

doi: 10.19697/j.cnki.1673-4432.201905012

粉煤灰-矿粉-水泥三元胶凝材料 对混凝土抗压强度的影响

刘永森¹, 段岳强², 王瑞攀³, 何富强⁴, 陈昌萍⁴, 王晨飞^{4,5}

(1. 厦门轨道交通集团有限公司, 福建 厦门 361004;

2. 中交一公局厦门工程有限公司, 福建 厦门 361021;

3. 厦门大学材料学院, 福建 厦门 361005;

4. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361024;

5. 重大工程结构裂缝控制福建省高校工程研究中心, 福建 厦门 361024)

[摘要] 为研究粉煤灰-矿粉-水泥三元胶凝材料对混凝土抗压强度的影响, 测试混凝土标准养护 3、7、14、28 和 56 d 龄期的抗压强度, 分析混凝土抗压强度与胶凝材料各组分的关系。实验结果表明, 混凝土抗压强度与粉煤灰-矿粉-水泥三元体系组分的掺量比例有密切关系。粉煤灰和矿粉双掺时, 由于粒径不同会相互填充, 从而产生超叠加效应, 使掺加粉煤灰和矿粉的混凝土抗压强度得到明显改善。水泥、矿粉、水泥及粉煤灰的组合、粉煤灰和矿粉的组合对混凝土的抗压强度有增强作用, 其中粉煤灰和矿粉的协同效应对混凝土抗压强度增强最为明显。随着龄期增加, 粉煤灰和矿粉的协同效应对混凝土抗压强度的增强作用逐渐减弱, 与 28 d 抗压强度相比, 其对 56 d 抗压强度贡献降低了 55.9%; 粉煤灰及水泥-粉煤灰-矿粉的三元组合对混凝土抗压强度的影响逐渐降低, 与 28 d 抗压强度相比, 粉煤灰及水泥-粉煤灰-矿粉的三元组合对 56 d 抗压强度的降低效应分别减少了 40.9% 和 67.3%。

[关键词] 粉煤灰-矿粉-水泥三元胶凝材料; 混凝土; 抗压强度; 掺量

[中图分类号] TU528.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1673-4432(2019)05-0071-07

目前在建筑领域, 单纯以水泥作为胶凝材料已难以满足工程对混凝土性能的要求, 需要发展其他适用于混凝土的辅助性胶凝材料作为补充和替换。我国工业生产产生大量有活性的粉煤灰和矿渣, 而这两种物质作为掺合料取代一定量的水泥配制混凝土, 对提高混凝土的经济性、资源的循环利用和建设节约型社会都有重要意义。外加剂与矿物掺合料已被公认为是高性能混凝土应用技术中的两个关键性组成材料^[1]。矿物掺合料的加入, 一方面在节能减排的大环境下可以充分利用工业废料; 另一方面可以改善混凝土工作性能, 优化混凝土内部结构, 提高混凝土的抗渗、抗腐蚀能力, 因而矿物掺合料已成为配制高性能混凝土不可缺少的组分^[2]。近年来, 由于内部温度过高引起的大体积混凝土开裂的案例越来越多, 有研究表明, 在混凝土中双掺粉煤灰和矿粉, 可有效降低大体积混凝土内部温升, 因此, 双掺粉煤灰和矿粉已成为大体积混凝土温度控制的最有效途径之一。

研究者对掺加粉煤灰和矿粉的混凝土进行了大量研究^[2-9], 均认同矿物掺合料对混凝土具有重要

收稿日期: 2019-03-06

修回日期: 2019-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778551); 福建省科技厅青年创新项目(2016J0514)

通信作者: 刘永森, 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为地铁建筑施工技术与控制理论, E-mail: 57695488@qq.com。

引文格式: 刘永森, 段岳强, 王瑞攀, 等. 粉煤灰-矿粉-水泥三元胶凝材料对混凝土抗压强度的影响[J]. 厦门理工学院学报, 2019, 27(5): 71-77.

