

同水胶比下混凝土中水泥-矿渣-粉煤灰-硅灰的混料效应

唐 明, 刘宏亮, 李婧琦

(沈阳建筑大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 为探索同一水胶比下混凝土中水泥-矿渣-粉煤灰-硅灰多元掺合料对强度和渗透性的混料效应, 通过混料设计, 研究了同一水胶比下混凝土水泥、矿渣、粉煤灰和硅灰混料因子对 7、28 d 抗压强度和 28 d 电通量的影响。按多元混料回归设计的方法分析评价了各因素影响的内在规律, 探讨了显著因素之间的交互作用。研究表明, 建立的同一水胶比下水泥-矿渣-粉煤灰-硅灰多元混料 7、28 d 抗压强度和 28 d 电通量的回归模型都是非常显著的, 在约束条件下绘制的三角坐标混料等高线很好地反映了混料因子间的内在规律, 试验结果的分析中, 单掺硅灰的抗压强度最高, 电通量最低, 但较高硅灰掺量会增加混凝土的成本。在 28 d 抗压强度满足设计要求的情况下, 粉煤灰掺量和矿渣掺量分别在 50% 时的电通量和三元掺合料的电通量值也非常好。SEM 结果分析表明, 同一水胶比下, 三元矿物掺合料显著改善了混凝土材料的显微结构, 其宏观性能良好。

关键词: 混凝土; 掺合料; 氯离子扩散; 显微结构; 强度

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A 文章编号: 1002-3550(2011)12-0001-04

Mixing actions from slag, fly ash and silica fume in concrete on the same water-binder ratio condition

TANG Ming, LIU Hong-liang, LI Jing-qi

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to explore the mixing actions from the admixtures include slag, fly ash and silica fume on the strength and permeability of the same water-binder ratio concrete. Research factors as fly ash, slag and silica fume influence on the different strength grade of 7 d compressive strength, 28 d compressive strength and chloride diffusion performance of concrete had the same water-binder ratio, followed the mixture design. Use multielement regression analysis to evaluate the internal rules of the different influence factors, explore the interaction of significant factors. Research shows that the regression model between strength and the electric flux is very significant, the mixture equivalence contour of triangular coordinate can well display the related between mixture factors on the curbed condition. Showing in the visual analysis, the concrete only mixed silicon-ash have the best strength and chloride diffusion resistance, but mix overmuch silica fume cloud improve the costing. On the condition that may get applicable strength, concrete mixed with 50% add quantity slag ash or fly ash, can also get well chloride diffusion resistance. The results of SEM show that, the concrete of admixture with three species improve the microstructure of concrete material, therefore, it shows good macro properties.

Key words: concrete, admixtures, chloride diffusion, microscopic structure, strength

0 引言

近年来, 随着混凝土工程的大型化和巨型化, 现浇工程量的日益增大, 泵送混凝土得到了长足发展, 目前中国的泵送混凝土中掺合料的用量相当之大, 诸多混凝土科学家和工程技术人员研究了掺合料对混凝土强度和耐久性的影响, 但同一水胶比下, 多元掺合料相互之间对强度和耐久性的影响方面研究仍显不足。

为深入探索同一水胶比下混凝土中水泥-矿渣-粉煤灰-硅灰多元掺合料对强度和耐久性的混料效应, 本文通过混料设计, 研究了同一水胶比下混凝土水泥、矿渣、粉煤灰和硅灰混料因子对 7、28 d 抗压强度和 28 d 电通量的影响。除对试验结果直接分析外, 按多元混料回归设计的方法建立了相应的回归方程, 通过约束条件下绘制出三角坐标混料等高线图, 描述混料因子

间的相互影响。通过 SEM 结果分析三元矿物掺合料对混凝土材料的显微结构的改善。

1 原材料、试验方法及试验设计

1.1 原材料

(1) 水泥: 选用冀东牌 P·O 42.5 水泥, 其化学成分见表 1, 性能指标见表 2。

表 1 水泥化学成分

表 1 水泥化学成分							%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	Loss
21.72	5.81	4.33	62.41	1.73	2.56	0.50	1.47

(2) 细集料: 按现行行业标准 JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》的相关规定检验, 细集料为第二级配区中砂。

