

# 金佛山混凝土面板堆石坝应力变形二维有限元分析

张慧萍<sup>1</sup>, 刘良军<sup>2</sup>, 邓弟平<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆市水利电力建筑勘测设计研究院, 重庆 400020; 3. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 成都 610061)

**摘要:** 针对重庆市金佛山混凝土面板堆石坝初步设计方案, 通过静力平面应力变形分析计算, 分析了坝体在竣工期、蓄水期的应力变形分布规律, 重点研究了主堆石孔隙率、次堆石材料对面板和趾板的应力变形、周边缝变位等的影响, 为选取主堆石孔隙率、次堆石区筑坝材料提供依据。计算结果表明, 主堆石孔隙率采用 20.1% 和 19.1% 均可行, 次堆石筑坝材料采用弱风化带粉砂岩: 页岩= 7: 3 和弱风化带粉砂岩: 页岩= 5: 5 均是可行的。但是相对于其他方案, 采用主堆石孔隙率为 20.1%, 次堆石筑坝材料为弱风化带粉砂岩: 页岩= 7: 3 的方案, 坝体、面板、趾板的应力变形较小。

**关键词:** 混凝土面板堆石坝; 应力应变; 有限元分析

**中图分类号:** TV64   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0149-05

## Two-dimensional Finite Element Stress-Displacement Analysis for the Jinfo Mountain Concrete Face Rockfill Dam

ZHANG Hui ping<sup>1</sup>, LIU Liang jun<sup>2</sup>, DENG Di ping<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Surveying and Design Institute of Water Resources, Electric Power and Architecture, Chongqing 400020, China; 3. Southwest Geotechnical & Design Institute of China Nuclear Industry, Chengdu 610061, China)

**Abstract:** Based on the preliminary design scheme of Jinfo Mountain concrete face rockfill dam located in Chongqing, the stress deformation distributions of the dam during the completion period and storage period were analyzed through the stress deformation calculation on the static plane. The study was focused on the effects of main rockfill porosity ratio and secondary rockfill dam materials on the stress deformation distribution of the face slab and toe slab of the dam and the deformation of the peripheral joint, which can form the basis for the selection of dam materials. The calculation results showed that the main rockfill porosity ratios of 20.1% and 19.1% are feasible, and the secondary rockfill dam materials with the ratios between the weak weathered zone silty sandstone and shale of 7: 3 and 5: 5 are feasible. The stress deformation of dam body, face slab, and toe slab is small with the main rockfill porosity ratio of 20.1% and the secondary rockfill dam materials with the ratio between the weak weathered zone silty sandstone and shale of 7: 3.

**Key words:** concrete face rockfill dam; stress and strain; finite element analysis

混凝土面板堆石坝从 20 世纪 30 年代的抛填式发展到 70 年代的现代碾压式, 是筑坝史上的一个巨大突破。碾压式面板堆石坝具有工程量小、工期短、造价低、安全性高等优点, 常成为坝型选择中的一种主要方案<sup>[1-6]</sup>。

按目前的科学发展水平, 用有限元方法进行大坝应力应变分析, 可以预估在施工期及运行期坝体的变形分布、面板应力应变、周边缝和垂直缝的张开量与压缩量等。为堆石体坝料分区、施工程序安排及运行性态预测提供科学依据。对指导坝体结构设计具有重要的意义<sup>[7]</sup>。

在金佛山水利工程初步设计方案中, 将混凝土面板堆

石坝作为一个比选方案。该工程坝址开挖料和料场爆破料中均含有一定比例的页岩, 如果在坝体填筑料中能够利用部分页岩料, 将具有显著的经济效益和环境效益。本文拟对重庆市金佛山水利工程混凝土面板堆石坝进行二维静力有限元应力应变分析, 探讨竣工期和蓄水期坝体、面板、趾板、周边缝的应力和变形特点, 并对页岩料的利用问题进行了研究。

## 1 工程概况

金佛山水利工程位于重庆市南川区、万盛区以及贵州省桐梓县, 是以灌溉、供水为主, 兼顾发电等综合利用的大(2)

收稿日期: 2013-02-22   修回日期: 2013-11-06   网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01149.html>

