

## 大掺量粉煤灰混凝土早期强度影响因素研究

孔凡敏<sup>1</sup>, 陈喜旺<sup>1</sup>, 倪坤<sup>1</sup>, 杨柳<sup>2</sup>, 韩冰<sup>2</sup>

(1. 北京建工新型建材有限公司, 100015, 北京; 2. 北京建工新型建材科技股份有限公司, 102600, 北京)

**摘 要:** 大掺量粉煤灰混凝土是通过粉煤灰取代混凝土中的部分水泥, 不仅可以改善工作性能, 而且能节约成本, 在实际工程中也得到了一定的应用。以粉煤灰掺量、砂子细度、养护温度为试验参数, 研究不同因素在不同龄期对大掺量粉煤灰混凝土抗压强度的影响。结果表明: 粉煤灰掺量的适量增加 (0%~40%) 能提高混凝土的工作性能, 养护温度在前期对大掺量粉煤灰混凝土的强度影响很大, 后期减弱, 砂子细度 (1.8~2.6) 与抗压强度成正比, 随着粉煤灰掺量增加, 抗压强度降低, 大掺量粉煤灰混凝土的早期强度上升慢, 后期可上升到使用强度。

**关键词:** 粉煤灰掺量; 抗压强度; 养护温度; 砂子细度

中图分类号: TU 5

文献标志码: A

文章编号: 1000-4726(2023)19-2328-05

## STUDY ON INFLUENCING FACTORS OF EARLY STRENGTH OF CONCRETE WITH LARGE FLY ASH CONTENT

KONG Fan-min<sup>1</sup>, CHEN Xi-wang<sup>1</sup>, NI Kun<sup>1</sup>, YANG Liu<sup>2</sup>, HAN Bing<sup>2</sup>

(1. BCEG Advanced Construction Materials Co., Ltd., 100015, Beijing, China; 2. Beijing Construction Engineering New Building Materials Technology Co., Ltd., 102600, Beijing, China)

**Abstract:** In concrete with large fly ash content, fly ash is used to replace some cement, which can not only improve the workability but also can reduce costs. This has been applied in some actual projects. With the fly ash content, sand fineness and curing temperature as test parameters, the influence of different factors on the compressive strength of concrete with large fly ash content at different ages was studied. Results showed: An appropriate increase of fly ash content (0%~40%) can improve the workability of concrete. The curing temperature has great impact on the strength of concrete with large fly ash content in the early stage, but the impact weakens in the later stage. The sand fineness (1.8~2.6) is proportional to the compressive strength, which can improve the workability in the later stage.

**Keywords:** fly ash content; compressive strength; curing temperature; sand fineness

粉煤灰是燃煤火力发电厂排出的主要固体废物, 且随着电力工业的发展, 燃煤电厂的粉煤灰排放量逐年增加, 已经成为我国当前排量较大的工业废渣之一。2000年我国粉煤灰排放量约1.5亿t, 2010年达到3亿t, 2022年达到5.07亿t, 而粉煤灰利用率仅在60%左右<sup>[1]</sup>。粉煤灰利用不足导致大量粉煤灰成为工业废料, 如何处理和利用粉煤灰已成为研究热点。

大掺量粉煤灰混凝土通过粉煤灰取代混凝土中的部分水泥, 能够减少环境污染, 节约成本, 且可以减少用水量、改善工作性能。大掺量粉煤灰混凝土的使用可有效提高粉煤灰的使用率, 研究大掺量粉煤灰混凝土对于粉煤灰废料处理具有重要的意义。

目前, 对大掺量粉煤灰混凝土使用性能已经开展了大量的研究工作。杨忠波等<sup>[2]</sup>研究养护方式对大

掺量粉煤灰混凝土抗压强度的影响, 发现不同养护条件下, 粉煤灰混凝土的后期抗压强度随着粉煤灰掺量的增长而降低; 金明山等<sup>[3]</sup>通过50%、70%两组掺量在养护3d、7d和14d的早期强度的试验, 分析了大掺量粉煤灰混凝土早期抗压强度变化规律; 杜森<sup>[4]</sup>针对大掺量粉煤灰混凝土早期强度低和抗冻性不佳的缺点进行了深入研究, 从大掺量粉煤灰混凝土中粉煤灰的水化特性及混凝土抗冻性的改性机理层面探讨了混凝土抗冻性提升的措施。

