

高等学校教材

地下洞室围岩 稳定性分析

华北水利水电学院 李华晔 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TU457
I-217

高 等 学 校 教 材



地下洞室围岩稳定性分析

华北水利水电学院 李华晔 主编

中国水利水电出版社

892957

内 容 提 要

全书共七章,分别论述了国内外地下洞室建设现状和进展;地下洞室岩体物理力学参数;地下洞室围岩应力量测;地下洞室山岩压力稳定分析;地下洞室岩石动力学基础;块体理论基础和在地下洞室稳定分析中的应用。该书理论联系实践,论述精当,资料翔实,可读性强。

该书为“水利水电工程地质”、“水利水电建筑工程”、“岩土工程”等专业研究生教材,也可供从事岩石力学工作的水利水电、地下建筑、地质、矿山、冶金、交通以及国防等工程技术人员及其有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下洞室围岩稳定性分析/李华晔主编. —北京:中国水利水电出版社, 1999.

高等学校教材

ISBN 7-80124-987-9

I. 地… II. 李… III. 地下洞室-围岩稳定性-分析(力学)-高等学校-教材 IV. TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 05754 号

书 名	高等学校教材·地下洞室围岩稳定性分析
作 者	华北水利水电学院 李华晔 主编
出 版	中国水利水电出版社, (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京京丰印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 242 千字
版 次	1999 年 10 月第一版 1999 年 10 月北京第一次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	10.60 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

本书是根据水利部第四轮教材第一批选题（1996～1997 年）规划写成的。它主要用作“水利水电工程地质”、“水利水电建筑工程”、“岩土工程”等专业研究生的教材，同时也可供有关工程技术人员参考。在编写过程中，考虑到以上几个专业的本科生在岩石力学方面已有的知识，凡涉及其间的，本书不再作深入介绍，但对在大学本科教材中没有涉及的内容（如第六章，第七章），本书均作了详细的介绍。

本书由李华晔编写第一章、第三章、第五章、第六章和第七章的第四、五、六节。刘汉东编写第二章。霍润科编写第四章和第七章的第一、二、三节。最后由李华晔统稿并主编。

本书由清华大学戚筱俊主审。他对本书提出了许多宝贵意见，谨此表示衷心的感谢。恳切希望广大读者对书中存在的缺点或差错，提出意见，不吝指正，我们将不胜感激。

编 者

1999 年 1 月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 国内外地下洞室建设现状与地质灾害概述	1
第二节 岩质地下工程岩石力学研究进展	6
第二章 地下洞室岩体物理力学参数	10
第一节 概述	10
第二节 岩体力学参数选取方法	10
第三节 岩体力学参数工程实录	23
第三章 地下洞室围岩应力量测	32
第一节 概述	32
第二节 孔壁应变法	32
第三节 孔底应变法	40
第四节 岩体表面应力测试法	48
第四章 地下洞室山岩压力分析	54
第一节 概述	54
第二节 地下水对围岩稳定性的影响	54
第三节 连续介质洞室山岩压力分析	55
第五章 地下洞室岩石动力学基础	69
第一节 概述	69
第二节 岩体波动方程及波的传播	70
第三节 应力波折射、反射及其对岩体的影响	74
第四节 地震和爆炸对岩体的效应	77
第五节 动应力对隧洞岩石的作用和稳定性评价	81
第六节 Griffith 理论与岩爆判别准则	85
第六章 块体理论基础	89
第一节 概述	89
第二节 学习块体理论应具有的基础知识	90
第三节 块体理论的基本原理	105
第四节 块体可动性判别法	113
第五节 关键块体的判别	120
第七章 块体理论在地下洞室稳定分析中的应用	127
第一节 运用全空间赤平投影方法判别围岩内可动块体	127
第二节 运用矢量运算方法判别围岩内可动块体	134

第三节 地下洞室围岩稳定分析的步骤 137

第四节 地下洞室方位的选择方法 139

第五节 交叉洞室与岩墙稳定分析 140

第六节 块体理论在隧洞围岩稳定分析中的应用 143

符号说明 160

参考文献 161

第一章 绪 论

第一节 国内外地下洞室建设现状与地质灾害概述

由于世界人口迅速增加,人类生存环境不断发生变化,资源日趋短缺,土地砂化现象也越来越严重。对此,世界上一些国家除采取综合性治理措施外,认为地下洞室空间的开挖和利用对人类生存和发展非常重要,即“往深处想”。有人估计,到21世纪世界人口的1/3将穴居地下,把岩土体看成国家新型资源或地下工业。它可大量节省土地和能源,建筑物本身有较好的抗震性,防护和运行费用低。因此有人说,19世纪是桥的世纪,20世纪是高层建筑的世纪,21世纪会成为地下空间发展的世纪。既然地下洞室有如此多的优点,我国在这方面做得怎样,和世界一些发达国家差距何在,笔者做了一些资料收集并进行了分析,概述如下。

