

硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土力学性能试验研究

马艳霞^{1,2}, 聂思凡^{1,2}, 郭佳庆³

(1. 青海大学 土木工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016;
3. 西部机场集团有限公司, 陕西 西安 710086)

摘要:【目的】探究硫酸盐渍土地区粉煤灰掺量对混凝土抗压强度的影响, 为实际的工程建设提供参考。【方法】在试验场地埋置 4 组(粉煤灰掺量分别为 0%、10%、15% 和 20%) 共 48 块尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体混凝土试块, 定期测量其抗压强度, 并用扫描电镜分析其微观结构。【结果】在侵蚀早期不同配合比混凝土试块的抗压强度出现一定幅度的增长; 但随着侵蚀时间的增加, 抗压强度开始逐渐下降, 结合正交试验分析认为粉煤灰的最佳掺量为 10%; 在侵蚀后期渗入混凝土内部的 SO_4^{2-} 与水化产物结合生成的钙矾石晶体逐渐增多, 钙矾石吸水膨胀并导致微裂缝进一步扩展, 影响了结构的整体密实度。使用 MATLAB 中的 General Model Gauss 函数对侵蚀早期混凝土抗压强度的试验数据进行拟合, 拟合效果较好。【结论】对于硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土耐久性的研究, 需采用多种试验方法对混凝土力学性能的变化过程进行分析; 加强数值仿真手段与试验结果的结合可以对混凝土抗压强度进行更好的预测。

关键词: 粉煤灰混凝土; 硫酸盐渍土; 抗压强度试验; 微观结构; 正交试验分析

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Experimental research on mechanical properties of fly ash concrete in sulfate saline soil area

MA Yan-xia^{1,2}, NIE Si-fan^{1,2}, GUO Jia-qing³

(1. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Energy-Saving Building Materials and Engineering Safety, Xining 810016, China;
3. China West Airport Group, Xi'an 710086, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to explore the influence of fly ash content on concrete compressive strength in sulfate saline soil area to provide some reference for practical engineering construction. [Methods] Four groups of 48 standard cubic concrete test blocks with side length of 150 mm were embedded in the test site, whose fly ash contents were 0%, 10%, 15% and 20%, respectively. The compressive strength was measured regularly and the microstructure was analyzed through scanning electron microscope. [Findings] The compressive strength of concrete test blocks with different mix proportion increases to a certain extent at the early stage of erosion. With the increase of erosion time, the compressive strength begins to decrease gradually. Combined with orthogonal test analysis, it is considered that the best content of fly ash is 10%. The ettringite crystals formed by the combination of SO_4^{2-} penetrated into the concrete and hydration products gradually increase

收稿日期: 2021-11-23

基金项目: 青海省科技厅应用基础研究项目(2018-ZJ-749)

通信作者: 马艳霞(1978—), 女, 副教授, 主要从事地基基础方面的研究。E-mail: myxdyp@163.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

at the later stage of erosion, and the ettringite absorbs water and expands, resulting in the expansion of micro cracks and affecting the overall compactness of the structure. The General Model Gauss function in MATLAB was used to fit the test data of early concrete compressive strength. The results show that the fitting effect is good. [Conclusions] For the research on the durability of fly ash concrete in sulfate saline soil area, a variety of test methods should be used to analyze the changes of mechanical properties of concrete, and the combination of numerical simulation and test results should be strengthened to make a better prediction of the compressive strength of concrete.

Key words: fly ash concrete; sulfate saline soil; compressive strength test; micro structure; orthogonal test analysis

近年来,硫酸盐对混凝土结构的损坏已越来越被人们所重视。东部沿海以及西北内陆地区的建筑设施都出现了被硫酸盐侵蚀的现象。被侵蚀的混凝土工程的使用寿命将会大大缩减,造成人力物力的极大浪费^[1]。硫酸盐侵蚀会使混凝土结构表面脱落,内部钢筋裸露在外继而发生锈蚀,混凝土内部结构出现裂缝,保护层开裂,结构承载力降低,最终导致混凝土的耐久性失效,对建筑的安全性能产生不利影响^[2]。

