

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.015

库水位骤降与桩基作用对高填方岸坡稳定性影响研究*

贺林林^{1,2,3}, 周莉^{2,3}, 梁越^{1,2,3}

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要: 针对库水位骤降可能导致高填方岸坡滑坡, 从分析岸坡出现滑坡的因素出发, 阐释了库水位骤降作用下岸坡土体抗剪强度降低及岸坡下滑推力增大的原因, 同时考虑嵌入高填方岸坡的高桩码头桩基结构-岸坡土体相互作用下岸坡稳定性的变化。本文以三峡库区某高填方岸坡高桩码头为例, 通过不平衡推力法, 求得三种工况下高填方岸坡的稳定系数和剩余下滑推力; 并借助ABAQUS有限元软件, 在本文工况三的基础上, 采用强度折减法分析桩基作用下岸坡稳定性的变化。结果显示: 库水位从175 m骤降到145 m, 岸坡稳定系数从1.32减小至1.25, 且坡脚至填方平台以下约5 m的区域出现较大塑性变形; 而在桩基作用下岸坡的稳定系数从1.25增加至2.0, 增加了60.0%, 桩基间仅小范围出现较小塑性变形。因此, 码头桩基对高填方岸坡起着较明显的加固作用。

关键词: 库水位骤降; 桩基; 高填方岸坡; 不平衡推力法; 有限元法

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0959-08

Research on Effect of Sudden Drawdown of Reservoir Water Level and Pile Foundation on Stability of High Filled Bank Slope

HE Linlin^{1,2,3}, ZHOU Li^{2,3}, LIANG Yue^{1,2,3}

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University,

Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Hydraulic and Waterway Engineering,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of River and Ocean Engineering,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Aiming at the fact that the sudden drawdown of reservoir water level may lead to failure of high filled bank slope, based on the analysis of the factors influencing the slope stability, the reasons for the decrease of shear strength of bank slope soil and the increase of sliding force under the sudden drawdown of reservoir water level were illustrated. Besides, considering the interaction of the pile and soil, the stability of the high pile wharf bank embedded in the high filled bank slope was involved. In this paper, taking the high pile wharf in the high filled bank slope in the Three Gorges reservoir area as

* 收稿日期: 2018-09-07; 修回日期: 2018-11-05

基金项目: 重庆市基础与前沿研究科学基金(cstc2018jcyjAX0559)、重庆市博士后科研项目(Xm2017188)、中国地质调查局公益性项目(DD20189270)、重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2017A03)资助

作者简介: 贺林林(1983-), 女, 副教授, 硕导, 博士。主要从事港口海岸及近海工程结构设计理论和方法、土与结构相互作用方向的研究。Email: helinl@126.com

an example, the stability coefficient and residual sliding force of the high filled bank slope under three working conditions were obtained by means of imbalance thrust force method. And taking the influence of piles into consideration, the stability of the bank slope under the third condition herein was analyzed by adopting the strength reduction method using ABAQUS. The results show when the reservoir water level drops from 175m to 145m, the stability coefficient of the bank slope decreases from 1.32 to 1.25, and the plastic deformation occurs in the area about 5m from slope toe to the filled platform. While the stability coefficient of the bank slope with the pile foundation increases from 1.25 to 2.0, the increment is about 60%. There is only a small amount of plastic deformation that occurs in sporadic zones between pile foundations. Therefore, the pile foundation of the wharf plays an obvious role in reinforcing the high filled bank slope.

Keywords: sudden drawdown of reservoir water level; pile foundation; high filled bank slope; imbalance thrust force method; finite element method

引言

随着我国经济的快速发展,国家对基础设施建设的投资力度越来越大。因此,建筑用地的需求也日益增加。对于西部地区,山区河谷地带众多,地形地貌高低不平,相对于我国东部地区,平坦的地形较少。因此,在城市、公路、铁路、机场、水利等方面的一些工程项目建设必须挖山填沟来满足工程建设需要。在挖山填沟过程中会形成大量的填方体,填筑高差从几米到几十米,甚至高达上百米。目前,高填方体在公路路基、机场扩建等工程上已广泛应用,例如,位于四川省阿坝州松潘县的九寨沟黄龙机场,其填方量为2 763万 m^3 ,填筑最大高度达104 m^[1];山西吕梁机场填方高度约80 m,这样大体积的黄土高填方工程在国内工程尚属首例^[2];四川省巴中机场,其沟谷填方高度大,其中五显庙沟谷填方高度达110.5 m,填方量高达248.67万 m^3 ^[3];重庆江北国际机场土石填方高度超过90 m^[4]。白黔高速K44+470~K44+680填方路基,全长210 km,轴线最大填方高度35.4 m^[5]。

