

施工期临时断面挡水渡汛对于 面板坝坝坡稳定的影响研究

郭永吉¹, 崔自力², 王志杰³

(1. 宝鸡市水利水电规划勘测设计院, 陕西 宝鸡 721000; 2. 陕西水环境工程勘测设计研究院,
陕西 西安 710018; 3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 面板堆石坝施工期采用临时断面挡水度汛方案时, 由于临时断面上游尚未施工混凝土面板, 因此临时断面的大部分区域及坝基材料将处于饱和状态, 这种状态有可能对大坝竣工期的坝坡稳定产生某种影响。为研究临时断面挡水度汛对于大坝竣工期坝坡稳定的影响, 本文结合一工程实例, 首先采用有限元法进行了临时断面挡水度汛情况下的渗流分析, 然后采用非线性有限元法对临时断面是否挡水度汛两种情况下大坝竣工期的坝坡稳定性进行了比较研究。结果表明: 采用临时断面挡水度汛施工方案对于大坝竣工期上游坝坡抗滑稳定的影响要大于对于下游坝坡的影响, 但其影响是有限的。

关键词: 面板堆石坝; 临时断面; 挡水度汛; 竣工期; 坝坡稳定

中图分类号: TV641.43 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2012)04-0051-05

Study on the influence of temporary section of retaining dike for flood protection on the dam slope stability of CFRD during construction period

GUO Yongji¹, CUI Zili², WANG Zhijie³

(1. Baoji Planning Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Baoji 721000, China;
2. Shaanxi Reconnaissance Design & Research Institute of Water Environmental Engineering, Xi'an 710018, China;
3. Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: When using the temporary section of retaining dike for flood protection during the face rockfill dam construction, lacking of concrete panel construction in upstream will lead to a saturation state of most area on temporary section and dam foundation material, which would affect the stability of dam slope when the dam is completed. To study the effect of temporary section of retaining dike for flood protection on stability of CFRD, combining with the Hongjiadu concrete face rock-fill dam project, the paper analyzed the seepage under temporary section of retaining dike for flood protection by finite element method, and studied the dam slope stability in the two situations that whether temporary section retains flood or not by using nonlinear finite element method. The result showed that the impact of using temporary section for flood protection on the upstream dam slope stability against sliding will be more than the impact of that on downstream dam slope, while the impact was limited.

Key words: CFRD; temporary cross-section; retaining dike; completion period; dam slope stability

随着面板堆石坝高度越来越大, 坝体填筑方量也相应越来越大, 为加快施工进度, 并节省导流工程投资, 目前越来越多的面板堆石坝工程研究采用临时断面挡水度汛的施工方案^[1-3]。但由于这种施工方案往往是在临时断面上游尚未施工混凝土面板的情况下进行临时挡水度汛, 因此, 相较于未采用临时断面挡水度汛的正常施工方案, 该施工方案将使

得临时断面的大部分区域及坝基材料处于饱和状态, 进而可能对大坝填筑到顶即大坝竣工期的坝坡稳定性产生某种影响^[4-5]。本文拟结合一工程实例, 首先采用三维有限元法进行临时断面挡水度汛情况下的渗流分析, 然后采用非线性有限元法对临时断面是否挡水度汛两种情况下大坝竣工期的坝坡稳定性进行比较研究, 以探讨临时断面挡水度汛对

收稿日期: 2011-12-29; 修回日期: 2012-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779051)

作者简介: 郭永吉(1963-), 男, 陕西宝鸡人, 高级工程师, 主要从事水利水电工程设计与研究。

通讯作者: 王志杰(1987-), 男, 陕西延安人, 在读硕士, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

