

三峡工程混凝土的温度控制措施

杨富亮

(中国长江三峡工程开发总公司试验中心,湖北 宜昌 443133)

摘要:针对三峡工程混凝土工程量大、生产强度高、结构形体复杂、质量要求高、施工时间长的特点,根据坝区气温变化规律,制定了相应的温度控制措施,包括:采用优质高效减水剂、引气剂、国标Ⅰ级粉煤灰联掺工艺、设计优化混凝土配合比;合理选择坝段竖向施工缝形式和分缝间距,控制坝体最高温度,以及分期通水冷却等一系列先进技术和工艺,有效地控制了混凝土的温度裂缝。

关键词:混凝土;温度控制;裂缝;三峡水利枢纽工程

中图分类号:TV431 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-7647(2002)05-0040-04

三峡工程坝址位于湖北省宜昌市三斗坪镇,距下游已建成的长江葛洲坝水利枢纽约 40 km。三峡大坝系混凝土重力坝,坝体混凝土约 1 760 万 m³,结构复杂,坝身孔洞多,坝块尺寸大,受气温影响大。有资料显示,三峡工程坝区 6~9 月日平均气温较高,昼夜温差大,最高气温超过 38℃,气温骤降频繁,极易引起混凝土温度裂缝。为此,三峡工程在混凝土配合比设计优化方面,以及在坝体混凝土的施工中,针对温度变化规律制定了相应的温度控制措施。

1 温控设计基本资料

三斗坪气象站实测的三峡坝区多年平均水温、气温见表 1。三峡工程混凝土自然拌和出机口温度(四级配)见表 2。花岗岩人工骨料混凝土热学性能见表 3。

表 1 三峡坝区多年平均水温、气温 ℃

月份	多年月平均气温	多年月平均水温	月份	多年月平均气温	多年月平均水温
1	6.0	9.4	7	28.7	25.2
2	7.4	9.8	8	28.0	25.7
3	12.1	13.2	9	23.4	22.9
4	16.9	17.7	10	18.1	19.6
5	21.7	21.3	11	12.3	16.1
6	26.0	23.5	12	7.0	11.9

表 2 三峡工程混凝土自然拌和出机口温度(四级配) ℃

月份	温度	月份	温度	月份	温度	月份	温度
1	8.7	4	18.6	7	29.8	10	19.8
2	9.5	5	23.3	8	29.3	11	14.3
3	13.8	6	27.1	9	24.8	12	9.5

表 3 混凝土热学性能

导热系数 /(m ² ·h ⁻¹)	导热系数 /(W·(m·℃) ⁻¹)	比热 /(J·(kg·℃) ⁻¹)	线膨胀系数 /(10 ⁻⁵ ℃)
0.003 471	2.50	959	0.85

2 优化混凝土配合比的主要技术措施

2.1 原材料的选择与控制

a. 水泥。进入拌和机的水泥,最高温度不得超过 60℃,有其他保证措施除外。三峡工程坚持采用具有微膨胀性质的水泥,以减少混凝土收缩变形。三峡工程标准 TGPS03-1998 规定了中热水泥熟料中的 MgO 含量控制在 3.5%~5.0% 范围内,该项措施对减少混凝土裂缝具有重要意义。

b. 粉煤灰。在混凝土中掺入有“固体减水剂”之称的优质国标Ⅰ级粉煤灰。试验表明,这种粉煤灰在混凝土中掺入 20%,其减水率可达 10%;掺入 40%,其减水率约为 14% 左右^①。减水作用可减少混凝土干缩应力,避免和减少干缩裂缝;掺优质国标Ⅰ级粉煤灰可节约水泥,降低混凝土温升,有利于防止温度裂缝。

c. 胶凝材料水化热。以葛洲坝水泥厂生产的 525 号中热水泥掺Ⅰ级粉煤灰并掺 0.5% 的 ZB-1A 型高效减水剂为例,胶凝材料水化热见表 4。

d. 外加剂。采用优质缓凝高效减水剂(减水率为 20% 左右)和引气剂联掺技术,减水率高达 30%。三峡工程所用缓凝高效减水剂,可以降低水泥初期水化热,并使其热峰值推迟,最高温升降低,有利于

作者简介:杨富亮(1965—),男,河南滑县人,助理工程师,主要从事混凝土及建筑材料检测工作。

① 中国长江三峡工程开发总公司试验中心.长江三峡水利枢纽工程二阶段混凝土配合比设计试验总报告,1998.

