

高掺量粉煤灰混凝土综述

蒋林华

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘要 综述高掺量粉煤灰混凝土性能、原材料要求、配合比设计等方面的主要特点。介绍高掺量粉煤灰混凝土在大坝施工、道路工程和结构混凝土中的应用情况。认为高掺量粉煤灰混凝土具有优异的物理力学性能,但其微观机理、抗除冰盐性能、配制技术及质量控制、施工工艺等尚需进一步研究。

关键词 混凝土 粉煤灰 配合比 HFCC 掺量 粉煤灰混凝土

粉煤灰用作混凝土的掺合料可追溯到40年代末。传统的粉煤灰掺量一般限制在胶凝材料总量的20%~25%。高掺量粉煤灰混凝土(HFCC)是一种新材料,迄今尚没有关于它的明确的定义。HFCC的粉煤灰掺量一般在55%~70%,即混凝土中粉煤灰比水泥用量还多。HFCC原是为碾压混凝土坝施工而开发的,之后逐渐应用到其它混凝土结构工程中。在HFCC研究领域,加拿大、英国和美国处于领先地位。我国在常态混凝土中掺用粉煤灰亦有40多年的历史。但迄今为止,其掺量一般只占胶凝材料总量的15%~30%,掺量达40%以上的研究和应用实例较少。

当前,我国粉煤灰的年排放量已超过8000万t,而且增长势头迅猛,仅靠目前的利用量,还难以消纳,从综合利用和环境保护的角度出发,需要提高粉煤灰的利用率。HFCC可以大量利用粉煤灰,显著改善混凝土的耐久性,制备出各种性能十分优异的高性能混凝土。因此,研究和开发HFCC具有十分重要的意义。

1 HFCC的主要特点

1.1 物理力学性能

a. 和易性。HFCC具有良好的粘聚性,

能减少泌水。HFCC的和易性与粉煤灰质量、外加剂品种及掺量等有关。总的来说,只要HFCC的配合比恰当,搅拌时间充分,其和易性能够满足各种不同工程的需要。Malhotra等^[1]用8种不同粉煤灰配制的HFCC的塌落度在95~210mm之间,含气量为4.5%~6.1%。

b. 强度。混凝土中掺粉煤灰后,其早期强度一般会随掺量的增加而降低。HFCC中各组分的配比可以有较大的灵活性,因此可配制出早期强度高的HFCC。Malhotra等^[2]用F型粉煤灰配制的HFCC的1d,3d,7d,28d的抗压强度分别达到了13.7MPa,22.4MPa,34.2MPa,57.1MPa。大量试验研究还表明,HFCC在28d后强度还有很大的增长。不仅试验室的试件强度发展情况如此,现场混凝土也是一样。图1为英国Didcot电站施工的路面混凝土试件与芯样的强度发展情况^[3]。

c. 变形性能。HFCC的弹性模量与28d龄期抗压强度相当的硅酸盐水泥混凝土相类似,强度愈高,弹性模量愈大。HFCC的徐变和干缩率要低于硅酸盐水泥混凝土。这是因为HFCC的单位用水量较少,且HFCC的水化浆体较少而集料和未水化胶凝材料较多。

