

# 软岩料填筑混凝土面板堆石坝 三维非线性有限元分析

陈寒<sup>1</sup>, 王瑞骏<sup>1</sup>, 徐维生<sup>2</sup>, 陈泳霖<sup>3</sup>, 崔自力<sup>4</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072;  
3. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001; 4. 陕西水环境工程勘测设计研究院, 陕西 西安 710018)

**摘要:**以某已建工程为例,基于邓肯 E-B 材料本构模型,对混凝土面板堆石坝次堆石区采用软岩料填筑和硬岩料填筑两个方案进行三维有限元分析,分别获得软岩料填筑和硬岩料填筑时坝体应力变形的分布与变化规律。通过有限元计算分析,可以看出采用软岩填筑面板坝是可行的。

**关键词:**应力变形;非线性;有限元分析;软岩料;硬岩料

**中图分类号:**TV31 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-643X(2012)02-0120-06

## 3-D nonlinear finite element analysis for CFRD constructed by soft rock material

CHEN Han<sup>1</sup>, WANG Ruijun<sup>1</sup>, XU Weisheng<sup>2</sup>, CHEN Yonglin<sup>3</sup>, CUI Zili<sup>4</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Shaanxi Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, 710001, China;

4. Shaanxi Reconnaissance Design & Research Institute of Water Environmental Engineering, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** Taking one built project for example, based on the Dengken E-B constitutive material model, the 3-D nonlinear finite element analysis for the stress-deformation of the dam whose III C filled soft rock material and hard rock material was carried out, and the stress-strain distribution and variety rule for the dam were obtained. It is believed that the CFRD constructed with soft rock is feasible by finite element analysis and calculation.

**Key words:** stress-deformation; nonlinear; finite element analysis; rock material; hard rock material

混凝土面板堆石坝(CFRD)虽仅以薄面板防渗,但这种坝型在适应各种复杂地形和地质条件、抗震性、施工质量控制与质量检测技术等方面在近20年来取得了很大的进展,工程质量越来越有保证。更重要的是,面板堆石坝的用料范围有逐渐扩大的趋势,各种软岩料和砂砾石料应用逐渐增多。从已有的工程实例来看,软岩料利用的基本型式大致有3种情况:①将软岩堆石放置在坝体轴线下游干燥区(即III C次堆石区),如国外的温尼克、萨尔瓦兴娜、红树溪、中国的寺平、天生桥一级、三板溪等坝;②将软岩堆石料放在坝体中间部位,如国外的贝雷坝,在上游坝踵处设置一新鲜岩石的棱体,上下游坡面也填筑一层新鲜岩石,而中间部位采用溢洪道开挖的石渣填筑;③主、次堆石区中采用软岩料,如国外的袋鼠溪坝、帕拉坝、中国的大坳坝、茄子山等坝。

具体施工过程中在上游面板、过渡料层下及坝底部填筑一层新鲜岩石用来排水,而在其下游及上游干燥区填筑软岩料。虽然软岩料的利用已有成功的经验,但是主、次堆石区中普遍采用软岩填筑,在国内尚在发展中,有待于继续研究和实践。利用软岩料修筑的面板堆石坝,其坝体变形规律与采用硬岩堆石材料的面板坝有所不同。本文采用两个方案进行对比分析软岩料修筑的面板堆石坝和采用硬岩堆石材料的面板坝的坝体变形规律。

## 1 软岩料强度和应力特性及其利用

### 1.1 软岩料强度和应力变形特性

岩石按照硬度分类,《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287-99)<sup>[1]</sup>将以饱和单轴抗压强度小于等于30 MPa的岩石称为软岩,大于30 MPa的岩

石称为硬岩。软岩料的抗压强度虽然比硬岩堆石料低,而且,在剪切过程中粗颗粒破碎较烈, <5 mm 细粒含量增加较多,但 <0.005 mm 细粒含量所占比例很少,因此,软岩料的强度特性与硬岩料近似。表 1 为国内部分工程堆石料强度室内试验结果。从表中可以看出,软岩料的强度比硬岩料要低一些,软岩的非线性抗剪强度指标  $\varphi_0$  比硬岩的小。

