

大掺量矿渣粉煤灰混凝土试验研究

——一种低热、高强、大流动性混凝土

林琳

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘要 大掺量矿渣粉煤灰混凝土是一种低热、高强、大流动性混凝土。对该混凝土的工作性、抗压强度和劈拉强度、静力抗压弹性模量、抗折强度和极限弯拉应变、绝热温升以及混凝土的孔结构等主要物理力学性能进行了测试。结果表明,该混凝土具有大流动性(坍落度 $23\text{cm} \pm 2\text{cm}$)、低绝热温升($T = 22.94^\circ\text{C}, 20.39^\circ\text{C}$)和高强度($f_{c91} = 41.5\text{MPa}, 34.7\text{MPa}$)等性能,适用于高强度大体积混凝土工程。采用大掺量矿渣粉煤灰,并配合高效减水剂,可配制出高性能混凝土。

关键词 大体积混凝土 矿渣 粉煤灰 绝热温升 混凝土强度 拱坝

随着高拱坝建设的发展,坝的高度愈来愈高,坝体断面愈来愈薄,这就要求提高坝体混凝土的强度等级。混凝土强度等级的提高,一般将导致混凝土中水泥用量增加,混凝土的绝热温升值升高,从而就增加大体积混凝土温度控制的难度,使混凝土产生裂缝的可能性以及裂缝扩展的危险性增大。其它类似的高强度大体积混凝土工程如大型锚碇块、桩基承台等也存在这些问题。因此,寻求配制低水化热、高强度的大体积混凝土具有重要意义。

为了减小和防止大体积混凝土裂缝产生的可能性,根本的措施之一是改善混凝土的组成与结构,提高混凝土材料抗裂的适应性。通过在混凝土中掺入大量粉煤灰或矿渣,或同时掺入大量粉煤灰和矿渣是有效途径之一。这方面国外已有报导,特别是近年来日本在建造明石大桥(目前世界上最大的悬索桥)工程中提供了先例^[1]。我们在参考日本明石大桥经验的基础上,结合我国国情,通过大掺量矿渣、粉煤灰,配制出具有大流动性低水化热和高强度的大掺量矿渣粉煤灰混凝土(简称 HSFCC)。

1 研制概况

1.1 研制方案

试验研制工作分三个阶段进行:①配制出由普通水泥、矿渣和粉煤灰组成的三组分胶凝材料;②优化混凝土的配合比;③系统测试混凝土的主要物理力学性能。

1.2 试验原材料

试验研制采用 425# 普通水泥(记作 C);经碾磨的粒化高炉矿渣(记作 S),其比表面积为 $3100\text{cm}^2/\text{g}$,其化学组成见表 1;I 级粉煤灰(记作 F),其化学组成及颗粒级配和表观密度见表 2 和表 3。

表 1 矿渣的化学成分

化学成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO
含量(%)	33.53	38.43	13.50	1.576	11.03	0.28

表 2 粉煤灰的化学成分

化学成分	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
含量(%)	51.81	5.34	31.14	4.16	1.59	0.58
化学成分	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃	烧失量
含量(%)	1.31	1.27	0.33	0.045	0.81	1.04

作者简介:林琳,女,硕士,从事新型建筑材料的研制与开发。

粗骨料(记作 G)为石灰岩碎石,最大粒径 20mm,表观密度 26.5 g/cm^3 ;细骨料(记作 S_a)为河砂,细度模数 2.39,表观密度 2.61 g/cm^3 。外加剂选用 SN 减水剂,自来水(记作 W)拌和。

1.3 试验方法与数据处理

试件的成型、养护与测试及数据处理除注明外,均按《水工混凝土试验规程》(SD105-82)^[2]有关规定进行。

2 三组分胶凝材料的配制

为使三组分胶凝材料(记作 B, $B = C + S + F$)水化热低且具有较高的后期强度,试验了 5 种配方(见表 4,表中代号 C, S, F 的下标为相应组分在胶凝材料中所占的百分数,以

