

Basic characteristics and slope stability analysis of high fill embankment

Wenjun Lin¹ Zhiming Wang²

1. Xiangtan County Transportation Bureau, Xiangtan, Hunan, 411200, China

2. CCCC Third Navigation Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

Abstract

To evaluate the safety of high-fill embankments under various conditions, a stability analysis was conducted on the slope section of a highway project. The study first examined the fundamental characteristics of the embankment and simulated its stability using FLAC3D software under four operational scenarios. Results indicated that under initial design conditions, the embankment maintained overall structural integrity meeting safety standards, effectively resisting loads from daily traffic and environmental factors. However, in this terrain, the slope platform provided limited stabilization benefits. When simulating rainwater infiltration leading to fill saturation, the embankment's stability significantly deteriorated with markedly increased slope sliding risks. To ensure long-term safety and reduce risks, three remediation measures are recommended: embankment reinforcement, optimization of drainage systems, and traffic management implementation. This research provides a robust basis for the maintenance and reinforcement of high-fill embankments.

Keywords

road engineering; high fill embankment; basic characteristics; stability analysis

高填方路堤的基本特征及边坡稳定性分析

林文俊¹ 王志明²

1. 湘潭县交通运输局, 中国·湖南 湘潭 411200

2. 中交第三航务工程局有限公司, 中国·上海 200000

摘要

为了评估高填方路堤在不同条件下的安全性, 针对某公路项目斜坡段的高填方路堤进行了稳定性分析。首先探讨了路堤的基本特征, 并运用FLAC3D软件模拟了其在四种工况下的稳定性。结果表明, 在初始设计状态下, 路堤整体结构稳固, 满足安全标准, 能够有效抵御日常交通和环境条件带来的负荷。但在该地形条件下, 边坡平台对稳定性提升的作用有限。在模拟雨水渗透导致填料饱和的情况下, 路堤的稳定性显著下降, 边坡滑移风险显著增加。为保障路堤的长期安全, 为降低风险, 建议从加固路堤、优化排水系统、实施交通管理三方面采取处治措施。研究为高填方路堤的维护和加固提供了有力的依据。

关键词

道路工程; 高填方路堤; 基本特征; 稳定性分析

1 引言

高填方路堤具有填筑高度大、沉降周期长、稳定性差等特点。这些特性使其在施工及后续的运营阶段极易发生边坡失稳、垮塌等一系列工程问题, 严重威胁到市政道路的整体安全性和耐久性^[1-5]。边坡失稳不仅会影响道路的结构完整性, 还可能对周边环境和人员安全造成隐患, 因此, 在公共交通道路建设的历程中, 保障高填方路堤的稳定性始终占据着核心地位^[6-8]。本文基于某城市公路工程项目中的高填方路堤案例, 系统研究了高填方路堤的稳定性问题。通过对

工程数据的分析和施工过程的跟踪, 识别出影响其稳定性的关键因素, 并针对发现的问题提出针对性的解决方案。该研究不仅为类似市政道路工程提供了实践指导, 也为高填方路堤的安全设计和后续管理提供了理论依据和技术支持。

2 工程概况

2.1 路况

项目某区段紧邻一条交通繁忙的低级别公路, 对道路的安全性和行车舒适性提出了更高要求。线路走向大致为南北方向, 所在区域地形复杂多变, 崎岖不平, 高低落差明显, 地形起伏较大, 且沿线分布着多个急弯和陡坡。山坡属于陡峭坡地, 坡面上存在大量冲沟, 这些冲沟在长期水流冲刷和自然侵蚀作用下逐渐加深、加宽地表植被覆盖较为广泛, 以

