

2004

水力发电国际研讨会 论文集

(中 册)

主办单位：中国长江三峡工程开发总公司
湖北清江水电开发有限责任公司
中国水力发电工程学会
中国水利学会



2004年5月24-26日 湖北 宜昌

2004 水力发电国际研讨会

2004 年 5 月 24-26 日 湖北 宜昌

论文集

(中 册)

混凝土大坝的设计、施工及运行管理

大体积混凝土配合比优化设计与

外加剂的合理使用

2004 水力发电国际研讨会组织机构

组织委员会

组织委员会主席： 陆佑楣 中国大坝委员会主席

组织委员会副主席：

朱尔明	中国水利学会理事长、中国大坝委员会副主席
周大兵	中国水力发电工程学会理事长、中国大坝委员会副主席
陈方枢	中国安能建设总公司总经理
林初学	中国长江三峡工程开发总公司副总经理
郭建堂	中国水利水电建设集团公司总经理
李菊根	中国水电工程顾问集团公司总经理
汪金元	湖北清江水电开发有限责任公司副总经理

组织委员会委员（以姓氏笔划为序）：

于文星	中国长江三峡工程开发总公司办公室主任、中国大坝委员会副秘书长
王 宁	中国华电集团公司工程建设部副主任
尹 炼	中国南方电网有限公司国际合作部主任
左 强	国家自然科学基金委员会水利学科项目主任
许可达	三峡建设委员会装备司司长、中国大坝委员会副秘书长
齐志坚	国家电网公司国际合作部主任
曲 波	中国大唐集团公司工程管理部主任
刘金焕	国电大渡河流域水电开发有限公司总经理
吴世勇	二滩水电开发有限责任公司总经理助理、规划发展部主任
李赞堂	中国水利学会秘书长
邴凤山	中国水力发电工程学会秘书长、中国大坝委员会副秘书长
陈东平	中国华能集团公司水电开发部经理
钮新强	长江水利委员会长江勘测规划设计研究院院长
高 波	水利部国际合作与科技司司长
贾金生	中国水利水电科学研究院副院长、国际大坝委员会副主席
贾彦兵	中国国电集团公司工程建设部副主任
袁 德	中国电力投资集团公司安全生产部经理
谭少华	湖北清江水电开发有限责任公司副总经理
潘罗生	龙滩水电开发公司总工程师

组织委员会秘书长：

陈洪斌	中国长江三峡工程开发总公司国际合作部副主任
陈润发	湖北清江水电开发有限责任公司科技办主任
王连祥	中国水利水电科学研究院教授级高工

技术委员会:

技术委员会主席:

潘家铮 中国工程院、中国科学院院士、中国大坝委员会名誉主席
C.B. Viotti (巴西) 国际大坝委员会主席

技术委员会副主席:

张津生 中国大坝委员会副主席
曹广晶 中国长江三峡工程开发总公司副总经理
高季章 中国水利水电科学研究院院长、中国大坝委员会秘书长
L. Berga 西班牙大坝委员会主席

技术委员会委员 (以姓氏笔划为序):

付元初 中国水利水电建设集团公司副总经理
申茂夏 中国水利水电第七工程局副局长
汪小刚 中国水利水电科学研究院岩土所所长
周建平 中国水电工程顾问集团公司总工程师
张 诚 中国长江电力股份有限公司三峡电厂厂长
吴晓铭 国电大渡河流域水电开发公司总工程师
杨建明 湖北清江水电开发有限责任公司副总工程师
林绍忠 长江科学院总工程师
周厚贵 中国葛洲坝集团公司总工程师
陈厚群 中国水利水电科学研究院教高、中国工程院院士
高凤龙 中国水利水电科学研究院国科处副处长
梅锦煜 中国安能建设总公司总工程师
曹征齐 中国大坝委员会副秘书长
鲁一晖 中国水利水电科学研究院结构所所长
蒋国澄 中国水利水电科学研究院教授级高工
Andre Bergeret (法国) 国际大坝委员会秘书长
Charlwood (美国) 国际大坝委员会混凝土专业委员会主席
K. BABA (日本) 国际大坝委员会副主席
Seok-Ku Ko 韩国大坝委员会主席

技术委员会秘书长:

唐 澍 中国水利水电科学研究院机电所所长
张国新 中国水利水电科学研究院结构材料所所长
沈紫坪 《水电站机电技术》编辑部主任

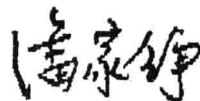
前 言

水力发电是一种可再生的清洁能源，在人类社会与经济发展中起到了不可替代的作用。但是，由于各种原因近 20 多年来水电发展在世界范围内呈减缓趋势。尽管如此在许多发展中国家包括中国，水电水利事业的取得了蓬勃的发展，技术发展硕果累累。为了促进中国水电行业同各国同行的交流，中国长江三峡工程开发总公司、湖北清江水电开发有限责任公司、中国水力发电工程学会和中国水利学会联合举办了“2004 年水力发电国际研讨会”。会议于 2004 年 5 月 24 日—26 日在中国宜昌三峡工程现场召开，参会代表近 300 人，来自 20 多个国家和地区。会议收到论文 133 篇，会议文集用中、英文印，分为上、中、下三册，论文涉及以下几个主要方面：

- 高面板坝设计、施工及监测
- 混凝土大坝的设计、施工及运行管理
- 大体积混凝土配合比优化设计与外加剂的管理使用
- 水电站大型水轮机组的稳定性与运行经验
- 水电站的增容与改造。

