

# 磨细高炉矿渣和硅灰对重复荷载作用下混凝土氯离子透过性的影响

张武满<sup>①\*</sup>, 巴恒静<sup>②</sup>

① 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191;

② 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150006

\* E-mail: wzmzhang@buaa.edu.cn

收稿日期: 2012-03-12; 接受日期: 2012-08-02

国家自然科学基金(批准号: 50808045)、北京市自然科学基金(批准号: 2112024)和霍英东教育基金(批准号: 132016)项目资助

**摘要** 研究了磨细高炉矿渣(GGBFS)与硅灰(SF)对重复荷载作用下混凝土中氯离子透过性的影响。磨细高炉矿渣的掺量分别为 20%, 30%, 40%, 硅灰的掺量分别为 5% 和 10%, 并对混凝土试件施加了 5 次最大荷载为 40% 与 80% 圆柱体抗压强度( $f'_c$ )的重复荷载。混凝土的氯离子透过性利用氯离子加速迁移装置阳极溶液中的氯离子浓度进行评价。结果表明: 掺加 20%, 30% 矿渣的混凝土及 5% 和 10% 硅灰的混凝土氯离子透过数量低于基准混凝土, 掺加 40% 矿渣的混凝土氯离子透过数量高于基准混凝土。最大荷载为 40% 与 80%  $f'_c$  的 5 次重复荷载增大了混凝土的氯离子透过数量, 掺加 5% 硅灰的混凝土与掺加 20% 矿渣的混凝土抗氯离子渗透性相当。

**关键词**  
混凝土  
磨细高炉矿渣  
硅灰  
氯离子迁移  
重复荷载

氯离子渗入到混凝土内并由此产生的劣化(如钢筋锈蚀引起的开裂和剥落)是钢筋混凝土结构的耐久性与寿命预测的一个主要问题<sup>[1~4]</sup>。氯离子引起的钢筋锈蚀已被认为是钢筋混凝土结构最主要的劣化机理之一<sup>[5]</sup>。混凝土内钢筋表面氯离子含量达到 593.3~949.3 g/m<sup>3</sup> 水平时即可导致锈蚀的发生<sup>[6]</sup>。氯离子侵蚀被认为是影响混凝土结构使用寿命的最重要因素之一<sup>[7]</sup>。磨细高炉矿渣和硅灰替代部分水泥以提高混凝土的力学性能与耐久性能已被应用了许多年<sup>[8~15]</sup>。

Ozyildirim 和 Halstead<sup>[16]</sup>研究表明掺加矿渣后混凝土的强度与基准混凝土近似, 但氯离子渗透性较低。掺加矿渣后混凝土表现出更高的抵抗氯离子渗透性能也被报道<sup>[17~20]</sup>。Vejmelková 等人<sup>[21]</sup>认为磨细

高炉矿渣掺量较低时表现为更环境友好和有价值的替代胶凝材料, 或至少不会降低硬化混凝土的性能。

Gesoglu 和 Güneyisi<sup>[22]</sup>研究表明硅灰可作为提高橡胶混凝土氯离子渗透性能的有效措施。Shekarchi 等人<sup>[15]</sup>认为硅灰部分取代水泥达到 7.5% 时可以降低扩散系数, 但更高的取代率时扩散系数降低的并不明显。Toutanji 等人<sup>[23]</sup>得到了类似的结果。Bentz<sup>[24]</sup>研究表明硅灰掺量为 10% 时可以降低混凝土中氯离子传输 15 倍以上。

Saito 和 Ishimori<sup>[25]</sup>发现对试件施加高达 90% 极限强度的静载对混凝土氯离子渗透性的影响较小。然而最大应力水平为 60% 或更高的重复荷载将导致氯离子渗透性显著增大。Samaha 和 Hover<sup>[26]</sup>研究表明

低于 75%最大承载力的单次轴向压应力对氯离子渗透性无影响, 但更高应力水平可使氯离子渗透性增大 20%. Cao 等人<sup>[27]</sup>认为适当的压应力可降低氯离子渗透系数; 然而由于微裂纹的持续扩展, 更高应力水平将增大氯离子渗透系数.

通常情况下, 混凝土结构将同时承受不同的环境因素与外部荷载的作用<sup>[28~31]</sup>. 外部荷载将导致混凝土内产生微裂纹, 因此, 确定外部荷载是否对混凝土传输性能有显著影响有利于设计和施工过程中限制外部应力水平<sup>[26]</sup>, 也将有助于预测氯离子环境下钢筋混凝土服役期间传输性能的变化. 本文的研究目的是评估磨细高炉矿渣和硅灰对重复荷载作用下氯离子透过性的影响.

