

赞比亚某水电站大坝碾压混凝土配合比设计及应用

毛会永¹, 耿士超²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 中国电建集团第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 赞比亚某大型水电工程挡水建筑物为碾压混凝土坝, 碾压混凝土配合比设计采用欧美标准。为了确保碾压混凝土高质量、快速施工, 在挪威咨询工程师的指导下, 最终采用了全坝体统一配比、整体防渗的施工措施, 并在统一配合比的基础上进行了变态混凝土(GERCC)设计。目前RCC大坝已浇筑完成, 从质量检测成果来看, 碾压混凝土各项性能指标均满足设计要求。级配统一的碾压混凝土配合比设计及在本工程的成功应用, 为施工条件困难、合同工期要求紧迫的类似工程提供了经验借鉴。

关键词: RCC大坝; 碾压混凝土配合比; 粉煤灰; 抗压强度; ASTM标准

中图分类号:

文献标识码: A

1 前言

赞比亚某大型水电站位于赞比亚东南部某河流上, 工程以发电为主, 总装机容量750MW。工程主要建筑物包括拦河大坝、坝身表孔溢流泄洪系统及右岸引水发电系统。其中大坝为碾压混凝土重力坝, 坝顶总长374.5m, 最大坝高130.5m, 碾压砼总方量为129万m³, 平均仓面面积在1万m²左右。

为了满足高强度快速施工的需求, 尽可能简化碾压混凝土施工程序。在挪威咨询工程师的指导下, 最终决定采取一种全坝体统一碾压混凝土配合比设计方案^[1]。根据大坝设计参数, 进行了R12MPa(筒体强度)@365d碾压混凝土配合比(MSA=63mm)设计及性能研究, 并成功应用于施工。

承包商试验室首先进行原材料比选, 确定水泥、粉煤灰、人工骨料、外加剂等主要原材料, 然后向业主提交配合比设计计划; 批准后, 按照最大骨料粒径(MSA)63mm进行初步配合比试验, 获得碾压混凝土180d龄期的试验结果, 以该结果推算365d龄期的性能, 最后用365d的实测结果验证复核初选配合比, 得到R12MPa@365d碾压混凝土施工配合比, 并在此基础上进行了变态混凝土配合比设计。在业主认可下, 将该成果应用于RCC大坝施工; 同时持续开展混凝土配合比试验和施工检验工作, 以指导生产^[2]。

2 碾压混凝土原材料试验

2.1 水泥

通过业主建议和考察比选, 确定采用赞比亚Lafarge水泥厂生产的CEM 42.5N型水泥。现场实验室对该厂生产的水泥性能进行了测试, 测试结果见表1, 结果符合BSEN197-1标准要求。

表1 水泥性能检测成果表

检验项目	细度 (%)	密度 (g/cm ³)	安定性 (mm)	凝结时间		抗压强度	
				初凝 (min)	终凝	2d (MPa)	28d
Lafarge 水泥 42.5N	2.5	3.12	1.5	124	229	32.1	52.8
合格标准 (BSEN197-1)	≤10	/	≤10	≥60	/	≥10	≥42.5 ≤62.5

2.2 粉煤灰

通过比选, 赞比亚Maamba煤矿有限公司被最终确定为主要供货商, 其生产的Maamba粉煤灰被选作配合比设计。现场实验室对到场粉煤灰的试验成果见表2, 其物理性能符合ASTM C618 F级的要求。

收稿日期:

作者简介: 毛会永(1981-), 男, 河南开封人, 高级工程师, 主要从事水利水电工程地质、工程管理方面的技术和科研工作。

E-mail: mhuiy2008@qq.com

表2 粉煤灰性能检测成果表

检验项目	密度 (g/cm ³)	含水量 (%)	安定性 (mm)	烧失量 (%)	细度 (0.045mm 方孔筛余量) (%)	需水量 (%)	强度活动指数		
							7d	28d	90d
Maamba 粉煤灰	2.33	0.4	0.11	3.76	17.9	103	86	94	111
合格标准 (ASTM C618 F)	≥2.0	≤10	≤0.8	F级, ≤6	F级, ≤34	F级, ≤105	≥75	≥75	/

