



低热硅酸盐水泥在犍为船闸 大体积混凝土中的应用

吴礼国, 李泳龙

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 温度裂缝控制是大体积混凝土应用中需要解决的一个关键问题, 结构开裂将会对混凝土的耐久性产生不利影响。为控制大体积混凝土开裂, 犍为船闸主要水工建筑物采用低热水泥混凝土进行浇筑, 并对实物试样的检验结果、现场采集温度数据及现场混凝土实际效果进行分析。结果表明, 各龄期的水化热和混凝土的绝热温升均低于普通水泥, 可有效降低混凝土温度应力, 减少混凝土开裂风险。低热硅酸盐水泥可较好地应用于船闸工程中的大体积混凝土以解决开裂难题。

关键词: 低热硅酸盐水泥; 犍为船闸; 温控; 抗裂性

中图分类号: U 641.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)12-0115-04

Application of low heat Portland cement in mass concrete of Qianwei ship lock

WU Li-guo, LI Yong-long

(Sichuan Communication Surveying and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: Temperature crack control is a key problem to be solved in the application of mass concrete. Structural crack will have a negative impact on the durability of concrete. In order to control the problem of mass concrete cracking, we pour the main hydraulic structures of Qianwei ship lock with the low heat cement concrete, and analyze the inspection results of physical samples, the temperature data collected on site and the actual effect of concrete. The results show that the hydration heat and the adiabatic temperature rise of concrete at each hydration age are lower than these of ordinary cement, which can effectively reduce the temperature stress of concrete and the risk of concrete cracking. The low heat Portland cement can be better used in the mass concrete of ship lock engineering to solve the problem of cracking.

Keywords: low heat Portland cement; Qianwei ship lock; temperature control; crack resistance

近年来, 低热硅酸盐水泥已先后在三峡、溪洛渡、深溪沟、瀑布沟等大型水电工程的导流洞、泄洪洞、消力池等工程部位使用, 成功解决了大体积混凝土开裂难题^[1-3]。在建的国家重点工程白鹤滩水电站、乌东德水电站全坝采用低热硅酸盐水泥混凝土进行浇筑^[4], 低热硅酸盐水泥正逐步成为大型水电工程建设的常用水泥品种。随着内河航运高速发展, 大型船闸工程不断兴建, 大体积混凝土在船闸工程中的应用也逐渐增多。温度

裂缝控制是大体积混凝土应用中需要解决的一个关键问题, 结构开裂会对混凝土的耐久性产生不利影响。岷江犍为航电枢纽船闸工程等级为Ⅲ级, 船闸有效尺度为 220 m×34 m×4.5 m(长度×宽度×门槛水深), 年设计通过能力 1 474.67 万 t, 是目前西南地区建成的最大规模船闸。为解决大体积混凝土开裂难题, 犍为船闸主要水工建筑物采用低热硅酸盐水泥混凝土进行浇筑。本文通过分析实物试样的检验结果、现场采集温度数据及现场

混凝土实际效果，对低热硅酸盐水泥应用于船闸工程大体积混凝土的抗裂性进行验证。

1 低热硅酸盐水泥

低热硅酸盐水泥(高贝利特水泥)是以 C₂S 为主要矿物的硅酸盐水泥，与传统硅酸盐水泥相比具有需水量低、早期强度和后期强度增进率大等特点，其显著特点是水化热低、放热峰延迟^[5-7]。低热硅酸盐水泥是一种低钙型硅酸盐水泥，不仅

石灰石消耗量较普通水泥少，而且其生产过程中的能耗也较低，是一种绿色建筑材料。采用低热硅酸盐水泥代替普通水泥可以有效降低混凝土能耗(14.1%~15.3%)和 CO₂排放(14.9%~15.7%)，以白鹤滩水电站为例，可节约 8.377×10¹³ J 的能源^[8]。

1.1 水泥基本指标

根据实物试样的检验结果，键为船闸所采用的低热硅酸盐水泥(HBC)与普通硅酸盐水泥(PC)的化学组成及物理性能指标见表 1~3。

表 1 水泥化学组成

水泥品种	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF	C ₃ A	烧失量/%
HBC	23.85	3.83	4.51	60.55	1.82	1.79	28.01	47.24	13.71	2.53	2.91
PC	19.71	6.04	3.36	59.25	3.05	2.19	54.70	17.70	9.61	8.23	4.38

