

# 水位下降过程中超孔隙水压力对边坡稳定性的影响

唐晓松, 郑颖人

(后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 400041)

**摘要:** PLAXIS 程序在渗流计算方面具有强大的功能. 应用 PLAXIS 程序对水位下降过程中的边坡稳定性进行了数值模拟, 分析了不同的水位下降速率及土体渗透系数对边坡稳定性的影响. 分析结果表明, 水位下降速率越大、土体的渗透系数越小, 则越不利于边坡的稳定.

**关键词:** 水位下降速率; 渗透系数; 边坡稳定性; PLAXIS 程序

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)01-0001-06

## Effect of excess pore water pressure on stability of slopes under drawdown condition

TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren

(Department of Architecture & Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

**Abstract:** The PLAXIS program has the powerful function of seepage calculation. The PLAXIS program is adapted to simulate the stability of a slope during the drawdown process of the water level, and effects of the drawdown rate of water level and permeability coefficients of soil on the stability of slopes are analyzed. Results show that the faster the drawdown rate of water level is, the smaller the permeability coefficients become and the more unstable the slope is.

**Key words:** drawdown rate of water level; permeability coefficient; slope stability; PLAXIS program

水库蓄水后, 库水位的变化将可能导致部分在蓄水之前较稳定的坡体产生滑塌, 这是水库建成后发生滑坡的重要原因之一. 目前, 国内外关于水位变化对边坡稳定性的影响作了大量的研究工作. 时卫民<sup>[1]</sup>以 Boussinesq 方程为基础, 通过 Laplace 变换求解方程, 得到了坡体浸水后坡体内的浸润线的解析解, 并将分析结果用数学拟合的方法, 提出了便于工程应用的实用计算式. 同时, 又在有限元数值分析的基础上对其进行了修正, 并用模型试验进行了验证. 刘新喜<sup>[2]</sup>通过对库水位下降过程中滑坡稳定性的研究表明, 库水位下降产生的渗流对滑坡稳定性的影响非常大, 其影响的程度取决于土体渗透系数的大小. 徐则民等<sup>[3]</sup>论述了渗流场与应力场耦合分析的基本原理, 及其在斜坡稳定性评价中应用的理论基础和技术路线. 陈祖煜<sup>[4]</sup>提出的库水位陡降时边坡稳定分析的总应力法, 直接由下降前土体的状态确定其水位下降后的抗剪强度, 该方法简化了库水位骤降时坡体稳定分析的过程. D. V. Griffiths 等<sup>[5]</sup>研究了土体浸润面与库水位作用下的边坡稳定性, 并采用自编程序, 应用有限元强度折减法, 通过算例计算得出的边坡安全系数与传统方法计算得到的

收稿日期: 2006-07-03

作者简介: 唐晓松(1979-), 男, 江苏海门人, 硕士, 主要从事岩土工程稳定性分析及其数值模拟工作.

安全系数吻合较好,但未能显示边坡滑裂面. C. S. Desai<sup>[6]</sup>将有限元应用到坡体承受库水位瞬态下降的稳定分析中,用有限元法确定不同时刻坡体中浸润面的位置,然后,用瑞典圆弧法分析了密西西比河河岸的稳定性.

从上述前人所作的工作可以看出,在分析水位下降过程中的边坡稳定性时,很少研究坡体内地下水位下降的滞后效应引起的超孔隙水压力对边坡稳定性的影响. 由荷兰 PLAXIS. B. V 公司开发的 PLAXIS 有限元程序在渗流计算方面具有强大的功能,并且该程序还采用了有限元强度折减法进行边坡稳定性分析. 因此,本文将采用 PLAXIS 程序分析水位下降过程中边坡的稳定性,以及水位下降过程中坡体内产生的超孔隙水压力对边坡稳定性的影响.

## 1 PLAXIS 程序在渗流作用下边坡稳定性分析中的应用

### 1.1 PLAXIS 程序简介

PLAXIS 程序是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,可用于分析土的本构模型,如线弹性、理想弹塑性模型,软化和硬化模型以及软土流变模型;可模拟施工步骤,进行多步计算. 且后处理简单、方便. 该程序能够计算平面应变和轴对称问题,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,以及模拟隧道、桩基础工程等.

