

地基变形模量对碾压混凝土拱坝应力分布的影响

王亮清^{1,2}, 唐辉明², 胡新丽², 张宜虎³, 夏元友¹, 梁 焯², 杨有成², 吴 琼²

1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北武汉 430070
2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074
3. 水利部长江科学院, 湖北武汉 430010

摘要: 以贵州省鱼简河水利工程为背景, 在拟定坝址区地质模型和边界条件的基础上, 建立拱坝与地基相互作用的三维数学力学模型, 应用 ANSYS 软件研究不同变形模量对拱坝应力分布的影响. 结果表明: (1) 最大主应力主要分布于坝底部位及软弱夹层附近; (2) 中间软层变形模量的大小对拱端与拱冠应力影响较大; 中间软弱层变形模量小于 0.5 GPa 时, 其应力差异较大; (3) 当地基为 3 种材料时, 最大拉压应力不是位于中间软弱层的顶部, 而是位于距离软弱层顶约 10~15 m 的位置, 这一结论对拱坝优化设计与坝基处理提供很好的理论依据.

关键词: 变形模量; 拱坝与地基相互作用; 三维数学力学模型; 应力分布.

中图分类号: P642.2

文章编号: 1000-2383(2007)03-0409-06

收稿日期: 2007-03-19

Influences of Foundation Deformation Modulus to Stress Distribution of Roller Compacted Concrete Arch Dam

WANG Liang-qing^{1,2}, TANG Hui-ming², HU Xin-li², ZHANG Yi-hu³, XIA Yuan-you¹,
LIANG Ye², YANG You-cheng², WU Qiong²

1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Scientific Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China

Abstract: With Yujianhe hydraulic engineering as the background and on the basis of geological module and boundary conditions of Liding dam, a 3-D mathematic and mechanical module was constructed to study the influence of different deformation modules on stress distribution by ANSYS software. The result indicates: (1) The maximum principal stresses are chiefly distributed at the bottom of the dam and close to weak intercalated layers; (2) The deformation module of weak intercalated layers affects the stresses of abutment and crown of the arch, and when it is less than 0.5 GPa, the differences of stresses are obvious; (3) When the foundation is composed of three materials, the maximum tensile and compressive stresses exist about 10-15 m to the top of the weak intercalated layers rather than at the top of them. This conclusion provides a theoretical basis for the optimal design for arch dam and dam treatment.

Key words: deformation modulus; interaction of arch dam and foundation; 3-D mathematical and mechanical model; stress distribution.

0 引言

在建的贵阳市息烽县鱼简河水库水利工程为贵阳市重要的水利工程, 水库总库容 1 050 万 m³, 大

坝为碾压混凝土双曲拱坝, 坝高 81 m, 坝顶高程 1 062 m, 坝底高程 981 m. 水库正常蓄水位 1 057 m, 校核洪水位 1 061 m.

坝址区出露地层从上至下依次为: 中三叠统狮

基金项目: 中国地质调查局“鄂西恩施地区滑坡形成机制与危险性评价”项目(No. 1212010640604).

作者简介: 王亮清(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水利水电工程地质与地质灾害防治研究. E-mail: wlq027@126.com

子山组 T_2sh^{1-1} 中一厚层状灰岩、白云质灰岩、白云岩；中三叠统松子坎组 T_2s^{3-2} 薄一中厚层状泥晶灰岩、泥质白云岩和杂色钙质泥(页)岩互层，顶部有厚约 7 m 的软弱层；中三叠统松子坎组 T_2s^{3-1} 中厚层状微晶灰岩夹少量杂色泥(页)岩。坝基岩体按其力学性质可概化为“硬—软—硬”三层结构，中间软层变形模量的大小对拱坝优化设计起着至关重要的作用。