本研究以粉煤灰掺量、砂子细度、养护温度为试验参数, 研究不同因素在不同龄期对大掺量粉煤灰混凝土抗压强度的影响规律, 同时探究粉煤灰掺量对混凝土工作性能的影响。

## 1 试验材料及方法

## 1.1 试验材料

水泥采用某公司生产的P·O42.5普通硅酸盐

收稿日期: 2023-06-25

作者简介: 孔凡敏 (1976—), 女, 河北承德人, 高级工程师,  
e-mail: 13501367825@qq.com.

水泥,初凝时间165min,终凝时间254min,标准稠度用水量( $P$ )27.5%,安定性合格,3d抗压强度27.2MPa,抗折强度6.3MPa,28d抗压强度47.5MPa,抗折强度8.7MPa。

粉煤灰采用某公司生产的Ⅱ级粉煤灰,细度(45 $\mu$ m筛筛余)17.1%,需水量比97%,烧失量4.12%。

砂子采用机制砂,细度模数分别为1.8、2.2、2.6,石粉含量2.1%,压碎值6.8%,亚甲蓝MB值0.85%。粗骨料采用公称粒径5~25mm的碎石,含泥量0.2%,压碎值7.6%。

## 1.2 试验设计

本次试验以粉煤灰掺量、砂子细度、养护温度为变量因素,每个因素选取3个水平(表1),采用正交试验设计方法,有9组试验组合,加1组对照实验组(粉煤灰掺量为0,砂子细度为1.8,常温20℃养护条件),共10组试验组合,见表2。

表1 正交试验设计各因素的水平取值

变量	水平		
粉煤灰掺量(因素A)/%	20	40	60
砂子细度(因素B)	1.8	2.2	2.6
养护温度(因素C)/℃	20	50	80

表2 正交试验组合

序号	组合	粉煤灰掺量/%	砂子细度	养护温度/℃
1	A1B1C1	20	1.8	20
2	A3B2C1	60	2.2	20
3	A2B3C1	40	2.6	20
4	A2B1C2	40	1.8	50
5	A1B2C2	20	2.2	50
6	A3B3C2	60	2.6	50
7	A3B1C3	60	1.8	80
8	A2B2C3	40	2.2	80
9	A1B3C3	20	2.6	80
10	对照组	0	1.8	20

注:试块养护是指试块在水温为特定温度的条件下,养护8h后转标准养护至规定龄期的养护模式。

## 1.3 配合比设计

根据正交试验设计,加1组对照组,本实验共有10组不同试验组合,砂子采用细度模数1.8、2.2、2.6这3种,粉煤灰分别以20%、40%、60%的掺量替代水泥,其他材料在试验中保持不变,配合比见表3。

表3 各试验组的配合比

kg/m<sup>3</sup>

序号	粉煤灰掺量/%	砂子细度	水泥	粉煤灰	砂子	碎石	水	减水剂	养护温度/℃
1	20	1.8	291	73	796	1055	160	5.50	20
2	40	1.8	218	146	796	1055	160	5.10	50
3	60	1.8	146	218	796	1055	160	5.25	80
4	20	2.2	291	73	796	1055	160	5.20	50
5	40	2.2	218	146	796	1055	160	4.82	80
6	60	2.2	146	218	796	1055	160	5.00	20
7	20	2.6	291	73	796	1055	160	5.05	80
8	40	2.6	218	146	796	1055	160	4.72	20
9	60	2.6	146	218	796	1055	160	4.90	50
10	0	1.8	364	0	796	1055	160	5.60	20

## 1.4 试验内容

### 1.4.1 坍落度试验

新拌混凝土的坍落度试验用于评估所有混凝土混合料的工作性能,操作程序按GB/T50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行,混凝土坍落度试验如图1所示。



图1 混凝土坍落度试验

### 1.4.2 抗压强度试验

根据GB/T50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行抗压强度试验,试验采用100mm×100mm×100mm的混凝土立方体试块,本次养护龄期为1d、3d、7d、28d,每组试验制作3个试件,混凝土试件在万能试验机上进行试验,如图2所示。

