

水与裂隙对边坡稳定性的影响分析及工程应用

谭桔红¹, 晏鄂川²

(1. 中国地质大学研究生院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 地下水与岩土体之间发生的氧化还原作用, 既改变着岩土体中的矿物成分, 又改变着地下水的化学组分及侵蚀性, 从而影响岩土体的力学特性。将剖面上垂直裂缝深度取为边坡稳定性系数为最小值时的对应深度值来确定裂缝的开裂深度。裂缝与水的相互作用加剧边坡变形并使之滑动。运用岩石边坡平衡破坏的分析计算模型, 对工程实例进行稳定性计算与分析。结果表明, 在边坡稳定性计算中, 考虑裂隙、水以及它们的共同作用能比较合理地评价边坡稳定性状况。

关键词: 边坡; 水; 裂隙; 稳定性计算

中图分类号: P642. 2

文献标识码: A

边坡的稳定问题是岩土工程所要解决的主要问题之一。对于山区高等级公路, 因山岭重丘绵延不断, 为了达到线形要求的平、纵断面标准, 施工中的深开挖、高填方是不可避免的, 这就要求深刻认识这类边坡工程岩体的变形机制, 并采取合理的线路设计和有效的防治措施。对影响边坡稳定性的因素进行分析, 可提高边坡稳定性计算与评价结论的可靠性, 从而提出针对性更强的措施。影响边坡稳定性的因素很多, 如边坡岩体组成与结构、滑动面、抗剪强度、水及裂缝发育状况等。本文主要探讨在稳定性计算中如何合理考虑水、裂隙及其共同作用时对边坡稳定性的影响。

1 水的作用

水对边坡稳定性的影响形式有两种: 地表水的影响主要是表现在对组成边坡的岩体产生侵蚀, 甚至使其失去侧向约束作用或底部的支撑作用, 它还能加速物理风化作用对边坡岩体的破坏作用; 地下水是一种重要的地质营力, 有统计结果显示: 90% 以上的滑坡是由地下水或其渗流作用引起的^[1]。

地下水与岩体的相互作用有包括物理作用(润滑作用、软化和泥化作用), 化学作用(离子交换、溶解作用、水化作用、水解作用、溶蚀作用、氧化还原作用) 以及力学作用(静水压力和动水压力作用)。因此, 地下水既改变着岩(土) 体的物理、化学及力学性质, 也改变着自身的物理、力学性质及化学组分。

1.1 水对岩土体产生的物理作用

润滑作用: 岩土体中的地下水, 在岩土体的不连续边界(如未固结的沉积物及土壤的颗粒表面或坚硬岩石中的裂隙面、节理面和断层面等结构面) 上产生润滑作用, 使不连续面上的摩阻力减小和作用在不连续面上的剪应力效应增强, 其结果是沿不连续面诱发各种形式岩土体的剪切运动。这个过程在边坡受降雨入渗、地下水位升到滑动面以上时表现尤其显著。地下水对岩土体产生的润滑作用使岩土体的内摩擦角减小, 一般可使边坡破坏面的计算强度值减少 $4^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 。

软化和泥化作用: 地下水对岩土体的软化和泥化作用主要表现在对土体和岩体结构面中充填物的物理性状的改变, 结构面中充填物随含水量的变化, 发生由固态向塑态直至液态的弱化效应。一般在断

收稿日期(Received date): 2004- 01- 10; 改回日期(Accepted): 2004- 02- 20。

基金项目(Foundation item): 三峡库区地质灾害专项科研项目([2003] 0402 号)。[Supported by the three gorges key research project of Geological Hazards(20030402).]