收稿日期: 2011-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(51078241)、国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB623106)

表2 水泥物理性能

细度(0.08 mm 筛余) /%	凝结时间/min		安定性	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
	初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
3.6	132	216	合格	4.6	8.2	20.6	52.2

(3)石:采用 5~25 mm 连续级配的苏家屯区康家山花岗岩碎石。

(4)粉煤灰:选用沈海热电厂 I 级粉煤灰,需水量比为 90%, 45 μm 筛筛余量为 11.7%,符合国家现行标准 GB/T 1596—2005《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》中 I 级粉煤灰的技术性能指标要求,如表 3。

表3 粉煤灰化学成分及性能 %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	Loss
56.89	24.45	6.78	2.13	3.20	0.74	4.24	0.88

(5)粒化高炉矿渣粉:选用鞍钢 11# 炉前水淬渣,颜色呈黄白色,密度 2.87 g/cm³,主要矿物成分为钙铝黄长石(2CaO·Al₂O₃·SiO₂)、镁黄长石(2CaO·MgO·2SiO₂)、硅酸二钙(2CaO·SiO₂)等矿物。玻璃体含量为 95%,质量系数 >1.2,其主要化学成分见表 4。

表4 矿渣粉的化学成分 %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	MnO	R ₂ O
37.50	11.81	0.42	42.17	7.03	0.10	0.32	0.10	0.40

(6)硅灰:沈阳市建恺特种工程材料有限公司生产,灰白色粉末,平均粒径在 0.15 μm。其化学成分及细度如表 5 所示。

表5 硅灰的化学成分及细度

比表面积 (m ² /kg)	化学成分 /%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Loss
1.5×10 ⁴	91.86	0.87	0.85	0.63	0.72	0.60	2.92

(7)减水剂:沈阳市依力达建筑外加剂厂生产的 WJF 聚羧酸高效减水剂,减水率为 30%。

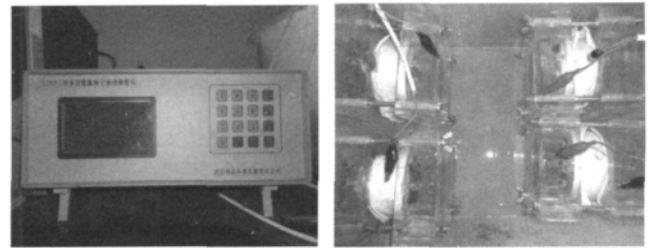
(8)拌合水:满足标准要求的自来水。

1.2 试验方法

新拌混凝土坍落度控制在 120~150 mm。按照国家标准 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能测试方法》测定混凝土 7、28 d 强度。本试验试块规格为 100 mm×100 mm×100 mm。

混凝土渗透性试验采用 ASTM C1202 直流电量法,对混凝土电通量进行测试。测试仪器为武汉尚品科技公司产 LRNY-1 型多功能氯离子渗透测量仪,测试试样为养护 28 d 的 φ100 mm×

50 mm 圆柱形混凝土试件。试验设备如图 1 所示。



(a)数据采集仪器

(b)试件测试

图1 电通量测试仪器

1.3 混料试验设计及混凝土配合比

为探索粉煤灰(F)、矿渣(S)和硅灰(SF)掺合料对混凝土强度以及抗氯离子渗透性的影响,确定的考核指标为 7、28 d 抗压强度和 28 d 电通量。采用四分量混料设计,约束条件如下:

$$\begin{cases} x_c + x_s + x_f + x_{sf} = 1 \\ x_c \geq 0.5, 0.5 \geq x_s \geq 0 \\ 0.5 \geq x_f \geq 0, 0.15 \geq x_{sf} \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

模型的混料设计谱点见图 2。

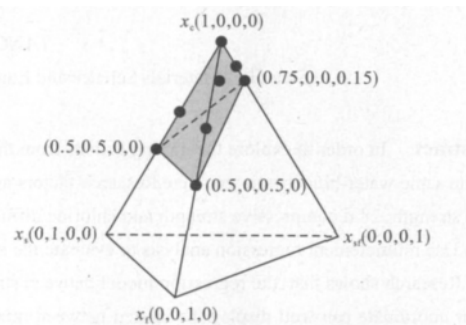


图2 模型的混料设计谱点

相应的多项式混料模型为:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i<j}^4 \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

