

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.032

# 南水北调中线穿黄工程南岸明渠高边坡稳定性研究

邢义川<sup>1</sup>, 张爱军<sup>2</sup>, 安鹏<sup>1</sup>, 张少宏<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048;  
2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 穿黄南岸连接段渠道位于黄土地区, 工程地质条件复杂, 约有 2/3 的渠段位于地下水位以下, 该渠段黄土高边坡高度可达 80 m, 属一级建筑物。其黄土高边坡的稳定性是南水北调工程建设中关键的技术难题之一。分析了该地区大量黄土基本试验资料, 并选取了计算参数, 通过极限平衡法、非线性有限元和动力有限元分析计算了原设计方案进口和出口段黄土高边坡的稳定性, 修改了原设计坡型, 提出了符合黄土特点的新边坡设计方案。稳定验算结果表明, 新设计方案优于原方案。

**关键词:** 南水北调中线; 黄土高边坡; 设计方案修改; 边坡稳定性验算

**中图分类号:** TV 68    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0148-04

## Stability of High Slope in Open Channel on South Bank for Crossing the Yellow River Project in the Middle Route of South to North Water Diversion Project

XING Yi chuan<sup>1</sup>, ZHANG Ai jun<sup>2</sup>, AN Peng<sup>1</sup>, ZHANG Shao hong<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The connecting canal of south bank for Crossing the Yellow River Project is located in the loess area, which belongs to class I building with complicated geological conditions. About 2/3 of the canal section is located below groundwater level, and the highest height of high loess slope at this segment reaches 80 m. The high loess slope stability is one of key technical problems in construction of the South to North Water Diversion Project. In this paper, a large number of loess fundamental test data in the region were analyzed and the parameters were selected for the calculations of loess high slope stability of the outlet and inlet sections from the original design using the limit equilibrium method, nonlinear finite element analysis, and dynamic finite element analysis. A new slope design scheme was proposed based on the characteristics of loess. The results suggested that the new design is better according to the slope stability calculations.

**Key words:** Middle Route of South to North Water Diversion Project; high loess slope; design modification; slope stability calculation

## 1 研究背景

穿黄南岸连接段由进口明渠段、黄土隧洞段及出口明渠段组成。进口明渠段长 777.85 m, 原设计渠底高程 111.00~113.00 m, 渠道挖深 32~44 m, 地下水位最大高出渠底 27.18 m。121.0 m 高程以下的坡比为 1:2, 121.0 m 高程以上单级坡比均为 1:0.7, 在 121.0 m 高程设 17.0 m 宽平台, 121.0 m 高程以上平台宽均为 7.0 m, 横断面如图 1 虚线所示(图中说明部分指本文优化后坡型)。出口明渠段长

758.15 m, 沿满沟布设, 原渠底设计高程为 111.66~110.16 m。原设计 121.0 m 高程以下的坡比为 1:2, 121.0 m 高程以上单级坡比均为 1:0.7, 单级坡高均为 7 m, 121.0 m 高程设 17 m 宽平台, 121.0 m 高程以上平台宽度均为 7.0 m。出口明渠段渠道横断面如图 2 虚线所示。

明渠段黄土层分为 5 层, 第Ⅴ层黄土处于地下水位以上属非饱和黄土, 第Ⅳ层、Ⅲ层、Ⅱ层和Ⅰ层黄土均为饱和黄土, 各层物理力学指标数值有所差异。区内地震基本烈度为 7 度。明渠进口段为人工挖方形成的黄土高边坡, 出

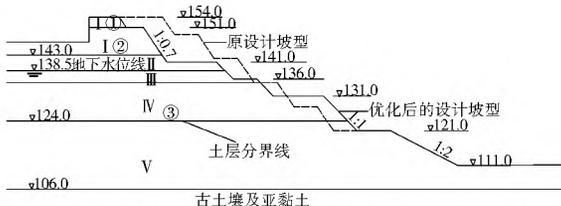
收稿日期: 2013-11-20    修回日期: 2014-01-10    网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.001.html>

基金项目: 中国水利水电科学研究院开放基金资助项目(2009025)

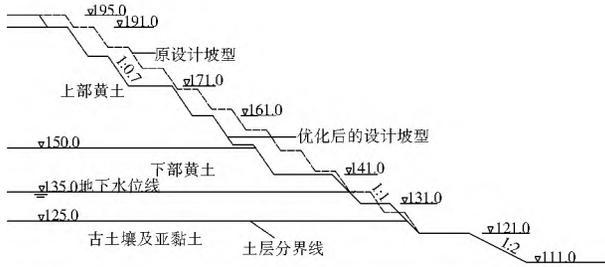
作者简介: 邢义川(1956), 男, 陕西镇安人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: xingych@iwhr.com

