

隧道力学概论

关宝树 编

西南交通大学出版社

新登字(川)018号

隧道力学概论

关宝树 编

※

西南交通大学出版社出版发行

(四川成都九里堤)

四川省新华书店经销

成都盲哑学校印刷厂印刷

※

开本:787×1092 1/16 印张:10.5

字数:200千字 印数:1—2000册

1993年3月第1版 1993年3月第1次印刷

ISBN 7-81022-403-4/O·034

定价:7.95元

目 录

绪 论	1
-----	---

第一篇 隧道工程的地质环境

第一章 坑道开挖前围岩的应力状态	3
§ 1—1 重力应力场	4
§ 1—2 构造应力场	5
第二章 围岩的工程性质	7
§ 2—1 岩石的基本性质	7
§ 2—2 岩体的构造——力学性质	12
§ 2—3 岩石和岩体的破坏准则	23
§ 2—4 岩石的流变特性	28
第三章 地下坑道围岩分级及其应用	34

第二篇 坑道开挖后的力学行为

第四章 坑道开挖后的二次应力状态	44
§ 4—1 坑道开挖后的弹性二次应力状态	45
§ 4—2 坑道开挖后形成塑性区的二次应力状态	49
§ 4—3 无支护坑道的稳定性及其破坏	56
第五章 坑道围岩的三次应力状态	60
§ 5—1 支护阻力对坑道周边应力分布的影响	60
§ 5—2 支护阻力对坑道周边位移状态的影响	63

第三篇 支护结构的力学动态

第六章 支护结构的类型、构造	68
§ 6—1 支护结构的基本要求	68
§ 6—2 支护结构的类型	71
§ 6—3 支护类型的选择	72

第七章 支护结构的力学特性	75
§ 7—1 混凝土或喷混凝土的支护特征曲线	76
§ 7—2 钢支撑的支护特性曲线	77
§ 7—3 锚杆的支护特性曲线	79
§ 7—4 组合支护体系的特性	82

第四篇 隧道支护体系的设计原则和方法

第八章 概 述	86
第九章 坑道支护体系的结构力学计算方法	91
§ 9—1 结构计算模式	91
§ 9—2 围岩压力的统计分析	92
第十章 隧道支护体系的岩石力学计算方法	102
§ 10—1 剪切滑动破坏法	102
§ 10—2 特征曲线法	107
第十一章 隧道支护体系的信息反馈设计方法概述	121
§ 11—1 信息反馈方法	122
§ 11—2 隧道净空位移的监控基准及监控曲线	128
第十二章 隧道支护体系的经验设计	133

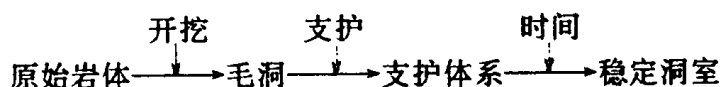
第五篇 隧道施工的基本经验与原则

第十三章 新奥法施工	142
§ 13—1 施工的基本原则	142
§ 13—2 施工方法及过程	143
§ 13—3 新奥法的优缺点及适用范围	150
第十四章 隧道动态的量测技术	152
§ 14—1 量测方法概述	152
§ 14—2 量测值的评价	156
参考文献	161

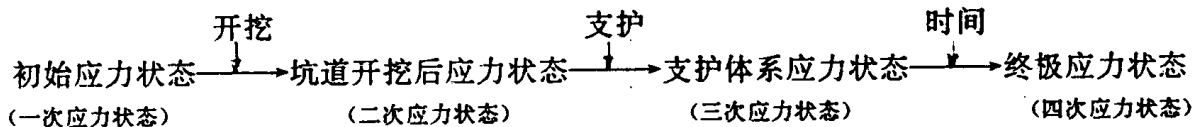
绪 论

众所周知，地下工程所处的环境条件与地面工程是全然不同的。但长期以来都是沿用适应于地面工程的理论和方法来解决在地下工程中所遇到的各类问题，因而常常不能正确地阐明地下工程中出现的各种力学现象和过程，使地下工程长期处于“经验设计”和“经验施工”这种举步不前的局面。这种局面与迅速发展的地下工程的现实是极不相称的。因此寻求用于解决地下工程问题的新的理论和方法，已成为近十几年来众所努力共同愿望。由此而形成的一个以岩体力学、工程地质力学、结构力学、弹性力学……等为基础的、综合性的“隧道力学”，则成为现代工程力学的一个重要分支。

地下施工的基本目的是在各类地质体（岩体或土体）中修筑为各种目的服务的、长期稳定的洞室结构体系。从结构角度看，这个结构体系是由周围地质体和各种支护结构构成的，即洞室结构体系=周围地质体+支护结构。它的形成则是通过一定的施工过程或者说是一定的力学过程来实现的。这个过程大体上可作如下表达：



与之相适应的力学过程如下所示：



文后的框图表达了隧道及地下工程设计、施工的基本思路和方法。

由此可见，隧道力学所牵涉的内容是比较广泛的。它包括从地质体的研究一直到形成稳定洞室为止的全部内容，而要解决这些问题，则需要有关地质学、地质力学、岩体力学、结构力学、弹性及塑性力学以及各种支护结构所用的建筑材料、结构设计原理和方法等各方面的知识。因此，隧道力学也可以说是一门综合性比较强的边缘学科。

根据上述，我们把隧道力学所研究的基本内容大体上归纳为下述几个方面。

1. 地质工程体的研究

这里的地质体，即指洞室的地质环境。大家知道，洞室是处在各种地质环境中的地下结构，因此，它必将受到周围环境的强烈影响。所谓的地质环境包括：地质体的形成及其经历；初始应力场（包括构造应力场在内）；各种地质体的物理的、力学的、构造的和时间的特性及其分类等。科学地认识地质环境对地下结构体系的影响是正确地进行结构设计和施工的前提。

