

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.06.11

分层填筑对桩-锚-加筋土组合结构加固 边坡试验研究

李玉瑞^{1,3}, 吴红刚^{2,3,4}, 赖天文¹, 牌立芳^{1,3}, 赵金^{1,3}

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030; 3. 中国中铁滑坡工程实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 西部环境岩土及场地修复技术工程实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 本文以攀枝花机场12#滑坡治理工程为背景, 通过模型试验与有限元数值模拟结合分析加筋土分层回填对桩-锚-加筋土组合结构加固边坡的影响, 得出以下结论: (1) 随着回填高度的增加, 水平位移主要向后排桩以前的坡面方向发展, 竖向位移主要向后排桩以后的方向发展, 在后排桩顶部形成位移拱效应; (2) 随着回填高度的增加, 后排桩顶的填土与桩体存在较大的刚度差异, 使得填土的竖向位移在桩顶受到明显约束, 因此在后排桩顶回填时宜增设垫层结构来减弱变形不协调问题; (3) 随着回填高度的增加, 前、后排桩的受力模式从锚固力控制的外侧受拉逐步转化为水平推力控制的内侧受拉, 期间锚索承载力逐步发挥, 桩身最大弯矩由桩顶逐渐转移到滑面位置; (4) 前两级加筋土工况下前排桩锚索轴力增长较快, 后两级加筋土工况后排桩锚索轴力增长较快, 这表明高填方情况下后排桩身承受更大的水平荷载; (5) 通过强度折减法分析各回填工况下的边坡稳定性, 得出随着桩-锚-加筋土组合支护体系的逐步形成, 该边坡的稳定性达到了较高的安全系数。

关键词: 分层填筑; 桩-锚-加筋土组合结构; 加固边坡; 试验研究

中图分类号: P64

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)06-0077-09

Effects of layered filling on slope reinforcement with pile-anchor-reinforced soil composite structure

LI Yurui^{1,3}, WU Honggang^{2,3,4}, LAI Tianwen¹, PAI Lifang^{1,3}, ZHAO Jin^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. China Northwest Research Institute Co. Ltd. of CREC, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. China Railway Landslide Engineering Laboratory, Lanzhou, Gansu 730000, China; 4. Western Environmental Geotechnical and Site Rehabilitation Technology Engineering Laboratory, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Taking Panzhihua Airport 12# landslide control project as a case study, the model test and finite element numerical simulation are adopted to analyze the influence of reinforced soil layered backfill on the slope reinforcement with pile-anchor composite structure. The following conclusions are drawn: (1) As the height of backfilling increases, horizontal displacement mainly develops in the slope direction before the back row piles. The vertical displacement mainly develops behind the back row piles. The displacement arch effect is formed at the top of the back row pile. (2) With the increase of backfill height, there is a greater stiffness difference between the backfill and the pile body, which leads to the vertical displacement of the fill be

收稿日期: 2018-05-06; 修订日期: 2018-05-31

基金项目: 中铁科研院重点课题(2015-KJ037-G006-03)

第一作者: 李玉瑞(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土与边坡工程研究。E-mail: 1299957795@qq.com

通讯作者: 吴红刚(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师。主要从事岩土和边坡工程研究。E-mail: 271462550@qq.com

restrained obviously at the top of the pile, so the cushion structure should be added to reduce the deformation incoordination. (3) With the increase of backfill height, the stress mode of the front and back piles is gradually transformed from the lateral tension controlled by the anchor stress to the inner tension controlled by the horizontal thrust, while the bearing capacity of the bolt is gradually exerted, and the maximum bending moment of the pile body is gradually transferred from the top of the pile to the position of the sliding surface. (4) The axial force of the front row pile increases rapidly under the working condition of former two grades of soil reinforced, and the axial force of the anchorage cable increases rapidly under the condition that the post two grade soil reinforced, which indicates that the rear pile body is subjected to a greater horizontal load in the case of high fill. (5) The stability of slope under various backfilling conditions is analyzed by the strength reduction method. With the gradual formation of pile-anchor-reinforced soil combination support system, the slope obtained a high safety factor.

Keywords: stratified filling; pile-anchor-reinforced soil composite structure; reinforcement of slope; experimental research

0 引言

随着我国西部大开发政策实施以来,西部地区大规模基础设施建设如火如荼进行,然而我国西部为多山区,由于不同的地形地貌、特殊土,加之降雨、地震等自然灾害以及爆破等工程扰动的影响,极易出现滑坡病害。因此众研究工作者对滑坡治理工程措施展开大量的研究,其中各种支挡结构和土的相互作用影响成为研究的一大热点。

