

文章编号: 1671-6833(2008)04-0086-05

高掺量粉煤灰混凝土性能试验研究

施养杭, 袁双喜

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 针对粉煤灰的显著特性及其在工程中的广泛应用, 经对工程充分调查、材料成分分析和配合比设计, 以水胶比、粉煤灰掺量和砂率为变化参数, 采用正交试验法对高掺量粉煤灰混凝土进行试验研究, 并对各影响因素进行了深入分析。结果表明, 水胶比、粉煤灰取代率是影响混凝土性能的主要因素, 砂率对混凝土的流动性和强度影响较大。同时, 得出在高掺量粉煤灰状况下各影响因素与混凝土性能的相关关系及其变化规律, 可供理论研究和工程实践参考。

关键词: 高性能混凝土; 水胶比; 粉煤灰; 砂率; 强度

中图分类号: TU 528 **文献标识码:** A

0 引言

高性能混凝土是在大幅度提高常规混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术, 选用优质原材料如水泥和集料, 再参加足够数量的活性细掺合料和高性能外加剂, 以获得混凝土的高性能, 是一种新型高技术混凝土^[1-12]。高性能混凝土的配合比到目前为止仍然没有一个大家公认的方法, 只有大致的原则, 这与高性能混凝土尚无一个明确的定义有关, 但更重要的是试验表明高性能混凝土的性能指标与混凝土中所掺入的材料不是简单的线性关系。在多因素的作用下, 很难找到混凝土性能随所掺入材料性能不同及掺入材料量的多少而发生变化的规律。

正交试验^[2]是采用正交设计方法处理多因素的试验, 在理论上和应用中已经被证明是一种科学的方法。利用规格化的正交表, 对选定的因素合理安排试验, 只要做较少的试验就可以获得比较多的信息, 得出正确的结论和获得较好的研究效果。

粉煤灰高性能混凝土的设计思路是: 利用高效减水剂的减水作用降低水灰比, 同时掺入粉煤灰改善其性能, 以获得具有高强、高耐久性和优良工作性能的混凝土材料^[3], 影响粉煤灰高性能混凝土的因素很多^[12]。本次试验拟研究水胶比、粉

煤灰掺量和砂率3个因素对其强度和流动性的影响。为减少试验次数, 采用正交试验设计方法, 通过科学安排试验方案和有效分析试验结果, 来推断出各种因素的影响规律, 并确定最佳配合比。

1 试验原材料

(1) 粉煤灰: 厦门双建粉煤灰厂Ⅱ级粉煤灰, 主要物理性质见表1, 主要化学成分见表2。

表1 粉煤灰的物理性质

Tab. 1 Physical property of fly ash %

细度 0.045 mm	需水量	烧失量	含水率	三氧化硫
12	97	0.99	0.04	0.60

表2 粉煤灰化学成分

Tab. 2 Chemical constituents of fly ash %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
31.97	39.60	10.30	12.97	0.92	0.60

(2) 水泥: 福建龙岩三德水泥厂生产的普通硅酸盐水泥 P. O. 42.5R, 标准稠度 29.8%。

(3) 砂: 泉州地区中砂, 细度模数 2.6, 近似密度为 2 640 kg/m³, 堆积密度为 1 490 kg/m³, 含泥量为 2.1%。

(4) 碎石: 所有碎石为石灰石, 最大粒径

收稿日期: 2008-08-17; 修订日期: 2008-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478120); 福建省自然科学基金项目(2008J0161); 国家标准专题研究项目(GBKY6001)

作者简介: 施养杭(1962-), 男, 福建泉州人, 华侨大学教授, 博士, 从事混凝土理论与耐久性研究, E-mail: d. s666@163.com

20 mm, 近似密度为 $2\ 800\ \text{kg}/\text{m}^3$, 堆积密度为 $1\ 450\ \text{kg}/\text{m}^3$.

(5) 外加剂: TW-10 萘系高效减水剂.

