

岩石力学与
工程研究著作 丛书

坐标投影图解法及其在岩石 块体稳定分析中的应用

◎杨志法 王思敬 高丙丽 著



岩石力学与工程研究著作丛书

坐标投影图解法及其在岩石 块体稳定分析中的应用

杨志法 王思敬 高丙丽 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了可用于岩石工程中结构面、结构面与临空面组合和块体的空间形态描述及稳定性分析的坐标投影图解法,涉及相应的原理、方法及其在地下工程、边坡工程等领域中的实际应用。

本书可供从事岩石工程设计、施工、科研的有关人员及大专院校工程地质、岩石力学等相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

坐标投影图解法及其在岩石块体稳定分析中的应用/杨志法,王思敬,高丙丽著. —北京:科学出版社,2009

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-023363-9

I. 坐… II. ①杨…②王…③高… III. 坐标-投影术-应用-岩体-稳定分析 IV. TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 174516 号

责任编辑:刘宝莉 张 丽 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:赵 博 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 7 月第一次印刷 印张:16 1/4

印数:1—2 000

字数:306 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下洞室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多 m;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击岩压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

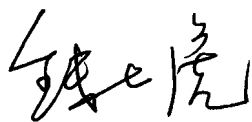
近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对上述科学与工程技术的攻克陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统地总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划;先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,来反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。出版时间计划为2007~2011年,分期分批出版。到2007年底,已有二十多本专著列入出版计划。

本丛书编委会编委由58位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任与重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007年11月28日

前 言

我国快速的经济建设过程中涉及大量的岩石工程,如水利水电领域中的地下厂房、船闸边坡、坝基工程、采矿业中的地下采场、矿井和运输巷道、露天矿边坡、铁道和公路隧道、路堑边坡、山区旅游景点涉及的洞室和陡坡,以及军工部门的各种岩石工程。在这些岩石工程的设计和施工过程中,往往会遇到结构面或结构面与临空面组合切割出来的潜在不稳定块体问题。根据工程地质力学观点,岩石工程(无论是岩石地下工程,还是岩石边坡工程)的变形破坏规律基本上都受到岩体结构面的制约。大量工程实践表明,由于块体界面的破坏而导致块体失稳,进而影响岩石工程稳定或运营的实例是相当多的。出于块体失稳研究的需要,孙玉科等在国内率先提出有关块体破坏的赤平极射投影作图法,并逐步得到推广和应用,甚至进入了规范和教科书。即使是对于计算机普遍应用的今天来说,针对块体稳定性分析问题而提出来的赤平极射投影作图法(尤其是它的实用性)仍然受到重视。换句话说,这种实用性很强的图解法仍存在巨大的应用空间,所以需要得到进一步发展。

工程实践及深入研究表明,赤平极射投影作图法在角度描述方面具有优势,而在长度描述方面却存在着不足。所以,当采用该方法进行块体稳定性分析作图时,必然存在某些不足。例如,利用该方法难以对所有可能相关的结构面进行综合集成;到目前为止,赤平极射投影作图法仅被用于单块体作图,对更为重要的多块体问题极少涉及;对于块体出露于非平直临空面上的曲线描述,赤平极射投影作图法也缺少手段;在研究地下工程块体稳定性问题时,围岩对块体的“夹力”不可忽略,但在赤平极射投影作图法中难以做到对上述“夹力”的描述和计算;当结构面呈现弯曲时,赤平极射投影作图法缺少描述手段。

为了解决赤平极射投影作图法在块体研究方面存在的上述问题,本书提出了坐标投影图解法。该方法是以正投影为基础,吸收赤平极射投影作图法在“角度”描述方面的优势而形成的,两者的结合使其在解决块体描述和块体稳定性分析的功能方面有了很大的提高。例如,利用该方法可以完成赤平极射投影作图法在结构面综合集成、多块体图解、块体出露曲线描述、围岩对块体的“夹力”、弯曲结构面的描述等方面难以解决的问题。