不少学者通过加入粉煤灰等活性掺合料来研究混凝土抵抗硫酸盐侵蚀的性能^[3-5]。一方面,掺入粉煤灰会在混凝土中产生火山灰反应,即粉煤灰与水泥水化产物发生二次水化反应,生成的水化硅酸钙凝胶填充在混凝土内部的孔隙结构内,降低了混凝土试件的孔隙率,使硫酸盐等侵蚀性物质的浸入更加困难^[6]。另一方面,二次水化反应消耗了钙矾石膨胀破坏所需的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,降低了硫酸盐的侵蚀反应速率,但是需要将粉煤灰的掺量控制在一个合适区间内才能使混凝土的改良效果达到最佳^[7]。刘敬等^[8]研究了粉煤灰和矿粉掺量对混凝土抵抗硫酸盐性能的影响,结果表明 15% 和 25% 粉煤灰掺量的混凝土的耐久性较高,而 35% 粉煤灰掺量的混凝土的损伤速率明显加快,即过多的粉煤灰在一定程度上降低了混凝土抗硫酸盐侵蚀的性能。罗小博等^[9]的研究表明粉煤灰对混凝土结构的后期强度影响较小。郭敬业等^[10]在冻融循环条件下研究了粉煤灰混凝土的抗盐冻性能,结果表明粉煤灰的掺入减缓了混凝土相对动弹性模量的下降。有些学者还针对粉煤灰与其他掺合料的复掺进行了研究^[11]。管小健^[12]的研究表明粉煤灰与矿渣或硅灰的复掺能显著改善混

凝土的抗渗透性能。张路等^[13]研究了石灰、粉煤灰等掺料比例的改变对混凝土立方体抗压强度和弹性模量的影响,并提出了抗压强度值和弹性模量的定量关系模型。

目前,关于硫酸盐渍土地区全埋混凝土力学性能的研究较少。本研究通过硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土试块的全埋试验分析试块抗压强度的变化规律及强度衰减原因,并以此为基础对粉煤灰混凝土抗压强度进行函数拟合,为硫酸盐渍土地区混凝土耐久性指标的确定提供参考。

1 现场试验内容和方法

1.1 试验场地条件

选取青海省海东市平安区某盐渍土地区为研究区域,在现场取两份土样对其进行化学分析,其 $c(\text{Cl}^-)/2c(\text{SO}_4^{2-})$ 分别为 0.03 和 0.14。根据《盐渍土地区建筑技术规范》(GB/T 50942—2014)^[14],可以判定该试验场地土壤类型为硫酸盐渍土。

1.2 试验原材料

水泥选用青海省祁连山有限公司生产的 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,初凝时间为 124 min,终凝时间为 172 min。细骨料选用永通砂厂生产的细度模数为 2.8 的 II 区中砂。粗骨料选用青海青瑞有限公司生产的粒径为 5~30 mm 连续级配玄武岩碎石。减水剂为聚羧酸减水剂,减水率为 20%。采用 F 类 II 级粉煤灰。水泥的主要化学成分见表 1。

表 1 水泥的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of the cement %						
$w(\text{CaO})$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$
62.15	19.02	4.53	3.10	2.50	1.80	0.18

1.3 试验方案

为了探究粉煤灰掺量对现场全埋混凝土试块抗压强度的影响,制作4组尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的标准立方体混凝土试块,每组12块,共48块。对这4组混凝土试块分别掺入0%、10%、15%和20%的粉煤灰,各组混凝土试块

的具体配合比见表2(表中4种配合比混凝土的强度等级均为C45)。将试件在(20±5)℃的温度下成型,并在24 h后拆模,然后将其放置在恒温、恒湿养护室内养护28 d,取出后埋入试验场地1.5 m的土层中。在每个侵蚀龄期将试件挖出后测量其抗压强度,并对破碎的试块取样进行微观试验分析。

表2 混凝土配合比
Table 2 Concrete mix proportion

配合比	数量/ 块	粉煤灰 掺量/%	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	石子/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ (kg·m ⁻³)
PB-A	12	0	500	0	176	719	1 035	12.5
PB-B	12	10	450	50	176	719	1 035	12.5
PB-C	12	15	425	75	176	719	1 035	12.5
PB-D	12	20	400	100	176	719	1 035	12.5

2 试验结果分析

2.1 微观结构分析

图1所示为各配合比粉煤灰混凝土试块不同

侵蚀龄期的SEM照片。从图1(e)~1(h)可以看出,在侵蚀早期(0~240 d)混凝土试块中存在着大量的六方板状Ca(OH)₂晶体和层状C-S-H凝胶,说明混凝土试块与粉煤灰中的活性成分发生了二次水化反应^[15],埋置于现场的粉煤灰混凝土试块

