

气温骤降条件下混凝土面板温度应力 及其保护措施研究

王瑞骏,李炎隆,焦丽芳,田 艳

(西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

[摘 要] 结合某在建的混凝土面板堆石坝,针对施工期日温差及发生寒潮等气温骤降情况,进行了气温骤降条件下面板温度场及温度应力的全过程仿真分析。结果表明,在气温骤降条件下,面板表面及中心的温度将随气温骤降的发生而持续降低,其中面板表面温度降幅最大;此时面板表面和中心均出现拉应力,面板表面的最大主应力大于面板中心的最大主应力;面板表面和中心的最大主应力均发生在高程约为坝高一半的位置。采取保护措施,可以明显削减气温骤降所产生的面板降温幅度及最大主应力增幅,保护措施越强其削减效果越明显。

[关键词] 施工期;气温骤降;堆石坝;混凝土面板;温度应力

[中图分类号] TU755.7

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)07-0213-06

Research on the concrete face slab temperature stress and the protective measures under the condition of temperature sudden drop

WANG Rui-jun, LI Yan-long, JIAO Li-fang, TIAN Yan

(Institute of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract : Combined with a concrete face rock-fill dam in process, the simulation analysis on the face slab's temperature field and temperature stress is processed in connection with the condition of temperature sudden drop caused by daytime temperature differences and cold wave and so on during the construction period. The result indicates that under the condition of temperature sudden drop, the temperature of face slab's surface and centre will fall consecutively along with the temperature sudden drop, and the face slab's surface temperature drop-out range will reach maximum; under this condition, the tensile stress appears in the face slab's surface and centre, the maximum principal stress in the face slab's surface is larger than that in the face slab's center; the maximum principal stress in the face slab's surface and centre both occurs in the position that the elevation equals approximately to half of the dam's height. Taking protective measures can obviously reduce the face slab's surface temperature drop-out range and the maximum principal stress amplification caused by temperature sudden drop, and the stronger protective measures are, the more obvious reduced effect is.

Key words : construction period; temperature sudden drop; rock-fill dam; concrete face slab; temperature stress

对混凝土面板堆石坝面板裂缝成因的研究成果表明,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^[1-5]。面板的温度应力产生于内外温差和均匀温降两个方面。一般认为,由日温差及

* [收稿日期] 2006-10-13

[作者简介] 王瑞骏(1963 -),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,主要从事水工结构应力分析及计算机模拟研究。

寒潮等气温骤降因素产生的温度应力,主要使面板产生表面裂缝,不会产生贯穿性裂缝^[6-8]。但如果由日温差及寒潮所产生的气温骤降发生在施工期,此时由于面板混凝土内部水化热升温较高而自身强度又较低,那么由此产生的温度应力不仅可能使面板产生表面裂缝,而且可能促使面板产生贯穿性裂缝。因此,对于混凝土面板堆石坝工程,研究分析在气温骤降的较不利条件下,面板温度场和温度应力的变化与分布规律,并探讨在此条件下的面板表面保护措施,对工程设计与施工具有重要的指导意义。

1 计算目的、原理与计算条件

1.1 计算对象与目的

某水电站在建的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,上游坝坡坡比 1 1.4,下游局部坝坡 1 1.5~1 1.4,综合坝

坡 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,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。大坝标准剖面见图 1。按照施工进度安排,面板混凝土浇筑施工时段选定为 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^[9]。

本文拟结合该混凝土面板堆石坝,针对施工期可能发生的较为不利的日温差及寒潮情况,对气温骤降条件下混凝土面板温度场和温度应力的变化与分布规律、温度应力与面板表面保护措施的相关性等问题进行研究。

