隧洞围岩中岩块稳定动力学分析

田景元,孙树林,刘汉龙

(河海大学土木工程学院,江苏 南京　210098)

摘要:按时间离散分析了单一岩块的稳定性,即岩块受力松动引起形成岩块的充填物的变形和破裂,使充填物作用在岩块上的力不断改变,设在每一时间步内岩块沿直线路径运动.根据岩块的运动规律和结构面的破裂状态判断是否结束岩块的运动分析,于是判断出岩块的稳定性.该方法分析计算量小,结论合理.

关键词:岩块;稳定;结构面;充填物;破裂状态;时间步

中图分类号:TU457　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1980(2002)02-0081-04

岩体被各式各样宏观的结构面,如层面、不整合面、片理、断层、节理等,分割成大小不等、形态各异、各有一定规律排列的岩块.本文讨论的岩块由3个结构面和隧洞开挖面切割而成,结构面有充填物存在.开挖面可以是平面,也可以是曲面.如马蹄形隧洞开挖面的侧墙和底板为平面,顶部半圆拱为半圆柱面,见图1.

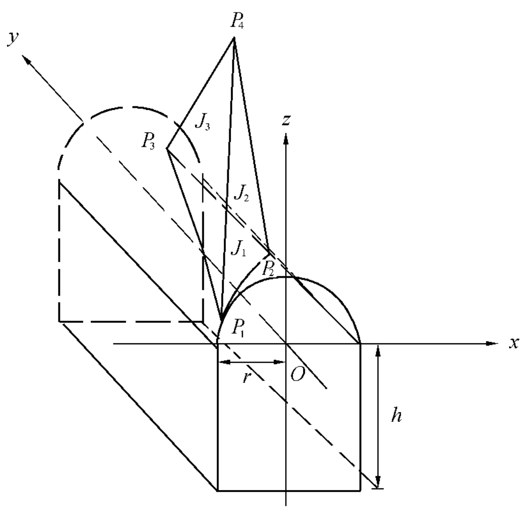

图1　岩块及岩块各顶点和结构面的编号

Fig.1　Block and serial number of vertexes and joint surfaces

岩块的稳定性往往对岩体的稳定起控制作用.分析岩块稳定性主要采用古德曼提出的块体理论[1,2]和石根华提出的非连续变形方法(DDA)[3].

根据块体理论,岩块沿单面滑动满足

$$|\boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}|\tan\varphi - |\boldsymbol{w} - \boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}\hat{\boldsymbol{n}}| < 0 \tag{1}$$

沿双面滑动满足

$$|\boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}_1|\tan\varphi_1 + |\boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}_2|\tan\varphi_2 - |\boldsymbol{w} - \boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}_1\hat{\boldsymbol{n}}_1 - \boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}_2\hat{\boldsymbol{n}}_2| < 0 \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{w}$——岩块所受惯性力;$\hat{\boldsymbol{n}}$——结构面向上的单位法向量;φ——结构面内摩擦角;| |——对向量取模.

当块体位于形成它的各个结构面的下方时,如图1所示,块体理论认为其一定会掉落.但实际上该岩块却不一定掉落,因为结构面向块体提供的力可能足以平衡岩块的重力.块体理论的不足之处在于把岩块的受力条件过于简化.Crawford和Bray[4]分析了如图1岩块稳定所须满足的条件,但限于二维情形.

本文根据Crawford和Bray的分析思路,提出了岩块稳定分析的新方法.该方法综合了Crawford和Bray、块体理论、DDA的一些分析方法,其基本原理、假设条件与块体理论、DDA以及其他方法不一样,分析过程及结论也不尽相同.本文方法的结论基本符合实际.

1　基本思路和假设条件

岩块所受力包括自重、结构面向岩块提供的沿各结构面法向和切向的力.岩块所受合力不为零时,将在合力的作用下产生运动.刚运动时速度很小,亦即岩块在岩体内松动.若岩块失稳,岩块将以较大速度脱离部

收稿日期:2001-03-22

作者简介:田景元(1972—),男,四川安岳人,博士研究生,主要从事岩土体动力学研究.

