

RENGONG GAOQIEPO CHAOQIAN ZHENDUAN YU CHUZHJ JISHU

《人工高切坡超前诊断与处治技术》课题组◎著

人工高切坡超前诊断 与处治技术



人民交通出版社
China Communications Press

Rengong Gaoqiepo Chaoqian Zhenduan

人工高切坡超前诊断

yu Chuzhi Jishu

与处治技术

《人工高切坡超前诊断与处治技术》课题组 著

人民交通出版社

前 言

随着交通建设大发展、西部大开发战略的快速实施,我国西部地区正在紧锣密鼓地进行着基础设施建设。然而,西部地区尤其是西藏自治区,自然条件极为恶劣,区内山高谷深,沟壑纵横。特殊的地理、地貌特征给西藏公路建设和维护管理带来了极大的困难。

由于开挖路堑的需要,在公路建设中不可避免地需要进行边坡开挖,形成了大量的人工高切坡。众多残酷的实例告诉我们,若不对高切坡进行超前诊断及采取相应的处治措施,高切坡极易演变成滑坡,造成重大的财产损失甚至人员伤亡,严重地影响工程建设的工期,甚至会破坏西藏地区脆弱的生态环境,给西藏公路建设造成不可弥补的损失。高切坡灾害现已成为继滑坡、崩塌、泥石流、水毁之后的又一大公路病害,严重制约了西藏公路建设的发展。

近年来,国内外众多的科研工作者围绕高切坡的超前诊断与处治技术进行了深入的研究和积极的探索。本书在认真总结国内外高切坡的超前诊断与处治技术研究现状的基础上,结合西藏地区特殊的地理环境,详细介绍了西藏公路边坡病害情况,深入研究了高切坡超前诊断理论与方法,提出了公路高切坡超前处治结构设计方法及其施工关键技术,进而结合西藏地区隐患灾害点,依托工程的监测反馈信息,对其进行超前处治效果评估,本书所有研究成果可供从事公路边坡超前诊断及处治的同仁们借鉴与参考。

本书共分四章,各章的编写人员分别为:第一章冉仕平、周建庭、陈悦;第二章周建庭、姚国文、张劲泉;第三章周建庭、张永水、张劲泉;第四章周建庭、刘思孟;全书由冉仕平、田金昌、何思明、张正波、周建庭、刘元雪统稿。本书得到了教育部新世纪优秀人才计划、交通部西部交通建设

科技项目(200731895041、200631879285)的大力支持,得到了所有参编人员的密切配合;同时,借鉴参考了国内外有关专家学者的研究成果。在此,一并致谢!

由于本人水平所致,本书有疏漏之处在所难免,诚望从事边坡超前诊断及处治的同仁不吝赐教。

周建庭

2011年5月于重庆交通大学

目 录

第一章 绪论	1
第一节 边坡工程超前诊断与处治技术研究的意义	1
一、边坡病害类型	2
二、边坡病害危害性分析	5
三、边坡工程超前诊断与处治技术研究的意义	5
第二节 国内外研究现状	6
一、边坡工程稳定性的研究	6
二、切坡工程稳定性的研究	9
三、边坡工程超前处治技术研究	11
第三节 边坡工程超前诊断与处治技术研究的技术路线	12
第二章 高切坡超前诊断技术研究	13
第一节 危险性高切坡坡体结构概化模型研究	13
一、单一边坡极限高度的理论计算	13
二、复杂边坡稳定性分析方法研究	22
第二节 高切坡无支护开挖指标体系研究	56
一、开挖卸荷带内岩土体的抗剪强度指标	56
二、雨水入渗后岩土体的抗剪强度指标	59
三、人工高切坡的长期强度	62
四、算例	62
五、结论	63
第三节 危险性高切坡快速判别及超前诊断理论与方法体系的建立	64
一、基于 RMR 值高切坡稳定性的超前诊断	64
二、基于 C-M 准则土质高切坡稳定性的超前诊断	70
三、基于 Hoek-Brown (H-B) 准则岩质高切坡稳定性的超前诊断	77
四、层状岩质高切坡稳定性的超前诊断	98

