

三峡大坝混凝土设计及温控防裂技术突破

郑守仁

(长江水利委员会 湖北 武汉 430010)

摘要 介绍三峡工程大坝混凝土设计及温控防裂技术的创新方法。大坝混凝土设计从传统的混凝土强度设计转为将混凝土耐久性与强度设计并重,采取了提高大坝混凝土耐久性的措施。在大坝混凝土温度控制及防裂技术中,首次提出并应用“个性化”通水冷却方案,混凝土施工监控实施天气预警、温度控制预警及间歇期预警制度,以及细化的综合防裂措施,取得了显著成效。

关键词 重力坝;大体积混凝土;温度控制;防裂技术;三峡水利枢纽工程

中图分类号:TV632.63;TV331

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2009)05-0046-08

Innovations in concrete design, temperature control and anti-cracking techniques for concrete construction of Three Gorges Dam//ZHENG Shou-ren(Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, Hubei, 430010)

Abstract: The innovative methods of concrete design, temperature control and crack prevention technology of the Three Gorges Project Dam are introduced. The concrete design of the Three Gorges Dam is different from the conventional design, which only considers concrete strength; it is an integrated design that considers concrete durability and strength, and takes measures to improve the dam's concrete durability. For temperature control and prevention of cracking in dam concrete placement, some measures are put forward, including individuation water cooling, weather, temperature control, and intermission early warning systems for concrete construction monitoring, as well as detailed integrated crack control measures, which are a notable achievement.

Key words: gravity dam; mass concrete; temperature control; anti-cracking technology; Three Gorges Project

三峡水利枢纽工程由大坝、电站和通航建筑物组成(图1)。大坝为混凝土重力坝,坝顶高程185.0m,坝顶长2309.5m,最大坝高181.0m。大坝按千年一遇洪水流量 $98\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 设计,相应的挡水位为175.0m;校核按万年一遇洪水加大10%洪水流量 $124\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 设计,相应的挡水位为180.4m。泄洪坝段布置在河床中部,泄洪设施为深孔和表孔。泄洪坝段前缘总长483.0m,分为23个坝段,每个坝段中部设宽7.0m、高9.0m的泄洪深孔,进口底高程90.0m,2个坝段之间跨缝布置净宽8.0m的泄洪表孔,溢流堰顶高程158.0m(图2)。为满足施工导流及截流要求,在表孔的正下方跨缝布置22个导流底孔,出口宽6.0m、高8.5m,中间的16个孔进口底高程为56.0m,两侧各3个孔的进口底高程为57.0m,导流底孔已全部回填混凝土封堵。泄洪坝段两侧的厂房坝段及坝后厂房共布置26条电站引水压力管道,进水口位于大坝上游侧,进口底高程为108.0m,直径为12.4m,在其下部布置7个直径4.5m的圆形排沙孔,进口底高程为70.0m及

90.0m。在泄洪坝段与两侧厂房坝段相接的导墙(右侧兼作纵向围堰)坝段各布置1个排漂孔,孔宽10.0m,高12.0m,进口底高程为133.0m;右岸厂房安Ⅱ坝段设1个排漂孔,孔宽7.0m、高10.0m,进口底高程为130.0m。两岸非溢流坝段与厂房坝段相接,在左岸非溢流坝段内布置升船机上闸首和临时船闸坝段。临时船闸坝段已建成,为2孔冲沙闸(进口底高程102.0m,出口宽5.5m,高9.6m)。大坝混凝土体积达1610万 m^3 ,是当今世界上已建大坝混凝土量最多、坝体过流孔口最多、泄流量最大的重力坝。大坝施工按导流方式分为3期:一期施工纵向围堰(右导墙)坝段和左岸非溢流坝段;二期施工泄洪坝段和左厂房坝段及左厂房;三期施工右岸非溢流坝段和右厂房坝段及右厂房。

重力坝为大体积混凝土结构,混凝土裂缝的成因是温度变化对体积变化的约束。混凝土浇筑后,由于水泥在水化热凝固过程中散发大量的水化热,使混凝土体积膨胀,温度急剧上升,此时混凝土的弹性模量较小,徐变较大,升温引起的压应力不大,待

