

周公宅拱坝三维非线性有限元分析

高 健¹,孙林松²,叶跃清³,汪 勇³

(1.浙江水利水电专科学校,浙江 杭州 310018;2.扬州大学水利与建筑工程学院,江苏 扬州 225009;
3.桐庐县水利局,浙江 桐庐 311500)

摘要 用三维非线性有限单元法对周公宅拱坝进行了基本荷载组合下的非线性分析和水压超载分析.结果表明 在基本荷载作用下坝体屈服范围不大,但右岸 F1 和左岸 F30 处均有不同程度的屈服和开裂破坏,且这些地方有可能成为潜在的滑动面而影响坝肩稳定.超载系数在 3.0~4.0 之间.

关键词 周公宅 拱坝 荷载 非线性有限元分析

中图分类号 TV314 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)04-0399-03

周公宅水库位于浙江省东部沿海宁波市鄞县境内,距宁波市区 51 km.坝址所在河流樟溪是甬江流域奉化江上的主要支流之一.坝址基岩裸露,地形完整,峡谷两岸比较对称,河谷底宽 30~60 m,左岸平均坡度 35°~37°,右岸平均坡度 36°~40°.坝基岩体为熔接凝灰岩,地质条件较好,适宜修建混凝土拱坝.设计方经多次比选修改后,提出了抛物线拱坝体型.大坝坝顶高程 240 m,最大坝高 126.5 m,拱冠梁顶厚 6 m,底厚 29 m.坝体混凝土方量 57 万 m³.为了解大坝的稳定性,本文用三维非线性有限元法对该坝进行了基本荷载组合下的非线性分析和水压超载分析.

1 三维非线性有限元分析方法

1.1 材料破坏准则与本构模型

用考虑拉伸断裂的理想弹塑性材料模型模拟基岩和坝体材料,屈服判断准则采用 Drucker-Prager 准则^[1]

$$F_1 = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - \kappa = 0 \quad (1)$$

拉裂破坏准则为

$$F_2 = \sigma_1 - f_t = 0 \quad (2)$$

式中: I_1 ——第 1 应力不变量; J_2 ——第 2 应力偏量不变量; σ_1 ——第 1 主应力; f_t ——混凝土的抗拉强度; α , κ ——材料常数.

1.2 非线性求解方法

有限元离散后将非线性结构计算问题归结为非线性方程组的求解问题.非线性方程组的求解方法有多种,大致可分为迭代法、增量法、增量迭代法等几类.由于在拱坝结构非线性分析中,材料的性质与应力和变形的历史有关,本构方程是以增量形式表达的,因此本文采用增量迭代法进行求解.为此,在每个荷载步中构造迭代计算格式^[2]

$$\begin{cases} K_{TA} \Delta \delta_{i+1} = \Delta R + \bar{R} + \Delta R^u_i \\ \Delta R^u_i = \sum_e C_e^T \int_{v_e} B^T (\Delta \sigma^u_i - \Delta \sigma_i) dv \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta \sigma^u = D_{epA} \Delta \varepsilon \quad (4)$$

式中: K_{TA} ——上一增量步结束时的劲度矩阵; $\bar{R}$ ——残余失衡力.

式(3)的收敛判断条件为

$$\frac{\|\Delta\delta_{i+1}-\Delta\delta_i\|}{\|\Delta\delta_i\|}\leqslant\varepsilon\tag{5}$$

式中 ε 为收敛标准.

2 周公宅拱坝三维非线性分析

2.1 计算模型及有限元剖分

非线性有限元分析中基岩的计算范围在左右岸、上游和深度方向各取 1 倍坝高,下游侧基岩计算范围约 2 倍坝高. 计算模型充分考虑了坝肩区域岩体的主要地质构造,模拟了基础岩体、蚀变岩以及 F1,F20,F23,F26,F30,F31 断层.

计算时,坝体单元沿厚度方向分为 4 层,沿高度方向分为 14 层. 模型结点总数 8 807,单元总数 7 446. 单元网格如图 1 所示. 约束条件为底部固定约束及四周链杆约束.

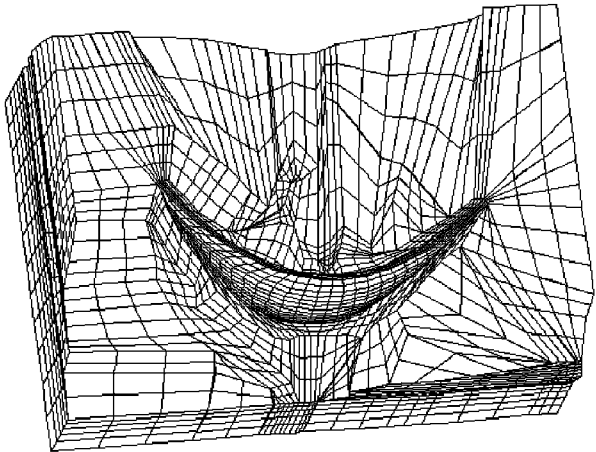


图 1 有限元网格

Fig.1 FEM mesh

计算工况为基本荷载组合“正常蓄水位+相应下游水位+淤沙压力+温降”超载分析采用增加上游水压的方法进行.