基金项目: 重庆市基础与前沿研究计划项目“山区河流港区填方砂泥岩混合料的工程特性研究”(cstc2013jcyjA30009)

作者简介: 张慧萍(1972-), 女, 甘肃陇西人, 高级实验师, 主要从事土石坝工程方面的研究。E-mail: zhanghui ping@s@126.com

型水利工程, 水库枢纽工程由拦河大坝、溢洪道、泄洪放洪洞、坝后式电站、渠道工程等组成。

混凝土面板堆石坝的设计坝顶高程 839.80 m, 坝顶宽 9.0 m, 最大坝高 109.80 m, 坝顶轴线长 298.20 m。堆石坝上游边坡采用 1: 1.4。下游边坡采用 1: 1.4, 坡面结合进厂交通道路布置三层 7.0 m 宽“Z”型马道, 下游综合坡度 1.63, 下游面采用大块石护坡, 水平宽度 1.0 m。

从图 1 可知, 坝体从上游向下游依次分为盖重区、上游黏土铺盖区、垫层区、特殊垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区、排水堆石区。垫层料和过渡料采用响滩子料场奥陶系中

统宝塔组(O<sub>2b</sub>)新鲜或微、弱风化灰岩料; 主堆石料采用大坪料场的小河坝组新鲜以及微、弱风化石英粉砂岩; 次堆石料采用大坪料场小河坝组新鲜及微、弱风化石英粉砂岩, 部分采用大坝、溢洪道、左岸近坝库岸边坡开挖的小河坝组新鲜及微、弱风化石英粉砂岩开挖料。

## 2 坝体材料的本构模型

混凝土(C25)在达到破坏强度之前, 线性关系较好, 本研究中作为线弹性材料考虑。

土石料应力应变表现为非线性, 本构模型采用邓肯-张

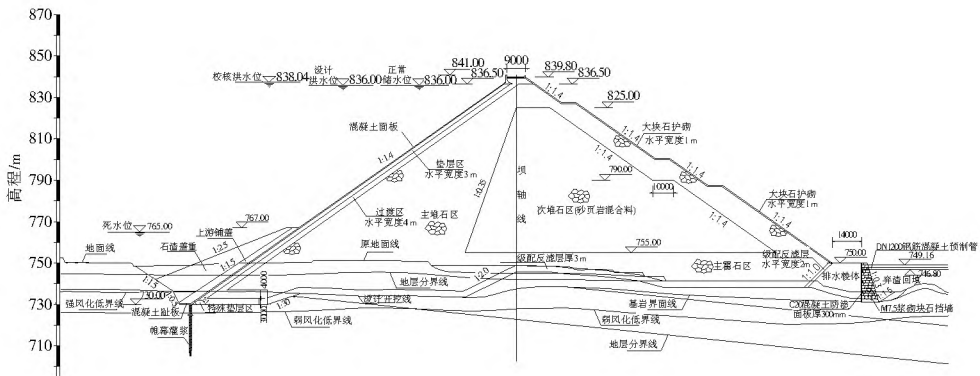


图 1 坝体典型剖面

Fig. 1 Typical section of the dam

E-B 非线性弹性模型<sup>[8-9]</sup>。

### 2.1 邓肯-张 E-B 非线性弹性模型

邓肯-张 E-B 非线性弹性模型中, 切线弹性模量  $E_t$  和体积模量  $B$  分别表示为:

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

$$B = K_b P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (2)$$

式中:  $K_b$ 、 $m$ 、 $R_f$ 、 $K$ 、 $n$  为模型参数;  $c$  为土体黏聚力;  $\varphi$  为土体内摩擦角;  $P_a$  为大气压力。

### 2.2 单元破坏后的应力修正

单元发生破坏后, 需对相应单元的应力进行修正, 计算才能继续进行。修正的方法是: 假定大主应力  $\sigma_1$  不变, 改变小主应力  $\sigma_3$  使其与  $\sigma_1$  构成的应力摩尔圆与抗剪强度包络线相切。中主应力  $\sigma_2$  则根据修正前后的应力洛德参数不变来确定, 即:

$$\hat{\sigma}_2 = \hat{\sigma}_3 + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} (\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_3) \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为修正前的三个主应力;  $\hat{\sigma}_1$ 、 $\hat{\sigma}_2$ 、 $\hat{\sigma}_3$  为修正后的三个主应力。

