

文章编号: 1000-7598-(2005)增刊-021-04

水及开挖卸荷对岩质边坡稳定性影响分析

汤平, 李刚, 徐卫军

(长江科学院 工程安全与病害防治研究所, 武汉 430010)

摘要: 水及开挖卸荷是影响节理裂隙岩质边坡稳定性的重要因素。分析研究了水对节理裂隙岩质边坡的力学及物理化学作用机理。应用弹塑性力学及断裂力学的相关理论, 分析讨论了裂隙面的压剪起裂破坏机理; 提出了由于开挖卸荷而引起裂纹扩展的作用机理。

关键词: 岩体边坡; 水; 卸荷; 稳定性

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

Influence of water and unloading on rocky slope

TANG Ping, LI Gang, XU Wei-jun

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Water and unloading are important influential factors in fractured rock slope stability. The mechanical and physicochemical action of water on rock slope is researched. Based on elastoplastic mechanics and fracture mechanics theory; the joint growing mechanism of the slope rock under the action of compression and shearing is analyzed. The mechanism of the crack growth and propagation under the action of unloading is put forward.

Key words: rocky slope; water; unloading; stability

1 前言

对于高陡岩质边坡, 其稳定性的影响因素很多。这些影响因素可分为内在因素和外部因素: 内在因素一般有组成边坡的岩石(土)性质、地质构造, 岩体节理裂隙发育程度、结构面产状、结构面的起伏差、结构面的凝聚力 c 及内摩擦角 φ 值大小、地应力、水的作用等; 外部因素通常包括工程荷载条件、振动、人工开挖后产生的应力-应变重新分布、岩体风化情况等。下面就岩体的开挖卸荷及地表水对边坡的影响机理进行分析。

2 水对边坡病害作用

边坡塌落、滑坡滑动等地质灾害的发生, 往往与大气降雨、水库水位变化等引起的坡体地下水渗流场的动态特征和变化规律有着密切的联系。岩质边坡中的地下水压力主要表现在静水压力和动水压

力两方面, 其作用效果使边坡结构体的稳定性降低。当潜在崩滑体(或结构体)相对不透水时, 广义孔隙水压力作用于岩体结构面(潜在破坏面)上, 表现在3个方面: (1) 降低该面的正应力, 减小摩阻力, 进而降低崩滑体的抗滑力; (2) 动水压力沿边坡临空面产生的分量增加了下滑力; (3) 孔隙水压力的“水楔作用”推动了裂隙的扩展进程, 进而破坏岩体, 使边坡发生渐进性破坏。尤其是暴雨、山洪水流和水库回水等渗入坡体时, 地下水位迅速回升, 孔隙水压力随之增加; 而在地下水迅速下降时, 水力梯度则突然增加, 而诱发较大的动水压力。在两种水压力的组合作用下, 对边坡的稳定程度有很大的影响。例如, 三峡工程永久船闸边坡处于饱水状态时安全系数要降低 0.6^[1]。

研究表明^[2], 当有降雨作用时, 随着降雨积水的形成, 裂隙的水压力也增长较快, 当降雨稳定时, 裂隙中的水压力达到最大值, 降雨停止后, 随着裂

隙中地下水流的运动,会在裂隙中产生一定的负压,负压的出现滞后于雨停时刻,在一定时刻,负压达到最大值,之后负压值开始减小,裂隙中的压力恢复到初始未降雨时的情况。另外,从降雨过程来看,由于裂隙开始时刻处于干燥状态,裂隙表面因介质不同其吸附水的能力有所不同,这对于初始阶段压力会产生一定的影响,当裂隙表面湿润后,裂隙中正压值将有所增加,裂隙中的负压值则恰好相反。介质表面吸附水的能力越大,则裂隙中的初始负压也越大。

为使工程设计偏于安全,美国一些工程采用水面达地表的静水压力分布^[3]。这一假定基于以下认识:历时长的降雨使边坡裂隙完全饱水,暂态有效地下水位达到地表。对于高边坡工程,采用这一孔隙压力分布使加固设计过于保守。我国一些边坡工程常将静水压力乘以折减系数来作边坡设计,如漫湾选用折减系数为 0.4;五强溪水电站则采用类似 Hoek 建议图形,但取值较小;三峡工程曾采用折减系数为 0.3,目前采用强排水体系而不考虑暂态孔隙压力。图 1 是不同方法采用的边坡暂态孔隙压力分布^[3],彼此差别极大,且均缺少理论分析及实测数据的支持。由此可见,如何恰当地估计雨季在边坡体内暂态孔隙压力是边坡加固设计的关键问题。

