

論文 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

金谷光秀*¹・榊田佳寛*²・阿部道彦*³・西山直洋*⁴

要旨：本研究は、海岸に5年間暴露したコンクリート中への塩化物イオン浸透量の測定結果において、各位置での塩化物イオン浸透量の経時変化をもとに各位置、各材齢での拡散係数を算出したものである。その結果、拡散係数は同一材齢では位置による差は小さいが、材齢による差は大きく、材齢とともに減少して一定の値に近づく。また、コンクリートの含水率の影響を受け、含水率が小さくなると拡散係数も小さくなる。さらに、その拡散係数を用いてコンクリート中への塩化物イオン浸透量の推定を行い、従来の方法による推定値と比較した。

キーワード：暴露試験、塩化物イオン浸透量、拡散係数、差分方程式、境界条件

1. はじめに

海岸に建設される鉄筋コンクリート構造物では、コンクリート中に塩化物イオンが浸透・拡散して、鉄筋を腐食させ、耐久性を損なわせる。そのため、コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散性状を定式化し、耐久設計に反映させることが重要である。本研究は、海岸に5年間暴露したコンクリート壁試験体への塩化物イオン浸透量および飛来塩化物イオン量を測定し、コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散現象における拡散係数ならびに塩化物イオン浸透量の推定方法を検討したものである。

2. 暴露試験方法

2. 1 試験体

試験体は、800mm×800mm×200mmの鉄筋コンクリート壁板を海側および山側となるように縦置きし、その上側に800mm×1000mm×200mmの鉄筋コンクリート床板を横置きしたものである。コンクリートに用いた骨材の試験結果を表-1に、コンクリートの調合および物性を表-2に示す。

試験体は、ウレタン樹脂塗装された型枠用合板を用い、所定の寸法に加工し枠組みした型枠の中にコンクリートを打設して作製した。コンクリートの製造は、練混ぜ容量100ℓのパン型強制練りミキサを用いて行った。試験体は、コンクリート打設後1カ月を経ってから暴露場所へ運搬し、設置した。試験体の裏側および側面は、そこから塩化物イオンが浸透するのを防止するために、ウレタン外壁用防水材を塗布して被覆した。

2. 2 暴露試験方法

暴露試験場所は、北海道積丹半島の付け根にある堀株川の河口岩内郡共和町宇梨野舞納地内であり、海から約80mの地点に図-1に示すように試験体を配置した。

*1八洋コンクリートコンサルタント(株) 技術部(正会員)

*2宇都宮大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

*3建設省建築研究所 第二研究部 無機材料研究室工博(正会員)

*4西松建設(株) 技術研究所 技術部(正会員)

表-1 骨材の物理試験結果

種類	産地	表乾比重	吸水率 %	洗い 損失量 %	塩分 含有量 %	単位容 積質量 kg/ℓ	実積率 %	粗粒率
細骨材	大井川産 川砂	2.62	1.64	1.04	0.001 以下	1.77	68.7	2.64
粗骨材	大井川産 川砂利	2.65	0.59	0.44	-	1.71	64.9	7.12

表-2 コンクリートの調合および物性

W/C %	s/a %	単位量 kg/m ³				スラ ンプ cm	空気 量 %	塩化物 イオン 量 kg/m ³	圧縮強度 N/mm ²			水の拡散係数 ¹⁾ cm ² /s
		W	C	S	G				7日	28日	1年	
60	42	165	275	778	1,089	18.0 ± 1.0	4.5 ± 0.5	0.020 ± 0.005	19.8	30.2	34.0	8.39 × 10 ⁻⁴

