

软岩料填筑面板堆石坝湿化变形分析

王刚¹, 王瑞骏¹, 陈前玲², 崔自力², 陈寒¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西水环境工程勘测设计研究院, 陕西 西安 710021)

摘要: 结合一工程实例, 基于改进的湿化变形计算模型, 采用邓肯-张 E-B 本构模型和有限元分析方法, 研究软岩料的湿化变形对堆石体及面板应力变形的影响。结果表明: 由于软岩堆石料湿化变形的影响, 坝体整体沉降增加, 并发生向下游的水平位移, 面板的挠度增大, 面板的压应力增量增大, 对面板的应力变形产生了不利影响。

关键词: 软岩堆石料; 湿化变形; 初应变; 有限元;

中图分类号: TV641.43

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)01-0135-04

Wetting deformation of concrete faced rockfill dam filled by soft-rock material

WANG Gang¹, WANG Ruijun¹, CHEN Qianling², CUI Zili², CHEN Han¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Reconnaissance Design & Research institute of Water Environmental Engineering, Xi'an 710021, China)

Abstract: Combined with a project case, based on the improved calculation model for wetting deformation, Duncan - Chang E - B model was adopted to simulate the rockfill embankment. This paper studied the effects of wetting deformations upon rock - fill and face slab of CFRD. The research results indicated that the effect of rockfill material wetting deformations made the dam embankment settlement increases, and the increment of face slab pressure stress was so large that an unfavorable effect upon the face slab stress deformation was generated.

Key words: soft rock materials; wetting deformation; initial strain; finite element method (FEM)

湿化变形是土石料由天然风干状态浸水至饱和时, 由于被水润滑和颗粒中矿物浸水软化, 骨架中颗粒相互滑移、破碎和重新排列而引起的变形^[1]。它与土石料本身的性质有关, 如矿物成分、颗粒级配、密实度和初始含水量等。堆石料的湿化变形是影响面板堆石坝安全的重要因素之一^[2]。

软岩料由于其物理力学特性, 其湿化特征则更加明显。软岩一般软化系数较小, 即浸水饱和后强度损失较大, 有时只剩下干燥状态的 20% ~ 30%。同时, 试验研究表明^[3], 软岩料的湿化变形也较大, 其主要特征是软岩料的湿化轴向变形随小主应力的增大而增加。在同一周围压力下, 应力水平愈高, 湿化轴向变形愈大。因此, 针对软岩料填筑面板堆石坝进行湿化变形分析是十分必要的。

本文针对软岩料填筑面板堆石坝, 首先进行了湿化变形的分析, 然后根据湿化变形计算模型, 在已有的三维非线性应力应变分析程序 TOSS 中编制相关的湿化程序, 并结合一工程实例, 进行了大坝应力变形有限元计算, 根据计算结果, 分析探讨了坝料湿

化变形对大坝应力变形的影响规律。

1 湿化变形分析原理及计算方法

1.1 湿化变形计算原理

湿化变形是在应力状态不变的情况下土料由于干变湿所产生的, 计算原理是将浸水部分的堆石体先假想受到约束, 不产生变形^[5]。图 1 给出了单元湿化应力状态的变化。在浸水前单元应力状态为 σ_d , 假想将单元从堆石体中脱离出来, 设定单元边界上的一系列的力为 P_d , 再假想一刚臂施加于堆石体单元, 将堆石体单元浸水饱和, 湿化使单元应变有变化的可能, 但假想的刚臂阻止了这种变形。

以 σ_s 和 P_s 分别代表浸水后应力状态及刚臂施加于单元的力, 则浸水前后浸水湿化引起的松弛应力为 $\sigma_s - \sigma_d$, 作用力的改变量为 $P_s - P_d$ 。由于刚臂是假想的, 在单元饱和后, 需卸除刚臂。施加与作用力 $P_s - P_d$ 大小相等且方向相反的结点力 F 于单元堆石体上, 来抵消刚臂在浸水过程中对堆石体单元的假想约束作用, 从而达到卸除刚臂的目的。堆石体单元在力的作

