

3562  
1121

689012

高等学校试用教材

# 工程地质分析原理

(工程地质专业用)

成都地质学院 张倬元 王士天 王德生 编著



地质出版社

统一书号：15038·教125

定 价： 3.80 元

高等学校试用教材

# 工程地质分析原理

(工程地质专业用)

成都地质学院

张倬元 王士天 王兰生 编著

地质出版社

成都地质学院  
张倬元  
PDG

## 内 容 简 介

本书系统论述人类工程活动中经常遇到的一些主要工程地质问题的分析与评价,其中包括区域稳定问题,岩体稳定问题,与地下渗流有关的工程地质问题,和与侵蚀、淤积有关的工程地质问题等四个大的方面。为了深入理解区域稳定和岩体稳定问题的基本机制,还以专门章节论述了岩体的结构特征、应力状态和变形破坏机制。

以合理地开发、保护和改造人类工程活动的地质环境为基本出发点,本书密切联系工程活动的实际,对各种工程地质问题的分析与评价力求地质分析与力学机制分析并重,定性评价与定量评价并重,尽可能地运用了岩体力学的新成就并力图反映国内外本学科的现代水平。

本书除作为大专院校工程地质专业教材外,尚可供工程地质专业研究生及科学技术人员参考。

高等学校试用教材  
工程地质分析原理  
(工程地质专业用)  
成都地质学院  
张傅元 王士天 王兰生 编著

地质部教育司教材室编辑  
责任编辑:张文澜

地质出版社出版  
(北京西四)

地质印刷厂印刷  
(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张: 28<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 字数: 690,000

1981年12月北京第一版·1981年12月北京第一次印刷

印数1-4,210册·定价3.80元

统一书号: 15038·42125

# 序

本书是为高等院校工程地质专业学生学习《工程地质》学所编写的教材。它系统论述了如何分析与评价人类工程活动中经常遇到的一些主要工程地质问题，其中包括区域稳定问题、岩体稳定问题、与地下渗流有关的工程地质问题以及与侵蚀淤积有关的工程地质问题等几个大的方面。为了较深入地理解区域稳定和岩体稳定的力学机制，还专门论述了岩体结构特征、其应力状态和变形破坏机制。

只有能正确分析评价这些问题，才能合理开发、妥善保护以致有效改造人类工程活动的地质环境。所以，本课程所涉及的内容是工程地质学这门学科的基本理论的重要组成部分，而且应在学习《工程岩土学》、《土力学》及《岩石力学》等课程之后学习本课程。

在五十年代以至六十年代的工程地质课程体系，没有设置过本课程。与它大体相当的部分是《工程动力地质学》，论述与人类工程活动有关的各种动力地质作用。经过长期的教学实践，我们感到该课程侧重于地质分析，侧重于定性评价，与普通地质学及地貌学论述的内容有较多的重复；与工程建设活动的要求，与岩体力学等有关学科的迅速发展，远远不相适应。因此，自七十年代初，在我们的工程地质课程体系中就设置了《主要工程地质问题的分析与评价》这门课程，并由王士天（主编）、王兰生同志编写了教学讲义。

经过几年的教学实践，我们认为这门课在充分运用岩体力学的新成就与人类工程活动实践密切结合；地质分析与力学机制分析并重；定性评价与定量评价并重；减少与其他课程的重复等方面是可取的。一九七八年我们计划对该教学讲义进行一次重大的修改与补充，力求体系严整、内容充实，尽可能反映国内外本学科的最新成就和现代水平。由于课程目的是通过主要工程地质问题的分析与评价，掌握工程地质分析的基本原理，所以将课程名称定为《工程地质分析原理》，并将修订的编写大纲印发有关单位征求意见。

一九七八年七月，地质部教育司在北京召开了工程地质专业统编教材会议。在会上讨论了上述大纲，提出了修改补充意见，并决定由我们负责按修改后的大纲编写统编教材。

本书的绪论、四、五、六、七、十二、十三章由张倬元编写，二、八、十、十一章由王士天编写，一、三、九、十四、十五章由王兰生编写，最后由张倬元校订定稿。

本教材图件由成都地质学院绘图室绘制，季恒玉同志绘制了部分图件。

一九八〇年三月在成都召开了审稿会，张文澜（主审）、张威恭、肖执中、谭周地、温健、沈孝宇、胡德富、胡厚田、权宝增、唐永富、孙喜贤、江达铠、胡继孔等同志对原稿进行了逐章审查，沈孝宇同志还审阅了全部原稿。会上提出了宝贵的修改意见。会后编者又根据审查意见进行了修改，修改稿由张文澜同志负责审查和编辑加工。编者谨对参加本教材审查的全体同志致以衷心感谢。

编者希望本书除作为教材外，还可以作为工程地质科技人员的参考书。

由于编写时间仓促，又限于编者水平，缺点和错误在所难免，热情欢迎读者提出批评和指正。来函寄成都地质学院工程地质教研室。

编 者

1980.7.

