

論文

[1109] コンクリート表層部の細孔構造と塩素イオン透過性

正会員 ○鳥 居 和 之 (金沢大学土木建設工学科)

正会員 川 村 満 紀 (金沢大学土木建設工学科)

1. まえがき

コンクリートの表層部は、セメントの水和反応が抑制されることにより組織が多孔質になるとともに乾燥・湿潤や凍結融解の繰り返しの影響によりひび割れが生じたりするので、鉄筋腐食の進行に密接に関係する塩素イオン、水分、酸素などの拡散・透過性の問題に関連して、コンクリート表層部の性質の理解とその改善策の確立が重要な課題となっている [1]。コンクリートの表層部は、一般に表面から2~3cm程度までとされており、この部分の性状は内部のコンクリートとは大きく相違することが報告されている [2], [3]。しかし、各種環境下において、実際に環境の影響を強く受けているコンクリートの表層部はどの程度の範囲までであるかについては不明であり、かぶりコンクリートの鉄筋の保護機能との関係よりこの点について明らかにする必要がある。一方、コンクリートの表層部に及ぼす環境作用の影響は、コンクリートの大きさやその形状によっても相違することを考慮すると、実際のコンクリート構造物と対応するような環境の作用を受ける表面積に対して大きな内部容積を持つコンクリート供試体を使用して環境の影響を検討することが望ましい。

本研究は、各種環境条件下に約1年間放置された立方体状のコンクリート供試体より採取したコンクリートコアを使用して、塩素イオン透過性、細孔径分布、強熱減量、中性化深さの各測定およびSEMによる表面組織の観察を実施し、コンクリート表層部の性質に及ぼす配合、養生条件および環境条件の影響について検討したものである。

2. 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメント (OPC、N社製) を使用した。本実験に使用したフライアッシュ (FA)、高炉スラグ微粉末 (BS) およびシリカフェーム (SF) の物理的性質を表-1に示す。細骨材および粗骨材は、川砂 (比重: 2.61、吸水率: 1.3%) および碎石 (比重: 2.69、吸水率: 0.8%、最大寸法: 25mm) である。コンクリートの配合条件は、単位セメント量 (または単位結合材量) を  $300 \text{ kg/m}^3$ 、水・セメント比を 45%、55% および 65% (混和材使用の場合の水・結合材比は 55% とした)、および空気量を  $5 \pm 1\%$  とした。また、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームの重量置換率はそれぞれ 30%、50% および 10% である。コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートの前養生の条件は、水中養生7日後に、気中養生25日継続 (初期水中養生期間7日、略号A) および水中養生28日継

表-1 鉱物質混和材の物理的性質

Fly ash (FA)	Specific gravity: 2.28, Blaine specific surface area: 3960 $\text{cm}^2/\text{g}$
Blastfurnace slag (BS)	Specific gravity: 2.92, Blaine specific surface area: 3700 $\text{cm}^2/\text{g}$
Silica fume (SF)	Specific gravity: 2.33, BET specific surface area: 24.2 $\text{m}^2/\text{g}$ Silica content: 90.4 %

表-2 各種コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	Unit content ( $\text{kg/m}^3$ )			Slump (cm)	Air (%)
			Water	Cement	Admix.		
O P C	45	36	135	300		2.0	4.5
	55	38	165	300		8.5	5.5
	65	40	195	300		18.0	5.7
F A	55	38	165	210	90	15.5	5.5
B S	55	38	165	150	150	12.5	5.2
S F	55	38	165	270	30	2.0	5.6

OPC: Ordinary Portland cement, FA: Fly ash, BS: Blastfurnace slag, SF: Silica fume

続（初期水中養生期間28日、略号W）の2種類とし、前養生28日後引き続き、水中養生継続（略号IW、温度20℃）、屋内暴露（略号ID、温度20℃、湿度60%の乾燥室内に放置）および屋外暴露（略号OD、本学建物屋上に放置、年平均気温14.3℃、年平均湿度73%、1年間の凍結融解日数12日）の3種類の環境下に約1年間放置した。