作者简介:蒋林华,男,硕士,副教授,从事建筑新材料和混凝土材料研究,曾发表《聚酯无纺布老化试验研究》等论文。

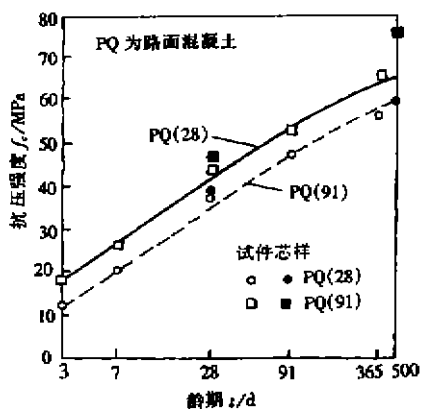


图1 Didcot 电站路面 HFCC 强度发展

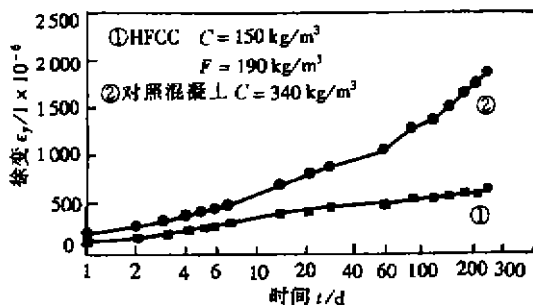


图2 潮湿养护 28d 后对照混凝土和 HFCC 的徐变

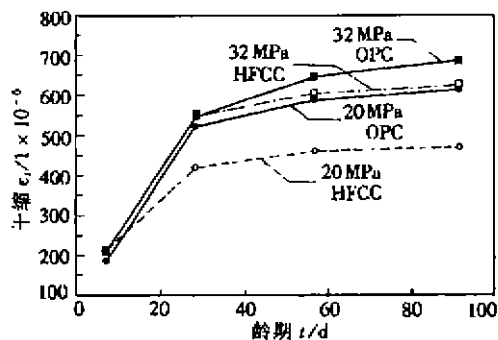


图3 普通混凝土与 HFCC 的干缩

图 2^[2] 和图 3^[4] 分别为 HFCC 的徐变和干缩试验结果。

d. 热学性能。由于 HFCC 含有大量粉煤灰,因此 HFCC 的自生温升要比硅酸盐水泥混凝土低得多^[5,6]。硅酸盐水泥混凝土有明显的温峰且到达温峰后温度下降相对较快,而 HFCC 的温峰不太明显且到达最大温度后温度不会快速下降,见图 4^[2]。

e. 耐久性。HFCC 的孔径分布与硅酸盐水泥混凝土不同,大孔数量较少,渗透系数很小,一般在 $1.6 \times 10^{-14} \sim 5.7 \times 10^{-13} \text{ m/s}$,具

有很强的抗离子渗透能力。HFCC 抗氯离子能力随龄期而变化,强度愈高,氯离子渗透性愈低。图 5 为英国 Grangetown 立交桥采用 HFCC 使用 10 年后的混凝土芯样氯化物测定情况^[7]。尽管混凝土表面的氯化物浓度很高,但钢筋周围的氯化物浓度很低。

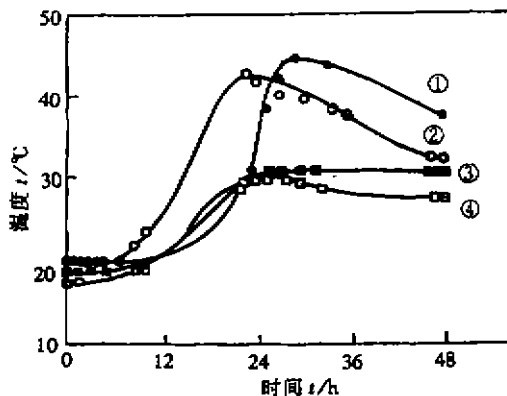


图4 混凝土的自生温升

① 对照混凝土, $W/C = 0.39, C = 340 \text{ kg/m}^3$; ② 对照混凝土, $W/C = 0.46, C = 290 \text{ kg/m}^3$; ③ HFCC, $W/(C+F) = 0.30, C = 150 \text{ kg/m}^3, F = 190 \text{ kg/m}^3$; ④ HFCC, $W/(C+F) = 0.35, C = 150 \text{ kg/m}^3, F = 190 \text{ kg/m}^3$

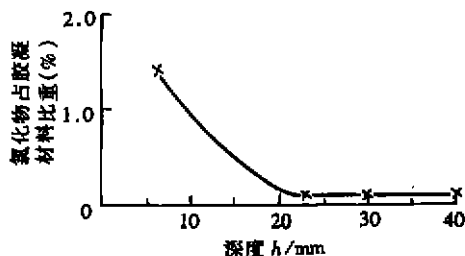


图5 混凝土芯样氯化物测定情况

HFCC 具有极好的抗冻融性能。图 6 的试验结果表明, HFCC 的耐久性系数高于对照混凝土^[2]。但试验中也发现大约 50 次冻融循环后, HFCC 有轻微的表面剥落。文献[1]的试验结果亦表明, HFCC 的耐久性系数很高。

HFCC 对碳化的敏感程度不比具有相应强度的传统硅酸盐水泥混凝土和粉煤灰混凝土大。英国的一些用 HFCC 建造的建筑物在使用 10 年后测得的碳化深度平均值在 1 ~ 3 mm^[7]。加拿大 Malhotra 等得到的试验结果是: 试验块在暴露 2 年后, HFCC 和对照混凝土的碳化深度分别为 0 ~ 3 mm 和 3 ~ 5 mm, 而胶凝材料用量较少的混凝土的碳化深度为

