

滑坡侵蚀离散元分析研究

郑书彦^{1,2}, 李占斌¹, 李甲平³, 苟建忠⁴

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 长安大学, 陕西 西安 710054;
3. 甘肃省宁县气象局, 甘肃 宁县 745200; 4. 甘肃省地勘局, 甘肃 天水 725400)

摘要: 首先介绍了离散单元法分析原理, 用铜王公路 2#滑坡侵蚀实例建立了地质模型, 根据黄土中实际最为发育的垂直节理面以及层面来划分单元及建立计算模型, 滑坡体被这 2 组结构面分割成 297 个单元, 滑体以下的滑床基岩部分作为固定单元处理。采用离散单元法对滑坡侵蚀运动过程中各演化阶段的平均速度、平均加速度, 滑坡侵蚀体后缘、中部、前缘的合力、合力矩进行了分析研究, 由此可将滑坡的演化过程划分为 5 个运动阶段: 启动破坏、剧动加速、高速运动、碰撞减速、停滞缓动。

关键词: 岩土力学; 滑坡侵蚀; 离散元; 演化过程

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)12-2124-05

STUDY ON LANDSLIDE EROSION BY DISCRETE ELEMENT METHOD

ZHENG Shu-yan^{1,2}, LI Zhan-bin¹, LI Jia-ping³, GOU Jian-zhong⁴

(1. College of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Ningxian Weather Bureau of Gansu, Ningxian 745200, China;
4. Geology Exploration Bureau of Gansu, Tianshui 725400, China)

Abstract: The principle of discrete element analysis method is introduced and applied to simulate a real case of the No.2 landslide on Tong—Wang highway. The geological model is built up with consideration of vertical joints and strata planes as discrete discontinuities in loess. Then the landslide body is meshed into 297 units by the two sets of structural planes, while the units under the sliding bed which is bed rock are treated as fixed. Furthermore, discrete element method is used to analyze the typical characters of the erosion evolution process of landslide. The average velocity, average acceleration, resultant forces and moment in back, middle and front portion of the landslide are calculated. The results suggest that the evolution process of landslide can be divided into five stages, i. e. initial breaking stage, extensive accelerating stage, high speed moving stage, bumping deceleration stage and slow braking stage.

Key words: rock and soil mechanics; landslide erosion; discrete element; evolution process

1 引言

离散单元法的思想源于分子动力学(molecular dynamics), 1971 年文[1]提出适用于岩石力学的离

散元法, 1979 年文[2~4]又提出了适用于土力学的离散元法, 我国学者王泳嘉 1990 年代初引入了离散元法^[5], 以后许多学者进行了多方面的探索与实践^[6~9]。

滑坡运动问题为典型的不连续变形块体的动力

收稿日期: 2004-03-30; 修回日期: 2004-04-26

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2003034413); 陕西省自然科学基金资助项目(2000D08)

作者简介: 郑书彦(1958-), 男, 2002 年于中国科学院水土保持研究所获博士学位, 现任副教授, 主要从事水土保持和边坡稳定方面的教学与研究工
作。E-mail: zhengshuyan@sina100.com。

学问题, 目前的研究大多集中在用极限平衡法进行边坡的稳定性分析, 该方法不考虑岩土体的变形问题, 无法描述滑坡的运动学特点和运动过程; 有限元法用于滑坡稳定性分析是基于连续性的假设, 它不能求解滑坡滑动实际可能产生的大变形和大位移。基于牛顿运动定律的离散单元法是一种非连续分析方法, 该方法可充分考虑离散块体之间的滑动、转动等运动形态, 建立滑坡侵蚀的刚度矩阵、质量矩阵、载荷矩阵等, 根据总势能最小化原理建立平衡方程式, 通过求解结构矩阵的方法分析块体系统力和位移的相互关系, 能得到大变形、大位移解, 对滑坡运动的全过程进行数值模拟, 演化滑坡运动的时空变化规律。

