

绪 论

一、工程地质学的任务

工程地质学是研究人类工程建设活动与自然地质环境相互作用和相互影响的一门地质科学，它以地学学科的理论为基础，应用数学、力学的知识与成就和工程学科的技术与方法来解决与工程规划、设计、施工和运营有关的地质问题。

地质环境对工程建设场地的选择和建筑物结构类型及施工方法的确定，起着决定性的影响。水利水电工程坝址，坝型及其他水工建筑物类型的选择；铁路、桥梁、隧道的选线和施工；软土地基上修建高层建筑地基基础方案的确定等等，无一不与工程建设地区的地质环境有着密切的关系。例如，在坚硬岩基上，常可采用重力坝或重力拱坝方案；在河流两岸岩性坚硬均一，弹性模量高，则可采用拱坝方案；但在坚硬岩基上如当地建筑土石料来源丰富，亦可采用土石坝方案。在软岩或松软土基上，则常采用柔性的土石坝。在淤泥质软基上修建高层建筑，则常采用桩基或人工加固地基，或者采用对不均匀沉降适应性较大的箱式基础及在建筑结构上采用工程加固措施等。地质环境不良，一方面可能因需要采取地基处理措施而提高工程的造价，另一方面可能会影响工程建筑的稳定、安全和正常使用。世界上大坝破坏和失事的事例中，至少有一半是由地质条件不良而引起的。据国际工程地质协会 1979 年 9 月在前苏联第比利斯举行的水工建设工程地质国际讨论会发表的论文，在世界上所有大坝的破坏事例中，30%起因于地基岩石，28%归结于内部侵蚀和管涌，34%是洪水漫坝造成的，其余 8%破坏原因未确定。显然，前两者都与地质条件有关。洪水漫坝造成土坝或混凝土坝的破坏，地质虽然不是一个主要因素，但在非常洪水并且地质条件不良的情况下，地质条件就会发生作用。在美国收集的大坝破坏和事故的资料表明，约 60%的事故在某些方面都与地质条件有关。

对“地质环境”这个术语，目下仍存在着不同的理解。显然，地质环境是自然环境的组成部分之一，与岩石圈、水圈以及大气圈、生物圈都有关系。环境的概念起源于人类的生存与活动，因此，地质环境也与人类的生存与活动有关。这样，地质环境广泛的涵义可理解为人类生存与活动进程中地壳表层的地形、地貌、岩土、水、地层构造、矿产资源、地壳稳定性等自然因素的总称。在工程地质学中，对人类工程活动的地质环境常用工程地质条件来描述。工程地质条件是一个综合性概念，可理解为与工程建筑有关的地质条件的总称。一般认为，它包括工程建设地区的岩土工程地质性质、地形地貌、地质构造、水文地质条件、物理地质现象、地质物理环境（地应力及地热等）、天然建筑材料等七个方面的因素。在不同地区、不同工程类型、不同设计阶段解决不同问题时，上述各方面的重要性并不是等同的，而是有主有次。其中岩土的工程地质性质和地质构造往往起主导作用。但在某些情况下，地形地貌或水文地质条件也可能是首要因素。工程地质条件所包括的各方面因素是相互联系、相互制约的。因此，在解决工程建设中的地质问题时，应该对各方面因素综合分析论证。

物理地质现象或称自然地质现象，是指由内外动力地质作用在地壳表层引起的一系列地质现象，例如滑坡、崩塌、岩溶、泥石流、地震、岩体风化、冲沟等现象；而由于人类工程活动所产生的地质条件的变化，引起的地质现象，则称为工程地质作用或现象。这些现象对工程建筑物的稳定、安全、经济和正常使用影响很大。因此，常列为工程地质条件的一个重要因素。实际上，当物理地质现象造成大规模的或区域性的岩土体失稳或破坏而对工程建筑物造成严重的威胁时，工程地区的物理地质现象已不仅属于“条件”，而应作为工程地质问题来研究。

人类工程活动和自然地质作用会改变地质环境，影响工程地质条件的变化。当工程地质条件不能满足工程建筑上稳定、安全的要求时，亦即工程地质条件与工程建筑之间存在矛盾时，就称为存在工程地质问题。工程地质问题与工程建筑的类型和规模有着密切的关系。各类工程建筑，由于其结构类型和工作方式不同，存在着各种各样的工程地质问题。工业与民用建筑常遇到的工程地质问题是地基的变形、强度和稳定问题；铁路、道路工程常遇到的有路基边坡、隧洞围岩和桥墩桥台的稳定问题、道路的冻胀问题；地下建筑工程常遇到的是围岩稳定、涌水及影响建筑施工的高地应力、高地热和有害气体问题、岩爆问题；海港工程常遇到的有码头地基、岸坡的稳定、海浪侵蚀及回淤问题；矿山工程常遇到露天矿边帮及地下巷道的稳定及涌水、采矿引起地面塌陷问题；而水利电力工程的工程地质问题则更为复杂多样，除与其他工程相类似的区域地壳稳定、坝基、边坡和地下洞室岩土体的稳定问题外，还有库坝区渗漏、水库库岸稳定、水库淤积、滨库地区浸没、水库诱发地震等问题；在特种土地地区如红土、黄土、淤泥、膨胀土等同样会遇到特殊的工程地质问题。由于大量抽取地下水、石油及天然气而造成大范围地面沉降，放射性能源的应用而存在核废料的储存，采矿而产生的废矿渣的处理等则属于环境工程地质问题。

综上所述，工程地质学的基本任务有：

- 1) 评价工程建设地区的工程地质条件。
- 2) 预测和分析工程建设过程中及完成后工程地质条件可能产生的变化，亦即可能出现的工程地质问题。
- 3) 选择最佳工程场地和克服不良现象应采取的工程措施，包括环境的保护与利用和地基处理等问题。
- 4) 提供工程规划、设计、施工所需的工程地质资料。

二、工程地质学的分科、研究内容及研究方法

工程地质学可分为工程岩土学、工程动力地质学（工程地质问题分析）、工程地质勘测和区域工程地质学四门分支学科。

1. 工程岩土学

工程岩土学是研究岩体和土体的工程地质性质及其形成和变化规律以及改善这些性质的科学。岩土的工程地质性质包括岩土物理力学性质和与水渗透有关的性质，它们主要取决于岩土的化学成分和结构构造。因此，工程岩土学研究岩土的工程地质性质除采用专门的试验方法（取样试验和原位试验）外，还必须采用地质学的自然历史分析法，研究在漫长地质历史中，在内、外动力地质作用下形成的岩土地质特征，并预测其变化和发展。

工程岩土学在前苏联等国家称为土质学（Грунтоведение），研究与人类工程活动有关的

各类岩土的物质组成、结构构造、成因类型及物理力学性质。在美洲、西欧、澳洲等国家则将其研究内容包括在岩土工程学 (Geotechnical Engineering) 中或者分散在土力学和岩石力学中讨论；岩石力学奥地利学派 (地质力学学派) 则主张工程地质与岩石力学密切结合起来研究岩体的工程地质性状。考虑到水利电力类工程地质与水文地质专业现行教学计划设置有土质学及土力学、岩石力学课程，因此本教材第一篇重点探讨岩土结构的工程地质研究、软岩和软土的工程地质特征，而岩土的物理力学性质未编入。

