

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 04 - 0418 - 05

大掺量粉煤灰免振捣混凝土的均匀试验研究

周 梅, 纪成君, 肖建华

(辽宁工程技术大学 土木与建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 研究了胶凝材料用量、粉煤灰掺量、水胶比、外加剂和砂率等因素对大掺量粉煤灰免振捣混凝土性能的影响。利用 SPSS 软件中的逐步回归分析法建立了以混凝土拌合物流速、混凝土强度等为目标函数的回归方程, 用 Matlab 软件中的优化技术求出了大掺量粉煤灰免振捣混凝土的优化配比组合。即水泥用量 粉煤灰掺量 高效减水剂掺量 = 1 0.74 0.035 6, 水胶比 40%, 砂率 45.4% 指导试验, 成功地配制出 C₄₀ 高抗渗免振捣混凝土。最后从机理上分析了粉煤灰对免振捣混凝土性能的影响。

关键词: 大掺量粉煤灰; 免振捣; 混凝土; 均匀设计; 配合比

中图分类号: TU528.31 **文献标识码:** A

The uniform design experimental research of a large amount of fly ash self-compaction concrete

ZHOU Mei, JI Cheng-jun, XIAO Jian-hua

(Institute of Civil and Architectural Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Studied the effect of quantity of cementing material and fly ash, W/B (water-binder) ratio, admixture, sand percentage, and so on to performance of super fly-ash self-compaction concrete. Utilized the step-by-step regression analysis method in SPSS software to found regression equation, which uses the flow rate of concrete mixture and strength of concrete as objective function, and obtained the optimum mix proportion of super fly ash self-compaction by the optimization technology in the Matlab software. The result of this experiment shows the C₄₀ high permeability resistance self-compaction concrete can be made up successfully with the optimum mix proportion which is cement fly ash high range water reducer is 1 0.74 0.035 6, 40% W/B ratio and 45.4% sand percentage. In the last, analyzed the effect of fly ash to self-compaction concrete from the aspect of principle

Key words: a large amount of fly ash; self-compaction; concrete; uniform design; mix proportion

免振捣混凝土顾名思义在成型过程中不需要振捣, 在浇注时混凝土拌合物仅靠自身的重力, 无需经任何振捣就能达到自动流平、均匀密实地充满模型。免振捣混凝土拌合物具有高流动性而无离析现象。由于免去了振捣, 避免了混凝土成型过程中机械噪音造成的环境污染, 省能、省力; 同时因为要实现免振捣, 必须在普通混凝土组分的基础上加入能提高流动性的掺合料, 而目前掺合料大多是由固体废弃物再加工的矿物质细粉, 这就为固体废弃物的综合利用找到了一条途径, 所以有人称免振捣混凝土是绿色混凝土。

免振捣混凝土已得到全球认识, 为使其更富有竞争力, 各地利用当地廉价的原材料来制备。阜新市是老工业矿区, 有大型的露天煤矿、火力发电厂, 有“取之不尽, 用之不竭”的煤矸石、粉煤灰。本文依托阜新地区的粉煤灰, 采用大掺量粉煤灰制备免振捣混凝土, 不仅具有经济和生态上的益处, 而且还具有

收稿日期: 2004-11-30

作者简介: 周 梅 (1964-), 女, 广东潮阳人, 高级工程师, 硕士生导师。Tel: 0418-3351094, E-mail: sk-tongtong@163.com

几个技术方面的优势。免振捣混凝土的配合比设计至今并无统一的设计方法, 本文利用均匀试验设计展开研究, 提出一个微机辅助免振捣混凝土配合比设计的新方法, 经实验室及实际工程验证, 精度理想。

1 原材料选择

选用唐山晋东水泥厂生产的盾石牌 42.5 普通硅酸盐水泥 (P·O); 阜新发电厂排放再加工处理的粉煤灰^[1], 各项技术指标: 细度 (0.045 mm 方孔筛筛余) 7.2%, 需水量比 89%, 烧失量 0.28%, 含水量 0.42%, 28 d 抗压强度比 75%, 三氧化硫 2.00%, 满足国家对 I 级粉煤灰的标准规定; 选用北京化工建材厂生产的 FDN 混凝土高效减水剂 (棕色粉剂), 减水量 19.2%, 最佳掺量 1% ~ 2%, 碱含量 12.76%; 细骨料选用阜新红帽子河砂, 表观密度 2.55 g/m³, 堆积密度 1 560 kg/m³, 空隙率 38.2%, 细度模数 $M_x = 3.345$, 级配合格; 粗骨料选用阜新三家子 5 ~ 40 mm 石灰岩碎石, 表观密度 2.70 g/cm³, 堆积密度 1 480 kg/m³, 空隙率 42.54%, 级配合格。

