双江口水电站人工骨料原岩物理力学特性及骨料性能试验研究

李　静，　袁国庆
（中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都　610072）

摘　要：双江口水电站具有“窄河谷、高水头、高流速、大泄量”的特点，高速挟沙水流对泄水建筑物表面会造成空蚀和冲磨损破坏。通过对人工骨料原岩物理力学特性进行研究以及进行人工细、粗骨料性能试验和抗磨耗试验，发现由坝址区附近的河口石料场变质砂岩、飞水岩石料场花岗岩制备的人工骨料均不能满足配制高标号抗冲耐磨混凝土的要求，而距离坝址较远的色龙沟石料场灰质白云岩可满足要求。

关键词：人工骨料；高标号；抗冲耐磨；混凝土；双江口水电站
中图分类号：TV7；TV42；TV41　　**文献标识码**：B　　**文章编号**：1001-2184(2015)增 2-0074-04

1　概　述

双江口水电站坝址河谷狭窄，泄洪、放空建筑物泄洪最大水头约 250 m，洞内流速高、下泄流量大，洞式溢洪道最大流速约 46 m/s，深孔泄洪洞最大流速约 40 m/s，竖井泄洪洞最大流速约 32 m/s，放空洞最大流速约 40 m/s，枢纽的泄洪流量达 8 086 m^3/s。具有“窄河谷、高水头、高流速、大泄量”的特点。高坝泄洪时，高速挟沙水流对泄水建筑物表面会造成空蚀和冲磨损破坏，破坏程度与水流和泥沙条件，如流速、流量、水流中的含沙量、泥沙粒径、颗粒形状及硬度等有关，也取决于建筑物表面材料的抗蚀、抗冲磨性能。因此，该工程在对河口料场、飞水岩料场和色龙沟料场不同人工骨料原岩物理力学性质研究的基础上进行了细、粗骨料性能、抗磨耗试验研究，进而优选出了最佳的骨料料源。

2　料场概况及原岩性能指标

河口料场位于坝址上游约 1 km 的脚木足河与绰斯甲河汇合口，两河所夹的条形山脊为近坝上游一主要石料场。绰斯甲河侧地形较陡，地形坡度约 55°，脚木足河侧地形坡度稍缓，约 44°，坡脚发育狭长阶地。该石料场基岩多裸露，基岩岩性主要为变质砂岩夹板岩、千枚岩捕掳体，次为伟晶岩和燕山晚期中细粒二云二长花岗岩，受火成岩体侵入和地质构造影响岩体挤压变形明显，岩层产状变化较大，总体产状为 N10°E ~ N22°W/NW(SW)∠72° ~ 84°。

飞水岩石料场位于坝址下游约 1 ~ 2 km 的大渡河左岸 S211 省道旁、飞水岩沟的下游侧，交通方便，为近坝下游的主料场。该料场分布高程约 2 350 ~ 2 700 m，地形坡度 35° ~ 45°，岩性为燕山早期似斑状黑云钾长花岗岩，穿插伟晶岩脉（约占 3% ~ 8%）。2 380 m 高程以上多分布厚约 15 ~ 30 m 的崩坡积层，后缘地形坡度较陡，约 65° ~ 80°。

色龙沟料场位于坝址下游约 196 km 的色龙沟沟口上游侧，山体两面临空，分布高程 1 750 ~ 2 000 m，地形坡度 45° ~ 55°。地表基岩大多裸露，局部覆盖坡残积堆积物、崩塌堆积物，推测厚度为 3 ~ 5 m，局部可达 8 ~ 10 m，为剥离层。岩性为泥盆系薄 ~ 中厚层状变质灰岩、白云岩夹绢云母钙质石英片岩，岩层产状为 N45°E/NW∠55°。

对各料场原岩进行的矿化分析表明：飞水岩花岗岩和河口变质砂岩含量均以 SiO_2 为主，最低含量均超过 50%，Al_2O_3 含量次之，平均含量在 10% 以上，其它化学成分以 CaO、Fe_2O_3 为主，但总体含量较少。色龙沟料场岩石化学成分以 CaO 为主，其次为 SiO_2 和 MgO，其烧失量在 30.23% ~ 39.16% 之间，结合磨片鉴定结果，表明其主要组成为白云石。

