

台阶形岩石基础及厂坝联合结构的应力计算研究

Study on stress calculation for the structure with step rock foundation and block power plant

刘礼华 周剑波 雷 艳

刘志明

(武汉水利电力大学水电学院, 武汉, 430072) (长江水利委员会, 武汉, 430010)

文 摘 按混凝土材料线弹性和弹塑性两种应力-应变关系模式, 对某河床式电站厂坝及岩基结构进行了三维受力比较分析, 得出了正常工作情况下各典型部位的应力大小, 其结果已被该工程设计所采用。

关键词 结构, 应力, 材料非线性

中图法分类号 TU311.4

作者简介 刘礼华, 男, 1963 年生, 1990 年在武汉水利电力大学获结构力学专业硕士学位, 现为该校副教授。主要从事结构分析与应用研究。

Liu Lihua Zhou Jianbo Lei Yan

(Department of Hydroelectric Engineering Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan, 430072)

Liu Zhiming

(Yangze River Water Conservancy Commission, Wuhan, 430010)

Abstract In this paper, comparison of three-dimensional load-bearing is conducted between the structure of block power plant and rock foundation, according to two models of linear elasticity and elastoplastic concrete. The stress values for each typical part of this structure are derived. The result is adopted in project design.

Key words structure, stress, nonlinear material

1 引 言*

某水利水电枢纽工程因地形、地质和水文条件的限制, 电站厂房为河床式厂房, 坝顶高程为 83 m, 正常工作水头为 39.5 m, 安装 3 台单机容量为 84 MW 的水轮发电机组, 水轮机中心安装高程为 36 m, 其混凝土与岩基的胶接面呈梯形变化, 图 1 为主厂房横剖面图。

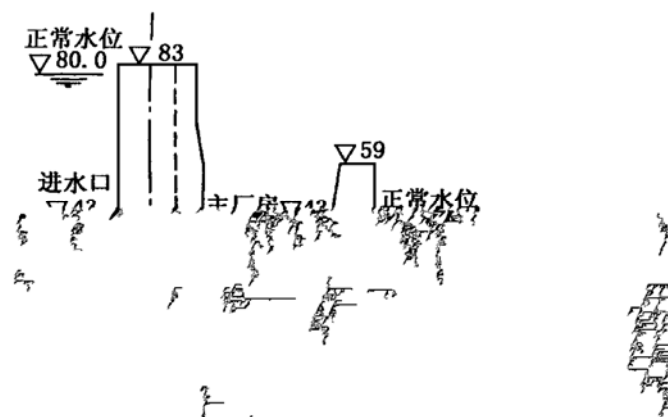


图 1 厂房横断面示意图

Fig. 1 Cross section of factory building

由于在基础处理上, 本工程采取了 2 项新的措施:

①将直角坝踵改成斜坡坝踵(如图 1 所示); ②由于基岩局部破碎, 为节省工程量, 一改过去的平面形状, 将基础设计成台阶形状。考虑到厂房和基础材料性质不

同, 在水压力(正常水位)和坝体自重等荷载作用下, 除坝踵会有拉应力产生之外, 其它区域也会产生局部拉应力。基岩厂坝结构的应力分布较为复杂, 工程设计者十分关心受拉区域材料受拉屈服后的应力变化情况, 故对其作深入研究。

2 材料力学模型

2.1 线弹性材料

厂房结构的混凝土和坝基的岩石, 当其上作用的外荷载较小时, 它们的应力-应变都可以近似地看作为线弹性关系, 即

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

式中 E 为常数弹性模量, 通常采用零应变时切线模量 E_0 。

在水利水电工程中, 由于按线弹性来分析结构受力, 计算简单快捷, 结果基本反应出结构内力变形情况, 所以在很多情况下, 对水工结构仍进行线弹性计算。

因水电站厂房结构受较大外荷作用, 结构的局部

会因应力过大,材料出现压碎、拉裂等现象,其应力-应变并不保持线弹性关系,而是一种非线性本构关系。在本文中对厂房结构也进一步做了非线性有限元分析。

2.2 非线性材料

目前已建立了多种混凝土材料的非线性本构关系,非弹性本构模型是其中之一。从计算和实用角度看,在该模型中以 Elwi, Murray^[1]提出的三轴应力下增量正交本构模型比较简单。该模型将混凝土看作是正交型材料,材料参数根据试验采用等效单轴应力应变关系来确定。单轴应力应变关系式采用以下形式:

单轴受压时,采用 Saenz 表达式^[2]

$$\sigma = \frac{E \varepsilon}{A + B \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right| + C \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right|^2 + D \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right|^3} \quad (2)$$

式中 E 为弹性模量; A, B, C, D 为常量,由下列条件确定:

- a) $\varepsilon = 0, \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_0$ (原点切线模量)
- b) $\varepsilon = \varepsilon_c, \sigma = \sigma_c$ (最大压应力值 σ_c 和相应的应变值 ε_c)
- c) $\varepsilon = \varepsilon_c, \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$
- d) $\varepsilon = \varepsilon_u, \sigma = \sigma_u$ (ε_u 为最大可用压应变,一般 $\varepsilon_u = -0.003 \sim -0.004$)

单轴受拉时, $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_t$ 段为线弹性

$$\sigma = E_0 \varepsilon \quad (3)$$

当 $\varepsilon > \varepsilon_t$ 时为线性软化,材料具有塑性。单轴应力应变关系曲线如图 2 实线所示,图中的应力以拉为正。

重力坝中的混凝土多处于双轴或三轴受力状态,试验表明^[3],多轴应力状态下混凝土的抗拉强度与单轴受力比较差别不大。混凝土在双轴或三轴受压时,微裂缝受约束,材料的抗压强度明显增大。对于该应力状态下的混凝土,在加载条件下,其等效的应力应变关系仍用 Saenz 表达式,只是式(2)中确定参数的 $\sigma_c, \varepsilon_c, \sigma_u, \varepsilon_u$ 要由 $\sigma'_c, \varepsilon'_c, \sigma'_u, \varepsilon'_u$ 代替^[4]。多轴应力状态下的等效单轴应力应变关系曲线如图 2 中虚线所示。有了以上等效的应力应变关系,不难求得混凝土材料对应当前应变状态各主应力方向的即时切线模量 E_i^t ($i = 1, 2, 3$),进而得到混凝土材料的增量正交本构模

型切线刚度矩阵。

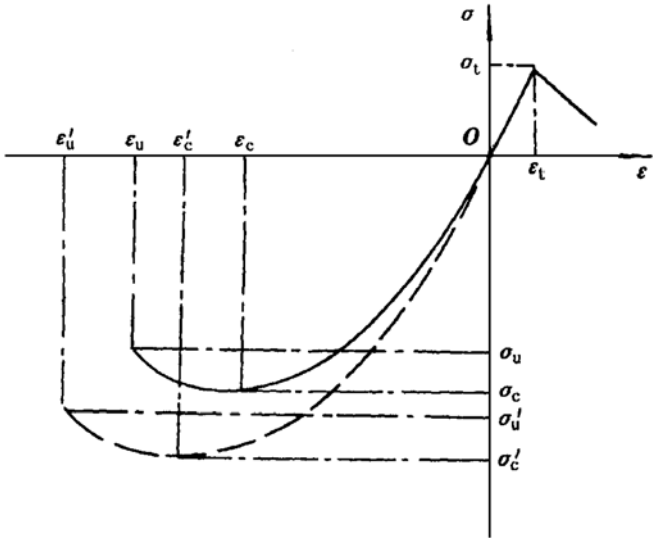


图 2 混凝土应力-应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain relation for concrete

程序系统按上述本构关系建立起混凝土材料模型。混凝土模型具有以下性质:

- a) 混凝土的应力应变关系是非线性的。多轴受力加载时,应力应变关系由等效单轴应力应变关系得到;卸载时,假定材料是各向同性的,且用初始弹模计算切线刚度矩阵。
- b) 混凝土的拉伸破坏和压缩破坏,由主应力空间的破坏包络面界定。
- c) 模拟材料在拉坏和压坏后的性态。当某主拉应力超过混凝土抗拉强度,认为沿主拉应力方向的混凝土开裂,开裂面沿法向和切向的刚度由衰减因子 η_n 和 η_s 折减,一般取 $\eta_n = 1 \times 10^{-4}$, $\eta_s = 0.5$ 。当主压应力超出混凝土破坏包络面时,认为材料被压碎,压碎后的材料假定是各向同性的,一般取 $E_i^t = 1 \times 10^{-4} E$ 。