2. 工程动力地质学

工程动力地质学或称为工程地质问题分析，主要研究各种工程地质问题产生的地质条件、力学机制和发展演化规律；结合工程规划、设计、施工的要求进行正确评价，并提出防治措施。工程动力地质学实质上是结合工程建筑的特点来研究自然地质作用和工程地质作用，并由此产生的工程地质问题。前已提到过物理地质现象是工程地质条件之一，当与工程建设结合评价时，便构成工程地质问题。本教材第二篇主要讨论水利电力建设中经常遇到的工程地质问题，并对于滑坡、崩塌、岩溶、泥石流、地震、河流侵蚀、海岩剥蚀等物理地质作用的发生、发展规律及工程地质评价亦作了论述。

3. 工程地质勘察

工程地质勘察是运用地质学、岩土力学、工程地质学的理论，按照科学的勘察程序与方法，利用有效的测试仪器和技术，调查工程地质条件，评价存在的工程地质问题，为工程的规划、设计、施工和运营提供地质资料。本教材第三篇主要讨论这方面的内容，重点是结合水利水电工程地质勘察。

4. 区域工程地质学

区域工程地质学研究区域性工程地质条件形成的特点和规律，预报这些条件在人类活动影响下的变化，评价区域稳定性，阐述工程地质分区和编制区域工程地质图的原则，为国民经济建设规划及环境的开发、利用和保护提供依据。我国小比例尺的区域工程地质图曾由谷德振、刘国昌等编制过，大、中比例尺的区域工程地质图、城市环境及山区环境工程地质图正在陆续编制中。

从上述工程地质学的研究内容来看，工程地质学是属于应用地质科学的范畴，与许多学科有密切的联系，其中与岩石力学、土力学和水文地质学的关系特别密切。工程地质学的基础理论课有动力地质学、矿物学、岩石学、构造地质学、地史及古生物学、地貌学及第四纪地质学等，并与应用地球物理、遥感遥测学、基础工程学等工程技术学科有密切联系。因此，可以认为工程地质学是一门介于地质学与土木建筑、水利工程学之间的一门边缘科学。

工程地质学的研究方法，通过几十年来的工程实践，大多数研究者已认识到在地质机制定性分析的基础上加强定量分析的重要性。工程地质分析研究除传统的自然历史分析法 (地质学方法)、室内和现场试验、原位测试方法和经验判断法外，随着计算机在工程地质工作中的应用和普及，近二三十年来，应用数学、力学方法，建立了岩土体的工程地质力学模型和数学模型，采用有限元法、边界元法及离散元法等数值方法，编制开发了各种计算机软件，为量化提供了有效的途径。在岩土体稳定分析评价和地质数据处理中，由于岩土体地基的复杂性，各种参数的随机性、模糊性和不充分性 (灰色性质)，概率论和数理

统计、模糊数学、灰色系统理论、分形几何等已经在工程地质分析中得到推广和应用；工程地质学科已引入系统科学的思维方法，包括系统论、控制论和信息论及其派生的新理论；随着 21 世纪信息技术的发展，地理信息系统（GIS）、遥感信息系统（RS）、计算机网络系统也将在工程地质学中得到广泛的应用；将采用工程地质数据库、专家系统和计算机制图等相结合的工程地质综合分析方法。但必须指出理论计算和数值方法并不能代替工程地质学的其他研究方法。正确模拟地质边界条件，准确合理地选择数学、力学模型和计算参数，才能使理论计算得出正确的结论；地质分析和经验判断实际上并不完全是定性分析，采用回归分析、判别分析等数理统计方法建立的经验方程和公式，亦是工程地质量化的重要手段之一。奥地利岩石力学专家米勒（L. Müuer）说：“要将过去所得的经验，加上计算、模型试验和地质定性分析，进行综合思考”，又说：“不但要计算，要观测，而且要凭感性的经验整体思考问题”。由此可见经验判断、综合分析的重要性。

三、工程地质学的发展历史及趋向

工程地质学是一门比较年轻的科学，是随着大规模的工程建设的发展才逐渐形成的一门独立的学科。在欧、美、澳洲、日本等国家中，早先常将工程地质学或地质工程学作为土木建设事业中进行地质调查和研究的一个分科，属于岩土工程学的范畴。在前苏联，形成独立的工程地质学科时间较早，早期的著作如 Ф. П. 萨瓦林斯基（Саваренский）的《工程地质学》（1939 年）И. В. 波波夫（Попов）的《工程地质学》（1951 年）В. А. 普里克朗斯基（Приклонский）的《土质学》（1949 年）等，将工程地质学作为地质学的一个分科，但偏重于地质背景和区域稳定性分析，主要是利用地质学方法分析动力地质现象，一般性的论述和定性分析多于具体的定量分析，地质条件的论述与工程建筑的设计、施工和运营结合得不紧密。中国的工程地质学，在新中国成立前只是处于萌芽状态，一些地质学家如丁文江、李学清、林文英等人，先后曾结合建筑材料、长江三峡、滇缅、川滇公路、宝成铁路等进行了地质调查。1946 年在中央地质调查所曾设有工程地质室，但仅有三四个工作人员，未承担生产实践任务。较早的工程地质著作是孙翥著《工程地质学》（1946 年商务印书馆出版），仅是从建筑材料、煤及矿产的开采角度介绍了地质基础知识，并作为大学土木系学习地质学的一门课程。新中国成立后，随着我国 1953 年开始的大规模经济建设，工程地质学才蓬勃地发展。1952 年在北京、长春新建了两个地质学院及南京大学设立了水文地质工程地质专业；铁道、水利电力、冶金、城建等部门都先后设立了工程地质勘察的专门机构，在工程实践中逐渐形成了一支强大的工程地质勘察技术力量。

近 20 多年来，与其他地质学科一样，国内外工程地质学的研究领域日益扩大，工程地质学有了飞速的发展。工程建设的规模日益扩大，突出地表现为向海洋和地球深部进军，深埋隧洞、深采巷道和海底隧道不断出现。矿产的开采深度已超过千米；露天矿山边坡高度已达 400~500 m，甚至达 800 m；大坝的高度已超过 300 m，人造水库的库岸总长度已超过地球赤道的长度；高层建筑最高已达 100 层以上。海洋石油、天然气及矿产开采和海岸，近海工程建设，使海洋土层的沉积环境、地质特征、物理力学性质及海底地貌、地质构造的研究越来越受到重视。人类工程建设活动对自然地质环境的影响，环境保护、治理和开发利用的需要，促使工程地质学者为环境问题的研究挑起了重担。因此，工程地质的分支学科，除了形成较早的水利水电工程地质学、铁路工程地质学、区域工程地质学继续发展

