

柔性支挡防护在公路滑坡治理中的应用

陈金华

(中交第一航务工程局有限公司总承包工程分公司)

摘要: 为了治理昭通西环高速公路膨胀土高边坡因降雨及原有排水缺陷引发的滑塌问题,采用柔性支挡防护技术,通过土工格栅反包、分层加筋与综合排水系统相结合的工艺进行处治。施工中创新性地采用“立体排水、协同加筋、动态控制”于一体的柔性支挡综合处治方法,构建“防排结合”的立体排水体系,有效抑制膨胀土遇水软化的问题。监测结果表明:边坡累计水平位移最大值为 24.6 mm,累计竖向位移最大值为 18.3 mm,边坡水平与竖向位移均控制在允许范围内,坡体稳定性显著提升。该方案相较于传统方案大幅节约成本,并实现了边坡的快速绿化,成功解决了复杂地质条件下滑坡治理难题,为同类公路工程提供了经济高效、生态友好的技术参考。

关键词: 柔性支挡;膨胀土滑坡;立体防排;协同加筋

0 引言

公路膨胀土边坡的治理一直是岩土工程领域的难点,其失稳多源于土体吸水膨胀软化与工程扰动的共同作用^[1]。传统刚性支挡结构(如抗滑桩、重力式挡墙)虽应用广泛,但常面临施工周期长、对地形扰动大、经济性不佳以及对膨胀土胀缩变形适应性不足等问题^[2]。柔性支挡防护技术利用高强土工合成材料与填土的相互作用形成复合结构,具有良好的变形协调能力和较强的抗拉性能,为处理此类问题提供了新思路^[3]。然而,在膨胀土地区,单纯的加筋体往往不足以应对因水分变化引起的土体强度衰减,如何将柔性加筋与高效排水、有效防渗有机结合,形成系统性的解决方案,是工程应用成败的关键。

本文依托昭通西环高速公路一处典型的膨胀土高边坡滑塌治理工程,重点阐述柔性支挡防护技术为解决本工程特定地质隐患所进行的应用创新,包括为抑制膨胀土效应而设计的“防-排-阻”一体化排水防渗系统,以及相应的施工工艺优化与全过程稳定性控制方法。通过监测数据与技术经济对比,系统论证该技术在解决实际工程问题、提升治理效率与综合效益方面的突出优势。

1 工程概况

昭通西环高速公路 K11+275—K11+570 段右侧挖方边坡原设计采用“重力式挡墙+拱形骨架护坡”防护。施工期间,二至五级边坡在雨季发生大范围浅层滑塌。地质勘查揭示,坡体主要由含砾黏土与自由膨胀率达 57.69% 的中等膨胀性土构

成。深入分析认为,滑塌的内因是膨胀土遇水后强度急剧衰减,外因则是开挖形成临空面、连续降雨入渗及原有排水系统缺陷导致的坡体浸泡。因此,治理思路必须从单纯的“支挡”转向“支挡固本、排水疏源、防渗截流”的多目标协同。

经论证,决定对此段山体二至五级边坡(含已滑塌及潜在风险区域)统一变更采用“柔性支挡+喷播植草”的综合防护体系(设计参数见表 1)。本文所述应用的核心在于:不仅将柔性支挡作为受力结构,更将其作为一个整合了支挡、排水、防渗与生态恢复功能的系统工程进行设计与实施。柔性支挡结构在此被赋予三重功能:1) 通过加筋体提供稳定抗力;2) 通过其背部排水层和基底渗沟构建内部排水通道;3) 通过坡面防渗层隔离外部水源,从而从根本上抑制膨胀土的软化效应。

表 1 边坡防护设计参数

起讫桩号	边坡等级	坡率	防护形式
K11+275—K11+570	第二级	1:1.5	柔性支挡+喷播植草
K11+280—K11+565	第三级	1:1.5	柔性支挡+喷播植草
K11+300—K11+520	第四级	1:1.5	柔性支挡+喷播植草
K11+315—K11+465	第五级	1:1.5	柔性支挡+喷播植草

