

纳米 SiO_2 提高不同龄期混凝土力学性能试验

唐小萍, 魏秀瑛, 刘晓文, 王学彦

湖南高速铁路职业技术学院, 湖南衡阳 421001

摘要 以实际工程项目为背景, 用纳米 SiO_2 等量替换水泥制作混凝土试块, 分别进行龄期为 7、28、56d 的立方体抗压强度试验、弹性变形试验、耐久性试验。采用线性回归的分析方法, 对混凝土抗压强度试验数据进行分析, 研究纳米 SiO_2 的掺入量与提高混凝土强度之间的数值关系, 建立了以纳米 SiO_2 掺量为自变量, 混凝土龄期分别是 7、28、56d 的抗压强度计算表达式。对弹性变形试验数据进行统计分析, 研究不同纳米 SiO_2 的掺入量对混凝土各龄期弹性模量的改善和提高、纳米 SiO_2 对混凝土微观结构的改变、对抗渗标号和抗氯离子渗透能力的提高的影响, 得出纳米 SiO_2 的最佳掺入量, 指导纳米 SiO_2 混凝土的生产。

关键词 纳米 SiO_2 ; 抗压强度; 线性回归; 弹性模量

中图分类号 TU528.79

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.21.011

Mechanical Properties Improvement in Concrete of Every Age by Using Different Contents of Nano- SiO_2

TANG Xiaoping, WEI Xiuying, LIU Xiaowen, WANG Xueyan

Hunan Technical College of High-speed Railway, Hengyang 421001, Hunan Province, China

Abstract Based on the actual projects, tests of concrete cubic-compressive strength, tests of elastic modulus, and tests of durability involving the concrete which cement is replaced with the same amount of nano- SiO_2 making concrete blocks in the age periods of 7, 28, and 56 days are respectively conducted. The data is analyzed, and the numerical relationship between incorporation of nano- SiO_2 and concrete strength elevation is studied by using linear regression method. The calculation expression for the cubic-compressive strength of concrete with nano- SiO_2 content and concrete periods of 7, 28, and 56 days is established. The test data of elastic modulus is statistically analyzed, and the ways for improving and increasing of elastic modulus in different concrete ages with different contents of nano- SiO_2 , the effects of nano- SiO_2 on the change of concrete microstructure and on the increase of anti-penetration grade and chloride-penetration resistance are explored. The best mixing amount of nano- SiO_2 is obtained in order to guide the production of concrete contained nano- SiO_2 .

Keywords nano- SiO_2 ; compressive strength; linear regression; elastic modulus

0 引言

纳米 SiO_2 高强度和高性能混凝土在工程中的应用研究已涵盖了建筑工程、道路工程、桥隧工程等方面。城市高层建筑、超高层建筑的底层结构需要大量纳米 SiO_2 高强度混凝土; 少量的公路路面应用了具有良好耐磨性和耐久性的纳米 SiO_2 混凝土。由于其水化热低、抗渗透性强, 浇注大体积的水工结构效果更佳, 纳米 SiO_2 高强度混凝土与围岩黏结强度大、终凝速度快, 防治与处理地下工程的塌方、断层、渗水、滴

水等不良地质状况的效果显著。在许多工程应用中都是采用试验法, 没有对纳米 SiO_2 掺量的变化与混凝土强度的量化关系进行深入的理论研究。本研究按照新建湖南省长沙—株洲—湘潭城际铁路之中的树木岭隧道、理工大学特大桥、南唐特大桥等桥隧结构对混凝土的使用要求, 用纳米 SiO_2 等量替换水泥, 其余所用材料都与实际工程项目相同。研究等量替换掺入纳米 SiO_2 的条件下, 混凝土的强度和弹性模量、耐久性指标的变化。通过大量的试验研究, 采用线性回归方

收稿日期: 2011-02-16; 修回日期: 2011-07-08

基金项目: 湖南省科技厅科研计划项目(2010GK3148); 湖南省教育厅科研计划项目(10C0159); 衡阳市科技局科研计划项目(2010KG66)

作者简介: 唐小萍, 副教授, 研究方向为工程结构与材料, 电子信箱: txp101112@163.com



法分析纳米 SiO₂ 不同的掺量对提高混凝土强度的数值关系,建立了纳米 SiO₂ 提高混凝土立方体强度的计算表达式,分析了不同纳米 SiO₂ 掺量对混凝土弹性模量的改善和提高,为以后的纳米 SiO₂ 高强度混凝土和高性能混凝土的生产提供指导。