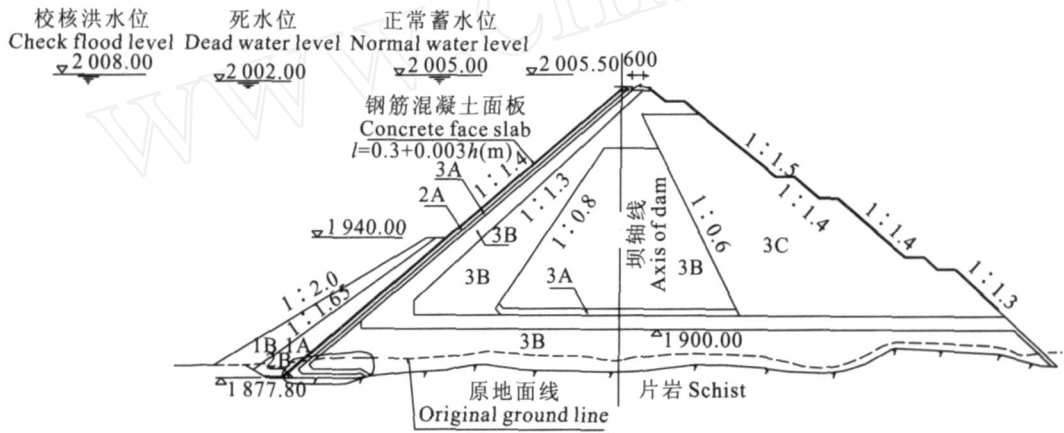


图 1 某水电站大坝标准剖面图
Fig.1 Standard profile chart of certain hydropower dam

1.2 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^[10]:

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

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: $T(t) = f(t)$, 其中 $f(t)$ 为已知温度变化;

第二类边界条件: $-\lambda(\frac{\partial T}{\partial n}) = f_1(t)$, 其中 $f_1(t)$ 为已知热流量变化;

对绝热边界, 则有 $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$;

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

T_a 为气温。
式中: t 为时间, a 为导温系数, θ 为混凝土的绝热温升, λ 为导热系数, n 为表面法线方向, β 为表面放热系数。当混凝土表面受到保护后, 放热系数由下式计算:

$$\beta = \frac{1}{h/\lambda_s + 1/\beta_0} \quad (2)$$

式中: h 为保护层厚度, λ_s 为保温材料的导热系数, β_0 为保温板的外表面与空气之间的放热系数。

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 $\{T\}_0$ 计算时段末结点温度 $\{T\}_1$ 的有限元通式^[10]为:

$$([H] + \frac{[C]}{\Delta t})\{T\}_1 = \{p\}_1 + \frac{[C]}{\Delta t}\{T\}_0 \quad (3)$$

式中各系数矩阵(向量)的计算参见文献[10], 此略。

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,则 $\Delta\tau$ 时段内的结点温度徐变应力增量可按式计算^[6] :

$$\{\Delta\sigma_n\} = [D_n]([B]\{\Delta\delta_n\} - \{\Delta\varepsilon_n^c\} - \{\Delta\varepsilon_n^T\} - \{\Delta\varepsilon_n^0\})。$$

(4)

式中:[D_n]为弹性矩阵,[B]为应变矩阵,{ $\Delta\varepsilon_n^c$ }为徐变变形应变增量,{ $\Delta\varepsilon_n^T$ }为温度变形应变增量,{ $\Delta\varepsilon_n^0$ }为自生体积变形应变增量,{ $\Delta\delta_n$ }为位移增量,可由下式求得:

$$[K]\{\Delta\delta_n\} = \{\Delta p_n\} + \{\Delta p_n^c\} + \{\Delta p_n^T\} + \{\Delta p_n^0\}。$$

(5)

式中:[K]为结构刚度矩阵,{ 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 }为温度变形当量荷载增量,{ Δp_n^0 }为自生体积变形当量荷载增量。

1.3 计算条件

1.3.1 计算参数的选用 坝址区气温、水温、地温、日温差及寒潮等气象资料,采用坝址下游的循化县气象站统计资料。其中坝址区多年平均日温差为 10 的天数有 258 d,日温差为 15 的天数有 144 d,日温差为 20 的天数有 31 d。因此,坝址区发生频率较高的日温差为 10 ,其次为 15 。坝址区寒潮资料见表 1^[9]。

