

# 街面水电站面板堆石坝应力变形计算分析

胡本雄<sup>1</sup>, 郭晨<sup>2</sup>, 徐泽平<sup>3</sup>

(1. 深圳市水电规划设计院, 广东 深圳 518001; 2. 北京木联能工程科技有限公司, 北京 100011; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

关键词: 面板堆石坝; 应力变形; 街面水电站

摘要: 采用非线性有限元分析方法, 对福建街面水电站面板堆石坝坝体及面板在施工期和蓄水期的应力变形特性进行了分析、研究, 给出了坝体及面板各部分的应力、位移分布, 其计算分析结果除可以为街面工程的设计、施工提供依据外, 对其他类似工程也具有一定的参考价值。

## Stress and deformation analysis of the Jiemian CFRD

Hu Ben-xiong<sup>1</sup>, Guo Chen<sup>2</sup>, Xu Ze-ping<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Water Resources Planning & Design Institute, Shenzhen Guangdong 518001; 2. Beijing Millennium Engineering Technology Co., Ltd, Beijing 100011; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

Key Words: CFRD; stress and deformation; Jiemian Hydropower Station

Abstract: For the Jiemian CFRD with the maximum dam height of 126 m, the stress and deformation properties of dam body and concrete slab were presented in the paper. The computation results could not only be taken as an instruction for the engineering design and construction of the Jiemian CFRD, but also a good reference for other similar projects.

中图分类号: TU313.3

文献标识码: B

## 1 计算方案

福建省尤溪街面水电站大坝坝型为混凝土面板堆石坝, 最大坝高 126 m, 坝顶长 500.5 m。为全面了解坝体在施工期和蓄水期的应力变形情况, 对坝体和面板进行了应力变形计算分析。计算中选取的典型断面如图 1 所示。计算的工况包括了竣工期和蓄水期, 计算分析中模拟了坝体的实际填筑施工步骤和蓄水过程。面板按实际的工况分两期浇筑, 坝体的填筑荷载分 21 步施加, 水库蓄水的过程分成 5 步逐级蓄至正常蓄水位。整个计算分析模型共剖分为 328 个单元、348 个节点。计算分析的网格剖分见图 2。

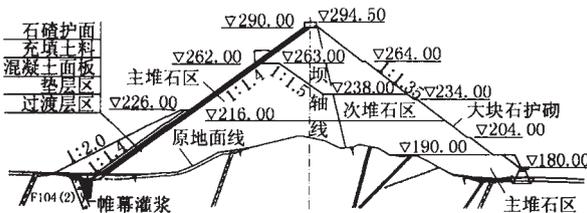


图 1 坝体典型断面示意

## 2 计算模型

计算分析中采用逐次增量的方法模拟堆石的非线性特

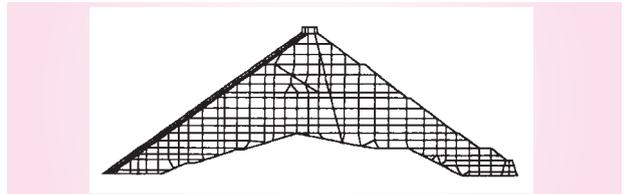


图 2 计算断面的网络剖分

性。荷载被分成若干步, 在每一小增量步里材料的应力应变关系被视为线性。

在平面应变情况下, 以体积模量形式( $E-B$ 模型)表示的本构关系方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{3B}{9B-E} \begin{bmatrix} 3B+E & 3B-E & 0 \\ 3B-E & 3B+E & 0 \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

式中,  $\Delta \sigma_x$  为  $x$  方向应力增量;  $\Delta \varepsilon_x$  为  $x$  方向应变增量;  $\Delta \sigma_y$  为  $y$  方向应力增量;  $\Delta \varepsilon_y$  为  $y$  方向应变增量;  $\Delta \sigma_{xy}$  为剪应力增量;  $\Delta \gamma_{xy}$  为剪应变增量。

