

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230323

# 极端气候条件对某土石坝稳定特性的影响研究

罗登科<sup>1</sup>, 方艺翔<sup>2</sup>, 李卓<sup>2,3</sup>, 刘欣怡<sup>2</sup>

(1. 宁夏彭阳县水务局, 宁夏 彭阳 756500; 2. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029;  
3. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 受全球气候变化和人类活动的影响, 干旱、降雨等极端气候导致水库大坝产生了滑坡等灾害, 同时碾压式土石坝设计规范未考虑蒸发、降雨对大坝坝坡渗流和稳定性的影响。对此, 构建了某土石坝有限元计算模型, 研究了蒸发、降雨和库水位作用对土石坝孔隙水压力、浸润线和坝坡抗滑稳定安全系数的影响, 并结合地勘和监测资料分析了滑坡的成因机制。研究表明, 蒸发、降雨对下游坝坡 0~2 m 范围土体的孔隙水压力影响较大; 测压管实测水位与有限元计算浸润线差值小于 0.4 m; 初始阶段蒸发作用提高了坝坡稳定性, 但蒸发作用导致坝体表层填土不断收缩、开裂, 为降雨入渗提供了通道, 随着降雨、蒸发循环次数的增加和库水位上升, 裂缝不断增加, 裂缝底部附近的局部滞水区相互连通形成饱和带, 从而导致大坝下游浅层坝坡失稳破坏; 研究结果为完善土石坝设计规范和水库大坝滑坡预警提供了科学依据。

**关键词:** 土石坝; 蒸发; 降雨; 库水位; 滑坡

**中图分类号:** TV3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)08-0121-05

## 1 概况

某土石坝建成于 1966 年, 正常蓄水位 111.80 m, 校核洪水位 114.95 m, 总库容  $2.204 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 按 100 年一遇洪水设计, 5 000 年一遇洪水校核。枢纽由大坝、溢洪道、输水管等建筑物组成。大坝为粘性土均质坝, 最大坝高 17.00 m, 坝顶高程 116.00 m, 坝顶总长 3 220 m, 顶宽 6.0 m, 大坝上、下游坝坡坡比分别为 1:4、1:2.5。该水库流域属亚热带季风气候, 多年平均气温 15.3 °C, 历年最高温度 41 °C, 最低温度 17.7 °C。多年平均降水量 769.9 mm, 春末夏初常有干旱现象, 夏秋多有暴雨, 7~9 月雨量最多。历年最大风级为 10 级, 风速为 30 m/s。2021 年 8 月, 降雨-蒸发循环导致大坝溢洪道右侧上游混凝土护坡出现 4 cm 宽裂缝, 溢洪道右侧下游坝体产生滑坡, 滑坡导致排水沟断裂、错位和扭曲。在未来持续变暖背景下, 极端气候事件如极端降水、高温热浪的发生频率和强度均将提升<sup>[1]</sup>, 因此蒸发对坝坡的影

响越来越受到重视<sup>[2-5]</sup>。目前考虑降雨、蒸发对边坡渗流和稳定性影响的研究较多, 但土石坝坝坡与普通边坡相比存在筑坝材料、压实度、含水率、渗透系数、粒径等不同; 且《碾压式土石坝设计规范》(SL274-2020)<sup>[6]</sup>仅考虑了库水位恒定或骤降时大坝的渗流和稳定性, 尚缺少综合考虑蒸发、降雨和库水位变化对水库大坝坝坡渗流和稳定性影响的研究。且有关蒸发对边坡浅层土体影响的研究大部分仅考虑了单一气象因素, 缺少综合考虑降雨、气温、湿度、风速、太阳辐射量 5 个气象因素对坝坡渗流和稳定性的影响的研究。鉴此, 选取某土石坝坝址区实测气象资料, 采用 Geo-studio 中的 VADOSE/W、SLOPE/W 模块建立有限元计算模型, 分析了蒸发、降雨和库水位作用对土石坝孔隙水压力、浸润线和坝坡稳定性的影响, 并结合地勘资料、监测资料揭示了土石坝下游坝坡滑坡机理与特性。

## 2 土石坝有限元计算模型

**收稿日期:** 2023-03-06, **修回日期:** 2023-03-29

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51979173)

