混凝土面板堆石坝施工期面板 温度应力仿真分析

王瑞骏,王党在,陈尧隆

(西安理工大学 水利水电学院,陕西西安 710048)

[摘 要] 结合在建的公伯峡水电站混凝土面板堆石坝,考虑影响面板温度场及温度应力的各项因素,实时 模拟面板的施工过程,对施工期面板的温度场和温度应力进行了全过程仿真分析。结果表明,在面板混凝土浇筑初 期,面板各个层面(表面、中心)的最高温升与面板厚度有关,且面板中心的最高温升大于面板表面的最高温升。此 后,面板各个层面的结点温度均迅速下降,表面降温比中心快。最大压应力发生在最高温升时的面板底部中心层面 上,最大拉应力发生在最高温升后出现最大温降时的面板中部表面上。

[关键词] 混凝土面板; 堆石坝; 施工期; 面板温度应力 [中图分类号] TV 431 [文献标识码] A

影响面板堆石坝质量及安全的主要因素是面板 裂缝。关于面板堆石坝面板裂缝成因的不少研究成 果表明^[1-3],面板裂缝尤其是贯穿性裂缝的产生,主 要是由温度应力引起的。但在以往关于面板堆石坝 应力变形的研究分析中^[1],一般均认为面板尺寸相 对较小,因此将面板温度应力忽略不计,这显然与面 板坝尤其是高面板坝面板的实际应力变形情况不 符。作者拟结合在建的公伯峡水电站混凝土面板堆 石坝,考虑影响面板温度场及温度应力的各项因素, 实时模拟面板的施工过程,对施工期面板的温度场 和温度应力进行全过程仿真分析,以期获得施工期 面板温度场及温度应力的变化及分布规律。

1 计算原理与计算条件

1.1 温度场与温度应力计算原理

坝体温度场 *T* (*x*, *y*, *z*, *t*) 满足下列热传导方程 及相应的初始条件和边界条件^[4,5]:

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

初始条件: $T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$ 边界条件:

第一类边界条件: *T*(*t*) = *f*(*t*), *f*(*t*)为已知温度 变化;

第二类边界条件: -
$$\lambda(\frac{\partial T}{\partial n}) = f_1(t), f_1(t)$$
为已

[文章编号] 1671-9387(2004)10-0123-04

知热流量变化,对绝热边界有 $\frac{\partial T}{\partial n} = 0;$

第三类边界条件: - $\lambda(\frac{\partial T}{\partial n}) = \beta(T - T_a), T_a$ 为 气温。

式中, *T* 为温度, λ 为导热系数, *a* 为导温系数, *t* 为时 间; β 为表面放热系数; *n* 为表面法线方向, θ 为混凝 土的绝热温升。对计算域和时间域进行离散, 采用加 权余量法, 并经积分、化简和整理后, 可得由 Δt 时 段初始结点温度{*T*}。计算时段末结点温度{*T*} 的 有限元通式^[5]:

$$[H] + \frac{[c]}{\Delta t} \{T\}_1 = \{p\}_1 + \frac{[c]}{\Delta t} \{T\}_0$$
 (2)

式中各系数矩阵(向量)的计算详见文献[5]。

采用初应变增量有限元法,考虑面板混凝土的 徐变变形及自生体积变形, Δt 时段内的结点温度徐 变应力增量{ $\Delta \sigma_t$ }可按下式计算^[5]:

$$\{\Delta \sigma_n\} = [D_n] ([B] \{\Delta \delta_n\} - \{\Delta \epsilon_n^c\} \}$$
(3)

式中, [D_n]为弹性矩阵, [B]为应变矩阵, { Δc }为徐 变变形应变增量, { Δc }为温度变形应变增量, { Δc } 为自生体积变形应变增量, { $\Delta \delta$ }为位移增量, 可由 下式求得^[5]:

$$[k] \{ \Delta \delta_{n} \} = \{ \Delta p_{n} \} + \{ \Delta p_{n}^{c} \} + \{ \Delta p_{n}^{T} \} + \{ \Delta p_{n}^{0} \}$$
(4)

^{* [}收稿日期] 2004-02-09

[[]作者简介] 王瑞骏(1963-), 男, 陕西宝鸡人, 副教授, 在读博士, 主要从事坝工应力及水工结构仿真研究。

^{© 1994-2010} China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中, [k]为结构刚度矩阵; { Δp_n }为外荷载增量; { Δp_n^s }为徐变变形产生的当量荷载增量; { Δp_n^T }为温 度变形当量荷载增量; { Δp_n^s }为自生体积变形当量 荷载增量。

