



成都勘测设计研究院有限公司
CHENGDU ENGINEERING CORPORATION

WEIYANTI YUNYU SHIWEN GUOCHENG YU
WULI JIZHI

危岩体孕育失稳过程与 物理机制

张世殊 张建海 刘恩龙 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

危岩体孕育失稳过程与 物理机制

张世殊 张建海 刘恩龙 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书采用现场调研、试验分析（室内试验与物理试验）和数值模拟相结合的研究方法，探讨水电水利环境边坡危岩体的破坏模式、动力性质、发育与失稳运动过程。

本书主要内容为：基于水电水利环境边坡危岩体的工程勘测资料，研究危岩体的类型和发育特点；采用动三轴试验和现场落石试验，研究危岩块体的动力性质和崩塌特点；应用有限元和离散单元法，研究危岩体在降雨入渗情况下的发育过程和在地震荷载作用下的启动和运动演化过程；研究危岩体崩塌与滚石防治对策。

本书可供电、水利、岩土、交通、国防工程、矿山、地震灾区重建等领域的科研、勘察、设计、施工人员及高等院校有关专业的师生参考使用。

图书在版编目（C I P）数据

危岩体孕育失稳过程与物理机制 / 张世殊，张建海，
刘恩龙著. — 北京：中国水利水电出版社，2014.8
ISBN 978-7-5170-2490-3

I. ①危… II. ①张… ②张… ③刘… III. ①危岩体
—研究 IV. ①P642.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第213241号

书 名	危岩体孕育失稳过程与物理机制
作 者	张世殊 张建海 刘恩龙 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.25印张 243千字
版 次	2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	40.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

2008年5月12日,四川省汶川县发生了Ms8.0级特大地震。地震触发了多达6万处左右的边坡失稳地质灾害,不仅数量众多,损失惨重,而且还呈现出了一些大规模的高速抛射与远程运动飞石,大量山体震裂松动。在公路沿线,即使公路开挖边坡本身是稳定的,也因大量的高位滑坡、崩塌、落石、残坡积物流动堆积,致使桥梁断裂、路面砸毁、路基掩埋、交通中断。在灾区26座大中型水电站中,出现了一些在工程边坡之上的环境边坡失稳造成引水发电建筑物等的破坏,如沙牌、鱼子溪、映秀湾、太平驿等水电站,因落石、滑坡、崩塌造成建(构)筑物受损,电站停运。这些现象和问题,已远远超出了人们原有的认识和知识范畴。这1000年一遇的极震事件,给我们的震撼和影响是深远的,很多方面需要我们深刻反思,谦虚地向大自然学习。

近年来,我国水电事业得到了长足的快速发展,水电工程主要集中在云、贵、川、藏等地。受印度洋板块与欧亚板块的碰撞、隆升影响,该地区河谷深切狭窄,谷坡陡峻,地质条件异常复杂,出现了一批100~300m级的高坝,开挖边坡高达300~500m,开挖边坡之上还可能存在数百米至千余米的环境边坡,岸坡坡度 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。迄今为止,人们普遍对开挖的工程边坡稳定性研究予以特别的关注和开展较深入的研究,而对工程边坡之上的环境边坡危岩体稳定性缺乏足够重视,尚未开展系统研究。

环境边坡指位于工程边坡开挖开口线之外的,在自然营力作用或人为作用下,一旦失稳可能会对工程或人员构成威胁的、具有一定倾斜度地形的地质体。环境边坡内发育的危岩体,在降雨入渗和地震荷载作用下,会发育、

失稳、滑动，从而进一步危及水利枢纽建筑物的安全，所以对这些环境边坡危岩体在地震荷载作用下的安全评估和预测是必须的。

本书在研究水电水利工程环境边坡危岩体工程资料的基础上，对危岩体进行了分类，开展了岩石的动三轴试验和落石崩塌试验，并采用有限单元法模拟了危岩体降雨入渗过程和离散单元法模拟了地震荷载作用下危岩体的启动和滑动过程，最后提出了崩塌滚石常用的防治对策。全书包括：绪论、水电水利工程环境边坡危岩体分类和发育特点、危岩体在循环荷载作用下的动力损伤特性、危岩崩塌体（滚石）的运动学与动力学研究、降雨条件下危岩体边坡的入渗过程分析、地震荷载作用下危岩体崩塌的运动过程模拟、危岩体崩塌与滚石防治对策研究，以及结论与展望等内容。

本书是在中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司（以下简称“成都院”）科技项目——“水电水利工程环境边坡危岩体勘察关键技术研究”的基础上撰写的，本书在撰写过程中得到了成都院公司领导，以及院科技质量部、技术管理委员会和地质处等相关部门的大力帮助。本书个别章节引用了该科技项目的研究成果，在此向该项目合作单位——成都理工大学、四川大学、中国地质大学（武汉）的项目研究团队一并致谢！

