シリカフュームコンクリートの塩化物イオン拡散性状および固定化特性

川原真一^{*1} 嶋毅^{*2} 須田裕哉^{*1} 佐伯竜彦^{*3}^{*1} 新潟大学 大学院自然科学研究科環境科学専攻(〒950-2180 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)^{*2} 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所(〒274-8601 千葉県船橋市豊富町 585)^{*3} 新潟大学 工学部建設学科(〒950-2180 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

要旨：シリカフュームの混和による塩化物イオン実効拡散係数低下のメカニズムを明らかにすることを目的として研究を行った。塩化物イオン実効拡散係数は、直径 10nm 以上の空隙量の影響が支配的であり、シリカフュームの混和による塩化物イオン実効拡散係数の低下は、直径 10nm 以上の空隙量の減少によるものであることが分かった。また、塩分浸透抵抗性を総合的に評価するために、シリカフュームの混和による固定塩化物量の変化についても検討を行った。シリカフュームの混和により固定塩化物量の上限が小さくなったが、鋼材腐食発生限界濃度における固定塩化物量は、シリカフュームの混和の有無にかかわらず同程度であった。

キーワード：シリカフューム、塩化物イオン実効拡散係数、酸素拡散係数、固定塩化物

1. はじめに

コンクリートの品質を向上させる産業副産物のひとつとして、シリカフュームがある。シリカフュームを用いたコンクリートは、ポズラン反応やマイクロファイラー効果により空隙構造が緻密化され、高強度コンクリートが容易に製造できる。我が国においては、主としてコンクリートの施工性改善と高強度化を目的としてシリカフュームが利用されている。一方で、シリカフュームは耐久性の向上にも効果があるとされているが、詳細な検討は不十分である。そこで著者らは、前報において¹⁾、耐久性の中でも塩分浸透抵抗性に着目し、電気泳動法により拡散係数を測定して検討を行った。Fig. 1 に、シリカフューム置換率と塩化物イオン実効拡散係数との関係を示す。シリカフュームを混和することで、塩化物イオン実効拡散係数が大きく低下し、シリカフューム無混和で水結合材比 35 %のコンクリートと、シリカフューム置換率 4 %で水結合材比 45 %のコンクリートの塩化物イオン実効拡散係数が同程度となった。

この結果を受け本研究では、シリカフュームを混和することでコンクリートの塩化物イオン実効拡散係数が小さくなるメカニズムを明らかにすることを目的とした。コンクリート中の塩化物イオンの拡散は、空隙構造の影

響や、細孔壁との電気的な相互作用の影響を受けると考えられる。塩化物イオン実効拡散係数における空隙構造の影響を調べるために、空隙構造のみの影響を受けて拡散する酸素拡散係数との関係について検討を行った。さらに、塩化物イオンの拡散に影響を与える空隙径を調べるために、空隙径分布を測定し検討を行った。

また、塩化物イオンの浸透において、塩化物イオンの一部はセメント水和物に固定化される。この影響を考慮

Fig. 1 Relationship between silica fume replacement and effective diffusion coefficient of chloride ion¹⁾

Table 1 Chemical composition of silica fume (%)

Type of SF	SiO ₂	H ₂ O	LOI 950	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
A	96.50	0.40	0.81	0.13	0.46	0.18	0.37	0.22	0.86	0.05
B	89.32	0.88	1.83	0.95	0.30	0.69	<1.6	0.85	3.02	0.12

するために、シリカフェュームの混和による固定塩化物量の変化についても検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、固定塩化物量、水和生成物の測定についてはセメントペースト供試体を、酸素拡散係数、空隙径分布の測定についてはコンクリート供試体を用いた。

2.1 使用材料

セメントは市販の普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³、ブレン値: 3350cm²/g)を用いた。細骨材および粗骨材は、それぞれ陸砂(表乾密度: 2.57g/cm³)および碎石(表乾密度: 2.84g/cm³)を用いた。混和剤としては、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤およびポリアルキレングリコール誘導体系の消泡剤を使用した。混和材としては、シリカフェュームを使用した。Table 1 に、シリカフェュームの化学分析結果を示す。シリカフェュームは、JIS A 6207 2006 を満足するもの(以下、シリカフェューム A)(密度: 2.20g/cm³、BET: 18m²/g)と塩化物イオンのみ JIS 規格を満足しないもの(以下、シリカフェューム B)(密度: 2.20g/cm³、BET: 18m²/g)の 2 種類を使用した。なお、シリカフェューム B の塩化物イオンは、0.12 %であった。

