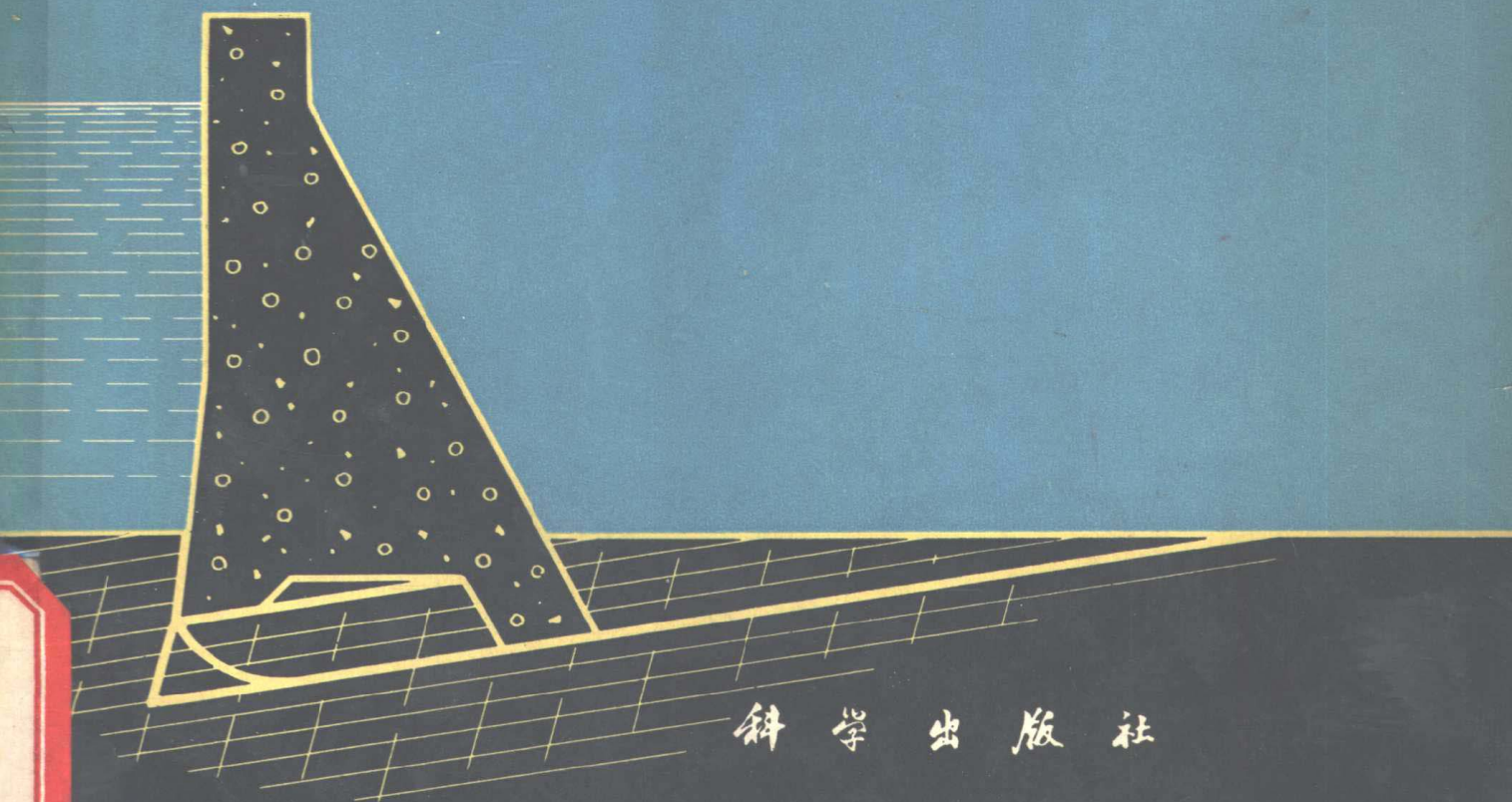


水文地质工程地质问题

谷德振等著



科学出版社

內 容 簡 介

本文集乃中国科学院地质研究所第十一室近年来的部分研究成果，共刊载论文五篇，主要内容分三个方面：

1. 用地质力学的理论与方法，以我国水利工程建设实例，进行地质构造分析，探索它与建筑物有关的岩体稳定性。对岩体结构及其工程地质性质形成的地质历史过程的研究作了尝试。
2. 阐述了水的混合作用，对了解地区水文地质条件颇有意义。
3. 对依据潜水位动态预测资料计算含水层的水文地质参数及渗入补给的理论和方法作了叙述。

本书可供地质、地理及水利工程工作者从事研究和实际工作之参考。

水文地质工程地质问题

谷德振等著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街117号

北京市书刊出版业营业许可证出字第061号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1965年10月第一版 开本：787×1092 1/16

1965年10月第一次印刷 印张：8 插页：2

印数：0001—3,600 字数：168,000

统一书号：13031·2183

本社书号：3323·13—14

定价：[科七] 1.20元

目 录

水利工程建设中的地质构造问题·····	谷德振	1
构造体系的地质力学分析方法·····	李兴唐	27
岩体结构及其工程地质性质形成的地质历史过程·····	王思敬	46
水混合作用的研究在了解某矿区地下水形成问题中的意义·····	汪成民	65
根据潜水位动态观测资料计算含水层的水文地质参数及渗入补给·····	胡长麟	77

水利工程建設中的地質构造問題

谷 德 振

一、前 言

工程地质研究的对象,仅是地壳结构的表层部分,但它反映了地壳长期活动发展的结果。它是由不同大地构造单元组合而成的极其复杂的部分。每个大地构造单元都拥有各种各样的沉积建造和岩组岩系,由于它们的形成环境不同,岩相岩性也就有显著的变化,因而岩石组合就非常复杂。各种岩石都有各自独特的物理力学性质,所以从一个地质体或者岩体来看,岩性是不均一的,并具有同向异性及异向同性的特点。在地壳运动的发展过程中,所反映的构造体系、构造型式也就大不相同。但是它们都是在一定应力作用下的构造变形结果,所以在形成的机制方面应有一定的力学联系,在空间分布上彼此之间则保持着相互依存关系。所谓构造体系就是褶皱断裂及其有关的小型构造与隐微构造的綜合体。它们的存在制约着矿产的形成条件与分布规律,也影响着与工程建设有关的岩体稳定性。我们为了阐明矿产的成因、富集与分布规律以及开采条件,为了论证建筑物地区的水文地质和工程地质条件以及评价岩体的稳定性,都必须进行地质构造发展历史、构造体系或构造系统的形成过程与力学机制的研究。李四光教授所创始的地质力学,就是企图解决这些问题的基本理论与科学方法。现在各国的构造地质学家都向着这个方向努力。近些年来,工程地质学家、土力学家、岩体力学家亦在研究土体、岩体在受力情况下的应力状态、应力与应变关系、极限强度理论、破坏机制和破坏过程。所有这些研究成果,都有助于地质力学的发展。通过我们几年来的工作实践,深深感觉到采用这种观点及方法,来分析较小地区的地质构造问题,还是行之有效的,相信运用到区域构造的研究方面,也必然能收到同样的效果。

