

# 守口堡水库胶凝砂砾石之砂率 试验研究

李记明<sup>1</sup> 史小波<sup>2</sup>

- (1. 山西省水利水电科学研究院, 山西 太原 030002;  
2. 山西省水利建筑工程局中心试验室, 山西 太原 030031)

**【摘要】** 胶凝砂砾石筑坝技术是一种新型筑坝技术,本文通过守口堡水库施工现场砂砾石料的实地调查、试验,对现场砂砾石料颗粒分布情况进行了初步分析,并通过室内试验,论述了砂砾石的砂率对胶凝砂砾石强度的影响,提出合理化的建议。

**【关键词】** 胶凝砂砾石; 砂率试验; 研究

中图分类号: TV649

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2017)05-0032-04

## Research on sand coarse aggregate ratio of cemented sand and gravel in Shoukoubao Reservoir

LI Jiming<sup>1</sup>, SHI Xiaobo<sup>2</sup>

- (1. Shanxi Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, Taiyuan 030002, China;  
2. Shanxi Water Conservancy Construction Engineering Bureau Central Laboratory, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** Cemented sand and gravel damming technique is a novel dam construction technology. In the paper, the particle distribution condition of gravel stones in the site is analyzed preliminarily through the field investigation and experiment of sand and gravel materials in the construction site of Shoukoubao Reservoir. The influence of sand coarse aggregate ratio of sand and gravel on the strength of cemented sand and gravel is discussed, and rational suggestions are proposed.

**Keywords:** cemented sand and gravel; sand ratio test; research

胶凝砂砾石坝是介于混凝土坝和散粒料坝中间的一种坝型,属于胶结颗粒坝的一种,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型筑坝技术,其特点是采用胶凝材料和砂砾石材料拌和筑坝,使用高效率的土石方运输机械和压实机械施工,施工工艺简单、速度快,水泥用量少,可充分利用当地筑坝材料,使废弃料大大减少,材料运输量也大为减少,不仅大幅节约成本,而且降低了施工对环境的影响程度。国外

从20世纪70年代开始研究胶凝砂砾石筑坝技术,近年一些国家已经将胶凝砂砾石筑坝技术应用于永久工程。中国从20世纪90年代开始胶凝砂砾石筑坝技术的研究,通过对筑坝材料特性、大坝受力特性、防渗体系、施工工艺等的系列研究,在2004年修建了中国的第一座采用胶凝砂砾石筑坝技术的围堰工程。目前,胶凝砂砾石筑坝技术在中国多个围堰工程中得到应用并取得了良好效果。

守口堡水库大坝,是中国第一座采用胶凝砂砾石筑坝技术的永久工程,该大坝胶凝砂砾石设计强度采用 150mm×150mm×150mm 立方体试件 180 天龄期的极限抗压强度,设计强度为 6 MPa。目前,守口堡水库枢纽工程正在建设中。

## 1 工程概述

守口堡水库位于黑水河上游,在大同市阳高县境内,坝址以上控制流域面积 291km<sup>2</sup>,多年平均径流量 1577 万 m<sup>3</sup>;工程等级为 IV 等,主要建筑物等级为 4 级,次要建筑物等级为 5 级,坝顶长 354m,最大坝高 61.6m,大坝主体为胶凝砂砾石,上下游防渗保护层为常态混凝土。水库总库容为 980 万 m<sup>3</sup>,是一座集工业供水、农业灌溉及防洪等综合利用为一体的小(1)型水库。

守口堡水库工程初步设计原为混凝土重力坝,鉴于守口堡水库坝址区河床砂砾石丰富,且砂卵石覆盖层较厚,具有建造胶凝砂砾石坝的天然良好条件。为了充分利用当地材料,达到节省投资、加快施工进度、减少弃料、保护环境的目的,相关科研、设计、施工等单位对守口堡水库工程应用胶凝砂砾石筑坝技术进行了专题研究,在进行大量调查研究、科学试验及专家论证的基础上,对初步设计确定的坝型进行设计变更。守口堡水库工程作为中国第一座采用胶凝砂砾石筑坝技术的永久工程开始建设。

