

JIEGOU MIAN YU GONGCHENG YANTI WENDINGXING

# 结构面与工程 岩体稳定性

杜时贵 著

地震出版社

P583

2

浙江建设职业技术学院教师专著出版基金资助出版  
浙江省自然科学基金（编号 Y505008）资助项目

# 结构面与工程岩体稳定性

杜时贵 著

地震出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

结构面与工程岩体稳定性/杜时贵著. —北京:地震出版社, 2006.02

ISBN 7-5028-2542-8

I. 结… II. 杜… III. ①岩体结构面—表面粗糙度—系数—研究 ②岩土工程—加固—研究 IV. ①P583 ②TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 067993 号

地震版 XT 200400246

### 内 容 简 介

本书主要涉及岩体结构面工程性质及其对工程岩体稳定性的影响。主要内容包括结构面表面形态基本特征、结构面粗糙度系数测量方法, 结构面表面形态的力学效应, 结构面粗糙度系数的工程应用, 岩石质量指标及其工程应用, 工程岩体稳定性评价等。既有理论高度, 又有工程实际意义, 对岩体工程稳定性分析具有参考价值。适用于水利、交通、采矿、地质、地下建筑等工程技术人员参考。

## 结构面与工程岩体稳定性

杜时贵 著

责任编辑: 陈晏群

责任校对: 郭京平

---

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

---

版(印)次: 2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 391 千字

印张: 14.5

印数: 0001~1000

书号: ISBN 7-5028-2542-8/TU·175 (3168)

定价: 40.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

# 前 言

本书是作者 20 年结构面及其对工程岩体稳定性影响研究的结晶。岩体工程实践表明, 不管基础岩石如何坚固, 只要岩体中存在不利结构面构成软弱地质界面或分割面, 岩体就失去了其完整性和连续性, 就有可能沿这些结构面发生变形破坏。勿需置疑, 结构面的发育、组合特征及其工程性质是工程岩体稳定性分析的基础。基于此, 20 年来, 作者聚焦于岩体结构面的几何特征和力学性质研究, 并应用于岩体工程实践, 形成了系列的理论与实践研究成果。应地震出版社之约, 将结构面与工程岩体稳定性研究成果结集出版。

本书共分八个部分:

绪论阐述了结构面与结构体共同构成岩体的基本观点, 分析了结构面对隧道围岩稳定和边坡岩体稳定的影响, 探讨了结构面在水库诱发地震中的作用;

第一章通过野外大量岩体结构面表面形态调查和 20078 条结构面表面轮廓曲线的测量统计, 分析了岩体结构面表面形态的基本特征, 研究了结构面粗糙度系数的各质异性、各向异性、非均一性和尺寸效应等性质, 提出了定向统计测量岩体结构面粗糙度系数的思路;

第二章主要介绍岩体结构面粗糙度系数测量手段和测量方法, 根据岩体结构面表面形态的具体特征, 设计了简易纵剖面仪、轮廓曲线仪、粗糙度尺、多量程粗糙度尺等结构面粗糙度系数测量仪器, 推导了 JRC 修正直边法的数学表达式, 为岩体结构面粗糙度系数的定向统计测量奠定了基础;

第三章侧重研究岩体结构面表面形态的力学机理, 建立了表面形态参数与力学性质的本构关系, 评价了各影响因素的结构面力学效应;

第四章介绍了岩体结构面粗糙度系数的分形分析方法及其实用性, 建立了 JRC 尺寸效应分形模型;

第五章通过若干基于粗糙度系数统计测量的岩体结构面抗剪强度经验估算工程应用实例, 介绍了岩体结构面粗糙度系数工程应用方法, 评价了粗糙度系数

工程应用的效果;

第六章是岩石质量指标研究的成果,集中作者在工程实践中的所思所想,提出了RQD工程应用中的几个重要问题,探讨了解决问题的思路和方法;

第七章给出了两个具体的工程岩体稳定性研究实例,介绍工程岩体稳定性分析时结构面的研究方法。

本书是作者学术成长过程的历史记录,凝聚了许多前辈和学术同行的智慧。王思敬院士的长期指导使作者把准了岩体结构面研究方向,硕士阶段的导师潘别桐教授、博士阶段的导师龚晓南教授、博士后阶段的合作导师杨树峰教授的高水准指导使作者产生了许多灿烂的学术火花,徐世浙院士、杨裕云教授、伍法全教授、唐辉明教授、刘佑荣教授、徐光黎教授、杨杨教授、肖树芳教授、陈剑平教授、王清教授、王驹教授、沈珍瑶教授、贺可强教授、胡勇平教授、叶俊林教授、朱玉龙总工、应元成总工的启发性指导使作者受益匪浅;邵俊江博士、吴德兴博士、罗战友博士、许四法博士、彭卫博士、任伟中博士、朱益军博士、楼建东博士、胡晓飞硕士、郭霄硕士、颜育仁硕士、童宏刚硕士、万颖君硕士、徐健硕士、赵文宏硕士、陈德生硕士,以及浙江建设职业技术学院岩土工程研究所刘俊龙副教授、林伟军副教授、张敏高工、姜健老师、胡轶敏老师、沈毅老师、余伯增老师、蒋莉老师、杨益老师、沙玲硕士、崔春霞硕士、毛肖硕士、王晓翠硕士和陈中龙同学提供了许多有益的帮助;浙江省教育厅副厅长郑继伟博士、浙江省建设厅赵如龙副厅长、贾宝林副厅长、浙江建设职业技术学院党委书记徐公芳副教授、院长丁夏君教授、副书记朱志忠副教授、副院长刘建军副教授、李海波博士为本书的出版创造了许多便利条件;在本书编辑过程中得到了金华职业技术学院学报编辑部付美贞副教授和洪琴仙副教授的无私帮助。本书的出版得到了浙江建设职业技术学院教师专著出版基金资助。在此一并表示衷心的感谢!