于面板堆石坝大坝竣工期坝坡稳定的影响规律。

1 计算原理与计算方法

1.1 挡水度汛临时断面的渗流有限元分析

面板堆石坝采用临时断面挡水度汛施工方案时,一般根据度汛洪水标准及导流建筑物的泄水能力,经综合分析,设计确定一个具有一定高度的临时堆石坝体断面来迎挡超过导流建筑物泄水能力的洪水。在挡水以前,临时断面上游尚未施工混凝土面板,一般按规范要求^[6],在满足临时断面抗滑稳定及渗透稳定的前提下,只是在垫层区的上游坡面实施较小厚度的喷混凝土或水泥砂浆层等固坡措施,而度汛历时往往较长,因此,挡水度汛临时断面一般可以形成稳定渗流。根据本文所研究问题的性质,将挡水度汛的临时断面视作一斜墙坝,主要进行其稳定渗流的计算。假定水和土是不可压缩的,对于各向同性土体,稳定渗流的基本方程为^[7-8]:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中: h 为渗流水头; x, y, z 为三向坐标。

对于本文所述的临时堆石坝体的稳定渗流计算,式(1)求解的边界条件包括:已知水头边界和已知流量边界。本文基于渗流场与温度场计算原理的相似性,通过对计算参数的相似代换,采用 ADINA 通用有限元软件中的温度场计算模块实施临时堆石坝体断面的稳定渗流有限元计算。

1.2 材料本构模型及非线性问题求解方法

面板堆石坝坝体主要材料构成有垫层区、过渡层区、主堆石区及次堆石区等。研究表明,这些材料具有明显的非线性变形特征^[8]。目前,国内外在进行面板堆石坝应力变形研究时,大多采用非线性弹性的邓肯-张 E-B 模型。邓肯-张 E-B 模型的基本原理如下^[8-9]:

假定材料为非线性弹性体。应力增量与应变增量的关系写成如下基本方程式:

$$\{\Delta\sigma\} = [D]_t \{\Delta\varepsilon\} \quad (2)$$

式中: $[D]_t$ 称作切线模量矩阵,其矩阵元素为切线弹性模量 E_t 和切线体积模量 B_t 的函数。切线弹性模量 E_t 的表达式为:

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin\varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 \quad (3)$$

切线体积模量 B_t 的表达式为:

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (4)$$

土石料的内摩擦角统一采用下式计算:

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (5)$$

式(3)~式(5)中: c, ϕ, R_f, K, n, D, G 和 F 为可由常规三轴试验确定的材料参数; p_a 为大气压力, σ_1, σ_3 分别为大、小主应力。

由于 E_t, B_t 与应力状态 (σ_1, σ_3) 有关,因此式(2)所示的基本方程式为非线性方程组。本文采用能较好地模拟面板坝分级加载特性的中点增量法进行该方程组的求解。中点增量法的基本计算式为^[9,12]:

$$\begin{cases} [K]_i \{\Delta\delta\}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{\{\Delta R\}_{i+1}}{2} \\ [K]_{i+\frac{1}{2}} \{\Delta\delta\}_{i+1} = \{\Delta R\}_{i+1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\Delta\delta\}$ 为位移增量向量; $\{\Delta R\}$ 为荷载增量向量; i 为荷载级,其中 $i+1/2$ 表示第 i 级与第 $i+1$ 级的中间(平均)荷载。

1.3 坝体填筑过程的模拟

面板堆石坝坝体一般均采用分层填筑、碾压的的施工过程,因此,坝体填筑过程应采用分级加载的方式进行模拟。本文运用 ADINA 有限元通用软件实施大坝应力变形的三维有限元计算。该软件可以通过时间定义单元的“生死”,针对坝体分层填筑的施工安排,通过时间函数、时间步、单元生死的联合设置,可以准确地模拟面板堆石坝分层填筑的施工过程。在 ADINA 中,假定新填筑堆石体为超固结状态,采用前期最大固结压力计算初始弹性常数的方法来确定填筑层的初始应力状态。因为对于每一级新填筑堆石体,总是经过碾压的,碾压后的填筑层处于超固结状态,考虑到应力历史的影响,用前期固结压力计算初始弹性常数是基本合理的。

1.4 坝坡稳定分析方法

面板坝的坝坡稳定分析目前大多采用刚体极限平衡法^[6,14]。但刚体极限平衡法人为把潜在滑动面上的滑移体划分为刚性条块,并且引入了种种人为的假定,不能考虑堆石料的实际应力变形状态,也不能考虑高应力状态下堆石料抗剪强度的非线性特征,因此导致其结果往往偏于保守。本文拟基于坝体应力有限元计算结果,采用应力结合滑动面法进行坝坡稳定分析。其主要步骤如下:

(1) 计算出整个坝体包括拟分析边坡的每一单元的应力。

(2) 根据一般经验,对于堆石坝体,假定可能的滑动面均为折线形^[11-12],基于应力变形有限元计算结果运用数学规划法,搜索确定坝坡稳定安全系数

最小的最危险滑动面。

假定任一滑动面穿过了 n 个单元,已知任一单元 i 的应力分量为 σ_{xi} 、 σ_{yi} 、 σ_{xyi} ,则该单元相对于滑动面所产生的法向应力 σ_i 和切向应力 τ_i 分别为 ($i = 1, 2, \dots, n$)^[13]:

$$\sigma_i = \frac{1}{2}(\sigma_{xi} + \sigma_{yi}) - \frac{1}{2}(\sigma_{xi} - \sigma_{yi})\cos 2\alpha_i - \tau_{xyi}\sin 2\alpha_i \quad (7)$$

$$\tau_i = \frac{1}{2}(\sigma_{xi} - \sigma_{yi})\sin 2\alpha_i - \tau_{xyi}\cos 2\alpha_i \quad (8)$$

式(7)、(8)中: α_i 为在单元 i 内滑动面中点处的切线与水平面的夹角; σ_{xi} 、 σ_{yi} 以压应力为正, τ_{xyi} 以顺时针方向为正。

假设单元 i 内滑动面的弧长为 L_i ,则任一滑动面的整体抗滑稳定安全系数为^[13]:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i L_i \tan \varphi_i + c_i L_i)}{\sum_{i=1}^n l_i L_i} \quad (9)$$

式中: φ_i 、 c_i 分别为单元的材料内摩擦角及凝聚力。

1.5 堆石料的非线性抗剪强度指标

研究表明,面板坝各区堆石料的抗剪强度指标呈现明显的非线性特性,坝坡稳定计算应计及这一特性^[14-16]。鉴于堆石料为非粘性材料,其凝聚力 $c = 0$,对于内摩擦角,本文采用式(4)来考虑其非线性特性^[14]:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/p_a) \quad (10)$$

式中: φ 为内摩擦角; φ_0 为一个大气压力下的内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为 σ_3 增加一个对数周期下 φ 的减小值; σ_3 为滑动面上的小主应力; p_a 为大气压力。

2 工程实例

2.1 工程概况

某混凝土面板堆石坝正常蓄水位 1 140 m,总库容 49.47 亿 m^3 ,工程规模为一等大(1)型。大坝(最大坝高 179.5 m)为 1 级建筑物,坝顶高程 1 147.5 m,坝顶宽 10.95 m,趾板建基面高程 968.2 m,上游坝坡坡比为 1: 1.4 下游局部坝坡坡比为 1: 1.25,加上坝后公路平均坝坡坡比为 1: 1.4。大坝标准剖面见图 1^[3]。

图中 I 期坝体为施工期临时挡水断面。其坝顶高程为 1 023 m,顶宽 40 m,上下游坡比分别为 1.4 及 1: 2.5,尾部水平段填到 980 m 高程。临时挡水断面下游坡为 1: 2.5。在汛期来临之前将临时断面填至 1 023 m 高程,并完成垫层料坡面喷 10 cm 厚聚丙烯化学纤维混凝土保护,具备拦挡 100 年一遇

洪水($Q = 5\ 210\ m^3/s$)的条件。

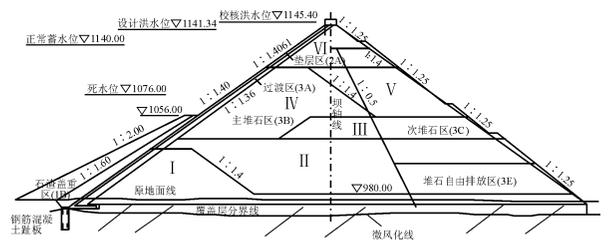


图 1 大坝标准剖面图

2.2 渗流计算模型

ADINA 的计算坐标系规定为: X 轴为顺河流方向,指向下游;Y 轴为坝轴线方向,指向左岸,取坝上游坡脚为 Y 轴零点;Z 轴为竖直方向,指向上方,与高程一致。