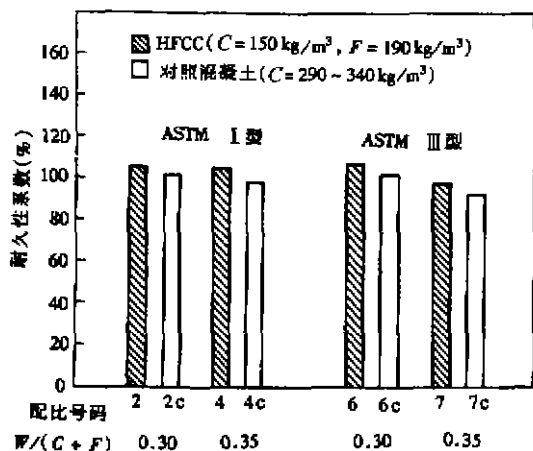


图6 HFCC和对照混凝土的耐久性系数
(按 ASTM C666, 程序 A)

10 mm^[2]。因此,混凝土的碳化还与混凝土中胶凝材料用量有关。

HFCC具有非常好的抗硫酸盐侵蚀性。日本 M. Kawamura 等^[8]把 HFCC 浸入 10% 的 Na₂SO₄ 溶液中,通过长达 2 年的试验研究,发现 HFCC 能有效地改善混凝土的抗硫酸盐性能,结果见图 7。

HFCC 能有效地抑制碱集料反应,即使

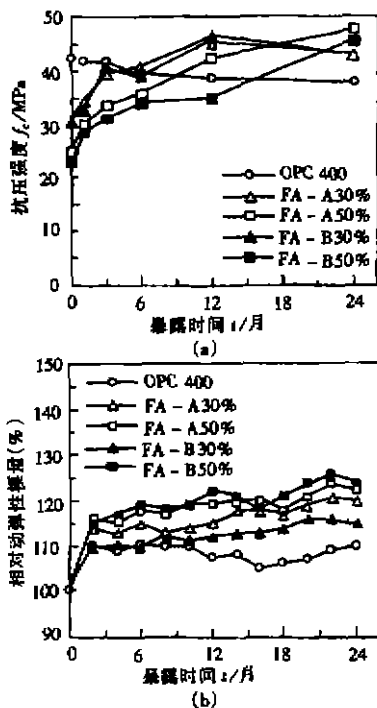


图7 HFCC 和 OPC 的抗硫酸盐
试验结果

在一些严酷的条件下也是如此。图 8 为 Malhotra 等的一组试验数据, HFCC 中粉煤灰掺量为 58%^[9]。显然, HFCC 大大降低了混凝土的膨胀。

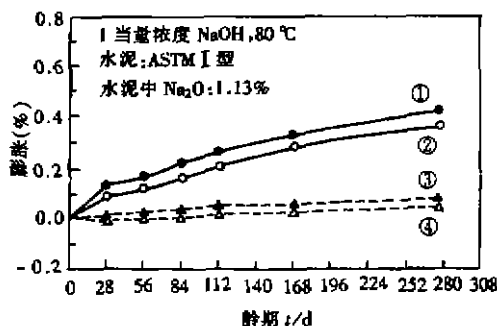


图8 浸没在 80℃, 1 当量浓度 NaOH
溶液中混凝土试件的膨胀
①不掺粉煤灰加碱; ②不掺粉煤灰;
③掺粉煤灰; ④掺粉煤灰加碱

HFCC 的抗除冰盐能力较差。文献[1]用 8 种粉煤灰制作的 HFCC 板状试件进行除冰盐试验, 结果除 5 号混凝土在 50 次冻融循环后表现等级为 4 等外, 其余的混凝土经 50 或 100 次冻融循环后表现等级均为 5 级。根据 ASTM 标准, 4 级与 5 级分别对应于中度剥落和严重剥落。

1.2 对原材料要求

HFCC 对水泥、集料无特殊要求, 基本与普通混凝土相同。HFCC 的水胶比较小, 单位用水量亦较少, 因此 HFCC 需掺用超塑化剂。为使混凝土的拌和物具有一定的含气量, 改善混凝土的流动性, 一般在掺塑化剂的同时还要掺引气剂。HFCC 与普通混凝土在原材料方面最大的差别是要掺大量的粉煤灰。国外一些学者经过研究认为^[1,3], 并不是优质的粉煤灰才能用于 HFCC, 只要粉煤灰的质量稳定, 用低质量的粉煤灰同样可以配制高性能的 HFCC。文献[10]的研究结果亦表明, 用 I 级灰配制的 HFCC 强度并不明显优于用 II 级灰配制的 HFCC。表 1 为美国、加拿大和我国有关标准对粉煤灰的质量要求。表 2 为国外部分 HFCC 所用的粉煤灰。从表 1 和表 2 可以看出, 国外 HFCC 所用的