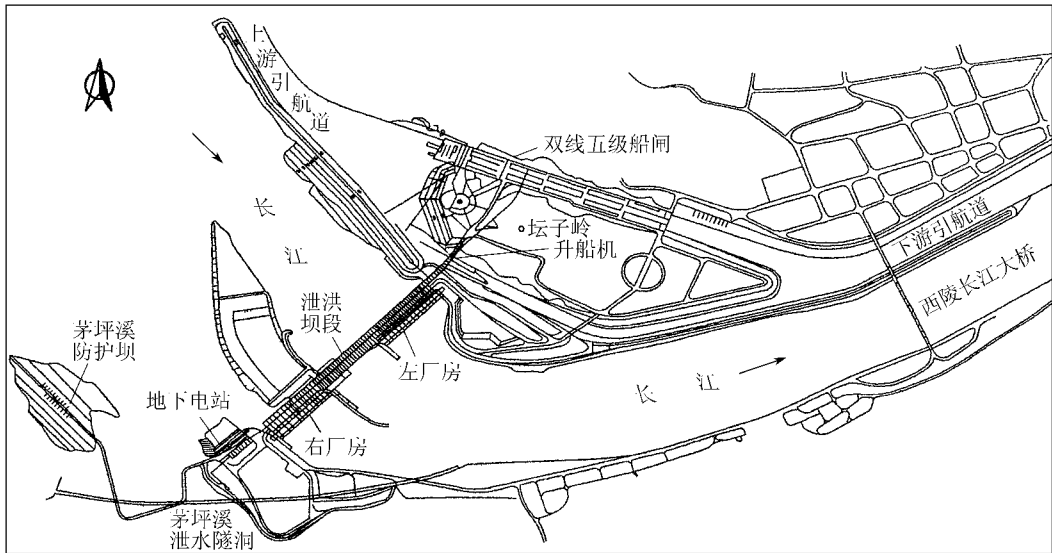


图1 三峡水利枢纽平面布置

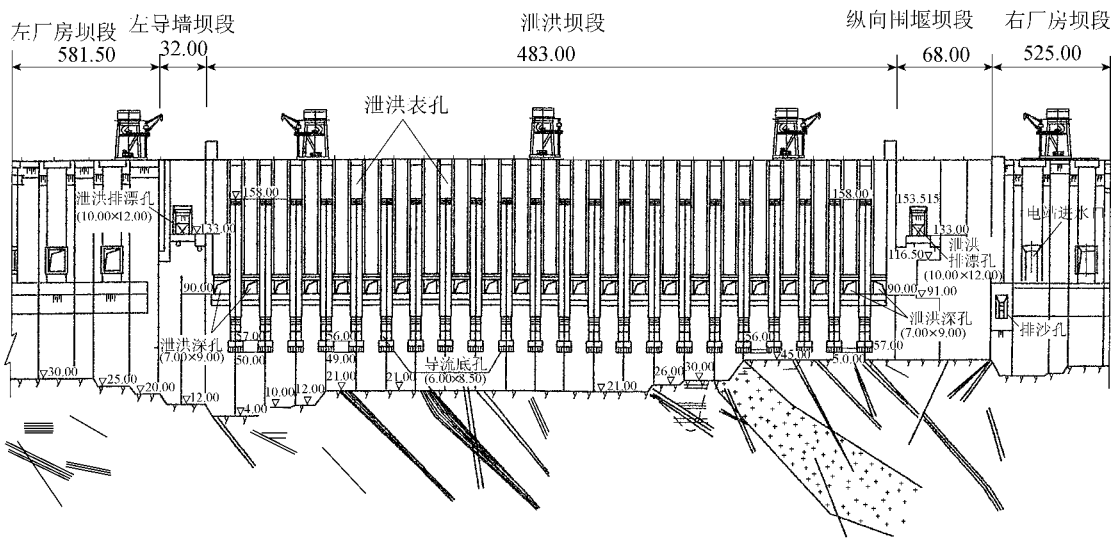


图2 大坝泄洪坝段及厂房坝段上游立视图(单位:m)

混凝土温度达到最高温度后,随着热量向外部介质散发,温度开始下降,混凝土体积收缩,此时,混凝土的弹性模量较大,徐变较小,在一定约束条件下会产生相当大的拉应力。另外,大体积混凝土常年暴露于大气中,有些部位与水接触,年气温和水位的变化都会在混凝土结构中产生较大的拉应力。混凝土是脆性材料,抗拉强度只有抗压强度的1/10左右,当温度变化引起的拉应力超过混凝土的抗拉强度时,就会产生裂缝。国内外已建混凝土坝较多出现了裂缝,例如,美国的诺福克(Norfolk)重力坝出现了贯穿性裂缝,雷威尔斯托克(Revelstoke)、德沃歇克(Dworshak)、卢塞尔(Richard B. Russel)等重力坝上游面出现严重的劈头裂缝,前苏联兴建的马马康、布拉茨克、布赫塔尔明等宽缝重力坝都出现了大量裂缝;我国丹江口重力坝、桓仁大头坝、陈村拱坝等也都出现了裂缝。有些大坝混凝土裂缝较多,有的大坝因

裂缝严重而被迫停工修补。混凝土裂缝影响大坝的整体性和耐久性,对大坝运行安全造成不利影响。三峡工程大坝混凝土施工采取严格的温度控制和综合防裂措施,使大坝混凝土裂缝得到有效控制,一、二期工程施工的大坝混凝土,出现浅表层裂缝0.032条/万 m^3 (为无贯穿性裂缝);三期工程施工大坝混凝土量396.5万 m^3 ,未发现1条裂缝,创造了当今世界混凝土重力坝筑坝史上的奇迹。

1 大坝混凝土设计

1.1 大坝混凝土设计主要指标

三峡工程大坝混凝土设计将耐久性和强度要求并重,混凝土除满足强度要求外,还应满足抗渗、抗冻、抗裂、抗冲磨、抗碳化、抗侵蚀性及防止碱骨料反应等耐久性方面的要求。大坝混凝土设计标号及主要指标见表1。

表 1 三峡工程大坝混凝土标号及主要设计指标

混凝土 标号	级配	抗冻 标号	抗渗 标号	抗 侵蚀	抗 冲磨	极限拉伸值/ 10^{-6}		限制最大 水胶比	最大粉煤灰 质量分数/%	使用部位
						28 d	90 d			
R ₉₀ 200	三	F ₁₅₀	W ₁₀	✓		≥85	≥88	0.50~0.55	30	基岩面 2 m 范围
R ₉₀ 200	四	F ₁₅₀	W ₁₀	✓		≥85	≥88	0.50~0.55	30~35	基础约束区及填塘
R ₉₀ 150	四	F ₁₀₀	W ₈			≥70	≥75	0.55~0.60	40	大坝内部
R ₉₀ 200	三、四	F ₂₅₀	W ₁₀			≥85	≥88	0.50	25	水上、水下坝体外部
R ₉₀ 250	三、四	F ₂₅₀	W ₁₀			≥85	≥88	0.45	20	水位变化区外部、公路桥墩
R ₂₈ 300	一、二、三	F ₂₅₀	W ₁₀		✓	≥85		0.45	20	孔口周边胸墙、牛腿等结构混凝土
R ₉₀ 300	一、二、三	F ₂₅₀	W ₁₀		✓	≥85		0.45	20	孔口周边胸墙、牛腿等结构混凝土
R ₂₈ 400	二	F ₂₅₀	W ₁₀		✓	≥90		0.35	10~15	泄洪孔、排沙孔、排漂孔抗冲磨部位
R ₉₀ 400	二	F ₂₅₀	W ₁₀		✓	≥90		0.35	10~15	泄洪孔、排沙孔、排漂孔抗冲磨部位
R ₉₀ 150	三	F ₂₀₀	W ₈			≥70	≥75	0.50	40	纵向围堰及左导墙 RCC
R ₉₀ 100	三	F ₁₅₀	W ₆			≥60	≥65	0.50	50	纵向围堰及左导墙 RCC