选取三维渗流有限元分析的范围为:坝踵向上游、坝趾向下游以及河床向下分别取一倍坝高,在竣工期坝体最大断面处沿坝轴线方向取长 50 m 的坝段。由于临时断面模型是大坝整体模型的一部分,共划分单元 40 380 个,节点 44 770 个。临时断面有限元模型见图 2。

三维渗流有限元计算的边界条件为:左、右坝肩以及底面为不透水边界,坝基上游顶面及下游顶面、上游水位以下的上游坝面及下游水位以下的下游坝面为已知的等水头边界。

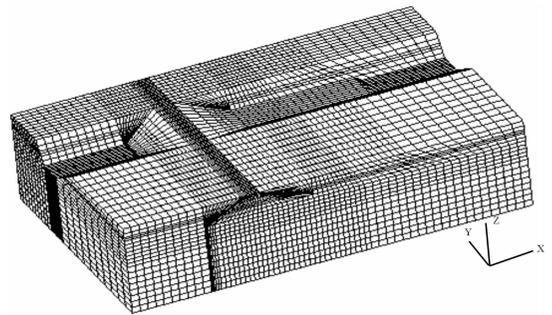


图 2 临时断面三维有限元网格图

2.3 渗流计算工况及计算参数

选取渗流计算工况为:临时断面挡水度汛期,坝前水位为 995 m,下游无水。根据设计资料^[3],并类比其它工程资料,选取坝体材料及基岩渗透系数见表 1。

表 1 坝体材料及坝基渗透系数取值表

材料	基岩	防渗帷幕	混凝土喷护、面板	垫层	过渡层	主、次堆石
渗透系数	2.2×10^{-4}	5.5×10^{-5}	1×10^{-7}	1.5×10^{-3}	3×10^{-2}	4×10^{-1}

2.4 渗流计算结果及分析

临时断面稳定渗流的计算原理见 1.1 节。本文采用 ADINA 通用有限元软件中的温度场计算模块进行临时断面稳定渗流场的三维有限元计算。采用该软件的切片功能,切取临时断面的最大剖面,得到临时断面挡水度汛期渗流水头等值线的计算结果见图 3。

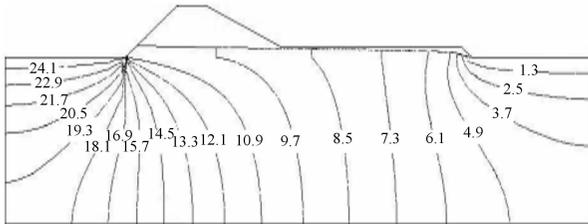


图 3 临时断面挡水度汛期渗流水头等值线图(单位:m)

由图 3 可以看出,汛期利用临时断面挡水度汛,临时断面内部浸润线经混凝土喷护层后迅速下降,逸出点在下游坡脚附近,临时断面渗透坡降主要分布在上游坝坡面附近,最大坡降达 93,小于混凝土喷护层的允许渗透坡降 ($J_{允} = 200$)。对于临时断面,在没有浇筑面板的情况下,浸润线位置较低,说明汛期在上游面喷护混凝土的临时防渗效果明显,临时断面在挡水度汛期满足渗透稳定要求。

2.5 坝坡稳定计算工况及计算参数

为研究临时断面挡水度汛对于大坝竣工期坝坡稳定的影响情况,选取计算工况如下:

工况 1:大坝竣工期(施工期未利用临时断面挡水度汛),坝体上、下游无水。

工况 2:大坝竣工期(施工期利用临时断面挡水度汛),坝体上、下游无水。

根据设计资料^[4],选取坝体材料的非线性抗剪强度指标见表 2。

2.6 坝坡稳定计算过程

坝坡稳定计算的基本过程如下:

(1)应力变形三维有限元计算。应力变形三维有限元计算原理见 1.2、1.3 节。为模拟大坝分层碾压填筑及汛期临时断面挡水的施工度汛过程,大坝分层碾压填筑共分 21 级荷载以实现逐级加载,其中,临时断面的填筑及汛期来临前的上游保护分 7

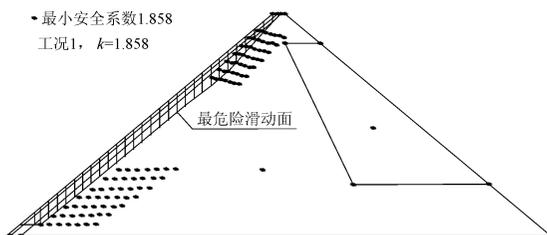


图 4 竣工期上游坝坡最危险滑动面计算结果图

级荷载步,度汛后至坝顶的填筑分 11 级荷载步,混凝土面板浇筑分 3 级荷载步。挡水度汛过程分 5 级荷载步,水位上升期为 3 级荷载步,水位降落期为 2 级荷载步。其中,挡水度汛时的水荷载以水压力的方式加载和卸载。

表 2 坝体材料非线性抗剪强度指标表 $\text{kN/m}^3, \text{kPa}, (^\circ)$

指标	混凝土	垫层料	过渡料	主堆石料	次堆石料
密度	干样	24.50	22.05	21.90	21.81
	饱和	24.50	23.66	23.55	23.48
非线性抗剪强度指标	c 干样	10000	0	0	0
	饱和	10000	0	0	0
φ_0	干样	0	52	53	53
	饱和	0	47	46	51
$\Delta\varphi$	干样	0	10	9	9
	饱和	0	6.7	4.7	8.3

计算时,对于工况 2,假定大坝竣工期时,原临时断面浸润线以下的坝料仍处于饱和状态,采用饱和样的抗剪强度指标;原临时断面浸润线以上的坝料与工况 1 相同,均采用干样的抗剪强度指标。

(2)坝坡稳定计算。基于上述应力变形三维有限元计算结果,提取大坝标准剖面上的各个应力分量及主应力,然后按照 1.4、1.5 节所述方法,运用数学规划法,搜索确定坝坡稳定安全系数最小的最危险滑动面及其相应的抗滑稳定安全系数。

2.7 坝坡稳定计算结果及分析

按照上述计算过程,得到两种工况下大坝竣工期的坝坡稳定最小稳定安全系数计算结果见表 3。工况 1 上、下游坝坡最危险滑动面计算结果见图 4~图 5,工况 2 上、下游坝坡最危险滑动面计算结果图 6~图 7。

表 3 坝坡稳定计算结果表

工况	计算位置	计算最小安全系数 k	规范规定最小安全系数
大坝竣工期(施工期末利用临时断面挡水度汛)	上游坝坡	1.858	1.3
大坝竣工期(施工期末利用临时断面挡水度汛)	下游坝坡	1.826	1.3
大坝竣工期(施工期利用临时断面挡水度汛)	上游坝坡	1.665	1.3
大坝竣工期(施工期利用临时断面挡水度汛)	下游坝坡	1.752	1.3

