

大型泄洪洞衬砌混凝土施工期温度场和 温度应力的仿真计算

韩 刚¹, 齐 磊², 马 涛³, 于 猛³

(1 东方电力设备联合公司, 四川 成都 610036; 2 国电大渡河流域开发公司, 四川 成都 610041;

3 中水顾问集团 中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

[摘要] 【目的】探明地下衬砌混凝土出现裂缝的原因, 研究进一步采取综合温控措施防裂的有效性和合理性。【方法】结合工程实际情况, 在考虑混凝土热力学参数随混凝土龄期的变化, 以及坝体分层浇筑过程对温度应力影响的基础上, 利用大型有限元软件对泄洪洞衬砌施工过程中的温度场和温度应力进行了三维仿真计算。【结果】仿真结果给出了衬砌混凝土温度场、温度应力分布及其随时间变化的规律, 即于开浇后的第 2 天达到最大温度值, 第 3 天即开始出现较大拉应力值, 而极值出现在中后期。【结论】在混凝土浇筑过程中, 应采取降低浇筑温度等措施; 在浇筑后的 10~28 d 降温期间, 要对混凝土表面施行流水养护等温控措施, 严格各项施工规范。

[关键词] 大型泄洪洞; 衬砌混凝土; 施工期; 温度场; 温度应力; 仿真分析

[中图分类号] TV554; TV315

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)04-0225-06

Simulation of temperature field and thermal stress of pubugou diversion tunnel during construction

HAN Gang¹, QI Lei², MA Tao³, YU Meng³

(1 Dongfang Electric Corporation, Sichuan, Chengdu 610036, China; 2. Dadu River Hydropower Development CO., LTD, Sichuan, Chengdu 610041, China; 3. Mid-South Design and Research Institute, Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: 【Objective】The research discussed the causes leading to the appearance of cracks in the side wall lining concrete of the diversion tunnel, and studied the effectiveness and reasonability of comprehensive temperature measures to prevent cracks. 【Method】Given the actual situation, large-scale finite element software was used for spillway lining of the construction temperature, the temperature stress field in the three-dimensional simulation. Calculations took into consideration the changing of the concrete thermodynamic parameters with age, and the effect of the dam laying process on temperature stress. 【Result】The simulation results showed temperature, and temperature stress distribution changed over time; namely, the temperature peaked on the second day after pouring, from the third day more stress value began to appear, and the extreme value appeared in the latter part. 【Conclusion】In the concrete pouring, it is necessary to reduce the pouring temperature. During 10 to 28 days after pouring, water conservation measures should be taken to control temperature strictly.

Key words: large spillway; lining concrete; operation period; temperature field; temperature stress; simulation analysis

随着国家西部大开发战略的全面实施, 我国的水利水电工程建设进入了大规模的建设阶段。目前在建和即将要建的一批大型和特大型工程有三峡、

溪洛渡、小湾、紫平铺、向家坝、拉西瓦、锦屏一级、锦屏二级、水布雅、南水北调工程等。截至目前, 人们对隧洞稳定性问题已进行了许多卓有成效的研

* [收稿日期] 2008-06-10

[作者简介] 韩 刚(1984—), 男, 陕西泾阳人, 助理工程师, 硕士, 主要从事大体积混凝土温控研究。E-mail: hangang-1984@163.com

