

内 容 提 要

搞工程建设免不了和岩体打交道,如建水坝、修铁路、挖隧道、架桥梁及搞大的地下工程建设等,都要考虑岩体的稳定性问题。岩体滑坡、变形、蠕动、坠落、崩塌等,无一例外地受岩体结构面的力学效应控制。研究岩体结构面的工程性质是当今工程地质最具现实意义的课题。本书就岩体的结构面工程性质的研究方法、地质分类、几何学分析、力学效应、经验估算方法,实用分析等详加介绍。本书可供工程设计施工和研究人员,以及该专业的本科生、研究生学习参考。

岩体结构面的工程性质

杜时贵 著

责任编辑:陈晏群

责任校对:张晓梅

*

地质出版社出版

北京民族学院南路9号 邮编:100081

北京地大彩印厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 7.125印张 183千字

1999年6月第一版 1999年6月第一次印刷

印数 001—600

ISBN 7-5028-1645-3/P·891

(2136) 定价:20.00元

前 言

黄文熙教授所著《土的工程性质》是一部经典巨著，对岩土工程的发展产生了深远的影响。作者设想，随着对岩体的工程性质的研究进展，岩土工程将进入一个崭新的历史阶段。然而，岩体力学是一门新兴的学科，还有许多方面需要完善，以作者现有的能力和知识结构是不可能独立承担此项重任的。但是，为岩体的工程性质研究积累资料是岩体力学工作者的职责，这是撰写本书的初衷。希望本专著能引起抛砖引玉的作用，以引起同行们对岩体的工程性质研究的兴趣，用以推动这项工作的进展。

结构面是岩体的基本组成部分，结构面的存在是造成岩体工程性质不连续、各向异性和不均一的根源。一方面，结构面构成岩体中的隔离面和滑动面，控制了岩体失稳破坏的规模和类型，结构面的力学性质对岩体稳定性产生巨大影响；另一方面，结构面的存在破坏了岩体的连续性和完整性，使岩体工程性质恶化，结构面的发育程度影响工程岩体的稳定性。因此，结构面工程性质的研究包含着两方面的内容，即结构面的几何学性质和结构面的力学性质。本书正是按这样的主线来构思的。

得益于10年构造地质基本功训练，作者历来重视野外地质调查工作，书中主要学术观点都是从野外调查中总结出来的。例如，JRC各质异性、各向异性、非均一性和尺寸效应规律的概括及其定向统计估测方法的提出，RQD各向异性与结构面组数以及块径界线值的关系等等。此外，与工程结合是结构面工程性质研究的立足点，它决定了结构面工程性质研究的目的。

作者对结构面工程性质的研究工作始于1990年，为评价小浪底水库风雨沟西侧边坡、进口高边坡、消力池边坡的稳定性，调查了自然斜坡的失稳破坏现象。调查中发现，几乎所有的自然斜坡失稳类型：滑坡、倾倒变形、深层蠕动、水平剪切位移及坠落、崩塌及错落等，无一例外地受岩体中结构面的控制。1993~1998年，在沿海大通道浙江段20多个隧道的工程地质勘察中，作者十分注意分析结构面对隧道围岩稳定的影响，受到设计部门的充分肯定。

本书是作者近 10 年对结构面工程性质研究工作的总结，其中有部分成果已公开发表。为使全书具有系统性，还收录了国内外同行们的研究成果。作者的许多研究思想受惠于王思敬院士的指导，以及同杨裕云教授、刘佑荣教授、唐辉明教授的学术交流，在此一并表示感谢。本专著得到浙江工业大学学术专著出版基金资助，特表谢意！