一、地下洞室建设

对水电工程279个地下洞室开挖宽度统计结果,如表1-1所示。

表1-1是我国90年代以前已建工程情况。它说明在这一时期以小型洞室(宽度小于10m)为主。宽度大于20m的洞室所占比例较小。

表 1-1 水电工程 279 个地下洞室开挖宽度统计表

统计宽度(m)	1.0~10	10.1~20	20.1~30	30.1~40
统计个数	229	35	11	4
宽度合(m)	1020.4	464.4	285.4	148.0
平均宽度(m)	4.5	13.3	26.0	37.0
各组所占百分数(%)	82.1	12.6	3.9	1.4

对开挖高度来说,大于50m的地下洞室有:刘家峡水电站地下厂房(64m),白山水电站地下厂房(52.8m),二滩水电站地下厂房(67.5m),小浪底水电站主厂房(57.9m),锦屏I级水电站地下厂房(50m),龙滩水电站地下厂房(50m),拉西瓦、小湾、溪洛渡水电站地下厂房也均超过50m。

在隧洞长度上,90年代以前超过10km的较少,近些年来随着改革开放和引进外资的增加,发展非常迅速,长度大于10km的洞室不断增加,详见表1-2所列。

表 1-2 地下洞室开挖长度大于 10km 统计表

编号	洞室名称	长度(km)	备注	编号	洞室名称	长度(km)	备注
1	引大入秦盘道岭隧道	15.7	完成	10	雅鲁藏布江墨托水电站引水隧洞	33.9/条 (共3条)	计划
2	引大入秦30A隧道	11.64	完成	11	渤海海峡隧道	57.0	计划
3	引黄入晋南干5号隧道	26.8	在施工	12	琼州海峡隧道	30(或15)	计划
4	引黄入晋南干6号隧道	14.5	在施工	13	西耳河一级水电站引水隧洞	8.2	完成
5	引黄入晋南干7号隧道	43.5	在施工	14	引滦入津隧洞	9.7	完成
6	鲁布革水电站引水隧洞	9.4	完成	15	京广大瑶山铁路隧洞	14.3	完成
7	南水北调西线引水隧洞	131 (最长的1条)	计划	16	西安—安康铁路隧洞	18.5	施工
8	引黄入晋总干6号引水隧洞	13.6	完成	17	驿马岭铁路隧洞	17.0	完成
9	引黄入晋北干支一下称沟段	20(约计)	计划				

国外的情况，对 31 个国家（不包括美国）洞室开挖宽度的统计列于表 1-3。值得指出的是，挪威奥林匹克岩石地下体育场跨度达 61m，奥地利圣桥镇地下机场跨度达 83m。

美国 108 个地下洞室的开挖宽度统计，列于表 1-4。

表 1-3 世界 31 个国家地下洞室开挖宽度统计表

统计宽度(m)	1.0~10	10.1~20	20.1~30	30.1~40	大于 40
统计个数	1	59	37	1	2
宽度合(m)	10	967.0	886.8	33.5	144
平均宽度(m)	10	16.4	24.0	33.5	72
各组所占百分数(%)	1	59	37	1	2

表 1-4 美国 108 个地下洞室开挖宽度统计表

统计宽度(m)	1.0~10	10.1~20	20.1~30	30.1~40
统计个数	16	52	30	10
宽度合(m)	136	819	762	363
平均值(m)	8.5	15.8	25.4	36.3
各组所占百分数(%)	14.8	48.1	27.8	9.3

近些年来，世界隧道长度发展很快，已建、在建、拟建的洞室统计，列于表 1-5。

从表 1-1、表 1-3、表 1-4 看出，在 90 年代以前我国洞室开挖宽度以 1~10m 为主（占统计数的 82.1%），而欧美以 10~20m 为主（占统计数字的 48%~60%）。

自 90 年代以后，我国洞室开挖进展很快，如表 1-2、表 1-5 所示，在开挖长度上基本和西方国家相当。

世界各国对地下洞室需求量增加很快，尤其地下厂房和油库设置在地下已成为近 10 多年的发展趋势。1970~1979 年间，世界一些国家对地下洞室的需求量，列于表 1-6。

表 1-5 世界各国已建、在建、拟建大于 10km 的隧道统计表

编号	洞室名称	长度(km)	备注
1	日本大清水双线隧道	22	已建
2	青涵津轻海峡隧道	54	已建
3	英吉利海峡隧道	52	已建
4	挪威伦达恩隧道	28.5(3条156)	已建
5	丹麦大贝尔特海峡隧道	8	在建
6	日本东京湾公路隧道	10(2条20)	在建
7	希腊 Evinos—Morris 水工隧洞	30	在建
8	法国里昂—意大利都灵隧道	54	在建
9	瑞士 Gotthard 铁路隧道	57	在建
10	南非莱索托水工隧洞	200(已挖 84)	在建
11	美国对撞机地下工程	87(环形)	停工
12	直布罗陀海峡隧道	60	拟建
13	意大利墨西拿海峡隧道	17(铁路)27(公路)	拟建
14	法国里昂—意大利都灵隧道	54	拟建
15	日本—俄罗斯海底隧道	43(或 7)	拟建
16	美国、俄罗斯、加拿大白令海峡隧道	90	拟建
17	丹麦穿北海、波罗的海隧道		拟建
18	丹麦哥本哈根—瑞典马尔墨隧道		拟建
19	丹麦洛兰岛—德国本土海底隧道		拟建

