

西南山区高速公路高填方弃土场破坏模式分析及稳定性研究

袁旭凯, 许万忠*, 严铁军, 胡明欣

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:西南山区工程地质条件复杂,山区高速公路高填方弃土场的滑坡失稳时有发生,这一问题已严重阻碍高速公路的建设。该文以西南山区某高速公路高填方弃土场为研究对象,通过资料分析和现场踏勘,分析弃土场可能发生的破坏模式,结合弃土场建设方案及防护工程设计,定性评价弃土场场地的安全性;再通过定量计算,全面系统地对弃土场场址稳定性、弃土场局部和整体稳定性、弃土场支挡结构的稳定性进行安全评估,并对截排水系统进行验算,可为其他高速公路高填方弃土场的稳定性评估提供重要的类比资料以及技术参考。

关键词:高速公路;弃土场;高填方边坡;稳定性分析

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

随着中国经济建设的快速发展,基础设施建设不断向西南山区扩展。在高速公路建设过程中有大量的深挖边坡和长隧道,开挖量和隧道渣量大。由于受交通的限制,运输距离长。挖填方难以平衡,便会产生大量永久弃方,必然要设置弃土场来处置弃土^[1-2]。而高速公路弃土场设计规模大,在特殊工况下会发生地质灾害,影响工程建设的顺利进行。

目前针对高速公路高填方弃土场的稳定性研究不多,沈明祥等^[2]通过现场调查和计算分析评估了贵州省六盘水至威宁高速公路弃土场稳定性;抗兴培等^[3]从饱和和非饱和理论出发分析了强降雨条件下弃土场边坡稳定性变化历程;李研^[4]对高速公路弃土场的处置方案进行了研究;蒋成海^[5]指出高速公路弃土场存在的问题并提出了相应的处置措施;韩信等^[6]对弃土场位置选择以及设计原则进行了研究。以上文献从现场调查、饱和和非饱和理论、风险评价、处置方案设计等方面研究了高速公路弃土场的相关问题,但缺乏全面系统的稳定性评估。因此,有必要结合具体工程实例对高速公路高填方弃土场进行系统的评价,了解其各工况各阶段的稳定性,预防地质灾害的发生。

该文以西南山区某高速公路高填方弃土场为研究对象,根据现场实地走访调查,分析弃土场可能发生的破坏模式;并结合场地工前工后,从定性定量的角度全

面系统地对弃土场场址稳定性、弃土场局部和整体稳定性、弃土场支挡结构的稳定性等方面进行安全评估。为其他类似工程弃土场设置提供分析设计经验。

1 弃土场工程概况

1.1 周边情况

该高速公路弃土场位于云贵高原山区,地形连续,地表根据山势起伏较大。处于构造剥蚀中山斜坡地貌区,地表覆盖薄层第四系残坡积土,岩性以黏性土为主,多呈硬塑状,局部混少量强风化砂岩碎石。下伏地层为紫红色泥岩、砂岩,固结程度低,抗风化能力弱。距弃土场上游 200 m 处有一户居民。

研究区属低纬度高原季风气候区域,受滇西北高原和横断山脉高山峡谷地形的影响,区域内一年干湿季分明,气候空间立体变化明显,应考虑强降雨对弃土场稳定性的影响。

研究区地震活动频繁,地质构造复杂,总体上属于地震活动强烈区域。该区地震震中一般位于构造体系复合部位,地震活动具有明显的周期性变化,近期地震运动频繁,稳定性评估时应考虑地震的影响。

1.2 设计概况

弃土场设计弃土石方量约 50.28 万 m³,占地面积

收稿日期:2021-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41562016)

作者简介:袁旭凯,男,硕士研究生, E-mail:943081726@qq.com

* 通信作者:许万忠,男,博士,教授, E-mail:582647881@qq.com

40 446 m²。弃土场设置两个台阶,台阶标高分别为 2 905 m、2 880 m,平台宽度 20 m,坡比为 1:2,弃土场设计堆放剖面如图 1 所示。在弃土场周围设置截排水沟,排水沟断面为矩形,一侧沟宽 1.5 m,深 1.5 m,另一侧沟宽 1 m,深 1 m,排水沟为混凝土浇筑。弃土场下游支挡结构为重力式挡墙,高 8 m。

