

文章编号: 1005-0523(2020)04-0027-06

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.04.005

## 水位升降对库坡渗流场及稳定性影响

雷卫佳<sup>1</sup>, 刘伟煌<sup>2,3</sup>, 郭生根<sup>4</sup>, 谈亦帆<sup>2,3</sup>, 祝俊华<sup>2,3</sup>

(1. 江西省港航管理局界牌枢纽管理处, 江西 鹰潭 335099; 2. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013; 4. 江西省港航管理局, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 依托某库区边坡工程, 通过现场水文地质勘察、室内试验, 掌握库岸边坡岩土工程性质, 结合干湿循环试验、理论分析及数值仿真软件, 研究该工程蓄水期及运营后水位动态升降变化下的库岸边坡稳定性。结果表明: 在高水位时, 地下水浸润线呈“凹”形, 低水位时则为“凸”形。库区水位在正常蓄水位 30 m、最高蓄水位 36 m 之间可视为安全水位范围。本研究可为此库区边坡防护与库区水位调度方案提供参考。

**关键词:** 库区边坡; 水位动态升降; 流固耦合; 数值仿真; 边坡稳定性

中图分类号: TU432

文献标志码: A

本文引用格式: 雷卫佳, 刘伟煌, 郭生根, 等. 水位升降对库坡渗流场及稳定性影响[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(4): 27-32.

**Citation format:** LEI W J, LIU W H, GUO S G, et al. Analysis of influence of water level rise and fall on seepage field and stability of reservoir slope[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(4): 27-32.

库区水位会对库区边坡的地质环境产生影响, 库岸边坡的自然条件会随着水库的运行发生变化。在库区水体的浸泡下, 岩土体的各项物理力学参数会随着浸泡时间产生变化。而水库运行过程中水位的升降变化对库区边坡的影响尤为显著。

刘才华等<sup>[1]</sup>分析得到库区开始蓄水时边坡的安全系数会降低, 此时边坡很可能发生破坏, 随着蓄水水位的上升, 边坡的安全系数会增加。郁舒阳等<sup>[2]</sup>研究 Geo-slope 中 Fredlund&Xing 模型参数对边坡渗流及稳定性影响, 结果表明  $\alpha$  值主控孔压变化幅度,  $m$  值对剩余含水量影响较大, 安全系数随  $n$  值减少而明显降低。廖红建等<sup>[3]</sup>针对三峡水利工程的水位回落周期, 运用 Geo-slope/seep 法获得水位下降在不同渗透系数的渗流场数据, 通过极限平衡法分析坡体安全性, 分析水位降速、饱和渗透系数、边坡稳定性三者之间的联系。王乐等<sup>[4]</sup>考虑非饱和渗流原理, 通过 Geo-slope2012 研究了 4 种降雨类型结合库水位骤降的工况, 结果表明库水位下降越快, 稳定系数越小, 不同降雨类型的稳定系数不同, 且失稳一般先发生在下部浅层。张开鹏等<sup>[5]</sup>通过仿真软件将水位变化与降雨结合分析, 分析了几种降雨强度及降雨类型对边坡的安全性影响。石文学等<sup>[6]</sup>提出了浸水湿化型失稳、岸坡冲刷型失稳及坡脚淘刷型失稳的情况, 在地下水的物理及化学作用下, 库岸边坡岩土体被湿化和软化, 故坡体的失稳破坏突发性高。梁鑫等<sup>[7]</sup>研究巫峡干井子滑坡, 发现高陡峡谷区降雨渗流滑体深部困难, 滑体稳定性及地下水位主要受库水位作用。梁学战等<sup>[8]</sup>分析了三峡工程水位波动下的多种渗透条件下的坡体地下水浸润线分布及坡体稳定性。郑颖人等<sup>[9]</sup>求解了坡体浸润线公式、渗透力公式, 认为坡体稳定性主要受地下水位影响。李俊业等<sup>[10]</sup>研究了重庆鹤峰滑坡瞬态稳定性, 发现在较高库水位下, 如果降雨与水位骤降同时出现, 对坡体安全性影响很大。涂国祥等<sup>[11]</sup>研究了库区岸坡堆积体在水位变化速度影响下渗流场及稳定性的变化机理和规律。熊将等<sup>[12]</sup>利用改进的 Sarma 法对库岸边坡安全性进行计算。李邵军等<sup>[13]</sup>在离心模型试验的基础上研究库水波动对坡体稳定性影响。

