

※ 编程技术 应用实践 ※

岩质边坡随强度恶化的失稳演化

张帅 钱江 丁月双

(成都理工大学环境与土木工程学院, 成都, 610059)

【摘要】以岩质边坡为实例, 基于数值试验软件 RFPA-2D 边坡版, 进行了岩质边坡在发育有各类型结构面情况中发生下滑垮塌的数值模拟。该边坡版软件是以有限元强度折减法为理论基础, 通过对岩体与结构面强度的同步折减实现具有原生、构造、浅表生结构面岩质边坡的变形失稳模拟, 以此得到发育有典型性结构面岩坡的变形失稳过程。

【关键词】岩质边坡; 结构面; RFPA; 有限元; 强度折减

引用工程地质分析原理书中一句精髓, “如果将地质环境比作一个机体, 由于工程活动而引起机体产生各种变化, 则工程地质分析可以比做病理研究。”^[1]病理诊断有定性及定量两部分组成, 本文即是通过 RFPA 边坡赠送版完成了对岩质边坡的数值试验——定量分析。岩坡有其独特的性质。实际岩体中存在着大量不同构造、产状和特性的裂隙体, 其稳定性与岩体的结构, 容重和强度、边坡坡度、高度、岩坡表面和顶部所受荷载等因素均有关, 这些都给岩质边坡的稳定分析带来了巨大的困难, 岩质边坡稳定性研究可谓是国内外研究的热点和难点之一。同时, 由于结构面是在建造和改造过程中形成, 其空间性状和界面特征与其成因和演变历史密切相关, 因为按成因分类是最基本的分类, 可分为原生结构面, 构造结构面和浅表生结构面^[8], 本文通过对发育有上述几种基本类型结构面岩坡的 RFPA 数值试验, 对岩坡的稳定性进行了分析, 并直观的演示出边坡失稳的全过程。

1 原理

RFPA-slope2D 是利用有限元强度折减法进行数值计算, 以基元破坏个数的最大值作为边坡失稳的判据。而且, 程序可自动求得滑动面, 模拟过程中能够跟踪边坡起裂、裂纹发展和滑动面的形成过程。^[2]其所利用的强度折减法分析边坡稳定性的基本思想是: 在弹塑性有限元计算中将边坡岩土体抗剪切强度参数逐渐降低至达到破坏状态为止, 程序可自动根据弹塑性计算结果得到破坏滑动面(塑性应变和位移突变地带), 此时的折减系数 F_s 就是边坡的安全系数^[3]。

以下是对某岩质边坡稳定性的模拟示例。

2 模型

模拟为某岩质边坡, 高度为 60m, 坡角为 60° , 由于边坡赠送版仅适用于小单元数的模型计算, 所以将网格划分为 60×100 个基元, 尽管模型略显粗糙, 但是同时也可以实现在不要求精度要求的情况下, 大大的提高了计算速度。试样模型尺寸为 $60000\text{mm} \times 100000\text{mm}$, 边界条件为 X 方向固定, 即受位移约束, Y 方向只受自重, 如图 1。

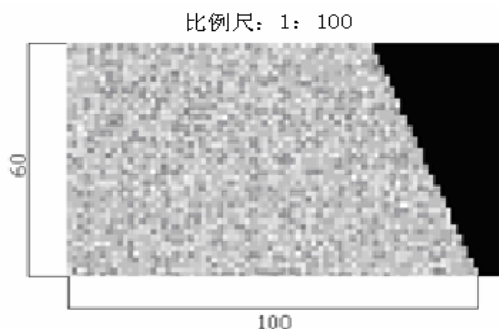


图 1 60×100 单元截图 (单位: m)

模型建立中需要注意的是边界条件和模型形状的选取,对于边界条件的设定,本模型中是仅考虑了 Y 方向的自重,所以对 X 方向进行了位移约束,而 Y 方向设定的是无约束;对于形状的选取,要注意坡度, X 向模型剩余长度等,否则会造成计算结果显示为从坡跟底部发生空洞跨塌而歪曲试验结果。

3 参数选取

数值模型采用的岩石物理力学性质参数如表 1。

表 1 岩质边坡模型参数

参数名称	数值
均值度系数 m	4
弹性模量 E (GPa)	1.3
泊松比 ν	0.25
摩擦角($^{\circ}$)	40
自重(N/mm ³)	2.8e-5
折减系数	0.01
初始强度(MPa)	3