外，又逐渐形成了海洋工程地质、矿山工程地质、城市建设及建筑材料工程地质、环境工程地质、地震工程地质、地下建筑工程地质等新的分支学科。

与工程地质学科关系密切的国际学术组织有国际大坝委员会、国际土力学与基础工程学会（ISSMFE，成立于20世纪30年代）、国际岩石力学学会（ISRM，成立于1962年）、地科联所属国际工程地质协会（IAEG，成立于1964年）等。近20多年来都定期召开大会或分专题广泛开展了岩土工程与工程地质的学术讨论与交流，促进了各学科之间相互渗透和工程地质科学的进一步发展。1983年由国际土力学与基础工程学会、国际岩石力学学会、国际工程地质协会在比利时联合召开了一次年会，成立了这三个学术组织的常设协调秘书处，它标志着工程地质学、岩石力学和土力学与基础工程这三门学科将进入共同协作、相互渗透的新阶段。工程地质学发展的总趋向是：在工程设计、施工、运营各阶段，工程地质将与岩土力学、岩土工程更密切的结合；在研究不同类型建筑物的工程地质条件和选择工程设计、施工中所需要的地质参数时，将与数学、力学、应用地球物理及遥感遥测技术等相结合；在进行工程环境的综合评价及研究地质环境的保护、利用和开发时，将与水文地质学相结合。

大型水利水电工程建设开始较早。国际大坝委员会1951年就设立了岩石力学分会，1957年又建立了地下工程委员会。但当时高坝不多，没有引起对岩石力学与工程地质的足够重视。据统计，世界上超过150m以上的高坝，绝大多数是20世纪60年代后兴建的。其中著名的高坝有巴西、巴拉圭的伊泰普双支墩坝，高190m装机容量1400万kW；苏联努列克土石坝，高300m，罗贡土石坝，高325m；苏联英古里拱坝，高272m；意大利瓦伊昂拱坝，高262m；瑞士大狄克桑斯重力坝，高285m；加拿大马尼克五级连拱坝，高214m等。从20世纪50年代以来，国际上出现了多起由于地质原因而引起大坝破坏事故：1959年法国玛尔帕塞坝，高66.5m，因左岸坝肩岩体受挤压破裂而导致坝体突然崩溃，死亡325人；1963年10月9日意大利瓦伊昂水库因库区大滑坡引起200多m高的涌浪越坝而过，造成下游朗加镇全毁，死亡近3000人；1963年12月14日美国鲍德温山（Baldwin Hills）水库因库、坝区断层的沉陷与挤压，引起水库失事；1976年6月5日美国提堂（Teton）坝，高93m（碾压土坝），因细粒土料的管涌，从坝心墙进入坝基张开裂隙，而引起土坝溃决。这些事例引起了工程学术界的极大的震惊，因而对工程地质、岩石力学的研究日益受到重视。

我国水能资源极为丰富，理论蕴藏总量（未包括台湾省）达6.76亿kW，可开发容量约3.78亿kW，相应年发电量19200亿kW·h，居世界首位。但1949年全国装机容量仅36万kW，年发电量为12亿kW·h。近50年以来，我国依靠自己的力量，从建设第1座坝高102m、总库容220亿m³、装机容量66.25万kW的新安江水电站开始，建设了一大批大中型水电站，特别是改革开放以来，我国水电建设有了更大的发展。据初步统计，全国已建和在建的大、中型水电站有220座，其中100kW以上大型电站就有20座。20世纪80年代建成的有贵州乌江渡（63万kW）、吉林白山（90万kW）、青海龙羊峡（128万kW）、湖南东江（50万kW）、广西大化（40万kW）和万里长江第一坝——葛洲坝（271.5万kW）等大型水电站。20世纪90年代以来，我国水电建设进入了一个快速发展时期，相继投产的有被誉为“五朵金花”的岩滩（121万kW）、漫湾（125万kW）、广州抽水蓄能

(一期 120 万 kW)、隔河岩(120 万 kW)、水口(140 万 kW) 5 座水电站;由于引进了新的机制,施工期大大缩短,造价得到控制,质量不断提高,主体工程开工后,分别仅用了四、五年就投产发电;此外,湖南五强溪(120 万 kW)、青海李家峡(160 万 kW)、四川二滩(330 万 kW)、天生桥一级(120 万 kW)、天生桥二级(132 万 kW)等大型水电站也先后投产发电。截止 1999 年底,全国水电装机容量已达 7297 万 kW 年发电量 2129 亿 kW·h,均居世界第二位。正在建设的三峡枢纽是世界上最大的水利枢纽,装机容量为 1820 万 kW,也是世界上最大的水电工程。我国已形成了金沙江、雅砻江、大渡河、乌江、长江上游、南盘江红水河、澜沧江、黄河上游、黄河中游北干流、湘西、闽浙赣、东北十二个大水电基地,在今后中西部水电资源的全面开发,解决全国的防洪防旱、调水供水、灌溉通航等水利水电工程的勘察、设计、施工中,将带来一系列复杂的工程地质问题。南水北调、引黄灌晋等跨流域大型水利工程将提上日程;长江三角洲、珠江三角洲、京津唐、中西部等工业基地的建设,南海、渤海石油的开发;新型的、技术难度大的工程建筑物,如核电站、抽水蓄能电站、工业污物地下存放工程、海底隧道、跨海和跨江大桥、地下储气和高压蓄能工程、深埋长隧道工程、松软含水地层地下铁道等的建设,也将带来一系列复杂的工程地质问题。为了降低工程造价,缩短建设周期,选择最优方案,以便快速、优质地完成工程的前期工作,工程地质勘察和综合研究在国民经济建设中的地位将日益受到重视。

我国今后工程地质学需要研究的课题和发展方向主要有:

(1) 复杂地基上高坝和高层建筑的地基稳定研究。我国已建成了不同类型的高坝,如二滩双曲拱坝高 240 m,天生桥一级混凝土面板堆石坝高 178 m,江垭碾压混凝土重力坝高 131 m 等,均处于世界领先地位,今后拟建的小湾水电站双曲薄拱坝,坝高 292 m,金沙江溪洛渡水电站双曲薄拱坝,坝高 295 m,锦屏一级水电站拱坝,坝高 300 m;瀑布沟土石坝,坝高 195 m,龙滩水电站碾压混凝土重力坝,坝高 192 m;坝基稳定、拱坝坝肩稳定问题,将是今后一个重大课题。随着城市建设的发展,40 层以上超高层建筑将不断出现,基底压力可达 700~800 kPa 以上,桩基和人工地基的稳定问题,亦将是一个重要课题。

(2) 高边坡岩土体稳定分析。库坝区自然与人工开挖边坡还需预测和研究施工期、运行期的边坡的滑动机制、滑动失稳时间和速度问题。

(3) 巨型地下洞室围岩稳定分析。随着西部大开发和大型水电站的建设,将遇到大直径洞群、深埋长隧道的勘察、设计、施工问题。开发城市地下空间是实现可持续发展城市化的重要途径,向地下要土地、要空间是全世界城市发展的必然趋势。随着地下铁道、地下公路隧道、地下商业街、地下供水、供热、存贮工程等的建设,将带来一系列地下深埋工程和深基础工程的岩土工程地质问题。

(4) 海洋工程地质问题的研究。我国海岸带的建设和海洋开发工程将提出软土、海洋地质构造、海底活断层和地震、水下滑坡、海洋石油钻井平台工程等一系列海洋地质工程和环境工程地质课题。

(5) 工程建设与环境保护、资源开发利用相结合。水利水电建设将更加注重生态环境问题,水电站对国土资源的影响,对人类生存环境的影响,将成为我们需要认真研究的课题;要预测各种类型的地质灾害(滑坡、崩塌、泥石流等)。因此,环境工程地质问题和城市岩土工程问题的研究,将成为重要的课题。