用下将会产生变形,即为单元浸水过程的自然变形。此结点力 F 为浸水变形的等效结点力。

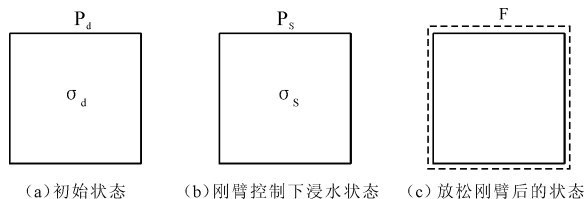


图1 堆石体单元应力状态变化图

1.2 湿化变形计算模型

目前国内外学者已建立起多种可用于进行土石坝湿化变形计算的计算模型和方法,沈珠江院士在对砂土、砂砾料和黄土进行大量不同偏应力下的浸水变形实验后,假设湿化引起的剪应变与应力水平成双曲线关系,湿化引起的体应变为常数,提出了一个湿化模型;李全明等人根据试验结果,认为湿化引起的体应变与围压有关,从而对沈珠江湿化模型进行了改进^[5]:

$$\begin{cases} \varepsilon_v = \sigma_3 / (a + b\sigma_3) \\ \varepsilon_a = d_w S_1 / (1 - S_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_v 和 ε_a 分别为湿化体积应变和轴向应变(下同); d_w 、 a 、 b 为模型参数; σ_3 为第三主应力; S_1 为应力水平, $S_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$; $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为主应力差, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏主应力差, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2(\sigma_3 \sin \varphi + c \cos \varphi)}{1 - \sin \varphi}$; c 为凝聚力; φ 为内摩擦角。

假定应变主轴与应力主轴重合,采用 Prandtl - Reuss 流动法则,应变张量可以写为^[6]:

$$\{\varepsilon\} = \frac{\varepsilon_v}{3} I + \frac{\gamma}{\sigma_s} \{S\} \quad (2)$$

式中: $\{S\}$ 为偏应力张量; σ_s 为广义剪应力。

1.3 等效荷载的计算

湿化变形在有限元分析时,通常采用初应变法^[7],将湿化引起的应变增量当成初应变考虑。根据式(1)求出湿化应变,再根据下式求出湿化主应变。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_a \quad \varepsilon_2 = (\varepsilon_v - \varepsilon_a) \frac{\sigma_2}{\sigma_2 + \sigma_3}$$

$$\varepsilon_3 = (\varepsilon_v - \varepsilon_a) \frac{\sigma_3}{\sigma_2 + \sigma_3} \quad (3)$$

$$\{\varepsilon\}_{\text{主}} = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3] \quad (4)$$

式中: $\{\varepsilon\}_{\text{主}}$ 为湿化主应变, ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为3个主应变分量, σ_2 、 σ_3 为第二主应力和第三主应力。

在湿化之前堆石体中各点的应力状态、应力水平、应力主方向均已经确定。则主应力空间转换到一般应力空间的转换矩阵也就完全确定,采用应变主

方向与应力主方向一致的假定,则湿化引起的6个应变增量即可利用转换矩阵表达为:

$$\{\varepsilon\} = [T] \{\varepsilon\}_{\text{主}} \quad (5)$$

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}] \quad (6)$$

式中: $[T]$ 为转换矩阵; $\{\varepsilon\}$ 为应变矩阵; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 、 γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{zx} 为6个应变分量。

在计算中,将湿化引起的应变视为初应变 $[\varepsilon_0]$,转化为等效节点力:

$$\{F\} = - \sum \iint [B]^T [D_s] [\varepsilon_0] dV \quad (7)$$

式中: $[B]$ 为形函数矩阵(下同)。将该等效节点力 $\{F\}$ 作为荷载,可以求出湿化引起的节点位移; $[D_s]$ 为堆石料饱和状态下的刚度矩阵,根据饱和状态下的参数计算得到。

由湿化变形转化成的等效结点荷载实际上是不存在的,为了保持静力平衡,单元的应力中应扣除由于湿化引起的应变增量相对应的那部分应力,即为:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e - [D]\{\varepsilon_0\} \quad (8)$$

式中: $[D]$ 为刚度矩阵; $\{\delta\}^e$ 为单元结点位移。

1.4 应力变形有限元分析方法

1.4.1 堆石体本构模型 面板堆石坝的材料主体为垫层、过渡层及堆石体等散粒体材料,在荷载作用下这些材料通常呈现非线性变形特性。在非线性模型中,邓肯 E - B 模型在概念上和数学表达上都很简单^[7],模型参数易于确定,许多参数已有大量的数据,便于有限元分析计算,并已有丰富的工程应用经验,本文堆石体本构模型采用邓肯 E - B 模型。

1.4.2 材料非线性问题的有限元方法 目前,材料非线性问题的基本解法有迭代法和增量法两种,其中按材料切线模量迭代计算过程的不同,增量法又分为基本增量法和中点增量法两种。相比较而言,由于中点增量法具有分级迭代易于收敛,计算精度较高等优点,因此在工程实际中应用更为普遍。中点增量法的基本步骤见参考文献^[7]。本文有限元计算采用中点增量法。