工程设计的主导思想就是要适用、经济而安全,重点是在安全原则之下求适用与经济,不但要求上部结构要坚实牢固,而下部结构即基础部分一定要稳妥可靠。基础岩体就是工程地质研究对象,它直接关系着上层建筑物的安全与经济问题。建国以来,随着国民经济的发展,我们国家兴建了很多大型工程。事实告诉我们,只有掌握了建筑物地区的工程地质条件和基础的工程地质特性,才可以选定合理的工程位置,保证施工的顺利进行,以及工程的经济合理与稳妥可靠。在水利水电工程方面,在不同的河流上曾修建了不同高度,不同型式的堤坝,如重力坝、宽缝重力坝、大头坝、连拱坝、重力拱坝等,也开凿了

许多大型渠道等。在铁路工程方面,修建了许多盘山铁道、隧洞,也修建了横渡大江大河的桥梁工程。所有这些宏伟的艰巨工程对基础及有关的岩体的要求都是很高的。由于摸清了基岩的工程地质条件及存在的地质问题,在施工进度方面创造了非常迅速的效应,现在都在安全的运转,给工农业的发展开创了良好的条件。可是前几年由于对工程地质的重视不够,认识不足,以及缺乏经验,我们确实走了不少弯路,给国家也造成了一些损失。譬如个别水库,在施工过程中曾三度移动坝轴线;个别水库,在基础开挖时发现顺河断层曾中途停工研究;个别水库建成后,曾因断层而遭致绕坝渗漏;个别水库中,蓄水后会沿一个断裂面而发生大滑坡体;个别坝址曾遇到伴随逆断层的横断层组,而造成基岩的支离破碎;个别导流隧洞,在施工时会遇到沿断层面而发生塌顶事故;尚有个别水库当蓄水后,曾发生频繁的地震;在通往山区的铁道沿线,经常遇到一系列的物理地质现象,如崩塌、座落、滑坡等。通过这些实例,可以看出工程地质问题是十分复杂的,其中最突出的也是比较难以解决的就是地质构造问题。它不但直接危害工程,尚给风化、喀斯特等造成了有利条件。由于地质构造破坏了岩体的完整性,显然这种结构面就控制了岩体的稳定性。所以在论证岩体稳定性时,首先要确定岩体中构造断裂的特性和分布规律及其与工程建设的相互关系。为了解决这个问题,我们不但要用地质力学的方法去进行地质构造分析,同样要用这种方法探索与建筑物有关岩体的稳定性分析。

二、岩体变形和破裂的基本规律

构造变形过程就是岩体内部应力——应变关系随着时间进程的具体表现。当岩体受力之后,由于内部应力的促使,岩体则发生变形,变形过程是循序渐变的(图1)。根据应力状态可分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段及破裂阶段(图2)。在弹性阶段的变形为可逆变形,是符合虎克定律的。其余阶段的变形为不可逆的变形或称永久变形。弹性变形

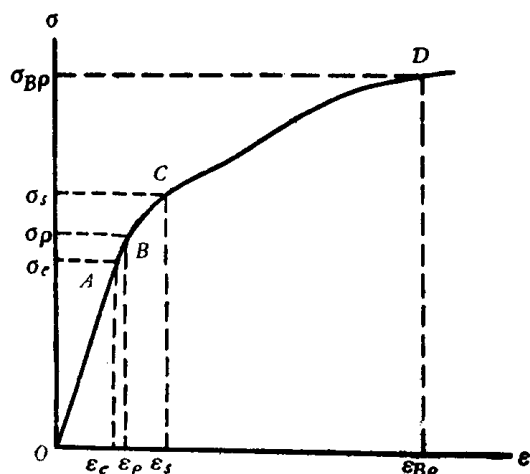


图1 弹性-塑性材料的应力-应变图的一般形式

A——弹性极限 σ_e ; B——比例极限 σ_p ;
C——流动极限 σ_s ; D——强度极限 σ_{BP} 。

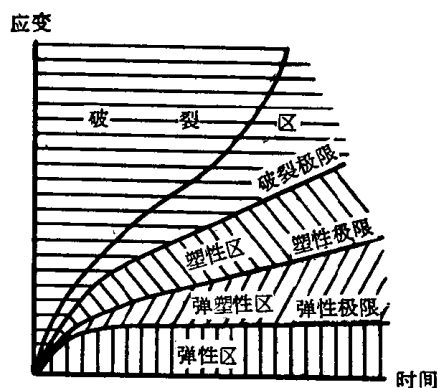


图2 应变-时间关系图(表示不同变形区间)
(L. U. 狄塞特: 1956, 构造地质学)

和永久变形二者之和为物体的总变形。在永久变形阶段，曾有过不同的变形——强度理论，如最大正应力理论及最大应变理论。

最大正应力理论，即物体受力后，不管应力状态如何复杂，当任一方向的正应力达到简单拉伸或压缩情况发生破坏的数值时，物体即被破坏。它未考虑比最大主应力小的其余二个主应力。这个理论只适于脆性材料而不适于塑性材料，即变形过程中屈服现象不能解释。通过有侧压的实验结果，证明物体破坏时比简单压缩时所受的应力大很多倍。最大应变理论，即物体受力后，不管应力状态如何复杂，当任一方向的相对伸长或缩短达到简单拉伸或压缩的破坏值时，物体即被破坏。依此则最大应变即表示最危险的相对变形，就不应该大于简单拉伸或压缩时的许可相对变形。通过实验这种结果未被证实，相反的还有一些矛盾。上述理论都不符合实际情况，随后就提出了最大剪应力理论，即物体受力后，不管应力状态如何复杂，当剪切应力达到简单拉伸或压缩情况下破坏时的剪切应力数值时，物体即被破坏。依此，当最大与最小两主应力之差达到极限值时，物体即进入危险状态。莫尔把这个强度理论经过改善提高，使其适用于在拉伸主应力不等于压缩主应力场合的强度理论。通过实验证明这是比较接近实际的。

土岩三轴实验就是研究三维应力状态下，材料的强度特性与变形破坏规律。当物体受力后，从物体內任一剪损面上的一点的应力平衡条件，可以得出剪应力、法向应力与主应力的关系方程式（图3）。