下同。),并平行地对比测试了水化热和胶砂强度,然后从中筛选出最佳配比。

2.1 三组分胶凝材料水化热的测定

三组分胶凝材料水化热测定结果见表 5 和附图。

从表 5 和附图可以看出,纯普通水泥(序号 5)水化热温峰最高(28°C),且早期发热量很大,1 d 的水化热 q_1 达 76.62 kJ/kg 。随着粉煤灰和矿渣的掺入,不仅使温峰降低,发热量减少,而且还使放热过程后移,这些对于大体积混凝土工程的温控是有利的。若以纯普通水泥(序号 5)的水化热为基准,将其它三组分胶凝材料各龄期的相对水化热(%)列于表 6,则可以看出,序号 4 的水化热最低,7 d

表 3 粉煤灰的颗粒级配和表观密度

粒 度 分 布 (%)							总表面积 $A/\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	表观密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
$> 50\mu\text{m}$	$50\sim 40\mu\text{m}$	$40\sim 30\mu\text{m}$	$30\sim 20\mu\text{m}$	$20\sim 10\mu\text{m}$	$10\sim 1\mu\text{m}$	$< 1\mu\text{m}$		
0	4.0	1.7	4.0	16.8	72.2	1.3	5.70	2.50

表 4 三组分胶凝材料配比

序 号	三组分胶凝材料代号	配合比 (%)		
		C	S	F
1	$C_{18}S_{52}F_{30}$	18	52	30
2	$C_{18}S_{42}F_{40}$	18	42	40
3	$C_{21}S_{24}F_{55}$	21	24	55
4	$C_{19}S_{19}F_{62}$	19	19	62
5	$C_{100}S_0F_0$	100	0	0

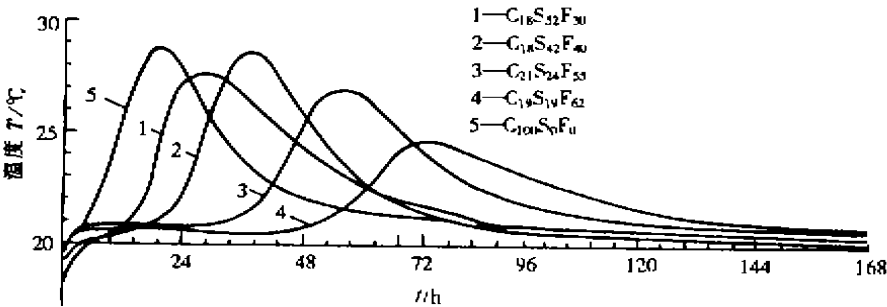
表 6 三组分胶凝材料的相对水化热 (%)

序 号	龄期/d		
	1	3	7
1	21.1	59.2	59.4
2	6.9	55.6	58.0
3	7.7	40.1	53.7
4	5.5	15.4	48.2
5	100	100	100

表 5 三组分胶凝材料的水化热

序号	三组分胶凝材料代号	砂量/g	水胶比 W/B	SN 掺量 (%)	水化热 $q/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$						
					1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d
1	$C_{18}S_{52}F_{30}$	400	0.248	0.56	16.19	79.09	103.95	114.64	122.00	127.96	132.40
2	$C_{18}S_{42}F_{40}$	400	0.248	0.74	5.32	61.41	97.71	112.44	120.22	125.62	129.30
3	$C_{21}S_{24}F_{55}$	400	0.265	0.96	5.88	19.82	70.42	94.72	106.34	113.95	119.65
4	$C_{19}S_{19}F_{62}$	400	0.263	1.16	4.23	9.12	27.03	66.48	88.68	99.98	107.40
5	$C_{100}S_0F_0$	572.5	0.279	0	76.62	149.23	175.60	192.69	205.52	215.30	223.00

注:外加剂掺量为胶凝材料总量的百分含量;所有试验,标准稠度保持为 24.8%和 26.4%。



附图 三组分胶凝材料水化热曲线

的水化热 q_7 仅及序号 5 同龄期的 48.2%; 其次是序号 3, 为序号 5 的 53.7%; 序号 1 和序号 2 相近, 约为序号 5 的 59%。

2.2 三组分胶凝材料胶砂强度的测定

对应于前述 4 种三组分胶凝材料, 分别测定了其胶砂强度。为了考察三组分胶凝材料对水胶比 (W/B) 的敏感性, 每一配比又设计了大、小两种水胶比。试验中, 通过调整外加剂掺量来保持流动度基本一致。由于原材料批与批之间的质量小波动, 对上述 4 种配比相应作了小的修正。9 组 (其中一组为纯普通水泥胶砂) 试验结果列于表 7。