由于作者水平有限，书中难免存在不妥或错误之处，恳请读者批评指正！

作 者

2014年7月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 环境边坡的概念	2
1.3 环境边坡的范围和环境边坡危岩体	3
1.4 危岩体的研究现状	6
2 水电水利工程环境边坡危岩体分类和发育特点	13
2.1 水电水利工程环境边坡危岩体的地质环境条件	13
2.2 水电水利工程环境边坡危岩体的分类	15
2.3 水电水利工程环境边坡危岩体的发育特征	16
2.4 水电水利工程环境边坡危岩体的危害性	26
2.5 本章小结	27
3 危岩体在循环荷载作用下的动力损伤特性	28
3.1 试验设备和加载路径	28
3.2 试验结果及分析	29
3.3 本章小结	37
4 危岩崩塌体(滚石)的运动学与动力学研究	38
4.1 滚石试验设计	38
4.2 滚石运动状态分析	44
4.3 滚石运动参数分析	49
4.4 试验验证	59
4.5 本章小结	62

5 降雨条件下危岩体边坡的入渗过程分析	63
5.1 流固耦合基本原理及有限元方法.....	63
5.2 计算工况及有限元计算软件介绍.....	66
5.3 滑塌式危岩体的入渗过程.....	67
5.4 倾倒式危岩体的入渗过程.....	76
5.5 坠落式危岩体的入渗过程.....	84
5.6 本章小结.....	93
6 地震荷载作用下危岩体崩塌的运动过程模拟	94
6.1 离散单元法基本原理.....	94
6.2 地震荷载作用下滑塌式危岩体失稳的运动过程.....	99
6.3 地震荷载作用下倾倒式危岩体失稳的运动过程.....	112
6.4 地震荷载作用下坠落式危岩体失稳的运动过程.....	123
6.5 本章小结.....	134
7 危岩体崩塌与滚石防治对策研究	135
7.1 崩塌与滚石的防护等级.....	135
7.2 崩塌与滚石的常用防治对策.....	144
7.3 本章小结.....	151
8 结论与展望	152
8.1 结论.....	152
8.2 展望.....	153
参考文献	154

1 绪 论

1.1 问题的提出

近些年来,我国水电事业得到了长足的快速发展,水电工程主要集中在云南、贵州、四川、西藏等地。受印度洋板块与欧亚板块的碰撞、隆升影响,该地区河谷深切狭窄,谷坡陡峻,地质条件异常复杂,出现了一批 100~300m 级的高坝,开挖边坡高达 300~500m,开挖边坡之上还可能存在数百米至千余米的自然边坡,岸坡坡度 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。例如:大岗山水电站坝址开挖边坡高达 313m,自然边坡高度近 600m;猴子岩电站工程开挖边坡最大超过 150m,自然边坡 800~1000m;双江口最大坝高 314m,开挖边坡高达 378m,坝顶至山顶尚有 800~1000m 斜坡;锦屏一级水电站开挖边坡 540m,自然边坡高度达 1500~1600m 等^[3,4]。这些边坡的规模是世上少有的。边坡稳定性问题成为水电工程中迫切要求解决的关键性工程地质问题,地质工程师面临前所未有的挑战。迄今为止,人们普遍对开挖的工程边坡稳定性研究予以特别的关注和开展较深入的研究,而对工程边坡之上的自然边坡稳定性缺乏应有的足够重视,尚未开展系统的研究。其实,由于周边边坡位置高程高,势能大,任一小型的边坡失稳都有可能对下部工程构筑物构成巨大的危害,为确保施工期及运营期的保障车辆、设备和人员的安全,保障工程的顺利施工和长期运营,对其进行研究与评价刻不容缓。工程边坡之上的环境边坡问题是摆在我们面前的又一新的研究课题。

尽管危岩体的研究取得了大量研究成果,但是危岩体发育和形成机制、失稳模式和演化过程、运动特征及防治措施在水电工程环境边坡中还没有很好的解决,存在诸多问题,主要表现如下:

(1) 西南地区水电工程环境边坡危岩体的主要类型是什么?其失稳的主要模式又是什么?

(2) 危岩体的发育失稳过程有其发生的物理力学机制,如何结合工程地质学从岩土力学的角度来研究这一问题?

(3) 地震荷载作用下危岩体失稳的物理机制是什么?不同类型的危岩体其失稳的物理机制有何区别?

(4) 危岩体崩塌之后的运动特征、轨迹是什么?不同崩塌方式的滚石对建(构)筑物的危害程度如何评价?

