



普通高等教育地质矿产类规划教材

工程地质分析原理

张倬元 王士天 王兰生 编著

地质出版社



200354730

- 077686

P642/01

普通高等教育地质矿产类规划教材

工程地质分析原理

张倬元 王士天 王兰生 编著



00696296

S244/14



地质出版社

(京)新登字085号

内 容 简 介

本书系统论述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,包括区域稳定性、工程岩(土)体稳定性问题,与地下渗流有关的和与河、海、湖侵蚀堆积有关的工程地质问题等四个方面。为了深刻理解地质体或工程岩体变形失稳机制,还以专门章节论述了岩体的结构特征,天然应力状态及岩体在加、卸荷载和动荷载下的变形破坏机制。

密切联系人类工程活动的实际,以工程活动的地壳表层地质环境这一大的开放系统为研究对象,以合理开发和保护、改造这一环境为目标,通过地质分析识别和提取工程涉及的地质体或岩体变形发展到失稳破坏全过程的内部信息,再尽可能实现地质体或岩体各种参量的定量描述和定量表达,通过物理模拟或(和)数值模拟再现和验证变形到失稳破坏这一动力学过程,最后定量或半定量地判定稳定现状,并对未来的失稳破坏作出预测。这就是本书所采用的地质分析与力学机制分析并重,定性评价与定量评价相结合的工程地质问题分析与评价的技术途径。它反映和体现了现代工程地质学在地质学与土力学、岩体力学紧密结合的基础上,广泛吸收数学、力学的最新成就,充分运用现代测试技术与现代计算技术,沿多学科交叉与综合的途径发展的总趋势。

* * *

本书由张咸恭教授主审,经地矿部工程地质课程教学指导委员会于1992年5月召开的全体会议审稿,同意作为高等学校教材出版。

* * *

普通高等教育地质矿产类规划教材 工程地质分析原理

张倬元 王士天 王兰生 编著
地质矿产部教材编辑室 编辑

*
责任编辑:屠湧泉 孟索

地质出版社出版

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所发行

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 37.25 字数: 390000

1994年3月北京第二版·1994年3月北京第一次印刷

印数: 1—1700册 定价: 17.30元

ISBN 7-116-01332-6/P·1102

再版序

自本书第一版出版迄今已经过去十二个年头。十二年来我国的工程建设事业在改革开放的新形势下以空前未有的速度蓬勃发展。于是许多重大工程地质问题相继提到我国工程地质工作者面前，通过这些问题的深入研究和逐一解决更有力地推动了我国工程地质学的发展。大型、超大型工程建设的规划、选址大大促进了区域稳定性研究的进展；高坝、大型地下洞室和高边坡的设计与施工则大大促进了岩体稳定性研究的进展。研究和解决这些重大工程地质问题的技术途径，通常是：通过地质分析识别和提取工程涉及到的地质体或岩体变形发展到失稳破坏全过程的内部信息，再尽最大可能地实现地质体或岩体各种参量的定量描述和定量表达，还要通过物理模拟或（和）数值分析和模拟再现和验证这一动力学过程，从而定量或半定量地判定其稳定现状、发展趋势及对未来的失稳破坏做出预测。引人注目地显示出现代工程地质学正是沿着地质学与土力学、岩体力学紧密结合，广泛吸收数学、力学的最新成就，充分运用现代测试技术和现代计算技术，沿着多学科交叉与综合的途径发展的总趋势。

十二年来我国工程地质学的重大进展，一方面证明本书第一版以“系统论述工程活动中所经常遇到的一些主要工程地质问题，地质分析与力学机制分析并重，定性评价与定量评价并重”的编写体制和方针是合适的；而另一方面也促使我们着手对本书第一版进行必要的修改与补充，以求与我国和国际工程地质学的当前发展水平相适应。在修订时保存了原五篇十五章的总框架体系，但是对一、二、三、四、五、九、十等七章做了重大修改，其它各章也做了适当的修改与补充。

本书的绪论、四、五、六、七、十二、十三章仍由张倬元编写，二、八、十、十一章仍由王士天编写，一、三、九、十四、十五章仍由王兰生编写，最后由张倬元统一校订定稿。本书图件主要由李志侃同志绘制。

一九九二年五月在长沙召开的地质矿产部工程地质课程教学指导委员会会议上对本书书稿进行了评审。张咸恭教授（主审）、胡广韬教授、蒋爵光教授、罗国煜教授、李景阳副教授对书稿进行了逐章审查，提出了修改意见并推荐由地质出版社教材室出版。会后编者又根据评审意见进行了必要的修改。修改稿由张咸恭教授主审。

编者谨向参加本书评审的所有专家和为本书绘图的李志侃同志致以衷心的感谢、编者还要向对修订本书提出过建议的彭一民教授、马国彦总工表示谢意。

书中的缺点和不足之处热情欢迎读者提出批评和指正。

编者

1993.2.