2.3 砂石骨料

在距离坝址约4km处确定了人工骨料场，料场母岩岩性为花岗片麻岩，原岩饱和抗压强度试验值55MPa~102MPa^[4]。

岩石破碎、筛分后，将粗、细骨料按比例充分混合，配制符合标准的颗粒级配，试验成果见图1。人工砂主要物理性能试验成果见表3，试验成果符合EM1110-2-2006标准要求。粗骨料按ASTM C33和EM1110-2-2006标准分为4组：公称粒径范围分别为4.75mm~19mm、19mm~37.5mm、37.5mm~50mm和37.5mm~63mm，各级配骨料主要物理性能试验成果见表4，试验成果符合ASTM C33标准要求。

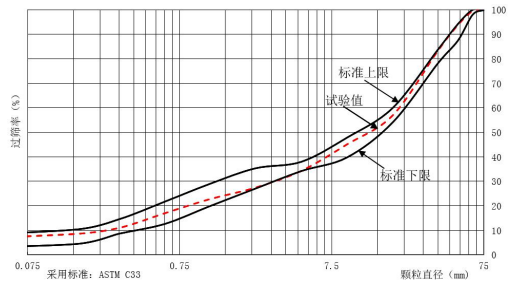


图1 粗、细骨料混合后颗粒级配曲线图

表3 人工砂主要物理性能试验成果表

试验项目	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	细度模数	稳定性 (%)	轻物质含量 (%)	有机质含量	粘土块和易碎颗粒 (%)	石粉含量 (%)
试验结果	2.61	2.3	2.65	6	0.1	0	0.4	13.4
合格标准 (EM1110-2-2006)	>2.5	/	2.10-3.1	<12	<0.5	0	<3%	/

表4 粗骨料主要物理性能试验成果表

试验项目 (mm)	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	洛杉矶磨损	稳定性 (%)	Flak. & Elong. 指数 (%)	粘土团块 (%)	轻物质 (%)	<75 μm (%)
公称粒径 4.75-19	2.62	0.8	25	5.0	3.7	0.30	0.08	0.8
19-37.5	2.63	0.6	27	5.8	2.5	0.25	0.08	0.6
37.5-50	2.64	0.4	27	6.2	3.3	0.20	0.07	0.3
37.5-63	2.64	0.3	28	7.0	8.8	0.20	0.06	0.3
合格标准 (ASTM C33)	>2.5	/	<50	<12	<30	<3	<0.5	<1

2.4 外加剂

使用中国电建某工程局外加剂厂生产的SN-2 型高效减水剂和SN-HG 缓凝剂，其含水量、减水率、控制抗压强度、凝结时间、含气量等性能均满足ASTM C494标准要求。

3 碾压混凝土配合比设计

3.1 目标平均强度确定

根据设计图纸、ACI 214、ACI 207.5R和EM1110-2006等标准或手册要求，大坝碾压混凝土(RCC)、变态混凝土(GERCC)的目标平均强度按标准偏差法确定。期望标准偏差S和概率值z为：S=3.5MPa，z=1.28，则期望目标抗压强度 $f_{cr}' = f_c' + z \times S$ ，碾压混凝土强度设计标准见表5。