1.5 湿化变形的计算方法与步骤

坝体在浸水后,浸润线以下的坝体将受到水的浮托力作用,浮托力将使坝体产生回弹变形。假设单元的体积为 V ,孔隙率为 n ,则单元所受浮力的大小为:

$$F_b^e = \gamma_0 V^e (1 - n) \quad (9)$$

式中: F_b^e 为单元所受浮托力, $n = n_0 - \varepsilon_v$; n_0 为单元初始(设计)孔隙率; γ_0 为水容重; ε_v 为坝体填筑完成时(蓄水前)单元已经发生的体积应变。

堆石体浸水饱和后,浸润线以下的石体将受到

水的浮托力作用,另一方面,堆石体又受到湿化变形的影响。因此湿化过程是一种应力、弹性模量和物理力学参数都在不断发生变化的过程。在计算中按下列方法处理:

- (1) 先施加某一级的全部浮力,根据前一级应力状态 $\{\sigma\}$,按饱和堆石体的参数确定刚度矩阵 $[D_s]$ 进行有限元计算,得到各单元的应力;
- (2) 根据求得的单元应力状态,按增量法将计算出的应力与初始计算的应力平均,再根据平均应力并利用饱和堆石体的参数计算来确定刚度矩阵 $[D_s]$;
- (3) 在第二步求得了该级下平均应力相应的弹性常数后,重新施加该级的全部浮力,进行有限元计算,得到各单元的应力;
- (4) 根据得出的应力状态,用湿化试验的拟合公式计算浸水单元的等效结点荷载;
- (5) 将等效结点荷载作为外荷,将其与浮力、重力及水压力加在一起,进行有限元求解;
- (6) 对于有限元计算结果,单元的应力中应扣除与湿化应变增量相对应的那部分应力。

2 应用实例

2.1 工程概况

某混凝土面板堆石坝工程,是一座以软岩料为主要填筑材料的面板堆石坝,坝体填筑总方量 $1.39 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中主、次堆石区为 $114.5 \times 10^6 \text{ m}^3$,实际应用软岩料为 $84 \times 10^6 \text{ m}^3$,占总填筑量的 73.4%。坝顶总长 423.75 m,坝顶高程 221.20 m,坝顶宽 6.5 m,最大坝高 90.2 m,大坝上游边坡 1: 1.4,下游边坡设有二级 3 m 宽马道,平均边坡 1: 1.4,断面分为混凝土防渗面板、垫层区、过渡层区、竖向排水区、主堆石区和副堆石区,坝体典型断面见图 2。

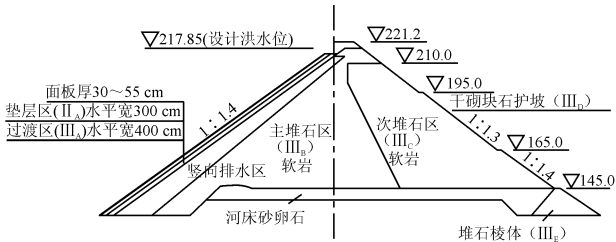


图 2 坝体典型剖面图

2.2 有限元模型

沿坝轴线选取最大剖面所在的坝段建立有限元计算模型。由于大坝修建在基岩上,因此,选取计算范围时没有考虑坝基。计算范围:上下游方向分别取至上、下游坝坡坡脚,沿坝轴线方向取一个面板块

的宽度即 12 m 的坝段,坝底取至河床基岩面。堆石体、垫层及过渡层采用邓肯 - 张 E - B 模型,面板混凝土采用线弹性模型,用无厚度 Goodman 单元模拟面板混凝土与垫层之间的接触^[8]。选用 8 节点等参单元进行剖分,单元总数 102,单元节点 246,坝体填筑分 11 期完成,蓄水分两期完成,有限元计算网格如图 3 所示。

