relative displacement between the anchorage body and the surrounding soil. When applied to expansive soil slope, the influence of bolt reinforcement principle on the wetting expansion law of expansive soil is not clear. Therefore, the indoor expansive soil slope bolt pull-out test was carried out, and the artificial immersion method was used to simulate the river water storage. The actual deformation vector diagram of the soil unit before and after immersion is analyzed, and the software GeoPIV8 is used to study the deformation law of the bolt soil during the pull-out process. The test results show that the closer to the top of the anchorage body, the greater the influence range of the anchorage body on the surrounding soil during the drawing process, and gradually decreases along the length direction of the anchorage body. The expansion deformation of the slope after soaking shows that the shallower the buried depth, the greater the expansion deformation of the soil. Compared with the state of expansive soil before soaking, the influence range of anchor body on surrounding soil after soaking first increases to 4.4 times of its range during drawing process, and then gradually decreases to 40% of that before soaking.

【Key words】 expansive soil slope; anchor rod; pull-out test; side slope support

0 前言

锚杆锚固是一种应用广泛、经济安全的边坡加固处理方式^[1-2], 其作用失效主要表现为锚固体与周围土体产生较大相对位移, 锚固体与周围土体界面发生剪切破坏。膨胀土反复胀缩的特性对膨胀土边坡

工程危害显著^[3], 该特性加剧了雨水入渗, 导致锚杆锚固段与周围土体之间产生位移, 进而影响其沿长摩阻力的分布, 此外浸水软化会降低土体的抗剪强度, 弱化锚杆的锚固性能, 使得其作用机理不同于普通边坡锚杆^[4]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378337)

作者简介: 武晓文, 男, 2001 年生, 在读硕士研究生, 主要从事软土地基处理研究。E-mail: 18837365049@163.com

通信作者: 吴跃东, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 主要从事软基处理与基础工程和岩土工程测试技术的教学和科研。E-mail: hhuwyd@163.com

工程实践表明, 降雨是造成膨胀土边坡破坏的主要诱因之一。膨胀土在胀缩循环作用下会生成大量的裂隙, 雨水会通过裂隙进入更深的土体, 干湿循环作用与雨水入渗相互促进, 破坏了土体的结构性, 导致边坡稳定性变差、安全系数变小。王建成等^[5]选用 Geostudio 软件, 针对 3 种降雨强度, 分析锚固前后边坡稳定性及孔隙水压变化。程永辉等^[6]研发了一种可在离心机中模拟降雨的试验装置, 使用该装置进行离心模型试验, 获得了降雨条件下膨胀土边坡的失稳机理。周 健等^[7]开展膨胀土边坡干湿循环模型试验后采用 ABAQUS 软件模拟分析了干湿循环后膨胀土边坡的稳定性; 而 Wang 等^[8]使用离散元法 (DEM) 研究了干湿循环对膨胀土边坡稳定性的影响, 并与极限平衡法和有限元法计算的结果进行了比较。Xu 等^[9]研究不同降雨强度下锚固植被系统 (ARVS) 防护边坡的径流率与土壤流失率。

国内外学者进行了大量原位工程试验和室内锚杆模型试验, 用以研究锚固体受力和变形的规律与特性, 奠定了锚杆荷载传递机理研究的基础。Hyett 等^[10]、Barley^[11] 和 Woods 等^[12] 系统地研究了锚固体摩阻力分布特征, 试验表明其分布不均, 且平均摩阻力随锚固长度增加而降低。雨水入渗膨胀土体引发膨胀力, 会影响边坡锚杆的锚固作用, 李 凡等^[13]提出了新式成孔与添加减水剂的方式削弱膨胀土遇水膨胀的特性, 减少对锚杆荷载传递的不利影响; 丁振洲等^[14]研究了非扩底和扩底锚杆, 分析了膨胀土浸水后锚杆的破坏形式; 吴顺川等^[15]针对膨胀土吸水膨胀的特点, 提出了一种膨胀土边坡自平衡预应力锚杆加固方法, 并利用数值分析进行验证; 唐延贵等^[16]在膨胀土地层应用机械挤扩工艺施工多段扩体锚杆, 并根据锚杆荷载-位移曲线判定其破坏模式为杆体与锚固体黏结界面失效; 刘俊斌^[17]基于试验研究了膨胀土土层中锚-土界面在长期荷载下的长期强度和剪切蠕变特性; 严太勇等^[18]通过室内模型试验研究, 得到膨胀土边坡浸水前后锚杆的拉拔荷载位移曲线, 该曲线具有明显的三阶段特征。

