

自己充てん型高強度高耐久コンクリートの長期海洋曝露試験結果

佐藤 文則・紙田 晋^{*1}・牛島 栄^{*2}

Results of Long Term Marine Exposure Tests on Super Quality Concrete

If there is a catch phrase, please put it.

Fuminori SATO, Susumu KAMITA, Sakae USHIJIMA

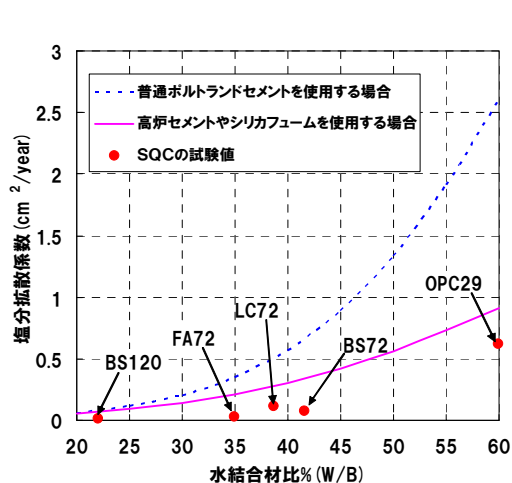


図-1 水結合材比と塩分拡散係数の関係

LC72:低熱ホルト、72N/mm² FA72:フライアッシュセメント、72N/mm²
BS72:高炉セメント、72N/mm² BS120:高炉セメント、120N/mm²
OPC29:普通セメント、29N/mm²

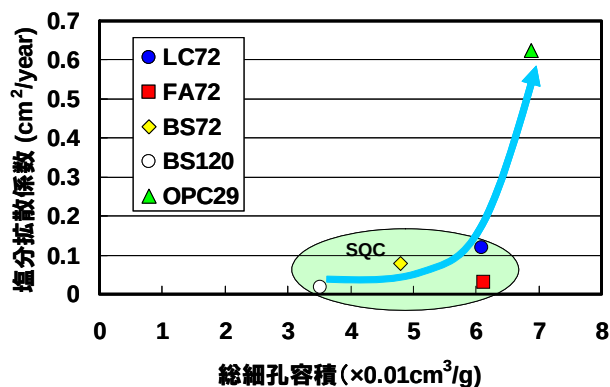


図-2 細孔容積と塩分拡散係数の関係

研究の目的

著者らは、自己充てん型高強度高耐久コンクリート（以下 S.Q.C と称す）を対象として、これまで耐久性に関する数々の試験を行い、各劣化因子に対する抵抗性について検討してきた¹⁾。一連の試験の内、S.Q.C の塩分浸透抵抗性を評価するため、9 年にわたる長期海洋曝露試験を鹿島灘の海浜で実施してきた。高強度領域の実環境下における塩分浸透に関する曝露試験データは少ないのが現状であり、本試験結果は貴重なデータと思われる。本報は、海洋曝露期間 9 年後の S.Q.C の塩分浸透抵抗性の結果について報告するものである。

技術の説明

図-1 に水結合材比と塩分拡散係数の関係を示す。なお、図中には標準示方書に示される拡散係数の予測値も合わせて示した。これらによれば、水結合材比は小さい程、塩分拡散係数が小さくなっており、OPC29 に対して著しく S.Q.C は塩分拡散係数が小さく、その抵抗性が高いことが分かる。また、OPC29 も高炉セメントやシリカフュームを使用する場合の予測値に近い結果となっている。図-2 に各コンクリートの総細孔容積と塩分拡散係数との関係を示す。S.Q.C の細孔容積は 3.523～6.129(×0.01cm³/g)で、OPC29 は、6.881(×0.01cm³/g)となっている。図のように FA72 および LC72 と OPC29 の総細孔容積には大きな差が無いが、塩分拡散係数には大きな違いがあることが分かる。これは塩分浸透抵抗性に直接寄与する細孔構造を評価できていないと考えられる。細孔構造の評価として、水銀圧入試験でインクボトル効果を考慮した脱着曲線による評価が必要と考えられる。

主な結論

長期海洋曝露試験の結果、自己充てん型高強度高耐久コンクリートの塩分浸透抵抗性に対する有意性を示した。また、これらの塩分浸透に関する曝露試験データは、高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性の評価する上で重要と考えられる。今後は海洋曝露試験期間を 15 年まで継続する予定であり、曝露期間の増大に伴う塩分拡散係数の変化等を、試験体の細孔構造の観点から取りまとめる予定である。