【作者简介】林文俊(1981-), 男, 中国湖南湘潭人, 本科, 工程师, 从事公路工程施工技术研究和管理工作。

杂草、乔木为主，其中包括一些耐旱性强、适应性高的灌木和树种。

2.2 工程地质

该路段地层分布为如表 1 所示。

表 1 地层分布情况

地层位置	地层类型	岩石特征描述	厚度范围	颜色	岩石类型	硬度 / 承载力类别
山体中部	华力西期花岗岩 (γ42)	全风化层质地松软，轻微触碰即破碎；强风化层：结构破碎，硬度略增但易碎	全风化层：2.0 ~ 5.0m 强风化层：3.0 ~ 8.0m	全风化层为红褐色；强风化层为浅红色	全风化层：Ⅲ类硬土 强风化层：Ⅳ类软岩	全风化层：Ⅲ类硬土 强风化层：Ⅳ类软岩
山体中部表层	第四系残坡积层 (Q4dl)	主要由中、粗粒花岗石构成，含水量较高	0.2 ~ 3.0m	灰褐色	Ⅲ类硬土	Ⅲ类硬土
河谷地表及过渡地带	第四系冲积层 (Q4al+dl)	含水量大，密度适中	不定	浅灰色	Ⅱ类土	$\sigma_0=120\text{kPa}$

该区域水系不丰富，地表径流较少，且地下水埋藏深度较深，普遍超过 5.0 米，基本不会对路堤施工过程产生直接影响。因此，施工中无需考虑地下水的排水处理问题，减少了相应的施工成本和工序复杂度。道路西侧紧邻河谷区域，相比之下水系较为丰富，但该河谷区域的大部分土地已被开垦为农田，水流流速较慢，未形成明显的水流侵蚀现象，对路堤施工同样未构成威胁或干扰。

2.3 路堤概况

该路段路堤的构筑过程主要依赖于削坡收脚技术和阶梯式布局，旨在通过优化边坡结构来增强自然边坡的稳定性。削坡收脚技术通过对坡脚部分的切削和调整，逐步降低边坡坡度，减少坡面受到的垂直荷载，使得填土的重量可以更均匀地分布到坡面上，降低边坡整体的滑移风险。

在施工过程中，采取了逐步收缩坡脚区域的策略，以便有效分散填土所带来的荷载压力。这一措施不仅减小了坡脚的应力集中，还为填土提供了稳固的基础。与此同时，在边坡表面布置阶梯，使得坡面结构分级，形成台阶状。阶梯式布局能够增加坡面的粗糙度和抗滑阻力，有助于防止土体滑移。同时，每一层台阶能够起到拦截和缓冲雨水径流的作用，减少水流直接对坡面的冲刷侵蚀，进一步提升边坡的整体稳定性。通过削坡收脚和阶梯式布置相结合，该路段路堤在施工过程中得到了有效的稳定性保障。

3 工程基本特征

该工程因排水系统的建设进度延迟，未能及时投入使用，导致路堤在随后降雨侵袭中遭遇严重的雨水渗透问题。大量雨水不断渗透到路堤填料内部，填料的含水量大幅上升，进而显著增加其容重，导致材料的抗剪强度逐渐减弱。由于填料密度和湿度的变化，填方的稳定性受到削弱，难以有效抵抗外部压力。

3.1 变形监测

该路段高填方路堤变形情况主要体现在边坡变形、坡面防护损坏、路堤沉降三个方面。在左侧区域，排水沟与坡脚部位出现明显开裂，裂缝周围伴有大量细小裂纹，显示出土体的不稳定性。部分位置的坡面防护设施受到破坏，混凝

土拱形骨架部分垮塌，无法继续提供支撑。与此同时，截水沟也受到了影响，部分区域产生了 1.0 ~ 1.5 厘米宽的裂缝。在路堤的局部区域，尤其是中间区域，出现了显著的沉降现象。中部沉降量最大，而两侧的沉降相对较小。这种不均匀沉降进一步加剧了边坡的变形风险。以上变形情况表明，该路段高填方路堤的边坡稳定性和结构完整性受到严重威胁，需要及时采取加固和修复措施。

3.2 工程质量分析

3.2.1 钻芯取样分析

通过取样分析，对路堤填料的力学性能、密实度及填层厚度等关键指标进行了全面检测。检测结果表明，填料的抗压强度和剪切强度均达到并符合相关规范及设计标准要求。且各层填料厚度一致性较好，无明显不均匀情况。但填料在填筑过程中含水量较高，接近饱和状态。