粉煤灰中,多数粉煤灰相当于我国的Ⅱ级灰或Ⅲ级灰。因此,我国有相当部分Ⅱ级或Ⅲ级灰可用来配制 HFCC。

表 1 粉煤灰的质量指标要求 (%)

质量指标	ASTM C618-84		CSA A23.5-M82		GBJ 146-90		
	F型	C型	F型	C型	I级	II级	III级
细度 ^①	≤34	≤34	≤34	≤34	≤12	≤20	≤45
烧失量	≤6.0	≤6.0	≤12.0	≤6.0	≤5.0	≤8.0	≤15.0
需水量比	≤105	≤105	—	—	≤95	≤105	≤115
SO ₃	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤3.0	≤3.0	≤3.0

注:①45μm筛余。

表 2 部分粉煤灰的化学成份与物理性能 (%)

指标或成份	文献[1]	文献[11]	文献[7]
细度 ^①	15.3~31.9	17.3~46.0	6.1~51.0
需水量比	—	92~100	—
烧失量	0.3~2.78	0.29~9.72	2.2~5.0
SiO ₂	46.2~55.39	38.3~62.1	48.5~51.0
Al ₂ O ₃	15.32~31.53	12.8~24.9	27.7~31.1
Fe ₂ O ₃	6.28~16.57	2.99~39.7	6.9~11.7
CaO	1.17~19.37	1.21~12.3	1.6~4.6
MgO	0.85~5.48	0.43~1.76	1.4~2.2
SO ₃	0.37~1.85	0.16~1.40	0.57~0.85

注:①45μm筛余。

1.3 配合比设计

HFCC 的配合比设计具有较大的灵活性。英国的 Dunstan^[3]把粉煤灰作为混凝土的“第四组分”进行配合比设计,这使配合比设计在具有较大灵活性的同时,也产生了一些困难,设计者必须考虑每个组分的特性,尤其是粉煤灰的需水量和水泥的质量,因为 HFCC 的强度对用水量的变化更加敏感。此外,水泥的质量与组成对 HFCC 的强度发展亦有显著的影响。表 3 为一些典型的 HFCC 配合比^[1,10,11]。

表 3 HFCC 的配合比

材料用量/kg·m ⁻³			水胶比 W/(C+F)	粉煤灰掺量 (%) F/(C+F)	砂率 (%)	外加剂品种与掺量	坍落度 /mm	抗压强度/MPa		
水	水泥	粉煤灰						7d	28d	91d
151	291	291	0.26	50	36	N型高效减水剂 1.2%	225	43.4	56.5	72.2
117	228	315	0.22	58	36	AEA978 mL/m ³ ; SP15.9 kg/m ³	200	34.8	54.7	69.8
126	212	292	0.25	58	36	AEA1513 mL/m ³ ; SP41.2 kg/m ³	200	19.6	32.3	41.5
117	151	209	0.33	58	35	AEA150 mL/m ³ ; SP2.8 L/m ³	160	26.5	42.2	50.4
166	252	378	0.26	60	32	N型高效减水剂 1.2%	240	35.5	56.8	—

(下转第 48 页)

2 HFCC 的应用

a. 大坝施工中的应用。开发 HFCC 先是为了用于碾压混凝土筑坝。如英国的 Milton Brook 坝,芯部碾压混凝土中 $F/(C+F)$ 为 0.73;美国的上静水坝,芯部碾压混凝土 $F/(C+F)$ 为 0.75。我国广西岩滩水电站的围堰施工,亦采用了碾压混凝土, $F/(C+F)$ 为 0.70。HFCC 除用于大坝芯部碾压混凝土外,还适用于面层滑模混凝土施工。

b. 道路工程中的应用。HFCC 除用于大坝施工外,还很快地被推广应用到道路工程中。如英国 Heathrow 机场, M25 公路和 Didcot 电站煤运区的路基及 Gatwick 机场, A126 干线公路的路面等均采用了 HFCC。

c. 在结构混凝土中的应用。HFCC 从路面用的低塌落度混凝土已进一步扩展到中或大塌落度的配筋结构混凝土。如英国的 Didcot 储油罐钢筋混凝土基础, Wincanton 污水处理厂和 Grangetown 高架桥等工程均采用了 HFCC。其中 Wincanton 污水处理厂的混凝土有高抗硫酸盐的要求,且集料可能会发生碱-硅反应,因此 HFCC 能经济有效地解决这些问题。

