

基于重度增加法的岩坡破坏过程流形元分析

王述红, 高红岩, 张紫杉

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 考虑岩体边坡滑动大变形破坏特性和现有研究分析手段, 提出利用第一作者团队开发研制的 GeoSMA-3D, 在现场岩体结构信息采集的基础上, 建立岩体边坡空间数值模型, 实体表征岩体三维模型; 利用现代数值流形法 (NMM) 模拟岩体大变形破坏分析手段, 在块体理论的基础上, 运用有限元分析中经常用到的重度增加法, 不断增加岩体的重度, 直到岩体边坡中的“关键块体”产生滑动, 使边坡发生大变形破坏; 同时以最危险“关键块体”水平位移随重度增加发生突变为破坏依据, 对边坡的安全系数进行评定. 实例分析某边坡工程的破坏过程, 实现了岩体边坡大变形数字表征, 为边坡支护提出解决方案, 为工程施工和边坡灾害的处置提供参考和借鉴.

关 键 词: 重度增加法; 块体; 大变形分析; 数值流形法; 岩体边坡

中图分类号: TU 457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)03-0403-05

Manifold Analysis of the Rock Slope Failure Process Based on the Gravity Increase Method

WANG Shu-hong, GAO Hong-yan, ZHANG Zi-shan

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GAO Hong-yan, E-mail: hongyangoon@163.com)

Abstract: The characteristic of large deformation damage and the existing analysis method in rock slope engineering was considered; meanwhile, based on the structural information collection of the rock slope, a numerical space model of rock slope was established through GeoSMA-3D which was developed by the first author's team. The numerical model can represent 3D model of rock slope, using the numerical manifold method (NMM) to simulate the process of large deformation in rock slope, based on the block theory and the gravity-increase method which is often used in the finite element method, through increasing the gravity of rock mass continuously, until the “key blocks” begin to slide, and the slope generates large deformation failure. At the same time, the safety factor of slope can be confirmed if the displacement of the most dangerous “key block” increases sharply with the increase of gravity. At last, an example of slope engineering in Liaoning is presented to achieve the characterization of large deformation damage in rock slope, proposing solutions for the slope support, providing a reference for engineering construction and prevention of slope disaster.

Key words: gravity increase method; blocky rock mass; large deformation analysis; NMM (numerical manifold method); rock slope

在土木工程建设中, 块状结构岩体边坡经常遇到, 其中节理岩体边坡工程事故时有发生. 为了保证工程的安全性, 需要对块状岩体边坡的稳定性以及破坏过程中的变形问题进行研究.

本文通过对各种数值方法的分析对比, 考虑岩质边坡破坏的大变形破坏特征, 应用 GeoSMA-3D (geotechnical structure and model analysis)^[1] 实现岩质边坡的三维表征, 然后选取有代表性的

收稿日期: 2015-01-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, 51179031); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006); 国家高端外国专家资助项目(GDW20142100050).

作者简介: 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授.

二维断面,应用重度增加法,通过石根华建立的数值流形法^[2],应用二维流形元程序进行边坡稳定分析.在二维流形元程序中不断增加岩体单位质量,即相当于增加岩体重度^[3],并在“关键块体”上布置测点,监测其水平位移.当位移随重度的增加突然增大,则确定此时的重度为边坡发生破坏的重度,进而确定边坡的安全系数^[4].最后提出加固措施,并用二维流形元程序进行验证.

1 重度增加法基本原理

重度增加法是保持岩体的抗剪强度、黏聚力 c 以及摩擦角 φ 为常数,逐渐增大岩体重力加速,相当于增大岩体的自重,直到岩体达到极限平衡状态,在自重力的作用下产生滑动破坏趋势.此时的重力加速度 g_{limit} 与实际的重力加速度 g 的比值称为该边坡的安全系数,即

$$F_s = g_{\text{limit}}/g . \tag{1}$$

其中: g_{limit} 为极限状态时岩体的重力加速度; g 为实际重力加速度,一般取值为 9.81 m/s^2 ; F_s 称为边坡的安全系数.

