

基于数值流形法的反倾层状岩质边坡倾倒破坏分析¹

王欢欢 郭明珠

(北京工业大学, 城市建设学部, 北京 100124)

摘要 边坡破坏是累积性过程, 从变形到破坏的过程中会产生永久位移, 如果永久位移过大, 极有可能产生滑坡。因此根据不同工况下采集到的位移数据, 分析地震作用下反倾层状岩质边坡在不同内摩擦角下的破坏特征。利用二维数值流形法 (NMM), 以青藏高原金沙江流域西藏昌都地区芒康县索多西乡贡扎倾倒滑坡为研究对象, 依据实地考察数据及室内力学试验得到的物理力学参数, 建立数值计算模型, 模拟地震作用下反倾层状岩质边坡倾倒破坏过程, 并在边坡上布置 3 组监测点获取位移数据。模拟结果表明: 随着内摩擦角的增大, 边坡坡体从开始破坏到新的平衡状态和达到最大位移所需的时间越短, 同时, 滑动块体最大水平位移逐渐减小; 内摩擦角 $< 40^\circ$ 时, 坡体在前 15 s 呈整体移动趋势, 大部分岩块产生整体滑移, 靠近坡顶处的岩块发生轻微转动, 推动前面的岩块加速滑动, 呈倾倒-滑移模式; 内摩擦角 $> 40^\circ$ 时, 靠近坡顶的岩块首先产生滑动, 并转动驱使前面的岩块, 推动坡脚处岩块产生滑动, 最终上部岩块达到新的平衡, 呈渐进式倾倒破坏, 产生整体性破坏的可能性较小。

关键词: 反倾层状岩质边坡 数值流形法 倾倒破坏 内摩擦角

Analysis of Toppling Failure of Anti Toppling Rock Slope Based on Numerical Manifold Method

Wang Huanhuan and Guo Mingzhu

(Beijing University of Technology, Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing, 100124, China)

Abstract Slope failure is a cumulative process, and permanent displacement will be produced from deformation to failure process, if the value of permanent displacement is too large, it is very likely to produce landslide. Therefore, the displacement data generated by different friction angles under seismic load are used to analyze the failure characteristics of anti dip layered rock slope under different friction angles. Based on the two-dimensional numerical manifold method (NMM) proposed by Dr. Shi Genhua, the gongzha landslide in suoduoxi Township, Mangkang County, Changdu Prefecture, Tibet, is studied. According to the field investigation data and the required physical and mechanical parameters obtained from the indoor mechanical test, a numerical calculation model is established to simulate the toppling failure process of the anti inclined rock slope under the action of earthquake. In the process of simulation, three groups of monitoring points were arranged on the slope to obtain displacement data. The simulation results show that: with the increase of friction angle, the process of slope from failure to new equilibrium state and the time to reach the maximum displacement value are shorter. At the same time, the maximum horizontal displacement of the sliding block decreases gradually. When the friction angle is less than 40 degrees, the slope will move as a whole in the first 15 seconds, most of the rock blocks will slide as a whole, and the rock blocks near the top of the slope will rotate slightly to accelerate the sliding of the rock blocks in front, showing a toppling sliding mode; when the friction angle is more than 40 degrees, the rock blocks near the top of the slope will first slide and rotate to drive the rock blocks in front, and push the rock blocks at the foot of the slope to slide. Finally, the upper rock mass reaches a new balance and presents progressive collapse failure, so the possibility of overall failure is small.