国内外许多学者结合不同的工程从拱坝与地基相互作用的角度研究坝体与地基应力分布特征做了许多工作。如法国 Coyne et Bellier 公司(Carrere et al., 1987)、柴军瑞和件彦卿(2000)对龙滩水电站从拱坝与地基相互作用的角度研究应力分布，优化拱坝设计。王亮清等(2003, 2004)和张宜虎等(2005)在研究贵州省鱼简河水库坝址区地质模型与参数的基础上，建立拱坝与地基相互作用的数学力学模型，进行稳定性分析；钱向东等(2001)研究建基面强度对拱坝应力、变形的影响；朱伯芳等(2002)从拱坝的作用机理与受力分析等方面对碾压混凝土拱坝进行系统研究。

本文在建立拱坝与地基相互作用的地质力学模型的基础上应用 ANSYS 软件模拟中间层变形模量变化对拱坝应力分布的影响。对坝地质模型的建立充分考虑岩体结构特征与地基处理工作；坝址区各岩组变形模量是在理论研究、室内外试验、参数估算与计算机模拟的基础上得出的，能真实反映左右坝肩岩土体的真实变形特点。

1 地质力学模型的建立

1.1 地质结构

经过施工图阶段的建基面地形测量、地质工作与统计分析，根据岩体类别、风化程度、岩体基本质量与物理力学性质的不同，将建基面处共分为 15 个区，其中第 6 区和第 10 区岩性为黄色泥岩夹薄层泥质白云岩，在建基面处的出露宽度为 0.7~1.5 m，平均厚度约 1.0 m，该层岩体虽然变形模量很小，但厚度较小，在设计与施工时采取混凝土传力墩和混凝土塞进行置换，可以改善坝体的受力环境；而第 4 区和第 12 区岩性为黄色中薄层至厚层泥质白云岩与泥岩互层，在建基面处出露宽度为 6.4~8.6 m，岩体的变形模量较小，对于坝工优化设计而言，该层变形模量的大小是十分重要的。本节从建立地质模型的角度出发，将坝基岩土体划分为 3 种材料，分述

如下：(1)中三叠统松子坎组第二段第三层(T_2s^{2-3})至中三叠统松子坎组第三段第二层第一亚层(T_2s^{3-2-1})，岩性为浅灰、土黄色薄至中厚层泥晶白云岩、泥质白云岩与杂色页岩互层；(2)中三叠统松子坎组第三段第二层第二亚层(T_2s^{2-3-2})，岩性为黄色中薄层泥质白云岩与泥岩互层，厚度 7.0 m；(3)中三叠统狮子山组第一段(T_2sh^1)，岩性为中一厚层灰岩、白云质灰岩、白云岩。

1.2 模拟范围及边界条件

模拟范围根据坝址区工程地质条件并结合拱坝结构设计确定。模型区底边界为固定边界，前、后、左、右边界为高程方向(Z)有位移，其他方向固定的铰支边界。三维几何模型见图 1，模拟区力学模型及网格剖分见图 2。

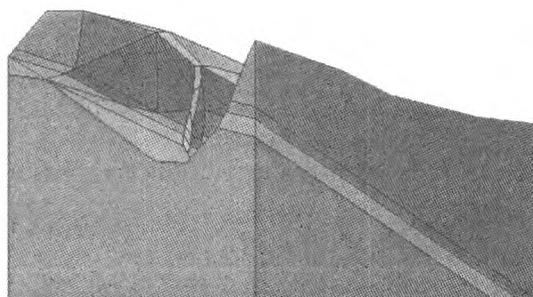


图 1 三维几何模型

Fig. 1 3D geometrical model

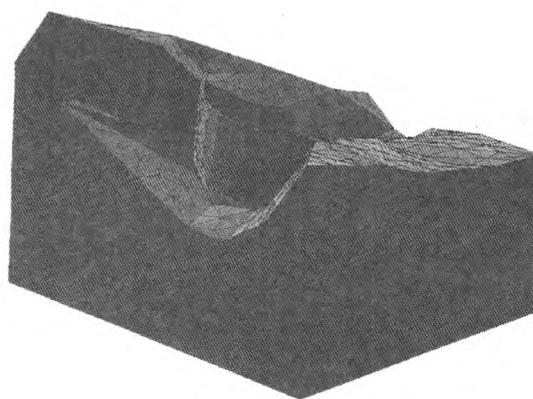


图 2 网格剖分图

Fig. 2 Meshing picture

1.3 计算参数

在综合前面研究成果的基础上，结合地质模型的需要，计算参数如表 1。泥砂的内摩擦角 $\varphi=12^\circ$ ，泥砂的浮容重 $\gamma_n=12 \text{ kN/m}^3$ 。

