

双膨胀水泥混凝土自生体积变形的试验研究

李承木¹ 陈学茂¹ 李晓勇² 袁天国¹

(1. 贵州中水建设的项目管理有限公司, 贵州 贵阳 550002;
2. 国家电力公司成都勘测设计研究院科研所, 四川 成都 610072)

摘要 通过改变低热微膨胀水泥中 MgO 的掺量和掺入方式、改变水泥组成、调整膨胀源组分等方法制备了不同膨胀性质的双膨胀水泥, 对低热微膨胀水泥和这几种双膨胀水泥在不同试验温度、不同养护制度下的混凝土自生体积变形进行全面试验研究, 阐明了温度、湿度变化及水泥质量组成对混凝土自生体积变形的影响。试验结果表明: 在低热微膨胀水泥中掺入 MgO 能减少其回缩, 增大膨胀量, 稳定膨胀变形; G13 型水泥膨胀量最大, 优化复合型水泥组分掺 MgO 可能获得理想的膨胀过程曲线。

关键词 低热微膨胀水泥; 双膨胀水泥; 水泥混凝土; 自生体积变形; 膨胀量

中图分类号 : TU528.55 ; TU528.45 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-764X(2007)03-0001-04

Experimental study on autogenous volume deformation of double-swelling cement concrete // LI Cheng-mu¹, CHEN Xue-mao¹, LI Xiao-yong², YUAN Tian-guo¹ (1. Guizhou-Zhongshui Construction Project Management Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. Scientific Research Department, Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute, NEPC, Chengdu 610072, China)

Abstract : By changing the amount of MgO mixed into the low-heat micro-expansive cement, the mixing mode, the composition of cement, and the components of expansive sources, several kinds of double-swelling cement with different swelling properties were produced. An experimental study was performed on autogenous volume deformation of the low-heat micro-expansive cement and these kinds of double-swelling cement at different temperatures and curing conditions, and the influences of variations of temperature and humidity and the composition of cement on the autogenous volume deformation of the concretes were expounded. Test results show that the mixing of MgO into the low-heat micro-expansive cement can effectively decrease the back-shrinkage, increase the volume expansion and stabilize the expansion-induced deformation, and that the expansion of cement G13 is the greatest. As a result, the optimization of the components of cement with MgO mixed is helpful to obtain satisfactory expansion deformation curve.

Key words : low-heat micro-expansive cement; double-swelling cement; cement concrete; autogenous volume deformation; volume expansion

双膨胀水泥集中了低热微膨胀水泥较大的早期膨胀和高镁水泥(或外掺 MgO 水泥)的延迟膨胀变形特性, 满足水工混凝土结构物较大膨胀量的需要。双膨胀水泥的最大优点是弥补了低热微膨胀水泥膨胀变形不稳定(回缩)的缺陷, 能够促进增大膨胀变形, 又能使变形保持长期稳定, 而且后期变形还稍有增大的趋势。这类既具低热^[1]又具有较大膨胀变形的双膨胀水泥已在四川铜街子、贵州普定及东风等水电站工程导流洞和导流底孔封堵以及厂坝连接中成功应用^[2], 并取得了显著的技术经济效益^[3]。实践证明, 这种水泥是应用于填塘堵洞和导流洞封堵工程的最佳水泥, 可推广应用。大量研究和工程实

践说明, 为了达到温控设计要求的膨胀量, 研究以 MgO 为主的复合型 MgO 膨胀材料, 是拓展和完善 MgO 混凝土筑坝技术的关键问题, 值得科技工作者做进一步的深入研究。本文着重对双膨胀水泥和低热微膨胀水泥等几种水泥制作的混凝土自生体积变形性能、规律、膨胀过程, 以及温度的影响规律进行研究。