1 纳米 SiO₂ 混凝土试验设计

1.1 试验材料

(1) 水泥

采用湖南浏阳南方水泥有限公司生产的 P.O42.5 型水泥,其主要物理力学性能指标如下:比表面积 334m²/kg,初凝时间 50min,终凝时间 140min,3、28d 的抗压强度分别是 26.1、47.8MPa,3、28d 的抗折强度分别是 5.5、7.9MPa,密度为 3.1g/cm³。

(2) 矿物掺料

所用的矿物掺料为粉煤灰和纳米 SiO₂。粉煤灰产自益阳昌源电力运营有限公司,质量等级为 F 类 II 级粉煤灰,试验证明能达到规定的性能指标,其主要的物理性能指标:细度是 45μm 筛余量 13.8%,需水量比 98%,体积安定性为雷氏夹增加距离 1.5mm,含水量 0.5%,密度为 2.23g/cm³。

纳米 SiO₂ 是由浙江舟山纳米材料公司生产,其主要化学成分与物理性能指标:纳米 SiO₂ 中的 SiO₂ 含量大于 99.6%,粒径 12nm,比表面积 645m²/kg,表面羟基 48%,摇实密度为 0.18g/cm³,杂质含量小于 0.1%。

(3) 化学外加剂

采用武汉辰龙材料技术有限公司生产的 PC-2000 聚羧酸高性能减水剂(缓凝型),掺入量为胶凝材料的 1%,其主要的物理性能指标:物理状态为黏稠液体,减水率大于 26%,褐色,密度 1.08g/cm³,pH 值为 7.0,能与任何比例的水混溶。

(4) 集料

采用的细骨料是湖南湘江湘阴的河砂。细度模数为 2.7,系 II 区中砂,表观密度为 2.59g/cm³,松堆密度为 1460kg/m³,紧密密度为 1670kg/m³。岩石的抗压强度与混凝土的抗压强度之比 11.78。

1.2 混凝土配合比设计

按照新建湖南省长沙—株洲—湘潭的城际铁路之中的树木岭隧道、理工大学特大桥、南唐特大桥等桥隧结构对混凝土的设计配比等级 C35 进行设计。纳米 SiO₂ 的掺量为 0%、2%、5%等量替换水泥进行混凝土配合比设计,见表 1。

表 1 混凝土强度试验配合比设计
Table 1 Mixture design of concrete strength test

试验号	设计配比等级	配制强度/MPa	水胶比	纳米 SiO ₂ 替换率/%	材料用量/(kg·m ⁻³)						
					水	水泥	粉煤灰	纳米 SiO ₂ 粉	砂	碎石	减水剂
1	C35	43.2	0.37	0	145	235	157	—	745	1118	3.92
2				2	145	227	157	8	745	1118	3.92
3				5	145	215	157	20	745	1118	3.92

2 混凝土立方体抗压强度试验及分析

2.1 混凝土立方体抗压强度试验方案

混凝土试块制作与养护、力学性能试验、和易性试验都按照 GB/T 50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[3],GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[4]进行。对 3 种不同纳米 SiO₂ 掺量的混凝土分别在同批次制作了 30 组(每组 3 块)150mm×150mm×150mm 试件,分别在 7、28 和 56d 龄期进行抗压强度试验。

混凝土立方体抗压强度试验采用无锡建筑仪器有限公司生产的 YE-5000C 型压力机。

2.2 混凝土立方体抗压强度试验结果

不同纳米 SiO₂ 掺量的混凝土立方体抗压试验数据见表 1。

2.3 混凝土立方体抗压强度线性回归分析

2.3.1 因素 X_i 和混凝土强度平均值 R_i 及各离差的系数值

因素纳米 SiO₂ 的掺量平均值: $\bar{X} = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} X_i = 0.023(\%)$; 7d

龄期混凝土强度平均值: $\bar{R} = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} R_i = 29.901(\text{MPa})$; 因素纳

米 SiO₂ 的离差平方和: $L_{XX} = \sum_{i=1}^{90} (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^{90} X_i^2 - 90\bar{X}^2 = 0.038$; 7d