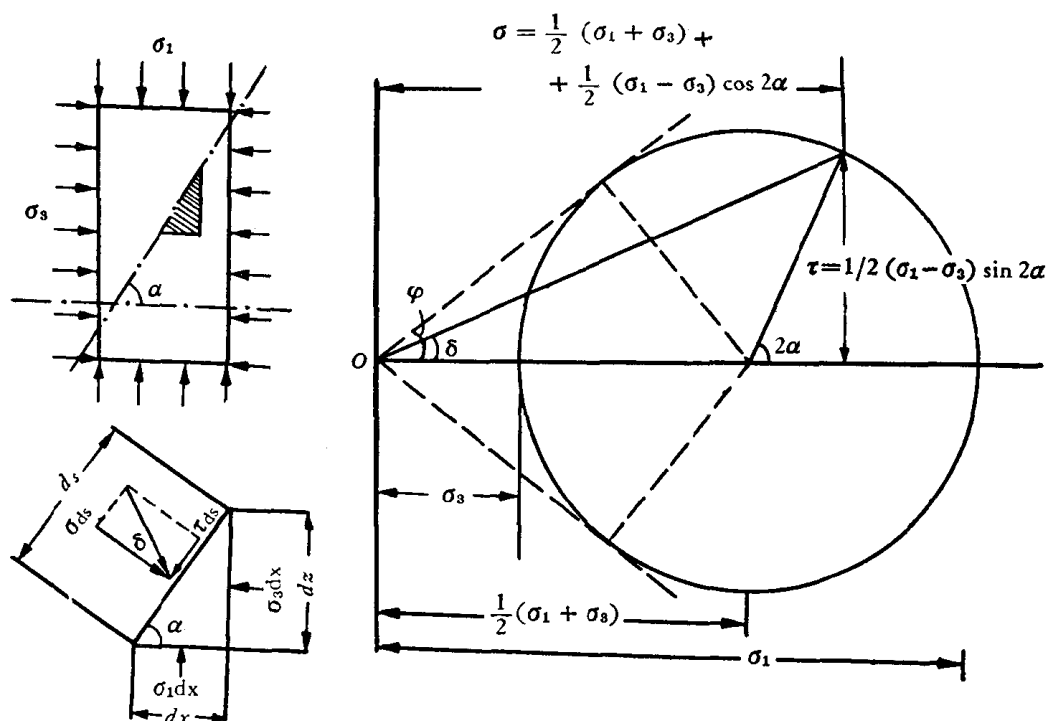


图3 物体內任意一点法应力、剪应力与主应力之间的关系

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha \\ \tau &= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (A)$$

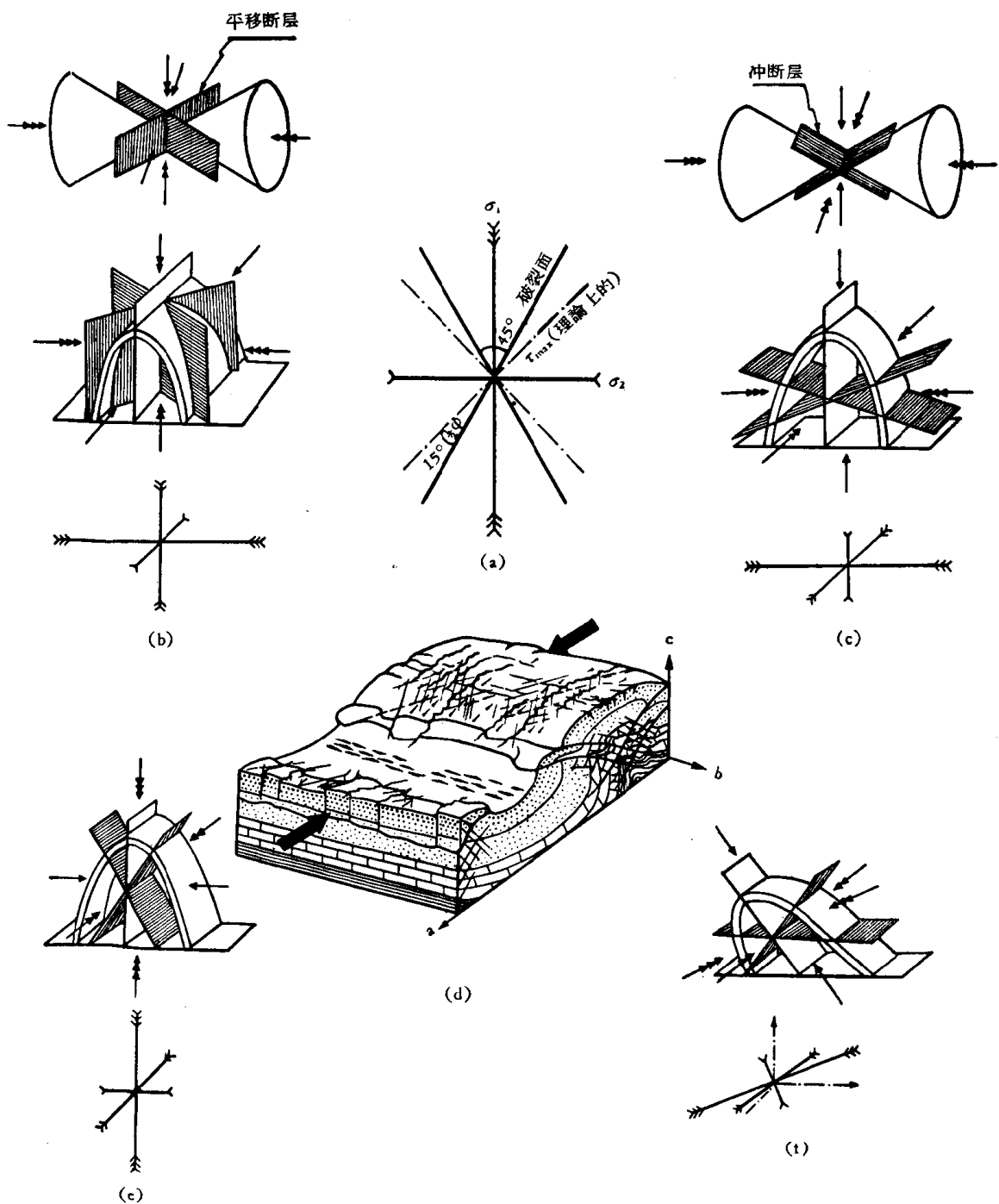


图 4 之一

式中 σ ——法向应力； τ ——剪应力； σ_1 ——最大主应力； σ_3 ——最小主应力； α ——剪切面与最大主应力面的交角。

公式 (A) 平方后可写成

$$\left. \begin{aligned} \left[\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right]^2 &= \frac{1}{4}(\sigma_1 - \sigma_3)^2 \cos^2 2\alpha \\ \tau^2 &= \frac{1}{4}(\sigma_1 - \sigma_3)^2 \sin^2 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (B)$$

