

某黄土多级贴坡高填方稳定性分析与综合治理

丁保艳^{1,2}, 杨校辉³, 陈昆全³

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃地质灾害防治工程勘查设计院, 甘肃 兰州 730050;

3. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为研究多级贴坡高填方的稳定性及其综合治理措施, 以西北地区某黄土多级贴坡高填方为例, 通过理论分析其稳定性, 然后提出综合治理措施, 再由数值模拟验证其治理后的可靠性。结果表明: 原始斜坡在自重工况下的稳定性系数为 1.035, 处于欠稳定状态, 亟待进行治理; 在对该表层土体风化严重的冲沟斜坡进行综合治理时, 需要将强风化的原始坡面堆积物挖除, 设置 24 级阶梯状交界面, 施用加筋土进行八级贴坡填方, 并设置锚索及抗滑桩来提高其稳定性; 通过数值模拟分析综合治理措施的可靠性, 表明贴坡分级支护后斜坡位移得到有效控制, 坡面水平侧移控制在 5.6 mm 以内, 最大沉降控制在 5.8 mm 以内, 边坡趋于稳定。研究可为多级贴坡高填方的稳定性分析及其综合治理设计提供参考。

关键词: 多级边坡; 贴坡高填方; 稳定性分析; 综合治理

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)05—0117—06

Stability Analysis and Comprehensive Treatment Measures of a Loess Multi-level High Fill Slope

DING Baoyan^{1,2}, YANG Xiaohui³, CHEN Kunquan³

(1. The Third Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Gansu Geological Disaster Prevention Engineering Exploration and Design Institute, Lanzhou, Gansu 730050, China;

3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: In order to analyze the stability of multi-level high fill slope and its comprehensive treatment measures, a loess multi-level high fill slope in Northwest China was taken as an example, the stability is analyzed theoretically, then the comprehensive treatment measures are proposed, and finally the reliability after treatment is verified by numerical simulation. The results are as follows. According to the theoretical analysis results of the original slope stability, the stability coefficient of the slope under the gravity condition is 0.94, which is in an unstable state and needs to be treated urgently. Since the slope is a gully and the top of the slope is an important historical protection building, during the comprehensive treatment process, it is necessary to excavate the strongly weathered original slope deposit, set up a 24-level stepped interface, and then carry out eight-level slope filling with reinforced soil to restore the collapsed road and square foundation at the top and effectively support it, at the same time anchor bolts and anti-slide piles should be set to improve its stability. Through the numerical simulation analysis of the reliability of the comprehensive treatment measures, it can be seen that the slope displacement is effectively controlled after the graded support of the slope, the horizontal lateral displacement of the slope is controlled within 5.6 mm, and the maximum horizontal displacement is well controlled compared with that before reinforcement. The vertical settlement is the largest at the top of the slope, which is controlled within 5.8 mm after reinforcement, and the slope tends to be stable.

Keywords: multistage slope; high fill slope; stability analysis; comprehensive treatment measures

收稿日期: 2022-07-03

修稿日期: 2022-07-31

基金项目: 甘肃省青年科技基金计划(20JR5RA434); 甘肃省建设科技攻关计划项目(JK2021-46, JK2021-55)

作者简介: 丁保艳(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治方面的研究工作。E-mail: 378044265@qq.com

通讯作者: 杨校辉(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土地基处理、支挡结构与滑坡防治方面的研究工作。E-mail: yxhui86@126.com

随着西部大开发与一带一路战略的全面实施,人类工程建设活动在西北黄土地区大量进行,许多工程建设不得不在工程性质较差的湿陷性黄土山区进行,且存在很多的临边斜坡需要进行处理^[1]。该工程所处地区河谷深切、沟壑纵横导致土地资源匮乏^[2],采用贴坡填方的方式拓宽地基以及加固原始边坡是一种可行的方式。当前关于黄土地区贴坡高填方相关研究鲜见报道,因此,此类斜坡的稳定性分析以及工程治理研究具有极强的现实意义。

