

某土岩结合边坡垮塌事故原因分析及处理方案探讨

陈贵生¹, 余再西^{2*}

1. 昆明恒基建设工程施工图审查中心, 云南 昆明 650000

2. 云南建安昆宁工程设计咨询有限公司, 云南 昆明 650000

摘 要：高边坡受工程地质条件、水文条件、空间几何条件、环境条件、运营维护条件等因素影响，这些影响因素中有些是稳定因素，有些是不稳定因素，不稳定因素常常成为边坡事故的诱因，不稳定因素中水和后期的运营维护显得尤为活跃，经常因处理不当引发边坡事故。本文基于某土岩结合边坡因水的处理和后期运营维护不当而引发的事故，分析了边坡垮塌的过程和水造成此边坡垮塌的机理，并给出了处理措施，旨在提醒工程技术人员重视水的处理和后期运营维护，减少类似事故的发生。

关 键 词：土岩结合边坡；不稳定因素；水；运营维护

Analysis of the Causes of a Slope Failure on a Mixed Soil and Rock Terrace and Discussion of Treatment Options

Chen Guisheng¹, Yu Zaixi^{2*}

1. Kunming Hengji Construction Engineering Construction Drawing Review Center, Kunming, Yunnan 650000

2. Yunnan Jianan Kunning Engineering Design & Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650000

Abstract：High slopes are affected by engineering geological conditions, hydrological conditions, spatial geometric conditions, environmental conditions, and operational and maintenance conditions. Some of these factors are stability factors, while others are instability factors. Instability factors often serve as the cause of slope accidents, and among them, water and post-operation and maintenance conditions are particularly active and often lead to slope accidents due to improper handling. Based on a slope failure caused by improper water treatment and post-operation and maintenance in a soil-rock combination slope, this paper analyzes the process of slope collapse and the mechanism by which water caused this slope collapse, and provides treatment measures to remind engineering technicians to pay attention to water treatment and post-operation and maintenance, in order to reduce similar accidents.

Keywords：Loess-rock combined slope; unstable factors; water; operation and maintenance

高边坡安全性受工程地质条件、水文条件、空间几何条件、环境条件、运营围护条件等因素影响，这些影响因素中有些是稳定因素，有些是不稳定因素，不稳定因素常常成为边坡事故的诱因，不稳定因素中水和后期的运营维护显得尤为活跃，经常因处理不当引发边坡事故。水对边坡安全影响是多方面的^[1-8]：物理方面主要是增加岩土体重度、改变其状态、减小岩土体之间的摩擦系数；水化学方面：溶解胶结物、增加结合水厚度、减弱颗粒之间的连接强度、改变亲水矿物的形态和体积产生胀缩效应；力学方面：产生静水压力（潜水或承压水）、渗流力、潜蚀作用和冲刷作用，改变非饱和土的基质吸力，降低岩土体的强度等，这些影响最终结果是增加边坡荷载，减小边坡抗力，降低边坡安全系数，当安全系数低于1.0时，边坡将发生破坏。本文基于某土岩结合边坡因水的处理和后期运营维护不当而引发的事故，分析了边坡垮塌的过程和水造成此边坡垮塌的机理，并给出了处理措施，旨在提醒工程技术人员重视水的处理和后期运营维护，减少类似事故的发生。

一、项目概况

（一）地质概况

此项目所处区域为山体自然坡度较缓，按地貌成因类型分为山地丘陵地貌。事故工点地质情况如下：此工点地层由新到老依

次为：第四系全新统滑坡堆积（ Q_4^{del} ）层、第四系全新统冲洪积层（ Q_4^{al+pl} ）层及三叠系中统个旧组二段（ T_2^{gb} ）石灰岩，典型地质剖面图如图1所示。

现根据场地内各岩土层的地质年代、成因及物理力学性质划分工程地质单元层，将各岩土单元层岩性及分布特征叙述如

作者简介：陈贵生（1965-），男，汉族，云南曲靖人，工程地质学士，高级工程师，国家注册土木工程师（岩土），主要从事岩土工程勘察、设计、检测、咨询和施工图审查工作，Email: chs97412@163.com。

