

論文 長期海洋曝露試験による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関する考察

佐藤 文則*1・新 大軌*2・坂井 悦郎*3

要旨: 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) は、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。著者らは、S.Q.C 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 15 年にわたり実施してきた。曝露後 9 年の分析結果により、S.Q.C が優れた塩分浸透抵抗性を有していることを確認している。今回、曝露期間 15 年を迎え、曝露後 9 年の試験結果と比較することで、S.Q.C の塩分浸透性状や細孔構造の経年的な変化に着目し検討を行ったので、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

1. はじめに

著者らは、S.Q.C 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 15 年にわたり実施してきた。

S.Q.C は、自己充填性を有する粉体系高流動コンクリートであり、設計基準強度 (材齢 56 日) で 60N/mm² 以上有する高強度コンクリートである。曝露後 9 年の試験結果により、S.Q.C は硬化体が非常に緻密であるため優れた塩分浸透抵抗性を有していることが確認されている²⁾。

一方、これらの高強度領域のコンクリートに関して、計画的な長期間に渡る実環境下の曝露試験データは少ないのが現状であり、どの程度の年数の曝露試験により塩分拡散係数を評価するべきかを明らかにしておく必要がある。本報は、曝露期間 15 年を向かえ、曝露後 9 年の試験結果と比較することで、S.Q.C の塩分浸透性状や細孔構造の経年的な変化に着目し、上記事項に対して得られた知見について報告する。

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 の使用材料と配合を表-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 海洋曝露試験体

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。

表-1 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: 3.16g/cm ³ 低熱ポルトランドセメント[LC] 密度: 3.26 g/cm ³ 高強度・高流動コンクリート用ハイライトセメント [BL] 密度: 3.20 g/cm ³
混和材	フライッシュ II 種[FA] 密度: 2.11 g/cm ³ , 比表面積: 3480cm ² /g 高炉スラグ微粉末[BS]72N/mm ² 用 密度: 2.89 g/cm ³ , 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 g/cm ³ , 比表面積: 15000cm ² /g
細骨材	川砂 表乾密度: 2.54 g/cm ³ , 吸水率: 2.70%, 粗粒率: 2.61
粗骨材	硬質砂岩 2005 碎石 表乾密度: 2.54 g/cm ³ , 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 (リゲニンスルホン酸系)

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 15 年とした。海洋曝露場所は、茨城県鹿嶋市の工場敷地内の海岸から 18m の飛沫帯である。飛来塩分量

*1 前田建設工業 (株) 土木事業本部土木設計・技術部 (正会員)

*2 東京工業大学助教 大学院理工学研究科材料工学専攻 工博 (正会員)

*3 東京工業大学教授 大学院理工学研究科材料工学専攻 工博 (正会員)

表—2 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 [°]	目標空隙量	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:スランプの値を示す。

は、ガーゼ法で 0.177(0.028~0.423)mgNaCl/day/100cm² となっている。飛来塩分の測定期間は、30ヶ月である。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 の腐食環境であった。

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、海洋曝露後9年、15年で海洋曝露供試体を回収し次の測定を行った。

(1) 超音波伝搬速度の測定とマイクロクラック観察

S.Q.C は単位粉体量が多い。そのため、自己収縮等によるマイクロクラックがペーストあるいは骨材界面に発生していないか確認するため、曝露 15 年の供試体を用いて曝露表面から深さ方向に超音波伝搬速度を測定し、加えてマイクロスコープによる目視観察を行った。

(2) 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、曝露供試体より試料を切り出し、コンクリート表面から深さ方向に 10mm ピッチでスライスした。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。

(3) 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く関係していると思われる。そのため、水銀圧入法により各配合の細孔径分布の測定を行った。なお、水銀圧入法では連続した空隙構造を評価するため、低圧および高圧でそれぞれ、2回加圧減圧を繰り返し、細孔径分布を測定した³⁾⁴⁾⁵⁾。分析位置は各配合とも表面から 30mm