综上所述, 以往专家学者对膨胀土边坡锚杆加固机理和变形特征进行了大量研究, 取得了一定研究成果, 但目前关于膨胀土边坡锚杆在受拉过程中界面土体的变形特征, 以及对锚固体周边土体的影响范围尚不明确, 仍需开展深入研究。本文依托引江济江淮沟通段 7-2 标段的河道边坡支护工程, 开展室内模型试验研究膨胀土边坡锚杆浸水拉拔过程中周边膨胀土的变形特征, 进而为膨胀土边坡锚杆设计提供理

论依据。

1 试验方案与步骤

1.1 试验方案

为研究膨胀土边坡浸水前后锚杆受力和变形特征及其变化规律, 本研究制备了 5 组锚固长度梯度变化、锚固段直径恒定的现浇锚杆试件, 每组设置 2 根参数相同的对比试件, 用以分析浸水工况变化的影响, 试验锚杆参数及工况设置情况见表 1。

表 1 室内膨胀土边坡锚杆拉拔试验锚杆参数
Tab. 1 Anchor parameters of indoor expansive soil slope bolt pull-out test

锚杆编号	是否浸水	杆体直径/mm	锚固长度/cm	锚固体直径/mm
B1	否	8	70	50
B2	否	8	65	50
B3	否	8	60	50
B4	否	8	55	50
B5	否	8	50	50
B6	是	8	70	50
B7	是	8	65	50
B8	是	8	60	50
B9	是	8	55	50
B10	是	8	50	50

1.2 试验装置

试验系统由 EOS 200D 数码单反相机、防频闪 LED 补光系统及三脚架构成的多维度数据采集模块 (见图 1) 和由加载装置、位移传感器、定制模型箱构建的物理试验平台 (见图 2) 组成。

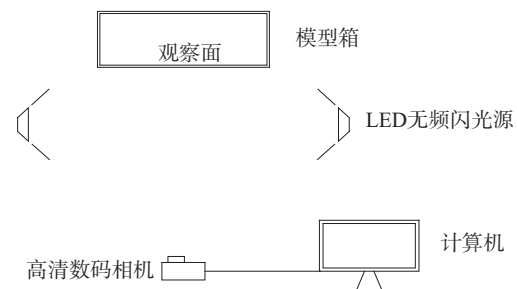


图 1 试验图像采集示意图

Fig. 1 Experimental image acquisition schematic diagram

1.3 试验土体

试验膨胀土选自工程现场的⑤层重粉质壤土, 其各项物理性质指标如表 2 所示。

1.4 试验步骤

1.4.1 浸水前拉拔试验

浸水前拉拔试验主要步骤如下: ①制备含水率为 23.0% (最优含水率) 的土样, 将预制土样进行闷料。

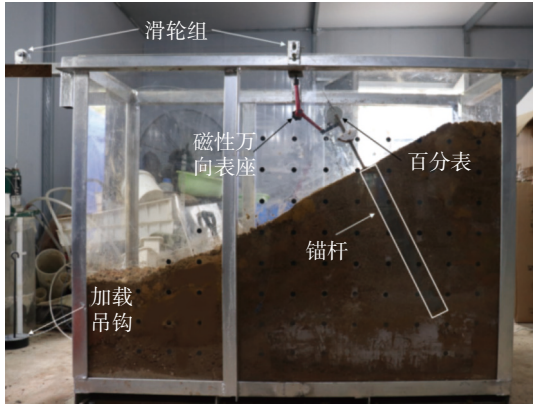


图2 模型箱实物图

Fig. 2 Physical diagram of model box

表2 土样的物理性质指标

Tab. 2 Physical properties of soil samples

$w_L/\%$	$w_p/\%$	I_p	$w_{op}/\%$	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	$\delta_{cp}/\%$
47.5	25.9	21.6	23.0	1.56	61