Citation: LIU Y M, DUAN Y Q, WANG R P, et al. Effect of fly ash-slag powder-cement blends on concrete compressive strength[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2019, 27(5): 71-77. (in Chinese)



影响。但是大部分研究进行的是某一系列固定胶凝材料比例的混凝土抗压强度等性能，并从中选取相对最优配比，对于由此选定的混凝土配合比，是否就是整个混凝土配比当中的最优配比，如何才能选取要求条件下混凝土掺合料的最优比例，还需要进一步研究。基于此，本文采用混料设计的方法，就目前常用的矿物掺合料粉煤灰和矿粉对混凝土抗压强度的影响进行较系统的试验研究和分析，并在特定抗压强度要求下选取最优胶凝材料比例，以期揭示其对混凝土抗压强度的影响规律。

1 试验

1.1 试验原材料

试验采用厦门市美益集团生产的 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥，试验用粉煤灰为 II 级粉煤灰，矿粉为 S95 级矿渣。原材料的化学成分和主要物理力学性能如表 1~2 所示，其各项指标符合相应规范的要求。

表 1 水泥、粉煤灰和矿粉的化学组成
Table 1 Chemical compositions of cement, fly ash and slag powder

原材料	w / %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Loss
水泥	25.54	8.13	5.59	52.27	1.85	2.27	0.014	1.75
粉煤灰	78.61	15.14	3.80	2.98	0.56	0.55	0.050	0.86
矿粉	16.76	12.22	2.42	36.46	4.92	0.21	0.008	1.07

表 2 水泥的主要力学性能
Table 2 Main mechanical properties of cement

碱含量 / %	比表面积 / m ² · kg ⁻¹	抗压强度 / MPa		抗折强度 / MPa		凝结时间 / min	
		3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝
		0.26	358	27.1	50.6	5.4	8.8

石子采用 5.0~31.5 mm 连续级配碎石，砂子为厦门市河砂，细度模数为 2.6，符合 2 区级配要求。拌和用水为自来水。

1.2 试验配合比设计

以 C35 混凝土为研究对象，通过改变水泥、粉煤灰和矿粉的掺量，基于混料设计方法采用混凝土配合比设计的质量法得到 9 组混凝土配合比，具体如表 3 所示。其中胶材掺量选定为 370 kg · m⁻³，水胶比为 0.42，砂率为 0.38，减水剂掺量为 1.1%（胶凝材料质量比）。

表 3 混凝土配合比
Table 3 Combination ratio of concrete

编号	胶凝材料			砂子	石子	水	减水剂
	水泥	粉煤灰	矿粉				
1	309.9	27.8	32.4	712.3	1 162.3	155.4	4.07
2	370.0	0.0	0.0	712.3	1 162.3	155.4	4.07
3	254.4	83.3	32.4	712.3	11 62.3	155.4	4.07
4	217.4	27.8	124.9	712.3	1 162.3	155.4	4.07
5	185.0	0.0	185.0	712.3	1 162.3	155.4	4.07
6	217.4	83.3	69.4	712.3	1 162.3	155.4	4.07
7	185.0	111.0	74.0	712.3	1 162.3	155.4	4.07
8	249.8	55.5	64.8	712.3	1 162.3	155.4	4.07
9	259.0	111.0	0.0	712.3	1 162.3	155.4	4.07

1.3 试件成型与养护

试验采用的混凝土抗压强度试件尺寸为(150×150×150) mm,试件成型后先用薄膜覆盖1 d后拆模,随后将试件放于标准养护室内养护至规定龄期,分别测试混凝土3 d、7 d、14 d、28 d和56 d抗压强度。

1.4 试验方法

依据GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[10]进行混凝土试件抗压强度试验。为避免混凝土试件湿度发生变化,测试前用湿毛毯覆盖,保持试件潮湿状态。测试时先将混凝土试件进行称重以衡量试件的均匀性,随后进行抗压强度的测试,控制加载速度为0.5~0.8 MPa·s⁻¹,每组测试3块试件,并按规范对测试结果进行处理。

2 试验结果与分析

2.1 混凝土抗压强度测试结果

基于胶凝材料中各组分不同掺加比例,对不同养护龄期的混凝土抗压强度进行测试,测得的9组混凝土的抗压强度如表4所示。

表4 不同龄期混凝土抗压强度值
Table 4 Compressive strength of concrete at different curing ages

