

## 库水作用下的边（滑）坡稳定性分析

郑颖人, 唐晓松

(后勤工程学院军事建筑工程系, 重庆 400041)

**摘要:** 水库蓄水后, 将形成大量的涉水岸坡, 当水位上升时, 坡体中由于水的渗入, 导致坡体浸水体积的增加, 从而使滑面上的有效应力减少或抗滑阻力减少和部分滑带饱水后强度的降低; 当水位下降时, 由于坡体中浸润面下降的滞后效应, 导致坡体内产生超孔隙水压力, 也将对滑坡的稳定性产生影响。因此, 关于库水作用下的边(滑)坡稳定性分析成为了一个重要的研究课题, 就近几年针对该课题所取得的研究成果进行总结, 重点研究了水位下降时坡体内浸润面位置解析解与数值解的对比分析以及根据经验概化确定浸润面位置进行稳定性分析所存在的误差。

**关键词:** 滞后效应; 超孔隙水压力; 稳定性分析; 浸润面; 经验概化

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)08-1115-07

**作者简介:** 郑颖人(1933-), 男, 浙江镇海县人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学、岩土工程与地下工程的研究工作。E-mail: lwgqsp@yahoo.com.cn。

### Stability analysis of slopes under drawdown condition of reservoirs

ZHENG Ying-ren, TANG Xiao-song

(Dept. of Architecture & Civil Engineering, LEU, Chongqing 400041, China)

**Abstract:** A lot of paddle slopes will be formed after the impoundment of a reservoir. After that due to the permeation of water the inundation volume increases, and it will would lead to the decline of effective stress or sliding resistance and the strength of partial sliding zone. On the other hand, under the drawdown condition of the reservoir, the excess pore pressure will be produced for the sake of the lagged effect of the declining underground water. So the stability of the slopes will be influenced as well. The stability analysis of slopes under the drawdown condition of reservoirs is a new important subject. The achievements of this aspect in recent years were concluded, and a comparison between the analytic and the numerical solutions under the drawdown condition of reservoirs and the inaccuracy of location of phreatic surface determined by the empirical generalization stability analysis were studied.

**Key words:** lagged effect; excess pore pressure; stability analysis; phreatic surface; empirical generalization

### 0 引言

水库蓄水后, 将形成大量的涉水边坡, 库区水位的变化将导致部分蓄水之前稳定的坡体产生滑坡。当库水水位上升时, 坡体中由于水的渗入, 浸润面的位置将升高, 这将导致坡体浸水体积的增加, 从而使滑面上的有效应力减少或抗滑阻力减少和部分滑带饱水后强度的降低; 当库水水位下降时, 由于坡体中浸润面下降的滞后效应, 将导致坡体内产生超孔隙水压力, 也将对滑坡的稳定性产生影响。因此, 关于库水作用下边(滑)坡的稳定性分析是一个十分重要的研究课题。近几年, 笔者对该课题展开了积极的研究工作, 下面将对主要的研究成果进行如下总结。

研究的主要思路是首先如何准确地确定库水作用下坡体内浸润面的位置, 然后再结合有限元强度折减法来进行渗流作用下的边(滑)坡稳定性分析。文中

将分别介绍关于库水作用下坡体内浸润面位置的解析解和数值解, 其中时卫民以 Boussinesq 方程为基础, 将问题简化为一维非稳定渗流问题, 通过拉普拉斯变换来求解方程, 得到了浸润面位置的解析解, 并用数值解对其一维情况进行修正, 从而得到了解析解的近似公式; 而 PLAXIS 有限元程序则是通过渗流计算来求得坡体内浸润面位置的数值解。同时还介绍了 PLAXIS 有限元程序和时卫民自编程序在库水作用下边(滑)坡稳定性分析中的应用, 其中 PLAXIS 有限元程序就是采用目前国内外广泛使用的有限元强度折减法来进行稳定性分析的。最后, 再对目前实际工程中在确定坡体内浸润面位置时, 采用的经验概化法所引起的误差进行研究。

收稿日期: 2006-11-30

# 1 库水作用下坡体内浸润面位置的求解方法

## 1.1 库水作用下坡体内浸润面位置的解析解

### (1) 基本假设

为了得到库水变化过程中坡体内浸润面位置的解析解<sup>[1-3]</sup> (这里只介绍库水水位下降时的求解方法), 首先作了以下5点基本假定: ①含水层均质、各项同性, 侧向无限延伸, 具有水平不透水层; ②库水降落前, 原始潜水面水平; ③潜水流为一维流; ④库水位以 $V_0$ 的速度等速下降; ⑤库岸按垂直考虑。库水降幅内的库岸与大地相比小的多, 为了简化将其视为垂直库岸。