从表 7 可以看出, 序号 1_小 与序号 3_小 各龄期的抗折 (f_f)、抗压 (f_c) 强度均较高; 在后期强度的增长上, 后者又较前者显著, 其 $f_{c,91}/f_{c,7}$ 比值, 前者是 1.64, 而后者是 1.87。另外还可以看出, 随着粉煤灰掺量的增加, 后期强度的增长率逐渐提高, 其 $f_{c,91}/f_{c,7}$ 比值, 从序号 1_小 到序号 4_小, 依次为 1.64, 1.47, 1.87 和 2.04_c。

为了探讨大掺量矿渣粉煤灰对水胶比的敏感性, 现就 7 d、28 d 和 91 d 的抗压强度作一分析, 结果见表 8。

从表 8 可以看出, 随着粉煤灰掺量大于

40% 以后, 由于粉煤灰的掺入, 引起各龄期抗压强度变化的幅度要大于水胶比变化的幅度。这说明大掺量粉煤灰对水胶比敏感, 也就是说通过外加剂或其它工艺措施, 使水胶比尽量减小, 可有效地提高 HSFCC 的强度。

结合水化热和胶砂强度测试结果, 最后筛选出最优的三组分胶凝材料的配比为: C:S:F = 21:49:30 和 C:S:F = 21:23:56。

3 大掺量矿渣粉煤灰混凝土测试结果

3.1 主要物理力学性能

混凝土配合比按 91d 抗压强度 30 ~ 40MPa, 拌和物坍落度 15cm ± 2cm 要求进行设计。为使批量成型试件时, 便于操作、减少称量误差和相对比较, 对已选定的胶凝材料中 C, S, F 的配比作了小调整。在少量试拌的基础上, 经调整最后确定的配合比为: B:S_a:G:W = 1:1.75:2.35:0.38 (记作 C₂₀S₅₀F₃₀-C), 和 B:S_a:G:W = 1:1.79:2.42:0.36 (记作 C₃₀S₃₀F₅₀-C)。然后, 采用搅拌机拌和、振动台振动成型, 成批制作试件; 经标准养护, 按预定龄期进行各项性能测试。测试内容包括: 混凝土拌和物的工作性, 混凝土的抗压和劈拉强度、静力抗压弹性模量、抗折强度和极

表 7 三组分胶凝材料胶砂强度

序 号	三组分胶凝材料代号	配合比 (%)			水胶比 W/B	胶砂 (抗折 f_f /抗压 f_c) 强度 /MPa			
		C	S	F		7 d	14 d	28 d	91 d
1 _小	C ₂₁ S ₄₉ F ₃₀	21	49	30	0.40	5.54/22.4	6.69/28.4	6.47/29.4	6.84/36.8
2 _小	C ₁₉ S ₄₁ F ₄₀	19	41	40	0.38	5.08/19.8	5.66/24.2	6.08/27.5	6.08/29.2
3 _小	C ₂₁ S ₂₃ F ₅₆	21	23	56	0.33	5.46/23.0	6.05/29.7	6.36/33.2	6.94/42.9
4 _小	C ₁₉ S ₁₇ F ₆₄	19	17	64	0.33	3.43/16.6	4.13/24.0	5.09/25.1	5.58/33.9
1 _大	C ₂₁ S ₄₉ F ₃₀	21	49	30	0.50	5.11/19.5	6.36/21.7	6.94/26.6	6.71/34.7
2 _大	C ₁₉ S ₄₁ F ₄₀	19	41	40	0.48	4.21/14.4	5.04/15.8	5.97/22.2	6.38/28.3
3 _大	C ₂₁ S ₂₃ F ₅₆	21	23	56	0.43	3.36/12.9	4.47/17.0	5.23/19.8	5.41/27.4
4 _大	C ₁₉ S ₁₇ F ₆₄	19	17	64	0.38	3.16/11.9	4.00/13.9	4.57/18.3	5.09/22.9
5	C ₁₀₀ S ₀ F ₀	100	0	0	0.59	3.81/18.7	4.46/21.3	5.62/26.3	6.08/36.3