¹ 基金项目 国家重点研发计划项目 (2018YFC1505001)

[收稿日期] 2021-01-06

[作者简介] 王欢欢, 女, 生于 1996 年。硕士。主要研究数值流形方法及其应用。E-mail: 17862903393@163.com

Key words: Layered anti-dip rock slope; Numerical manifold method; Toppling failure; Friction angle

引言

反倾层状岩质边坡指岩层走向与边坡走向接近一致, 而倾向与坡面倾向相反的边坡, 倾倒变形破坏是岩质边坡典型破坏失稳形式(李明霞, 2015)。倾倒破坏模式通常分为块体倾倒、块体弯曲倾倒和弯曲倾倒(Goodman 等, 1976)。青藏高原地区是板块运动最活跃的地区, 该地区地壳内、外动力条件强烈交织和转化, 使大型滑坡灾害发育(黄润秋, 2007), 具有灾害类型多、影响范围广、破坏程度大等特点, 其中滑坡、泥石流、崩塌产生的直接危害最严重。青藏高原地区反倾层状岩质边坡深层倾倒现象较常见, 特别是金沙江、岷江等深切峡谷地区, 倾倒深度可达 200~300 m, 对川藏铁路、水资源开发等重大工程建设产生影响。反倾层状岩质边坡倾倒破坏严重影响山区经济社会发展, 危及群众生命财产安全, 因此, 需研究反倾层状岩质边坡倾倒破坏特征。

目前, 国内外学者对反倾层状岩质边坡的数值模拟分析可分为以下两类: 一类是将边坡看作连续体进行数值计算(如极限平衡法、有限元法等), 是对真实情况的数值近似表征, 分析结构应力与变形后, 再进行边坡稳定性判断, 但对裂缝等不连续问题和结构破坏后运动过程的处理较困难。韩贝传等(1999)、王宇等(2013)、代仲海等(2018)、王霄等(2018)构建了反倾层状岩质边坡有限元模型, 探讨了坡体变形破坏机制及稳定性影响因素。另一类是将岩石看作离散体进行数值计算(如离散元法、非连续变形分析方法), 以不连续力学为基础, 将岩体结构看作离散的块体, 块体之间采用接触连接, 不仅可分析块体运动、变形、破坏等, 还可对块体间的相互作用进行分析。然而, 该方法采用全一阶位移近似和小角度假定, 且在块体接触、参数取值、边界处理等方面存在不足, 影响含裂缝的不连续结构计算结果准确性。刘云鹏等(2012)、王章琼等(2014)、陶志刚等(2017)等使用 UDEC 分析了层状岩质边坡破坏模式。

1992 年, 石根华首次提出数值流形法(NMM), 充分发挥以上两类方法的优势, 解决了有限元、DDA 和解析法存在的计算问题, 可同时处理连续和非连续问题, 具有广泛应用前景。NMM 以数值流形为核心, 在非连续变形方法的块体系统理论基础之上, 融入有限元法和解析法, 是连续分析方法。因此, 该方法既可计算块体内部变形, 也可模拟块体系统力学行为(裴觉民, 1997)。

针对反倾层状岩质边坡的研究多采用有限元、离散元或非连续变形分析方法等, 采用 NMM 进行地震力作用下的边坡破坏研究较少。本文采用 NMM 建立反倾边坡模型, 对地震作用下不同内摩擦角的反倾层状岩质边坡进行倾倒破坏模拟, 并分析倾倒破坏过程。

1 边坡概况

贡扎滑坡位于西藏自治区昌都市芒康县索多西乡, 地理坐标为 E20°28'42"、N99°3'2", 是典型的倾倒滑坡。该区域位于松潘—甘孜造山带与羌塘—昌都陆块交接的西部碰撞结合带内, 出露的主要地层为第四系全新统冲击砂卵石 Q_4^{al} , 第四系全新统冲洪积卵石 Q_4^{al+pl} , 第四系全新统坡积碎石土 Q_4^{dl} , 第四系晚更新统冲积砂卵石 Q_3^{al+pl} , 第四系晚更新统滑坡块石夹碎石土 Q_3^{del} , 二叠系下统石英片岩、混合片麻岩 P_1^c , 如图 1 所示。