2 关键施工技术与创新应用

本工程的应用创新主要体现在以下 3 个关键环节的集成与优化。

2.1 “立体防排”系统的创新构建

为根治水害,设计了由内至外的三层防护体系,如图 1 所示。

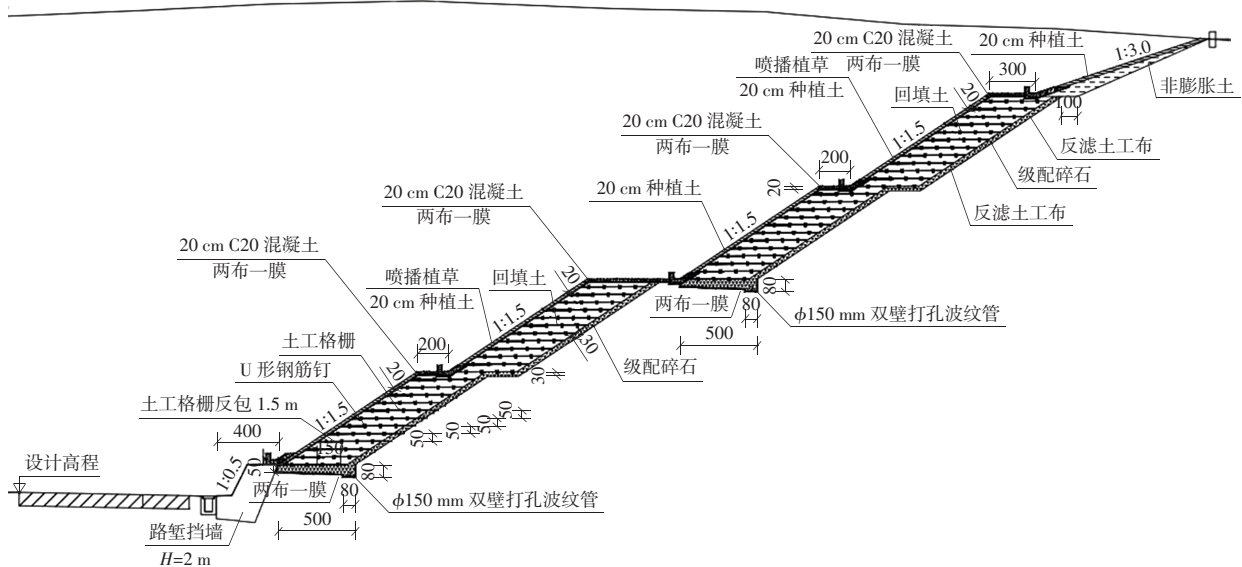


图 1 柔性支挡横断面图(mm)

1) 内部疏导层(基底排水渗沟): 在加筋体底部设置外高内低(坡度 4%)的纵向排水渗沟, 内置 φ150 mm 软式透水管, 快速汇集并引排从坡体内部渗出的地下水。

2) 中间过渡层(背部连续排水层): 在加筋体与原始坡面之间, 设置厚度不小于 0.3 m 的级配碎石排水层, 与基底渗沟全程贯通, 形成垂直连续的排水路径, 确保任何位置的渗水都能被及时导出, 避免在加筋体背部形成静水压力。

3) 外部阻隔层(全封闭防渗系统): 在加筋体

顶部及坡面铺设防水土工布, 并将其延伸包裹所有截水沟、排水沟砌体, 接缝处采用专用密封胶处理, 实现坡顶地表水、坡面雨水的完全隔离, 从源头减少入渗。

2.2 基于实时监测的动态施工与风险管控

为确保施工过程安全可控, 并验证治理效果, 本项目建立了覆盖地表与深层的立体化实时监测体系, 具体监测方案见表 2。该体系的核心在于将监测数据深度融入施工决策流程, 实现动态化、信息化的风险管控。

表 2 稳定性监测方案

监测内容		监测设备	监测目的
地表监测	水平位移监测	全站仪、光电测距仪	掌握地表水平向位移量及其演变趋势
	垂直位移监测	水准仪	获取地表垂直向沉降或抬升数据
	裂缝监测	标桩、直尺、裂缝计	监测裂缝宽度、长度等参数的变化过程
地下位移监测		测斜仪	探测地下岩土体相对于稳定地层的位移; 识别与确认正在活动的变形构造; 判定潜在滑动面位置与主滑方向; 对边坡或滑坡体的稳定性进行定量评估; 评价滑坡治理工程的加固效果

1) 监测系统的建立与运行: 施工前在边坡关键位置布设监测网络。地表监测采用全站仪与水准仪对坡面水平及竖向位移进行高频率追踪; 为精准捕捉潜在滑动面的活动, 在各级边坡平台埋设了安装有 4 个测斜探头(分别位于孔底 0.5 m、3.0 m、5.5 m、8.0 m 处)的测斜管^[2], 通过自动化设备实时获取深层土体水平位移数据。所有数据均实现实时采集与传输, 从而为施工决策提供即时依据。

