

1、岩体稳定性分析和地下水渗流分析通常把岩体视为由岩块（结构体）与结构面组成的地质体。

2、岩体工程中的软弱夹层问题：

如黄河小浪底水库工程左坝肩的泥化夹层；

葛洲坝水利工程坝基的泥化夹层；

黑河水库左坝肩单薄山梁的断层引发的渗漏问题；

长江三峡自然坡中的软弱夹层等。

这些软弱结构面在不同程度上影响和控制着工程岩体的稳定性。因此，结构面变形与强度性质的研究，在工程实践中具十分重要的实际意义：

1) 大量工程实践表明：在工程荷载（小于 10Mpa）范围内，工程岩体的失稳破坏有相当一部分是沿软弱结构面破坏的。因此，结构面的强度性质的研究是评价岩体稳定性的关键。

2) 在工程荷载作用，结构面及其充填物的变形是岩体变形的主要组成部分，控制着工程岩体的变形特性。

3) 结构面是岩体中渗透水流的主要通道。

4) 工程荷载作用下，岩体中的应力分布受结构面及其力学性质的影响。

第一节 结构面的变形性质（特性）

结构面的变形包括法向变形和剪切变形两个方面。

一、结构面的法向变形

1. 法向变形特征（Normal deformation）

设不含结构面岩块的变形为  $\Delta V_r$ ，含结构面岩块的变形为  $\Delta V_t$ ，那么结构面的法向闭合变形

$\Delta V_j$  为：

$$\Delta V_j = \Delta V_t - \Delta V_r$$

由结构面法向应力  $\sigma_n$  与变形的关系曲线可得如下特征：

1)  $\sigma_n \uparrow$ ， $\Delta V_j \uparrow$ ，曲线呈上凹型；

$\sigma_n \rightarrow \sigma_0$ ， $\sigma_n - \Delta V_t$  变陡，与  $\sigma_n - \Delta V_r$  大致变形；

2) 初始压缩阶段， $\Delta V_t$  主要由结构面闭合造成的；

3) 试验研究表明，当开始，含结构面岩块的变形由以结构面的闭合  $\rightarrow$  岩块的弹性变形；

4)  $\sigma_n - \Delta V_j$  曲线的渐近线大致为：

$$\Delta V_j = V_m$$

5) 结构面的最大闭合量小于结构面的张开度（ $e$ ）。

含结构面的岩块和不含结构面的岩块在法向上加荷、卸荷后的应力—变形曲线，见教材 P76-77（Bandis 等，1983）。

2. 法向变形本构方程（法向应力与变形之间的关系）

这方面的研究目前仍处于探索阶段，已提出的本构方程都在试验的基础上总结出来的经验方程，如

Goodman, Bandis 及孙广忠等人。

1) 古德曼（Goodman, 1974）双曲线函数拟合结构面法向应力  $\sigma_n$  与闭合变形  $\Delta V_j$ （mm）间的本构关系：

或 式中： $\sigma_i$  为结构面所受的初始应力。

2) 班迪斯等（Bandis 等，1983）

当  $\sigma_n \rightarrow \infty$  时， $\Delta V_j \rightarrow$

由初始法向强度的定义得：

### 3. 法向刚度的确定 (normal stiffness)

1) 定义:  $K_n$  为在法向应力作用下, 结构面产生单位法向变形所需的应力。

(Mpa/cm)

试验 (室内压缩试验、现场压缩变形试验如中心孔承压板法) 求得结构面的  $\sigma_n - \Delta V_j$  曲线  $\rightarrow K_n$ 。

中心孔承压板法:

2) 不同法向应力下结构面的法向刚度  $K_n$ :

由法向刚度的定义:

又 代入  $K_n$  得:

式中,  $K_{ni}$ 、 $V_m$  可通过室内含结构面岩块压缩试验求得。

如无试验资料时, 可用 Bandis (1983) 提出的经验方程求取:

其中,  $e$  为结构面的张开度;  $JRC$  为结构面的粗糙度系数;  $JCS$  为结构面的壁岩强度。

## 二、结构面的剪切变形

### 1. 剪切变形特征

1) 非线性的, 可分为脆性变形和塑性变形如图 5.3 所示。

①有一定宽度的破碎带、软弱夹层及含较厚充填物的裂隙、节理等软弱结构面的  $\tau - \Delta u$  曲线多属于塑性变形型;

②无充填且较粗糙的硬性结构面则属于脆性变形型。

2) 峰值位移 受其风化程度的影响如图 5.4 所示;

3) 剪切刚度  $K_s$  受风化程度的影响;

4)  $K_s$  具明显的尺寸效应;

5)  $K_s$  随  $\sigma_n \uparrow$  而  $\uparrow$ 。

### 2. 剪切变形本构方程

卡尔哈韦 (Kalhaway, 1975)  $\tau - \Delta u$  曲线用双曲函数拟合得:

$m, n$  为双曲线的形状系数,

### 3. 剪切刚度的确定

$K_s$  (shear stiffness)

(峰值  $\tau - \Delta u$  曲线上任一点的切线斜率如图 5.5 所示)

