

铁矿石混凝土在万家寨水利枢纽工程中的应用

谢学礼, 李 伟

(中国水利水电第四工程局勘测设计研究院, 山西 偏关 036412)

摘要:黄河万家寨水利枢纽工程泄水建筑物采用以灰岩为主的人工骨料,其主要成分为方解石,硬度 $H_d=3.5$,系质地较弱的造岩矿物,在泥沙的磨损过程中,其抗冲磨性较弱,用其拌制的混凝土90d抗磨强度仅为 $0.23\sim 0.27\text{ h}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 。针对这一情况,结合现场施工多次进行试验研究,采用天然砂、铁矿小石、人工中石拌制的混凝土具有较好的抗冲磨性,90d抗磨强度可大于 $1.00\text{ h}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$,较好地解决了抗冲磨问题,使大坝的整体质量与安全更有保障。

关键词:泄水建筑物;悬移质;铁矿石混凝土;抗冲磨强度;万家寨水利枢纽

中图分类号:TV431⁺.9

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2001)05-0040-04

1 工程概况

万家寨水利枢纽工程位于黄河北干流托克托至龙口河段峡谷内,是黄河中游规划开发的8个梯级中的第一个枢纽电站。枢纽为半整体式直线重力坝,由非溢流坝段、引黄取水口坝段、溢流坝段、电站坝段、工业取水口坝段等共22个坝段构成。厂房为坝后式厂房,最大坝高105m,坝顶长度443m,总库容8.96亿 m^3 ,总装机容量1080MW,是一座以供水为主,结合发电调峰,兼有防洪、防凌等综合利用的(I)型水利工程。

万家寨水利枢纽工程地处黄河中游,泥沙含量较大,其坝址控制流域面积39.5万 km^2 ,多年平均实测流量790 m^3/s ,多年平均径流量249亿 m^3 ,设计年径流量192亿 m^3 。枢纽设计多年平均入库沙量为1.49亿t,多年平均含沙量为 $6.6\text{ kg}/\text{m}^3$ 。汛期的多年平均含沙量为 $12.6\text{ kg}/\text{m}^3$,最大达 $37.6\text{ kg}/\text{m}^3$,年平均含沙量为 $7.76\text{ kg}/\text{m}^3$,坝址泥沙的78%集中在汛期7~10月份,而汛期沙量又集中在洪水期。其特点是峰高量小,历时短,形成大的含沙水流。枢纽采取蓄清排浑运用方式,排沙期运用水位高程为952~957m,为保持4.45亿 m^3 的调节库容,每年需从中、底孔排走80%的泥沙。有关试验及计算结果均显示,表孔、中孔、底孔溢流面的流速均在25~30 m/s 间,属于高流速区。因此,泄水建筑物的抗冲磨问题成为本工程一个迫切需要解决的问题。1996年实测坝址断面最大含沙量312 kg/m^3 。

泄水建筑物位于河床左半侧,由1个表孔、8个底孔、4个中孔组成,均采用长护坦挑流消能。由于本工程地处多泥沙河流,泄水建筑物的抗冲磨问题一直是工程设计的一个主要问题。原设计标号为 $R_{30}^{30}D_{20}$,但试验表明,用人工砂石骨料配制的混凝土,其90d抗磨强度仅为 $0.23\sim 0.27\text{ h}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$,用本工程附近柳树滩天然砂石骨料配制的混凝土其抗冲磨强度为 $0.71\text{ h}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$,用天然砂与本工程人工碎石制成的混凝土抗冲磨强度平均达到 $0.88\text{ h}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$,仍然较低,不能满足工程需要。后借鉴国内在葛洲坝、新疆三屯河等工程应用铁矿石混凝土的成功经验,结合本工程的特点,在工程现场结合施工进行了抗冲磨试验,使混凝土的抗冲磨强度有了较大提高,其90d的抗冲磨强度达到了 $1.22\sim 1.34\text{ h}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 。

2 原材料试验

a. 水泥。选用大同525号普通硅酸盐水泥,经检测,该水泥符合GB175-92标准。

b. 硅粉。选用山西铁合金厂生产的硅粉,其物理性能和化学成分符合《水工混凝土硅粉标准暂行规定》。

c. 细骨料。砂子选用枢纽工程附近河曲县大东梁质地优良的天然河砂,铁矿砂由安徽芜湖磨料磨具厂生产。其中,铁矿砂与天然砂的比例为50:50。有关砂的物理性能符合SDJ207-82标准。

d. 粗骨料。铁矿石的粒径为5~20mm和20~40mm两级,人工石子粒径也为5~20mm和20~

作者简介:谢学礼(1968—),男,甘肃临夏人,工程师,主要从事建筑材料和混凝土结构试验研究。

40mm两级.粗骨料级配选用连续级配,由容重法确定最优级配.石子采用万家寨人工碎石及安徽芜湖磨料磨具厂生产的铁矿石,铁矿石与人工碎石的级配比例为50:50.粗骨料的物理性能符合SDJ207-82标准.