口段是在原来的边坡上整修形成的高边坡。为了保证穿黄南岸连接段工程施工及运行安全,在对高边坡地质特性进行详细勘察研究的基础上,需要对明渠高边坡稳定性进行研究。



说明:(1)106.1 m高程以上为Q<sub>3</sub>黄土,106.0 m高程以下为Q<sub>2</sub>黄土,Q<sub>3</sub>黄土根据其力学性质不同划分为5层。  
(2)121.0 m高程以下的坡比为1:2,121.0~140.0 m高程之间单级坡比均为1:1,140.0 m高程以上单级坡比均为1:0.7。  
(3)在121.0 m高程处设10.0 m宽平台,131.0 m和141.0 m高程均设15.0 m平台,136.0 m高层设7.0 m平台,151.0 m设5.0 m平台。  
(4)图中尺寸均为m。

图1 穿黄南岸进口段黄土高边坡设计断面图(0+ 628.5)  
Fig. 1 Design section of the inlet of high loess slope on the south bank for crossing the Yellow River Project (0+ 628.5)



说明:(1)125.0 m高程以上为Q<sub>3</sub>黄土,125.0 m高程以下为Q<sub>2</sub>黄土,Q<sub>3</sub>黄土根据其力学性质不同划分为上部黄土和下部黄土。  
(2)121.0 m高程以下的坡比为1:2,121.0~140.0 m高程之间单级坡比均为1:1,140.0 m高程以上单级坡比均为1:0.7。  
(3)在131.0 m高程处设10.0 m宽平台,141.0 m高程设20.0 m平台,171.0 m高程设15.0 m平台。  
(4)图中尺寸均为m。

图2 穿黄南岸出口段黄土高边坡设计断面图(1+ 759.7)  
Fig. 2 Design section of the outlet of high loess slope on the south bank for crossing the Yellow River Project (1+ 759.7)

## 2 边坡地下水渗流计算

采用南京水利科学研究所 DQB 平面渗流有限元程序计算明渠开挖和渗流水抽排施工过程的渗流场。计算中黄土层渗透系数取  $5.8 \times 10^{-4}$  cm/s,给水量  $\mu$  取 0.052。

表1 极限平衡法土层分类与计算参数汇总

Table 1 Soil classification and calculation parameters of the limit equilibrium method

土类	部位	层类	含水量 (%)	干重度 / (kN · m <sup>-3</sup> )	抗剪强度(天然状态)		抗剪强度(饱和状态)		
					$C_{eq}$ /kPa	$\varphi_{eq}$ (°)	$C_{eq}$ /kPa	$\varphi_{eq}$ (°)	
Q <sub>3</sub>	进口明渠段	$\tilde{N}^1$	32	14.6	20	20.6	20	20.6	
		$\tilde{N}^0$	15.5	15.5	60	25			
		$\tilde{0}$	30.4	14.8	31.5	23.4	31.5	23.4	
		$\tilde{0}$	27.1	15.6	30	27	30	27	
		$\tilde{0}$	27.1	15.6	30	27	30	27	
Q <sub>2</sub>	出口段	$\tilde{0}$	22.6	16.6	33	26	33	26	
		上部	$\tilde{1}$	32	14.3	20	20.6	20	20.6
		$\tilde{0}$	5.13	14.3	64.3	21.7	30	27	
	下部	$\tilde{0}$	7.3	15.2	62	24.2	30	27	
Q <sub>2</sub>	古土壤及亚黏土		22.1	16.5	44	25	44	25	

注:(1) $\tilde{N}^1$ 与上部 $\tilde{1}$ 参数相同,均为考虑雨水作用时 Q<sub>3</sub> 黄土的强度指标,范围 0~3 m;(2) $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 均为饱和状态,故天然与饱和状态强度值相同。

## 2.1 稳定渗流计算结果

经计算,渠道开挖至不同高程时的稳定浸润线见图3中曲线<sup>1</sup>至<sup>8</sup>,可以看出:(1)开挖高程在128 m以上时,渠道附近地下水位降落较明显,浸润线末端均能降至开挖高程处,地下水没有从边坡出逸现象。但浸润线与地下水位相接处附近20 m以内浸润线降落不明显;(2)开挖至123.4 m高程时,地下水从123.5 m高程处出逸;(3)开挖至121 m高程时,地下水从121.2 m高程处出逸,再往下开挖时浸润线基本保持不变,121 m高程以下边坡上均为出渗段。

