

变水位多工况下大型渠道土质边坡的稳定分析

张 玉^{1,2},张方方³

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098;3.山东省水利勘测设计院,山东 济南 250001)

摘要 以南水北调东线穿黄河工程南干渠 0+420 标段特征断面为例,分析大型渠道土质边坡的极限坡高与设计坡角,确定合适的开挖坡度与坡高。根据三轴试验确定岩土体力学参数取值,并结合国内类似边坡工程取值经验寻求合理的计算参数。建立考虑不同条件下的安全系数表达式,搜索该边坡在地下水位变化条件下多种工况的最小安全系数及相应的危险滑面,并进行对比分析,得到对大型渠道土质边坡稳定性研究有益的结论。

关键词 大型渠道;土质边坡;边坡稳定分析;极限坡高

中图分类号 :TV146+.3 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2010)01-0056-05

Stability analysis of soil slopes for large-scale canals considering variable water levels and various working conditons//
ZHANG Yu^{1, 2}, ZHANG Fang-fang³ (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shandong Design Institute of Water Resources, Jinan 250001, China)

Abstract :The characteristic section 0+420 of the southern main canal of the tunneling project across Yellow River for the Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project was taken as an example. The limit slope height and the design slope angle of soil slopes for large-scale canals were analyzed so as to determine appropriate excavation slope angel and height. The geotechnical mechanical parameters for rock/soil were determined according to triaxial tests, and based on the experience for the values in similar slopes in China the reasonable calculation parameters were found. The expressions for safety factor were derived under various conditions to search the minimum safety factor and the corresponding dangerous sliding surface of the study slope under variable water levels and various working conditions. Finally, comparative analysis was performed, and some useful conclusions were drawn for the stability of soil slopes of large-scale canals.

Key words :large-scale canal; soil slope; slope stability analysis; limit slope height

南水北调东线工程建设中有大量的渠道土质边坡,一旦失稳,不但影响南水北调工程建设的正常运行,而且可能造成巨大的经济损失和人员伤亡,因此其稳定性问题一直备受人们关注。目前,国内土质边坡稳定研究主要集中在高土石坝、交通道路高边坡等,极少研究大型渠道土质边坡稳定的问题^[1-4]。传统渠道边坡设计主要依据GB 50288—1999《灌溉与排水工程设计规范》和GB 50286—1998《堤防工程设计规范》,稳定分析方法主要采用瑞典圆弧法或根据经验确定渠道边坡坡度,也可参照碾压式土石坝设计规范,上述规范中涉及渠道边坡稳定性分析的相关规定如表1所示。但瑞典圆弧法是一种简化的条分法,因为完全没有考虑侧向力的作用,在理论上存在明显的缺陷,计算结果误差较大,难以准确地评

价边坡安全性,故不宜采用规范所提供的瑞典圆弧法作为大型渠道边坡稳定分析的方法。

表1 渠道边坡稳定分析方法

规范名称	稳定分析方法	施工期强度指标	边界条件
《灌溉与排水工程设计规范》	按经验确定渠道边坡坡度	未作规定	不考虑渠道挖填方式和复杂应力对边坡稳定影响
《堤防工程设计规范》	瑞典圆弧法	不固结不排水剪	不考虑渠道挖填方式和复杂应力对边坡稳定影响

大型渠道土质边坡坡度和坡高是直接影响边坡稳定、施工进度以及工程造价的重要因素。目前工程设计与决策在许多情况下仍依赖工程经验^[5]。本文运用岩土边坡极限平衡理论,通过推导出的极限坡高与设计坡角的关系式,绘出所研究边坡的极限

坡高与设计坡角的关系曲线,对其坡度与坡高进行更为经济的选取。

简化 Bishop 法虽然忽略了条块间的剪力差,但其考虑了土条侧向力的不平衡,计算精度高且迭代求解简单,进行边坡稳定性分析得到的安全系数在一般情况下较精确^[6-7]。故结合南水北调大型渠道边坡的工程实际,改进了现行规范中规定的渠道边坡稳定分析方法,推导出简化 Bishop 法在考虑多种条件下的安全系数表达式,搜索出该边坡在地下水位 34 ~ 38 m 变化的情况下正常运用条件、非常运用条件Ⅰ和非常运用条件Ⅱ等多种工况下的最小安全系数和最危险滑面,对边坡稳定性进行判断分析。