表 1 软、硬岩堆石料的非线性强度对比  $g/cm^3, \%, (\circ)$

坝名	岩性	干密度 $\rho_d$	孔隙率 $n$	$\varphi_0$	$\Delta \varphi$
大坳	砂岩	2.04	23.0	46.6	9.0
鱼跳	泥岩	2.11	20.4	42.6	5.7
盘石头	软岩 弱风化页岩	1.94	28.9	44.0	11.4
	强风化页岩	2.12	23.5	44.9	11.5
十三陵上池	风化安山岩	2.0	29.7	45.4	4.4
西北口	白云质灰岩	2.04	26.8	52.2	7.2
珊溪	硬岩 凝灰岩	1.98	25.0	54.4	9.8
洪家渡	灰岩	2.22	18.7	57.0	13.1

图 1 和图 2 为鱼跳和大坳两工程软岩堆石料三轴试验成果<sup>[2]</sup>。从图中可以看出应力变形曲线和强度包线都呈现非线性特征。

1.2 软岩料的利用

《混凝土面板堆石坝设计规范》<sup>[3]</sup> (SL228-98) 规定,坝体主堆石区作为支撑面板的主体,一般均需采用较好的硬岩,软岩的利用一般放在坝体下游的次堆石区。根据国内外已有的工程实践,对于软岩堆石料的利用实际采用的原则<sup>[2]</sup>是:保证软岩料区的下边界线在大坝运行时处于干燥区,以便坝体排水畅通,并避免软岩遇水产生湿化变形;保证坝体下游边坡的稳定,且在其外侧留有不小于 2 m 厚的新鲜硬岩填筑区,以防止软岩料的继续风化;上边线应保证其上有不小于 5~10 m 厚的新鲜硬岩填筑层覆盖。通过计算分析,在保证坝体施工期、运行期的沉降量以及面板的应力在合理范围内的前提下,上游边界线尽量往坝体上游侧靠近,以期能够最大限度地利用软岩材料,从而使工程设计进一步优化。

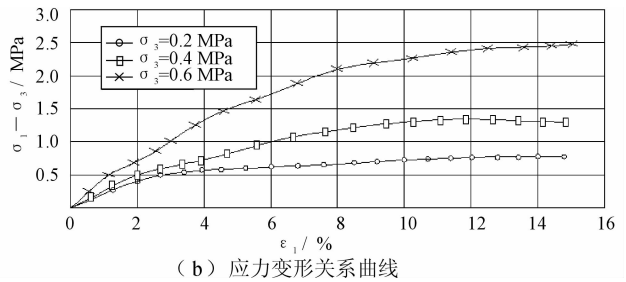
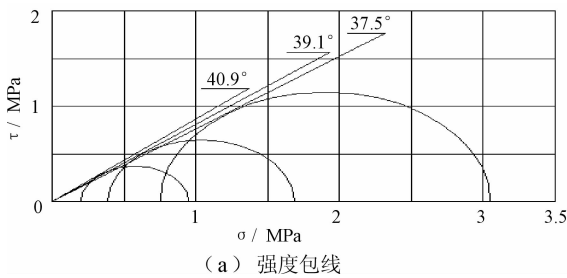


图 1 鱼跳堆石料三轴试验(平均级配,  $\rho_d = 2.11 g/cm^3$ )

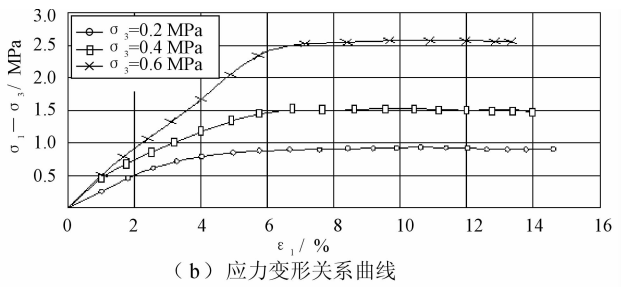
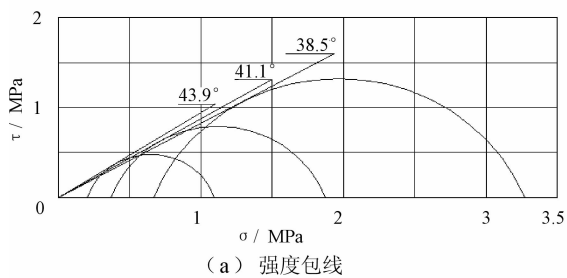


