

論文

[1099] 海岸に暴露したコンクリートへの塩分浸透について

正会員○太田 利隆（北海道開発局開発土木研究所）

佐々木慎一（北海道開発局開発土木研究所）

正会員 堺 孝司（北海道開発局開発土木研究所）

高柴 保明（北海道開発局小樽開発建設部）

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋の腐食を促進する塩化物イオンは、コンクリート練り混ぜ時に材料から混入するものと、コンクリート硬化後外部から浸透するものとに分けられる。前者については鉄筋の初期の腐蝕速度を低く抑えるため、土木学会コンクリート標準示方書ではRC構造物の場合 0.6 kg/m^3 以下と規定している。一方後者は材料、配合、養生、かぶり、暴露条件、暴露期間、塗装などに大きな影響を受けるのみならず、その量も多く鋼材腐食に及ぼす影響も大きい。

本研究は留萌海岸で行っている暴露試験のうち、20年経過したRC桁について、コンクリート中に浸透した塩化物とコンクリートの材料、配合の影響についてまとめたものである。

表-1 セメントの物理的、化学的性質

セメント	比重	粉末度 (cm^2/g)	化学成分 (%)								
			ig. loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	MnO
OPC	3.16	3130	0.6	0.6	22.4	4.6	64.1	2.9	1.6	2.0	-
BB	3.06	3900	0.5	0.8	25.0	9.7	55.3	2.1	2.7	1.8	0.5
FB	2.95	3300	0.6	15.3	-	-	-	-	-	1.7	-

2. 実験概要

2. 1 材料、配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメント（OPC）、高炉セメントB種（BB）、フライ

表-2 コンクリートの配合及び圧縮強度

アッシュセメントB種（FB）であり、物理的、化学的性質を表-1に示す。減水剤は主成分リグニンスルホン酸塩化合物を用いた。細骨材は錦岡産海岸砂（比重 2.75、吸水率	配合	セメントの番号	単位セメント量 (kg/m^3)	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	減水剤 (kg/m^3)	圧縮強度 (Mpa)	推定塩化物量 (kg/m^3)	備考
	番号	種類								
	1	OPC	300	43.7	7.5	5.6	1.5	41.4	0.44	海水
	2	OPC	300	48.3	4.9			39.8	0.06	
	3	OPC	300	52.3	6.2			35.2	3.01	
	4	OPC	300	44.3	7.7	5.5	1.5	41.2	2.94	
	5	OPC	250	51.6	6.6	6.3	1.25	33.3	0.37	海水
	6	OPC	275	47.3	8.1	7.4	1.38	39.2	0.41	
	7	OPC	300	43.3	6.9	4.7	1.5	49.0	2.36	
	8	OPC	300	44.3	5.8	6.1	1.5	46.5	4.28	
	9	OPC	300	51.0	6.5			44.9	1.98	CaCl ₂ 3kg
	10	OPC	300	52.7	5.6			44.9	3.89	CaCl ₂ 6kg
	11	OPC	300	44.3	5.9	5.4	1.5	41.2	4.86	CaCl ₂ 3kg, 海水
	12	OPC	300	45.0	7.3	7.0	1.5	40.8	6.81	CaCl ₂ 6kg, 海水
	13	BB	300	44.0	6.7	3.7	1.5	38.9	0.44	
	14	BB	300	52.0	6.5			35.2	0.06	
	15	FB	300	40.7	6.5	4.7	1.5	37.8	0.44	
	16	FB	300	47.0	5.3			38.1	0.06	

0.85, F.M. 2.58) 粗骨材は最大寸法 25 mm の静内川産砂利 (比重 2.73, 吸水率 1.19, F.M. 7.10) である。配合及び圧縮強度を表-2 に示す。塩化カルシューム 6 kg は、当時の土木学会コンクリート標準示方書寒中コンクリートでセメント

