

# 大掺量粉煤灰配制高性能渠道衬砌混凝土的研究\*

姜宗科<sup>1</sup>, 阎宁霞<sup>1</sup>, 周亚娟<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2 杨凌区水利局, 陕西 杨凌 712100)

**[摘要]** 研究了水胶比、粉煤灰掺量、激发剂掺量、减水剂掺量对混凝土抗压强度和抗渗性的影响。结果发现, 掺入 20 g/kg 的石膏激发剂和 35 g/kg 的 HA 早强减水剂, 即使粉煤灰掺量达到 600 g/kg, 混凝土的强度等级也能达到 C15~C20, 抗渗等级可达到 W4 以上, 满足渠道衬砌对混凝土的技术要求。这表明, 在渠道衬砌中应用大掺量粉煤灰混凝土是完全可行的, 而且具有材源广、性能优和经济安全等方面的优势。

**[关键词]** 粉煤灰混凝土; 渠道衬砌; 抗压强度; 抗渗性

**[中图分类号]** TV42+3

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2004)12-0103-04

粉煤灰是从电厂烟气中收集的粉状灰渣, 据悉 2000 年我国粉煤灰的年排放量已经超过 1.6 亿 t<sup>[13]</sup>, 而且增长势头十分迅猛, 但目前粉煤灰的年利用率仅为 30%~40%<sup>[11]</sup>, 大量的粉煤灰被闲置和废弃, 使排灰的电力工业面临着环境保护法规处罚越来越严和粉煤灰处理费用越来越高的困境。若不加大对粉煤灰综合利用研究和处理力度, 将会给能源生产、资源利用和环境保护带来严重后果。过去人们从经济和环保角度出发, 将粉煤灰一直作为水泥的替代品, 在结构混凝土中掺入量被限制在 200 g/kg 左右, 很少达到 300 g/kg<sup>[4,5]</sup>。随着高效减水剂的逐渐普及, 粉煤灰的潜能不断得到发挥, 粉煤灰作为独立组分在混凝土的强度、耐久性、工作性、水化热和变形性能等方面表现出许多积极作用, 大掺量粉煤灰混凝土甚至比普通混凝土表现出更好的耐久性能<sup>[5,6]</sup>。粉煤灰独特的“形态效应”、“微集料效应”和“火山灰效应”, 使得大掺量粉煤灰混凝土具有低强度、高抗渗、抗冻耐久性。渠道衬砌混凝土的作用是防渗抗冲, 对强度要求不高, 设计等级仅为

C10~C20; 而北方地区水位变动区混凝土冬季承受频繁的冻融循环作用, 必须具有足够的抗渗抗冻耐久性, 其抗渗等级应在 W4 以上, 抗冻等级应在 F50F100 以上<sup>[7]</sup>, 才能保证混凝土长期稳定地工作, 最大限度地减少维修费用。以往的研究结果<sup>[8]</sup>表明, 满足 F50 抗冻要求的普通混凝土, 其强度等级应达到 C20 以上。

本试验将高效减水剂和激发剂掺入混凝土中, 研究了大掺量粉煤灰对混凝土强度和抗渗等级的影响。试图在不增加水泥用量的前提下提高混凝土的抗渗等级, 以满足渠道衬砌工程对混凝土低强度高耐久性的要求, 从而降低工程造价。同时, 提高了粉煤灰利用率, 化害为利, 变废为宝, 为粉煤灰的综合利用创造了条件。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

粉煤灰: 宝鸡电厂生产的 Ⅱ 级灰, 其物理性能测试结果见表 1。

表 1 粉煤灰技术指标测试结果

Table 1 Experimental results of physical and mechanical items of fly-ash

项目 Items	45 μm 方孔筛筛余 Sieve residue	烧失量/ % Burning amount	需水量比/ % Water requirement ratio	SO <sub>3</sub> 含量/ % SO <sub>3</sub> content	等级 Grade
国家标准 GB146-90 standard Nation	< 12 20	5 8	95 105	3 3	
测试结果 Results	14.6	1.38	93	0.66	

[收稿日期] 2004-04-05

[基金项目] 国家 863 节水重大专项(2002AA2Z4211); 西北农林科技大学专项基金项目

[作者简介] 姜宗科(1962-), 男, 陕西凤翔人, 副教授, 硕士, 主要从事水工结构与建筑材料研究。

水泥:眉县水泥厂生产的普通硅酸盐水泥 P. O. 32.5 水泥,密度为  $3.10 \text{ g/cm}^3$ 。

减水剂:HA-1 型早强减水剂(粉剂),西安得莱克混凝土外加剂公司生产。不同掺量的减水率试验结果见表 2。

表 2 减水剂掺量与减水率

Table 2 The content of water reducer admixture and water-reducing ratio

掺量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Content	减水率/ $\%$ Water-reducing ratio
20	6
30	10
40	14

