

塩害データベースを用いたコンクリート中への 塩化物イオン拡散の定量評価

前田聡¹・武若耕司²・山口明伸³

¹学生会員 工修 鹿児島大学大学院 理工学研究科博士後期課程 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: maech@oce.kagoshima-u.ac.jp

²正会員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

³正会員 博士 (工学) 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

塩害環境下の構造物において新設時の設計および維持管理を合理的に実施するためには、コンクリート中への塩化物イオンの拡散を精度良く予測する必要がある。本研究では、我が国で過去 28 年間に調査・報告された実構造物あるいは自然暴露供試体の塩化物イオン濃度調査データの整理・分析を行い、海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオン拡散に関するデータベースを構築した。さらに、構築したデータベースを分析した結果、コンクリート中への塩化物イオン拡散性に関して、海洋環境下のコンクリート構造物の予防保全までを含めた維持管理計画を立てる上で非常に有益な情報を得ることができた。

Key Words : salt damage, diffusion coefficient of chloride ion, marine concrete, data base

1. はじめに

性能照査型の設計では、時々刻々と変化するコンクリート構造物の性能を把握することが重要である。特に塩害環境下のコンクリート構造物においては、劣化過程の潜伏期の長さを決定する主要因である塩化物イオンが、コンクリート中へ拡散していく過程を把握することが不可欠となり、その精度良い予測ができれば、構造物の設計や維持管理を合理的に実施することも可能となる。

現在、塩化物イオンの拡散予測には、塩化物イオンの見かけの拡散係数（以下、塩化物イオン拡散係数と称す）が用いられている。塩化物イオン拡散係数は、コンクリート中へ拡散する塩化物イオンの速さを規定するものであり、2002 年度制定土木学会コンクリート標準示方書「施工編」によると、コア採取などの点検結果から拡散方程式の解を回帰分析し求めるとされている。ここで、この場合の点検結果とは、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布である。しかし、点検結果がない場合や新設時の維持管理計画においては、一般に、示方書に示している水セメント比と塩化物イオン拡散係数の関係式を用い、

塩化物イオン拡散係数を推定することになる¹⁾。

一方、コンクリート構造物の塩害問題の顕在化に伴い、実構造物の調査や自然環境下における暴露実験が実施され、これらの研究成果として、これまでコンクリート中の塩化物イオン濃度分布に関する実測データが多数蓄積されてきた。しかし、現状では、必ずしもこれら既往の調査データが正しく整理・分析され、積極的に利用されているとは言い難い。

このような現状を鑑み、著者らは、我が国の土木・建築両分野のセメント・コンクリート関係の論文集や学会誌などに報告された実構造物あるいは自然環境下における暴露供試体の調査データの整理・分析を行い、海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオン拡散に関するデータベースの構築を進めている。また、そのデータベースを用いた分析結果の一例を既に報告している^{2), 3)}。ここでは、これまでに構築したデータベースのデータをより詳細に整理・分析し、拡散予測に不可欠なパラメータである塩化物イオン拡散係数やコンクリート表面における塩化物イオン濃度などに及ぼす各種要因の影響を検討したので報告する。

2. 調査データ

本データベースは、過去 28 年間に我が国の土木・建築両分野のセメント・コンクリート関係の論文集や学会誌などで報告された実構造物あるいは自然環境下における暴露供試体から得られた調査結果を基に構築したものである。データベースを構築するために、これまでに、引用した文献数およびデータ数を表-1 に示した。この表でも示されているように、本データベースは、現在、コンクリート中の塩化物イオンに関連した 222 件の文献、ならびに 1840 組の塩化物イオン濃度分布の調査データから構築されている。

引用したデータはいずれも、データベース構築の際に設定した必須条件である以下の 4 項目が明記されたものである。すなわち、①コンクリートの配合（水セメント比およびセメント量）および使用セメントの種類、②実構造物および実験供試体の設置された環境条件と設置期間、③塩化物イオンの抽出方法および定量方法、④1 組のデータは 3 ヶ所以上の深さ位置における塩化物イオン濃度あるいは塩分濃度の測定結果である。

これらのデータは、表-2 で示されるようなデータベースの入出力項目に従って整理されている。ここでは、上記の 4 項目以外にも、引用文献名、著者、

文献の出典名およびコンクリート品質の一つであるスランプなども合わせて入力できる様になっている。

図-1 には、データベースを構築するために用いた文献を発表年ごとに示した。この図から、1980 年以前は年間数件しかなかった塩害関係の文献が、塩害による実害が顕在化し、産・学・官の各方面で研究が進められるようになった 1980 年代後半以降、急増したことが伺える。また、データベースの全データの中から、実構造物に関して調査されたデータのみを抽出し、実構造物の施工された年代ごとのデータ数をまとめたものが図-2 である。土木構造物は長期にわたり使用されるため、戦前に建設され、施工後 70 年以上経過した海洋コンクリート構造物の調査事例もあったが、全体としてはまだ 50 年にも満たない構造物における調査事例が大半を占めた。特に、高度経済成長期の 1955~1970 年（施工後 30~40 年）や除塩の不完全な海砂が使用されていた 1970~

表-1 引用文献数および調査データ数

| 関連学協会等 | 文献数 | データ数 |
|--------------|-----|------|
| 土木学会 | 91 | 505 |
| 日本コンクリート工学協会 | 91 | 773 |
| セメント協会 | 20 | 200 |
| 日本建築学会 | 20 | 362 |
| 合計 | 222 | 1840 |

表-2 データベースの入出力項目

| | |
|-------|---|
| 入力データ | 文献名、文献の出典名および発行年、論文番号、著者名、著者の所属 論文概要（実構造物、暴露実験）、実構造物の施工年、暴露地域、暴露年数 暴露環境（海中、干満、飛沫、海上大気、海岸地域、海岸線からの距離）、備考 水セメント比、単位セメント量、単位水量、セメントの種類、スランプ、空気量 初期塩化物濃度、測定内容および単位、測定深さごとの塩化物濃度（3点以上） |
| 出力データ | 塩化物イオン拡散係数、表面塩化物イオン濃度、付着塩化物イオン濃度 |