防止混凝土的温度裂缝。

表 4 胶凝材料水化热 kJ/kg

时间	粉煤灰掺量				时间	粉煤灰掺量			
	0	20%	30%	40%		0	20%	30%	40%
1 h	18.6	17.2	14.0	11.4	72 h	220	178	176	148
2 h	21.0	18.9	15.0	12.4	90 h	237	196	192	163
3 h	21.5	19.5	16.6	13.1	120 h	255	220	209	178
24 h	123	71	84	48	140 h	260	227	218	185
48 h	191	149	152	123	168 h	269	238	227	190

2.2 混凝土配合比设计

a. 外加剂、粉煤灰联掺工艺. 三峡工程二阶段混凝土, 采用花岗岩人工骨料, 单位用水量偏高, 较天然骨料混凝土的用水量高 40 kg/m^3 左右, 胶凝材料用量相应增加, 混凝土内部温升较高, 易导致混凝土产生温度裂缝. 缓凝高效减水剂和引气剂、国标 I 级粉煤灰(掺量 30%)联掺, 减水率高达 34.4%^①, 大幅降低了混凝土的单位用水量. 如四级配混凝土用水量可降至 85 kg/m^3 左右, 大坝混凝土的温升可控制在避免发生裂缝的限值以下. 选用新型高效减水剂, 减少胶凝材料用量, 混凝土最高温度可降低 6°C 左右($R_{28}400$ 从 $45^\circ\text{C} \sim 46^\circ\text{C}$ 降低到 $39^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$, 满足设计要求).

b. 优化混凝土配合比. 优化混凝土配合比、减少胶凝材料用量是混凝土温控的重要措施之一. 根据专家意见及中国长江三峡工程开发总公司的有关规定, 用 525 号中热水泥、缓凝高效减水剂和引气剂、国标 I 级粉煤灰, 经过多次试验调整后的施工配合比见表 5.

c. 混凝土自生体积变形. 混凝土的自生体积变形对大坝混凝土的抗裂性有着不可忽视的影响. 用葛洲坝水泥厂生产的中热 525 号水泥(MgO 含量 4.05%)、掺平圩 I 级粉煤灰, 在恒温(20°C 左右)、绝湿

条件下, 以 24 h 龄期的测值为基准值, 执行 SD105-82 《水工混凝土试验规程》, 对三峡大坝混凝土进行了自生体积变形试验, 试验结果见图 1. 从图 1 可以看出, 自生体积变形均为膨胀变形, 从而可利用混凝土微膨胀产生的预压应力, 补偿混凝土降温时的收缩, 以防止或减少大坝混凝土产生裂缝.

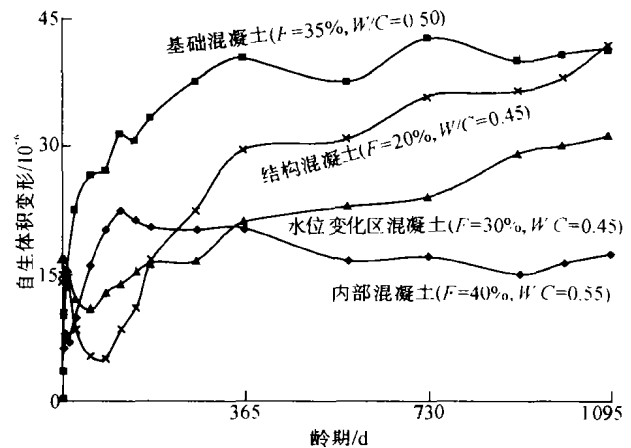


图 1 混凝土自生体积变形曲线

3 控制混凝土施工温度的主要措施

3.1 分缝分块

大坝被永久性横缝划分为坝段, 合理选择坝段竖向施工缝形式和分缝间距是大坝温控防裂的主要措施之一. 以泄洪坝段为例, 泄洪坝段横缝间距 21 m, 坝块顺流向最大宽度 126.7 m, 分 3 块. 泄 1 至泄 7 号坝段各仓顺流向长度分别为 25 m, 44.7 m, 47.2 ~ 57 m (两条纵缝分别距坝轴线 25 m 及 69.7 m); 泄 8 至泄 23 号坝段各仓顺流向长度分别为 25 ~ 30 m, 39 m, 41 ~ 52.9 m (两条纵缝分别距坝轴线 25 m 及 64 m); 坝块最大尺寸 21 m $\times$ 57 m.

