

地震荷载作用下倾倒式危岩体动力失稳机理研究

薛新华¹,樊旭¹,郭志元¹,刘恩龙¹,张世殊²

(1. 四川大学水利水电学院,四川 成都 610065; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川 成都 610072)

摘要 目的 研究地震作用下倾倒式危岩体的动力响应规律及稳定性. 方法 以金沙江下游溪洛渡水电站14岩流层内1#危岩体为例,利用离散单元法对倾倒式危岩体进行全时程动力分析. 结果 倾倒式危岩体在地震荷载作用下发生破坏后,落石的主要运动可分为三个阶段,即启动准备阶段、倾倒、翻滚阶段和减速滞留阶段. 结论 揭示了地震荷载作用下危岩体的失稳规律,为危岩防灾减灾提供了理论依据,可以为类似工程提供参考和借鉴.

关键词 离散单元法;倾倒式;危岩体;地震荷载;失稳

中图分类号 TU45

文献标志码 A

Dynamic Stability Analysis of Toppling Unstable Rock under Seismic Loading

XUE Xinhua¹, FAN Xu¹, GUO Zhiyuan¹, LIU Enlong¹, ZHANG Shishu²

(1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, China, 610065; 2. Chengdu Engineering Corporation Limited, Power China, Chengdu, China, 610072)

Abstract: This paper focuses on the dynamic response and stability of toppling unstable rock under the action of earthquake. Taking the 1# perilous rock within 14 rock flow layer of Xiluodu hydropower station as example, the full range of dynamic analysis of toppling unstable rock is analyzed by means of discrete element method. The results show that the toppling unstable rock mass can be classified as three phases after seismic loading, that is preparation for starting, toppling, rolling as well as deceleration and stasis phases. The above collapse regularity of dangerous rock mass under earthquake load can provide theoretical basis for prevention and reduction of natural disasters, and also provide reference for similar engineering.

Key words: discrete element method; toppling unstable rock; perilous rock; seismic loading; instability

危岩崩塌具有突发强致灾、快速随机等特性^[1],严重威胁着我国山区居民生命与财

产安全. 因此,揭示危岩崩塌演化理论,实现危岩崩塌防灾减灾,具有非常重要的理论价

值和工程实用意义.

国内外学者对危岩的稳定性问题进行了深入的分析研究. 颜天佑等^[2]将有限单元法应用到危岩体稳定性分析中,但在实际计算中可能会遇到结果收敛困难,模型过于简化造成误差过大. 唐红梅等^[3]运用模糊数学等不确定性分析方法对危岩体进行研究,但这类方法过多关注参数之间的数学关系,而忽略了分析其中的力学机理的联系等. 离散单元法 (Discrete Element Method, DEM) 是由美国学者 Cundall^[4]在 1971 年首先提出的一种用于解决非连续介质问题的有效方法,近年来在岩土工程领域得到了广泛的应用^[5-20]. 笔者以金沙江下游溪洛渡水电站 14 岩流层内 1#危岩体为例,运用离散单元法研究了典型倾倒式危岩体在地震动荷载作用下破坏失稳的机理,初步确定了危岩体破坏后的运动阶段及运动状态,可以为类似工程提供参考和借鉴.

1 工程概况

金沙江下游溪洛渡水电站 14 岩流层内 1#危岩体为典型的倾倒式危岩体(见图 1).



图 1 溪洛渡水电站 14 岩流层 1#危岩体
Fig.1 The 1# perilous rock of 14th layer within Xiluodu hydropower station

该危岩体位于坝址右岸,发育在 P2β12

层玄武岩内,分布在坝 0-346~0-385 m, EL. 635~680 m, 宽高为 39 m×45 m, 最大厚度约 8 m. 呈一向外凸出的山嘴,危岩边界明显,后部发育一条较为连续的裂缝,张开宽度一般 20~30 cm,局部达 40 cm,充填次生黄泥、岩块和碎块等. 14 层玄武岩位于岸坡的顶部,临空条件好,岩体卸荷强烈,岩体中裂隙发育,普遍张开,局部张开宽度可达 5~10 cm,且坡脚紫红色凝灰岩,性状较差,遇水易软化而产生塑性变形,进一步发展可导致 14 层玄武岩卸荷张开、塌滑,影响上部谷肩堆积体的稳定,对右岸电站进水口运行构成较大威胁.

2 数值分析模型

2.1 计算模型与参数

图 2 为典型倾倒式危岩体简图.