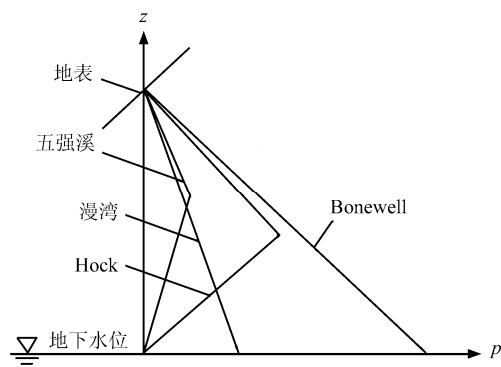


图 1 各工程采用地下水位以上因降雨而形成孔隙水压力分布

Fig.1 Seepage force distribution used in different projects

雨水对边坡岩体除了产生力学作用外(包括静水压的有效应力作用和动水压的冲刷作用),还产生物理与化学作用,包括软化、泥化、膨胀与溶蚀作用,这种作用的结果使岩体性状逐渐恶化,以致发展到使岩体变形、失稳、破坏。

岩石是一种多矿物体,不同岩石所含矿物成分也不相同,因而也决定了其遇水软化膨胀的性态不

同。许多岩体中含有粘土质矿物,这些矿物遇水软化泥化,降低了岩体骨架的结合力,从而表现为各方面的软化性态。物理与化学作用的直接表现为引起裂隙岩体弹性系数(E , c , φ)的降低。

对粘土质岩石进行的不同含水状态下的全过程曲线及流变曲线的实验研究结果表明^[4],岩石的弹性模量 $E(\text{MPa})$ 、单轴抗压强度 $\sigma_c(\text{MPa})$ 与含水率 $W(\%)$ 之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{6\,345.1}{W-1.75} - 1\,167.6 \\ \sigma_c &= 30.36 - 4.93W \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对砂岩浸水软化特性的实验研究表明^[5],砂岩的单轴抗压强度 σ_c 与含水率 W 之间的关系为

$$\sigma_c = 72.27 - 12.12W \quad (2)$$

岩石在水的作用下,强度与变形模量均有不同程度的降低。孔隙水压 p 对弹性模量 E 的影响可表示为

$$E = a - bp \quad (3)$$

式中 a , b 分别为不同的拟合常数。

库水位下降时,边坡会发生快速失稳,究其原因主要是因为水位下降,形成卸荷作用,并且同时导致了地下水位及渗流场的变化,改变了孔隙水压力,从而导致了滑坡的发生。研究计算表明^[6]:因水库水位下降对边坡产生卸荷作用,可导致边坡稳定系数平均下降 6.39%。

3 开挖卸荷对边坡病害作用

对于岩体边坡,由于边坡开挖引起的卸荷对岩体边坡的作用机理与加载作用破坏机理不同。当边坡岩体中的裂隙构造带由压应力占优势转为卸荷作用时,其开裂滑动过程将经历闭合摩擦滑动、压剪起裂,形成分支张型裂纹。新裂纹面顺最大主应力方向不断延伸发展直至位于分支张开型裂纹尖端的微裂纹区互相汇合,导致宏观裂纹的击穿贯通,从而导致裂隙的宏观开裂和滑动。起裂准则为^[7]

$$\tau_d = \tau + f_0 \sigma = \frac{2 - \nu_0}{2K} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{2a'}} \quad (4)$$

式中 τ_d 为剪切驱动力; f_0 为岩体的剪切摩擦系数; K_{Ic} 为岩石的张型断裂韧性; K 为实验常数; $2a'$ 为裂纹宽度; σ 为裂隙面正应力。裂隙面的压剪起裂及分支扩展模型见图 2。

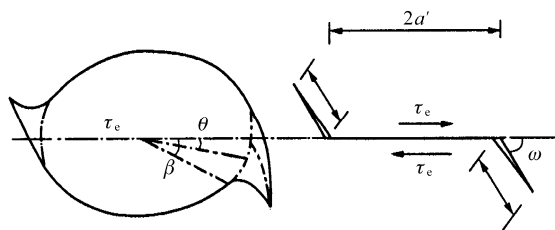


图2 裂隙面的压剪起裂及分支扩展示意图

Fig.2 Joint growth and kinking under compression and shearing

将岩体三轴卸荷至受拉破坏, 得到不同结构面夹角条件下试件的抗拉强度与结构面方向的关系^[8], 见图 3。由图可知, 卸荷岩体的抗拉强度随着结构面方向的变化而变化。夹角较小, 抗拉强度较高, 随着夹角的加大, 抗拉强度明显降低, 当 $\alpha=90^\circ$ 时, 抗拉强度为 0.3 MPa, 仅为未设置结构面岩石抗拉强度的 1/13。这说明对于含有节理、裂隙的岩体, 在卸荷作用下, 其强度具有明显的各向异性。

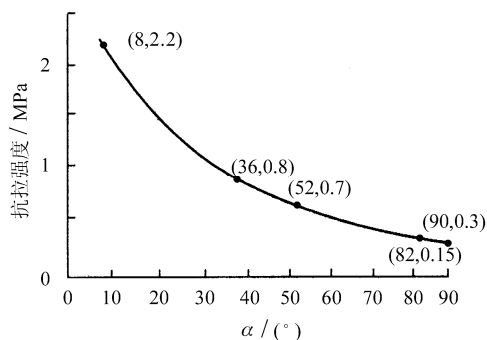


图3 卸荷作用下, 结构面方向与抗拉强度关系

Fig.3 Relationship between structure direction and tensile strength, under unloading