### (2) 解析解计算公式的求解

以上述假设为基础的潜水非稳定运动微分方程可由布辛涅斯克(Boussinesq)方程得到, 其微分方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left( H \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式(1)为一个二阶非线性偏微分方程, 目前还没有求解析解的方法, 通常采用简化方法, 将其线性化。简化的方法是将括号中的 $H$ 近似地看作常量, 用时段始、末潜水流厚度的平均值 $h_m$ 代替, 这样就得到简化的一维非稳定渗流的运动方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = a \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$a = \frac{kh_m}{\mu} \quad (3)$$

其中通过对式(2)进行拉普拉斯变换求解, 得到了库水位等速下降时坡体浸润线的计算公式

$$h_{x,t} = h_{0,0} - V_0 t M(\lambda) \quad (4)$$

式中,  $M(\lambda)$ 为减函数, 当 $\lambda > 2$ 时,  $M(\lambda)$ 近似等于0。 $\lambda$ 与 $M(\lambda)$ 的关系曲线如图1所示。

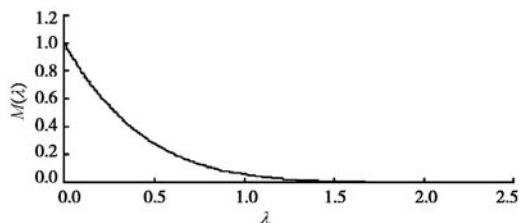


图1  $\lambda$ 与 $M(\lambda)$ 的关系曲线

Fig. 1 The relationship curve between  $\lambda$  and  $M(\lambda)$

通过对 $M(\lambda)$ 进行多项式拟合, 得

$$M(\lambda) = \begin{cases} 0.1091\lambda^4 - 0.7501\lambda^3 + 1.9283\lambda^2 - 2.2319\lambda + 1 & (0 \leq \lambda < 2) \\ 0 & (\lambda \geq 2) \end{cases} \quad (5)$$

这样我们就得到库水位等速下降时浸润线的简化计算公式:

$$h_{x,t} = \begin{cases} h_{0,0} - V_0 t (0.1091\lambda^4 - 0.7501\lambda^3 + 1.9283\lambda^2 - 2.2319\lambda + 1) & (0 \leq \lambda < 2) \\ h_{0,0} & (\lambda \geq 2) \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$\lambda = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{\mu}{kh_m t}} \quad (7)$$

式中,  $k$ 为渗透系数(m/d),  $h_m$ 为潜水流平均厚度(m), 取 $h_m = (h_{0,0} + h_{0,t})/2$ ,  $h_{0,0}$ 为库水下降前的水位(m),  $h_{0,t}$ 为 $t$ 时刻库水的水位(m),  $\mu$ 为给水度,  $t$ 为库水下降时间(d)。

### (3) 有限元分析及公式修正

由于式(7)忽略了竖向渗流的影响, 是按一维问题来处理的, 因此必须对引起的误差进行修正。借助有限元分析程序SEEP/W, 通过分析一维公式与有限元的误差, 提出了适合工程应用的修正公式:

$$h_{x,t} = h_{0,t} + \eta[1 - M(\lambda)]V_0 t \quad (8)$$

式中,  $\eta$ 为修正系数。

通过研究发现修正系数 $\eta$ 与下降速度指标 $\beta$ 有关, 其表达式为

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu V}{k}} \quad (9)$$

通过数学拟合得到修正系数 $\eta$ 与下降速度指标 $\beta$ 的关系式为

$$\eta = \begin{cases} 9.2989\beta & (\beta < 0.088) \\ 0.0066\beta + 0.8218 & (\beta \geq 0.088) \end{cases} \quad (10)$$