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

配制混凝土所用胶凝材料为 42.5 普通硅酸盐水泥, 满足国家标准 GB/T 18046-2008 的磨细高炉矿渣和硅灰. 胶凝材料的化学组成及物理性能见表 1.

细骨料为细度模数 2.82、表观密度 2610 kg/m<sup>3</sup>的河沙. 粗骨料为最大粒径 5 mm、表观密度 2690 kg/m<sup>3</sup>的饱和面干辉绿岩碎石. 采用 M-100 蔚系高效减水剂控制新拌混凝土的工作性.

### 1.2 混凝土配比与试样制备

混凝土中胶凝材料用量为 450 kg/m<sup>3</sup>, 砂率为

表 1 水泥、矿渣和硅灰的化学组成与物理性能

	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	R <sub>2</sub> O <sup>*</sup> (%)	Loss (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Specific area surface (m <sup>2</sup> /kg)
OPC	62.28	21.08	5.47	3.96	1.73	2.63	0.80	1.61	3.17	335
GGBFS	42.49	38.61	6.72	0.40	6.71	0.80	0.70	2.53	2.86	501
SF	0.2	93.7	0.3	0.8	0.2	0.5	0.3	3.7	2.26	15000

\*R<sub>2</sub>O=Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O

表 2 混凝土配合比

	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	GGBFS (kg/m <sup>3</sup> )	SF (kg/m <sup>3</sup> )	Fine aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Superplasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	W/B*
C	450	—	—				2.7	
GS20	360	90	—				2.6	
GS30	315	135	—				2.5	
GS40	270	180	—	737	1105.5		3.0	157.5 0.35
SF5	427.5	—	22.5				3.2	
SF10	405	—	45				3.3	

W/B\*为水胶比; C 为基准混凝土; GS20, GS30 和 GS40 分别为矿渣掺量 20%, 30% 和 40% 的混凝土; SF5 和 SF10 分别为硅灰掺量 5% 和 10% 的混凝土.

0.40, 水胶比为 0.35. 磨细高炉矿渣的掺量分别为 20%, 30%, 40%, 硅灰的掺量分别为 5% 和 10%. 减水剂以粉状与混凝土的固体组成材料充分搅拌, 通过调整减水剂的用量将混凝土拌合物的坍落度控制在 200±20 mm 范围内. 混凝土的配比见表 2.

固体材料置入搅拌机前将 10% 的拌合水喷洒到搅拌机内, 然后将剩余拌合水均匀的与固体拌合物加入到搅拌机内. 搅拌完成后每个配比的混凝土分别成型一组直径 95 mm, 高 300 mm 的圆柱体. 利用振动台使试件充分密实. 刮平试件表面并用塑料薄膜覆盖. 浇注 24 h 后脱模, 试件置于 20°C 的碱性溶液中养护 28 d, 碱性溶液可保证试件的饱和度并避免混凝土内离子的浸出现象<sup>[32]</sup>. 每个配比混凝土取 3 个圆柱体试件在 28 d 进行轴心抗压强度试验. 另外 2 个圆柱体通过 200 kN 的 WHY 系列全自动试验机施加 5 次循环的重复荷载. 本文中采用了 5 次循环的重复荷载主要是由于试验机最大循环次数设置所限. 尽管 5 次循环荷载与实际工况之间存在差别, 但所得结果仍可为类似研究提供参考.

Kermani<sup>[33]</sup>发现混凝土的水渗透性与施加的应力水平有关, 并确定了 40% 极限强度的应力水平为阀值应力. Choinska 等人<sup>[34]</sup>发现只有当应力水平超过 80% 极限强度后混凝土的气体渗透性才会有显著的增大. 对混凝土的水渗透性, Hearn<sup>[35]</sup>获得了比其他人更高的应力阀值, 为峰值应力的 80%. 当混凝土承受 30%~50% 极限强度的应力水平时, 裂纹的长度, 宽度和数量开始增加. 应力水平达到 70%~90% 极限

强度时, 砂浆中裂纹将显著增加, 并形成连续的裂纹形态<sup>[25]</sup>. Uchikawa 等人<sup>[36]</sup>认为混凝土通常在 60% 的断裂应力时出现开裂, 应力水平超过 80% 断裂应力时, 裂纹迅速扩展. 重复荷载作用下裂纹的增长明显高于单次荷载的作用. 因此, 本文选择 40%  $f'_c$  和 80%  $f'_c$  作为最大重复荷载.