e.外加剂.大量的试验表明,为了配制高质量的抗冲磨混凝土,通过掺用高效减水剂使混凝土在很低的水灰比下获得很高的坍落度,这也是解决本工程泵送和配钢筋较难于捣固所需要的.由于该混凝土抗冻性要求较高,通过AE型引气剂引入了一定的有效空气量.本工程先期所用减水剂为山西太原混凝土高效减水剂厂生产的NSF-2型;联掺使用的AE型引气剂系山西省万荣县城南化工厂的产品.抗冲磨混凝土中后期施工为适应泵送的严格要求,解决坍落度损失,选用减水效果更好并具有保坍作用的高效减水剂JM-II型,它是由江苏建筑科学院生产的;联掺使用的引气剂也为AE型.所用外加剂符合GB8076-1997标准.

3 混凝土抗磨强度试验

3.1 铁矿石砂体积与抗磨强度研究

根据试验要求,选择不同的配合比进行铁矿石砂体积对抗磨强度的影响试验,试验结果见表1.

分析表1可知:在保持水胶比0.35~0.40,坍落度为3~5cm范围内,抗冲磨混凝土的抗磨强度受铁矿石影响最大,因此,选择品质优良的粗骨料是关键.当铁矿石的体积不小于0.1398m³时,其抗磨强度均可大于1.20h/(kg·m⁻²).试验表明,铁矿石和混合石混凝土的抗磨强度均较高,但石子全部选用铁矿石时,抗磨强度提高幅度并不大,而铁矿石成本较高,因此,石子选用人工碎石与铁矿石两者的混合石可兼顾技术与成本控制两方面的要求.铁矿砂对抗磨强度影响很小,仅用铁矿砂配制的抗磨混凝土,在其它条件基本相同的情况下,与天然砂配制混凝土的抗磨强度基本一样,且其成本较高,因此,可

用天然砂替代.另外,铁矿砂的掺用对该混凝土抗冻也有不利影响.

3.2 现场试验混凝土部位的选择及试验

为了确定万家寨工程抗冲磨部位的混凝土配合比与施工方案,在现场进行了抗冲磨材料的模拟试验.

3.2.1 试验部位的选择

考虑到施工条件和不影响其它部位的正常施工,选取护坦5-1的一部分作为现场试验部位.护坦5-1当时浇筑形象高程为899.00m,由于溢流面设计形象高程900.00~902.15m为曲面,为了简化施工工艺,所以选取护坦5-1:下(0+081.38)m~下(0+088.00)m,899.7~900m高程作为试验块,其下部位仍按原设计的常态混凝土配比进行浇筑.每一试验块其工程量为:6.62m×16m×0.3m=31.8m³.试验块分4块,按4种配比,分别在试验块1(冲-1)、试验块2(冲-2)、试验块3(冲-3)、试验块4(冲-4)处浇筑.

3.2.2 现场抗冲磨试验

试验条件:养护至28d龄期后,在每个试验块各取5个冲刷点(每块面积为0.4m×0.4m),用高速夹砂水流进行喷射;喷射角度为15°左右,喷射管口距冲刷点1.5mm~2.0mm;喷射流速为20m/s,30m/s(通过变换喷嘴直径来实现);含砂量为12.6kg/m³(采用比重法控制);高速夹砂水流喷射持续时间为4h,8h,16h,24h,48h.有关含沙水流喷射流速为30m/s时的现场抗冲磨试验结果见表2.