表 5 三峡工程二阶段使用的主要混凝土施工配合比

工程部位	设计要 求	级配	水胶比	用水量/kg	粉煤灰掺量/%	水泥用量/kg	粉煤灰/kg
大坝内部	$R_{90}150D100S8, \epsilon_{P28} = 0.70 \times 10^{-4}, \epsilon_{P90} = 0.75 \times 10^{-4}$	三	0.55	94	40	103	68
		四	0.55	83	40	91	60
基础约束区	$R_{90}200D150S8, \epsilon_{P28} = 0.80 \times 10^{-4}, \epsilon_{P90} = 0.85 \times 10^{-4}$	三	0.50	102	35	133	71
		四	0.50	85	35	111	60
水上、水下外部	$R_{90}200D250S10, \epsilon_{P28} = 0.80 \times 10^{-4}, \epsilon_{P90} = 0.85 \times 10^{-4}$	三	0.50	102	30	143	61
		四	0.50	86	30	120	52
水位变化区	$R_{90}250D250S10, \epsilon_{P28} = 0.80 \times 10^{-4}, \epsilon_{P90} = 0.85 \times 10^{-4}$	三	0.45	102	30	159	68
		四	0.45	86	30	134	57
内部 ^①	$R_{90}150D100S8, \epsilon_{P28} = 0.70 \times 10^{-4}, \epsilon_{P90} = 0.75 \times 10^{-4}$	四	0.55	86	40	94	63
约束区 ^①	$R_{90}200D150S8, \epsilon_{P28} = 0.80 \times 10^{-4}, \epsilon_{P90} = 0.85 \times 10^{-4}$	四	0.50	90	35	117	63

注: ①表示塔带机施工的配合比。

① 中国长江三峡工程开发总公司试验中心. 长江三峡水利枢纽工程二阶段混凝土配合比设计试验总报告, 1998.

3.2 控制坝体最高温度

控制坝体实际最高温度的有效措施是降低混凝土的浇筑温度,减少胶凝材料的水化热温升.而降低混凝土的浇筑温度应从降低混凝土出机口温度,减少运输途中和仓面的温度回升两方面着手.三峡大坝坝体各区域坝体设计允许最高温度见表6.

表6 三峡工程各区域坝体设计允许最高温度 ℃

坝体区域	12月 至2月	3月和 11月	4月和 10月	5月和 9月	6~8月
基础强约束区	23~24	26~27	30~31	31~33	31~34
基础弱约束区	23~24	26~27	30~31	33~34	33~36
脱离基础约束区	23~24	26~27	30~31	33~34	36~37

注:导流底孔区域混凝土5~9月份浇筑时允许最高温度应降低1~2℃.

a. 严格控制混凝土出机口温度和浇筑温度.三峡工程工期紧,施工强度大,温控要求高,为保证进度和质量,基础强约束区12月至2月为自然入仓,其他季节采用二次风冷骨料工艺,使骨料温度降至-3℃左右以及加冰拌和,控制混凝土出机口温度小于或等于7℃;脱离基础约束区混凝土12月至3月为自然入仓,其他季节出机口温度小于或等于14℃.相应浇筑温度(指混凝土经过平仓振捣后测得10~15cm处的温度)为12℃~14℃和16℃~18℃.监理要求机口和仓面每2h测温一次,若超过允许幅度,应及时通知拌和楼调整,超过2℃以上则作废料处理.据实测,2000年4~10月三峡工程各部位的混凝土入仓温度和浇筑温度见表7.

表7 混凝土入仓温度和浇筑温度统计 ℃

标段	入仓温度				浇筑温度				超温率
	测次	最大	最小	平均	测次	最大	最小	平均	
I、II B标	10665	25	3	11.2	10070	27	5.0	13.6	8.2%
II A标	7008	22	4	11.2	6662	27	5.5	14.0	5.1%
III标	2126	18	6	12.7	2126	21	7.0	14.9	1.4%

b. 运输、入仓过程的温度控制措施.三峡工程夏季混凝土运输、入仓过程的温度控制要求做到以下几点:①混凝土运输车辆,车顶设遮阳篷,以减少混凝土受太阳直接辐射,车两侧设保温被,以减少混凝土温度倒灌,拌和楼前停车处设喷雾装置;②尽量缩短混凝土运输时间和卸料入仓时间,在混凝土浇筑期间严控门机作他用;③禁止非混凝土运输车辆抢占、堵塞混凝土运输路线,合理安排混凝土运输车辆,保证混凝土入仓强度;④加强塔带机、皮带机运输的保冷措施,控制混凝土温度回升在2℃左右.

