

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.030

上缓下陡土质高边坡关键块体的破坏模式研究

汪儒鸿¹, 周海清^{1,2}, 刘琪颖¹

(1. 陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401331; 2. 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 针对部分高边坡坡度变化大, 在采取锚索格构类的大范围支挡时存在工程成本高昂, 对环境的影响较大的问题, 在保证安全的前提下, 为尽可能的节省该类高边坡的治理成本, 缩减施工规模, 专门提出针对上缓下陡地形土质高边坡的“关键块体”概念。通过对“关键块体”稳定性及破坏模式的分析, 可以为符合条件的高边坡提供局部支挡设计的理论依据。与传统的边坡稳定分析方法相比, “关键块体”分析方法针对性更强, 更适合对特殊地形土质高边坡的支挡设计中引为参考。从施工角度来说, 该方法为土体临空面较高而难以治理的高边坡提供了新的支挡设计思路, 实际应用价值较大。

关键词: 关键块体; 上缓下陡地形; 土质高边坡; 局部支挡; 稳定分析

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)03-0165-05

Failure Modes of Key Blocks in High Slope with Steep Downward Soil

WANG Ruhong¹, ZHOU Haiqing^{1,2}, LIU Qiyang¹

(1. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China;

2. Key Laboratory of Geomechanics and Geological Environment Protection of Chongqing Municipality, Chongqing 401331, China)

Abstract: For large changes in the slope of some high slopes, there are problems such as high engineering costs and large environmental impacts when adopting large-scale support for the grid structure of anchor ropes. In order to ensure its safety and save the cost as much as possible. The management cost of high-grade slopes is reduced, and the scale of construction is reduced. The concept of “key blocks” for high-grade slopes with steeply downward slopes is specifically proposed. Through the analysis of the “key block” stability and failure mode, it can provide a theoretical basis for local support design for high slopes that meet the conditions. Compare to the traditional slope stability analysis method, the “key block” analysis method is more pertinent and more suitable for referencing the support design of a special terrain high soil slope. From the perspective of construction, this method provides a new design concept for supporting high-rise slopes with high surface voids and difficult to manage, and has great application values.

Keywords: key blocks; slow and steep terrain; high soil slope; local support; stability analysis

在我国西南山区公路建设中, 经常不可避免地穿越地质条件较差的地区, 有许多规模较大, 坡势陡峭的高陡边坡需要治理。受复杂地形条件影响, 高陡边坡的治理一直是边坡治理中的难点, 特别是对地形呈明显上缓下陡趋势的高边坡: 一方面滑坡的形成具备了临空条件; 另一方面, 地形上的突兀变化容易在陡缓交界处产生应力集中。当土层厚度较小时, 交界处剪应力就会超过土体抗剪强度, 并使得塑性区域产生和不断扩大。当塑性区域贯通时, 土体

就会从交界处发生破坏, 形成滑动面, 从而引发牵引式滑坡^[1-2]。因此, 如何有效防止此类高边坡失稳是我国西南地区修建公路时必须解决的问题。在实际工程中, 确定此类高边坡的支挡范围偏于保守, 多普遍采用支挡结构全覆盖: 比如神龙架某处机场采用土工格栅加筋土结构对高边坡不同坡度的坡面做了全支挡加固^[3]; 重庆市彭水县某处边坡采用阻滑键、预应力锚索等多种结构物对复杂坡面进行了全支挡^[4]等等。这种全方位的支挡方案虽然效果良

收稿日期: 2017-12-19

修稿日期: 2018-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目“锚索框架-抗滑桩联合支挡结构的全程受力规律与设计理论的研究”(41272356)

作者简介: 汪儒鸿(1994—), 男, 湖北恩施人, 硕士研究生, 研究方向为防灾减灾及防护工程。E-mail: 13167943342@163.com

通讯作者: 周海清(1973—), 男, 湖南安化人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程稳定性与支挡结构设计理论研究。E-mail: 976922172@qq.com