五、基于非线性破坏准则高切坡稳定性的超前诊断	104
第三章 危险性高切坡超前处治设计与施工关键技术	111
第一节 超前处治结构与高切坡的耦合作用机制	111
一、超前支护桩与高切坡作用机理	111
二、超前支护锚杆与高切坡作用机理研究	123
三、半隧道超前支护结构与高切坡作用机理研究	134
第二节 危险性高切坡超前处治新型结构形式研究	142
一、预应力锚索抗滑挡土墙研究	142
二、土钉加固高切坡研究	148
三、主动减压超前支护结构研究	164
第三节 超前处治结构的实用设计方法研究	169
一、支护桩的实用设计方法研究	169
二、预应力锚索超前支护研究	195
三、基于非线性破坏准则的超前支护桩研究	205
四、路堤边坡抗滑桩超前支护研究	217
五、超前支护桩加固高切坡的静动力响应与永久位移预测研究	225
六、条形基础荷载作用下的研究	236
七、基于上限定理的抗滑群桩研究	248
第四节 超前处治结构施工关键技术研究	255
一、主动减压超前支护结构施工关键技术研究	255
二、其他超前支护结构施工关键技术研究	256
第四章 危险性高切坡超前诊断与处治示范工程及效果后评估	261
第一节 中尼公路曲(水)一大(竹卡)K4773 + 510 段高切坡 示范工程	261
一、K4773 + 510 段高切坡工程地质特性	261
二、K4773 + 510 段高切坡超前支护设计	264
三、K4773 + 510 段高切坡监测信息反馈	265
第二节 中尼公路曲(水)一大(竹卡)K4783 + 704 段高切坡 示范工程	266
一、K4783 + 704 段高切坡工程地质特性	266
二、K4783 + 704 段高切坡超前支护设计	269

三、K4783 + 704 段高切坡监测信息反馈	270
第三节 国道 317 线岗托至妥坝段改扩建工程	
K987 + 650 ~ 900 段高切坡示范工程	272
一、K987 + 650 ~ 900 段高切坡工程地质特性	272
二、K987 + 650 ~ 900 段高切坡超前支护设计	280
三、K987 + 650 ~ 900 段高切坡监测信息反馈	282
第四节 国道 317 线西藏段公路危险性高切坡超前诊断与超前 处治效果后评估	282
一、技术状况评估	283
二、经济状况评估	284
三、社会状况评估	284
附录	286
参考文献	291

第一章 绪 论

第一节 边坡工程超前诊断与处治 技术研究的意义

地球上,山区高地面积占陆地总面积的四分之一,居住人口占世界人口的10%。我国更是一个山区面积占国土陆地面积69%的多山国家,在全国2300多个行政县中,有1500多个山区县,山区人口占全国总人口的56%。我国山区主要集中分布在中西部地区,据不完全统计,西部12个省(自治区、直辖市)的山区面积占西部陆地总面积的86%以上。

山区建设与发展是全人类的共同课题,已经引起国际社会的广泛关注,联合国确定2002年为“世界山区年”(International Year of Mountains 2002)。山区在我国占有举足轻重的地位,我国从2000年开始实施“西部大开发”战略,在某种意义上也就是“西部山区的大开发”。

随着人类社会的发展,人类工程活动的加剧,山区城乡开发建设面临着许多特殊的工程问题,如在我国“西部大开发”城镇与交通建设中,由于场地地形条件的限制,很多时候就不得不进行人工开挖形成道路、房屋建筑等工程建设场地;此时,开挖形成的人工高切坡的稳定性问题成为威胁工程建筑物安全的一项主要因素。

事实上,人工高切坡安全问题在山区建设中广泛存在,尤其在我国西部如西藏这样的山地城镇与交通建设中。西藏地处青藏高原,自然条件极为恶劣,区内山高谷深,沟壑纵横。特殊的地理、地貌特征给西藏公路建设和维护管理带来了极大的困难。由于开挖路堑的需要,在公路建设中不可避免地需要进行边坡开挖,形成了大量的人工高切坡。如果边坡开挖不当,或开挖后不及时进行支护、长期暴露,在开挖卸荷、雨水入渗等因素综合作用下极易导致高切坡发生变形破坏,甚至演变成滑坡,造成重大的财产损失甚至人员伤亡,严重地影响工程建设的工期,破坏西藏地区脆弱的生态环境,给西藏公路建设造成不可弥补的损失,这样的实例在西藏公路建设中屡见不鲜,不胜枚举。高切坡灾害已成为继滑坡、崩塌、泥石流、水毁之后的又一大公路病害,严重制约了西藏公路建设的发展。

