

铜街子工程碾压混凝土溢流坝段的温度控制研究

黄其愚

(成都勘测设计研究院,成都,610072)

提 要 铜街子水电站主体工程中的溢流坝段采用碾压混凝土筑坝技术。在温度控制研究方面除用常规计算外,还采用按计划的施工进度,根据坝址区统计月平均气温及拟定浇筑温度进行筑坝全过程仿真计算,并对坝的温度及应力进行了分析。

关键词 铜街子工程 溢流坝 碾压混凝土 温度控制

1 前 言

铜街子水电站溢流坝段原设计为常态混凝土浇筑,1986年我院承担“七五”攻关《碾压混凝土筑坝技术在大型水电主体工程中的应用》专题,在原审定方案的基础上对部分结构进行修正,以适应碾压法的需要。在坝的温度控制设计方面,除按混凝土重力坝规范有关条文进行常规计算外,并委托天津大学和成都科技大学编制二维问题的碾压混凝土重力坝温度场与应力场全过程仿真计算研究。在全过程仿真计算中,大坝的铺筑顺序、层厚、间歇时间以及蓄水运行等均按施工组织设计进行。这与实际施工情况是有出入的,总的来说大体上仍然可以反映大坝在各阶段的温度及应力情况。

2 温控计算资料

2.1 气温、水温及地温

铜街子水电站坝址区全年各月的气温、水温及地温见表1。

2.2 水库蓄水过程及水温

原施工设计拟定1990年11月30日以

前坝体竣工,12月1日大坝开始蓄水,1991年10月1日以后水库开始运行,计算上、下游水位按图1所示的时间进行变化,该计划后因故推迟一年。

水库表面水温采用河水温度,库底425m高程以下采用恒温10℃作仿真计算;下游采用河水温度(蓄水期)和堰上水头中心高程温度(运行期)。在常规计算中库底水温曾参照上游龚嘴水电站水库水温的实测资料,结合本工程实际情况选取12℃。

表1 铜街子工程坝址区气温、水温和地温

月 份	1	2	3	4	5	6	7
平均气温(℃)	7.2	8.5	12.6	17.3	21.2	23.4	25.5
平均水温(℃)	7.5	9.0	11.7	15.7	17.4	17.9	19.2
平均地温(℃)	13.1	12.8	14.5	17.0	19.7	22.1	24.2
月 份	8	9	10	11	12	全年	
平均气温(℃)	25.2	21.5	17.3	12.9	8.7	16.8	
平均水温(℃)	19.6	17.8	15.2	12.0	9.0	14.3	
平均地温(℃)	25.6	24.8	22.1	19.2	17.0	19.4	

2.3 混凝土和基岩的热学参数

混凝土绝热温升采用双曲函数表达式:

$$Q_r = Q_0 \tau / (m + \tau)$$

式中 Q_r —— 龄期为 τ 时的累积水化热 (kJ/kg);

Q_0 —— 最终水化热 (kJ/kg);

τ —— 龄期 τ (h);

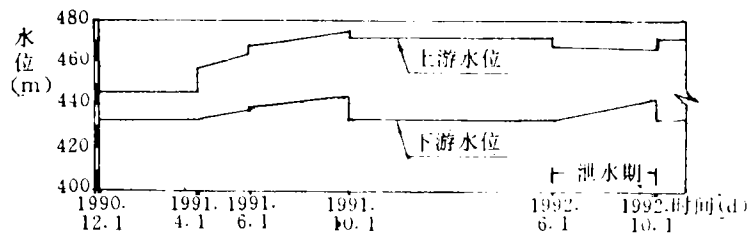


图 1 上下游水位变化过程线

表 2 混凝土及基岩的热学参数

材料种类	比热 C kJ/(kg·°C)	导温系数 a (m ² /h)	导热系数 λ W/(m·°C)	最终水化热 Q ₀ (°C)	系数 m	线膨胀系数 α (1/°C)	密度 ρ (kg/m ³)
普通混凝土 R ₉₀ 200	0.9127	0.0037	2.298	28.5	61.20	8.57×10 ⁻⁶	2450
碾压混凝土 R ₉₀ 100	0.8415	0.0039	2.291	16.7	76.44	9.25×10 ⁻⁶	2450
基岩(玄武岩)	0.9504	0.0035	1.872			8.50×10 ⁻⁶	2580

m —— 水化热衰减系数。

混凝土和基岩的热学参数见表 2, 表中所示仅用量较大的混凝土。

2.4 大坝浇筑顺序及混凝土浇筑温度

仿真计算是以 3[#]溢流坝作为研究的重点。在该坝段内埋设的观测仪器较多, 便于对比验证。3[#]溢流坝的剖面及标号分区参见图 2。浇筑顺序、层厚及间歇时间见图 3。混凝土浇筑温度见表 3。