作 者

2005年10月于钱塘江岸

# 目 录

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 绪论：结构面与工程岩体稳定性·····                 | (1)   |
| 第一节 岩体的基本构成——结构面和结构体·····           | (1)   |
| 第二节 公路隧道围岩稳定的结构面影响·····             | (5)   |
| 第三节 网络模拟在隧道围岩稳定性分析中的应用 ·····        | (11)  |
| 第四节 岩坡稳定性破坏概率分析 ·····               | (17)  |
| 第五节 水库诱发地震可能性定量预测 ·····             | (24)  |
| 第一章 岩体结构面表面形态和粗糙度系数的基本特征 ·····      | (28)  |
| 第一节 岩体结构面表面形态基本特征及其应用研究 ·····       | (28)  |
| 第二节 岩体断裂粗糙度系数的各向异性研究 ·····          | (32)  |
| 第三节 岩体结构面力学行为的尺寸效应研究 ·····          | (42)  |
| 第四节 岩体结构面粗糙度系数 JRC 的尺寸效应研究 ·····    | (50)  |
| 第五节 岩体结构面粗糙度系数的统计估测 ·····           | (56)  |
| 第二章 岩体结构面粗糙度系数测量方法 ·····            | (59)  |
| 第一节 岩体结构面粗糙度系数研究进展 ·····            | (59)  |
| 第二节 简易纵剖面仪及其在岩体结构面粗糙度系数研究中的应用 ····· | (64)  |
| 第三节 直边法估测 JRC 的实践检验 ·····           | (68)  |
| 第四节 JRC 修正直边法的数学表达 ·····            | (73)  |
| 第五节 岩体结构面粗糙度系数 JRC 的定向统计研究 ·····    | (81)  |
| 第六节 JRC 快速测量技术 ·····                | (87)  |
| 第七节 节理粗糙度系数 JRC 测量新方法 ·····         | (91)  |
| 第三章 岩体结构面形态的力学效应 ·····              | (96)  |
| 第一节 岩体节理面的力学效应研究 ·····              | (96)  |
| 第二节 岩体结构面表面形态与力学机制关系研究·····         | (106) |
| 第四章 岩体结构面粗糙度系数的分形描述·····            | (110) |
| 第一节 岩石节理粗糙度系数的分形特征·····             | (110) |
| 第二节 JRC 尺寸效应分形的特征·····              | (114) |
| 第三节 Fractal 法研究 JRC 的实践检验·····      | (116) |
| 第四节 JRC 分形估测方法的实用性·····             | (121) |

|                                                  |       |
|--------------------------------------------------|-------|
| <b>第五章 岩体结构面粗糙度系数的工程应用</b> .....                 | (126) |
| 第一节 JRC-JCS 模型在工程实践中预测能力的回顾.....                 | (126) |
| 第二节 小浪底水库风雨沟西侧边坡岩体节理抗剪强度研究.....                  | (130) |
| 第三节 大溪岭隧道围岩结构面抗剪强度.....                          | (135) |
| 第四节 小浪底水库进口高边坡岩体节理抗剪强度研究.....                    | (139) |
| 第五节 JRC-JCS 模型在抗剪强度参数取值中的应用.....                 | (144) |
| 第六节 大梁山隧道围岩稳定性研究.....                            | (149) |
| 第七节 岩体结构面抗剪强度经验估算方法在杭千高速公路路堑边坡<br>稳定性研究中的应用..... | (155) |
| <b>第六章 岩石质量指标基本特征及其工程应用</b> .....                | (161) |
| 第一节 岩石质量定量描述研究现状及趋向.....                         | (161) |
| 第二节 RQD 研究的几个理论问题.....                           | (168) |
| 第三节 岩石质量指标 (RQD) 的各向异性分析.....                    | (177) |
| 第四节 岩石质量的分形表述.....                               | (183) |
| 第五节 岩石质量指标 RQD 与岩体工程分类 .....                     | (189) |
| 第六节 RQD 在隧道围岩分类中的应用.....                         | (195) |
| <b>第七章 工程岩体稳定性研究实例</b> .....                     | (199) |
| 第一节 新岭隧道围岩稳定分析.....                              | (199) |
| 第二节 黄河小浪底水库风雨沟西侧边坡稳定性研究.....                     | (204) |
| <b>参考文献</b> .....                                | (213) |
| <b>参考资料</b> .....                                | (217) |
| <b>附录: 科研成果目录</b> .....                          | (218) |



# 绪论：结构面与工程岩体稳定性

## 第一节 岩体的基本构成——结构面和结构体\*

**摘 要：**从材料性和工程作用对象两个方面阐述了“岩石”和“岩体”的概念，分析了结构面与结构体的层次性和相对性。认为“岩体”是工程作用对象的岩石工程地质体，而“岩石”仅仅指构成岩体的物质组成或材料。定义岩体为在地质历史过程中形成，并遭受后期地壳运动和地球外部营力重新塑造，具有一定的岩石组成和结构面网络，赋存于特定地质环境中的岩石工程地质体。岩体的基本构成是结构面和结构体，结构面与结构体具有层次性和相对性，且相互包容。