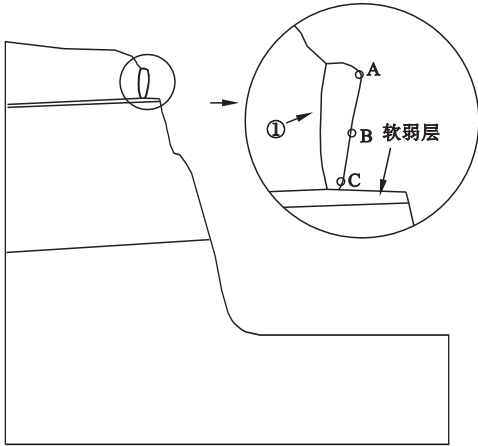


图 2 典型倾倒式危岩体简图
Fig.2 Typical diagram of toppling unstable rock mass

金沙江下游溪洛渡水电站坝址区域母岩主要以玄武岩为主,14 岩流层底部有凝灰岩软弱夹层,力学性质较差,遇水容易软化,在长期地质作用下,软弱层变形较上部玄武岩体大,玄武岩体逐渐下切,形成后缘拉裂面(见图 2 中结构面①),进而坚硬的上部岩体成为凸出状,形成倾倒式危岩体. 节理与裂隙力学参数如表 1 所示.

表1 节理与裂隙力学参数

Table 1 Mechanical parameters of joints and fractures

节理或裂隙	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
主要结构面	1.27	0.48	205	35
岩体节理	2.0	0.85	413	45

图3为倾倒式危岩体的离散元计算模型,模型采用三角形单元进行网格划分,共有5个块体,5 754个单元,3 079个节点,计算时将模型左右两侧设为水平方向的支约束,下底边设为固定约束。计算所采用的围岩物理力学参数如表2所示。

表2 岩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩体分类	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/GPa	变形模量/GPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	抗拉强度/kPa
Ⅳ类	2 650	10.3	6.2	3 820	40	630

2.2 地震荷载

溪洛渡水电站坝址地震基本烈度为Ⅷ度,相应水平向峰值加速度为0.18 g。对一人工地震波进行修正,得到峰值加速度为0.188 g的加速度时程曲线如图4所示,峰值加速度对应时刻为2.788 s,傅里叶频谱分析得到的平均地震波频率为4.64 Hz。因为UDEC在进行动力计算时不允许给模型直接施加加速度时程,故笔者在计算时将加速度进行积分得到速度时程曲线,再将速度时程