再根据修正前后的主应力方向不变的原则, 求出修正后的 6 个应力分量。

## 3 计算模型及方案

### 3.1 有限元计算模型

计算模型见图 2, 其中坐标系规定如下: 顺水流方向为 X 轴, 指向下游为正方向; 沿坝轴线方向为 Y 轴, 指向纸面方向为正。平面有限元计算采用的有限元网格见图 2。单元总数 351, 节点总数 772。

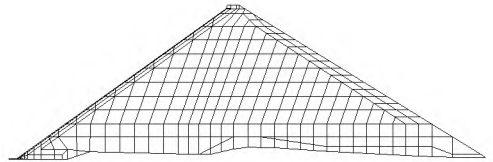


图 2 二维有限元模型单元网格

Fig. 2 Two dimensional meshes of FEM model

### 3.2 计算参数

坝体堆石料采用邓肯-张(E-B)模型, 计算参数见表 1。

垫层料、特殊垫层料、过渡区、主堆石区、次堆石区、排水棱体、坝基覆盖层和坝肩覆盖层等材料的邓肯-张模型参数由重庆市水利电力建筑勘测设计研究院提供, 主要依据《重庆市南川区金佛山工程堆石坝材料试验研究》。计算中, 土石料的强度均假定满足非线性的强度公式:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi I_g (\sigma_3 / P_a) \quad (4)$$

面板与垫层接触面、面板与特殊垫层接触面、周边缝均采用有厚度的接触面单元模拟。模型参数参照相关工程并结合经验确定。接触面单元有无厚度单元(如 Goodman 单元)和有厚度单元(如 Desai 单元)两类。本文认为面板与垫层、面板与特殊垫层间发生相对剪切变形的可能性大于相对滑移的可能性, 宜用有厚度的接触面单元模拟; 周边缝本身是具有一定的厚度, 因此采用有厚度的接触面单元模拟是合理的。

混凝土面板及趾板(C25)按照线弹性材料考虑, 弹性模量取为常量,  $E = 2.8 \times 10^7$  kPa, 泊松比取为常量  $\nu = 0.167$ 。混凝土面板和趾板的容重均取为  $\gamma = 24$  kN/m<sup>3</sup>, 抗拉强度取 1.27 MPa。

面板与垫层接触面、面板与特殊垫层接触面、周边缝的邓肯-张 E-B 模型参数见表 2。

表1 土石料邓肯张 E-B 模型参数

Table 1 Duncarr chang E-B model parameters of the earthrock material

材料	$R_f$	$K$	$n$	$K_b$	$m$	$K_{ur}$	$\varphi_0(^{\circ})$	$\Delta\varphi(^{\circ})$	$\rho(g \cdot cm^{-3})$	备注
垫层料	0.82	1 115	0.30	340	0.24	2 230	44.4	5.5	2.42	弱风化带石灰岩
特殊垫层料	0.82	1 153	0.29	360	0.22	2 306	44.0	4.9	2.42	弱风化带石灰岩
过渡料	0.81	910	0.25	440	0.15	1 820	47.8	8.2	2.36	弱风化带粉砂岩
主堆石料	0.85	1 050	0.25	530	0.17	2 100	49.0	8.3	2.35	弱风化带粉砂岩(孔隙率 20.1%)
主堆石料	0.85	1 150	0.26	560	0.17	2 300	49.5	8.4	2.367	弱风化带粉砂岩(孔隙率 19.1%)
次堆石料	0.84	840	0.24	410	0.20	1 680	42.8	6.7	2.36	弱风化带粉砂岩: 页岩= 7: 3
次堆石料	0.82	730	0.26	400	0.18	1 460	41.6	7.7	2.37	弱风化带粉砂岩: 页岩= 5: 5
排水棱体料	0.85	1 050	0.25	530	0.17	2 100	49.0	8.3	2.35	弱风化带粉砂岩
坝基覆盖层	0.77	440	0.38	140	0.31	880	38.3	8.5	2.23	-