根据混料设计谱点,计算的实际配合比见表 6。

表6 混凝土浆试样的配合比

编号	x _c	x _s	x _f	x _{sf}	材料用量/(kg/m ³)							水胶比	
					水泥	矿渣	粉煤灰	硅灰	减水剂	石	砂		水
1(基准)	1.00	0	0	0	502	0	0	0	2	1 053	702	190	0.38
2(单掺 S30%)	0.70	0.30	0	0	352	151	0	0	2	1 053	702	190	0.38
3(单掺 F30%)	0.70	0	0.30	0	352	0	151	0	2	1 053	702	190	0.38
4 B4(单掺 SF8%)	0.92	0	0	0.08	462	0	0	40	2	1 053	702	190	0.38
5(S:15% F:15% SF:5%)	0.65	0.15	0.15	0.05	327	75	75	25	2	1 053	702	190	0.38
6(单掺 S50%)	0.50	0.50	0	0	251	251	0	0	2	1 053	702	190	0.38
7(单掺 F50%)	0.50	0	0.50	0	251	0	251	0	2	1 053	702	190	0.38
8(单掺 SF15%)	0.85	0	0	0.15	427	0	0	75	2	1 053	702	190	0.38

2 试验结果与分析

2.1 测试结果

同一水胶比下各混料因素对 7、28 d 抗压强度和电通量影响的测试结果见表 7。

从表 7 的试验结果可以看出,单掺硅灰的抗压强度最高,电通量最低,且随着掺量增大,性能更好,但工程中较高的硅灰掺量会增加混凝土的成本。在 28 d 抗压强度满足设计要求的情况下,粉煤灰掺量和矿渣掺量分别在 50% 时的电通量和三元掺合料的电通量值也非常好。

表7 C50 混凝土(水胶比为 0.38)的混料及测试结果

编号	水泥	矿渣	粉煤灰	硅灰	7 d 抗压强度 /MPa	28 d 抗压强度 /MPa	28 d 电通量 /C
B1(基准)	1.00	0	0	0	53.0	55.1	64.3
B2(单掺 S30%)	0.70	0.30	0	0	48.6	48.9	62.7
B3(单掺 F30%)	0.70	0	0.30	0	52.1	51.1	62.7
B4(单掺 SF8%)	0.92	0	0	0.08	60.9	59.4	72.4
B5(S :15% ,F :15% ,SF :5%)	0.65	0.15	0.15	0.05	55.8	58.2	58.9
B6(单掺 S50%)	0.50	0.50	0	0	51.8	53.6	63.1
B7(单掺 F50%)	0.50	0	0.50	0	44.4	47.4	54.0
B8(单掺 SF15%)	0.85	0	0	0.15	63.1	62.3	73.4

2.2 统计分析

表 7 的试验结果经统计分析 ,得到 7、28 d 抗压强度和 28 d 电通量的混料数学模型如式(3)~(5)。

$$R_7=54.05x_c+88.77x_s+32.41x_f-167.99x_{sf}-74.83x_cx_s+10.67x_cx_f+265.48x_cx_{sf}+311.79x_sx_f \quad (3)$$

$$R_{28}=65.35x_c+78.80x_s+65.32x_f-342.04x_{sf}-33.50x_cx_s-37.339x_cx_f+539.29x_cx_{sf}+490.52x_sx_f \quad (4)$$

$$Q=614.50x_c-1519.50x_s-233.00x_f+2350.45x_{sf}+2770.00x_cx_s+75.00x_cx_f-13261.90x_cx_{sf}-15597.70x_sx_f \quad (5)$$

式中 R_7 ——混凝土 7 d 抗压强度 ,MPa ;

R_{28} ——混凝土 28 d 抗压强度 ,MPa ;

Q ——混凝土 28 d 电通量 ,C ;

x_c ——水泥的混料比率 ;

x_s ——矿渣的混料比率 ;

x_f ——粉煤灰的混料比率 ;

x_{sf} ——硅灰的混料比率。

回归方程(3)的相关系数 $r=0.976$,方程(4)的相关系数 $r=0.982$,方程(5)的相关系数 $r=0.999$ 表明 3 个回归方程相关性非常好。回归方程及交互作用回归系数的方差分析见表 8。