# 目 录

绪 论 .....	1
<b>第一篇 区域稳定及岩体稳定分析的几个基本问题</b>	
<b>第一章 地壳岩体结构特征的工程地质分析 .....</b>	<b>5</b>
1.1 基本概念及研究意义 .....	5
1.2 结构面及岩体结构的主要类型与特征 .....	7
1.3 岩体原生结构特征的岩相分析 .....	14
1.4 岩体构造结构特征的地质力学分析 .....	22
1.5 岩体结构特征的统计分析 .....	30
<b>第二章 地壳岩体的天然应力状态 .....</b>	<b>38</b>
2.1 基本概念及研究意义 .....	38
2.2 现代地应力场的空间分布及随时间变化的一般规律 .....	43
2.3 表层岩体应力状态的复杂性 .....	54
2.4 岩体天然应力状态的研究和评价方法 .....	64
<b>第三章 岩体的变形与破坏 .....</b>	<b>67</b>
3.1 基本概念及研究意义 .....	67
3.2 岩体在加荷过程中的变形与破坏 .....	72
3.3 岩体在卸荷过程中的变形与破坏 .....	79
3.4 岩体在动荷载条件下的变形与破坏 .....	84
3.5 岩体变形破坏过程中的时间效应 .....	88
3.6 空隙水压力在岩体变形破坏中的作用 .....	94
3.7 岩体变形破坏的地质模式 .....	98
<b>第二篇 与区域稳定性有关的工程地质问题</b>	
<b>第四章 活断层的工程地质研究 .....</b>	<b>101</b>
4.1 基本概念及研究意义 .....	101
4.2 活断层的特性 .....	103
4.3 活断层区规划设计建筑物的原则 .....	113
4.4 活断层的判别标志 .....	118
4.5 活断层的调查和监测方法 .....	122
<b>第五章 地震与区域稳定性 .....</b>	<b>125</b>
5.1 地震及地震波的基本知识 .....	125
5.2 我国地震地质的基本特征 .....	134
5.3 地震对建筑物作用的分析和地震区建筑物的破坏方式 .....	146
5.4 场地地质地形条件对震害的影响 .....	153
5.5 地震区抗震设计原则 .....	162
<b>第六章 水库诱发地震活动的工程地质分析 .....</b>	<b>165</b>
6.1 概述 .....	165

6.2	水库诱发地震活动性变化的几种典型情况	167
6.3	水库诱发地震的共同特点	177
6.4	水库诱发地震的诱发机制	181
6.5	产生水库诱发地震的地质条件	186
6.6	水库诱发地震工程地质研究的基本原则	188
6.7	关于地震的人为控制问题	189
<b>第七章 地震导致的区域性砂土液化</b>		190
7.1	概述	190
7.2	地震时砂土液化的机制	191
7.3	区域性地震砂土液化的形成条件	194
7.4	砂土地震液化可能性的判定标准	201
7.5	砂土地震液化的防护措施	204
<b>第八章 地面沉降问题的工程地质分析</b>		207
8.1	概述	207
8.2	地面沉降的形成机制和产生条件	211
8.3	地面沉降的人工控制问题	220

### 第三篇 与岩体稳定性有关的工程地质问题

<b>第九章 斜坡岩体稳定性的工程地质分析</b>		227
9.1	基本概念及研究意义	227
9.2	斜坡岩体应力分布特征	229
9.3	斜坡变形与破坏的基本类型及一般特征	236
9.4	斜坡变形破坏的演变过程	243
9.5	内外营力对斜坡变形破坏的影响	256
9.6	斜坡稳定性评价	262
9.7	防治斜坡变形破坏的原则及主要措施	279
<b>第十章 地下洞室围岩稳定性的工程地质分析</b>		283
10.1	基本概念及研究意义	283
10.2	地下开挖后围岩应力的重分布	284
10.3	地下洞室围岩的变形、破坏及山岩压力问题	291
10.4	地下洞室和压力隧洞围岩稳定性的分析与评价	310
10.5	保证地下洞室围岩稳定性的措施	317
<b>第十一章 地基岩体稳定性的工程地质分析</b>		320
11.1	基本概念及研究意义	320
11.2	地基岩体内的应力分布特征	322
11.3	坝基岩体的变形与破坏	327
11.4	坝基(肩)岩体稳定性的工程地质评价	341
11.5	改善坝基稳定条件的措施	355

### 第四篇 与地下渗流有关的工程地质问题

<b>第十二章 岩溶及岩溶渗漏的工程地质分析</b>		358
12.1	基本概念及研究意义	358

12.2	碳酸盐溶蚀的物理化学原理	359
12.3	岩溶发育的基本条件	367
12.4	岩溶发育的阶段性及岩溶发育历史	374
12.5	岩溶渗漏分析	379
12.6	岩溶区修建水库的措施与防渗处理	386