好,但依据传统设计成本较高,工期也较长。因此,不少学者试图提出新颖支挡方式来对这类高边坡的治理方法加以改进。比如肖剑秋等^[5]对锚杆网格梁在护坡中的作用机理进行过研究。王中峰等^[6]研究过高支挡轻质符合型结构在某高陡边坡支挡加固中的作用。吴小强等^[7]对复合土钉墙结构在某高边坡中的支护效果进行过研究。以上研究有效优化了部分支挡结构,但基本没有跳出特殊边坡坡面全支挡的范畴,在成本控制方面作用有限。更重要的是:在部分地质条件恶劣的地区不利于边坡工程的高位施工,大范围支挡结构的设计也不易开展。因此,如果在这类高边坡的治理过程中,能在保证安全的前提下尽可能的优化支挡设计方案,对控制工程成本和缩减施工难度都有巨大意义。

1 上缓下陡地形土质高边坡“关键块体”概念的提出

1.1 局部支挡设计方案说明

图 1 是高边坡治理对象中普遍出现的上缓下陡地形土质高边坡的简化示意图:基岩表面呈明显上缓下陡趋势,下部坡角 α 大于上部坡角 β ,使得土层的倾角不同。边坡地形陡缓交界点突出,土体临空面明显。为便于分析,将基岩上覆土层视为等厚。 B 点为地形陡缓交界点; C 点为陡坡土体临空面最高点,简化为位于 B 点正上方。以 BC 为界,位置较高的 $BCEF$ 区域代表缓坡段土体,位置较低且靠前的 $BCYZ$ 区域代表陡坡段土体。

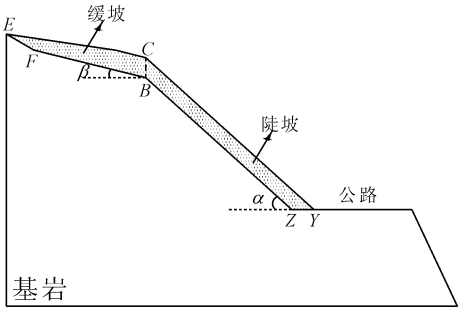


图 1 上缓下陡地形土质高边坡简化示意图

一般情况下,缓坡土体位置较高,势能较大,如果陡缓交界处岩土抗力不足,或受到隧道开挖等扰动影响时极易出现从临空面剪出的情况。而下方陡坡土体由于受到缓坡的挤压,在不加治理的情况下若遇见强降雨等也容易滑坡失稳^[8]。因此,实际治理工程中多为图 2 所示的大面积、全方位结构物覆盖,即对不同坡度的坡面共同支挡加固。



图 2 边坡支挡工程

在多数情况下,全方位坡面支挡能取得良好的治理效果。但不容忽视的是:对于坡度陡峭,垂直高程较高的高边坡,这种支挡方案工程量大,治理成本较高。而且在许多情况下,现场的实际条件并不一定满足高位施工的要求。因此,如果能在对该类边坡只进行局部支挡治理的同时亦保证未支挡部分岩土体的稳定,那么这种设计方案所带来的经济效益是不容忽视的。基于此笔者提出一种特针对上缓下陡地形土质高边坡的局部支挡方案,如图 3 所示:只对该类高边坡的陡坡段进行坡脚加固以及局部坡面支护,支挡结构采取常见的滑桩-锚索格构联合支挡结构,其中 A 点为支挡结构的高度上限点。这样治理过后,支挡结构覆盖到的陡坡坡面以及陡坡坡脚基本都是稳定的,这些范围内一般不用考虑土体失稳的情况。但 A 点以上依然存在着部分裸露岩土体,也就相应还存在发生土质滑坡或其他失稳风险。在此,提出一种专门针对这种支挡方案的边坡稳定分析方法,即“关键块体”分析方法用于该方案的可行性验证。

