

库水位骤降偶遇地震作用下黏土心墙坝渗透及抗震稳定性分析

吴平, 万燎榕

(江西省水利规划设计研究院, 江西 南昌 330029)

摘要: 利用岩土软件 Geostudio, 根据非饱和渗流原理, 以四方井水利枢纽中的黏土心墙土石坝为背景, 分析了库水位骤降偶遇地震作用下黏土心墙土石坝上下游坝坡渗流特性及抗震稳定性。计算结果表明: 库水位下降速率越大, 上游坝坡的孔压力变化越剧烈, 安全稳定系数越小; 监测点位置越高, 孔压越难以达到稳定值。对于下游坝坡而言, 孔压力变化相对平缓, 监测点距离地下水位越远, 孔压越难以稳定, 孔压力响应库水位骤降的时间越长; 库水位骤降至死水位情况下发生地震时, 库水位骤降速率越大, 上游坝坡安全系数越小, Newmark 位移越大。下游坝坡的安全系数对于骤降速率不敏感, 安全系数基本一致, Newmark 位移非常接近。研究成果可为实际工程管理运行提供一定的参考。

关键词: 黏土心墙坝; 库水位骤降; 坝坡抗震稳定性; 永久变形; 孔隙水压力; 非饱和渗流

中图分类号: TV641.1; TV312

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0194-06

Analysis of seepage and anti-earthquake stability of clay core dam under rapid drawdown and sudden occurrence earthquake

WU Ping, WAN Liaorong

(Jiangxi Institute of Water Resources Planning and Design, Nanchang 330029, China)

Abstract: according to the principle of unsaturated seepage and taking the clay core wall earth-rock dam in Sifangjing Water Conservancy Project as the research object, the seepage characteristics and anti-earthquake stability of the upstream and downstream dam slopes of the clay core earth-rock dam under the accidental earthquake of sudden drop of reservoir water level was simulated and analyzed. The calculation results showed that the greater the rate of water level drops, the more severe the pressure of the upstream dam slope is, the smaller the coefficient of safety stability is. The higher the location of the monitoring point is, the more difficult it is to reach the stable value of the pore pressure. For the downstream dam slope, the change of pore pressure is relatively gradual, the farther away from the groundwater level, the more difficult it is to stabilize the pore pressure, and the longer the response time of pore pressure to respond to the sudden drop of reservoir water level. When the reservoir water level drops suddenly to the dead water level, the larger the sudden drop rate, the smaller the safety factor, and the larger the Newmark displacement. The safety factor of downstream dam slope is not sensitive to the plummeting rate, and the safety factor is basically the same, and Newmark displacement is very close. The research results can provide some reference for the actual project management and operation.

Key words: clay core dam; rapid drawdown of reservoir water level; seismic stability of dam slope; permanent deformation; pore water pressure; unsaturated seepage

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-22

作者简介: 吴平 (1980-), 男, 江西南昌人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事水利水电工程地质勘察技术及天然建筑材料研究。

1 研究背景

近年来,我国发生了许多水库库岸滑坡事故,大量的滑坡体滑入水库,不仅减少了水库的有效库容,而且滑坡体高速滑入水库时造成大量的涌浪,威胁大坝安全以及库区周边人民群众生命财产安全^[1-3]。库水位的循环涨落是影响库岸边坡稳定性的一个主要因素。大多数学者都认为库水位骤降时,由于坡内水位滞后于坡外水位,坡内渗流产生指向坡外的渗流力,从而降低了土体强度,导致边坡失稳破坏^[4-6]。国内外众多学者对水位骤降对临水边坡的影响进行大量的数值模拟、模型试验以及现场监测等研究。李卓等^[7]根据自主设计的试验开展了降雨与库水位共同作用下边坡滑坡研究,结果表明在库水位剧烈变化以及降雨的双重作用下,边坡的有效应力减小,坡面产生塌陷裂缝。赵瑞欣等^[8]以三峡库区凉水井滑坡为例,运用数值软件模拟不同库水位骤升和骤降速率下边坡的稳定性变化规律。张珂峰^[9]利用有限元软件研究了库水位骤降与降雨条件下深浅层边坡的稳定性。毕书贞等^[10]运用数值计算软件模拟了库水位急剧变化时边坡土体 Fredlund 非饱和参数对边坡渗流特性及稳定性的影响规律。李鹏岳等^[11]借助 Geostudio 模拟了不同库水位升降速率下库岸的稳定性变化趋势。岑威钧等^[12]模拟了水位骤降期间偶遇地震作用时高土石坝抗震安全稳定。陈铸等^[13]结合振动台试验以及数值模拟研究了库水与地震力共同作用下某边坡的动力响应。