目前,有关不同因素对高填方边坡稳定性影响的研究有很多。学者们通常认为,高填方边坡的破坏始于土体固结沉降,王志斌等^[3]认为分层填筑夯实的贴坡高填方实质为成层岩土体;马闰等^[4]通过原位试验与三轴试验研究了贴坡高填方变形破坏演化过程,得出其变形破坏的诱因为土体固结沉降;杨校辉等^[5]通过现场监测研究发现山区高填方边坡变形以沉降为主;胡长明等^[6]通过离心模型试验,发现贴坡体固结变形是高贴坡变形的主导因素。此外,水分入渗软化土体会使得填方变形增大,杨玉生等^[7]通过室内双线法增湿湿陷试验研究,指出填方压实黄土沉降随着水分浸润增湿含水率的增加;聂超等^[8]对降雨入渗情况下某滑坡的渗流场特性进行理论分析,发现随着地下水位逐渐升高,坡体稳定性系数下降,变形增大。李麒麟等^[9]对黄土高填方边坡在不同工况下的稳定性进行数值模拟分析,发现降雨与地震作用下黄土高填方边坡稳定性下降明显。然而,黄土地区的多级贴坡高填方稳定性分析的相关研究极少,因此其稳定性分析还有待进一步深入。

当前关于黄土贴坡高填方的综合治理方法尚比较匮乏。胡长明等^[10]通过黄土压缩试验,发现土体压实度对高填方土体的沉降变形和强度有决定性的影响,因此需要提高填筑土体的压实度。侯俊伟等^[11]和刘远程等^[12]分别通过数值模拟和室内模型试验研究高填方边坡,发现在填筑体下部与稳定基岩之间会形成具有一定厚度的滞水层软弱带,最终发生整体滑移失稳,因此贴坡挖填交界面需要特殊处理以增强其稳定性。此外,减少降雨入渗也可以很好的控制边坡的变形,谢春庆等^[13]针对降雨入渗不能及时排出所导致的边坡应急处理,采取填筑体顶面黏性土回填、坡面碎石换填以及薄膜覆盖,有效地控制了边坡的进一步变形;唐培连等^[14]采用土工布加筋方案对30 m高的填方边坡进行处理,发现其工序简单且加固效果好。冯波等^[15]认为抗滑桩方

案对边坡的抗滑稳定安全系数控制效果最好,土工格栅对边坡的位移控制最明显。朱彦鹏等^[16]采用预应力锚索桩板墙对多级高填方边坡进行支护,加固效果显著。吴红刚等^[17]通过数值模拟对锚索-抗滑桩-加筋土挡墙的高填方边坡综合治理方案的分析,发现在抗滑桩桩顶部增设垫层可以使得结构与土体协同变形,从而更好的发挥抗滑桩的性能。因此,由于黄土地区贴坡高填方的复杂性,需要采取多种措施的综合治理手段才能保证其可靠性。

综上,当前关于黄土多级高贴坡的稳定性研究相对匮乏,同时对此类边坡的治理缺乏足够深入的认识。本文以甘肃正宁县某黄土多级高贴坡治理工程为依托,通过理论计算和数值模拟等手段,分析该高陡边坡的稳定性并提出综合治理措施,相关研究结果可为类似黄土地区的多级高贴坡稳定性分析与设计提供参考。

1 工程概况与特点

1.1 地形地貌与地质构造

研究区斜坡所在地点为甘肃省正宁县南邑村,按地貌成因划分属侵蚀剥蚀黄土塬地貌类型,为长期遭受流水侵蚀切割的更新统厚层黄土而形成的。黄土塬边直至河谷底部的区域在流水的强烈侵蚀下,地形支离破碎而呈丘陵沟壑地貌,较大冲沟延伸方向多与塬面走向大角度相交,沟谷深切,沟岸滑坡、崩塌等不良地质现象发育,其上部分布有坡耕地,如图1所示。

