

基于有限元堆石混凝土坝温度仿真模拟分析

杜勇超

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年7月27日; 录用日期: 2024年8月18日; 发布日期: 2024年8月29日

摘要

堆石混凝土坝的稳定性是保障坝体施工期安全运作的重要因素之一。堆石混凝土坝的不稳定性可能导致坝体受温度梯度影响而破坏, 从而引发严重的灾害, 造成人员伤亡和财产损失。因此, 保证堆石坝施工期的稳定性对于保证人民生命财产安全和维护社会稳定具有重要意义。采用有限元ANSYS对坝体进行建模, 以陕西镇安抽水蓄能电站拦沙坝工程为例, 建立大坝并分仓浇筑混凝土的二维有限元分析模型, 从而进行对比和研究分析, 研究堆石混凝土坝温度和变化规律并且受外界温度、温度初始条件和边界条件的施加、水化热模拟以及温度荷载的施加、混凝土弹性模量变化、徐变模型的处理。验证温度变化规律及ANSYS数值模拟, 对堆石混凝土坝施工期稳定性的研究开展具有重要意义。

关键词

堆石混凝土, ANSYS, 数值模拟, 温度仿真

Temperature Simulation and Modeling Analysis of Rockfill Concrete Dams Based on Finite Element

Yongchao Du

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 27th, 2024; accepted: Aug. 18th, 2024; published: Aug. 29th, 2024

Abstract

The stability of rockfill concrete dam is one of the important factors to ensure the safe operation of the dam during construction. The instability of rockfill concrete dam may cause the dam to be damaged by the influence of temperature gradient, which will lead to serious disasters, resulting

in casualties and property losses. Therefore, it is of great significance to ensure the stability of rockfill dam construction period for ensuring the safety of people's lives and property and maintaining social stability. The finite element ANSYS is used to model the dam body. Taking the sand dam project of Zhen'an Pumped Storage Power Station in Shaanxi Province as an example, a two-dimensional finite element analysis model of dam and concrete pouring is established, so as to compare and study the temperature and variation law of rockfill concrete dam, which is affected by external temperature, initial temperature conditions and boundary conditions, hydration heat simulation, temperature load application, concrete elastic modulus change and creep model treatment. It is of great significance to verify the temperature variation law and ANSYS numerical simulation for the study of the stability of rockfill concrete dam during construction.

Keywords

Rockfill Concrete, ANSYS, Numerical Simulation, Temperature Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土坝坚固耐久,但存在“无坝不裂”的顽疾[1],大体积混凝土的抗裂能力不足以抵御混凝土水化热温升导致的温度应力[2][3]。叶巴滩高海拔地区堆石混凝土二道坝采用结构分缝+表面保温措施;整体浇筑堆石混凝土拱坝型式正在积极探索与工程实践中,曾提出过上下游表面采用预制混凝土块模板[4]。为了研究冷却水管对混凝土的降温作用,两类数值方法被提出:①非均质离散模拟,通过各自的热传导方程进行热量传递[5],此方法网格量大,但可模拟水管附近的温度梯度;②均质等效“负热源”法[6],从空间平均意义上考虑冷却水管所能吸收的热量,采用均质化网格和统一的正负热源热传导方程,该方法计算简便、应用广泛。

随着工程设计的经验不断积累,堆石混凝土筑坝安全可靠得到进一步验证。在堆石混凝土绝热温升、坝体温度应力仿真分析及温控措施等方面国内外均有诸多研究[7]-[9]。近年来,混凝土的堆石尺寸较大,所以如果要想实现“自身不裂”的混凝土坝,必须在降低水化热的同时提高混凝土抗裂能力。由于堆石混凝土是基于利用骨料强度又降低水泥用量的理念而发展起来的绿色低碳大体积混凝土技术,因此难以采集大量的堆石混凝土实验参数样本进行相关规律的提取和总结。

2. 混凝土坝温度与应力之间的关系

受客观条件限制,只采用有限的数量样本进行比对。绝热升温与极限拉伸2个参数指标与混凝土的抗裂性能的数据体现,可以通过这两个参数的取值变化来了解混凝土抗裂性能的优劣。另外,施工工艺也是影响徐变的重要因素,综上所述,堆石混凝土在受温度影响后的表现是通过以下几个参数进行全方位的体现:

