

层状岩质边坡地下水分布特征及其控稳作用

陈志坚, 吉 林

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 :在阐述层状岩质边坡岩性组合分类和地下水分布特征的基础上,介绍了考虑残坡积层孔隙水、包气带裂隙水和裂隙潜水控稳作用的边坡稳定性计算方法.根据小浪底水利枢纽工程若干边坡的有限元计算,结果表明:考虑包气带裂隙水作用时,边坡安全系数可降低 5% ~ 15%;当库水位骤降时,裂隙潜水对边坡稳定性也有重要影响.

关键词 :层状岩体;边坡;稳定性;裂隙潜水;包气带裂隙水;有限元

中图分类号 :P641.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2001)01-0107-04

层状岩质边坡是指由层状岩体组成的边坡,具有层状构造的沉积岩占陆地面积的 2/3,许多变质岩也具有层状构造特征.所以,在人类工程活动中将遇到大量的层状岩质边坡稳定问题.调查研究表明,边坡失稳大多出现在雨季或暴雨之后,可见降雨入渗及地下水的作用对边坡稳定具有重要意义.然而,以往的研究仅侧重于考虑饱和地下水对边坡稳定的影响.但实践表明,层状岩质边坡由于其固有的岩性组合特征,决定了其地下水分布具有如下特征:地下水位往往较低,包气带厚度较大,并分布有多个滞水层,每个滞水层上的地下水呈网络状分布,不饱和的包气带裂隙水也可对边坡稳定产生较大的影响.

1 岩性组合及结构面分布特征

层状岩体通常呈软、硬相间互层,常见的硬岩层有石灰岩和碎屑岩等脆性岩层,软岩则指粘土岩等塑性岩层.层状岩质边坡的稳定性主要取决于岩体中软弱结构面(断层、软弱夹层和裂隙)的分布和组合特征及其性状,它们构成了边坡稳定的边界条件,并控制了地下水的分布特征.层状岩质边坡中,稳定性较差的主要是岩层倾向坡外且倾角小于坡角的顺向坡.限于篇幅,本文侧重阐述这类边坡中软弱结构面和地下水的分布特征及其控稳作用.

层状岩质边坡中的软弱结构面主要有软弱(泥化)夹层、层面、断层和裂隙.其中裂隙可分为层间裂隙和切层裂隙两种.层间裂隙的发育受控于软岩层和层面,它们间距小、数量多,破坏了岩体的完整性,增大了岩体的透水性,但其延伸和切割深度也小.切层裂隙的分布则不受软岩和层面的限制,它们延伸长,切割深,往往构成边坡滑动破坏的后缘拉裂面和侧向切割面,并具有较强的导水和储水作用.但它们间距大、数量少,分布也具有规律性,在岩体数值分析中必须建立专门的裂隙单元给予模拟.

层状岩体中软弱夹层、裂隙等结构面的分布规律和组合特征在很大程度上受控于其岩性组合特征.层状岩体按岩性组合特征一般可分为 4 类:(a)互层状薄层软、硬岩组合体,其岩层单层厚度小,软岩所占的比例高,且易在褶皱和差异卸荷作用下因层间错动而形成剪切光面,岩体中的裂隙多表现为闭合隐裂隙,所以岩体透水性差,水力联系弱,具有较好的阻水、滞水作用;(b)互层状中厚层、厚层软、硬岩组合体,一般是几层硬岩与几层软岩呈相间互层,软岩层对裂隙和地下水的分布具有限制作用,但切层裂隙破坏了其完整性.通常硬岩层中裂隙的间距为其厚度的 0.5 ~ 2 倍,裂隙与层面的夹角大于 70°,软岩层中裂隙的间距较小,但多呈闭合的隐裂隙,而且倾角较硬岩中的小,对于泥质含量较高的软岩,其裂隙的倾角可比硬岩中的小 10° ~ 20°,软、硬岩中裂隙的这种“转层”现象,往往导致反向坡稳定问题,其滑裂面呈台阶状;(c)厚层、中厚层硬岩夹薄层软岩组合体,岩体中裂隙的发育不受软岩限制,裂隙的间距和切割深度较大、延伸较长,岩体透水性强,水

收稿日期:1999-11-02

基金项目:国家“八五”科技攻关项目(208-03-0X3-2-5)

作者简介:陈志坚(1963—),男,福建福清人,博士,副教授,主要从事岩土体稳定性研究.