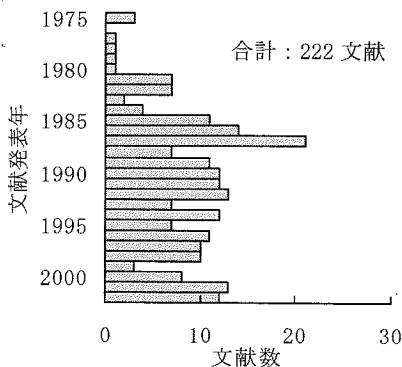


図-1 発表年ごとの引用文献数

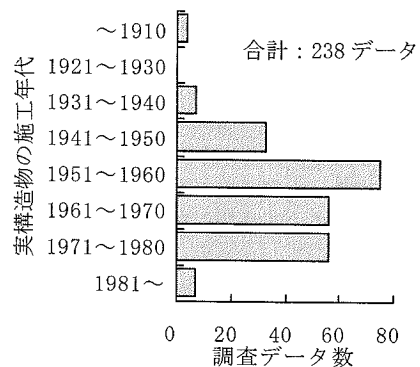


図-2 引用文献数および調査データ数

1980年(施工後10~20年)に施工された構造物のデータを整理,分析することは,今後,予防保全まで含めたコンクリート構造物の維持管理計画を立案する上で非常に有益な情報を提供することになると思われる。

3. データの処理方法

コンクリート中の塩化物イオン分布に関する調査データは,塩化物イオン拡散過程推定のためのより具体的な資料とするために,次のような処理を施した。

(1) 環境条件ごとの理論解

まず,コンクリート中への塩化物イオンの浸透はマクロ的には拡散現象とみなせることから,式(1)に示すFickの第2法則として知られる拡散方程式に従うものとした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dc \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

ここに, C: 液相の塩化物イオン濃度

Dc: 塩化物イオン拡散係数

x: コンクリート表面からの距離

t: 時間

次に,海洋環境における塩化物イオンの供給条件の違いから,式(1)を次の2つの条件で解いた解をそれぞれの環境にあるコンクリート中の塩化物イオンの理論解と見なした。すなわち,コンクリート表面が海水と接し,コンクリート表面における塩化物イオン濃度が一定と考えられる海中部のコンクリートについては,式(2)が塩化物イオン拡散の理論解であるとした。なお,干満帯では乾燥湿潤の繰返しが生じ12時間ごとと短いこと,ならびに藻や海洋付着生物などの影響により,コンクリート表面は比較的湿潤状態であると考え,干満帯においても海中部と同様に式(2)が適用できると見なした。

一方,飛沫帯および海岸地域においては,塩化物イオンは飛沫や海塩粒子として飛来することによって供給されるため,コンクリート表面における塩化物イオン濃度は時間とともに変化すると考えられる。そこで,これらの環境では,コンクリート表面に常時一定量で付着した塩化物イオンがすべてコンクリート中へ拡散すると仮定し,式(3)を塩化物イオン拡散の理論解とし用いた⁴⁾。

[コンクリート表面の塩化物イオン濃度が一定の場合(海中・干満帯)]

$$C(x,t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

[コンクリート表面に一定速度で塩化物イオンが付着する場合(飛沫帯・海岸地域)]

$$C(x,t) = 2A \left[\sqrt{\frac{t}{\pi D}} \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right) - \frac{x}{2D} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \right] \quad (3)$$

ここに, C(x, t): 深さ x(cm), 時刻 t(year)における塩化物イオン濃度(kg/m³)

C₀: 表面における塩化物イオン濃度(kg/m³)

D: 塩化物イオン拡散係数(cm²/year)

A: 単位時間あたりにコンクリート表面に付着する塩化物イオン濃度(kg/m²/year)

erf: 誤差関数

(2) 塩化物イオン濃度分布の回帰分析

最後に,コンクリート中における塩化物イオンの測定位置が3点以上である塩化物イオン濃度の分布データを1組とし,コンクリートの置かれている環境条件ごとに,各組のデータを式(2)あるいは式(3)で最小二乗近似させ,各組ごとのコンクリートの塩化物イオン拡散係数,ならびに海中・干満帯におけるコンクリート表面の塩化物イオン濃度(以下,表面塩化物イオン濃度と称す),あるいは飛沫帯・海岸地域において単位時間あたりにコンクリート表面に付着する塩化物イオン濃度(以下,付着塩化物イオン濃度と称す)を求めた。

4. データベースからのデータの抽出方法

(1) データベースを用いた既往の分析結果

図-3には一例として,データベースを基にコンクリートの塩化物イオン拡散係数を推定し,普通ポルトランドセメントを用いた場合の塩化物イオン拡散係数を水セメント比との関係で整理した著者らの既往の成果を示した³⁾。このときの分析結果においては,水セメント比が同程度であるにもかかわらず,塩化物イオン拡散係数にはかなりのばらつき(2~3桁の相違)が見られる結果となっていた。そこで今回は,まず,このばらつきの原因について詳細に検討を行った。そしてその結果,ばらつきの中には,

コンクリートの品質自体のばらつきによるもの以外に、データベースからデータを抽出・整理、あるいは分析する際の問題に起因すると考えられるものもかなりあることが明らかになった。そこで、使用データの抽出条件をこれまでより細かく設定し、データを厳選することで、分析結果の信頼性を向上させることを試みた。

(2) データの抽出方法の検討

上記2. で示したように、データベースの構築にあたっては、これまで、データ抽出に関わる4つの条件をクリアしたものをデータとして取り入れ、その全てを分析に使用していた。しかし、そのデータの中には、上記の4つの条件以外の項目において不明な点があったり、より詳細な検討が必要な項目も含まれていることが判明した。そこで、新たに表-3に示すようなデータの抽出条件および検討項目の取り扱い方法を規定し、十分に吟味しながらデータベースからデータを抽出することにした。新たに取り扱った項目としては、コンクリートの中性化によるフリーデル氏塩の分解とこれに伴う塩化物イオンの遊

離ならびに中性化フロント部分における塩化物イオンの濃縮現象、海砂などの使用で予めコンクリート内に混入された塩化物イオンの定量化、および文献に示されている塩分の定義、などに関する問題が含まれる。この内、特に塩化物イオンに注目する意味

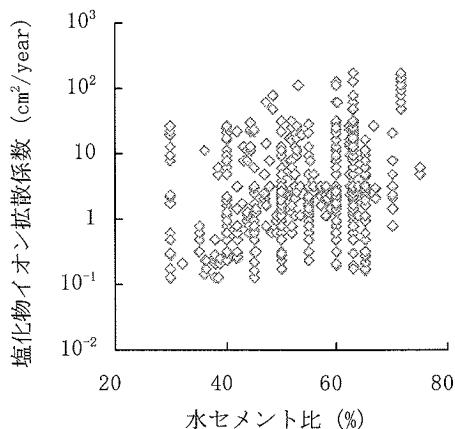


図-3 普通ポルトランドセメントを用いた場合の水セメント比と塩化物イオン拡散係数の関係 (全データの分析結果、合計：659データ)

