

基于子模型法的混凝土面板堆石坝 应力变形数值分析

孙超伟¹, 柴军瑞^{1,2}, 韩鹏辉³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 710048; 2. 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 采用非线性有限单元法, 并基于邓肯-张(E-B)非线性本构模型, 考虑面板堆石坝填筑施工与蓄水过程, 利用中点增量法对苗家坝面板堆石坝进行了三维有限元数值仿真分析, 得到了坝体施工期和蓄水期坝体的应力变形分布规律, 从坝体结构意义上判断, 堆石坝体工作是可靠的; 同时, 为了获得面板及其接缝应力变形更为精确可靠的结果, 采用发展的三维子模型方法, 而面板与垫层区之间的特殊边界用耦合的薄层单元进行模拟。工程算例的计算结果表明: 面板应力和变形规律正常, 较大拉应力分布范围局限在铺盖保护区以内, 面板竖缝和周边缝变形值不大, 面板的安全性是比较有保障的。同时, 进一步证明了用耦合的薄层单元模型模拟接触面的子模型法在面板应力变形计算中具有一定的可行性和可靠性。

关键词: 混凝土面板堆石坝; 邓肯-张 E-B 模型; 三维子模型法; 耦合的薄层单元; 应力变形;

中图分类号: TV314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2013)03-0030-08

Numerical analysis of stress and deformation of concrete face rockfill dam based on sub - model method

SUN Chaowei¹, CHAI Junrui^{1,2}, Han Penghui³

(1. Faculty of Hydraulic and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Civil and Hydroelectric Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. Northwest Hydro Consulting Engineering, CHECC, Xi'an 710065, China)

Abstract: The mid - point incremental method was used to carry out 3D FEM analysis for a CRFD project called Miaojiaba based on Duncan - Chang (E - B) nonlinear constitutive model and the filling construction and retaining water process of the dam was also considered. As a result, a corresponding general law of the dam's stress and deformation distribution during construction and storage period were obtained. Judging from the view of the dam structure, the rockfill dam body works reliably. In order to get more accurate results of the face and its joints' stress and deformation, the developed 3D sub - model method was applied to the calculation with the coupling thin - layer element to simulate the specific boundary between face and cushion. According to the results of engineering example, the stress and deformation distribution of the dam conforms to the general law. The concrete face also has a normal stress and deformation law that distribution of larger tensile stress is restricted to blanket protected area. The deformation of transverse joints and peripheral joints is small, which indicates that the concrete face works well and safely. At the same time, it is further proved that the sub - modeling method with the coupling thin - layer element to simulate the contact face is feasible and believable.

Key words: concrete face rockfill dam; Duncan - Chang(E - B) model; 3D sub - model method; coupling thin - layer element ; stress and deformation

1 概述

混凝土面板堆石坝是以分块拼接的钢筋混凝土面板作为防渗结构, 堆石体作为支承结构的堆石坝

形式。由于坝体材料分区、堆石体逐层碾压施工、面板分块浇筑和面板接缝(周边缝、垂直缝)共同影响, 其应力变形研究是一个复杂的三维非连续变形分析问题。问题主要在于: 面板堆石坝的垂直缝、周

收稿日期: 2013-01-26; 修回日期: 2013-02-24

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20096118110007)

作者简介: 孙超伟(1989-), 男, 陕西西安人, 硕士, 主要从事水工结构数值分析方面的工作。

边缝以及面板和垫层之间的接触是大坝三维静力、动力分析的关键位置,但是这些部位构造尺寸与大坝整体尺寸相差十分悬殊,而且结构尺寸、材料属性和结构边界的变异性均较大。因此,在进行整体有限元分析时,对接头部位及坝体同时进行保证应力计算精度的网格剖分难度较大,此时若均采用较密的网格划分,用映射方式生成网格,会导致有限元模型的规模非常庞大,求解困难;若采用较稀疏的网格则无法保证细节部位的结构特征,上述关键部位的真实应力变形状态不能保证。如何既快又好地计算局部结构的真实应力和变形是一值得研究的问题。

汪明元等^[1]在国家“九五”科技攻关项目的基础上首次提出了采用三维子模型法进行面板的三维应力变形分析,并采用无厚度 Goodman 单元对水布垭大坝的面板进行了数值分析,验证了子模型法在面板堆石坝上的应用的可行性,并为以后面板应力变形分析研究提供了相应的思路。三维子模型法是解决面板坝应力变形数值分析问题的有效方法,但是子模型法在应用过程中还存在着不能回避的两个问题^[2]:①必须考虑高面板堆石坝实际的施工特点和面板分期浇筑特点,把面板浇筑前的削坡和补坡等施工程序反映到面板计算分析的子模型去,以真实反映面板浇筑前的初始变形条件和应力条件,否则计算的面板应力变形结果将是真实的。②必须采用合适的单元和本构模型模拟面板与垫层或者挤压边墙之间以及各面板之间的竖缝、面板与趾板之间周边缝的接触关系。