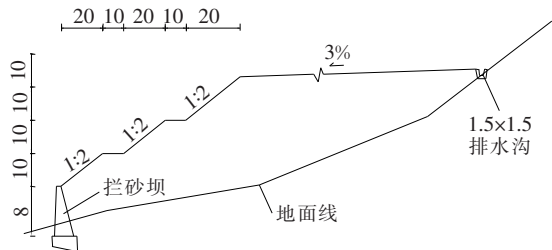


图 1 弃土场剖面图(单位:m)

1.3 弃土来源及弃土场级别

弃土场堆积材料主要为公路弃渣。填筑区沟谷纵坡平缓,填料整体质量较好,严格按施工方案进行分级填筑、压实并合理控制边坡分级填筑高度、坡率,堆放的弃土按照设计标准进行了分层压实,压实度不低于 85%。

根据 GB 51018—2014《水土保持工程设计规范》,弃土场级别应根据堆土量、堆土最大高度以及弃土场失事后对主体工程或环境造成危害程度确定^[7],具体标准如表 1 所示。

表 1 弃土场级别

渣场 级别	堆渣量 $V/$ (10^4 m^3)	最大堆渣高度 H/m	渣场失事对主体 工程或环境造成 的危害程度
1	$2\ 000 \geq V \geq 1\ 000$	$200 \geq H \geq 150$	严重
2	$1\ 000 > V \geq 500$	$150 > H \geq 100$	较严重
3	$500 > V \geq 100$	$100 > H \geq 60$	不严重
4	$100 > V \geq 50$	$60 > H \geq 20$	较轻
5	$V < 50$	$H < 20$	无危害

经对比分析,弃土场场地条件一般,设计堆置高度 33 m,弃土容积为 50.28 万 m³,弃土场上游 200 m 有一户居民,弃土体失稳,对上游有一定影响。故此弃土场级别属 3 级。常用工况下该弃土场允许的最小安全系数为 1.25;非常用工况下该弃土场允许的最小安全系数为 1.10。

2 弃土场基本破坏模式

根据张倬元等^[8]对弃土场进行的研究,整理总结

并通过现场工程地质勘查分析,在弃土场滑坡中,按滑动面位置及其滑动产生的原因,可以将弃土场的滑坡分为以下 4 类:沿弃土场内部滑动面的滑坡,沿基底接触面的滑坡、沿地基软弱层的滑坡和沿弃土场表层局部坍塌与错动。

2.1 弃土场内部滑动

当弃土场基底岩层比较稳固,由于弃土自身物理力学性质较差,或在外界条件的影响下,此时在弃土内部发生剪切破坏,但滑体未剪穿下部滑床基底岩土体,剪出口常出现在弃土坡面靠近坡脚处的位置(图 2)。对于含水量较高并具有一定湿度的弃土场,随弃土场内弃土高度增加,会发生压实和沉降,由于弃土场内部孔隙压力的不平衡,导致出现应力集中区,孔隙压力的存在也会降低潜在滑移面上的摩擦阻力,进而导致滑坡的发生。

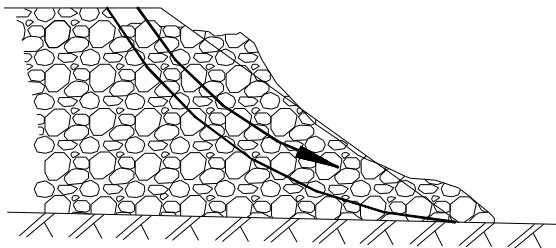


图 2 弃土场内部滑坡

发生在弃土场内部的滑坡,大多数与弃土的物理力学性质有关,在弃土场受到大气降雨、地表水的浸润或者地震的影响时,往往会严重恶化弃土场的稳定状态。因此对弃土场进行安全评估时要验算多种工况下的局部稳定性。

2.2 沿基底接触面的滑动

当弃土场的基底倾角较陡,弃土与基底接触面之间的抗剪强度小于弃土物料本身的抗剪强度时,便会发生沿基底接触面的滑动(图 3)。如果基底上部存在风化层或腐殖土层,这一层土堆积在弃土下部会形成软弱夹层,遇到雨水的浸润或者地震的摇振,便会促进滑坡的形成。这类滑坡的主要控制因素是基底表面与弃土之间的物理力学强度指标以及基底表面本身的倾

