

岩体工程地质力学的原理和方法

中国科学院地质研究所工程地质与抗震研究室

一、前言

工程地质力学研究的目的,就是解决建筑物基础岩体的稳定问题,防止重大事故,保证施工顺利,为合理的工程设计提供依据。

以成因土质学为基础发展起来的传统工程地质学,以及由材料力学为基础的岩石力学方法,都不能成功地解决岩体稳定问题。因此,要求我们从岩体的客观实际出发,抓住岩体变形、破坏的主要矛盾,发展工程地质力学的科学方法,这也是国际上岩体力学正在探索的方向。

李四光教授所创导的地质力学,是抓住地壳的构造形迹,用力学的观点加以阐明,进行构造体系理论研究,在地质工作、地震工作等领域中成功地得到推广。同时,它也为我们的工程地质力学研究指出了方向和工作方法。

二、岩体构造体系的地质力学研究

1. 褶皱断裂体系的形成过程

岩体是地质体的一部分,它的结构是长时期地质历史发展的产物,主要取决于构造变形过程。这个过程实质上是岩体内部应力应变依时间进程的具体表现^[1]。

为了探索岩体构造变形的规律,我们对不同物性的材料进行了力学试验研究。从泥巴试验、石膏模型试验,一直到岩石的单轴及三轴试验,试件内应力应变及变形破裂的基本规律可以概括如下:

1. 三轴应力下发生应变椭球体,它的几何轴与主应力轴一致。
2. 试件内,在任一与主应力斜交的方向上产生法向应力及剪应力。
3. 达到极限状态时,在大体上与最大主应力相交为 $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ 的方向上出现一对共轭