コンクリート供試体は、図-1に示す24×24×21cmの立方体を各条件につき1個ずつ作製し、環境作用の影響を受ける1面（型枠に接する側面）を除く他の5面はすべてアクリル系塗料で塗装した。供試体中央部より採取した直径10cmのコンクリートコア（表面から5cmまでと5～10cmまでの部分に分割し、前者を表層部、後者を内部とする）を使用して、急速試験法（AASHTO T-277、60Vの一定電圧下で拡散セル中のコンクリートを流れる6時間の電流量（クーロン）を測定する）により塩素イオン透過性を評価した[4]。また、直径5cmのコアを使用して、表面から1cmまでと5～6cmまでの部分から採取したコンクリート試料の強熱減量値（900～1000℃）および細孔径分布（水銀圧入式ポロシメータ使用、乾燥条件：-55℃で48時間の凍結乾燥）を測定するとともに、コンクリート表面部を炭素および白金で蒸着し、表面組織および反応生成物の特徴を調べた。暴露開始時（28日材令）における圧縮強度および塩素イオン透過量を表-3に示す。

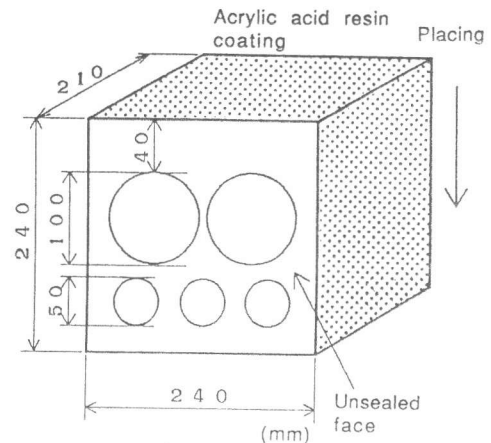


図-1 立方体状供試体におけるコア採取位置

表-3 暴露開始時（28日材令）における圧縮強度および塩素イオン透過量

	Compressive strength (MPa)	Chloride ion permeability (coulombs)	
		0-5 cm	5-10 cm
OPC 45 A	35.3	6170 (H)	7350 (H)
45 W	36.0	4360 (H)	6640 (H)
OPC 55 A	27.7	6610 (H)	9510 (H)
55 W	26.2	6120 (H)	8150 (H)
OPC 65 A	23.9	8440 (H)	9110 (H)
65 W	20.9	8340 (H)	10580 (H)
F A 55 A	20.4	5340 (H)	4300 (H)
55 W	20.0	3580 (M)	3400 (M)
B S 55 A	21.2	3100 (M)	2910 (M)
55 W	24.1	2420 (M)	2820 (M)
S F 55 A	31.3	1320 (L)	1590 (L)
55 W	27.9	1610 (L)	2450 (M)

( ) : Evaluation according to AASHTO T-277 (H:High, M:Moderate, L:Low, VL:Very low)

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 細孔径分布および表面組織の特徴

普通セメントコンクリートの細孔径分布を図-2に示す。普通セメントコンクリートの全細孔量は、水・セメント比に比例して増大するとともに、表面部は内部よりもかなり大きな全細孔量を示すことがわかる。この理由としては、型枠に接する表面部（表面から数mm程度）にはブリージングにより水・セメント比の大きいセメントペースト層が形成されるためである。また、普通セメントコンクリートの細孔構造に及ぼす乾燥の影響は、水・セメント比の大きなものほど顕著となる。すなわち、水・セメント45%では、表面部および内部の全細孔量の差がほとんどなく、早期に緻密な組織が形成され、水分の移動が抑制されるので、乾燥の影響をあまり受けていない。それに対して、水・セメント65%では、表面と内部の細孔量に前養生の影響が表われており、とくに乾燥・湿潤の繰り返しを受ける屋外暴露のものは屋内暴露のものよりも全細孔量の増加および細孔径分布の大きな径への移行が顕著である。実際、屋外養生を行ったコンクリート供試体の表面部には、暴露期間中に0.1mm程度のひびわれが発生しており、このようなひびわれの発生は前養生における初期水中養生期間の短いものほど顕著であった。混和材を使用したコンクリートの細孔径分布を図-3に示す。混和材を使用したコンクリートの細孔構造に及ぼす乾燥の影響は水和反応速度の遅いコンクリートほど顕著である。すなわち、フライア