2. 坑道开挖后的围岩力学动态和过程

坑道开挖以前围岩是处在初始应力的平衡状态之中，当开挖洞室后破坏了这种初始的平衡状态，出现了应力重新分布、构造应力的释放（如岩爆……等）、坑道周围岩体的性质变化、坑道断面的收敛、甚至坑道崩塌等各种物理现象。了解和认识从毛洞（即无支护坑道）的形

成到其破坏的全部过程将有助于充分地、有效地发挥岩体——支护体系的重要组成部分——在整个支护体系中的作用。

无支护坑道的稳定性及其破坏机理是岩体力学研究的重要课题之一。因为地下工程实践证明，无支护坑道和洞室是大量存在的。

3. 坑道支护体系的评价

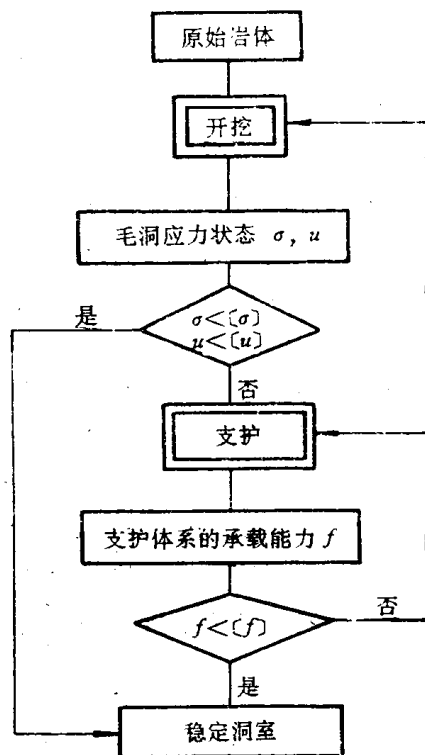
在控制岩体变形的发展，有效地利用岩体的承载能力时，需要修筑支护结构。前已指出，一个完整的支护体系是由周围岩体和支护结构组成的。因此，支护体系的设计必须包括对周围岩体支护效应及支护结构效应的评定。而解决后者的关键是正确认识 and 了解各类支护结构（模筑混凝土衬砌、喷混凝土支护、锚杆、钢支撑……等）的构造及其支护效应，必须正确地确定支护结构与坑道围岩的接触状态及其相互作用机理，即建立两者的相互作用力学模式。与之相适应的各种支护体系的设计方法，包括建立在一定理论基础上的经验设计方法，以及建立在量测基础上的信息反馈设计方法，都是迫切需要解决的问题。

4. 时间对整个支护体系的影响及评价

各种材料（包括岩石及岩体、混凝土、金属材料……等）的性质，尤其是长期性质都与时间有关。因此，构成坑道支护体系的岩体和结构材料也必将受到时间的影响。例如支护结构参与工作的时间、围岩压力的时间效应、岩体或混凝土徐变、流变对应力应变的影响等。

5. 施工和支护过程的力学评价

前已指出，洞室的形成是通过开挖和支护两个施工阶段完成的。因此，采用的施工方法及支护方法也必然对整个坑道的稳定给予一定的、甚至是极为重要的影响。例如，全断面开挖及分部开挖、爆破开挖及非爆破开挖、木支撑与钢支撑、早期支护及二次支护、仰拱的及时封闭、一次掘进进尺……等都对坑道及结构的应力状态产生相应的影响。因此，在隧道力学中，施工技术的研究也是很重要的。实际上，隧道工程是一个经验性极强的学科，长期以来都是凭经验设计、施工的，但在这些大量的、丰富的经验中有许多都是符合科学的，有一定的理论基础。因此把这些行之有效的经验提高到理论上来认识和理解，是隧道力学的一个重要任务，同时，它也是形成隧道力学的一个实践基础。



隧道设计施工的基本思路

第一篇 隧道工程的地质环境

正确地认识和掌握地质环境条件对地下工程力学行为的作用和影响是合理地进行地下工程结构体系设计、施工的前提和基础。毫不夸大地说，离开了地质环境来谈地下工程是没有实际意义的。

本篇主要叙述与隧道工程设计、施工以及对地下工程力学行为有重要影响的地质因素，如原岩的初始应力场、坑道围岩的工程性质及其分类等。

第一章 坑道开挖前围岩的应力状态

地下工程的一个重要的力学特性就是：地下工程是修筑在应力岩体之中的，也就是在有一定的应力历史和应力场的岩体中进行修建的。所以，应力岩体的状态，就不可能不极大地影响着在其中发生的一切力学现象，这一点与地面工程是极其不同的。

所谓应力岩体就是指具有一定应力历史和一定应力场的岩体，它在坑道开挖前是客观存在的，在这种岩体中修建地下工程就必须了解它的状态及其影响。

对评定应力岩体有重要意义的是岩体的初应力场。这里所指的初应力场泛指坑道开挖前的岩体的初始静应力场。它的形成与岩体构造、性质、埋藏条件以及构造运动的历史等有密切关系，问题比较复杂。

岩体的初应力状态与施工引起的附加应力状态是不同的，它对坑道开挖后围岩应力分布、变形和破坏有着极其重要的影响。可以说，不了解岩体初应力状态就无法对坑道开挖后一系列力学过程和现象作出正确的评价。

岩体的初应力状态，一般受到两类因素的影响：

第一类因素有重力、温度、岩体的物理力学性质及构造、地形等经常性的因素。

第二类因素有地壳运动、地下水活动、人类的长期活动等暂时性的或局部性的因素。

因此，初应力场由两种力系构成，即

$$\sigma = \sigma_y + \sigma_T$$

式中 σ_y ——自重应力分量；

σ_T ——构造应力分量。

在上述因素中，目前主要研究的是由岩体的体力或重力形成的应力场，而其他因素只认为是改变了由重力造成的初应力状态。一般来说，重力应力场的估计可以采用连续介质力学的方法。它的可靠性则决定于对岩石的物理力学性质及岩体的构造——力学性质的研究。其误差通常是很大的。而其他因素造成的初应力场，主要是用实验（现场试验）方法完成的。