2.1. 抗裂特性

1) 绝热升温:主导混凝土发热量的因素是混凝土的水化热。堆石混凝土和普通混凝土之间最大的区别在于水泥的用量,由于堆石混凝土鉴于自身特性的远近,在制作的过程中会添加大量的粉煤灰,因此绝热温升低于常态混凝土。

2) 极限拉伸: 堆石混凝土的抗裂性可主要通过极限拉伸来反映, 而现实中堆石混凝土的极限拉伸值比常态混凝土低是受配合比和施工方法的影响。混凝土配合技术和实验精度长足的提高有赖于近几年的试验与研究, 堆石混凝土的极限拉伸值也有了质的飞跃, 但在实际的实施过程当中, 90 d 龄期的混凝土在极限拉伸值得表现方面与试验恰恰相反, 仍然低于同质的常态混凝土。

2.2. 徐变度

徐变是反映温度影响的一个重要指标, 能够直接地反应堆石混凝土在温度作用下的变化。混凝土对于温度变化的重要反映是通过徐变值表现出来的, 在温度应力作用的部分, 可以通过徐变使混凝土体块减小应力反应, 徐变与应力呈反比关系。由于胶凝材料用量在混凝土中的作用, 相比于常态混凝土而言, 堆石混凝土的徐变维持在一个低水平的取值, 就可以保持坝体的功能稳定性, 但是这一点于温度应力与防裂不利。

2.3. 施工方法的影响

中国堆石混凝土冷量损失大, 究其原因是采用低温入仓导致, 类似于常态混凝土那样的低温浇筑通常难以实现。常态混凝土在浇筑中可以通过温控措施来保持混凝土的完整性。然而, 由于堆石混凝土的热性所致, 水管冷却会对其施工带来不利影响, 因此近几年大部分堆石混凝土浇筑工程不推荐采用此种方法, 少数设置冷却水管的也仅限于高温季节浇筑的部位。在常态混凝土中通常会采用以下方法对此类问题进行规避, 一个是降低浇筑温度, 第二个是通水冷却。后者在对视混凝土中难以实现并且效果欠佳。鉴于堆石混凝土坝通常不做二期冷却, 仅靠大自然散热进行后期稳定, 需要较长一段时间坝体处于温度降至稳定, 故大坝会长时间处于一种高温状态, 当遇到温度骤降时, 降温所带来的温差将产生热胀冷缩从而出现裂缝。

3. 堆石混凝土温度场计算原理

由于大体积混凝土温升在四周不具备散热的条件下, 温升曲线如图, 实际可能出现绝热状态, 但大体积混凝土内部在浇筑初始 1~5 d 之间接近绝热状态此后温度逐渐扩散冷却, 最终与环境温度一致。

由水化热引起的混凝土中心绝热温升计算按照:

$$T = T_j + T_\tau = T_j + \frac{wQ}{C\rho}(1 - e^{-m\tau}) \quad (1)$$

式中: T_τ ——绝热状态下龄期 τ 时混凝土内部温升值($^{\circ}\text{C}$);

T ——绝热状态下龄期 τ 时混凝土内部温度值($^{\circ}\text{C}$);

T_j ——混凝土浇筑温度($^{\circ}\text{C}$);

w ——水泥用量(kg/m^3);

Q ——每公斤水泥水化热量(kJ/kg);

C ——混凝土比热;

ρ ——混凝土密度;

τ ——龄期(d);

m ——水泥水化速度系数, 与水泥品种、浇筑温度有关。

混凝土暴露在大气之中不可能绝对隔热实际温度比绝热温升要低, 因此可以根据不同的表面散热情况做出适当的修正。如对不同混凝土浇筑厚度混凝土中平均温升可按照如下计算:

$$T_n = T_j + T\tau^\xi \quad (2)$$

式中： T_r ——混凝土绝热温升值， $T_r = \frac{wQ}{C\rho}(1 - e^{-mr})$ 见公式(1)；

ζ ——混凝土温升修正系数。

4. 有限元分析模型建立

以陕西镇安抽水蓄能电站拦沙坝工程为例,通过 ANSYS 仿真软件对堆石混凝土坝温度进行仿真分析。

在 ANSYS 软件中,使用 SOILD 70 单元进行模型的热分析,并定义材料属性,在此过程中,主要的问题有:动态分层浇筑,边界条件,混凝土绝热温升,水化生热率及外界气温变化,温度的初始温度以及模型切体、划分网格等操作,坝体高 10 m,坝体上游坡率为 1:0.5,下游坡率为 1:0.6,坝基的宽和高取坝体高度的 1.5 倍,为方便坝体温度应力仿真分析,得到的大坝的有限元模型图如下图所示。坝体每仓浇筑高度为 2 m,坝体单元划分后共 19,656 个节点,16,068 个单元。其中地基单元为 12,168 个,坝体单元为 3900 个。见图 1、图 2 所示:

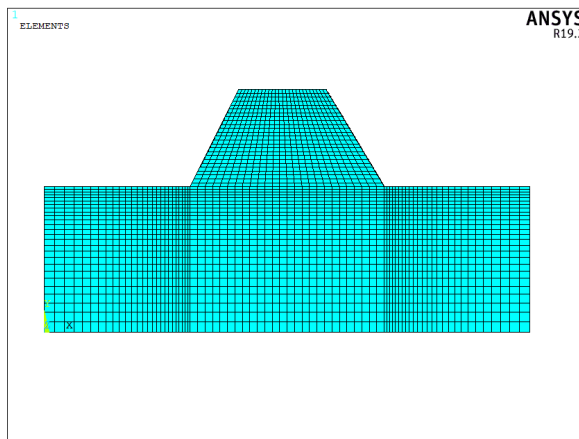


Figure 1. Model unit division

图 1. 模型单元划分

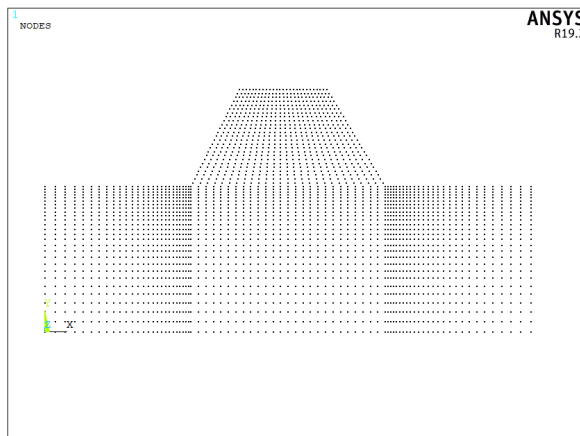


Figure 2. Model grid division

图 2. 模型网格划分

相应的技术有:动态施工过程采用“生死单元”功能;单元网格划分根据上述方法操作,混凝土的绝热温升通过生热率来实现;生热率及外界气温变化的施加采用 ANSYS 命令流 APDL 编程进行施加和

计算；混凝土分层浇筑块的初始温度同样采用 APDL 命令流的形式进行施加。

4.1. 混凝土瞬态温度 ANSYS 软件模拟关键技术

由于外界环境、材料参数、施工过程等因素在时空上的不断变化，采用 ANSYS 软件模拟瞬态温度场及温度应力场时，必须将其有关的功能加以整合，灵活运用。为了通过 ANSYS 软件实现瞬态温度场仿真分析这一复杂过程，本文设计了仿真分析思路：利用参数设计语言(APDL)以及多种内部函数，编制了宏命令以控制 ANSYS 程序，成功实现了大体积混凝土分层浇筑过程及运行期温度场及温度应力场仿真分析从建模、计算及结果的后处理的自动化和参数化。

4.2. 模拟堆石混凝土参数

坝体混凝土与岩基的材料参数主要是根据选取现场原材料进行相关试验获得，本工程的材料参数值主要是则根据系列在建堆石混凝土工程经验参数值取得。其中选值参考《大体积混凝土温度应力与温度控制》(朱伯芳著)，选定本工程堆石混凝土材料参数。弹性模量 50 GPa；泊松比 0.27；容重 2400 kg/m³；线膨胀系数 $0.7 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ；比热容 1 kJ/(kg·°C)；导热系数 8.28 kJ/(m·d·°C)；绝热温升 21°C。

4.3. 初始条件和边界条件

计算岩基温度作为分析初始条件，坝底高程以上基岩温度初始设定为 20°C，进行传热。

温度场计算中，地基 4 个侧面为绝热面，底面为恒热流边界；地基表面为与大气接触的第三类散热面；坝体上下游面及顶面为散热面；上、下游表面为第三类边界；温度边界示意图见图 3 所示：