基岩材料也有上述性质,因此在程序中套用混凝土材料模型模拟岩石地基。

3 三维有限元应力分析

3.1 基本数据

电站厂房高 62 m,宽 23.2 m,长 75 m,采用 250# 混凝土,坝基胶接面设计成三级台阶,建在上峰尖岩上。根据试验资料,混凝土和基岩材料的特性参数取值如表 1 所示。

表 1 混凝土和岩石材料参数

Table 1 Parameters for concrete and rock

材 料	E_0/GPa	μ	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	q_i/MPa	σ_c/MPa	ε_c	σ_u/MPa	ε_u
混凝土	27.9	0.167	24.5	1.90	-18.5	-0.002	-15.0	-0.0027
基 岩	15.0	0.28	26.5	0.333	-5.0	-0.0016	-4.1	-0.0024

3.2 三维有限元分析

取典型厂房坝段(图1)分析,该坝段包括#1~#3机厂坝结构和足够大的岩基范围(上、下游及深度方向分别取坝高的3倍、3倍和2.8倍),采用8~20结点三维等参单元剖分坝体和基础,机组固定导流片用桁杆单元模拟,厂房共剖分了1100个单元,基础共剖分了1720个单元,导流片共用12根桁杆单元,总计有2832个单元,结点为4315个。弹性基础两侧边界水平坝轴向位移为零,其它远处边界的结点位移也为零。

为便于比较,首先假定厂房混凝土和基础岩石均为线弹性材料,它能反映厂房结构内力的基本变化规律;其次认为混凝土和岩石是弹塑性材料,即混凝土或岩石受拉屈服后仍保留一部分抗拉强度,拉应力将随应变的增加而减小。混凝土或岩石受压屈服后,材料被压碎,压碎后的材料取折减弹模计算应力。

非线性分析时,按下列4个步骤加载:①施加厂房底板结构自重;②施加厂房上部结构自重;③施加正常运行时的上、下游水压力、扬压力的0.7倍;④增加水压力、扬压力至正常运行时上、下游水压力、扬压力的大小。

在坝基胶接面上,由于混凝土材料参数与基础岩石材料参数差异较大,例如,弹性模量两者就相差1.86倍。预计会有较大的应力集中问题。在非应力集中区(应力较小),认为胶接面完整,混凝土与基岩协调变形,在应力集中区(应力较大),当主拉(或压)应力超过材料(岩石)容许值时,认为胶接面沿主应方向开裂,此时,单元被破坏,混凝土与基岩出现相对滑动位移。

防渗帷幕布置在坝轴线上游3m处,平均宽度3m,计算时,考虑到其性质不同,另分为一组单元。

大坝正常工作时,基础有渗流荷载作用,它对结构应力有较大影响。因在防渗帷幕后,沿坝轴线方向布置了大量的排水管,坝基渗流应力分布如图3所示。所确定的压力荷载对应地加到坝基胶接面单元上。



图3 坝基渗流水压力分布图(单位:MPa)

Fig. 3 Seepage water pressure distribution on dam foundation(unit: MPa)

3.3 计算结果

计算结构是由3个厂房坝段构成的空间体系,在上游水压力、下游水压力、坝底扬压力和厂房结构自重等荷载的作用下,结构中的每一点都是空间应力点。由于所有的外荷载都作用在厂坝的横断面内,从计算结果上看,坝轴线方向是一个主应力方向,并且该方向上的主应力都较小,为了能清楚地讨论问题,本文主要给出了横断面内的2个主应力和基岩面顺河向的水平剪应力,规定主应力以拉应力为正, $\sigma_1 > \sigma_2$, 单位:MPa。