李长冬^[1]深入研究了抗滑桩与滑坡相互作用的机理,提出了基于土拱效应的抗滑桩最小桩间距计算模型和最大桩间距计算模型;冯文娟等^[2]利用 FLAC^{3D}能够相对准确的模拟滑坡传力和抗滑桩受力过程,提出了一种抗滑桩设计新方法;叶海林等^[3]利用动力有限差分软件 FLAC^{3D},考虑了桩与岩土体地震荷载下动力相互作用,提出动力强度折减分析法;王新刚等^[4]研究应力-渗流耦合作用下抗滑桩加固库区滑坡位移和受力特征,探讨了滑坡-抗滑桩相互作用体系的防治效果;陈新泽^[5]利用 FLAC^{3D}数值模拟模型试验方法,分析了预应力锚拉桩的相互作用机制,并评价了加固效果。李凯玲等^[6]研究分析了锚索-抗滑桩-岩土体相互作用,并建立了新的锚索抗滑桩计算理论。BRANDON^[7]和 TAN^[8]分析了不同工况下抗滑桩的受力规律,为优化抗滑桩设计提供参考;苏美选等^[9]利用快速拉格朗日有限差分程序 FLAC^{3D},较好的考虑抗滑桩、预应力锚索、滑坡体及锚固地层之间的相互作用、共同工作特性,为预应力锚索抗滑桩的设计提供了参考。吴润泽等^[10]采用 FLAC^{3D}分析了不同预应力作用下锚索桩滑坡推力的分布规律,得出桩背总桩土相

互作用力的相对大小决定了锚索预应力对桩后滑坡推力的分布形式。郑桐等^[11]通过离心振动台模型试验,分析了锚索抗滑桩与桩间土的相互作用及响应规律,为验证和发展锚索抗滑桩的抗震设计理论、数值模拟方法、厘清抗震加固机制及破坏模式提供翔实的资料。蒲建军等^[12]对比分析了在横向荷载作用下抗滑桩及桩板式挡墙(后置式挡土板)两种支护结构的受力及变形特点(考虑深层滑坡),为边坡支护结构形式的选择提供参考。以上众学者通过模型试验以及数值模拟的方法研究了各种锚索抗滑桩与滑坡的相互作用规律,为边(滑)坡的支护和锚索抗滑桩的设计提供了基础。

有时限于工程实际,在边(滑)坡治理支护完成后不可避免的要求回填,这与土方减载的原则相悖,针对这方面还鲜有学者进行研究。本文依据特定工程实际,考虑工后分级回填对桩-锚-加筋土组合结构加固边坡的影响进行研究,以期得到回填对支挡结构受力以及边坡稳定性的影响规律,为类似工程提供有益的借鉴。

1 模型试验设计

1.1 试验原型与目的

本试验以攀枝花机场 12#滑坡治理工程为原型,该机场以半填半挖的方式建筑在地质环境较差的缓倾顺层砂泥岩斜坡上,最大填方边坡高度达 128 m,较高填方坐落在自稳定性较差的顺层地段坡体上堵塞了地下水通道,加之土面区降水易下渗到下伏基岩顶面,下伏基岩是强风化的砂泥岩互层且倾向坡外,泥岩受水软化,形成了滑带。该滑坡的治理一方面选用多锚点

锚索抗滑桩进行支挡;另一方面,为了达到机场通航规定的最小土面区宽度,需要在滑坡后部进行填方,因该滑坡位于易家坪老滑坡之上,为了避免老滑坡复苏,应减少回填量,因此选用可以快速收坡的新型加筋土分层回填技术来减少回填,降低滑坡推力。现场加筋土回填如图1所示。

现场加筋土回填过程中,经监测边坡水平位移、沉降、抗滑桩锚索轴力等均产生了较大的变化(图2),尤其为累积水平位移随填土高度发生了明显的增长,给边坡稳定性带来了重大的威胁。本次试验研究目的为通过模型试验以及有限元数值分析来模拟加筋土分层回填进行其对桩-锚-加筋土组合结构加固边坡稳定性的影响规律研究。



图1 加筋土回填竣工图

Fig.1 Completion map of reinforced soil backfilling

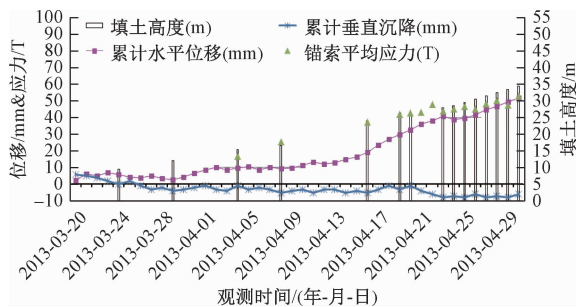


图2 某测试点变形图

Fig.2 Deformation of a testing point

1.2 试验设计

根据滑坡地层情况以及滑坡治理工程,采用尺寸相似比 $C_L = 50$ 进行模型试验设计(图3)。

模型试验材料设计如下:

(1)土体材料:坡体的主要填料为黏土。滑床部分采用水:石灰:黏土 = 1:3:9的配比进行分层夯实模拟;滑带为模型试验中关键部位,为了使坡体的滑动过程连续,本次试验特采用特氟纶薄膜来模拟,其耐高温、耐腐蚀、无油自润滑(图4);滑体部分采用过筛的黏土填筑,每级回填土之间铺设防护网来模拟加筋材