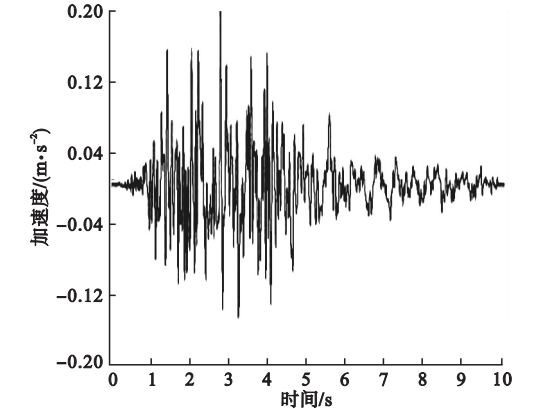


图4 修正后的加速度时程曲线

Fig. 4 The modified acceleration time-history curve

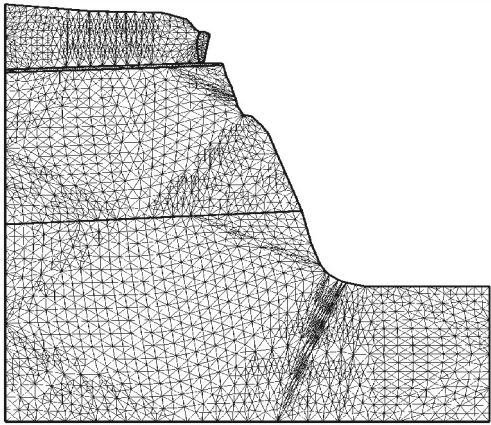


图3 倾倒式危岩体计算模型

Fig. 3 The calculation model of toppling unstable rock mass

换算为应力波施加于模型边界上,速度时程曲线见图5所示。

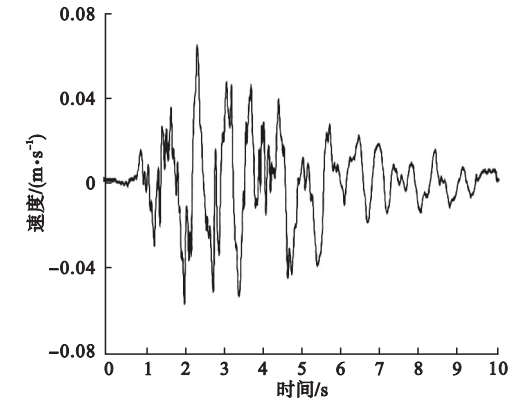


图5 修正后的速度时程曲线

Fig. 5 The modified velocity time-history curve

为了使边界能够有效吸收应力波,在模型左右两侧及底部设置自由区域,并将底部赋予黏性边界属性,利用图5所示的速度时程给模型底部施加切向应力波,来模拟地震作用下剪切波对危岩体的稳定性影响程度。

