

# 地下水位线对土坡稳定的影响分析

张卫民<sup>1, 2</sup>, 陈兰云<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 金华学院 建筑工程系, 浙江 金华 321017)

**摘要:** 边坡稳定安全系数受到多方面因素的影响, 地下水位线的位置对边坡稳定的影响较大。通过对各种边坡模型的计算分析表明, 地下水位变化对边坡稳定性的影响是有一定的规律的, 地下水位在距坡脚 3/10~4/10 坡高范围内变化时对土坡的稳定安全系数影响不大。随着地下水位线的升高, 边坡的稳定安全系数线性减小, 可能发展为整体滑动破坏。

**关键词:** 岩土工程; 边坡工程; 地下水位; 土坡; 稳定安全系数; 极限平衡理论

**中图分类号:** P 642.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000 - 6915(2005)增 2 - 5319 - 04

## EFFECT OF WATER TABLE ON SOIL SLOPE STABILITY

ZHANG Wei-min<sup>1, 2</sup>, CHEN Lan-yun<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Architectural Engineering, Jinhua College, Jinhua 321017, China)

**Abstract:** Slope stability safety factor is influenced by many factors, in which the condition of water table change affects greatly. The analysis and calculation of the stability safety factor based on diversified slope models indicate that there are certain rules of effect of water table on soil slope stability. Through calculation of the stability factor of the slope with two different software based on theory of limit equilibrium, it is shown when the water table changing between the range of 3/10-4/10 the height of the slope, it affects the stability of the slope negligibly. With the water table rising, the safety factor linearly reduces, and it is likely to induce landslide.

**Key words:** geotechnical engineering; water table; soil slope; safety factor; theory of limit equilibrium

## 1 引言

水是诱发滑坡的主要因素之一。在深基坑开挖过程中, 往往需要进行井点降水, 降水的过程导致地下水位线发生漏斗状变化, 从而改变土坡中土体的有效应力分布, 影响土体的抗剪强度, 使边坡稳定性受到影响。当土坡的安全系数降低到一定程度时将导致滑坡, 所以有必要对降水引起地下水位变化对土坡稳定的影响进行分析研究。地下水位对边坡稳定的影响主要与地下水的非稳定渗流有关, 其

影响因素有水位下降速度、滑体的渗透系数等, 要得到边坡的稳定系数, 需确定浸润线的位置, 依据浸润线确定渗透力进行稳定计算。对浸润线的确定, 文[1]用布西涅斯克(Boussinesq)非渗流基本微分方程和边界条件, 来确定水库水位下降情况下的浸润线计算公式, 并采用多项式拟合的方法得到简化计算公式, 该公式中涉及不同时刻的水位、渗透系数、给水度等参数。对于一般的深基坑施工, 为了保证边坡开挖的稳定与安全, 当地下水位较高时, 需要进行井点降水, 并计算边坡的稳定安全系数, 由于参数确定困难, 上述方法在应用上仍有一定困难。

**收稿日期:** 2005 - 06 - 26; **修回日期:** 2005 - 07 - 08

**作者简介:** 张卫民(1975 - ), 男, 现为讲师、硕士研究生, 主要从事边坡稳定、土体加固方面的教学与研究工作。E-mail: jgxyzm@126.com。

本文应用基于极限平衡理论的边坡分析软件，建立边坡分析模型，采用坡体土层的基本物理力学指标：土的重度  $\gamma$ 、粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  等，并考虑地下水水位的影响，计算出不同水位时的安全系数。通过对各种边坡模型的稳定安全系数的计算分析表明，地下水水位变化对边坡稳定性的影响有一定的规律。

## 2 边坡安全系数 $K$ 与土中水的关系

土坡沿着某一滑裂面滑动的安全系数  $K$  定义为：将土的抗剪强度指标降低为  $\frac{c}{K}$  和  $\frac{\tan \varphi}{K}$ ，则土体沿着此滑裂面处达到极限平衡，即