力联系密切 (d) 厚层、中厚层软岩夹薄层硬岩组合体, 岩体中的主要结构面是层面和闭合隐裂隙, 结构面优势作用不明显, 岩体透水性差, 水力联系弱.

2 层状岩质边坡中地下水的分布特征

层状岩质边坡中的地下水主要靠大气降水入渗补给. 在其坡顶和山坡上往往分布有一定厚度的残坡积层, 它们起着滞水和临时性的储水作用, 所以在残坡积层中分布有间歇性的孔隙潜水. 在降雨期间及雨后的一段时间内, 残坡积层中的间歇性孔隙水将不断下渗补给裂隙水. 若基岩面以下一定深度内的岩体由软岩层组成, 则孔隙水在基岩面以上富集并沿基岩面向坡外排泄, 只有在切层裂隙和断层分布处, 孔隙水才继续下渗补给裂隙水. 显然, 基岩面由软岩组成时 (图 1(a)), 裂隙水补给条件差, 其分布在很大程度上受控于断层和切层裂隙的分布. 若基岩面由裂隙发育的硬岩组成 (图 1(b)), 则残坡积层中的孔隙水主要以下渗为主, 裂隙水补给条件好. 裂隙水在下渗过程中, 当遇到以软岩为主的岩层时, 则在岩层顶面富集, 并沿层面向坡外排泄, 只有在切层裂隙和断层分布处才继续下渗. 显然, 层状岩质边坡中裂隙水的分布往往呈现多层网络状 (尤其是降雨期间); 残坡积层中的孔隙水分布较均匀, 水力联系强, 在降雨期间其饱和度; 以软岩为主的岩层

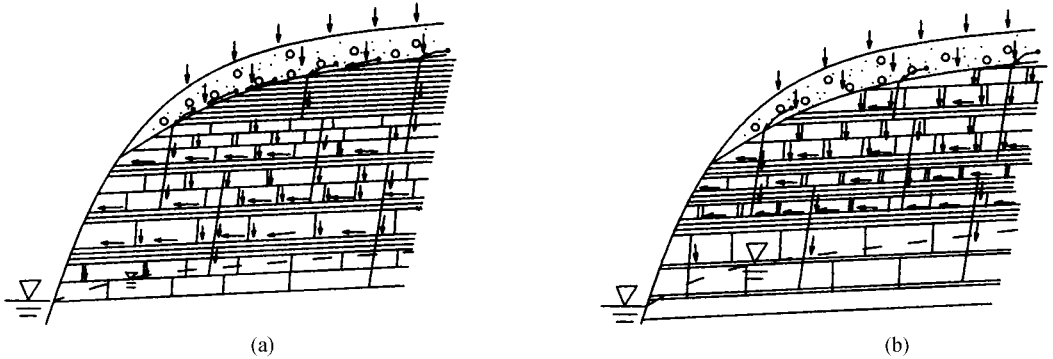


图 1 层状岩质边坡地下水分布示意图

Fig.1 Sketch of distribution of underground water in layered rock slope

中, 裂隙水的分布较严格地受控于断层和切层裂隙, 呈稀疏的网络状并以下渗为主; 以硬岩为主的岩层中, 岩层上部地下水沿裂隙下渗, 而岩层的下部, 地下水受下伏软岩阻隔而富集, 层间裂隙和切层裂隙的饱和度均较高, 地下水呈密集的网络流并沿层面向坡外排泄. 所以, 从总体上看, 层状岩质边坡的包气带中分布有多层呈网络状分布的上层滞水, 边坡的顶 (残坡积层) 底 (地下水位以下) 部饱和度高, 地下水位埋深大 (往往仅略高于坡脚高程或地表水位), 水力坡降小.

综上所述, 层状岩质边坡的岩性组合和分布以及结构面的分布特征均对地下水的分布以及裂隙水对边坡稳定性的影响起主导作用. 对于互层频繁的层状岩质边坡, 按岩性组合特征对岩体进行分层分类并分别考虑地下水对边坡稳定性的影响是十分必要的.

3 考虑裂隙水作用的边坡稳定性分析

通常层状岩质边坡中的地下水可分为残坡积层中的孔隙水、包气带裂隙水和裂隙潜水 3 种类型, 其分布特征以及对边坡稳定性的影响各不相同.