1 工程概况

穿黄河工程是南水北调东线工程从东平湖至黄河以北输水干渠的输水工程,全长 7.87 km,是南水北调东线的关键控制性项目。工程位于山东省东平和东阿两县境内、黄河下游中段,起始于黄河南岸的东平县东平湖,向北穿过黄河至北岸东阿县位山,地处鲁中南山区与华北平原接壤带中部的剥蚀堆积孤山和残丘区。该工程由出湖闸前疏浚段、出湖闸、黄河南岸输水干渠(以下简称“南干渠”)、滩地埋管进口检修闸、滩地埋管、穿黄隧洞、穿引黄渠埋涵、出口闸和连接明渠等建筑物组成。

南干渠位于东平湖玉斑堤出湖闸至子路堤之间,地处孤山残丘山间平原,前后分别连接出湖闸和滩地埋管进口检修闸。渠道在斑鸠店镇内横穿梁济公路,渠道沿线地形平坦开阔,地面高程为 40 ~ 41 m,渠首桩号 0 + 105 m,底高程为 34.51 m,渠末桩号 2 + 505 m,底高程为 34.43 m,渠道总长为 2 400 m,纵坡为 1/28 900,渠道采用梯形断面,渠底宽度为 18 m,边坡在 1:1.5 ~ 1:3 范围,一般挖深 6 m 左右,渠道设计水深为 4.5 m。根据钻孔显示,组成边坡的土层均接近水平,无不良地质发育。工程区地震动峰值加速度为 0.10 g。渠段地下水主要为第四系松散土层孔隙潜水,主要赋存于砂壤土和裂隙黏土层中,其补给来源为东平湖和大气降水,该地区的暴雨主要集中在七八月份,多年平均最大日降雨量为 110 mm。地下水位高程 34 ~ 38 m,埋深在 3.00 ~ 6.00 m,年变幅为 3 ~ 5 m,对边坡稳定性存在一定的影响。

对于大型渠道土质边坡的研究,由于其地势平坦,地层结构沿渠线变化不大,且边坡成对出现,左右侧边坡的性状基本相同,故不考虑滑动土体两端的阻力,选取南干渠输水渠道 0 + 420 标段特征断面土质边坡一侧进行稳定性评价。该断面地面高程为 40.68 m,渠底高程为 34.46 m,地层高程及工程地质

剖面如图 1 所示。组成边坡的岩土地层主要为第四系松散堆积层,按成因类型可分为冲积层(Q_4^{al})、冲积湖积层(Q_4^{il})和冲积洪积层(Q_4^{al+pl}),地基岩土为弱透水的裂隙黏土(1)和砂壤土(1-1,2),以及较为稳定、透水性微弱、可视为相对隔水层的黏土、壤土、砂质壤土等。

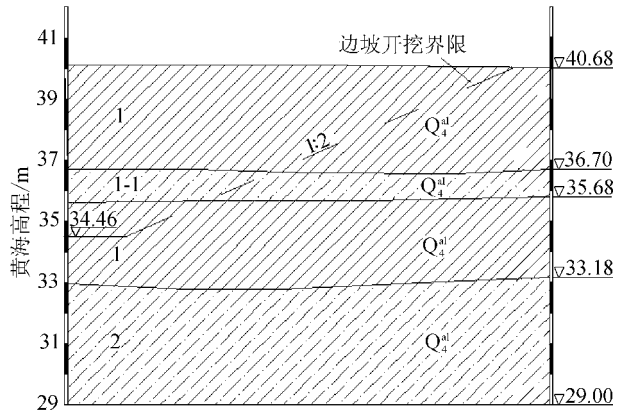


图 1 0 + 420 标段工程地质剖面

2 计算工况及边坡参数的确定

2.1 计算工况的确定

考虑到地下水和地震的作用,渠道边坡稳定分析工况分为正常运用条件、非常运用条件Ⅰ和非常运用条件Ⅱ。正常运用条件为渠道正常输水运行的情况,非常运用条件Ⅰ包括在正常输水运行的情况下水位骤降 4.5 m、暴雨的情况以及施工完建期的情况,非常运用条件Ⅱ为正常输水运行的情况下遭遇地震时的情况,如表 2 所示。