4 完全岩质和具结构面岩质边坡数值实验

4.1 岩质边坡稳定性数值分析

以下是整个计算过程中边坡开始发生显著滑动时的应力图。模型设定的折减系数为 0.01,初始强度为 3MPa,计算总步数是 100,每一个计算步强度折减为 $3/100=0.03$ MPa。数值模型采用的岩石物理力学性质参数如表 1。

图 2 为变形过程截图。分别代表岩体超过弹性极限后开始发生破坏的各个阶段。见图 2 a、b、c、d。

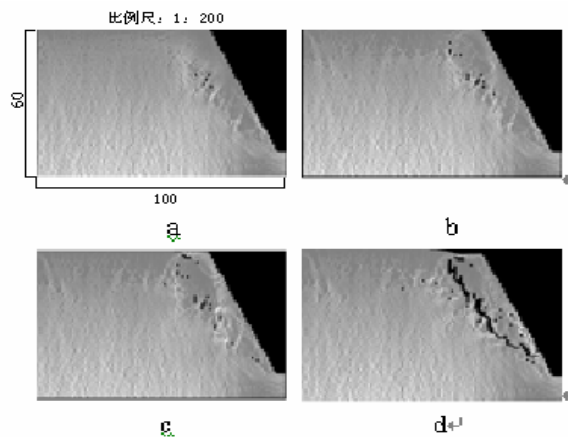


图 2 岩质边坡应力图

a、b 图为稳定破裂发展阶段; c 为不稳定破裂发展阶段; d 表现为强度丧失和完全破坏阶段^[9]。滑动面自动求出,且其结果完全符合岩体变形破坏后期过程和阶段^[4]。通过计算分析表明,由于边坡的形成,岩体中地应力发生重新分布,平行于临空面的最大主应力显著升高,在边坡表面达到最大值,而垂直于临空面的最小主应力明显降低,临空面附近岩体中应力差最大,主应力转为拉应力当其值超过了岩体的抗拉强度后就会发生拉裂破坏^[12],当所形成的拉张裂隙端部出现较大的应力集中时,拉裂隙将会进一步扩展,最终形成连续贯通破裂面。整个岩质边坡失稳垮塌^[5]。

4.2 结构面岩质边坡的稳定性数值分析

4.2.1 节理发育的岩质边坡

基础模型仍然采用原模型,在靠近坡面 10m 处有一节理,该节理平行于坡面,贯通率约 60%,计算模

型失稳部分过程, 见应力比较图 3 如下:

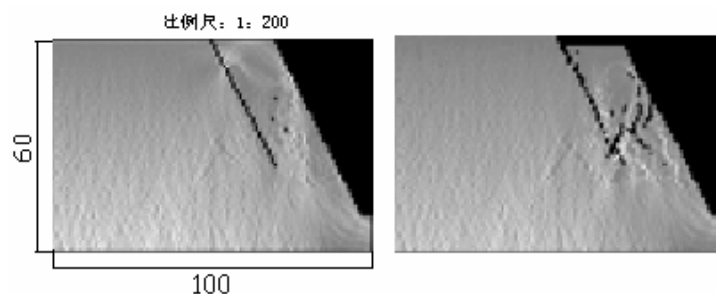


图 3 节理发育岩坡 RFPA 应力图

该边坡变形破坏过程相同于完全岩质边坡, 由于发育节理, 边坡的整体性遭到影响, 破坏完全被节理所控制, 而后坡体沿节理面发生整体滑移而后导致失稳。

4.2.2 软弱夹层发育的岩质边坡

对于发育有此类原生结构面的岩质边坡, 其软弱带强度较低, 往往构成工程岩体的破坏滑移面, 对岩体稳定极为不利。所用计算参数见下表。

表 2 发育软弱层面岩坡模型参数

参数名称	岩体	软弱层
均值度系数 m	4	4
弹性模量 E (GPa)	1.3	0.5
泊松比 ν	0.25	0.33
摩擦角($^{\circ}$)	40	30
自重(N/mm ³)	2.8e-5	1.5e-5
折减系数	0.01	0.01
初始强度(MPa)	3	1