§ 1—1 重力应力场

首先，我们研究上覆岩体自重所产生的应力场。

我们研究具有水平成层、地面平坦的情况。如图 1—1 所示，设岩体是线性变形的，在 xz 平面内是均质的，沿 y 轴方向是非均质的。设 E, μ 分别为沿垂直方向的岩体弹性模量和泊桑比， E_1, μ_1 为沿水平方向的岩体弹性模量和泊桑比，则因岩体的变形性质沿深度而变，故可假定： $E=E(y), \mu=\mu(y), E_1=E_1(y), \mu_1=\mu_1(y)$ ，同时单位体积重量也认为是沿深度而变，即 $\gamma=\gamma(y)$ 。这样，距表面 h 深处一点的应力状态可表示如下：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \int_0^h \gamma(y) dy \\ \sigma_x &= \sigma_x(y) \\ \sigma_z &= \sigma_z(y) \\ \tau_{xy} &= \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

(1—1) 式满足了地面的边界条件，即

$$h=0, \quad \sigma_y=0.$$

大多数研究者认为，处于静力平衡状态的岩体内，沿水平方向的变形等于零，故

$$\sigma_z = \sigma_x = \frac{E}{E_1} \cdot \frac{\mu_1}{1-\mu} \sigma_y \quad (1-2)$$

当 $E=E_1=$ 常数， $\mu=\mu_1=$ 常数时，则得出大家熟知的公式

$$\sigma_z = \sigma_x = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \sigma_y \quad (1-3)$$

设 $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$ ，并谓之侧压力系数，则上式可写成

$$\sigma_z = \sigma_x = \lambda \cdot \sigma_y \quad (1-4)$$

显然，当垂直应力已知时，水平应力的大小决定于围岩的泊桑比 μ 。大多数围岩的泊桑比变化在 0.15~0.35 左右。因此，在自重应力场中，水平应力通常是小于垂直应力的。

深度对初始应力状态有着重大影响。随着深度的增加， σ_y 和 σ_x (σ_z) 都在增大。但围岩本身的强度是有限的，因此当 σ_y 和 σ_x 增加到一定值后，各向受力的围岩将处于隐塑性状态。在这种状态下，围岩物性值 (E 和 μ) 是变化的， λ 值也是变化的。并随着深度的增加， λ 值趋于 1，即与静水压力相似。此时围岩接近流动状态。

由此可见，围岩的初应力状态是随深度而变的，其应力状态可视围岩的不同，分别处在弹性的、隐塑性的及流动的三种状态。围岩的隐塑性状态在坚岩中约在距地面 10km 以下，也有可能浅处产生，如在岩石临界强度低（如泥岩……等）的地段。通常情况下，在隧道所涉及的范围內，都可视初应力场为弹性的，这一点亦可由部分量测资料所证实。

上述各式所表达的应力场是理论性的。实际上由于地壳运动的结果，岩层会产生各种变态，如变成各种倾斜状的、弯曲的等等。在这种情况下，围岩的初应力状态也有所变化。例

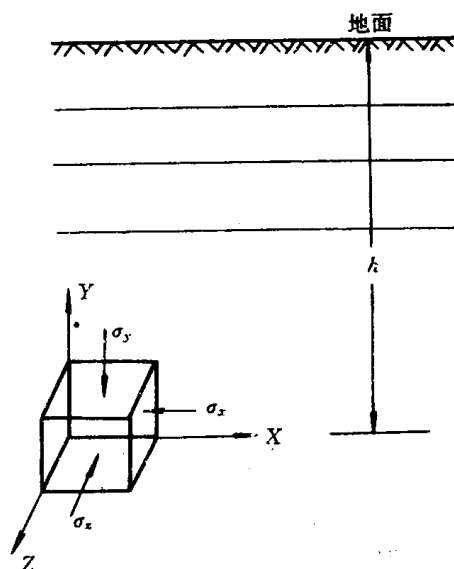


图 1—1 地表水平时的自重应力场

如，以垂直成层为例，由于各层的物理力学性质不同，在同一水平面上的应力分布可能是不同的；又如在背斜情况下，由于岩层成拱状分布，使上覆岩层重量向两翼传递，而直接处在背斜轴下面的岩层则受到较小的应力（图 1—2）。在被断层分割的楔形岩块情况中（图 1—3），也可观察到类似情况。下窄上宽的楔形岩体移动时，受到两侧岩块的夹制，因而使应力减小；反之，下宽上窄的岩块，则受到附加荷载的作用。大量的实测资料表明，地质构造形态改变了重力应力场的初始状态，这在实际工作中有时是不容忽视的。

上述各式是假定地表面为水平的，实际上地表面并不完全是这样。如图 1—4 所示，这种地形的变化，当然对初应力场有很大影响，该图表示考虑地形影响后，初应力场主应力大小及其方向的变化。在埋深较小的情况下，这种影响是不容忽视的。

