

接触非线性有限元在碎裂岩体中的应用

张雄文¹, 薛 涛², 陈志坚¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 兰州市房地产职工培训学校, 甘肃 兰州 730070)

摘要:在分析碎裂岩体结构特征及力学作用模型的基础上, 介绍了碎裂岩体中的接触非线性有限元分析方法, 并以某水电站地下洞室围岩为例, 验证了该分析方法的适用性。

关键词:接触问题; 碎裂岩体; 非线性; 有限单元法

中图分类号: TU457; O241.82

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2000) 07-0040-03

碎裂结构岩体常见于断裂破碎带、裂隙密集带、褶皱的核部以及岩浆岩侵入接触带, 其完整性差, 整体强度低、易变形, 表现出很强的非线性和粘弹性。在边坡工程中易构成不稳固块体的切割面、滑动面, 甚至起临空面的作用, 往往成为边坡变形失稳的控制因素; 作为高、重、大建筑物的岩基, 往往出现地基承载力低、沉降和不均匀沉降大等岩土工程问题; 作为洞室围岩, 易引起大规模的松动、塌方, 甚至冒顶, 严重危及工程稳定与安全。因此, 研究碎裂结构岩体的变形及应力传播规律具有重要的现实意义。

1 碎裂结构岩体的特征及变形规律

碎裂结构岩体一般为 III, IV, V 级结构面切割下形成的分离结构岩体。结构体的主要形式为碎块状或板片状。结构面主要为节理、断层、劈理以及层面、层间错动带。易受地下水不良作用, 稳定性差。在力学性质上, 碎裂结构岩体既受结构面控制, 又受结构体力学性质控制。在无围压或低围压条件下, 其应力传递和变形发展经常呈现不连续特征。在岩体应力传播上, 具有强烈的结构效应。

碎裂结构岩体中存在三组以上结构面时, 结构面的排列组合方式对岩体变形性质有较大影响。根据结构面组合形式, 可将碎裂结构分为对缝式碎裂结构和错缝式碎裂结构。碎裂结构岩体的变形都可分为三个区(如图 1 和图 2 所示)^[1], 即: ①直接压缩

区; ②剪切连续变形区; ③压应力作用下连续变形区。碎裂结构岩体的变形特征, 除与岩石材料和结构面的压缩变形特征有关外, 与结构面抗剪强度也有密切关系。

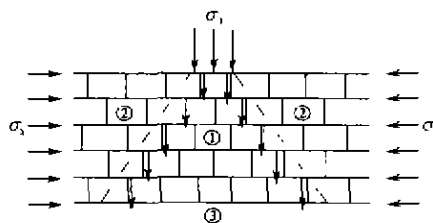


图 2 错缝式结构力学作用模型

2 碎裂结构岩体的主要分析方法

由于碎裂结构岩体变形与破坏的复杂性, 研究碎裂结构岩体的变形是一件困难的事情。目前, 应用于研究碎裂结构岩体变形的的方法很多, 主要有以下几种: ①边界元法; ②数学规划法; ③图解分析法; ④有限元法。图解分析法将岩体当作纯粹的刚体来研究, 不能准确计算碎裂结构岩体的变形及应力变化规律; 边界元法与数学规划法在分析接触问题方面尚不成熟, 在分析碎裂结构岩体变形上, 也没有发展成熟; 有限元法是一种解决复杂工程结构问题的有效方法, 将碎裂结构岩体的变形当作接触非线性问题考虑, 用有限元法加以分析, 对研究碎裂结构岩体的变形而言是行之有效的。

3 接触非线性有限元分析的基本思路

对于两个接触介质 A 和 B(如图 3 所示), 介质 B 上有固定的边界, 外力 F 作用在介质 A 上, 介质 A 的接触力是 $\bar{P}_j$, 介质 B 上的接触力是 $\bar{P}_j^i$, 对于二维情况, 它们可以表示成:

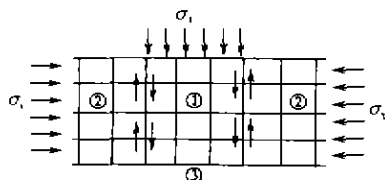


图 1 对缝式结构力学作用模型

$$\bar{P}_j = \begin{bmatrix} P_j^t \\ P_j^n \end{bmatrix} \quad \text{和} \quad \bar{P}_j' = \begin{bmatrix} P_j^{t'} \\ P_j^{n'} \end{bmatrix} \quad (1)$$

