

基于 NMR 的库区滑坡三维稳定性数值模拟

胡新丽,唐辉明,马淑芝,章广成

中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074

摘要: 传统的勘探、测试手段,难以获取可靠的滑坡岩土体水文参数,直接影响滑坡研究的建模、评价工作。应用核磁共振找水方法并结合其他方法建立滑坡三维地质模型,并提出基于 NMR 技术的库区滑坡稳定性研究思路。以赵树岭滑坡进行测试,获取了岩土体的水文地质参数数据,确定出该滑坡具有两层地下水,上部潜水含水层,下部微承压含水层;具有两层滑面。该技术的分析结果与钻孔数据吻合较好,可为建立符合实际的滑坡模型提供可靠依据。利用自编渗流—应力耦合有限元程序和 ANSYS 进行了 145 m、175 m 及 175 m 降至 145 m 滑坡的稳定性模拟。结果表明:145 m 及 175 m 水位,该滑坡整体处于稳定状态,前缘随水位抬升局部破坏范围扩大;175 m 降到 145 m 时,坡整体稳定性接近极限状态,且滑坡后缘局部位置出现小规模变形破坏的可能。

关键词: 库区滑坡;NMR;地下水;地质模型;稳定性评价。

中图分类号: X141

文章编号: 1000-2383(2006)02-0279-06

收稿日期: 2005-05-01

Numerical Simulation of the 3D Landslide Stability in Three Gorges Area Based on NMR

HU Xin-li, TANG Hui-ming, MA Shu-zhi, ZHANG Guang-cheng

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

Abstract: Reliable hydrological parameters of the rock and soil in a landslide are difficult to obtain using traditional investigative and testing methodology. This affects the quality of landslide modelling and evaluation. Based on the NMR (nuclear magnetism resonance) method of water seeking combined with some other investigation methods, a 3D landslide model was established. The method for studying the landslide stability in the Three Gorges was presented. The Zhaoshuling landslide in the Three Gorges Reservoir area was chosen to determine the accuracy of the 3D modelling. The hydrological parameters of the rock and soil were obtained by NMR and from a borehole. Two aquifers were determined: the upper one is an unconfined aquifer; and two sliding zones were found. The result from NMR analysis was identical with the data obtained from the borehole. This result could supply a reliable basis for landslide modelling which conforms to actual landslide conditions. Using the FEM program to consider the interaction between seepage and stress and ANSYS, the stability of the landslide was simulated with a water level under 145 m, at 175 m and from 175 m falling to 145 m. The results show that the landslide is still in a stable state at a water level of 145 m and 175 m. The unstable area in the front region of the landslide enlarges as the water level rises. When the water level falls from 175 m to 145 m, the landslide is in a state of limited equilibrium and local deformation and damage on the posterior border of the landslide is likely to occur.

Key words: landslide in reservoir area; NMR; groundwater; geological model; landslide stability evaluation.

核磁共振技术是当前世界上的尖端技术,在物理、化学、生物学、医学、石油化工以及地学中得到了广泛的应用。地面核磁共振(surface nuclear magnetic resonance,缩写为 SNMR)找水方法,又称地

面 NMR 测深. 该方法应用核磁感应系统 (nuclear magnetic induction system, 缩写为 NUMIS) 实现对地下水资源的探测. 早在 1962 年美国的 Varian R H 提出过用 NMR 技术调查地下水的构想; 1965 年, 张昌达、崔岫峰等进行了 NMR 找水的初步试验 (潘玉玲和张昌达, 2000); 20 世纪 70 年代从 1978 年起, 前苏联科学院西伯利亚分院化学动力学和燃烧研究所 Семехов А Г 教授为首的一批物理学家, 开始了利用 NMR 技术进行找水方法的研究, 开发出了在地磁场中测定 NMR 信号的仪器, 称为核磁共振找水仪 (Semenov and Burshtein, 1968; Puser *et al.*, 1991).