我相信文集反映了近年来水电枢纽和大型水轮机技术方面的丰富成果。衷心地希望这本文集将为水电水利行业的决策者、投资者、研究人员和工程师提供有价值的参考。

潘家铮



2004 水力发电国际研讨会 技术委员会主席

2004 年 5 月 20 日 于北京

目 录(中册)

三峡二期工程混凝土研究.....	1
甄永严, 王秀军	
大坝混凝土的新理念	10
姜福田, 陈改新	
氧化镁混凝土自生体积变形的长期试验研究成果	17
李承木, 袁明道	
HBC 低热高抗裂大坝混凝土的开发研究	25
李金玉, 彭小平, 隋同波, 文寨军, 史振寰	
三峡大坝混凝土施工配合比试验研究	34
田育功	
三峡二期工程左厂房大体积结构混凝土配合比优化设计	41
谢凯军	
三峡工程花岗岩骨料的碱活性反应试验研究	50
杨华全, 王迎春, 曹鹏举, 陆建华	
相变温控大体积混凝土的设计	56
陈美祝, 何 真, 陈胜宏	
MgO 微膨胀混凝土的发展及自生体积变形的分析应用	63
袁明道, 杨光华, 李承木	
辉绿岩砂石粉在百色 RCC 中的研究应用	69
程国银, 田育功	
聚脲弹性体抗冲磨防护材料及应用技术研究	77
吴怀国, 孙志恒	
大体积混凝土配合比设计材料相容性问题	83
梁松, 杨医博, 莫海鸿	
用劈裂试验方法评价新老混凝土粘结面的抗冻性能	87
李平先, 赵国藩, 张雷顺	
提高碾压混凝土含气量的试验研究	94
纪国晋, 姜福田, 姜荣梅	
辅助胶凝材料对水泥基材料早期开裂的影响	99
王信刚, 梁文泉, 叶群山	
提高碾压混凝土抗裂性能的试验研究.....	106
曾力, 刘数华, 吴定燕	
抗裂剂对大体积混凝土体积稳定性的影响.....	112
陈美祝, 何 真, 马保国	
河流水质对水工混凝土的侵蚀性及其判断方法的探讨.....	119
阮燕, 方坤河	
尼尔基厂房混凝土蜗壳采用低掺率聚丙烯纤维限裂和抗渗的尝试.....	124
王 琛, 李军, 史小兴	
粉煤灰对大体积混凝土抗裂性能的影响.....	130
刘数华, 方坤河, 石妍	
SLAGSTAR—大坝工程大体积混凝土中所需的特殊胶凝材料.....	134
Alexius Vogel, Robert Novak	

丙烯酸类高效减水剂 SR3 性能及其三峡大坝应用·····	143
周守贤, 王豪源, 胡孟其	
巴基斯坦 BASHA DIAMER 大坝工程——最高的碾压混凝土重力坝 ·····	147
Muhammad Amin, Dr. Izhar-ul Haq, Zubair M. Pirzada	
二滩大坝的建设·····	159
吴世勇	
百色水利枢纽主坝的某些特点·····	164
陈顺天, 崔晋莉	
三峡三期 RCC 围堰工程快速施工关键技术·····	171
朱忠华, 戴志清	
三峡二期工程大坝混凝土塔带机入仓快速施工技术·····	176
周厚贵, 曾 明	
碾压混凝土筑坝新技术在梯子洞工程的运用·····	181
刘 洪	
混凝土拱坝承载能力研究·····	185
王均星, 张优秀, 王汉辉	
长沙外掺 MgO 混凝土拱坝仿真分析·····	192
张国新, 金峰, 刘振威, 罗小青	
大坝安全监测遗传回归模型研究及应用·····	198
陈维江, 赵德海, 鲁一晖	
龙滩碾压混凝土重力坝渗流场与应力场耦合数值模拟·····	203
柴军瑞, 李康宏, 仵彦卿, 李守义	
大体积混凝土高温季节施工仓面保护效果分析·····	210
张宇鑫, 刘海成, 黄达海	
大体积混凝土温度场差分法求解精度问题·····	217
张宇鑫, 黄达海, 刘海成	
太平湾电站大坝溢流面混凝土裂缝分析与处理·····	222
郭惠民	
石门子 RCC 拱坝地质条件与加固措施·····	227
王恩志, 毛宗原, 黄远智, 柯文虎	
三峡水电站厂坝间压力钢管受力特性研究·····	233
赵德海, 陈维江, 鲁一晖	
伊朗 SHIRVAN 大坝混凝土配合比设计优化·····	238
Mohammad Reza Jabarooti, Mahab Ghodss	
冻融环境下混凝土结构耐久性设计与施工·····	244
李金玉	
坝美拱坝外掺 MgO 混凝土不分横缝新技术的工程实践·····	253
章鹏 李少鹏	
土石坝沥青混凝土心墙底部接头的结构模型试验研究·····	258
余梁蜀, 吴利言, 许庆余	
大型水轮机蜗壳结构研究·····	263
伍鹤皋, 阳 芳	

三峡二期工程混凝土研究

甄永严, 王秀军

中国水利水电科学研究院结构材料所

摘要: 本文主要介绍了我们为三峡工程混凝土从原材料优选到混凝土配合比成分优化的一系列研究工作, 并取得了显著的经济效果, 使三峡工程混凝土技术性能得到了全面的提高, 同时获得上亿元的经济效益。针对三峡工程原材料的特点, 本文有介绍了我们在研究工作中的一些技术措施, 其中包括: 1、混凝土中掺引气剂; 2、混凝土中掺用 I 级粉煤灰; 3、选用品质优良的高效减水剂并和引气剂联合掺用; 4、采用缩小水胶比增加粉煤灰掺量的技术路线; 5、采用有微膨胀性质的水泥, 使混凝土自生体积变形呈膨胀型。事实证明, 上述措施是有效的, 并对其它相关的混凝土工程都有指导意义。

