

# 抗冲耐磨混凝土配合比设计及性能试验研究

——以新疆米兰河山口水利枢纽工程为例

张 勇<sup>1</sup>, 石 妍<sup>2</sup>, 杨 华 全<sup>2</sup>, 董 芸<sup>2</sup>

(1. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 长江科学院 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**为给米兰河山口水利枢纽工程后续设计与施工提供必要的技术依据,对该工程所用抗冲耐磨混凝土展开了配合比设计及性能试验。试验结果表明:其他条件一定时,天山水泥混凝土的用水量比青松水泥混凝土高约 5 kg/m<sup>3</sup>,抗压强度高 1.9~3.8 MPa;人工骨料混凝土的用水量比天然骨料混凝土高 12 kg/m<sup>3</sup>,抗压强度高 14.6 MPa;人工骨料混凝土的抗冲耐磨强度高,磨损率低;各试件抗硫酸盐侵蚀能力均良好。因此,建议混凝土中掺入适量磨细矿渣粉,并尽量使用人工骨料,当仅有天然骨料料源时,可适量掺入硅粉,以增强混凝土的抗冲耐磨效果。

**关 键 词:**抗冲耐磨混凝土;配合比;物理性能;米兰河山口水利枢纽工程  
**中图法分类号:** TV431      **文献标志码:** A      **DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.S1.001

## 1 工程概况

新疆若羌县米兰河山口水利枢纽工程位于若羌米兰河出山口上游约 4 km 处,距兵团农二师 36 团约 34 km。水库正常蓄水位 1 422 m,总库容 4 128 万 m<sup>3</sup>,电站装机容量 4.4 MW,坝高 83 m。电站主要建筑物包括砂砾石沥青心墙坝、导流兼泄洪排砂洞、溢洪道、引水系统及电站厂房等,施工总工期为 3 a。本文对米兰河山口水利枢纽工程所用抗冲耐磨混凝土开展了配合比设计及性能试验,以对后期设计及施工提供必要的技术依据。抗冲耐磨混凝土设计指标见表 1。

表 1 米兰河山口枢纽抗冲耐磨混凝土设计指标

序号	设计技术指标	级配	其他技术要求	配制强度/MPa
1	C50F200W6	二	抗腐蚀,高抗硫	56.5
2	C40F200W6	二	抗腐蚀,高抗硫	46.5

## 2 原材料及配合比

试验原材料包括:天山 42.5 中热硅酸盐水泥和青松 42.5 中热硅酸盐水泥,巴州西海矿微粉开发有限公

司生产的 S75 级粒化高炉矿渣粉,甘肃三远硅材料有限公司生产的硅粉,天山建材集团精细化工有限责任公司生产的 PC-1 聚羧酸减水剂和 AER 引气剂,米兰河山口水利枢纽天然骨料,用于对比试验的人工灰岩骨料。

混凝土均为二级配,粗骨料组合比为中石:小石 = 55:45,控制混凝土坍落度在 40~60 mm 之间,含气量 3.0%~4.5%。经过初选和优化,抗冲耐磨混凝土试验配合比见表 2。

表 2 抗冲耐磨混凝土试验配合比及拌和物性能

编号	水泥品种	水胶比	矿渣粉/	硅粉/	砂率/	减水剂/	引气剂/	单位用水量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	拌和物性能	
			%	%	%	%	%		坍落度/ mm	含气量/ %
L1	天山	0.38	40	-	31	1.0	0.015	111	55	4.0
L2	青松	0.38	40	-	31	1.0	0.015	105	45	4.0
L3	天山	0.40	-	4	31	1.0	-	124	45	3.5
L4	青松	0.40	-	4	31	1.0	-	118	55	3.0
L5	天山	0.30	40	-	30	1.0	0.015	111	45	3.5
L6*	天山	0.30	40	-	30	1.0	0.015	123	45	3.1
L7	青松	0.30	40	-	30	1.0	0.010	105	46	3.4
L8	天山	0.30	-	4	30	1.0	-	124	48	3.4
L9	青松	0.30	-	4	30	1.0	-	118	50	3.3

