

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.02.22

围岩温度对输水洞衬砌混凝土温度与温度应力的影响研究

司政¹, 霍晓宇¹, 辛兰芳²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 北京哈泰克信息技术有限公司, 北京 100032)

摘要: 为了研究围岩温度对隧洞衬砌混凝土温度应力的影响规律, 确保长距离输水隧洞的安全运行, 以某水电站无压输水洞为研究对象, 采用三维有限元温度场与徐变应力场仿真计算平台, 对 20、40、60、80 °C 围岩温度情况下的输水洞施工期及运行期进行仿真模拟。分析围岩温度对输水洞衬砌混凝土温度场和徐变应力场的影响, 并研究了浇筑温度对高围岩温度隧洞衬砌混凝土应力场和损伤程度的影响。结果表明: 围岩温度对输水洞衬砌混凝土温度场和温度应力场影响均较大, 围岩温度每升高 1 °C, 则衬砌混凝土的最高温度平均升高 0.5 °C, 最大应力增大 0.033 MPa; 浇筑温度每降低 1 °C, 则其最大应力值减小约 0.07 MPa。衬砌混凝土底板与边墙的交界处以及顶拱与边墙的交界处为隧洞衬砌结构的易损伤部位。降低浇筑温度, 可以有效减小衬砌混凝土的损伤量, 改善其应力状态, 抑制损伤的发展。此研究可为类似高围岩温度隧洞工程提供参考。

关键词: 输水洞; 衬砌混凝土温度; 围岩温度; 温度应力; 热损伤

中图分类号: TV672⁺.1; TV314 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2021)02-0151-07

Influence of surrounding rock temperature on the temperature and temperature stress of concrete lining in water conveyance tunnels

SI Zheng¹, HUO Xiaoyu¹, XIN Lanfang²

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Beijing Hi-Tech Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: In order to study the influence of surrounding rock temperature on the temperature stress of tunnel lining concrete and ensure the safe operation of long-distance water conveyance tunnels, the construction period and operation period of a non-pressure water conveyance tunnel under the surrounding rock temperature of 20 °C, 40 °C, 60 °C and 80 °C were simulated with the help of a 3D finite element platform for the simulation of temperature field and creep stress field. By comparing the temperature change curves and the stress at special time of the top arch, side wall and bottom plate, we analyzed the influence of surrounding rock temperature on the temperature field and creep stress field of the lining concrete of the water conveyance tunnel. At the same time, the influence of pouring temperature on the stress field and damage degree of high rock temperature lining concrete was studied. The results show that the temperature of the surrounding rock has great influence on the temperature field and temperature stress field of the lining concrete. When the rock temperature increases by 1 °C, the maximum temperature of lining concrete increases by 0.5 °C on average and the maximum stress increases by about 0.033 MPa. When the pouring temperature decreases by 1 °C, the maximum stress decreases by about 0.07 MPa. The junction between the lining concrete base plate and the side wall, and that between the top arch and the side wall are the vulnerable parts of the tunnel lining concrete structure. Lowering the pouring temperature can effectively reduce the damage of the concrete, improve its stress state, and inhibit the development of the damage. This study can provide

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879217, 51409207)

作者简介: 司政(1981-), 男, 湖北浠水人, 博士, 教授, 研究方向为水工结构应力及温控防裂。

a reference for similar high surrounding rock temperature tunnel projects.

Key words: water conveyance tunnel; lining concrete temperature; surrounding rock temperature; temperature stress; thermal damage

1 研究背景

长距离输水隧洞一般埋于较深地下,围岩温度对隧洞衬砌的影响极为突出,高岩温隧洞在通水后受到低温冷水的作用,会产生较大的温度应力,从而对水工隧洞混凝土衬砌的安全运行产生不利影响。因此,研究岩温对衬砌混凝土结构温度场和徐变应力场的影响规律具有重要的实际工程意义。

温度场与徐变应力场的分析是高岩温隧洞温度分布规律与受力特性研究的基础。刘乃飞等^[1]利用解析法对超高地温水工隧洞衬砌结构的温度分布规律和受力特性进行了研究分析,结果表明衬砌结构的温度场受输水期冷水影响显著,衬砌结构应力呈线性分布。孟尧等^[2]基于对流-导热耦合模型,利用有限元软件对隧洞洞室内通风温度进行了分析,其研究结果对水工隧洞温度场模拟有重要参考意义。邵珠山等^[3]应用微分方程级数求解与无量纲化的方法,得到了高岩温环境下圆形断面隧洞的热弹性理论解,确定了围岩由于隧洞开挖引起的温度变化范围。郭进伟等^[4]采用热-结构耦合与有限元计算软件相结合的方法,计算了高温隧洞衬砌结构在内水荷载影响下的应力分布,发现增加衬砌混凝土厚度不能改善结构的受力情况。