图 2 大坳堆石料三轴试验(平均级配,  $\rho_d = 2.04 g/cm^3$ )

2 面板堆石坝应力变形三维非线性有限元分析计算原理

2.1 材料的本构模型

堆石体作为混凝土面板堆石坝的主体,其应力应变关系的合理模拟对提高混凝土面板堆石坝应力变形计算结果的合理性非常重要。常用的堆石体本构模型大体上可以分为非线性弹性模型和弹塑性模型两大类。非线性弹性模型以邓肯 E-B 模型<sup>[4-9]</sup>

及 K-G 模型最为典型及常用;弹塑性模型中主要有“南水”双屈服面模型和殷宗泽双屈服面模型。这些模型从不同的方面表征了堆石料的应力应变关系性质。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,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。本文采用邓肯 E-B 模型。

2.2 材料非线性问题的有限元解法

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如下<sup>[10]</sup>:

(1) 设第  $i$  级荷载增量为  $\{\Delta\delta\}_i$ , 根据初始应力  $\{\sigma\}_{i-1}$  确定  $E_{i,i-1}$ 、 $\nu_{i,i-1}$  等参数, 并进而形成刚度矩阵  $[K]_{i-1}$ 。

(2) 加荷载增量之半, 即  $\{\Delta R\}_i/2$  于结构, 由线性方程组解位移增量。

$$[K]_{i-1}\{\Delta\delta\}_{i-1/2} = \{\Delta R\}_i/2 \quad (1)$$

(3) 根据  $\{\Delta\delta\}_{i-1/2}$ , 求  $\{\varepsilon\}_{i-1/2}$ 、 $\{\sigma\}_{i-1/2}$ , 并进而累加求  $\{\varepsilon\}_{i-1/2}$ 、 $\{\sigma\}_{i-1/2}$ 。

(4) 由  $\{\varepsilon\}_{i-1/2}$  或  $\{\sigma\}_{i-1/2}$  确定  $E_{i,i-1/2}$  等材料模量参数, 再形成矩阵  $[K]_{i-1/2}$ 。

(5) 在  $\{R\}_{i-1}$  基础上重新加  $i$  级全荷载增量  $\{\Delta R\}_i$  用下式解出本级位移增量  $\{\Delta\delta\}_i$ :

$$[K]_{i-1/2}\{\Delta\delta\}_i = \{\Delta R\}_i \quad (2)$$

(6) 由  $\{\Delta\delta\}_i$  求  $\{\Delta\varepsilon\}_i$ 、 $\{\Delta\sigma\}_i$ , 进而求  $\{\varepsilon\}_i$ 、 $\{\sigma\}_i$ , 得到施加  $i$  级荷载增量  $\{\Delta R\}_i$  后的结果。

(7) 仿照上述步骤逐级进行计算, 直至  $i = n$  (荷载总级数), 就得到全部结果。

### 3 应用实例

某混凝土面板堆石坝是一座以灌溉和供水为主, 兼有发电、防洪、环境保护、旅游等综合效益的I等大(1)型水利枢纽工程。该工程总库容 11.12 亿  $m^3$ , 电站装机容量 76 万 kW。混凝土面板堆石坝趾板建基高程 728 m, 坝顶高程 884 m, 最大坝高 156 m, 坝顶长 663.77 m, 宽 12 m。上游坝坡 1:1.4, 下游坝坡在高程 840 m 马道以上为 1:1.5, 其下为 1:1.4。