表-3 データの抽出条件と検討項目の取り扱い規定

| 検討項目 | データの抽出条件と取り扱い |
|---------------|---|
| 文献の種類 | 実構造物、あるいは自然環境下での暴露実験であることが明記してあること |
| コンクリート配合 | 水セメント比、セメント量、セメントの種類が明記してあること。ただし、混和材混入の場合は水セメント比は水結材比とし、セメント量に混和材量を加味した。また、実構造物の場合には必ずしもコンクリート配合が明記してある必要はない |
| 暴露環境 | 海中や干満帯、飛沫帯や海岸地域、あるいは海岸線からの距離などが論文中に明記してあること |
| 設置期間 | 実構造物については施工年あるいは竣工年、暴露実験については暴露期間が明記してあること |
| 試料の採取方法 *1 | 実構造物については、原則、コア採取であること |
| 塩化物の定量方法 *1 | 電位差滴定法、もしくは吸光度法であること |
| 測定内容の取り扱い *2 | 塩化物量、もしくは塩化物濃度と明記してあること。また、NaClの場合は塩化物濃度に換算した。塩分と塩化物、あるいは全塩分と可溶性塩分の判別ができないデータは除外した |
| 中性化領域の取り扱い *2 | 中性化領域のデータは全て除外し、中性化部より内部の塩化物イオンの分布データを用いた |
| 初期塩化物の取り扱い *2 | 実構造物の場合は初期塩化物の混入はないとした。暴露実験については初期塩化物の混入がないものについて抽出した |
| 補修や防食 *1 | 実構造物については補修・補強をしていないこと。暴露実験では被覆などの防食処理を施していないこととした |
| データの重複について *1 | 詳細に検討し、1つのデータにまとめた |

*1 再度チェックし直した項目

*2 新しく取り扱いを規定した項目

から、論文中の塩分の定義については十分に検討し、塩化ナトリウム濃度なのか塩化物イオン濃度なのか判別できない「塩分濃度」として記載されたデータは、分析には使用しないことにした。なお、塩化ナトリウム濃度と明記されたデータは、従来と同様に塩化物イオン濃度に換算して使用した。結果として、データベースから抽出し本報告で取り扱ったデータは、コンクリート中の塩化物イオン拡散に関連した合計 867 組のデータ（文献としては 118 件）となった。

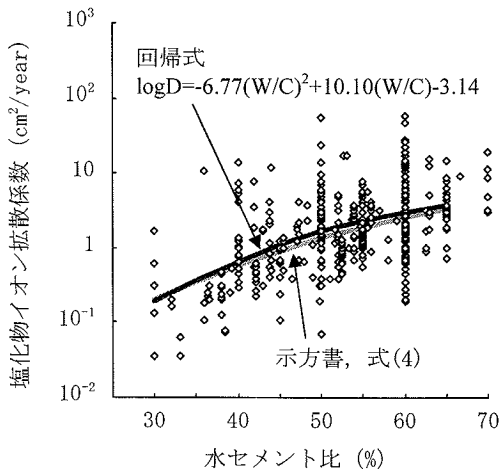
5. 厳選データの分析結果および考察

(1) 塩化物イオン拡散係数

本節では、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布に対して、式(2)、(3)を用いて逆算し、求めたコンクリートの塩化物イオン拡散係数について検討した。塩化物イオン拡散係数に影響を及ぼす要因として検討した項目は、水セメント比、セメントの種類、単位セメント量、実構造物の施工年および調査対象物である。

a) 水セメント比およびセメントの種類の影響

各種セメントごとのコンクリートの塩化物イオン拡散係数に関する整理結果を図-4 に示した。なお、同図には、今回整理した拡散係数と水セメント比の関係を回帰した式、および同様の関係について 2002 年制定土木学会コンクリート標準示方書「施工編」に示されている式(4)、(5)も併記した。



(a) 普通ポルトランドセメントの場合
(データ数: 415)

[普通ポルトランドセメントを使用する場合]

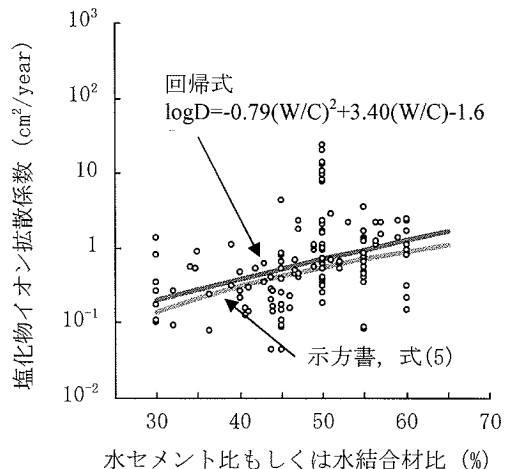
$$\log D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (4)$$

[混合セメント（高炉セメントやシリカフェーム、フライアッシュ）を使用する場合]

$$\log D = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (5)$$

ここに、W/C：水セメント（水結合材）比

使用データの絞込みを行った今回の分析結果においても、水セメント比と塩化物イオン拡散係数の関係にばらつきは見られるが、全データを分析に使用した場合の図-3 と比較すると、そのばらつきは明らかに小さくなっていることが分かる。さらに、この結果から塩化物イオン拡散係数は、いずれのセメントにおいても概ね $10^{-1} \sim 10 \text{ cm}^2/\text{year}$ の範囲にあった。また、混合セメント（高炉スラグ、シリカフェーム、フライアッシュを混和材として使用した場合も含む）を使用した場合には特異的に存在する一部のデータを除いて、塩化物イオン拡散係数が $10 \text{ cm}^2/\text{year}$ 以上のデータは見られないが、普通ポルトランドセメントを使用した場合には、塩化物イオン拡散係数が $10 \text{ cm}^2/\text{year}$ となるデータも数多く見られた。一方、本分析データより得られた回帰式より、低水セメント比においてはセメントの種類が塩化物イオン拡散係数に及ぼす影響について有意な差は認められないが、水セメント比 45%～65% の範囲においては、普通ポルトランドセメントに比べ混合セメントを使用した場合には、同一の水セメント比における塩化物イオン拡散係数は半分以下に減少することが分かる。