面板混凝土的热力学参数及弹性模量和绝热温升随龄期的拟合公式取自文献[11]的试验结果。坝体材料及基岩热力学参数选用见表 2^[11]。

表 1 坝址区历年平均寒潮数及其最大的降温幅度

Table 1 Maximum temperature decrease range and average records of cold wave each year in dam site area

月份 Month	平均寒潮数 Monthly average cold wave number of times	最大降温幅度/ Cold wave's biggest temperature decrease scope	月份 Month	平均寒潮数 Monthly average cold wave number of times	最大降温幅度/ Cold wave's biggest temperature decrease scope	月份 Month	平均寒潮数 Monthly average cold wave number of times	最大降温幅度/ Cold wave's biggest temperature decrease scope
1	0.7	9.1	6	0.8	9.9	11	0.5	12.2
2	0.9	12.1	7	0.7	9.2	12	0.3	7.2
3	1.4	9.1	8	0.9	11.5	全年 Whole year	13.6	14.2
4	2.4	11.5	9	1.0	9.5			
5	2.6	14.2	10	1.4	11.5			

表 2 坝体材料及基岩的热力学参数

Table 2 Calorific and mechanics parameters of dam body material and bedrock

材料 Material	容重/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) Volume weight	平均比热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$) Mean specific heat	导热系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$) Thermal diffusivity	导热系数/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot$ $^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Thermal conductivity	表面放热系数/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot$ $^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Surface heat evolution coefficient	线膨胀系数/ ($10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) Coefficient of linear expansion	弹性模量/ MPa Modulus of elasticity	泊松比 Poisson ratio
面板、趾板混凝土 Face slab and plinth concrete	2 397	0.979 3	0.003 76	8.83	83.72	10.05	见式(6) See eq.(6)	0.17
垫层料、过渡料 Cushion and transition material	2 150	0.880	0.003 27	6.18	41.20	5.03	182	0.30
堆石料 Rock fill material	2 200	0.735	0.002 73	4.42	29.47	7.04	235	0.30
基岩 Bedrock	2 450	1.050	0.003 09	7.95	53.00	9.05	10 000	0.25

面板、趾板混凝土弹性模量为:
 $E(\tau) = 3.322 \times (1 - 0.536e^{-0.1485\tau}) \times 10^4$ (MPa)。
(6)

面板、趾板混凝土绝热温升为:
 $\theta = 42.717\tau / (2.0354 + \tau)。$
(7)
式(6)、(7)中: τ 为混凝土龄期(d)。

面板、趾板混凝土的徐变度及自生体积变形等参数采用试验曲线结果^[11]。

1.3.2 计算工况及保护措施拟定 根据本电站坝址处日温差及寒潮资料,为了计算获得气温骤降条件下面板施工期较为不利的温度应力结果,拟定相应较不利的温度场计算工况为:

工况 1:面板混凝土浇筑结束后 7 d 左右(即 4 月中旬)发生 15 的日温差。日温差期间,假设面板表面未及时加强保护,仍采用正常气温时的一般保护措施(表面覆盖 2.5 cm 厚稻草席),对应的面板

表面等效放热系数 $\beta = 12.54 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

工况 2:面板混凝土浇筑结束后 21 d 左右(即 5 月上旬)遭遇持续 3 d 的寒潮,最大寒潮降温 14.2

。寒潮期间,面板表面仍采用与工况 1 相同的一般保护措施。

1.3.3 单元划分及计算模型 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,这样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,选取大坝标准剖面(最大剖面)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 结点等参元对上述两个剖面进行网格剖分。大坝标准剖面的单元总数为 4 062 个,结点总数为 4 211 个,其中面板

单元数为 183 个,结点数为 248 个。温度场计算时考虑了面板混凝土的初始浇筑温度、水化热温升以及气温随时间的变化等因素,面板混凝土的初始温度取浇筑温度,坝体垫层料、过渡料、堆石料及基岩的初始温度取面板浇筑时的旬平均气温。温度应力计算时考虑了面板混凝土在施工期的弹性模量、徐变度等随时间变化的因素,坝体其他材料和基岩的弹性模量和泊松比等根据设计资料进行选取。温度应力计算时,地基上、下游边界处取水平铰支,底边界固定。

