

論文 海岸地域におけるコンクリートへの塩化物イオン浸透挙動

竹田 祐二^{*1}・榎田 佳寛^{*2}・中村 成春^{*3}

要旨：北海道日本海側の海岸において、コンクリート供試体の水セメント比および海岸からの距離を変化させて暴露実験を実施した。供試体表面からの深さ毎の全塩化物量実測値から、見かけの拡散係数、供試体表面の塩化物イオン量および蓄積塩化物イオン量を算出し、以下の知見を得た。(1) 飛来塩化物イオンがコンクリート中に蓄積する量は、ある収束値をもつ緩やかな指数増分傾向を示した。(2) 見かけの拡散係数、表面塩化物イオン量の経時変化を考慮し、W/C=60%、海岸から 50m、暴露 10 年での蓄積塩化物イオン量を予測した結果、約 0.2kg/m² となった。

キーワード：蓄積塩化物イオン量，見かけの拡散係数，表面塩化物イオン量

1. はじめに

海岸地域における鉄筋コンクリート構造物は、飛来塩化物の浸透によって鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートのひび割れ、剥落などの劣化が起り易い。そのため、塩化物イオン浸透挙動を予測し、適切な対策を講じることが必要である。コンクリート中への塩化物イオンの浸透過程は、一般的に Fick の拡散方程式を用い、コンクリートの品質に応じた拡散係数および環境に応じたコンクリート表面の塩化物イオン量を与えてこれを解き、鋼材位置の塩化物イオン量を予測する方法がとられている。土木学会コンクリート標準示方書(以下、示方書という)では、拡散係数を水セメント比の関数で、表面の塩化物イオン量を海岸からの距離で与えている¹⁾。

本研究では、コンクリート供試体を北海道の海岸地域に 10 年間暴露し、表面からの深さ毎に塩化物イオン量を測定し、その結果を Fick の拡散方程式に合うよう逆解析し、見かけの拡散係数と供試体表面の塩化物イオン量を求め、それらの傾向を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験計画

表 - 1 に実験の要因と水準を示す。実験は 3 シリーズ実施し、図 - 1 に示すように暴露した。

2.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)、細骨材は大井川産川砂(密度 2.62g/cm³、吸水率 1.64%)、粗骨材は実験 A では青

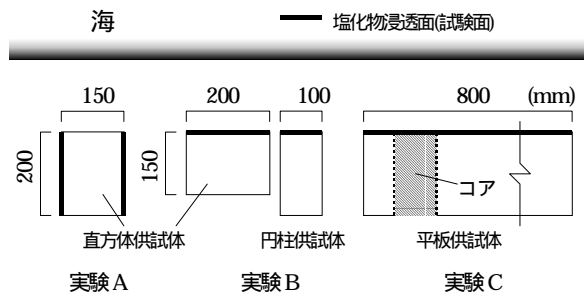


図 - 1 暴露状況

表 - 1 実験の要因と水準

要因	水準		
	A	B	C
実験シリーズ	A	B	C
試験面	海に対し左右	海方向	海方向
距離(m)	80	50, 80, 150	80
供試体形状	直方体	直方体, 円柱	平板から切取ったコア
暴露期間(year)	2, 8	1, 3, 5, 7	1, 3, 5, 7, 10
水セメント比(%)	45, 55, 65	60	60

*1 大木建設株式会社 工修 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博 (正会員)

梅産硬質砂岩砕石（密度 2.64 g/cm³，吸水率 0.59%，最大寸法 20mm），実験 B および実験 C では大井川産川砂利（密度 2.65 g/cm³，吸水率 0.59%，最大寸法 25mm）を使用した。

2.3 供試体作製

表 - 2 にコンクリートの調合を示す。フレッシュ性状は，スランプ 18cm，空気量 4.0%，練り上がり温度 20 を目標とした。実験 A では鋼製型枠を使用し 150×150×244mm に成形し，翌日の脱型後，7 日間湿布養生（20 ，80%）を行った。実験 B では表 - 3 に示すような種々の型枠および寸法とした。実験 C ではウレタン塗装合板製型枠を使用し 800×800×200mm に成形した。実験 B,C とも脱型後 28 日間乾燥した。各実験とも，養生後に試験面以外の面からの塩化物浸透防止のために試験面以外をエポキシ樹脂などでシールした。その後 7 日間室内（20 ，60%）で養生を行い，暴露に供した。実験 C においては所定の暴露期間終了後，図 - 1 に示すように平板供試体の任意の位置から 100×200mm の円柱コアを採取した。なお，採取跡は塩分浸透を防ぐためシールした。