1.2 提高大坝混凝土耐久性的措施

针对三峡大坝混凝土原材料的特点和其满足耐久性的要求,在原材料优选的基础上,通过不同水胶比、不同粉煤灰掺量的多种组合对混凝土配合比进行了力学、热学、变形等全面的性能试验,经技术经济比较,优选出大坝各部位混凝土配合比。三峡大坝混凝土配合比设计从传统的强度设计转变为以耐久性为主的设计,其主要技术措施如下:选用Ⅰ级粉煤灰,用以减水,节约水泥、降低混凝土温升,减少干缩、改善混凝土性能;选用具有微膨胀性能的强度等级为 42.5 的中热水泥,将 MgO 含量适当提高,利用其膨胀性来补偿混凝土降温阶段的体积收缩,减少裂缝;选用缓凝高效减水剂,降低人工骨料混凝土用水量;掺用引气剂提高混凝土的抗冻等级,降低水胶比(内部 0.55,外部水上、水下 0.50,水位变化区 0.45;基础 0.50),掺粉煤灰质量分数增大(内部 40%,外部 30%,基础 35%,结构 10%~20%)。施工检测成果证明大坝混凝土设计先进合理。

a. 混凝土的抗冻性能。抗冻性是混凝土耐久性的主要指标,虽然三峡坝区不是寒冷地区,但为了增强大坝混凝土对自然风化因素的抵抗能力,提高混凝土的耐久性,对大坝混凝土仍提出了较高的抗冻性要求,大坝抗冻标号内部混凝土为 F₁₀₀、基础混凝土为 F₁₅₀、大坝表部混凝土及其他部位为 F₂₅₀。混凝土配合比设计,通过降低水胶比、掺用引气剂、掺用Ⅰ级粉煤灰、降低用水量等综合措施提高混凝土的抗冻能力。室内试验及施工检测成果表明,大坝混凝土抗冻性均达到并超过了设计标准,具有很高的抗冻耐久性。

b. 混凝土的抗渗性也能反映其密实性。混凝土的渗透性对耐久性起重要的作用,因为渗透性控制水分渗入的速率,也控制混凝土受热或冰冻时水的变化。三峡工程通过采用低水胶比、低用水量以及正确的施工振捣和养护,保证了混凝土的抗渗性。

检测成果表明各部位混凝土抗渗等级均满足设计要求,在达到设计抗渗等级的同时,试件渗水程度较低,说明大坝混凝土具有良好的抗渗能力。

c. 混凝土的抗碳化性能。大坝混凝土中有部分是结构性混凝土,必须考虑混凝土的碳化和钢筋锈蚀问题。当碳化深度超过混凝土的保护层时,在水与空气存在的条件下,就会使混凝土失去对钢筋的保护作用,钢筋生锈之后其受力面积减少。钢筋锈蚀后,其锈蚀产生的体积膨胀将导致混凝土开裂、剥落,从而影响结构物运行的安全性和耐久性。三峡大坝结构性混凝土水胶比均不大于 0.45,掺粉煤灰质量分数不大于 20%,碳化试验测得 28 d 最大的碳化深度仅为 1.26 cm,大致相当于自然环境中 50 a 的碳化深度,而大坝结构混凝土保护层厚度一般大于 6 cm。利用多系数碳化方程计算,预测碳化深度达到钢筋保护层厚度至少要 500 a 以上。

d. 混凝土的抗裂性能。大坝混凝土裂缝往往会引起渗漏、溶蚀、冻融破坏及钢筋锈蚀等,严重的裂缝还会影响建筑物的整体性和稳定性,甚至威胁建筑物的安全运行。因此,混凝土的抗裂性能也是耐久性的一个重要方面。三峡工程通过采用大掺量Ⅰ级粉煤灰、优质外加剂及质量分数 4% 左右 MgO 中热水泥,改善了大坝混凝土的变形性能,使混凝土具有低热性及体积稳定性。试验成果表明,大坝混凝土极限拉伸值均在 85×10^{-6} 以上(90 d);干缩变形较小,在 382×10^{-6} 以内(90 d);绝热温升值较低,为 19.9~22.9℃;混凝土具有微膨胀性,自生体积变形约为 $(15 \sim 45) \times 10^{-6}$,满足混凝土抗裂性的要求。

e. 混凝土碱骨料反应。混凝土如果发生碱骨料反应,将导致其膨胀开裂,严重时会导致坝体结构破坏。大坝混凝土采用的花岗岩人工骨料经多种试验方法检测,判定为非活性骨料,但仍对混凝土原材料水泥、粉煤灰、外加剂等碱含量和混凝土总碱量进行了严格限制,其控制指标高于国家标准和有关

规定,从现场检测结果看,原材料碱含量远低于控制指标,水泥熟料含碱质量分数小于0.5%,粉煤灰含碱质量分数为1.0%,而以最不利情况即原材料以最大含碱量及大坝混凝土以最高强度($R_{28}400$)配合比计算混凝土总碱量最大值为 2.3 kg/m^3 ,小于控制值(2.5 kg/m^3)。

