

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.03.012

三峡电站地下厂房岩锚梁温度应力控制措施探讨

徐跃之,肖汉江,陕亮

(长江科学院材料与结构研究所,湖北武汉 430010)

摘要:以三峡地下电站厂房岩锚梁为研究对象,采用三维有限元数值仿真技术,从岩锚梁混凝土浇筑季节、预应力锚杆加载方式等方面,就如何控制岩锚梁的温度应力进行探讨。认为岩锚梁产生较大温度应力的主要原因是预应力锚杆极大地增加了围岩对岩锚梁的约束作用,限制了梁体的温度变形;为有效降低岩锚梁的温度应力,应尽量安排在低温季节浇筑岩锚梁混凝土,采取分期加载或“卸载—恢复预应力”等温控措施和施工工艺。

关键词:三峡电站;地下厂房;岩锚梁;温度应力

中图分类号:TV315;TV731.6 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2008)03-0050-04

Temperature stress control measures for rock anchor beam in the underground powerhouse of the Three Gorges Project//XU Yue-zhi, XIAO Han-jiang, SHAN Liang(Department of Material and Structure, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The problem of how to control the temperature stress on a rock anchor beam is analyzed with 3D FEM technology and with consideration of concrete-pouring season, pre-stressed loading means, and other factors, using a rock anchor beam in the underground powerhouse of the Three Gorges Project as an example. The results show that the pre-stressed anchor greatly enhances the constraint and restricts the temperature deformation of the beam. To deduce the temperature stress on the rock anchor beam efficiently, some measures should be taken: the pouring of concrete in a low-temperature season, application of the pre-stress in several stages and use of load-unload-restore pre-stressed technology.

Key words: Three Gorges Power Station; underground powerhouse; rock anchor beam; temperature stress

岩锚梁是岩壁吊车梁的简称,它是利用预应力锚杆将钢筋混凝土梁体锚固在岩壁上,吊车的全部荷载通过锚杆和钢筋混凝土吊车梁与岩石接触面上的摩擦传递到岩体上。采用岩锚梁这种结构形式,无需支撑立柱,可充分利用围岩的承载能力,不仅能减少地下厂房开挖跨度,有利于围岩稳定,减少开挖工程量,而且可以提前安装吊车,给厂房混凝土浇筑和机组安装带来方便,从而加快施工进度,节约投资,经济效益十分显著。

作为一种新型的承力结构,岩锚梁于 20 世纪 70 年代首先在挪威使用^[1],1986 年首次在国内鲁布革水电站地下厂房中成功应用,随后广州抽水蓄能电站、大广坝电站、东风电站等电站地下厂房均采用了岩锚梁,显示了其良好的安全及经济性能^[2]。当前,我国在建的三峡电站、龙滩电站、索风营电站等一些大型、超大型电站的地下厂房都采用了岩锚梁作为

吊车的承力结构^[3-7]。同时,岩锚梁在一些路基加固工程中也得到了应用^[8]。

岩锚梁一般不设固定尺寸的永久缝,只在可能出现变形突变的位置设置永久缝。岩锚梁混凝土等级一般为 C30,级配为二级配,胶凝材料用量较高,混凝土的水化热温升亦很高,温降也大,并且岩锚梁在长度方向的尺寸较大,预应力锚杆又使梁体与岩体紧紧贴在一起,其自身变形受到极大约束,因此温度应力不可忽视。根据国内的工程实例,一些地下电站厂房岩锚梁发生的裂缝与温度应力有很大的关系^[9-10]。岩锚梁的温度应力大小取决于原材料、环境条件、温控措施和施工工艺,当原材料和环境条件一定后,影响温度应力大小的主要是温控措施和施工工艺。本文以三峡电站地下厂房岩锚梁为研究对象,采用三维有限元数值仿真技术,从岩锚梁混凝土浇筑季节、预应力锚杆加载时间、大小和工艺等方

面,就如何控制岩锚梁的温度应力进行探讨。

1 计算模型及计算条件

1.1 计算模型

沿梁轴线方向取 80 m 长梁段为计算对象,岩体向上、向下、向里各取 10 m 作为基础。计算模型断面网格如图 1 所示,梁体断面尺寸为 2.15 m × 3.53 m。坐标轴方向:岩锚梁轴线方向为 y 向,水平方向为 x 向, z 向为竖直方向,原点在计算模型的端头断面上。锚杆布置:上部按 $\varnothing 36 @ 60$ 布置 2 排长为 12 m 的锚杆,下部按 $\varnothing 32 @ 75$ 布置 1 排长为 9 m 的锚杆。