2.4 暴露環境

供試体は，北海道岩内郡共和町梨野舞納 138 番地に暴露した。気象条件は，暴露場に最も近い寿都气象台で平年気温 8.2 （最低-2.7 ，最高 20.9 ），平年相対湿度 75%，平年降水量 1218mm であった。

2.5 試験方法

(1) 飛来塩化物イオン量

海岸から，50，80 および 150m の地点に土研式飛来塩化物捕集器を海に向けて設置し，1 ヶ月毎の飛来塩分量を測定した。測定期間は，1992 年 12 月から 1994 年 11 月までとした。

(2) 塩化物イオン量

コンクリート中の塩化物イオン量の測定は JCI-SC4(硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法) に準じて，全塩化物イオン量を電位差滴定法により測定した。測定用試料は，供試体を表面から 5~20mm の厚さで切断したもの

表 - 2 コンクリートの調合

実験 シリーズ	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
A	45	44	185	411	744	953
	55	46	185	336	807	953
	65	48	185	285	862	940
B, C	60	42	165	275	778	1089

表 - 3 実験 B の供試体寸法と使用型枠

記号	供試体寸法 (mm)	試験面の 型枠種別
cy	100×200	鋼製
m	150×150×200	
b	150×150×200	合板製
u	150×150×200	ウレタン塗装合板製

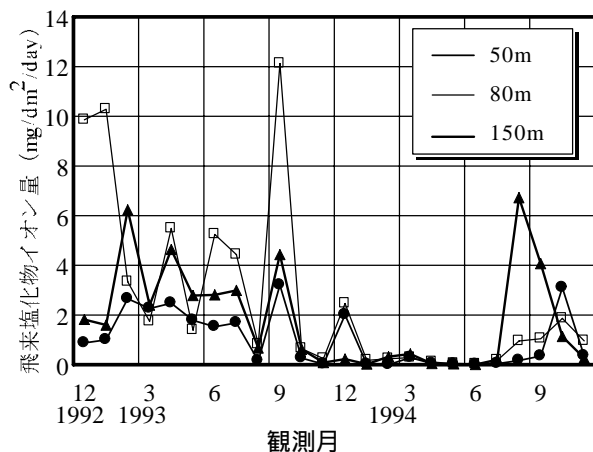


図 - 2 飛来塩化物イオン量

をクラッシャーで粗砕し，振動ミルで微粉碎して得た。測定は，塩化物イオンがほとんど検出できなくなる深さまで行った。

また，暴露期間中にコンクリート中に蓄積された塩化物イオン量を蓄積塩化物イオン量とし，実測値（切断幅の範囲の平均値に相当）に切断幅を乗じたものを積算する事によって算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 飛来塩化物イオン量

図 - 2 に飛来塩化物イオン量測定結果を示す。本実験では，海岸から 150m 地点の飛来塩分量が，80m 地点の結果よりも多い。これは，測定場所の地形や風の影響によるものと考えられる。