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50年代以至60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70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）、张咸恭、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
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	6
1.1 基本概念及研究意义	6
1.2 岩体结构特征及主要类型	8
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	23
1.5 岩体结构特征的统计分析	34
第二章 地壳岩体的天然应力状态	42
2.1 基本概念及研究意义	42
2.2 影响岩体天然应力状态的主要因素及其作用	48
2.3 我国地应力场的空间分布及随时间变化的一般规律	55
2.4 地壳表层岩体应力状态的复杂性	65
2.5 岩体应力及区域地应力场的研究	83
第三章 岩体的变形与破坏	92
3.1 基本概念及研究意义	92
3.2 岩体在加荷过程中的变形与破坏	97
3.3 岩体在卸荷过程中的变形与破坏	114
3.4 岩体在动荷载条件下的变形与破坏	119
3.5 岩体变形破坏过程中的时间效应	123
3.6 空隙水压力在岩体变形破坏中的作用	129
3.7 岩体变形破坏的地质力学模式	134
第二篇 与区域稳定性有关的工程地质问题	
第四章 活断层的工程地质研究	137
4.1 基本概念及研究意义	137
4.2 活断层的特性	139
4.3 活断层活动的时空不均匀性	159
4.4 活断层区规划设计建筑物的原则	164
4.5 活断层的调查监测与研究	168
第五章 地震的工程地质研究	177
5.1 基本概念及研究意义	177
5.2 地震及地震波的基础知识	178

5.3	我国地震地质的基本特征	188
5.4	地震区划及地震危险性分析	205
5.5	场地地震反应及地震小区划	216
5.6	地震区抗震设计原则	232
第六章	水库诱发地震活动的工程地质分析	235
6.1	基本概念及研究意义	235
6.2	水库诱发地震活动性变化的几种典型情况	237
6.3	水库诱发地震的共同特点	253
6.4	水库诱发地震的诱发机制	256
6.5	产生水库诱发地震的地质条件	262
6.6	水库诱发地震工程地质研究的基本原则	263
第七章	地震导致的区域性砂土液化	266
7.1	基本概念及研究意义	266
7.2	地震时砂土液化机制	268
7.3	区域性砂土地震液化的形成条件	271
7.4	砂土地震液化的判别	278
7.5	砂土地震液化的防护措施	284
第八章	地面沉降问题的工程地质分析	287
8.1	基本概念及研究意义	287
8.2	地面沉降的形成机制	290
8.3	地面沉降的产生条件	299
8.4	地面沉降的研究、预测及防治	300

第三篇 与岩(土)体稳定性有关的工程地质问题

第九章	斜坡岩(土)体稳定性的工程地质分析	308
9.1	基本概念及研究意义	308
9.2	斜坡岩体应力分布特征	310
9.3	斜坡的变形与破坏	315
9.4	斜坡变形破坏机制与演化	321
9.5	斜坡破坏后的运动学	338
9.6	斜坡变形破坏与内外营力的关系	346
9.7	斜坡稳定性评价与预测	363
9.8	防治斜坡变形破坏的原则及主要措施	378
第十章	地下洞室围岩稳定性的工程地质分析	383
10.1	基本概念及研究意义	383
10.2	地下开挖后围岩应力的重分布	384
10.3	地下洞室围岩的变形破坏及山岩压力问题	392
10.4	地下洞室围岩稳定性的分析与评价	410
10.5	地下洞室围岩变形量测的方法及应用	426

10.6	地下洞室围岩的支护措施	428
第十一章	地基岩体稳定性的工程地质分析	431
11.1	基本概念及研究意义	431
11.2	地基岩体内的应力分布特征	433
11.3	坝基岩体的变形与破坏	438
11.4	坝基(肩)岩体稳定性的工程地质评价	453
11.5	改善坝基稳定性的措施	467