的剪切面, φ 通常称为内摩擦角。

4. 主应力的继续作用,导致试件的进一步变形及破坏,如岩石颗粒的重排列、再结晶;压劈理、流劈理的出现;迭瓦式及羽状裂隙的产生;试件的侧向膨胀及裂隙面的张开等。

5. 不同物质材料的试件往往有不同的变形特征,有的以塑性变形为主,有的以脆性破裂为主。

上述一些规律,大体上反映了地质体构造变形过程,但是实际的褶皱断裂体系是极为复杂的。图 1 概括了各类地区的一次构造体系。从比较简单的平缓岩层地区,一直到

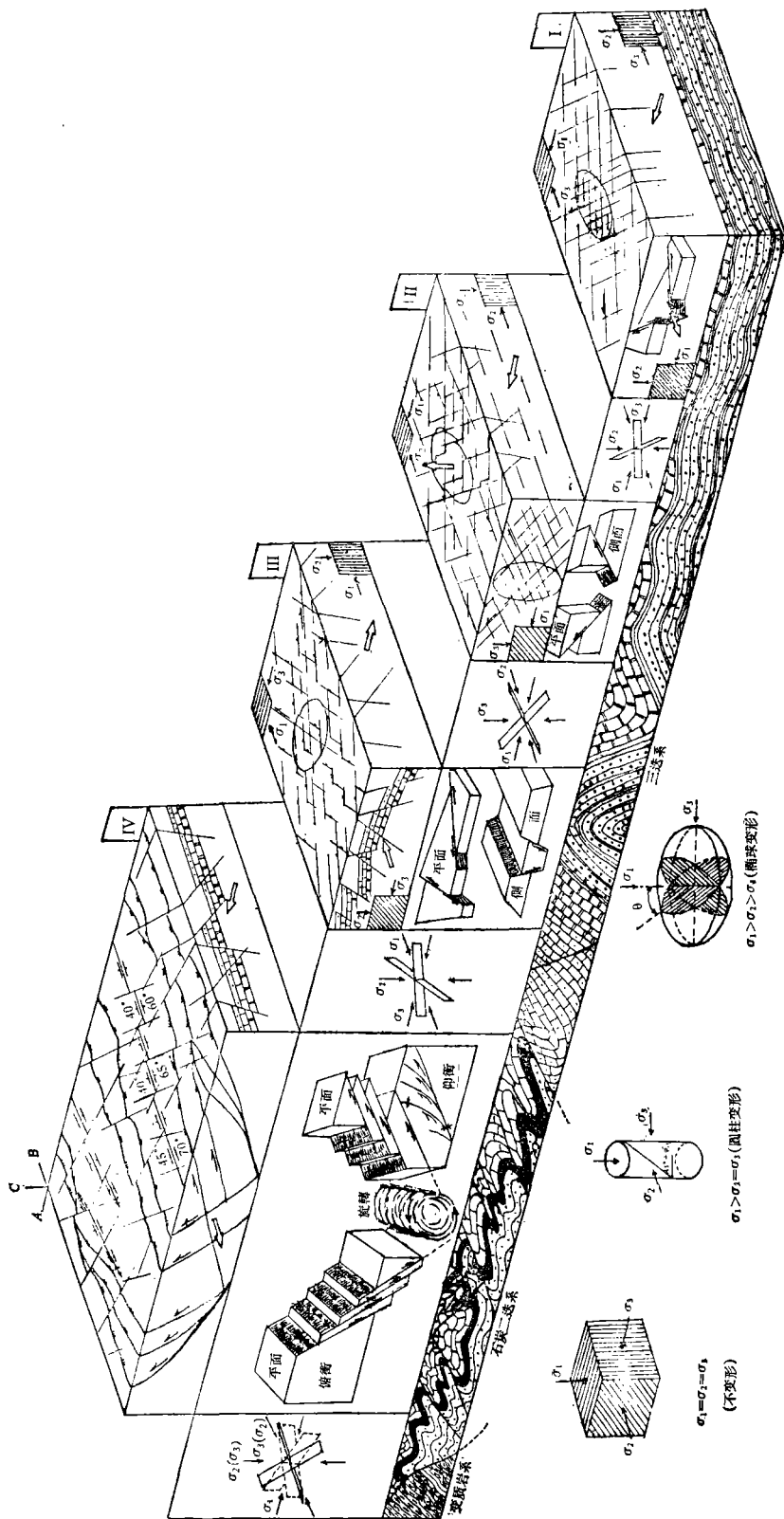


图 1 褶皱断裂体系形成过程及其地质力学分析

I. 平缓岩层:

仅出现一对 X-型高角度剪切破裂。有时同等发育,有时一组发育,一组不显,大部为节理系统,断层少见。此时需注意它与倒转平缓岩层的区别。

II. 岩层褶皱区:

岩体中的裂隙继续发展,并加密、加长、加宽,沿着已有 X 裂隙逐渐发展为张节理。原剪切裂隙由于岩层变位也改变着它的走向、倾向及倾角。与此同时,在侧面上(ac-横剖面)则出现另外的 X-型剪切破裂,随着作用力的持续加强,冲断层(仰冲、俯冲、层间错动)则逐步形成。在平面上表现为走向裂隙及走向断层,往往被横断层及按断层所错开,共同组成米字型断裂型式。

III. 背斜轴区:

当岩层紧遇褶皱隆起时,于背斜轴部往往出现次一级应力场,又形成一对 X-型剪切破裂,并逐渐发展为纵向张性断层,于侧面上呈阶梯式、地垒式、地堑式正断层及逆断层。这种变形往往使第 II 种情况下的断裂系统复杂化。这一对 X-型节理的锐角一般较小,水平摩擦也较显著,需注意它与冲断层、横断层的相互影响。

IV. 岩层强烈变形区:

当岩层发生强烈褶皱及断裂时,岩体构造变形已达到了累积阶段,构成上述 I, II, III 三种情况构造的复合体。此时构造体系在侧面上则出现迭瓦式冲断层、交叉式冲断层、明显层间错动及逆掩断层,并出现旋转构造、帚状构造等,甚而因冲断层过大,还可导致次一级构造如羽状构造、劈理、拖拉褶皱等。在平面上,冲断层及逆掩断层,往往受横向张断层及斜向平移按断层所切割呈不连续状,它们共同构成复杂的构造网络。此时在纵剖面上(bc-面)则出现由横断层及按断层所形成的阶梯式、地堑式、地垒式构造。在这个阶段需注意构造的序次。

1. 这张示意图是一次构造运动且以水平作用力为主情况下的褶皱破裂。但变形岩层基底形态有起伏(古地形),应力场随变形过程有所不同,岩性亦有差异,因而所产生的构造形迹是十分复杂的,各个地区的反映也是不一样的。此仅作为一般的构造地质力学分析示意图。

2. 地质力学分析所采用的理论基础是库伦-摩尔理论,亦即最大剪应力强度理论。当物体受力后,经过弹性变形,达到极限强度时的最大剪应力时,材料就要破坏。材料的强度,不仅决定于凝聚力,还决定于材料各分子间的内摩擦力,但内摩擦力与正应力是成正比的。根据实验得知,剪切破裂与作用力保持着一一定的关系,压应力方向是一对剪切破裂的锐角平分线。在一地区若知道压应力方向,即可根据应力场来预测破裂的方向了。

3. 构造应力场的确定:一个应力场是由压应力、张应力及一对剪应力所构成。若能知某地区压应力的方向,主构造应力场即可定下来。随着变形的发展,还可能产生次一级的应力场,有时构造部位不同,应力场亦不完全一致,如褶皱的轴部与翼部。但地质构造运动已成过去,我们只能在地质体中寻找构造遗迹来确定当时构造运动时的应力场,亦即当时压应力的作用方向是什么。在这里就是要抓构造线。所谓构造线即垂直压应力的面与地平面的交线。

4. 构造线的确定:构造线的方向可以下列诸构造的方向作代表。

- (1) 褶皱轴即向背斜轴面、向斜轴面、倒转等斜褶皱轴面的方向。紧逼、线性、延长的最有代表性。
- (2) 大面积分布的陡倾直立岩层、片理、片麻结构等走向。
- (3) 冲断层(仰冲、俯冲、层间错动、逆掩断层)的走向。要注意受横断层及按断层拖拉牵引的影响。
- (4) 平卧柱状构造轴面、帚状构造走向、线排列展布方向,应力矿物定向排列等。

对上述构造遗迹作详细观察、量测、统计之后,构造线方向即可确定下来,垂直构造线的方向即压应力方向。再依构造应力场中各种应力的相互关系,即可进行地质力学分析及构造序次的对比确定亦即构造配套组合。

5. 构造发展历史:整个地质构造发展历史是长期的、多轮运的。若具体到某一地区,则有很大的区别,所以到一地之后,首先要了解本区地质体的时代及其发展历史,从而确定本地质体形成后所经受构造运动的幕次,每次运动的特征(褶皱运动、升降运动),以及晚期构造运动对前期构造形迹的影响。区域构造历史概念明确之后,即可着手构造形迹的调查测绘与地质力学分析。但需指出两期构造的复合问题是十分复杂的,还待进一步的研究。若构造运动伴随有岩浆岩活动,那就更需具体的对待了,不应如此简单的去分析,要考虑特殊应力场的参与。

6. 主构造线的方向,一般说来是稳定的。但构造层基底的起伏是不一致的,凸起岩体常是上覆岩层变动时的低柱,可因此而使主应力场发生变异,导致构造线变向呈弧形。当构造层发生形变时,隆起区与凹陷区的边界条件不同,表层应力状态与深部应力状态不同,构造线亦可能发生改变。地质体是不均质的,各向异性的,常产生次一级应力场而导致主构造线的变位。总之,具体条件要作具体分析,但要有全局观点,也不能忽视局部变化。

7. 地质体是长期地壳变动的结果,它的结构是各种各样的,有的是十分复杂的。在剖析时要有应力场、应力-应变、强度理论、破坏机制、结构面组合、应力场转化、构造线、运动轮迴、应力再分配、构造复合等基本概念,这就是地质力学方法。依此对地质结构即能有较清楚的认识,但地质体中仍有许多弄不清楚的形迹,这是客观存在,不能曲解,不能忽视,应深入研究。

