

# 库水位下降条件下残积土边坡的力学响应

周正峰<sup>1,2</sup>, 马俊<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 3. 中国石油天然气股份有限公司 西气东输管道分公司, 上海 200122)

**摘要:** 为了进一步认识库水位下降对残积土边坡力学响应的作用机理, 基于饱和—非饱和渗流以及非饱和土力学理论, 采用有限元软件, 分析了库水位下降条件下残积土边坡的渗流场、应力场和位移场分布特征。结果表明, 库水位下降过程中, 路基内浸润线随下降速率的不同而差异较大, 但随时间增长趋于一致; 路基内孔隙水压力及位移均随水位下降持续时间及下降速率的增大而增大, 坡体土有效应力逐渐增大, 但总应力不变; 边坡安全系数随时间呈现先下降后上升的变化趋势, 建议在水库泄洪管理方面, 适当控制泄洪速率, 同时加强路基坡体排水, 以有利于库岸边坡稳定。

**关键词:** 残积土; 饱和—非饱和渗流; 非饱和土力学; 力学响应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0146-04

中图分类号: TU45

## Mechanical Response of Residual Soil Slope Under Declined Reservoir Water Level

ZHOU Zheng-feng<sup>1,2</sup>, MA Jun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University,

Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. West to East Gas Pipeline Corporation of CNPC, Shanghai 200122, China)

**Abstract:** To recognize the effect mechanism of declined reservoir water level on residual soil slope, based on saturated—unsaturated seepage theory and unsaturated soil mechanics, the distribution features of seepage field, stress field and displacement field with declined reservoir water level were discussed by using finite element method. The results indicated that different declined rates caused different saturated line in the subgrade in the process of reservoir water declining, however, the saturated lines tended to be consistent as time went on. The pore water pressure and the displacement increased with the duration time of water level and declined rate, and the effective stress in the slope increased while the total stress kept constant. The slope safety factor appeared to decrease firstly and increase subsequently. Hence, controlling flood rate and strengthening subgrade drainage in the management of reservoir floor discharge are recommended to benefit reservoir slope stability.

**Keywords:** residual soil; saturated—unsaturated seepage; unsaturated soil mechanics; mechanical response

我国东南沿海地区, 花岗岩分布广泛, 闽、粤两省花岗岩出露面积占总面积的 30%~40%<sup>[1]</sup>。随着山区的不断开发, 建设了不少中、小型水库, 致使原来多条沿溪公路通过改建、移建成了库岸公路。水库蓄水以后, 随着库水位上升及周期性涨落, 岸坡岩土体经过库水位及地下水的渗透作用, 导致岸坡工程地质条件发生变化, 使得路基失稳的可能性增大<sup>[2-3]</sup>。对于库岸路基失稳机理, 国内外众多学者通过研究, 取得了许多卓有成效的成果<sup>[4-10]</sup>。但同时可以看出, 上述研究针对残积土库岸路基相对较少。

本研究以典型残积土库岸路基为例, 基于饱和—

非饱和渗流理论以及非饱和土力学理论, 采用有限元软件模拟库水位下降过程中库岸路基渗流场、应力场、位移场的时空分布特征, 并在此基础上进行路基稳定性分析, 揭示库水位诱发残积土路基失稳机理。

根据 Darcy 定律和渗流连续性方程, 可推导出二维饱和—非饱和渗流控制方程<sup>[4]</sup>:

$$m_v \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial h}{\partial y}) \quad (1)$$

式中:  $m_v$ ——土水特征曲线斜率;  $h$ ——水头;  $k_x$ ,  $k_y$ ——分别为  $x$  和  $y$  方向渗透系数。

采用的非饱和土抗剪强度按 Fredlund 等于 1978 年提出的公式<sup>[5]</sup>确定:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi + (u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2)$$

式中:  $\tau$  ——非饱和土抗剪强度;  $c'$ ,  $\phi$  ——分别为有效黏聚力和有效内摩擦角;  $\phi'$  ——基质吸力角;  $\sigma_n$  ——总应力;  $u_a - u_w$  ——土体的基质吸力。