2) 数据驱动的施工与风险预警: 施工全过程

严格遵循“监测先行, 数据决策”的原则。开挖前, 需基于不少于 7 d 的连续监测数据确认坡体初始稳定状态。施工中, 设定 2 mm/d 的位移速率作为预警阈值, 并建立快速响应机制: 一旦监测数据突变或超限, 立即暂停施工, 分析原因并调整方案, 如加强临时排水、调整加载速率等。

3 柔性支挡施工工艺

3.1 工艺流程

柔性支挡施工工艺流程为: 施工准备→稳定性检测→修建便道→坡面开挖清方→基底排水渗

沟→修筑柔性支挡加筋体及背部排水层→防渗层及坡面排水系统施工→回填种植土及喷播植草→现场清理。

3.2 施工准备

组织图纸会审,熟悉边坡设计参数与结构要求。现场勘察,完成测量放线、临时排水及运输方案规划工作,并对回填料、土工格栅、锚钉、反滤层级配碎石及土工布进行取样送检,确保材料合格。

3.3 稳定性检测

在完成施工准备后、正式开挖前,必须对既有边坡的稳定性进行系统评估:首先,利用监测网络进行连续不少于7d的初始位移监测,获取天然状态背景值,若位移超限则暂停施工并优化方案;其次,清方前由地勘及设计人员对暴露坡面进行地质编录,复核地层岩性及结构面,发现不利地质条件时立即调整支护参数;最后,利用地质雷达等物探手段扫描坡体深部,探测空洞、裂缝或富水区,据此确定开挖与支护的重点防范区域。

3.4 修建便道

从支挡端部沿路基坡脚填筑至各级平台位置,结合挖方平台宽度形成上下多条纵向贯通便道,分别位于各级边坡坡脚平台处。便道宽度不小于6m,顶面回填2m厚石渣,填料优先选用就近路基挖方料。

3.5 坡面开挖清方

根据柔性支挡结构的设计轮廓线自上而下分级开挖。针对已发生浅层滑塌的区域,采取针对性措施:首先,彻底清除滑塌体及所有已松动、开裂的土石方,直至露出相对稳定的天然坡面;然后,对清方后暴露的坡面进行详细的地质编录,若发现裂缝或潜在软弱面,需进行挖除或夯填处理;最后,严格按照设计坡比进行修整,确保坡面平整、稳定,为后续加筋体施工提供坚实、规则的基础。开挖面预留0.3m厚保护层,采用人工配合机械修整至设计坡面。对坡面松散土体、孤石及危岩进行彻底清理,确保坡面平整、稳定。上下作业面同时开挖时,上一级边坡开挖安全距离不小于10m后,方可进行下一级开挖。开挖过程中,实时进行坡面平整度检测,允许偏差 ± 50 mm,同时做好坡面临时排水,在坡顶设置截水沟,坡面每隔20m设置1道临时急流槽,将雨水引排至

坡脚排水沟。满足回填重复利用的挖方宜放置附近,但距柔性支挡结构坡脚不得小于2m;无法重复利用部分运至弃渣场存放。

3.6 基底排水渗沟

边坡修整至设计坡率后,在支挡底面设置纵向排水通道,采用防渗土工布包裹级配碎石并埋设打孔波纹管,与坡面排水系统联通,引至路基边沟或急流槽内排出,以形成立体排水网络,从根本上降低地下水及坡面渗水对膨胀土边坡稳定性的不利影响。施工工艺为:首先,在坡脚处开挖排水渗沟,沟底设计为外高内低、横坡坡度为4%的斜向通道,靠坡内侧深度为0.7m,靠坡外侧深度为0.5m,以引导坡体内积水向外侧汇集排出;渗沟开挖成型后,在其周围铺设一层防渗土工布,防止外部水体渗入沟内,同时在沟底靠近坡内一侧埋设 $\phi 20$ cm软式透水管,并确保管道纵坡坡率不小于1%,以满足排水要求;透水管埋设完毕后,采用碎石均匀回填覆盖,碎石顶面与挡墙齐平,人工夯实至压实度不低于85%,随后在碎石顶部铺设1层透水土工布,作为反滤层隔离细颗粒土,并铺设第1层土工格栅开始反包加筋施工,格栅端部采用U形钉固定于碎石层中,确保加筋体与排水层协同受力;在透水管出水口位置,对格栅进行局部裁剪以便管道伸出坡面,待边坡整体修筑完成后,于出水口处设置浆砌片石八字形护墙,如图2所示,墙顶设置帽石,防止土石、枝叶等杂物堵塞排水出口,确保排水系统长期通畅。