3 结果分析

图6为倾倒式危岩体在切向地震荷载作用下不同时刻块体位移矢量和位置分布图。

从图中可以看出,在1 s时,危岩体位移便倾向右下方,3 s时结构面①明显开裂,危岩体沿着下部支点向右倾倒失稳,7 s时,危岩体

完全脱离母岩,开始整体倾倒翻滚下落,此后,失稳的危岩体在空中或陡峻坡面翻滚直至最后在坡脚滞留。

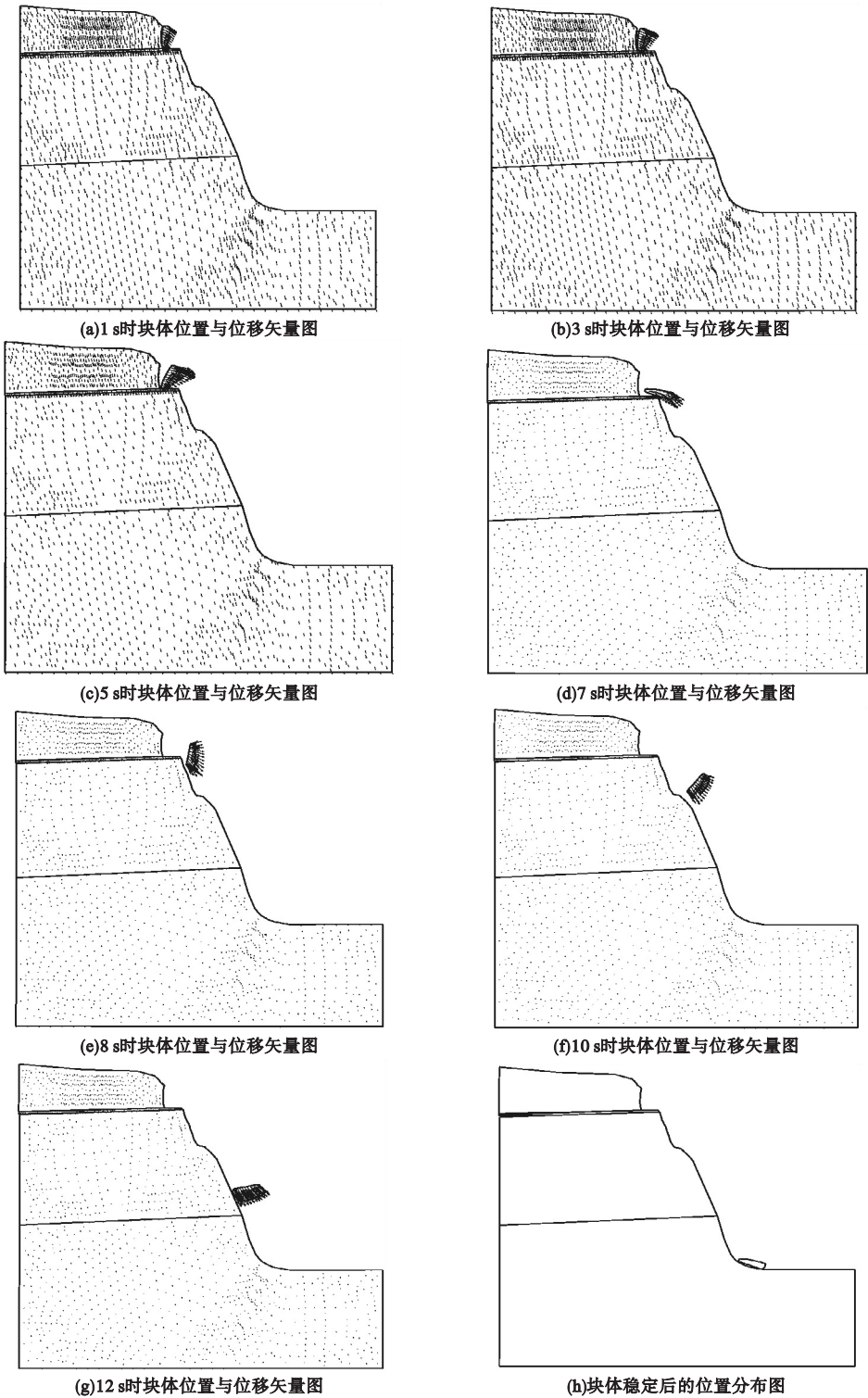


图6 不同地震时刻块体位置变化与位移矢量图

Fig. 6 The diagram of position change and displacement vector at different seismic moment

图 7 为 3 个监测点在地震荷载作用下的位移变化曲线。

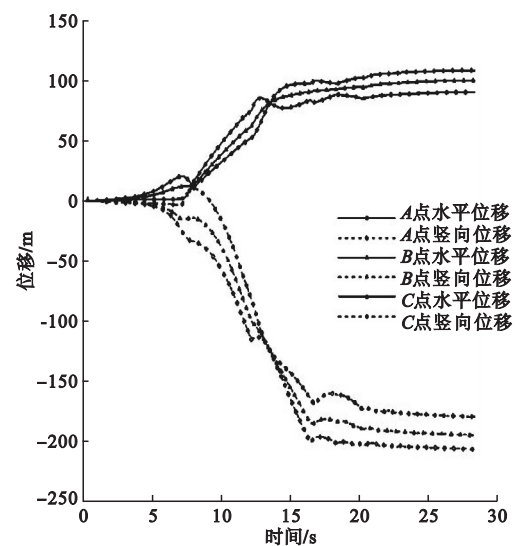


图 7 监测点 A、B、C 位移变化曲线

Fig. 7 The displacement curves of monitoring point A, B, C

由图中可以看出,倾倒式危岩体失稳过程可归结为三个阶段:

(1)启动准备阶段(损伤累积阶段,0 至 3.2 s). 在该阶段,随着地震加速度的增大和地震荷载的持续,切割母岩形成危岩体的后缘结构面逐渐张裂,损伤裂缝宽度逐渐累积,结构面强度减小. 危岩体为一外凸型的整体块体,A、B、C 三点分别位于危岩体顶部、中部、底部,在同一时刻三点位移依次减小,其中 A、B 两点位移在本阶段一直增大,而 C 点位移几乎没有变化,位移变化的不一致导致危岩体在下一阶段失稳时具有倾倒趋势. 从速度变化曲线来看(见图 8 ~ 图 10),A、B 两个监测点在该阶段的速度呈波动上升趋势,且 A 点速度大于 B 点速度,C 点一直处于波动状态,其速度值始终小于 A、B 两点,这也说明,倾倒式危岩体在失稳破坏时具有一定角速度.

(2)倾倒、翻滚阶段(3.2 s 至 16 s). 在上一阶段中,危岩体的位移累积值自上到下呈由大到小变化,故失稳破坏时,危岩体沿底部支点向右侧倾倒状运动. 之后,危岩体完全