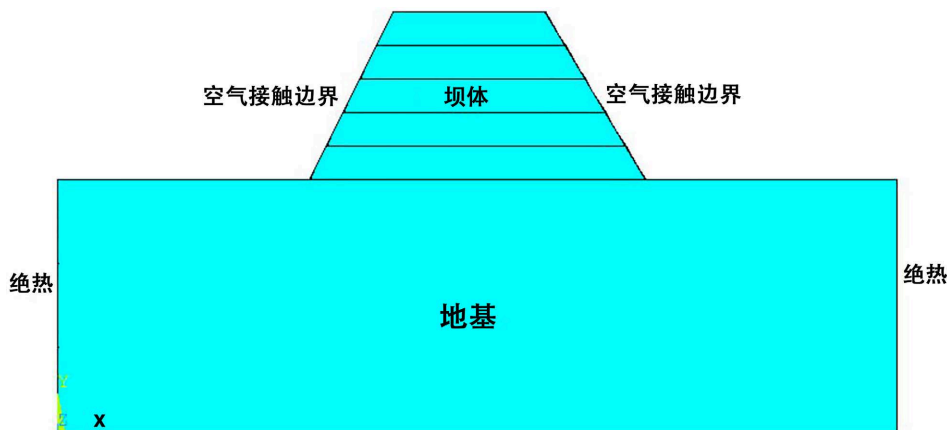


Figure 3. Temperature boundary condition
图 3. 温度边界条件

4.4. 计算过程及边界条件设定

1) 混凝土的绝热温升常采用单指数模型：

$$T = \theta_0 \left(1 - e^{-m(t-t_0)}\right)$$

式中： T 为绝热温升， θ_0 为最终绝热温升， $t-t_0$ 为混凝土龄期， m 为待定系数。

根据工程设计资料，设计工况下常态和碾压全部采用单指数绝热温升模型，不考虑混凝土的后期发热效应。

2) 气温资料

气温呈周期变化可用余弦函数进行拟合，拟合公式如下：

$$T = T_a + A_a \cos \left[\frac{\pi}{12} (t - t_0) \right]$$

通过拟合该地气温数据资料为代表，拟合出如下公式：

$$T = 8.0 + 11.86 * \cos(0.52367 * (\{TIME\} / 30 - 5))$$

3) 模拟计算温度选用 SOLID75 单元进行分析；转应力计算时调用 SOLID185 单元进行计算。

4) 水化热计算

通过写入公式进行计算水化热，时间步长设定为 1 d，每隔 1 d 进行水化热计算，直至浇筑完最后一仓，计算水化热按照式(1)计算。

4.5. 模拟温度云图结果

取坝基底部温度为 20℃，在浇筑坝体时预先对坝基进行传热，传热时间为 200 d，待坝基温度恒定后，开始浇筑坝体主体。坝体每仓浇筑时间为 20 d，共 100 d 完成。入仓温度预设为 12℃，见图 4 所示：

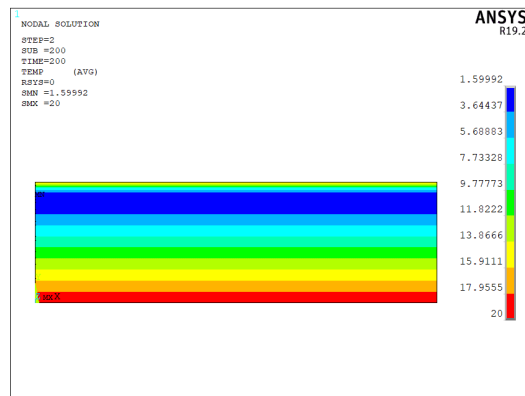


Figure 4. Dam foundation heat transfer 200 d temperature cloud map
图 4. 坝基传热 200 d 温度云图