### (4) 修正公式的试验验证

为了验证修正公式的正确性, 我们用砂槽试验对其进行了验证。砂槽的净尺寸: 长3.7m, 宽1.5m, 高1.5m, 见图2。



图2 砂槽试验图

Fig. 2 Sand launder experiment

槽壁用水泥砂浆和砖砌筑, 为了便于观察和量测水位, 在槽壁的一侧设置了测压管, 以测定试验中水头高度, 测压管的水平间距为0.3m。在槽壁的另一

侧设置玻璃窗, 通过它可以直观的了解自由水面的变化情况。为了排水方便, 在槽壁的侧面设置了 5 个进排水龙头, 通过这些龙头来实现砂槽的蓄水和排水功能。通过砂与砂+土的模型试验对修正公式的正确性进行了验证。试验结果表明: 试验结果与修正公式的结果非常接近, 除坡体前部个别点外, 其误差均在 5% 以内。在坡体前部, 试验值略大于修正公式的计算值; 在坡体中后部, 试验值略小于修正公式的计算值。

### 1.2 库水作用下坡体内浸润面位置的数值解

目前通过数值模拟来确定库水作用下坡体内浸润面位置的方法主要有差分法、有限单元法和边界元法等<sup>[4-5]</sup>。本文选用了在渗流计算方面功能比较强大的 PLAXIS 有限元程序对库水作用下坡体内浸润面的位置进行数值模拟。

#### (1) PLAXIS 程序简介

PLAXIS 程序是荷兰 PLAXIS B V 公司开发的比较职能的岩土工程有限元软件, 程序界面友好, 建模简单, 自动进行网格剖分。用于分析的土的本构模型有: 线弹性、理想弹塑性模型、软化和硬化模型以及软土流变模型; 可以模拟施工步骤, 进行多步计算; 后处理简单方便。程序能够计算两类工程问题: 平面应变问题和轴对称问题, 能够模拟土体; 墙、板、梁结构; 各种元素和土体的接触面; 锚杆; 土工织物; 隧道以及桩基础等元素。

#### (2) 有限元模型的建立

利用 PLAXIS 程序进行库水作用下的边坡稳定性分析, 需要分别建立有限元模型和渗流计算模型, 由于 PLAXIS 程序中渗流计算也是基于有限元原理进行的, 因此, 两个模型有限元网格的划分可以是一样的。利用 PLAXIS 程序进行二维分析, 用户可以选择 6 节点或 15 节点三角型单元。

#### (3) 材料的选择及参数

PLAXIS 程序提供了 3 种材料(线弹性、莫尔-库仑理想弹塑性、软化硬化模型和软土流变模型)用于模拟岩土的工程性状。

在进行材料的定义时, PLAXIS 程序为每种材料的力学行为提供了 3 种选择: ①排水条件下的力学行为; ②不排水条件下的力学行为; ③无孔隙条件下的力学行为。其中排水力学条件下的力学行为, 适用于模拟土的长期力学行为, 当选择这种力学行为时, 在计算过程中土体内将不会产生超孔隙水压力; 而选择不排水力学条件下的力学行为, 则土体内的超孔隙水压力在计算过程中将得到充分的发展; 对于无孔隙条件下的力学行为, 则适合于模拟计算过程中既不存在初始孔隙水压力也不会产生超孔隙水压力的材料。

在渗流计算模型中需要输入的主要参数除了水的

重度以及土体水平和竖直方向的渗透系数, 还必须建立相应的水利边界条件。

#### (4) PLAXIS 程序渗流计算基本原理的介绍<sup>[6]</sup>

PLAXIS 程序认为水流在多孔介质中的流动符合达西定律, 其不同之处在于程序为了区别孔隙水在饱和土体(浸润面以下)和非饱和土体(浸润面以上)中的流动, 在控制微分方程中引入了一个折减函数  $K^r$ , 其表达式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K^r k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K^r k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (11)$$

折减函数  $K^r$  的定义如下: 对于孔隙水压力为拉应力,  $K^r = \alpha$ ; 对于孔隙水压力为压应力,  $K^r = 1$ ; 对于过渡区域,  $K^r = \alpha + (1 - \alpha) \frac{\gamma_w \delta - p}{\gamma_w \beta}$ 。  $K^r$  和孔隙水压力

之间的关系如图 3 所示。如上所述折减函数  $K^r$  在浸润面以下等于 1; 在浸润面以上等于  $\alpha$ ; 在浸润面附近的过渡区域  $K^r$  从 1 变化到  $\alpha$ , 如图 3 所示系数  $\beta$  和  $\delta$  定义了过渡区域的大小和位置。