龄期混凝土强度离差平方和: $L_{RR} = \sum_{i=1}^{90} (R_i - \bar{R})^2 = \sum_{i=1}^{90} R_i^2 - 90\bar{R}^2 = 1054.7$; 因素纳米 SiO₂ 的掺量离差与 7d 龄期混凝土强度离差之积: $L_{XR} = \sum_{i=1}^{90} (X_i - \bar{X})(R_i - \bar{R}) = 6.100$ 。

2.3.2 7d 龄期混凝土强度的回归系数 $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 估计值及线性回归方程

回归系数 $\hat{b} = \frac{L_{XR}}{L_{XX}} = 158.85$; 回归系数 $\hat{a} = \bar{R} - \hat{b}\bar{X} = 26.20$ 。则纳米 SiO₂ 等量取代水泥时 7d 龄期提高混凝土立方体抗压强度的线性回归方程是:

$$\hat{R}_i = \hat{a} + \hat{b}X_i = 26.20 + 158.854X_i \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

对线性回归方程(1)的显著性进行检验。

建筑工程上常给定显著性水平 $\alpha=0.05$, 则 $F_{\alpha(p,n-p-1)} = F_{0.05(1,88)}$ 。根据 F 分布位数表查得 $F_{0.05(1,88)} = 3.95$, 经计算 $F = 1003.91$, $F = 1003.91 > F_{0.05(1,88)} = 3.95$

R_i 与 X_i 之间存在显著线性关系, 则线性回归方程(1)成立。

从线性回归方程看, 7d 龄期时混凝土强度的回归系数 $\hat{a} = 26.20$, 接近纳米 SiO₂ 掺量为零时的 7d 龄期强度平均值, $\hat{b} =$



表 2 不同纳米 SiO₂ 掺量 (X_i) 的混凝土立方体抗压强度试验数据统计表 (单位: N·mm⁻²)

Table 2 Statistic data of cubic compressive strength test for the concrete contained different contents of nano-SiO₂ (Unit: N·mm⁻²)

样本序号	龄期								
	7d			28d			56d		
	X _i =0%	X _i =2%	X _i =5%	X _i =0%	X _i =2%	X _i =5%	X _i =0%	X _i =2%	X _i =5%
1	26.23	30.54	33.67	44.14	47.68	49.92	47.32	49.58	52.65
2	26.51	31.18	33.26	43.96	48.36	50.58	47.67	48.67	53.78
3	26.82	30.90	33.78	44.95	48.84	51.29	46.84	50.30	52.96
4	25.69	31.36	34.13	45.33	46.57	50.17	45.92	48.98	52.93
5	26.85	30.74	33.74	45.28	49.33	53.13	46.28	48.29	53.31
6	25.92	29.92	33.19	43.69	48.90	52.29	46.76	48.47	53.15
7	25.84	30.18	33.28	43.90	45.74	51.61	46.68	48.92	54.26
8	26.57	28.74	34.64	43.81	49.82	50.87	46.85	52.70	52.14
9	24.38	30.53	34.81	43.93	48.68	52.20	48.29	51.24	52.27
10	26.45	30.17	34.75	44.79	47.91	51.17	48.27	50.95	54.70
11	26.93	29.72	34.48	44.65	48.26	51.46	46.75	51.76	54.18
12	25.76	30.70	33.18	42.19	48.80	50.68	47.90	49.68	52.63
13	24.38	30.58	33.60	44.92	49.27	52.22	45.76	52.18	55.15
14	24.90	29.66	32.28	44.18	49.59	52.18	43.97	53.21	53.91
15	25.65	29.27	32.91	44.93	48.94	50.61	46.18	52.70	53.28
16	25.56	28.83	34.90	44.38	49.36	50.90	44.95	51.19	53.70
17	25.19	29.94	32.29	45.65	48.18	52.81	46.68	50.84	53.36
18	26.23	30.35	32.87	44.19	48.62	53.10	46.94	50.16	54.28
19	26.91	30.81	33.91	45.91	49.87	49.98	46.76	53.12	55.70
20	25.76	30.13	34.56	43.76	49.26	50.26	46.18	50.56	55.16
21	25.29	29.92	34.83	43.78	50.61	51.18	45.26	49.38	53.70
22	24.88	29.96	33.90	46.17	49.38	51.46	47.31	51.30	53.62
23	25.25	28.57	35.69	43.94	49.97	50.18	47.93	52.21	53.34
24	24.87	28.68	34.58	43.93	48.59	50.91	45.87	48.69	55.50
25	27.93	29.64	34.28	43.78	50.10	51.94	44.86	49.78	54.96
26	26.64	29.56	34.90	44.76	47.69	52.19	47.23	47.99	52.84
27	26.81	28.85	34.18	44.67	48.54	50.78	46.71	51.11	55.48
28	24.96	28.78	33.83	44.46	49.91	51.84	46.57	48.86	55.80
29	25.54	28.93	34.18	45.18	49.78	50.36	47.29	51.28	53.91
30	25.87	28.18	34.62	44.95	48.69	49.68	46.68	50.93	53.73
强度平均值 $\bar{R}_i$ /(N·mm ⁻²)	25.83	29.69	33.89	44.39	48.76	51.28	46.65	50.46	53.96

