

# 表面保温对施工期闸墩混凝土温度和应力的影响

马跃峰 朱岳明

( 河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098 )

**摘要** 对于严寒季节施工的混凝土工程 ,常采用各种表面保温措施以防止裂缝的产生 . 针对水闸这一典型的水利工程结构 ,分析水闸施工期闸墩混凝土温度和应力变化规律与开裂机理 ,阐述了不同表面保温措施对闸墩混凝土温度和应力的影响 . 研究表明 ,较强的表面保温可以大大减小闸墩混凝土早期内外温差和表面拉应力 ,防止产生表面裂缝 ,但同时使得后期闸墩内部拉应力增大 ,产生贯穿性裂缝的可能性增加 . 对于不同的工程 ,应通过数值仿真计算选择适合本工程的表面保温措施 ,以减小混凝土开裂的可能性 .

**关键词** 闸墩 ;混凝土 ;温度 ;应力 ;裂缝

中图分类号 :TV662      文献标识码 :A      文章编号 :1000-1980( 2006 )03-0276-04

在水利工程中 ,混凝土开裂较为普遍 . 对水闸结构而言 ,裂缝多出现在工程的施工期 ,混凝土温度变化对裂缝的产生具有重要影响<sup>[1-3]</sup> . 严寒季节施工时 ,由于气温较低 ,产生裂缝的可能性大大增加 ,在施工时常采用各种表面保温措施来防止混凝土裂缝的产生<sup>[4-5]</sup> . 保温措施的保温性能越好 ,混凝土受外界环境温度的影响也就越小 ,但并不说明保温性能越强 ,对闸墩混凝土防裂就越有利 ;“过度”保温又会产生其他问题 . 因此 ,合理选择保温方式对工程施工和混凝土温控防裂具有重要意义 . 本文在对水闸施工期闸墩混凝土温度和应力变化规律与开裂机理进行分析的基础上 ,研究表面保温对施工期闸墩混凝土温度和应力的影响 .

## 1 计算原理与方法

在计算域  $R$  内任何一点 ,不稳定温度场  $T(x, y, z, t)$  需满足热传导方程

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

式中 : $T$ ——温度 ; $a$ ——导温系数 ; $\theta$ ——混凝土绝热温升 ; $t$ ——时间 ; $\tau$ ——龄期 . 温度场有限元计算方法见文献 [6] .

混凝土在复杂应力状态下的应变增量包括弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量、干缩应变增量和自生体积应变增量 ,因此有

$$\Delta \epsilon_n = \Delta \epsilon_n^e + \Delta \epsilon_n^c + \Delta \epsilon_n^T + \Delta \epsilon_n^s + \epsilon_n^0 \tag{2}$$

式中 : $\Delta \epsilon_n^e$ ——弹性应变增量 ; $\Delta \epsilon_n^c$ ——徐变应变增量 ; $\Delta \epsilon_n^T$ ——温度应变增量 ; $\Delta \epsilon_n^s$ ——干缩应变增量 ; $\epsilon_n^0$ ——自生体积应变增量 . 应力场有限元计算方法见文献 [6] .

## 2 闸墩混凝土温度和应力分析

某退水闸共 16 孔 ,每孔净宽 10 m ,采用钢筋混凝土开敞式结构 . 闸室顺水方向长 19 m ,闸墩高 9.025 m ,厚 1.30 m ;底板采用分离式 ,大底板厚 1.50 m ,宽 5.30 m ,小底板厚 1.00 m ,宽 5.96 m . 计算网格如图 1 所示 . 混凝土主要热学参数见表 1 ,混凝土力学

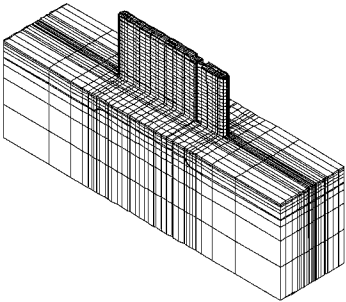


图 1 仿真计算网格

Fig.1 Mesh for simulative calculation

参数由试验确定.在仿真计算过程中,对施工过程、环境因素(气温、风速等)、物盖条件、养护方法、拆模时间等均进行模拟.

表 1 混凝土主要热学参数

Table 1 Main thermal parameters of concrete

导温系数/ ( $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ )	导热系数/ ( $\text{kJ}\cdot(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比热容/ ( $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ )	绝热 温升/ $^\circ\text{C}$	表面放热系数/( $\text{kJ}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )		
					裸露	竹胶模板	塑料保温板
0.00478	10.838	23.79	0.952	$\frac{55.124\tau}{0.996+\tau}$	63.08	28.10	4.65

钢模板无保温作用,竹胶模板具有一定的保温作用,塑料板的保温性能最强.为比较不同保温措施对混凝土温度和应力的影响,取钢模板、竹胶模板、竹胶模板内衬塑料保温板 3 种情况进行仿真计算.