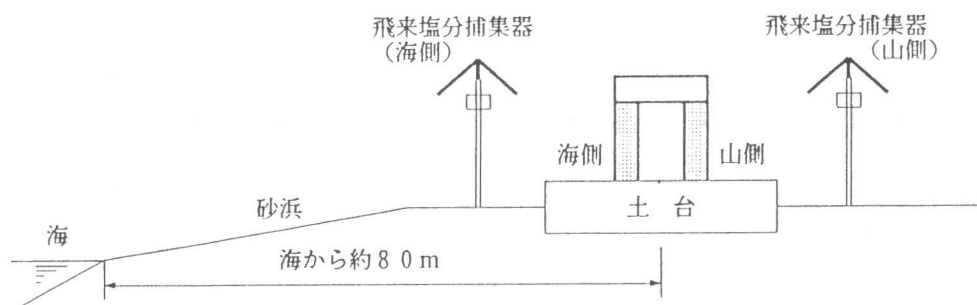


図-1 試験体の配置

2.3 塩化物イオン浸透量の測定方法

塩化物イオン浸透量の測定は、暴露後1年、3年、5年とし、φ10cmのコアを採取して行った。コンクリート中の塩化物イオン量の測定は、JCI「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(案)」に準拠して、全塩化物イオン量を電位差滴定法により測定した。コア試料は、表面より1cm毎に円盤状に切断して、塩化物イオンがほとんど検出できなくなる深さまで分析を行った。以下、表面から深さ1cmまでを0.5cmの位置、深さ1cmから2cmまでを1.5cmの位置、というように呼ぶこととする。

コンクリートの含水率は、コア試料中央部から割裂によってコンクリート片を採取し、絶乾状態にして測定した。コア採取時には水を使っているが、非常に短時間であり、コアの中心部の含水状態を大きく変化させることはないと考えられる。

2.4 飛来塩化物イオン量の測定方法

試験体の前後に各々1ヵ所ずつ、10×10cmの木枠内に2枚重ねのガーゼをはめこんだ飛来塩分捕集器を、海に臨む方向に設置して、飛来塩化物イオン量を測定した。ガーゼの交換は、毎月一回とし、JIS Z 2381「屋外暴露試験方法通則」によって塩化物イオン量の分析を行った。

3. 試験結果

3.1 塩化物イオン浸透量の測定結果

コンクリート中への塩化物イオン浸透量の測定結果を図-2に示す。また、採取したコアの含

水率の経年変化を図-3に示す。

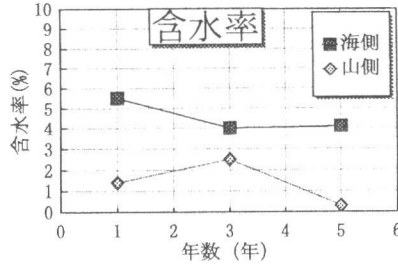
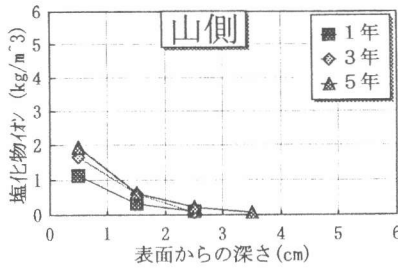
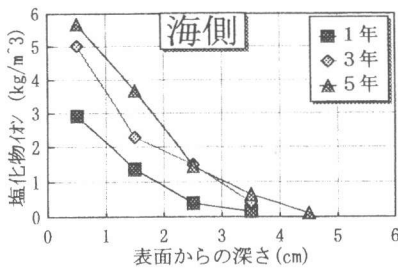


図-2 塩化物イオン浸透量の測定結果

図-3 含水率の経年変化

塩化物イオンは、暴露期間が長くなるにつれてコンクリートの奥深くまで浸透していき、いずれの深さにおいても浸透量が増加していくのが認められる。また、海側と山側では、海側の方が塩化物イオン浸透量が多いのがわかる。コンクリートの含水率は、海側も山側も材齢とともに減少していく傾向にあるが、5年目の海側の含水率が約4%であるのに対し、山側では1%以下と非常に乾燥している。この原因として、海からの湿った潮風の影響が考えられる。