**关键词：**岩石；岩体；结构面；结构体；基本构成

### 1 引言

结构面的存在是岩体作为工程介质区别于其他工程介质的本质根源。与土体相比，岩体工程性质的特殊性主要表现在以下三个方面：

(1) 不连续性。岩体是由不同规模、不同形态、不同成因、不同方向和不同次序的结构面以及被结构面围限而成的结构体共同组成的综合体，岩体在几何上和力学性质上都具有不连续性。

(2) 各向异性。由于发育在岩体中的各种结构面均具有明显的方向性，受结构面的影响，岩体的工程性质呈现显著的各向异性。随着岩体中发育的结构面组数的增多，岩体工程性质的各向异性程度趋于减弱。

(3) 非均一性。由于岩体工程性质的不连续、各向异性以及岩体组成物质的非均质，加之结构面在岩体不同部位发育程度和分布规律的差异，不同工程部位的岩体常表现出不同的工程性质。

岩体工程性质的特殊性决定了岩体工程性质的复杂性，要求对岩体工程性质的研究方法应与土体及其他工程介质相区别。本文通过分析结构面与结构体的相对性和层次性，从几何学和力学结合的角度探讨结构面和结构体的客观定义。

### 2 岩石与岩体

从地质角度对岩石和岩体的描述与从工程地质角度对岩石和岩体的定义是截然不同的。地质学将岩石定义为地壳发展过程中的自然历史产物，是构成地壳的主要独立组分，它可以由一

\* 本文作者杜时贵、程俊杰、王思敬，2000年发表于《工程地质学报》第305~308页。



种或几种造岩矿物或天然玻璃组成,具有稳定的外形的固态集合体。岩石按其成因可分成岩浆岩、沉积岩和变质岩。在地质学中,岩体是一个没有明确地质含义的术语,它不过是地质学家的一种习惯表达,岩体通常是指不具有成层构造的岩浆岩或混合岩化的变质岩的俗称。

在工程地质学领域,“岩石”和“岩体”是工程性质截然不同的两个术语,工程地质学家特别强调岩石与岩体的区别应用。目前,国内工程地质界对岩石和岩体的定义尚未达成共识。中国科学院地质研究所工程地质力学课题组历来注重区分岩石和岩体,他们出版的所有论著都非常严格地采用“岩体”这个强调工程概念的术语,认为岩体内存在着不同成因、不同特性的地质界面,包括物质分异面和不连续面,如层面、片理、断层和节理等,这些面统称为结构面。岩体中的结构面依自己的产状,彼此组合将岩体切割成形态不一、大小不等以及成分各异的岩块,这些由结构面所包围的岩块统称为结构体。根据这个定义,岩石仅仅是指构成岩体的物质组成或材料(王思敬,1990;谷德振,1979;孙广忠,1988)。

类似的,中国地质大学岩体力学课题组也非常重视岩体的工程地质描述,在所著的《岩体力学》一书中,非常清晰地贯穿了岩块和结构面共同构成岩体的学术思想,认为岩体(Rock Mass)由地质过程中形成的岩块和结构面网络组成,岩体具有天然应力,岩体的强度、变形和渗透性主要受结构面网络控制;岩块(Rock)是没有包含显著结构面的岩石块体,是构成岩体的最小岩石单元。从力学属性看,岩块可视为均质、各向同性的连续介质;而岩体(除少数外)都是非均质、各向异性的非连续介质(潘别桐,1990)。

相比而言,水利系统的专家并不强调岩石和岩体的应用区别,所发表的论著偏爱用“岩石”而不用“岩体”。他们的观点是,岩石作为一种自然历史的产物,是构成地壳(岩石圈)的物质基础。岩石这一术语,是工程领域和地质学领域包括岩石力学和工程地质学领域的一般用语。若把岩石视为工程建筑物的环境、基础和材料,则岩石作为一个泛指的名词,即作为地壳(岩石圈)岩石的统称,包括岩块和岩体。所谓岩块是指脱离天然状态母岩的块体,如钻取的岩芯、爆破得到的石块和人工凿取的石料等,而岩体是指一定范围的天然岩石——地壳岩石圈的自然状态(周维垣,1990)。

笔者认为,工程地质对岩石工程地质体的研究目的是探索地壳(岩石圈)中,人类工程所涉及的范围,作为工程作用环境和介质的岩石工程地质体的工程稳定性问题。从这个意义上说,应该突出岩石工程地质体的工程响应,即岩石工程地质体对工程的适应性,这正是地质学的岩石研究领域与工程地质学的岩石研究领域的界线所在。也就是说,从工程的角度,“岩体”一词比“岩石”更能客观地反映事物的本质,使人们对岩石的研究目的(无论是工程地质学研究的岩石还是地质学研究的岩石)一目了然。此外,为了与土体(土的工程地质体)相对应,以“岩体”作为岩石工程地质体的简称也是非常恰当的,它强调岩石工程地质工作者的研究对象是岩石工程地质体,包括结构面和结构体,以及岩石所处的自然环境如地应力、地下水等等。因此,“岩体”比“岩石”包含了更广泛而深刻的内涵。

### 3 结构面与结构体

20世纪70年代以来,国外工程地质学家和岩体力学专家都注意到各种结构面切割的岩体与完整岩块的性质存在区别,并提出了岩块(Rock)和岩体(Rock Mass)的概念(Muller, 1974; Broilli, 1974; Bieniawski, 1974, 1976; Goodman, 1976)。他们称岩块为岩石材料

(Rock Material)、完整岩块(Intact Rock)、岩石物质(Rock Substance)或岩样(Rock Specimen);称结构面为不连续面(Discontinuities)、分离面(Separation plane)或断裂(Fracture)。并认为岩体由岩块和结构面组合而成。特别是,美国加利福尼亚州立大学的 Goodman 和 Gen-hua Shi (1985)创建的块体理论(Key Block)是岩体结构控制论观点在工程实践中成功应用的典范。