### 第十三章 渗透变形的工程地质分析 ..... 389

13.1	基本概念及研究意义	389
13.2	土石渗透变形的产生条件	391
13.3	渗透变形可能性的判定	395
13.4	渗透变形的防治措施	399

## 第五篇 与侵蚀淤积有关的工程地质问题

### 第十四章 河流侵蚀、淤积规律的工程地质分析 ..... 401

14.1	基本概念及研究意义	401
14.2	河水动力学特征	402
14.3	水流对河床的作用及河床稳定性	405
14.4	河床侵蚀、淤积的某些基本规律	409
14.5	水库淤积及坝下游河床再造	417
14.6	河流整治的一般原则	421

### 第十五章 海(湖)边岸磨蚀与堆积的工程地质分析 ..... 423

15.1	基本概念及研究意义	423
15.2	波浪和岸流的一般特征	423
15.3	海(湖)边岸磨蚀与堆积的基本规律	427
15.4	水库边岸再造及滑体涌浪预测	435
15.5	海(湖)边岸及沿岸建筑物的防护措施	441

### 主要参考文献目录 ..... 444





# 绪 论

## 一、人类工程活动与地质环境的相互关系

人类工程活动都是在一定的地质环境中进行的，两者之间必然产生特定方式的相互关联和相互制约。

地质环境对人类工程活动的制约是多方面的。既可以表现为以一定作用影响工程建筑物的稳定和正常使用；也可表现为以一定作用影响工程活动的安全；还可表现为由于某些地质条件不具备而提高了工程造价，视地质环境的具体特点和人类工程活动的方式和规模而异。例如在活动断层和强烈地震区修建各类工程建筑物，如果建筑场地选择不当或建筑物类型、结构设计不合理，就会由于断层活动或伴随断层活动产生的强烈地震使建筑物损坏或毁坏。在石灰岩区修建水工建筑物，如未能查明溶蚀洞穴的分布规律和采取适当措施，轻则造成大量库水漏失，重则造成水库完全不能蓄水，使建筑物不能正常使用。进行地表开挖无视地质条件的特点或对边坡稳定判断失误，有时会引起大规模的崩塌或滑坡，不仅增加工程量、延长工期和提高造价，甚至会危及施工者的安全。如果工程活动是在岩、土体中开挖地下洞室，显然洞室本身稳定及支衬结构、施工方法、施工的正常工作条件及施工人员的安全都受周围的地质环境所制约。地质环境影响工程造价可以通过两种不同的方式。其一往往是由于建筑场地选择不当，为了在复杂条件下保证建筑物的安全，如不对威胁建筑物的地质因素采取某种处理措施，就必须采用更为复杂的建筑物结构。例如，在淤泥质软弱地基上修建高层建筑，由于没有可靠的天然地基，或者是采用人工改良地基或者是采用更为复杂的箱形基础，以保证建筑物不致因强烈不均匀沉降而毁坏，工程建筑物的造价因之而提高是显而易见的。另一种情况是选择了当地不能提供充分天然建筑材料的建筑物型式。例如在天然产出的砂砾石很少的地区修建混凝土坝，本来可以选用混凝土方量小的轻型结构却选用了大体积的重力坝，如不从远地运来天然砂砾作为骨料就必须制造人工骨料，建筑物造价的大大提高也是不可避免的。

人类工程活动又会以各种方式影响地质环境。例如房屋建筑物引起地基土层的压密，又如桥梁改变局部水流条件从而使局部河段的侵蚀淤积规律发生变化等。由于人类工程活动规模愈来愈大，所以它对地质环境的影响早已超出局部场地的范围而波及到广大区域。例如大量抽汲地下水或其它地下流体，降低了土体中的空隙液压，结果就引起了大范围的地面沉降，使沉降区已有建筑物的正常工作条件受到严重影响。又如修建大坝形成大水库，大区域的水文动态和水文地质条件因之改变，往往引起区域性的坍岸或浸没。有时库尾淤积还会引起支流泄水不畅，造成更大区域的地下水迴水，如属黄土地区还会进一步引起大区域的湿陷。在某些地区还会产生水库诱发地震，较强的水库诱发地震往往使较大区域内的建筑物受到危害。

由此可见，由于地质环境不同和人类工程活动的类型和规模不一，工程活动与地质环

境之间的相互关联相互制约是多种形式的,既有两者之间某种形式的相互作用,这是主要的;也有不属于相互作用的某种方式的相互制约,例如因不具备某些地质条件而提高了工程的造价。不能根据具体地质环境和工程活动方式预见到两者之间相互制约的基本形式,不但不能合理开发(或利用)地质环境以致影响到工程活动的安全与经济,甚至会使广大区域的地质环境恶化致使大范围内的大量已有建筑物受到不良影响。所以,研究人类工程活动与地质环境之间的相互制约,以便合理开发和妥善保护地质环境,就是作为一门科学的工程地质学的基本任务。随着人类日益大规模地改造自然环境,改造世界上有名的多泥沙河流黄河、改造沙漠、南水北调等伟大工程终久会付诸实践,而只有掌握地质规律按客观规律办事,才能因势利导达到有效地改造地质环境的目的。所以,有效改造地质环境也是工程地质学在不远的将来所要面临的重要任务。