原岩性能试验结果见表 1。表 1 中累计了各个料场取样的原岩试验结果的平均值。

收稿日期：2015-03-08

表 1　原岩矿化分析结果平均值汇总表

料场	分析指标　/%						
	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	烧失量	SO_3
河口	65.17	4.7	15.79	6.23	2.09	2.47	0.06
飞水岩	67.89	2.35	16.27	6.75	1.27	1.95	0.05
色龙沟	25.01	3.86	3.82	22.47	13.54	30.23	0.03
DL/T5388 – 2007	/	/	/	/	/	/	<0.5%

表 2　原岩试验结果平均值汇总表

取样部位	天然密度 /g · cm^{-3}	干密度 /g · cm^{-3}	饱和密度 /g · cm^{-3}	含水率 /%	饱和吸水率 /%	干抗压强度 /MPa	饱和抗压强度 /MPa	软化系数	冻融重量损失 /%
河口	2.68	2.67	2.69	0.12	0.4	102	80.9	0.79	1.76
飞水岩	2.64	2.63	2.64	0.17	0.47	105	83	0.8	0.02
色龙沟	2.8	2.79	2.8	0.1	0.22	122.96	92.33	0.75	0.03
DL/T5388 – 2007	/	/	/	/	/	/	>40	/	<1%

从表 2 可以看出,各原岩的天然密度、干密度、饱和密度等指标相差很小,但不同岩性之间差别较大,其中色龙沟料场白云质灰岩指标最大,飞水岩料场花岗岩指标最小。各料场原岩平均含水率为 0.1% ~0.17%、饱和吸水率为 0.22% ~0.47%、软化系数为 0.75 ~0.8,较为适中,各原岩的平均冻融损失率为 0.02% ~1.76%,较小。飞水岩花岗岩干抗压强度平均值为 105 MPa,饱和抗压强度平均值为 83 MPa;河口变质砂岩的干抗压强度平均值为 102 MPa,饱和抗压强度平均值为 80.9 MPa;色龙沟白云质灰岩干抗压强度平均值为 122.96 MPa,饱和抗压强度平均值为 92.33 MPa。

各料场原岩的饱和抗压强度均大于 40 MPa,冻融重量损失低于 1%,SO_3 含量低于 0.5%,均满足规范《水电水利工程天然建筑材料勘察规程》DL/T5388 – 2007 要求。相对而言,色龙沟白云质灰岩的各项指标均略优于其他两种岩石。

依据《水工混凝土砂石骨料试验规程》(DL/T5151 – 2001)中岩石碱活性的检测方法,采用化学法、砂浆长度法、砂浆棒快速法、混凝土凝柱体法对各料场岩石进行了碱活性的检测,均为非活性骨料。

3　人工细骨料性能指标

人工细骨料加工均采用 XMBL – 77 型溢流式棒磨机室内加工,采用相同的工艺对各料场岩石人工细骨料进行物理力学性能试验。细骨料试验按照《水工混凝土砂石骨料试验规程》DL/T5151 – 2001 进行,并按照《水电水利工程天然建筑材料勘察规程》DL/T5388 – 2007 和《水工混凝土施工规范》DL/T5144 – 2001 对检测结果进行评判。试验结果见表 3。

表 3　人工细骨料物理性能试验结果平均值汇总表

料场	主要岩性	堆积密度 /g · cm^{-3}	表观密度 /g · cm^{-3}	饱干密度 /g · cm^{-3}	空隙率 /%	饱干吸水率 /%	坚固性 /%	细度模数	平均粒径 /mm	石粉含量 /%	云母含量 /%	成品率 /%
河口	变质砂岩	1.47	2.67	2.65	45	1.8	5.2	2.33	0.38	27.2	0.5	87.8
飞水岩	花岗岩	1.4	2.62	2.61	46	1.6	2.5	2.49	0.39	15.2	0.4	87.6
色龙沟	灰质白云岩	1.58		2.78	43.2	1.22	1.62	2.85	0.426	11.9	0	86.9
DL/T5144 – 2001		/	≥2.5	/	/	≤6	≤8	2.4 ~2.8	/	6 ~18	≤2	/
DL/T5388 – 2007		>1.5	>2.55	/	<40	≤6	≤8	2.4 ~2.8	0.36 ~0.5	6 ~18	<2	/

从表 3 可以看出,各料场的人工细骨料的表观密度、表干密度、饱和吸水率、坚固性、平均粒径和云母含量均满足相关规范要求,但堆积密度、空隙率、细度模数和石粉含量都出现了没有达到或突破规范推荐范围的情况。松散堆积密度较低,空隙率较高,其原因为室内加工的细骨料形状差异较大,《水工混凝土施工规范》(DL/T5144 – 2001)没有对空隙率和堆积密度作要求或规定,