②打印带有已知坐标的黑色圆点的 A0 图纸, 将图纸固定于观察窗上, 在模型箱观察面内侧张贴直径相同的黑色圆形贴纸, 用透明胶布覆盖保护, 将图纸固定于模型箱内侧。③试验土样属于黏土, 土颗粒比较细小, 为满足 PIV 程序的需要, 仅在与模型箱接触的部分边坡侧面采用 2 ~ 2.5 mm 的中粗砂构造土体纹理, 如图 3 所示。土样共分为 8 层, 每层厚度为 10 cm, 在土样分层击实前在模型箱底部铺设一层 20 mm 厚的砂垫层提高浸水效率, 将闷料完成的预制土体采用人工法击实, 边坡坡度为 1:2。④锚杆杆体采用 $\phi 8$ mm (HRB400) 钢筋, 锚固体砂浆材料选用 P·O 42.5 水泥、中细砂和自来水, 砂浆质量配比为水: 水泥: 砂=0.5: 1: 1.2, 采用重力注浆。注浆前使用铁丝对锚杆孔壁进行刮毛, 随后清孔, 注浆时利用锚杆杆体进行振捣, 确保浇筑锚杆锚固体的质量, 同时确保锚杆垂直于坡面。现浇锚杆前预先使用透明硅脂涂抹在锚孔的有机玻璃侧壁进行润滑, 防止锚固体与有机玻璃侧壁黏结。锚杆浇筑完成后养护 28 天。⑤万向表座吸附于模型箱, 安装百分表, 其测头垂直顶端拓展截面。模型箱对应位置固定滑轮组, 钢丝绳连接锚杆端部预留孔洞与滑轮组。⑥将相机安装在三脚架上, 根据拍摄需求调整三脚架高度和位置, 确保相机与模型箱平行。将相机连接到计算机, 并调整无频闪 LED 泛光灯的位置和高度。⑦采用砝码分级加载, 加载步骤按《土层锚杆设计与施工规范》执行。⑧按照 GeoPIV8 操作步骤, 首先输入控制点位置信息, 然后分析土体单元的图像位移, 生成变形矢量图。使用 GeoPIV8 进行校准, 最终输出土体单元的实际变形矢量图。

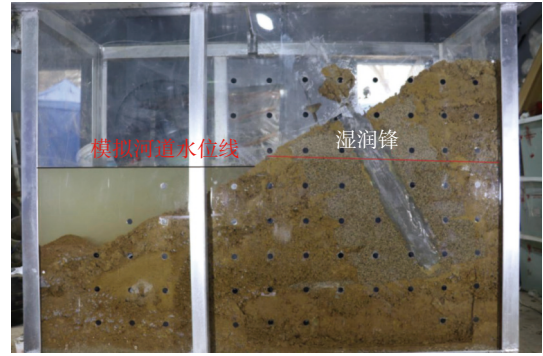


图3 起始时刻

Fig. 3 Starting time

1.4.2 浸水后拉拔试验

利用 GeoPIV8 模拟分析河道边坡浸水前后边坡土体产生的位移, 以模拟的河道水位达到试验前设定的水位时为起始时刻, 以膨胀土边坡膨胀稳定后为结束时刻, 其中边坡膨胀稳定标准为边坡膨胀速率小于 0.05 mm/d, 如图 4 所示, 达到稳定后即开始浸水后拉拔试验。

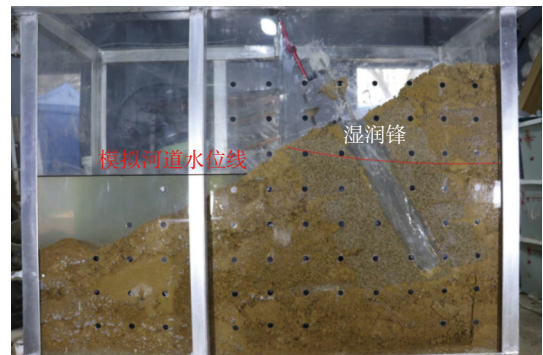


图4 结束时刻

Fig. 4 End time

浸水后拉拔试验步骤除平整膨胀土边坡及模拟河道蓄水外, 其余部分与上文一致。具体操作步骤如下: ①完成膨胀土边坡处于最优含水率下的室内膨胀土边坡锚杆拉拔试验之后, 清理相应锚杆孔道, 利用细铁丝对锚杆孔壁进行刮毛, 随后清理锚杆孔道, 最后修复膨胀土边坡。②采用人工加水的方式模拟河道处于高水位的状态, 加水速率约为 6 L/min, 持续 20 min, 一共加水 120 L。