ッシュおよび高炉スラグ微粉末コンクリートでは、表面部は内部よりも大ききな細孔量を示し、その傾向は初期水中養生期間の短いものほど顕著となるが、強度発現の早いシリカフェームコンクリートでは普通セメントコンクリートの水・セメント45%と同様に表面部と内部との全細孔量の相違が認められない。また、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末コンクリートでは、乾燥による表面部の多孔質化が顕著であり、屋内暴露のものは屋外暴露のものよりも表面部の全細孔量が増大するが、それより内部の細孔構造は環境条件の相違による影響をほとんど受けていないこともわかる。屋外暴露の条件では、暴露期間中に降雨により断続的に水分が供給されるので、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の水和反応が長期にわたって持続されたものと思われる。

コンクリートの表面組織のSEM観察結果を写真-1に示す。普通セメントコンクリートでは、水・セメントが小さいものほど表面部のセメントペースト層の厚みが増大し、乾燥によるひびわれの発生も少なくなる。一方、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末コンクリートでは、乾燥を受けた表面部のフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末は未反応のまま残存し、表面部に大きな空隙が観察される。一方、シリカフェームコンクリートでは、表面部には空隙はなく、均質かつ緻密な組織が形成されている。

### 3. 2 塩素イオン透過性

屋内および屋外暴露供試体の塩素イオン透過量を図-4および5に示す。普通セメントコンクリートでは、水・セメント比の増加に比例して塩素イオン透過量が增大する。屋内暴露供試体の表層部と内部との塩素イオン透過量を比較すると、表層部の塩素イオン透過量は内部よりも小さくなり、両者の差は水・セメント比の大きいものほど、また初期水中養生期間が短いものほど顕著となる。これらの結果は、表面部のセメントペースト層が塩素イオンの浸透を抑制する働きをすること、および屋内暴露条件下においては初期水中養生期間が短くなると表面部の中性化深さが大きくなり（表-4参照）、表面部に形成された炭酸カルシウムの緻密な層が塩素イオンの浸透を抑制することによりもたらされたもので

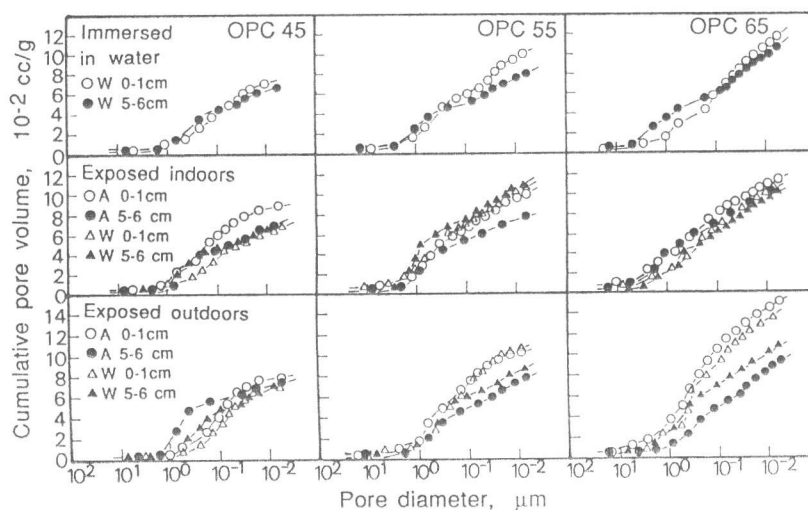


図-2 普通セメントコンクリートの細孔径分布 (暴露期間: 1年)