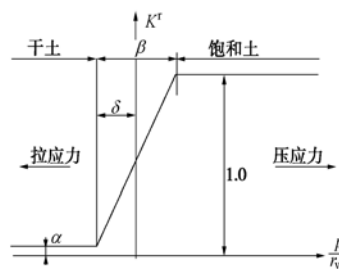


图 3  $K^r$  和孔隙水压力之间的关系示意图

Fig. 3 The relationship between  $K^r$  and pore water pressure

### 1.3 解析解和数值解计算结果的对比分析

算例: 已知滑坡土体的渗透系数  $k_x = k_y = 0.3 \text{ m/d}$ , 库水的下降高度为 30 m, 下降速度 1 m/d, 给水度为 0.0312, 孔隙率 0.35, 求库水下降过程中坡体内浸润线的变化, 滑坡简图见图 4。

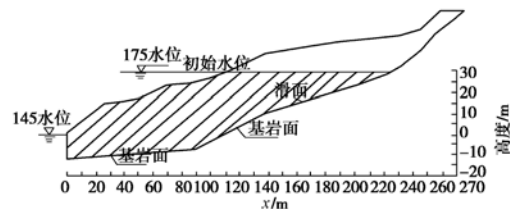


图 4 滑坡简图

Fig. 4 Land slide

该算例浸润线的计算结果见表 1 和图 5, 从其中的数据和对比曲线可以看出有限元与修正公式的结果非常接近, 总体呈现解析解近似公式的计算结果大于有限元计算结果的趋势。误差随水平距离的增大而减

小,除坡体前部个别点误差较大外(最大为14.71%),大多数误差都在10%以内。

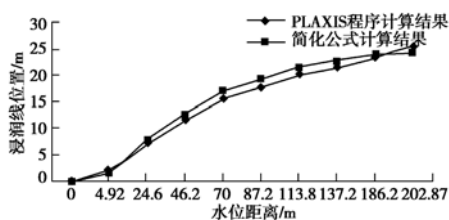


图5 浸润线解析解和数值解的对比曲线

Fig.5 The comparison between the analytic and numerical solutions of seepage

## 2 库水作用下边(滑)坡稳定性的分析方法

### 2.1 PLAXIS 程序进行库水作用下边(滑)坡稳定性分析的分析方法

PLAXIS 程序是通过程序提供的有限元强度折减法<sup>[7]</sup>来进行安全系数的求解。其分析方法是通过对强度参数  $\tan \phi$  和  $c$  不断减小直到计算模型发生破坏。在程序中系数  $\sum Msf$  定义为强度的折减系数,其表达式为

$$\sum Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}}, \quad (12)$$

式中,  $\tan \phi_{input}$ ,  $c_{input}$  为程序在定义材料属性时输入的强度参数值,  $\tan \phi_{reduced}$ ,  $c_{reduced}$  为在分析过程中用到的经过折减后的强度参数值。程序在开始计算时默认  $\sum Msf = 1.0$ , 然后  $\sum Msf$  按设置的数值递增至计算模型发生破坏,此时的  $\sum Msf$  值即为计算模型的安全系数值。

应用 PLAXIS 程序进行库水作用下边(滑)坡稳定性分析算例:均质边坡,坡高  $H = 30\text{ m}$ ,黏聚力  $c = 20\text{ kPa}$ ,坡角  $\arctan(1/2)$ ,土重度  $\gamma_{dry} = 20\text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_{wet} = 22\text{ kN/m}^3$ ,内摩擦角  $\phi = 23^\circ$ ,泊松比  $\nu = 0.35$ ,渗透系数  $k_x = k_y = 1.0\text{ m/d}$ ,坡体前部库水水位下降速率  $3\text{ m/d}$ ,天然情况下坡体的安全系数  $F_s = 1.491$ 。利用 GEO-SLOPE (SLOPE 和 SEEP/W 耦合)程序和 PLAXIS 程序的分析结果见表2和图6。

从安全系数结算结果表2和坡体前部水位和安全系数的关系曲线图6可以看出,传统条分法的 GEO-SLOPE 程序和 PLAXIS 有限元程序的计算结果基本吻合,误差在4%以内,符合计算精度的要求。在库水水位下降到38 m时,边坡的安全系数最低,我们称此时的水位为“最不利水位”,通过上述算例,说明 PLAXIS 程序对渗流作用下的边坡稳定性分析具有一定的适用性。