研究不同级别岩体的工程特性具有十分重要的工程意义。从工程地质的角度,从大的板块到小的岩石手标本或岩芯都可以看成由结构面和结构体构成的岩体,而其中的结构面和结构体的规模却相差悬殊。作为板块边界的洋中脊、转换断层、深海沟和地缝合线可视为地壳岩石圈最大级别的结构面。对应地分布于洋中脊、转换断层、深海沟和地缝合线之间的板块则构成地壳岩石圈最大规模的结构体。这样,整个地壳岩石圈可视为由欧亚板块、美洲板块、非洲板块、太平洋板块、澳大利亚板块和南极洲板块等六大板块为结构体,由洋中脊、转换断层、深海沟和地缝合线等板块边界构造为结构面的全球范围的超大型岩体。其中,结构体即板块内部是地壳相对稳定的地区,其工程地质稳定性较好;而结构面即板块的边界如洋中脊、转换断层、深海沟和地缝合线等则是地球上地震活动强烈、火山活动频繁、工程稳定性差的地带。例如,大陆地震主要集中在太平洋四周的环太平洋地震带、阿尔卑斯—印尼地震带和大陆裂谷地震带,海洋地震则多集中在大洋中脊地震带(朱志澄、宋鸿林,1990)。

就板块范围而言,一些对区域地壳稳定起控制作用的区域性断裂,包括大小构造单元接壤的深大断裂,是区域性的巨型结构面,相当于谷德振教授分类的Ⅰ级结构面,它们与稳定地块(结构体)共同构成区域规模的巨型岩体。其中,结构体即稳定地块内部是工程稳定性较好的“安全岛”。而结构面即区域性深大断裂带则是地震活动和新构造运动非常活跃的地带。如我国境内沿东部地台和西部地槽交界带分布的中枢大地震带,沿汾渭断裂带分布的华北大地震带,沿下辽河凹陷、渤海凹陷、及河北平原凹陷的北东向活动断裂带分布的华北平原大地震带和沿郯城—庐江深大断裂带发育的郯城—庐江地震带等,一般工程建筑均应尽量避让。

节理和中小规模断层是人类活动最常遇到的一类结构面,相当于谷德振教授分类的Ⅲ级和Ⅳ级结构面,这种级别的结构面和结构体组成的岩体被绝大多数岩体工程地质工作者所习见,其范围多包含在具体的工程作用范围之内,是容易为大家所接受的概念。

最小一级的结构面是岩石手标本或岩芯内部的微裂纹或微断裂,若将这些微裂纹或微断裂视为结构面,则其间的岩块(绝对意义上的岩块)就是结构体。因此,岩石手标本或岩芯可看成是最小级别的岩体。

作者的这种论述无意使岩体、结构体和结构面的概念复杂化,虽然就工程范围而言,Ⅲ级结构面和Ⅳ级结构面及其所围限的结构体共同构成的岩体是工程地质学家和岩体力学专家的主要研究对象。显然,自然界岩体的这种层次性、相对性和相互包容乃是辩证唯物主义的基本观点,也是岩体力学研究必须贯彻的科学思路。因此,我们强调的基本观点是,结构面和结构体构成岩体,岩体、结构面和结构体的概念都是相对的和分级别的。具体的说,结构体并不是内部没有包含任何结构面的理想岩块,事实上结构体内部总是或多或少地包含各种结构面,但这种包含于结构体内部的结构面与作为结构体分离边界的结构面相比,其几何上和力学属性上均可忽略不计。或者说,在工程作用下,沿结构体内部的结构面发生失稳破

坏的概率是沿结构体边界的结构面发生失稳破坏概率的万分之一。

岩体结构控制论即结构面与结构体共同构成岩体的观点已得到无数工程实践和野外调查结果反复证实。尽管岩体的工程性质不等于结构体的工程性质和结构面的工程性质的简单叠加,不可否认,岩体的工程性质主要取决于结构体的工程性质和结构面的工程性质,包括岩体赋存的地质环境(地应力、地下水等)和工程作用特点。其中,结构面是岩体工程性质复杂性的总导演:一方面,结构面的存在破坏了岩体的连续性和完整性,使岩体具有不均一性和各向异性;另一方面,作为岩体组成部分的结构面本身,其几何上和力学上也是错综复杂的。所以说,结构面及其工程性质的复杂性是造成岩体工程性质千差万别的最根本的原因。

#### 4 结构面与工程岩体稳定性

根据谷德振教授(1979)的定义,结构面是地质历史发展过程中,在岩体内形成具有一定方向、一定规模、一定形态和特征的面、缝、层、带状的地质界面。面——是指岩块间刚性接触的,无任何充填的劈理、节理、层面、片理等,是自然界最直观、最易被人们认识的一类结构面;缝——是指有充填物,而且充填物有一定厚度的裂缝,如泥化夹层、岩脉等,这类结构面具有清楚的界面,也是人们所熟悉的;层——是指岩层中工程性质相对软弱的软弱夹层,如玄武岩中的凝灰岩夹层,灰岩中的泥灰岩夹层,砂岩中的黏土层夹层等,是物质成分和力学性质有明显差异的两种成层岩石在空间上韵律分布形成的,这类结构面野外容易识别,但按传统的观点,人们并不把它视为结构面。可以说,这是一类根据力学属性定义的结构面;带——是指具有一定厚度(或宽度)的构造破碎带、接触破碎带、顺层或层间错动带、古风化壳(不整合)和风化槽等。因此,考虑工程稳定性的研究目的,结构面不但包括几何属性和力学属性上的面状构造,还包括在几何上由上、下两个界面所限制,在物质组成上有一定厚度的相对软弱的物质充填,在力学属性上存在明显不连续性的缝、层、带状构造,由于充填于上、下两个界面之间的软弱物质厚度与相邻岩块厚度相比是微不足道的,从宏观上仍可看作是一种面状构造。