表 3 混凝土浇筑温度 单位: °C

月 份	1	2	3	4	5	6
常态混凝土	9.7	11.0	14.5	18.7	20.0	20.0
碾压混凝土	9.1	10.4	14.1	18.5	19.6	20.0

月 份	7	8	9	10	11	12
常态混凝土	20.0	20.0	20.0	18.6	14.6	11.1
碾压混凝土	20.0	20.0	20.0	18.4	14.4	10.6

2.5 混凝土与基岩的力学参数

1. 混凝土的弹性模量表示如下:

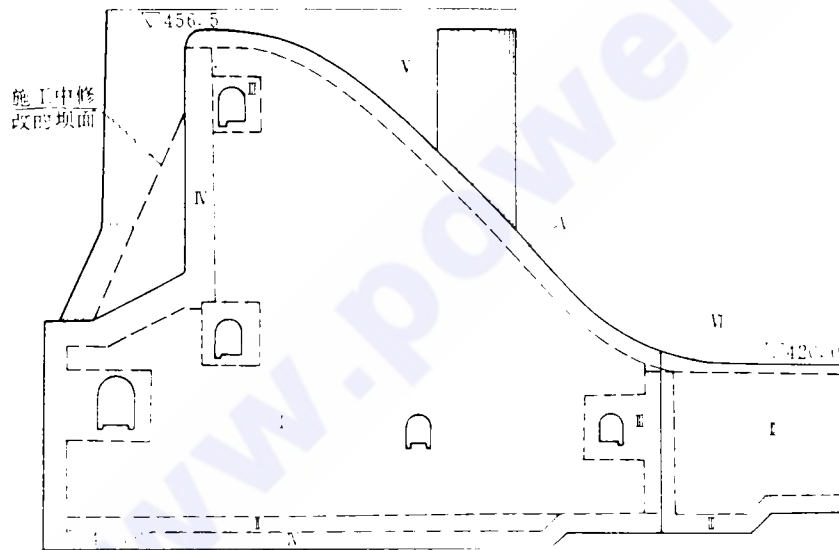


图 2 3[#]溢流坝段剖面图

注: I 碾压 R₉₀100; II 常态 R₉₀100; III 常态 R₉₀150; IV 常态 R₉₀200; V 常态 R₂₈350; VI 常态 R₂₈450。

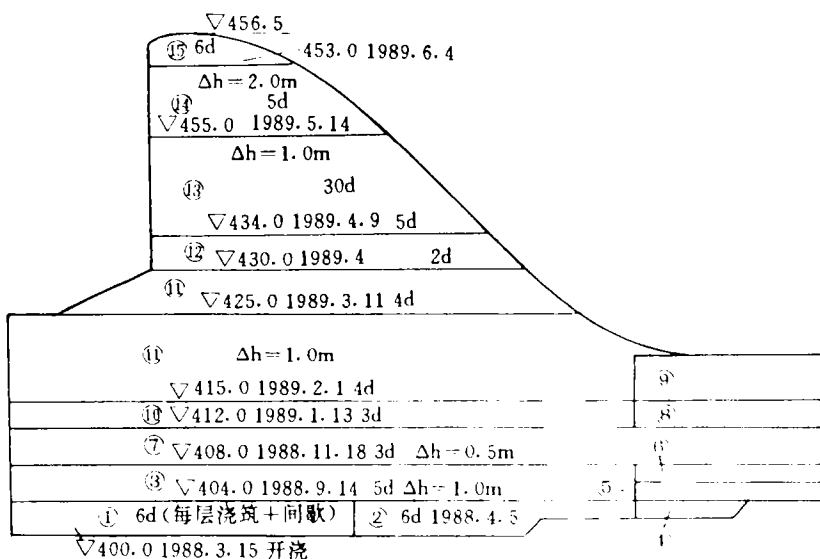


图3 大坝浇筑顺序、层厚及间歇时间

注:④19880929,6d;⑤19881101,6d;⑥19881113,4d;⑦19881212,2d;⑧19881224,6d.

$$E = E_0(1 - e^{-\alpha t^\beta})$$

式中 τ 为龄期, E_0 、 α 、 β 参见表4。

表4 混凝土弹性模量

混凝土种类	E_0 ($\times 10^4$)MPa	α	β
常态 [#] 200	2.65	0.472	0.308
碾压 [#] 100	2.00	0.400	0.333