说明这两项指标可以在施工时选择优良的机械设备得到改善。河口料场平均细度模数为 2.33，石粉含量为 27.2%，超出了规范要求，这对骨料的开发使用不利。色龙沟料场石粉含量最低，其平均值为 11.9%，而细度模数最高，平均值为 2.85。

在实际施工生产中，通过选用制砂设备并调整生产工艺，可以获得满足施工规范要求的人工细骨料。

4　人工粗骨料性能指标

人工粗骨料采用 PE250×150 型颚式破碎机和 600×400 复摆型颚式破碎机破碎轧制块石后，经室内人工筛分分级成四个级配的人工粗骨料并进行了基本性能试验。试验按照《水工混凝土砂石骨料试验规程》DL/T5151－2001 进行，并按照《水电水利工程天然建筑材料勘察规程》DL/T5388－2007 和《水工混凝土施工规范》DL/T5144－2001 对检测结果进行评判。不同料场粗骨料试验结果平均值统计结果见表 4。

表 4　人工粗骨料物理性能试验结果平均值汇总表

料场		松散密度 /g·cm^{-3}	振实密度 /g·cm^{-3}	表观密度 /g·cm^{-3}	松散空隙率 /%	吸水率 /%	针片状 /%	压碎指标 /%	坚固性 /%	成品率 /%
河口	特大石	1.21	1.53	2.75	56	0.4	1.1	16.2	1.2	79.5
	大石	1.25	1.58	2.74	54	0.5	5.7			
	中石	1.32	1.6	2.73	52	0.7	4.3			
	小石	1.34	1.62	2.72	51	0.9	12.1			
飞水岩	特大石	1.15	1.42	2.63	55	0.5	1.2	17.6	0.9	94
	大石	1.23	1.49	2.62	53	0.6	4.8			
	中石	1.27	1.51	2.62	52	0.7	6.2			
	小石	1.29	1.6	2.61	51	0.9	9.8			
色龙沟	特大石	1.29	1.53	2.84	54.7	0.29	1.56	6.41	0.74	97.8
	大石	1.3	1.6	2.84	54.18	0.41	2.16			
	中石	1.32	1.64	2.83	53.44	0.53	3.23			
	小石	1.36	1.71	2.82	51.86	0.79	9.54			
DL/T5144－2001		/	/	≥2.5	/	≤2.5	≤15	见表 5	≤5	/
DL/T5388－2007		>1.6	/	>2.55	<45	<1.5	≤15	≤20	≤5	/

从表 4 可以看出，各料场人工粗骨料堆积密度、空隙率相对较大，已经超出了《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》DL/T5388－2007 的要求，其原因是室内加工的粗骨料形状差异较大，《水工混凝土施工规范》DL/T5144－2001 没有对空隙率和堆积密度作出要求或规定，说明这两项指标可以在施工时选择优良的机械设备得到改善。

《水工混凝土施工规范》DL/T5144－2001 对压碎指标的规定与说明：(1)压碎指标值是碎石或卵石抵抗压碎的能力。碎石和卵石的压碎指标是根据近十多年的统计数据并参考国外有关标准修订的，我国大部分地区的粗骨料可以满足要求。碎石和卵石的压碎值与混凝土强度等级之间的关系较为复杂，目前还没有获得足够的试验数据，因此，标准中规定的限值(表 5)可以作为一般的控制值。(2)对于深成的火成岩和变质岩，当其压碎指标不大于 12% 时，可以用于配制 $C_{90}40$～$C_{90}55$ 标号的混凝土；当其压碎指标不大于 20% 时，可以用其配制 $C_{90}35$ 及以下标号的混凝土。

表 5　粗骨料压碎指标表

骨料种类		不同混凝土强度等级的压碎指标值	
		$C_{90}55$～$C_{90}40$	≤$C_{90}35$
碎石	水成岩	≤10	≤16
	变质岩或深成的火成岩	≤12	≤20
	火成岩	≤13	≤30
卵石		≤12	≤16

从三个料场骨料的压碎指标看，河口料场、飞水岩料场的骨料多处于 12%～20% 之间，按照《水工混凝土施工规范》DL/T5144－2001 要求，可以用于配制 $C_{90}35$ 及以下的混凝土，而不宜用于配制 $C_{90}40$～$C_{90}55$ 标号的混凝土，色龙沟料场骨料压碎指标为 6%，可以满足配置 $C_{90}40$～$C_{90}55$

