

# 全断面胶凝砂砾石（CSG）过水围堰 施工技术研究与应

田福文

中国水利水电第八工程局有限公司，湖南 长沙 410007

【摘要】胶凝砂砾石（CSG）筑坝技术是碾压混凝土筑坝技术的延伸，其就地取材，拓宽了骨料使用范围，减少了对环境的影响；骨料不筛分、不冲洗、施工工艺粗放，降低了工程造价。大华桥水电站上游过水围堰最大堰高 57m，为全断面胶凝砂砾石结构，最大骨料粒径 250mm。通过 CSG 配合比设计与试验、现场工艺试验及应用，上游过水围堰实现了快速施工，按期到顶，提高了围堰挡水标准和大坝基坑过流标准，为胶凝砂砾石筑坝技术的推广应用积累了宝贵经验。

【关键词】全断面 胶凝砂砾石料（CSG） 围堰 配合比 施工 泄洪

## 1. 前言

胶凝砂砾石坝（CSG）是近 20 年来新兴起的一种筑坝技术，是在面板坝和碾压混凝土重力坝基础上发展起来的一种新坝型。筑坝材料是使用少量的胶凝材料和现场不筛分、不冲洗的砂砾石或开挖料，通过简易拌和、摊铺、振动碾压或浇筑振捣后形成具有一定强度和抗剪性能的材料<sup>[1]</sup>。

与面板堆石坝相比，CSG 筑坝材料中加入了胶凝材料，在碾压过程中，由于水泥的胶结作用，将原有的散粒体凝结为胶结体，坝体边坡稳定性更好，上下游坝坡可以更陡，即坝体断面减小，填筑总量减少，工程投资降低。CSG 筑坝与堆石坝施工方法相同，采用高效率的土石方运输机械和压实机械连续施工，施工工艺粗放，速度较快，缩短了工期。经碾压后的 CSG 材料具有一定的抗冲刷能力和较高的抗剪、抗压强度，坝体运行期间抗渗流冲蚀和洪水漫顶的安全度大大提高。

与碾压混凝土重力坝相比，CSG 筑坝技术是碾压混凝土筑坝技术的延伸，最大优势是拓宽了骨料使用范围，可以利用当地材料，天然砂砾石混合料、开挖料，减少了对环境的影响；CSG 坝典型结构断面为等腰梯形，比一般的重力坝三角形断面明显增大，基底应力较小，对材料和坝基的要求相对较低，骨料可不筛分、不冲洗，可建在弱风化的基岩上；CSG 筑坝材料为一种“超贫胶结混凝土”材料，胶凝材料用量少，绝热温升高，可简化或不进行温度控制，施工更加快速和简捷。

CSG 筑坝技术吸收了堆石坝就地取材、施工工艺粗放和连续施工的优点，吸纳了碾压混凝土重力坝胶凝材料用量少、温控简化、变态防渗以及抗冲刷能力的优点，同时优化了体型和结构断面。CSG 坝就地取材、施工快捷、节约造价，环境友好等诸多技术优势，具有高安全性、高抗震性和对地基条件要求低的优点，被誉为“最安全的大坝”。

CSG 围堰临时工程参照碾压混凝土施工工艺，上游面采用变态 CSG 防渗，下游面采用预制混凝土台阶防冲刷或采用变态 CSG 防护。CSG 大坝永久工程参照面板堆石坝施工工艺，上游面采用常态混凝土面板防渗，下游面采用常态混凝土防护。

## 2. 工程概述

大华桥水电站位于云南省怒江州兰坪县兔峨乡境内的澜沧江干流上，是澜沧江上游河段规划开发中的第六级电站。大坝为 106.0m 高的碾压混凝土重力坝，电站安装 4 台单机容量为 230MW 的立轴混流式水轮发电机组，总装机容量为 920MW。

本工程大坝施工导流采用围堰一次拦断河流，枯期围堰挡水、右岸导流隧洞（12m×14m）泄流，汛期导流隧洞和过水围堰（CSG）及基坑联合泄流。枯期基坑内施工、汛期暂停的导流方式。

2014 年 11 月上旬大江截流，2014 年 11 月上旬～2015 年 4 月 30 日上游临时土石围堰挡水下修建胶凝砂砾石 CSG 围堰。临时土石围堰设计挡水标准为枯期 11.1~次年 4.30 时段 10 年一遇洪水，相应流量为 1420 m<sup>3</sup>/s，上游水位为 1416.9m。