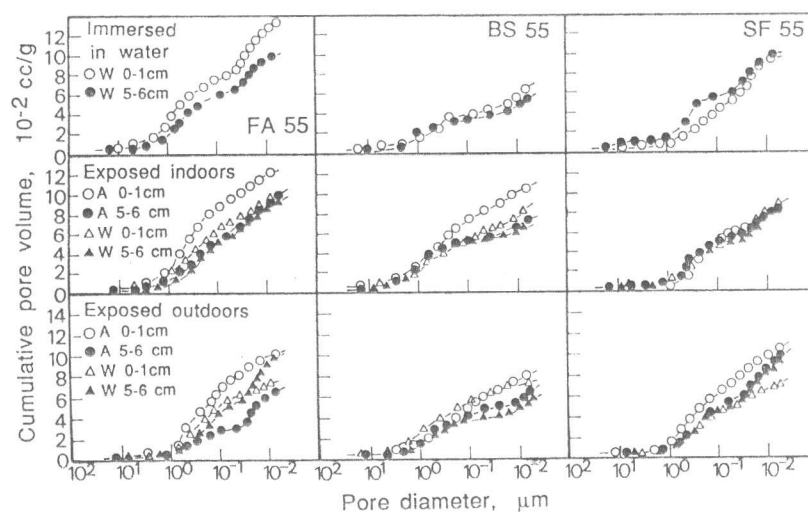


図-3 混和材を使用したコンクリートの細孔径分布 (暴露期間: 1年)

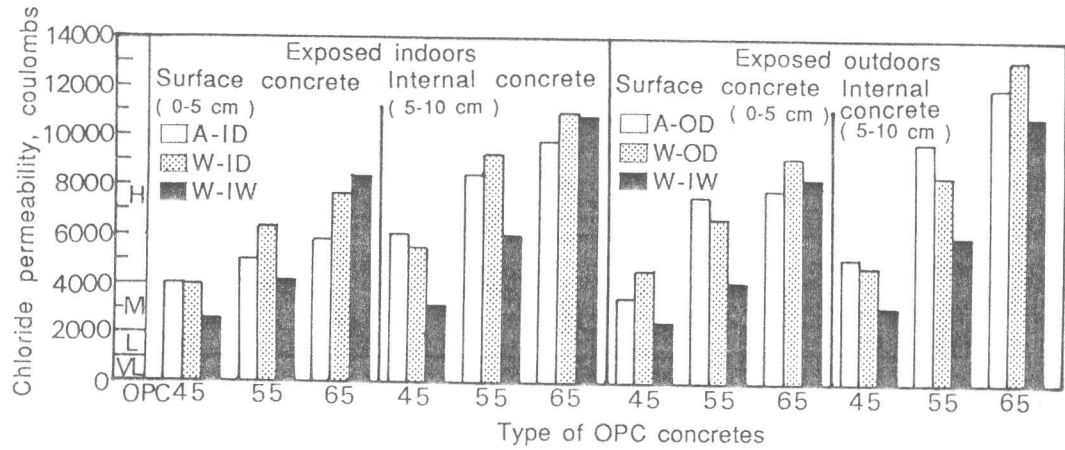


図-4 普通セメントコンクリートの塩素イオン透過性 (暴露期間: 1年)