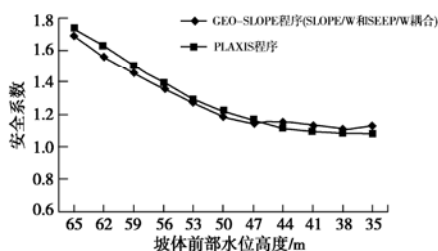


图6 坡体前部水位和安全系数的关系曲线图

Fig. 6 The curve relationship between water level and safety factor

### 2.2 时卫民自编程序进行库水作用下边(滑)坡稳定性分析的分析方法

时卫民通过解析解近似公式确定坡体内浸润面位置,并以不平衡推力法作为稳定性分析的基础,通过理论分析和算例比较,认为不平衡推立法显式解不能保证在任何情况下的正确性,建议取消它的应用。而对于隐式解,则认为其计算精度与滑面控制点处滑面倾角的变化密切相关,通过控制该变化角度可以控制其精度,工程中建议将滑面控制点处的倾角变化小于  $10^\circ$  作为该方法的使用条件<sup>[8]</sup>。因此,不平衡推力法的隐式解及其使用条件就是时卫民自编程序的编制依据。在库水变化过程中该程序是通过上述解析解近似公式来确定坡体内浸润线位置的。

## 3 库水水位下降条件下边(滑)坡稳定性影响因素分析及两种解法的比较

算例:已知滑体的天然重度为  $20.8\text{ kN/m}^3$ ,饱和重度为  $21.0\text{ kN/m}^3$ ,滑带土的抗剪强度指标,天然状态下  $c = 20\text{ kPa}$ ,  $\phi = 10^\circ$ ;饱和状态下  $c = 15.6\text{ kPa}$ ,  $\phi = 9.27^\circ$ 。坡体表面荷载为  $15\text{ kN/m}^2$ 。为了反映库水下降速度和土体渗透系数的影响,因此这里在稳定性分析中考虑了超孔隙水压力的积累和消散,见图7。

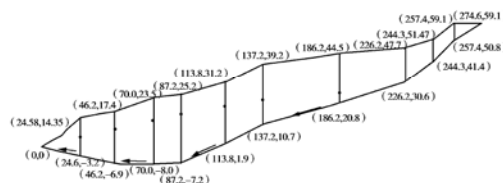


图7 滑坡简图

Fig. 7 Land slide

### 3.1 库水下降速度的影响

从解析解近似公式我们发现,对坡体稳定有利的因素也就是使  $\lambda$  减小的因素,反之对坡体稳定不利的因素也就是使  $\lambda$  增大的因素。通过  $\lambda$  的定义式可以看出,库水水位的下降速度是一个影响  $\lambda$  大小的重要因素,因此,本文取不同的库水水位下降速度进行了稳定性分析,计算结果见表3和图8。为了考虑库水水位

表 1 浸润线计算结果表

Table 1 The calculated results of seepage

不同计算方法结果	水平距离									
	0.0 m	4.92 m	24.6 m	46.2 m	70.0 m	87.2 m	113.8 m	137.2 m	186.2 m	202.87 m
解析解近似公式/m	0.00	1.74	7.76	12.87	16.99	19.18	21.53	22.81	24.07	24.25
有限元/m	0.00	2.04	7.33	11.62	15.58	17.72	20.16	21.58	23.47	25.47
误差/%	0.00	14.71	-5.87	-10.76	-9.05	-8.24	-6.75	-5.70	-2.56	4.79

表 2 安全系数计算结果表

Table 2 The calculated results of safety factor

分析软件	水位高度										
	65 m	62 m	59 m	56 m	53 m	50 m	47 m	44 m	41 m	38 m	35 m
GEO-SLOPE 程序(SLOPE/W 和 SEEP/W 耦合)	1.692	1.556	1.458	1.359	1.271	1.188	1.141	1.151	1.132	1.109	1.124
PLAXIS 程序	1.738	1.628	1.500	1.398	1.294	1.221	1.162	1.117	1.093	1.079	1.082
误差/%	2.72	4.63	2.88	2.87	1.81	2.78	1.84	-2.95	-3.45	-2.71	-3.74%

表 3 不同的库水水位下降速率的计算结果表

Table 3 The calculated results of declining speed of reservoir drawdown

水位下降速率/(m·d <sup>-1</sup> )		0.4	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
安全	时卫民自编程序	0.978	0.937	0.925	0.909	0.898	0.892	0.890
系数	PLAXIS 有限元程序	0.998	0.961	0.950	0.937	0.929	0.922	0.919
误差/%		2.04	2.56	2.70	3.08	3.45	3.36	3.26