158.85, 体现了纳米 SiO₂ 等量取代水泥而提高混凝土早期强度的幅度非常大。

同理,对 28、56d 的抗压强度试验数据进行了线性回归分析(略去分析过程)。建立了以下立方体抗压强度的线性回归方程。

28d 的立方体抗压强度线性回归方程:

$$\hat{R}_i = \hat{a} + \hat{b}X_i = 44.68 + 313.176X_i \text{ (MPa)} \quad (2)$$

56d 的立方体抗压强度线性回归方程:

$$\hat{R}_i = \hat{a} + \hat{b}X_i = 47.15 + 346.235X_i \text{ (MPa)} \quad (3)$$

2.4 纳米 SiO₂ 对混凝土和易性的影响

在混凝土中掺入纳米 SiO₂ 后,混凝土拌合物变得非常黏稠,和易性迅速下降。以 7d 龄期的混凝土为例,没有掺入纳

米 SiO₂ 的混凝土坍落度平均值为 185mm; 纳米 SiO₂ 掺量为 2%时,混凝土坍落度平均值为 155mm,下降了 30mm; 纳米 SiO₂ 掺量为 5%时混凝土坍落度平均值为 110mm,下降了 75mm。因此,若要保持混凝土坍落度不变,必须增加减水剂的掺量。

3 混凝土弹性变形试验与弹性模量分析

3.1 混凝土弹性变形试验方案

在混凝土立方体抗压强度试验中发现,纳米 SiO₂ 的掺量由 2%提高到 5%时,混凝土立方体抗压强度提高幅度较小,和易性迅速下降。综合考虑混凝土抗压强度与和易性、施工要求、经济效益等因素,取消了纳米 SiO₂ 掺量为 5%的试验,



纳米 SiO₂ 掺量为 2% 时, 其抗压强度、和易性等有很好的效果。对纳米 SiO₂ 掺量为 2% 进行调整, 调整幅度为 0.5%, 增加了纳米 SiO₂ 掺量为 1.5%、2.5%、3.0% 的试验研究。

弹性变形试验的试块尺寸为 150mm×150mm×300mm, 不同纳米 SiO₂ 掺量的混凝土分别制作了 6 组(每组 3 块)试块, 不同龄期分别用 1 组试块测定混凝土轴心抗压承载力、另 1 组试块测定混凝土弹性模量。弹性模量试验采用浙江路达建

筑仪器有限公司生产的 TM-2 混凝土弹性模量测定仪, 在试块的对称两侧测定距中轴线各 75mm 处的应变。

3.2 混凝土弹性变形试验结果

3.2.1 混凝土轴心抗压承载力试验结果

根据文献[5], 首先采用同批次试块进行混凝土轴心抗压承载力试验, 确定试块的轴心抗压承载力, 根据轴心抗压承载力确定弹性变形试验的加载值。

表 3 不同纳米 SiO₂ 掺量的混凝土的轴心抗压承载力试验数据统计表 (单位: kN)

Table 3 Statistic data of axial compressive bearing capacity test for the concrete contained different contents of nano-SiO₂ (unit: kN)

纳米 SiO ₂ 掺量	加载值	龄期								
		试件编号								
		7d			28d			56d		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
0%	各样本值	166.5	166.8	159.3	372.5	373.1	373.4	416.0	415.2	415.0
	平均值		166.2			373.0			415.4	
1.5%	各样本值	221.2	220.6	220.0	408.9	409.6	409.4	431.0	429.6	430.0
	平均值		220.6			409.1			430.2	
2%	各样本值	217.8	217.0	216.8	347.0	347.3	346.5	401.2	401.6	401.4
	平均值		217.2			346.9			401.4	
2.5%	各样本值	198.0	179.9	197.2	343.5	343.0	342.7	391.3	391.5	390.5
	平均值		197.7			343.1			391.1	
3%	各样本值	200.0	200.7	199.5	376.0	376.5	375.7	403.0	403.8	403.7
	平均值		200.1			376.1			403.5	