由方差分析可知 3 个回归方程都是非常显著的 ,在交互作用因素中 ,水泥混料比率和矿渣混料比率的交互作用因子(x_cx_s)对混凝土 7 d 抗压强度影响显著 ,矿渣混料比率和粉煤灰混料比率的交互作用因子(x_sx_f)对混凝土 28 d 抗压强度的影响非常显著 ,水泥混料比率和矿渣混料比率(x_cx_s)、水泥混料比率和硅灰混料比率(x_cx_{sf})、矿渣混料比率和粉煤灰混料比率(x_sx_f)的交互

作用因子对混凝土 28 d 电通量影响非常显著。回归方程的拟合结果见表 9。由表 9 可知 ,拟合的精度良好。

2.3 交互作用分析

为深入分析交互作用因子的影响规律 ,根据方程式(3)绘制的水泥混料比率和矿渣混料比率的交互作用因子(x_cx_s)对混凝土 7 d 抗压强度(R_7)的效应如图 3 所示 ,根据方程(4)绘制的矿渣混料比率和粉煤灰混料比率的交互作用因子(x_sx_f)对混凝土 28 d 抗压强度(R_{28})的效应如图 4 所示 ,根据方程(5)绘制的水泥混料比率和矿渣混料比率(x_cx_s)、水泥混料比率和硅灰混料比率(x_cx_{sf})、矿渣混料比率和粉煤灰混料比率(x_sx_f)的交互作用因子对混凝土 28d 电通量(Q)的效应如图 5 所示。

由图 3 可知 ,同种水胶比条件下 ,单掺粉煤灰和单掺矿渣对于 7 d 抗压强度均产生负效应 ,而粉煤灰与矿渣配合适当条件下 ,可制备 7 d 抗压强度较高的混凝土。由图 4 可知 ,同种水胶比条件下 ,矿渣与粉煤灰的交互作用对 28 d 抗压强度具有显著增强效果。

由图 5(a)可知 ,同种水胶比条件下 ,单一的粉煤灰组分和矿渣组分对改善混凝土的抗渗透性有显著的效果 ,粉煤灰和矿渣的交互作用对抗渗透性的改善具有更显著的效果。由图 5(b)可知 ,同种水胶比条件下 ,随着硅灰掺量的增大 ,混凝土的抗渗透性得到明显的改善 ,水泥与硅灰的交互作用具有同样的效果。

3 显微结构分析

将空白试样与三元掺合料试样进行扫描电镜显微分析 ,经对比发现 ,空白试样显微缺陷较多 ,加入掺合料的混凝土其显微结构均比较致密。具体情况见图 4。

表 8 回归方程及交互作用的显著性

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	临界值
R_7	x_cx_s	26.53	1	26.53	9.11*	$F_{0.01}(7,8)=6.03$
	x_sx_f	15.16	1	15.16	5.21(*)	$F_{0.01}(1,8)=11.26$
	回归	469.81	7	67.12	23.07**	$F_{0.05}(1,8)=5.32$
	剩余	23.27	8	2.91		$F_{0.10}(1,8)=3.46$
	总和	493.08	15			
R_{28}	x_cx_{sf}	12.14	1	12.14	4.68(*)	$F_{0.01}(7,8)=6.03$
	x_sx_f	37.51	1	37.51	14.46**	$F_{0.01}(1,8)=11.26$
	回归	557.57	7	79.65	30.69**	$F_{0.05}(1,8)=5.32$
	剩余	20.76	8	2.60		$F_{0.10}(1,8)=3.46$
	总和	578.33	1			
Q	x_cx_s	36345.32	1	36345.32	470.49**	$F_{0.01}(7,8)=6.03$
	x_sx_f	26.64	1	26.64	0.34	$F_{0.01}(1,8)=11.26$
	x_cx_{sf}	40804.00	1	40804.00	528.21**	
	x_sx_f	37929.86	1	37929.86	491.00**	
	回归	389339.00	7	55619.86	720.00**	
剩余	618.00	8	77.25			
总和	389957.00	15				

