

不规则实体堰坝流场及应力场耦合分析

丁少超, 黄青

(浙江省水利水电技术咨询中心, 浙江 杭州 310020)

摘要:针对现有堰坝稳定计算方法存在模型简化简单,无法准确反映不规则堰坝的流场及应力分布的问题,基于有限元软件 ANSYS Workbench,通过引入气液两相流来求解堰坝的表面流场和水压力,将流场计算结果耦合到结构力学分析中实现某不规则实体堰坝的应力及变形分析。计算结果表明,设计洪水位和常水位工况下堰坝压应力均满足地基承载力要求,且堰体内部未出现拉应力;堰坝整体变形分布合理,能很好地反映堰体与基础非连续性的变形情况。该方法可有效地解决堰坝三维形态复杂及表面压力分布不均所带来稳定分析困难,可为堰坝设计提供依据。

关键词:堰坝;两相流;流固耦合;应力;流场;有限元分析

中图分类号:TV315

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)03-0061-07

Coupling analysis of flow field and stress field for an irregular solid barrage//DING Shaochao, HUANG Qing (Zhejiang Water Conservancy and Hydropower Technology Consulting Center, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Model generalization is simple in existing weir stability calculation methods, which cannot accurately reflect the flow field and stress distribution of an irregular barrage. Aiming at the problem, a gas-liquid two-phase flow was introduced to solve the surface flow field and the water pressure of the barrage based on finite element method and ANSYS Workbench software. The calculated results of the flow field were coupled into structural mechanics analysis to complete the stress and deformation analysis of an irregular barrage dam. The results show that the compressive stress can meet the foundation bearing capacity requirements under design flood level and ordinary water level working conditions, and there is no tensile stress inside the barrage dam. The overall deformation distribution of the barrage is reasonable, which can well reflect the discontinuity of the barrage body and the foundation. Therefore, this method can effectively solve the difficulty of stability analysis caused by the complex three-dimensional shape of the barrage and the uneven surface pressure distribution, providing the basis for barrage design.

Key words: barrage; two-phase flow; fluid-structure coupling; stress; flow field; FEM analysis

千百年来堰坝作为一种壅水建筑物,主要用于灌溉,是古代先民治水历史中的重要智慧结晶^[1-2]。它通过拦截水流,抬高水位来满足引水灌溉的需求,同时一定程度上也可对整个河道的坡降进行调整,以起到巩固泥沙的作用;另一方面它还能够改善和治理区域内的生态环境和生态质量,从而促进人与自然的和谐发展^[3]。在全国中小河流中有着不计其数的堰坝,其中多为实体固定堰。近年来较多堰坝并未达到使用年限就发生局部冲毁甚至整体破坏的现象^[4-5]。因此,在设计阶段完善堰坝流场分析与稳定性分析显得尤为重要。

目前堰坝稳定计算主要采用结构静力学的方法,在堰体稳定分析时常选取堰坝剖面进行单宽计算,而不规则堰坝各剖面均不同,采用该方法无法准确反映堰坝及基础受力情况^[6]。此外,在受力分析

时常将堰体、基础和水体作为单独对象,没有考虑结构之间的相互影响以及应力、变形的分布情况。

近些年,随着计算机辅助工程(CAE)软件的完善,有限元法在水利工程领域已经得到广泛应用,但考虑自由表面外部流场与应力场耦合的堰坝稳定分析还较为欠缺^[7-16]。本文基于 ANSYS Workbench 仿真平台对不规则实体堰进行流固耦合仿真计算。首先,考虑结构之间的相互作用关系,建立堰坝和基础的材料模型;然后,将模型导入 ANSYS CFX 中引入气液两相流来模拟堰坝的流场以及水压力分布;最后,将流体计算结果耦合到结构力学分析中完成堰坝的应力及变形分析。

1 工程概况

设计中的堰坝位于浙江省东阳市南江水库下游

湖溪镇境内, 堰坝宽 77.3 m, 长 15 m, 消力池长度为 11.5 m, 堰坝底部最低点高程为 133.52 m, 堰顶高程为 139.5 m, 设计 20 年一遇洪水水位高程为 141.1 m。堰坝上下游齿墙深入弱风化粉砂岩 0.5 m, 堰坝上游与消力池下游设有抛石防冲槽。堰体采用金包银结构, 堰体内为 C20 埋石混凝土, 外部采用 50 cm 厚 C20 混凝土。消力池为 C25F50 钢筋混凝土结构。基础材料从上至下分别为含细粒土砾、强分化粉砂岩和弱风化粉砂岩。图 1 给出堰坝的整体模型和材料分区情况。