3.2.2 探地雷达分析

探地雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）能够穿透不同地质材料并反射回信号，通过分析这些反射波形，可以获得地下目标物体的深度、形状及位置等信息，该工程测点布置方式如图 1 所示，以确保覆盖整个路堤结构的关键区域。检测结果显示，检测过程中未发现内部存在空洞或其他显著的质量缺陷，检测结果与钻芯取样分析一致。雷达测点布置图详见图 1 所示

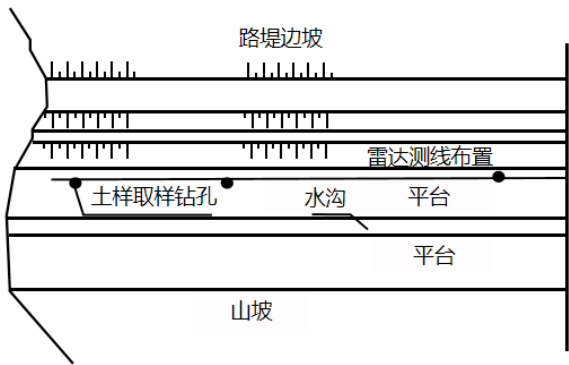


图 1 雷达测点布置图

4 工程稳定性分析

为了全面评估路堤在不同工况条件下的稳定性表现，本文利用 FLAC3D 软件构建了一个长度 100 米、高度 40 米

的数值模型。模型的尺寸和结构特征均根据实际路堤情况进行设置，以确保模拟结果的准确性和代表性。计算模型如图 2 所示。相关的材料参数如表 2 所示。

表 2 模型参数

地层及填料	天然重度 $\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和重度 $\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 μ	天然状态		饱和状态	
				黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\psi / (^\circ)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\psi / (^\circ)$
填土层	19.30	20.40	0.32	21.0	12	16.0	9.0
粉质土	20.40	21.10	0.34	14.0	20	11.0	16
细角砾	22.40	23.40	0.34	2.0	24	1.50	19
花岗岩（全风化）	19.40	21.80	0.31	23.0	21	17.0	17
花岗岩（强风化）	24.40	25.70	0.34	650.0	44	41.0	36
基床表填料层	19.50	20.30	0.34	30.0	9	23.0	7
基床底填料层	19.30	20.10	0.32	21.0	12	16.0	9
基床底层填料	19.50	20.30	0.34	30.0	9	23.0	7

在模型边界条件的设定中，顶部和临坡侧面均设置为自由边界，以模拟自然边坡的受力情况。靠山一侧的侧面施加侧向位移约束，防止模型在计算过程中产生非物理性侧移；模型底部则设置为竖向位移约束，以模拟实际地基条件下的稳定性。

全，满足长期使用的可靠性需求。进一步分析显示，临山侧增设的边坡平台对路堤的整体安全性影响不显著，说明在该地形条件下，边坡平台对稳定性提升的作用有限。然而，当路堤填料在饱和状态下，安全系数降至 0.87，低于规范所要求的最低安全标准，边坡的抗滑性能显著减弱。

5 应对策略

针对该高填方路堤的滑坡风险，从加固路堤、优化排水系统、实施交通管理三方面提出处治措施。

（1）对现有路堤进行加固处理，如增加支撑结构、提升填料的密实度或引入加强筋等，以增强其整体稳定性，确保其在长期使用过程中保持安全可靠^[9]。

（2）合理布局防排水设施，确保路堤顶部的雨水能够顺利通过临山侧的排水设施排出，减少雨水对路堤的冲刷和侵蚀^[10]。建议定期检查和维护排水设施，防止堵塞或损坏，以保证系统在高降雨条件下的排水效率。