滑坡区主要出露石英片岩、砂岩等硬岩及少量片麻岩和石灰岩等软岩, 岩体结构面发育。石英片岩是坡内出露的主要岩性, 成层性较好, 表面风化强烈。堆积体主要成分为石英片岩夹少量片麻岩, 区域岩性变化较小。滑坡堆积体方量 4 500 万 m^3 , 水平向长度 1 400 m, 高度方向落差 1 000 m, 滑坡堆积体距坡趾最远达 1 022 m。滑坡区主要受 3 组节理控制, 倾向分别为 $375^\circ \angle 40^\circ$ 、 $78^\circ \angle 82^\circ$ 和 $185^\circ \angle 78^\circ$, 岩层表现为反倾向。通过调查分析, 绘制贡扎滑坡体平面图和主剖面图, 分别如图 1、2 所示。

2 室内力学试验

点荷载试验是获取岩石力学参数的主要方法之一, 在进行室内点荷载试验的基础上, 通过仪器油表获得岩石点荷载强度。为确定数值模拟主要物理力学参数, 进行室内点荷载试验。由于对贡扎滑坡进行了现场实地勘察, 并从现场带回了多块堆积体岩石(图 3), 因此开展室内点荷载试验较方便, 试验数据具有可信度。

根据点荷载计算原理, 进行径向测试时, 等效岩芯直径 D_e 即为岩芯直径 D 。进行不规则岩块轴向测试

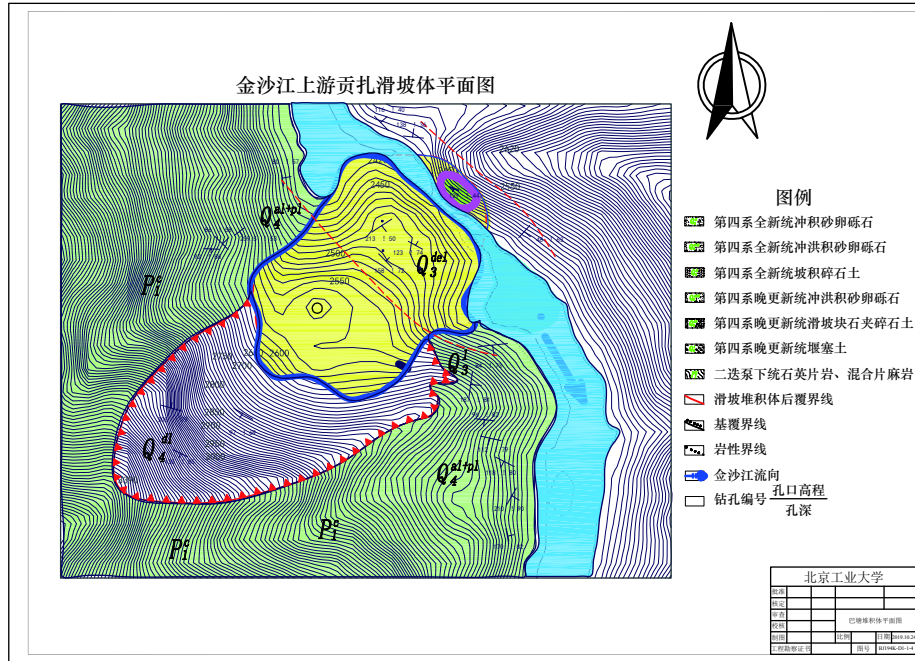


图 1 贡扎滑坡平面图
Fig. 1 Plan of gong-za landslide

时，等效岩芯直径 D_e 计算如式 (1) 所示。当 D_e 取 50 mm 时，可换算出直径为 50 mm 标准试件点荷载强度，由于原型岩石形状不规则，故采用式 (2)、(3) 进行计算。通过点荷载强度 $I_{s(50)}$ 及式 (4) 可推导出岩石单轴抗压强度值 σ_c 及单轴抗拉强度 σ_t ，进而推导出黏聚力 c 及内摩擦角 φ 。

$$D_e = \frac{4WD}{\pi} \quad (1)$$

$$I_{s(50)} = FI_s \quad (2)$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^m \quad (3)$$

$$\sigma_c = 20I_{s(50)} \quad (4)$$

$$\sigma_t = 1.5I_{s(50)} \quad (5)$$

$$c = \frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2} \quad (6)$$

$$\varphi = k \arctan \frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} \quad (7)$$