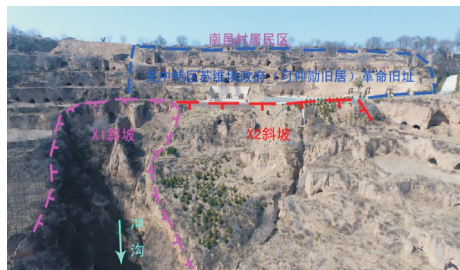


图1 工程区不稳定斜坡全景图

斜坡场地地势西北高东南低,相对高差可达195 m,总的地形具有冲沟发育、地形破碎、人类改造较强烈的特点。斜坡中上部为上世纪该区居民居住区,受人为改造成台阶状开挖窑洞作为主要居所,台阶宽度8 m~35 m不等,形成的陡边坡高差5 m~20 m不等,坡度多直立。受长期雨水冲刷及风化作用影响,大部分窑洞废弃、窑洞及其所在边坡坍塌严重。斜坡中下部多为自然形成,人类工程活动相对

较少,坡度 $35^{\circ}\sim 60^{\circ}$,但冲沟发育、溯源侵蚀严重,冲沟宽窄不一,3 m~20 m 不等,多呈“V”型,较大沟谷下游沟道呈“U”型,沟谷两侧坡度较陡,为 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$,小型滑坡、崩塌发育。

斜坡地处鄂尔多斯台拗南缘,陇东白垩系盆地的东南部,于大地构造上属较为稳定的地块。此区域总体构造变动极为微弱,基岩盖层均属巨厚的下白垩统,其产状近水平。存在一北东至南西走向宽约 15 km 的平缓向斜,岩层倾角普遍仅 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$,项目区域内及其附近无较大的活动构造。

新构造运动在本区以整体性抬升为特征,河(沟)谷下切强烈,形成大面积流水切蚀和重力侵蚀的沟壑与残塬地貌,沟坡均较为陡峻,为滑坡、崩塌、泥石流的形成奠定了基础。正宁境内基本无震级大于 4.0 级的地震发生,数次地震均属相邻区域地震波及,主要为盆地西南缘六盘山东麓断裂带地震造成。工程所在地抗震设防烈度为 VI 度,基本地震加速度值为 0.05g。

1.2 工程地质条件

(1) 钻孔勘探揭示地层岩性。对斜坡所在区域进行钻孔勘探,揭示岩性底层为含砾钙质结核层;中层为冲洪积砂砾层夹砂质土,密实,力学性能较高;上层为淡褐红-棕红色石质黄土,即午城黄土,密实坚硬,夹钙质结核层。斜坡坡脚分布有结构松散、厚度不均的全新统崩积物,主要成分为粉质黏土。

(2) 高密度电法物探分析。高密度电法通过分析不同区域电阻率大小来判断地层分布情况。2 号剖面(见图 2)位于两斜坡之间,靠近冲沟填方位置,因此冲沟的底层信息可以参考该剖面情况。在 21 号—58 号电极间、-10 m 以浅出现高阻区,视电阻率值约为 $70\ \Omega\cdot\text{m}\sim 170\ \Omega\cdot\text{m}$;8 号—18 号电极间、-10 m 以上区域出现相对低阻区,视电阻率值约为 $10\ \Omega\cdot\text{m}$;29 号—35 号电极间、-15 m~-6 m 之间出现相对低阻区,视电阻率值约为 $16\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

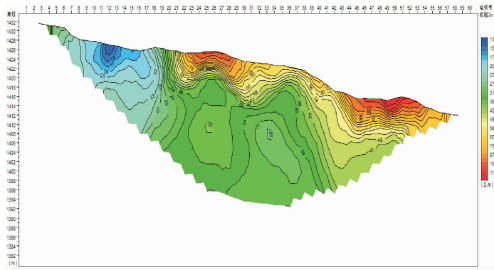


图 2 2 号剖面视电阻率 ρ_s 断面图

根据上述电性特征,推断浅层 21 号—58 号电极间出现的相对高阻区是窑洞及落水洞等空洞所致(见图 3);在 29 号—35 号电极间、-15 m~-6 m 之间,42 号—47 号电极间、-10 m 以深出现的相对低阻区土层含水率相对较高。