人工高填方技术在基础建设工程中已得到较为广泛地应用,但在复杂环境条件下该技术还存在诸多尚未解决的难题。这些难题对填方体稳定性影响至关重要,主要表现在工后沉降变形和高边坡滑坡两方面。在实际工程中影响填方体稳定性的因素有很多,主要有外部影响因素如地震、强降雨、施工方法、地形地质特性等;内部影响因素如土颗粒自身的结构、土体的物理化学性质等。

三峡库区两岸多高填方岸坡,其受到库水位周

期性变化的影响严重。但目前对水位变动影响下高填方岸坡稳定性的相关研究还较少,而对三峡库区天然岸坡在水位周期性变化影响下的研究较多。三峡库区天然库岸滑坡的原因较多,主要有岸坡自身因素和外在因素,自身因素主要包括库岸自身的岩土性质及地质构造条件;外在因素主要是岸坡内地下水的作用^[6]。同样,地下水对高填方岸坡稳定性的影响主要也是外在诱发因素。而随着内河高填方高桩码头结构的提出,必须开展三峡库区大水位差变化对高填方岸坡稳定性影响研究,同时码头桩基结构存在对高填方岸坡稳定性影响程度不明。因此本文针对库水位骤降对高填方岸坡稳定性影响以及码头桩基对岸坡稳定性影响开展相关研究。

1 库水位对高填方岸坡稳定性影响

1.1 库水位对高填方岸坡物理作用

三峡水库蓄水后,高填方岸坡内地下水位上升,岸坡土体孔隙内气体被挤出,土体中含水量增大,土颗粒表面的强结合水增多增厚,土颗粒之间的基质吸力减弱,同时强结合水起到了一定的润滑作用,土颗粒之间发生相互移动的现象明显,土体软化,高填方岸坡抗滑阻力减小。当含水量持续增加到岸坡土体中出现自由水,土体中就会产生孔隙水压力^[6-8]。含水量增加也使土体的浮容重增加,土颗粒之间粘聚力、内摩擦角减小。因此,高填方岸坡土体的抗剪强度降低,坡体的稳定性受到影响。

1.2 库水位对高填方岸坡力学作用

库水位变化导致高填方岸坡内地下水位随之

变化,在地下水位变化过程当中,其对高填方岸坡土体产生浮托力和渗透力,进而影响高填方的受力机理。

(1)浮托力

三峡库区库水位周期性变动,使库岸高填方岸坡受到水位变动的影 响,进而引起岸坡内地下水位上下变动,对岩土体产生浮托作用。浮托力对岸坡稳定性的影响不仅有破坏作用也有加强作用,浮托力的产生减小了岸坡内土体的有效重度,有效重度减小会使土体内孔隙水压力上升,正应力降低,岸坡的抗滑阻力降低^[9-10]。但随着高填方土体的有效重度减小,滑坡体引起的下滑力随之减小,有助于岸坡稳定。因此,库水位变动引起浮托力变化,浮托力对高填方岸坡起着既有破坏也有稳定的双重作用。

(2)渗透力

随着三峡大坝投入使用,库区水位在 145~175 m 时呈现周期性变化,变幅水位差高达 30 余米。如此大水位差的变化直接干扰库区两岸高填方岸坡内的渗流场。若岸坡外库水位快速下降,高填方岸坡内地下水来不及同库水位同步降落,则地下水会向岸坡外产生渗流,进而对岸坡产生渗透压力。渗透压力是对滑坡体稳定极为不利的一个因素。渗透压力的大小与浸润线形状、岩土体渗透系数、岩土体饱水面积大小及潜在滑动面等多种因素有关^[6,11]。