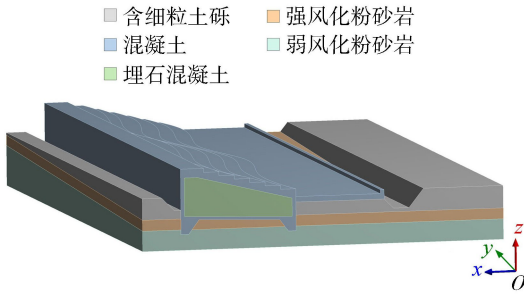


图 1 堰坝模型和材料分区

由于堰坝左右两岸基岩面高程相差较大, 弱风化粉砂岩高程相差 1.6 m, 因此, 堰坝底部高程需根据基岩面进行调整, 整体为左高右低的倾斜面。堰坝底部高程的改变将会造成堰体内部结构的变化, 而采用传统的断面单宽进行计算显然并不准确。本文通过建立各材料的三维模型并设置对应的材料参数以及材料之间的接触关系, 来模拟实际工程中堰坝的情况。

2 基本假定及控制方程

2.1 基本假定

数学模型建立时采用如下基本假定: ①水体为不可压缩黏性流体; ②堰体为具有小变形理想弹性体; ③水体与堰体接触界面上法向位移是相等的, 即水体与堰体在法向不发生直接脱离, 只沿切向发生相对滑动。

2.2 基本方程

流固耦合中, 控制方程包括流体控制方程和结构运动方程。

2.2.1 流体控制方程

求解自由边界问题常采用拉格朗日、欧拉和任意拉格朗日-欧拉(ALE)3种方法^[17]。流体的控制方程建立在拉格朗日法下可较好地模拟流体自由面和边界情况, 但流体变化较大时会导致网格畸变严重, 求解不收敛。采用欧拉法计算时收敛情况较好, 但由于网格不允许变形, 难以模拟流体的变化情况。ALE 坐标系为拉格朗日坐标系和欧拉坐标系的组合, 独立于

材料和有限元网格区域的坐标系统, 有限元网格和材料允许在该坐标系下任意移动^[18]。因此, 本文采用 ALE 法模拟堰坝水体自由面与流固耦合面的流速、流线及水压力的分布情况。在 ALE 坐标系下求解流体的控制方程由连续方程和动量方程组成^[19-21]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_1 \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho_1 (u_j - \hat{u}_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho_1 F_{ti} \quad (2)$$

其中
$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: u_i 、 u_j 分别为 x_i 、 x_j ($i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3$) 方向的流体流动速度; \hat{u}_j 为 x_j 方向的网格速度; ρ_1 为流体密度; F_{ti} 为 x_i 方向的单位质量的体积力; τ_{ij} 为剪切力; p 为压强; δ_{ij} 为 Kronecker 系数; μ 为流体黏性系数; t 为时间; 角标 i, j 遵循 Einstein 求和约定, 即在一项中出现重复角标, 对于三维问题表示对该角标从 1 到 3 求和。

2.2.2 结构运动基本方程

对于弹性小变形结构, 在 x_i 坐标中的运动方程为

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_{si} = \rho_s a_i \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial s_j}{\partial x_i} + \frac{\partial s_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 为应力; ε_{ij} 为应变率; F_{si} 为固体体积力在 x_i 方向上的分量; ρ_s 为固体密度; s_i 、 a_i 分别为 x_i 方向上的位移分量和加速度分量。

2.2.3 流固耦合中的有限元方程

假设耦合体系的求解向量为 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_f, \mathbf{X}_s)$, 其中 \mathbf{X}_f 和 \mathbf{X}_s 分别为定义在水体和结构节点上的求解向量。将流体方程和结构方程统一到刚度矩阵中, 则流固耦合体系的有限元方程可写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ff} & \mathbf{A}_{fs} \\ \mathbf{A}_{sf} & \mathbf{A}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{f,k} \\ \Delta \mathbf{X}_{s,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_f \\ \mathbf{B}_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{A}_{ff} 、 \mathbf{B}_f 分别为流场的系统矩阵、外部作用力矩阵; \mathbf{A}_{ss} 、 \mathbf{B}_s 分别为固体区域的系统矩阵、外部作用力矩阵; \mathbf{A}_{sf} 、 \mathbf{A}_{fs} 为流固耦合矩阵; $\Delta \mathbf{X}_{f,k}$ 、 $\Delta \mathbf{X}_{s,k}$ 分别为 \mathbf{X}_f 、 \mathbf{X}_s 在第 k 个迭代步的变化量。