c. 混凝土浇筑过程的温度控制措施.三峡工程混凝土浇筑过程的温度控制措施有:①控制开仓时间,基础强约束区要求16时开仓,次日10时收仓;②采用台阶法浇筑混凝土,台阶宽3m,高50cm,并合理安排4~6台振捣器振捣,提高起吊设备入仓强

度,缩短混凝土的覆盖时间,减少混凝土浇筑过程中的温度回升,控制温度回升在2℃~3℃的范围内;③禁止仓内电焊作业,以减少机械散热而引起的混凝土温度回升;④及时铺设保温被(三峡工程采用高发泡聚乙烯片材,表面贴一层彩条布),防止混凝土冷量损失;⑤仓内采取喷雾措施(以风带水形成雾或以气带水通过管道上小孔喷雾),降低仓内环境气温,减少混凝土温升;⑥合理安排混凝土施工进度,做到浇筑块连续、均匀上升.

d. 混凝土养护过程的温度控制措施.三峡工程混凝土养护过程的温度控制措施有:①混凝土冲毛后,可派专人落实表面洒水养护工作,养护时间为28d,以降低混凝土温度,防止混凝土干缩;②混凝土浇筑后,及时铺设湿草垫,在混凝土初凝后,不间断洒水进行保湿养护;③有条件的部位采用蓄水或流水养护,侧面形成水幕养护;④加强混凝土的温控养护和冬季保温.

e. 合理的层厚及间歇期.大体积混凝土浇筑层厚为:基础约束区一般为11月至次年3月采用1.5~2m,4~10月采用1.5m;脱离基础约束区一般为2m.层间间歇期应不少于3d,也不宜大于10d.大体积混凝土层间间歇期应满足表8的要求,墩、墙等结构混凝土层间间歇期应满足表9的要求.

表8 大体积混凝土浇筑层间间歇时间 d

层厚	12月至2月	3~5月	6~8月	9~11月
1.5m	3~7	4~8	5~9	4~8
2.0m	5~9	6~10	7~10	6~10

表9 墩、墙混凝土浇筑层间间歇时间

部位	层厚/m	层间间歇时间/d
厚度小于2.5m	3~4	4~9
压力管道周围混凝土	2~3	6~10

注:低温季节取下限值.

3.3 通水冷却

通水冷却分三期^[1]进行.初期通水的目的是削减浇筑层水化热温升,从而控制坝体最高允许温度.水温6℃~8℃,通水时间10~15d.在混凝土收仓后12h内开始通水,水管通水流量不小于18L/min.初期冷却后的闷温(预埋在混凝土中的各坝块通水范围内间距为(1.5m×1.5m)~(1.5m×3.0m)不等的若干水管(闷管)通水后3~5d内测得的闷管中水温)资料表明,混凝土最高温度得到了有效控制.中期通水的目的是为了预防内外温差作用造成混凝土裂缝.采用江水进行,从每年9月份起,通水时间1.5~2.5个月,以混凝土块体温度达到20℃~22℃为准,水管通水流量达到20~25L/min.三峡工程通过中期通水,夏季浇筑的混凝土到10月份其内部温度基本降至21℃~

25℃.需进行坝体接缝灌浆及岸坡接触灌浆的部位,必须进行后期通水冷却.一般从10月初开始,通水时间以坝体达到灌浆温度为准.三峡工程I、II B标2000年接缝灌浆混凝土温度偏差均控制在设计规定温度的-2℃~1℃之间,511个灌区的后期通水于9月中旬开始;II A标2000年灌浆部位的混凝土温度均在14℃~16℃,满足设计要求.

3.4 表面养护

三峡坝区昼夜温差变幅大,气温骤降频繁,即使夏季也是如此.为此在气温骤降期要求对坝体浇筑块(龄期大于7d以上)进行保温.另外对当年浇筑的混凝土从当年10月起开始对暴露面进行保温,时段延长至次年气温升高止.对孔洞要进行封堵.保温材料性能应符合设计提出的标准.据实测,三峡工程采用表面贴防雨彩条布的高发泡聚乙烯片材(根据不同部位要求选择不同厚度)后,混凝土表面温度与外界气温之差约5℃左右.