(1) 线性计算

线性计算结果反映了厂坝及岩基部位主要有6个应力集中区。其中A、B、C、D4个属拉应力区,坝踵A点混凝土拉应力高达1.2MPa,是坝体中最大拉的应力,D区出现拉应力集中的主要原因是该部位有进水口,因而降低了局部刚度,它比C区的拉应力要大;E、F是2个压应力区,主厂房的上游转角E处的压应力为2.4MPa(如图4(b)所示),是整个结构中的最大压应力点,坝趾F处混凝土的压应力为1.8MPa。另外厂房结构还有一个拉应力区I,这主要是由电站正常运行时水轮机工作水头造成的,它的最大拉应力是0.2MPa。

基岩中只有坝踵和坝趾2个应力集中区,A点基岩的拉应力为0.7MPa,已超出基岩的拉伸截止应力0.333MPa。在台阶转折部位有轻度的应力集中,但数值都较小,见图4(a)、(b)所示。坝底基岩表面的剪应力特点是坝踵、坝趾和中间部位较大(图5(a)),分别为0.38、0.27、0.23MPa,符合剪应力分布规律。

(2) 非线性计算

与线性计算结果不同,非线性计算由于考虑到基岩受拉屈服,大坝前沿基岩产生屈服开裂,裂缝深度达15m,图6中的虚线示意裂缝。坝踵A和B区域的应力很小,只有C、D、E、F、H5个应力集中区,进水口D区的最大拉应力为0.4MPa,比线性计算结果要大,是整个计算范围内的最大拉应力。主厂房上游转角处E的压力仍为2.4MPa。但坝趾F处的压应力升为2.2MPa(图6),比线性计算结果要大22%左右。对于I区,拉应力的数值变化不大。

在基岩中尽管只有H和F两个应力集中区,但整个基础的应力分布规律与线性计算时完全不同,H区域的最大拉应力只有0.33MPa。与主应力相同,由于坝踵基岩开裂,剪应力后移,基岩表面上游10m左右范围的剪应力为零,而下游部分的剪应力较大,坝趾最大剪应力达0.41MPa(图5(b))。

