

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.02.024

考虑岩体强度演化的全强风化岩质 边坡主动加固设计方法

冯志秀^{1,3}, 李大茂^{2,3}, 袁从华⁴, 吴振君⁴

(1. 云南建投建设集团有限公司, 云南 昆明 650034; 2. 云南省公路开发投资有限责任公司, 云南 昆明 650200;
3. 云南小磨高速公路改扩建工程建设指挥部, 云南 景洪 666100;
4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 全强风化岩质边坡由于岩体破碎, 易受工程扰动和降雨影响而导致强度发生弱化, 因此在公路路基开挖过程中极易失稳。以某公路全强风化岩质边坡为例, 通过对处于不同阶段的边坡稳定性进行反分析, 分别得到岩体初始强度和弱化后强度, 获取了岩体强度的演化过程。通过主动加固和被动加固工程措施的对比分析, 表明主动加固设计能够有效利用岩体原始强度, 大大降低加固工程量。对于受工程扰动和降雨影响较大的全强风化岩质边坡, 采用主动加固设计十分必要且有效, 可为全强风化岩质边坡设计提供参考。

关键词: 全强风化岩体; 边坡稳定性; 工程扰动; 岩体强度演化; 主动加固

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)02-0124-04

Active Reinforcement Method for Highly Weathered Rock Slope Considering the Evolution of Rock Mass Strength

FENG Zhixiu^{1,3}, LI Damao^{2,3}, YUAN Conghua⁴, WU Zhenjun⁴

(1. Construction Group of Yunnan Highway Development and Investment Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650034, China;
2. Yunnan Province Highway Investment and Development Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China;
3. Yunnan Xiaomo Expressway Extension Project Construction Headquarters, Jinghong, Yunnan 666100, China;
4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The strength of highly weathered rock slope is very weak due to engineering disturbance and rainfall, so slope failure usually occurs in highly weathered rock slope mass during highway construction. In previous research slope design is often based on a certain state which cannot reflect the evolution process of rock mass strength under the influence of engineering disturbance and rainfall. In this paper the strength of rock mass at different stages is analyzed by back-analysis method, and the results of active and passive reinforcement for a highway engineering slope are compared and analyzed. The results show that active reinforcement design can effectively utilize the original rock mass strength, thus greatly reduce the amount of reinforcement works.

Keywords: highly weathered rock; slope stability; engineering disturbance; evolution of rock strength; active reinforcement

边坡稳定问题一直是岩土工程的一个重要研究内容。对于全强风化岩质边坡, 长期的风化作用使

岩体的物理力学性质发生很大变化, 工程扰动后坡体变形显著, 且遇水易弱化, 进而降低岩体强度, 导

收稿日期: 2016-12-09

修稿日期: 2017-01-17

基金项目: 云南省交通科技项目(云交科教[2016]163号一(三)), (云交科[2014](A)01); 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室开放基金项目(NELBP201601)

作者简介: 冯志秀(1973—), 女, 云南巧家人, 高级工程师, 经济师, 主要从事交通工程管理工作。E-mail: 1016090006@qq.com

致路基开挖过程中全强风化岩边坡极易发生破坏^[1]。

目前国内外对于边坡稳定性的分析方法主要是安全系数评价法,其发展主要体现在以下方面:极限平衡方法作为最经典的确定性方法逐步得到完善^[2-3];各种数值方法通过计算岩体边坡内部的变形特性和应力状态对边坡稳定进行评价^[4-6];此外,神经网络估算法^[7]、可靠度分析法^[8]、模糊综合评判法^[9]、灰色系统理论等非确定性的方法也逐渐应用到边坡稳定的研究中。在实际工程中常采用加固方法,主要包括锚杆、预应力锚索、抗滑挡土墙、抗滑桩等^[10-12]。

对全强风化岩质边坡来说,工程开挖扰动和降雨易使全强风化岩体强度发生弱化,路基开挖过程中极易发生边坡失稳,因此,对于全强风化岩体边坡,开挖之前采取主动加固设计显得极为重要。然而在现在的很多边坡设计中,通常是基于某一特定状态进行设计,并没有考虑岩体强度在工程扰动及降雨等因素影响下弱化过程。因此,本文以某公路工程全强风化岩质边坡为例,充分考虑不同阶段的岩体强度演化过程,采用极限平衡分析方法进行了岩体强度参数反分析,提出此类边坡的主动加固设计方法,进行了主动加固和被动加固工程措施的对比分析。