2 大坝混凝土温度控制设计

2.1 坝体的分缝分块

泄洪坝段横缝间距为 21.0 m ,坝体顺流向最大长度为 126.7 m ,设2条纵缝(图3),最大浇筑块长度达 57.0 m ;厂房坝段横缝间距与机组宽度相同,为 38.3 m ,受引水压水钢管控制分为 25 m 的钢管坝段和 13.3 m 的非钢管坝段,顺流向最大长度为 118.0 m ,设2条纵缝(图4),最大浇筑块长度为 43.0 m 。

2.2 大坝混凝土温度控制标准

2.2.1 基础温差标准

a. 坝体稳定温度。三峡大坝上游水位为 175.0 m ,水面温度为 $18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,直线变化至 107.0 m 高程时水面温度为 $14.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,其下保持水温 $14.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不变。下游水位 76.0 m 处水面年均水温为 $17.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,河床底部高程 10.0 m 处的年均水温为 $15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,其间为直线变化。坝址气温多年平均值为 $17.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,下游坝面受太阳辐射影响,年均升温值为 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,地基 150.0 m 深处地温为 $17.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。按上述边界条件计

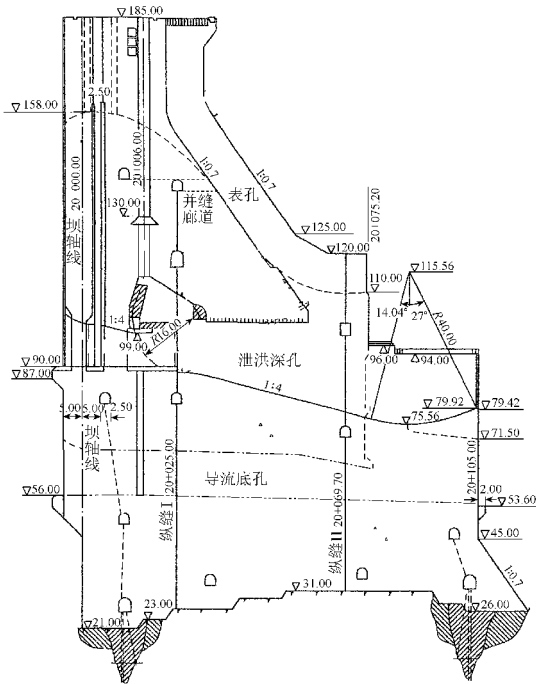


图3 泄洪坝段剖面示意图(单位:m)

算,泄洪坝段及厂房坝段非钢管坝段基础约束区稳定温度第1仓为 $14.6\sim 14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,第2仓及第3仓为 $15.5\sim 15.8\text{ }^{\circ}\text{C}$;厂房坝段钢管坝段基础约束区稳定温度第1仓为 $14.4\sim 14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,第2仓及第3仓为 $14.7\sim 15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

b. 基础允许温差。大坝混凝土采用柱状块浇筑,基础允许温差按表2控制。

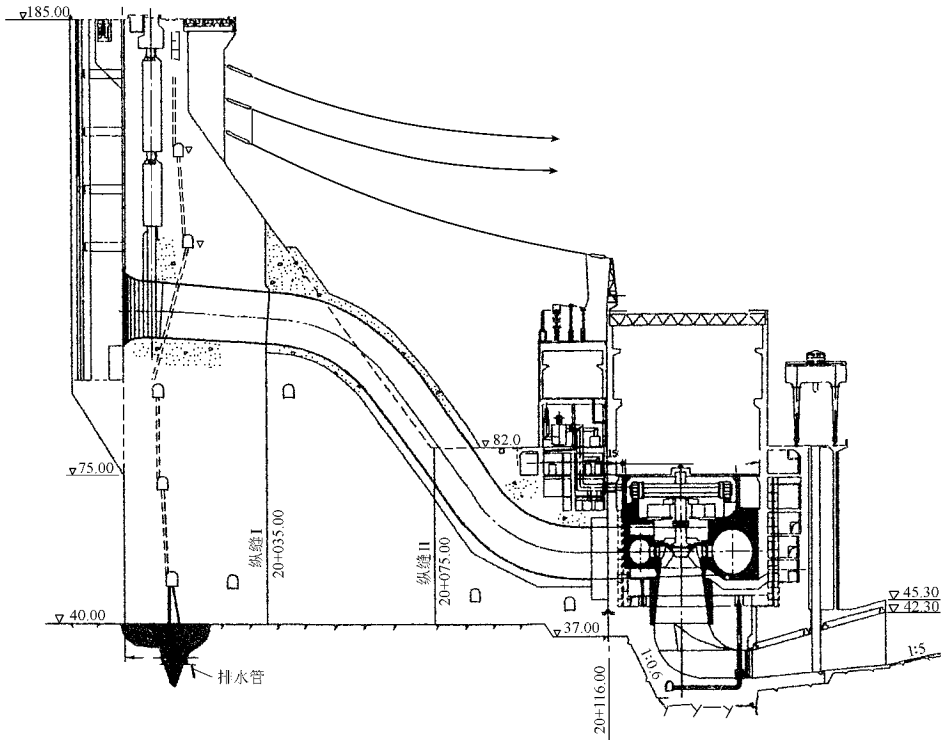


图4 厂房坝段典型剖面(单位:m)

表2 大坝混凝土基础允许温差 ℃

部位	大坝混凝土基础允许温差				通仓
	$L \leq 20\text{ m}$	$L = 21 \sim 30\text{ m}$	$L = 31 \sim 40\text{ m}$	$L = 41 \sim 50\text{ m}$	
基础强约束区	22	21 ~ 30	19 ~ 17	16 ~ 15	14
基础弱约束区	25	24 ~ 23	22 ~ 20	19 ~ 18	17