1 主要试验条件和方法

1.1 混凝土原材料

a. 水泥 ①陕西略阳水泥厂生产的 425 号低热微膨胀水泥(简称低热水泥)Ⅱ型外掺 4.5% 的 MgO

(I-A) ;②陕西略阳水泥厂直接烧成的高镁低热水泥(Ⅲ-3和Ⅲ-4型);③厂家采用共混法外掺入一定比例的MgO的低热水泥(G13型);④低热G13熟料与掺4.5%海城镁砂共同粉磨的膨胀水泥(I-G13);⑤低热I型水泥占70%、四川峨眉525号中热水泥占30%的复合水泥外掺4.5%的MgO(I-B);⑥低热与中热水泥各占50%的复合水泥外掺4.5%的MgO(I-C)。

b. 粗细骨料 :铜街子工程葫芦坝料场的河沙和卵石。

c. MgO 辽镁公司海城镁矿回转窑生产的粉状MgO180目。

d. 外加剂 :吉林省开山屯生产的木钙 ,掺量0.25%。

1.2 混凝土配合比

本文试验研究所用混凝土配合比见表1。

1.3 试验温度和方法

a. 试验温度为20℃、30℃和40℃,其中20℃又分为绝湿和灌水养护(配比Ⅲ-5)两种工况。

b. 试验方法和结果处理均按照SD105—82《水工混凝土试验规程》进行。

2 常温养护条件下双膨胀水泥混凝土的自生体积变形

在常温条件下(20℃),几种双膨胀水泥混凝土的自生体积变形试验结果见表2,由表2可以看出:

表1 混凝土配合比

配比编号	设计标号	水泥品种	MgO 掺量		混凝土配合比 (水泥:砂:石)	水灰比	水泥用量/ (kg·m ⁻³)	砂率/ %	陷度/ cm	石子级配
			质量分数/%	掺入方式						
I-1	C15	G13 型	4.50	厂掺	1:3.005:6.380	0.70	221	32	6~8	2
I-2	C15	G13 型	4.00	厂掺	1:3.005:6.380	0.70	221	32	6~8	2
II-3	C20	III-3 型	12.16	内含	1:2.276:8.248	0.50	210	22	4~6	3
II-4	C20	III-4 型	11.63	内含	1:2.276:8.248	0.50	210	41	4~6	3
III-5	C ₉₀ ²⁵	I-A 型	4.50	外掺	1:2.858:4.112	0.54	280	41	9~13	2
III-6	C ₉₀ ²⁵	I-G13 型	4.50	共磨	1:2.831:4.076	0.54	290	41	9~14	2
IV-7	C ₉₀ ²⁵	低热 I 型	0		1:3.011:4.343	0.54	280	41	9~13	2
IV-8	C ₉₀ ²⁵	I-A 型	4.50	外掺	1:2.858:4.112	0.54	280	41	9~13	2
V-9	C ₉₀ ²⁵	I-B 型	4.50	外掺	1:2.858:4.112	0.54	280	41	9~13	2
V-10	C ₉₀ ²⁵	I-C 型	4.50	外掺	1:2.858:4.112	0.54	280	41	9~13	2

注 ①配比编号为IV-7~V-10的水泥为时隔1年后的第2批低热膨胀水泥;②第2批水泥的回缩率较大,故常温下的自生体积变形较小。

表2 20℃时不同龄期的双膨胀水泥混凝土的自生体积变形

配比 编号	3 d	7 d	14 d	28 d	40 d	90 d	180 d	365 d	540 d	730 d	910 d	1000 d
I-1	246.1	260.0	267.0	269.3	266.4	262.5	256.7	256.5	249.4	250.0	249.6	250.2
I-2	232.2	248.0	253.5	254.0	250.0	245.6	240.0	238.6	230.5	232.8	230.0	229.8
II-3	211.3	309.1	274.1	247.5	232.6	206.4	187.5	180.0	181.3	196.0	210.5	215.0
II-4	186.2	313.9	279.6	254.1	241.5	215.0	200.0	192.5	195.0	204.5	220.0	226.3
III-5	241.1	270.3	255.5	241.6	235.0	224.2	213.8	217.5	210.0	225.8	226.4	242.5
III-6	211.3	254.3	240.0	223.8	217.5	198.7	183.8	173.2	171.5	163.7		
IV-7	147.5	128.0	122.6	108.3	97.5	67.4	52.5	41.0	40.0	36.3	38.5	38.8

