

泵送高强硅粉混凝土在小浪底工程中的应用

王铁城

(水利部小浪底水利枢纽工程建设管理局,河南 济源 454681)

摘要:在小浪底工程导流洞大体积混凝土施工中,采用硅粉、粉煤灰和普通硅酸盐水泥配制水泥用量低、大坍落度适合泵送的高强硅粉混凝土获得成功,介绍高强硅粉混凝土原材料、配合比及施工方法。

关键词:导流洞;高强硅粉混凝土;衬砌;钢模台车;小浪底水利枢纽

中图分类号:TV42+1

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2001)01-0045-02

黄河小浪底水利枢纽导流工程,由3条混凝土衬砌后内径为14.5m的隧洞组成,3条导流洞总长约3552m,衬砌厚度平均2m,于1997年10月截流前顺利通过国家验收,对工程总体评价优良。

3条导流洞完成导流后,改为永久龙抬头孔板消能泄水建筑物。当水库形成后,泄水建筑物工作水头为100~143m,黄河汛期水流平均含沙量 49 kg/m^3 ,瞬时最大含沙量达 941 kg/m^3 ,水库高水位时,泄水建筑物下泄洪水流速高达 30 m/s 以上,像小浪底这样在高水头、高流速、高含沙量条件下运行的泄洪排沙建筑物在世界上尚属少见,其中突出问题是高流速泥沙对泄洪建筑物的空蚀和磨损,根据三门峡水库运行情况,磨损和空蚀是相当严重的,为此小浪底导流洞混凝土衬砌设计总量为 26.2 万 m^3 ,按合同规定,中闸室上游段采用C30低标号混凝土衬砌,中闸室下游段采用C70高强硅粉混凝土衬砌,其中C30混凝土 10.5 万 m^3 ,C70混凝土 15.7 万 m^3 ,用量如此之大的高强硅粉混凝土施工,在我国水工建筑史上也是首次,总结这方面的施工经验对今后水工建设是很有益处的。

1 施工方案的确定

导流洞为圆型断面,洞身部分共分251个浇筑块,每块长12m,由于工期紧,整体性和混凝土表面光滑度要求又高,所以原考虑一个浇筑块分三次浇完,改为分两次浇筑完成,圆型中心水平线以下(圆心角 180°)范围内为底拱部分,以上部分为顶拱部分,每条导流洞采用2套(共6套)钢模台车,另外还配有顶拱钢筋台车、配电台车和修补台车,采用2座从美国C.S.Johnson公司购进的强制型自动称量拌

合楼生产混凝土,低温常态混凝土生产能力每座拌合楼为 $120\text{ m}^3/\text{h}$,使用6~9台混凝土搅拌车将料运至洞内浇筑地点,通过HB85型混凝土泵送到浇筑仓内,采用插入式混凝土震捣器捣实混凝土,先浇底拱,后浇顶拱,由导流洞进、出口向中间段合龙,浇筑上升速度不得超过 0.8 m/h ,顶拱不得超过 0.5 m/h 。

2 混凝土配合比设计

导流洞混凝土配合比须考虑四种因素:①满足混凝土合同技术指标;②满足混凝土的可泵性;③满足混凝土初凝时间不小于2h的要求;④满足混凝土施工温控要求。

2.1 原材料

a. 水泥。采用洛阳525R普通硅酸盐水泥,在外商工地试验室检测基础上,监理工程师试验室抽样(下同)检测56组,28d抗压强度为 $54.6\sim 63.4\text{ MPa}$,满足水泥标号要求。

b. 细骨料。选用黄河连地滩天然细砂掺20%~30%人工粗砂(使用天然粗骨料磨制),混合后细度模数抽检65组在2.6~2.8之间,比重2.5~2.7,含泥量小于3%,谓中砂。

c. 粗骨料。使用黄河连地滩天然河卵石(含有一部分人工碎石),粒径为 $5\sim 19\text{ mm}$ 和 $19\sim 37.5\text{ mm}$ (美国标准)连续级配,骨料坚固性抽检48组为2.6%~5.4%,小于18%,满足规定要求,比重为2.69,含泥量小于5%。

2.2 掺合料

a. 粉煤灰。掺用河南焦作热电厂Ⅱ级粉煤灰,细度抽检46组为5.6%~18.2%,烧失量平均为6.7%,需水量88%~95%,满足Ⅱ级灰标准。

b. 硅粉. 选用青海省民和镁厂生产的加密型硅粉, 其合同要求与抽检结果汇总见表 1. 由表 1 可知硅粉质量满足规定要求.

表 1 硅粉检测结果 %

项 目	火山灰活性指数	细 度	烧失量	含水量	SiO ₂ 含量
合同要求	≥90	≤10	≤6	≤3	≥85
民和硅粉	114.8	1.25	3.62	0.47	92.5

2.3 外加剂

混凝土外加剂外商选用瑞士驻香港 Sika 公司液体装: VZ 减水剂、NN 高效能减水剂、Ret 缓凝剂, 以上外加剂运抵工地后抽样检查, 基本满足水工混凝土试验规程 SD108 的规定, 其中 VZ 减水率为 9.2%, NN 减水率为 15%, Ret 缓凝剂时间增加 90 min. 小浪底采用了高效能减水剂 (NN) 和普通减水剂 (VZ) 复合使用, 获得了较低用水量和大大坍落度效果. 外加剂化学分析结果详见表 2.