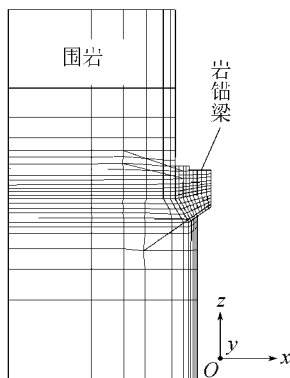


图 1 计算网格

1.2 材料参数

混凝土导温系数为 $0.0833 \text{ m}^2/\text{d}$,比热容为 $959 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,线膨胀系数为 $0.85 \times 10^{-5} ^\circ\text{C}^{-1}$,最终弹性模量取 40 GPa,基岩弹性模量取 35 GPa,考虑开挖影响基岩表层弹性模量降低 10%,锚杆弹性模量为 210 GPa;锚杆无黏接长度为 380 cm(基岩内 330 cm,混凝土内 50 cm);混凝土和基岩接触面摩擦因数 $f = 1.0$,黏结力 $c = 1.2 \text{ MPa}$,法向抗拉强度取 1.0 MPa 。

1.3 混凝土徐变度

混凝土徐变度为

$$\alpha(t, \tau) = \left(C_1 + \frac{D_1}{\tau^{m_1}} \right) [1 - e^{-k_1(t-\tau)}] + \left(C_2 + \frac{D_2}{\tau^{m_2}} \right) [1 - e^{-k_2(t-\tau)}]$$

式中: $\alpha(t, \tau)$ 为混凝土徐变度, 10^{-6} MPa^{-1} ; τ 为混凝土加荷龄期, d; t 为混凝土龄期, d; $C_1, C_2, D_1, D_2, k_1, k_2, m_1, m_2$ 均为试验拟合系数。

1.4 通水冷却

在梁的中心部位埋设 1 根内径为 25 mm 的冷却水管,每仓设单独水管。在混凝土水化热温升达到最高温度以前,通水流量为 40 L/min,达到最高温度以后通水流量为 20 L/min。通水温度为 $10 \sim 12 ^\circ\text{C}$,梁体温度降到 $30 ^\circ\text{C}$ 即停止通水冷却。

1.5 边界条件

温度计算时与气温接触的边界按第三类边界条件处理,基岩四周及底部按绝热处理,梁体两侧也按绝热处理。地下厂房的环境温度按 $21 \sim 29 ^\circ\text{C}$ 变化考虑,年温度按正弦曲线变化。应力计算时基岩内侧取全约束,其余侧面取法向约束。

1.6 浇筑方式及入仓温度

80 m 长岩锚梁按每 8 m 分 1 段,共 10 段,分 4 批跳仓浇筑,第 1 批同时浇筑第 1、3、5 段,第 2 批同时浇筑第 2、4 段,第 3 批同时浇筑第 7、9 段,第 4 批同时浇筑第 6、8、10 段,各批次间的间歇期为 4 d。每段梁的预应力均在混凝土第 21 d 龄期施加。混凝土入仓温度按 $12 \sim 14 ^\circ\text{C}$ 控制。

2 计算方法

温度场计算:先计算在外界气温作用下的岩体准稳定温度场,在此基础上进行模拟梁体混凝土施工过程的温度场仿真计算,考虑了环境温度变化、水泥水化热温升、通水冷却等因素。瞬态温度场的计算在空间上用有限元离散,在时间上采用向后差分的隐式差分格式^[11]。

在获得基岩与梁体的温度场后进行应力与变形分析。将岩体、预应力锚杆和梁体作为整体进行仿真计算,从混凝土浇筑开始至运行期,模拟梁体浇筑和锚杆施加预应力过程以及岩体与梁体间的接触等,考虑了自重、温度和徐变的影响。计算中采用初应变法^[11]考虑徐变的影响,接触面单元物理方程见文献^[12]。

整个计算模型包括梁体、锚杆和基岩,并模拟浇筑过程,有近 10 万个节点,不仅计算规模大、计算时段多,而且要进行接触问题非线性迭代,计算工作量相当大。因此,计算程序中采用了对称逐步超松弛预处理共轭梯度迭代法(SSOR-PCG)的改进迭代格式作为求解器^[13],极大地提高了计算效率。