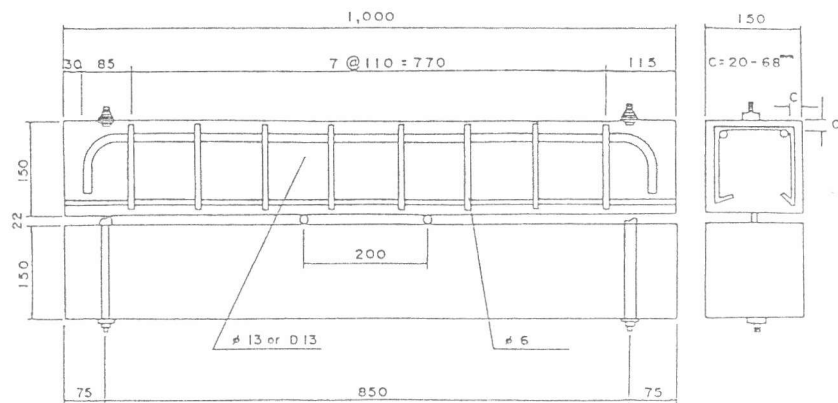


図-1 試験桁

量の 2% 程度の使用を推奨していたものに相当するものである。また海水は離島などで淡水の確保が難しい場合を考慮し、練り混ぜ水として海水 (石狩湾より採取) を使用したものである。

2. 2 試験桁の製作

試験桁は 15 x 15 x 100 cm で主鉄筋として $\phi 13$ mm 2 本を配置した (図-1)。コンクリート打設後 1-2 日で脱型し材令 7 日まで 21°C 湿潤養生槽に置き、その後実験室に放置した。材令 28 日で所定のひびわれを入れ、2 桁を一組としてボルト締めを行い、ひびわれが戻らないようにした。

2. 3 暴露条件

試験桁は日本海に面した留萌海岸の汀線から 30-40 m、高さ 1-4 m の暴露台に設置した。留萌における気象上の特徴は、冬期間シベリヤから吹く季節風が強いことで、一年間に最大風速 10 m/秒をこえる日数は 131 日、15 m/秒では 21 日である。図-

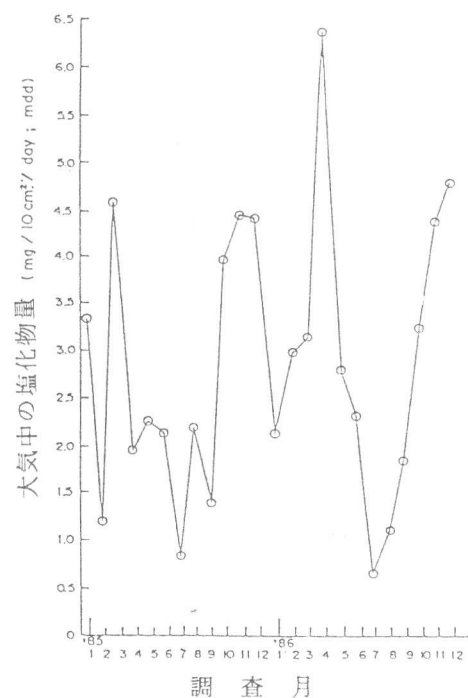


図-2 大気中に含まれる塩化物量 (ガーゼ法)

2 は暴露地付近において大気中に含まれている塩化物量の変化である。年平均塩化物量は 3 m d d (mg/10 cm²/day) である。

2. 4 塩化物イオンの抽出および定量

$\phi 7.5$ mm のコアを抜き所定の厚さに切断

表-3 塩化物イオンの抽出及び定量法

年 度	1972-1982年	1982年以降	
抽出法	抽出法 1 全塩化物量	抽出法 2 全塩化物量	抽出法 3 可溶性塩化物量
試料の調整	1.2mm フリイを通過するように粉碎	0.15mm フリイを通過するように粉碎	
抽出法	試料10g に蒸留水200mlを加え、100℃で24時間湯浴	試料10g に蒸留水200mlを加え、100℃で1時間強制攪拌	試料40g に蒸留水200mlを加え、20℃で30分振とう攪拌
定量法	硝酸第2水銀法で定量	30% H ₂ O ₂ を抽出液10ml当り0.05ml添加後吸光光度法により定量	

した後、粉碎し蒸留水により塩化物の抽出を行った。抽出方法及び定量方法を表-3に示す。抽出法1は当所で種々検討の結果、1972-1982年の間採用したものである。

1. 2mmフルイを通過という比較的粗なコンクリートの場合、抽出する塩化物量が安定するためには湯浴時間24時間以上必要であることを確認したものである。抽出法2はコンクリートの細粒化が比較的容易となったため、抽出時間の短縮をはかったもので1982年以来当所における標準的抽出法である。表-4は各抽出法による塩化物量の比較である。抽出法1, 2による塩化物量は硝酸