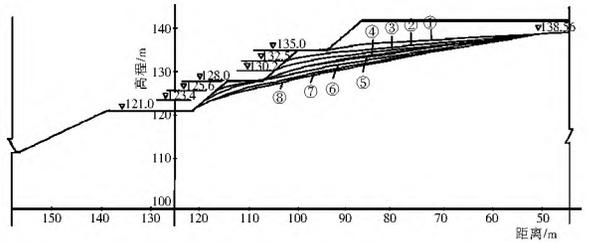


图3 渗流计算成果

Fig. 3 Seepage calculation results

## 2.2 非稳定渗流计算结果

3个水位的降落时间为:从138.58 m降至第<sup>1</sup>条浸润线的135 m位置时需4 d;从135 m降至132.67 m,即从第<sup>1</sup>条浸润线位置降至第<sup>0</sup>条浸润线位置时需1.365 d;从132.67 m降至130.20 m,即从第<sup>0</sup>条浸润线位置降至第<sup>0</sup>条浸润线位置时需0.552 d。

## 3 极限平衡法边坡稳定计算

### 3.1 计算方法与参数

本文采用毕肖普法和瑞典圆弧法进行极限平衡法边坡稳定计算,地层情况和各层土的计算参数见表1。

### 3.2 原设计方案计算结果

计算中渠道的进口段和出口段各选择了4个剖面,对施工期和运行期多种工况进行了计算,其中施工期计算中不考虑地震的作用,运行期计算考虑地震作用。断面位置、计算工况和边坡稳定安全系数计算值见表2、表3。

表 2 施工期计算安全系数汇总

Table 2 The calculation safety coefficients during the construction period

位置	断面	工 况	原方案安全系数		新方案安全系数	
			毕肖普法	瑞典圆弧	毕肖普法	瑞典圆弧
进口段	纵断面	开挖至地下水水位	1.912	1.782	2.193	2.056
		开挖至地下水水位到设计渠底一半处	1.481	1.361	1.849	1.695
		开挖至设计渠底	1.042	1.03	1.109	1.095
	横断面	开挖至地下水水位	2.314	2.127	1.534	1.46
		开挖至地下水水位到设计渠底一半处	1.644	1.526	1.583	1.428
出口段	纵断面	开挖至设计渠底	1.288	1.159	1.348	1.235
		开挖至地下水水位	1.728	1.617	1.582	1.536
		开挖至设计渠底	1.253	1.216	1.267	1.201
	横断面	开挖至地下水水位	1.613	1.514	1.569	1.471
		开挖至设计渠底	1.306	1.197	1.345	1.278

表 3 运行期计算安全系数汇总

Table 3 The calculation safety coefficients during the operation period

位置	断面	工 况	原方案安全系数		新方案安全系数	
			毕肖普法	瑞典圆弧	毕肖普法	瑞典圆弧
进口段	纵断面	渠满水加地震	1.009	0.986	1.144	1.1
	横断面	渠满水加地震	1.241	1.109	1.311	1.192
出口段	纵断面	渠满水加地震	1.233	1.174	1.244	1.186
	横断面	渠满水加地震	1.237	1.158	1.237	1.171

计算表明:进口段比出口段边坡的稳定性差,纵断面比横断面的稳定性差。造成这一结果的原因是进口段的地下水水位比出口段的高。其中施工期进口、出口段原设计边坡断面的安全系数均大于规范规定的允许值,证明边坡是稳定的;运行期进口段边坡在地震情况下安全系数偏小,小于规范允许的范围,有发生滑动的可能;出口段是稳定的,但安全富余量不大。

### 3.3 新设计方案计算结果

鉴于原设计方案边坡的坡型从上到下采用相同的形式,平台宽度均为 7 m 不够宽,未考虑土层特性的不同和不同挖深的渗流特性和应力状况的差别,导致设计边坡局部不稳定。所以必须对原设计方案进行修改。

根据该处地质、地形情况和黄土高边坡运行特点将原设计方案修改为“大平台,陡边坡,控制单级坡高”的新设计方案。采用“大平台”可以有效缓减坡脚应力集中,利于坡体排水系统的设置;“陡边坡”就是在单个边坡上采用较陡的坡比,减小降雨对边坡的冲刷;“控制单级坡高”就是控制单级坡高不超过 10~15 m,减小局部滑动可能性。

