

硅粉粉煤灰双掺高性能混凝土的配制及其应用*

马少军, 姚汝方, 李光宇, 曹四伟

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 在实验的基础上研究了硅粉、粉煤灰、外加剂等因素对混凝土强度、工作性能、耐久性等的影 响, 采取硅粉和粉煤灰双掺技术成功配制某工程C70 高性能混凝土, 确定了其最佳参数。结果表明, 硅粉掺量为 17 kg/m^3 , 粉煤灰掺量为 83 kg/m^3 , 高效减水剂(NN)用量为 8.6 L/m^3 , 普通减水剂(VZ)为 3.0 L/m^3 时, 混凝土90 d 抗压强度平均值为 79.9 MPa , 标准差为6.3, 离差系数为0.08, 保证率为93.4%, 同时满足了抗渗、抗冻、抗冲磨及良好的和易性及流动性等一系列高性能要求。

[关键词] 硅粉; 粉煤灰; 双掺技术; 高性能混凝土

[中图分类号] TU 528.062

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)09-0127-04

随着混凝土技术的进步和发展, 以及建筑、水利等工程在技术方面的特殊要求, 高性能混凝土的研究和应用日益得到重视。目前普遍认为^[1,2], 高性能混凝土除需满足高强度外, 还要重点保证混凝土的耐久性、工作性、适用性、体积稳定性、经济合理性等要求, 而采用超细矿粉(硅粉、粉煤灰等)和高效减水剂已成为配制高性能混凝土的关键技术手段。研究资料表明^[3~6], 硅粉能够显著提高混凝土的早期强度, 同时能够有效提高混凝土的抗氯化物、抗硫酸盐、抗渗、抗冻和抗碱硅反应能力, 特别是抗冲磨、抗空蚀性能。研究资料还表明^[7,8], 在水泥浆体中硅粉的水化热值与普通水泥相似, 但其等效水泥系数约为3。因此, 在混凝土中掺入硅粉可减少水泥用量从而降低水化热。研究资料表明^[5,7,8], 用粉煤灰取代部分水泥能够改善新鲜混凝土的和易性, 有利于泵送施工; 同时粉煤灰的活性较水泥低, 其水化热远小于水泥, 因而能有效降低水化热; 粉煤灰对混凝土强度的影响表现为混凝土早期强度有所降低, 但后期强度能得到显著增长。综合上述因素, 既要重视硅粉、粉煤灰对混凝土温控、耐久性等方面的有利因素, 也不能忽视硅粉容易导致混凝土早期开裂、粉煤灰可能影响混凝土抗冲磨性能和降低混凝土早期强度等不利因素。因此, 在配制高性能混凝土时, 需要通过大量的试拌试验选择合理的配制参数, 最大限度地满足工程技术要求。本研究基于某水利工程泄水建筑物C70 高性能混凝土的配制, 结合使用高效

减水剂, 采用硅粉、粉煤灰双掺, 在相对最佳的配制参数下, 不仅克服了单掺粉煤灰混凝土早期强度低, 以及单掺硅粉混凝土早强而后期强度增长缓慢的缺点, 还赋予了混凝土高强、抗冲磨、抗空蚀等一系列高性能, 使混凝土具备良好的和易性及流动性, 并且减少了混凝土单位水泥用量, 减轻了温控负担, 取得了显著的技术经济效益。

1 工程概况

某水利工程泄洪项目主要由进水口引渠、进水塔、孔板(导流)洞、明流洞、排沙洞、溢洪道、出口消力塘和泄水渠、尾水明渠等建筑物组成。水库建成后泄洪建筑物工作水头为100~143 m, 所在河道汛期水流平均含沙量 49 kg/m^3 , 瞬间最大含沙量达 941 kg/m^3 。水库高水位时, 泄洪建筑物下泄洪水流速高达 30 m/s 以上。《水工混凝土抗冲磨防空蚀技术规范》中提出: 对于过流介质以悬移质为主的工程, 当过水最大流速为 $25\sim 35\text{ m/s}$, 且过流中同时含有的推移质含量大于 2 kg/m^3 时, 应选用强度等级 $\geq\text{C}60$ 的掺用硅粉的抗磨蚀混凝土。因此, 为提高高水头、高含沙、高流速条件下泄洪建筑物的抗冲磨和抗空蚀能力, 设计采用龄期28 d, 强度等级为C70 的高性能混凝土浇筑衬砌, 实际浇筑量近 50 万m^3 。