表 2 水泥物理性能

水泥品种	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	标准稠度用水量/%	凝结时间/min		安定性	抗压(抗折)强度/MPa		
			初凝	终凝		3 d	7 d	28 d
HBC	347	25.4	140	202	合格	15.6(4.4)	22.4(5.1)	48.6(8.8)
PC	354	26.9	133	185	合格	26.6(6.8)	-	53.0(8.3)

表 3 水泥水化热

水泥品种	水化热/(J·g ⁻¹)	
	3 d	7 d
HBC	193	220
PC	248	287

注：HBC 的 3、7 d 水化热标准上限值为 230、260 J/g。

1.2 水泥干缩率

键为船闸所采用的低热硅酸盐水泥(HBC)与普通硅酸盐水泥(PC)的干缩率试验结果见图 1，其试验方法按《水泥胶砂干缩试验方法》^[9]进行。

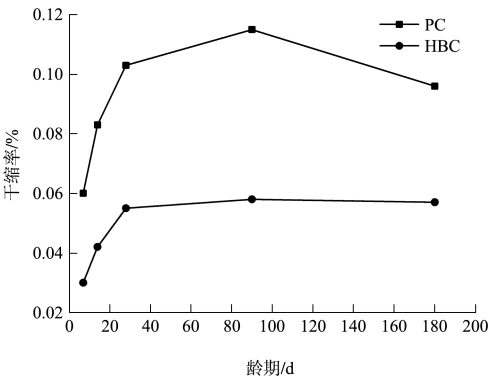


图 1 水泥干缩率试验结果

由图 1 可看出，低热硅酸盐水泥的干缩率低于普通硅酸盐水泥，各龄期的干缩率为普通硅酸

盐水泥的 50%~70%，具有优异的抗干缩性能。早期收缩应变较小，较普通水泥具有更好的抗裂性能。

1.3 水泥耐侵蚀性

键为船闸所采用的 HBC 与 PC 的耐侵蚀性试验结果见图 2，其试验方法按《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》^[10]进行，采用质量分数 3%的 Na₂SO₄溶液作为侵蚀介质。可以看出，低热硅酸盐水泥表现出比普通硅酸盐水泥更好的抗侵蚀性能。

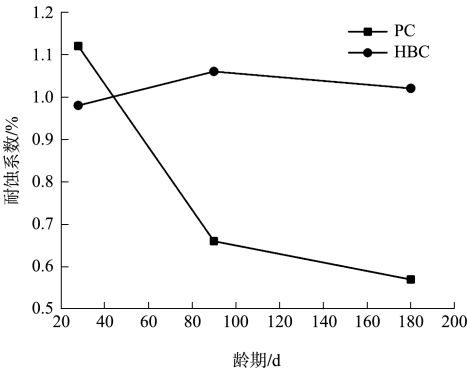
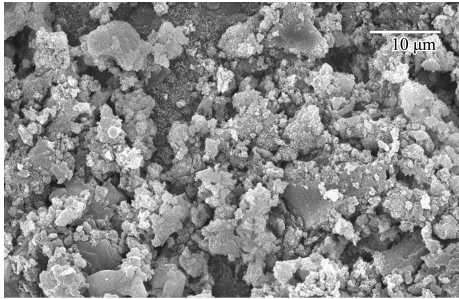
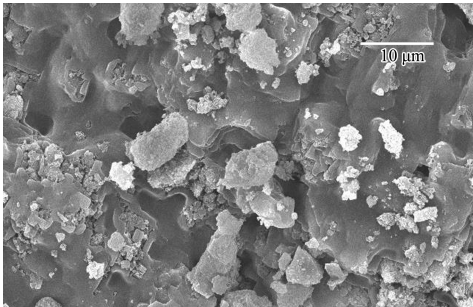