2. 混凝土的徐变度用下式表示

$$c(t_1, \tau) = \sum_{r=1}^3 (a_r + b_r / \tau^{c_r}) (-e^{-d_r(t-t_1)})$$

式中 τ 为龄期, $(t - \tau)$ 为持荷时间, a_r 、 b_r 、 c_r 、 d_r ($r = 1, 2, 3$) 为系数, 参见表5。

表5 混凝土徐变度公式中的系数

种类	a_1	b_1	c_1	d_1	a_2	b_2
常态200 [#]	0.64	5.88	0.45	0.30	1.44	2.45
碾压100 [#]	-0.5313	5.8128	0.3849	0.1342	-0.0783	3.4236

种类	c_2	d_2	a_3	b_3	c_3	d_3
常态200 [#]	0.45	0.0057				
碾压100 [#]	0.1755	0.0129	0.0599	5.0954	0.5666	0.9467

注:碾压100[#]混凝土为拟合值

3. 混凝土和基岩的力学参数

4. 混凝土应力松弛系数的计算

表6 混凝土和基岩的力学参数

种类	弹性模量 E_0 (GPa)	容重 (kN/m^3)	波桑比 ν	极限拉伸 $\epsilon_p \times 10^{-4}$	劈拉强度 R_L (MPa)
常态200 [#]	26.5	24.01	0.167	0.70	2.0
碾压100 [#]	20.0	24.01	0.167	0.55	1.1
玄武岩	P_2, β_3^{-2}	7.0			
	P_2, β_3^{-1}	3.0	25.28	0.27	
	P_2, β_3^0	2.0			

对混凝土块周边固定, 计算出常应力条件下的徐变应力, 并计算出不同时间的松弛系数值如表7所示。

表7 混凝土松弛系数计算值

种类	3d	7d	28d	90d
常态100 [#]	0.28	0.38	0.49	0.56
碾压100 [#]	0.30	0.40	0.52	0.62

3 全过程仿真计算成果简述

碾压混凝土重力坝温度场与应力场全过程仿真计算, 由天津大学水利系编制的二维有限元程序, 按照3[#]溢流坝段浇筑块的铺筑

顺序,考虑混凝土的铺筑温度、铺层大小、间歇时间、水化热温升、外界气温和水温变化、累加自重、水库蓄水、混凝土徐变和自生体积变形等,进行不稳定温度场和徐变应力场全过程仿真计算。从坝体第一个铺层算至大坝建成投入正常运行和坝体内部温度场和应力场达到稳定状态。得出坝体全过程的温度和应力变化情况,使算出的应力更接近实际情况,对改进设计、指导施工和运行管理均有重要意义。

对3[#]溢流坝段,采用4节点等参单元。每个铺筑层布置两层单元,边界单元的边长1~2m,不考虑廊道和闸墩,溢流坝及其护坦共划分3050个单元,3187个节点。计算时间自1988年3月15日开始浇筑,按施工组织设计提供铺筑、蓄水运行时间进行计算,至1996年12月15日共计3150d。在筑坝期间经过试算,计算时段选取12h。大坝建成后,计算时段逐步增大,最后增大到5d,沿时间差分采用隐式格式,在外界温度作用下,据以往经验计算时段取5d是可行的。

3.1 不稳定温度场仿真计算

3.1.1 各浇筑层温度变化过程 在分析中限于计算机容量仅输出6个竖直面和9个水平面上各点温度过程线以便于对坝体上、下和内、外温度变化规律进行研究。

靠近上游坝面竖直向各铺筑层中心点的温度变化。第1层因地基散热,早期最高温升较低为23.1℃。第4层在4月1日铺筑后,由于基础固结灌浆间歇期长达135d,浇筑温度高于第1层,且不能直接从地基散热,早期最高温升达28.2℃;4月21日热量散发后下降至19.7℃,以后随气温上升,7月16日达到24.9℃。第9~22层为冬季施工铺筑层厚0.5m,早期最高温升为21.5℃。靠近堰顶的混凝土标号较高,浇筑层厚达2m,早期最高温升为37.5℃。蓄水前期(457~976d)温度受气温控制,坝体温度冬季为8.4℃,夏季为24.9℃,蓄水后期(977~3150d)温度受水库

水温控制,坝体上部温度有明显变幅,冬季为8.7℃,夏季为16.6℃;下部随高程降低温度变幅减小,相位基本相同,在425m高程以下,接近库底水温10℃。由于计划铺筑时间与实际铺筑时间到后期差别较大,在科研计划中曾要求施工完建后,按实际情况再进行一次计算,使研究成果更趋于完善。