2 混凝土正交试验设计

试验以水胶比, 粉煤灰掺量, 砂率 3 个因素进行正交设计, 每个因素选取 3 个水平. 单方胶凝材料总量为 $540\ \text{kg}/\text{m}^3$, 外加剂掺量为胶凝材料总量的 0.75%, 以混凝土的坍落度和 4 个龄期抗压强度为考核指标. 试验因素和水平的安排如表 3 所示. 采用 $L_9(3^4)$ 正交表, 为方便起见, 水胶比、粉煤灰、砂率 3 因素分别用代号 A、B、C 表示. 得到粉煤灰混凝土配合比有关的试验如表 4 所示.

表 3 正交试验因素与水平表

Tab. 3 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	水胶比(A)	粉煤灰掺量(B)/%	砂率(C)/%
1	0.33	0	27
2	0.30	20	31
3	0.28	40	35

表 4 正交试验表

Tab. 4 Table of orthogonal experiment

试验号	1	2	3	4
	水胶比(A)	粉煤灰掺量(B)/%	砂率(C)/%	水平数/因素
1	0.33(1)	0(1)	27(1)	1
2	0.33(1)	20(2)	31(2)	2
3	0.33(1)	40(3)	35(3)	3
4	0.30(2)	0(1)	31(2)	3
5	0.30(2)	20(2)	35(3)	1
6	0.30(2)	40(3)	27(1)	2
7	0.28(3)	0(1)	35(3)	2
8	0.28(3)	20(2)	27(1)	3
9	0.28(3)	40(3)	31(2)	1

从表 4 可以看出, 用正交表安排试验有以下特点: ①对于 3 个因素, 3 个水平, 应有 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 种不同的试验条件. 而采用正交试验法只需要做 9 组试验, 试验次数大大减少; ②各因素的各个不同水平, 在试验中出现的次数相同. 例如, 水胶比 0.30 在 4、5、6 试验中, 粉煤灰掺量 20% 在 2、5、8 试验中……, 它们所出现的次数相等, 均为 3 次; ③任何两个因素中不同水平的搭配, 在试验中均有出现, 并且出现的次数相同.

因此, 正交试验法安排的试验方案是具有代表性的, 能够比较全面地反应各因素、各水平对试验指标的主要影响, 最后可得到各组混凝土的

准配合比如表 5 所示.

表 5 粉煤灰混凝土基准配合比

Tab. 5 Fiducial mixture ratio of fly ash concrete

试验号	混凝土原材料的用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)						水胶比
	水泥	水	粉煤灰	砂	石	外加剂	
1	540	178	0	480	1 299	4.05	0.33
2	432	178	108	551	1 228	4.05	0.33
3	324	178	216	623	1 156	4.05	0.33
4	540	162	0	551	1 228	4.05	0.30
5	432	162	108	623	1 156	4.05	0.30
6	324	162	216	480	1 299	4.05	0.30
7	540	151	0	623	1 156	4.05	0.28
8	432	151	108	480	1 299	4.05	0.28
9	324	151	216	551	1 228	4.05	0.28

3 试验指标测定

根据表 5 中正交试验得出的 9 个配合比, 对混凝土进行试配, 每个配合比拌制 15 L 混凝土, 测定其坍落度, 同时将试块分别养护 3 d、7 d、28 d、60 d, 然后测得 4 个龄期的抗压强度, 结果如表 6 所示.

表 6 试验结果

Tab. 6 Test result

试验号	坍落度/mm	试验结果			
		f_3/MPa	f_7/MPa	f_{28}/MPa	f_{60}/MPa
1	215	52.3	65.3	77.8	88.0
2	240	46.2	60.3	76.6	88.0
3	245	30.7	53.5	64.6	77.0
4	202	60.5	70.5	84.2	90.8
5	220	54.8	67.8	82.7	87.5
6	225	39.5	57.3	76.0	85.3
7	190	64.3	74.2	88.5	94.0
8	200	55.8	69.5	87.5	97.5
9	205	40.0	64.0	74.5	99.0

4 试验成果分析

4.1 和易性分析

由表 6 可知, 坍落度最大为 245 mm, 其余均在 190 mm 以上, 达到流态混凝土要求, 而且随着水胶比、粉煤灰掺量、砂率的增大, 混凝土坍落度均有上升的趋势. 为了更直观地分析试验成果, 绘制正交试验的趋势图如图 1 所示.

