

水库蓄水前后库岸稳定性研究方法概述

高明忠¹, 谢和平², 周宏伟¹

(1. 中国矿业大学北京校区力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 简介形成库岸滑坡失稳的影响因素, 概述现有的库岸稳定研究方法, 包括实验方法、计算方法和统计方法, 给出了国内外库岸稳定研究方法的分类, 并进一步讨论了各种方法的适用范围和条件, 以及库岸稳定研究方法的发展趋势。

关键词: 库岸; 稳定性分析; 堆积体; 有限元; 综述

中图分类号: TV697.3+3 文献标识码: A 文章编号: 1006-764X(2004)07-0093-04

水库中影响库岸失稳的主要因素包括地质构造、地应力、岩性、结构面、边坡坡角、地震、植被、水文地质条件、水库水位骤降以及人类工程活动等, 就目前已有的资料来看, 水对库岸稳定性的影响往往占主导地位, 水的入渗一方面会降低岩体力学参数, 一方面会改变原有的应力场, 从而改变工程地质渗流场。

1 基于极限平衡理论的条分法

条分法有 3 条基本计算原则: 第一, 安全系数 F 是将土的抗剪强度指标降低为 c'/F 和 $\tan\varphi'/F$, 则土体沿着此滑动面处处达到极限平衡; 第二, 满足 Mohr-Coulomb 准则; 第三, 静力平衡条件。虽然条分法人为假定的条间作用力并不代表斜坡真实的应力状态, 但条分法计算简单, 发展历史较长, 就稳定性而言, 其结果已能满足实际需要, 尤其对土坡是如此。各种条分法的对比说明, 在参数相同的情况下, 采用不同的计算假设, 其结果差别不大^[1~3], 误差主要来源于参数的取值。这也说明条分法的发展已相当成熟。

2 岩体的 RMR-SMR 分类及稳定性评价方法

1985 年, 西班牙的 Romana 等将 RMR^[4,5]与边坡岩体的节理产状及边坡的破坏模式结合起来, 给出滑动或倾倒不同破坏模式下节理产状的修正评分方法, 同时还考虑了开挖施工方法对 RMR 的影响, 提出了边坡岩体的分类系统——SMR 系统。 F_{SMR} 的确定方法如下式^[6]:

$$F_{SMR} = F_{RMR} - (F_1 F_2 F_3) + F_4 \tag{1}$$

式中: F_1 为结构面走向与坡面走向间角距关系的修正系数; F_2 为节理倾角的修正系数; F_3 为坡面倾角与结构面倾角关系的修正系数; F_4 为边坡开挖方法的影响调整参数。上述各种参数的具体取值见文献[4]。为消除各项分值的急剧变化, 一般采用内插法求得 F_1, F_2, F_3 。Romana 根据边坡岩体的 F_{SMR} 值将边坡分成五级(表 1)^[4]。前不久, 我国对漫湾、李家峡、二滩等 40 余个边坡工程进行了 SMR 分类应用的评价, 取得了一系列的经验^[7]。

表 1 SMR 评价边坡稳定性的分级

类别	F_{SMR} 值	岩体特征	稳定性	破坏模式	加固方法
I	81 ~ 100	很好	极稳定	无	无
II	61 ~ 80	好	稳定	掉块	局部加固
III	41 ~ 60	中等	部分稳定	小规模的面或楔体	滑动系数加固
IV	21 ~ 40	差	不稳定	大规模的平面或楔体	大规模加固
V	0 ~ 20	很差	极不稳定	平面滑动类似土体滑坡	开挖

3 运动学法稳定性分析

a. 天然状态下滑坡堆积体稳定性分析^[8]。王兰生、董孝壁利用运动参数反推公式, 得到发生滑坡时的最大滑速为

$$V_{max} = \sqrt{2gH(1 - \tan\varphi_d / \tan(\varphi_d/2 + \alpha/2))} \tag{2}$$

式中: α 为滑面平均坡度(滑坡后缘与剪出口连线同水平面之夹角); H 为滑坡在垂直方向上的落距; φ_d 为动摩擦角(滑体后缘点与滑坡趾尖的连线同水平面之夹角)。高速滑坡堆积体稳定性系数 K 可由下