2015 年 5 月 1 日～2015 年 5 月 31 日，上游胶凝砂砾石 CSG 围堰挡水，设计挡水标准为枯期 10.16~次年 5.31 时段 10 年一遇洪水，相应流量为 2060 m<sup>3</sup>/s，上游水位为 1424.6m。

2015 年 6 月 1 日～2015 年 10 月 15 日主汛期，上游 CSG 围堰漫顶过流，过流标准为全年 20 年一遇洪水，相应流量为 6950 m<sup>3</sup>/s，上游水位为 1434.9m。

CSG 过水围堰最大堰高 57m，堰顶宽度 7m，堰顶长度约 125.0m，共计 CSG 填筑 10.2 万 m<sup>3</sup>。

## 3. CSG 围堰设计

### 3.1 设计挡水标准

根据澜沧江流域汛期洪峰流量和导流洞泄洪能力，并结合大华桥水电站总体进

度安排, 上游胶凝砂砾石 CSG 围堰设计挡水标准为枯期  $P=10\%$ ,  $Q=2060\text{m}^3/\text{s}$ , 上游水位  $1424.6\text{m}$ ; 度汛标准为汛期  $P=5\%$ ,  $Q=6950\text{m}^3/\text{s}$ , 上游水位  $1434.9\text{m}$ 。

### 3.2 材料设计

CSG 骨料级配连续, 堰体 CSG 最大粒径不大于  $250\text{mm}$ , 变态 CSG 最大粒径不大于  $150\text{mm}$ 。压实后密度  $>2200\text{kg}/\text{m}^3$ , 28 天龄期抗剪断强度:  $f>0.55$ 、 $C'>0.45\text{MPa}$ , 28 天龄期 80% 保证率的强度为 C3.5, 抗渗等级 W5<sup>l</sup>。

### 3.3 结构体型设计

CSG 围堰按照等腰梯形设计, 上游边坡  $1:0.5$ , 下游边坡为  $1:0.6$ 。设计堰顶最大高程为  $1429.0$ , 堰顶宽度  $7.0\text{m}$ , 堰底宽  $61.56\text{m}$ , 最大堰高  $57.0\text{m}$ 。考虑到 CSG 胶凝材料用量较少, 水化热低, 围堰不设横缝和纵缝。为减少汛期漫顶过流对 CSG 围堰顶部的冲刷破坏, 顶面采用  $1.0\text{m}$  厚的 C20 混凝土保护, 下游坡面采用  $2\text{m}\times 0.85\text{m}\times 1.2\text{m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 的 C20 混凝土预制台阶消能, 在围堰下游坡面  $1390.2\text{m}$  高程设置  $9.0\text{m}$  宽的缓冲防冲刷平台, 平台顶面采用  $1.0\text{m}$  厚的 C20 混凝土保护, 具体断面结构见图 3.3-1。