表 2 渠道边坡稳定分析工况及组合

计算工况	渠内水位/m	地下水位/m	允许安全系数
正常输水运行	38.96	34.00 ~ 38.00	1.30
施工完建	34.46	34.00 ~ 38.00	1.25
正常输水运行 + 水位骤降 4.5 m	34.46	34.00 ~ 38.00	1.25
正常输水运行 + 暴雨	38.96	34.00 ~ 38.00	1.25
正常输水运行 + 地震	38.96	34.00 ~ 38.00	1.15

2.2 计算参数的选取

根据与山东省南水北调建设管理局共同进行的现场取样、勘测、室内三轴剪切仪试验,确定出一系列岩土体力学参数值,如表 3、表 4 所示。

由于 1 层裂隙黏土和 1-1 层砂壤土为新近堆积的欠固结土,在施工完建期取不固结不排水剪强度指标的均值进行稳定分析。所得施工完建期安全系数为 0.849,这与工程实际情况明显矛盾,验证了 GB 50286—1998《堤防工程设计规范》中提到的在施工期强度指标选择如采用不固结不排水剪强度指标,对于挖方土渠段不符合实际情况,强度指标偏低的情形。

表 3 计算试验组数

层号	岩性	含水量	湿密度	土粒相对密度	饱和度	试 验 组 数						渗透系数
						不固结不排水剪		固结不排水剪				
								总强度		有效强度		
						黏聚力	内摩擦角	黏聚力	内摩擦角	黏聚力	内摩擦角	
1	裂隙黏土	24	24	25	25	7	6	7	7	6	7	11
1-1,2	砂壤土	18	18	19	18	7	7	7	8	8	8	11

表 4 计算参数试验值

层号	岩性	数值类别	含水量/ %	湿密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土粒相 对密度	饱和 度/%	不固结不排水剪		固结不排水剪				渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
							黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	总强度		有效强度		
									黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	
1	裂隙黏土	均 值	36.2	1.85	2.75	96.6	9.43	4.3	20.00	9.0	16.00	13.0	5.0×10^{-5}
		大值均值	40.8	1.89	2.76	98.6	15.00	4.9	32.67	11.6	27.00	14.2	8.8×10^{-5}
		小值均值	33.0	1.81	2.75	94.5	7.20	4.1	7.33	6.4	5.00	11.8	1.2×10^{-5}
1-1,2	砂壤土	均 值	24.3	1.98	2.70	95.1	6.14	21.9	16.25	14.0	8.25	19.0	1.7×10^{-5}
		大值均值	25.7	2.00	2.70	99.0	7.33	25.7	16.25	20.6	11.25	28.6	2.6×10^{-5}
		小值均值	22.0	1.95	2.69	91.2	5.25	12.2	16.25	7.4	5.25	9.4	7.8×10^{-6}

大型渠道边坡稳定分析岩土体强度指标在渠道正常输水运行阶段可参照 SL 386—2007《水利水电工程边坡设计规范》并依据边坡的实际情况选取固结不排水剪有效强度指标进行边坡的稳定性计算。但是对于施工完建期土坡稳定计算,考虑到该边坡上层为新近堆积的欠固结土且土坡以挖方为主,结合山东省引黄济青边坡工程和南水北调济平干渠边坡工程等国类似边坡工程的经验取值,确定对所研究边坡施工完建期稳定性分析宜选取固结不排水剪强度指标,采用有效应力法和总应力法同时进行边坡的稳定性计算,取两者计算的较小值作为最小安全系数。

根据渠道地层岩性分布和试验分析成果,选取渠道计算参数采用值如表 5 所示。

2.3 边坡坡度与坡高的确定

进行渠道边坡的稳定性分析,首先要对边坡的坡度及坡高进行选择、优化。设一边坡的设计坡角为 β,坡内存在某一潜在剪切破坏面,假设破坏面倾角为 α,在重力作用下,该面上受到岩土体的重力(W)所产生的滑动分力(T)与该面上的抗滑力(F)作用^[8-9],如图 2 所示。此边坡对应的边坡稳定系数为 F_s,破坏面对应的边坡高度 H 即为此边坡的极限坡高。当边坡处于极限平衡状态时,可得潜在破坏面上变形体的高度:

$$h = \frac{2c}{\rho g \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan \varphi)}$$

(1)

