

水利工程灌浆三维建模及稳定性分析

徐建忠

(浙江中水东方建设工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310005)

摘要:结合水利工程实例,建立三维模型和建筑实体模型,再结合拥有强大实体布尔运算功能的 ABAQUS 软件,有效规避了在将 inventor 实体模型直接导入 ABAQUS 时几何信息错误的产生。同时,将工程实体模型运用 ABAQUS 软件用网格划分并进一步优化,创建三维渗流有限元网格模型,并对其稳定性进行研究。

关键词:黏土心墙;三维建模;水利工程;稳定性分析

中图分类号:TV;U445.55+2;N945.12

文献标识码:A

文章编号:1001-2184(2022)05-0106-03

Research on 3D Modeling and Stability Analysis of Grouting in Hydraulic Engineering

XU Jianzhong

(Zhejiang Zhongshui Dongfang Construction Engineering
Consulting Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310005)

Abstract: Based on a water conservancy project, the 3D model and building solid model are established, and by utilizing the ABAQUS software which has powerful solid Boolean operation function, the generation of geometric information errors when the inventor solid model is directly imported into ABAQUS is effectively avoided. At the same time, the engineering solid model is divided and further optimized by using ABAQUS software, then the three-dimensional seepage finite element mesh model is created and the stability is studied.

Key words: Clay core wall; 3D modeling; Water conservancy project; Stability analysis

0 引言

近年来,水利行业随着 BIM 技术的大力普及,水利工程的可视化仿真发展突飞猛进,尤其是复杂地质模型的仿真建模得到了前所未有的提高。运用 Inventor 软件建立水利工程的三维模型和建筑物的实体模型,再结合 ABAQUS 的实体布尔运算功能,可以有效规避 inventor 实体模型导入 ABAQUS 时几何信息错误的产生。采用 ABAQUS 网格划分和优化实体模型,可以创建三维渗流有限元网格模型,进而分析其稳定性,同时,还可以将此项研究成果作为三维仿真建模与数值计算分析(CAD/CAE)集成技术的参考^[1]。本文选择了某水库工程作为研究对象,探究三维建模在水利工程灌浆稳定性分析中的应用。

某水库工程位于浙江地区,工程等级为Ⅲ级,土石坝是其水工建筑物坝型,其最大坝高为 83.5 m,建筑等级提高Ⅰ级至Ⅱ级。大坝采用黏

土心墙防渗。心墙顶宽 5 m,上下游坡比 1 : 0.25。在心墙底部设置 1.5 m 深的黏结槽。将 0.5 m 厚 C15 混凝土垫层分别设置在黏结槽底以及基础接触面,设置两层反滤层心墙于下游。大坝上下游坝坡比分别为 1 : 1.9 和 1 : 1.7。

1 坝基防渗设计

河床冲洪积层和岸坡残积层应彻底清除;除两个断层的坝心墙缝槽嵌入基岩 2.8~2.5 m 外,其余部位的坝心墙缝槽一般嵌入基岩 1.5 m。心墙使用固结灌浆为基础,保持 5 m 的深度。保持 8 m 的固结灌浆深度在两个断层之间。大坝装有三排帷幕。大坝心墙轴线是大坝主帷幕灌浆轴线所在。辅助帷幕位于主帷幕上游 1.2 m 处。主幕和副幕为悬挂式,主帷幕灌浆底界由 0.8 倍水头控制。辅助帷幕布置在河床段和 0.5 倍水头以下的右坝段。第三排帷幕设置在另一断层处,位于主帷幕下游侧,底界与主帷幕相同。大坝帷幕灌浆防渗标准为 $Q \leq 3 Lu$,固结灌浆防渗标准

收稿日期:2022-05-11

为 $Q \leq 5 Lu$ 。

2 稳定性分析理论

根据达西定律,将坝区渗流场视为非均质各向异性不可压缩土的三维稳定渗流场。三维模型稳定性的渗流控制方程为^[2]:

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q = 0 \quad (1)$$

式中 x_j 为坐标, $i=1,2,3$; k_y 为一个二阶对称渗透率张量; h 为总水头; Q 为渗透池中的源项或汇项。

计算中使用的渗流计算边界见图1,边界条件理论如下:

$$\begin{aligned} h | \gamma_1 &= h_1 \\ -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i | \gamma_2 &= q_n \\ -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i | \gamma_3 &= 0, h = x_3 \\ -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i | \gamma_4 &\geq 0, h = x_3 \end{aligned} \quad (2)$$