究^[1],但现有研究很少考虑施工期隧洞衬砌混凝土的温控问题。造成这种状况的主要原因是隧洞衬砌混凝土较薄,洞内温度和环境条件变化较小,因而混凝土温控问题的重要性尚未引起人们的足够重视。然而大多数地下工程的施工实践表明,施工期内几乎都已出现不同程度的裂缝,而这些裂缝均与温度的变化有直接关系^[2]。隧洞衬砌混凝土在施工期,由于水泥水化热的作用,及外界环境温度的变化,温度应力影响显著,加之围岩的强约束作用,是引起衬砌混凝土结构裂缝的重要原因之一。温度裂缝,尤其是贯穿裂缝对结构的危害较大。国内外对大体积混凝土工程的温控研究比较重视,理论也日趋成熟^[2]。但对地下工程混凝土衬砌的温控研究却比较少,有代表性的如方朝阳等^[3]对三峡水利枢纽工程永久船闸输水隧洞衬砌混凝土的温度与温度应力进行了三维仿真分析;段云岭等^[4]运用自己编写的 SPS_FET2D 软件对小浪底泄洪洞衬砌的施工过程进行了仿真计算,其创新性地用杆单元模拟新老混凝土的接缝。目前,有关规范^[5]对隧洞衬砌混凝土的施工仅作了一般的规定,对明确的温控措施或方法尚没有具体要求,而地下工程中混凝土衬砌温度裂缝的现象并不少见。例如,小浪底工程导流洞混凝土的衬砌裂缝^[6]、三峡永久船闸地下输水系统衬砌混凝土有不少结构段在二分之一长度附近发生了裂缝^[3]。由此可见,施工期隧洞混凝土衬砌的温控问题是一项值得重视和研究的重要课题。为此,本研究以某泄洪洞为例,采用三维有限元法^[7]对其温

度场、应力场进行了仿真模拟,分析了其分布规律,以为大型泄洪洞衬砌混凝土的施工提供参考。

1 仿真计算

1.1 计算思路

某大型水电站泄洪洞规模大,混凝土方量也较大,地下洞室围岩条件复杂。泄洪洞最大泄洪流量为 $3\,412\text{ m}^3/\text{s}$,最大流速为 38 m/s 。在运行时,洞内高速水流对混凝土衬砌结构的抗空蚀空化能力要求较高,衬砌混凝土的抗冲耐磨设计问题非常突出。所以在结构设计时,泄洪洞流道边墙底板混凝土衬砌选择 C₅₀ 抗冲耐磨高强硅粉混凝土,在高流速段设置掺气减蚀设施,以将高速水流对混凝土结构的破坏减少到最小程度。

现根据泄洪洞的实际情况,考虑施工季节、混凝土浇筑温度、围岩弹性模量等因素^[8],利用大型有限元软件热分析模块中的瞬态热分析,模拟混凝土施工期温度的发展过程;在求得相关时段温度场的前提下,以各时段内的温度增量为荷载,考虑混凝土弹性模量随时间的变化,利用有限元软件求得考虑徐变时衬砌混凝土的温度应力值。

1.2 计算模型

泄洪洞的结构断面如图 1-a 所示。建模时以衬砌底面中心为坐标原点,洞宽方向为 X 方向,向右为正;洞轴线方向为 Y 方向,顺水流方向为正;铅直方向为 Z 方向,向上为正。