高岩温隧洞衬砌由于其不利的应力状态易产生裂缝的问题,不少学者对此开展了裂缝成因及其防治措施的研究。王家赫等^[5]针对某隧洞衬砌混凝土的开裂情况分析了其开裂成因与影响因素,结果发现采用低热水泥与调控混凝土入模温度措施可有效降低其开裂风险。方攀^[6]研究了隧洞二次衬砌时环向与纵向裂缝的成因和发展规律,最终发现浇筑温度的降低可有效抑制裂缝发展。穆震^[7]对高岩温环境下衬砌混凝土的配置参数、配合比设计以及混凝土的性能等问题进行了研究,发现高温养护条件下混凝土前期抗压强度会增强,但后期会略低于常规养护条件下的混凝土抗压强度,而向其中掺入粉煤灰可以有效改善这一状况。何廷树等^[8-9]对掺入粉煤灰与矿渣粉后的隧洞衬砌混凝土在高岩温、低湿度条件下的性能进行研究,发现该养护条件下混凝土的孔隙率较大、内部结构疏松、密实度较低、抗碳化能力较低。白国权等^[10]在较高岩温条件下利用有限元数值模拟法研究了不同隔热材料对衬

砌的保温功效,发现聚氨酯是一种保温效果较好的隔热层材料,而且在一定的厚度内,隔热层越厚,隔热效果越好。吴鑫健^[11]通过模型试验研究了高岩温隧洞的隔热体系与隔热新材料,发现隔热材料的热阻越大,其隔热效果越好,并设计出一种针对隧洞隔热材料的新型施工方法。

针对高岩温水工隧洞衬砌结构温度场与徐变应力场的计算与分析,常用的方法为数值模拟分析法与解析解法,且大多是对单一岩温条件下衬砌混凝土的分析与研究,缺少在不同岩温影响下隧洞衬砌混凝土温度场与应力场变化规律的总结^[12]。本文拟在不同的围岩初始温度下,对水工隧洞衬砌混凝土的温度场与徐变应力场进行深入的分析研究,进而探索岩温对水工隧洞温度与应力影响的规律,为类似工程提供参考。

2 计算原理

2.1 温度场计算理论

混凝土非稳定温度场内任意一点温度 $T(x, y, z, \tau)$ 满足如下方程式^[12]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中: $\partial T/\partial \tau$ 为温度随时间的变化率; α 为导温系数, m^2/h ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为时间, h ; θ 为混凝土的绝热温升, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据变分原理,可以对公式(1)进行时间域差分与空间域离散,同时将初始条件与边界条件引入此式,最终代换出向后差分的温度场有限元计算递推方程:

$$\left(\mathbf{H} + \frac{1}{\Delta t_n} \mathbf{R} \right) \mathbf{T}_{n+1} - \frac{1}{\Delta t_n} \mathbf{R} \mathbf{T}_n + \mathbf{F}_{n+1} = 0 \quad (2)$$

式中: \mathbf{H} 为热传导矩阵; \mathbf{R} 为热传导补充矩阵; \mathbf{T}_n 、 \mathbf{T}_{n+1} 节点温度列阵; \mathbf{F}_{n+1} 为节点温度荷载列阵; n 为时段序数; Δt 为时间步长。将初始设定的温度 \mathbf{T}_0 代入公式(2),通过递推计算,可以得到任意时间点的节点温度。

2.2 应力场计算理论

根据有限元增量理论,在复杂应力的作用下,混凝土的应变增量不仅包括弹性应变、徐变应变等应力增量,还应考虑混凝土干缩应变、温度应变和自生体积变形应变等非应力增量^[12],即:

$$\Delta \epsilon_n = \Delta \epsilon_n^e + \Delta \epsilon_n^c + \Delta \epsilon_n^s + \Delta \epsilon_n^T + \Delta \epsilon_n^g \quad (3)$$

式中: $\Delta \epsilon_n^e$ 为混凝土弹性应变增量; $\Delta \epsilon_n^c$ 为徐变应变增量; $\Delta \epsilon_n^s$ 为干缩变形增量; $\Delta \epsilon_n^T$ 为温度应变增量; $\Delta \epsilon_n^g$ 为自生体积变形增量。