第四篇 与地下水渗流有关的工程地质问题

第十二章	岩溶及岩溶渗漏的工程地质分析	470
12.1	基本概念及研究意义	470
12.2	碳酸盐溶蚀的物理化学原理	471
12.3	岩溶发育的基本条件	481
12.4	岩溶发育的阶段性及其发育历史	489
12.5	岩溶渗漏分析	500
12.6	岩溶区修建水库的措施与防渗处理	506
第十三章	渗透变形的工程地质分析	509
13.1	基本概念及研究意义	509
13.2	土石渗透变形的产生条件	512
13.3	渗透变形可能性的判定	516
13.4	渗透变形的防治措施	521

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	525
14.1	基本概念及研究意义	525
14.2	河流水动力学特征	526
14.3	水流对河床的作用及河床稳定性	530
14.4	河床演变的某些基本规律	535
14.5	水库淤积及坝下游河床再造	545
14.6	河流开发治理的一般原则	549
第十五章	海(湖)边岸磨蚀与堆积的工程地质分析	552
15.1	基本概念及研究意义	552
15.2	波浪和岸流的一般特征	552
15.3	海(湖)边岸磨蚀与堆积的基本规律	556
15.4	水库边岸再造及滑体涌浪预测	564
15.5	海(湖)边岸及沿岸建筑物的防护措施	572
主要参考文献目录		575

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陷而毁坏，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。又如修建高坝形成大水库，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回水，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。

进入本世纪80年代，人们已充分认识到人类的工程活动或其它经济活动已经成为改变地表面貌、改变环境的强大营力，其规模和速度甚至超过了自然营力。如果不认识人类赖以生存的大环境——岩石圈表层、水圈、大气圈、生物圈这一大系统的各子系统之间的内在联系、相互作用和环境发展演化的客观规律，人类活动总是不自觉地破坏或恶化环境。于是，人类活动的环境效应受到了高度重视。为了防止人类工程活动对地质环境的不利影响，就需要定量预测人类活动干预下地表岩土体的变形破坏过程，预测各种工程活动可能产生的环境效应，研究各种地质灾害的区域性成灾规律和危险性分析评价(hazard asses-

sment) 方法, 研究区域的、城市的或重大工程的地质环境评价的原则和方法, 以便达到合理开发利用和保护改善环境的目的。以上述环境工程地质问题的研究评价为主要内容的环境工程地质学就逐渐成长为工程地质学的一个新的分支学科。

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、形成机制, 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, 就不能对斜坡的稳定性现状作出合理的判断, 而斜坡的稳定性现状只不过是斜坡整个演化过程中的一个片断, 是过去发展历史的结果及将来发展演化的起点, 所以不理解其现状, 也就不能对其未来的发展趋势作出正确的预测。

由此可见, 既然绝大多数工程地质问题都涉及到特定地质环境中地质体的发展演化过程, 所以, 研究这些问题必须首先以地质学的观点、自然历史的观点分析地质体与周围因素相互作用的特定方式, 随时间发展演化的历史及其发展的阶段性, 从全过程上和内部作用机制上把握其形成、演化、现状及未来发展趋势, 也就是说首先进行地质过程的机制分析。其所得结果虽然是定性的, 因为它往往是区域性或趋势性规律, 所以对工程活动的规划选点、可行性研究, 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参数或定量数据。在信息技术迅速发展各种测试手段不断完善的今天, 对地质过程的研究已经不再局限于传统的、建立在现象描述基础上的定性分析、定性评价阶段, 而是在定性评价的基础上, 将地质学对现象的研究与现代岩石力学、数学力学、计算机科学和测试技术有机结合起来, 尽最大可能地提取地质体发展演变过程中的内部信息; 尽最大可能地实现地质参量或岩体力学参量的定量描述和定量表达; 尽最大可能地实现地质体演变全过程的模拟再现, 以达到对地质体变形破坏演变过程及其所代表的稳定性状态和未来的发展趋势进行半定量以至定量的评价和预测。也就是说要进行地质过程的机制分析——定量评价。在阐明主要工程地质问题形成机制的基础上, 建立一些简化模型进行必要的定量计算与预测, 诸如地面沉降量计算、地震砂土液化可能性计算, 斜坡稳定性、坝基稳定性计算, 预测斜坡破坏时间的计算等。由于地质条件十分复杂, 有时还不得不用类比法进行定量评价, 也就是根据条件类似地区已

