

# 沥青混凝土心墙堆石坝有限元数值分析

李炎隆<sup>1</sup>, 李守义<sup>1</sup>, 韩艳<sup>2</sup>, 刘宇宇<sup>3</sup>, 周邴鹏<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 四川省水利水电勘测设计研究院规划设计分院, 四川 德阳 618000; 3. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 基于邓肯-张 E-B 材料本构模型, 采用大型通用有限元软件 ADINA, 对某沥青混凝土堆石坝进行了应力变形有限元计算, 以便研究其应力应变特性。并在计算结果的基础上对沥青混凝土心墙的邓肯-张材料模型参数杨式模量、凝聚力、体积模量等进行了敏感性分析。坝体有限元计算结果表明: 坝体上、下游坝坡附近小范围内出现拉应力; 坝体应力在心墙附近有突变, 出现了拱效应; 各参数的变化对心墙的应力应变影响程度不一, 其中杨式模量  $K$ 、杨式模量指数  $n$  属于高敏感性参数, 而体积模量指数  $m$  为低敏感性参数。为确保大坝安全, 在上、下游坝坡采取必要的护坡措施, 同时在大坝填筑施工时应适当提高上、下游坝坡附近坝体的压实标准; 为保证心墙的稳定安全, 适当调整沥青混凝土的配合比, 并根据试验计算调整心墙的变形模量, 使之和过渡料的模量协调一致, 尽量减小沉降差异带来的不利影响。

**关键词:** 有限元模型; 沥青混凝土心墙; 应力变形; 敏感性分析

中图分类号: TV641.41

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)02-0038-05

## Finite element numerical analysis on asphalt concrete core wall of earth-rock fill dam

LI Yanlong<sup>1</sup>, LI Shouyi<sup>1</sup>, HAN Yan<sup>2</sup>, LIU Yuyu<sup>3</sup>, ZHOU Bingpeng<sup>3</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Planning and Design Branch of Sichuan Province Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering Investigation and Design, Deyang 618000, China; 3. Northwest Hydro Consulting Engineers, CHECC, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Based on Duncan-chang E-B material model and used the finite element software ADINA, the paper conducted stress and deformation finite element calculation on an asphalt concrete rockfill dam so as to study the dam's stress strain characteristic. based on the result of the calculation, it carried out sensitivity analysis on the Duncan-chang E-B material model parameters of asphalt concrete core wall, such as Young's modulus of elasticity, cohesion, bulk modulus. The finite element calculation results of the dam show that there has been tensile stress near the small range of upstream and downstream dam slope; dam stress becomes a mutation and appears an arch effect near the core wall; each parameter's change has different degrees of influence on the stress and deformation of the core wall, which Young's modulus  $K$ , Young's modulus index  $n$  belong to high sensitivity parameters, and bulk modulus index  $m$  to low sensitivity parameter. In order to ensure dam safety, slope protection measures must be taken in the upstream and downstream dam slope. At the same time, the compaction standard of dam body near the upstream and downstream dam slope should be enhanced in the dam filling construction period; the asphalt concrete mix proportion should be appropriately adjusted in order to ensure the safety and stability of the core wall and according to the test calculation to adjust the core wall deformation modulus and make it coordinate with the transition material's modulus and minimize the negative effect of settlement difference.

**Key words:** finite element model; asphalt concrete core-wall; stress-strain; sensitivity analysis

某沥青混凝土心墙堆石坝坝顶高程 343.3 m, 坝顶长度 241.0 m, 坝顶宽度 10 m, 最大坝高 60 m, 大坝上游坡比为 1:2.5、1:2.5、1:2.7, 下游坡比为 1:2、1:2.2。大坝由沥青混凝土心墙, 上游坝壳, 下游坝壳, 上游过渡层, 下游过渡层, 下游堆石排水区,

上游盖重区 7 部分组成, 其中沥青混凝土心墙铺筑总量为 5 477 m<sup>3</sup>, 心墙高 57.7 m。该工程正常蓄水位 341.0 m, 总库容 4 903 万 m<sup>3</sup>。本文利用大型通用有限元计算软件, 结合此实际工程, 研究沥青混凝土心墙堆石坝的应力应变特性及沥青混凝土心墙邓