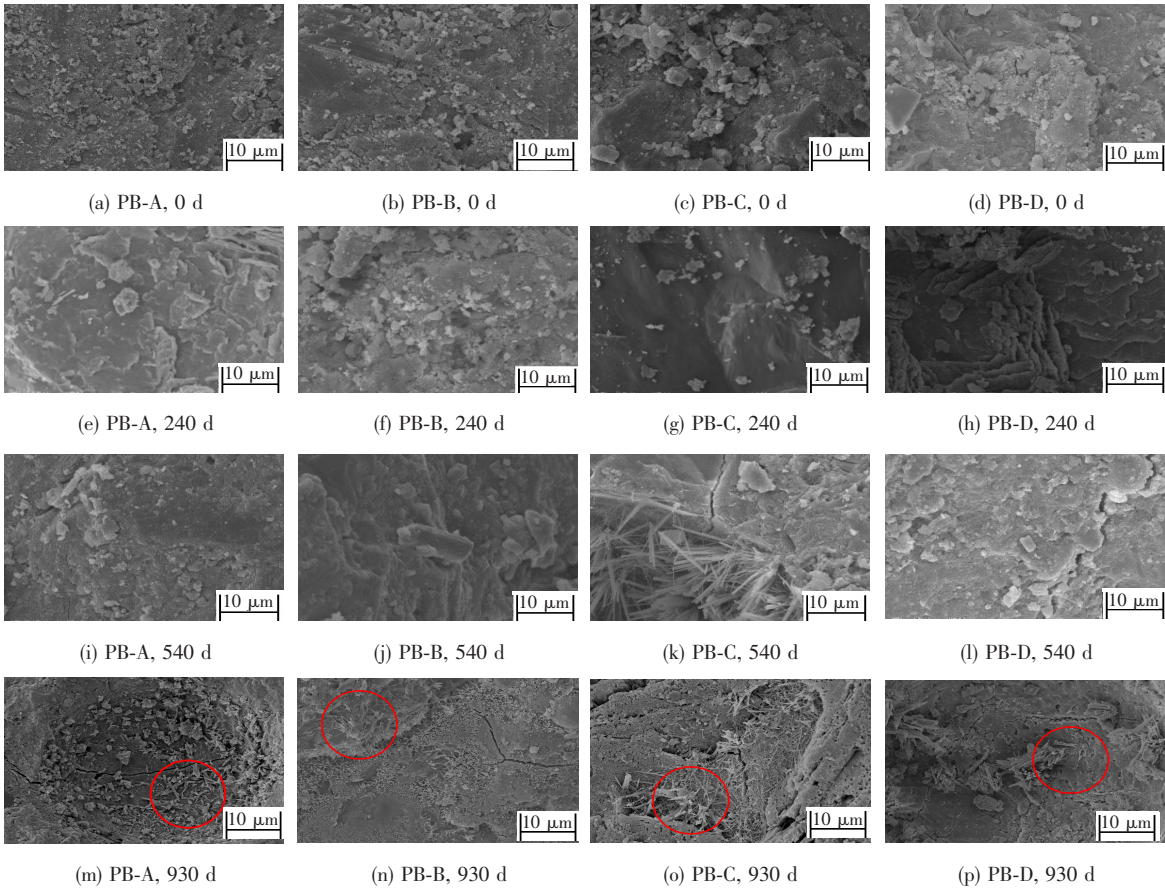


图1 各配合比混凝土试块不同侵蚀龄期时的SEM照片
Fig. 1 SEM images of concrete test blocks with each mix proportion at different erosion ages

内部结构在前期未出现明显变化,也未出现劣化迹象。从图 1(i)~1(l)可以看出,当侵蚀龄期为 540 d 时,除 PB-B 以外的混凝土试块中均出现了微裂缝,其中以 PB-C、PB-D 试块的微裂缝最为明显。微裂缝使混凝土的内部结构遭到破坏,降低了试块的整体密实度,导致混凝土抗压强度开始下降。从图 1(k)还可以看出,PB-C 混凝土试块有大量针棒状晶体生成。随着侵蚀时间的增加,微裂缝向多个方向扩展,排序错乱的钙矾石晶体吸附在裂缝壁上,吸水膨胀产生的内应力导致微裂缝进一步扩展,使得混凝土的抗压强度持续降低。从图 1(m)~1(p)可以看出,在侵蚀后期微裂缝继续发展,并向四周扩散,同时伴有针棒状晶体出现。

为探究主要元素组成,需对图 1 中红圈选定的物质进行物质分析。图 2 所示为侵蚀龄期为 930 d 混凝土试样的 EDS 能谱分析图。物质分析结果表明:针棒状晶体主要由 Ca、O、Al、S 元素组成,这 4 种元素均为主要侵蚀产物钙矾石(化学式为 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)的组成元素。钙矾石主要是由硫酸盐渍土提供的 SO_4^{2-} 与混凝土试块中水泥的水化产物 C-S-H 凝胶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 提供的 Ca^{2+} 发生单硫型硫铝酸钙反应后形成的^[16-17],即:

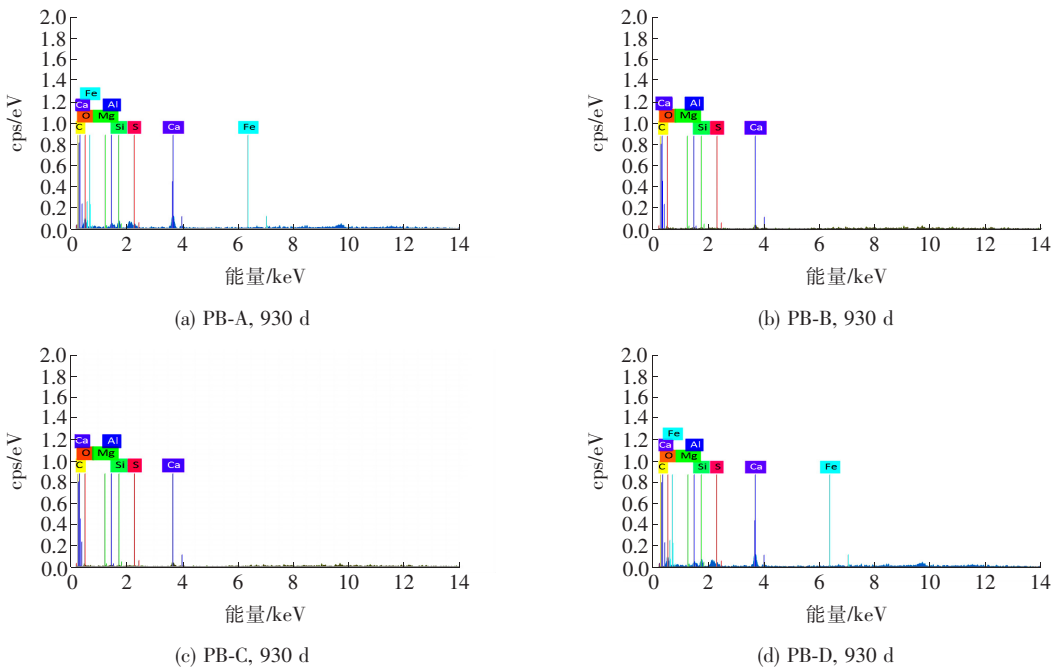
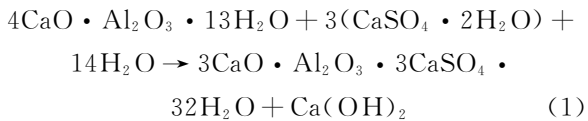


图 2 各配合比混凝土试块 930 d 龄期时的 EDS 能谱分析图

Fig. 2 EDS energy spectrum analysis diagrams of concrete test blocks with each mix proportion at 930 d age

2.2 混凝土试块抗压强度分析

2.2.1 残余强度系数

为探究硫酸盐渍土地区混凝土强度随侵蚀时间的变化规律,在此引入混凝土残余强度系数^[18-19],其计算公式为:

$$R = \frac{f_t}{f_c} \quad (2)$$

式中:R 为混凝土残余强度系数; f_t 为各侵蚀龄期的混凝土试块强度; f_c 为标准养护 28 d 后的初始强度。

图 3 所示为现场埋置的不同配合比混凝土试块残余强度系数 R 随侵蚀龄期的变化趋势。从图 3 可以看出,R 值在侵蚀早期(0~240 d)出现一定幅度的增长,在这一阶段 R 值均大于 1,说明混凝土试块尚未出现劣化。随着侵蚀龄期的增加,R 值逐渐降低,在 540 d 时 R 值降低到 1 以下,不同配合比混凝土的 R 值分别下降了 9.0%、4.4%、10.7%和 11.3%,表明现场埋置的粉煤灰混凝土试块开始出现劣化迹象。

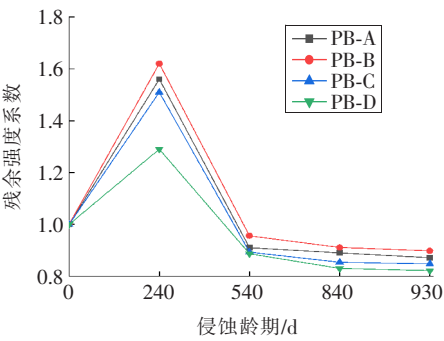


图3 各配合比混凝土试块残余强度系数变化趋势

Fig. 3 Variation trend of residual strength coefficient of concrete test blocks with each mix proportion