2 结果分析

2.1 浸水前模型试验土体变形分析

图 5 为各组试验浸水前后锚杆荷载-位移曲线。如图 5 所示, 浸水前后不同长度锚杆的曲线规律相似, 因此选取锚固长度为 60 cm 的锚杆作为研究对象, 分析拉拔过程中土体的变形。分别选取了两个过程: 一是锚杆锚固在处于最优含水率的膨胀土边坡中进行拉拔; 二是锚杆锚固在处于浸水状态的膨胀土边

坡中进行拉拔。由于锚杆在拉拔过程中荷载-位移曲线具有明显的阶段性,故对锚杆在拉拔过程中荷载位移曲线进行阶段划分。

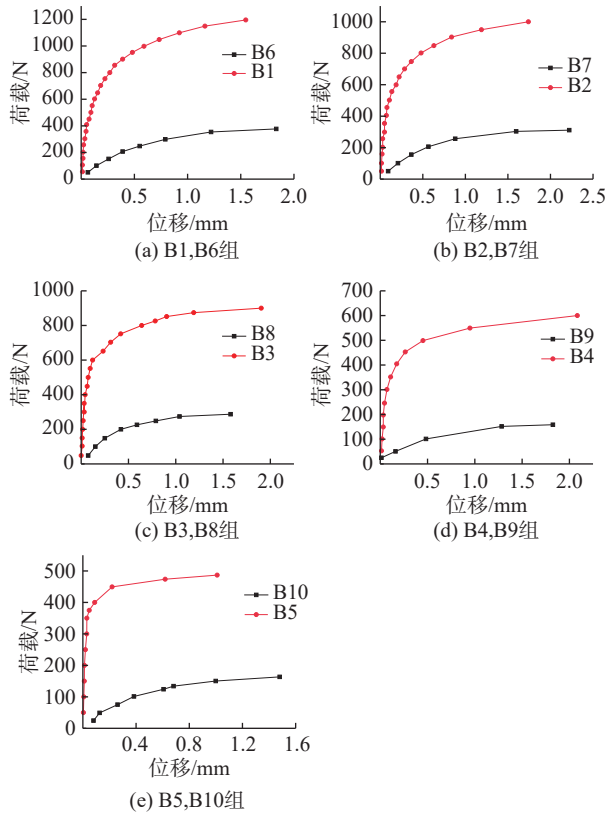


图5 浸水前后锚杆荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of bolt before and after immersion