由于作者水平有限，书中肯定存在许多不足，诚望同行们批评指正。

作 者

1999 年 4 月于浙江工业大学

目 录

绪论	(1)
第一节 岩体的基本构成——结构面与结构体	(1)
第二节 结构面与工程岩体稳定性	(4)
第三节 岩体结构面工程性质研究思路	(7)
第一章 岩体结构面的分类	(9)
第一节 岩体结构面的成因类型	(9)
第二节 岩体结构面的分级	(10)
第三节 岩体结构面的分类	(11)
第二章 岩体结构面的几何学描述	(14)
第一节 具一定厚度结构面的几何学特征	(14)
第二节 节理几何模型	(15)
第三节 岩体结构面的网络模拟	(21)
第三章 岩体结构面的几何学效应	(33)
第一节 结构面的空间方位效应	(33)
第二节 结构面的岩体完整性效应	(39)
第四章 岩体结构面的力学效应	(48)
第一节 结构面力学效应研究现状	(48)
第二节 结构面表面形态与粗糙度系数	(49)
第三节 岩体结构面的基本力学性质	(71)
第四节 岩体结构面的力学效应	(73)
第五节 工程岩体稳定性分析中结构面力学参数的合理选取	(78)
第五章 岩体结构面的分形分析	(82)
第一节 结构面几何参数分形分析	(82)
第二节 岩石质量的分形表述	(85)
第三节 JRC 分形估测方法的实用性	(88)
第四节 结构面力学参数的分形表述	(95)
结论及存在的问题	(97)
参考文献	(100)
作者科研成果一览表	(105)

绪 论

结构面是岩体的重要组成部分,是岩体作为工程介质区别于其它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。岩体是由不同规模、不同形态、不同成因、不同方向和不同序次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,岩体在几何上和工程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。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它工程介质相区别。进行岩体工程地质勘察时常会出现这样的情况,钻探得到的不同钻孔岩石质量指标 RQD 值离散性非常显著,甚至两个相邻的钻孔,那怕相隔距离仅几米,其 RQD 值也相差很大,以致对钻探资料利用无从下手。显然,这是岩体工程性质复杂性的一种具体表现。研究表明,结构面是岩体工程性质复杂性的关键所在: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。从绝对意义上讲,自然界不存在工程性质完全相同的结构面,在以后的章节里将详细分析这个问题。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,结构面及其工程性质的研究是工程岩体分类的基础性工作。

工程实践反复证明,自然岩体和工程岩体的失稳源于结构面,岩体的破坏机制在很大程度上受结构面的控制,这也是关键块体分析方法和结构分析方法的理论依据。结构面的几何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。

简言之,岩体结构面的工程性质研究对客观认识岩体工程性质和正确评价工程岩体的稳定性都是必不可少的,这是作者刻意表达的基本思想。

第一节 岩体的基本构成——结构面与结构体

一、岩石和岩体的区别

1. 国内学者的看法

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,它可以由一种或几种造岩矿物或天然玻璃组成,具有稳定外形的固态集合体。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。可见,地质学家偏爱用“岩石”而不用“岩体”。换言之,地质学中岩石比岩体具有广泛得多的地质意义,岩体可以理解为具有某种特殊成因的岩石的代名词。

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(谷德振,1979;王思敬,1990;孙广忠,1988)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。无论从实际存在出发,还是从形态来看,岩体是由结构面和结构体两个基本单元所组成的。根据这个定义,岩石仅仅是指构成岩体的物质组成或材料。

类似地,中国地质大学潘别桐(1989)也特别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岩体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。

相比而言,水利系统的专家(陶振宇,1981,1991,1992;周维恒,1990)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”,如《岩石力学的理论与实践》,《岩石力学原理与方法》和《高等岩石力学》等等。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。

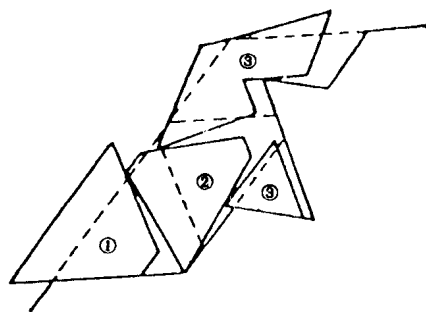
2. 国外学者的看法

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; Broili, 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Genhua 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。块体理论的精髓思想是,在坚硬和半坚硬的岩层中,岩体被不同成因、不同期次、不同产状、不同规模的结构面切割成各种类型的空间镶嵌块体。在自然状态下,这些空间块体处于静力平衡状态。当进行边坡、地基以及地下洞室的人工开挖,或对岩体施加新的荷载后,暴露在临空面上的某些块体失去原有的静力平衡状态,造成某些块体首先沿着结构面产生滑移而失稳,进而引起其它

块体的连锁破坏,导致整个岩体工程的破坏(图 0-1)。

3. 作者的看法

我们认为,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(工程地质所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。