为了进一步提高坐标投影图解法在块体(包括多块体)描述、结构面(包括弯曲结构面)描述、块体及结构面稳定性分析的工作效率,作者还进行了坐标投影图解法的计算机化研究,以提高相应的应用效率。作者相信,根据坐标投影图解法原理和方法编制的程序将有助于该方法的推广和应用。

到目前为止,坐标投影图解法已成功地应用于某些水利水电工程、采矿工程、铁道隧道工程、公路边坡、大型古地下工程等。另外,坐标投影图解法还被国家军用标准的规范所采用。作者相信,随着实际工程应用的增加,坐标投影图解法一定会得到进一步的改善和发展。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2009年4月15日

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石工程的一种重要破坏方式——块体破坏	1
1.2 单一结构面几何形态描述和稳定性分析问题	6
1.3 块体破坏的主要研究方法和坐标投影图解法的提出	7
1.3.1 块体的几何条件和块体破坏的主要研究方法	7
1.3.2 在块体研究方法方面存在的某些问题	10
1.3.3 坐标投影图解法的提出	12
1.4 坐标投影图解法的研究目的及主要研究内容	17
1.5 坐标投影图解法的特点和主要内容	18
1.5.1 坐标投影图解法的特点	18
1.5.2 坐标投影图解法的主要内容	19
第 2 章 坐标投影图解法形成的基本思路	22
2.1 坐标投影图解法形成的基本思路	22
2.1.1 将正投影与赤平极射投影相结合以形成坐标极射投影作图	22
2.1.2 在统一直角坐标系下进行的坐标投影图解	23
2.1.3 建立一个可对现场结构面和临空面进行综合集成的平台	23
2.2 正投影原理及其三投影面体系	23
2.2.1 坐标投影中所采用的三投影面体系	24
2.2.2 点、线、面在三投影面体系中投影的图解方法	25
2.2.3 从块体研究角度对正投影图解法优缺点的评价	31
2.3 赤平极射投影原理及基本图解方法	32
2.3.1 赤平极射投影的概念及吴氏投影网	32
2.3.2 赤平极射投影的基本作图方法及其理论根据	34
2.3.3 关于块体几何条件确定和稳定性分析的赤平极射投影作图法	40
2.3.4 赤平极射投影作图法在块体研究方面的优势和不足	46
2.3.5 坐标投影图解法形成的思路	47

第3章 结构面、新破坏面和临空面信息的综合集成及水平切面的图解方法	49
3.1 结构面信息	49
3.1.1 与岩石工程块体有关的结构面类型分析	49
3.1.2 结构面的分级	54
3.1.3 结构面的自然特性	56
3.2 新破坏面问题	61
3.3 结构面信息的综合集成和水平切面图的提出	62
3.3.1 结构面信息综合集成的必要性和水平切面图研究平台	62
3.3.2 水平切面图的定义及特点	62
3.3.3 基本数据的量测问题	63
3.3.4 水平切面图的一般图解方法	64
3.3.5 其他相关问题的讨论	64
3.3.6 水平切面图的图解例子	65
第4章 平面块体和单一结构面几何条件的图解方法	71
4.1 块体分类和单一结构面分类	71
4.1.1 块体分类	71
4.1.2 单一结构面分类	71
4.2 块体和单一结构面的假想剥离	73
4.2.1 块体的假想剥离和可见性判断	73
4.2.2 单一结构面的假想剥离	73
4.3 岩石工程平面块体几何条件的图解方法	73
4.3.1 问题的提出	73
4.3.2 辅助体的概念及作图方法	74
4.3.3 块体顶点的投影作图方法	74
4.4 平面块体顶点图解与块体的确定	82
4.4.1 地下工程平面块体的确定	83
4.4.2 边坡工程平面块体的确定	83
4.5 单一平直结构面几何条件的坐标投影图解法	84
4.5.1 考虑厚度的平直结构面几何条件的图解方法	84
4.5.2 不考虑厚度的平直结构面几何条件的图解方法	86
第5章 非平面块体出露曲线的图解方法	87
5.1 简单非平面块体和复杂非平面块体	87
5.2 非平面块体出露曲线的坐标投影图解法的原理	88
5.2.1 曲线追踪作图法	88