五仓共浇筑 600 d，每仓浇筑 20 d，共 200 浇筑完成，坝基设定恒热源进行 200 d 传热，节选 1、3 和五仓浇筑情况，见图 5~9 所示：

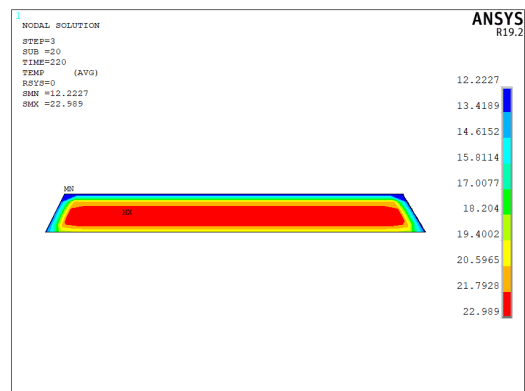


Figure 5. One warehouse pouring 20 d temperature cloud map
图 5. 一仓浇筑 20 d 温度云图

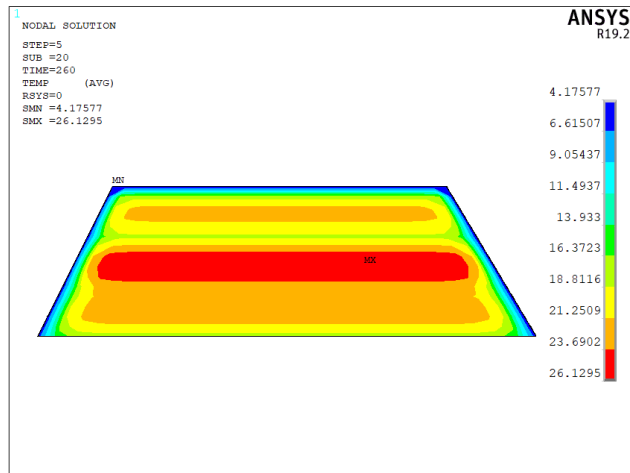


Figure 6. Three warehouse pouring 20 d temperature cloud map
图 6. 三仓浇筑 20 d 温度云图

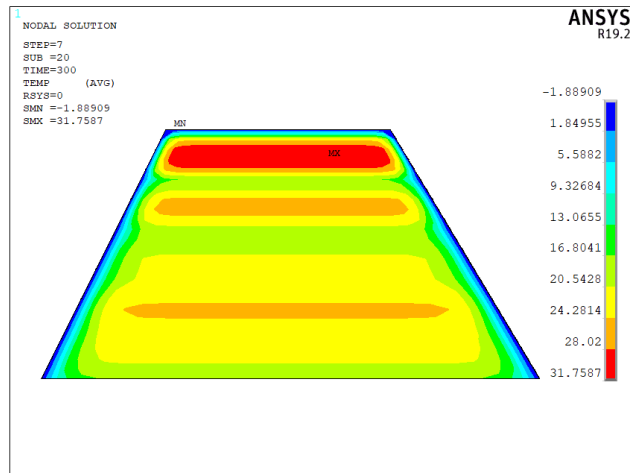


Figure 7. Five warehouse pouring 20 d temperature cloud map
图 7. 五仓浇筑 20 d 温度云图

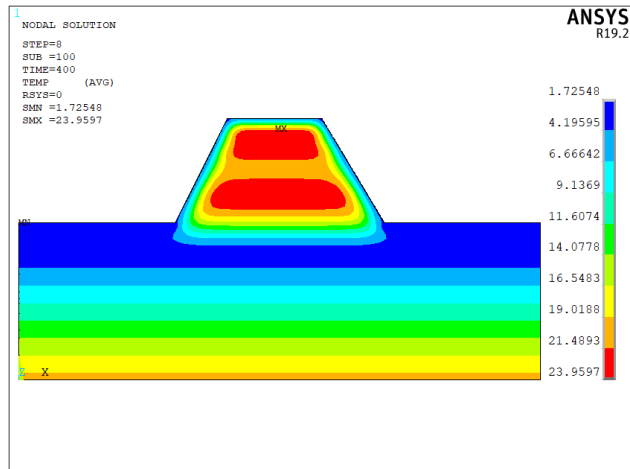


Figure 8. 400 d temperature cloud chart