2 离散单元法分析原理

离散单元法是求解块体集合体在外力作用下, 块体间的相互作用以及运动过程的有效方法, 在块体准刚性假设的前提下, 以牛顿第二定律为理论基础建立起来的, 它研究的是块体的运动特征, 并以微小运动状态的求解来准态模拟物体的宏观大变形, 如地质体变形演化发展到后期阶段所具备的变形特征等。其基本思想是将岩土体视为由裂隙切割的非连续介质, 块体间按照岩体的裂隙切割形成相互镶嵌排列, 构成块体的集合体。当这一集合体作用有力系或其边界约束条件发生变化时, 块体间就会产生相互作用力, 从而导致块体产生一定的加速度及相应的位移, 使其空间状态发生变化。位移的块体之间, 由于差异位移矢量的存在, 从而使块体之间彼此又发生新的作用, 这种作用在离散单元法中用块体之间产生一定的位移“迭合”来描述, 根据力-位移关系, 按“迭合”位移又可计算出新的作用力系, 从而计算出集合体各块体在新力系下的加速度、位移及新的运动位置。如此反复迭代, 直至整个体系作用的力系达到新的平衡状态, 这样, 岩土体的运动过程就被真实地模拟出来了^[10, 11]。

3 地质模型

本研究以铜王公路 2[#]滑坡侵蚀为例(图 1)。铜王公路从 2[#]滑坡体南边界进入, 向北到达 2[#]滑坡体中部后拐弯向南东方向后, 再折向北东方向行进, 在 2[#]滑坡后部边界穿出。铜王公路 2[#]滑坡呈不规则的圈椅状, 后缘略宽而前缘略窄, 滑坡长约 610 m,

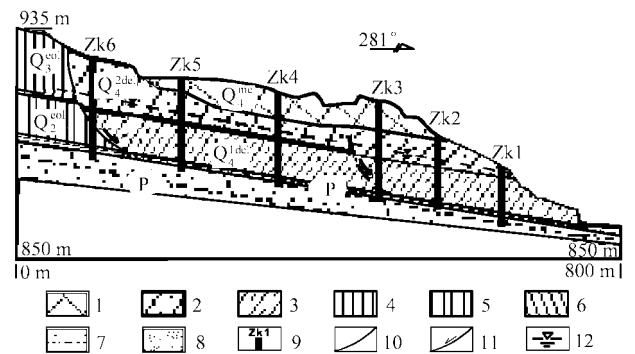


图 1 铜王公路 2[#]滑坡侵蚀地质模型

Fig.1 Geological model in 2[#] landslide erosion of Tongwang Highway

前缘宽约 510 m, 后缘宽约 590 m, 总面积约 $33.55 \times 10^4 \text{ m}^2$, 潜在滑坡侵蚀量达到 $1409 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡发育在黄土地层中, 滑动面为二叠系泥页岩及其风化壳, 滑动方向 281° , 倾角 $12 \sim 15^\circ$ 。滑坡后缘高程 928 m, 前缘(雷家河河面)标高 873 m, 前后相对高差 55 m。该滑坡是古滑坡的局部复活。

根据现场调查和钻孔资料, 铜王公路 2[#]滑坡区域地层结构从新到老如下: (1) 滑带土(Q_4^{del}): 由二叠系泥页岩的风化壳组成, 力学强度小, 呈强风化状态, 软泥状, 厚约 0.3 m; (2) 素填土(Q_4^{me}): 黄色、黄褐色, 主要为煤矸石、煤渣、碎砖等, 结构疏松, 不均一, 厚约 5.0~8.0 m; (3) 砂质粘土($Q_4^{2\text{del}}$): 原为马兰黄土, 现为滑体, 土体结构较松散, 厚约 15 m; (4) 粉质粘土($Q_4^{1\text{del}}$): 原为离石黄土, 由于滑体的影响, 土体结构较松散, 厚约 10 m; (5) 马兰黄土(Q_3^{ol}): 黄褐色, 均质, 结构疏松, 可塑—软塑, 其颗粒成分以粉粒为主, 大孔隙、垂直节理发育, 厚约 18 m; (6) 离石黄土(Q_2^{ol}): 呈深黄褐色结构较紧密, 均质, 含有数层古土壤, 厚约 12 m; (7) 二叠系泥页岩(P): 泥页岩互层, 页岩呈暗绿色、紫红色或黑灰色, 薄层状构造, 层理发育, 中等或强风化, 厚为 1~2 m, 泥岩呈褐红色、紫红色等杂色, 本层力学性质极差, 其产状 $340^\circ 9 \sim 13^\circ$; (8) 二叠系砂岩(P): 泥页岩下部是硬度较大的白色、灰白色砂岩, 中细—粗粒结构, 块状构造, 钙质胶结, 中厚层, 层理发育, 铜川地区二叠系地层主要是石干峰组、石盒子组、山西组, 岩石试验资料表明, 该砂岩力学指标偏低。