## 1 路基的渗流机理分析

### 1.1 计算模型及材料参数

选取图 1 所示的路基断面进行分析计算。路基分两层, 上层为花岗岩残积填土, 下层为强风化花岗岩。路基材料参数如表 1 所示, 通过滤纸法测得土—水特征曲线, 并由土—水特征曲线及饱和渗透系数得到相应的渗透特性曲线。由于水位下降过程中水头边界是动态的, 设计边界水头函数为:

工况 1: 下降速度  $v = 1.0 \text{ m/d}$

$$H(t) = \begin{cases} 17 - t & [t \in (0 \sim 6 \text{ d})] \\ 11 & [t \in (6 \sim 30 \text{ d})] \end{cases} \quad (3)$$

工况 2: 下降速度  $v = 2.0 \text{ m/d}$

$$H(t) = \begin{cases} 17 - 2t & [t \in (0 \sim 3 \text{ d})] \\ 11 & [t \in (3 \sim 30 \text{ d})] \end{cases} \quad (4)$$

工况 3: 下降速度  $v = 3.0 \text{ m/d}$

$$H(t) = \begin{cases} 17 - 3t & [t \in (0 \sim 2 \text{ d})] \\ 11 & [t \in (2 \sim 30 \text{ d})] \end{cases} \quad (5)$$

### 1.2 渗流计算结果分析

模拟时先给定库水位为 17 m 时孔压场, 有限元分析时将此孔压场作为水位下降时瞬态渗流计算的

初始条件, 按照 1 d 为 1 个时步来分别计算不同库水位下降速率条件下的渗流场变化情况。

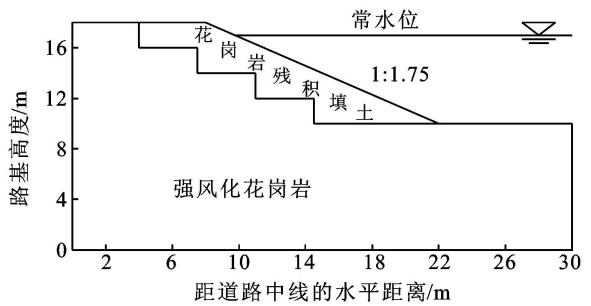


图 1 典型路基计算模型(m)

表 1 典型路基材料参数

土体参数	强风化花岗岩	花岗岩残积填土
有效黏聚力 $c'/\text{kPa}$	15	17
有效内摩擦角 $\phi/^\circ$	30.0	17.8
基质吸力角 $\phi'/^\circ$	15.0	8.9
土体容重 $\gamma/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 020	1 920
饱和渗透系数 $k_s/(10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.5	0.1
饱和体积含水量 $\theta, \%$	28	38
弹性模量 $E/\text{MPa}$	49	38

图 2 分别为库水位在 11~ 17 m 范围内以不同速率下降时, 路基坡内浸润线 10 d 内的变化过程。可见, 水位下降前 6 d 内, 不同下降速率路基坡内的浸润线的位置差异显著, 但随着时间的增长, 不同下降速率路基坡内的浸润线的位置接近一致。

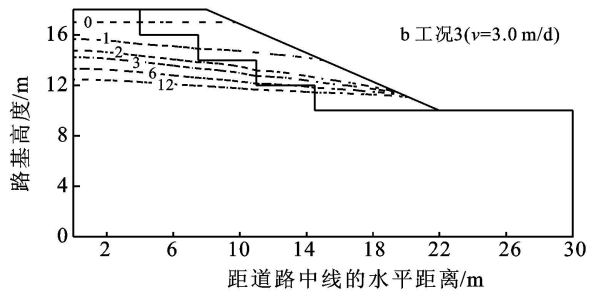
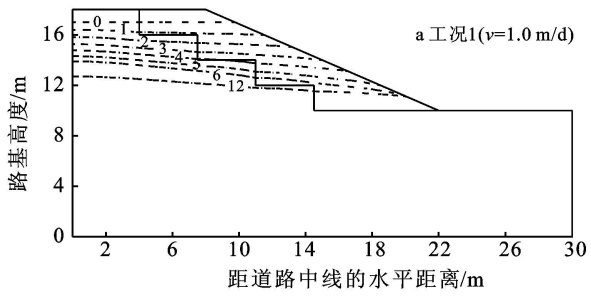


图 2 路基坡内浸润线变化(d)