2 水位骤降高填方岸坡浸润线确定

三峡库区库水位下降后,填方岸坡内地下水一部分外渗,土体内孔隙水压力逐渐消散,且高填方岸坡土体密实,渗透系数较小,因此,库水位以上高填方岸坡存在一条浸润线。浸润线以上填方体处于非饱和状态,浸润线以下填方体处于饱和状态。而两种不同状态土体的饱和度不同,对土体产生的渗透压力不同。因此,确定土体内的浸润线位置可使高填方岸坡稳定性分析结果更接近工程实际。

对于浸润线计算公式,文献[12-13]通过在已有公式基础上简化得到库水位等速下降时岸坡内浸润线的简化计算公式。其表达式为:

$$h_{x,t} = \begin{cases} h_{0,0} - V_0 t (0.109 1\lambda^4 - 0.750 1\lambda^3 + \\ 1.928 3\lambda^2 - 2.231 9\lambda + 1) & (0 \leq \lambda < 2) \\ h_{0,0} & \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{\mu}{kh_m t}} \quad (2)$$

式中, k 为渗透系数(m/d); h_m 为含水层的平均厚度(m); μ 为给水度; t 为库水位下降时间(d); $h_{0,0}$ 为库水位下降前的水位(m)。

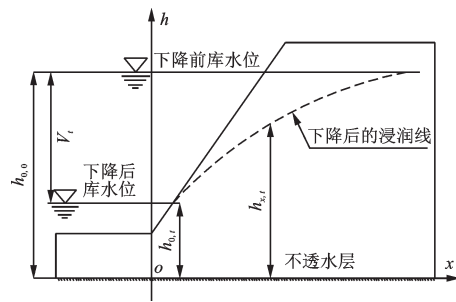


图1 岸坡内浸润线位置

Fig.1 Location map of infiltration line in slope

对坐落于三峡库区河谷滩地上的高填方岸坡,其下部坐落在裸露的河床基岩上,基岩面近似于平面,为不透水层,其含水层厚度计算公式为^[13]:

$$h_m = \frac{2}{3} h + Z \quad (3)$$

式中, h 为库水位下降高度(m); Z 为浸润线出水点到基岩不透水层的距离(m)。

根据国内外砂砾土和黏性土的试验资料,分析求得给水度的经验公式为^[13]:

$$\mu = 1.137n(0.000 1175)^{0.067(6+\lg k)} \quad (4)$$

式中, n 为孔隙率; k 为渗透系数(cm/s)。

3 水位聚降对高填方岸坡稳定性分析

目前岸坡稳定性分析方法主要有:极限平衡法、有限差分法、有限元法。其中极限平衡法是一种定量的分析方法,也是工程中使用最多,最成熟的方法,有瑞典圆弧法、Fellenius法、Bishop法、Janbu法、Spencer法、Morgenstern-Price法、Sarnia法、不平衡推力传递法等。其中不平衡推力法是我国工程技术人员创造的一种实用滑坡稳定分析方法。由于不平衡推力法适用于任意形状滑动面,并且计

算简单、利于手算,我国很多规范和手册都推荐使用。本文考虑岸坡上部水重,并结合不平衡推力法和有限元数值模拟的方法进行高填方岸坡稳定性分析。

对于高填方岸坡上部存在作业平台,则条块会受到上部流动荷载、堆货荷载等的作用,如图2中abcd条块区域,这时假定条块间的作用力方向与上一条块的滑面方向平行,如图3所示。