关键词: 三峡工程、配合比、I 级粉煤灰、引气剂、减水剂

1 概况

1.1 工程概况

三峡工程坝址位于湖北省宜昌市三斗坪镇, 控制流域面积 100 万 km^2 , 多年平均径流量 4510 亿 m^3 。设计正常蓄水位 175m, 总库容 393 亿 m^3 , 防洪库容 221.5 亿 m^3 。工程具有防洪、发电、航运、供水, 养殖等巨大综合经济效益。

三峡水利枢纽主要建筑物由大坝、电站厂房和通航建筑物等三大部分组成。大坝为混凝土重力坝, 轴线全长 2309.5m, 坝顶高程 185m, 最大坝高 183m, 水电站为两组坝后式厂房, 共装机 26 台, 单机容量 700MW, 总装机容量 18200MW, 年均发电量 846.8 亿 kW.h。通航建筑物设在左岸, 由垂直升船机和双线连续五级船闸组成。主要工程量为: 土石方开挖 10400 万 m^3 , 土石方填筑 3262 万 m^3 , 混凝土浇筑 2941 万 m^3 , 钢筋 54.89 万 t, 金属结构安装 25.7 万 t, 总工期为 17 年, 分三期进行:

第一期 5 年 (1993 年至 1997 年) 开挖右岸导流明渠, 修碾压混凝土纵向围堰, 同时在左岸进行主体建筑物基础开挖;

第二期 6 年 (1998 年至 2003 年) 修建左岸大坝和左岸电站厂房, 在 2003 年完成左岸电站第一批水轮发电机组安装, 并网发电, 建成双线连续五级船闸投入运行。

第三期 6 年 (2004 年至 2009 年) 修建右岸大坝和电站厂房, 完成两岸所有水轮发电机组安装, 并投入运行。

对如此重大的工程, 工程质量的提高, 服务寿命的延长, 技术的创新, 对国内、外都将产生深远的影响, 并已引起普遍的关注。为此, 三峡工程开发总公司高度重视工程混凝土质量, 采取很多措施加强质量管理, 例如派技术人员驻水泥厂监控出厂水泥质量, 粉煤灰入仓前质量检测, 不合质量要求的灰严禁入库, 外加剂和砂、石骨料都按质控要求进行抽检。并委托中国水科院结构材料所进行混凝土配合比的优化等方面的研究工作, 研究内容有: 碱活性骨料试验; 二期混凝土配合比优化; 全级配混凝土大试件试验。整个研究工作约 4 年有余。在碱活性骨料试验中, 我们采取了标准方法和各种快速法, 同时进行试验, 最终提出了长江料场天然骨料为活性骨料和人工花岗岩骨料为非活性骨料的结论。在混凝土配合比优化过程中, 我们采取“两

掺一低”的原则和缩小水胶比增加粉煤灰掺量的技术路线,研究成果在技术经济上取得了显著的效果。在全级配大试件混凝土研究工作中也取得了一些新进展,完善、补充了以往的研究工作。

1.2 三峡二期工程设计对混凝土的技术要求

根据有关的投标文件,三峡工程第二期大坝混凝土的主要设计指标见表1。

表1 三峡工程第二阶段大坝混凝土主要设计指标

序号	混凝土 标号	级配	抗冻 标号	抗渗 标号	抗侵 蚀	极限拉伸值 ($\times 10^{-4}$)		限制最大 水胶比	水泥 品种	最大粉煤 灰掺量	使用部位
						28d	90d				
1	R ₉₀ 200	三	D150	S10	√	0.80	0.85	0.55	中热 525	30%	基岩面2m 范围内
2	R ₉₀ 200	四	D150	S10	√	0.80	0.85	0.55	低热 425	10%	基础约束 区
									中热 525	25~30%	
3	R ₉₀ 150	四	D100	S8		0.70	0.75	0.60	低热 425	15%	内部
									中热 525	30~35%	
4	R ₉₀ 200	三、四	D250	S10		0.80	0.85	0.50	中热 525	25%	水上、水下 外部
5	R ₉₀ 250	三、四	D250	S10		0.80	0.85	0.45	中热 525	20%	水位变化 区外部、公 路桥墩
6	R ₈₀ 400	二	D250	S10				0.38	中热 525	0	大坝及排 沙孔出口 抗冲耐磨 部位

2 研究内容

2.1 碱活性骨料

本项研究工作是三峡大坝基坑开挖的闪云斜长花岗岩碎石及下岸溪斑状花岗岩人工砂进行碱活性骨料检测,检验方法用《水工混凝土试验规程》(SD-105-82)中的化学法、岩相法和砂浆长被:《砂、石碱活性快速试验方法》CECS48:93;ASTM 标准 C-1260-94 等国内外有关的试验规程和标准,进行了岩相分析、化学分析、砂浆长度法、小砂浆棒压蒸快速法以及快速检验砂浆棒碱—硅反应等方法的试验。由于花岗岩骨料碱活性反应有缓慢而持续时间长的特点,所以在本项研究工作中又采用了 ASTM 标准 C1260-94,该方法就是针对缓慢反应活性骨料的。根据用各种方法的测定结果,并用显微镜观察反应产物,其结论为三峡花岗岩人工砂、石骨料为非活性骨料,长江料场天然骨料为活性骨料,南村坪料场天然骨料具有潜在危害的可能性。

