

新技术与新工艺在东风水电站大坝施工中的应用

沙仲芳 李惠泰

(中国水利水电第九工程局 清镇 551408)

TV642.42

摘要 东风水电站拱坝为亚太地区最薄的不对称式抛物线双曲混凝土拱坝,底宽25 m,顶宽6 m,高162 m。中国水利水电第九工程局在施工中推广和应用了一系列新的技术及科技成果,其中坝基开挖爆破技术、“混合上料、二次筛分、连续风冷、微机控制”混凝土搅拌机,悬臂模板的研究应用、硬化混凝土质量检验新技术等成果,达到国际先进水平。

关键词 高拱坝 施工 新技术 新工艺 温度控制 东风水电站

1 工程概况

东风水电站位于贵州小清镇市与黔西县交界的乌江干流鸭池河段上,是国家“七五”和“八五”期间水电重点建设工程项目,距贵阳市88 km,电站总装机容量为51万kW(3·17万kW),年平均发电量为24.2亿kW·h,总库容10.25亿m³。

东风水电站由拦河坝、地下厂房、泄洪及防渗帷幕系统四大部分组成。其中拦河坝为抛物线双曲混凝土拱坝,坝高162 m,坝顶高程978 m,顶宽6 m,825 m高程拱坝底宽25 m,宽高比为0.163,目前为亚太地区已建成的最薄的高拱坝。坝体孔洞多,结构复杂。为泄洪和排砂的需要,在坝身890 m和967 m高程分别开设3个中孔(左右中孔为5 m·6 m,中中孔为3.5 m·4.5 m)和3个表孔(均为11 m·7 m)。溢洪道进口堰顶高程950 m,断面为15 m·21 m,穿过左坝肩D坝段。为了便于大坝监测、灌浆、排水、交通等需要,在坝内沿坝轴线方向开设6层纵向廊道,设坝后交通桥、电梯井及集水井等。为满足施工后期导流的要求,于高程842~845 m设有3个6 m·9 m的底孔,

在蓄水前必须封堵。大坝设计按Ⅰ级建筑物标准,而洪水标准仍按百年一遇洪水设计,洪峰流量为11000 m³/s,千年一遇洪水校核,洪峰流量为14400 m³/s。

2 施工特点

东风拱坝施工特点是大坝与其它枢纽布置集中,施工干扰大;坝区洪枯水位差达24 m,汛期坝体过水;典型的窄河床,峡谷深切,卸荷裂隙发育;坝区多年平均气温16.7℃,极端最高气温40.5℃,极端最低气温-5℃,寒潮袭击频繁,最大降温幅度达18.9℃。因此,大坝开挖难度大,坝体混凝土防裂技术要求高。

东风水电站由水电九局承担全部施工任务,由贵阳勘测研究院承担拱坝设计任务。施工单位在设计院的密切配合下,结合“七五”、“八五”国家科技攻关项目“高拱坝快速施工技术研究”、“高拱坝快速施工与温度控制研究”,并采用有关研究成果及其它新技术与新工艺,使施工中的难题得到圆满解决。该电站于1984年底进点筹建,1989年1月30日实现截流,在截流后五年多的时期内,克服前期资金不到位所带来的困

雄,精心施工,于1994年8月和12月实现两台机组顺利投产发电的目标。

从1994年4月6日开始下闸蓄水至今,最高蓄水位已达 $\nabla 964.58\text{ m}$ 接近正常水位 $\nabla 970\text{ m}$ 。一年多来,一千多台大坝内部监测仪器提供的各类观测数据表明:蓄水期大坝变位基础变形、渗流渗压、扬压力等项目的观测成果和设计计算值基本吻合,说明大坝初期运行状态正常。东风水电站首台机组启动验收委员会的验收报告认为,已完建的工程总体质量是好的,其中大坝开挖和混凝土工程质量达优良。大坝共浇筑混凝土约43万 m^3 ,仅发现15条裂缝,在国内实属少见。