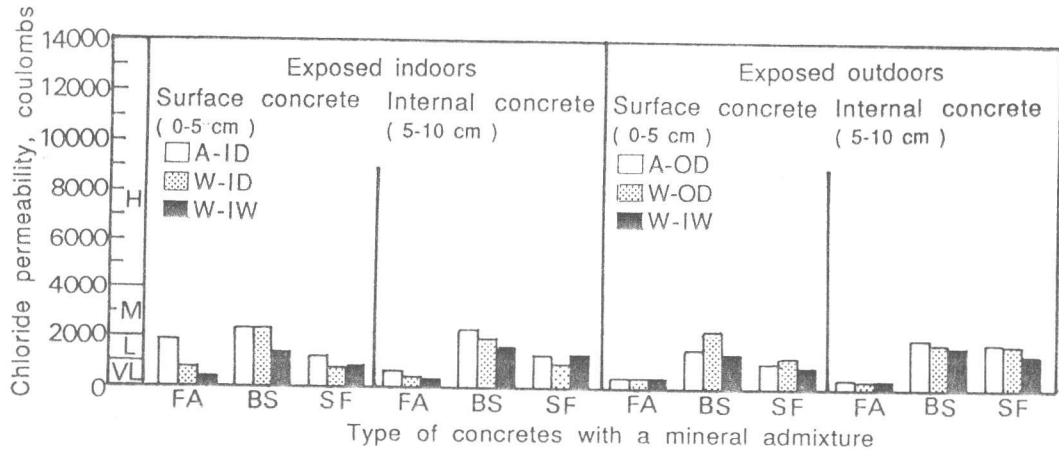


図-5 混和材を使用したコンクリートの塩素イオン透過性 (暴露期間: 1年)

ある。一方、混和材を使用したコンクリートでは、初期水中養生期間が長いものほど塩素イオン透過量が小さくなるとともに、塩素イオン透過量は同一の水・セメント比の普通セメントコンクリートの1/3~1/8程度に大きく減少している。とくに、フライアッシュを使用したコンクリートは、初期水中養生期間が短い時には表層部の方が内部よりも塩素イオン透過量が大きいが、水中養生が長期にわたって継続されると、両者の差は小さくなり、いずれも非常に小さな塩素イオン透過量 (AASHTO T-277 判定基準 Very Low) となる。混和材を使用したコンクリートでは、ポゾラン反応の過程でセメントペースト中の大きな径の毛細管空隙が閉塞する効果とともに、セメントペーストと骨材との界面の多孔質部分が改善されることが塩素イオン透過量の低減に大きく寄与しているものと考えられる [5]。また、屋外暴露供試体では、暴露期間中に水分が供給されるので、前養生の影響が屋内暴露供試体よりも小さくなり、このような傾向は普通セメントコンクリートよりも混和材を使用したコンクリートにより顕著に表われている。しかし、屋外暴露を行った普通セメントコンクリートでは、水・セメント比が大きくなると屋内暴露のものよりも塩素イオン透過量が大きくなり、乾燥・湿潤および凍結融解などの気象作用により発生したひびわれが塩素イオン透過性に影響を及ぼしているのが認められる。

表-4 中性化深さ (暴露期間: 1年)

	Average depth of carbonation (mm)		
	Indoors	Outdoors	In water
OPC 45 A	0	0	---
45 W	0	0	0
OPC 55 A	6.6	0.3	---
55 W	0.6	0.2	0.3
OPC 65 A	5.1	1.0	---
65 W	3.9	1.3	0.3
F A 55 A	7.6	1.4	---
55 W	6.9	1.5	0.4
B S 55 A	11.9	2.4	---
55 W	6.9	1.3	0.5
S F 55 A	6.2	0.8	---
55 W	3.0	0	0.6

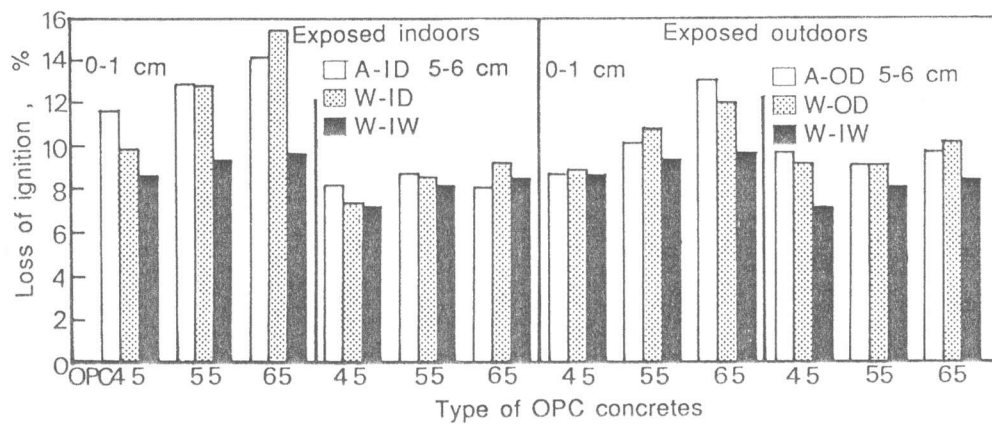


図-6 普通セメントコンクリートの強熱減量値 (暴露期間: 1年)