为了保证守口堡水库胶凝砂砾石坝的施工质量,相关科研单位及建设、施工单位合作在水库坝址上游河床位置现场进行了胶凝砂砾石坝模拟坝的胶凝砂砾

石填筑、碾压试验。模拟试验坝面积为 11m×90m,多个条带进行不同胶凝砂砾石配合比试验,至少两个碾压层。胶凝砂砾石采用专用拌和设备进行拌制,自卸汽车运输直接上模拟试验坝,用推土机平料,铺料厚度每层 350~450mm,铺两层然后采用 26t 碾压机碾压,碾压 6~10 遍,即静压 2 遍,有振碾压 4~8 遍,边角部位用手扶式振动碾碾压,分两层碾压;层间面铺设一层 1:3.5 的水泥砂浆,砂浆层厚 20mm。碾压完毕后,现场检测压实度,并于 180d 后切割制取 450mm×450mm×450mm 立方体试件检测抗压强度。

## 2 守口堡水库砂砾石料场调查试验

守口堡水库砂砾石料场位于大坝上游库区河床区域,河床覆盖层物质为卵石混合土、级配不良砂;砂砾石成分以麻粒岩、花岗岩、角闪岩等为主。砂粒成分为石英、长石、角闪石等。为了便于施工中挖取砂砾石料,料场靠近大坝施工区域,河床宽度约 200m 左右,施工围堰位于大坝上游约 1km 处,围堰与导流洞之间设导流明渠。为了保障胶凝砂砾石坝建设的顺利进行,在大坝基础开挖阶段山西省水工局中心试验室等单位对砂砾石料场进行了较全面的料场调查试验。对砂砾石料场分区域、分砂砾石层深度的不同,共取用砂砾石 25 组试样,每份试样重量约 500kg,经简单堆放即进行了筛分(未进行烘干处理)。25 组试样的平均砂率为 32%,最大砂率为 43%,该组砂样为最细级配的砂砾石料,最小砂率为 25%,该组试样为最粗级配的砂砾石料,结果见表 1。

表 1 原样砂砾石料颗粒级配试验结果

粒径/mm	>150	150~120	120~100	100~80	80~60	60~40	40~20	20~10	10~5	5~2	2~1	1~0.50	0.50~0.25	0.25~0.10
最细级配/%	3.0	2.4	4.8	4.0	5.4	9.6	15.0	9.6	3.7	8.3	3.2	10.6	10.2	10.2
平均级配/%	8.3	6.3	5.0	5.8	8.5	9.2	11.6	7.8	5.4	9.3	3.6	9.4	6.1	3.6
最粗级配/%	17.2	8.1	7.4	6.6	8.9	7.2	8.8	6.1	4.7	8.9	3.0	7.7	3.5	1.8

依据《胶结颗粒料筑坝技术导则》(SL 678—2014)砂砾石中粒径小于 5mm 的砂料宜在 18%~35%,粗骨料中粒径为 5~40mm 的骨料宜为 35%~65%。大于 150mm 的石料宜剔除。表 1 中显示砂砾石料的最大砂率为 43%,最小砂率为 25%,5~40mm 的石料含量为

20%~28%。砂率略显偏大,5~40mm 石料偏少(详见图 1),上包络线为 25 组砂砾石试样的各粒径范围内累计过筛百分率中取最大值的级配组合,下包络线为取最小值的级配组合,平均线为各粒径范围内累计过筛百分率的平均值。