5.2.2 曲线定比分作图法	95
5.2.3 相贯曲线作图法	104
5.3 非平面块体出露曲线图解的作用	108
5.4 关于单一非平直结构面几何条件图解方法的讨论	109
第6章 多块体几何条件的图解及块体边界面积和体积的确定	110
6.1 多块体几何条件的图解方法	110
6.1.1 多块体问题的提出	110
6.1.2 多块体几何条件图解方法的举例说明	110
6.2 块体界面面积的确定	114
6.3 块体体积的求解	121
6.3.1 平面块体体积的求解原理及方法	121
6.3.2 非平面块体体积的求解原理及方法	126
6.3.3 块体体积确定的例子	128
6.4 锚杆和锚索的图解问题	136
第7章 用于块体力系分析的坐标投影图解法	138
7.1 空间共点力系的赤平极射投影图解法	138
7.2 用于空间力系坐标投影图解的三投影面体系	140
7.3 有关力的图解	141
7.3.1 已知力的投影求力的图解方法	141
7.3.2 已知确定的力求作投影矢量	143
7.4 有关力矩的图解	144
7.4.1 力对点的矩	144
7.4.2 力对一轴之矩	146
7.5 共点力系合成图解	147
7.5.1 双多边形投影作图法	148
7.5.2 共点力系的平衡条件及几何特征	148
7.5.3 华利农定理及其应用	149
7.6 平行力系图解	149
7.6.1 二同向平行力系合成图解法的原理	149
7.6.2 同向平行力系合成图解法的原理	149
7.6.3 二反向平行力系合成图解法的原理	149
7.6.4 一般平行力系的合成	150
7.6.5 块体重心作图的原理	150
7.6.6 有关二同向力系和二反向力平行力系合成的举例	151

7.7 力偶与力偶矩图解	152
7.7.1 力偶矩的图解	152
7.7.2 力偶和力偶矩的主要性质	153
7.7.3 力偶的加法	153
7.8 任意空间力系图解	154
7.8.1 力在空间的平移	154
7.8.2 任意空间力系的合成图解	154
7.8.3 任意力系合成的例子	154
7.9 两个例子	155
7.9.1 有关地下工程拱顶块体力系的坐标投影分析	155
7.9.2 有关在地震条件下边坡块体稳定性的坐标投影分析	160
第8章 块体稳定性分析的坐标投影图解法	165
8.1 基于解析法、赤平极射投影法和数值法的块体稳定性分析	165
8.1.1 块体稳定性分析的解析法	165
8.1.2 块体稳定性分析的赤平极射投影作图法	174
8.1.3 块体稳定性分析的数值法	178
8.2 坐标投影图解法中块体稳定性分析的原理及一般方法	178
8.2.1 坐标投影块体稳定性分析的主要步骤	178
8.2.2 关于坐标投影边坡块体稳定性分析方法的讨论	179
8.2.3 关于坐标投影地下工程块体稳定性分析方法的讨论	179
8.3 坐标投影图解法的块体稳定性分析算例	186
第9章 坐标投影图解法计算机化及实现方法	191
9.1 面向对象程序设计方法及 Visual C++ 语言简介	191
9.1.1 面向对象程序设计方法	191
9.1.2 C++ 语言的特点	192
9.1.3 Visual C++ 的特点	192
9.2 坐标投影图解法的计算机化	193
9.2.1 结构面的确定方法	194
9.2.2 块体结构面界面面积的确定	195
9.2.3 块体体积的确定	196
9.3 CPH 程序框图	196
9.3.1 CPH-I 程序	196
9.3.2 CPH-II 程序	197
9.3.3 CPH-III 程序	200