の表層部分とした。

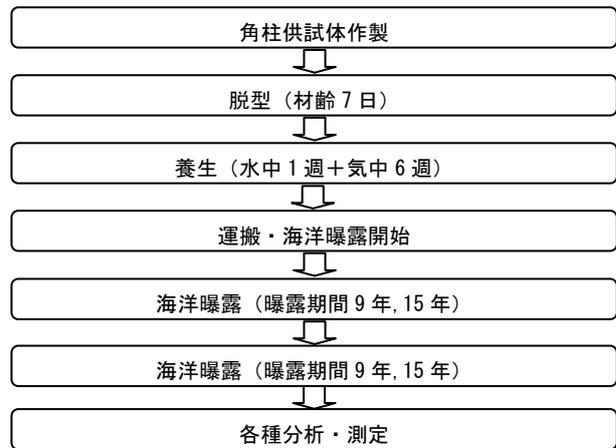


図-1 海洋曝露試験フロー

3. 試験結果および考察

3.1 マイクロクラック

図-2 に各コンクリートの超音波伝搬速度結果を示す。図によれば、強度レベルに応じて超音波伝搬速度は大きくなっており、BS120 で 5000m/sec, OPC29 で 4500m/sec 程度の値を示している。また、曝露表面側の超音波伝搬速度が極端に小さくなるといった傾向は認められない。写真-1 に一例として単位粉体量が最も多い BS120 のマイクロスコープ画像を示す。写真からも分かるようにペースト部や骨材界面等にマイクロクラックは存在していない。これは他の配合も同様であり、15 年経過しても均質な状態となっている。

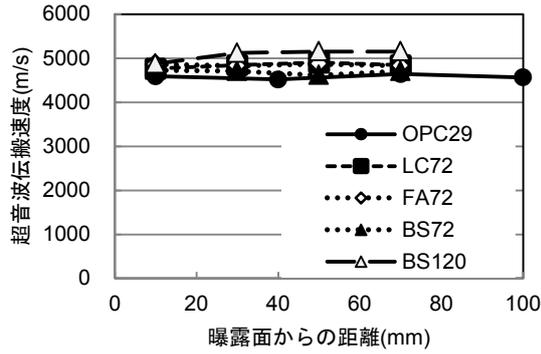


図-2 超音波伝搬速度

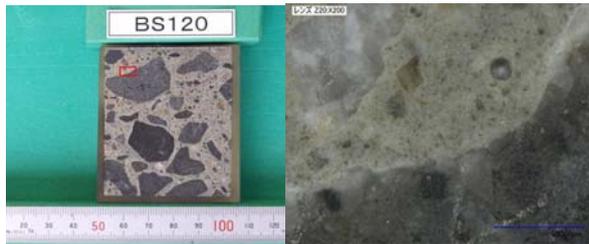
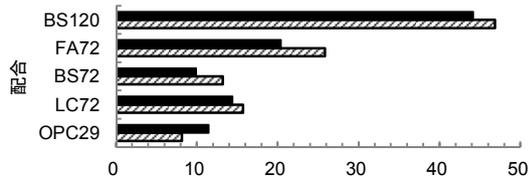


写真-1 マイクロスコップ画像(BS-120:倍率 200 倍)

3.2 塩分浸透抵抗性

図-3 に曝露後 9 年, 15 年後の全塩化物イオン量の分布と経時変化を示す。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。特に, フライアッシュ・高炉スラグ微粉末を混和した FA72, BS72, BS120 は顕著である。また, 9 年から 15 年にかけての塩分浸透は, 低熱セメントを用いた LC72 では内部にわずかに進んでいるが, OPC29 を含めた混和材を添加した配合では, 9 年後と 15 年後の全塩化物イオンの分布はほとんど変化しておらず, ほぼ定常状態となっている。コンクリート内部での塩化物イオンの移動が生じていないことが示唆されている。この現象は, 既に岸らの研究によって塩化物イオン浸透の停滞現象が示されているように, 拡散や移流とは異なる機構が関与しているものと思われる⁶⁾。

