

高掺粉煤灰对氧化镁混凝土自生体积变形的影响

李承木

(国家电力公司成都勘测设计研究院科学研究所, 四川 成都 610072)

摘要: 主要研究掺粉煤灰对氧化镁混凝土体积变形的影响, 探索高掺粉煤灰同时掺氧化镁混凝土在不同试验温度条件下, 自生体积变形的特性和规律, 阐明了掺粉煤灰混合材抑制方镁石膨胀的机理。

关键词: 粉煤灰; 氧化镁; 自生体积变形; 方镁石; 水镁石

中图分类号: TV 41

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2000)增-0072-04

1 前言

混凝土的自生体积变形是施工温度应力计算或温度徐变应力计算及混凝土坝温控设计不可缺少的重要资料, 也是原型观测资料整理分析的必须资料, 它对应力计算结果、温控措施、工程质量及技术经济效益的影响是很大的。

氧化镁(MgO)混凝土筑坝技术已在我国近20座大中型水利水电工程中成功应用, 并取得了显著的技术和社会效益。但是对在系统开展高掺粉煤灰同时考虑不同温度对MgO混凝土自生体积变形的影响规律的研究却很少。我们根据铜头和沙牌工程的实际需要, 结合两工程所用的原材料, 先后开展了高掺粉煤灰对MgO混凝土的力学及体积变形规律的影响的研究, 并获得比较理想的、其变形规律完全一致的研究成果。

本试验主要研究不同粉煤灰掺量, 不同养护温度, 不同MgO掺量的混凝土的自生体积变形, 探索掺粉煤灰及温度对MgO膨胀混凝土的自生体积变形规律的影响, 并根据试验结果, 预计不同粉煤灰和MgO掺量, 在各种温度条件下可能达到的自生体积膨胀变形量, 以便类似电站在大坝温控设计时参考应用。

2 试验概况

试验采用夹江425号中热水泥, 掺成都热电厂粉煤灰分

别为: 0、20%、25%、30%、40%; 外掺MgO分别为: 0、3%、4%、5%、6%; 试验温度为: 20、30、40。粗细骨料均为铜头电站的天然河沙和卵石; 试验配比参数: 水胶比0.65, 沙率23%, 胶材用量162 kg/m³, 混凝土配合比详见另文。试验方法均按照原水电部《水工混凝土试验规程》(SD105-82)规定进行。

3 掺粉煤灰对MgO混凝土自生体积变形的影响

根据上一节所叙述的试验条件, 现将各种组合情况的混凝土自生体积变形的试验研究成果汇总于表1中, 并将其变形规律分别论述于后。

3.1 在不同试验养护温度条件下混凝土的自生体积变形

在试验养护温度为20、30和40条件下, 外掺MgO为3%、4%、5%和6%, 19组掺粉煤灰混凝土的自生体积变形试验结果见表1, 并将其部分成果绘于图1中, 从图1和表1中可以看出:

(1) 试验研究结果表明, 试验养护温度越高, 粉煤灰混凝土的自生体积膨胀变形越大。其变形规律是40养护温度条件下的膨胀变形量最大, 30的次之, 20的最小。如360d龄期, 掺MgO 6%, 温度为40、30和20所对应的自生体积变形分别为 195.0×10^{-6} 、 169.8×10^{-6} 和 108.0×10^{-6} 。这表明温度对掺粉煤灰混凝土自生体积变形规律的影响与