收稿日期: 2012-12-21

基金项目: 陕西省重点学科建设专项资金资助项目 (106-00X9030); 陕西省自然科学基金 (2012JQ7008)

作者简介: 李炎隆 (1980-), 男, 山东莱州人, 博士, 讲师, 主要从事水工结构数值仿真研究工作。

肯-张 E-B 模型参数<sup>[1]</sup>的敏感性。

1 三维非线性有限元计算

1.1 有限元模型

为了适当减小工作量,对实际工程进行了适当简化:坝顶宽为 10.0 m,最大坝轴线长度 241.0 m,心墙最大高度为 57.7 m,坝体右岸高程 320.0 m 以上采用综合坡比 1: 1.24,上游坝坡在 301.0 mm 以上采用 1: 2.5,高程 301.0 mm 以下采用 1: 2.7,下游坝坡均为 1: 2.2。对模型进行单元划

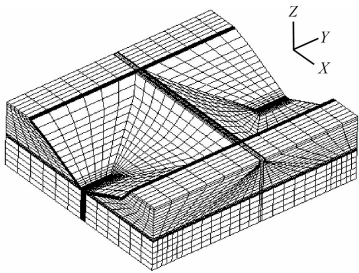


图 1 坝体及坝基三维有限元模型

分,共划分为 22 711 个节点,20 040 个单元。坝体及坝基三维有限元模型见图 1,心墙网格剖分见图 2。

1.2 计算参数

堆石体、河床覆盖层、过渡料及沥青混凝土心墙均采用邓肯-张 E-B 材料本构模型<sup>[2-4]</sup>,混凝土垫座、坝基及两岸基岩采用线弹性材料本构模型<sup>[5]</sup>,计算模拟了心墙、过渡区、堆石区等坝体材料分区。根据试验资料,坝体各分区材料的计算参数如表 1。

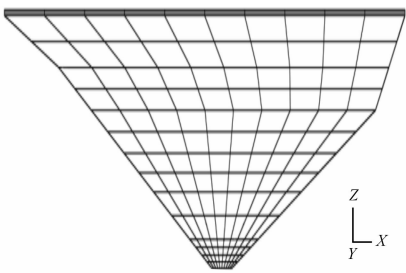


图 2 心墙剖面网格剖分图

表 1 坝体材料邓肯-张 E-B 模型计算参数表

| 坝料种类  | $\gamma$ | $C$  | $\varphi$ | $R_f$ | $K$   | $n$  | $K_b$ | $m$  | $K_{ur}$ | $n_{ur}$ |
|-------|----------|------|-----------|-------|-------|------|-------|------|----------|----------|
| 堆石料   | 21.2     | 0    | 36.0      | 0.78  | 700   | 0.34 | 400   | 0.27 | 1400     | 0.34     |
| 过渡料   | 21.0     | 0    | 34.0      | 0.80  | 1000  | 0.32 | 850   | 0.19 | 2000     | 0.32     |
| 沥青混凝土 | 24.0     | 0.64 | 28.2      | 0.71  | 233.8 | 0.65 | 1450  | 0.43 | 800      | 0.65     |
| 覆盖层   | 22.0     | 0    | 33.0      | 0.75  | 400   | 0.45 | 240   | 0.10 | 800      | 0.45     |

注:  $\gamma$  为容重( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $C$  为凝聚力( $\text{MPa}$ );  $\varphi$  为摩擦角( $^\circ$ );  $R_f$  为破坏比;  $K$  为杨式模量;  $n$  为杨式模量指数;  $K_b$  为体积模量;  $m$  为体积模量指数;  $K_{ur}$  为卸荷模量;  $n_{ur}$  为卸荷模量指数。

混凝土垫座采用线弹性材料本构模型,弹性模量  $E$  为  $2.55 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,泊松比为 0.167。两岸及坝体底部基岩也采用线弹性材料本构模型,弹性模量  $E$  为  $0.7 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,泊松比为 0.25。