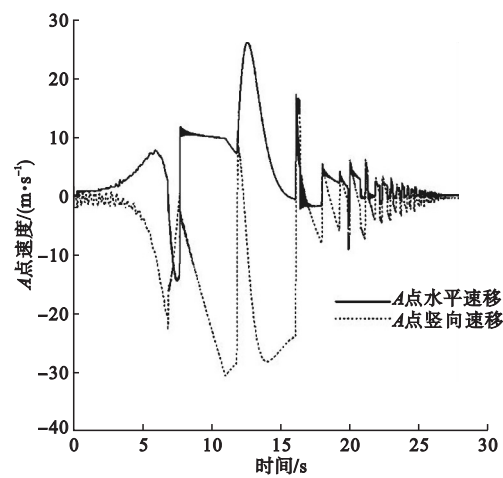


图 8 监测点 A 速度变化曲线

Fig. 8 The velocity curves of monitoring point A

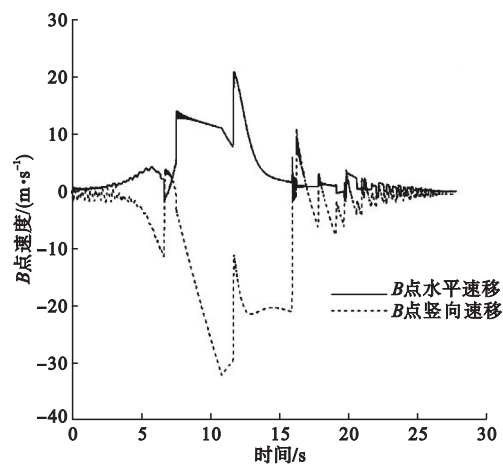


图 9 监测点 B 速度变化曲线

Fig. 9 The velocity curves of monitoring point B

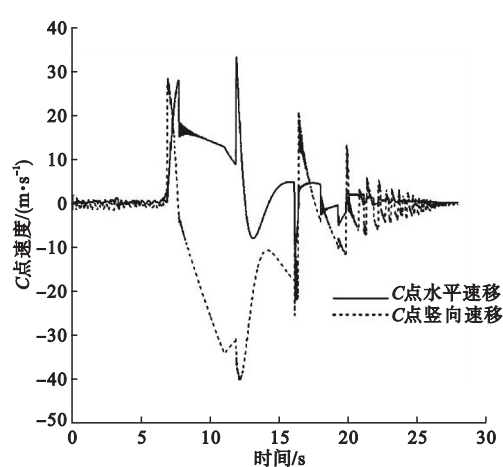


图 10 监测点 C 速度变化曲线

Fig. 10 The velocity curves of monitoring point C

脱离母岩,沿陡坡翻滚而下.从速度变化曲线看,该阶段3个监测点的速度变化较为剧烈,以A点为例,从3.2 s到6.1 s水平和竖向速度一直增加,6s时刻,由于危岩体彻底倾倒,在边坡台阶处以块体中部一点为支点发生旋转,水平速度和竖向速度急剧减小,而后在翻转作用下7.8 s时刻速度又开始增大,如此反复,直到块体达到坡脚,因发生多次反弹,A点速度经多次振荡趋于零.

(3)滞留稳定阶段(16 s及以后).多次翻滚后的危岩体在到达坡脚后,因地势平坦,运动受阻,经过多次弹跳后最终稳定.从监测点速度变化曲线可以明显看到,在此阶段,3个监测点速度都有多次振荡最终归零的现象.

4 结 论

(1)倾倒式危岩体在地震荷载作用下发生破坏后,落石的主要运动可分为启动准备、倾倒与翻滚以及滞留稳定等3个阶段.

(2)随着地震加速度的增大和地震荷载的持续,切割母岩形成危岩体的后缘结构面逐渐张裂,损伤裂缝宽度逐渐累积,结构面强度减小.危岩体为一外凸型的整体块体,在同一时刻危岩体顶部、中部、底部位移依次减小,且在失稳破坏时具有一定角速度.

(3)在倾倒、翻滚阶段,危岩体完全脱离母岩,沿陡坡翻滚而下.该阶段水平和竖向速度一直增加,之后由于危岩体彻底倾倒,在边坡台阶处以块体中部某点为支点发生旋转,水平速度和竖向速度急剧减小,而后,在翻转作用下速度又开始增大,如此反复,直到块体达到坡脚.

(4)在滞留稳定阶段,多次翻滚后的危岩体在到达坡脚后,因地势平坦,运动受阻,经过多次弹跳后最终稳定.从监测点速度变化曲线可以明显看到,在此阶段,3个监测点速度都有多次振荡最终归零的现象.