图 3 X1 斜坡坡顶塌陷形成落水洞

1.3 气象与水文地质条件

该地区降雨多集中于夏季,日最大降水量 96.7 mm,十分钟最大降水量 25.4 mm。研究区无地表水及地下水分布,在斜坡冲沟下游沟道内发现土体湿润迹象,但未发现地下水明显出露点,地下水类型主要为赋存于黄土塬区离石黄土中的孔隙裂隙水。区内标准冻土深度 0.80 m,为季节性冻土,冻结时间由 11 月一翌年的 3 月,存在一定的冻融冻胀危害。

1.4 边坡特点

(1) 该贴坡高填方从冲沟底部开始填冲,总高差约为 91 m,最上面两级坡度可达 45° ,填方量很大,对高陡边坡稳定性十分不利。现行规范对高度超过 15 m 的土质边坡设计未作出明确规定,因此,该类贴坡高填方的支挡结构设计是一个亟待解决的问题。

(2) 由于该高填方边坡的坡顶存在重要的革命遗址,对变形有严格要求,因此挖填交界面与填筑土体均需进行特殊处理,严格控制工后变形沉降与裂缝。此外,黄土的湿陷性对水分较为敏感,还应进行减小降雨冲刷及入渗的防治措施。

2 综合治理方案

2.1 稳定性分析

2.1.1 稳定性计算方法及参数确定

由于目前尚无多级边坡的稳定性算法,且根据现场勘查,该不稳定边坡物质组成较单一,潜在滑面近似圆弧状,稳定性计算参考现行规范^[18]并采用圆弧型滑面的边坡稳定性计算公式,计算简图如图 4 所示。

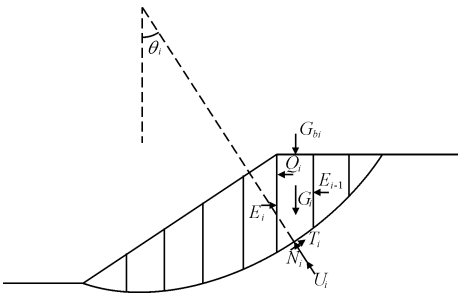


图 4 边坡稳定性计算简图

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\theta_i}} \left[c_i L_i \cos \theta_i + (G_i + G_{bi} - U_i \cos \theta_i) \tan \varphi_i \right]}{\sum_{i=1}^n \left[(G_i + G_{bi}) \sin \theta_i + Q_i \cos \theta_i \right]} \quad (1)$$

$$m_{\theta_i} = \cos \theta_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \theta_i}{F_s} \quad (2)$$

$$U_i = \frac{1}{2} \gamma_w (h_{wi} + h_{w,i-1}) L_i \quad (3)$$

式中： F_s 为边坡稳定性系数； c_i 为第 i 计算条块滑面黏聚力，kPa； φ_i 为第 i 计算条块滑面内摩擦角， $(^\circ)$ ； L_i 为第 i 计算条块滑面长度，m； θ_i 为第 i 计算条块滑面倾角， $(^\circ)$ ； U_i 为第 i 计算条块滑面单位宽度总水压力，kN/m； G_i 为第 i 计算条块单位宽度自重，kN/m； G_{bi} 为第 i 计算条块单位宽度竖向附加荷载，kN/m； Q_i 为第 i 计算条块单位宽度水平荷载，kN/m； h_{wi} 与 $h_{w,i-1}$ 为第 i 及第 $i-1$ 计算条块滑面前端水头高度，m； γ_w 为水重度，kN/m³； i 为计算条块号； n 为条块数量。

对原始斜坡进行稳定性分析，选取其主剖面进行计算，物理力学参数取值见表 1。

表 1 岩土体物理力学参数

黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)	天然重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率 /%	孔隙比
20.7	29.2	16.9	16.58	0.88

2.1.2 稳定性计算结果

对该斜坡稳定性进行初步评价，该斜坡高 20 m 左右，坡度 65°~85°，岩土体稍湿—干燥，坡体前缘临空面大，局部呈近直立状，坡面垂直节理、裂缝发育，坡体中部曾发生局部垮塌，坡顶有裂缝、落水洞等变形，表面土体结构较松散，表层岩土体较破碎，拉裂变形破坏明显，局部坡脚有少量溜滑堆积物。