编号	胶材组分/%			抗压强度/MPa				
	水泥	粉煤灰	矿粉	3 d	7 d	14 d	28 d	56 d
1	83.75	7.50	8.75	42.5	46.8	52.2	54.3	57.6
2	100.00	0.00	0.00	44.8	46.5	53.4	55.6	58.0
3	68.75	22.50	8.75	36.7	38.7	41.9	54.1	54.7
4	58.75	7.50	33.75	32.4	41.7	45.6	41.1	44.6
5	50.00	0.00	50.00	27.0	40.3	43.1	51.0	47.5
6	58.75	22.50	18.75	32.4	40.3	41.0	47.5	50.5
7	50.00	30.00	20.00	26.9	34.9	35.2	42.3	42.9
8	67.50	15.00	17.50	31.7	39.4	41.5	47.9	51.4
9	70.00	30.00	0.00	31.7	38.0	38.7	43.5	43.5

从表4可以看出,总体上,随着养护龄期的增长,混凝土抗压强度逐渐增大,但随着混凝土中粉煤灰和矿粉掺量的增加,其抗压强度逐渐降低,且掺加矿物掺合料的混凝土抗压强度基本均低于不掺矿物掺合料的混凝土。

对比第5组和第7组、第4组和第6组可以看出,当水泥掺量分别为50%和58.75%,虽然矿粉和粉煤灰掺量不同,但是它们在前7 d的抗压强度基本相同,说明在水化早期,矿物掺合料对混凝土抗压强度影响不大。这是因为粉煤灰、矿粉本身与水反应速度较慢,粉煤灰和矿粉活性的激发需要碱性或者硫酸盐类水化产物,而在本试验中,由于水泥被粉煤灰和矿粉大量取代,水泥量相应降低,使得水泥水化生成的Ca(OH)₂量减少,不能有效激发粉煤灰和矿粉发生水化反应,因此粉煤灰和矿粉对混凝土抗压强度的贡献不大。

在水化后期,对比第1组和第2组可以看出,掺加7.5%粉煤灰和8.75%矿渣的混凝土抗压强度与不掺矿物掺合料的混凝土抗压强度基本相同。这是因为,一方面,在水化后期,粉煤灰和矿粉发生二次水化反应,生成的水化产物与水泥水化产物共同作为胶结体系;另一方面,未反应的矿物掺合料起到微骨料效应,填堵混凝土内部微小孔隙,使得混凝土更加密实,抗压强度提高。

对比第5组和第7组可以看出,当辅助胶凝材料掺加总量相同时,掺加50%矿渣的混凝土抗压强度大于掺加20%矿渣和30%粉煤灰的混凝土,这是由于试验采用的粉煤灰为II级粉煤灰,其活性较低,而粒化高炉矿渣粉为S95级矿粉,矿粉的活性要大于粉煤灰的活性,相应的矿渣的水化程度也优

于粉煤灰。

2.2 混凝土抗压强度等值图

为了更直观地看出水泥、粉煤灰和矿粉对混凝土抗压强度的影响，将表 4 中的测试抗压强度结果作三元等值线图^[11]，其结果如图 1 所示。等值图的具体读法可参照文献 [12]。