表 1-6 1970~1979 年间世界一些国家对地下洞室的需求量

国 家	运输隧道 (km)	输水隧道 (km)	公用事业 (km)	合计 (km)
美 国	477	1020	8724	10221
法 国	270	574	2352	3196
日 本	2306	379	175	2849
意 大 利	892	—	—	892
瑞 典	152	227	346	725
挪 威	80	635	—	715
德 国	266	108	232	606
英 国	212	196	183	591
澳大利亚	25	70	79	174
西 班 牙	158	128	—	286
其他国家	297	170	73	548
合 计	5135	3507	12164	20803

另外,当前微型隧道工程技术发展很快。这是一种小型隧道暗挖技术,主要用于工业和民用管道,其特点是机械自动化程度高,激光导向,有完善的顶管系统,开挖精度高,导向误差不超过 $\pm 2.55\text{cm}$ 。开挖直径 $25\sim 300\text{cm}$,一次开挖长度 600m ,班进尺 $10\sim 20\text{m}$,在硬岩和软岩中都可以使用。在闹市区、高层建筑物下,在名胜古迹下,在高速公路下、铁路下等暗挖,与明挖相比有快速、经济、安全等优点。在这方面走在前列的为日本和西欧。

二、地质灾害

随着我国经济建设的不断发展,地下工程应用领域越来越广,其规模也越来越大。在水利水电、铁路、公路、矿山、化工、国防等部门的地下工程建设已成为支柱产业。

水工隧洞。我国已建的水工隧洞400余条,总长达 400km ,地下厂房40余座。洞室的建设规模也越来越大,如二滩水电站地下厂房为 $25.5\text{m}\times 67.5\text{m}\times 242.9\text{m}$ (宽 $\times$ 高 $\times$ 长),刘家峡水电站地下厂房 $31\text{m}\times 64\text{m}$ (宽 $\times$ 高)。甘肃引大入秦工程是我国目前最大跨流域引水工程,引水洞有71座,总长达 110km 。黄河小浪底水电站地下洞室立体交叉、纵横交错。规划中的南水北调工程地下洞室规模更是世界罕见。由于一些水电工程规模巨大,依山傍水,其洞室的环境地质条件往往很复杂。

铁路隧洞。我国自1890年以来共修建铁路隧洞4900余条,总长 2600km 。在60年代修建的成昆铁路全线共415座隧洞,其中塌方的占25%,涌水的占93.5%,因隧洞地质灾害造成的停工,占隧洞总工期的 $1/5\sim 1/4$ 。由此可见,隧洞在山区铁路建设中占有非常重要的位置。按铁路规程,山区隧洞分傍山隧洞和越岭隧洞。傍山隧洞受地形控制明显,其突出的问题是,库岸重力卸荷和山体的整体稳定、进出口稳定、地下水等,尤其雨季地下水对隧洞带来的影响更为明显。越岭隧洞突出的问题是,山岩压力、地下水、塌方、片帮、底鼓、岩爆、瓦斯、岩溶等。

矿山洞室。矿山采掘系统非常复杂,有井巷、采场,在空间上往往是几层开采系统立体交叉,带来的岩石力学问题非常多。如有一矿山井壁不断发生脱落,最后达到地表引起地面建筑物的变形破坏,有的巷道变形挤出,使其几度改变支护措施。此外,地应力问题、地下水问题、山岩压力问题、高温问题也很突出。

从水利水电、铁路、矿山三个部门的资料说明,地下洞室建设常遇到的岩石力学问题有:

(1)天然应力 即在洞室未开挖前在岩体中存在的应力。这主要是由地壳运动产生,特别是在新构造运动活动区更为明显,如二滩水电站坝区112个钻孔中,有58个钻孔由于地应力作用使岩芯呈厚 2cm 的饼状块体,应力达到 $19\sim 25\text{MPa}$ 。另一实例为甘肃金川矿二矿区构造应力情况,该矿区巷道变形破坏有以下特征:顶拱混凝土坍落,沿长轴开裂,巷道呈桃形(图1-1a, b);洞室拱腰或拱脚发生斜向或纵向剪切裂缝,侧墙内鼓(图1-1c)张开,并有纵向裂缝;拱顶下垂甚至被压平;底板鼓起(图1-1d),有些部位两轨高差达 17.5cm 。为了弄清该矿区地应力情况,做了地应力量测,得最大主应力为 30MPa ,且与二矿区1250巷道轴线垂直。