(6) 区域构造稳定性研究。编制经济开发地区的大比例尺区域工程地质图，开展地震工程地质和预测水库诱发地震研究。

(7) 研究地质物理环境（高地应力、高地热、地下水等）对岩土体力学性质及岩土工程施工的影响，岩土体工程地质分类综合评价。

(8) 不均匀、各向异性裂隙岩体中地下水渗流研究。

(9) 深厚覆盖层上建坝、松软含水地层上地基、边坡、地下洞室的稳定研究。

(10) 喀斯特发育规律、喀斯特渗漏及防渗处理的研究；喀斯特地区地下洞室的涌水、涌泥（砂）、高外水压力问题的研究。

(11) 综合勘测手段、遥感技术、工程物探和钻探新技术，原位测试技术的应用研究，以提高勘察的精度、速度和定量化程度。

(12) 开展地质力学模型试验。

第一篇 岩土体的工程地质研究

第一章 岩土体结构的工程地质研究

第一节 岩土体结构的基本概念

任何工程建设，包括水利电力工程、铁路、公路、矿山开发、工业与民用建筑、港口及航道工程等，都是建筑在地表或地壳浅部，以岩土体作为地基或作为修建环境。因此，工程地质学在研究工程建筑物与地质环境相互作用、相互影响而产生的一系列工程地质问题时，首先涉及的是岩体和土体的工程地质性质。由于工程建筑所处地区的自然条件和地质环境不同，有的是山区，有的是平原或滨海地区；有的是地质构造活动区，有的是稳定地块，使工程地质条件复杂化，加上各类工程建筑物的设计和施工具有不同的特点、不同的要求，因此所遇的工程地质问题往往是多种多样的。但概括起来，主要是两大问题，一是岩土体的稳定问题，二是地表水和地下水对工程地基的危害问题。在水利水电工程中，前一类常遇到的有区域稳定性问题，坝基、边坡和地下建筑围岩的稳定问题；后一类常遇到的有坝基或库区的渗漏问题，坝基的潜蚀液化问题，基坑和地下工程的涌水、突泥问题，由岩溶（喀斯特）引起的地面塌陷问题，河流侵蚀、库区坍岸和海浪冲蚀问题等。

岩体与土体，简称岩土，既存在多方面的共性和密切的联系，又存在明显的区别，主要以它们组成的物质成分间有无坚固的联结而区分。土体可理解为由分散土组成的土层。而岩体的涵义比较广。如前苏联的学者认为岩体是处于与工程建筑物相互作用下的任意一种岩土层（不取决于其内部结构），或把岩体理解为一定地质结构范围内的地质体，甚至用一个术语 $\Gamma P Y H T$ 来表示岩土。石中有土，土中有石，有时很难确切区分岩石和土。从动力地质学观点来说，土在深部的高温高压环境下经过成岩作用能够固结为岩石，而岩石经过风化作用和外动力的沉积和搬运后，又可成为分散的土。某些岩石如我国新老第三纪的红色岩系，开挖后很快风化成土；固结较差的粘土岩、页岩以及变质岩中的云母片岩、绿泥石片岩等，其颗粒间联系弱、强度低、弹模小，属半坚硬岩石，有时很难确切区分它们是属于岩石还是土；同类岩石，如凝灰岩、构造岩等，由于物质成分、胶结程度不同，有的熔结或坚强胶结，有的疏松，其工程地质性质也有很大的差别，其过渡类型也很难区分为岩石或土。岩体完整的工程地质定义可理解为：岩体是一种地质体，是自然历史的形成物，位于一定的地质环境中，经历了地壳形成和形变两个历史阶段，具有自身固有的成分、结构、状态和工程地质性质。岩土体按规模不同，可以由一套岩石综合体及其组合构成的复杂地质体，也可以是具有相同岩石成分、相同裂隙特性的简单地质体。在工程地质调查中具有相同成分、结构、状态和工程地质性质的岩体，则称为工程地质单元。因此，岩土体的工程地质性质，除与物质成分有关外，还直接依赖于它的成因历史和地质结构特征。研究岩土体的工程地质性质时，必须从研究岩土的地质成因及结构特征着手，进而探讨岩土在

外力作用下的变形和破坏规律以及与水有关的性质，并提出改善这些性质的方法和措施。

岩体是非均质的、各向异性和裂隙性的不连续体。在岩体中力学强度较低的部位或岩性相对软弱的夹层，构成岩体的不连续面，亦称为结构面。结构面实际上是地质发展历史中，在岩体中形成具有一定方向、一定规模、一定形态和特性的地质界面。这些地质界面，可以是无任何充填的岩块间的刚性接触面，如节理面、层面、劈理面、片理面等；亦可以是具有充填物的裂隙面或明显存在上下两个层面的软弱夹层；还可以具有一定厚度的断层、构造破碎带、接触破碎带、古风化壳等。由一系列结构面具有自己的产状，彼此组合将岩体切割成形态不一、大小不等和成分各异的地块或岩块，统称为结构体。岩体就是由结构面、结构体两个基本单元所组成。岩体结构是指结构面和结构体的自然、地质特征及其组合状况，是工程地质学中常用的术语。结构（Structure）和构造（texture）这两个术语，在不同学科中有不同的涵义，各国在应用上亦比较混乱，有人还用组构（fabric）这个广义术语，将结构、构造特征合并在这个术语中。工程地质学对结构、构造的理解：结构是指岩土组成单元（矿物颗粒、集粒、玻璃质等）的大小、形状、表面特征、数量关系，而特别重视相互间的联结特征；构造是指岩土结构单元的空间相对位置和分布标志的总和。显然，前述的岩体结构是一个广义的术语。岩体中的软弱结构面，常常成为影响岩体稳定的控制面。岩体的变形、破坏机制以及物理力学性质主要受裂隙、软弱结构面及其组合形式的控制，例如实际上不透水的厚层泥岩、花岗岩等岩石组成的岩体，常因裂隙性表现为完全透水，其渗透系数可达 10 m/d 以上，有的裂隙玄武岩渗透系数可达 100 m/d 裂隙灰岩为 $10\sim 20\text{ m/d}$ 。强透水性的砂土层因存在粘土夹层在整体上可能只有很低的透水性。在不连续面附近往往导致应力集中；不同地质界面的存在，导致弹性波速明显降低、波幅显著衰减的结果。图 1-1 为花岗岩块、裂隙发育花岗岩体和断层破碎带试件的应力—应变图。从图 1-1 看出裂隙对岩体破坏、变形的影响非常显著，岩块和岩体的变形、强度特性有很大的差别。岩体还具有以下特点：岩体为一种多介质的裂隙体，主要由固相和液相两种介质所组成，其中液相水的压力作用与岩体的物理化学反应、溶解岩石将降低岩体的强度和稳定性。岩体（特别是软弱岩体）还具有蠕变性，在应力作用下，微观与宏观结构的滑移、位错、形变随时间而变化。岩体本身还存在复杂的天然应力场，不仅存在着自重应力，而且还存在着由于构造运动和风化剥蚀作用引起的构造应力、地球内应力引起的封闭应力等。

要明确岩块和岩体的区别，重视结构面或不连续面和岩体结构自然、地质特征的研究，这是近数十年来，通过无数工程实例成败的总结才认识到的。岩石是一个泛称的名词，涵义比较笼统，岩块或称岩石材料、石料，其变形和强度性质取决于岩块本身矿物成分和岩性，而岩体的变形强度性质取决于结构面和岩体结构的工程地质特性。这也是国际上岩石力学奥地利学派（地质力学学派）的基本观点之一。L.