0-1 关键块体破坏机理

图中图码分别代表岩石块体失稳破坏的顺序

综上所述,“岩体”比“岩石”包含了更广泛而深刻的内涵。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(地应力、地下水)中的岩石工程地质体。岩体与人类的工程活动密切相关。结构面和结构体是岩体的自然组成部分。需要强调的是,不能纯粹从几何意义上绝对地理解结构面和结构体的概念。作为工程作用对象的岩体,同时从几何上和力学属性上综合理解结构体和结构面是非常必要的。从这个思路出发,可把结构体(或岩块)定义为在几何上和力学属性上都不含有显著结构面的岩石块体,结构体是构成岩体的基本岩石单元;结构面则定义为结构体之间的几何学和力学的显著分界面或不连续面,是岩体工程性质复杂性的根源。

二、研究岩体结构的意义

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。

1. 宏观岩体结构

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。

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免。

2. 细观岩体结构

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。也是本书研究的重点。

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。

3. 对工程的意义

著者的上述论述无意使岩体、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。具体地说，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。

显而易见，岩体结构控制论即结构面与结构体共同构成岩体的观点是著者的基本岩体力学观。实际上，这已是被无数工程实践和野外调查结果反复证实了的基本现象。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，结构面的工程性质是影响岩体工程性质的决定性因素。相信结构面工程性质的研究必将对客观理解岩体的工程性质起到举足轻重的作用。

第二节 结构面与工程岩体稳定性

工程经验表明，工程岩体的失稳与结构面的发育程度、发育位置、产状、组合特征及其工程性质有着十分密切的内在联系。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。本人1997年分析了两种著名的工程岩体分类方案RMR分类和Q系统，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次塌方，有22次塌

方与结构面有关,占塌方总数的75.9%。郭志(1996)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。

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,砂岩中的粘土岩夹层等,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。可见,结构面是工程岩体的一种几何属性和力学属性上的不连续面,正是这种不连续面的存在,使工程岩体失去其连续性和不完整性,从而导致工程岩体工程性质的复杂性。

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。也就是说,工程岩体的变形、破坏取决于岩体的结构特性,起决定作用的是软弱结构面的几何特征、力学特征以及相互之间的组合特征、结构面空间方位与工程作用力方向的关系等等。下面就几个主要的问题进行分析:

一、岩体结构面对坝基和坝肩岩体稳定性的影响

王思敬院士(1990)是坝基和坝肩岩体地质力学研究专家,在广泛调查和分析大坝失事原因后,认为坝基岩体的变形和破坏有两种可能的方式,一种是岩石软弱或破碎,沿坝基下剪应力最大部位产生剪切变形并剪断,这是浅层滑动模式;另一种方式是由于岩体的不均一和不连续结构,在坝基或坝肩产生局部的应力集中和不均一变形,导致结构上的失稳,往往表现为深部失稳方式。影响坝基岩体稳定最常见的岩体结构有三种:

- (1) 坝基软弱岩层和风化破碎岩层,它们强度低,在坝基应力作用下产生成层浅层滑动;
- (2) 坝基下平缓的软弱夹层,以及和断裂或破碎岩体组合,形成沿软弱夹层滑动及部分岩体的压缩变形;
- (3) 坝基或坝肩的断裂、软弱夹层组合,尤其是顺河流及平缓断裂的组合,往往形成块体或多块体的错动失稳。

研究发现,几组贯通性结构面可将坝基或坝肩岩体切割成形状和规模各不相同的可能滑动块体,决定可能滑动块体的控制性边界是可能的滑动面,坝肩岩体中的低倾角软弱结构面、坝基岩体中的各种软弱结构面均有可能成为可能滑动面。断续结构面(节理和小规模断层)相

对于滑动岩体尺寸而言是不贯通的,但其产状组合却有利于滑动边界的构成,仍可以形成破坏分离面。断续结构面形成破坏分离面的机制可分为归从、迁就、追踪和连通等四种。在迁就过程中,破坏分离面是沿原有结构面组合,部分拉开,部分滑移;追踪是破坏分离面大致上沿原有结构面的组合发展,部分滑移,部分剪切,故产生较大的摩擦阻力;在破坏过程中出现断续结构面的断裂扩展,形成贯通性的结构面称连通,连通过程中产生部分的岩石剪断或脆性破裂,因而产生很大的摩擦阻力。