坝体内部竖直向各铺筑层中点的温度变化,早期温度情况:第4层为100[#]常态混凝土较上游面常态混凝土(200[#])低,最高温升为25.8℃。第9~22层(高程408~415m)系100[#]碾压混凝土,温度较低,最高仅19.9℃。靠近堰顶处早期最高达41.3℃,堰顶以下高程456.5~445m,因坝体厚度小,受气温的影响呈周期性变化,蓄水以前冬季最低温度为11℃,而夏季最高温度为24.1℃,随着高程的降低,温度变化幅度减小,且有滞后的现象;在高程446m处温度峰值较堰顶(高程456.5m)滞后约4个月。蓄水运行期温度情况:蓄水后受水温影响,温度峰值降低,变幅减小,近堰顶处温度冬季最低为10℃,夏季最高为16.3℃,随着高程降低温度变幅愈小,高程446m处年变幅不超过10℃。高程435~445m之间的温度仍呈周期性变化,但变幅很小,峰值缓慢下降;高程400~435m之间的温度已无周期性变化,年温度下降值缓慢约为0.5℃,到计算结束时温度过程线已非常平缓,最高温度约为17℃。

靠近下游坝面竖直向各铺筑层中点的温度变化;第4层(高程403~404m)在4月下旬浇筑,为200[#]常态混凝土较同层混凝土晚浇20d,浇筑温度及气温均接近20℃,早期最高温度为29.8℃。近堰顶处为350[#]常态混凝土,其最高温度达44.6℃。护坦高程(420m)以上靠近溢流面各高程的温度,蓄水前受气温影响冬季最低为9.9℃,夏季最高为24.3℃。蓄水运行期:每年6月1日至10月1日为泄洪期,整个溢流面受水库上层水温控制,非泄洪期在下游水位以上受气温控制,

以下为水温控制。护坦高程以下与护坦连成整体,高程愈低外界温度影响愈小,温度变幅也愈小,底层温度下降极为缓慢。

护坦中部竖向各层混凝土温度的变化情况;在早期由于护坦在冬季铺筑,各层最高温度不超过 25℃。蓄水前受气温控制冬季最低为 9.4℃,夏季最高为 24.4℃;蓄水后受水温控制冬季最小为 9.4℃,夏季最高为 17.7℃。混凝土温度随距表面愈深,温度峰值及变幅均减小,峰值滞后可达 3 个月以上,最终稳定温度为 16℃。

3.1.2 坝体水平截面上各点温度变化
不同高程有不同的最大内外温差,参见表 8。最大内外温差均发生在蓄水前的冬季(1990 年 1 月 30 日),高程愈高内外温差愈大。

表 8 坝体不同高程最大内外温差表

高 程(m)	408.75	416.54	424.54	430.54	435.54	440.54	446.5
最大内外温差(℃)	12	13.5	17	20	22	24	23

在高程 405.5~435.0m 各截面的温度变化规律有下述特点:

a. 上、下游表面温度随气温或水温变化,呈周期性;

b. 内部点不受外界温度影响,浇筑后温度缓慢上升,然后缓慢下降。达到最高温度的历时为 400~1 000d,并随高程升高而减短。内部温度每年下降 0.5°~1.0℃,随着高程增加,坝体减薄、温度下降加快;

c. 内外温度峰值的相位差可达半年;

d. 外界温度的影响深度约 13m。

在高程 435.0~446.5m 各截面的温度变化规律有下述特点:

a. 上、下游表面及内部点均受外界温度影响呈周期性变化,距表面愈远变幅愈小,坝体愈薄内部温度变幅愈大;

b. 内外温度峰值的相位差约为 5 个月。

3.1.3 坝体温度场 施工过程中,在浇筑后的第 419d(1989 年 5 月 13 日),浇筑高程为 445.0m,坝壳为高标号常态混凝土温度较高,而新浇层由于水化热作用温度最高,因此在新浇筑顶层上、下游边界为温度集中区,大坝建成后,坝体最高温度位置逐渐下移,温度值亦逐渐下降,其下降速率逐渐降低,参见表 9 及图 4~5。

表 9 坝体不同时刻最高温度及其位置

坝体浇筑后累计天数	660	1380	1560	2100	2640	3150
坝体最高温度值(℃)	31.36	22.21	21.22	19.29	18.15	17.39
最高温度的高程(m)	443	430	425	416	411	406