3. 2 飛来塩化物イオン量の測定結果

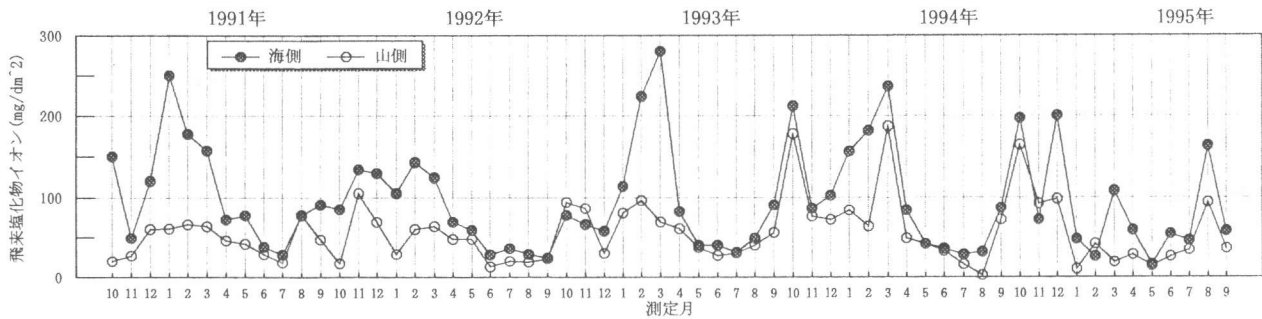


図-4 飛来塩化物イオン量の測定結果

1991年10月より5年間の飛来塩化物イオン量の測定結果を、図-4に示す。年ごとに多少のバラツキがみられるが、冬期に多い傾向にあり、海側は1年間で965~1287 mg/dm²、山側は558~875 mg/dm²である。5年間を平均すると、図-5に示すように海側は約1150 mg/dm²、山側は640 mg/dm²となっている。

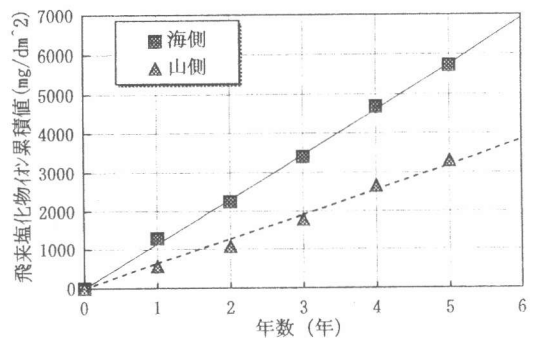


図-5 飛来塩化物イオンの累積値

4. 考察

4. 1 コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数の算定

コンクリート中への塩化物イオン浸透量の予測は、拡散理論を適用し、拡散方程式を解いて求めることが多い。この場合、拡散係数と境界条件を与えることが必要であるが、実構造物におけるコンクリートの拡散係数は、各深さでの分布を測定し、その測定結果に1次元の半無限固体への拡散方程式の解(1)をあてはめ、最小二乗法などを用いて拡散係数と表面の塩化物イオン量が求められる。^{2) - 4)}

$$C(X_i, T) = C_0(1 - \text{erf}(X_i / 2\sqrt{D_c \cdot T})) \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $C(X_i, T)$: 経過年数 T 、深さ X_i の位置の塩化物イオン量 (kg/m^3)
 C_0 : 表面の塩化物イオン量 (kg/m^3)
 X_i : 表面からの深さ (cm)
 D_c : 拡散係数 (cm^2/s または $\text{cm}^2/\text{年}$)
 T : 経過年数 (年)
 erf : 誤差関数

この方法を用いて、暴露試験結果から拡散係数および表面の塩化物イオン量を求めると図-6、図-7のようになる。これらの図によれば表面の塩化物イオン量は、年数とともに増加するが、拡散係数は材齢と共に減少していることがわかる。この方法は、一般によく用いられているが、拡散係数が材齢とともに変化するのであれば、ある材齢までの拡散係数の値を一定として拡散方程式を解いた解をあてはめることは、理論的に矛盾しているといえる。