根据物理、几何和平衡方程可知任意时段内整个区域上的有限元支配方程为:

$$K_n \Delta \delta_n = \Delta P_n + \Delta P_n^c + \Delta P_n^s + \Delta P_n^T + \Delta P_n^g \quad (4)$$

式中: K_n 为整体的刚度矩阵; $\Delta \delta_n$ 为混凝土结构的位移增量; ΔP_n 、 ΔP_n^c 、 ΔP_n^s 、 ΔP_n^T 和 ΔP_n^g 分别代表外荷载、徐变、干缩变形、温度和自生体积变形等因素引起的荷载增加量。

3 计算模型与方案

以某大型水电站无压输水隧洞为研究对象,该隧洞衬砌混凝土浇筑的起始时间为 7 月 5 日,浇筑顺序为先完成边墙与顶拱的浇筑,待 30 d 后开始底板的浇筑;720 d 时隧洞开始输水,根据参考文献 [13] 假定水温为 5 °C;仿真计算总时长为 1 080 d。各个方案除初始围岩温度、混凝土浇筑温度不同外,其余计算参数相同。

3.1 有限元模型的建立

研究对象衬砌为对称结构,所以计算模型取一半的圆拱直墙断面,运用 ANSYS 有限元软件建立模型:取洞宽方向为 X 轴,指向右边墙为正向;洞轴线方向为 Y 方向,指向水流方向为正向;洞高方向为 Z 轴,指向顶拱方向为正向。

衬砌混凝土模型尺寸:底板厚度为 0.5 m,边墙与顶拱的厚度为 1.05 m。模型中围岩的计算范围:在 Z 轴方向向上、下各取 2 倍洞高,在 X 轴方向向右取 2 倍洞宽。采用 Solid70 六面体单元划分网格,建立如图 1 所示的有限元模型。

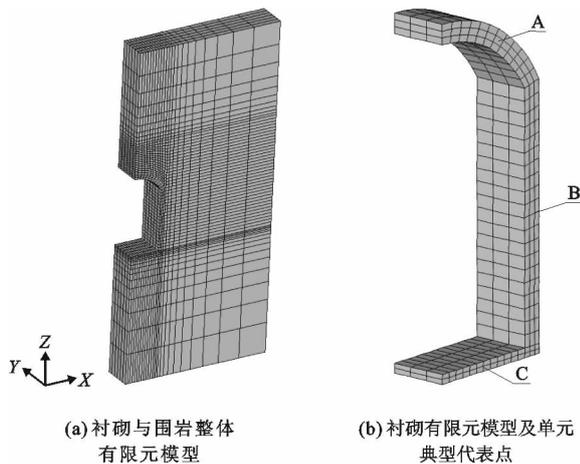


图 1 某水电站输水隧洞有限元计算模型示意图

衬砌模型的另一半相对于计算模型是绝热的,按热力学第二类边界条件处理;输水前,底板、边墙和顶拱与空气对流换热,是固-气边界,按第三类边界条件处理;输水后,顶拱未接触水体仍为固-气边界,按第三类边界条件处理,与水接触的边墙和底板部位为固-水边界,按第一类边界条件处理。

应力场边界条件比较简单,围岩外部界面根据其部位施加法向链杆约束,在对称面上施加对称约束。有限元温度场模拟开始前,设定围岩单元的初始温度为围岩温度,混凝土单元的初始温度为浇筑温度。

3.2 衬砌混凝土及围岩计算参数

混凝土的弹性模量按下式计算:

$$E_1(\tau) = 34500\tau / (10.2 + \tau) \quad (5)$$

式中: E_1 为混凝土弹性模量,MPa; τ 为混凝土龄期,d。

围岩的弹性模量 E_2 为常数,取 $E_2 = 20\ 300$ MPa。

混凝土的徐变度近似地按下式进行计算^[14]:

$$C(t, \tau) = (A_1 + B_1 \tau^{-C_1}) [1 - e^{-D_1(t-\tau)}] + (A_2 + B_2 \tau^{-C_2}) [1 - e^{-D_2(t-\tau)}] \quad (6)$$

式中: C 为混凝土的徐变度,MPa; t 为时间,d; τ 为混凝土的龄期,d; $t - \tau$ 为混凝土的持荷时间,d; A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 、 D_1 、 D_2 均为相关参数。