由于振实过程中固体颗粒的沉降和拌合水向上迁移, 混凝土试件表面易出现富净浆层, 而底部易出现富骨料层<sup>[37]</sup>. 另外, 由于压力机上下压板对混凝土试件的环箍作用, 试件的两端处于非均匀的轴压状态. 因此, 从试件两端获取的圆盘试样将对测试结果产生“壁效应”. 本文中采用金刚石锯从圆柱体试件的中部分别取 3 个直径 95 mm, 厚 10 mm 的混凝土圆盘试样进行氯离子迁移试验, 该处理过程不会引入新的裂纹<sup>[38]</sup>. 为了保证氯离子进行一维传输, 试样的侧面采用环氧树脂进行密封.

### 1.3 氯离子迁移试验装置

本文采用的氯离子迁移装置见图 1.

阴极室注入 1.5 L NaCl 和 NaOH 混合溶液, 浓度分别为 0.5 和 0.3 mol/L. 较大的阴极室可以阻止氢氧根离子的积聚, 同时提供充足的氯离子. 此时阴极室中迁移离子处于近似恒定的浓度, 某种程度上实现真实孔溶液的碱性环境. 阳极室注入 0.6 L 采用蒸馏水配制的 NaOH 溶液, 可避免由于 pH 值降低而产生氯气<sup>[39]</sup>. 较小体积的阳极室可以尽早发现透过试样的氯离子, 但又要提供足够的体积以避免试验过程中电解质浓度的显著变化. 选用石墨电极可降低电极的氧化和腐蚀<sup>[40]</sup>. 测试过程中试样两侧的直流电压控制为 12 V, 可避免溶液出现较高的温升<sup>[41]</sup>. 采用 PCIS-10 型氯度计测量氯离子浓度, 测量范围为  $5.0 \times 10^{-5}$ ~1.0 mol/L. 每个混凝土配比取 3 个直径 95 mm, 厚 10 mm 试样, 试验前试样的侧面用环氧树脂

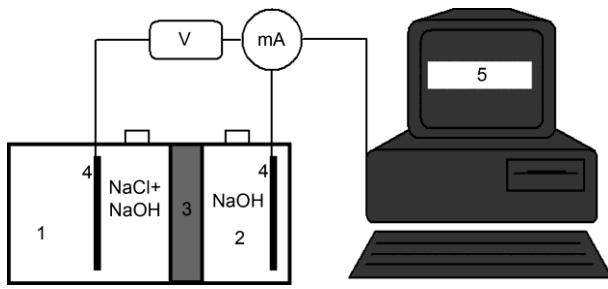


图 1 氯离子迁移装置

1, 阴极室; 2, 阳极室; 3, 试样; 4, 电极; 5, 数据采集系统

密封, 每个试件进行 168 h 的氯离子迁移试验并取氯离子浓度平均值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 混凝土强度

混凝土的抗压强度见表 3.

矿渣掺量为 20% 和 30% 时, 圆柱体混凝土的 28 d 抗压强度高于基准混凝土, 但矿渣掺量为 40% 时, 混凝土的强度降低了 40.3%. 矿渣掺量为 20% 和 30% 时, 未水化的矿渣颗粒具有较高的弹性模量, 可在水泥石中起微集料的作用, 从而抑制微裂纹的扩展. 同样, 失效前矿渣颗粒周围的裂纹需要消耗更多的能量<sup>[42, 43]</sup>. 然而, 当矿渣掺量为 40% 时, 未水化颗粒的微集料效应不足以弥补水泥水化产物过少带来的影响<sup>[44]</sup>, 因此, 40% 矿渣掺量的混凝土强度明显低于基准混凝土. 此外, 对于矿渣掺量较高的混凝土而言, 养护时间对混凝土强度以及耐久性的发展起至关重要的作用<sup>[11]</sup>.

硅灰掺量为 5% 和 10% 时, 混凝土 28 d 的强度分别增加了 22.2% 和 32.6%. 硅灰增加混凝土强度的机理主要为: 1) 孔隙的细化和基体的致密; 2)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的减少; 3) 水泥石与骨料界面的细化<sup>[45, 46]</sup>.

