

水位变化引起分层边坡滑坡的实验研究^{*}

张均锋 孟祥跃 朱而干

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 通过对分层的边坡在水位变化时滑坡的模拟实验,考察了分层坡体的滑坡模式、坡体变形、破坏和渗流引起的滑坡,重点考察了水位涨落速度对坡体稳定的影响,以及坡面从产生张拉裂缝直到形成滑面的整个过程,并对这类滑坡中的现象给出了定性解释。最后用有限元对实验坡体进行了应力和位移的静力场分析,计算结果与实验结果基本一致。

关键词 岩土力学, 滑坡, 分层边坡, 水位涨落, 渗流, 有限元法

分类号 P 642.22, TU 458^{+.3}

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)16-2676-05

TESTING STUDY ON LANDSLIDE OF LAYERED SLOPE INDUCED BY FLUCTUATION OF WATER LEVEL

Zhang Junfeng, Meng Xiangyue, Zhu Erqian

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

Abstract The frequent fluctuation of water level of 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 behavior variation of geological materials will also play important roles in the failure of slopes. A new experimental setup was designed to study the behavior of a layered slope under the fluctuation of water level. The landslide pattern of a layered slope induced by fluctuation of water level is explored by means of simulating experiments. The influence of fluctuating speed of water level on the stability of layered slope is probed, especially the whole process of deformation and development of the landslide with time. The experimental results show that the slope is stable during the rising of water level, and the sliding body occurs in the upper layer of the slope under certain drawdown speed of water level. In the process of slope failure, some new small sliding body would be developed on the main sliding body, which would speedup the disassembly of the whole slope. A qualitative analysis and explanation about the phenomena occurring in such a kind of landslide are also given. As the permeability of the upper soil is very low, the gradient of out-seepage force of the pore water is very large nearing the crest of the slope. The large gradient of out-seepage force of pore water does cause the tensile cracks on the slope. Of course, the component of weight along the inclination is another unneglectable factor for the occurrence of this landslide. Furthermore, the softening effect of water on soil should be considered for a real landslide, especially for the initially non-saturated slopes. At last, the distribution of stress and displacement of the slope is calculated by using static finite element method, and the computation result is in good agreement with experimental result.

Key words rock and soil mechanics, landslide, layered slope, fluctuation of water level, seepage, finite element method

2002 年 12 月 5 日收到初稿, 2003 年 3 月 6 日收到修改稿。

^{*} 国家自然科学基金(10372104)、国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412706)与中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJ CX2-SW-L1)资助课题。

作者 张均锋 简介, 男, 1966 年生, 1998 年于中国科学院力学研究所获博士学位, 现任高级工程师, 主要从事山体滑坡灾害机理与防治方面的研究工作。E-mail: zhangjf@imech.ac.cn

1 引言

三峡水库 2003 年开始蓄水,未来库区运行水位提高,每年在高程 135~175 m 周期涨落,而库区岸坡大部分由崩滑体和结构松散的岩体构成^[1],在水位周期性变化的条件下,边坡土石体的不均匀性以及库水的渗透与反渗将直接影响坡体的稳定性,严重者可能对库区的工程和人们的生活带来不便和危害。

由于水位涨落造成的崩、滑事故已有许多先例:意大利的 Vaiont 坝上游左岸大滑坡是最著名的,毁灭下游一座城市、几个镇,并有 1 926 人丧生^[2];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^[3]。而乌江渡水电站大、小黄崖区在水库蓄水后分别出现 300×10^4 和 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的不稳定体,一旦滑入江中,坝区辅助建筑物、乌江镇、川黔铁路、公路桥梁等都将受到威胁^[4]。大沅河水库 1981 年 11 月放空时发生的主坝滑坡,是库水位骤降的主要诱发因素^[5]。

文[6]对清江隔河岩水库蓄水后发生的茅坪滑坡的影响因素进行了分析后认为:库水位上涨时滑坡前缘和滑带被水淹没,土石体处于饱和状态,降低了滑带抗剪强度;库水位下落时,土石体中的地下水来不及排出,产生了孔隙水压力,滑体内部产生向清江方向的动水压力,驱动滑体下滑,尤其在高水位陡落时这种作用更为强烈。而库水位反复涨落是滑坡体前部的主要环境动力因素。文[7]认为,库水位降速过快、降幅过大,是导致土坝上游边坡发生严重滑塌事故的主要因素。此外,文[8,9]等探讨了水库土石坝边坡稳定的分析方法。