于共磨使 MgO 分布均匀所致。研究表明 ,MgO 在水泥中分布越均匀 ,它的压蒸值和体积变形越小^[2] ,并且镁砂比水泥熟料更易粉磨细 ,MgO 的粒度越细 ,其膨胀变形量就越小。另外也与低热水泥每批的质量组成、养护制度以及试验条件等因素有关。由此可以得出结论 :共同混合的 MgO 水泥混凝土的自生体积变形稍大于共同粉磨的。

d. 大量研究证明 ,钙矾石含有大量结晶水 ,这说明生成钙矾石需从外部吸收很多水分^[4]。因此 ,凡是以钙矾石为主要膨胀源的膨胀水泥 ,其膨胀量受湿度的影响很大。如Ⅲ-5 组试验在成形密封后 ,将试件置于 $\varnothing 25\text{ cm} \times 65\text{ cm}$ 的铁皮桶内 ,然后装满水养护 ,同时在试件上端顶盖中心出线口处经常灌水长期养护 ,水分从试件上端缓慢地向下部渗透 ,直至试件成全饱和状态。试验观测结果为 :第 8 d 龄期的最大自生体积变形为 271.4×10^{-6} ,最小值为 210.0×10^{-6} ,平均长期稳定在 234.5×10^{-6} ,半年后的自生体积变形又有所增长 ,其变形过程线呈上升趋势。表 2 中其余各组试验均是在恒温绝湿条件下进行 ,其值(除Ⅰ-1 和Ⅰ-2 组试验以外)在龄期 90 d 后都比Ⅲ-5 组的自生体积变形小 ,原因主要是养护制度不同所致 ,灌养饱水促进了Ⅲ-5 组混凝土后期的自生体积变形比绝湿条件下的Ⅱ和Ⅲ组的都大(见表 2)。对比试验说明 ,在工程中凡是以钙矾石为主要膨胀源的硅酸盐水泥混凝土 ,必须特别注意加强饱水养护 ,以使其充分水化 ,才能获得较大的膨胀量。将这类双膨胀水泥用于大坝混凝土浇筑时 ,最好应用于强约束区或非水位变化区 ,才能达到较理想的预期效果。

3 不同试验温度下混凝土的自生体积变形

在 3 种试验温度(20℃、30℃、40℃)条件下 ,采用低热微膨胀水泥 1 型 ,分不掺 MgO(Ⅳ-7)和外掺 MgO(Ⅳ-8)两种情况进行混凝土自生体积变形试验 ,结果列于表 3 中。从表 3 可以看出 :

a. 总体而言 ,低热微膨胀水泥外掺 MgO 和未掺 MgO 混凝土后期的自生体积变形都随试验养护温度(以 20℃为基准)的升高而增大 ,回缩量明显小。但

在龄期 90 d(Ⅳ-7)和 40 d(Ⅳ-8)之前 ,20℃时的自生体积变形大于 40℃时的 ,其大小顺序是 :30℃时的自生体积变形最大 ,20℃时的变形次之 ,40℃时的变形最小。其后两配比的变化规律相同 ,都是 30℃时的自生体积变形最大 ,40℃次之 ,20℃最小。外掺 MgO 水泥混凝土(Ⅳ-8)在龄期 90 d 后 ,在 3 种温度下的自生体积变形都有逐渐增大的趋势。如 30℃条件下 ,90 d 龄期的最大自生体积变形为 192.5×10^{-6} ,龄期 1 000 d 时则为 239.8×10^{-6} ;在 40℃条件下 ,龄期 1 000 d 的自生体积变形反而比 3 d 龄期(最大值)还大 7%。这说明外掺 MgO 于低热微膨胀水泥中 ,对减少回缩、稳定膨胀变形是有利的。

b. 在各相同试验温度条件下 ,掺 MgO 水泥混凝土的自生体积变形均比未掺 MgO 的大 ,前者的自生体积变形比后者的要大 1~3 倍。如龄期 365 d 和 1 000 d ,温度相应为 20℃、30℃、40℃ ,外掺 MgO 混凝土的自生体积变形比未掺 MgO 的分别大 2.2 倍、1.2 倍、1.5 倍和 3.2 倍、1.5 倍、1.8 倍。