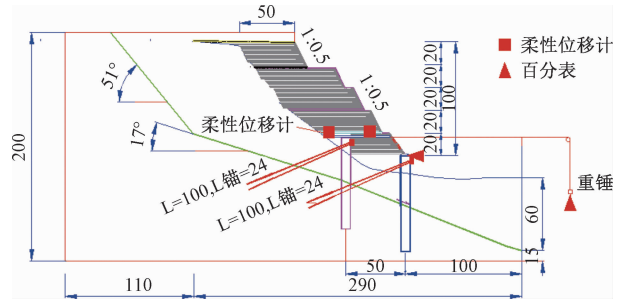


图3 模型设计断面图(单位:cm)

Fig.3 Section map of the designed model(unit: cm)

料(图5),每级回填20 cm。



图4 特氟纶薄膜铺设实物图

Fig.4 Picture of teflon thin film



图5 模拟加筋材料铺设实物图

Fig.5 Picture of simulated reinforced material

(2)锚索抗滑桩:抗滑桩选用松木切割加工制作,尺寸为前排悬臂式桩6 cm × 8 cm × 84 cm,后排埋入式桩5.6 cm × 7.6 cm × 80 cm。锚索采用两排直径为6 mm螺纹杆来模拟,其提供斜向拉力,上、下排锚索倾角分别为22°、24°,自由端由塑料波纹管包裹连接桩顶,锚固端外套直径12 mmPVC管(管长24 cm),管内浇筑石膏模拟(图6(a)),锚固端锚固在滑床深处(图6(b))。

1.3 试验量测系统

由于天气原因以及松木与应变片的适应性问题,全

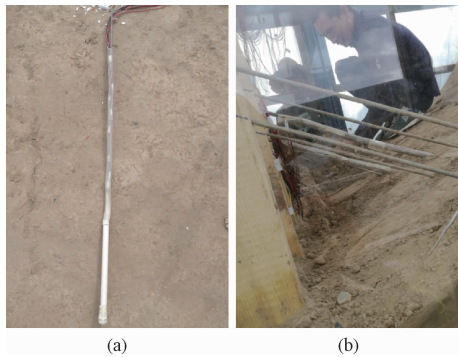


图 6 锚索制作及装置图

Fig. 6 Production and setting of anchorage cable

部量测数据没有完全捕捉到,根据试验有效数据的传感器(柔性位移计、百分表)进行标识(图3),测试桩如图4所示,其中柔性位移计选用湖南亿测无线传感系统进行数据采集,现场试验装置见图7。

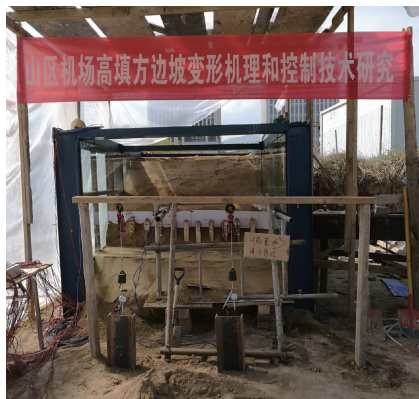


图 7 现场试验图

Fig. 7 Picture of field test

1.4 试验工况模拟

回填土总分四层,每次回填高度 20 cm,每层回填土之间铺设防护网来模拟加筋土,每回填一层待读数稳定再回填下一级,试验过程及工况阶段模拟见表 1。

表 1 试验过程及工况阶段模拟

Table 1 Test process and working condition

试验阶段	时间/min	工况模拟	对应工况
一层回填	0 ~ 40	加筋土一级施工	工况一
二层回填	40 ~ 80	加筋土二级施工	工况二
三层回填	80 ~ 120	加筋土三级施工	工况三
四层回填	120 ~ 终	加筋土四级施工	工况四

2 试验结果分析

(1) 柔性位移计位移

利用柔性位移计量测后排桩桩顶前后加筋土水平位移。分析整个试验过程中柔性位移计测点水平位移

随时间变化趋势,如图 8(a)所示,一层回填工况,桩后水平位移明显大于桩前水平位移,但一层回填工况之后,桩后水平位移增长趋势缓慢,基本没有发生变化;桩前水平位移随着回填工况一直保持增长趋势,每层回填初期都存在一个位移的突变,之后缓慢增长。分析原因:桩后测点受到后排埋入式桩桩顶拱效应的影响,水平位移受到限制,因此加筋土回填对桩后的水平位移没有较大的影响;由于桩前土运动相对自由,故其水平位移在随着上层加筋土回填发生变化。分析各工况下两测点的净水平位移量如图 8(b)所示,桩前测点加筋土水平位移随着回填层数的增加,变形量也在逐级增加,这表明上层加筋土回填对于后排桩桩前的水平位移影响较大,施工中宜增设锚索框架等支护结构进行限制其水平位移。