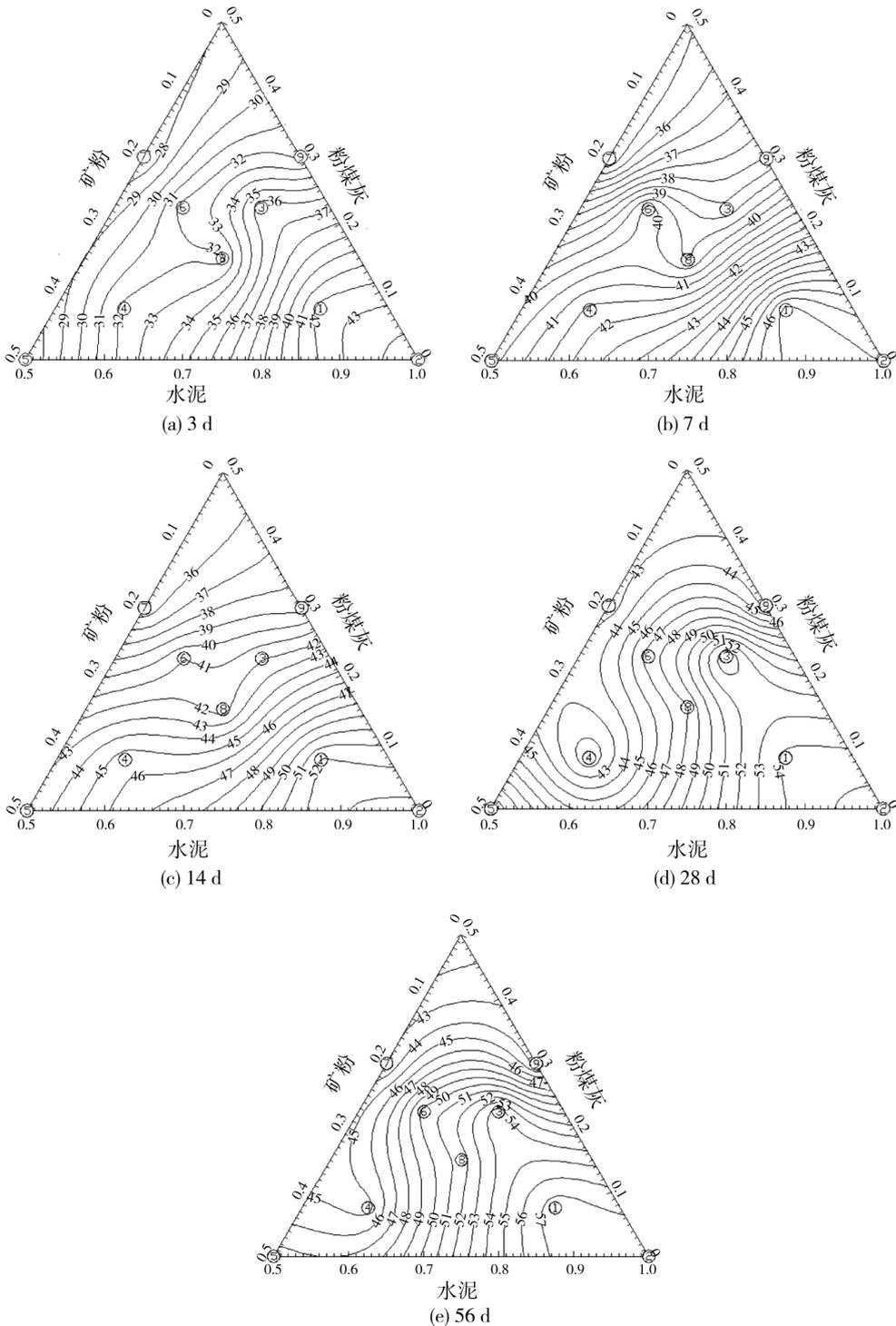


图 1 混凝土不同龄期抗压强度等值图 (单位: MPa)

Fig. 1 Contour plots of compressive strength of concrete at different curing ages (MPa)

从图 1(a)、(b)可以看出,在水化 3 d 时,混凝土抗压强度等值图中等值线基本与等值图左轴(矿渣掺量变化轴)相平行,亦即在水化早期,混凝土抗压强度主要受到水泥掺量的影响,随着水泥掺量的增加,混凝土抗压强度逐渐增大,而矿渣掺量对混凝土抗压强度基本没有影响。这一时期,胶凝材料组分对混凝土抗压强度的影响为水泥>粉煤灰>矿粉。

从图 1(b)、(c)可以看出,在水化 7 d 和 14 d 时,混凝土抗压强度等值图中的等值线已发生倾斜,不与左轴平行,这说明矿粉已开始发挥作用,整体上混凝土抗压强度随着水泥和矿粉掺量的增加而增大,随着粉煤灰掺量的增加而降低,这是由于本试验采用的 S95 级矿粉,其活性更高,而粉煤灰为 II 级粉煤灰,相对矿渣的活性偏低,因此,相同条件下矿粉掺量大的混凝土其抗压强度较高。