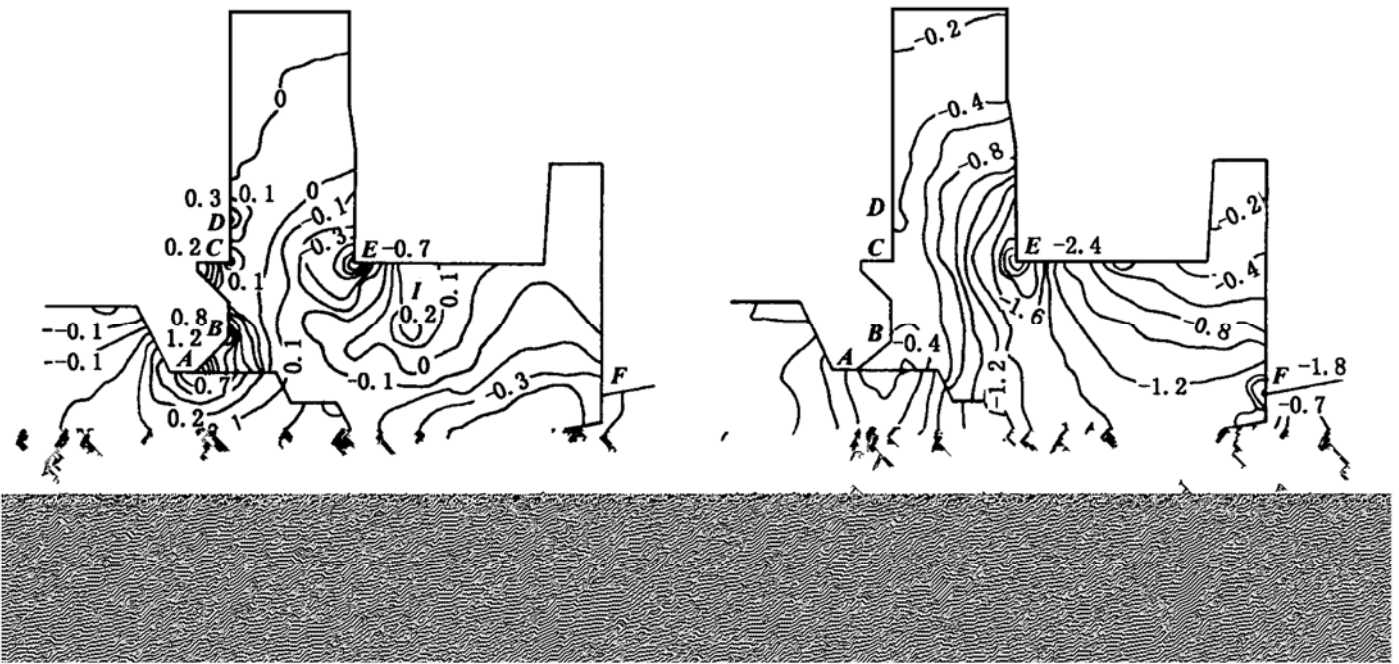


图 4 线弹性计算时横断面主应力等值线图(单位: MPa)

Fig. 4 Principal stress contours on a cross section calculated with the linear elastic model(unit: MPa)

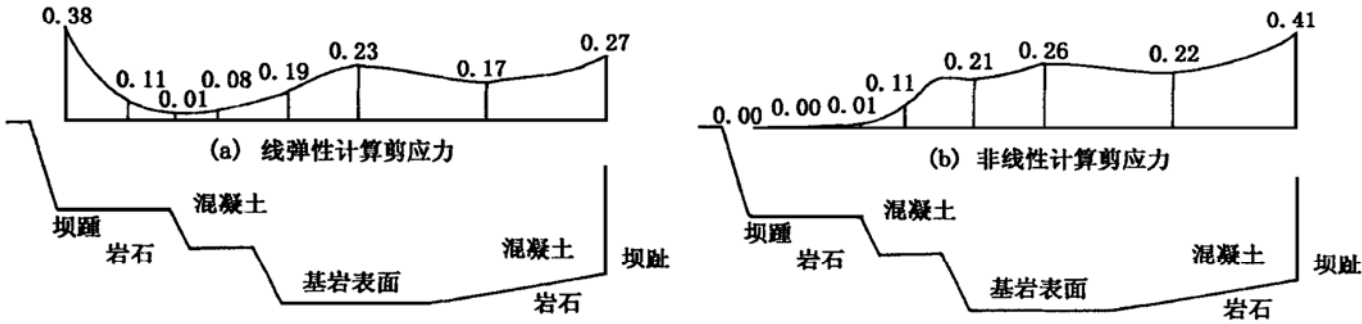


图 5 基岩表面顺河向水平剪应力图(单位: MPa)

Fig. 5 Horizontal shear stress on the surface of base rock(unit: MPa)