强烈褶皱地区,表现了岩体在不同阶段构造变形的发展过程。在平缓岩层区,岩层处于变形的初期阶段;在岩层褶皱区,变形有了进一步的发展;在背斜轴部区突出地引起次一级应力场的作用;在岩层强烈褶皱区,构造变形达到积累阶段。在整个岩体构造变形的过程中,主应力轴,尤其是中间主应力轴是在转化的。

实际上图 1 只描述了一次以水平压力为主的构造运动所形成的褶皱断裂体系的一般规律,而野外地质构造调查所得的情况往往更为复杂,其原因是:(1)各地区的岩性物性不同,基底的形态不同,变形、破裂现象有很大差异。(2)地壳运动是多期的。晚期的构造运动在很大程度上与早期的构造体系复合,使之复杂起来。(3)在岩层的褶皱变形和断裂错动中,产生次一级,甚至第三级的应力场,导致相应一级的变形和破裂。(4)从构造运动的作用力来看,一般情况下符合水平压力的作用。但有的地区出现扭力作用的扭动构造体系;有的地区如岩浆岩地区,也可能出现垂直顶托作用。

总之,要认识岩体构造体系的规律性,关键在于从实际构造形迹的特征出发,用力学方法,抓住主要方面,进行认真的分析。

2. 构造体系的地质力学分析

根据岩体构造体系形成过程中的客观规律,以及多年来在工程建设地区的实践经验,我们提出以下方法步骤,进行岩体范围内的构造体系的地质力学分析^[2]。

I. 确定构造线 所谓构造线是指与构造运动压力相垂直的平面与地面的交线,亦即岩体受压缩而产生三维变形的最大延伸方向。垂直构造线的方向,是代表压力的最大主应力,它是变形、破裂的主导因素。因此,抓住了构造线,就等于抓住了矛盾的主要方面,就便于掌握整个应力场的情况。

构造线的方向可由下列构造形迹的方向作代表:(1)褶皱轴的走向,尤其是紧密线性褶皱最具代表性,但要注意是否为横断层切割,错动拖拉,而引起方位上的改变。

(2)区域性陡倾、直立岩层、片理、片麻结构等,要注意避免局部现象的误解。

(3)冲断层(包括仰冲、俯冲、层面错动、逆掩断层等)的走向,也要注意是否为横断层错断而改变方位。

(4)平卧柱状构造轴向、帚状构造走向、线排列展布方向、应力矿物的定向排列等,这些小型构造及微构造,经过细致研究,也可作构造线的标志。

确定构造线是构造体系分析的基础,要根据多种标志综合判断。并且应结合区域构造地质情况分析,以免将局部变位了的构造方向误认为构造线方向。

II. 分析构造线的次序 一个地区往往经受多次强烈的构造运动,应力场也发生过不止一次的变化,在一地区可能发现几组构造线方向。分析构造线的次序就是认识某地区有几次应力场,各代表哪些构造运动幕次,也就是不同应力场的先后次序。为此,要调查区域地质发展史(包括沉积过程、地层时代、岩浆活动及变质特征等),同时分析各组构造线对不同岩系的切割关系,各组构造线的互相穿插关系。最后,确定每组构造线所代表的构造运动。

III. 构造体系及其复合关系的分析 划分构造体系的工作就是构造配套,即确定在同一构造运动的应力场中产生的,有成生联系的各组构造形迹相对于构造线的从属关系。这个工作可按图 2 所示组合关系来进行划分,但应注意次一级应力场的作用(图 3)。

X节理变化情况			水平岩层区		高角度X—节理断裂型式，往往一组发育，一组不发育。可出现规模不大的平移断层，但少见。其层位要素随层位而改变。
X节理极点投影图			缓倾岩层区		沿X—节理可能产生较大的平移断层，沿断层可出现羽状断裂及雁行断裂型式。其产状随岩层变位而改变。
X节理			倾斜岩层区		X—节理、羽状断裂、雁行断裂、层位变位而变位，还可继续产生。由于岩层变位侧面上可出现X—型冲断层，表面上则表现为走向断层，同时还产生倾向断裂。在背斜轴部还可由次生X—节理形成纵断断裂，总的看来，则组成X—字形断裂型式。
			直立岩层区		岩层陡倾直立时，原平面上的X—节理，则与倾向节理接近平行，此时各种断裂均很发育，有的还有变位，断裂组合型式为州城十字型的构造型式