图 8. 400 d 温度云图

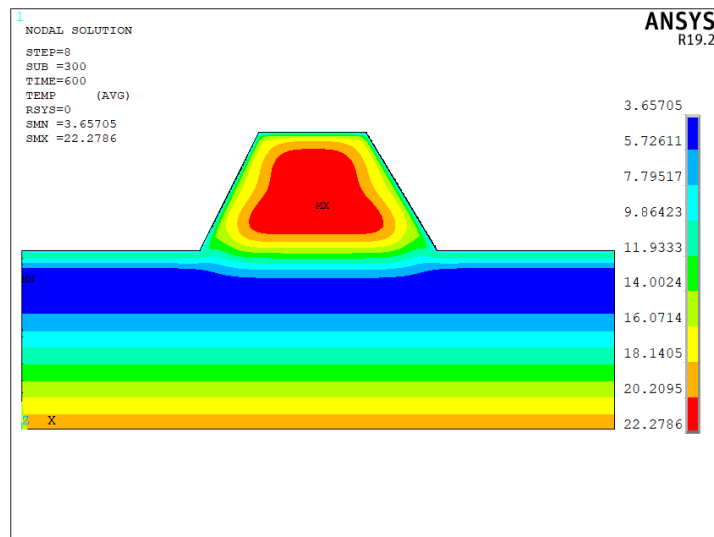


Figure 9. 600 d temperature cloud chart
图 9. 600 d 温度云图

一般来说，由于坝体表面和空气接触，坝面附近的混凝土温度随气温变化而变化较激烈，而坝体内部混凝土温度变化缓慢。另一方面，由于散热效应，坝面附近混凝土的温度一般较低，而坝体内部混凝土由于水化热产生的热量不能快速地与外部进行热交换，其温度相对较高，且高温持续时间也较长。以上两个因素使得冬季气温较低时，在混凝土表层易出现较大范围、有一定深度的较高温度梯度区。混凝土内部的相对高温区的范围和温度随季节和浇筑范围的增加而逐步演变。本次施工期从1月1日开始浇筑，7月30日模拟大坝浇筑完成，在整个施工浇筑过程中在坝体中上部形成了较大片团状“中心高温区”，是由于刚浇筑的混凝土水化热温升导致温度升高形成“中心高温区”。高温区先随着层厚的增加不断扩大，后来随着长时间的散热慢慢缩小。这是因为每仓混凝土浇筑产生水化热后，经过一段时间与外界空气和库水热交换散热，温度就会慢慢降下来。