一、边坡病害类型

鉴于西藏地区特殊的地理位置及典型的地形地貌,现对国道 317 线西藏段公路边坡类型进行了调查分析,调查结果如下。

1. 夏曲养护段(K1815 + 500 ~ K1994)

边坡病害主要存在于 K1894 ~ K1922 段,主要病害类型为危岩体、崩塌以及坡面破碎所致的小规模坍塌、崩落,主要是由岩体风化、雨水侵蚀所致。总体来看,边坡致灾情况少,危害较小(见图 1.1 ~ 图 1.2)。

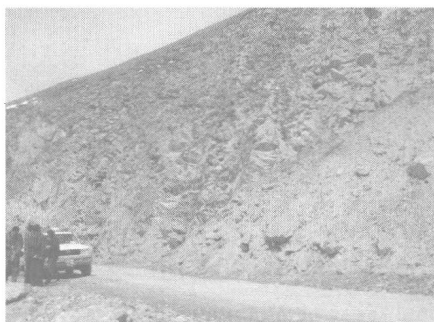


图 1.1 夏曲养护段某边坡外观



图 1.2 边坡岩体风化节理发育情况

2. 巴青养护段(K1815 + 500 ~ K1625)

K1811 ~ K1794 段扎拉沟,为峡谷地貌,多岩质高边坡及坡崩积体边坡,部分岩质边坡节理发育,发育有危岩、崩塌等病害;残坡积的岩屑堆边坡结构松散(见图 1.3),受扰动易发生连续的坍塌,影响道路通行。K1794 ~ K1736 段多堆积体边坡,堆积体介质以粗颗粒的土、砂为主,有些夹有大量的块石、卵石,粒径大小不一,一般胶结弱,在开挖扰动或雨水侵蚀作用下,容易发生坡面的剥落、坍塌、崩落等病害;本段也有很多破碎岩质边坡,主要是坡面风化所致。另外,本段松散岩土体较多,为泥石流沟的发育提供了充分的物质来源,统计到的较大的泥石流沟有十几处(见图 1.4)。K1728 ~ K1690 段地形较平缓,多为高度不高或坡度较缓的堆积体边坡,偶有岩质高边坡,边坡危害较小。K1688 附近路段多岩质高边坡,有几处节理发育完全,崩塌、危岩发育,有些岩质边坡的风化产物堆积于坡脚处,如开挖易坍塌。K1677 ~ K1667 段为恰拉山上下山路段,多岩质高陡边坡,但岩层比较完整,目前危害性不大,在恰拉山顶段有冰雪冻害路段。K1666 ~ K1639 段为宽谷地貌,地形比较平坦,边坡病害少。K1665 附近页岩等风化严重,局部路段边坡发育为西藏地区常见的边坡病害——溜砂坡。K1636

~ K1625 段多堆积体、崩积体边坡,由于风化、雨水侵蚀作用,坡面比较破碎。



图 1.3 扎如沟内的破碎岩体边坡



图 1.4 泥石流沟

3. 丁青养护段(K1671 + 868 ~ K1184)

从养护段起点至丁青约在 K1550 的一段,多为堆积体、坡积体边坡,目前病害以坡面的风化剥落为主(见图 1.5),如开挖边坡易加剧坡面的破碎,可能导致坡面浅层滑塌破坏,另外本段有泥石流沟近 10 处。K1561 + 368 处为一大型滑坡体,滑坡体介质为厚土层,疑为沿基岩面的变形,受河流切割坡脚或地震等作用的影响,每年都有小量的滑移,建议勘测后判定其危险程度。K1548 ~ K1515 段,多为岩质边坡,坡面风化,节理发育,崩塌病害点较多。K1515 ~ 1492 段为 U 形宽谷,地形较平坦,危险边坡较少,但发育两处大型滑坡,均为土质滑坡,滑坡发育时间较长,公路通车后即发现有变形迹象,现每年仍有小量变形,初步判断滑坡仍然处于前期的蠕滑变形阶段,应注意观察,保证坡体上排水通畅。K1492 进入荣通沟后,在约 13km 的路段内,边坡病害较多,主要是坡面物质松散、破碎,地下水丰富,坡面坍塌比较严重,由于排水不畅,路基水害有几处。