注： L 为浇筑块长边尺寸，高度等于 $0 \sim 0.2L$ 的为基础强约束区，高度等于 $0.2 \sim 0.4L$ 的为基础弱约束区。

2.2.2 上下层温差标准

当坝体下层混凝土龄期超过28d成为老混凝土时，其上层混凝土浇筑应控制上下层温差，对连续上升坝段且浇筑高度大于 $0.5L$ 时，允许老混凝土面上下各 $L/4$ 范围内上层混凝土最高平均温度与新混凝土开始浇筑时下层实际平均温度之差不大于 17°C ，浇筑块侧面长期暴露或上层混凝土高度小于 $0.5L$ 或非连续上升时，应严格控制上下层温差标准。

2.2.3 坝体表面保护标准

a. 初期气温骤降。大坝施工期内每月浇筑的混凝土都有可能遭遇降温袭击，新浇混凝土遇日平均气温在 $2 \sim 3\text{ d}$ 内连续下降 $6 \sim 8^\circ\text{C}$ 时，基础约束区和特殊部位龄期 $2 \sim 3\text{ d}$ 以上、一般部位 $3 \sim 4\text{ d}$ 以上均需进行表面保护。

b. 中后期气温年变化及气温骤降。坝体在气温年变化和气温骤降的同时作用下，无保护时极可能使混凝土表面产生裂缝。大坝施工期内，应视混凝土浇筑的不同月份和不同部位，结合考虑后期通水情况进行中期通水冷却，并采取必要的表面保护。

2.2.4 坝体最高温度控制标准

控制坝体混凝土最高温度实质上是控制坝体内外混凝土温度差。对均匀上升浇筑块，其各季节坝体混凝土最高温度按表3控制。

表3 混凝土最高温度控制标准 ℃

混凝土标号	12月至翌年2月	3月、11月	4月、10月	5月、9月	6~8月
$R_{90} \leq 200$	23 ~ 24	26 ~ 27	31	33 ~ 34	35 ~ 38
$R_{28} \geq 250$	24 ~ 26	28 ~ 29	31 ~ 33	34 ~ 35	37 ~ 39

注：重要部位取下限值。

2.2.5 设计允许最高温度

根据大坝各部位稳定温度及上述温控标准确定大坝各部位的设计允许最高温度。对于基础约束区混凝土，可按基础允许温差加上坝体稳定温度与坝体最高温度控制标准比较后取其低值；对于均匀上升的脱离基础约束区混凝土，可按坝体最高温度控制标准确定。

3 大坝温控防裂技术措施

3.1 优化大坝混凝土配合比，提高混凝土抗裂能力
大坝混凝土配合比设计中选用具有微膨胀性的

强度等级为42.5的中热水泥，掺用缓凝高效减水剂和引气剂，在满足混凝土标号及抗冻、抗渗、极限拉伸值等主要设计指标前提下，尽量增大Ⅰ级粉煤灰掺量，降低水胶比，并要求满足混凝土匀质性指标及强度保证率，改善混凝土性能，提高混凝土抗裂能力。三期工程大坝混凝土极限拉伸值较一、二期大坝混凝土有所提高，28d龄期极限拉伸值由 80×10^{-6} 提高至 85×10^{-6} ，90d龄期极限伸值由 85×10^{-6} 提高至 88×10^{-6} 。

3.2 控制大坝坝块混凝土最高温度

a. 三峡大坝混凝土浇筑仓面大、强度高，采用塔带机为主、门塔机为辅的施工方案。为控制坝块混凝土最高温度不超过设计允许的最高温度，需采取降低混凝土浇筑温度、合理的层厚及间歇期、初期通水等措施。严格控制混凝土运输时间和仓面浇筑坯层面覆盖前的暴露时间。混凝土运输机具设置保温设施，使高温季节混凝土自拌和楼出机口运至仓面浇筑坯层被覆盖前的温度回升率不大于0.25，对三期工程大坝混凝土施工塔带机胶带（长 $800 \sim 1050\text{ m}$ ）输送预冷混凝土温度回升率进行分析计算，温度回升 $4 \sim 6^\circ\text{C}$ ，回升率为 $0.17 \sim 0.18$ ，与测试结果基本一致。

b. 在高温季节或较高温月份浇筑大坝混凝土时，采用预冷混凝土。基础约束区混凝土除冬季12月至翌年2月自然入仓外，其他季节浇筑温度均不得超过 $12 \sim 14^\circ\text{C}$ （相应的拌和楼出机口混凝土温度为 7°C ），脱离基础约束区混凝土11月至翌年3月自然入仓，其他季节浇筑温度不得超过 $16 \sim 18^\circ\text{C}$ （相应的拌和楼出机口混凝土温度不大于 14°C ），夏季浇筑能力要适应入仓强度要求，避免在中午高温时间浇筑。高温季节浇筑混凝土表面采取流水养护措施，可使混凝土早期最高温度降 1.5°C 左右。

3.3 大坝基础约束区混凝土避开在夏季浇筑

通过对大坝混凝土温度应力计算成果分析，结果表明，若在夏季浇筑基础约束区混凝土则坝体水平受拉区范围较大，坝段各块基础约束区都呈受拉状态，大于 1.0 MPa 的拉应力在距基岩面 $8.0 \sim 10.0\text{ m}$ 的区域，最大值均发生在距基岩 1.0 m 的部位，即第1层 2.0 m 厚的混凝土内，坝段各块水平拉应力较大，后期通水结束后，坝段第3块（丙块）基岩面附近的最大水平拉应力均为 2.1 MPa ，稳定温度时的最大水平拉应力为 1.9 MPa ，混凝土存在产生裂缝的风险。因此，浇筑大坝基础约束区混凝土应安排在8月份以后。设计针对三峡大坝基础岩体的特点，在总结二期工程大坝基础采用浇筑找平混凝土（厚 0.3 m 左右）封闭式固结灌浆实践经验的基础