式中 ρ 为岩土体密度。

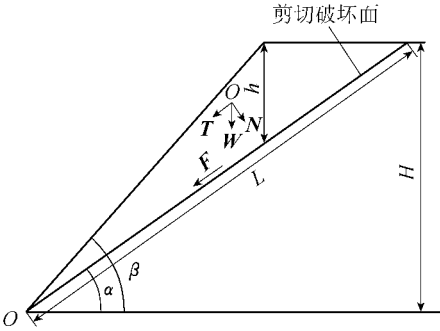


图 2 边坡受力分析及坡高、坡角关系

根据所选边坡的计算参数,采用有效应力法分别计算裂隙黏土和砂壤土分别在天然密度和饱和密度下的极限坡高随设计坡角的变化情况,如图 3 所示。

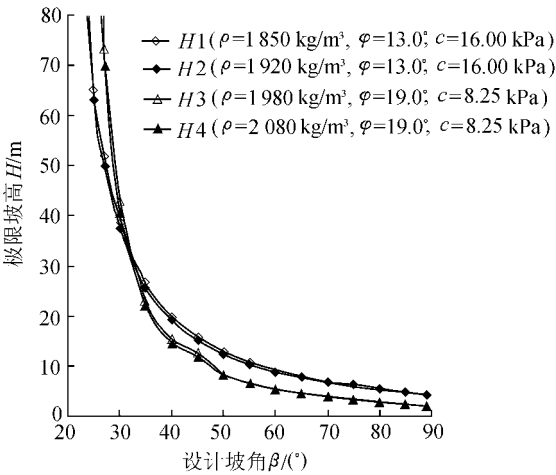


图 3 极限坡高与设计坡角关系曲线

由图3得极限坡高、设计坡角与破坏面倾角关系:

表 5 计算参数采用值

层号	岩性	天然密度/(kg·m ⁻³)	饱和密度/(kg·m ⁻³)	总强度		有效强度		渗透系数/(m·s ⁻¹)
				黏聚力/kPa	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角 φ/(°)	
1	裂隙黏土	1850	19.2	20.00	9.0	16.00	13.0	5.0×10 ⁻⁵
1-1,2	砂壤土	1980	20.8	16.25	14.0	8.25	19.0	1.7×10 ⁻⁵

$$\frac{H}{\tan\beta} = \frac{H-h}{\tan\alpha} \quad (2)$$

依据 β 与 α 的关系：

$$\alpha = \frac{\beta + \varphi}{2} \quad (3)$$

可知边坡极限坡高为

$$H = \frac{2c \tan\beta}{\rho g \cos^2\alpha (\tan\alpha - \tan\varphi) (\tan\beta - \tan\alpha)} \quad (4)$$

在设计坡角相同的情况下饱和状态的极限坡高比天然状态低,这说明水是影响此边坡稳定性的重要因素,分析时应着重考虑。但由于 2 种土体饱和度均达到 95% 以上,导致区分度并不是十分明显。极限坡高在其设计坡角等于内摩擦角时趋于无穷大,形成以内摩擦角为渐近线逐渐降低的趋势。在设计坡角由内摩擦角逐渐增大的过程中,极限坡高由无穷大逐渐减小;当设计坡角逐渐接近于 90° 时,极限坡高趋于无穷小, $H=0$ 为其渐近线;当设计坡度取 1:1.5 ~ 1:3 时,坡高 6.22 m 均可满足稳定要求。综合考虑安全稳定、便于机械开挖等多方面因素,选取更为经济合理的坡度 1:2、坡高 6.22 m 的开挖方式。

3 边坡稳定性分析

简化 Bishop 法是一种非严格条分法,其基本原理是假设条块间作用力方向为水平 ($\Delta Y_i = 0$),建立整体力矩平衡方程,并由静力平衡条件求解安全系数。基于此原理,采用拟静力法考虑该土条在地震、稳定渗流等不同条件下的受力情况,如图 4 所示(图中 Q 为水平地震力, V 为竖向地震力, R 为半径)。