粗骨料:5~40 mm 的碎石,小石 中石 = 40

表 3  $L_9(3^4)$  正交试验因素水平表

Table 3 The tested factors and levels of  $L_9(3^4)$  orthogonal experiment

水平 Level	因素 Factor			
	激发剂掺量(A)/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Activator amount	减水剂掺量(B)/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Water reducer amount	水胶比(C) Water-cement ratio	粉煤灰掺量(D)/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Fly-ash amount
1	20	15	0.3	300
2	30	25	0.4	450
3	40	35	0.5	600

### 1.3 试验方法

混凝土强度按《水工混凝土试验规程》DL/T5150-2001 规定的方法进行测定;抗渗性采用一次加压法测定其相对渗透系数,并据此进行极差分析和方差分析,最后根据文献[4]将渗透系数换算为抗渗等级;混凝土坍落度取 30~50 mm,以此控制不同配合比中的混凝土单位用水量。

60,表观密度  $2.71 \text{ g/cm}^3$ ,堆积密度  $1.63 \text{ g/cm}^3$ 。

细骨料:渭河河砂,表观密度  $2.61 \text{ g/cm}^3$ ,堆积密度  $1.53 \text{ g/cm}^3$ ,细度模数 2.64。

### 1.2 试验设计

为了寻找低强度高耐久性的混凝土配合比,借鉴以往的试验结果<sup>[8]</sup>,经过理论分析,确定本次试验采用掺加粉煤灰和高效减水剂的双掺技术。由于混凝土耐久性内容非常丰富,绝大多数长期性能与其抗渗性密切相关,以混凝土 28 d 抗压强度和抗渗等级为混凝土质量好坏的表示指标,并以激发剂(石膏)掺量、减水剂掺量、水胶比、粉煤灰掺量为考察因素。为了减少试验次数,采用  $L_9(3^4)$  正交表安排试验,选定的因素水平见表 3。

## 2 结果与分析

本试验目的是在不提高混凝土抗压强度、不增加水泥用量的前提下,试图通过同时掺用粉煤灰和高效减水剂提高混凝土的抗渗性,以满足渠道衬砌混凝土低强度高耐久性的要求。试验结果见表 4,极差分析结果见表 5,方差分析结果见表 6。

表 4  $L_9(3^4)$  正交试验结果

Table 4 Experiment results of  $L_9(3^4)$  orthogonal test

编号 Number	A	B	C	D	强度/MPa Compressive strength			渗透系数/ $(\text{nm} \cdot \text{s}^{-1})$ Permeability coefficient				
					$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	1(20)	1(15)	1(0.3)	1(300)	47.5	48.9	46.7	0.000 1	0.006 1	0.000 9	0.000 5	0.000 3
2	1	2(25)	2(0.4)	2(450)	29.0	29.3	29.9	0.013 4	0.053 2	0.071 3	0.046 0	0.046 0
3	1	3(35)	3(0.5)	3(600)	20.9	22.9	20.0	0.069 2	0.031 2	0.073 6	0.058 3	0.058 3
4	2(30)	1	2	3	18.7	16.4	17.2	0.360 6	0.360 6	0.360 6	0.360 6	0.360 6
5	2	2	3	1	27.6	29.3	28.4	0.032 5	0.082 8	0.076 4	0.063 9	0.063 9
6	2	3	1	2	48.9	48.0	45.0	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
7	3(40)	1	3	2	23.1	23.5	24.0	0.540 0	0.095 2	0.317 6	0.317 6	0.317 6
8	3	2	1	3	38.4	41.9	41.8	0.000 4	0.000 2	0.011 3	0.000 2	0.007 3
9	3	3	2	1	42.1	44.6	39.6	0.006 8	0.008 0	0.004 8	0.002 9	0.005 5

注:A,B,C,D 分别代表激发剂掺量、减水剂掺量、水胶比和粉煤灰掺量。

Notes:A,B,C,D respectively indicates the amount of activator,the amount of water-reducer,water-cement ratio and the amount of fly-ash.