2.1 闸墩混凝土温度与应力变化规律及开裂机理

以钢模板条件下的计算结果为例,分析闸墩温度与应力变化规律及开裂机理.图 2 为采用钢模板时闸墩典型点的温度和应力历时曲线,典型点距底板上表面 3 m,顺水流方向上位于闸墩中央,厚度方向上 1 号点位于闸墩中心,依次向外,5 号点位于闸墩外表面.

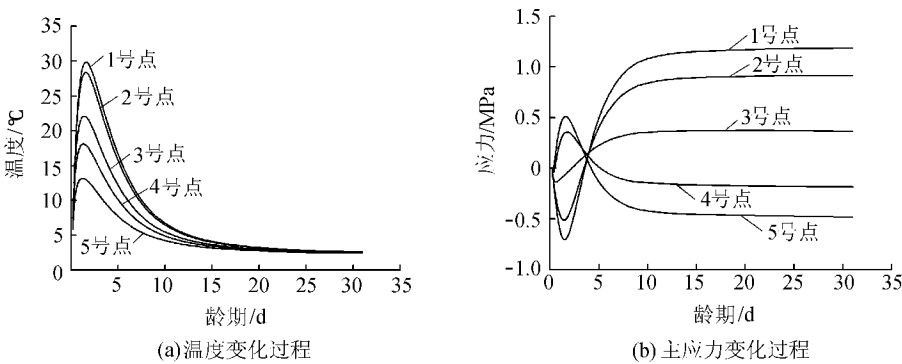


图 2 采用钢模板时闸墩典型点温度和应力历时曲线

Fig.2 Time-history curve of temperature and stress at typical node in pier with steel form board

由图 2 可知,混凝土浇筑初期闸墩表面承受拉应力,内部承受压应力,且拉应力和压应力几乎都在混凝土内部温度达到峰值时达到了极大值.此后随着混凝土内外温度的降低,表面拉应力和内部压应力都逐渐减小.在闸墩混凝土浇筑完后 4 d 左右,混凝土外表面开始承受压应力,内部开始出现拉应力,且表面压应力和内部拉应力都随龄期逐渐增加,直至闸墩混凝土降温到一定程度后,内外应力才趋于稳定.

对于早期闸墩混凝土,产生上述“表面受拉、内部受压”应力特征的主要原因在于混凝土温度的变化.在混凝土浇筑后的温升时期,由于表面散热作用,表面混凝土的温升幅度远小于内部混凝土,产生内外温差,且温差约在内部混凝土温度达到峰值时达到最大值.此时虽然闸墩内外混凝土都处于膨胀变形,但相对于外部混凝土来讲,内部混凝土的热胀更快,从而形成自身内外变形约束作用,导致闸墩表面产生拉应力,内部出现压应力,容易产生“由表及里”发展的裂缝.

后期间闸墩内外混凝土温度都逐渐降低,但内部混凝土的降温幅度远大于表面,结构内部收缩变形大,产生拉应力,相应地表面产生压应力.与早期混凝土不同的是,后期间闸墩混凝土除自身相互约束外,底板对闸墩的约束作用增强,当约束作用与降温收缩变形以及自生体积收缩变形叠加后,闸墩中间近底板的部位就成为拉应力最大的区域,最容易产生启裂于闸墩内部,而后向外发展的裂缝.

2.2 不同保温性能的影响

2.2.1 温度分析

保温性能越好,闸墩混凝土内部最高温度越高,达到最高温度所需时间也越长.采用钢模板时(图 2(a)),闸墩内部 1 号典型点在该层混凝土浇筑完毕 1.5 d 达到最高温度 30℃;采用竹胶模板时(图 3(a)),1 号典型点在 2 d 时达到最高温度 33℃;采用塑料保温板时(图 4(a)),1 号典型点在 3.5 d 达到最高温度 40.5℃.分析其原因,混凝土的温度变化主要受水泥水化热和混凝土表面散热的影响,水化放热使得混凝土温度升高,而表面散热使得混凝土温度降低.保温效果越好,混凝土表面散热能力越弱,水化热起主导作用的时间也

就越长,从而使得混凝土温度越高,达到最高温度的时间也就越晚.