c. 以钙矾石为膨胀源的硅酸盐水泥有两个主要组分 :一是强度组分 ;二是膨胀组分。研究表明 ,养护制度对这类膨胀水泥的影响较大。由于温度不同 ,膨胀和强度的增进速度就不同 ,导致膨胀量的差别很大。养护温度越高 ,时间越长 ,消耗掉的膨胀组分就越多 ,甚至可能全被耗尽^[4]。当养护温度提高时 ,强度组分的水化作用会大大加速 ,使强度迅速增长。与此同时 ,钙矾石的形成速度也大大加快 ,但由于早期混凝土尚处于塑性状态 ,膨胀只能填充硬化水泥浆体孔隙而起密实作用 ,再加之徐变的影响 ,因而不能再产生自压应力 ,只能起到增强作用。另外钙矾石在高温下的稳定性很差 ,还会脱水分解 ,并不以针状晶体的形态存在 ,多为单硫型的连续固溶体 ,不起膨胀作用。这就从理论上阐述了低热微膨胀水泥的养护温度越高 ,其膨胀变形却反而小的原因。笔者的试验结果也揭示了这一规律 ,即 40℃温度条件下混凝土的自生体积变形均小于 30℃时的自生体积变形。

d. 从自生体积变形在高温条件下的试验结果和低热膨胀水泥的压蒸试验成果来看 ,低热膨胀水

表 3 不同温度不同龄期的混凝土自生体积变形 10⁻⁶

配比 编号	温度/ ℃	3 d	7 d	14 d	28 d	40 d	90 d	180 d	365 d	540 d	730 d	910 d	1 000 d
Ⅳ-7	20	147.5	128.0	122.6	108.3	97.5	67.4	52.5	41.0	40.0	36.3	38.5	38.8
Ⅳ-7	30	153.8	150.1	146.5	142.0	136.3	108.7	95.5	98.0	95.8	98.3	97.6	97.5
Ⅳ-7	40	125.0	117.5	109.7	98.4	90.8	80.0	72.8	70.5	72.4	73.5	72.6	72.5
Ⅳ-8	20	173.8	211.3	186.5	168.0	157.5	138.3	125.3	130.0	131.3	137.5	156.3	162.5
Ⅳ-8	30	250.9	240.0	219.6	209.6	202.5	192.5	206.3	210.0	212.5	227.6	235.0	239.8
Ⅳ-8	40	188.9	166.4	160.9	160.0	163.8	165.5	166.3	172.5	181.5	192.0	197.5	202.5

表 4 不同温度不同龄期复合水泥混凝土的自生体积变形

10⁻⁶

配比 编号	温度/ ℃	3 d	7 d	14 d	28 d	40 d	90 d	180 d	365 d	540 d	730 d	910 d	1 000 d
V-9	20	77.5	76.1	57.5	48.0	36.7	21.3	14.0	24.0	36.1	51.0	61.0	62.1
V-9	30	43.0	32.2	28.6	27.0	25.4	31.5	52.8	67.3	84.1	95.7	112.5	117.0
V-9	40	22.1	21.1	20.5	21.3	21.5	27.5	43.2	62.4	82.0	93.1	108.0	113.5
V-10	20	48.2	40.7	39.2	34.0	28.7	24.5	23.5	30.2	29.0	34.6	35.3	36.0
V-10	30	39.9	39.4	36.0	35.1	35.8	49.0	70.4	86.3	100.0	111.1	117.0	121.9
V-10	40	11.3	12.1	14.0	24.5	27.3	43.4	66.2	77.0	90.5	105.0	112.5	118.2

泥的膨胀源(钙矾石) 实属常温环境介质中的膨胀物质 , 高温条件对其膨胀不起促进增大的作用。低热微膨胀水泥或双膨胀水泥的适宜养护温度是在 30℃ 左右 , 此时的膨胀可能最大。