图 2 水泥耐侵蚀性试验结果

HBC 表现出来的优异抗干缩和耐侵蚀性能是其微观结构所决定的，HBC 与 PC 的微观结构见图 3。



a) PC



b) HBC

图 3 水泥浆扫描电子显微镜成像

由图 3 可看出, HBC 水化后的结构更加密实, 是因为其水化形成的水化硅酸钙凝胶较致密, 且水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量较 PC 少, 进一步提高密实度, 从而具有更精细的多孔结构, 使得其混凝土的微观结构更加致密, 在一定程度上提高了最终的力学性能和耐磨性^[11]。

2 混凝土

2.1 混凝土配合比及强度

以岷江犍为航电枢纽工程闸室 C20 混凝土为例, 其配合比技术参数见表 4, 各原材料比例 $m_{\text{水泥}}:m_{\text{砂}}:m_{\text{石}}:m_{\text{粉煤灰}}:m_{\text{水}}:m_{\text{减水剂}}=1:3.15:8.94:0.34:0.71:0.0214$ 。

表 4 闸室 C20 混凝土配合比技术参数

水胶比	水泥/kg	减水剂掺量/%	粉煤灰掺量/%	坍落度/mm
0.53	238	1.6	25	70~90

注: 粉煤灰为内掺; 外加剂掺量以胶凝材料质量为计算基数。

现场浇筑时在出机口取样测定混凝土强度, 不同批次混凝土强度见表 5。可以看出, 低热硅酸

盐水泥配制的混凝土强度完全满足设计要求。

表 5 混凝土强度结果

批次	28 d 抗压强度/MPa	达到设计强度标准值的百分比/%
1	29.3	146
2	28.5	142
3	30.0	150
4	27.2	136

2.2 混凝土绝热温升

犍为船闸所采用的 HBC 与 PC 配制的混凝土绝热温升结果见图 4, 其试验按《水工混凝土试验规程》^[12] 进行。

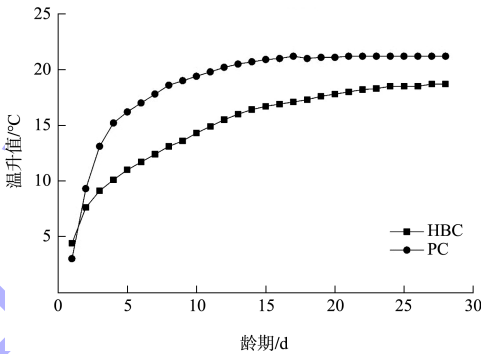


图 4 混凝土绝热温升

由图 4 可看出, HBC 绝热温升速率较 PC 低, 且整个测试龄期的温升值明显更低, 表明其具有更优异的热学性能。

3 现场采集温度数据

在混凝土内部埋设温度传感器, 现场采集温度数据。将铺设冷却水管与不铺设冷却水管的数据进行对比, 分析混凝土内部温度变化情况。

右闸室 11-1 仓采用 HBC 配制的混凝土进行浇筑, 设有降温冷却水管, 混凝土坍落度 90 mm, 环境温度 17.2 °C, 入模温度 22.6 °C。现场采集的混凝土其他相关指标及温度曲线见表 6 及图 5。

表 6 右闸室 11-1 仓混凝土温度数据

测温点	最高温/°C	温升值/°C
1 [#] (距模板 20 cm)	—	—
2 [#] (距模板 1.5 m)	31.4	8.8
3 [#] (距模板 2.5 m)	34.0	11.4

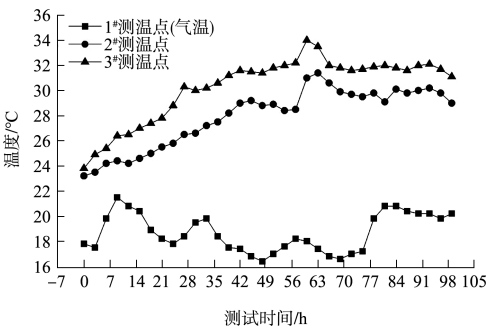


图 5 右闸室 11-1 仓混凝土温度曲线

下引航道右导墙 15-6 仓采用 PC 配制的混凝土进行浇筑, 设有降温冷却水管, 混凝土坍落度 90 mm, 环境温度 30.2 ℃, 入模温度 27.5 ℃。现场采集的 2[#]测温点(距模板 1.5 m)的最高温、温升值分别为 58.6、21.1 ℃, 混凝土温度曲线见图 6。