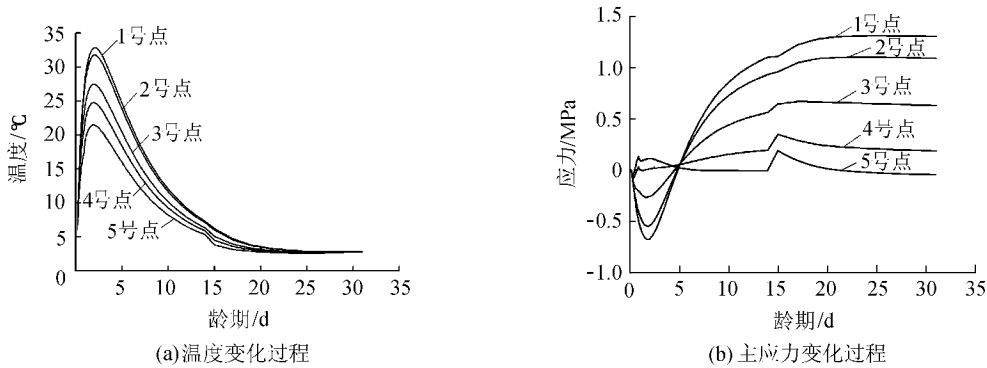


图 3 采用竹胶模板时闸墩典型点温度和应力历时曲线

Fig.3 Time-history curve of temperature and stress at typical node in pier with bamboo form board

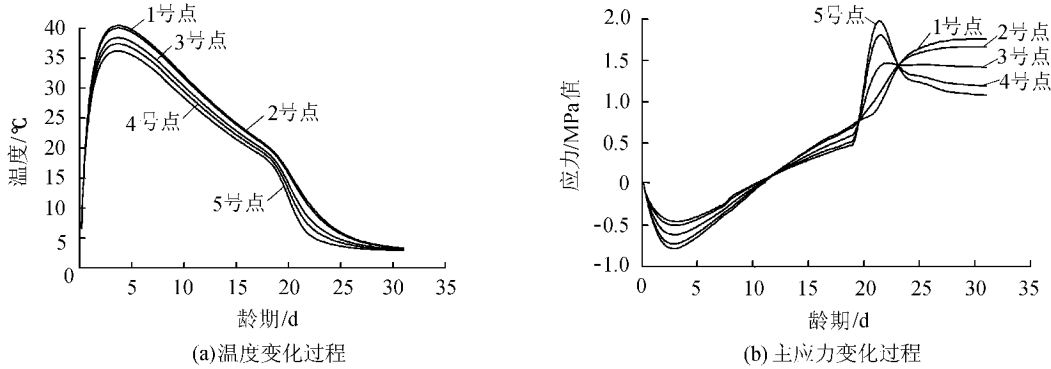


图 4 采用塑料保温板时闸墩典型点温度和应力历时曲线

Fig.4 Time-history curve of temperature and stress at typical node in pier with plastic form board

早期混凝土内外温差随着保温性能的增强而减小.采用钢模板时典型点的最大内外温差约为 17℃;采用竹胶模板时,典型点最大内外温差约为 11℃;而采用塑料保温板时,典型点的最大内外温差仅为 4℃.混凝土作为热的不良导体,其传热和散热的速度缓慢,闸墩表面受保温性能的影响相对较大,内部相对较小,混凝土表面温度随保温性能加强而增加的幅度远大于内部,从而使得内外温差大幅度减小.

另外,较强的保温性能使得混凝土的温降速度减缓,拆模时混凝土表面温度和气温的差别加大,从而引起表面温度的迅速下降,类似于寒潮的冷击作用,这对混凝土的表面防裂是不利的.比较各温度历时曲线,采用钢模板时拆模对混凝土表面温度无任何影响,竹胶模板拆模时混凝土表面温度的变化也不大,采用塑料板时,虽将拆模时间延长至 20 d,拆模时表面温度仍在极短时间内下降约 12℃,极易导致混凝土表面开裂.

2.2.2 应力分析

闸墩混凝土早期表面拉应力随表面保温性能的增强而减小.采用钢模板时,早期闸墩表面主应力约在 1.5 d 达到极大值 0.50 MPa;采用竹胶模板时,闸墩内外混凝土应力变化规律和钢模板时的情况基本相同,由于早期内外温差较小,混凝土表面拉应力值很小,2 d 时的拉应力值约为 0.11 MPa,保温效果比较显著;而采用塑料保温板时,由于较强的保温性能,早期闸墩混凝土几乎无内外温差,所以从典型点的应力历时曲线来看,此时混凝土内外均承受压应力,这对防止混凝土早期表面裂缝非常有利.

