

文章编号: 1002-0268 (2007) 10-0044-04

# 水位下降对边(滑)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:** 通过 PLAXIS 有限元程序对一边坡算例进行分析, 根据实际工程的需要选择理想弹塑性模型和莫尔-库仑屈服准则进行数值模拟, 并对比分析了土体分别设置为排水条件和不排水条件时的情况。计算结果表明, 当土体设置为排水条件时, 在库水水位下降过程中, 安全系数随水位的下降逐渐减小, 但当水位下降了 20 m 以后, 由于孔隙水压力给滑面提供了竖直方向的作用力, 随着水位的继续下降安全系数反而略有上升。当土体设置为不排水条件时, 坡体内产生的超孔隙水压力对边坡安全系数的降低更为明显。考虑坡体内超孔隙水压力时安全系数的计算结果比不考虑坡体内超孔隙水压力时的计算结果低 10% 左右, 因此实际工程中应该充分考虑超孔隙水压力的积累和消散, 并根据“最不利水位”所对应的安全系数进行校核。在计算过程中 PLAXIS 程序能较好地模拟水位下降引起的渗流作用对边(滑)坡稳定性的影响。

**关键词:** 道路工程; 渗流作用; PLAXIS; 稳定性; 水位下降; 超孔隙水压力

**中图分类号:** U416.1<sup>+</sup>4

**文献标识码:** A

## The Effect on Stability of Slope under Drawdown Conditions

TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren

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

**Abstract:** The program of PLAXIS is adopted to analyse the slope stability. The ideal elastic-plastic model and the yield criterion of Mohr-Coulomb theory are simulated numerically for the realistic project. The drainage condition and undrained condition of the soil body are compared. The calculation shows that the safety factor declines with the drawdown of the water level under the drainage condition. However, the safety factor would rise after the water level drops by 20 meters, which is caused by the vertical acting force of the pore pressure, and its influence on the safety factor of the slope is more obvious under the undrained condition. The safety factor with the excess pore pressure is 10% lower than that without regard to the pressure. As a result, the accumulation and dissipation of the excess pore pressure should be taken into consideration in the practice. What's more, the safety factor should be checked according to the "least favorable water level". The program of PLAXIS can simulate the effect of seepage on the slope stability when the water level drawdown in calculation.

**Key words:** road engineering; seepage effect; PLAXIS; stability; drawdown; excess pore pressure

## 0 前言

目前国内外针对水位变化引起的渗流作用对滑坡稳定性的影响作了大量的研究工作。

汪自力<sup>[1]</sup>等在饱和-非饱和渗流作用下动网格有限元计算的基础上, 寻求用土体单元所受的渗透力代替其周边的孔隙水压力, 以达到利用渗流计算时的剖

分网格和计算结果, 直接连续进行稳定性分析的目的。

刘新喜<sup>[2]</sup>通过对库水位下降滑坡的稳定性研究结果表明, 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滑坡体渗透系数的大小, 渗透系数越小, 滑坡稳定性越差。

Griffiths·D·V<sup>[3]</sup>研究了浸润面与库水位作用下的边

收稿日期: 2006-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40318002)

作者简介: 唐晓松 (1979-), 男, 江苏海门人, 博士研究生, 从事岩土工程稳定性分析及其数值模拟. (hxm97@163.com)

坡稳定性。采用自编程序,应用有限元强度折减,通过算例计算得到的边坡安全系数与传统方法计算得到的安全系数吻合较好,但未能显示滑裂面。

从前人所作的上述工作可以看出,如何考虑水位变化引起的渗流作用对滑坡稳定性的影响是一个十分复杂的问题。目前大部分都是通过自编程序进行渗流的数值模拟并采用条分法进行求解的,因此计算结果的可靠性无法得到验证,同时自编程序在功能上也有一定的局限性。

本文试图探索应用国际通用程序结合有限元强度折减法分析由于库水水位下降所引起的渗流作用对边坡(滑)稳定性产生的影响。由于 PLAXIS 有限元程序在渗流计算方面具有比较强大的功能,并且该程序是采取强度折减法来进行稳定性分析的,因此本文在分析时采用 PLAXIS 有限元程序。

## 1 有限元强度折减法

利用 PLAXIS 程序进行安全系数的求解时,可以选择程序提供的有限元强度折减法。其分析方法是对强度参数  $\tan \varphi$  和  $c$  不断减小直到计算模型发生破坏。在程序中系数  $\sum M_f$  定义为强度的折减系数,其表达式如下:

$$\sum M_f = \frac{\tan \varphi_{\text{input}}}{\tan \varphi_{\text{reduced}}} = \frac{c_{\text{input}}}{c_{\text{reduced}}}, \quad (1)$$