根据 Mohr – Coulomb 破坏理论,材料的破坏通常为剪切破坏^[5].在块状岩体边坡中,存在大量的软弱结构面,块体往往沿这些软弱结构面发生剪切破坏^[6],因此可以用 Mohr – Coulomb 破坏准则解释重度增加法.

采用 Jeager 等建立的单结构面理论^[7],假设岩体中存在一组结构面,其与最大主应力平面夹角为 β ,由摩尔应力圆理论可知,作用在结构面上的法向应力和剪切应力分别为

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta , \tag{2}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta . \tag{3}$$

结构面抗剪强度服从 Mohr – Coulomb 准则,剪切应力 τ_f 是法向应力 σ 的函数,即

$$\tau_f = \sigma \cdot \tan \varphi + c . \tag{4}$$

将式(4)带入式(2)和式(3),可以得出结构面发生剪切破坏的极限平衡条件为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c + \sigma_3 \tan \varphi)}{(1 - \tan \varphi \cot \beta) \sin 2\beta} . \tag{5}$$

随着重度的不断增加,当作用在结构面的主应力满足式(5)所示的条件时,结构面处于极限平衡的应力状态,岩块的下滑力和抗滑力平衡,认为岩体已经破坏^[8].

已有研究表明在岩体边坡抗剪参数较小,且坡度较大的情况下,重度增加法求得的安全系数

较为准确,与本文研究的块状岩体相符.

2 边坡模型空间表征及流形元法实现

2.1 边坡模型空间表征

在 GeoSMA – 3D 中输入表 1 中所示的结构面信息,三维坐标 X, Y, Z , Dip (倾向), Dip angle (倾角), L (迹长),同时软件也会自动生成一些不确定性结构面,生成三维的块状岩体边坡模型,并识别出岩体临空面中的“关键块体”^[9].

表 1 岩体结构面信息
Table 1 The structural plane information of rock mass

结构面	X/m	Y/m	Z/m	Dip/ (°)	Dip angle/(°)	L/m
1	0	41	0	101.5	81.4	9.94
2	0	40	0	109	78.9	13.7
3	0	35.5	0	96.6	73.2	5.881
4	3	-32.7	0	228.1	72.8	2.29
5	0	31	0	263.2	83.5	13.82
6	0	27.5	0	33.7	35.5	8.53
7	0	26.5	0	204.5	83.7	6.08
8	0	25	0	246.1	69.9	16.06
9	0	-23.5	0	70	28	12.83
10	0	22.5	0	162.3	84.2	6.55
11	0	20	0	196.7	58.6	8.41
12	0	18.5	0	170.2	28.8	16.47
13	0	17.4	0	291.8	83.2	13.57
14	0	15.5	0	284.7	84	9.05
15	0	13.3	0	26.5	8.7	7.66
16	0	11.5	0	282.3	82.9	12.39
17	0	8.5	0	265.9	82.9	15.99
18	0	-3.3	0	94.1	88.2	18.93
19	0	5.5	0	250.3	77.9	19.86
20	0	2.8	0	284.7	98	13.56
21	0	-13.3	0	26.5	89.6	18.68
22	0	15.5	0	282.3	56.9	12.75
23	0	8.5	0	265.9	65.7	9.86
24	0	-5.3	0	94.1	45.2	10.68
25	0	-0.5	0	250.3	23.9	8.66

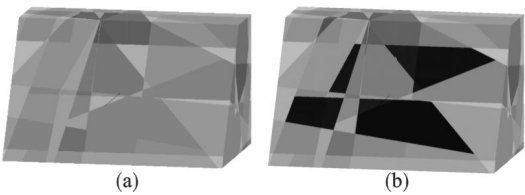


图 1 GeoSMA – 3D 边坡模型及关键块体
Fig. 1 The slope model of GeoSMA-3D and key blocks
(a)—GeoSMA – 3D 边坡模型; (b)—关键块体.

2.2 数值流形方法分析原理及其实现过程

数值流形方法应用数学覆盖和物理网格,建立了岩土工程中连续与不连续介质的求解格式^[10].