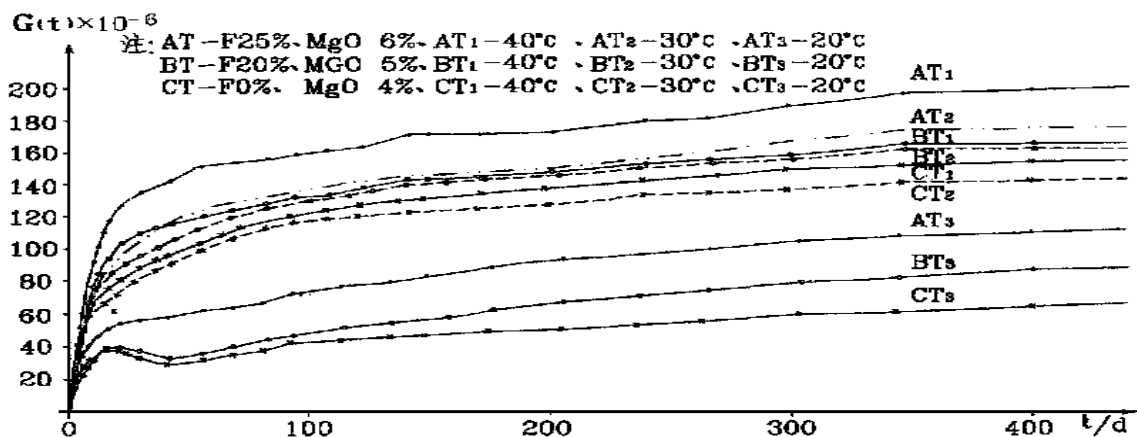


图1 不同养护温度下的混凝土的自生体积变形曲线图

表1 外掺氧化镁混凝土的自生体积变形[G(t) × 10⁻⁶]表

观测 龄期 /d	粉煤灰掺量(F) /%																																																																																																																																																																																																																																				
	25					0					20					25					30					40																																																																																																																																																																																																											
	MgO 掺量 /%																																																																																																																																																																																																																																				
	0				4				5				3				5				6				5				5																																																																																																																																																																																																								
试验温度 /																																																																																																																																																																																																																																					
20		20		30		40		20		30		40		20		40		20		30		40		20		30		40		20		40																																																																																																																																																																																																					
3	2.8	17.1	22.3	39.6	15.5	25.5	37.4	20.6	22.3	20.8	20.5	39.1	24.9	35.7	41.2	24.0	35.0	21.7	24.2	2.8	26.9	46.6	60.8	27.4	46.7	60.0	27.5	34.2	30.3	34.1	62.3	41.1	58.0	75.0	36.2	62.6	32.3	51.1	1.8	36.5	63.5	74.0	34.5	73.0	91.0	31.5	47.6	40.7	44.5	86.0	48.3	83.1	110.0	44.5	90.5	41.4	72.0	-10.1	34.5	81.2	87.4	35.4	93.1	109.2	33.6	56.1	42.7	54.5	104.3	55.8	103.6	134.0	50.5	100.7	47.4	79.7	-22.1	34.1	102.0	105.0	36.5	116.2	121.8	36.4	63.0	46.8	66.2	116.0	62.6	126.0	151.6	58.6	104.1	55.6	86.1	-24.6	41.8	111.6	116.3	43.1	129.0	131.0	38.1	65.2	52.6	73.0	120.2	70.1	133.1	156.7	65.7	105.4	61.4	92.0	-25.7	48.1	123.4	135.0	61.6	144.0	146.5	41.2	69.0	70.0	82.2	130.0	89.1	146.1	171.0	78.5	116.2	73.0	100.0	-26.1	53.1	130.2	142.3	70.5	152.5	156.0	42.5	78.0	78.4	93.6	135.0	96.8	155.8	179.4	84.9	123.4	79.8	105.4	-26.6	60.2	138.0	150.5	80.3	158.4	161.9	43.8	85.1	87.5	101.1	145.0	108.0	169.8	195.0	95.6	131.1	90.3	116.1	-26.6	70.1	145.0	157.4	93.5	163.5	165.6	46.4	89.1	98.5	108.6	151.0	124.2	174.6	200.8	104.0	135.6	96.6	123.7	-30.0	75.0	145.8	158.1	96.8	164.2	166.3	49.2	90.0	103.6	110.0	152.1	127.5	175.2	201.5	108.2	136.1	100.6	124.1	1000	~	81.6	~	~	104.0	~	~	53.4	~	110.5	~	~	134.0	~	~	111.4	~	103.8	~