$$\tau = \frac{c}{K} + \sigma'_n \frac{\tan \varphi}{K} \quad (1)$$

式中： $K$  为土坡的安全系数， $\sigma'_n$  为滑动面上土的法向有效应力。

上述将强度指标的储备作为安全系数定义的方法是被工程界广泛承认的一种作法<sup>[2]</sup>。在分析边坡的稳定性问题时，大多采用安全系数来衡量滑坡体的稳定性，并根据安全系数采取相应的边坡治理措施，如设置支挡结构、削坡减载、抗滑桩、预应力锚索等。边坡的安全系数实质上是边坡工作状态的一个量化描述，当边坡稳定安全系数  $K = 1$  时，边坡处于稳定极限状态，边坡稳定极限状态实质上是边坡工作状态的一个阈值，这一阈值将边坡分为稳定状态( $K > 1$ )和失稳状态( $K < 1$ )，如果用  $X_1, X_2, \dots, X_n$  表示影响边坡稳定的基本随机变量，则  $K$  为  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的函数，在直角坐标系中，边坡的工作状态如图 1 所示。由式(1)可知， $K$  值的计算与土体的抗剪强度指标有很大的关系。土体的抗剪强度指标与土中水的关系密切，在土工试验中，不同固结和排水条件下得到的抗剪强度指标有较大的差异。根据有效应力原理，在饱和土中，有

$$\sigma' = \sigma - \sigma_w \quad (2)$$

式中： $\sigma$  为土的总应力， $\sigma'$  为土的有效应力， $\sigma_w$  为孔隙水压力。

有效应力等于总应力减去孔隙水压力，孔隙水压力的增大会导致土有效应力的降低，从而降低土体的抗剪能力。在非饱和土中，毕肖普(A. W. Bishop)等人提出土的有效应力可以用下式表示：

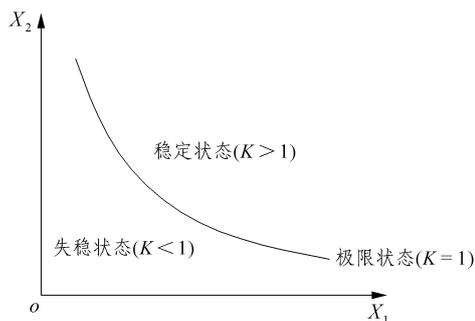


图 1 边坡的工作状态

Fig.1 Work condition of a slope

$$\sigma' = \sigma - \sigma_a + x(\sigma_a - \sigma_w) \quad (3)$$

式中： $x$  为由试验确定的参数，它与土的饱和度有直接关系，当饱和度等于 100% 时， $x = 1$ ，当饱和度等于 0 时， $x = 0$ ，这时土中只有气压力  $\sigma_a$ ，即  $\sigma' = \sigma - \sigma_a$ 。有效应力的大小与土的饱和状态直接相关。在土坡中土的饱和状态与地下水位的的关系密切，图 2 所示为作用在滑动圆弧面上的孔隙水压力的分布示意。地下水位的的变化导致土坡中潜在滑裂面上的土的有效应力分布的变化，如在深基坑开挖井点降水过程中，随着坑底水位的降低，地下水水位线会形成漏斗状。浸润线的形状决定滑坡体中有效应力的分布，文[1]中探讨了水库水位下降情况下确定浸润线的简化计算公式。在基坑工程中浸润线的确定往往根据设计人员的经验结合土质和井点布置情况确定，当土的渗透性较好时，如在砂土中浸润线相对平缓；在粘性土中，由于渗透性较差，浸润线相对曲率较大，这种确定方法具有一定的随意性，但当坡高不是很高时对计算结果的影响并不大。土体中浸润线的形状决定有效应力的分布，有效应力分布的变化会导致土坡潜在滑动面上的抗剪能力降低，滑坡体产生缓慢蠕动，这种蠕动的积累最终可能导致土坡的整体下滑，造成滑坡事故，其过程