一般而言,工程岩体稳定性受地质条件和工程作用力的共同制约。工程作用力与工程的类型、性质和规模直接相关,是通过设计能够了解清楚的;地质条件则是岩体对工程的适应性,包括岩体结构的工程地质特性、块体滑动的几何条件、地应力和水文地质条件等,它们不同程度地受岩体中结构面的分布位置、产状、数目、规模、宽度、充填物特征、结构面力学性质以及不同结构面之间的切割与组合关系等因素控制。不管基础岩石如何坚固,只要岩体中存在不利的结构面构成软弱的地质界面或分割面,岩体就失去了其完整性和连续性,就有可能沿着这些结构面发生变形破坏。许多大规模的自然斜坡的崩落和滑坡、人工边坡、坝基和坝肩岩体的滑移失稳,以及地下开挖工程的坍塌、冒顶、底鼓和侧墙弯折破坏都与岩体结构面的存在有着千丝万缕的联系。杜时贵(1997)分析了两种著名的工程岩体分类方案 RMR 分类和 Q 系统(Bieniawski, 1989),发现在 RMR 分类中“结构面”因素占 75%,而 Q 系统中几乎所有六个分类要素均与结构面相关。邓宜明和李坚诗(1987)的调查资料显示,大瑶山隧道施工过程中出现的 29 次坍方,有 22 次坍方与结构面有关,占坍方总数的 75.9%。郭志(1990)列举了三峡水库坝基、小浪底水库左坝肩、法国的布泽坝等 13 个国内外著名工程受结构面影响的实例。因此,结构面的几何学特征和力学特征的研究是工程岩体稳定性评

价和加固处理方案确定的基本前提。

谷德振教授(1979)对结构面与工程岩体稳定性的关系作了科学概括,即岩体的完整性取决于结构面的数量多少和性质;岩体的稳固性取决于结构面的几何形态和软弱结构面的泥化程度即结构面的抗滑阻力。

## 5 结论

(1) 在工程地质学领域,“岩体”比“岩石”包含了更为广泛而深刻的内涵:一方面,它描述了介质类型是岩石工程地质体而不是土的工程地质体;另一方面,它描述了工程作用对象是包含结构面和结构体的岩体,而不是完整的岩石块体。而“岩石”仅仅指构成岩体的物质组成或材料。

(2) 岩体是在地质历史过程中形成,并遭受后期地壳运动和地球外部应力重新塑造,具有一定的岩石组成和结构面网络,赋存于特定地质环境中的岩石工程地质体。岩体的基本构成是结构面和结构体,结构面与结构体具有层次性和相对性,且相互包容。从板块构造到岩石手标本可分为五种级别的岩体,各级岩体中的结构面规模大致与谷德振教授的结构面分级相对应。就工程范围而言,Ⅲ级结构面和Ⅳ级结构面及其所围限的结构体共同构成的岩体是工程地质学的主要研究对象。

(3) 以往人们习惯于从几何属性上定义结构面,而岩体中力学性质的不连续面(层)容易被忽略。结构面的完整理解应该同时从几何学和力学属性上去把握,即结构面的工程性质既包括几何学性质,也包括力学性质,两者缺一不可。其中,几何学性质包含两方面的内容:结构面作为工程岩体失稳破坏的隔离边界和滑移面,控制了失稳块体的形状和规模,这是岩体结构面的空间方位效应;结构面的存在破坏了工程岩体的连续性和完整性,使岩体工程性质恶化,这是结构面的岩体完整性效应。

(4) 岩体工程性质的特殊性在于它的各向异性、不连续性和非均一性,岩体工程性质复杂性的根源在于结构面几何学和力学性质的复杂性。

## 第二节 公路隧道围岩稳定的结构面影响\*

**摘 要:** 结构面是影响公路隧道围岩稳定的重要因素。本节引用最新研究成果,系统地分析了结构面空间方位、几何参数和抗剪强度对公路隧道围岩稳定的影响。根据工程实践,探讨了 RQD 指标运用的若干问题,推荐了 JRC (Joint Roughness Coefficients) 的定量统计估测方法。

**关键词:** 公路隧道; 结构面; 岩石质量指标 RQD; 粗糙度系数 JRC

自 Terzhaqi 于 1946 年提出适用于拱型金属支架支护的隧道围岩分类以来,国内外相继出台了许多隧道围岩分类方案。当今最具权威性的分类当属南非科学和工业研究委员会

---

\* 本文作者杜时贵、周庆良、孙有法,1977 年发表于《中国公路学报》第 64~69 页。

(CSIR) Bieniawski (1989) 的地质力学分类和挪威岩土工程研究所 (NGI) Barton、Lien 和 Lunde (1974) 的 Q 分类体系, 前者已在 351 个工程中应用, 后者也是在 212 个工程实例基础上发展起来的 (徐光黎, 1993)。分析上述两个分类体系各因素可知, 在地质力学分类中, “结构面” 要素占总评分的 75%; 在 Q 分类体系中, 几乎全部 6 个要素均与 “结构面” 有关。《公路隧道勘测规程》(TJT063-85) 是中国公路隧道稳定性评价的行业标准, 其中与 “结构面” 有关的指标也占很大的比重。可见, 结构面对公路隧道围岩稳定的重要作用已被人们所普遍认识。