図-4 に表面塩化物イオン量の経時変化を, 図-5 に



	OPC29	LC72	BS72	FA72	BS120
■15年	11.46	14.42	9.91	20.40	44.16
□9年	8.14	15.67	13.18	25.80	46.83

表面塩化物イオン量(kg/m³)

図-4 表面塩化物イオン量の経時変化

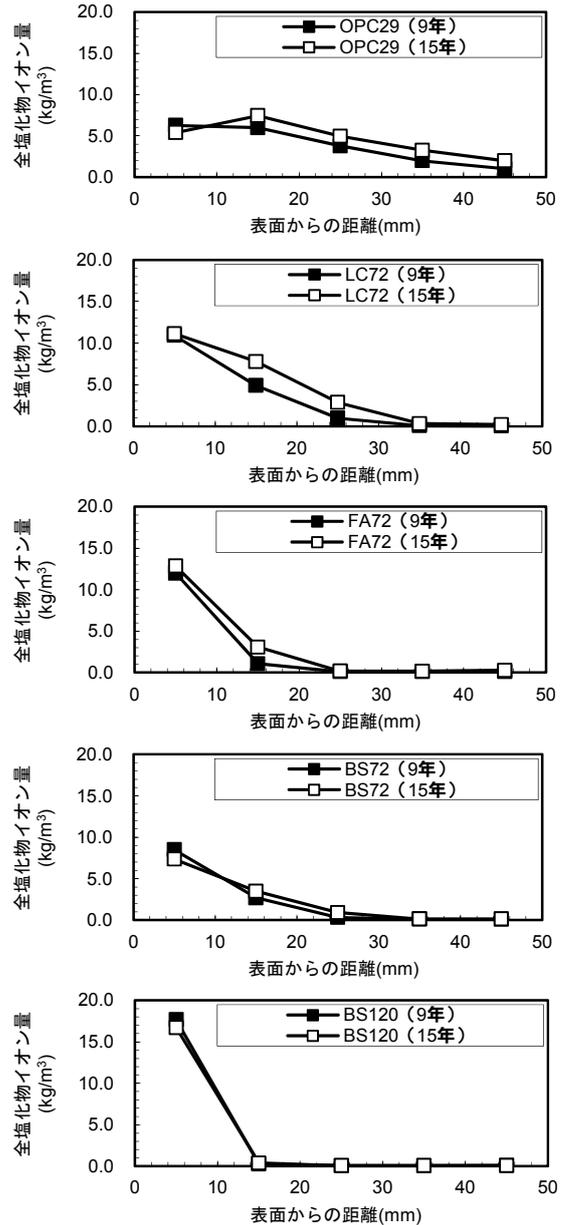
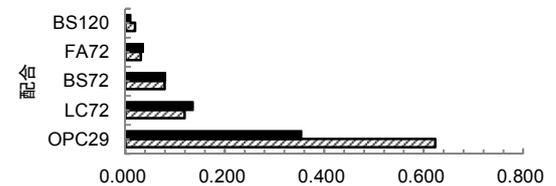


図-3 全塩化物イオン量の分布と経時変化



	OPC29	LC72	BS72	FA72	BS120
■15年	0.3542	0.1364	0.0806	0.0359	0.0107
□9年	0.6230	0.1190	0.0790	0.0312	0.0191

見かけの塩分拡散係数(cm²/年)

図-5 見掛けの塩分拡散係数の経時変化

見掛けの塩分拡散係数の経時変化を示す。図より, 表面塩化物イオン量は, 経年的な関係はなく水結合材比が小さく, かつフライアッシュや高炉スラグ微粉末を混和し

た配合が大きな値を示している。特に高炉スラグ超微粉末（比表面積：15000cm²/g）を用いた BS120(W/B=22%)の配合は、その傾向が顕著である。見掛けの塩分拡散係数は、水結合材比の小さいS.Q.Cの配合では、OPC29に対して著しく小さな値を示しており、経年的な見掛けの塩分拡散係数の変化もほとんど無い。