复形法^[15-16] 是通过比较目标函数从而决定搜索方向、用于解决有约束的非线性规划问题的一种方法,其基本思路是从问题维数 2 倍的复形顶点出发,经过不断的调整取优得到最优解。通过复形法拟合混凝土徐变度各参数值为: $A_1 = 5.94$, $B_1 = 54.60$, $C_1 = 0.45$, $D_1 = 0.30$, $A_2 = 13.42$, $B_2 = 22.81$, $C_2 = 0.45$, $D_2 = 0.005$ 。

选取 C30 强度的混凝土进行有限元温度场计算,结果得到的绝热温升 θ 为 26.5 °C。衬砌混凝土及围岩的热力学参数见表 1。

表 1 衬砌混凝土与围岩的热力学参数表

| 序号 | 参数 | 衬砌混凝土 | 围岩 |
|----|---|--------|--------|
| 1 | 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 2420 | 2666 |
| 2 | 泊松比 | 0.167 | 0.200 |
| 3 | 导热系数/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) | 300.83 | 220.00 |
| 4 | 比热/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) | 0.945 | 0.960 |
| 5 | 线膨胀系数/ 10^{-6}°C^{-1} | 8.60 | 7.00 |
| 6 | 对流换热系数/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) | 1440 | 1440 |

注:顶拱、边墙及底板单元计算参数均相同。

3.3 计算方案

以探究不同围岩温度对隧洞衬砌混凝土温度应力的影响为目的,同时为了揭示其温度场与应力场的变化规律,拟定了围岩温度分别为20、40、60、80℃共4种方案,并且针对各个方案建立了其对应的洞室内气温变化公式,见表2。

表2 各方案洞内气温变化公式表

| 方案 | 围岩温度/℃ | 浇筑温度/℃ | 洞室内气温(T_a)变化公式 |
|----|--------|--------|--|
| 1 | 20 | 28.3 | $T_a = 25.0 + 5.0 \cos[\pi/6(\tau - 7)]$ |
| 2 | 40 | 35.6 | $T_a = 35.8 + 4.9 \cos[\pi/6(\tau - 7)]$ |
| 3 | 60 | 43.0 | $T_a = 43.8 + 4.6 \cos[\pi/6(\tau - 7)]$ |
| 4 | 80 | 55.0 | $T_a = 55.4 + 4.4 \cos[\pi/6(\tau - 7)]$ |

由于隧洞从开挖到输水期结束共3年时间,有限元仿真模拟过程中各部位温度场变化各异,且衬砌不同部位所处边界条件不同,所以应分别分析不同部位的温度场规律,因此选取衬砌顶拱、边墙、底板等不同部位温度场典型代表点进行规律分析。如图1(b)所示,选取顶拱、边墙、底板部位的中心点A、B、C分别为各自的温度场典型代表点。

4 围岩温度对衬砌混凝土温度的影响

4.1 顶拱衬砌混凝土单元代表点温度变化

图2为各计算方案下顶拱混凝土单元典型代表点A的全过程温度变化曲线,由图2可以看出,不同岩温下的顶拱混凝土温度场呈规律性变化。在施工期时温度达到最高点,随后温度开始下降;施工完毕后,环境温度的季节性变化导致围岩温度呈周期性变化,顶拱混凝土亦随之呈周期性变化;进入输水期后,由于隧洞整体温度因冷水输入而下降,顶拱混凝土虽未与冷水接触,但其温度亦有所下降。

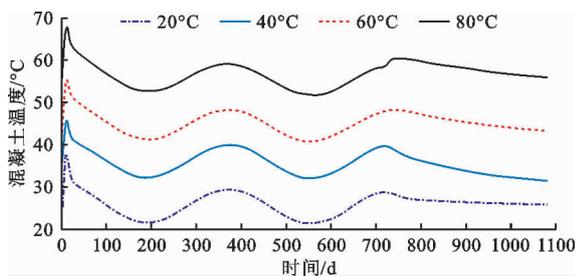


图2 各方案顶拱衬砌混凝土典型代表点A的温度变化曲线

4.2 边墙与底板混凝土单元代表点温度变化

图3与图4分别为各计算方案下边墙、底板混凝土典型代表点B、C的全过程温度变化曲线。从图3、4可以看出,底板与边墙的混凝土在各方案下

的温度变化规律相近。边墙和底板代表点的温度均在施工期时达到最高点(由于底板浇筑晚30d,其达到最高温度的时间点也比边墙晚30d),随后温度开始下降;施工完毕后,边墙与底板混凝土温度因环境温度变化而呈周期性变化;进入输水期后,由于边墙和底板与冷水接触的部位与水体发生对流换热,从而使混凝土温度骤降,基本下降到同一温度;在输水运行稳定后,混凝土温度缓慢下降,最终稳定至水温(5℃)附近。