2.2 二期混凝土配合比优化

2.2.1 原材料优选:由于三峡工程的重要性以及所用骨料用水量较高的特点,在原材料优选过程中误调以下几点是十分必要的:极积的推广应用 I 级粉煤灰,粉煤灰在水工混凝土中应用已是成功的经验,现在掺用粉煤灰已由单纯节约水泥列作为功能材料对混凝土进行改性,这是利用粉煤灰的一大突破,这样可使粉煤灰的三大效应得到充分的发挥。在三峡工程中坚持用 I 级粉煤灰,不但在技术上可获得良好的效果,在经济上节约效果也相当可观。由于 I 级粉煤灰掺入混凝土能减水 6%~8%,改善混凝土拌和物的和易性、减少泌水和干缩,提高耐久性和抗裂性都较 II、III 级粉煤灰为好;极积的推广高效减水剂和引气剂联合掺用,因为用花岗岩人工骨

料为粗、细骨料的混凝土,四级配用水量已达到 $110\text{kg}/\text{m}^3$,这与二滩工程人工骨料混凝土用水量相比约多 $25\text{kg}/\text{m}^3$,相当于每方混凝土多用 $50\text{kg}/\text{m}^3$ 胶材,这是很大的差距。现代混凝土,特别是三峡工程混凝土多用水泥并非好事,不但要增加混凝土的单价,还要影响混凝土的一系列性能,特别是提高了大体积混凝土的温升。由于选用了高效缓凝减水剂和引气剂以及与 I 级粉煤灰联合掺用,使混凝土在室内试拌时用水量最低降到 $79\text{kg}/\text{m}^3$,一般在 $85\text{kg}/\text{m}^3$,在国内外处于领先水平;限制中热水泥熟料和混凝土中碱含量,并使水泥中含有一定数量的 MgO ,防止混凝土碱活性骨料反应和保持混凝土自生体积变形的微膨胀性,这项措施对防止混凝土裂缝的产生都有积极意义。三峡工程在优选原材料方面,针对工程的实际情况,采取了综合措施,为优化混凝土配合比提供了先决条件。

2.2.2 混凝土配合比优化和推荐:三峡工程混凝土配合比设计是在“缩小水胶比,增加粉煤灰掺量,坚持两掺一低”的技术路线指导下进行的。混凝土配合成份优化新选用的水泥为葛洲坝水泥厂生产的 525#中热和 425#低热水泥、湖南特种水泥厂生产的 525#中热水泥,初期,粉煤灰选用重庆电厂准 I 级灰,混凝土特性试验时改为用平 I 级粉煤灰,外加剂选用 ZB-1 减水剂(特性试验时用 ZB-1A)和 DHqs 引气剂。混凝土的成型、养护和试验工作按《水工混凝土试验规程》(SD105-82)进行。试验用原材料特性分别列入表 2—表 5。优化试验采用二级配,小石(5mm-20mm)与中石(20mm-48mm)的比例为 45:55;混凝土塌落度控制在 $3\text{cm}\sim 5\text{cm}$ 范围;含气量在 4%-5%之间,减水剂掺量 0.5%-0.7%范围内。共计试拌成型 78 个混凝土配合比。优选后混凝土配合比做性能试验时粗骨料采用下列级配:

特大石:大石:中石:小石

四级配 30 : 30 : 20 : 20

三级配 50 : 20 : 30

二级配 55 : 45

经过优化和性能试验推荐的混凝土配合比列入表 6。

表 2 水泥物理力学性能和水化热试验结果

水泥 品种	物理力学性能											水化热 (kJ/kg)			
	密度 (g/cm ³)	细度 (%)	稠度 (%)	安定 性	凝结时间 h:min		抗压强度 (MPa)			抗挤强度 (MPa)					
					初凝	终凝	3天	7天	28天	3天	7天	28天	1天	3天	7天
葛洲坝 525#中热	3.20	0.60	24.1	合格	1:59	3:06	26.8	39.6	56.6	4.9	6.25	8.17	177	244	276
葛洲坝 425#低热	3.04	2.46	26.4	合格	2:49	6:00	—	19.4	45.6	—	4.36	7.88	108	172	220
湖特 525#中热	3.17	3.8	24.2	合格	1:37	3:44	29.7	43.0	59.4	6.17	7.23	9.03	177	237	270
GB200-89 525#中热	—	≤12	—	合格	≥1:00	≤12:00	≥20.6	≥31.4	≥52.5	≥4.1	≥5.3	≥7.1	—	≤251	≤293
GB200-89 425#低热	—	≤12	—	合格	≥1:00	≤12:00	—	≥18.6	≥42.5	—	≥4.1	≥6.3	—	≤197	≤230

表3 粉煤灰品质指标检验结果

粉煤灰品种	细度 (%)	需水量比 (%)	烧失量 (%)	SO ₃ 含量 (%)	表观密度 (g/cm ³)
重庆电厂	8.2	95.5	6.9	0.64	2.4
平圩电厂	5.9	90.0	1.1	0.26	2.22
I 级灰 (GB1596-91)	≤12	≤95	≤5	≤3	—
II 级灰 (GB1596-91)	≤20	≤105	≤8	≤3	—

表4 外加剂性能试验结果

外加剂种类	掺量 (%)	减水率 (%)	含气量 (%)	泌水率比 (%)	凝结时间差 (h:min)		抗压强度比 (%)				90 天 干缩率 比 (%)	相对耐 久性指 标 (%)
					初凝	终凝	3 天	7 天	28 天	90 天		
ZB-1	0.5	14.6	3.3	69	+7:05	+7:38	129	147	119	119	114	—
ZB-1A	0.8	24.8	1.4	—	—	—	172	173	153	144	—	—
DHqs	0.0065	12.2	5.2	80.6	—	—	91.2	80.6	89.1	86.7	110.9	300 次 快冻 95.8