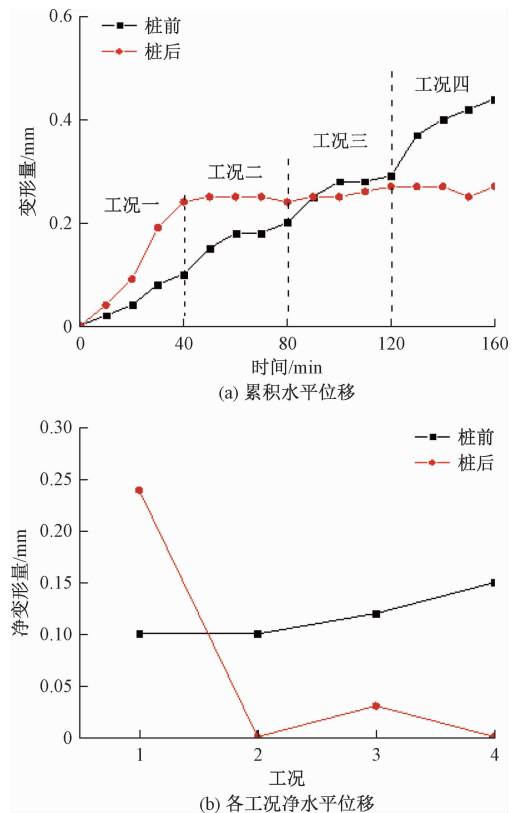


图 8 测点水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement curve at measuring points

(2) 桩顶位移

利用百分表量测桩顶位移,如图 9(a)所示,后排桩为埋入式桩,由于存在桩前土体提供抗力,桩顶位移在前两层加筋土回填并没有发生位移,在第三层回填时才出现了较小的水平位移,同时由于存在锚索的拉力,桩顶位移发展缓慢;前排悬臂式桩首次回填便出现了较小的位移,随着回填层数增加,桩顶位移也逐渐增

大。分析各工况桩顶位移净变形量如图 9(b) 所示,在二层回填时,前排桩净变形量达到最大值,第四层回填,桩顶净变形量减小,表明锚索逐渐发挥了作用,提供的拉力逐渐增大。

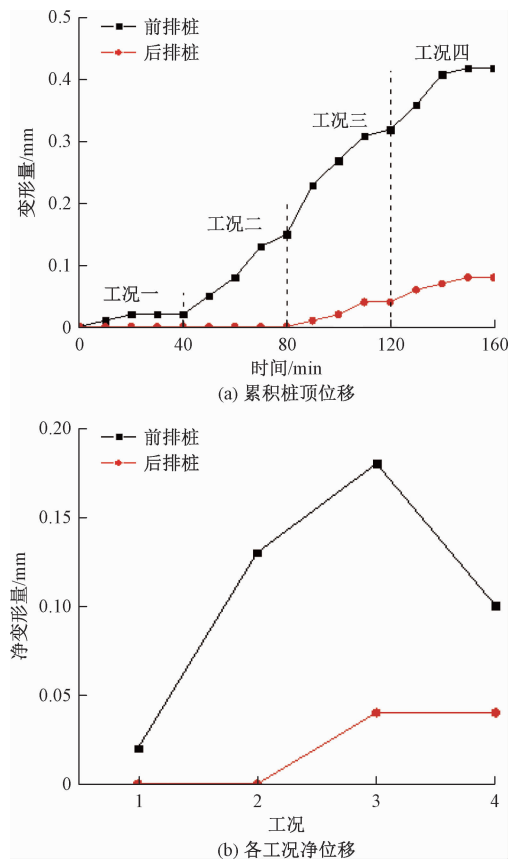


图 9 桩顶水平位移变形图

Fig. 9 Horizontal displacement curve of pile top

3 数值模拟分析

运用有限元软件进行数值模拟分析,使用土体本构模型和各种结构单元来真实模拟边坡坡体及其复杂边界条件,包括坡体的土岩接触面、坡体内部的原始滑移带等地层结构,得到坡体的弹塑性变形及其应力应变,支护结构的变形和内力,以及支护体系与土体相互作用的受力机制。此外,采用有限元强度折减法进行边坡稳定性分析,可以按照土体的强度破坏条件直接计算得到塑性剪切面的位置,并通过强度折减比例获得安全系数,弥补极限平衡分析中由于各种假定所导致的误差。

3.1 有限元软件采用单元类型

(1) 实体单元:模拟地层、填土和抗滑桩,为 15 节点的高阶三角形单元,其精度非常高,可以更加准确的计算单元应力应变。

(2) 锚索单元:模拟预应力锚索的自由段,为 2 节点弹簧单元,可以承受拉、压荷载。

(3) 嵌入式梁单元:模拟预应力锚索的注浆段,由可以承受拉、压、弯、剪荷载的 5 节点梁单元,和梁单元周围附加的沿其长度的 10 节点特殊接触单元,表达注浆段与周围岩土体的摩擦接触作用。

(4) 格栅单元:模拟土工加筋材料,为 5 节点单元,仅可承受拉应力,可与接触面单元组合表达加筋材料与填土的共同作用。

(5) 接触面单元:模拟抗滑桩、土工筋材与周围土体的接触作用,以及土岩分界面、地层原始滑移带等,为 10 节点单元,表达两种材料相互接触时的剪切、拉压作用。

3.2 有限元模型建立

选取攀枝花机场 12#滑坡中部 3-3 断面为代表进行有限元分析,根据设计资料,其支护结构为桩-锚-加筋土组合结构挡挡体系,根据 3-3 断面地层状况及滑坡形态、支护设计方案,建立的有限元分析模型如图 10 所示。