岩质边坡的滑落失稳,整体来说还是沿着出露面向外,在横断面内进行的^[11].通过 GeoSMA-3D 模型提取流形元二维横断面,如图 2a 所示.

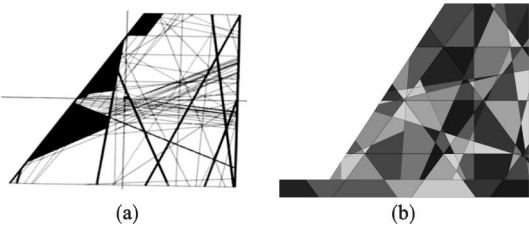


图 2 二维断面的选取

Fig. 2 The selection of two-dimensional cross section
(a)—横断面; (b)—流形元边坡模型.

在二维流形元程序中输入断面坐标、各固定点坐标(需将岩体边坡的右侧和底部固定).在各坐标都输入完毕之后,覆盖精度定义为 3.运行前处理程序,将生成数学覆盖和物理网格,二者叠加形成物理覆盖,生成边坡模型,见图 2b.

3 大变形破坏数值分析

3.1 边坡最危险“关键块体”的确定

当岩质边坡受到扰动时,临空面上的一些块体就会失去平衡状态^[12],率先产生滑动的块体称为“关键块体”,当岩体重度增加到一定程度时,“关键块体”将会沿着潜在滑动面产生滑动^[13].

对岩体表面的危险块体进行编号,如图 3 所示,并在块体上添加测量点,监测块体位移.在程序计算到 16 步时,⑤号块体首先产生水平位移,同时,与 GeoSMA-3D 搜索出的关键块体进行对比,确定⑤号块体为最危险的“关键块体”.

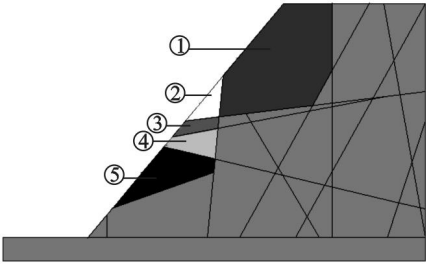


图 3 可能产生滑动块体

Fig. 3 The potential blocks to slide

3.2 边坡的破坏依据以及安全系数的确定

岩体稳定性丧失往往伴随大变形破坏发

生^[14].本文用⑤号“关键块体”水平位移随岩体重度增加的关系曲线位移突然增大作为边坡发生破坏的依据.设定岩体物理力学参数如下:容重 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$,黏聚力 $c = 40 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$,弹性模量 $E = 20 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu = 0.25$.结构面黏聚力设定为 0.05 MPa (符合一般结构面黏聚力取值).

重度增加系数 F 先分别取 $1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$.岩体重度根据重度增加系数一次增大,计算步距取 10 步.各安全系数和位移关系如图 4 所示.

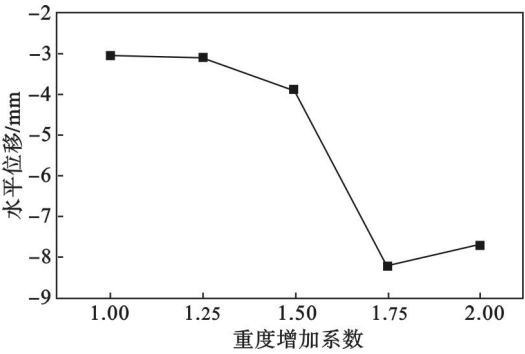


图 4 测点水平位移随重度增加系数变化曲线

Fig. 4 The curve of horizontal displacement of measuring points with gravity-increase factor

从图 4 中可以看出,当重度系数增加到 1.5 和 1.8 之间时,位移显著增大.进一步划分重度增加系数,如图 5 所示.当重度达到 34 kN/m^3 之后,测点位移急剧增大,边坡达到失稳破坏的标准.边坡安全系数 F_s 如下:

$$F_s = g_{\text{limit}}/g = 1.7.$$

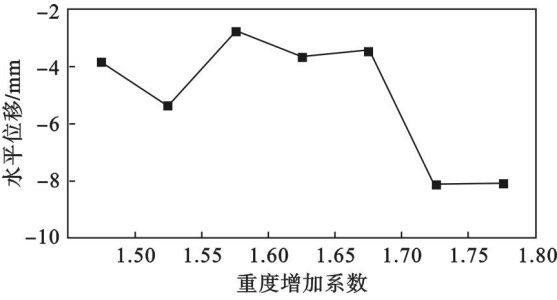


图 5 测点水平位移随重度增加变化曲线

Fig. 5 The curve of horizontal displacement of measuring points with gravity-increase