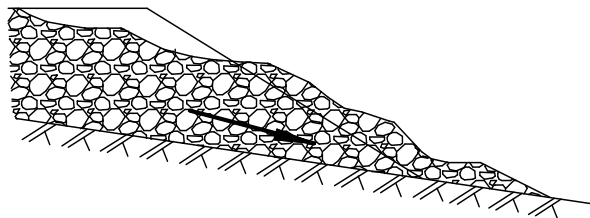


图 3 弃土场沿基础底面滑坡

角。因此要结合弃土和基底岩土体的土工试验数据,验算弃土场多种工况下的整体稳定性。

2.3 沿地基软弱层滑动

当弃土场地基含有软弱层时,由于承载力较低,在弃土场散体岩土体荷载或雨水等因素作用下易产生沿软弱地基的滑坡。这类破坏主要表现为沉降变形和坐落一滑移式滑坡(图 4)。

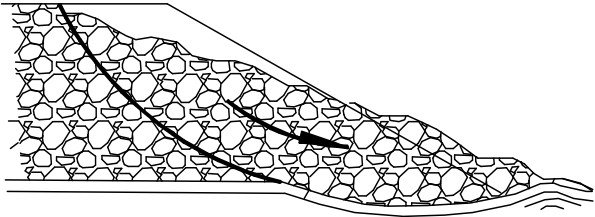


图 4 弃土场沿地基软弱层滑坡

沉降变形主要发生在较陡的地基上且具有较大沉降系数的干旱地区。较厚的部分比较薄的部分具有更大的沉降,从而导致沉降不均产生许多拉裂缝。缝隙中的裂缝为降雨和渗水创造了便利的条件。当缝隙中的水存储量增加时,可能会导致滑坡。

坐落一滑移式滑坡主要是由于弃土场之下的地基内因水和软弱层的存在及过载等因素而导致的地基滑坡。在弃土场堆填过程中,弃土堆填高度的不断增加,基底土层持力层厚度也随着弃土的荷载加大而不断加深,当弃土堆填到一定高度时,弃土载荷达到软弱基底的承载极限,基底连续性好的、强度低的软弱带,被挤压产生塑性流动,沿下部基底剪切隆起,同时在软弱带上方弃土层内形成拉伸应力,加上弃土松散物料属于非均质岩体,在自身重力作用下弃土沿基底软弱层切入,引起弃土场坐落一滑移式滑坡。因此,这类滑坡危害较大,对弃土场进行稳定性评估时,要全面验算场址稳定性、边坡局部和整体稳定性、支挡结构稳定性。

2.4 弃土场表层的坍塌与错动

当弃土场局部堆积坡度过大,在上部进行继续堆积时就有可能打破局部的应力平衡,导致坡体错动形成新的平衡稳定状态。此种破坏常发生在弃土表层,是一种局部小规模滑坡(图 5)。

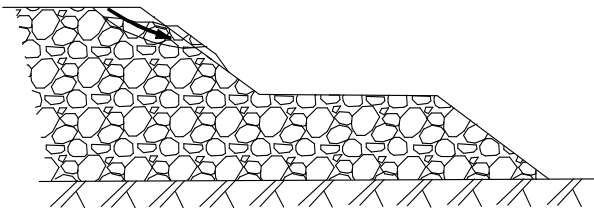


图 5 弃土场表层局部坍塌破坏

3 弃土场稳定性分析

3.1 弃土场稳定性定性评估

经现场调查,研究区内及周围未发现不良地质灾害体,现状场地危害小。根据弃土场场址的地质环境条件、建设规模、结构特点等在建设中和运营后可能造成风险的影响因子,定性综合判定该弃土场场地危险性小。