以上两例说明,在地下洞室建设中尤其在高地应力区,对地应力问题应给予充分重视,以保施工安全和洞室正常运营。

(2)洞室塌方和片帮破坏 这种破坏是指洞室围岩发生突发性塌落和片滑、崩塌所引

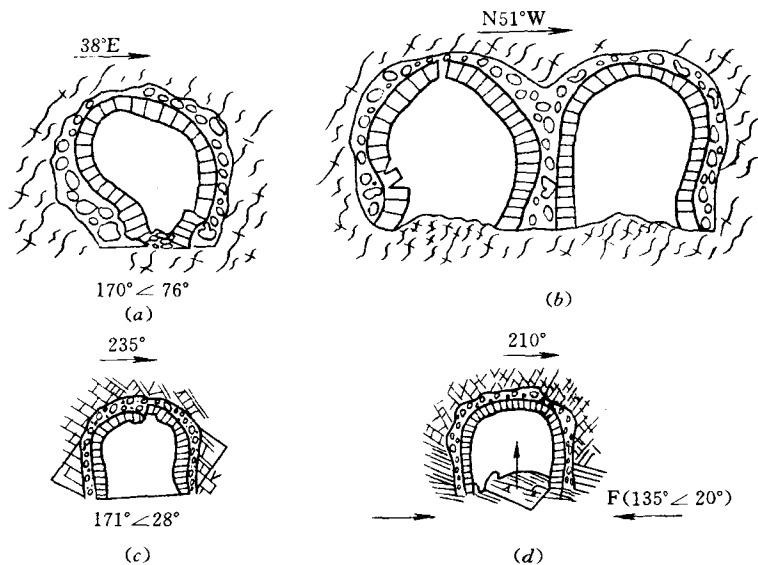


图 1-1 金川二矿受地应力作用洞室产生的变形与破坏
(a) 东西副井联络道路；(b) 东西副井绕道岔口；(c) 侧墙“鼓肚子”
造成顶板冒落；(d) 沿岩脉 29 行处，因有断层 (F) 严重底鼓

起的地质灾害，常发生在断层破碎带、膨胀岩、第四系松散岩层、不整合接触面、侵入岩接触带及岩体不利组合地段。这往往和洞室的开挖跨度、支护时间等因素有关，如猫跳河四级引水洞 0+92~0+109m 设计断面为圆形，直径 6.5m，由于未能及时支护，沿结构面形成 17m×9m×7m 的塌方。成昆线有隧道 415 座，在施工中有 25% 发生过大规模塌方；青藏线关角隧道通过 11 条断层带，塌方达 60 余次，最长的达 5m，方量为 1500m³；京广线驿马岭隧道长 17km，通过 10 多处断层带，塌方达 60 余次；大秦线西坪隧道长 0.3km，穿过第四系黄土夹砂卵石层，一次塌方 9000m³，塌高 25m。按京广线大瑶山隧道 29 处塌方统计，拱部占 79.3%，拱脚占 13.8%，片帮占 6.9%。塌方不但影响工期、增加经费，而且人身伤亡有时非常严重，如意大利—瑞士间勤奇山隧道长 14.6km，塌方死亡 25 人。日本 1984~1997 年间隧道施工死亡 220 人，塌方造成的死亡占 26%。

(3) 涌水和突水 涌水和突水是地下洞室施工和运营中常见的地质灾害，时常引起严重的后果。出现部位为断层破碎带、松散岩体和岩溶区。

按 1988 年以来建成的铁路隧道，在施工中 80% 遇到水害，涌水量在 1×10⁴m³/d 以上有 31 座。在运营中有 1300 余座产生渗水，漏水问题占隧道总数的 30%，如京广线大瑶山隧道穿过 9 号断层时，突水量达 3×10³m³/d，成昆线沙水拉达隧道全长 6.4km，涌水量达 5.2×10⁴m³/d，因突水抢修停工 32 天，通车后严重漏水 10 余处，治理 13 年耗资 800 余万元。襄渝线中梁山隧道 4km，无论在施工或运营中都产生大量涌水现象，经过几年的治理耗资数百万元。另如京广线南岭隧道、襄渝线大巴山隧道、川黔线娄关山隧道、京广线驿马岭隧道，在施工或运营过程中都遇到了涌水、渗水、突水等不同类型的地质灾害，这不

但拖延工期,耗资也很巨大。

在国外铁路隧道建设中,涌水、突水现象也是常见的地质灾害。如日本归丹那隧道全长 7.8km,始建于 1918 年,成建于 1934 年,在此期间有 6 次大的突水,水压高达 2.88~4.2MPa,最大的一次沿一大断层突水达 $28.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,至少花了 16 年的时间才建成该隧道。清水隧道遇到 $1.58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 突水,大清隧道遇到 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 突水,青函隧道 4 次达 $11.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 突水,死 34 人,伤 1300 人,总工期较原计划迟 10 年之多。瑞士—意大利辛普伦 1 号隧道,为控制山岩压力和地下水耗资是原设计的 6 倍,拖延工期 1.5 年。