一方、OPC29の見掛けの塩分拡散係数は、9年後の値に対して15年後の値が約60%に低下する結果となっている。

図-6に水結合材比と見掛けの塩分拡散係数の関係を示す。図中には、コンクリート標準示方書[設計編]2012年制定で示される拡散係数の予測値も示した⁷⁾。図より各配合の塩分拡散係数は、配合種類に因らず高炉セメントB種相当の水セメント比と塩分拡散係数の関係式に非常に近い値となっている。

示方書で示される水セメント比と見掛けの拡散係数との関係式は、試験室あるいは実構造物等様々な条件から得られたデータをもとに設定されたものと推察されるが、S.Q.Cのように自己充填性がある高流動コンクリートでは、ブリーディング等の影響による施工時の品質のバラツキも小さく、非常に緻密な空隙構造を保有していると考えられるため、これらの予測値は相当安全側の評価になっていると思われる。そこで、設計耐用年数を100年とした場合のかぶりの設計値を試算した。その結果を図-7に示す。なお、試算条件は表面塩化物イオン量13kg/m³一定とし、鋼材腐食発生限界濃度は示方書式に準拠した。

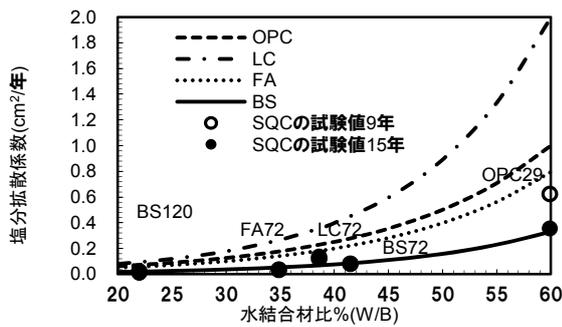


図-6 水結合材比と塩分拡散係数との関係

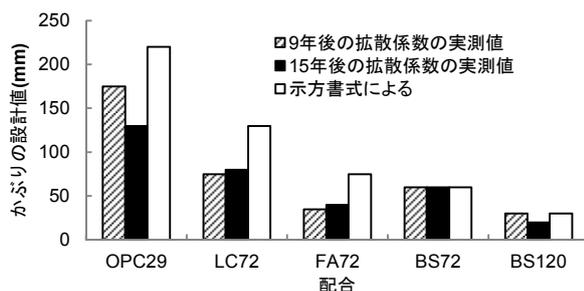


図-7 耐用年数100年を想定した時のかぶりの設計値

図によれば、高炉スラグ微粉末を用いた BS72,BS120の配合は、拡散係数の実測値と示方書の予測値がほぼ一致しているため、かぶりの設計値もほぼ同じとなるが、水結合材比の小さい低熱ポルトランドセメントを用いた LC72とフライアッシュを用いた FA72は、実測値を用いた方が、かぶりの設計値をより低減できることが分かる⁸⁾。このように S.Q.C のような緻密な空隙構造を持つコンクリートでは、かぶりの設計をより合理的に評価・設計できる可能性がある。

3.3 コンクリートの空隙構造

水銀圧入法による曝露後9年および15年の配合種類と総細孔容積との関係を図-8に示す。また、各配合の細孔直径と累積細孔容積との関係を図-9に示す。なお、本試験では連続的に繋がった空隙量を把握するため、水銀の細孔中への加圧と減圧を2回繰り返している。すなわち、1回目の加圧の後に減圧しても、その全ての水銀は戻らず、その量がインクボトル細孔量として取り扱われることができ、圧入2回目に測定された細孔容積は、塩化物イオン等が移動しやすい連続的に繋がった細孔（以下連続細孔と称す）と考えることができる³⁾⁴⁾⁵⁾。