表5 碾压混凝土强度设计标准

设计特征强度 (圆柱体)	室内配制目标强度 (圆柱体)
f_c' , (MPa)	f_{cr}' , (MPa)
12	16.5

3.2 水胶比及粉煤灰掺量选择

碾压混凝土拌合物主要由砂、石、粉煤灰、外加剂、水泥和水构成。根据施工经验和原材料物理性能，在取得最佳砂率及基准用水量后，选取5个水胶比，3种粉煤灰掺量（60%、65%和70%），进行配合比试验，其中设定最大粒径MSA=63mm，Vb值（Vebe time）=10±5s。配合比试验统计结果见表6，各试验组的水胶比或总胶材与拌合物抗压强度见图2、图3。分析试验成果可以得出，配制的各组碾压混凝土原材料中粗、细骨料差异不大，减水剂和缓凝剂不变、用水量相同时，混凝土抗压强度与总胶材用量线型相关且敏感；当水胶比在0.71左右，粉煤灰掺量65%，总胶材172kg时，配合比基本上在最优状态，可满足配制强度要求。

表6 粉煤灰掺量60%、65%、70%碾压混凝土配合比设计试验统计表

试验组数	水胶比	砂率	粉煤灰 (%)	减水剂	缓凝剂	水	水泥	粉煤灰	总胶材	原材料用量 (kg/m ³)					
										砂	小石 4.75~19	中石 19~37.5 (mm)	大石 37.5~63	减水剂 SN-2	缓凝剂 SN-GH
5	0.65	36	60	1	0.3	122	75	113	188	748	400	536	403	1.877	0.563
	0.68	36					72	108	179	751	402	538	405	1.794	0.538
	0.71	36					69	103	172	753	403	540	406	1.718	0.515
	0.75	37					65	98	163	778	399	534	402	1.627	0.488
	0.80	37					61	92	153	781	401	536	404	1.525	0.458
5	0.65	36	65	1	0.3	122	66	122	188	747	400	535	403	1.877	0.563
	0.68	36					63	117	179	750	401	537	404	1.794	0.538
	0.71	36					60	112	172	752	403	539	406	1.718	0.515
	0.75	37					57	106	163	777	398	533	401	1.627	0.488
	0.80	37					53	99	153	781	400	536	403	1.525	0.458
5	0.65	36	70	1	0.3	122	56	131	188	746	399	534	402	1.877	0.563
	0.68	36					54	126	179	749	401	537	404	1.794	0.538
	0.71	36					52	120	172	752	402	539	405	1.718	0.515
	0.75	37					49	114	163	776	398	533	401	1.627	0.488
	0.80	37					46	107	153	780	400	535	403	1.525	0.458

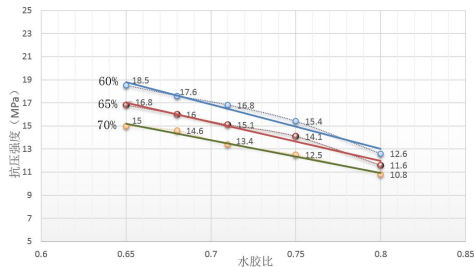


图2 水胶比-抗压强度关系曲线图 (龄期 180d, MSA63mm)

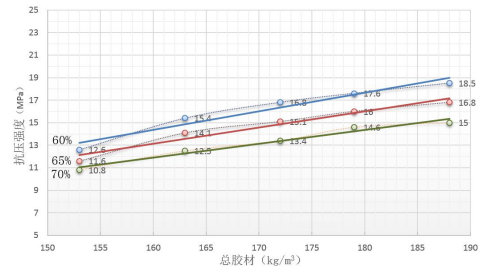


图3 总胶材-抗压强度关系曲线图 (龄期 180d, MSA63mm)

3.3 确定配合比及性能测试

根据前述各系列试验成果，结合工程经验适当调整后，最终确定采用最优水胶比0.71和总胶材172 kg/m³开展新拌混凝土性能试验。确定的配合比参数见表7，新拌混凝土物理性能试验成果见表8。

表7 R12MPa@365d (MSA63mm) 碾压混凝土配合比表

特征强度	水胶比	砂率	粉煤灰 (%)	减水剂	缓凝剂	水	水泥	粉煤灰	总胶材	原材料用量 (kg/m ³)					
										砂	小石 4.75~19	中石 19~37.5 (mm)	大石 37.5~63	减水剂 SN-2	缓凝剂 SN-GH
12MPa	0.71	36	65	1.0	0.3	122	60	112	172	752	403	539	406	1.718	0.515