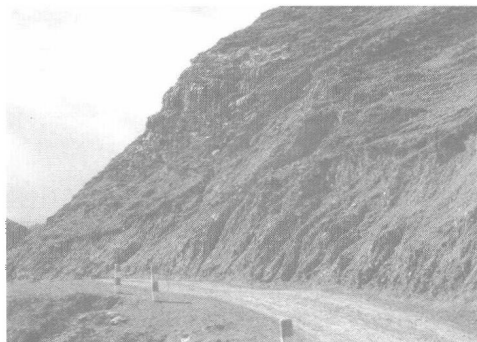


图 1.5 表面风化破碎的堆积体边坡

4. 类乌齐—昌都段

沿线总体来看,本段海拔较低,气候温和湿润,植被茂盛。边坡病害主要是边坡坡脚处的风化剥落(见图 1.6),即山坡上部植被良好,下部由于边坡开挖扰

动或风化等原因造成植被破坏,坡面破碎,严重的坡段随时可能发生剥落、掉块等小规模的风化破坏,雨季时则更为严重。本段翻越朱角拉山,上山前从K1397~K1351段为U形宽谷,多为山坡坡积层的风化剥落,坡面表层破坏较多,同时也有一些岩质高边坡。上山前段多高陡边坡,盘山公路上为高边坡(或原始山坡),下临深渊,接近山顶的路段,边坡较缓。下山段多岩质高边坡(见图1.7),平缓地带多为堆积体边坡,有滑坡发育。



图 1.6 山坡坡脚处的公路边坡风化破碎形态



图 1.7 有部开挖后的岩质高边坡

5. 江达—岗拖段

本段边坡病害以坡面破碎为主,边坡介质主要是堆积体和坡积体,也有一些岩质边坡的坡面风化破碎。堆积体边(山)坡坡脚受开挖或其他原因扰动,植被遭到破坏,坡面植被生态系统难以自行恢复,致使坡面风化逐渐向边坡上方及两侧侵蚀蔓延(见图1.8)。此类边坡目前主要表现为表面的剥落、掉块,如开挖坡脚易引起坡面破碎加剧,甚至发育浅层或深层滑坡。另外,本段有两处大型滑坡发育,目前主要活动迹象表现为路基连续多年不均匀沉陷(见图1.9),但滑坡体上部未见明显变形破坏迹象。峡谷地段岩质高边坡较多,但岩层较完整,稳定性比较好。

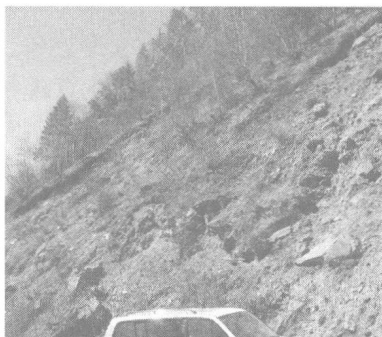


图 1.8 坡面扰动后的风化破碎



图 1.9 路基沉陷段边坡

通过上述调查分析我们发现,国道 317 线西藏段公路边坡病害类型主要有:坡面破碎、滑坡、崩塌和溜砂坡。其中,坡面破碎方面的病害数量最多,主要表现为坡面物质发生持续的小规模塌滑崩落。

二、边坡病害危害性分析

如此多的边坡病害类型,究其原因,分析如下:自然边坡受长期自然营力作用,已处于天然条件下的极限平衡状态,在施工开挖边坡后,破坏了坡体原有的静力平衡条件,由此引起坡体内土体应力重分布,使得岩土体内原有的裂隙不断融合和扩展,在土体内产生大量的卸荷裂隙,并在开挖边坡一定深度范围内形成卸荷带,卸荷带内土体的抗剪强度急剧降低,严重影响边坡的稳定。在降雨条件下,雨水沿坡体裂隙渗透进入坡体内部,并形成暂时的渗流场。一方面增大了坡体重力,产生不利于边坡稳定的渗透压力;另一方面,雨水的入渗,使土体软化,降低了土体的抗剪强度。同时雨水或地下水将土体中易溶盐溶蚀掉,也会造成土体抗剪强度指标的变化。在以上几种(甚至多种)因素的共同作用下,高切坡极易诱发表演变成滑坡。

