

三维裂隙单元法基本假设及控制方程

王保田¹, 严应征²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098 2. 长江水利委员会第一工程勘测院, 湖北 丹江口 442700)

摘要 完整性好的块状结构岩体, 岩石本身坚硬、压缩性小、强度高, 岩体的变形和稳定问题由切割岩体的软弱结构面的压缩和剪切产生. 三维裂隙单元法基于这一认识, 假定岩体由完整的岩块和切割岩体的软弱结构面组成, 岩块由各种软弱结构面包围. 在岩体总的变形量中, 岩块本身的压缩量很小, 假设可以忽略不计. 岩体的压缩和位移假设完全由结构面的压缩和结构面两侧岩体滑移引起, 岩块本身的强度认为是无穷大, 剪切只能沿软弱结构面发生. 本文在上述假设的基础上推导了三维状态下的岩体受力和变形计算公式, 并列出了矩阵形式的控制方程, 用于数值计算分析.

关键词 裂隙单元法; 软弱结构面; 控制方程

中图分类号 :O343.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)06-0087-03

1 软弱结构面的变形和受力表示方法

1.1 岩块和裂隙的定义

岩体中的软弱结构面十分复杂, 不同结构面的厚度和充填物的性质在较大范围内变化, 即使同一结构面在不同空间位置变化也很大. 本文假设空间岩体被多组结构面切割成块体, 块体的四周被结构面或临空面包围. 我们取被结构面和/或临空面包围的、完整性好的、可以不计其变形和破坏的岩块作为裂隙单元法中的岩块单元. 各岩块单元间被裂隙切割分离. 岩块间的裂隙取作裂隙单元. 每一个裂隙单元在未受外力作用时, 为等厚的不规则的板状多边形单元. 不同的裂隙单元厚度、抗剪强度、应力应变关系可以不同. 受力后, 裂隙单元发生压缩、扭转、剪切, 而岩块单元只能发生刚体平动和转动.

1.2 裂隙单元的坐标系和受力与变形分量的表示

对裂隙单元取局部坐标系 ξ - η - ζ , 裂隙面的形心为局部坐标原点, ζ 方向为垂直结构面的向上法线方向, ξ 和 η 为裂隙单元内的两个垂直的方向.

1.2.1 软弱结构面的变形分量

a. 线位移分量表述和方向. 沿 ζ 方向的变形 δ_ζ 以使裂隙单元压缩为正, 拉伸为负; 沿 ξ 和 η 方向的剪切变形 δ_ξ , δ_η 以剪力矩指向垂直的坐标正向为正.

b. 转角分量表述和方向. 绕 3 个坐标轴方向的转角分别为 θ_ζ , θ_ξ , θ_η . 转角的正向定义为转动方向满足右手法则, 拇指指向为坐标正向时, 转角为正.

1.2.2 软弱结构面的受力分量

a. 结构面的作用力. 三个方向的压力或剪力分量 F_ζ , F_ξ , F_η 以指向三个坐标轴的正向为正, 反向为负.

b. 结构面的转动力矩. 绕三个坐标轴的转动力矩 M_ζ , M_ξ , M_η 满足右手法则时, 即力矩矢量指向坐标轴的正向为正, 反向为负.

2 软弱结构面的应力应变关系

裂隙单元法假设岩体由不变形的岩块和分割岩块的软弱结构面组成, 软弱结构面的强度和变形特性决定了岩体稳定和变形量.

2.1 软弱结构面的应力应变关系

软弱结构面的应力应变关系包括: 结构面法线方向的正应力与正应变的关系(或法向力与法向位移 F_ζ

$-\delta_\zeta$ 的关系);剪应力与剪应变的关系(或剪力与剪位移 $F_\xi - \delta_\xi, F_\eta - \delta_\eta$ 的关系)转动力矩与转角的关系(即 $M_\xi - \theta_\xi, M_\eta - \theta_\eta$ 的关系).这些基本的应力—应变关系组成软弱结构面的本构方程,需要通过室内或现场试验获得.重要工程的控制性软弱结构面均有部分的实测应力—应变关系,一般缺少转动力矩—转角之间的关系曲线,它们可由正应力与正应变的关系和剪应力与剪应变的关系曲线推得.软弱结构面一般屈服应力很低,大多自起始阶段即出现非线性的应力应变关系.结构面的典型应力应变关系见图 1.