注:第 456d(198906021)浇至堰顶

3.2 徐变应力场仿真计算

徐变应力场仿真计算,网格划分同温度场,计算时段在筑坝阶段取 1d,完建一定时间后逐步增大,最后增至 1 个月,共计算 3 150d。

混凝土徐变计算采用初应变法,徐变增量采用隐式格式,计算荷载组合有 a. 温度荷载;b. 累加自重、水荷载及集中力;c. 总荷载为前二次叠加。

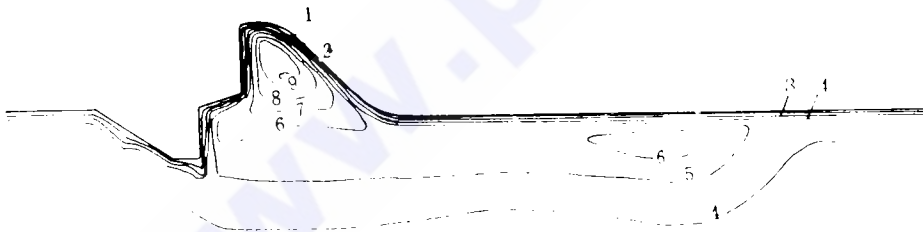


图 4 3^号溢流坝第 660d(19900114)坝体温度场

注:温度值(℃)1. 7.03; 2. 9.74; 3. 12.44; 4. 15.14; 5. 17.81; 6. 20.55; 7. 23.25; 8. 25.95; 9. 28.66; 10. 31.36。

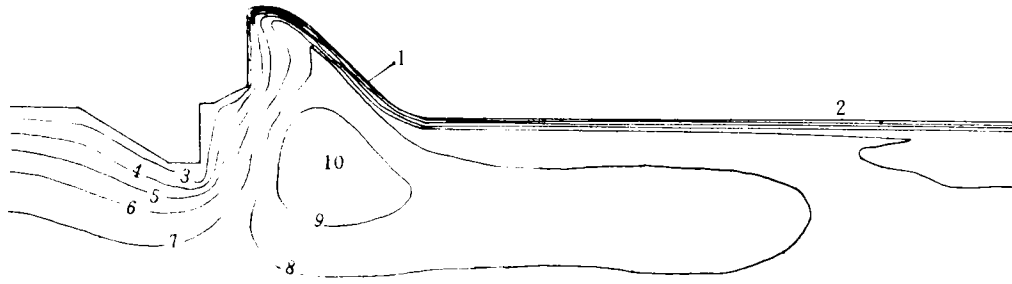


图5 3[#]溢流坝第3150d(19961214)坝体温度场

注:温度值(℃)1.8.84;2.9.79;3.10.74;4.11.69;5.12.64;6.13.59;7.14.54;8.15.49;9.16.44;10.17.39.

3.2.1 温度荷载下的应力情况 温度荷载是大坝的基本荷载,其应力占有较大的比重。温度应力的产生,一是温度变化,二是温度变形的制约。竖直方向温升率的差异是产生水平正应力 σ_x 的主要因素;水平方向(内、外)温升率的差异是产生竖直正应力 σ_y 的主要因素。

3.2.1.1 坝体建基面(高程400.5m)截面应力情况。大坝坝体上游段建基高程400m,原地面高程为405.5m,计算时假定坝面与坝前岩体和回填混凝土之间用缝分开,考虑坝踵处于裂缝之尖端。

水平正应力的变化情况:坝踵单元早期应力起伏较多,应力值不大。蓄水前受气温控制,第514d出现最大压应力 $\sigma_x = -1.2\text{MPa}$;到第691d产生0.25MPa拉应力,第975d开始蓄水,为库底水温,分缝两侧及岩面附近温度骤降使拉应力增大,到第2851d最大拉应力 $\sigma_x = 2.39\text{MPa}$ 。坝中心部位单元应力在 $-0.54 \sim 0.21\text{MPa}$ 之间变化,最大拉应力发生在第1381d。坝趾单元应力,因护坦与坝连接,不直接受外界温度影响,早期应力起伏较多,均为压应力,最大值发生在第198d, $\sigma_x = -0.28\text{MPa}$,最大拉应力发生在第511d, $\sigma_x = 0.75\text{MPa}$ 。蓄水后全截面均为拉应力,中心及坝趾应力平稳,坝中心不超过0.22MPa,坝趾不超过0.74MPa,坝踵部位处于缝的尖端