1.3 加载过程

考虑到计算速度与精度,在施工期,根据坝体施工进度安排,从大坝建基面开始至坝顶分 10 级荷载模拟大坝填筑施工进度,第一级为两岸基岩及河床覆盖层,第二级为混凝土底座及廊道浇筑;第三至第十级为坝体全断面填筑,每级荷载坝体上升约 10 m;在蓄水期,分 6 级荷载模拟水库水位逐渐上升的过程,每级水荷载上升也约为 10 m。全部共有 16 级加载完成坝体填筑和蓄水模拟。

2 计算结果分析

2.1 坝体的应力变形

竣工期和蓄水至正常蓄水位时坝体最大沉降值分别为 32.9、37.3 cm,出现部位均在大约 2/3 坝高

处(图 3(a)、(b)),其沉降量分别占最大坝高的 0.55% 和 0.62%。坝体的水平位移在上、下游两侧基本呈对称分布,蓄水期后坝体上游面的水平位移最大值较竣工期有少许的减少,从 10.9 cm 减少为 10.4 cm,而下游面的最大值较竣工期则由 12.3 cm 增大为 15.1 cm,由此可以看出在受到水压力的作用后,整体有向坝体下游移动的趋势。

从图 3(c)、(e)可以看出:竣工期和蓄水期坝体的大主应力分布较为规则,从坝顶到坝底逐步增加,其应力等值线基本与上下游坝坡平行;主要表现为压应力;极值均出现在坝体靠近底部混凝土基座的位置,蓄水后大主应力比竣工期有一定的增大,最大值为 1.571 MPa。从图 3(d)、(f)可以看出:坝体的小主应力分布规律与大主应力基本一致,竣工期、蓄水期坝体小主应力的最大值为 0.643、0.854 MPa,为压应力,且均发生在廊道底座附近,值得注意的是,在蓄水期,上游坝壳堆石料由于水的浸入作用以及浮托力的作用,小主应力大为降低。