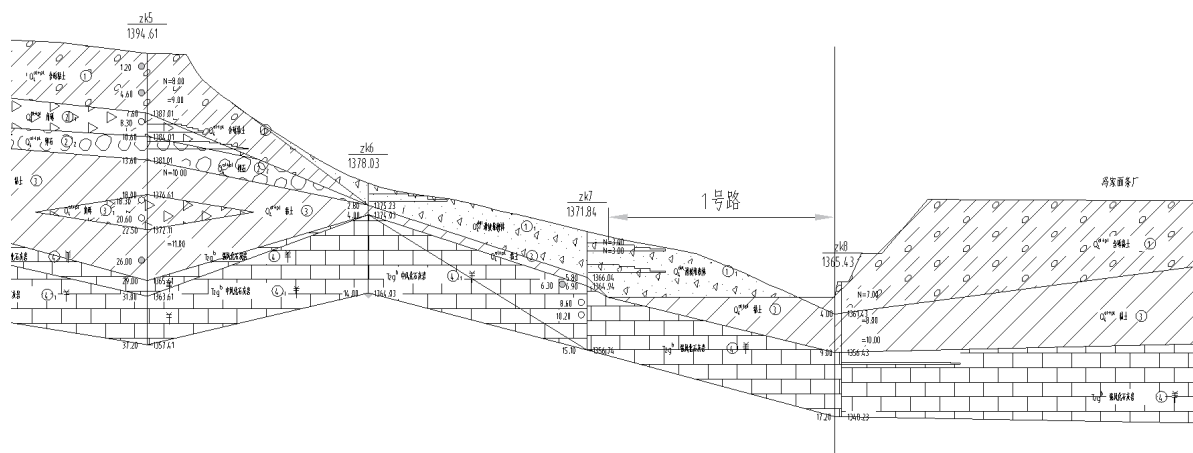
通讯作者：余再西（1988-），男，汉族，云南大理人，岩土工程硕士，高级工程师，国家注册土木工程师（岩土）、一级建造师，主要从事岩土工程勘察、设计、审查、咨询和研究工作，Email: 764388172@qq.com。

下：第四系全新滑坡堆积（ Q_4^{del} ）层：①₁层滑坡堆积体：红、褐红，可塑状，欠固结，具有高压缩性，切面粗糙，无光泽，干强度及韧性低，无摇振反应，含角砾、碎石、风化岩屑、卵石、混凝土块，其为滑坡时坡体倾倒滑移时产生，厚度1.2～5.8m。第四系全新统冲洪积（ Q_4^{al+pl} ）层：①层含砾黏土：可塑状，具有中压缩性，切面粗糙，无光泽，干强度及韧性中等，无摇振反应，含角砾、碎石、风化岩屑、卵石，含量约25%～35%，厚度1.2～10.7m。②₁层角砾：白、褐黄，稍密，以棱角状为主，局部亚圆形状，粒径0.2～6厘米，含量约55%～65%，母岩成分为砂岩、石英砂岩、石灰岩，粉质黏土、砂及卵石充填，局部含薄层状粉砂、粗砂，级配较差，厚度3.0～11.7m。②₂层卵石：白、褐黄，稍密，以棱角状为主，局部亚圆形状，粒径0.2～6厘米，含量约55%～65%，母岩成分为砂岩、石英砂岩、石灰岩，粉质黏土、砂及卵石充填，级配较差，厚度2.40～5.0m。③层黏土：褐红、黄、褐黄，硬塑状、局部可塑，具有中压缩性，切面光滑，稍有光泽，干强度及韧性中等，无摇振反应，含角砾及风化岩屑，局部表现为粉质黏土，厚度1.1～11.8m。③₁层角砾：褐灰、褐黄，中密，以棱角状为主，局部亚圆形状，粒径0.2～5厘米，含量约60%～70%，母岩成分为砂岩、