国道 317 线西藏段公路沿线滑坡的数量不多,但规模较大,一旦发生破坏可能造成的危害很大。目前没有发现活动剧烈的滑坡,但在道路改扩建的过程中,不适当的边坡开挖极易造成本来就处于极限平衡状态的边坡发生失稳,甚至诱发大型滑坡,这在妥昌公路的改建过程中已经有深刻的教训。沿线的岩质高边坡数量很多,大多岩体风化节理发育,为崩塌灾害的孕育提供了温床,这种灾害潜在的危险也很大。另外,一些路段发育有溜砂坡灾害,这些边坡在自然营力的长期作用下处于基本稳定状态或潜伏状态,但一旦受到扰动,可能恢复活动,带来灾害。总之,国道 317 线西藏段沿线的公路边坡病害发育的种类多、数量大,一旦暴发灾害,带来的危害会相当大,应给予高度重视。

三、边坡工程超前诊断与处治技术研究的意义

古人曰:“认识问题的存在就是解决问题的一半”。这句话特别适合边坡失稳的认识和诊断。随着我国基础设施建设规模的日益扩大,铁路、公路建设逐渐向山岭重丘区推进,在这些工程的勘察、可行性论证以及设计过程中,边坡失稳的认知和诊断可以说是其基础中的基础,直接关系到工程的科学设计、安全施工和运营等。它不仅能够降低人类经济甚至生命的损失,而且还能为人类改造环境提供科学的依据。边坡工程的危险性超前诊断是对整个边坡形成过程的稳定性判断,包括短期稳定性和长期稳定性,局部和整体稳定性以及现状评价、预测评价和综合评价。因此,对边坡失稳进行超前诊断是非常重要的。

所谓边坡危险性的超前诊断是指在高切坡形成之前,首先对其进行危险性判别,若判定该高切坡属于危险性边坡(不稳定边坡),特别是在施工过程中或形成后不久就可能发生变形破坏的高切坡,则在高切坡形成之前先进行支护结构设计和施工,待支护工程完成后,再进行边坡开挖。采用这种设计思想后,可完全避免人工开挖边坡诱发滑坡的情况出现,从根本上解决因施工开挖切坡诱发滑坡这一困扰西藏公路建设多年的技术难题。采用这种设计思想有非常明显的优点。具体表现在:(1)可完全避免因人工开挖边坡而诱发滑坡,造成人员、财产的损失,具有非常明显的社会效益;(2)可减少开挖卸荷、雨水入渗对边坡土体抗剪强度的影响,因此,在进行超前支护结构设计时,可采用原状土体的抗剪强度指标进行计算,因而,可大大降低支护结构的投资,具有显著的经济效益;(3)采用超前支护可减少因高切坡失稳对边坡周围环境的破坏,具有较好的生态效益;(4)采用超前支护技术,可大大加快工程建设速度,避免因滑坡影响工程进度的情况发生。

当前正是西藏干线公路修建的高潮时期,也正是西藏干线公路建设中高切坡出现病害最多的时期,故开展“西藏公路边坡病害超前诊断及超前处治技术研究”不仅是必要的,而且是当务之急。本研究成果完全可以避免因开挖不当导致滑坡的情况发生,若这种新的思想能在我国西藏、西部山区乃至全国推广,将会从根本上改变公路建设投资偏高,建设周期过长的不利局面,极大地推进西藏公路建设的发展。因此,开展西藏公路边坡病害超前诊断及超前处治技术研究,对于加快西藏公路基础设施建设,推进西藏经济可持续发展具有重要的科学意义和实用价值。