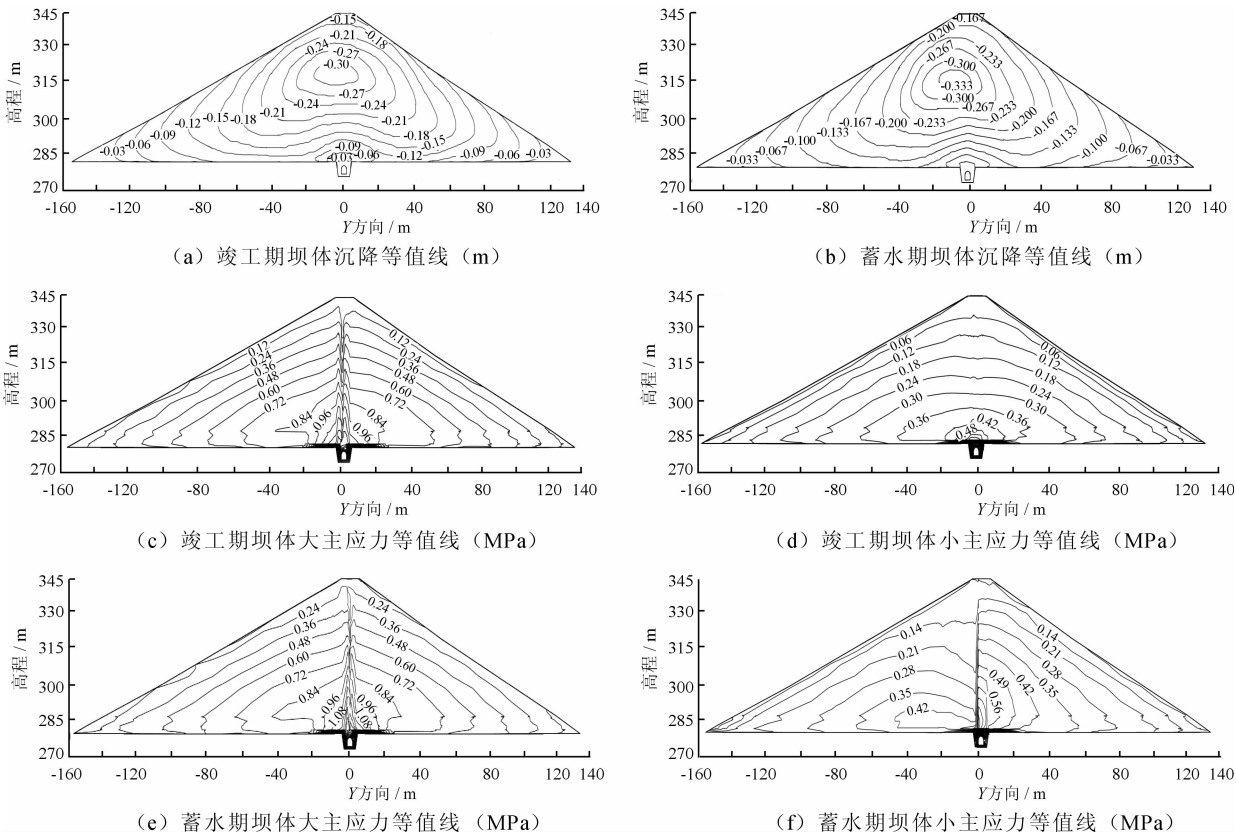


图3 竣工期和蓄水期坝体的沉降及应力等值线图

2.2 心墙的应力变形

竣工期沥青混凝土心墙最大沉降值为 32.5 cm, 蓄水后心墙的最大沉降量有所增大, 增大为 35.3 cm, 最大沉降量的出现部位和竣工时的大体一致, 图 4(a) 给出了最大剖面心墙竖直位移的变形曲线。心墙沿水流方向位移的最大值在竣工期和蓄水期分别为 0.7、7.2 cm, 且最大值的出现位置发生了变化, 图 4(b) 给出了最大剖面心墙水平位移的变形曲线。

竣工期心墙大主应力与小主应力的极值分别为 1.076、0.548 MPa, 而蓄水后其大主应力与小主应力的极值分别为 1.327、0.743 MPa; 竣工期和蓄水后心墙的应力等值线与等高线基本平行, 且从坝顶向坝基呈现逐渐加大的趋势; 不管是在竣工期还是蓄水期, 心墙基本全部受压, 仅在右岸高程为 320.0 m 部位和心墙顶部出现小范围的拉应力区, 且拉应力最大值不超过 1 MPa。

