

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.03.01

岩质边坡倾倒变形机理及稳定性研究综述

安晓凡, 李 宁, 孙闻博

(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 倾倒破坏是岩质边坡的一种典型失稳模式, 目前对于岩质边坡倾倒变形的稳定性分析与评价仍存在很多问题与争议。本文在回顾和总结国内外边坡倾倒失稳案例的基础上, 阐述了岩质边坡倾倒变形的分类和破坏机理。从块体倾倒、弯曲倾倒、块体一弯曲倾倒和次生倾倒的角度详细介绍了倾倒边坡解析方法的研究现状, 进一步论述了数值方法和物理模型试验的研究进展。基于悬臂梁力矩平衡思路, 提出了岩质边坡弯曲倾倒的解析方法。最后, 讨论了各种稳定性分析方法的不足与适用性, 指出了以后研究的重点和有待深入探讨的问题。

关键词: 倾倒变形; 破坏机理; 解析方法; 稳定性分析

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)03-0001-11

Review on the mechanism and stability of toppling deformation of rock slopes

AN Xiaofan, LI Ning, SUN Wenbo

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Toppling failure is a typical instability mode of rock slope. At present, there are still many problems and disputes about the stability analysis and evaluation of rock slope toppling. On the basis of reviewing the cases of toppling instability at home and abroad, the classification and failure mechanism of toppling deformation of rock slope are expounded. Furthermore, the research status of analytical methods for toppling slope is introduced from the perspectives of block toppling, flexural toppling, block-flexural toppling and secondary toppling, and the research progress of numerical methods and physical model tests are further discussed. Based on the idea of moment balance of cantilever beam, an analytic method for flexural toppling is proposed. Finally, the shortcomings and applicability of each analysis method are pointed out, the future research emphases and the problems which need deeply discussing are explained.

Keywords: toppling; failure mechanism; analytical method; stability analysis

0 引言

伴随着众多水利水电、露天矿、交通工程等大型项目的建设, 岩质边坡倾倒失稳的现象被逐渐发现和揭露, 成为制约此类工程建设的重点和难点问题, 逐步引起国内外学者、工程师的广泛关注。

倾倒变形是边坡岩体向临空面倾覆的一种失稳模

式, 多发生于反倾层状的岩质边坡中。早期普遍认为反倾边坡的自稳能力好于顺层边坡, 变形常发生于浅层岩体中, 不会出现大规模由于岩层倾倒变形触发的滑动失稳现象。但是我国是一个地质灾害频发的国家, 近 30 年来, 西南、西北等高山峡谷地区不断揭露出弯曲倾倒变形深度高达上百米的边坡, 这种变形模式很可能会发展为大型和巨型的深层滑坡^[1]。因此, 对

收稿日期: 2017-08-28; 修订日期: 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11572246; 51179207)

第一作者: 安晓凡(1988-), 男, 岩土工程专业, 博士研究生, 主要从事边坡工程方面的研究工作。E-mail: anckham@163.com

易发生倾倒变形的岩质边坡进行失稳机理、稳定性分析与评价方法以及治理措施的研究至关重要,具有理论意义和实际应用价值。

Müller^[2]在对意大利 Vaiont 拱坝上游左岸滑坡的研究中首次提出了自然岩块的倾覆 (Overturning) 现象。基于理论和试验模型, Ashby^[3]对此失稳现象提出了简单的评价准则,并且用倾倒 (Toppling) 来描述此类现象。金川露天矿边坡是我国最早发现,也是报道最为详细的边坡倾倒破坏实例之一^[4-5]。1974 年下半年,一矿区边坡受开挖、连续降雨和坡底大规模爆破的影响,岩体向矿坑方向倾倒变形,岩层倾斜 10° 左右,最大水平位移高达 7 m。该矿区东部采场边坡于 1990 年 2 月出现变形破坏的急剧加速,边坡前缘观测点水平位移速度由每天几十毫米增至 200 mm 左右,最高达 358 mm/d,垂直位移量最高达 331 mm/d。下盘边坡形成数条长达数十米至数百米,相对上升 4~10 m 的反翘陡坎;3 月 24 日,上盘边坡大面积坍塌,近 $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的岩石滑移堆于坑底。此后,我国的龙滩水电站坝址左岸边坡、红莲池铁矿边坡、盐池河磷矿边坡、重庆武隆鸡尾山、锦屏一级水电站左岸边坡、茨哈峡水电站 I 号倾倒体、三峡库区巫峡段龚家坊 2#斜坡、溪洛渡水库星光三组倾倒变形体、昌马水库枢纽工程边坡、天生桥二级水电站厂房南侧边坡等均出现不同程度的倾倒变形,轻则致使坡表出现裂缝、掉块现象,重则导致大规模山体崩塌、滑动破坏。

本文在阐述岩质边坡倾倒变形机理的基础上,结合国内外研究成果,详细总结了倾倒边坡的稳定性分析与评价方法,提出了基于力矩平衡的弯曲倾倒解析方法,并且对所存在的问题和下一步的研究方向进行了探讨。

1 岩质边坡倾倒变形的特点和类型

1.1 倾倒变形的分类

Goodman 等^[6]将岩质边坡的倾倒变形分为块体倾倒 (Block toppling)、弯曲倾倒 (Flexural toppling)、块体—弯曲倾倒 (Block-flexural toppling) 和次生倾倒 (Secondary toppling) (图 1、图 2)。这种分类方式沿用至今,基本上涵盖了自然界能够观察到的倾倒边坡。