式中： W 为两加荷点最小截面宽度 (mm)； F 为修正系数； I_s 为未修正点荷载强度 (MPa)； m 为修正指标，一般取值为 0.45； k 为修正系数，当岩石为硬岩时 $k=0.8\sim 0.9$ ，当岩石为软岩时 $k=0.6\sim 0.7$ 。

计算得到贡扎滑坡地区硬岩黏聚力 $c=17.23$ MPa，内摩擦角 $\varphi=47.39^\circ$ ；软岩点荷载强度 $I_{s(50)}=0.74$ MPa，单轴抗压强度 $\sigma_c=14.8$ MPa，单轴抗拉强度 $\sigma_t=1.11$ MPa，黏聚力 $c=2.02$ MPa，内摩擦角 $\varphi=41.57^\circ$ 。

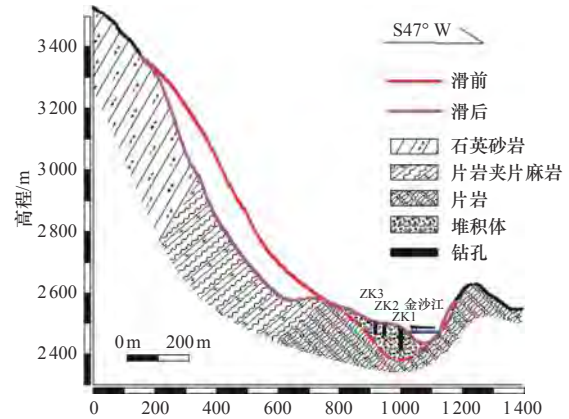


图 2 贡扎滑坡主剖面图
Fig. 2 Main section of gong-za landslide



图 3 试验所用硬岩和软岩
Fig. 3 Hard and soft rocks used in the test

3 算例分析

3.1 计算模型

为简化数值模拟计算过程, 采用图 4 所示简化边坡模型, 其中坡角为 30° 、岩层倾角为 65° 、边坡长 1 400 m、高 1 200 m。模型边界固定采用位移边界固定法, 对左右边界及底部进行约束。各岩层均采用莫尔-库仑准则岩石本构模型, 同时, 在边坡上布置 3 组编号为 1~6 的监测点, 以便分析内摩擦角对监测点位移的影响。

3.2 模型参数选取

坡体主要包括石英片岩、砂岩及少量片麻岩和石灰岩等, 石英片岩是坡内出露的主要岩体, 成层性较好, 表面风化强烈。堆积体主要成分为石英片岩夹少量片麻岩, 通过室内试验得到相关力学参数如表 1 所示。动力系数为 1, 单步允许最大位移率为 0.01, 总时间步选为 10 000 步, 泊松比为 0.25, 超松弛系数为 1.35。

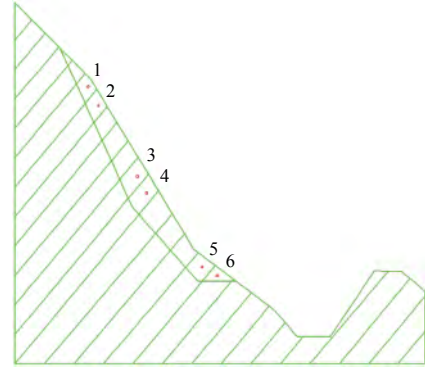


图 4 简化边坡模型

Fig. 4 simplified model of slope

表 1 岩石力学参数取值

Table 1 Rock mechanical parameters

岩层	密度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	体积模量/MPa	抗拉强度/MPa	剪切模量/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/ $^\circ$
石英片岩	2.86	1 677	9.44	2 500	17.23	47.39
片麻岩	1.78	1 225	1.11	1 838	2.02	41.57

3.3 数值计算过程

主要研究内摩擦角 φ 对岩质边坡倾倒破坏的影响, 取计算总时间步数为 10 000 步, 时间步长为 0.008 s, 最大位移比为 0.001。计算模型如图 5 所示, 在边坡底部输入日本岩手地震记录到的地震波 (图 6)。