### 1.2 有限元模型的建立

利用 PLAXIS 程序分析水位下降过程中的边坡稳定性,需要分别建立有限元模型和渗流计算模型. 因为 PLAXIS 程序中的渗流计算也是基于有限元原理,故两个模型的有限元网格划分可以一样. 利用 PLAXIS 程序进行二维分析,可以选择 6 节点或 15 节点三角形单元.

### 1.3 模型材料的选择及参数

PLAXIS 程序提供的上述 3 种模型可用于模拟岩土的工程性状. 在定义模型时,PLAXIS 程序为每种模型的力学行为提供了 3 种选择,即排水条件下的力学行为、不排水条件下的力学行为和无孔隙条件下的力学行为. 其中,排水条件下的力学行为适用于模拟土的长期力学行为,在计算过程中土体内将不会产生超孔隙水压力;选择不排水条件下的力学行为时,土体内的超孔隙水压力在计算过程中将得到充分发展;至于无孔隙条件下的力学行为,则适合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水的重度、土体水平和垂直方向的渗透系数外,还必须建立相应的水力边界条件.

### 1.4 PLAXIS 程序中地下水渗流计算的方法

PLAXIS 程序认为,地下水在孔隙中的流动服从 Darcy 定律. 该程序和其他有限元程序的不同之处在于,为了区别浸润面上、下的在非饱和土和饱和土中地下水渗流方式的不同,对 Darcy 定律中的渗透系数引入了折减系数  $K'$ . 当土体位于浸润面以下时,对应的渗透系数折减系数  $K' = 1$ ;当土体位于浸润面以上时,对应的渗透系数折减系数  $K' < 1$ ;而在浸润面附近的“过渡”区内的土体,其渗透系数折减系数  $K'$  则线性递增至 1.

### 1.5 PLAXIS 程序中安全系数的求解方法

利用 PLAXIS 程序求解安全系数,是通过程序提供的有限元强度折减法进行的,即不断减小土体的强度参数  $\tan\varphi$  和  $c$  直至计算模型破坏. 在程序中定义  $\Sigma M_{sf}$  为强度的折减系数,即

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan\varphi_{in}}{\tan\varphi_{re}} = \frac{c_{in}}{c_{re}}$$

其中: $\tan\varphi_{in}$  和  $c_{in}$  为程序在定义材料属性时输入的强度参数值; $\varphi_{re}$  和  $c_{re}$  为经折减后的强度参数值. 程序在开始计算时默认  $\Sigma M_{sf} = 1.0$ , 然后,  $\Sigma M_{sf}$  按设置的数值递增至计算模型破坏,这时的  $\Sigma M_{sf}$  值即为安全系数.

有限元强度折减法不需要对滑动面形状和位置做出假定,也无需进行条分<sup>[7]</sup>,通过强度折减使边坡达到不稳定,非线性有限元静力计算将不收敛,此时的折减系数即为边坡稳定安全系数.

## 2 算例验证

某均质边坡坡高  $h=20\text{ m}$ , 坡角  $30^\circ$  (见图 1). 边坡土体粘聚力  $c=20\text{ kPa}$ , 摩擦角  $\varphi=24^\circ$ , 非饱和土干重度  $\gamma_d=15\text{ kN/m}^3$ , 饱和土湿重度  $\gamma_w=18\text{ kN/m}^3$ , 渗透系数  $k_x=k_y=1\times 10^{-3}\text{ m/d}$ , 弹性模量  $E=2\ 000\text{ kPa}$ , 泊松比  $\nu=0.35$ . 利用 PLAXIS 程序分析土坡左、右两侧边界上均分别施加作用水头  $H=10$  和  $20\text{ m}$  的荷载时的边坡稳定性. 通过给各结点定义水头值施加荷载计算的边坡稳定安全系数见表 1. 可见, 该计算结果与 ADINA 程序、GEO-SLOPE 程序计算结果的误差均在 3% 以内, 故符合计算精度的要求. 这就说明 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<sup>[8]</sup>.

