

文章编号: 1002-0268 (2005) 08-0015-05

复合超细粉煤灰高性能道路混凝土的试验研究

高英力, 周士琼, 尹 健
(中南大学土木建筑学院 湖南 长沙 410075)

摘要: 以经改性的复合超细粉煤灰 (简称 CUFA), 等量取代水泥, 获得 CUFA 高性能道路混凝土, 并通过试验研究了混凝土的力学性能及部分长期性能。结果表明, 随着 20%~40% CUFA 的掺入, 混凝土强度接近或达到 C50 强度级别, 并建立起相应的强度回归经验式; 同时干缩、抗渗、耐磨、抗裂等诸性能均优于基准混凝土。

关键词: 复合超细粉煤灰; 高性能道路混凝土; 力学性能; 长期性能

中图分类号: U214.1⁺8

文献标识码: A

Experimental Investigation of High Performance Highway Concrete with Composite Ultra-fine Fly Ash

GAO Ying-li, ZHOU Shi-qiong, YIN Jian

(Civil Architectural Engineering College, Central South University, Hunan Changsha 410075, China)

Abstract According to the data analysis in a series of experimental studies, the paper proved that the composite ultra-fine fly ash (CUFA) which replaced equivalent cement and added into ordinary highway concrete, may produce high performance highway concrete. Mechanical properties and long-term properties of the CUFA were analyzed, the correspondent strength equations of regression set up. The experimental results indicate that the concrete strength is close or up to C50 grade with the addition of 20%~40% CUFA, and other performances such as drying shrinkage, impemeability, wearing and cracking, etc, are also better than the reference concrete.

Key words: Composite ultra-fine fly ash; High performance highway concrete; Mechanical properties; Long-term properties

0 前言

耐久性差、易开裂是当今普通混凝土路面存在的主要问题,从混凝土本身找原因,是由于在普通道路混凝土的制备过程中原材料选择、配比设计不当,以及材料本身存在缺陷或施工及养护不当等;把高性能混凝土技术用于普通道路混凝土的配制,掺入复合超细粉煤灰(Composite Ultra-fine Fly Ash,简称 CUFA)配制高性能道路混凝土不失为一种解决方法。由于使用了大量的工业废料——粉煤灰,还可获得显著的经济效益和环保效益,符合绿色环保型建材的发展方向。

CUFA 是以超细粉煤灰为主要原料经复合改性而

成。以 30%左右的 CUFA 等量取代水泥成功配制了 C50 强度级别的高性能道路混凝土,并对其力学性能以及部分长期性能进行了试验研究,还从试验的角度分析论证了 CUFA 掺量对高性能道路混凝土各项性能的影响。

1 试验用原材料及试验方法

水泥: 湖南省湘乡水泥厂生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥,其性能指标见表 1。

砂: 河砂,湘江产,细度模数为 2.45, III 区级配合格,含泥量为 0.5%,表观密度 3.12g/cm³,松散表观密度 1580kg/m³,空隙率 49.4%。

收稿日期: 2004-05-15

基金项目: 国家科技部九五重点攻关资助项目

作者简介: 高英力 (1977-), 男, 湖北松滋人, 博士研究生, 主要研究方向为道路建筑材料。(staury@163.com)

石: 卵石, 符合 5~40mm 连续级配要求, 压碎指标为 6.2%, 表观密度 2.53g/cm³, 松散表观密度 1.630kg/m³, 空隙率 35.6%。

复合超细粉煤灰 (简称 CUFA): 在超细粉煤灰中掺入 ≤5% 的无机矿物外加剂复合改性而成。超细粉煤灰 (湘潭电厂产) 的化学成分及性能见表 2。

试验方法: 粉煤灰按《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB1596-91 试验; 水泥性能试验、混凝土力学性能、耐久性试验均按《公路工程水泥混凝土试验规程》JTJ053-94 进行。

表 1 水泥性能指标 (ISO 标准)

水泥品种	细度 /%	凝结时间/min		体积安定性	3d 强度 /MPa		28d 强度 /MPa	
		初凝	终凝		抗压	抗折	抗压	抗折
42.5 级普通硅酸盐水泥	6.9	155	350	合格	22.6	4.1	47.8	7.4