由图 1 可知, 水胶比和粉煤灰掺量是影响坍落度的主要因素. 其中水胶比的影响最大, 其次是粉煤灰掺量, 而砂率对坍落度影响非常小. 由 3 因素对坍落度影响的趋势图可知, 最佳组合为 $A_1B_3C_3$. 即水胶比为 0.33, 粉煤灰掺量为 40%, 砂

率为35%时混凝土流动性最好。

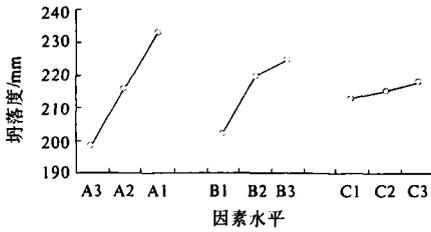


图1 因素及水平对坍落度影响情况

Fig.1 Instance of factors and levels affecting slump

4.2 抗压强度分析

对试块4个龄期的抗压强度分别进行极差分析,可得到影响混凝土各龄期抗压强度各因素影响的主次顺序.对于3 d、7 d及28 d抗压强度而言,因素的主次顺序为粉煤灰掺量、水胶比和砂率;对60 d抗压强度而言,影响因素的主次顺序为水胶比、砂率和粉煤灰掺量。

为更直观地分析试验结果,分别用各因素的诸水平做横坐标,用平均试验指标做纵坐标,绘制4个龄期抗压强度曲线,分别如图2、图3、图4所示。

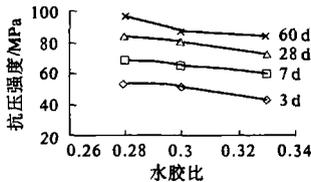


图2 水胶比对抗压强度的影响情况

Fig.2 Instance of mixture ratio affecting compressive strength

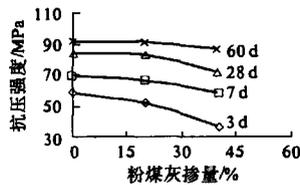


图3 粉煤灰对抗压强度的影响情况

Fig.3 Instance of fly ash proportion affecting compressive strength

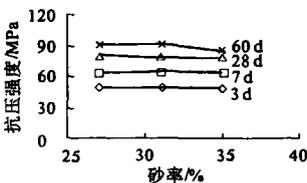


图4 砂率对抗压强度的影响情况

Fig.4 Instance of sand rate proportion affecting compressive strength

从图2~图4可以看出单因素对各龄期抗压

强度的影响情况.分析可知,要使各龄期抗压强度较高,各因素诸水平的最佳组合为:3 d、7 d抗压强度最佳组合为A₃B₁C₃,即水胶比为0.28,不掺粉煤灰,砂率为35%;28 d抗压强度最佳组合为A₃B₁C₁,即水胶比0.28,不掺粉煤灰,砂率为27%;60 d抗压强度最佳组合为A₃B₂C₂,即水胶比0.28,粉煤灰掺量20%,砂率31%。

为进一步研究某种因素对抗压强度的具体影响情况,绘制各种因素下的强度曲线,如图5、图6、图7,得到各因素不同水平情况下混凝土抗压强度的发展过程。

由图5~图7可知,混凝土的强度均随着龄期的增长而提高.其中图5说明对于相同的龄期,水胶比越大,混凝土的抗压强度越低;图6说明对于相同的龄期,粉煤灰掺量越大,混凝土抗压强度越低,早期尤其影响明显;图7说明对于相同的龄期,砂率的影响非常小。