作者简介(Biography): 谭桔红(1978-), 女, 硕士研究生。从事岩土体稳定性研究与评价。[T AN Juhong(1978-), Female, Graduate student. Study on the stability of rock-soil. Email: tanjuhong@ 163. com]

层带或破碎岩带易发生泥化现象。软化和泥化使岩土体的力学性能降低、内聚力和摩擦角减小。

1.2 水对岩土体产生的化学作用

地下水对岩土体产生的化学作用主要是改变岩土体的矿物成分,进而影响岩土体的力学性能。

离子交换作用:地下水与岩土体之间的离子交换是由物理力和化学力吸附到土颗粒上的离子和分子与地下水的一种交换过程。能够进行离子交换的物质是粘土矿物,如高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石、氧化铁以及有机物等,主要是因为这些矿物大的比表面上可吸附胶体类物质。地下水与岩土体之间的离子交换作用使得岩土体的结构改变,从而影响岩土体的力学性质。

溶解和溶蚀作用:具有侵蚀性的地下水对可溶性岩石如石灰岩、白云岩、石膏、岩盐以及钾盐等产生溶蚀作用,其结果使岩体产生溶蚀裂隙、孔隙和溶洞等,增大了岩体的空隙率及渗透性。

水化作用:水渗透到岩土体的矿物结晶格架或水分子附着到可溶性岩石的离子上,使岩体的结构发生微观、细观及宏观的改变,减小岩土体的内聚力。自然中的岩石风化作用就是由地下水与岩土体之间的水化作用引起的,还有膨胀土与水作用发生水化作用,使其发生大的体应变。

水解作用:地下水与岩土体(实质上是岩土物质中的离子)之间发生的一种反应。水解作用一方面改变着地下水的 pH 值,另一方面也使岩土体物质发生改变,从而影响岩土体的力学性质。

氧化还原作用:是一种电子从一个原子转移到另一个原子的化学反应。地下水与岩土体之间常发生的氧化作用有:硫化物的氧化过程产生 Fe_2O_3 和 H_2SO_4 ,碳酸盐岩的溶蚀产生 CO_2 。地下水与岩土体之间发生的氧化还原作用,既改变着岩土体中的矿物成分,又改变着地下水的化学组分及侵蚀性,从而影响岩土体的力学特性。

1.3 水对岩土体产生的力学作用

主要以静水压力或动水压力作用对岩土体的力学性质产生影响。前者通过减小岩土体的有效应力而降低岩土体的强度,在裂隙岩体中的静水压力可使裂隙产生进一步的扩容变形;后者对岩土体产生切向的推力而降低岩土体的抗剪切强度。地下水在松散土体、破碎岩体及软弱夹层中运动时,对其施加一体积力,在动水压力的作用下可使岩土体中的细颗粒物产生移动,甚至被携带出岩土体之外,产生潜

蚀而使岩土体破坏,这就是管涌现象。

在岩体裂隙或断层中的地下水对裂隙壁施加两种力,一是垂直于裂隙壁的孔隙静水压力(面力),该力使裂隙产生垂向变形;二是平行于裂隙壁的裂隙动水压力(面力),可裂隙产生切向变形。

此外,岩体中地下水的渗流还会对岩体产生动力压水,同时,水位的升高将产生浮托力。

2 坡顶裂缝影响深度的确定

岩质边坡本身的渗透率很小,雨水入渗量极为有限。如果不考虑裂隙的存在,则降雨对边坡的影响可以忽略,这与实际情况不符。因此,在分析边坡稳定性时,必须重点查清边坡中的裂隙发育状况。

要考虑裂缝对边坡稳定性的影响,必须知道裂缝的开裂深度。但是要准确估计裂缝开裂深度比较困难,因为它与边坡的受力状态、边坡岩体力学性质、地质条件、风化程度、时间等多种因素有关。已有学者从不同角度来讨论这个问题,但是还没有取得普遍性的结果。最近, Fredlund 在其专著《非饱和土土力学》中指出,土质边坡的裂缝开裂深度一般为坡顶到边坡地下水位间距离的 10% ~ 20%。在已有的工程实例计算中,稳定性系数随垂直裂缝深度变化的幅度都 < 10%。因此,在一般的情况下,在计算剖面上将垂直裂缝深度取为边坡稳定性系数为最小值时的对应深度值,不仅在工程应用上是合理的,且由于它引起的误差较小,所以,在工程评价与设计时,一般按照此原则来确定坡顶垂直裂缝的深度^[2-3]。据此,裂缝在坡顶的位置就可以确定,即边坡稳定系数达到最小值时的坡顶裂缝假设位置,就是裂缝在坡顶的开裂位置。当然,在实际工程中,还需与边坡的工程地质条件结合考虑。