**作者简介:** 罗登科(1972-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水利工程建设管理, E-mail: pywwsbz@163.com

**通讯作者:** 李卓(1979-), 男, 博士、正高级工程师, 研究方向为水工建筑物防冻胀和水库大坝安全评价, E-mail: zhuoli@nhri.cn

### 2.1 模型及边界条件

选取某土石坝典型剖面,采用 Geo-studio 中的 VADOSE/W 模块进行渗流稳态和瞬态分析,随后将渗流计算结果导入 SLOPE/W 模块进行坝坡稳定性分析;模型和测点布置见图 1。模型网格共划分为 2 413 个节点和 1 708 个单元;为使分析结果更精确,在大坝表面以下 0.5 m 范围内设置了 5 层厚度为 0.1 m 的表面层单元。

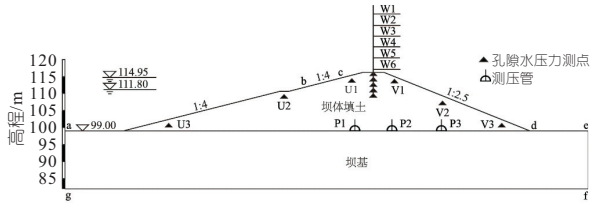


图 1 某土石坝有限元计算模型与渗流压力测点布置图  
Fig. 1 Finite element calculation model of a earth-rock dam and layout of seepage pressure measuring points

设 abc 为库水位变化边界;cd 为降雨、蒸发气象边界;土石坝下游无水,故 de 为下游水头边界;efga 为不传热、不透水边界。在土石坝坝顶距离表面 0.2、1、2、4、6、8 m 各设置一个测点,另外在上下游坝坡坡顶、坡肩和坡脚距离表面 0.5 m 处各布置 1 个测点。其中坝顶测点由上到下依次为 W1、W2、W3、W4、W5、W6,上游坝坡测点为 U1、U2、U3,下游坝坡测点为 V1、V2、V3,具体布置见图 1。

### 2.2 材料参数

土石坝坝体填土及坝基材料参数见表 1。

表 1 坝体填土及坝基材料参数表

Tab. 1 Parameters of dam filling and dam

foundation materials							
坝体分区	渗透系数	饱和含水率	重度	有效粘聚力	有效内摩擦角	导热系数	体积热容
坝体填土	$6.89 \times 10^{-4}$	30.0	18.6	27.3	12.0	1.04	1 875
坝基	$3.39 \times 10^{-6}$	26.0	19.2	42.7	14.7	1.85	2 010

注:渗透系数、饱和含水率、重度、有效粘聚力、有效内摩擦角、导热系数、体积热容单位分别为 cm/s、%、kN/m<sup>3</sup>、kPa、°、J/s/m<sup>2</sup>/°C、kJ/m<sup>3</sup>/°C。

### 2.3 计算工况

选取 2021 年实测降雨量最大、气温最高的 8 月份作为气象边界条件,降雨时同时考虑降雨—蒸发作用,无降雨(高温干旱)时仅考虑蒸发作用,具体气候参数见表 2。根据某水库实际运行工况,选取库水位的上升速率。2021 年 8 月降雨历程见图 2,计算工况见表 3。

## 3 结果分析

表 2 气象参数统计

Tab. 2 Statistical table of meteorological parameters

时间(月-日)	最高温 度/°C	最低温 度/°C	最高湿 度/%	最低湿 度/%	风速 /(m·s <sup>-1</sup> )
08-01~08-06	40	25	60	40	3
08-07~08-09	32	20	95	75	2
08-10	40	25	60	40	3
08-11~08-13	32	20	90	75	2
08-14	40	25	60	40	3
08-15~08-17	32	20	90	75	2
08-18~08-21	40	25	60	40	3
08-22	32	20	95	75	2
08-23~08-24	40	25	60	40	3
08-25~08-30	32	20	90	75	2

注:太阳辐射量为在 Geo-studio 中输入大坝所在纬度和起止日期,分布形式为正弦波,选择估算净辐射,从而得到估算的太阳辐射量。

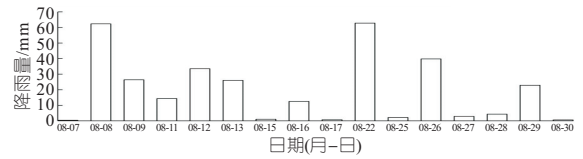


图 2 降雨历程图

Fig. 2 Rainfall history chart

表 3 计算工况表

Tab. 3 Calculation table

计算工况	库水位/m	上升速率/(m·d <sup>-1</sup> )	降雨类型
1	111.80		降雨—蒸发
2	111.80~114.95	0.5	蒸发
3	111.80~114.95	1.0	蒸发
4	111.80~114.95	1.5	蒸发
5	111.80~114.95	0.5	降雨—蒸发
6	111.80~114.95	1.0	降雨—蒸发
7	111.80~114.95	1.5	降雨—蒸发
8	111.80		降雨

