

Establish an Anti-dumping Stratified Rock Slope Failure Criterion Based on Energy Balance

Kairen Tang

School of River & Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China
Email: 1072324474@qq.com

Abstract: In a large reservoir area, counter-tilt stratified rock slope is common after lifting the water level, and the development thick and thin interbedded hard and soft white rock structures occur large slump. The slump has a bottom-up process of grading sliding characteristics. When the reservoir water, and soak in the scour effect of water level, landslide first slide, slide after slide landslides upper landslide formed between the upper and lower rock beam. In order to study this kind of rock slope failure criterion in rock beam based on fracture mechanics fracture theory, build energy fracture criterion. The obtained results of the stability analysis and engineering protection measures are important.

Keywords: counter-tilt stratified rock slope; rock beam; fracture mechanics; energy criterion

基于能量平衡建立反倾层状岩石边坡的破坏判据

唐楷人

重庆交通大学 河海学院, 重庆, 中国, 400074
Email:1072324474@qq.com

摘要: 反倾层状岩石边坡在大型库区中是很常见的, 在库水位抬升后, 发育薄厚互层和软硬相间的岩体结构会发生大型滑塌。该滑塌过程具有自下而上的分级滑动的特征。当水库蓄水时, 在库水位的淘蚀和浸泡作用下, 滑坡前缘首先滑动, 滑坡上部滑体后滑动, 在上下滑坡之间形成岩梁。为了研究该类岩石边坡中岩梁的破坏判据, 基于断裂力学中的断裂理论, 按能量平衡理论建立能量判据。所得成果对稳定性分析和工程防护措施有重要意义。

关键词: 反倾层状岩石边坡; 岩梁; 断裂力学; 能量判据

1 引言

边坡的稳定性问题是一个重要的地质和环境问题, 层状岩体的边坡在自然界很常见, 当层状岩体的倾向与边坡坡面倾向相反时(夹角 $150^\circ \sim 210^\circ$), 称为反倾层状边坡或反倾边坡 [1]。与顺向边坡失稳破坏模式不同, 反倾边坡的破坏模式不是沿某一软弱结构面滑动破坏, 而是组成边坡的板状岩体在自重弯矩及外力共同作用下, 以悬臂梁形式向坡面方向发生的弯曲-拉裂破坏[2], 在自重或上部加载的情况下, 岩石开裂-裂纹发展-最终破坏, 所以要准确判断反倾岩石现阶段所处状态, 需对裂纹发展状况及止裂等作出判定, 断裂力学的某些经典理论可以应用于反倾岩质边坡的裂纹发展情况分析, 进而对现阶段边坡稳定性作出判定。

在一些大型的露天矿边坡、水电工程边坡和交通

工程边坡, 经常可见到反倾层状岩体的倾倒和滑动破坏[3], 对人类工程活动产生严重威胁和经济损失, 如我国金川露天镍矿的西南帮曾发生过大规模倾倒滑坡, 已建的小浪底工程, 受反倾层状岩石边坡稳定问题的影响, 坝址和水工建筑物布局受限, 增加了工程造价和施工进度; 雅砻江上游的锦屏水电站左岸边坡及两河口水电站左岸边坡都存在倾倒变形和破裂现象 [4-6]。

目前, 比较常见的方法是采用极限平衡原理来分析[3]。具体过程是将倾倒地离散为若干倾斜的矩形条块, 根据静力平衡条件分析边坡倾倒的稳定性系数。除此, 也采用基于能量学、非线性数学和数值模型的稳定性评价方法, 例如, 悬臂梁弯曲极限平衡分析模型[7-9], 非连续变形分析 (DDA) [10-12], 尖点突变模型[13]和复杂结构岩石边坡变形破坏的力学模型、破坏机制及判据[14]等。该类边坡的破坏判据包括应

力判据和变形判据 2 种, 其中, 应力判据是基于最大拉应力准则, 提出岩层弯曲折断的应力判据和挠度判据[15]。以往的研究鲜有对此类复杂结构岩石边坡的岩梁采用断裂理论, 因此, 本文以反倾层状岩石边坡中的岩梁为研究对象, 基于断裂理论探讨岩梁的破坏判据, 所得成果对稳定性分析和工程防护措施有重要意义。