3.2.2 混凝土弹性变形试验结果

根据试验方案, 对不同纳米 SiO₂ 掺量、不同龄期的混凝土试块进行弹性变形试验。取混凝土轴心抗压承载力的 1/3 作为混凝土弹性变形试验的加载值, 不同纳米 SiO₂ 掺量的混凝土试块的各龄期应变值见表 4。

3.3 混凝土弹性变形试验与弹性模量分析

根据规范规定, 对混凝土的弹性变形试验结果进行数据处理, 不同纳米 SiO₂ 掺量的混凝土在各个龄期的弹性模量见图 1。

从图 1 可看出, 由于掺入了纳米 SiO₂, 7—28d 之间混凝土弹性模量增加较快, 28—56d 之间混凝土弹性模量增加率下降。纳米 SiO₂ 掺量由 0% 增加到 1.5% 时, 弹性模量随着纳米 SiO₂ 掺量的增加而增加, 但纳米 SiO₂ 掺量由 2% 增加到 3% 时, 弹性模量随着纳米 SiO₂ 掺量的提高而减少。不管纳米 SiO₂ 是何种掺量, 掺入纳米 SiO₂ 的混凝土的 28 龄期弹性模量都比未掺入纳米 SiO₂ 混凝土的弹性模量要大。从纳米 SiO₂ 的微观结构图和衍射图看, 纳米 SiO₂ 有絮团结构, 无定形的物质, 离散性较大, 且比表面积大。当掺量大于等于 2% 时, 需水量迅速增大, 增加了混凝土的变形, 降低了混凝土的弹性模量。纳米 SiO₂ 能有效地细化界面中的 Ca(OH)₂ 晶粒并吸收界面富集的 Ca(OH)₂ 晶体, 大幅度降低界面 Ca(OH)₂ 的取向程度, 改

善了浆体与骨料界面结构, 提高了混凝土的物理力学性能。纳米 SiO₂ 作为活性掺和料加入到混凝土中, 以液态形态加入到混凝土中比固态形态加入到混凝土中的效果要好。

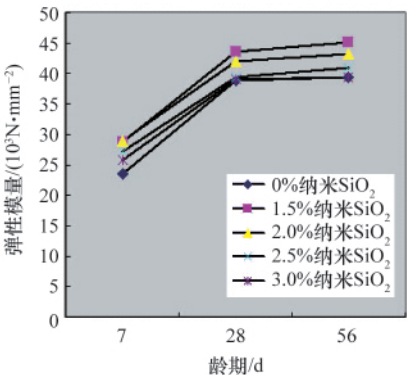


图 1 不同纳米 SiO₂ 掺量混凝土各龄期的弹性模量

Fig. 1 Elastic modulus of concrete in the every age with different nano-SiO₂ admixture amounts

4 混凝土耐久性试验及分析

4.1 混凝土耐久性试验方案

混凝土耐久性试验包括抗渗性试验和抗氯离子渗透试验。抗渗性试验采用圆台形试件, 其上底直径为 175mm、下底

表 4 不同纳米 SiO_2 掺量的混凝土的弹性变形试验数据统计表Table 4 Statistic data of axial compressive bearing capacity test for the concrete contained different contents of nano-SiO₂