3 计算成果分析

3.1 锚杆预应力大小对梁体轴向应力的影响

岩锚梁是利用预应力锚杆将梁体锚固在岩壁上,通过锚杆和围岩对梁体的约束将载荷传递到岩体上,而围岩对梁体的约束作用限制了梁体温度变形,特别是轴线方向的变形,使梁体产生温度应力(主要是轴线方向的应力),所以锚杆预应力的大小对梁体温度应力有很大影响。为了分析梁体温度应力对锚杆预应力的敏感性,计算了不施加锚杆预应力和锚杆预应力分别为 50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN 等 5 种工况的梁体轴向应力,梁体典型断面最大轴

向应力见表 1。由表 1 可见,不施加锚杆预应力时,梁体最大应力为 0.25 MPa,锚杆预应力为 50 kN,100 kN,150 kN,200 kN 时,最大应力分别为 2.53 MPa,2.58 MPa,2.69 MPa,2.93 MPa。显然,施加了锚杆预应力后梁体的应力显著增大。而且,梁体的最大应力随锚杆预应力的增加而增加,但锚杆预应力由 50 kN 增加到 200 kN 时,梁体的最大应力只增加了 0.4 MPa,增加的幅度不大。

表 1 预应力大小对梁体典型断面最大轴向应力的影响

预应力/ kN	最大轴向应力 /MPa						
	y = 15.5 m	y = 24.5 m	y = 31.4 m	y = 40.7 m	y = 47.3 m	y = 56.6 m	y = 63.5 m
0	0.19	0.24	0.16	0.19	0.18	0.25	0.19
50	2.45	2.43	2.53	2.39	2.38	2.38	1.95
100	2.46	2.43	2.49	2.33	2.39	2.58	1.89
150	2.60	2.62	2.62	2.51	2.60	2.69	2.19
200	2.72	2.75	2.75	2.71	2.72	2.93	2.61

3.2 分期加载锚杆预应力对梁体轴向应力的影响

由表 1 可见一次性对梁体锚杆加载 50 kN 以上的预应力,在温度荷载的作用下,梁体的轴向应力几乎都超过了 C30 混凝土的强度标准值(轴心抗拉强度 2.00 MPa)。由于锚杆预应力作用对梁体轴向应力的影响敏感,考虑分期加载锚杆预应力,即在保证锚梁结构安全的前提下,初期加载尽可能小的锚杆预应力,待梁体浇筑后的第一个低温季节时再将锚杆预应力加载到位,以削弱温降期间围岩对梁体的约束作用,从而达到控制梁体温度应力的目的。表 2 为初期分别加载 10 kN 和 30 kN 的锚杆预应力,待梁体浇筑后的第一个低温季节时再加载到 50 kN 的情况下,梁体典型断面的最大轴向应力。由表 2 可见,梁体各典型断面最大轴向应力都低于 C30 混凝土的强度标准值。

表 2 分期加载锚杆预应力梁体典型断面最大轴向应力

初期 加载/ kN	最大轴向应力 /MPa						
	y = 15.5 m	y = 24.5 m	y = 31.4 m	y = 40.7 m	y = 47.3 m	y = 56.6 m	y = 63.5 m
10	1.45	1.37	1.38	1.22	1.35	1.40	1.50
30	1.91	1.75	1.66	1.53	1.57	1.60	1.51

注:两工况后期均加载至 50kN。

图 2 为分期加载和一次性加载锚杆预应力时计算所得的梁体最大拉应力部位应力历程曲线。由图 2 可见,在初期加载 10 kN 预应力到后期加载至 50 kN 预应力的这段时间内,梁体的应力增加非常缓慢,而初期加载 30 kN 预应力的梁体在加载时间内应力增加的幅度较大,当锚杆预应力加载至 50 kN 后,梁体的应力呈陡升趋势,直到环境温度下降到最低点截止。之后,当环境温度上升时,梁体的应力向压的方向发展;当环境温度下降时,向拉的方向发展,呈周期变化。由此可以认为,加载预应力的最佳