隧道坍方调查资料表明, 结构面是导致隧道坍方的关键因素。例如, 大瑶山隧道施工过程中出现的 29 次坍方中, 与结构面有关的坍方为 22 次, 占坍方总数的 75.9% (邓宜明、李坚诗, 1987)。

隧道开挖和衬砌的接触摩擦单元有限元模拟成果显示, 结构面的存在使隧道变形和受力状况大大恶化, 甚至引起坍方 (雷晓燕、王武全, 1993)。

综上所述, 结构面的研究是正确评价公路隧道围岩稳定的重要基础。岩体结构面系指在岩体形成过程和形成以后的地质历史时期, 受地质作用形成的各种不连续地质界面, 包括岩层层面、不整合面、断层面 (带)、各种成因节理裂隙、软弱夹层和泥化夹层等。本节从结构面的空间方位 (走向、倾向、倾角)、几何参数 (密度、间距、RQD 指标) 和抗剪强度 (隙宽、充填物及其厚度、壁岩强度、JRC) 等方面阐述结构面对公路隧道围岩稳定的影响。同时, 提出了一些新的研究思路。

## 1 结构面空间方位的影响

结构面空间方位对公路隧道围岩稳定的影响取决于结构面的产状要素与隧道开挖工程面的空间几何关系, 其表现形式总是直接或间接地与围岩分类相联系。例如, Bieniawski (1989) 的地质力学分类将结构面空间方位对隧道围岩稳定的影响从 “非常有利” 到 “非常不利” 的定性描述 (表 0-1) 给以不同的负值来调整围岩分类的总评分。事实证明, 这种做法对于分析单一结构面对隧道围岩稳定的影响是行之有效的, 但对绝大多数实际工程而言, 这只是一种近似的方法。

表 0-1 结构面走向和倾角对隧道开挖的影响

| 走向垂直于隧道轴线 |         |         |         | 走向平行于隧道轴线 |         | 不论什么走向 |
|-----------|---------|---------|---------|-----------|---------|--------|
| 沿倾向掘进     |         | 反倾向掘进   |         |           |         |        |
| 倾角        | 倾角      | 倾角      | 倾角      | 倾角        | 倾角      | 倾角     |
| 45°~90°   | 20°~45° | 45°~90° | 20°~45° | 45°~90°   | 20°~45° | 0°~20° |
| 非常有利      | 有利      | 一般      | 不利      | 非常不利      | 一般      | 不利     |

众所周知, 岩体中的结构面特别是节理几乎没有单一出现而是成组出现的。产状变化在某一范围内的一群结构面构成一个结构面组。一般来说, 岩体中发育一组或几组结构面, 每一组结构面都由许多条结构面所组成, 且每一条结构面的空间方位都不可能完全相同, 人们

无法对众多的结构面逐一分析其对隧道围岩稳定的影响。换言之，即使人们能够分析每一条结构面对隧道围岩稳定的影响，也无法了解结构面组对隧道围岩稳定的总体影响。因此，表 0-1 的实际应用存在一定的困难。

大量岩体结构面产状要素统计测量资料表明，表征结构面空间方位的走向、倾向和倾角均具有随机分布特点，且围绕某一中心服从一定形式分布。例如，结构面的走向和倾向多服从正态或对数正态分布，倾角多服从正态分布。

结构面方位的表示方法很多，如玫瑰花图、等角度或等面积散点图、等密度图等。其中，利用结构面产状的极射赤平投影所做的等密度图最为直观清晰（等密度图的中心点即代表一组结构面的平均方位，等密度图的形状和大小代表一组结构面方位的离散程度），是目前工程地质界广泛采用的表示方法。Francis (1991) 根据表 0-1 绘制成与极射赤平投影等密度图配套的版图（图 0-1），用以分析结构面组对隧道围岩稳定的综合影响。其使用方法是，将版图叠置于标有隧道开挖方向线的结构面极射赤平投影等密度图上，使版图和等密度图的隧道开挖方向线重合并保持一致，便能读出每一组结构面对隧道围岩稳定的“有利”或“不利”影响。图 0-2 是某隧道页岩结构面方位测量统计分析的实例：隧道自  $299^\circ$  向  $119^\circ$  方向掘进，结构面组 A 为薄层状层面，倾向 NW（有些层面由于受断层影响倾向相反），倾角低缓，这组结构面群集在“不利”的区域内；B 组结构面处于“非常有利”和“一般”的范围内，具体是“非常有利”还是“一般”则取决于该组结构面主体倾向与隧道开挖方向一致还是相反；C 组结构面与 B 组结构面情形相似；D 组结构面由于走向与隧道轴向平行，且倾角大小中等，故位于“非常不利”的范围内。