基金项目: 国家 973 资助项目(2002CB412707); 紫坪铺水利枢纽工程蓄水后库岸整体稳定性监控与安全性评价资助项目(CZC-2003-056)
作者简介: 高明忠(1980—), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 从事库岸稳定研究。

式计算：

$$K = 1.171 + 0.363(V_{\max}/\varphi_d) \tag{3}$$

b. 水库蓄水后滑坡堆积体的稳定情况预测及分析^[8]. 蓄水后稳定性安全系数的递减值 ΔK 可采用成都理工大学刘汉超提出的经验公式进行计算：

$$\Delta K = \gamma \Delta H \tag{4}$$

式中 ΔH 为库(河)水位与滑坡体剪出口高程差, γ 为经验系数. 根据刘汉超等对三峡库区十几个大型滑坡调查与验算得出, $\gamma = 0.001\,00 \sim 0.007\,25$.

4 弹塑性块体单元法

块体单元法^[9,10]以块体形心处的刚体位移作为基本未知量, 即用分片的刚体位移模式逼近实际位移场. 在块体单元之间设“缝”单元, 反映结构的弹塑性. 根据虚功原理求出各块体形心处的刚体位移后, 由缝单元两侧块体的相对位移确定缝的变形和应力.

坝体失稳的评判准则为: ①关键点位移发生异常改变, 即当材料强度改变 K 倍时, 该结点的水平位移 u 与 K 的关系曲线产生突变, 则此时的 K 为 K_c ; ②屈服区连通, 当材料强度改变 K 倍时, 基础内的屈服区连通, 形成一个滑移通道, 则此时的 K 为 K_c . 具体算法已编制成三维边坡稳定分析的计算程序 EMU-3D^[9].

块体单元法既具有刚体极限平衡法的特点, 又具有有限元方法的优点, 而且克服了位移有限元应力不连续的缺点, 提高了应力精度, 使稳定安全系数的计算更为可靠. 可以方便且精确地模拟各种复杂的结构面, 得到精度较高的位移和应力成果. 根据弹塑性块体元的成果, 同时采用位移变化率和屈服区连通的失稳判据确定抗滑稳定的强度储备安全系数, 可自动找出最危险滑移面. 根据位移突变失稳判据, 可得到稳定安全系数的变化范围, 其上限与屈服区连通失稳判据求得的安全系数接近, 选用较大的容许安全系数. 因此, 块体单元法特别适用于具有软弱结构面的岩体稳定分析.

5 三维上限解分析方法

极限平衡法是工程实践中广泛应用于求解安全系数的方法, 但是由于这一方法对静力平衡方程中的多余未知物理量采用引入假定的方法来求解安全系数, 其理论基础受到一定的损害^[11]. 而上限解方法恰好弥补了这一缺点, 三维上限解分析方法是二维的 Sarma 法在三维条件下的扩展^[15]. 对于一个处于极限状态的边坡(图 1)^[13], 假定土体里存在一个塑性区 Ω^* , 塑性区里各点达到屈服且服从 Mohr-Coulomb 破坏准则, 在这一塑性区和边界上如果由于

某一外荷载增量导致一个塑性应变速率 ϵ_{ij}^* , 那么可通过塑性力学中的上限定理求解相应这一塑性变形模式的外荷载 T^* , 即

$$\int_{\Omega^*} \sigma_{ij}^* \epsilon_{ij}^* dv + \int_{\Gamma^*} dD_s^* = WV^* + T^* V^* \tag{5}$$

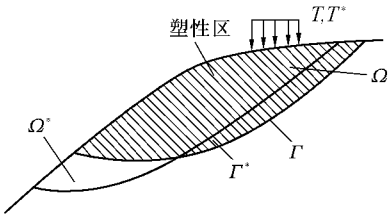


图 1 二维塑性力学上限解示意图

上限定理指出, 相应真实塑性区 Ω^* 的外荷 T 一定比 T^* 小或相等. 因此, 极限分析上限解就是在许多可能的滑动机构 Ω^* 中寻找一个使 T^* 最小的临界滑动机构. 式(5)中 V^* 是外荷载增量引起的相应塑性位移速率. W 是塑性区的体积力. 式(5)的左边两项分别是产生于破坏体 Ω^* 内和沿滑裂面 Γ^* 的内部耗散能.