### 3.1 渗流场分析

#### 3.1.1 蒸发、降雨作用下土石坝孔隙水压力分析

图 3 为工况 1 坝顶孔隙水压力时变图。由图 3 可知,W1、W2、W3、W4、W5、W6 测点孔隙水压力在高温干旱时减小,在降雨时增大,且 W1、W2、W3 测点孔隙水压力变幅较明显,表明降雨、蒸发对坝坡浅层土体(0~2 m 范围内)影响较大。

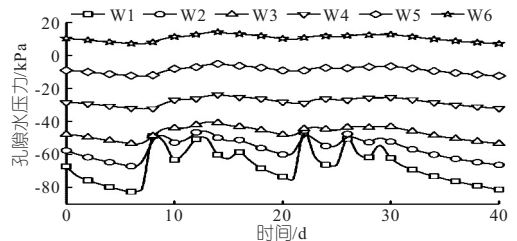


图 3 工况 1 坝顶孔隙水压力时变图

Fig. 3 Time-varying diagram of pore water pressure at dam crest under condition 1

图 4 为工况 1 坝坡孔隙水压力时变图。由图 4(a)可知,U1 测点孔隙水压力变化较明显,变幅为 18.41 kPa,U2、U3 测点高程小于库水位高程,孔隙水压力变化不大。由图 4(b)可知,V1、V2 测点孔隙水压力变化与降雨-蒸发循环过程密切相关,变幅分别为 23.56、10.95 kPa,V3 测点位于大坝浸润线以下,蒸发、降雨作用对其影响不大。上、下游坝坡孔隙水压力对蒸发、降雨作用的响应程度由小到大依次为坡脚<坡肩<坡顶。

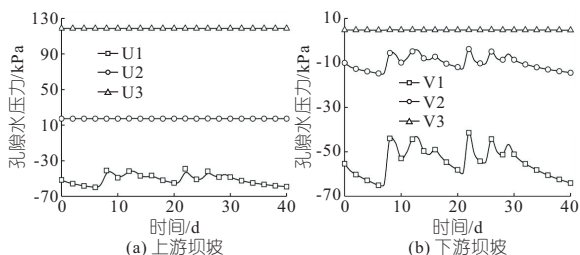


图 4 工况 1 坝坡孔隙水压力时变图

Fig. 4 Time-varying diagram of pore water pressure on dam slope under condition 1

### 3.1.2 库水位作用下土石坝孔隙水压力分析

选取工况 2 进行库水位作用下土石坝孔隙水压力分析,结果见图 5。由图 5 可知,上下游坝坡孔隙水压力在库水位上升作用下总体呈增大趋势。

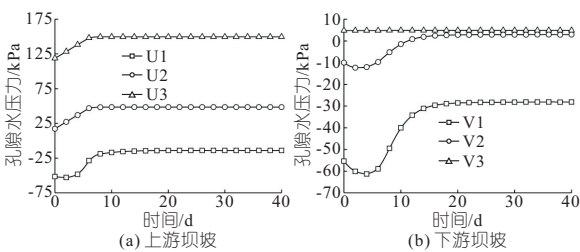


图 5 工况 2 坝坡孔隙水压力时变图

Fig. 5 Time-varying diagram of pore water pressure on dam slope under condition 2