4 支护方案的模拟

根据破坏过程可以看出,破坏符合块体理论.最危险的⑤号“关键块体”首先沿结构面产生滑动引起上部块状块体的滑动,故先提出对⑤号块体加固.在对⑤号“关键块体”加固之后,通过模拟发现由于③号块体的滑动,继续发生大变形破

坏.同时,根据破坏过程,可以推测出,在固定③号块体之后,②号块体仍有可能诱发边坡失稳.因此,同时对③号块体、②号块体进行加固.破坏情况见图 6,边坡稳定.

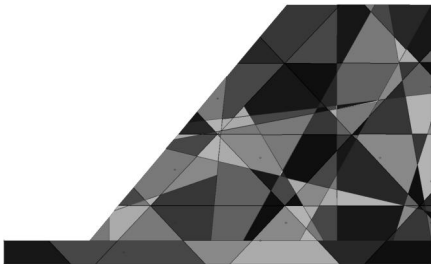


图 6 程序计算到 100 步时的破坏情况
(②,③,⑤号块体已经固定)

Fig. 6 The destruction when the program runed to 100 steps (No2, No3, No5 blocks have been fixed)

5 工程实例

5.1 工程背景

辽宁省建兴高速公路 K48 + 690 ~ K48 + 850 段(即小盘岭)边坡开挖顶面到开挖路面的高度约为 50.1 m,坡角为 31°~46°,工程地质岩体条件较差.影响边坡稳定性的不确定因素较多,为边坡施工带来了极大的麻烦.

5.2 结构面信息采集

通过 ShapeMetriX3D 系统对三维图像进行细节部分的精细测量,结构面数据见表 2.

表 2 结构面信息
Table 2 Structural plane information

分组 编号	倾角		倾向		迹长	间距
	均值 (°)	标准差	均值 (°)	标准差	均值 m	均值 m
1	74.2	3	108.9	5	2.77	1.9
2	10.1	3	89.7	5	3.92	3.5
3	48.1	3	186.8	5	3.93	2.1

5.3 边坡模型空间表征和“关键块体”的搜索

将 ShapeMetriX3D 系统分析得到的结构面信息输入到 GeoSMA - 3D 软件中,建立边坡空间表征模型,并进行“关键块体”分析,如图 7 所示.

5.4 数值流形方法分析“关键块体”及支护措施

选取通过图 7b 所示的 A 块体的断面进行二维流形元方法的模拟,结果如图 8,图 9 所示(将底部和右侧岩体固定).

根据破坏过程可以清楚地看到,在数值流形程序中,率先滑动的关键块体 A'与 GeoSMA - 3D

模型中的关键块体 A 相吻合,因此流形元模拟结果准确.并因此提出对 A 关键块体进行支护,如图 10 所示.

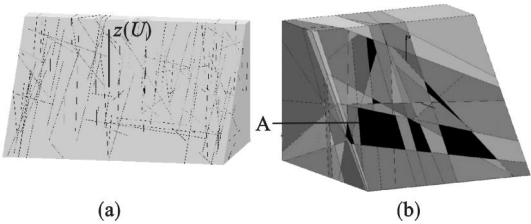


图 7 坡面迹线及关键块体

Fig. 7 Joint traces on the surface and key blocks
(a)—迹线; (b)—关键块体.