在本次计算分析中, 堆石的应力应变关系采用非线性模

收稿日期: 2005-07-28

作者简介: 胡本雄(1963—), 四川绵阳人, 高级工程师, 深圳市水利规划设计院院长, 主要从事水工结构设计方面的工作。

# 设计与施工

型(邓肯模型),如果某单元处于初始加载状态,其切线弹性模量  $E$  和切线体积模量  $B$  的相应计算公式为:

$$E = KP \left( \frac{\sigma_3}{P} \right)^n \left[ 1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2$$

$$B = K_v P \left( \frac{\sigma_3}{P} \right)^m$$

卸荷时,采用卸荷弹性模量  $E_r = K_w P \left( \frac{\sigma_3}{P} \right)^n$

式中  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  为最大和最小主应力;  $P$  为大气压力;  $k$  和  $\phi$  为强度指标;  $R_f$  为破坏比;  $K$  为弹性模量数;  $n$  为弹性模量指数;  $K_b$  为体积模量数;  $m$  为体积模量指数;  $K_w$  为卸荷弹性模量数。

计算分析所采用的材料参数系采用其他工程的类比数值,如表1所示。

表1 材料的邓肯-张模型参数

材料名称	材料参数									
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$K$	$K_w$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\phi$ (°)	$\Delta\phi$ (°)	
垫层	22.1	1 100	2 250	0.40	0.87	680	0.21	52.0	10.0	
过渡	21.9	1 050	2 150	0.43	0.87	620	0.24	53.0	9.0	
主堆石	21.8	1 000	2 050	0.47	0.87	600	0.40	53.0	9.0	
次堆石	21.2	850	1 750	0.6	0.75	580	0.30	52.0	10.0	

## 3 计算结果

在计算分析成果的整理中,主要给出了坝体在竣工期(坝体填筑到顶)和蓄水期(水库水位蓄至正常蓄水位)情况下的应力、变形分布规律。

### 3.1 坝体的应力变形分布

坝体在竣工期和蓄水期的应力变形分布分别如图3~12所示。图中水平坐标以坝轴线为原点,水平位移以指向下游为正,竖向位移向上为正,应力以压为正。

从坝体应力和位移分布上看,竣工期坝体的水平位移大致呈对称分布,上游坝体的水平位移方向朝向上游,下游坝体水平位移方向朝向下游,水平位移的“零线”基本上处于坝轴线的位置上。受基岩地形线的影响,坝体水平位移最大值发生的部位略偏向坝体底部。蓄水以后,由于面板传递的水压力作用,水平位移的分布发生了变化,坝轴线上游部分坝体朝向上游方向的位移有所减小,朝向下游方向的位移有所增加,水平位移的“零线”位置也发生了一些偏转。竣工期坝体的最大垂直位移为0.4 m左右,位置在坝体的中上部并靠近坝轴线附近。蓄水后,坝体的垂直位移的数值略有增加,但相对而言,垂直位移的增加量不大,且垂直位移的分布规律与竣工期相比也没有明显的变化。

坝体应力基本按坝高分布,竣工期和蓄水期坝体最大的大、小主应力均位于坝中线的底部,其中,大主应力的数值比坝体土柱重力略小,坝体底部的大主应力约为1.4 MPa。蓄水后,坝体的大、小主应力在垫层区和过渡区均有所增加,但蓄水作用对坝体大主应力分布的影响相对较小。从蓄水期坝体小主应力的分布看,在蓄水作用下,坝体小主应力分布等值线较竣工期明显上抬,垫层区、过渡区以及部分上游主堆石区的小主应力有较明显的增加。

### 3.2 面板的应力和变形

图13~15分别为竣工期、蓄水期以及由于蓄水(指扣除了

竣工期面板的变形,仅考虑纯粹由水库蓄水荷载所引起的面板的变形)所引起的面板变形。从面板的变形曲线上看,施工期,坝体底部的面板在坝体沉降和水平位移的共同作用下向坝体上游侧突出,而坝体顶部的面板则随顶部坝体向下游侧变形。水库蓄水以后,面板在库水压力的作用下,整体呈向下游侧变形的趋势。坝体底部面板基本恢复至原坝坡处的位置,而顶部面板向下游侧位移的趋势则进一步加大。从由于蓄水引起的面板变形曲线上看,这一挠度曲线基本上是一个平滑的曲线。