收稿日期: 2019-11-30

作者简介: 雷卫佳(1962—), 男, 高级工程师, 研究方向为水运工程项目管理及灾害防治。

通信作者: 刘伟煌(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为饱和土动力学、颗粒材料动力学。

综上所述,对于库岸边坡的研究,主要集中在水位升降作用下边坡的稳定性及边坡稳定性影响因素的研究上。鉴于此,本文采用 Geo-studio 针对水位升降速度对库区坡体稳定性展开研究,研究成果可为此库区水位调度方案提供参考,因研究结论来自于仿真软件,而不同岸坡的地质结构和土层分布各异,故参数的变化和组合可能会对研究结论有不同影响<sup>[4]</sup>。

## 1 库区边坡的基本特征

### 1.1 基本地质概况

库区渠化河道属典型的河槽型水库,分布最广库段均为冲积阶地土质岸坡,组成物多为粘土和粉质粘土,主河道多远离河岸,水流冲刷作用较小。

### 1.2 库区周边概况

渠化河道两岸台地广布,台地地面高程在 32~36 m 间,地形平缓,除右岸将近半数段堤防已做砼防渗墙垂直截渗处理外,大部分堤防均未做防渗处理。根据现场勘察及相关资料,以未做防渗处理的典型边坡进行分析。

## 2 边坡稳定性分析模型及工况

### 2.1 仿真软件 Geo-studio

采用加拿大岩土软件 Geo-studio 进行边坡渗流模拟稳定性分析和位移计算。采用 SEEP/W 进行边坡渗流模拟,采用 SLOPE/W 进行边坡稳定性分析。

### 2.2 计算原理

#### 2.2.1 土的储水-含水量函数估计方法

明确孔压和含水量之间的相关性在渗流分析中是十分必要的。土颗粒及颗粒间的孔隙构成了土体结构,孔隙中存在水和空气,饱和土中的孔隙完全被水填充,其体积含水量与孔隙率有如下关系:

$$\theta_w = nS \quad (1)$$

式中: $\theta_w$  为体积含水量; $n$  为土的孔隙率; $S$  为饱和度(饱和土等于 1.0 或者 100%)。

孔隙率  $n$  和孔隙比  $e$  的关系为:

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{\omega G_s}{S} \quad (2)$$

式中: $\omega$  重量含水率; $G_s$  为颗粒重量。

当土体为非饱和状态时,含水率处于动态变化中,在 1980 年, Van Genuchten 提出以一个多参数方程获取体积含水量函数的闭合解。

控制方程如下:

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_w - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (3)$$

式中: $\theta_w$  为体积含水量; $\theta_r$  为饱和体积含水量; $\Psi$  为负孔隙水压力; $a, n, m$  为曲线拟合参数

#### 2.2.2 渗透系数函数估计方法

非饱和土渗透系数函数可由体积含水量函数推导,SEEP/W 提供 Fredlund 法,借助体积含水量函数和饱和渗透系数来获取非饱和渗透系数函数。方程如下:

$$k_w = k_{R+} \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^i) - \theta(\Psi)}{e^{e^i}} \theta'(e^i)}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^i) - \theta_R}{e^{e^i}} \theta'(e^i)} \quad (4)$$

式中: $k_w$  为指定含水量或者负孔隙水压力计算所得渗透系数, m/s; $k_R$  为测得的饱和渗透系数, m/s; $\theta_R$  为饱和体积含水量; $e$  为自然对数的底, 2.718 28; $y$  为代表负孔隙水压力算法的虚拟变量; $i$  为  $j$  到  $N$  之间的数值间距; $j$  为最终函数描述的最小负孔隙水压力; $N$  为最终函数描述的最大负孔隙水压力; $\Psi$  为对应第  $j$  步的负孔隙水压力; $\theta'$  为方程起始值。

$$\theta=C(\Psi)+\frac{\theta_R}{\left[\ln\left[e+\left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right]\right]^m} \quad (5)$$

式中: $a$  为约等于土中空气进入值; $n$  为控制体积含水量函数拐点段斜率的参数; $m$  为与残余含水量有关的参数; $C(\Psi)$  为定义为方程式下列所示的修正函数。

$$C(\Psi)=1-\frac{\ln\left(1+\frac{\Psi}{C_r}\right)}{\ln\left(1+\frac{1\,000\,000}{C_r}\right)} \quad (6)$$