在三维情况下, 将滑体剖分成一系列具有倾斜侧面的条块(图 2a、b). 图 2c 表示一形状为六面体的条块. 底面 $ABCD$ 是滑面的一部分, $EFGH$ 是边坡表面的一部分. $ABFE$ 和 $DCGH$ 分别为前后表面即行与

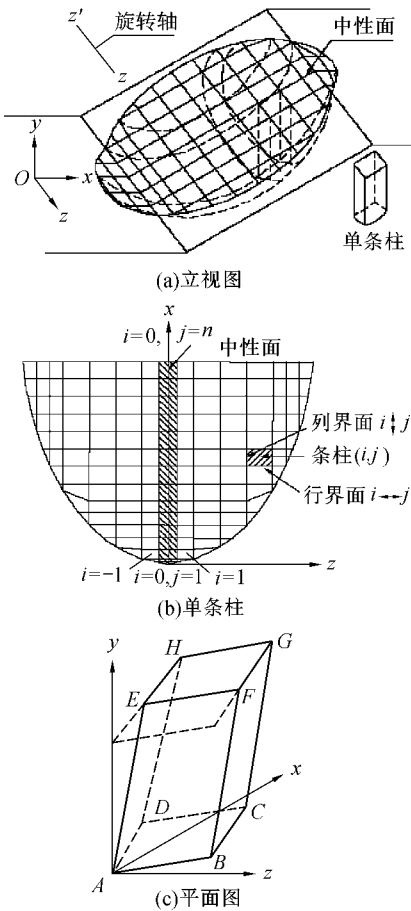


图 2 三维滑体离散图

行的界面,以下简称行界面,用符号 $\leftrightarrow$ 代表,它们垂直于 xOy 面。左右侧面 $ADHE$ 和 $BCGF$ 垂直于 yOz 平面,用符号 $\downarrow$ 代表,简称列界面。同时,定义 $c'_e = c'/F$ 和 $\tan\varphi'_e = \tan\varphi'/F$, F 为安全系数。则式(5)可近似表达为^[13]

$$\sum D_{i\leftrightarrow j,e}^* + \sum D_{i\downarrow j,e}^* + D_{i,j,e}^* = WV^* + T^*V^* \quad (6)$$

式(6)左边的3项分别指两行条柱之间界面、两列条柱之间界面及滑裂面上的内能消耗。下标 e 代表该物理量相应经缩减后的 c'_e 和 φ'_e 。

这样,可通过式(6)求解隐含于 c'_e 和 φ'_e 中的安全系数 F (注意式(6)中 T^* 为设定的外荷,已不再是未知量),并通过寻找 F 的最小值逼近临界的破坏模式。三维上限解最终归结为计算一个具有倾斜界面条柱体系的协调速度场问题。利用速度与相应的滑动面夹角为 φ_e ^[14,15]这一条件,某一条块的速度可由其相邻条块的速度来确定^[14~17]。

6 Sarma 法

Sarma 法是萨尔码 1979 年在《边坡和堤坝稳定性分析》一文中提出的,著名边坡专家 Hoek 博士将萨尔码方法程序化^[18],使得该方法在西方国家被普遍采用,是目前国内外考虑因素较全面、较正确的一种边坡稳定性计算方法。

Sarma 法的基本概念是:边坡上的岩体,除非是沿着一个理想的平面或圆弧面,才可作为一个完整的刚体移动,否则滑体必须首先破裂成可以相对滑动的块体才能发生滑坡;也就是说,在滑动时,不仅要克服主滑面的抗剪强度,而且必须克服滑体本身的强度。

