

低热硅酸盐水泥对大坝混凝土体积稳定性影响试验

李光伟

(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:为了探讨低热硅酸盐水泥对大坝混凝土体积稳定性的影响,采用SL352—2006《水工混凝土试验规程》规定的试验方法,研究了低热硅酸盐水泥对大坝混凝土体积稳定性的影响。试验结果表明:低热硅酸盐水泥大坝混凝土具有温度变形、收缩变形和碱骨料反应活性膨胀变形较小的特点,与中热硅酸盐水泥相比,低热硅酸盐水泥可以提高大坝混凝土的体积稳定性。

关键词:水工材料;低热硅酸盐水泥;体积稳定性;温度变形;收缩变形;碱活性膨胀变形

中图分类号:TV431 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)06-0023-04

Investigate the effect of low heat Portland cement on concrete dam volume stability//LI Guangwei (Powerchina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to investigate the effect of low heat Portland cement on concrete dam volume stability, we applied the test method according to the *Hydraulic Concrete Testing Procedures* (SL352-2006) regulations. Overall, the experimental studies show: low heat Portland cement concrete has characteristics of low temperature deformation, low shrinkage and reducing swelling alkali reactivity. Further, compared with moderate heat Portland cement, low heat Portland cement concrete can increase the volume stability of dam.

Key words: hydraulic material; low heat Portland cement; volume stability; temperature deformation; shrinkage; swelling alkali reactivity

为了节能降耗、保护环境并提高混凝土的耐久性,我国从20世纪90年代开始研究低热硅酸盐水泥^[1]。低热硅酸盐水泥的熟料矿物成分与传统硅酸盐水泥相同,区别在于它是以C₂S为主导矿物(C₂S质量分数大于40%),具有低水化热、高后期强度增进率、良好的外加剂相容性、优异的耐久性等特点^[2],配制的水工大坝混凝土具有优越的性能^[3-5]。

混凝土的体积稳定性是指混凝土硬化后在非荷载条件下保持其初始几何尺寸的特性。硬化后的混凝土在非荷载条件下依然会产生变形,这是由于混凝土内部水分的改变,水化反应以及环境温度、湿度的变化导致混凝土的体积发生变化^[6]。在工程结构中,混凝土的体积变化常受到基础、钢筋和邻接构件的约束,其应力变化造成混凝土开裂甚至破坏。减小混凝土的体积变形、提高混凝土的体积稳定性是解决水工大坝混凝土开裂问题的关键^[7]。影响混凝土体积稳定性的因素很多,其中水泥品种是影响因素之一。为此,本文结合西南某水电工程的实际,对比不同品种水泥配制大坝混凝土的体积稳定性,

在试验研究的基础上,进行低热硅酸盐水泥对大坝混凝土体积稳定性的影响分析和探讨。

1 混凝土原材料及试验方法

试验采用四川嘉华企业(集团)股份有限公司生产的低热硅酸盐水泥,为了便于分析,同时采用实际工程中使用的中热硅酸盐水泥进行比较,水泥的化学成分及矿物组成见表1,水泥的基本物理力学性能见表2。

试验采用云南宣威I级粉煤灰,粉煤灰的细度为5.3%,需水量比为94.0%。粗骨料为当地具有潜在碱硅酸反应活性的变质石英砂岩,其表观密度为2.69g/cm³,饱和面干吸水率为0.5%。细骨料为当地大理岩,其表观密度为2.68g/cm³,饱和面干吸水率为1.1%,石粉质量分数为15.0%,细度模数为2.75。

采用相同的混凝土配合比进行不同水泥品种大坝混凝土性能试验,其中粉煤灰的掺量为35%,复掺一定量的缓凝高效减水剂和引气剂。试验方法参照SL352—2006《水工混凝土试验规程》。