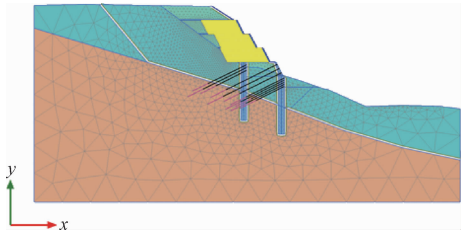


图 10 有限元分析模型图

Fig. 10 Finite element analysis model

模型参数取值如表 2 所示。

表 2 模型参数取值

Table 2 Model parameters

材料名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
填土	19.5	50	0.25	30	23
前部滑带	19.5	30	0.27	10	12
中部滑带	19.5	30	0.27	10	18
后部滑带	19.5	30	0.27	0	30
土体	19.5	30	0.27	15	30
砂岩	27	2 000	0.2	180	38
抗滑桩	24	30 000	0.2	/	/

加筋土的加筋材料选取土工格栅,其弹性模量: $E = 20\,000\text{ kN/m}^2$,抗拉强度 $F_t = 200\text{ kN}$;预应力锚索自由段 $E = 3.5 \times 10^5\text{ kN/m}^2$,锚固段 $E = 8.8 \times 10^5\text{ kN/m}^2$,单锚承载力特征值 $F = 1\,100\text{ kN/m}^2$,锚索间距 $L = 6\text{ m}$,初始预应力值 $P = 660\text{ kN}$,为锚索设计荷

载的 60%。

3.3 加筋土分层回填影响分析

本次分析分别对四级加筋土分层填筑 4 个工况进行分析

(1) 边坡位移与塑性区发展分析

从四级加筋土分层填筑过程加筋土边坡的变形情况看,如图 11~图 13 所示,随着回填高度增加,竖向位移主要向后排桩以后的方向发展,在后排桩顶部形成位移拱效应;水平位移主要在后排桩以前的坡面方向发展,桩前位移逐渐大于桩后位移,这与模型试验加筋土水平位移表现出同样的规律;填土内塑性区主要沿后排桩顶、坡面及填土加筋末端发育。后排桩顶的塑性区发展由填土与桩体较大的刚度差异引起,使得填土的竖向位移在桩顶受到明显约束,桩顶剪切带逐步延伸至坡面附近。

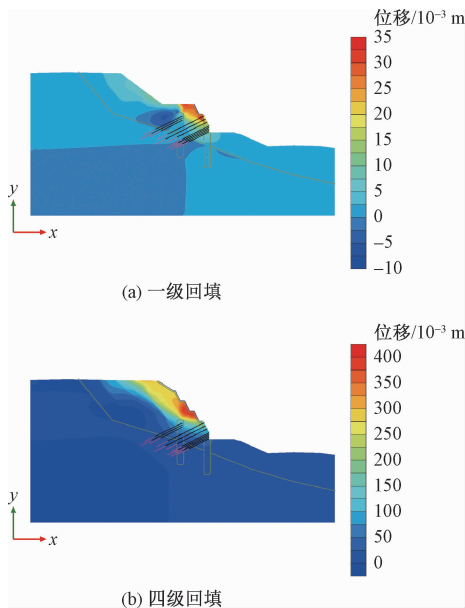


图 11 水平位移云图

Fig. 11 Horizontal displacement cloud map

(2) 锚索抗滑桩受力分析

① 后排桩

锚索锁定阶段桩身荷载主要为桩顶锚索预应力,在土岩分界面(滑带)处弯矩达到 $5\,359\text{ kN}\cdot\text{m}$,剪力为 $1\,008\text{ kN}$,外侧受拉。第一级加筋填土之后桩顶产生约 3.9 mm 位移,桩身受力模式不变,最大弯矩下降到 $4\,518\text{ kN}\cdot\text{m}$,剪力为 983 kN 。随着边坡填土增高,产生的水平推力不断加大,桩顶水平位移逐步增加(第四级填土后达到 102.5 mm),桩身受力模式改变为内侧受拉,第四级填土后滑带处弯矩达到 $14\,730\text{ kN}\cdot\text{m}$,剪力为 $2\,038\text{ kN}$,如图 14~图 15 所示。