## 二、工程地质学的研究对象与分科

工程地质学的上述基本任务,必然要求对工程活动的地质环境,或称为工程地质条件,进行深入研究。一般认为,工程地质条件包括岩石和土的性质、地质构造、地貌、水文地质条件、自然地质现象和天然建筑材料等方面,但其中最根本的是岩石和土的性质,因为作为建筑物地基或环境的总是具有一定成分和性质的土或岩石或它们的组合。所以它们与工程活动有关的属性,是决定人类工程活动与地质环境相互制约的形式和规模的基本条件。这些属性通称土石的物理力学性质或工程地质性质。研究这些性质的形成和它在自然或人类活动影响下的变化,是工程地质学的专门分支之一工程岩土学的任务。

查明工程地质条件的基本特征的基础上,要进一步研究工程活动与地质环境相互制约的一些主要形式,或称主要工程地质问题。分析这些问题产生的地质条件、力学机制及其发展演化规律,以便正确评价和有效防治它们的不良影响,是工程地质学另一专门分支工程地质分析的基本任务。

上述两个专门分支学科是工程地质学的理论基础。要将这些理论用于解决工程实际问题,保证与人类工程活动的规划、设计、施工、使用、维修等有关的地质因素均能有效查明和妥善处理,需要在总结过去实践经验基础上探讨调查研究方法,这是工程地质学另一专门分支工程地质勘察的任务。

如果将地质环境比做一个机体,由于工程活动而引起机体产生各种变化,则工程岩土学所研究的对象可以比做生理研究,工程地质分析则可比做病理研究,而工程地质勘察则相当于诊断研究。它们的研究对象各有侧重,构成工程地质学完整链条上的三个主要环节。

由于工程地质条件有明显的区域性分布规律,因之工程地质问题也有区域性分布的特点,研究这些规律和特点的专门分支为区域工程地质学。

## 三、工程地质分析的基本方法

如上所述,工程地质分析的研究对象是地质环境与人类工程活动相互制约的一些主要形式,即主要的工程地质问题,其中以两者之间的相互作用为主。研究它们产生的地质条件、力学机制,探讨它们发展演化趋势,以便正确评价和提供合理的防治措施。

显然它所研究的都是地质问题，都有其产生的特定的地质环境或地质条件。岩溶渗漏就是一个明显的例证。作为渗漏通道的洞穴管道体系，是可溶性岩石在一定的水循环交替条件下溶蚀作用长期发展的结果。不了解地区地质构造、地貌、水文地质条件、河谷发育历史，就不能正确判定洞穴体系的发育程度和空间分布规律，也就不能正确判定渗漏的可能性及其严重程度，所提供的防渗措施当然不可能是合理的。斜坡岩体的变形破坏也是一定地质条件下长期发展演化的地质过程，包括斜坡形成过程中岩体的卸荷回弹、岩体中应力重分布、岩体中结构面的表生改造、蠕变性长期变形、局部破坏以致失稳滑落，而且在整个过程中始终与周围地表水、地下水、风化营力、地震等因素的作用相联系而发展。脱离了地质环境、脱离了与周围因素的联系，无视其长期发展变化的全过程，就不能对斜坡稳定性的现状及将来发展趋势作出正确评价。

由此可见，研究这些地质问题或地质作用，绝对不能离开地质分析或自然历史分析这一基本方法。这种分析不仅研究地质体与周围因素的相互关联和相互制约的方式，还要研究它随时间而发展演化的历史和发展的阶段性。所得的结果虽然是定性的，因为它往往是区域性或趋势性的规律，所以对人类工程活动的规划、选点，或者说工程活动的战略布局，有很重要的指导意义，同时它又是进一步定量评价的基础。

工程地质分析为人类工程活动服务这一明确目的，就必然要求对主要工程地质问题进行定量评价，以便为工程设计或防护措施设计提供必要的定量数据。为此就必须运用土力学、岩石力学的基本原理，通过试验、物理模拟、数值模拟等方法，阐明各主要工程地质问题产生的力学机制。只有较深刻地理解其力学机制，才能对各种因素在该问题产生和发展中的作用，各种参数在定量计算中的意义，有较系统和透彻地理解。在此基础上就可以建立一些简化模型进行必要的定量计算，诸如地面沉降量计算、地震砂土液化可能性计算，斜坡稳定、坝基稳定计算，预测斜坡破坏时间的计算等等。由于地质条件十分复杂，有时还不得不依靠类比法进行定量评价，也就是根据条件类似地区的已有工程地质问题的观测资料，对研究中的问题进行定量预测，例如水库坝岸带宽度预测等。