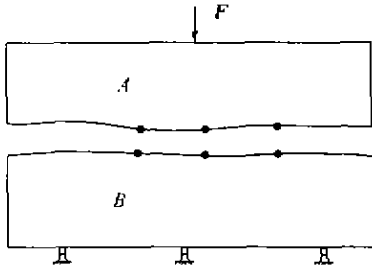


图3 接触介质示意图

介质A和B在接触点上的柔度方程可分别表示成:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\delta}_{iB} &= \sum_{j=1}^m C_{ij}^B \bar{P}_j' \\ \bar{\delta}_{iA} &= \sum_{j=1}^m C_{ij}^A \bar{P}_j + \sum_{k=1}^e C_{ik}^A \bar{f}_k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: m 为接触点对数目; $j = 1, 2, \dots, m$ 为接触点对编号; $\bar{\delta}_{iA}$ 和 $\bar{\delta}_{iB}$ 为介质A和B在接触点 i 的位移; C_{ij}^A 和 C_{ij}^B 分别为介质A和B在结点 i 由结点 j 作用力引起的柔度子矩阵; $\bar{f}_k$ 为第 k 个荷载点的外力向量; e 为外荷点数。若接触点对是连续的, 接触面上的相容方程表示为

$$\bar{\delta}_{iA} = \bar{\delta}_{iB} + \bar{\delta}_{i0} \quad (3)$$

式中: $\bar{\delta}_{i0}$ 是第 i 个接触点对的初始间隙向量。在接触点上, 作用在两个物体上的接触力必须是作用力与反作用力的关系, 即

$$\bar{P}_j = -\bar{P}_j' \quad (4)$$

将式(1)和(3)代入式(2), 可得连续状态点的相容方程

$$\sum_{j=1}^m (C_{ij}^A + C_{ij}^B) \bar{P}_j = - \sum_{k=1}^e C_{ik}^A \bar{f}_k + \bar{\delta}_{i0} \quad (5)$$

对于滑动状态, 假设满足库仑摩擦定律, 则有:

$$P_j^t = \mu P_j^n \quad (6)$$

每次迭代求解只需根据接触点的接触状态, 用式(6)替换式(5)就可以了。

4 有限元分析

4.1 基本假定

- 岩块之间的接触为弹性接触。
- 岩块是线弹性体, 满足小变形假定。
- 接触面满足库仑定律。
- 接触表面是连续和平滑的。

4.2 有限元基本方程

对于由介质A和B组成的接触问题(如图4所示), 它们的有限元基本方程如下:

$$\left. \begin{aligned} K_a u_a &= R_a + P_a \\ K_b u_b &= R_b + P_b \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: K_a 和 K_b 分别为介质A、B的刚度矩阵; u_a 和 u_b 分别为介质A、B结点位移向量; R_a 和 R_b 分别为介质A、B接触力向量; P_a 和 P_b 是作用在介质A、B上的外力向量。给定 R_a 和 R_b , 即可按典型的有限元位移法求解。

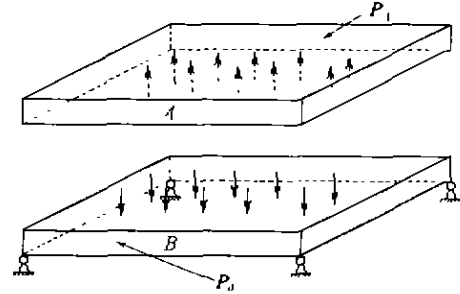


图4 接触介质相互作用示意图

4.3 接触点的柔度方程

如图5, 介质A和B在接触面上的接触点分别是 i_A 和 i_B , $i = 1, 2, \dots, m$ 。若 K_a 和 K_b 是非奇异的, 可以求得接触点的柔度方程为

$$\left. \begin{aligned} u_i^{(a)} &= \sum_{j=1}^m C_{ij}^{(a)} R_j^{(a)} + \sum_{k=1}^{n_a} C_{ik}^{(a)} P_k^{(a)} \\ u_i^{(b)} &= \sum_{j=1}^m C_{ij}^{(b)} R_j^{(b)} + \sum_{k=1}^{n_b} C_{ik}^{(b)} P_k^{(b)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: i, j, k 为结点号, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为结点对的数目; n_a 和 n_b 为介质A、B的外力作用点数目; 并且定义 $u_i^{(a)}$ 和 $u_i^{(b)}$ 表示介质A、B在接触点 i 的位移向量; $R_j^{(a)}$ 和 $R_j^{(b)}$ 为介质A、B在接触点 j 的接触力向量; $P_k^{(a)}$ 和 $P_k^{(b)}$ 为介质A、B在结点 k 所作用的外力向量; $C_{ij}^{(a)}$ 和 $C_{ij}^{(b)}$ 分别表示介质A、B上, 由 j 点的单位力在 i 点引起的 x, y, z 三个方向的 3×3 阶柔度子矩阵。

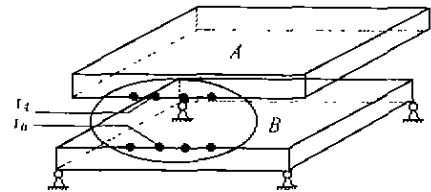


图5 接触面上点对示意图

若 K_a 和 K_b 是奇异的, 对接触体A作如下处理: 在物体A上引入假定约束消除 K_a 和 K_b 的奇异性, 引入假定约束的个数与刚度矩阵的奇异性相适应。