1.4 荷载的确定

(1)自重。混凝土的自重作为体积力作用于坝

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of the materials

岩性层	变形模量 E_m (GPa)	泊松比(μ)	内聚力 (MPa)	摩擦系数	容重 (kN/m ³)	地层代号
(1)	5	0.32	0.85	0.8	27.10	$T_2s^3 - T_2s^3^{-1-1}$
(2)	0.05~4	0.3~0.4	0.40	0.35	24.00	$T_2s^3 - 2^{-2}$
(3)	9	0.27	1.0	0.98	27.50	T_2sh^1
混凝土	28*	0.167	2.8	1.0	25.0	

注:标“*”为碾压混凝土的弹性模量.

体;(2)静水压力.上游水位按荷载组合所规定的特征水位计算,下游面为相应的不利下游水位,水的容重取 9.81 kN/m³; (3)泥砂压力.作用在坝面单位长度上的泥砂压力按主动土压力计算:

$$P_{sk} = \frac{1}{2} \gamma_{sb} h_s^2 \text{tg}^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}),$$

$$\gamma_{sb} = \gamma_{sd} - (1 - n) \gamma_w.$$

式中, P_{sk} 为泥砂压力, kN/m; h_s 为坝前泥砂淤积高程, m; γ_{sb} 为泥砂浮容重, kN/m³; γ_{sd} 为泥砂干容重, kN/m³; γ_w 为水的容重, kN/m³; n 为泥砂的孔隙率; ϕ 为泥砂的内摩擦角(°).

1.5 荷载组合

本节主要讨论地基变形模量对拱坝应力场分布的影响情况,荷载组合选择特殊组合:自重+校核洪

水位及相应的下游水位+泥砂压力.

1.6 计算工况

为了解地基变形对拱坝应力的影响,共计算以下几种工况:(1)地基是刚性的, $E_m = 10 E_c$; (2)地基弹性模量为混凝土弹性模量的 1/10, $E_m = E_c/10$ (柔性基础); (3)地基分为 3 层,中间层的变形模量分别取 0.05、0.1、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 GPa,上下两层的变形模量分别为 9 GPa 与 5 GPa.