によるものとほとんど差がないため全塩化物量に相当すると考えているが、高炉セメントの場合硝酸による抽出が必ずしも最大とならないので、より適切な定量方法を検討中である。可溶性塩化物の抽出はJCI法によったものである。

表-4 各抽出法による塩化物量の比較

供試体の状態	セメント	抽出法1	抽出法2	抽出法3	硝酸による抽出
塩水噴霧直後	OPC	0.952	0.897	—	1.000
	BB	1.477	1.194	—	1.000
20年暴露	OPC	1.027	0.995	0.826	1.000
	BB	1.020	1.011	0.517	1.000

3. 実験結果

3. 1 塩化物浸透量

図-3は同一配合を有する供試体の塩化物量の分布である。桁番号A-64の塩化物量の大きい事が目につく。製作時のデータによれば他の桁に比し、スランプ13.1cmと大きく、圧縮強度354kgf/cm²と小さくなっている。骨材の表面水などの管理が不十分でW/Cが大きくなったものと考えられるが、この様にコンクリートのわずかな品質の変化によっても、コンクリート中への塩化物の浸透量は大きく変化することは品質管理の大切さを示していると思われる。以後データの処理から除く事にする。図-4はコンクリートの各深さにおける平均塩化物量と標準偏差を示したものである。塩化物量xが大きくなれば標準偏差σも大きくなり、その関係は $\sigma = 0.3\sqrt{x}$ で近似できるようである。

図-5はコンクリートのW/Cと塩化物量の関係である。W/C=43.7%の場合桁中心では0.2kg/m³程度であるのに対し、W/Cが47%を越えると、コンクリート内部まで

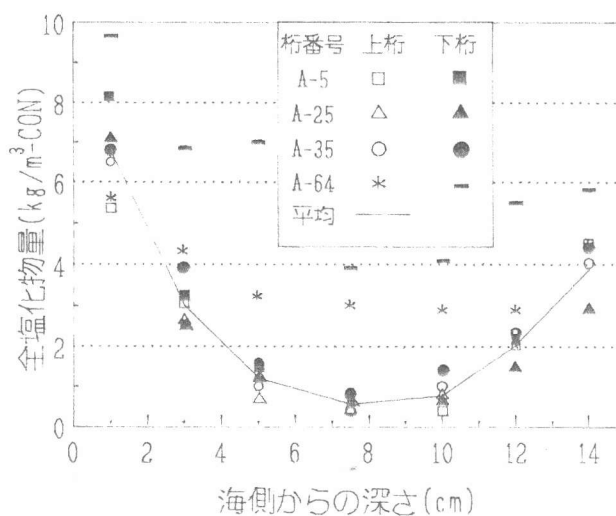


図-3 塩化物浸透量のばらつき
(配合-1, 20年暴露)

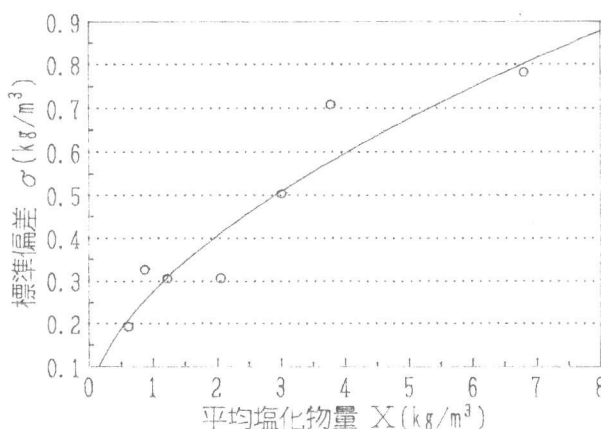


図-4 平均塩化物量とその標準偏差

深く浸透することを示している。配合-2と配合-6では、単位セメント量に差があるにもかかわらず、塩化物浸透量はほとんど変わらず、W/Cの影響の大きい事を示している。またエポキシ樹脂をコンクリート表面に塗布した場合、外観上見分けのつかない程塗料が劣化していたにも拘らず、特にコンクリート表面から5 cm程度までの塩化物浸透量に差がでていた。定期的に塗りかえるなどの処置をすれば、コンクリート中の鋼材防食法として効果が大きいものと思われる。