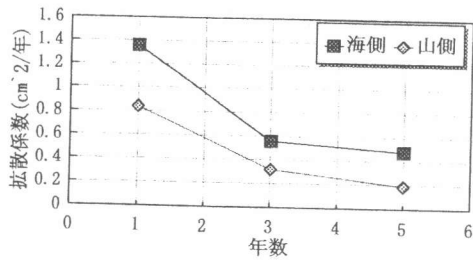


図-6 拡散方程式の解をあてはめて求めた拡散係数

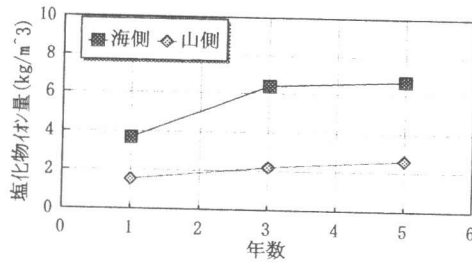


図-7 拡散方程式の解をあてはめて求めたコンクリート表面の塩化物イオン量

今回の暴露試験では、コンクリート中への塩化物イオン浸透量を深さ1cm毎に、また暴露期間1年目から2年毎に測定している。そこで、拡散係数が材齢およびコンクリート中での位置によって変化するとした拡散方程式(2)を考え、これを差分方程式(3)、(4)でおきかえて測定値を代入し、各々の位置および材齢での拡散係数を求めることとした。

$$\partial C / \partial t = D(t, x) * \partial^2 C / \partial x^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$\partial C / \partial t = \{C(t + \Delta t, x) - C(t, x)\} / \Delta t \dots\dots\dots(3)$$

$$\partial^2 C / \partial x^2 = \{C(t, x + \Delta x) + C(t, x - \Delta x) - 2C(t, x)\} / \Delta x^2 \dots\dots\dots(4)$$

その結果は、図-8に示すとおりであり、材齢によって大きく変化し減少する傾向にあるが表面からの拡散係数はそれほど変化がないことが認められた。海側と山側とで大きな差があるが、これらは同一の材料・調合のコンクリートであり、拡散係数は本来近い値になると考えられる。このように大きな差が生じた原因の一つとして、コンクリートの含水率に違いがあることが考えられる。

コンクリートの深さ方向には、拡散係数に大きな差がないことからその平均値を求め、材齢が長くなるにつれて一定の値に収束するとして拡散係数の変化を予測すると、図-9のように海側では $0.180\text{cm}^2/\text{年}$ 、山側では $0.031\text{cm}^2/\text{年}$ となった。

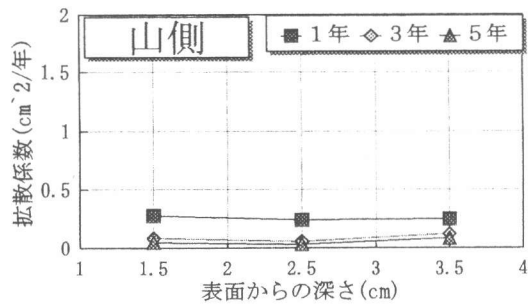
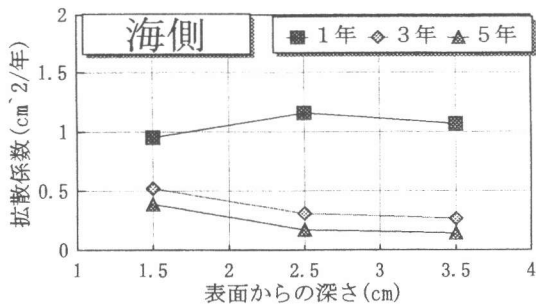


図-8 拡散係数

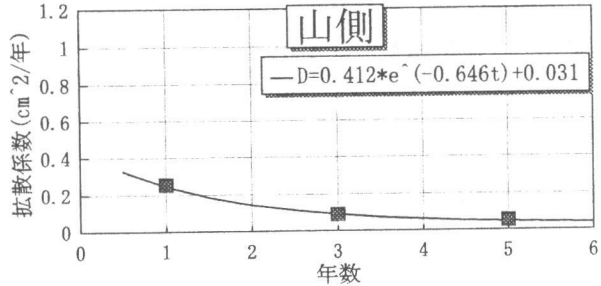
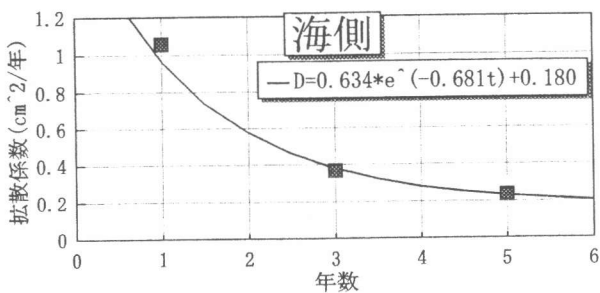