表2 有厚度接触面单元邓肯张 E-B 模型参数

Table 2 Duncarr chang E-B model parameters of the face elements with thickness

材料	$R_f$	$K$	$n$	$K_b$	$m$	$K_{ur}$	$\varphi(^{\circ})$	$\Delta\varphi(^{\circ})$	$\rho(g \cdot cm^{-3})$	备注
面板与垫层接触面	0.82	1 115	0.30	340	0.24	2 230	44.4	5.5	2.42	经验值
面板与特殊垫层接触面	0.82	1 153	0.29	360	0.22	2 306	44.0	4.9	2.42	经验值
周边缝	0.0	100	0	0.42	0	100	35	0	1.5	经验值

### 3.3 计算方案

主要计算方案共 4 种, 见表 3。计算中对大坝采用分级加荷模拟施工加荷过程, 蓄水荷载也分多级施加。整个加荷过程共分为 18 级。

表3 有限元计算方案

Table 3 The finite element calculation schemes

方案编号	土石料本构模型	主堆石孔隙率	次堆石材料名称
E-B 1	邓肯-张 E-B 模型	20.1%	弱风化带粉砂岩: 页岩= 7: 3
E-B 2	邓肯-张 E-B 模型	20.1%	弱风化带粉砂岩: 页岩= 5: 5
E-B 3	邓肯-张 E-B 模型	19.1%	弱风化带粉砂岩: 页岩= 7: 3
E-B 4	邓肯-张 E-B 模型	19.1%	弱风化带粉砂岩: 页岩= 5: 5

1 至 14 级为模拟筑坝过程。第 1 级为坝基覆盖层, 由于坝基覆盖层为天然地基土, 固结过程已经完成, 计算中不考虑其在自重作用下的变形; 第 2 至 12 级为模拟坝体施工; 第 13、14 级模拟混凝土面板施工。

15 至 18 级模拟蓄水过程。第 15 级模拟库水位自坝底蓄水至高程 756.80 m; 第 16 级模拟库水位自高程 756.80 m 蓄水至高程 783.20 m; 第 17 级模拟库水位自高程 783.20 m 蓄水至高程 809.60 m; 第 18 级模拟库水位自高程 809.60 m 蓄水至正常库水位高程 836.00 m。

## 4 计算结果与分析

### 4.1 坝体变形

图 3~图 6 为 E-B 3 方案的竣工期和蓄水完成期的沉降和水平位移等值线图。可以发现如下结果。

在坝体施工完成期, 坝体沉降基本呈上下游对称分布, 最大沉降值位于近 2/3 坝高处。竣工期方案 E-B 1、E-B 2、E-B 3 和 E-B 4 的坝体沉降最大值依次为 80.49 cm、86.11 cm、78.85 cm 和 83.98 cm, 分别占最大坝高的 0.73%、0.78%、0.72% 和 0.76%; 蓄水后依次为 82.94 cm、88.62 cm、81.31 cm 和 86.46 cm, 分别占最大坝高的 0.76%、0.81%、0.74% 和 0.79%。

蓄水完成之后, 坝体顺河向水平位移基本呈上下游对称, 向上游和向下游的水平位移最大值均发生在近半坝高处。竣工期方案 E-B 1、E-B 2、E-B 3 和 E-B 4 的坝体向上游的水平位移最大值依次为 25.33 cm、25.77 cm、22.10 cm 和 22.60 cm, 分别占最大坝高的 0.23%、0.23%、0.20% 和 0.21%; 坝体向下游的水平位移最大值依次为 38.71 cm、44.57 cm、37.58 cm 和 43.38 cm, 分别占最大坝高的 0.35%、0.41%、0.34% 和 0.39%。蓄水后坝体向上游的水平位移最大值依次为 24.48 cm、24.91 cm、21.30 cm 和 21.80 cm, 分别占最大坝高的 0.22%、0.22%、0.19% 和 0.20%; 坝体向下游的水平位移最大值依次为 39.38 cm、45.26 cm、38.22 cm 和 43.98 cm, 分别占最大坝高的 0.36%、0.41%、0.35% 和 0.40%。

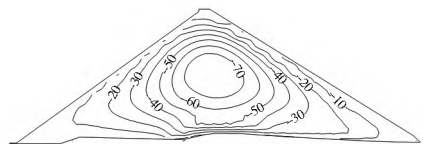


图3 坝体的竣工期沉降等值线(单位: cm)  
Fig. 3 The settlement isoline of the dam body in the completion period (unit: cm)