2.3 边界方程

在求解堰坝表面流时, 流体域是由空气和水体组成的两相流, 初始条件下考虑流体域自由面气体的体积分数为 1, 即自由面为气相。入口边界条件为流体沿竖直方向的流速方程且入口水体的体积分数为 1, 入口高程为堰上水位高程, 入口为液相; 出口边界条件为水体自由面相对压强为零, 压强沿竖

直方向由静水压强公式控制,出口为气液两相边界。通过两相流基本方程,求解水体自由面,即计算出水体的体积分数为1的临界面。同时在计算流固耦合面上流体相对于固体的运动关系时,须满足运动学和动力学两种边界条件^[22-23]。

气液两相流动基本方程为

$$\frac{d}{dt} \int_{V_1} \rho_1 dV_1 + \frac{d}{dt} \int_{V_2} \rho_2 dV_2 = - \int_{A_1} \rho_1 \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{n}_1 dA_1 - \int_{A_2} \rho_2 \mathbf{v}_2 \cdot \mathbf{n}_2 dA_2 \quad (6)$$

式中: \mathbf{v}_k 、 V_k 、 A_k 、 \mathbf{n}_k 分别为第 k 相($k=1$ 表示液相, $k=2$ 表示气相)的速度、体积、表面面积、表面的单位外法向矢量; ρ_2 为气体密度。

运动学边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} u_s + \frac{\partial f}{\partial y} v_s + \frac{\partial f}{\partial z} w_s = 0 \\ f(x, y, z, t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_s 、 v_s 、 w_s 分别为水体自由面沿 x 方向(坝宽方向)、 y 方向(坝轴线方向)、 z 方向(竖直方向)的速度分量。

动力学边界条件为

$$p_0 = p_{\text{气}} \quad z = h(x, y, t) \quad (8)$$

式中: p_0 为流固耦合面上的压强; $p_{\text{气}}$ 为气体压强。

流体与固体接触面会发生相互作用,流体会使堰坝发生应变,而堰坝变形又会改变流体形态,因此在流固接触面上需满足作用力平衡(动力学条件)和位移一致性(运动学条件):

$$\mathbf{n} \boldsymbol{\tau}_f = \mathbf{n} \boldsymbol{\sigma}_s \quad (9)$$

$$\mathbf{s}_f = \mathbf{s}_s \quad (10)$$

式中: \mathbf{s}_f 、 \mathbf{s}_s 分别为流体和结构在流固耦合界面上的位移; $\boldsymbol{\tau}_f$ 、 $\boldsymbol{\sigma}_s$ 分别为流体和结构在流固耦合界面上的应力; \mathbf{n} 为流固耦合面的外法线向量。

由位移一致性可得耦合面流体速度条件: $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{s}}_s$ (无滑移)或 $\mathbf{n} \mathbf{v} = \mathbf{n} \dot{\mathbf{s}}_s$ (滑移),其中 \mathbf{v} 为耦合面流体速度。

3 计算模型

3.1 计算工况

分2种工况进行计算:①设计洪水位工况,堰上水位高于堰顶1.6 m,堰上流速1.38 m/s,荷载组合为自重、水重、静水压力、扬压力;②常水位工况,堰上水位高于堰顶0.3 m,堰上流速0.34 m/s,荷载组合为自重、水重、静水压力、扬压力。

3.2 网格模型

流体模型和堰坝模型建立后,根据求解顺序先对流体模型进行网格划分。在求解堰坝流固耦合问题

时忽略热传导作用,因此,在对流体进行网格划分时可先抑制堰坝模型,定义流体与堰坝接触面,根据流场求解器选择对应的流体网格划分方式。此外,由于需要分析接触面上的流场和水压力分布,因此考虑对接触面网格进行加密处理。流体全局网格单元尺寸控制为0.5 m,流体与固体接触面网格单元尺寸控制为0.3 m。同时对堰顶水深处局部网格进行加密处理,设计洪水位工况下,局部接触面尺寸设置为0.15 m,常水位工况下,局部接触面尺寸设置为0.1 m。图2(a)给出设计洪水位工况的流体计算网格,其中单元节点数为548 899,网格单元数为2947 440。图2(b)给出常水位工况的流体计算网格,其中单元节点数为431 331,网格单元数为2 215 298。