铜王公路 2[#]滑坡的变形破坏明显, 雷家河河床

原宽 6~8 m, 由于滑坡前缘的移动使河床不足 2 m, 河流堵塞, 雷家河被迫改道, 据此推测, 滑坡复活以来其前舌主滑部位向前移动了 3~6 m。根据 2# 滑坡变形破坏特征判断该滑坡为牵引式滑坡。由于雷家河的冲刷侵蚀使前缘变高变陡, 坡体上雨水入渗抬高地下水位, 导致前部土体的崩塌与剥落并逐步牵引着后面的土体沿软弱结构面发生滑移, 并在坡体上形成拉张裂隙, 裂隙又成为后面坡体的临空面, 使之向下滑动, 前部牵引后部, 从而发生整体移动。

根据现场调查、室内试验、反分析资料, 用圆弧条分法计算: 不考虑拉裂时, 稳定系数 $k = 0.99$; 考虑拉裂缝时, 稳定系数 $k = 0.98$ 。稳定系数 $k < 1$, 说明该边坡处于临界状态, 若遇大暴雨、地震等触发因素, 该滑坡会整体失稳而滑动。

4 计算参数选取及计算模型

按照土力学的离散元法^[2-4], 斜坡失稳破坏后的过程是一个运动学问题, 对这一过程的模拟采用离散单元法来模拟散体介质的运动过程是非常有效的。用离散元来模拟铜王公路 2# 滑坡破坏后的运动过程, 离散单元法单元的划分根据节理的自然切割状况确定。因此, 对铜王公路 2# 滑坡, 根据黄土中实际最为发育的垂直节理面以及层面来划分单元及建立计算模型, 如图 2 所示, 滑坡体被这 2 组结构面分割成 297 个单元。滑体以下的滑床基岩部分作为固定单元处理。

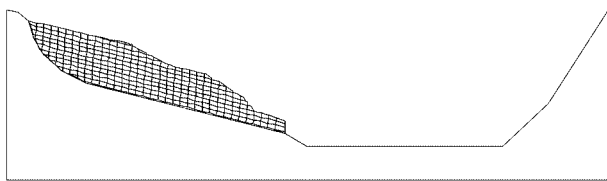


图 2 计算模型及网络剖分图

Fig.2 Mesh and calculation model of DEM

计算所需参数主要是节理和层面的力学特性指标, 选取时主要考虑试验成果资料^[12]。铜王公路 2# 滑坡的 2 组节理面参数值选取如下: 接触摩擦系数: 0.25; 接触法向刚度: 600 MPa/m; 接触切向刚度: 50 MPa/m; 节理摩擦系数: 0.58(30°); 节理法向刚度: 1 900 MPa/m; 节理切向刚度: 190 MPa/m; 节

理粘聚力: 0; 滑坡体重度: 17.5 kN/m³; 滑带土重度: 15.5 kN/m³; 滑床重度: 23.2 kN/m³。

5 离散单元法模拟成果分析

根据上节建立的计算模型, 对铜王公路 2# 滑坡进行了全过程的离散元数值模拟。为了加快收敛, 节省内存, 加在所有块体上的重力加速度为 10 g。模拟全过程共用了 1 102 115 个时间单位, 理论上每个时间单位 0.87×10^{-5} s, 整个迭代过程理论历时 95.88 s, 很直观地再现了滑坡运动的全过程。根据计算结果, 整理出不同时刻滑坡体后缘、中部、前缘运动的运动轨迹、运动距离(线位移)、转角、合力、合力矩、形心位移、形心速度、速度、加速度等特征。在滑坡体的后缘、中部、前缘分别选 245#、227#、89# 块体进行观察, 其运动轨迹见图 3。将滑坡各演化阶段的平均速度、平均加速度数据列于表 1。滑坡体运动过程中的后缘、中部、前缘的合力、合力矩如图 4~9 所示。