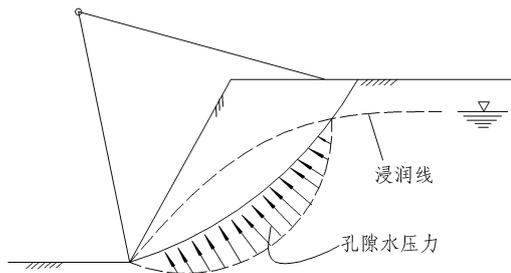


图 2 作用在滑动面上的孔隙水压力

Fig.2 Pore water pressure on slide surface

如图 3 所示。

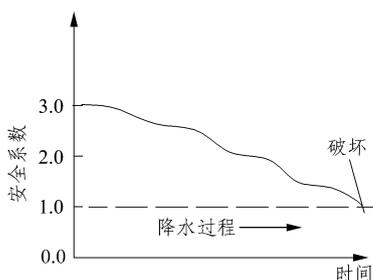


图 3 降水导致滑坡的过程

Fig.3 Process of slope slide induced by drawdown

### 3 边坡稳定分析研究

#### 3.1 计算模型的建立

目前边坡稳定分析方法主要有两大类，一类是建立在极限平衡理论基础上的解析方法；另一类是被广泛采用的数值解法即有限单元法。本文采用极限平衡方法并考虑渗流的作用。根据对土条的条间力的假定和对平衡方程组增设的边界条件不同，常用的计算方法有：瑞典圆弧法(Fellenius 法)、简化毕肖普(Bishop 法)、简布法(Janbu 法)、陆军师团法、摩根斯坦 - 普赖斯法(Morgenstern-Price 法)、斯宾塞法(Spencer 法)和沙尔玛法(Sarma 法)等。为了便于对结果的比较，本文采用瑞典圆弧法、简化毕肖普法和简布法的计算结果进行比较研究。

计算模型采用如图 4 所示：(a) 1 : 1.5 均质边坡，(b) 1 : 2 均质边坡，坡高均为 10 m，用不同计算方法计算安全系数  $K$ ，粘聚力  $c = 8 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 20^\circ$ ， $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$ ，土体浸水软化后  $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$ ，地下水位变化，变化范围距坡脚  $h = 0 \sim 7 \text{ m}$ ， $h$  为地下水位线最高点 to 坡面终止点的垂直距离，采用总应力法，考虑渗透力作用，不考虑边坡外侧静水压力。最危险滑裂面的确定采用边坡分析软件自动搜索得到。

#### 3.2 计算结果分析

通过对上述模型用极限平衡理论的简化计算方法进行计算，为了考虑计算软件的偏差，本文采用了 Slope 软件和理正软件进行计算，得到的计算结果如图 5 所示。

各种计算方法的到的结果有些有较大的偏差，但对与同一计算方法用两种不同软件所的结果基本接近，有部分结果基本一致，说明两种计算软件运行是可靠的。计算方法的偏差是由于不同的计算方

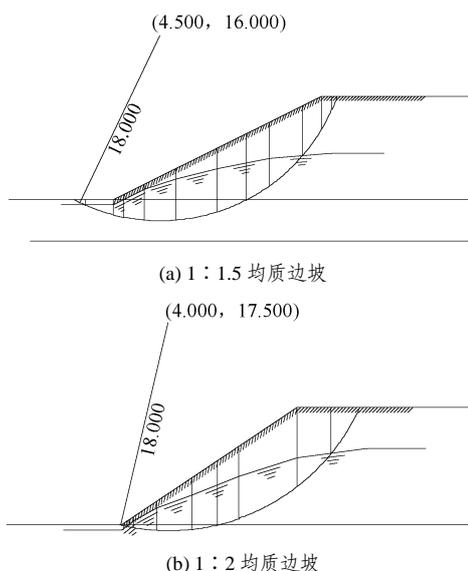
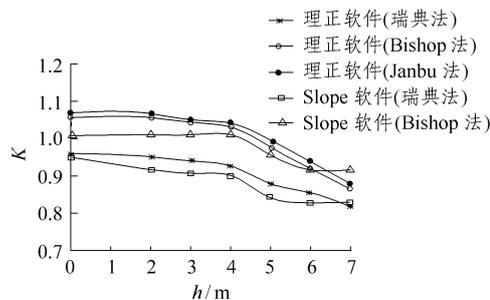
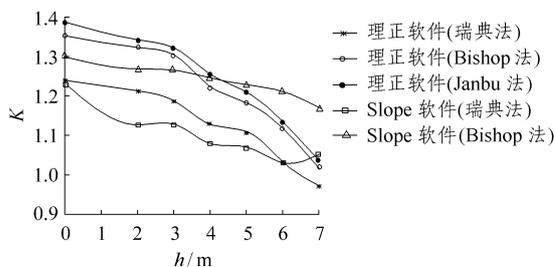


图 4 均质边坡计算模型(单位: m)

Fig.4 Calculation model of soil slope (unit: m)



(a) 1 : 1.5 均质边坡地下水位变化时的安全系数  $K$



(b) 1 : 2 均质边坡地下水位变化时的安全系数  $K$

图 5 均质边坡在地下水位变化时的安全系数  $K$

Fig.5 Safety factors at different water tables

法的假定条件不一致导致的，如瑞典法由于在对土条受力分析时不考虑条间应力，所以计算所得的稳定系数  $K$  值都偏小，简布法的结果一般偏大，毕肖普法计算的结果基本都居于瑞典法和简布法的计算结果之间<sup>[3]</sup>。