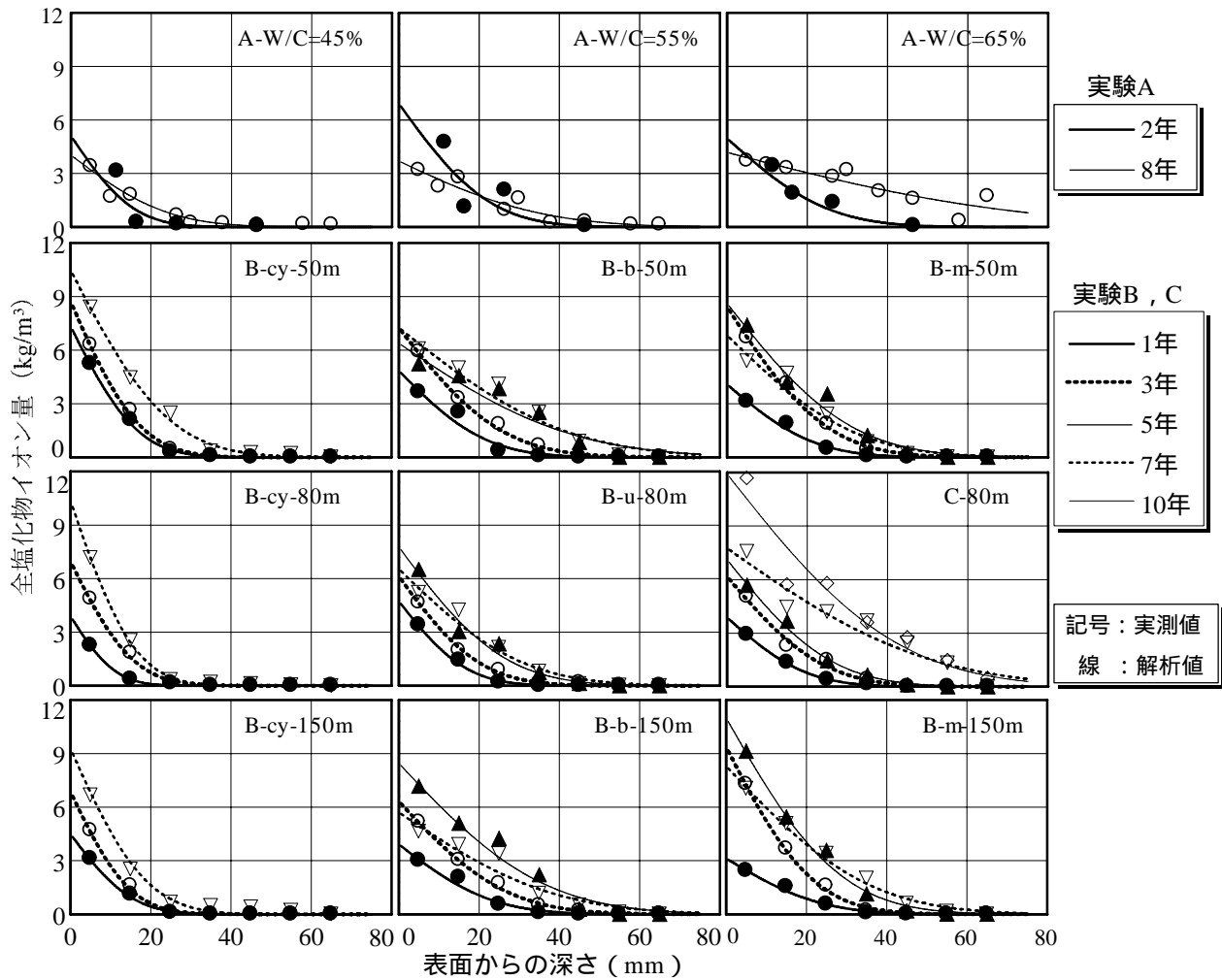


図 - 3 全塩化物イオン量測定結果

飛来塩化物イオン量は値にバラツキが見られるので、傾向を見るために2年間の値を平均すると、海岸から50mでは $2.66 \text{ mg/dm}^2/\text{day}$ 、80mでは $1.01 \text{ mg/dm}^2/\text{day}$ 、150mでは $1.86 \text{ mg/dm}^2/\text{day}$ となっている。

3.2 全塩化物量

図 - 3 に全塩化物イオン量測定結果を示す。実験 A については、海に対して左右側面にある試験面の両方からの値を統合して使用しているため、値にバラツキがみられる。暴露時の海に対する試験面の向きで比較すると、海方向のほうが表面の塩化物イオン量が多い。

次に、測定値から見かけの拡散係数 D と表面塩化物イオン量 C_0 を算定した。 D と C_0 は、式 (1) に示す Fick の一次元拡散方程式の厳密解を用いて、逆解析により求めた。その際、解析

