

文章编号: 1000-7598-(2003)02-0270-03

一种新的节理裂隙岩体弹塑性模型

杨万托¹, 余天堂²

(1. 南京市人防工程建设管理所, 江苏 南京 210008; 2. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 提出一种节理裂隙岩体弹塑性模型, 将结构划分为块体单元和缝单元, 其中缝单元可以是实际节理裂隙, 也可以是人为缝单元。以块体单元形心的刚体位移和块体的平均应变作为基本未知量。该模型能充分考虑节理裂隙材料和块体材料的本构关系, 计算量不大, 是一种位移不协调单元。该模型特别适合节理裂隙岩体的数值分析。

关 键 词: 节理; 裂隙, 刚体位移; 平均应变; 块体单元法

中图分类号: TU 45; O344.3 **文献标识码:** A

A new elastoplastic model for jointed rock

YANG Wan-tuo¹, YU Tian-tang²

(1. Institute of Construction Administration of Nanjing People's Air Defense, Nanjing 210008, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A new elastoplastic model for jointed rock is presented. The structure is divided into block elements and fault elements, which are real joint elements or artificial fault elements. The basic unknown quantities are the rigid displacements and the average strains of the block elements. The constitutive laws of joint material and block material can be fully considered in the model. The cost of computation is low. It is a discontinuous element for displacement. The model is suited to numerical analysis of jointed rock.

Key words: joint; fissure; rigid displacements; average strains; block element method

1 引 言

工程中所遇到的岩体, 其内部多包含各种软弱结构面, 如断层、节理、裂隙等, 软弱结构面的存在往往影响岩体的稳定。国内外很多学者对节理裂隙岩体的稳定问题进行过研究, 其方法主要以块体理论^[1]、离散元^[2]、均匀化法^[3]、块体单元法^[4]和有限元法^[5]等为代表。块体单元法是一种比较好的节理裂隙岩体的数值分析方法, 能充分考虑节理裂隙材料的本构关系, 计算量不大, 是一种位移不协调单元, 因此该方法特别适合不连续介质问题。块体单元法的缺点是将块体作为刚体处理^[6], 虽然文[4]将块体的弹性等效地考虑在缝面材料性质内, 但仍然不能得到块体的应变和应力。本文将块体单元法进行了改进, 以块体单元形心的刚体位移和块体的平均应变作为基本未知量, 这样就能得到块体的应力, 同时就可对块体进行弹塑性分析。改进后的块体单元法能更有效地进行节理裂隙岩体的稳定分析。

2 节理裂隙岩体计算模型

将计算范围的物体离散为有限个块体单元, 块体单元之间为缝单元, 缝单元可以是实际存在的岩体结构面, 也可以是人为假定的虚拟缝。若缝单元为实际存在的岩体结构面, 则计算时采用实际结构面的物理力学参数; 若为虚拟缝, 则采用岩体的物理力学参数。

2.1 位移模式

设第 i 块体的形心位移和块体的平均应变为:

$$\{\delta\}_i = [u_i \ v_i \ w_i \ \alpha_i \ \beta_i \ \gamma_i \ \varepsilon_{xi} \ \varepsilon_{yi} \ \varepsilon_{zi} \ \gamma_{xyi} \ \gamma_{yzi} \ \gamma_{xzi}]^T \quad (1)$$

式中 u_i 、 v_i 、 w_i 为第 i 块体的形心沿 x 轴、 y 轴、 z 轴的平动位移; α_i 、 β_i 、 γ_i 为第 i 块体的形心绕 x 轴、 y 轴和 z 轴的转动位移, ε_{xi} 、 ε_{yi} 、 ε_{zi} 、 γ_{xyi} 、 γ_{yzi} 、 γ_{xzi} 为第 i 块体的平均应变。块体上任一点 (x, y, z) 的位移可表示为

$$\{f\}_i = [u_i \ v_i \ w_i]^T = [N]_i \{\delta\}_i \quad (2)$$

收稿日期: 2001-12-19

作者简介: 杨万托, 男, 1971 年生, 工程师, 结构工程专业, 主要从事地下空间结构的施工管理。

式中 令 $x - x_0 = A$; $y - y_0 = B$; $z - z_0 = C$

$$[N]_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & C & -B & A & 0 & 0 & \frac{B}{2} & 0 & \frac{C}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -C & 0 & A & 0 & B & 0 & \frac{A}{2} & \frac{C}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & B & -A & 0 & 0 & 0 & C & 0 & \frac{B}{2} & \frac{A}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 x_0 、 y_0 、 z_0 为块体形心坐标。