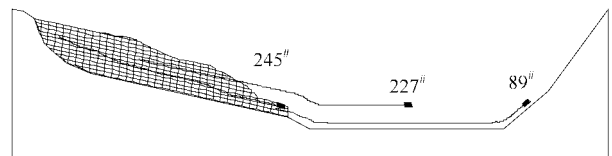


图 3 跟踪块体移动轨迹图

Fig.3 Movement tracks of the blocks

表 1 滑坡各演化阶段平均速度、平均加速度成果表

Table 1 Calculation results of average velocity and average acceleration for the landslide at every stage

滑坡演化阶段	历时/s	时步	平均速度 /(m·s ⁻¹)	平均加速度 /(m·s ⁻²)
启动破坏	0.00~0.44	0~7 000	0.394 0	0.730 0
剧动加速	0.44~6.09	7 001~70 000	1.431 0	1.842 0
高速运动	6.09~26.10	70 001~300 000	1.641 0	1.159 0
碰撞减速	26.10~39.15	300 001~450 000	0.491 0	0.637 0
停滞缓动	39.15~95.88	450 001~1 102 115	0.028 6	0.133 5

根据离散元数值模拟计算结果, 可将铜王公路 2# 滑坡的运动过程划分成 5 个阶段。

第 1 阶段: 0~7 000 时步, 历时 0.44 s, 为启动破坏阶段。在滑体重力的作用下, 滑体沿着中前部的泥岩夹层产生蠕变, 使应力不断在锁固段集中, 导致锁固段渐近性破坏, 锁固段越来越短, 滑坡中前部开始移动, 拖动滑坡中后部滑移, 滑面迅速向