図-6はセメントの種類の影響である。配合-1, 13, 15はAEコンクリート, 配合-4, 14, 16はプレーンコンクリートで単位セメント量を一定としたため、W/Cが異なったものである。普通ポルトランドセメントのW/Cによる影響の大きいことは前述したが、混合セメントの場合にはW/Cにあまり影響をうけずに塩化物の浸透を防止する能力の大きいことを示している。即ちコンクリート表面から2-3 cm程度までは普通ポルトランドセメントに比し混合セメントの塩化物量は多いが、特に5 cmを越えるとはほとんど塩化物の浸透は認められない。普通ポルトランドセメントの場合量は少ないが、桁中心まで塩化物の浸透がある事を考えると混合セメントは海洋コンクリート構造物用として、非常に有利なセメントであるといえる。高炉セメントとフライアッシュセメントの差はほとんど認められない。

図-7は初期塩化物量の影響である。W/Cは43.7-45%とほとんど等しいにも拘らず、当初から塩化物量が多く混合されている場合、コンクリート表面付近に蓄積する塩化物量は少

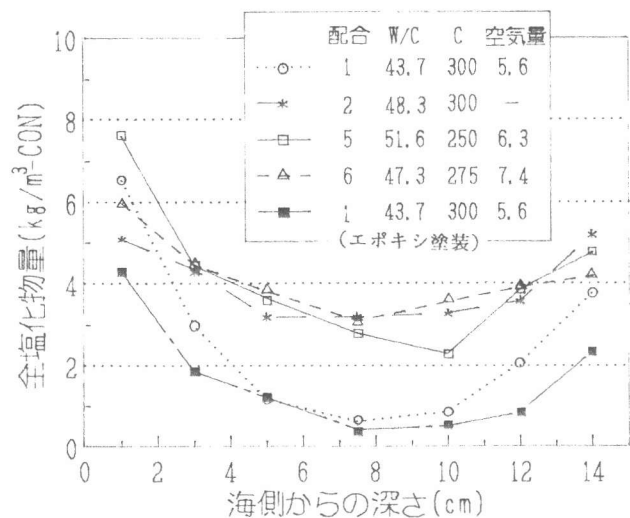


図-5 水セメント比の影響

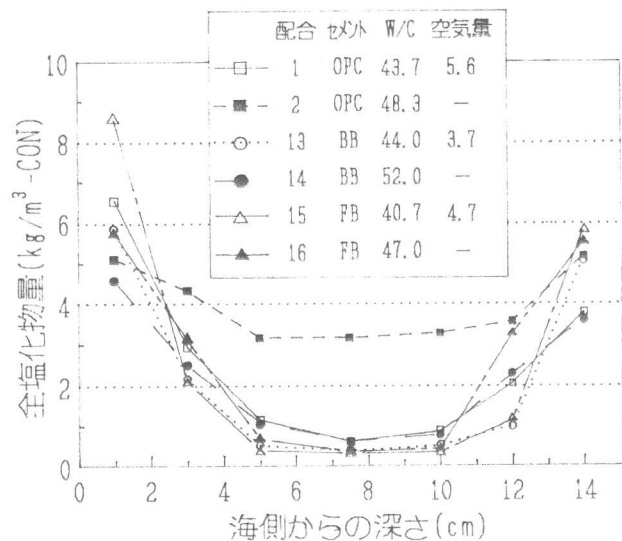


図-6 各種セメントの影響

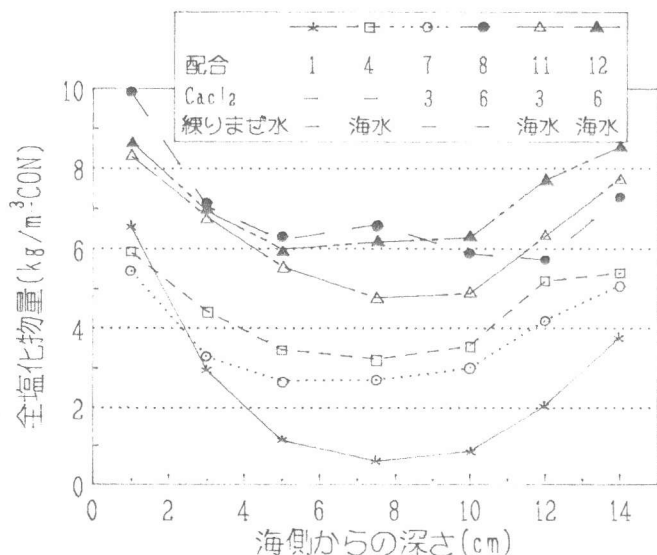


図-7 初期混入塩化物の影響

なく、その勾配は小さくなっている。
配合-12の場合(海水, CaCl_2 0.6 kg) コンクリート表面を除いて当初混入したと推定される量に達していない。

図-8は塩化物量の経年変化である。普通ポルトランドセメントの場合暴露期間が長くなるに従い、コンクリート内部まで塩化物が浸透している。一方混合セメントではかぶり5cm以上における塩化物の浸透はほとんどなく、5cm以内では暴露期間5-10年で塩化物は大量に蓄積され、その後の増加はあまり無いようである。

図-9は上下方向の塩化物量の分布である。コンクリート上部から浸透した塩化物が重力による水分の移動に伴い下方に蓄積されている様子を良く表している。一方W/Cが小さかったり、混合セメントを使用した場合には一部上部に蓄積されている。また下面から約3cmの範囲には大量の塩化物が蓄積されており、特に混合セメントの場合その量が著しい。下面から5cmにおける塩化物量を測定していないので確定は出来ないが、スラブなどの場合でも5cm程度のかぶりを確保するのが望ましいと考える。

3. 2 全塩化物量と可溶性塩化物量

図-10は全塩化物量と可溶性塩化物量の関係である。全塩化物の抽出は抽出法2によったものである。ほぼ直線関係にあるが、練り混ぜ水として海水を用いた場合他の配合とは異なった値を示している。全塩化物量に比し可溶性塩化物量が多くなっている。海水には種々のイオンが含まれているためと思われる。