基于上述背景,本文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、滑坡的模式等,并对实验现象给出了定性的解释。本文主要给出实验结果并作定性分析,坡体变形的定量分析和渗流场对坡体稳定的影响将另文给出。

2 实验装置与层状坡体

2.1 实验装置

文[10]在研究降雨引起坡体破坏时采用了 $140 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 的有机玻璃箱,并设计了具有上游水补充的辅助装置。为了便于观察坡体变形直至滑坡的过程,选用高透明度的有机玻璃箱作为主要

的实验装置(图 1)。有机玻璃箱壁厚 20 mm,内部尺寸为 $2\,000 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 1\,100 \text{ mm}$ (长×宽×高)。箱内离箱体底部 100 mm 处设置夹层支撑,并用 5 mm 厚的带孔钢板覆盖,其孔径为 20 mm,孔距为 50 mm,钢板上固定不锈钢丝网,网孔为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。水位的变化是通过进、排水阀给夹层注水或放水来调节。主箱内右端还有一个有机玻璃小箱(尺寸为 $800 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 1\,100 \text{ mm}$),小箱靠坡体的侧面带孔(孔径 3 mm),用来给上游坡体内补水。

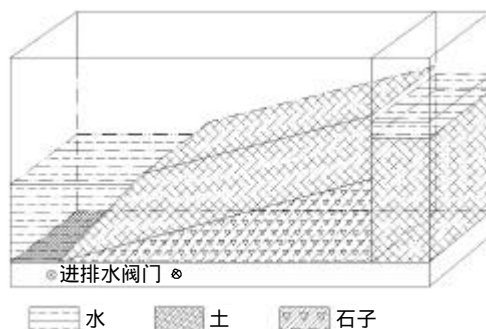


图 1 滑坡实验主箱示意图

Fig.1 Main test box for landslide study

2.2 土样的性质与坡体参数

由于坡体变形主要是重力和水的渗透压力作用,而室内小型实验不能满足相似性。为了能尽量反映实际,根据无量纲参数 $c/r_g H$ (c 为粘聚力, r 为土样密度, g 为重力加速度, H 为土样厚度),必须降低实验土样的粘聚力和内摩擦角。因此,选用粘聚力 c 较低的淤泥,其主要物理力学性质如下:土粒介质密度 $r_s = 2.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,孔隙比 $e = 1.8$,天然干密度 $r_d = 0.98 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,饱和密度 $r = 1.625 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,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 ,液性指数为 1.51,流限为 50.9,塑限为 27.2,塑性指数为 23.7,固结系数为 $7.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。(1) 快剪: $c = 10.4 \text{ kPa}$, $j = 0.95^\circ$;(2) 固结快剪: $c_u = 14.5 \text{ kPa}$, $j_u = 13^\circ$ 。三轴抗压强度:(1) 不固结不排水: $c = 12 \text{ kPa}$, $j = 0.57^\circ$;(2) 固结不排水: $c_{cu} = 11.2 \text{ kPa}$, $j_{cu} = 13.3^\circ$ 。无侧限抗压强度:(1) 原状土 $q_u = 20.45 \text{ kPa}$;(2) 重塑土: $Q_u = 5.4 \text{ kPa}$ 。

考虑到层状坡体的构造,将坡体模型简化如下:(1) 上面的部分为淤泥,主要模拟风化土和壤土(还可能夹杂碎石);(2) 第 2 层为石子,表示该层为碎石、块石或卵石,该层为未风化的崩塌堆积层;(3) 固定的钢丝网、钢板为底层,模拟基岩。初始坡体

及各部分尺寸见图 2, 通过水位涨落使坡体完全固结。坡体侧面与有机玻璃箱的侧壁间设置示踪点, 坡面上用 10 cm 长的细棉线布置方格, 用作对坡体变形的观测、滑坡的启动和滑移量的测量。