表8 R12MPa@365d (MSA63mm) 碾压混凝土拌合物物理性能试验成果表

特征强度	编号名称	密度 (kg/m ³)	Vb值 (s)	含气量 (%)	初凝时间 (h:min)	终凝时间 (h:min)
12MPa	R2/MB/12/63/365d	2375	8.2	0.8	26:40	52:15

由表8可知,碾压混凝土Vb值8.2s,含气量0.8%,拌和物密度2375kg/m³,初凝时间26:40,终凝时间52:15,各值均在要求范围内。三级配碾压混凝土的中低密度材料粉煤灰掺量较大,但并未明显降低混凝土的密度,这与骨料密度较大和吸水率较低可能有较大关系,也侧面验证了各项原材料质量较好。

采用表7中混凝土配合比试拌了混凝土试件,开展了圆柱体试块抗压强度、劈裂强度、直接拉伸强度等物理力学性能试验,综合试验成果见图4由试验结果可以看出,碾压混凝土满龄期各级强度均能够达到目标要求。

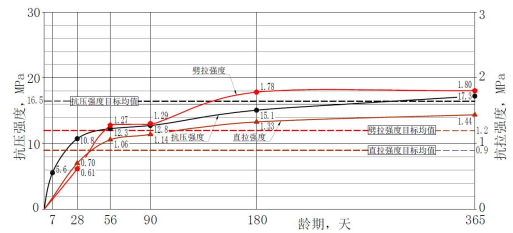


图4 R2/MB/12/63/365d 碾压混凝土龄期-强度关系曲线图

4 变态混凝土配合比设计

变态混凝土(GERCC)主要应用在坝体上游、下游,廊道及左右岸坝肩接触部位,GERCC总方量约6.5万m³。在浆液铺洒之前,利用RCC拌合料在加浆区域围成1m²网格。通过试验,确定按碾压混凝土体积的7%在碾压混凝土中加入浆液^[5],浆液铺洒在网格里面。RCC拌和料摊铺到浆液上面以后,利用Φ100振捣棒进行振捣,直到表面均匀泛浆为止。变态混凝土拌和后的坍落度试验值为29mm,7天抗压强度6.2Mpa,28天抗压强度14.7Mpa,180天抗压强度19.4Mpa,365天抗压强度20.5Mpa,满足设计要求。

5 质量检测

RCC大坝碾压混凝土施工从2018年3月份开始,至2020年5月结束。施工采用的碾压混凝土配合比即前述表7所列设计配合比。拌和楼出口控制配合比Vb值为5s~10s,现场RCC的Vb值控制在8s~10s。摊铺层厚为30cm,采用14t振动碾静碾2遍,有振碾6遍。

核子密度仪的检测结果显示RCC压实度可达98%以上,95%以上的RCC表面光滑、平整、富有弹性,验证了RCC设计配合比在本工程中的适宜性^[6]。同时在仓面上按规范和挪威咨询工程师的要求,钻取芯样,见图5。从岩芯外观来看,芯样表面光滑致密,骨料分布均匀,空隙较少,层缝界面不明显^[7];所做的RCC试块抗压强度试验结果在14.5Mpa以上,满足设计要求^[8]。同时在RCC坝体钻孔进行现场压水试验,各孔段透水率均满足设计要求;对RCC接缝部位取样室内试验,无处理接缝处透水率一般小于 0.06×10^{-6} cm/s,满足设计要求。各种检测结果均证明,RCC大坝整体抗渗性能良好,本工程设计的统一配合比是适宜的。