表 3 高性能道路混凝土配合比及结果

编号	C/kg·m ⁻³	CUFA /%	S/kg·m ⁻³	G/kg·m ⁻³	W/C /%	W/B /%	抗压强度 /MPa		抗折强度 /MPa		劈拉强度 /MPa		弹性模量 /×10 ⁻⁴ MPa	
							7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d
0	400	0	634	1231	34	34	35.2	49.7	4.97	5.60	3.23	3.51	3.16	3.94
1	320	20	640	1240	38	30	38.8	55.6	5.13	6.42	3.45	4.63	3.62	4.51
2	280	30	641	1244	41	29	37.6	56.5	5.40	6.50	3.18	4.59	3.84	4.42
3	240	40	642	1246	47	28	40.5	53.8	4.76	6.42	3.88	3.98	3.71	4.16
4	385	0	638	1237	36	36	38.2	48.2	4.63	5.78	2.76	3.35	3.45	3.95
5	305	20	639	1241	44	35	41.2	57.3	4.58	7.04	3.01	4.46	3.85	4.41
6	269	30	641	1244	48	34	39.8	56.7	4.12	6.84	2.94	4.21	3.76	4.20
7	231	40	643	1247	54	32	36.4	48.4	4.24	6.41	2.61	3.76	3.51	3.86

注: 为和标准试件所测数据比较, 表中抗压强度为所测强度乘以换算系数 0.95 后所得值, 抗折、劈拉强度均为所测强度乘以换算系数 0.85 后所得值。

2.2 力学性能测试

本文试验采用不同胶凝材料用量及不同 CUFA 掺量配制了高性能道路混凝土, 并综合测试了力学性能。表 3 试验结果表明, 掺 CUFA 配制的高性能道路混凝土 7d 抗压强度 36.4~41.2MPa, 抗折强度 4.12~5.40MPa, 28d 抗压强度 48.4~57.3MPa, 抗折强度 5.78~7.04MPa, 其中 3 号和 7 号掺 40%CUFA 的混凝土 7d、28d 抗折强度分别达到 4.76、6.42MPa 和 4.24、6.41MPa, 抗压强度达到 40.5、53.8MPa 和 36.4、48.4MPa, 满足 7d 开放交通的要求, 28 天抗压强度均大于 C35, 除 7 号外已达到 C50 级别。由图 1、图 2 抗压、抗折强度随龄期增长的发展曲线图可看出, 混凝土早期强度随 CUFA 掺量的增加而降低, 而后期 28d 由于粉煤灰的二次水化反应, 混凝土的抗压、抗折强度均赶上或接近了基准混凝土, 到 56d 龄期时, 掺 CUFA 的混凝土强度均超过了基准混凝土。由图 3 CUFA 掺量与拉压比、折压比关系曲线图可以看出, 适宜的 CUFA 掺量不仅不会降低拉压比、折压

表 2 超细粉煤灰的化学成分及性能

材料	烧失量 /%	含水率 /%	化学成分 /%							比表面积 /m ² ·kg ⁻¹	
			SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O		Na ₂ O
超细粉煤灰	3.2	<1	0.45	51.8	5.0	26.4	4.1	1.0	1.3	1.0	600

2 试验结果及讨论

2.1 试验配比及结果

在本文试验中 CUFA 分别以 20%、30%、40% 等量取代水泥, 试验配合比及结果见表 3。其中抗压试件和劈拉试件尺寸为 100mm×100mm×100mm, 抗折试件尺寸为 100mm×100mm×400mm, 弹模试件尺寸为 100mm×100mm×300mm, 干缩试件尺寸为 100mm×100mm×515mm, 所有试件均采用标养。