对于接触面的研究主要包括两个方面,一方面是接触面的本构关系的模拟,即合理建立剪应力与剪应变或剪切变形的关系;另一方面是合理选择能够模拟这种接触关系的单元型式。人们根据大量试验提出了不同的本构模型,目前主要有双曲线模型、弹塑性模型、刚塑性模型、粘塑性模型和三参数模型等。早在 20 世纪 70 年代,Clough 等^[3]根据直剪试验结果,认为 $\tau - \omega$ 关系呈双曲线关系。建立的计算切向劲度系数的关系式概念简单明确,且参数可由直剪试验方便地确定,目前已被岩土工程数值计算广泛接受。张冬霖等^[4]根据单剪试验结果并考虑接触面上的粘聚力,推算得出薄层单元的切向劲度,对双曲线模型进行了改进。Brandt^[5]经过深入的室内试验和现场研究,提出一个简化模型描述接触面切向应力和变形,用两条折线描述 $(\tau/\sigma - \omega)$ 曲线。陈慧远^[6]提出了接触面上剪应力与剪切位移简化的弹塑性关系:当切向应力小于接触面上的

摩擦力时,切向应力与剪切位移呈线弹性关系;当切向应力大于接触面上的摩擦力时,接触面进入摩擦滑移阶段应力和位移之间不再遵循某一特定的关系式。钱家欢^[7]认为,接触面的相对位移与应力的关系既非弹性也非塑性,而呈粘弹塑性。殷宗泽等^[8]认为,接触面的破坏是一个由边缘向内部逐渐发展的过程,提出了接触面错动变形的刚塑性模型。接触面附近土体变形分为两个部分:一是土体的基本变形,不管滑移与否都存在;二是破坏变形,包括滑移破坏和拉裂破坏。

接触面可看作是一种特殊的“材料”,因此在建立接触面本构关系之后就需要选择合适的单元型式进行具体表述。接触面单元不同于普通的实体单元,是一种能模拟接触面上产生错动、滑移或开裂等物理现象的特殊单元。目前通常采用无厚度单元或薄层单元两种型式。其中,Goodman^[9]于 1968 年提出了无厚度平面四结点接触面单元。它能较好地反映接触面切向变形和应力之间的非线性关系,并且在一定程度上反映接触面的剪切特性。但其也具有较大的缺点:单元无厚度可能会导致接触面两侧单元会发生嵌入或脱离,就不得不靠调整法向劲度系数的取值来解决,而法向刚度系数的取值有很大的任意性和人为性,如果取值不合理,就很容易在计算当中出现病态方程,计算困难。而且位移计算的一个微小误差,就会使应力出现较大误差,从而使应力的计算不合理。为了克服无厚度单元可能造成两侧单元嵌入或脱离的问题,以及模拟剪切破坏常常发生在附近土体内这一现象,许多研究人员都建议采用有厚度的薄层单元来模拟,目前国际上已有不少学者提出过多种薄层单元类型,其中最有代表性的是 Desai^[10]提出的薄层单元。薄层单元能模拟土与结构相互作用破坏时常发生在附近土体一薄层范围内剪切错动的现象,但薄层单元模型仍有两个问题没有解决好,一是薄层单元厚度 t 的确定, t 的取值直接影响剪切模量,再是 Desai 回避了问题,没有测定和反映法向与切向的耦合影响^[11]。因此建立一个较能客观描述薄层单元的本构模型以及寻找合理确定薄层单元厚度的方法将有利于薄层单元的推广应用。卢廷浩等^[12]于 1999 年提出了耦合薄层单元,对 Desai 的薄层单元进行了改进。他认为土与结构在相对滑动之前仍然存在剪切错动带,在相互作用中进行力的传递。在单剪试验成果的基础上,提出了耦合的薄层单元模型用,从而使计算结果更符合实际。耦合薄层单元模型除了能较好地模拟接

触界面土体一侧的剪切错动外,还反映了土体特别是粗颗粒土在剪切过程中存在的明显的剪胀(剪缩)效应,这在理论上是一个进步。

本文通过采用非线性有限单元法,并基于邓肯-张(E-B)非线性本构模型,考虑坝体填筑施工和蓄水过程,采用中点增量法对苗家坝面板堆石坝进行了三维有限元数值仿真分析,得到了坝体施工期和蓄水期应力变形。并基于发展的三维子模型法,结合了耦合的薄层单元本构模型模拟面板与垫层之间的接触面,计算得到了面板子模型的应力和变形。通过结果可以看出,应力变形符合面板坝应力变形的一般规律,验证了基于耦合的薄层单元模拟接触面的子模型法在面板应力变形分析中是合理可行的。

2 土石坝静力本构模型

静力计算中,堆石料静力本构关系采用 Duncan 双曲线 E-B 模型,其切线弹性模量可表达为

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

式中: c 为材料粘聚力; φ 为材料的内摩擦角; k 为切线模量基数,由初始切线模量 E_i 与侧限压力 σ_3 试验曲线确定的参数; n 为切线模量指数,由初始切线模量 E_i 与侧限压力 σ_3 试验曲线确定的参数; p_a 为单位大气压力。