(4) 山体变形 山体变形主要是指滑坡、错落等,常会对浅埋、偏压隧道造成危害。如襄渝线磨滩隧道建在滑坡体上,施工中隧道多次滑坡塌方,运营后衬砌变形,破坏后中线移动达 200~300 mm,改线投资 3000 万元。青藏线关角隧道,由于受构造应力作用引起滑坡,使道床鼓起最大达 300 mm,中线最大偏移达 140 mm,整理费用达 2000 万元。在国外,由于隧道内水外渗引起边坡滑动实例也很多。如 Kandersteg 隧道为无压隧道,后改为有压隧道,使衬砌出现裂缝,承压水渗漏到山坡岩体中,在不透水层阻隔下形成“上层滞水”,岩石性质恶化,使山体发生大滑坡,附近居民生命财产损失巨大。

(5) 岩溶塌陷 岩溶洞穴对洞室稳定存在着潜在威胁,常会因排水引起洞穴塌陷,地表水枯竭等。如贵昆线老虎嘴隧道遇到 $90\text{m} \times 120\text{m} \times 100\text{m}$ 洞穴。宜珙线轿顶山隧道,遇到 $80\text{m} \times (50 \sim 60) \text{m} \times (20 \sim 30) \text{m}$ 洞穴,都因处理困难,在洞内被迫绕行。川黔线虾子河遇暗河采用筑梁通过。襄渝线中梁山隧道因突水洞顶塌陷 29 处,使 48 个泉有 37% 枯竭。京广线南岭隧道因突水突泥使地面 45 处塌陷,最大深达 5 m。清江隔河岩水电站引水发电洞,遇到 4000 m^3 大岩溶洞穴,给施工带来许多困难,建设费用增加。

(6) 泥石流 一般和突水相伴生,在洞室开挖中带来灾害。如京广线南岭隧道生潮垌段曾发生 3 次突泥达 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,淹没坑道 177 m,处理达 6 个月。大秦线将军都山隧道两次突出泥、岩屑 600 m^3 和 1500 m^3 ,淹没隧道造成巨大损失。在日本,归丹隧道突出泥沙 3500 m^3 ,引起严重人身伤亡。

(7) 岩爆 岩爆现象属于动力学岩石力学问题,在矿山、铁路、水利部门洞室开挖中常会遇到,尤其是在高地应力区更为明显。在洞室围岩中由于构造应力作用会蓄集一定的应变能力,洞室开挖后有了能量释放空间,使岩石发生碎化,弹落并伴有爆破声。统计资料指出,洞室开挖后 0.3~0.5 h 内易发生岩爆,埋深往往大于 500~1000 m,如我国成昆铁路关村坝隧洞埋深 1650 m。日本大清水隧道开挖后岩爆持续 2~3 个月,射出块体 $(0.2 \sim 1.2) \text{ m} \times (0.2 \sim 2.5) \text{ m} \times (0.5 \sim 1.0) \text{ m}$;吴越隧道发生岩爆 1433 次,其中一次岩爆抛出总量 45 m^3 的岩石。岩爆不但威胁到施工人员安全,对支护物也会造成破坏,如渔子溪、映秀湾水电站,在施工中曾因岩爆引起人身事故和支护物的破坏。

(8) 高地温、瓦斯及有害气体 当洞室埋深超过 1500 m 时,一般隧道温度可达 30°C ,瓦斯和有害气体在煤系地层洞室和煤矿区较为常见。

(9) 核废料处理 自 50 年代兴建核电站以来,全世界 30 多个国家已建 438 座,发生核泄漏的有 2 座:一为美国三英里岛核电站,事故发生在 1979 年 3 月 28 日,使电站周围 80 公里范围内生态环境受到污染,从 1979~1984 年间有 13000~46000 人受到过量的镭照射;二为前苏联的切尔诺贝利核电站,事故发生在 1986 年 4 月 26 日,因反应堆爆炸,有

203 人受伤,其中 29 人在 1 个月内死亡。受影响的区域为前苏联欧洲部分以及东欧、西欧、北欧一些国家。核废料需深层掩埋,一般应在 400 m,且保证一万年不泄漏。要解决这样的问题,不光是岩石力学本身的任务,也涉及到区域地质、地下水渗流、放射性元素迁移、热力学等。

总之,在地下工程建造中进行地质灾害研究和预报是一项极其重要的工作,这对工程建造、工期和人身安全等方面至关重要。加强这方面的研究,对地质工程师和科学家将是责无旁贷的。

第二节 岩质地下工程岩石力学研究与进展

岩石力学研究的内容极广,大体可归结为计算、实验测试和工程实践三个方面。三者之间相互联系、依存,任何一方面缺少都会使岩石力学的概念不完整。以下所介绍的内容远未包括岩石力学的全部。

一、岩石损伤、断裂及其细观力学研究

损伤是指一种材料与结晶结构中有着原始缺陷存在,且这些缺陷随着时间推移可能产生扩展和积累。损伤可分成初始损伤、弹塑性损伤、疲劳损伤、蠕变时效损伤、动力损伤等。其所研究的内容:①建立岩体裂隙及其分布概率统计模型或概化模型,如用 Monte-Carlo 法模拟裂隙分布;②从实测与统计资料等计算节理岩体初始损伤张量;③建立节理材料损伤本构关系,即损伤模型和损伤及其损伤扩展与演化方程;④用有限单元法计算岩体强度、变形,以确定岩体稳定状态。