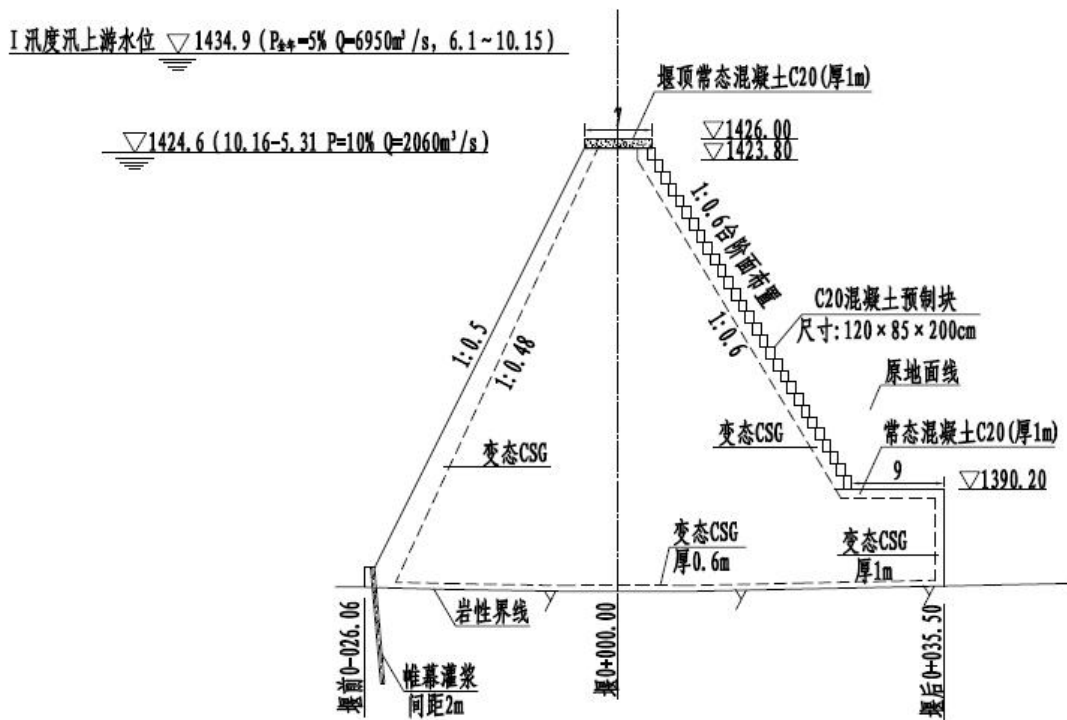


图 3.3-1 上游 CSG 过水围堰断面图

堰顶面常态混凝土与 CSG 变态区设置间距为  $1.0\text{m}$ 、长度为  $1.5\text{m}$  的锚筋, 锚筋

深入 CSG 堰体 80cm，下游面预制块每块设置四根长度为 90cm、外露 50cm 的连接筋，具体见图 3.3-2。

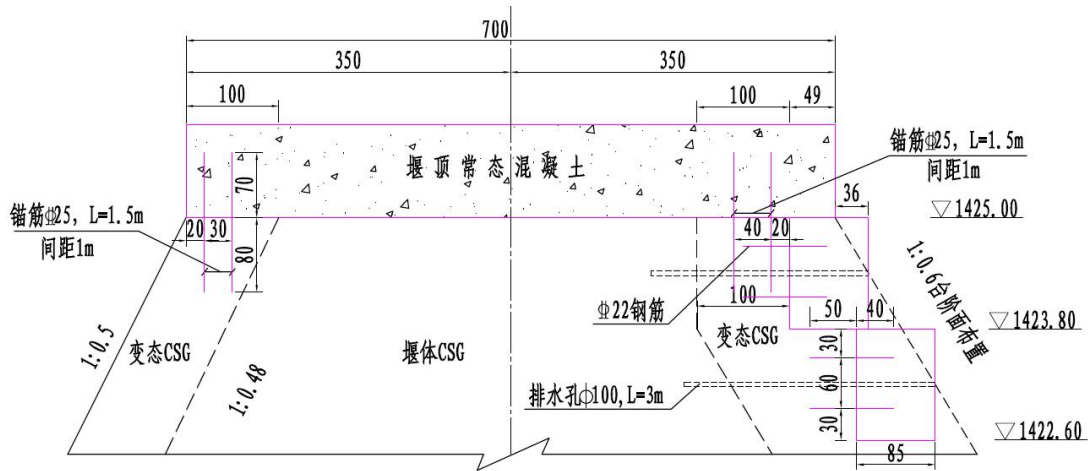


图 3.3-2 常态混凝土与变态 CSG 衔接大样图

利用 C20 常态混凝土将 CSG 堰顶结构浇筑成凹形（中部高程为 1426.0m，左岸堰顶高程为 1429.0m，右岸堰顶高程为 1427.0m，左侧通过 12%坡度、右侧通过 10%坡度分别与中部衔接），以利水流归槽，减少对下游左右岸边坡的冲刷，堰顶具体结构见图 3.3-3。

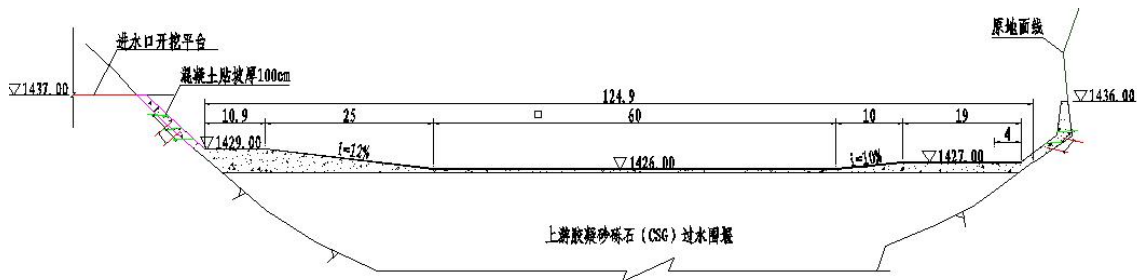


图 3.3-3 上游 CSG 过水围堰堰顶结构图

### 3.4 防渗与排水设计

胶凝砂砾石料（CSG）为半透水结构，仅靠自身防渗不能满足运行期间需要。CSG 围堰上游前沿和左右堰肩前沿设计一排间距为 2.0m 帷幕灌浆防渗，围堰上游迎水面 1.5~2m 厚富浆变态 CSG 作为防渗层，建基面基础采用 60cm 厚的富浆变态 CSG 垫层和左右岸堰肩 1.0m 厚变态 CSG 辅助防渗。