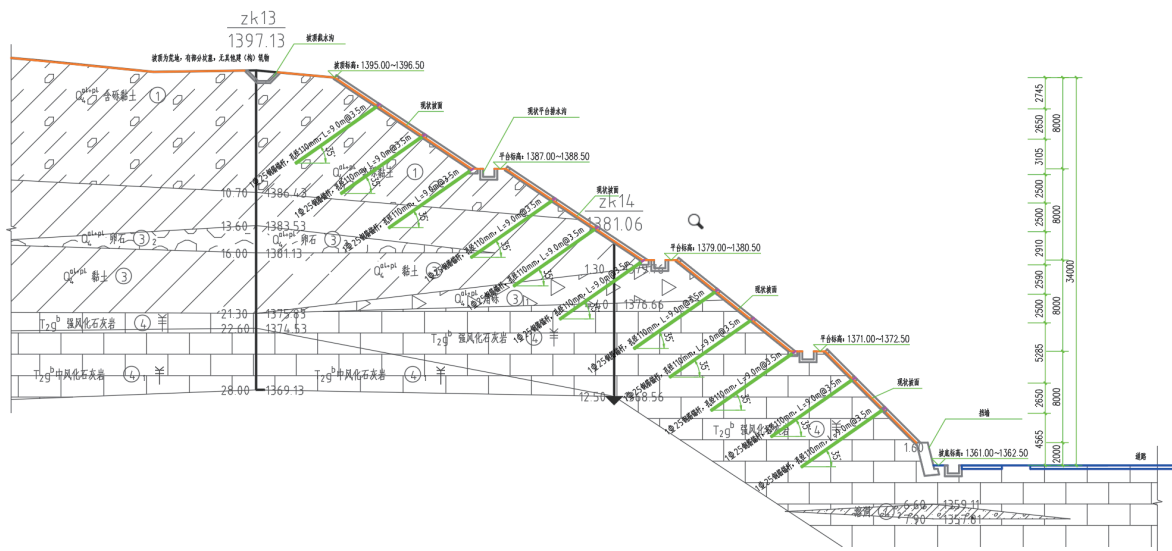
石英砂岩、石灰岩，粉质黏土、砂及卵石充填，级配较，厚度2.0～4.5m。③₂层卵石：黄、褐灰、褐黄，中密，以圆形、亚圆形为主，含量约60%，母岩成分为砂岩、石英砂岩、石灰岩，粉质黏土、砂、角砾充填，级配较差。场地仅钻孔zk13揭露，层顶深度13.6m，层顶高程为1383.53m，厚度2.4m。三迭系中统个旧组二段（ T_2^{gb} ）：④层强风化石灰岩：灰白、灰黑、灰，隐晶质结构，块状构造，钻探岩芯块状、饼状为主，少许呈短柱状，块径0.2～8cm，溶蚀作用发育，裂隙发育，岩石较坚硬，岩体较破碎，岩芯采取率70%～80%，RQD=10～20%，岩体基本质量等级Ⅳ，厚度1.30～12.0m。④₁层中风化石灰岩：灰白、灰黑、灰，隐晶质结构，块状构造，钻探岩芯以柱状、长柱状为主，少许呈饼状、碎块状，最大柱长42cm，溶蚀作用发育，裂隙发育，岩石较坚硬，岩体较完整，岩芯采取率80%～85%，RQD=60～80%，岩体基本质量等级Ⅲ，厚度5.2～10.0m。

（二）设计概况

坡顶标高为1397m，坡脚标高为1363m，边坡高度为34m，采用1:1.5（强风化灰岩中按1:1）分级放坡(8m高一级，台宽3m)+构造锚杆格构梁+灌草（植生袋）护坡方案，如图2所示。



> 图1 典型地质剖面图



> 图2 边坡支护方案剖面图

（三）施工概况

本项目于2018年7月开工，2020年3月12日前完工，2020年3月12日后施工单位和建设单位由于相关事项未达成共识，项目处于停摆无管理状态，施工过程现场照片如图3、图4所示。