注:\*表示混凝土采用人工灰岩砂石料,用于混凝土性能对比,下同。

### 3 抗冲耐磨混凝土物理性能试验

#### 3.1 拌和物性能

抗冲耐磨混凝土和易性均较好。当其他条件相同时,天山水泥混凝土的用水量比青松水泥混凝土多 6 kg/m<sup>3</sup>;人工骨料混凝土的用水量比天然骨料混凝土高 10 kg/m<sup>3</sup> 左右。

#### 3.2 力学及变形性能

按照 DL/T 5150-2001《水工混凝土试验规程》的规定展开抗冲耐磨混凝土物理性能试验,力学及变形性能试验结果见表 3 和图 1、2。

表 3 抗冲耐磨混凝土力学及变形性能试验结果

编号	抗压强度/MPa		劈拉强度/MPa		轴拉强度/MPa		极限拉伸值/×10 <sup>-6</sup>		抗压弹性模量/GPa	
	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d
L1	28.3	48.4	2.16	3.18	2.14	2.76	79	91	20.5	26.9
L2	27.0	46.5	1.89	2.82	1.96	2.55	80	90	19.7	26.3
L3	36.3	55.6	2.41	3.58	2.26	3.18	89	105	20.5	29.4
L4	37.9	52.2	2.48	3.43	2.35	2.93	85	102	20.6	28.8
L5	41.4	60.2	2.87	4.14	2.74	3.62	89	105	22.5	29.4
L6*	53.4	74.8	3.65	5.38	3.37	4.02	96	110	28.5	36.8
L7	41.8	58.2	3.02	3.74	2.96	3.39	83	96	26.0	33.3
L8	59.5	70.3	3.62	4.53	3.71	4.02	99	112	23.5	32.6
L9	57.3	66.5	3.91	4.37	3.71	3.73	99	110	24.6	30.8

配制要求,单掺硅粉的混凝土强度富余较大;混凝土的抗压强度越高,劈拉强度和轴拉强度也越高。

配合比参数一定时,天山水泥混凝土的 28 d 抗压强度比青松水泥混凝土高 1.9 ~ 3.8 MPa,人工骨料混凝土的抗压强度比天然骨料混凝土高 14.6 MPa;单掺矿渣粉的混凝土极限拉伸值在 (90 ~ 110) × 10<sup>-6</sup> 之间,单掺硅粉的极限拉伸值在 (102 ~ 112) × 10<sup>-6</sup> 之间。

#### 3.3 抗渗抗冻性能

试验结果表明,抗冲耐磨混凝土的抗渗及抗冻性能良好,抗渗等级均大于 W6,抗冻等级大于 F200,完全满足设计要求。观察抗渗试件的劈裂面发现,天然骨料混凝土的断面凸凹不平,均从粗骨料与砂浆的界面断开,说明界面的粘结较弱;而人工骨料混凝土的断面则直接穿过骨料,说明界面粘结较强。

#### 3.4 抗冲耐磨性能

采用水下钢球法,测定混凝土表面受水下高速流动介质磨损的相对抗力,用于评价混凝土表面的相对抗磨性能。混凝土抗冲耐磨试验结果见表 4。

表 4 混凝土抗冲耐磨性能试验结果

编号	抗冲耐磨强度/ [kg·(m <sup>2</sup> ·h) <sup>-1</sup> ]		磨损率/ %	编号	抗冲耐磨强度/ [kg·(m <sup>2</sup> ·h) <sup>-1</sup> ]		磨损率/ %
L1	6.75	4.21	3.39	L6*	14.25	1.91	2.67
L2	5.96	4.65		L7	8.19	3.32	
L3	9.76	4.05		L8	12.08	2.31	
L4	8.54	4.98		L9	10.45	2.67	
L5	8.42	3.39					