工程实例分析可知,几乎所有大坝失事都离不开渗透压力的不良作用,而渗透压力的形成与岩体结构面的导水或阻水作用有关。结构面的张裂使库水或地下水可以渗入其内,渗入到结构面中的地下水得不到排泄是造成岩体内部形成超高渗压,从而导致坝基或坝肩岩体失稳的诱因。法国 Malpasset 坝的失事和我国梅山水库坝肩岩体的变形都是很生动的例子。

从上述分析可知,无论作为滑动块体的割离边界、可能滑动面或者是地下水超高渗压的孕育场所,岩体结构面在影响坝基和坝肩岩体稳定中有着举足轻重的作用。

二、岩体结构面对斜坡岩体稳定性的影响

野外调查发现,自然斜坡的崩落和滑坡往往源自山体或岩体内部某些地质界面-岩体结构面。例如,云南禄劝大滑坡是由于玄武岩中的凝灰岩夹层遭受风化和地下水的软化,使其力学性质急剧恶化造成的。小浪底水库三坝址左岸自然斜坡失稳破坏均与结构面有关:

(1) 滑坡。小浪底地区滑坡体形成的基本条件是,顺坡向的软弱夹层或泥化夹层作为潜在滑动面,滑坡体前缘由于水流冲刷形成临空面,滑坡体后缘存在结构面作为拉裂面,地下水的软化作用以及超高渗压的产生。

(2) 倾倒变形体。倾倒变形体是一种岩体表层物理地质现象,形成于中更新世早期,其上常被 Q_2 黄土所覆盖。倾倒变形体具有统一的滑动面,但各倾倒变形块体之间以及每一变形块体的不同部位变形速度和变形量都不相同。平面上,从前缘到后缘,从主滑线到两侧,变形块体的变形速度和变形量由大变小,并逐渐向不动体过渡;剖面上,倾倒变形体呈反叠瓦状错列特征,由上而下块体变形量由大变小,并逐渐向滑床不动体过渡。研究表明,倾倒变形体的形成与结构面的作用是密不可分的。一方面,一组垂直于层面的节理将坚硬的砂岩层切割成大小不等的矩形块体,这是倾倒变形体形成的基本前提;另一方面,夹于坚硬砂岩层之间的软弱夹层(粘土层)或泥化夹层是产生塑性变形的物质基础;大气降水或地表水沿砂岩垂直裂隙下渗至软弱粘土层或泥化夹层,使软弱粘土层或泥化夹层产生软化作用,同时形成渗透压力,在适宜的坡度条件下,软弱粘土层或泥化夹层发生塑性流动,并带动砂岩块体的蠕动而产生倾倒变形体。

(3) 崩塌-错落体。整体岩石脱离母体,突然从陡峻的斜坡上崩落下来,并顺着斜坡猛烈地翻滚、跳跃,最后堆落于坡脚;后缘运动量较小,整体向下错落。崩塌-错落体的特点是,滑移破坏面不是单一的结构面,而是追踪断续结构面而成的组合结构面。从前缘到后缘,崩塌-错落体的变形程度逐渐变小。当后缘存在贯通性的结构面(断层或规模较大的节理)时,崩塌-错落体与不动体呈截然分界;当后缘不存在贯通性结构面时,崩塌-错落体与不动体呈连续过渡。

(4) 水平剪切位移-坠落。在陡峭的黄河两岸,在反向坡且岩层倾角小于 10° 的地段,由于河水冲蚀基岩河岸,将河岸切割成陡峭状形成临空面。临空面的卸荷作用使近水平的坚硬岩层沿软弱夹层或泥化夹层向外发生水平剪切位移而呈屋檐状翘出;二组或二组以上的近垂直

结构面将砂岩切割成孤立块体,并为地下水的入渗提供通道,使软弱夹层或泥化夹层力学性质降低。当水平剪切位移达到一定程度或孤立块体下部又被河水冲蚀掏空时,在自重作用下,孤立岩石块体即失去支撑而突然向下坠落。

人工边坡的变形破坏与岩体结构面的关系尤为密切。李铁汉和潘别桐(1980)认为,边坡岩体的破坏,不外乎剪切和拉断两种型式,除少数情况外,绝大部分边坡的破坏均为滑动破坏型式。根据滑动面的形态、数目、组合特征以边坡岩体破坏的力学性质,岩体边坡的破坏类型可分为曲面滑动、平面滑动、双平面滑动、多平面滑动和倾复破坏。因此,除软弱岩体和散体结构岩体外,多数岩体边坡的滑动破坏都是由若干个软弱结构面和若干个岩体自由面切割而成的具有一定几何形态和尺寸的非稳定岩体沿着某些软弱结构面向一定的自由空间发生滑动造成的。