3 新技术与新工艺在拱坝施工中的应用及效果

3.1 坝基坝肩开挖爆破技术

在坝基深槽和坝肩开挖施工中,全面应用“孔间顺序微差起爆与水平(含斜面和垂直)预裂爆破相结合,不留保护层一次爆到建基面”的爆破技术,在国内首先突破坝基建基面保护层开挖的传统观念。加之得当的施工方,即先开挖坝基深槽和回填混凝土,然后自上而下每10 m一个梯段开挖两坝肩。每梯段石碴推入河床,待枯水季节集中出碴,保证了坝基坝肩开挖进展顺利。

经声波测试和现场检验,建基面98%以上测孔声波大于4.5 km/s的设计要求,坝基斜面和水平预裂面眼痕保存率分别为94.5%和84.2%,坝肩预裂面眼痕保存率一般在90%以上。据分析,保留岩体基本上只受到爆破振动的影响,爆破后的建基面岩体是稳定的。应用爆破新技术,实现一年内快建、优质完成大坝开挖约48万 m^3 的任务、为基础开挖工程创出一条新路。实现孔间微差顺序爆破的主要措施是塑料导爆管接力式起爆网络。塑料导爆管系统由塑料导爆管、组合延期起爆雷管及连接元件组

成。其特点是,安全可靠,简单灵活,经济效益显著。

通过现场试验,选定坝基爆破参数如下:

深孔梯段(孔间微差顺序爆破)

孔径 110 mm;
孔距 3~3.5 m;
排距 $2.5 \pm 0.3\text{ m}$;
单耗 $0.45 \sim 0.55\text{ kg/m}^3$;
梯段深度 8~12 m;
单响药量 <150 kg;

预裂爆破

孔径 110 mm;
孔距 1.0 m;
线装药密度 $280 \sim 350\text{ g/m}$;
单响药量 <20 kg。

3.2 大坝混凝土生产及运输技术

东风水电站“978”拌合系统是国内首次采用“混合上料、二次筛分、连续风冷、自动控制”新技术与新工艺生产大坝混凝土的国产搅拌楼。其中为“混合上料、二次筛分”而研制成功可随时无级调节给量的调频振动给料机及料位指标器属国内首创;为实现“连续风冷”而研制的附壁式冷风机,自重轻、体积小、便于安装,使用灵活可靠,传热系数高,具有结构新、耗能小、造价低的特点,其性能已达到国外同类产品先进水平;研制了一套较为可靠的微机自动控制及监测系统,并将砂含水率测定及砂-水自动补偿接入微机控制系统中,提高搅拌楼自动控制能力。

大坝混凝土出机后卸入特制的混凝土罐车内,由水平运输机车拉至坝头吊罐平台卸入不脱钩吊罐中,由缆机运入仓。其中研制的水平运输机车,其性能与国外产品相同;不脱钩吊罐优于国外同类产品,稳定性好,有液压蓄能装置,卸料轻便灵活安全;为实现缆机运输安全快速准确入仓,研究和开发了“垂直运输、定点下料、仓面监视”新技

术,它的主要创新是实现了缆机电脑控制,在施工现场设有工业电视监视装置,操作人员能全面监视、遥控缆机运行和仓面施工情况。以上配套与研制的设备全部国产化。

3.3 大坝混凝土质量检测技术

采用对原材料和混凝土快速检测新技术对大坝混凝土生产和浇筑质量进行控制。例如:用促凝压蒸法 30 分钟推定掺粉煤灰混凝土强度;用“容重-比重试验法”15 min 测定新拌制混凝土水灰比,并推定其强度;在 90 min 内推定水泥胶砂强度;用“碳化钙气压法”3 min 内快速测定砂子含水率;用研制的具有国际先进水平的“混凝土面波测强仪”可对 3 m 深度范围内的硬化混凝土进行无损强度检测和均匀性检验等。这些新技术在施工现场的全面应用,对确保大坝混凝土生产和浇筑质量起到了良好作用。据统计,在大坝施工期机口取样共计 1900 组,设计 $R_{90} = 30 \text{ MPa}$,实际平均抗压强度 $\bar{R}_{90} = 39.68 \text{ MPa}$,离差系数 $C_r = 0.15$,强度保证率 $P = 94\%$ 。

