

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 ΔV_r ，含结构面岩块的变形为 ΔV_t ，那么结构面的法向闭合变形

ΔV_j 为：

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

由结构面法向应力 σ_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， ΔV_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 σ_n 与闭合变形 ΔV_j （mm）间的本构关系：

或 式中： σ_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;

ϕ_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 $C=0$ ）

σ 为法向应力； φ_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 σ_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 φ_b 且 $C_b=0$

根据力的平衡：（滑移面上的 σ_n 和 τ_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 σ 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 σ_1 后，凸起被剪断，此时：

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

φ 、 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 (α_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 ΔV 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 τ 与 α_d 以及 JCS 与 α_d 之间的关系：

式中： φ_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 、 φ_j —裂隙面的粘聚力与摩擦角；

C 、 φ —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 τ ，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， τ 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， τ 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， τ 随含水率的增高而 \downarrow 。