2 试 验

2.1 影响因素确定的依据

综合国内外的研究资料及前期试验结论, 在兼顾试验条件的前提下, 本文选取砂率、胶凝材料、粉煤灰、水胶比、减水剂等 5 个影响因素。

(1) 砂率 只有具备较小的骨料体积含量和足够黏度的砂浆, 才能保证免振捣混凝土拌合物的流变性良好。依据这两个最基本要素^[2]确定砂率为 0.450 ~ 0.505。

(2) 胶凝材料 已有的研究资料显示, 当砂子在砂浆中体积含量超过 42% 时, 拌合物堵塞随砂体体积含量的增加而增加; 当砂体体积含量达到 44% 时, 堵塞几率为 100%。故砂浆中砂体体积含量不能超过 44%。确定胶凝材料含量为 500 ~ 555 kg/m³ (水泥 + 粉煤灰)。

(3) 粉煤灰 粉煤灰由于其本身的化学成分、结构和颗粒形状等特征, 在混凝土中可产生活性、颗粒形态、微骨料 3 种效应, 达到改善混凝土拌合物的流动性、保水性、可泵性及抹面性的目的, 但粉煤灰取代水泥量过多, 会使混凝土抗碳化耐久性变差。因此, 根据阜新地区粉煤灰特点, 在综合考虑混凝土工作性、强度、耐久性要求的基础上, 确定粉煤灰掺量为 30% ~ 52% (占整个胶凝材料的百分比)。

(4) 水胶比 水胶比大, 则浆体浓度小, 混凝土拌合物流动性就好, 但强度随水胶比的增大而下降, 为保证混凝土的耐久性, 一般高性能混凝土水胶比应低于 0.4。本文确定水胶比为 0.345 ~ 0.400。

(5) 减水剂 减水剂的加入, 一是导致水泥絮凝结构解体, 释放出游离水, 从而有效地增大了混凝土拌合物的流动性; 二是在水泥颗粒表面形成一层稳定的溶剂化水膜, 这层水是很好的润滑剂, 有利于水泥颗粒的滑动, 从而使混凝土流动性进一步提高。减水剂还能使水泥更好地被水湿润, 有利于工作性的改善。试验选用北京产 FND 型高效减水剂, 掺量为 1.45% ~ 2.00% (占胶凝材料)。

2.2 配合比设计及试验内容

因为选定 5 个因素, 安排 12 组试验, 即 5 因素 12 水平均匀设计, 所以选用均匀设计表 $U_{12}^*(12^5)$ 及其使用表来安排试验^[3], 具体配合比详见表 1。

混凝土拌合物采用强制式搅拌机拌合 5 min, 振动台振动 1 min, 成型试件 150 mm × 150 mm × 150 mm (测抗压及劈拉强度), 顶面直径 175 mm、底面直径 185 mm、高度 150 mm 的圆台体 (测抗渗压力), 100 mm × 100 mm × 400 mm (测弹性模量)。试件 24 h 后脱模, 放在标准养护室内养护到龄期。

对于免振捣混凝土拌合物流动性的检测目前国内还没有标准, 塌落度值是反映新拌混凝土在自重作用下克服屈服剪切应力而塌陷的程度。对水胶比低、胶结材料用量大的免振捣混凝土来说, 并不能真实地反映其在泵送压力下的黏聚性和抗离析性。结合流动度和填充性能, 特意设计了一套适合免振捣混凝土流变性能的测定仪, 如图 1 所示。根据《普通混凝土力学性能试验方法》(GBJ81 - 85) 进行力学指标检测, 根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GBJ82 - 85) 进行抗渗压力等检测。其结果见表 2。

表 1 免振捣混凝土实验室配合比

编号	胶凝材料	水	粉煤灰	水泥	砂子	石子	减水剂
1	500	185.00	210.0	290.0	817.02	834.02	7.750
2	505	184.33	262.6	242.4	760.87	875.00	8.838
3	510	201.45	173.4	336.6	774.49	838.78	9.945
4	515	180.25	185.4	329.6	756.74	906.58	8.498
5	520	200.20	249.6	270.4	799.60	783.61	9.620
6	525	199.50	157.5	367.5	757.99	854.75	7.613
7	530	182.85	233.2	296.8	773.17	854.35	10.600
8	535	214.00	246.1	288.9	707.16	830.20	8.560
9	540	194.40	172.8	367.2	803.06	803.06	9.720
10	545	193.48	272.5	272.5	761.87	809.10	8.175
11	550	206.25	220.0	330.0	699.26	854.49	10.450
12	555	216.45	210.9	344.1	746.47	776.92	9.435