时间应该在环境温度最低的时候。由图 2 还可看出,与一次性加载锚杆预应力相比,分期加载锚杆预应力的梁体应力有明显减小。

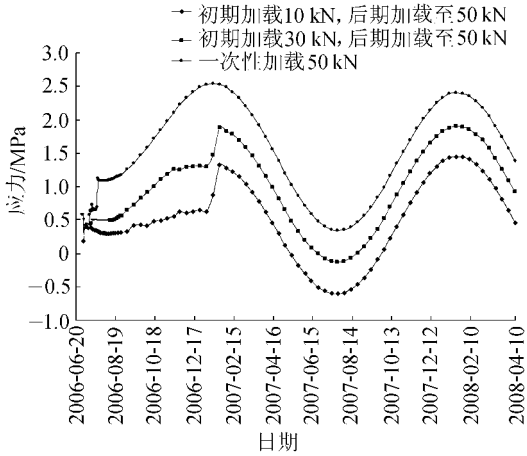


图 2 梁体最大拉应力部位应力历程

3.3 “卸载—恢复预应力”对梁体轴向应力的影响

图 2 中一次性加载 50 kN 预应力的应力历程曲线表明,在锚杆预应力的作用下,随着环境温度的降低,梁体的拉应力将会超过 C30 混凝土的强度标准值,且拉应力主要是在梁体降温期间产生的。为减小梁体的拉应力,提出在梁体降温期间卸掉锚杆预应力,然后在低温季节恢复的措施(即“卸载—恢复预应力”)。具体做法是在环境温度降低的过程中,对已加载 50 kN 预应力的锚杆做卸载处理,让梁体充分自由变形,以释放梁体的拉应力,然后再恢复至原预应力。这个“卸载—恢复预应力”措施可以根据梁体应力的变化过程多次实施,但最后一次恢复原应力的时间应该选在环境温度最低的时候。例如:自梁体开始浇筑起,分别在第 90 d 和第 190 d 对梁体做预应力卸载处理,并分别在第 110 d 和第 210 d 对梁体做预应力恢复处理,其他计算条件同 3.1,梁体各典型断面最大轴向应力见表 3。由表 3 可知,各断面最大轴向应力均低于 C30 混凝土的强度标准值。

表 3 不同温控措施和施工工艺下

断 面	典型断面的最大轴向应力 /MPa		
	高温季节、 一次性加载 50 kN 预应力	高温季节、 二次“卸载— 恢复预应力”	低温季节、 一次性加载 50 kN 预应力
y = 15.5 m	2.45	1.48	1.09
y = 24.5 m	2.43	1.58	1.04
y = 31.4 m	2.53	1.55	1.05
y = 40.7 m	2.39	1.43	0.93
y = 47.3 m	2.38	1.35	1.11
y = 56.6 m	2.38	1.36	1.12
y = 63.5 m	1.95	1.50	1.05

图 3 为采用“卸载—恢复预应力”措施计算得到的典型点应力历程曲线。由图 3 可见,在每次卸载

时,梁体的拉应力都有一次较大的释放,而每次恢复原预应力后,梁体的拉应力又随着环境温度的降低回升,但到最低温度后,梁体应力开始向压的方向发展,并随着气温周期变化。

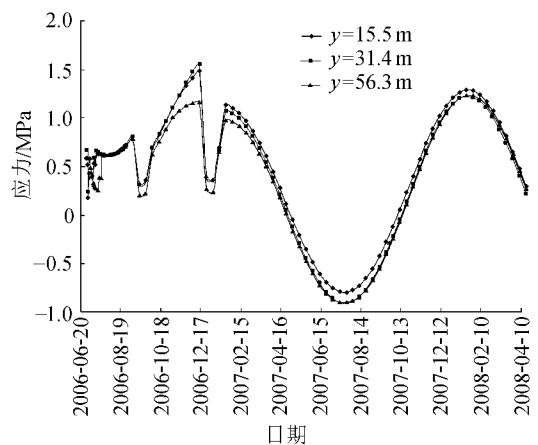


图3 二次卸载预应力典型点应力历程

3.4 浇筑季节对梁体轴向应力的影响

为了控制温度应力,约束区大体积混凝土一般安排在低温季节浇筑,但由于施工计划和工程进度的需要,不可能将岩锚梁混凝土全部安排在低温季节浇筑,以上分析都是基于将梁体混凝土的浇筑时间安排在高温季节上的。为了比较混凝土浇筑季节对梁体温度应力的影响,计算了低温季节浇筑混凝土梁体典型断面的最大轴向应力(锚杆施加50kN的预应力,其他计算条件同3.1),计算结果见表3,梁体典型点温度应力的历程见图4。由表3可知,低温季节浇筑梁体混凝土和施加锚杆预应力,梁体各典型断面的最大轴向应力要比高温季节浇筑梁体混凝土时小得多。所以,尽量安排在低温季节浇筑梁体混凝土是控制温度应力的有效手段。