分结构面或脱离全部的结构面而运动.这时,岩块的3个结构面全部破裂.

结构面向岩块施加的力由结构面充填物与岩块交界面上的应力状态来决定,假设充填物内的应力状态在时间固定的情况下沿充填物所在结构面的法向方向是不变的.

充填物在岩块刚松动时的应力状态为初始应力状态.在结构面上布置一定数目的点的阵列,则第 i 结构面第 j 点对应充填物的应力状态表示为

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xij} & \tau_{xyij} & \tau_{xzij} \\ \tau_{yxij} & \sigma_{yij} & \tau_{yzij} \\ \tau_{zxij} & \tau_{zyij} & \sigma_{zij} \end{bmatrix} \tag{3}$$

该点充填物对块体作用的力

$$\boldsymbol{f}_{ij} = (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) = (l_i, m_i, n_i)\boldsymbol{\sigma}_{ij} \tag{4}$$

式中 l_i, m_i, n_i 为该点所在结构面背离块体的法向矢量与 x, y, z 轴的夹角余弦.

将力 $\boldsymbol{f}_{ij}$ 分解成沿结构面法向和切向的力 $\boldsymbol{n}_{ij}, \boldsymbol{t}_{ij}$

$$\boldsymbol{n}_{ij} = (l_iX_{ij} + m_iY_{ij} + n_iZ_{ij})\hat{\boldsymbol{n}}_i \tag{5}$$

$$\boldsymbol{t}_{ij} = \boldsymbol{f}_{ij} - \boldsymbol{n}_{ij} \tag{6}$$

根据节理面的内摩擦角 φ 和凝聚力 c 按摩尔-库仑准则判断节理面是否破裂.若此时结构面已破裂,应修正 $\boldsymbol{t}_{ij}$ 或 $\boldsymbol{n}_{ij}$ 或同时修正 $\boldsymbol{t}_{ij}$ 和 $\boldsymbol{n}_{ij}$.若该点在 $\boldsymbol{n}_{ij}$ 为拉力的情况下破裂,称该点处于拉裂状态,应修正 $\boldsymbol{n}_{ij}$ 和 $\boldsymbol{t}_{ij}$,令 $\boldsymbol{n}_{ij}=\boldsymbol{0}, \boldsymbol{t}_{ij}=\boldsymbol{0}$ 称在 $\boldsymbol{n}_{ij}$ 为压力的情况下破裂状态为压裂状态,应只修正 $\boldsymbol{t}_{ij}$,修正后 $\boldsymbol{t}_{ij}$ 的方向与修正前的 $\boldsymbol{t}_{ij}$ 相同,大小等于充填物在法向应力 $\boldsymbol{n}_{ij}$ 下的抗剪强度.

$$\boldsymbol{t}_{ij} = \frac{\text{修正前的 } \boldsymbol{t}_{ij}}{|\text{修正前的 } \boldsymbol{t}_{ij}|}(|\boldsymbol{n}_{ij}|\tan\varphi_i' + c_i') \tag{7}$$

式中:φ_i'——该点所在结构面破裂后的内摩擦角;c_i'——该点所在结构面破裂后的凝聚力;$|\ |$——对向量取模.

需指出的是,结构面上部分区域的 $\boldsymbol{n}_{ij}, \boldsymbol{t}_{ij}$ 经修正后,整个岩体内的应力状态应重新调整.但由压裂原因产生的应力调整的程度很小,只需考虑由拉裂原因产生的应力调整.

岩块所受合力为自重和充填物与岩块交界面上各点对岩块施加的力的总和.在各交界面上布置均匀分布、成阵列的点,则岩块所受合力为

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{w} + \sum_{i=1}^{3}\left(\sum_{j=1}^{m_i}\frac{\boldsymbol{n}_{ij} + \boldsymbol{t}_{ij}}{m_i}S_i\right) \tag{8}$$

式中:m_i——各交界面(或结构面)上布置的点数,m_i 一般取为100;$\boldsymbol{n}_{ij}, \boldsymbol{t}_{ij}$——各点施加给岩块的法向、切向力;$S_i$——各交界面(或结构面)的面积.