比, 相反与未掺 CUFA 的混凝土相比, 还会稍有增大, 当胶凝材料用量为 385kg/m³, CUFA 掺量分别为 20%、30%、40% 时, 拉压比、折压比依次为 1/13.1、1/8.14、1/13.5、1/8.29、1/12.9、1/7.55, 均大于基准混凝土, 这表明掺 CUFA 配制高性能道路混凝土的受拉性能得到了改善, 脆性有所降低, 同时抗折强度这一重要指标也能得到保证, 因而抗裂性能会有较大改善。图 4、图 5 分别为 CUFA 掺量与 28d 抗折强度、劈拉强度以及抗压强度之间的关系曲线图, 随着 CUFA 掺量的增加, 高性能道路混凝土 28d 的强度与基准混凝土相比均有不同程度的增大, 掺量达到 40% 时, 强度有所降低, 但也能赶上或接近基准混凝土。在试验的基础上, 对 C50 高性能道路混凝土的配制进行了复演试验, 并采用多元回归分析方法, 分析了 CUFA、W/B、W/C 对高性能道路混凝土 7、28d 抗压强度和抗折强度的影响, 同时对自变量的偏回归平方和进行了 F 检验 (括号中数值为 F 值), 各因素对强度影响显著性大小顺序为:

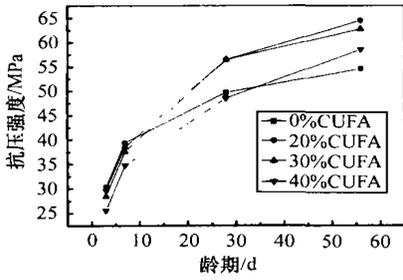


图 1 高性能道路混凝土抗压强度随龄期的发展曲线图

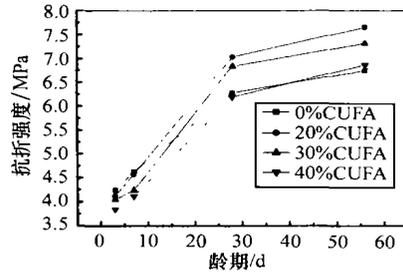


图 2 高性能道路混凝土抗折强度随龄期的发展曲线图

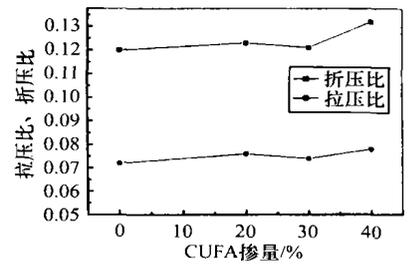


图 3 高性能道路混凝土 CUFA 掺量与 28d 拉压比、折压比关系曲线

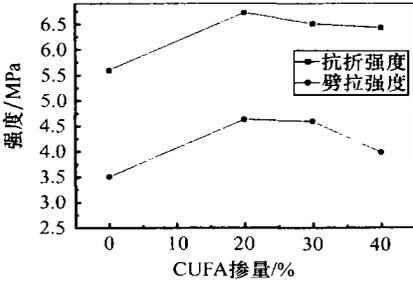


图 4 高性能道路混凝土 CUFA 掺量与 28d 抗折强度、劈拉强度关系曲线

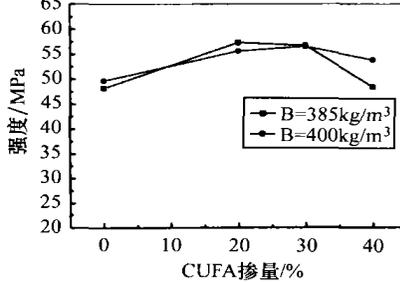


图 5 高性能道路混凝土 CUFA 掺量与 28d 抗压强度关系曲线

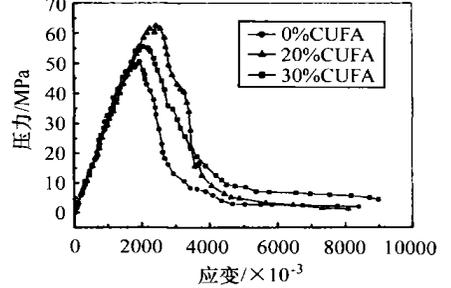


图 6 普通混凝土与高性能道路混凝土应力-应变全曲线

抗压强度

$$f_{cu, 7d}: W/C(30.0) > CUFA(24.6) > W/B(8.73)$$

$$f_{cu, 28d}: W/B(49.06) > CUFA(31.42) > W/C(8.36)$$

抗折强度

$$f_{fp, 7d}: W/C(36.1) > CUFA(24.8) > W/B(16.9)$$

$$f_{fp, 28d}: CUFA(115.5) > W/B(38.7) > W/C(6.49)$$

并建立了强度与各因素间的回归经验公式:

抗压强度回归经验公式

$$f_{cu, 7d} = 21.4438CUFA + 54.6317W/B - 70.7258W/C + 41.60151$$

(复相关系数 $R = 0.83277$, $SD = 0.979$, $F = 13.2$, $n = 20$)

$$f_{cu, 28d} = -1.66815CUFA + 207.42606W/B - 44.95325W/C + 3.29096$$

(复相关系数 $R = 0.90988$, $SD = 0.95774$, $F = 26.9$, $n = 20$)

抗折强度回归经验公式

$$f_{fp, 7d} = 0.6544CUFA + 0.81548W/C - 3.33994W/B + 5.78946$$

(复相关系数 $R = 0.83$, $SD = 0.11891$, $F = 13.0$, $n = 20$)

$$f_{fp, 28d} = 8.27432CUFA - 67.46213W/B + 0.03917W/C + 28.48904$$

(复相关系数 $R = 0.9974$, $SD = 0.03153$, $F =$

502.2, $n = 20$)

由上述分析可知, 高性能道路混凝土早期强度主要决定于 W/C 和 CUFA 掺量, 而后期 28d 龄期时由于 CUFA 参与了二次水化反应, 加之微集料填充效应, 因而使得强度主要取决于 W/B 和 CUFA 掺量, W/C 的影响则不明显了, 与表 3 的试验结果相符。

2.3 应力-应变全曲线分析

混凝土应力-应变全曲线是混凝土在各个受力阶段的变形, 内部裂缝的发展, 损伤积累, 达到强度极限, 峰值后的残余性能, 外表的破损剥落和最终破坏形态的形成等一系列变化过程的完整宏观反应。本文选取 CUFA 掺量为 20% 和 30% 的两组作为测试对象, 研究了其应力-应变关系, 试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{mm}$, 在试验室标准养护至 28d 龄期取出。通过附加刚性架, 在普通试验机上进行, 荷载和变形数据通过 IMP 数据采集系统进行采集, 并与基准未掺 CUFA 的混凝土应力-应变全曲线进行比较, 其受压应力应变全曲线上特征点的应力和应变平均值见表 4, 应力应变全曲线测试结果如图 6 所示。

上述试验数据表明, 采用附加刚性架, 在普通压力试验机上多次重复加卸载可以获得 C50 高性能道路混凝土的应力-应变全曲线, 与基准混凝土相比较, 其上升段与之相似, 且随着强度的提高, 比例极限、峰值应力和峰值应变均有所增加, 同时高性能道路混凝土下

降段与普通混凝土也相似,残余应力与普通混凝土相比相对较高或接近,这说明掺CUFA的高性能道路混凝土的设计可遵循现行规范,且CUFA的掺入不仅使混凝土的强度能够得到可靠保证,其变形性能也有所改善。

表4 普通混凝土与高性能道路混凝土应力-应变全曲线特征点的平均应力、应变值

试件类型	上升				下降					
	0	$0.4f_{cp}$	$0.85f_{cp}$	f_{cp}	$0.85f_{cp}$	$0.65f_{cp}$	$2\epsilon_{cp}$	$3\epsilon_{cp}$	$4\epsilon_{cp}$	
PO.C50	ϵ	0	683	1428	1945	2152	2421	3890	5835	7780
	σ	0	20.2	43.0	50.6	43.0	32.9	7.1	2.7	2.2
C50	ϵ	0	833	1849	2439	2764	3252	4878	7317	—
	σ	0	25.0	53.0	62.4	53.0	40.6	4.9	1.5	—
(20%CUFA)	ϵ	0	729	1539	2179	2470	2768	4358	6537	8716
	σ	0	22.2	47.1	55.4	47.1	36.0	11.0	6.7	5.0