式中: $C_r$  为对应残余含水量的基质吸力有关的常数。

### 2.3 分析模型及其土体参数

现场坡体基本为二级边坡,原先的自然边坡土以粉质粘土为主,其上回填砂砾土,坡面再覆一层红黏土与自然边坡相连,一级边坡的平均坡度约为  $38^\circ$ ;二级边坡的平均坡度约  $12^\circ$ ,其中红黏土渗透性质相对复杂,根据室内多次干湿循环试验及勘察资料确定其天然状态下物理参数,以滤纸法测其基质吸力,并用 Van-Genuchten 模型拟合土-水特征曲线,如图 1 所示,表 1 为土体基本物理性质指标。库区死水位高程为 28 m,下游正常蓄水位在 30 m 左右。

### 2.4 计算工况

计算工况结合实际库水位调度计划考虑不同的库水位变化速度对边坡的影响,如表 2,水位变化速度设置为 0.5, 1.0, 1.5 m/d, 初始蓄水位为 30 m,以水位为 30 m 时的初始渗流场为基础展开计算。

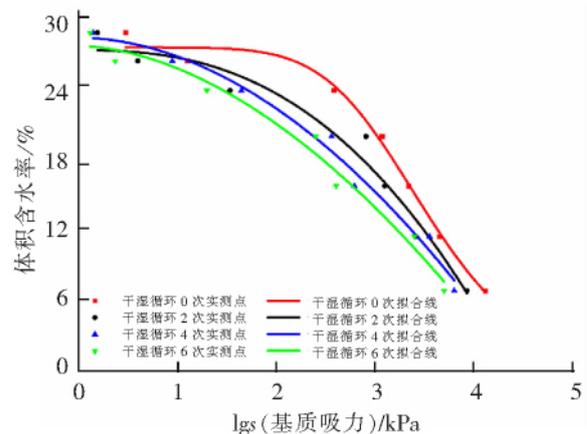


图 1 红黏土干湿循环下的的土水特征曲线  
Fig.1 Soil-water characteristic curve of red clay under dry and wet cycles

表 1 土体基本物理性质指标  
Tab.1 Basic physical properties of soil

材料	泊松比	弹性模量/ GPa	渗透系数/ (m/d)	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	内摩擦角(饱和)/ (°)	黏聚力(饱和)/ kPa
红黏土	0.3	0.05	0.421	19.5	10	16
粉土	0.3	0.05	0.548	18.7	14	8
砂土	0.3	0.07	2.251	21.6	30	0

表2 计算工况  
Tab.2 Calculation conditions

工况	波动速度/(m/d)	初始水位(0~5 d)	水位调度
1	0.5	30	上升期:(6~17 d);36 m
			平稳期:(18~155 d);36 m
			下降期:(156~167 d);36~30 m
			平稳期:(168~305 d);30 m
2	1.0	30	上升期:(6~11 d);30~36 m
			平稳期:(12~155 d);36 m
			下降期:(156~161 d);36~30 m
			平稳期:(162~305 d);30 m
3	1.5	30	上升期:(6~9 d);30~36 m
			平稳期:(10~155 d);36 m
			下降期:(156~159 d);36~30 m
			平稳期:(160~305 d);30 m

### 3 边坡稳定性分析

#### 3.1 渗流分析

通过不同的库水位变化速度探究库区边坡的孔隙水压力和地下水浸润线的变化规律。

根据地勘资料,下游河流段两岸下伏砂卵砾石层厚度大、分布连续、透水性强,赋存其内的地下水与河水连通,地下水径流通畅,地下水位与河水位基本持平,互相补给。

图2,图3分别为工况1库水位上升,下降阶段的地下水浸润线变化情况。

1) 库水位从30 m升至36 m的过程中,地下水位随之上升,但速度与库水位相比有滞后性,且越靠近坡面,地下水位上升速度越快,说明库水正由坡面缓慢入渗坡体中,因而水位上升阶段,地下水位浸润线呈“凹”形。

2) 在高水位条件下,虽然坡体内外存在水位差,但如果水位稳定不变,则随着时间延长,坡体饱和区不断扩大,地下水浸润线会逐渐上升,直到与库区水位持平。

3) 库水位从36 m降至30 m的过程中,地下水位随之下降,但速度与库水位相比有滞后性,且越靠近坡面,地下水位下降速度越快,说明库水正从坡体中经坡面缓慢排出,因而水位下降阶段,地下水位浸润线呈“凸”形。