修改后的新设计方案为:(1)进口断面边坡上部 140.0 m 高程以上单级坡比控制在 1:0.7 之间,下部坡比均为 1:1;单级坡高取 10.0 m;进口横断面在 121.0 m 设 10 m 宽平台,131.0 m、140.0 m 高程设 15.0 m 平台;高程 136.0 m 设 7.0 m 平台,151.0 m 高程设 5.0 m 平台。修改后渠道开口宽度与原设计一样。变更后的新设计断面见图 1(实线)。(2)出口断面,纵、横断面均在 130.0 m 高程设 10.0 m 平台,在 140.0 m 设 20.0 m 平台,高程 170.0 m 设 15.0 m 平台,其余高程设 7.0 m 平台;除 121.0 m 坡高为 9.0 m 外其余单级坡高均取为 10.0 m;140.0 m 高程以上单级坡比为

1:0.7,以下单级坡比为 1:1,对原过水段面部分不做变更。变更后的新设计断面见图 2(实线)。

对新设计方案进行稳定计算,得到的各种工况下的安全系数见表 2、表 3。

结果显示,修改设计方案边坡稳定安全系数较原设计方案大,均可满足规范要求,修改方案是合理的。

## 4 高边坡静、动力有限元计算

### 4.1 静力有限元计算

本次计算采用邓肯-张 E-μ 模型。将高边坡按平面应变问题考虑,在进出口段选定了纵横 4 个典型断面,每个断面又分为 3 个开挖深度计算。

采用自编的二维等参 4 节点动静力有限元计算程序 CJAP 计算,模拟计算思路为:先计算出未开挖时断面的变形及应力场,将初始变形忽略,作为初始应力场;由以上计算出的应力场,确定土体的模量、泊松比及卸载模量;然后对开挖单元分 6 级卸载,并将已开挖单元的刚度取很小的值,判断每个单元的应力是加载还是卸载而采用不同的模量值,迭代计算开挖时土体的应力和变形场,并依次计算直到开挖至渠底。计算参数见表 4 和表 5。

邓肯张模型的应力水平  $S_l$  值反映了土体破坏程度,其计算公式为:

$$S_l = \frac{(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c' \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \quad (1)$$

式中: $S_l$  为应力水平值; $c'$ 、 $\phi$  为土体有效强度指标; $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  为大小主应力

一般认为该值接近 1.0 时表明土体接近破坏,计算得到的应力水平等值线见图 4 和图 5。从图中看出,优化后坡型土体是稳定的。

表4 进口段邓肯张模型参数

Table 4 The parameters of Duncan-Chang model for the inlet section

地层	$R_f$	$k$	$n$	$G$	$F$	$D$	$k_{ir}$
Q <sub>3</sub>	$\bar{N}$	0.907	497	0.097	0.414	0.088	0.938
		0.802	343	0.748	0.475	0.159	0.932
	$\dot{O}$	0.898	214	0.615	0.215	0.03	8.89
	$\acute{O}$	0.802	343	0.748	0.475	0.159	0.932
	$\hat{O}$	0.672	116	0.505	0.394	0.201	1.509
Q <sub>2</sub>	0.67	247	0.797	0.483	0.228	1.459	494
Q <sub>2</sub>	0.835	336	0.551	0.471	0.248	1.485	672

表5 出口段邓肯张模型参数

Table 5 The parameters of Duncan-Chang model for the outlet section

地层	$R_f$	$k$	$n$	$G$	$F$	$D$	$k_{ir}$
上部黄土 Q <sub>3</sub>	0.838	446	0.064	0.464	0.159	1.415	892
	0.845	140	0.337	0.282	0.264	2.291	280
下部黄土 Q <sub>3</sub>	0.316	483	0.393	0.448	0.082	0.999	966
	0.802	343	0.748	0.475	0.159	0.932	686
Q <sub>2</sub>	0.835	336	0.551	0.471	0.248	1.485	672