卸载时切线弹模 E_{ur} 随着侧限压强 σ_3 而变化,可用下式计算:

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_{ur}} \quad (2)$$

式中: K_{ur} 、 n_{ur} 是由试验确定的两个系数,其确定方法与 k 、 n 相似。

设加载状态函数为:

$$SS = S \cdot (\sigma_3/p_a)^{1/4} \quad (3)$$

历史上最大的SS值表示为 SS_m ,按现有 σ_3 计算最大应力水平 S_c :

$$S_c = \frac{SS_m}{(\sigma_3/p_a)^{1/4}} \quad (4)$$

然后将 S_c 与土体当前应力水平 S 比较来判别切线弹模 E_t 的取值。当 $S \geq S_c$,判别为加荷,取 $E_t' = E_t$;当 $S \leq 0.75S_c$,判别为卸荷,取 $E_t' = E_{ur}$;当 $0.75S_c \leq S \leq S_c$ 时,则在 E_t 和 E_{ur} 之间内插。

切线体积模量为:

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (5)$$

式中: K_b 为体积模量系数; m 为体积模量指数。

模型同时还考虑粗粒料内摩擦角 φ 随围压 σ_3 的变化:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (6)$$

式中: φ_0 为 σ_3 等于单位大气压力时的 φ 值; $\Delta\varphi$ 为反映 φ 值随 σ_3 而降低的一个参数。

3 面板应力变形分析的子模型法

子模型方法又称切割边界位移法或特定边界位移法,它是随着传统有限单元法的逐渐应用而发展起来的一种有限元技术。其中,切割边界是指从原始粗糙模型中截取的子模型边界,粗糙模型中该边界位移计算结果将作为子模型计算的边界条件。不论求解对象的规模有多大,有限元求解的均是一个线性代数方程组:

$$K \cdot \delta = F \quad (7)$$

式中: K 为结构总刚度矩阵; F 为结构外荷载向量; δ 为结构待求位移分量。

假设 δ 中有一部分已知为 δ_1 ,其余为 δ_2 ,则式(7)可以进行相应划分

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将上式展开,得

$$K_{12}\delta_2 = F_1 - K_{11}\delta_1, K_{22}\delta_2 = F_2 - K_{21}\delta_1 \quad (9)$$

由此可以看出,对待求的 δ_2 而言,指定位移 δ_1 已经成为求解 δ_2 的荷载项的一部分,换句话说,指定位移此时已转化为荷载项。

子模型技术就是采用该思路,在整体模型中切割出一块区域重新进行计算,区域边界采用整体模型中的位移计算结果进行约束。由于子模型和整体模型的相对独立性,因此可以增加子模型中的网格密度,以对指定区域进行更高精度计算。对子模型切割边界的位移约束从整体模型中插值得。

面板堆石坝的应力变形是典型的复杂三维非连续变形问题^[12]。各块面板、面板与垫层、面板与趾板之间的非连续边界都存在不断开闭的接触相互作用;材料与施工分区的边界复杂并相互切割;作为支承结构的堆石体是不连续介质,其在复杂应力路径下的本构关系复杂,室内试样与实际材料的尺度差别大;这些因素导致面板坝的三维数值分析比较困难。为解决面板单元尺度过大,计算精度不足的问题,发展了三维子模型法,具体分析过程是:

(1)先不考虑面板与垫层的接触问题,考虑复

杂的施工分区、材料分界和加载历程;计算实际加载路径下整个坝体的应力与变形。

(2)将面板、垫层、过渡层和面板周边的混凝土趾板从面板坝整体模型中脱离出来作为子模型进行研究计算,并把主堆石体表面的位移作为已知位移边界条件。

(3)将子模型的网格细分,考虑面板与垫层、各块面板之间、面板与趾板的缝间接触,计算分析子模型的应力与变形。

这种算法的突出优点是可以采用传统的界面元模拟非连续边界的相互作用。利用已有的接触面研究成果,快速地解决面板计算精度不足的问题。

4 接触面薄层耦合单元本构模型

在法向应力和切向应力的共同作用下,考虑剪胀效应,薄层单元的法向总应变为法向应变 ϵ_{nm} 和法向剪胀和剪缩应变 ϵ_{ns} 的耦合^[13]。写成增量形式。

$$d\epsilon_n = d\epsilon_{nm} + d\epsilon_{ns} \quad (10)$$

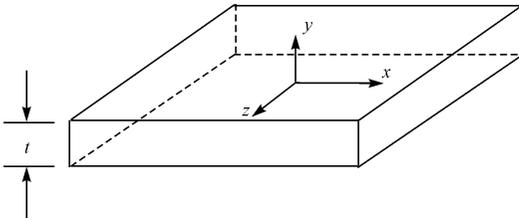


图1 三维薄层单元

在三维问题中(如图1),剪胀/剪缩的法向应变 ϵ_{ns} 同时受到两个方向的剪应力 τ_{yx} 和 τ_{yz} 的共同影响,而不是简单的叠加。作为一种近似方法,引用剪胀/剪缩影响系数 η_{yx} 和 η_{yz} 来考虑这种影响,使 $\eta_{yx} + \eta_{yz} = 1$, 当两个方向的剪应力单调增加时有:

$$\left. \begin{aligned} \eta_{yx} &= \frac{|\tau_{yx}|}{|\tau_{yx}| + |\tau_{yz}|} \\ \eta_{yz} &= \frac{|\tau_{yz}|}{|\tau_{yx}| + |\tau_{yz}|} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