断裂力学,它着重于:①裂隙岩体的受力和变形;②在给定载荷作用下岩体裂隙扩展的规律;③寻求能反映材料抵抗裂纹扩展的测试和实验手段;④用断裂力学对有裂隙岩体进行安全性评价。

细观力学,是指岩体结构晶体或分子团的尺度,用这样的尺度来研究裂纹端部损伤积累演化和扩展。目前可用扫描电镜液色渗径摄相来研究裂纹端部变化。

二、非连续介质岩体力学——岩石块体力学理论和方法

该理论在 70 年代由我国学者石根华提出,1985 年石根华和 R. E. Goodman 出版了《块体理论及其在岩石工程中的应用》专著。该理论的三个重要特征是:①它是一种有关岩石块体稳定状态的预报方法;②它的理论是用静力学对关键块体进行静态分析;③当岩体不稳定或有运动趋势时进行几何分析。该理论的主要特点在开挖临空面找关键块体。

块体理论的研究与进展:①概率关键块体模型。通过模拟开挖面上交叉节理形迹,计算形迹之间的交叉,进而最后确定关键块形迹,再用 Monte-Carlo 法模拟关键块体分布及出现概率;②用有限元法与关键体相结合求关键块体稳定性;③弹粘塑性与渗流耦合作用块体理论分析法,块体为刚体,其结构面具有粘塑性和渗透性然后加以耦合进行块体分析;④把分形几何引入块体理论,分析层状岩体的稳定性;⑤随机块体理论把结构面 c, φ 值看成随机变量分析洞室围岩稳定性。

三、分形几何与岩石力学

(1) 分形几何研究的内容 它研究的是某些支离破碎的形体,包括:①具有自相似性

不规则曲线和位线；②具有相似反演性的不规则图形；③具有自平方性分形变换；④具有自仿射性分形集。目前应用最广的是线性分形，即自相似性。

(2) 分形研究的几个方面 ①分形的实验测定用覆盖法或图像法处理加计算机技术测一结构分维，再找分维与物理本征量间关系；②分形模型法，根据分形特点简化成一数学模型，找出分维值，再探求分维与物理量之间的关系；③维象法，检查测定分形的幂律关系，由幂律关系得分维再求分维与诸物理量之间的关系；④分形结构模型，根据结构特点制成分形边界和分形结构进行计算模拟和实验。

(3) 分形岩石力学研究的主要问题 ①分形损伤力学，把岩石材料的损伤看成分形，用损伤模型来模拟岩石材料损伤扩展，确定损伤密度与分维间的关系；②分形断裂，断裂面的不规则性反映了断裂能量耗散和结构效应，可用分形法加以模拟；③分形孔隙和分形粒子。把孔隙和微裂隙看成一个分维数结构，再构造多孔介质分形模型来模拟孔隙介质的分形；④岩体结构分形的力学分析。通过抗剪试验得到分维对节理抗剪强度的影响；⑤分形块体力学把分形与块体理论相结合突破块体力学只研究凸块体系，可研究任意块体的稳定性。

四、高地应力岩体特性与岩爆

1. 高地应力区研究内容

- 1) 高地应力分类及其展布机理。
- 2) 高地应力岩体工程实测资料统计分析。
- 3) 高围压条件下岩体强度及其变形特征。
- 4) 高地应力岩体稳定与工程思考。
- 5) 高地应力围岩与支护间的关系。
- 6) 软岩结构面剪切蠕变效应粘弹塑性分析。
- 7) 高地应力围岩—隧道支护系统非线性流变效应。
- 8) 渗水膨胀围岩模拟及耦合流变机理。

2. 岩爆问题研究

1) 岩爆预报—声发射技术与微震监测。①利用微裂纹扩展速率与岩体应力状态间的关系建立围岩微震活动与岩石破坏的关系；②利用微震监测法确定岩爆活动振源位置监测岩爆微震型式；③利用荧屏波形判定能量释放数量规模和岩爆成因；④设置岩爆微震网络，以判定岩爆区的大小和分布。

2) 岩爆控制与防治。①设法改善岩爆区岩体物理力学特性，降低岩体中的应力；②改变开挖方式和方法，提高岩体稳定环境；③加强支护类型与岩爆关系研究；④加强岩体微观结构与岩爆之间关系研究。

五、岩体介质与岩石工程结构的耦合作用

这主要表现在地应力场、地下水渗流场和地热场三者之间的线性或非线性耦合关系。岩石工程结构包括了岩体本身结构，也包括在岩体上建造的工程。

(1) 岩体与结构相互作用分析 这包括：①建立结构分析模型，研究其力学性质；②建立地层分析模型，研究其力学性质；③研究地层与结构面的工作条件；④研究地层与结构的耦合问题。