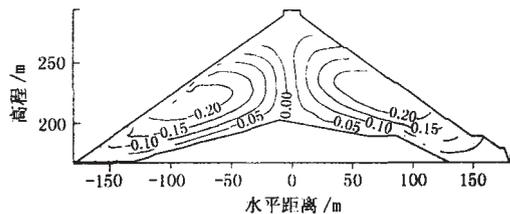


图3 竣工期坝体水平位移分布(单位:m)

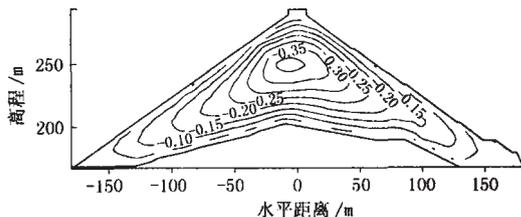


图4 竣工期坝体竖向位移分布(单位:m)

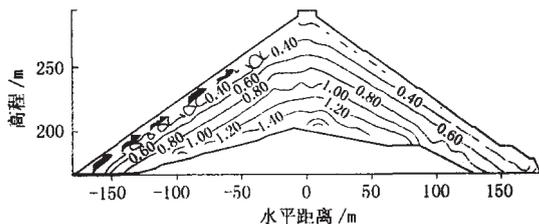


图5 竣工期坝体大主应力分布(单位:MPa)

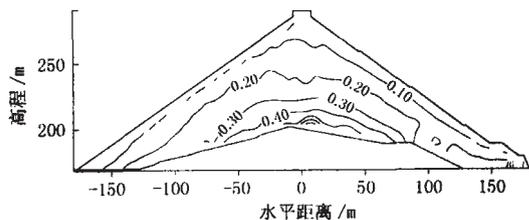


图6 竣工期坝体小主应力分布(单位:MPa)

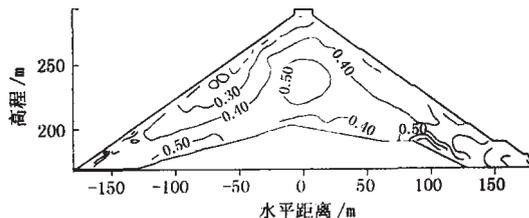


图7 竣工期坝体应力水平分布(单位:MPa)

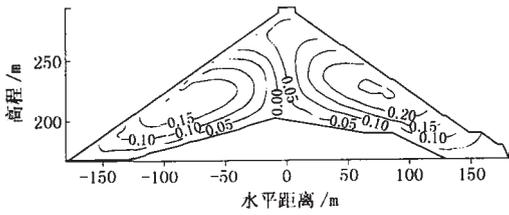


图 8 蓄水期坝体水平位移分布(单位:m)

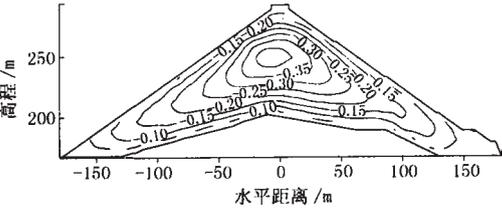


图 9 蓄水期坝体竖向位移分布(单位:m)

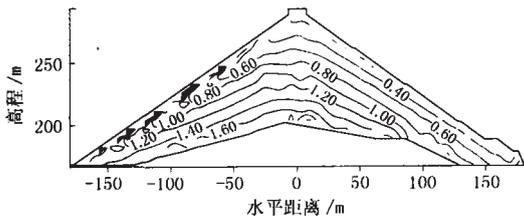


图 10 蓄水期坝体大主应力分布(单位:MPa)

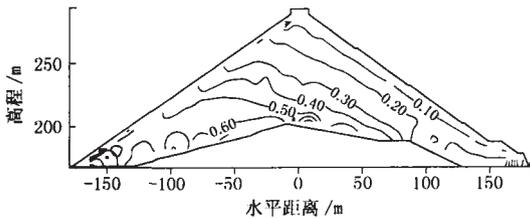


图 11 蓄水期坝体小主应力分布(单位:MPa)