无论是进行地质分析或是力学机制分析，都需要深入观察、研究和观测地质现象。任何形式的地质环境与工程活动间的相互作用，都可以在自然界找到与其类似的作用，也就是说大自然是包罗万象的地质作用原型模拟试验室，而且是没有经过任何简化的。作用长期发展的结果就会出现各种地质现象。不同地质条件中的现象，不同形式变形破坏产生的现象，作用的不同阶段的现象都是有所不同的。通过仔细的观察、对比和分析，就可以将现象产生的空间条件、时间序列区分出来，这样就可以透过现象认识作用的力学机制和发展变化的全过程。有些野外观察是难于用室内模拟所代替的，如地应力场、地应力集中所造成的一些现象等等。所以野外地质现象的观察研究所获得的资料，是工程地质分析所应依据的最基本的第一性资料。但物理模拟和数值模拟也有其特有的优点，这主要是它能在短期内重现作用的全过程，所以，它可以对根据现象作出的分析判断进行实验验证。两者应该密切结合而不应有所偏废。

#### 四、工程地质分析原理的内容及学习方法

本课程通过一些主要工程地质问题的成因、发展历史、力学机制分析与定量评价，讨

论工程地质分析的基本原理。

主要工程地质问题有区域稳定问题、岩体稳定问题、与地下渗流有关的问题以及与侵蚀淤积有关的工程地质问题等四个方面。

区域稳定问题讨论在特定的地质条件中产生的、并影响到广大区域的工程地质问题，包括活断层，地震，水库诱发地震，地震砂土液化和地面沉降。掌握这些问题的规律性，对规划选场，或者说对地质环境的合理开发与妥善保护，具有重要意义。某些自然（物理）地质现象的区域性分布规律，则在以后的有关章节讨论。

岩（土）体稳定问题讨论斜坡、洞室、地基岩（土）体稳定性的成因发展历史分析和力学机制分析，主要用于具体场地的稳定性评价，但在开发与保护地质环境中也有意义，特别是斜坡、洞室岩（土）体的稳定性。

与地下渗流有关的工程地质问题包括岩溶及岩溶渗漏分析和渗透变形分析两章。前者以保证水工建筑物正常工作为目的，后者主要讨论渗流作用下土体的稳定性。

与侵蚀淤积有关的工程地质问题，包括河流侵蚀淤积和海湖岸边磨蚀堆积规律及人为工程活动对它们的影响两章，前者对改造河流后者对开发海洋都有重要意义。

岩体结构特征及其变形破坏机制，是进行区域稳定和岩体稳定分析的基础理论，所以本书一开始首先对此问题进行了必要的论述。决定岩体变形破坏的主导因素是岩石材料的性质、岩体结构特征、岩体的应力状态、孔隙裂隙中的水和时间因素。岩石材料是工程岩土学讨论范围，所以本书第一章首先对岩体结构特征进行地质历史的、力学的和统计的分析。第二章讨论岩体应力状态的总背景，地壳岩体的天然应力状态。第三章讨论岩体变形与破坏，其中包括了岩体变形破坏中的孔隙水压力效应和时间效应。

这就是本书五篇十五章的基本内容。

学习本课程的目的熟悉各种主要工程地质问题，并掌握对它们进行分析评价的基本原理和方法。以便在今后工作中能根据具体地质条件和人类工程活动特点，判定主要工程地质问题并提供恰当的处理措施。实践经验证明，工程建筑物因地质原因产生问题主要是由于分析判断失误。所以，最重要的是学会具体问题具体分析，而不是记忆某些条文。

本书的第七、八、十四、十五等四章可以作为工程地质专门问题这门选修课的讲授内容。如果学时不足，水库诱发地震一章也可以考虑采用这种处理方式。

# 第一篇 区域稳定及岩体稳定分析的 几个基本问题

## 第一章

### 地壳岩体结构特征的工程地质分析

#### 1.1 基本概念及研究意义

岩体 (rock mass) 通常指地质体中与工程建设有关的那一部分, 它由处于一定应力状态的、被各种结构面所分割的岩石所组成。

岩体具有一定的结构特征, 它由岩体中含有的不同类型的结构面及其在空间的分布和组合状况所确定。

所谓结构面, 系指岩体中具有一定方向、力学强度相对较低、两向延伸 (或具一定厚度) 的地质界面 (或带), 例如岩层层间、软弱夹层、各种成因的断裂裂隙等。由于这种界面中断了岩体的连续性, 故又称为不连续面 (discontinuities)。结构面在空间的分布和组合可将岩体切割成不同性状的结构体 (图1-1)。

岩体的结构特征是在漫长的地质历史发展进程中形成的。它以特定的建造 (如沉积岩建造、火成岩建造和变质岩建造) 为其物质基础。建造确定了岩体的原生结构特征, 而岩体所经历的不同时期、不同程度的构造作用改造以及表生作用 (如卸荷、风化、地下水作