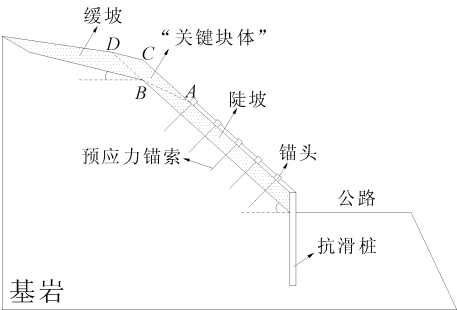


图 3 上缓下陡地形土质高边坡局部支挡示意图

1.2 基于定性分析的“关键块体”概念

郑颖人等^[9]的研究指出:广义剪应变或塑性应变的贯通是边坡破坏的必要条件但不是充分条件。对于上缓下陡地形的土质高边坡,诸多滑坡实例表现出其滑面发育位置及贯路线的情况大致分为两类,如下所述:

(1) 基岩上覆土层平均厚度较大时,地形陡缓

交界点处的应力集中对边坡稳定性造成的影响较小,土体发生位移滑动往往是自身强度条件不够所导致的。此时滑动面的位置是不固定的。在采取局部支挡措施时,支挡结构未覆盖的裸露坡面的任意一点都有可能发生土体剪出破坏,因此需要进行潜在滑动面搜索,这类边坡称之为第一类边坡。

(2) 基岩上覆土层平均厚度较小时,地形陡缓交界点处的应力集中对边坡稳定性造成的影响较大。四川宁南县高位滑坡灾害的相关研究^[10-11]指出:该类边坡滑面发育位置与地形陡缓交界点密切相关:滑面的贯通趋势大致是从地形陡缓交界点出发,顺着陡坡延长线的方向往缓坡发展。由于这种现象在土层平均厚度较浅,且受地形影响较大的土质高边坡发生高位滑坡时经常可以观察到,可称之为第二类边坡。

对以上两类边坡,目前采取的边坡稳定分析法普遍是极限平衡分析法^[12]。该方法需要先假设边坡滑动面的位置已知^[13],在应用到第一类边坡时难度较大,过程复杂且不一定准确。因此,为简化计算过程和提高分析准确性,本文只展开对第二类边坡的研究:即受地形条件影响较大,土层平均厚度较浅,滑面发育位置基本可以预测的上缓下陡地形土质高边坡。

第二类边坡在进行如图 3 所示局部支挡以后,地形陡缓交界点 B 点和陡坡支挡结构上限点 A 点都会产生较大的应力集中,两点的土体应力会首先超过土体抗剪强度。就之前总结的第二类边坡滑面贯通规律而言:在应力不断加大的情况下,土体塑性点会沿着 AB 段和 BD 段不断衍生发展,其中 D 点是陡坡延长线与缓坡的交点。当两处塑性区域贯通时, $ABCD$ 整个范围内的土体就会沿着新形成的滑动面蠕动变形甚至整体下滑,从而引发牵引式失稳。基于局部支挡条件下第二类边坡的滑面位置相对固定,可以将 $ABCD$ 区域内的土体视为整个边坡未支挡部分的“关键块体”。“关键块体”既是缓坡的坡脚,同时也是陡坡段唯一存在剪出可能性的局部裸露岩土体。只要“关键块体”边界的土体破坏情况在安全范围以内,或考虑一定安全系数下“关键块体”不存在蠕动变形或沿滑动面滑动的可能,那么整个边坡的未支护部分就是相对安全的,不需要再做额外支护,局部支挡方案有效可行;反之,则证明局部支挡方案不行,需要对边坡进行额外支护。

2 “关键块体”的数值模拟验证及全程失稳规律分析

“关键块体”概念是基于大量滑坡实例并经定性分析后得到的结果,其合理性有待验证。岩土工程有限元软件 PLAXIS 程序的应用性非常强,能够模拟复杂的工程地质条件,尤其适合于变形和稳定分析^[14]。因此,本文拟利用有限元强度折减法^[15]搜索上缓下陡地形土质高边坡在局部支挡条件下的潜在滑动面位置,从而验证“关键块体”概念的合理性及全程失稳规律。数值模拟做如下假设:(1) 边坡几何模型简化为二维平面应变问题进行处理;(2) 边坡条件:匀质,地下水位于模型底边界以下(即不考虑地下水的影响),初始应力的产生仅与土坡自重及理想支挡效果有关。