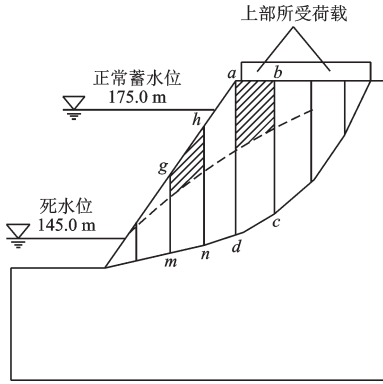


图2 不平衡推力法计算简图
Fig.2 Calculation diagram of unbalanced thrust method

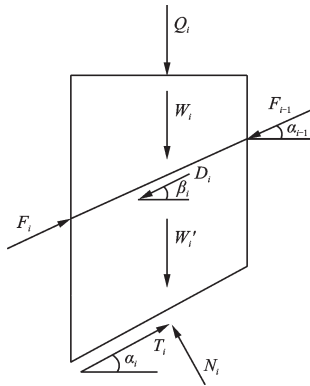


图3 荷载作用下受力分析
Fig.3 Force analysis under load

若条块上部为岸坡,如图2中hgmn条块区域,则条块上部无外荷载的作用,可以去除上部荷载 Q_i ,若岸坡上部存在水重,则需要加上水重,计算时将 Q_i 改为上部水重 W_w ,如图4所示。在图3和图4中 F_{i-1} 为第 $i-1$ 滑块剩余下滑力, F_i 为第 i 滑块剩余下滑力,用渗透压力 D_i 取代土条中的水重及周岸静水压力。由条块的静力平衡条件得^[13-15]:

$$N_i = (W_i + W_i' + Q_i) \cos \alpha_i - D_i \sin(\alpha_i - \beta_i) + F_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (5)$$

$$T_i = (Q_i + W_i + W_i') \sin \alpha_i + D_i \cos(\alpha_i - \beta_i) + F_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - F_i \quad (6)$$

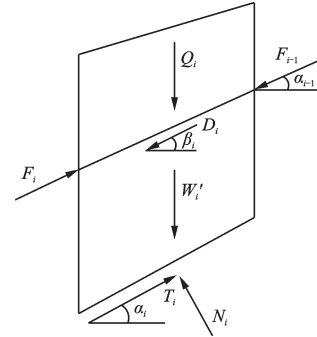


图4 无荷载作用下受力分析
Fig.4 Force analysis without load

其中抗滑力 T_i 又可由摩尔库仑准则得:

$$T_i = \frac{c_i l_i + N_i \tan \varphi_i}{F_s} \quad (7)$$

$$F_i = [(Q_i + W_i + W_i') \sin \alpha_i + D_i \cos(\alpha_i - \beta_i)] - \left\{ c_i l_i + [(Q_i + W_i + W_i') \cos \alpha_i - D_i \sin(\alpha_i - \beta_i)] \tan \varphi_i \right\} / F_s + F_{i-1} \psi_{i-1} \quad (8)$$

而(8)式中传递系数和渗透压力为:

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i}{F_s} \quad (9)$$

$$D_i = \gamma_w h_w l_i \cos \alpha_i \sin \beta_i \quad (10)$$

式中, W_i 为第 i 块滑块浸润线以上土体重量(kN); W_i' 为第 i 块滑块浸润线以下土体饱和重量(kN); α_{i-1} 为第 $i-1$ 块滑块的滑面与水平面的夹角($^\circ$); D_i 为第 i 滑块中的渗透压力(kN); β_i 为第 i 滑块中渗透压力与水平面的夹角($^\circ$); N_i 为第 i 滑块滑面的有效法向反力(kN); T_i 为第 i 滑块滑面的抗滑力(kN)。

式(8)的解法有两种,即隐式解法和显式解法^[16]。本文采用隐式解法,该方法通过迭代求解。从图3和图4可以看到,填方体滑坡体顶部第一块土条的下滑力 F_{i-1} ,计算时假设第一块条块的 $F_{i-1}=0$,再依次从第1块土条开始计算下滑力 F_i ,再计算第2块土条在第一块土体作用下的不平衡下滑推力,依次类推计算到第 i 块,如果该土条在原有荷载及推力作用下,求得的推力 F_i 刚好为零,则满足要求,否则调整 F_{i-1} 的值按上述步骤重新迭代计算。直到第 i 块土条的 $F_i \leq 0$ 时满足要求,停止计算。

4 案例分析

位于三峡库区内某高填方岸坡高桩码头,其填方高度约34 m,上部平台所受荷载约为40 kPa,填

方土体孔隙率为 0.28, 土体渗透系数为 5.17×10^{-3} m/s, 嵌入高填方岸坡里的高桩码头桩基直径为 1.6 m。根据三峡水库调控方案, 三峡水库正常蓄水后, 每年 11 月到次年 2 月为枯水期, 库水位从 175 m 降至 145 m 时, 降速约为 1.2~2 m/d。高填方岸坡计算简图如图 5 所示, 岸坡土体其它参数见表 1。