4) 在低水位条件下,虽然坡体内外存在水位差,但如果水位稳定不变,则随着时间延长,坡体饱和区不断缩小,地下水浸润线会逐渐下降,直到与库区水位持平。

图4为工况1孔隙水压力变化情况,a,b,c为坡体临水面上的测点,a点为坡顶测点,b点为最高水位处坡体测点,c点为正常蓄水位处坡体测点。a点在正常水位时,孔压保持在-79.15 kPa左右,而在最高水位时,孔压在-20 kPa附近,结合b,c两测点孔压及坡体渗流场特性可知,孔压变化呈现一定的滞后性,且测点高程越高,滞后性越强,但孔压变化值与水位前后差值基本一致。显然,地下水位与库区水位之间互相补给,在高水位时,库区水位入渗坡体,低水位时,水流从临水面渗出坡体,孔压变化规律与水位变化规律保持一致。

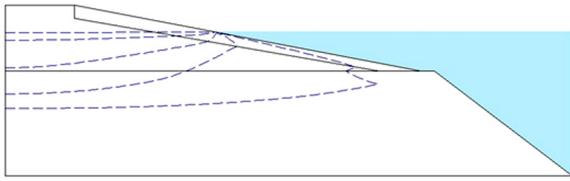


图 2 工况 1-最高蓄水位时地下水位浸润线  
Fig.2 Working condition 1 - Groundwater level saturation line at the highest water level

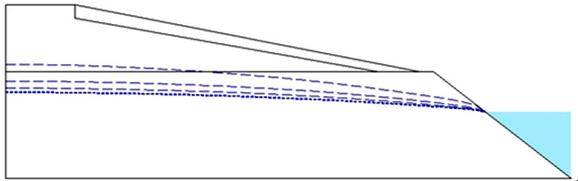


图 3 工况 1-正常蓄水位时地下水位浸润线  
Fig.3 Working condition 1 - Groundwater level saturation line at normal water level

3.2 稳定性分析

根据孔隙水压力变化可知,库水位上升时,边坡所受静水压力增大;坡体饱和区扩大,水流从坡面入渗坡体,产生向内的渗透压力。库水位下降时,边坡所受静水压力减小;坡体饱和区缩小,水流从坡面流出坡体,产生向外的渗透压力。图 5 为 3 种工况下最危险的滑坡,可以看出,当库水位变化时,上部边坡稳定性相对较高,失稳最可能发生在下部浅层边坡,图 6,7,8 为工况 1,2,3 的坡体稳定性与库水位变化的关系,在工况 1 中,当库水位上升至

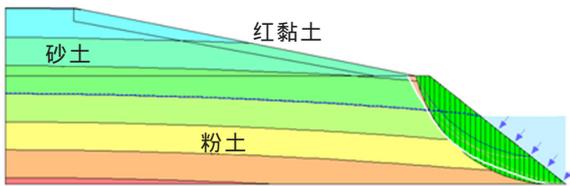


图 5 下部浅层边坡失稳  
Fig.5 Lower shallow slope instability

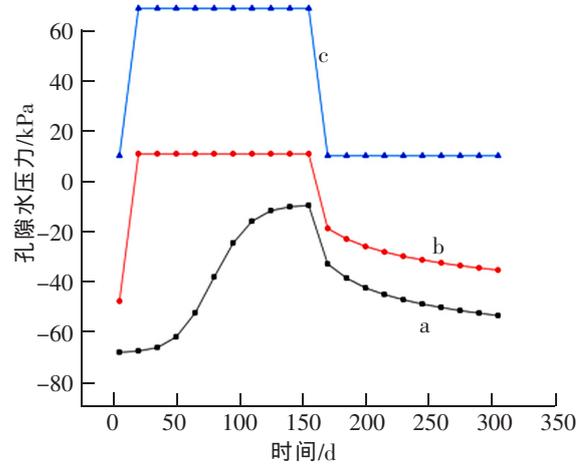


图 4 工况 1-水位升降过程中孔隙水压力变化  
Fig.4 Change in pore water pressure during Working condition 1 - water level fluctuation