图6为锚杆B3锚固在处于最优含水率的膨胀土边坡中进行拉拔试验所对应的荷载-位移曲线。

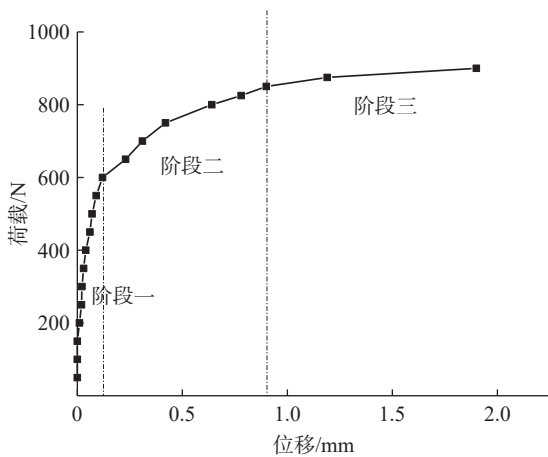


图6 B3锚杆荷载位移曲线

Fig. 6 Load displacement curve of bolt B3

如图6所示,曲线可划分为3个阶段。阶段一中,锚固体周边土体产生了细微的位移,位移方向沿锚杆轴向向上,根据GeoPIV8的输出结果数据,得到

锚固体周边土体最大位移量为0.12 mm,表明锚杆与部分周边土体发生平动,并未发生滑脱,且都发生在锚固体土体界面处。在阶段二中,锚固体周围的土体位移较阶段一增大,部分靠近锚固体的土体发生了沿锚杆轴向、背离锚固体的位移。如图7所示,在此阶段锚固体周边土体产生的位移明显增大,位移方向整体沿锚杆轴向向上,部分锚固体附近的土体发生了沿锚固体轴向且背离锚固体的位移,主要发生在锚固体膨胀土边坡表面和锚固体横截面变化处。根据GeoPIV8的数据,最大位移为1.00 mm,主要集中在膨胀土边坡的表面,表明该区域的土体在拉拔过程中经历了严重的破坏,甚至发生了脱离和崩坏。此外,锚固体横截面变化处的土体位移也较为明显,最大位移可达到0.67 mm。

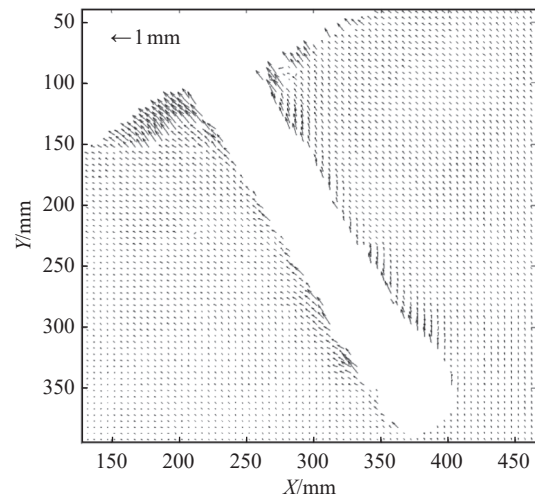


图7 阶段三B3锚固体周边土体的位移矢量图

Fig. 7 The displacement vector diagram of the soil around the B3 anchorage body in stage three

图8为锚杆B3在拉拔过程中锚固周边土体的影响范围。为同时满足室内试验及PIV分析的精度需求,当土体位移超过0.01 mm即认为土体受到锚杆拉拔的影响。在拉拔过程中的3个不同的阶段,锚固体对周边土体的影响范围有着较大的差异。阶段一拉拔过程中锚固体对周边土体影响较小,影响半径为 $0.12D$ (D 为锚固体直径);阶段二拉拔过程中锚固体对周边土体的影响范围显著增大,最大影响半径为 $2.4D$;阶段三拉拔过程中锚固体对周边土体的影响范围在阶段二的基础上进一步变大,最大影响半径为 $3.8D$,影响范围表现为距锚固体顶端越近的周边土体受影响越大,沿锚固体方向向下影响范围逐渐变小。

2.2 浸水后模型试验土体变形分析

由室内拉拔试验得到B8锚杆荷载-位移曲线,如图9所示。

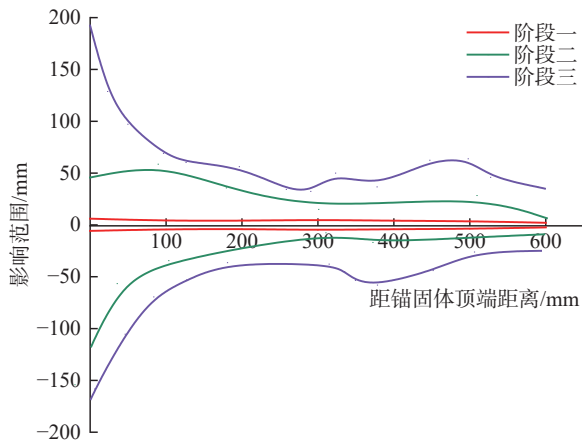


图8 浸水前锚杆 B3 在拉拔过程中对周边土体的影响范围
Fig. 8 Influence range of bolt B3 on the surrounding soil during the drawing process before immersion