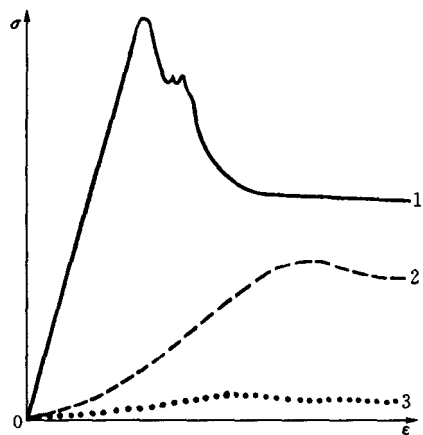


图 1-1 一定围压状态下岩块、岩体、断层破碎带试件的应力—应变示意图
1—花岗岩块 2—裂隙发育的花岗岩体试件；
3—花岗岩体中断层破碎带试件

米勒(Müller)在总结岩体力学性质时提到：“岩体力学特性，尤其是它的强度，主要取决于单元岩块之间接触面上的强度；对于岩体变形，主要或者可说90%~95%的变形产生于节理(裂隙)，而不是单元岩块的变形；岩体是由固体和液体两相介质所组成，其中液相的压力作用，能够改变岩体的强度和变形特性。这个观点对岩体工程地质分析是十分重要的，大大促进了工程地质与岩石力学、岩体工程更密切的联系。

岩土的物理力学性质已经在土质学和土力学、岩石力学中作了详细的叙述，本章主要讨论岩土的地质结构特征及其对工程地质性质的影响。

第二节 结构面的主要类型及其自然特征

由于各个地区岩体形成的历史不同，所经历的构造变形就有差异，即使在同一构造变动过程中，由于所处的部位不同，组成物质成分的差异，其褶皱、断裂的发展也不一致。岩体的生成、发展和演化历史的不同，使结构面的特性和空间组合以及结构体的性质和形态千变万化，岩体的结构特性也就不同。所以要正确认识结构面的力学效应，首先要对结构面的成因及其自然特性进行研究。

一、结构面的成因类型

按地质成因，可以分为原生结构面、构造结构面及次生结构面三种。

(一) 原生结构面

原生结构面是成岩过程中形成的地质界面。自然界三种基本成因的岩类：沉积岩、火成岩和变质岩，由于物质来源、动力条件、生成环境和形成方式都极不相同，因而它们的原生结构面各具有不同的特点。

1. 沉积结构面

沉积结构面是在沉积和成岩过程中所形成的物质分界面，包括反映沉积间歇性的层面和层理，也包括显示沉积间断的不整合面和假整合面，还包括由于岩性变化所形成的原生软弱夹层等。一般延展性很强，其产状随岩层变位而变化，其特性随岩石性质、岩层厚度、水文地质条件以及风化条件而有所不同。但陆相及滨海相沉积岩层往往易尖灭而形成透镜体、扁豆体、使原生层面呈波浪起伏。工程实践中，最具有实际意义的是原生软弱夹层。例如坚硬石灰岩中夹薄层的泥灰岩、页岩等，坚硬的砂、砾岩中夹薄层的页岩、粘土岩等，在后期构造运动和地下水作用下易次生泥化。沉积间断面，它可以是造山运动的标志即不整合面；也可以是显示升降运动的假整合面。它们有一个共同的特点，即在沉积历史中都经历了一段漫长的风化剥蚀过程，所以不但是起伏不平，而且有古风化的残积物，是一个形态多变的软弱带。沿这些结构面经常有地下水的赋存和运行，它往往起了相对阻水层的作用，因此它的存在不仅构成地下水的富集，而且导致自身的泥化，对岩体稳定是十分不利的。

2. 火成结构面

火成结构面是岩浆侵入、喷溢、冷凝过程中所形成的结构面，包括大型岩浆岩体边缘的流动构造面(流层、流线)，侵入岩体与围岩的接触界面、软弱的蚀变带、挤压破碎带；也包括岩浆岩体中冷凝的原生节理和岩浆间歇性喷溢所形成的软弱结构面等。

岩浆岩体中这些结构面的工程地质性质是很不一样的。流层、流线在新鲜岩体中不易剥开，但一经风化便形成易于剥离或脱落的弱面。冷凝原生节理常常是平行及垂直接触面的、平缓及高倾角的张裂隙。在浅成侵入岩体、火山岩体中还发育有特殊的节理，例如玄武质熔岩、流纹质熔结凝灰岩中的柱状节理，辉绿岩中的球状节理等等。这些结构面往往形成裂隙水的通道或被次生的泥质物所充填。

岩浆岩体与围岩的接触面，一种是混融接触面，接触带岩体致密，工程地质条件良好；另一种是裂隙接触带，工程地质性质较差；再一种是接触破碎带，构成软弱结构面。接触面的形态、产状、规模及性质均与围岩和侵入岩体的性质有关。接触变质不仅可发生在围岩中即外接触变质，也可发生在侵入体边缘部位中即内接触变质。外接触变质带的厚度与性质亦随围岩的性质和侵入岩体的规模、性质而变化。一般泥质或泥灰质岩石对接触变质极其敏感，其厚度也较大；花岗岩侵入体，其围岩的变质程度要比基性、超基性岩深，变质带厚度也较大。对于绢云母—绿泥石片岩带，不仅片理、揉曲发育，而且常易在地下水作用下泥化，对工程威胁甚大。而接触带混合岩化，则往往是有利的。因此，对岩浆岩体的围岩接触带或蚀变质要作深入的研究。我国二滩水电站坝址，右岸二层玄武岩中，由于印支期正长岩体侵入活动及构造运动的综合作用，而产生围岩蚀变带，形成两条宽 10~25 m 的纤闪石化玄武岩带，该带裂隙密集，岩体完整性极差，结构不均一，隐裂隙发育，小破碎带及错动面平均 0.34 条/m，裂隙普遍充填滑石、绿泥石等软弱矿物，组成软弱带，是控制岩体变形和稳定的主要因素。如微风化的玄武岩，变形模量 $E_0 = 35 \times 10^3$ MPa，抗剪断强度 $\text{tg}\phi' = 1.73$ ， $C' = 4$ MPa；而纤闪石化玄武岩 $E_0 = 0.8 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^3$ MPa， $\text{tg}\phi' = 0.58$ ， $C' = 0.6$ MPa。

3. 变质结构面

变质结构面是在区域变质作用中形成的结构面，可分为变余结构面和变成结构面两大类。变余结构面主要指的是在变质程度较浅的层状岩石中残留下来的原岩的层面，但由于经受变质作用的结果，在层面上往往有片状矿物（如绢云母、绿泥石、滑石等）不同程度地集中并呈定向排列。变成结构面或称重结晶结构面主要包括千枚状构造、片理和片麻理，可总称之为结晶片理，是由于发生了深度的重结晶作用和变质结晶作用改变了原岩层理的面貌，使片状和柱状矿物大量集中并高度定向排列而形成的变质结构面。在变质岩中所夹的薄层云母片岩、绿泥石片岩及滑石片岩等，岩性软弱，片理易揉曲，易于风化并在地下水作用下泥化，往往构成软弱结构面。陕西安康水电站，坝基岩性为震旦系千枚岩（ Z_0 ），由于结构面揉曲，两岸产生倾倒变形及在施工期发生 10 多处坍塌。