设两个方向的应力应变关系一致,引入剪胀影响系数,薄层单元的法向总应变增量是两个方向共同影响的结果。则:

$$d\epsilon_{ns} = \frac{S_{yx}\eta_{yx}}{G_{lyx}}d\tau_{yx} + \frac{S_{yz}\eta_{yz}}{G_{lyz}}d\tau_{yz} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} G_{lyx} &= kp_a \left[\frac{\sigma_n}{p_a} \right]^n \left[1 - \frac{R_f \tau_{yx}}{\tau_f} \right]^2 \\ G_{lyz} &= kp_a \left[\frac{\sigma_n}{p_a} \right]^n \left[1 - \frac{R_f \tau_{yz}}{\tau_f} \right]^2 \end{aligned} \quad (13)$$

于是有三维本构方程:

$$\begin{aligned} \{d\epsilon\} &= \begin{Bmatrix} d\gamma_{yx} \\ d\epsilon_n \\ d\gamma_{yz} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1/G_{lyx} & 0 & 0 \\ S_{yx}\eta_{yx}/G_{lyx} & 1/E_{nt} & S_{yz}\eta_{yz}/G_{lyz} \\ 0 & 0 & 1/G_{lyz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\tau_{yx} \\ d\sigma_n \\ d\tau_{yz} \end{Bmatrix} \\ &= |C| \{d\sigma\} \end{aligned} \quad (14)$$

前述的柔度矩阵|C|为非对称矩阵,这是因为考虑了土的剪胀作用,这个矩阵是符合接触面薄层单元的实际情况的。为了简化和便于有限元计算,可对矩阵|C|作对称处理,假定接触面一侧的土体的剪切屈服符合摩尔-库伦准则,则对于三维问题有:

$$|C| = \begin{bmatrix} 1/G_{lyx} & 0 & 0 \\ 0 & 1/E_{nt} + H & 0 \\ 0 & \sigma & 1/G_{lyz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{其中: } H = \frac{S_{yx}\eta_{yx}\text{tg}\beta_{yx}}{G_{lyx}} + \frac{S_{yz}\eta_{yz}\text{tg}\beta_{yz}}{G_{lyz}}$$

$$\beta_{yx} = \text{tg}^{-1} \frac{\tau_{yx} - c}{\sigma_n}, \beta_{yz} = \text{tg}^{-1} \frac{\tau_{yz} - c}{\sigma_n}$$

有了柔度矩阵|C|,便可得到刚度矩阵|D|。至此可以在局部坐标系统简历薄层单元劲度矩阵,经坐标转换后可得整体坐标下的劲度矩阵。

5 工程实例

5.1 工程概况

苗家坝水电站混凝土面板堆石坝坝顶长度为348.20 m,坝顶宽度为10.0 m,最大坝高111 m,上游坡1:1.4,下游局部坡度1:1.35和1:1.4,下游综合坡比1:1.55,坝顶设有高度为5.2 m的“L”型防浪墙与面板相接,坝顶高程805.0 m。大坝典型断面及材料分区见图2。

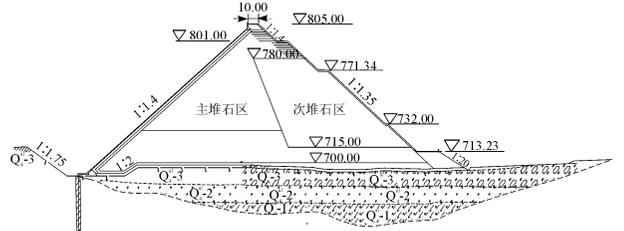


图2 家坝面板坝典型断面的填筑及材料分区

5.2 有限元计算模型

在静力计算中,为考虑坝基及两岸山体变形对混凝土面板堆石坝应力变形的影响,三维有限元模型计算范围除了混凝土面板堆石坝以及坝基覆盖层外,还包括了覆盖层下的岩石基础和两岸山体,地基

范围在冲积层底部以下延伸 150 m, 上下游方向各延伸 150 m, 左右岸方向各延伸 150 m。建模中以顺水流方向为 X 轴的正向; 沿坝轴方向从右到左为 Y 轴正向; 竖直向上为 Z 轴的正向。

大坝整体有限元模型: 三维网格剖分时主要采用八节点六面体单元和少数的六节点三棱柱过渡单元。单元总数共 12 860 个, 节点总数 9 458 个。坝体有限元网格如图 3(a) 所示。