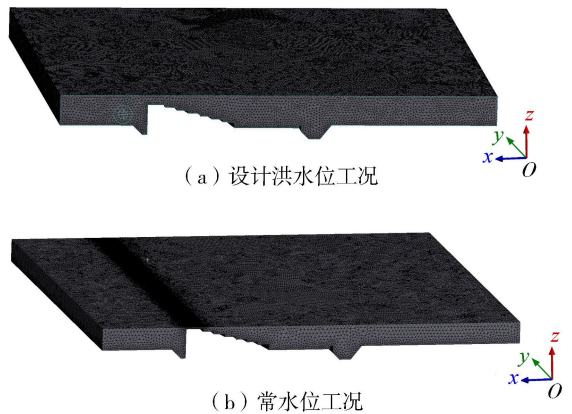


图2 流体计算网格

在流场计算完成后进行堰坝结构稳定分析,需对堰坝及基础模型进行网格划分。在进行流固耦合分析时流体与固体接触面会发生应力传递,因此需要加密流体与固体接触面的网格,具体通过设置固体接触面网格尺寸和膨胀层来完成。在固体表面设置3层膨胀层,增长率为1.2。堰坝外层混凝土结构采用四面体网格划分,堰体、消力池和基岩采用六面体网格划分,全局网格尺寸控制为0.5 m。图3给出堰坝及基础的整体网格模型,其中单元节点数为1 552 462,网格单元数为501 523。

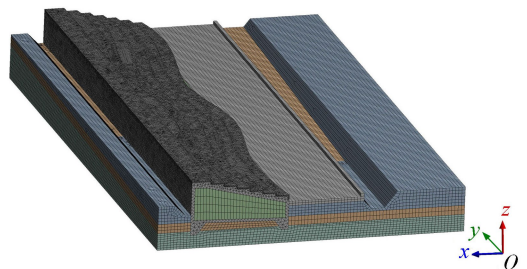


图3 堰坝及基础网格模型

3.3 计算参数

堰坝及基础材料力学计算参数见表1。

表 1 材料力学计算参数

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	允许承载力/ kPa	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
混凝土	25	0.20	25.0	1.00×10^{-8}		1.3	12.5
埋石混凝土	23	0.20	24.5	1.00×10^{-8}		1.3	12.5
含细粒土砾	20	0.20	17.5	7.84×10^{-3}	220		
强风化粉砂岩	13	0.20	20.0	2.56×10^{-4}	280		
弱风化粉砂岩	43	0.15	23.0	9.51×10^{-5}	1100		11.6

4 计算结果分析

4.1 流场分析

图 4 给出堰坝纵剖面流速分布。由图 4 可见,堰坝上的水体由上游至下游势能转化为动能,水体的流速由初始值逐渐增大,并在消力池内发生水跃,随后流速下降。对比图 4(a)与图 4(b)可见,相较于低流速水流,高流速水流发生掺气的现象明显,能量消散较快,相应流速变化梯度也较大。由于水流阻力,液体流速从固体壁面上零值增加到主流流速,形成一定的流速梯度。因此,水体沿堰坝下泄时最大流速发生在水体内部。需要注意的是剖视图中的流速涵盖了水气混合的流速分布。图 5 为相对压强为零的自由表面流速分布。该图可以直观地表现出流体沿堰坝下泄时的特性。从图 5(a)可以看出,堰坝下游水深小于共轭水深,发生远离水跃,且在堰坝曲线凹侧共轭水深大于其他位置处。

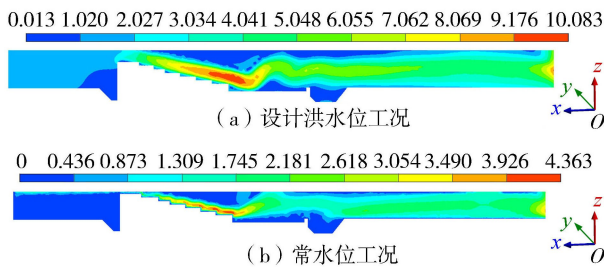


图 4 堰坝纵剖面流速分布 (单位:m/s)

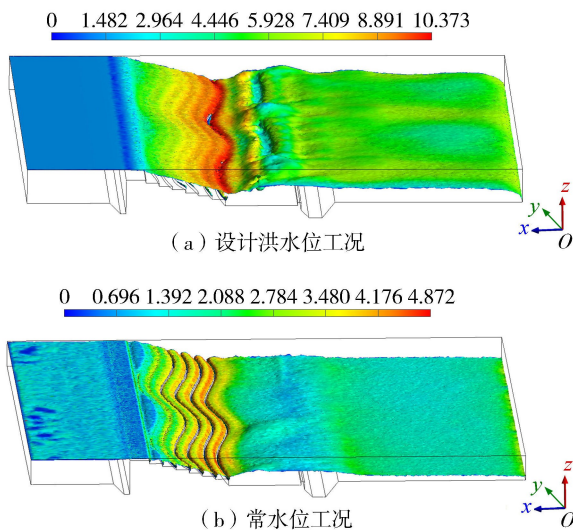


图 5 自由表面流速分布 (单位:m/s)