2.2 基本荷载组合计算结果与分析

- a. 坝体上游面最大顺河向位移为 4.39 cm,最大主拉应力为 1.88 MPa ;下游面最大主压应力为 - 7.64 MPa ;上游坝踵部位共有 6 个单元屈服进入塑性状态.
- b. 在上游面顶拱端部存在一定的拉应力区,最大拉应力在 1.2 MPa 左右,该区域仍处于弹性状态. 从坝体屈服范围和应力分布规律及量值的大小来看,都符合 120 m 左右高度拱坝的实际情况.
- c. 坝踵上游基岩内拉应力区深度约 26 m,靠近坝踵处的部分基岩发生塑性屈服.
- d. 在基本荷载作用下,坝肩基岩中的屈服和开裂单元主要发生在 160 m 高程以下,在 125 m 高程右岸 F1 和左岸 F30 处均不同程度地发生了屈服和开裂破坏,这有可能成为潜在的滑动面而影响坝肩稳定. 在下游基岩内,F1 断层引起了比较明显的应力集中现象 F20 对基岩内的应力分布有一定影响,但并不十分显著.

2.3 超载计算分析

超载计算以基本荷载组合为基本状态,超载方式为:保持其他荷载不变,通过增加水的密度来提高坝面水压力,即超载系数 $k=\rho/\rho_w$ (ρ 为计算密度, ρ_w 为水的密度). 当 $k=1.5$ 时,拱坝上游面有 10 个单元发生开裂破坏,其中包括在基本荷载作用下已经屈服的 6 个单元 ;当 $k=3.0$ 时,上游面开裂范围沿坝高方向已扩展至 180 m 高程,拱冠梁底部开裂深度也已到达坝厚的 3/4 ;当 $k=4.0$ 时,坝体开裂范围进一步扩展,而且在拱坝下游面中部拱冠偏左的位置也有单元发生屈服和开裂破坏. 如图 2 所示. 从拱端位移分析可知,在基本荷载作用下拱端最大位移为 3.5 mm,拱端位移随着超载系数的增加而增加,当超载系数达到 3.0 时,125 ~ 160 m 高程的拱端位移增加至 10.7 ~ 12.2 mm. 一般认为,当拱端位移超过 10 mm 时可能会对坝体强度和稳定产生危害性影响^[2]. 综合考虑坝体破坏区域与拱端位移可知,周公宅拱坝的超载安全系数在 3.0 ~ 4.0 之间.

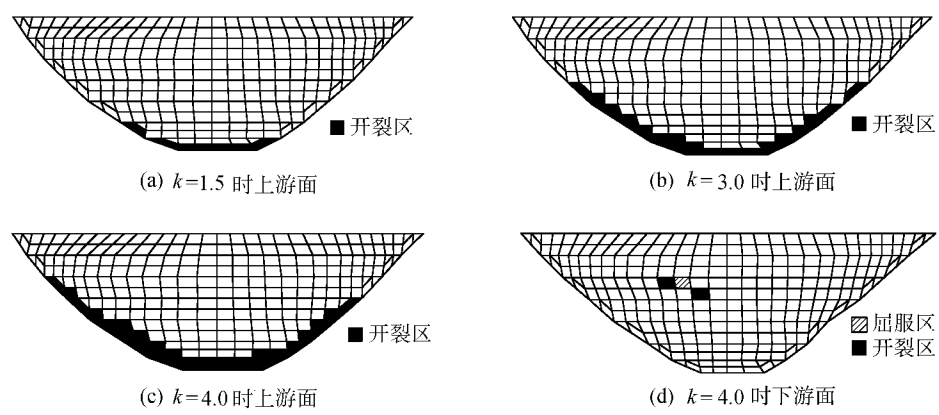


图 2 坝面屈服开裂区域

Fig.2 Yield and cracking area on dam surface

3 结 论

- a. 在基本荷载作用下,周公宅拱坝屈服范围不大,最大顺河向位移 4.39 cm,最大主拉应力为 1.88 MPa,下游面最大主压应力为 - 7.64 MPa,这基本符合 120 m 左右拱坝的实际情况.最大拱端位移 3.5 mm,不致危及坝体强度和坝肩稳定.
- b. 超载分析并综合考虑坝肩位移和坝体破坏范围,周公宅拱坝的水密度超载系数在 3.0 ~ 4.0 之间,可见大坝有一定的超载能力.
- c. 在基本荷载作用下,右岸 F1 和左岸 F30 均不同程度地发生了屈服和开裂破坏,这些地方有可能成为潜在的滑动面而影响坝肩稳定.为保证大坝安全可靠,有必要对几个高程区域范围内的坝肩进行加固处理.

参考文献：

[1] 刘锦华,吕祖珩.块体理论在工程岩体稳定分析中的应用[M].北京 水利水电出版社,1988.50—75.
[2] 殷有泉.固体力学非线性有限元引论[M].北京 北京大学出版社,清华大学出版社,1987.30—35.

Three-dimensional non-linear finite element analysis for Zhougongzhai arch dam

GAO Jian¹, SUN Lin-song², YE Yue-qing³, WANG Yong³

- (1. Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou 310018, China ;
2. College of Water Conservancy and Architecture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China ;
3. Tonglu Water Conservancy Bureau, Tonglu 311500, China)

Abstract: An analysis was made on the Zhougongzhai arch dam under basic load combination and overloading of hydraulic pressure by use of 3-D nonlinear finite element method. The results showed that the scope of dam yield was small under basic load combination, but different degrees of yields and cracking failures occurred at F1 on the right bank and F30 on the left bank, which might become latent sliding surfaces and decrease the stability of the dam abutment, and that the overloading coefficient of water density varied in a range of 3.0 – 4.0.

Key words : Zhougongzhai ; arch dam ; load ; nonlinear finite element analysis