面板有限元子模型: 该子模型包括面板、垂直缝、周边缝及缝间连接单元、趾板、面板和垫层的接触面、垫层、过渡层及下部部分堆石料和基岩; 面板与垫层之间、周边缝和垂直缝设置摩擦接触和连接单元。子模型单元总数共 19 587 个, 节点总数 17 563 个。面板子模型有限元网格如图 3(b) 图所示。

边界条件: 坝基底部施加固定约束, 坝基上、下游边界及坝基和坝肩的左、右边界面均施加相应的法向铰约束。

5.3 计算参数和计算工况

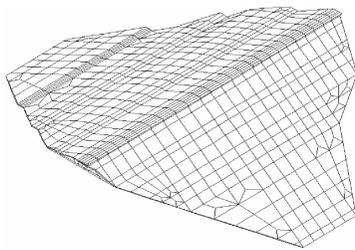
在三维有限元计算中, 面板、趾板混凝土和基岩

采用各向同性线弹性材料, 其参数见表 1。对于垫层、过渡层、堆石材料及坝基覆盖层, 均采用邓肯 - 张 E - B 本构模型。坝体堆石材料的计算参数采用室内大型三轴压缩试验结果, 坝基覆盖层材料的计算参数采用现场旁压试验成果, 具体参数见表 2。

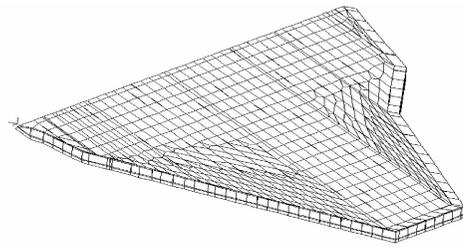
计算时, 共分 30 级模拟坝体填筑、面板浇筑及水库分期蓄水过程。其中, 前 11 级模拟大坝填筑至高程 735 m; 第 12 级模拟一期面板浇注至顶部高程 730 m; 第 13 ~ 19 级模拟二期大坝填筑至坝顶高程 805 m; 第 20 级模拟二期面板浇注, 二期面板顶部高程 801 m; 第 21 ~ 30 级模拟水库蓄水至正常蓄水位 801 m。详见大坝施工填筑和蓄水过程汇总表 3。根据上述加载过程, 拟定计算工况如下:

工况一(竣工期): 荷载为自重, 坝体上、下游无水, 模拟计算大坝竣工期应力变形。

工况二(蓄水期): 荷载为自重和静水压力, 上游水位为正常蓄水位 801 m, 下游无水, 模拟计算上游从无水到蓄水至正常蓄水位过程中的大坝应力变形。



(a) 坝体有限元网格图



(b) 面板子模型有限元网格图

图 3 有限元计算模型

表 1 坝体堆石材料计算参数

材料	重度	粘聚力 c	摩擦角		破坏比 R_f	切线模量系数 k	切线模量指数 n	体积模量系数 k_B	体积模量系数 m	卸荷切线模量系数 k_{ur}
			φ	$\Delta\varphi$						
主堆石	22.50	0	51.31	9.70	0.733	1016	0.22	1201	-0.10	2540
次堆石	22.55	0	52.28	11.26	0.705	750	0.33	781	-0.03	1875
过渡层	22.70	0	51.56	9.92	0.737	1119	0.35	1350	-0.17	2797
垫层	22.80	0	52.83	11.42	0.700	1800	0.52	2062	0.01	4500
冲积层	20.50	0	38.00	5.00	0.650	600	0.50	900	0.10	1500

表 2 面板、趾板和基岩计算参数 $\text{kg/m}^3, 10^{10}\text{Pa}$

材料	密度	弹性模量 E
面板	2450	2.8
趾板	2450	2.8
微风化岩层	2250	0.8
弱风化岩层	2250	0.3
全风化岩层	2250	0.04

表 3 大坝填筑施工和蓄水过程 m

加载次序	加荷类型	相应高程
1	基础增量	700
2 ~ 11	一期坝体施工堆石增量	735
12	面板一期施工增量	730
13 ~ 19	二期坝体施工堆石增量	805
20	面板二期施工增量	801
21 ~ 30	蓄水过程水荷载增量	801

5.4 计算结果分析

按照上述有限元模型及加载过程,进行大坝应力变形三维有限元计算,获得了竣工期和蓄水期大坝的应力变形计算结果。应力以拉为正,以压为负。表4为竣工期、蓄水期两种计算工况下坝体和面板应力。