の精度を向上させるため、蓄積塩化物イオン量についての実測値と、解析値である式 (1) の積分値が一致するようにした。図 - 3 に逆解析によって求めた D と C_0 をもとに計算した結果を示すが、実測値と良く一致している。

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

x : 表面からの深さ (mm), t : 暴露期間 (year)

C : 深さ x における塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_0 : 表面塩化物イオン量 ($x=0$ における塩化物イオン量 (kg/m^3))

D : 見かけの拡散係数 (cm^2/year)

erf : 誤差関数

3.3 見かけの拡散係数

表 - 4 に算定した見かけの拡散係数 D の一覧

表 - 4 見かけの拡散係数 D (cm²/year)

実験 シリーズ	距離 (m)	W/C (%)	暴露期間(year)							
			1	2	3	5	7	8	10	
A	80	45	-	0.38	-	-	-	-	0.22	-
		55	-	0.79	-	-	-	-	0.49	-
		65	-	0.98	-	-	-	-	2.07	-
B-m	50	60	1.46	-	0.64	0.59	0.45	-	-	-
B-b			1.46	-	0.68	1.14	0.75	-	-	-
B-cy			0.86	-	0.31	-	0.27	-	-	-
B-u	80	60	0.88	-	0.43	0.42	0.41	-	-	-
B-cy			0.40	-	0.26	-	0.11	-	-	-
B-m	150	60	1.70	-	0.49	0.49	0.55	-	-	-
B-b			1.66	-	0.74	0.80	0.66	-	-	-
B-cy			0.73	-	0.23	-	0.16	-	-	-
C	80	60	1.22	-	0.58	0.41	1.10	-	0.56	-

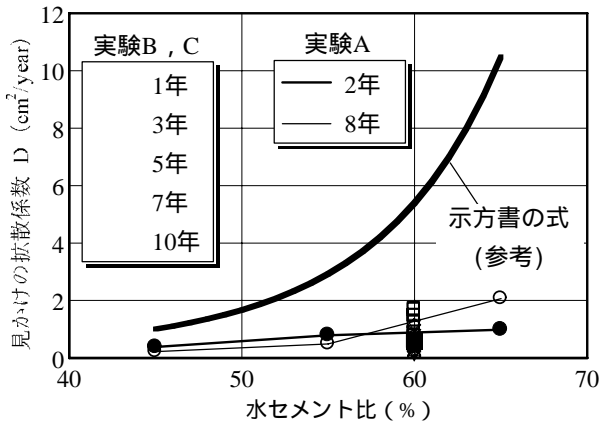


図 - 4 水セメント比と D との関係

を示す。また、図 - 4 に水セメント比と見かけの拡散係数 D の関係を示すが、実験 A, B, C で大きな差はなく、見かけの拡散係数は水セメント比が大きくなるにつれて大きな値をとる。一方、参考にした示方書の式は、水セメント比が大きくなるにつれて測定値との差が開き、過剰に安全側の評価になっている。図 - 5 に暴露期間と見かけの拡散係数 D との関係について示す。実験 A の結果より、水セメント比 55% までの範囲では、水セメント比が小さいほど拡散係数は小さい傾向がある。また、暴露期間が長くなるにつれて見かけの拡散係数 D は減少している。更に期間が経つと、蓄積塩化物イオン量および表面塩化物イオン量は共に一定値に収束するといわれており^{2), 3)}、そのことから拡散係数 D は 0 に収束すると考えられる。ここで、暴露期間と見かけの拡散係数 D との関係を定量評価するために、式(2)⁴⁾に合うように回帰分析