2.2.2 粉煤灰掺量对抗压强度的影响

图4所示为各配合比混凝土试块抗压强度随侵蚀时间的变化规律。从图4可以看出,4种配合比混凝土试块抗压强度的变化规律在整个侵蚀过程中都具有一致性。在早期(0~240 d)混凝土试块的抗压强度都出现了一定程度的增大,原因是在这一时期,将标准养护28 d后的粉煤灰混凝土试块埋置在现场土层中之后,在地层的潮湿环境中粉煤灰中含有的大量活性 SiO_2 和 Al_2O_3 与混凝土内部的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等碱性物质发生反应并生成了水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝性物质,这些持续形成的二次水泥水化反应产物填平了混凝土内部的毛细孔隙壁,提高了试块的密实度^[20],并阻碍了外部 SO_4^{2-} 的渗透,使混凝土前期强度出现了增长。在侵蚀龄期达到540 d后,各配合比粉煤灰混凝土的抗压强度开始降低。结合该时期混凝土内部的SEM照片进行分析后认为微裂缝的产生使混凝土结构的稳定性有所降低,导致抗压强度开始下降。随着侵蚀龄期的增加,地下土层中的 SO_4^{2-} 逐渐渗入,与前期水泥水化产物结合生成针棒状、具有吸水膨胀特性的钙矾石,并逐渐填充在孔隙中,对混凝土结构的耐久性产生不利影响^[21]。在侵蚀后期(840~930 d),各配合比粉煤灰混凝土的抗压强度仍呈下降趋势,但降低幅度远低于中期。由于混凝土的强度主要取决于水泥石的强度及水泥与骨料的黏结力,而它们的大小又取决于水化硅酸钙凝胶的多少,因而推测水泥中C-S-H凝胶的消耗有所减少,但钙矾石等侵蚀产物及粉煤灰也会对混凝土的结构产生影响,所以这一阶段混凝土内部的作用机理还需要进一步研究。

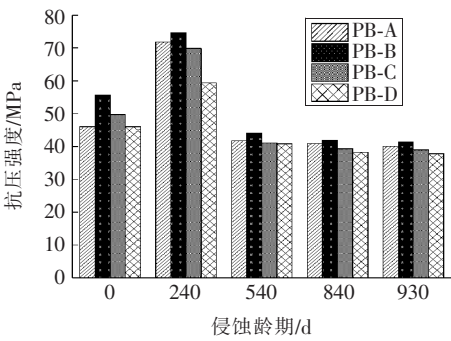


图4 各配合比混凝土试块抗压强度衰减规律

Fig. 4 Attenuation law of compressive strength of concrete test blocks with each mix proportion

通过对比各配合比粉煤灰混凝土不同侵蚀龄期的抗压强度,发现配合比为PB-B的混凝土在龄期为0、240、540、840和930 d的抗压强度均大于其他配合比混凝土相应龄期的抗压强度。因此,粉煤灰的最佳掺量应选为10%。

2.3 正交试验设计与分析

基于现场粉煤灰混凝土抗硫酸盐侵蚀试验的结果,通过正交试验分析可以更加合理地得到粉煤灰掺量及侵蚀龄期对混凝土抗压强度的影响程度^[22]。本研究采用 $L_8(2^4)$ 正交表进行过程分析。表3~4分别为正交试验分析中的因素水平表和试验方案与结果分析。

表3 因素水平表

Table 3 Factor level table

水平	因素	
	配合比	侵蚀龄期/d
1	PB-A	240
2	PB-B	540
3	PB-C	840
4	PB-D	930

从表4可以看出,侵蚀龄期的极差值大于粉煤灰掺量的极差值,因此极差的主因素为侵蚀龄期,次因素为粉煤灰掺量,说明在现场试验中,侵蚀龄期对混凝土抗压强度的影响最显著。

由于上述正交试验设计中的水平数大于3,且为了更加科学地探究粉煤灰掺量和侵蚀龄期的交互作用对混凝土试块抗压强度的影响,本研究采用方差分析法确定差异源^[16,23-24]。取显著性水平 $\alpha=0.05,0.01$,计算 P 、 F 值。正交试验方差分析

结果见表 5。从表 5 可以看出,粉煤灰掺量和侵蚀龄期的概率 P 均小于 0.05,即从统计意义上说明粉煤灰掺量和侵蚀龄期对现场混凝土抗压强度的变化有显著影响。其中,粉煤灰掺量的显著性水平为“* *”,说明粉煤灰掺量对混凝土抗压强度的变化有显著影响;侵蚀龄期的显著性水平为“* * *”,说明侵蚀龄期对混凝土抗压强度的变化具有非常显著的影响。