围堰下游面设置直径为 100mm、间排距为 2.0m×1.2m、孔深 3.0m 的排水孔。

在 1425m 高程左右岸各布置 3 根直径 400mm、间距为 500cm 的通气管，通气管沿堰体至左右岸堰肩贴坡混凝土，从贴坡混凝土顶部出露 10cm，具体见图 3.4-4。

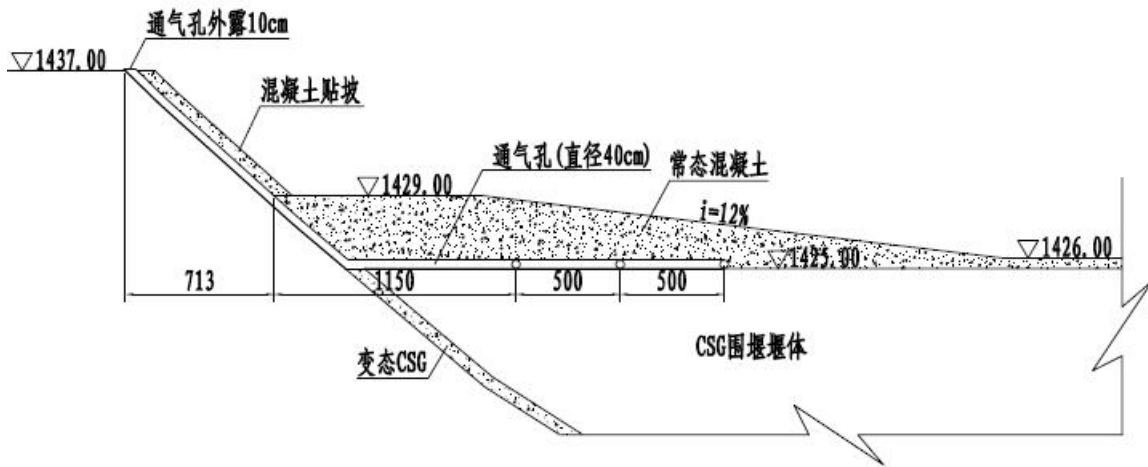


图 3.4-4 CSG 过水通气孔布置图

## 4. 配合比设计与工艺试验

### 4.1 粗细骨料

大华桥水电站上游 CSG 过水围堰填筑料共计 10.2 万  $m^3$ ，共需砂砾石骨料 15.3 万  $m^3$  左右。受截流时长和流速影响，河床覆盖层冲刷流失严重，造成河床砂砾石储量不足，且偏向下游段砂和细骨料比例高达 50%；受上游来水含泥量影响，河床天然砂砾石含泥量较高（平均含泥量 8%，最大含泥量为 11%，超过规范 5% 要求）。本工程共利用天然砂砾石料 7.15 万  $m^3$ ，其中基坑天然砂砾石料 4.09 万  $m^3$ ，下游左右岸河床开采 3.05 万  $m^3$ ，洞室开挖料 8.16 万  $m^3$ 。河床天然砂砾石料和洞室开挖料颗粒级配检测结果如表 4.1-1。

表 4.1-1 河床天然砂砾石料、洞室开挖料颗粒级配检测结果 (%)

骨料类型	0~5mm	5~20mm	20~40mm	40~80mm	80~250mm	>250mm
天然砂砾料	24.47	18.13	15.92	21.83	13.35	6.30
洞室开挖料	7.09	15.77	17.30	30.68	25.06	4.10

从上表可以看出，天然砂砾石料含砂率 24.47%，80mm 以上特大石接近 20%，其中大于 250mm 的大颗粒达到了 6.3%；洞室开挖料含砂率仅为 7.09%，80mm 以上特大石接近 30%。