表 8 矿渣、粉煤灰掺量与水胶比和强度的关系

三组分胶凝材料代号	配合比 (%)			水胶比变化率 (%)	抗压强度变化率 (%)		
	C	S	F		7 d	28 d	91 d
C ₂₁ S ₄₉ F ₃₀	21	49	30	-20	14.9	10.5	6.0
C ₁₉ S ₄₁ F ₄₀	19	41	40	-21	37.5	22.2	3.2
C ₂₁ S ₂₃ F ₅₆	21	23	56	-23	78.3	67.7	56.5
C ₁₉ S ₁₇ F ₆₄	19	17	64	-13	39.5	37.2	48.0

限弯拉应变,以及绝热温升值等。测试结果见表9。

从表9可以看出:①混凝土拌和物工作性很好,其实测容重大于相当的普通混凝土^[4],说明混凝土成型密实性好。另外,在水胶比分别为0.38和0.36的情况下,仍具有大于20cm的坍落度,说明在不要求这样大流动性的条件下,就可进一步节约胶凝材料;或降低水胶比,进而提高混凝土的强度和耐久性;②在强度发展上,与不另掺矿渣或粉煤灰、强度等级相近的普通混凝土(其7d、28d和91d龄期的相对强度依次为80%,100%和110%)^[5]相比,矿渣掺量大于粉煤灰的混凝土($C_{20}S_{30}F_{30}-C$),不仅后期强度增长较大,且早期(7d)强度也较高;而粉煤灰掺量较多的混凝土($C_{20}S_{30}F_{30}-C$)则大致相近。另外,在拉压比上,HSFCC较普通混凝土(拉压比 $k_p = f_{pt}/f_c$ 一般在1/10~1/16)^[6]的高;③在变形性能上,HSFCC与强度等级相当的普通混凝土相当;④混凝土的绝热温升,较强度等

级相当的普通混凝土降低30%左右。

3.2 混凝土的孔结构

混凝土结构物的多种破坏因素如冻融破坏、化学腐蚀、钢筋锈蚀等均与混凝土自身的孔隙、裂隙有关。孔隙愈多愈大,外界的水、氧、盐等就愈容易渗入,进而引起严重破坏。因此,可以认为材料的致密性比其化学组成更为重要。为此,对HSFCC通过小角度X衍射法测定了混凝土内部的孔级配(微孔分布),结果见表10。

从表10可以看出, $C_{20}S_{30}F_{30}-C$ 随着龄期的增加,最小孔径显著变小,小于1000Å的微孔增加,大于1000Å的有害孔显著减少;而 $C_{20}S_{30}F_{30}-C$,上述效应更为明显。

4 结 语

a. 采用一般的425[#]普通水泥、I级粉煤灰、粉磨粒化高炉矿渣和SN减水剂,在常规工艺情况下所配制的HSFCC: $C_{20}S_{30}F_{30}-C$ 和 $C_{20}S_{30}F_{30}-C$,其绝热温升分别为22.94℃和

表9 HSFCC主要物理力学性能

物理力学性能		$C_{20}S_{30}F_{30}-C$	$C_{20}S_{30}F_{30}-C$	备 注
坍落度 s_t/cm		23.0	25.0	拌和物可自流平,且粘聚性好
实测容重 $\gamma_0/kg \cdot m^{-3}$		2480	2440	
抗压强度 f_c/MPa	7d	29.3/84%	24.8/76%	试件尺寸:10cm×10cm×10cm
	28d	34.8/100%	32.5/100%	
	91d	41.5/119%	34.7/107%	
劈拉强度 f_{td}/MPa	7d	2.94/92%	3.16/88%	试件尺寸:10cm×10cm×10cm
	28d	3.19/100%	3.61/100%	
	91d	3.85/121	3.72/103	
拉压比 k_p	7d	1/10.0	1/7.8	
	28d	1/10.9	1/9.0	
	91d	1/10.8	1/9.3	
静力抗压弹性模量 $E/\times 10^4 MPa$		3.19	3.25	试件尺寸:10cm×10cm×20cm,龄期28d
抗折强度 f_f/MPa	28d	4.67	4.50	试件尺寸:10cm×10cm×40cm;三分点加荷
	91d	5.00	4.80	
极限弯拉应变 $\epsilon_b/\times 10^{-6}$	28d	168	170	
	91d	169	174	
绝热温升 $T/^\circ C$		22.94	20.39	绝热温升按文献[3]估算