2 结果与分析

2.1 不同工况的面板温度场

与工况 1、2 对应的面板表面各高程点温度随时间的变化过程见图 2 和图 3。

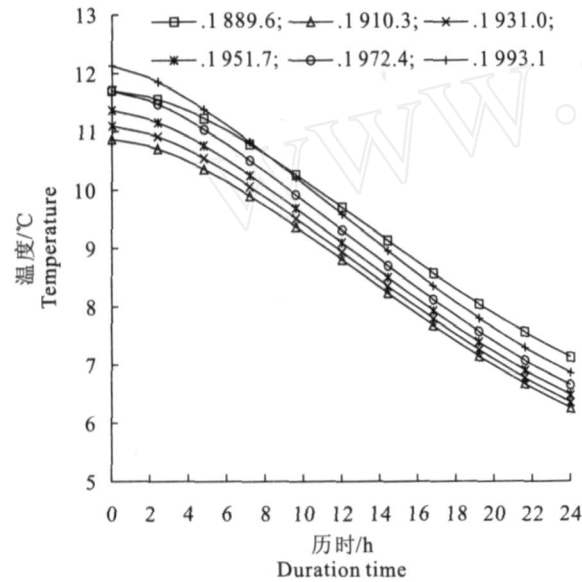


图 2 日温差条件下面板表面温度的变化

Fig. 2 Surface temperature variation of face slab under the condition of daily temperature difference

从图 2 可以看出,在面板施工期发生日温差 15 的条件下,面板表面各高程处的结点温度随日温差的发生而持续降低,但由于按气温为常温情况仍采取了一定的保护措施,因此面板表面的降温幅度较为有限。其中,面板顶部表面的降温幅度较大,为 5.3 ;底部表面的降温幅度较小,为 4.6 。从图 3 可以看出,在面板施工期发生 3 日型寒潮最大降温 14.2 的气温条件下,面板表面各高程处的结点温度随寒潮的发生而持续降低,但由于采取了保护措施而使降温幅度较小。其中面板顶部表面的降温幅度较大,约为 3.7 ;底部表面的降温幅度较小,约为 3.6 。同时经计算表明,在日温差及寒潮发

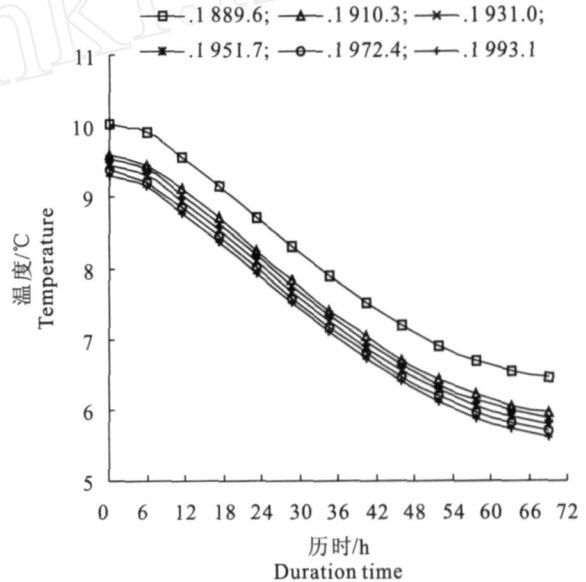


图 3 寒潮条件下面板表面温度的变化

Fig. 3 Surface temperature variation of face slab under the condition of cold wave

生过程中,面板中心各高程处的结点温度也发生了与面板表面结点温度基本一致的变化规律,但面板中心各点的降温幅度均小于相应面板表面各点的降温幅度。

2.2 不同工况的面板温度应力

日温差及寒潮两种气温骤降条件下的温度应力计算工况与相应温度场的计算工况相同。日温差、寒潮结束时面板表面和中心最大主应力沿各自层面的分布情况分别见图 4 和图 5。