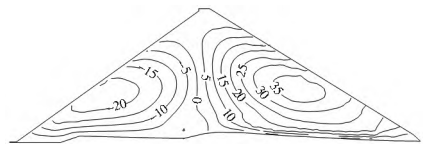


图4 坝体的竣工期水平位移等值线(单位: cm)  
Fig. 4 The horizontal displacement isoline of the dam body in the completion period (unit: cm)

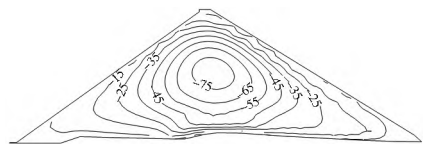


图5 坝体的蓄水期沉降等值线(单位: cm)  
Fig. 5 The settlement isoline of the dam body in the storage period (unit: cm)

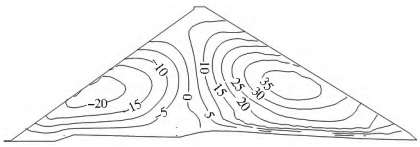


图 6 坝体的蓄水期水平位移等值线(单位: cm)

Fig. 6 The horizontal displacement isoline of the dam body in the storage period (unit: cm)

## 4.2 坝体应力

图 7-图 10 为 E-B 3 方案的竣工期和蓄水完成期的大小主应力等值线图,可以看出,4 个方案的竣工期和蓄水后的坝体大主应力分布均匀,没有出现应力集中区,也没有出现拉应力区;小主应力分布均匀,没有出现应力集中区,也没有出现拉应力区;应力水平分布均匀,没有出现应力水平大于 1.0 的区域,表明坝体没有出现破坏区。

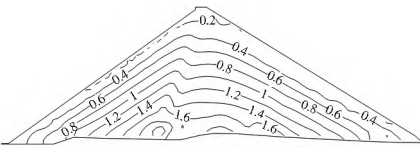


图 7 坝体的竣工期大主应力等值线(单位: MPa)

Fig. 7 The maximum principle stress isoline of the dam body in the completion period (unit: MPa)

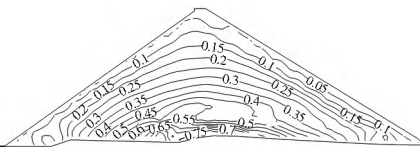


图 8 坝体的竣工期小主应力等值线(单位: MPa)

Fig. 8 The minimum principle stress isoline of the dam body in the completion period (unit: MPa)

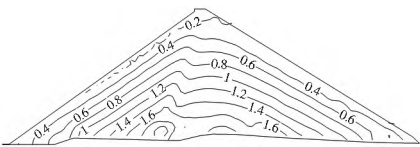


图 9 坝体的蓄水期大主应力等值线(单位: MPa)

Fig. 9 The maximum principle stress isoline of the dam body in the storage period (unit: MPa)

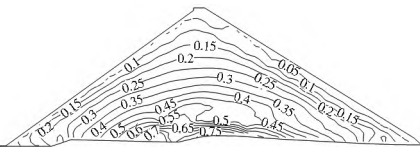


图 10 坝体的蓄水期小主应力等值线(单位: MPa)

Fig. 10 The minimum principle stress isoline of the dam body in the storage period (unit: MPa)

## 4.3 面板变形

从表 4 中可看出,4 个方案的竣工期和蓄水后的面板沉降均很小,竣工期面板沉降最大值小于 0.5 cm,蓄水后面板沉降最大值小于 0.4 cm;水平位移是向上游的,最大水平位移不足 0.15 cm,蓄水后的面板水平位移是向下游的,最大水平位移不足 1.70 cm;总位移最大值不足 0.50 cm,蓄水后的面板总位移最大值不足 1.75 cm。