该斜坡为高度大于 15 m 的土质边坡，边坡失稳可能造成人员伤亡或财产损失，破坏后果为严重，边坡工程安全等级为二级。通过理论计算可得，自重工况下其稳定安全系数为 1.035，为欠稳定状态。

2.2 联合支护方案

由于该斜坡较陡，且下部为一冲沟，斜坡顶部为重要历史保护建筑，因此，为了防止地表水进一步侵蚀斜坡表面，并恢复其顶部塌陷的道路以及广场地基，需要进行贴坡填方，并对其进行有效支护，从而提高其稳定性。

贴坡治理如图 5 所示，首先将原始坡面的堆积物挖除，然后设置 24 级阶梯状交界面，之后再行加筋土回填并分层夯实，坡面布设加筋麦克垫做边坡防护防冲刷。加筋土回填按设计坡率分八级坡，每级坡面布设 3 m、5 m 宽度间隔设置的卸荷平台，垂直间距 3 m 铺设高韧性聚酯纱线集束格栅。

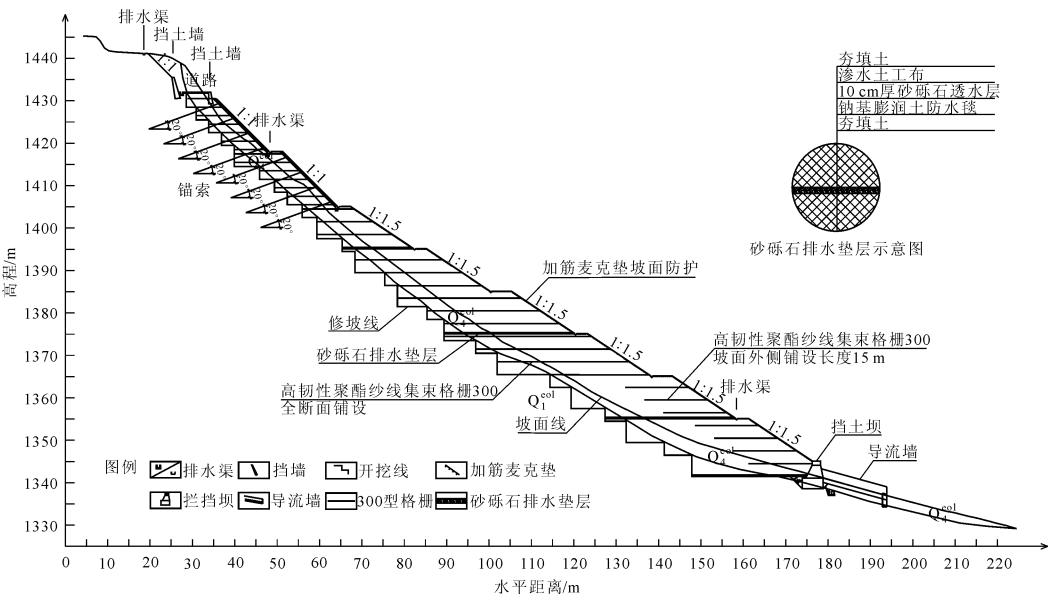


图 5 斜坡主剖面图

2.2.1 加筋土分层填筑

对 X1 斜坡所在冲沟进行加筋土回填治理,先对原始坡面、沟道按设计开挖成台阶状共计 24 级台阶,台阶高度 3 m、5 m,夯实基底。加筋土回填按设计坡率分八级坡,自下而上依次为第 1 至 8 级坡面,每级坡面布设卸荷平台,3 m、5 m 宽度间隔设置,垂直间距 3 m 铺设 300 型高韧性聚酯纱线集束格栅。第 1 至 6 级坡率 1.0:1.5,坡高均为 10 m;第 7 级、第 8 级坡坡高分别为 12.5 m、12.9 m,坡率 1:1,坡面布设锚索框架。每级平台设置截排水渠,坡面布设加筋麦克垫做边坡防护防冲刷。