表5 人工骨料物理性能试验结果

骨料粒径 (mm)	表观密度 (kg/m ³)	吸水率 (%)	堆积密度 (kg/m ³)	细度模数	含泥量或石粉含量 (%)	云母含量 (%)
粗砂	2630	0.40	1440	2.72	1.4	0.1
细砂	2650	0.40	1400	2.34	1.4	0.1
5-10	2720	1.02	1320		1.0	
10-20	2740	0.83	1290		0.2	
20-40	2760	0.48	1340		0.2	
40-80	2740	0.46	1320		0.2	
80-150	2740	0.19			0.2	

注：砂按 60%粗砂+40%细砂混合

表6 推荐的混凝土配合比

混凝土使用部位和种类	设计要求	级配	水胶比	粉煤灰掺量 (%)	砂率 (%)	外加剂掺量		每立方米材料用量 (kg)				
						ZB-1 A (%)	DHqs (1/万)	水	水泥	粉煤灰	砂	石
大坝内部	R ₉₀ 150	四	0.50	45	28.5	0.70	0.70	79.0	87.0	71.0	618.7	1624.8
大坝基础 (包括外部)	R ₉₀ 200	四	0.50	30	28.5	0.70	0.65	83.0	116.2	49.8	616.1	1620.3
水位变化区	R ₉₀ 250	四	0.45	30	28.0	0.70	0.65	82.0	127.5	54.7	601.8	1622.3
RCC-1	R ₉₀ 200	三	0.50	40	32.0	0.70	3.50	72.0	86.4	57.6	701.0	1562.0
RCC-2	R ₉₀ 150	三	0.50	50	32.0	0.70	4.50	70.0	70.0	70.0	702.9	1564.0
抗冲磨混凝土	R ₂₈ 400	三	0.30	20	31.0	0.70	0.4	118.0	315.0	79.0	577.4	1286.9
结构混凝土	R ₉₀ 300	三	0.45	20	28.0	0.70	0.50	92.0	163.6	40.9	593.6	1561.1
予应力混凝土	R ₂₈ 350	二	0.35	20	32.5	0.70	0.0	118.0	269.7	67.4	659.2	1368.8

2.2.3 推荐的混凝土技术经济效果

影响混凝土质量的因素很多, 分析混凝土技术经济效果是在满足全部设计技术要求的条件下与设计提出的混凝土进行比较的。混凝土性能包括内容很多, 用单项性能比较很难显出混凝土技术的优势, 本节利用综合指标进行对比分析, 以便比较优化效果, 现将对比结果列入表 7。

表 7 大坝混凝土几项综合指标 (90d)

混凝土标号	设计与优化	水泥功能因素 (MPa/kg)	热强比 (KJ/MPa)	弹强比 (10^3)	抗裂系数(K)
R ₉₀ 150	设计	0.164	1064.4	1.40	0.137
	优化	0.316	610.8	1.04	0.155
R ₉₀ 200	设计	0.182	1091.2	1.11	0.134
	优化	0.287	781.2	0.91	0.201
R ₉₀ 250	设计	0.183	1087.6	0.99	0.161
	优化	0.297	798.8	0.83	0.222

注: 1、表中设计资料来自长江委“长江三峡水利枢纽单项工程技术设计”报告第一册(下)大坝设计。2、抗裂系数 $K = \text{抗拉强度} \times \text{极限拉伸} / \text{干缩} \times \text{抗拉弹模}$

表 7 中水泥功能因素是每立方米混凝土所能产生的抗压强度, 可以认为水泥功能因素是体现了混凝土原材料、配合比的优化水平, 水泥功能因素高, 就意味着混凝土达到设计强度所用的水泥少, 混凝土的发热量、干缩也会由此而减少。由表 7 看出, 大坝不同部位的混凝土优化后水泥功能因素要比设计高出 52.7%~92.7%, 效果显著。

热强比是每立方米混凝土所产生的热量与强度之比, 表中混凝土的热量是用水泥水化热计算的。该项指标综合了混凝土发热量与强度之间对抗裂性能的矛盾。为了提高混凝土抵抗温度应力的能力, 降低热强比是很重要的途径。优化后的混凝土热强比比设计降低了 41.0%~59.4%。单位强度能如此大幅度的降低发热量, 主要是掺 I 级粉煤灰和高效减水剂的结果。

弹强比是混凝土的弹性模量与其强度之比。混凝土的强度与弹性模量是有内在联系的两种特性, 对混凝土抗裂能力有影响而且有矛盾, 弹强比就是把两种特性合而为一综合评价混凝土特性。从提高混凝土抗裂能力考虑, 希望混凝土具有较高的强度和较低的弹模, 换句话说, 希望混凝土每 MPa 强度所产生的弹强模要小, 既弹强比要小, 优化后混凝土弹强比下降幅度为 16.2%~25.7%。

抗裂系数是综合对混凝土产生裂缝有影响的相关性能综合为一个指标, 用以评定混凝土的抗裂能力。混凝土抗裂系数越大, 抗裂能力就越高。大坝不同部位混凝土经过优化后, 抗裂系数提高了 13.1%~50.0%。应该指出, 混凝土的抗裂系数是在节约胶凝材料, 全面优化混凝土性能的前提下取得的。

由以上几种混凝土主要指标看出, 经过优化, 改善了混凝土的多种性能, 特别是改善了混凝土的综合性能, 提高了混凝土的质量和抗裂能力。

经过优化后, 除了取得以上的技术效果外, 由于所采取的技术路线还节约了水泥, 也取得可观的经济效果。经济分析是以下列单价为依据 (98 年报价):