4.6. 模拟位移云图结果

各仓位移见图 10~12 所示：

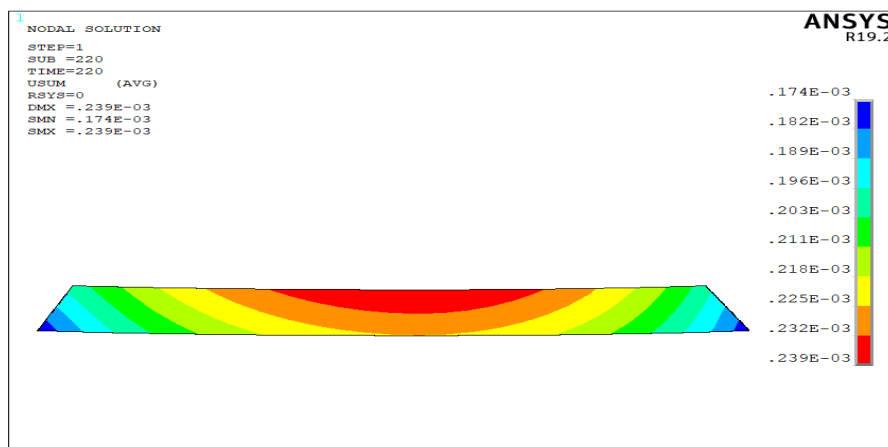


Figure 10. A warehouse displacement distribution map
图 10. 一仓位移分布图

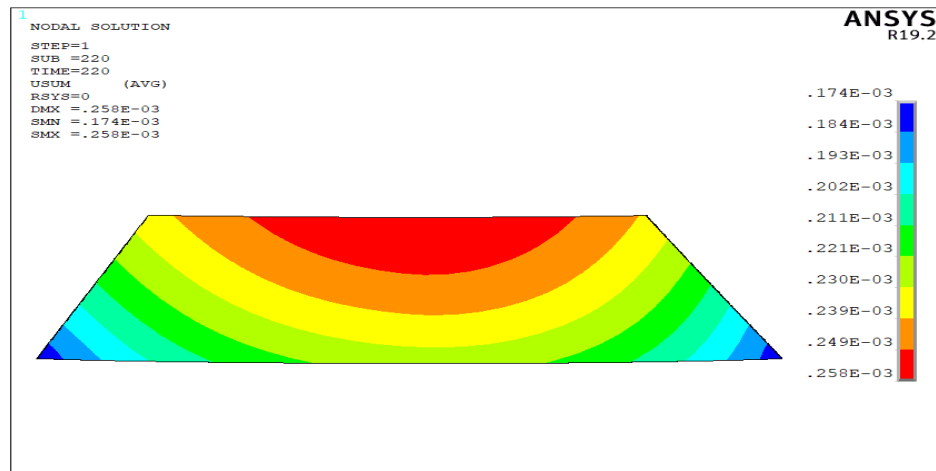


Figure 11. Three warehouse displacement distribution map
图 11. 三仓位移分布图

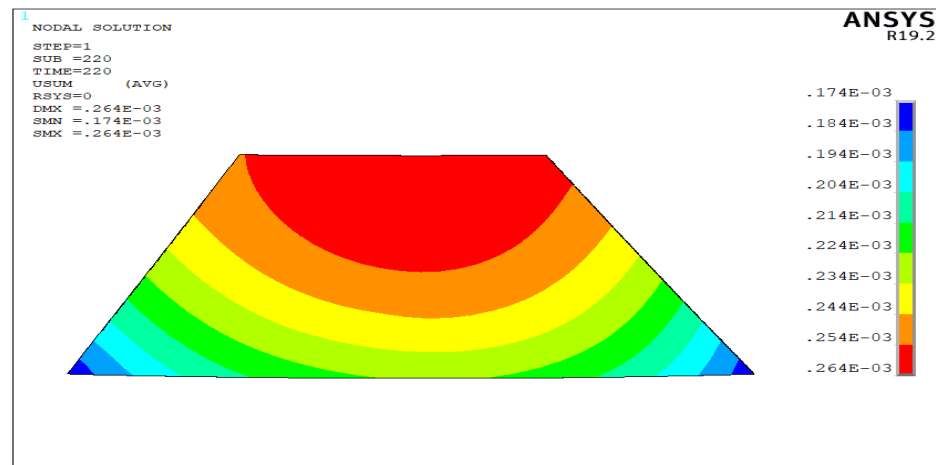


Figure 12. Five warehouse displacement distribution map
图 12. 五仓位移分布图

参考陕西水利文献《抽水蓄能电站拦砂坝堆石混凝土温度应力仿真分析与结构优化建议》在各个浇筑中部典型节点的温度云图，节选 1、3、5 仓，通过对比温度变化规律，在无温度措施下的模拟温度分析可知，由于采用通仓浇筑的施工方式，表面混凝土温度随气温变化较剧烈，而坝体内部混凝土温度较高且变化缓慢，使得冬季气温较低时，在混凝土表层易出现较大范围、有一定深度的较高温度梯度区，易产生较高的温度拉应力，夏季时该区域的拉应力将由于温度升高而消失。仿真分析也反映了这一规律 [10]。

4.7. 提取温度数据结果

为了进一步验证堆石混凝土水化热过程中进行了热交换，选择温度检测仓面进行温度检测，手动选择模型每仓中心位置节点并导出温度数据，绘制出见图 13 所示的温度曲线图，步长与温度之间的关系。图示现象表明，由于堆石混凝土水化热的影响导致浇筑初期的温度处于上升期，下一仓浇筑也会影响上一仓浇筑，导致温度有所上升；上部浇筑层对下部坝体温度影响与所处的部位密切相关，其中坝体两侧设置绝热条件，坝体中散热条件较差，其最高温及最大温升明显高于前四仓。