#### 3.1 方案拟定

根据规范<sup>[3]</sup>, 本文将次堆石区的材料分别采用硬岩和软岩进行三维有限元计算。坝体最大剖面见图 3。

方案一: 次堆石区 III C 采用硬岩料(砂卵石)。

方案二: 次堆石区 III C 采用软岩料(砂泥岩)。

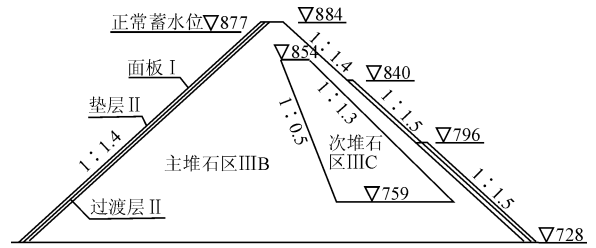


图 3 坝体最大剖面图

#### 3.2 有限元模型

计算范围: 沿坝轴线选取最大剖面所在的坝段建立计算模型, 运用大型有限元软件 ADINA, 进行坝体应力变形的有限元计算。计算范围: 坝基取到基岩面, 上、下游方向分别取至上、下游坝坡坡脚, 左右岸取至坝体坝肩。边界条件: 底部、左右岸取为固定约束。混凝土面板及趾板采用线弹性模型, 垫层、过渡层及主堆石及次堆石体材料采用非线性邓肯 E-B 模型。选用 8 节点等参单元进行剖分。计算的有限元网格剖分结果见图 4。

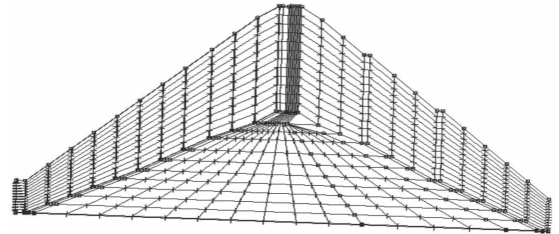


图 4 三维有限元网格图

#### 3.3 计算参数

(1) 水库特征水位。正常蓄水位 877.00 m, 设计洪水位 871.10 m, 校核洪水位 883.10 m。

(2) 混凝土面板按照线弹性材料计算, 计算中取材料密度  $\rho_d = 2450 \text{ kg/m}^3$ , 泊松比  $\mu = 0.167$ , 弹性模量  $E = 2.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 。

(3) 邓肯 E-B 模型参数。坝体各区材料的邓肯 E-B 模型参数采用该电站工程相应的材料试验结果。参数选用见表 2。

#### 3.4 计算工况

计算工况分: 大坝竣工期和蓄水期两种。施工期的坝基开挖及坝体填筑共分 13 级荷载实施计算,

表 2 邓肯 E-B 模型材料参数表

材料	密度	$c$	$K$	$n$	$K_{ur}$	$n_{ur}$	$R_f$	$K_B$	$m$	$\varphi$
垫层料	2300	0	1274	0.44	2548	0.44	0.84	1260	-0.026	57.51
过渡料	2250	0	1153	0.38	2306	0.38	0.75	1085	-0.089	57.63
主堆石料	2160	0	1090	0.33	2180	0.33	0.79	965	0.211	55.39
次堆石料(硬岩)	2150	0	820	0.40	1640	0.40	0.80	430	-0.250	49.00
次堆石料(软岩)	2100	0	500	0.25	1050	0.12	0.727	250	0	48.00

$\text{kg/m}^3, \text{Pa}, (^\circ)$

水库蓄水至正常高水位的蓄水过程分 3 级荷载步。

### 3.5 蓄水期水荷载施加

混凝土面板堆石坝的蓄水工程是随着坝前水位的抬高,水荷载将逐步施加在面板上。假设分三级施加库水压力,每一级坝高一次为  $h_1, h_2, h_3$ ,用  $\gamma$  表示库水重度,图 5 示意了分级施加库水压力的方法。库水压力是随着库水水位的升高而升高的,所以,在每一个新的坝面上施加库水压力时,如图 5 所示,较低坝面上的库水压力也应该随着增加。即在任一坝面高为  $h$  的上游坝面,库水压力  $p_h$  静水压力公式为:

$$p_h = \gamma(h_1 + h_2 + h_3 - h) \quad (3)$$

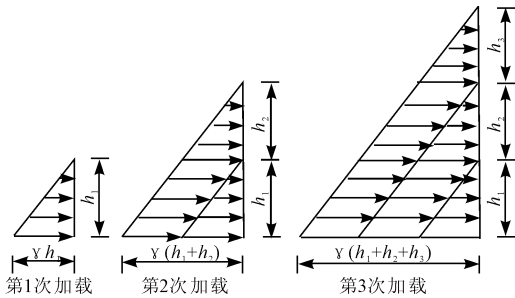


图 5 水荷载逐级施加后的库水压力示意图

## 4 计算结果及分析

按照上述有限元计算模型,按逐级加载的方法,进行大坝非线性有限元仿真计算,得到大坝竣工期和蓄水期的应力变形计算结果。计算结果见表 3。

### 4.1 竣工期及蓄水期大坝应力变形的分布规律

4.1.1 竣工期坝体的变形及应力 两个方案竣工期坝体的变形及应力如图 6 ~ 图 15,结果表明,最不利的应力变形发生在坝体填筑到坝顶时,即大坝竣工时。

工况	计算内容	m, kPa	
		方案一 次堆石区 (硬岩料)	方案二 次堆石区 (软岩料)
竣工期	坝体最大沉降	0.6649	1.004
	坝体最大	向上游:0.2038	向上游:0.2092
	水平位移	向下游:0.2013	向下游:0.2162
	坝体大主应力	2770.1380	2863.9900
蓄水期	坝体小主应力	914.7200	932.4660
	沿坝轴线	向右岸:0.105	向右岸:0.1130
	方向位移	向左岸:0.1063	向左岸:0.1121
	坝体最大沉降	0.6732	1.085
蓄水期	坝体最大	向上游:0.1897	向上游:0.1885
	水平位移	向下游:0.2017	向下游:0.2194
	坝体大主应力	3284.1670	3986.418
	坝体小主应力	1122.0000	1134.091
蓄水期	沿坝轴线	向右岸:0.1054	向右岸:0.1122
	方向位移	向左岸:0.1058	向左岸:0.1115

注:坝体水平位移以向下游为正,垂直位移以竖直向上为正,沿坝轴线方向位移以指向右岸为正;坝体应力以压应力为正。

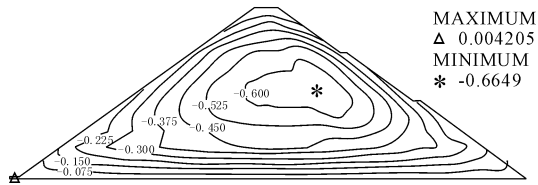


图 6 方案一:竣工期垂直位移等值线图(单位:m)

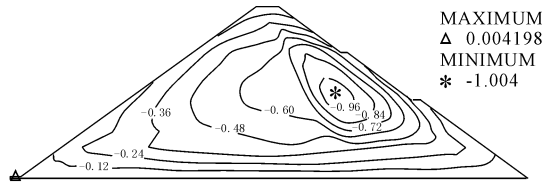


图 7 方案二:竣工期垂直位移等值线图(单位:m)

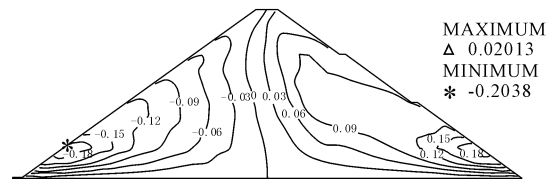


图 8 方案一:竣工期水平位移等值线图(单位:m)

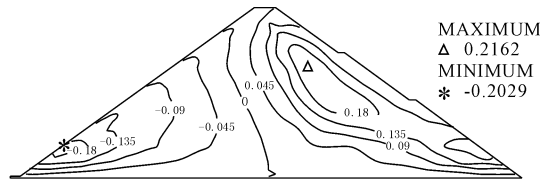


图 9 方案二:竣工期水平位移等值线图(单位:m)