### 2.2 混凝土变形

加载过程中可得到连续的应力-应变曲线. 当所加荷载为 40%  $f'_c$  或 80%  $f'_c$  时, 可得到试件的最大变形. 当 5 次重复加载过程结束并完全卸载后可获得残余变形. 本文中的最大变形和残余变形按下面公式计算.

$$D_{\max} = (L_0 - L_{\min}) \times 10^{-6} / L_0, \quad (1)$$

$$D_r = (L_0 - L_{\text{unloading}}) \times 10^{-6} / L_0, \quad (2)$$

其中,  $D_{\max}$ , 最大变形;  $D_r$ , 残余变形;  $L_0$ , 试件的原始长度;  $L_{\min}$ , 加载过程中试件的最小长度;  $L_{\text{unloading}}$ , 加

表 3 混凝土 28 d 抗压强度(MPa)

	Compressive strength			Mean value
	1	2	3	
C	45.1	44.6	42.9	44.2
GS20	47.6	48.4	50.1	48.7
GS30	52.1	49.3	48.6	50.0
GS40	25.8	26.5	26.9	26.4
SF5	53.3	54.7	53.9	54.0
SF10	57.1	56.7	61.9	58.6

载过程结束并卸载后试件的长度。

混凝土的变形见图 2。与基准混凝土相比, 最大重复荷载为  $40\% f'_c$  条件下, 矿渣掺量为 20% 和 30% 并养护 28 d 时, 混凝土的最大变形分别降低了 9.7% 和 17.3%, 残余变形分别降低了 24% 和 36%。然而, 矿渣掺量为 40% 时, 混凝土的最大变形和残余变形分别增大了 66.4% 和 240%。最大重复荷载提高为  $80\% f'_c$  时, 掺加矿渣后混凝土的变形规律类似。

最大重复荷载为  $40\% f'_c$  条件下, 硅灰掺量为 5% 和 10% 并养护 28 d 时, 混凝土的最大变形分别降低了 6.9% 和 11.1%, 残余变形分别降低了 4% 和 12%。最大重复荷载提高为  $80\% f'_c$  时, 混凝土的变形明显增加, 但与基准混凝土相比, 最大变形仍分别降低了 6.8% 和 23.5%, 残余变形分别降低了 27.8% 和 42.6%。这主要是填充效应和火山灰反应综合作用的结果<sup>[47]</sup>。

### 2.3 氯离子迁移试验

混凝土中氯离子迁移试验结果见图 3。由图 3 可知, 试验一段时间后, 透过混凝土的氯离子浓度与时间呈线性关系并随时间的延长而增加。这表明此时垂直迁移方向的所有区域中质量通量为常数。

当矿渣掺量为 20% 和 30% 时, 透过混凝土的氯离子浓度略有降低。但矿渣掺量为 40% 时, 氯离子浓度明显增加。掺加硅灰时, 透过混凝土的氯离子浓度低于基准混凝土, 并随硅灰掺量的增加而降低。此外, 掺加 5% 硅灰的混凝土与掺加 20% 或 30% 矿渣的混凝土抗氯离子渗透性相当。