(1)坝体的应力变形。竣工期和蓄水期两种工况下坝体位移分布规律基本相同,如图4~7。顺河向位移大致以主、次堆石区为分界线分别向上、下游方向位移,其中竣工期向上、下游的最大位移为分别为17.39 cm和18.59 cm,均位于坝高约1/3附近。蓄水期大坝整体向下游移动,向上游最大位移减小到9.19 cm,位于坝高约1/3附近,而向下游最大位移增大到26.22 cm,位于坝高约1/2附近。竖向位移(沉降)在竣工期和蓄水期分布基本没变化,由于材料分区和分期填筑的综合影响,最大沉降均发生在约2/3坝高、稍偏向下游位置;竖向位移等值线基本上呈同心圆分布,从最大值处逐渐过渡到边界上与上下游坝坡及基岩平行;在堆石区的分界处坝体沉降变形的分布均略有突变现象,其中竣工期最大沉降为109.3 cm(约占坝高的1.0%),而蓄水期有所增加,为133.2 cm(约占坝高的1.2%)。

两种工况下的坝体主应力(图8~13)分布规律基本相同,竣工期坝体主应力分布表现为:坝轴线附近大,坝上下游边坡附近小,坝基附近最大且随着坝高的增加逐渐减小。最大主应力均为压应力,最小主应力在下游坝坡表面附近基本为0;由于上游水压力的作用,在蓄水期大、小主应力等值线在上游部位出现上抬,且与迎水坝坡相交其值也有较明显的

增大,而下游部位则变化不大,在上游靠近坝坡部位应力路径发生偏转。完建期第一主应力的最大值为0.82 MPa,第三主应力的最大值为3.03 MPa;蓄水期最小主应力的最大值为0.73 MPa,最大主应力的最大值为2.05 MPa。由竣工期和蓄水期坝体应力水平看,坝体应力水平分布基本没变化而且最大值(竣工期0.50、蓄水期0.51)都小于规范要求。

(2)面板及其接缝的应力变形。图14~16为蓄水期面板位移(法向、坝轴向和顺坡向位移)分布图。图17、18为面板顺坡向和坝轴向应力分布图。

位置	计算工况	竣工期	蓄水期
坝体	最大垂直位移	109.30	133.20
	最大水平位移	17.39	9.19
	最大水平位移	18.59	26.22
	主应力 σ_1	0.82(压应力)	0.73(拉应力)
	主应力 σ_3	3.03(压应力)	2.05(压应力)
最大应力水平	0.50	0.51	
面板	最大挠度		19.34
	顺坡向应力		5.14
	坝轴向应力		1.52
垂直缝	最大张拉		6.17
	最大沉降		1.28
	最大剪切		16.13
周边缝	最大张拉		10.54
	最大沉降		9.96
	最大剪切		19.00

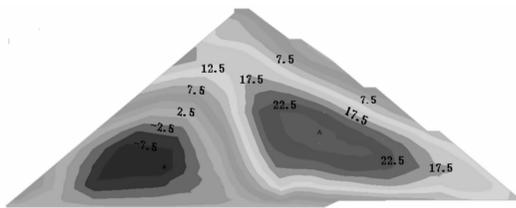


图4 竣工期顺河向位移(单位:cm)

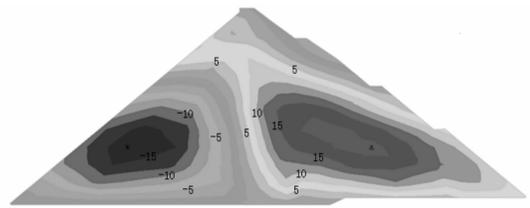


图5 蓄水期顺河向位移(单位:cm)

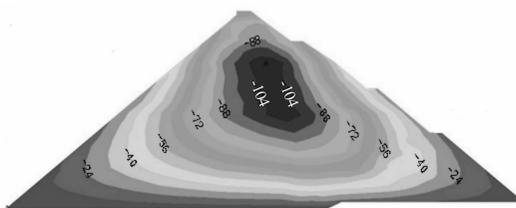


图6 竣工期沉降(单位:cm)

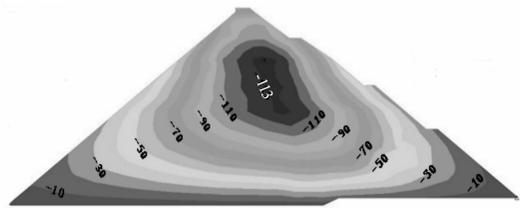


图7 蓄水期沉降(单位:cm)

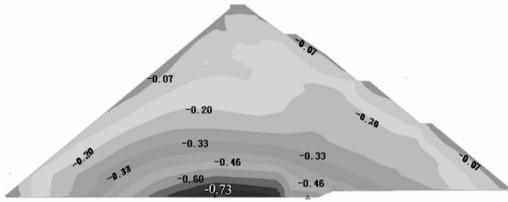


图 8 竣工期第一主应力(单位:MPa)

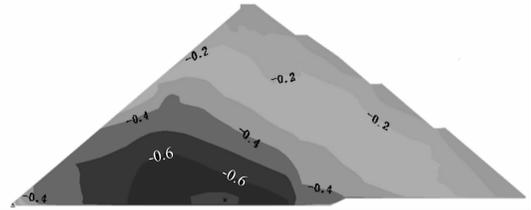


图 9 蓄水期第一主应力(单位:MPa)