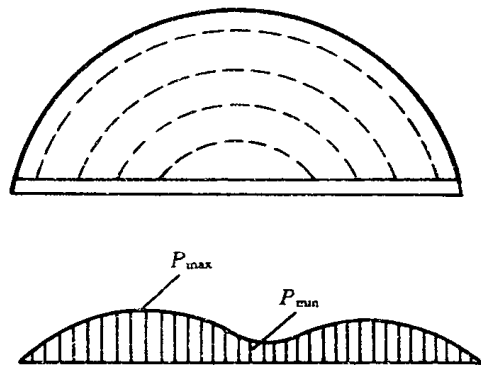


图 1—2 背斜构造的自重应力

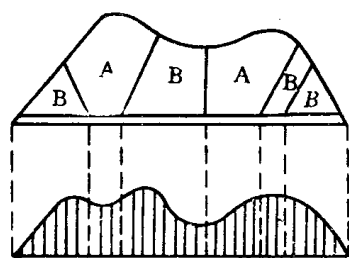


图 1—3 断层构造中的自重应力

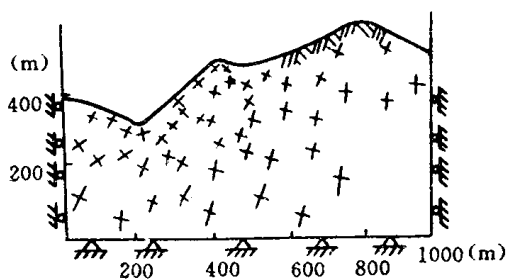


图 1—4 地形对自重应力的影响

§ 1—2 构造应力场

前已述及，整个地下工程都是在某种应力场中的地壳上部范围内进行的。这种应力场基本上是由重力应力场和构造应力场构成的。地质力学认为：地壳各处发生的一切构造变形与破裂都是地应力作用的结果。因而地质力学就把构造体系和构造形式在形成过程中的应力状态称之为构造应力场，它是动态的。

由于构造应力场的不确定性，很难用函数形式表达。它在整个初应力场中的作用只能通过某些量测数据加以分析。已发表的一些成果表明：

1. 地质构造形态不仅改变了重力应力场，而且除以各种构造形态获得释放外，还以各种形式积蓄在岩体内，这种残余构造应力将对地下工程产生重大影响。

2. 构造应力场在不深的地方已普遍存在，而且最大构造应力的方向，多近似为水平，其值常常大于重力应力场中的水平应力分量，甚至也大于垂直应力分量，这与重力应力场有很大不同。位于片岩中的陶恩隧道实地量测的初应力状态（图 1—5）就是一个例证。

在南非测定的垂直应力和平均水平应力的比值与深度的关系如图 1—6 所示。并可用下式表述：

$$\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \left(\frac{248}{H} \right) + 0.448 \quad (1-5)$$

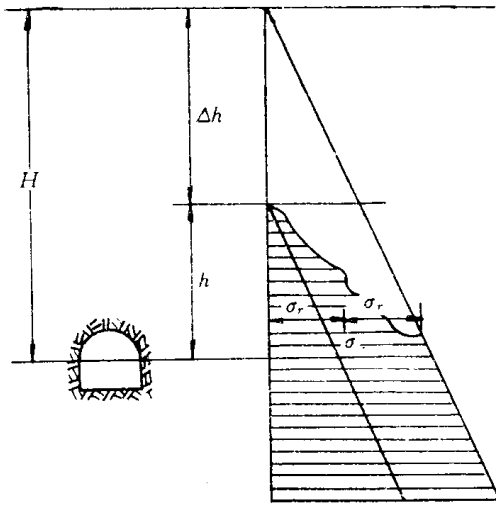


图 1—5 陶恩隧道的初应力场

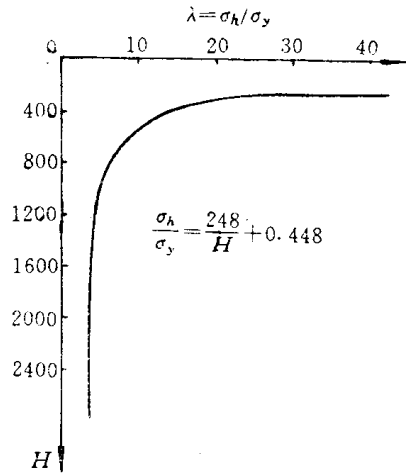


图 1—6 垂直应力与水平应力比值随深度的变化

(1—5) 式表明, 埋深较小时, 水平应力和垂直应力的比值 λ 很大。随着埋深的增加, λ 趋于减小。从我国现阶段积累起来的浅层 (埋深小于 500m) 实测资料看, λ 小于 0.8 者约占 27.5%。在 0.8~1.25 之间者约占 42.3%, 大于 1.25 者约占 30.2%。

3. 构造应力场很不均匀, 它的参数无论在空间上、时间上都有很大变化, 特别是它的主应力轴的方向和绝对值变化很大。

当近似地确定水平构造应力 T_H 后, 其应力场可初步作下述分析。(图 1—7)。

设在深 H 的岩体内某一点作用有水平构造应力 T_H , 则在微分体上的最大主应力 σ_{xT} 可近似认为等于

$$\sigma_{xT} = T_H \quad (1-6)$$

由于水平构造应力在另外两个方向产生不同的岩石变形, 所以

$$\sigma_{yT} = \chi \cdot T_H$$

$$\sigma_{zT} = \psi \cdot T_H$$

系数 ψ 、 χ 分别为构造应力场中水平和垂直方向的扩张系数。

这样, 地壳中的初应力场应等于

$$\sigma = \sigma_y + \sigma_T$$

用分析方法求解初应力场, 由于明显的原因 (构造的、力学形态的、量测技术上的……等), 常常会导致极大的偏差。因此, 在理论分析中, 常把初应力场按静水应力场来处理。在某些重要的工程中, 多采取实地量测的方法来判断主应力的大小及其方向的变化规律。在这些方法中比较通用的有地震法、水压致裂法、超前钻孔应力解除法、声发射法等。有关这部分内容可参考专门文献, 此处从略。

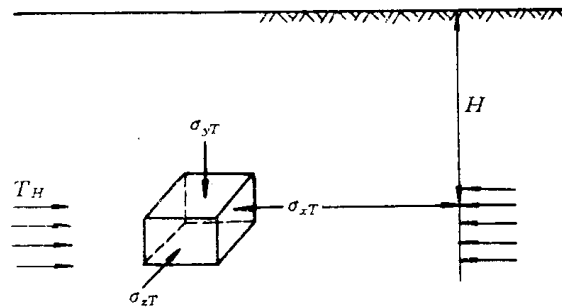


图 1—7 水平构造应力

$$(1-7)$$

第二章 围岩的工程性质

隧道或地下工程修筑在有一定的应力履历和构造迹象的地质体中，因此，合理地进行地下洞室结构的设计和施工的前提是正确地理解和掌握这种地质体的基本性质和工程性质。

从宏观上说，地质体基本上可分为岩体和土体两大类：岩体是由岩石、各种类型的结构面及充填物组成的；而土体通常系指土和破碎岩石等非胶结的粒状集合体，因为大多数地下工程都是修筑在岩体中的，故本章的重点放在对岩体的工程性质的说明上。