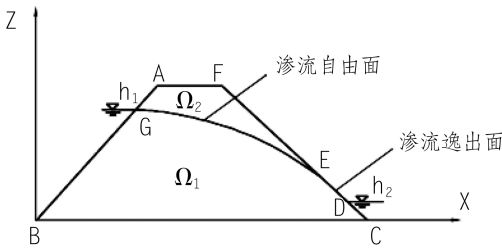


图1 渗流计算边界示意图

其中,已知函数是 h_1 和 h_2 ; 渗流边界平面外法线的余弦是 $n_i, i=1,2,3$; 可知水头的第一类渗流边界条是 $\Gamma_1 = BG$ 和 CD , 第二类渗流边界条件是 $\Gamma_2 = GA, AF, FE$ 和 DC , 渗流池中真实和假想渗流区域之间的渗流自由面是 $\Gamma_3 = GE$, 渗流逸出面是 $\Gamma_4 = ED$, 因为事先并不了解渗流逸出点 E 的具体位置, 以及所有逸出面具体的尺寸, 所以, 这属于边界非线性渗流问题, 要经过迭代求解可知, 边界法向流是 QN , 流出为正。

3 三维有限元建模

依据本项目工程的地形地貌, 了解主要结构面断层的分布, 结合建筑物设置和防渗措施, 构建出涵盖心墙坝结构(黏土心墙、反滤层和堆石区)、灌浆帷幕、灌浆盖板、固结灌浆等在内的本项目工程的三维有限元模型, 同时模拟了坝基的主要断层和基岩, 其中包括基岩、断层、河床溶蚀带等^[3]。

首先, 从项目的工程高线图中找出等高线点数据, 使用 rhino 软件创建三维地形曲面, 建立基础实体, 然后导入到 Inventor 软件中。Inventor 可以创建坝基开挖面、溶蚀带实体、渗透性边界面、断层实体、固结灌浆实体、大坝分区实体、帷幕灌浆实体。由于模型的复杂性, 如果在 inventor 中通过布尔运算形成项目建筑实体, 然后将其导入 ABAQUS, 则经常会发生几何错误, 以致于造成操作失败。运用超强的 ABAQUS 布尔运算功能, 导入由 invnetor 创建的各种实体和曲面, 然后进行布尔运算, 以此完成最后的工程建筑实体。ABAQUS 能够准确识别实体并将它们以平滑网格划分。

该项目工程的三维模型共有 422 340 个单元, 74 123 个节点, 主要组成部分为四面体单元。其生成的三维有限元网格模型, 主要分为大坝模型、断层和河床溶蚀带模型、固结灌浆、灌浆盖板、四个断层模型以及防渗帷幕模型^[4-5]。

4 材料渗透性、边界条件及计算工况

4.1 材料渗透特性参数

依据主要建筑材料室内试验/地层、主要结构面综合、钻孔水压试验结果, 该项目工程材料分为多个材料区, 材料渗透特性参数见表1。

表1 材料渗透特性参数

序号	材料名称	渗透系数 / (cm · s ⁻¹)
1	黏土心墙	4.23×10^{-6}
2	第一层反滤料	6.82×10^{-3}
3	第二层反滤料	7.10×10^{-2}
4	堆石料	9.28×10^{-2}
5	灌浆盖板	1.00×10^{-6}
6	固结灌浆	4.90×10^{-5}
7	防渗帷幕	3.12×10^{-5}
8	四个断层	8.10×10^{-4}
9	断层(埋深 < 30 m)	2.00×10^{-3}
10	断层(埋深 30 ~ 60 m)	106.20×10^{-4}
11	断层(埋深 > 60 m)	1.00×10^{-4}
12	溶蚀带	8.10×10^{-4}
13	覆盖层	5.10×10^{-2}
14	强透水层岩体	1.00×10^{-2}
15	中等透水层岩体(上部)	6.62×10^{-4}
16	中等透水层岩体(下部)	2.03×10^{-4}
17	弱透水层岩体(上部)	8.00×10^{-5}
18	弱透水层岩体(下部)	3.12×10^{-5}

4.2 边界条件

将计算区域周围的截止边界和底边界条件视

为水头界面;在地表边界坝轴线上游方向,水头边界要低于水库上游 1 551.92 m 的位置;已知水头边界条件位于坝轴线下游侧,也低于下游水位的位置,可能的渗漏逸水面要高于下游水位的位置。

4.3 计算条件

计算工况(表 2)综合了河床段基岩局部帷幕损坏对库区水流造成的影响,标明了此次工程三维稳定性有限元计算的分析工况。

表 2 计算工况

计算工况	特征水位 /m		工况说明
	上游水位	下游水位	
A1	1 549.89	1 478.0	帷幕完好
A2	1 549.89	1 478.0	断层帷幕破坏
A3	1 549.89	1 478.0	河床溶蚀带帷幕破坏
A4	1 549.89	1 478.0	断层、河床溶蚀带帷幕均破坏