表 4 正交试验方案与结果分析
Table 4 Orthogonal test scheme and result analysis

试验 编号	因素					抗压强度 f_i/MPa
	A	B	$(A\times B)_1$	$(A\times B)_2$	$(A\times B)_3$	
1	1	1	1	1	1	71.8
2	1	2	1	2	2	41.8
3	1	3	2	1	2	40.9
4	1	4	2	2	1	40.1
5	2	1	2	2	1	74.4
6	2	2	2	1	2	44.0
7	2	3	1	2	2	41.9
8	2	4	1	1	1	41.3
9	3	1	1	2	2	69.9
10	3	2	1	1	1	41.1
11	3	3	2	2	1	39.3
12	3	4	2	1	2	39.0
13	4	1	2	1	2	59.4
14	4	2	2	2	1	40.8
15	4	3	1	1	1	38.2
16	4	4	1	2	2	37.8
K_1	194.6	275.8	383.8	375.7	387.3	—
K_2	201.9	167.7	378.2	386.3	374.7	—
K_3	189.3	160.3	—	—	—	—
K_4	176.2	158.2	—	—	—	—
k_1	48.650	68.950	95.950	93.925	96.825	—
k_2	50.475	41.925	94.550	96.575	93.675	—
k_3	47.325	40.075	—	—	—	—
k_4	44.050	39.550	—	—	—	—
r	6.425	29.400	95.950	96.575	96.825	—
S_j	88.175	2 437.815	36 294.170	36 304.300	36 310.100	—

注:表中 $K_1\sim K_4$ 为各水平之和; $k_1\sim k_4$ 为各水平的均值; r 为极差; S_j 为因素平方和;A 为配合比;B 为侵蚀龄期。

图 5 所示为试验因素水平—抗压强度均值直观趋势图(图中 $A_1\sim A_4$ 、 $B_1\sim B_4$ 分别表示因素 A、B 的 4 个水平)。从图 5 可以看出, A_2 为最佳配合比(粉煤灰掺量为 10%), A_4 为最差配合比(粉煤灰掺量为 20%);试验指标 B 越大,抗压强度越小。结合极差分析及方差分析结果,进一步证实了粉煤灰掺量和侵蚀龄期对现场全埋混凝土抗压强度的劣化规律具有重要影响。

表 5 正交试验方差分析结果

差异源	离差平方和	自由度	均值	F 值	P 值	显著性
A	88.175	3	29.392	3.993	0.046	**
B	2 437.815	3	812.605	110.408	2.04E-07	***
误差	66.240	9	7.360	—	—	—
总和	2 592.230	15	—	—	—	—

注：“显著性”一列中，“*”越多表示显著性水平越高。

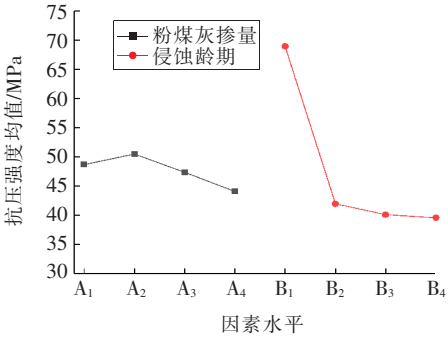


图 5 试验因素水平—抗压强度直观趋势图

Fig. 5 Visual trend chart of test factor level and compressive strength

2.4 粉煤灰混凝土抗压强度 f_t 的拟合

为了进一步明确粉煤灰掺量、侵蚀龄期与混凝土抗压强度之间的变化关系,使用 MATLAB 对其进行函数拟合。由于 540~930 d 内混凝土试块的抗压强度下降缓慢,因此在拟合过程中选取图 4 中 0~540 d 的试验数据,并采用 General Model Gauss 函数对抗压强度 f_t 进行拟合,即:

$$f_t = a \times \exp\{-[(t - b)/c]^2\} \tag{3}$$

式中: f_t 为不同侵蚀龄期混凝土试块的抗压强度; t 为侵蚀时间, $t \in [0, 540]$; a 、 b 、 c 为 General Model Gauss 函数的拟合系数。

抗压强度 f_t 的拟合结果见图 6。

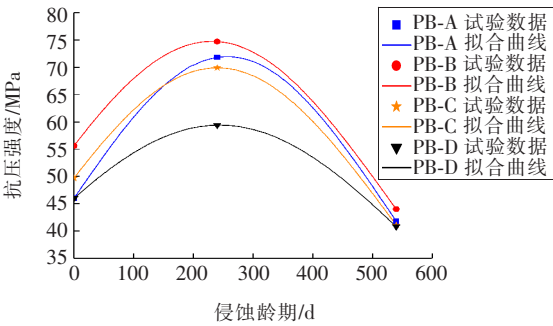


图 6 抗压强度 f_t 的拟合结果

由图 6 可以看出,拟合曲线与试验数据之间吻合良好。表 6 所列为拟合系数。

表 6 General Model Gauss 函数的拟合系数

Table 6 Fitting coefficient of General Model Gauss function				
拟合系数	PB-A	PB-B	PB-C	PB-D
a	71.94	74.73	69.9	59.4
b	256.90	230.90	240.2	244.1
c	384.20	424.60	411.4	482.7