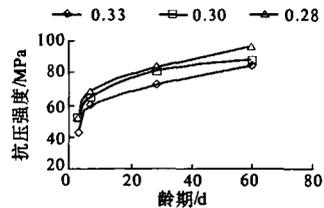


图5 不同水胶比情况下抗压强度发展过程

Fig.5 Developing process of compressive strength of different mixture ratio

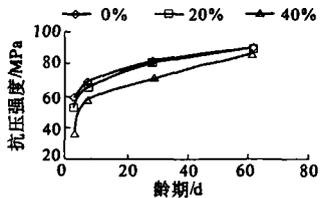


图6 不同粉煤灰掺量情况下抗压强度的发展过程

Fig.6 Developing process of compressive strength of different fly ash proportion

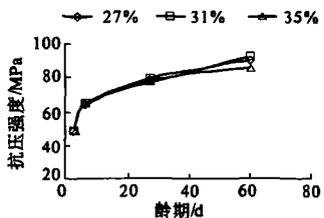


图7 不同砂率情况下抗压强度的发展过程

Fig.7 Developing process of compressive strength of different sand rate

4.3 不同配合比下混凝土强度的对比分析

为了对不同配合比、相同龄期的混凝土强度进行对比,同时还为了弄清各配合比混凝土强度的发展趋势,先将每种配合比的强度发展历程绘在同一坐标内,如图8所示。分析可知,混凝土强度均随龄期的增长而提高。经过比较发现试验号5是一个较优的配合比,虽然其早期强度不一定高,但后期强度较高(28 d强度达82.7 MPa),发展较快,增长趋势明显,并且其坍落度也较高。此外,试验号5对粉煤灰利用率也比较高。

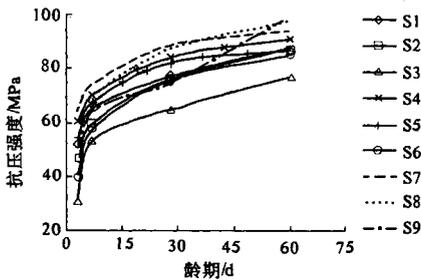


图8 不同配合比混凝土强度对比分析

Fig.8 Contrast analysis of concrete strength of different compounding

4.4 作用机理分析

从试验结果看,水胶比和粉煤灰掺量成为影响抗压强度的主要因素,而砂率是影响混凝土流动性的主要因素。水胶比对混凝土各龄期的抗压强度均有影响。这主要是因为水泥水化时所需的结合水,一般只占水泥重量的23%左右^[4],为了获得必要的流动性,常需加入多余的水,也即较大的水灰比。当混凝土硬化后,多余的水分残留在混凝土中形成水泡或蒸发后形成气孔,大大地减少了混凝土抵抗荷载的实际有效断面,而且有可能在孔隙周围产生应力集中。因此,水灰比越小,混凝土的强度越高。

掺粉煤灰主要影响混凝土的早期强度,而对后期强度影响较小。这主要是因为粉煤灰取代水泥造成水泥熟料的减少,由于混凝土的早期强度主要取决于水泥水化生成的C—S—H的数量,水泥熟料的减少,必然引起生成C—S—H的数量减少,所以造成混凝土早期强度的下降;粉煤灰取代水泥量越多,早期生成C—S—H的量就越少,混凝土早期强度下降就越大。随着水泥水化产物与粉煤灰二次水化反应的进行,水泥水化生成的C—S—H的量在增加,混凝土的强度在增大;时间越长,水化生成的C—S—H的量就越多,混凝土的强度就越高。当掺粉煤灰的混凝土与未掺粉

煤灰的混凝土产生C—S—H的量相接近时,二者强度就相差不大。这就是为什么掺粉煤灰对混凝土早期强度影响较大而对后期强度影响较小的主要原因。

砂率的改变,只是改变了骨料的总孔隙率及总表面积,其影响的是拌合物的流动性。

4.5 套箍效应分析

取第5组配合比28 d抗压强度试块,对粉煤灰高性能混凝土试块的“套箍效应”进行研究,见图9。发现“套箍效应”不明显。这主要是因为掺粉煤灰与水泥水化释放的氢氧化钙反应,形成低钙C—S—H的过程缓慢;加上氢氧化钙通过表面水化生成物层向内部扩散十分困难,因此在混凝土拌合后相当长时间内,粉煤灰水化产物不多,填充空隙的能力差,裂缝沿骨料与水泥颗粒交界发展,宏观表现为竖向裂缝。