坑道围岩是指坑道开挖所影响的那一部分岩（土）体，或是对坑道稳定性有影响的那一部分岩（土）体。这部分岩（土）体因受到开挖和支护过程的影响，其性质有所变化。一般来说，岩（土）体处在原始状态之下，未受到人为的工程外力（开挖、爆破等）的干扰和破坏；而围岩则不同，它受到人为的工程外力的作用，变得松弛，强度也会降低、劣化。所以研究和了解围岩工程性质的这种变化，在隧道力学中是极其重要的。

§ 2—1 岩石的基本性质

岩石，通常是由不同矿物，经由各种地质作用而构成的，因而其性质主要由构成岩石的矿物成份、排列顺序、矿物间的联系状态而定。自然界中存在的矿物种类极多，故岩石的基本性质也是多样的，而且变化幅度也较大。

岩石的物性指标包括强度（抗压，抗拉，抗剪）、变形（弹性，塑性，粘滞性……等）以及透水性、空隙率、单位容量等。本节重点介绍岩石的力学性质，即强度及变形性质，其他可参阅有关岩石力学专著。

一、岩石的变形性质

岩石变形的基本特征是联系应力和变形的弹性系数 E 和横向变形系数 μ ，另一个在物理方程中常常遇到的系数 G 是由前二个派生出来的。在线弹性变形范围内， E 具有弹性模量的含义并可用法向应力与该方向的变形值之比来表示。在这种情况下， G 有剪切模量的含义，也是一个常数。

与金属不同，岩石的弹性极限是一个极有条件的性质，因为当应力水平比较小的时候就会出现残余变形。图 2—1 表示应力—轴向应变（曲线 1）和应力—横向应变（曲线 2）的关系图。

当应力从 0 开始增加时，应力应变曲线稍向上凹，而后随着应力的增加，应力应变曲线就变得非常接近直线，这种情况一直维持到应力达到某一数值 σ' （ $0a$ 和 $0a'$ 段）。该阶段是以岩石内部缺陷的封闭（如果有的话）和矿物晶格受弹性压缩为特征的。

继续增加应力，开始出现裂隙，此时横向变形系数 μ 逐渐增大，因而破坏了应力—横向变形的直线关系（ $a' \sim b'$ 段）。同时应力—轴向应变的关系仍是直线的（ $a \sim b$ 段）。但是由于非弹性变形的出现， E 具有所谓变形模量的含义，其数值较弹性模量为低。例如，如果采取多次加载、卸载的方法，得到的弹性模量值将比一次加载决定的弹性模量大 1.2~1.5 倍，在

某种情况下甚至更大些。

当应力增加到 σ' 时,形成的裂隙开始发展,破坏了“应力—轴向应变”的直线关系,直到岩石强度丧失和破坏。

在一般情况下,对多数岩石来讲,Ob段是非线性的,但与直线关系只有很小偏差。因此,在用弹性理论方法求解问题时,可以采用线性本构关系。但是这种代替只有在不造成岩石的应力—应变状态重大失真时才是允许的。

在这种情况下,作为变形模量的 E 值则由相应于线性变形极限应力 σ' 与由它引起的相对应变总值 ϵ' (图2—1曲线1)之比值决定。超出线性变形范围之外, E 值就不再是一个常数,而与作用应力值有关,即随着应力的增加而减小。表2—1列出某些岩石在不同变形阶段的 E 值和 μ 值。

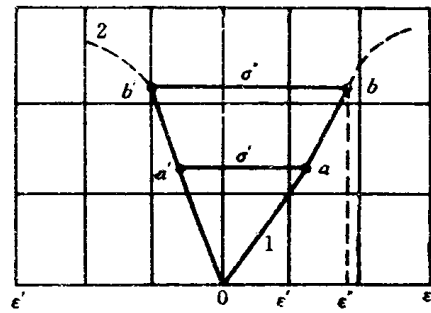


图2—1 岩石的应力—应变曲线

表 2—1

形 变 阶 段	$E_0 \times 10^4$ MPa	μ
受压 直到产生裂隙	9.5	0.226
裂隙的不稳定扩展	9.5	0.298
强度丧失	0.15	0.33
受拉 (各阶段是同时的)	8.5	0.226

岩石属于各向异性材料,其受压—受拉的性能是不相同的,所以视荷载作用方向,变形模量也是不同的。遗憾的是,目前还没有这方向的充分资料。对某些页岩研究的个别结果指出,受压时的变形模量比受拉时大1.2~1.5倍,对砂粘土是1.5~5倍。受拉与受压时变形模量的不同是由于变形过程的不同性质所造成的。受压时,其变形过程可分为若干阶段:如裂隙闭合、形成新裂隙、裂隙的不稳定扩展以及强度丧失等,而受拉时上述情况几乎是同时出现的。

岩石的变形性质与应力状态的形式有关。由单向应力状态变为多向应力状态时,由于平均的法向应力(σ_p)的增加,将导致变形模量的增加,这个现象与试件密度的变化有关,特别是对空隙率大的岩石。例如对冻结砂实验的结果,当 σ_p 由4MPa增加到8MPa时,变形模量增大1.5倍。对石灰岩,当各向压力从0增加到100MPa时,变形模量增加10%,粘土增加12.5%,而石灰岩、砂岩则增加35~40%。

另外一个重要的变形性质是横向变形系数 μ 。它是横向应变 ϵ' 与纵向应变 ϵ (单向受拉或受压)比值的绝对值。

$$\text{即 } \mu = \left| \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right| \quad (2-1)$$