表 2 外加剂化学分析结果

项目	外观	比重	pH	固含物 /%	表面张力 / (N·m ⁻¹)	还原糖 /%	Na ₂ SO ₄ Cl/ %
NN	棕褐色液体	1.21	6.88	40.26	0.04910	0.40	2.90 0.037
NZ	棕褐色液体	1.14	4.77	30.20	0.03432	3.95	0.20 0.0178
Ret	浅黄色液体	1.13	5.74	18.82	0.07012	无	0.10 0.471

2.4 配合比确定

经工地试验室提出多种配合比试验成果和结合现场施工实际, 选定具有代表性配合比之一列入表 3. 由表 3 可知, 粉煤灰掺量为 21%, 硅粉掺量为 3%. 表 3 中外加剂以干粉重量表示.

2.5 施工应用情况

导流洞底拱混凝土衬砌采用液压无轨式钢模台车, 直接在工作面上安装. 模板为半敞开式, 即两侧上口和底拱中部不设模板, 控制范围为圆心角 90° 以下. 两台移动式混凝土泵车, 配 4~6 辆混凝土搅拌车 (6~9 m³) 从拌合楼拉料. 因为高强硅粉混凝土粘度大, 搅拌车边走边拌合, 料在入泵前现场进行坍落

度检测, 如果坍落度损失过大, 就地再加适量 NN 溶液拌合, 以保证坍落度在允许范围, 使泵送料畅通无阻. 料从底拱中部和两侧上口进料, 每层铺料 40~50 cm 厚, 插入式和模板附壁式振捣器振实混凝土, 待底部混凝土距永久面 40~50 cm 时停浇, 以便预留出继续浇筑两侧混凝土时挤压中部料使其底部涌高不超过永久面, 增加抹面难度, 待中部混凝土在初凝之前将底部剩余混凝土浇筑完成, 最后采用弧形刮板式平仓振捣器平仓和人工抹面. 浇筑完成 12~24 h 后拆除模板, 采用麻袋覆盖, 人工洒水养护, 冬季采用 1 cm 厚泡沫塑料保温养护.

顶拱混凝土衬砌, 待轨道式钢筋绑扎台车完成钢筋绑扎退出后, 采用全液压轨道门架式钢模台车, 钢模为封闭式. 供料通过两台落地泵, 经台车操作平台上的分料器接软管穿过钢模壁上不同高程和位置上预留的小窗口至浇筑面, 顶拱两侧同步上升, 浇筑至拱顶时, 通过钢模顶部预埋的钢管进行垂直封拱. 浇筑完成 24 h 后拆模, 涂 Sika 公司提供的养护剂养护.

由于施工设备配套, 机械化程度高, 浇筑速度较快, 混凝土坍落度控制方法得当, 克服了以往高强混凝土施工粘度大, 坍落度损失快, 造成经常堵泵, 混凝土出现冷缝、蜂窝、麻面等质量事故. 底拱混凝土平均月浇筑 197 m, 顶拱平均月浇筑 123.5 m, 顺利完成抢工计划每天浇筑 5~7 块的任务, 世界银行检查团专家们对分包的中国水电施工队伍表示钦佩.

2.6 施工质量

经过现场工程师拌合楼机口取样 1124 组, 3 条导流洞分别评定, 结果详见表 4. 从表 4 可见混凝土施工强度和保证率均满足设计要求, 抗冻和抗渗也满足设计要求. 拆模后混凝土表面光滑, 没有出现较大的蜂窝和麻面. 经混凝土钻芯取样观察震捣密实.

施工完成后, 3 条导流洞混凝土都有不同程度的裂缝, 经调查共发现 132 条, 平均 1230 m² 有 1 条裂缝. 裂缝宽度一般为 0.5 mm, 最大 2 mm, 深度一般为 20~25 cm, 每条裂缝长度不等, 平均为 4 m, 裂缝

表 3 混凝土配合比

强度等级	水胶比	砂率 /%	含气量 /%	每 m ³ 混凝土材料用量/kg								坍落度/mm	
				水泥	砂	石	粉煤灰	硅粉	水	NN	VZ		Ret
C70	0.25	36	1~3	380	632	1103	100	15	120	1.15	0.23	0.03	160~180

注: 机口取样强度: 7 d 为 51.1 MPa; 28 d 为 69.4 MPa; 90 d 为 80.4 MPa.