4.2 应力分析

在进行堰坝稳定分析时,需导入流体分析的计算结果进行耦合。图 6 为耦合后堰坝及基础表面的水压强分布,可以看出模拟的水压强分布与水力学公式计算值基本一致。

堰坝及基础最小主应力分布如图 7 所示,其中拉应力为正值,压应力为负值。由图 7 可以看出,压

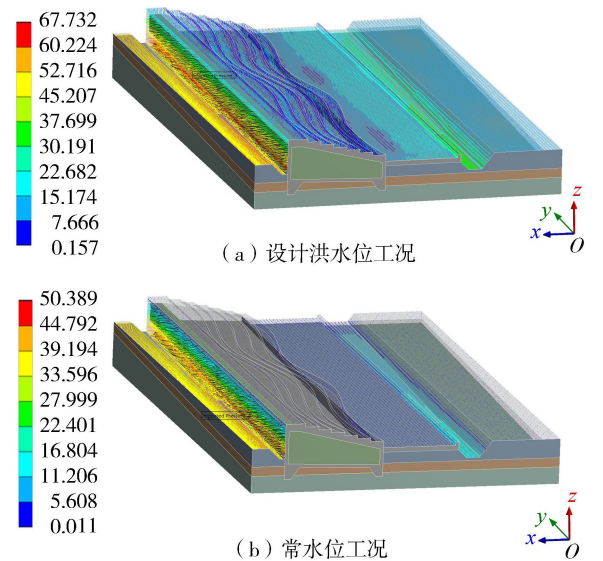


图 6 水压强分布 (单位:kPa)

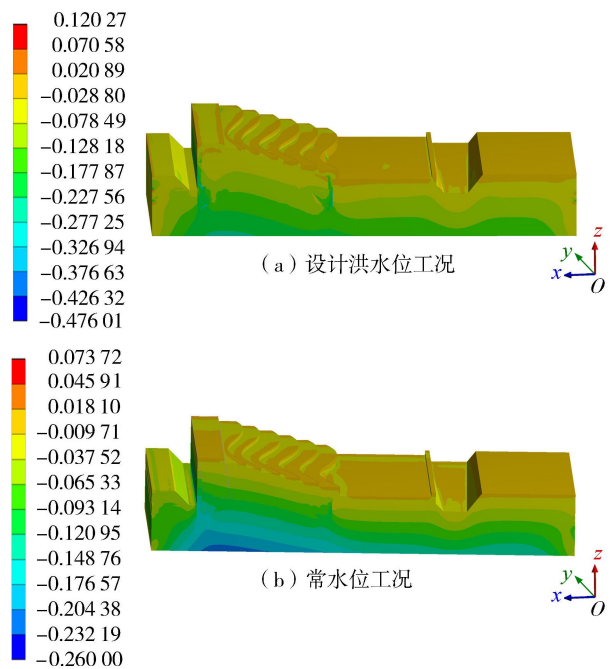


图 7 最小主应力分布 (单位:MPa)

应力自上而下递增,设计洪水水位工况下堰坝在含细粒土砾层、强分化粉砂岩层和弱风化粉砂岩层的压应力最大值分别为 55 kPa、155 kPa 和 180 kPa,常水位工况下各层压应力最大值分别为 45 kPa、140 kPa 和 171 kPa,均能满足各层地基承载力要求。

图 8 给出两种工况下堰坝剖面最小主应力分布,设计洪水水位和常水位工况下堰坝基底面压应力最大值与最小值之比分别为 1.20 和 1.28,均能满足规范要求。

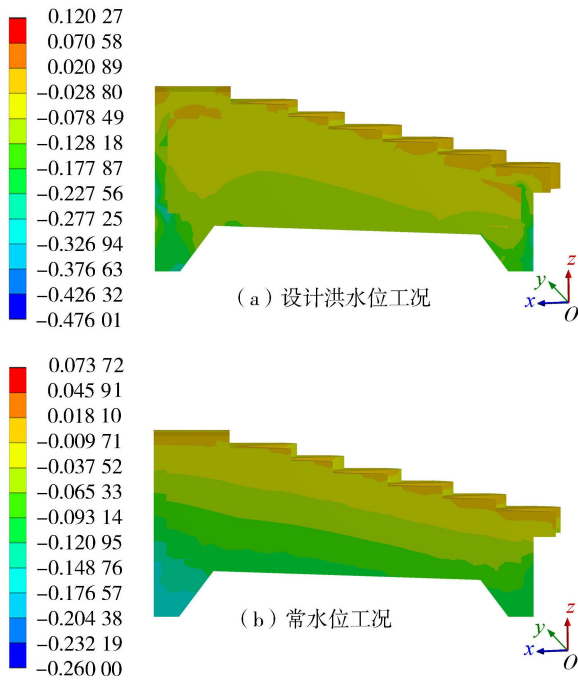


图 8 堰坝剖面最小主应力分布(单位:MPa)