图2 不同产状条件下断裂发育变化及组合形式

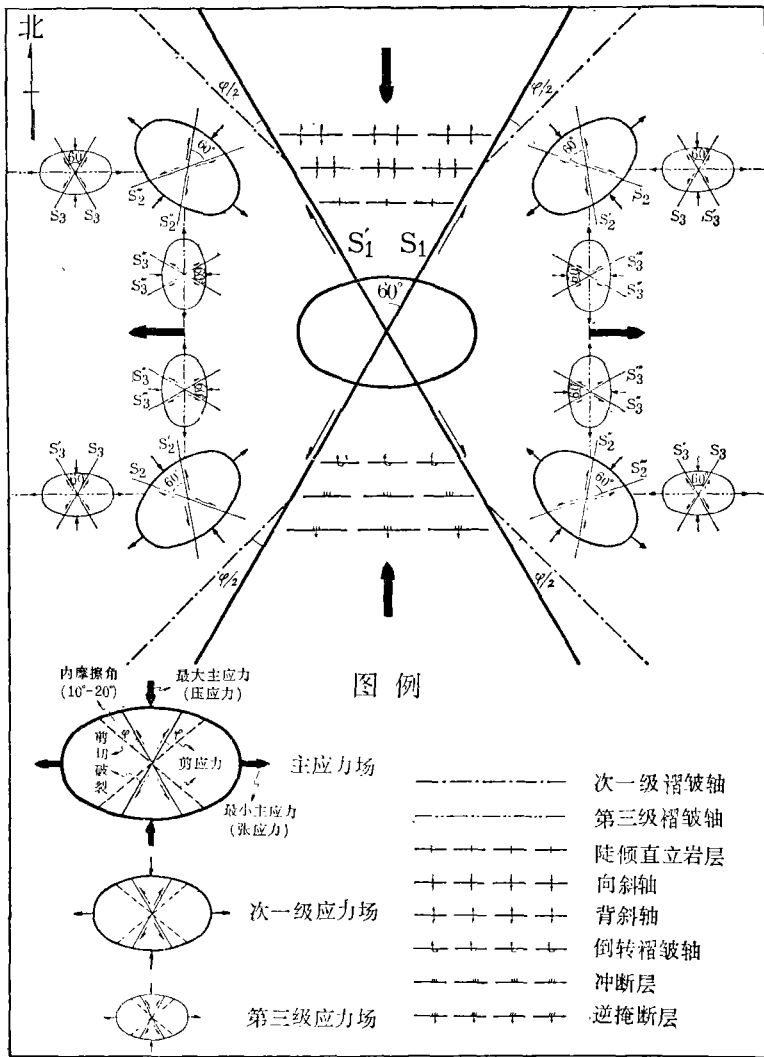


图3 一次构造运动中主、次应力场的相互关系

说 明

1. 南北向压应力的主应力场, 最先产生X-剪切裂隙组, 即 $N30^{\circ}E(S_1)$ 与 $N30^{\circ}W(S_1')$, 逐渐形成东西向构造线, 可以下列构造方向表示之: (1)东西向褶皱轴(特别是紧逼线性的向斜轴及背斜轴); (2)东西向陡倾直立岩层、片理、片麻结构等(要大面积分布); (3)东西向等斜倒转褶皱轴; (4)东西向冲断层(仰冲、俯冲); (5)东西向逆掩断层(高角度、低角度); (6)东西向柱状构造、帚状构造、线状排列等。

2. 当主应力场的剪应力发生强烈作用时, 沿主平移断裂 S_1 或 S_1' 均可产生次一级应力场如: (1)北东向压应力的应力场; (2)北西向压应力的应力场。

此时应力场均可产生次一级X-剪切裂隙组, 前者为 $N15^{\circ}E(S_2')$ 及 $N75^{\circ}E(S_2'')$, 后者为 $N15^{\circ}W(S_2)$ 及 $N75^{\circ}W(S_2')$ 。在此等压应力作用下, 逐渐形成北西向及北东向两种次一级构造线, 类似主应力场构造类型, 一般规模小, 延伸不远。

3. 当次一级应力场的剪应力发生强烈作用时, 沿次一级平移断裂 S_2 、 S_2' 、 S_2'' 或 S_2''' , 仍可产生第三级应力场如: (1)近东西向压应力的应力场; (2)近南北向压应力的应力场。

此时各个应力场均可产生第三级X-剪切裂隙组, 前者为 $N60^{\circ}W(S_3')$ 及 $N60^{\circ}E(S_3'')$, 后者为 $N30^{\circ}E(S_3)$ 及 $N30^{\circ}W(S_3')$ 。在此等压应力作用下, 逐渐形成近东西向及近南北向不显著的第三级构造线, 但规模更小, 延伸更近, 仅为局部现象。近东西向构造线则与主应力场的褶皱断裂接近一致而使其强化。

注: (1) X-剪切裂隙组, 不一定同等发育, 往往一组发育, 另一组不显。

(2) 剪应力与剪切裂隙的夹角为岩石内摩擦角的一半($\varphi/2$), 视岩性不同而异, 一般为 $10 \sim 20$ 度。

(3) 应力场包括压应力、张应力及一对剪应力。前二者互相垂直, 但均为剪应力的平分线, 压应力则为剪切裂隙的锐角平分线, 张应力则为其钝角平分线。

以构造线为代表的构造体系划分之后,还要进行早期和晚期各构造体系间的复合关系的分析。这里应考虑构造形迹的多次活动迹象,如多组擦痕、充填物之再破坏、岩脉之错动等。

岩体构造体系的地质力学分析,不但帮助我们了解到岩体构造变形的历史,而且提供了岩体褶皱、断裂体系的配套,是岩体工程地质及岩体力学研究的基础。

三、岩体结构及其力学属性

1. 岩体结构要素及岩体结构类型的划分

I. 岩体结构概念 关于岩体结构的观念是在岩体力学实践中逐渐形成的。无论是从岩体构造变形过程及其地质历史所赋予的特征来看,还是从影响岩体稳定的实际问题来看,岩体结构应该包括两个方面要素,即结构面和结构体^[3]。

结构面是地质发展历史,尤其是构造变形过程,在岩体内形成的各种具有一定方向、延展较大、厚度较小的两维面状地质界面,包括物质的分界面及不连续面,如层面、节理、断层等等。结构体是指由不同产状的结构面组合起来,将岩体切割而成的单元块体。岩体结构是指岩体受结构面切割而构成之结构体的组合。结构面和结构体只是一个问题的两个互相联系的侧面。岩体的结构类型主要就是根据这两方面要素,考虑结构体的组合特征来划分的。

岩体力学的实践表明,大部分岩体受工程作用力的破坏过程,主要是结构体沿结构面的剪切滑移、拉开,以及整体的累积变形和破裂。所以岩体的稳定性主要取决于:(1)结构面的性质及其空间组合;(2)结构体的性质及其立体形式。

II. 结构面的类型 岩体内的结构面是在各种不同的地质作用中生成和发展的,它们主要的成因类型有沉积、火成、变质、构造、次生等类结构面,其工程地质特征列于表1。在研究岩体结构面时,我们应当注意以下几个问题:

1. 有些结构面上物质软弱破碎,含泥质物及水理性质不良的粘土矿物,抗剪强度低,它们对岩体稳定性影响最大,我们称之为软弱结构面。对于这种软弱结构面的研究应予以充分的注意,并且对其矿物物质组成也要进行分析。

