

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.014

粉煤灰混凝土早期强度的现场调查与试验研究

胡晓鹏,牛荻涛,张永利

(西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要:采用试验研究和现场调查相结合的方法,研究粉煤灰混凝土早期强度的时变规律和影响因素,分析养护时间对粉煤灰混凝土抗压强度时变规律的影响,对比 28 d 标准养护试块强度、同条件养护试块强度和实际结构强度三者的异同及不同构件类型的实际结构强度增长的差异。结果表明:(a)粉煤灰混凝土的后期强度随粉煤灰掺量的增加而增大;(b)粉煤灰混凝土的后期强度随着养护时间的延长而明显增大;(c)龄期为 28 d 的粉煤灰混凝土,同条件养护试块的强度最高,标准养护试块的强度次之,实际构件的强度最低。

关键词:粉煤灰混凝土;强度增长规律;养护时间;粉煤灰掺量

中图分类号:TV41;TU528.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)06-0676-05

Field investigation and experimental research on early-stage strength of fly ash concrete

HU Xiaopeng, NIU Ditao, ZHANG Yongli

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Experimental research and field investigations were conducted to study the time-varying rule of early-stage strength of fly ash concrete and its factors. The impact of curing time on the time-varying rule of compressive strength of fly ash concrete was analyzed. The differences in the strength of a standard-cured test specimen, a test specimen in the same condition, and an actual structure of concrete with a 28-day curing age were compared, and the differences in the increase of actual structural strength of different types of components were compared. The results show that (a) the strength of fly ash concrete at a later stage increased with the fly ash content, (b) the strength of fly ash concrete at a later stage significantly increased with the extension of curing time, and (c) for the 28-day fly ash concrete, the test specimen in the same condition had the greatest strength, followed by the standard-cured specimen and the actual structure.

Key words: fly ash concrete; strength increase law; curing time; fly ash content

粉煤灰系固体废弃物,对其加以利用可促进资源的再生和环境保护,促进社会经济可持续发展。粉煤灰作为掺和料在建筑结构中应用日益广泛,随着粉煤灰的掺入,混凝土的力学性能和耐久性将发生变化,其早期强度增长与普通混凝土有着较大的差异。文献[1-7]研究了粉煤灰混凝土在施工期内的抗压强度变化规律,结果表明,早期粉煤灰混凝土的抗压强度增长速度缓于普通混凝土,且其增长速度随粉煤灰掺量的增大而减慢。目前对粉煤灰混凝土的研究均局限在混凝土龄期 90 d 内,且仅是以标准立方体试块进行研究。实际工程中常结合标准养护试块强度和同条件养护试块强度来推测实际结构的混凝土抗压强度,尤其是采用同条件养护试块强度作为拆除模板的主要评判依据,而标准养护试块强度、同条件养护试块强度与实际构件强度存在一定的差异,用标准养护立方体试块强度作为施工现场混凝土强度控制标准是欠妥当的。对粉煤灰混凝土进行更长龄期的抗压强度研究,完整掌握粉煤灰混凝土抗压强度随龄期的时变规律及其影响因素,对于研究粉煤灰混凝土结构构件的施工期承载性能和提高粉煤灰混凝土结构的施工质量具有重要的现实意义。

收稿日期:2011-12-07

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ03A02-03);陕西省自然科学基金(2012JQ7020)

作者简介:胡晓鹏(1980—),男,陕西大荔人,讲师,博士,主要从事混凝土结构耐久性研究。E-mail:shs339@sina.com

义和工程应用价值。

笔者采取实验室试验和工程现场调查相结合的方法,对粉煤灰混凝土的早期强度时变规律及其影响因素进行研究及对比分析,研究标准养护条件下粉煤灰混凝土抗压强度的时变规律,并分析养护时间对其时变规律的影响,对比分析混凝土龄期为 28 d 时标准养护试块强度、同条件养护试块强度和实际结构强度三者的差异,研究不同构件类型的实际结构强度增长的差异。