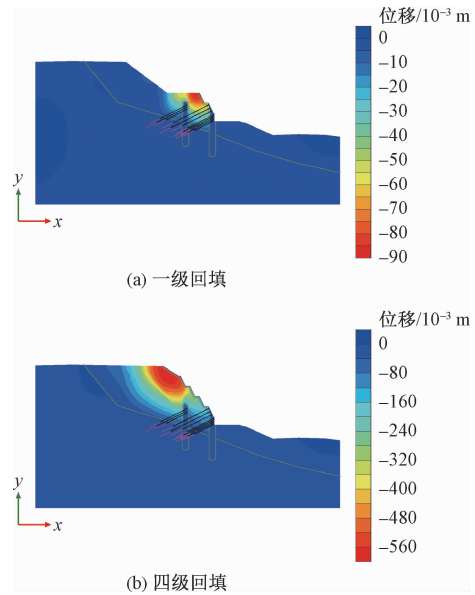


图 12 竖向位移云图

Fig. 12 Vertical displacement cloud map

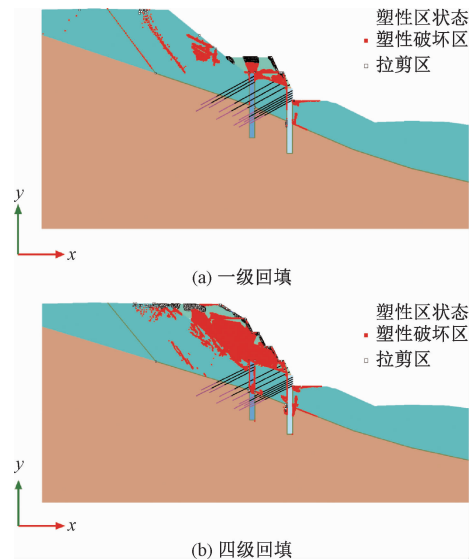


图 13 塑性区发展图

Fig. 13 Development of plastic zone

由上述计算结果可见,后排桩的受力模式从锚索力控制的外侧受拉逐步转化为水平推力控制的内侧受拉,期间锚索承载力逐步发挥。

② 前排桩

锚索锁定阶段桩身荷载主要为桩顶锚索预应力,在土岩分界面(滑带)处弯矩达到 $2\,029\text{ kN}\cdot\text{m}$,剪力为 $1\,147\text{ kN}$,外侧受拉;桩顶弯矩 $2\,526\text{ kN}\cdot\text{m}$,剪力为 466 kN ;可见此时锚索预应力为抗滑桩结构的控制荷载。第一级加筋填土之后桩顶产生约 14.4 mm 位移,最大弯矩发生在土岩分界面滑带处为 $6\,737\text{ kN}\cdot\text{m}$,对

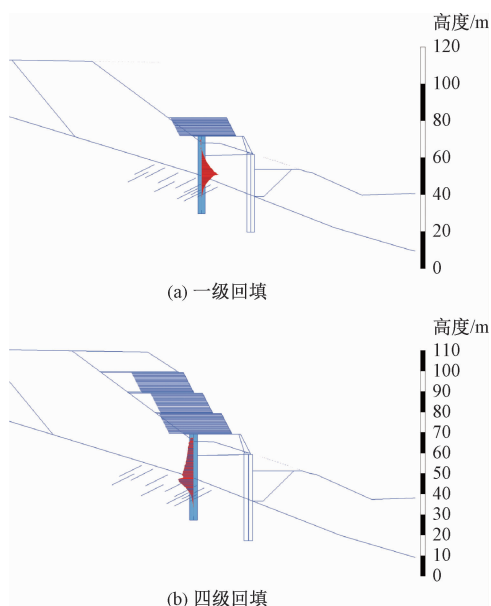


图 14 弯矩图

Fig. 14 Bending moment diagram

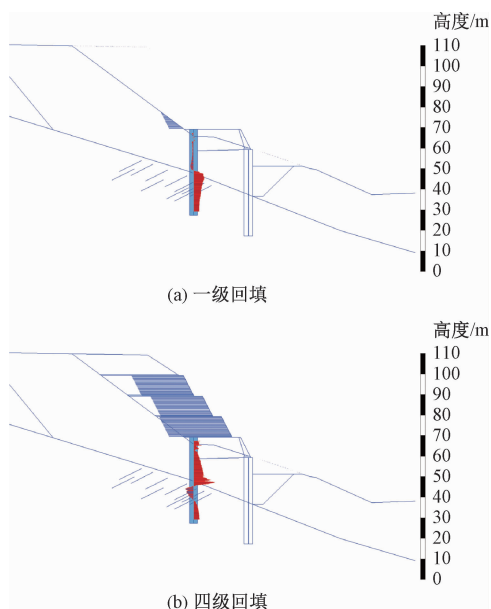


图 15 剪力图

Fig. 15 Shear diagram

应的最大剪力为 1 485 kN; 此时桩顶弯矩减小到 2 399 kN·m。随着边坡填土增高, 产生的水平推力不断加大, 桩顶水平位移逐步增加 (第四级填土后达到 81.9 mm), 桩身受力模式改变为内侧受拉, 第四级填土后滑带处弯矩达到 22 890 kN·m, 剪力为 2 021 kN, 如图 16 ~ 图 17 所示。