堰坝最大主应力分布如图 9 所示,可以看出堰体内部最大主应力值为负,说明堰体内部未出现拉

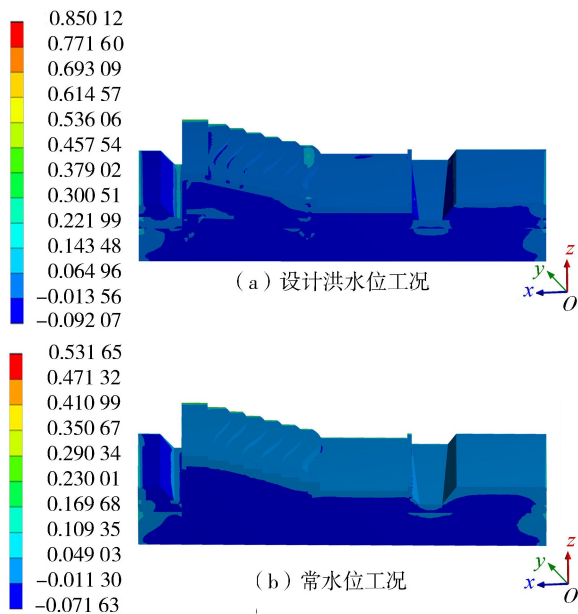


图 9 最大主应力分布(单位:MPa)

应力。在设计洪水水位工况下,堰坝表面出现少量拉应力,主要分布在堰坝最后一个台阶与消力池内。此外,由于堰坝两岸受到位移约束的影响,使得拉应力极值出现在堰坝与两岸挡墙交接面上。堰坝表面和堰坝上下游位置处挡墙均为 C20 混凝土材料,抗拉强度为 1.3 MPa,模拟的拉应力极值小于混凝土的抗拉强度。

4.3 变形分析

位移约束考虑基础在弱风化基岩面下 1.5 m 处不发生相对位移,将堰坝与挡墙结构视为整体进行分析,堰坝模型上下游边界视为无穷远,相对位移为零。堰坝整体变形分布如图 10 所示,可以看出整体变形自上而下递减,变形极值出现在上游抛石防冲槽右岸,由材料模型可看出该处为含细粒土砾,右岸至左岸基岩面逐渐上升,整体变形也逐渐变小,符合材料模型的变形规律。

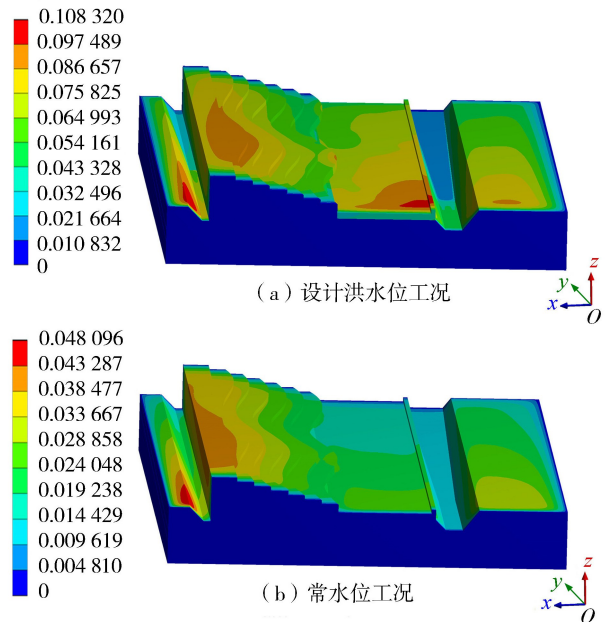


图 10 整体变形(单位:mm)

图 11 给出堰坝和基础沉降变形,负号代表变形方向。设计洪水水位工况下最大竖向变形为 0.10 mm,常水位工况下最大变形为 0.048 mm,远小于规范允许的地基最大沉降量。最大沉降均发生在含细粒土砾层,与实际情况相符。