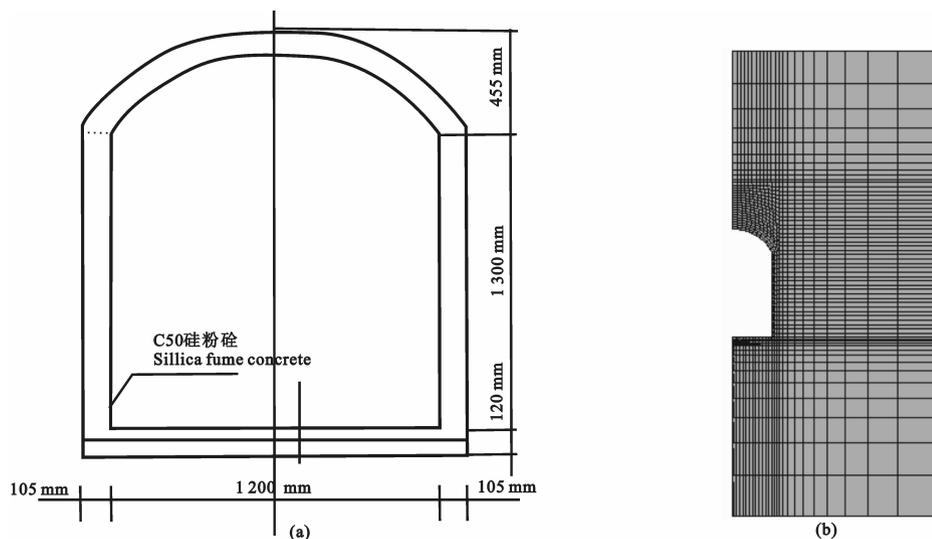


图 1 某大型泄洪洞结构断面及计算模型示意图

(a)断面结构;(b)模型

Fig. 1 Spillway structure of a large cross-section diagram and model

(a)The structure of section;(b)The model

计算模型中围岩的计算范围为:沿洞宽方向取 2 倍洞宽,沿洞高方向上、下各延伸 2 倍洞高。衬砌计算时长度取为 10 m。整个结构采用六面体八节点等参单元,共划分单元 7 308 个,节点 9 212 个,其模型如图 1-b 所示。

表 1 C₅₀ 硅粉混凝土及围岩的导温、导热、比热、线胀系数

Table 1 Temperature conduction, heat conduction, specific heat, the linear expansion coefficient information of the C₅₀ silica fume concrete and wall rock

混凝土种类 Concrete category	导热系数/ (kJ·m ⁻¹ ·h ⁻¹ ·°C ⁻¹) Thermal coefficient of conduction	导温系数/ (m ² ·h ⁻¹) Thermal diffusivity	线膨胀系数/ (10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹) The linear expansion coefficient	放热系数/ (kJ·m ⁻² ·h ⁻¹ ·°C ⁻¹) Heat evolution coefficient	比热/ (kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹) Specific heat	容重/ (kN·m ⁻³) Unit weight
C ₅₀	8.873	0.003 67	9.03	30	1.029 5	25.5
围岩 Wall rock			7.3	30	0.716	

注:围岩恒温区地温取 20 °C。

Note: Ground temperature is 20 °C in the wall rock constant temperature section.

表 2 C₅₀ 硅粉混凝土的力学性能参数

Table 2 Mechanical information of the C₅₀ silica fume concrete

等级 Grade	水胶比 W/C ratio	坍落度/mm Slump	抗压强度/MPa Compressive strength			劈拉强度/MPa Splitting tensile strength			弹性模量/GPa Elastic modulus			
			7 d	28 d	90 d	3 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
C50	0.35	145	42.0	57.5	60.1	1.5	3.0	3.6	3.8	21.0	24.5	25.0

C₅₀ 混凝土材料绝热温升变化曲线的表达式为:

$$T = 52.5 \times (1 - e^{-0.574 \times t^{2.845}})$$

式中: T 为混凝土绝热温度; t 为混凝土龄期。

利用 C₅₀ 混凝土最终弹性模量值,通过线性插值可得其弹性模量公式为:

$$E(\tau) = 28.7 \times 10^9 \times (i - 0.5) / (i - 0.5 + 1.76)$$

式中: $E(\tau)$ 为弹性模量; i 为浇筑天数。

围岩类别为 III 类,弹性模量 E 选定为 7.0 GPa。

表 3 C₅₀ 混凝土徐变度拟合公式材料特性参数的确定

Table 3 Creep of fitting material parameters of the formula

混凝土材料 Concrete Material	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
C ₅₀	8.15	70	0.45	0.3	2.46	36.78	0.45	0.005

1.3.3 初始条件 在隧洞工程施工中,对混凝土衬砌温度场和应力场影响较大的是气温和地温。用余弦函数曲线^[2]模拟泄洪洞洞室气温的年周期性变化,其表达式为:

$$T_a = 15.625 + 6.55 \cos[(2\pi \div 365) \times (A + i - B)]$$

式中: T_a 为泄洪洞洞室气温; i 为浇筑天数; A 为开始浇筑期距每年 01-01 的天数,结合本文实际情况 A 的取值为 215 d; B 为年最高气温日期距每年 01-01 的天数,结合本文情况 B 取值为 250 d。

地温的分布比较均匀和稳定,一般地表附近的

1.3 计算条件

1.3.1 C₅₀ 混凝土和围岩的热力学参数^[2]

泄洪洞衬砌选用 C₅₀ 抗冲耐磨高强硅粉混凝土。根据粉煤灰、水泥、外加剂的用量比和现场试验,选取混凝土和围岩的热、力学参数如表 1、表 2 所示。

1.3.2 C₅₀ 混凝土的徐变度 本文计算采用朱伯芳^[2]提出的用于初步设计的混凝土徐变公式,即:

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

式中: $C(t, \tau)$ 为徐变度; t 为持荷时间; τ 为加荷龄期,单位为 10⁻⁶ MPa⁻¹; A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 为材料特性参数。采用复形法^[2]对 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 进行拟合,所得数值如表 3 所示。