3 裂缝与水的共同作用

在进行边坡稳定性计算时,不仅要考虑水、裂缝对边坡的单独作用,还应考虑二者的共同作用。含有硬性非贯通分布裂隙的高边坡岩体(不考虑含有贯通的软弱结构面的情况)的变形,常常是岩体损伤演化的结果,在增加了雨水或地下水的作用时,则在原有损伤演化的基础上叠加了水入渗产生的静、动水压力和水对裂隙端部的侵蚀作用,从而进一步加快损伤发展的速度,导致变形进一步加大。若将雨

水渗入过程视作某类渗流场, 则渗透荷载导致演化加剧, 从而引起损伤场的变化; 而损伤场的变化又进一步引起岩体渗透性的变化, 导致渗流场的变化和渗透荷载的加大, 从而进一步加剧损伤演化及其复杂化。

高润德^[4]等人考虑了坡顶垂直裂缝与水的共同作用对边坡稳定性的影响, 结果表明: 在不考虑裂隙或裂隙中没有雨水入渗的情况下, 边坡的稳定系数随裂缝深度的增加有所下降, 但下降幅度并不明显, 约为 10%。其原因主要是: 当边坡破坏面不切穿裂缝时, 尽管随着坡顶垂直裂缝开裂深度增加, 滑动长度减少, 边坡抗滑力相应减少; 与此同时, 由于滑动土体的体积减少, 下滑力也相应减少, 两者作用的结果是抗滑力和下滑力相互趋于平衡, 导致边坡稳定系数变化不明显。若不考虑边坡裂隙, 雨水入渗仅引起坡体浅表层的孔隙水压力变化, 内部几乎不受降雨的影响。所以, 在边坡稳定性分析中, 若裂缝开裂深度在允许值范围(约为 0.2 倍坡高)之内, 在没有外界因素影响(如降雨), 可以不考虑裂缝对边坡稳定性的影响。

在雨水入渗情况下, 边坡稳定系数随坡顶裂缝的发展下降明显。这是因为在雨水入渗作用下渗流场改变显著。边坡垂直裂缝中充满了水, 水的作用一方面使局部坡体浸水饱和, 降低了岩体的抗剪强度, 增大岩体重度; 另一方面裂隙中的积水产生静水压力, 水在坡中的渗流产生动水压力^[5]。随着裂隙深度的加大, 渗流影响区域逐渐扩大, 其作用大于裂隙的开裂深度。随着时间的推移, 裂隙间湿润前锋的相互交叉使边坡中浅部形成一定深度的含水饱和区, 这些不利因素加剧边坡变形并产生滑动。

4 计算模型

对于岩质边坡的计算模型, 作者认为, 其主要任务是研究各种类型的节理、裂隙在岩体中的展布情况, 应包括三方面的内容: 岩体的结构类型及相关的水力学模型; 其次是用结构面网络模拟来分析岩体中节理、裂隙展布状况, 并求得岩体等效渗透系数, 在此基础上进行稳定性计算。

本文运用 E. Hoek 和 J. W. Bray 所著《岩石边坡工程》提出的岩石边坡平衡破坏的分析计算公式^[6], 对一个实例进行稳定性计算与分析。该公式考虑了坡顶张裂缝在贯通时的水压力, 此时边坡受

力状况如图 1。

边坡安全系数 F 等于总抗滑力与总下滑力之比

$$F = \frac{C * A + (W * \cos \Psi_f - U - V * \sin \Psi_p) * \tan \varphi}{W * \sin \Psi_f + V * \cos \Psi_p}$$

式中 边坡安全系数与 Ψ_f (边坡角)、 Ψ_p (裂隙或断层倾角)、 W (滑块体重量)、 U (滑动面上水压所产生的浮托力)、 V (张裂缝中水压产生的力)、 C 和 φ (滑动面上的抗剪强度参数粘聚力和内摩擦角) 有关, 而 U 和 V 的大小又与 Z_w (张裂缝中充水高度) 有关。