然而这些研究都没有涉及到不同库水位骤降速率下发生地震时土石坝坝坡的渗透及抗震稳定性。因此,本文以某黏土心墙土石坝为研究背景,利用 Geostudio 中的 Seep/w、Slope/w 以及 Quake/w 模块对不同库水位骤降速率以及偶遇地震情况下其上下游坝坡的渗流特性以及稳定性变化趋势进行研究,为水库的安全运营提供一定的参考。

2 理论背景

2.1 非饱和理论

库水位骤降时,土石坝坝体上、下游堆石区呈现出典型的饱和-非饱和渗流特性,特别是上游堆石区内的孔压力出现较大的波动,饱和-非饱和渗流^[14]的张量形式如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{ij}^s k_r(h_c) \right] + Q = [C(h_c) +$$

$$\beta S_s] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中: x_i, x_j 为 i, j 方向的位置坐标, m; k_{ij}^s 为饱和渗透张量; k_r 为相对透水率; h_c 为压力水头, m; β 为非饱和常数; S_s 为贮水量, m³; Q 为源汇项; C 为比水容度; θ 为与压力水头相关的函数; n 为孔隙率; t 为时间, s。

2.2 非线性材料模型

本文进行动力模拟时采用 Geostudio 中 Quake/w 中的非线性材料模型, 本文主要研究对象为坝体上下游堆石区, QUAKE/w 提供的粗粒土的剪切模量表达式如下:

$$G_{\max} = 22K \sqrt{P_a \sigma'_m} \quad (2)$$

$$\sigma'_m = \frac{(2K_0 + 1) \sigma_v}{3} \quad (3)$$

式中: $G_{\max}$ 为土体最大的剪切模量, Pa; K 为与土体性质相关的模量, Pa; K_0 为侧向土压力系数; P_a 为大气压力, Pa; σ'_m 为土体平均应力, Pa; σ_v 为土体竖向应力, Pa。

2.3 坝坡永久变形

本文采用 1965 年 Newmark^[15] 提出的地震下边坡的永久变形分析方法, 即同时计算多个潜在滑动面并且计算出最大变形边坡滑动面, 在获得最大变形的滑动面后 Geoslope 计算出安全系数 F_s 为 1 时的屈服加速度 a_y 以及该潜在滑动面随时间变化的平均加速度 a , 对 $(a - a_y)$ 关于时间二次积分即可得到潜在滑动面的 Newmark 边坡永久位移大小。

3 计算模拟

3.1 工程概况

宜春市温汤河四方井水利枢纽工程中的拦河坝为黏土心墙土石坝, 从上游到下游依次为上游围堰、上游堆石区、过渡层、黏土心墙、下游堆石区以及下游堆石棱体。坝顶高程为 156.20 m, 正常蓄水位为 152.0 m, 死水位为 125 m, 典型剖面如图 1 所示。

3.2 计算模型

模型网格图如图 2 所示, 地基厚度取为 50 m, 长 305 m, 地面高程 (110 m) 取为 0, 则死水位为 15 m, 正常蓄水位为 42 m。N1、N2、N3、N4、N5 和 N6 分别为上下游堆石区内不同位置的监测点。网格单元类型主要为三角形和四边形。为了更准确地反映上下游堆石体内不同监测点的孔隙水压力变化, 取上下游堆石体和心墙部分的划分网格尺寸为 1.5 m, 其余部分取 3.5 m, 全局共划分 3 854 个单元,