图 3 为路基边坡按照工况 2 边界水头函数分别下降 1 和 6 d 路基坡内孔隙水压力等值线图。从图 3 可以看出, 在相同下降速率条件下, 随着时间的增长, 坡内孔压等值线由陡峭逐渐趋于平缓; 路基边坡坡脚处的孔压等值线由密转疏, 这是由于随着时间的增长, 孔隙水压力在不断扩散所致。

## 2 浸水路基的力学响应

### 2.1 库水位下降时坡内应力场变化

图 4—5 分别表示水位以 2 m/d 速率下降 1 和 6

d 时路基坡内水平和竖向应力场分布。从图 4—5 可以看出, 有效应力随库水位下降而变化, 库水位下降引起土的孔压减小, 有效应力增大, 等值线明显上升, 这种趋势随着时间推移逐渐减弱。路基土体的有效应力都是随着时间增长而增大, 变化的速率逐渐减小, 到一定程度有效应力不再变化。

### 2.2 库水位下降不同时刻坡内各点应力变化

为了研究库水位下降过程中坡体内应力变化情况, 选取  $x = 6 \text{ m}$  截面 (6, 16), (6, 14), (6, 12), (6, 10), (6, 8), (6, 6), (6, 4), (6, 2) 这 8 个点处的应力进

行了分析。图 6 表示 8 个点在库水位下降不同时刻的有效应力、孔隙水压力和总应力大小。

从图 6 可以得出,初始状态下坡体内的总应力和有效应力值都较小。当库水位下降时,坡体内的水位

也逐渐下降,使得水对土颗粒的浮力作用减小,土的有效应力逐渐增大,孔隙水压力逐渐减小。由于土的总应力为有效应力与孔隙水压力之和,因而其保持不变。

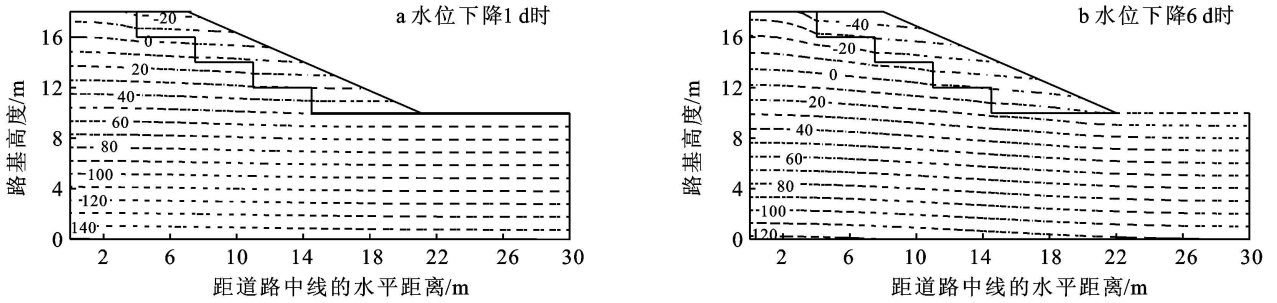


图 3 工况 2( $v=2.0\text{ m/d}$ ) 路基坡内孔压场 (kPa)

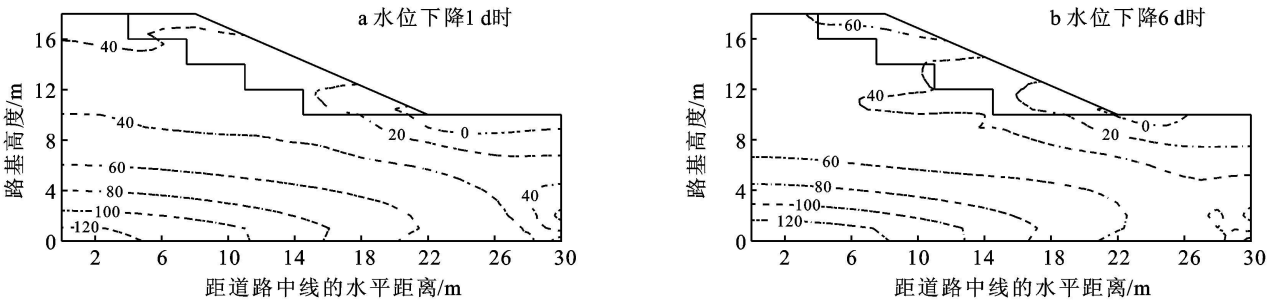


图 4 工况 2( $v=2.0\text{ m/d}$ ) 路基水平应力场(kPa)