(5) 危岩体防治中所应用的方法种类繁多,但很多方法都是凭经验进行设计的,缺乏理论指导。

(6) 水电工程环境边坡危岩体的研究还处于探索阶段,没有形成完整的研究体系,也没有成熟的相关规范。

西南地区在兴建高坝大库后形成了很多不稳定环境边坡危岩体,在降雨入渗和地震荷载作用下这些环境边坡危岩体会发育、失稳、滑动,从而进一步危及水利枢纽建筑物的安全,所以对这些环境边坡危岩体在地震荷载作用下的安全评估和预测是必需的。

1.2 环境边坡的概念

限于国情、行业和研究人员的角度不同,国内外对于边坡的理解不尽相同。无论是在名称上还是在内涵上多存分歧,同一术语的概念也有很大差异,迄今还没有一个公认的定义。在英文翻译上更是五花八门。例如,工程边坡的英译有:engineering slope, engineered slope, cut slope, cutting slope, excavated slope, excavation slope, man-made slope等。因此,在提出环境边坡概念之前,有必要对几个边坡的概念和内涵进行厘定^[5]。

(1) 边坡或斜坡(slope):在自然营力作用或人为作用而形成一定倾斜度地形的地质体。它包括天然斜坡和人工开挖的边坡,具有一定的坡度和高度,在重力和其他地质营力作用下改变着斜坡的外貌,表现为斜坡土石的下向移动,使之逐渐变缓。由全国科学技术名词审定委员会审定公布的边坡/斜坡定义为:岩体、土体在自然重力作用或人为作用而形成一定倾斜度的临空面。我们认为,这个定义不全面,不应只从地貌形态上来定义,边坡不只是一个面,它的稳定性是受软弱面、结构面组合、甚至是受深部卸荷裂隙控制的,是具有一定的深度的“地质体”。

(2) 自然边坡(natural slope):由自然地质作用形成地面具有一定倾斜度地形的地质体。它是天然存在的,是经受长期自然营力作用的产物,包括滑坡、倾倒变形体边坡。

(3) 工程边坡或人工边坡(engineering slope):由人工开挖、填筑形成地面具有一定倾斜度地形的地质体。它由人类工程活动而形成,如因修建水工建筑物、构筑物 and 市政工程开挖或填筑施工所形成的边坡。对于水电工程而言,工程边坡一般是由人工开挖形成的,因而英译 cut slope 也是比较妥当的。

(4) 边坡工程(slope engineering):为满足工程需要,人工对边坡进行改造、加固或采取支护措施来达到边坡稳定性的工程。边坡工程概念早在霍克教授(1977)《岩石边坡工程》经典专著中就有体现^[6],孙广忠(1993)明确地提出了边坡工程的概念^[7],它具有两层含义:以最经济的造价修建一个人工边坡,或者以最经济的造价防治一个自然边坡破坏,其目的是建成一个经济实用的边坡工程。

(5) 边坡环境(slope surroundings):边坡影响范围内的岩土体、水系、建(构)筑

物、道路及管网等的统称。此概念在建筑基坑工程中应用较多，而在水电工程很少提及。基坑工程地处都市，建筑物密布，在边坡开挖和基坑支护时，就必须考虑边坡环境，以免造成差异沉降、地面开裂、挖断地下生命线等。而水电工程地处深山峡谷，少有建（构）筑物、道路及管网等，所以在开挖及支护中，一般无需考虑边坡环境。此处的“环境”概念中并不涉及大气圈、水圈、噪声的“environment”，而是关于开挖边坡周边堆放的岩土体、地表水、地下水、已有的建（构）筑物、道路、电线和管网等的道路交叉条件、上空净空条件和地下埋设物，因而采用“surroundings”用语较为贴切。

在传统的水电工程中，重视对开挖的工程边坡的勘察、设计和管理，对库首边坡也有一定的关注，但对工程边坡之上的自然边坡的危害性认识不足，在条例、规程、规定上尚属空白。汶川地震的教训是深刻的，它告诫人们：工程边坡稳定，不一定道路桥梁工程就安全，之上的自然边坡是一大危险源，不能轻视之！现代水电工程，越来越多地建在深山峡谷中，在数百米工程边坡之上，还有数百米至千米以上的自然边坡，由于其势能巨大，一块落石就有可能造成极大的危害。对它的稳定性和危害性调查和评价更不能轻视之。为引起大家对这一问题足够重视，特引入环境边坡的概念。

(6) 环境边坡 (surroundings slope): 位于工程边坡开挖开口线之外的，在自然营力作用或人为作用下，一旦失稳可能会对工程或人员构成威胁的、具有一定倾斜度地形的地质体。即，它是自然边坡的一部分，在自然条件下及人类工程振动等作用下，在工程边坡范围之外、可能发生落石、崩塌、滑坡等地质灾害，进而造成其下人员伤亡和财产损失的边坡^[8]。

从自然边坡中划分出环境边坡，是为了区别一般意义上的自然边坡，突出工程边坡周边边坡的重要性和潜在危险性，扩展边坡概念，修正边坡的勘察、设计和管理理念，达到减灾防灾的目的。

1.3 环境边坡的范围和环境边坡危岩体

1.3.1 环境边坡的范围

环境边坡是位于工程边坡开挖开口线之外的对工程具有潜在危害的边坡。对于水电工程而言，工程边坡是指枢纽建筑物区的开挖边坡，环境边坡是指枢纽建筑物区的工程边坡开挖线以外的自然边坡，见图 1.1 所示。那么，环境边坡涉及的范围是多大？

环境边坡的范围不是一个确定的值，尽管它的下限一开口线是确定的，但是它的上限是由多个因素综合确定的一个相对界限。在确定环境边坡范围时，至少应考虑以下因素^[9-11]。