第 10 章 坐标投影图解法的实际工程应用	202
10.1 实例一:在某矿山探洞中的应用	202
10.1.1 工程概况	202
10.1.2 地质素描图的改造和坐标投影水平切面图的形成	203
10.1.3 结构面倾向和倾角的确定	207
10.1.4 结构面产状的罗盘量测结果与坐标投影图解结果的对比分析	209
10.2 实例二:在某大型地下工程中的应用	211
10.3 实例三:在某公路边坡工程中的应用	211
10.3.1 工程概况	211
10.3.2 结构面的确定和编号	212
10.3.3 结构面 $J_1 \sim J_9$ 方程的建立	213
10.3.4 水平切面图的建立与块体顶点坐标的计算	214
10.3.5 块体界面面积及体积的计算	215
10.3.6 各块体稳定性分析的结果	216
10.4 实例四:在某水电工程中的应用	216
10.4.1 工程概况	216
10.4.2 主变室下游边墙内部结构面延展确定问题的提出	218
10.4.3 所借用的预应力锚索钻孔的位置	218
10.4.4 CCD 钻孔探测结果	220
10.4.5 应用 CPH-I 软件确定结构面的空间位置	221
10.5 实例五:在某水利工程中的应用	222
10.5.1 水平切面图的形成	222
10.5.2 南湾新泄洪洞块体的确定	223
10.5.3 块体的稳定性分析及其处理建议	230
10.6 实例六:在某古地下工程中的应用	232
10.6.1 清风洞概况	232
10.6.2 研究思路	232
10.6.3 图解方法	234
参考文献	236
结束语	242

第 1 章 绪 论

1.1 岩石工程的一种重要破坏方式——块体破坏

随着我国国民经济的飞速发展,岩土工程建设如火如荼。来自水利水电、矿山、铁道和军工等部门的地下工程和边坡工程等都是典型的岩土工程。对于岩石地下工程和岩石边坡工程来说,为了进行可靠而经济的设计,首先需要在掌握地质条件的基础上搞清工程岩体的变形破坏规律。只有对这些岩体在具体地质条件下所发生的变形破坏有足够精度的预测,才能作出好的设计。理论研究和工程实践表明,工程岩体的变形破坏规律基本上受控于地质条件,或者说它是受岩体结构控制的^[1~5]。这里需要简单提到岩体结构分类问题。根据谷德振、王思敬、孙玉科、孙广忠等的岩体结构分类^[1~5],岩体在结构上可划分为块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构等四大类和若干亚类,后来又有所发展^[2~5]。例如,当地下工程中出露较宽的松散或碎裂等结构类型的断层或风化严重的垂直风化囊时,该处就有可能发生严重的松散体塌方;又例如,当岩石地下工程或岩质边坡中出现由若干结构面组合切割而成的块体时,在一定条件下该块体有可能失稳,进而块体塌方^[3,6,7]。应当说,上述松散结构体(或碎裂结构体)塌方和块体塌方是两种常见的岩土工程破坏方式或破坏类型。

作为松散结构类型(或碎裂结构类型)塌方的例子,这里拟举某军事地下工程因大断层的出现而造成的大塌方和某铁路隧道因遇到风化囊而发生的大塌方。前者是一个开挖在西部某地流纹岩中的大型地下工程。由于它的跨度很大而采用了 3 排 9 洞的施工方案(即采用 9 个导洞进行施工),本例所述的是其中位于上排宽约 6m 的中间导洞。在该导洞开挖过程中遇到了一条宽约 23m 的陡倾角断层,因预加固不及时而造成了高 7m 的大塌方;后者则是发生在大秦线经过北京市延庆县山区的军都山铁路隧道某工程段。该工程段岩体为坚硬而较完整的花岗岩体,设计者和施工者都未预测到前方一处沿着陡倾角断层发育的大型垂直风化囊。该风化囊中花岗岩体的长石和云母已被严重风化,花岗岩也因此而解体成为由石英颗粒和高岭土所组成的松散“粗砂团”。工程师们预先没有对该大型风化囊做出预测,因此也未采取任何工程措施(包括小药量短进尺等工程措施),在钻爆法施工中仍保持一炮 5m 的进尺速度。结果,在该处厚达 34m 的上覆岩层中出现了“开天窗”式大塌方(见图 1.1),在上方地表则出现了一个直径约为

