

文章编号: 1000-7598-(2005)增刊-001-05

水位涨落引起分层边坡滑坡的机理分析

张均锋

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 基于分层边坡在水位涨落时发生滑坡的模拟实验, 简要描述了实验中的主要现象, 计算了实验模拟的分层坡体内与水位变化直接相关的动态渗流场、孔隙水压力场与渗透速度场分布。根据计算结果, 对水位变化导致坡体变形失稳的机理进行了分析, 为这类分层边坡滑坡的治理提供了依据。

关 键 词: 分层边坡; 滑坡; 水位涨落

中图分类号: TV 22 文献标识码: A

Mechanism analysis of landslide of a layered slope induced by drawdown of water level

ZHANG Jun-feng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The frequent drawdown of water level of the Yangtse River will greatly influence the stability of the widely existing slopes in the Three Gorges Reservoir zone, especially those layered ones. Apart from the fluctuating speed of water level, the different geological materials will also play important roles in the failure of slopes. Thus, it needs firstly study the mechanism of such a landslide caused by drawdown of water level. A new experimental setup has been designed to study the performance of a layered slope under the drawdown of water level. The pattern of sliding of a layered slope induced by drawdown of water level has been explored by means of simulating experiments. The influence of fluctuating speed of water level on the stability of the layered slope was probed, especially on the whole process of deformation and evolution of landslide of the slope. The experimental results showed that the slope is stable during the water level being rising, and the sliding body occurred in the upper layer of the slope under certain drawdown speed of water level. In the process of slope failure, some new small sliding bodies developed on the main sliding body, and these small sliding bodies could speed up the disassembly of the whole slope. Based on the simulating experiment about landslide of a layered slope under drawdown of water level, the whole process of the seepage velocity, the pore water pressure, and the gradient of pore water head within the slope body were calculated. The computational results were in good agreement with the experimental results. Accordingly, the mechanism of deformation and landslide of the layered slope induced by drawdown of water level was analyzed, which may provide basis for treating this kind of layered slopes in practical engineering.

Key words: layered slope; landslide; drawdown of water level

1 引 言

库水位涨落诱发的岸坡失稳严重威胁着库岸水电工程和周围居民的安全。1963 年意大利北部的 Vajont 水库近坝段滑坡致使当时世界上最高的双曲拱坝失效, 毁灭下游一座城市和几个镇, 并有 1926 人丧生于涌浪造成的洪水^[1]。1981 年, 一场近百年一遇的洪水就使重庆到宜昌段的长江两岸 100 余处松散堆积体发生变形。1965~1969 年奥地利 Cepatsch 坝在水库蓄水和运行初期, 坝上游的几处滑坡体发生了 10 余米的变形。1942~1953 年美国大古力水库引发了约 500 m 处岸坡失稳。我国三峡

水库已开始蓄水, 库区运行水位在高程 135 m 至 175 m 之间涨落, 而库区岸坡的松散堆积层在水位周期性变化的条件下, 再加上大气降雨和特殊的地质环境, 坡体的不均匀性、分层、节理以及库水的渗透与反渗等都将直接影响坡体的稳定性^[3-6]。

清江隔河岩库区的茅坪滑坡是在 1993 年 4 月水库蓄水后开始发生变形的, 至 2001 年 9 月最大位移已达 2.1 m。该滑坡前缘 180 m 长的平缓段(一级平台)有近 3/4 是位于库水位以下(主要为松散堆积体)。根据现场布置的地表和地下监测结果, 滑坡的变形量对水库水位的下降反应十分明显, 而对

收稿日期: 2005-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.10372104)和国家重点基础研究发展规划(973)项目(No.2002CB412706)。

作者简介: 张均锋, 男, 1966 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事滑坡机理及动荷载下边坡稳定方面的研究工作。E-mail: zhangjf@imech.ac.cn

库水位的上升反应要迟缓的多。尽管茅坪滑坡是在库水位有较大变动和降雨综合作用下发生的,但库水位涨落对滑体造成的介质材料力学效应、水力学效用等都是导致滑坡的主要因素之一^[7,8]。

基于上述背景,笔者通过实验研究了水位涨落时层状坡体由变形到滑坡的过程,并对实验现象给出了定性的解释^[9]。本文主要分析了实验中模拟的坡体,在水位涨落条件下的渗流场速度、压力水头分布及梯度,探讨水位变化时水力作用对坡体变形的影响,而坡体介质材料变化效应这里不作论述。