有较大的应力集中, σ_x 值高达2.39MPa,形成坝踵岩体部位的拉裂区。

铅直正应力的变化情况:坝踵单元全过程均为压应力。蓄水前受气温影响,第491d(7月25日),内外温度变化率差异较大,最大 $\sigma_y = -2.95\text{MPa}$;冬季坝面温度下降,第691d(2月16日)减小到0.86MPa。第975d蓄水后坝面遇冷,应力剧降,在 $-0.36 \sim -0.75\text{MPa}$ 之间变化,坝中心部位受表面压应力影响为拉应力,最大值发生在520d, $\sigma_y = 0.12\text{MPa}$;坝趾单元全过程均为压应力,最大值发生在197d, $\sigma_y = -0.25\text{MPa}$ 。

剪应力的变化情况:坝中心及坝趾的剪应力均很小,坝趾 $\tau_{xy} = -0.09 \sim 0.17\text{MPa}$,坝中心 $\tau_{xy} = 0.08 \sim 0.01\text{MPa}$,坝踵变化较大,蓄水前为负剪应力,第517d达到最大值 $\tau_{xy} = -1.01\text{MPa}$,第688d(2月13日)接近零值,蓄水后坝面遇冷转为正值,到第2851d(1月16日) $\tau_{xy} = 1.04\text{MPa}$ 。

3.2.1.2 坝体430.5m高程截面应力情况。水平正应力变化过程,上游面单元靠近变坡处,蓄水前受气温控制,应力变幅较大,最大拉应力 $\sigma_x = 0.26\text{MPa}$,发生在第661d(1月16日);而最大压应力 $\sigma_x = -0.75\text{MPa}$ 发生在第482d(7月17日)。蓄水后坝面遇冷,在1236d(8月23日)压应力为 -0.04MPa ,以后由于坝体上部降温快,下部较慢,峰值压应

力增大,到 2 851d (1 月 16 日) $\sigma_x = -0.49\text{MPa}$,坝中心处应力变幅不大,在 $-0.26\sim 0.17\text{MPa}$ 之间。下游面单元应力,因系高标号混凝土浇筑,蓄水前应力变幅较大,最大拉应力 $\sigma_x = 0.74\text{MPa}$,发生在 661d (1 月 16 日),最大压应力 $\sigma_x = -0.85\text{MPa}$,发生在 841d (7 月 16 日)。蓄水后应力及其变幅均有减小,到 2 817d (1 月 12 日) $\sigma_x = 0.44\text{MPa}$,2 957d (6 月 2 日) $\sigma_x = -0.54\text{MPa}$ 。

垂直正应力变化过程,上游面单元最大拉应力发生 661d (1 月 16 日) $\sigma_y = 1.30\text{MPa}$,最大压应力发生 871d (8 月 16 日) $\sigma_y = -2.59\text{MPa}$ 。蓄水后压应力峰值逐渐增大,到 3 040d (8 月 20 日) $\sigma_y = -2.45\text{MPa}$;坝中心变幅不大, σ_y 在 $-0.31\sim 0.25\text{MPa}$ 之间,1 463d 以后均为拉应力,下游面单元应力,最大拉应力 $\sigma_y = 0.72\text{MPa}$ 发生在 661d,最大压应力 $\sigma_y = -0.88\text{MPa}$ 生发在 841d (7 月 16 日)。

剪应力变化过程,上游面单元最大正剪应力 $\tau_{xy} = 0.35\text{MPa}$,发生在 676d (2 月 1

日),最大负剪应力 $\tau_{xy} = -0.85\text{MPa}$ 发生在 483d (7 月 18 日),蓄水后变幅减小,1 785d 以后均为负值且随时间增大,到 3 038d (8 月 23 日) $\tau_{xy} = -0.54\text{MPa}$,坝中心应力及变幅均不大, $\tau_{xy} = -0.13\sim 0.24\text{MPa}$ 之间。下游面单元, $\tau_{xy} = 0.85\text{MPa}$ 发生在 841d (7 月 16 日), $\tau_{xy} = -0.74\text{MPa}$ 发生在 661d (1 月 16 日)。

3.2.2 总荷载作用下的应力情况 总荷载包括累加自重、温度荷载、水荷载和集中力,参见表 10。其中建基面(高程 400.5m)。坝踵部位按断裂分析,岩基面产生裂缝后未进行应力转移,得出拉应力较大故未列入。

3.2.3 廊道周围温度及应力 在仿真分析中成都科技大学曾对 2#溢流坝段进行二维有限元计算。计算中考虑廊道与外界气温连通,靠上游侧基础廊道周围温度仍呈连续趋势。廊道内侧温度受廊道散热的影响,在后期内侧温度较外侧为高。廊道角缘及坝外转折处均出现应力集中现象,随着距离的增加集中程度亦减轻和消失。

表 10 总荷载作用下各截面最大应力值(MPa)