由表 4 可以看出,水胶比越低,混凝土的抗冲耐磨强度越高,磨损率越低。天山水泥混凝土的抗冲耐磨强度略高于青松水泥混凝土,这主要是由于抗压强度的不同决定的。人工骨料混凝土的抗冲耐磨强度最高,磨损率最低,显示出优异的抗冲耐磨效果,这是由于人工骨料与水泥砂浆的界面结合较好。

#### 3.5 抵抗硫酸盐侵蚀性能

参照 GB/T 749-2008《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》的规定,进行混凝土抗硫酸盐侵蚀试验。试件均在相关溶液中浸泡 28 d 后取出,然后展开抗压强度和抗折强度的测试,结果见表 5,并计算试件的抗蚀系数,用于评价各配合比的相对抗侵蚀性能,相关计算公式为

$$K = \frac{R_{液}}{R_{水}}$$

(1)

式中, K 为抗蚀系数; R<sub>液</sub> 为试件在硫酸钠溶液中浸泡 28 d 的抗折强度,MPa; R<sub>水</sub> 为试件在 20℃ 水中养护 28

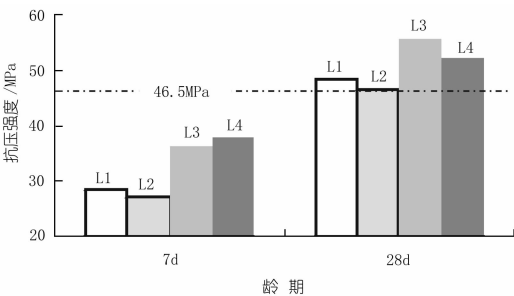


图 1 C40 抗冲耐磨混凝土抗压强度柱状图

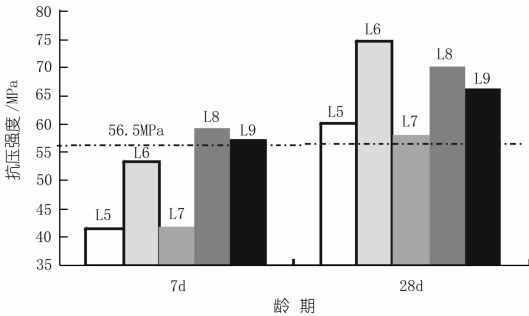


图 2 C50 抗冲耐磨混凝土抗压强度柱状图

试验结果表明, L1 ~ L4 抗冲耐磨混凝土 28 d 抗压强度均达到 C40 配制要求,但 L1(天山水泥,单掺矿渣粉)和 L2(青松水泥,单掺矿渣粉)的强度富余较小; L5 ~ L9 抗冲耐磨混凝土 28 d 抗压强度均达到 C50

d 的抗折强度,MPa。

试验结果表明,配合比一定时,与水养试件相比,Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸泡的湿筛砂浆试件抗压强度和抗折强度均有所降低。水胶比为 0.38~0.40 时,试件抗蚀系数在 84% 以上;水胶比为 0.30 时,试件抗蚀系数在 92% 以上,水胶比越小,抗蚀系数越高。总体而言,各试件抗硫酸盐侵蚀能力均较好。

表 5 混凝土抗硫酸盐侵蚀性能试验结果					
编号	28 d 抗压强度/MPa		28 d 抗折强度/MPa		抗蚀系数
	水养	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 浸泡	水养	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 浸泡	
L1	60.7	53.7	12.35	11.25	0.91
L2	57.6	47.3	12.07	10.19	0.84
L3	63.8	60.2	13.75	12.97	0.94
L4	60.5	57.3	13.04	12.15	0.93
L5	79.3	77.9	17.10	16.79	0.92
L6 *	91.9	88.7	19.80	19.13	0.97
L7	69.6	66.4	15.01	14.32	0.95
L8	81.1	74.8	17.48	16.11	0.98
L9	78.2	73.9	16.86	15.93	0.94

4 试验结果分析及建议

基于以上米兰河山口水利枢纽工程抗冲耐磨混凝土试验结果,提出以下建议。

(1) 两种水泥均可使用。天山 42.5 硅酸盐水泥强度稍高、需水量比略大,因此,配制同一强度等级混凝土时,天山水泥混凝土的水胶比高 0.02,需水量提高约 5 kg/m<sup>3</sup>,两种水泥混凝土总体胶材用量相当。