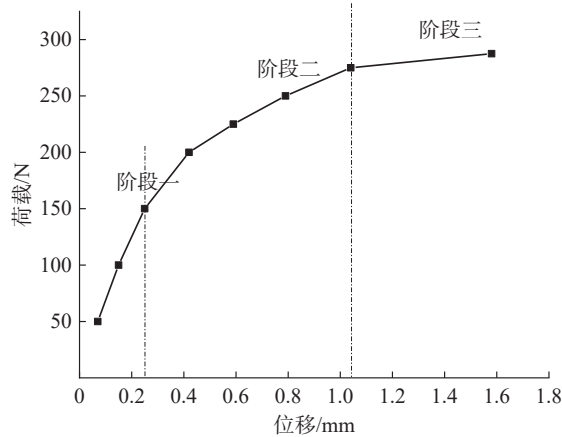


图9 B8 锚杆荷载位移曲线
Fig. 9 Load-displacement curve of bolt B8

如图9所示,曲线同样可划分为3个阶段。阶段一中锚固体周边土体产生了细微的位移,位移方向沿锚杆轴向向上,根据 GeoPIV8 的输出结果数据,得到锚固体周边土体最大位移量 0.25 mm,表明锚杆与部分周边土体发生平动,并未发生滑脱,且都发生在锚固体土体界面处。阶段二中锚固体周边土体产生的位移较阶段一明显,位移方向整体沿锚杆轴向向上,锚固体中部的土体发生了沿锚固体轴向且向外的位移,且主要发生在其下侧,原因为当前部位的锚固体横截面出现变化。根据 GeoPIV8 的输出的结果数据,得到锚固体周边土体最大位移量 0.73 mm,锚杆与部分周边土体发生了的相对滑动。图10为阶段三锚固体周边土体位移矢量图,此阶段仅膨胀土边坡表面的土体发生了较明显的位移,最大位移量为 0.51 mm,方向沿锚杆轴向向上,其他部位发生的位移较小。说明此阶段锚固体已与周边土体滑脱,周边土体被剪破。

图11为锚杆 B8 在拉拔过程中锚固体对周边土体的影响范围。与浸水前锚杆 B3 有所不同,浸水后

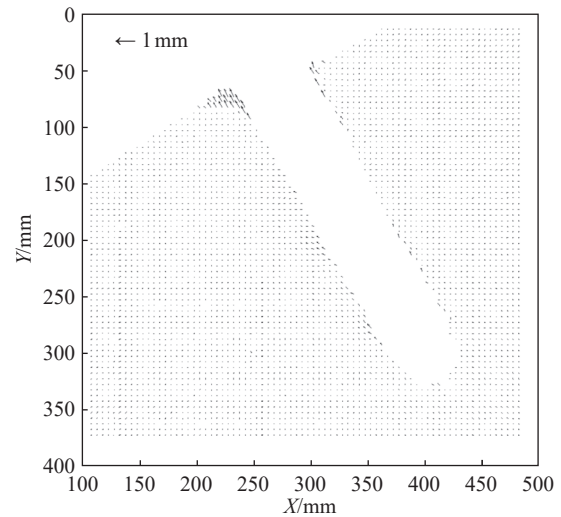


图10 阶段三 B3 锚固体周边土体的位移矢量图
Fig. 10 Stage three B3 anchor solid surrounding soil displacement vector diagram

锚固体对周边土体影响范围最大的阶段为阶段二,阶段三次之,阶段一对周边土体的影响范围最小。在拉拔过程中的三个不同的阶段,锚固体对周边土体的影响范围有着较大的差异。阶段一拉拔过程中锚固体对周边土体影响较小,锚固体上下对周边土体的影响范围差异不大,最大影响半径为 $0.53D$;阶段二拉拔过程中锚固体对周边土体的影响范围显著增大,最大影响半径为 $3.0D$,阶段二锚固体对周边土体的影响范围总体表现为距锚固体顶端近的周边土体受影响最大,锚固体中部下侧影响范围较大,影响半径为 $1.68D$,然后沿锚固体向下影响范围逐渐变小;阶段三拉拔过程中在锚固体顶端的影响范围最大,最大影响半径为 $1.54D$,锚固体上侧和下侧影响范围不对称存在差异。造成这种现象的原因如下:一是阶段三的锚固体周边土体界面发生的变形为塑性变形,经历了阶段一和阶段二的位移积累,土体发生较大的变形,较大的变形破坏了边坡的结构性,造成土体与土体之间产生裂隙,导致影响范围突然变化。由 GeoPIV8 的分析结果来看,土体膨胀变形量最大为 5.3 mm,在边坡的右下角区域,土体膨胀变形量几乎为零。二是以锚杆为分界线,锚杆上侧与下侧土体变形存在较大差异。锚杆上侧土体膨胀变形方向为斜向上,且随埋深的增大,膨胀变形方向与水平线的夹角越大,数值上随埋深的增加,膨胀变形减小;锚杆下侧土体膨胀变形方向主要是向坡脚水平膨胀,埋深浅的土体膨胀变形较大,随埋深的增加,土体膨胀变形减小。锚杆下侧产生的最大膨胀变形较锚杆上侧大。