### 4.2 胶凝材料与外加剂

水泥采用红塔滇西水泥厂生产的登牌 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥, 掺合料采用攀枝花 II 级粉煤灰, 外加剂采用江苏博特新材料有限公司的 JM-II 混凝土高效减水剂, 用于改善 CSG 性能, 以满足缓凝、减水、和易性等要求。

### 4.3 砂率、水胶比与强度试验

根据大华桥河床天然砂砾石料含砂率情况, 我们委托科研单位对砂率 20%、24%、30%和 35%四种工况、每种工况取水胶比 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 五种情况进行强度试验研究<sup>[3]</sup>, 试验结果见表 4.3-2。

表 4.3-2 天然砂砾石料 CSG 不同砂率、水胶比与强度关系 (Kg/m<sup>3</sup>)

编号	砂率%	水胶比	水	水泥	粉煤灰	砂	石	密度	减水剂%	VC 值 S	抗压强度 MPa		
											7d	28d	90d
1	20	0.6	86	100	43	445	1781	2464	0.8	7.3	6.8	10.5	15.3
2		0.8	87	76	33	451	1804	2483	0.8	7	5.2	7.9	11
3		1.0	88	62	26	454	1818	2491	0.8	6.4	4.3	6.7	9.1
4	24	0.6	87	102	44	533	1688	2446	0.8	5.9	7.6	12.1	16.8
5		0.8	88	78	33	539	1708	2460	0.8	5.7	5.8	8.9	12.3
6		1.0	90	63	27	543	1721	2479	0.8	5	4.9	7.7	9.9
7	30	0.6	89	104	45	663	1548	2447	0.8	6.3	7.4	11.4	16.1
8		0.8	91	80	34	671	1566	2459	0.8	5.9	5.4	8.1	11.5
9		1.0	92	64	28	677	1579	2443	0.8	5.5	4.2	6	7
10	35	0.6	93	109	47	768	1425	2360	0.8	7.8	6.5	10.2	14.8
11		0.8	94	82	35	779	1446	2354	0.8	8.0	5.0	7.8	10.5
12		1.0	95	67	29	785	1458	2336	0.8	7.5	4.2	5.6	6.9

对天然砂砾石料和洞室开挖料掺配方案, 按照砂砾石与洞室开挖料 7:3 比例混合进行试验。掺配后复合骨料按照综合砂率 20%、24%、30%和 35%四种工况、每种工况取水胶比 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 五种情况进行强度试验研究, 用洞室开挖料中的砂调整洞室开挖料含砂率到相应的比例掺配, 试验结果见表 4.3-3。

表 4.3-3 砂砾石料与开挖混合料 CSG 不同砂率、水胶比与强度关系 (Kg/m<sup>3</sup>)

编号	砂率%	水胶比	水	水泥	粉煤灰	砂砾砂	砂砾石	开挖料砂	开挖料	密度	减水剂%	VC 值 S	抗压强度 MPa		
													7d	28d	90d
1	20	0.6	85	99	43	314	1255	134	538	2464	1	6.5	7.9	12.3	17.1
2		0.8	86	75	32	318	1272	136	545	2483	1	6.4	6.5	8.9	12.2
3		1.0	87	61	26	320	1281	137	549	2491	1	6.7	4.6	7.4	10.3

4	24	0.6	88	103	44	374	1185	160	508	2446	1	6.5	8.7	13.2	17.7
5		0.8	89	78	33	379	1201	163	515	2460	1	5.8	7.1	10.4	13.2
6		1.0	90	63	27	382	1210	164	519	2479	1	6	5.6	8.2	11.5
7	30	0.6	91	106	46	465	1084	199	465	2390	1	6	7.6	11.8	16.3
8		0.8	92	81	35	471	1100	202	471	2386	1	6	6.7	9.5	13.3
9		1.0	93	65	28	475	1108	204	475	2364	1	6.2	5.1	8	10.1
10	35	0.6	94	110	47	539	1000	231	429	2330	1	7.2	6.8	9.7	13.6
11		0.8	95	83	36	547	1015	234	435	2321	1	7.6	5.6	8.3	10.5
12		1.0	96	67	29	551	1024	236	439	2307	1	7.4	4.4	6.5	7.7