5 结论

a. 基于 ANSYS CFX 的有限体积法求解流场,通过引入气液两相流求解堰坝的表面流场和水压力。计算结果表明该方法可有效解决自由表面外部流动问题。

b. 设计洪水水位工况下堰坝下游水深小于共轭水深,发生远离水跃,且在堰坝曲线凹侧共轭水深大

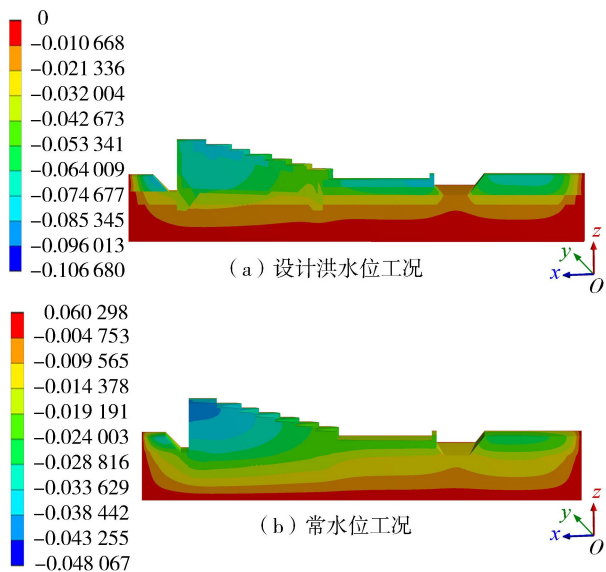


图 11 沉降变形(单位:mm)

于其他位置处,因此堰坝下游需设消能工。

c. 设计洪水水位与常水位工况下堰坝在含细粒土砾层、强分化粉砂岩层和弱风化粉砂岩层的压应力均能满足各层地基承载力要求,且堰体内部未出现拉应力。

d. 堰坝及基础变形计算结果合理,且能很好地反映堰体与基础非连续性的变形情况。两种工况下最大竖向变形小于规范允许的地基最大沉降量,且沉降极值均发生在含细粒土砾层,与实际情况相符。

参考文献:

[1] 陈月君,顾晓峰,傅宗甫,等. 上游边坡系数对折线型实用堰流量系数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 425-432. (CHEN Yuejun, GU Xiaofeng, FU Zongfu, et al. Effects of slope coefficient in the upstream side on the discharge coefficient of broken-line practical weirs [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(5): 425-432. (in Chinese))

[2] 王芳芳,吴时强. 都江堰工程思考及其启示[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 19-24. (WANG Fangfang, WU Shiqiang. Reflection and enlightenment of Dujiangyan Project[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 19-24. (in Chinese))

[3] 段江东. 生态水利工程概念研究与典型工程案例分折[J]. 水利经济, 2019, 37(4): 1-4. (DUAN Hongdong. Conceptual research on eco-hydraulic engineering and case study of typical projects [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(4): 1-4. (in Chinese))

[4] 叶林. 山溪性河流上砂砾石堰坝的破坏形式分析及设计实践[J]. 浙江水利科技, 2018, 46(6): 45-47. (YE Lin. Failure analysis and design practice of gravel weir on

mountain stream [J]. Zhejiang Hydraulics, 2018, 46(6): 45-47. (in Chinese))

[5] 罗辉,邓创,赵高文. 2008—2017 年中国典型滑坡堰塞坝(湖)灾害事件统计与初步分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1): 17-24. (LUO Hui, DENG Chuang, ZHAO Gaowen. Statistics and preliminary analysis for typical landslide dams in China in past decade [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1): 17-24. (in Chinese))

[6] 吴国君,刘晓平,方森松,等. 低实用堰水力特性及其对工程的影响[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(9): 21-24. (WU Guojun, LIU Xiaoping, FANG Sensong, et al. Hydraulic characteristic of low practical weir and its influence on engineering [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(9): 21-24. (in Chinese))

[7] 张挺,伍超,卢红,等. X型宽尾墩与阶梯溢流坝联合消能的三维流场数值模拟[J]. 水利学报, 2004, 35(8): 15-20. (ZHANG Ting, WU Chao, LU Hong, et al. 3-D numerical simulation of flow on stepped spillway combined with X-shape flaring gate piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(8): 15-20. (in Chinese))

[8] 李如忠,张翩翩,杨继伟. 多级拦水堰坝调控农田溪流营养盐滞留能力的仿真模拟[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 668-677. (LI Ruzhong, ZHANG Pianpian, YANG Jiwei. Experimental manipulations of efficiency of nutrients retention by multilevel low-grade weirs in an agricultural headwater stream [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 668-677. (in Chinese))

[9] 祁媛媛,李国栋,李珊珊,等. 琴键堰过流水力特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 164-169. (QI Yuanyuan, LI Guodong, LI Shanshan, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of piano-key weir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 164-169. (in Chinese))

[10] 练继建,桑林瀚,缙文娟,等. 高拱坝表孔宽尾墩体型参数对泄流能力的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3): 1-7. (LIAN Jijian, SANG Linhan, GOU Wenjuan, et al. Effects of flaring gate piers with different shape parameters on discharge capacity of surface spillway in a high arch dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3): 1-7. (in Chinese))

[11] MACHIELS O, PIROTTON M, PIERRE A, et al. Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs [J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(3): 326-335.