从图 4 及相关计算结果可以发现,在发生日温差 15 的条件下,由于日温差结束时面板表面各点的温度均有所降低,导致面板表面各点均产生拉应

力;由于面板表面的降温幅度大于面板中心的降温幅度,因此面板表面的最大主应力明显大于面板中心的最大主应力;与日温差开始发生时相比,面板表面的拉应力增幅明显较面板中心的拉应力增幅大。此时面板表面和中心的最大拉应力为 1.19 和 0.53 MPa,相对于日温差开始发生时的增幅分别为 0.68 和 0.53 MPa。面板表面和中心的最大主应力均发

生在面板中部,即高程约为坝高一半的位置。从图 5 及相关计算结果可以发现,在发生 3 日型寒潮的气温条件下,面板表面及中心的温度应力呈现出与日温差基本一致的变化及分布规律,此时面板表面和中心的最大主应力分别为 1.15 和 0.44 MPa,相对于寒潮开始时的增幅分别为 0.82 和 0.21 MPa。

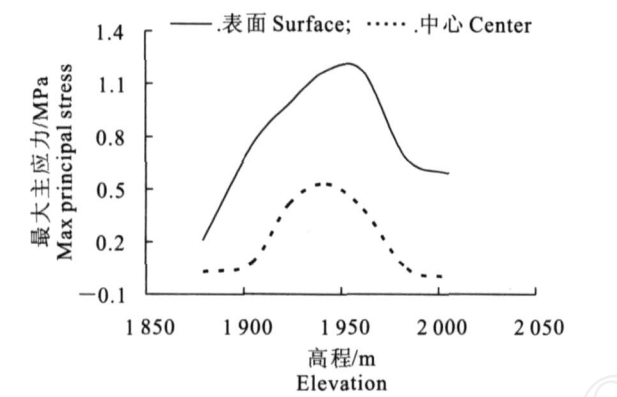


图 4 日温差结束时面板表面及中心最大主应力的分布
Fig.4 Maximum principal stress distribution at the face slab's surface and center after daily temperature difference

2.3 保护措施的影响

结合前述的日温差及寒潮两种气温骤降工况,本文对不同表面保护措施下面板温度应力进行了比较计算,其中与两种工况对应的面板表面温度应力

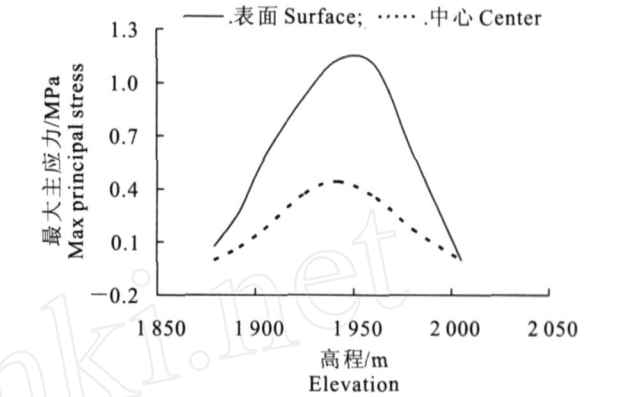


图 5 寒潮结束时面板表面及中心最大主应力的分布
Fig.5 Maximum principal stress distribution at the face slab's surface and center after cold wave

计算结果见表 3。表 3 中,无保护指面板表面裸露,一般保护指面板表面覆盖 2.5 cm 厚稻草席,加强保护指面板表面覆盖 2.5 cm 厚泡沫塑料板。

表 3 气温骤降条件下不同保护措施面板表面温度应力的比较

Table 3 Comparison of the temperature stress at face slab's surface under temperature sudden decrease with the different protective measures

表面保护措施 Surface protective measures	等效放热系数/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) Equivalent heat release coefficient	日温差 Daily temperature difference		寒潮 Cold wave	
		日温差末最大主应力/ MPa Maximum principal stress after daily temperature difference	日温差始末最大主应力增幅/ MPa Amplification of maximum principal stress during daily temperature difference	寒潮末最大主应力/ MPa Maximum principal stress after cold wave	寒潮始末最大主应力增幅/ MPa Amplification of maximum principal stress during cold wave
无保护 No protection	83.72	2.56	1.15	2.35	1.35
一般保护 Common protection	12.54	1.19	0.68	1.38	0.96
加强保护 Reinforcing protection	4.49	0.84	0.41	1.15	0.82