2.2 配合

セメントペーストの配合は、Table 2 に示す通りである。

Table 3 に、コンクリートの配合を示す。各配合とも単位水量を一定とし、細骨材率については、良好なワーカビリティが得られるよう水結合材比ごとに適宜変更した。目標スランプおよび目標空気量は、それぞれ 18cm および 4.5 %とし、それぞれ 18.0±1.0cm および 4.5±0.5 %の値が得られるように混和剤添加率を適宜調整した。

2.3 実験方法

(1) 酸素拡散係数の測定

試験は、JCI-DD5「酸素の拡散係数試験方法(案)」に準拠して行った。供試体は、28 日間標準養生を行ったφ10×20cm のコンクリートを、コンクリートカッターを用いて厚さ約 5cm に切断し、温度 50℃で恒量となるまで乾燥させたものを用いた。ガス流量は、窒素ガス、

酸素ガスともに 130cm³/min とした。酸素拡散係数は、白川ら²⁾の式[1]により算出した。

$$D_e = \frac{R_N \cdot (C_N - C_b) \cdot (L + \delta_N + \delta_O)}{\left\{ 1 - \frac{R_N}{R_O} \cdot \left[\frac{M_O}{M_N} \right]^{1/2} \cdot (C_N - C_b) - C_N \right\} \cdot A_c} \quad [1]$$

ここに、 D_e : 酸素拡散係数(cm²/year)

C_N : 窒素ガス中の酸素濃度(%)

C_b : 窒素ガスボンベ中の酸素濃度(%)

R_N , R_O : 窒素および酸素のガス流量
(cm³/year)

M_N , M_O : 窒素および酸素分子量(g/mol)

L : 供試体の厚さ(cm)

A_c : 供試体の断面積(cm²)

δ_N , δ_O : 窒素ガス側および酸素ガス側の
境界膜の厚さ

本実験条件では 2.1mm とした。

(2) 空隙率および空隙径分布の測定

試料は、28 日間標準養生を行ったコンクリートのモルタル部分を用いた。硬化体を 1cm 角程度に粗砕し、3g 程度の試料を、イオン交換水で真空飽和処理を行った後、表面乾燥質量および水中質量を測定した。その後、温度 50℃で恒量となるまで乾燥させ、50℃乾燥質量を用い、アルキメデス法により 50℃乾燥空隙率を算出した。

Table 2 Mixture proportion of cement pastes

	W/B	SF/B	Unit Content (kg/m ³)			Type of SF
	(%)	(%)	W	C	SF	
35-0	35	0	525	1500	—	—
45-0	45	0	587	1305	—	—
45-4A		4	583	1244	52	A
45-4B			583	1244	52	B
45-8A		8	579	1183	103	A

Table 3 Mixture proportion of concretes

	W/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	Unit Content (kg/m ³)					SP (%)	DA (%)	Slump (cm)	Air (%)	Type of SF
				W	C	SF	S	G					
35-0	35	0	39	175	500	—	623	1077	0.80	0.0010	19.0	4.9	—
35-4		4	39	175	480	20	620	1072	0.75	0.0015	18.0	5.0	A
40-0	40	0	40	175	438	—	660	1093	0.80	0.0005	19.0	4.8	—
40-4		4	40	175	420	18	657	1089	0.75	0.0015	19.0	4.5	A
45-0	45	0	41	175	389	—	692	1101	0.75	0.0010	18.5	4.7	—
45-4		4	41	175	373	16	690	1097	0.75	0.0045	19.0	4.9	A
45-8		8	41	175	358	31	688	1094	0.85	0.0035	18.0	4.3	A

Fig. 2 Relationship between silica fume replacement and effective diffusion coefficient of oxygen

空隙径分布は、水銀圧入ポロシメータにより測定を行った。試料は、コンクリートのモルタル部分を5mm角程度に粗砕し、アセトンにより水和停止処理を行った後、シリカゲルを入れたデシケータにおいて恒量となるまで乾燥させたものを用いた。空隙径分布の測定範囲は、直径6nm~200μmとした。