1 混凝土早期强度试验研究

1.1 原材料

水泥:陕西秦岭 42.5 R 级普通硅酸盐水泥,品质符合 GB 175—2007 标准。
粉煤灰:陕西渭河电厂生产的Ⅱ级粉煤灰,其细度模数、烧失量、需水量分别为 0.18,5%,95%。
细骨料:灞河中砂,细度模数为 2.9,堆积密度为 1 450 kg/m³。
粗骨料:粒径为 5~16 mm 的碎石,压碎指标为 12%,堆积密度为 1 400~1 700 kg/m³。
高效减水剂:RD-N 型高效减水剂,减水效果在 20% 左右,1 h 内无坍落度损失,掺入量为胶凝材料质量的 1%。

1.2 配合比

粉煤灰掺量(粉煤灰占胶凝材料质量比,超量代掺系数为 1.1)分别为 0,10%,20% 和 30% 的混凝土配合比见表 1。

表 1 粉煤灰混凝土的配合比
Table 1 Mix ratio of fly ash concrete

编号	设计强度等级	粉煤灰掺量/%	水泥/kg	水/kg	砂/kg	石子/kg	粉煤灰/kg	减水剂/kg
A0	C30	0	314	159	731	1 193	0	3.0
A1	C30	10	282	159	726	1 182	47	3.4
A2	C30	20	251	159	719	1 173	94	3.4
A3	C30	30	220	159	713	1 164	141	3.8
B	C40	20	320	164	681	1 110	120	4.5
C	C50	20	374	164	653	1 065	139	5.0

1.3 试件成型与养护

采用 100 mm×100 mm×100 mm 的试件,粉煤灰混凝土采用强制式搅拌机搅拌 2 min 后振动成型,试件 24 h 后脱模。各种编号的试件分成 2 批,第 1 批放在标准养护室内养护 28 d 后放置于室内自然环境,在龄期为 7 d,14 d,28 d,60 d,90 d 和 180 d 分别进行抗压强度试验,以研究粉煤灰混凝土强度的时变规律;第 2 批放在标准养护室分别养护 3 d,5 d,7 d,9 d,12 d,14 d 和 28 d 后放置于室内自然环境,并分别在龄期为 7 d,28 d 和 90 d 进行试验,以分析养护时间对粉煤灰混凝土抗压强度时变规律的影响。

1.4 试验结果

1.4.1 粉煤灰混凝土抗压强度的时变规律

图 1 给出了同一设计强度等级(C30)下不同粉煤灰掺量(0,10%,20% 和 30%)粉煤灰混凝土的抗压强度 $f_{cu}(t)$ 随混凝土龄期 t 的增长情况。可以看出:60 d 内粉煤灰混凝土的抗压强度增长速度慢于普通混凝土,且其增长速度随粉煤灰掺量的增大而减慢;60 d 后粉煤灰混凝土的抗压强度增长速度快于普通混凝土,且其增长程度随粉煤灰掺量的增加而增大。龄期 180 d 时普通混凝土的抗压强度比龄期 28 d 的混凝土抗压强度 $f_{cu,28}$ 增长仅 30% 左右,而粉煤灰掺量为 30% 的混凝土其抗压强度增长近 60%。

图 2 表示同一粉煤灰掺量(20%)、不同设计强度等级(C30,C40 和 C50)下粉煤灰混凝土的抗压强度增长情况。可以看出:不同设计强度等级粉煤灰混凝土的后期强度比接近;龄期为 90 d,180 d 和 300 d 的强度

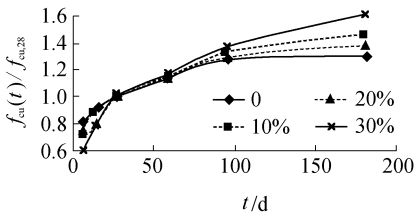


图 1 粉煤灰掺量对抗压强度时变规律的影响
Fig. 1 Influence of fly ash content on time-varying rule of compressive strength

约为28 d强度的1.24倍、1.35倍和1.48倍。

根据图1和图2散点图趋势,参考文献[8-9],选取2条曲线拟合粉煤灰混凝土抗压强度 $f_{cu}(t)$ 的增长规律,表达式如下:

$$f_{cu}(t) = \left(\frac{AW}{C} + \frac{Bf}{C} + D\right) [E + G\ln(t + H)] \tag{1}$$

$$f_{cu}(t) = \left(\frac{AW}{C} + \frac{Bf}{C} + D\right) (E + GH^t) \tag{2}$$

式中: C, W, f ——水泥、水和粉煤灰用量,kg; t ——粉煤灰混凝土的龄期,d; A, B, D, E, G, H ——待定参数。

经非线性最小平方拟合^[10],得到2条拟合曲线的参数(表2)。由于备选拟合曲线(1)的相关系数 R 大于备选拟合曲线(2),因而选定曲线(1)来描述粉煤灰混凝土抗压强度的时变规律,代入相关参数得曲线方程为

$$f_{cu}(t) = \left(-6.335 \frac{W}{C} + 2.233 \frac{f}{C} + 6.494\right) [1.579 + 2.745\ln(t + 5.644)] \tag{3}$$