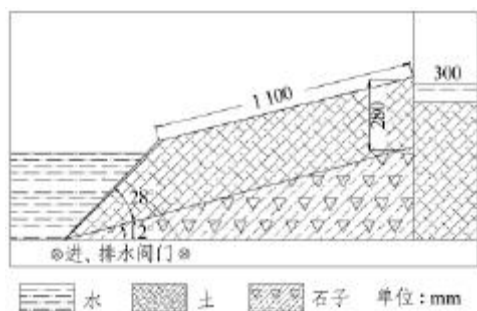


图 2 初始坡体尺寸示意图

Fig.2 Initial size of slope

3 实验现象与结果

在图 2 中, 提高试验箱的右端以改变坡角, 使上坡面的坡角达 23° 。通过箱底的进、排水阀缓慢地改变水位, 使坡体经过固结、变形的过程后稳定下来, 水位随时间的变化如图 3 所示。应当注意的是: 水位以图 3 所示的速度下降时, 不会引起坡体的滑动, 而只会产生固结沉降。

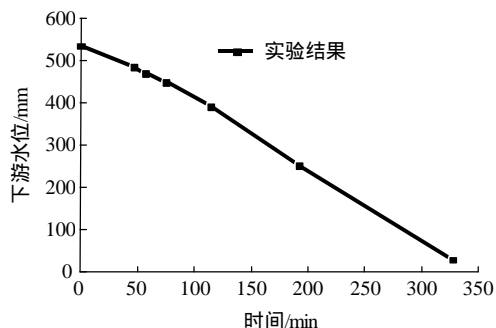


图 3 水位随时间缓慢变化

Fig.3 Slow variation of water level with time

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分析。当坡体完全被水淹没后, 通过排水阀快速放水, 使下游水位下降较快, 而坡体上游小箱内的水通过侧壁小孔慢慢渗入坡体, 使上游水位下降较慢, 水位变化如图 4 所示。

实验中观察到: 当下游水位达到 300 mm 时, 坡面出现张拉裂缝见图 5。2 min 后下游水位为 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, 裂缝的长度和宽度越来越大,

坡体的一部分也开始下滑, 且滑动越来越快。滑动过程中伴有小的滑体产生, 进一步加剧主滑体的滑动。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, 整个过程约持续 20 min。

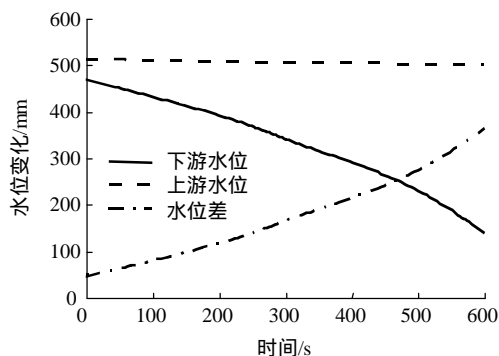


图 4 水位随时间的变化(较快)

Fig.4 Quick variation of water level with time

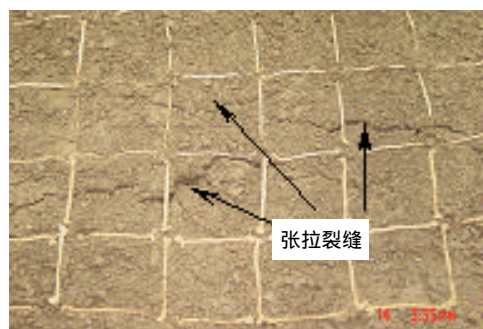


图 5 坡面上的张拉裂缝

Fig.5 Tensile cracks on the surface of slope

由于整个过程中裂缝宽度的增加与滑体向下滑移几乎是同时发生的, 因此, 在进行图像分析时很难将横向和竖向的位移区分开来。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, 则通过图像分析得到坡体位移变形和滑动速度随时间的变化如图 6, 7 所示。