5 计算结果及分析

5.1 帷幕完整条件下的工况

通过 ABAQUS 的非饱和渗流分析模块进行渗流计算。从该项目渗流特征结合区域整体渗透场图来看,具备明显的三维渗流特征^[6];蓄水之后,库水通过坝基渗透带向下游渗漏,同时绕过左

右坝肩经过两岸渗透带。因此可得出:(1)坝体防渗心墙以及坝基帷幕灌浆的效果非常明显,大坝渗流场水头势等值线分布具备高密度,并在心墙内大量减小总水头差;(2)从两岸渗流场分布看,在两岸延伸帷幕作用下,左右岸地下水位显著降低,尤其是两岸坝肩段。由于地质条件很差,沿河床和溶蚀带上下游均有断层穿过,对库区渗流产生不利影响。经过处理,坝体浸润线在心墙内迅速下降,水位等电位线在心墙、混凝土垫层、固结灌浆带、帷幕内密集。由此可见,防渗体系的效果是明显的。

坝体和坝基的渗流是该项目工程防渗设计中特别关注的内容之一。在正常蓄水位情况下,该项目工程大坝、坝基等部位的渗流情况见表 3。在计算范围内,库区总渗流量为 54.31 L/s,年渗流量约 867.45 m³(按水库满库 6 个月计算),占水库库容的 2.47%。坝段渗流量为 39.03 L/s,其中心墙渗透性为 4.38×10^{-6} cm/s,坝体渗流量为 0.87 L/s,仅占坝段总渗流量的 2.36%,坝段坝基渗流量为 37.12 L/s,左岸山体渗流量为 5.02 L/s,右岸山体渗流量为 10.19 L/s。

表 3 大坝、坝基等部位的渗流情况

库水位 /m	尾水位 /m	左岸坝肩 /L·s ⁻¹	主坝段			右岸坝肩 /L·s ⁻¹	总渗流量 /L·s ⁻¹
			坝体 /L·s ⁻¹	坝基 /L·s ⁻¹	坝段总量 /L·s ⁻¹		
1 548.83	1 489.00	5.12	0.81	38.13	37.12	10.33	54.31

通过水力梯度值针对坝体、坝基的一些重要部位展开分析,以便于更深入评估坝体和坝基的稳定性、安全性。经计算,心墙最大水力梯度值为 2.317。有必要在心墙下游侧设置反滤层,以防止黏土心墙出现裂缝时心墙土壤持续侵蚀和流失。混凝土盖板、固结灌浆以及帷幕的水力梯度值均低于允许值,符合渗透稳定性要求。左坝肩断层以及右坝肩断层的最大水力梯度值分别为 1.323、0.541、2.520,为河床段断层的最大水力梯度值。所以,在断层下游的裸露区域安装适当的过

滤层势在必行。

5.2 局部帷幕破坏研究

表 4 体现了部分渗流条件下帷幕的破坏情况。从中可以看出,在 A₂、A₃ 和 A₄ 工况条件下的总渗流量比 A₁ 工况条件(帷幕完好)分别增加了 3.61 L/s、3.05 L/s 和 5.40 L/s,增加百分比分别为 6.7%、5.6% 和 10.0%,说明断层和溶蚀带外帷幕灌浆的质量对枢纽区的渗流有很大影响。同时还可看出,在部分帷幕破坏的情况下,断层和溶蚀带的水力梯度值比帷幕完整条件下大,

表 4 部分渗流条件下帷幕的破坏情况

工况	左岸坝肩 /L·s ⁻¹	主坝段			右岸坝肩 /L·s ⁻¹	总渗流量 /L·s ⁻¹
		坝体 /L·s ⁻¹	坝基 /L·s ⁻¹	坝段总量 /L·s ⁻¹		
A ₂ —断层帷幕破坏	5.02	0.87	41.75	42.65	10.21	57.88
A ₃ —溶蚀带帷幕破坏	5.03	0.87	41.22	42.12	10.17	57.32
A ₄ —溶蚀带及断层帷幕破坏	5.02	0.89	43.52	44.41	10.24	59.67

不利于渗流的稳定性。

(下转第 112 页)

同时,不断加强运营管理和对职工的教育培训,设备设施的安全可靠性不断提高。近几年电站实现了按上游来水持续不间断发电,最大限度提高了机组利用小时数,保障了当地居民冬季生产、生活用电,缓解了当地电网供电的紧张局面,为促进高原藏区经济发展和社会稳定发挥了重要的作用。

参考文献:

- [1] 陈容. 浅谈小型水电站大坝安全运行管理存在问题及解决对策[J]. 大坝与安全, 2018, (1): 16-19.
- [2] 梁慧芬. 临夏县农村小水电站运行管理中存在的问题及对策[J]. 农业科技与信息, 2018, (18): 90-92.