根据本电站设计确定的基础混凝土温度应力控制标准,各种温差所产生的面板混凝土的温度应力之和应不超过 1.8 Mpa。从表 3 可以看出,如果在施工期发生较不利的日温差或寒潮,且面板表面未进行及时、有效地保护,那么在日温差及寒潮终了时面板表面的最大主应力将分别达到 2.56 和 2.35 Mpa。显然,由于日温差或寒潮产生的温度应力将首先使面板表面产生裂缝,并使应力向面板中心转移,与面板中心的应力叠加作用后,有可能使裂缝向

纵深发展,直至贯穿整个板厚形成贯穿性裂缝。同时由表 3 可以看出,在施工期发生日温差或寒潮的情况下,与面板表面无保护措施($\beta = 83.72 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$)相比,采取保护措施可以明显削减日温差或寒潮始末的最大主应力增幅,且保护措施越强其削减效果越好。这是因为采取表面保护措施,可以显著削减整个面板尤其是面板表面的降温幅度。因此,在施工期应加强对日温差及寒潮等特殊气象情况的监测和预报工作,在较不利的日温差或

寒潮来临之时,应及时加强面板表面保护。根据上述温度应力计算结果,并结合本电站的混凝土温度应力控制标准,建议在较不利的日温差或寒潮来临时,面板表面保护标准以使面板表面等效放热系数 $\beta \leq 4.49 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 为宜。

3 结 论

1) 在施工期发生日温差或寒潮等气温骤降情况下,面板受到日温差或寒潮的冷击作用,面板表面及中心的温度将随着气温骤降而持续降低,面板表面的温度降幅大于面板中心的温度降幅。采取保护措施可以显著削减降温幅度,保护措施越强削减效果越明显。

2) 在上述气温骤降条件下,面板表面各点均产生拉应力,且面板表面的最大主应力一般均大于面板中心的最大主应力;与气温骤降开始时相比,气温骤降结束时面板表面的拉应力增幅明显大于面板中心。就温度应力分布而言,面板表面的最大拉应力位于面板中部偏上的表面上,面板中心的最大拉应力位于面板中部的中心层面上。

3) 对于北方寒冷地区,由于日温差及寒潮等气温骤降情况的发生频率高、降温幅度大,因此在堆石坝面板混凝土的施工期,应特别注意气温骤降所产生的冷击温度应力,加强对日温差及寒潮等气温骤降情况的监测和预报,在较不利的日温差或寒潮来

临时,及时加强对面板表面的保护。

【参考文献】

- [1] 麦家焯,孙立勋.西北口堆石坝裂缝成因的研究[J].水利水电技术,1999,30(5):32-34.
- [2] 杨德福.面板堆石坝混凝土面板防裂分析[J].水利水电技术,1995,30(4):5-10.
- [3] 罗先启,刘德富,黄 峰.西北口面板堆石坝面板裂缝成因分析[J].人民长江,1996,27(9):32-34.
- [4] 徐明星.天生桥一级堆石坝面板裂缝原因分析[J].红水河,2001,20(3):40-47.
- [5] 杨德福,马锋玲.面板混凝土抗裂及耐久性研究[J].水力发电,2001,30(8):42-44.
- [6] 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,2001,32(7):1-5.
- [7] 张国新,彭 静.考虑摩擦约束时面板温度应力的有限元分析[J].水利学报,2001,42(11):75-79.
- [8] 杨德福,马锋玲,何树祥,等.混凝土面板温度收缩应力及相关参数分析[J].实验研究,2002,30(7):59-69.
- [9] 国家电力公司西北勘测设计研究院.黄河公伯峡水电站工程初步设计重编报告:第五篇 枢纽布置及建筑物[R].西安:国家电力公司西北勘测设计研究院,1995:1-119.
- [10] 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.
- [11] 国家电力公司西北勘测设计研究院工程科研实验院.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,2001:41-62.