*1 住金鉱化（株）

*2（株）ティーネットジャパン

自己充てん型高強度高耐久コンクリートの 長期海洋曝露試験結果

佐藤 文 則 紙 田 晋^{*1}
牛 島 栄^{*2}

要 旨

自己充てん型高強度高耐久コンクリートは、自己充てん性を有する粉体系高流動コンクリートの範疇にあり、材齢56日の設計基準強度で60N/mm²以上の高強度コンクリートである。水結合材比も小さく、緻密であるため優れた塩分浸透抵抗性があると考えられる。著者らは、自己充てん型高強度高耐久コンクリートの塩分浸透抵抗性を把握するため、鹿島灘の海浜で長期海洋曝露試験を9年に渡り実施してきた。今回、曝露試験体を用いて塩分と細孔構造の分析を行い、自己充てん型高強度高耐久コンクリートの優れた塩分浸透性能を確認したのでここに報告する。

キーワード 自己充てん型高強度高耐久コンクリート／塩分浸透抵抗性／細孔構造／長期海洋曝露

目 次

- | | |
|-------------|--------------|
| 1. はじめに | 3. 試験結果および考察 |
| 2. 長期海洋曝露試験 | 4. 結論 |

RESULTS OF LONG TERM MARINE EXPOSURE TESTS ON SUPER QUALITY CONCRETE

Fuminori SATO Susumu KAMITA
Sakae USHIJIMA

Synopsis:

Super Quality Concrete has the performance of self-compacting, high durability, high strength and is concrete into the category of having a self-powder system. Design strength of Super Quality Concrete is 60N/mm² at 56days. Because the water-binder ratio is very small, porosity structure of super Quality Concrete is high density, and we have excellent penetration resistance to chloride ion. In order to evaluate the penetration resistance of Super Quality Concrete, authors have been carrying out the long-term marine exposure tests at the sea of Kashima Nada for the last 9 years. According to the results of analysis on pore structure and total chloride ion, we confirmed the excellent performance of the penetration resistance to chloride ion of Super Quality Concrete.

*1 住金鉱化（株） *2（株）ティーネットジャパン

1. はじめに

S.Q.C構造物開発・普及協会では、自己充てん型高強度高耐久コンクリート（以下S.Q.Cと称す）を対象として、これまで耐久性に関する数々の試験を行い、各劣化因子に対する抵抗性について検討してきた¹⁾。

一連の耐久性に関する試験項目の内、S.Q.Cの塩分浸透抵抗性を評価するため、長期海洋曝露試験を鹿島灘の海浜で9年に渡り実施してきた。

S.Q.Cは、自己充てん性を有する粉体系高流動コンクリートの範疇に入り、材齢56日の設計基準強度で60N/mm²以上有する高強度コンクリートであり、優れた塩分浸透抵抗性を保有していることが予想される。

一方、これらの高強度領域のコンクリートに関して、長期間にわたる実環境下の曝露試験データは少ないのが現状であり、本試験結果はこの観点より貴重なデータであると思われる。本報は、海洋曝露期間9年後のS.Q.Cの塩分浸透抵抗性の結果について報告するものである。

2. 長期海洋曝露試験

S.Q.Cの長期海洋曝露試験の内容を次に示す。

2.1 使用材料および配合

長期海洋曝露試験を行ったS.Q.Cの配合と使用材料を表-1、表-2に示す。配合の種類は、配合強度で72N/mm²～120N/mm²の4種類のS.Q.Cと、比較用として29N/mm²の普通コンクリートの計5種類とした。

2.2 海洋曝露供試体

海洋曝露供試体の形状寸法は、150×150×500mmの角柱供試体とし、5種類の配合を対象として作製した。供試

表-2 使用材料

材料種別	材料名および物性
セメント	普通ポルトランドセメント[OPC] 密度：3.16 低熱ポルトランドセメント[LC] 密度：3.26 高強度・高流動コンクリート用ビークライトセメント[BL] 密度：3.20
混和材	フライアッシュ[FA] 密度：2.11, 比表面積：3480cm ² /g 高炉スラグ微粉末[BS]72N/mm ² 用 密度：2.89, 比表面積：5830cm ² /g 高炉スラグ超微粉末[BSS]120N/mm ² 用 密度：2.91, 比表面積：15000cm ² /g
細骨材	川砂 表乾密度：2.54, 吸水率：2.70%, 粗粒率：2.61
粗骨材	硬質砂岩 2005 砕石 表乾密度：2.54, 吸水率：2.70%, 実積率：60.1%
混和剤	高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系） AE 減水剤（リグニンスルホン酸系）