3.2 弃土场场址稳定性评估

3.2.1 计算模型建立

此次弃土场场址稳定性计算将原始地形剖面进行了地质概化,建立稳定性计算模型。采用 GeoStudio 软件的 Slope/W 模块进行计算分析(图 6)。

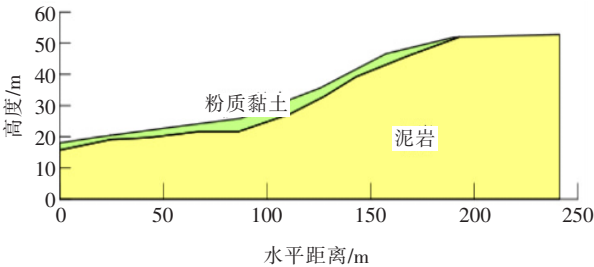


图 6 场址稳定性计算模型

3.2.2 参数选取及工况设置

通过室内土工试验以及相关工程类比分析,综合对比,选取弃土场基底岩土体物理力学参数(表 2)。场址稳定性验算设置 3 种工况:天然工况、暴雨工况、地震工况。

表 2 弃土场各土层物理力学参数

材料名称	重度/(kN·m ⁻³)		黏聚力 c/kPa		内摩擦角 φ/(°)	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
填土	20.0	20.5	12.0	10.0	26.0	24.0
粉质黏土	19.6	20.7	25.1	23.4	14.3	11.6
泥岩	24.5	25.6	1 200.0	1 080.0	43.1	39.8
挡土墙	25.0		—		—	

3.2.3 计算结果分析

弃土场场址稳定性计算结果见表 3。
由表 3 可知:弃土场场址边坡在自然工况下安全系数为 3.33,大于标准安全系数 1.25;暴雨工况下安全系数为 2.91,地震工况下安全系数为 2.72,均大于标准安全系数 1.10,满足规范的稳定性要求,故原始

边坡稳定。

表 3 弃土场场址稳定性计算结果

工况	安全系数
天然工况	3.33
暴雨工况	2.91
地震工况	2.72

3.3 弃土场边坡局部和整体稳定性评估

3.3.1 计算模型建立

根据弃土场设置概况以及场地工程地质条件将剖面图进行地质概化(图 7)。采用 GeoStudio 软件的 Slope/W 模块进行计算分析。

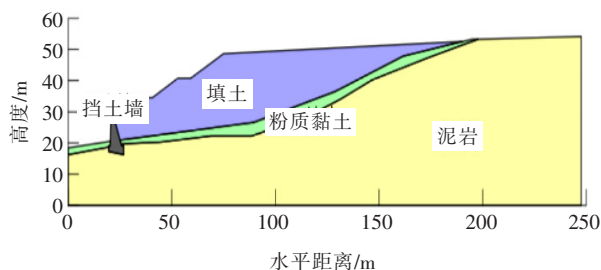


图 7 边坡局部及整体稳定性计算模型

3.3.2 参数选取及工况设置

结合土工试验,以及相关工程资料,考虑降雨环境下填土力学参数大大降低,各土层物理力学参数见表 2,其中挡土墙在软件中设置为高强度材料,排除从挡土墙范围内剪出的可能性。

3.3.3 计算结果分析

弃土场局部和整体稳定性计算结果见表 4。

表 4 弃土场局部和整体稳定性计算结果

工况	安全系数	
	局部稳定性	整体稳定性
天然工况	1.97	1.91
暴雨工况	1.73	1.70
地震工况	1.68	1.65

由表 4 可知:弃土场边坡局部稳定性和整体稳定性在 3 种工况下,稳定性系数呈有规律下降,大于标准安全系数,满足规范的稳定性要求,故弃土场边坡局部和整体稳定。

3.4 弃土场支挡结构物稳定性评估

该弃土场支挡结构为重力式挡土墙,此次稳定性验算利用理正岩土软件的挡土墙模块进行验算。

3.4.1 支挡结构模型建立

挡土墙稳定性计算模型见图 8。

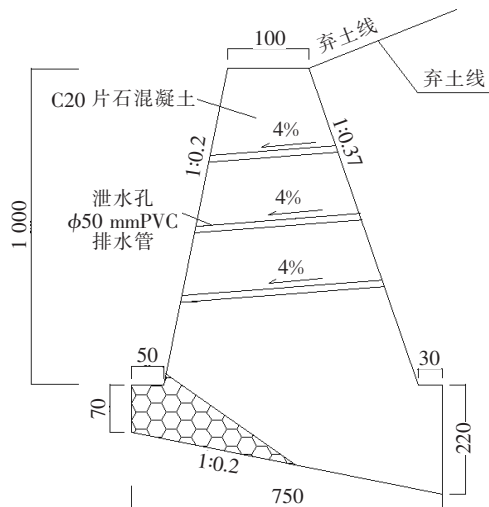


图 8 挡土墙稳定性计算模型(单位:cm)

3.4.2 支挡结构计算结果分析

经过软件计算各工况稳定性,该挡土墙的滑动稳定性验算、基础强度验算、台顶截面强度验算、抗倾覆稳定性验算、整体稳定验算等均满足 GB 51018—2014《水土保持工程设计规范》要求,故该挡土墙满足弃土场设计的稳定性要求。