把公式 (B) 中二式相加, 即得

构造现象	图例	南北向 压力时的 产状	各方向表现形态			描 述	应力状态
			ab 面	ac 面	bc 面		
1. 皱 褶		走向 EW	σ_1 σ_3	—	—	只在表面出现, 向斜轴部密集	$\sigma_{B0} > \sigma_1 > \sigma_3$
2. 擦痕		走向 SN	σ_1 σ_3	—	—	因层面间相对滑动产生	
3. 平面 X 节理(剪切)		走向 NE NW	X 形	垂直或 倾角很陡	垂直或 倾角很陡	在 ab 面上, X 的锐角对 σ_1 , 钝角对 σ_3 , σ_2 为两节理面之交线, 此交线垂直。沿此节理产生平移断层。	
4. 侧面 X 节理(剪切)		走向 EW 倾向 SN 倾角 $\angle 45^\circ$	与 b 轴 平行	X 形	与层面 平行或 倾角很缓	在 ac 面上, X 的锐角对 σ_1 , 钝角对 σ_3 , σ_2 为两节理面之交线, 此交线水平。褶皱翼部最发育, 且有一组发育最好, 切断另一组, 成冲断层。	
5. 横节理(张性) ac 节理		走向 SN	平行 σ_1	—	垂直或 倾角很陡	1) 牵就平面 X 剪切节理发育成锯齿状; 2) 纯系张力产生的张节理。沿此节理产生许多横断层(或正断层)呈横向的阶梯地壑地垒形状	$\sigma_1 \gg \sigma_3$
6. 纵节理(张性) bc 节理		走向 EW	与 σ_1 垂	垂直或 倾角很陡	—	当 σ_1 继续加大, 背斜顶部产生与 σ_1 方向相反的局部张应力而造成。沿此节理亦可产生纵向的地壑、地垒, 但规模远比横向为小。	

图 4 之 二

图 4 褶皱断裂发育示意图及其说明

$$\left[\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right]^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 \quad (C)$$

公式 (C) 是一个圆的方程式, 此即所谓的莫尔应力圆。这个圆上的任一点都是剪面上法向应力与剪应力的轨迹, 而法向应力与剪应力是随着最大主应力与最小主应力的改变而变化的。莫尔以图解法找出它们彼此之间的相互关系。根据上述变形和强度理论的发展历史, 通过土岩力学的实验研究结果, 我们从中可以获得岩体变形和破坏的一些基本规律。

1. 当物体受力后, 在三个主应力不等的情况下, 物体则发生椭球变形成三轴不等的椭球应变体, 最大主应力的方向 (相应于最小应变轴) 则发生压缩变形, 最小主应力的方向 (相应于最大应变轴) 则相应发生拉伸变形。在三个主应力相等的情况下, 物体则均匀缩小或均匀胀大。若三个主应力中的最小主应力和中间主应力相等时, 则为圆柱应变体, 在破裂时, 剪切面则为对顶的锥形。

2. 在三维应力状态下, 材料达到极限强度破坏时, 则出现一对共轭存在的剪切面, 最大主应力为其锐角平分线, 最小主应力为其钝角平分线。这个时候中间主应力则为一对剪切面的交线。在弹塑性变形阶段, 最大剪应力是最大主应力与最小主应力交角的平分线, 亦即 $\alpha = 45^\circ$ 。当剪切面与最大主应力面的交角大于 45° 时, 材料即将达到破裂阶段。

剪切面与最大主应力面的交角小于 45° 时,材料则处于塑性范畴。根据图解可以看出剪应力 $\left[\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha\right]$ 之最大值为 $2\alpha = 90^\circ$,即 $\alpha = 45^\circ$ 时。事实上当剪应力达最大值时,材料并不破坏,这主要取决于材料的内摩擦角,若内摩擦角等于零,剪应力达到最大值时,材料即破坏,这时剪切面与最大及最小主应力面均作 45° 之夹角。依此,我们可知一对X-节理,由于剪损面的摩擦力所致不可能互相垂直存在。

3. 从塑性阶段到破裂阶段,特别是材料达到极限强度而破裂时,物体内的应力状态是以压应力(最大主应力)、拉应力(最小主应力)和一对剪切应力同时存在的应力情况(图4-a)。彼此之间的关系是,压应力与拉应力互相垂直,它们都是一对剪应力的平分线,压应力是锐角平分线,拉应力是钝角平分线。

4. 在同一应力情况中同时存在着上述几种应力,它们的活动结果均可使岩体发生变形(图4d)。压应力仅促使岩体压缩变形,使岩石的组成颗粒从新组合排列,发生再结晶作用,并能产生压劈理及流劈理,不可能产生节理和断层。拉应力可使岩体伸长并产生张性节理及断层,往往形成地堑、地垒及阶梯式的构造型式。剪应力可使岩体扭歪变形并产生剪切节理与擦断层及冲断层,往往形成迭瓦式构造型式。所有这些节理及断层,在力学意义上是有着显著的不同,彼此都具有各自的特性,所以要研究地质构造,还应再深入研究这些基本理论和规律。

5. 物体受力后所经过的不同变形阶段,视物体材料性质的不同,变形的各个阶段则有长有短。从土岩力学实验材料,可以看出松软岩石,半坚硬岩石与坚硬岩石的变形是有显著差异的。一些坚硬的材料受力后,其塑性变形范畴很短,甚至看不出塑性变形而直接出现破裂,有些柔性韧性材料受力后,很清楚的反映出塑性变形,最后到达硬化破裂。所以不同岩性组成的岩体或地质体,虽然受同样的外力作用,构造形式可以大不相同,软弱岩层地区往往出现各种各样的褶皱及流动构造;而在坚硬块状岩石区,则呈现为各种各样的断裂及节理系统。虽然它们表现的构造形式不一,发育的强度不同,但彼此间确保持着一定的力学联系。所以我们分析一个地区的地质构造时,一定要掌握岩体变形特性和它的破坏规律。

三、褶皱断裂的发生和发展程序

褶皱、断裂是地壳运动时保存在地质体中的构造遗迹,是在一定外力作用下的岩体变形结果。可是自然界的构造运动已成历史无法再演,这些褶皱、断裂究竟是在什么样作用方式以及什么样强度的外力下所导致的结果?我们首先是抓住地质体中各种各样的构造形迹,研究它们的特性及彼此间的关系,然后进行模拟实验研究,推想自然界这些具体现象的发展过程和力学机制。纵然模拟实验有很大的局限性,但有些现象和规律还是接近相似的,这就有助于我们更深入的思考问题,并能指出在野外构造地质调查时应注意的问题。