式中,  $\tan \varphi_{\text{input}}$ 、 $c_{\text{input}}$  为程序在定义材料属性时输入的强度参数值;  $\varphi_{\text{reduced}}$ 、 $c_{\text{reduced}}$  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  $\sum M_f = 1.0$ , 然后  $\sum M_f$  按设置的数值递增至计算模型发生破坏, 此时的  $\sum M_f$  值即为计算模型的安全系数值。

有限元强度折减法<sup>[4,9]</sup>不需要对滑动面形状和位置做假定,也无需进行条分,通过强度折减使边坡达到不稳定状态时,非线性有限元静力计算将不收敛,此时的折减系数就是稳定安全系数。

## 2 有限元模型的建立

利用 PLAXIS 程序进行二维分析(平面应变或者轴对称情况),用户可以选择 6 节点或 15 节点三角形单元,本文选择的是 6 节点三角形单元。PLAXIS 程序在进行网格划分的时候,提供了自动划分并可以局部加密(可以在几何点附近加密也可以在局部几何区域上加密)的功能。

本文根据实际工程的需要选择理想弹塑性和莫尔-库仑屈服准则进行数值模拟,其需要输入的主要参数分别是:弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ 、摩擦角  $\varphi$ 、粘聚力  $c$  以及剪胀角  $\psi$ 。

此外, PLAXIS 程序对每种材料的力学行为提供了 3 种选择:排水条件下的力学行为、不排水条件下的力学行为以及无孔隙条件下的力学行为。

本文将对对比分析当土体分别设置为排水条件和不排水条件(即是否考虑水位下降过程坡体内所产生的超孔隙水压力)时,边坡稳定性的分析结果。

## 3 有限元模型的初始条件

### 3.1 初始应力场的施加<sup>[6-8]</sup>

PLAXIS 程序可以通过  $K_0$  法和施加重力荷载 2 种方法考虑初始应力场的影响。其中  $K_0$  法适用于模型中所有土层的表面以及浸润面的位置都是水平的情况,而施加重力荷载的方法则适用任何情况。

#### (1) $K_0$ 法

当通过  $K_0$  法施加初始应力场时,首先必须输入水平侧压力系数值  $K_0$ , 然后设置参数  $\sum M_{\text{weight}} = 1.0$ , 则此时土体重力的影响才能完全考虑。在实际计算中,对于正常固结土通过试验可以验证  $K_0$  的大小和摩擦角  $\varphi$  有关, PLAXIS 程序在计算时取的表达式为:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi. \quad (2)$$

对于超固结土,  $K_0$  的实际值将比通过式(2)计算的结果略大一些。

#### (2) 施加重力荷载法

由于考虑水位变化时坡体内浸润面的位置往往不是水平的,因此本文在施加初始应力场时采用的是施加重力荷载的方法。PLAXIS 程序是通过塑性计算土的重度系数从 0.0 变化到 1.0 的方法,来考虑重力荷载产生的初始应力场对计算模型的影响。

### 3.2 初始孔隙水压力的施加

PLAXIS 程序既可以通过定义浸润面的位置,直观、快速地计算出坡体内孔隙水压力的数值;也可以根据边界条件通过地下水渗流计算得到坡体内孔隙水压力的数值。

PLAXIS 程序中地下水的渗流计算是以有限元原理为基础的,它通过定义土体的渗透系数、划分网格以及定义边界条件,然后建立水利计算模型进行计算。PLAXIS 程序假设孔隙水在多孔介质中的运动符合 Darcy 定律,因此关于稳定流的连续性方程以及通

过有限元离散得到的有限元方程这里不予讨论。

由于本文是考虑水位下降对边坡稳定的影响，因此坡体内浸润面的位置随水位的下降也不断发生变化，所以无法在模型中准确绘制浸润面的位置，故本文选择通过渗流计算求解水位下降过程中坡体内的孔隙水压力。

4 渗流计算模型的建立

PLAXIS 程序是基于有限元原理，通过渗流计算得到计算模型体内的孔隙水压力，此时的网格划分和有限元模型的网格划分是一样的。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，还要建立相应的水利边界条件。PLAXIS 程序在进行渗流计算时，对没有定义水利边界条件的边界全部默认为是排水边界条件。

由于在计算过程中水位是不断变化的，因此不同的水位就应该有不同的渗流计算模型。本文是利用 PLAXIS 程序可以建立不同的施工步来实现的。PLAXIS 程序在不同的施工步中，可以改变几何模型（如开挖等问题）、定义不同的材料参数以及考虑不同的水利边界条件（如水位的上升或下降等问题）。