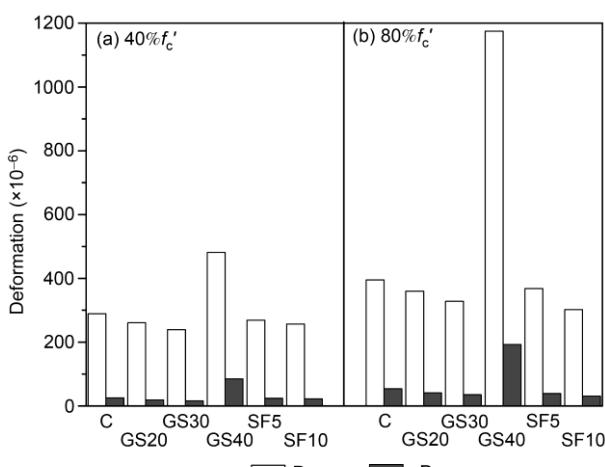


图 2 混凝土的变形

(a)  $40\% f'_c$ ; (b)  $80\% f'_c$

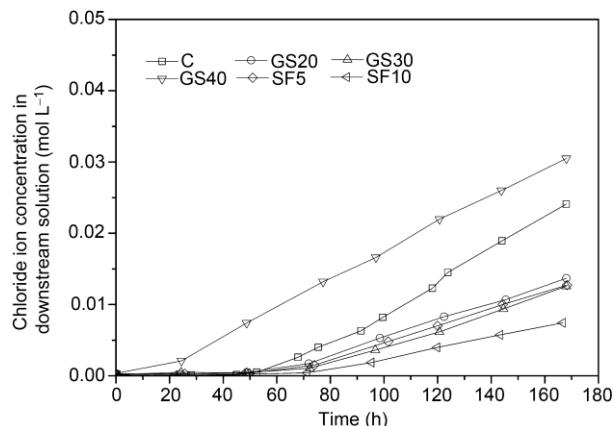


图 3 混凝土中氯离子迁移试验

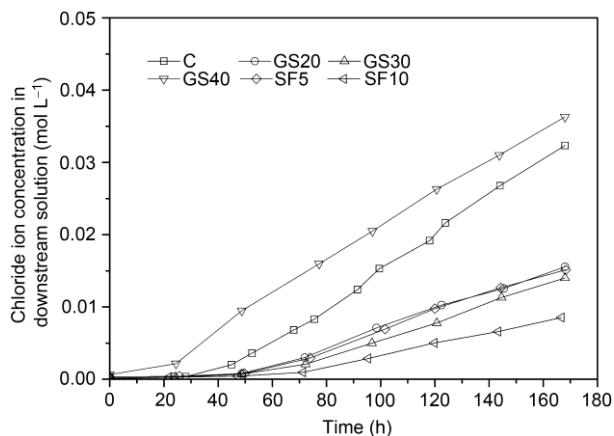


图 4 最大重复荷载为  $40\% f'_c$  时混凝土的氯离子迁移试验

最大重复荷载为  $40\% f'_c$  时混凝土的氯离子迁移试验结果见图 4。承受荷载后, 透过混凝土的氯离子浓度均比相应无荷载混凝土高。最大重复荷载提高为  $80\% f'_c$  时, 透过混凝土的氯离子浓度均进一步增大, 见图 5。最大重复荷载为  $40\% f'_c$  和  $80\% f'_c$  时, 矿渣和硅灰对透过混凝土的氯离子浓度的影响与无荷载时类似。而且, 掺加 5% 硅灰的混凝土与掺加 20% 或 30% 矿渣的混凝土抗氯离子渗透性相当。

### 2.4 讨论

当钢筋表面的氯化物浓度超过某一临界值时, 混凝土内的钢筋易发生腐蚀<sup>[4]</sup>。因此, 透过混凝土保护层的氯离子数量对暴露于氯离子环境中混凝土结构的寿命预测是一个非常重要的指标。