标号混凝土的要求。

5　人工骨料抗磨耗试验

试验采用室内小型球磨机,按《水工混凝土砂石骨料试验规程》DL/T5151—2001 规定的骨料试验级配进行,各料场相同级配骨料相同转数时磨耗率的平均值统计结果见表 6。

表 6　人工骨料磨耗试验结果平均值汇总表

料场	级配	损失率　/%		损失率　/%	
		100 转	500 转	200 转	1 000 转
河口	a	\	\	12	39.8
	b	\	\	10.7	39.2
	c	\	\	12.9	43.6
	A	13.3	39.9	\	\
	B	14.5	41.1	\	\
	C	20.1	44	\	\
	D	21.2	52.5	\	\
飞水岩	a	\	\	14.9	37.4
	b	\	\	10.6	39.6
	c	\	\	12.2	54.7
	A	15.3	50.9	\	\
	B	17	53.9	\	\
	C	20.9	53.3	\	\
	D	21.7	47.8	\	\
色龙沟	a	\	\	8	29.4
	b	\	\	8.2	29.8
	c	\	\	8	30.6
	A	9.3	27.2	\	\
	B	9.3	27.7	\	\
	C	13.3	34.2	\	\
	D	14.5	36.8	\	\
《水工混凝土砂石骨料试验规程》		<10	<40	<10	<40

从表 6 可以看出,河口料场和双江口料场各个级配磨损率均超过规程的要求,表明两个料场骨料的抗磨损能力均较差。色龙沟料场 a、b、c 级配的人工粗骨料在 200 转和 1 000 转时,磨耗率均满足规程要求。对于 A、B、C、D 级配粗骨料 100 转的磨耗率也仅是 C、D 级配的磨耗率超过规程要求,其余磨耗率均满足规程要求。

6　结　语

(1)三个料场原岩性能指标和粗、细骨料性能指标均能满足配制 $C_{90}35$ 及以下的混凝土;

(2)从骨料的压碎指标看,色龙沟料场骨料可满足配制 $C_{90}40 \sim C_{90}55$ 标号的混凝土,河口料场和飞水岩料场骨料均不满足配制高标号混凝土的要求,故可针对这两种骨料进行高标号混凝土的试验研究;

(3)从骨料的抗磨耗指标看,色龙沟料场骨料满足规程要求,河口料场和飞水岩料场骨料均不满足规程要求,故可针对这两种骨料进行改性冲磨混凝土试验研究。

参考文献:

[1]　水电水利工程天然建筑材料勘察规程,DL/T5388 - 2007[S].
[2]　水工混凝土砂石骨料试验规程,DL/T5151 - 2001[S].
[3]　水工混凝土施工规范,DL/T5144 - 2001[S].

作者简介:
李　静(1963-),女,四川井研人,高级工程师,从事水电工程地质勘测技术工作;
袁国庆(1979-),男,湖北团风人,高级工程师,学士,从事水电工程地质勘测技术工作.

(责任编辑:李燕辉)

(上接第 60 页)

在轻微 ~ 极强等级岩爆段,其中强岩爆、极强岩爆一旦发生,破坏性较大,对工程影响较大,是岩爆段掘进施工防治的重要监控点。为保证强岩爆、极强岩爆段安全掘进,研究制定了强岩爆、极强岩爆段安全施工流程,即岩爆预测预报、超前锚杆支护、应力解除爆破、危石清理及其它、初喷纳米钢纤维混凝土、防岩爆临时锚固支护、系统支护。在开挖施工过程中,监理工程师要求承包商现场施工必须按照工序流程开展,上道工序未经验收签字确认,不得进入下道工序施工,以保证工序环环紧扣及支护的及时性、完整性,最大程度降低了岩爆危害。

4　结　语

在锦屏二级水电站引水隧洞开挖过程中,通过采取上述技术措施,在参建各方的共同努力下,四条引水隧洞均较合同工期提前实现了贯通,施工过程中未发生安全责任事故,开挖质量满足设计规范要求。

锦屏二级水电站引水隧洞开挖过程表明,在强岩爆洞段开挖过程中采用“事前预控、事中过程控制、事后纠偏控制”的科学控制手段,主动预防与被动防护相结合,有效降低了岩爆造成的危害,最大程度地减少了岩爆对现场施工的影响。

作者简介:
李金辉(1983-),男,河北邢台人,工程师,学士,从事水利水电工程监理工作;
徐茂华(1972-)男,四川蒲江人,副总监理工程师,工程师,学士,从事水利水电工程建设监理工作.

(责任编辑:李燕辉)