(3) 自由塩化物イオン量および固定塩化物量の測定

試験は、石田ら³⁾の方法を参考に行った。測定には、7日間もしくは28日間水中養生を行ったφ5×10cmのセメントペーストを用いた。初期養生終了後、供試体をφ5×1cmに切断し、塩化物イオンの浸透を促進するために3日間真空デシケータにおいて乾燥させた。その後、塩水に14日間浸漬した。塩水のNaCl濃度は0.5、1、3.5、10%とした。浸漬終了後、高圧抽出法により抽出した細孔溶液を1/200mol/L硝酸銀溶液で電位差滴定することで、自由塩化物イオン量を測定した。固定塩化物量は、全塩化物量をJCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(案)」により求め、全塩化物量から自由塩化物イオン量を差し引くことで算出した。

(4) 水和生成物の測定

7日間もしくは28日間密封養生を行ったセメントペーストをアセトン浸漬により水和停止処理を行い、デシケータ内で20℃、R.H.11%の環境下において恒量となるまで乾燥させた。その後、90μm以下に粉碎し、水和物分析試料とした。シリカフュームを用いていない硬化体においては、相組成から物質収支によりC-S-H生成量およびCa/Siモル比(以下C/S比)の算出を行った。シリカフュームを用いた硬化体のC-S-H生成量は、重液分離後、サリチル酸・メタノール抽出を行い定量した。C/S比は、サリチル酸・メタノール抽出溶液中のCa量、Si量をそれぞれキレート滴定、分光光度計により測定し、計算により求めた⁴⁾。結合水量および水酸化カルシウム量は、熱重量分析により定量した。モノサルフェートは、粉末X線回折/Rietveld解析により定量した。非晶質を定量するために、内部標準物質としてコランダムを内

Fig. 3 Relationship between effective diffusion coefficient of oxygen and effective diffusion coefficient of chloride ion

割りで10%加え、測定を行った。未反応シリカフューム量は、抽出液に塩酸および炭酸ナトリウムを用いた選択溶解法により定量した⁵⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 シリカフュームの混和による塩化物イオン実効拡散係数低下のメカニズム

Fig. 2に、シリカフューム置換率と酸素拡散係数との関係を示す。すべての水結合材比において、シリカフュームを混和することで酸素拡散係数が小さくなり、シリカフューム置換率4%で水結合材比45%の配合の酸素拡散係数がシリカフューム無混和で水結合材比35%のものと同程度まで低下するなど塩化物イオン実効拡散係数と同様の傾向がみられた。そこで、酸素拡散係数と塩化物イオン実効拡散係数との関係について検討を行った。

Fig. 3に酸素拡散係数と塩化物イオン実効拡散係数との関係を示す。ややばらつきがあるもののほぼ直線関係といえる。塩化物イオンの拡散は空隙構造の影響のみならず、細孔壁との電気的な相互作用の影響を受ける。一方、酸素の拡散は、空隙構造のみの影響を受けると考えられる。両者の関係が直線関係となったことから、細孔壁による電気的な影響は線形的であるといえる結果となった。つまり、酸素拡散係数を定数倍することで、塩化物イオン実効拡散係数を評価することができると考えられる。

そこで、電気的な影響がほとんどないと考えられる酸素拡散係数と空隙構造との関係について検討を行った。Fig. 4に、50℃乾燥空隙率と酸素拡散係数との関係を示す。50℃乾燥空隙率が同程度でも、シリカフュームを混和した配合の方が、酸素拡散係数が小さくなる結果となった。50℃乾燥空隙率では、酸素拡散係数を一律に評価できないことが分かった。そこで、酸素拡散係数が同程度となった35-0と45-4のいくつかの空隙径ごとの空隙率に着目して検討を行った。Fig. 5に各配合の

Fig. 4 Relationship between porosity (50 °C dry) and effective diffusion coefficient of oxygen

Fig. 5 Porosity (diameter $\geq 10\text{nm}$) and porosity (50 °C dry)

Fig. 6 Relationship between porosity (diameter $\geq 10\text{nm}$) and effective diffusion coefficient of oxygen

Fig. 7 Relationship between porosity (diameter $\geq 10\text{nm}$) and effective diffusion coefficient of chloride ion