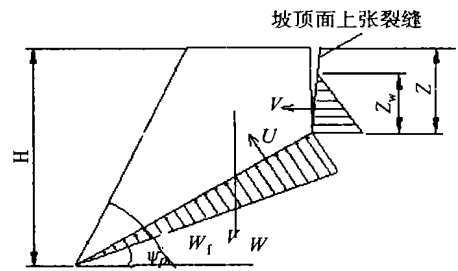


图 1 坡顶面上有裂缝的边坡受力图

Fig. 1 Forces on the slope with fissures on the slope surface

5 实例计算

狮子包边坡位于沿江路铜盆溪西侧, 长 368 m, 高度 10~50 m, 坡体绝大部分近于直立, 边坡走向近东西、倾向为 350°、坡角 70°~86°。边坡区地层岩体较简单, 垂向上分为: 耕植层、残坡积层、三叠系中统巴东组中厚层灰岩 (T_2b^{3-5})、泥质灰岩 (T_2b^{3-3}) 以及强风化灰岩 (T_2b^{3-4}), 边坡类型为岩质逆向坡。边坡岩体节理发育, 主要有三组: 一组为倾向近北 (350°~15°)、倾角 64°~80°的基本平行于陡立坡面的张性节理或裂隙; 第二组为倾向近东 (85°~103°)、倾角 78°~89°的近于垂直陡立边坡坡面节理裂隙; 第三组为倾向近西 (260°~290°)、倾角 72°~84°的近于垂直陡立边坡坡面的节理或裂隙。

运用上述原理, 对狮子包边坡的典型剖面进行稳定性计算, 其中考虑了水、裂隙以及两者对边坡稳定性影响共同作用。在计算过程中根据工程特点考虑了 5 种工况: (1) 天然状况; (2) 饱水状况; (3) 饱水+1/3 裂隙充水; (4) 饱水+1/2 裂隙充水; (5) 叠加 VI 度地震。天然状况计算参数如表 1, 其他工况

考虑到水对岩体的软化作用, 根据不同岩性抗剪强度参数适当的降低。裂缝深度按照使边坡稳定系数达到最小值这一原则来确定。在稳定性分析中, 垂直裂缝对边坡稳定性的影响的假设条件: (1) 裂缝区的土体不存在抗剪强度; (2) 裂缝区的滑动面为裂缝线加岩体破裂面组成, 其裂缝张拉深度由最小化原则确定; (3) 裂缝区的水按作用于垂直面上的静水压力计算。计算结果如表 2。

| 表 1 岩体力学计算参数 | | | |
|--|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| Table 1 The mechanics calculation parameter of rock-mass | | | |
| 指标 | 泥质灰岩 (T_2b^{3-3}) | 泥灰岩 (T_2b^{3-4}) | 灰岩 (T_2b^{3-5}) |
| 密度 ρ (g/cm ³) | 2.66 | 2.26 | 2.69 |
| 变形模量 E_m (GPa) | 8.6 | 2.2 | 11.2 |
| 泊松比 μ | 0.32 | 0.37 | 0.37 |
| 单轴抗压强度 σ_{mc} (MPa) | 0.6 | 0.009 | 12.4 |
| 单轴抗拉强度 σ_{mt} (MPa) | 0.04 | 0.0005 | 1.3 |
| 剪切强度 c_m (MPa) | 0.9 | 0.17 | 3.5 |
| Φ_m (°) | 28 | 20 | 42 |

表 2 典型剖面稳定性计算结果

Table 2 The results of the stability calculating of the typical profile

| 名 称 | | 稳 定 性 系 数 | | | | |
|---------------|------|-----------|-------|------------|------------|----------|
| 滑动面 | | 天然状态无水 | 饱水状态 | 暴雨加 | 暴雨加 | 天然 |
| | | | | 1/3 裂隙高度充水 | 1/2 裂隙高度充水 | 加 VI 度地震 |
| 典型剖面滑 动面编号 | A 滑面 | 1.249 | 1.245 | 1.181 | 1.131 | 1.107 |
| | B 滑面 | 1.217 | 1.214 | 1.124 | 1.083 | 1.054 |
| | C 滑面 | 1.183 | 1.180 | 1.168 | 1.100 | 1.008 |