表2 粉煤灰混凝土强度增长参数拟合结果

Table 2 Fitting results of strength increase of fly ash concrete

拟合曲线	样本数量	待定参数						相关系数
		A	B	D	E	G	H	
曲线(1)	288	-6.335	2.233	6.494	1.579	2.745	5.644	0.973
曲线(2)	288	-45.54	16.026	46.87	2.219	-1.158	0.982	0.971

1.4.2 养护时间对粉煤灰混凝土抗压强度增长规律的影响

粉煤灰混凝土的早期性能变化很大,养护条件是其中的一个重要因素^[11],然而由于养护时间的延长会造成后续施工的不便,加之竖向构件侧面和水平构件底面等结构表面养护的困难,实际工程中构件的养护时间难以保证。在设定龄期对不同养护条件下的粉煤灰混凝土试件进行抗压强度试验,测试结果如图3所示。

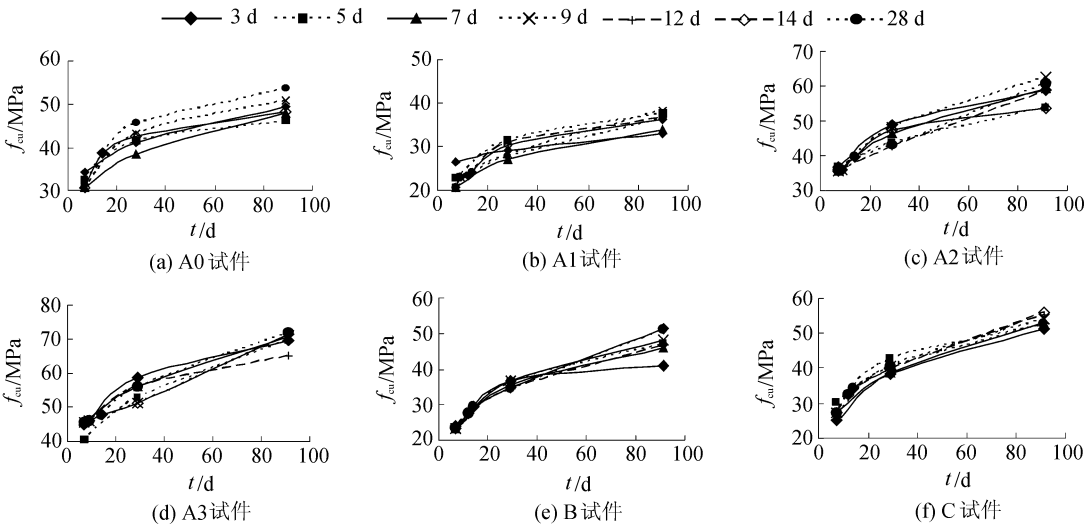


图3 养护时间对粉煤灰混凝土抗压强度增长规律的影响

Fig. 3 Influence of curing time on increase of compressive strength of fly ash concrete

从图3可以看出,随着养护时间的延长,粉煤灰混凝土的后期抗压强度增长更为明显,且设计强度越高,延长养护时间对后期抗压强度增长的效果越明显。因此,对于粉煤灰混凝土,尤其是高强度粉煤灰混凝土,应适当延长养护时间以充分保证混凝土强度的后期增长。

2 混凝土早期强度现场调查

目前关于粉煤灰混凝土抗压强度时变规律的研究大多基于90 d内标准立方体试块强度的试验结果,而实验室养护条件与实际情况存在一定的差异,用标准养护试块强度来建立实际结构混凝土抗压强度时变规