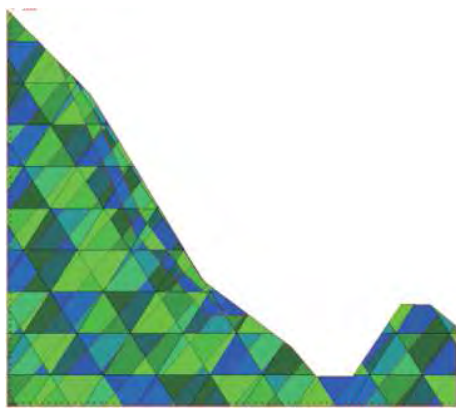


图 5 边坡网格划分模型图

Fig. 5 Grid division model of slope

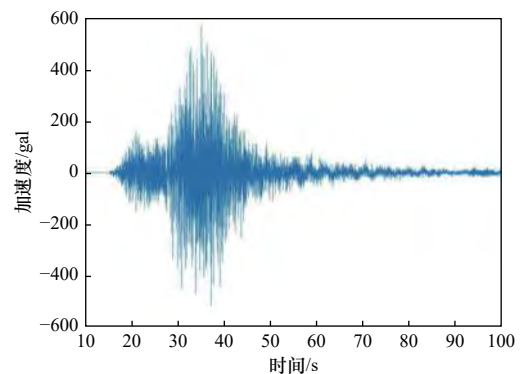


图 6 加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration time history curves

NMM 计算步骤如下: (1) 对含节理、裂缝的岩体进行流形法网格剖分, 定义物理和数学网格; (2) 进行第 1 步加载, 计算地震作用下的应力分布及变形; (3) 计算各裂缝尖端应力强度因子; (4) 读取每个流形单元数据并计算其接触方式; (5) 判断接触方式并计算变形; (6) 形成法向弹簧和剪切弹簧的加法矩阵, 进行迭代求解; (7) 计算变形模式。

模拟结果如图 7 所示, 由图 7 可知, 随着内摩擦角的增大, 块体之间的摩擦系数增加, 块体抗滑力增加。

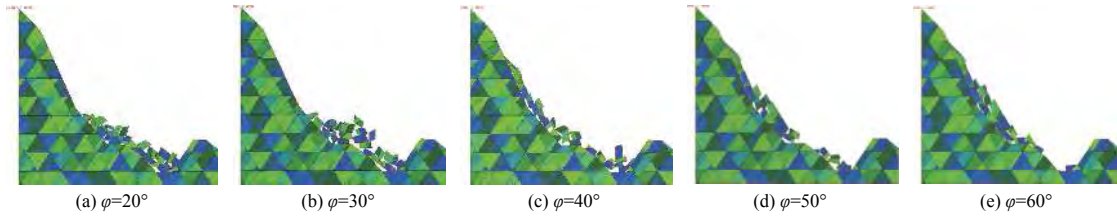


图 7 内摩擦角不同时边坡破坏特征

Fig. 7 Failure characteristics of slope with different friction angles

因此坡体从开始破坏到新的平衡状态和达到最大位移所需的时间越短。随着内摩擦角的逐渐增大，摩擦系数增大，当增大至一定程度时，阻止块体滑动的力将大于块体滑动力，这时斜坡上的岩石块体处于稳定状态，如图 7(e) 所示。

3.4 模拟结果分析

通过观察数值模拟结果可知，不同内摩擦角下边坡最终破坏状态不同，但边坡上部均开始出现裂缝，然后上部破坏，继而推动边坡下部岩体滑动，导致边坡倾倒破坏。使用 Origin 软件进行数据处理，得到监测点位移如图 8 所示。