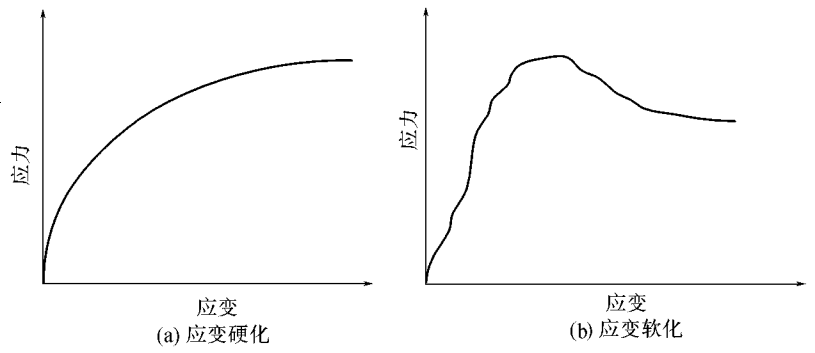


图 1 软弱结构面的典型应力应变关系

Fig.1 Stress vs. strain for soft surface

2.2 软弱结构面力与位移的关系

可用弹性有限元的单元分析相似的方法得到任意软弱结构面力与位移的关系,表述如下.

$$\mathbf{F}_i^T = \{F_\zeta, F_\xi, F_\eta, M_\xi, M_\eta, M_\zeta\}_i^T = \mathbf{k}_i \mathbf{\epsilon}_i^T = \mathbf{k}_i \mathbf{B}_i \{\delta_\zeta, \delta_\xi, \delta_\eta, \theta_\zeta, \theta_\xi, \theta_\eta\}_i^T \quad (1)$$

式中: $\mathbf{k}_i$ ——结构面单元的刚度矩阵,由结构面的应力—应变关系得到; $\mathbf{B}_i$ ——结构面单元的位移—应变转换矩阵.可将结构面单元作为常应变单元,因此位移与应变为线性关系,转换矩阵的形式如下:

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 1/2H_i & & & & & \\ & 1/2L_{\xi i} & & & & \\ & & 1/2L_{\eta i} & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_\zeta \\ \delta_\xi \\ \delta_\eta \\ \theta_\zeta \\ \theta_\xi \\ \theta_\eta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: H_i ——裂隙单元的厚度; $L_{\xi i}, L_{\eta i}$ ——裂隙单元 i 在 ξ, η 两个方向的长度.

3 岩块单元的位移和受力

裂隙单元法将岩块单元作为不变形刚体单元,它只有刚体位移(平移和转动),因此,可用岩块中任一点的位移表示岩块的位移,笔者用岩块形心的位移和力表示该岩块的位移和力.岩块的力和位移分量均用整体坐标表示.(a)岩块形心的三个平移分量: u, v, w 分别表示岩块 i 在整体坐标中分别沿 x, y, z 三个方向的平移分量.(b)块体形心的三个转动分量:分别用 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 表示岩块 i 绕三个坐标的 x, y, z 的转角.(c)岩块单元受力:岩块单元 i 受力也可表述成整体坐标下的 6 个分量: $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$.