第二节 国内外研究现状

一、边坡工程稳定性的研究

边坡工程由于受很多复杂因素的影响,很难对其稳定性做出非常准确的评价。根据现有的研究成果可知:一方面,要正确了解边坡失稳的主要影响因素,对边坡失稳起重要作用的基本因素和诱发因素进行分析,是边坡工程稳定性评价的基础;另一方面,相同的边坡体在不同的工况下,破坏模式也可能不同,不同的破坏模式,其力学模式也相应有所差别,对边坡所有可能破坏模式进行分析,是边坡稳定性评价的基本依据。

大量的实践证明,边坡工程稳定性评价相当复杂,包括诸多模糊、随机和不确定性影响因素,对边坡主要影响因素的分析是稳定性评价的基础。根据现有

国内外边坡稳定性评价成果,主要影响因素大致可概括为内因和外因,其内因主要包括:地形地貌、地层和地质构造等,外因主要有:水、震动和人类工程活动等。当然,根据不同评价级别和勘察精度,每个影响因素都可分解为若干因子。例如,地形地貌可分为:山地、丘陵和盆地,而山地也可分为凸形坡、直线形坡和凹形坡或者其组合等;水可以分为降雨、地表水和地下水等。每个影响因素对边坡稳定性评价都起到各自的作用,在分析过程中,可以采取控制其中一个因素变化,求出各自的贡献值;也可以采取全部因素变化,通过数学方法计算各自的贡献值。但具体到某一地区或某一类边坡时,只会采用对边坡稳定性起主要作用的因素,否则只会增加计算的复杂性。例如,英国专家曾对失稳边坡统计结果进行分析,单一因素、二个因素、三个因素、四个因素导致边坡失稳的情况分别占失稳边坡总数的16%、35%、34%、14%,这几种情况共占失稳边坡总数的99%,也就是说,影响边坡稳定性的主要因素不会超过5个。

边坡岩土体的不连续性、非均质性、各向异性、赋存条件的差异性以及制约因素不同方式的组合,在不同人类工程活动或工程荷载的作用下,使得边坡体变形、力学破坏模式和机制都显示出极大的差异性。当然针对不同破坏模式下,边坡稳定性评价是不一样的,因此,正确分析边坡工程所有可能的破坏模式,是边坡稳定性评价的重要依据。目前,边坡的破坏模式并没有一个统一的分类,根据不同的分类,破坏模式可谓是五花八门,如:(1)根据岩性(火成岩、变质岩、沉积岩)、结构(块状、层状、碎裂状)、变形形式(滑动、张裂、崩塌、蠕动)综合分类;(2)孙玉科根据工程地质岩组特征、岩体结构、初始应力场、破坏形态、水文地质和变形破坏时间效应等6个方面提出了5种地质模型:①完整岩体边坡的圆弧破坏模式;②层状结构边坡的顺层滑动、倾倒变形破坏和溃屈破坏;③块状结构边坡的平面滑动、阶梯状滑动、折线形滑动;④碎裂结构边坡的圆弧滑动、追踪结构面滑动;⑤散体结构边坡的圆弧形滑动。(3)黄润秋从变形破坏的力学机理出发,指出岩石边坡破坏模式的力学机理有:滑移—拉裂—剪断三段式机理、“挡墙溃屈”机理、阶梯状蠕滑—拉裂机理、压缩—倾倒变形机理以及高应力—强卸荷深部破坏机理。(4)王兰生、张卓元等提出斜坡变形破坏的6种模式:蠕滑—拉裂、滑移—压致拉裂、滑移—拉裂、弯曲—拉裂、塑流—拉裂、滑移—弯曲。这些破坏模式的划分一定程度上反映了边坡破坏形状、力学特征或变形特性,为了反映边坡破坏时的力学与变形关系,边坡工程破坏模式应该划分为变形—力学、力学—位移模式。这样在边坡具体破坏模式计算中,就可根据已知量和未知量的关系进行理论分析。

边坡工程稳定性评价是以地质地貌现场调查与施工中的技术资料为基础,

采用一些稳定性评价方法,按照稳定性评价过程对边坡工程做出稳定性评价的,因此,稳定性评价方法是边坡稳定性评价正确与否的关键,稳定性评价过程是边坡稳定性评价时效性的根本。