2 实验装置与结果

2.1 实验装置

文献[10]在研究降雨引起坡体破坏时采用了有机玻璃箱,并设计了具有上游水补充的辅助装置。笔者也采用高透明度的有机玻璃设计了实验装置如图1所示。有机玻璃箱壁厚20 mm,内部尺寸(长×宽×高)为2 000 mm×800 mm×1 100 mm。箱体底部100 mm设置夹层支撑,并用5 mm厚的带孔钢板覆盖,孔径20 mm,孔距50 mm,钢板上固定不锈钢网,网孔3 mm×3 mm。水位的变化就是通过进排水阀给夹层注水或放水来调节。主箱内右端的小有机玻璃箱(尺寸:800 mm×300 mm×1 100 mm),只在靠坡体的侧面带孔(孔径为3 mm),用来作为上游坡内水的补给。不锈钢网,网孔3 mm×3 mm。水位的变化就是通过进排水阀给夹层注水或放水来调节。主箱内右端的小有机玻璃箱(尺寸:800 mm×300 mm×1 100 mm),只在靠坡体的侧面带孔(孔径3 mm),用来作为上游坡内水的补给。

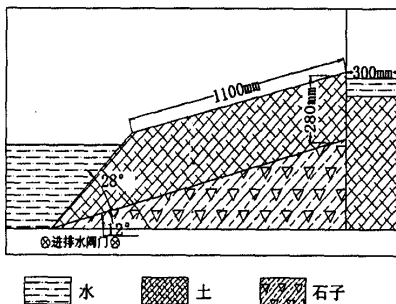


图1 滑坡实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

2.2 坡体与土层介质参数

实验中构造层状坡体模型为:(1)上层为粘土,模拟风化土和壤土(还可能夹杂碎石);(2)第二

层为石子,模拟未风化的崩塌堆积层,如碎石、块石或卵石等;(3)底层固定的钢网、钢板模拟基岩。初始坡体尺寸见图1。坡体侧面靠近有机玻璃箱的侧壁处设置示踪点,坡面上用细棉线布置方格,以便对坡体变形、滑坡的启动和滑移量的测量。实验土样选用凝聚力较低的淤泥,其主要物理力学性质为:土密度 $\rho_s=2.75 \text{ g/cm}^3$,孔隙比 $e=1.8$,天然干密度 $\rho_d=9.8 \text{ g/cm}^3$,饱和密度 $\rho=1.625 \text{ g/cm}^3$,渗透系数 $K=3.20 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,垂直压缩系数为 1.78 MPa^{-1} ,压缩模量为 1.935 MPa 。快剪: $c=10.4 \text{ kPa}$, $\phi=0.95^\circ$ 。固结快剪: $c_u=14.5 \text{ kPa}$, $\phi_u=13^\circ$ 。三轴试验(a)不固结不排水剪: $c=12 \text{ kPa}$, $\phi=0.57^\circ$,(b)固结不排水剪: $c_{cu}=11.2 \text{ kPa}$, $\phi_{cu}=13.3^\circ$ 。

2.3 实验结果

在 12° 坡角状态下通过箱底的进排水阀缓慢地进排水改变水位,使坡体经过固结、变形的过程后完全稳定下来。提高实验箱的右端改变坡角,使坡面坡角达 23° 。改变水位涨落的速度,观察坡体的变形,将整个过程用摄像机记录下来以便于分析。实验中水位变化如图2所示。可以观察到:当下游水位达到300 mm时,坡面出现张拉裂缝(图3)。2 min后,下游水位236 mm,裂缝长度达155 mm左右、宽4 mm。随着下游水位的逐渐降低,裂缝的长和宽越来越大,坡体的一部分也开始下滑,且滑动越来越快。滑动过程中还有小的滑体(次滑体)产生,进一步加剧主滑体的滑动(图4)。图5(b)中的第2个速度峰值就是由于次滑体的运动所引起。当坡脚堆积越来越多,滑动速度也就越来越慢,直至最后停止,整个过程持续约20 min。