2.2 应变和应力

设两块体接触缝面的厚度为 t (见图 1)。材料的弹性模量为 E , 泊松比 μ 。则缝面上任一点的应变为

$$\{\varepsilon'\} = \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{t} [L][N]\{\delta\}^e \quad (4)$$

式中 $[N] = [[N]_i - [N]_j]$; $\{\delta\}^e = [\{\delta\}_i^T \ \{\delta\}_j^T]^T$; $[L]$ 是整体坐标系与局部坐标系之间的方向余弦矩阵。

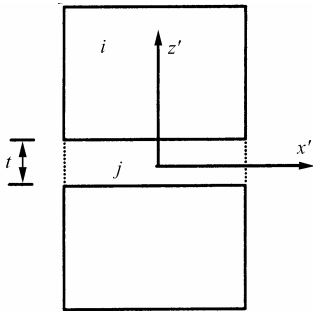


图1 缝面单元示意图
Fig. 1 Joint element

由广义 Hooke 定律得缝面应力为

$$[\sigma_{\text{joint}}] = [D_{\text{joint}}]\{\varepsilon'\} = \frac{1}{t} [D_{\text{joint}}][L][N]\{\delta\}^e \quad (5)$$

式中 $[D_{\text{joint}}]$ 为缝面材料的弹性矩阵。

块体单元的应力为

$$[\sigma_{\text{block}}] = [D_{\text{block}}]\{\varepsilon\}$$

式中 $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}\}$ 为块体单元的平均应变, $[D_{\text{block}}]$ 为块体材料的弹性矩阵。

2.3 块体单元法的支配方程

应用变分原理可得块体单元法的支配方程^[4]:

$$[K]\{\delta\} = \{R\} \quad (6)$$

式中 $[K]$ 为结构的整体劲度矩阵; $[C]^e$ 为单元选择矩阵; $[R]$ 为整体荷载列阵;

$$[K] = \sum_{e \in V} ([C]^e)^T [k] [C]^e \quad (7)$$

$$[k] = \frac{1}{t^2} \int_{V_{\text{joint}}} [N]^T [L]^T [D_{\text{joint}}] [L] [N] dV_{\text{joint}} + \int_{V_{\text{block}}} [A]^T [D_{\text{block}}] [A] dV_{\text{block}} \quad (8)$$

式中

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[R] = \sum_{i \in V_{\text{block}}} ([C]_j^e)^T [R]^e \quad (10)$$

式中 $[R]^e$ 为作用在 i 块体的荷载列阵。

2.4 材料的非线性考虑

(1) 块体单元的材料非线性模型

采用经典的弹塑性模型, 对岩体一类材料, 常用的屈服准则为 D-P 准则。

$$\text{屈服函数为 } F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (11)$$

式中 α 和 k 为常数。屈服后材料的塑性矩阵可用相关联的流动法导出

$$[D]_p = \frac{[D_{\text{block}}] \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} (\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}})^T [D_{\text{block}}]}{(\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}})^T [D_{\text{block}}] \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} + \zeta} \quad (12)$$

式中 F 为屈服函数; ζ 为材料强化系数; 对理想弹塑性材料 ζ 为 0。

(2) 缝面单元材料非线性模型 缝面单元的破坏形式主要是剪切屈服和法向开裂, 剪切屈服可由 M-C 准则判别, 开裂可由法向拉应力判别。如果法向应力 $\sigma_z > \sigma_t$ (抗拉强度), 接触面单元开裂, 认为其刚度丧失; 如果 $F = (\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)^{0.5} - c + \sigma_{\delta'} f > 0$, 则发生滑移屈服。其中 c , f 分别为缝面材料的粘结力和摩擦系数。

3 数值分析

一受到条形载荷的半无限大节理岩体, 节理间距为 10 m, 由于对称性, 取一半进行分析 (图 2), 水平方向取 100 m。岩体的力学参数为: $E = 20 \text{ GPa}$, $\nu = 0.20$, $c = 1.7 \text{ MPa}$, $f = 1.19$, $\sigma_t = 1.1 \text{ MPa}$; 节理的力学参数 $E = 16 \text{ GPa}$, $\nu = 0.25$, $c = 0.2 \text{ MPa}$, $f = 0.36$, $\sigma_t = 0.0005 \text{ MPa}$, 节理厚度为 2 cm。