2. 有些结构面延展性较强,在一定工程范围内切割整个岩体,对稳定性影响较大。而另一些结构面比较短小,互不连贯,岩体强度有一部分仍受岩石强度控制,稳定性较好。

3. 结构面的密集程度、结构面的平直程度及光滑度或是起伏差,都应加以研究,以便区别各类结构面的力学特性,为确定强度参数提供依据。

III. 结构体的形式 岩体受结构面切割而形成之不同块体的形状,称之为结构体形式。一般常见的单元结构体可分为柱状、块状、板状、楔形、菱形及锥形等六类形态。就结构体这一方面因素而言,岩体的稳定性取决于结构体的形式及其与工程有关的空间位置和方向。

IV. 岩体结构类型的划分 结构体的组合方式决定岩体结构的类型,这是在结构面及结构体研究的基础上进一步概括的结果。常见的岩体结构类型有:块状结构、镶嵌结构、碎裂结构、层状结构、层状碎裂结构、散体结构等,它们的特征列于表2。

在划分岩体结构类型时,必须充分注意到岩体的组合。这种具备不同岩体结构的岩

表1 岩体结构面类型及其特征

N	成因类型	地质类型	主要特征			工程地质评价
			产状	分布	性质	
1	沉积结构面	1. 层层层面, 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, 为层间结构面	海相岩层中此类结构面分布稳定, 陆相岩层中呈交错状, 易尖灭	层面、软弱夹层等结构面较为平整; 不整合面及沉积间断面多由碎屑、泥质物构成, 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的, 如奥斯青、圣佛连西、马尔巴赛坝的破坏, 瓦扬坝的巨大滑坡
2	火成结构面	1. 侵入体与围岩接触面, 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, 而原生节理受岩体接触面控制	接触而延伸较远, 比较稳定, 而原生节理往往短小密集	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, 如弗莱德拱坝坝肩安山岩的局部滑移
3	变质结构面	1. 片理, 2. 片岩软弱夹层	产状与岩系或构造线方向一致	片理短小, 分布极密, 片岩软弱夹层延展较远, 具固定层次	结构面光滑平直, 片理在岩体深处往往闭合成隐团结结构面; 片岩软弱夹层含片状矿物, 呈鳞片状	在变质较浅的沉积变质岩, 如千枚岩等路· 堑边坡常见坍方。片岩夹层有时对工程及地下洞体稳定也有影响
4	构造结构面	1. 节理(X型节理、张节理), 2. 断层(冲断层、扳断层、横断层), 3. 层间错动面, 4. 羽状裂隙、劈理	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; 剪切断裂延展较远; 压性断裂(如冲断层、逆掩断层)规模巨大, 但有时为横断层切割成不连续状	张性断裂不平整, 常具次生充填, 呈锯齿状; 剪切断裂较平直, 具羽状裂隙; 压性断层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, 大都具有构造结构面的配合作用。此外常构成边坡及地下工程的坍方、冒顶
5	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. 次生夹泥层	受地形及原结构面控制	分布上往往呈不连续状, 透镜体, 延展性差, 且主要在地表风化带内发育	一般为泥质物充填, 水理性质很差	在天然及人工边坡上造成危害, 有时对坝基、坝肩及浅埋隧洞等工程亦有影响, 但一般在施工中予以清基处理

组的划分, 在剖面上可作为工程地质分段的依据, 在平面图上则为工程地质分区的基础, 对确定工程布局、预报工程地质条件具有实际意义, 对进一步的岩体力学的试验研究, 分析方法也能起到指导作用。

2. 岩体力学属性的研究

1. 基本概念 岩体的力学属性是指作为工程建设基础的岩体, 从力学观点来看, 究竟是何种介质、具有什么最本质的性能。它体现了岩体各种力学性质之间的相互关系, 及其变化时的规律性, 因而是决定岩体力学研究途径和岩体稳定分析方法的基础^[4]。

根据岩体的现场试验的大量资料可以认为: 岩体的应力应变关系, 大体上是一种具

表2 岩体结构类型及其特性

N	岩体结构类型	岩体地质类型	主要结构体形式	结构面发育情况	工程地质评价
1	块状结构	厚层沉积岩, 火成侵入岩, 火山岩, 变质岩	块状柱状	节理为主	岩体在整体上强度较高, 变形特征上接近于均质弹性各向同性体。作为坝基及地下工程洞体具良好的工程地质条件; 在坝肩及边坡条件虽也属良好, 但要注意不利于岩体稳定的平缓节理
2	镶嵌结构	火成侵入岩, 非沉积变质岩	菱形锥形	节理比较发育, 有小断层错动带	岩体在整体上强度仍高, 但不连续性较为显著。在坝基除局部处理后仍不失为良好地基, 在边坡过陡时以崩坍形式出现, 不易构成巨大滑坡体, 在地下工程若跨度不大, 坍方事故很少
3	碎裂结构	构造破碎较强烈岩体	碎块状	节理、断层及断层破碎带交叉, 劈理发育	岩体完整性破坏较大, 强度受断层及软弱结构面控制, 并易受地下水作用影响, 岩体稳定性较差。在坝基要求对规模较大的断层进行处理, 一般可做固结灌浆, 在边坡有时出现较大的坍方, 在地下矿坑开采中易产生坍方、冒顶, 要求支护紧跟, 对永久性地下工程要求衬砌
4	层状结构	薄层沉积岩, 沉积变质岩	板状楔形	层理、片理、节理比较发育	岩体呈层状, 接近均一的各向异性介质。作为坝基、坝肩、边坡及地下洞体的岩体稳定与岩层产状关系密切, 一般陡立的较为稳定, 而平缓的较差, 倾向不同也有很大差异, 要结合工程具体考虑。但这类岩体在坝肩、坝基、边坡破坏事故出现很多
5	层状碎裂结构	较强烈褶皱及破碎的层状岩体	碎块状片状	层理、片理、节理、断层、层间错动面发育	岩体完整性破坏较大, 整体强度降低, 软弱结构面发育, 易受地下水不良作用, 稳定性很差。不宜选作高混凝土坝坝基坝肩, 或要求处理; 边坡设计角较低, 地下工程施工中常遇坍方, 永久性工程要求加厚衬砌
6	散体结构	断层破碎带, 风化破碎带	鳞片状碎屑状颗粒状	断层破碎带, 风化带及次生结构面	岩体强度遭到极大破坏, 接近松散介质, 稳定性最差。在坝基及人工边坡上要作清基处理, 在地下工程进出口处也应进行适当处理

