

边坡工程地质条件分析及失稳机制研究

张宾 130522198904111418

摘要

边坡稳定性是岩土工程领域长期关注的核心问题，其失稳破坏不仅会阻碍工程建设进度，还可能引发严重的人员伤亡与财产损失。本文以西南山区某拟建公路边坡为研究对象，通过现场地质勘察、室内岩土试验结合理论分析，系统梳理了研究区边坡的工程地质条件，明确了地形地貌、地层岩性、地质构造与水文地质对边坡稳定性的控制作用，并在此基础上剖析了边坡的失稳机制。研究结果表明，该边坡属于顺层岩质边坡，受层面软弱夹层与降雨入渗的共同影响，潜在失稳模式为沿软弱夹层的顺层滑动，边坡安全储备不足，需要采取针对性的加固治理措施。本研究可为同类山区公路边坡的稳定性评价与灾害防控提供参考依据。

关键词：边坡工程；地质条件分析；失稳机制；顺层边坡；软弱夹层

一、引言

随着我国交通基础设施建设向山区不断延伸，大量工程开挖形成的人工高边坡层出不穷，边坡失稳滑坡已经成为山区工程建设中最为常见的地质灾害类型之一。据不完全统计，我国每年因边坡失稳引发的地质灾害造成的直接经济损失超过百亿元，伤亡人数数百人，因此开展边坡工程地质条件分析与失稳机制研究，对保障工程建设安全、降低地质灾害风险具有重要的现实意义。

近年来，国内外学者针对边坡工程地质条件评价与失稳机制开展了大量研究，在地质勘察方法、稳定性评价模型、失稳预测预警等方面取得了丰硕成果。但由于不同区域地质条件存在显著差异性，边坡失稳的控制因素与演化过程也各不相同，因此针对具体边坡开展针对性的工程地质分析依然是边坡稳定性研究的基础工作。本文以西南山区某拟建二级公路开挖边坡为研究对象，通过现场勘察与室内试验，系统分析其工程地质条件，并揭示其潜在失稳机制，为后续边坡治理设计提供地质依据。

二、研究区边坡工程地质条件分析

2.1 地形地貌

研究区边坡位于四川盆地南缘低山丘陵区，属于侵蚀剥蚀山地地貌，区域整

体地势呈现北高南低的特征，自然边坡坡度约 $25^{\circ}\sim 32^{\circ}$ ，坡体植被发育，以亚热带乔木与灌木为主。本次公路开挖形成的人工边坡走向约 115° ，倾向约 25° ，坡高约 38m，开挖后坡面坡度约 42° ，属于典型的高陡人工边坡。

2.2 地层岩性

根据现场钻孔勘察与探槽揭露，研究区边坡地层从上到下依次为第四系残坡积粉质黏土、侏罗系下沙溪庙组泥岩、砂质泥岩与砂岩互层，各地层工程地质特征如下：

- 第四系残坡积层（ Q_4^{el+dl} ）：主要分布于坡体表层，厚度约 1.2~3.5m，颜色为褐黄色，土体结构松散，含有少量砂岩碎石颗粒，孔隙度较大，透水性较好，抗剪强度较低，在降雨条件下容易发生浅层溜滑。
- 侏罗系下沙溪庙组（ J_2s ）：为坡体的主体基岩地层，整体呈现砂泥岩互层结构，其中上部以泥岩、砂质泥岩为主，厚度约 12~18m，泥岩质地较软，遇水容易软化膨胀，抗剪强度会显著降低；下部以中厚层状长石砂岩为主，厚度大于 25m，岩体完整性较好，强度较高。在砂泥岩接触面位置发育一层厚度约 0.3~0.8m 的泥化夹层，夹层物质为泥岩碎屑与黏土混合物，呈软塑状态，抗剪强度极低，是边坡稳定性的控制软弱结构面。

2.3 地质构造与岩体结构

研究区区域构造位于川南构造带北部，区域内断层活动不强烈，地震活动频率较低，研究区边坡范围内未发现大型断裂构造发育，仅发育层间节理与层面构造。边坡基岩岩层产状为 $28^{\circ}\angle 22^{\circ}$ ，与人工开挖边坡坡面倾向大致相同，属于典型的顺层边坡，坡面倾角大于岩层倾角，开挖后岩层层面在坡脚位置出露，形成临空面。