(上接第 100 页)

(3)相比传统的联接螺栓刚强度校核计算,采用整体结构有限元计算能对螺栓在各种工况下的受力情况有更为细致地掌握,不仅可为为此类结构关键联接部件的刚度计算分析提供解决方案,同时还可为进一步优化设计提供支持。

参考文献:

- [1] 王明,肖良瑜. 1000 MW 级水轮机顶盖与蜗壳座环的联合受力分析[J]. 大电机技术, 2011, (1): 58-60.
- [2] 刘晶石,钟苏,庞立军. 某电站水轮机顶盖结构改进方案有限元分析[J]. 大电机技术, 2013, (3): 40-42.
- [3] 孙立宾,曾明富,常喜兵. 水泵水轮机顶盖/座环联接件应力幅分析[J]. 东方电气评论, 2011, 25(2): 27-30.
- [4] 潘月辉,刘计娟. 水泵水轮机蜗壳座环和顶盖有限元分析研究[J]. 西北水电, 2012, (1): 102-105.

(上接第 108 页)

6 结 语

BIM 技术的推广和发展,为实现建立模拟水利工程的有限元模型提供了无限可能,同时也强化了数值模拟分析在工程建设以及安全评估时的重要影响。通过三维稳定性有限元计算分析得知,坝基是此次项目工程渗漏最主要集中位置,左右岸岸坡是次要位置。为了防止断层中填料的渗透损失,有必要在三条断层的暴露下游铺设过滤材料。研究发现,假如断层及河床溶蚀带的帷幕受损,也会影响到总渗流,对促进断层和溶蚀带的稳定性和安全性有不利影响。所以,应该在帷幕施工时,对幕墙的施工质量进行严格管控。

参考文献:

- [3] 罗永全. 对中小型水电站运行管理提高经济效益方法的探讨[J]. 工程建设与设计, 2018, (13): 132-134.
- [4] 吴建良. 严寒严寒高海拔地区水电站引水渠道设计[J]. 西北水电, 2016, (1): 33-36.
- [5] 陈造奎. 水力机组安装与检修[M]. 郑州:华北水利水电学院出版社, 1986: 169-189.

作者简介:

刘均明(1970-),男,四川成都人,高级工程师,一级建造师,主要从事水电投资、建设、运营管理工作;

李永强(1979-),男,四川成都人,高级工程师,一级建造师,主要从事水电站建设、运维管理工作。

(责任编辑:卓政昌)

- [5] 肖良瑜,李永恒. 考虑预紧力的顶盖与座环联合受力研究[J]. 东方电气评论, 2011, 25(98): 31-33.
- [6] 贾伟,李建伟,刘晶石,等. 某轴流式水轮机顶盖有限元分析及结构优化设计[J]. 电力学报, 2014, 29(4): 349-352.
- [7] 陈柳,于纪幸,罗永要,等. 先居抽水蓄能电站顶盖座环联接螺栓的受力特性初步分析研究[J]. 水力机械技术, 2018, (2): 2-6.
- [8] 郑发平. 甲米一级混流式水轮机顶盖强度及刚度计算研究[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2011, 25(3): 36-38.

作者简介:

谭 啸(1986-),男,湖北宜昌人,工程师,硕士,主要从事电力生产、工程管理方面工作;

朱 毅(1986-),男,湖北宜昌人,高级工程师,硕士,主要从事水电水利工程机电设计、工程数字化、BIM 技术的研发和应用方面的工作。

(责任编辑:卓政昌)

- [1] 邓韶辉,王晓玲,敖雪菲,等. 大坝基岩帷幕灌浆液灌浆的三维数值模拟[J]. 水利学报, 2016, (2): 165-172+179.
- [2] 钱朝阳. 某水库土石坝防渗墙及帷幕灌浆质量评价探讨[J]. 工程与建设, 2015, (4): 555-558.
- [3] 占文婷. 土石坝的渗流特性分析及数值模拟[J]. 工程建设与设计, 2018, (21): 121-123.
- [4] 娄一青,王林素,苏怀智. 碾压混凝土坝层面渗流变异特性研究[J]. 水利规划与设计, 2011, (6): 56-58+62.
- [5] 王晓玲,刘长欣,李瑞金,等. 大坝基岩单裂隙灌浆流固耦合模拟研究[J]. 天津大学学报, 2017, (10): 1037-1046.
- [6] 罗平平,朱岳明,赵咏梅,等. 岩体灌浆的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, (8): 918-921.

作者简介:

徐建忠(1979-),男,浙江杭州人,本科,高级工程师,主要从事土木工程施工。

(责任编辑:卓政昌)