岩块由静止开始松动,假设岩块的运动只是平动,不发生转动,经过很短的一段时间 Δt 后,即经过一个时间步后,速度增量

$$\Delta\boldsymbol{v} = \frac{\boldsymbol{F}\Delta t}{m} \tag{9}$$

式中 m 为岩块的质量,Δt 一般取0.001 s.

第一个时间步末,岩块速度

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{0} + \Delta\boldsymbol{v} = \Delta\boldsymbol{v} \tag{10}$$

则岩块在这段时间步内的位移改变量为速度在这一时间步内的平均值乘以时间步长,即

$$\Delta\boldsymbol{s} = (1 + \boldsymbol{v})\Delta t/2 \tag{11}$$

假设岩块和围岩为刚性,不变形,仅结构面充填物发生变形,岩块的松动引起充填物的法向变形 $\Delta\boldsymbol{s}_{ni}$ 为 $\Delta\boldsymbol{s}$ 在该结构面法向的投影值.

$$\Delta\boldsymbol{s}_{ni} = \Delta\boldsymbol{s}(l_i, m_i, n_i)(l_i, m_i, n_i) \tag{12}$$

充填物的切向变形

$$\Delta\boldsymbol{s}_{ti} = \Delta\boldsymbol{s} - \Delta\boldsymbol{s}_{ni} \tag{13}$$

若第 i 结构面充填物的法向劲度为 k_{ni},切向劲度为 k_{ti}(设劲度为常量),法向、切向应力改变量为

$$\Delta \boldsymbol{n}_{ij} = k_{ni} \Delta \boldsymbol{s}_{ni} \tag{14}$$

$$\Delta \boldsymbol{t}_{ij} = k_{ti} \Delta \boldsymbol{s}_{ti} \tag{15}$$

第一个时间步末充填物上各点的应力值为松动前的应力值加上本时间步应力改变量.根据本时间步末的法向、切向应力值还需判断该点现在处于什么样的破裂状态,以便对法向、切向应力值进行修正.本时间步前处于未破裂状态的点可能变为压裂、拉裂;处于压裂状态的点可能变为拉裂;处于拉裂的点当岩块又运动回到结构面时则变为压裂.

充填物的应力状态改变了,其施加给岩块的力也改变了.岩块在新的合力 F_1 作用下(F_1 的计算仍按式(8),只是把公式等号左边的 F 改成 F_1),在 Δt 内又产生一段位移,经过这一时间步后,岩块的速度矢量改变量为 $F_1 \Delta t / m$,充填物的破裂状态和应力状态又改变了,岩块再在新的合力作用下继续运动.

若岩块的运动速率由 0 变到最大又逐渐变为 0,这时岩块所受的合力把岩块向未松动时的位置往回拉,岩块将作振动运动,岩块稳定.

若岩块的 3 个结构面上的点已全部破裂,且位于岩块之上的结构面的点全为拉裂状态,应停止岩块运动的计算,若岩块位于 3 个结构面之下,岩块掉落.否则,若式(16),(17)成立,则岩块失稳.

沿单面滑动

$$|\boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}| \tan\varphi - |\boldsymbol{w} - \boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}\hat{\boldsymbol{n}}| + |c'| S < 0 \tag{16}$$

沿双面滑动

$$|\boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}_1| \tan\varphi_1 + |\boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}_2| \tan\varphi_2 - |\boldsymbol{w} - \boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}_1\hat{\boldsymbol{n}}_1 - \boldsymbol{w}\hat{\boldsymbol{n}}_2\hat{\boldsymbol{n}}_2| + |c_1'| S_1 + |c_2'| S_2 < 0 \tag{17}$$

值得一提的是,岩块随开挖过程在开挖面上从开始出露到完全出露有一个时间过程,岩块的松动是从岩块刚从开挖面上出露就开始了的.文中假设岩块的松动是从岩块在开挖面上完全出露后才开始的.