2 C70 高性能混凝土的技术要求

配制高性能混凝土必须从原材料品质、配合比

* [收稿日期] 2003-11-19

[作者简介] 马少军(1969-), 男, 甘肃静宁人, 工程师, 在读硕士, 主要从事混凝土材料结构研究。

优化、施工工艺与质量控制等方面进行综合考虑,和普通混凝土相比,硅粉混凝土虽具有较高的强度和耐久性,但由于其水胶比小、水泥用量大且不易泌水,因而比普通混凝土更容易发生塑性收缩,其早期干缩率和自身体积变形也比普通混凝土更大,这些因素交织在一起,导致硅粉混凝土在施工中往往出现早期开裂的技术难题。为此,在进行配合比设计时,考虑通过以粉煤灰等活性矿物料取代部分水泥

及掺加高效减水剂等手段,在满足各项技术要求的前提下,尽可能减少水泥用量,降低混凝土绝热温升,从而减轻温控负担,降低混凝土出现裂缝的风险。通过掺加高效减水剂和粉煤灰,还可使硅粉混凝土具有良好的和易性及流动性,以满足该工程现场泵送施工的要求。表1给出了该工程合同技术规范中C70 高性能混凝土的主要技术指标。

表1 C70 高性能混凝土主要技术指标
Table 1 The main technical indexes of C70 HPC

混凝土类别 Concrete class	最大骨料粒径/mm Maximum aggregate size	最大水胶比 Maximum water-cement ratio	设计龄期/d Age of design	强度等级 Compressive strength grade	抗渗等级 Permeability grade	抗冻等级 Freeze-thaw resistance grade	泵送要求 Requirement of pumping
A 1/A 2	37.5	0.30	28	C70	S6	D50	可泵送 Pumpious
A 2	63	0.28~0.30	28	C70	S6	D50	可泵送 Pumpious

3 C70 高性能混凝土的配制

3.1 原材料

选用优质的原材料是配制高性能混凝土的前提。根据该工程合同技术规范的要求,结合材料产地和经济性选用满足国标标准、部颁标准及美国ASTM 标准的原材料。

- 1) 水泥采用洛阳水泥厂生产的525R 早强型普通硅酸盐水泥和525MH 中热水泥。
- 2) 粉煤灰采用焦作热电厂生产的Ⅱ级粉煤灰。
- 3) 硅粉采用青海民和镁厂生产的加密硅粉。
- 4) 外加剂采用瑞士Sika 香港公司生产的高效减水剂(NN)、普通减水剂(VZ)和缓凝剂(Ret),其中NN 减水率为15%,VZ 减水率为9%。
- 5) 细骨料采自黄河连地滩料厂,由天然细砂掺20%~30% 人工粗砂混合而成,混合后细度模数为2.6~2.8,属中砂,其中人工粗砂由天然粗骨料破碎

加工而得。

6) 粗骨料采自黄河连地滩料厂,由天然河卵石破碎并分级筛分而得,其主要成分为硅质石英砂岩和玄武岩,属坚硬岩石类,岩石抗压强度高达170~250 MPa,因而有利于配制抗冲磨、抗空蚀能力较高的高性能混凝土。

7) 拌合用水采用地方饮用水,水质满足要求。

3.2 配合比设计

配合比按照美国混凝土协会ACI 211.1-92^[9]设计。其要点是:(1)选择满足合同技术要求的水胶比;(2)混凝土各组分级配按ACI 及ASTM 相关标准最佳级配线计算选配;(3)依据混凝土强度等级和泵送施工要求确定用水量;(4)通过计算和试配确定硅粉、粉煤灰和外加剂的最佳掺量。表2列举了该工程施工过程中采用的部分C70 高性能混凝土配合比。