## 4.4 面板应力

4 个方案的竣工期的面板大主应力分布均匀,没有出现突变区域,也没有出现拉应力区域。大主应力最大值不足 0.90 MPa,蓄水后不足 0.85 MPa。

表 4 面板应力应变值

Table 4 The stress and strain values of the concrete face

方案	工况	混凝土面板 水平位移最 大值/cm	混凝土面 板总位移 最大值/cm	混凝土面板 大主应力最 大值/MPa	混凝土面板 小主应力最 小值/MPa
E-B 1	竣工期	-0.14	0.49	0.87	-0.07
	蓄水后	1.64	1.66	0.83	-0.94
E-B 2	竣工期	-0.13	0.49	0.86	-0.07
	蓄水后	1.69	1.72	0.77	-0.95
E-B 3	竣工期	-0.13	0.46	0.85	-0.06
	蓄水后	1.60	1.63	0.80	-0.89
E-B 4	竣工期	-0.12	0.46	0.86	-0.06
	蓄水后	1.58	1.60	0.78	-0.94

从表 4 可知 4 个方案的竣工期的面板小主应力最小值出现了很小的拉应力,最大拉应力不足 0.1 MPa;蓄水后面板小主应力明显减小,拉应力最大值达 0.95 MPa,但小于面板混凝土(C25)抗拉强度 1.27 MPa。面板小主应力分布均匀,没有出现突变区域。

## 4.5 趾板应力

各方案竣工期的趾板大主应力最大值不足 0.50 MPa,蓄水后有所增大,但不足 1.50 MPa。趾板大主应力分布均匀,没有出现突变区域,也没有出现拉应力区域。

各方案竣工期的趾板小主应力最小值出现了很小的拉应力,最大拉应力不足 0.2 MPa;蓄水后趾板小主应力明显减小,拉应力最大值达 1.11 MPa,仍小于趾板混凝土(C25)的抗拉强度 1.27 MPa。

## 4.6 周边缝变位

4 个方案的竣工期的周边缝水平向张开位移最大值仅为 0.6 mm,蓄水后明显增大,最大值为 9.0 mm。竖直向剪切位移竣工期最大值仅为 0.3 mm,蓄水后有所增大,最大值为 3.7 mm。

## 5 结论

(1)通过对金佛山混凝土面板坝进行的二维应力应变计算分析可知,该工程在竣工期和蓄水期坝体变形及应力、面板变形及应力、趾板应力和周边缝变位等方面,应力和变形符合一般规律。坝体整体稳定性较好,能够满足结构稳定要求。

(2)从坝体变形及应力、面板变形及应力、趾板应力和周边缝变位等方面分析,主堆石孔隙率采用 20.1% 和 19.1% 是可行的,次堆石筑坝材料采用弱风化带粉砂岩:页岩=7:3 和弱风化带粉砂岩:页岩=5:5,均是可行的。

由于二维有限元计算仅选取的是坝体的最大断面作为计算断面,计算得到的坝体应力变形特点与整个坝体的情况存在着差别,因此本次计算仅可作为坝体材料选择设计的参考。另外,计算选取的两个因素(主堆石孔隙率和次堆石筑坝材料)变化对工程造价并没有显著影响,因此本文没有进