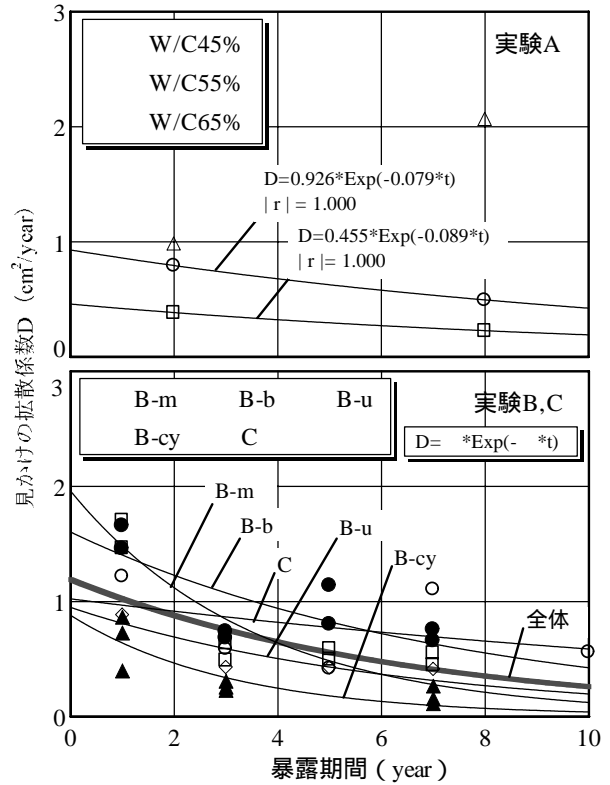


図 - 5 暴露期間と D との関係

表 - 5 実験 B および C における式 (2) の係数の回帰分析結果

	全体	B-m	B-b	B-u	B-cy	C
	1.191	1.960	1.600	0.946	0.878	1.019
	0.152	0.281	0.134	0.159	0.321	0.056
r	0.539	0.901	0.756	0.864	0.829	0.386

全体：B-m, B-b, B-u, B-cy, Cを全部含めた状態

表 - 6 表面の塩化物イオン量 C₀ (kg/m³)

実験 シリーズ	距離 (m)	W/C (%)	暴露期間(year)							
			1	2	3	5	7	8	10	
A	80	45	-	5.10	-	-	-	4.03	-	
		55	-	6.92	-	-	-	3.70	-	
		65	-	4.97	-	-	-	4.18	-	
B-m	50	60	4.08	-	8.42	8.62	6.83	-	-	
B-b			4.84	-	7.24	6.38	7.26	-	-	
B-cy			7.35	-	8.73	-	10.49	-	-	
B-u	80	60	4.73	-	6.12	7.77	6.54	-	-	
B-cy			3.89	-	6.95	-	10.35	-	-	
B-m	150	60	3.12	-	9.37	10.99	8.29	-	-	
B-b			3.91	-	6.32	8.45	5.70	-	-	
B-cy			4.48	-	6.85	-	9.26	-	-	
C	80	60	3.87	-	6.17	7.12	7.76	-	11.92	

を行い係数を算定した。

$$D = \text{係数} \cdot \exp(-\text{係数} \cdot t) \quad (2)$$

t : 暴露期間 (year) , 係数

D : 見かけの拡散係数 (cm²/year)