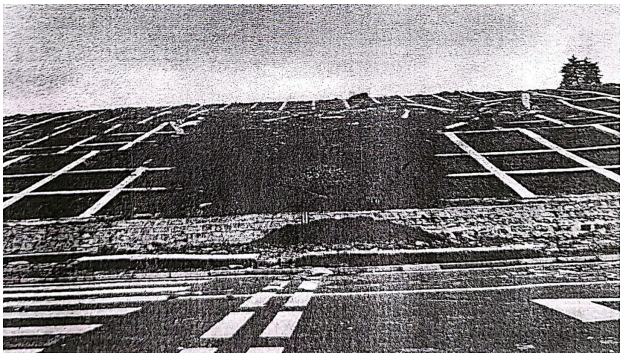
> 图3 施工过程中现状照片1



> 图4 施工过程中现状照片2

（四）边坡垮塌过程

边坡垮塌过程如下：2020年3月12日完工→2021年6月5日1号路1K0+380~1K0+500里程段西侧边坡从下往上数第二级边坡坡脚（土层和强风化灰岩交界面）局部发生垮塌→因施工单位和建设单位双方处于打官司阶段边坡无人管理→2021年~2023年边坡垮塌范围陆续扩大形成现状的情况，现场照片如图5、图6所示。



> 图5 2021年6月第一次垮塌现场照片

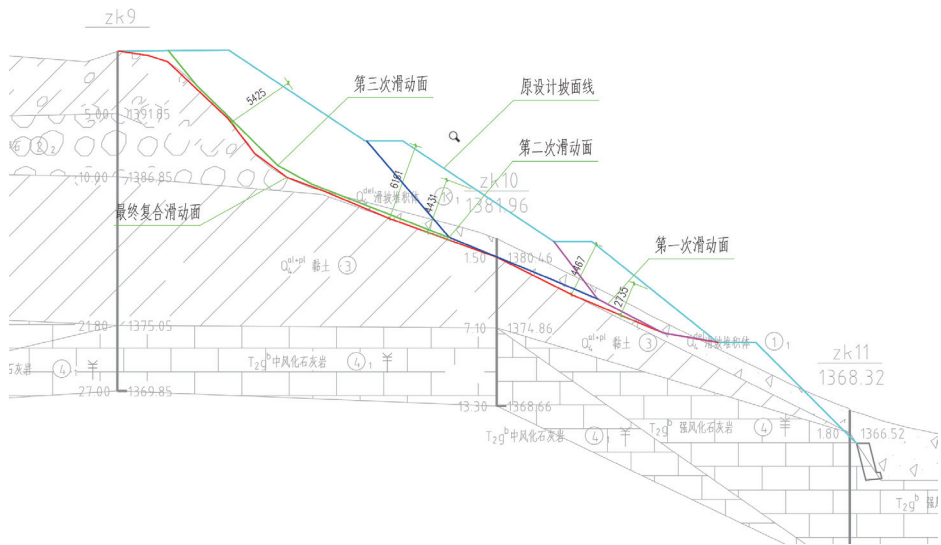


>>图6 垮塌现状照片2（2023年7月）

二、边坡破坏的地质和力学原因分析

（一）边坡现状和破坏模式判别

如图7所示从边坡的破坏过程的发展可以看出此边坡垮塌是一种从局部到整体的牵引式浅表滑移破坏：从下往上数第二级边坡坡脚（土层和强风化灰岩交界面）局部发生垮塌，由第二级逐步发展到第二级以上整个坡体的破坏。如图7所示：在第一次滑动牵引作用下，逐步经过第二次、第三次滑动形成最终的复合滑动面，即破坏现状，此过程中滑体厚度约3m~6m。



> 图7 边坡破坏过程示意图

（二）地质原因分析

由图7可以看出，本边坡的滑动是从土层和强风化灰岩交界面开始破坏，由于局部破坏未及时修复在地表水的长期作用下破坏范围逐步扩大到强风岩以上的整个边坡。经了解第一次破坏也是由于降雨的作用，雨水下渗作用导致第二级边坡局部出现垮塌。从这个破坏过程可以看出：③层黏土遇水易软化，同时黏土层上的角砾或卵石层透水性强，地表水易从卵石或角砾层下渗至其下的黏土层是此边坡破坏的内在地质原因；降雨（地表水）下渗是此边坡破坏的外因。