边坡工程稳定性评价方法是在人类长期的工程实践中发展起来的,国内外大致经历了六个阶段:刚体极限平衡阶段;工程地质类比阶段;岩体结构控制论阶段;新方法、新理论阶段;数值计算阶段以及定性和定量、概念模型和仿真模型和监测和反馈相结合的新阶段。就当前而言,国内更注重定量分析,而国外侧重风险分析、可靠度分析、模糊概率分析以及定性和定量相结合分析。

目前,边坡稳定性评价方法的分类并没有统一的标准,工程中最早分为定性分析和定量分析,后来定量分析又分为确定性分析和非确定性分析等,当然每个分类都可以往下划分为很多小类,如一些新方法、新理论的交叉应用。目前工程中最常用分析方法主要有三种分类:定性分析、定量分析、非确定性分析、物理模型法和现场监测分析;安全评价法、阈值法、相关性评价法和试验模拟法;单因素分析和多因素分析。

定性分析方法是从宏观上,通过地质勘察、了解边坡失稳的主要影响因素和可能的破坏模式,对边坡稳定性给出定性的评价。定性分析主要包括:自然(成因)历史分析法、图解法、稳定性分析数据库和专家系统等。

自然(成因)历史分析法采用追溯边坡形成的全过程,对边坡稳定性的现状和未来做出评价和预测,主要用于天然斜坡稳定性评价。

图解法又分为诺模图法和投影图法,前者主要用于土质或全强风化具有弧形破坏面的边坡稳定性评价,后者主要采用赤平极射投影原理评价岩质边坡的稳定性。

从早期的工程类比法到现在的专家系统都是建立在以前尽可能多的自然边坡或人工边坡稳定性评价的基础上,使目标边坡和收集数据库里的现有边坡进行比较,获得稳定性评价的一种分析方法。如基于灰色关联或模糊相似边坡稳定性范例推理方法,以及基于神经网络分析专家系统等。

定量分析方法是从微观上,通过量化指标给出边坡稳定性评价的;同时,从量化指标上,又可以分为量值为定值的确定性分析方法和量值为区间的多因素分析方法,以及边坡的可靠度分析。

极限平衡法是确定性分析主要方法,它的发展经历了一百多年的历史,虽然它有很多不足之处,如滑面形状事先假定、无法考虑变形影响等,但在理论分析中是应用最广泛的一种方法。根据土条块假定的不同,主要包括:Fellenius 法、Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法、Spencer 法、不平衡推力法、Sarma 法等。

可靠度分析是把边坡岩体性质、荷载、地下水、破坏模式以及计算模型等作为不确定量,借鉴可靠度理论方法,采用可靠指标或破坏概率来评价边坡安全度。主要分析方法有:一次一阶矩法、改进的一次一阶矩法、JC 法以及 Monte Carlo 法等。

将影响边坡稳定性的主要因素作为变量,采用一些数学或交叉学科新理论方法进行分析都属于多因素分析方法。例如,把边坡影响因素看作灰色量,采用灰色系统理论建立数学模型,评价边坡稳定性;也有采用模糊数学中的模糊变换原理和最大隶属度原则,结合层次分析法,判断边坡的稳定性;还有一些新理论如分形理论、可拓学理论、突变理论等都属于多因素问题。多因素分析方法在实际操作时,评价中权数的分配带有一定的经验性和主观性。目前多因素分析方法主要是层次分析法,其权值的确定主要有:模糊矩阵法、故障树法、专家调查法、经验法、资料法以及黄金分割点法等。

边坡稳定性评价试验模拟法主要包括:虚拟数值模拟和物理模型模拟。虚拟数值模拟是目前发展比较迅速的一种稳定性评价方法,能够模拟边坡破坏的整个过程,并显示其应力应变的变化等。主要包括有限元法、边界元法、离散元法以及衍生的强度折减法和显式 FLAC 法等。物理模型模拟主要分为底摩擦模型和离心模型。底摩擦模型原理是采用模型底部的摩擦力来代替重力,而摩擦力可以通过带速的大小来调整,主要用于模拟二维物理模型;离心模型主要采用离心力模拟边坡的重力,根据相似原理,模型与原型的几何特征主要物理量必须满足一定的比例关系。