(1) 水工建筑物及其重要程度。按照库容的大小和装机容量，水电枢纽区工程等级划分一等、二等、三等、四等、五等；水工建筑物分为永久性和临时性建筑物；永久性建筑物又分为主要建筑物和次要建筑物。工程等级越高，水工建

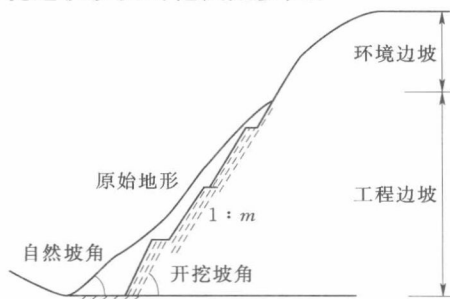


图 1.1 环境边坡与工程边坡关系示意图

筑物级别越高，相应的环境边坡的范围越大，永久性水工建筑物的环境边坡范围大于临时性的，主要建筑物的环境边坡范围大于次要建筑物的。

(2) 环境边坡失稳地质体的规模及其稳定性。滑坡、崩塌或者泥石流的规模愈大，涉及的范围就会愈大；它们的稳定性越差，可能失稳的概率就大，就应在更大范围内进行排查。

(3) 人为工程活动的强度和影响范围。人为工程活动的影响深度已远远超过自然营力，水电工程尤甚。对边坡的影响可以是持久的，如坝基和边坡开挖的深度、坡率和范围；也可以是短暂的，如施工爆破与振动、施工用水管理失控、非常水位降落、泄水雨雾；还可以是周期性的，如水库运行的水位变化、泄洪雾化形成高强度的降雨等。对于排水、泄洪建筑物边坡，就需要考虑大流量、高流速、高挑距泄流的泄洪雾化影响范围。

(4) 环境边坡失稳地质体势能及其危险度。环境边坡的潜在危险度，与失稳地质体的势能密切相关。但也不能就肯定地说：势能越大危险度就越大。它还取决于落石的形状、途径斜坡的坡度、物质组成、形态和植被状态等复杂因素。对此，我国研究成果甚少。笔者正致力于环境边坡危险度的评价体系的构建方面的研究。

环境边坡范围的精确确定不是一件容易的事情，受认识水平以及潜在的安全隐患的性状和规模、危害度等多个因素的影响和控制。但是，也无需对环境边坡涉及的范围过于纠结，在一般情况下，如在可行性研究阶段，以第一分水岭作为环境边坡的上边界是比较切实可行的。

1.3.2 环境边坡危岩体

环境边坡局部的、个别的、高悬的失稳块体，对坡下水电枢纽区都是重大的潜在威胁。因此，为确保坡下的边坡工程、构建筑物和施工人身安全，按潜在危险源对环境边坡进行划分是一个合理可取的方法。根据地质属性，环境边坡的危险源可分为：孤石（群）、危石（群）、危岩体和高位覆盖层等4类。

(1) 孤石（群）。它是指坡面上零星分布、具有一定体积的（一般大于 1m^3 ）、孤立的岩石块体。若以单体形式呈现的则称为孤石；若以群体形式呈现，块石之间相互叠置、集中连片分布的则称为孤石群。孤石（群）无根，置于残坡积、崩坡积或者强风化岩体之上，是差异风化、崩塌的产物。常见于风化花岗岩、凝灰岩、凝灰角砾岩等边坡之上，或者是在山脊附近有突兀的悬崖陡壁、常发生崩塌的下方（图 1.2）。



图 1.2 孤石（群）示意图

(2) 危石（群）。受边坡表部的风化卸荷裂隙、构造裂隙等结构面的组合交切，有脱

离母体向临空方向发生松动变位趋势的、稳定性差的岩石块体。由一个或有限个岩石块体组成,中间不包含显著的分离结构面,为相对完整的块体。若以单体形式呈现的则称为危石;若以群体形式呈现,危石之间间隔很小、密集分布的则称为危石群。它与崩塌的机制相同,但规模小(一般小于 100m^3)。它们可能是以滑移、坠落或倾倒等形式崩塌的地质体(图 1.3),受风化卸荷作用影响大。