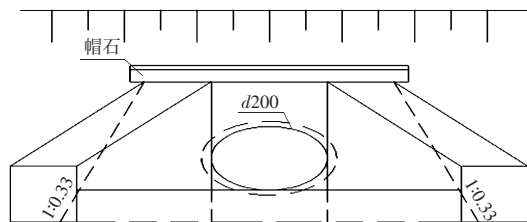


图2 排水管出口八字墙结构示意图

3.7 柔性支挡加筋体及背部排水层

柔性支护加筋体是采用土工格栅反包土填料、并分层摊铺碾压成型的,背部排水功能层的填料与加筋体填料同步摊铺和碾压。

1) 土工格栅的下料:采用三向土工格栅,极限抗拉强度大于50kN/m,下料长度为加筋长度、反包长度和重叠长度三者之和,重叠长度不小于1.5m,如图3所示。

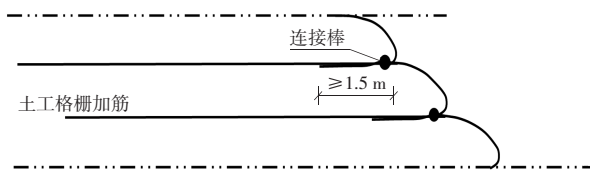


图3 土工格栅反包示意图(m)

2) 土工格栅的摊铺: 首先进行放样, 标示出格栅铺设的端部位置及背部排水功能层所在范围; 摊铺时保持土工格栅受力方向与路基横断面方向一致; 将摊铺的土工格栅张紧, 并用 U 形钉锚固在下承层的压实土体顶面, 锚钉纵横向间距 1.0 m, 土工格栅纵向搭接宽度应不少于 0.3 m。

3) 回填料摊铺与压实: 加筋体高度取 6 m, 坡率 1:1.5, 回填采用低液限黏土分层摊铺碾压, 每层松铺厚度不大于 50 cm, 2 层压实厚度不超过 50 cm, 压实度不低于 90%, 并保持外高内低的横坡, 坡率宜不小于 4%。严禁机械直接碾压土工格栅, 应采用小型推土机从一侧推填, 坡面外侧 1.0 m 范围内人工夯实。

4) 格栅反包与锚固: 填料压实后应随即将格栅反包, 并用 PE 绳将反包格栅与上层格栅连接, 张紧后用 U 形钉将其锚固于压实成形的填料顶面。铺设后应及时覆盖, 避免材料老化。

5) 背部排水层: 确保与基底排水渗沟上下贯通、通畅, 并采用级配碎石进行铺设, 粒径控制在 5~20 mm, 含泥量不大于 5%。其铺设范围为整个加筋体背部, 宽度不小于 0.3 m, 与加筋体同步分层施工, 每层回填厚度与加筋体压实厚度相同, 即不超过 0.25 m。摊铺时应均匀平整, 确保排水层连续、无间断, 并与基底排水渗沟中的透水管紧密连接, 形成完整的排水网络, 及时排走加筋体后部的渗水, 避免积水软化土体, 影响支挡结构的稳定性。

3.8 防渗层及坡面排水系统施工

从加筋体顶面开始摊铺防水土工布, 沿坡面自上而下铺设, 幅宽搭接宽度不小于 0.3 m; 坡顶截水沟与平台排水沟的施工前同样应铺设防水土工布, 将排水沟砌体外周包裹, 且与坡面土工布连为一体, 向上下方向各延伸 0.3 m; 所有防水土工布搭接处均采用专用密封胶密封, 以防止雨水下渗。平台与排水沟间用 C20 混凝土封闭保护, 厚度 20 cm。截水沟及排水沟采用 C25 混凝土现浇, 沟底纵坡不小于 0.5%。坡面每隔 50 m 设置 1

道急流槽, 急流槽采用 C25 混凝土现浇, 断面尺寸为 300 mm×300 mm, 底部设置消能坎, 与平台排水沟及坡脚纵向边沟顺接, 形成完整的排水体系, 有效排除坡面及平台积水, 避免雨水对边坡的浸泡和冲刷。

3.9 回填种植土及喷播植草

防渗层完成后及时回填 0.2 m 厚的耕植土层, 采用人工或机具修平拍实, 避免土工材料老化。完成上述工序后, 进行喷播植草施工, 选择适宜当地生长的植物种类, 采用客土喷播等技术进行坡面绿化, 喷播厚度 50~70 mm。喷播时, 采用液压喷播机均匀喷洒于坡面, 喷播后覆盖无纺布保湿, 待草籽发芽、幼苗生长稳定后拆除无纺布, 适时进行浇水养护, 确保植被成活率不低于 90%。

