

文章编号: 1000-7598-(2005)增刊-011-05

库水位下降条件下斜坡稳定性研究

唐辉明, 章广成

(中国地质大学 工程学院, 武汉 430074)

摘要: 采用核磁共振(NMR)技术反演水文地质参数, 在此基础上, 基于非饱和土强度理论, 对现有滑坡剩余推力法进行改进。以三峡工程库区赵树岭滑坡为例, 对库水位以不同速度下降时不同时刻的滑坡稳定性进行了研究, 结果表明: 在库水位下降过程中会出现稳定性系数达到极小值的现象。下降速度越大, 稳定性极小值越小, 出现极小值的时刻也相对早。

关键词: 核磁共振; 库水位下降; 非饱和强度理论; 剩余推力法; 赵树岭滑坡

中图分类号: TU 697.3⁺9

文献标识码: A

A study on slope stability during reservoir water level falling

TANG Hui-ming, ZHANG Guang-cheng

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The hydrogeology parameters are inverted by nuclear magnetic resonance (NMR), and then the push force method to evaluate landslide stability is modified based on unsaturated strength theory. Taking Zhaoshuling landslide in the Three Gorges Reservoir area for example, the stabilities of the slope at different periods when the Three Gorges reservoir water level falls at various speeds are studied systematically. The result shows that the stability coefficient has a minimum, the larger the fall speed is, the less the minimum value is, and the earlier it happens relatively.

Key words: NMR; reservoir water level falling; unsaturated strength theory; push method; Zhaoshuling landslide

1 引言

库水位变化与斜坡稳定性关系密切。由于库水位下降改变边坡岩土体的重度, 增大坡内部分水力梯度, 使岩土体有效应力减小, 从而降低岩土体的抗剪强度, 危及斜坡的稳定性。库水位变化对滑坡稳定性的影响研究一直是个难题, 原因有三, (1) 难以确定库水位变化引起的非饱和渗流参数; (2) 对渗流作用导致的边坡变形和稳定性变化的复杂机理缺乏明确认识; (3) 在饱和-非饱和土稳定研究方法与技术方面尚存在着不足^[1]。

目前, 稳定性评价方法主要有: 极限平衡法、塑性极限分析法、数值方法、可靠度方法、人工智能方法等。但真正被广泛应用于工程实践中的还是极限平衡法。历经数十年极限平衡法形成了较完整的理论体系。目前主要使用的极限平衡法包括: Fellenius法、Bishop法、Janbu法、Morgenstern&price

法、Spencer法、Sarma法和我国广泛使用的剩余推力法等。然而, 这些方法都是基于饱和土强度理论, 未考虑非饱和土体的强度和水力学特性, 故尚存在不足^[2, 3]。因此, 有必要提出一种考虑非饱和岩土体的稳定性评价方法。本文以赵树岭滑坡为例, 基于非饱和强度理论, 对现有剩余推力法进行了改进, 采用NMR技术反演赵树岭滑坡的水文地质参数, 对库水位以不同速度从175 m泄水到145 m过程中不同时刻的稳定性进行了评价, 并得到一些有用的结论。

2 非饱和土的强度理论

饱和土体的Mohr-Coulomb强度准则的表达式为:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (1)$$

式中 τ_f 为破坏面上的剪应力; c' 为有效凝聚力;

σ 和 σ' 分别是总法向应力和有效法向应力; u_w 为破坏面上的水压力; ϕ' 为有效内摩擦角。

工程实践证明, Mohr-Coulomb 有效应力破坏准则只适用饱和土, 在非饱和土力学中一般用 $(\sigma_f - u_a)_f$, $(u_a - u_w)_f$ 两个独立应力变量来描述非饱和土的应力状态。Fredlund 用延伸的 Mohr-Coulomb 公式表示非饱和土的抗剪强度:

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (2)$$

式中 $(\sigma_f - u_a)_f$ 为破坏面上的净法向应力; $(u_a - u_w)_f$ 为破坏面上的基质吸力; ϕ^b 表示抗剪强度随基质吸力而增加的速率, 其大小由固结排水三轴试验获得。如果令

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (3)$$

则式 (2) 可以写成

$$\tau_f = c + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' \quad (4)$$

由于公式 (4) 在形式上与饱和 Mohr-Coulomb 式 (1) 相同, 这样就可以采用分析饱和边坡稳定性的方法来计算非饱和边坡的稳定性。在计算中一般取 $u_a = 0$ 。在饱和区, c 取有效凝聚力, 在非饱和区, c 值大小根据式 (3) 求得。