综合分析可知:(1)隧洞衬砌混凝土温度场经历了5个阶段:施工期温度急剧升高、施工完毕温度下降、温度随季节周期性变化、输水期输水导致温度骤降(顶拱因不与水体接触无此阶段)、持续输水运行后温度稳定。(2)岩温每升高1℃,衬砌混凝土最高温度升高0.5℃左右。在80℃围岩温度方案下,顶拱典型代表点A最高温度达到了67℃,边墙典型代表点B最高温度达到了69℃,底板典型代表点C最高温度达到了62℃。另外,岩温越高,输水时与水体接触的混凝土部位温度骤降幅度也越大。

5 围岩温度对衬砌混凝土温度应力的影响

5.1 边墙与底板混凝土单元代表点应力场分析

围岩温度为80℃时衬砌混凝土在两个特征时刻各方向的应力云图见图5。通过对隧洞衬砌混凝土应力场的计算,发现边墙混凝土X方向应力与底板混凝土Z方向应力较小,边墙混凝土单元的Y与Z方向应力以及底板X与Y方向应力受温度场影响,有较大的变化,因而将边墙与底板典型代表点B与C的特征时刻应力值进行整理列于表3(表中压应力为负,拉应力为正)。

由表3分析可知,第3d与第32d时衬砌边墙和底板混凝土分别浇筑完毕,此时水泥水化放出大量热量,导致边墙和底板混凝土温度急剧升高,分别在第3d与第32d时产生了很大的压应力,方案4中边墙的Y方向压应力与Z方向压应力分别为1.82和2.96MPa,底板的X方向压应力与Y方向压应力分别为3.07和2.30MPa。底板X方向压应力受岩温影响最大,岩温每升高1℃,其最大值增大0.033MPa。随后混凝土逐渐由受压状态转变为受拉状态,第180d时,拉应力已经进入平稳增长阶段;第720d时开始输水,边墙与底板衬砌混凝土因接触水体而温度骤降,从而使拉应力进入了快速增长阶段;最终在第1080d时拉应力达到稳定的最大值。

初始岩温越高,则拉应力的最终稳定值越大,在围岩温度为 80 ℃ 的方案 4 中,边墙的 Y 方向及 Z 方向的拉应力均超过 C30 混凝土的抗拉强度(2.01 MPa),分别为 3.40 MPa 和 3.90 MPa;底板 X 方向拉应力达到了 3.50 MPa, Y 方向拉应力则高达 5.85 MPa。可以看出各方案中底板的 Y 方向最终拉应力值为最大拉应力值,其受围岩温度影响也最大,岩温每升高 1 ℃,其最大值增大约 0.033 MPa。

5.2 浇筑温度对混凝土应力场影响分析

选取围岩温度为 80 ℃ 的方案 4,降低其浇筑温度。采取温控措施后,混凝土的浇筑温度由原来的 55 ℃ 下降到 30 ℃。以此为方案 5 进行衬砌混凝土温度场与应力场仿真计算,提取其边墙与底板典型代表点 B 与 C 的特征时刻应力值,建立表 4 与原方案 4 进行对比。

由表 4 可以看出,在降低了浇筑温度的方案 5 中:1 080 d 时边墙的 Y 方向与 Z 方向拉应力分别为 2.36 MPa(减小了 1.04 MPa)和 2.53 MPa(减小了 1.37 MPa);底板的 X 方向拉应力为 1.89 MPa(减小了 1.61 MPa), Y 方向拉应力为 4.11 MPa(减小了 1.74 MPa)。浇筑温度每降低 1 ℃,底板 Y 方向最大拉应力值平均下降约 0.07 MPa,其边墙与底板最终拉应力值有明显的降低,这证明了降低浇筑温度可有效改善衬砌结构的后期应力。

5.3 混凝土温度损伤计算与分析

混凝土在温度荷载作用前就存在一些微小空隙与裂缝,即混凝土的初始损伤。当其受到温度荷载的作用后,初始损伤开始增大,当经历一定温差变化后,产生较大的温度应力使裂缝发生断裂,即损伤的发展过程^[17-19]。