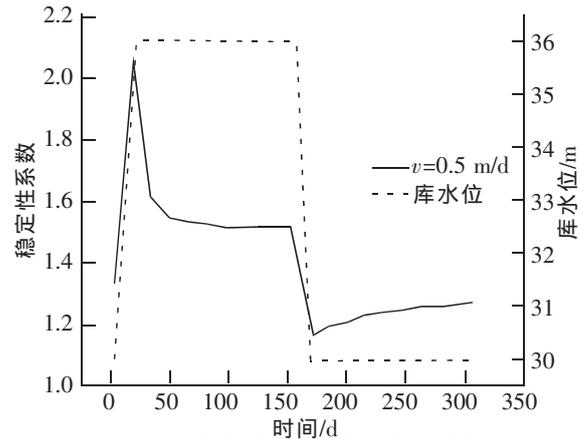


图 6 工况 1-水位升降过程中稳定性系数变化  
Fig.6 Working condition 1-Change of stability coefficient during water level fluctuation

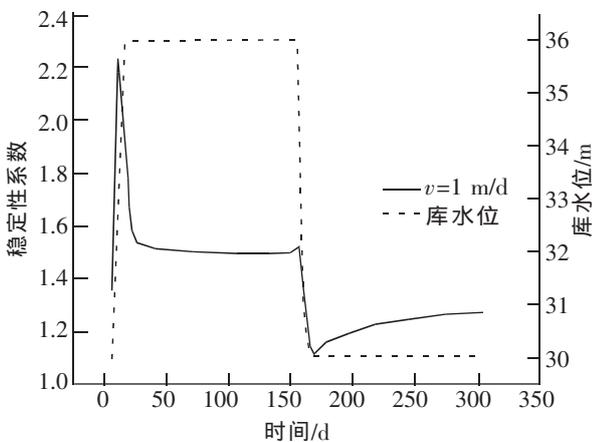


图 7 工况 2-水位升降过程中稳定性系数变化  
Fig.7 Working condition 2-Change of stability coefficient during water level fluctuation

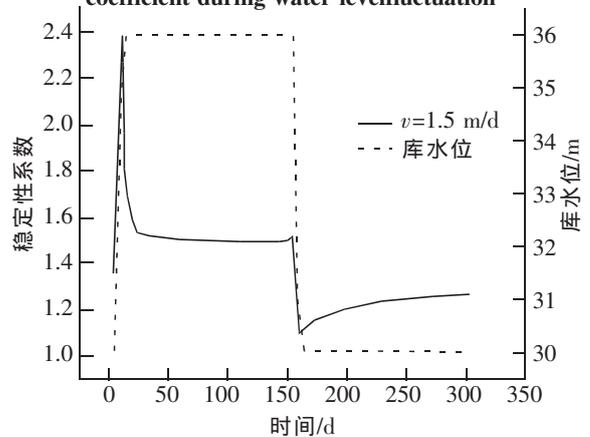


图 8 工况 3-水位升降过程中稳定性系数变化  
Fig.8 Working condition 3-Change of stability coefficient during water level fluctuation

最高水位 36 m 时,坡体稳定性系数达到最大。

在工况 2,3 中,坡体稳定性系数均在最高水位之前达到最大,说明水位上升速度只在一定范围内时,坡体稳定性系数会逐步增加,过快的水位上升速度反而会对坡体稳定性起到负面影响。稳定系数达到峰值,因土体饱和程度增加,饱和范围增大,坡体整体的抗剪强度指标衰减,故坡体稳定性系数不断减小。库水位从高到低期间,坡体稳定性不断减小,水位维持在低水位期间,由于坡内地下水位浸润线不断降低,相当一部分土体由饱和状态转为非饱和状态,基质吸力增加,土体抗剪强度指标提升,故稳定性增加。

另外,水位上升速度提高,坡体稳定性系数峰值随之增大,水位下降速度提高,坡体稳定性系数值变化较小。不同水位波动速度之间的坡体稳定性系数在一定范围内变化,不会导致坡体变形及稳定性发生明显变化。

#### 4 结论

以某库区边坡为例,利用仿真软件实现流固耦合对其在不同速度条件下坡体稳定性进行分析,得出以下结论:

1) 地下水与河水连通,地下水径流通畅,地下水位与河水位基本持平,互相补给,在高水位时,地下水浸润线呈“凹”形,低水位时,则为“凸”形。

2) 对于库区边坡的稳定性而言,库水位由初始水位上升时,提高了边坡稳定,但水位回落对边坡稳定性不利,坡体稳定性会降低到初始水位的稳定性系数之下,最易失稳位置为下部浅层坡体。

3) 水位上升速度只在一定范围内时,坡体稳定性系数会逐步增加,过快的水位上升速度反而会对坡体稳定性起到负面影响。随着库水位下降速度的增大,边坡的稳定系数下降速度也随之增大,但其最小稳定系数值基本不变。