试验 168 h 后透过混凝土的氯离子数量见图 6。

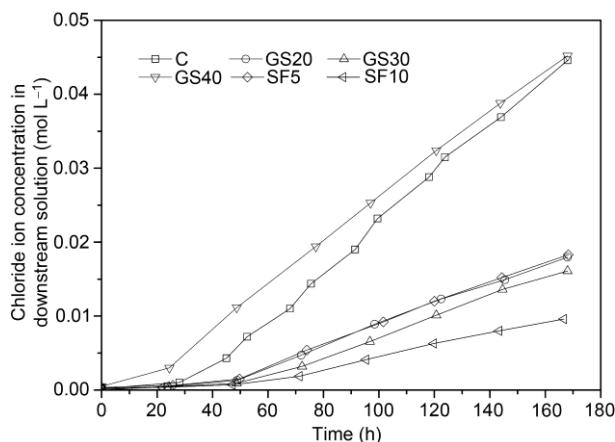


图 5 最大重复荷载为  $80\% f'_c$  时混凝土的氯离子迁移试验

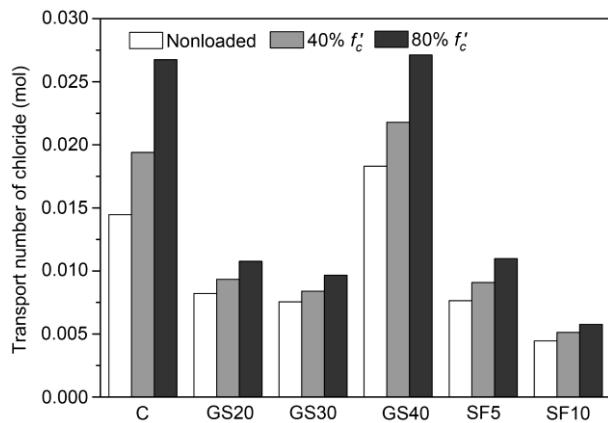


图 6 透过混凝土的氯离子数量

由图 6 可知, 矿渣和硅灰对透过混凝土的氯离子数量影响显著。与基准混凝土相比, 矿渣掺量为 20% 和 30% 并养护 28 d 时, 透过混凝土的氯离子数量分别降低了 43.3% 和 47.9%。这可能是由于早期矿渣的火山灰反应在混凝土内部生成了较多的  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  和 C-S-H 凝胶, 从而减小了孔隙尺寸和累计孔隙体积<sup>[19, 44, 49~51]</sup>。此外, C-S-H 凝胶可结合更多的氯离子并阻断传输路径, 因此降低了混凝土的渗透性。矿渣混凝土中  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{AlOH}^{2+}$  和  $\text{Si}^{4+}$  总离子数高于硅酸盐水泥混凝土, 矿渣混凝土中的离子浓度高于基准混凝土。扩散能力较低的离子可能限制氯离子的移动<sup>[52~54]</sup>。然而, 与基准混凝土相比, 矿渣掺量为 40% 时, 透过混凝土的氯离子数量增加了 26.6%。这可能

是由于水泥水化产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  不能满足大掺量矿渣火山灰反应所需<sup>[44, 55]</sup>。

与基准混凝土相比, 硅灰掺量为 5% 和 10% 并养护 28 d 时, 透过混凝土的氯离子数量分别降低了 47.1% 和 69.2%。硅灰增加混凝土抗氯离子渗透性有几个途径。作为细度大和活性高的矿物掺合料, 硅灰可细化过渡区的孔结构<sup>[47]</sup>并生成较多的 C-S-H 凝胶<sup>[56]</sup>, 同时降低相同水化程度水泥石的孔隙率<sup>[57, 58]</sup>。Bentz 等人<sup>[59]</sup>发现硅灰生成的火山灰凝胶的扩散性比普通水泥水化生成的凝胶低 25 倍。这可能是由于孔隙的细化、基体的密实、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量降低和水泥石-集料界面细化的原因<sup>[60]</sup>。另外, 由于硅灰和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的火山灰反应通常使界面过渡区更致密<sup>[61]</sup>。

与无荷载混凝土相比, 重复荷载增加了所有混凝土的氯离子透过数量。其中, 最大重复荷载为  $40\% f'_c$  和  $80\% f'_c$  时, 基准混凝土的氯离子透过数量分别增加了 34.2% 和 85.0%。最大重复荷载为  $40\% f'_c$  时, 混凝土内微裂纹的长度、宽度和数量将会增加; 当最大重复荷载提高为  $80\% f'_c$  时, 砂浆内微裂纹将显著增加并相互连通<sup>[25]</sup>。因此, 无论混凝土中是否掺加了矿物掺合料,  $40\% f'_c$  和  $80\% f'_c$  的重复荷载通常会增加混凝土的渗透性。

矿物掺合料的取代率和重复荷载对混凝土的氯离子透过性有显著影响。为使试验结果更好的与实际条件相关联, 外界条件或养护温度的变化对掺加掺合料混凝土离子透过性的影响仍需开展更多的研究。

### 3 结论

矿渣掺量为 20% 和 30% 时, 对养护 28 d 混凝土的强度发展有积极促进作用, 但掺量为 40% 时反而降低了混凝土强度。

掺加 20% 和 30% 矿渣、5% 和 10% 硅灰的混凝土的氯离子透过性低于基准混凝土, 但掺加 40% 矿渣后增大了混凝土的氯离子透过数量。

最大荷载为 40% 与  $80\% f'_c$  的 5 次重复荷载增大了混凝土的氯离子透过数量, 掺加 5% 硅灰的混凝土与掺加 20% 矿渣的混凝土抗氯离子渗透性相当。