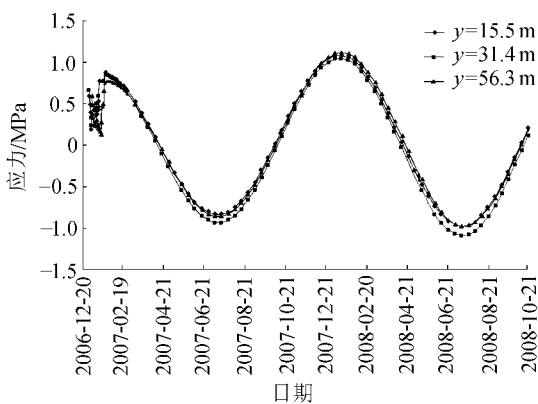


图4 低温季节浇筑岩锚梁典型点应力历程

4 结 语

本文的计算分析表明,岩锚梁产生较大温度应力的主要原因是预应力锚杆极大地增加了围岩对岩锚梁的约束作用,限制了梁体的温度变形。为了有

效地控制岩锚梁的温度应力,当原材料和环境条件一定后,在施工计划和工程进度允许的条件下,尽量安排在低温季节浇筑梁体混凝土;若在高温季节浇筑梁体混凝土,在保证岩锚梁结构安全的前提下,初期加载尽可能小,然后分期加载锚杆预应力,待梁体温度下降到准稳定温度后,在低温季节将锚杆预应力加载到位;也可以采用“卸载—恢复预应力”措施,即在梁体降温期间分次卸掉部分锚杆预应力,然后在梁体温度下降到稳定温度后,在低温季节恢复预应力。通过这些温控措施和施工工艺,可以有效地降低岩锚梁的温度应力,保证岩锚梁的安全运行。

参考文献:

- [1] LIEN R, KRISTIANSEN J, PRAN L S. Suspended support for crane rails in Norwegian underground power-houses [J]. International Water Power and Dam Construction, 1990, 42(4): 48-50.
- [2] 陈明, 卢文波, 易长平, 等. 大型地下厂房岩锚梁爆破安全控制标准研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 499-504.
- [3] 刘燕波, 陈敦科, 尹俊宏. 三峡工程地下电站岩锚梁岩台开挖技术研究 [J]. 水利水电快报, 2006, 27(20): 16-18.
- [4] 张小春, 洪国平, 梁德平. 龙滩水电站地下厂房岩锚梁开挖质量控制 [J]. 中南水力发电, 2004(2): 57-59.
- [5] 王宝仲. 索风营水电站岩锚梁混凝土温度裂缝与控制 [J]. 贵州水力发电, 2006, 20(4): 41-42.
- [6] 郭培华. 拉西瓦地下厂房岩锚梁开挖爆破优化与实施 [J]. 爆破, 2005, 22(4): 38-40.
- [7] 孙林中. 小湾工程地下厂房岩锚梁施工 [J]. 水利水电施工, 2005(3): 29-30.
- [8] 王连有, 王飞. 岩锚梁在路基加固工程中的应用 [J]. 甘肃水利水电技术, 2003, 39(3): 255.
- [9] 黎山, 周钧平, 谢代翠, 等. 索风营水电站地下厂房岩锚梁裂缝成因分析及预防对策 [J]. 中南水力发电, 2006(4): 60-61.
- [10] 杨定华, 王朝晴, 欧阳涛. 江垭地下主厂房岩锚梁安全性态分析 [J]. 人民长江, 2000, 31(4): 11-12.
- [11] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [12] 徐跃之, 黄作森, 林绍忠. 三峡永久船闸第三闸首接触问题仿真计算 [J]. 长江科学院院报, 1998, 15(4): 23-27.
- [13] 林绍忠. 用预处理共轭梯度法求解有限元方程组及程序设计 [J]. 河海大学学报, 1998, 26(5): 112-115.

(收稿日期 2007-09-20 编辑 骆超)