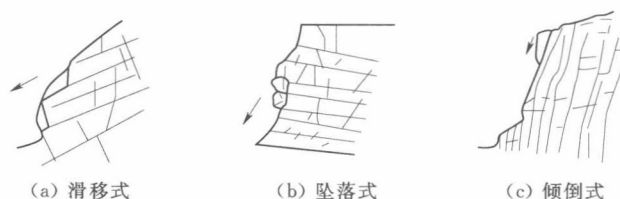


图 1.3 危石(群)示意图

(3) 危岩体。被多组不连续结构面切割分离,稳定性差,可能以滑塌、坠落或倾倒等形式失稳的地质体(图 1.4)。

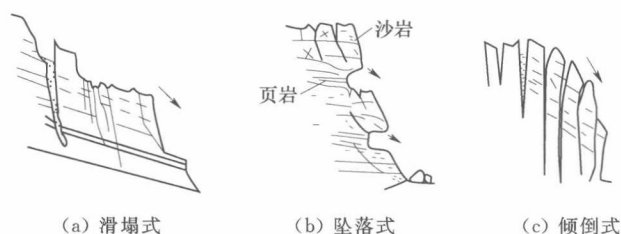


图 1.4 危岩体示意图

危岩体的体积比危石的体积要大得多,它可以包含数个或多个显著的结构面,只不过这些结构面不构成切割面或者滑移面而已,只起到破坏岩体的完整性的作用。按照《滑坡防治工程勘查规范》(DZ T0218—2006),体积不小于 100万 m^3 的为特大型, $10\text{万} \sim 100\text{万 m}^3$ 的为大型, $1\text{万} \sim 10\text{万 m}^3$ 的为中型,小于 1万 m^3 的为小型崩塌。

(4) 高位覆盖层:位于工程边坡开口线以外,具有较高势能的、松散的第四系堆积物或人工弃渣。主要由高位阶地冲洪积物、坡顶风化残坡积物、坡中残坡积物和崩坡积物等物质组成(图 1.5)。

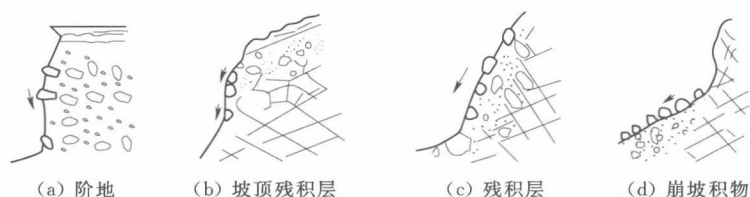


图 1.5 高位覆盖层示意图

在天然状况下,阶地冲洪积物、坡残积物稳定性较好,但在开口线处由于形成新的临空面,容易形成于流动型破坏,发生小规模土溜,雨季时形成坡面泥石流。崩坡积物分布

在陡崖下方，大小混杂，一般具有架空现象，也容易形成于流动型破坏，发生滑动或者滚石。

另外，由于公路开挖、料场弃土等人工弃渣是在很短的时间内形成的松散堆积体，以天然休止角产状产出，架空结构明显，稳定性差。在后部加载情况下，极易发生流动破坏，雨季时容易发生泥石流。若处在工程边坡影响范围之内，人工弃渣亦可成为环境边坡的潜在危险源之一。

由上述可知，孤石、危石、危岩体是环境边坡最主要的危险源，是环境边坡勘察最重要的调查评价对象，统称为危岩体。

1.4 危岩体的研究现状

危岩体是指陡峭边坡上被多组结构面切割，在重力、风化营力、地震、渗透压力等作用下与母岩逐渐分离，稳定性较差的岩体。危岩体一般存在于高陡边坡及陡崖上，是高边坡稳定性问题的重要组成部分，是高边坡主要的地质灾害类型之一，也是对水电站、公路和铁路等各种工程建设有较大危害的地质灾害类型之一。

1.4.1 危岩体成因机制研究

危岩体成因是危岩研究最基础的内容，认清危岩体的成因和其所处的变形发展阶段，有益于危岩体防治对策的制定，目前危岩体成因研究成果大体如下^[12-17]：危岩体发育是内外部条件共同作用的结果，表现为高陡的岩质边坡上由于地质作用或应力的重分布等内外营力的作用下，岩体形成裂隙，主控面的失稳断裂和贯通是形成危岩体的根本。内在条件主要包括地形地貌、地层岩性、地质构造等，这是危岩体形成的物质基础；外在条件如降雨和地下水、地震、风化及人为因素等对危岩体的形成和发展起着重要的作用。

在此基础上，一些学者分析了其他因素如底部大规模采空和热应力的交变作用对危岩体形成的影响，指出底部大规模采空是某些危岩体形成的主要原因，热应力的交变作用是危岩体形成的重要因素。另外，有的学者提出了岩石边坡的稳定性是一个动态演化的地质历史过程，将其分为3个具有典型意义的阶段：表生改造、时效变形和破坏发展。骆银辉等（2008）^[18]认为陡峻边坡崩塌主要受控于节理裂隙和结构面的组合，其活跃程度取决于卸荷裂隙的扩张与扩展，层状结构岩体的岩层面和构造裂隙面在崩塌的形成中普遍起到控制作用，因而水平岩层、顺向岩层、逆向岩层、块状岩体陡峻边坡崩塌的形成条件不同，崩塌表现出不同的扩展特点。唐红梅等（2005）^[19]以万州区太白岩为例，探讨了三峡库区危岩体的发育过程，将其分为初始阶段、河谷下切阶段、差异风化阶段、临界岩腔形成阶段、初始危岩体形成阶段、危岩体崩落初始阶段、危岩体崩落连锁阶段和微观链完成阶段等8个阶段。陈洪凯等（2009）^[20]提出了危岩形成主要是危岩体后部主控裂隙面发展和贯通，着眼于危岩主控结构面的损伤—断裂机制。