(b) 混合セメントの場合
(データ数: 139)

図-4 水セメント比と塩化物イオン拡散係数の関係（厳選データの分析結果）

一方、いずれのセメントを用いた場合も、データの回帰式は示方書で示された式と同様に上に凸の放物線で近似され、水セメント比の増大に伴い、塩化物イオン拡散係数は増加していた。また、その増加割合も、セメント種類のいかんによらず、示方書の式とほぼ同様の結果を示していた。

b) 単位セメント量の影響

図-5には一例として、普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比 45%, 55%, 65%の場合について、塩化物イオン拡散係数と単位セメント量の関係、およびそれらの関係を回帰した式を示した。この結果、水セメント比 55%および65%の場合では単位セメント量が増えても塩化物イオン拡散係数はほとんど変化せず、ほぼ一定の値を示していたが、水セメント比 45%の場合には、単位セメント量が増大するに伴い、塩化物イオン拡散係数は明らかに低下する傾向を示した。これについては、水セメント比が比較的大きな場合には、単位セメント量の範囲が250~350kg/m³程度に限られることを考慮すると、単位セメント量がおおよそ350kg/m³以下の範囲ではセメント量の影響はあまり現れないが、それ以上のセメント量となると、セメント水和物中への塩化物イオンの固定化量の増大などが、塩化物イオンの拡散性に顕著に影響するようになることを予想させる。いずれにしてもこの結果から、特に、単位セメント量が大きくなるような低水セメント比の場合、現在、示方書に示されている式(4)および(5)のように、水セメント比のみから便宜的に塩化物イオン拡散係数を推定する方法では限界があり、今後、水セメント比のみではなく、単位セメント量などの影響も加味することも必要となってくるものと思われる。

c) 実構造物の施工年の影響

コンクリートの品質は構造物が施工された時代に

よって異なることが指摘されている。そこで、図-6には、海洋環境下に施工された実構造物に関して調査されたデータのみを抽出し、実構造物の施工年ごとに塩化物イオン拡散係数をまとめた結果を示した。その結果、実構造物のコンクリートにおける塩化物イオン拡散係数の平均は、施工年に拘らずおよそ1cm²/yearとなり、施工年代に拘らず、調査対象構造物の強度や耐久性に対する要求性能は、ほぼ同程度であると考えられる。その一方で、年代別の傾向としては、1950年以前では5cm²/yearを上回る塩化物イオン拡散係数を有するコンクリートはほとんど見当たらず、概ね良好なコンクリートであったと思われる。しかし、高度経済成長期を迎えた1950年代後半からは混和剤などの開発によりコンクリートの品質が向上し、塩化物イオン拡散係数が10⁻¹cm²/year以下の良質なコンクリートがある一方で、5cm²/year

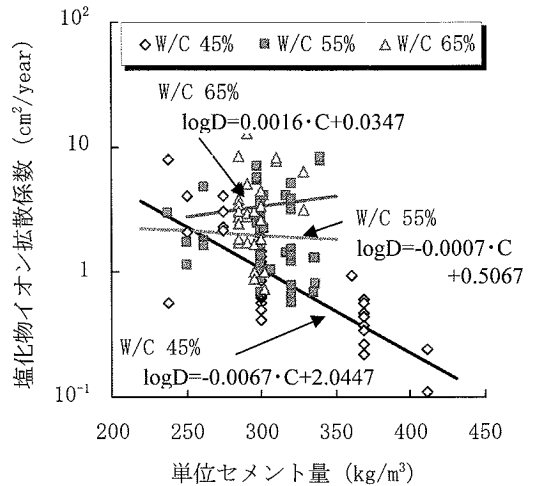


図-5 単位セメント量と塩化物イオン拡散係数の関係 (普通ポルトランドセメント)

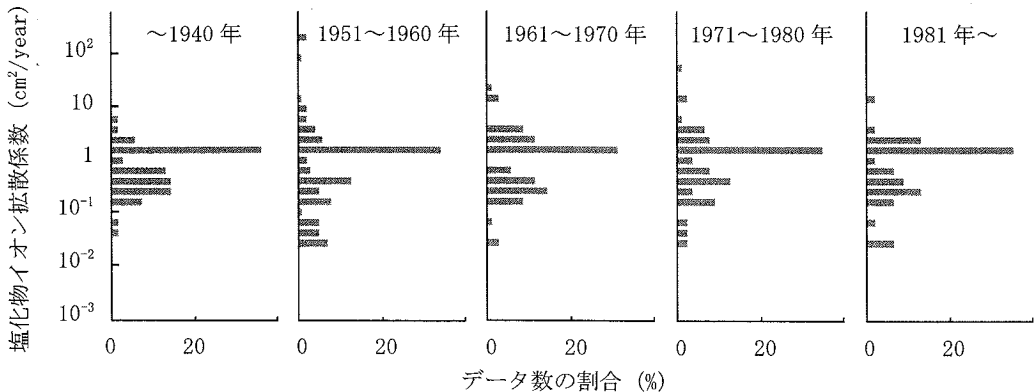


図-6 実構造物における施工年ごとの塩化物イオン拡散係数 (普通ポルトランドセメント)

以上の耐久性に乏しいコンクリートも施工されていることがわかる。すなわちこの結果は、高度経済成長期においてコンクリートの配合改善や混和剤の開発によるコンクリートの品質向上の一方で、これまでも各所で議論されている急速施工や施工の合理化によるコンクリートの施工状態の不良が、塩化物イオン拡散係数に少なからず影響していることを予想させる。

d) 調査対象物の影響

普通ポルトランドセメントを用いて造られた実構造物と実験供試体のデータをそれぞれ別々に分析し、水セメント比と塩化物イオン拡散係数の関係、およびその関係を回帰した式を図-7に示した。この結果、回帰式の傾向より、一般に実験室などで造られ、比較的良好な耐久性を有していると考えられる実験供試体に比べ、主に現場施工による実構造物の方が、同一水セメント比における塩化物イオン拡散係数がかえって小さくなることが分かった。この原因については、実構造物における調査時期（施工後約30～80年）に比べて、実験供試体の暴露期間（約1～10年）は相対的に短期であることから、塩化物イオン拡散係数の算定結果に材齢の影響が含まれていることが考えられる。なお、示方書の式は実験供試体と実構造物それぞれにおける回帰式の間位置するようであった。

