

岩体的力学性质包括岩体的变形性质、强度性质、动力学性质和水力学性质等方面。

岩体在外力作用下的力学属性表现出非均质性、非连续、各向异性和非弹性。

岩体的力学性质取决于两个方面：

- 1) 受力条件；
- 2) 岩体的地质特征及其赋存环境条件。

其中地质特征包括岩石材料性质、结构面的发育情况及性质(影响岩体的力学性质不同于岩块的本质原因)；

赋存环境条件包括天然应力和地下水。

第一节 岩体的变形性质

一、岩体变形试验及其变形参数确定

变形参数包括变形模量和弹性模量。按静力法得到，动力法得到。

1. 承压板法

刚性承压板法和柔性承压板法

各级压力 $P-W$ (岩体变形值) 曲线

按布西涅斯克公式计算岩体的变形模量 E_m (Mpa) 和弹性模量 E_{me} (Mpa)。

式中： P —承压板单位面积上的压力 (Mpa)；

D —承压板的直径或边长 (cm)；

W, W_e —为相应 P 下的总变形和弹性变形；

ω —与承压板形状、刚度有关系数，圆形板 $\omega=0.785$ ，方形板 $\omega=0.886$ 。

μ_m —岩体的泊松比。

★定义：

岩体变形模量 (E_m)：岩体在无侧限受压条件下的应力与总应变之比值。

岩体弹性模量 (E_{me})：岩体在无侧限受压条件下的应力与弹性应变之比值。

2. 钻孔变形法

钻孔膨胀计

利用厚壁筒理论 (弹性力学) 得：

式中： d 为钻孔孔径 (cm)；

P 为计算压力 (Mpa)；

u 为法向变形 (cm)。

与承压板比较其优点：

- ①对岩体扰动小；
- ②可以在地下水位以下相当深的部位进行；
- ③试验方向不受限制；
- ④可以测出几个方向的变形，便于研究岩体的各向异性。

缺点：涉及岩体体积小，代表性受局限。

3. 狭缝法 (狭缝扁千斤顶法)

水平的，也可以是垂直的。如图 6.3 所示。

二、岩体变形参数估算

现场原位试验费用昂贵，周期长，一般只在重要的或大型工程中进行，因此，岩体变形参数的很多情况下必须进行估算。

两种方法：

- ① 现场地质调查→建立适当的岩体地质力学模型→室内小试件试验资料→进行估算；
- ② 岩体质量评价和大量试验资料→建立岩体分类指标与变形参数间的经验关系→进行估算。

1. 层状岩体变形参数估算

E、 μ 、G 为岩块参数，Kn、Ks 为层面变形参数。

1) 法向应力 σ_n 作用下，如图 6.4 所示

沿 n 方向加荷：

岩体总变形：

沿 t 方向加荷：

岩体的变形主要是岩块 引起的

2) 剪应力作用下

岩体剪切变形 Δu_j = 层面滑动变形 Δu + 岩块的剪切变形 Δu_r

注：以上是假定岩块和结构面的变形参数及各岩层厚度均为常数的情况下推导出来的。

2. 裂隙岩体变形参数的估算

1) 比尼卫斯基 (Bieniawski, 1978) (南非)

$$E_m = 2RMR - 100 \quad (RMR > 55)$$

E_m 变形模量，RMR 分类指标值。

$$RMR = 9 \lg Q + 44, \quad (\text{巴顿岩体质量分类})$$

Serafim 和 Pereira (1983)

$$(RMR \leq 55)$$

2) 挪威的 Bhasin 和 Barton 等 (1993) 岩体分类指标 Q 值—岩体质量分级 (巴顿)

三、岩体变形曲线类型及其特征 (岩体中存在结构面，与岩块的峰值前的变形曲线区分开来)