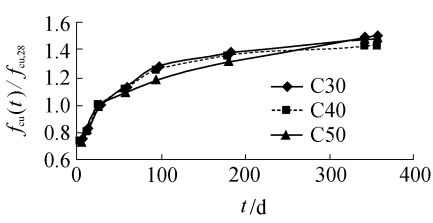


图2 不同设计强度等级的粉煤灰混凝土抗压强度的时变规律

Fig. 2 Time-varying rule of compressive strength of different concrete design strength

律显然是不准确的。

2.1 调查概况

选取咸阳市某框剪结构及西安市某框架结构为调查对象,2 个结构均采用泵送商品混凝土,混凝土设计强度等级分别为 C30 和 C35,粉煤灰掺量均为 15%。

a. 工程 1:咸阳市某框剪结构。随施工进展,预留标准养护试块 1 组和同条件养护试块 10 组(浇筑时间为 9 月份,浇筑时日平均温度为 15℃),每组 6 个试块,标准养护试块养护 28 d 后测试其强度,同条件养护试块在龄期 3 d,7 d,14 d,28 d,45 d,60 d,100 d,240 d 和 360 d 分别进行强度测试。同时,在龄期为 7 d,14 d,28 d,60 d,275 d 和 382 d 时钻取芯样测试实际构件混凝土强度^[12],测试构件涉及梁、柱、墙和板 4 类。

b. 工程 2:西安市某框架结构。预留标准养护试块 1 组和同条件养护试块 1 组(浇筑时间为 4 月份,浇筑时日平均温度为 15℃),每组 6 个试块,养护 28 d 后分别测试其混凝土强度。同时,在龄期为 3 d,7 d,9 d,14 d,22 d,28 d,45 d 和 60 d 时钻取芯样测试现浇混凝土板的强度。

2.2 调查结果与分析

图 4(a)给出了工程 1 同条件养护试块强度和实际构件混凝土强度增长情况,图 4(b)给出了工程 2 实际构件强度增长情况。从图 4 结果可以看出,与同条件养护试块相比,实际构件混凝土强度增长速度较慢,90 d 后同条件试块强度已经接近最大值,而实际构件混凝土强度仅达到最大值的 85%左右。由此可见,采用同条件养护试块强度作为拆除模板的主要评判依据是偏于不安全的。

图 5 给出了工程 1 的梁、柱、墙和板 4 类构件的强度增长情况。可以看出:梁和柱的后期增长较大,28 d 的强度仅为最大强度值的 75%左右;墙和板的后期增长较小,28 d 强度已达到最大强度值的 90%以上。

表 3 给出了 2 个工程龄期 28 d 的标准养护试块、同条件养护试块和实际构件混凝土强度三者之间的对比结果。可以看出,同条件养护试块强度最高,标准养护试块强度次之,实际构件强度最低(仅为标准养护试块强度的 85%左右)。目前实际工程中常结合标准养护试块强度和同条件养护试块强度来推测实际结构的混凝土强度,尤其是采用同条件养护试块强度作为拆除模板的主要评判依据,可见是偏于不安全的。

3 结 语

本文采取实验室试验和工程现场调查相结合的方法,对粉煤灰混凝土的早期强度增长规律及其影响因素进行研究及对比分析,建立了标准养护条件下粉煤灰混凝土强度的时变模型,并分析养护时间对其时变规律的影响。所得结论如下:

- a. 粉煤灰混凝土后期强度随粉煤灰掺量的增加而增大;不同设计强度的粉煤灰混凝土后期强度比接近。
- b. 随着养护时间的延长,粉煤混凝土的后期强度增大更明显;而设计强度越高后期增长的效果越明显。
- c. 与同条件养护试块强度相比,实际混凝土构件的强度增长速度较慢;龄期同为 28 d 的粉煤灰混凝土,

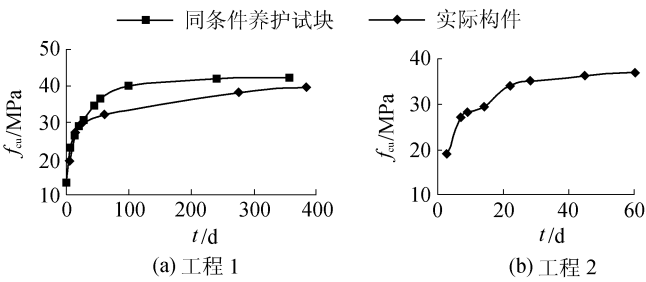


图 4 同条件养护试块强度与实际构件强度增长对比
Fig. 4 Comparison of strength increase of test specimen in same condition and actual structure