4 监测成果与稳定性分析

为验证治理效果, 在 K11+400 断面典型位置布设监测点, 对施工及工后期间的边坡变形进行持续跟踪。主要监测成果如下:

1) 地表水平位移: 自施工开始至竣工后 6 个月, 边坡坡面累计水平位移最大值为 24.6 mm, 位于第三级边坡中部。位移主要发生在施工前期和降雨期间, 最大单日位移量为 1.8 mm, 未超过 2 mm/d 的预警阈值。竣工后 3 个月, 位移趋于稳定, 月平均位移量小于 1 mm。

2) 地表竖向位移: 同期监测数据显示, 坡面累计竖向位移最大值为 18.3 mm(沉降), 同样位于第三级边坡。沉降主要发生在加筋体填筑过程中, 竣工后回弹和再压缩量均较小, 表明加筋体压实质量良好, 整体处于弹性工作状态。

3) 深层水平位移: 测斜管监测数据表明, 地下不同深度处的水平位移量均较小, 最大累计位移发生在孔深 5.5 m 处, 约为 12.5 mm, 且没有发现明显的位移突变点, 证明坡体内部无潜在的滑动面正在活动, 加筋体与背后土体协同工作性能良好。

以上监测数据表明, 边坡水平与竖向位移均控制在允许范围内(设计允许值: 水平位移≤50 mm, 竖向位移≤30 mm), 坡体稳定性显著提升, 验证了柔性支挡防护及立体防排系统的有效性。

5 应用效果

5.1 经济效益

通过对比柔性支挡、锚杆框格梁及喷锚网护坡 3 种方案, 结果如表 3 所示。

表3 3种方案技术经济对比

处置方案	防护面积/m ²	工期/d	造价指标/(元·m ⁻²)
柔性支挡	12 174	40	180
锚杆框格梁	12 174	90	340
喷锚网护坡	12 174	60	295

从工期与成本效益的角度综合比较，柔性支挡方案相较于另外2种支护方式具有明显优势。该方案可有效规避雨季施工安全隐患，降低边坡二次失稳的可能，从而减少安全管理的复杂性和次生灾害处置费用。同时，施工周期的缩短也直接降低了机械设备租赁、现场管理及人力等方面的投入。此外，该方案对周边环境影响较小，土方开挖与弃渣量显著减少，相应减少了土方外运和弃渣场地处理等环节的费用，进一步提升了项目的整体经济性。这一兼具低成本和施工高效特点的治理方式，在公路滑坡防治工程中具备较高的推广价值。

5.2 社会效益

柔性支挡防护技术在昭通高速膨胀土边坡治理中的应用，消除了施工与运营期间的安全隐患，保障了过往车辆与沿线群众的生命财产安全。该技术对周边地形扰动小，减少了土方开挖与弃渣量，降低了生态破坏，结合喷播植草有效恢复了边坡植被，提升了生态景观质量，符合绿色发展理念。该技术在工程上成功应用，保障了昭通西环高速的如期通车，完善了区域路网，促进了沿线经济社会发展。同时，为类似地质条件下的边坡治理提供了宝贵经验，推动了柔性支挡技

术的推广应用，对提升公路建设安全水平与技术进步具有积极意义。

6 结语

柔性支挡防护技术通过土工格栅与回填土的复合作用，有效提升了边坡整体稳定性，成功抵御了膨胀土等不良地质条件引发的滑坡风险。该技术弥补了传统刚性结构在适应性、环境友好性、工期与成本方面的不足，减少了对原始地貌的破坏，并为生态恢复创造了条件。施工工艺简便、工期短、造价低，为类似公路滑坡治理工程提供了经济可行且环境友好的技术路径。

展望未来，随着土工合成材料性能的不断提升和绿色环保理念的深化，柔性支挡技术有望在以下方面取得进一步发展：1) 与智能化监测技术深度融合，利用物联网、大数据分析等手段，实现对边坡健康的实时感知与预警，构建智慧防灾体系；2) 探索利用工业废渣、建筑再生骨料等替代传统回填料，进一步提高材料的环保性和经济性；3) 优化设计理论与计算方法，针对不同地质条件形成更为精细化的设计指南和标准，推动该技术在更复杂、更高难度边坡治理工程中的推广应用。

参考文献：

- [1] 郑健龙. 公路膨胀土工程理论与技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 243-245.
- [2] 张锐, 凌时光, 郑健龙, 等. 膨胀土路堑边坡柔性加固方法及现场监测[J]. 中国公路学报, 2024, 37(6): 87-97.
- [3] 杨果林, 胡敏, 申权, 等. 膨胀土高边坡支挡结构设计方法与加固技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 301-304.