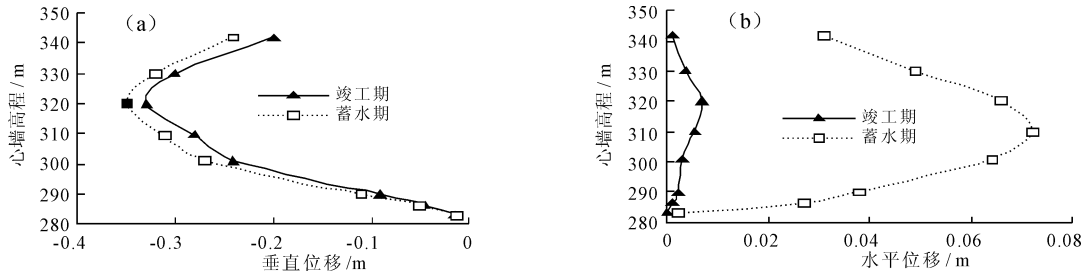


图4 竣工期和蓄水期的心墙位移的变形曲线

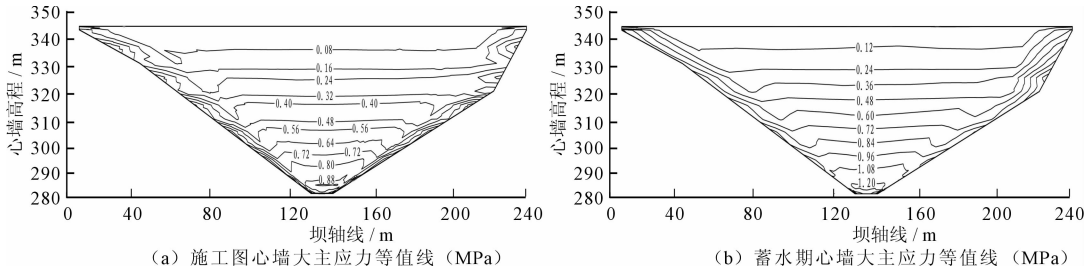


图5 竣工期和蓄水期心墙的沉降及应力等值线图

3 沥青混凝土材料参数敏感性分析

3.1 敏感性分析方法及方案

在沥青混凝土心墙堆石坝的应力应变研究中,人们最关心的是沥青混凝土心墙的最大垂直位移 $z_{\max}$ 和最大主应力 $\sigma_{1\max}$ <sup>[6-11]</sup>,因此本文选取这两个计算结果作为待分析的特性目标指标。因为不能将 $z_{\max}$ 和 $\sigma_{1\max}$ 表示为关于模型材料参数的简单显式表述式。为了简便,本文主要利用大型有限元计算软件,结合以上实际工程进行模拟计算分析<sup>[12-13]</sup>。敏感性分析的有限元模型如图 1。

参数敏感性分析<sup>[14-15]</sup>的具体方案为:沥青混凝土邓肯-张 E-B 模型的待分析参数为  $K$ 、 $n$ 、 $\varphi$ 、 $C$ 、 $K_b$ 、 $m$ , 并选择这 6 个参数的变化范围为 -60%、-30%、30%、60%。

3.2 沥青混凝土材料参数敏感性分析

由图 6(a) 和表 2 可以看出,  $K$ 、 $n$ 、 $\varphi$ 、 $C$ 、 $K_b$ 、 $m$  6 个参数对  $z_{\max}$  的影响各不相同。 $K$ 、 $n$ 、 $\varphi$ 、 $C$ 、 $K_b$  这 5 个参数在 -60% 到 60% 区间变化时,  $z_{\max}$  的变化不是很明显, 参数减小 60% 时,  $z_{\max}$  的最大变化率仅为 2.93%, 其规律为基本呈线性递减, 变化趋势接近直线; 而这 5 个参数中,  $K$  对  $z_{\max}$  的影响最大,  $n$  次之,  $C$  对  $z_{\max}$  的影响小于  $n$ ,  $\varphi$  对  $z_{\max}$  的影响大于  $K_b$  而小于  $C$ ; 更值得注意的是参数  $m$  的变化对  $z_{\max}$  的影响甚微, 几乎可以说是没有影响。由此可以得出 6 个参数对心墙最大垂直位移  $z_{\max}$  的影响按从大到小的顺序排列为:  $K > n > C > \varphi > K_b > m$ 。

由图 6(b) 和表 3 可以看出,  $K$ 、 $n$ 、 $\varphi$ 、 $C$ 、 $K_b$ 、 $m$  6 个参数对  $\sigma_{1\max}$  的影响各不相同。 $K$ 、 $n$ 、 $\varphi$ 、 $C$ 、 $K_b$  这 5 个参数在 -60% 到 60% 区间变化时,  $\sigma_{1\max}$  的变化规律为基本呈线性递增, 变化趋势接近直线。在各个参数减小的情况下, 对  $\sigma_{1\max}$  的影响不是很大, 参数减小率达 60% 时,  $\sigma_{1\max}$  的减小率最大为 14.78%; 而在各个参数增大情况下, 参数增大率达 60% 时,  $\sigma_{1\max}$  的增大率最大为 38.72%。综合来看这 5 个参数中,  $n$  对  $\sigma_{1\max}$  的影响最大,  $K$  次之,  $C$  和  $K_b$  对  $\sigma_{1\max}$  的影响相当且均小于  $K$ ,  $\varphi$  对  $\sigma_{1\max}$  的影响小于  $C$  和  $K$ ; 和各参数对  $z_{\max}$  的影响一样, 参数  $m$  的变化对  $\sigma_{1\max}$  也几乎没有影响。由此可以得出 6 个参数对心墙最大主应力  $\sigma_{1\max}$  的影响按从大到小的顺序排列为:  $n > K > K_b > C > \varphi > m$ 。

由以上分析可以看出,  $K$ 、 $n$ 、 $\varphi$ 、 $C$ 、 $K_b$ 、 $m$  6 个参数对心墙的  $z_{\max}$  和  $\sigma_{1\max}$  的影响均不一样。相对而言, 参数变化对  $z_{\max}$  的影响要小于对  $\sigma_{1\max}$  的影响, 且  $K$ 、