普通混凝土掺MgO的膨胀变形规律是一致的。

(2) 掺粉煤灰混凝土的自生体积膨胀变形随着MgO掺量的增加和观测龄期的延长而增大。如温度为40℃，掺粉煤灰25%，观测龄期为360d时，MgO掺量为3%、5%和6%，相应的自生体积变形分别为85.1 × 10⁻⁶、145.0 × 10⁻⁶和195.0 × 10⁻⁶，其膨胀变形规律与普通混凝土相同。

(3) 大量试验证明，温度升高，水泥水化的化学反应能力增强，膨胀变形速度增大，曲线斜率增加，粉煤灰混凝土的自生体积膨胀变形增大。从试验研究结果看，温度每增加10℃，40℃的比30℃的，30℃的比20℃、40℃的比20℃的自生体积膨胀变形分别平均增长33%、81%、100%，其变化并随粉煤灰的掺量而异。

(4) 试验表明，温度对掺粉煤灰同时掺MgO混凝土的自生体积变形的影响有明显减弱的趋势(与不掺粉煤灰的比较)。从图1可见，养护温度为40℃(AT)和30℃的自生体积变形过程线比较接近，前者的变形比后者的平均只大20%左右。又如图1中编号BT的40℃与30℃的自生体积变形过程线更接近，两者的变形相差很少。同时掺粉煤灰为40%的40℃与20℃的两变形过程线也很靠近，两者的变形平均只相

差35%左右。这些情况说明，在30℃和40℃条件下的自生体积变形相差不大，高温对掺粉煤灰混凝土的自生体积膨胀变形的影响减小。

3.2 不同粉煤灰掺量对混凝土自生体积变形的影响

在试验温度为常温(20℃)和高温(40℃)两种情况下，粉煤灰掺量20%、25%、30%、40%，外掺MgO为5%的膨胀混凝土的自生体积变形见表1，并将其变形分别绘入图2中，从图2和表1中可以看出如下规律：

(1) 试验结果表明，夹江水泥只掺粉煤灰时，混凝土的自生体积变形为收缩型，最大收缩变形量为30.0 × 10⁻⁶。当水泥中掺入MgO时就改变了变形性质，则产生了膨胀型的自生体积变形。试验还表明，在掺粉煤灰的同时掺MgO混凝土自生体积变形，无论两者掺量多少，自生体积变形均为膨胀型。从图2可见，早龄期28d前的膨胀速度快，变形量较大，即在常温和高温两个温度下，其膨胀变形量平均分别可达稳定值的50%和70%。