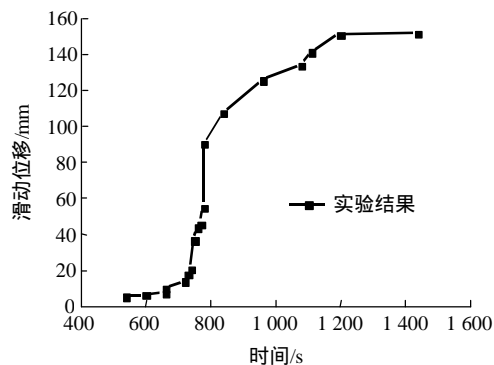


图 6 滑动位移与时间的关系

Fig.6 Sliding displacement versus time

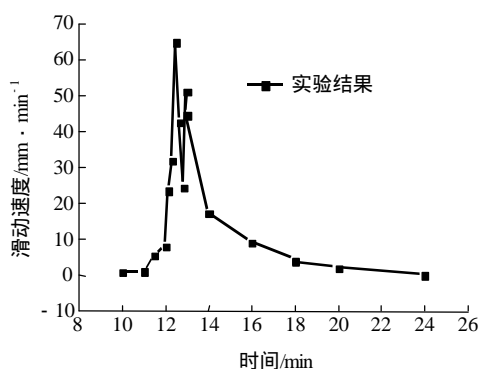


图 7 滑动速度与时间的关系

Fig.7 Sliding velocity versus time

实验中滑坡的滑舌是淹没在水下的,当箱内的水放完时可见明显的滑舌。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,可以知道坡体临空面坡角减小了 5° ,滑面的形状接近圆弧形。

4 实验现象的定性分析与解释

在实验中,影响滑坡的因素除了坡体土样的物理力学性质及坡体几何尺寸外,主要是水位的变化。一般情况下,在水位上涨的过程中(无论快慢),坡体基本没有滑动,只有水位下降时,坡体才会产生变形和滑动。而当水位变化较为缓慢时(图 3),坡体也不会滑动,只是坡面上可能会产生较细的张拉裂缝,但不会滑坡。

实验中当水位以图 4 所示的速度变化时,滑面并不是发生在渗透性变化较大的土石界面,而是产生在上层渗透性较差的土层中,这是因为水位变化时,对渗透性较强的石子层来说,不会在该层中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,而坡体临空面的坡角又相对较大,从而在重力和孔隙水压力的双重作用下,坡面表层就发生拉伸变形,而在临空面附近,这种拉伸变形又是最大的,因此,坡面上出现的张拉裂缝在临空面附近出现得较早,且张裂较大。

随着水位下降、裂缝的继续扩张,发展最快的裂缝下降也最快,沿该裂缝深部逐步形成了滑移面。主滑体一旦形成,其坡面上其他的张拉裂缝就不再

继续扩张。随着主滑体的滑动,由于滑面的形状不规则或滑舌各部分向前推进的位移量不同,在主滑体上又产生了小的滑体(次滑体)如图 8, 9 所示,且次滑体的滑动反过来又会加剧主滑体的滑动。从图 7 可以看出,在第 13 min 左右,主滑体的速度由下降而又变为上升,从而有 2 个速度峰。根据图像分析,这正是次滑体脱离主滑体的过程中所引起的。

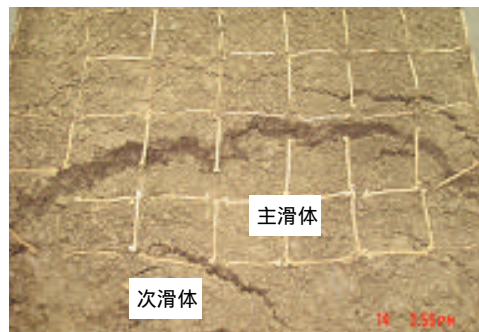


图 8 主滑体与次滑体

Fig.8 The main and secondary sliding bodies

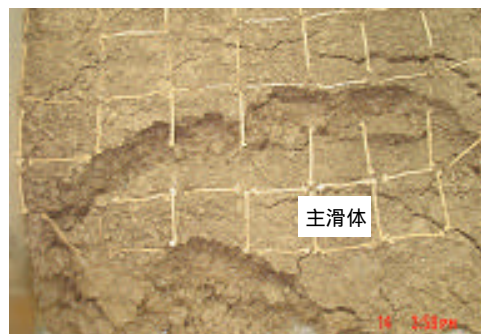


图 9 次滑体脱离主滑体

Fig.9 Secondary sliding body departing from the main one

5 坡体应力与变形场分析

基于实验中的坡体,采用有限元进行静态应力分布和位移变形的分析,各部分几何尺寸同图 2。计算时沿坡体纵轴剖分,剖面为对称边界,粘土层与石子层间的界面用柔性接触单元;土层、石子层与边壁有机玻璃的界面都采用刚体-柔体接触单元;坡体单元为 8 节点实体单元。参数选取同节 2.2。计算模型与网格见图 10(仅计算原始尺寸的一半)。