坚硬岩柱被规模较大正交节理切割时可能会发生块体倾倒。构成边坡坡脚的短岩柱,由于受到后方翻倒下来岩柱的荷载作用而被向前推出,导致坡脚滑移。

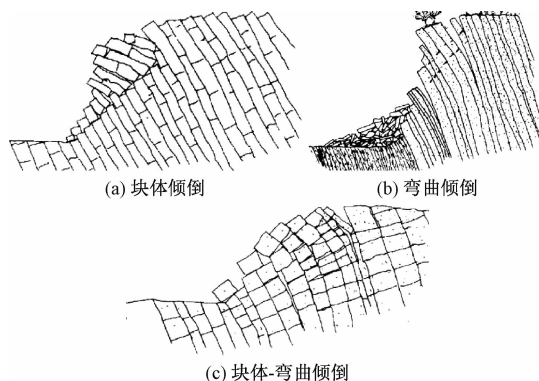


图 1 边坡倾倒变形基本类型

Fig. 1 Basic types of toppling deformation

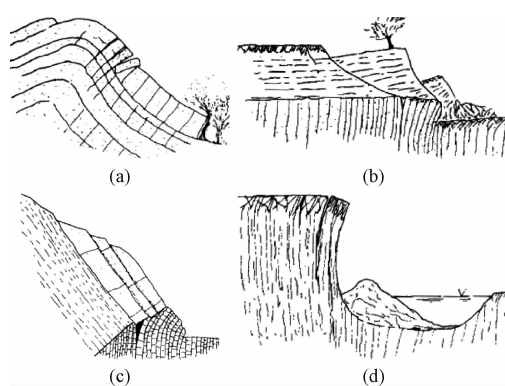


图 2 次生倾倒类型

Fig. 2 Types of secondary toppling

块体倾倒存在比较清晰的底面,通常是由一个个逐渐向上的阶梯状的横切节理组成 (图 1a)。弯曲倾倒多发生于非常发育的陡倾斜不连续面所分割的连续岩柱,由于悬臂岩柱向临空面运动导致层间滑移,因此会形成一系列逆向陡坎 (图 1b)。当岩柱被许多横节理切割,岩柱变形由横节理分割的各小岩块位移累计而成,形成似连续性弯曲状,则为块体—弯曲倾倒 (图 1c)。

次生倾倒也称作二次倾倒,按照倾倒岩体变形的触发形式不同,可以分为:底部滑移牵引上部岩体的倾倒 (图 2a),上部变形体滑移推动下部岩体的倾倒 (图 2b),上部岩体滑移促使坡角倾倒 (图 2c) 以及陡倾岩体的拉伸倾倒破坏 (图 2d)。

实际边坡的倾倒变形往往是同时包含上述几种变形破坏模式的复合倾倒,变形破坏机理也更加复杂、很难预测。

现阶段倾倒边坡的理论研究和解析模型的建立基本上是以上述分类为基础。相对而言,对块体倾倒所开展的研究最多,分析理论也较为成熟;而弯曲倾倒的研究成果有限。对于复合倾倒和二次倾倒的理论研究

也只是在近几年才有报道,大多停留在野外观测和统计分析方面。

1.2 倾倒变形的特点

倾倒变形的发生除了由于岩性和岩体结构的特殊组合形式外;长时间降雨入渗,库区水位变化,岩体冻融循环,人工开挖、爆破,洞室开挖、采矿活动等外界因素都可能会触发大规模的倾倒失稳。黄润秋^[7]在分析我国典型滑坡灾害实例的基础上,对大中型反倾层状岩质边坡变形破坏规律得出以下认识:

(1) 反倾层状岩质边坡的大规模倾倒变形破坏与边坡的岩性软弱程度、岩层厚度等有密切关系。一般发生在具有“柔性”特点的反倾向或近直立薄层状地层中,尤其是以薄层状板岩、片岩、砂板岩互层、薄层状大理岩、泥质灰岩等岩性组合形式为主。

(2) 大规模的倾倒破坏存在一个很长的孕育演化过程。在此过程中,岩层可能发生很大的柔性弯曲而不折断,而其破坏一定是变形发展到极致的产物。不同于顺层边坡的潜在滑动面受一些先决条件控制,这类边坡滑动面的形成完全是自身演化的结果。然而一旦演化到滑坡阶段,由于其长期的地质历史积累,必然是深层的、大规模的。

(3) 陡倾的坚硬中一厚层状边坡岩体也常见倾倒破坏,但通常情况下,其变形和破坏的深度均不大,一般为30~40 m。与柔性地层时效变形的特点不同,这类地层通常发生的是“结构性质”的变形,即通过节理裂隙的“弯折”而表现出倾倒的特征。从人类工程活动的角度上,前者在其变形阶段的稳定性状态相对较好。后者的岩层变形可在较短时间内发生,稳定性也表现出较强的突发性特点。

2 倾倒边坡的稳定性分析方法

2.1 解析方法

2.1.1 块体倾倒

Goodman 等于1976年建立了岩质边坡块体倾倒稳定分析的计算模型,给出了对应的极限平衡分析方法(以下简称G-B方法),该方法奠定了岩质边坡倾倒破坏分析的理论基础(图3)。1981年,Hoek等^[8]在《Rock slope engineering》一书中直接引用了该论文的内容与结论,使得G-B方法得到广泛传播和应用。但是G-B方法所针对的只是块体倾倒这种模式,对于其他变形模式的计算模型和解析方法并未涉及。

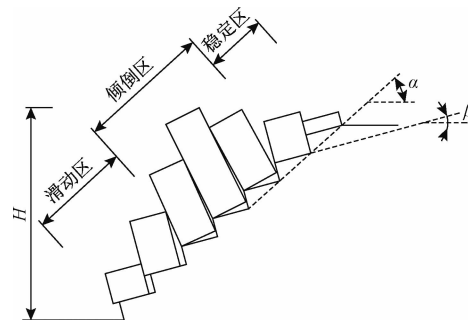


图3 块体倾倒计算模型

Fig.3 Calculation model of block toppling

此后一些学者在 Goodman 等人研究的基础上做了一些论证和改进工作,使其适用性得以加强。Wyllie^[9]首次将G-B方法应用在三个工程实例中,证实了该方法的适用性。Zanbak^[10]通过程序实现G-B方法,并提出了图表法设计倾倒边坡的思路。Aydan等^[11]基于极限平衡的概念,建立了块体倾倒的动态平衡方程,并通过试验验证其可行性。Sagasetta等^[12]假定组成边坡的岩块厚度相对于其高度为一微量,采用微分方程来描述边坡中块体的平衡状态。但是该方法只有在岩柱的长细比大于一定值时才能保证计算结果的准确性。Liu等^[13]基于极限平衡理论,提出了岩质边坡倾倒破坏分析的传递系数法。Babiker等^[14]认为由于节理存在不符合实际的剪胀现象,导致极限分析过高估计了它的稳定性。进而提出的改进的塑形极限分析程序,考虑了非关联、低剪胀、摩擦模型。