(2) 今后需待加强研究的问题 ①加强对岩土材料本构关系研究；②加强对地层和结构相互作用分析方法研究；③加强工程现场测试和实验室研究。

六、软科学在岩石力学与工程中的应用

软科学是指自然科学、社会科学、数学、哲学的理论和方法应用到现代科学技术和生产上以解决有关的问题。大体上分成不确定分析法，系统分析法和综合智能分析法。

1. 不确定分析法

1) 概率论与数理统计分析。这包括一次二阶矩法，Monte-Carlo 法；随机有限元法等。

2) 随机过程法。将岩土状态变量如位移、应力和材料特性参数如 E 、 μ 、 c 、 φ 看作与时间有关的随机变量。其一是时间序列分析，把位移值视为一时间序列，建立数学模型，用其预报同类岩土体位移值；其二是随机预报，把岩土体变形位移视为时间和空间上连续的随机过程，建立方程式，以描述变形位置随时间空间域的路径变化，以及变形概率随时间空间变化。

3) 模糊数学方法。这对于岩土工程来说亦此亦彼的说法，如洞室围岩“基本”稳定，结构面比较发育，在模糊数学上可用隶属度 0~1 来描述。目前在这方面常用的方法有模糊综合评判，智能模糊推理，模糊概率和模糊可靠度等。

4) 灰色系统。岩土工程许多问题属于灰箱。灰色理论包括：灰色预测，灰色统计，灰色决策，灰色聚类分析，灰色控制。在洞室围岩工程中，应用较多的是灰色预测和聚类分析。

2. 系统分析法

1) 系统识别。把岩体视为变换器，把初始应力和开挖应力释放看成变换器的已知输入值，把观测的收敛位移视为变换器输出值，按系统识别理论来判断岩土体等价物理模型和力学参数与工程要求符合情况（弹性、塑性等）。目前常用最小二乘法识别准则，即设模型计算值与工程实测值残差平方和最小为最佳模型。该理论目前主要用于粘弹塑性模型识别。

2) 系统工程。把岩土体视为一个系统，要认识整个岩土体的特征，应研究各个部分及其过程间的关系，即对整个系统加以研究。如新奥法施工是一个系统工程，从施工设备，开挖方法，适时支护，岩体监测等必须统一考虑。目前在系统工程中，应用最广的是运筹学，即运用数学使规划和运行达到最优。另外，最优设计用于岩土参数反分析。

3) 信息论。该理论认为，系统是由信息获取、传递、加工和处理等一系列变换才能实现有目的运动。在岩土工程中，运用信息量可加原理进行分析，即：

$$I(\text{后验}) = I(\text{先验}) + I(\text{观测}) + I(\text{理论})$$

这主要在岩土变化预报中使用。

4) 控制论。该理论涉及到系统控制信息，反馈、输入和输出等。控制即“施控制”以适当手段给“受控者”按预先设计发生变化。该理论强调系统与环境有明显界限，且两者又相互联系和作用，环境对系统称输入，系统效果为输出。在岩土工程上如位移反分析、施工反馈技术。

5) 突变理论。突变是指物质变化是不连续的，突发的，非光滑的和定性的。如岩爆、瓦斯（水）突出，塌方等。从量的角度来研究各种突变事件的不连续变化，研究过程本身是连续的，而连续的原因引起不连续的结果。目前已用于模拟岩爆、地震、岩石破裂等。

6) 协同学理论。协同学考虑研究对象的宏观和微观两个层次,其核心是伺服原理。从巨系统中的子系统出发寻找动力学稳定性,参量,并区分出快变量和慢变量。快变量受慢变量的伺服,从而找出起主导作用的慢变量。

与协同学一起发展的还有耗散结构理论和混沌理论,这三种理论目前在岩土工程上尚未见到应用。

3. 综合智能分析

该系统包括专家思维、判断、分析和计算机软、硬件处理。它由知识库、数据库、逻辑推理机,解释机和学习机等部分组成。知识库用于解决某一类问题的知识、程序、实验分析、专家经验。数据库用于用户与系统对话。推理机用于模拟专家思维、判断、分析与综合机制能力。解释机用于回答用户不清楚的知识。学习机不断充实知识库知识,并删除旧知识,如围岩分类专家系统,采矿方法咨询专家系统等,应属智能专家系统范畴。

第二章 地下洞室岩体物理力学参数

第一节 概 述

在水电、采矿、交通等地下工程中，反映地下洞室围岩状态的物理力学参数很多，如岩石（岩体）密度、比重、孔隙率、吸水率、渗透系数、抗压强度、抗拉强度、抗剪强度、抗力系数、弹性（变形）模量、泊松比、纵横波速、内摩擦角 φ 和凝聚力 c 等。

地下洞室的优化设计研究是当前地下洞室稳定性研究课题的重要内容，这不仅关系到地下洞室工程的安全，而且对资源的合理开发与利用起着决定作用，对工程投资及施工也都具有重要的现实意义。然而，地下洞室优化设计首先要遇到的问题是地下洞室岩体物理力学参数的选取，它关系到工程投资及安全运行等问题。依据现有的设备和采集数据的手段，获取地下洞室岩体物理力学参数往往与工程岩体实际性状有较大的出入，究其原因就是人们在处理实际工程时，只考虑了岩体本身的复杂性，而没有考虑岩体的不确定性，从而使得获取参数的手段和方法局限于经验、半经验，导致所选取的参数与实际情况差异较大。