μ 叫做泊桑比,在线性变形范围内,是个常数。

一般来说,如果压缩(拉伸)关系如图2—1曲线所示,则在线性变形范围之外, μ 值增加到0.5。在岩石实验(单向受压)时曾测得 μ 值从形成裂隙阶段的0.22增加到强度丧失阶段的0.33。在某些情况下,在岩石破坏阶段 μ 值会大于0.5。

通常情况下， μ 值并不影响岩石应力—应变状态的定性图式，对这个状态定量方面的影响也不大，例如把 0.3 代以 0.5，其误差约为 10~15%，即处在实验精度范围之内。因此在解决弹塑性问题时，令 $\mu=0.5$ 是有根据的。

应该指出，在地下工程实践中，岩石多数是处在多向应力状态之下的。因此，通过三轴压缩试验来探讨岩石的应力—应变特性，对解决实用问题，至为重要。

通过三轴压缩试验所得的结果，大体上可把岩石试件的内部变化分为四个阶段（图 2—2）。

第一阶段：在 0—I 的部分加上轴差应力 σ 后，纵向产生很大应变，随着 σ 的增大，轴向应变 ϵ_a 的增加逐渐减小。即弹性系数 E 增大，并接近一定值，但是横向应变 ϵ_r 的增加比纵向应变小，所以泊桑比 μ 逐渐减小，这说明随着 σ 的增加，体应变也减小。在第一阶段，岩石的空隙在围岩轴压作用下闭合。

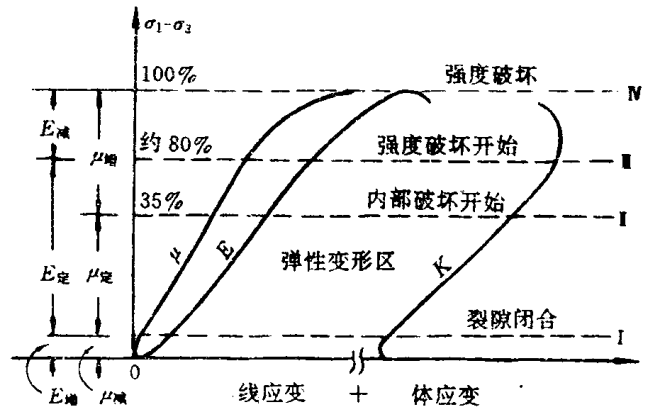


图 2—2 三轴压缩试验时岩石的应力—应变关系 (Bieniawski 1967 年)

第二阶段：图中的 I—II 部分，轴差应力和纵向应变、横向应变、体应变之间皆呈直线关系，即符合虎克定律的条件。在这一阶段空隙闭合，岩石成为构成矿物粒子的紧密的固体集合物，即显示完全确定的性质。

第三阶段：轴差应力大于 II 点后， σ_a 和轴向应变 ϵ_a 的关系没有变化，即弹性系数仍为定值，但横向应变 ϵ_r 增大，所以泊桑比也变大。这说明，试件体积变小的比例比以前减小了，在试件内部逐渐产生纵向裂隙。因此 II 点是开始产生纵向裂隙的始点，换句话说，在 II 点这个试件开始破坏。

第四阶段：轴差应力超过 III 点，纵向应变和横向应变都比前一阶段增大，应力和纵向应变的关系偏离直线关系， E 值减小。此外 μ 的减小比例也比 II—III 阶段大。在这一阶段裂隙逐步贯穿试件，构成岩石的颗粒被压碎，因此产生空隙，体积增大。但增大的体积应变在 III 点达到最大值后逐渐减小，III 点是发生不稳定裂隙的始点。因此第四阶段是表示岩石材料的破碎、分解的过程。

在三轴试验的条件下，与最大应力相比，II 点约在 35%，III 点约在 80% 的应力下出现。上述的应力—应变过程，对了解岩石的脆性破坏是很重要的。

上述的试验结果是在一般的柔性试验机，即普通试验机条件下取得的。它的缺点是不能获得岩石的应力—应变的全过程。当试件破坏后，试验就中断了，即缺少峰值后的应力—应变关系以及变形破坏动态的过程，而这一点对研究地下工程的力学行为是极为重要的。