(2) 混凝土中可适量掺入磨细矿渣粉。磨细矿渣粉的掺入,可减少水泥用量,降低水化热,改善混凝土

性能,节约工程成本。而且,磨细矿渣粉可以抑制碱骨料反应<sup>[1]</sup>。

(3) 推荐使用人工破碎骨料。混凝土是非匀质材料,强度取决于骨料强度、水泥石强度和界面粘结强度。一般而言,骨料的强度最高,其次是水泥石,而界面结构粘结强度是最薄弱的,而界面结构粘结强度是影响混凝土整体或宏观强度的主导因素<sup>[2]</sup>。因此,为提高混凝土的抗冲耐磨性能,需尽量减少界面薄弱环节并提高界面粘结强度,即降低骨料最大粒径,使用人工破碎骨料。与天然骨料相比,人工骨料的表面粗糙,与水泥砂浆粘结力较强,可有效提高混凝土的抗冲耐磨性能。

(4) 采用天然骨料时,建议混凝土中掺入适量硅粉。在重视界面过渡区强度的同时,混凝土中水泥石的强度和密实度也是不可忽视的。硅粉在低水胶比条件下有填充效应、微集料效应及火山灰效应,能有效改善界面结构<sup>[3]</sup>,提高界面粘结强度,增强水泥石的密实度和强度,从而提高混凝土的抗冲耐磨能力。但是,硅粉混凝土的干缩和水化热较大,应精心施工、充分养护,以减少早期裂缝。

参考文献:

[1] 王迎春,苏英,周世华.水泥混合料和混凝土掺合料[M].北京:化学工业出版社,2011.

[2] 陈惠苏,孙伟,Stroeven Piet.水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述(一):实验技术[J].硅酸盐学报,2004,32(1):63-69.

[3] 长江水利委员会长江科学院.米兰河山口水利枢纽工程抗冲耐磨混凝土配合比设计及性能试验[R].武汉:长江水利委员会长江科学院,2012.

(编辑:胡旭东)

(上接第 185 页)

力学性能比低热水泥好,后期低热水泥混凝土力学性能比中热水泥好,掺改性 PVA 纤维的低热水泥混凝土力学性能比中热水泥好。

(3) 未掺改性 PVA 纤维的低热水泥混凝土干燥收缩比中热水泥小,掺入改性 PVA 纤维后,低热水泥混凝土的干燥收缩有所增加,这与改性 PVA 纤维水泥混凝土拌制时增加 3 kg 用水量有关。

(4) 未掺改性 PVA 纤维的低热水泥混凝土自生体积变形大于中热水泥,掺入改性 PVA 纤维后,增加了中热水泥的自生体积变形,降低了低热水泥的自生体积变形。

参考文献:

[1] 孙明伦,张利平,石妍.大坝改性 PVA 纤维混凝土的性能试验研

究[J].混凝土,2012,(7):124-126.

[2] 计涛,纪国晋,王少江,等.PVA 纤维对水工抗冲磨混凝土性能的影响[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(增刊Ⅱ):192-197.

[3] 李光伟,鲁少林,钟贻辉.PVA 纤维在水工高拱坝混凝土中的应用[J].华北水利水电学院学报,2012,33(6):112-115.

[4] 窦立刚,施建梅.金沙江向家坝改性 PVA 纤维混凝土的技术参数研究[J].黄河水利职业技术学院学报,2012,24(1):18-21.

[5] 钱桂枫,高祥彪,钱春香.PVA 纤维对混凝土力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2010,(6):52-54.

[6] 王述银,董维佳,王迎春,等.中低热微膨胀水泥混凝土性能试验研究[J].水利学报,2000,(4):24-28.

[7] 杨富亮.溪洛渡水电站掺 PVA 纤维混凝土的试验研究及应用[J].云南水力发电,2011,27(5):11-17,40.

(编辑:胡旭东)