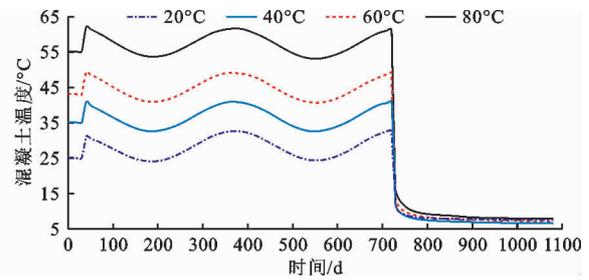
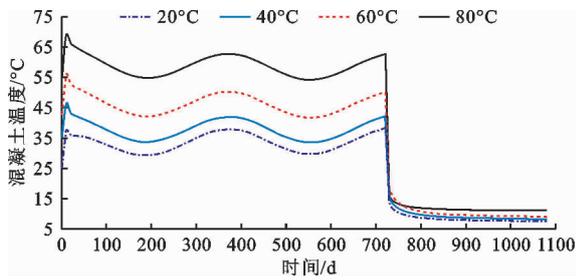


图 3 各方案边墙衬砌混凝土典型代表点 B 的温度变化曲线

图 4 各方案底板衬砌混凝土典型代表点 C 的温度变化曲线

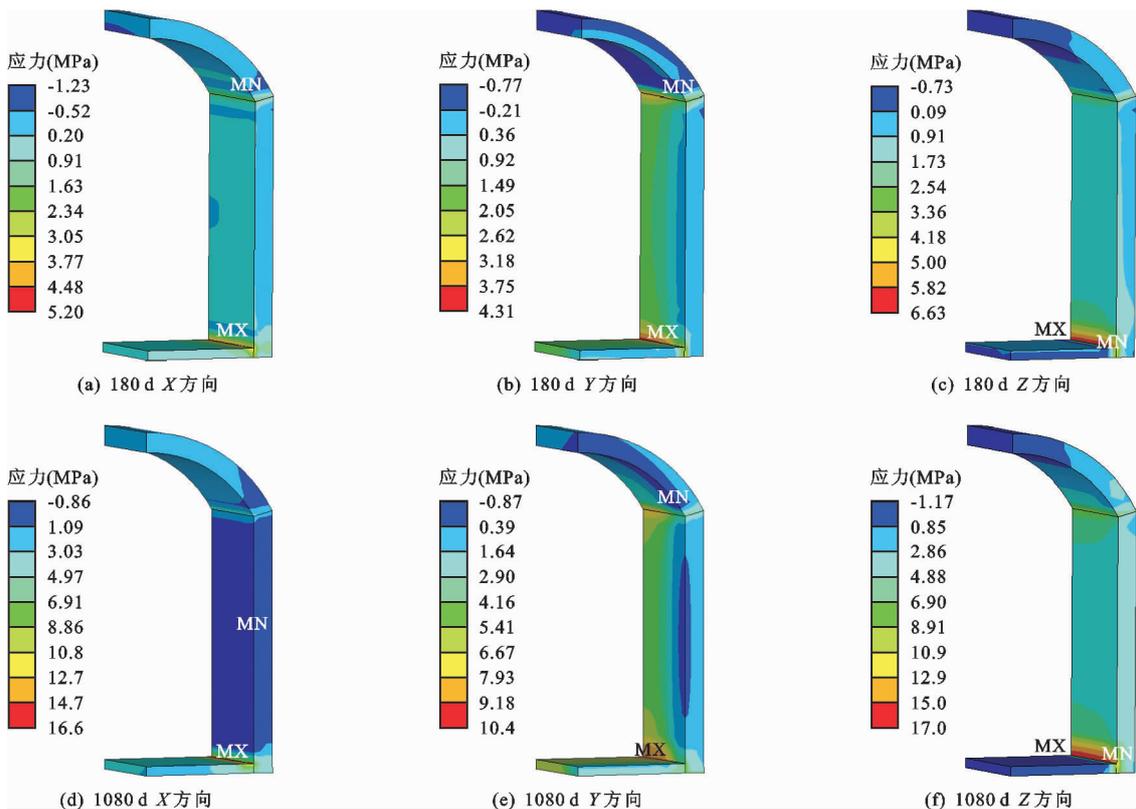


图 5 围岩温度为 80 ℃ 时(方案 4)衬砌混凝土在两个特征时刻各方向的应力云图

表3 各方案典型代表点B、C的特征时刻不同方向应力值

| 部位 | 时间/d | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 |
|--------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Y方向应力 | | | | | Z方向应力 | | | | |
| 边墙典型 代表点B | 3 | -1.37 | -1.75 | -1.79 | -1.82 | -2.02 | -2.70 | -2.86 | -2.96 |
| | 32 | 0.28 | 0.29 | 0.14 | 0.05 | 0.66 | 0.53 | 0.23 | 0.04 |
| | 180 | 1.08 | 1.13 | 1.01 | 0.93 | 1.92 | 1.66 | 1.31 | 1.09 |
| | 720 | 1.29 | 1.41 | 1.44 | 1.48 | 2.42 | 2.27 | 2.06 | 2.00 |
| | 1080 | 2.31 | 2.70 | 2.93 | 3.40 | 3.40 | 3.48 | 3.52 | 3.90 |
| X方向应力 | | | | | Y方向应力 | | | | |
| 底板典型 代表点C | 3 | -0.23 | 0.21 | 0.74 | 1.08 | -0.29 | 0.25 | 0.94 | 1.37 |
| | 32 | -1.09 | -1.89 | -2.61 | -3.07 | -1.45 | -1.93 | -2.16 | -2.30 |
| | 180 | 1.94 | 1.64 | 1.03 | 0.65 | 1.97 | 2.00 | 1.77 | 1.62 |
| | 720 | 2.69 | 2.79 | 2.52 | 2.58 | 2.61 | 2.99 | 3.08 | 3.38 |
| | 1080 | 3.16 | 3.27 | 3.41 | 3.50 | 3.85 | 4.62 | 5.03 | 5.85 |

表4 方案4与方案5典型代表点B、C的特征时刻不同方向应力值