3 896个节点。

3.3 土体参数

黏土心墙土石坝各区域的物理力学参数如表 1 所示,土水特征曲线采用 Fredlund&Xing 模型^[14],描述土水特征曲线(SWCC 曲线)是衡量土体内部渗透系数和体积含水率与基质吸力之间的重要曲线,如图 3 所示。

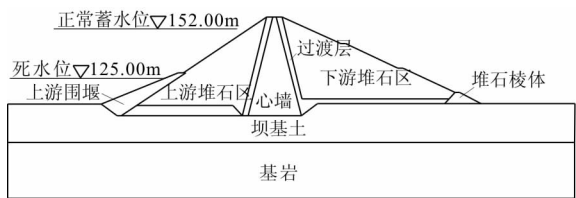


图1 心墙坝典型剖面图

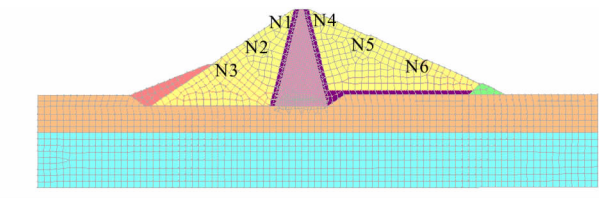


图2 模型网格图

表 1 坝体材料力学参数

材料	干密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	最大剪切 模量/GPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	阻尼比
心墙	1610	5	0.308	6	26	3×10^{-6}	0.05
堆石区	1500	5	0.288	0	34	5.79×10^{-3}	0.03
过渡层	1550	5	0.334	8	26	7.08×10^{-3}	0.03
坝基土	1600	5	0.255	3	20	3.53×10^{-3}	0.03
上游围堰	1580	5	0.353	7.47	28	5.23×10^{-3}	0.03
排水棱体	1680	5	0.255	0	34	2.11×10^{-1}	0.03
基岩	1670	5	0.353	5	24	1.00×10^{-9}	0.06