（三）边坡垮塌的力学原因分析

如图8所示，原设计正常情况下边坡潜在滑动为深层整体滑动，滑体厚度约10m，实际破坏为从整体破坏的坡脚处开始的局部到整体的浅层滑移破坏。第二级边坡底为潜在剪出口，此部位应力最大，同时还是灰岩和黏土的交接部位应力集中。垮塌区域地质情况为下部滑动面下部为强风灰岩，上部为黏土层，黏土层上为强透水的卵石层，同时次边坡采用绿化护坡，坡面未封闭，雨水易下渗软化土体。综上所述，在应力最高部位的黏土层强度降低，土体强度小于土体内应力水平，导致在第二级边坡坡脚部位发生破坏，第二级破坏导致上部土体缺少支撑而逐步破坏，最终发展为现状的破坏形态。

（四）综合判定边坡垮塌原因

综上所述：在边坡完工后由于缺少必要的管养导致坡面绿化未达到预期效果，给雨水下渗提供了外部条件；垮塌部位③层黏土遇水易软化，同时黏土层上为透水性强的卵石层，地表水易从卵石或角砾层下渗至其下的黏土层是此边坡破坏的内在地质原因；降雨（地表水）下渗是此边坡破坏的外因；边坡破坏的力学原因为：垮塌部位第二级边坡底为潜在剪出口，此部位应力最大，同时还是灰岩和黏土的交接部位应力集中，在应力最高部位的黏土层遇水强度降低，当土体强度小于土体内应力时，导致在第二级边坡坡脚部位发生破坏，第二级破坏导致上部土体缺少支撑而逐步破坏，最终发展为现状的破坏形态。

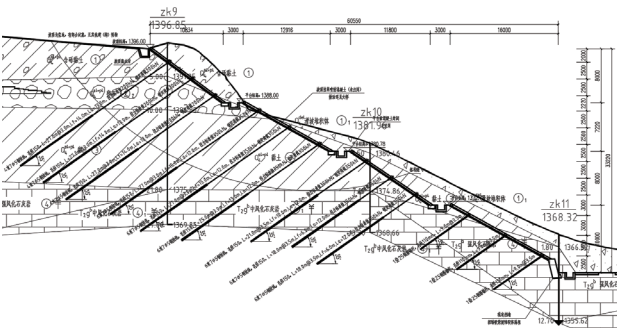
三、加固措施及建议

（一）加固范围的确定

从现场调查发现除垮塌区域外，两侧坡体排水沟部位局部有开裂现象，两侧裂缝延伸长度约10m~20m，加固范围建议按垮塌范围每侧延伸30m来确定。

（二）加固措施及建议

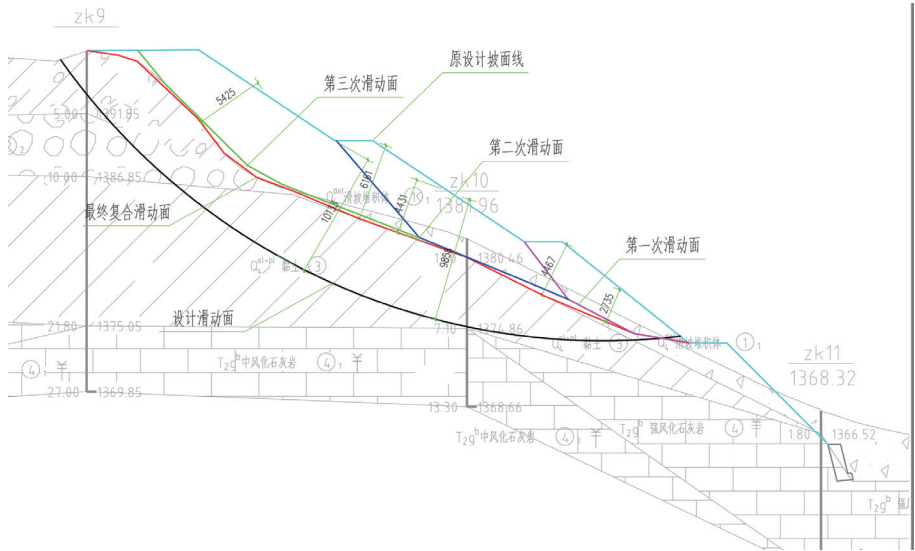
边坡破坏的原因主要为地表水下渗软化土体造成，同时垮塌部位两侧边坡已有一定的变形，加固措施和建议如下：（1）按“治坡先治水”的原则，对垮塌部位坡面采用挂网喷射混凝土封闭处理，避免地表水再次下渗导致坡体再次垮塌，其余部位对边坡进行全面检查发现裂缝应采用灌注水泥浆等封堵措施对地面裂缝进行封堵；（2）在治水后应对垮塌部位及两侧采用预应力锚索框格梁进行加固处理；（3）坡体加固完成后应按设计要求严格进行监测和管养，发现问题及时处理避免类似情况的再次发生。加固方案如图9所示。