（二）构造结构面

由于地壳运动，在构造应力作用下岩体形成的破裂面或破碎带，称为构造结构面，包括断层、层间错动带、节理、裂隙、劈理及其他小型的构造动力结构面。构造结构面属于成岩后形成的次生结构面的一种。

1. 断层

一般指位移显著的构造结构面，其规模相差十分悬殊，有的深切岩石圈甚至上地幔；有的仅限于地壳表层甚至地表数十米。因此，根据穿切深度，可分为岩石圈断裂、地壳断裂、基底断裂、盖层断裂等。研究构造断裂和断层破碎带的工程地质特征是一个极为重要的课

题。断层从地质力学的观点，按力学性质分为压性、张性、扭性、压扭性和张扭性五类，但纯压性的断层实际上是不存在的。因此，在实际分析中，可以分为张性（包括张扭）、扭性、压扭性断层三类。张性断层面多起伏不平，断裂带中一般为松散角砾岩块及岩粉碎屑。扭性断层面比较光滑平直，压扭性断层面则呈舒缓波状，断层带厚度不等，而破碎影响带较宽。在扭性和压扭性破碎带中，常存在断层泥、构造粘土岩、糜棱岩，断距大时还有角砾岩、压碎岩，还可以存在劈理带、褶皱扭曲带以及地下水强循环的浸染带等。

层间错动带是指岩层发生构造变动时，在派生力作用下使岩层面之间产生相对的位置和滑动的地带。这在褶皱岩层地区及大断层两侧，分布很普遍。使层面间形成碎屑状、片状或鳞片状物质，并在地下水作用下产生泥化现象，构成软弱结构面。

2. 节理

泛指没有位移或位移很小的构造破裂面。它无论沿走向延展，还是沿纵深发展的范围均是很有限制的，大者数十甚至上百米，小者不过数十厘米，其厚度一般小于数厘米，实际上是一个面或者是一条缝隙。有人把大型的无错动的不连续面称为节理，而将小型的称为裂隙、裂纹，但并没有一个明确的界线。节理形成的力学机制也不外乎剪切作用和张性破裂，有的平直光滑，有的波浪起伏，有的参差曲折而粗糙，有的面为擦痕镜面而附有各种泥质薄膜如高岭石、绿泥石、滑石等矿物组成的薄膜。由于岩体中节理发育程度的不同，就造成了岩体中工程地质特性差异的分段性。

3. 劈理

可分为流劈理、破劈理及滑劈理等类型，它影响着局部地段岩体的完整性及强度。劈理的宽度与岩性关系很大。泥岩及板岩劈理间距可小至 1~2 mm，而砂岩及石灰岩的劈理间距可达 5~10 cm。

关于岩体中破裂面对岩体力学性质的影响，K. 太沙基在 1936 年就开始认识到这个问题，但 20 世纪 60 年代以前，国际上很少注意。自 60 年代以来，随着岩体力学的发展，情况才完全改观。

（三）次生结构面

在地表条件下，由于外营力（如风化、卸荷、人工爆破和地下水作用等）的作用，在岩体中形成的结构面称为次生结构面，它包括风化裂隙、卸荷裂隙、次生夹泥层等。它们发育的特点呈无序状、不平整、不连续，并构成软弱结构面。

1. 风化裂隙

由风化作用形成的结构面，可以分为两类。第一类为单纯因温度变化导致岩体胀缩而产生的风化裂隙，分布范围主要限于风化壳以内，延伸较浅，规模较小，方向和产状都较紊乱。第二类则是沿原有结构面经风化而成，如原结构面为其他成因的节理、裂隙，经风化作用而形成风化裂隙；如原结构面为断层、岩脉或原生软弱夹层，经风化后形成风化软弱夹层或风化槽、风化囊，它们可以延展到岩体较深的部位。

2. 卸荷裂隙

河谷尤其是地壳急剧上升的高山峡谷地区的岩体受冲刷剥蚀，破坏了岩体中原始应力的平衡状态，导致岩体产生张性或剪性破裂而形成卸荷裂隙。垂直向卸荷形成了水平或近乎水平的卸荷裂隙；而在谷坡上因侧向卸荷而产生的裂隙则走向与河谷基本平行，直立或

略倾向河谷。在河谷两岸岩体应力状态，大致可分为三个区域，即应力松弛区（卸荷带）、应力集中区（应力强化带）和初始应力区（应力不变带），如图 1-2 所示。在河谷谷坡和谷底，侵蚀切割作用使岩体初始应力得到释放，表面应力降低，形成松弛区。在这一区域内卸荷裂隙发育。应力集中区是在河谷临空面形成后产生应力重分布而形成的，剖面形状与河谷剖面一致。由应力集中区向谷坡和谷底岩体深部逐渐转为初始应力区，应力平稳不变。卸荷带的宽度或深度可达数十米至上百米，例如雅砻江二滩水电站，坡高 500 m，卸荷带宽达 50~100 m；岷江渔子溪水电站，坡高 500 m，卸荷带宽达 70~100 m 新安江水电站的为 30 m。卸荷裂隙张开度可达十几到几十厘米。例如，西洱河一级水电站厂区施工，开挖出十几条卸荷裂隙，宽达 5~20 cm，最宽达 50 cm，发育深度可达 70 m。在高地应力区，坝基坑开挖过程中还可以因卸荷而在坡脚一带形成平缓的剪裂面，例如葛洲坝工程大型机巢，开挖初期沿剪裂面滑移速度达 2 cm/月。

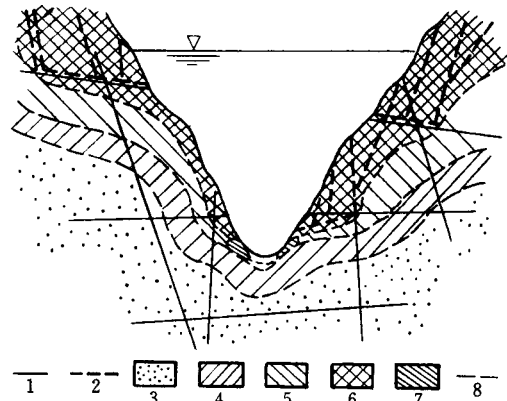


图 1-2 河谷岩体应力状态图

1—构造断裂；2—卸荷裂隙；3—初始应力区；
4—应力集中区；5—应力松弛区；6—地表张力区；7—坡脚应力集中区；8—分界线

3. 次生夹泥层

主要是由流水或重力搬运的粘土物质沉积充填在已有裂隙中而形成的。

另外，在内、外动力综合作用下形成的泥化软弱夹层，在工程地质实践中十分重要，将在第二章作专门的阐述。

二、结构面的分级

对结构面的规模及其对岩体稳定性所起作用的分级研究，有助于在实际工作中能区分主次，在不同问题中，抓住起主导作用的结构面，使对具体的岩体稳定问题，得到正确的认识。结构面按规模一般可分为五级：