参考文献

- [1] 陈洪凯,唐红梅,王林峰,等.危岩崩塌演化理论及应用[M].北京:科学出版社,2009.
(CHEN Hongkai, TANG Hongmei, WANG Linfeng, et al. Crag collapse evolutionary theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [2] 颜天佑,李同春,郑治,等.索风营水电站 Dr2 危岩体稳定安全度有限元分析[J].河海大学学报(自然科学版),2009,37(6):691-696.
(YAN Tianyou, LI Tongchun, ZHENG Zhi, et al. Finite element analysis for safety factor of Dr2 endangered rock mass of Suofengying Hydropower Plant [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2009, 37(6): 691-696.)
- [3] 唐红梅,叶四桥,祝辉,等.危岩耦合参数研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊1):2642-2649.
(TANG Hongmei, YE Siqiao, ZHU Hui, et al. Research on coupling parameter of perilous rock [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006, 25(S1): 2642-2649.)
- [4] COUNDALL P A. The measurement and analysis of acceleration on rock slopes [D]. London: University of London, Imperial College of Science and Technology, 1971.
- [5] JIANG M, MURAKAMI A. Distinct element method analyses of idealized bonded-granulate cut slope [J]. Granular matter, 2012, 14(3): 393-410.
- [6] MUSASHI Y, YAMASAKI M, MIZUYAMA T, et al. Study on the simulation method of collapsed soil movement [J]. Shin sabo, 2011, 64: 37-45.
- [7] 王泳嘉,刑纪波.离散单元法及其在岩土力学中的应用[M].沈阳:东北工学院出版社,1991.
(WANG Yongjia, XING Jibo. Discrete element method and their applications in geotechnical [M]. Shenyang: Northeast China Institute of Technology Press, 1991.)
- [8] 朱永生,朱焕春,石安池,等.基于离散单元法的白鹤滩水电站复杂块体稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2068-2075.
(ZHU Yongsheng, ZHU Huanchun, SHI Anchi, et al. Complicated block stability analysis of Baihetan hydropower station based on distinct element method [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30

- (10):2068-2075.)
- [9] 徐寅,陈胜宏.基于离散单元法的滑坡堆积及其涌浪计算[J].岩土力学,2012,33(9):2850-2856.
(XU Yin, CHEN Shenghong. Calculation of heap shape of landslide and its surge based on discrete element method[J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(9):2850-2856.)
- [10] 贺续文,刘忠,廖彪,等.基于离散元法定节理岩体边坡稳定性分析[J].岩土力学,2011,32(7):2219-2224.
(HE Xuwen, LIU Zhong, LIAO Biao, et al. Stability analysis of jointed rock slopes based on discrete element method[J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(7):2219-2224.)
- [11] SHEN H, ABBAS S M. Rock slope reliability analysis based on distinct element method and random set theory[J]. International journal of rock mechanics & mining sciences, 2013, 61(10):15-22.
- [12] KIM J S, KIM J Y, LEE S R. Analysis of soil nailed earth slope by discrete element method[J]. Computers & geomechanics, 1997, 20(1):1-14.
- [13] SU O, AKCIN N A. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method[J]. International journal of rock mechanics & mining sciences, 2011, 48(3):434-442.
- [14] 肖俞,蒋明镜,孙渝刚.考虑简化胶结模型的深海能源土宏观力学性质离散元数值模拟分析[J].岩土力学,2011(增刊1):755-760.
(XIAO Yu, JIANG Mingjing, SUN Yugang. Numerical simulation of macro mechanical properties of deep-sea energy soil by discrete element method under simplified bond model[J]. Rock and soil mechanics, 2011(S1):755-760.)
- [15] SCHOLTÈS L, DONZÉF V. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2012, 52(6):18-30.
- [16] 刘一鸣,杨春和,霍永胜,等.考虑转动阻抗的粗粒土离散元模拟[J].岩土力学,2013,34(增刊1):486-493.
(LIU Yiming, YANG Chunhe, HUO Yongsheng, et al. Discrete element modeling of behaviors of coarse grained soils considering rolling resistance[J]. Rock and soil mechanics, 2013, 34(S1):486-493.)
- [17] PROCHAZKA P P. Application of discrete element methods to fracture mechanics of rock bursts[J]. Engineering fracture mechanics, 2004, 71(4/6):601-618.
- [18] 蒋明镜,胡海军,彭建兵.结构性黄土一维湿陷特性的离散元数值模拟[J].岩土力学,2013,34(4):1121-1130.
(JIANG Mingjing, HU Haijun, PENG Jianbing. Simulation of collapsible characteristics of structural loess under one-dimensional compression condition by discrete element method[J]. Rock and soil mechanics, 2013, 34(4):1121-1130.)
- [19] BHANDARI A, HAN J. Investigation of geotextile-soil interaction under a cyclic vertical load using the discrete element method[J]. Geotextiles and geomembranes, 2010, 28(1):33-43.
- [20] OBERMAYR M, DRESSLER K, VRETTOS C, et al. Prediction of draft forces in cohesionless soil with the discrete element method[J]. Journal of terramechanics, 2011, 48(5):347-358.