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 (胡新丽等, 2002). 本研究主要探讨利用 NMR 技术探明滑坡结构、滑坡建模及稳定性评价的方法, 并将该方法应用于三峡库区典型滑坡赵树岭滑坡的稳定性评价.

1 基于 NMR 技术的库区滑坡三维稳定性评价方法

利用 NMR 技术研究库区滑坡稳定性的思路方法如图 1 所示, 其核心是利用 NMR 查明其他方法难以确定的滑坡地下水的分布, 同时获取水文地质参数, 与其他勘探手段结合确定滑面和滑坡体结构,

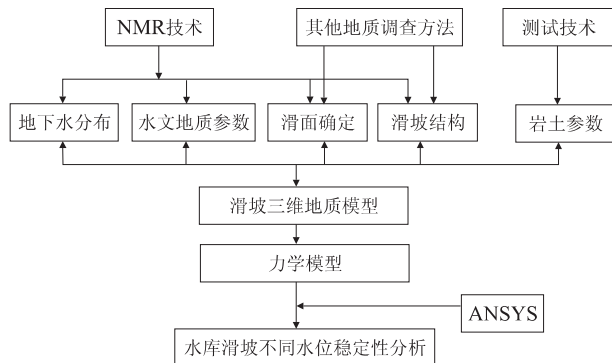


图 1 基于 NMR 技术的库区滑坡三维稳定性研究思路

Fig. 1 Method of the 3D simulation of the landslide in reservoir area based on NMR

为正确的建立滑坡三维地质模型提供依据.

2 利用 NMR 确定滑坡稳定性分析参数和滑坡结构

2.1 核磁共振研究地下水特征方法原理

核磁共振找水方法的核心原理 (Semenov and Burshtein, 1968; Puser, 1991) 是: 地下水中的氢核 (质子) 具有核子顺磁性, 其在地磁场作用下将产生一宏观磁矩 M , 如果在垂直地磁场方向施加一交变磁场脉冲, 其频率等于质子在地磁场中的拉摩尔进动频率, 则脉冲的宽度 t 与交变磁场振幅 $2B_1$ 的乘积为:

$$\gamma B_1 t = \theta.$$

(1) 式中: θ 为地磁场与 M 的夹角, 调整式中左边数据使 $\theta = \pi/2$, 则宏观磁矩 M 将转向垂直于地磁场的方向, 此时脉冲停止, M 将绕地磁场作进动而地面上产生最强的自由进动信号 (FID), 改变脉冲参数并记录 FID 信号, 由其振幅和横向弛豫时间, 经过反演可得到地下不同深度各含水层的含水量、孔隙度及渗透率等数据, 查明地下水的时空赋存特征.

在地面 NMR 方法的实际工作中, 在每个 NMR 测点上是通过由小到大 ($100 \sim 9\,000 \text{ A} \cdot \text{ms}$ 或者 $100 \sim 18\,000 \text{ A} \cdot \text{ms}$) 依次改变激发脉冲矩 q ($q = I_0 \cdot t_p$, 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.

2.2 NMR 方法测量参数和反演解释获得的水文地质参数

NMR 方法测量参数和反演解释获得的水文地质参数见表 1.

通过 SNMR 观测和反演能直接得到各含水层的深度、厚度、含水量; 经过计算可得到渗透系数等参数.

(1) 地下含水层的深度和厚度: 在数据采集时, 选择了脉冲矩个数, 每个脉冲矩对应一个深度. 脉冲矩从小到大, 反映从地面向下由浅到深岩土含水变化特征. 通过 NMR 信号反演可以直接得到地下各含水层的深度和厚度.

(2) 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.