7 库岸稳定性离心模型实验研究法

为满足模型特性与原型特性的严格相似,模型试验必须在相似三定理^[19]的指导下进行,对模型除必须与原型保持几何相似外,还应使模型和原型两者对应各点的应力、应变满足相似要求,即满足几何相似、运动相似和动力相似。相应的相似准则主要有两种情形,即等应力相似理论和不等应力相似理论。等应力相似理论主要从物理方程或运动方程的因次和谐出发,寻找物理量的相似比尺,以重力和离心力相等为出发点推导其相似关系。例如,原型深度为 h_p 处的土压力为^[19]:

$$P = \rho gh_p \quad (7)$$

对应模型中该点的离心加速度为 ng ,深度为 h_m ,则有^[22]

$$\rho gh_p = \rho n g h_m \quad (8)$$

$$\frac{h_p}{h_m} = \frac{\rho g}{\rho n g} = \frac{1}{n} \quad (9)$$

式中 ρ 为材料密度。

离心模型试验方法可以研究库岸在天然无水、蓄水、开挖及地震工况的稳定性及失稳破坏机理,这种方法依赖于现代高分子材料,可以在相似三定理的指导下把库岸整体按比例缩小为试验模型在实验室进行研究。

8 结 语

由于库岸稳定性研究往往是大面积大范围的,从工程实际可行性来考虑,很详细地研究每个库段是不现实的,目前可以利用 InSar, GPS 和红外遥感结合库区地质条件和岸坡结构类型,识别出危险的、需要进一步监测的库段,然后选择上述合适的研究方法深入分析。

基于极限平衡理论的条分法只限于二维情况下分析,而且滑动面大都由人为的假定,与实际情况有一定的差距, RMR-SMR 只能用于定性的分析岩质库岸稳定,不能定量,但由于该方法计算简单,计算结果能直观的比较库岸稳定性。随着计算机性能的不断提高,数值分析方法得到了充分发展,并进入成熟阶段。当前,最大的矛盾是对本构关系的研究远远落后于计算技术的发展,成为制约计算成果可靠程度的瓶颈。有限元要继续发展完善,应该考虑本构关系上的非线性和几何上的非线性。本构关系上的非线性已经考虑到(如黏-弹-塑性模型),但岩土体的本构关系实在太复杂,模型与实际情况之间总有一定差别;几何上的非线性在小变形时还不明显,因此不为人所注意,但变形较大时就不可忽略不计^[20]。小变形已越来越不适应理论发展的需要,基于大变形前提的计算理论是今后发展的方向。但由于对物理机制的认识尚不充分,加之很难精确确定各个因素的影响,因此数值计算至今还不能完全取代比较成熟的物理模型试验。在今后相当长的时间里,模型试验将与数值模拟并存,两者还可以相互验证。模型试验还会继续得到发展。这方面日本的模型试验水平是比较高的,他们的模型试验规模很大,仿真性强,自然更接近于真实情况^[21]。

参考文献:

[1] 陈祖煜.土坡稳定分析通用条分法及其改进[J].岩土工程学报,1983,5(4):11~27.
[2] 潘家铮.建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M].北京:水利出版社,1980.3~22.

[3] 陈祖煜. 改进的通用条分法的收敛特性和计算精度 [A]. 见: 中国土木工程学会. 第四届土力学及基础工程学术会议论文集 [C]. 北京: 建筑工业出版社, 1986. 460 ~ 468.

[4] 周创兵, 孙万和, 王柏源, 等. 白水峪水电站右岸坝下游边坡岩体的 RMR-SMR 分类及稳定性评价 [J]. 工程地质学报, 1997, 5(3): 224 ~ 230.

[5] 汤献良. 浅谈边坡岩体地质力学分类方法 [J]. 水利水电工程地质, 1992.

[6] 张成, 刘汉超. 高边坡岩体质量及稳定性的 RMR-SMR 评价 [A]. 见: 工程地质及岩土工程新技术新方法论文集 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.

[7] 范中原. 水利水电工程岩质高边坡的工程地质勘测与加固处理措施 [A]. 见: 工程地质及岩土工程新技术方法论文集 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.