表2 C70 高性能混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of C70 HPC

配比号 Mix No.	水胶比 Water-cement ratio	水/ (kg·m ⁻³) Water	水泥/ (kg·m ⁻³) Cement	粉煤灰/ (kg·m ⁻³) Fly ash	硅粉/ (kg·m ⁻³) Silica fume	外加剂/(L·m ⁻³) Addixture			骨料/(kg·m ⁻³) Aggregate		坍落度/ cm Slump
						NN	VZ	Ret	细 Fine	粗 Coarse	
A 2-1	0.26	124	380	90	10	7.2	2.4	/	621	1 178	16~18
A 2-2	0.26	125	365	75	40	7.2	2.4	/	619	1 174	16~18
A 1/A 2-1	0.23	110	380	83	17	8.6	3	/	655	1 141	16~18
A 1/A 2-2	0.26	128	365	75	40	8.6	2.4	/	649	1 129	13~15

注:缓凝剂Ret 的掺入根据施工需要复配。
Note: The retarder agent (Ret) will be added according to the need of construction

3 3 硅 粉

硅粉掺量因混凝土技术要求不同而不同。研究表明^[3, 6, 10], 硅粉对混凝土用水量较为敏感, 随着硅粉掺量的增大, 混凝土用水量显著增加, 水泥用量也相应增加。为满足低水胶比、泵送、温控等技术要求, 需掺加高效减水剂来进行补偿, 当硅粉掺量增加到一定程度时混凝土性能反而降低, 因此, 掺加的硅粉量为相对最佳掺量时, 才能显著改善混凝土的性能。结合该工程C70 高性能混凝土配合比的试拌及应用情况, 考虑到高效减水剂用量的限制, 以及利用粉煤灰可提高混凝土后期强度之优点, 从经济技术指标综合分析, 选择3% (占胶凝材料总量的质量分数) 左右的硅粉掺量来配制工程所需的高性能混凝土是可行的, 掺量过大反而不利。硅粉掺量为5%~8% 时, 虽然有利于提高混凝土强度, 但由于硅粉用量和高效减水剂用量的增加大大加速了水泥早期的水化^[10], 因而也加大了混凝土出现早期裂缝的可能, 这一点在该工程混凝土早期裂缝检测中得到了证实。此外, 由于硅粉掺量增加加大了混凝土的粘聚力, 也给泵送施工造成了一定困难。

在高性能混凝土中, 硅粉起水化产物核心作用, 这一性能的发挥需要硅粉在水泥浆体中的良好分散

性来保证。由于该工程采用的是加密硅粉, 为使硅粉掺入混凝土后能够均匀分散, 参考国外的施工经验, 承包商采用了湿掺解密的施工工艺, 即将加密硅粉与水1 1 (重量比) 混合后高速搅拌进行解密, 湿掺解密后形成含50% 硅粉的均匀浆液。需要强调的是, 湿掺解密工艺要求精度较高的机械设备, 其中称量、搅拌和泵送设备最为关键, 该工程以上主要设备均为进口, 其中搅拌机为德国造SC100QM S 型, 转速达380 r/m in。此外, 为了保证硅粉浆液的均匀性和稳定性, 应在搅拌过程中添加质量优良的浆液稳定剂, 该工程选用的浆液稳定剂为瑞士Sika 公司生产, 掺量为1% (占硅粉浆的质量分数)。

3 4 粉煤灰

从表3 和表4 可以看出: 对于掺加粉煤灰的混凝土, 应当充分利用其后期强度增长较快的特点, 在不影响工程运行期限的前提下, 可适当延长混凝土设计龄期, 这样既满足了设计要求, 又能够节省材料。这一点与我国DL /T 5055- 1996《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》中关于粉煤灰混凝土设计龄期应采用90 d 或更长龄期的观点是一致的。该工程在进行最后评定验收时即将混凝土设计龄期由原来的28 d 改为90 d。