3.4 悬臂模板技术

采用悬臂模板不仅解决了东风抛物线双曲率薄拱坝带来的曲面变坡、调弧、收分、扭曲等问题,而且满足了大坝仓面使用平仓机进行平仓振捣快速施工的要求。大坝使用悬臂模板立模 8 万多 m^2 ,模板板面周转次数高达 50 余次。使用这种悬臂模板为混凝土施工达到快速、高效、安全、优质创造了条件。

悬臂模板参数如下:

模板面板高 宽 $3.3 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$;

混凝土浇筑层最大高度 3.0 m ;

浇筑速度 冬季 $< 0.4 \text{ m/h}$,夏季 $< 0.6 \text{ m/h}$ (铺筑层厚度);

最大顺坡角度 24° ,最大倒悬角度 20° ;

模板面相对支架横移 $\pm 30 \text{ cm}$,相对混凝土面后退 60 cm ;

模板总重 $2.0 \pm 0.2 \text{ t}$ 。

3.5 施工测量放样技术

为了满足大坝施工进度和型体的精度要求,应用微机进行坝体各参数的计算。具体做法是,根据大坝设计图和参数,再结合大坝施工过程中需要的数据,用 C 语言编制了一个较完整的程序。该程序的主要功能有:计算任意块高程、仓面面积、立模面积、浇筑块混凝土体积、横缝长、抛物线上下游段长及抛物线上任意一点的坐标和通过该点的法线、方位角等。凡大坝开挖混凝土浇筑过程中需要的数据都可用微机计算打印出来,施工和质检人员可随时利用各自所需要的数据进行测量控制与检查,以确保大坝位置、尺寸(体型、高程、断面)均符合设计要求的精度,其中先上升坝块和孔口为检查控制的重点。

3.6 拱坝泄洪中孔采用硅粉混凝土代替钢材

坝身三个泄洪中孔,原设计采用 16Mn 钢板衬砌,厚度 20 mm,需要用钢材 481.5 t。由于施工期钢材紧缺,且制造安装进度影响相邻坝段均衡上升。经研究,决定改为孔身全长过流表面采用 50 cm 厚硅粉混凝土衬砌,并在出口跌坎下布置掺气孔的方案。

硅粉混凝土较粘稠,使拌和、出料、中转运输、吊罐入仓、平仓振捣均较困难。主要施工工艺要求:①拌合时硅粉与粉煤灰可同时投料,也可相继投料,在加入水泥后紧接着加入硅粉,拌和时间不少于 4.5 min;②尽量缩短硅粉混凝土中转运输时间;③硅粉混凝土与常态混凝土可同时浇筑,浇筑面不作特殊处理;④振捣时间应比一般混凝土适当延长;⑤严防早期塑性开裂,宜采用喷雾以保持湿润环境,早期湿润养护不少于 21 天,炎热季节延长到 28 天。

硅粉混凝土温度控制除早期湿润养护较严格外,其它与常态混凝土温控要求相同。另外,硅粉和粉煤灰同时掺入混凝土中

可较大幅度节省水泥用量而不会降低早期强度,还能改善混凝土的力学性能和耐久性、降低混凝土的水化热温升,提高混凝土抗裂性能。

三个中孔共浇筑硅粉混凝土约 1.49 万 m^3 ,机口取样 28 天龄期 41 组,(设计 $R_{28} = 50 \text{ MPa}$) 平均抗压强度 $\bar{R}_{28} = 54.2 \text{ MPa}$,离差系数 $C_v = 0.08$;180 天龄期平均抗压强度为 64.3 MPa ,后期强度增长为 18.6%。由于重视早期养护,拆模后未发现裂缝,经三个汛期多次泄洪,高达 30 m/s 以上流速的冲刷,硅粉混凝土尚未发现被破坏的问题。总之,采用硅粉混凝土代替钢衬,除节约工程费用外,不仅能大幅度提高混凝土强度,还能提高混凝土的抗裂、抗渗、抗冲磨、抗空蚀等性能、保证工程进度和质量。

