

细骨料品种对混凝土大坝温度应力的影响

董福品,丁 晓,李赵宇

(华北电力大学可再生能源学院,北京 102206)

摘要:以某大型水电站工程的河床坝段为例,仿真分析了玄武岩砂混凝土、石灰岩砂混凝土和白云岩砂混凝土等 3 种细骨料品种混凝土大坝的温度和温度应力,分析结果表明,混凝土细骨料品种对大坝的温度应力及温控特性具有较大的影响,并得到了温控措施与坝体抗裂安全系数的关系,为细骨料品种的优化选择提供依据。

关键词:水工结构;安全系数;温控措施;细骨料品种选择

中图分类号:TU528 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2010)01-0011-03

Influences of fine aggregates on thermal stresses in concrete dams//DONG Fu-pin, DING Xiao, LI Zhao-yu (School of Renewable Energy, North China Electric Powe University, Beijing 102206, China)

Abstract: Taking a riverbed dam reach of a large-scale hydropower station as anexample, the temperatures and thermal stresses of concrete dams with 3 kinds of fine aggregates, basalt concrete, limestone concrete concrete and dolostone concrete, were simulated and analyzed. The results show that the fine aggregates in concrete have important influences on the thermal stresses and temperature control characteristics. The relationship between the temperature control measures and the safety factor of crack resistance of concrete dams were yielded, and it would be useful for the optimization and selection of fine aggregates.

Key words: hydraulic structure; safety factor; temperature control measure; selection of fine aggregates

混凝土中的骨料对混凝土的热学和力学性能具有重要的影响^[1]。混凝土性能的改变不仅对混凝土坝的温度应力状态和抗裂能力有影响,而且对温控措施及温控费用带来相当大的影响。同一种骨料可能对混凝土有些性能的影响是有利于温控的,而对另一些性能的影响是不利于温控的,因此,无法直接判断骨料对温控总体影响的好与坏。当有几种骨料品种可供选用时,需要通过温度应力仿真分析和坝体抗裂安全系数的研究来判断和选择。

过去,人们研究骨料品种对混凝土性能的影响时,细骨料品种通常选择岩性一致的同一种岩石。在工程中,根据现场的实际情况,混凝土中的细骨料品种有可能选择不同岩性的岩石。因此,细骨料品种的选择对大坝温控特性的影响是一个值得探讨的问题。本文结合某大型水电站工程中细骨料品种对混凝土性能影响的试验结果,仿真分析了 3 种细骨料品种混凝土大坝的温度和温度应力,综合研究了在混凝土组成材料中只改变细骨料品种的情况下,细骨料品种对大坝混凝土温控特性的影响和在温度控制方面的优

劣,得到了温控措施与坝体抗裂安全系数的关系,为细骨料品种的优化选择提供依据。

1 研究方案和主要参数分析

选取某大型水电站工程的河床坝段进行分析研究。用 20 结点等参数单元对坝体和地基进行网格剖分,用大体积混凝土结构温度场和温度徐变应力仿真分析软件 DTSSA 进行三维温度和应力仿真分析^[2]。计算从浇筑第 1 层混凝土开始,一直算到坝体温度场达到准稳定温度为止。计算中模拟了混凝土施工过程、材料性能的变化过程、外界条件(气温、水温、保温、水管冷却)的变化过程。研究从 3 方面进行:①无温控措施条件下三维温度应力仿真分析;②浇筑温度对抗裂安全系数的影响研究;③在预冷和水管冷却措施下浇筑温度对抗裂安全系数的影响研究。

选择 3 种细骨料品种的混凝土,分别为玄武岩砂混凝土、石灰岩砂混凝土和白云岩砂混凝土。其主要热学和力学性能参数试验结果见表 1 和表 2。

表 1 混凝土的热学参数

混凝土类型	导温系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	热膨胀系数/ ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	绝热温升 表达式
玄武岩砂混凝土	0.002 18	7.33	$\theta(\tau) = \frac{25.08\tau - 3.7}{\tau + 1.56}$
石灰岩砂混凝土	0.002 48	6.39	$\theta(\tau) = \frac{21.92\tau - 3.7}{\tau + 1.56}$
白云岩砂混凝土	0.002 65	7.44	$\theta(\tau) = \frac{23.63\tau - 3.7}{\tau + 1.56}$