3 基于非饱和土强度理论的剩余推力法

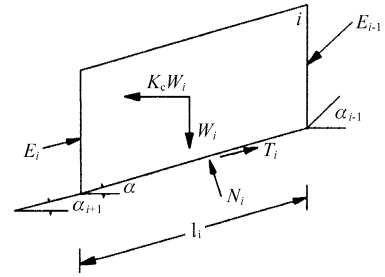
剩余下滑力在计算滑坡推力和稳定性时, 假定该滑面取单位宽度计算, 不计两侧摩擦力和滑体自身挤压力; 滑动面和破裂面分别按直线计算, 整体呈折线滑动。并假定每一条块剩余下滑力方向与条块底部滑面平行。在主滑剖面上取序号为 i 的一个条块 (图1) 分析其受力情况^[2, 3]。其上作用有垂直荷载 (W_i) 和水平荷载 (Q_i), 前者如重力和工程荷载等, 后者指向坡外的水平向地震力 K_c , W_i 及水压力 U_i 等。该条块承受了上一分条的剩余下滑力 E_{i-1} , 倾角 α_{i-1} , 以及本条块的剩余下滑力 E_i 的反力, 倾角 α_i , 底部为垂直潜滑面的反力 N_i , 扬压力 U_i 及切反力 T_i 。通过 $\sum x_i = 0$, $\sum y_i = 0$ 进行联立求解可得:

第 i 块的下滑力为

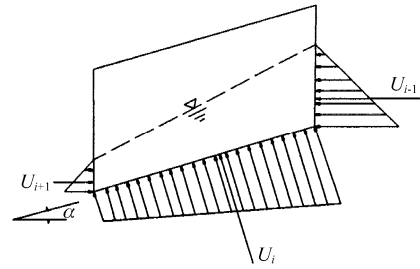
$$T_F = W_i \sin \alpha_i + K_c W_i \cos \alpha_i + (U_{i-1} - U_{i+1}) \cos \alpha_i + E_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (5)$$

第 i 块的抗滑力为

$$T_{\text{抗}} = [W_i \cos \alpha_i - U_i - K_c W_i \sin \alpha_i - (U_{i-1} - U_{i+1}) \sin \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)] \tan \phi' + C_i l_i \quad (6)$$



(a)



(b)

图1 第 i 条块受力分析
Fig.1 Forces on the slice No. i

式中 W_i 是第 i 条块的重量; K_c 是地震水平加速度; α_i 是第 i 条块的滑面倾角; c_i 由式 (3) 求得, 代表第 i 条块与凝聚力有关的项; l_i 是第 i 条块的滑面长度; E_{i-1} 是第 $i-1$ 条块的剩余下滑力; 式中 U_{i-1} , U_i , U_{i+1} , 在饱和区为静水压力或扬压力, 在非饱和区为基质吸力, 假设任意直线上的基质吸力呈线性分布, 这样可以类似于饱和区静水压力 (或扬压力) 分布规律来考虑非饱和区基质吸力。

稳定性系数为

$$K = \frac{T_{\text{抗}}}{T_F} \quad (7)$$

具体计算滑坡推力时, 采用的方法有增大下滑力法 (E_n^+)、减小抗滑力法 (E_n^-) 和既不增大也不减小下抗滑力法 (E_n)。在具体应用时, 若滑坡结构及采用的强度参数足够清楚和精确, 可采用 E_n , 否则, 可采用 E_n^+ , 综合比较研究结果, 采用 E_n^- (减小抗滑力法) 为宜。故第 i 条块的下滑力为

$$E_i = W_i \sin \alpha_i + K_c W_i \cos \alpha_i + (U_{i-1} - U_{i+1}) \cos \alpha_i - \frac{1}{K} T_{\text{抗}} + E_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (8)$$

通过反复迭代计算得最后一个条块剩余下滑力为 0 时的稳定性系数 K 即为所求。

4 NMR 找水方法测量参数和反演解释获得的水文地质参数

在滑坡研究中, 由于滑坡系统的复杂性, 其结构、地下水分布十分复杂, 在进行滑坡研究建模时, 利用传统的勘探、测试手段, 难以获取实用、可靠的滑坡岩土体水文参数, 对滑坡结构、地下水分布状况均难以明确确定, 直接影响滑坡研究的建模、评价工作^[4]。核磁共振技术(NMR)是当前世界上的尖端技术, 应用 NMR 找水仪进行地下水的勘探, 这是目前 NMR 在地球物理学方面的最新应用方向^[5]。