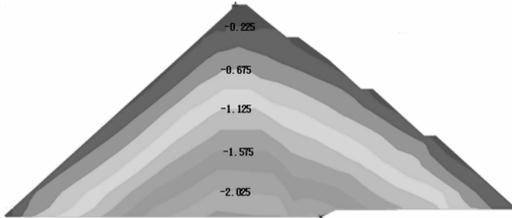


图 10 竣工期第三主应力(单位:MPa)

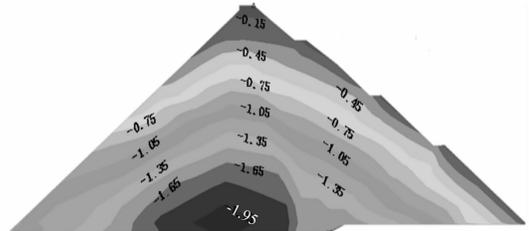


图 11 蓄水期第三(小)主应力(单位:MPa)

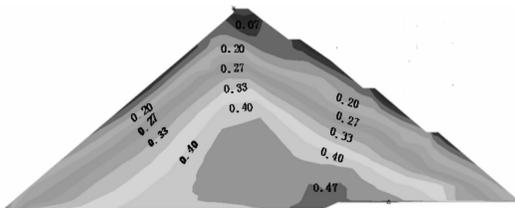


图 12 竣工期应力水平分布图

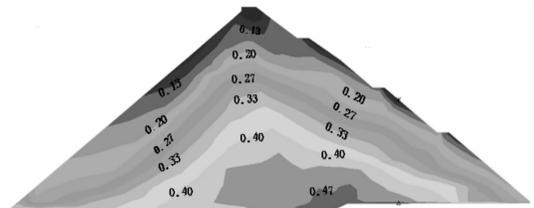


图 13 蓄水期应力水平图

法向位移(挠度):从分布上看,在各面板间是连续的,沿面板厚度方向基本无变化。大部分区域向下,趾板附近变形接近于0。蓄水期面板法向变位左右岸基本对称,整体向坝内变形,且中部变形最大,向四周逐渐减小,整体上呈中部向坝坡面法线方向下陷的下凹变形形态;面板最大挠度(法向位移)为 19.34 cm,发生在约 1/3 坝高坝体中部范围附近。

坝轴向位移:面板沿坝轴向位移的分布以河槽中心线为界,左右基本呈反对称趋势,表现为左右侧朝河槽中心处的变形,大致与河谷的走向一致。除坝轴线中部的受压区相邻面板间的坝轴向位移是连续的,坝轴向位移在板与板之间一般不连续,尤其在岸坡中各面板之间有一定的张开量。蓄水期向右岸位移的最大值为 3.0 cm 左右,向左岸位移的最大值为 3.12 cm 左右。

顺坡向位移:面板中部整体顺坡向向上变形,以河谷中心两侧基本对称,面板与面板之间有明显的错动,中部面板顺坡向位移较大,向坝肩逐渐减小,板与板间错动量逐渐增大。面板顺坡向位移最大值为 6.01 cm(面板平面内顺坡向位移规定,以顺坡向下为负),位于面板 1/3 坝高范围附近。

顺坡向应力:面板周边有局部拉应力区,面板中部为压应力区。面板中部压应力区顺坡向压应力最

大约 5.14 MPa,面板底部顺坡向拉应力约为 0.50 MPa 左右,面板顺坡向的最大拉应力值为 1.52 MPa,出现在河床中央面板左岸高程 750 m 附近,且河床中央面板拉应力区大于 1.0 MPa 的范围拉应力主要集中在 750 m 高程至坝底高程的范围内,因此,建议在面板上游铺设粉细砂、粉煤灰保护层至 750 m 是合适的。

坝轴向应力:靠近两岸岸坡的面板有局部受拉区,小范围内拉应力达到 1.0 MPa。面板中部压应力区横向向压应力大部分在 5 MPa 以内,最大压应力为 6.17 MPa。边缘局部拉应力相对较大,最大拉应力值为 1.28 MPa,出现在面板与周边山体相接处附近,大约位于高程 750 m 附近。

接缝的变形:面板垂直缝和周边缝顺坡向剪切变形、沉降剪切变形和张拉变形基本沿面板中心轴线方向对称。其中垂直缝顺坡向剪切变形最大值出现在面板底部,为 9.96 mm;沉降剪切变形最大值出现在上游面板底部边缘处,为 10.54 mm;最大张拉变形最大值出现在上游面板底部边缘处,为 16.13 mm,为张开变形;周边缝顺缝向剪切变形最大值出现在面板左岸底部,为 11.81 mm;沉降剪切变形最大值出现在面板右岸 1/2 高程处,为 19.00 mm。

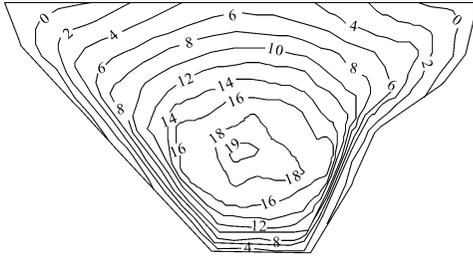


图14 蓄水期面板法向位移(单位:cm)