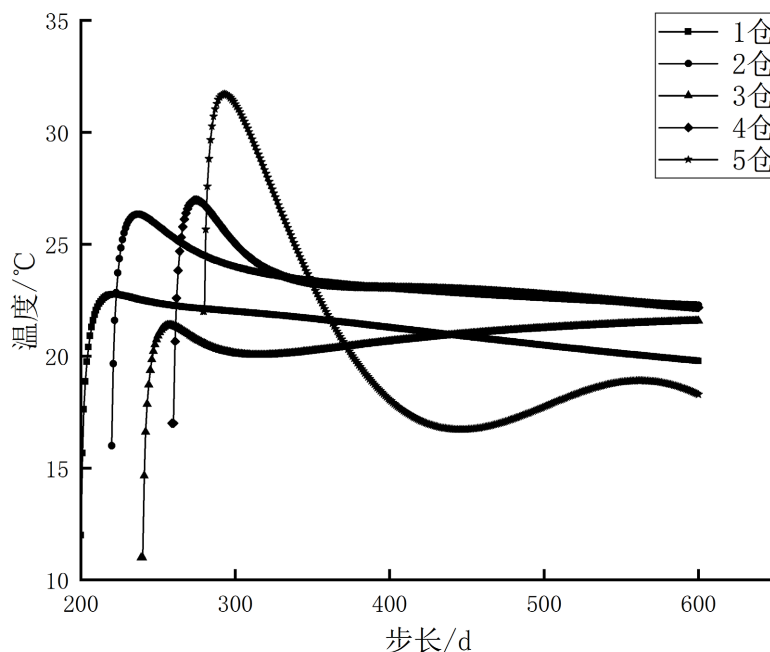


Figure 13. Temperature curve of each warehouse
图 13. 各仓温度曲线图

5. 结论

1) 基于 ANSYS 软件, 通过对堆石混凝土坝体模型的热分析, 利用参数化设计语言(APDL)以及页面操作, 完成对温度场的计算和分析, 仿真了堆石混凝土的绝热温升值及温度变化过程, 仿真结果虽能反应堆石混凝土的温度趋势, 但没有完全考虑到所有因素, 后面研究可以更加全面。

2) 分析了 ANSYS 中一些瞬态温度场的导热微分方程、计算了温度的变化规律, 验证混凝土温度变化规律。

3) 对混凝土构件进行 ANSYS 有限元数值分析, 设置相关材料参数并建立几何模型, 定义弹性模量及环境温度数组, 并调用生热率函数, 得到了施工期的混凝土块体的温度场分布, 结果表明, 堆石混凝土容易受到温度的影响, 混凝土块体中心处与外界难以发生热交换, 不断积聚热量使温度升高, 会逐渐膨胀产生压应力, 而混凝土外部则随着外界环境温度的下降产生拉应力, 因此对堆石混凝土要及时采取冷却降温措施, 避免温度骤升骤降产生温度裂缝及温度应力。

4) 整体上, 可将堆石混凝土的温度变化分为以下阶段: 第一阶段为浇筑填充期堆石混凝土与 SCC 的入仓温度过程, 第二阶段为混合均匀后堆石混凝土与 SCC 的共同温升过程, 第三阶段为整体温度趋向并缓慢下降的过程。

5) 如果在无施工措施下进行堆石混凝土的浇筑, 不满足其水化温升的要求, 故采用有效措施进行堆石混凝土的温度措施, 如加入冷却水管等, 可有效降低等效入仓温度和等效绝热温升减小堆石混凝土裂缝的可能。

参考文献

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [2] 赵厚然, 徐艳杰, 赵恒, 等. 叶巴滩堆石混凝土二道坝温度应力仿真分析及温控措施研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(2): 167-173+182.

- [3] 赵志方, 钟阳峰, 李新宇, 等. 大坝混凝土早龄期变温条件下拉伸徐变研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 46-54.
- [4] 曾旭, 张全意, 成克雄, 等. 混凝土预制块模板在堆石混凝土坝中的应用[J]. 水利规划与设计, 2020(1): 129-132.
- [5] 丁建新, 张石虎, 陈胜宏. 基于复合单元法的温度场仿真与反馈分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 190-197.
- [6] 陈宇. 龙岩坪坑水库堆石混凝土重力坝坝段横缝间距探讨[J]. 水利科技, 2023(2): 67-70.
- [7] Zhang, X., Liu, Q., Zhang, X., Li, Y. and Wang, X. (2018) A Study on Adiabatic Temperature Rise Test and Temperature Stress Simulation of Rock-Fill Concrete. *Mathematical Problems in Engineering*, **2018**, 1-12.
<https://doi.org/10.1155/2018/3964926>
- [8] 徐小蓉, 何涛洪, 雷峥琦. 超长坝段堆石混凝土重力坝蓄水运行安全评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(9): 1375-1387.
- [9] 吴建明, 李庆斌, 谭尧升, 等. 特高拱坝温控曲线合理性改进与复核[J]. 水力发电学报, 2021, 40(6): 160-168.
- [10] 陈焕民, 李峰, 郭立红, 等. 抽水蓄能电站拦沙坝堆石混凝土温度应力仿真分析与结构优化建议[J]. 陕西水利, 2022(11): 154-156.