(3) 滑坡面确定: NMR 信号初始相位是天线中

表 1 NUMIS 和 NUMIS⁺ 系统的实测、解释参数Table 1 Measuring and deducing parameter with the NUMIS and NUMIS⁺ system

NMR 找水方法测量参数	反演解释得到的水文地质参数
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)
信号的初始相位 φ_0 (度)	含水层的导电性 (电阻率)

激发电流与测量到的衰减电压之间的相位差。NMR 信号的初始相位反映地下岩石的导电性。地下岩石的导电性信息对滑坡面的识别提供参考依据。

(4) 求取孔隙率: 利用 NMR 得到的驰豫时间, 可计算出地下岩层的孔隙率, 孔隙率的计算公式如下:

$$n = \frac{V_b}{V} = \frac{\rho S T_s}{V} \quad (1)$$

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 为孔隙的驰豫时间; ρ 为界面邻近层水距界面某一距离 h 与其该层水的驰豫时间常数之比。

(5) 渗透率 R 的估计 (潘玉玲和张昌达, 2000): 根据已发表的 NMR 数据, 用试配法得到以下的数值模型:

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

式中: k 是渗透率, 以毫达西 (md) 表示; Φ 是有效孔隙度, 以百分比表示; T_2 是横向驰豫时间, 以毫秒 (ms) 表示。

(6) 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 :

$$k_w = \frac{\rho_w g}{\bar{u}_w} k \quad (3)$$

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 是渗透率。

(7) 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:

$$\bar{v}_w = \frac{\Delta h \rho_w g (Q - 1)}{2k_w A t} \quad (4)$$

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 是水的渗透系数。

2.3 滑坡体结构的确定

根据 NMR 测试的不同深度各含水层的含水量、孔隙度及渗透率等数据, 可准确地确定地下水的

时空赋存特征和岩土体孔隙度及渗透率随深度的变化规律, 由于测试结果随深度增加各分层增厚, 所以在滑坡调查评价中, 应结合钻孔柱状图和其他岩土体测试结果, 准确地确定出滑坡体的岩土体结构及地下水的分布特征, 可建立准确的滑坡稳定性评价模型, 并可获得用于水岩耦合应力场计算的参数。

3 工程应用

3.1 赵树岭滑坡概况

赵树岭滑坡总体上为一巨型勺状滑坡, 是经多次局部滑移和弯曲倾倒滑移形成的综合滑体。赵树岭滑体平面上呈不太规则的长方形, 中前部大致等宽。滑体东西宽约 550 m, 南北长约 900~950 m, 面积约 $50 \times 10 \text{ m}^2$ 。滑体表面总体呈阶梯状。400 m 以上为滑坡后缘陡坡。

滑坡区物质总体上可分为二大层, 即表层崩滑体层和基岩。表层崩滑体层主要由岩体经滑移形成的块裂、碎裂岩、含泥碎块石及碎块石组成, 主要来源于 $T_2 b^3$ 。基岩则以 $T_2 b^2$ 紫红色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主。崩滑体层最大厚度约 50~65 m。最低一个滑带位于 $T_2 b^3/T_2 b^2$ 界面附近, 该滑带形状上基本与地形起伏一致, 前部及中部较缓, 后部及下部较陡。

地层岩性、地质结构、地形地貌、人类工程活动、地震、降雨等几个因素在短时间内不会改变滑坡整体稳定的状况。水文地质条件是一个随时间变化的因素, 特别是三峡水库蓄水及水位波动, 将极大地改变滑坡体内的水文地质条件, 是影响滑坡整体稳定性的重要因素 (柴军瑞和李守义, 2004; 廖巍和刘新喜, 2004; 李晓等, 2004; 肖国峰等, 2004; 孙云志和苏爱平, 2005)。因此必须首先查明滑坡地下水的分布情况, 才能正确评价水文变化的影响。