(2) 从图2可看出，在常温条件下，当MgO掺量为5%时，混凝土的自生体积变形随着粉煤灰掺量的减少而减小。如果以掺20%粉煤灰的自生体积变形为基准值，则粉煤灰掺

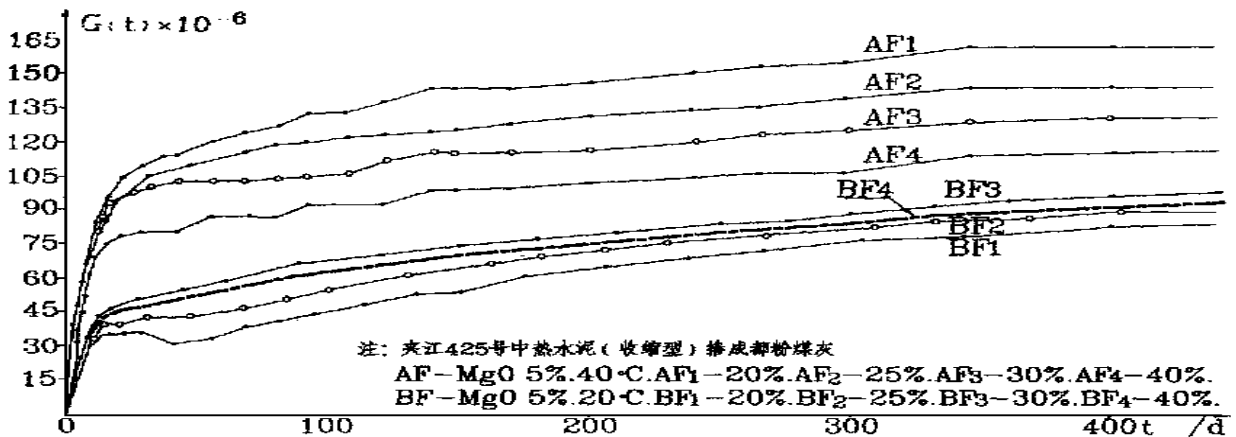


图2 不同粉煤灰掺量混凝土的自生体积变形曲线图

量为 40%、30%、25% 的混凝土的自生体积变形平均分别比掺 20% 的大 31%、36%、19%。另外,图 2 中龄期为 42 d 时,掺 20% 粉煤灰的膨胀变形过程线出现了一个凹谷点,其他掺量的变形过程线均无此现象。这表明该点的自生体积变形膨胀量未能抵消其下降减少量,还达不到光滑曲线水平,所以变形过程线出现了凹谷现象。

产生上述结果的原因与粉煤灰的质量有着密切关系。微观分析结果表明,成都电厂收尘飞灰属优质粉煤灰,它的玻璃体球形珠含量高,表面光滑,颗粒细,烧失量小,其 SiO_2 和 Al_2O_3 以及 Fe_2O_3 总含量达到 87.1%~90.6%,70 蒸养强度比可达到 180%,活性高,火山灰反应能力强。

粉煤灰在水泥中除火山灰反应外,还具有微粉效应,其微细粉可进入水泥颗粒构成的网状絮凝结构中,使水化物析出的有效空间增大,从而加速水泥及粉煤灰的水化反应。在常温水化物有充分时间扩散及均匀分布于水泥颗粒间的整个空隙中,其水化产物有可能生成较多的钙矾石,使水泥浆体产生体积膨胀,这样的结果会增加混凝土的自生体积变形。在高温下,由于水化物的低溶解度及低扩散性,当升高温度使水化速度加快时,水化物来不及扩散,在水泥颗粒周围就会迅速形成高浓度的水化物膜,阻碍水泥颗粒的继续水化

以及火山灰反应的进行。故使水化物难于生成水化硫铝酸钙,而且钙矾石在高温下还会脱水分解,并不以针状结晶体的钙矾石形态存在,多为单硫型水化硫铝酸钙的连续固溶体不起膨胀作用,其结果会使混凝土的自生体积变形减小。实践证明,这种粉煤灰混凝土,在高温条件下,对膨胀起主导作用的应该是 M_gO 膨胀剂。

(3)从图 2 还可看出,在高温条件下,当 M_gO 掺量为 5% 时,混凝土的自生体积变形随着粉煤灰掺量的增加而减小,仍以掺粉煤灰为 20% 的自生体积变形为基准,则粉煤灰掺量为 25%、30%、40% 的混凝土的自生体积变形分别平均减少 8.0%、13.2%、28.2%。可见高温条件下的自生体积变形规律与掺混合材的水泥压蒸试验及水泥中 M_gO 的膨胀机理的微观研究结果是完全一致的。

3.3 不同温度和不同粉煤灰掺量对混凝土自生体积变形的影响

根据不同粉煤灰掺量 ($F_{0\%}$ 、 $F_{20\%}$ 、 $F_{25\%}$ 、 $F_{30\%}$ 、 $F_{40\%}$),不同试验养护温度 (20、30、40),不同氧化镁掺量 (4%、5%、6%) 和不同观测龄期的混凝土的自生体积变形试验结果进行综合分析比较,可以得出关于温度及粉煤灰对自生体积变形影响的变化规律(见表 2)。