4 复合水泥外掺 MgO 混凝土的自生体积变形

采用 I-B 型和 I-C 型两种复合水泥(配比编号分别为 V-9 和 V-10) 在 3 种试验温度(20℃ , 30℃ , 40℃) 条件下进行了自生体积变形试验。将其结果列入表 4 中 , 从表 4 可以看出 :

a. 低热微膨胀水泥占 70% 的(I-B) 型复合水泥 , 在早期(60 d 前) 呈现出变形较大的特点。而低热膨胀水泥占 50% 的 I-C 型复合水泥其变形明显较小。如 3 d 龄期 , 养护温度依次为 20℃ , 30℃ , 40℃ , 两种水泥混凝土相应的自生体积变形分别为 77.5×10^{-6} , 43.0×10^{-6} , 22.1×10^{-6} 和 48.2×10^{-6} , 39.9×10^{-6} , 11.3×10^{-6} 。两者相比 , 早期 I-B 型复合水泥的自生体积变体比 I-C 型复合水泥的平均大 55% , 而且在常温条件下 I-B 型复合水泥的前后龄期的自生体积变形都比 I-C 型复合水泥的大。

b. 龄期 90 d 前混凝土自生体积变形的总体规律是 20℃ 时变形最大 , 30℃ 时次之 , 40℃ 时最小 ; 其后是 30℃ 时的变形最大 , 40℃ 时次之 , 20℃ 时最小。在高温条件下 , 40 d 以后 I-C 型复合水泥混凝土的自生体积变形比 I-B 型复合水泥混凝土的自生体积变形大。该组 I-C 型复合水泥混凝土的变形曲线是前期膨胀小 , 后期膨胀大 , 而且随着龄期的增加逐渐增长 , 与理想曲线有些类似 , 可认为是较理想的膨胀变形过程线。

c. 通过改变低热微膨胀水泥成分的试验研究 , 不仅能获得不同膨胀量的自生体积变形 , 而且能改变其变形曲线的规律和形状 , 使之成为温控设计希望的理想的膨胀变形过程线。这为研究和生产膨胀混凝土或配制双膨胀水泥以及外掺复合膨胀源提供了借鉴 , 与文献 [2] 中的结论一致。

5 结 语

a. 双膨胀水泥集中了低热膨胀水泥和 MgO 水

泥的基本特性。这种水泥的自生体积膨胀变形量大 , 通常可达到 $200 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$, 膨胀变形长期稳定 , 水泥水化明显延迟 , 变形过程线呈逐渐增长趋势 , 加强饱水养护其性能会更理想。通过改变低热膨胀水泥中 MgO 的掺量和方式、改变低热水泥的组成、调整膨胀源组分等方法均可制得不同膨胀性质的双膨胀水泥 , 可满足水电工程建设中温控对不同膨胀量的要求。

b. 外掺 MgO 于低热膨胀水泥中 , 能促进增大混凝土的自生体积变形 , 其膨胀量比未掺 MgO 时大 1~3 倍。掺入 MgO 对减少低热膨胀水泥的回缩量 , 稳定膨胀变形十分有利。增大湿度、加强饱水养护是提高混凝土自生体积变形的有效措施。钙矾石属常温环境介质中的膨胀物质 , 高温对其膨胀不起促进增大的作用 , 使这类膨胀水泥产生较大变形的适宜温度可能是 30℃ 左右。不同低热水泥的质量组成对膨胀量影响较大 , 其中 G13 型水泥的组成质量好 , 膨胀量最大 ; 优化复合型水泥组分掺 MgO , 有可能获得理想的膨胀变形过程线。

参考文献 :

[1] 吴来峰 , 储传英 , 张锡祥 , 等 . 建坝新途径 [M] . 北京 : 水利电力出版社 , 1987 .
[2] 陈其武 , 李晓新 . 氧化镁混凝土筑坝技术文集 [C] // 北京 : 水利部水利水电规划设计总院 , 1994 .
[3] 李承木 , 袁明道 . 外掺 MgO 微膨胀混凝土筑坝技术应用综述 [J] . 水利水电科技进展 , 2003 , 23 (6) : 57-63 .
[4] 薛君 , 吴中伟 . 膨胀和自应力水泥及其应用 [M] . 北京 : 中国建筑工业出版社 , 1985 : 494-514 .

(收稿日期 2006-07-07 编辑 骆超)