2 变形模量对拱坝应力的影响

2.1 对最大主应力 σ_1 的影响

计算成果见图 3,由图可知:(1)从整体上讲,最

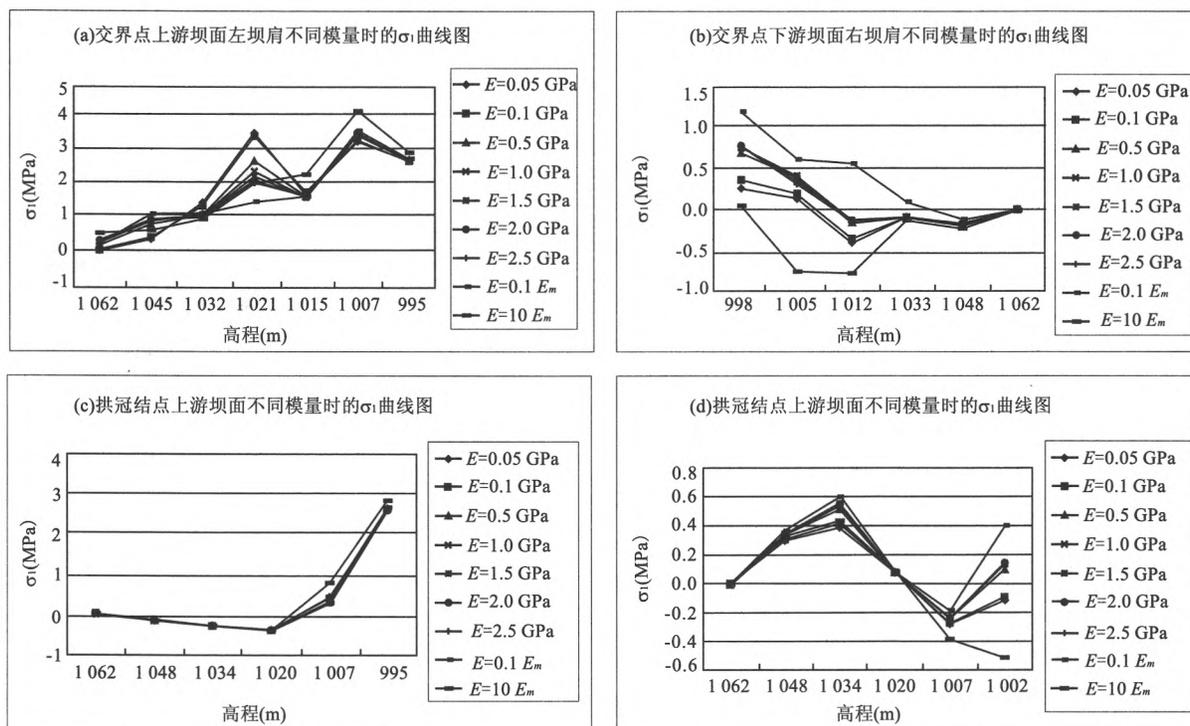


图 3 基础变形模量对上游坝面交界点、下游坝面交界点与拱冠剖面处最大主应力的影响(E_m 为混凝土的弹性模量)

Fig. 3 Influences of deformation module of foundation on the maximum principal stress of the intersection of upper stream dam, lower stream dam and section of arch crown

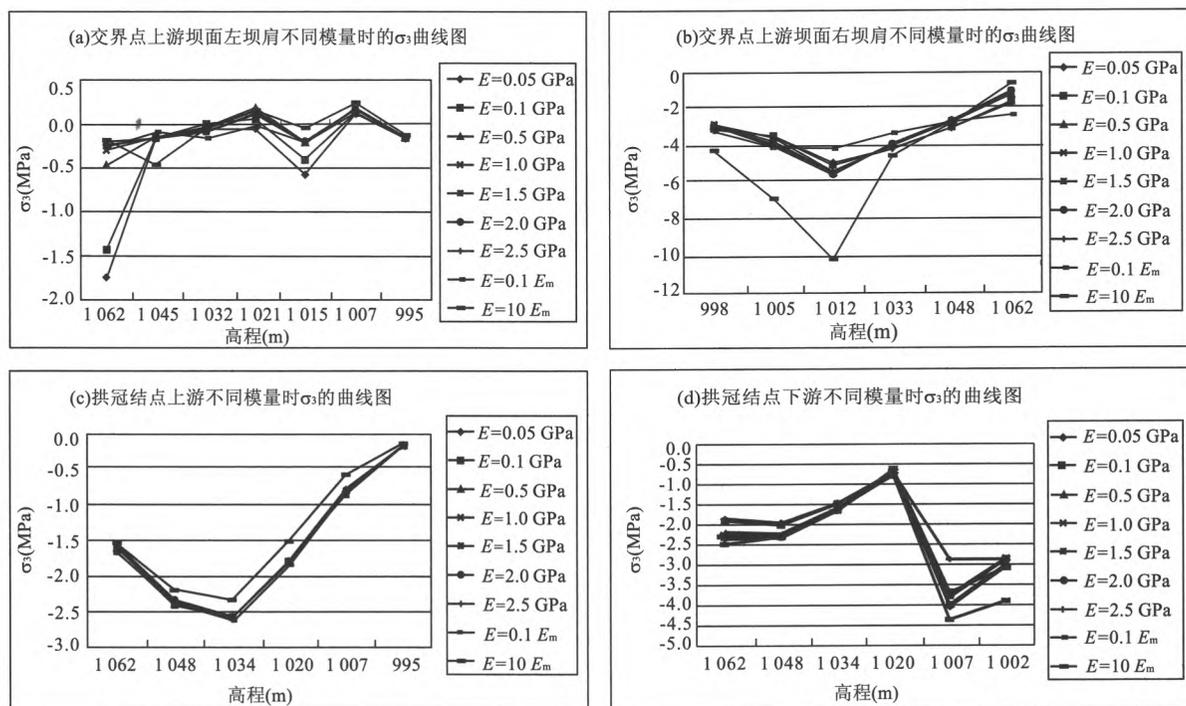


图 4 基础变形模量对上游坝面交界点、下游坝面交界点与拱冠剖面处最小主应力的影响

Fig. 4 Influences of deformation module of foundation on the minimum principal stress of the intersection of upper stream dam, lower stream dam and section of arch crown