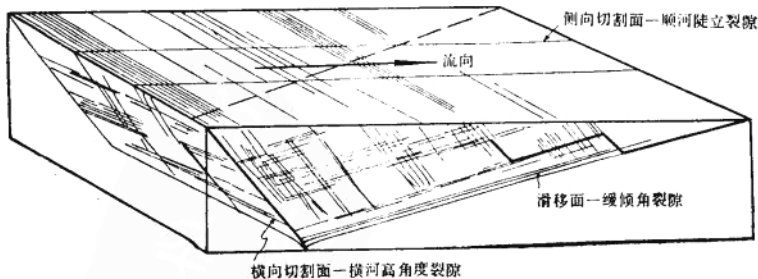


图 1-1 某坝坝基岩体结构示意图

用等，主要出现在靠近地表的岩体中)改造，使岩体结构趋于复杂化。岩体的结构正是建造与改造两者综合作用的产物。

岩体的天然应力状态十分复杂，不仅与所经历的构造应力场的变化史有关，且与其结构特征及所处地貌部位等因素有关，有关这方面的问题将在第二章中详细讨论。

“岩体”这一术语在工程地质学中广泛出现，并成为重要的研究课题，也不过只有一、二十年的历史，但它标志着这门学科的一个极为重要的发展阶段。在这以前，人们习惯用岩石材料的力学性质来评价岩体稳定性，对岩体中的软弱面在岩体稳定性中的重大意义认识不足。近百年来世界大坝失事的统计资料表明，在重力坝失事原因中，因软弱面引起坝基失稳而酿成的事故竟占45%以上。本世纪50年代末和60年代初，世界上又发生两起重大岩体失稳事件，其一是法国的60米高的马尔帕塞(Malpasset)薄拱坝，因左坝头沿片麻岩中的绢云母页岩发生滑动，导致坝体破裂而于1959年(蓄水后5年)失事，这是世界拱坝建筑史上第一次巨大破坏事件；另一起发生在意大利的瓦伊昂(Vaiont)水库，这个当时世界上最高(267米)的薄拱坝建成蓄水后，于1963年大坝附近约2亿多方岩体迅速下滑、淤满水库，造成严重事故，全部工程报废(两事件详见第九、十两章)。这两起重大事件在工程地质和岩石力学界引起极大震动，此后对岩体结构特征、岩体的力学属性、岩体的变形破坏机制与过程的研究愈来愈受到各界的重视。

工程地质之所以要将岩体的结构特征作为重要研究对象，有以下几方面意义。

(1) 岩体中的结构面是岩体中力学强度相对薄弱的部位，它导致岩体力学性能的不连续性、不均一性和各向异性。因而，岩体的结构特征在很大程度上确定了岩体的介质特征和力学属性。只有掌握岩体的结构特征，才有可能阐明岩体在不同荷载条件下岩体内部的应力分布和分异状况。

(2) 岩体的结构特征对岩体在一定荷载条件下的变形破坏方式和强度特征起着重要的控制作用。岩体中的软弱结构面，常常成为决定岩体稳定性的控制面，如图1-1所示，各结构面分别为确定坝基抗滑稳定性的分割面和滑移控制面。

(3) 靠近地表的岩体，其结构特征在很大程度上确定了外营力对岩体的改造进程。这是由于结构面往往是风化、地下水等各种外营力较活跃的部位，也常常是这些营力的改造作用能深入岩体内部的重要通道。尤其是那些所处地貌部位和水文地质部位均有利于外营力沿之积极活动的结构面(或带)，是岩体中外营力作用的活跃带，它将成为岩体中强度变化最剧烈的部位，在岩体演变进程中，往往发展为重要的控制面。

此外，对岩体结构特征的研究还可以推广于宏观地质体，应用于区域构造稳定性评价之中。宏观地质体中的莫霍面、构造层的分界面、区域性大断层等相当于地质体中的巨型结构面。莫霍面的分布深度和起伏特征决定了地壳的厚度及其变化状况(图1-2、1-3)，区域性大断层的特定组合可将地壳划分为不同的构造体系(地质力学观点)或不同形状的板块及板内构造体系(板块学说)。同样，这样一些巨型结构面对宏观地质的演变也起着重要控制作用。例如对地震震中分布规律的研究表明，莫霍面深度剧烈变异带，也即地壳等厚线的密集带(见图1-2、1-3)恰好为强震分布带，而地震震中又总是沿近期有活动的区域性大断层展布(见第四、第五章)。