以上假设条件可归纳为如下 6 点:(a)岩块的松动是从岩块在开挖面上完全出露后才开始的;(b)岩块和围岩为刚性,不变形,仅结构面的充填物发生变形;(c)围岩中应力调整只发生在松动之前;(d)岩块的运动只是平动,不发生转动;(e)充填物内的应力状态在某一固定时刻沿充填物所在结构面的法向方向是不变的;(f)岩块的受力,不考虑与其运动速度有关的阻尼[5].

2　算 例 分 析

某一马蹄形铁路隧道拱半径 2 m,侧墙高 4 m,其中某段隧道长 200 m,上覆岩体厚 110 m.运用弹性力学有限元法求围岩内的应力,可按平面应变问题处理.有限元网格剖分如图 2 所示.图中左右边界的每个节点 x 方向固定,下边界的每个节点 z 方向固定,p 为上边界线上覆 100 m 厚岩体由于其自重产生的压力,岩体泊松比 $\nu = 0.2$,弹模 $E = 2.1 \times 10^6$ kPa.算出围岩内的应力场,其中单元 A 内的应力在 xOz 平面内(σ_x,σ_z,τ_{xz})为(-346.285 kPa,-152.813 kPa,-143.202 kPa),$\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z) = -99.82$ kPa,$\tau_{xy} = \tau_{zy} = 0$.岩块结构面上布置的成阵列的点的应力可由有限元单元中心处的应力插值而得.

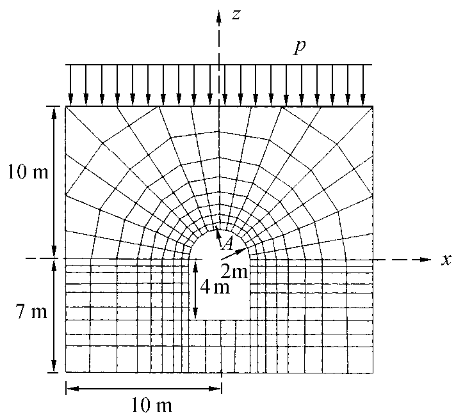

图 2　计算网络

Fig.2　Mesh for computation

下面分析几个不同位置、不同体积的岩块的稳定性.如图 1 所示,点 P_1,P_2,P_4 组成结构面 J_1,点 P_2,P_3,P_4 组成结构面 J_2,由点 P_3,P_1,P_4 组成结构面 J_3.各岩块的 P_1,P_2,P_3 坐标分别为:(-1.0,0.0,1.732),(1.0,0.2,1.732),(0,3.0,2.0).计算的结构面参数为:$k_{n1} = -2\,500$ kPa/cm,$k_{n2} = -3\,000$ kPa/cm,$k_{n3} = -3\,500$ kPa/cm,$k_{t1} = -4\,500$ kPa/cm,$k_{t2} = -5\,000$ kPa/cm,$k_{t3} = -5\,500$ kPa/cm,$\varphi_1 = 25°$,$\varphi_2 = 30°$,$\varphi_3 = 30°$,$c_1 = -15$ kPa,$c_2 = -20$ kPa,$c_3 = -25$ kPa,$\varphi_1' = 10°$,$\varphi_2' = 10°$,$\varphi_3' = 10°$,$c_1' = -5$ kPa,$c_2' = -5$ kPa,$c_3' = -5$ kPa.

由于充填物作用在岩块上的力与岩块的运动方向相反,故劲度 k_n,k_t,c 取负值.计算结果如表 1 所示,这 5 个算例岩块开挖面上的 3 个角点坐标相同,只是岩块在岩体中的一个角点的 x,y 坐标不一样.当 P_4 在 xOy 面上的投影点偏移 P_1,P_2,P_3 在 xOy 面上的投影点组成的三角形的中心时,岩块由不稳定变得稳定,这是合理的.