3.2 赵树岭滑坡三维模型

我们采用了法国生产的核磁共振找水仪 (Numis) 对赵树岭滑坡进行了测试, NMR 测试结果见图 2。

可以看出: (1) 赵树岭滑坡有两层水力联系较差的含水单元: 第一层埋深 19.1~23.2 m 之间, 渗透率为 0.1848, 渗透性较差; 第二层埋深约为 41.9~50.0 m, 渗透率为 18.0110, 渗透性较上层好; 两层水之间的地层含水量低, 为相对隔水层。(2) 该滑坡体存在 2 个滑动面, 在地面高程为 210 m 时, 浅层滑面埋深约在 18.1 m, 深层滑面埋深约在 42.1 m。(3)

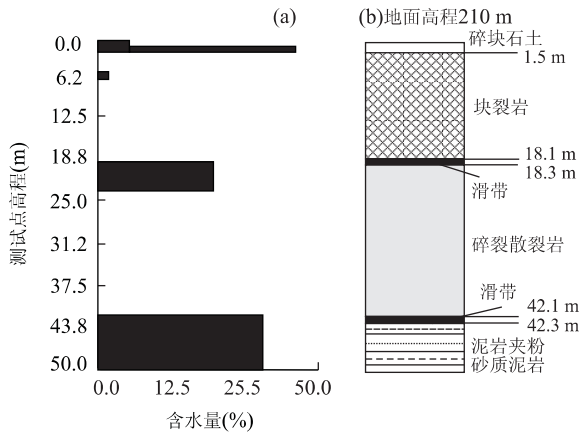


图 2 NMR 测试含水量—深度关系曲线

Fig. 2 Moisture content-depth curve by NMR

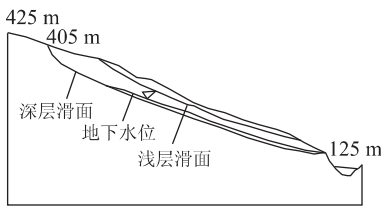


图 3 赵树岭滑坡地质模型二维图

Fig. 3 2D model of Zhaoshuling landslide

滑坡物质结构主要有 2 层:上部块裂岩,厚约 17 m;下部为散裂岩,厚约 25 m;滑床为透水差的泥岩夹粉砂质泥岩。对比赵树岭滑坡对应位置钻孔柱状图(图 2),可以看出,NMR 测试分析结果与钻孔揭露情况基本一致,在深部滑带附近由于分层较厚,所以结果应以钻孔结果为准。因此,可依据 NMR 测试分析结果和钻孔柱状图综合建立地质模型。由上述结果我们可以建立如图 3 的赵树岭滑坡模型。

3.3 有限元计算参数

有限元计算参数见表 2。

3.4 计算模型与计算工况

根据赵树岭的工程地质条件,选择北至长江中心,南至斜坡后缘上李家坡,南北长约 150 m,东至田家梁子—狮子包,西至黄家屋场,东西宽 900 m 的区域作为计算区域。选择 NNW345°为 x 轴正方向,NEE75°为 y 轴正方向,竖直向上方向为 z 轴正方向,从地表到高程 -200 m 的空间内进行三维有限元计算的网格剖分(图 4)。

计算模型的应力场边界条件确定为:南北边界和东西边界水平方向上固定、竖直方向上自由;底边界竖直方向上固定、水平方向上自由。

渗流场边界条件确定为:南边界为定水头边界;

表 2 有限元计算参数表

Table 2 Coefficients of finite element simulation

岩性	滑带	残坡积	滑体	泥岩	泥灰岩	灰岩
弹性模量(MPa)	80	150	3 000	2 000	4 000	4 500
泊松比	0.40	0.38	0.30	0.35	0.20	0.18
内聚力(MPa)	0.02	0.08	0.19	0.20	0.36	0.40
内摩擦角(°)	20	25	24	23	32	35
残余内聚力(MPa)	0.015	0.032	0.170	0.150	0.280	0.320
残余内摩擦角(°)	18	21	20	20	25	30
抗拉强度(MPa)	0.001	0.001	0.030	0.030	0.100	0.150
天然密度(kg/m ³)	2 000	2 100	2 500	2 300	2 550	2 580
饱和密度(kg/m ³)	2 200	2 300	2 600	2 590	2 690	2 680
孔隙率(%)	20	25	15	4	3	1
渗透系数(m/d)	3	10	10	0.05	5	10
饱和内聚力(MPa)	0.012	0.040	0.130	0.120	0.200	0.280
饱和内摩擦角(°)	18	23	22	21	30	32
饱和和残余内聚力(MPa)	0.01	0.02	0.10	0.08	0.15	0.20
饱和和残余内摩擦角(°)	16	19	18	18	23	28