2.1 模型搭建

为突出地形条件对边坡稳定性造成的影响,数值模拟过程中主要通过改变双坡角参数及平均土层厚度来验证上缓下陡地形土质高边坡在局部支挡设计方案下的滑动面发育特点,从而验证“关键块体”概念的合理性。如图 4 所示:模型变量参数包括陡坡坡角 α 、缓坡坡角 β 、土层平均厚度 t 。而其他影响较小且非目标的参数则采取定量控制,如缓坡水平长度 L_1 、陡坡水平长度 L_2 以及支挡结构上限高度 h 均取为定值: $L_1 = 50\text{ m}$ 、 $L_2 = 60\text{ m}$ 、 $h = 35\text{ m}$;土层部分选用摩尔-库仑模型,参数取值见表 1;基岩部分由于变形很小,通过线弹性模型设置为刚性体。

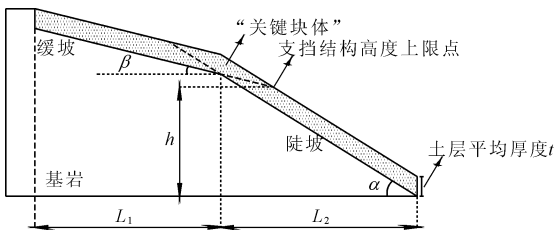


图 4 数值模拟模型示意图

表 1 土层材料参数取值

γ_{unsat} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$K_x = K_y$ /($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	E /kPa	ν	c /kPa	$\phi/(^\circ)$
20	0.001	2000	0.35	29	25

根据变量参数的不同,预加载模型分为 9 组,如表 2 所示。为突出第二类边坡土层平均厚度较小的特征,此处土层厚度 t 小于或等于 8 m ^[16]。同时,根据统计表明:滑坡主要发生在 20° 至 45° 的山坡上,缓于 20° 者滑坡较少^[17]。因此本文将所研究特殊边坡

的缓坡段坡角定义为小于 20°,陡坡段坡角大于 20°小于 45°。

表 2 预加载模型组别

组别	陡坡坡角 α /(°)	缓坡坡角 b /(°)	土层厚度 t /m
1	40	20	8
2	40	20	5
3	40	20	3
4	35	15	8
5	35	15	5
6	35	15	3
7	30	10	8
8	30	10	5
9	30	10	3

2.2 结果分析

采用边坡广义塑性区域的贯通并结合数值计算不收敛作为边坡失稳评判标准^[9]。由于组别较多,仅展示第一组数值模拟结果。

图 5 为第一组数值模拟得到的上缓下陡地形土质高边坡在局部支挡条件下的边坡部分剪应力云图。通过折减安全系数,可以清晰地观察到其滑面发育过程:边坡塑性区域的贯通路线与“关键块体”的理论边界有极大联系。在滑面形成的过程中,塑性区域基本上是沿着 AB 段及 BD 段的方向衍生发展,而这两处恰好都是“关键块体”的理论边界。经分析,支挡范围以外的裸露岩土体的失稳过程主要包含三个阶段:

(1) 第一阶段:塑性区域的产生阶段。如图 5(a)所示,此时在 A 点、B 点等应力集中点虽有塑性点产生,但塑性区域均未连接贯通。由于没有形成顺畅的滑动面,此时“关键块体”边界仅有应力集中点附近发生小范围的土体变形,其整体稳定性是良好的。

(2) 第二阶段:局部失稳阶段。如图 5(b)所示,此时“关键块体”边界之一的 BD 段的土体塑性区域已经连接贯通,形成了局部滑动面,但 AB 段还没有完全形成。导致“关键块体”内部靠近 BD 段的土体开始发生蠕动变形,并挤压最外侧土体使其向临空面运动。而在土体运动的过程中 AB 段塑性点也越来越多。