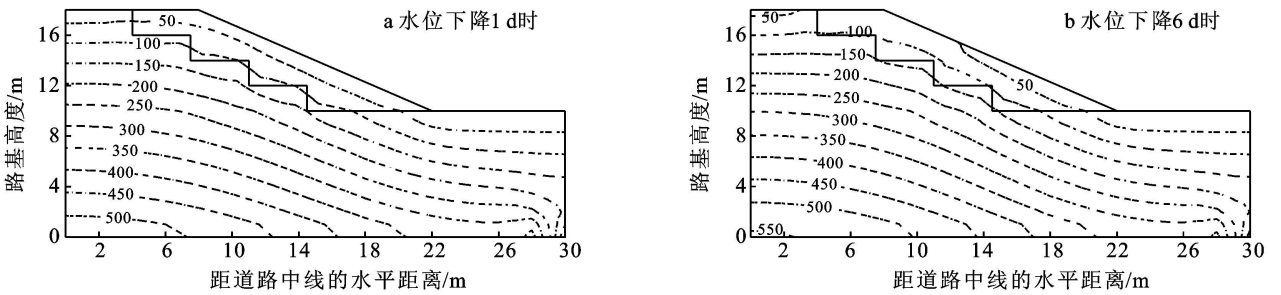


图 5 工况 2( $v=2.0\text{ m/d}$ ) 路基竖向应力场(kPa)

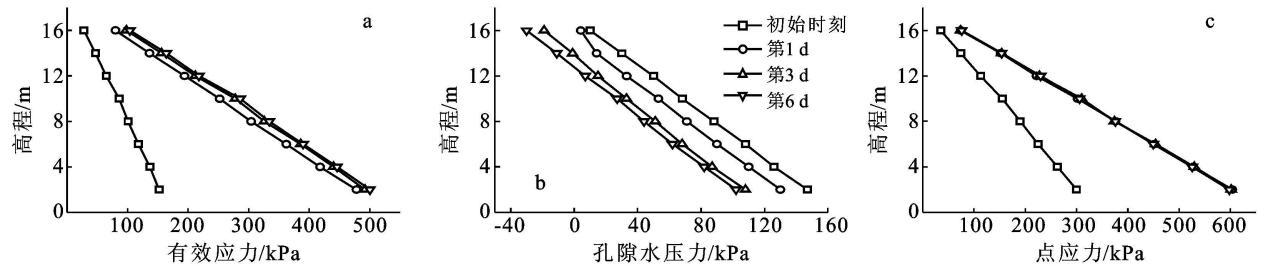


图 6 工况 2( $v=2.0\text{ m/d}$ )  $x=6\text{ m}$  处不同时刻的力学响应量

### 2.3 库水位下降时坡内位移场变化

图 7 表示水位以  $2\text{ m/d}$  速率下降 1 和 6 d 时的竖向位移分布图。从图 7 可以看出,竖向变形随时间

的增长而增大,库水位稳定后一段时间里竖向位移逐渐增大,变化的速率逐渐减小。竖向变形值为负,路基下陷,从顶部到底部,绝对值大小逐渐减小。

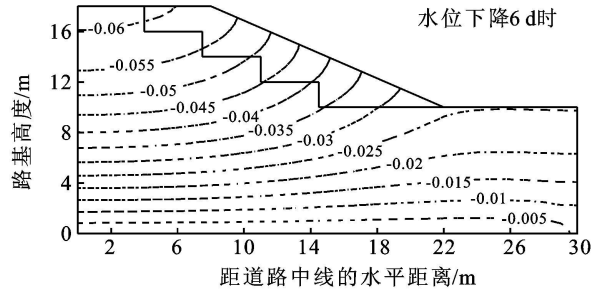
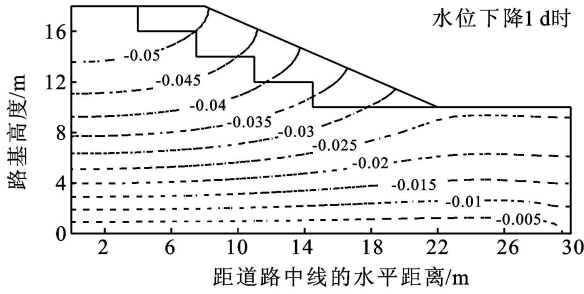