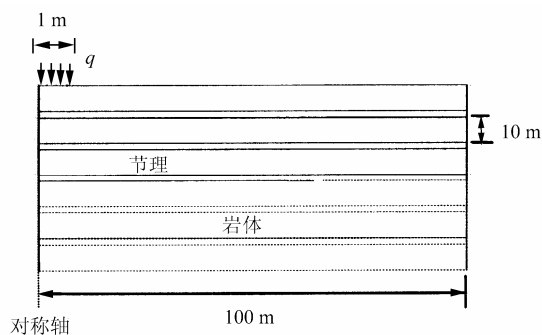


图 2 结构图
Fig. 2 Structural diagram

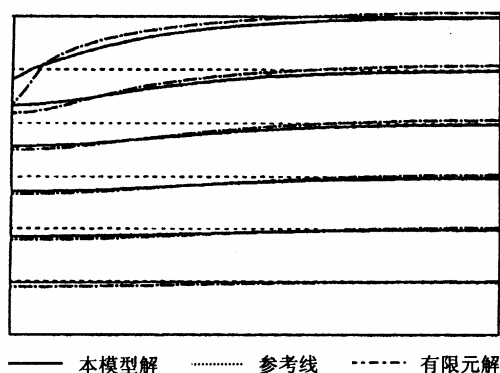


图 3 铅直向变形图
Fig. 3 Vertical deflections

图 3 给出了采用本文提出的节理裂隙岩体弹塑性模型和有限元法得到的铅直向变形图, 从图 3 可知两种方法的结果比较一致。但用有限元求解时, 需单独划分节理单元, 而本方法不需单独划分节理单元。

上接第 269 页

地质情况和构筑物对周围土体液化行为的影响。

(4) 尽管本文的计算认为, 隧道周围会发生局部液化, 但所引起的隧道位移较小, 仍可认为此隧道在 7° 地震下不会失稳。但是, 由于结构物的动力反应与场地不同而引起的局部液化是否会扩展, 以及对结构物产生多大的危害, 是一个尚需进一步研究的问题。

参考文献

- [1] GBJ111-89, 建筑抗震设计规范[S].
- [2] GBJ111-87, 铁路工程抗震设计规范[S].
- [3] 刘汉龙, 井合进, 一井康二, 等. 大型沉箱式码头岸壁

4 结语

文中提出一种新的节理裂隙岩体弹塑性模型, 该模型具有以下特点:

- (1) 以块体单元形心的刚体位移和块体的平均应变作为基本未知量。
- (2) 能充分考虑节理裂隙和岩体材料的本构关系。
- (3) 是一种位移不协调单元。
- (4) 不需单独划分节理单元, 计算量不大, 特别适合节理裂隙岩体等不连续变形问题的数值分析。

参考文献

- [1] R E Goodman. Block theory and its application. 35th Rankine lecture, *Geotechnique*, 1995, 45 (3): 383—423.
- [2] Cundall P A. Distinct element models of rock and soil structure[A]. *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics* CE [C]. London: Allen, Unwin, 1986, 7: 129—163.
- [3] Lee J S, Pande G N. A new joint element for the analysis of media having discrete discontinuities[J]. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1999, 4: 487—504.
- [4] 任青文. 块体单元法及其在岩体稳定分析中的应用[J]. 河海大学学报, 1995, 23(1): 1—7.
- [5] 孙钧. 地下结构有限元法解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
- [6] 任青文, 余天堂. 块体单元法的理论和计算模型[J]. 工程力学, 1999, 16(1), 67—77.

- 地震反应分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20, (2): 26—30.
- [4] Iai S, Kaneoka T. Finite element analysis of earthquake induced damaged to anchored sheet pile quay walls[J]. *Soil and Foundation*, 1993, 133 (1): 71—91.
- [5] 森田年一, 井合进, 刘汉龙, 等. 液化时构筑物受害预测程序 Flip 各种必要参数的简易设定法[R]. 日本港湾技研资料, 1997, (7): 869.
- [6] 宫全美, 周顺华, 方焱华, 等. 南京地铁地基地震液化规范判别的差异分析[J]. 岩土力学, 2000, 3: 141—144.
- [7] Masanori Hamada, Susumu Yasuda, Ryuji Isoyama, Katsutoshi Emoto. 液化引起的地面永久变形[J]. 世界地震工程, 1989, 1: 43—49.