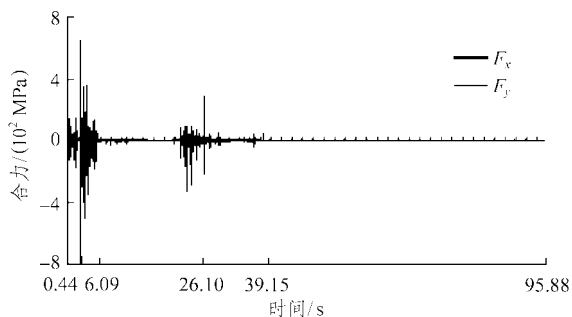


图 4 滑体前缘 89#块体合力历时曲线
Fig.4 Time curve of resultant force at 89# block

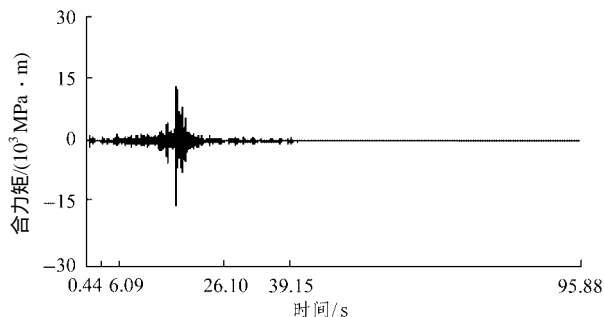


图 8 滑体中部 227#块体合力矩历时曲线
Fig.8 Time curve of resultant moment at 227# block

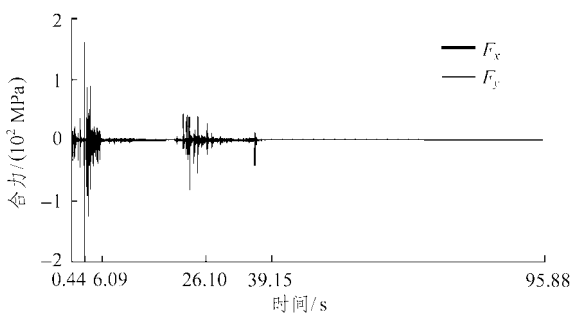


图 5 滑体中部 227#块体合力历时曲线
Fig.5 Time curve of resultant force at 227# block

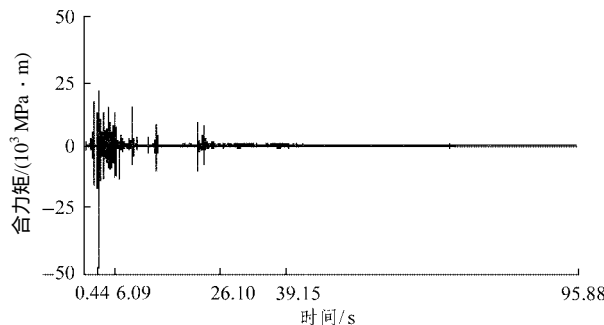


图 9 滑体后 245#块体合力矩历时曲线
Fig.9 Time curve of resultant moment at 245# block

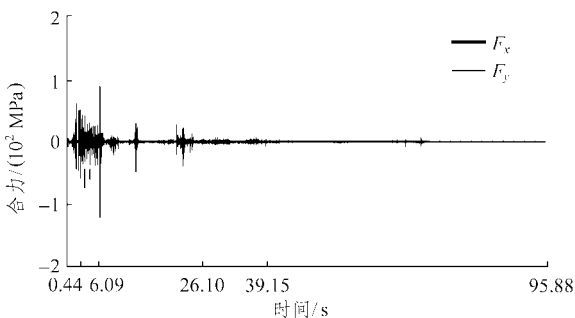


图 6 滑体后缘 245#块体合力历时曲线
Fig.6 Time curve of resultant force at 245# block

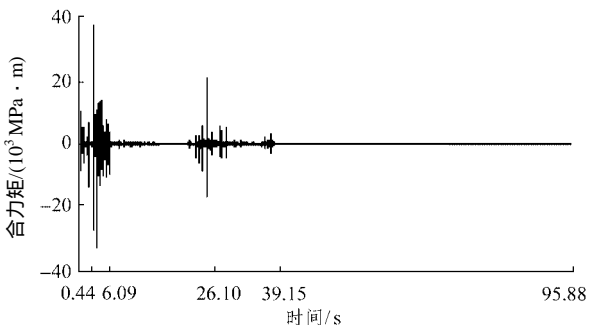


图 7 滑体前缘 89#块体合力矩历时曲线
Fig.7 Time curve of resultant moment at 89# block

中后部扩大，最终使得滑面贯通破坏，滑体整体向下、向前开始移动。该时段平均速度 0.394 m/s，平均加速度 0.730 m/s²，加速度较大，速度较小，

说明滑坡正在启动阶段。

第 2 阶段：7 001 ~ 70 000 时步，历时 0.44 ~ 6.09 s，为剧动加速阶段。由于滑坡面的突然贯通，锁固段变形中贮存的弹性应变能的释放产生的加速效应十分巨大，滑体获得一个很大的启程加速度，达到了加速度最高峰，高达 4.183 m/s²，产生了剧动加速现象，滑速也达到了最高点 3.883 m/s，加速度的平均值也达到了各阶段的最高 1.842 m/s²，加速度较大，速度较小。这一阶段的合力、合力矩相应也很大。

第 3 阶段：70 001 ~ 300 000 时步，历时 6.09 ~ 26.10 s，为高速运动阶段。在剧动高速的基础上，由于势动能的不断转化及惯性力的影响效应，高速引起的滑床面上气垫效应，使得滑动面上摩阻力显著降低，滑体以高速度向前向下运动，平均速度达到 1.641 m/s，而平均加速度仅有 1.159 m/s²，加速度较小，速度较大。这一阶段合力、合力矩反而很小。

第 4 阶段：300 001 ~ 450 000 时步，历时 26.10 ~ 39.15 s，为碰撞减速阶段。滑体高速运动过河谷，到达对岸山体时，滑坡前缘碰撞到对岸的山坡而停止，速度迅速减弱，但在这一阶段初期速度还是较高，加速度较小，由于滑体巨大的冲力，是后部滑体向前部压密，各个滑块速度从前部向后部逐渐变