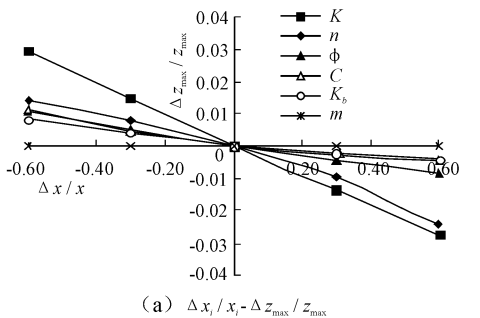
$n$  对于  $z_{\max}$  和  $\sigma_{1\max}$  来说都属于高敏感性参数, 而  $m$  对于  $z_{\max}$  和  $\sigma_{1\max}$  来说却属于低敏感性参数。因此, 相较而言, 在沥青混凝土邓肯-张 E-B 模型试验参数求解过程中,  $K$ 、 $n$  值的确定更为重要, 在以后的试验研究中, 可结合实际测量值进行反分析<sup>[16]</sup>, 已得到更为合理的数值。换言之, 在以后的模型参数反分析时, 参数  $K$ 、 $n$  是首选。而参数  $m$  的确定可以略微粗糙一点, 因为其对于沥青混凝土心墙的应力应变影响不大, 有条件时, 可以进行反分析, 如果条件有限时, 可以暂不考虑。

表 2 沥青混凝土邓肯-张 E-B 模型各参数变化对心墙  $z_{\max}$  的影响结果表 ( $z_{\max}$  的变化率) %

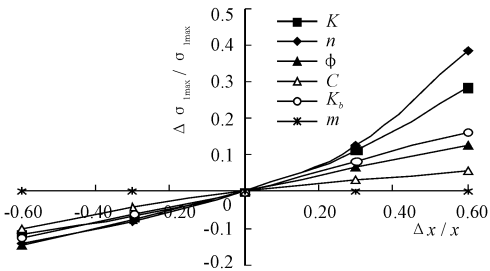
| 变化率 | $K$   | $n$   | $C$   | $\varphi$ | $K_b$ | $m$ |
|-----|-------|-------|-------|-----------|-------|-----|
| -60 | 2.93  | 1.42  | 1.07  | 1.10      | 0.82  | 0   |
| -30 | 1.48  | 0.79  | 0.54  | 0.44      | 0.41  | 0   |
| 0   | 0     | 0     | 0     | 0         | 0     | 0   |
| 30  | -1.36 | -0.99 | -0.47 | -0.28     | -0.25 | 0   |
| 60  | -2.74 | -2.43 | -0.82 | -0.47     | -0.41 | 0   |

表 3 沥青混凝土邓肯-张 E-B 模型各参数变化对心墙  $\sigma_{1\max}$  的影响结果表 ( $\sigma_{1\max}$  的变化率) %

| 变化率 | $K$    | $n$    | $C$    | $\varphi$ | $K_b$  | $m$ |
|-----|--------|--------|--------|-----------|--------|-----|
| -60 | -11.68 | -14.09 | -14.78 | -10.31    | -12.89 | 0   |
| -30 | -6.82  | -8.25  | -7.79  | -4.24     | -6.19  | 0   |
| 0   | 0      | 0      | 0      | 0         | 0      | 0   |
| 30  | 11.39  | 12.54  | 6.70   | 3.15      | 8.42   | 0   |
| 60  | 28.29  | 38.72  | 12.43  | 5.61      | 16.09  | 0   |



(a)  $\Delta x_i / x_i - \Delta z_{\max} / z_{\max}$



(b)  $\Delta x_i / x_i - \Delta \sigma_{1\max} / \sigma_{1\max}$

图 6 沥青混凝土邓肯-张 E-B 模型各参数的  $\Delta x_i / x_i - \Delta z_{\max} / z_{\max}$  及  $\Delta x_i / x_i - \Delta \sigma_{1\max} / \sigma_{1\max}$  关系曲线

## 4 结 语

(1) 坝体有限元计算结果表明, 坝体上、下游坝坡附近小范围内出现拉应力, 以及其应力水平有大于 1.0 的情况出现, 因此, 建议设计时在上、下游坝坡采取必要的护坡措施, 同时在大坝填筑施工时应适当提高上、下游坝坡附近坝体的压实标准, 在碾压过程中, 将其孔隙率控制在允许范围内, 以保证坝体的稳定安全;