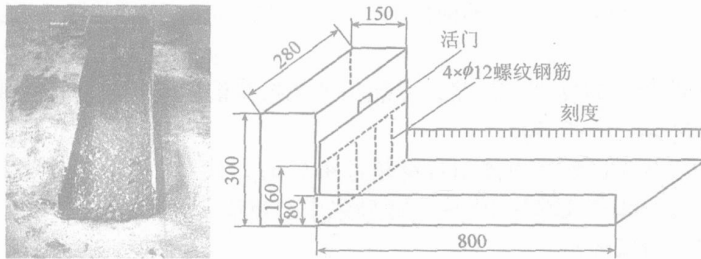


图 1 免振捣混凝土流变性能测定仪及检测结果 (单位: mm)

Fig. 1 The measuring machine and testing result for fluidity of self-compaction concrete

2.3 试验数据处理

采用均匀设计法安排试验, 试验点在高维空间中均匀分布, 它不具有正交设计的“简单与直观分析性”, 但具有“可控及优化的分析性”, 所以需要借助计算机软件来建立模型. 本文是借助 SPSS 中的多元逐步回归方法来建模的^[4], 该方法吸收了前进法和后退法的优点, 克服了它们的缺点, 计算明显减少, 且最终保证得到相对某检验水平的“最优”回归方程. 以表 3 试验实测数据为样本, 利用 SPSS 软件进行

逐步回归分析, 可得到以不同指标为目标函数的回归方程 (表 3).

表 2 混凝土拌合物流变性能、强度、渗压力指标

表 2 The value of fluidity, strength and emanating pressure of concrete mix

编号	塌落度 /mm	塌落流动度 /mm	L - 800 仪		L /mm	筒内塌落度 /mm	28 d 抗压强度 /MPa	28 d 劈拉强度 /MPa	2.6 MPa 水压力渗水高度 /mm
			t_{150} /s	v_{150} /mm · s ⁻¹					
1	265	560	3.15	47.62	750	190	49.56	3.51	30
2	280	680	2.52	59.52	800	220	51.30	3.53	34
3	260	550	2.98	50.34	780	185	55.86	3.91	34
4	265	580	3.23	46.44	700	170	59.09	3.89	39
5	270	650	2.45	61.22	800	210	49.37	3.23	39
6	250	545	3.06	49.02	700	155	45.38	3.55	44
7	255	565	3.01	49.83	720	160	45.73	3.87	25
8	260	555	2.36	63.56	800	190	43.57	2.68	47
9	265	620	2.62	57.25	800	200	49.02	3.67	40
10	270	675	2.08	72.12	800	220	33.80	3.03	24
11	250	610	3.30	45.45	700	150	45.70	3.81	28
12	260	635	2.78	53.96	800	180	47.69	3.03	29

注: t_{150} 为拌物流至 150 mm 时所用的时间; v_{150} 为拌物流至 150 mm 时的流速; L 为拌合物在 L - 800 仪中流动的长度.

表 3 回归方程
Table 3 The regression equations

Y	回归方程
拌合物流速 $v_{150} / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_{150} = -1710 + 6.294x_1 + 176.300x_4 - 0.807x_2x_3 + 0.369x_2x_4 - 6.90 \times 10^{-2}x_2x_5 - 415.525x_3x_4 + 48.003x_3x_5 - 5.86 \times 10^{-3}x_1^2 + 2.331 \times 10^{-3}x_2^2 - 0.534x_5^2$
28 d 抗压强度 p_{cu28} / MPa	$p_{cu28} = -79.868 + 0.319x_2 - 320.227x_3 + 55.82x_5 - 2.04 \times 10^{-3}x_1x_2 + 2.688 \times 10^{-2}x_1x_5 + 3.091x_2x_3 - 2.02 \times 10^{-2}x_2x_5 - 1.53 \times 10^{-3}x_2^2 - 459.651x_3^2 - 3.516x_5^2$
28 d 劈拉强度 p_{s28} / MPa	$p_{s28} = 59.748 - 0.156x_1 - 2.01 \times 10^{-2}x_2 + 29.106x_3 - 76.759x_4 - 0.148x_1x_3 + 2.869 \times 10^{-2}x_2x_4 + 2.365 \times 10^{-4}x_2x_5 + 119.229x_3x_4 + 0.111x_3x_5 + 2.068 \times 10^{-4}x_1^2$