作者简介:李光伟(1962—),男,湖北武汉人,教授级高级工程师,主要从事水工混凝土性能试验研究。E-mail:lguangwei@chidi.com.cn

表 1 水泥的化学成分及矿物组成

水泥品种	化学成分质量分数/%							矿物组成质量分数/%			
	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	烧失量	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
中热硅酸盐水泥	60.64	21.48	5.35	4.00	4.67	1.86	0.61	44.34	27.84	1.84	16.28
低热硅酸盐水泥	60.57	23.65	5.12	4.44	4.50	1.91	0.80	19.64	43.03	1.88	16.60

表 2 水泥的物理力学性能

水泥品种	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	表观密度/ (g·cm ⁻³)	标准 稠度/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
				初凝	终凝	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
中热硅酸盐水泥	324	3.17	24.8	157	233	5.8	6.8	9.3	22.1	29.3	48.0
低热硅酸盐水泥	321	3.22	24.3	186	283		4.4	10.6		14.1	50.1

2 试验结果及分析

水工大坝混凝土体积变形的种类依据不同的起因有不同的分类,其中影响最为显著的是温度变形、收缩变形以及碱骨料活性膨胀变形等。

2.1 对大坝混凝土温度变形的影响

混凝土随着环境温度的升降而产生的膨胀或收缩变形称为温度变形。对于大坝混凝土来说,裂缝主要是由温度变化引起的,因此如何减小大坝混凝土的温度变形是一个重要的问题。

不同品种水泥的水化热试验结果见图 1。由图 1 可见,低热硅酸盐水泥的水化热低于中热硅酸盐水泥,其 3d 水化热低 32.7%,7d 水化热低 23.9%。在相同条件下不同品种水泥配制的混凝土绝热温升试验结果见图 2。由图 2 可见,与中热硅酸盐水泥相比,采用低热硅酸盐水泥配制混凝土 28 d 的绝热温升低 2℃左右。

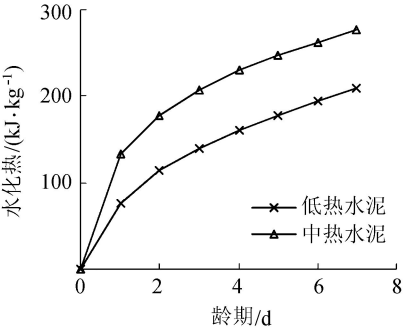


图 1 不同品种水泥的水化热

2.2 对大坝混凝土收缩变形的影响

大坝混凝土的收缩变形主要是指由于环境湿度的变化而引起的混凝土干燥收缩变形和在恒温绝湿条件下由于胶凝材料的水化作用而引起的自生体积收缩变形。

大坝混凝土的内部不存在干燥收缩问题,但其表面的干燥收缩会引起表面裂缝,并可能成为进一步发展为大裂缝的起点,因此混凝土表面干燥收缩是大坝混凝土体积稳定性的重要组成部分。不同品

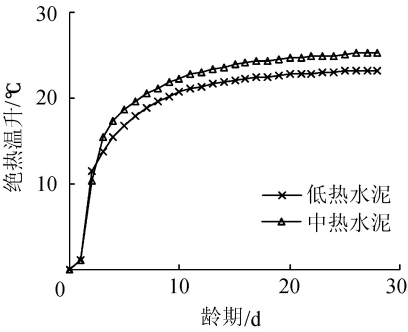


图 2 不同品种水泥大坝混凝土绝热温升

种水泥对大坝混凝土干燥收缩变形的影响见图 3(a)。由图 3(a)可以看出:采用两种水泥配制的大坝混凝土的干燥收缩变形差异不大,相比而言,采用低热硅酸盐水泥配制的大坝混凝土的干燥收缩变形略低于中热硅酸盐水泥配制的大坝混凝土。