(a)典型裂缝之一



(b)典型裂缝之二

图9 混凝土裂缝发展情况

Fig.9 Developing of concrete crack

5 结论

(1)利用正交试验方法分析研究了水胶比、粉煤灰掺量和砂率等3因素对粉煤灰高性能混凝土的流动性和抗压强度的影响规律及其影响的显

著性. 试验结果表明:水胶比和粉煤灰掺量是决定粉煤灰高性能混凝土抗压强度的重要因素,而砂率是决定混凝土流动性的主要因素. 对于本次试验所采用的Ⅱ级粉煤灰,粉煤灰掺量在20%以内对混凝土早期强度影响不显著;但当粉煤灰掺量增加到40%,早期强度会有大幅降低,后期强度影响不大.

(2)通过对试验结果的分析,确定了60 MPa、70 MPa、80 MPa及90 MPa粉煤灰高强混凝土的可选配比.

(3)对粉煤灰高性能混凝土试块的“套箍效应”进行研究,发现“套箍效应”不明显. 裂缝沿骨料与水泥颗粒交界发展,宏观表现为竖向裂缝.

(4)粉煤灰高性能混凝土能大量利用粉煤灰,节约水泥,降低混凝土成本;同时,可以获得优良的性能. 因此,是具有广阔发展前景的绿色建筑材料. 将数理统计原理应用于粉煤灰混凝土试验研究中,对材料研究及工程实践都会有重要的指导意义.

参考文献:

[1] 冯乃谦. 实用混凝土大全[M]. 北京:科学出版社,

2001.1-10.

- [2] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2005.41-52.
- [3] 沈旦申. 粉煤灰混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社,1989.2-10.
- [4] 湖南大学,天津大学等. 建筑材料[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.12-25.
- [5] 刘中辉,施养杭. 智能混凝土[J]. 福建建筑,2005,92(2):76-78.
- [6] 黄志辉,施养杭. 高性能混凝土及其应用前景[J]. 基建优化,2005,26(2):94-97.
- [7] 张璐,施养杭. 碳纤维混凝土压敏、温敏性能的研究与应用[J]. 工业建筑,2005,35(7):74-76.
- [8] 李浩,施养杭. 粉煤灰混凝土及其在工程中的应用[J]. 基建优化,2006,27(1):100-103.
- [9] 柴振宁,王全凤,施养杭. 混凝土力学的研究现状与发展[J]. 工业建筑,2005,35(增1):641-644.
- [10] 施养杭,华建兵. 大气环境中混凝土碳化灰色评估方法[J]. 建筑结构学报,2006,27(增2):10-12.
- [11] 袁双喜,施养杭. 混凝土耐久性的影响因素及其对策与展望[J]. 建筑技术开发,2007,34(1):33-36.
- [12] 张纯禹,李启令. 粉煤灰混凝土强度的优化设计[J]. 郑州大学学报:理学版,2002,34(4):88-92.

Experiment and Study for Performance of High Fly Ash Concrete

SHI Yang-hang, YUAN Shuang-xi

(Department of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: With the notable characters of fly ash and its application in the engineering fields, on the basis of the adequate surveys on projects, composition of materials and mixing ratio design, the the water gel rate, the fly ash replacement rate and the sand rate were taken as variable parameters, orthogonal design method is adopted to study high fly ash Concrete, and the influential factors are analyzed deeply. Results from analysis indicate that the water gel rate and fly ash replacement rate are the main factors effected to the concrete and the sand rate has influence to the concrete strength and the flow property of the concrete. At the same time, the correlation and the law of variation between the performance of high fly ash Concrete and influential factors are introduced, which can be referred in the theoretic Investigation and design of engineering.

Key words: high performance concrete; water gel rate; fly ash; sand rate; strength