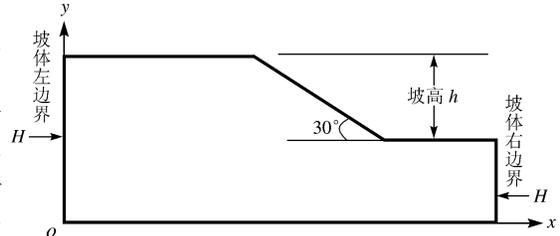


图 1 边坡渗流计算模型

Fig. 1 Calculation module of the slope seepage

表 1 渗流作用下边坡安全系数计算结果

Tab. 1 Calculation results of the slope safety factor under seepage

软件计算程序	安全系数		
	无孔隙水压力	作用水头 $H=10\text{ m}$	作用水头 $H=20\text{ m}$
ADINA	1.566	1.571	1.514
GEO-SLOPE(SLOPE/W 和 SEEP/W 耦合)	1.579	1.579	1.543
PLAXIS	1.561	1.568	1.532

## 3 水位下降过程中边坡稳定性分析

### 3.1 有限元模型的建立

根据实际边坡工程的需要, 用 6 节点三角形单元划分模型网格, 选择理想弹塑性模型和莫尔-库仑屈服准则进行数值模拟. 需要输入的主要参数包括边坡土体的弹性模量  $E$ 、泊松比  $\nu$ 、摩擦角  $\varphi$ 、粘聚力  $c$  和剪胀角  $\psi$ .

计算中选择模型的力学行为时, 排水的力学行为适于模拟水位下降至一定高度后, 边坡内的孔隙水经过长时间的消散至稳定, 此时, 坡体内的超孔隙水压力为零; 而不排水的力学行为则适于模拟水位骤降到一定高度, 孔隙水压力来不及消散, 此时, 边坡内的超孔隙水压力将得到充分的发展. 因此, 本文将采用这两种力学行分析边坡的稳定性, 以反映由于水位下降过程中边坡内水位下降的滞后效应所引起的超孔隙水压力对边坡稳定性的影响.

### 3.2 计算结果

同前例的均质边坡, 只是摩擦角  $\varphi=20^\circ$ . 在渗流计算模型中, 土坡左侧边界的地下水补给充足, 且作用水头  $H=30\text{ m}$  保持不变, 右侧边界的水位从初始水位  $40\text{ m}$  开始, 以不同的速率下降.

边坡有限元模型和渗流计算模型的网格划分见图 2. 渗流计算模型见图 3.

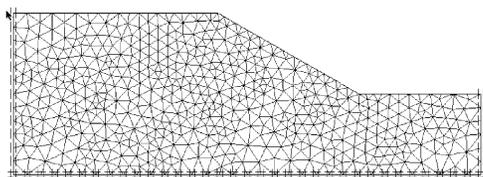


图 2 边坡有限元模型和渗流计算模型的网格划分

Fig. 2 Meshes of the finite element module and seepage calculation module

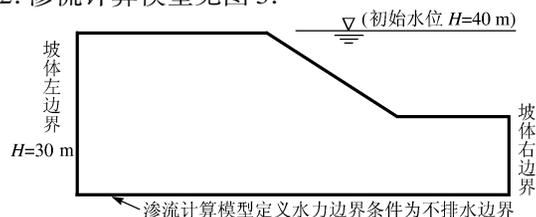


图 3 边坡渗流计算模型

Fig. 3 Calculation module of the slope seepage

由于初始水位为 40 m,故可认为在初始水位时,坡体已经受水的长期浸泡,坡体内的超孔隙水压力已完全消散,因此,在初始水位时土体符合排水条件下的力学行为。

**3.2.1 水位下降速率的影响** 为了分析水位下降速率对边坡稳定性的影响,本文采用了设置固结天数的方法。即如果水位从 30m 处按 1 m/d 的速率下降,程序中则设置水位从 30 m 下降到 29 m 后稳定 1 d 再下降,程序对这 1 d 的时间进行固结计算,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,在这稳定的 2 d 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。

可见,在 PLAXIS 程序中,如果单纯地考虑水位的变化就无法考虑时间的因素。所以,应采用结合固结计算的方法以考虑时间因素,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。因此,对于不同的水位下降速率(即水位下降到一定高度所经历的不同时间),就可以通过设置水位下降到一定高度后,再进行固结计算的不同时间来实现。

PLAXIS 程序提供的固结计算的功能,可以准确地分析边坡土体内超孔隙水压力随时间积累和消散的过程。该程序既可通过设置固结时间的方式来终止计算,也可通过预设某个超孔隙水压力值(程序默认该值为 1 kPa)的方式。当程序计算得出土体内每个结点处的超孔隙水压力均低于该预设值时,表明固结计算完成。此时,土体内的超孔隙水压力得到了充分消散。