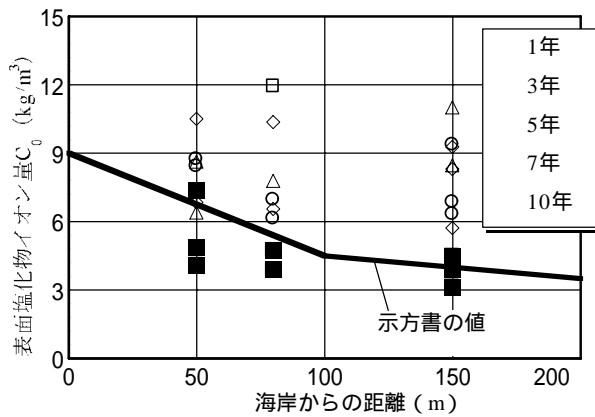


図 - 6 海岸からの距離と C_0 との関係

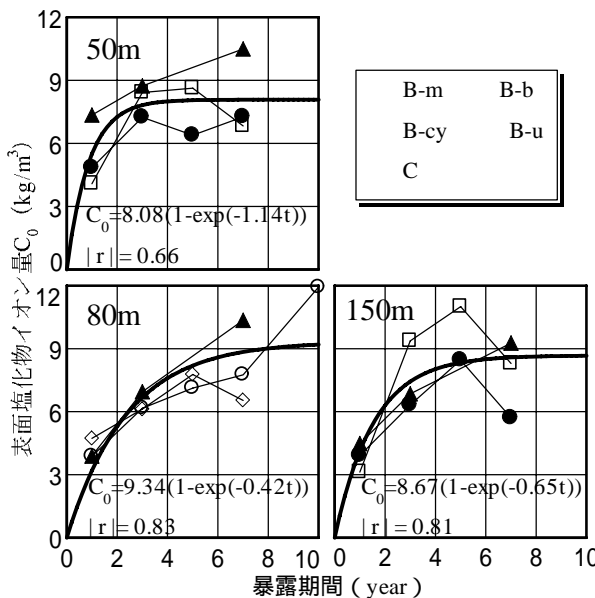


図 - 7 暴露期間と C_0 との関係

結果を図 - 5 中および表 - 5 に示す。特に、実験 B については型枠種類によってコンクリート表面の品質に差が生じ、それに伴う拡散係数の違いが発生すると考えられるので、型枠別においても回帰分析を行った。全実測値について、解析値は概ね一致している。

3.4 表面塩化物イオン量

表 - 6 に算定した表面塩化物イオン量 C_0 の一覧を示す。図 - 6 に海岸からの距離と表面塩化物イオン量との関係を示す。示方書との比較では、暴露 1 年目の結果については対応しているがそれ以降の経時変化には対応していない。図 - 7 に暴露期間と C_0 との関係を示す。表面の塩化物イオン量は時間と共に増大するが、暴露 5 年を過ぎた頃から最大値に達し、その後値が低

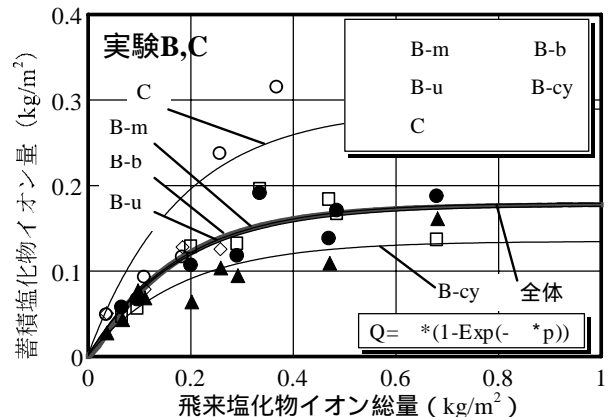


図 - 8 飛来塩化物イオン総量と蓄積塩化物イオン量との関係

表 - 7 実験 B 及び C における式 (4) の係数の回帰分析結果 ($\alpha = 5.575$)

	全体	B-m	B-b	B-u	B-cy	C
	0.180	0.178	0.176	0.180	0.134	0.290
型枠別/全体	1.000	0.989	0.978	1.000	0.744	1.611

下する。これは時間の経過によってコンクリート中の塩化物イオン量の最大値が内側に移動していく現象が、いくつかの実験で報告されており^{2),5)},その兆候が現れたものだと考えられる。しかし今回は、時間が経つにつれ、一定の値に収束すると仮定し式 (3) で回帰分析を行った。

$$C_0 = (1 - \exp(-\alpha t)) \quad (3)$$

t: 暴露期間 (year) , α : 係数

C_0 : 表面の塩化物イオン量 (kg/m^3)

3.5 蓄積塩化物イオン量

図 - 8 に実験 B, C における、飛来塩化物イオン総量(一日に飛来する塩化物イオン量 × 暴露日数)と蓄積塩化物イオン量との関係を示す。飛来塩化物イオン総量の増加とともに蓄積塩化物イオン量も増加するが、その増加量は飛来塩化物イオン総量が多いほど少なくなる。このような蓄積塩化物イオン量の経時変化特性は、ある収束値を持つ緩やかな指数増分傾向を示すことがいわれている²⁾。これより、実験 B, C の値について式 (4) を用いて回帰分析を行った。

$$Q = (1 - \exp(-\alpha \cdot p)) \quad (4)$$

Q: 蓄積塩化物イオン量 (kg/m^2)

p : 飛来塩化物イオン総量 (kg/m²)