由上述计算结果可见, 前排桩受力模式从起初锚索力控制的外侧受拉逐步转化为水平推力控制的内侧

受拉, 最大弯矩也从桩顶移动到滑带附近, 滑带附近为主要受剪断面。

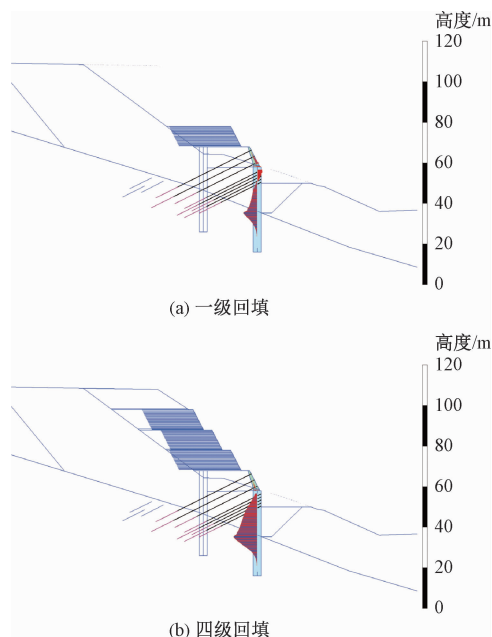


图 16 弯矩图

Fig. 16 Bending moment diagram

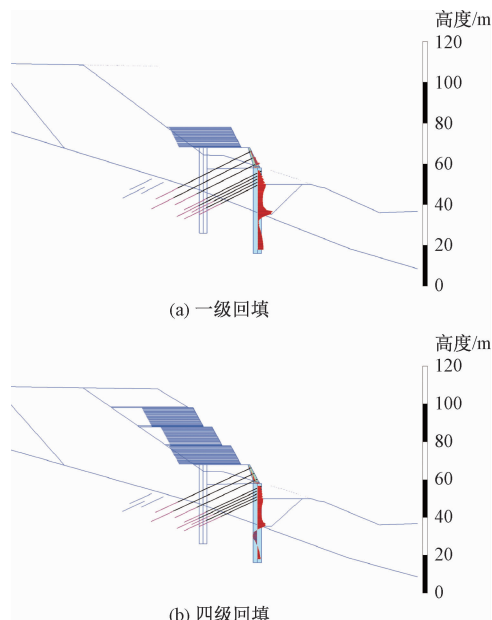


图 17 剪力图

Fig. 17 Shear diagram

③锚索

锚索内力随填土级数变化如表 3 所示, 前两级加筋土工况下前排桩锚索轴力增长较快, 后两级加筋土工况后排桩锚索轴力增长较快, 如图 18 所示, 这与高填方情况下后排桩身承受更大的水平荷载有关。此

外,在第三级加筋填土工况所有锚索轴力基本达到或者超过了其设计荷载(后排桩锚索轴力设计荷载为2 200 kN,前排桩锚索轴力设计荷载为1 100 kN),按照设计要求,在该工况下应将锚索预应力释放至设计荷载的70%,待第四级填土结束且基本达到稳定状态之后,根据锚索内力监测结果决定是否需要补张拉至锚索的设计锁定荷载。如果在第三级加筋填土工况下不释放锚索预应力,第四级填土工况下锚索轴力增长为设计荷载的1.23~1.58倍,处于极限荷载的范围。

表3 锚索轴力表(最大值:kN)

Table 3 Anchorage axial force meter(max;kN)

材料名称	后排桩	前排桩
前部滑带	1 357	788
中部滑带	1 655	954
后部滑带	2 184	1 139
抗滑桩	2 994	1 351

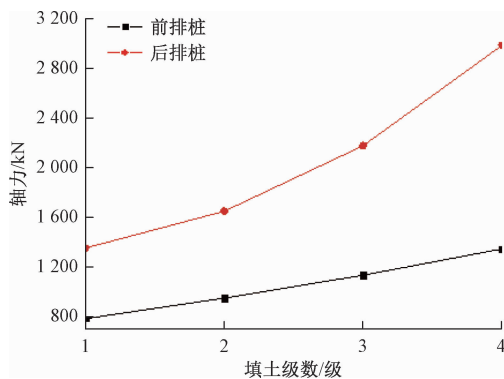


图18 锚索轴力随填土级数变化图

Fig. 18 The variation of the axial force of the anchorage cable with the fill series

(3) 边坡稳定性分析

通过强度折减法对各个工况的边坡进行稳定性分析,计算结果见图19,前三级加筋填土工况下经过强度折减之后均形成从填土顶部坡脚剪出的潜在滑面,

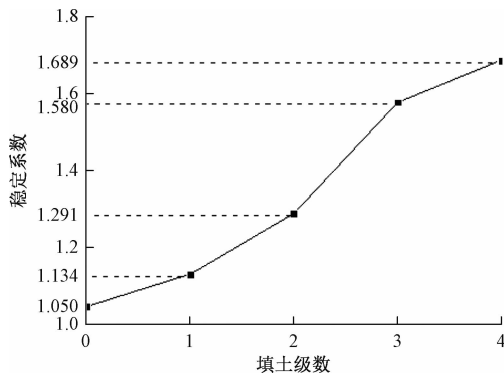


图19 各级填土稳定系数图

Fig. 19 Stability coefficients of filling at all levels

在第四级填土工况时形成沿抗滑桩顶面剪出的潜在滑动面。随着桩-锚-加筋土组合结构体系的逐步形成,该边坡的稳定性达到了较高的安全系数。

4 结 论

本文通过模型试验与数值模拟结合的方法,对加筋土分级回填对桩-锚-加筋土组合结构加固边坡的影响进行分析,得到如下主要结论及建议:

(1)随着回填高度的增加,水平位移主要向后排桩以前的坡面方向发展,因此在每层坡面宜增设锚索框架等结构进行支挡;竖向位移主要向后排桩以后的方向发展,在后排桩顶部形成位移拱效应;

(2)随着回填高度的增加,后排桩顶的塑性区发展由填土与桩体较大的刚度差异引起,使得填土的竖向位移在桩顶受到明显约束,桩顶剪切带逐步延伸至坡面附近,因此在后排桩顶回填时宜增设垫层结构来减弱变形不协调问题;

(3)随着回填高度的增加,前、后排桩的受力模式从锚索力控制的外侧受拉逐步转化为水平推力控制的内侧受拉,期间锚索承载力逐步发挥,桩身最大弯矩由桩顶逐渐转移到滑面位置;

(4)前两级加筋土工况下前排桩锚索轴力增长较快,后两级加筋土工况后排桩锚索轴力增长较快,这表明高填方情况下后排桩身承受更大的水平荷载;

(5)通过强度折减法分析各回填工况下的边坡稳定性,得出随着桩-锚-加筋土组合结构体系的逐步形成,该边坡的稳定性达到了较高的安全系数。

参考文献:

- [1] 李长冬. 抗滑桩与滑坡体相互作用机理及其优化研究[D]. 中国地质大学, 2009.
LI Changdong. Mechanism and optimization of interaction between anti slide piles and landslide [D]. China University of Geosciences, 2009.
- [2] 冯文娟, 琚晓冬. 基于FLAC^{3D}的抗滑桩设计方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2): 256-259.
FENG Wenjuan, XIAO Xiaodong. Design method of anti slide pile based on FLAC^{3D} [J]. Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 256-259.
- [3] 叶海林, 郑颖人, 黄润秋, 等. 强度折减动力分析法在滑坡抗滑桩抗震设计中的应用研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 317-323.
YE Hailin, ZHENG Yingren, HUANG Runqiu, et al. Application of strength reduction dynamic analysis

- method to seismic design of landslide anti slide piles [J]. Geotechnical Engineering, 2010, 31 (S1): 317 - 323.
- [4] 王新刚, 胡斌, 连宝琴, 等. 库水位骤变下滑坡 - 抗滑桩体系作用三维分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2439 - 2446.
- WANG Xingang, HU Bin, LIAN Baoqin, et al. 3D analysis of the role of landslide anti slide pile system under the sudden change of reservoir water level [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (12): 2439 - 2446.
- [5] 陈新泽. 基于 FLAC^{3D} 预应力锚拉桩作用机制和加固效果研究[J]. 岩土力学, 2009, 30 (S2): 499 - 504.
- CHEN Xinze. Study on action mechanism and reinforcement effect of prestressed anchor pile based on FLAC^{3D} [J]. Geotechnical Engineering, 2009, 30 (S2): 499 - 504.
- [6] 李凯玲, 门玉明. 锚索抗滑桩与岩土体相互作用研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(1): 20 - 22 + 26.
- LI Kailing, MEN Yuming. Interaction between anchor piles and rock and soil. [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006 (1): 20 - 22 + 26.
- [7] BRANDON TOMAS L, WRIGHT STEOHEN G, DUNCAN J MICHAEL. Analysis of the stability of 1 - walls with gaps between levee fill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(5): 692 - 700.
- [8] TAN YONG, PAIKOWSKY SAMUEL G. Performance of sheet pile wall in peat[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(4): 445 - 458.
- [9] 苏美选, 戴自航, 林智勇. 预应力锚索抗滑桩支挡结构体系数值模拟研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 50 - 53.
- SU Meisuan, DAI Zihang, LIN Zhiyong. Numerical simulation study on prestressed anchor cable anti slide pile retaining structure system [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19 (3): 50 - 53.
- [10] 吴润泽, 周海清, 胡源, 等. 基于 FLAC^{3D} 的锚索抗滑桩滑坡推力分布规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5): 548 - 555.
- WU Runze, ZHOU Haiqing, HU Yuan, et al. Study on the thrust distribution law of anti slide piles based on FLAC^{3D} [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(5): 548 - 555.
- [11] 郑桐, 刘红帅, 袁晓铭, 等. 锚索抗滑桩地震响应的离心振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2276 - 2286.
- ZHENG Tong, LIU Hongshuai, YUAN Xiaoming, et al. The centrifugal shaking table model test of the seismic response of anchor cable anti slide pile [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (11): 2276 - 2286.
- [12] 蒲建军, 梁庆国, 刘璐, 等. 桩及桩板墙加固路基边坡的对比室内模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1583 - 1592.
- PU Jianjun, LIANG Qingguo, LIU Lu, et al. Comparison of pile foundation and pile plate wall to reinforce roadbed slope. [J]. Laboratory of Engineering Geology, 2017, 25 (6): 1583 - 1592.

敬告作者和读者

为适应我国科技信息化建设的需要,扩大作者、读者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》及《中文科技期刊数据库》。今后,本刊将作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如果作者不同意将文章编入上述数据库,请在投稿时声明,本刊将作适当处理。谢谢!

《中国地质灾害与防治学报》编辑部