考虑到拟合函数针对的是硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土前期的侵蚀状况,因此后期仍需大量的试验数据来对拟合函数进行完善、修正。

3 结论

1) 硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土抗压强度的变化规律表明,在侵蚀早期(0~240 d),混凝土试块的抗压强度出现一定程度的增大;随着侵蚀龄期的增加(240~540 d),混凝土抗压强度开始快速下降;在侵蚀后期(540~930 d),各配合比混凝土的抗压强度仍然呈降低趋势,但下降速率逐渐减缓。由粉煤灰混凝土抗压强度衰减曲线与正交试验得到的结论为:粉煤灰的最佳掺量为 10%。

2) 微观结构分析结果表明:在侵蚀前期粉煤灰混凝土未出现劣化迹象,生成的钙矾石晶体增多、膨胀导致内部结构出现微裂缝是混凝土抗压强度降低的主要原因。

3) 通过正交试验分析可以得出:侵蚀龄期是现场全埋混凝土试块抗压强度变化的主要因素,粉煤灰掺量为次要因素。

4) 基于混凝土抗压强度衰减曲线,借助 MATLAB 进行了硫酸盐渍土地区不同配合比粉煤灰混凝土抗压强度的函数拟合,虽然拟合曲线与试验数据之间吻合良好,但仍需大量的后期数据对拟合函数进行修正、完善。

〔参考文献〕

[1] 申春妮,杨德斌,方祥位,等. 混凝土硫酸盐侵蚀影响因素的探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2004(2):16-19.

SHEN Chun-ni, YANG De-bin, FANG Xiang-wei, et

- al. Investigation on influencing factors of sulfate attack of concrete[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2004(2):16-19.
- [2] 王磊,伍一,戴理朝. 钢绞线锈蚀导致混凝土开裂及锈蚀产物分布研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(1):79-85.
- WANG Lei, WU Yi, DAI Li-zhao. Study on distribution of strand corrosion products and crack propagation of concrete[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2018, 15(1):79-85.
- [3] 李北星,方晴,方鹏. 大掺量掺合料混凝土半浸泡于硫酸盐溶液中的耐久性[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(6):892-898.
- LI Bei-xing, FANG Qing, FANG Peng. Durability of high-volume mineral admixture concrete half immersed in sodium sulfate solution[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(6):892-898.
- [4] 袁俊,王学明,魏鹏,等. 湿养护不充分条件下矿物掺合料对混凝土抗盐渍土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9):2 829-2 834, 2 841.
- YUAN Jun, WANG Xue-ming, WEI Peng, et al. Effect of mineral admixture on the resistance to saline soil erosion of concrete under condition of insufficient moist curing[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(9):2 829-2 834, 2 841.
- [5] 方鹏,李北星,方晴. 大掺量矿物掺合料混凝土抗盐冻性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2):572-577.
- FANG Peng, LI Bei-xing, FANG Qing. Salt-freezing resistance of high-volume mineral admixture concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(2):572-577.
- [6] 钟含,王昂. 寒冷地区不同掺量 II 类粉煤灰混凝土的力学特性研究[J]. 公路工程, 2017, 42(3):292-296.
- ZHONG Han, WANG Ang. Research of mechanical properties of concrete with different proportion of II fly ash in cold region[J]. Highway Engineering, 2017, 42(3):292-296.
- [7] 鲁丽华,潘桂生,陈四利,等. 不同掺量粉煤灰混凝土的强度试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(1):107-111.
- LU Li-hua, PAN Gui-sheng, CHEN Si-li, et al. Strength of concrete with different contents of fly ash[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009, 31(1):107-111.
- [8] 刘敬,余浩,李北星. 矿物掺和料对 PC 箱梁混凝土耐久性影响研究[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(3):27-30.
- LIU Jing, YU Hao, LI Bei-xing. The influence of the mineral admixture on the durability of concrete for the PC box girder[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(3):27-30.
- [9] 罗小博,宋彧,郭启明,等. 粉煤灰掺量对混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2021(8):88-90, 95.
- LUO Xiao-bo, SONG Yu, GUO Qi-ming, et al. Experimental study of influence of the mechanical behavior about fly ash content on concrete[J]. Concrete, 2021(8):88-90, 95.
- [10] 郭敬业,贾海洋. 水泥砼路面抗盐冻性能研究[J]. 公路与汽运, 2020(1):81-84, 97.
- GUO Jing-ye, JIA Hai-yang. Research on the salt freeze resistance of cement concrete pavement[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(1):81-84, 97.
- [11] 董振平,张成中,孙广帅,等. 掺合料混凝土早期强度的试验研究[J]. 混凝土, 2017(10):83-86, 92.
- DONG Zhen-ping, ZHANG Cheng-zhong, SUN Guang-shuai, et al. Experimental research on early strength of mineral admixture concrete[J]. Concrete, 2017(10):83-86, 92.
- [12] 管小健. 掺合料、石粉及石屑对再生混凝土抗压强度及抗氯离子渗透性能影响研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(3):16-19.
- GUAN Xiao-jian. Influence of mineral admixture, stone powder and stone chips on compressive strength and resistance to penetration of chloride ions of recycled concrete[J]. New Building Material, 2016, 43(3):16-19.
- [13] 张路,罗大明,文波. 掺合料对微粒混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(9):2 716-2 721, 2 728.
- ZHANG Lu, LUO Da-ming, WEN Bo. Experimental study on the effect of admixture on mechanical properties of microconcrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9):2 716-2 721, 2 728.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盐渍土地区建筑技术规范:GB/T 50942—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development