I 级结构面：延展几公里到几十公里以上，深度至少切穿一个构造层，破碎带宽数十米到数十米以上的大断层或区域性大断裂，对区域构造起控制作用。

II 级结构面：延展数百米到数千米；延深数百米以上，破碎带宽度数米到几厘米的断层、层间错动带、接触破碎带及风化夹层等，对山体 and 岩体稳定起控制作用。

III 级结构面：延展在百米范围以内的断层、挤压和接触破碎带、风化夹层，其宽度在 1 m 或 1 m 以内；也包括宽度在数十厘米以内，走向和纵深延伸断续的原生软弱夹层、层间错动带等。它们直接影响工程具体部位岩体的稳定。

IV 级结构面：延展短，一般在数米至数十米范围内，未错动，不夹泥，如节理、层面、劈理及次生裂隙等。

V 级结构面：延展性差，无厚度之别，分布随机，为数甚多的细小结构面，主要包括隐节理、隐微裂隙、劈理、不发育的片理、线理、微层理等。

结构面的分级是一个相对的概念，各个部门和各个学者对分级的规定和认识不很统一。结构面的分级实际上还必须考虑到岩土工程的规模和类型。

三、结构面的自然特征及其定量描述方法

结构面复杂的成因，加上后期又经历了不同性质、不同时期构造运动的改造和表生演化，造成了结构面自然特征的千差万别。例如，有些沉积结构面，在后期构造运动中产生层间扭曲和错动，使层间结合力降低；有的结构面由于后期岩浆注入或淋滤作用所形成的石英、方解石脉网络等，使其结合力有所增加；而有些裂隙经地下水的溶蚀作用而加宽，或充以气和水，或充填粘土物质，甚至使其结合力完全丧失。因此，在工程地质实践中，对岩体结构面的现状亦即自然特征的研究是十分重要的。结构面的自然特征，国际岩石力学学会实验室和现场试验标准化委员会在 1977 年提出了《岩体不连续面定量描述的建议方法》(CFT 第 4 号文件)规定从 10 个方面进行研究：

(一) 方位

方位即结构面在空间的分布状态，用倾向和倾角表示。结构面相对于工程结构的方位，在很大程度上决定着能否存在不稳定条件和过度变形的发展，对建筑物的安危起重要作用。结构面的方位（即产状）还控制着岩块和岩体的破坏机制，影响到岩块和岩体的变形和强度性质。结构面的方位一般利用罗盘或测斜仪测量。当结构面的规模较大，或者需要测量的结构面的数量较多，或者结构面在磁异常区而不宜使用磁针时，可以采用摄影测量法。所测得的大量结果，可以用玫瑰花图或极点等密图等形式表示出来。

表 1-1 结构面间距的描述

描述	间距 (mm)
极窄的	<20
很窄的	20~60
窄的	60~200
中等的	200~600
宽的	600~2000
很宽的	2000~6000
极宽的	>6000

(二) 间距

间距指相邻结构面之间的垂直距离，通常是指一个节理组的平均的或最常见的间距。结构面间距是反映岩体完整程度和岩石块体大小的重要指标。根据所测得的结构面的平均间距，可将岩体按表 1-1 进行描述。

岩体的完整性，在生产实践中还常采用表征结构面密集程度的裂隙率来表示。

(1) 线裂隙率（又称线密度或节理频率） K_l （条/m）：指沿测线方向单位长度上结构面或裂隙的条数。如结构面的平均间距为 s (m)，则

$$K_l = \frac{1}{s} \quad (1-1)$$

(2) 面裂隙率（又称结构面面积密度） K_a ：指单位测量面积中裂隙面积所占的百分率，表示为

$$K_a = \frac{\text{各裂隙面积 (长度} \times \text{宽度) 之和}}{\text{所测量的岩体面积}} \times 100\% \quad (1-2)$$

(3) 体积裂隙率（ K_v ）：即单位测量体积中裂隙体积所占的百分率，可表示为

$$K_v = \frac{\text{各个裂隙体积 (长度} \times \text{宽度} \times \text{厚度) 之和}}{\text{所测量的岩体体积}} \times 100\% \quad (1-3)$$

(三) 延续性

延续性表征结构面的展布范围和延伸长度。它是岩体很重要的特性之一。然而，在野外进行精确的定量是相当困难的。因为，岩体的露头往往比延续的结构面面积或长度小，这时真实的延续性就只能进行估计；即使有许多岩体的露头，但在野外测量结果中所包含的困难和不确定因素也是相当多的。对岩石边坡和坝基，要尽力估计从产状上看来对稳定性不利的结构面的延续性，特别要注意延续到相邻岩块下面而不是终止于坚实岩石或其它构造面的延续程度。对于隧道工程，如果存在平滑的粘土充填的结构面或有两个以上的结构面组，即使结构面只延续跨过有限的岩块，也会发生局部的破坏。

表 1-2 结构面延续性描述

描 述	延续长度 (m)
延续性很差的	<1
延续性差的	1~3
中等延续性的	3~10
延续性好的	10~30
延续性很好的	>30

在研究岩体的延续性时，考虑结构面延伸度与岩体工程规模的相对大小更为重要。例如，在隧道或地下洞室的围岩中，如果存在延续 5~10 m 范围的平缓的结构面，那对于稳定性就可能具有很大的意义。然而，这样规模的结构面，对于 100 m 高的岩坡或大坝坝基则往往并不重要。在水利电力工程地质地下工程围岩勘察中，延伸长度大于 3 m 或 1/3 的隧洞直径的结构面，便要给予充分注意。

根据各组结构面所测得的延续长度，试验标准化委员会建议对延续性作如表 1-2 的描述。我国水利水电工程实践分为三级：延伸长度大于 10 m，延续性长，3~10 m，延续性中，小于 3 m，延续性短。

(四) 粗糙度

粗糙度指结构面侧壁的粗糙程度，用起伏度和起伏差来表征。结构面的粗糙度对于研究岩体的抗剪强度和评价岩体的剪胀有重要意义。起伏度常用起伏角 i 来表示；波状起伏的结构面则以波峰与波谷之间的距离表示起伏差 h (单位 cm)。在野外填图的初始阶段 (即可行性研究阶段) 在小规模 (几厘米) 和中等规模 (几米) 观测的基础上，可将结构面分为台阶形的、波浪形的和平直形的三种典型剖面。每种剖面又可分为粗糙的、平坦的和光滑的三种类型 如图 1-3 所示。

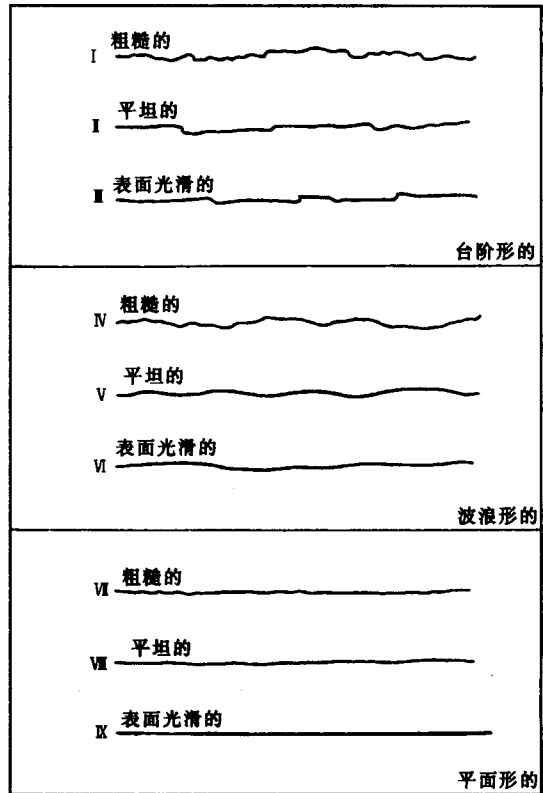


图 1-3 表示结构面粗糙度的典型剖面及建议术语 (每个剖面长度变化范围 1~10m)