表3为浸水前后锚固体影响范围分布情况。从图11和表3可以看出,浸水后拉拔试验过程中锚固

体对周围土体的影响范围呈现先增后减趋势, 相对于浸水前试验, 在阶段一其影响范围约为浸水前影响范围的 4.4 倍, 至阶段二其影响范围约为浸水前影响范围的 1.25 倍, 后逐步减小, 至阶段三其影响范围约减至浸水前影响范围的 40%。表明膨胀土边坡浸水后, 土体发生软化、强度降低, 导致影响范围在阶段一和阶段二变大, 阶段三锚固体影响范围变小是因为锚土界面形成了黏滑层, 加之土体软化、强度降低, 锚杆锚固作用已失效。

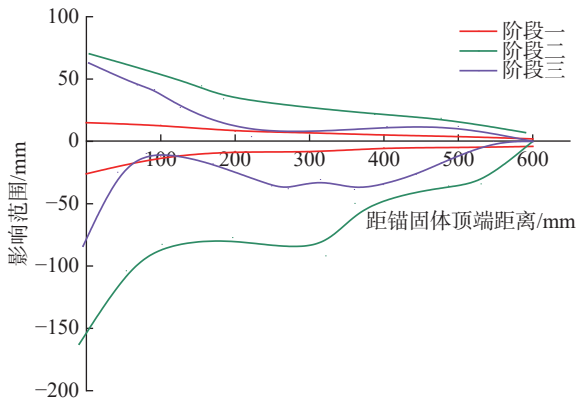


图 11 浸水后锚杆 B8 在拉拔过程中对周边土体的影响范围
Fig. 11 Influence range of the bolt B8 on the surrounding soil during the drawing process after soaking

表 3 浸水前后锚固体影响范围分布

Tab. 3 Distribution of influence range of anchorage body before and after soaking

是否浸水	阶段一	阶段二	阶段三
否	0.12D	2.4D	3.8D
是	0.53D	3D	1.54D

3 结论

通过室内模型试验和数值模拟, 研究浸水前后膨胀土边坡锚杆拉拔过程中锚杆-土体变形特征及规律, 得出以下结论:

(1) 锚固体在拉拔过程中对周围土体的影响范围表现为: 越靠近锚固体顶端影响范围越大, 沿锚固体长度方向向内影响范围逐渐变小。

(2) 从膨胀土边坡浸水膨胀变形矢量图可以看出以下变形特征: 一是膨胀土边坡膨胀变形量是不均匀分布的。整体表现为埋深越浅的土体膨胀变形量越大。二是以锚杆为分界线, 锚杆上侧与下侧土体变形存在较大差异。锚杆下侧产生的最大膨胀变形较锚杆上侧大。