国内学者也做了一些研究工作。孙广忠^[15]建立了岩体结构转动和倾倒变形的力学模型,基于力矩平衡得出了结构体转动破坏和倾倒变形的计算公式和破坏判据。这与国外学者的研究思路不谋而合,岩体转动其实是块体倾倒的力学模型,而岩体倾倒变形的模型基础便是悬臂梁模型。但是该研究只是针对于单个块体而言,并没有给出整个边坡的系统解法。陈祖煜等^[16]对G-B方法做出四点改进,即考虑岩柱底滑面的连通率、重新定义安全系数、确定破坏模式、将条块视为更一般的平行四边形,并给出相应的解析方法。之后在其著作中^[17]详细介绍了改进的G-B方法,并且基于该方法编制了倾倒边坡的计算程序EMU。李天扶^[18]指出G-B模型最大的缺陷是没有考虑水压力的作用,因此无法解释倾倒体的各种不规则现象,例如陡倾角的顺层边坡发生向外倾倒的现象等。在层状岩质边坡倾倒稳定分析中,应计入上层滞水产生的倾倒力矩,有效地排水应是对易发生倾倒的边坡首选的治理措施。刘才华等^[19]、郑允等^[20]分别基于传递系数法

和连续性分析法的概念,提出了考虑地震作用的块体倾倒分析方法。郑允等^[21]基于传递系数法,在 G-B 模型的基础上,提出了坡顶荷载作用下岩质边坡倾倒破坏地质力学模型和解析方法。高连通等^[22]基于陈祖煜改进的 G-B 方法,推导了考虑地下水作用的反倾岩质边坡稳定性计算方法。

2.1.2 弯曲倾倒

弯曲倾倒一般没有已知的破坏面,岩层在自重或外力的作用下向临空面发生弯曲变形,表现出明显的柔性特征。日本学者 Aydan 等^[23]基于极限平衡方法,运用悬臂梁弯曲理论对 G-B 模型进行改进,建立了弯曲倾倒的力学模型,通过迭代求解得到反倾边坡坡脚剩余下滑力,该方法仍然以剩余下滑力作为边坡稳定性的判别标准,并通过室内基底摩擦试验进行了验证。该研究首次建立了弯曲倾倒的解析方法。计算模型见图 4。

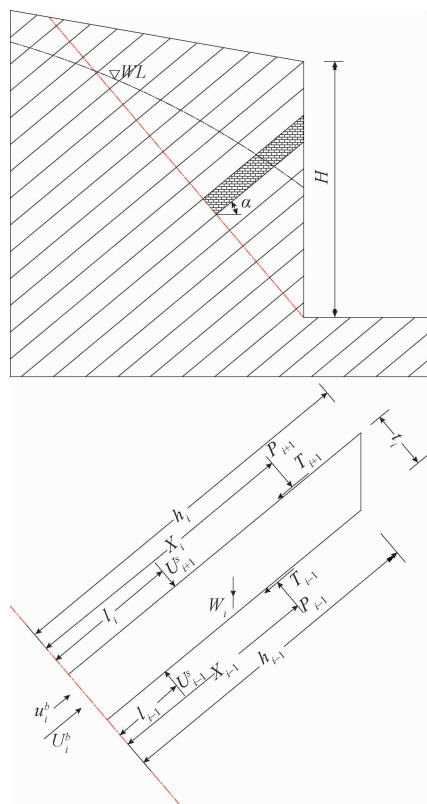


图 4 弯曲倾倒计算模型

Fig.4 Calculation model of flexural toppling

Adhikary 等^[24]通过离心机试验发现,倾倒折断面与岩柱并不是垂直的(G-B 模型假定折断面与岩柱垂直)。并对 Aydan 等^[23]提出的弯曲倾倒模型进行改进,得出了倾倒折断深度的计算公式以及安全系数的计算方法。之后 Adhikary 等^[25]基于 Cosserat 理论建

立了弯曲倾倒分析的模型,但是 Cosserat 模型无法考虑岩层间的滑移、错动。蒋良淮等^[26]基于悬臂梁模型,并考虑板上下侧缘的层间错动阻力,统一地利用能量方法,推导了屈曲失稳和弯折破坏的判据。卢海峰等^[27]在 Adhikary 提出的悬臂梁弯曲极限平衡分析模型的基础上,对其折裂面形式、层间凝聚力的影响和各层岩体重度等方面问题进行了修正。陈从新等^[28]通过对模型试验的分析,将弯曲倾倒破坏区域分为滑移倾倒区和悬臂倾倒区,并且建立了相应的力学模型和分析方法。

2.1.3 块体—弯曲倾倒和次生倾倒

实际工程中发生的边坡倾倒变形现象多是较为复杂的组合倾倒模式或二次倾倒变形。Evans^[29]针对次生倾倒模式提出了应力重分布的分析方法。王思敬^[4]介绍了金川露天矿边坡的滑动—倾倒复合变形实例,指出其变形是在两种机制共同作用下发生的,岩体条块状碎裂结构对变形机制和发展过程起到控制作用。伊朗学者 Amini 等^[30]首次建立了弯曲—块体倾倒的力学模型(图 5),得出了这种变形模式的解析方法,并通过编程实现应用在两个典型的反倾边坡实例中(图 6)。Mohtarami 等^[31]介绍了一种特殊的次生倾倒理论分析模型,即上部土体圆弧滑动、下部岩体块体—弯曲倾倒,并给出相应的解析方法。杨保军等^[32]基于传递系数法,提出了岩质边坡上部滑动—下部块体倾倒组合破坏的解析分析方法。