1 工程开挖扰动和降雨引起的岩体强度演化过程

1.1 工程开挖扰动影响

在自然条件下,全强风化岩体边坡往往处在稳定或略高于极限平衡状态,坡脚成为最重要的阻滑段。公路路基通常通过边坡坡脚,当工程开挖切除坡脚后,边坡临空的高度增加,有些软弱结构面可能被揭露出来,这导致开挖后的边坡向外侧变形且逐渐发展,这种临空方向的变形使得岩体节理、裂隙发生张开变形,裂隙张开直接导致岩体抗剪强度下降。随着工程开挖的进行,岩体强度逐渐发生弱化。

1.2 降雨影响

工程经验表明,多数工程滑坡的发生都是降雨诱发的,暴雨和持续时间较长的降雨最易诱发滑坡。全强风化岩边坡由于坡体破碎,加之工程开挖后边坡产生的变形裂缝等条件为雨水的下渗提供了有利通道。降雨入渗后对全强风化岩体的软化作用明

显,使得岩体的抗剪强度大幅降低。文献[13]中的试验结果表明了这种不利影响,如自然条件下泥岩夹层的室内试验结果:内摩擦角为 $22^{\circ} \sim 26^{\circ}$,黏聚力为 $30 \text{ kPa} \sim 50 \text{ kPa}$,遇水软化后内摩擦角仅为 6° ,黏聚力下降到 $6 \text{ kPa} \sim 12 \text{ kPa}$ 。文献[14]中大型剪切试验成果显示:岩体中软弱夹层遇水软化后,摩擦系数下降 $5\% \sim 30\%$, c 值下降可达 $30\% \sim 80\%$ 。此外,在持续降雨作用下,岩体重度增加、静水或动水压力增加,这导致下滑力增加,进一步降低边坡的稳定性。

2 边坡主动加固设计方法

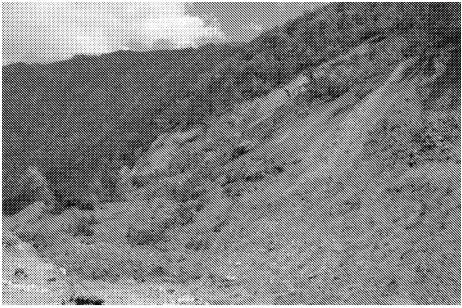
不管采用何种稳定性分析方法,根据边坡稳定性计算结果,当其稳定系数不能满足边坡自稳的要求时,就要采取一定的工程措施进行加固。对于开挖后岩体强度发生明显弱化的边坡,为有效利用岩体初始强度,采用主动加固设计方法非常必要。

主动加固是袁从华等^[12]提出的一种针对易发生软化岩体边坡的设计方法,其核心观点是岩体强度在工程建设过程中不是一成不变的,而是随着工程的进行而逐渐发展演化的,处于不同阶段的边坡,岩体强度是不同的。通过对比分析可以得到:采用目前工程上常用的被动加固设计方法,由于边坡的开挖施工改变了原斜坡地表形态,使得斜坡体发生卸荷变形,岩体裂隙张开,雨水下渗使滑带抗剪强度下降,降低了边坡的抗滑力,边坡由自然条件下的稳定状态过渡到极限平衡状态,一旦发生破坏造成很多连锁反应,工程损失巨大。在边坡开挖前根据初步判断,若开挖后坡体有滑动可能,需要在边坡开挖前就采取主动加固设计方法,避免潜在滑带性质弱化,通过支护手段预先增加边坡抗滑力,使边坡稳定性满足工程要求。

3 工程实例

3.1 工程概况

以某二级公路 K126 段失稳全强风化岩质边坡为例,获取不同阶段岩体强度参数,并对主动加固和被动加固进行对比分析。K126 段自然坡的坡度 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$,高约 80 m,汇水面积大,按原设计方案削坡,边坡开挖后形成一个约 $6 \text{ m} \sim 9 \text{ m}$ 的临空面,坡体发生临空变形,在雨水下渗条件下,潜在滑动面岩体软化而造成大面积滑坡,滑动范围在坡段之外 90 m (见图 1、图 2)。



