

高填方路基边坡稳定性分析与防护设计

董立颖

天津城建设计院有限公司 天津 300122

【摘要】：高填方路基属于山区公路常用的结构形式，边坡失稳坍塌属于造成路基运营安全的主要病害。为了解决高填方路基边坡沉降变形、滑坡溜塌等问题，以山区公路改扩建工程为例，对边坡稳定性的影响因素进行分析，对边坡稳定性进行定量计算，并对边坡防护方案进行优化设计。用极限平衡法进行不同工况下边坡稳定系数的计算，根据现场地质条件、填筑参数和水文环境来确定边坡失稳的主要原因，有针对性地提出分级防护、截排水系统、坡面加固相结合的综合防护方案。数值计算以及工程监测的结果显示，改进的防护措施可以大幅度提高边坡的整体稳定程度，有效控制边坡的变形量，达到公路路基设计规范的安全要求。研究成果可以给同类山区高填方路基边坡设计、施工和病害治理提供工程上的参考。

【关键词】：高填方路基；边坡稳定性；极限平衡法；失稳诱因；防护设计

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.033

引言

边坡稳定属于高填方路基工程设计及施工的关键控制指标。目前边坡稳定性研究大多只考虑单一的影响因素，防护设计存在方案单一、针对性不强的问题，部分工程出现防护结构与边坡工况不匹配、极端天气下防护失效的情况。因此，本文以实际的山区公路工程为基础，对高填方边坡稳定性的影响因素进行全方位的分析，利用定量计算来评价不同的工况下边坡的安全状况，结合工程实际情况来改进综合防护方案，用现场监测来检验方案的可行性和有效性，为山区高填方路基工程的安全建设提供技术支持。

1 工程概况

本次研究选取了某山区二级公路改扩建工程作为依托，路线全长为 12.6km，沿线地形起伏较大，山体沟壑密布，共有 5 段高填方路基，最高填筑高度为 32.8m，属于典型的山区高填方路基工程。项目区属亚热带季风气候，年均降水量 1280mm，雨季在 6-9 月，多短时强降雨。场地地层自上而下依次为素填土、粉质黏土、碎石土、强风化砂岩，地基土体整体承载力一般，表层填土结构松散，压实性差。

路基填筑使用沿线碎石土混合填料，设计路基宽度为 12m，原设计边坡为单一放坡防护，坡率为 1:1.5，坡面为植草防护，没有设置完善的截排水系统。施工过程中发现部分边坡有细微的纵向裂缝，雨季出现局部坡面冲刷、土体溜塌的现象，存在较大的安全隐患，需要做稳定性分析并进行防护设计。根据现场勘察数据，整理出路基边坡主要填筑和地质参数，见表 1。

表 1 场地土体物理力学参数

土层类型	天然重度 (kN/m ³)	饱和重度 (kN/m ³)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	压缩模量 (MPa)
素填土	18.2	19.5	12.5	16.8	4.2

粉质黏土	19.0	20.2	28.6	22.5	7.8
碎石土	20.1	21.3	22.3	28.6	12.5
强风化砂岩	21.5	22.6	35.8	32.4	25.6

(注：续表 1)

2 高填方边坡稳定性影响因素分析

根据工程现场病害特点和岩土工程理论，高填方路基边坡稳定性由土体性质、填筑施工、地形工况、水文环境这四个主要因素引起，各个因素之间互相影响，共同决定边坡的安全状况。

2.1 土体物理力学特性

填筑土体的黏聚力、内摩擦角和重度是决定边坡抗滑能力的主要参数。黏聚力和内摩擦角越大，土体的抗剪强度就越高，边坡的抗滑稳定性就越强。本工程表层素填土结构松散，黏聚力和内摩擦角数值小，土体抗剪性能差，是边坡浅层失稳的主要内因。同时土体压缩模量偏小，填筑后容易产生不均匀沉降，引起边坡裂缝，逐渐扩大形成贯通滑面。

2.2 施工填筑质量

高填方路基填筑厚度大，分层压实质量好坏直接关系到边坡的整体稳定。施工过程中如果分层填筑厚度超过规定、压实度不够，就会造成填筑土体孔隙率偏大，土体整体性差。后期由于自重应力的作用，土体不断固结沉降，边坡产生不均匀变形。另外路基填料级配不合理、新旧路基结合面处理不到位，都会造成结构薄弱面，成为边坡滑移的通道。