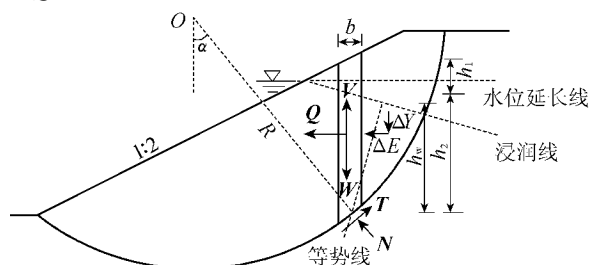


图 4 土条受力分析
根据有效应力法建立平衡方程

$$W_i \pm V_i - T_i \sin\alpha_i - N_i \cos\alpha_i = 0 \quad (5)$$

$$T_i = \tau_i l_i = \frac{N_i \tan\varphi - \mu_i l_i \tan\varphi + c l_i}{F_s} \quad (6)$$

得出

$$N_i = \frac{1}{m_{ai}} \left(W_i \pm V_i - \frac{c l_i \sin\alpha_i}{F_s} - \frac{\mu_i l_i \tan\varphi \sin\alpha_i}{F_s} \right) \quad (7)$$

$$m_{ai} = \cos\alpha_i + \frac{\tan\varphi \sin\alpha_i}{F_s}$$

$$T_i = \frac{(W_i \pm V_i - \mu_i b) \tan\varphi + c b}{F_s m_{ai}} \quad (8)$$

式中: μ_i 为土条底部的孔隙水压力; l_i 为土条的底部弧长。

对水平地震力 Q_i 运用平行移轴定理,半径为 R ,将其移到土条底部中心点处,再对整个土条建立力矩平衡方程:

$$\sum W_i R \sin\alpha_i - \sum T_i R + \sum Q_i \left(R \cos\alpha_i - \frac{h_i}{2} \right) = 0 \quad (9)$$

则 F_s 的表达式为

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_a} [(W \pm V - \mu b) \tan\varphi + c b]}{\sum (W \pm V) \sin\alpha + \sum Q \left(\cos\alpha - \frac{h}{2R} \right)} \quad (10)$$

其中

$$W = \rho g h_1 + \rho_s g h_2$$

$$h = h_1 + h_2$$

$$\mu = \rho_w g h_w$$

正常输水阶段,当遇到水位骤降,假设水压力的改变量 $\Delta\mu$ 等于总应力的改变量 $\Delta\sigma_1$, $\Delta\mu$ 为土条底部中点以上土和水柱的质量变化。由于此边坡土层为裂隙黏性土、砂壤土,而且渗透系数较小,在水位骤降的时候,土层中的水还未来得及排出,只有土条以上水的质量发生变化。

$$\Delta\mu = \Delta\sigma_1 = -\rho_w g z \quad (11)$$

$$\mu' = \mu + \Delta\mu = \rho_w g (h_w - z) \quad (12)$$

在不考虑地震的作用下,式(10)可写为

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_a} [\rho g h_1 + \rho_s g h_2 - \rho_w g (h_w - z)] b \tan\varphi + c b}{\sum (\rho g h_1 + \rho_s g h_2) b \sin\alpha} \quad (13)$$

用替代容重法且不考虑竖向地震力 V ,式(10)可写为

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_a} (\rho g h_1 + \rho_b g h_2) b \tan\varphi + \sum c b}{\sum (\rho g h_1 + \rho_s g h_2) b \sin\alpha + \sum Q \left(\cos\alpha - \frac{h_1 + h_2}{2R} \right)} \quad (14)$$

根据当地水文局实测资料显示,此地区最大平均降雨强度为 110 mm/d,但由于边坡在正常输水阶段水位较高,根据现场取样、勘测、室内三轴剪切仪试验结果,土体的饱和度均达到了 95% 以上。因此,可认为此边坡基本处于饱和渗流状态,暴雨工况基本不会改变边坡的力学性能,对边坡稳定性影响不大,故暴雨工况不作为此边坡稳定性分析的控制性工况。

根据简化 Bishop 法输入地下水位不同情况下所选工况的计算参数,取土条数为 25 进行稳定分析。取 F_s 初始值为 1,代入公式进行迭代运算。当算出的 F_s 满足精度(0.005)要求时,达到收敛。此时的 F_s 即为所求的最小安全系数,对应的滑面为最危险滑面。