对于顺层岩体边坡, 当边坡开挖时, 破坏了岩层坡角, 使岩层失稳沿原有弱面下滑, 该类滑坡机理简单明了, 但绝大多数边坡的滑坡剪出面是穿过岩层而滑出, 因此, 剪出口岩体开裂及贯通是滑坡产生的关键, 下面从卸荷对裂隙扩展的影响机理进行分析讨论。

在边坡的上部岩体没有开挖时, 见图 4, 相当于给潜在剪出口施加压力, 这时潜在滑出口处岩体中的微裂隙会受压闭合, 其抗剪强度增大。当边坡开挖后, 相当于卸荷, 研究资料表明^[9, 10]: 同类型的岩体在相同的主差应力作用下, 卸荷产生的扩容量比加荷的更大; 卸荷破坏的强度比加荷的更低; 加荷下岩体易呈剪切破坏特征, 而卸荷下岩体常呈张剪复合型破坏特征。

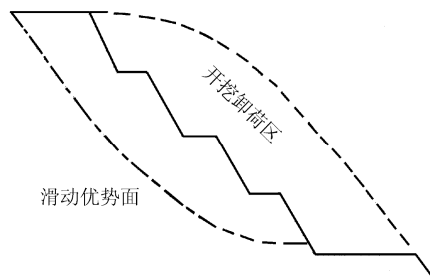


图4 边坡开挖卸荷示意图

Fig.4 Unloading slope

根据断裂力学理论, 由于卸荷而产生张力, 当裂隙尖端的张力强度因子超过岩石的抗拉强度时, 使得节理裂隙张裂扩展, 这时裂隙间的摩擦系数大为减小。根据莫尔-库仑理论:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

因裂隙表面正应力 σ 减小, $\tan \varphi$ 减小, 其直接结果是岩石的抗剪强度大为降低, 这时在潜在滑体的自重应力及振动等附加应力作用下, 岩体裂纹贯通而滑移, 形成滑坡。

由线弹性断裂力学理论知, I-II 复合型 (即张剪型) 裂缝端的应力强度因子, 既有 K_I 又有 K_{II} , K_I 和 K_{II} 的组合情况随裂缝的长度、方位以及受力状态变化而变化。经过对弱风化岩石及微新岩石进行的 I-II 复合型断裂试验得到经验公式如下^[11]:

$$\text{弱风化岩石: } \frac{K_I}{K_{Ic}} + 2.12 \left(\frac{K_{II}}{K_{Ic}} \right) = 1 \quad (6)$$

$$\text{微新岩石: } \frac{K_I}{K_{Ic}} + 1.89 \left(\frac{K_{II}}{K_{Ic}} \right) = 1 \quad (7)$$

上面两式左端小于、等于和大于 1, 分别对应裂缝稳定、临界状态和失稳扩展。从式 (6)、式 (7) 中可明显看到, 由于卸荷下岩体中出现了张剪复合型破坏特征, 使得岩体出现失稳的可能性大为增加。

4 结 语

影响岩质边坡稳定性的因素很多, 如地震、边坡形态、岩体结构等。本文只是从地表水及开挖卸载两个方面的影响因素进行了分析讨论。水及开挖卸载对岩质边坡稳定性的影响程度与边坡岩体的结构构造密切相关, 特别是与边坡岩体中节理裂隙的性质密切相关, 这几个方面的相互耦合关系有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 陈洪凯, 翁其能. 边坡岩体中地下水优化排水机理研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 112—115.
- [2] 孙役, 王恩志, 陈兴华. 降雨条件下的单裂隙非饱和渗流实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(11): 14—17.
- [3] 张有天, 刘中. 降雨过程裂隙网络饱和/非饱和、非恒定渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 104—111.
- [4] 汤平, 张电吉. 降雨对裂隙岩质边坡稳定性影响分析研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2004, 56(3): 30—32.
- [5] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [6] 包太, 刘新荣, 税月. 水位下降卸荷诱发库岸边坡快速失稳机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2004, (5): 7—11.
- [7] 周维垣, 杨若琼, 剡公瑞. 岩体边坡非连续非线性卸荷及流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 210—216.
- [8] 李建林, 孟庆义. 卸荷岩体的各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 338—341.
- [9] 吴刚. 岩体在加、卸荷条件下破坏效应的对比分析[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 13—16.
- [10] 周维垣, 杨若琼, 剡公瑞. 岩体边坡非连续非线性卸荷及流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 210—216.
- [11] 徐平, 夏熙伦. 花岗岩 I - II 复合型断裂试验及断裂数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 62—70.