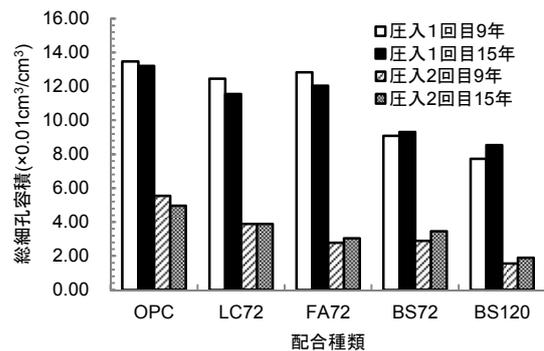


図-8 配合種類と総細孔容積との関係

図-8より、1回目の圧入試験結果では、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、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。

しかしながら、2回目の圧入試験結果によれば、連続細孔の累積量は、BS120,FA72,BS72,LC72,OPC29の順序で大きくなっており、1回目の圧入試験結果と順序が異なっていることが分かる。これらの傾向は、曝露期間によらず同じである。図-9より、1回目と2回目の圧入結果とも、細孔直径の分布は OPC29が0.1~10μmの細孔量が S.Q.C の配合に比べて多い結果となっている。S.Q.C の中では、特に高炉スラグ微粉末を混和した BS72,BS120が、0.1~10μmの細孔量が少ないのが特徴