截面高程(m)		上游面单元			中心单位			下游面单元		
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_x	σ_y	τ_{xy}
400.5	蓄水前	-2.75	-6.93	-2.61	0.40	-0.95	0.12	0.53	-0.78	0.29
	蓄水后	/	-2.79	3.19	0.42	-0.86	0.07	0.42	-1.11	0.34
430.5	蓄水前	-1.09	-4.00	-1.29	-0.34	-0.81	-0.14	0.65	0.61	0.94
	蓄水后	-0.94	-3.15	-0.64	-0.36	-0.24	0.34	0.37	-1.08	0.94

4 综合分析

1. 碾压混凝土系大仓面、薄层铺筑,其温度状态与季节、铺筑速度、间歇期及在坝体中所处的具体部位密切相关。沿高程的温度分布基本呈 S 形,显示高温、低温季节期间铺筑特点。坝体内部混凝土的温度只有在覆盖的混凝土厚度较大(大于 8m),间歇时间较短(少于 2.5d),其温升值可接近混凝土的水化

热温升值。

2. 温度荷载所产生的应力有以下特点:

a. 碾压混凝土温升与温降过程长;

b. 蓄水前上、下游坝面附近受气温控制,应力值的变幅较大,夏季受拉、冬季受压,最大拉(压)应力大多发生在蓄水前,蓄水后受水温控制的部位其应力变幅减小;

c. 坝体内部应力变幅小,应力值受外部应力制约,外部受拉时内部受压,内外应力相位差约半年;

d. 坝体上部各温度应力分量大于坝底部。是由于坝体上部厚度较小,上、下层和内外之间的温度变幅及相位差较大而造成的;

e. 对温度荷载所产生的 σ_x 和 τ_{xy} 值亦不容忽视。

3. 坝体水平向温度应力变化与浇筑季节、间歇时间等有关。低温季节铺筑初期均呈压应力,若间歇期较长,压应力值减少,甚至出现拉应力。从低温向高温季节的过渡时间中铺筑,初期为压应力,高温时间歇一月后续铺上部混凝土,由高温进入低温季节,下部份混凝土温度降低,在邻近该高程处出现拉应力。高温季节铺筑初期为压应力,当向低温季节过渡时将转变为拉应力,若其上部覆盖混凝土较厚则坝中心部位的拉应力不会太大。根据上述情况可以看出,由于铺层停铺曝露时间过长、铺筑速度快,或者是在高温向低温的过渡季节铺筑均易出现拉应力,说明碾压混凝土的温度控制有其自身的特点。

4. 在总荷载作用下的应力有以下特点:

a. 坝踵应力集中,在复杂应力作用下将产生破坏,应做好基础处理工作;

b. 上游坝面出现折坡,折坡斜面倾角小;易造成应力集中。铜街子工程溢流坝上游坝面已将斜面坡度改陡;

c. 铺筑层因长间歇会产生较大的拉应力。最大拉应力一般发生在上(下)游面处;

d. 坝体上部应力也较大,在设计中应予以重视。

5 铜街子工程碾压混凝土坝温度控制标准

铜街子工程碾压混凝土坝温度控制标准,是以常规计算为基础拟定的,参见表 11。

通过仿真验算,基础约束范围内的最高温度为 28°C ,基础温度 11°C ,新老混凝土的上、下层温差 5°C ,最大内外温差 $12^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{C}$,弱约束区内第 660d 内最高温度为 31.36°C 。

总荷载所产生的应力,上游面除坝踵应力集中 σ_x 值较大易产生裂缝外,上游坝面各单元中最大 σ_y 值为 0.4MPa ,出现在高程 443.0m , $200^{\#}$ 常态混凝土区域内。坝中心部位以第 5 层水平拉应力最大, σ_x 值为 0.77MPa ;最大铅直拉应力发生在高程 451.0m 处, σ_y 值为 0.3MPa ;下游面水平拉应力 σ_x 值为 0.83MPa ,发生在第 5 层 $200^{\#}$ 常态混凝土内,堰顶附近 $350^{\#}$ 常态混凝土层内出现最大水平拉应力 σ_x 值达 1.19MPa ;最大铅直拉应力 σ_y 值为 0.5MPa ,出现在高程 421.0m 处。根据应力采用公式 $\sigma \leq E\epsilon_h/K_f$ 和不同标号、种类混凝土弹性模量及极限拉伸值,反求抗裂系数除少数单元在 1.4 外,其他均大于 1.8,基本上能满足抗裂要求。