表 2 混凝土的弹性模量和极限拉伸值

混凝土类型	弹性模量/GPa				极限拉伸值/ 10^{-6}			
	7 d	28 d	90 d	180 d	7 d	28 d	90 d	180 d
玄武岩砂混凝土	20.3	25.4	31.1	33.7	73	108	114	120
石灰岩砂混凝土	22.2	27.4	32.9	35.0	81	89	110	111
白云岩砂混凝土	19.7	26.0	33.0	35.3	83	92	111	116

试验结果表明,在满足设计要求的条件下,不同细骨料品种配制的混凝土的弹性模量、线胀系数、极限拉伸值、绝热温升等指标存在一定的差别。混凝土热膨胀系数、绝热温升等对混凝土大坝的温度应力影响比较大,弹性模量的变化既影响温度应力的量值,又影响混凝土的抗裂能力。极限拉伸值的变化也影响混凝土的抗裂能力。在热膨胀系数和绝热温升方面,石灰岩砂混凝土优于其他 2 种混凝土。在弹性模量方面,对温度应力来讲,玄武岩砂混凝土优于其他 2 种混凝土;对混凝土抗裂能力来讲,白云岩砂混凝土优于其他 2 种混凝土。在极限拉伸值方面,玄武岩砂混凝土优于其他 2 种混凝土。因此,3 种细骨料品种混凝土的性能变化对温度应力和混凝土抗裂能力的影响是不一致的。

2 混凝土温度应力计算原理和方法

2.1 混凝土温度场和温度徐变应力有限元法计算原理

根据热量平衡,混凝土温度场的导热方程为

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

式中: a 为导温系数; T 为温度; θ 为混凝土绝热温升; τ 为时间。

根据变分原理,热传导问题可以等价地转化为泛函的极值问题,把求解区域 R 划分为有限个单元,所有单元集合后得到方程组:

$$\left(H + \frac{1}{\Delta \tau} R \right) T_{\tau+\Delta \tau} - \frac{1}{\Delta \tau} R T_{\tau} + F_{\tau+\Delta \tau} = 0 \tag{2}$$

求解此方程即可由 τ 时刻的温度值 T_{τ} 得到各结点在 $\tau + \Delta \tau$ 时刻的温度值 $T_{\tau+\Delta \tau}$ 。

由有限元法中的平衡方程可得混凝土温度徐变

应力有限元法基本方程:

$$K \Delta \delta_n = \Delta P_n + \Delta P_n^c + \Delta P_n^T + \Delta P_n^0 \tag{3}$$

式中: K 为结构的刚度矩阵; ΔP_n 为外荷载增量; ΔP_n^c 为徐变变形产生的当量荷载增量; ΔP_n^T 为温度荷载增量; ΔP_n^0 为自生体积变形荷载增量。

由式(3)求得位移增量 $\Delta \delta_n$ 后,应力增量由式(4)计算^[3]。

$$\Delta \sigma_n = \bar{D}_n (B \Delta \delta_n - \eta_n - \Delta \epsilon_n^I - \Delta \epsilon_n^0) \tag{4}$$

2.2 混凝土结构水管冷却等效分析

水管冷却效果受混凝土温度与水管中水温之间差值的控制,差值越大,冷却效果越好;反之,差值小,冷却效果差。因此,影响水管冷却效果的因素除了开始冷却时混凝土温度 T_0 与水管水温 T_w 的差值($T_0 - T_w$)和水泥水化热外,还有一个很重要的因素,即混凝土表面散热。文献[4]中提出了考虑混凝土表面散热对水管冷却效果影响的计算方法。

2.2.1 第1种计算方法

设在 $\Delta \tau$ 内由于混凝土表面散热引起的混凝土平均温度降低为 ΔT_u ,并且假设 ΔT_u 只发生在时段末,从 τ_0 到 τ_n 时间混凝土表面散热对水管冷却效果的影响为

$$T_{in} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta T_{u,i} [1 - \varphi(\tau_n - \tau_i)] \tag{5}$$