地温接近于月平均气温,地表以下深 10 m 的地温接近于年平均气温^[2]。边墙顶拱于 2008-08-05 开始浇筑,2008-09-05 开始浇筑底板,取浇筑温度为初始温度,为 28.3 °C,围岩、隧洞表面温度取为当月洞室平均气温,为 20 °C。

1.3.4 边界条件 在温度场的计算中,选取边界条件时^[2],由于衬砌段结构对称面在温度场计算中为绝热边界,属于第二类热学边界条件,在应力场计算中给予垂直该表面的位移约束,即水平约束;围岩周边距离衬砌段较远,给予已知温度边界条件和全约束力学边界条件;模板在拆模前起法向约束作用,在

模板和衬砌混凝土表面,由于模板的导热系数较大,近似地将其表面看作光滑固体表面与空气热对流边界,这些边界属于第三类热学边界条件。

2 有限元计算及其成果分析

2.1 温度场分析

通过对泄洪洞温度场的三维仿真计算,可得到边墙和底板各个时期的温度分布及其变化发展规律。由于衬砌为对称结构,因此仿真分析成果,根据工程经验,选取边墙典型点和地板典型点 2 个温度典型点进行说明,其位置如图 2 所示。边墙典型点和地板典型点 410 d 的温度历时曲线如图 3 所示。

由图 3 可见,从混凝土开浇时起,衬砌混凝土的温度场一般经历了水化热温升、温降及随环境气温周期变化 3 个阶段。现结合以往温控分析经验^[9],分 3 个阶段描述温度场变化的基本规律:

(1)温升阶段。浇筑后,衬砌早期温度迅速升

高,边墙中央混凝土温升速率最快,温度峰值最高;开浇后 2 d 左右,边墙中央温度达到最高值(参见图 3、表 4)。

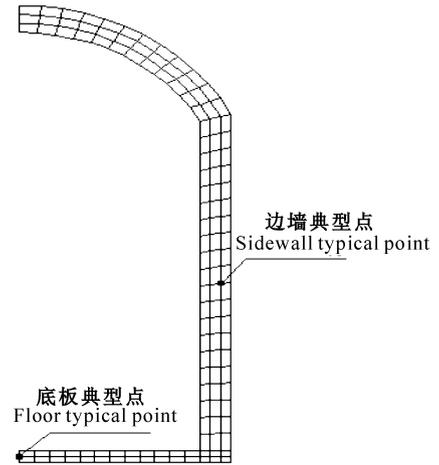


图 2 泄洪洞边墙和底板温度典型点的选取

Fig. 2 Spillway wall and floor temperature typical point

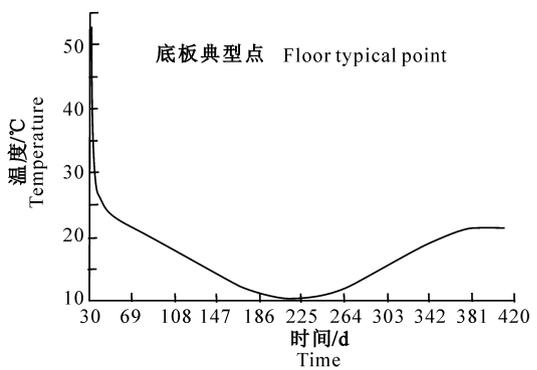
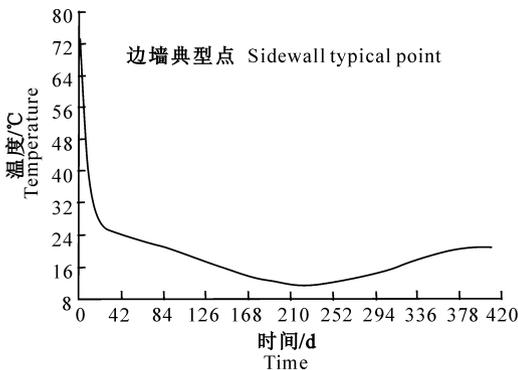