NMR 找水方法利用了水中氢核(质子)的弛豫特性差异, 在地面上利用核磁共振找水仪, 观测、研究在地层中水质子产生的核磁共振信号的变化规律, 进而探测地下水的存在性及时空赋存特征。信号强弱或衰减快慢直接与水中质子的数量有关, 即 NMR 信号的幅值与所探测空间内自由水含量成正比, 因此构成了一种直接探测地下水技术, 形成了地面核磁共振找水方法。

在地面 NMR 方法的实际工作中, 在每个 NMR 测点上是通过对由小到大(100 A·ms~9 000 A·ms 或者 100 A·ms~18 000 A·ms)依次改变激发脉冲矩 q ($q=I_0 t_p$, 式中 I_0 , t_p 分别为激发电流脉冲的幅值和持续时间)来探测由浅到深的含水层的赋存状态。NMR 方法测量参数和反演解释获得的水文地质参数见表 1。

表 1 NMR 系统的实测、解释参数
Table 1 The measure and explain parameters of NMR system

NMR 找水方法测量参数	反演的水文地质参数
信号初始振幅 E_0 /nV	含水量(有效孔隙度)
信号衰减时间 T_2^* /ms	孔隙大小(渗透性)

通过 NMR 观测和反演, 经过计算可得到渗透系数等参数。

(1) 地下各含水层的含水量 NMR 信号初始振幅的大小与含水层的含水量成正比, 通过 NMR 信号反演可以直接得到地下各含水层的含水量。

(2) 求取孔隙率 利用 NMR 得到的弛豫时间, 可计算出地下岩层的空隙率, 孔隙率的计算公式如下:

$$n = \frac{V_B}{V} = \frac{\rho S T_s}{V} \quad (9)$$

式中 n 为孔隙率; V 为土体体积; V_B 为孔隙体积; S 为孔隙面积; T_s 为孔隙的弛豫时间; ρ 为界面邻近层水距界面某一距离 h 与其该层水的弛豫时间常

数之比。

(3) 渗透率 k 的估计^[4]

根据已发表的 NMR 数据, 用试配法得到以下的数值模型:

$$k = 2.2 \Phi T_2^2 \quad (10)$$

式中 k 为渗透率, 以毫达西(md)表示; Φ 为有效空隙度, 以百分比表示; T_2^2 是横向弛豫时间, 以毫秒(ms)表示。

(4) 水的渗透系数

水的渗透系数 k_w 是岩土中可用于水流动空间的一种度量。它取决于流体的性质和孔隙介质的性质。利用前面估计出的渗透率, 可以求取水的渗透系数 k_w

$$k_w = \frac{\rho_w g}{\bar{u}_w} k \quad (11)$$

式中 $\bar{u}_w$ 为水的绝对粘度; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度; k 为渗透率。

(5) 平均孔隙水压力

利用 NMR 测试数据求取的水文地质参数, 是根据脉冲距数求取某一段岩层的平均值。因此根据水的渗透系数, 利用稳态方法, 可以反推出岩层中某一段的平均孔隙水压力

$$\bar{v}_w = \frac{\Delta h \rho_w g (Q-1)}{2k_w A t} \quad (12)$$

式中 $\bar{v}_w$ 为平均孔隙水压力; Δh 为水头差; Q 为在 t 时间内流过断面 A 的总水量; k_w 为水的渗透系数。

表 2 赵树岭滑坡计算参数
Table 2 The calculated parameters of Zhaoshuling landslide

岩性	孔隙率/%	渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
滑带	20	3
残坡积	25	10
滑体	15	10

赵树岭滑坡是三峡库区典型的大型滑坡, 其稳定性直接关系到巴东县城的安全、三峡水库的安全运行和长江航运的畅通。为了正确的评价赵树岭滑坡的稳定性, 必须确定出滑坡的岩土体结构和地下水特征, 以便建立符合实际的滑坡模型。笔者采用了法国生产 Numis 核磁共振系统对该滑坡进行了近 3 年的监测, 取得了较好的应用效果, 下面对几次实测结果进行初步分析。

(1) 单个 NMR 点结果及其与钻井资料的对比

分析

图 2 是 2003 年 3 月巴东赵树岭滑坡 NMR 的反演结果。由反演结果可以看出, ① 在浅地表有一含水层, 含水量不大, 此层不是我们研究的主要对象; 18 m 深度附近有一含水层, 含水量较大; 在 40 m 深度附近有一主要含水层, 含水量最大; ② 18 m 深度附近的含水层渗透系数较大, 40 m 深度附近的含水层渗透系数相对最大; ③ 两层水之间的岩层含水量低, 为相对隔水层。由此我们可以判断, 在 18 m 附近有一个滑动面; 在 40 m 深度附近有一滑动面。钻孔资料 (见图 3) 证实, 18.2 m 处有一滑动面, 42 m 有一滑动面。上述结果表明, 通过 NMR 结果识别滑动面是可行、有效、经济和快速的。