图 4 有限元计算网格

Fig. 4 Mesh for FEM analysis

北边界为零流量边界;东西边界为零流量边界;底边界为零流量边界。

现采用自编有限元程序和 ANSYS 来对此进行评价分析。

计算工况:工况一:145 m 水位;工况二:175 m 水位;工况三:175 m 水位向 145 m 水位快速泄水(水位在一周内从 175 m 降到 145 m)。

4 有限元计算结果分析

4.1 考虑渗流自编有限元程序计算成果分析

图 5a,5b 为蓄水至 145 m 和 175 m 纵剖面的最大剪应力图。可以看出,当蓄水至 145 m 时,应力场改变较大,主要集中于滑坡前缘,在被江水淹没的地方,正应力和剪应力大小发生变化,不再出现单向应力,方向也略有变化。离水边较远的地方,应力特征

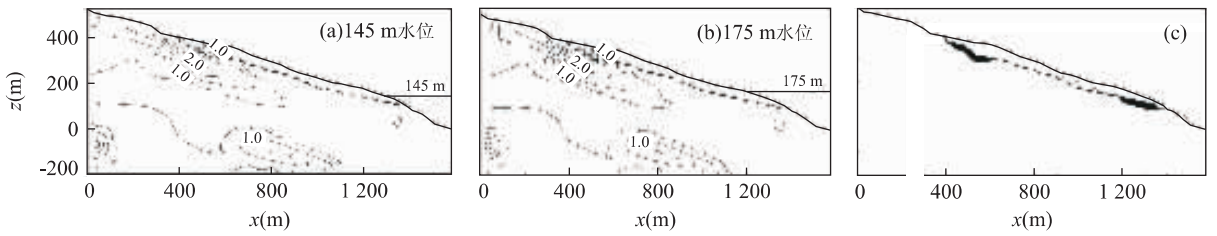


图 5 工况一、工况二时纵剖面最大剪应力图(a,b)和工况一塑性区分布(c)

Fig. 5 Max shear stress of the longitudinal section under condition 1 and 2 (a,b); plastic zone distribution of the section stress under condition 1 (c)

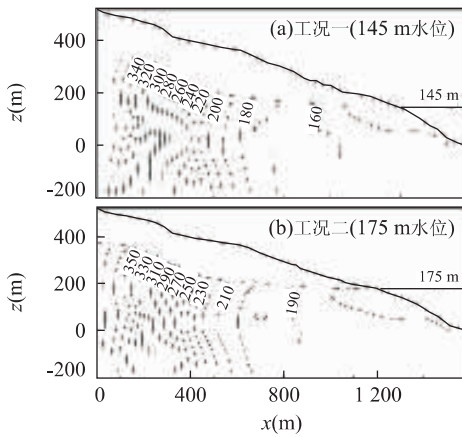


图 6 蓄水后渗流场等水头线

Fig. 6 Water head contour of the seepage field after water level rising

几乎不发生变化。

图 5c 为 145 m 水位主滑方向上的塑性区分布图。这时在斜坡前缘地带出现了塑性区,说明滑坡整体稳定性降低,尤其是滑坡前缘,稳定性较差,有局部失稳的可能性。

图 6 为蓄水后渗流场的模拟结果。地下水位线进一步抬升,更多的滑体被淹没,但滑坡后缘的水力

梯度有所变小。

图 7 为工况四泄水 15 d 时的应力场模拟结果。可以看出,应力场进一步发生改变,滑坡前缘应力略有降低, x 方向水平应力有所加大。位移则以水平方向位移为主,方向向外,位移量有所增加。塑性区范围进一步扩大,在滑坡前缘、中部、后缘均出现塑性区,说明滑坡整体稳定性进一步下降,特别是塑性区接近于相互贯通,因此,可以断定滑坡整体稳定性接近极限状态,安全储备很小,有整体滑移的可能性。