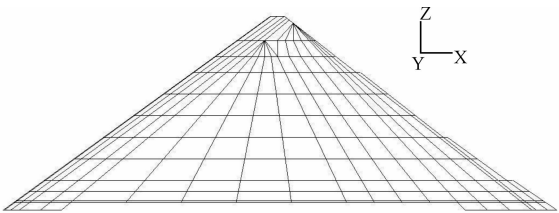


图 3 有限元计算网络

2.3 计算工况与计算参数

根据大坝施工、蓄水的两个不同时段以及湿化变形的影响,应力变形有限元计算分施工期、蓄水期不考虑湿化,蓄水期考虑湿化三个工况。

混凝土面板按线弹性材料考虑,取材料密度 $P_d = 2\,450 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 2.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$,泊松比 $\mu = 0.167$ 。坝体堆石料采用邓肯 - 张的 E - B 模型,参考试验成果,材料计算参数见表 1,由于缺少试验资料,根据工程类比选定类似工程的材料湿化变形计算参数^[6],见表 2。水库正常蓄水位 217 m,设计洪水位 217.85 m,校核洪水位 220.52 m。

坝体浸润线:计算所采用的浸润线采用正常工况稳定渗流分析得到的浸润线。

表 1 面板堆石坝材料参数 $\text{g/cm}^3, \text{kPa}, (^\circ)$

材料	ρ_d	C	φ_0	$\Delta\varphi$	R_f	K	K_{ur}	n	K_b	m
垫层	2.18	0	53.8	11.2	0.73	800	1000	0.46	136	0.4
过渡层	2.14	0	54.4	10.2	0.72	800	1000	0.42	136	0.3
主堆石	2.12	0	47.8	6.2	0.71	630	800	0.40	120	0.3
次堆石	2.10	0	45.0	7.6	0.72	307	368	0.39	134	0.3

表 2 湿化变形参数

材料	a	b	d_w
垫层	1.9	14.6	0.3
过渡层	0.8	2.4	1.7
主堆石	1.2	1.0	0.9
次堆石	1.6	4.8	0.9

2.4 计算结果分析

计算模拟了坝体的施工和水库蓄水过程。计算分不考虑湿化和考虑湿化两种情况,湿化范围取正常蓄水位浸润线以下。计算结果见表 3。

图 4~图 6 给出了不考虑湿化时正常蓄水位工况下坝体沉降、大主应力和水平位移分布结果,坝体最大沉降为 0.92 m,向上游水平位移最大值为 0.15 m,向下游水平位移最大值为 0.37 m。图 7~图 9 为考虑湿化湿化时正常蓄水位工况下坝体沉降、大主应力和水平位移计算结果,坝体最大沉降为 0.94 m,向上游水平位移最大值为 0.12 m,向下游水平位移最大值为 0.40 m。由计算结果可知,由于浸润线以下软岩料的湿化变形,引起坝体竖向沉降和顺河向位移均有所增加,其中,顺河向位移的增量方向指向下游,最大值约为 0.03 m;竖向沉降的最大值约为 0.02 m。

由图 5、图 8 可以看出,考虑湿化和不考虑湿化相比,坝体应力变化不大,说明湿化变形对坝体应力的影响有限。图 10、图 11 为正常蓄水位面板挠度曲线和顺坡向应力分布,混凝土面板的挠度因为湿化变形的影响有所增加,考虑和不考虑湿化时面板最大挠度分别为 25.33 cm、27.12 cm。面板顺坡向应力以压应力为主,拉应力仅发生在面板顶部附近很小区域,面板最大顺坡向最大压应力分别为 2.23 MPa、2.71 MPa,最大拉应力分别为 0.14 MPa、0.56 MPa。计算结果说明,由于坝料湿化导致面板的挠度有所增大,并对面板应力有一定的影响。面板水平向压应力和拉应力均有所增加,面板顺坡向压

应力出现一定的压应力增量,最大值为 0.48 MPa,也使拉应力峰值及范围有所增大。

根据考虑湿化变形和不考虑湿化变形的计算结果表明,由于浸水后材料的软化,导致浸润线以下材料骨架中颗粒相互滑移、破碎和重新排列,引起的坝体沉降及水平位移量都有所增大,并引起的面板挠度增加,同时导致顺坡向应力也有所增大。因此,在进行大坝设计和安全性评价时应该考虑坝料湿化作用的影响。

表 3 大坝应力变形主要计算结果			
		m, MPa, cm	
工况	计算内容	不考虑湿化变形	考虑湿化变形
施工期	坝体最大沉降	0.90	
	坝体最大	向上游:0.18	
	水平位移	向下游:0.32	
	坝体大主应力	1.47	
	坝体小主应力	0.48	
	面板最大挠度	23.53	
蓄水期	坝体最大沉降	0.9278	0.9413
	坝体最大	向上游:0.15	向上游:0.12
	水平位移	向下游:0.37	向下游:0.40
	坝体大主应力	1.58	1.60
	坝体小主应力	0.52	0.53
	面板最大挠度	25.33	27.12
	面板顺坡向应力	压应力:2.23	压应力:2.71
		拉应力:0.14	拉应力:0.56