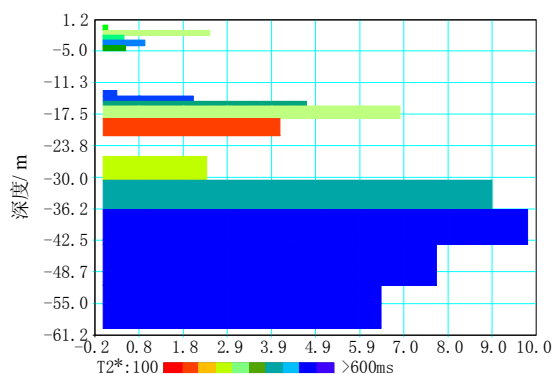


图 2 巴东赵树岭滑坡 NMR 的反演结果

Fig.2 The SNMR deductive result of Zhaoshuling landslide

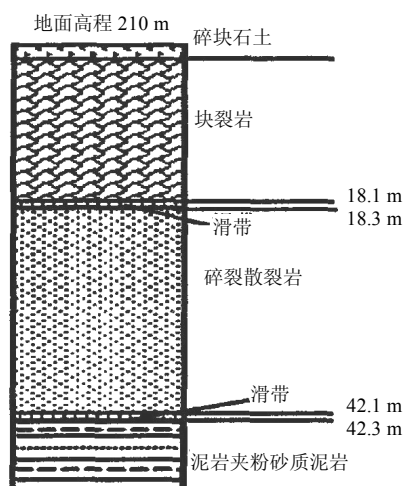


图 3 赵树岭滑坡钻孔柱状图

Fig.3 The borehole column of Zhaoshuling landslide

(2) 汛期与枯水期 NMR 结果对比分析

笔者在巴东赵树岭滑坡共进行了 5 次实测。枯水期 3 次结果对比表明: ① 浅地表含水层的含水量

变化大; ② 18 m 处含水层含水量变化不大, 含水层的深度基本不变; ③ 40 m 处含水层含水量变化也不大, 含水层的深度也基本不变。汛期 2 次结果对比与枯水期有相似的规律。

(3) 汛期和枯水期结果对比分析

汛期和枯水期结果对比有以下规律: ① NMR 结果显示的 18 m 和 40 m 两个滑动面在汛期和枯水期的深度基本不变; ② NMR 结果表明: 18 m 和 40 m 两个滑动面在汛期和枯水期的含水量有一定的变化, 汛期的含水量大于枯水期的含水量。

通过以上分析可见, NMR 方法获得了巴东赵树岭滑坡地下水分布及季节性变化信息和有用的实测数据, 为建立符合实际的滑坡模型及进一步稳定性分析评价提供了依据。

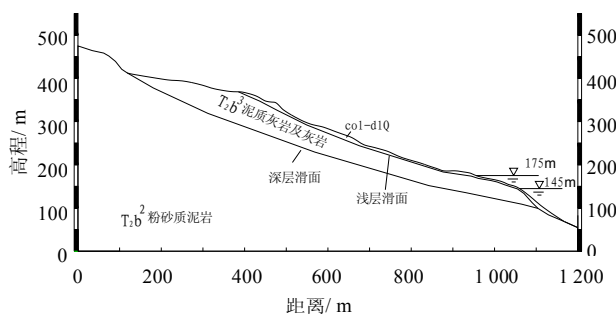


图 4 赵树岭滑坡物理模型

Fig.4 The physical model of Zhaoshuling landslide

利用 ANSYS 软件二次开发的非稳定饱和-非饱和和渗流程序, 模拟了赵树岭滑坡在库水位从 175 m 分别以 5 m/d、3 m/d、2 m/d 三种泄水速度下的渗流场进行了分析。模拟结果表明:

(1) 当库水位从 175 m 高程分别以 5 m/d, 3 m/d, 2 m/d 的速度下降到 145 m 高程时, 水库水位依次在第 6 d, 10 d, 15 d 后不再变化, 但地下水却分别在第 14 d, 16 d, 20 d 后才基本趋于稳定, 依次滞后 8 d, 6 d 和 5 d。说明在库水起始高程相同的情况下, 库水位下降速度越大, 地下水位达到稳定所需时间越长;