体の養生条件は、材齢7日で脱型し、その後養生温度20±2℃のもとで水中養生7日間、気中養生42日間の計56日間養生した。なお、海洋曝露供試体は、曝露期間中の塩分浸透方向が1方向となるように、角柱供試体の一面（型枠底面）を除きプライマー処理後、エポキシ樹脂により塗装し遮塩した。

2.3 海洋曝露条件

海洋曝露供試体の養生終了後、海洋曝露を開始し曝露期間は9年とした。海洋曝露場所は、茨城県鹿嶋市の工場敷地内の飛沫帯である。飛来塩分量の測定結果は、ガーゼ法

表-1 コンクリートの配合

配合条件							単位量(kg/m ³)						
配合名	配合強度	目標スランプロー	目標空気量	水結合材比	粗骨材かさ容積	細骨材率	水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	AE剤
	(N/mm ²)	(cm)	(%)	(%)	(m ³ /m ³)	(%)						B* ² ×%	B* ² ×%
LC72	72	60	4.0	38.6	0.52	52.9	165	427	-	891	827	1.00	0.0020
FA72	72	60	4.0	34.9	0.52	50.0	165	378	95	809	827	1.25	0.0075
BS72	72	60	4.0	41.5	0.52	52.9	165	199	199	891	827	1.05	0.0025
BS120	120	65	3.0	22.0	0.50	47.2	165	675	75	681	795	1.75	0.0012
OPC29	29	12* ³	4.5	59.9	0.65	45.1	160	267	-	813	1034	0.25	0.0030

*1 結合材の種類 LC72：低熱ポルトランドセメント FA72：普通ポルトランドセメント+フライアッシュ BS72：普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末(BS)

BS120：高強度・高流動用ビークライトセメント+高炉スラグ超微粉末(BSS) OPC29：普通ポルトランドセメント

*2B：セメント+混和材 *3：スランプローの値を示す。

で $0.177(0.028\sim0.423)\text{mgNaCl/day}/100\text{cm}^2$ となっている。

また、鋼材（曝露鋼材）の腐食状態を測定したところ、9年で腐食度 26.4mdd, 侵食度 0.125mm/year の腐食境となっている。写真-1 に海洋曝露状況を、写真-2 に鋼材の腐食状況を示す。



曝露場所：飛来塩分量
 $0.028\sim0.423\text{mg/dm}^2/\text{day}$



写真-1 海洋曝露状況



写真-2 鋼材の腐食状況（9年後）

2.4 試験項目および方法

図-1 に示す海洋曝露供試体作製から分析・測定までのフローにしたがい、9年間の海洋曝露終了後、海洋曝露供試体を回収し次の試験を行った。

(1) 全塩化物イオン量の測定

全塩化物イオン量の深さ方向の分布を把握するため、曝露供試体よりコアを採取し、コンクリート表面から深さ方向に 10mm ピッチで $\phi 25\text{mm}$ の小径コアをスライスした。その後、各試料を JIS A 1154 に準拠して、電位差滴定法により全塩化物イオン量の測定を行った。

(2) 細孔径分布の測定

コンクリートの塩分浸透抵抗性は、その空隙構造に大き



図-1 海洋曝露試験フロー

く関係していると思われる。そのため、各コンクリートの試料を用いて、水銀圧入法により細孔径分布の測定を行った。

(3) 中性化深さ

全塩化物イオン量の分布を評価する際、コンクリートの中性化による、塩分の濃縮現象が考えられるため、中性化深さを測定した。中性化深さの測定は、採取コアの側面にフェノールフタレイン 1%エタノール溶液を噴霧し、無定色部分の距離をノギスにより測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 中性化抵抗性

図-2 に各コンクリートの中性化深さ測定結果を示す。図によれば、曝露期間 9 年後の中性化深さは最大で OPC29 で 3.3mm と小さな値を示している。これは海洋曝露環境であり、曝露供試体内部が概ね湿潤状態に保たれており、細孔内の炭酸ガスの拡散速度が小さかったことが主な要因