下降速率的影响, 在 PLAXIS 程序中是采用设置固结天数的方法实现的。即如果水位从 30 m 处按 1 m/d 的速率下降, 则程序设置水位从 30 m 下降到 29 m 后稳定 1 d 再下降, 在这 1 d 的时间里程序进行固结计算, 从而使产生的超孔隙水压力消散 1 d; 同样, 如果水位下降的速率为 2 m/d, 则水位从 30 m 下降到 28 m 后稳定 2 d 再下降, 在这 2 d 的时间里也进行固结计算, 从而使产生的超孔隙水压力消散 2 d, 由此既可以考虑库水下降时坡体内超孔隙水压力的积累, 也可以考虑其消散。从上述的内容可以看出, 在 PLAXIS 程序中如果单纯地考虑水位的变化是无法考虑时间因素的, 所以采用结合固结计算的方法来考虑时间因素, 即把水位下降到一定高度所经历的时间通过固结计算的时间来体现超孔隙水压力的消散。因此对于不同的水位下降速率, 也就是水位下降到一定高度所经历的时间, 可以通过设置水位下降到一定高度后, 再进行同样时间的固结计算实现。

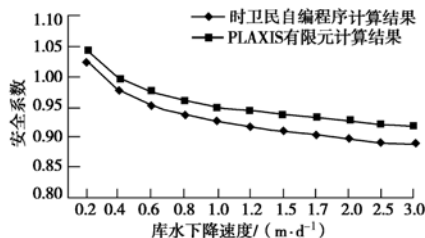


图 8 稳定性分析结果对比曲线

Fig. 8 The comparison among stability analysis results  
从表 3 中的数据和图 8 的对比曲线可以看出当库

水水位下降速度增快时, 坡体的稳定性逐渐降低, 不同的水位下降速度所对应的有限元的与时卫民自编程序的计算结果基本吻合, 自编程序的计算结果略小于有限元的计算结果, 且误差均在 4% 以内。

### 3.2 土体渗透系数的影响

通过  $\lambda$  的定义式可以看出, 土体的渗透系数也是一个影响  $\lambda$  大小的因素, 因此本文取不同的土体渗透系数对该算例进行了稳定性分析, 计算结果见表 4 和图 9。

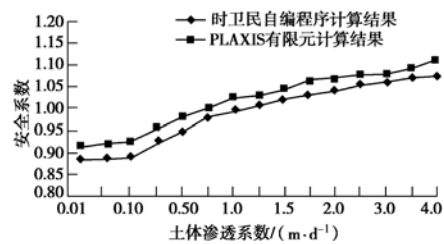


图 9 稳定性分析结果对比曲线

Fig. 9 The comparison among stability analysis results

从表 4 中的数据和图 9 的对比曲线可以看出当土体渗透系数增大时, 坡体的稳定性也逐渐提高, 不同的土体渗透系数所对应的有限元的与时卫民自编程序的计算结果基本吻合, 自编程序的计算结果略小于有限元的计算结果, 其误差均在 4% 以内。

通过上述算例, 我们可以看出, 应用结合解析解编制的自编程序和 PLAXIS 有限元程序对库水水位下降条件下边(滑)坡的稳定性进行分析, 两种程序计算结果的误差均在 4% 以内, 达到了计算精度的要求。同时, 通过对土体渗透系数和库水水位下降速度等因



表4 不同的土体渗透系数的计算结果表

渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )		0.1	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
安全	时卫民自编程序	0.890	0.996	1.024	1.041	1.054	1.065	1.071
系数	PLAXIS 有限元程序	0.919	1.025	1.047	1.070	1.078	1.082	1.097
	误差/%	3.26	2.91	2.25	2.79	2.28	1.60	2.43

素的研究, 说明了解析近似公式能真实地反映这些因素对库水作用下边(滑)坡稳定性的影响。

#### 4 浸润面位置的确定方法对边(滑)坡稳定性分析的影响

目前实际工程中在进行库水作用下的边(滑)坡稳定性分析时, 通常是采用经验概化的方法来粗略地确定坡体内稳态浸润面的位置, 因此, 该方法计算结果的可靠性究竟如何已经成为一个急需解决的问题。本章将对对比分析按渗流计算和经验概化两种方法所确定的浸润面位置, 对库水作用下边坡稳定性分析的影响, 从而确定按经验概化的方法计算到底存在有多大误差。