17m, 深为 2m 的塌陷坑。

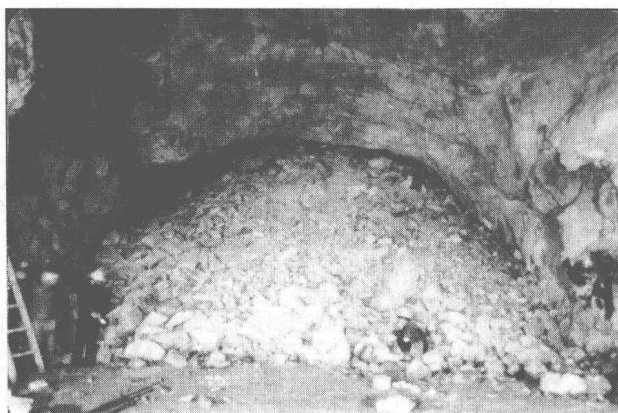


图 1.1 军都山铁路隧道某工程段的大塌方(照片由丁恩保提供)

有关块体塌方的工程实例也很多,如军都山铁路隧道某花岗岩工程段的一处由四条结构面和一个临空面(边墙)组合切割而成的五面体块体(见图 1.2)。该块体出露在边墙上,其长方形侧面的面积约为 6.1m^2 ,而插入边墙的深度约 1.5m 。对于人工开挖的边坡来说,如果因各种结构面、剪切面、开裂面和临空面切割而形成块体和危石,并因某种原因而下滑、滚动,则对下方的人员、设施等构成严重威胁,甚至因严重伤人和毁物而造成地质灾害^[8,9]。例如,浙江省三门县蛇盘岛某公路边坡上发育着由多条结构面和边坡临空面组合切割而成的块体(见图 1.3)^[8]。现场考察表明,如果不对它们进行处理,这些块体在一定条件下很容易失稳而下落,从而对下方公路上车辆和人员的安全构成严重威胁。图 1.4 给出位于浙江省