2.2.2 第2种计算方法

设由混凝土表面散热引起的混凝土平均温度降低值 $T_u(\tau)$ 在 $\Delta \tau$ 内是线性变化的。经过推导,得从 τ_0 到 τ_n 时间混凝土表面散热使水管冷却效果降低的温度值为

$$T_{in} = \sum_{i=1}^n \Delta T_{u,i} \left[1 - \frac{\tau(\tau_n - \tau_{i-1})}{\Delta \tau_i} \right] \tag{6}$$

3 细骨料品种对大坝温度应力和温控特性的影响

首先研究了无温控措施条件下坝体的温度应力和抗裂安全系数。仿真计算了坝体的温度场,玄武岩砂混凝土坝体的最高温度为 48.8 $^{\circ}\text{C}$,石灰岩砂混凝土坝体的最高温度为 46.0 $^{\circ}\text{C}$,白云岩砂混凝土坝体的最高温度为 47.2 $^{\circ}\text{C}$ 。计算结果表明,玄武岩砂混凝土坝的温度最高,石灰岩砂混凝土坝的温度最低。对比表 1 中 3 种混凝土材料的绝热温升值,坝体温度的高低与混凝土绝热温升的高低相对应。

由温度徐变应力仿真计算结果可知,坝体温度应力突出的部位是基础强约束区。3 种细骨料品种混凝土中玄武岩砂混凝土的温度徐变应力最大,最大拉应力为 2.3 MPa;白云岩砂混凝土次之,最大拉应力为 2.2 MPa;石灰岩砂混凝土最小,最大拉应力

为 1.9 MPa。

单从温度应力的大小不能完全判别各种混凝土材料的优劣,必须从综合反映混凝土材料各种性能的抗裂安全系数方面进行判别。玄武岩砂混凝土坝体的抗裂安全系数为 1.54,石灰岩砂混凝土坝体的抗裂安全系数为 1.91,白云岩砂混凝土坝体的抗裂安全系数为 1.66。研究结果表明,石灰岩砂混凝土坝体的抗裂安全系数优于其他 2 种混凝土坝体,白云岩砂混凝土坝体的抗裂安全系数又优于玄武岩砂混凝土坝体。因此,细骨料品种对混凝土坝体的抗裂安全性具有比较大的影响。

4 混凝土预冷与坝体抗裂安全系数的关系

把混凝土进行预冷,混凝土浇筑温度分别为 10℃, 14℃和 18℃。温度应力仿真计算结果如表 3 所示。图 1 给出了 3 种细骨料品种混凝土材料坝的混凝土浇筑温度与坝体抗裂安全系数的关系曲线^[56]。

表 3 混凝土预冷情况下坝体最大温度拉应力

混凝土浇筑 温度/℃	拉应力/MPa		
	玄武岩砂 混凝土	石灰岩砂 混凝土	白云岩砂 混凝土
10	1.49	1.20	1.43
14	1.71	1.40	1.65
18	1.97	1.62	1.90

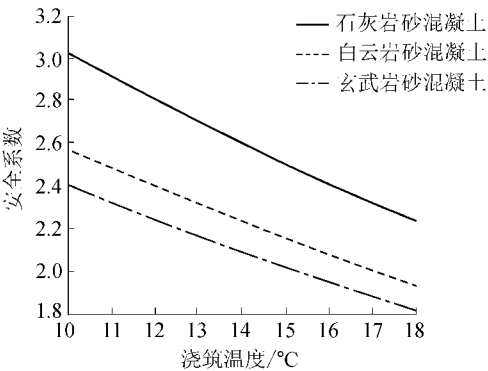


图 1 混凝土浇筑温度与坝体抗裂安全系数的关系(无冷却水管)

研究结果表明,在混凝土预冷情况下,混凝土的浇筑温度越低,坝体的抗裂安全系数越大。随着混凝土浇筑温度的降低,3 种细骨料品种混凝土坝的抗裂安全系数之间的差别逐渐增加;要达到相同的抗裂安全系数,石灰岩砂混凝土需要的温控费用较低,玄武岩砂混凝土需要的温控费用较高,白云岩砂混凝土需要的温控费用介于石灰岩砂混凝土和玄武岩砂混凝土之间。