2.4 水文地质条件

研究区属于亚热带湿润季风气候，年平均降水量约 1200mm，降雨主要集中在 6~9 月，占全年降水量的 70%以上，降雨是边坡失稳的主要诱发因素。根据地下水赋存条件，研究区地下水可以分为两类：一类是赋存于残坡积层中的孔隙水，主要接受大气降雨补给，排泄方式为沿坡面渗流排泄，水位随季节变化显著，雨季水位较高，旱季水位较低；另一类是赋存于基岩节理裂隙中的裂隙水，主要接受孔隙水下渗补给，沿节理与层面裂隙运移，最终在坡脚软弱夹层位置出露。降雨入渗过程中，一方面会增加坡体的自重应力，另一方面会对软弱夹层产生软化作用，降低软弱夹层的抗剪强度，同时还会产生渗透压力，推动坡体向下滑动，

因此地下水对边坡稳定性的负面影响十分显著。

三、边坡失稳机制分析

3.1 边坡变形破坏边界条件

基于上述工程地质条件分析，该边坡为顺层岩质边坡，已经形成了完整的变形破坏边界：后缘边界为顶部拉裂带，受地形与开挖卸荷影响，坡顶已经出现细微的拉裂缝，为后缘变形破坏提供了边界；侧向边界为两组节理构造切割形成的侧向临空面，两个方向的节理将滑动体与两侧稳定岩体分割开；底滑面为砂泥岩接触面的泥化软弱夹层，夹层强度低，产状与边坡倾向一致，在坡脚位置出露形成临空，构成了边坡滑动的底界面。因此，该边坡已经具备了发生顺层滑动的边界条件。

3.2 失稳影响因素分析

该边坡失稳的影响因素可以分为内因与外因两个方面：内因是边坡自身的地质条件，主要包括顺层的岩体结构、软弱夹层的存在以及坡脚开挖形成的临空条件。其中软弱夹层是控制边坡稳定性的核心因素，由于夹层强度低，遇水容易软化，成为坡体内部的软弱结构面，为滑动破坏提供了基础条件；开挖卸荷改变了坡体原有的应力平衡状态，临空面的形成使得坡体向临空方向的变形成为可能，是边坡失稳的必要条件。

3.3 失稳演化过程与失稳模式

该边坡的失稳演化过程可以分为三个阶段：第一阶段为初始卸荷变形阶段，公路开挖形成临空面后，坡体原有应力平衡被打破，坡体向临空方向发生回弹卸荷，坡顶位置出现拉应力，逐渐形成微小拉裂缝，该阶段变形速率较慢，变形范围较小；第二阶段为累进性破坏阶段，在持续降雨作用下，雨水沿着坡顶拉裂缝不断下渗，逐渐进入底部的软弱夹层，导致夹层不断软化，强度持续降低，坡体变形速率不断加快，拉裂缝不断扩展延伸，逐渐形成贯通的后缘拉裂面，此时边坡变形进入加速发展阶段；第三阶段为整体滑动破坏阶段，当软弱夹层的强度降低至不足以维持边坡平衡时，坡体将沿着软弱夹层发生整体顺层滑动，滑动体前缘从坡脚位置挤出，后缘沿着贯通的拉裂缝下错，最终形成完整的滑坡灾害。

四、结论

本文通过对西南山区某公路边坡的工程地质条件进行系统分析,深入研究了边坡的失稳机制,得到以下主要结论:(1)研究区边坡为顺层岩质高边坡,坡体内部发育一层泥化软弱夹层,夹层强度低,遇水衰减明显,产状与边坡一致,是控制边坡稳定性的核心因素;(2)边坡失稳是内因与外因共同作用的结果,顺层结构、软弱夹层与开挖临空是失稳发生的内在基础,降雨入渗是最主要的诱发因素,降雨通过增加坡体自重、软化软弱夹层、产生渗透压力三种方式降低边坡稳定性;(3)该边坡潜在失稳模式为沿软弱夹层的整体顺层滑动,演化过程分为卸荷变形、累进破坏、整体滑动三个阶段,当前边坡安全储备不足,需要采取锚固与排水结合的加固措施,防范滑坡灾害发生。

参考文献

- [1] 黄润秋. 岩石边坡工程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.
- [2] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 殷坤龙. 滑坡灾害预测预报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003.