在刚性试验机上对岩石进行试验得出的荷载—变形关系，一般如图 2—3 所示，大体上分为三个阶段。

第一阶段：线性阶段。应力—应变关系大体上是线性的，实质上这就是图 2—1 或图 2—2 所表达的。

第二阶段：当应力达到峰值时，试件的承载能力并没有完全丧失，而是一边降低，一边变形，试件表面部分出现分离破坏，这种现象叫强度劣化或应变软化。此时随着应变的发展，

应力—应变的曲线坡度愈来愈缓。

第三阶段：最后当试件的分离破坏终止时，出现变曲点，应变无约束地增大，但保留一定的强度，即所谓的残余强度。这种现象谓之松弛现象或塑性流动。

上述过程对各种岩石大致都是相同的。应该指出，在强度恶化阶段及达到残余强度后，岩石的物性指标也发生了相应的变化。

由此可见，为了完善地表达岩石的应力—应变关系，下述的数值是必不可少的（图2—4）。

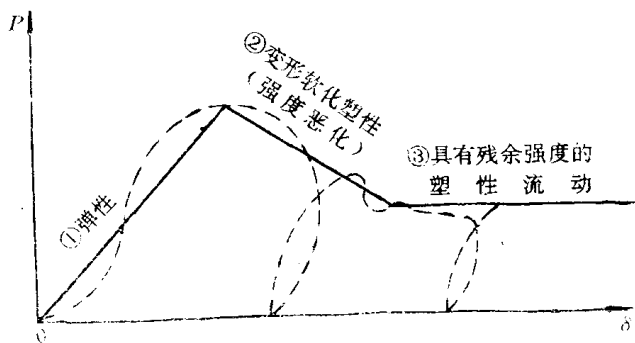


图2—3 刚性试验机的荷载—变形曲线

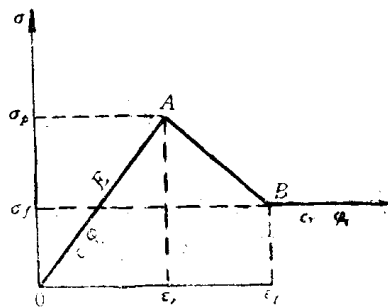


图2—4 线性的应力—应变全曲线

岩石的峰值强度 σ_p (c, φ)、与之对应的弹性应变 ϵ_e 和由此决定出的线弹性范围内的弹性模量 E 。

岩石的残余强度 σ_f (c_r, φ_r)、与之相应的极限应变 ϵ_f 以及 AB 段的负斜率 κ 。

依上所述，我们可以看出，岩石的变形、破坏现象与压力条件有关。在一定应力水平或长期作用下，岩石会由弹性变形转变为非弹性变形，甚至塑性变形的流动。因此研究岩石的应力—应变的本构关系是异常重要的。

二、岩石的强度性质

“岩石强度”一语系指它抵抗各种力的作用而不被破坏的能力。抗压或抗拉强度就是作用力（压力 P_c 或拉力 P_p ）与试件横断面积 F_0 的比值。

$$\sigma_c = \frac{P_c}{F_0} \quad \sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \quad (2-2)$$

过去曾错误地认为用这种方法决定的 σ_c 和 σ_p 是该岩石真正的强度，但实质上由于影响这些数值的因素很多，因而只能把它看作为一个相对指标，以此对各种类型岩石的强度进行比较。

影响“岩石强度”的因素有两类。第一类包括与岩石构造——力学性质有关的因素。如岩石组成、构造、组织、非均质性、各向异性、含水量等。第二类包括与进行试验工艺方面有关的因素，其中重要的有：试件端部的接触条件、试件尺寸及其形状的影响、加载速度等。

现在较详细地谈谈第二类因素。试件端部接触条件的影响在很大程度上决定了试件破坏的性质。在单轴抗压试验时试件破坏基本形式可分为：由剪应力造成的角锥形（图2—5a）和断裂形成的柱形（图2—5b）。

在岩石的单轴压缩试验时，于试件端部及压力机加压板之间设由厚纸板、钢板、塑料板、铅板、橡皮和石蜡等做成的垫板。试验结果指出：在采用的垫板能保证试件端部横向自由变形时（石蜡、塑料板、铅、橡皮）破坏都是以与压力方向平行的断裂形式出现的，同时试件的

承载能力大为降低(超过3倍)。另外,试件高度与直径比值愈大,强度降低越多,可能达到5倍或更大。

在试验时,试件的端部接触条件应该是怎样的呢?为了解决这个问题,必须求助于对自然条件下岩石破坏性质进行现场观察的结果。大家知道,坑道围岩是处在多维应力状态之下的,并向坑道中心移动,同时承受拉伸变形。

在未受到爆破影响的坑道内,观察到的裂隙都是与暴露面平行或几乎是平行的,也就是说,与最小主应力方向垂直。这证实在破坏开始阶段,断裂起到很重要的作用。

在这方面,当试件端部可横向自由变形时,进行的不等压三轴试验($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)指出:在各种情况下,破坏都是由拉伸变形造成的,其裂面与最小主应力 σ_3 方向垂直(图2—6),这与自然观测结果是一致的。一些在单轴压缩条件下研究这种影响的资料也得出结论:“试件的破坏是拉应力作用的结果,拉应力方向与试件轴线和破坏平面垂直”。而剪切破坏是由应力状态的不均匀性所造成的。

由上所述可以得出两个重要结论:第一,在压缩条件下断裂与剪力一样对岩石的破坏过程起着重要的作用,在某些条件下这种作用是决定性的。第二,实验室试验条件应保证不仅与自然条件有相似的应力状态,也应有同样的破坏性质。

影响试件强度的另外一个因素是它的尺寸。试件尺寸的影响也叫做“比例效应”。多数试验表明:尺寸逐渐增大,其抗压强度也依次减小,尺寸超过一定大小后,强度将维持在一个定值左右。例如,根据一些单轴抗压试验的资料,大理石试件当其直径增加5.8倍时(此时高度是 $h=2\sqrt{F_0}$, F_0 即为试件面积)强度降低1.33倍(图2—7曲线1)。对辉长岩约减小1.15倍(图2—7曲线2)。