表 5 极差分析结果

Table 5 Results of extreme analysis

考核指标 Index	项目 Items	激发剂掺量/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Activator amount	减水剂掺量/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Water- reducer amount	水胶比 Water-cement ratio	粉煤灰掺量/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Fly-ash amount
混凝土强度/ MPa Compressive strength	K <sub>1</sub>	295.1	266.0	401.7	354.7
	K <sub>2</sub>	279.5	295.6	266.8	300.7
	K <sub>3</sub>	319.0	332.0	219.7	238.2
	R	39.5	66.0	187.4	116.5
	最优方案 Scheme	A3	B3	C1	D1
渗透系数/ (nm · s <sup>-1</sup> ) Permeability coefficient	K <sub>1</sub>	0.528	0.340	0.017	0.355
	K <sub>2</sub>	2.123	0.559	2.060	1.818
	K <sub>3</sub>	1.625	0.318	2.198	2.102
	R	1.595	0.241	2.181	1.748
	最优方案 Scheme	A1	B3	C1	D1

注:1) K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> 分别代表试验因素为 1, 2, 3 水平时的指标和; 2) R 代表各因素不同水平指标和的极差。

Notes: 1) K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> respectively represents the sum of index from the corresponding level; 2) R is the extreme value.

表 6 方差分析结果

Table 6 Result of variance analysis

考核指标 Index	方差来源 Sources	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F 值 F value	显著性 Significance	F <sub>α</sub> (f <sub>j</sub> , f <sub>e</sub> )
混凝土强度 Compressive strength	A	0.88	2	0.44	19.130	**	F <sub>0.01</sub> (2, 18) = 0.61
	B	2.43	2	1.215	52.826	**	F <sub>0.05</sub> (2, 18) = 3.55
	C	21.12	2	10.56	459.130	**	
	D	7.55	2	3.775	164.130	**	
	e	0.41	18	0.023			
			32.39	26			
渗透系数 Permeability coefficient	A	0.116	2	0.058	14.5	**	F <sub>0.01</sub> (2, 36) = 5.26
	B	0.508	2	0.254	63.5	**	F <sub>0.05</sub> (2, 36) = 3.27
	C	0.258	2	0.129	32.25	**	
	D	0.152	2	0.076	19	**	
	e	0.134	36	0.004			
			1.168	44			

## 2.1 强度

采用尽可能小的水胶比是采用大掺量粉煤灰配制高性能混凝土的措施之一,为了在中低抗压强度的基础上进行比较,进行了水胶比为 0.3~0.5 的混凝土强度试验。从表 5~表 6 的分析结果可看出:

(1) 影响混凝土强度的因素主次顺序为: C(水胶比) D(粉煤灰掺量) B(减水剂掺量) A(激发剂掺量),最佳组合应为 A3B3C1D1(强度越大越好)。

(2) 混凝土强度随粉煤灰掺量的增加而减小,但在采用激发剂和减水剂条件下,即使粉煤灰取代率高达 600 g/kg,采用较大的水胶比 0.5,混凝土强度至少可以达到 17.4 MPa,完全能够满足渠道衬砌混凝土 C10~C20 的强度要求。

(3) 石膏掺量由 20~40 g/kg 变化时,混凝土强度先降后升,其掺量为 30 g/kg 时混凝土强度最低。

## 2.2 抗渗性

(1) 影响渗透系数的因素主次顺序为 C(水胶比) D(粉煤灰掺量) A(激发剂掺量) B(减水剂掺量),最佳组合为 A1B3C1D1(渗透系数越小越好)。

(2) 随着水胶比的增大和粉煤灰掺量的增加,混凝土渗透系数不断增大,其抗渗性逐渐下降。本试验条件下,混凝土渗透系数仍然可以降至 0.07 nm/s 以下,即混凝土抗渗等级达到 W4 以上<sup>[5]</sup>。

(3) 激发剂掺量由 20~40 g/kg 变化时,混凝土渗透系数先升后降,其掺量为 30 g/kg 时,混凝土渗透系数最大,其抗渗性最差。

## 2.3 混凝土配合比的选取

从表 5 和表 6 可见:

(1) 水胶比是影响混凝土抗压强度和抗渗性的主要因素,水胶比为 0.3~0.5 时,混凝土抗压强度

均能达到 C15 ~ C20 的要求,水胶比大则水泥用量少,但其抗压强度和抗渗性明显降低。粉煤灰掺量为 300 ~ 600 g/kg,通过优化其他组分,当水胶比为 0.5 时,混凝土的渗透系数仍可降至 0.07 nm/s 以下,即混凝土抗渗等级达到 W4<sup>[4]</sup>以上。因而,选定水胶比为 0.5 (C3)。