小。由于减速需要能量的消耗，这一阶段的合力、合力矩反而变得很大。

第 5 阶段：450 001 ~ 1 102 115 时步，历时 39.15 ~ 95.88 s，为停滞缓动阶段。滑体由于能量的逐渐消耗，加速度虽然较大，但因为滑坡前部的运动受阻，速度还是越来越小，中前部滑体基本上处于停滞状态，只有后部滑体还在运动，同时滑体在自重作用下产生压密作用，当滑坡能量消耗殆尽时，滑坡体停止运动。这一阶段的合力、合力矩基本接近于 0。

6 结 论

(1) 根据铜王公路 2[#]滑坡变形破坏特征判断 2[#]滑坡为牵引式滑坡，是古滑坡的复活。

(2) 用圆弧条分法计算，稳定系数 $k < 1$ ，说明该边坡处于临界状态，若遇大暴雨、地震等触发因素，该滑坡会整体失稳而滑动。

(3) 铜王公路 2[#]滑坡的运动过程可分为 5 个阶段：启动破坏、剧动加速、高速运动、碰撞减速、停滞缓动。

(4) 铜王公路 2[#]滑坡滑动后，潜在滑坡侵蚀量将达到 $1\ 409 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

参考文献(References)：

- [1] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky system[A]. In : Müller L ed. Proc. Symp. Int. Soc. Rock Mechanics[C]. Rotterdam : A. A. Balkema, 1971. 8 - 11.
- [2] Strack O D L, Cundall P A. The distinct element method as a tool for research in granular media[A]. In : Part I Report to the National Science Foundation[C]. Minnesota : University of Minnesota, 1978. 36 - 46.
- [3] Cundall P A, Strack O D L. The distinct element method as a tool for research In granular media[A]. In : Part II Report to the National Science Foundation[C]. Minnesota : University of Minnesota, 1979. 56 - 67.
- [4] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1) : 47 - 65.
- [5] 王泳嘉, 邢纪波. 离散元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳 : 东北工学院出版社, 1992.(Wang Yongjia, Xing Jibo. Discrete Numerical Method and Its Application to Rock and Soil Mechanics[M]. Shenyang : Northeast University of Technology Press, 1992.(in Chinese))
- [6] 徐泳, 孙其诚, 张凌. 颗粒离散元研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(2) : 251 - 260.(Xu Yong, Sun Qicheng, Zhang Ling. Advances of discrete element method in particulate materials[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(2) : 251 - 260.(in Chinese))
- [7] 周少怀, 杨家岭. DDA 数值方法及工程应用研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(2) : 124 - 128.(Zhou Shaohuai, Yang Jialing. DDA method and its application to engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(2) : 124 - 128.(in Chinese))
- [8] 安关峰, 殷坤龙, 唐辉明. 黄土坡滑坡的离散元研究[J]. 地球科学, 2002, 27(4) : 465 - 468.(An Guanfeng, Yin Kunlong, Tang Huiming. Discrete element analysis of Huangtupo landslide[J]. Earth Science, 2002, 27(4) : 465 - 468.(in Chinese))
- [9] 侯克鹏, 阮永芬. 离散元法模拟边坡稳定性若干问题探讨[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(1) : 93 - 96.(Hou Kepeng, Ruan Yongfen. Simulating study on slope stability with discrete element method[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2000, 25(1) : 93 - 96.(in Chinese))
- [10] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京 : 水利电力出版社, 1993.(Zhou Weiyuan. Advanced Rock Mechanics[M]. Beijing : Water Resources and Electric Press, 1993.(in Chinese))
- [11] 潘别桐, 黄润秋. 工程地质数值法[M]. 北京 : 地质出版社, 1994.(Pan Bietong, Huang Runqiu. Numerical Method on Engineering Geology[M]. Beijing : Geological Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [12] 郑书彦. 滑坡侵蚀及其动力学机制与定量评价研究[博士学位论文][D]. 北京 : 中国科学院研究生院, 2002.(Zheng Shuyan. Research on slide erosion and its dynamical mechanism and quantitative evaluation[Ph. D. Thesis][D]. Beijing : Postgraduate Student College, Chinese Academy of Sciences, 2002.(in Chinese))