(2) 地下水位线是一条上凸的曲线, 且后缘潜水面几乎水平, 滑坡前沿水力梯度较后缘大; 随着距水库越近地下水位线逐步降低, 滑坡前缘地下水位线同时略微变陡, 渗透压力有所增加。

(3) 库水位下降初期, 滑坡前缘接近地表的地下水流流速有向上的分量, 这表示滑坡前缘渗透压力减小, 不利于滑坡稳定。

(4) 随着库水位下降, 图中相应的等水位线

向边坡体上游移动, 饱和和流场中的水压力在降低;

(5) 非饱和区范围扩大, 饱和区水压力降低均对边坡稳定性有利。因此, 应在可能情况下, 选择较小库水位的下降速度, 以确保边坡稳定性的降低范围最小。

5 赵树岭滑坡稳定性分析

采用改进的剩余推力法对赵树岭滑坡不同工况不同时刻的稳定性进行了计算, 见图5。

由稳定性计算结果显示: 三峡水库蓄水位为175 m时, 赵树岭浅层滑坡稳定性系数为1.11, 深层滑坡稳定性系数为1.35。当库水位由175 m以不同速度降至145 m高程时, 滑坡稳定性发生变化, 而且如图5所示, 均先减小后增大, 地下水位稳定后这

两个滑坡在库水位为145 m高程时的稳定性系数比库水位为175 m高程时的稳定性系数要大, 浅层滑坡稳定性系数为1.21, 深层滑坡稳定性系数为1.45。在库水位下降过程中会出现稳定性系数达到极小值的现象。对于同一滑坡, 下降速度不同, 稳定性极小值大小不同, 出现的时刻也不同, 图5(a)和(b)都有这样的规律: 下降速度越大, 稳定性极小值越小, 出现极小值的时刻也比较早。出现极小值的时刻介于库水位开始下降与达到稳定之间。所以, 我们在水库运行过程中, 应该根据实际情况适当调节水库水位变化速度, 以减少滑坡发生的可能性。

6 结 论

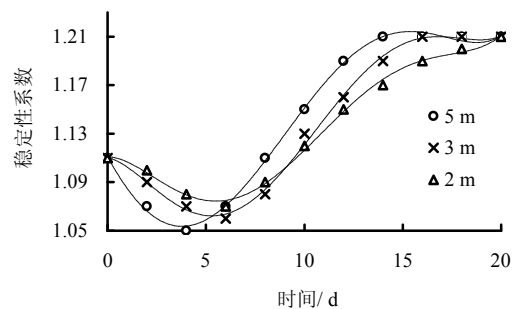
(1) 核磁共振(NMR)技术是岩土体水文地质参数反演有效手段, 它可以为饱和-非饱和土稳定性模拟提供必需的参数。

(2) 本文基于非饱和土强度理论, 对现有滑坡剩余推力法进行了改进, 工程应用表明其具有较广泛的实用性。

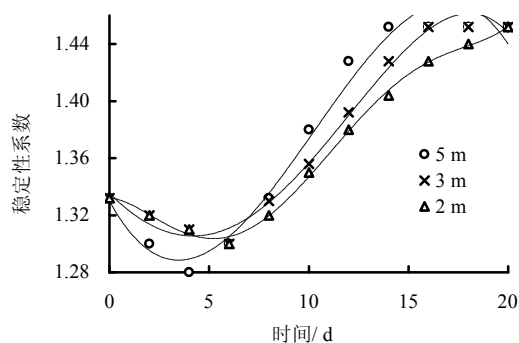
(3) 以三峡工程库区赵树岭滑坡为例, 对库水位以不同速度下降时不同时刻的滑坡稳定性进行了研究, 结果表明: 在库水位下降过程中会出现稳定性系数达到极小值的现象。下降速度越大, 稳定性极小值越小, 出现极小值的时刻也相对早。该结论对赵树岭滑坡综合治理具有参考意义。

参 考 文 献

- [1] 晏鄂川, 唐辉明. 工程岩体稳定性评价与利用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002.
- [2] 黄润秋, 许强, 戚国庆, 等. 降雨诱发滑坡机理及其评价方法研究[M]. 成都: 成都理工大学, 2004.
- [3] 仵彦卿. 地下水与地质灾害[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 303—310.
- [4] 杜延龄, 许国安. 渗流分析的有限单元法和电网络法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992.
- [5] 李振宇, 李俊丽, 潘玉玲. 地面核磁共振找水方法综述[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(6): 55—58.



(a) 浅层滑坡



(b) 深层滑坡

图5 库水水位以不同速度下降时滑坡稳定性曲线

Fig.5 The slope stability curves during the reservoir water level falling at different speeds