#### 4.4 工艺试验

在科研单位推荐配合比基础上进行了两次生产性工艺试验，2014年5月14日挖掘机拌合工艺第一次生产性试验，2015年2月6日连续滚筒式专用搅拌机拌合工艺进行第二次生产性试验。工艺试验骨料最大粒径250mm，拌搅铺筑厚度、胶凝材料添加顺序、挖掘机拌合顺序和遍数、搅拌机拌合时间，仓面摊铺厚度分别按照70cm、60cm和50cm，25t单轮碾压机按照无振碾压两遍+有振4、5、6、7遍组合进行碾压遍数试验，变态CSG加浆量按照4%、6%、8%三种比例进行试验。通过两次工艺试验确定施工工艺如下：

(1) 通过生产性工艺试验成果，挖掘机拌合铺筑厚度确定为50cm，拌和顺序为：铺筑50cm后砂砾石料（洞挖料）→人工剔除超径大石→人工均匀铺洒水泥、粉煤灰和减水剂→再铺筑50cm后砂砾石料（洞挖料）→人工剔除超径大石→人工均匀铺洒水泥、粉煤灰和减水剂→挖掘机干拌两遍→均匀加水→挖掘机湿拌四遍→拌合完成验收合格。单个拌合坑挖掘机拌合强度30~40m<sup>3</sup>/h，VC值按照5~10s控制。

(2) 本项目引进的JLB200型连续滚筒式专用拌合机，该拌合机是在满足最大粒径150mm设备基础上适当改进而来，其对超径骨料要求较为严苛，加之该拌合设备为科研试验产品，实际拌合效率大大折扣。拌合天然砂砾石骨料强度为80~100m<sup>3</sup>/h，洞室开挖料粒径大于80mm的块石偏多，且在拌合前需要挖机掺配天然砂和细骨料，洞室开挖料拌合强度仅为50~60m<sup>3</sup>/h。

(3) CSG胶凝材料拌合物摊铺厚度为70cm，碾压厚度为60cm。25t单轮碾压机无振两遍，有振六遍进行碾压，碾压速度控制在1.5~2.0Km/h，碾压条带间搭接宽度控制在30~40cm，端头搭接长度不小于100cm<sup>[4]</sup>。变态区每层分为两次铺料，

每次铺料厚度为 35cm，采用打孔法或抽槽法加浆，天然砂砾石料变态 CSG 加浆量按体积的 6% 控制，洞室开挖料按体积的 8% 控制。人工持  $\phi 100$ 、 $\phi 130$  振捣棒对变态 CSG 进行振捣，为确保变态 CSG 振捣和防渗效果，在摊铺后和振捣过程中，将粒径大于 150mm 的骨料进行剔除。

(4) CSG 胶凝材料初凝时间控制在 10h~12h，高温和大风时段，层面局部发白或干缩喷雾湿润即可连续施工；层间间隔时间在 12h~16h，层面喷洒 1cm 厚水泥净浆后继续施工，层面暴露时间超过 16h 按照施工缝面处理，即层面简单拉毛并喷洒水泥净浆<sup>[2]</sup>。

(5) 根据科研单位提供的参考配合比，并结合施工区料源特性实际情况、气候以及施工设备性能，最终确定施工配合比见表 4.4-4 和表 4.4-5。

表 4.4-4 砂砾石料 CSG 施工配合比

砂率%	水胶比	每方材料用量 (Kg/m <sup>3</sup> )						胶凝材料剂量
		水	水泥	粉煤灰	砂	石	减水剂	
22	0.78	78	70	30	503	1784	1.0	4%
	0.5	592	947	237			5.92 (0.5%)	变态掺浆量 6%

表 4.4-5 洞室开挖料 CSG 施工配合比

砂率%	水胶比	每方材料用量 (Kg/m <sup>3</sup> )						胶凝材料剂量
		水	水泥	粉煤灰	砂	石	减水剂	
20	0.77	95	92	31	448	1794	1.23 (1%)	5%
	0.5	592	947	237			5.92 (0.5%)	变态掺浆量 8%

备注：洞室开挖料中掺配了 20% 的天然砂和细骨料，以调整含砂率和级配。

## 5. CSG 围堰施工

### 5.1 施工模板

CSG 围堰上游面和下游面消能平台 (1390.2m 高程) 以下部位采用 3m×3.1m 的连续翻转钢模板，左右堰肩局部采用钢模板或木模板。下游面消能部位预制模板尺寸通过有限元模拟仿真消能效果、借鉴以往 CSG 过流围堰消能预制台阶施工经验、吸取以往消能预制台阶模板结构教训、结合施工仓面起吊设备和施工工艺，综

合考虑, 确定下游消能预制台阶采用  $2\text{m} \times 0.85\text{m} \times 1.2\text{m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) C20 混凝土预制模板。预制模板既是堰体的一部分, 也是围堰漫顶过流时消能建筑物。