纳米 SiO ₂ 掺量	力学性能	龄期								
		试样编号								
		7d			28d			56d		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
0%	加荷载值/kN	55.4	55.4	55.4	124.3	124.3	124.3	138.5	138.5	138.5
	应变 $\varepsilon_1/10^{-4}$	315	318	308	420	430	456	463	462	468
	应变 $\varepsilon_2/10^{-4}$	297	317	319	402	398	438	456	470	470
	平均应变/ 10^{-4}	306	318	314	411	414	447	460	466	469
		313			424			465		
1.5%	加荷载值/kN	73.5	73.5	73.5	136.4	136.4	136.4	143.2	143.2	143.2
	应变 $\varepsilon_1/10^{-4}$	378	392	376	420	415	406	412	418	427
	应变 $\varepsilon_2/10^{-4}$	397	370	365	430	422	412	430	424	432
	平均应变/ 10^{-4}	388	381	371	425	419	409	421	421	430
		380			418			424		
2%	加荷载值/kN	72.4	72.4	72.4	115.6	115.6	115.6	133.8	133.8	133.8
	应变 $\varepsilon_1/10^{-4}$	340	344	325	353	367	380	407	414	422
	应变 $\varepsilon_2/10^{-4}$	330	326	337	360	370	378	405	407	419
	平均应变/ 10^{-4}	335	335	331	357	369	379	406	411	421
		334			368			413		
2.5%	加荷载值/kN	65.9	65.9	65.9	114.4	114.4	114.4	130.4	130.4	130.4
	应变 $\varepsilon_1/10^{-4}$	318	332	314	390	385	393	424	428	419
	应变 $\varepsilon/10^{-4}$	320	325	328	395	392	382	432	422	427
	平均应变/ 10^{-4}	319	329	321	393	389	388	428	425	423
		323			390			425		
3%	加荷载值/kN	66.7	66.7	66.7	125.4	125.4	125.4	134.5	134.5	134.5
	应变 $\varepsilon_1/10^{-4}$	341	348	352	438	445	448	454	467	460
	应变 $\varepsilon_2/10^{-4}$	350	337	345	430	435	452	462	464	457
	平均应变/ 10^{-4}	346	343	349	434	440	450	458	466	459
		346			441			461		

直径为 185mm、高为 150mm。不同纳米 SiO_2 掺量的混凝土制作 3 组试块(每组 6 块),分别用于 7、28、56d 混凝土的抗渗性试验。抗氯离子渗透试验(抗海水侵蚀)的试件采用直径为 95mm、高度为 (51 ± 2) mm 的圆柱体。不同纳米 SiO_2 掺量的混凝土制作 3 组试块(每组 3 块),分别用于 7、28、56d 混凝土的抗氯离子渗透性试验。

混凝土抗渗性试验和抗氯离子渗透试验均采用北京路达建筑仪器有限公司生产的设备。混凝土抗渗性试验采用 HS40 型全自动抗渗仪, 抗氯离子渗透试验采用 SW-6D 型混凝土氯离子电通量测定仪。

4.2 混凝土抗渗性试验及分析

混凝土的抗渗性直接影响混凝土的耐久性。对不同纳米SiO₂掺量、不同龄期的混凝土试块进行了抗渗性标号值试验,对试验数据统计分析得出最终结果,见表5。

表 5 不同纳米 SiO_2 掺量混凝土抗渗性能标号值

Table 5 Label values of impermeability in concrete with different contents of nano-SiO₂

纳米 SiO ₂ 掺量	各龄期的抗渗标号		
	7d	28d	56d
0%	P6	P8	P9
2%	P10	P12	P12
5%	P12	P14	P15

从试验数据中可以看出:掺入纳米 SiO_2 能够有效地提高混凝土的抗渗性,随着龄期的增长,混凝土的抗渗性能逐渐提高。这是因为随着龄期的增长,水泥的水化程度逐渐提高,纳米 SiO_2 的活性得到更进一步的发挥,混凝土中的孔隙数量和孔隙体积逐渐减少、孔隙的通道进一步减少和曲折,从而

提高了混凝土的抗渗性。

4.3 混凝土抗氯离子渗透性试验及分析

对港口建筑、桥隧结构中的混凝土需要进行抗海水侵蚀或抗地下水氯离子腐蚀试验。不同纳米 SiO_2 掺量的混凝土在各龄期抗氯离子渗透试验,即进行 6h 通电量试验,对试验数据统计分析得出最终结果见图 2。

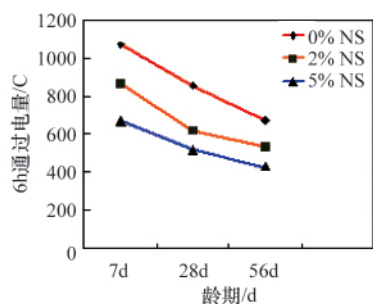


图2 不同纳米 SiO_2 掺量混凝土抗氯离子渗透试验数据统计

Fig. 2 Test statisticso of chloride-penetration resistance in concrete with different contents of nano- SiO_2