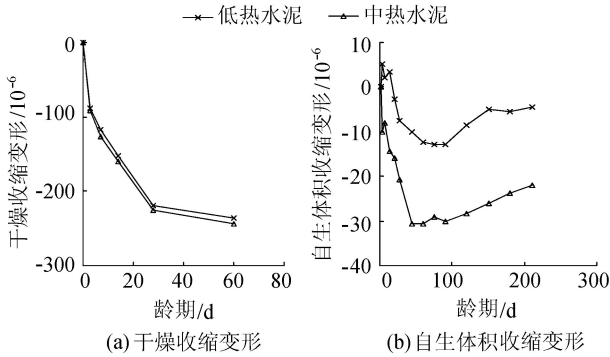


图 3 不同品种水泥大坝混凝土收缩变形

混凝土的自生体积收缩变形主要是水泥水化过程中水泥晶体成分的体积变化和水化胶状生成物的体积变化,不同品种水泥对大坝混凝土自生体积收缩变形影响见图 3(b)。由图 3(b)可以看出:采用低热硅酸盐水泥和中热硅酸盐水泥配制的大坝混凝土的自生体积变形均为收缩变形,在相同条件下,采用低热硅酸盐水泥配制的大坝混凝土自生体积收缩变形要小于采用中热硅酸盐水泥配制的大坝混凝土。

2.3 对大坝混凝土碱骨料反应膨胀变形的影响

防止混凝土碱骨料反应是当今混凝土工程面临

的重要课题之一。水利水电工程较长的使用寿命要求和所处的潮湿环境为碱骨料反应提供了充分的时间和环境条件。使用非活性骨料对防止水工混凝土碱骨料反应而言是最安全可靠措施,但由于活性骨料分布广泛,以及受工程造价的影响,水工大坝混凝土有时不得不采用具有一定潜在碱活性的骨料。

不同品种水泥对大坝混凝土碱骨料反应膨胀变形的影响见图4。与中热硅酸盐水泥相比,采用低热硅酸盐水泥其14 d的砂浆碱骨料反应膨胀率减少了74.1%(见图4(a)),1 a的混凝土碱骨料反应膨胀率减少了57.1%(见图4(b)),可见采用低热硅酸盐水泥有利于减少大坝混凝土碱骨料反应的膨胀变形。

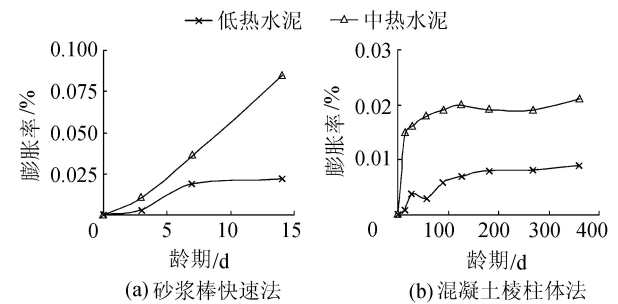


图4 水泥品种对大坝混凝土碱骨料反应膨胀变形的影响

2.4 机理分析

水泥水化理论研究表明,Ca(OH)₂是水泥水化产物中必然存在的不良组分^[8]。一方面浆体需要Ca(OH)₂维持一定的碱度来保持C-S-H凝胶的稳定性,同时Ca(OH)₂又是硅质及硅铝质掺和材料的碱性激发源;另一方面,浆体中的Ca(OH)₂具有较高的二次反应能力和一定的溶解度,在不利的环境中易受到物理化学反应的侵蚀,且Ca(OH)₂易在水泥浆体与集料界面区域富集并择优取向,形成结构疏松的界面过渡区,影响水泥混凝土的性能。水泥的水化产物主要为C₃S及C₂S的水化产物,C₃S与C₂S具有相同的水化产物,但后者需水量低,水化过程生成的Ca(OH)₂仅为前者的1/3。此外,C₂S的水化速度慢,有利于生成比较细致的C-S-H凝胶结构。由此可见,低热硅酸盐水泥的水化产物较中热硅酸盐水泥具有更好的结构完整性和耐久性。

在水泥熟料的矿物组成中,C₂S单矿物28 d的水化热只有C₃S的1/3^[9]。与中热硅酸盐水泥相比,低热硅酸盐水泥的C₂S含量较高,C₃S含量较低,因此在相同的条件下,采用低热硅酸盐水泥配制的大坝混凝土的温度变形要小于中热硅酸盐水泥配制的大坝混凝土。