4.2 ANSYS 模拟结果分析

145 m 及 175 m 水位时,滑坡前缘的位移曲线见图 8。

应力分析:第一主应力等值线分布图从地表向下数值基本上按递减的规律,越靠近地表的等值线越曲折,同一等值线在滑坡前缘较后缘深度要大,第一主应力最大值主要分布在地表低洼地带。第三主应力分布等值线图与地表近似平行,且从地表向下依次递减。随着水位抬升在滑坡前缘应力集中现象明显,范围明显扩大。

位移分析:滑坡前缘突出部分位移最大。175 m 水位时,滑坡前缘位于水位以下一定深度,因而滑坡

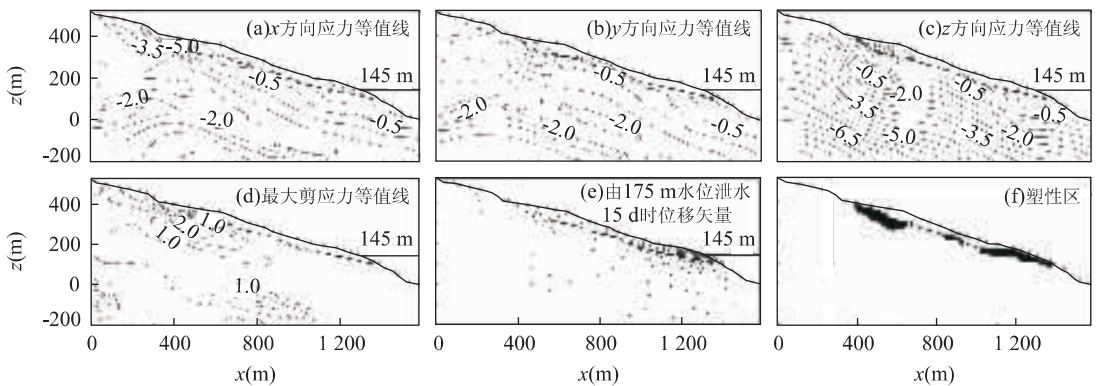


图 7 工况三泄水 15 d 时纵剖面应力场模拟结果

Fig. 7 Longitudinal section stress field after 15 d sluicing water under condition 3