2.3 地形与填筑工况

边坡填筑高度、坡率、原地形属于稳定性的重要影响因素。填筑高度越高，土体自重应力越大，边坡下滑力也就越大。边坡坡率越陡，边坡整体稳定性越差，失稳风险就越大。本工程部分路段原始地面坡度较陡，填筑前基底清理、台阶开挖不到位，填筑土体与原地面结合强度不够，容易沿着岩土结合面发

生整体滑移。

3 边坡稳定性定量计算与结果分析

3.1 计算方法与工况设定

本次稳定性计算采用岩土工程中常用的 Bishop 极限平衡法,该方法适合于均质和多层填土边坡稳定性计算,可以准确地分析出圆弧滑动面边坡的稳定状态。稳定系数的计算公式是根据极限平衡原理来计算的,用边坡抗滑力矩和滑动力矩之比来判断边坡是否稳定。

根据工程实际情况确定两种计算工况,即天然干燥工况和暴雨饱和工况,分别代表路基运营常态和极端天气状态。按照公路路基设计规范,高填方路基边坡稳定系数的安全允许值,在天然工况下不小于 1.20,在暴雨饱和工况下不小于 1.10。

3.2 计算断面选取

选取项目区内最大填筑高度 32.8m 的典型断面进行计算,该断面边坡坡率 1: 1.5,分层填筑,基底为强风化砂岩,表层为碎石土填筑体,土体参数采用现场试验实测数据,计算模型符合实际工程状态。

3.3 计算结果与稳定性评价

经过数值计算得到典型断面不同工况下边坡稳定系数,统计边坡最大位移量,计算结果见表 2。

表 2 边坡稳定性计算结果

计算工况	稳定系数	最大位移量 (mm)	规范允许值	稳定性评价
天然干燥 工况	1.23	8.6	≥ 1.20	基本稳定
暴雨饱和 工况	1.05	22.3	≥ 1.10	不稳定,不满足规范要求

由计算结果可知,在天然工况下边坡稳定系数略大于规范限值,边坡整体基本稳定,但是安全储备较小。暴雨饱和工况下,由于雨水入渗的影响,土体抗剪强度急剧下降,边坡稳定系数小于规范允许值,最大位移量明显增大,边坡有滑坡失稳的风险,与现场雨季出现坡面溜塌、裂缝扩展的病害现象一致。因此必须对高填方边坡做专项防护优化设计,提高边坡整体稳定性和抗灾能力。

4 边坡综合防护优化设计

根据稳定性计算结果和现场病害特征,按照分级防护、因地制宜、综合治理的原则,摒弃原来的单一植草防护方案,建立坡脚加固、坡面防护、顶底截排水、坡面生态修复为一体的综合防护体系,满足结构安全和生态环保的要求。

4.1 边坡分级放坡优化

根据原边坡坡率单一、高段边坡稳定性差的特点,进行分级放坡设计。将 32.8m 高填方边坡分三段填筑防护,第一段高

10m,坡度为 1: 1.2,第二、三段高均为 11.4m,坡度为 1: 1.5。各级边坡之间设 2m 宽平台,平台向内 2%排水横坡,防止平台积水入渗边坡土体,从地形结构上降低边坡下滑力,提高整体稳定性。

4.2 坡脚加固防护设计

坡脚是边坡受力的核心区域,也是失稳破坏的起始位置。本次设计在边坡坡脚处设置重力式挡土墙,墙体用 C25 混凝土浇筑,墙高 3m,基础嵌入强风化砂岩地层不小于 1.5m,提高基础锚固性能。挡土墙顶部设泄水孔,间距 2m,泄水孔后面设反滤层,防止土体流失,及时排除墙后积水,减小墙后土压力,提高坡脚抗滑支撑能力。

4.3 坡面主体防护设计

根据边坡高度大、雨季冲刷严重的特点,各级边坡坡面用锚杆框架梁加固和喷混植生防护相结合的方式进行处理。框架梁为 C30 混凝土现浇,网格尺寸为 3m×3m,框架节点设全长粘结型锚杆,锚杆长 6m,锚固入稳定土层,有效锁定边坡土体,抑制边坡变形开裂。框架内用喷混植生工艺,铺上种植土后种下乡土草本、灌木种子,达到坡面生态覆盖的目的,防止雨水坡面冲刷,改善边坡生态环境。