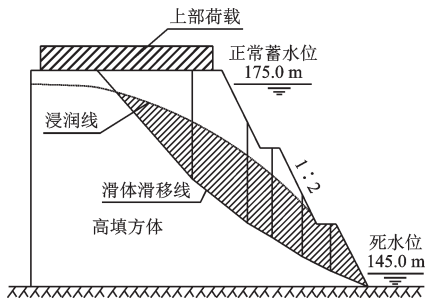


图 5 高填方岸坡计算简图

Fig.5 High filled slope calculation diagram

表 1 岸坡土工参数

Table 1 Bank slope geotechnical parameters

参数	非饱和土体	饱和土体
c/kPa	56	48
$\varphi/(\text{°})$	35	28
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	19.8	20.2
E/MPa	45	43
ν	0.25	0.25

4.1 不平衡推力法

采用不平衡推力法对高填方岸坡进行计算分析, 存在以下三种工况: 工况 1 只考虑高填方岸坡自重和上部荷载; 工况 2 在工况 1 下考虑库水位处于 175 m 时岸坡上部水重; 工况 3 在工况 1 下考虑库水位以 2 m/d 的速度从 175 m 水位骤降到 145 m, 其中考虑岸坡上部剩余水重。

根据浸润线计算式(1), 可得高填方岸坡的浸润线方程, 其方程为:

$$h_{x,1} = \begin{cases} 32 - 1.16 \times 10^{-4} x^4 + 4.40 \times 10^{-3} x^3 - \\ \quad 6.28 \times 10^{-2} x^2 + 0.4026x \quad (0 \leq x < 2) \\ 32 \end{cases}$$

通过浸润线方程得到浸润线位置, 然后采用不平衡推力法隐式解法, 通过式(8)迭代求得最后坡脚最后一块滑块剩余下滑推力 F_i 。最后得到高填方

岸坡在三种工况下的稳定系数和剩余下滑推力。此高填方岸坡为一级永久边坡工程, 根据《建筑边坡工程技术规范》^[17], 其岸坡工程安全系数取 1.35。计算结果见表 2。

表 2 稳定系数及剩余下滑推力

Table 2 Stability coefficient and residual slip thrust

参数	工况		
	1	2	3
稳定系数	1.41	1.33	1.26
剩余下滑推力/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	-24.98	28.58	9.65

工况 1 只考虑高填方岸坡自重和上部荷载的作用, 其土体参数取压实过后非饱和土体状态参数, 计算得到岸坡土体剩余下滑推力为 -24.98 kN/m, 即 $F_n < 0$, 且求出的稳定系数大于安全系数, 因此, 高填方岸坡处于稳定状态; 工况 2 土体受到库水位的影响, 其中位于浸润线以下的土体取饱和状态土体参数; 相对于工况 1, 工况 2 的稳定系数较小, 剩余下滑推力 $F_n > 0$, 稳定系数小于且接近安全系数, 岸坡处于临界状态。表明库区水位为 175 m 不变时, 高填方岸坡内土体性质有一定程度改变, 使得岸坡稳定系数降低, 稳定性下降; 工况 3 相对于工况 2, 库区水位出现了以 2 m/d 的下降速度从 175 m 骤降至 145 m, 高填方岸坡内地下水外渗, 渗流对坡体产生渗透压力, 岸坡剩余下滑推力 $F_n > 0$, 稳定系数相对于工况 2 没有水位下降的情况下进一步减小, 岸坡出现破坏; 因此, 库水位骤降过程中, 岸坡土体的粘聚力和内摩擦角减小, 抗剪强度降低, 且坡体内水力梯度增大, 渗透压力增加, 高填方岸坡稳定性下降。