図-9 拡散係数の推定値の経時変化

4.2 表面から0.5cmの位置の飛来塩化物イオン量

拡散方程式を用いてコンクリート中の塩化物イオン浸透量を推定するには、拡散係数とともに境界条件を与えることが必要である。ここでは、境界条件として0.5cmの深さの塩化物イオン量を与えることにする。図-10は深さ0.5cmの塩化物イオン量が一定の値に収束するとして、その経年変化を予測したものである。海側では約 $5.9\text{kg}/\text{m}^3$ 、山側では約 $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ に収束している。

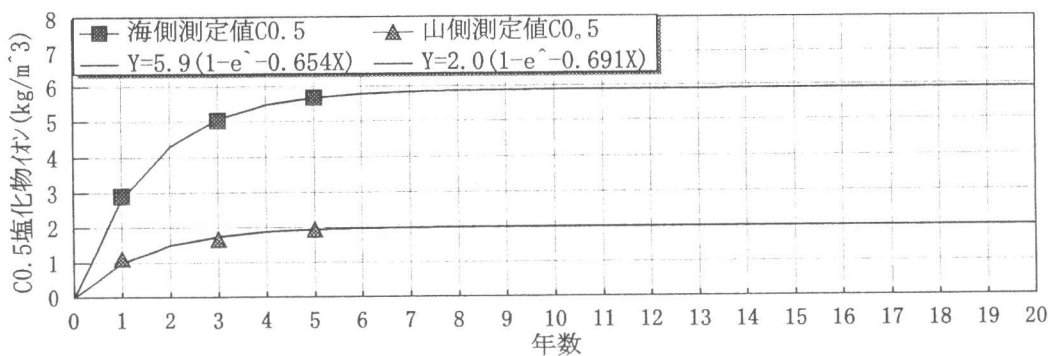


図-10 飛来塩化物イオンとC0.5塩化物イオン量の関係

4.3 コンクリート中への塩化物イオン浸透量の推定

上に述べた拡散係数および境界条件を用いて式(2)を差分方程式におきかえ、逐次、各位置での塩化物イオン量を計算する⁵⁾と図-11のようになる。なお、参考のためにこれまで多く用いられてきたある材齢の測定結果に拡散方程式の解をあてはめて拡散係数を求め、その値を用いて得られる拡散方程式の解から、材齢25年および50年の塩化物イオン浸透量の推定を行った結果を図-12に示す。これらの結果を比較すると、今回行った方法による推定結果に比べて、これまでの方法では塩化物イオンの浸透が非常に大きすぎるという結果になることが分かる。