试验数据表明,掺入纳米 SiO_2 的混凝土在 6h 内通过的电量迅速减小,随着龄期的增长其抗氯离子渗透能力逐渐增强,提高了抗海水侵蚀与抗地下水氯离子腐蚀的能力。这是因为纳米 SiO_2 吸收了浆料与骨料界面富集的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体进行二次反应,一方面降低混凝土内部的毛细孔数量;另一方面降低毛细孔的连通程度,从而提高了混凝土的抗氯离子渗透能力。

5 结论

(1) 掺入纳米 SiO_2 提高了混凝土强度和耐久性。由于纳米 SiO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的快速反应和二次反应 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量减少,产生了新的 C—S—H 凝胶,改善了浆料与骨料的界面结构,纳米 SiO_2 混凝土中有较多的钙矾石,具有更好的密实度,从而提高了混凝土强度和耐久性。尤其是混凝土早期强度的提高速率远大于后期的提高速率,适用于紧急抢修工程。

(2) 当纳米 SiO_2 的掺入量不超过 2% 时,每增加 1% 时的掺入量提高混凝土强度的相对幅度大于纳米 SiO_2 掺入量为 5%。综合考虑混凝土强度与和易性,纳米 SiO_2 的适宜掺入量为 1.5%—2.5%。5% 的掺入量偏大,混凝土的和易性大幅度降低,不利于现场施工。随着纳米 SiO_2 掺量的增加,高效减水剂的掺量应同时增加。

(3) 掺入纳米 SiO_2 能够很好地改善混凝土的弹性模量,掺量大于等于 2% 时,需水量迅速增大,导致混凝土的变形增加,降低了弹性模量。当纳米 SiO_2 掺入量为 1.5% 时,对提高混凝土的弹性模量最为有效。

参考文献 (References)

[1] 宋国芳,朱平. 纳米粉煤灰夹心砌块的研制 [J]. 科技导报, 2009, 28

(17): 96—100.

Song Guofang, Zhu Ping. *Science & Technology Review*, 2009, 28(17): 96—100.

[2] 唐新华. 纳米材料在混凝土中的应用研究现状与发展[J]. 低温建筑技术, 2009(6): 18—20.

Tang Xinhua. *Low Temperature Architecture Technology*, 2009(6): 18—20.

[3] 中华人民共和国建设部. GBIT 50080—2002 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

China Ministry of Construction. GBIT 50080—2002 Performance test method standard for common concrete mix [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.

[4] 中华人民共和国建设部. GB 50081—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

China Ministry of Construction. GB 50081—2002 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.

[5] 中华人民共和国建设部. GBIT 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

China Ministry of Construction. GB 50081—2002 Mechanical performance test method standard for common concrete[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.

[6] Li H, Zhang M H, Ou J P. Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement [J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(7): 1292—1301.

[7] Monteiro P J M, Kirchheim A P, Chae S, et al. Characterizing the nano and micro structure of concrete to improve its durability [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(8): 577—584.

[8] 傅沛兴. 现代混凝土特点与配合比设计方法 [J]. 建筑材料学报, 2010 (6): 705—710.

Fu Peixing. *Journat of Building Materials*, 2010(6): 705—710.

[9] 李响, 阎培渝. 粉煤灰掺量对水泥孔溶液碱度与微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2010(6): 787—835.

Li Xiang, Yan Peiyu. *Gournat of Building Materials*, 2010(6): 787—835.

[10] 谢帮华. 纳米混凝土试验与应用模拟分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2007. Xie Banghua. Laboratory study nanometer concrete and simulation analysis the application of nanometer concrete[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.

[11] 张再勇. 粉煤灰节能环保建筑材料的开发试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.

Zhang Zaiyong. A study of developing fly ash into an energy-saving and environmentally-friendly material in architecture [D]. Xi'an: Xi'an University Science and Technology, 2008.

[12] 孙萍, 高玉峰. 谈高强混凝土与高性能混凝土之异同 [J]. 陕西建筑, 2007(4): 38—39.

Sun Ping, Gao Yufeng. *Shaanxi Building*, 2007(4): 38—39.

[13] 吕英娟. 高性能混凝土技术发展与应用初探[J]. 科技创新月刊, 2010 (1): 148—150.

Lu Yingjuan. *Pioneering with Science & Technology Monthly*, 2010(1): 148—150.

[14] Jo B W, Park S K, Kim D K. Mechanical properties of nano-MMT reinforced polymer composite and polymer concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2008(1): 14—20.

[15] Li G Y. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano- SiO_2 [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004(6): 1043—1049.

(责任编辑 岳臣)