表2 高速含沙水流现场抗冲磨试验结果

部位	编号	水灰比	外加剂		不同冲磨时间磨损深度/mm		
			NSF-2/%	AE/%	16h	24h	48h
冲-1	M1	0.35	1.0	0.0025	0.4	0.6	1.5
冲-2	M3	0.35	1.0	0.0045	0.3	0.5	0.6
冲-3	M5	0.35	1.0	0.0020	0.2	0.5	0.8
冲-4	M10	0.35	1.0	0.0025	0.4	0.7	1.1

从表2可看出,磨损深度最大的为冲-1,其次为冲-4,而冲-2和冲-3比较接近,磨损深度也较小,这比天然砂人工碎石骨料混凝土的磨损深度减少了

表1 铁矿石砂体积与抗磨强度之间的关系

编号	水胶比	水泥用量/(kg·m ⁻³)	硅粉/(kg·m ⁻³)	砂率/%	铁矿砂石/m ³	铁矿石/m ³	铁小石/m ³	铁中石/m ³	铁矿砂/m ³	抗冲磨强度/(h·(kg·m ⁻²) ⁻¹)
M1	0.35	323	28	35						0.88
M2	0.35	434	38	35(铁矿砂)	0.6494	0.4199	0.1697	0.2502	0.2295	1.34
M3	0.35	394	34	35(铁矿砂占1/2)	0.2780	0.1800	0.0723	0.1077	0.0980	1.28
M4	0.35	381	33	35(铁矿砂占1/2)	0.0839				0.0839	0.91
M5	0.35	342	30	34	0.4011	0.4011	0.1614	0.2397		1.33
M6	0.35	426	37	35(铁矿砂)	0.3880	0.1858	0.0748	0.1111	0.2022	1.32
M7	0.40	345	30	37(铁矿砂)	0.0685				0.0685	0.86
M8	0.40	345	30	36(铁矿砂占1/2)	0.5308	0.4132	0.1663	0.2469	0.1176	1.36
M9	0.40	299	26	36			0.1053	0.1043		1.41
M10	0.35	344	30	35	0.1737	0.1737	0.0699	0.1039		1.25
M11	0.35	344	30	35	0.1398	0.1398	0.0398			1.22

注:铁矿砂石的体积系指在每立方米抗冲磨混凝土中所占体积;铁矿砂石体积为铁矿石和铁矿砂体积之和.

60%左右,冲-3混凝土配比粗骨料全部使用铁矿石,成本较高,最大磨损深度与铁矿石总体积在每立方米抗冲磨混凝土中所占比例有直接关系,其总体趋势为铁矿石在每立方米混凝土中所占体积越大,则磨损深度越小。

3.3 抗冲磨混凝土现场取样分析

对浇筑的4个试验块现场取样,进行3d,7d,28d,90d龄期抗压强度试验和28d龄期抗冻和极限拉伸试验,试验结果见表3。由表3可看出,4个试验块混凝土90d的抗压强度为53.9~62.8MPa,均满足设计标号50MPa的要求。

4个试验块混凝土28d的极限拉伸值均满足28d极限拉伸值大于 1.0×10^{-4} 的设计技术要求。冲-1、冲-3、冲-4混凝土28d的抗冻均满足设计 D_{200} 的要求,冲-2混凝土尽管90d强度高达62.8MPa,但抗冻只达到 D_{100} ,未能满足要求。分析该配比参数,我们认为是原材料膨胀系数之比不合适造成的,该配比除了铁矿石,铁矿砂比其它配比多用了 402 kg/m^3 ,由于铁矿石热传导率较高,故铁矿石混凝土的热传导率也远高于普通混凝土,铁矿砂的大量使用,加剧了该混凝土对冷热能量的传输,反复的热胀冷缩导致试件松酥,使强度急剧下降,这说明铁矿砂(特别是铁矿砂)用量过大对抗冻有不利影响,对于未能满足抗冻要求的冲-2块混凝土,已凿除重浇。

另外,7d,28d,90d的抗压强度和28d的抗冲磨强度两种配比都很接近,表明利用铁矿石全部替代一种人工碎石与分别替代50%的人工碎石和中碎石,对混凝土性能基本没有影响。

4 泄水建筑物抗冲磨混凝土的实施方案

为确保工程按期蓄水发电,方便施工,并结合泄水建筑物实际运用工况,对溢流面抗冲磨混凝土按以下方案实施。

a. 中孔溢流面采用天然砂、人工碎石、掺硅粉

的抗冲磨混凝土。

b. 表孔堰顶范围溢流面也采用天然砂、人工碎石、掺硅粉的抗冲磨混凝土,其余部位仍采用人工砂石骨料掺硅粉的抗冲磨混凝土。

c. 6号~8号坝段溢流面剩余部位表层采用天然砂、混合石、掺硅粉的抗冲磨混凝土,原预留台阶抬高,由于采用混合石的混凝土标号提高,中间设过渡层。

d. 6号~10号坝段护坦表层采用天然砂、混合石、掺硅粉的抗冲磨混凝土,厚度35cm,下部设过渡层。

e. 为方便施工,保证工期,护坦部位表层抗冲磨层与下部过渡层(为常态混凝土)分两层浇筑,水平施工缝设层面结合插钢筋,在尾坎及反弧体型较为复杂的部位采用 $\varnothing 16$ (Ⅱ级钢筋),单根长90cm,每平方米4根,梅花型布置,在过渡层混凝土初凝前将层面插筋插入65cm,外露25cm,外露部分为抗冲磨混凝土。