地下水位的的变化范围距坡脚  $h = 0 \sim 7 \text{ m}$ ，对 1 : 1.5 的均质土坡，水位在距坡脚  $h = 0 \sim 4 \text{ m}$  范围内变化，各种计算方法都表明地下水位变化对安全系数  $K$  的影响很小(有所降低，但  $K$  值变化量为 0~

0.016)。水位在距坡脚  $h = 4 \sim 7$  m 范围内变化时, 各种计算方法所得结果变化趋势基本一致, 即都线性减小, 安全系数  $K$  的降低幅度较大, 甚至导致  $K < 1.0$  发生整体滑坡。对 1:2 的均质边坡的计算结果, 水位在距坡脚  $h = 0 \sim 3$  m 范围内变化时, 对安全系数  $K$  的影响也不大, 安全系数  $K$  有所降低, 但幅度不大(变化量为 0.03~0.14), 但水位在距坡脚  $h = 4 \sim 7$  m 范围内变化时, 各种计算方法所得的结果也基本表现为线性降低, 安全系数的降低幅度为 0.070~0.285。地下水位的升高导致边坡的稳定性急剧下降。由此可见地下水位线最高点相对坡脚的高度对边坡的稳定性有很大的影响, 特别是当地下水位线最高点距坡脚较高时, 可能会导致滑坡的发生<sup>[4~10]</sup>。

## 4 结 语

边坡稳定的影响因素较多, 地下水位线的位置对边坡的稳定影响较大。但当地下水位线最高点距坡底较低时(为坡高的 3/10~4/10), 水位线的位置对安全系数影响不大, 这与危险滑裂面处于地下水的浸润线以下部位较少有关, 地下水位的变化对安全性的影响可以忽略不计; 当地下水位线最高点为坡高的 3/10~4/10 时, 水位线距坡脚相对升高, 将导致土坡的安全系数  $K$  线性降低, 甚至可能出现整体滑坡。这一分析结果, 对深基坑施工采用井点降水时, 地下水位所须达到的深度提供了参考依据。

### 参考文献(References):

- [1] 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): 76 - 80.(Shi Weimin, Zheng Yingren. Analysis of stability of landslide during reservoir drawdown[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (3): 76 - 80.(in Chinese))
- [2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(Chen Zuyu. Soil Slope Stability Analysis[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [3] 张卫民, 陈兰云, 凌道盛. 边坡稳定安全系数影响因素的探讨[J]. 铁道建筑, 2005, (2): 52 - 54.(Zhang Weimin, Chen Lanyun, Ling Daosheng. Discussion on influence factors of slope stability safety coefficient[J]. Railway Engineering, 2005, (2): 52 - 54.(in Chinese))
- [4] 赵明华, 邹新军, 蒋德松. 边坡稳定分析及其在堤防工程中的应用[J]. 湖南大学学报, 2001, 28(6): 97 - 101.(Zhao Minghua, Zou Xinjun, Jiang Desong. Slope stability analysis and its application to embankment engineering[J]. Journal of Hunan University, 2001, 28(6): 97 - 101.(in Chinese))
- [5] 汪益敏, 陈页开, 韩大建, 等. 降雨入渗对边坡稳定影响的实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 920 - 924.(Wang Yimin, Chen Yekai, Han Dajian, et al. Case study on influence of rainfall permeation on slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 920 - 924.(in Chinese))
- [6] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭, 等. 地下水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 419 - 422.(Liu Caihua, Chen Congxin, Feng Xiating, et al. Effect of groundwater on stability of slopes at reservoir bank[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 419 - 422.(in Chinese))
- [7] 张永生, 梁立孚, 周健生. 水位骤降对土质渠道边坡稳定性影响的弹塑性有限元分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(6): 736 - 739.(Zhang Yongsheng, Liang Lifu, Zhou Jiansheng. Elasto-plastic finite element analysis of influence of sudden water level fall on stability of canal slope soil[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(6): 736 - 739.(in Chinese))
- [8] Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7): 577 - 596.
- [9] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [10] 张鲁渝. 一个用于边坡稳定分析的通用条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 496 - 501.(Zhang Luyu. Generalized limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 496 - 501.(in Chinese))