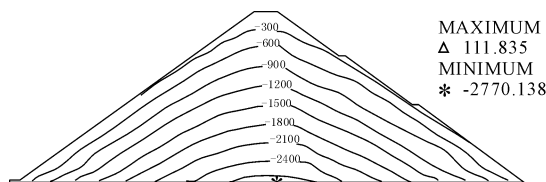


图 10 方案一:竣工期大主应力等值线图(单位:kPa)

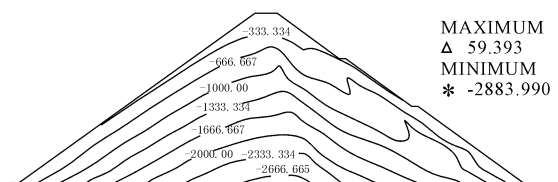


图 11 方案二:竣工期大主应力等值线图(单位:kPa)

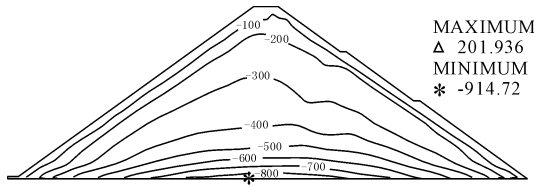


图 12 方案一: 竣工期小主应力等值线图(单位: kPa)

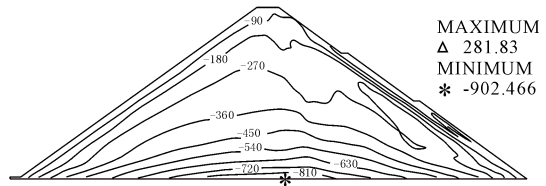


图 13 方案二: 竣工期小主应力等值线图(单位: kPa)

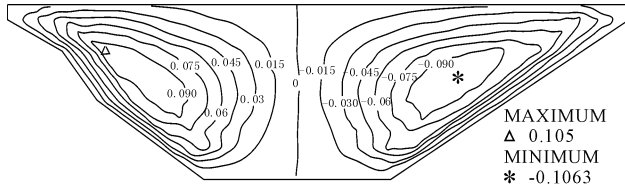


图 14 方案一: 竣工期沿坝轴线方向位移等值线图(单位: m)

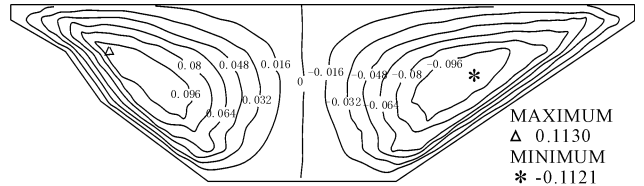


图 15 方案二: 竣工期沿坝轴线方向位移等值线图(单位: m)

(1)竣工期坝体垂直位移等值线如图 6 和图 7 所示,两个方案的最大沉降分别是 0.6649 m、1.004 m。两方案竣工期坝体最大沉降均发生在大约 1/2 坝高处的次堆石区域内,两个方案的最大沉降值相差较大。

(2)竣工期坝体水平位移等值线图如图 8 和图 9 所示,两个方案上游坡顺河向最大水平位移分别为 0.2038 m、0.2029 m,下游坡的最大水平位移分别为 0.2013 m、0.2162 m。从图中可以看出硬岩料填筑的坝体顺河向水平位移比较对称,软岩料填筑的坝体顺河向水平位移不对称,软岩料填筑的坝体顺河向最大水平位移值较大。

(3)竣工期坝体最大断面的大、小主应力等值线见图 10、图 11 和图 12、图 13。两个方案坝体最大剖面最大主应力最大值分别为 2770.138、2863.99 kPa,

位于坝体底部。两个方案坝体最大剖面最小主应力最大值分别为 914.72、932.466 kPa,位于坝体底部。

(4)竣工期坝体沿坝轴线方向位移等值线图见图 14 和图 15。两个方案坝体右岸沿坝轴线方向最大位移分别为 0.105 m、0.1130 m,左岸沿坝轴线方向最大位移分别为 0.1063 m、0.1121 m。