[12] 刘全,胡志根,槐文信,等. 土石围堰溃堰洪水三维动态仿真模型[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1432-

1437. (LIU Quan, HU Zhigen, HUAI Wenxin, et al. Three-dimensional dynamic simulation of earth-rock cofferdam failure flood [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1432-1437. (in Chinese))
- [13] 闫晓惠, 陈新. 基于 LES 模型的矩形宽顶堰流数值模拟及堰顶宽度对水流场的影响分析[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(6):198-199. (YAN Xiaohui, CHEN Xin. Numerical simulation of rectangular widetop weir flow based on LES model and analysis of influence of weir width on flow field[J]. China Water Transport, 2015, 15(6):198-199. (in Chinese))
- [14] ADIB M R M, AMIRZA A R M, WARDAH T, et al. Effectiveness using circular fibre steel flap gate as a control structure towards the hydraulic characteristics in open channel [J]. Materials Science and Engineering, 2016,136(1) : 956-961.
- [15] 王晓玲, 李潇, 朱晓斌, 等. 基于 PLS-ELM 响应面法的坝基抗滑稳定可靠度分析 [J]. 水力发电学报, 2019, 38(4) : 224-233. (WANG Xiaolin, LI Xiao, ZHU Xiaobin, et al. Reliability analysis of anti-sliding stability of a gravity dam foundation based on PLS-ELM dynamic response surface method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(4) : 224-233. (in Chinese))
- [16] CERFONTAINE B, DIEUDONNÉ A C, RADU J P, et al. 3D zero-thickness coupled interface finite element: formulation and application [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 124-140.
- [17] WANG H, SI F, LOU G, et al. Hydrodynamic characteristics of a suspended curtain for sediment trapping [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2015,141(1) : 14-30.
- [18] 岳宝增, 刘延柱. 带自由液面 Navier-Stokes 流动问题的 ALE 分步有限元方法[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2003, 18(3) : 463-469. (YUE Baozeng, LIU Yanzhu. ALE finite element method for free surface Navier-Stokes flow using fractional step methods [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(3) : 463-469. (in Chinese))
- [19] 王华坤. 基于 ALE 动网格的流固耦合分区算法及其在流致振动分析中的应用 [D]. 上海: 上海交通大学. 2015.
- [20] NEMES A, ZHAO J, JACONO D L, et al. The interaction between flow-induced vibration mechanisms of a square cylinder with varying angles of attack [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 710:102-130.
- [21] 周墨臻, 张丙印, 王伟. 高面板堆石坝软缝接触计算模型及其数值实现 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2803-2810. (ZHOU Mozhen, ZHANG Bingyin, WANG Wei. Algorithm and simulation methods for the soft longitudinal joint of the concrete faces in high concretefaced rockfill dams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup1) : 2803-2810. (in Chinese))
- [22] MASUD A, BHANABHAGVANWALA M, KHURRAM R A. An adaptive mesh rezoning scheme for moving boundary flows and fluid-structure interaction [J]. Computers & Fluids, 2015, 36(1):77-91.
- [23] 王博, 陈淮, 徐伟, 等. 考虑槽身与槽内水体流固耦合的渡槽地震反应计算 [J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(3):5-7. (WANG Bo, CHEN Huai, XU Wei, et al. Seismic response analysis of aqueducts with consideration of fluid-solid coupling [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(3):5-7. (in Chinese))
- (收稿日期:2019-05-08 编辑:雷燕)
- +++++
- (上接第 27 页)
- [20] YAO Fuhai, GUAN Shaoheng, YANG He, et al. Long-term deformation analysis of Shuibuya concrete face rockfill dam (China) based on response surface method and improved genetic algorithm [J]. Water Science and Engineering, 2019,12(3):196-204.
- [21] 练继建, 桑林瀚, 缙文娟, 等. 高拱坝表孔宽尾墩体型参数对泄流能力的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3) : 1-7. (LIAN Jijian, SANG Linhan, GOU Wenjuan, et al. Effects of flaring gate piers with different shape parameters on discharge capacity of surface spillway in a high arch dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3) : 1-7. (in Chinese))
- [22] 陈月君, 顾晓峰, 傅宗甫, 等. 上游边坡系数对折线型实用堰流量系数的影响 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(5) : 425-432. (CHEN Yuejun, GU Xiaofeng, FU Zongfu, et al. Effects of slope coefficient in the upstream side on the discharge coefficient of broken-line practical weirs [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(5) : 425-432. (in Chinese))
- [23] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- (收稿日期:2019-08-21 编辑:雷燕)