总之，对岩体的结构特征的研究，是分析评价区域稳定性和岩体稳定性的重要依据。

从工程地质分析的实际需要出发，最为关注的是各类结构面的分布规律、发育密度、

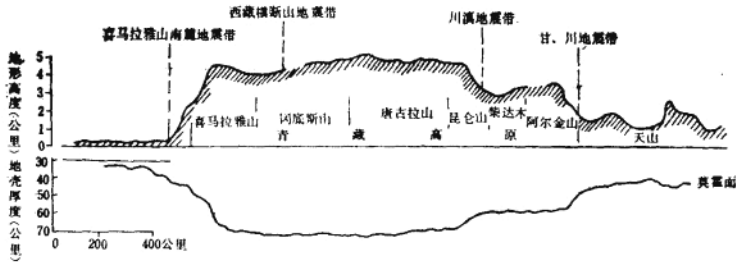


图 1-2 青藏高原地壳厚度剖面 and 地震带位置 (据时振梁等)

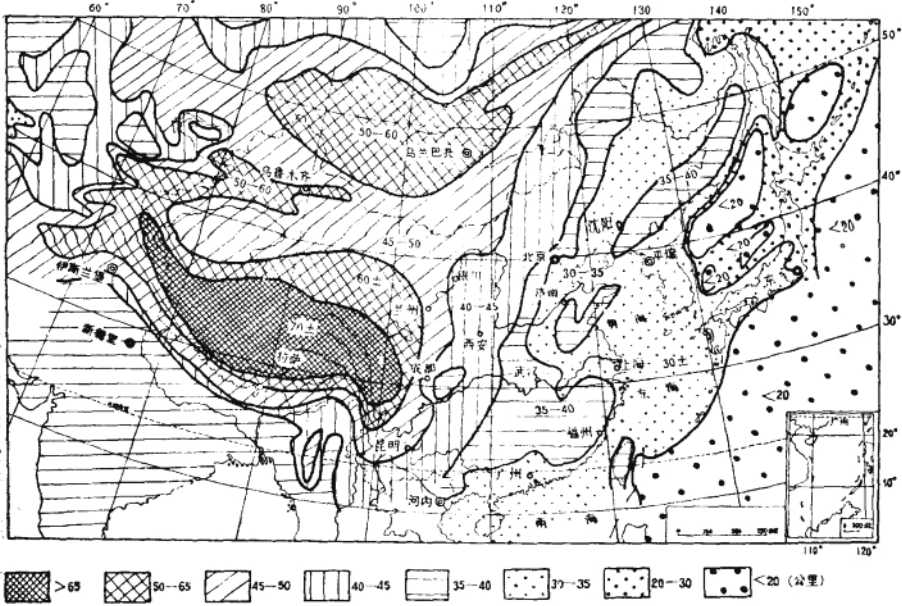


图 1-3 中国及邻区地壳厚度分布图 (据地球物理所)

注: 南海诸岛国界线有误

表面特征、连续特征以及它们的空间组合形式等。

本章首先讨论了结构面和岩体结构的主要类型和特征。然后应用岩相分析的理论与方法, 分别对岩体的原生结构特征和构造结构特征进行了分析, 建立了相应的岩体结构地质模式, 讨论了如何运用这种分析方法和地质模式对岩体结构特征进行评价和预测。有关岩体原生结构特征的分析方法和地质模式, 将在以后有关章节中结合具体问题进行讨论。最后讨论了岩体结构特征的统计分析, 建立了可直接应用于定量评价的岩体结构的定量模式。

## 1.2 结构面及岩体结构的主要类型与特征

### 1.2.1 结构面的主要类型及其特征

岩体结构面的分类原则和具体方案甚多,可按其成因,也可按其规模、表面特征等。由于结构面是在建造和改造过程中形成的,其空间性状和界面特征与其成因和演变历史密切相关,因而按成因分类是最基本的分类,可分为原生结构面、构造结构面和表生结构面三大类,其主要特征列于表1-1。

#### A. 原生结构面

岩体中成岩阶段形成的结构面称原生结构面。按成因又可分为沉积结构面、火成结构面和变质结构面三类。各类结构面主要特征见表1-1。

原生结构面通常比较密合,原始抗剪强度并不一定很低,并有一定结合力,但其性能常因构造或表生作用改造而恶化。原生的软弱夹层往往是岩体中最薄弱的部位,也是后期改造中性能最易恶化的部位,对岩体稳定性起着极为重要的控制作用。

#### B. 构造结构面

岩体中受构造应力作用所产生的破裂面,包括劈理、节理、断层及层间错动破碎带等称构造结构面。它们的主要特征见表1-1。同一期构造应力场作用下,不同性质的断裂面在空间分布上有一定组合规律;而不同时期构造应力场所产生的断裂之间又具有一定的历史结合规律。分析这些规律是构造地质学和地质力学课程的任务。应用这些规律具体分析岩体构造结构特征,是工程地质分析中所关注的一个重要方面(见1·4)。