5 施工中的问题及解决措施

在护坦8-4,8-3抗冲磨混凝土浇筑一周后均发生裂缝,至28d裂缝面有所扩大。8-4用泵送,8-3用缆机入仓,施工浇筑过程不存在问题。分析认为,该混凝土的水泥用量大,硅粉掺量较多,浇筑层薄(35cm),浇筑块大,混凝土发生裂缝在所难免。由于当时防汛需要,工期紧迫,只能边施工边研究。为减少混凝土裂缝,我们采取了以下措施:①降低硅粉用量,由8%降为6%;②对于泵送混凝土,通过调整泵的位置,减少泵管弯头;③调整外加剂,增加混凝土的和易性,经试验择优,确定选用JM-Ⅱ型高效减水剂;④护坦6-4面积为 $22 \text{ m} \times 22 \text{ m}$,其它块面积也很大,要分为4块,分两次浇筑完成,间歇时间应在7d以上;⑤在保持该混凝土抗磨损强度基本不变的前提下,标号由 $R_{90}^{300}D_{200}$ 调整为标号 $R_{90}^{350}D_{200}$,这是降低灰量,减少裂缝的基本措施。调整后铁矿石混凝土的试验结果见表4。

表3 现场抗冲磨混凝土强度及抗冻试验结果

部位	编号	水灰比	抗压强度/MPa				抗冻试验相对动弹性模量/%				抗冻试验失重率/%			
			3d	7d	28d	90d	50次	100次	150次	200次	50次	100次	150次	200次
冲-1	M1	0.35	31.4	42.1	54.6	57.4	98.97	98.01	97.01	95.81	0.13	0.28	0.43	0.55
冲-2	M3	0.35	34.7	43.2	56.4	62.8	92.67	87.96	49.54		0.24	0.49	2.46	
冲-3	M5	0.35	39.9	50.1	56.8	60.3	93.54	93.54	90.42	87.51	0.16	0.27	0.81	1.20
冲-4	M10	0.35	27.8	35.1	46.0	53.9	98.83	97.47	94.86	91.82	0.17	0.32	0.52	0.87

表4 调整后的抗冲磨强度及抗冻性试验结果

水灰比	胶材总量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	外加剂		坍落度 /cm	抗压强度/MPa				抗冲磨强度 ($\text{h} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$)	抗冻性试验相对动弹模量				抗冻性试验失重率/%			
		JM-Ⅱ /%	AE-A /%		7d	28d	90d	28d (拉)		D_{50}	D_{100}	D_{150}	D_{200}	D_{50}	D_{100}	D_{150}	D_{200}
0.40	363	0.8	0.0025	11~13	25.2	36.7	46.2	3.51	1.05	83.46	79.75	77.91	75.04	0.23	0.29	0.38	0.98
0.40	300	0.8	0.0025	5~7	28.0	39.5	48.2	3.94	1.20	96.20	92.40	87.60	84.60	0.20	0.25	0.40	0.52

表4试验结果表明,调整后的抗冲磨混凝土其强度、抗冻性等指标均满足标号要求,通过采取上述措施、有效减少了干缩变形和龟裂、基本解决了裂缝的产生。抗磨强度不论是常态混凝土还是泵送混凝土都大于 $1.00\text{ h}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$,能满足工程要求,但比标号 $\text{R}_{28}^{200}\text{D}_{200}$ 的抗冲层的抗冲磨强度有所降低,这表明,水灰比、硅粉掺量、坍落度、铁矿石砂体积的变化对抗冲磨强度均有一定的影响,特别是铁矿石对泵送混凝土的影响更大,因为由于坍落度增大(11~13 cm)而导致比重较大的铁矿石一定程度的分离和沉降,使该混凝土表层的铁矿石体积有所减少,进而影响抗磨强度。需要指出,在万家寨水利枢纽工程泄水建筑物部分抗冲层使用泵送混凝土,是由现场施工条件决定的。