2.2 数值方法

随着计算机的广泛应用,研究人员不断尝试用各种数值方法来研究边坡的倾倒变形问题。其中最为常用的是离散元方法,代表软件是 Itasca 公司开发的 UDEC 和 PFC,其次是石根华博士创立的非连续变形分析方法(DDA),也有少数学者应用节理网格有限元和有限差分法展开研究。

离散单元法是 Cundall^[33]于 1971 年提出来的,该方法适用于研究在准静力或动力条件下节理系统或块体集合的力学问题。Ishida 等^[34]首次将离散元方法应用于裂隙岩体边坡块体倾倒变形的研究中。Pritchard 等^[35]最早利用离散元法分析大型边坡的弯曲倾倒破坏。程东幸等^[36-37]利用三维离散元程序 3DEC 对反倾边坡的影响因素及反倾条件进行了模拟研究,并将其应用在对龙滩水电站工程边坡的三维变形特征分析中。Brideau 等^[38]通过两个不同约束条件的理想模型介绍了 3DEC 在分析块体倾倒边

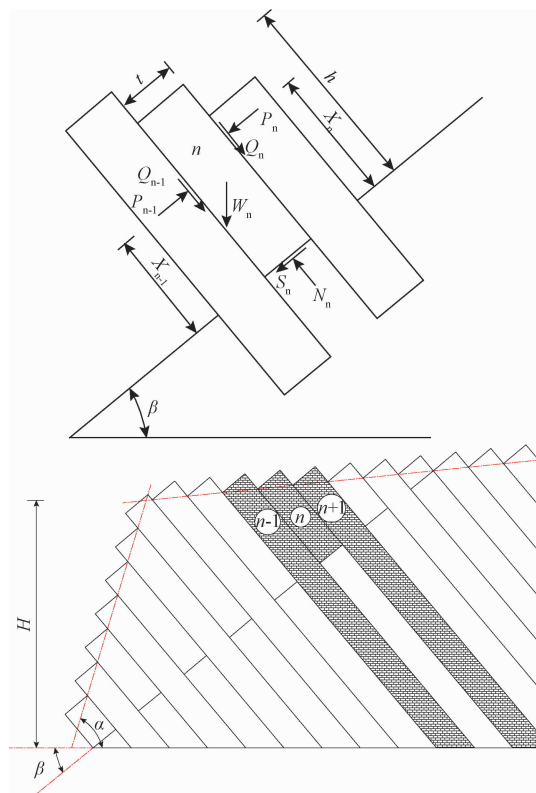


图5 块体一弯曲倾倒计算模型

Fig. 5 Calculation model of block-flexural toppling

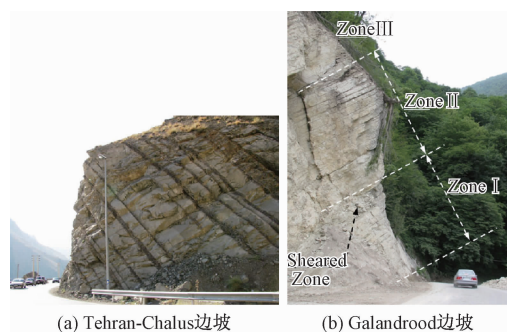
图6 典型反倾边坡实例^[30]

Fig. 6 Typical examples of anti-dipped slope

中的应用。蔡跃等^[39]探讨了弯曲倾倒边坡的稳定性和岩层倾角、厚度及边坡倾角之间的关系。Alejano等^[40]以西班牙一露天矿边坡为背景,介绍了一种新的次生倾倒破坏模式—上部倾倒、下部圆弧形滑动。在计算中首先用G-B方法求得上部倾倒体的下推力,然后将此力施加在下部滑体上,用离散元强度折减法对整体稳定性进行分析。王章琼等^[41]研究露天矿边坡在自重、露采、地下开采等因素作用下的变形破坏特征。Li等^[42]用基于连续模型的离散元方法(CDEM)模拟反倾露天矿边坡的弯曲倾倒变形。

颗粒离散元方法被应用在研究岩土体的破裂和裂纹的发展,以及颗粒间的相互作用问题、大变形问题、断裂问题等。一些学者用此方法来模拟边坡的倾倒变形。Scholtes等^[43]介绍了颗粒离散元方法在弯曲倾倒边坡中的应用。Jiang等^[44]基于PFC^{3D}介绍了离散元接触黏结模型(novel DEM bond contact model)在节理岩质边坡的应用。岑夺丰等^[45]研究了块裂反倾巨厚层状岩质边坡的破坏机制及稳定性。

数值流形方法(NMM)和非连续变形分析(DDA)是石根华于20世纪90年代初提出的数值分析方法^[45]。孙东亚等^[46]使用DDA验证G-B方法的合理性,指出了G-B法可能出现的问题。张国新等^[47-48]将数值流形方法进行扩充,使之能够模拟完整岩体的拉裂与剪断,并且证实了该方法能够很好模拟实际岩质边坡的倾倒破坏。蒋青青等^[49]采用FLAC^{3D}中的遍布节理模型分析层理倾角、倾向与边坡稳定性之间的关系。宋彦辉等^[50]和王宇等^[51]基于强度折减法的节理有限元法(JFEM-SSR)对反倾层状边坡的变形破坏机制进行研究,并应用于实际工程当中。

2.3 试验研究

解析方法的可靠性需要通过试验研究加以验证。对倾倒边坡的试验研究主要有倾斜台面模型试验、基底摩擦试验和离心模型试验三类。

Ashby^[3]、Whyte^[52]和Soto^[53]进行过一系列倾斜台面的模型试验。Wong等^[54]开发了一个三维倾斜试验台,可以在模型侧面施加不同的压力。Amini等^[55]在其理论研究的基础上,运用倾斜试验台模拟了岩质边坡的块体一弯曲倾倒破坏。Bray等^[56]利用基底摩擦试验台研究该问题,用模型与砂纸间的摩擦力来模拟块体的体积力。Steward等^[57]、汪小刚等^[58]介绍了利用离心模型试验设备展开的研究工作。