3.1 残坡积层孔隙水对稳定性的影响

残坡积层具有滞水和临时性的储水作用, 其中的孔隙水是下伏基岩裂隙水的主要补给源. 降雨期间其径流作用强烈. 残坡积层的组成、厚度以及顶、底面形态和坡度对边坡地下水的分布以及地下水对边坡稳定性的影响程度均有较大影响. 残坡积层中的孔隙水主要以下渗为主, 其溶滤作用导致粘粒在以软岩为主的基岩面上富集 (基岩面由裂隙发育的硬岩组成时, 粘粒成分将被带入裂隙), 并对软岩进行软化泥化作用. 当基岩面坡度较大时, 容易导致残坡积层在自重和动、静水压力作用下出现失稳破坏. 所以, 在评价残坡积层稳定性时, 除了考虑其物理力学性质和基岩面形态外, 还应重视基岩面的岩性特征. 此外, 在进行边坡岩体稳定有限元分析时, 由于残坡积层的厚度较薄, 往往不容易得到正确的模拟计算和重视, 故应在定性评价的基础上, 采

用土力学的有关方法进行计算评价。

3.2 库水位骤降时裂隙潜水的控稳作用

大多数层状岩质边坡地下水位较低,水力坡降小,裂隙潜水的控稳作用主要表现为对滑动面抗剪参数的弱化及其产生的动静水压力。但是当坡外地表水位(如库水)骤降时,或者对于经喷锚等防护处理的边坡在暴雨期间和排水系统失效时,裂隙潜水位对边坡稳定性的影响将很突出。在库水位骤降之前,图 2 所示 GB 线以下岩体中的地下水,由于有库水与之平衡,所以由其产生的渗透力对边坡稳定性的影响不明显。对边坡稳定影响较大的地下水仅是 GB 线以上的裂隙水,它不产生抗滑力,但能形成下滑力。也就是说,在计算抗滑力和滑动力时,GB 线以下的岩体均用浮重度,浸润线以上的岩体均用湿重度,而 GB 线以上、浸润线以下的岩体,在计算抗滑力时用浮重度,在计算滑动力时则用饱和重度。在库水位骤降后,虽然抗滑力基本上没有什么变化,但由于地下水未能及时排出,所以骤降前、后库水位高程之间的地下水由于失去库水与之平衡而形成下滑力。显然,若库水位骤降幅度大,排水系统未能及时有效地排出地下水,则边坡稳定性将大幅度降低。暴雨期间,对于排水不畅的边坡(尤其是经喷锚等防护处理后),地下水位壅高较大,裂隙潜水对其稳定性也有类似于库水位骤降时的重要影响,其分析计算方法相似。

3.3 考虑包气带水作用的稳定性分析

降雨期间,地表水不断补给地下水,包气带中地下水径流强烈,它不仅影响包气带岩体的物理力学性质,也对边坡岩体产生复杂的动、静水压力。由于层状岩质边坡包气带中地下水的分布不均匀、非饱和,并呈多层滞水,所以包气带裂隙水对边坡整体应力场的影响不大,在边坡有限元数值分析中通常也不考虑其对边坡应力场的影响,但是,包气带裂隙水对边坡稳定的影响是不容忽视的。在边坡岩体中,陡倾角断层和切层裂隙的切割深度不受软岩限制,它们既构成边坡稳定的切割面,又是主要的导水和储水构造,所以在边坡稳定性计算中,以作用于后缘切割面上的面力考虑包气带裂隙水对边坡稳定的影响是必要的,也是可行的。

如上所述,包气带裂隙水的分布呈现多层滞水形式,各滞水层的分布和水力联系在很大程度上受软岩和岩性组合形式控制,当软岩厚度较大以及岩性组合体中软岩所占比例较高时,上下滞水层之间的水力联系弱,水力损失大。所以,在边坡稳定计算中,必须根据岩性组合特征分层考虑包气带裂隙水对边坡稳定的影响(如图 3 所示),分层应以野外调查和试验研究为依据,侧重考虑岩性组合特征、结构面分布特征和滞水层的分布(降雨期间地下水的渗出是其重要表征),边坡稳定性可由下式计算:

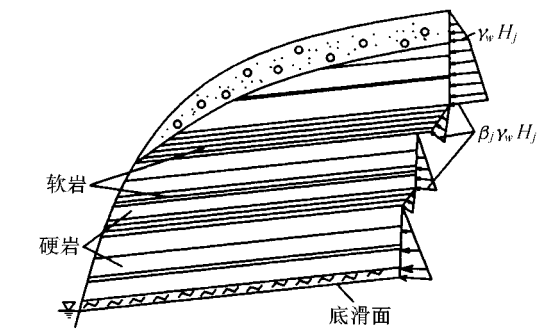


图 3 考虑包气带水作用的边坡稳定计算示意图
Fig.3 Sketch of slope stability caculation in consideration of water in aerated zone