50 °C 乾燥空隙率と直径 10nm 以上の空隙率を示す。直径 10nm 以上の空隙率で比較すると、35-0 と 45-4 が同程度であった。そこで、10nm 以上の空隙率と酸素拡散係数との関係について検討を行った。Fig. 6 に直径 10nm 以上の空隙率と酸素拡散係数との関係を示す。図より、両者の間には相関がみられ、すべての水結合材比においてシリカフュームを混和することで直径 10nm 以上の空隙率が減少し、それに伴い酸素拡散係数が指数関数的に低下していることが分かる。大きな空隙が多いほど、空隙の連結性が高くなり、屈曲度が高くなることが考えられるため、この結果は妥当であるといえる。

塩化物イオン実効拡散係数と酸素拡散係数との間に相関がみられたことから、酸素拡散係数と同様に、塩化物イオン実効拡散係数と直径 10nm 以上の空隙率との関係についても検討を行った。Fig. 7 に直径 10nm 以上の空隙率と塩化物イオン実効拡散係数との関係を示す。図より、直径 10nm 以上の空隙率の減少に伴い塩化物イオン実効拡散係数が小さくなっていることが分かる。以上のことから、電気泳動法により求めた塩化物イオン実

効拡散においては、直径 10nm 以上の空隙率の影響が支配的であると考えられる。また、シリカフュームの混和による塩化物イオン実効拡散係数の低下は、直径 10nm 以上の空隙率の減少によるものと考えられる。

3.2 シリカフュームの混和が固定塩化物量に及ぼす影響

Fig. 8 に、本研究で得られた自由塩化物イオンと固定塩化物の平衡関係を示す。両者の平衡関係は、Langmuir 型吸着式[2]により回帰した。Table 4 に、各配合における式[2]中の α 、 β を示す。

$$C_b = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f} \quad [2]$$

ここに、 C_b ：固定塩化物量(wt% of binder)

C_f ：自由塩化物イオン量
(wt% of binder)

α 、 β ：定数

Fig. 8 Relationship between amount of free chloride ion and amount of bound chloride (Curing period : 28days)

Fig. 9 Relationship between silica fume replacement and maximum amount of bound chloride (Curing period : 28days)

Langmuir 型吸着式において、自由塩化物イオン量を無限大としたときの固定塩化物量は α/β である。即ち、 α/β は、固定塩化物量の上限値と見なすことができる。Fig. 9 に、シリカフューム置換率と固定塩化物量の上限値との関係を示す。なお、コンクリートにおける固定塩化物量を比較するために、単位コンクリート容積当たりの固定塩化物量に換算した。図より、シリカフューム置換率が大きいほど固定塩化物量の上限値が小さくなっていることが分かる。また、塩化物イオン実効拡散係数が同程度となった 35-0 と 45-4A の固定塩化物量の上限値は、45-4A のほうがわずかに小さくなる結果となった。一方、実際の構造物において問題となるのは、鋼材腐食が発生する濃度域である。そのため、鋼材腐食が発生する濃度域における固定塩化物量についても検討を行った。鋼材腐食発生限界濃度は、単位セメント量やセメント種類によって異なると考えられる。しかし、単位セメント量やセメント種類ごとの鋼材腐食発生限界濃度は明確になっていない。そこで、コンクリート標準示方書⁶⁾を参考に鋼材腐食発生限界濃度を一律 1.2kg/m^3 (全塩化物量) とし、式[2]を用いて固定塩化物量を算出した。

Table 4 α , β and α/β

No.	Curing period (days)	α	β	α/β
35-0	7	14.5	9.0	1.6
	28	8.0	3.4	2.3
45-0	7	13.3	4.5	2.9
	28	11.3	3.7	3.1
45-4A	7	11.1	4.0	2.8
	28	7.7	2.9	2.7
45-4B	7	8.1	2.6	3.1
	28	7.3	2.5	2.9
45-8A	7	10.0	3.9	2.6
	28	6.2	3.0	2.1

Fig. 10 Relationship between silica fume replacement and amount of bound chloride (Curing period : 28days)

Fig. 10 にシリカフューム置換率と鋼材腐食発生限界濃度における固定塩化物量との関係を示す。水結合材比、シリカフューム置換率にかかわらず固定塩化物量が同程度となった。