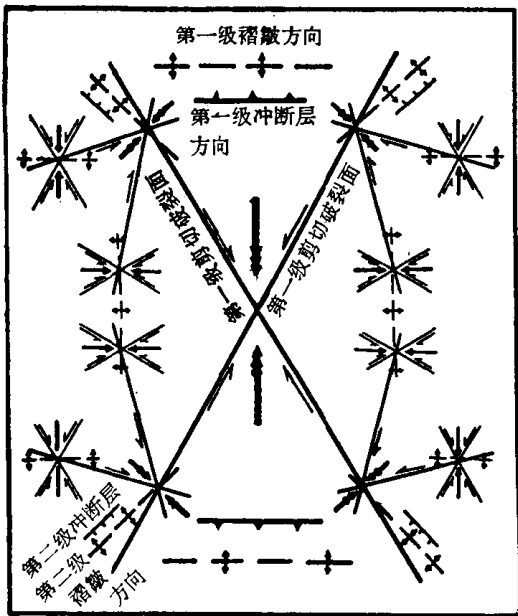
根据野外地质构造现象的调查研究与构造变形实验的初步资料,无论外力的作用方

式是拉伸、压缩、剪切、顶托或者弯曲，在变形过程中，总是使试样整体呈现显明的在某一方向发生压缩与在另一方向发生扩张。于试样的表面上首先出现由于压缩而出现一组小的皱折，它与压应力方向作垂直的定向排列，多分布在凹陷部位。与此同时，尚出现与压应力斜交的一对隐约条纹，然后显出吕德氏线，继而沿此破裂。破裂线与吕德氏线之间，吕德氏线与隐约条纹之间均保持极小的夹角。亦即破裂线并不完全吻合吕德氏线及隐约条纹而破裂。出现隐约条纹可能是剪应力的最大值，但试样并未开始破裂，而真正破裂时已超过了最大剪应力值。因之，一对破裂线作 X-型，不象一对吕德氏线及隐约条纹比较接近相互垂直。这时一对 X-型裂隙的锐角平分线显然为压应力的方向。当外力持续作用，整体试样则发生显明的隆起与拗陷。在隆起部位的表面上，往往沿已有的 X-型裂隙发展为参差不齐的张节理，其方向大致与压应力平行。同时在垂直隆起部位的侧面上，又出现一对倾向相反而且倾角较低的 X-型裂隙。当外力继续作用时，沿着这一对 X-型裂隙发生位移而形成与延伸方向平行的走向断层，即冲断层，往往构成一组倾斜相同的冲断层组，即迭瓦式构造。有时也构成倾斜相反的冲断层组，当变形强烈时，可使岩层发生倒转，沿断层面使老的岩层掩盖于新的岩层之上而成为逆掩断层。当冲断层或逆掩断层出现时，表面上的张裂隙及 X-裂隙往往发展为横断层及捩断层或平移断层。它们是伴随着冲断层而发展起来的，所以它们就分割了冲断层，分割的块体有大小之别，因而沿冲断面的位移量就有所不同。横断层相邻两侧的岩体的位移速度不同，沿横断层面常发生拖拉现象，其结果不但使冲断面被割切，有时还改变了冲断层的方位，所以在野外追踪冲断层时，往往很大的破碎带突然消失或被一方向不同的横断层或捩断层所代替。沿这些断层再追索时，就会再遇到被它们分割的冲断层破碎带。上述的捩断层大部是平移剪切性质。横断层是张性的，有时沿断层再作水平剪切移动，即所谓的张扭性结构面。我们经常称这种结构面为张性结果而具剪切现象。当横断层作上下位移时，可形成阶梯式、地堑式及地垒式的构造型式，都是张性断裂，它们与岩体的伸张方向是接近垂直的，亦即与褶皱轴成直交的。上述构造变形过程是在整体试样不易褶皱隆起时所出现的构造现象（图 4）。当试样受力后，容易褶皱隆起时，表面的 X-型裂隙就不发育，当变形达到一定程度时，在垂直隆起部位的侧面上，则先出现一对倾向相反倾角较低的 X-型裂隙，并沿此发展为走向断层或冲断层等。随着压缩隆起变形，这种 X-型的断裂面的倾角可变大或者变小。这个时候表面相应亦出现 X-裂隙及张裂隙，但仍不明显。沿着这种裂隙发展为横断层及捩断层的机会就更少，即使会有，其规模亦很小。垂直岩体延伸方向的剖面上的 X-型裂隙或冲断层，当压力方向与地平面接近平行时，它们的倾角差不多大小一样（图 4.e）。当压力方向与地平面相交一定的角度时，这一对 X-型的裂隙或断层之中的一组是高角度的，另一组则是低角度的（图 4.f）。不管这些断层的倾角如何变化，横断层及捩断层的倾角一般都是高角度的，甚而直立。当外力持续作用，岩体发生强烈隆起褶皱时，虽然压应力仍是水平的，可是在隆起部位顶托力则起着主导作用。此时的拉应力是垂直岩体原来延伸方向的，结果可以形成平行褶皱轴向的张性纵节理，沿着它们亦可发展为张性的断层，亦可

构成与褶皱平行的地垒、地堑及阶梯式的构造型式,从发生序次上则是比较晚的,规模与前者相比就更小了。

根据上述情况,变形实验过程中,当受力达到破裂阶段时,不管是侧面上或表面上,总是 X-型裂隙最先出现。从三维应力作用下物体的破坏规律来看,只有一对 X-型裂隙发生,为什么在同样水平压力下同一试件的表面及侧面上都能出现 X-型裂隙呢?当表面上出现 X-型裂隙时,中间应力轴基本上是垂直的(图 4. b)。当侧面上出现 X-型裂隙时,中间应力轴基本上是水平的(图 4. c)。这种事实说明,当最大主应力不变的情况下,若先出现表面上 X-型裂隙,然后再出现侧面上的 X-型裂隙时,是变形过程中随着边界条件的改变,中间主应力和最小主应力是可以互相转化的。究竟如何转化尚需进一步研究。

通过一些实验及野外观察,我们认识到断裂系统包括裂隙系统及断层系统,的确是很复杂的。我们也了解到褶皱断裂的形成除受主应力情况的控制外,在发展过程中尚有次一级及更高一级的应力情况,所有这些应力情况共同组合而构成某一地区的应力场(图 5),只要我们对不同应力情况中的各种应力的作用、相互关系与变形的发生程序有所认识,就有可能把这个地区的褶皱断裂予以合理的组合配套而形成一定的构造体系或构造系统。再考虑不同岩体中的岩石组合特性,就能更好的了解各种构造类型形成的力学机制。当然地壳的发展历史是悠久的,地壳运动是多期的,运动的方式及强度也是不一样的,因而形成的构造现象就不是那么简单。我们本着这种地质力学的理论及方法来作地质构造的求解,完全是可能的。但现有的理论水平及方法,应该说是不够完善的,还需要大力的去发展,还需要大量的地质资料来验证与充实。



平移断层方向	褶皱和冲断层方向
第一级	
N 30 W N 30 E	E-W E-W
第二级	
N 15 E N 75 W N 15 W N 75 E	N 45 E N 45 E N 45 W N 45 W
第三级	
N 30 W N 30 W N 60 E N 60 E N 30 E N 30 E N 60 W N 60 W	S-N S-N E-W E-W S-N S-N E-W E-W

图 5 南北向压力下均质体中的平移断层、冲断层与褶皱轴向示意图

(P. C. 巴格莱 1959, 勘探地质方法)