边坡工程稳定性评价经过多年的发展,取得了很多研究成果,但在实际应用中仍然存在一些问题:有时使评价结果过于保守,造成很大的浪费;有时风险太大,发生频繁的崩滑等地质灾害。主要存在的问题有:边坡地质因素的随机性偏于主观经验和地质模型过于简化;变形破坏模式的认识和稳定性评价针对性不强;数值计算中实验参数和计算参数转化和本构模型不清楚;新理论、新方法难以精确反映地质的随机性和非均质性,只是从方法上进行学术创新,在实践中应用不多;各种方法综合运用程度不高等。

二、切坡工程稳定性的研究

边坡工程超前诊断包括边坡现状评价和预测评价两方面内容,也就是所谓的边坡稳定性和切坡稳定性分析。边坡稳定性评价主要为定性评价和定量评价,定性评价目前主要以模糊数学、层次分析、专家系统、神经网络等方法为主,定量分析主要以极限平衡理论(简单边坡)和数值分析方法为主。切坡稳定性分析主要有考虑卸荷的楔形体理论以及考虑爆破、卸荷等因素的数值分析。

晏鄂川等研究了边坡开挖中最优坡度的计算问题,一般情况下,开挖坡度越缓,越有利于边坡稳定;但不加区别地放缓坡度,不仅增加开挖量,而且更多地破坏了地表植被和环境,因而并不可取。应从边坡稳定性和经济方面进行综合分析,确定一个使开挖工程量与支护工程量之和最少的开挖坡度,该开挖坡度称为最优开挖坡度,并建立了人工边坡优化设计的数学模型。陈静曦等以丘陵地区高速公路的人工高切坡为例,探讨了高切坡路基开挖的合理化问题,提出了以监测为先导,边开挖、边加固的科学、合理的开挖程序,并通过实例的分析比较,证明了按合理化的开挖程序进行施工,既可节省资金,缩短施工工期,又能保证施工安全顺利进行。廖红建等对人工开挖边坡的长期稳定性问题进行了一系列的室内三轴试验,研究了黏性土在饱水后强度指标的降低程度,以及强度指标的变化情况,模拟了降雨和地下水位变化时土中应力状态的变化过程,并得出了高切坡由于水的渗入、长期的地质风化、开挖扰动等因素的共同作用下,使其有效黏聚力几乎降低为零的结论,为高切坡的长期稳定性评价提供了一种理论计算方法。李守德等考虑了开挖卸荷的应力路径,通过试验进行模拟,分析了天然固结地基土在侧向开挖过程中土体的变形规律,并根据 Duncen-Chang 模型推导了模量计算公式,该方法能较好地确定土体开挖卸荷后的变形特征。时卫民等研究了人工开挖形成的阶梯状边坡的稳定性计算问题,在假定阶梯形边坡的滑移面为直线的前提下,利用传统稳定系数的概念,推导了阶梯形边坡安全系数的统一表达式,使用非常方便,可用于对普通人工放坡开挖形成的阶梯状高切坡的稳定性进行初步评判。高切坡的长期强度指标是研究其长期稳定性的关键,而影响高切坡长期强度的因素较多,但在工程寿命期内,主要以开挖卸荷和雨水入渗两种因素为主,何思明以损伤理论为基础,分别定义了开挖卸荷引起的岩土体损伤和雨水入渗引起的岩土体损伤,研究了考虑损伤后岩土体的长期抗剪强度指标问题,给出了计算边坡岩土体长期强度的计算公式,从而为研究高切坡的长期稳定性提供了基础。T. Shiotani 采用声发射技术研究了岩质高切坡的长期稳定性。Hiroshi Hayashi, Wilson H. Tang 采用数值方法研究了应变软化土层开挖边坡的渐进破坏模式。此外,杨小礼、李新坡、何思明等采用极限分析的上限定理研究了遵循非线性破坏准则岩土体(碎石土边坡、层状岩质边坡、破碎岩质边坡等)边坡无支护开挖的极限高度问题,从而能方便地对高切坡的稳定性做出初步判断。

肖四国分析了楔形体与开挖坡体模型之间的关系,他采用平面应变条件下的楔形体理论分析开挖坡体的应力场,给出了确定边坡开挖应力场的弹性理论近似解析方法,并从岩土材料的强度准则出发,提出了坡体稳定系数的一种表示方法。在应力分析的基础上,利用坡体内从上而下所作的不同参考线段的稳定