表10 混凝土孔级配测试结果

测试样品	龄期/d	最小孔径/Å	孔 径 分 布(%)			
			<100Å	100~500Å	500~1000Å	>1000Å
$C_{20}S_{30}F_{30}-C$	7	62.47	61.4	21.1	4.3	12.6
	91	33.37	79.0	11.4	2.3	6.7
$C_{20}S_{30}F_{30}-C$	91	31.39	82.3	11.4	3.3	2.4

20.39℃(计算值);坍落度分别达 23.0 cm 和 25.0 cm,且无泌水现象;91d 龄期抗压强度分别达 41.5 MPa 和 34.7 MPa。

b. 采用普通水泥、粉磨粒化高炉矿渣和优质粉煤灰配制成的三组分胶凝材料,配合掺用高效减水剂,可配制出低绝热温升、大流动性和高强度的大体积混凝土。

c. 由于大掺量粉煤灰对水胶比很敏感,因此,采用大掺量矿渣、粉煤灰,并配合高效减水剂或其复合外加剂或辅以其它工艺措施,可进一步降低水胶比,从而配制出施工性能良好、强度高、体积稳定、耐久性好的高性能混凝土。

d. 推广应用 HSFCC,既节约能源和资源,保护环境,还可大大改善混凝土的性能,提高其耐久性,具有重大的经济效益和社会效益,有着特殊的现实意义。

南京水利科学研究院王昌义高工为本文提供了水化热资料,谨此表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Tanaka K, et al. Development and utilization of high-performance concrete for the construction of the Akashi Kaikyo Bridge. In: High Performance Concrete in Service Environment, ACI SP140-2, 1993: 25~51
- 2 《水工混凝土试验规程》修订小组. 水工混凝土试验规程(SD105-82). 北京: 水利电力出版社, 1986
- 3 叶林昌, 沈义. 大体积混凝土施工. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987. 34~36
- 4 牛光庭, 李亚杰. 建筑材料. 第三版. 北京: 水利电力出版社, 1993
- 5 Lin Jiaping, et al. Study on physical and mechanical properties of roller compacted concrete with fly ash for highway use. In: International Symposium on New Development in Concrete Science and Technology, Nanjing. Publishing of Southeast University, 1995. 499~506
- 6 蔡正咏. 混凝土性能. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979

(收稿日期: 1996-05-20 编辑: 许宇鹏)

(上接第 10 页)

开矿、修路、水利水电建设、基本建设、森林砍伐和土地开垦等开发建设项目必须有水土保持方案,水土保持措施要与主体工程实行“三同时”制度,将人为产生新的水土流失控制到最低限度。要进一步健全配套法规体系和水土保持监督执法体系,建设一支政策水平高、法规业务熟的执法队伍。

c. 加速治理进程,抢救一切可抢救的土地,是一项紧迫而艰巨的任务。特别是在长江上游以及南方石灰岩地区和北方的土石山区,土层薄,土地退化严重,防止土地“石化”和砂砾化已是刻不容缓,在这些地区的治理是带抢救性的。否则就像广西岩溶地区那样,没有生存的土地,被迫易地迁移。在“九五”期间,要争取国家和地方增加投入,另外从政策想办法。“九五”期间年均治理 5 万 km²,那么到 2010 年年均治理任务应该增长 50% 以上,那时将有 50% 的水土流失面积得到治理。

d. 建设一支科技素质和政治素质高的水土保持队伍,是搞好水土保持工作的前提。提高防治水平,必须依靠科技和教育,在巩固提高现有水土保持大学正规教育的同时,大力发展初、中级水土保持教育和在职培训以及加强对农民的技术培训。同时,加强对水土保持科研的指导和协调,首先将现有科研成果筛选应用于生产实践,并组织力量对防治的重大问题攻关。

e. 建立水土流失动态监测监控预报系统,为政府决策提供科学依据。根据《中华人民共和国水土保持法》规定,定期公告全国水土流失消长状况,是水行政主管部门一项重要职责。及时掌握水土流失消长动态,可以有针对性地采取有效措施防止水土流失的恶化。按《水土保持法实施条例》规定,建立水土保持监测网络,预报水土流失发展趋势和水土保持成效,并提供主管部门定期公告。

(收稿日期: 1997-06-09 编辑: 马敏峰)