[8] 陈德川, 王坚. 二滩水电站近坝库岸霸王山滑坡稳定性分析 [J]. 大坝与安全, 2003(3): 6 ~ 9.

[9] 任青文, 余天堂. 三峡大坝左岸 3 号坝段稳定性的块体元分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(1): 20 ~ 24.

[10] 任青文. 块体单元法及其在岩体稳定分析中的应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 1995, 23(1): 1 ~ 7.

[11] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525 ~ 529.

[12] 弥宏亮, 陈祖煜, 汪小刚. 三峡左岸坝段三维抗滑稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 1960 ~ 1965.

[13] 王仁, 黄文彬. 塑性力学引论 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2001. 807 ~ 812.

[14] Chen Z, Wang X, Haberfield C, et al. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part I: theory and methods [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 38(3): 369 ~ 378.

[15] Chen Z, Wang J, Yin J, et al. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part II: numerical approaches, applications and extensions [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3): 379 ~ 397.

[16] Hungu O, Salgado F M, Byrne P M. Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(4): 679 ~ 686.

[17] Lam L, Fredlund D G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(4): 905 ~ 919.

[18] 黄永浩, 张勇. 沙河集水库大坝右岸滑坡体稳定性分析 [J]. 西部探矿工程, 2002, 7(4): 131 ~ 132.

[19] 潘亨永, 胡小明, 胡定. 小湾左岸坝前高边坡稳定性离心模型试验研究 [J]. 红水河, 2000, 19(3): 29 ~ 33.

[20] 何满潮. 软岩巷道工程概论 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1993.

[21] 宋昆仑. 日本的滑坡研究及滑坡整治技术 [J]. 水文地质与工程地质, 1993(5): 11.

(收稿日期: 2004-05-31 编辑: 马敏峰)

(上接第 61 页)

2.4 实现从图形查属性

系统设计了三种从图形查属性的查询方式: 自动查询、单站查询、多站查询。

自动查询根据用户在树框架中的点击, 取得 Servlet 的真实路径, 自动弹出查询页面。在汛情监视模块中暴雨监视、洪水监视、行洪监视、放水监视和蓄水监视都支持自动查询。用户点击了左框架树中

的行洪监视后, 执行结果如图 5 所示。

单站查询和多站查询是用户利用框选按钮, 确定了查询的站号和个数, 再利用 Servlet 查询。查询这部分工作主要集中在 Servlet 的开发上, ArcIMS 部分的开发只是提供了一个程序入口。

3 结 语

本文结合河北省水雨情查询系统的开发, 主要研究了基于 ArcIMS 的定制开发, 对类似系统的开发将有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 周惠成, 何斌, 梁国华, 等. WebGIS 在省级防汛指挥决策信息服务子系统中的应用研究 [J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 104 ~ 108.

[2] 谢建华, 陶红, 李培铮. 开发 WebGIS 的一种新技术——ArcIMS 技术. 遥感信息 [J] 2002(4): 57 ~ 60.

[3] 何川, 方兴, 陈渝. JSP 编程实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 18 ~ 19.

(收稿日期: 2004-03-04 编辑: 熊水斌)

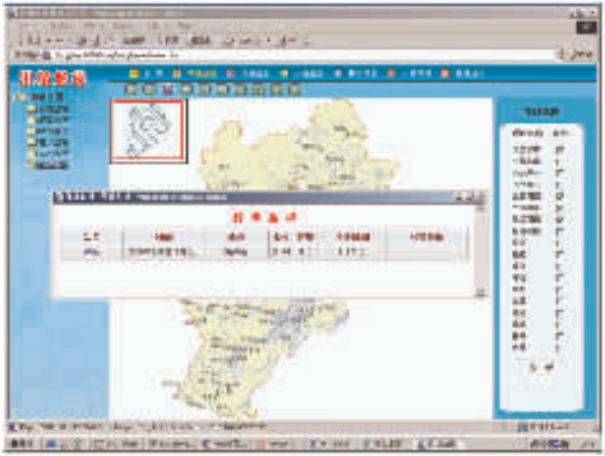


图 5 行洪监视