2.2.2 挡土墙与挡土坝

填方贴坡的顶部挖填交界处,由于挖方恢复道路形成一高约 9 m 的路堑边坡,且填方顶部第 8 级坡作为路基形成一放坡为 1:1 的路堤边坡,为了保证道路稳定,在道路两侧均需要布设挡土墙。此外,在斜坡填方坡脚设置 4 m 高挡土坝。

2.2.3 框架锚索

在填方贴坡顶部的 7 级、8 级坡面分别施作锚索框架工程。每片框架横向宽度 9.98 m、垂向高度 13.2 m,坡面长度 19.6 m,由三根竖肋和五道横梁连接而成,横梁、竖肋截面尺寸均为 0.4 m×0.5 m,竖肋横向间距 3.5 m,横梁竖向间距 3.5 m。每片框架为 C25 现浇钢筋混凝土整体一次性浇筑,每两片框架之间设置 2 cm 宽、20 cm 深的聚乙烯闭孔泡沫板塞填伸缩缝。

每片框架布设 4 排预应力锚索,在框架梁节点处设置锚索,锚索由 3 根 Φ15.2 高强度低松弛预应力钢绞线制成,与水平面夹角 20°,锚索总长 18 m,锚固段长度为 10 m。

3 数值模拟

考虑到本次设计采用了多种支护结构形式,为控制支护施工阶段的位移,采用 MIDAS/GTS NX 对各个施工进行数值模拟并分析其位移情况。将该问题简化为 2D 平面应变问题,岩土体材料本构模型采用理想弹塑性模型,强度准则采用莫尔-库仑屈服准则;然后布置框架锚索、挡土墙与挡土坝等综合支护措施,截面属性见表 2。

框架锚索、挡土墙与挡土坝等支挡工程施工后的水平位移云图分别如图 6 和图 7 所示。由数值模拟得出综合治理后边坡的安全系数为 1.72,满足规范要求的二级边坡的稳定安全系数不小于 1.3,判定治理后边坡处于稳定状态。

表 2 截面属性			
弹性材料	弹性模量 /MPa	容重 /(kN·m ⁻³)	泊松比
C30	30000	23.50	0.20
锚杆	210000	76.98	0.26
框架格构	30000	17.00	0.32

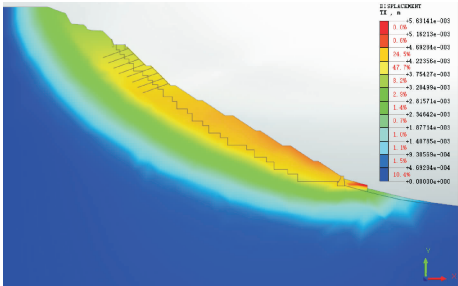


图 6 综合治理后水平位移云图

由图 6 可以看出,施工完成后坡体中下部有向外位移的趋势,水平位移最大值在边坡坡脚处挡土坝前方,这是由于挡土坝嵌固段对土体作用力很大,承担了较大的水平推力。第一至八级边坡坡脚水平位移方向指向坡外,前三级边坡位移值较大,边坡平台外侧位移可达 5.6 mm。分析其原因为坡体回填土压力过大所致。

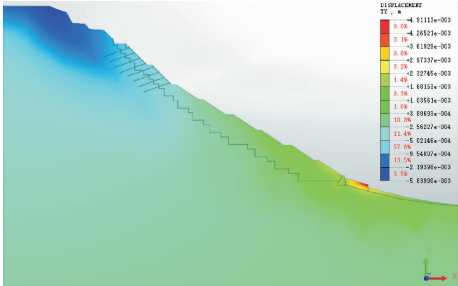


图 7 综合治理后竖向位移云图

斜坡在综合治理后的竖向位移如图 7 所示,其中下部竖向位移向上,最大竖向正位移出现在边坡坡脚处挡土坝前方,可达 4.9 mm,是由于坡体上部岩土体的推力使得坡脚处土体隆起。由位移云图 7 可知,治理范围内的竖向沉降值小于 1 mm,表明框架锚索与挡土墙支护效果好;最大沉降位置出现在斜坡治理支护范围以上的边坡外侧,其值为 5.8 mm。综合治理后土体位移从表层向深处逐渐减小,未出现明显滑裂面,学者普遍认为的挖填交界面这一软弱带未见明显滑动面,说明将坡体破碎堆积层挖除后设置阶梯状交界面是可行的。