β_j ——各岩组的水力折减系数,可根据各岩组的渗流特征按文献[3]取值。

式中分子为各滑动面单元上的阻滑力矢在整体滑动方向上投影的总和,滑动面和整体滑动方向 r 由干扰能量法确定,分母为各滑动面单元上的滑动力矢在方向 r 上投影的总和。

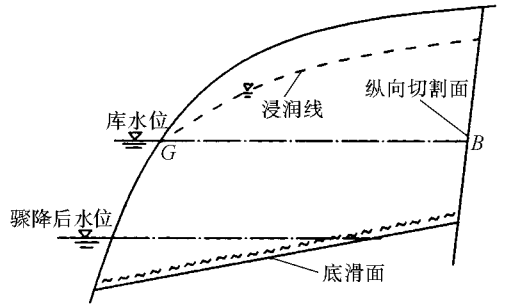


图 2 库水位骤降时边坡稳定计算示意图
Fig.2 Sketch of slope stability calculation for sudden reservoir stage fall

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^{Ne} (c - f\sigma_n) \sqrt{l_i^2 + m_i^2} A_i}{\sum_{i=1}^{Ne} (l_i \tau_{z'x'} + m_i \tau_{z'y'}) A_i + \sum_{j=1}^n (\frac{1}{2} \beta_j \gamma_w H_j L \cos \alpha)} \quad (1)$$

式中: x', y', z' ——单元局部坐标; z' ——该滑动面单元的外法线方向; l_i, m_i ——整体滑动方向 r 与单元局部坐标系夹角的方向余弦; f, c ——滑动面抗剪参数; σ_n ——滑动面单元上的正压力(以拉为正); A_i ——各滑动面单元面积; Ne ——滑动面单元总数; L ——后缘切割面长度; γ_w ——水的重度; n ——滑体内按岩性组合特征划分的岩组层数,或者为后缘面高度除以切层裂隙切割深度后取整加 1; H_j ——各岩组的厚度或切层裂隙的切割深度; α ——后缘面法线与 r 的夹角;

根据对小浪底水利枢纽若干层状岩质边坡的三维有限元计算,结果表明:在水库蓄水前,若考虑包气带裂隙水的上述影响,则边坡的稳定安全系数约降低 5% ~ 15%;在水库正常蓄水后,当库水位骤降 10 m,而坡内地下水排水不畅时(如排水系统失效或因库水浸泡和淤积使边坡浅表层透水性降低),边坡的稳定安全系数可降低 10% ~ 20%。

参考文献:

- [1] 卓家寿. 非线性固体力学基础[M]. 北京: 水利水电出版社, 1996. 46 ~ 53.
- [2] 陈志坚. 样本单元法及层状岩质边坡稳定性评价[D][学位论文]. 南京: 河海大学, 1996.
- [3] SD 134—84 水工隧洞设计规范[S].

Distribution Character and Stability Controlling Effect of Underground Water in Layered Rock Slope

CHEN Zhi-jian, JI Lin

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract On the basis of the combination and classification of the lithological character and the feature of underground water distribution, a slope stability calculation method is introduced, which includes the effect of pore water in the eluvial slope, fissure water in the aerated zone and fissure phreatic water. The finite element calculation for many slopes of Xiaolangdi Multipurpose Dam Project proves that the safety factor will reduce by 5% ~ 15% when fissure water in the aerated zone is considered and that fissure phreatic water has a large effect on the slope stability when the reservoir water level falls suddenly.

Key words layered rock; slope; stability; fissure phreatic water; fissure water in aerated zone; finite element

欢迎订阅

全国水利系统优秀期刊 江苏省优秀期刊

欢迎投稿

水利水电科技进展

新颖 实用 快捷



(也可直接汇款至编辑部订阅,
另加 6.00 元邮寄费)

双月刊 A4 开本 彩色封面 64 页 2001 年全年定价 30.00 元 全国各地邮局均可订阅

国际标准刊号: ISSN 1006—7647

国内统一刊号: CN 32—1439/TV

国外发行代号: DK 32003

(中国出版对外贸易总公司)

国内邮发代号: 28—244

编辑部地址: 210098 南京市西康路 1 号

联系电话: (025) 3713777—50335

电子信箱: kkb@hhu.edu.cn

银行账号: 南京工行宁海路分理处

02114249—0102459