4.4 截排水系统设计

水文因素是边坡失稳的主要原因,完善的排水系统是提高边坡稳定性的主要方法。在边坡坡顶设截水沟,拦截山体地表水,防止雨水直接冲刷坡顶、入渗边坡。各级边坡平台设横向排水沟,坡面框架梁留有排水孔,坡脚挡土墙底板设纵向排水沟,构成顶截、坡排、底疏的完整排水系统。

5 防护方案效果验证

5.1 验证方案与评价标准

为了对本次分级综合防护体系的应用效果进行全方位的检验,根据路基边坡设计规范以及工程运营的要求,采用数值复算和现场动态监测相结合的方式验证。通过对防护施工前后边坡稳定系数、土体变形指标变化情况进行对比分析,来评价防护结构加固的效果。同时依靠现场长时间监测数据来检验边坡在自然降雨、自重固结等常规工况下整体运行状况,判定防护方案是否实用、耐久。

本次验证采用前文的两个主要工况,即天然干燥工况和暴雨饱和工况,评价标准严格按照公路路基设计规范进行。天然工况下边坡稳定系数不小于 1.20,暴雨饱和工况下稳定系数不小于 1.10,边坡竖向和横向位移量均应在工程允许范围内,无开裂、溜塌、沉降超限等问题。

5.2 数值计算结果对比分析

在完成防护方案的设计之后,对同一个典型的高填方断面进行稳定性复算,保留原有的土体力学参数、边界条件和工况

设置,保证前后计算数据具有可比性,优化后的边坡稳定性相关数据统计结果如下表所示。

防护结构实施之后,边坡整体受力体系得到改善,坡脚挡土墙较好地抵抗了土体侧向压力,锚杆框架梁较好地约束了坡面土体变形,完善的排水系统大大减少了雨水入渗造成的土体强度衰减问题。不同的工况下边坡稳定系数和位移控制效果都有明显提高,具体数据见表3。

表3 防护优化后边坡稳定性计算结果

计算工况	优化后稳定系数	优化后最大位移量(mm)	规范允许值	稳定性评价
天然干燥工况	1.48	3.2	≥ 1.20	稳定,安全储备充足
暴雨饱和工况	1.32	9.5	≥ 1.10	稳定,满足极端工况要求

由表可知,防护优化之后边坡稳定性能得到明显改善。在天然干燥工况下,边坡稳定系数由原来的 1.23 提高到现在的 1.48,安全储备大大提高,土体最大位移量由原来的 8.6mm 减少到现在的 3.2mm,边坡自身的固结变形的得到了有效的控制。

暴雨饱和工况下,边坡原有稳定系数达不到规范要求,优化后的稳定系数为 1.32,远大于极端工况的安全限值,最大位移量由原来的 22.3mm 降到 9.5mm,彻底解决了降雨引发的边坡大变形、失稳滑移隐患。

数据对比可知,单一生态防护模式只能起到表层坡面的防护作用,不能改善边坡整体受力结构和抗渗能力。本次所用的结构加固、排水优化、生态防护相结合的综合方案,从本质上改善了高填方边坡的力学性能,有效地克服了高填方土体固结性差、雨季强度衰减大的缺点。

6 结论

本文以山区高填方路基实体工程为依托,对边坡稳定性的影响因素进行系统的分析、定量计算以及防护优化设计,得到如下主要结论土体力学性能、施工填筑质量、地形工况、水文条件等都会对高填方边坡稳定性产生影响,降雨入渗导致的土体强度下降、渗流压力增大,是边坡雨季失稳的主要原因。用分级放坡、坡脚挡墙加固、锚杆框架梁坡面防护、完善截排水系统综合防护方案,可以提高边坡整体稳定性,大幅度减少边坡变形量,在极端降雨工况下仍然可以满足安全运营要求,防护效果明显。

参考文献:

- [1] 吴晓月.基于稳定性分析的公路黏土质填方边坡病害处治方案[J].交通世界,2026,(17):97-99.
- [2] 颜志盛.降雨条件下的高填方路基边坡稳定性研究[J].西部交通科技,2026,(4):81-84.
- [3] 赵沁来,宣寿通.基于强度折减法高填方路基边坡稳定性分析与优化设计[J/OL].科技通报,1-8[2026-08-02].
- [4] 韦雨,韦耀庭.强度折减法在山区高填方路基边坡稳定性分析中的应用[J].西部交通科技,2025,(11):37-39.
- [5] 袁阔.高速公路填方路基边坡光伏设施设计要点及对边坡稳定性影响分析[J].山西交通科技,2025,(5):51-54.