粘滞性的弹塑性介质特征, 可以通过力学试验, 求得一些简单的模型来表达。但是必须注意到: (1) 它们的塑性和粘滞性不是一成不变的, 在不同结构的岩体中所占比重是很不相同的, 而且经过预压或固结灌浆处理后, 有很大改善; (2) 塑性变形系数随应力的改变而改变; (3) 蠕变率亦随时间进程而改变。所有这些特点, 都是与岩体结构有密切的联系。

II. 岩体中的应力不连续性 岩体作为一个由结构面切割的结构体系, 其传递应力的性能与理想的均一体区别很大。往往在某些部位或某些方向上产生应力集中, 而在另一些部位或方向上应力又有所削弱。此外, 出现应力轨迹的转折、弯曲、以及应力值的不连续现象。

根据野外试验及模型实验研究资料, 岩体结构对岩体中应力分布的影响有其一般的规律性:

1. 在块状结构及镶嵌结构的岩体中, 若有断层破碎带、软弱夹层等大型软弱结构面时, 沿这些软弱结构面法向压应力减弱, 张应力及剪应力增加, 不利于岩体稳定。
2. 在块状及镶嵌结构岩体中, 应力分布受节理组的影响, 压应力及剪应力侧向传递受到限制, 引起在荷载范围内的应力集中。
3. 层状结构岩体可视为连续的各向异性体进行应力分析。

4. 碎裂结构岩体及散体结构岩体,有时在一定范围内可作均一体考虑。

目前,多裂隙岩体的应力分布问题,还处于广泛的探索、研究之中。

III. 岩体强度的不连续性 岩体强度决不等于岩石强度。受结构面强度的控制,形成岩体的强度包络线,它高于结构面抗剪曲线,但低于岩石的强度曲线。对于受多组结构面切割的岩体,空间应力状态很重要。这时不但最大及最小主应力起作用,中间应力对岩体的破坏也起到一定的作用,这一点和均一完整岩石的强度理论概念是不一样的。因此,对于多裂隙岩体要采用空间完全摩尔圆来进行分析。

IV. 岩体受力状态 岩体除受工程作用力外,影响到岩体稳定的还有它内部力的作用,包括地应力、动应力及地下水渗透压力。

地应力的分析主要应根据前述的岩体地质力学分析的步骤进行。在确定了最新构造应力场后,还要作地应力的量测,取得定量数据。动应力的来源为爆破、机震、以及地震力。但是浅源振动和地震的效应有很大差别。渗透压力的研究基础是岩体水文地质结构,必须弄清地下渗流的补给、导向、排泄的部位,查明导水、阻水的结构面的作用,才能正确地进行渗压的评价。

四、岩体稳定分析

1. 岩体稳定的力学分析

岩体稳定是相对的概念,是指在一定的时间内,在一定工程力作用下,岩体不产生破坏性的剪切滑动的意思。这种剪切滑动的实质就是应力应变关系表现为滑动及抗滑的矛盾。岩体稳定的力学分析就是要定量地考察它两者的对立统一关系及其转化的条件。主要步骤如下:

I. 根据岩体结构进行岩体滑动边界条件的分析 岩体的破坏往往是一部分不稳定的结构体,沿着某些结构面拉开,并沿着另一些结构面向一定的自由空间滑移的结果。所以滑动边界条件的分析是确定这些起切割作用及沿之滑动的结构面,以及不稳定的滑动岩体的形式。我们称之为切割面、滑动面及滑动体。

在坝基坝肩的岩体稳定分析中,采用极射赤平投影方法,可以在图上将岩体结构面产状及工程作用力同时表达出来,便于确定切割面及滑动面。并按实体比例投影,作出可能滑动体的形式(图4),从而判断是否具备滑动条件,如果具备的话,可供下一步分析的依据。在不具备滑动边界条件的情况下,岩体是稳定的,设计时仅考虑坝体混凝土与岩石接触面的抗滑稳定。

对于边坡岩体边界条件分析的重点是确定可能滑动面,可根据岩体结构剖面图进行,基本原则如下:

(1) 薄弱段,如软弱岩组界面、断层破碎带等控制滑动面的关节点,即拉裂点、滑出点及转折点;

(2) 结构面,如节理、片理、断层、岩脉产状及其发育的交线控制滑动的倾角;

(3) 结构类型控制滑动面的形式,在大型破碎带及软弱岩组中可能形成弧状滑动面,在块状、镶拼、碎裂结构岩体中可能出现阶梯状滑动面等;