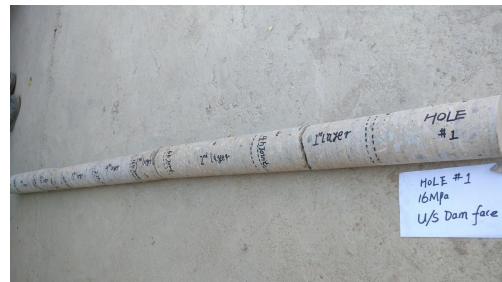


图5 RCC大坝钻孔岩芯照片

6 结论

结合国际工程特点和工程所处当地环境,提出了MSA63mm的三级配碾压混凝土和在此基础上加浆7%振捣形成变态混凝土配合比,简化了配合比种类,混凝土各项性能满足设计要求。通过采用统一级配、统一配合比种类、整体防渗的工程措施,可以减少施工干扰,加快施工进度;配合比中采用了最大粒径63mm的大石,减少了骨料分离^[1];坝体上游面50cm、下游面30cm范围加浆使碾压混凝土改性为变态混凝土,使坝体抗渗得以进一步提高。

在确保工程质量的前提下,通过参建各方的不懈努力,本水电站大坝施工顺利,资源相对节约,

为工程后序施工和发挥效益创造了良好条件，对其他类似工程有较好的借鉴意义。

参 考 文 献 :

- [1] 李文伟,陈文耀. 三峡工程三期围堰RCC配合比设计优化[J].中国三峡建设, 2002,37(2):37-38.
- [2] 方坤河. 中国碾压混凝土坝的混凝土配合比研究[J].水利发电, 2003, (11):51-53.
- [3] 刘伟宝,陆采荣,梅国兴,戈雪良,王 珩,杨 虎. 软弱砂岩骨料碾压混凝土的配制及其特性研究[J].海洋工程, 2014, 32(6):105-110.
- [4] 任喜平,李元来,许鹏飞,李荣军,党建涛. 三河口大坝碾压混凝土配合比试验研究[J].水利水电技术, 2017, 48(8):68-73.
- [5] 秦国逊,康进辉,许安生. RCC大坝变态混凝土试验研究[J].人民长江,2008, 39(9):92-94.
- [6] 郑凯,李伟. 藁河口水电站碾压混凝土配合比设计[J].水利发电,2004, (2):42-44.
- [7] 邓文海,张积金,刘顺香. 云南万家口子水电站双曲拱坝碾压混凝土施工配合比优化及性能分析[J].红水河,2020, 39(1):125-130.
- [8] 孙彦华,薛国红. 美水水坝碾压混凝土配合比设计与试验[J]. 中国三峡建设, 2003, 000(002):P.33-34.

Design and application of RCC mix proportion for a hydropower station in Zambia

MAO Hui-yong

(Northwest Engineering Corporation Limited, Xi' an 710065,China)

Abstract: The water-retaining building of a large hydropower project in Zambia is a RCC dam. The RCC mix proportion test uses European and American standards. In order to ensure high-quality and rapid construction of RCC dam, under the guidance of Norwegian consulting engineers, the construction measures of uniform gradation and overall anti-seepage were finally adopted. Based on the RCC mix proportion design, the mix proportion of the grout enriched vibratable RCC was designed and adopted during the construction. At present, the pouring of RCC dam has been completed. Judging from the quality inspection results, all the concrete indicators meet the design requirements. The design and application of the RCC mix proportion is successful, which It provides experience for similar projects with difficult construction conditions and urgent contract period requirements.

Key words: RCC dam; RCC mix; Fly ash; Compressive strength; ASTM standard

作者简介:毛会永(1981-),男,河南开封人,高级工程师,主要从事水利水电工程地质、工程管理方面的技术和科研工作。电话: 18066967850;

E-mail: mhuivy2008@qq.com。

耿士超(1981-),男,内蒙古扎兰屯人,工程师,主要从事水利水电工程试验方面的技术和科研工作。电话: 18003989163; E-mail: 88203209@qq.com。