4.4 接触点的相容方程

在接触区域上, 按照接触点对的不同接触状态, 可以将接触面划分为连续、滑动和自由3种, 下面分别建立对应的相容方程^[2]。

a. 连续边界. 连续边界上的接触点的位移相容方程为

$$\bar{u}_i^{(a)} = \bar{u}_i^{(b)} + \delta_{i0} \quad (9)$$

b. 滑动边界. 在接触面的切平面 $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 方向上接触力的合力达到极限值, 按库仑摩擦定律得

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{\bar{x}} &= \mu |\bar{R}_{\bar{y}}| \cos \alpha \\ \bar{R}_{\bar{y}} &= \mu |\bar{R}_{\bar{x}}| \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

c. 自由边界. 自由边界的相容方程为

$$\bar{R}_j = 0 \quad (11)$$

在外荷载一定时, 总可以根据上述 3 种状态的判断条件将不同围压作用下不同段的接触边界分为不同的接触状态. 在实际计算中, 先假设接触状态, 然后根据求解结果来判断和修正接触状态. 这样不断循环直到接触状态稳定为止. 据此, 笔者编制了相应的计算程序.

5 工程实例

某工程, 在正长岩中开挖一直径为 12 m 的地下隧道, 实测得弹性模量 $E = 10^5$ MPa, 泊松比 $\mu = 0.25$, 摩擦系数 $f = 0.7$, 结构面最大闭合应变为 $\varepsilon_{j0} = 300 \times 10^{-6}$, 结构面闭合模量 $E_j = 0.2 \times 10^5$ MPa. 实测地应力为 10 MPa. 计算采用 Drucker-Prager 屈服准则, 分别应用有限元法和弹塑性理论获得了径向位移 u_r 与半径 r 以及不同内水压力作用下围岩径向应力的数值解和理论解, 并分别绘制了它们的关系曲线, 如图 6 和图 7 所示. 从图中可以看出, 数值解与理论解具有较好的一致性.

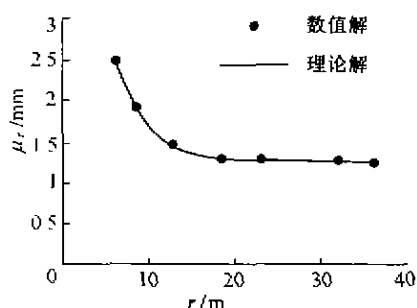


图 6 洞壁围岩径向位移与洞径关系曲线

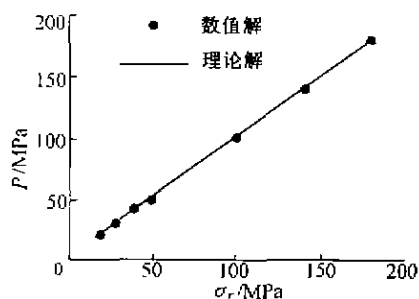


图 7 洞壁径向应力与内水压力关系曲线

6 结 论

碎裂结构岩体中结构面很发育, 在加载过程中, 结构面界面上的边界条件不断发生变化, 这个变化过程是不可逆的, 整个系统的响应不是线性关系. 因此, 在外荷载作用下碎裂结构岩体的变形是属于接触非线性问题.

计算实例表明, 接触非线性问题的有限元分析在求解碎裂结构岩体的变形发展问题上与理论解能很好地一致起来, 可以起到预测各种工况下碎裂结构岩体变形的作用. 采用有限元分析, 可以得到碎裂结构岩体中应力的分布, 能为采取合理的工程措施提供参考意见.

参考文献:

- [1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] 卓家寿. 非线性固体力学基础[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [3] 陈志坚, 卓家寿. 样本单元法及层状含裂隙岩体力学参数的确定[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 14~17.

(收稿日期: 2001-08-02 编辑: 熊水斌)

(上接第 33 页)③有限元计算表明, F_{17} 、 F_{18} 两断层处于屈服状态, 但由于其走向与边坡开挖走向夹角较大, 因此不会对边坡产生多大影响; ④该边坡从理论上计算虽然稳定性较好, 但由于为一永久性边坡, 为防止浅部岩体松弛、塌落和被软弱结构面切割的楔形体滑动, 建议对边坡开挖区采用系统锚杆和随机锚杆支护, 有的地段还须加强锚固强度, 特别是在高程 333 m 以下的开挖区, 同时还必须布置排水系统和建立边坡变形观测系统.

4 结 语

溢洪道人工高边坡设计开挖平均坡比为 1:0.75, 开挖量 39 万 m^3 , 而实际开挖平均坡比为 1:0.4, 开挖量为 33 万 m^3 (高程 333.00 m 以上). 边坡开挖完成后只进行了几处局部加固处理, 从上至下没有进行系统加固处理, 运行至今, 该边坡稳定性尚好, 没有发生岩体失稳.

该边坡开挖运行表明, 在山区狭窄河谷建面板堆石坝, 溢洪道的布置对控制工程投资意义非常重要. 边坡开挖设计及边坡防护加固处理设计科学、合理, 既能保证边坡稳定, 避免地质灾害发生, 又能减少开挖量, 节约工程投资.

(收稿日期: 2001-08-08 编辑: 熊水斌)