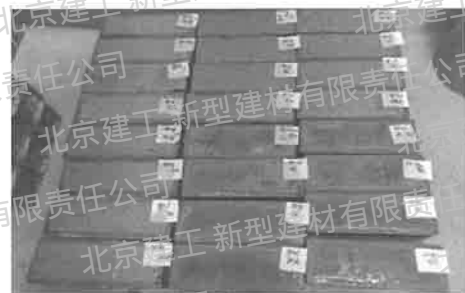


图2 混凝土试件制备

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 工作性能分析

通过 10 组试验,测试了每组混凝土的坍落度,结果见表 4。

表 4 坍落度试验结果

序号	粉煤灰掺量	砂子细度	坍落度 /mm
1	20%	1.8	195
2	60%	2.2	212
3	40%	2.6	225
4	40%	1.8	204
5	20%	2.2	210
6	60%	2.6	215
7	60%	1.8	195
8	40%	2.2	216
9	20%	2.6	216
对照组	0	1.8	190
k1	207	198	—
k2	215	213	—
k3	206	218	—
R	9	20	—

表 5 1d 抗压强度试验结果

序号	粉煤灰掺量	砂子细度	养护温度	1d/MPa
1	20%	1.8	20℃	15.30
2	60%	2.2	20℃	10.54
3	40%	2.6	20℃	14.16
4	40%	1.8	50℃	22.04
5	20%	2.2	50℃	33.04
6	60%	2.6	50℃	20.05
7	60%	1.8	80℃	35.06
8	40%	2.2	80℃	38.48
9	20%	2.6	80℃	46.65
对照组	0%	1.8	20℃	16.47
k1	31.66	24.13	13.33	—
k2	24.89	26.41	25.04	—
k3	21.88	26.94	40.06	—
R	9.78	2.81	26.73	—

在 1d 养护龄期时,养护温度对抗压强度的影响占主导作用,养护温度的增高,使试验构件能够快速上升强度,20℃常温养护条件下,试件强度正常增长,只能达到 40% 左右,50℃水浴养护条件下,强度可达到 55% 以上,80℃水浴养护条件下,强度达到了 90% 以上。粉煤灰掺量在 1d 龄期时对强度影响也很大,相比对照组结果,粉煤灰掺量增大时,抗压强度都呈现减小的趋势,同时发现 20% 掺量与 0% 掺量的强度接近。前期粉煤灰掺量大,混凝土水化反应较慢,强度增长也慢。掺量越大,这种影响越大。砂子细度在 1d 龄期时对强度影响很小,细度越大,强度越高。

表 6 是养护龄期 3d 的混凝土抗压强度试验结果。从表 6 中的  $k$  值可以看出,粉煤灰掺量、砂子细度、养护温度对抗压强度的影响规律与 1d 龄期一致,通过表 6 中的  $R$  值发现,3 个因素对抗压强度的影响作用:养护温度 > 粉煤灰掺量 > 砂子细度,但影响程度在发生变化。在 3d 养护龄期时,养护温度对抗压强度的影响仍占主导作用,对于养护 80℃ 的 3 组试件,强度几乎不再上升;对于养护 50℃ 的试件,强度增加至 65% 左右;常温养护 20℃ 的试件,强度稳步上升。粉煤灰掺量对强度的影响作用依然很大,强度随着掺量增大而减小,混凝土前期的水化反应相比 1d 龄期时在逐渐增长,通过对照组试验发现,掺量 20% 的强度上升很快,几乎接近 0% 掺量。砂子细度在 3d 龄期时影响仍然很小,抗压强度随着

细度的增大而提高。

表6 3d抗压强度试验结果

组	粉煤灰掺量	砂子细度	养护温度	3d/MPa
1	20%	1.8	20℃	19.76
2	60%	2.2	20℃	13.26
3	40%	2.6	20℃	18.53
4	40%	1.8	50℃	23.56
5	20%	2.2	50℃	35.51
6	60%	2.6	50℃	22.24
7	60%	1.8	80℃	35.34
8	40%	2.2	80℃	38.86
9	20%	2.6	80℃	46.41
对照组	0%	1.8	20℃	20.03
k1	33.89	26.89	17.18	—
k2	27.65	28.21	27.77	—
k3	23.61	29.16	40.2	—
R	10.28	2.27	23.02	—