一些学者以开挖作为“触发因素”模拟边坡的失稳。左保成等^[59]、卢增木等^[60]利用相似模型试验,研究岩层的倾角、厚度、结构面强度对反倾层状边坡稳定性的影响,结果显示此类边坡的变形破坏过程具有明显的“叠合悬臂梁”的特征。

对倾倒边坡动力特性的研究主要是振动台模型试验。Aydan等^[61]模拟动荷载作用下主动(active)与被动(passive)弯曲倾倒的破坏。杨国香等^[62]研究地震作用下反倾层状结构岩质边坡动力响应特征及破坏过程。

3 基于力矩平衡的弯曲倾倒模型

孙广忠认为倾倒变形由以下两个过程组成:(1)在自重作用下板裂体产生弯折;(2)折断点连贯成面,上覆岩体在重力作用下产生滑动或溃屈,最后导致边坡破坏。基于力矩平衡提出了反倾的板裂体弯曲倾倒折断的条件为:在自重和传递力作用下岩块产生的倾覆力矩 M_T 大于内部摩擦力产生的抵抗力矩 M_r 。

$$M_T > M_r \quad (1)$$

其力学模型如图 7 所示,对 A 点取矩可得:

$$\int_0^l (\sigma_h - \sigma'_h) x dx + W \left(\frac{l}{2} \cos \alpha - \frac{b}{2} \sin \alpha \right) - b \int \tau dx \geq 0 \quad (2)$$

式中: σ_h 、 σ'_h ——分别为岩柱左侧和右侧的法向应力;

τ ——岩柱侧面的切向应力;

W ——岩柱重量;

l 、 b ——分别为岩柱的长度和宽度;

α ——岩柱倾角。

弯折破坏的判据为:

$$\sigma_T = [\sigma_T] \quad (3)$$

式中: $[\sigma_T]$ ——岩柱的抗拉强度;

σ_T ——岩柱内的拉应力。

$$\sigma_T = \frac{M \cdot y}{I} \quad (4)$$

式中: M ——岩柱截面内弯矩;

y ——中性轴距表面距离;

I ——岩柱截面对中性轴的惯性矩, $I = \frac{1}{12} bl^3$ 。

孙广忠只是给出了岩柱折断的判据,并没有将其应用于整个的边坡的求解中。基于力矩平衡的思路有别于 G-B 方法中基于静力平衡的思路。

式(4)中对折断面拉应力的求解公式是针对纯弯曲梁,然而对于叠合梁中考虑侧面摩擦力的情况并不适用,应当加上由于侧面摩擦力而产生的拉应力,如式(5)。

$$\sigma_T = \frac{M \cdot y}{I} + \frac{\int \tau dx}{b} \quad (5)$$

针对于上述问题,可得:

$$\sigma_T = \frac{(M_T - M_r) \cdot y}{I} + \frac{\int_0^l (\tau_h - \tau'_h) x dx}{b} \quad (6)$$

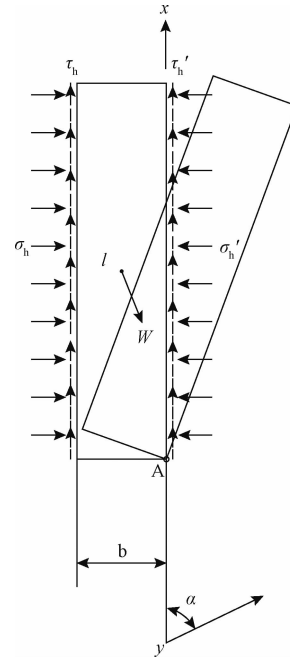


图 7 弯曲倾倒力学模型

Fig. 7 Mechanical model of flexural toppling

式中: τ_h 、 τ'_h ——岩柱左侧和右侧的切向应力。

其中, M_T 、 M_r 改为对折断面中点取矩:

$$M_T = \int_0^l (\sigma_h - \sigma'_h) x dx + \frac{l}{2} W \cos \alpha \quad (7)$$

$$M_r = \frac{b}{2} \int_0^l (\tau_h - \tau'_h) x dx \quad (8)$$

将式(7)和(8)带入式(6),得到岩柱内拉应力的表达式:

$$\sigma_T = \frac{\int_0^l (\sigma_h - \sigma'_h) x dx + \frac{l}{2} W \cos \alpha - \frac{b}{2} \int_0^l (\tau_h - \tau'_h) x dx}{I} + \frac{\int_0^l (\tau_h - \tau'_h) x dx}{b} \quad (9)$$

根据库伦定律,不考虑接触面的黏聚力有: $\tau = \sigma \tan \varphi$; 当岩柱达到折断的极限平衡条件时: $\sigma_T = [\sigma_T]$ 。带入上式并且积分可以得到岩柱左侧和右侧推力 P_h 与 P'_h 的关系。依次从坡顶到坡角,对每个岩柱求解可以得到对应的受力关系。根据坡角处最后一块岩柱的受力状态 P_0 进行边坡稳定性判断,并可以得到所需要的加固力。

$P_0 < 0$, 边坡稳定;

$P_0 = 0$, 边坡处于极限平衡状态;

$P_0 > 0$, 边坡失稳。

4 讨论与结论

(1) 倾倒破坏是岩质边坡失稳的主要模式,但由于岩层倾倒变形所引起的边坡二次破坏形式有可能是滑动、崩塌等。

(2) 倾倒变形易发生于反倾层状岩质边坡中,但并不等同于其他形式的边坡就不会发生倾倒变形。岩层的长细比较大或岩柱的刚度较小时,易发生向临空面方向的弯曲倾倒;受节理切割的块状岩体或块状一层状互层岩体的失稳模式往往是块体倾倒或块体一弯曲倾倒。顺层陡倾或近直立岩层的边坡,由于层间水压力或冻融作用会形成额外的倾倒力矩,可能会导致边坡的倾倒失稳。次生倾倒模式中,荷载由上部潜在的滑动体传递到下部层状岩体也可能会诱发倾倒失稳。