水泥因配料成分以及生产工艺条件的不同,氧化镁可以稳定地存在于水泥熟料的各种矿物成分

中,这部分氧化镁和以玻璃相形式存在的氧化镁在水化过程中不会产生体积膨胀,只有游离态的氧化镁结晶体(即方镁石)才能产生有效的体积膨胀变形。研究表明,煅烧温度是影响方镁石结晶尺寸最重要的因素^[10]。煅烧温度越低,形成的方镁石晶体尺寸越小,晶格畸变越大,活性越高。与中热硅酸盐水泥相比,低热硅酸盐水泥的煅烧温度较中热硅酸盐水泥低(低100~150℃),因此低热硅酸盐水泥中生成的方镁石活性较高,可以部分补偿混凝土的收缩变形。

混凝土碱骨料反应膨胀的发生和发展可分为两个阶段:第一阶段,包含于孔溶液中的碱迁移至活性骨料表面的物理过程和碱与活性组分反应生成凝胶的化学过程。在这个过程中,体系中的碱含量和水泥水化生成的Ca(OH)₂在骨料碱硅反应膨胀中起促进作用。第二阶段为碱硅凝胶的吸水肿胀。Ca(OH)₂对碱硅反应膨胀的促进作用机理可归结为^[11]:Ca(OH)₂可以维持水泥水化产物的高碱度,推动Na⁺、K⁺、OH⁻与活性集料反应;可以起缓冲液作用,维持水泥石液相的高pH;可与活性SiO₂生成不溶物进一步阻止SiO₂溶出。与中热硅酸盐水泥相比,低热硅酸盐水泥可以减少水泥浆体中的Ca(OH)₂含量,从而减少混凝土的碱硅反应膨胀变形。

3 结 语

如何有效降低混凝土水化热温升、提高大坝混凝土的体积稳定性、增强大坝混凝土的温控防裂能力是水工大坝混凝土施工亟待解决的问题之一。由于建设速度的加快,建设者往往注重于混凝土的早期强度,在水工大坝混凝土中选用C₃S含量较高的水泥。但采用C₃S含量较高的水泥不仅能源消耗大,环境污染比较严重,而且会导致水泥水化时放热量加大,使混凝土产生温度变形和收缩变形的机会变大。结合西南某水电工程实际开展的试验研究表明:与中热硅酸盐水泥相比,采用低热硅酸盐水泥可以有效地减少大坝混凝土的温度变形、收缩变形和碱活性膨胀变形,从而提高大坝混凝土的体积稳定性。

参考文献:

[1] 李文伟,理查德 W 伯罗斯. 混凝土开裂观察与思考[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013:384-392.
[2] 李华,吴笑梅,樊粤明. 低热水泥的研究现状及展望[J]. 广东建材,2006(5):24-26. (LI Hua, WU Xiaomei, FAN Yuemin. Research status and prospects low heat portland cement[J]. Guangdong Building Materials, 2006