1.4.2 危岩体分类及变形失稳模式研究

危岩体的分类是对危岩体进行系统研究基础上，根据危岩体规模、运动方式、失稳机理或模式、块体方位等不同标准进行划分。迄今，对危岩体分类尚未统一，从不同角度出

发存在多种方案^[20]。

1.4.2.1 按规模分类

按规模危岩主要有以下 3 种分类方式^[21]：

(1) 分为边坡表层崩塌（岩石崩落、表土崩落）、坡肩崩落、坡面体崩落（岩石崩塌、沉积层崩塌）。

(2) 按体积大小将危岩体分为：特大型（ $\geq 1000\text{m}^3$ ）、大型（ $100 \sim 1000\text{m}^3$ ）、中型（ $10 \sim 100\text{m}^3$ ）、小型（ $1 \sim 10\text{m}^3$ ）、落石（ $\leq 1\text{m}^3$ ）。

(3) 按块体规模分为崩塌、坠落、剥落。

1.4.2.2 按运动方式

危岩体按失稳后的运动方式划分为^[22]坠落式、跳跃式、滑动式、复合式。

1.4.2.3 按失稳机理或模式分类

危岩体的失稳模式即危岩体的破坏模式，是稳定性研究及治理措施研究的基础。由于分类角度、研究区域不同，危岩失稳模式存在多种分类方案。

胡厚田等（1989）^[23]按照危岩体发生失稳破坏机理及发展规律，将危岩失稳模式分为倾倒式、滑移式、鼓胀式、拉裂式和错断式。这个分类反映了危岩形成发展的几个基本途径，危岩体在岩性、结构面特性、地貌、危岩体形状、岩体受力状态、起始运动形式和失稳因素等方面都有不同特点，其中危岩体受力状态和起始运动形式是分类的主要依据。在某些条件下，还可能存在的某些过渡类型如鼓胀—滑移式、鼓胀—倾倒式等中间类型。

黄润秋（2004）^[24]在大量的工程实践的基础上，按危岩体的控制条件和失稳机理对危岩体失稳模式进行分类，共分为贴坡式、悬挂式、孤立式、板裂式、碎裂式、砌块式和软弱基座式等 7 个基本类型。

唐红梅和陈洪凯等（2005）研究认为^[25, 26]：根据危岩体失稳破坏的可能模式，可将危岩体分为单体及群体两大类型，群体由单体叠置组合而成。危岩单体分为压剪滑动型、拉剪倾倒型、拉裂坠落型和拉裂—压剪坠落型 4 类；群体危岩分为底部诱发破坏型及顶部诱发破坏型 2 类。

研究区域不同，危岩体可能的失稳模式不同。如：①杨淑碧等（1994）^[27]根据危岩体变形破坏方式的不同，将重庆市中心区危岩体分为拉断坠落式（Ⅰ类）和滑落式（Ⅱ类）两大类。同时根据危岩体的发育特征，拉断坠落式Ⅰ类危岩体分为爬壳式、帽沿式和板状三亚类；滑落式危岩体分为受两组裂隙切割成柱形体和三组以上裂隙切割的楔形体两亚类。②旷镇国（1994）^[28]按危岩体最终破坏时的受力状态和破坏机制，将重庆渝中区危岩体失稳模式划分为拉断—坠落、剪切—坠落或崩落、压碎—崩落、倾倒—崩塌等四类。③张奇花等（1998）^[29]研究认为链子崖危岩体可能有 8 种破坏模式：蠕滑体滑移失稳、整体压陷倾斜崩塌、滑移倾斜交错或同步、裂隙段屈曲变形破坏、上下滑出破坏、倾斜—滑移破坏、倾斜—隐裂缝开裂—崩塌、倾斜—滑移—隐裂缝开裂—崩塌或滑坡。④刘廷登（2001 年）^[30]在研究砂页岩悬崖陡壁危岩体发育机制时，根据危岩体的发育形态将重庆至万县一带危岩体分为“爬壳”式、“帽沿”式、“板式”、“拱梁”式、“板梁”式、“半拱”式、柱状和楔形 8 类。

1.4.3 滚石运动特征研究

危岩体在自然或人为因素作用下,与母岩彻底分离,以滚石形式向坡下运动,会对坡表、坡脚处的建(构)筑物和居民造成严重的危害。鉴于此,国内外的一些学者采用推导运动学公式、物理力学试验和数值模拟等手段对危岩体失稳后的运动路径进行了有益的探索^[31-38]。

影响危岩落石运动轨迹的因素有危岩落石本身的大小、形状、坚硬程度及起始运动状态,边坡(或山坡)的高度、坡度、坡形,以及坡面组成物质及其表面起伏程度,覆盖层及植被等。危岩失稳后的运动形式分为:滑动、直落、滚动和跳跃4种^[23]。