(2) 粉煤灰掺量即使高达 600 g/kg,通过采取其他技术措施,混凝土抗压强度仍可达到 20 MPa,抗渗等级可达 W4,强度和耐久性完全满足渠道衬砌混凝土的需要。所以,选定粉煤灰掺量为 600 g/kg (D3)。

(3) 应用高效减水剂是配制大掺量粉煤灰混凝土的重要基础,随着 HA-1 型早强减水剂掺量的增大,混凝土强度逐渐增大。减水剂掺量为 25 g/kg 时混凝土的渗透系数最大,为 35 g/kg 时渗透系数最小。因此,选定减水剂掺量为 35 g/kg (B3),超出了普通混凝土中减水剂的适宜掺量 2 倍以上<sup>[5]</sup>。

(4) 为了提高大掺量粉煤灰混凝土的强度,特别是早期强度,掺用适量的激发剂是必需的。试验结果表明,激发剂掺量为 30 g/kg 时混凝土强度最小,而渗透系数最大。激发剂掺量为 20 g/kg 和 40 g/kg 时,混凝土强度相差不大,而渗透系数则以掺量为 20 g/kg 时最小,故选定激发剂掺量为 20 g/kg (A1)。

综合分析强度和抗渗性指标,选定的最佳组合

条件为 A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>,即激发剂掺量为 20 g/kg、减水剂掺量为 35 g/kg、水胶比为 0.5,粉煤灰掺量为 600 g/kg,此组合为正交表中的第 3 号试验,其抗压强度等级为 C20,抗渗等级达到 W4 以上。

### 3 结论与讨论

1) 水胶比、粉煤灰掺量、激发剂掺量和减水剂掺量均是显著影响大掺量粉煤灰混凝土抗压强度和抗渗性的因素,对抗压强度的效应顺序为水胶比 > 粉煤灰掺量 > 减水剂掺量 > 激发剂掺量;对抗渗性能的效应顺序为水胶比 > 粉煤灰掺量 > 激发剂掺量 > 减水剂掺量。

2) 使用高效减水剂和激发剂条件下,即使采用较大的水胶比(如 0.5),粉煤灰取代率达到 600 g/kg,亦能配制出满足规范要求的高性能渠道衬砌混凝土。通过本试验,建议的配合比参数为激发剂掺量 20 g/kg,减水剂掺量 35 g/kg,水胶比 0.5,粉煤灰掺量 600 g/kg。

3) 大掺量粉煤灰混凝土中高效减水剂的掺量,超过其在普通混凝土中用量的 2 倍以上;石膏激发剂为 30 g/kg 时,混凝土强度最小,渗透系数最大。

4) 在渠道衬砌中应用大掺量粉煤灰混凝土是完全可行的,并且具有材源广、性能优和安全经济等方面的优势。应当转变观念,加大其应用力度。

#### [参考文献]

- [1] 刘圣勇,张全国,杨群发,等.粉煤灰资源化特性及路面工程应用技术研究[J].自然资源学报,2000,15(2):180-183.
- [2] 韩怀强,蒋挺大.粉煤灰利用技术[M].北京:化学工业出版社,2001.6-7.
- [3] 陈美祝,吕梁.粉煤灰混凝土技术的发展[J].电力环境保护,2000,16(3):49-51.
- [4] 李亚杰.建筑材料[M].北京:中国水利水电出版社,2000.78-85.
- [5] 林宝玉,吴绍章.混凝土工程新材料设计与施工[M].北京:中国水利水电出版社,1998.73-97.
- [6] 邹建喜,李显金,迟培云.粉煤灰混凝土的变形性能研究[J].混凝土,2003,(6):38-40.
- [7] SL18-91.渠道防渗工程技术规范[S].
- [8] 刘和斌.低强度高抗冻耐久性混凝土试验研究[J].混凝土,1997,(2):24-27.

## Study on properties of high fly-ash amount concrete for canal liner

LOU Zong-ke<sup>1</sup>, YAN Ning-xia<sup>1</sup>, ZHOU Ya-juan<sup>2</sup>

(1) College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Water Resoures Bureau of Yangling, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The effects of water-cement ratio, the amount of fly-ash, activator and superplasticizer on compressive strength and seepage resistance of concrete were studied. The results suggested that an addition of 20 g/kg stimulator, 35 g/kg HA-1 water-reducer, 600 g/kg fly-ash met the requirement of the compressive strength and anti-seepage of concrete used in canal liner.

**Key words:** fly-ash concrete; canal liner; comperssive strength; seepage resistance