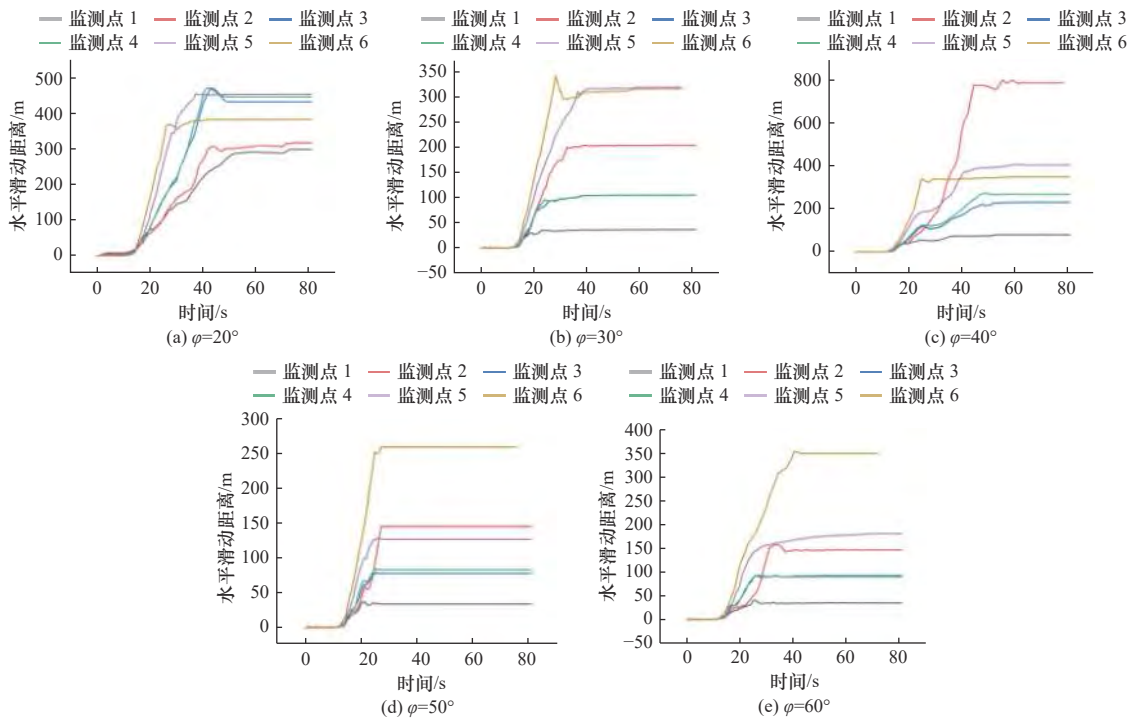


图 8 监测点位移图

Fig. 8 Displacement diagram of monitoring points

内摩擦角 $<40^\circ$ 时，大部分岩块产生整体滑移，靠近坡顶处的岩块发生轻微转动，推动前面的岩块加速滑动，呈倾倒-滑移模式。内摩擦角 $>40^\circ$ 时，坡顶岩块首先产生滑动并转动驱使前面的岩块滑动，推动坡脚处岩块产生滑动，呈渐进式倾倒破坏，产生整体性破坏的可能性较小。

由图 8 可知，前 15 s 滑坡体整体移动，说明在水平地震作用下整体下滑，位移变化差异小；然后下部坡体在水平力作用下抛出，中间的倾倒区域块体出现倾覆现象，最终坡体倾倒破坏。坡脚位置的监测点 5、6 水平位移远大于其他位置，说明在地震来临时，边坡下部的岩体对地震作用更敏感，移动距离较大。

4 结语

采用二维数值流形法分析了在其他岩体物理力学参数保持常量时，仅改变内摩擦角，地震作用下反倾层状岩质边坡倾倒破坏特性。结果表明，内摩擦角 $<40^\circ$ 时，坡体首先在水平地震作用下整体下滑，然后下部坡