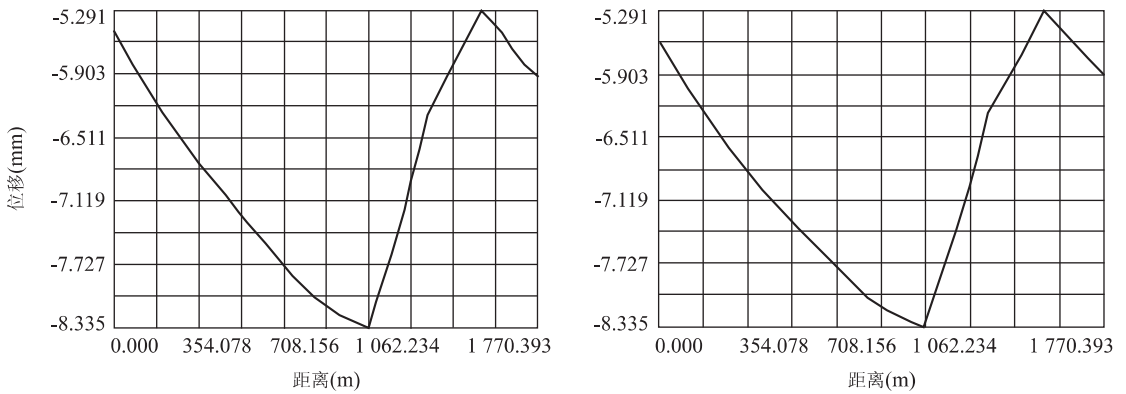


图 8 145 m 和 175 m 水位滑坡前缘沿轴线位移曲线

Fig. 8 Displacement curves of sliding zone in 145 m and 175 m water level

前缘表面存在水压力,位移稍小. 145 m 水位时滑坡位移较大,说明地下水对滑坡作用以渗透作用为主,而滑坡表面水压力其次。

水位从 175 m 降到 145 m,这时,位移以水平方向位移为主,方向向外,位移量有所增加. 塑性区范围进一步扩大,在滑坡前缘、中部、后缘均出现塑性区,滑坡整体稳定性进一步下降,特别是塑性区接近于相互贯通,滑坡整体稳定性接近极限状态,安全储备较小。

滑坡后缘附近水力梯度较大,渗流力较大,使滑坡后缘附近局部出现拉应力,导致滑坡后部稳定性较差,因此不排除滑坡后部局部位置出现小规模变形破坏的可能。

References

- Chai, J. R., Li, S. Y., 2004. Coupling analysis of seepage and stress fields in Xietan landslide in Three Gorges region. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(8): 1280—1284 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. L., Tang, H. M., 2002. Application of nuclear magnetic resonance to landslide research. *Rock and Soil Mechanics*, 23(Suppl.): 17—19 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Zhang, N. X., Liao, Q. L., et al., 2004. Analysis on hydrodynamic field influenced by combination of rainfall and reservoir level fluctuation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(21): 3714—3720 (in Chinese with English abstract).
- Liao, W., Liu, X. X., 2004. Study on landslide stability evaluation for the Three Gorges reservoir. *China Safety Science Journal*, 14(9): 104—107 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y. L., Zhang, C. D., 2000. Theory and method of the surface nuclear magnetic resonance for seeking under-

ground water. China University of Geosciences Press, Wuhan, 88 (in Chinese).

- Puser, A. Y., 1991. Software development for the NMR tomography of subsurface water bearing horizons. *USSR Acad. Sci. Moscow*
- Semenov, A. G., Burshtein, J. F., 1968. Groundwater survey method and apparatus. US Patent 3398355.
- Sun, Y. Z., Su, A. J., 2005. De-layer observation technique and application in complex landslides. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(2): 241—244 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, G. F., Chen, C. X., Lin, T., et al., 2004. Stability analysis of clayey gentle slopes considering variation of water level. *Rock and Soil Mechanics*, 25(11): 1754—1760 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴军瑞, 李守义, 2004. 三峡库区泄滑滑坡渗流场与应力场耦合分析. *岩石力学与工程学报*, 23(8): 1280—1284.
- 胡新丽, 唐辉明, 2002. 核磁共振在滑坡研究中的应用技术. *岩土力学*, 23(增刊): 17—19.
- 李晓, 张年学, 廖秋林, 等, 2004. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析. *岩石力学与工程学报*, 23(21): 3714—3720.
- 廖巍, 刘新喜, 2004. 三峡库区滑坡稳定性评价研究. *中国安全科学学报*, 14(9): 104—107.
- 潘玉玲, 张昌达, 2000. 地面核磁共振找水理论和方法. 武汉: 中国地质大学出版社, 88.
- 孙云志, 苏爱军, 2005. 复杂滑坡体地下水分层观测技术与应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(2): 241—244.
- 肖国峰, 陈从新, 林涛, 等, 2004. 考虑水位变动影响的粘土质缓坡稳定性分析. *岩土力学*, 25(11): 1754—1760.