> 图9 加固方案示意图

（三）加固施工注意事项

边坡开挖、施工及使用过程中，做好对边坡变形监测及周边建构筑物变形、位移的监测工作，以便对地质情况、设计参数进行验证，并根据施工现场的地质状况、施工情况和变形、应力监测的反馈信息，对施工安全性进行判断，以便对原设计及施工方



> 图8 现状边坡破坏面与设计整体滑动破坏面对比图

案做补充、修正，确保工程安全，设计合理。

四、结论和建议

（1）从边坡的破坏过程的发展可以看出此边坡垮塌是一种从局部到整体的牵引式浅表滑移破坏：从下往上数第二级边坡坡脚（土层和强风化灰岩交界面）局部发生垮塌，由第二级逐步发展到第二级以上整个坡体的破坏。

（2）边坡破坏的地质和力学原因主要为：在边坡完工后由于缺少必要的管养导致坡面绿化未达到预期效果，给雨水下渗提供了外部条件；垮塌部位③层黏土遇水易软化，同时黏土层上为透水性强的卵石层，地表水易从卵石或角砾层下渗至其下的黏土层是此边坡破坏的内在地质原因；降雨（地表水）下渗是此边坡破坏的外因；边坡破坏的力学原因为：垮塌部位第二级边坡底为潜

在剪出口，此部位应力最大，同时还是灰岩和黏土的交接部位应力集中，在应力最高部位的黏土层遇水强度降低，当土体强度小于土体内应力时，导致在第二级边坡坡脚部位发生破坏，第二级破坏导致上部土体缺少支撑而逐步破坏，最终发展为现状的破坏形态。

（3）后期缺少监测和管养为此次边坡垮塌破坏的直接原因。

（4）边坡破坏的原因主要为地表水下渗软化土体造成，同时垮塌部位两侧边坡已有一定的变形，加固措施和建议如下：1）按“治坡先治水”的原则，对垮塌部位坡面采用挂网喷射混凝土封闭处理，避免地表水再次下渗导致坡体再次垮塌，其余部位对边坡进行全面检查发现裂缝应采用灌注水泥浆等封堵措施对地面裂缝进行封堵；2）在治水后应对垮塌部位及两侧采用预应力锚索框格梁进行加固处理；3）坡体加固完成后应按设计要求严格进行监测和管养，发现问题及时处理避免类似情况的再次发生。

参考文献

[1] 唐栋, 等. 不同时期降雨与土 - 水特征曲线对边坡稳定的影响 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (增刊1): 148-155.
[2] 李胜杰. 成都某边坡垮塌事故原因鉴定分析 [J]. 岩土工程与地下工程, 2022, 43 (6): 129-131.
[3] 左威. 基于非饱和土水特征曲线的路基(堤)边坡稳定分析 [J]. 中外公路, 2011, 31 (1): 16-18.
[4] 郑勇. 路堑边坡垮塌成因分析及防治措施探讨 [J]. 黑龙江交通科技, 2021, 第3期: 41-43.
[5] 罗勇, 等. 湿软路基边坡动水侵蚀垮塌机理及模拟研究 [J]. 中外公路, 2010, 30 (4): 39-43.
[6] 王平卫, 等. 水对土质边坡的稳定性影响分析 [J]. 地质与勘探, 2007, 43 (3): 121-122.
[7] 马豪豪, 等. 水对岩石力学特性及边坡稳定的影响及其机理分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10 (4): 86-89.
[8] 姚晓琴, 等. 水 - 气耦合下的土质边坡稳定系数场分析 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (3): 337-344.