表 11 铜街子工程碾压混凝土溢流坝温控标准

项 目	铺筑层	铺筑层	铺筑间歇	铺筑速度	最高温度	
	长 度	厚 度	时 间			
单 位	m	m	d	m/d	$^{\circ}\text{C}$	
数 值	≤ 68	1.0	$\frac{5}{\text{(含铺筑)}}$	0.2	≤ 32	
容许温差		浇筑温度		上、	内外温差	
强约束区	弱约束区	强约束区	弱约束区	下层	强约	弱约
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	温差	束区	束区
≤ 16	≤ 19	≤ 17 (10月 ~3月 铺筑)	夏季 ≤ 20 , 其它气 温入仓	15 ~ 20	≤ 20	≤ 25

6 结 束 语

铜街子碾压混凝土坝,通过常规和仿真两种方法计算,证实所提的温度控制标准是可行的,经过施工阶段及运行时期的观察,尚未发现构成威胁大坝安全的深层裂缝。

参 考 文 献

- 1 成都勘测设计院铜街子设计处. 铜街子水电站碾压混凝土坝温度控制研究. 1990: 12
- 2 天津大学水资源系. 碾压混凝土重力坝温度场与应力场全过程及抗裂分析. 1990: 1
- 3 成都科技大学水利系. 铜街子水电站碾压混凝土不稳定

气管为一根打有 $\phi 5\text{mm}$ 孔眼(间距 15cm)的 $\phi 38\text{mm}$ 管。孔眼向上,紧贴洞顶壁,管口一端封堵,另一端引至洞口。但由于开挖的洞顶高

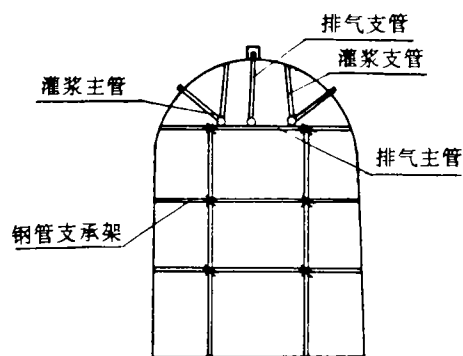


图3 灌浆管、排气管安装示意图

低不平,排气管不可能紧贴洞顶壁。这样浇筑时,混凝土即会堵住管的孔眼,而形成许多空穴。为了保证混凝土的浇筑质量,减少回填灌浆量,对排气管做了较大修改,将孔眼间距改为 1.0~1.5m,在孔眼位置焊接 25mm 支管,将支管伸到洞顶预先打好的钻孔内 5cm,此排气管在施工中效果较好。灌浆管、排气管

安装示意图 3。

3 施工组织设计概要

在施工前,对于较长轴线的洞室,考虑到楚天泵运送能力不足,拟采用夹江泵进入洞口接力入仓,而实际施工中考虑到两种泵运送能力不同,若其中一台坏了全线将停产,故未采用接力泵,而是采用搭设或开辟便道的办法解决。楚天泵管入仓,共设四条进料线;即在 $\nabla 495$ 高程 10[#] 地勘洞 1[#] 支洞布置一条进料站;在 $\nabla 491$ 高程 D₅ 洞口布置另一条进料站;在 $\nabla 507$ 高程 1[#] 地勘洞口布置第三条进料站;在 $\nabla 537$ 高程布置第四条进料站。灌浆总站布置在 10[#] 地勘洞 1[#] 支洞洞口,对于路线较长洞室采用接力灌浆。施工时,由于裂隙发育,岩石破碎,因此安全很重要。我们采取,施工中注意观察,及时支护的原则,在整个施工中未发生伤亡事故,按质、按量、按期完成了施工任务。

(收稿日期:19940418)

(上接第 58 页)

Study on Temperature Control of Roller Compaction Concrete(RCC) Overflow Section at Tongjiezi Project

Huang Qiyu

(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Research Institute)

Abstract RCC dam construction technology is applied in overflow section in principal part of the Tongjiezi Waterpower Project. In temperature control reserach, not only conventional computation method is used, but also planned construction schedule. Based on statistical mean monthly air temperature at damsite and givin placing temperature, pseudo real computation during whole dam construction period was carried out, temperature and stress of dam were analyzed.

Key Words Tongjiezi Project, overflow section, RCC, temperature control.

更正:本刊 1994 年第 3 期第 2 页第 13 行 30 年每年 1 亿 t,应为 30 年每年 1.5 亿 t。第 17 页表 1 每万千瓦投资应为单位千瓦投资;第 17 页表 1 单位千瓦淹地应为每万千瓦淹地。特此更正。

本刊编辑部