注: f_{cp} 为峰值应力; ϵ_{cp} 为峰值应变。

2.4 干缩试验研究

混凝土的干缩是反映混凝土体积稳定性的一项重要指标,本文针对5种不同CUFA掺量的混凝土干缩进行了试验研究,干缩率随CUFA掺量的变化关系图如图7所示。

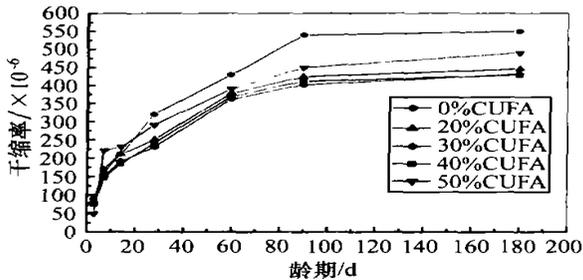


图7 CUFA掺量对混凝土干缩的影响

已有大量研究资料^[3]表明,超细粉煤灰由于其优良的减水性能、密实填充、微集料效应等,可以较好地抑制混凝土的干缩。通过本文试验,由图7可以看出,当CUFA掺量 $\leq 40\%$ 时,高性能道路混凝土随着CUFA掺量的增加其干缩率有明显的降低,60d以前,混凝土的干缩随龄期的增长有较大幅度的增加,60d龄期时掺20%、30%、40%CUFA的高性能道路混凝土其干缩率分别为 378×10^{-6} 、 362×10^{-6} 、 369×10^{-6} ;60d以后,混凝土的干缩增长幅度趋于平缓,到180d时,其干缩率分别为 446×10^{-6} 、 432×10^{-6} 、 429×10^{-6} ,均远小于基准混凝土。而CUFA掺量达到50%时,混凝土的早期干缩率有了明显的增加,但其14d后干缩率也小于基准混凝土;分析其减缩机理,可以这样认为,由于粉煤灰优良的微集料效应以及其本身强度高,形成坚强的微集料骨架强化了水泥基材;同时超细粉煤灰水化早期作为一种惰性填料均

匀分布于水泥浆体的基相之中,增大了集料体积,从而减少了干缩;另外由于粉煤灰的减水作用,使得混凝土的用水量可减少 $15 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ ^[11],这样拌和物的水灰比更低,有效地减少了干缩。然而当粉煤灰掺量 $\geq 50\%$,混凝土的干缩率又随之增大,这是由于粉煤灰掺量较大,而早期又不参与水化(根据中南大学的试验结果是14d前),因而 w/c 大,从而表现为随粉煤灰掺量的增加而自由水分增大,蒸发失水加大,干缩增加,所以粉煤灰抑制混凝土干缩有一个最佳值。通过本文试验研究,可以认为,当CUFA掺量 $\leq 40\%$ 时,随着CUFA的掺入,混凝土的干缩可以被有效地抑制,运用于实际具有较好的工程实践意义。

2.5 抗渗性

混凝土的抗渗性是表征混凝土耐久性能的一项重要指标,在本文试验中,选取了3组不同CUFA掺量(20%、30%、40%)的混凝土分别进行了抗渗性试验,试验中我们将水压一次加到1.2MPa,稳压8h然后观察渗水情况。试验结果表明,3个配比混凝土的所有试件均未渗水,其渗水高度平均值分别为11.2、10.0、9.9cm,且随着CUFA掺量的增大,渗水高度有一个减小的趋势,这说明随CUFA掺量的增加,混凝土的抗渗性有一定程度的增强,分析其原因,可以认为,超细粉煤灰优良的密实填充及微集料效应能有效的填充混凝土中的空隙并改善孔结构和强化水泥石与骨料界面,因而使得抗渗性增大,事实上粉煤灰高性能混凝土本身就是自防水混凝土,所以混凝土中掺入CUFA对混凝土抗渗性的提高有很好的效果,对于在实际工程中尤其环境较恶劣的道路混凝土施工中都具有重要意义。