表9 三个回归方程的拟合结果

R_7	\hat{R}_7	$(\hat{R}_7 - R_7)/R_7$	R_{28}	\hat{R}_{28}	$(\hat{R}_{28} - R_{28})/R_{28}$	Q	\hat{Q}	$(\hat{Q} - Q)/Q$
53.0	54.05	0.019 80	64.3	65.35	0.016 30	624	614.50	-0.015 2
48.6	45.75	-0.058 60	62.7	62.35	-0.005 60	550	556.00	0.010 9
52.1	49.80	-0.044 10	56.4	57.50	0.019 50	370	376.00	0.016 2
60.9	60.15	-0.012 30	72.4	72.43	0.000 40	205	212.50	0.036 6
55.8	55.50	-0.005 34	66.8	68.64	0.027 60	271	264.50	-0.024 0
51.8	47.70	-0.079 10	63.1	63.70	0.009 50	243	240.00	-0.012 4
44.4	45.90	0.033 80	54.0	56.00	0.037 00	204	209.50	0.027 0
63.1	62.70	-0.006 34	73.4	72.96	-0.005 90	186	189.00	0.016 1
55.1	54.05	-0.019 10	66.4	65.35	-0.015 80	605	614.50	0.015 7
48.9	45.75	-0.064 40	62.0	62.35	0.005 60	562	556.00	-0.010 7
47.5	49.80	0.048 50	58.6	57.50	-0.018 80	382	376.00	-0.015 7
59.4	60.15	0.012 60	72.5	72.43	-0.000 98	220	212.50	-0.034 1
58.2	55.50	-0.046 40	70.5	68.64	-0.026 40	258	264.50	0.025 2
53.6	47.70	-0.110 00	64.3	63.70	-0.009 30	237	240.00	0.012 7
47.4	45.90	-0.031 60	58.0	56.00	-0.034 00	215	209.50	-0.025 6
62.3	62.70	0.006 40	72.6	72.96	0.005 00	192	189.00	-0.015 6

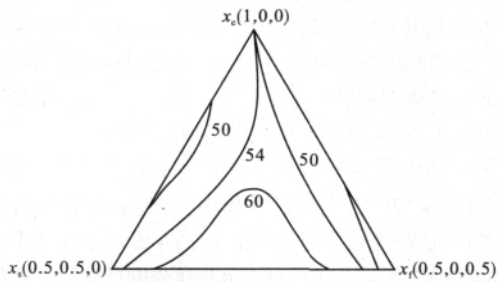


图3 水泥与矿渣交互作用对混凝土7 d抗压强度的效应

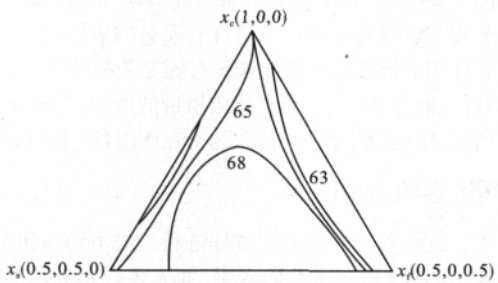
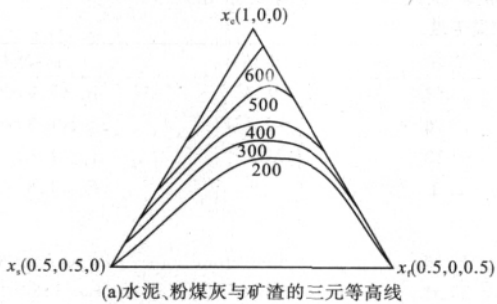
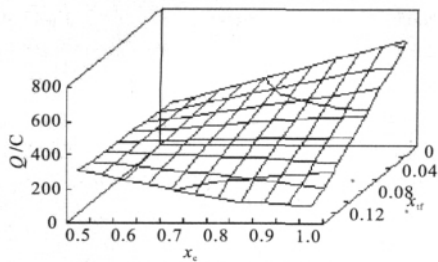