这一类型边坡失稳过程见图 4, 图中箭头所指处即为软弱层带。

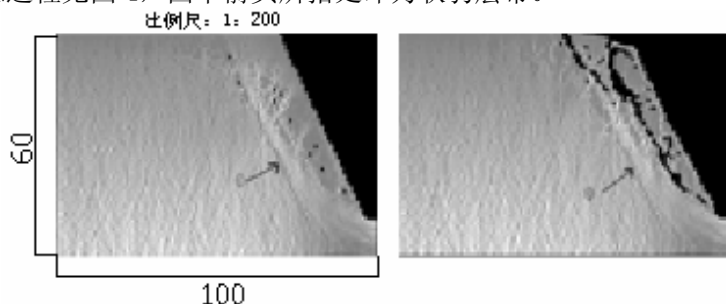


图 4 软弱层面发育的岩坡 RFPA 应力图

可见变形破坏过程同前, 沿软弱面发生滑移拉裂最终导致坡体整体失稳。

4.2.3 多组结构面发育的边坡

众所周知, 岩体中的结构面一般成组出现, 产状变化在某一范围内的一群结构面构成一个结构面组, 以下取岩体发育的两组边坡进行数值试验, 模型中, 参数与表 2 一致。第一组面倾角为 60° , 第二组倾角为 45° 。过程截图见图 5。

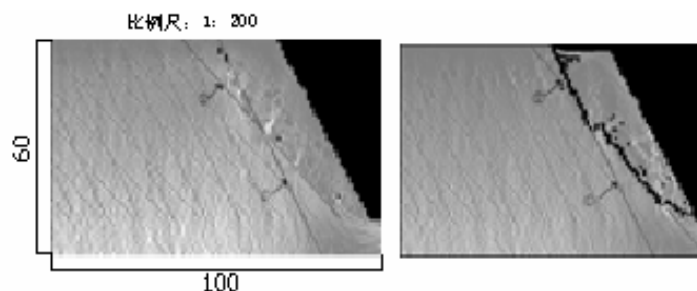


图 5 发育两组结构面的岩坡 RFPA 应力图

图中，直线标注处是对两组结构面的重描，由图可见，滑体的滑动破裂首先沿较陡面 1 发生，随后应力集中到两组结构面相交部位，再沿面 2 发生破坏。

5 结论

对于典型岩质边坡基于 RFPA-slope 的数值分析在基本模型基础上考虑了构造结构面，节理，软弱层面等不同条件。直观的得到了各个边坡的破坏变形过程。对于完全岩质边坡，其滑动面自动求得，破坏过程典型清晰；对于节理和软弱面边坡，其结构面破坏了岩体的连续性，控制了岩体变形破坏的演化方向；发育有多组结构面的边坡，岩体变形力学性质具有各向异性特征，其岩体自身的完整性遭到了破坏。对于以上几类边坡相同的是它们的变形破坏基本过程以及阶段，都是从稳定破裂发展到强度丧失且完全破坏。RFPA-Slope 赠送版对岩坡的整个数值实验过程在自动求得滑动面以及应力分布一目了然的基础上还具有操作简单，方便可行的特征。

参考文献

- [1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 地质出版社, 1993.
- [2] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] RFPA 用户手册[M]. 大连力软科技有限公司.
- [4] 李连崇, 唐春安, 邢军, 唐烈先. 节理岩质边坡变形破坏的 RFPA 模拟分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 559-562.
- [5] Wong R H C, Chau K T, Tang C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock2like materials containing three flaws—part I: experimental approach [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2001, 38(7): 909-924.
- [6] 石永生, 张宏伟, 王志辉. RFPA 岩石破断过程分析系统软件应用[J]. 洁净煤技术, 2006, 12(1): 81-84.
- [7] Li L C, Tang C A, Li C W, et al. Slope stability analysis by SRM2based rock failure process analysis (RFPA) [J]. Geomechanics and Geoengineering, 2006, 1(1): 1-12.
- [8] 杜时贵. 岩体结构面的工程性质[M]. 地震出版社, 1999.
- [9] 唐大雄. 工程岩土学[M]. 地质出版社, 2005.
- [10] 刘文彬, 唐春安, 唐烈先. 残余强度特性对岩石宏观破坏的影响[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(2): 59-63.
- [11] 潘别桐, 黄润秋. 工程地质数值法[M]. 地质出版社, 1994.
- [12] 徐卫亚. 边坡及滑坡环境岩石力学与工程研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.