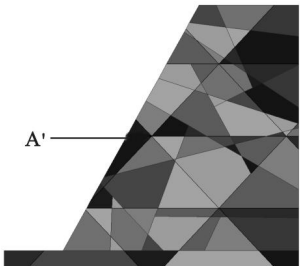


图 8 流形元法边坡模型

Fig. 8 The slope model of NMM

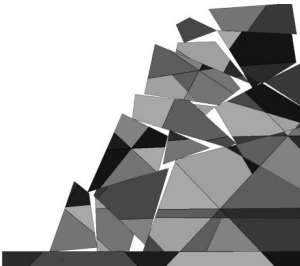


图 9 程序计算到 100 步时边坡破坏情况
Fig. 9 The destruction condition when the program runed to 100 steps



图 10 程序计算到 50 步时的破坏情况
(A 块体已经固定)

Fig. 10 The destruction condition when the program runed to 50 steps (A block has been fixed)

6 结 论

在流形元程序中,重度增加法保证了块状岩体的重度逐步增大,通过监测确定边坡率先滑动的“关键块体”,以“关键块体”的水平位移突然增大为边坡的破坏依据,进一步确定边坡的安全系数。随后,通过流形元程序生动有效地模拟出块状岩体边坡的大变形破坏过程,可以清晰地看到块体开始产生滑动直至脱离岩体的全部动态过程,为边坡的支护、监测提供准确的理论依据。

在工程建设中,对坡面露出的所有块体全部进行加固是不合理、不经济的。通过流形元模拟破坏分析,可以准确地判断出能够阻止边坡滑动的“关键块体”,为边坡支护加固提供准确的块体定位,为支护以及预警监测提供极大便利。

致谢: 本文研究工作得到石根华博士指点和帮助,特此致谢。

参考文献:

- [1] Wang S H, Ni P P. Application of block theory modeling on spatial block topological identification to rock slope stability analysis [J]. *International Journal of Computational Methods*, 2013, 11(1): 390–400.
- [2] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民, 译. 北京: 清华大学出版社, 1997: 3–14.
(Shi Gen-hua. Numerical manifold method (NMM) and discontinuous deformation analysis (DDA) [M]. Translated by Pei Jue-min. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 3–14.)
- [3] Li L C, Tang C A, Zhu W C. Numerical analysis of slope stability based on the gravity increase method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(7): 1246–1258.
- [4] 康亚明, 刘长武, 贾延, 等. 重度增加法确定边坡滑动面[J]. *人民长江*, 2008, 39(8): 75–77.
(Kang Ya-ming, Liu Chang-wu, Jia Yan, et al. Gravity increase method to determine the sliding surface of slope[J]. *Yangtze River*, 2008, 39(8): 75–77.)
- [5] Ngai L, Wong Y, Wu Z J. Application of the numerical manifold method to model progressive failure in rock slopes [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 119(3): 1–20.
- [6] Wang S H, Huang R Q, Ni P P, et al. Fracture behavior of intact rock using acoustic emission: experimental observation and realistic modeling [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2013, 36(6): 903–914.
- [7] Wang S H, Ni P P, Guo M D. Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2013, 38(8): 357–367.
- [8] Li S C, Cheng Y M. Enriched meshless manifold method for two-dimensional crack modeling [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2005, 44(3): 234–248.
- [9] 王述红, 张航, 张艳桥, 等. 随机结构面切割岩质边坡空间块体模型及关键块体分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(3): 431–434.
(Wang Shu-hong, Zhang Hang, Zhang Yan-qiao, et al. Random structural plane cutting of a rock slope spatial block model and its key block analysis [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(3): 431–434.)
- [10] Shi G H, Goodman R E. Two dimensional discontinuous deformation analysis [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1985, 9(1): 541–556.
- [11] Zhang H H, Li L X, An X M, et al. Numerical analysis of 2-D crack propagation problems using the numerical manifold method [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2010, 34(1): 41–50.
- [12] Wang S H, Lee C I, Ranjith P G, et al. Modeling the effects of heterogeneity and anisotropy on the excavation damaged/disturbed zone (EDZ) [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, 42(2): 229–258.
- [13] Ning Y J, An X M, Ma G W. Footwall slope stability analysis with the numerical manifold method [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2011, 48(6): 964–975.
- [14] Goodman R E, Shi G H. Block theory and its application to rock engineering [M]. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1985.