2.6 耐磨性

当CUFA分别以20%、30%、40%等量取代水泥时,由于超细粉煤灰良好的减水增强效应,同时因其本身玻璃体微珠强度很高,故28d单位面积磨耗值均比基准混凝土的低,相对磨耗率分别只有基准混凝土的41%、48%、60%。这说明随着CUFA的掺入,混凝土的耐磨性得到了很大程度的改善,能够满足现代道路交通的要求(见表5)。

表5 高性能道路混凝土的耐磨性能试验结果

编号	$C/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	CUFA $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	CUFA /%	$f_{cs,28d}$ /MPa	28d 磨耗值 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	相对磨耗 率/%
0	400	0	0	44.4	4.57	100
1	320	80	20	54.1	1.88	41
2	280	120	30	55.4	2.21	48
3	240	160	40	52.2	2.72	60

2.7 抗裂性

本文抗裂性试验采用平板法, 使用模具参考 Y. - Kasai 等人研制的仪器自行加工制造, 其结构尺寸为 $600\text{mm} \times 600\text{mm} \times 80\text{mm}$ 。抗裂性试验数据及评定结果见表 6。

表 6 数据表明, CUFA 的掺入对道路混凝土的抗裂性能有很大程度的改善, CUFA 掺量 20% 和 30% 的混凝土其单位面积的总开裂面积分别为 27.8 和 $5.56\text{mm}^2/\text{m}^2$, 而掺量为 40% 的混凝土没有出现裂纹。按照平板法试验评定开裂等级的规则, 3 种配比试样评定开裂等级均为 I 级, 这说明 CUFA 的掺入能有效地抑制混凝土的开裂, 能够作为解决长期以来普通混凝土路面易开裂问题的一种途径。

表 6 抗裂性试验数据及评定结果

编号	坍落度 /mm	CUFA /%	初次开 裂时间 /h	平均开 裂面积 /mm ²	单位面 积开裂 数目/ 条·m ⁻²	单位面 积总开 裂面积 /mm ² ·m ⁻²	开裂 等级
1	30	20	23	5	5.56	27.8	I
2	30	30	23	2	2.78	5.56	I
3	30	40	无	无	无	无	I

注: 试件成型环境温度 30℃, 相对湿度 70%。

3 结论

(1) 以超细粉煤灰为主要原料, 加入改性剂而成的复合超细粉煤灰 (CUFA) 以适宜掺量等量取代水泥, 可成功配制出质量优良、性能稳定的 C50 高性能道路混凝土。

(2) 由力学性能试验可知, 混凝土早期强度主要取决于 w/c 和 CUFA 掺量, 而后期则主要取决于 $w/$

B 和 CUFA 掺量。

(3) 高性能道路混凝土其抗渗、耐磨、抗裂性能优良, 有很好的工程实践价值。

(4) 通过应力-应变全曲线分析可知, 高性能道路混凝土可采用现行规范设计。

(5) 试验结果表明, 综合考虑抗折、抗压、劈拉、干缩、抗渗、耐磨、抗裂等性能, 同时考虑到实际工程中施工及养护条件等因素的变异, 以及《公路水泥混凝土路面滑模施工技术规程》规定的道路混凝土中粉煤灰掺量应 $\leq 30\%$ 的要求, 又鉴于掺 40% CUFA 尚缺乏应用经验, 为保险起见, 在实际运用中我们认为 CUFA 等量取代水泥以不超过 30% 为宜。

(6) CUFA 高性能道路混凝土大量利用了工业废料粉煤灰, 具有显著的经济和环保效益。

参考文献:

- [1] 沈旦申. 粉煤灰混凝土 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [2] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [3] 冯乃谦. 高性能混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [4] 傅智. 水泥混凝土路面滑模施工技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [5] 周士琼, 等. 高性能混凝土专用粉煤灰复合超细粉 [J]. 施工技术, 1999, 28 (5): 13-14.
- [6] 周士琼, 尹健, 谢友均. 超高强粉煤灰高性能混凝土的长期性能 [C]. 长沙: 第四届高强与高性能混凝土及其应用学术讨论会论文集, 2001.