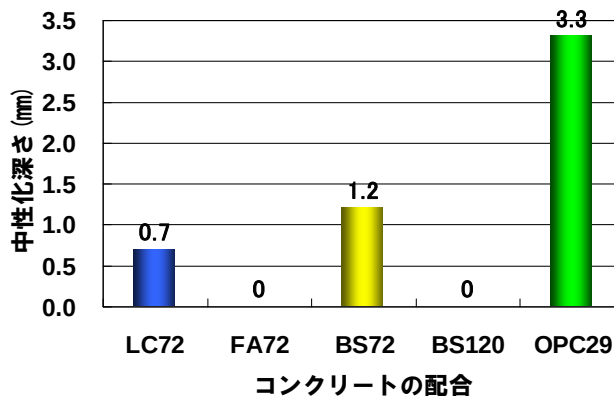


図-2 中性化深さ測定結果

と思われる。

全体の中性化深さは小さいが、コンクリート種類による中性化深さの違いを見ると、OPC29 に対して、S.Q.C は中性化深さが小さく、その優位性が表れている。また、中性化は、コンクリートの極表面部に留まっており、中性化による塩分濃縮現象に関しては、ほとんど考慮する必要がないと考えられる。

3.2 塩分浸透抵抗性

図-3 に全塩化物イオン量の測定結果を示す。図によれば OPC29 に対して、S.Q.C はコンクリート内部への塩分浸透量は少なく、塩分浸透抵抗性が高い結果となっている。また、高炉スラグ微粉末・フライアッシュを混和した S.Q.C は塩分浸透量が少ない。これは混和材の塩分捕捉効果によるものと思われる。特に高炉スラグ超微粉末を混和した BS120 は、塩分浸透抵抗性が著しく大きくなっていることが分かる。

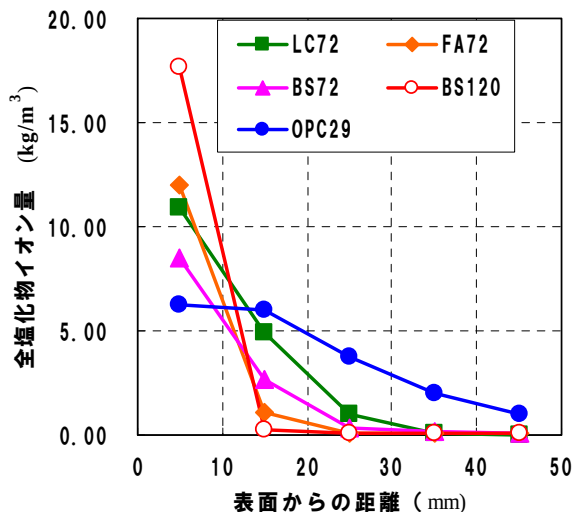


図-3 全塩化物イオン量の分布

表-2 に全塩化物イオン量分布より算出した表面塩化物イオン量と見掛けの塩分拡散係数を示す。図-4 に水結合材比と塩分拡散係数の関係を示す。なお、図中にはコンクリート標準示方書[設計編]に示される拡散係数の予測値も合わせて示した。拡散係数の予測式は、式[1]、式[2]のとおりである。²⁾

(a)普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log_{10} D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad [1]$$

(b)高炉セメントやシリカフェームを使用する場合

$$\log_{10} D_p = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad [2]$$

表-3 見掛けの表面塩化物イオン量と塩分拡散係数

配合	W/B	表面塩化物イオン量	見掛けの塩分拡散係数
		$C_0(\text{kg/m}^3)$	$D_c(\text{cm}^2/\text{year})$
LC72	38.6	15.67	0.119
FA72	34.9	25.80	0.031
BS72	41.5	13.18	0.079
BS120	22.0	46.83	0.019
OPC29	59.9	8.14	0.623