3. 3 拡散係数

拡散係数はかぶりと塩化物量の関係を推定するのに欠かせないものである。

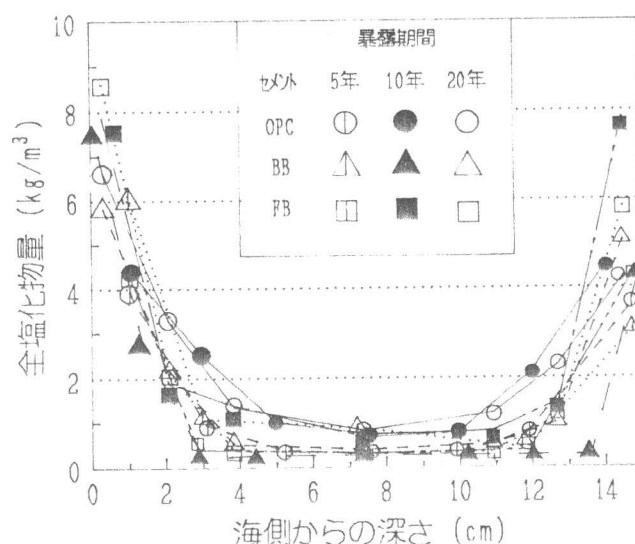


図-8 塩化物量の経年変化

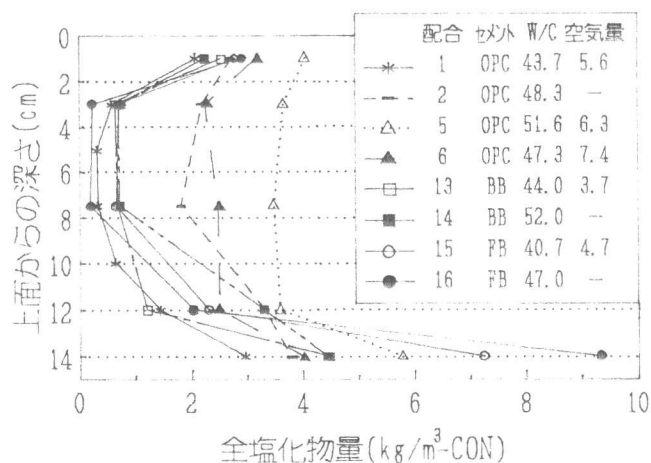


図-9 塩化物の垂直分布

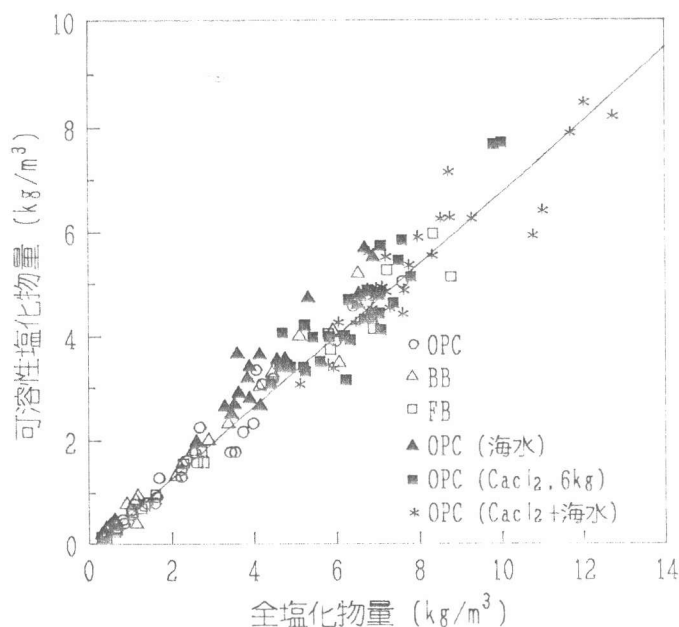


図-10 全塩化物量と可溶性塩化物量

表-5はコンクリートの塩化物量の測定値から練り混ぜ時に混入したと推定される塩化物量をさしひき、拡散係数を算定したものである[1]。一般に拡散係数は $10^{-8} \sim 10^{-9}$ cm^2/sec 程度であるといわれるが[2, 3, 4, 5], コンクリートの品質による影響も大きい。3. 1で述べたセメントの種類, W/Cの影響などの特徴を良く表しているように思われる。

表-5 拡散係数

セメント	W/C (%)	S	D ($\times 10^{-8}$)
OPC	43.7	0.172	1.012
OPC	47.3	0.336	5.012
OPC	51.6	0.397	13.08
BB	44.0	0.129	0.635
FB	40.7	0.178	0.414

4 まとめ

本研究の結果次のことが明らかとなった。

1) 普通ポルトランドセメントの塩化物浸透に対するW/Cの影響が大きい。W/C 47%以上では塩化物はコンクリート内部にまで浸透する。またW/C 43.7%でも暴露期間が長くなるに従い、徐々に浸透して行く。

2) 混合セメントの塩化物浸透阻止能力は大きく、W/Cに余り影響されない。かぶり5cm以上ではほとんど浸透しない。またコンクリート表面付近には比較的短期間で多量の塩化物が蓄積される。

3) 塩化物は重力による水分の移動に伴い、桁の下部に多量に蓄積する。スラブなどではかぶりのとりかた(例えば5cm以上)に一考を要する。