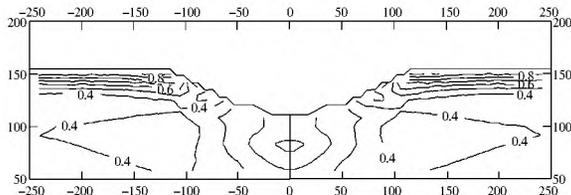


图4 进口段应力水平等值线

Fig. 4 Contour line of stress level of the inlet section

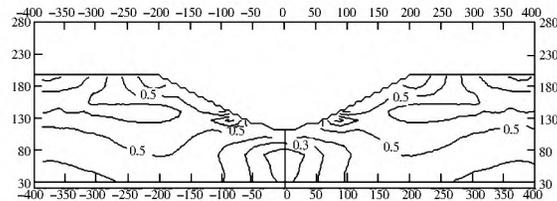


图5 出口段应力水平等值线

Fig. 5 Contour line of stress level of the outlet section

通过对原方案和新方案进行的变形特性分析,以及对进口明渠段和出口明渠段的横断面、纵断面的应力特性分析发现:(1)进口明渠段新方案横断面和纵断面的应力水平较原方案断面有所减小,边坡的稳定安全性好,但边坡的上部15 m的范围内由于单级坡高加大,坡比变陡,其应力水平较高,值得注意;(2)出口明渠横断面和纵断面开挖到渠底时,新方案断面的开挖量较原设计断面减少了很多,但其边坡的稳定性并没有减少,表明新设计断面的稳定性更好。

#### 4.2 动力有限元计算

为了与静力计算相对应,将高边坡按平面应变问题考虑。计算中假定地震惯性力沿水平方向作用于渠底的基岩上,地震波从基岩垂直向上传播,由于边坡土质渗透性较小,因此不考虑地震过程中土体内孔隙水压力的消散。仍采用CJAP计算软件计算。

地震加速度时程曲线确定:选用唐山地震迁安强余震实测地震加速度反应曲线作为输入水平地震加速度反应曲线

模型,根据Seed提出的方法把原有地震加速度时程曲线的加速度值乘以 $a_0/a_{max}$ 值,将横坐标(时值)乘以 $T_p/T_{max}$ ,并将地震持续时间折算到20 s,得到计算地震加速度时程曲线。计算中采用哈丁-德聂维契(Hardir Drnevich)提出的等效黏弹性模型,孔压增长采用徐志英孔压模型,饱和区采用有效应力法计算,非饱和区采用总应力计算。

输入的地震加速度过程曲线见图6。计算结果表明:进口明渠段高边坡在地震情况下不会发生液化,边坡坡面上变形幅值不大,说明该段边坡是稳定的;出口明渠段黄土高边坡在地震情况下不会发生液化,但边坡上部动变形较大,值得注意。

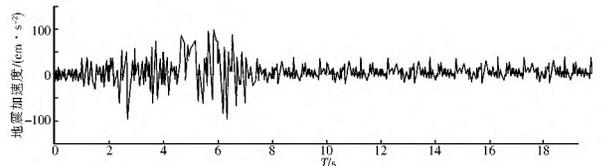


图6 地震加速度过程线

Fig. 6 Seismic acceleration process line

## 5 结论

(1)由渗流计算可见:逐级开挖明渠、渠底抽水降低浸润线的施工方法对降低施工区域的浸润线有一定效果,但开挖至128 m高程以下将出现渗出段,会给施工带来一定困难。建议在111.4 m(渠底)高程增设辐射管井点抽排水设施,进一步降低浸润线保证明渠施工顺利进行;在128 m高程以下明渠两侧边坡出逸段上增设反滤层,采用400 g/m<sup>2</sup>无纺布做反滤,上覆干砌块石护坡,以保证明渠在运用期的渗流安全。

(2)坡体排水是保证边坡安全的关键,建议在施工期采用深排水沟与井点相结合的排水措施,同时作好坡面排水。

(3)极限平衡稳定计算、静力和动力有限元分析表明:原设计方案进、出口段边坡在施工期是稳定的;而运行期进口段

(下转第164页)