算例: 坡高  $H = 30 \text{ m}$ , 黏聚力  $c = 25 \text{ kPa}$ , 坡角  $\arctan(1/2)$ , 土体重度  $\gamma_{\text{dry}} = 20 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_{\text{wet}} = 22 \text{ kN/m}^3$ , 内摩擦角  $\varphi = 23^\circ$ , 泊松比  $\nu = 0.35$ , 坡体后部为定水头边界, 保持  $H = 60 \text{ m}$  不变, 坡体前部水位从初始水位  $60 \text{ m}$  逐渐下降。文中采用 PLAXIS 程序分别计算了坡体内浸润面分别按渗流计算和经验概化两种方法确定时边坡的安全系数。图 10 是根据经验概化得到坡体内浸润面位置的示意图, 如图 10 所示, 经验概化法通常是指坡岸远处水位与库水下降到最低时水位两点的直线连线。这里首先计算了当土体设置为排水条件时的情况。

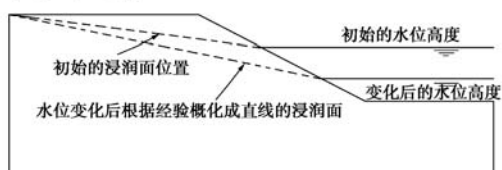


图 10 根据经验概化得到坡体内浸润面位置的示意图

Fig. 10 The location of seepage in the land by empirical generalization

由于一般在实际工程中对水位下降过程中安全系数的变化并不关心, 而只是关心库水下降到一定高度后安全系数的大小。对于上述根据经验概化确定坡体内浸润面位置的情况, 关心的只是水位下降到最低时的安全系数。因此, 通过表 5 (排水条件, 不考虑超孔隙水压力的影响) 中的数据可以看出, 目前按经验概化得到的浸润面位置进行稳定性分析得到的水位下降到  $30 \text{ m}$  时安全系数的计算结果等于  $1.273$ , 该值就是实际工程中设计时采用的数值。当按渗流计算得到

的浸润面位置计算时, 水位下降到  $30 \text{ m}$  时对应的安全系数计算结果为  $1.106$ , 两者之间的误差在  $10\%$  以上, 因此, 按上述的工程采用值进行设计将偏于危险。图 11 绘制了当坡体前部水位下降到  $45 \text{ m}$  时, 按不同的浸润面位置确定方法计算得到的滑面和浸润面位置示意图, 图 11 (a) 浸润面位置由概化得到, 土体为排水条件; 图 11 (b) 浸润面位置由渗流计算得到, 土体为排水条件。图 11 (b) 中浸润面位置高于图 11 (a) 中的浸润面位置。

表 5 库水条件下边坡安全系数计算结果表

坡体前部水位高度 /m	PLAXIS 程序	
	渗流计算	概化直线
60	1.782	1.782
55	1.587	1.628
50	1.396	1.482
45	1.263	1.366
40	1.163	1.291
35	1.121	1.258
30	1.106	1.273

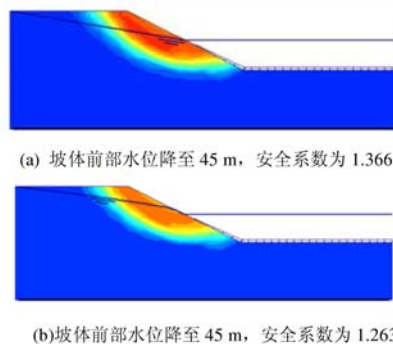


图 11 浸润面和滑面位置示意图

Fig. 11 The location of phreatic surface and sliding surface

当土体设置为不排水条件时, 即考虑超孔隙水压力的积累对坡体稳定性的影响, 安全系数的数值将更低, 此时库水下降速率也将对边坡的稳定产生影响, 计算结果见表 6 (不排水条件, 考虑超孔隙水压力的影响)。由于假设初始水位  $60 \text{ m}$  时, 坡体经过长期的浸泡, 坡体内超孔隙水压力为  $0$ , 因此, 此时边坡的安全系数和表 5 中土体设置为排水条件时的计算结果是一样的。