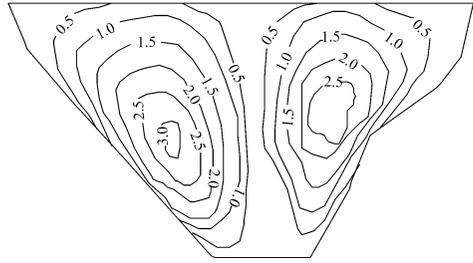


图15 蓄水期面板坝轴向位移(单位:cm)

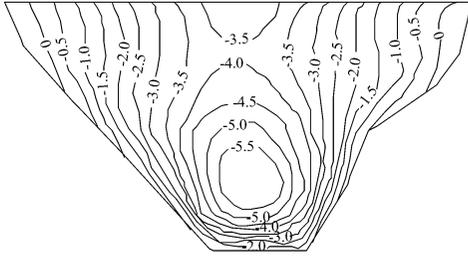


图16 蓄水期面板顺坡向位移(单位:cm)

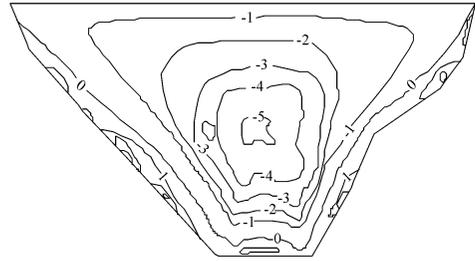


图17 蓄水期面板顺坡向应力(单位:MPa)

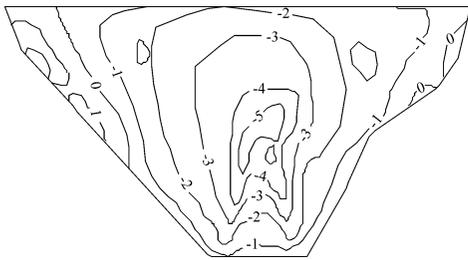


图18 蓄水期面板坝轴向应力(单位:MPa)

6 结 语

(1)本文基于邓肯-张E-B非线性本构模型,并考虑了填筑施工与蓄水过程,采用中点增量法对苗家坝面板堆石坝坝体施工期和蓄水期的应力变形进行了三维有限元仿真分析。计算结果表明:竣工期和蓄水期坝体应力变形分布符合一般规律,且最大、最小值均在规范要求以内。从坝体结构意义上判断,堆石坝体工作是可靠的。

(2)详细阐述了接触面薄层单元耦合本构模型和发展子模型法的原理和应用于面板应力变形计算的实施步骤。工程算例计算结果表明,面板应力和变形规律正常,较大拉应力分布范围局限在铺盖保护区以内,面板竖缝和周边缝变形值不大,面板的安全性是比较有保障的应用子模型法模拟面板应力变形是可行的。

参考文献:

[1] 汪明元,程展林,林绍忠.高面板堆石坝应力变形的三维子模型法研究[C]//水力发电国际研讨会论文集,2004.

[2] 周伟,常晓林,杨启贵等.基于接触摩擦单元的面板坝子模型分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊):2772-2778.

[3] Clough W, Duncan J M. Finite element analyses of retaining wall behavior [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1971, 97(12):1657-1673.

[4] 张冬霖,卢廷浩.一种土与结构接触面模型的建立及应[J].岩土工程学报,1998,20(6):62-66.

[5] BRANDT J R T. Behavior of soil-concrete interface[D]. Edmonton: University of Alberta, 1985.

[6] 陈慧远.摩擦接触面单元及其分析方法[J].水利学报,1985,16(4):44-50.

[7] 钱家欢.接触面剪切流变特性试验研究[G]//安关峰,高大钊.岩土与水工建筑物共同作用研究成果汇编.南京:河海大学,1990.

[8] 殷宗泽,朱泓,许国华.土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J].岩土工程学报,1994,16(3):14-22.

[9] Goodman R E, Taylor R L, Breke T L. A model for the mechanics of jointed rock [J]. J. Soil Mech. and Found. Engrg. Div., ASCE, 1968,94(3):637-660.

[10] Desai C S, Zaman M M, Lighter J G, et al. Thin-layer element for interfaces and joints [J]. Int. J. Numerical and Analytical Methods in Genomic., 1984,8(1):19-43.

[11] 卢廷浩,鲍伏波.接触面模型在高面板堆石坝中的应用研究[J].红水河,2000,19(4):12-15.

[12] 汪明元,程展林,林绍忠,等.水布垭面板堆石坝的三维弹塑性数值分析研究[J].岩土力学,2004,25(增刊):507-512,523.

[13] 卢廷浩,鲍伏波.接触面薄层单元耦合本构模型[J].水利学报,2000,31(2):71-75.