邱俊等^[63]提出层状岩质边坡“倾倒临界倾角 δ ”的概念。顺倾边坡 $\delta \approx 60^\circ$, 当岩层倾角 $\alpha > \delta$ 时,边坡将可能产生倾倒变形;当 $\alpha < \delta$ 时,边坡通常产生顺层面的“滑移-弯曲”或“滑移-拉裂”型破坏。在地质条件基本相同的情况下,反倾边坡演化形成的倾倒体的发育分布面积和倾倒深度通常大于顺倾边坡,反倾边坡形成的倾倒体后缘高程一般在坡肩位置,而顺倾边坡通常会低于坡肩一定高度。

(3) 块体倾倒与弯曲倾倒解析模型最大的不同点是:块体倾倒模型存在已知的破坏面,且假定岩块为刚性体,其本身不发生变形;而弯曲倾倒的潜在破坏面是未知的,岩层可以发生弯曲变形。

大型工程中倾倒边坡的变形多数是弯曲倾倒,合理确定潜在的破坏面对分析边坡的稳定性至关重要。依据地质勘探中岩层倾角和岩体完整性的变化,能够初步推测潜在的倾倒折断面。以往的解析模型基本上是根据模型试验的结果假定破坏面,其准确性和适用性值得进一步探讨。

(4) 目前对倾倒边坡的研究主要集中在稳定性分析方法上,尤其是用数值方法探索此类边坡的变形破坏机理。然而与之相对应的评价方法的研究较少。G-B 方法以保证坡脚第一块岩柱稳定所需的抗滑力作为边坡稳定的标志,在实际应用中很不方便。强度折减法较好地弥补了其不足,将计算结果转换成工程中易接受的安全系数。基于考虑倾倒问题中岩柱的抗弯能力,在对剪切强度指标 c 和 $\tan\varphi$ 折减的同时,应同时对抗拉强度 σ_t 进行折减。

实际工程中遇到的大型高陡边坡越来越多,尤其

是倾倒边坡的变形机制较普通滑坡复杂且可预测性差,仅凭一个安全系数的概念不足以判断其安全性,因此建立全面的评价体系至关重要。

(5) 无论是 G-B 方法还是基于悬臂梁理论的弯曲倾倒模型,在处理该问题时都做了相应的假设,故极限平衡法的适用性有限。有限元法因其平衡方程的连续性,使得在模拟裂隙岩体的大变形受到限制。

离散元克服了有限元法的局限性,使得节理接触的形成和断开、大变形、离散块体的转动和块体变形都很容易实现。结合强度折减的思想,以计算不收敛(设置最大不平衡力控制)作为边坡破坏的依据,在计算中可以通过对应的速度矢量图确定滑动面(破坏面)的位置^[64-67]。因此,离散元法适用于各种类型、大小尺度的边坡倾倒变形分析。

(6) 已有的研究大多是基于边坡在自然状态下展开的,较少有涉及到外荷载的影响。但是降雨、库水位变化、开挖卸荷、爆破和地震作用等外荷载影响往往会加剧岩层的倾倒变形,甚至直接导致边坡失稳。针对这方面的研究将会是今后的重点。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡稳定性工程地质分析[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
HUANG Runqiu. Engineering geology for high rock slopes[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] MULDER L. New considerations on the Vaiont slide[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1968 (6): 4-91.
- [3] ASHBY J. Sliding and toppling modes of failure in models and jointed rock slopes[D]. London: Imperial College, Royal School of Mines, 1971.
- [4] 王思敬. 金川露天矿边坡变形机制及过程[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 76-83.
WANG Sijing. On the mechanism and process of slope deformation in an open pit mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1): 76-83.
- [5] 宋怒夏, 张纪定. 金川露天矿东部采场边坡的变形破坏[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(1): 12-22.
SONG Nuxia, ZHANG Jiding. Slope deformation failure in eastern slope of the Jinchuan open-pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(1): 12-22.
- [6] GOODMAN R E, BRAY J W. Toppling of rock slopes [C]//Proceedings of ASCE Specialty Conference,

- Rock Engineering for Foundations and Slopes, Colorado, 1976: 201 – 234.
- [7] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 – 454.
- HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 – 454.
- [8] HOEK E, BRAY J. Rock slope engineering [M]. Institution of mining and metallurgy, 1981.
- [9] WYLLIE D C. Toppling rock slope failures: examples of analysis and stabilization [J]. Rock Mechanics, 1980, 13(2): 89 – 98.
- [10] ZANBAK C. Design charts for rock slopes susceptible to toppling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(8): 1039 – 1062.
- [11] AYDAN O, SHIMIZU Y, ICHIKAWA Y. The effective failure modes and stability of slopes in rock mass with two discontinuity sets[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1989, 22: 163 – 188.
- [12] SAGASETA C, SANCHEZ J M, CANIZAL J. A general analytical solution for the required anchor force in rock slopes with toppling failure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38: 421 – 435.
- [13] LIU C H, JAKSA M B, MEYERS A G. A transfer coefficient method for rock slope toppling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(1): 1 – 9.
- [14] BABIKER A F A, SMITH C C, GILBERT M, ASHBY J. Non-associative limit analysis of the toppling-sliding failure of rock slopes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71: 1 – 11.
- [15] 孙广忠. 岩体结构力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- SUN Guangzhong. Structural mechanics of rock mass [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [16] 陈祖煜, 张建红, 汪小刚. 岩石边坡倾倒稳定分析的简化方法[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 92 – 95.
- CHEN Zuyu, ZHANG Jianhong, WANG Xiaogang. The predigesting way of analyzing toppling stability of rock slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 92 – 95.
- [17] 陈祖煜. 岩质边坡稳定分析—原理·方法·程序 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- CHEN Zuyu. Rock slope stability analysis: theory, method and programs [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.
- [18] 李天扶. 论层状岩石边坡的倾倒破坏[J]. 西北水电, 2006(3): 4 – 6.
- LI Tianfu. On tilting failure of bedded rock slope[J]. Northwest Hydropower, 2006(3): 4 – 6.
- [19] 刘才华, 陈从新. 地震作用下岩质边坡块体倾倒破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S): 3193 – 3198.
- LIU Caihua, CHEN Congxin. Analysis of toppling failure of rock slope due to earthquakes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S): 3193 – 3198.
- [20] 郑允, 陈从新, 朱玺玺, 等. 地震作用下岩质边坡倾倒破坏分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1025 – 1040.
- ZHENG Yun, CHEN Congxin, ZHU Xixi, et al. Analysis of toppling failure of rock slopes subjected to seismic loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1025 – 1040.
- [21] 郑允, 陈从新, 刘婷婷, 等. 坡顶荷载作用下岩质边坡倾倒破坏分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2639 – 2658.
- ZHENG Yun, CHEN Congxin, LIU Tingting, et al. Analysis of toppling failure of rock slopes under the loads applied on the top [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2639 – 2658.
- [22] 高连通, 晏鄂川, 谢良甫. 考虑地下水作用的 Goodman-Bray 方法改进及应用[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 78 – 83.
- GAO Liantong, YAN Echuan, XIE Liangfu. Improved Goodman-Bray method consideration of groundwater effect [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(2): 78 – 83.
- [23] AYDAN O, KAWAMOTO T. The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilization[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1992, 25(3): 143 – 165.
- [24] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, JEWELL R J, STEWART D P. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, 30(2): 75 – 93.
- [25] ADHIKARY D P, DYSKIN A V. Modelling of progressive and instantaneous failures of foliated rock slopes [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(4): 349 – 362.