中热水泥	577 元/t	I 级灰	345 元/t
低热水泥	536 元/t	II 级灰	315 元/t
高效减水剂	10000 元/t		
普通减水剂	2300 元/t		

上述单价是以几个厂家当时报价的平均数取值。对比混凝土的配合成份是参考长委技术设计报告大坝设计中混凝土配合成分和大坝与厂房二期工程施工招标文件中对混凝土要求确定的。现将综合对比列入表 8。

表 8 设计与优化混凝土胶材经济核算

混凝土种类	设计与优化	水泥品种	$\frac{W}{C+F}$	W (kg/m ³)	C+F (kg/m ³)	C (kg/m ³)	F (kg/m ³)	C+F 单价(元/m ³)	外加剂单价(元/m ³)	总单价(元/m ³)	优化与设计差价(元/m ³)
大坝内部	设计	低热	0.60	115	192	154	38	94.5	1.32	95.82	13.22
		中热	0.60	115	192	125	67	93.2	1.32	94.52	11.92
	优化	中热	0.50	79	158	87	71	74.7	7.90	82.60	
基础	设计	中热	0.60	115	192	154	38	100.9	1.32	102.22	9.72
	优化	中热	0.50	83	166	116	50	84.2	8.3	92.50	
水变区	设计	中热	0.50	113	226	226	0	130.4	1.56	131.96	30.36
	优化	中热	0.45	82	182.2	127.5	54.7	92.5	9.1	101.60	

从表中看出,设计与优化混凝土差价最低是基础混凝土为 9.72 元/m³,最高是水位变化区混凝土为 30.36 元/m³,如果按基础与内部混凝土平均差价计,三峡工程混凝土通过优化可节约经费 2 亿元以上,这还没有包括由于减少了水泥用量,减少发热量而减少的温控费用。

2.2.4 全级配混凝土特性试验

三峡工程是跨世纪的宏伟工程,从工程的重要性、安全性等方面考虑进行全级配大试件试验是十分必要的。并且三峡工程第二阶段混凝土特性研究已经提出了十分丰富的、全面的力学、变形和热学等试验资料,在此基础上,根据已定的第二阶段混凝土配合比再进行一些全级配混凝土特性试验非常必要。三峡工程全级配大试件试验内容非常全面,其中包括:抗压和劈拉强度、弹性模量、极限拉伸、干缩、自生体积变形、徐变和抗渗等不同龄期的试验。试验用原材料同小试件(标准试件)相同,并用大、小试件同时成型进行对比。

成型大试件试模尺寸为:

抗压试件: 45×45×45cm; 劈拉试件 $\phi 45 \times 45$ cm;

弹性模量试件: $\phi 45 \times 90$ cm 抗渗试件: $\phi 45 \times 45$ cm;

极限拉伸试件: 45×65×225cm; 八字试模: 干缩、自变和徐变试件 $\phi 45 \times 90$ cm。

现将大、小试件抗压、劈拉、弹模、极限拉伸、干缩、抗渗、自生体积变形和徐变和变等试验结果分别列入表 9~表 14。

表 9 大、小试件抗压、劈拉试验结果

部位	级配	抗压强度 (MPa)			劈拉强度 (MPa)		
		7 天	28 天	90 天	7 天	28 天	90 天
基础	D	19.4	27.3	33.9	1.06	1.46	1.96
	S	16.7	24.6	32.8	1.26	1.78	2.34
	D/S	1.16	1.11	1.03	0.84	0.82	0.84
内部	D		21.4	27.1		1.27	1.61
	S		18.1	24.9		1.3	1.97
	D/S		1.18	1.09		0.98	0.82
水位变化区	D		34.6	38.0		1.94	2.52
	S		34.0	45.2		2.37	2.86
	D/S		1.02	0.84		0.82	0.88
比值总平均	D/S	1.10			0.86		

注: D: 代表大试件; S: 代表小试件

表 10 大、小试件混凝土的抗压强度、极限拉伸值和拉伸弹性模量

项目 级配	28 天			90 天		
	R _p (MPa)	$\Sigma p (\times 10^{-4})$	E _{0.5} (GPa)	R _p (MPa)	$\Sigma p (\times 10^{-4})$	E _{0.5} (GPa)
全级配 (D)	1.19	0.43	36.31	2.1	0.58	47.33
湿筛二级配 (S)	1.91	0.77	29.86	3.43	0.97	41.76
比值 D/S	0.62	0.56	1.22	0.61	0.60	1.13

表 11 混凝土的干缩 ($\times 10^{-6}$)

项目	试件尺寸 (cm)	龄期 (天)									
		3	7	15	30	45	60	90	120	150	180
全级配 (D)	$\phi 45 \times 90$	9.2	16.0	30.6	47.9	61.4	71.6	82.5	92.0	100.1	104.3
湿筛二级配 (S)	$10 \times 10 \times 50$	31.8	79.9	163.7	259.9	297.1	325.8	336.1	345.2	348.3	350.6
D/S		0.29	0.16	0.19	0.18	0.21	0.22	0.25	0.27	0.29	0.30

表 12 混凝土的抗渗试验

项目	试件尺寸 (cm)	抗渗标号	渗透高度 (cm)	相对渗透系数 (10^{-11}m/s)
全级配 (D)	$\phi 45 \times 45$	$>S_8$	18.7	5.70
湿筛二级配 (S)	$\phi 18 \times 15$	$>S_8$	8.0	0.93
D/S			2.3	6.1

表 13 混凝土自生体积变形 ($\mu \epsilon$)