4.2 有限元分析

利用 ABAQUS 有限元软件, 采用强度折减法对第三种工况下高填方岸坡及其在高桩码头桩基作用下的稳定性分析。

(1) 在高填方岸坡没有桩基作用的情况下, 高填方岸坡有限元分析结果如图 6~9 所示。

由图 6 可以看到, 库水位以 2 m/d 的速度从 175 m 骤降至 145 m 过程中, 塑性应变主要发生在接近坡脚处, 为滑坡的剪出口, 塑性应变区沿着滑带向上至填方平台以下约 5 m 位置处。由图 7~8 可以看出, 高填方岸坡滑坡的滑移面位置, 且在 x 方向

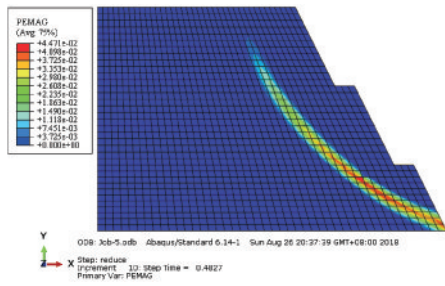


图6 塑性应变等值线

Fig.6 Plastic strain contour map

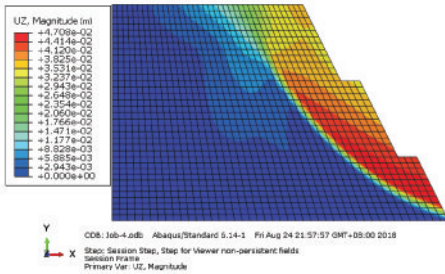


图7 增量位移云图

Fig.7 Displacement contour map

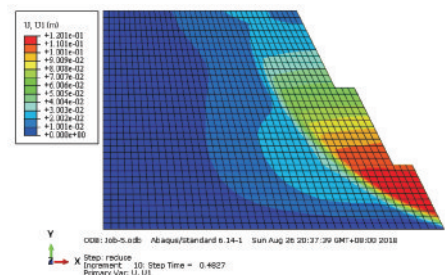


图8 U_1 位移等值线

Fig.8 U_1 displacement contour map

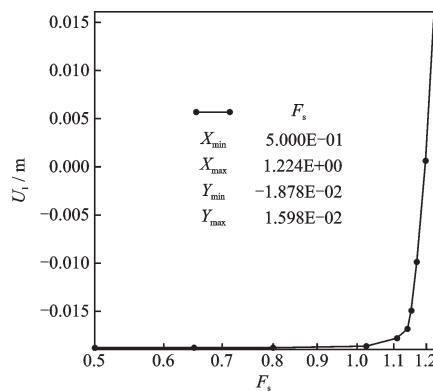


图9 无桩作用时 F_s 与 U_1 的关系曲线

Fig.9 The relationship between F_s and U_1 curve without piles

的位移最大出现在接近坡脚的位置,而坡顶在 x 方向的位移为零,坡顶处主要是 y 方向的位移。由图9得到库水位骤降后岸坡的稳定系数为1.224,与岸坡

安全系数1.35相差较大,岸坡出现破坏。

(2)在高桩码头桩基的作用下,高填方岸坡有有限元分析结果如图10~13所示。由图10可以看出,库水位骤降过程中,塑性应变区出现在第一根桩基后缘处和两桩之间的岸坡位置处,塑性应变范围小,与无桩情况下岸坡塑性应变相比,有桩情况下塑性应变基本在两桩之间岸坡的浅层区域。因此,桩基会减小高填方岸坡的塑性形变,增强岸坡的稳定性。图11~12分析得到,在有桩的作用下,高填方岸坡的总位移最大出现在坡顶位置处,在 x 方向