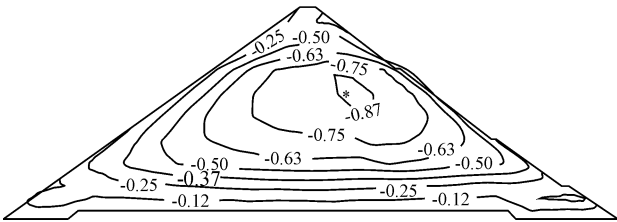


图 4 蓄水期不计湿化变形沉降

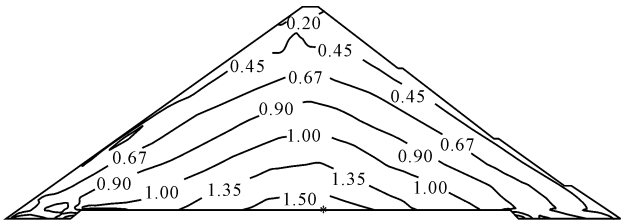


图 5 蓄水期不 计湿化变形大主应力分布

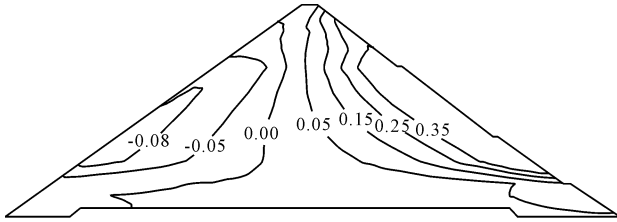


图 6 蓄水期不计湿化变形水平位移

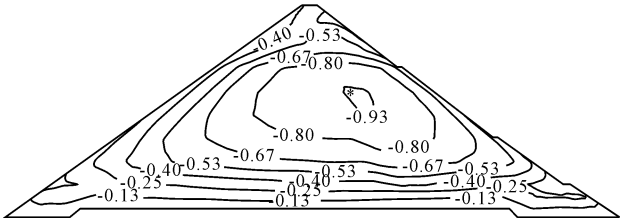


图 7 蓄水期计湿化变形沉降

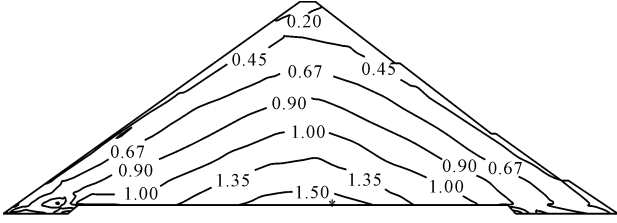


图 8 蓄水期计湿化变形大主应力分布

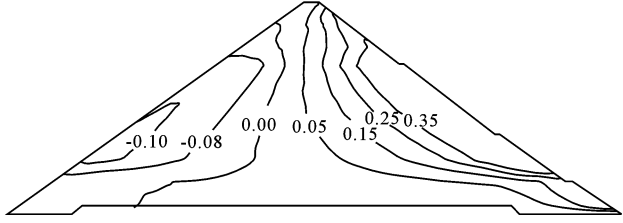


图 9 蓄水期计湿化变形水平位移

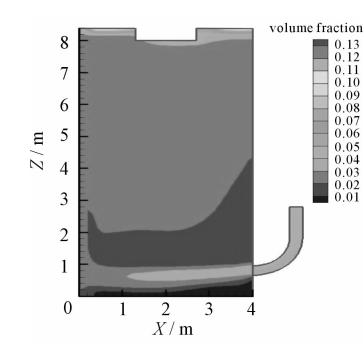


图 5 气体体积分数等值线图

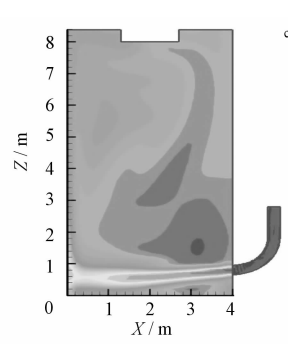


图 6 臭氧浓度等值线图

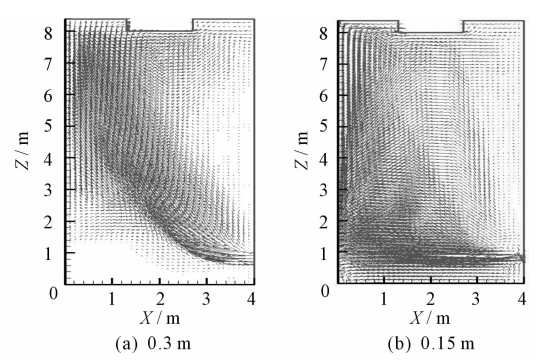


图 7 速度矢量图

出口槽的下方,接触池出口槽处需要做出一些改进以允许气体从顶部排出,模拟结果对单管式臭氧接触池的优化有一定的借鉴作用。

参考文献:

[1] 齐爱玲. 饮用水臭氧消毒模型的研究[D]. 哈尔滨工业大学,2010.
[2] 于衍真,谭 娟,冯 岩. 臭氧组合工艺在水处理中的应用[J]. 工业用水与废水, 2008,39(3): 8 - 11.
[3] 黄锐文. 臭氧系统应用于给水深度处理的施工新技术[J]. 四川建筑, 2007,27(6):180 - 181.
[4] 张奎山. 饮用水臭氧化工艺研究与接触池流场模拟[D]. 天津大学,2005.

[5] 梁 萍. 净水厂臭氧处理系统的设计要点与分析[J]. 工业用水与废水,2007,38(4):74 - 76.
[6] 森冈崇行,汪兆康. 采用模拟系统设计臭氧接触池[J]. 中国给水排水, 2006,22(2): 49 - 51.
[7] Ta C T, Hague J. A two - phase computational fluid dynamics model for ozone tank design and troubleshooting in water treatment[J]. Ozone: Science & Engineering, 2004, 26(4): 403 - 411.
[8] 缪 佳,李 继,张金松,等. CFD 在臭氧接触系统优化中的应用[J]. 中国给水排水, 2006,22(10): 46 - 49.
[9] 纪家林. 基于 CFD 的臭氧接触池优化[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.

~~~~~  
(上接第 138 页)

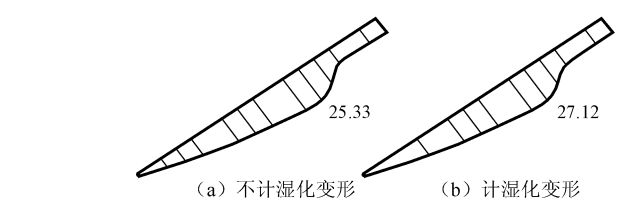


图 10 正常蓄水位面板挠度曲线

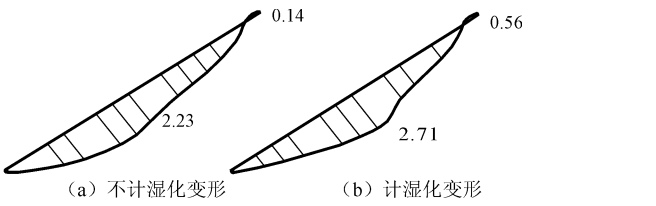


图 11 正常蓄水位面板内顺坡向应力分布

3 结 语

本文研究分析了材料湿化的基本原理和计算方法,并基于改进的湿化变形计算模型,编制相关的湿化程序,在此基础上,对某软岩料填筑面板堆石坝进行考虑湿化变形条件下的坝体应力变形,得出结论:①坝料的湿化变形会导致坝体的沉降和向下游的水平位移增加;②坝料湿化变形使得面板挠度增大,面板的顺坡向应力出现压应力增量,其拉应力峰值及范围有所增大。因此,对坝体先期进行浸水,使主要的湿化变形在面板浇筑前发生,可以改善面板的应力变形状态。

参考文献:

[1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利

水电出版社,1979,第二版.  
[2] 陈慧远. 土石坝有限元分析[M]. 南京:河海大学出版社,1988.  
[3] 蒋 涛,付 军,周晓文. 软岩筑面板堆石坝技术[M]. 中国水利水电出版社,2010.  
[4] 彭 成,郭德发,王 庆. 面板堆石坝软岩料的应用分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2008,26(5):611 - 615.  
[5] 朱百里,沈珠江. 计算土力学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.  
[6] 李全明,于玉贞,张丙印,等. 黄河公伯峡面板堆石坝三维湿化变形分析[J]. 水力发电学报,2005,24(3):24 - 29.  
[7] 朱百里,沈珠江. 计算土力学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.  
[8] 王钰琳,喻蔚然. 面板堆石坝应力变形分析[J]. 水力发电学报,2007,33(2):54 - 57.