保温效果越好,拆模时闸墩混凝土表面拉应力的增幅就越大.由于钢模板无保温性能,拆模时混凝土应力不受影响,竹胶模板具有一定的保温作用,拆模时混凝土表面拉应力增加,但增幅不大,塑料保温板由于较强的保温性能使得拆模时表面拉应力急剧增加,如图 4(b)所示,为了减小拆模的影响,将拆模时间延长至 20 d,但闸墩表面 5 号典型点拉应力仍由 0.50 MPa 增至 2.00 MPa,很有可能引起闸墩表面开裂.

从温度分析结果可知,保温性能越好,混凝土内部最高温度越高,相应地后期温降幅度也越大.与此相对应,后期闸墩因降温收缩产生的内部拉应力的值也随着保温性能的提高而增大.以闸墩浇筑完毕 30 d 时为例,采用钢模板时,闸墩内部 1 号典型点拉应力为 1.20 MPa,采用竹胶模板时拉应力增至 1.30 MPa,而采用塑料板时达到 1.80 MPa,容易引起由内向外扩展的贯穿性裂缝(图 5).

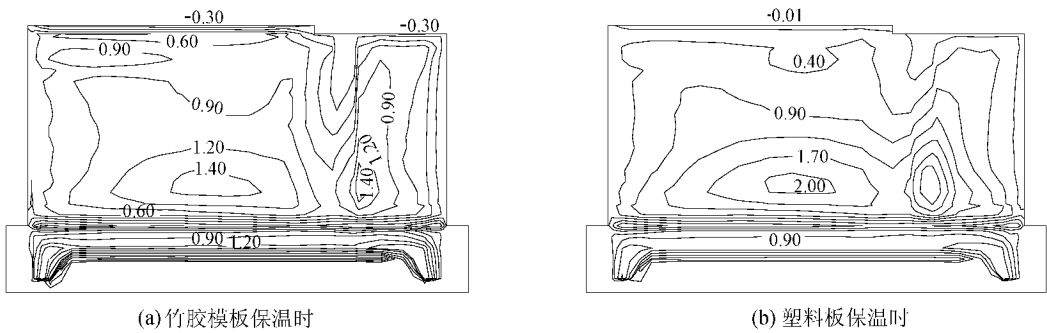


图 5 后期闸墩中心面主应力分布(单位 MPa)

Fig.5 Distribution of principal stress in central plane of pier at later stage

3 结 论

早期闸墩易产生“由表及里”发展的裂缝,裂缝产生的机理在于混凝土的内外温差和由此产生的内外变形约束.后期闸墩易产生“由内向外”发展的裂缝,裂缝产生的机理在于混凝土的降温收缩和自生体积收缩以及由此产生的自身变形约束和底板约束.

较强的表面保温可以大大减小闸墩混凝土早期内外温差和表面拉应力,防止表面裂缝的产生,但同时也引起混凝土内部早期温升和后期温降幅度的增加,使得后期闸墩内部拉应力增大,可能产生危害性较大的贯穿性裂缝.此外,表面保温性能越强,拆模的影响也就越大,有可能产生表面裂缝.所以,就实际工程而言,必须根据具体的施工条件进行计算,选择适合本工程的保温措施.

参考文献:

[1] 曹为民,吴健,闪黎.水闸闸墩温度场及应力场仿真分析[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):48-52.  
[2] 赵之瑾,关新强.水闸闸墩裂缝成因及防治[J].水利水电科技进展,2003,23(4):62-65.  
[3] 张子明,郭兴文,杜荣强.水化热引起的大体积混凝土墙应力与开裂分析[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):12-16.  
[4] 厉易生,朱伯芳,林乐佳.寒冷地区拱坝苯板保温层的效果及计算方法[J].水利学报,1995(7):54-58.  
[5] 杜彬.聚氨酯硬质泡沫在大坝工程中的应用研究[J].水利水电科技进展,2002,22(4):14-16.  
[6] 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,1998.

Effect of surface heat preservation on temperature and stress of pier concrete during construction period

MA Yue-feng , ZHU Yue-ming

( College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China )

**Abstract :**In concrete engineering , measures of surface heat preservation are often used to prevent cracks in concrete in severe cold season. Aiming at the typical structure of sluice in hydraulic projects , an analysis was made of the mechanism of cracking and regularity of temperature and stress variation in pier concrete , and the effects of different surface heat preservation measures were expounded. The results show that the adoption of heat preservation measures can effectively prevent cracks in pier surface by decreasing the difference between the inside and outside temperatures at early stage and the tensile stress of concrete surface , but it increases the internal tensile stress at later stage , and therefore , results in a high probability for occurrence of penetration cracks. As for different projects , suitable surface heat preservation measures should be selected by numerical simulation so as to reduce the probability of cracking in concrete.

**Key words** pier ; concrete ; temperature ; stress ; crack