上述分析使我们有理由相信,斜坡岩体的稳定性问题,实质上是作为滑动面的软弱结构面上致滑力与摩擦阻力这对矛盾运动和发展的必然结果。几组结构面切割形成的可能滑动块体是斜坡失稳的必要条件,地下水沿结构面渗流并在其中形成超高渗压以及使滑动结构面力学性质弱化是斜坡失稳的诱因。可见,斜坡岩体稳定性问题,实质上是岩体结构面的性状、组合及其与工程作用力的关系问题。

三、岩体结构面对地下工程围岩稳定性的影响

地下开挖在岩体中形成一个自由变形的空间,原来处于挤压状态的围岩,由于解除了束缚力而发生向洞内松脱变形,当这种松脱变形程度超过了围岩本身的承受能力,则围岩就产生破坏,并从母岩中脱落形成坍塌、冒顶、滑动或岩爆。围岩变形破坏的严重程度,一方面取决于原生的应力状态(数值、方向和性质),另一方面取决于围岩结构及其力学特性(潘别桐,1990)。就坚硬块状围岩而言,顶板小规模坍塌和掉块以及高地应力区岩爆的发生主要受岩体结构面控制;层状围岩变形破坏以不稳定的楔形体崩落、滑动和因层面张裂、折断、岩层弯曲而向洞内滑移或塌落为特征,起主导作用的乃是顺层的结构面及其工程性质;破碎围岩和松散围岩常产生塌方、滑动和塑性变形破坏,虽然变形破坏与岩体结构面不存在直接的关系,但这种特殊围岩介质的形成却受结构面发育程度的控制。大秦铁路隧道围岩塌方调查(王松龄,1992)和宁(波)台(州)温(州)高速公路隧道围岩变形破坏可能性分析(杜时贵,1993)发现,最有可能发生隧道失稳的地段是风化裂隙发育地段、陡倾角节理密集带、断层破碎带、层间错动带、岩浆岩与围岩的接触带、岩脉发育带、陡立的软弱夹层和不利的结构面组合将坚硬围岩切割成块状结构体的部位。这些部位都不同程度地发育岩体结构面。

综上所述,岩体结构面是影响工程岩体稳定性的决定性因素。谷德振教授(1979)对岩体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。

著者相信,岩体结构面工程性质的研究,必将带动工程岩体稳定性评价的质的飞跃。

第三节 岩体结构面工程性质研究思路

从前述分析可知,结构面工程性质是岩体工程性质的重要组成部分。结构面通过几何学和力学两个方面对工程岩体稳定性产生影响,故岩体结构面的工程性质应包括几何学性质和力学性质。基于这个思想,本文提出图 0-2 所示的岩体结构面工程性质研究思路。

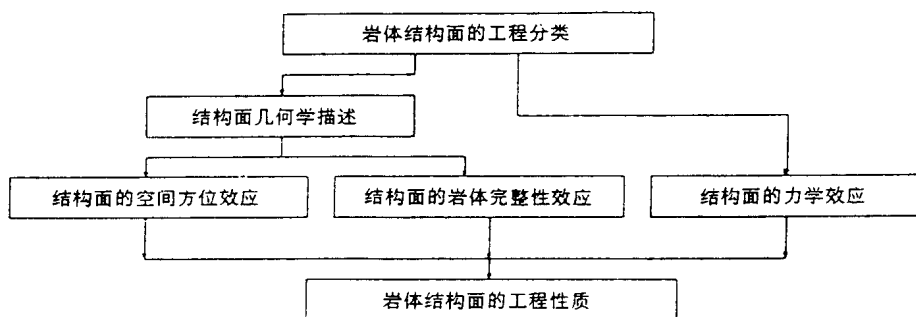


图 0-2 岩体结构面工程性质研究思路图

第一章 岩体结构面的分类

岩体结构面的工程性质与它的地质成因和力学成因密切相关,不同成因类型的结构面具有不同的几何特性和力学性质。客观的结构面分类有利于研究结构面的工程性质。

第一节 岩体结构面的成因类型

潘别桐 1990 年根据地质成因将结构面分成三大类(参见表 1-1):