### 3.1.3 蒸发、降雨、库水位作用下土石坝孔隙水压力分析

选取工况 5 进行蒸发、降雨、库水位作用下土石坝孔隙水压力分析,结果见图 6。由图 6(a)可知,U1 测点孔隙水压力在库水位未上升至测点

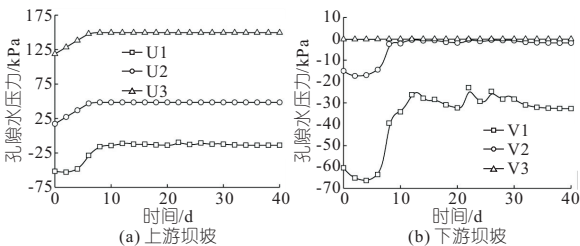


图 6 工况 5 孔隙水压力时变图

Fig. 6 Time-variation diagram of pore water pressure under working condition 5

高程时主要受蒸发效应影响,孔隙水压力缓慢减小,当库水位超过 U1 测点高程时孔隙水压力主要受库水位上升影响不断增大,降雨导致孔隙水压力在 8 月 8、12、22 日突然增大。U2、U3 测点孔隙水压力主要受库水位上升影响而不断增大,随后趋于稳定。由图 6(b)可知,下游坝坡 V1、V2 测点孔隙水压力先缓慢减小,随后迅速上升,最后呈上下波动变化趋势;V3 测点孔隙水压力无明显变化。库水位作用是影响上下游坝坡孔隙水压力的关键因素。

### 3.1.4 浸润线分析

在土石坝典型断面布置了 P1、P2、P3 三根测压管,其中 P1 位于上游坝坡,P2、P3 位于下游坝坡,测压管布置见图 1。选取工况 1、8 进行分析,有限元模型计算值与测压管实测值对比见表 4。由表 4 可知,工况 1 测压管实测水位与模型浸润线差值均小于 0.4 m。且工况 1 相比工况 8 实测值与计算值差值较小,表明考虑蒸发、降雨比仅考虑降雨更能反映大坝真实情况。工况 1 在 8 月 1、7 日 P3 测点对应有限元计算模型相同位置浸润线高程分别为 105.53、105.06 m,表明蒸发作用能降低坝体浸润线,8 月 8 日降雨量为 62.3 mm,浸润线高程为 105.97 m,表明降雨入渗能显著抬升浸润线,且 P3 测点对应有限元模型相同位置浸润线高程相比 P1、P2 测点在降雨-蒸发循环、库水位作用下变幅大,表明下游坝坡坡肩部位受蒸发、降雨、库水位变化的影响最大。

表 4 有限元模型计算值与测压管实测值统计表

Tab. 4 Statistical table of calculated values of finite element model and measured values of piezometer tube

工 况 号	8月1日		8月7日		8月8日		9月9日		
	计算值 /m	实测值 /m	计算值 /m	实测值 /m	计算值 /m	实测值 /m	计算值 /m	实测值 /m	
1	P1	109.75	109.54	109.38	109.16	109.59	109.29	109.41	109.14
	P2	108.54	108.28	108.14	107.88	108.28	107.99	108.19	107.96
	P3	105.53	105.24	105.06	104.77	105.97	105.65	105.09	104.78
8	P1	109.75	109.54	109.73	109.16	110.02	109.29	109.92	109.14
	P2	108.54	108.28	108.52	107.88	108.79	107.99	108.78	107.96
	P3	105.53	105.24	105.51	104.77	106.39	105.65	105.65	104.78

## 3.2 坝坡稳定性分析

### 3.2.1 蒸发、降雨作用下土石坝稳定性分析

图 7 为蒸发、降雨作用下坝坡稳定性时变图。由图 7 可知,考虑蒸发作用时,上下游坝坡在高温干旱时抗滑稳定安全系数不断增大,因此蒸发对提高坝坡稳定性起到促进作用。在 8 月 8、12、22、26 日遭遇强降雨后抗滑稳定安全系数急剧下降。由此表明,降雨入渗降低了坝坡的稳定性,蒸发能提高坝坡的稳定性,且降雨、蒸发作用对下游坝坡抗滑稳定安全系数的影响大于上游坝坡。