## 参考文献

- 1 Buenfeld N R, Glass G K, Hassanein A M, et al. Chloride transport in concrete subjected to electric field. *ASCE J Mater Civil Eng*, 1998, 10(4): 220–228
- 2 Glass G K, Buenfeld N R. Chloride-induced corrosion of steel in concrete. *Prog Struct Eng Mat*, 2001, 2(4): 448–458
- 3 Jaffer S J, Hansson C M. Chloride-induced corrosion products of steel in cracked-concrete subjected to different loading conditions. *Cem Concr Res*, 2009, 39(2): 116–125
- 4 Poupard O, Aït-Mokhtar A, Dumargue P. Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy. *Cem Concr Res*, 2004, 34(6): 991–1000
- 5 Lin G, Liu Y, Xiang Z. Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments. *Cem Concr Compos*, 2010, 32(8): 571–579
- 6 Berke N S, Pfeifer D W, Weil T G. Protection against chloride-induced corrosion. *Concr Int: Design Constr*, 1988, 10(12): 45–55
- 7 Song H W, Shim H B, Petcherdchoo A, et al. Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method. *Cem Concr Compos*, 2009, 31(2): 120–127
- 8 Chandra S. *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*. Westwood, New Jersey: Noyes Publications, 1996
- 9 Ramachandran V S. *Concrete Admixtures Handbook—Properties, Science, and Technology*. 2nd ed. Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1995
- 10 Shi C J, Qian J S. High performance cementing materials from industrial slags—a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, 9(3): 195–207
- 11 Güneyisi E, Gesoḡlu M. A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag. *Mater Struct*, 2008, 41(3): 479–93
- 12 Cohen M D, Bentur A. Durability of Portland cement silica fume pastes in magnesium sulfate attack and sodium sulfate solution. *ACI Mater J*, 1988, 85(3): 148–157
- 13 Chung D D L. Review: Improving cement-based materials by using silica fume. *J Mater Sci*, 2002, 37(4): 673–682
- 14 Dotto J M R, de Abreu A G, Dal Molin D C C, et al. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. *Cem Concr Compos*, 2004, 26(1): 31–39
- 15 Shekarchi M, Rafiee A, Layssi H. Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. *Cem Concr Compos*, 2009, 31(10): 769–775
- 16 Ozyildirim C, Halstead W. Resistance to chloride ion penetration of concrete containing fly ash, silica fume, or slag. *Permeability Concr ACI SP*, 1988, 108(3): 35–61
- 17 Fukute T, Hamada H, Mashimo M, et al. Chloride permeability of high strength concrete containing various mineral admixtures. In: Larrard F, Lacroix R, eds. *The 4th International Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete Proceedings*. Paris, France, 1996. 489–498
- 18 Geiseler J, Kollo H, Lang E. Influence of blast furnace cements on durability of concrete structures. *ACI Mater J*, 1995, 92(3): 252–257
- 19 Detwiler R J, Fapohunda C A, Natale J. Use of supplementary cementing materials to increase the resistance to chloride ion penetration of concrete cured at elevated temperatures. *ACI Mater J*, 1994, 91(1): 63–66
- 20 Yeau K Y, Kim E K. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. *Cem Concr Res*, 2005, 35(7): 1391–1399
- 21 Vejmelková E, Pavlíová M, Keršner Z, et al. High performance concrete containing lower slag amount: A complex view of mechanical and durability properties. *Constr Build Mater*, 2009, 23(6): 2237–2245
- 22 Gesoḡlu M, Güneyisi E. Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume. *Mater Struct*, 2007, 40(9): 953–964
- 23 Toutanji H, McNeil S, Bayasi Z. Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. *Cem Concr Res*, 1998, 28(7): 961–968
- 24 Bentz D P. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials: II. Multi-scale modeling of concrete diffusivity. *Cem Concr Res*, 2000, 30(7): 1121–1129
- 25 Saito M, Ishimori H. Chloride permeability of concrete under static and repeated compressive loading. *Cem Concr Res*, 1995, 25(4): 803–808
- 26 Samaha H R, Hover K C. Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete. *ACI Mater J*, 1992, 89(4): 416–424
- 27 Cao Q W, Wan X M, Zhao T J, et al. Effect of mechanical loading on chloride penetration into concrete. In: Jin W L, Ueda T, Basheer P A M, eds. Hangzhou: Zhejiang Univ Press, 2008
- 28 Parant E, Pierre R, Maou F L. Durability of a multiscale fibre reinforced cement composite in aggressive environment under service load. *Cem Concr Res*, 2007, 37(7): 1106–1114
- 29 Sun W, Mu R, Luo X, et al. Effect of chloride salt, freeze-thaw cycling and externally applied load on the performance of the concrete. *Cem Concr Res*, 2002, 32(12): 1859–1864
- 30 Yoon S, Wang K, Weiss W, et al. Interaction between loading, corrosion, and serviceability of reinforced concrete. *ACI Mater J*, 2000, 97 (6): 637–644
- 31 Khatri R P, Sirivivatnanon V. Characteristic service life for concrete exposed to marine environments. *Cem Concr Res*, 2004, 34(4): 745–752