表 1-1 岩体结构面的成因类型及其主要特征

成因类型		地质类型	主要特征			工程地质评价
			产状	分布	性质	
原生结构面	沉积结构面	1. 层理层面; 2. 软弱夹层 3. 不整合面 假整合面 4. 沉积间断面	一般与岩层产状一致,属层间结构面	海相岩层中分布稳定,陆相岩层中呈交错状,易尖灭	层面、软弱夹层较为平整,不整合面和沉积间断面多由碎屑和泥质物质组成且不平整	国内外很多坝基滑动及滑坡由这类结构面造成,如圣弗连西、马尔巴塞坝的破坏,瓦扬坝大滑坡
	火成结构面	1. 侵入岩与围岩接触面; 2. 岩脉、岩墙接触面; 3. 原生冷凝节理	岩脉受构造结构面控制,原生节理受岩体接触面控制	接触面延伸较远,而原生节理短小密集	接触面可具熔合及破裂两种不同的特征,原生节理一般为张裂面,较粗糙不平	一般不造成大规模的岩体破坏,但有时与构造断裂配合,也可形成岩体的滑移
	变质结构面	1. 千大理; 2. 板理; 3. 片理; 4. 片麻理; 5. 片岩软弱夹层	产状与岩层或构造线方向一致	片理短小且分布极密,板理延伸较稳定	结构面平直光滑,千大理表面较粗糙	对岩体工程稳定性有一定的影响,但影响程度相对较小
构造结构面		1. 节理; 2. 断层; 3. 羽状裂隙; 4. 劈理; 5. 层间错动面	产状与构造线呈一定关系,层间错动与岩层一致	张性断裂较短小,剪性断裂延展较远,压性断裂规模巨大	张性断裂不平整,常有次生充填,呈锯齿状;剪切断裂较平直,具羽状裂隙;压性断层有断层泥	对岩体稳定影响很大,常造成坝基或坝肩岩体失稳、边坡滑移破坏、地下洞室的塌方和冒顶等
次生结构面		1. 卸荷裂隙; 2. 风化裂隙; 3. 风化夹层; 4. 泥化夹层; 5. 次生夹泥	受地形、临空面产状和原有结构面产状控制	横向不连续,多透镜状,延展性较差,且主要在地表风化带内发育	一般为泥质物充填,其水理性质很差	在天然斜坡或人工边坡上造成危害,对坝基、坝肩及浅埋隧道稳定不利

(据潘别桐, 1990 补充)。

一、原生结构面

在成岩过程中形成的结构面称原生结构面，包括沉积作用形成的层理、层面、原生软弱夹层、沉积间断及不整合、古风化壳夹层；岩浆凝固过程中形成的原生节理、岩浆岩与围岩的接触面；变质作用过程形成的板理、千枚理、片理、片麻理等。除少数经风化作用或经后期地壳运动改造已产生分离的结构面外，原生结构面一般具有一定的连结力和较高的强度。

二、构造结构面

构造结构面是岩体形成后，在构造运动过程中产生的各种破裂面，如断层、节理、层间错动面、劈理等。规模较大的构造结构面多充填有厚度不等、成分各异、性质和连续程度均不一致的充填物，其强度多接近岩体的残余强度值，而且，它们往往贯通整个工程岩体，构成不稳定块体的隔离边界或滑动面，是导致工程岩体失稳的决定性因素；规模较小的结构面虽然没有贯穿整个工程岩体，但它们的存在使岩体的连续性和完整性遭到破坏，导致岩体质量下降而对工程岩体稳定不利。

根据力学成因不同，构造结构面又可分成张性结构面和剪性结构面两类。前者形成于张应力环境，其特征是张开度较大，连续性差，形态不规则，断面凹凸不平，粗糙度大，破碎带宽度变化大，构造岩多为角砾岩，破碎带易被岩脉和矿脉充填，导水性强且剪切强度较高；后者形成于剪应力环境，其特征是结构面上具擦痕，空间分布常呈共轭性，断层面平直光滑，粗糙度小，破碎带多为断层泥，导水性差而剪切强度低。