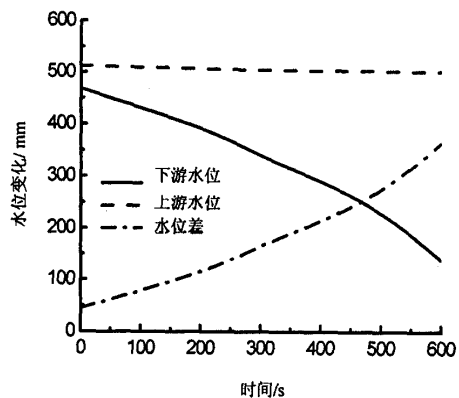


图2 水位随时间的变化
Fig.2 Water level versus time

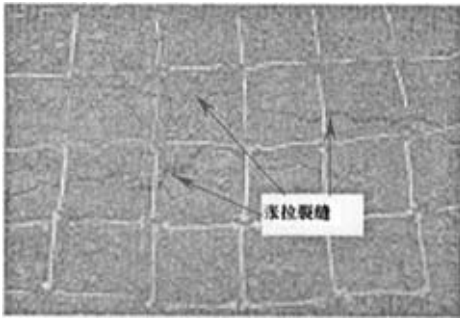


图3 坡面上的张拉裂缝

Fig.3 Tensile cracks on the surface of slope

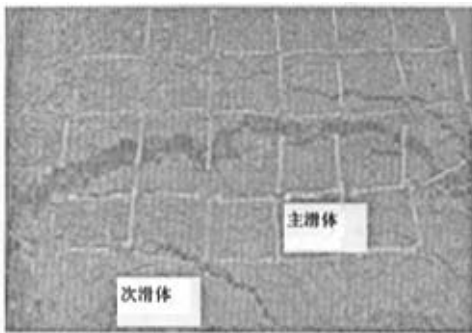


图4 主滑体与次滑体

Fig.4 The main and secondary sliding bodies

若将坡面产生张拉裂缝的时间认为就是滑动开始的时间,张拉裂缝的宽度也认为是滑移的位移,则通过图像分析,坡体位移变形和滑动速度随时间的变化如图5所示。

实验中坡角的变化以及滑面的形状可从实验箱的侧壁观测。根据从实验箱侧壁拍摄的照片,可知坡面坡角减小了 5° ,滑面的形状接近圆弧形。

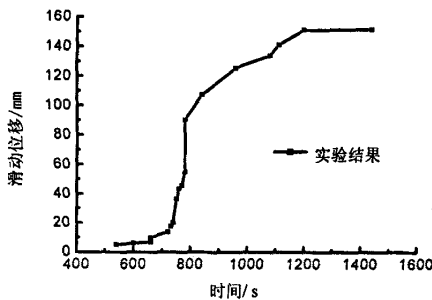


图5 滑动位移与时间的关系

Fig.5 Sliding displacement versus time

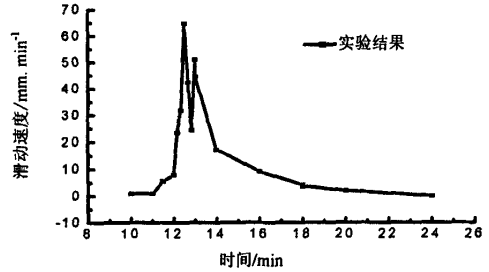


图6 滑动速度与时间的关系

Fig.6 Sliding velocity versus time

3 水位变化时渗流场数值模拟结果

由于水位的涨落是导致滑坡的主要因素之一,而水位涨落又是通过坡体内的渗流场和孔隙水压力场变化起作用。对实验中的坡体来说上层渗透性较差,短时间内坡内水位线变化不大,而下游水位的急剧下降造成坡内孔隙水压力的梯度变化较大,因此,水位变化产生的水力学效应是诱发滑坡的最主要的原因。

用有限元法对所模拟的坡体中的渗流场进行数值模拟,其中土层渗透系数 $k_s=3.2 \times 10^{-6}$ m/s,石子渗透系数 $K_g=1.0 \times 10^{-2}$ m/s;边界条件为给定外部水头高度,底边和其它边界条件为自由边界。图7为坡体内饱和水位线(水头为零)随时间的变化,可以看出,在上游水位几乎不变的情况下,由于上层土坡的渗透性很差,即使下游水位急剧下降,坡内的水位线下降也不大。图7~11分别为坡体外水位刚开始下降(高度 $h=46.8$ cm,时间 $t=0$ s)和坡外下游水位到达 $h=13.8$ cm,时间 $t=600$ s,两种工况下的孔隙水压力场、渗透速度以及水力梯度场分布的等值线。应注意的是,图7和图8中坡体内的水位线是表示计算的水头为零的等值线,水位线以上的孔隙水头为负值说明处于非饱和状态。