大主应力主要分布于拱坝与地基的交界面附近及软弱层附近;但拱坝上下游界面与地基的交界面附近及软弱层附近的应力分布特征不同;由于结构不对称与河谷不对称,导致左右坝肩交界面附近相同高程位置处的最大主应力分布特征不同。(2)当为柔性或刚性地基时,交界点上游坝面左右坝肩均为拉应力,应力大小随坝体高程的增大而减小;当中间层岩体的变形模量由 0.05 GPa 逐渐增加时,在中间软弱层附近出现一拐点,该点位于 1 021 m 高程处,拐点位置应力值随中间层的变形模量增加而减小,当中间层变形模量为 0.05 GPa 时,交界点上游坝面左坝肩最大拉应力值为 3.44 MPa,交界点上游坝面右坝肩最大拉应力值为 2.83 MPa;当中间层变形模量为 2.50 GPa 时,交界点上游坝面左坝肩最大拉应力值为 1.948 MPa,交界点上游坝面右坝肩最大拉应力值为 2.00 MPa。对于左坝肩而言,软弱层分布的最高高程为 1 005.8 m,最低高程为 995.1 m;对于右坝肩而言,软弱层分布的最高高程为 1 006.7 m,最低高程为 993.9 m;从最大拉应力分布情况来看,最大拉应力距离软弱层顶部 14.3~15.2 m,即位于第 3 区与第 13 区的浅灰色中厚层泥晶灰岩、白云质灰岩中。当为刚性地基时,交界点下游坝面左右坝肩均

为压应力;当地基为柔性时,交界点下游坝面除右坝肩 1 045 m 以上,左坝肩 1 040 m 以上为拉应力区外,交界点其余部位为压应力;当地基为 3 种材料时,随着中间层变形模量的增加,交界点下游坝面左右坝肩的拉压应力分界点向坝底方向移动。拱冠剖面上、下游坝面拉压应力分界所对应的高程分别为 1 013 m 与 1 016 m;对于上游面而言,1 013 m 高程以上为压应力区,以下为拉应力分布区;而对于下游面而言,1 016 m 高程以上为拉应力区,以下为压应力分布区。随着中间层变形模量的增加,拱冠剖面处拉压应力的绝对值呈增大趋势。

2.2 对最小主应力 σ_3 的影响

计算成果见图 4,由图可知:(1)整体讲,最小主应力主要分布于拱坝与地基的交界面附近及软弱层附近;但拱坝上下游界面与地基的交界面附近及软弱层附近的应力分布特征不同;由于结构不对称与河谷不对称,导致左右坝肩交界面附近相同高程位置处的最小主应力分布特征不同。(2)当为柔性或刚性地基时,除右坝肩坝顶位置为拉应力外,其余部位为压应力。(3)拱冠剖面上、下游坝面除坝底与软弱层附近为拉应力外,其余部位为压应力分布区。