三、次生结构面

由于地球的外部营力作用产生的结构面，如风化裂隙面(包括温差风化造成的层层剥落、植物的根劈作用形成的裂隙、冰劈作用和盐类的结晶与潮解作用产生的裂隙等)、卸荷裂隙面、泥化夹层以及次生夹泥层等称为次生结构面。其中，风化裂隙面大多由构造结构面或原生结构面风化改造形成，其作用是将岩体中原有的隐结构面(即没有分离开的结构面)风化改造成显结构面而呈分离状态。次生结构面一般规模不大，方向紊乱，连续性较差，它们的存在使岩体失去连续性和完整性，导致岩体质量降低。

第二节 岩体结构面的分级

谷德振教授(1979)指出，岩体稳定性受结构面所控制，而各种结构面随其发育的规模不同，在分析中所处的地位就不同。对结构面的规模及其对岩体稳定所起作用的分级研究是十分必要的。根据结构面的走向延展性、纵深发育和宽度(厚度)大小，岩体结构面可分为五级：

一、Ⅰ级结构面

这类结构面一般指对区域构造起控制作用的断裂带，包括大小构造单元接壤的深大断裂带，是地壳内巨型地质结构面。走向延伸远，一般数十公里以上，纵深方向延伸至少切穿一个构造层，破碎带宽度多在数米以上，其规模在工程范围内可以认为是不变的。Ⅰ级结构面控制了区域稳定性和工程范围内岩体的构造格局，对区域稳定性、山体稳定性和工程岩体稳定性都有不同程度的影响。

二、Ⅱ级结构面

Ⅱ级结构面包括延展性强而宽度有限的地质界面，如不整合面、假整合面、原生软弱夹

层、风化夹层、接触破碎带，以及延展数百至数千米，宽度 1m 以上，但不超过 3~5m 的断层。这级结构面往往贯穿整个工程岩体范围，它们的存在与组合控制了岩体稳定性和工程岩体的稳定性。

三、Ⅲ级结构面

走向上和纵深方向上延伸有限(一般数百米)、宽度小于 1m 的断层、挤压或接触破碎带、风化夹层、原生软弱夹层和层间错动带等。Ⅲ级结构面直接影响工程具体部位的岩体稳定，制约着块体滑移机理。Ⅲ级结构面对工程岩体稳定性的影响，通常可用关键块体分析法和极射赤平投影法进行分析。

四、Ⅳ级结构面

Ⅳ级结构面主要是岩体中断续分布的节理和层理，包括岩浆岩、变质岩中的原生结构面和岩体中的次生结构面等。其特征是结构面数量众多但规模较小，一般不能切穿整个工程岩体，只能局部地把岩体切割成块体。Ⅳ级结构面的存在不仅破坏了岩体的完整性和连续性，直接影响岩体的力学性质和应力分布状态，而且很大程度上影响岩体的破坏方式。对这类结构面不可能逐个进行详细研究，而必须采用统计方法加以分析和处理，目前习惯采用节理玫瑰花图、极射赤平投影、结构面网络模拟等手段。

五、Ⅴ级结构面

延展性甚差、无厚度之别、分布随机、为数甚多的细小结构面，主要包括微小的节理、劈理、隐微裂隙、不发育的片理、线理、微层理等。它们的存在降低了由Ⅳ级结构面所包围的岩块的强度，而对工程岩体稳定影响不大。

Ⅰ级结构面属区域稳定性研究领域；Ⅱ级和Ⅲ级结构面控制着工程岩体的稳定性，往往构成岩体力学作用的边界；Ⅳ级结构面直接影响岩体的完整性，控制了岩体的强度和变形，其结构面组合对岩体的破坏型式构成影响；Ⅴ级结构面可以认为是隐结构面，在天然状态下对岩体的工程性质影响不大，但在开挖、振动、风化和卸荷等作用下可分离成显结构面，其作用与Ⅳ级结构面类似。

Ⅱ级和Ⅳ级结构面工程性质是本文研究的主要内容。

第三节 岩体结构面的分类

一、岩体结构面从岩体断裂力学上的分类

岩体断裂力学从岩体断裂起始、扩展、相互作用机制和断裂力学条件研究入手定义节理和剪性断裂。Pollard(1988)将断裂扩展归纳为三种基本类型(图 1-1)：Ⅰ型(张开型)、Ⅱ型(滑移型)和Ⅲ型(撕裂型)。三种类型的组合为复合型断裂。