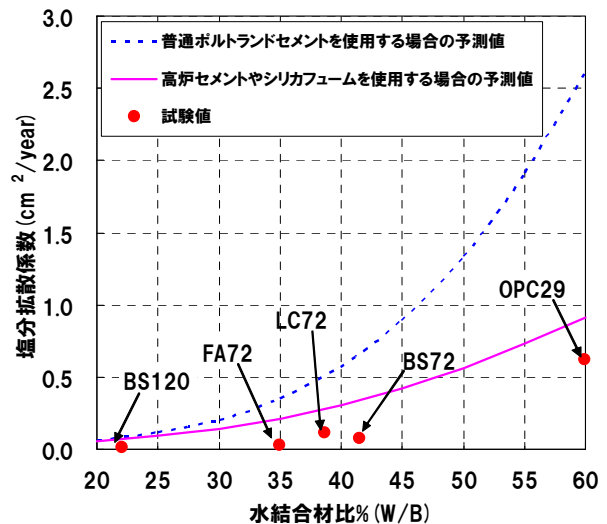


図-4 水結合材比と塩分拡散係数の関係

これらによれば、水結合材比が小さい程、塩分拡散係数が小さく、見掛けの表面塩化物イオン量も大きくなる傾向を示している。また、OPC29 に対して S.Q.C は、塩分拡散係数が著しく小さく、塩分浸透抵抗性が非常に高いことが分かる。また、OPC29 も高炉セメントやシリカフェームを使用する場合の予測値に近い結果となっている。

表-2 に示した見掛けの塩分拡散係数をもとに、フィックの拡散則[3]により、コンクリートからの距離毎に全塩化物イオン量の経時変化を計算し、鋼材腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 達する期間を求めた。図-5 にその結果を示す。

$$C = C_0 \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1c}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right) \quad [3]$$

ここに、 C_0 ：表面塩化物イオン量(kg/m^3)

c ：コンクリート表面からの距離(mm)

D_c : 見掛けの塩分拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

t : 時間(年)

なお、コンクリート表面部の塩化物イオン濃度は、飛沫帯であることより $13\text{kg}/\text{m}^3$ として試算した。²⁾

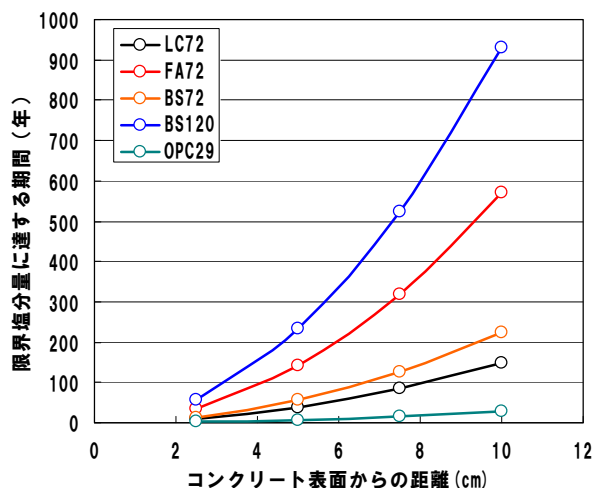


図-5 限界塩分量に達する期間

図より、各コンクリートの限界塩分量 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ に達するまでの期間をかぶり 10cm の場合で比較すると、OPC29 は約 30 年であるのに対して、S.Q.C は約 150 年以上という結果となっている。塩害環境下に代表される特に厳しい環境条件において、S.Q.C が有効であることが分かる。

ただし、本試算結果はコンクリート標準示方書設計編に基づいて、コンクリート表面塩分量を $13\text{kg}/\text{m}^3$ 一定で試算したものである。図-3、表-2 から分かるように実際の全塩化物イオン量は、 $13\text{kg}/\text{m}^3$ を大きく上回っている配合もある。したがって、塩害に対する照査を行う際に、コンクリート表面の塩化物イオン量を過小評価し、塩分浸透解析をしているとも考えられる。特に、フライアッシュや高炉スラグなどの混和材を添加したコンクリートでは、混和材による塩化物イオンの捕捉効果に加わると思われ、この現象が顕著になると予想される。したがって、今後塩分浸透の予測解析を行う際には、コンクリートの種類・配合に応じた、表面塩分量の設定が重要になると考えられる。

3.3 コンクリートの細孔構造

表-3 に各コンクリートの細孔構造一覧を、図-6 に細孔径分布を、図-7 に累積細孔容積を示す。これらより、高炉スラグ微粉末を混和した BS72、BS120 は、他の配合に比べて総細孔容積が小さくなっている。

また、LC72、FA72、OPC29 は、ほぼ同程度の総細孔容積となっている。総細孔容積の結果のみで判断すれば、BS120、BS72、LC72、FA72、OPC29 の順で緻密なコンクリートと言える。