(a) 滑坡后全貌



(b) 滑面后缘

图 1 K126 段滑坡图

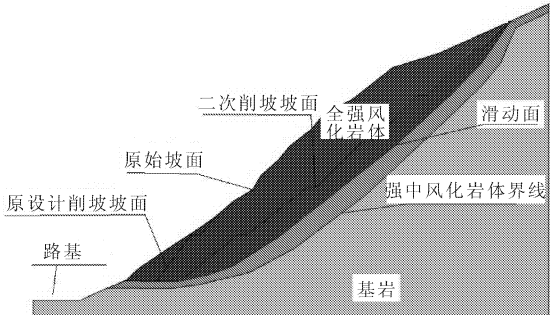


图 2 K126 滑坡剖面

3.2 岩体强度演化过程反分析

根据勘察得到的全强风化岩体结构和胶结情况,通过工程类比得到岩体强度参数的分布范围。恢复边坡的原始地形,自然坡稳定系数取 1.2,采用极限平衡方法反演全强风化岩体强度参数^[15],通过两个相似剖面的边坡稳定性方程联立求解,可得到岩体初始强度 $c_1 = 30 \text{ kPa}$ 、 $\varphi_1 = 28^\circ$ 。边坡开挖后,若岩体强度参数不发生软化,此时边坡的安全系数为 1.05 ~ 1.1,边坡是能够稳定的。实际边坡开挖后,一段时间之后失稳,稳定系数取值范围为 0.95

~ 1.0,通过两个相似剖面的边坡稳定性方程联立求解,得到边坡失稳时岩体软化后强度为 $c_2 = 26 \text{ kPa}$ 、 $\varphi_2 = 27^\circ$,稳定系数为 0.97。实际情况是初始设计方案下边坡失稳,因此岩体强度至少已经演化到软化后的强度。

3.3 主动加固和被动加固对比分析

主动加固是预先采取加固措施,尽量减少对坡体的扰动,一方面需要限制坡体产生较大的变形,另一方面需要补偿切坡后造成的抗滑力降低。主动加固工程措施为:6 m 高挡墙,设计加固力 200 kN/m,嵌入基岩 2 m。分段开挖边坡,开挖后即施工挡墙,挡墙施工完毕后再开挖路基,并做好相应的截排水措施。采用反分析确定的岩体初始强度参数(c_1 、 φ_1),对挡墙加固的开挖边坡进行稳定性计算,由于边坡的破坏是由前缘开挖后导致的牵引滑动,这里我们分别计算了三个典型滑面的稳定性,计算得到边坡滑面 1、2、3 的安全系数分别为 1.76、1.35、1.16,滑动面如图 3 所示。可见,采用主动加固措施后的边坡满足工程稳定性要求。

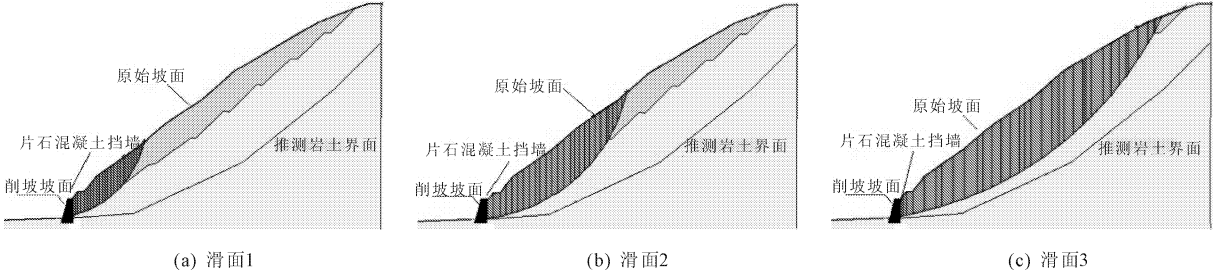


图 3 典型滑面的稳定性计算结果

若不采用主动加固措施,采用有限元软件 Rocscience Phase 2 建立边坡的数值计算模型,对斜坡体在不同的工程状态下进行分析。图 4 给出边坡开挖后坡体的变形计算结果。当坡脚因工程开挖后,斜

坡体原有平衡被破坏,坡体呈现牵引式滑动模式。

实际边坡开挖后未采取加固措施,当岩体强度下降后,首先坡脚失稳,随着变形发展,破坏范围逐渐向后缘扩展,边坡失稳后,不得不清理坡面重新进

行设计,工程损失巨大。若要保证开挖后边坡整体(图 3 中滑面 3)稳定系数大于 1,需要一排间距 5 m 的 3 m×2 m 抗滑桩(桩长 15 m)对边坡进行加固,才