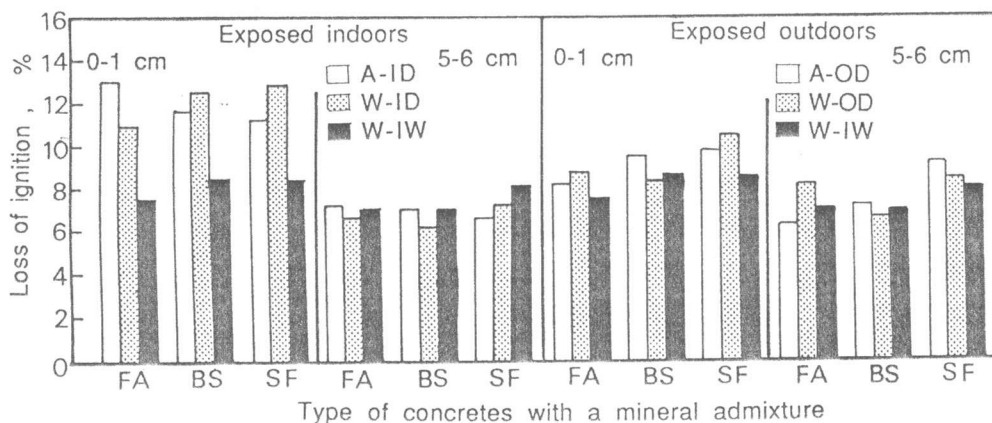


図-7 混和材を使用したコンクリートの強熱減量値 (暴露期間: 1年)

### 3. 3 強熱減量値および水和反応への影響

屋内および屋外暴露供試体の強熱減量値を図-6および7に示す。屋内暴露供試体の表面部では、初期水中養生期間の短いものほど強熱減量値が大きくなり、セメントおよび混和材の水和度よりも炭酸化の程度が測定結果に大きな影響を及ぼしているのがわかる。一方、屋内暴露供試体でも、内部になると屋外暴露供試体と同様に初期水中養生期間による相違がほとんど見られず、乾燥による水和反応の抑制の影響がこの領域まで達していないことがわかる。本実験で使用した比較的大きなコンクリート供試体では、湿度60%の環境下に放置された場合、表面から1~2cmまでの部分は早期から乾燥および炭酸化の影響を受けているようであるが、それより内部は外部環境の湿度との平衡を保つために内部からの水分の移動が徐々に生じることにより、供試体の内部湿度は長期にわたってセメントの水和反応および混和材のポズラン反応を継続するのに必要となる限界値以上(80%程度と推定される)に保持されていることが明らかである。さらに、屋外暴露供試体では、表面部のひびわれ発生が問題となるが、セメントの水和反応および混和材のポズラン反応の抑制は非常に小さいことも確認できる。

### 4. 結論

コンクリートの表面部は、養生および環境条件の相違が敏感に反映される部分であり、早期に乾燥を受けると多孔質な組織が形成されるが、普通セメントコンクリートでは水・セメント比が小さいものほど、混和材を使用したコンクリートではシリカフェームコンクリートのように水和反応速度の速いものほど、養生および環境の影響を受けにくいことが認められた。とくに、乾燥面に対して比較的大きな内部容積をもつコンクリート供試体から得られた本実験の結果より、屋内および屋外暴露の両条件下においてセメントおよび混和材の水和反応の進行に及ぼす乾燥の影響はコンクリートの表面部に限定されて