注： x_1 为胶凝材料； x_2 为粉煤灰； x_3 为砂率； x_4 为水胶比； x_5 为高效减水剂。

利用回归方程求得的预测值与试验实测值对比结果见表 4。从表 4 可清楚地看到，使用 SPSS 软件建立的回归方程预测精度是比较理想的，流速最大误差 3.6%，28 d 抗压强度最大误差 2.8%，28 d 劈拉强度最大误差 6.5%，足以保证实际工程对精度的要求。对上面的回归方程取最大化，可容易地求出各目标函数最优值时各影响因素的掺量。但笔者发现，各因素对各目标函数影响存在着强烈的交互作用，综合考虑混凝土拌合物流速、混凝土强度等指标，不易分析判断谁是主要的影响因素。最后利用 Matlab 优化工具箱中的 constr 函数，在保证拌合物流速等指标的前提下，求解出抗压强度最优配合比组合。水泥用量 粉煤灰掺量 高效减水剂掺量 = 1 0.74 0.035 6，水胶比 40%，砂率 45.4%。

表 4 免振捣混凝土实验室预测与实测精度的比较

Table 4 The comparison of forecasted and real value of self-compact concrete strength

编号	混凝土拌合物流速 $v_{150} / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$			28 d 抗压强度 /MPa		28 d 劈拉强度 /MPa	
	预测值 / 实测值	误差		预测值 / 实测值	误差	预测值 / 实测值	误差
1	48.49/47.62	+0.87		48.33/49.56	-1.23	3.28/3.51	-0.23
2	60.84/59.52	+1.32		49.87/51.30	-1.43	3.62/3.53	+0.09
3	51.10/50.34	+0.76		55.60/55.86	-0.26	3.87/3.91	-0.04
4	47.05/46.44	+0.61		58.87/59.09	-0.22	3.94/3.89	+0.05
5	62.48/61.22	+1.26		49.91/49.37	+0.54	3.29/3.23	+0.06
6	50.21/49.02	+1.19		44.92/45.38	-0.46	3.61/3.55	+0.06
7	50.65/49.83	+0.82		44.48/45.73	-1.25	3.75/3.87	-0.12
8	64.73/63.56	+1.17		44.27/43.57	+0.70	2.89/2.68	+0.21
9	58.44/57.25	+1.19		50.13/49.02	+1.11	3.82/3.67	+0.15
10	73.76/72.12	+1.64		32.89/33.80	-0.91	3.29/3.03	+0.26
11	46.12/45.45	+0.67		44.86/45.70	-0.84	3.67/3.81	-0.14
12	55.21/53.96	+1.25		48.23/47.69	+0.54	2.88/3.03	-0.15

2.4 试验结果分析

(1) 粉煤灰对混凝土拌合物流变性能的影响 从表 2 的试验结果可知，混凝土拌合物塌落度及流变性随粉煤灰掺量的变化其变化规律基本一致，随粉煤灰掺量的增加，混凝土拌合物的塌落度增加；降低水胶比，粉煤灰掺量对混凝土拌合物的流动性的影响幅度增大^[5]。这是由于超细粉煤灰的密实填充作用可置换出水泥颗粒间的填充水，使润滑水量增加，其珠形颗粒的“滚珠轴承”作用，也可大大改善混凝土的流动性。并且，在低水胶比混凝土中，颗粒间润滑水极小，粉煤灰的作用效果则更明显。

(2) 粉煤灰对混凝土抗压强度的影响 如图 2 所示，当掺量较小时，混凝土的抗压强度随粉煤灰掺量的增加而增大，而当掺量较大时，混凝土的抗压强度随粉煤灰掺量的增加而降低；粉煤灰对混凝土后期

强度的影响要大于早期强度的影响(28和56 d混凝土抗压强度的峰值对应不同的掺量,且56 d抗压强度的掺量高于28 d的掺量)。主要是由于当粉煤灰掺量较小时,粉煤灰中活性成分与水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 氢氧化钙反应,生成水化硅酸钙和水化铝酸钙,不断填充混凝土中的孔隙,使混凝土的强度提高;而当粉煤灰掺量超过一定程度时,粉煤灰的大量掺入势必降低混凝土中骨料的用量,而造成混凝土强度降低;至于粉煤灰对混凝土后期强度影响大主要是因为粉煤灰参与反应是在水泥水化生成氢氧化钙之后,必须是在碱性激发剂的激发下才能发生的二次反应,故后期抗压强度增进率较大。