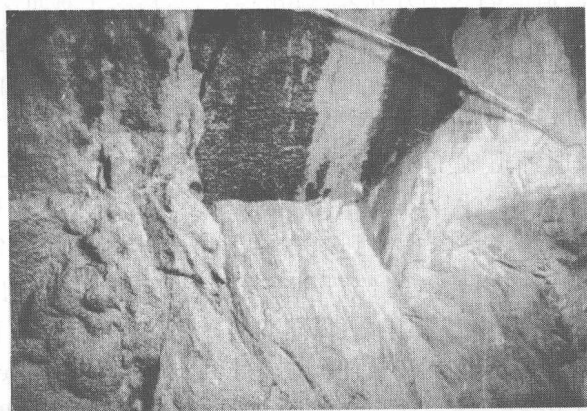


图 1.2 军都山铁路隧道某花岗岩工程段发生块体(五面体)塌落后的情况

仙居县飞凤岩大型古地下采石场 2 号洞洞顶上部已塌落块体的痕迹(该块体的基底面积约 0.7m^2 , 高约 0.6m)^[10]。虽然由于该块体已经塌落而不再对其下方游人的生命构成威胁,但它的塌落将或多或少地降低相邻块体的稳定性。显然,如果不再对它们进行加固,下方人员的安全将受到这些危险块体的严重威胁。图 1.5 和图 1.6 给出浙江省龙游县凤凰山未开发旅游的 20 号洞不同部位的两张照片,其中图 1.5 为洞顶发生一次塌方后的情况。该次塌方的形状似一个方锥台,其长、宽和高分别约为 4m 、 3m 和 2m ,体积约达 7m^3 。由于作者近年来多次进入 20 号洞观察,并由塌落断口较新这一点判断,该洞顶块体的塌方时间很可能在两年之内。图 1.6 所示的则是从 20 号洞南面洞外拍向该洞口边坡的照片。该照片清楚地显示出洞口上方一块约 4m^3 的四面体块体塌方后的情况。2006 年 5 月考察该洞时发现该块体并未塌落,而 2006 年 8 月再次考察该洞时却看到已经发生了这一块体塌方。由此可以判断,图 1.6 所示的洞口边坡块体塌方应当发生在 2006 年 5 月到 2006 年 8 月之间的 3 个月。



图 1.3 蛇盘岛某公路边坡上的结构面及由它们切割而成的多块体

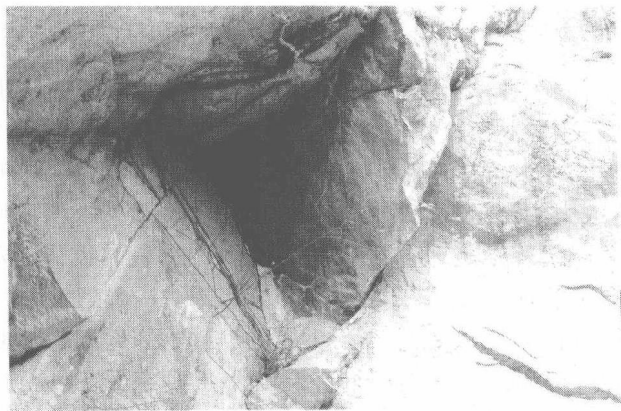


图 1.4 飞凤岩大型古地下采石场 2 号洞顶部上部已塌落块体

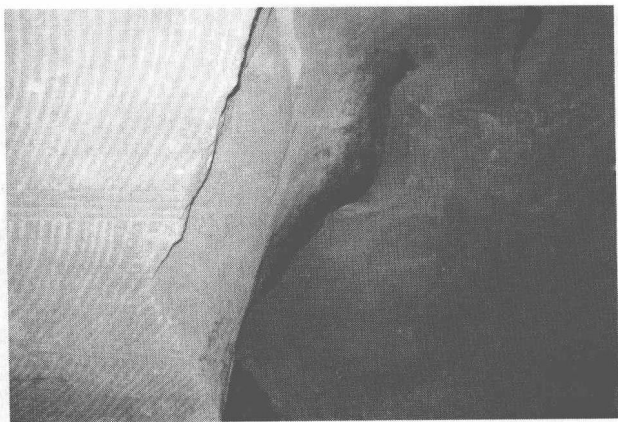


图 1.5 龙游县凤凰山未开发旅游的 20 号洞洞顶的块体塌方



图 1.6 龙游县凤凰山未开发旅游的 20 号洞南洞口边坡的块体塌方

虽然图 1.5 和图 1.6 给出的两个块体已经塌落,但通过进一步分析仍可以得出以下两点看法:第一,这两次塌方是由于长期风化而产生的地质演化,是一种自然现象。值得指出,龙游县凤凰山石窟管理部门在 20 号洞这一未开放的古洞室的洞口处设置禁止入内的警示牌而阻止游人进入洞中。虽然这两次块体塌方都未伤人,但也为我们敲响了警钟。现有洞室如果不加保护,任其风化则发生块体塌方是必然的,只是或早或晚而已。第二,从多块体角度看,一个块体的塌方,将导致相邻块体的稳定程度下降,而风化速度却会加快。换言之,邻近未坍塌块体如不经处理,就很可能发生塌方。若塌方发生时附近有人类活动,则有可能伤人。显然,以上分析值得旅游管理者参考。事实上,龙游县龙游石窟旅游管理部门已经在 20 号洞及其他有可能出现因块体失稳塌落而伤人的洞口设置了“禁止入内”一类的警告牌。它们将