1.2 计算条件

在建的公伯峡水电站混凝土面板堆石坝最大坝 高 139 m,坝顶全长 429 m,坝顶宽 10 m,上游坝坡 比 1 1.4,下游局部坝坡比 1 1.5~1 1.4,综合 坝坡比 1 1.81。钢筋混凝土面板顶端厚 0.3 m,底 部最大计算厚度 0.76 m。面板按坝体应力变形计算 结果设置竖向缝,受拉区竖缝间距 6 m,受压区竖缝 间距 12 m, 沿高程方向不设缝, 这样, 大坝混凝土面 板共分为 38 块, 分缝长度共约 5 000 m, 最大单块长 度约 219 m。面板混凝土标号为C25, 面板内配置一 层双向钢筋^[6]。按照施工进度安排^[7], 面板混凝土浇 筑施工时段选定为 2004-04-01~06-30, 8 月中旬水 库开始蓄水, 9 月初发电。面板混凝土施工采用分序 跳仓、单块一次性滑模浇筑的施工方法, 滑模平均滑 升速度为 1.5 m/h。公伯峡坝址区的气温、水温、地 温及寒潮等气象资料采用坝址下游的循化县气象站 统计资料^[6]。温度场及温度应力计算中采用的坝体 材料热力学参数见表 1^[8]。

表1 坝体材料热力学参数

TTT	Table 1 Thermodynamic parameters of dam body materials					
材料 M aterials	容重())/ (kg·m ⁻³) Bulk density	平均比热(c)/ (kJ・kg ⁻¹ ・ - 1) A verage specific heat	导温系数(a)/ (m ² · h ⁻¹) Themal diffusivity	导热系数 $(\lambda)/(kJ \cdot m^{-1} \cdot m^{-1})$ h ⁻¹ ···) Them al coefficiet of conduction	表面放热 系数(β)/ $(kJ \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot h^{-1} \cdot h^{-1})$ Surface coeffffici- ent of heat evolution	线膨胀系数(@/ (×10 ^{-6 - 1}) Linear expansion coefficient
面板、趾板混凝土 Face slab, toe slab concrete	2 397	0 979 3	0 003 76	8 83	83.72	10 05
垫层料、过渡料 Layer filling m aterials	2 150	0.88	0 003 27	6 18	41. 20	5. 03
堆石料 Rock-filling ma- terials	2 200	0 735	0 002 73	4 42	29.47	7.04
基岩Bed-rocks	2 450	1. 05	0 003 09	7.95	53 0	9. 05

面板、趾板混凝土弹性模量为^[8]:

$$E(\tau) = 3 \ 322 \times (1 - 0 \ 536e^{-0 \ 148 \ 5\tau}) \times 10^4 \,(\text{M Pa})$$
(5)

面板、**趾板混凝土绝热温升为^[8]:**

 $\theta = 42 \ 717 \tau / (2 \ 035 \ 4 + \tau)$ (6)

式(5),(6)中, **r**为混凝土龄期(d)。

面板、趾板混凝土的徐变度采用文献[8]的试验 曲线结果。

1.3 计算方法及有限元网格剖分

由于每块面板是独立且一次性连续浇筑的,而 且相邻块之间的浇筑时间相差 14 d 左右^[7],故相邻 面板块之间温度场的相互影响很小,基本可以忽略 不计;同时,由于面板沿坝轴线方向分缝,呈平面受 力状态,所以相邻面板块之间温度应力的相互影响 也很小。因此,选取大坝最大剖面(标准剖面)按平面 问题进行面板温度场和温度应力的非线性有限元分 析,采用4结点等参元对大坝标准剖面进行网格剖 分。为了保证面板单元的计算精度,将面板分三层且 按照使单元各边大致正交的原则进行面板单元的剖 分。面板下游的垫层及过渡层,按照网格从密到疏的 原则逐步渐变。同时,在趾板下部的岩石地基中,将 网格适当加密。

2 施工期面板温度场计算与结果分析

面板混凝土浇筑初期,大坝最大剖面面板表面 和中心不同高程处的结点温度随时间的变化过程分 别见图 1 和图 2。从图 1 可以看出, 混凝土浇筑后面 板表面各高程处的结点温度急剧升高,从初始温度 上升到最高温度的时间均大致为 7 h。结点最高温 升值与面板厚度有关,厚度较大的面板底部(近趾板 处)表面最高温升为 13.7 , 而厚度较薄的面板顶 部表面最高温升为 12 3 。产生这种温升快、最高 温升值与面板厚度大体成正比现象的原因,在于所 采用的混凝土的水化热特性。达到最高温升值后,由 于面板表面散热,因此导致表面各结点温度又迅速 下降,大致12 d 左右降到与气温基本一致。由此产 生的面板表面最大温降在底部为11.5,在顶部为 9.9 。从图2可以看出,混凝土浇筑后面板中心各 高程处的结点温度急剧升高,但比表面的温升时间 长,中心各点升温时间约10h。与表面类似,面板中 心结点最高温升值也与面板厚度有关,厚度较大的 面板底部(近趾板处)中心最高温升为 25.1 , 而厚 度较薄的面板顶部中心最高温升为 20.5 ,其原因 与面板表面相同。达到最高温升值后,同样由于面板 3