表 1 算例

Table 1 Cases for computation

算例序号	块体角点 P_4 的坐标/m	块体体积 /m^3	分析过程及结果
1	(0,2.0,5.0)	2.633	取 $\Delta t = 0.002$ s,在第 214 时间步末各结构面都拉裂,由于各结构面都位于岩块之上,岩块掉落
2	(1,2.0,5.0)	2.634	取 $\Delta t = 0.002$ s,在第 148 时间步末各结构面都破裂,位于岩块之上的 J_1,J_3 拉裂,按式(16)计算,岩块沿 J_2 滑动
3	(2.0,2.0,5.0)	2.634	取 $\Delta t = 0.001$ s,在第 133 时间步岩块向上运动,J_2 未完全破裂,岩块稳定
4	(2.0,0,5.0)	2.804	取 $\Delta t = 0.001$ s,在第 225 时间步末各结构面都破裂,位于岩块之上的 J_3 拉裂,按式(17)计算岩块沿 J_1,J_2 滑动
5	(3.0,-1,5.0)	2.89	取 $\Delta t = 0.001$ s,在第 98 时间步岩块向上运动,位于岩块之上的 J_3 未完全破裂,岩块稳定(岩块位于 J_1,J_2 之上)

3 讨论及结论

a. 本方法对于三个以上结构面切割成的岩块同样适用.

b. 所有结构面无充填物时,岩块无松动过程,可按式(8)计算出的 F 来判断岩块是否稳定.若 F 的 z 轴分量向上,岩块稳定,否则不稳定.对岩块部分结构面有充填物、部分无充填物的情况,可假设无充填物的结构面有劲度进行计算.

c. 位于隧洞顶部的岩块,隧洞顶部有拉应力状态区比没有拉应力状态区时岩块较不稳定.前一情况计算的结果偏不安全,后一情况计算的结果偏安全.

d. 本文方法不太适用于边坡稳定分析,因为本方法假设岩块和岩块周围围岩为刚体,不变形,而边坡岩块在松动后其上部岩石变形、位移量很大.

e. 本文方法在力学方面考虑的因素比块体理论及文献[4]的方法更全面,因此结论较合理;与 DDA 最大的不同点是只分析一个块体的运动过程,计算量较小.但本文方法的理论仍须进一步完善,实用性须得到实际进一步验证.

参考文献:

[1] Goodman R E. Block theory and its application[J]. Geotechnique, 1995, 45(3): 383~422.

[2] 刘锦华,吕祖珩.块体理论在工程岩体稳定分析中的应用[M].北京:水利电力出版社,1986.4~26.

[3] 石根华. 数值分析方法与非连续变形分析[M]. 裴爱民译.北京:清华大学出版社,1997. 92~98.

[4] Crawford A M, Bray J W. Influence of the in-situ stress field and joint stiffness on rock wedge stability in underground openings [J]. Can Geotech, 1983, 20: 276~287.

[5] 陶连金,苏生瑞,张倬元.节理岩体边坡的动力稳定性分析[J].工程地质学报,2001,9(1):32~38.

Dynamic Analysis of Rock Block Stability for Confining Rocks in Tunnels

TIAN Jing-yuan, SUN Shu-lin, LIU Han-long

(*College of Civil Engineering*, *Hohai Univ.*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: The stability of single rock block is analyzed by the discrete time-step method, that is, the force that the joint filler acts on a block makes the block move, and the movement causes deformation and rupture of the joint filler, which further results in continuous change of the force acting on the block. Under the hypothesis that the block moves in a straight line in every time-step, the ending of analysis of the block movement is determined according to the movement law of blocks and rupture states of joint surface, thus, the stability of the block is judged. The present method can shorten calculation time, and the result is reasonable.

Key words: rock block; stability; joint surface; filler; rupture state; time-step