シリカフュームを混和することにより、塩化物イオン実効拡散係数が半分程度になったのに対して、固定塩化物量の減少が多くても 3 割程度であることから、シリカフュームの混和により、全体として塩分浸透抵抗性は向上すると考えられる。

シリカフュームを混和することで、固定塩化物量の上限が低下した原因を明らかにするために、更なる検討を行った。丸屋ら⁷⁾の報告によれば、固定塩化物は、フリーデル氏塩のような化学吸着により吸着された塩化物、即ち「固相塩化物」と、物理吸着により吸着されている「吸着塩化物イオン」に分類される。モノサルフェートからフリーデル氏塩が生成されるとき、モノサルフェート 1mol あたり 2mol の塩化物イオンが固定される⁸⁾。固定塩化物が上限値に達したとき、塩水浸漬前のモノサルフェートがすべてフリーデル氏塩に変化すると仮定し、固定された 2mol の塩化物イオンを固相塩化物量とした。

Fig. 11 Each amount of adsorbed chloride ion and Friedel's salt in amount of bound chloride (Curing period : 28 days)

Fig. 12 Relationship between Ca/Si ratio and specific surface area of C-S-H⁽¹⁰⁾

Fig. 13 Relationship between Ca/Si ratio and Amount of adsorbed chloride ion per unit mass of C-S-H

Fig. 14 Relationship between Ca/Si ratio and amount of adsorbed chloride ion per unit surface area of C-S-H

吸着塩化物イオン量は、固定塩化物量の上限值から固相塩化物量を差し引いたものとした。Fig. 11 に、各配合の固相塩化物量と吸着塩化物イオン量を示す。固定塩化物量において吸着塩化物イオン量が大半を占める結果となった。吸着塩化物イオンは、おもに C-S-H の層間に吸着すると考えられている⁹⁾。そこで、C-S-H の物性と吸着塩化物イオン量との関係について検討を行った。C-S-H の物性は、CaO/SiO₂ モル比(以下 C/S 比)と高い相関があるので、C/S 比に着目し検討を行った。

Fig. 12 に、C/S 比と C-S-H の比表面積との関係を示す。C-S-H の比表面積は、C/S 比が低下することで、増大する傾向がみられ、両者の関係は、式[3]の回帰式によって近似される¹⁰⁾。

$$S_{C-S-H} = 732 - 284 \cdot (C/S) \quad [3]$$

ここに、 S_{C-S-H} : C-S-H の比表面積(m²/g)

吸着塩化物イオンは、C-S-H の表面に物理吸着されているため、C-S-H の比表面積が大きいほど、つまり

C/S 比が小さいほど、吸着塩化物イオン量が増加することが考えられる。Fig. 13 に、C/S 比と吸着塩化物イオン量との関係を示す。C/S 比が小さいほど吸着塩化物イオン量が大きくなる傾向は認められなかった。そこで、C/S 比と C-S-H の単位表面積あたりの吸着塩化物イオン量との関係について検討を行った。Fig. 14 に C/S 比と C-S-H の単位表面積あたりの吸着塩化物イオン量との関係を示す。図より、C/S 比が低下することで C-S-H の単位表面積あたりの吸着塩化物イオン量が減少していることが分かる。C/S 比の低下により、C-S-H のゼータ電位が低下することが報告されている¹¹⁾。ゼータ電位が高いほど、陰イオンである塩化物イオンは吸着されやすくなるため、この結果は妥当であるといえる。

以上のことから、シリカフュームを混和した配合の固定塩化物量の上限値が、シリカフューム無混和の配合と比べて小さくなったのは、シリカフュームの混和による C-S-H のゼータ電位の低下が主な原因であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、シリカフュームの混和による塩化物イオン実効拡散係数低下のメカニズムを明らかにすることを目的として検討を行った。また、塩分浸透抵抗性を総合的に評価するために、シリカフュームの混和による固定塩化物量の変化についても検討を行った。その結果、以下に示す知見を得た。