5 算例

均质边坡，坡高  $H = 20\text{ m}$ ，粘聚力  $c = 20\text{ kPa}$ ，土容重  $\gamma_{\text{天然}} = 16\text{ kN/m}^3$ ； $\gamma_{\text{饱和}} = 18\text{ kN/m}^3$ ，内摩擦角  $\varphi = 17^\circ$ ，渗透系数  $k_x = k_y = 1 \times 10^{-3}\text{ m/d}$ ，泊松比  $\nu = 0.35$ ，弹性模量  $E = 2\,000\text{ kPa}$ 。

在渗流计算模型中认为坡体后部地下水补给充足，坡体后部边界水头值保持  $H = 40\text{ m}$  不变，坡体前部水位分别按 40、30、20、10 m 逐渐降低。

有限元模型和渗流计算模型的网格划分示意图如图 1 所示，渗流计算的模型示意图如图 2 所示。

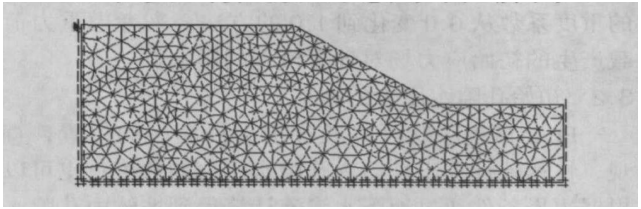


图 1 有限元模型和渗流计算模型的网格划分示意图

Fig 1 The grid of finite element module and seepage calculation module

5.1 不考虑超孔隙水压力影响时的分析结果

当土体设置为排水条件时，此时在库水水位下降过程中，坡体内产生的孔隙水压力将得到充分的消

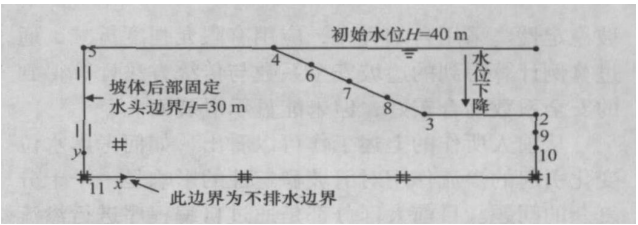


图 2 渗流计算模型示意图

Fig 2 The module of seepage calculation

散。利用 PLAXIS 程序进行水位下降时边坡稳定性分析的结果见表 1。图 3 和图 4 分别绘制了水位下降 20 m 和 30 m 时，浸润面和滑面位置的示意图。

表 1 安全系数的计算结果

Tab 1 Calculation results of safety factor

水位下降 的高度/m	0	5	10	15	20	25	30
安全系数	1.848	1.432	1.159	1.023	0.977	0.984	1.022

从表 1 中的数据可以看出，随着水位的降低，坡体的安全系数明显下降。其中当坡体前部水位下降至 20 m 时，坡体的安全系数与初始水位 40 m 时的安全系数相比下降了 47%。但当水位下降了 20 m 以后，随着水位的继续下降滑坡安全系数反而略有上升，这主要是因为随着水位的降低（如图 4 所示），滑面进入位于浸润面以下的部分逐渐减少，且大部位滑面已位于浸润面以上，因此孔隙水压力给滑面提供了竖直

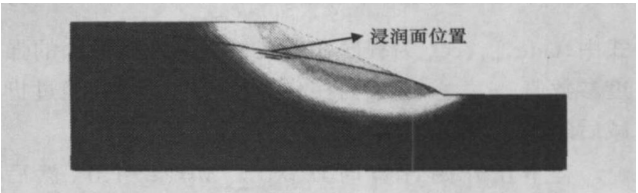


图 3 水位下降 20 m，安全系数为 0.977 时的浸润面和滑面位置示意图

Fig 3 The section of seepage and slip as the water level dropped by 20 m and the safety factor is 0.977

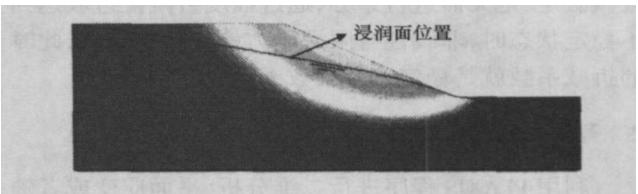


图 4 水位下降 30 m，安全系数为 1.022 时的浸润面和滑面位置示意图

Fig 4 The section of seepage and slip as the water level dropped by 30 m and the safety factor is 1.022

方向的作用力, 反而阻止了滑面的滑动, 故相对地提高了坡体的安全系数。

5.2 考虑超孔隙水压力影响时的分析结果

当土体设置为不排水条件时, 此时在库水水位下降过程中, 坡体内产生的孔隙水压力将得到充分的发展和积累。利用 PLAXIS 程序进行水位下降时边坡稳定性分析的结果见表 2。图 5 和图 6 分别绘制了水位下降 20 m 和 30 m 时, 浸润面和滑面位置的示意图。