表7 7d抗压强度试验结果

组	粉煤灰掺量	砂子细度	养护温度	7d/MPa
1	20%	1.8	20℃	28.96
2	60%	2.2	20℃	20.33
3	40%	2.6	20℃	24.28
4	40%	1.8	50℃	28.98
5	20%	2.2	50℃	39.03
6	60%	2.6	50℃	26.9
7	60%	1.8	80℃	35.86
8	40%	2.2	80℃	39.04
9	20%	2.6	80℃	46.88
对照组	0%	1.8	20℃	29.42
k1	38.01	27.87	23.67	—
k2	30.77	32.22	31.63	—
k3	28.12	32.68	40.2	—
R	9.89	4.81	16.53	—

表8 28d抗压强度试验结果

组	粉煤灰掺量	砂子细度	养护温度	28d/MPa
1	20%	1.8	20℃	40.18
2	60%	2.2	20℃	36.63
3	40%	2.6	20℃	40.24
4	40%	1.8	50℃	38.06
5	20%	2.2	50℃	45.88
6	60%	2.6	50℃	37.12
7	60%	1.8	80℃	36.75
8	40%	2.2	80℃	39.83
9	20%	2.6	80℃	46.96
对照组	0%	1.8	20℃	41.05
k1	44.34	38.73	38.68	—
k2	39.38	39.44	40.35	—
k3	35.83	41.44	41.18	—
R	8.51	2.71	2.5	—

养护龄期7d的混凝土抗压强度试验结果见表7。

从表7中的 $k$ 值以及对照组数据可以看出,粉煤灰掺量增加时,抗压强度降低,粉煤灰掺量对抗压强度的影响在降低,经过7d龄期的养护,前期的水化反应已经加快,抗压强度在快速提升,特别是第2组试件,前期掺量高,养护温度低,强度上升很慢,这时也已经达到60%以上。砂子细度的影响规律没发生变化,但是通过 $R$ 值发现对抗压强度的影响变大了,细度为2.2和2.6的较1.8的砂子强度高。养护温度的影响此时仍然很大,但相比1d龄期时降低很多,此时养护80℃的试件,强度达到100%,养护50℃的试件,强度增加至80%以上,常温养护20℃的试件,强度也达到了70%。

28d龄期混凝土抗压强度试验结果见表8,通过 $K$ 值和对照组数据,发现在28d龄期时抗压强度随着粉煤灰掺量的增加而降低,20%的掺量时已非常接近0%掺量的混凝土,砂子细度越大,抗压强度越大,温度对抗压强度影响几乎很小。

通过图3发现,粉煤灰掺量因素对抗压强度的影响作用在前期大于后期,前期粉煤灰影响水化反应,后期粉煤灰促进二次水化反应,大掺量粉煤灰混凝土强度也快速上升;砂子细度的影响随龄期波动,整体影响程度接近;养护温度的影响在1d龄期最小,随着龄期增加,影响不断减小,在28d的影响几乎很小。

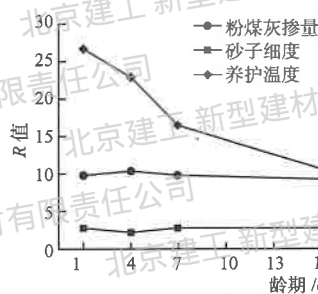
图3 不同因素在不同龄期的 $R$ 值

图4是28d龄期时不同粉煤灰和不同砂子细度的抗压强度对比,结合对照组试验结果可以看出,粉煤灰掺量在0%~20%时抗压强度相近,当掺量为20%~60%时,抗压强度降低,特别是第2组数据,当60%掺量粉煤灰且养护温度为20℃时,抗压强度前期很低,在1d龄期10MPa左右,常温养护28d,强度可达到使用要求的30MPa以上,但依然低于高温养护的试件。