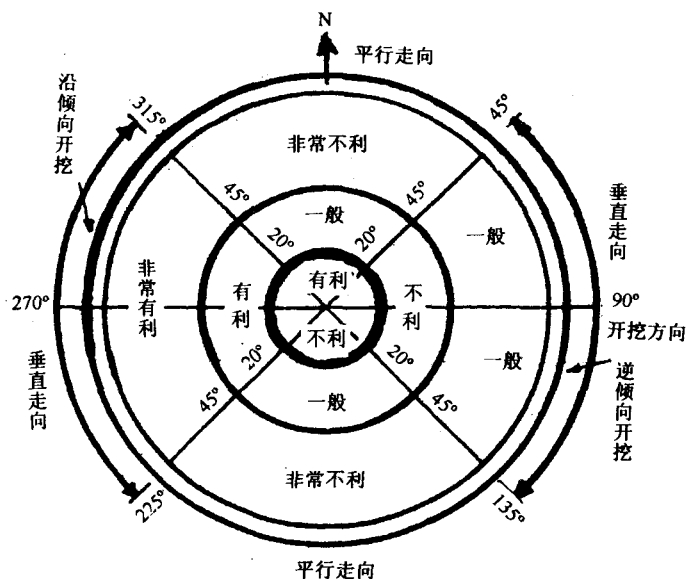


图 0-1 根据表 0-1 绘制的与极射赤平投影等密度图配套的版图

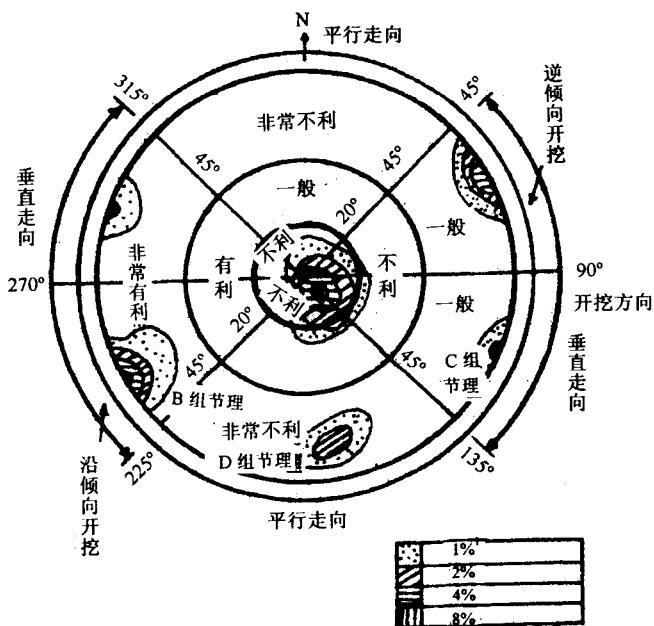


图 0-2 版图与等密度图配套使用 (据 Francis, 1991)

## 2 结构面几何参数的影响

结构面几何参数是表征岩体完整性的指标, 而完整性的好坏对隧道围岩稳定影响重大。通常, 结构面几何参数对隧道围岩稳定的影响通过“岩石块度”刻画岩体的完整程度, 岩石块度由 RQD 指标表示。RQD 也称作岩石质量指标, 由美国学者 Deere (1964) 根据金刚石钻机钻进的岩芯采取率提出的一个定量指标, 定义为:

$$RQD(\%) = 100 \times \frac{10\text{cm以上整段岩芯的累计长度}}{\text{钻孔长度}}$$

一般规定, 确定 RQD 要用直径 > 50mm 的岩芯, 且此岩芯应是用双套管的金刚石钻机钻取的, 且应按每个钻进回次逐一确定。RQD 与岩石质量的关系见表 0-2。

表 0-2 RQD 与隧道围岩稳定的关系

| Deere (1964) |        | 公路隧道设计规范 (1990) |         |        |
|--------------|--------|-----------------|---------|--------|
| RQD/ (%)     | 隧道围岩质量 | RQD/ (%)        | 完整性系数   | 隧道围岩类别 |
| <25          | 很差     | <25             | <0.2    | I      |
| 25~50        | 差      | 25~50           | 0.2~0.4 | II     |
| 50~75        | 一般     | 50~75           | 0.4~0.6 | III    |
| 75~90        | 好      | 75~85           | 0.6~0.8 | IV     |
| 90~100       | 很好     | 85~95           | 0.8~1.0 | V      |
|              |        | >95             | 0.8~1.0 | VI     |



虽然 RQD 指标已在隧道围岩稳定评价中普遍采用, 是公路隧道围岩分类必不可少的指标, 但仍有许多方面值得改进。

根据 Deere 的 RQD 定义, RQD 反映的是岩体中某一点沿某一特定方向的岩石块度值。而实际工程岩体具显著的非均一性, 即使在相距很近的两点钻探得到的 RQD 也不相同, 有时甚至相差很大, 例如, 杭(州)金(华)衢(州)高速公路新岭隧道微风化凝灰质粉砂岩的 RQD 值, 在 ZKC2 孔为 78%, 在 ZKC2A 孔为 22%, 而两孔相距仅 50m。

众所周知, 实际工程岩体中的结构面发育存在严重的各向异性, 即使在同一地点, 沿不同方向的 RQD 值变化很大。设想岩体中只发育一组水平结构面, 结构面间距为 9cm, 则该岩体沿水平方向的 RQD 为 100%, 而沿铅直方向的 RQD 却为 0%。

结构面的产状变化也会使 RQD 测量结果大相径庭。同样对发育一组间距为 9cm 的结构面的岩体, 根据 Deere 推荐的方法, 当结构面的倾角  $< 26^\circ$  时, RQD 值为 10%。而倾角  $> 26^\circ$  时, RQD 值为 100%。

此外, Deere 的 RQD 定义中块径界线 10cm 也值得商榷。极端例子是, 结构面间距为 8~9cm 的岩体 RQD 等于 0%, 而结构面间距 11~12cm 的岩体 RQD 则等于 100%, 根据这个标准, 就会得出前者岩体完整性很差, 而后者的岩体完整性很好的错误结论; 同理, 结构面间距为 11~12cm 的岩体 RQD 等于 100%, 与结构面间距大于 100cm 的岩体 RQD 相等, 而实质上这两种岩体的完整性却相差悬殊。进一步研究发现, 用任何块径界线来定义 RQD 都将导致类似的错误。为避免这类错误, 可将 RQD 的定义延拓为:

$$RQD_t(\%) = 100 \times \frac{\text{沿某一方向大于某一确定值 } t \text{ 的间距之和}}{\text{该方向上所有间距总和}}$$