关于地壳运动作用力的方式究竟是水平运动或是垂直运动,构造地质学家有着不同的见解。我们从岩体中的褶皱现象出发,认为褶皱应该是岩体的压缩变形结果。这种压

缩变形可以直接受水平运动的促使,亦可能由垂直运动所产生的侧向压力作用的结果。不管是水平运动所产生的水平压力或者是垂直运动所产生的侧向水平压力,其结果都必然会使岩体发生褶皱。其形态可能是平缓舒展的,也可能是紧逼倒转的,也可能是二者间互存在。其分布可能是大面积的,也许是小范围的。在这里需要把由于断裂而牵引出来的拖拉褶皱与揉皱加以区别。因为这些褶皱都是局部应力作用的结果,虽然它们也是压缩变形,但并不完全与大区域的相一致。垂直运动不一定都能产生侧向压力,顶托力同样可以形成穹窿及其有关的断裂系统,我们也应该加以分析研究,不应该把所有构造现象统统纳入水平运动系统中。就是水平运动也不一定都是以水平压力作为主要的作用方式,也可能以水平剪切或者力偶作为主要的作用方式,其结果亦能形成一套褶皱断裂系统,也应该予以分别对待,不应统统归并于水平压力的构造系统内。总之,自然界的造物是十分复杂的,我们进行地质构造分析时,不但要有构造发展的观点,也应有地质力学的观点。事实上地质力学的方法,不但着重在力学方法的分析,一向也未忽视过地质的发展历史。

四、地质力学分析所需的构造地质现象

地质露头一般都不是十分良好的,我们往往是根据所见到的一些点滴的构造地质现象,然后依理加以推断作出假定,最后再予以证实。工作假定也必须有一定的事实根据。为了搞清一个地区的构造体系或构造系统,关键在于如何正确确定构造线。所谓构造线就是与压力垂直的平面和地面相交的线,亦即岩体受压缩而产生构造变形的最大延伸方向。垂直这个方向的应力即最大主应力。因之,我们根据三维应力情况下的弹塑性变形与极限平衡理论,再依所掌握到的构造迹象就可以确定这个地区构造变形时的应力情况。能代表构造线的地质标志与构造现象可概括有下列几个方面:

1. 高角度或者直立的岩层、片理、剥理、片麻结构等的走向 因为这些结构面的陡峻表示了岩体最大的压缩变形,垂直它们的方向即最大主应力的方向。在工作时应注意它们是否具有区域代表性,以避免局部的特殊现象。

2. 冲断层及逆掩断层的走向 这些断层可组成同倾向的迭瓦式构造,亦可能组成交叉式的构造型式。这些断层性质是剪切作用,其走向又与最大主应力相垂直,所以称这种结构面为压扭性结构面,即挤压性的断层。这些断层往往被派生的横断层及扳断层所切割,冲断面可以上下不衔接,亦可以前后不衔接,其走向亦可因拖拉而改变方位,所以在确定其走向时尙须注意这些问题。

3. 褶皱轴的走向 因褶皱有平缓舒展的,亦有紧逼倒转成束状的,前者的轴向比较难于确定,后者是容易量测确定的。不过紧逼倒转形式显示着强烈的挤压,往往伴随有横断层,因之褶皱的方位亦可有所改变,亦需注意。

4. 节理的特性 构造节理是不同应力的作用结果,因应力性质有所不同,节理结构面的特性亦不一样。同时在变形过程中,尙有不同序次的节理,有些节理在方向上大体一致,但性质迥然不同,我们都应该加以区别。所以在节理量测时要注意它们的特性,同时要注意

意它们的割切关系。在统计时可以采用玫瑰式的表示法,最好是用极点投影法,这样可以看出它们的空间分布,更便于决定构造线的方向。这里我们不但要注意平面上的 X-型节理,同样也要注意侧面上的 X-型节理。在节理量测时,应按不同时代的地层,不同岩性,不同地理方位,不同高程来分别进行,然后综合分析才有助于构造线的确定。我们固然要重视剪切节理,但张性节理亦不容忽视。

5. 有关的小型构造 在构造变形过程中,由于岩体的结构不同,应力分布情况也就不同,除上述褶皱、断裂外,也必然产生一些小型构造。当迭瓦式冲断层发生时,在冲断面附近常有帚状构造,其性质与冲断层性质相同。若冲断层呈 X-型交叉状,由于沿剪切面的位移结果,在两组断层之间的坚硬岩体,由于力偶所致往往产生圆柱状构造,圆柱的轴向也是构造线方向。在挤压断层面及其上下岩层之间,亦能产生层间滑动,若为坚硬岩石,在层面上常有与压力平行的擦痕;若为软弱岩层则出现层间揉皱及拖拉褶皱,其轴向也是构造线的方向。在半坚硬岩石的层面上,往往出现许多小的皱垅,并成定向排列,即所谓线排列,其延长方向与作用力方向垂直,所以线排列亦是构造线方向。

6. 构造岩中再结晶矿物的排列方向 构造运动所形成的挤压破碎带,有断层泥、糜棱岩、角砾岩、压碎岩及影响带。在这些岩层中,因受挤压常发生再结晶作用,有些长轴矿物的长轴方向及片状矿物的底面排列方向,往往与应力保持着一定的关系。根据野外定向标本进行岩组学的分析研究,除了解构造岩的特性外,还可以研究显微构造及再结晶矿物的量测工作,从这些结果亦可协助确定某地区的构造线方向。

构造线的确定是很重要的,不能以上述单一因素来确定,应该是综合因素。根据这些构造现象把构造线确定之后,若有航空照片可资利用,应判读制出区域构造纲要图、水系和河谷的网络图。这样就可以把某一地区的构造特征反映出来。构造线确定之后即知本区最大主应力的作用方式与方向,再依据上述的构造变形强度理论与试验构造的资料,即可进行构造断裂的力学分析。当确定了主要的冲断层之后,伴生着它必然有一系列的派生断层,即横断层与拆断层,它们共同组成了一个构造体系。这种方法对了解一个小地区的构造情况,是行之有效的。这对勘探工作部署,对工程地质条件评价,以及对工程地质作用下的岩体稳定预报,都有着实际意义。

五、地质构造对工程建设的影响

论证与建筑物有关岩体的稳定时,首先要查明影响岩体稳定的自然现象和地质因素。通过这些现象与因素,就可确定岩体所具备的工程地质特性和稳定分析时的边界条件。所以工程地质研究时,必须从岩石组合阐明岩体物质组成的均一性,同时还必须从地质构造论述岩体结构的完整性。这二者不但对地下水的埋藏条件和运动特性起着控制作用,而且对风化作用、喀斯特溶蚀作用以及其他的物理地质作用都起着决定性的影响。一般岩体都拥有褶皱断裂及复杂的节理系统,因而就使岩体与土体有着显著的区别。关于土体的稳定分析,现在有了比较成熟的工作方法与计算理论,对于岩体的稳定分析还处于萌