(2) 由竣工期和蓄水期坝体的大主应力图知, 坝体应力在心墙附近有突变的现象发生, 这是由于堆石体与心墙的模量数相差太大所致, 故建议将沥青混凝土心墙、过渡料及坝壳料的模量数  $K$  控制在合理的比例范围内, 在设计时将心墙上、下游过渡层的  $K$  值适当减小, 使得心墙与其上下游过渡层间变形尽量协调; 而将上、下游坝壳料的  $K$  值适当加大, 可减小坝体及心墙沉陷和水平位移, 有利于改善心墙的应力状况, 保证心墙稳定可靠;

(3) 为保证心墙的稳定安全, 可适当调整沥青混凝土的配合比, 并根据试验计算调整心墙的变形模量, 使之和过渡料的模量协调一致, 尽量减小差异沉降带来的不利影响。因此, 建议对坝壳料、沥青混凝土心墙料及其过渡料进行三轴试验, 使其应力、应变达到良好的相关关系。

(4) 沥青混凝土  $E-B$  模型参数  $K$ 、 $n$  对心墙的  $z_{\max}$  和  $\sigma_{1\max}$  的影响较大, 属于高敏感性参数; 相对而言, 参数  $m$  对于  $z_{\max}$  和  $\sigma_{1\max}$  来说却属于低敏感性参数。6 个参数对心墙最大垂直位移  $z_{\max}$  的影响按从大到小的顺序排列为:  $K > n > C > \varphi > K_b > m$ ; 对心墙最大主应力  $\sigma_{1\max}$  的影响按从大到小的顺序排列为:  $n > K > K_b > C > \varphi > m$ 。且心墙应力受外界条件的影响比应变受的影响要大一些。

### 参考文献:

- [1] 陈慧远. 土石坝有限元分析[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988: 8-12, 38-41.
- [2] 王瑞骏, 李炎隆, 韩艳丽. 均质土坝基础混凝土防渗墙应

力变形特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(9): 222-228.

- [3] Shouyi Li, Yanlong Li, Zheng Si, et al. Research on seepage computation model of face slab cracks based on Equi-width joint constant flow[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(7-8): 1000-1004.
- [4] 李炎隆, 李守义, 司政, 等. 接缝止水失效情况下湿化对面板堆石坝应力变形的影响分析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 342-346.
- [5] 张丙印, 李全明, 熊焰, 等. 三峡茅坪溪沥青混凝土心墙堆石坝应力变形分析[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 18-21.
- [6] 郭雪莽, 王成西, 吴焕营. 沥青混凝土心墙土石坝的非线性有限元分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, 3(2): 131-136.
- [7] 胡春林, 黄廖山, 李友华. 土石坝沥青混凝土心墙的变形特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(9): 47-49.
- [8] 崔娟, 沈振中, 凌春海. 官帽舟沥青混凝土心墙混合坝应力变形分析[J]. 水电能源科学, 2008, 26(2): 72-75.
- [9] 荣冠, 朱焕春. 茅坪溪土石坝沥青混凝土心墙施工期变形分析[J]. 水利学报, 2003, 34(7): 115-119.
- [10] 尹蓉蓉, 朱合华. 邓肯-张模型参数敏感性分析[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2003, 17(1): 20-23.
- [11] 王娟, 李勋峰. 金平沥青混凝土心墙堆石坝三维有限元数值分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25(1): 71-74.
- [12] Zhong W X, Sun S M. A finite method for elastio-plastic structure and contact problem by parametric quadratic programming[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 26: 2723-2738.
- [13] NgO D, Scordelis A C. Finite element analysis of reinforced concrete[J]. ACI Journal, 1967, 46(14): 152-163.
- [14] 王千, 李忠良. 岩体力学参数敏感性分析在工程中的应用[J]. 东北电力技术, 2005(11): 17-20.
- [15] 张继周, 缪林昌, 王华敬. 邓肯-张模型参数敏感性分析与控制变形研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(3): 75-79.
- [16] 朱晟, 张美英, 戴会超. 土石坝沥青混凝土心墙力学参数反演分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 636-644.