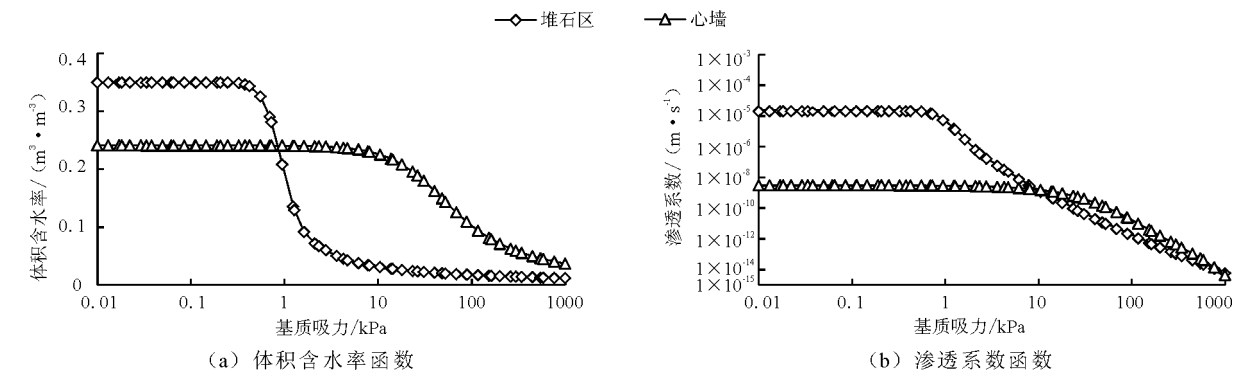


图3 坝体堆石区及心墙土水特征函数曲线

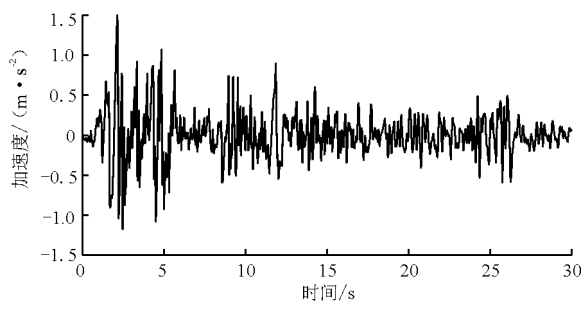


图4 校正后水平向加速度时程曲线

根据可研性研究报告,库区的地震动峰值加速度为 $0.15g$,相应的地震烈度为Ⅶ度。本次数值模拟采用国际上常用的 EI - Centro 水平方向的地震加速度时程曲线,为缩短计算时间截取地震振幅较大的前 30 s 作为输入波,在对地震波进行滤波以及基线校正处理的基础上将其峰值调为 $0.15g$ ($g = 10 \text{ m/s}^2$),图 4 为校正后的加速度时程曲线。

4 计算结果分析

4.1 不同骤降速率上下游堆石区孔隙水压力分析

为反映黏土心墙土石坝在不同库水位骤降速率下 ($0.5、1.0、1.5 \text{ m/d}$),从正常蓄水位 (152 m) 降落至死水位 (125 m) 过程中上下游堆石区不同位置的渗流特性,设置不同监测点进行详细分析。监测点位置如图 2 所示,其中 N1、N2、N3 分别位于上游堆石区的上部、中部、下部位置,N4、N5、N6 分别位于下游堆石区的上部、

中部、下部位置。本次模拟时长为 180 d, 包括库水位骤降期与库水位保持恒定期。不同库水位骤降速率上、下游各监测点孔隙水压力随时间的变化分别见图 5、6。从图 5(a) 可以看出, 随着库水位骤降速率的增大, 上游堆石区的上部监测点的孔隙水压力减小速率也增大, 且库水位骤降速率为 1.0 和 1.5 m/d 的孔隙水压力变化曲线非常接近。第 55 ~ 180 d 内, 三者不同骤降速率下的孔隙水压力变化曲线几乎重合; 在库水位降落至死水位后该监测点的孔隙水压力仍在继续减小, 但是减小速率趋于平缓。图 5(b) 与 5(a) 有着相似的变化规律, 但是从图 5(b) 可知在库水位骤降的第 100 ~ 180 d 之间, 不同骤降速率下的孔隙水压力开始趋于一致, 并且保持不变。对于图 5(c), 由于下部监测点一直位于库水位以下或库水面以上, 所以其孔隙水压力为线性变化, 且当库水位降至死水位后, 其孔隙水压力就保持不变。综合比较图 5(a)、5(b) 和 5(c) 可知, 监测点离库水位越远, 其孔压呈现出越明显的非线性变化, 不同库水位骤降速率下孔压的趋同性越高, 孔压力达到稳定所需时间越长; 在库水位降落至死水位且经过一段比较长的时间后, 库水位以上的土体中的

孔隙水压力会趋于一个变化区间, 上中部监测点最后的孔隙水压力为 $-130 \sim -125$ kPa; 上游各监测点的孔压值变化范围在 130 ~ 264 kPa。

从图 6(a) 可以看出, 在 3 种不同库水位骤降速率下, 上部监测点的孔压力变化几乎相同, 在库水位开始骤降的前 26 d 内, 孔隙水压力变化幅度非常小, 在 27 ~ 180 d 之间孔隙水压力几乎呈现线性变化, 总体的孔压力变化范围约为 18 kPa, 图 6(b) 的变化规律与图 6(a) 类似, 只是在 0.5 m/d 的库水位骤降速率下孔压力的变化要小于 1.0 和 1.5 m/d 的库水位骤降速率。图 6(c) 为下部监测点的孔压力变化曲线, 从图中可以看出在库水位开始骤降的前 10 d 内孔隙水压力几乎保持不变, 在第 11 ~ 150 d 孔隙水压力呈非线性变化, 第 151 ~ 180 d 孔隙水压力又达到一个稳定的状态。从图 6(a)、6(b)、6(c) 可知, 监测点离下游地下水位越远, 不同库水位骤降速率下的孔隙水压力变化区别越不明显, 孔隙水压力也越难以达到稳定状态, 孔隙水压力响应库水位骤降的时间也越长。下游各监测点的孔压变化范围在 18 ~ 27 kPa 之间。