图 3 边墙典型点和地板典型点 410 d 温度历时曲线

Fig. 3 Sidewall and floor typical point temperature curve lasted 410 days

表 4 泄洪洞边墙和底板衬砌混凝土的最高温度点

Table 4 Spillway wall and floor of concrete lining the highest temperature point

位置 Location	最高温度/°C Sidewall maximum temperature	最高温度点坐标/m Coordinate of the maximum temperature points			出现时间 Time
		X	Y	Z	
边墙 Sidewall	73.8	6.70	6.00	6.47	2008-08-06
底板 Floor	52.6	0.00	6.00	0.95	2008-09-06

由表 4 可知,边墙的最高温度达到 73.8 °C。其原因有 3 个方面:一是由于浇筑时间为 8 月份,浇筑温度较高(28.3 °C);二是由于混凝土的水泥标号很高,绝热温升值高达 52.5 °C;三是因为外界气温较高,混凝土散热条件较差等。混凝土是在 8 月上旬浇筑的,此时气温较围岩初始计算温度高,故相比较而言,表面点的温升值和温升速率较内侧点高。

(2)温降阶段。混凝土温度达到最大峰值后,即进入温降阶段。衬砌混凝土表面和中央部位的温

降速率都很大,最大温降速率可达 8 °C/d 左右,而与其与围岩胶结面的温降速率较慢。

(3)随环境气温周期变化阶段。浇筑后约 30 d,混凝土表面温度已基本趋同于洞内气温,并开始随气温作周期性变化,混凝土内部温度也随之波动。愈靠近表面,混凝土温度波动的幅度越大,且内部混凝土的温度变化有所滞后。其中边墙靠近围岩侧的波动幅度最小,变化最缓。开浇后到次年 2 月下旬,衬砌混凝土中央温度达到最低。

2.2 应力场分析

根据工程经验,应力分析时主要取图 4 所示 6 个点的竖向应力进行观测。由于篇幅原因,这里仅列出了应力最大点,即边墙 1 号点和底板 3 号点的应力历时曲线(图 5),SX、SY、SZ 分别是模型中坐标系 X、Y、Z 方向的正应力。由图 5 可知,各部位的温度应力变化一般均经历了压应力增长、压应力减小、产生拉应力、拉应力平稳增长、拉应力快速增长并达到最大值、拉应力减小及随气温呈周期性变化的过程。施工早中期,在边墙横断面 1/2 墙高附近范围内,混凝土表层出现了较大的沿洞轴线方向的拉应力;在施工后期,新老混凝土胶结面、混凝土与围岩胶结面、边墙与顶拱交线中央和表面等均出现很大的拉应力。随持续时间的推进,拉应力区域发生变化,在不同时刻,最大拉应力出现的部位也不相

同。

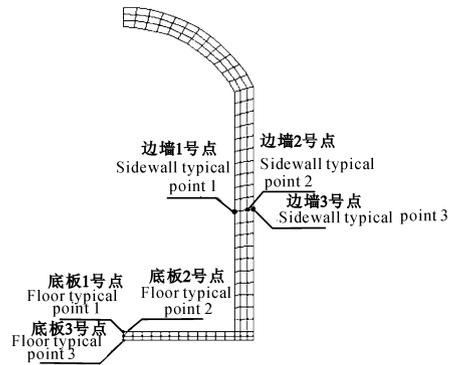


图 4 泄洪洞边墙和底板温度应力典型点的选取
Fig. 4 Spillway wall and floor temperature stress typical points