图4 矿渣与粉煤灰交互作用对混凝土28 d抗压强度的效应

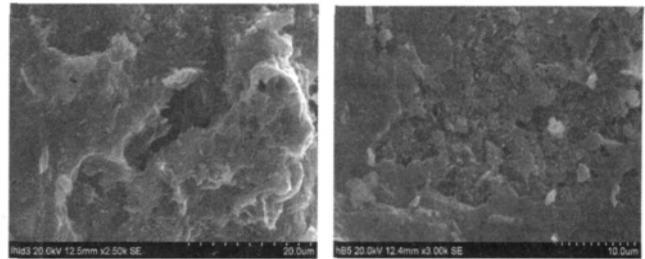


(a)水泥、粉煤灰与矿渣的三元等高线



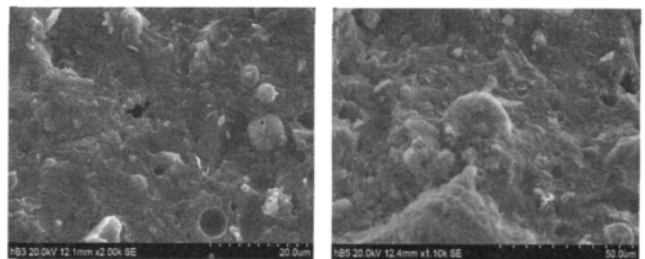
(b)水泥与硅灰的交互作用

图5 交互作用对混凝土电通量的效应



(a)空白组试样SEM

(b)掺入矿渣的混凝土试样SEM



(c)掺入粉煤灰的混凝土试样SEM

(d)三元掺合料混凝土试样SEM

图6 不同试样的SEM照片

4 结论

(1)单掺硅灰的抗压强度最高,电通量最低,且随着掺量增大,性能更好,但工程中较高的硅灰掺量会增加混凝土的成本。在28 d抗压强度满足设计要求的情况下,粉煤灰掺量和矿渣掺量分别在50%时的电通量和三元掺合料的电通量值也非常好。

(2)建立的三元混料模型回归方程具有很好的相关性,3个回归方程都是非常显著的。在交互作用因素中,水泥混料比率和矿渣混料比率的交互作用因子对混凝土7 d抗压强度影响显著,矿渣混料比率和粉煤灰混料比率的交互作用因子对混凝土28 d抗压强度的影响非常显著,水泥混料比率和矿渣混料比率、水泥混料比率和硅灰混料比率、矿渣混料比率和粉煤灰混料比率的交互作用因子对混凝土28 d电通量影响非常显著。回归方程的拟合的精度良好。

(3)在约束条件下绘制的三角坐标混料等高线很好地反映了混料因子间的内在规律,同种水胶比条件下,单掺粉煤灰和单掺矿渣对于7 d抗压强度均产生负效应,而粉煤灰与矿渣配合适当条件下,可制备7 d抗压强度较高的混凝土。矿渣与粉煤

· 下转第15页

表3 高流动混凝土气泡参数与冻融试验结果

编号	含气量 /%	平均气泡直径 / μm	气泡间距系数 $L/\mu\text{m}$	抗冻耐久性指数 $DF/\%$	冻融循环次数
S1-1	2.50	106.77	495.93	28.7	150
S2-1	2.80	109.63	521.68	30.4	175
S1-2	2.00	99.09	584.72	26.9	150
S2-2	1.90	102.87	610.63	28.1	150
S1-3	1.70	145.24	821.00	17.1	125
S2-3	1.80	124.30	619.01	18.4	100

水压力与渗透压力造成的,因此,混凝土的抗冻性与内部孔结构有直接的关系^[6]。图5是抗冻耐久性指数与分形维数的关系,由图5可见,分形维数与抗冻耐久性指数具有良好的相关关系,说明随着分形维数的增大,抗冻耐久性指数逐渐增大。究其原因,分形维数是表征孔结构复杂程度的量化参数,它与小于100 nm的孔隙比例密切相关。而大量研究表明,混凝土的抗冻性与孔径大小、分布有关,孔径越小,冰点越低,从而减小因结冰引起的对混凝土的破坏^[7-8],分形维数越大,其内部小于100 nm的孔隙比例越大,即无害孔或少害孔所占比例越大,其内部孔结构更趋于优化,从而其抗冻性更好。