为了克服以上问题的弊端，本章以抗剪参数选取的方法为例，结合实际工程岩体剪切试验资料，对岩体抗剪参数的合理选取进行了理论分析和探讨。工程实践表明，这些方法更符合实际，且精度高。本章第三节给出了国内外岩体力学参数工程实录。

第二节 岩体力学参数选取方法

一、正交试验设计原理

正交试验设计，是利用数理统计学和正交性原理，从大量的试验点或多元参数组中挑选出适量的具有代表性、典型性的点，应用“正交表”合理安排试验，是一种最优的试验设计方法。它避免了“孤立试验法”的不足，吸取了“全面试验法”的长处。正交性原理包括两方面的内容，即水平均匀性和搭配均匀性。

设有三个参数 A, B, C ，每个参数各取三个不同的水平 $A_1, A_2, A_3; B_1, B_2, B_3; C_1, C_2, C_3$ 。如果全面试验要做 $3^3=27$ 次试验，但是用正交试验设计只做9次就可以了，如表2-1所示，其中 X 为试验指标。

表 2-1 三参数三水平正交表

试验号	A	B	C	指标 X	试验号	A	B	C	指标 X	试验号	A	B	C	指标 X
1	A_1	B_1	C_1	X_1	4	A_2	B_1	C_2	X_4	7	A_3	B_1	C_3	X_7
2	A_1	B_2	C_2	X_2	5	A_2	B_2	C_3	X_5	8	A_3	B_2	C_1	X_8
3	A_1	B_3	C_3	X_3	6	A_2	B_3	C_1	X_6	9	A_3	B_3	C_2	X_9

从表 2-1 可以看出, 所选 9 次试验对每个参数来说, 每个水平分配是均匀的。且三个参数的搭配出现次数也是相同的。为了便于直观想象, 我们将全面试验的 27 次试验绘于图 2-1, 每个结点即为一个全面试验的试验点。正交试验所选的 9 次试验是打有黑点的 9 个结点。从图上看出, 每个面上都有且只有 3 个结点, 而且每个结点的两个坐标都与其他结点的另两个坐标完全不同, 因此它们能够全面地反映 27 次试验。

通过这些参数的交叉组合, 利用正交试验设计的方差分析或直观分析方法, 可以确定最优试验方案或参数对指标的影响程度及顺序。

二、异常值剔除

在实验过程中, 由于读错、记错和仪器本身等方面的问题, 使测试数据出现异常现象。这样的一些异常值如果参与正常值计算或数据整理会造成计算成果的歪曲甚至错误。根据统计学原理, 在给定一置信概率 (如 $1-\alpha=0.99$) 情况下, 确定出相应的置信限, 凡超过此置信限则为随机误差, 应给予剔除。对一维数组坏值剔除有许多准则可循。而成比例的二维数组如何剔除尚未见到可遵循的

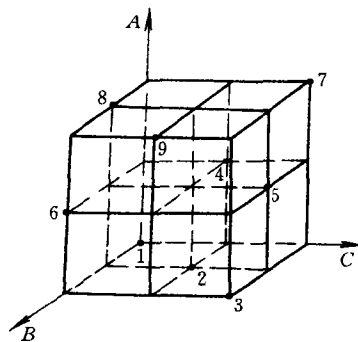


图 2-1 全面试验与正交试验比较

规则。如剪切试验, 建议将剪应力除以相应的法向应力转换为一维数组, 然后按数值剔除法进行计算。

异常数据的判别与剔除, 有物理判别法和统计判别法, 格拉布斯准则属于后者。其基本思想为: 给定一个危险率 (如, 0.05, 0.01), 确定相应的置信限, 凡超过这个界限的误差, 就认为它不属于随机误差范畴, 而是粗大误差, 应予以剔除。

设试验数据 X 为正态分布: $XN(\mu, \sigma)$, 试验数据 X 按值的大小排成顺序统计量:

$$X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \cdots X_{(n)} \quad (2-1)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{(i)} \quad (2-2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{(i)} - \bar{X})^2 \quad (2-3)$$

$$\bar{X}_n = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n X_{(i)} \quad (2-4)$$

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_{(i)} - \bar{X}_n)^2 \quad (2-5)$$

于是可进一步推导出:

$$\begin{aligned} X_{(n)} - \bar{X} &= \left(\frac{n-1}{n} \right) (X_{(n)} - \bar{X}_n) \\ \sum_{i=1}^n (X_{(i)} - \bar{X})^2 &= \sum_{i=1}^n (X_{(i)} - \bar{X}_n)^2 + \frac{n}{n-1} (X_{(n)} - \bar{X}_n)^2 \\ \frac{\sigma_n^2}{\sigma^2} &= 1 - \frac{1}{n-1} \left(\frac{X_{(n)} - \bar{X}}{\sigma} \right)^2 \end{aligned} \quad (2-6)$$

格拉布斯导出了