- Water, 2011, (2): 38-40. (in Chinese))
- [8] 李世君, 李宇, 周训. 利用地下水库强调蓄功能建设备用地下水源地[J]. 地下水, 2006, 28(5): 41-43. (LI Shi jun, LI Yu, ZHOU Xun. Study on Construction Of Emergency Under-ground Reservoir by Using Its Storage Function[J]. Groundwater, 2006, 28(5): 41-43. (in Chinese))
- [9] 北京市地质工程勘察院, 怀柔应急水源地地下水动态监测报告[R]. 2003-2010. (Beijing Institute of Geological & Prospecting Engineering, Monitoring Report of Huairou Emergency Well Field, from 2003 to 2010[R]. 2003-2010. (in Chinese))
- [10] 刘记来, 庞忠和, 王素芬, 等. 近 30 年来降水量变化和人类活动对北京潮白河冲积扇地下水动态的影响[J]. 2010, 30(1): 138-144. (LIU Ji lai, PANG Zhong he, WANG Su fen, et al. Impact of Precipitation Change and Human Activities on Groundwater Regime in The Chaobai River Alluvial and Diluvial Fan in Beijing in The Last 30 Years[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(1): 138-144. (in Chinese))
- [11] 郭高轩, 刘久荣, 许亮, 等. 近 300 年来北京地区降水的变化特征[J]. 水资源与水工程学报 2011, 22(1): 90-93. (GUO Gao xuan, LIU Jiu rong, XU Liang, et al. The Characteristics of Precipitation in Beijing Region from 1724-2009[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(1): 90-93. (in Chinese))
- [12] 郭高轩, 辛宝东, 朱琳, 等. 基于小波变换的北京地区 1724-2009 年降水量多尺度分析[J]. 水文, 2012, 32(3): 29-33. (GUO Gao xuan, XIN Bao dong, ZHU Lin, et al. Multi scale Analysis of Annual Precipitation in Beijing Area from 1724 to 2009 Based on Wavelet Transformation[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(3): 29-33. (in Chinese))
- [13] 朱琳, 刘畅, 潘云, 等. 基于 WetSpss 的北京降雨入渗量时空变化研究[J]. 地球科学, 2013, 38(5): 1065-1072. (ZHU Lin, LIU Chang, PAN Yun, et al. Research on the Temporal and Spatial Changes of Precipitation Infiltration in Beijing Based on WetSpss[J]. Journal of Earth Science, 2013, 38(5): 1065-1072. (in Chinese))
- [14] 北京水文地质工程地质大队, 北京潮白河牛栏山地区水资源地下调蓄试验研究报告[R]. 1984. (Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing, . Storage Test Report in the Chaobai River Niulanshan area[R]. 1984. (in Chinese))
- [15] 刘记来. 北京怀柔应急备用地下水源地开采两年后续采年限研究[J]. 城市地质, 2008, 3(4): 13-15. (LIU Ji lai. A Study of The Continued Mining Life of The Huairou Emergency Backup Water Source after Being Mined for Two Years[J]. City Geology, 2008, 3(4): 13-15. (in Chinese))
- [16] 任永强, 宫辉力, 潘云. 北京怀柔应急地下水源地降水入渗补给时滞性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 93-96. (REN Yong qiang, Gong Hui li, PAN Yun. Analysis of Rainfall Infiltration Lag Time of Emergency Groundwater Source Field in Huairou of Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 65-68. (in Chinese))
- [17] 叶超. 缓解首都地区水资源紧缺的战略研究—剖析应急备用水源地的建立[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2004: 1-102. (YE Chao. Alleviate Water Shortage in The Capital Region's Strategic Research—On Feasibility of Emergency Well Field [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2004: 1-102. (in Chinese))
- [18] 沈媛媛, 郭高轩. 怀柔应急水源地地区地下水流数值模拟及地下水场演化研究[R]. 2010: 1-62. (SHEN Yuan yuan, GUO Gao xuan. Huairou Emergency Water Source Numerical Simulation of Groundwater Flow and Groundwater Flow Field Evolution [R]. 2010: 1-62. (in Chinese))

(上接第 151 页)

边坡在地震情况下安全系数较小, 有发生滑动的危险; 出口段基本是稳定的, 但安全富余量不大, 在地震作用下有发生局部崩塌的危险。所以必须修改原设计方案。

(4) 按照“大平台、陡边坡和控制单级坡高”的思路, 对原边坡设计方案的优化修改符合黄土边坡特有的变形和破坏形态, 优化后的边坡在保持平均坡比不变的情况下, 稳定性有较大幅度增加。

#### 参考文献(References):

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2003. (MAO Chang xi. Seepage Computation Analysis & Control [M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zu dian. Loess Mechanics and Engineering [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (XIE Ding yi. Soil Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese))
- [4] 邢义川, 吴培安, 骆亚生. 非饱和和原状黄土三轴试验方法研究[J]. 水利学报, 1996, 27(1): 47-52. (XING Yi chuan, WU Pei an, LUO Ya sheng. Triaxial Test on Undisturbed Unsaturated Loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(1): 47-52. (in Chinese))
- [5] Lu, N., W. J. Likos. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [6] Fredlund, D. G., H. Rahardjo. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: Wiley Publications, 1993.
- [7] Tarantino, A., S. Tombolato. Coupling of Hydraulic and Mechanical Behaviour in Unsaturated Compacted Clay [J]. Geotechnique, 2005, 55(4): 307-317.