2 裂力学理论

对材料和构件在裂纹尖端的应力使用弹塑性理论进行研究, 对裂纹扩展规律进行研究, 建立裂纹开展的判断依据, 考察裂纹对结构自身的影响。裂缝的扩展有两种观点: 一种是能量分析的方法, 这种观点认为产生新裂纹所需要的能量要与裂纹开展释放出来的能量相等。另一种观点认为, 裂纹开展是由于裂纹尖端应力场强度达到了临界值。物体内部细小裂纹引起的应力集中导致了物体的断裂破坏, 在裂纹扩展的过程中会释放一定的势能, 这些势能进而转化为在裂缝扩展过程中克服材料阻力所做的功。这种力为裂纹扩展力, 由于它包括系统各个部分的贡献, 所以裂纹扩展力是一个全局性, 而不是局部性的参数。应力强度是对作用于裂纹尖端的力进行量化, 裂纹的发展情况将由它来决定, 而不是单纯的取决于外力, 这种应力分布是建立在经典线弹性理论基础上的。应力强度因子 K 取决于外荷载, 物体形状以及裂纹长度。所以, 在均匀线弹性介质中的任一种特定形式的裂纹, 裂尖端部应力场的强度由应力强度因子表征。

3 反倾层状岩石边坡的破坏阶段及机制

该类边坡滑塌过程具有自下而上的分级滑动的特征。当水库蓄水时, 在库水位的淘蚀和浸泡作用下, 滑坡前缘首先滑动, 滑坡上部滑体后滑动, 在上下滑坡之间形成岩梁。其滑坡过程可概括为 4 个阶段。

(1) 滑动前坡脚软化阶段: 在河谷下切卸荷和上部岩层重力作用下, 斜坡表层岩体发生弯折、顺坡向的纵张节理进一步展开、贯通。斜坡内节理和裂隙表现为由表到里、由上到下逐渐减小、断续和闭合的特点, 此类斜坡, 坡脚处浅表部岩体的稳定性是控制整个坡体稳定的关键。当库水抬升时, 下部滑体前缘的岩土体在库水位的浸泡下, 强度降低, 特别是泥灰岩和页岩中的泥质成分, 易软化, 沿着纵张的结构面, 其强度迅速降低。(2) 初始滑动阶段: 库水浸泡

后, 坡脚处浅表部岩体的强度降低, 沿着构造节理面开始破坏, 在前缘剪断节理面之间的岩桥, 形成贯通的滑动面。初始变形区, 滑坡开始启动。(3) 下部滑体分级滑动阶段: 由于坡脚处岩体发生滑动, 一方面, 对上部岩体产生牵引作用, 另一方面, 上部岩体失去支撑作用。此时, 滑动面沿弯曲倾倒体内部和平行坡面的纵张节理、裂隙面发展, 形成多级滑动面。斜坡表现为自下而上, 由外向内发展的分级滑动模式。由于岩层中存在相对坚硬的夹层, 强度相对较高, 下部滑坡到该层位会出现滑动的不连续, 而非整体性一次滑动。(4) 上部滑体错落崩滑阶段: 斜坡内的厚层岩石充当了支撑岩梁, 下部滑体首先发生滑动, 致使厚层岩悬空。在短时间内岩梁支撑着上部斜坡的稳定, 由于灰岩内部存在顺坡向的纵张节理面, 上部的松散岩体的重力作用使岩梁内部的节理面被剪断, 形成错落式的崩滑体。

4 建立能量判据

根据能量理论, 当裂纹发生扩展时, 裂纹体内将有两种能量发生变化。其一是裂纹体的位能将降低而释放出部分弹性能来; 另一是由于裂纹扩展形成了新裂纹表面而增加了表面能因而要吸收一部分能量。因此, 裂纹扩展的条件是裂纹体在裂纹扩展过程中能释放出足够的弹性能足以提供增加表面能的需要。此外, 在裂纹扩展过程中还往往伴随着动能的变化, 但是在本文中的讨论只涉及裂纹的缓慢扩展, 因此动能项可以忽略不计。

如图 1 所示的是岩梁具有中心穿透裂纹的模型, 在压应力 σ 和自身重力 G 的作用下, 裂纹发生了扩展。假设裂纹两端沿着原来的裂纹线方向各扩展了长度 Δ , 于是由于裂纹扩展所增加的新表面能就为

$$\Delta R = \Gamma 4B\Delta\alpha \quad (1)$$

其中, $4B\Delta\alpha$ 为裂纹表面积的增量, B 为模型的厚度; Γ 是岩石材料的比表面能。

显然, 表面能是由系统释放出来的弹性能所提供的。设在裂纹扩展过程中岩梁向下偏转了 β , 于是上部岩石压力 σ 和自身重力 G 所做的总功就为

$$W_{\text{总}} = W_{\sigma} + W_G \quad (2)$$

$$W_{\sigma} = \int_0^L \frac{1}{2} \sigma L \sin \beta dx \quad (3)$$

$$W_G = \int_0^{\beta} \frac{1}{2} (G \sin \gamma) L \frac{1}{2\pi} d\gamma \quad (4)$$