5 在预冷和水管冷却措施作用下坝体抗裂安全系数的敏感性分析

当有预冷和水管冷却共同作用时,为了比较不

同细骨料品种混凝土坝的温控特性,分别计算了 3 种细骨料品种混凝土材料坝在冷却水管作用下不同浇筑温度时的温度应力和安全系数。冷却水管采用高强聚乙烯(HDPE)管,外径 32 mm,壁厚 2 mm。混凝土一期冷却水温 12℃,浇筑后开始通水,持续通水 15 d。混凝土二期冷却水温 8℃,浇筑后 90 d 开始通水,持续通水冷却到混凝土温度达到灌浆温度。混凝土进行预冷,浇筑温度分别为 10℃, 14℃和 18℃。

温度应力计算结果见表 4。图 2 给出了有水管冷却条件下 3 种细骨料品种混凝土材料坝的浇筑温度与抗裂安全系数的关系曲线。在有水管冷却的情况下,混凝土浇筑温度与坝体抗裂安全系数的变化关系和没有水管冷却时一致。比较图 2 和图 1,增加冷却水管后,混凝土坝体抗裂安全系数有所降低,随着混凝土浇筑温度的提高,安全系数的降低幅度逐渐减小,在浇筑温度约 18℃,有无冷却水管时混凝土坝体抗裂安全系数差别很小。混凝土坝体抗裂安全系数降低的原因是二期冷却使混凝土降温速度比较快,在短期内徐变的作用不能充分发挥,导致温度应力松弛小,温度应力大。对于浇筑温度提高时安全系数的降低逐渐减小的问题,分析其原因,是由于浇筑温度高时一期水管冷却降温幅度大,可以更多地抵消二期冷却带来的应力增加,所以随着混凝土浇筑温度的提高,有冷却水管时的安全系数比无冷却水管时的安全系数的降低幅度逐渐减小。

表 4 在预冷和水管冷却措施作用下坝体最大温度拉应力

混凝土浇筑 温度/℃	拉应力/MPa		
	玄武岩砂 混凝土	石灰岩砂 混凝土	白云岩砂 混凝土
10	1.64	1.30	1.62
14	1.78	1.45	1.77
18	1.97	1.61	1.96

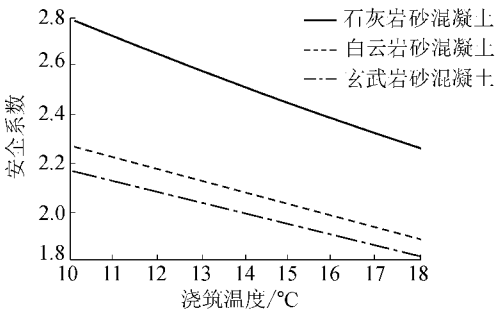


图 2 混凝土浇筑温度与坝体抗裂安全系数的关系(有水管冷却)

6 结 语

通过仿真分析研究表明,石灰岩砂混凝土优于白云岩和玄武岩砂混凝土,白云岩砂(下转第 55 页)

根据以上原因,具体解决方法:①灌浆花孔应呈梅花形布置,避免集中在同一条直线上,在满足施工需要的基础上尽量少布置灌浆花孔且孔径不宜过大;②开钻时要轻压、慢钻,钻进过程应尽量保持匀速,保持冲击回转钻进,避免进行纯冲击钻进;③可适当调整锚杆位置,并根据需要加密。

4.3 注浆泵位置调整

考虑到井下施工空间狭小及多工序、多工种交叉作业,施工初期注浆泵布置在井口,浆液由注浆泵通过输浆管路直接压入锚杆体内。随着开挖深度的增加,浆液自重产生的压力越来越大,造成实际灌浆压力远远大于设计压力,吃浆量明显增大而锚杆孔洞内见不到浆液,大部分浆液扩散到距井壁较远的部位,起不到超前固结、保证井壁稳定的作用。根据现场情况,施工中做出相应调整:①将储浆器和注浆泵固定在同一个支架上;②进行锚杆注浆施工时,将支架通过门机吊至井底,浆液在井口拌制后输送到储浆器,吸入注浆泵;③注浆泵加压将浆液压入锚杆体内,压强控制在 $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 。通过以上措施,有效地解决了灌浆压力过大而导致井壁固结效果不好的问题。