4 结 论

(1) 根据原始边坡的受力特性,综合试验结果及经验值分析,选取合适的岩土参数,通过理论计算得出自重工况下稳定性系数为 1.035,处于欠稳定状态,此斜坡亟需进行治理。

(2) 由于该斜坡为一冲沟,斜坡顶部为重要历史保护建筑,因此,为了防止地表水进一步侵蚀斜坡表面,并恢复其顶部塌陷的道路以及广场地基,需要进行贴坡填方,并对其进行有效支护,从而提高其稳定性。

(3) 贴坡综合治理时,首先将原始坡面的堆积物挖除,然后设置 24 级阶梯状交界面,之后再继续进行加筋土回填并分层夯实,坡面布设加筋麦克垫做边坡防护防冲刷。加筋土回填按设计坡率分八级坡,每级坡面布设 3 m、5 m 宽度间隔设置的卸荷平台,垂直间距 3 m 铺设高韧性聚酯纱线集束格栅。

(4) 贴坡分级支护后斜坡位移得到有效控制,坡面水平侧移控制在 5.6 mm 以内,最大水平位移较加固前得到了很好的控制;最大沉降位置出现在斜坡后缘支护范围外侧,加固后控制在 5.8 mm 以内,边坡趋于稳定。

参考文献:

- [1] 李 萍,黄丽娟,李振江,等. 甘肃黄土高边坡可靠度研究[J]. 岩土力学,2013,34(3):811-817.
- [2] 祝 珣. 黄土特高边坡垮塌原因分析及综合整治措施[J]. 铁道工程学报,2018,35(6):31-35.
- [3] 王志斌,李 亮,杨小礼,等. 水平条分法在贴坡高填方路堤稳定性分析中的应用[J]. 中国公路学报,2007(3):29-34.
- [4] 马 闫,王家鼎,彭淑君,等. 黄土贴坡高填方变形破坏机制研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(3):518-528.
- [5] 杨校辉,朱彦鹏,周 勇,等. 山区机场高填方边坡滑移过程时空监测与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3977-3990.

- [6] 胡长明,梅 源,刘增荣,等. 湿陷性黄土高贴坡变形模式和稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(12):2585-2592.
- [7] 杨玉生,李 靖,邢义川,等. 压实黄土增湿变形性质及其影响因素试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(4):626-635.
- [8] 聂 超,韩文喜,宋柏冰. 西南某机场高填方边坡于不同降雨条件下的变形影响[J]. 科学技术与工程,2018,18(3):174-183.
- [9] 李麒麟,丁保艳,王 鹏. 兰州地区某黄土高填方边坡的稳定性分析与联合支护设计[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(6):165-171.
- [10] 胡长明,梅 源,王雪艳. 吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性[J]. 工程力学,2013,30(10):108-114.
- [11] 侯俊伟,唐秋元,李杨秋,等. 西南某山区机场高填方边坡稳定性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(3):82-88.
- [12] 刘远程,刘 涛,杨 杰. 深厚软土地区高填方路基边坡稳定分析[J]. 公路,2019,64(1):73-78.
- [13] 谢春庆,潘 凯,廖崇高,等. 西南某机场高填方边坡滑塌机制分析与处理措施研究[J]. 工程地质学报,2017,25(4):1083-1093.
- [14] 唐培连,车文侠,刘艳东,等. 土体加筋技术在站场高填方边坡工程中的应用[J]. 油气储运,2017,36(5):585-589.
- [15] 冯 波,郑 中,白 琳,等. 西南山区某电厂高填方边坡加固措施研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2020,53(S1):313-318.
- [16] 朱彦鹏,魏真红,杨校辉,等. 预应力锚索桩板墙支护多级高填方边坡监测研究与分析[J]. 中国农村水利水电,2020(7):202-207.
- [17] 吴红刚,牌立芳,赖天文,等. 山区机场高填方边坡桩-锚-加筋土组合结构协同工作性能优化研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(7):1498-1511.
- [18] 建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.