（3）治理期间，限制车辆通行，以减轻施工期间的边坡负荷。待治理完成并经质量评估合格后，再逐步恢复通车。

6 结论

本文以实际工程为例，首先定性分析了该工程的实际状况，并运用 FLAC3D 软件，模拟计算了在始设计状态下设有边坡平台，饱和状态下设有边坡平台，初始设计状态下未设边坡平台，以及饱和状态下未设边坡平台四种工况条件下的稳定性表现，结论如下：

（1）通过实地勘查发现，路堤边坡发生了显著的结构变形，出现了坡面防护结构的损坏和局部区域的沉降，可能导致进一步的结构变形甚至滑移风险。

（2）为了评估填料的质量，采用了钻芯取样和探地雷达分析手段，检测了填料的力学性能、密实度和层厚度等关键指标，检测结果表明整体稳定性良好，内部无明显质量问题。

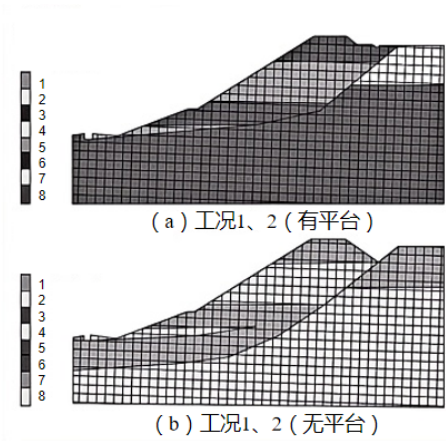


图 2 不同工况数值计算模型

为了评估不同条件下高填方路堤边坡的稳定性，根据工程实际情况，对以下四种工况进行了模拟分析：初始设计状态下设有边坡平台，饱和状态下设有边坡平台，初始设计状态下未设边坡平台，以及饱和状态下未设边坡平台。不同工况下堤边坡安全系数如表 3 所示。

表 3 安全系数计算

计算工况	安全系数
工况 01	1.25
工况 02	0.87
工况 03	1.24
工况 04	0.87

由表 3 可知，初始设计的路堤安全系数达到 1.15 以上，其整体稳固性较高，边坡结构在正常自然条件下能够保持安

(3) 利用 FLAC3D 软件在不同工况下对边坡进行了模拟分析,结果表明,路堤在初始设计条件下整体结构稳固,满足安全标准,然而,在模拟雨水渗透导致填料饱和的情况下,路堤的稳定性显著下降。

(4) 针对上述发现的问题,建议增加支撑结构、提升填料的密实度或引入加强筋等,并定期检查和维护排水设施,防止堵塞或损坏,减少交通荷载的影响,保障施工过程中的安全性,以增强路堤的整体稳定性。

参考文献

- [1] 宋晓.填方路堤滑坡病害分析与处治[J].福建建材,2023(5):66-68.
- [2] 王江荣,梁永平,任泰明,等.暴雨工况下的已加固黄土高填方路基边坡稳定性评价[J].水利规划与设计,2020(12):108-113.
- [3] 瞿竹,姬同旭,刘双塘.降雨入渗条件下斜坡高填方路基稳定性分析[J].路基工程,2020(1):81-84.
- [4] 黄亚飞,盖卫鹏,赵丽娟.山区土石混合高路堤快速填筑与沉降

抑制技术[C]//2022年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册).《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司,2022:4.

- [5] 谭恒程,邱林,谢红平,等.高填方路堤常见病害成因及防治方法分析[J].四川水泥,2021(4):331-332.
- [6] 纪伟杰,张西.公路高边坡稳定性分析与加固措施研究[J].城市道桥与防洪,2020(1):24-26+8-9.
- [7] 贺林林,周莉,梁越.库水位骤降与桩基作用对高填方岸坡稳定性影响研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):959-966.
- [8] 侯超.高填方路堤稳定性与沉降监测分析[J].山西交通科技,2023(4):24-26+95.
- [9] 杜英亮.软基高填方路堤稳定性影响因素分析及对策[J].四川水泥,2022(10):215-217.
- [10] 雷云,李闯.山区市政道路高填方路堤设计分析探讨[J].公路,2021,66(8):95-98.