行经济方面的分析。

### 参考文献(References):

- [1] 恩戈科. 混凝土面板堆石坝的应力应变计算的发展与灵敏度分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(4): 97-100. (NGOKO. Development and Sensitivity Analysis of Concrete Face Rockfill Dam Stress-Strain Calculations [J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(4): 97-100. (in Chinese))
- [2] 张朝辉. 柏叶口水库混凝土面板堆石坝施工期坝体排水[J]. 山西水利科技, 2011, (4): 10-11. (ZHANG Chaohui. Construction period Dam Body Drainage for Baiyekou Concrete Face Rockfill Dam [J]. Shanxi Hydrotechnics, 2011, (4): 10-11. (in Chinese))
- [3] 吕生玺. 九甸峡混凝土面板堆石坝应力和变形有限元分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 117-120. (LV Shengxi. Finite Element Analysis on Stress and Deformation for Jiudianxia Concrete Face Rockfill Dam [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 117-120. (in Chinese))
- [4] 戴乐军, 杨文龙, 余仲军. 德泽水库混凝土面板堆石坝趾板混凝土裂缝处理[J]. 人民长江, 2012, 43(4): 46-48. (DAI Lejun, YANG Wenlong, YU Zhongjun. Treatment of Concrete Crack of Toe Slab of CFRD of Deze Reservoir [J]. Yangtze River, 2012, 43(4): 46-48. (in Chinese))
- [5] 牟林, 蔡德文. 紫坪铺混凝土面板堆石坝震损特性分析[J]. 吉林水利, 2010, (3): 8-11. (MU Lin, CAI Dewen. Analysis of Earthquake Damage for Zipingpu Concrete Face Rockfill Dam [J]. Jilin Water Resources, 2010, (3): 8-11. (in Chinese))
- [6] 陈传慧, 肖化文. 水布垭水电站面板堆石坝应力变形分析[J]. 水力发电, 2001, (8): 38-39. (CHEN Chuahui, XIAO Huawen. Stress Deformation Analysis Shuibuya Hydropower Station Concrete Face Rockfill Dam [J]. Water Power, 2001, (8): 38-39. (in Chinese))
- [7] 张浩. 牛岭水电站混凝土面板堆石坝三维应力应变分析[J]. 安徽水利科技, 1996, (2): 18-21. (ZHANG Hao. 3-D Stress Deformation Analysis of Niuling Hydropower Station Concrete Face Rockfill Dam [J]. Anhui Water Science and Technology, 1996, (2): 18-21. (in Chinese))
- [8] 邹爽, 罗启北, 杜清贵. 混凝土面板堆石坝变形非线性有限元分析[J]. 贵州水力发电, 2003, (1): 28-30, 34. (ZOU Shuang, LUO Qibei, DU Qingui. Nonlinear Finite Element Analysis on Deformation of Concrete Face Rockfill Dam. Guizhou Water Power, 2003, (1): 28-30, 34. (in Chinese))
- [9] 吴兴征, 栾茂田, 辛军霞. 修正邓肯模型及在面板堆石坝应力与变形分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(A01): 1098-1102. (WU Xirzheng, LUAN Maotian, XIN Junxia. Modification of Duncan's Nonlinear Soil Model and Application in Stress and Deformation Analysis of Concrete Faced Rockfill Dams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(A01): 1098-1102. (in Chinese))
- [9] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. (DENG Julong. The Primary Methods of Grey System [M]. Wuhan: Huazhong University of Science Press, 2002. (in Chinese))
- [10] 王朝阳, 许强, 范宣梅, 等. 灰色新陈代谢 GM(1, 1) 模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2009, (2): 108-111. (WANG Chaoyang, XU Qiang, FAN Xuamei et al. Application of Renewal Gray GM(1, 1) Model to Prediction of Landslide Deformation with Two Case Studies [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, (2): 108-111. (in Chinese))
- [11] 刘国华, 何勇兵, 汪树玉. 土石坝沉降预测中的多变量灰色预测模型[J]. 水利学报, 2003, (12): 84-88. (LIU Guohua, HE Yongbing, WANG Shuyu. Application of Grey Multi-variable Forecasting Model for the Settlement of Earth Dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (12): 84-88. (in Chinese))
- [12] 翟军, 盛建明. MGM(1, n) 灰色模型及应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, (7): 109-113. (ZHAI Jun, SHENG Jianming. The Grey Model MGM(1, n) and Its Application [J]. Systems Engineering theory & Practice, 1997, (7): 109-113. (in Chinese))
- [13] 刘思峰, 郭天榜. 灰色系统理论及应用[M]. 开封: 河南大学出版社, 1991. (LIU Sifeng, GUO Tianbang. Theory of Grey System and Its Application [M]. Kaifeng: Henan University Press, 1991. (in Chinese))
- [14] 龙浩, 高睿, 孔德新, 等. 基于 BP 神经网络马尔科夫链模型的隧道围岩位移预测[J]. 长江科学院院报, 2013, (3): 40-43. (LONG Hao, GAO Rui, KONG Dexin, et al. Forecast of Tunnel's Surrounding Rock Displacement by BP Neural Network and Markov Chain [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, (3): 40-43. (in Chinese))
- [15] Leonard E. Baum, Ted Petrie, George Soules, et al. A Maximization Technique Occurring in the Statistical Analysis of Probabilistic Functions of Markov Chains [J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1970, (41): 164-171.

(上接第 148 页)