表 2 安全系数的计算结果

Tab 2 Calculation results of safety factor

水位下降 的高度/m	0	5	10	15	20	25	30
安全系数	1.848	1.308	1.020	0.866	0.805	0.811	0.921

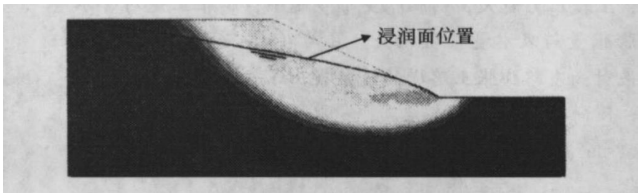


图 5 水位下降 20 m, 安全系数为 0.805 时的  
浸润面和滑面位置示意图

Fig 5 The section of seepage and slip as  
the water level dropped by 20 m and  
the safety factor is 0.805

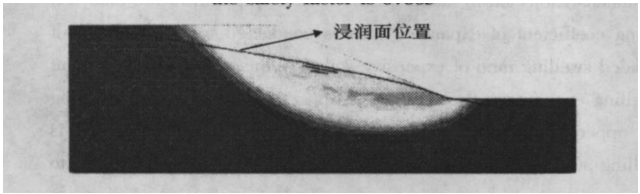


图 6 水位下降 30 m, 安全系数为 0.921 时的  
浸润面和滑面位置示意图

Fig 6 The section of seepage and slip as  
the water level dropped by 30 m and  
the safety factor is 0.921

从表 2 中的计算结果可以看出, 当土体设置为不排水条件时, 坡体内产生的超孔隙水压力对边坡安全系数计算结果的降低十分明显。当水位下降至 20 m 时, 坡体的安全系数为 0.805 降至最低, 与初始水位 40 m 时的安全系数相比下降了 56%。

从图 7 水位下降高度和安全系数的对比曲线可以看出, 考虑坡体内超孔隙水压力时安全系数的计算结果比不考虑坡体内超孔隙水压力时的计算结果低 10% 左右, 说明水位下降过程中坡体内超孔隙水压力的发展和积累对坡体的稳定十分不利。同时, 从图 7 的对比曲线还可以看出, 在水位下降过程中, 安全系

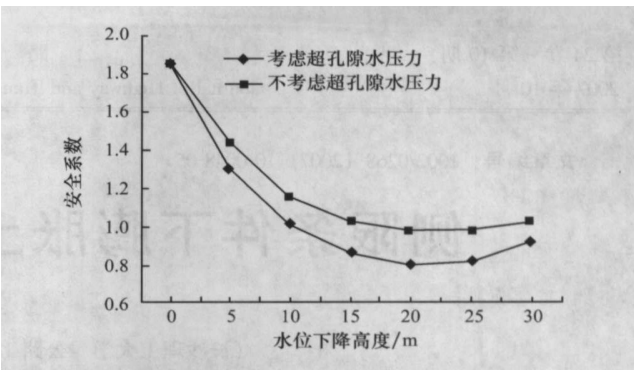


图 7 水位下降高度和安全系数的对比曲线

Fig 7 The curve of water level and safety factor

数并不是随着水位的下降一直降低。当水位下降到一定高度后, 随着水位的下降, 安全系数反而升高, 称安全系数降至最低时所对应的水位为“最不利水位”。因此, 建议在实际工程中以此来作为校核点。

6 结语

由于 PLAXIS 程序在渗流计算方面的强大功能及其对边坡工程安全稳定性分析的适用性, 本文利用该程序结合强度折减法对水位下降过程中边坡的稳定性进行了分析。通过计算可以看出, 水位下降引起的渗流作用对滑坡稳定性的影响十分明显, 水位下降过程中坡体内超孔隙水压力的发展和积累对边坡的稳定性十分不利。同时, 在库水位的下降过程中, 坡体存在一个最危险的水位, 即最不利水位, 建议在实际工程中以此作为校核点。

参考文献:

[1] 汪自力. 饱和-非饱和渗流作用下边坡稳定分析的混合法[J]. 郑州大学学报, 2002, (1): 22-25.  
[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]. 北京: 中国地质大学, 2003.  
[3] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49 (3): 387-403.  
[4] 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.  
[5] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003 (1): 21-27.  
[6] 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.  
[7] 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 (4): 13-16.  
[8] 姚爱军, 薛廷河. 节理化岩体边坡的地下水动力学稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22 (3): 17-20.