4.1.2 蓄水期坝体的变形及应力 蓄水期坝体的变形及应力如图 16 ~ 图 25,结果表明,最不利的应力变形发生在正常蓄水位 877.00 m 时。

(1)蓄水期坝体垂直位移等值线如图 16 和图 17 所示,坝体垂直位移的分布规律与竣工期垂直位移的分布规律相似,蓄水期两个方案的最大沉降量分别为 0.6732 m、1.085 m。坝体在水荷载作用下的沉降略有增加,但增加不大。

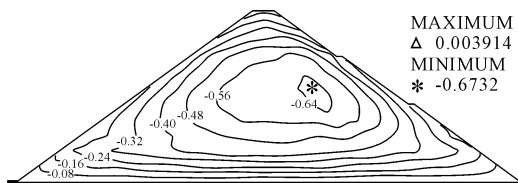


图 16 方案一: 蓄水期垂直位移等值线图(单位: m)

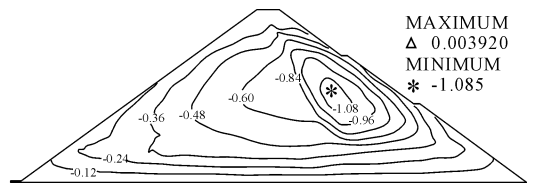


图 17 方案二: 蓄水期垂直位移等值线图(单位: m)

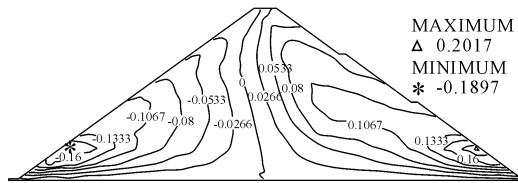


图 18 方案一: 蓄水期水平位移等值线图(单位: m)

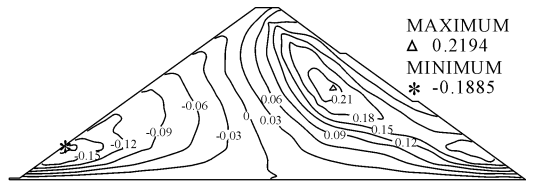


图 19 方案二: 蓄水期水平位移等值线图(单位: m)

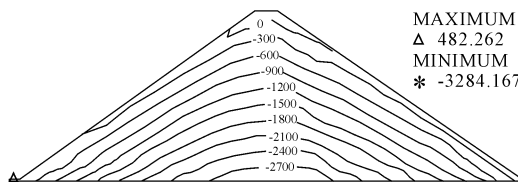


图 20 方案一: 蓄水期大主应力等值线图(单位: kPa)

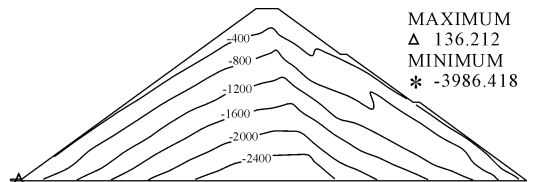


图 21 方案二: 蓄水期大主应力等值线图(单位: kPa)

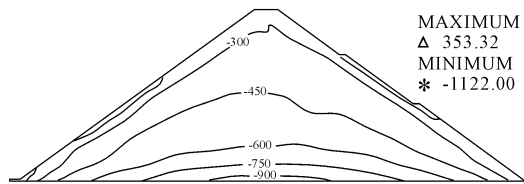


图22 方案一:蓄水期小主应力等值线图(单位:kPa)

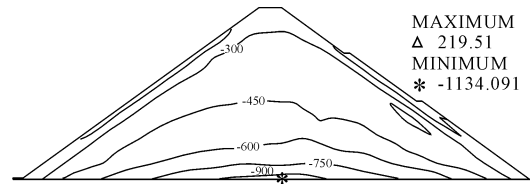


图23 方案二:蓄水期小主应力等值线图(单位:kPa)