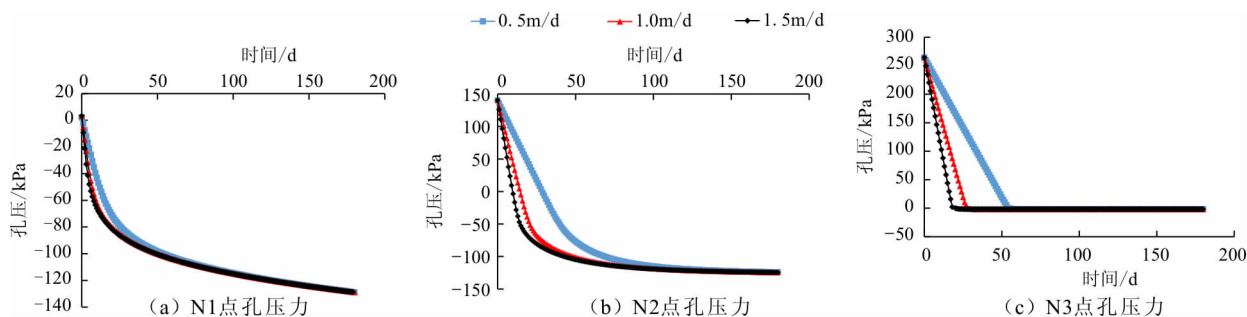


图5 不同库水位骤降速率上游监测点孔隙水压力随时间变化图

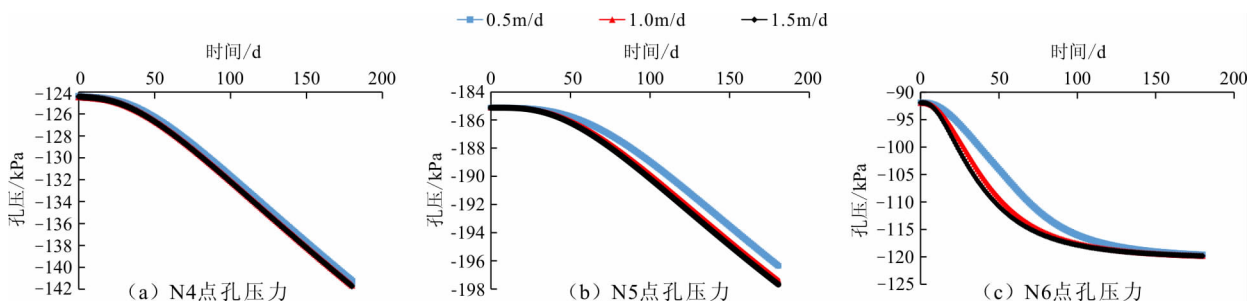


图6 不同库水位骤降速率下游监测点孔隙水压力随时间变化图

对比上下游堆石区内不同位置监测点的孔隙水压力随时间变化规律可知, 上游监测点的总体孔压力变化值较下游大, 孔压力响应库水位骤降的时间和达到稳定值所需的时间均较下游短。

4.2 不同库水位骤降速率上下游堆石区稳定分析

图 7 为上下游堆石区在不同库水位骤降速率下的

安全系数变化图。从图 7(a) 可看出, 不同库水位骤降速率下上游坝坡的安全系数总体是先减小后增大再保持不变。库水位骤降速率越大, 出现最小安全系数的时间越早, 最小安全系数越小。在库水位骤降速率分别为 0.5、1.0、1.5 m/d 时, 最小安全系数分别出现在第 54、27 和 18 d, 恰好是库水位以不同骤降速率降落至死