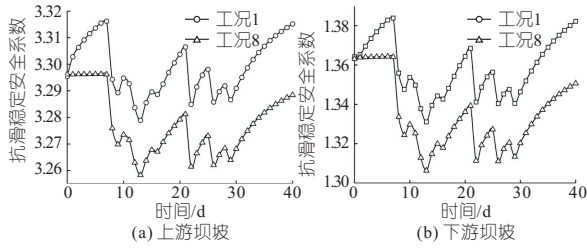


图7 蒸发、降雨作用下坝坡稳定性时变图

Fig. 7 Time-varying map of dam slope stability under evaporation and rainfall

### 3.2.2 库水位作用下土石坝稳定性分析

图8为库水位作用下土石坝稳定性时变图。由图8可知,库水位上升时,上游坝坡抗滑稳定安全系数随着库水位的上升而增大,下游坝坡抗滑稳定安全系数随库水位的上升而减小。

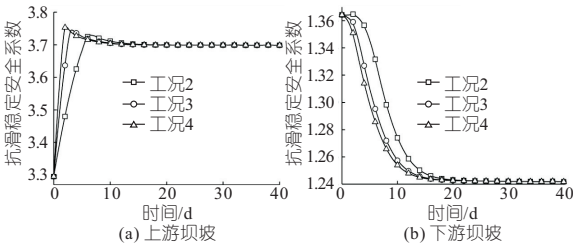


图8 库水位作用下坝坡稳定性时变图

Fig. 8 Time-varying diagram of dam slope stability under reservoir water level

### 3.2.3 蒸发、降雨和库水位作用下土石坝稳定性分析

图9为蒸发、降雨和库水位作用下坝坡稳定性时变图。由图9可知,上游坝坡抗滑稳定安全系数呈增大—减小—稳定态势,下游坝坡抗滑稳定安全系数先以较快速度减小,随后呈波动上升趋势。

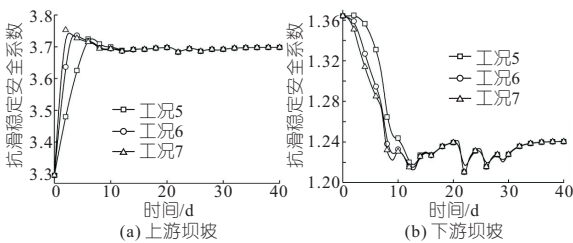


图9 蒸发、降雨、库水位作用下坝坡稳定性时变图

Fig. 9 Time-varying diagram of dam slope stability under evaporation, rainfall and reservoir water level

初时时刻上下游坝坡抗滑稳定安全系数分别为3.30、1.36,在降雨—蒸发作用下,8月7日分别增大至最大值3.32、1.38,8月13日分别下降为最小值3.28、1.33;下游坝坡在降雨—蒸发循环中,抗滑稳定安全系数多次下降至规范<sup>[6]</sup>允许值1.35以下,表明下游坝坡可能产生失稳破坏,与水库现场滑坡勘察结果一致。

综合孔隙水压力、浸润线、坝坡稳定性和滑坡现场地勘、监测资料分析结果可得,从降低坝体填土含水率、增大基质吸力的角度分析,初始阶段蒸发对提高坝坡稳定性起到促进作用;但蒸发过程中土体在基质吸力作用下孔隙比不断减小,土体不断收缩,当土体颗粒间由于基质吸力产生的张拉应力大于抗拉强度时,土体表面出现裂缝;裂缝的出现破坏了坝坡的整体性,为降雨入渗提供了优势通道,且裂缝底部土体的渗透系数较小,因此在裂缝底部附近易形成局部滞水区,导致裂缝附近土体含水率迅速增大,抗剪强度降低。随着降雨—蒸发循环作用次数的增加和库水位不断上升,裂缝数量、宽度、深度不断增大,裂缝底部附近的局部滞水区相互连通形成饱和带,从而导致大坝下游浅层坝坡坡肩部位失稳破坏。

库水位作用下上下游坝坡抗滑稳定安全系数分别在8月7、4、2日增大至最大值,增幅均为13%。库水位作用下下游坝坡抗滑稳定安全系数均在8月22日减小至最小值1.24,降幅均为8.89%。

蒸发、降雨和库水位作用下上下游坝坡抗滑稳定安全系数增大至最大值的时间与库水位单独作用一致,增幅约为13%。蒸发、降雨和库水位作用下下游坝坡抗滑稳定安全系数在8月22日减小至最小值1.21,降幅均为11.28%。表明库水位变化是影响上下游坝坡抗滑稳定安全系数的主要因素,降雨入渗进一步加剧了坝坡稳定性下降。

## 4 结论

a. 与普通边坡在蒸发作用下坡脚裂缝导致的牵引式滑坡和坡顶裂缝导致的推动式滑坡不同,大坝下游坝坡在坡肩浅层部位出现裂缝并产生了滑坡,因此碾压式土石坝设计规范应重视蒸发、降雨作用对大坝浅层坝坡渗流和稳定性的影响。

b. 初始阶段蒸发作用降低了坝体填土的孔隙水压力,提高了坝坡稳定性,同时蒸发导致坝体填土不断收缩、开裂,为降雨入渗提供了通道,随着降雨—蒸发循环次数的增加和库水位不断上升,裂缝数量、宽度、深度不断增加,裂缝底部附近的局部滞水区相互连通形成饱和带,从而导致大坝下游浅层坝坡坡肩部位失稳破坏。

c. 测压管实测水位与模型浸润线差值均小于0.4 m。P3测点对应有限元计算模型相同位置浸润线相比P1、P2测点在降雨—蒸发循环中变幅最大,表明下游坝坡坡肩部位受蒸发、降雨影响最大。