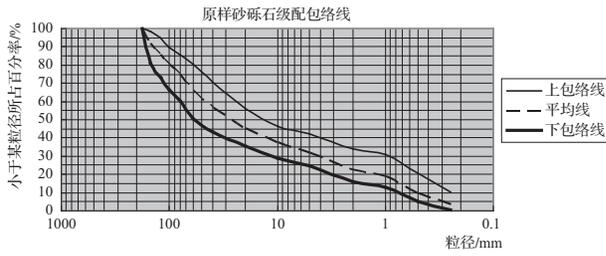


图1 原样砂砾石料级配包络线

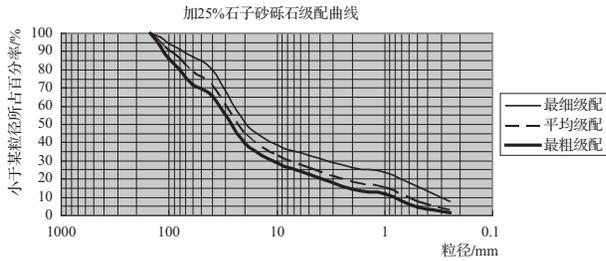


图2 加25%石子砂砾石料级配曲线

图2为最细级配组合、最粗级配组合和平均级配组合的砂砾石,分别剔除 >150mm 粒径石子并参加

25% 比例 5~40mm 粒径石子后的砂砾石料级配曲线。比较二者,颗粒粒径变化范围明显变窄,砂率也明显下降,参加 25% 石子后最小和最大砂率变化为 23% 和 33%,比较有利于施工过程的配合比控制。

### 3 砂率对胶凝砂砾石抗压强度的影响

守口堡水库工程大坝主体设计为强度等级为  $C_{180}6$  的胶凝砂砾石,胶凝材料用量为不少于  $90\text{kg}/\text{m}^3$ 。结合守口堡水库砂砾石料颗粒级配的试验结果,在室内针对砂砾石料的砂率对胶凝砂砾石抗压强度的影响进行了试验。

#### 3.1 试验用原材料

##### 3.1.1 水泥和粉煤灰

试验中使用的水泥为 P. O42.5 普通硅酸盐水泥,水泥物理性能检测结果见表 2,各项检测指标都符合 GB 175—2007 的要求。

表2 水泥物理性能指标

项目 名称		比表面积/ ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	标准稠度/ %	密度/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
					初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
冀东水泥 P. O 42.5		418	28.1	合格	225	352	25.9	50.2	4.9	8.3
依据标准 GB 175—2007	普硅 P. O 42.5	$\geq 300$	—	—	$\geq 45$	$\leq 600$	$\geq 17$	$\geq 42.5$	$\geq 3.5$	$\geq 6.5$

试验中使用的粉煤灰为大同第二发电厂的 II 粉煤灰,该批次粉煤灰经检测达到 III 级粉煤灰指标,因胶凝砂砾石设计指标为  $C_{180}6$ ,且是用于坝体内部填筑,故仍然采用该批次粉煤灰进行了试验。通过试验,采用该批次粉煤灰配制的胶凝砂砾石,150mm × 150mm × 150mm 试件 180d 抗压强度达到了 12.70MPa,可以满足  $C_{180}6$  设计要求。

##### 3.1.2 砂砾石

砂砾石从守口堡水库料场取样,按小于 5mm、5~20mm、20~40mm、40~80mm、80~150mm 进行筛分。砂料的含泥量比较高,不符合《水工混凝土施工规范》(DL/T 5144—2001)中对天然砂的品质要求。《胶结颗粒料筑坝技术导则》(SL 678—2014)中也有砂砾石含泥量不宜超过 5% 的要求。但如果按砂砾石的砂率

最大为 43% 换算,则砂砾石的含泥量为 4%。小于 5mm 的砂料的物理性能检测结果见表 3。

表3 砂料的物理性能

项目	细度模数	表观密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	堆积密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	空隙率/ %	含水率/ %	含泥量/ %
天然砂	2.6	2660	1530	42	2.1	9.8

#### 3.2 抗压试件的成型

该次胶凝砂砾石配合比试验针对最粗颗粒级配、最细颗粒级配及平均颗粒级配的砂率范围进行了试验。在砂砾石添加 25% 的 5~40mm 石料前提下,调配砂率为 20%、25%、30%、35%、40%、45% 六组别的砂砾石料,用水量控制在  $105 \sim 110\text{kg}/\text{m}^3$ ,胶凝材料用量保持不变为 P. O42.5 水泥  $50\text{kg}/\text{m}^3$ ,粉煤灰  $40\text{kg}/\text{m}^3$ ,

分别成型 150mm × 150mm × 150mm 立方体抗压试件,试件成型过程中配重并置于振动台振动 80 ~ 90s 后抹平置于标养室养护 28d。

### 3.3 砂率与抗压强度关系曲线

按不同砂率的胶凝砂砾石试件经 28d 标准养护后,进行了抗压强度的测试,砂率与抗压强度的关系曲线见图 3。从图中可以看出,当砂砾石的砂率大于 30%,试件的抗压强度呈现明显下降的趋势。由于胶凝砂砾石的胶凝材料只有 90kg/m<sup>3</sup>,当砂率大于 30%后,由用水量、水泥用量、掺合料用量所组成的灰浆浆体已开始无法完全填满砂的所有空隙,造成了抗压强度的下降。