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，例如水库边岸再造带宽度预测就多采用这种评价方法。

定性与定量评价相结合的地质过程的机制分析——定量评价，按下述程序或层次进行。

评价的起点和基石是原型的工程地质研究和概念模型的建立。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其类似的作用，或者说大自然是包罗万象的地质作用未经任何简化的原型模拟试验室。作用长期发展的结果就可以出现各种地质现象，现象就是地质作用过程的记录。不同地质环境条件中产生的现象、不同作用方式产生的现象、作用不同发展阶段产生的现象都会有所不同。通过仔细观察、对比结合地质环境进行分析，就可以将现象产生的空间（地质环境）条件和时间序列区分出来，这样就可以透过现象认识其产生的原因和内部作用过程，也就是形成机制。由于现象的不完备性和认识的局限性，从现象提取的内部作用过程信息也是不完备的，甚至是片面的，需要进一步验证。通过现象分析所建立的尚待验证的机制模型就是概念模型。

为了运用数、理、力学理论和方法验证和完善对地质作用形成机制和发展演化全过程的认识，首先必须通过实验以获得岩体力学性态的定量描述（即岩体力学参量）及应力-应变本构模型，亦即通过实验研究建立岩体力学模型。

基于正确的岩体力学模型和参量的物理模拟和数值模拟分析，可以在短时期内重现作用发生发展的全过程，经与原型和现象观测相对照（反馈对照），如能达到拟合，即可验证概念模型，使之上升为系统全面的内部作用过程的理性认识，或者说成为理论模式。其中物理模拟多用以获取特征点的物理量（例如变形、应力等），数值模拟则可获得全场的物理量并可用以模拟运动过程或演化过程。两者配合使用可以得到更好的效果。

经过物理、数值模拟获取了边界条件、强度参数、影响因素及敏感因素等方面信息之后，即可有助于选择适当的计算方法进行定量计算，作出定量评价或预测。

基于定量评价和预测，就可以确定合理的防治对策、设计整治方案并付诸实施。

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边岸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。

学习本课程的目的是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进行合理的分析与评价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岩石, 它处于一定的应力状态、被各种结构面所分割。

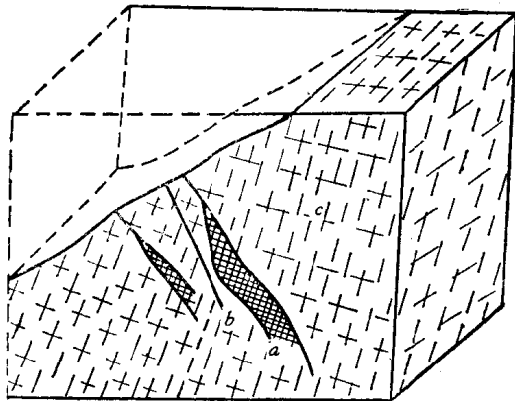


图 1-1 雅砻江二滩电站右坝肩岩体结构示意图

a—软弱岩带; b—断层; c—裂隙网络

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(或具有一定厚度)的地质界面(或带), 例如岩层层面、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形状的结构体(图1-1)。

岩体的结构特征是在漫长的地质历史发展过程中形成的。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浅、表生作用(epigene-action; 如卸荷、风化、地下水作用等, 主要出现在地壳浅部或表部岩体中)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、并成为一个重要的研究课题, 也不过只有二、三十年的历史, 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60m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（Vajont）水库，这个当时世界上最高（267m）的薄拱坝建成蓄水后，于1963年大坝附近约2亿多m³岩体迅速下滑、填满水库，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肩岩体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环境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，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，最为关键的是各类结构面的分布规律、发育密度、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和方法 and 地质力学的理论与方法，分别对岩体的原生结构特征和构造结构特征进行分析，建立相应的岩体结构地质模式，讨论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。有关岩体浅、表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。最后讨论岩体结构特征的统计分析，建立可直接应用于定量评价的岩体

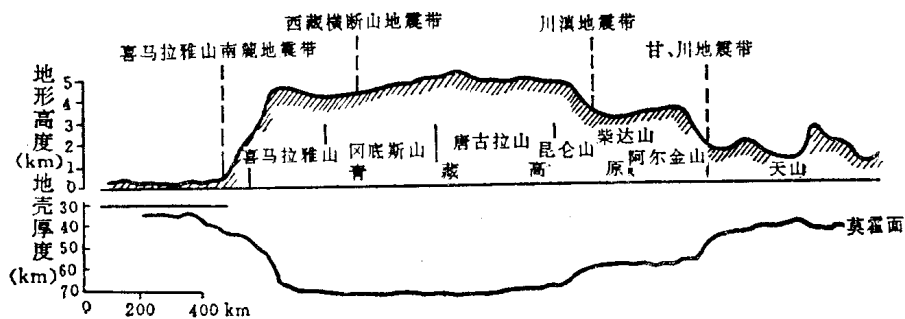


图 1—2 青藏高原地壳厚度剖面 and 地震带位置
(据时振梁等)