24

表面散热, 因此导致面板中心各结点温度快速下降, 但降温速度要比表面慢, 面板中心各结点约需 15 d



20 Cemperature 猫度/C 16 12 8 4 04-05 04-11 04-17 04-23 04-29 05-05 日期 Date 图 1 浇筑初期面板不同高程表面温度历时 -•-.1 889.6 m; ---.1 931.0 m; ---.1 972.4 m; ------. 气温;----.1 910、3 m;---.1 951.7 m; -+-.1 993.1 m Fig. 1 Time graph of face-plate surface temperature at the beginning of concrete placement $- \bullet - .1$ 889.6 m; - - .1 931.0 m; $- \Box - .1$ 972.4 m; -----. Air temperature; -▲--.1 910. 3 m; -×-.1 951. 7 m; -+-.1 993.1 m 施工期面板温度应力计算及结果分 析 根据上述面板温度场的变化规律,温度应力分 0.5 Maximum principal stress 0.1 最大主应/Mpa -0.3 -0.7 -1.1 0.7 1 860 1 880 1 900 1 920 1 940 1 960 1 980 2 000 2 020 高程/m Altitude 图 3 最高温升时最大主应力分布



从图 3 可以看出,由于面板表面和中心最高温 升均发生在面板底部(近趾板处)的各自相应位置, 此时面板其他部分尚未浇筑,所以此时面板其他部 分应力为零。发生最高温升时,面板表面和中心均在 发生最高温升的对应位置产生最大压应力。其中,面 板表面的最大压应力为- 0 43 M Pa,面板中心的最 大压应力为- 1.29 M Pa。表明表面最大压应力小于



析的重点时刻应是最高温升时及此后的最大温降 时。面板表面和中心最高温升及最大温降时最大主 应力沿各自层面的分布情况见图 3 和图 4。





——,表面;----,中心



at face-plate surface and center when the maximum temperature drop is over

----- Surface : ----. Center

中心最大压应力,其原因是面板底部中心最高温升 (25.1)大于表面最高温升(13.7)。从图4可以 看出,发生最大温降时,由于此时面板整体处于降温 阶段,所以在面板表面和中心均出现拉应力。而且, 由于面板顶部为自由端,底部设有周边缝,面板伸缩 时可以自由变形,因此,面板因温降而收缩时的最大 拉应力发生在面板中部,即在其高程约为坝高一半

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的位置。由于面板表面收缩受到面板中心的约束,因此面板表面最大拉应力大于面板中心最大拉应力, 面板表面的最大拉应力为0 32 M Pa,面板中心的最 大拉应力为0 23 M Pa。

4 结 语

面板混凝土浇筑初期,面板各个层面(表面、中心)的最高温升与面板厚度有关,厚度较大的面板底 部最高温升大,厚度较薄的面板顶部最高温升较小; 而且,面板中心的最高温升大于面板表面的最高温 升。在浇筑初期的最高温升后,面板各个层面的结点 温度均迅速下降,发生最大温降,直到与气温基本一 致。就面板各个层面的降温速率相比较,表面降温 快,中心次之。施工期面板的最大压应力发生在最高 温升时的面板底部中心层面上;最大拉应力发生在 最高温升后出现最大温降时的面板中部表面上。

作者从偏安全的角度出发,未考虑面板表面保 护措施的保温作用。关于保温作用与面板温度场和 温度应力的相关性问题,笔者拟另文叙述。

[参考文献]

- [1] 蒋国澄,傅志安,凤家骥 混凝土面板坝工程[M]]武汉:湖北科学技术出版社,1997.
- [2] 麦家煊, 孙立勋 西北口堆石坝面板裂缝成因的研究[J]. 水利水电技术, 1999, (5): 32-34
- [3] 张国新, 张丙印, 王光纶 混凝土面板堆石坝温度应力研究[J] 水利水电技术, 2001, (7): 1-5.
- [4] 朱伯芳, 王同生, 丁宝瑛, 等. 水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1976
- [5] 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.
- [6] 黄河公伯峡水电站工程混凝土面板堆石坝设计说明[R]. 西安: 国家电力公司西北勘测设计研究院, 2001.
- [7] 公伯峡水电站混凝土面板堆石坝工程混凝土面板一次性施工技术研究补充报告R] 西安: 陕西省水电工程局(集团)公司, 2002
- [8] 公伯峡水电站工程混凝土配合比及其性能试验报告[R]. 西安: 国家电力公司西北勘测设计研究院工程科研实验院, 2001.

Simulation analysis on slab's them al stress of CFRD in construction period

WANG Rui-jun, WANG Dang-zai, CHEN Yao-long

(Institute of W ater Resources and Hydro-electric Engineering, X i an University of Technology, Shaanxi, X i an 710048, China)

Abstract Combining with the building Gongboxia CFRD and considering each factor affecting the temperature field and them al stress of slabs, the construction process of slabs is, in real time, simulated A lso, the simulation analysis is made for the complete process of temperature field and temperature stress of slabs in construction period The results show that at the beginning of concrete placement, the maximum temperature rises for different layers (surface and center) of slabs are related to the thickness of slabs, and the maximum temperature rise of slab center is larger than that of slab surface The maximum compressive stress occurs on the center layer of slab bottom in the time of the maximum temperature rise, the maximum tensile stress occurs on the surface of slab center when the maximum temperature drop happens, after the maximum temperature rise occurs

Key words: concrete slab; rockfill dam; construction period; them al stress of slab