(五) 结构面侧壁强度

结构面侧壁的抗压强度直接影响到岩体的抗剪强度和变形性质。靠近地表的侧壁岩体常易遭受风化，而热液作用则使岩体产生蚀变。由于风化或蚀变，侧壁强度将远较深部的新鲜岩块强度为低。因此，在研究侧壁强度时，必须同时描述岩石类型和岩体风化或蚀变的程度。在野外工程地质测绘时，可用施密特回弹仪或点荷载试验仪等轻便仪器来测定侧壁强度。

(六) 张开度

裂缝张开度是指结构面相邻岩壁间的垂直距离。如果岩壁间具有粘土或其他充填物则称为充填结构面的宽度。结构面的张开度通常不大，一般小于 1 mm。因此除了钻孔和掘进机钻的隧道以外，小的张开度用肉眼观察是很困难的，并易与爆破裂缝或风化裂隙相混淆。在下述情况下，可能见到颇大的张开度：波状的或具有颇高粗糙度的裂隙发生剪切位移以后；张性裂隙，特别是在河谷侵蚀或冰川后退而发生的拉伸作用下形成的张性裂隙；已有裂隙经冲刷溶蚀而被改造了的裂隙。

描述张开度可采用表 1-3 所列的分级。我国水利水电工程实践分为三级：张开度小于 0.5 mm，闭合的；0.5~5 mm，微张的；大于 5 mm，张开的。

表 1-3 结构面的张开度

描 述		张开度 (mm)
闭合结构面	很紧密的	<0.1
	紧密的	0.1~0.25
	不紧密的	0.25~0.50
裂开结构面	窄的	0.50~2.5
	中等宽度的	2.5~10
	宽的	>10
张开结构面	很宽的	10~100
	极宽的	100~1000
	洞穴式的	>1000

(七) 充填物

充填物是指充填于结构面相邻岩壁间的物质。这些物质一般比母岩软弱。典型的充填物有砂、粉土、粘土、角砾、断层泥、糜棱岩和方解石、石英、石膏等化学沉淀物质。碎屑物质仅起机械填充作用，而充填在裂隙中的方解石脉、石英脉等则对结构面起胶结愈合作用。结构面有时可被外来物质全部填充，有时仅被局部填充。全充填结构面的力学强度主要取决于充填物的性质，而局部充填结构面，其侧壁特征将起不同程度的作用。

在充填物的充填方式上还有一种敷膜式充填，即充填物仅附着在侧壁上呈薄膜状，常见的物质有方解石或石膏。尽管它们有时很薄，但对侧壁的力学性能有颇大的影响。对于粘土质充填物，还应注意研究粘土矿物成分、颗粒组成、含水量、渗透系数、固结程度以及结构曾否遭受过剪切破坏等。

在充填物较薄的情况下，还应测量结构面粗糙度的平均幅度（起伏差）和充填物的平均厚度。在泥化软弱夹层的研究中，求出充填物厚度 t 与起伏差 h 之比，对评价软弱夹层的抗剪强度和变形性质是很有价值的。 $t < h$ 时，结构面力学性质受侧壁特征控制 $t > h$ 时，充填物性质起主导作用。对复杂充填结构面，如剪切带、压碎带、断层带、岩脉和岩性接触面，可绘制野外素描。这样可把两壁岩体的破裂程度或蚀变状况清楚地表达出来。量测尽可能准确到 10%。

(八) 渗流

渗流指在单个结构面或整个岩体中所见到的水流情况。结构面是岩体中地下水流通的

主要通道。研究结构面中是否存在渗流和渗流量的多少，对于评价结构面的力学性质，研究岩体中有效应力的改变以及预测岩体的稳定性和施工的困难程度都有重要的意义。我国在地下工程围岩稳定性评价中，将渗流分级如表 1-4 所示。

表 1-4 结构面渗流分级

活动状态	干燥	渗水	滴水	流水	涌水
水量 (L/min/10m 洞长)		<10	10~25	25~125	>125
压力水头 (m)			<10	10~100	>100

(九) 节理组数

节理组数指组成交叉节理系统的节理组数目。根据结构面分布的规律性，可将其划分为有系统的和随机的两大类。原生结构面和某些次生结构面（如构造结构面、卸荷裂隙等）分布规律性较强，都属于前者。按照产状，可将其分组进行研究。节理组数有可能是岩坡稳定性的支配因素。在地下洞室围岩中，三组或三组以上节理相互交叉常常构成三维的块状结构。它比少于三组节理的岩体具有更大的活动性。例如，只含有一组窄间距节理的薄层状千枚岩可能与三组宽间距节理的块状花岗岩具有同等好的稳定条件。在隧道中坍塌总量通常明显地与节理组数有关。

我国水利水电工程地质勘察部门常按节理（裂隙）的组数，描述结构面的发育程度。一般分为四个等级：

(1) 不发育：有一或二组规则节理，一组时间距多大于 1 m，二组时间距多大于 2 m；节理延伸长度小于 3 m，多闭合，无充填。

(2) 较发育：有二或三组规则节理和少数不规则节理，一组时间距多为 0.6~1 m，二三组时间距多为 1~2 m；一般延伸长度小于 10 m，多闭合，无充填或有方解石、长英质细脉充填，个别张开有泥膜或岩粉、碎屑充填。

(3) 发育：一般规则节理多于三组和较多不规则节理，延伸长短不匀，多数延伸长度大于 10 m；间距一二组时为 0.2~0.4 m，三组以上时间距多为 0.4~0.6 m，节理面风化者多张开夹泥。

(4) 很发育 规则节理多于三组，间距多小于 0.2 m，并有很多不规则节理，杂乱无章，节理多张开夹泥，并有延伸较长的大裂隙。

(十) 块体大小

由数组结构面切割而成的岩石块体，在岩体结构研究中，称为结构体。严格说来，结构体已不属于结构面的特征，而是由结构面的某些特征（如间距、延续性、节理组数等）所决定的岩体结构特征之一，根据结构体的大小可分为断块体、山体、块体、岩块四级。根据结构体的大小及形状，可将岩体分为下列六种类型进行描述：①巨块状：几乎没有节理或间距极宽；②块状：各个方向尺寸近似相等；③不规则状：岩块大小及形状变化甚大；④板状；⑤柱状；⑥碎裂状：节理发育，碎裂成“糖块状”（图 1-4）。

定量表示块体大小的指标，A. 帕尔姆斯特拉姆（Palmstram）建议用体积节理数 J_v （Volumetric joint count）表示，定义为单位岩体体积内通过的总节理（结构面）数（节理