从表 6 中的数据可以看出, 当考虑孔隙水压力消散, 进行固结计算时, 水位下降至  $30 \text{ m}$  安全系数达到最低值  $0.883$ ; 而当考虑孔隙水压力消散时, 库水的下降速率越大, 安全系数的数值越小, 当库水下降速率

为 4 m/d 时, 水位下降至 30 m 安全系数达到最低值 1.057, 比不考虑孔隙水压力消散时得到的安全系数数值增大了 20%。从表 6 (不排水条件, 考虑超孔隙水压力的影响) 中可以看出, 上述 4 种情况下按渗流计算得到的浸润面位置计算的结果分别是 0.883, 1.085, 1.078 和 1.057, 和表 5 中的工程采用值 1.273 相比, 其误差分别是 30.6%, 14.8%, 15.3% 和 17.0%。图 11 为根据表 5, 6 中的计算结果绘制的不同计算条件下坡体前部水位和安全系数的关系曲线图。

表 6 库水条件下边坡安全系数计算结果表

Table 6 The calculated results of safety factor of slopes

坡体前部水位高度/m	不考虑孔隙水压力消散	考虑孔隙水压力消散		
		1 m/d	2 m/d	4 m/d
60	1.782	1.782	1.782	1.782
55	1.415	1.486	1.474	1.442
50	1.209	1.334	1.326	1.315
45	1.076	1.220	1.201	1.190
40	0.967	1.138	1.125	1.096
35	0.906	1.102	1.087	1.070
30	0.883	1.085	1.078	1.057

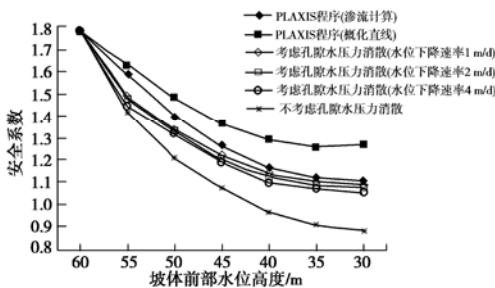


图 12 坡体前部水位和安全系数的关系曲线图

Fig. 12 The relationship between the water level in the front of slope and the safety factor

从图 12 可以看出, 利用 PLAXIS 程序按渗流计算得到的浸润面位置进行库水条件下的边坡稳定性分析比目前工程中广泛采用的根据经验概化得到的浸润面位置来进行稳定性分析的方法更合理, 而在计算过程中, 把土体设置为不排水条件, 考虑坡体内超孔隙水压力消散的方法更符合工程实际, 并且该方法能充分反映库水位下降速率对边坡稳定性的影响。同时也表明, 目前工程中广泛采用的经验概化的方法偏于危险, 应该引起设计部门的高度关注。

参考文献:

[1] 时卫民. 三峡库区滑坡与边坡稳定性实用分析方法研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2004. (SHI Wei-min. Researches on the practical method for the landslide and slope stability in

the Three Gorges reservoir area[D]. Chongqing: China University of Geosciences, 2004. (in Chinese))

[2] 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2004(3): 67 - 71. (SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren. Analysis on stability of landslide during reservoir drawdown[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 67 - 71. (in Chinese))

[3] 郑颖人, 时卫民. 边(滑)坡稳定分析进展讲座(4)一库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3203 - 3210. (ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min. The lecture about the development of slope stability analysis (4): calculation of seepage force and phreatic surface under drawdown condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3203 - 3210. (in Chinese))

[4] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. (MAO Chang-xi. The analysis and control of seepage calculation[M]. Beijing: China Water Resources and Electric Power Press, 1990. (in Chinese))

[5] 杜延龄, 许国安. 渗流分析的有限元法和电网络法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (DU Yan-ling, XU Guo-an. The finite elementary method and electric network in seepage analysis[M]. Beijing: China Water Resources and Electric Power Press, 1992. (in Chinese))

[6] 唐晓松, 郑颖人, 等. 应用 PLAXIS 有限元程序进行渗流作用下的边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 13 - 16. (TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren, et al. Stability analysis of soil slope under seepage by PLAXIS finite element program[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(4): 13 - 16. (in Chinese))

[7] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343 - 346. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis of safety factors of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 - 346. (in Chinese))

[8] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明, 张鲁渝. 边坡稳定不平衡推力方法的精度分析及其使用条件[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 125 - 129. (SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren, TANG Bo-ming, ZHANG Lu-yu. Accuracy and application range of imbalance thrust force method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 125 - 129. (in Chinese))