水位时的时间点。当库水位骤降至死水位之后,各骤降速率下的最小安全系数都有所上升但均小于初始安全系数,并在之后保持同一恒定的安全系数,这是因为当作用在上游坝坡面的水压力慢慢消失后,坝坡减少了一个支撑力,坝坡的安全系数慢慢减小,之后死水位以上的坝坡土体的强度不断增强,安全系数有所上升。

对于下游坝坡,不同库水位骤降速率下安全系数呈现出不断增大后保持不变的趋势,库水位骤降速率越大,最大安全系数出现的时间越早,最大安全系数越大,但是最大安全系数差值不大,为 0.01。

由于上游水位不断下降,下游堆石区内的浸润线高程也不断下降,下游坝体的非饱和区域增大,土体强度不断增大,所以安全系数不断增大。

对比上下游坝坡的安全系数可知,上游坝坡的初始安全稳定系数要大于下游,但是库水位骤降使得上游坝坡的稳定性大大降低,需要引起重视。

4.3 不同库水位骤降速率下偶遇地震上下游堆石区抗震稳定分析

图 8 和 9 分别为不同库水位骤降速率上、下游坝坡的动力响应图。

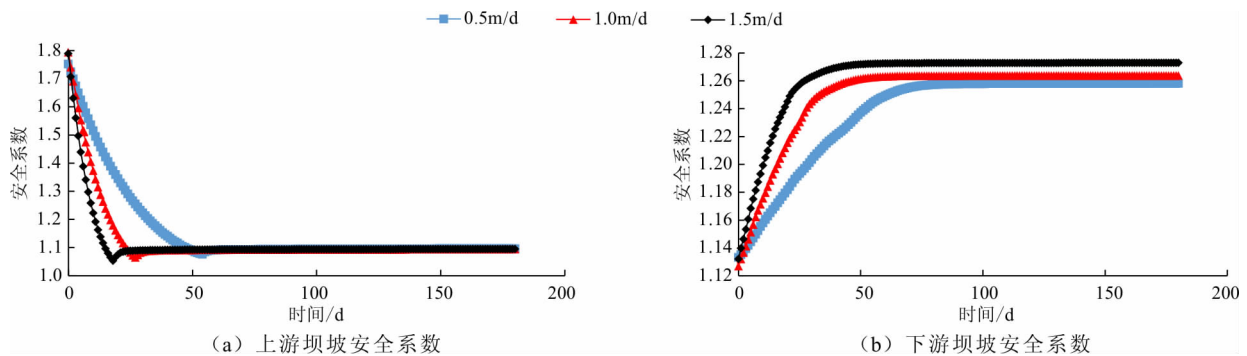


图 7 不同库水位骤降速率上下游坝坡安全稳定系数随时间变化图

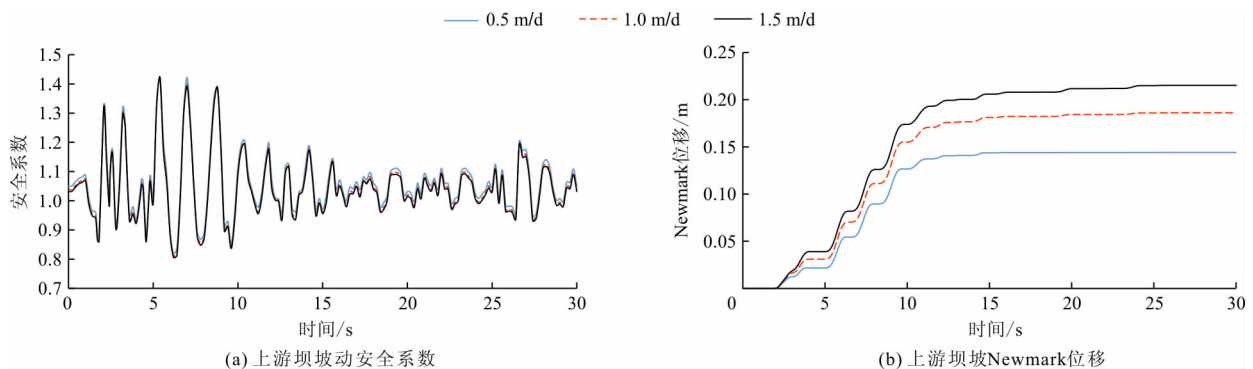


图 8 不同库水位骤降速率上游动力响应图