能使边坡安全系数满足工程稳定性要求。被动加固措施下滑面 1、滑面 2 和滑面 3 的安全系数见表 1。

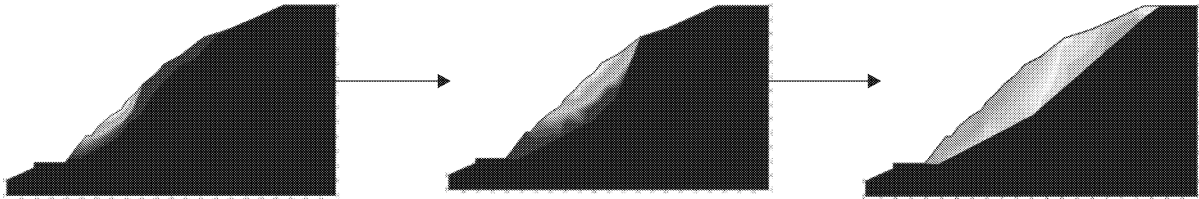


图 4 开挖后边坡的牵引滑动模式

表 1 加固前和抗滑桩加固后的边坡稳定性			
滑动范围	滑面 1	滑面 2	滑面 3
未加固稳定系数	1.27	1.13	0.97
加固后稳定系数	1.87	1.28	1.13

综上对比边坡的主动加固措施和被动加固措施(见表 2),主动加固措施在边坡开挖之前进行挡墙施工,对坡体的扰动小,可充分利用岩体的初始强度,加固工程量较小,也能有效保护坡面的原有植被。被动加固措施中,由于岩体强度下降,需要更强的加固手段才能保证边坡的稳定性。因此及时采取主动加固措施是必要、合理的。

表 2 主动加固和被动加固措施对比		
加固措施	主动加固措施	被动加固措施
加固工程量	挡墙(高 6 m)	3 m×2 m 抗滑桩 (桩长 15 m,间距 5 m)
岩体强度	$c_1 = 30 \text{ kPa}$, $\varphi_1 = 28^\circ$	$c_2 = 26 \text{ kPa}$, $\varphi_2 = 27^\circ$

4 结 论

传统的边坡设计方法通常基于某一特定状态进行设计,未考虑公路路基开挖过程中岩土强度受扰动后的演化过程,这样的设计可能是偏于冒险的,也导致一些边坡失稳灾害。全强风化岩质边坡由于岩体破碎,受工程扰动和降雨影响其强度大大弱化,边坡设计中需考虑施工过程中岩体强度的演化过程。本文以某公路工程全强风化岩质边坡为例,反分析不同阶段的岩体强度,结果表明边坡失稳时岩体强度较初始强度有较大下降,若采用主动加固设计方法,边坡开挖前采用挡墙加固,可满足工程稳定性;若开挖后采用被动加固措施,需采用抗滑桩加固才能满足稳定性要求。对于岩体强度若受工程开挖和降雨影响而弱化的边坡,采用主动加固设计非常必要。

参考文献:

[1] 李满意,周洪燕,魏燕珍,等.类土质边坡失稳机理分析与稳定性研究[J].长江科学院院报,2016,33(5):111-115.

[2] 丁参军,张林洪,于国荣,等.边坡稳定性分析方法研究现状与趋势[J].水电能源科学,2011,29(8):112-114,212.

[3] 靳付成.边坡稳定性分析方法的研究现状与展望[J].西部探矿工程,2007,19(4):5-9.

[4] 孙 川,周 涛.边坡稳定性数值分析方法研究进展[C]//北京力学学会第 20 届学术年会论文集,2014:735-736.

[5] 邓钟敏,徐世光,郭婷婷.边坡稳定性分析评价方法综述[J].矿业工程,2010,8(1):14-16.

[6] 杨建成,邓 琴.岩质边坡倾倒破坏的非连续变形分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):118-122.

[7] 李元松,陈文峰,李新平,等.基于模糊神经网络的边坡稳定性评价方法[J].武汉理工大学学报,2013,35(1):113-118.

[8] 李典庆,肖 特,曹子君,等.基于极限平衡法和有限元法的边坡协同式可靠度分析[J].岩土工程学报,2016,38(6):1004-1013.

[9] 王艳霞.模糊数学在边坡稳定分析中的应用[J].岩土力学,2010,31(9):3000-3004.

[10] 陈晓裕,林永贵.岩质边坡的稳定性分析及加固效应研究[J].中外公路,2012,32(5):24-29.

[11] 黄细超,任光明,周纵横,等.浅层滑坡中的地下水作用机理及治理方法概述[J].水利与建筑工程学报,2016,14(5):181-188.

[12] 袁从华,童志怡,卢海峰.牵引式滑坡特征及主被动加固比较分析[J].岩土力学,2008,29(10):2853-2858.

[13] 袁从华,吴振君,陈从新,等.山区高速公路边坡勘察设计常见问题分析[J].岩土力学,2010,31(S1):271-278.

[14] 万宗礼,聂德新.坝基红层软岩工程地质研究与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

[15] 蒋中明,龙 芳,熊小虎.多元边坡抗剪强度参数协同反分析研究[J].中外公路,2015,35(5):24-28.