芽时期,还需要共同去努力。这里仅就地质构造对岩体稳定的影响加以讨论。

1. 建筑物对岩体的要求

工程地质主要是解决工程建设地区与建筑物有关的岩体稳定问题,如地基稳定、边坡稳定与地下建筑物围岩的稳定等。不但要论证在自然地质作用下的岩体稳定性,更重要的是要论证在施工期间由于人工开挖而影响的岩体稳定性,以及运转期间在工程地质作用下的岩体稳定性。为了很好的解决这个问题,自然要对与建筑物有关的岩体进行详细的勘测研究,但也必须了解工程意图及建筑物设计对基础的要求。

建筑物和基础是一个工程的上部结构和下部结构的重要组成部分,二者相互影响,相互制约。为了保证建筑物整体的安全,上部结构和下部结构都需要进行应力分析,也必须了解它们的相互关系。工程建设种类是繁多的,我们以水利工程中拦河坝的应力分析来了解对基础的要求。大坝应力分析时,曾考虑到坝体重量、静水压力、动水压力、淤积物重量、风力、温度变化、纵向及横向的地震力、浮托力等,然后得出了坝体内的应力情况。主应力有第一主应力(压应力)及第二主应力(拉应力)。这些主应力都要通过建筑物而传递到基础及坝肩岩体上。所求得的主应力都是有向量,既有方向亦有大小。它们作用到基础上可视为岩体所受到的外力或附加力。根据外力的大小结合基础土岩物理力学性质来论证地基的承载力是否满足上层建筑的要求,并依此来考虑坝型、坝高和基础的处理措施。一般岩石地基从其极限强度分析,大都可以满足建筑物的需要,问题在于岩体中存在着各样的软弱结构面,破坏了岩体的完整性,而成为碎体结构。在外力作用下,其应力分布情况、应力与变形关系和破坏规律如何,是值得研究的课题。

不同坝型对基础的要求是不同的。坝型很多,有土坝、堆石坝、重力坝、空心重力坝、单拱坝、双曲拱坝、重力拱坝、双支墩及单支墩大头坝、平板坝、连拱坝等等。一般薄壳坝、支墩或垛墙的坝型与基础结合面积都是比较小的,所以应力也较集中,对基础要求就高。土石坝和重力坝底面较大,单位面积的应力则相应减小,一般对基础要求要低一些。拱坝对基础的要求也是很高的,但应力集中区则在坝肩岩体上。重力拱坝的应力分布,随着水头压力及其他条件的变更,有时集中坝肩,有时则集中坝基。坝的高度不同对坝基的要求也是不同的,坝高决定于岩石利用高程,随着基岩出露高程不同,对基础的要求也是不一样的。在坝基的不同部位,应力的分布也是不同的,第一主应力即压应力集中在坝轴线附近及下游坡脚之间,第二主应力即拉应力则集中于上游迎水面坡脚,愈近坝轴线愈小。当考虑到横向地震作用时,坝肩接头部分是拉应力集中地区;当考虑到竖向地震作用时,应考虑与基础内浮托力同时作用的影响。从这些情况分析,大坝对基础的要求是各种各样的,我们还是以压应力即第一主应力的作用来考虑对基础的影响。根据上述情况,我们即知如何结合工程设计要求与工程地质条件,来进行工程地质评价与岩体稳定分析。只有这样才能与工程人员来共同研究坝线与坝型。但地质条件是十分复杂的,往往不可能完全满足设计要求,就需要根据工程地质条件在坝型、坝高方面作出修改或者特殊的设计,

如复式坝型,有时也能利用转变段来变更坝线,以躲开地质上的缺陷。因为坝线转折的设计计算比较麻烦,施工标准不易掌握,同时也影响美观,一般不这样来处理。

2. 结构面的特性与工程地质意义

岩体的不均一性取决于岩石建造中各种岩石的物理力学性质与水理性质,也取决于风化岩、构造岩及软弱夹层的特性。岩体的完整性则取决于岩体中各种类型的结构面,特别是一些软弱的结构面。这些结构面的性质、数量、分布规律等,直接影响着岩体的工程地质条件和工程规模、布局和处理措施方案等。这里所提出的结构面或称界面可分为以下几种类型:

(1) 沉积作用形成的结构面 此为不同岩系接触的假整合与不整合接触面,以及整合接触的层理和层面。有岩性相同的接触面,有岩性不同的接触面。这些接触面可属坚硬类岩石的结构面,亦可为软弱相间的结构面,亦可为海底、湖泊及大陆火山喷发沉积形成的结构面。整合的结构面一般说来工程地质性质是没有什么问题的,但过薄的软弱夹层或透镜体,可引起不良的工程地质作用。假整合与不整合以及喷发岩所形成的接触面,因有构造运动的存在以及较长时间的间断,在盖层之下的岩层常有侵蚀面及古风化壳的存在,岩石性质就有显著的不同,在这些接触面附近常是地下水的良好通道,往往促进岩石的水解作用和风化作用,常形成不利的工程地质条件。譬如淮河 1 坝址,钻探达到不整合面时就有承压水溢出;淮河 3 水库导流隧洞中的不整合面附近,就有大量的地下水涌入,不整合面下的软弱岩石也发生泥化。这些结构面当水库蓄水就能沿着它而形成渗漏途径。

(2) 火成接触结构面 当火成岩侵入到围岩时,在火成岩体的周边则产生一种热力接触结构面。由于侵入体的形体可能为大型的岩基、岩丘,亦可能为小型的岩柱、岩瘤、岩墙和岩床等,由于围岩中原来没有侵入岩体的空间,所以当火成岩侵入时围岩则受挤压破碎而形成动力破碎结构面,这就造成了不良的工程地质条件。当高温的岩浆与围岩接触时常发生混合作用,如长石化、绿帘石化、蛇纹石化、黄铁矿化等等,这时则形成致密的混熔结构面,它的工程地质条件就是优越的。不过在距混合岩结构面稍远的围岩内,往往还会存在挤压破碎带。淮河 7 坝址几条与岩层斜交的岩脉,与围岩形成很好绿帘石化的混熔接触面,平行接触面的围岩中则又出现了破碎带。

(3) 火成岩原生结构面 在较大火成岩体的边缘,包括侵入岩与喷出岩,斑晶结构的岩体常常出现流线及流层,沿流层尚不容易分割劈开,但容易沿此风化形成剥理,亦可造成一些不良工程地质条件。火成岩冷却收缩时,亦能形成一套张性节理系统,有高角度的亦有低角度的,往往平行围岩接触面及地面,有时近于水平并展布较远。这些节理互相联系为风化创造了条件,常形成不利的工程地质条件。东南沿海 5 坝址的斑晶花岗岩体与淮河 5 坝址的细粒花岗岩中,均有较发育的近水平原生节理。