(4) 边坡应力状态控制滑动面的趋向,如滑动面上部陡,下部缓,坡顶出现拉裂面等。

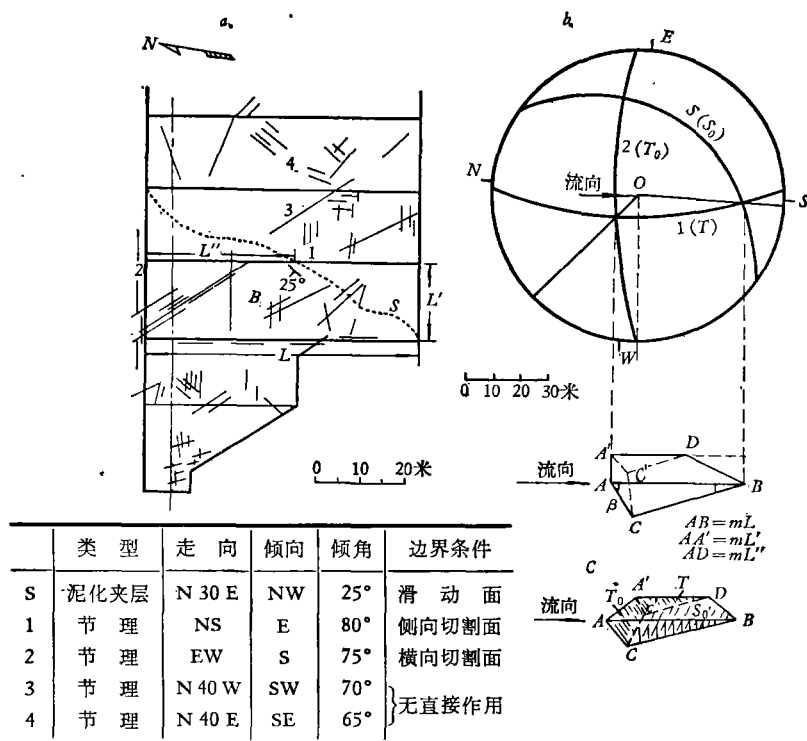


图 4 B 块坝基岩体滑动边界条件分析

a. 坝基平面示意图, b. 赤平投影立体比例投影图, c. 立体示意图

只有认真并正确地根据岩体结构与工程关系确定了滑动条件后,才能开展下一步的定量分析工作。

II. 根据岩体力学试验,选择变形及强度的参数 主要参数为抗剪强度,在某些特定的滑动边界条件上考虑部分岩石抗剪断强度。进行应力分析时对不均一岩体要求有变形模量的数据。

力学参数应有试验资料作依据,但是试验所得的平均值要经过修改后才能用作计算指标,这时考虑以下几个基本原则:

- (1) 根据试验条件看载荷方式、试件备置情况等是否符合岩体实际承载状态;
- (2) 根据地质调查看试验点能否反应地质结构面在大范围岩体内的状态;
- (3) 根据滑动面上物质成分、粘土含量及种类、物理水理性质,考虑未来性质的变化;
- (4) 根据滑动面上各岩组共同作用,看该段滑动面承担应力的情况,如对坡脚段参数值应低些等。

III. 根据工程设计及测试数据确定岩体受力条件 岩体受力条件部分地由设计方面确定,另一些如地应力、地下水渗压、地震力及动应力等应有定量的测试数据。需要注意的是岩体稳定分析属于静力系统的分析,要将地震及动应力考虑进去,必须研究动力作用所产生的静力效应,为此要进行一系列的静动力对比试验研究。

IV. 根据应力分析法或极限平衡法,进行岩体稳定安全系数的计算及图解分析 安全系数表示岩体滑动力与抗滑力的平衡关系。应力分析法是根据岩体边界条件进行应力

分析,求各点的法向应力及剪应力,然后求滑动面上整体安全系数或局部安全系数。在生产实践中由于岩体应力分布难于确定,大都采用极限平衡理论来计算。在边坡岩体稳定

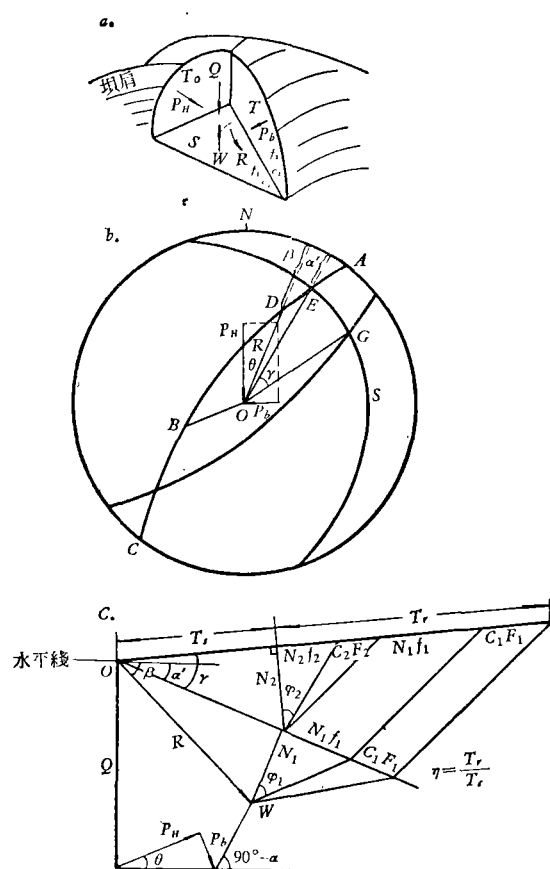


图5 坝肩岩体稳定图解分析法

a. 坝肩可能滑动体位置及作用力, b. 赤平投影图解, c. 岩体稳定分析

(图例: T_0 为横向切割面, S 为主要滑动面, T 为侧向切割面, α 为 S 面倾角, Q 为可能滑动体重量, P_H 为坝肩水平推力, P_0 为侧向渗压, W 为浮托渗压, R 为合力, f_1, f_2 为 S 及 T 面的内摩擦力, C_1, C_2 为相应之内聚力, F_1, F_2 为滑动面面积, η 为稳定安全系数)

类型及产状、特征的统计; (2) 岩体结构体的图解分析, 主要应用赤平极射投影^[5]及实体比例投影作图(图6); (3) 岩体稳定评价, 将岩体分为稳定结构、基本稳定结构及不稳定结构。这样鉴别比较, 对人工边坡推断坡角, 对坝基、坝肩岩体作稳定性的评价^[3, 6]。