(3) 浸水后拉拔试验过程中锚固体对周围土体的影响范围呈现先增后减趋势, 相对于浸水前试验, 在阶段一其影响范围约为浸水前影响范围的 4.4 倍,

至阶段二其影响范围约为浸水前影响范围的 1.25 倍, 后逐步减小, 至阶段三其影响范围约减至浸水前影响范围的 40%。

(4) 由于模型试验中边坡模型与实际边坡在尺寸及应力历史方面存在一定差异, 室内试验得出的研究结论和成果还有待进一步验证。

参 考 文 献

- [1] 焦 睿, 黄金坤, 徐永福. 锚杆锚固角度对边坡安全系数的影响 [J]. 徐州工程学院学报 (自然科学版), 2024, 39(3): 33-39. (JIAO R, HUANG J K, XU Y F. The effect of the anchoring angle of anchor rod on slope safety factors[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2024, 39(3): 33-39. (in Chinese))
- [2] 孙荣荣. 预应力锚杆支护多级边坡的稳定性分析 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020. (SUN R R. Stability analysis of multi-stage slope supported by prestressed bolt[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020. (in Chinese))
- [3] 廖世文. 膨胀土与铁路工程 [M]. 中国铁道出版社, 1984. (LIAO S W. Expansive soil and railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [4] 郑新秀. 锚杆与膨胀土相互作用机理及试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014. (ZHENG X X. Mechanism and experiment research on the interaction of anchor and expansive soil[D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese))
- [5] 王建成, 吴艳波, 康跃明, 等. 不同降雨工况下锚杆锚固提升风化凝灰岩高陡边坡稳定性研究 [J]. 能源与环境, 2024, 46(11): 29-36. (WANG J C, WU Y B, KANG Y M, et al. Research on improving stability of high and steep slopes of weathering tuff by anchor rod anchorage under different rainfall conditions[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(11): 29-36. (in Chinese))
- [6] 程永辉, 程展林, 张元斌. 降雨条件下膨胀土边坡失稳机理的离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 416-421. (CHENG Y H, CHENG Z L, ZHANG Y B. Centrifugal model tests on expansive soil slope under rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 416-421. (in Chinese))
- [7] 周 健, 徐洪钟, 胡文杰. 干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 152-156. (ZHOU J, XU H Z, HU W J. Impact of wetting-drying cycle effects on stability of expansive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2013, 35(S2): 152-156. (in Chinese))
- [8] WANG H, WANG Y J, JIN F J. Stability of expansive soil slopes under wetting-drying cycles based on the discrete element method[J]. *Water*, 2024, 16(6): 861.
- [9] XU Y Z, YANG C Y, SU C, et al. Ecological flexible protection method of expansive soil slopes under rainfall[J]. *Environmental Geotechnics*, 2025, 12(3): 194-207.
- [10] HYETT A J, BAWDEN W F, MACSPORRAN G R, et al. A constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified Hoek cell[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(1): 11-36.
- [11] BARLEY D. Theory and practice of the single bore multiple anchor system[C]//Proceedings of International Symposium on Anchors in Theory and Practice. Salzburg, 1995: 126-135.
- [12] WOODS R I, BARKHORDARI K. The influence of bond stress distribution on ground anchor design[M]//LITTLEJOHN G S. *Ground Anchorages and Anchored Structures*. London: Emerald Publishing Limited, 1997: 55-64.
- [13] 李 凡, 邵蒙新. 锚杆在膨胀土滑坡治理中的应用 [J]. *土工基础*, 2002, 16(4): 24-26. (LI F, SHAO M X. Application of bolt in expansive soil landslide correction[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2002, 16(4): 24-26. (in Chinese))
- [14] 丁振洲, 王敬林, 郑颖人, 等. 膨胀土地层扩底锚杆试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(5): 753-756. (DING Z Z, WANG J L, ZHENG Y R, et al. Test study on anchored bar with expanding ends in expansive soils[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(5): 753-756. (in Chinese))
- [15] 吴顺川, 潘旦光. 膨胀土边坡自平衡预应力锚固方法研究 [J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(4): 492-497. (WU S C, PAN D G. Reinforcement approach of self-balance prestressed bolts for expansive soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(4): 492-497. (in Chinese))
- [16] 唐延贵, 岳大昌, 朱维新. 膨胀土地层扩体锚杆施工工艺及拉拔试验 [J]. *岩土工程技术*, 2022, 36(6): 511-515. (TANG Y G, YUE D C, ZHU W X. Construction technology and pull-out test of underreamed anchor in expansive soil[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2022, 36(6): 511-515. (in Chinese))
- [17] 刘俊斌. 膨胀土土层锚杆蠕变特性及长期强度室内试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016. (LIU J B. Study of creep characteristic and long-term strength for grouted anchor in expansive soil based on indoor test[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese))
- [18] 严太勇, 朱贤哲, 邱坤华, 等. 浸水前后膨胀土边坡锚杆拉拔试验分析 [J]. *四川建筑*, 2024, 44(3): 213-215. (YAN T Y, ZHU X Z, QIU K H, et al. Analysis of pull-out test of anchor rod for expansive soil slope before and after soaking[J]. *Sichuan Architecture*, 2024, 44(3): 213-215. (in Chinese))

收稿日期: 2025-03-28