3.7 大坝混凝土防裂新技术

3.7.1 从选用优良的原材料和优化混凝土配合比入手,提高混凝土自身的抗裂性能

通过设计单位“七五”国家科技攻关研究,用于东风拱坝的混凝土,采用当地永宁镇组灰岩人工生产的优质砂石骨料、水城 525 号硅酸盐中热水泥、掺 30%~35% 风选优质粉煤灰和三复合外加剂,使设计 $R_{90} = 30 \text{ MPa}$ 混凝土的用水量降到 $84 \sim 86 \text{ kg/m}^3$ 、水泥用量控制在 120 kg/m^3 以内,其轴拉强度为 3.61 MPa ,线膨胀系数为 $(5.1 \sim 5.6) \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$,具有发热量低、抗裂性能优、和易性好、便于施工等特点,为温控创造了有利条件。其中采用的三复合外加剂(木钙 0.3% + DH_4BO_6 6% + DH_6O 3‰),可使混凝土胶凝材料水泥用量减少 20%,降低水化热温升 $4 \sim 5^\circ\text{C}$;具有较强的缓凝作用,推迟热峰出现,延缓温升速度,充分利用表面散热降低温升 $1 \sim 2^\circ\text{C}$;可减少坍落度损失,延长浇筑层的允许间隔时间,防止冷缝。

3.7.2 采用制冷新工艺,控制出机口温度

采用“混合上料、连续风冷、地面冰库、气力输冰”混凝土预冷新工艺,最大加冰量

控制在 $45 \sim 50 \text{ kg/m}^3$,降温 $4 \sim 6^\circ\text{C}$;连续风冷降温 $5 \sim 7^\circ\text{C}$;两者联合可使混凝土机口温度降低 $9 \sim 13^\circ\text{C}$ 。坝区 7、8 两月的最高旬平均气温为 29.4°C ,采用上述两项预冷措施完全满足混凝土机口温度 19°C 的设计要求。取消水冷,简化预冷工序,节约了工程费用。冰库建在地面上,可节省一座与搅拌楼大致相同高度的制冷楼。

3.7.3 采用外掺 MGO 混凝土新技术

坝基左侧有一深槽,最大深度为 9 m、长 52 m、宽 41 m,需回填混凝土约 1.4 万 m^3 。采用贵州 525 号硅酸盐水泥外掺 MGO 混凝土新技术,以简化温控措施,缩短工期。不埋设冷却水管,不掺冰,取消接缝灌浆;仅设三条横缝并与坝体横缝一致,取消纵缝;分层厚度为 $2.5 \sim 3 \text{ m}$,顶面厚度为 1 m,在表面布置限裂钢筋网,采用新型保温材料 B 型喷涂剂进行表面保护堆砌 6 cm;为了渡汛防冲和坝肩开挖石碴打砸,在顶面还加压 30 cm 厚的尼龙砂包和 5 m 厚的石碴进行保护。B 型喷涂剂是由膨胀珍珠岩粉、胶料和水泥等配制而成的,该材料具有导热系数低($\lambda < 0.116 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$),表面干燥快($h < 4 \text{ h}$),具有一定强度($R = 2.7 \text{ MPa}$)和耐水浸泡强等特点。

外掺 MGO 混凝土除拌合时间比一般混凝土延长 $120 \sim 150 \text{ s}$,其它施工工艺基本相同。由于深槽 MGO 混凝土是在低温季节浇筑,而它的膨胀性能与温度和约束有关,表面保护具有防裂和蓄热双重作用。因此,施工中对混凝土表面保护十分严格。横缝面采用带键槽的木模板,内贴气垫薄膜(单泡 5 mm),实测膜内温度与气温相差高 $8 \sim 10^\circ\text{C}$;水平施工缝也采用气垫薄膜保护,实测膜内温度与气温相差高 $4 \sim 6^\circ\text{C}$ 。MGO 混凝土设计 $R_{90} = 30 \text{ MPa}$,机口取样 32 组,平均抗压强度 $\bar{R}_{90} = 37.8 \text{ MPa}$,离差系数 $C_v = 0.11$,保证率 $P = 96.5\%$ 。一年后根据混凝土内埋设的仪器观测结果与