表 4 混凝土现场检测结果

导流洞编号	设计强度 / MPa	设计保证率 / %	验收龄期 / d	抽样组数	平均强度 / MPa	标准差 / MPa	抗冻标准 D ₅₀	抗渗标准	保证率 / %
1	C70	90	90	380	81.2	7.5	满足	≥ S ₉₀	93.7
2	C70	90	90	371	80.1	6.6	满足	≥ S ₉₀	93.6
3	C70	90	90	373	79.8	6.1	满足	≥ S ₁₀	94.7

(下转第 61 页)

保险是促使业主向提高水工建筑物安全措施投资的有效手段。

但是保障建筑物安全工作的资金、建立用于预防和消除失事的物质和资金储备、建立失事后果的民事责任资金保障,其中包括在自愿保险基础上的资金保障等问题目前均未解决^[6]。

7 结 语

俄罗斯正处在经济、政治体制变革的年代,但仍然十分重视水工建筑物的安全工作,从法律、监督管理体制、管理手段、科技、经济等多方面保障水工建筑物的安全。他们不仅着眼于运行,还注意到对设计、施工阶段的水工建筑物的安全管理。既致力于预防失事的发生,还考虑到一旦发生事故时的报警、紧急状态消除和赔偿处理等环节。通过近几年的努力,俄罗斯的水工建筑物安全保障体系逐步健全,其中有些经验和做法值得我国借鉴参考,以促进我国大坝安全管理水平的不断提高。

参考文献:

[1] Варнавский Б. П. Об отраслевой программе "Безопасность энергетических сооружений" и государственном надзоре за безопасностью гидротехнических сооружений [J]. Гидротехническое строительство, 2000(2):10~12.

[2] 王正旭译.俄罗斯联邦水工建筑物安全法[S].水利水电快报,1999(9):14~18.

[3] Дьяков А. Ф. Реализация и научно-техническое обеспечение Федерального закона "О безопасности гидротехнических сооружений" [J]. Гидротехническое строительство, 2000(2):2~3.

[4] Интервью с руководителем Департамента государственного энергетического надзора и энергетического обеспечения Минтопэнерго России Борисом Петровичем Варнавским [J]. Гидротехническое строительство, 1999(5):2~5.

[5] Бритвин О. В. Основные научно-технические правовые и организационно-финансовые проблемы, вытекающие из Федерального закона "О безопасности гидротехнических сооружений", пути их решения [J]. Гидротехническое строительство, 2000(2):4~9.

[6] Бритвин О. В. О ходе реализации и научно-техническом обеспечении Федерального закона "О безопасности гидротехнических сооружений" [J]. Гидротехническое строительство, 2000(2):20~23.

[7] 王正旭译.水工建筑物安全报告条例[S].水利水电快报,1999(22):26~28.

[8] Кузнецов В. А. О ходе выполнения программы представления деклараций безопасности гидротехнических сооружений алектростанций РАО "ЕЭС России" в 1998~1999 годах [J]. Гидротехническое строительство, 2000(2):13~16.

(收稿日期:2000-08-29 编辑:熊水斌)

(上接第46页)

表5 导流洞衬砌裂缝统计结果

导流洞 编 号	总计		需要处理的裂缝						不需要处理的裂缝	
			宽度 2~1 mm		宽度 1~0.5 mm		宽度 0.5 mm 以下(有渗水)		(宽度 0.5 mm 以下,无渗水)	
	条数	长度/m	条数	长度/m	条数	长度/m	条数	长度/m	条数	长度/m
1	66	238	10	14	31	124	8	32	17	68
2	21	55	13	23	4	16			4	16
3	45	157	18	49	13	52	6	24	8	32
总计	132	450	41	86	48	192	14	56	29	116

情况见表5。

裂缝产生具有以下特点:①早期裂缝多(大多数在混凝土拆模后2~5d),晚期裂缝少;②高标号区浇筑块裂缝多(占95%以上),低标号区裂缝少;③表面裂缝多(占90%),贯穿裂缝和深层裂缝少;④冬季施工的浇筑块裂缝多,其他季节裂缝少;⑤靠近中闸室和出口空气流畅的浇筑块裂缝多,而在洞身深处受外界气温影响小的浇筑块裂缝少。

经调查统计,产生裂缝的主要原因是高强混凝土内部温升高(45.7~61.1℃),拆模后混凝土表面温度也高(30~35℃),受到外界低气温的“冷击”而产生裂缝。尤其是在冬天和春秋气温连续3~5d发生骤降时,混凝土拆模后保温不及时产生裂缝多。

按合同规定对宽度大于0.5mm和长度大于1.5m的裂缝使用环氧注浆技术修补。工地选用Sika公司提供的环氧浆液和灌注技术进行补修,补修后的裂缝经钻孔取样质量合格,通过验收。

3 结 语

硅粉和粉煤灰联合掺入配制高强混凝土,由于硅粉和粉煤灰的微粒效应和火山灰效应,改变了硬化混凝土的物理化学结构,不但节约了水泥,减少了温控负担,而且弥补了单掺粉煤灰早期强度低的弊病,实现了较早的拆模,保证了施工进度,而从实现了小浪底工程1997年10月按期截流。

(收稿日期:1999-05-17 编辑:张志琴)