上,三期工程大坝建基岩体大部采用浇筑找平混凝土封闭式固结灌浆,对建基岩体裂隙发育及边坡部位仍采用引管进行有盖重固结灌浆。2003年6~9月完成了大坝基础固结灌浆,为10月份大面积浇筑基础约束区混凝土创造了条件。2004年5月,混凝土全部脱离基础约束区。

3.4 大坝混凝土浇筑采取合理的浇筑层厚及间歇期

a. 浇筑层厚。基础约束区一般在11月至翌年3月采用的浇筑层厚为1.5~2.0m,4~10月采用的浇筑层厚为1.5m,脱离基础约束区一般的浇筑层厚为2.0m。三期工程大坝非约束区混凝土浇筑层厚经过温控分析计算后,采用全年3.0m层厚的施工方案,使大坝混凝土提前半年于2006年5月全线浇筑至设计高程185m。温控措施为:①在3.0m浇筑层中埋设水管(间距1.5m×1.5m)。②12月至翌年2月浇筑混凝土自然入仓,浇筑温度不高于10℃,初期通江水进行冷却。3月和11月控制混凝土浇筑温度不高于14℃,4月和10月浇筑温度不高于16℃,5~9月浇筑温度不高于18℃,初期通6~8℃的制冷水进行冷却。③3.0m层厚混凝土浇筑时层间间歇采用9~10d,在备仓保证的情况下可适当缩短层间间歇期。

b. 层间间歇期。应严格控制大坝大体积混凝土浇筑的层间间歇期和墩、墙等结构混凝土浇筑的层间间歇期,使其不少于3d,也不宜大于10d。

3.5 控制大坝混凝土施工程序并合理安排施工进度

a. 基础约束区混凝土、导流底孔、深孔、排漂孔、尾水管及排沙孔等重要结构部位,在设计规定的间歇期内连续均匀浇筑上升,不得出现薄层层间间歇期,其余部位基本做到短间歇连续均匀地浇筑上升。

b. 相邻的浇筑块高差不大于6~8m,相邻坝段高差不大于10~12m。

3.6 大坝混凝土浇筑层面长间歇期的防裂措施

大坝右厂房坝段的钢管坝段由于钢管安装及其备仓等原因,有些浇筑层面的间歇时间较长,如右厂15~20号钢管坝段甲块高程106.5m层面的浇筑间歇期约为60d,右厂21~25号钢管坝段甲块高程106.5m层面的浇筑间歇期约为40d。对长间歇浇筑面采取的防裂措施如下:

a. 长间歇面层50cm厚浇筑纤维混凝土。在长间歇面浇筑层的最后一个坯层(厚50cm)的混凝土中掺质量浓度为1kg/m³的聚丙烯纤维。

b. 大坝上游面4.0m范围和坝块顺水流向中部1/3坝块面积布置1层钢筋网。大坝上游面4.0m范围内沿坝轴线方向的钢筋采用 $\varnothing 25@20$,顺流方

向的钢筋为 $\varnothing 22@20$,L为4m及5m(交错布置),坝块顺水流向中部1/3坝块面积布置的钢筋网为 $\varnothing 25@20$,顺水流方向相邻钢筋错距为1.0m。钢筋网距坝块边线的距离为5cm,距收仓面顶面的距离为6cm。

3.7 大坝混凝土通水冷却

a. 初期通水。对于采用预冷混凝土浇筑坝体时,在高温季节最高温度仍可能超过设计允许值者,应采取初期通水冷却措施以削减混凝土最高温度(据计算,坝体设计允许最高温度在6~8月小于或等于33℃,5月和9月时小于或等于31℃,相应月份的混凝土浇筑温度为12~14℃,均需进行初期通水冷却)。对于基础约束区和导流底孔部位,当高温季节采用预冷混凝土浇筑时,最高温度未超过设计允许值者也宜进行初期通水冷却,以确保坝体最高温度在允许范围内。初期通水应采用6~8℃的制冷水,通水时间为10~15d,并在混凝土收仓后12h内开始通水,且单根水管通水流量不小于18L/min。

b. 中期通水。对于高温或较高温时段浇筑的大体积混凝土,应进行中期通水,以削减坝体混凝土的内、外温差。中期通水开始时间如下:凡当年5~8月份浇筑的混凝土,应于9月开始进行中期通水;4月及9月份浇筑的,于10月初开始进行中期通水;10月浇筑的混凝土于11月初开始进行中期通水。中期通水采用江水进行,通水时间为1.5~2.5个月,以混凝土块体温度达到20~22℃为准,单根水管通水流量应达到18~25L/min。

c. 填塘、陡坡部位通水。在混凝土收仓1~2d后进行通水冷却,通水类别根据季节及进度要求采用制冷水或江水,4~10月一般采用8~10℃制冷水,其余季节采用江水,通水时间以混凝土块体达到或接近基岩温度(18~20℃)为准。单根水管通水流量不小于18L/min。

d. “个性化通水”和初、中期通水细化。初期通水的作用是降低大坝混凝土的早期最高温度,控制混凝土最高温度不超过设计允许的最高温度。中期通水是将大坝混凝土温度在入秋前降至20~22℃,以减小内外温差,防止冬季大坝混凝土遇寒潮而产生裂缝。设计通过对一、二期工程大坝混凝土产生裂缝的原因分析后认为,大坝混凝土在入秋后冷却至20~22℃,冬季遭遇气温骤降仍使大坝混凝土内外温差过大,尤其是保温不及时而产生裂缝。为此,三期工程大坝混凝土通水冷却对初期和中期通水进行了深入研究和细化,并推行“个性化通水”方案。①“个性化通水”。对高标号、高流态混凝土等个别水泥用量较多的部位埋设测温管,采用加密布置冷