- 32 Friedmann H, Amiri O, Ait-Mokhtar A, et al. A direct method for determining chloride diffusion coefficient by using migration test. *Cem Concr Res*, 2004, 34(11): 1967–1973
- 33 Kermani A. Permeability of stressed concrete. *Build Res Inf*, 1991, 19(6): 360–366
- 34 Choinska M, Khelidj A, Chatzigeorgiou G, et al. Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete. *Cem Concr Res*, 2007, 37(1): 79–88
- 35 Hearn N. Effect of shrinkage and load-induced cracking on water permeability of concrete. *ACI Mater J*, 1999, 96(2): 234–241
- 36 Uchikawa H, Hanehara S, Hirao H. Influence of microstructural change under stress on the strength-related properties of hardened cement mortar and paste. *Adv Cem Mater*, 1997, 6(3-4): 87–98
- 37 Kosmatka S H, Kerkhoff B, Panarese W C. *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th ed. Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 2003. 180–185
- 38 Japan Society of Civil Engineers Standard. *Test Method for Effective Diffusion Coefficient of Chloride Ion in Concrete by Migration*. JSCE-G571: 2003, Japan
- 39 Hisada M, Nagataki S, Otsuki N. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of chloride ion migration through mortar. *Cem Concr Compos*, 1999, 21(5-6): 443–448
- 40 Prince W, Gagn R. The effects of types of solutions used in accelerated chloride migration tests for concrete. *Cem Concr Res*, 2001, 31(5): 775–780
- 41 McGrath P F, Hooton R D. Influence of voltage on chloride diffusion coefficients from chloride migration tests. *Cem Concr Res*, 1996, 26(8): 1239–1244
- 42 Douglas E, Wilson H, Malhorta M. Production and evaluation of a new source of granulated blast furnace slag. *Cem Concr Aggr*, 1988, 10(2): 75–87
- 43 Jiang J F. The summarization of slag powder used in cement and concrete. *Concr Cem Prod*, 2002, 125(3): 3–6
- 44 Jau W C, Tsay D S. A study of the basic engineering properties of slag cement concrete and its resistance to seawater corrosion. *Cem Concr Res*, 1998, 28(10): 1363–1371
- 45 Feldman R F, Huang C Y. Properties of portland cement-silica fume pastes II Mechanical properties. *Cem Concr Res*, 1985, 15(6): 943–952
- 46 Rao G A. Development of strength with age of mortars containing silica fume. *Cem Concr Res*, 2001, 31(8): 1141–1146
- 47 Hamad B, Machaka M. Effect of transverse reinforcement on bond strength of reinforcing bars in silica fume concrete. *Mater Struct*, 1999, 32(6): 468–476
- 48 Detwiler R J, Mehta K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete. *ACI Mater J*, 1989, 86(6): 609–614
- 49 Basheer P A M, Gilleece P R, Long A E, et al. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. *Cem Concr Compos*, 2002, 24(5): 437–449
- 50 Boháč M, Gregerová M. The influence of blast-furnace slag hydration products on microcracking of concrete. *Mater Charact*, 2009, 60(7): 729–734
- 51 Song H W, Saraswathy V. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag-An overview. *J Hazard Mater*, 2006, 138(2): 226–233
- 52 Leng F G, Feng N Q, Lu X Y. An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cem Concr Res*, 2000, 30(6): 989–992
- 53 Luo R, Cai Y B, Wang C Y, et al. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. *Cem Concr Res*, 2003, 33(1): 1–7
- 54 Dhir R K, El-Mohr M A K, Dyer T D. Chloride binding in GGBS concrete. *Cem Concr Res*, 1996, 26(12): 1767–1773
- 55 Dehghanian C, Arjmandi M. Influence of slag blended cement concrete on chloride diffusion rate. *Cem Concr Res*, 1997, 27(6): 937–945
- 56 Bentz D P, Stutzman P E. Evolution of porosity and calcium hydroxide in laboratory concretes containing silica fume. *Cem Concr Res*, 1994, 24(6): 1044–1050
- 57 Mazloom M, Ramezanianpour A A, Brooks J J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cem Concr Compos*, 2004, 26(4): 347–357
- 58 Song H W, Jang J C, Saraswathy V, et al. An estimation of the diffusivity of silica fume concrete. *Building Environ*, 2007, 42(3): 1358–1367
- 59 Bentz D P, Jensen O M, Coats A M, et al. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials: I Experimental and computer modeling studies on cement pastes. *Cem Concr Res*, 2000, 30(6): 953–962
- 60 Hooton R D. Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *ACI Mater J*, 1993, 90(2): 143–151
- 61 Song H W, Pack S W, Nam S H, et al. Estimation of the permeability of silica fume cement concrete. *Constr Build Mater*, 2010, 24(3): 315–321