4 混凝土裂缝情况

a. 裂缝统计.三峡工程大坝迎水面混凝土,经多次检查,在泄16号、泄9至泄13号共6个坝段上游面先后发现8条竖向裂缝,泄13号、泄16至泄22号共8个坝段下游面发现9条竖向裂缝.2000年厂坝项目浇筑的混凝土裂缝统计情况见表10.

表10 厂坝混凝土裂缝统计(2000-01-01~12-31浇筑)

标段	混凝土方量 /万 m ³	裂缝类型及条数			裂缝率 /(条·(万 m ³) ⁻¹)
		II	III	IV	
I、II B标	248.72	17	1	0	0.072
II A标	104.5	1	1	0	0.019
III标	28.22	0	0	0	0

注:裂缝类型II类为表面(浅层)裂缝,一般缝宽 $0.2\text{ mm} \leq \delta < 0.3\text{ mm}$,缝深 $30\text{ cm} < h \leq 100\text{ cm}$,平面缝长 $300\text{ cm} < L < 500\text{ cm}$,呈规则状;III类为表面深层裂缝,缝宽 $0.3\text{ mm} \leq \delta \leq 0.5\text{ mm}$,缝深 $100\text{ cm} < h < 500\text{ cm}$,缝长 $L > 500\text{ cm}$,呈规则状.IV类缝宽 $\delta > 0.5\text{ mm}$,缝深 $h > 500\text{ cm}$,侧(立)面长度 $L > 500\text{ cm}$,为贯穿裂缝.

b. 原因分析及处理. I, II B标裂缝除左导墙为RCC外,大多发生在高标号抗冲磨400~450号混凝土中,尤其是泄洪深孔两侧墩墙裂缝较为严重.其主要原因是仓面间歇过长、坝块体型对防裂不利,架设模板、铺设钢筋等备仓过程中气温骤降,以及高标号混凝土发热量大、内外温差大等;II A标仓面产生裂缝的原因主要是温度骤降,仓面未能及时保温造成的.已采取了凿槽铺砂浆、布设限裂钢筋等处理措施.

5 结 语

a. 采用缓凝高效减水剂、引气剂、国标I级粉煤灰掺掺工艺,降低了混凝土的单位用水量,从而降

低了混凝土的水化热温升,既经济又对温控有利,值得推广.

b. 对混凝土原材料、拌和生产、运输、入仓浇筑、覆盖保温、通水冷却及洒水养护等全过程制定了一系列的温控措施,为夏季混凝土的温度控制积累了一定经验.

c. 通过选用新型高效减水剂,减少胶凝材料用量,混凝土最高温度可降低6℃左右.混凝土的最高温度得到了控制,对防止混凝土裂缝起到了显著作用.

d. 采用初期通水冷却控制坝体最高温度;中期通水削减内外温差;后期通水满足大坝分期分批冷却、灌浆的需要.这种通水冷却方式可在大中型水电工程推广.

参考文献:

[1] 龚召熊.水工混凝土的温控与防裂[M].北京:中国水利水电出版社,1999.255~256.

(收稿日期:2001-08-04 编辑:马敏峰)

·简讯·

德国风电装机2001年再创新高

德国是世界上开发风电最快的一个国家,1989年其风电装机不过10万kW,位居美国和丹麦之后,是世界上第三大风电装机国,但到了20世纪90年代,它的发很快,1995年其风电装机达113万kW,超过了丹麦,排名升至第二位.两年后的1997年,风电装机又增至193万kW,从而又超过了美国,处于世界领先地位.

近几年来,德国继续大力发展风电,步伐一年比一年加快.1998年达到287万kW,1999年为444万kW,2000年增加到611万kW,2001年更高达875万kW,把其它各国远远地甩在了后面.据德国风能协会主席称:2001年德国风电年发电量已达130亿kW·h,在同年电力供应中的比例已接近3%.

目前德国风电还局限在陆地上开发,主要在西北部的下萨克森州、西南部的北威州和北部的石荷州,从2002年起准备开发海上风电,计划在北海和波罗的海上开发,预计2003年可以部分投入运行.

据2002年德国风力能源研究所发表的报告称,2002年德国将再增加风电装机约290万kW.到2010年,德国陆地上风电装机将达到2000万kW,海上风电装机达到240万kW,到2030年,德国风电的年发电量将占总发电量的28%.

(吴冀高供稿)