- (5):24-26. (in Chinese))
- [3] 李金玉,彭小平,曹建国,等.高贝利特水泥低热高抗裂大坝混凝土性能的研究[J].硅酸盐学报,2004(3):364-371. (LI Jinyu,PENG Xiaoping,CAO Jianguo,et al. Research of high belite cemeng dam concrete with low heat and high crack resistance[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2004(3):364-371. (in Chinese))
- [4] 王可良,李文训,隋同波,等.高贝利特水泥对大体积混凝土温控的影响[J].混凝土,2011(8):128-130. (WANG Kelian,LI Wenxun,SUI Tongbo,et al. High belite cement affecting on temperature controlling of large volume concrete[J]. Concrete,2011(8):128-130. (in Chinese))
- [5] 吕鹏飞,吴勇.高贝利特水泥(HBC)性能试验研究与应用[J].人民长江,2010(9):67-70. (LYU Pengfei,WU Yong. Performance test and analysis of high belite cement (HBC) and application[J]. Yangtze River,2010(9):67-70. (in Chinese))
- [6] MINDESS S, YOUNG J F, DARWIN D. Concrete [M]. 2nd. New Jersey:Prentice Hall,2002.
- [7] 李光伟.组合骨料对大坝混凝土体积稳定性的影响[J].水力发电学报,2010(5):98-101. (LI Guangwei. Effects of composite aggregate on the volume stability of dam concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010(5):98-101. (in Chinese))
- [8] 彭小平,李金玉.高贝利特水泥(HBC)的性能分析[J].混凝土与水泥制品,2001(6):14-16. (PENG Xiaoping, LI Jinyu. HBC's performance analysis [J]. China Concrete and Cement Products, 2001(6):14-16. (in Chinese))
- [9] 廉慧珍.水泥标准修订后对混凝土质量的影响[J].建筑技术,2002(1):8-12. (LIAN Huizhen. Influence of cement standard revision on quality of concrete [J]. Architecture Technology,2002(1):8-12. (in Chinese))
- [10] 李洋,王述银,陈霞.MgO膨胀剂的特性及在水工混凝土中的研究进展[J].混凝土,2012(3):84-87. (LI Yang,WANG Shuyin,CHEN Xia. Research advanced in characteristic of MgO-type expansion agent and its application in hydraulic concrete[J]. Concrete,2012(3):84-87. (in Chinese))
- [11] 刘彬,王军,杨文.粉煤灰抑制碱硅酸反应的机理研究评述[J].混凝土世界,2012(3):85-87. (LIU Bin, WANG Jun, YANG Wen. Mechanism of inhibition of alkali-silica reaction fly research review [J]. China Concrete,2012(3):85-87. (in Chinese))
- (收稿日期:2013-11-22 编辑:胡新宇)
- +++++
- (上接第12页)
- [9] 赵剑明,常亚屏,陈宁.龙首二级面板堆石坝三维真非线性地震反应分析和评价[J].岩土力学,2004(增刊2):388-392,396. (ZHAO Jianming, CHANG Yaping, CHEN Ning. 3-D authentic nonlinear dynamic analysis and evaluation of Longshou concrete faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics,2004(Sup2):388-392,396. (in Chinese))
- [10] 汪明元,程展林,林绍忠,等.高面板堆石坝应力变形的三维子模型法研究[J].长江科学院院报,2005,22(5):49-51,69. (WANG Mingyuan, CHENG Zhanlin, LIN Shaozhong,et al. Study on 3D submodel method for stress and deformation analysis for high concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2005,22(5):49-51,69. (in Chinese))
- [11] 武甲庆,杨令强,杨克坤,等.子模型法研究拱坝裂缝的产状[J].中国农村水利水电,2009(9):108-111. (WU Jiaqing,YANG Lingqiang,YANG Kekun,et al. Sub-models used to study strength cracking generation of arch dams[J]. China Rural Water and Hydropower,2009(9):108-111. (in Chinese))
- [12] BAZANT Z P, CEDOLIN L. Blunt crack band propagation infinite element analysis[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE,1979,105(EM2):297-315.
- [13] 沈振中,徐志英.V形河谷中非均匀土石坝振动的简化分析[J].水利学报,2002(3):74-79. (SHEN Zhenzhong,XU Zhiying. Simplified analysis of transverse vibration for inhomogeneous earth-rock dams in triangular canyons[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002(3):74-79. (in Chinese))
- [14] 李远略,李中原.观音岩水坝地震动力分析[J].河南科学,2009,27(10):1301-1304. (LI Yuanlue, LI Zhongyuan. Guanyinyan dynamic analysis on the dam[J]. Henan Science,2009,27(10):1301-1304. (in Chinese))
- [15] DESAI C S, ZAMAN M M, LIGHTNER J G, et al. Thin-layer element for interfaces and joints [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1984,8:19-43.
- [16] 殷宗泽,朱泓,许国华.土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J].岩土工程学报.1994,16(3):14-22 (YIN Zongze, ZHU Hong, XU Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3):14-22. (in Chinese))
- (收稿日期:2013-09-05 编辑:刘晓艳)