图 11 为 Von Mises 应力场等值线分布,图 12 为坡体位移变形场等值线。从图 12 可以看出:发生位移最大的区域形状与实验中滑坡区域的形状(图 8, 9)基本是一致的,而且滑动区域以上位移较大的区域在实验中也发生了张拉裂缝。

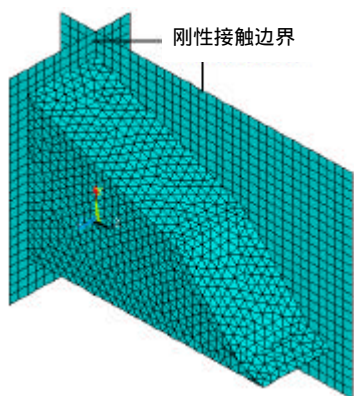


图 10 计算网格模型

Fig.10 Meshes of computing model

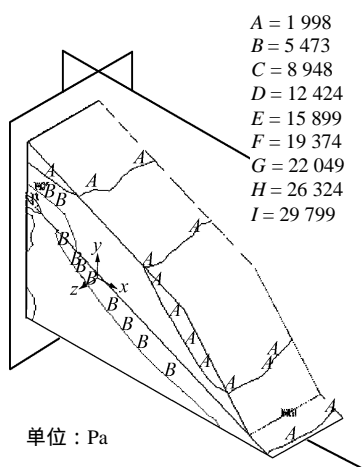


图 11 Von Mises 应力等值线

Fig.11 Contours of Von Mises stresses

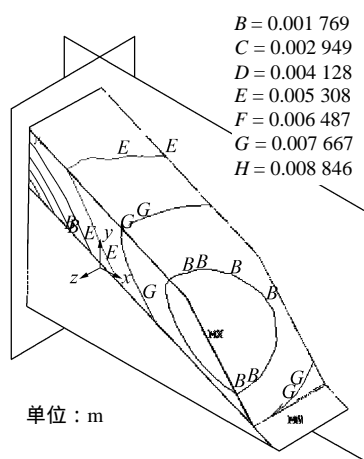


图 12 位移场等值线

Fig.12 Contours of displacement field

6 结 语

对具有渗透性不均匀的分层坡体, 由于水位下降的速度不同, 会产生不同的变形: 水位下降慢, 坡体内孔隙水压力梯度小, 坡体变形小(沉降或小的张拉裂缝); 水位下降快, 孔隙水压力梯度大, 张拉裂缝发展快, 易形成滑面而引起滑坡。滑坡发生时, 在主滑体上会产生次滑体, 当次滑体在主滑体上滑动时, 会加剧主滑体的滑动速度和位移。导致这类滑坡发生的根本原因是: 水位快速下降后, 坡体中的孔隙水向外排出时产生的外渗透力。这类主要由水的作用而引起的滑坡必须测量、分析水位涨落的过程中孔隙水压力的变化, 以及整个渗流场的分布情况, 这部分内容将另文发表。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Trollope D H. The Vajont slope failure[J]. Rock Mechanics, 1980, 13(2): 71~88
- 3 蔡耀军, 崔政权, Cojean R. 水库诱发岸坡变形失稳的机理[A]. 见: 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 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
- 7 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
- 8 陈祖煜. 库水位骤降期土石坝边坡稳定分析总应力法的计算步骤[J]. 水力水电技术, 1985, (9): 30~32
- 9 陈祖煜, 赵毓芝. 沟后水库坝坡稳定研究——确定性模型[J]. 青海水力发电, 1996, (1): 37~42
- 10 Enoki M, Kokubu A A, Ikeda Y. Infiltration of rainwater and slope failure[A]. In: Griffiths James S, Stokes Martin R, Thomas Robbert G ed. Proceedings of the Ninth International Conference and Field Trip on Landslides[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999, 27~35