式中,  $RQD_t$  代表块径为  $t$  时的 RQD 值, 以示与 Deere 的 RQD 概念相区别。在评价实际工程岩体的完整性时, 参考不同块径的  $RQD_t$  值, 可得到更符合客观实际的结论。

RQD 的物理含义及其刻画岩体完整性的功能, 客观上要求具有特定完整性的同一种工程岩体, 无论结构面的产状如何, 也不管在何处测量, 都应得出相同或相近的 RQD 指标。作为定义 RQD 的块径界线, 应通过大量实际工程的调查和统计研究, 定量分析岩体完整性与工程岩体稳定性的关系, 找出对岩体稳定影响最敏感的块径界线, 在这项工作尚未取得进展之前, 建议根据不同块径确定的  $RQD_t$  进行综合分析。

利用野外结构面几何参数统计测量资料, 运用 Monte-Carlo 原理进行结构面网络模拟, 求得岩体结构面网络图和结构参数, 可真实地描述岩体完整性特征(周庆良、杜时贵, 1994)。因为, 结构面几何参数的统计测量可克服一个或几个钻孔求取 RQD 代表性差的缺陷; 全方位  $RQD_t$  值可仿真地再现 RQD 的各向异性特征; 用 0.1m、0.3m、0.5m、0.7m 4 种块径的  $RQD_{0.1}$ 、 $RQD_{0.3}$ 、 $RQD_{0.5}$ 、 $RQD_{0.7}$  综合判断岩体完整性更能客观地评价岩体稳定性, 而且, 结构面网络模拟技术成本低, 实用效果好。

### 3 结构面抗剪强度的影响

研究表明, 结构面抗剪强度对隧道围岩稳定性影响显著, 特别当隧道轴线走向与结构面走向平行或近平行时。影响结构面抗剪强度的因素主要有充填胶结特征、表面粗糙起伏程度、壁岩强度以及结构面贯通性等。

## (1) 非贯通结构面的抗剪强度。

对非贯通的结构面而言,沿剪切面所通过的结构面和未贯通的“岩桥”均起抗剪作用,因此,其抗剪强度比贯通结构面高。假定沿整个剪切面上应力均匀分布,则其抗剪强度可表示为:

$$\tau = [nC_j + (1-n)C_r] + \sigma[nf_j + (1-n)f_r] \quad (0-1)$$

式中,  $n$  为连通率;  $C_j$  为结构面内聚力;  $f_j$  为结构面内摩擦系数;  $C_r$  为岩块的内聚力;  $f_r$  为岩块的内摩擦系数。

## (2) 有充填结构面的抗剪强度。

有充填结构面的抗剪强度取决于充填物的厚度及其物质组成。孙广忠(1988)通过黏土矿物充填结构面的抗剪强度试验发现,抗剪强度随充填物的厚度增厚而迅速降低,当充填物厚度大于一定值后,结构面的抗剪强度主要取决于充填物的力学性质(孙广忠,1988)。

如果充填物为方解石或石英,则结构面抗剪强度会由于“焊接”作用而提高,但隧道开挖振动会再次遭受破坏而形成新的不连续面;方解石或石膏充填的结构面,当它们呈多孔状或鳞片状时,在隧道服务年限内就会被溶解,即结构面抗剪强度会随时间延长而降低甚至消失(Hoek & Brown, 1980);黏土质充填的结构面,如泥化夹层或夹泥的结构面,由于本身就是一种润滑剂,结构面抗剪强度一般很低。表 0-3 列出小浪底不同泥化夹层的抗剪强度值。

表 0-3 小浪底不同泥化夹层的抗剪强度值

| 泥化夹层类型   | $C/\text{MPa}$ | $\varphi/ (^{\circ})$ |
|----------|----------------|-----------------------|
| 全泥型      | 0.013          | 14.0                  |
| 泥夹碎屑或粉砂型 | 0.007          | 15.0                  |
| 碎屑夹泥型    | 0.015          | 19.4                  |
| 粉砂夹泥型    | 0.011          | 19.3                  |

## (3) 无充填结构面的抗剪强度。

无充填、壁岩坚硬的结构面抗剪强度与结构面表面粗糙起伏程度、壁岩强度、残余摩擦角和地应力等因素有关。Barton (1973) 在 100 多条人工拉断节理研究的基础上,总结出估算无充填结构面抗剪强度的 JRC-JCS 模型。用 Barton 和 Choubey (1977) 给出的 10 条标准轮廓曲线估测结构面 JRC 的方法早已被大家所熟悉,随后,近 10 种 JRC 估测方法相继面世,但限于缺乏行之有效的结构面表面轮廓曲线绘制仪器, JRC 的估测精度和速度都较低。杜时贵(1992)研制了简易纵剖面仪,不仅具有体积小、重量轻、便于携带、成本低等特点,而且绘图速度快、测量精度能满足岩体结构面 JRC 测量要求,并已在 10 多项工程实践中成功应用,配合修正直边法,非常适合于具各质异性、各向异性、非均一性和尺寸效应的岩体结构面的 JRC 定量统计测量。

## 4 结语

综上所述,结构面的空间方位、几何参数以及抗剪强度等对岩质隧道围岩稳定构成极其重要的影响。近年来,在本节的研究思路指导下,黄河小浪底水库工程地下洞室围岩稳定性