却水管 ,并在初期实施了大流量通水(25 ~ 30 L/min) ,待最高温度出现后改为小流量通水(18 ~ 20 L/min)的冷却措施 ,有效控制大坝内部混凝土的最高温度 ,并防止对混凝土冷却过速。②初、中期通水分季节区别。在高温季节浇筑的混凝土 ,初、中期通水分别进行 ,并将初期通水时间延长 5 ~ 10 d ,适当降低最高温度 ;对 9 月份以后浇筑的混凝土则初、中期通水连续进行。③加大中期通水效果。在做好混凝土表面保温工作的同时 ,将中期通水时间提前 10 d 开始 ,将越冬坝体混凝土温度由 20 ~ 22 ℃ 调整为 18 ~ 20 ℃。

3.8 大坝混凝土表面保护

三峡大坝暴露面大 ,坝址气温骤降频繁 ,更突出了表面保温的重要性。为此 ,应根据设计表面保护标准确定不同部位、不同条件的表面保温要求 ,并应重视基础约束区、上游面及其他重要结构部位的表面保护。尤其应重视防止寒潮的冲击。所有混凝土工程在最终验收之前都必须加以维护及保护 ,以防损坏。浇筑块的棱角和突出部分应加强保护。三峡三期工程大坝各部位主要保温要求如下 :①临时暴露面 ,如大坝横缝侧面、仓面仍采用聚乙烯塑料卷材外套彩条布保温材料 ,但厚度由原来的 1.5 ~ 2.5 cm 改为 2.0 ~ 3.0 cm。②大坝上、下游面为永久暴露面 ,采用聚苯乙烯泡沫板(导热系数不大于 0.042 W/(m·K))粘贴于混凝土表面保温。大坝上游面高程 98.0 m 以下及基础约束区 ,外贴厚 5.0 cm 的聚苯乙烯板 ,其余部位外贴厚 3.0 cm 的聚苯乙烯板 ;大坝下游面及需经历 1 个冬季的钢管槽侧墙等部位 ,外贴厚 3.0 cm 的聚苯乙烯板。③对孔口异性部位采用喷聚氨酯(厚 1.5 cm)发泡保温。④冬季浇筑的混凝土 ,收仓后 3 ~ 5 d 进行保温。

3.9 大坝混凝土养护

养护一般应在混凝土浇筑完毕后 12 ~ 18 h 及时采取洒水或喷雾等措施 ,使混凝土表面经常保持湿润状态。对于新浇筑混凝土表面 ,在混凝土能抵御水的破坏之后 ,立即覆盖保水材料或采取其他有效方法使其表面保持湿润状态。混凝土体的所有侧面也应采取类似的方法进行养护。混凝土连续养护时间不少于 28 d。

3.10 大坝混凝土施工监控实行天气、温度控制、间歇期 3 个预警制度

中国长江三峡工程开发总公司工程建设部在大坝混凝土施工监控方面 ,创造性地建立了天气、温度控制、间歇期 3 个预警制度。

a. 天气预警。高温与气温骤降预警、降雨预警、雷电大风预警。三峡工程开发总公司气象预报中心每天全天候向各施工、监理、设计单位有关人员发布气象信息 ,以合理安排大坝混凝土施工和科学落实温度控制及防裂措施。

b. 温度控制预警。混凝土浇筑温度回升过快预警 ,敦促拌和楼骨料预冷系统加强控制 ,确保骨料预冷效果 ;实测仓面浇筑温度距设计允许值 2 ~ 3 ℃ 预警 ,敦促现场加强保温被覆盖、启动喷雾、加快混凝土入仓强度等 ,且连续 3 个测点(持续 1 h 浇筑温度)超温实行停仓制度 ;通过测温管监测 ,混凝土初期水化热温升过快或最高温度距设计允许值 2 ~ 3 ℃ 预警 ,采取加大通水流量、仓面流水养护、优化混凝土配合比等措施。

c. 层间浇筑间歇预警制度。低温季节大坝甲块浇筑间歇按 7 d 预警 ,乙、丙块浇筑间歇按 10 d 预警。通过控制层间浇筑间歇期 ,可以合理调配资源 ,使大坝整体均匀薄层连续上升 ;适当的浇筑间歇期既有利于浇筑块散热 ,同时可减少受气温骤降袭击的机会 ,控制相邻坝块高差 ,有利于纵缝张开进行接缝灌浆。

4 大坝温控防裂实施效果

4.1 大坝混凝土浇筑温度控制效果

大坝混凝土入仓温度和浇筑温度的控制效果见表 4。

4.2 大坝混凝土初期、中期通水冷却效果

a. 大坝混凝土初期通水。①通制冷水 :平均进水温度为 10.7 ℃ ,平均出水温度为 18.0 ℃ ,平均进出水温差为 7.3 ℃ ,平均通水流量为 20.8 L/min ,闷温后平均温度为 25.1 ℃ ;②通江水 :平均进水温度为 15.0 ℃ ,平均出水温度为 18.2 ℃ ,平均进出水温差为 3.2 ℃ ,平均通水流量为 22.9 L/min ,闷温后平均温度为 21.3 ℃。

表 4 监理单位实测大坝混凝土入仓温度和浇筑温度

控制标准	入仓温度						浇筑温度					
	2003 年		2004 年		2005 年		2003 年		2004 年		2005 年	
	检测 次数/次	平均 温度/℃	检测 次数/次	平均 温度/℃	检测 次数/次	平均 温度/℃	检测 次数/次	平均 温度/℃	检测 次数/次	平均 温度/℃	检测 次数/次	平均 温度/℃
$T_p \leq 14\text{ }^\circ\text{C}$	2372	8.7	1095	7.9	1288	8.0	2402	11.3	1134	10.9	1112	9.5
$T_p \leq 16\text{ }^\circ\text{C}$	486	10.8	773	9.2	952	10.4	403	15.0	1473	12.8	879	13.0
$T_p \leq 18\text{ }^\circ\text{C}$	60	10.3	4035	10.4	656	11.1	57	14.1	6166	13.5	5325	12.03
$T_p \leq 20\text{ }^\circ\text{C}$			633	12.3	1385	12.5			2526	14.7	1158	15.0