4.4 锚杆施工中孔洞、裂隙的处理

溪洛渡水电站左岸竖井穿越约 50 m 冰川、冰水堆积体($fgl + glQ21$),该地层主要由玄武岩块碎石夹杂角砾砂层组成,部分为钙质接触式胶结。施工过程中存在锚杆穿过孔洞、裂隙等问题。处理措施:①尽可能探明空洞范围、裂隙宽度及走向。②通过锚杆注浆,浆液初始水灰比定为 $0.5:1$ 。单根锚杆灌浆总量超过 1000 L ,流量仍较大且压力没有明显变化

时,该锚杆待浆 2 h 。③ 2 h 后继续注浆,如果流量仍很大,采用砂浆灌注;如果流量减小或压力升高,则继续采用纯水泥浆灌注。④将孔洞、裂隙周围每根锚杆灌注至结束标准。

5 结 语

结合工程自身特点,选择合适的施工器具及合理的施工参数对工程建设具有重要的指导意义。溪洛渡水电站左岸竖井自钻式锚杆施工,通过试验最终确定了灌浆压力、浆液胶凝速度等参数,比较符合该工程的特点,较大程度地发挥了自钻式锚杆施工的作用,取得了良好的工程效益,为以后类似地质条件的竖井施工提供了很好的借鉴。

自钻式锚杆在成本上比砂浆锚杆高,其抗弯能力比砂浆锚杆低,杆体在施工时易在尾部弯曲断裂,这2点需加以改进、提高,使自钻式锚杆在支护工程中得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 郑黎明,赵中伟,包叔平.自钻式锚杆在水电站高边坡支护中的应用[J].人民长江,2007,38(5):27-28.
- [2] 杨永涛.自钻式锚杆在小湾水电站坝肩堆积体中的应用[J].西北水电,2006,22(1):35-37.
- [3] 张光亮,刘雪松.中空自钻式锚杆在小湾导流洞施工中的应用[J].云南水力发电,2006,22(3):42-43.
- [4] DL/T5181—2003 水利水电工程锚喷支护施工规范[S].
- [5] 邓人清.高压富水隧道注浆堵水施工技术及应用[J].地下空间与工程学报,2006,2(2):263-267.

(收稿日期:2009-01-05 编辑:方宇彤)

(上接第13页)

混凝土又优于玄武岩砂混凝土。3种细骨料品种混凝土的抗裂安全系数差别比较大,因此,细骨料品种对混凝土的抗裂安全性具有比较重要的影响。

无论有无水管冷却措施,预冷降温幅度越大,坝体的抗裂安全系数越大。随着混凝土浇筑温度的降低,3种细骨料品种混凝土的抗裂安全系数之间的差别逐渐增加。

为了达到同样的抗裂安全系数,不同细骨料品种混凝土所需要的温控措施的强度也不相同。因此,当有几种细骨料品种可供选择时,必须考虑细骨料品种对大坝温控特性的影响和对温控措施的要求。本文的研究成果可为细骨料品种的优化选择提供依据。

参考文献:

- [1] 中国水利水电科学研究院结构材料研究所.大体积混凝土[M].北京:水利电力出版社,1990:140-169.
- [2] 董福品.混凝土温度应力分析的样条函数法与破开算子法及碾压混凝土坝温度徐变应力研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,1987.
- [3] 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,1999:402-405.
- [4] 董福品.考虑表面散热对冷却效果影响的混凝土结构水管冷却等效分析[J].水利水电技术,2001,32(6):16-19.
- [5] DL5108—1999 混凝土重力坝设计规范[S].
- [6] DL/T5346—2006 混凝土拱坝设计规范[S].

(收稿日期:2009-04-21 编辑:方宇彤)