- [26] 蒋良潍, 黄润秋. 反倾层状岩体斜坡弯曲—拉裂两种失稳破坏之判据探讨[J]. 工程地质学报, 2006, 14(3): 289–294.
JIANG Liangwei, HUANG Runqiu. Bending yielding and tensile cracking criteria for failure of rock slope whose dip direction opposite to the dip direction of strata[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(3): 289–294.
- [27] 卢海峰, 刘泉声, 陈从新. 反倾岩质边坡悬臂梁极限平衡模型的改进[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 577–584.
LU Haifeng, LIU Quansheng, CHEN Congxin. Improvement of cantilever beam limit equilibrium model of counter-tilt rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 577–584.
- [28] 陈从新, 郑允, 孙朝燧. 岩质反倾边坡弯曲倾倒破坏分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2174–2187.
CHEN Congxin, ZHENG Yun, SUN Chaoyi. An analytical approach on flexural toppling failure of counter-tilt slopes of layered rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2174–2187.
- [29] EVANS R S. An analysis of secondary toppling rock failures: the stress redistribution method [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1981, 14(2): 77–86.
- [30] AMINI M, MAJDI A, VESHADI M A. Stability analysis of rock slopes against block-flexure toppling failure[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(4): 519–532.
- [31] MOHTARAMI E, JAFARI A, AMINI M. Stability analysis of slopes against combined circular-toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67(2): 43–56.
- [32] 杨保军, 何杰, 吉刚, 等. 岩质边坡滑动-倾倒组合破坏模式稳定性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2335–2341.
YANG Baojun, HE Jie, JI Gang, et al. Stability analysis of sliding-toppling complex failure of rock slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2335–2341.
- [33] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in block rock systems [C]//Proceedings of Symposium of International Society of Rock Mechanics. Nancy, 1971: 8–11.
- [34] ISHIDA T, CHIGIRA M, HIBINO S. Application of the distinct element method for analysis of toppling observed on a fissured rock slope [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1987, 20(4): 277–283.
- [35] PRITCHARD M A, SAVIGNY K W. Numerical modelling of toppling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(6): 823–834.
- [36] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1362–1366.
CHENG Dongxing, LIU Daan, DING Enbao, et al. Analysis on influential factors and toppling conditions of toppling rock slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1362–1366.
- [37] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 反倾岩质边坡变形特征的三维数值模拟研究——以龙滩水电站工程边坡为例进行三维变形特征分析[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 222–226.
CHENG Dongxing, LIU Daan, DING Enbao, et al. Three-dimension numerical simulation of deformation characteristics of toppling rock slope: case study for a slope at longtan hydropower station [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 222–226.
- [38] BRIDEAU M, STEAD D. Controls on block toppling using a three-dimensional distinct element approach [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(3): 241–260.
- [39] 蔡跃, 三谷泰浩, 江崎哲郎. 反倾层状岩体边坡稳定性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2517–2522.
CAI Yue, MITANI Yasuhiro, ESAKI Tetsuro. Numerical analysis of stability for an antidip stratified rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2517–2522.
- [40] ALEJANO L, GOMEZ-MARQUEZ I, MARTINEZ-ALEGRIA R. Analysis of a complex toppling-circular slope failure [J]. Engineering Geology, 2010, 114(1): 93–104.
- [41] 王章琼, 晏鄂川, 尹晓萌, 等. 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 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7): 2295–2302.
WANG Zhangqiong, YAN Echuan, YIN Xiaomeng, et al. Study on collapse mechanism of anti inclined rock slope: A case study of Honglianchi iron mine slope in