(2) 表面塩化物イオン濃度

ここでは、厳選データの中から海中あるいは干満帯に暴露されたコンクリートの調査データのみを抽出し、式(2)を用いて推定した表面塩化物イオン濃度について検討した。表面塩化物イオン濃度に影響を及ぼす要因として検討した項目は、水セメント比、セメントの種類、海中や干満帯などの暴露環境、調査対象物についてである。

a) 水セメント比およびセメントの種類の影響

図-8には、コンクリート表面の塩化物イオン濃度と水セメント比の関係について、普通ポルトランドセメントあるいは混合セメントを使用したときの推定結果を比較して示した。この結果、海水と接するコンクリート表面の塩化物イオン濃度は、低水セメント比においてやや大きくなる傾向も伺えるが、ばらつきも大きいので、全体的には10～20kg/m³の範囲になるようであった。ただし、平均値について見ると、混合セメントを用いた場合には、普通ポルトランドセメントを使用した場合に比べコンクリート表面の塩化物イオン濃度がおよそ4kg/m³大きい結果となった。また、平成14年度示方書施工編「耐久性照査型」の改訂資料によると、海中部や干満帯の構

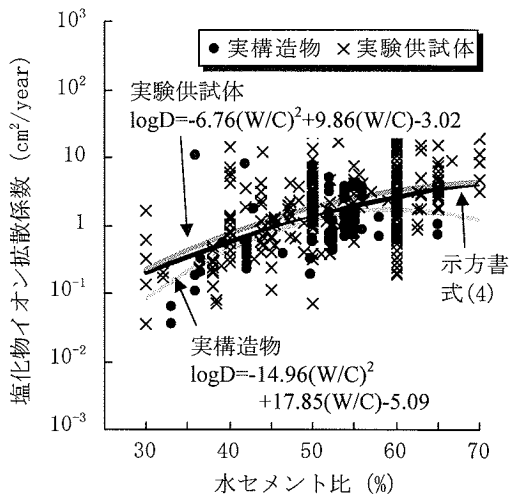


図-7 塩化物イオン拡散係数の調査対象別分類 (普通ポルトランドセメント)

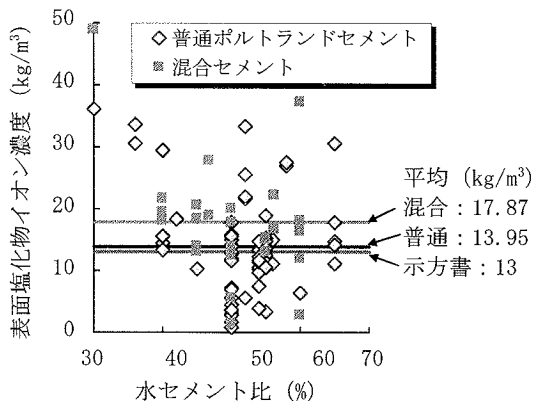


図-8 水セメント比と表面塩化物イオン濃度の関係 (データ数: 99)

造物において設計上設定されるコンクリート表面の塩化物イオン濃度は飛沫帯と同等 (13kg/m³) とされているが⁵⁾、この値と比較して、今回の推定結果は、普通ポルトランドセメントを使用した場合には、ほぼ同程度であったが、混合セメントを使用したコンクリートでは、幾分か大きな値を示していた。

なお、今回の解析においてセメントの種類の違いによってコンクリート表面の塩化物イオン濃度の平均値に差が生じた原因としては、次のことが考えられる。普通ポルトランドセメント、あるいは混合セメントを用いた水セメント比の等しいコンクリート中の塩化物イオン濃度分布の代表的な例を図-9に示した。前述の図-5の結果より明らかなように、一般に塩化物イオン拡散係数は混合セメントを用いた場合より普通ポルトランドセメントを用いた場合

の方が大きい傾向にある。そのため、普通ポルトランドセメントを用いた場合、塩化物イオンはコンクリート中へ比較的拡散しやすく、なだらかな塩化物イオン濃度分布を示す。一方、混合セメントを用いた場合、塩化物イオンはコンクリートの内部へ拡散しにくく、また固定化の影響もあり、表面付近に蓄積して大きな値を示す傾向にある。本分析では、表面塩化物イオン濃度もコンクリート中の全塩化物イオン濃度分布を基に推定した、いわゆる「見掛けの値」であるため、結果として固定化等の影響も加味され、普通ポルトランドセメントを用いた場合より混合セメントを用いた場合の方が、表面塩化物イオン濃度が大きくなったものと思われる。ただし、示方書に示されているような塩化物イオン浸透量の推定において、塩化物イオン拡散係数として「見掛けの値」を用いる場合には、表面塩化物イオン濃度においても、ここで示したような「見掛けの値」を使用するのが妥当であると考えられる。

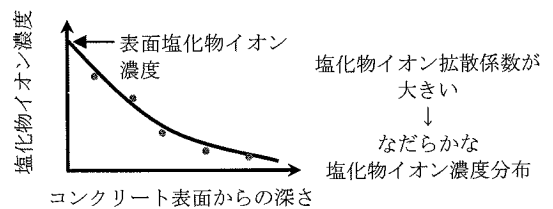
b) 暴露環境の影響

使用したセメントの種類ごとに、コンクリート表面の塩化物イオン濃度を干満帯と海中で比較した結果を図-10 に示した。普通ポルトランドセメントを使用した場合、表面塩化物イオン濃度の平均は干満帯より海中の方がやや大きくなった。一方、混合セメントを使用した場合、表面塩化物イオン濃度の平均は海中、干満帯のいずれも約 18kg/m^3 であり、今回の調査データからは干満帯における乾燥湿潤の繰返しの影響は認められなかった。これらのことから、少なくとも見かけ上は、今回仮定したように干満帯においても海中と同じように表面塩化物イオン濃度が一定であるとしてコンクリート中の塩化物イオン