此外, 巴顿 (Barton, 1977) 和乔贝 (Choubey, 1977) 提出的  $K_s$  经验公式:

式中:  $L$  为剪切结构面的长度;

$\phi_r$  为结构面的残余摩擦角。

## 第二节 结构面的强度性质 (力学性质)

重点研究它的抗剪强度。

影响结构面抗剪强度的因素: 结构面的形态、连续性、胶结充填特征及壁岩性质、次生变化和受力历史等等。

根据结构面的形态、充填情况及连续性等特征, 将其划分为四类:

### 一、平直无充填的结构面

包括：剪性破裂面如剪节理、剪裂隙；脆性断层；发育较好的层理面与片理面。

特点：平直、光滑，只具有微弱的风化蚀变。

抗剪强度： $\tau = \sigma \tan \varphi_j + C_j$ （有些教材为  $\tau = \sigma \tan \varphi$ ，因平直、光滑无充填  $C=0$ ）

$\sigma$  为法向应力； $\varphi_j$ 、 $C_j$  为结构面的摩擦角和粘聚力。

## 二、粗糙起伏无充填的结构面

特点：具有明显的粗糙起伏度。

当  $\sigma_n$  较小时  $\rightarrow$  剪胀效应（爬坡效应） $\tau \uparrow$

当  $\sigma_n \uparrow \rightarrow$  一定值时  $\rightarrow$  啃断效应  $\tau \uparrow$

### 1. 规则锯齿形结构面（理想模型）

1) 设起伏角  $i$ ，起伏差  $h$ ，齿摩擦角  $\varphi_b$  且  $C_b=0$

根据力的平衡：（滑移面上的  $\sigma_n$  和  $\tau_n$ ）

又由 Coulomb-Navier 判据： $\tau_n = \sigma_n \tan \varphi_b$

$$\therefore \tau = \sigma \tan(\varphi_b + i) \quad \text{①}$$

说明：①式为法向应力  $\sigma$  较低时的情况，同时说明，因为起伏度的存在可增大结构面的摩擦角， $\varphi_b \rightarrow \varphi_b + i$ 。

2) 当法向应力  $\sigma \uparrow \rightarrow$  定值  $\sigma_1$  后，凸起被剪断，此时：

$$\tau = \sigma \tan \varphi_b + C \quad \text{②}$$

$\varphi$ 、 $C$  为结构面壁岩的内摩擦角和内聚力。

由①和②可得剪断凸起的条件：

### 2. 不规则起伏结构面

绝大多数粗糙无充填的结构面将是不规则起伏的。

1) 巴顿 (Barton, 1982) 的结构面抗剪强度公式

认为应采用剪胀角来表示该种结构面的抗剪强度。

剪胀角 ( $\alpha_d$ ) (Angle of dilation)：结构面在剪切变形过程中所发生的（垂直）法向位移  $\Delta V$  与切向（水平）位移之比的反正切值。即：

通过大量的详细实验研究，他得出了  $\tau$  与  $\alpha_d$  以及 JCS 与  $\alpha_d$  之间的关系：

式中： $\varphi_u$  为岩石基本内摩擦角（平滑锯开面的内摩擦角）。

2) 莱旦依等 (Ladanyi 等, 1970)

$a_s$ —剪断率； $V$ —剪胀率。

### 三、非贯通断续的结构面

由裂隙面和非贯通的岩桥组成。

假定剪切面上应力分布均匀，则

$$\tau = K_1 C_j + (1 - K_1) C + \sigma [K_1 \tan \varphi_j + (1 - K_1) \tan \varphi]$$

式中： $K_1$ —线连续性系数（或裂隙连通率）；

$C_j$ 、 $\varphi_j$ —裂隙面的粘聚力与摩擦角；

$C$ 、 $\varphi$ —岩石的粘聚力与摩擦角。（目前已有有人用断裂力学理论开展此方面的研究。）

### 四、具有充填物的软弱结构面

泥化夹层、各种夹层泥层，其力学性质常与充填物的成分、结构及充填程度和厚度等有关。（参见孙广忠的

《岩体结构力学》)

### 1. 物质成分的影响

按充填物的颗粒成分，该结构面大致可分为如下几种类型：

泥化夹层；夹泥层；碎屑夹泥层；碎屑夹层。

变形机制：塑性曲线型→脆性曲线型

一般来说，软弱结构面的抗剪强度  $\tau$ ，随充填物的粘土含量  $\uparrow$  而  $\downarrow$ ，随碎屑成分增加和颗粒增大而  $\uparrow$ 。

### 2. 充填程度及厚度的影响

充填度：充填物厚度  $d$  与面起伏差  $h$  之比 ( $d/h$ )。

一般地， $d/h$  越小， $\tau$  越大；反之，抗剪强度越小。

### 3. 充填物的结构特征

结构疏松且具定向排列时，结构面的抗剪强度较低，反之， $\tau$  较高。

### 4. 水的影响

指的是充填物中的水对结构面强度的影响。

用含水率表征， $\tau$  随含水率的增高而  $\downarrow$ 。