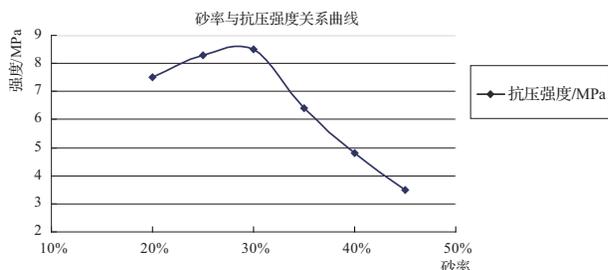


图 3 胶凝砂砾石砂率与强度关系曲线

(上接第 27 页)

## 4 结 语

开工建设后,针对工程建设过程中遇到技术重点及难点,参建单位也开展了一系列科学试验与研究。如:大坝混凝土面板施工、水库帷幕灌浆试验、坝料碾压复核试验、深斜井混凝土运输方式。为提高重大技术问题决策能力,聘请国内、省内从事水利水电工程建设的各相关专业资深技术专家,组建专家委员会,并委托专业咨询中心进行专项技术咨询,组织开展了溢洪道高边坡支护方案、泵站地下主厂房帷幕灌浆、引水隧洞通过暗河涌水带、输水线路不良地质洞段(浅埋、涌水、突泥等)处理方案、新增支洞方案等重大技术问题攻关。这些关键技术问题的解决,有效控制了工程质量、进度及投资,提供强有力的技术支撑,确保工程顺利建成,运行安全可靠。工程于 2013 年 12 月 28 日正

## 4 结 语

守口堡水库坝址砂砾石料场 25 组砂砾石样的筛分试验结果表明:该料场的砂砾石颗粒级配中,5 ~ 40mm 粒径的石料含量偏低,剔除 150mm 粒径大石后,小于 5mm 粒径的砂料含量则偏多;但添加 25% 的 5 ~ 40mm 粒径的石料不仅提高了 5 ~ 40mm 粒径的石料含量,还可有效降低砂料的含量,从砂砾石颗粒级配包络线上可以看出,上下包络线之间的面积变小,说明颗粒级配的变化范围变窄了,从施工过程中的配合比控制来说,更便于施工控制。从砂率与抗压强度的关系曲线可以看出,砂砾石砂率大于 30% 的胶凝砂砾石强度呈快速下降趋势,随着砂率的增加对灰浆的需求量增加,砂的空隙不能被灰浆完全填满,引起强度的快速下降;同时,如果砂率过低则石子的空隙也无法被砂浆有效填充,骨料分离同样引起强度的降低。砂砾石的砂率在 20% ~ 30% 之间比较有利,由于胶料的用量较少,所以在保障强度的前提下,较少的砂率更有利于灰浆填满砂的所有空隙,对胶凝砂砾石的质量更有利。◆

式投产运行,截至 2016 年 9 月底,已累计补水滇池 15.1 亿 m<sup>3</sup>,工程运行良好,通过向滇池补充稳定优质水源,配合昆明市已经实施的环湖截污、入湖河道整治等综合治理措施,滇池水体污染指数明显下降,水质得到显著改善,生态补水效益明显。同时,牛栏江水通过盘龙江河道汇入滇池,清澈的上游来水极大程度地净化了盘龙江,对昆明市的市容建设与生态环境改善都产生了积极作用,社会反映良好。◆

### 参考文献

- [1] 刘加喜. 实施牛栏江—滇池补水工程让高原明珠重现光彩[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 1-4.
- [2] 梅伟, 郑铭. 德泽水库溢洪道阶梯式消能设计[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 14-16.
- [3] 李云, 何伟, 朱国金. 输水线路关键技术问题初探[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 31-36.
- [4] 李云, 何伟, 朱国金. 牛栏江—滇池补水工程技术管理探悉[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 95-98.