1. 法向变形曲线

1) 直线型，如图 6.5a 所示→弹性岩体

$$dp/dw = k \quad (\text{岩体的刚度})$$

2) 上凹型，如图 6.5b 所示→弹塑性岩体

>0 ，值 $p \uparrow$ 而 \uparrow ，层状及节理岩体属于此种类型。

3) 下凹型 (上凸型)，如图 6.5c 所示→塑弹性岩体

随 $p \uparrow$ 而 \downarrow ，结构面发育且泥质充填的岩体或粘土岩、风化岩属于此种类型。

4) 复合型→塑-弹-塑性岩体

呈阶梯或“S”型，如图 6.5d 所示。

结构面发育不均或岩性不均匀的岩体多属于此种类型。

2. 剪切变形曲线

比较复杂

根据 τ - u 曲线的形状，残余强度 (τ_r) 与峰值强度 (τ_p) 的比值，可分为 3 类，如图 6.6 所示：

1) 峰前斜率小，破坏位移大，2~10mm；峰后位移 \uparrow ，强度降低或不变，如图 6.6a 所示。

沿软弱结构面剪切时的情况。

2) 峰前斜率较大, 峰值强度较高, 有较明显应力降, 如图 6.6b 所示。

沿粗糙结构面、软弱岩体及风化岩体剪切时的情况。

3) 峰前斜率大, 有较清晰的线性段和非线性段, 峰值强度大, 破坏位移小, 1mm 左右, 残余强度 (τ_r) 较低, 如图 6.6c 所示。

剪断坚硬岩体时的情况。

四、影响岩体变形性质的因素

岩体的岩性、结构面的发育特征、荷载条件、试件尺寸、试验方法和温度等等。

结构面的影响 (结构面效应):

方位: 导致岩体变形的各向异性、变形模量 E_m 的各向异性;

密度: $\rho \uparrow$, 变形增大, $E_m \downarrow$;

充填特征;

组合关系。

第二节 岩体的强度性质

岩体强度: 指岩体抵抗外力破坏的能力。

包括抗压强度、抗拉强度和抗剪强度。

一、岩体的剪切强度

定义: 岩体内任一方向剪切面, 在法向应力作用下所能抵抗的最大剪应力。包括:

抗剪断强度 ($\sigma_n \neq 0$, 预定剪切面)

抗剪强度 与岩块类似 ($\sigma_n \neq 0$, 沿已有破裂面)

抗切强度 ($\sigma_n = 0$ 的抗剪断强度)

1. 原位剪切试验及其强度参数 (C 、 ϕ) 确定

双千斤顶法直剪试验 (在平巷中进行), 如图 6.7 所示。

一般来说, 岩体中的 ϕ_m 与岩块的 ϕ 较接近; 而岩体的 C_m 大大低于岩块的 C 。这说明结构面的存在主要降低了岩体的连结能力, 进而降低其内聚力。

为使剪切面上不产生力矩效应, 合力通过剪切面中心 O , 使其接近于纯剪破坏; 另一千斤顶倾斜布置, $\alpha = 15^\circ$, 每组试件应有 5 个以上。

剪断面上:

F 为试件受剪截面积

2. 剪切强度特征

岩体的剪切强度主要受结构面、应力状态、岩块性质、风化程度及其含水状态等因素的影响。

1) 高应力条件时, 岩体的剪切强度较接近于岩块强度;

低应力条件下, 岩体的剪切强度主要受结构面发育特征及其组合关系的控制。

2) 工程荷载一般小于 10Mpa (低应力), 故与工程活动有关的岩体破坏, 基本上受结构面的控制。

3) 岩体的剪切强度不是单一值, 而是具有上限 (Upper limit & bound) 和下限 (Lower limit & bound) 的值域。其强度包络线也不是单一曲线, 而是有一定上限和下限的曲线族, 如图 6.8 所示。

(上限为岩体的剪断强度, 下限是结构面的抗剪强度)

由图 6.8 可知:

σ 较低时, τ 变化范围较大, $\sigma \uparrow$, τ 变化范围变小;

$\sigma \uparrow \rightarrow \sigma_0$ 时, 包络线为一曲线, 岩体强度 τ 将不受结构面的影响, 趋向各向同性体。

二、裂隙岩体的压缩强度

包括单轴抗压强度和三轴压缩强度。

原位试验工期长，费用高。

因此，人们就开始从理论上分析研究裂隙岩体的压缩强度。

耶格 (Jaeger, 1960) 提出单结构面理论。→“结构面的强度效应”