体在水平力作用下抛出, 中间的倾覆区域块体出现倾覆现象, 呈倾覆-滑移模式; 内摩擦角 $>40^\circ$ 时, 少量岩块发生倾覆破坏, 边坡较稳定。

参考文献

- 代仲海, 胡再强, 尹小涛等, 2018. 工程荷载作用下缓倾角反倾似层状岩质边坡变形稳定性分析. 岩土力学, **39** (S1): 412—418.
- Dai Z. H., Hu Z. Q., Yin X. T., et al., 2018. Deformation stability analysis of gentle reverse inclined layer-like rock slope under engineering load. *Rock and Soil Mechanics*, **39**(S1): 412—418. (in Chinese)
- 韩贝传, 王思敬, 1999. 边坡倾覆变形的形成机制与影响因素分析. *工程地质学报*, **7** (3): 213—217.
- Han B. C., Wang S. J., 1999. Mechanism for toppling deformation of slope and analysis of influencing factors on it. *Journal of Engineering Geology*, **7**(3): 213—217. (in Chinese)
- 黄润秋, 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. *岩石力学与工程学报*, **26** (3): 433—454.
- Huang R. Q., 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **26**(3): 433—454. (in Chinese)
- 李明霞, 董联杰, 2015. 层状反倾边坡变形特征及影响因素分析. *计算力学学报*, **32** (6): 831—837.
- Li M. X., Dong L. J., 2015. Analysis on influential factors and deformation characteristics of toppling slope. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, **32**(6): 831—837. (in Chinese)
- 刘云鹏, 邓辉, 黄润秋等, 2012. 反倾软硬互层岩体边坡地震响应的数值模拟研究. *水文地质工程地质*, **39** (3): 30—37.
- Liu Y. P., Deng H., Huang R. Q., et al., 2012. Numerical simulation of seismic response of anti-dumping rock slope interbedded by hard and soft layers. *Hydrogeology and Engineering Geology*, **39**(3): 30—37. (in Chinese)
- 裴觉民, 1997. 数值流形方法与非连续变形分析. *岩石力学与工程学报*, **16** (3): 80—93.
- Pei J. M., 1997. Numerical manifold method and discontinuous deformation analysis. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **16**(3): 80—93. (in Chinese)
- 陶志刚, 张海江, 尹利洁等, 2017. 基于 FDEM 的戒台寺古滑体开裂破坏过程数值模拟. *水文地质工程地质*, **44** (3): 105—112.
- Tao Z. G., Zhang H. J., Yin L. J., et al., 2017. Numerical modeling of cracking for the Jietai temple ancient landslide with the combined finite-discrete element method. *Hydrogeology and Engineering Geology*, **44**(3): 105—112. (in Chinese)
- 王霄, 陈志坚, 徐进鹏等, 2018. 似层状岩质边坡倾覆变形破坏过程数值模拟. *水文地质工程地质*, **45** (1): 137—143.
- Wang X., Chen Z. J., Xu J. P., et al., 2018. Numerical simulation of deformation and failure process of a toppling-sliding rock slope with a quasi-lamellar structure. *Hydrogeology and Engineering Geology*, **45**(1): 137—143. (in Chinese)
- 王宇, 李晓, 王梦瑶等, 2013. 反倾岩质边坡变形破坏的节理有限元模拟计算. *岩石力学与工程学报*, **32** (S2): 3945—3953.
- Wang Y., Li X., Wang M. Y., et al., 2013. Failure mechanism of topping rock slope using jointed finite element simulation method. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **32**(S2): 3945—3953. (in Chinese)
- 王章琼, 晏鄂川, 尹晓萌等, 2014. 层状反倾岩质边坡崩塌机理研究: 以湖北鹤峰红莲池铁矿边坡为例. *中南大学学报 (自然科学版)*, **45** (7): 2295—2302.
- Wang Z. Q., Yan E. C., Yin X. M., et al., 2014. Study on collapse mechanism of anti inclined rock slope: A case study of Honglianchi Iron Mine slope in Hefeng, Hubei province. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, **45**(7): 2295—2302. (in Chinese)
- Goodman R. E., Bray J. W., 1976. Toppling of rock slopes. In: *Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*. Boulder: American Society of Civil Engineering, 201—234.