表-4 細孔構造一覧

No.	配合名	総細孔容積 ($\times 0.01\text{cm}^3/\text{g}$)	比表面積 (m^2/g)	平均径* (μm)	中心径* (μm)
1	LC72	① 6.11	7.20	0.0170	0.0714
		② 6.07	7.39	0.0164	0.0753
2	FA72	① 6.13	8.06	0.0152	0.0950
		② 6.13	7.97	0.0154	0.0908
3	BS72	① 4.73	11.31	0.0084	0.0655
		② 4.87	11.48	0.0085	0.0657
4	BS120	① 3.47	10.35	0.0067	0.0324
		② 3.58	10.63	0.0067	0.0306
5	OPC29	① 6.95	9.85	0.0141	0.1561
		② 6.81	9.47	0.0144	0.1582

*平均径および中心径は、細孔の半径を示す。

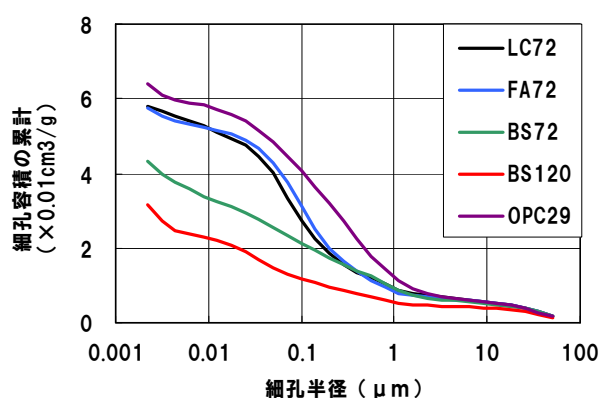


図-6 細孔径分布

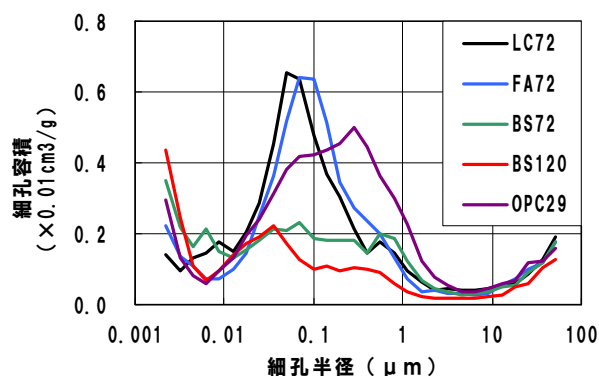


図-7 累積細孔容積

細孔半径の分布形状に着目すると、高炉スラグを混和した BS72、BS120 と LC72、FA72 および OPC29 の 3 タイプに分類できる。一般に、コンクリートの塩分浸透抵抗性は、その空隙の屈曲度などの形状や空隙量に大きく支配されると考えられるが、ここではコンクリートの空隙量すなわち緻密性の指標である各コンクリートの総細孔容積と塩分浸透抵抗性について検討する。

図-8 に総細孔容積と表-3 に示す見掛けの塩分拡散係数との関係を示す。

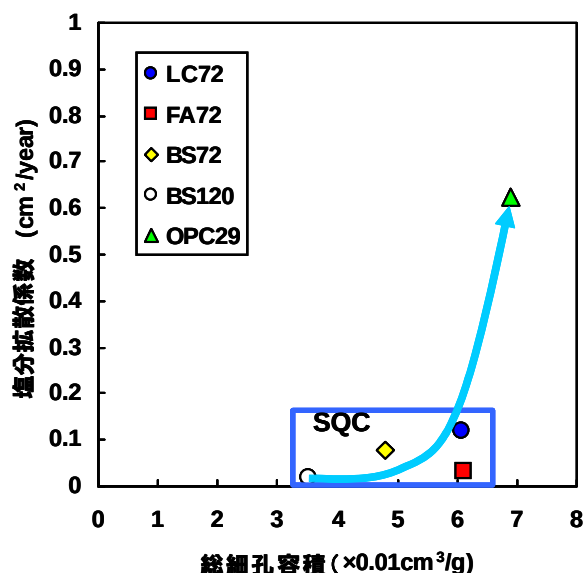


図-8 総細孔容積と塩分拡散係数との関係

S.Q.Cの細孔容積は 3.523~6.129($\times 0.01\text{cm}^3/\text{g}$)で、OPC29は、6.881($\times 0.01\text{cm}^3/\text{g}$)となっている。図のようにFA72 およびLC72 とOPC29 の総細孔容積には大きな差が無いが、塩分拡散係数には大きな違いがあることが分かる。また、LC72 とFA72 を比較すると、総細孔容積だけでなく、細孔径の分布もほぼ同じでありながら、見かけの塩分拡散係数には大きな違いがあり、FA72 の方が非常に小さな値を示している。これは塩分浸透抵抗性に直接寄与する細孔構造を評価できていない、あるいはフライアッシュの混和による塩分の捕捉効果によるものと考えられる。