从计算结果可知, 该边坡的稳定性系数较低, 小于一级边坡所要求的 1.35 的安全系数, 在不同工况条件下稳定性变化较大。在现今天然无水状态和暴雨饱水状态下, 边坡处于基本稳定状态; 在 1/3 或 1/2 裂隙高度充水的暴雨条件下处于欠稳定状态; 在天然状况叠加烈度 VI 度地震状态下, 边坡稳定性降低较大, 基本处于不稳定状态。

6 结 论

边坡稳定性分析中系统考虑裂隙和水的作用状况, 运用《岩石边坡工程》中的边坡平衡破坏的分析计算模式, 可以有效地解决工程问题。对三峡库区狮子包边坡的实例表明: 在边坡稳定性计算与分析中, 考虑裂隙、水以及它们的共同作用能合理的评价工程状况。

参考文献(References):

[1] Yan Tongzhen. Hydrogeology and environmental preservation[M].

China University of Geosciences Press, 1994. [晏同珍. 水文工程地质与环境保护[M]. 中国地质大学出版社, 1994.]

[2] Yao Hailin, Zheng Shaohu, Chen Shouyi. Analysis on the stability of expansive soil slope considering the influences of the fissures and precipitation[J]. *Journal of Geological Engineering*, 2001, **23**(5): 606~ 609. [姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 606~ 609.]

[3] Feng Dingxiang, Wu Jiaxiu, Ge Xirun. Discussion on a few problems of analysis on the slope stability[J]. *Journal of Geological Engineering*, 1990, **12**(3): 1~ 9. [丰定祥, 吴家秀, 葛修润. 边坡稳定性分析中几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(3): 1~ 9.]

[4] Gao Runde, Peng Liangqiang, Wang Zhao. Analysis on the stability of non-saturated soil slope considering the precipitation[J]. *Ren-Min Changjiang*, 2001, **32**(11): 25~ 27. [高润德, 彭良泉, 王钊. 雨水入渗作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. 人民长江, 2001, **32**(11): 25~ 27.]

[5] Qiao Jianping, Zhao Yu, Chen Yongbo. Studying method of typical landslide[J]. 2003, **21**(3): 369~ 372. [乔建平, 赵宇, 陈永波. 典型滑坡的研究方法[J]. 山地学报. 2003, **21**(3): 369~ 372.]

[6] Hoek E., Bray J. W. Rock Slope Engineering[M]. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1977.

Influence and Implication of Water and Fissure on Slope Stability

TAN Juhong¹, YAN E'chuan²

(1. Graduate faculty of China University of Geosciences, Wuhan, 430074;

2. Engineering faculty of China university of Geosciences, Wuhan, 433074)

Abstract: Many factors influence the slope stability, such as lityologic characters, rock structure, sliding surface, shear strength, water, fissures and so on, among which the influence of the water, fissures and their co-action is difficult to determine. For this purpose, this paper mainly discusses how to consider the influences of the water, the fissures and their co-action on the slope stability when slope stability is calculated. The interaction between the groundwater and the rock is very complex, mainly including physical action, chemical action and mechanical action, so the groundwater changes not only the physical, chemical and mechanical characteristic of the rock, but also the characteristic of itself. If the influence of the fissures isn't considered, the influence of the water on the slope may be ignored, which isn't accordance with the fact. According to the principle that the fissure vertical depth is the one when the slope stability coefficient reaches the minimum, the fissure open depth is determined when the infuence of the fissures on the slope stability is considered. The interaction between water and fissures leads to the change of damaging field and seepage field, which accelerates the slope deformation and sliding. Considering the influence of water and fissure, the stability of a basic case is calculated according to the formula by E. Hoek and J. W. Bray. Results show that water and fissure should be considered in stability calculation.

Key words: slope; water; fissure; stability calculating.