3.5 弃土场截排水系统验算

通过现场调查发现弃土场外围修筑了地表截排水沟,根据场区汇水条件,对截排水沟过水能力进行验算。

根据中国公路科学研究所提出的小汇水面积流量计算公式:

$$Q_p = \phi S_p F \quad (1)$$

式中: Q_p 为设计频率地表水汇流量(m^3/s); ϕ 为径流系数,取 0.2; S_p 为设计降雨强度(mm/h); F 为汇水面积(km^2)。

根据卫星影像测得场区汇水面积约为 0.86 km^2 。

在中国气象网查得,该地区 20 年一遇最大小时降雨量为 $61.6 \text{ mm}/\text{h}$,由此求得弃土场流域内最大汇水流量为 $10.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

根据 GB 50014—2006《室外排水设计规范》,排水沟的设计流量为^[9]:

$$Q_{\#} = AV = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$R = \frac{A}{x} \quad (3)$$

式中: $Q_{\#}$ 为排水沟设计最大流量; A 为排水沟过水断面面积(m^2); V 为流速; n 为粗糙系数; R 为水力半径(m); i 为水力梯度(明渠排水等于排水沟沟底的纵坡

度); x 为湿周(m)。

根据先期设计资料及现场调查,排水沟断面为矩形,一侧沟宽1.5 m,深1.5 m,另一侧沟宽1 m,深1 m,排水沟为混凝土浇筑,根据GB 50014—2006《室外排水设计规范》, $n=0.014$ 。考虑安全超高0.2 m, $A_1=1.95\text{ m}^2$, $A_2=0.8\text{ m}^2$, $x_1=4.5\text{ m}$, $x_2=3\text{ m}$, $R_1=0.43\text{ m}$, $R_2=0.26\text{ m}$, $i=0.03$ (排水沟顺地表布设),将上述数据代入式(2)、(3),得到:

$$Q_{\text{排}1}=10\text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{排}2}=5\text{ m}^3/\text{s}$$

由上述计算结果可知:弃土场区地表汇水流量 $Q=10.6\text{ m}^3/\text{s}$,小于排水沟的最大设计过水流量 $Q_{\text{排}}=15\text{ m}^3/\text{s}$,当前排水沟过流断面满足要求。

4 结论及建议

4.1 结论

(1) 根据定性分析可知,弃土场场地危险性评估结果为危险性小;该弃土场建设用地的适宜性为基本适宜,弃土场建设方案及主体防护工程设计合理,综合判定该弃土场建设安全性评估结果为安全。

(2) 通过定量计算,弃土场边坡在所有工况下,场址稳定性、局部稳定性和整体稳定性均满足规范要求,在天然工况下的安全系数均大于1.25;暴雨工况和地震工况下的安全系数均大于1.10,弃土场处于稳定状态。

(3) 泥石流拦挡设施及截排水沟符合设计要求,能满足该弃土场日常运行的稳定性需求。

4.2 建议

(1) 定期对弃土场边坡、支挡结构以及截排水系统进行检查和监测,发现变形、裂缝或位移应及时汇报相关部门,并加密监测频次,及时采取工程加固措施。

(2) 弃土场应采取必要的绿化措施,减小坡面水土流失。

参考文献:

- [1] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路路基设计规范:JTG D30—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [2] 沈明祥,罗红明,刘志鹏,等. 贵州省六盘水至威宁高速公路弃土场稳定性评估[J]. 中国岩溶,2019,38(4):559—564.
- [3] 抗兴培,孟凡成,曾超,等. 强降雨条件下弃土场边坡稳定性历程分析[J]. 中外公路,2019,39(3):34—39.
- [4] 李研. 高速公路弃土场处治方案设计研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016,12(12):187—189.
- [5] 蒋成海,彭立,李宏泉,等. 高速公路建设弃土场存在的问题及处治措施探讨[J]. 公路工程,2011,36(3):47—50.
- [6] 韩信,张敏静. 弃土场位置选择和设计原则方法探讨[J]. 公路,2008,55(9):282—285.
- [7] 水利部水利水电规划设计学院,黄河勘测规划设计有限公司. 水土保持工程设计规范:GB 51018—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
- [8] 张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [9] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 室外排水设计规范:GB 50014—2006[S]. 北京:中国计划出版社,2014.