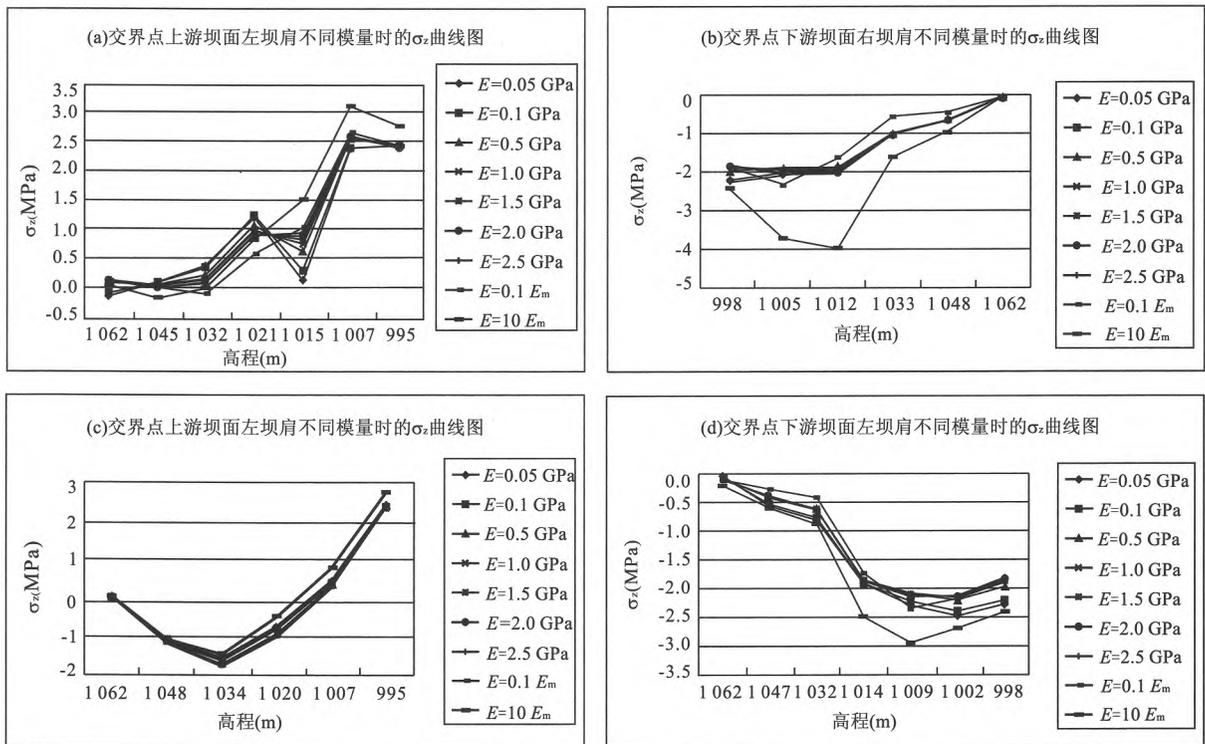


图 5 基础变形模量对上游坝面交界点、下游坝面交界点与拱冠剖面处铅直应力的影响

Fig. 5 Influences of deformation module of foundation on the vertical stress of the intersection of upper stream dam, lower stream dam and section of arch crown

2.3 对垂直应力 σ_z 的影响

计算成果见图 5, 由图可知: (1) 整体讲, 垂直应力最大值主要分布于拱坝与地基的交界面附近及软弱层附近; 但拱坝上下游界面与地基的交界面附近及软弱层附近的应力分布特征不同; 由于结构不对称与河谷不对称, 导致左右坝肩交界面附近相同高程位置处的垂直应力分布特征不同。 (2) 当为刚性基础或柔性基础时, 交界点上游坝面铅直应力为拉应力, 其大小随高程的增大而减小, 交界点下游坝面铅直应力由坝顶拉应力转为坝底压应力。当基础为 3 层材料且中间层材料变形模量大于 2.0 GPa 时, 交界点上游坝面铅直应力自坝顶至坝底拉应力呈现逐渐增大的趋势; 中间层变形模量小于 2.0 GPa 时, 铅直应力在上游坝面软弱层部位出现拐点, 对于上游坝面左坝肩而言, 拐点位于 1 021.0 m 高程处, 拐点位置处的最大拉应力值为 1.23 MPa, 对于上游坝面右坝肩而言, 拐点位于 1 016.0 m 高程处, 拐点位置处的最大拉应力值为 0.79 MPa; 中间层变形模量小于 0.1 GPa 时, 在上游坝面右坝肩软弱层部位出现压应力。交界点下游坝面左右坝肩交界点处均为压应力分布区。对于右坝肩而言, 软弱层分布的最高高