表3 C70 高性能混凝土试验数据总体统计结果

Table 3 The total statistics of experimental data for C70 HPC

抗渗等级 Pemeability grade	抗冻等级 Freeze-thaw resistance grade	抗压强度平均值/M Pa A verage compressive strength			标准差 Standard deviation		离差系数 Cv Coefficient of variation		保证率/% Safety guaranty 90 d
		7 d	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d	
> S6	> D50	52.6	71.1	79.9	6.9	6.3	0.10	0.08	93.4

表4 单掺与双掺混凝土抗压强度增长率比较

Table 4 Development comparison of compressive strength between concrete with silica fume and with silica fume & fly ash

处理 T reatment	胶凝材料比例/% Proportion of cementitious material			抗压强度增长率/% Development of compressive strength		
	水泥 Cement	粉煤灰 Fly ash	硅粉 Silica fume	7 d	28 d	90 d
单掺1 Single-combined one	80	20	0	67	100	115
单掺2 Single-combined two	97	0	3	81	100	107
双掺 Double-combined	77	20	3	73	100	110

3 5 外加剂

高性能混凝土以低用水量和低水胶比为前提, 因此掺加适量的高效减水剂, 是配制高性能混凝土的通用途径之一。通过大量试拌试验, 该工程采用了高效减水剂NN (增塑剂) 与普通减水剂V Z 复合掺入的方式, 在不超过减水剂最大限制掺量的情况下, 满足了高强硅粉混凝土低水胶比、低用水量、高早强

和泵送施工等技术要求。需要指出的是, 高效减水剂的掺入会加速水泥早期水化, 这不仅会增大硅粉混凝土早期温控的难度, 而且在低水胶比、硅粉掺量较大或环境温度较高的情况下, 还会使混凝土坍落度经时损失加快, 对于有一定运输距离或采用泵送施工的混凝土而言, 这也是极为不利的。该工程在混凝土运输或等待时间较长时, 主要采用复配缓凝剂

(Ret)的方式来解决上述问题。

3.6 单掺与双掺的比较

该工程高性能混凝土配制中的大量试拌试验结果表明: (1)在水灰比一定的情况下,采用硅粉、粉煤灰双掺不仅可以最大限度地代替水泥,降低水化热,而且能够克服单掺粉煤灰混凝土早期强度降低和单

掺硅粉混凝土早强但后期强度增长缓慢的缺点(表4); (2)掺20% (占胶凝材料总量的质量分数)左右粉煤灰后,硅粉混凝土抗冲磨性能得到提高,抗空蚀性能基本没有减小(表5); (3)采用较大粒径的骨料,混凝土抗冲磨和抗空蚀性能相对更好(表5)。

表5 单掺与双掺混凝土抗冲蚀试验结果

Table 5 Test results of abrasion and cavitation resistance for concrete with silica fume and with silica fume & fly ash

处理 Treatment	最大骨料 粒径/mm Maximum aggregate size	胶凝材料比例/% Proportion of cementitious material			抗冲磨强度/ (h · kg ⁻¹ · m ⁻²) Strength of abrasion resistance	抗空蚀重量 损失/g Weight loss of cavitation resistance
		水泥 Cement	粉煤灰 Fly ash	硅粉 Silica fume		
单掺 Single-combined	63	97.9	0	2.1	2.65	13.6
	37.5	97.9	0	2.1	2.59	13.6
双掺 Double-combined	63	77	20	3.0	2.95	9.8
	37.5	77	20	3.0	2.78	10.4

4 小 结

1) 本试验结果表明,结合使用高效减水剂,采用硅粉和粉煤灰双掺,不仅可克服单掺粉煤灰混凝土早期强度低和单掺硅粉混凝土早强但后期强度增长缓慢的缺点,还可赋予混凝土高强、抗冲磨、抗空蚀等一系列高性能,同时使混凝土具备良好的和易性及流动性,减少了混凝土单位水泥用量,从而减轻温控负担,其技术经济效果显著。