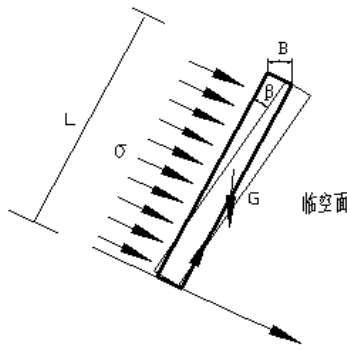


图 1. 岩梁模型受力

$W_{\text{总}}$ 除了提供增加表面能需要外, 还使岩梁的变形能由原来的 U 提高到了 $U + \Delta U$ 。由能量平衡理论就可以得到如下的表达式:

$$-(\Delta U - W_{\text{总}}) = \Delta R \quad (5)$$

上式等号的右边是裂纹扩展过程中表面能的增量, 而等号左边则就是在裂纹扩展过程中系统释放出来的弹性能。当裂纹两端各扩展了 Δ 长度时, 裂纹面积增量为 $\Delta A = 2B\Delta$ 。将能量平衡表达式两边各除以 ΔA , 并取极限, 则可得

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta U - W_{\text{总}}}{\Delta A} \right) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta R}{\Delta A} \right) \quad (6)$$

将 ΔR 的表达式代入上式, 并令

$$G_I = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta U - W_{\text{总}}}{\Delta A} \right) \quad (7)$$

则能量平衡表达式就可以改写成

$$G_I = 2\Gamma \quad (8)$$

这就是裂纹扩展过程中必需满足的能量平衡条件, 也就是根据能量平衡理论建立的断裂判据。GI 就是裂纹扩展过程中系统的弹性能释放率[18-20]。断裂力学中也把它叫做裂纹扩展力。裂纹要继续发展就得满足

$$G_I \geq G_{IC} \quad (9)$$

其中 G_{IC} 是材料固有的力学性能。

5 结语

在库区, 反倾层状岩石边坡的破坏具有自下而上分级滑动特点。下部岩层破坏后, 中间岩梁的稳定性至关重要。岩梁的稳定决定这滑坡是否继续, 岩梁破坏的时间决定着对险情的控制。通过断裂理论, 建立能量判据。能量判据为该类边坡开展预测预报和工程整治提供了理论指导。

References (参考文献)

- [1] 蔡跃, 三谷泰浩, 江琦哲郎等. 反倾层状岩体边坡稳的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2517-2522.
- [2] 张以晨, 仵磊, 沈世伟等. 反倾层状岩质边坡倾倒塌坏力学模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(增1): 0207-0213.
- [3] GOODMAN R E, BRAY J W. Toppling of rock slopes[C]// Proceedings of Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes. New York: [s.n.], 1977: 201-234.
- [4] 邹丽芳, 徐卫亚, 宁宇, 等. 反倾层状岩质边坡倾倒塌坏机制综述[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(5): 25-30.
- [5] 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.
- [6] 左保成, 陈从新, 刘小巍, 等. 反倾岩质边坡破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3 505-3 511.
- [7] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, JEWELL R J. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, 30(2): 75-93.
- [8] 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
- [9] Haifeng Lu, Quansheng Liu, Congxin Chen. Improvement of cantilever beam limit equilibrium model of counter-tilt rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 577-584(Ch).
- [10] 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.
- [11] 孙东亚, 彭一江, 王兴珍. DDA 数值方法在岩质边坡倾倒塌坏分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 39-42.
- [12] 冷先伦, 盛谦, 廖红建, 等. 反倾层状岩质高边坡开挖变形破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增1): 4 468-4 472.
- [13] 刘云鹏, 邓辉, 黄润秋, 等. 反倾软硬互层岩体边坡地震响应的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(3): 30-36.
- [14] 罗红明, 唐辉明, 胡斌, 等. 基于突变理论的反倾层状岩石边坡稳定性研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, (10): 58-60.
- [15] 殷坤龙, 周春梅, 柴波. 三峡库区巫峡段反倾岩石边坡的破坏机制及判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1635-1642.
- [16] 陈红旗, 黄润秋. 反倾层状边坡弯曲折断的应力及挠度判据[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 243-246.
- [17] 苗春波, 何俊. 岩石中断裂力学的研究[J]. 山西建筑, 2014, 40(3): 83-85(Ch).
- [18] 洪起超. 工程断裂力学基础 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1986: 45-46.
- [19] Rybichi E F; Kanninen M F A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack-closure integral 1977
- [20] Krueger R The virtual crack closure technique: history, approach and applications ICASE Report No.2002-10 2002
- [21] Okada H; Kawai H; Araki K A virtual crack closure-integral method (VCCM) to computer the energy release rates and stress intensity factors based on quadratic tetrahedral finite elements 2008(15)