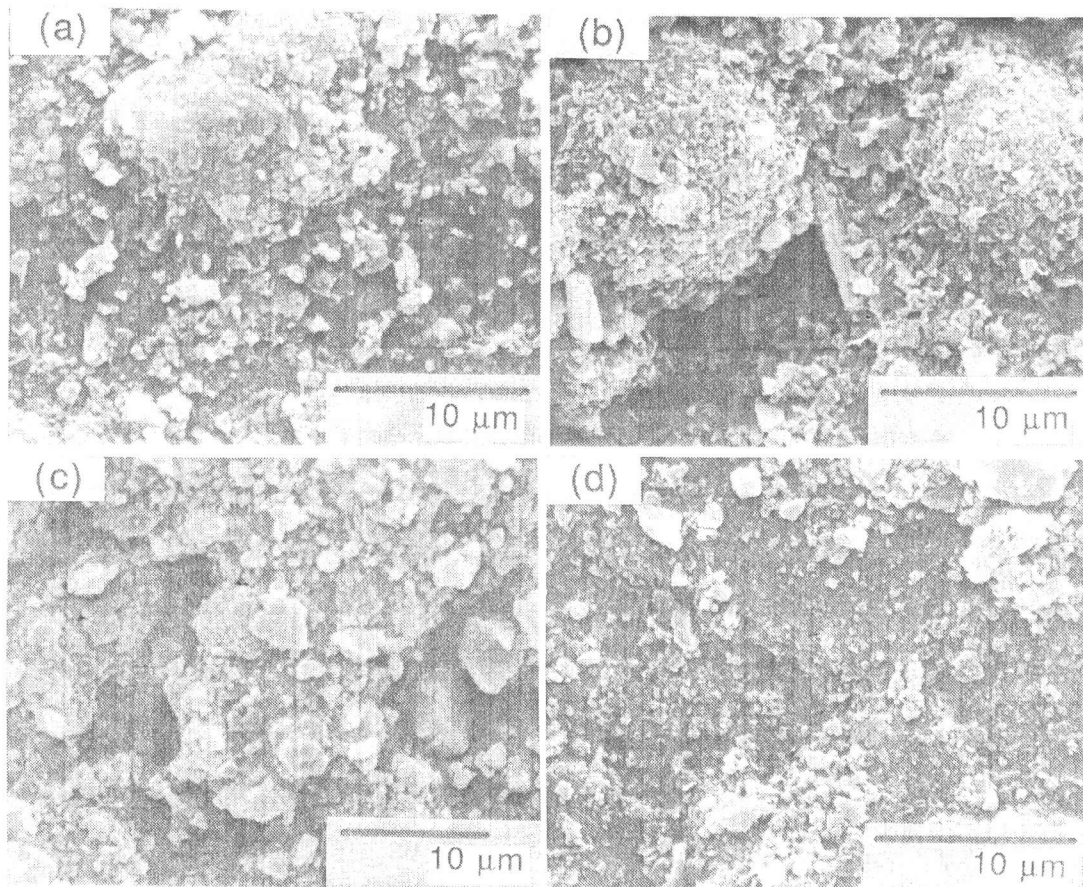


写真-1 屋内暴露1年におけるコンクリートの表面組織のSEM観察結果  
 ( a : OPC55 A-ID, b : FA55 A-ID,  
 c : BS55 A-ID, d : SF55 A-ID )

おり、少なくとも5 cmより内部になると環境および養生の影響をほとんど受けていないことが判明した。さらに、コンクリートの塩素イオン透過性に及ぼす混和材の効果は、屋内および屋外暴露の期間が長期になるとともに顕著となり、混和材を使用することによりコンクリートの表層部および内部の塩素イオン透過性を大きく低減できることが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) Kreijger, P.C.: The Skin of Concrete, Magazin of Concrete Research, Vol.39, No.140, pp.122-123, 1987.
- 2) Kreijger, P.C.: The Skin of Concrete -Composition and Properties-, Materiaux et Constructions, Vol.17, No.100, pp.275-283, 1983.
- 3) Senbetta, E., et al.: A New Approach for Testing Concrete Curing Efficiency, ACI Journal, No.81-12, pp.82-86, 1984.
- 4) Whiting, D.: Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete, Federal Highway Administration, Report No.FHWA/RD-81/119, 1981.
- 5) Kawamura, M. et al.: Chloride Permeability of Concrete Containing a Flyash and a Blastfurnace Slag, Proc. of 1988 MRS Symposium, Vol.137, pp.411-416, 1989.