项目	试件尺寸 (cm)	龄期(天)						
		15	30	60	90	120	150	180
全级配 (D)	Φ 45×90	0.9	1.1	1.82	3.4	5.6	5.6	7.0
湿筛二级配 (S)	Φ 20×60	8.1	8.2	10.5	14.2	19.0	21.7	23.4
D/S		0.11	0.13	0.17	0.25	0.29	0.26	0.30

表 14 大小试件混凝土徐变试验结果 ($10^{-6}/\text{MPa}$)

混凝土级配	龄期 (d)	τ (d)							
		7	15	30	60	90	120	150	180
全级配	7	18.73	21.66	24.63	27.16	29.31	30.68	31.20	31.80
湿筛二级配		33.79	40.40	45.57	50.74	51.25	53.43	54.46	55.53
比值 (D/S)		0.56	0.54	0.54	0.54	0.57	0.57	0.57	0.57
全级配	28	12.7	13.60	14.79	16.25	18.33	18.75	19.48	19.63
湿筛二级配		15.38	17.67	21.68	23.96	26.17	28.13	29.62	31.06
比值 (D/S)		0.83	0.77	0.68	0.68	0.7	0.65	0.66	0.63
全级配	90	7.64	8.45	9.65	11.14	14.1	14.52	15.33	15.50
湿筛二级配		6.65	8.12	10.39	12.61	13.85	15.46	16.62	16.63
比值 (D/S)		1.15	1.04	0.93	0.88	1.02	0.94	0.92	0.93

注: D: 代表大试件; S: 代表小试件

通过上述对混凝土全级配性能的全面试验,可归纳得出以下几条结论:

- (1) 全级配混凝土抗压强度比湿筛二级配混凝土小试件略高,而劈拉强度则略低。
- (2) 全级配混凝土的抗压弹性模量比湿筛二级配混凝土的弹性模量大 9%~16%,随龄期的增长,比值增大。
- (3) 全级配混凝土的抗拉强度为湿筛二级混凝土的 61%左右。
- (4) 全级配混凝土的极限拉伸值为湿筛二级配混凝土的 56%~60%。
- (5) 全级配混凝土的拉伸弹性模量为湿筛二级配混凝土的 1.10~1.22 倍。
- (6) 全级配混凝土的干缩仅为湿筛二级配混凝土的 16%~30%。
- (7) 全级配混凝土与湿筛混凝土的抗渗性能均满足抗渗标号 S8 的要求。但是试件的渗透高度,全级配较湿筛二级配高 2.3 倍,相对渗透系数大 6.1 倍。
- (8) 全级配混凝土与湿筛二级配混凝土自生体积变形均为膨胀型,而全级配混凝土自生体积变形较小,改为湿筛二级配混凝土的 3%。
- (9) 全级配混凝土徐变与湿筛二级配混凝土徐变相比,7d 和 28d 前者为后者分别小 50%~60% 和 63%~83%;90d 徐变全级配与湿筛相返,比值平均为 0.98。

3 工程应用

三峡工程混凝土由于各级领导重视,设计上又通过各种审查,科研工作的投入和到位,施工人员的精心施工,采取了各种具体确保质量的措施,加强了混凝土的原材料的质量管理和控制混凝土的抽样检测,混凝土的质量是良好的,截止 2003 年 5 月 15 日,二期工程单元工程评定共 70492 个,全部合格,优良率为 84.55%,其中主体工程混凝土单元工程评定 48596 个,全部合格,优良率为 85.83%。但是也应该看到,在二期式程大坝上、下游面也出现一些裂缝。根据专家研究分析,一致认为三峡工程泄洪坝段上游坝面的裂缝其性质是表面的、浅层的裂缝。三峡大坝裂缝产生的方根原因还是温度的作用,较大的内外温差导致混凝土产生裂缝。国内外混凝土坝绝大多数都有裂缝,不裂的仅是极个别的。三峡大坝裂缝与混凝土材料关系如何?也有个别人怀疑是混凝土质量问题这是不切合实际的,也是表面的浮浅的认识,因为:

- (1) 每个泄洪坝段几乎每个坝段都有裂缝,裂缝的位置、宽度和长度都很有规律;
- (2) 基础混凝土(强约束区)并没有产生贯穿性裂缝;
- (3) 混凝土所有性能都满足设计要求;
- (4) 泄洪坝段出现裂缝后,根据长委仿真计算最大拉应力为 3.2MPa,但出现裂缝时混凝土抗拉强度根据推算只有 2.49MPa,设计的混凝土不可能抵抗由于寒潮冷击产生为此大的拉应力。

混凝土是脆性材料,其特点就是拉压比低,在施工过程中应注意这个特点,并采取相应措施来弥补抗拉强度低的不足。例如应认真做好混凝土的养护和表面保护工作,特别是表面保护,应长期进行下去,避免混凝土表面受寒潮的冷击,这是防止混凝土裂缝的必要措施。

4 结语:

通过三峡工程混凝土配合比优化,我们采取了一些技术措施,这些措施是有效的,对其他相关的混凝土工程都有指导意义,这些措施包括:

- (1) 坚持在全部混凝土中掺引气剂,这是提高混凝土耐久性、抗裂性和工作性能的一项重要措施。通过掺引气剂,混凝土不但能满足设计对混凝土耐久性的要求,而且大部分混凝土都达到有关规范的抗冻耐久性混凝土最高要求的 300 次冻融循环;不掺引气剂的混凝土,水胶比就是降至 0.35,抗冻性也很低,难以满足设计对混凝土耐久性要求。由此可见,在混