(4) 变质作用形成的结构面 区域动力变质作用结果,不但改变了原有岩石的矿物

组成,也改变了它的组织结构。由于矿物的再结晶及重新组合作用,则产生了片理、剥理及片麻结构等结构面。由于片状矿物的富集,往往形成片理很薄而且发育良好,如千枚岩、云母片岩及绿泥石片岩等。这些矿物本身极易风化,再加片理发育,就大大促进风化作用的速度,而导致工程地质条件的迅速恶化。在区域变质岩中,由于沉积环境的影响常为复理式建造,软弱岩层经常作夹层出现,当受挤压后,沿结构面往往变成软弱的粘土岩,而削弱了结晶岩体的工程地质性质。

(5) 构造作用形成的结构面 这是构造运动直接产生的节理、断层、劈理或其他小型构造的动力结构面。这就是李四光教授地质力学中所述的结构面。依结构面形成的力学机制,划分为压性结构面、扭性结构面、张性结构面与压扭性结构面及张扭性结构面等。后二者是受性质不同应力的结构面。各种断层结构面的力学性质不同,破碎带的构造岩的特性及规模应有所不同,前面已有论述,在任一破碎带中,构造岩应作分类,如角砾岩、糜棱岩、断层泥、压碎岩及影响浸染带等。所有这些构造岩视结构面两侧围岩性质而有所不同。构造岩的特性应属岩石的工程地质性质研究范畴,但与结构面有着紧密联系,它决定着动力结构面的性质。如断层带为胶结良好的角砾岩及糜棱岩,它的工程地质性质并不很坏,仅仅是强度差。若断层带为断层泥或压碎岩,其工程地质条件则恶化。因为断层泥可能为高岭石、叶蜡石、绿泥石或其他类型的粘土矿物所组成,都是良好的润滑剂,需要从工程方面去很严格地处理。

(6) 次生的结构面 是在上述结构面的基础上而发展起来的,如岸边剪切裂隙,以及由于上覆岩层卸除而产生的水平裂隙,或者由于风化作用而引起的一些风化裂隙。这些次生的裂隙大都处于风化带中,往往为风化而形成的粘土物质所充填,常造成不良的工程地质条件。

上述种种类型的结构面,无论是沉积作用的层理、层面、假整合面、不整合面;火成岩侵入结构面及冷缩结构面;变质作用的片理、片麻构造的结构面;构造作用的断裂结构面等都与地壳活动有着内在的联系。它们的规模则有大小不同,结构面的性质亦有好有坏,但它们都是岩体中存在的地质现象,它们的相互组合,则能形成各色各样的工程地质条件。我们可以根据其中任何一种结构面单独进行工程地质分析,但作为岩体来说,很显然这些结构面是相互制约的,不应把它们作为孤立的来考虑,应把它们作为整体来分析。

这些结构面都是研究构造地质的标志,它们的分布规律直接受着构造运动的控制。结构面可以是水平的或直立的状态,亦可作倾角平缓和陡峻的状态。在水利枢纽地段,有些层状结构面可与河谷平行、垂直或者斜交。在平行河谷时,可向左岸或者右岸倾斜;当垂直或斜交河谷时,可向上游或者向下游倾斜。根据这些不同的情况,可产生不同的工程地质条件。有些地质工作者认为当层状结构面倾向上游时,不论对稳定或者渗漏来说都是比较有利的。也有一些地质工作者持不同的意见。我们认为岩体中的结构面是很复杂的,彼此都有一定的联系,在论证稳定或者渗漏时,应结合上部建筑物的应力情况、河谷山体形态、基础岩体特性、结构面的组合关系和软弱夹层的工程地质性质与地下水动力条件

等进行综合考虑。

3. 影响岩体稳定的地质构造分析

影响岩体稳定的因素是很多的,我们主要是从破坏岩体完整性的各种结构面来入手的,因为它们的存在,不但形成了岩体中的许多弱点,还给地下水的活动创造了条件,往往有些构造断裂还保持着残余应力或地应力。在外力(建筑物的附加力)作用下,岩体中的应力分布,也受这些结构面的控制,因而岩体破坏规律就不是使坚固的岩石达到极限强度而破坏,而是具有裂隙的岩体已达到极限状态,沿着某些结构面由于应力的集中就有发生压缩或滑移的可能性,这就影响了岩基的稳定性,从而威胁上部建筑物的安全,或者导致自然边坡以及地下建筑物围岩应力的重新调整,破坏边坡与围岩的稳定性。

为了防止地下水在基岩中的活动能力以及沿结构面而导致大坝的渗漏,我们则可进行帷幕灌浆或铺盖护坦以增加地下水的渗径长度,一方面可以减少渗漏量,同时可以降低上举浮托力。为了浮托力的有效降低,除在大坝的上游坡脚布置灌浆帷幕外,在下游坡脚还应布置排水井孔。于布置防渗措施时,固然要掌握水文地质试验参数,但必须了解基岩中裂隙的性质、发育情况和不同结构面的分布规律,然后进行灌浆孔和排水孔的孔距、孔深、孔位与钻孔结构的设计以及灌浆材料和水灰比的选择。在岸坡绕坝渗漏的地区,布置孔位时更需要结合岸边各种结构面的特点,在这里应注意绕坝渗漏可能产生侧向压力,对拱坝及支墩坝有比较显著的影响,所以帷幕的长度应视两岸各种结构面的发育和分布来决定。

当对岩体稳定分析时,我们要注意各种结构面。一般节理及层面都可通过固结灌浆与帷幕灌浆来解决。根据当前灌浆技术水平可以获得预期效果,这样对于上举浮托力的威胁是可以解决的,而最重要的是那些软弱结构面,不是通过灌浆就能解决的,需要特殊处理,因而就必须研究这种结构面和建筑物的依存关系。从建筑物所受的水平推力来考虑,静水压力、动水压力、风浪、纵向地震力以及地震所引起的波浪冲击力等水平推力作用时,首先考虑基础部分和建筑物结合面的抗滑稳定性。在河槽部位应注意结合面的形态即岩石利用高程面的形态,结合面最好是倾向上游。往往在河槽部分,由于水势之就下,所以覆盖层下面就是倾向下游的光滑岩面,因此就有必要人工开挖而形成参差不齐的粗糙面并使其倾向上游,这样就可使混凝土与岩石能很好结合。必要时还需进行结合面的灌浆处理。依此就能提高基础的抗滑稳定性。淮河5连拱坝的河槽部分就是这样处理的。最重要的是基岩面以下不深距离内有无近水平的结构面存在,如若存在,仍有沿此滑移的可能,所以在勘探清基时应作出岩面下有无近水平裂隙的论证,并予以处理。东南沿海5大头坝的河槽部分曾作过专门的论证。在峡谷地区,陡峻边坡与建筑物的结合面固然要注意,而最重要的是岸边岩体内有无与岸边平行及水平的软弱结构面,若存在时,在水平推力及侧向压力下,仍有沿此滑移的可能性,在这里需要结合两岸山地形势进行评价。东南沿海1重力坝右岸及淮河5连拱坝右岸都作过加固处理。