4) 在不考虑降雨对库坡的影响情况下,此坡体的天然稳定性较好,库区水位在正常蓄水位 30 m、最高蓄水位 36 m 之间可视为安全水位范围。

#### 参考文献:

- [1] 刘才华,徐健,曹传林,等. 岩质边坡水力驱动型顺层滑移破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19):3529-3529.
- [2] 郁舒阳,张继勋,王军磊,等. 基于 Fredlund&Xing 参数下不同雨型边坡渗透稳定性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2017(6):50-55.
- [3] 廖红建,高石夯,盛谦,等. 渗透系数与库水位变化对边坡稳定性的影响[J]. 西安交通大学学报,2006(1):88-92.
- [4] 王乐,秦世伟. 不同降雨类型与库水位波动耦合作用下的土质滑坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(6):109-117.
- [5] 张开鹏,刘新喜. 降雨入渗对三峡库区堆积层滑坡稳定性的影响[J]. 中国安全科学学报,2006(6):8-12.
- [6] 石文学,刘景兰,张林锋. 蓄水引起的库区边坡失稳分析[J]. 路基工程,2008(4):128-129.
- [7] 梁鑫,殷坤龙,陈丽霞,等. 库水位波动及降雨作用下巫峡干井子滑坡流-固耦合特征及稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(1):34-44.
- [8] 梁学战,陈洪凯. 库水位升降条件下不同渗透性的滑坡体稳定性变化规律[J]. 中国地质灾害与防治学报,2012(4):23-29.
- [9] 郑颖人,唐晓松. 库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2007,29(8):1115-1121.
- [10] 李俊业,唐红梅,陈洪凯,等. 考虑饱和-非饱和和渗流作用的重庆奉节鹤峰乡场镇滑坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010(4):5-11.
- [11] 涂国祥,黄润秋,邓辉. 典型冰水堆积体侵蚀作用下变形破坏机制研究[J]. 工程地质学报,2008(5):24-30.
- [12] 熊将,王涛,盛谦. 库区边坡稳定性计算的改进 Sarma 法[J]. 岩石力学,2006(2):153-156.
- [13] 李邵军,KNAPPETTJA,冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008(8):78-85.

## Research on Process Fault Identification Based on CapsNet Model

Zhong Lusheng, Lu Wentao

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiongtong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to realize the recognition and diagnosis of process faults, this paper uses CapsNet model to train data. Firstly, using the spatial characteristics of the network model, the training data was characterized and normalized in the form of vectors. Then, a convolution operation was performed to classify the faults on the dynamic consistent routing update. Finally, the reconstitution module was added to modify the input data matrix, reduce the loss error and make the network converge quickly. At the same time, feature visualization was performed on each layer of the network, and the changes in the feature map of each layer were clearly seen. The experimental results show that the process fault recognition performance of this model is better than other neural network models.

**Key words:** CapsNet; dynamic routing update; fault identification; CNN

(上接第 32 页)

## Analysis of Influence of Water Level Rise and Fall on Seepage Field and Stability of Reservoir Slope

Lei Weijia<sup>1</sup>, Liu Weihuang<sup>2,3</sup>, Guo Shenggen<sup>4</sup>, Tan Yifan<sup>2,3</sup>, Zhu Junhua<sup>2,3</sup>

(1. Jiangxi Port and Shipping Administration Border Management Office, Yingtan 335099, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China; 4. Jiangxi Province Harbor and Shipping Administration, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Relying on a slope project in a reservoir area, through on-site hydrogeological survey and laboratory tests, to master the geotechnical engineering properties of the bank slope, combined with dry and wet cycle tests, theoretical analysis and numerical simulation software, to study the water storage period of the project and the water level after operation Reservoir bank slope stability under dynamic ups and downs. The results show that the groundwater infiltration line is "concave" at high water levels and "convex" at low water levels. As the water level of the reservoir area rises, the stability of the slope will also increase, and when the water level gradually falls, the stability of the slope will decrease, and eventually the stability of the slope will be lower than that of the slope that has not experienced the change of water level. The water level in the reservoir area can be regarded as the safe water level range between the normal storage level of 30m and the highest storage level of 36m. This study can provide a reference for the slope protection of the reservoir area and the water level scheduling scheme in the reservoir area.

**Key words:** reservoir slope; dynamic fluctuation of water level; fluid-solid coupling; numerical simulation; slope stability