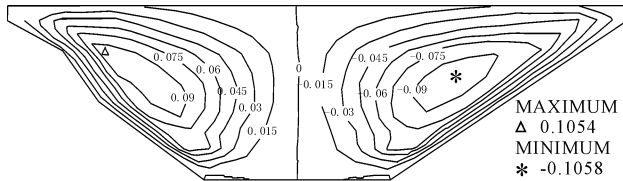


图24 方案一:蓄水期沿坝轴线方向位移等值线图(单位:m)

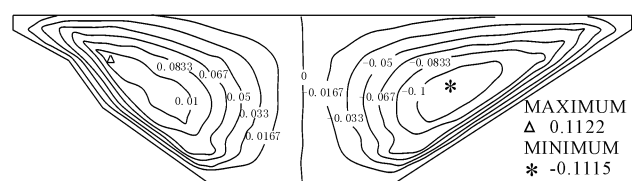


图25 方案二:蓄水期沿坝轴线方向位移等值线图(单位:m)

(2) 蓄水期坝体水平位移等值线如图18和图19所示,由于水荷载作用,两个方案上游坡顺河向最大水平位移分别为0.1897m、0.1885m,下游坡顺河向最大水平位移分别为0.2017m、0.2194m,对比分析竣工期的计算成果可以看出,蓄水期后坝体上游坡顺河向水平位移有所减少,而下游坡的水平位移与竣工期相差不大。可以看出,水荷载对坝体上游坡顺河向水平位移影响较大,而对坝体下游坡顺河向水平位移影响不大。

(3) 蓄水期坝体最大断面的大、小主应力等值线见图20~图23。与竣工期相比,坝体最大、最小主应力的分布规律与蓄水期基本一致,但大、小主应力的绝对值均有所增大。两个方案坝体最大主应力的最大值分别为3284.167kPa、3986.418kPa,位于坝体底部;两个方案坝体最小主应力最小值分别为1122.00kPa、1134.09kPa,位于坝体底部。

(4) 蓄水期坝体沿坝轴线方向位移等值线图见图24和图25。两个方案坝体右岸沿坝轴线方向最大位移分别为0.1054m、0.1122m,左岸沿坝轴线方向最大位移分别为0.1058m、0.1115m。

## 5 结语

本文基于有限元法,采用非线性邓肯E-B模型,运用中点增量法,对某面板堆石坝工程次堆石区采用硬岩堆石料和软岩堆石料分别进行了三维非线性有限元分析。考虑到面板防渗性能较好,在面板未破坏的情况下浸润线较低,对软岩料填筑的次堆石区影响不大,所以本文计算时未考虑湿化对坝体变形的影响。计算结果表明:坝体次堆石区采用软岩料填筑较硬岩料填筑在竖直方向和水平方向会产生较大的位移量,相应的大、小主应力也有所增加;

最大竖向位移向下游移动,在软岩区位移值最大;软岩料对上游水平位移影响不大,下游水平位移有较大增加。通过有限元计算分析,可以得出采用软岩填筑面板坝是可行的。

## 参考文献:

- [1] GB50287-99. 中华人民共和国水利行业标准[S]. 水利水电工程地质勘察规范. 北京:中国计划出版社,1999.
- [2] 蒋涛,付军,周小文. 软岩筑面板堆石坝技术[J]. 现代堆石坝技术进展,2009,10:2-90.
- [3] SL228-98. 中华人民共和国水利行业标准[S]. 混凝土面板堆石坝设计规范. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [4] 陈慧远. 土石坝有限元分析[M]. 南京:河海大学出版社,1988:201-213.
- [5] 朱百里,沈珠江,等. 计算土力学[M]. 上海:上海科技学术出版社,1990:145-150.
- [6] 高莲士,汪召华,宋文晶. 非线性解耦K-G模型在面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水利学报,2001,32(10):103-120.
- [7] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [8] Duncan J M, Byrne P, Wong K S, et al. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movement in soil masses [R], Report No. UCB/GT/80-01, University of California, Berkeley, 1980.
- [9] 孙淘,高希章,张建. 紫平铺混凝土面板堆石坝应力一应变分析[J]. 岩土力学,2006,27(2):247-251.
- [10] 王世夏. 水工设计的理论和方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.