(3) 第三阶段:整体失稳阶段。如图 5(c)所示,此时整个“关键块体”的边界,即 AB 段与 BD 段的土体塑性区域均已贯通,形成了顺畅的滑动面。“关键块体”将沿着滑动面整体下滑,并造成缓坡岩土体的

牵引式失稳。此时边坡支挡已经失效,支护范围以外的土体必将失稳破坏。

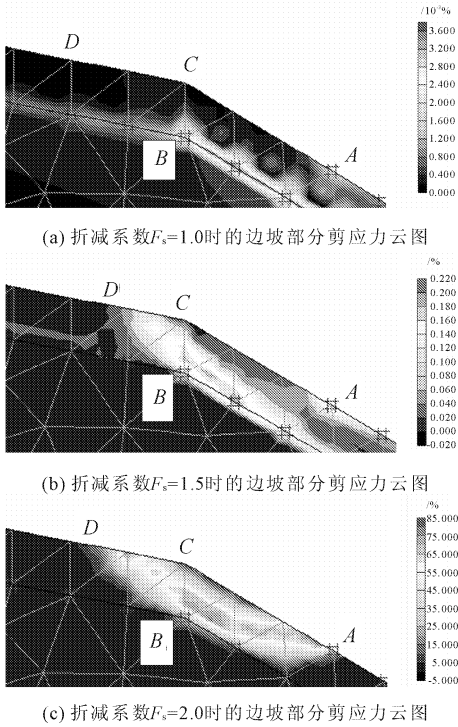


图 5 不同折减系数下边坡滑面附近剪应力云图

其余各组数值模拟的情况与第一组类似:对土层平均厚度较浅的上缓下陡地形土质高边坡,在局部支挡条件下其滑面发育位置及塑性区域贯通路线较大的受地形条件及支挡结构物的影响。尤其是塑性区域的贯通路线带有明显的走向:分别是地形陡缓交界点出发往陡坡延伸线的方向发展和从地形陡缓交界点出发往支挡结构上限点的方向发展。

综上,“关键块体”边界的选取基本契合了该类特殊边坡在局部支挡条件下的潜在滑面位置。由于“关键块体”位置的特殊性:既是缓坡的坡脚,又是支挡范围以外的高位临空岩土体,其自身稳定性对边坡整体稳定性影响巨大,基于“关键块体”概念的边坡稳定分析方法如下。

3 基于“关键块体”概念的边坡稳定分析方法

综上,局部支挡条件下针对该类特殊边坡稳定性的分析可转化对“关键块体”稳定性的评估。“关键块体”的失稳过程大致分为三个阶段,可分别对应三个不同的安全状态:第一阶段,“关键块体”能保持良好的稳定性,属于安全状态;第二阶段,“关键块体”不再稳定,有失稳破坏的可能,属于欠安全状态;第三阶段,“关键块体”区域完全失稳,属于不安全状

态。因此,借鉴边坡稳定分析方法 Sarma 法^[18]的思路,可将“关键块体”按两个潜在滑面位置划分为两个三角形区域:即 BCD 区域和 ABC 区域,如图 6 所示。两个三角形区域内的土体均视为不考虑内部变形的刚性体,其依次失稳分别对应“关键块体”失稳的二、三两个阶段。相较于传统条分法将滑面以上土体划分为多个条状刚性体的做法^[19]，“关键块体”划分法更加简单,也更适合对这类特殊边坡的局部支挡设计方案提供可行性分析。