凝土中掺引气剂是保证三峡大坝混凝土耐久性和使用寿命的重要措施；

- (2) 坚持在混凝土中掺用 I 级粉煤灰，三峡工程大坝混凝土由于花岗岩骨料用水量较大，采用常用措施后还达 $110\text{kg}/\text{m}^3$ （四级配），进一步降低混凝土用水量，采用具有固体减水剂之称的 I 级粉煤灰，把 I 级粉煤灰作为功能性材料掺用，这在国内水电站大坝混凝土施工中，还没有先例。由于 I 级粉煤灰颗粒细、烧失量低、需水量比小，在混凝土中掺 20%，减水率可达 10%；掺 40% 时，减水率可达 14% 左右。掺 I 级灰，使混凝土容易振实，这对胶凝材料用量少的人工骨料大坝混凝土更为重要。
- (3) 掺 I 级灰利用其活性高的特点和与水泥水化产物生成稳定的、具有一定强度的物质，避免了由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶产生的内应力，使混凝土各种性能在后期还能得到继续发展，掺 I 级粉煤灰还能抑制碱活性骨料反应，改善混凝土体积的稳定性。掺 I 级粉煤灰节约的水泥效果更明显，可进一步降低混凝土的温升，有利于防止温度裂缝。由于掺 I 级粉煤灰有明显的减水作用，大大减少了混凝土干缩，避免和减少出现干缩裂缝。选用 I 级粉煤灰是三峡工程的一项重大举措。
- (4) 坚持选用品质优良的高效减水剂，并和引气剂联合掺用。使用普通减水剂减水效果不够理想，四级配混凝土用水量仍在 $100\text{kg}/\text{cm}^3$ 以上。通过高效减水剂（减水率在 20% 以上）和引气剂联合掺用，使混凝土用水量降至 $85\text{kg}/\text{cm}^3$ ，用水量达到国内外先进水平，有效地解决了花岗岩人工骨料混凝土用水量高的难题，使大坝混凝土温控得到有效的控制。
- (5) 坚持采用缩小水胶比增加粉煤灰掺量的技术路线。众所周知，水胶比是影响混凝土强度和耐久性的重要因素。水胶比越大，混凝土孔隙率越大，强度越低，耐久性越差。从混凝土内部孔结构分析，混凝土强度和耐久性不仅与孔隙率有关，更重要的是与孔径的大小、孔的排列方向关系更大。缩小水胶比能减少孔隙率，掺粉煤灰则可细化、匀化混凝土的孔结构，可使有害孔变为少害孔，少害孔变为无害孔，特别是掺 I 级粉煤灰，由于其微珠效应和减水效果，改善混凝土的孔结构的作用更为突出。
- (6) 坚持采用有微膨胀性质的水泥，使混凝土自生体积变形呈膨胀型，改善温控条件，减少裂缝发生。

大坝混凝土的新理念

姜福田, 陈改新

中国水利水电科学研究院结构材料所

摘要: 本文总结了作者对坝工混凝土配合比设计 and 应用实践的新认识, 认为防止裂缝仍是大坝混凝土研究的主要方向。极限拉伸值是评定大坝混凝土抗裂性的重要指标, 设计龄期选用 90d 比较合理。在大坝混凝土配合比设计中, 充分发挥粉煤灰的活性效应, 用人工砂中的石粉置换部分粉煤灰, 可取得良好的经济效益。泄水建筑物抗冲磨混凝土应选用品质坚硬的骨料。设计抗压强度等级在 C40~C60 范围内比较合适。提高抗冲磨混凝土的抗裂性, 减少施工期发生裂缝更具重要性。

关键词: 大坝(碾压)混凝土, 配合比设计, 裂缝, 粉煤灰, 石粉

1 防止裂缝仍是大坝混凝土研究的主要方向

新颁布的《混凝土重力坝设计规范 DL5108-1999》规定在混凝土坝设计中用抗压强度等级(C)代替抗压强度标号(R)。在实际工程施工中, 混凝土实测抗压强度普遍比设计验收抗压强度超强, 而大坝混凝土裂缝则依然较普遍存在。但也有的坝裂缝甚少, 其关键是要认真对待每一个引起裂缝的因素。在正常施工条件下, 大坝混凝土因结构应力引起的裂缝极少, 绝大多数裂缝是由于外界温、湿度变化引起体积收缩造成的。引起大坝混凝土裂缝的体积变形有约束条件下温度下降引起的冷缩应变、混凝土表面湿度变化引起的干缩应变和混凝土自生体积收缩变形。混凝土抵抗拉伸变形的能力称拉伸应变能力, 国内通称极限拉伸。

大坝混凝土不发生裂缝的基本条件为:

$$|\varepsilon_t + \varepsilon_{sh} + \varepsilon_{au}| \leq \varepsilon_p \quad (1)$$

式中: ε_t —温度下降(ΔT)引起的冷缩应变, 自 $\Delta T=0$ 起始;

ε_{sh} —干缩应变, 自养护期终止开始;

ε_{au} —自身体积应变, 自浇筑后第 1 天开始;

ε_p —极限拉伸值, 以收缩发生时混凝土龄期计。

公式(1)左端 3 个参数可能不同时发生, 计算时应根据工程实际条件进行分析。

1.1 冷缩应变

水泥水化放热使混凝土温度升高, 产生体积膨胀, 因受到约束而产生压缩应变。此时混凝土塑性较大, 压缩应变大部分为其塑性变形所消耗。到后期混凝土冷却, 温度下降, 发生体积收缩, 冷缩应变受到约束, 容易使混凝土开裂。混凝土冷缩应变可用公式(2)表示:

$$\varepsilon_t = K\alpha\Delta T \quad (2)$$

式中: ε_t —冷缩应变, $\mu\varepsilon$;