在对危岩落石运动轨迹的影响因素和滚石运动形式分析的基础上,众多学者采用不同方法对滚石运动特征进行了研究。其中,在运动学公式推导方面^[23, 39, 40],胡厚田、唐红梅和高云河等人认为危岩体下落过程分为几个阶段,推导了各运动形式运动速度、运动距离、运动轨迹、腾越和弹跳等的运动学计算公式。在物理力学试验和数值模拟方面,亚兰等(1996)^[41]通过对链子崖危岩体的地质力学模拟和数值模拟,得出天然斜坡本身对方量不大的崩塌落石有很好的消能止动作用,计算出入江块石的运动能量和跳跃高度;周云武等(1998)^[42]通过对16块岩体的现场滚石试验,分析了岩体的运动速度、弹跳高度和冲击能量,验证了SNS柔性安全防护网的安全性能;Yoichi等(2000)^[43]通过在人工花岗岩边坡上进行的大量落石试验和数值模拟分析,指出运动距离与落石的体积(落石的数量)成正比关系,停留的中心距离与落石的体积(落石的数量)成反比;Joachim等(2003)^[44]对意大利的南蒂罗尔地区危岩体进行了试验和数值模拟的研究,分析了滚石停止运动时运动的距离、跳跃高度和动能的变化。另外,黄润秋等(2007)^[45]在落石试验的基础上,分析了坡面特征对滚石停留位置的影响,坡面对滚石运动时间(到达坡底动能)和对不同形状滚石的运动特征的影响,并对平台对滚石停积作用进行了试验研究;叶四桥等(2011)^[46]利用天然高陡边坡采用不同的落石形状进行了落石试验,寻找落石运动路径统计规律,对寻找落石运动特征的认识取得了较好效果。唐红梅等(2003)^[47]人将落石分为初始运动、碰撞、滑动、滚动4种运动形式,并根据危岩体的破坏形式推导了不同危岩破坏形式下落石在各运动阶段的轨迹方程。郑智能等(2008)^[48]通过颗粒流分析模拟出落石的自由落体、弹跳、滑动和滚动等运动形式、运动过程岩块的崩解;得到了落石的运动速度、位移等运动学参数。梁璋彬(2008)^[49]将落石按质量大小分为大质量、中质量、小质量3类,着重研究了不同质量落石的运动特征。魏云杰等(2010)^[50]基于颗粒流程序,建立颗粒与颗粒之间和颗粒与墙体之间线性接触刚度模型、滑动模型和带滞后阻尼性质的接触模型,对危岩体崩塌各个运动过程进行数值实验,得出了一种比较理想的模拟方法和参数选取方法。蔡红刚等(2011)^[51]人通过调查滚石与坡面碰撞留下的地质痕迹,真实复原了滚石运动路径,依据坡度、坡表覆盖层厚度、植被发育程度等,选择碰撞恢复系数,计算滚石运动参数;苏胜忠(2011)^[52]运用运动学原理对公路岩质边坡崩塌落石的运动轨迹、落石速度、弹跳高度、位移以及动能等运动特征,进行计算分析。章广成等(2011)^[53]通过大型有限元分析程序ANSYS探讨了落石边长、入射速度、入射角及地面岩土覆盖层对碰撞系数的影响。Yuannian Wang等(2011)^[54]利用离散元模型考虑了落石冲击破碎的三维碰撞模拟,成功预测了落石的运动撞击和破碎

过程。

各种落石计算、模拟方法可用来考察落石运动特征,但计算方法限于一定假设条件之下,与实际相比偏差较大。计算方法模型的建立和参数的选择和取用均依赖于大量的落石事件,或者重复试验结果,计算结果同时需要落石运动实验来验证。目前落石试验均未细化下垫面岩土介质参数的动力特性的影响。落石运动过程的复杂性,受众多因素影响,使其运动路径的偶然性、随机性是难以回避的。

同时,也有学者^[55-57]认为可以利用从监测资料中提取的位移、速度和加速度参数,建立危岩体的运动模型,预测危岩体运动状态的改变。

1.4.4 危岩体稳定性评价方法及防治对策研究

危岩体的研究主要通过科学的地质力学及数值计算^[58-63],分析危岩体所处的变形或失稳发展阶段,确定其危险性,然后采用合理的防治措施,保护危岩体影响范围内的人民生命财产的安全,避免安全事故的发生。而防治对策的合理应用取决于对危岩体本身稳定性的评价。由于稳定性评价和防治措施研究的重要性^[64-73],众多学者进行了有益的探索。

1.4.4.1 危岩体稳定性定性评价方法研究

危岩体稳定性评价的方法主要有四大类:定性方法、定量方法、数值与物理模拟法和不确定性分析方法。定性方法主要有工程地质类比法和赤平投影图解法等;定量评价方法主要有极限平衡法等;物理与数值模拟法主要有相似模型试验和数值模拟法;不确定性评价方法主要有灰色聚类法、比较识别法、可靠度分析法、时序分析方法等。