表 2 自生体积变形的相对变形比值表

粉煤灰和 (M_gO) 掺量	3 d		7 d		28 d		90 d		180 d		360 d		平均	
	G30	G40	G30	G40	G30	G40	G30	G40	G30	G40	G30	G40	G30	G40
	G20	G20	G20	G20	G20	G20	G020	G20	G20	G20	G020	G20	G20	G20
$F_0(4\%)$	1.30	2.32	1.73	2.26	2.35	2.53	2.67	2.78	2.57	2.81	2.29	2.50	2.15	2.53
$F_{20}(5\%)$	1.65	2.41	1.70	2.19	2.63	3.08	2.99	3.04	2.34	2.38	1.97	2.02	2.21	2.52
$F_{25}(6\%)$	1.43	1.65	1.41	1.82	1.86	2.40	1.90	2.24	1.64	1.92	1.57	1.81	1.64	1.97
$F_{30}(5\%)$	1.28	1.46	1.41	1.73	1.64	2.07	1.42	1.70	1.29	1.49	1.21	1.37	1.38	1.64
$F_{40}(5\%)$	1.07	1.12	1.35	1.58	1.31	1.54	1.19	1.31	1.12	1.20	1.10	1.17	1.19	1.32

表 2 列出了各自在 20 的自生体积变形,并以此为基准,即 $G30/G20$ 、 $G40/G20$ 的比值,也就是温度每变化 10 的变形相对比值。从表 2 结果可以看出,粉煤灰掺量越大,比值越小,说明高温的变形增长率不大,反映温度对其变形的影响较小。反之粉煤灰掺量越小,比值越大,说明高温的变形增长率较大,反映温度对其变形的影响显著。以早龄期 7 d 的比值 ($G40/G20$) 为例,当粉煤灰的掺量依次增大 F_0 、 F_{20} 、 F_{25} 、 F_{30} 、 F_{40} , 其比值则依次分别减小为: 2.26、2.19、1.82、1.73、1.58。说明在高温条件下的自生体积变形随着粉煤灰掺量的增加而减小,温度对其变形的影响也随粉煤灰掺量的增大而减弱。又以晚龄期 180 d 的变形比值 ($G40/G20$) 为例,也依次减小为: 2.81、2.38、1.92、1.49、1.20。从以上试验数据均说明在高温条件下,粉煤灰掺量增大,自生体积变形减小,在相同温度梯度条件下,温度对其变形的影响也是逐渐减弱的。我们所做的两次试验结果基本相同,其变化规律也是一致的。

4 掺粉煤灰混合材抑制方镁石膨胀机理的探讨

许多研究结果表明,掺有粉煤灰和矿渣的 M_gO 水泥的压蒸膨胀率较未掺的小,混合材掺量越多,水泥的膨胀率越小。当混合材掺量相同时,其中粉煤灰对方镁石膨胀的影响较大。当 M_gO 掺量相同时,硅酸盐水泥的压蒸膨胀率较矿渣

水泥的大,但前者的水泥净浆试件养护在水中的膨胀率反而小于后者。

4.1 粉煤灰水泥净浆试体压蒸膨胀率的变化规律

4.1.1 不同水泥净浆试体的压蒸膨胀率

从有关试验结果可见,各种水泥的压蒸膨胀率随 M_gO 掺量的增加而增大,并随粉煤灰掺量的增加而减小,其值又随水泥品种和粉煤灰的质量而变化。如峨眉水泥未掺粉煤灰压蒸合格的 M_gO 最大掺量为 2.35%,当掺 40% 豆坝粉煤灰之后,压蒸合格的 M_gO 掺量达到 6.85%,比前者的 M_gO 掺量提高了近 2 倍。未掺粉煤灰的试验曲线很陡,表明压蒸膨胀率易出现突变和拐点现象,但掺粉煤灰后,各条压蒸试验曲线就变得平缓得多,这在工程应用中是值得注意的。

4.1.2 掺不同粉煤灰水泥净浆试体的压蒸膨胀率

从有关研究资料可以看出,夹江水泥和白花水泥掺不同粉煤灰的压蒸规律是,压蒸膨胀率随着粉煤灰掺量的增加而迅速下降,这说明粉煤灰掺量的变化对水泥压蒸膨胀率的影响是很敏感的。当粉煤灰掺量在 30% 以内时,压蒸膨胀率随粉煤灰掺量的增加几乎成直线下降,当粉煤灰掺量由 30% 增加至 40% 时,其压蒸膨胀率变化缓慢,曲线平缓。试验表明,粉煤灰掺量越高,水泥压蒸膨胀率衰减愈缓慢。