, : 係数

分析結果と相関係数を図 - 8 中に併せて示すが、供試体の種類によって値が大きく外れるものが見られる。そこで全体の回帰分析結果の係数 =5.575 を固定し、供試体および型枠の種類毎に係数 を算出し、全体と比較した。その結果を表 - 7 に示す。係数 は蓄積塩化物イオン量の収束値を示しているが、直方体供試体に比べて、コア供試体の収束値は約 60% 高い値となり、型枠の種類による違いは少なかった。

3.6 塩化物イオン浸透シミュレーション

本実験で得られた D および C₀ を用い、海から 50m 地点に暴露した W/C=60% のコンクリートへの塩化物イオン浸透についてシミュレーションを行った。比較のために示方書に準じて算出した結果もあわせて図 - 9 に示す。また、暴露 10 年までの蓄積塩化物イオン量の経時変化予測を図 - 10 に示すが、塩化物イオンは 10 年で約 0.2kg/m² 蓄積される事が予測できる。見かけの拡散係数、表面の塩化物イオン量の経時変化を考慮することにより、より実際に即した塩化物イオン浸透予測をすることができた。

4. まとめ

海岸地域に暴露したコンクリート中の塩化物イオン浸透量の実測より、以下の知見を得た。

(1) 暴露期間中に飛来した塩化物イオンが、コンクリート中に蓄積する量は、ある収束値をもつ緩やかな指数増分傾向を示す。また、直方体および円柱供試体よりコア供試体が、蓄積塩化物イオン量が多い傾向が見られた。

(2) 本実験で得られた D, C₀ で、W/C=60%、海岸から 50m 地点での塩化物イオン浸透の例題をシミュレートし、10 年目までの蓄積塩化物イオン量を算出した結果、塩化物イオンは、10 年間で約 0.2kg/m² 蓄積される事が予測できた。

謝辞

本研究の実施にあたり、(株)八洋コンサルタ

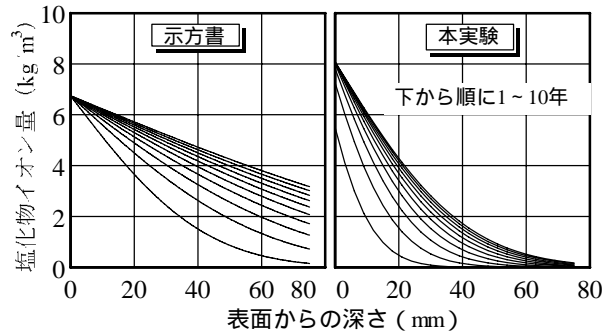


図 - 9 W/C=60%, 海岸から 50m の解析

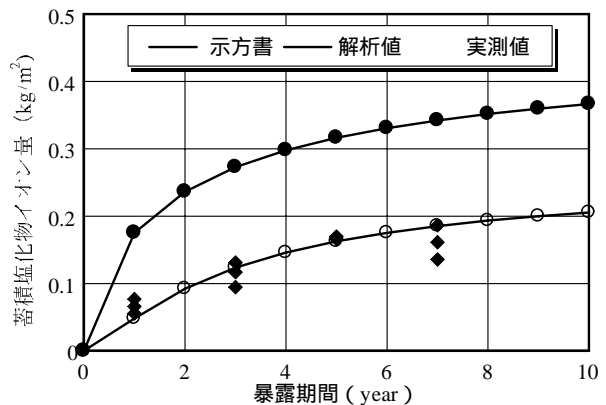


図 - 10 蓄積塩化物イオン量の予測

ントにご協力いただきました。

参考文献

- 1) 土木学会：平成 11 年度版コンクリート標準示方書 - 耐久性照査型 - [施工編]，2000.1
- 2) 山田義智，大城武，榎田佳寛：コンクリート中への塩化物イオン浸透性状に関する一考察，日本建築学会学術講演梗概集，pp961-962，1999.9
- 3) 谷川伸，山田義智，大城武，川村満紀：厳しい塩害環境下での鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 487 号，pp11-19，1996.9
- 4) 金谷光秀，榎田佳寛，阿部道彦，西山直洋：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.747-752，1996
- 5) 掛川勝，榎田佳寛，大城武ほか：飛来塩分とコンクリートへの塩分浸透に関する調査，日本建築学会学術講演梗概集，pp147-148，1994.9