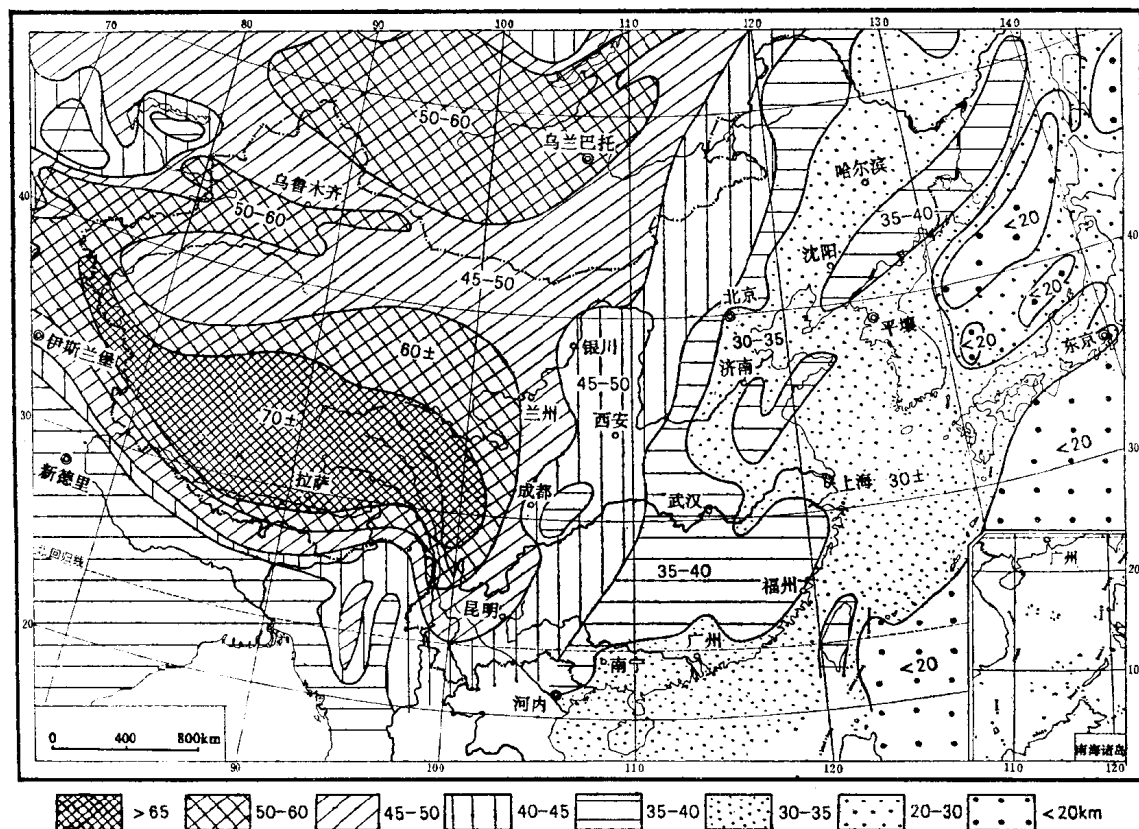


图 1—3 中国大陆及邻区地壳厚度图
(据地球物理所)

结构的量化模式。

1.2 岩体结构特征及主要类型

1.2.1 结构面的主要类型及特征

1.2.1.1 结构面的成因类型

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、表面特征等来划分。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

表 1-1 岩体结构面成因类型及其特征

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	沉积过程形成的层理,层面,软弱夹层,不整合面,假整合面,局部侵蚀冲刷面等成岩和后生过程中形成的成岩裂隙面和古风化面等	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(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,如圣佛兰西斯(St. Francis)提格拉(Tigra)坝的破坏,瓦依昂水库的巨型滑坡
	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 火山喷发间断界面	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	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,大渡河玄武岩中的太平坝大滑坡
	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隐闭结构面,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
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,岩体破坏过程中,大都有构造结构面的配合,常造成边坡及地下工程的塌方、冒顶
浅、表生结构面	卸荷断裂及重力扩展变形破裂面	受古剥蚀面及区域性断裂活动控制	由古剥蚀面和侧向临空面空间位置所确定	中、缓倾张扭断裂,层间错动面,滑动面	对岩体后期变形破坏和地面地质灾害起重要控制作用,如大渡河铜街子坝区地质结构,西安地裂缝等