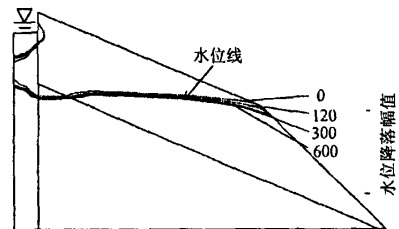


图7 坡体内水位线随时间变化

Fig.7 Change of water table in slope versus time

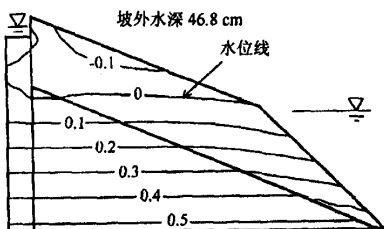


图8 水头压力等值线(单位: m)
Fig.8 Contours of water head(unit: m)

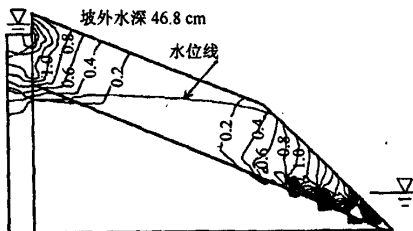


图13 水力梯度等值线(单位: m/s)
Fig.13 Contours of gradient of pressure head(unit: m/s)

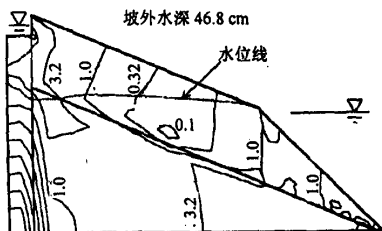


图9 速度场等值线(单位: 10^{-6} m/s)
Fig.9 Contours of velocity (unit: 10^{-6} m/s)

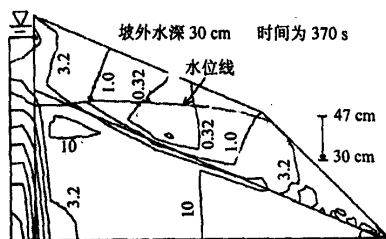


图14 速度场等值线(单位: m/s)
Fig.14 Contours of velocity (unit: m/s)

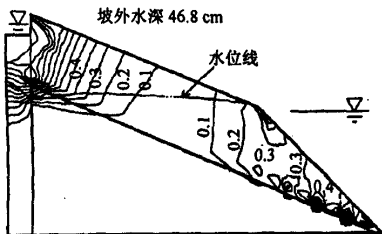


图10 水力梯度等值线(单位: m/s)
Fig.10 Contours of gradient of pressure head (unit: m/s)

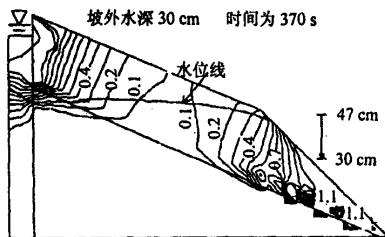


图15 水力梯度等值线(单位: m/s)
Fig.15 Contours of gradient of pressure head (unit: m/s)

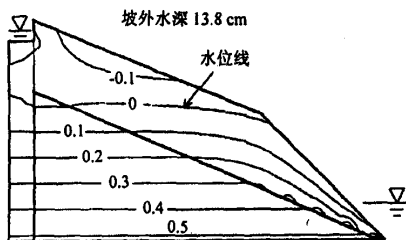


图11 水头压力等值线(单位: m)
Fig.11 Contours of water head(unit: m)

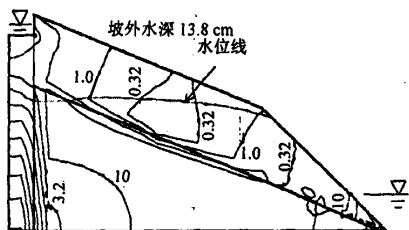


图12 速度场等值线(单位: 10^{-6} m/s)
Fig.12 Contours of velocity (unit: 10^{-6} m/s)