4.2 掺粉煤灰水泥砂浆试体的变形规律

(1) 峨眉水泥掺豆坝粉煤灰为 20%、30%、40% 时, 水泥砂浆试体的膨胀变形量接近, 变形曲线斜率一致, 过程线几乎相等, 在不同 M_gO 掺量情况下, 其膨胀变形规律完全相同。掺与不掺粉煤灰水泥砂浆试件的膨胀变形曲线斜率是一致的, 但 M_gO 掺量为 6% 时, 未掺粉煤灰的斜率比掺的稍大。

(2) 从有关资料给出的 8 组砂浆试体膨胀变形降低率看, 各组的降低率都在 36.8%~44.7% 之间, 总平均降低率为 40.2%。这表明, 掺粉煤灰对 M_gO 膨胀确有抑制作用, 同时还说明, 粉煤灰掺量的变化对水泥砂浆试体膨胀变形的影响不明显, 其敏感度减弱, 所以变形降低率均在 40% 左右。

4.3 粉煤灰混合材抑制方镁石膨胀机理概述

M_gO 在水泥中的膨胀机理可概括为: M_gO 水泥的膨胀起因在于 M_gO 水化时 M_g(OH)₂ 晶体的生成和生长发育。膨胀量主要取决于生成的 M_g(OH)₂ 晶体存在的位置、晶体的尺寸和形貌。即细小的聚集在 M_gO 颗粒表面附近的 M_g(OH)₂ 晶体能产生较大的膨胀, 粗大的分散在 M_gO 颗粒周围较大区域内的 M_g(OH)₂ 晶体引起的膨胀较小; 碱对膨胀量有影响, 膨胀能来自于 M_g(OH)₂ 晶体的肿胀力和结晶生长压力。在水化早期, 浆体的膨胀主要起因于极细小的 M_g(OH)₂ 晶体的吸水肿胀力, 随着 M_g(OH)₂ 晶体的长大, 晶体的结晶生长压力对浆体的膨胀起主导作用。掺混合材对 M_gO 的水化膨胀具有抑制作用。

通过对水泥净浆试体压蒸膨胀率和砂浆试体膨胀变形的宏观分析说明, 掺粉煤灰混合材对 M_gO 水化膨胀确实产生了抑制作用。这是由于掺粉煤灰后降低了水泥浆体孔隙液的碱度和结构多孔的共同作用所致。微观研究说明 M_gO 水化环境介质的碱度对 M_gO 水化产生的膨胀有促进作用, 氢氧根离子的存在会影响 M_gO 颗粒周围镁离子的分布, 同时又影响到 M_gO 水化生成的氢氧化镁晶体的形貌、尺寸和位置。在高碱度下生成的氢氧化镁晶体细小, 主要呈块状和短柱状, 并聚集在 M_gO 颗粒表面附近较窄的区域内, 这种晶体使硬化水泥浆体产生较大的膨胀。在低碱介质中, 生成的氢氧化镁晶体粗大, 呈针状或长柱状, 并分散在 M_gO 颗粒周围较大的区域内, 有的长入水泥石的孔洞内, 因此产生有效膨胀的晶体少, 故浆体的膨胀量就小。

测试结果表明, 掺粉煤灰水泥浆体的毛细孔和总孔增多, 其颗粒较少水化或水化反应固相体积增加较少, 这就使得水泥浆体的孔隙增加。如 28 d 龄期, 硅酸盐水泥和掺粉煤

灰水泥的碱度 (PH 值) 分别为 13.5 和 12.4, 两者的孔隙率则分别为 28.7% 和 39.7%。

综合上述分析得出, 掺粉煤灰能使水泥浆体孔隙液的碱度降低, 并使水泥石结构的总孔增多, 使得部分氢氧化镁晶体长入孔洞中以及可供氢氧化镁晶体占用的氧化镁水泥颗粒界面区增大, 使浆体膨胀的有效的氢氧化镁量减少。它们的共同作用是导致粉煤灰混合材对氧化镁水泥浆体膨胀产生抑制作用的主要原因。