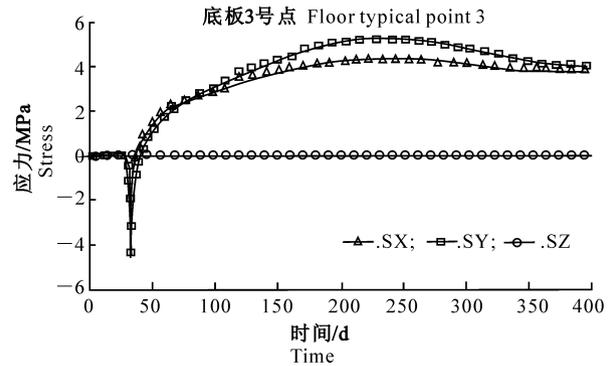
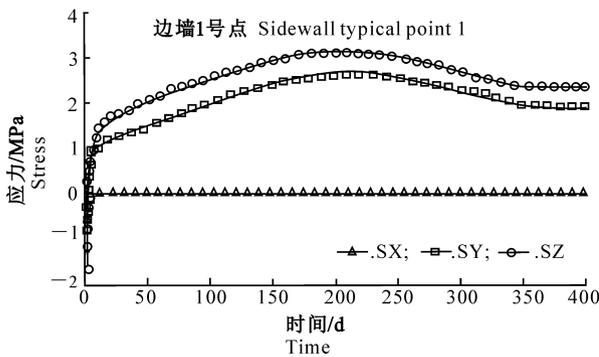


图 5 泄洪洞边墙和底板温度应力最大点的应力历时曲线

Fig. 5 Spillway wall and floor temperature stress the biggest point of stress-time curve

综上所述,虽然隧洞衬砌温度应力的分布和变化规律较为复杂,但仍能得到以下结果:

(1)边墙 Y、Z 方向应力较大;

(2)温降早期,边墙表面于第 3 天出现较大拉应力,Y 方向应力最大值超过 2.0 MPa,这是因为在早期温降阶段,表层混凝土散热快,收缩迅速,中部混凝土温降较慢,对表层产生相对约束作用并使之出现拉应力。此时拉应力值超过同龄期混凝土的劈拉强度(1.5MPa),因而在衬砌表面局部区域可能会出现裂缝。

(3)在温降初期,边墙与底板交线、边墙与顶拱

交线的表面点未出现较大拉应力,但在温降中后期其常出现较大的拉应力,这些部位的拉应力除与温降有关外,还与衬砌结构的几何形状密切相关。

(4)温降后期底板的应力值较大,特别是在底板新老混凝土的接触面上。底板最大应力值出现在次年的 2 月份,主要原因是由于先浇筑的底板混凝土的弹性模量较高,其对后面浇筑的 50 cm 厚底板混凝土的约束较强所致。

(5)由表 5 温度应力最大值的计算结果可以看出,边墙早期温度应力以 Y 向较大,后期温度应力以 Z 向较大;而底板 X、Y 向的后期温度应力均较大。

表 5 泄洪洞边墙及底板温度应力最大值的计算结果

Table 5 The maximum temperature stress

位置 Location	温度应力/MPa Temperature stress					
	σ_x		σ_y		σ_z	
	30 d	180 d	30 d	180 d	30 d	180 d
边墙 Sidewall	0.38		2.74	2.59	0.38	3.19
底板 Floor		4.24		5.19		0.01

3 结论与建议

综合分析可知,由于衬砌混凝土的水泥标号^[10]很高,加上围岩和老混凝土的强约束以及混凝土早期抗拉强度较低等因素的影响,衬砌混凝土比较容易产生裂缝。对温度应力应给予足够的重视,特别是对夏季施工的工程而言,在浇筑时应严格控制混凝土的浇筑温度,而在浇筑后 10~28 d 的温降期间,尤其应严格施工规范,并对混凝土表面进行养护。由此提出以下温控措施^[11]供工程施工时参考:

1) 由于衬砌混凝土施工结束后,整个衬砌部分散热很快,混凝土温度快速降低,从而使混凝土浇筑早期的表面温度应力较大,衬砌表面局部区域可能会出现早期裂缝。为了减小早期的温度应力,避免出现早期裂缝,防裂的重点在早期 28 d 以内,尤其要注意开浇后 14 d 内的温控防裂。故建议在浇筑完成后,及时将施工段两端用保温板进行封闭,用射灯或红外灯在施工段洞内进行加温,提高施工段的洞内温度以减小混凝土表面的温度梯度,或在衬砌表面加保温板,以降低衬砌混凝土的温降速率^[12-13]。