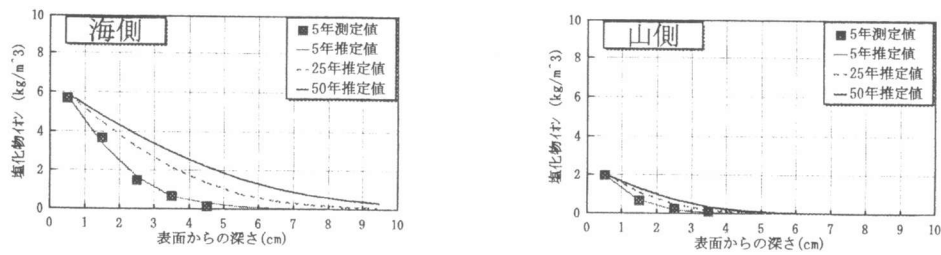


図-11 浸透塩化物イオン量推定結果

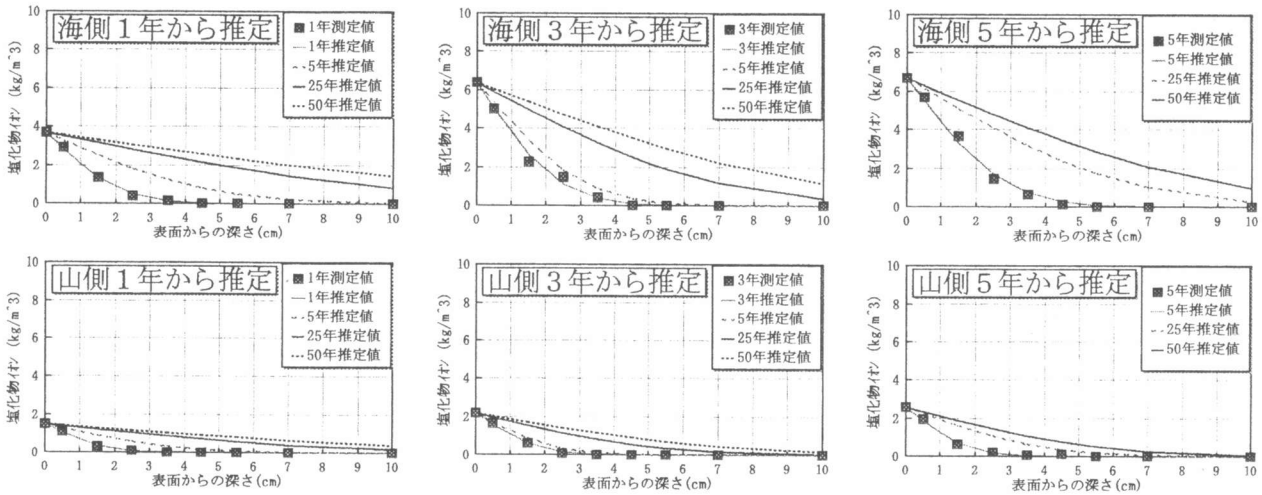


図-12 拡散方程式の解をあてはめて求めた拡散係数と表面塩化物イオン量から推定

5. まとめ

本研究は、海岸に五年間暴露したコンクリート中への塩化物イオン浸透量の測定結果から各材齢、各深さ毎の塩化物イオン浸透量の変化をもとに拡散係数、表層部の塩化物イオン量を求め、塩化物イオン量の分布を推定したものである。その結果、次のことがいえる。

- (1) コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数は、材齢とともに減少し一定の値に近づくが、コンクリート中の深さ方向での塩化物イオン拡散係数の変動は、それほど大きくない。
- (2) 海側と山側とでコンクリート中の塩化物イオン拡散係数は、大きく異なった。この原因としては、コンクリートの含水率は、山側の方がかなり小さく、コンクリートが乾燥している方が拡散係数は小さくなったと考えられた。
- (3) ある材齢の測定値に、拡散方程式の解をあてはめて求めた拡散係数と、表面塩化物イオン量を使って推定した塩化物イオン浸透量は、コンクリートの拡散係数の経時変化を考慮して、今回採用した塩化物イオン浸透量の推定値に比べて、かなり深い位置まで浸透するという結果を与える。

【謝 辞】

本実験は、(財)建築研究振興協会における塩害研究会において行ったものであり、清水主査(東京理科大学)、鎌田教授(北海道大学)、神谷氏・生野氏(西松建設札幌支店)、田辺氏(日本化成)、荒川氏(ダイフレックス)はじめとする委員会各位に感謝の意を表します。

【参考文献】

1) コンクリート工学ハンドブック改訂新版 10.6 防水性P.569 2) 岸谷孝一、笠井浩：鉄筋コンクリート構造物の塩分侵入に関する文献的研究：昭和60年度日本建築学会大会学術講演梗概集, P97~P98, 1985.10 3) 大城武、堀園義昭、谷川伸、永井健太郎：コンクリート中への塩素イオンの浸透に関する実験的および解析的研究：コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, P369~P374, 1987.6 4) 川上英男、脇敏一：コンクリートへの塩分浸透と塩害環境の評価：日本建築学会構造系論文報告集, No453, P9~P14, 1993.11 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書, 1992.10, 同(II), 1994.10