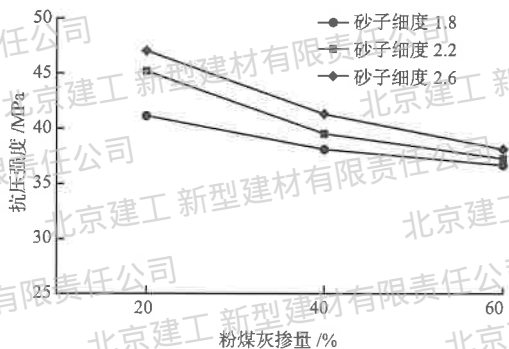


图4 28d不同粉煤灰掺量抗压强度

试验结果说明,粉煤灰掺量的适量增高,不仅可以提高工作性能,还能保持抗压强度,掺量增加到40%时,还可以进一步提高工作性能。虽然强度有所下降,但仍然能达到使用标准。粉煤灰掺入过多,其总表面积将大于浆体所能湿润的面积,细灰反而会聚成一团,不能分散到水泥浆体中,导致强度降低。砂子细度提高,抗压强度增大,细度模数为由2.2提高至2.6时,抗压强度提高幅度很小,说明砂子细度对抗压强度的影响也会呈现先增大后降低的规律;当砂子细度再增加,抗压强度会出现降低的现象。前期养护温度对试件的强度影响明显,帮助混凝土前期快速提高强度,龄期越长,养护温度的影响逐渐减小,对于大掺量粉煤灰混凝土的强度影响很大,前期能够很好地帮助大掺量粉煤灰上升强度,甚至影响后期的强度提升。

### 3 工程应用

大掺量粉煤灰混凝土已被应用在很多实际工程中,目前预制构件厂也逐渐开始使用,当混凝土中掺入适量粉煤灰时,不仅可以提高性能,还可以保持后期的抗压强度,节约成本,保护环境。大掺量粉煤灰混凝土的使用可为预制构件的发展提供新思路。

### 4 结论

大掺量粉煤灰混凝土通过掺加粉煤灰替代部分水

泥,能显著降低成本,且可减少用水量、改善工作性能,有效降低混凝土的水化热。通过9组正交试验和1组对照实验,研究粉煤灰掺量、砂子细度、养护温度在不同龄期对抗压强度的影响规律,得到以下结论。

(1) 粉煤灰掺量的适量增加(0%~40%)能提高混凝土的工作性能,但掺量过高(60%)时,反而会降低混凝土的工作性能。

(2) 通过正交试验的 $k$ 值,发现粉煤灰掺量的增加,抗压强度减小,随着砂子细度的增大,抗压强度也增大,养护温度越高,抗压强度越高。通过 $R$ 值可以看出3个因素在对3d和7d抗压强度发展的影响作用:养护温度>粉煤灰掺量>砂子细度,在28d抗压强度发展的影响:粉煤灰掺量>砂子细度>养护温度。

(3) 通过对照组试验,发现粉煤灰掺量增加时,抗压强度降低,大掺量粉煤灰混凝土的前期强度上升慢,后期可上升到使用强度。

(4) 养护温度在前期对大掺量粉煤灰混凝土的抗压强度影响很大,水浴80℃养护1d时强度可以达到90%以上,虽然后期影响较小,但对于粉煤灰掺量过高且前期温度低的试件,后期强度也不能上升到100%。

### 参考文献

- [1] 姜龙. 燃煤电厂粉煤灰综合利用现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 31-39.
- [2] 杨忠波, 黄森乐, 姚冀恺, 等. 养护方式对大掺量粉煤灰混凝土抗压强度的影响[J]. 实用技术, 2022, 396(8): 151-155.
- [3] 金明山, 宋杨, 孙剑飞, 等. 大掺量粉煤灰混凝土早期抗压强度变化规律[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(8): 109-114.
- [4] 杜森. 大掺量粉煤灰混凝土的水化特性及性能提升机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

### 山东省住房和城乡建设厅关于发布《山东省既有建筑改造工程消防设计审查验收技术指南》的通知

为进一步完善既有建筑消防改造利用技术依据,保障既有建筑改造工程消防质量安全,助力山东省城市更新建设。山东省住房和城乡建设厅组织有关单位和专家编制了《山东省既有建筑改造工程消防设计审查验收技术指南》,已经专家审查通过,自印发之日起施行。

该指南由山东省住房和城乡建设厅负责管理,同圆设计集团股份有限公司、山东省建设工程消防技术服务中心负责具体技术内容的解释。

(内容来源:山东省住房和城乡建设厅网站)