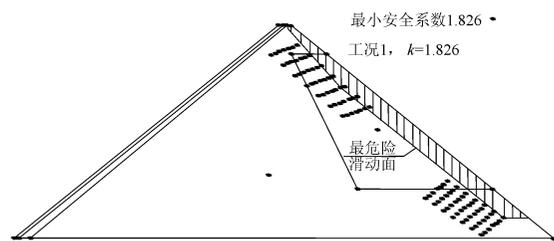


图 5 竣工期下游坝坡最危险滑动面计算结果图

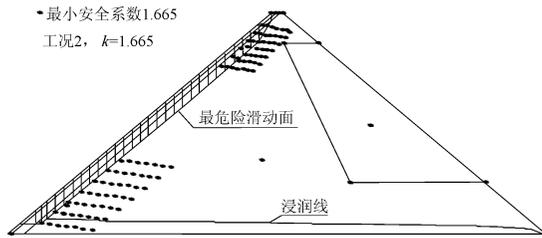


图6 竣工期上游坝坡最危险滑动面计算结果图

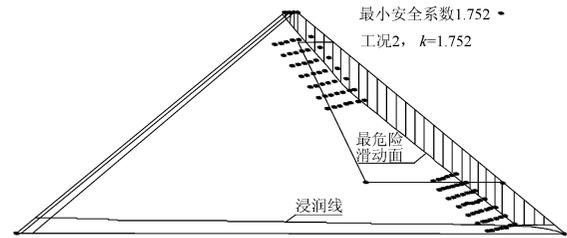


图7 竣工期下游坝坡最危险滑动面计算结果图

由表3及图4~图7可以看出,对于本工程实例,两种工况大坝竣工期的坝坡稳定均是满足规范要求的。对于施工期利用临时断面挡水度汛情况(工况2)而言,由于临时断面曾经挡水度汛,临时断面材料相当于经历了一次预加载,到竣工期时,临时断面的各应力分量均不同程度会有所减小;另外,临时断面曾经挡水度汛,将使其部分区域处于饱和状态,进而使得其抗剪强度相应减小。受这两个方面因素的影响,工况2大坝竣工期上、下游坝坡的抗滑稳定安全系数均略小于工况1的相应安全系数,因此,采用临时断面挡水度汛施工方案对于大坝竣工期坝坡稳定的影响的确是存在的。但将两个工况坝坡稳定最小安全系数进行比较可以发现,工况2上游坝坡的最小稳定安全系数比工况1减小10.4%,下游坝坡的最小稳定安全系数比工况1减小4.1%,由此说明,采用临时断面挡水度汛施工方案,对于大坝竣工期上游坝坡抗滑稳定的影响要大于对于下游坝坡的影响,但其影响均是有限的。

3 结 语

本文结合工程实例,采用三维有限元法进行了临时断面挡水度汛情况下的渗流分析,采用非线性有限元法对临时断面是否挡水度汛两种情况下大坝竣工期的坝坡稳定性进行了比较研究。结果表明,采用临时断面挡水度汛施工方案对于大坝竣工期坝坡稳定的影响的确是存在的;而且,采用临时断面挡水度汛施工方案,对于竣工期上游坝坡抗滑稳定的影响要大于对于下游坝坡的影响;但其影响是有限的,对本工程实例而言,其影响不会导致坝坡抗滑失稳。但在工程实际中,若采用临时断面挡水度汛施工方案,对上游坝坡的抗滑稳定性予以特别关注是必要的,对某些重要工程甚至可以在上游坝坡采取适宜的增稳措施。

参考文献:

- [1] 蒋国澄. 中国的混凝土面板堆石坝[J]. 水力发电学报, 1994, 13(3): 67-78.
- [2] 曹克明, 汪易森, 徐建军, 等. 混凝土面板堆石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. 12.
- [3] 王柏乐. 中国当代土石坝工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [4] 蒋国澄. 中国混凝土面板堆石坝20年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. 1-25.
- [5] 崔自力, 王瑞骏, 付国栋, 等. 临时断面挡水度汛对面板堆石坝应力变形的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(2): 132-136.
- [6] SL228-98. 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 中华人民共和国水利部. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [7] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1998. 44-74.
- [8] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. 69-81.
- [9] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. 302-339.
- [10] 殷宗泽. 高土石坝的应力与变形[J]. 岩土工程学报, 2009, 51(1): 1-14.
- [11] 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. 48-93.
- [12] 王勤成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 38-258.
- [13] 王宏硕. 水工建筑物专题部分[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991. 240-250.
- [14] SJ274-2001. 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. 36-42.
- [15] 郇能惠. 高面板堆石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. 1-25.
- [16] 张葛, 王瑞骏, 付国栋, 等. 基于非线性抗剪强度指标的面板堆石坝坝坡稳定有限元分析及应力变形分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 123-127.