## 参考文献:

- [1] 舒章康,李文鑫,张建云,等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5):116-125.
- [2] 叶伟,马福恒,胡江,等. 旱涝急转下斜墙坝渗流特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1923-1929.
- [3] 杨正华,刘嘉忻. 峡山水库大坝渗流安全评价[J].

- 水利水电科技进展, 2007(2): 40-44.
- [4] 刘永强,叶伟,石北啸. 干湿循环条件下裂缝对土体吸力影响的机制研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 101-104,96.
- [5] 陈勇,崔宪东,赵强,等. 干湿循环对边坡动力稳定性的影响及模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(9): 795-800.
- [6] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范: SL274-2020[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2020.

## Study on Impact of Extreme Weather Conditions on Stability Characteristics of Earth-Rockfill Dam

LUO Deng-ke<sup>1</sup>, FANG Yi-xiang<sup>2</sup>, LI Zhuo<sup>2,3</sup>, LIU Xin-yi<sup>2</sup>

(1. Water Affairs Bureau of Pengyang County, Pengyang 756500, China; 2. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Affected by global climate change and human activities, extreme weather events such as drought and rainfall have led to landslides and other disasters in the reservoir dam. At the same time, the impact of evaporation and rainfall on the seepage and stability of the dam slope has not been considered in the design specifications for roller compacted earth-rockfill dams. Taking an earth-rockfill dam as the research object, a finite element calculation model was established to study the impacts of evaporation, rainfall and reservoir water level changes on the pore water pressure, saturation line and safety factor of anti-sliding stability of the earth-rockfill dam. And the cause mechanism of landslide was analyzed in combination with geological exploration and monitoring data. The results show that evaporation and rainfall have a great impact on the pore water pressure of the soil within 0~2 m of the downstream dam slope. The difference between the measured water level of the piezometer and the saturation line calculated by the finite element method is less than 0.4 m. At the initial stage, evaporation improves the stability of the dam slope, but evaporation causes the surface fill of the dam body to shrink and crack continuously, providing a channel for rainfall infiltration. With the increase of the number of rainfall and evaporation cycles and the rising of the reservoir water level, the cracks continue to increase, and the local stagnant areas near the bottom of the cracks are interconnected to form a saturation zone, which leads to the instability and damage of the shallow dam slope downstream of the dam. The research results provide a scientific basis for improving the design specifications of earth-rockfill dams and the early warning of reservoir dam landslides.

**Key words:** earth-rockfill dam; evaporation; rainfall; reservoir water level; landslide

(上接第 138 页)

## Leakage Location Method of Water Supply Network Based on Graph Theory and Bayesian Theorem

WANG Tong<sup>a,b</sup>, KANG Bing-qing<sup>a,b</sup>, LI Zhong-yu<sup>a,b</sup>,

ZHU Duo-lin<sup>a,b</sup>, WANG Qing-yi<sup>a,b</sup>, ZHAO Hong-bin<sup>a,b</sup>, XU De-lun<sup>a,b</sup>, HONG Lei<sup>a,b</sup>

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Key Laboratory of Water Supply and Sewerage, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** At present, most leakage location methods rely on the hydraulic model of the pipe network. However, when the accuracy of the hydraulic model cannot meet certain requirements, or when the model cannot be established due to the lack of basic data, the model-based method will fail. For this purpose, the study of the leakage location of the water supply network was carried out on the basis of pressure monitoring data. Based on the modeling theory of graph theory, the interpolation method for estimating the node pressure of pipe network was obtained. The leakage position was estimated by analyzing the residual of the pressure monitoring value of each node and the measured value after the leakage occurs. With the help of Bayesian theorem, time-series reasoning was carried out on the positioning results, and the node with the largest probability in a certain period of time was regarded as the location where leakage occurs. By using the case of L Town, the state of pipe network was simulated when single point leakage occurred, and the feasibility and location performance of the leakage location method were verified.

**Key words:** water supply network; leakage location; graph theory; Bayes theorem; pressure monitoring data