## 5.2 分区与分层

根据 CSG 围堰施工进度要求、拌合设备能力以及工程度汛总体要求, 并结合 CSG 围堰结构 (不设横缝、堰体内无廊道和泄洪通道, 漫顶泄洪过流) 特点, CSG 围堰施工不分区, 全断面通仓施工<sup>[5]</sup>。

CSG 围堰基础 1372.0m~1376.0m 高程段为地质缺陷处理, 施工仓面狭小, 不具备 CSG 施工条件, 设计更改为 C15 常态混凝土。CSG 过水围堰填筑以消能平台为界分两层施工, 即 1376.0m~1389.2m 为一层, 1389.2m~1425.0m 为一层。

## 5.3 运输入仓

CSG 过水围堰施工采用 20t 自卸汽车直接运输入仓, 1390.0m 高程以下从 CSG 围堰下游中部入仓, 1390.0m~1399.8m 高程段从左岸坝肩下游的 1394.0m 高程入仓, 1399.8m 高程以上由左岸坝肩 1430m 高程道路经上游临时土石围堰背水坡面从 CSG 过水围堰的上游入仓。

## 5.4 摊铺与碾压

20t 自卸汽车将 CSG 拌合料运输到施工仓面端退法、两点卸料, 卸料高度控制在 1.5m 以内, 距离模板 1.5m, 人工配合挖掘机剔除粒径大于 250mm 的大块石。

仓内采用平仓机铺料, 人工辅助, 铺层厚度为 70cm, 变态区每层分为两次铺料, 每次铺料厚度为 35cm, 人工配合挖掘机将大于 150mm 的大块石剔除, 并补充部分中小石进去<sup>[2]</sup>。

CSG 堰体采用 25t 单轮碾压机无振两遍, 有振六遍进行碾压, 碾压速度控制在 1.5~2.0km/h, 碾压条带间搭接宽度控制在 30~40cm, 端头搭接长度不小于 100cm<sup>[4]</sup>。

## 5.5 变态 CSG 施工

施工阶段优化掉了 CSG 过水围堰上游前沿的帷幕灌浆防渗系统, 因而加大了上游和左右两岸堰肩变态 CSG 的宽度, 同时适当提高了加浆量。变态 CSG 每层铺料

厚度控制在 35cm，打孔或抽槽加浆，其中天然砂砾石料加浆量按体积的 6%控制，洞室开挖料按体积的 8%控制，人工持  $\phi 100$ 、 $\phi 130$  振捣棒进行振捣。

## 5.6 层间处理

1376.0m 高程段以下地质缺陷 C15 常态混凝土与 CSG 结合面凿毛、铺洒水泥砂浆，1389.2m 高程 CSG 施工缝面用水冲洗、清除表层杂物和松散骨料、铺洒水泥净浆，开始 CSG 填筑连续施工，1425.0m 高程 CSG 层面与 C20 常态混凝土结合面洒水湿润。在高温和大风时段，采取喷雾措施湿润碾压仓面，以提高每碾压层间的结合效果<sup>[2]</sup>。

## 5.7 排水孔施工

预制块内置直径为 100mm 的 PVC 管作为 CSG 围堰运行期的排水孔，但在施工过程中，即使 PVC 管口采取了封闭保护措施，浆液还是将 PVC 管堵塞，在当层 CSG 施工 7d 后采用潜孔钻进行排水孔施工。

## 5.8 施工进度

大华桥水电站上游 CSG 过水围堰 2015 年 3 月 7 日开始基础填塘常态混凝土浇筑，3 月 8 日基础填塘混凝土浇筑完成。2015 年 3 月 11 日开始 CSG 围堰填筑，1389.2m 高程因故停工 6 天，2015 年 5 月 17 日 CSG 填筑到堰顶 1425.0m 高程。2015 年 5 月 20 日~6 月 10 日堰顶左右岸常态混凝土浇筑。

## 5.9 质量检测

(1) CSG 施工过程中采用核子密度仪和挖坑灌水法测量碾压后密实度，核子密度仪检测 449 点，最大值 104.04%，最小值 97.0%，平均值 98.53%；灌水法共检测密实度 17 组，最大值 104.4%，最小值 97.5%，平均值 98.9%，均满足设计要求的  $\geq 97\%$  的标准。