2) 采取冬季保温措施,可使中、后期拉应力大幅降低。因此建议对于 9 月上旬开浇的衬砌混凝土,一般应在浇后 30 d 左右进行冬季覆盖保温,或用射灯、红外灯对施工洞进行加温^[14]。

3) 早期拆模后,混凝土表面不能立即直接用河水喷浇或进行表面流水养护,否则会因混凝土与河水之间温差过大而导致衬砌表面拉应力骤增,促使表面裂缝产生^[15]。

4) 底板特别是在底板新老混凝土的接触面上,其后期应力值较大,主要原因是由于先浇筑的底板混凝土的弹性模量较高,其对后浇筑的 50 cm 厚底板混凝土的约束较强所致。为此,建议将底板与边墙一起浇筑^[16-17]。

[参考文献]

- [1] 董安建,刘世煌. 我国的水工隧洞建设 [M]. 北京:水利水电技术出版社,1999.
Dong A J, Liu S H. Construction of Hydraulic Tunnels in China [M]. Beijing: Water Resources And Hydropower Engineering, 1999. (in Chinese)
- [2] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M]. 北京:中国电力出版社,1999.
Zhu B F. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese)
- [3] 方朝阳,段亚辉. 三峡永久船闸输水洞衬砌施工期温度与应力

- 监测成果分析 [J]. 武汉大学学报:工学版,2003,36(5):31-35.
Fang C Y, Duan Y H. Analysis of temperature and thermal stresses observation on concrete lining of water delivery tunnel of Three Gorges Project permanent shiplock [J]. Journal of Wuhan University: Engineering Ed, 2003, 36(5): 31-35. (in Chinese)
- [4] 段云岭,周睿. 小浪底工程泄洪洞衬砌施工期温变效应的仿真分析 [J]. 水利发电学报,2005,24(5):50-54.
Duan Y L, Zhou R. The simulation and analysis of thermal effect in Xiaolangdi diversion tunnel during construction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(5): 50-54. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国水利部. SL279-2002 水工隧洞设计规范 [S]. 北京:中国水利电力出版社,2002.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL279-2002 Specification for design of hydraulic tunnel [S]. Beijing: China Electric Hydraulic Power Press, 2002. (in Chinese)
- [6] 廖波. 小浪底泄洪工程高标号混凝土裂缝产生的原因及防治 [J]. 水利学报,2001(7):47-50.
Liao B. The cause and prevention of cracking in high strength concrete of Xiaolangdi Project's outlet works [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(7): 47-50. (in Chinese)
- [7] Chen Y L, Wang C J, Li S Y. 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. (in Chinese)
- [8] 叶琳昌,沈义. 大体积混凝土施工 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,1987.
Ye L C, Shen Y. The mass concrete construction [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1987 (in Chinese)
- [9] 李守义,赵基花. 碾压混凝土重力坝温度场与温度徐变应力仿真分析 [J]. 西安理工大学学报,2004,20(1):58-62.
Li S Y, Zhao J H. Simulation analysis of temperature field and thermal stress of RCC gravity dam [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2004, 20(1): 58-62. (in Chinese)
- [10] 李金玉,曹建国. 水工混凝土耐久性研究和应用 [M]. 北京:中国电力出版社,2004:52-150.
Li J Y, Cao J G. Research and application of concrete durability in hydraulic engineering [M]. Beijing: Electric Power Press of China, 2004: 52-150. (in Chinese)
- [11] 龚召熊. 水工混凝土的温控和防裂 [M]. 北京:中国水利电力出版社,1999.
Gong S X. Temperature control and crack resistance measures of hydraulic concrete [M]. Beijing: China Electric Hydraulic Power Press, 1999. (in Chinese)
- [12] 陈尧隆,何劲. 用三维有限元浮动网格法进行碾压混凝土重力坝施工期温度场和温度应力仿真分析 [J]. 水利学报,1998,(S1):1-5.
Chen Y L, He J. Simulation on temperature and thermal stress distribution of RCC gravity dam dur [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, S1: 1-5 (in Chinese)