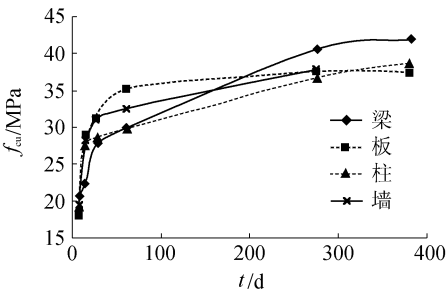


图 5 不同实际构件强度增长对比
Fig. 5 Comparison of strength increase of different actual structures

表 3 龄期为 28 d 的 3 种混凝土试块强度对比
Table 3 Comparison of three kinds of strength for 28-day concrete

工程编号	设计强度等级	抗压强度/MPa		
		同条件养护试块	标准养护试块	实际构件
1	C35	41.9	39.1	35.0
2	C30	37.4	35.8	29.8

同条件养护试块的强度最高,标准养护试块的强度次之,实际构件的强度最低。

参考文献:

[1] 马志霞,李金奎,候瑞柏,等. 不同掺量粉煤灰混凝土强度试验研究[J]. 河北建筑科技学院学报,2005,22(4):32-34. (MA Zhixia,LI Jinkui, HOU RuiBo, et al. The experiment on strength of concrete added with different volume fly-ash and the engineering application[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2005, 22(4):32-34. (in Chinese))

[2] 富强. 粉煤灰混凝土强度增长规律初探[J]. 混凝土,2005(7):24-26. (FU qiang. Growth law of the fly ash concrete strength. Concrete,2005(7):24-26. (in Chinese))

[3] 程智清,刘宝举. 低温养护条件下粉煤灰混凝土早期强度研究[J]. 煤炭科技,2006(5):7-10. (CHENG Zhiqing,LIU Baoju. Study of early strength of fly ash concrete under condition of low-temperature curing[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2006(5):7-10. (in Chinese))

[4] 曾波,杜庆檐. 掺粉煤灰混凝土强度增长与龄期关系的试验研究[J]. 广东水利水电职业技术学院学报,2003(3):24-26. (ZENG Bo,DU Qingyan. The testing researches on age strength relation of concrete adulterated with fly ash[J]. Journal of Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, 2003(3):24-26. (in Chinese))

[5] 张贺峰,刘大鹏,屈华静,等. 混凝土强度随时间变化趋势及微裂缝的影响[J]. 河北理工大学学报:自然科学版,2011,33(1):148-151. (ZHANG Hefeng,LIU Dapeng,QU Huajing,et al. The strength of concrete with time changing trends and micro cracks[J]. Journal of Hebei Polytechnic University:Ntural Science Edition,2011,33(1):148-151. (in Chinese))

[6] 段付珍,张慧海,牛荻涛,等. 掺合料及普通混凝土抗压强度随龄期变化规律试验研究[J]. 混凝土,2011(4):58-60. (DUAN Fuzhen,ZHANG Huihai,NIU Ditao,et al. Study of the compressive strength change with age of ordinary concrete and mineral admixture concrete[J]. Concrete, 2011(4):58-60. (in Chinese))

[7] 李志刚,李家和,张洪贵. 粉煤灰与矿渣复合掺合料对混凝土强度的影响[J]. 低温建筑技术,2009(4):17-19. (LI Zhigang,LI Jiahe, ZHANG Honggui. Influence of fly ash and ground slag admixture on strength of concrete[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009(4):17-19. (in Chinese))

[8] 赵楠. 多层钢筋混凝土框架结构施工期可靠性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.

[9] 尚连飞,张亚梅,孙伟. 粉煤灰混凝土抗压强度计算模型[J]. 建筑技术,2000,31(1):32-34. (SHANG Lianfei,ZHANG Yamei,SUN Wei. Calulation model of fly ash concrete compressive strength[J]. Architecture Technology, 2000,31(1):32-34. (in Chinese))

[10] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.

[11] 杨军. 混凝土的碳化性能与气渗性能研究[D]. 青岛:山东科技大学,2004.

[12] CECS03—2007 钻芯法检测混凝土强度技术规程[S].