(2) 抗压强度分别在拌合场和施工仓面取样，拌合场取样 112 组，最大值 17.8Mpa，最小 3.7Mpa，平均值 9.3Mpa，标准差 3.32，保证率 97%大于设计要求的保证率 80%。施工仓面 CSG 自身取样 62 组，最大值 16.7 MPa，最小值 3.8 MPa，

平均值 8.1 MPa，强度保值率 90% 大于设计要求的保证率 80%。变态 CSG 取样 13 组，最大值 11.1 MPa，最小值 3.8 MPa，平均值 6.2 MPa，满足设计要求的  $\geq 3.5$  MPa。

表 5.9-1 CSG 过水围堰强度成果统计表

施工部位	强度等级	统计组数	最大值 (MPa)	最小值 (MPa)	平均强度	标准差	保证率 (%)
CSG 堰体 (拌合)	C3.5W5	112	17.8	3.7	9.3	3.32	97
CSG 堰体 (现场)	C3.5W5	62	16.7	3.8	8.1	3.76	90
CSG 围堰堰体 (现场)	C3.5W5 变	13	11.1	3.8	6.2	/	/

(3) 变态区加浆浆液比重共检测 75 次，最大值 1.88g/cm<sup>3</sup>，最小值 1.57g/cm<sup>3</sup>，平均值 1.62g/cm<sup>3</sup>，满足设计要求的 1.62g/cm<sup>3</sup>。上游防渗区变态 CSG 抗渗检测 5 组，试验压力 0.6MPa，抗渗满足 W5 的设计要求。

## 6. 施工总结

1、胶凝砂砾石材料作为一种就地取材、生产拌合工艺和材料单价等方面比碾压混凝土有较大优势，胶凝砂砾石材料的强度、抗渗性能随着骨料级配、砂率、胶凝材料用量、用水量和粉煤灰掺量等不同而表现出较大的离散性。

2、胶凝砂砾石材料对骨料质量与级配要求不如混凝土严格，最大骨料粒径达 250mm，进一步拓宽了骨料使用范围，当采用挖掘机现场拌合时，最大骨料粒径可达 300mm，但需控制比例。河床天然砂砾石和洞室开挖料均可作为填筑料源，无需筛分、无需冲洗，省去了砂石料筛分系统，简化了拌合工艺，施工工艺按照土石坝分层碾压填筑，施工工艺简易粗放。

3、CSG 填筑料水泥用量较小，温控简化，堰体无需设置横缝和纵缝，全断面一次填筑碾压完成，铺筑最大厚度可达 70cm，碾压厚度 60cm，简化了仓面施工工艺，加快了施工进度。

4、两岸堰肩均为 IV~V 类围岩，风化严重，设计在上游堰脚及两岸布置了防渗帷幕，实施阶段业主考虑到 CSG 围堰为临时工程，将防渗帷幕优化取消，仅靠迎水面和两岸 1~2m 厚的变态 CSG 防渗。围堰运行期间，总渗水量约 9.97L/s (35.89m<sup>3</sup>/h)，其中左右堰肩岩石渗量约占 60%。

5、本 CSG 围堰历时 2015 年~2017 年三个汛期洪水的考验（2017 年最大洪水  $6200\text{m}^3/\text{s}$ ），围堰运行良好，2018 年 2 月 8 日大华桥水电站成功下闸蓄水，该 CSG 围堰作为坝前的一个挡砂坎使用不予拆除。

参考文献：

【1】贾金生，陈祖坪，马锋玲等。胶凝砂砾石坝筑坝材料特性及其对面板防渗体系影响的研究，北京：中国水利水电科学研究院，2004

【2】田育功，唐幼平。胶凝砂砾石坝筑坝技术在功果桥上游围堰中的研究与工应用[J]. 水利规划与设计，2011，1，51-57

【3】冯炜，贾金生，马锋玲。胶凝砂砾石材料配合比设计参数的研究[J]，水利水电技术，2013,44（2）：55-58

【4】黎学皓，刘勇，CSG 筑坝技术在洪口过水围堰中的应用，水利水电施工，2009

【5】肖兰，何蕴龙，张艳锋，CSG 技术在围堰工程中的应用，水利与建筑工程学报，2008

作者简介：田福文（1974 年 1 月），男，陕西，正高级工程师，硕士学位，从事水利水电施工技术与管理工

第一作者简介及详细通讯地址、电话、传真、手机号和电子邮件。

田福文，湖南省长沙市天心区长青路 8 号水电八局，13874969164, 283970723@qq.com