温度应力反馈分析成果基本吻合;混凝土平均膨胀量已达 $103.6 \cdot 10^{-6}$;未发现裂缝,施工缝、混凝土与岩壁结合处均紧密无缝。MGO 混凝土还用于大坝三个底孔的封堵。

3.7.4 大仓面混凝土施工工艺与温控

大仓面位于左岸溢洪道与坝体相交部位,高程 924~949.1 m,仓面大于 1000 m^2 的有 7 块,每块分层高为 1.5 m,其中在高程 937~938.5 m 的仓面面积最大,最长边为 52.1 m、最宽边为 41.5 m,面积为 1500.9 m^2 。主要采用的施工工艺和温控措施:

a. 充分利用和发挥“混合上料、二次筛分、连续风冷、快速运输”完整的混凝土生产和运输系统的作用,优质、快速地完成大仓面混凝土浇筑。

b. 在混凝土配合比中,掺入贵阳院科研所生产的新型外加剂——F 型膨胀剂,使混凝土早期就开始迅速膨胀,以后膨胀稳定发展,从而补偿混凝土温降产生的收缩,增加其自身的抗裂性能。

c. 采用仓面喷雾设施,经试验在夏季高温时段,可使仓面气温下降 $5 \sim 8^\circ\text{C}$ 、有效地保护混凝土不受阳光直射,达到混凝土温度不回升或少回升的目的。同时,加强一期冷却,通天然河水 15~25 天,以削减混凝土水化热温升,减少内外温差,防止表面裂缝的产生。

d. 对于冬季施工的大仓面混凝土,采用聚乙烯气垫薄膜覆盖其表面,分为模板内贴、表面外贴和表面覆盖等形式。对于夏季施工的大仓面混凝土表面,还研制采用由聚乙烯气垫薄膜和 PT 型聚苯乙烯泡沫塑料板条复合制成的新型隔热保温被对其覆盖,可减缓预冷混凝土温度回升和水分蒸发的速率,减轻阳光辐射热产生的温度倒灌。

大仓面共浇筑混凝土约 1.4 万 m^3 ,从内观仪器得知,早期混凝土膨胀量达 $40 \cdot$

$10^{-6} \sim 99 \cdot 10^{-6}$,其内外温差、基础温差、最高温升均控制得较好,未发现裂缝。

3.8 接缝灌浆采用拔管造孔技术

拱坝横缝键槽设计:半径为 29.5 cm、中心角为 $117^\circ 6'$ 、弦长为 50 cm 的半圆形槽,键槽中心距为 75 cm。两键槽之间设升浆孔,采用竖向升浆拔管造孔技术并成双回路系统,这种竖向升浆拔管孔尾部的基础连通支管和进、回浆管均用聚氯乙烯硬管。每灌区灌浆系统由双回路进、回浆管、排气管、升浆管以及止浆片组成。竖向升浆孔和水平排气孔均采用在先浇筑块设置 $30 \varnothing \text{ mm}$ 半圆木条,拆模后取出半圆形木条,嵌入 $\varnothing 20 \text{ mm}$ 的软管,充以 $0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 的压力空气,待后浇筑块混凝土终凝后一定时间内放气拔出软管。各进、回浆管均采用 $\varnothing 40 \text{ mm}$ 塑料硬管,在各灌区底部高程出露。由于采用上述造孔技术,严格质量控制,拱坝接缝灌浆管路通畅率达 99%,节约造孔材料、确保接缝灌浆施工质量。

3.9 施工管理关键技术开发

在高坝施工中还吸收国内外先进管理技术,结合东风工程及其它水电工程施工实际而开发的施工管理新技术。例如:混凝土坝施工质量微机管理系统;以网络技术为中心“进度、资源和费用”的施工综合管理系统;混凝土施工动态质量管理体系;施工期大坝混凝土的温度预测与控制;人工骨料合理生产利用及质量保证体系等施工管理关键技术开发研究都取得好成果。

上述许多科技成果、新技术与新工艺经部省级鉴定达到国际先进或国内领先水平,经济效益和社会效益显著。从东风拱坝施工实践证明,只有依靠科技进步,大胆推广和应用新技术与新工艺,才能快速、优质高效地进行水电站建设。

(收稿日期:1995-08-01)