图 7 工况 2( $v=2.0\text{ m/d}$ ) 竖向位移场(m)

2.4 不同库水位下降速率时坡内最大位移变化

图 8 表示库水位以不同速率下降时, 边坡最大位移与时间的关系。相同时间内, 库水位下降速率越大, 路基边坡位移越大。

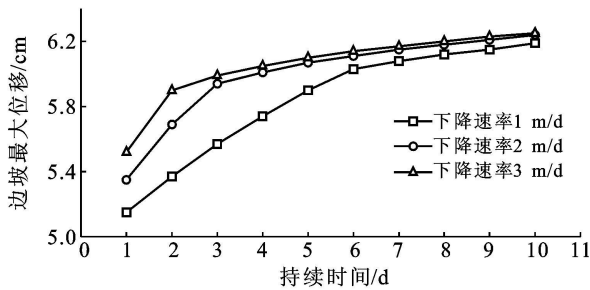


图 8 路基边坡最大位移与历时的关系

3 库水位下降对路基稳定性的影响

图 9 为不同库水位下降速率条件下典型路基安全系数与历时的关系曲线。可见, 库水位下降时, 安全系数迅速减小, 且水位下降速率愈大, 路基安全系数减小的愈多, 对路基的稳定性愈不利, 这是由于水位下降时, 路基内保持较高水位, 存在较大的渗透压力, 从而使安全系数迅速减小。

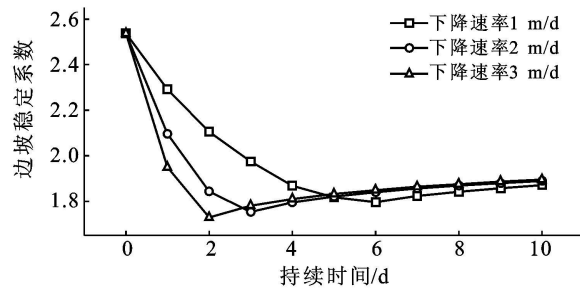


图 9 路基边坡安全系数与历时的关系

4 结论

(1) 水位下降初期, 下降速率对路基坡内浸润线位置影响显著, 但随着时间的增长坡内浸润线趋于一致。

(2) 库水位下降过程中, 土的总应力几乎保持不变, 土的有效应力逐渐增大, 孔隙水压力逐渐减小。

下降初期速率越大, 有效应力越大, 相应孔隙水压力越小, 之后库水位不再下降, 应力值基本趋于一致。

(3) 库水位下降过程中竖向位移逐渐增大, 待库水位平缓时, 位移变化速率趋于平稳。相同时间内, 库水位下降速率越大, 路基边坡位移越大。

(4) 库水位下降时, 路基安全系数迅速减小。下降速率越大, 安全系数减小的愈多, 但最终趋于稳定值。说明水位骤降不利于边坡的稳定, 故建议在水库泄洪管理方面, 适当控制泄洪速率, 同时加强路基坡体排水, 从而使边坡处于较安全的状态。

[ 参 考 文 献 ]

- [1] 中国科学院《中国自然地理》编委会. 中国自然地理地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 王学武, 冯学钢, 王维早. 库水位升降作用对库岸滑坡稳定性的影响研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 232-234.
- [3] 乔娟, 罗先启, 张立仁, 等. 库水作用下三峡库区某库岸堆积体稳定性研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2005, 27(6): 490-493.
- [4] Van Genuchten M T H. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.
- [5] Lane P A, Griffiths D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 443-450.
- [6] 郑颖人, 唐晓松. 库水作用下边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1115-1121.
- [7] 廖红军, 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, 40(1): 88-92.
- [8] 刘新喜, 夏友元, 张显书, 等. 库水位下降对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1439-1444.
- [9] 廖红军, 盛谦, 高石夯, 等. 库水位下降对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3454-3457.
- [10] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩石力学, 2005, 20(5): 769-773.