比较上述两个时刻(水位差最大)的计算结果可知,变化较大的是孔隙水压力梯度场和渗透速度场。由于实验中发现滑动裂隙的水位为300 mm(时间为370 s),因此有必要给出该时刻的压力梯度和渗透速度场分布,如图14、图15所示。

5 水位变化诱发滑坡的机理

由图8~15可见:

(1) 水位下降前后,坡体内孔隙水的共同特点是在坡脚处的水力梯度较大、渗透速度较大,也就是通常所说的渗透压力差较大,尤其是下降到较低水位时,水力梯度更大(图13),这是坡体不稳定的因素之一。

(2) 坡外水位下降过程中,靠近坡体临空面及坡脚处孔隙水压力梯度增加很快,这就是动孔压的

作用结果,是导致滑坡的又一个因素是图 10 图 13、图 15)。

(3) 图 12、图 14 中坡体临空面和坡脚附近的速度等值线明显高于图 9 中的速度等值线,说明水位下降后动孔隙水压力大于水位下降前的动孔隙水压力。

实验中水位变化对渗透性较强的石子层来说,不会形成较大的孔隙水压力梯度。相反,在渗透性较弱的土层中,由于水位下降较快,孔隙中的水来不及渗出,加上上游小箱中不断有水通过小箱侧壁小孔渗透到土层中,这样在土层中就形成较大的孔隙水压力梯度,图 10、图 13、和图 15 充分说明了这一点,而坡面的角度又相对较大,从而在重力和孔隙水压力(动压和静压)的双重作用下,坡面表层就发生拉伸变形,且在临空面附近这种拉伸变形是最大的,因此坡面上出现的张拉裂缝在临空面附近出现的较早,且张裂较大。随着表面张拉裂缝向坡内的扩展,再加上坡脚处的高水力梯度,其下面部分土体内逐渐形成了滑面而发生滑坡。

6 结 语

水位变化会在坡体内形成一定的孔隙水压力梯度,从而发生渗流,而渗流速度的大小直接反映了坡内的渗透压力大小。本文在对实验室模拟分层坡体滑坡的基础上,对实验坡体模型在水位变化过程中的渗流场、孔隙水压力场和水头梯度进行了计算。通过计算可知,水位降低后孔隙水在坡脚处产生了较大的压力梯度,使坡体更加不稳定,加上坡内渗流造成的动渗透压力、静水压力以及水位下降后较大的临空面和临空角度,在这些因素的共同作用下坡体开始变形直至产生滑面而滑坡。这样基本弄清了此类滑坡发生的机理。在实际滑坡治理工程中,必须合理设计排水系统、加强坡脚处的支护,以防止由于库水位涨落过快而造成塌岸或滑坡。

参 考 文 献

- [1] Trollop D H. The vaiont slope failure[J]. *Rock Mechanics*, 1980, 13(2): 71-88.
- [2] 崔政权, 李宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [3] 蔡耀军, 崔政权, Cojean R. 水库诱发岸坡变形失稳的机理[A]. 第六次全国岩石力学与工程学会大会论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000. 618-622.
- [4] 丁恩保. 金沙江水电开发中的超高陡边坡问题[J]. *工程地质学报*, 2000, 8(2): 131-135.
- [5] 程池元. 大沅河水库大坝滑坡分析及处理[J]. *江西水利科技*, 1992, 18(3): 207-210.
- [6] 汤维增. 水库放水导致土坝内坡滑塌事故的浅见[J]. *江西水利科技*, 1992, 21(4): 197-202.
- [7] 邓建辉, 马水山, 张保军, 等. 清江隔河岩水库茅坪滑坡复活机理初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10): 1 730-1 737.
- [8] 王尚庆, 易庆林, 严学清. 清江隔河岩库区茅坪滑坡变形特征及其影响因素[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1999, 10(2): 40-44.
- [9] 张均锋, 孟详跃, 朱而千. 水位变化引起分层边坡滑坡的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2 676-2 680.
- [10] Enoki M, Kokubu A A, Ikeda Y. Infiltration of rainwater and slope failure[A]. *Proceedings of the Ninth International Conference and Field Trip on Landslides*[C]. Thomas Robbert ed. [s.l.]: A. A. Balkema Rotterdam. 1999. 27-35.