单结构面强度效应

假定岩体中发育一组结构面 AB，AB 面（法线方向）与最大主应力方向夹角为 β 如图 6.9 (a) 所示。由 Mohr 应力圆理论：

.....①

结构面强度服从 Coulomb-Navier 准则，如图 6.9 (b)：

.....②

①代入②得沿结构面 AB 产生剪切破坏的条件：

.....③

式中： C_j ， ϕ_j 为结构面的粘聚力和摩擦角。

1) 当 $\beta = \phi_j$ 或 $\sigma_1 \rightarrow \infty$ ，岩体不可能沿结构面破坏，而只能产生剪断岩体破坏；

2) 当 $\beta \in [\beta_1, \beta_2]$ 时，岩体才沿结构面破坏，如图 6.9 (c) 所示。

略

结构面力学效应图给出了这两种破坏的强度包络线，如图 6.9 (d) 所示。

另外，由③可得：

岩体三轴压缩强度 σ_{1m} ：

当 $\sigma_3 = 0$ 时，得岩体单轴抗压强度 σ_{mc} ：

当 $\sigma_3 = 0$ 时，得岩体强度的最小值：

如果岩体中含有两组以上结构面时，先给出每一组结构面单独存在的强度包络线 ($\sigma_1 - \sigma_3 \sim \beta$)，取其中最小的包络线为该岩体的强度包络线，并以此确定岩体的强度。

三、裂隙岩体强度的经验估算

岩体强度是岩体工程设计的重要参数，而做岩体的原位试验又十分费时、费钱，难以大量进行。因此，如何利用地质资料及小试件室内试验资料，对岩体强度作出合理估算是岩石力学中重要研究课题。