4 岩块单元的平衡和整体平衡方程

4.1 岩块单元的平衡方程

由于岩块单元为刚体单元,由虚功原理有:岩块形心受力所作的虚功等于周边各接触面所作的虚功,即

$$\delta^* \mathbf{\epsilon}_G^T \cdot \mathbf{F}_G = \sum_i \delta^* \mathbf{\epsilon}_i^T \cdot \mathbf{F}_i \quad (3)$$

式中: $\delta^* \mathbf{\epsilon}_G^T$ ——块体 G 形心的虚位移; $\mathbf{F}_G$ ——块体 G 形心的受力; $\delta^* \mathbf{\epsilon}_i^T$ ——与块体 G 接触的边界 i 上的虚位移; $\mathbf{F}_i$ ——与块体接触的边界 i 上的作用力.

4.2 岩块形心位移与边界位移的关系

在刚性岩块的假设条件下,块体形心位移与边界位移的关系为

$$\delta_i^T = \mathbf{T}_i \delta_G^T \quad (4)$$

式中: $\mathbf{T}_i$ ——位移转换矩阵,

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos\alpha \sin\beta & \sin\alpha \sin\beta & \cos\beta & 0 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\alpha \cos\beta & \cos\alpha \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & 0 & 0 & \cos\alpha \sin\beta & \sin\alpha \sin\beta & \sin\beta \\ 0 & 0 & 0 & \sin\beta & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(5)

式中 α, β 为结构面的倾角和倾向.

将式 (4) 代入式 (3) 得

$$\delta_G^* F_G = \sum_i \delta_i^* T_i F_i$$

因此

$$F_G = \sum_i T_i F_i$$

(6)

将式 (4) 代入式 (1) 后代入式 (6) 得

$$F_G = \sum_i k_i B_i T_i \delta_G = k_G \delta_G$$

(7)

$$k_G = \sum_i k_i B_i T_i$$

4.3 整体平衡方程

式 (7) 为岩块单元的平衡方程. 与有限元相似, 采用最小势能原理, 可以得到以岩块单元形心刚体位移为基本未知量的整体平衡方程:

$$K u = F$$

(8)

$$K = \sum_{G=1}^n k_G \qquad F = \sum_{G=1}^n F_G \qquad u = \sum_{G=1}^n \delta_G$$

式中 n 为岩块单元数. 将一定的边界条件考虑到式 (8) 中, 对其求解, 可以得到岩块形心的力和位移. 代入式 (4) 和式 (1) 得到软弱结构面的力和变形. 考虑一定的破坏路径, 可以计算该破坏路径的稳定安全系数.

5 结 论

裂隙单元法将不含软弱结构面的岩块作为不变形的刚体, 而将切割岩体的软弱结构面作为可变形体, 采用有限元法相似的推导, 得到裂隙单元法的用岩块形心的力和位移表示的平衡方程. 裂隙单元法的最大优点是突出考虑了软弱结构面对岩体变形和稳定的控制作用, 计算工作量较小.

参 考 文 献:

[1] 王永嘉, 刑纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 哈尔滨: 东北工学院出版社, 1991. 8 ~ 30.
[2] Wang Baotian, Wu Shiwei. Safety analysis of slope stability for two dimensional crack texture rock mass[A]. Application of Computer Methods on Rock Mechanics[C], Shaaxi: Science and Technology Press, 1993. 873 ~ 876.

Basic Assumptions and Governing Equations for
Three Dimensional Crack Elements

WANG Bao-tian¹, YAN Ying-zhen²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China
2. No. 1 Survey Institute, Yangtzi River Commission, Danyingkou 442700, China)

Abstract: The rock blocks of block structural rock mass are of good solidity, high hardness, low compressibility, and high shear strength. The deformation and stability of rock mass depend on the compression and shear strength of soft structural surfaces. The 3-dimensional crack element supposes that the rock mass consists of rock blocks and soft structural surfaces, the compression of rock blocks can be neglected, and the shear strength of rock blocks is infinite. The compression and deformation of rock mass only occur along soft surfaces. The failure of rock mass is due to the sliding of rock mass along soft surfaces. An analysis of force and deformation of rock mass is conducted according to the above assumptions. The governing equations for 3-dimensional crack element are put forward in the paper.

Key words: crack element method; soft structural surface; governing equations