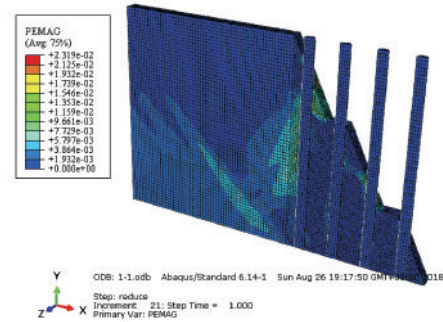


图10 塑性应变等值线

Fig.10 Plastic strain contour map

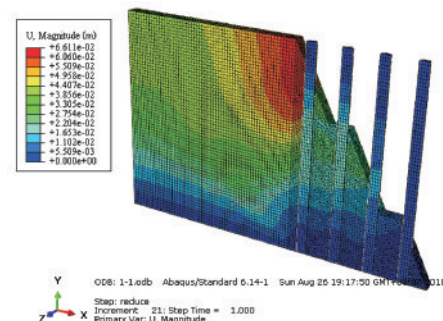


图11 位移等值线

Fig.11 Displacement contour map

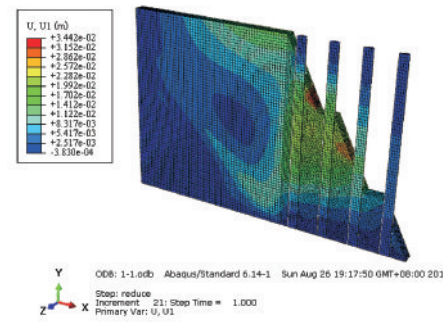


图12 U_1 位移等值线

Fig.12 U_1 displacement contour map

的最大位移基本上出现在两桩之间的岸坡处,坡顶处位移量较小。从图 13 中得到此时的岸坡稳定系数最大为 2.0,比岸坡安全系数 1.35 大了 48.2%,岸坡处于稳定状态。因此,在库水位骤降过程中,高桩码头桩基对岸坡起着较大的加固作用,增强了高填方岸坡的稳定性。

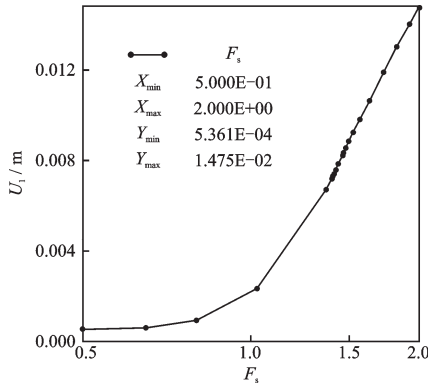


图 13 有桩作用时 F_s 与 U_1 的关系曲线

Fig.13 The relationship between F_s and U_1 curve with piles

4.3 两种方法计算结果对比分析

由表 3 可见,高填方岸坡只有在工况 1 和工况 3 有桩基作用的情况下坡体稳定系数大于安全系数,岸坡处于稳定状态。在工况 3 无桩的情况下,两种方法得到的岸坡稳定系数比较接近,但都小于岸坡的安全系数,岸坡发生破坏。而在有桩的情况下,岸坡的稳定系数达到了 2.0,远大于无桩情况下的岸坡稳定系数,比工况 3 求得的岸坡稳定系数 1.25 提高了 60%,比岸坡安全系数 1.35 大 48.2%,岸坡处于稳定状态。经过对比分析,可以得出库水位骤降过程中,填方土体参数发生变化,抗剪强度降低,高填方岸坡稳定性下降。而高桩码头的桩基在库水位骤降过程中提高了岸坡的稳定性,对岸坡加固作用非常显著。

表 3 两种方法求出的稳定系数

Table 3 The stability coefficients obtained by two methods

分析方法 工况	不平衡推力法	有限元法	
		无桩	有桩
工况 1	1.41	—	—
工况 2	1.32	—	—
工况 3	1.25	1.224	2.0

5 结 论

简述了库水位变动对高填方岸坡的影响,并通过不平衡推力法和 ABAQUS 有限元强度折减法对库水位骤降下高填方岸坡与桩基作用下高填方岸坡的稳定性分析,得到以下结论:

(1) 三峡库区库水位为 175 m 时,高填方岸坡稳定系数与安全系数较为接近,可能出现破坏;库水位从 175 m 骤降到 145 m 时,岸坡稳定系数进一步减小,岸坡出现破坏。这说明地下水存在,岸坡内孔隙水压力增加,土体抗剪强度降低,岸坡稳定性下降;而库水位骤降时,高填方岸坡内地下水外渗产生渗透压力,岸坡下滑推力增大,导致稳定性进一步降低。