- of the People's Republic of China. Technical code for building in saline soil regions; GB/T 50942—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [15] 郭佳庆. 青海盐渍土地地区埋地混凝土构件服役性能研究[D]. 西宁: 青海大学, 2021: 34-37.
- GUO Jia-qing. Research on service performance of buried concrete components in Qinghai saline soil area[D]. Xining: Qinghai University, 2021: 34-37.
- [16] 郭佳庆, 马艳霞, 高英, 等. 不同温度条件下硫酸钠对混凝土劣化性能影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3 184-3 190.
- GUO Jia-qing, MA Yan-xia, GAO Ying, et al. Effect of sodium sulfate on concrete deterioration performance under different temperature conditions [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39 (10): 3 184-3 190.
- [17] 冷发光, 周永祥, 王晶. 混凝土耐久性及其检验评价方法[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2012: 201-202.
- LENG Fa-guang, ZHOU Yong-xiang, WANG Jing. Inspection and assessment of concrete durability. Beijing: China Building Materials Press, 2012: 201-202.
- [18] 刘生纬, 杨子江, 张家玮. 硫酸盐持续浸泡作用下混凝土力学性能试验[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3 137-3 142.
- LIU Sheng-wei, YANG Zi-jiang, ZHANG Jia-wei. Mechanical properties of concrete under sustained sulfate soaking[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(10): 3 137-3 142.
- [19] 高润东. 复杂环境下混凝土硫酸盐侵蚀—宏观劣化规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2010: 25-27.
- GAO Run-dong. Micro-macro degradation regularity of sulfate attack on concrete under complex environments[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 25-27.
- [20] 娄许煜, 王起才, 代金鹏, 等. $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 养护环境下粉煤灰对混凝土的强度和孔结构影响[J]. 混凝土, 2019 (11): 15-18, 22.
- LOU Xu-yu, WANG Qi-cai, DAI Jin-peng, et al. Effect of fly ash on strength and pore structure of concrete under curing condition of negative temperature ($-3\text{ }^{\circ}\text{C}$) [J]. Concrete, 2019(11): 15-18, 22.
- [21] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1 569-1 581.
- QIAN Jue-shi, YU Jin-cheng, SUN Hua-qiang, et al. Formation and function of ettringite in cement hydrates[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(11): 1 569-1 581.
- [22] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 158-170.
- LI Yun-yan, HU Chuan-rong. Experiment design and data processing[M]. 2nd edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 158-170.
- [23] 严福章, 于明国, 胡瑾, 等. 混凝土的抗压强度和抗硫酸盐侵蚀性能的正交试验研究[J]. 混凝土, 2015 (3): 34-37.
- YAN Fu-zhang, YU Ming-guo, HU Jin, et al. Study on the compressive strength and sulfate attack resistance of concrete based on orthogonal experiment [J]. Concrete, 2015(3): 34-37.
- [24] 周志刚, 蔡扬发, 谭军. 聚酯纤维对橡胶改性沥青混凝土性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 1-8.
- ZHOU Zhi-gang, CAI Yang-fa, TAN Jun. Effect of polyester fiber on performance of rubber modified asphalt concrete[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(2): 1-8.

(编辑 石月珍)