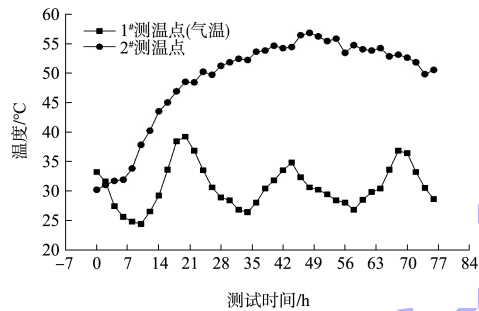


图 6 下引航道右导墙 15-6 仓混凝土温度曲线

右闸室 9-4 仓采用 HBC 配制的混凝土进行浇筑, 无降温冷却水管, 混凝土坍落度 90 mm, 环境温度 12.2 ℃, 入模温度 18.4 ℃。现场采集的混凝土其他相关指标及温度曲线见表 7 及图 7。

表 7 右闸室 9-4 仓混凝土温度数据

测温点	最高温/℃	温升值/℃
1 [#] (距模板 20 cm)	25.2	6.8
2 [#] (距模板 1.5 m)	37.2	18.8
3 [#] (距模板 2.5 m)	40.0	21.6

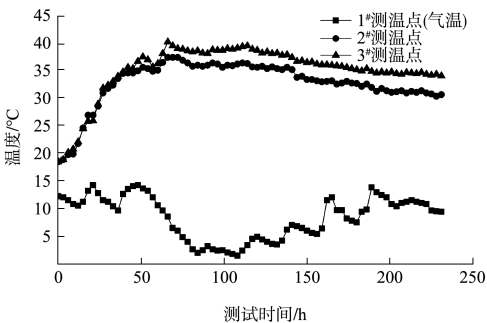


图 7 右闸室 9-4 仓混凝土温度曲线

由图表中数据可看出, 无任何温控措施时, HBC 混凝土最大温升值只有 21.6 ℃, 采用降温水管后最大温升值仅有 11.4 ℃, 而 PC 混凝土采用冷却水管的情况下, 最大温升值达到 21.1 ℃, 与不采取降温措施条件下 HBC 混凝土的温升值相当。工程实践表明, HBC 各龄期的水化热和其配制的混凝土绝热温升均较低, 可有效降低混凝土温度应力, 减少混凝土开裂风险。

根据岷江犍为航电枢纽工程的施工技术要求, 常态混凝土容许最高温度为 42 ℃。而 PC 混凝土的最高温度已经达到 58.6 ℃, 对混凝土抗裂性提出极大的挑战, 而表 7 中 HBC 混凝土在无任何温控措施的情况下, 最高温度也仅 40 ℃, 满足犍为船闸的温控设计容许最高温度要求。犍为船闸从 2018 年 1 月首仓混凝土开始浇筑至 2019 年 9 月船闸土建工程通过无水验收, HBC 混凝土均未出现因温度应力引起的可见裂缝, 实践证明 HBC 可较好地应用于船闸工程中的大体积混凝土以解决开裂难题。

4 结语

- 1) HBC 配制的混凝土虽早期强度发展较慢, 但 28 d 强度可满足船闸工程混凝土一般设计要求。
- 2) HBC 温控优势明显, 各龄期的水化热和混凝土的绝热温升均低于 PC, 可有效降低混凝土温度应力, 减少混凝土开裂风险。
- 3) 工程实践证明, HBC 可较好地应用于船闸工程中的大体积混凝土以解决开裂难题。

参考文献:

[1] 杨华全, 李文伟, 王迎春, 等. 低热硅酸盐水泥在三峡工程中的应用[J]. 人民长江, 2007, 38(1): 10-13.

[2] 孙明伦, 胡泽清, 石妍, 等. 低热硅酸盐水泥在泄洪洞工程中的应用研究[J]. 人民长江, 2011, 42(S2): 157-159.

[3] 韩建国, 吕鹏飞, 阳运霞, 等. 低热硅酸盐水泥改善大体积混凝土抗裂性能研究[J]. 人民长江, 2010, 41(18): 73-75.

[4] 樊启祥, 张超然, 陈文斌, 等. 乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术[J]. 水力发电学报, 2019, 38(2): 22-35.