如表 6 所示,各种工况下边坡安全系数均满足规范要求。为节省篇幅,每种工况仅列出地下水位最不利的情况(38.00 m)时最危险滑面,如图 5 所示。由于水的自重与土体孔隙水压力作用,随着地下水位的上升,边坡安全系数逐渐降低。施工完建期采用有效应力法和总应力法同时计算边坡最小安全系数,有效应力法计算值较小,为该工况时的最小安全系数。在正常运行期安全系数最高,边坡有较强的稳定性;当地震发生时,土坡受到水平向地震力(地震加速度为 0.1 g,不考虑竖向地震力)的影响,导致安全系数减小,虽对稳定存在一定影响,但整体仍满足稳定性要求。水位突然降落,坡体内的浸润线并未与坡外水位同时降落,孔隙水压力来不及消散,由坡外水位提供的静水压力在水位骤降时迅速消失,滑动面抗滑能力降低,安全系数变化明显,虽然整体满足稳定要求,但在其他因素作用下极易导致边坡失稳,当地下水位为 38.00 m 时,水位骤降 4.5 m 工况下的安全系数仅为 1.263,应避免此种情况的出现。

表 6 最小安全系数计算成果

地下 水位/m	最小安全系数			
	正常运用 条件 (正常输 水运行)	非常运用条件 I		非常运用 条件 II (正常输 水运行+ 地震)
		施工完建	正常输水 运行+水位 骤降 4.5 m	
34.00	2.116	1.598	1.304	1.474
34.23	2.112	1.593	1.302	1.471
34.46	2.108	1.588	1.300	1.467
35.00	2.098	1.575	1.295	1.460
35.50	2.087	1.562	1.290	1.453
36.00	2.075	1.549	1.285	1.445
36.50	2.062	1.535	1.280	1.436
37.00	2.050	1.519	1.275	1.426
37.50	2.035	1.503	1.270	1.415
38.00	2.020	1.485	1.263	1.405

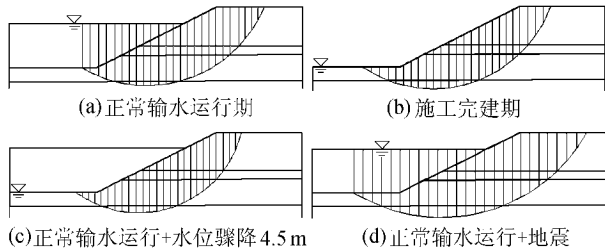


图 5 不同工况下地下水位为 38.00 m 时最危险滑面

4 结 语

- a. 对大型渠道土质边坡工程提出了合理的边坡岩土体计算参数选取方法,为所研究的边坡寻找出了合理的计算参数。通过工程实例计算,得到了对于挖方渠段在施工完建期稳定安全计算如采用不固结不排水剪强度指标,计算值偏低,不符合实际情况的结论。这种方法为类似边坡工程岩土体力学参数选取提供重要的依据。
- b. 基于选取的计算参数,绘出极限坡高与设计坡角关系曲线,提出坡度 1:2、坡高 6.22 m 的开挖方式,并验证了其在不同条件下的稳定性。计算结果符合实际、经济合理,满足边坡稳定要求,优化了拟定坡度 1:2.5 开挖方式,大幅度削减了渠道边坡挖方量,降低了工程造价,加快了施工进度。
- c. 改进了现行规范中规定的渠道边坡稳定分析方法,运用简化 Bishop 法推导出了考虑多种条件下的安全系数表达式,对地下水位变化条件下多种工况的边坡稳定性进行了分析,得到一些对边坡稳定有益的结论。边坡整体稳定性均符合规范要求。水是影响大型渠道土质边坡稳定性最重要的因素,一方面,地下水位上升导致边坡稳定性减弱,工程中需及时排泄渠道外水,防止高地下水位的情况出现;另一方面,渠内水位骤降极易导致边坡失稳,工程实际中应尽量避免水位快速下降,保持水位缓慢变化,使边坡处于相对较安全的状态。

参考文献:

[1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.

[2] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2002.

[3] 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, 2003.

[4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

[5] 陈文刚, 王艳杰, 马洪志. 北引渠道土质对边坡稳定的影响分析[J]. 黑龙江水利科技, 2007, 35(6): 79-82.

[6] DUNCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7): 577-579.

[7] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.

[8] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册[K]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.

[9] 徐世光, 祝传兵, 殷瑛. 一个极限稳定坡角与坡高的经验关系式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 22-27.

(收稿日期: 2009-03-26 编辑: 方宇彤)