1. 定性方法

工程地质类比法又称工程地质比拟法,是危岩体稳定性评价最基本的研究方法,其内容含有自然历史分析法、因素类比法、类型比较法等,其实质是把已有的危岩体研究经验,应用到条件相似的新高边坡危岩体的研究中,需对已有危岩体进行广泛的调查研究,全面研究工程地质因素的相似性和差异性,分析研究危岩体所处自然环境,以及影响危岩体变形发展的主导因素的相似性和差异性。其优点是能综合考虑各种影响危岩体稳定的因素,迅速地对危岩体稳定性及其发展趋势作出估计和预测,缺点是类比条件因地制宜,经验性强。赤平投影图解法也是岩体稳定性分析的一种重要方法,罗永忠等(2004)^[74]采用赤平投影图解法分析了达县城区立石子危岩体的稳定性,并应用于实践,取得了良好的效果。

2. 定量方法

极限平衡法通过计算在滑移破坏面上的抗滑力(矩)与滑动力(矩)之比即稳定系数来判断危岩体的稳定性。这种方法20世纪初提出来以后,经过众多学者的不断修正,成为目前在工程实践中最常用的危岩体稳定性分析方法。其优点是简单可行,结果明确。孙云志等(1994)^[75]、陈明东(1999)^[76]、吴文雪等(2003)^[77]和陈洪凯等(2004)^[78]分别根据各自的分类模式或具体工程特点,采用极限平衡法,提出了危岩体失稳判据。

3. 物理与数值模拟法

(1) 相似模型试验法。相似模型试验法是以相似原理为理论基础,针对所研究问题的实际情况,通过原型调研或前期研究成果,利用地质—力学分析,抽象建立模拟研究模型

即建模。采用特定的方法如研究区地质体介质相似材料选择,边界条件(位移边界或应力边界)的设计,在一定条件下进行模型试验研究,以达到再现或预测研究对象中已存在或发生过的地质现象之目的,是危岩体稳定性研究的一种重要方法,对于规模大,失稳危害性大的危岩体常采用此方法分析稳定性和失稳变形过程。哈秋聆(1995)^[79]利用相似理论,采用模型试验的方法分析了长江三峡链子崖危岩体的稳定性和变形失稳过程。

(2) 数值模拟法。随着计算机技术和计算方法的发展,复杂的工程问题可以采用离散化的数值计算方法并借助计算机得到满足工程要求的数值解,数值模拟技术是现代工程学形成和发展的重要动力之一。通过这些方法,可以模拟并得到岩土体内部的应力—应变关系,再现其变形甚至破坏过程及其机制。在危岩体数值分析中最常用的数值方法包括有限元法、离散元法和非连续变形数值分析(DDA)法等。这些方法目前在危岩体稳定性评价中均有应用。

从20世纪60年代开始,人们就开始尝试采用数值计算方法的分析岩土体稳定问题。在危岩体稳定性应用方面,20世纪90年代中期,杨淑碧(1994)^[27]、刘国明(1996)^[80]和何应强(1996)^[81]率先对危岩体稳定性进行了有限元分析,随后众多专家学者采用有限元法对边坡进行了大量的研究分析,取得了诸多研究成果。

20世纪70年代,Cundall提出离散单元法(DEM),使得节理岩体模拟这种更接近于块体运动的过程模拟成为可能^[82]。

20世纪80年代,Cundall提出快速拉格朗日分析方法(FLAC)^[83]并由Itasca公司进行商业程序化。这种方法考虑材料的非线性和几何学上的非线性,采用混合离散化法使塑性破坏和塑性流动得到体现;并采用显式时间差分解法,大大提高了运算速度;适用于求解非线性大变形,但节点的位移连续,本质上仍属于求解连续介质范畴的方法。赵晓彦(2003)^[84]通过对万县长江库岸危岩体在不同工况下的稳定性离散元数值分析,直观地揭示出危岩体在不同工况下的破坏程度,得出危岩体的主要破坏形式为倾倒式崩塌,并总结出危岩体的大规模破坏发生在蓄水回水期等有益的结论。

不连续变形分析法(Discontinuous Deformation Analysis)^[85-90],简称DDA法,由石根华和Goodman于1989年提出,它兼具有限元和离散元两种方法之部分优点,可以反映连续和不连续的具体部位,考虑了变形的不连续性和时间因素,可计算静力问题和动力问题,可计算破坏前的小位移和破坏后的大位移,特别适合危岩体极限状态的设计计算。

采用数值分析法研究危岩体的稳定性,弥补了静力解析法不能求出岩土体的应力—应变关系以及与实际工作状态不完全相符的不足,计算结果较精确。因此,数值分析方法已逐步成为危岩体稳定性的分析的常用方法。

4. 非确定性评价法

危岩体稳定性影响因素很多,评价指标的类型众多,信息往往不完整,存在大量定性因素,这些因素在一定程度上具有模糊性、不确定性,加上危岩体稳定性定量分析中存在大量人为的、模型的或参数的等不确定性因素,使得危岩体的稳定性分析具有随机性、模糊性和不确定性。目前仍没有一种十分精确的分析方法对危岩体稳定性进行精确计算和描述,为了克服危岩体稳定性工程地质评价工作中的随意性和不确定性,在确定性分析方法的基础上,人们尝试应用数学方法对整个评价过程进行定量或半定量描述,危岩体稳定分