从图 1(d)、(e)可以看出,在 28 d 和 56 d 龄期时,混凝土抗压强度等值图中的等值线发生明显弯曲。在 28 d 和 56 d 龄期时,复掺粉煤灰和矿粉的混凝土抗压强度还是均小于纯水泥作为胶凝材料的混凝土。当纯水泥作为胶凝材料时,混凝土的抗压强度分别达到最大,分别为 55.6 MPa 和 58.0 MPa,完全满足设计要求。但是考虑到仅仅以水泥作为胶凝材料的大体积混凝土在水化过程中将产生大量的水化热,在混凝土中双掺粉煤灰和矿粉,可有效降低大体积混凝土内部温升,同时改善混凝土工作性能,因此,本文在保证混凝土抗压强度条件下掺加粉煤灰和矿粉。从图 1(d)、(e)可以看出,在 28 d 和 56 d 养护龄期,当水泥掺量为 70%、粉煤灰掺量为 23%、矿粉掺量为 7% 时,混凝土抗压强度等值线有明显增大突变,混凝土的抗压强度分别达到 53 MPa 和 54 MPa,接近抗压强度最大值(分别为 55.6 MPa 和 58.0 MPa)。可见,本文选定的混凝土强度等级为 C35 混凝土,在养护 28 d 龄期时,在胶凝材料各组份掺量比例为 100% 条件下,当水泥掺量>63%,粉煤灰掺量<37%,矿粉掺量<37% 时,混凝土抗压强度均满足要求。

为此,考虑到水泥水化热及经济性等原因,可选取水泥掺量为 63%,粉煤灰掺量为 30%,矿粉掺量为 7%。

2.3 胶凝材料组份比例与混凝土抗压强度的关系

为了进一步揭示混凝土抗压强度与水泥、粉煤灰和矿粉掺量变化之间的规律关系,将混凝土抗压强度与混凝土中水泥、粉煤灰和矿粉掺量建立如式(1)所示的关系式^[13]:

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_{12} x_1 x_2 + \alpha_{13} x_1 x_3 + \alpha_{23} x_2 x_3 + \alpha_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (1)$$

式(1)中: y 为与胶凝材料各组份相关的响应,本文指混凝土抗压强度; x_1 为混凝土中水泥掺量; x_2 为混凝土中粉煤灰掺量; x_3 为混凝土中矿粉掺量; α_1 、 α_2 、 α_3 分别为水泥、粉煤灰和矿粉对抗压强度的影响系数, α_{12} 、 α_{23} 、 α_{13} 、 α_{123} 分别为水泥和粉煤灰、粉煤灰和矿粉、水泥和矿粉、水泥-粉煤灰-矿粉对抗压强度的影响系数。

将表 4 中不同龄期混凝土抗压强度值与水泥、粉煤灰和矿粉的掺量数值代入式(1)进行拟合,得到 y 与 x_1 、 x_2 、 x_3 之间的关系式,具体如表 5 所示。

表 5 混凝土抗压强度与胶凝材料各组份掺量拟合关系式

Table 5 Fitting relations between concrete compressive strength and component quantity in the blends

龄期/d	拟合关系式	拟合优度(R-Sq) /%
3	$y = 45x_1 - 2060x_2 + 489x_3 + 2946x_1x_2 - 962x_1x_3 + 7113x_2x_3 - 8279x_1x_2x_3$	99.24
7	$y = 47x_1 - 1048x_2 + 249x_3 + 1522x_1x_2 - 432x_1x_3 + 3869x_2x_3 - 4692x_1x_2x_3$	94.64
14	$y = 54x_1 - 1570x_2 + 357x_3 + 2248x_1x_2 - 649x_1x_3 + 5735x_2x_3 - 6949x_1x_2x_3$	99.45
28	$y = 57x_1 - 1246x_2 + 505x_3 + 1805x_1x_2 - 927x_1x_3 + 3078x_2x_3 - 2617x_1x_2x_3$	75.30
56	$y = 59x_1 - 1217x_2 + 423x_3 + 1754x_1x_2 - 780x_1x_3 + 3135x_2x_3 - 2705x_1x_2x_3$	87.43