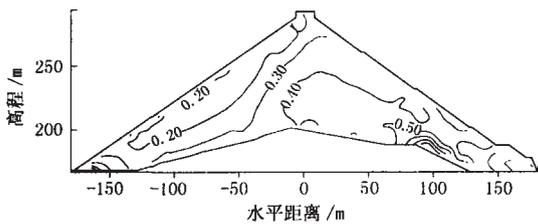


图 12 蓄水期坝体应力水平分布(单位:MPa)

对于面板的应力而言,其顺坡向的应力是一个主要的控制指标。因此,在计算成果的整理上主要给出了面板顺坡向应力的分布。图 16 所示为面板顺坡向应力沿面板高程方向的分布。从面板的应力分布上看,竣工期由于二期面板刚刚浇筑完毕,二期面板的应力相对较小,一期面板的应力相对较大。二期面板顶部存在局部受拉区。蓄水以后,在水荷载的作用下,面板顶部的拉应力消失,面板底部出现拉应力,面板的压应力数值增加,大部分面板的压应力分布是随水头的增加

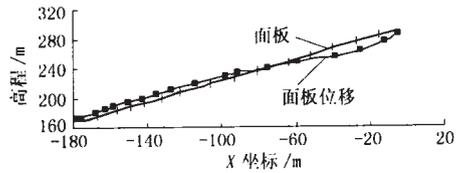


图 13 竣工期面板的位移(注:位移放大了 100 倍)

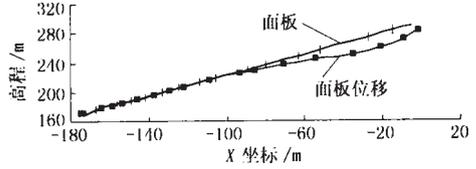


图 14 蓄水期面板的位移(注:位移放大了 100 倍)

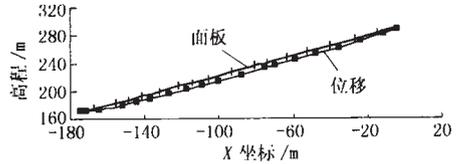


图 15 水库蓄水荷载引起的面板位移(注:位移放大了 100 倍)

而增大的。总体而言,面板沿坡面方向基本上处于受压状态,且下部压应力较大。

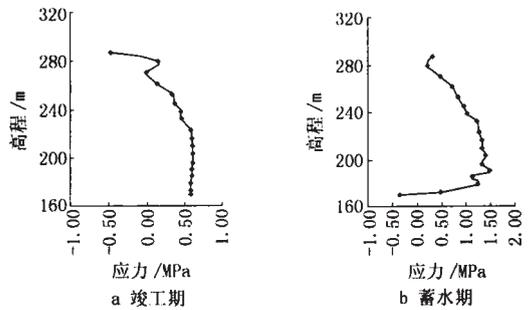


图 16 面板的应力分布

#### 4 主要结论

根据街面板堆石坝平面应力、变形计算分析的结果,可以得出以下几点结论和建议:

(1)从坝体应力变形分析的结果上看,根据目前的坝体断面设计方案,在采用工程类比拟定参数的情况下,坝体在蓄水期的累积垂直位移为 0.4 m 左右,大、小主应力的最大值分别为 1.6 MPa 和 0.6 MPa 左右,面板的最大挠度为 15 cm 左右。从应力变形分析的角度看,这样的数值均在合理范围之内,由此可以说明坝体的断面设计方案是基本可行的。

(2)由于此次平面计算所选取的坝体横断面基岩地形起伏变化较大,因此坝体的上、下游坡均存在一定的沿基岩边坡分别向上、下游位移的趋势。由此,也造成了坝体底部面板在竣工期向上游侧鼓出的位移趋势。不过,从计算结构看,这种位移趋势对面板应力的影响也在设计可接受的范围内。

(3)面板在水库蓄水的情况下,沿坝坡方向主要承受压应力,但在面板与趾板的交接处有局部拉应力。