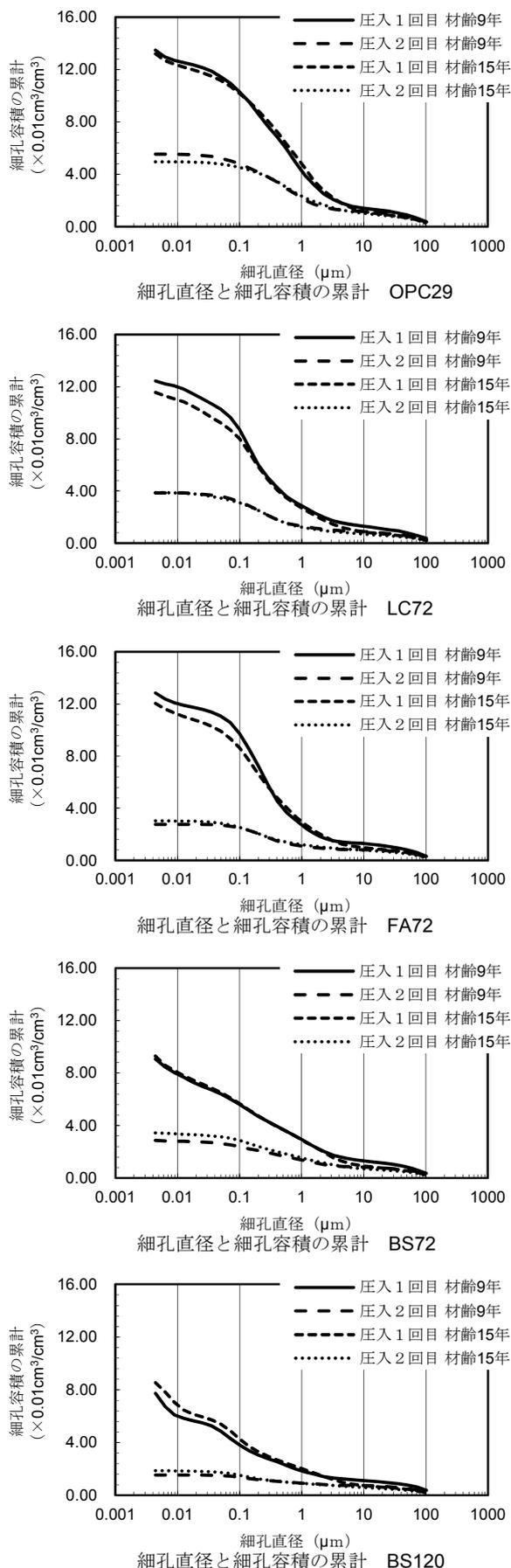


図-9 細孔直径と累積細孔容積との関係

的である。同一の強度レベル 72N/mm^2 の配合では、総細孔量に対する連続細孔量の割合は、曝露後 9 年と 15 年の平均値で LC72,FA72,BS72 で各々 32.9%,23.7%,34.6% となっている。総細孔量に対する連続細孔量の割合は、FA72 が最も小さくなっている。また、総細孔量は、LC72 と FA72 はほぼ等しく、これらの方が BS72 より大きな値を示している。一方、連続細孔量は、LC72 よりも FA72 と BS72 の方が小さく、その値はほぼ等しい。塩分拡散係数の値とあわせて判断すると、総細孔量より連続細孔量の方が、塩化物イオンの拡散に影響している可能性が高い。また、一般にはフライアッシュや高炉スラグ等の混和したコンクリートは、長期的に反応が継続すると言われているが、いずれの配合においても材齢 9 年から 15 年の間にコンクリートの空隙構造はほとんど変化しておらず緻密化は進行していない。塩化物イオンに対する見掛けの拡散係数が、空隙構造に支配されていると考えたと、図-5 に示した特に OPC29 に認められる拡散係数の大きな変化に対して評価することが難しい。一方、S.Q.C では見掛けの拡散係数の経年変化がほとんどなく、空隙構造の変化とうまく対応している。なお、OPC29 と S.Q.C の細孔構造と塩分拡散係数の対応の違いについては次項で記述する。

3.4 連続細孔容積と塩分浸透抵抗性

コンクリートの塩分浸透現象は、細孔溶液中の塩化物イオンの移動によるものであるため、コンクリートの塩分浸透抵抗性は、セメント硬化体中の空隙構造の影響を強く受けると考えられる。著者らは、水銀圧入法で得られたモルタル中の細孔容積を、各コンクリートの配合条件をもとに、単位ペースト当たりの連続細孔容積に換算し、コンクリートの塩分浸透抵抗性を評価した方が合理的であり、水結合材比から単位ペースト当たりの連続細孔容積を予測し、塩害に対する照査に必要な塩化物イオン拡散係数の特性値 D_k を算定できることを示した²⁾。ここでも、同じ考えに基づき曝露後 9 年と 15 年のデータを用いて、単位ペースト当たりの連続細孔容積と塩分浸透抵抗性との関係を整理した。表-3 に各配合の見掛けの塩分拡散係数と単位ペースト当たりの連続細孔量の

表-3 見掛けの塩分拡散係数と連続細孔量

配合	W/B (%)	見掛けの塩分拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)		単位ペースト当たりの連続細孔量 ($\times 0.01\text{cm}^3/\text{cm}^3$)	
		9 年	15 年	9 年	15 年
		OPC29	59.9	0.6230	0.3542
LC72	38.6	0.1190	0.1364	8.38	7.75
FA72	34.6	0.0312	0.0359	5.52	5.52
BS72	41.5	0.0790	0.0806	6.62	6.90
BS120	22.0	0.0191	0.0107	2.81	3.00