表 5 中 R-Sq 为拟合优度,是回归模型误差占总误差的百分比,其取值在 0% 和 100% 之间,数值越大,表明回归模型与数据吻合得越好。在本文中,R-Sq 代表的是 1 个比值, x 作为自变量,是 y 的 1 个影响因素, y 的变动可以分成两部分,一部分是由于 x 的变化所引起的,还有一部分是误差。可能存在其他的影响因素或者测量误差,R-Sq 作为比值,就是模型中可以解释的变动部分占 y 总变动的

比率。R-Sq 越大,说明可解释的变动占总变动的比率越大,说明因素越显著,也可以说方程拟和得越好。从表 5 中可以看出,混凝土抗压强度与胶凝材料各组分掺量之间的关系均较符合公式(1)的模型关系,除了 28 d 龄期 R-Sq 值为 75.3% 外,其余龄期拟合系数均大于 85%,尤其是在 14 d 龄期之前,R-Sq 值基本均大于 95%,这说明混凝土抗压强度与胶凝材料中各组分掺量间有密切关系。

由表 5 可见,混凝土中各参数的拟合系数有正有负,且值也不同。为了进一步研究各参数对混凝土抗压强度的影响,对上述拟合关系式的各个参数进行总结,得到各参数的拟合参数如表 6 所示。

表 6 拟合关系式中各参数的拟合系数
Table 6 Fit value of each parameter in the fitting relationship

龄期/d	系数						
	α_1	α_2	α_3	α_{12}	α_{13}	α_{23}	α_{123}
3	45	-2 060	489	2 946	-926	7 113	-8 279
7	47	-1 048	249	1 522	-432	3 869	-4 692
14	54	-1 570	357	2 248	-649	5 735	-6 949
28	57	-1 246	505	1 805	-927	3 078	-2 617
56	59	-1 217	423	1 754	-780	3 135	-2 705

从表 6 中可以看出,不同参数的拟合系数正负性不同,但是同一参数的拟合参数正负性是相同的,这说明在不同龄期,混凝土中单因素、双因素和三因素对混凝土抗压强度的影响是相同的。而 α_1 、 α_3 、 α_{12} 、 α_{23} 值均为正值,说明水泥、矿粉、水泥及粉煤灰的组合、粉煤灰和矿粉的组合对混凝土的抗压强度有增强作用,其中粉煤灰和矿粉的协同效应对混凝土抗压强度增强最为明显,且随着龄期的增长, α_1 值逐渐增大,与 28 d 抗压强度相比,其对 56 d 抗压强度贡献降低了 55.9%,这说明水泥在混凝土抗压强度中所起的作用也逐渐增大。而 α_{23} 值有逐渐减小的趋势,这说明粉煤灰和矿粉的协同效应对混凝土抗压强度的增强作用逐渐减弱。 α_2 、 α_{13} 、 α_{123} 值为负值,说明粉煤灰、水泥和矿粉的组合及水泥、粉煤灰和矿粉的组合对混凝土抗压强度有负面作用,即对混凝土抗压强度有降低效应。但是 α_2 和 α_{123} 值均随龄期逐渐减小,与 28 d 抗压强度相比,粉煤灰及水泥-粉煤灰-矿粉的三元组合对 56 d 抗压强度的降低效应分别减少了 40.9% 和 67.3%,这说明粉煤灰、水泥-粉煤灰-矿粉的组合对混凝土抗压强度的影响逐渐降低。这是由于随着水化的进行,粉煤灰和矿粉也开始发生二次水化效应,生成的水化产物对混凝土抗压强度的增强效应也越来越明显,贡献逐渐增大。

3 结论

1) 混凝土抗压强度与粉煤灰-矿粉-水泥三元体系组分的掺量比例有密切关系。采用混料设计方法可快速便捷地得到要求混凝土抗压强度下胶凝材料掺量比例,以及选定胶凝材料掺量比例条件下混凝土的抗压强度。

2) 不同矿物掺合料双掺,由于粒径不同会相互填充,从而产生超叠加效应。这种超叠加效应有效降低了混凝土的孔隙率,使有害的粗大连通孔转变为细小封闭的无害孔或者少害孔,优化了混凝土内部孔隙结构,使得掺加粉煤灰和矿粉的混凝土抗压强度得到明显改善。