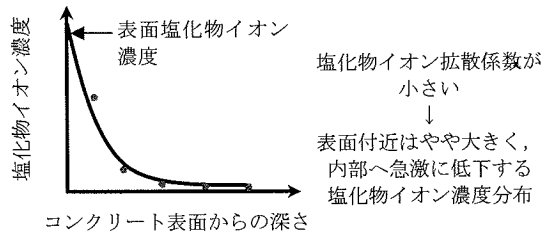
濃度分布を推定しても、差し支えないと思われる。

c) 調査対象物の影響

図-11 には、海中に暴露されたコンクリート表面の塩化物イオン濃度と水セメント比の関係について、普通ポルトランドセメントを用いて造られた実構造物の場合と実験供試体での場合を比較して示した。データ数は少ないものの、平均的な傾向として表面塩化物イオン濃度は、実験供試体より実構造物の方が約 5.5kg/m^3 大きい結果となった。このことは、この図に用いた実験供試体の暴露期間が1~10年であるのに対し、実構造物の暴露期間は30~80年と長期であること、および前述の図-7 に示したように塩化物イオン拡散係数は実験供試体より実構造物の方が

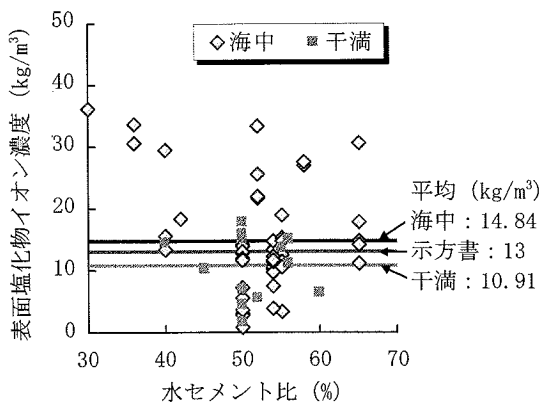


(a) 普通ポルトランドセメントの場合

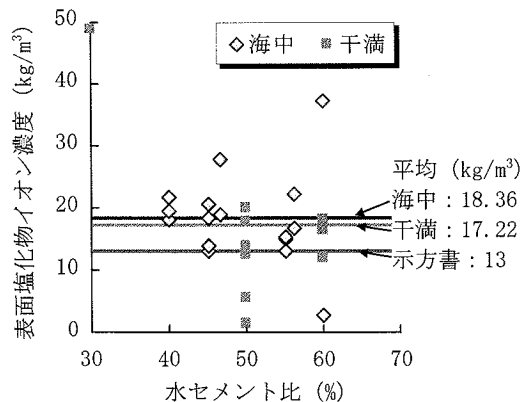


(b) 混合セメントの場合

図-9 コンクリート中の塩化物イオン濃度分布の概要図



(a) 普通ポルトランドセメントの場合
(データ数: 71)



(b) 混合セメントの場合
(データ数: 28)

図-10 表面塩化物イオン濃度の暴露環境による比較

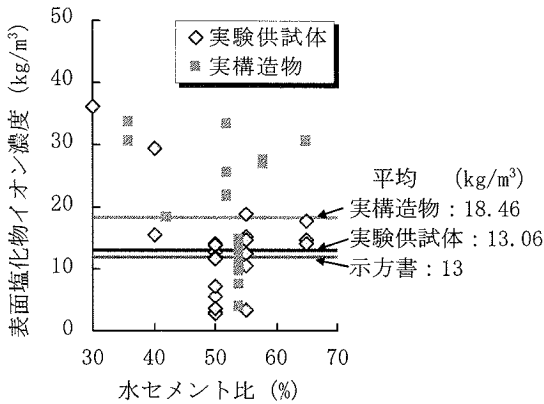


図-11 表面塩化物イオン濃度の調査対象物による比較 (海中, データ数: 40)

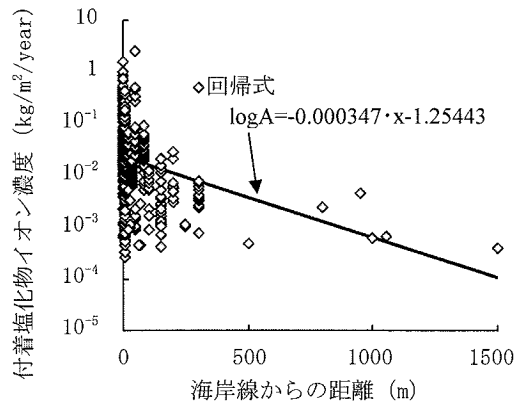


図-12 付着塩化物イオン濃度と海岸線からの距離の関係 (全国, データ数: 559)

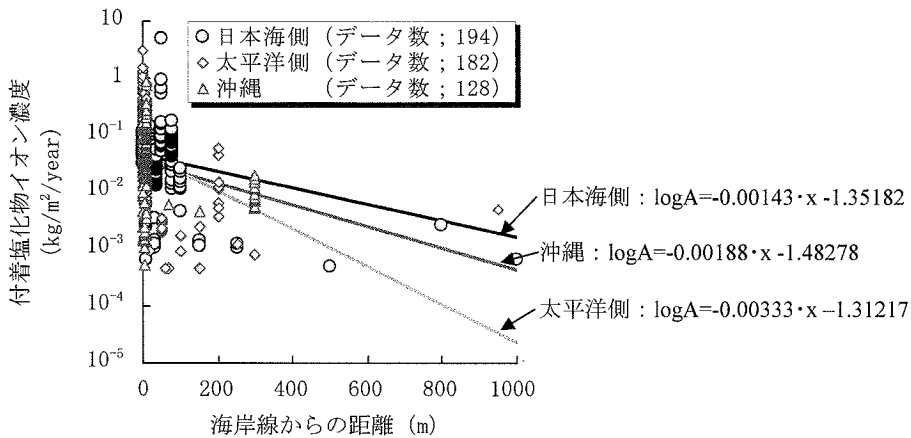


図-13 付着塩化物イオン濃度と海岸線からの距離の関係 (地域別)

小さいことを考慮すると、コンクリート表面が常時海水に浸漬されている状態であっても、固定化される分も含めてコンクリートの表層部分に蓄積される塩化物イオン濃度は時間とともに大きくなり、結果として、実構造物における表面塩化物イオン濃度が大きくなったものと考えられる。