表 5 大坝上游面裂缝检查结果

部位		检查范围	检查面积	检查结果
高程 98.0 m 以下	基础约束区	上游建基面以上 4 m 范围全坝段贯通抽条检查	检查 25 个坝段水平抽条 25 幅 550 m ²	均未发现裂缝
	典型坝段	右厂 17-1 甲水平抽条 1 幅 右厂 22-1 甲水平抽条 3 幅	检查 2 个坝段水平抽条 4 幅 88 m ²	均未发现裂缝
高程 98.0 m 以上	右安Ⅲ-1 甲~右非 1 号坝段	高程 106.5~108.0 m 贯通水平抽条检查	检查 15 个坝段水平抽条 15 幅 245 m ²	均未发现裂缝

b. 大坝混凝土中期通水。每年 9 月初开始进行中期通水冷却 ,至 11 月中旬基本结束 ,11 月 15 日抽测坝体混凝土温度平均为 21.7℃ ,满足越冬要求的温度(20.0~22.0℃)。

4.3 大坝混凝土最高温度控制效果

2004 年共检测 177 个仓次 ,埋设 183 组测温管 ,各标号混凝土最高温度监测成果如下 :R₉₀150 混凝土最高温度为 34.3℃ ,平均最高温度为 29.4℃ ,符合率为 100% ;R₉₀200 混凝土最高温度为 27.5℃ ,平均最高温度为 25.6℃ ,符合率为 100% ;R₉₀250 混凝土最高温度为 33.3℃ ,平均最高温度为 26.5℃ ,符合率为 100% ;R₉₀300 混凝土最高温度为 36.4℃ ,平均最高温度为 28.6℃ ,符合率为 95.9% ;R₉₀400 混凝土最高温度为 32.3℃ ,平均最高温度为 30.4℃ ,符合率为 100%。2005 年共监测 221 个仓次 ,埋设 230 组测温管 ,实测最高温度均未超标 ,平均富裕度为 7.8℃。

4.4 大坝混凝土保温效果

2003 年 9 月 24 日至 10 月 3 日 ,在右厂 18-2 块和右厂 20-2 块上游面进行外贴 5 cm 厚聚苯乙烯板的现场保温试验。右厂 18-2 甲块上游面聚苯乙烯板内部温度在 23.8~24.4℃ 之间 ,温度变幅 0.6℃ ,连续 2 个测点的温度变化最大为 0.3℃ ;气温在 14.0~35.0℃ 之间 ,温度变幅为 21.0℃ ,连续 2 个测点的温度变化最大为 6.8℃。右厂 20-2 甲块上游面聚苯乙烯板内部温度在 24.4~25.9℃ 之间 ,温度变幅为 1.5℃ ,连续 2 个测点的温度变化最大为 0.1℃ ;气温在 14.0~35.0℃ 之间 ,温度变幅为 21.0℃ ,连续 2 个测点的温度变化最大为 6.3℃。现场跟踪检测成果表明 ,聚苯乙烯板厚 5 cm 的内外温差可达 10℃ ,板厚 3 cm 的内外温差达 7℃ 以上 ;聚氨酯发泡材料内外温差为 6℃。

4.5 大坝混凝土裂缝检查结果

大坝混凝土裂缝检查由业主、设计、监理、施工四方代表联合进行 ,同时邀请中国长江三峡工程开发总公司质量总监办公室、国务院三峡工程建设委员会三峡枢纽工程质量检查专家组工作组成员参与检查。检查结果见表 5。

5 结 语

三峡工程大坝坝体内过流孔及闸门槽(井)尺寸大、数量多、体形复杂 ,增加了温控防裂的难度。在总结二期工程大坝混凝土温控防裂经验教训的基础上 ,对三期工程大坝混凝土温控防裂技术措施进行了深化和细化 ,在实施中取得了良好的效果。对三峡大坝混凝土施工主要采用塔带机胶带(长 800~1 050 m)输送混凝土入仓 ,在高温季节 ,对胶带输送预冷混凝土温度回升进行观测和分析研究 ,并采取措施 ,控制温度回升 4~6℃ ,回升率为 0.17~0.18。为削减大坝混凝土最高温升 ,通水冷却分初、中、后 3 期 ,首次提出按不同标号的混凝土分别进行‘个性化’初期通水的方案 ,将传统的中期通水冷却混凝土温度降至 20~22℃ 调整为降至 18~20℃ ,并在入秋后将中期通水与后期通水冷却连续进行 ,降低了大坝混凝土的内外温差 ,更有利于防裂。大坝上下游面采用聚苯乙烯泡沫板保温 ,取得显著的保温效果。在大坝非约束区混凝土浇筑中全年采用 3.0 m 层厚快速施工技术 ,并通过综合温控防裂技术措施 ,为大坝混凝土又好又快地施工创造了条件。三峡大坝混凝土温控防裂创新技术 ,可在我国水利水电工程混凝土坝施工中应用和推广。

参考文献 :

[1] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院.长江三峡水利枢纽三期大坝混凝土施工及温控防裂专题报告 [R].武汉 :长江水利委员会长江勘测规划设计研究院 ,2006.

[2] 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 ,2003.

[3] 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.

[4] 汪安华.三峡工程混凝土设计研究与实践[C]/三峡工程设计论文集.北京 :中国水利水电出版社 ,2003 :761-770.

[5] 中国长江三峡工程开发总公司.长江三峡三期工程枢纽工程蓄水(156 m 水位)验收文件[R].宜昌 :中国长江三峡工程开发总公司 ,2006.

(收稿日期 2008-10-23 编辑 :高建群)