- Hefeng, Hubei Province[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7): 2295 – 2302.
- [42] LI Z, WANG J A, LI L, WANG L X, LIANG R Y. A case study integrating numerical simulation and GB-InSAR monitoring to analyze flexural toppling of an anti-dip slope in Fushun open pit[J]. Engineering Geology, 2015, 197: 20 – 32.
- [43] SCHOLTES L, DONZE F 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.
- [44] JIANG M J, JIANG T, CROSTA G B, SHI Z M, CHEN H, ZHANG N. Modeling failure of jointed rock slope with two main joint sets using a novel DEM bond contact model[J]. Engineering Geology, 2015, 193(2): 79 – 96.
- [45] 岑夺丰, 黄达, 黄润秋. 块裂反倾巨厚层状岩质边坡变形破坏颗粒模拟及稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 984 – 993.
- CEN Duofen, HUANG Da, HUANG Runqiu. Simulation of deformation and failure for blocky anti-dip thick-layered rock slopes using particle flow code and analysis on its stability[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 984 – 993.
- [46] 孙东亚, 彭一江, 王兴珍. DDA 数值方法在岩质边坡倾倒破坏分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 39 – 42.
- SUN Dongya, PENG Yijiang, WANG Xingzhen. Application of DDA method in stability analysis of topple rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 39 – 42.
- [47] 张国新, 赵妍, 彭校初. 考虑岩桥断裂的岩质边坡倾倒破坏的流形元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1773 – 1780.
- ZHANG Guoxin, ZHAO Yan, PENG Xiaochu. Simulation of toppling failure of rock slope by numerical manifold method considering fracture of rock bridges[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1773 – 1780.
- [48] 张国新, 赵妍, 石根华, 等. 模拟岩石边坡倾倒破坏的数值流形法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 800 – 805.
- ZHANG Guoxin, ZHAO Yan, SHI Genhua, et al. Toppling failure simulation of rock slopes by numerical manifold method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 800 – 805.
- [49] 蒋青青, 胡毅夫, 赖伟明. 层状岩质边坡遍布节理模型的三维稳定性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 712 – 716.
- JIANG Qingqing, HU Yifu, LAI Weimin. Three-dimensional stability analysis of stratified rock slope based on ubiquitous-joint model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 712 – 716.
- [50] 宋彦辉, 黄民奇, 孙苗. 节理网络有限元在倾倒斜坡稳定分析中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1205 – 1210.
- SONG Yanhui, HUANG Minqi, SUN Miao. Application of finite elements with joint net to stability analysis of toppling slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1205 – 1210.
- [51] 王宇, 李晓, 王梦瑶, 等. 反倾岩质边坡变形破坏的节理有限元模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S): 3945 – 3953.
- WANG Yu, LI Xiao, WANG Mengyao, et al. Failure mechanism of toppling rock slope using jointed finite element simulation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S): 3945 – 3953.
- [52] WHYTE R J. A study of progressive hanging wall caving at Chambishi copper mine in Zambia using the base friction model concept[D]. London: Imperial College, Royal School of Mines, 1973.
- [53] SOTO C A. A comparative study of slope modeling techniques for fractured ground[D]. London: Imperial College, Royal School of Mines, 1974.
- [54] WONG R H C, CHIU M. A study on failure mechanism of block-flexural toppling by physical modelling testing[C]//Proceeding of 38th U. S. Rock Mechanics Symposium. Washington D C, 2001: 989 – 995.
- [55] AMINI M, GHOLAMZADEH M, KHOSRAVI M. Physical and theoretical modeling of rock slopes against block-flexure toppling failure[J]. International Journal of Mining and Geo-Engineering, 2015, 49(2): 155 – 171.
- [56] BRAY J W, GOODMAN R E. The theory of base friction models[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstract, 1981, 18(6): 453 – 468.
- [57] STEWART D P, ADHIKARY D P, JEWELL R. Studies on the stability of model rock slopes[C]//

- Proceedings of the International Conference Centrifuge 94. Singapore, 1994: 629 – 634.
- [58] 汪小刚, 张建红, 赵毓芝, 等. 用离心模型研究岩石边坡的倾倒破坏[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 14 – 21.
- WANG Xiaogang, ZHANG Jianhong, ZHAO Yuzhi, et al. Investigations on mechanism of slope toppling failure by centrifuge model testing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 14 – 21.
- [59] 左保成, 陈从新, 刘小巍, 等. 反倾岩质边坡破坏机理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3505 – 3511.
- ZUO Baocheng, CHEN Congxin, LIU Xiaowei, et al. Modeling experiment study on failure mechanism of counter-tilt rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3505 – 3511.
- [60] 卢增木, 陈从新, 左保成, 等. 对影响逆倾层状边坡稳定性因素的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 629 – 632.
- LU Zengmu, CHEN Congxin, ZUO Baocheng, et al. Experimentation research on factors influencing stability of anti-dip layered slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 629 – 632.
- [61] AYDAN O, AMINI M. An experimental study on rock slopes against flexural toppling failure under dynamic loading and some theoretical considerations for its stability assessment [J]. Journal of The School of Marine Science and Technology Tokai University, 2009, 7(2): 25 – 40.
- [62] 杨国香, 叶海林, 伍法权, 等. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2214 – 2221.
- YANG Guoxiang, YE Hailin, WU Faquan, et al. Shaking table model test on dynamic response characteristics and failure mechanism of antidip layered rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2214 – 2221.
- [63] 邱俊, 任光明, 王云南. 层状反倾—顺倾边坡倾倒变形形成条件及发育规模特征[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 513 – 525.
- QIU Jun, REN Guangming, WANG Yunnan. Characteristics of forming conditions and development scale of toppling in anti-dip and dip stratified slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 513 – 525.
- [64] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座—II 有限元强度折减法中边坡失稳的判断探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332 – 336.
- ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, ZHANG Yufang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 332 – 336.
- [65] 雷远见, 王水林. 基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1693 – 1698.
- LEI Yuanjian, WANG Shuilin. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction method based on UDEC [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1693 – 1698.
- [66] 王章琼, 晏鄂川, 刘骏, 等. 湖北鹤峰红莲池铁矿反倾岩坡崩塌破坏特征及形成机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(13): 7 – 13.
- WANG Zhangqiong, YAN Echuan, LIU Jun, et al. Characteristics and mechanism of the rockfall at Honglianchi iron mine in Hefeng, Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3): 7 – 13.
- [67] 易武, 赵红渠, 黄海峰, 等. 三峡库区弯龙村反倾岩质边坡变形破坏机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(4): 13 – 17.
- YI Wu, ZHAO Hongqu, HUANG Haifeng, et al. Failure mechanism of the rock slope at Xiulong, The Three Gorges Area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(4): 13 – 17.