6 结 语

目前,抗磨材料已从过去单纯的使用有机材料向无机材料方向发展,以及有机材料向无机和有机复合材料方向发展。虽然有些高分子材料本身的抗磨性能很好,但由于它们的温度变形系数远大于基底混凝土的温度变形系数,当温度变化时,两种材料结合面变形不一致,经过多次过水后,会造成上层的抗磨材料与基底混凝土脱落,且存在施工复杂、成本高、有毒性等缺点。为了克服环氧砂浆等抗冲磨混凝土的缺点,在葛洲坝、新疆三屯河等泄水建筑物已选

用铁矿石作为骨料,配制的抗磨混凝土均取得了较好效果。根据万家寨工程的特点,从降低工程造价和简化施工工艺着手,利用铁矿石配制的抗磨混凝土也已取得了较好的效果。

试验表明,影响混凝土抗冲磨强度的主要因素为粗骨料、水灰比和砂子品种,其中又以粗骨料为决定因素,因此,选择品质优良的粗骨料是关键。铁矿石混凝土的抗冲磨强度、基本与铁矿石的体积成正比关系,但石子全部采用铁矿石时,抗冲磨强度提高的幅度并不大,且铁矿石成本较高,因此,从经济、技术两方面考虑,粗骨料采用混合石较好。在抗冲磨混凝土施工中,对坍落度应有所控制,以避免比重较大的铁矿石下沉分离。在万家寨水利枢纽工程,由于施工现场条件的限制,而不得不在部分护坦抗冲层采用泵送混凝土,其抗磨强度比同条件下的常态混凝土有所下降,但完全能满足工程要求。铁砂混凝土在万家寨水利枢纽工程中成功应用,解决了泄水建筑物的一个技术难题,为设计和施工积累了经验。

参考文献:

- [1] GB175-92,硅酸盐水泥普通硅酸盐水泥[S].
- [2] SDJ207-82,水工混凝土施工规范[S].
- [3] GB8076-1997,混凝土外加剂标准[S].
- [4] SD105-82,水工混凝土试验规程[S].

(收稿日期:2000-02-29 编辑:张志明)

·简讯·

俄罗斯水电装机近年来停滞不前

俄罗斯是世界水电大国之一,在1990年,其水电装机即达4350万kW,仅次于美国、加拿大和巴西,居世界第4位。但近年来,水电装机却停滞不前,直至1998年,其水电装机仍只有4360万kW,在此期间,先后被我国和日本超过,下降为世界的第6位。

何以会如此呢?是没有后续工程建成投产吗?据俄刊介绍,目前俄罗斯处于施工阶段的水电工程仍有16座,但由于经济下滑,建设资金不到位,施工处于低速进展甚至停滞状态,使一些工程成了“胡子工程”。如位于安加拉河上的鲍谷昌电站,是一座装机300万kW(初期规模)的巨型电站,开工至今已24年了,仍未能发电。又如布列依电站,装机170万kW,由于同样原因,已开工建设21年了,也没有发电。

为扭转这一状况,俄罗斯统一电网公司已邀请一些专家组成工作组,经过调查研究,选定了7座优先工程,其中包括鲍谷昌和布列依,特别建议优先把资金集中投入到布列依第1台机组上,然后再投向鲍谷昌,争取能在2006年投产。

我国东部在“十五”期间将新开工建设的大型抽水蓄能电站

我国东部地区电力系统的突出问题之一就是峰谷差大,在实施西电东送后,这个问题将更加尖锐。由于长距离送电,故障在所难免,备用容量也不容忽视,为此在负荷中心配置一定的抽水蓄能电站是十分必要的。据了解在“十五”期间,我国东部将新建5座抽水蓄能电站,见表1。

表1 我国东部“十五”期间将开工建设的大型抽水蓄能电站

电站名称	地点	河流	装机容量 万 kW	年发电量 亿 kW·h	所在 电网	备注
桐柏	浙江天台	信风河	$4 \times 30 = 120$	20.1	华东	利用桐柏水库发电
官兴	江苏宜兴	太湖	$4 \times 25 = 100$	14.9	华东	利用太湖下水库
琅琊山	安徽滁州	小沙河	$4 \times 15 = 60$	8.56	安徽	利用城西八陡堰下库
张河湾	河北井陘	井陘河	$4 \times 25 = 100$	16.75	冀南	利用张河湾水库下水库
西龙池	山西五台	滹沱河	$4 \times 30 = 120$	20.1	山西	

(吴葵高供稿)