(3) 粉煤灰对混凝土抗折强度的影响 粉煤灰的掺量对混凝土抗折强度的影响不明显。这主要是由于粉煤灰的颗粒形状决定的,粉煤灰颗粒大多为球形,水化后其强度的黏结除了胶结力之外,没有其它的作用,不会由于颗粒外形不规则而产生摩擦阻力。

(4) 粉煤灰对混凝土抗渗性能的影响 粉煤灰掺量对混凝土抗渗性能的影响如图2(b)所示。由图2(b)可以看出,随粉煤灰掺量的增加,混凝土的渗水高度降低。这主要是因为粉煤灰的掺入使得它和水泥两者之间的“双向填充效应”得以充分发挥,混凝土密实度提高。

3 结 论

对多组分免振捣混凝土配合比设计,采用均匀试验设计法安排试验更合理、更科学。利用SPSS、Matlab等软件成功地建立了以流速、抗压强度、劈拉强度为目标函数的回归方程,且求出大掺量粉煤灰免振捣混凝土最优配合比组合。水泥用量 粉煤灰掺量 高效减水剂掺量 = 1 0.74 0.035 6,水胶比 40%,砂率 45.4%。适当掺入粉煤灰,可增加混凝土中的胶凝材料用量补充细粉料的不足,减少免振捣混凝土拌合物泌水离析现象。粉煤灰中大量球形玻璃体能起到润滑作用,增加免振捣混凝土的流动性。粉煤灰能降低混凝土初期的水化热,控制混凝土升温,很好地防止温度裂缝的产生。而且,粉煤灰的掺入能减少水泥用量,降低混凝土成本。以阜新地区粉煤灰为掺合料,成功配制出 C_{40} 以上高抗渗免振捣混凝土,具有推广应用价值。阜新市资源日趋枯竭,正处于经济转型时期,开发利用粉煤灰对可持续发展有重要意义。

参考文献:

- [1] 周梅. 粉煤灰混凝土的研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 1999, 12 (4): 379 ~ 382.
- [2] 冯乃谦. 高性能混凝土技术 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000. 80 ~ 88.
- [3] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999. 105 ~ 110.
- [4] 周梅, 张向东. 利用隧道排矸石配制高性能混凝土试验研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (2): 15 ~ 20.
- [5] 张青, 廉慧珍. 自密实高性能混凝土配合比研究与设计 [J]. 建筑技术, 1999, 30 (1): 19 ~ 21.
- [6] 刘宝举, 杨元霞. 大掺量粉煤灰高强混凝土研究 [J]. 混凝土, 2004 (10): 29 ~ 31.

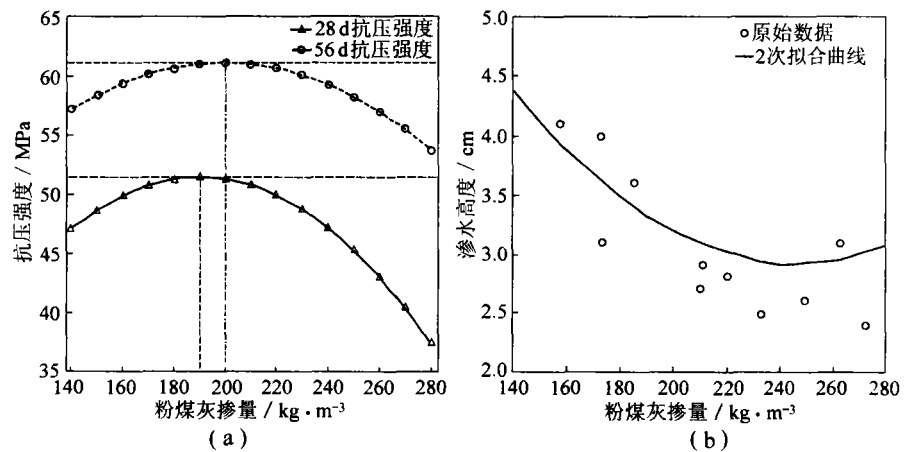


图 2 粉煤灰掺量对混凝土 28 和 56 d 抗压强度和抗渗性能的影响

Fig. 2 The effect of fly ash of different mass on strength of concrete in 28 and 56 d and impemeability of concrete