根据断裂力学的定义，节理是以张开位移为主的断裂，可称为广义上的Ⅰ型位移断裂；断层是以剪切位移为主的断裂，以Ⅱ、Ⅲ型位移为特征。

杜时贵(1993)的研究表明，不同类型的岩体断裂具有不同的表面形态特征，因而具有不同的粗糙度特征和力学性质。结合岩体断裂力学机制包括断裂起始、扩展、扩展轨迹、断裂终结及相互作用特性研究，分析和论述不同断裂力学成因岩体断裂的工程性质是一种全新的思路。

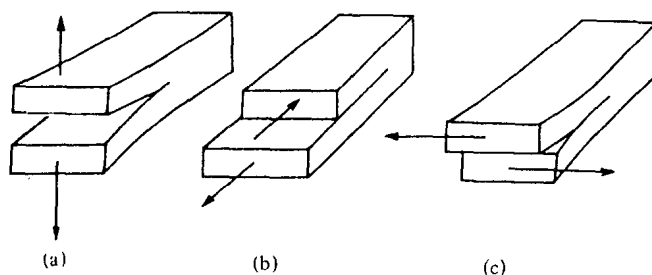


图 1-1 断裂的三种基本型式

(a) I 型(张开型); (b) II 型(滑移型); (c) III 型(撕裂型)

二、岩体结构面从地质力学上的分类

王思敬院士考虑了影响结构面力学特性的主要因素(结构面的充填情况,结构面的组成、结构及状态,结构面的平整度和光滑度,结构面两侧岩石的力学性质)的综合作用,将岩体结构面划分为破裂结构面、破碎结构面、层状结构面和泥化结构面等四种地质力学类型。

1. 破裂结构面

岩体中的破裂面或物质分异的不连续面,包括节理、片理、劈理和坚硬岩体的层面等。破裂结构面在法向应力作用下很易密合,从而呈刚性接触,属于硬性结构面。

破裂结构面的抗剪强度取决于结构面表面的平整度和粗糙度,可以用 JRC-JCS 模型进行估算。平直和光滑的扭性节理,其内聚力和内摩擦角均较小,抗剪强度可表示为

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c$$

波状起伏及弧形的压扭性节理内摩擦角显著增加,但内聚力较小,其抗剪强度可表示为

$$\tau = \sigma \tan(\varphi + \Delta\varphi) + c$$

结构面粗糙且不平整的张性节理或羽状裂隙发育的错动面,在法向应力作用下两壁岩石咬合力很强,在剪切变形过程中伴随有局部岩石的剪断,故内聚力很大,其剪切强度可表示为

$$\tau = \sigma \tan \varphi + (c + \Delta c)$$

对于波状起伏的粗糙结构面,内聚力和内摩擦角均较大,则抗剪强度可表示为

$$\tau = \sigma \tan(\varphi + \Delta\varphi) + (c + \Delta c)$$

实验统计资料显示, $\Delta\varphi$ 为 $11^\circ \sim 22^\circ$, Δc 可达 $100 \sim 300 \text{ kPa}$ 。

2. 破碎结构面

破碎结构面为岩体内的破坏分离面,包括断层破碎带、风化破碎带、断层及层间错动面等。破碎结构面多具有带状或透镜状分布的充填物,在法向应力作用下可产生显著的压密。

破碎结构面的剪切强度主要取决于充填物的组成和胶结程度。破碎结构面的充填物质主要有角砾岩、碎屑、岩粉、鳞片、断层泥等,且有一定程度的胶结,因而在剪切变形过程中岩块和碎屑咬合牢固,呈现很大的剪阻力,其抗剪强度可表示为

$$\tau = \sigma \tan(\varphi + \Delta\varphi) + (c + \Delta c)$$

破碎结构面中, $\Delta\varphi$ 由结构面不平整引起,其值可达 20° ; Δc 则由碎屑充填物咬合造成,其

值可达 94kPa。

3. 层状结构面

岩体中成层的不连续面，如层面、软弱夹层及软弱岩层的顺层接触面等属于层状结构面。层状结构面一般有一定程度的胶结，其剪切强度取决于结构面的胶结程度及软层本身的剪切强度。

4. 泥化结构面

泥化结构面是岩体中最软弱的一类结构面，它完全由塑性泥质物构成，如断层泥、次生夹泥层等。

泥化结构面的抗剪强度主要取决于充填物的厚度、粘土矿物成分、微观结构、含水量和固结程度等。泥化结构面往往构成工程岩体的破坏滑移面，对岩体稳定极为不利。