#### C. 表生结构面

靠近地表的岩体中由于应力状态变化产生的卸荷作用,或遭受各种外营力作用而形成的结构面称表生结构面,如卸荷裂隙、风化裂隙、风化夹层、泥化夹层以及次生夹泥等。

**卸荷裂隙**是在地表遭受剥蚀、侵蚀或人工开挖过程中,由于卸荷引起临空面附近岩体回弹变形、应力重分布所造成的破裂面。卸荷过程中可以产生一些新的裂隙,它多半平行于临空面,且属张性。但更多的情况是对原有结构面的改造,使其张开或错动,岩体因此而松弛。

受古剥蚀面控制的卸荷裂隙具有区域分布特征,与古剥蚀面近于平行。花岗岩等火成岩体中常见的产状较为平缓的席状裂隙(sheeting joint)即属此类,它是一种张性破裂面,裂面粗糙不平,相互错列,在强风化带中由于隐裂隙显露而变得更为密集。这种裂隙并不只限于火成岩体,在刚性较强的沉积岩中也很发育,由于迁就了层面,所以不易鉴别。裂面降低了岩体的刚性,因此在随后的构造变动中已被分割为“层状”的岩体也可以发生褶皱,使部分裂面产生“层间错动”。

受现代地貌过程所控制的卸荷裂隙在河谷地带最为发育。通常在谷底以下可发育一组与基岩表面近于平行的水平板状裂隙,其特征与席状裂隙近似,一般开口良好,甚至造成空洞,有的被次生夹泥充填,有的被水流进一步冲蚀扩大,形成河谷下的强透水带。谷坡一带由于侧向临空,卸荷裂隙的形成更加多样化,这些将在第三、九章中再作详细讨论。

**泥化夹层及表生夹泥**主要是在地下水作用下形成的。泥化夹层是某些粘土质软弱夹层(如泥岩、页岩、板岩、泥质灰岩等)与地下水相接触部位,在地下水的作用下使原岩膨胀软化成软塑或流塑状软泥而成。显而易见,这种泥化作用在作为隔水层的软弱夹层的顶部更为发育,上覆的较坚硬的岩石往往因裂隙发育而成为地下水的良好通道,为接触面处软岩的泥化提供有利条件。研究与实践证明,遭受过层间错动的接触面,经扰动的软岩就更



岩体结构面成因类型及其特征

表 1-1

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	一般与岩层产状近于一致,成岩裂隙产状零乱不规则	海相及湖相岩层中此类结构面分布稳定,陆相的河流相岩层中及海陆交互相(三角洲)岩层中分布特征较为复杂,呈交错状、透镜状	层面,软弱夹层等结构面较为平整,不整合面及局部侵蚀冲刷面,古风化面由碎屑、泥质物质构成,且不平整	国内外较大的坝基滑动及滑坡很多由此类结构面所造成,如奥斯汀(Austin)圣弗兰西斯(Sr. Francis)提格拉(Tigra)坝的破坏,瓦依昂水库的巨型滑坡	
	火成结构面	侵入体与围岩的接触面 岩脉,岩墙接触面 侵入岩的流线流面 原生冷凝节理	岩脉受构造结构面控制,而原生节理受岩体接触面控制	接触面延伸较远,比较稳定,而原生节理往往短小密集	接触可具熔合及破裂两种不同的特征;原生节理面一般为张裂面,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,如弗莱拱坝坝肩安山岩的局部滑移,大渡河玄武岩中的天公包大滑坡
	变质结构面	区域变质的片理,片麻理,板劈理,片岩软弱夹层等	产状与岩层或构造线方向一致	片理、片麻理分布极密;板劈理较前者长大;片岩软弱夹层延伸较远,具固定层次	结构面往往是板状光滑的,片理在岩体深部往往闭合成紧闭结构面,片岩软弱夹层含片状矿物,如云母、绿泥石,石墨及滑石等,呈鳞片状	片岩,千枚岩等边坡常见坍塌,片岩夹层可成为重要的滑移控制面
构造结构面	节理(X型节理,张节理),断层(张性断层或正断层,压性断层或逆断层,扭性断层或平移断层) 层间错动面,羽状裂隙,破劈理	产状与构造线呈一定关系,层间错动面与岩层面一致	张性断裂较短小;扭性断裂延伸较远;压性断裂规模巨大,但有时被正断裂切割成不连续状	张性断裂不平整,常具次生充填;扭性断裂较平直,具羽状裂隙;压性断裂具多种构造岩,成带状分布,往往含断层泥、糜棱岩	对岩体稳定影响很大,在上述许多岩体破坏过程中,大都有构造结构面的配合作用,此外常造成边坡及地下工程的塌方、冒顶	
表生结构面	卸荷裂隙 风化裂隙 风化夹层 泥化夹层 次生夹泥	受地形及原有结构面控制	分布上往往呈不连续状或透镜体状,延续性差,且主要在地表卸荷风化带内发育	一般为泥质物充填	在天然及人工边坡上造成危害,对坝基、坝肩及浅埋隧洞等工程亦有重要影响	

(据中国科学院地质研究所,稍作增减)