3.4 細孔構造と塩分浸透抵抗性

先に示したように、塩分浸透抵抗性にコンクリートの細孔構造は、大きく影響すると考えられるが、本実験範囲での分析結果では、見掛けの塩分拡散係数と総細孔容積との間には、強い関係はあるものの、総細孔容積と細孔径分布がほぼ同じでありながら、見かけの塩分拡散係数には大きな違いがあるなどの不明な点もある。この一要因として、今回の水銀圧入試験では、塩分浸透抵抗性に直接寄与する細孔構造を評価できていないことが考えられるが、これを評価するため、インクボトル効果を考慮した脱着曲線による評価が必要と考えられる。

細孔のインクボトル効果については、水銀圧入法により水銀の細孔中への加圧と減圧を繰り返し行い、1 回目の加圧と 2 回目の加圧結果からインクボトル細孔の影響検討を行った研究がなされている。^{3),4)} 図-9 に、細孔中への加圧と減圧を繰り返した場合の累積細孔容積の変化のイメージを示す。図のように、1 回目の加圧の後に減圧しても全ての水銀は戻らず、その量がインクボトル細孔量となる。逆に水銀の戻り量は、インクボトルを含まない細孔容積と考

えられ、空隙が連続的に繋がっているものと考えられる。したがって、このインクボトルを含まない空隙が、コンクリートの塩分浸透抵抗性に関して大きく寄与している可能性があり、今後この観点で検討する予定である。

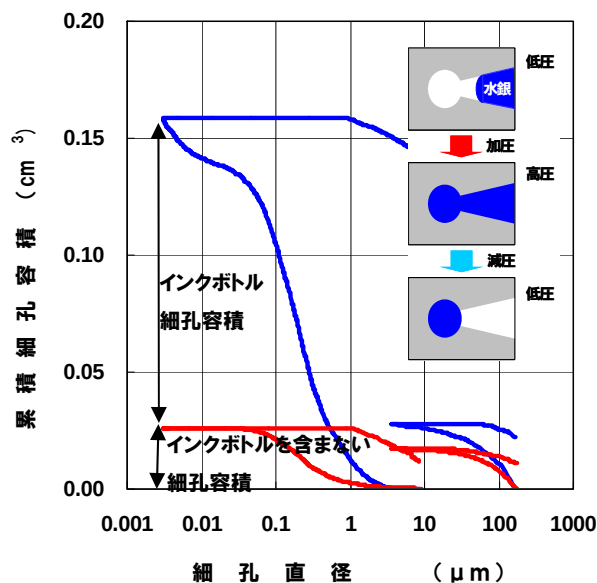


図-9 インクボトル効果のイメージ

4. 結論

長期海洋曝露試験の結果、自己充てん型高強度高耐久コンクリートの塩分浸透抵抗性に対する優位性を示した。また、これらの塩分浸透に関する曝露試験データは、高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性を評価する上で重要と考えられる。今後は海洋曝露試験期間を15年まで継続する予定であり、曝露期間の増大に伴う塩分拡散係数の変化等を、試験体の細孔構造の観点から取りまとめる予定である。

なお、本試験はS.Q.C構造物開発普及協会耐久性部会活動の一環として実施されたものであり、協会関係者の方々と、本実験でご指導頂いた東京工業大学 坂井教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針(案), 社団法人土木学会, 2001
- 2) コンクリート標準示方書 設計編 2007 年度制定, 社団法人土木学会, 2007
- 3) 岸 利治, 吉田 亮: 硬化セメントペーストが内包する複数のインクボトル幾何構造に関する研究, 生産研究, 60 巻 5 号, pp122-125, 2008
- 4) 吉田 行, 名和豊春, 田口史雄, 渡辺 宏: 高炉スラグ微粉末を用いたビーライトセメントコンクリートの中性化に及ぼす細孔組織の影響, 土木学会論文集, 社団法人土木学会, pp1-pp15, 2006