- (1) 塩化物イオン実効拡散係数と酸素拡散係数との間に直線関係があったことから、塩化物イオン実効拡散係数は、酸素拡散係数を定数倍することで評価できることが分かった。また、塩化物イオン実効拡散係数は、直径 10nm 以上の空隙量の影響が支配的であり、シリカフュームの混和による塩化物イオン実効拡散係数の低下は、直径 10nm 以上の空隙量の減少によるものと考えられる。
- (2) シリカフューム置換率が大きいほど、固定塩化物量の上限值が小さくなる傾向を示した。
- (3) 鋼材腐食発生限界濃度における固定塩化物量は、シリカフューム置換率にかかわらず同程度となった。一方、塩化物イオン実効拡散係数は、シリカフュームの混和により大きく低下することから、全体としてシリカフュームの混和により塩分浸透抵抗性は向上すると予想される。

参考文献：

- 1) 嶋毅ほか：シリカフュームコンクリートの塩分浸透抵抗性、セメント・コンクリート論文集、No. 63、pp. 414-420 (2009)
- 2) 白川敏夫ほか：セメントペースト硬化体中の乾燥の程度と気体拡散係数の関係、日本建築学会構造系論文集、No. 524、pp. 7-12 (1999)
- 3) 石田哲也、宮原茂禎、丸屋剛：ポルトランドセメントおよび混和材を使用したモルタルの塩素固定化特性、土木学会論文集 E、Vol. 63、No. 1、pp. 14-26 (2007)
- 4) 鈴木一孝：コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol. 1、No. 2、pp. 39-49 (1990)
- 5) 大沢栄也、坂井悦郎、大門正機：フライアッシュセメント系水和におけるフライアッシュの反応率、セメント・コンクリート論文集、No. 53、pp. 96-101 (1999)
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編] (2007)
- 7) 丸屋剛、Tangtermsirikul, S.、松岡康訓：コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化、土木学会論文集、No. 585、Vol. 38、pp. 79-95 (1998)
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書、pp. 22-25 (2000)
- 9) 平尾宙ほか：セメントによる塩化物イオン固定化挙動、第 58 回セメント技術大会講演要旨、pp. 118-119 (2004)
- 10) 須田裕哉、田中洋介、佐伯竜彦：C-S-H の組成と物理的性質に関する基礎的研究、土木学会論文集(投稿中)
- 11) 藤田智成、杉山大輔、SW. Swanton：放射性廃棄物処分の性能評価に与えるコロイドの影響—セメント水和物からコロイドの発生とその特性評価—、電力中央研究所報告 (2000)

DIFFUSION AND BINDING OF CHLORIDE IONS IN SILICA FUME CONCRETE

Shinichi KAWAHARA^{*1}, Tsuyoshi SHIMA^{*2}, Yuya SUDA^{*1} and Tatsuhiko SAEKI^{*3}

*1 NIIGATA UNIVERSITY, Graduate School of Science and Technology (8050, Ikarashi-2, Niigata-shi, Niigata 950-2181, Japan)

*2 SUMITOMO OSAKA CEMENT CO., LTD, Cement Concrete Research Laboratory (585, Toyotomi-cho, Funabashi-shi, Chiba 274-8601, Japan)

*3 NIIGATA UNIVERSITY, Department of Civil Engineering (8050, Ikarashi-2, Niigata-shi, Niigata 950-2181, Japan)

ABSTRACT : The diffusion coefficients of the chloride ion of silica fume concrete had been measured by electrical migration test. It had been confirmed that silica fume was effective in reduction of diffusion coefficients of chloride ion. The purpose of this study is to clarify this mechanism. The diffusion coefficients of oxygen and pore size distribution were measured and the effect of microstructure was investigated. The relationship between the diffusion coefficients of chloride ion and the diffusion coefficients of oxygen was nearly linear. From this result, it was confirmed that the diffusion coefficients of chloride ion can be estimated by the diffusion coefficients of oxygen. Silica fume was effective in reduction of pore volume which had more than 10nm in diameter. The reduction of diffusion coefficients of chloride ion was caused by reduction of the pore volume. In addition, the amount of bound chloride was measured and the effect of cement replacement ratio of silica fume was investigated. The higher the cement replacement ratio of silica fume tends to lead the lower the maximum amount of bound chloride. This phenomenon can be explained by the zeta potential of C-S-H. On the other hand, the amount of bound chloride, when amount of total chloride was 1.2kg/m^3 , was same regardless of cement replacement ratio of silica fume. Therefore, it was confirmed that silica fume is effective in controlling the salt attack.

KEY WORDS : Silica fume, Effective diffusion coefficient of chloride ion, Effective diffusion coefficient of oxygen, Bound chloride