下面介绍两种方法：

1. 准岩体强度

该方法的实质：用某种简单的试验指标来修正岩石（块）强度，做为岩体强度的估算值。

节理、裂隙等结构面是影响岩体的主要因素。

引入弹性波知识，根据弹性波在岩体和岩块中的传播情况，可判断岩体中裂隙发育程度。

岩体的完整性（龟裂）系数，以 K 表示：

式中：—岩体中弹性波纵波传播速度；

—岩块中弹性波纵波传播速度。

可以根据 K 来计算准岩体强度。

1) 准岩体抗压强度： $\sigma_{mc} = K\sigma_c$

2) 准岩体抗拉强度： $\sigma_{mt} = K\sigma_t$

式中： σ_c 、 σ_t 为岩石试件的抗压（拉）强度。

2. Hoek-Brown 经验方程

Hoek-Brown (1980) 用试验法导出岩块和岩体破坏时主应力间的关系：

式中： σ_1 、 σ_3 为破坏时的最大（小）主应力；

σ_c 为岩块的单轴抗压强度；

m 、 S 为与岩性及结构面情况有关的常数，查教材 P109 表 6-5。

上式的剪应力表达式为：

式中： τ 为岩体的剪切强度； σ 为法向应力； A 、 B 为常数；

1) 令 $\sigma_3=0$ ，则得岩体的单轴抗压强度 σ_{mc} ：

2) 令 $\sigma_1=0$ ，则得岩体的单轴抗拉强度 σ_{mt} ：

适用条件：适用于受构造变动扰动改造及结构面较发育的裂隙化岩体。而对低围压下较坚硬完整的岩体，估算强度偏低→缺点和不足！

除此之外，另外有 Sheery、Bisw 和 Choubeg（1989）等人的经验方程。

第三节 岩体的动力学性质

在动荷载作用下岩体的性质主要表现在以下几个方面：

弹性波的传播规律（岩体中）；

岩体的动力变形；

岩体的强度性质。

何谓波？应力波呢？

波是指某种扰动（运动参数、状态）（如应力、变形、振动、温度、电磁场强度等）的变化在介质中的传播。

应力波是应力在固体（岩体）介质中的传播。

根据固体介质变形性质的不同，在固体中传播的应力波分为如下几类：

①弹性波： $\sigma-\epsilon$ 关系服从虎克定理的介质中传播的波。

②粘弹性波：非线性弹性体中传播的波，除了弹性应力外还存在摩擦应力或粘滞应力。

③塑性波：应力超过弹性极限的波。（只在振源处才能观察到，且不是所有岩体中都能产生这样的波。）

④冲击波：大扰动的传播速度远大于小扰动的传播速度的介质中传播的波。

一、岩体中弹性波的传播规律

根据波动理论，连续、均匀、各向同性弹性介质中传播的 V_p 和 V_s ：

式中： E_d —动弹性模量；

μ_d —动泊松比；

ρ —介质密度。

影响岩体传播的弹性波的因素：

（1）岩性：岩体愈坚硬，波速愈大；反之，愈小；

（2）结构面：对弹性波传播起隔波（垂直于结构面方向）或导波（平行于结构面方向）作用，从而导致波速及波动特性的各向异性；

（3）应力状态：压应力时，波速随应力增加而增加，波幅衰减减少；拉应力时，波速随应力增加而降低，波幅衰增大。

（4）水：岩体中含水量的增加导致弹性波波速增加；

（5）温度：岩体处正温时，波速随 $T \uparrow$ 而 \downarrow ；处于负温时则随 $T \uparrow$ 而 \uparrow 。

二、岩体中弹性波速度的测定

式中： E ：静弹性模量

j ：折减系数

E_d ：动弹性模量

（在设计和应用上常用静弹性模量 E ，但它的获得费时、费事、费钱。）

三、岩体的动力变形与强度参数

1. 动力变形参数

（ E_d 、 μ_d 、 G_d ）

声波测试资料求取：

2. 动力强度参数

动态加载下的岩石强度比静态加载下的强度高→“时间效应”

王思敬等的经验公式：

岩体准抗压强度 R_m ：

式中： V_{mp} 、 V_{rp} 分别为岩体和岩块的纵波波速。

第四节 岩体的水力学性质

岩体的水力学性质：指岩体与水共同作用所表现出来的力学性质。

水对岩体的作用包括两个方面：

- 1) 水对岩石的物理化学作用（软化系数表示， α ）；（实际上包括软化和泥化作用）
- 2) 水与岩体相互耦合作用下的力学效应。

一、单个结构面的水力特征

设结构面为一平直光滑无限延伸的面，张开度 e 各处相等，如图 6.10 所示。

忽略岩块的渗透性，在稳定流的情况下，各层间的剪应力 τ 和静水压力 P 之间关系：

又

①

式中： u_x 为沿 x 方向的水流速度；

η 为水的动力粘滞系数（ $0.01\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）

1) 边界条件：

若 e 很小，可忽略 P 在 y 方向上的变化，求解①得：

②

由②可知：水流速度在断面上呈二次抛物线分布。

又

式中： γ 为水的运动粘滞系数（ cm^2/s ）

以上为平直光滑无充填贯通结构面导出的，但实际上岩体的结构面没有如此理想。于是，路易斯（Louis, 1974）提出了修正公式：

式中： K_2 —结构面的面连续性系数；

C —结构面的相对粗糙修正系数；

h 为结构面的起伏差。

二、裂隙岩体的水力特征

1. 含一组结构面岩体的渗透性能

如图 6.11 所示，一般结构面走向方向的等效渗透系数 K 为：

K_m 很小，可忽略，于是岩体的渗透系数 K 为：

2. 含多组结构面岩体的渗透性能（自阅）

3. 岩体渗透系数的测试

1) 压水试验

单孔、三段、注水试验等方法，如图 6.12 所示为一单孔压水试验。

$P \rightarrow P$ 后，5~10min 后测 Q (L/min)，岩体单位吸水量 W (L/min.m.m)：

巴布什金公式得：

2) 抽水试验

参见《地下水动力学》

三、应力对岩体渗透性能的影响

野外和室内试验研究表明：

结构面中的水流量随受的正应力 \uparrow 而 \downarrow ，并且随着加、卸载次数的增加，岩体的渗透能力降低（主要是结构面受力闭合的结果）。

许多经验公式：

1) 斯诺 (Snow, 1966)： $K = K_0 + (K_n t^2 / s) (P_0 - P)$

K_0 为初始应力 P_0 的渗透系数；

K_n 为结构面的法向刚度；

P 为法向应力。

2) 路易斯 (Louis, 1974)：其中 α 为系数， σ_0 为有效应力。

3) 孙广忠等 (1983)：(K_0 为附加应力 $=0$ 时的渗透系数； K_n 为结构面的法向刚度)。

由公式可知：岩体的渗透系数 K 是随应力的增加而降低的。并且随着岩体的埋深增大，结构面发育的密度和张开度都相应减小，故岩体的渗透性也减小。

工程实例中：①如地下洞室和边坡的开挖，改变了岩体中的应力状态，原来岩体中结构面的张开度因应力释放而增大，岩体的渗透性能也增大。

②水库的修建 \rightarrow 改变结构面中的应力水平 \rightarrow 影响岩体的渗透性能。

四、渗流应力

位于地下水面以下的岩体，当存在渗透水流时，就受到渗流静水压力和动水压力的作用。

在多孔介质如土体中时，对介质骨架作用的 P_d 为体积力。

当裂隙岩体中充满流动的地下水时，地下水对岩体裂隙壁施加一垂直于裂隙壁面的静水压力和与裂隙壁面的动水压力，动水压力为面力，即：

式中： b 为裂隙的隙宽。