本文根据所建立的有限元模型,分别分析了土坡右侧边界的水位按 1、2 和 4 m/d 速率下降时边坡的稳定性。其计算结果见表 2(渗透系数  $k_x = k_y = 4 \times 10^{-2}$  m/d)。

表 2 右侧边界不同水位下降速率的土坡安全系数

Tab.2 Safety factors of the slope with different drawdown rates of water level on the right boundary

渗透系数( $k_x = k_y$ ) / ( $m \cdot d^{-1}$ )	右边界水位/ m					坡体内超孔隙水压力 消散至最小值/ kPa	
	40	35	30	25	20		
1	2.42	1.91	1.59	1.39	1.28	1.23	1.36
2	2.42	1.90	1.58	1.35	1.23	1.20	1.36
4	2.42	1.87	1.53	1.34	1.20	1.15	1.36

由表 2 可见,水位下降速率越快,坡体的稳定性越差。水位按 1 m/d 下降到 32 和 24 m 时坡体的浸润面和滑动面的位置见图 4;水位按 4 m/d 下降到 32 和 24 m 时土坡的浸润面和滑动面位置见图 5;土体内超孔隙水压力消散后(小于 1 kPa)的浸润面和滑动面位置见图 6。

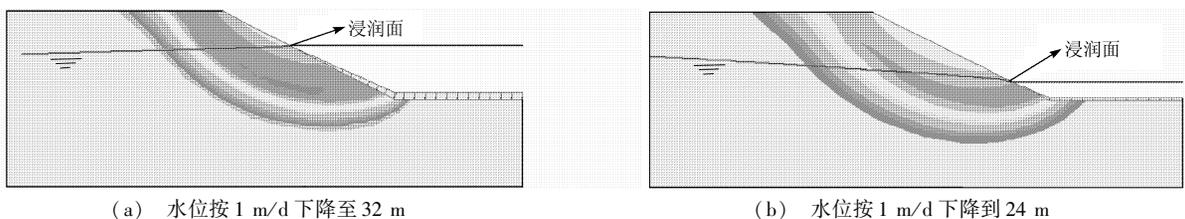


图 4 土体浸润面和滑动面位置

Fig.4 Situation of the phreatic and sliding surface of the slope with drawdown rate of 1 m/d

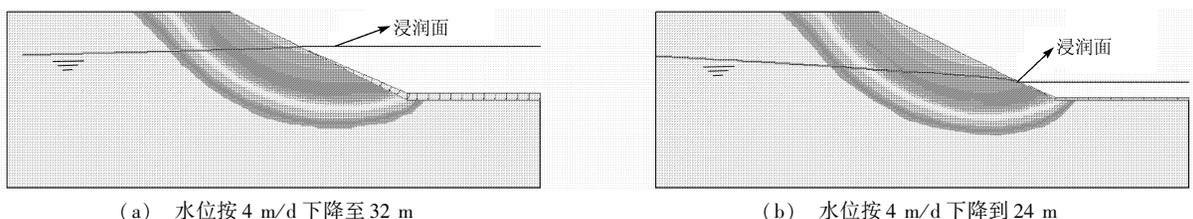


图 5 土体浸润面和滑动面位置

Fig.5 Situation of the phreatic and sliding surface of the slope with drawdown rate of 4 m/d

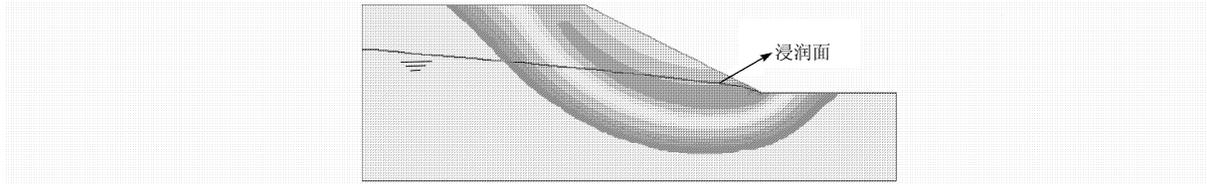


图 6 土体内超孔隙水压力消散至最小值的浸润面和滑动面位置

Fig. 6 Situation of the phreatic and sliding surface of the slope when the excess pore water pressure dissipates to the minimum

为了进一步说明水位下降过程中,由于土体内地下水位下降的滞后效应所产生的超孔隙水压力对边坡稳定性的影响,本文计算了该算例在完全排水条件下(即假设水位以 1 m/d 的速率下降到某一高度时,坡体内的超孔隙水压力均得到了充分消散)的边坡稳定安全系数. 其计算结果见表 3.