II. 工程地质力学的对比分析法 这是用对比的方法, 从已经产生的岩体变形、破坏的现象来分析同类岩体的稳定性。例如, 利用地下矿坑开采所产生的岩体崩落角, 经过反算, 进一步求得毗邻露天采场的稳定坡角, 这一资料较任何大型岩体力学试验更为可贵。

综合岩体力学分析、结构分析及对比方法, 以及室内模型实验研究的结果, 对岩体稳定性进行评价, 结论才是比较可靠的。例如, 对某露天采场的四百米高边坡上下盘设计为 50° 及 40° 时, 岩体力学分析 44 条可能滑动面安全系数为 1.06—3.03, 最集中的结果为

分析中往往采用分块计算法, 分块的原则是充分考虑岩体的结构。对于立体空间课题, 可以在赤平投影的配合下进行图解分析。图5介绍坝肩稳定分析的方法, 是解决空间课题的一种尝试。

V. 岩体稳定综合评价 根据安全系数计算结果, 结合地质条件、试验计算方法、工程特点, 并考虑其它分析方法所获得的结果, 对岩体稳定进行综合评价。关于这个问题, 在下节进一步介绍。

2. 岩体稳定性的综合分析和评价

计算出来的安全系数应与某一极限安全系数进行比较, 才能作出岩体稳定性的评价。考虑到工程的重要性, 地质勘测及试验的准确性不够, 工程运转期间条件的变化等等, 安全系数的标准值往往超过 1.0。在水利工程中, 不用岩石抗剪数的情况下极限安全系数一般为 1.05—1.10。

岩体力学分析结果, 还应与其它途径所获的结果, 对照起来, 综合评价。在我们的实践中采用了多种方法, 列举如下:

I. 岩体稳定的结构分析方法 这个方法是在岩体结构分析的基础上, 考虑工程作用方式, 对岩体稳定性作出判断。其基本步骤如下: (1) 岩体结构面

1.30; 根据岩体结构分析上下盘稳定坡角不少于 50° 及 40° ; 根据岩体崩落角的安全系数为 1.41—1.45。所以, 最终坡角确定为 50° 及 40° , 提交设计使用, 大量节约了剥离量, 并加速了矿山的建设。

五、結 語

岩体工程地质力学研究, 或叫岩体力学, 是近十年来迅猛发展的科学, 许多问题还在探索之中, 但是已经看到它对工程建设的安全、经济起到重要作用。

从我们的实践中, 感到要进一步解决岩体力学问题, 必须抓住岩体结构, 以此为基础。岩体结构是长时期地质历史的产物, 只有用地质力学的观点和方法, 才能把复杂的岩体结构体系的形成过程搞清楚, 正确理解它们的配套组合。岩体的力学属性是岩体结构的力学反映。正确认识岩体结构, 再加上相应的力学试验, 使我们对岩体作为工程建筑基础的本质有所认识。在岩体结构分析及力学研究的基础上, 初步建立了岩体稳定分析的方法步骤。目前, 我们所进行的岩体稳定的分析评价, 还是很粗略的, 但是比较符合地质体的客观情况, 因而也是较为可靠的。

近几年来, 国外岩体力学的发展也很快, 进行了许多探索研究, 其中许多作者也得到和我们类似的结论和看法^[7,8,9]。

岩体工程地质力学的进一步发展在很大程度上要得到地质力学、土力学、地球物理学各方面的帮助, 但是它的发展也将会推动这些相邻学科的发展。尤其是地震成因、地震机制及地壳应力集中与发震规律性的研究中, 岩体工程地质力学将能提供一些理论依据和实际资料。

参 考 资 料

- [1] 谷德振 1963 地质构造与工程建设, 科学通报, 第10期。
- [2] 谷德振等 1965 水文地质工程地质问题, 科学出版社。
- [3] 地质科学 1965年第4期, 330—352页。
- [4] 地质科学 1966年第1期, 64—78页。
- [5] 何作霖 1959 赤平极射投影在地质科学上的应用, 科学出版社。
- [6] 地质科学 1965年第1期, 29—42页。
- [7] Müller, L., 1963 *Der Felsbau, Band 1, Enke Verlag Stuttgart*.
- [8] Jaeger, J. C. & Cook, N. G. W., 1969 *Fundamentals of Rock Mechanics*. London. Methuen.
- [9] *Proceedings of the First Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon, Vol. I, II, 1966.*

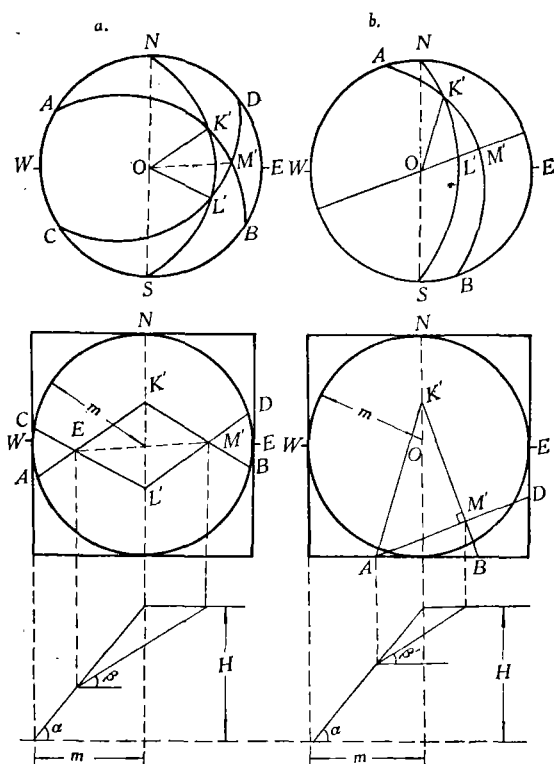


图6 实体比例投影方法

a. 求两组结构面交线倾角, b. 求一组结构面不稳定倾角
(图例: 弧 AB, CD 为岩体结构面, 弧 NS 为边坡面, K', L' 为结构面与边坡眉线交点, α 为坡角, β 及 β' 为所求的不稳定倾角, H 为坡高)