(3) 付着塩化物イオン濃度

ここでは、厳選データの中から、そのデータの得られた場所が飛沫帯、海上大気中、海岸地域であるもの、あるいは海岸線からの距離が明記されているものを抽出し、式(3)を用いて付着塩化物イオン濃度を推定した。そして、この付着塩化物イオン濃度は、実験供試体や実構造物の設置環境に大きく影響を受けると考えられることから、海岸線からの距離や暴露地域が付着塩化物イオン濃度に及ぼす影響について検討を行った。

a) 海岸線からの距離の影響

図-12 は、日本全国から得られた付着塩化物イオン濃度のデータをひとまとめにして示したものである。なお、図中の回帰式で用いている、A は付着塩化物イオン濃度 ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{year}$) を、また、x は海岸線からの距離 (m) を示している。なお、海岸線からの距離については、引用文献中に明記してある場合はその値を用いたが、環境条件が飛沫帯、海上大気中あるいは海岸地域とだけ記述されているものについては、便宜上、飛沫帯は 0m、海上大気中は 5m、海岸地域は 10m と海岸線からの距離を仮定して解析を行った。解析結果を見ると、特に海岸線の周辺においてばらつきが大きいものの、この領域の付着塩化物イオン濃度は、概ね $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{kg}/\text{m}^2/\text{year}$ であり、海岸線から 1000m 離れた沿岸地域でも、付着塩化物イオン濃度は $10^{-3} \text{kg}/\text{m}^2/\text{year}$ となっていた。また、海岸線から離れるに従って、付着塩化物イオン濃度は指数関数的に減少する傾向も確認された。

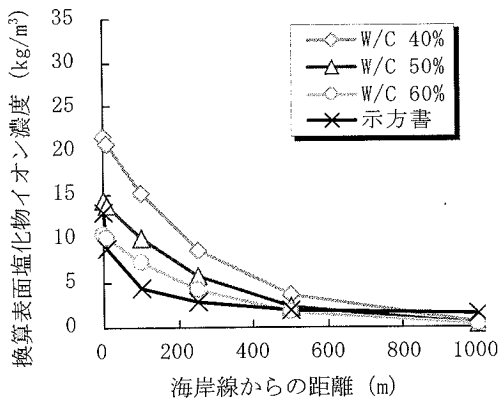
b) 地域による影響

図-13には、冬季に強い北西の季節風により飛来塩化物イオンによる塩害が多数報告されている日本海側、夏季の台風による飛来塩化物イオンが考えられる太平洋側および沖縄における付着塩化物イオン濃度を比較して示した。いずれの地域においても、飛沫帯やその周辺においては、約 $10^{-2} \sim 1 \text{kg/m}^2/\text{year}$ の付着塩化物イオン濃度があり、有意な差異は認められない。また、地域のいかに拘らず海岸線から離れるのに従って、付着塩化物イオン濃度は指数関数的に減少するようであった。ただし、その減少割合については、太平洋側や沖縄に比べ日本海側の方が小さい。例えば、海岸線から約 400m 離れた箇所の日本海側の付着塩化物イオン濃度は、太平洋側の約 10 倍の量となっていた。このことは、日本海側が太平洋側に比べて極めて苛酷な塩害環境であることを示しているとともに、付着塩化物イオン濃度が地域

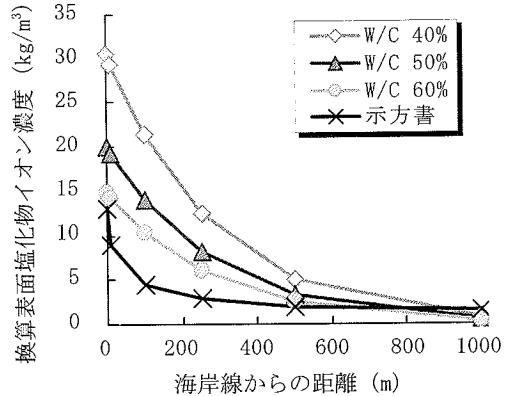
の気象や地形などの地理的環境条件に大きく影響を受け、地域ごとに適切な付着塩化物イオン濃度を設定する必要があることを示唆している。

(4) 換算表面塩化物イオン濃度

2002 年度制定示方書によると、海岸付近のコンクリート構造物中に蓄積される塩化物イオン濃度を推定するにあたっては、今回の解析に用いた式(3)ではなく、式(2)を用いることになっており¹⁾、その際、計算に使用するコンクリート表面の塩化物イオン濃度（以下では、この表面塩化物イオン濃度を海中部などの場合と区別するために、「換算表面塩化物イオン濃度」と称す）は、海岸線からの距離ごとに示方書中で設定されている。そこでここでは、今回の解析結果をもとに、示方書における設定値の妥当性について若干の検討を試みた。その検討の手順は次の通りである。



(a) 想定年数：50年



(b) 想定年数：100年

図-14 海岸線からの距離と換算表面塩化物イオン量の関係

表-4 海岸線からの距離と換算表面塩化物イオン量の関係

| 水セメント比 | 想定年数 | 海岸線からの距離 (km) | | | | | |
|---|------|---------------|------|------|------|-----|-----|
| | | 飛沫帯 | 汀線付近 | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 0.1 |
| 40% ($D=0.65 \text{cm}^2/\text{year}$) | 50年 | 21.6 | 20.8 | 15.1 | 8.8 | 3.6 | 0.6 |
| | 100年 | 30.5 | 29.4 | 21.3 | 12.5 | 5.1 | 0.9 |
| 50% ($D=1.64 \text{cm}^2/\text{year}$) | 50年 | 14.3 | 13.8 | 10.0 | 5.9 | 2.4 | 0.4 |
| | 100年 | 20.0 | 19.3 | 14.0 | 8.2 | 3.4 | 0.6 |
| 60% ($D=3.03 \text{cm}^2/\text{year}$) | 50年 | 10.5 | 10.1 | 7.3 | 4.3 | 1.8 | 0.3 |
| | 100年 | 14.7 | 14.2 | 10.3 | 6.0 | 2.5 | 0.4 |
| 土木学会示方書 | 注) | 13 | 9 | 4.5 | 3 | 2 | 1.5 |

注) 示方書では、想定年数ごとに表面塩化物イオン量を示していないため、ここでは、50年、100年とも示方書で示されている値をそのまま用いた

まず、図-4 に示した普通ポルトランドセメントを用いた場合の回帰式より推定される塩化物イオン拡散係数および、図-12 の回帰式より付着塩化物イオン濃度を、それぞれ式(3)に代入し、コンクリートの水セメント比および海岸線からの距離ごとに、暴露50年後および100年後のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を算出した。次に、上記で算出した塩化物イオン濃度分布に対して、拡散係数はそのままとして式(2)をあてはめ、換算表面塩化物イオン濃度を推定した。