还有一个影响试件强度的因素,就是加载速度。一般说随着加载速度的增加,强度也增加。图2—8是用石灰岩和绢云母片岩试件得出的结果。

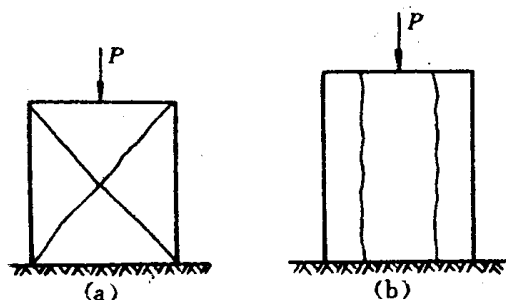


图2—5 破坏形式

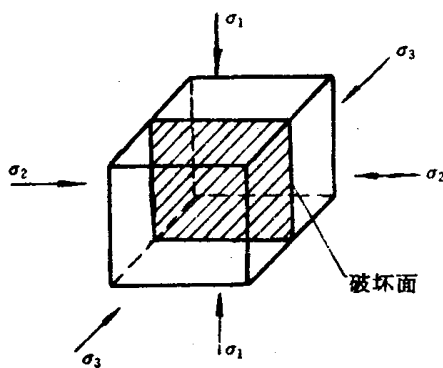


图2—6 不等压三向受力的破坏

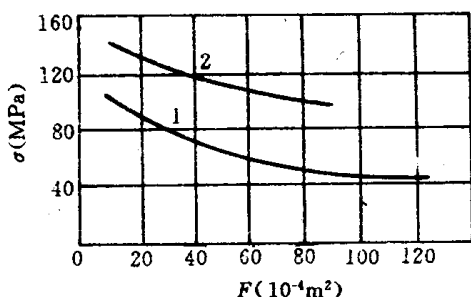


图2—7 岩石试件强度与试件尺寸关系曲线

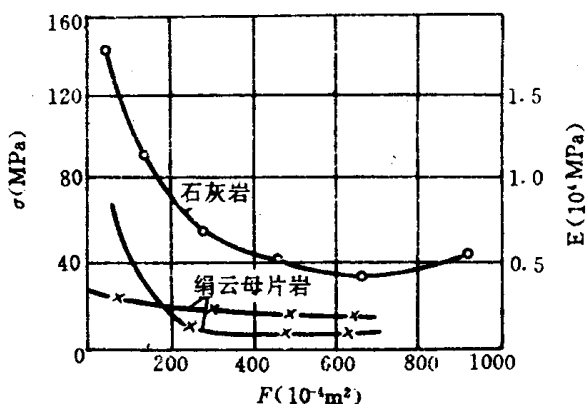


图2—8 岩石试件强度与试件尺寸关系曲线

由此可见，比较各类岩石强度应首先保证试验条件的一致，否则会得出错误的结论。

此外，岩石试件的采取及试验方法的不同，其力学性质有很大的变化，数值极为分散，因此使用时要极为慎重。

岩石强度通常有抗压强度、抗拉强度、抗剪强度（包括摩擦角及粘结力）等，它们在岩石和隧道工程设计中具有不同的重要意义。

岩石的单轴抗压强度通常是以单轴试验得到的破坏前的最大应力定义的，它与岩石的其他物性指标有较好的互换性，而且试验数据的分散性较小，试验方法简单，在隧道工程设计中应用较广。

由单轴拉伸试验得到的最大应力定义为抗拉强度，一般可用劈裂试验决定。前已指出，坑道周围岩体的破坏，多数是由拉应力造成的。因此，研究岩石的抗拉强度很重要。

抗压强度与抗拉强度之比谓之脆性度。岩石的脆性度约在 10~20 左右。

抗剪强度指在三轴试验得到的破坏应力圆的包络线切线与 τ 轴相交的长度 ($\sigma=0$)，与此同时可以决定内摩擦角 φ 。

有关岩石强度性质在许多专著中谈得较多，此处从略。

§ 2—2 岩体的构造——力学性质

岩体是整个地质母体中的一部分，这些岩体内部有着许多结构面，有的是构造作用形成的；有的是其他原因，如风化、变质等原因形成的。这些结构面把岩体分割成各种类型和尺寸的岩块，因此，岩体也可以说是各种类型和尺寸的岩石块的集合体。它们在初始应力状态（岩体的自重应力及潜在构造应力）下彼此联锁在一起而处于平衡状态。由此可见，岩体是由下述几部分构成的：

1. 不同尺寸和类型的岩石块；
2. 结构面；
3. 岩块间的充填物。

由此可见，岩体的生成及其埋藏条件赋予它一定的构造——力学特征。在这里，所指的岩体是地壳处在工程作用范围内的那一部分。它决定了施工条件及结构物使用条件，具有与其相邻地壳部分不同的构造——力学特征。

坑道围岩从构造——力学特征上看，大体上可分为无裂隙岩体和裂隙岩体两大类。地下工程在多数情况下是修筑在裂隙岩体中的，因此目前许多研究重点都放在裂隙岩体的构造——力学特征上。

一、裂隙岩体的构造特征

裂隙岩体的地质构造特征是结构面的存在。结构面是由各种地质原因形成的。有的是原生的（节理、层面……），有的是次生的（构造的、风化的……）。结构面的存在使岩体的力学、变形的各向异性极为显著，不均质性也很突出。

结构面使岩体变成不同岩块的组合体，从而赋予岩体呈现不同的结构形态或破碎状态。这种结构形态或破碎状态对岩体稳定有着重要的影响。

视裂隙岩体的结构形态，基本上可分为：

1. 规则的裂隙岩体。如明显层状构造的岩体，一些被规则裂隙切割的大块状岩体等。

2. 非规则的裂隙岩体。如被多组裂隙分割成碎块状的岩体, 处于某些断裂带、风化带的岩体等。

表 2—2 是中国科学院地质研究所对岩体结构类型的划分一例。

岩体结构类型及其特征

表 2—2

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
块状结构	厚层沉积岩 火成侵入岩 变质岩	块状 柱状	节理为主
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
破碎结构	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
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
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、节理断面间错动面发育
散体结构	断层破碎带 风化破碎带	鳞片状 碎屑状	断层破碎带, 风化带及次生结构面

应该指出, 在各种类型结构面中, 结构弱面对岩体稳定性影响很大, 它是决定岩体强度的基本条件。对地下坑道来说, 围岩中存在单一的软弱面, 一般并不会影响坑道的稳定, 这是与岩石边坡所不同的, 只在出现二组或二组以上的断裂系统时, 才能形成分离岩块。另外, 在进行稳定分析时, 还要对结构面的性质进行判断, 要判断哪些是弱面? 有些虽然是结构面, 但不一定是软弱面, 如硅质、钙质胶结的节理面, 岩脉接触面等, 它们的强度很大。因此, 软弱面基本是指那些断层, 剪切带、破碎带、泥质充填的节理、软弱夹层等控制岩体强度的结构面, 其强度较岩石强度低。

岩体内结构面是在各种不同的地质作用中生成和发展的, 各种类型结构面的工程地质特征见表 2—3。

由此可见, 岩石只是岩体构成的一部分, 它的性质并不能代表岩体的物性, 这一点是必须明确的。由上述条件决定的岩体构造——力学特征是它的非连续性、非均质性、各向异性和突变性。

连续性的数学概念是要求应力和变形的连续。大家知道岩石结构的颗粒、层理、裂隙等都破坏了岩体的连续性, 结果把岩体分割成层状、块状等单元体。但是, 如果所有这些单元,