程为 1 006.7 m, 最低高程为 993.9 m; 从垂直应力分布情况来看, 压应力最大值距离软弱层顶部 9.3~10.2 m (上游坝面右坝肩) 与 14.3~15.2 m (上游坝面左坝肩), 即位于第 3 区与第 13 区的浅灰色中厚层泥晶灰岩、白云质灰岩中。 (3) 拱冠节点上游坝面 1 013 m 高程以上为压应力区, 以下为拉应力区; 对于上游坝面而言, 最大压应力位于 1 013 m 高程处, 值为 -1.71 MPa (负号表示压应力); 拱冠节点下游坝面高程 1 023 m 以上为拉应力区, 以下为压应力区; 对于下游坝面而言, 最大压应力位于 1 007 m 高程处, 值为 -2.93 MPa (负号表示压应力)。随着变形模量的增加, 拉压应力的分界点向坝顶方向移动。

3 结论

本文在综合分析坝址区工程地质条件与地基岩体地质结构的基础上, 建立拱坝与地基相互作用的数学力学模型, 应用大型数值分析软件 (ANSYS) 进行三维有限单元法模拟, 得出以下结论: (1) 与一般的拱坝应力分析比较有 2 个特点, 其一为对坝基地

质模型的建立充分考虑岩体结构特征与地基处理工作;其二为坝址区变形模量是在理论研究、室内外试验、参数估算与计算机模拟的基础上得出的,能真实反映左右坝肩岩土体的真实变形特点。(2)最大主应力主要分布于坝底部位及软弱夹层附近。(3)中间软弱层变形模量的大小对拱端与拱冠应力影响较大;中间软弱层变形模量小于 0.5 GPa 时,其应力差异较大。(4)当地基为 3 种材料时,最大拉压应力不是位于中间软弱层的顶部,而是位于距离软弱层顶约 10~15 m 的位置,这一结论对坝基处理提供很好的理论依据。

References

- Carrere, A. C., Nury, C., Pouyet, P., 1987. The contribution of a non-linear, three dimensional finite element model to the evaluation of the appropriateness of a geologically complex foundation for 220 m high arch dam in Longtan, China. In: Proceeding 6th ISRM Congress.
- Chai, J. R., Wu, Y. Q., 2000. Mathematical model for couple analysis of seepage and stress field in RCCD. *Hydraulic Journal*, (9): 33-36 (in Chinese with English abstract).
- Qian, X. D., Zhao, Y., Ren, Q. W., 2001. Influence of the strength of bearing surface on stress and deformation of arch dams. *Journal of Hohai University*, 29(3): 95-98 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. Q., Tang, H. M., Liu, G. Y., et al., 2003. Study of rock mass deformation modulus on dam foundation of Yujianhe reservoir. *Coal Geology & Exploration*, 31(6): 34-36 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. Q., Tang, H. M., Liu, Y. R., et al., 2004. Application of VJC-RMR method to determining rock mass modulus of deformation. *Rock and Soil Mechanics*, 25(5): 811-813 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. H., Yin, H. M., Wang, L. Q., 2005. Rock mass stability analysis of abutments. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(18): 3305-3310 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, B. F., Gao, J. Z., Chen, Z. Y., et al., 2002. Arch dam design and study. China Water Power Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 柴军瑞, 仵彦卿, 2000. 碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型. *水利学报*, (9): 33-36.
- 钱向东, 赵引, 任青文, 2001. 建基面强度对拱坝应力、变形的影响. *河海大学学报*, 29(3): 95-98.
- 王亮清, 唐辉明, 刘贵应, 等, 2003. 鱼简河水库坝基岩体模量研究. *煤田地质与勘探*, 31(6): 34-36.
- 王亮清, 唐辉明, 刘佑荣, 等, 2004. VJC-RMR 法在岩体变形模量确定中的应用. *岩土力学*, 25(5): 811-813.
- 张宜虎, 尹红梅, 王亮清, 2005. 鱼简河拱坝坝肩岩体稳定性分析. *岩石力学与工程学报*, 24(18): 3305-3310.
- 朱伯芳, 高季章, 陈祖煜, 等, 2002. 拱坝设计与研究. 北京: 中国水利水电出版社.