| 部位 | 时间/d | 方案4 | 方案5 | 方案4 | 方案5 |
|--------------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | Y方向应力 | | Z方向应力 | |
| 边墙典型 代表点B | 3 | -1.82 | -1.89 | -2.96 | -3.21 |
| | 32 | 0.05 | -0.18 | 0.04 | -0.44 |
| | 180 | 0.93 | 0.74 | 1.09 | 0.75 |
| | 720 | 1.48 | 1.09 | 2.00 | 1.41 |
| | 1080 | 3.40 | 2.36 | 3.90 | 2.53 |
| | | X方向应力 | | Y方向应力 | |
| 底板典型 代表点C | 3 | 1.08 | 1.97 | 1.37 | 2.47 |
| | 32 | -3.07 | -4.17 | -2.30 | -2.73 |
| | 180 | 0.65 | -0.34 | 1.62 | 1.26 |
| | 720 | 2.58 | 1.10 | 3.38 | 2.44 |
| | 1080 | 3.50 | 1.89 | 5.85 | 4.11 |

混凝土不仅在施工期浇筑时发生较大的温差变化,而且在之后的运行期其内部温度也在不断地发生改变,这些温度的改变都可能引起混凝土力学性能的降低,即损伤的进一步积累过程。

混凝土温差的连续性变化会引起其损伤不断地增长,从而对衬砌结构产生危害^[18]。为了直观认识隧洞衬砌混凝土各部位的损伤程度,提取了隧洞衬砌结构的应变分量,再根据指数函数热损伤模型^[20]计算得到隧洞衬砌混凝土结构的损伤数据。利用 Tecplot360 软件对结构损伤进行可视化处理,分别绘制了方案4与方案5的衬砌混凝土损伤量等值线如图6所示。

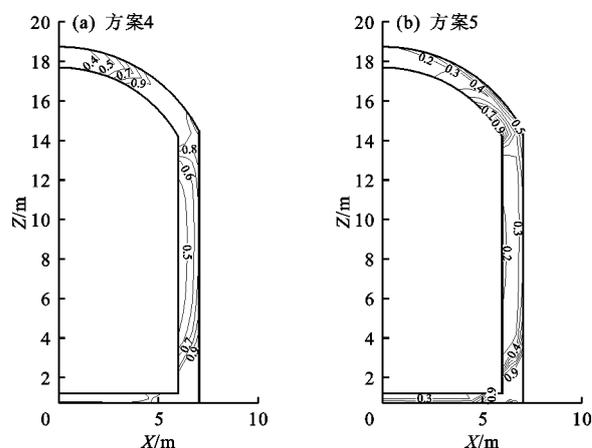


图6 方案4与方案5衬砌混凝土损伤量等值线

对图6进行分析得出:(1)基于损伤理论将0.7的损伤量定义为失稳损伤量^[21]。方案4在80℃的高围岩温度环境下(图6(a)),衬砌结构已经有1/4的部位损伤量超过0.7,混凝土损伤十分严重。这说明高围岩温度对隧洞衬砌混凝土的损伤影响很大。(2)衬砌混凝土底板与边墙交界处、顶拱与边墙交界处损伤程度较高,为隧洞衬砌混凝土结构的易损伤区域,运行期应考虑对此区域进行加固处理。(3)方案5在浇筑温度降低为30℃后(图6(b)),损伤量超过0.7的部位的面积大大减小,已不足整体结构的1/8。说明降低浇筑温度可以有效减小衬砌结构的损伤程度。