4) コンクリート練り混ぜ時に多量の塩化物を混合している場合、その後の塩化物浸透量は少ない。

5) 塩化物のコンクリートへの浸透はコンクリートの僅かな品質の変化により大きく変動する。品質管理が特に大切である。

6) 海水を練り混ぜ水として使用した場合、可溶性塩化物の割合が大きい。

参考文献

- 1) 武若耕司, 松本 進: 海洋環境下におけるコンクリート中への塩分浸透について, セメント技術年報 Vol. 37, 昭和58, pp. 337-340
- 2) 丸屋 剛, 宇治公隆: コンクリートの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化, コンクリート工学年次論文報告集, 第11巻, 第1巻, 1989, pp. 597-602
- 3) 大城 武ほか: コンクリートへの塩素イオンの浸透に関する実験的及び解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻, 第1巻, 1987, pp. 369-374
- 4) 横田 優ほか: 拡散理論に基づいた海岸部塩分汚染環境評価, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻, 第1巻, 1987, pp. 443-446
- 5) 柳 啓, 飛坂基夫: 硬化コンクリート中への塩素イオンの浸透性に関する2, 3の研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻, 第1巻, 1987, pp. 439-442

$$C=S \left\{ \sqrt{t/\pi D} \cdot \exp(-X^2/4Dt) - X/2D \cdot (1-\text{erf}(X/2\sqrt{Dt})) \right\}$$

S: 塩化物付着量 X: 深さ
D: 拡散係数 t: 時間
erf: 誤差関数