5 结束语

(1) 在高温条件下, 掺粉煤灰掺 M_gO 混凝土的自生体积膨胀变形随着粉煤灰掺量的增加而减小, 在相同温度间隔情况下, 温度对其膨胀变形的影响也随粉煤灰掺量的增大而减弱。在配比相同条件下, 养护温度越高, 混凝土的自生体积变形越大, 温度影响双掺混凝土的变形规律与普通混凝土单掺 M_gO 的膨胀变形规律是一致的。试验表明, 在常温条件下, 掺粉煤灰掺 M_gO 混凝土的自生体积变形随粉煤灰掺量的减少而减小, 产生这种现象的原因有待研究。试验还表明, 通过优化水泥品种, 可消除早期变形迭加现象, 进而有可能得到温控要求的理想的自生体积膨胀变形过程线, 这对坝体补偿温度应力十分有利。可以认为: 这是实现理想变形过程线的又一新途径。

(2) 通过水泥净浆压蒸膨胀率、砂浆和混凝土试体的变形试验表明, 掺粉煤灰对 M_gO 的膨胀确有抑制作用。粉煤灰掺量的变化对水泥净浆压蒸、砂浆和混凝土试体膨胀变形的影响其敏感度依次减弱。然而, 抑制砂浆膨胀变形的降低率确无明显变化, 当粉煤灰掺量从 20% 增加到 40% 时, 砂浆变形的降低率却始终维持在 40% 左右。

试验表明, 尺寸效应对压蒸膨胀率有影响, 因此, 标准试件的压蒸膨胀率可根据小试件的压蒸膨胀率乘以 0.8~0.85 的换算系数得到。

(3) 掺粉煤灰混合材会使水泥浆体孔隙液碱度降低并使水泥石结构多孔, 从而使部分 M_g(OH)₂ 晶体往孔洞中生长以及可供其晶体占用的 M_gO 水泥颗粒界面区增大。它们的共同作用结果使 M_gO 水泥产生的膨胀较小。这是导致掺粉煤灰混合材对 M_gO 水泥浆体膨胀产生抑制作用的主要原因。

作者简介:

李承木 (1939 年-), 男, 四川内江人, 国家电力公司成都勘测设计研究院科学研究所教授级高级工程师, 从事筑坝材料科学研究

省水电学会施工专委会召开小浪底施工技术交流会

四川省水电工程学会施工专委会于 2000 年 5 月 5 日至 8 日在小浪底工地召开了小浪底施工技术交流会及专委会工作会议。水电第五、七、十工程局, 省水电工程局, 武警水电三总队、二滩水电开发公司以及省水电勘测设计研究院、省水校、成都水电校等单位的代表 30 余人参加了会议。会议还特别邀请了国家电力公司南方公司、天生桥建管局、水利部小浪底建管局的领导及专家出席了会议, 小浪底建管局的领导在开幕式上作了题为“黄河治理开发与小浪底工程建设”的专题报告。

此次会议共收到论文 27 篇, 其中七局天生桥项目部专为会议编印了“天生桥一级水电站施工技术专辑”。二滩水电开发公司以及水电七局、五局等单位的代表在会上进行了交流, 他们的发言得到与会

代表的好评。会议组织代表全面参观了宏伟的小浪底水利工程。

在技术交流会期间, 由施工专委会主任委员夏文泽主持召开了施工专委会工作会议。主要研究落实 2000 年活动计划及讨论 2001 年活动安排, 并听取各单位代表对专委会工作提出的意见, 经过讨论, 决定专委会主办的内部刊物“施工技术与管理”今年出二期, 分别由水电五局和二滩水电开发公司主办。专委会 2000 年第二次活动由省水电工程局 10 月下旬在绵阳举办, 2001 年的活动具体安排在 10 月下旬绵阳会议上确定。

同时要求各成员单位按学会章程认真做好会员的发展工作, 争取更多的新会员。鉴于老同志退休较多, 会员变动较大, 要求各成员单位对单位的会员重新登记, 并将结果报施工专委会秘书组。

武警水电第三总队 王金茹