6 结论

本文通过 ANSYS 有限元计算软件模拟了20、40、60、80℃围岩温度下水工隧洞衬砌混凝土的温

度场与应力场,并对其变化规律加以研究总结;对比分析了浇筑温度降低前后应力场的变化情况,并编写程序提取混凝土结构损伤数据进行可视化处理,研究了浇筑温度降低前后衬砌混凝土的损伤程度。得出了以下结论:

(1) 水工隧洞衬砌混凝土的温度场与应力场受围岩温度影响显著。岩温越高,则混凝土最高温度越高,最大拉应力越大。岩温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,则衬砌混凝土的最高温度升高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。底板的 Y 方向稳定拉应力值为衬砌混凝土最大拉应力值,受岩温变化的影响最显著(岩温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,此值增大约 0.033 MPa)。

(2) 浇筑温度对衬砌结构的应力场和损伤程度有很大的影响。浇筑温度每降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,衬砌底板混凝土 Y 方向最大拉应力值减小约 0.07 MPa ;浇筑温度的降低可有效减轻结构的损伤程度。因此,高围岩温度隧洞工程应采取温控措施降低其浇筑温度。

(3) 衬砌底板与边墙的交界处、顶拱与边墙的交界处为衬砌混凝土结构的易损部位,其损伤程度是对温度场与应力场的反映。控制好混凝土浇筑时与隧洞输水时的温差变化,是抑制混凝土损伤积累与发展的关键。

参考文献:

- [1] 刘乃飞,李 宁,余春海,等. 布仑口水电站高温引水发电隧洞受力特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(4): 14-21.
- [2] 孟 尧,姜海波. 基于对流-导热耦合模型的寒区水工隧洞围岩温度场分布规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(1):221-226+233.
- [3] 邵珠山,乔汝佳,王新宇. 高地温隧道温度与热应力场的弹性理论解[J]. 岩土力学,2013,34(S1):1-8.
- [4] 郭进伟,方 焘,卢祝清. 高地温隧洞热-结构耦合分析[J]. 铁道建筑,2010,53(6):77-79.
- [5] 王家赫,黄法礼,李化建,等. 铁路隧道衬砌混凝土温度裂缝原因分析与防治措施[J]. 铁道建筑,2020,60(9):73-77.
- [6] 方 攀. 隧道二次衬砌混凝土温度应力与裂缝控制研究[D]. 西安:长安大学,2019.
- [7] 穆 震. 高地温环境对隧道衬砌混凝土性能影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [8] 何廷树,汲江涛,王 艳,等. 高岩温隧道下矿物掺合料对混凝土力学性能的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(6): 119-122.
- [9] 何廷树,张 弟,王 艳,等. 高岩温对衬砌混凝土耐久性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2013,32(2):325-329.
- [10] 白国权,仇文革,张俊儒. 高地温隧道隔热技术研究[J]. 铁道标准设计,2013,57(2):77-80+84.
- [11] 吴鑫健. 热害隧道隔热材料及隔热体系研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [12] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [13] 曲 星. 高岩温引水隧洞温度场、应力场耦合机理及支护结构设计原则研究[D]. 西安:西安理工大学,2014.
- [14] CHEN Yaolong, WANG Changjiang, LI Shouyi, et al. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3-D finite element relocating mesh method[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(9):677-682.
- [15] 朱伯芳. 混凝土徐变方程参数拟合的约束极值法[J]. 水利学报,1992,23(7):75-76.
- [16] 田 艳. 基于复形法的混凝土面板堆石坝优化设计研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(2):160-164.
- [17] LI Yan, NIE Lei, WANG Bo. A numerical simulation of the temperature cracking propagation process when pouring mass concrete[J]. Automation in Construction, 2014, 37:203-210.
- [18] 段亚辉,彭 亚,罗 刚,等. 门洞形断面衬砌混凝土温度裂缝机理及其发生发展过程[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(10):847-853.
- [19] 周 奎,申美玲. 温度影响下基于曲率模态的梁式桥损伤识别[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):179-185.
- [20] 司 政,辛兰芳,牛芙蓉,等. 大体积混凝土结构温度损伤研究[J]. 水电能源科学,2018,36(12):109-112.
- [21] 陈 军,王向东,韩金启. 基于损伤理论的混凝土裂缝扩展研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(6):61-65.