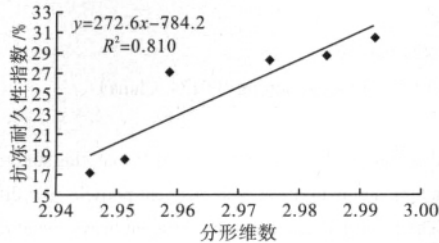


图5 高流动混凝土抗冻耐久性指数与分形维数的关系

4 结论

(1)高流动混凝土的孔表面积具有明显的分形特征且符合基于热力学关系的分形模型,计算得到的分形维数在2~3之间。孔表面积分形维数随龄期的增长逐渐增大,并随掺合料种类、掺量的不同而不同。

(2)孔表面积分形维数作为孔结构复杂程度的量化参数,与孔径分布、中值孔径、平均孔径密切相关。分形维数越大,混凝土内部小于100 nm孔隙比例越高,中值孔径与平均孔径越小,因此,可以用孔表面积分形维数表征孔结构中无害孔与少害孔

的分布状况,评定高流动混凝土内部孔结构的优劣性。

(3)孔表面积分形维数与抗冻耐久性具有一定的联系,分形维数越大,无害孔或少害孔所占的比例越大,高流动混凝土内部孔结构更优化,高流动混凝土的抗冻性越好。

本研究探讨了高流动混凝土的孔表面积分形维数与内部孔结构、抗冻性的关系,试验中的高流动混凝土均未掺引气剂,而掺入引气剂后分形特征与抗冻性的变化及关系还有待研究。

参考文献:

- [1] 李永鑫,陈益民,贺行洋,等.粉煤灰-水泥浆体的孔体积分形维数及其与孔结构和强度的关系[J].硅酸盐学报,2002.
- [2] 韦江雄,余其俊,曾小星,等.混凝土中孔结构的分形维数研究[J].华南理工大学学报,2007.
- [3] ZHANG B, LI S. Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1995.
- [4] 陈三强,刘永忠,程光旭,等.用压汞法计算冻干物料的表面分形维数[J].食品科学,2004.
- [5] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.
- [6] 廉慧珍,童良,陈恩义.建筑材料物相研究基础[M].北京:清华大学出版社,1996.
- [7] 黄孝衡,许彩虹,王丽文.硬化混凝土中气态性质对抗冻性影响的试验研究[J].港湾建设,2003.
- [8] 张士萍,邓敏,吴建华,等.孔结构对混凝土抗冻性的影响[J].武汉理工大学学报,2008.

作者简介:王剑(1987-)男,硕士研究生,研究方向:道路混凝土材料。
联系地址:北京市朝阳区平乐园100号北京工业大学交通研究中心(100124)
联系电话:15210834889

·上接第4页

灰的交互作用对28 d抗压强度具有显著增强效果。同种水胶比条件下,单一的粉煤灰组分和矿渣组分对改善混凝土的抗渗透性有显著的效果,粉煤灰和矿渣的交互作用对抗渗透性的改善具有更显著的效果。随着硅灰掺量的增大,混凝土的抗渗透性得到明显的改善,水泥与硅灰的交互作用具有同样的效果。

(4)SEM结果分析表明,矿物掺合料显著改善了混凝土材料的显微结构,因此,表现出良好的宏观性能。

参考文献:

- [1] 刘建忠,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] MEHTA P K, BURROWS R W. Building durable structures in the 21st century[J]. Concrete International, 2001(3):57-63.
- [3] 何廷树,等.不同水胶比下矿渣粉与粉煤灰对混凝土强度及抗氯离子渗透性能的影响[J].混凝土,2010(1):86-88.

- [4] SHAH S P, WANG K, WEISS J. Mixture proportioning for durable concrete[J]. Concrete International, 2000(9):73-78.
- [5] ASTM C1202-05 Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration[S]. West Conshohocken, 2005.
- [6] 唐明,陈宁.工程试验优化设计[M].北京:中国计量出版社,2009:145-149.
- [7] 张武满.混凝土结构中氯离子加速渗透试验与寿命预测[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006(11):3-4.
- [8] 冷发光,田冠飞.混凝土抗氯离子渗透性试验方法[J].东南大学学报:自然科学版,2006,36(supII):32-38.

作者简介:唐明(1956-)男,教授,博士。
联系地址:沈阳市浑南新区浑南东路9号(110168)
联系电话:024-24690309