2) 在配制含硅粉的高性能混凝土时,应特别注意高效减水剂与胶凝材料的适应性,通过试拌选择

相对最佳的胶凝材料用量、硅粉掺量和高效减水剂掺量,为满足部分技术指标而不加限制地使用高效减水剂,对混凝土总体质量而言弊大于利。

3) 本试验中,当硅粉掺量为17 kg/m³,粉煤灰掺量为83 kg/m³,NN 为8.6 L/m³,VZ 为3.0 L/m³时,可配制满足该工程合同技术要求的高性能混凝土,混凝土90 d 抗压强度平均值为79.9 MPa,标准差为6.3,离差系数为0.08,保证率为93.4%,同时满足了抗渗、抗冻、抗冲磨及良好的和易性及流动性等一系列高性能。

[参考文献]

- [1] 吴中伟. 绿色高性能混凝土与科技创新[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(1): 3- 8
- [2] 冯乃谦, 邢 锋. 高性能混凝土技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2000. 190- 191
- [3] Boerseth I 著. 硅粉在弗尔沃斯大坝中的应用[J]. 刘敬廉, 赵 庚, 译. 水电建设科技通讯, 1986, 12(3): 14- 17
- [4] Bruth G S. Durability of silica fume concrete exposed to chloride in hot climates[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(1): 41- 48
- [5] Langan B W, Wenig K, Ward M A. Effect of silica fume and flyash on heat of hydration of Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32: 1045- 1051
- [6] 马少军, 韩苏建, 曹四伟, 等. 硅粉混凝土在水利工程中的应用[J]. 西北水资源与水工程, 2000, 11(4): 51- 54
- [7] 钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 136- 199
- [8] 李淑进, 万小梅, 赵铁军. 粉煤灰高性能混凝土[J]. 混凝土, 2000, 138(4): 21- 24
- [9] Domone P L J, Soutsos M N. An approach to the proportioning of high-strength concrete mixes[J]. Concrete International, 1994, 10: 26- 31
- [10] Pinto R C A, Hover K C. Superplasticizer and silica fume addition effects on heat of hydration of mortar mixtures with low water-cementitious materials ratio[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96: 600- 604

(下转第134页)

Studies on the thermal decomposition characteristics of Quinolone drugs of P ipem idic A cid and Norfloxacin

ZHEN Bao-qin, ZHU Xiao-mei, HAN Sen

(Department of Chemistry, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China)

Abstract: The thermal characteristics of Quinolone drugs of P ipem idic A cid and Norfloxacin were analyzed by DSC (differential scanning calorimetry), TG (thermogravimetry), DTG (differential thermogravimetry). The thermal kinetic parameter-energy of activation (E) was calculated as well. The thermal decomposition characteristics and the difference of Quinolone drugs in organic structure were analyzed as well.

Key words: DSC; TG; DTG; thermal decomposition characteristics; P ipem idic A cid; Norfloxacin

(上接第130页)

M ix design and application of high performance concrete (HPC) double-combined w ith silica fum e and fly ash

MA Shao-jun, YAO Ru-fang, L I Guang-yu, CAO Si-wei

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: On the basis of experiment, the influence of silica fume, fly ash, and admixture on strength, workability, and durability of concrete is studied. By means of double-combination with silica fume and fly ash, C70 high performance concrete is produced successfully. And the best parameter C70 is established. The results show that compressive strength, standard deviation, and coefficient variation of concrete (90 d) is 79.9 MPa, 6.3, 0.08, and 93.4% in the condition of silica fume 17 kg/m^3 , fly ash 83 kg/m^3 , and water-reducing agent $\text{NN } 8.6 \text{ L/m}^3$, $\text{VZ } 3.0 \text{ L/m}^3$. At the same time, it achieves a series of high performance, such as permeability resistance, freeze-thaw resistance, abrasion and cavitation resistance, as well as perfect workability and fluidity.

Key words: silica fume; fly ash; techniques double-combination; high performance concrete (HPC)