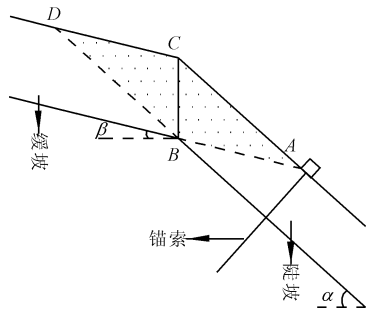


图6 关键块体划分示意图

根据以上划分方法,以 BC 为界,边坡 ABC 区域和 BCD 区域的安全系数可分别设为 f_1 和 f_2 ,根据滑面指标反算可分别算出这两个区域的安全系数。一般来说:安全系数等于 1 时边坡已属极限状态,存在较大滑坡的风险。结合之前分析出的滑面发展过程,此时应该先计算 ABC 区域的安全系数 f_1 ,若 $f_1 < 1$,说明两处滑面均已贯通,关键块体不稳定,不需再计算 f_2 ,此时必须对缓坡进行支挡加固,局部支挡方案不可行;若 $f_1 > 1$,说明 AB 段滑面未完全贯通,可继续计算 f_2 ,若 $f_2 < 1$,说明 BC 段滑面已经贯通,边坡欠稳定;若 $f_2 > 1$,说明局部支挡条件下边坡稳定性良好,不需要对缓坡做额外的支挡加固。

4 结 论

结合边坡滑坡实例及数值模拟分析,提出针对上缓下陡土质高边坡在局部支挡条件下的“关键块体”稳定分析概念,结论如下:

(1) “关键块体”稳定分析是一种土层厚度较浅且属于上缓下陡地形的土质高边坡在局部支挡条件下的特定边坡稳定分析方法。该方法力求在保证工程安全的同时,尽可能的节约工程成本,并方便施工开展。

(2) “关键块体”稳定分析在特定工程条件下较传统边坡稳定分析方法更为简便,可作为边坡稳定分析法的一类补充。

参考文献:

- [1] 何文秀,宫自强,蒋权翔,等.某高位滑坡的形成机制及灾害链治理分析[J].长春工程学院学报(自然科学版),2015,16(2):95-98.
- [2] 李风增.基于 Geo-Slope/W 的土质高边坡稳定性分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(5):67-70.
- [3] 邢晓毅,朱长歧,罗红兵,等.土工格栅加筋碎石土在神农架机场高陡边坡的应用[J].土工基础,2014,28(1):30-33,49.
- [4] 颜昌武,邓安福,高大水,等.重庆某厂区边坡工程稳定性分析与综合治理[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):693-697.
- [5] 肖剑秋,卿笃干,赵海斌.锚杆网格梁在护坡中的作用与机理分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(Z1):2218-2220.
- [6] 王中锋,毛旭阁,贺伟伟,等.高支挡轻质复合型结构在某厂区边坡加固中的应用[J].商品与质量,2016(30):118-118,119.
- [7] 吴小强.某土钉墙边坡支护工程治理措施研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(3):43-45.
- [8] 郭素芳,姚 巍.西南某高位滑坡成因机制及稳定性分析[J].山西建筑,2015,41(24):86-88.
- [9] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3388.
- [10] 孟庆丰,丁继新,王学良.四川宁南县坪子山滑坡发育特征及稳定性分析[J].中国矿业,2016,25(1):161-163,168.
- [11] 王知雄.四川宁南县白水河高位牵引式滑坡变形破坏机理及其灾害链研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [12] 巨能攀,赵建军,邓 辉,等.公路高边坡稳定性评价及支护优化设计[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1152-1161.
- [13] 苏爱军,王 建,周 涛.条块间作用力倾角的假定及其对条分法计算结果的影响[J].地球科学(中国地质大学学报),2013,38(1):188-194.
- [14] 孔郁斐,周梦佳,宋二祥,等.利用 PLAXIS 软件计算考虑降雨的边坡稳定性[J].水利水运工程学报,2014(3):70-76.
- [15] 秦 帆,王正中.基于有限元强度折减理论的边坡稳定分析方法探讨与改进[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):43-47.
- [16] 仵 磊,徐 燕,代树林.边坡工程[M].北京:科学出版社,2010.
- [17] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].2版.北京:人民交通出版社,2010.
- [18] 周志军,牛 涌,张铁柱.基于改进 Sarma 法的岩质边坡稳定性分析[J].交通运输工程学报,2013,13(1):15-19.
- [19] 贾 力,赵 涛,申连平,等.关于改进圆弧法在复合地基稳定性评价中的研究和应用[J].水利与建筑工程学报,2012,10(4):99-101.