(2) 高桩码头桩基作用下高填方岸坡的稳定性增加,岸坡稳定系数达到了 2.0,大于岸坡安全系数 1.35;且岸坡塑性应变基本位于两桩之间的小范围岸坡,岸坡处于稳定状态。而无桩作用下高填方岸坡的稳定系数为 1.224,小于岸坡的安全系数 1.35,更小于有桩岸坡的安全系数 2.0,此时,岸坡出现破坏。因此,高桩码头的桩基对高填方岸坡起着非常显著的加固作用,增强了岸坡稳定性。

参考文献:

- [1] 刘 宏. 四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究[J]. 地球与环境, 2005, 33(增1): 133-135.
Liu H. A systematic research on the deformation and stability of high embankment of jiuzhai-huanglong airport, Sichuan China[J]. Earth and Environment, 2005, 33(Sup1): 133-135. (in Chinese)
- [2] 朱才辉, 李 宁, 刘明振, 等. 吕梁机场黄土高填方地基工后沉降规律分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 293-301.
Zhu C H, Li N, Liu M Zh, et al. Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of Luliang Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 293-301. (in Chinese)
- [3] 吴 屹. 巴中机场五显庙深切沟谷高填方边坡稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
Wu Y. Research on the stability of the high embankment slope of Wu Xian Miao deep valley at Bazhong airport[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)

- [4] 李 达. 持续强降雨条件下超高填方边坡稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
Li D. The deterioration law of mechanical characteristic for silty clay under the action of wetting and drying cycles and its application in slope stability analysis [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [5] 贾 颖. 贵州省山区高速公路高填方路基变形规律及设计标准研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
Jia Y. Research of law and design standard of high fill-back embankment deformation in the mountainous area of Guizhou[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (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 C H, Chen C X, Feng X T, 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] 曾 铃, 史振宁, 付宏渊, 等. 降雨入渗对边坡暂态饱和区分布特征的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1): 25-34.
Zeng L, Shi Zh N, Fu H Y, et al. Influence of rainfall infiltration on distribution characteristics of slope transient saturated zone [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(1): 25-34. (in Chinese)
- [8] 邓华锋, 李建林. 库水位变化对库岸边坡变形稳定的影响机理研究[J]. 水利学报, 2014, 45(增2): 45-51.
Deng H F, Li J L. Research on the influence mechanism of water level fluctuation on the bank landslide deformation and stability [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(Sup2): 45-51. (in Chinese)
- [9] 刘新喜, 夏元友, 练 操, 等. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1 427-1 431.
Liu X X, Xia Y Y, Lian C, et al. Research on method of landslide stability valuation during sudden drawdown of reservoir level [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1 427-1 431. (in Chinese)
- [10] 周春梅, 赵子鹏, 鲁 阳. 含水量对滑带土强度变形参数及滑坡稳定性的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 213-219.
Zhou Ch M, Zhao Z P, Lu Y. The influence of water content on strength and deformation parameters of sliding zone and slope stability [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 26(9): 213-219. (in Chinese)
- [11] 梁学战, 陈洪凯. 库水位升降条件下不同渗透性的滑坡体稳定性变化规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(4): 20-26.
Liang X Zh, Chen H K. Stability variation of landslide with different permeability coefficient following reservoir water level fluctuation [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(4): 20-26. (in Chinese)
- [12] 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 W M, Zheng Y R. Analysis on stability of landslide during reservoir drawdown [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 76-80. (in Chinese)
- [13] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3 203-3 210.
Zheng Y R, Shi W M, Kong W X. Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3 203-3 210. (in Chinese)
- [14] 齐明柱. 不平衡推力法在滑坡治理工程中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2): 34-38.
Qi M Zh. Application of imbalance thrust force method in the remedy of landslide [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(2): 34-38. (in Chinese)
- [15] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明. 边坡稳定不平衡推力法的精度分析及其使用条件[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 313-317.
Shi W M, Zheng Y R, Tang B M. Accuracy and application range of imbalance thrust force method for slope stability analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 313-317. (in Chinese)
- [16] 郑颖人, 时卫民. 不平衡推力法使用中应注意的问题[J]. 重庆建筑, 2004(2): 6-8.
Zheng Y R, Shi W M. Attentive questions in using imbalance thrust fore method [J]. Chongqing Architecture, 2004(2): 6-8. (in Chinese)
- [17] 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)

(本文责编: 赵 霞)