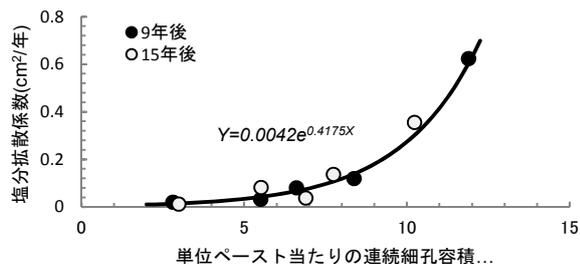


図-10 単位ペースト当たりの連続細孔容積と見掛けの塩分拡散係数と関係

一覧を示す。また、図-10に単位ペースト当たりの連続細孔容積と見掛けの塩分拡散係数の関係を示す。これらより、単位ペースト当たりの連続細孔容積と見掛けの塩分拡散係数との間には、寄与率で0.9028となり、強い相関関係が認められる。すなわち、曝露後9年と15年の結果より、セメント硬化体の空隙構造の内、連続細孔容積を指標とすることにより、コンクリートの見掛けの塩分拡散係数を適切に評価できることを再確認した。

図-11に水結合材比と単位ペースト当たりの連続細孔容積との関係を示す。図によれば、水結合材比と単位ペースト当たりの連続細孔容積との関係も、寄与率で0.9136と非常に強い相関関係が認められる。したがって、本試験結果の範囲ではあるが、曝露後9年と15年の結果より、式(1)のように水結合比と単位ペースト当たりの連続細孔容積を関連づけ、塩分拡散係数を算定することができると考えられる。実構造物での塩害に対する照査をする場合、ブリーディングの少ないS.Q.Cでは、構造物内の水結合材比が均一であると予想され、10年程度の曝露試験結果によりコンクリート内部への塩分浸透をより合理的に評価できるものと思われる。

$$D_k = 0.0042 \cdot e^{0.4175(0.2138W/B - 1.5556)} \quad (1)$$

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

W/B : 水結合材比(%)

4. 結論

長期海洋曝露の曝露後9年と15年の分析結果により、S.Q.Cの塩分浸透抵抗性に関して得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) S.Q.Cは、優れた塩分浸透抵抗性を有しており、塩害に対する照査において、合理的にかぶりの設計できることを示した。
- (2) 加圧・減圧を繰り返して測定した水銀圧入法により求めたセメント硬化体中の連続空隙とコンクリートの塩分浸透抵抗性とは密接に関連していることを再確認した。
- (3) 連続空隙量を塩分浸透抵抗性の指標として、S.Q.Cの

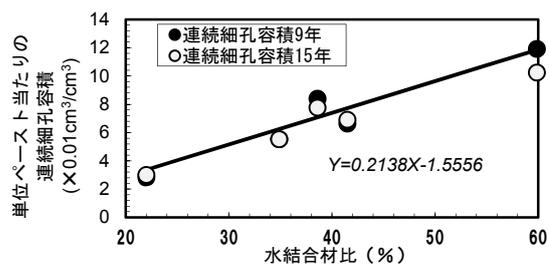


図-11 水結合材と単位ペースト当たりの連続細孔容積との関係

見掛けの塩分拡散係数を算定できることを示した。

- (4) 自己充填型高流動コンクリートに代表される硬化後の均一性が高いコンクリートでは、塩分拡散係数は10年程度の曝露試験により評価できることを示した。

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) 佐藤文則, 牛島 栄, 紙田 晋, 坂井悦郎: 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による塩分浸透抵抗に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.32, NO1, pp731-736, 2010
- 3) 坂井悦郎, 春日貴行, 浅賀喜与志, 大門正機: 分散剤を添加したセメントの水和と硬化体の微細組織, コンクリート工学年次論文, Vol.25, No.1, pp197-202, 2003
- 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, Vol.64, No.1, pp1-15, 2008.1
- 5) 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
- 6) 高橋佑弥, 岸 利治, 山田義智, 岡本堅志: フライアッシュを含む護岸コンクリートの塩化物浸透性状と見かけの拡散係数の調査材齢時による相違, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術に関するシンポジウム講演概要集(338委員会), pp1-pp8, 土木学会, 2009.10
- 7) 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
- 8) 石田哲也, 丸屋 剛, 宮原茂禎: 高炉スラグとポゾランを使用したセメント硬化体の塩分平衡特性, コンクリート工学年次論文, Vol.27, No.1, pp673-678, 2005