表 3 是否考虑坡体内超孔隙水压力影响的安全系数

Tab. 3 Safety factors considering and not considering the effect of the excess pore water pressure

是否考虑超孔隙水压力影响	右边界水位/ m					
	40	36	32	28	24	20
考虑	2.42	1.91	1.59	1.39	1.28	1.23
不考虑	2.42	2.08	1.77	1.52	1.45	1.37

由表 3 可见,水位下降过程中坡体内的超孔隙水压力,对边坡安全系数的影响十分明显,超孔隙水压力对边坡稳定性十分不利.

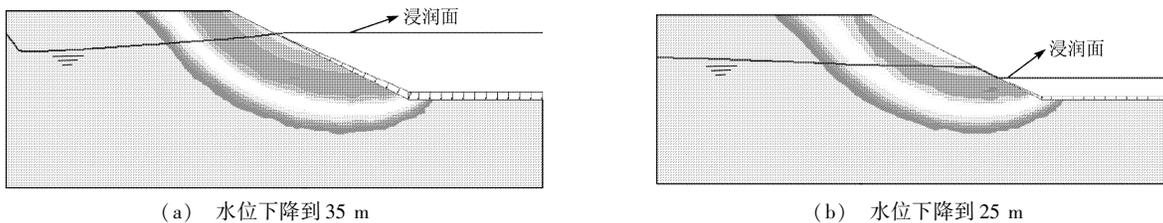
3.2.2 土体渗透系数的影响 本文还计算了坡体右边界水位以 1 m/d 的速率下降,土体的渗透系数( $k_x = k_y$ )分别为  $4 \times 10^{-2}$ 、 $4 \times 10^{-3}$  和  $4 \times 10^{-4}$  m/d 的坡体稳定安全系数. 其计算结果见表 4.

表 4 不同渗透系数的边坡稳定安全系数

Tab. 4 Safety factors of the slope with different permeability coefficients

渗透系数( $k_x = k_y$ ) / ( $m \cdot d^{-1}$ )	右边界水位/ m					坡体内超孔隙水压力 消散至最小值/ kPa
	40	35	30	25	20	
$4 \times 10^{-2}$	2.42	1.83	1.49	1.31	1.23	1.36
$4 \times 10^{-3}$	2.42	1.78	1.43	1.21	1.16	1.36
$4 \times 10^{-4}$	2.42	1.76	1.42	1.18	1.12	1.36

由表 4 可见,土体的渗透系数越小,边坡的稳定性越差. 土体渗透系数为  $4 \times 10^{-4}$  m/d 时,坡体左边界的水位下降到 35 和 25 m 时的浸润面和滑动面位置见图 7.



(a) 水位下降到 35 m

(b) 水位下降到 25 m

图 7 土体浸润面和滑动面位置

Fig. 7 Situation of the phreatic and sliding surface of the slope

## 4 结 语

利用 PLAXIS 程序并结合算例,对水位下降过程中由于坡体内水位下降的滞后效应所产生的超孔隙水压力对边坡稳定性的影响进行了分析.计算表明,超孔隙水压力对边坡的稳定性十分不利.水位下降过程中,水位下降速率越快、土体的渗透系数越小对边坡的稳定性越不利.在实际工程中,应重视对水位下降过程中坡体内超孔隙水压力的控制,采取降低水位下降速率或者增大土体渗透系数措施,以减缓孔隙水压力的累积或者加快孔隙水压力的消散.

### 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.
- [2] 刘新喜. 库水位下降对滑坡稳定性的影响及工程应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2003.
- [3] 徐则民, 黄润秋, 许 模, 等. 基于水-力耦合理论超深隧道围岩渗透性预测[J], 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 130-135.
- [4] 陈祖煜. 库水位骤降期土石坝坡稳定分析总应力法的计算步骤[J]. 水利水电技术, 1985, 16(9): 30-32.
- [5] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Geo-technique**, 1999, 49(3): 387-403.
- [6] Desai C S. Drawdown Analysis of Slopes by Numerical Method[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering**, 1977, 103 (GT7): 667-676.
- [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.
- [8] 唐晓松, 郑颖人, 邬爱清, 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): 13-17.