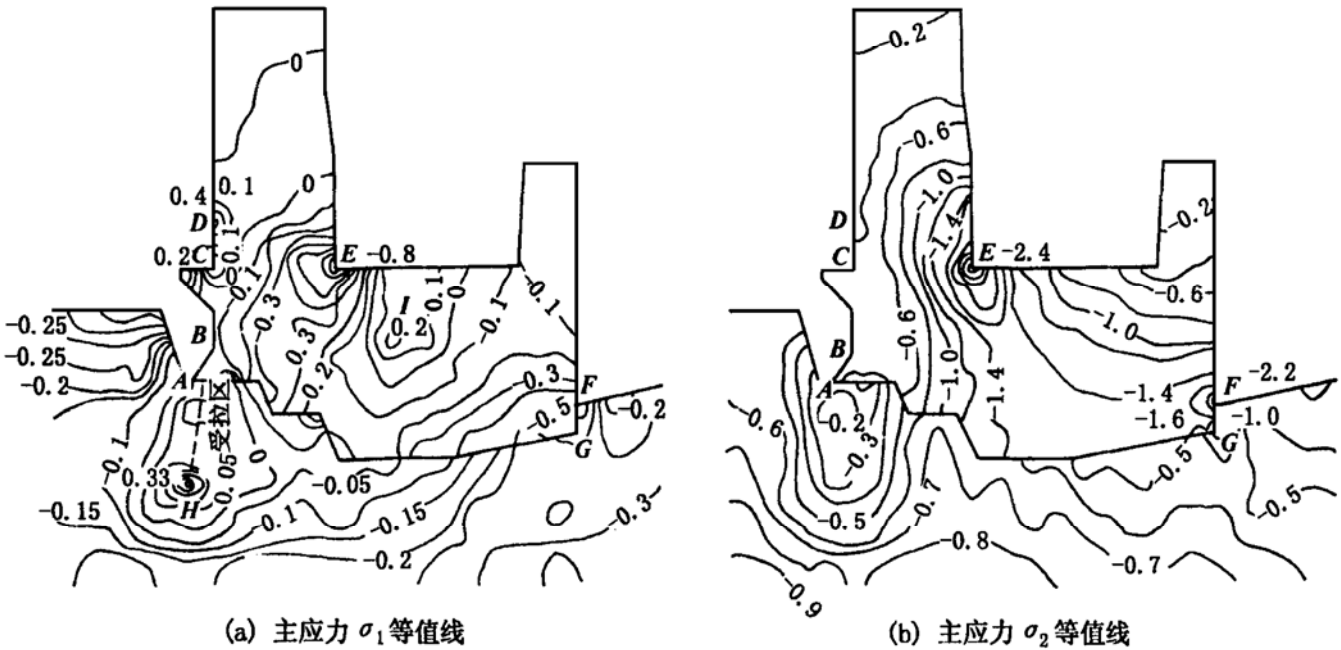


图 6 非线性计算横断面主应力等值线图(单位: MPa)

Fig. 6 Principal stress contours on a cross section calculated with nonlinear model(unit: MPa)

4 结论与分析

根据前面的计算结果,可概括如下:

(1) 因基岩拉伸截止应力较小,在坝踵集中应力区的拉应力作用下,大坝前沿基岩会产生裂缝。裂缝产生后,坝踵 *A* 和 *B* 区域的应力被释放,应力集中区从 *A* 下移到 *H* 区,同时坝趾下的最大压应力要增大 22% 左右,坝踵基岩的拉力相当一部分转化为坝趾基岩的压力,这一点应充分引起有关技术人员的重视。

(2) 本工程将坝踵前的基岩向上多挖了 5 m,坝体采用 *AB* 小斜面取代直角坝踵,一方面缓解了直角坝踵的应力集中程度,岩石中的最大拉应力为 0.7 MPa (线性计算),另一方面又使基岩的拉应力区域前移了 4~5 m。该措施对保护基础中的防渗帷幕非常有益。

(3) 无论是线性计算还是非线性计算,由于坝基胶接面较大,再加上基础台阶转角有一定的角度,台阶的应力集中问题不突出,除坝踵和坝趾本身应力集中之外,其它坝基胶接处不会因此造成应力(主应力、剪应力)过大。为节省工程量,根据实际情况,将坝基设计成台阶形状是可行的。

(4) 比较线性计算与非线性计算结果可以看出,

线性分析能够得出厂房应力分布的基本情况,反映了主要的问题,如应力集中区。但当应力过大(主要是拉应力),造成材料屈服产生塑料变形时,应力集中区会产生移动,结构应力分布会发生调整,应进行非线性计算。坝踵、坝趾、主厂房上游转角、厂房上游引水口都是应力集中突出区,值得特别关注。

(5) 根据前面的计算结果可以看出:结构的应力集中主要在坝踵和坝趾 2 个传统部位,这主要是结构体形突变造成的。坝基胶接面其它部位应力都较小,混凝土与岩石力学性能上的差异在此没有引起应力分布上的较大变化。

参 考 文 献

- 1 Elwi A A, Murray D W. A 3-D hypoelastic concrete constitutive relationship. ASCE, 1979, **105**(4): 623~ 641
- 2 朱伯龙等. 钢筋混凝土非线性分析. 上海: 同济大学出版社, 1985. 64~ 112
- 3 水利水电科学研究院译. 混凝土的强度和破坏译文集. 北京: 水利出版社, 1982. 52~ 87
- 4 Bath K J, Ramaswag S. On 3-D nonlinear analysis of concrete structures. Nuclear Engineering and Design, 1979, **52**(3): 428~ 451