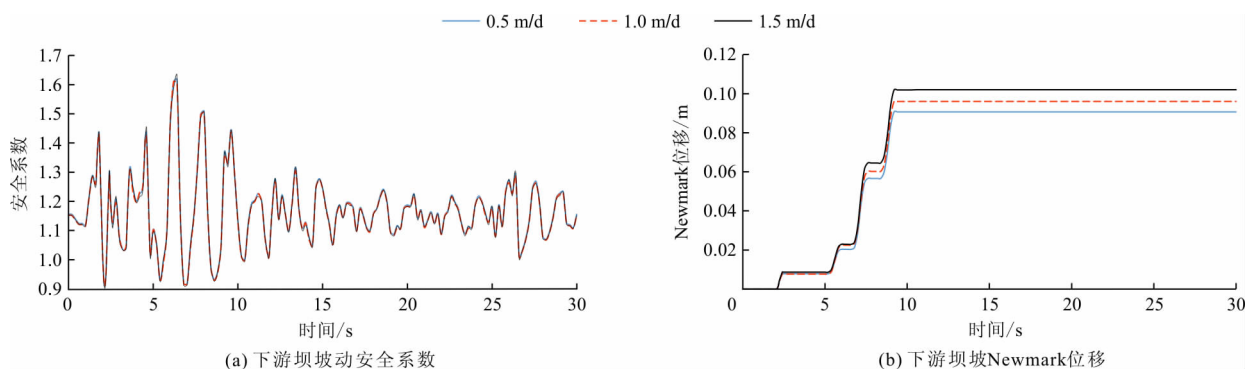


图 9 不同库水位骤降速率下游动力响应图

地震可能发生于库水位骤降的任意时刻,所以限于篇幅,本文假定库水位骤降至死水位时刻发生地震,即分别对应 $t = 18, 27, 54$ d 时刻。从图 8(a)

可以看出,不同库水位骤降速率下的上游坝坡安全系数过程线变化规律基本一致,库水位骤降速率越小,总体安全系数越大,由此可见库水位骤降速率越

大,坝坡在地震作用下的稳定性越差。从图8(b)也可以看出,库水位骤降速率与地震作用下 Newmark 位移呈正相关,在库水位骤降速率为0.5、1.0、1.5 m/d下,上游坝坡的永久变形分别为0.144、0.186和0.215 m。从图9(a)、9(b)可以看出,对于下游坝坡而言,不同库水位骤降速率下的坝坡安全系数过程线几乎重合在一起,不同库水位骤降速率下游坝坡永久变形分别为0.0907、0.0960和0.1020 m。由此可见,下游坝坡的安全系数稳定系数与库水位骤降速率相关性低。对比上、下游坝坡安全稳定系数曲线可得,下游坝坡的安全稳定系数相较于上游明显提高,这主要是因为虽然上游库水位骤降速率不同,但是由于心墙消耗了大量的水头,下游堆石区内的浸润线位置变化不大,孔隙水压力受上游库水位骤降影响小,而且下游堆石区内的非饱和区域大于上游堆石区,土体的强度比上游大。