図-14 および表-4 には、水セメント比ならびに想定年数ごとの海岸線からの距離と換算表面塩化物イオン濃度の関係を示した。この結果、今回得られた換算表面塩化物イオン濃度は、特に海岸付近において土木学会示方書に示されている値に比べてかなり大きな値を示す状況となった。これについては、本データベースには、塩害劣化が既に顕在化した構造物について調査され、学会等で発表されたデータが数多く含まれていることを考慮すると、解析結果が全体として、より厳しい劣化状態となる環境条件に偏りが生じたことも考えられる。また、想定年数が長くなる程コンクリート表面の塩化物イオン濃度は大きくなり、さらに、同じ想定年数で海岸線からの距離も等しい場合、水セメント比が小さくなるのに伴い、換算表面塩化物イオン濃度は大きくなることも明らかとなった。以上のことから、少なくとも海岸付近の構造物に対して示方書に示すような考え方でコンクリート中の塩化物イオン濃度を推定する場合、設定される換算表面塩化物イオン濃度は示方書のように海岸線からの距離との関係から一義的に定まるものではなく、水セメント比や構造物の耐用年数を適切に考慮して想定する必要があるものと考えられた。

6. 結論

本研究では、我が国で過去28年間に調査・報告された222文献の中から約1840組にのぼる海洋コンクリートの塩化物イオン濃度分布の調査データを整理・分析した。データ数が極めて多く多岐にわたるため、現在も分析を継続中であるが、その中で、これまでに厳選した867組のデータの分析結果から、次のことを確認した。

- (1) 学会誌等からコンクリート中の塩化物イオン浸透に関連した文献を引用する場合には、実構造物あるいは自然塩害環境下での暴露供試体による結果であることともに、コンクリー

ト配合および使用セメントの種類、実構造物および実験供試体の設置された環境条件と設置期間、塩化物の抽出方法および定量方法、1組のデータとして異なった3ヵ所以上の深さ位置での測定結果であること、など4項目が概ね明記されていることが不可欠である。

- (2) 塩化物イオンのデータを抽出する場合に、全塩化物イオンや可溶性塩化物イオンなどの測定対象物の検証、中性化領域における塩化物イオン濃度の取り扱いの検討ならびに、複数の論文による重複データの削除を行うことにより、さらに信頼性の高いコンクリートの塩化物イオン拡散に関する情報が得られる。
- (3) 低水セメント比においてはセメントの種類が塩化物イオン拡散係数に及ぼす影響について有意な差は認められないが、水セメント比45%~65%の範囲においては、普通ポルトランドセメントに比べ混合セメントを使用した場合には、同一の水セメント比における塩化物イオン拡散係数は半分以下に減少する。
- (4) 水セメント比が同じ場合でも単位セメント量が $350\text{kg}/\text{m}^3$ 以上となると、塩化物イオン拡散係数は単位セメント量の増大にしたがって小さくなる傾向にある。
- (5) コンクリートの配合だけでなく、コンクリートの施工年代、施工状態および品質を考慮し、塩化物イオン拡散係数を適切に推定することが必要である。
- (6) 普通ポルトランドセメントを用い、同じ水セメント比のコンクリートの塩化物イオン拡散係数は、実構造物より実験供試体の方が大きくなる傾向にある。
- (7) 海水と接するコンクリートの見掛けの表面塩化物イオン濃度は、 $10\sim 20\text{kg}/\text{m}^3$ の範囲にある。ただし、混合セメントを使用した場合は、普通ポルトランドセメントを使用した場合に比べ、コンクリートの見掛けの表面塩化物イオン濃度が大きくなる。
- (8) 干満帯におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を推定する場合、海中と同じように表面塩化物イオン濃度が一定であるとしても実用上の問題はない。
- (9) コンクリート表面の塩化物イオン濃度は、暴露期間の影響も受ける可能性がある。
- (10) 飛沫帯やその周辺の海岸線部におけるコンクリート表面への付着塩化物イオン濃度は、 $10^{-2}\sim 1\text{kg}/\text{m}^2/\text{year}$ の範囲にある。
- (11) コンクリート表面の付着塩化物イオン濃度は

海岸線から離れるに従って指数関数的に減少する。ただし、日本海側では太平洋側に比べてその減少割合は小さく、海岸線からかなり内部に位置する構造物においても塩害を受ける可能性がより高い。

- (12) コンクリート表面の付着塩化物イオン濃度のデータを基に、示方書において海岸付近のコンクリート中の塩化物イオン濃度を推定するために用いられている換算表面塩化物イオン濃度を算定した結果、この換算表面塩化物イオン濃度は示方書のように海岸線からの距離のとの関係から一義的に定まるものではなく、水セメント比や構造物の耐用年数を適切に考慮した値を用いる必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書「施工編」, pp. 80, 2002. 3.
- 2) 武若耕司:海洋環境下のコンクリートの含有塩分量に関する既往調査結果の整理と分析, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, 第5部門, pp. 36-37, 1988. 10.
- 3) 前田聡, 武若耕司, 山口明伸, 好本健一:コンクリート中への塩化物浸透過程に関する既往調査の整理と分析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol24, No. 1, pp. 795-800, 2002. 6.
- 4) 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, pp. 114-115, 1992. 10.
- 5) 土木学会:平成11年度版コンクリート標準示方書「施工編」-耐久性照査型-改定資料, pp. 25-26, 2000. 1.

謝辞:本研究の一部は、鹿児島大学および鉄道総合技術研究所が共同で実施したものである。ここに関係各位に感謝の意を表します。

(2003. 5. 12 受付)

QUANTIFICATION OF CHLORIDE DIFFUSION PROCESS INTO CONCRETE UNDER MARINE ENVIRONMENT BY ANALYSIS OF SALT DAMAGE DATA BASE

Satoshi MAEDA, Koji TAKEWAKA and Toshinobu YAMAGUCHI

According to the appearance of salt damage occurred in concrete structures, many investigation data on chloride contents in the concrete have been reported and accumulated. They are very important but are thought to be far from the effective use. In this research, data of the chloride diffusion into concrete which were investigated and reported for the past 28 years in Japan were arranged as a database. And, on the base of the database, diffusion coefficient of chloride and chloride concentration on concrete surface were evaluated quantitatively with influence of some factors to them, such as water cement ratio, the kinds of cement, unit weight of cement, construction years of structure and investigated objects. Finally, it was made clear that the database constructed in this study were quite useful for the chloride diffusion process into concrete.