3 结 语

HFCC 的历史较短,英国 Dunstan 等从 1979 年起开始研究和应用 HFCC,加拿大 Malhotra 等从 1985 年起又把 HFCC 的研究向前推进了一步。虽然经过 10 多年的试验研究和工程实践,解决了一些重大技术问题,但还存在许多问题有待进一步研究和实践^[12]。这些问题主要有:HFCC 的微观机理;HFCC

表5 各方案相应于A层指标的综合关联度

方案	综合关联度	方案	综合关联度	方案	综合关联度
1	0.584	6	0.456	11	0.658
2	0.625	7	0.398	12	0.642
3	0.449	8	0.369	13	0.691
4	0.514	9	0.477	14	0.658
5	0.502	10	0.688	15	0.647

2.5 结果分析

从表5的结果可知,方案13的综合关联度最大,即综合考虑项目的经济性、滚动性及风险性,筹资采用政府贴息,同时将围垦的土地全部用于养殖是最佳的方案,应作为公司首选的方案。结果也表明,方案8的综合关联度最小,即采用世行贷款并从事租赁经营是最不可取的方案。所有这些将为公司的决策提供全面而科学的依据。

3 结 语

使用层次分析与灰色关联分析相结合的方法进行项目的综合评价,既能保持评价的多层次性,从而处理较为复杂的问题,又能利用有限的信息将实际方案与最优的参考方案建立起关联,从而达到充分利用已有信息作出决策的目的。

这一综合评价的新方法具有概念清晰、层次分明、应用方便等优点,实例分析表明,这一方法得出的结果是科学合理的。

参考文献

- 1 邓聚龙.灰色系统理论教程.武汉:华中理工大学出版社,1990
- 2 孙光亮.多层次综合评判模型及其应用.系统工程,1996,15(3):25~30

(收稿日期:1996-08-29 编辑:许宇鹏)

(上接第34页)

的个别性能如抗除冰盐性能不能令人满意;HFCC的配制技术,包括外加剂与胶凝材料的适应性、激发剂的研制等;HFCC的推广应用技术。如HFCC的质量控制、施工工艺等。

参考文献

- 1 Malhotra V M, et al. Durability of concrete incorporating high volumes of fly ash from sources in the US. ACI Materials Journal, 1994, 91(1): 3~12
- 2 Malhotra V M, et al. Structural concrete incorporating high volumes of ASTM class F fly ash. ACI Materials Journal, 1989, 86(5): 507~514
- 3 Dunstan M. Fly ash as the "fourth ingredient" in concrete mixtures. ACI SP91-7, 1986
- 4 Nelson P, et al. Mechanical and durability properties of high volumes fly ash concrete. ACI SP145-52(Concrete Durability), 1994. 967~984
- 5 Malhotra V M, et al. Strength development and temperature rise in large concrete blocks containing high volumes of low-calcium (ASTM class F) fly ash. ACI Materials Journal, 1992, 89(4): 362~368
- 6 Malhotra V M, et al. Performance of high-volume fly ash concrete in large experimental monoliths. ACI Materials Journal, 1994, 91(4): 178~187
- 7 Dunstan M, et al. Investigation into the long-term in situ performance of high fly ash content concrete used for structural application. ACI SP132-1, 1992, 1.1~20
- 8 Kawamura M, et al. Sulfate resistance of high fly ash content concrete. Cement and Concrete Research, 1995, 25(4): 759~768
- 9 Malhotra V M, et al. Role of concrete incorporating high volumes of fly ash in controlling expansion due to alkali-aggregate reaction. ACI Materials Journal, 1991, 88(2): 159~163
- 10 王胜年.提高混凝土的耐久性——大掺量粉煤灰配制高性能海工混凝土的研究.见:中国土木工程学会混凝土耐久性专业委员会.第四届全国混凝土耐久性学术交流会论文集.苏州, 1996. 199~204
- 11 Malhotra V M, et al. Mechanical properties, creep, and resistance to diffusion of chloride ions of concrete incorporating high volumes of ASTM class F fly ash from seven different sources. ACI Materials Journal, 1991, 88(4): 407~416
- 12 Zhang M H. Microstructure, crack propagation, and mechanical properties of cement pastes containing high volumes of fly ashes. Cement and Concrete Research, 1995, 25(6): 1165~1178

(收稿日期:1996-08-28 编辑:马敏峰)