综上所述,不同库水位骤降速率下黏土心墙土石坝的上游边坡为抗震稳定薄弱区,库水位骤降速率越大,抗震稳定性越差,但同时也要对下游坝坡的安全稳定做出相应的防护措施。

5 结 论

(1)在不同库水位骤降速率下,上游堆石区内的监测点离库水位越远,则孔压力呈现出越明显的非线性变化,孔压力之间的变化区别越小,孔压力达到稳定值的时间越长,稳定值越小。对于下游堆石区来说,监测点离下游地下水位越远,不同库水位骤降速率下的孔隙水压力变化区别越不明显,孔隙水压力也越难以达到稳定状态,孔隙水压力响应库水位骤降的时间也越长。

(2)不同库水位骤降速率上游坝坡的安全系数总体上是先减小后增大再保持不变。库水位骤降速率越大,出现最小安全系数的时间越早,最小安全系数越小。对于下游坝坡而言,不同库水位骤降速率下安全系数呈现出不断增大后保持不变的趋势,库水位骤降速率越大,则最大安全系数出现的时间越早,最大安全系数也越大,但是差别不大。

(3)在库水位骤降至死水位时偶遇地震情况下,上游坝坡的安全系数变化过程线变化规律基本一致,库水位骤降速率越大,则安全系数越小,Newmark 位移越大。对于下游坝坡而言,不同库水位骤降速率对下游坝坡的安全系数影响不大,下游坝坡的安全系数过程线基本一致。

(4)无论在何种情况下,库水位骤降对于上游

坝坡的稳定性影响要大于下游坝坡,在水库管理运行过程中应尽量避免库水位骤降的发生,同时加强上下游坝坡的安全稳定性。

参考文献:

- [1] DU Juan, YIN Kunlong, LACASSE S. Displacement prediction in colluvial landslides, Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2013,10(2):203-218.
- [2] HUANG Q X, WANG J L, XUE X. Interpreting the influence of rainfall and reservoir infilling on a landslide[J]. Landslides, 2015,34(2):1201-1211.
- [3] SONG Kun, YAN Echuan, ZHANG Guodong, et al. Effect of hydraulic properties of soil and fluctuation velocity of reservoir water on landslide stability[J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(6):5319-5329.
- [4] 江泊洧,项伟,曾雯,等.三峡库区黄土坡临江滑坡体水岩(土)相互作用机理[J].岩土工程学报,2011,34(7):1209-1216.
- [5] 朱朋,卢书强,薛聪聪,等.库水位升降与降雨条件下滑坡的渗流及稳定性分析[J].长江科学院院报,2015,32(11):87-92.
- [6] 郭子正,殷坤龙,唐扬,等.库水位下降及降雨作用下麻柳林滑坡稳定性评价与预测[J].地质科技情报,2017,36(4):260-265+270.
- [7] 李卓,何勇军,盛金保,等.降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡模型试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(3):453-459.
- [8] 赵瑞欣,殷跃平,李滨,等.库水波动下堆积层滑坡稳定性研究[J].水利学报,2017,48(4):435-445.
- [9] 张珂峰.库水位骤降与降雨条件下深浅层边坡稳定性分析[J].水电能源科学,2018,36(11):139-143.
- [10] 毕书贞,马冬梅.库水位骤降时边坡渗透稳定的非饱和和渗透参数敏感性分析[J].水电能源科学,2018,36(9):134-137+126.
- [11] 李鹏岳,巴仁基,倪化勇,等.库水位升降速率对雅安双家坪堆积体滑坡稳定性影响模拟分析[J].地质力学学报,2017,23(2):288-295.
- [12] 岑威钧,王建,王帅,等.水库骤降期偶遇地震作用时高土石坝抗震安全性分析[J].岩土工程学报,2013,35(S2):308-313.
- [13] 陈铸,车爱兰,严飞,等.库水与地震力共同作用下金沙江特大桥桥址边坡动力响应研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):148-155.
- [14] FREDLUND D G, RAHARDJO H, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. John Wiley & Sons, 1993.
- [15] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. Geotechnique, 2015,15(2):139-160.