3) 水泥、水泥及粉煤灰的组合、粉煤灰和矿粉的组合对混凝土的抗压强度有增强作用,其中粉煤灰和矿粉的协同效应对混凝土抗压强度增强最为明显。随着龄期增加,粉煤灰和矿粉的协同效应对混凝土抗压强度的增强作用逐渐减弱,粉煤灰及水泥-粉煤灰-矿粉的三元组合对混凝土抗压强度的影响逐渐降低。

[参考文献]

- [1] 刘建忠,刘加平,邓敏,等.矿物掺合料对混凝土抗压强度和氯离子渗透性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2005

(4): 11-13.

- [2] 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.
- [3] 王立久,董晶亮,谷鑫.不同矿物掺合料对混凝土早期强度和工作性能影响的研究[J].混凝土,2013(4):1-3.
- [4] 滕骅,俞小光.掺合料对高性能混凝土抗压强度增长的影响[J].浙江建筑,2012,29(7):52-55.
- [5] 柴天红,习海平.掺合料对回弹法检测泵送混凝土强度的影响研究[J].江西建材,2015(23):7-9.
- [6] 秦力,丁婧楠,朱劲松.掺合料高强混凝土微观结构及其对强度的影响研究[J].混凝土,2017(7):83-87.
- [7] 张小龙,曾馨花,张会苹,等.复掺矿物掺合料混凝土性能试验研究[J].铁道建筑,2015(9):121-124.
- [8] 李懿卿,牛荻涛,宋华.复合矿物掺合料混凝土力学性能的试验研究[J].混凝土,2009(3):47-49.
- [9] 李源,贾磊,马清波.粉煤灰、矿粉掺合料对低强度等级混凝土的强度及和易性的影响[J].混凝土,2014(10):93-95,98.
- [10] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [11] SHI C, WANG D, WU L, et al. The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement-silica fume-slag binder[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 61: 44-52.
- [12] 史才军,王德辉,安晓鹏,等.基于多种性能要求的混凝土组成设计方法[J].硅酸盐学报,2018,46(2):230-238.
- [13] HU X, SHI C, SHI Z, et al. Early age shrinkage and heat of hydration of cement-fly ash-slag ternary blends[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 857-865.

Effect of Fly Ash-Slag Powder-Cement Blends on Concrete Compressive Strength

LIU Yongmiao¹, DUAN Yueqiang², WANG Ruipan³, HE Fuqiang⁴, CHEN Changping⁴, WANG Chenfei^{4,5}

(1. Xiamen Rail Transit Group, Xiamen 361004, China;

2. CCCC First Highway Xiamen Engineering, Xiamen 361021, China;

3. College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

4. School of Civil Engineering & Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

5. Structural Crack Control for Major Projects, Fujian University Engineering Technology Research Center, Xiamen 361024, China)

Abstract: In order to study the effects of fly ash-slag powder-cement cementitious combination on the compressive strength of concrete, the compressive strengths of concrete curing for 3, 7, 14, 28 and 56 d age were tested, and effect of each component studied and analyzed. The results show that the compressive strength of concrete is closely related to the proportion of cement, fly ash and slag powder in the three element components. When fly ash and slag powder are double-doped, they will fill each other due to difference in the particle sizes and result in a super-superposition effect, which significantly improves the compressive strength of the fly ash-slag powder concrete. Combination of cement, cement-fly ash blend, and fly ash-slag powder blend has good effect in elevating the compressive strength of concrete. Fly ash and slag powder working together has the most significant synergistic effect in elevating the concrete compressive strength. With the increasing curing age, however, the synergistic effect of fly ash and slag powder on the concrete strength is gradually weakened to measure 55.9% less to the 56 d compressive strength compared with that on the 28 d compressive strength; and similarly, the influence of the combination of fly ash and cement-fly ash-slag powder blend on the concrete compressive strength is gradually reduced to measure 40.9% and 67.3% less respectively compared with that on the 28 d compressive strength.

Key words: fly ash-slag powder-cement blends; concrete; compressive strength; content

(责任编辑 马 诚)