論文 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

前田 聡^{*1}·武若 耕司^{*2}·山口 明伸^{*3}·好本 健一^{*4}

要旨: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浸透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27年間に調査・報告された約1500組にのぼる海洋コンクリート中の塩化物イ オン量調査データを、塩化物イオンの浸透過程の推定に有効活用できる資料とするために整 理・分析した。その結果、コンクリート中への塩化物イオンの浸透に関するデータベースを 作成し、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てる上で非常に有益な 情報を得ることができた。

キーワード: 塩害, 塩化物イオン, 塩化物イオン拡散係数, 海洋コンクリート

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 ート中へ浸透していく過程を把握することは不 可欠である。現在、塩化物イオン浸透の予測に は、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、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)を 求める方法がある。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 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求めているの が現状である。¹⁾

一方,これまでコンクリート構造物の塩害問 題の顕在化に伴い,その元凶であるコンクリー ト中の塩化物量についての調査データが多数報 告・蓄積されてきた。しかし,これら既往の調 査データが整理・分析され,現在,積極的に利 用されているとは言い難い。2)

本研究では,我が国で過去27年間に調査・報告された約1500組にのぼる海洋コンクリート 構造物の塩化物イオン量の調査データを,塩化 物イオンの浸透過程の推定に有効活用できる資料とするために整理・分析した。

2. 使用データの内訳

今回整理を行ったデータは,過去27年間に我 が国の土木・建築両分野のセメント・コンクリ ート関係の学会誌,雑誌などで報告された実構 造物あるいは自然環境下での暴露供試体の調査 結果である。これら学会誌等のコンクリート中 の塩化物浸透に関連した181件の文献から合計 1523組のデータを引用した。引用したデータは, いずれも整理の都合上,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, 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

*1 鹿児島大学大学院理工学研究科 工修 (正会員)
*2 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)
*3 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)
*4 鹿児島大学大学院理工学研究科 (正会員)



法,1組のデータは異なった3ヵ所以上の深さ 位置での測定結果,など4項目が概ね明記され たものである。なお、複数の学会誌などでデー タが重複した場合には、1 つのデータにまとめ た。図-1には今回引用した文献を年代別に示し た。1980年以前は年間1件程度しかないが、塩 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 年頃より塩害に関 係した文献が急増したことがわかる。また、今 回整理したデータの内、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、明治・大正時代に建設された施工後 70 年以上経過した海洋コンクリート構造物の調査 事例もかなりあったが、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。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 1970~1985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てる上で非常に有益 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

調査データをコンクリート中への塩化物イオンの浸透過程推定のより具体的な資料とするために,次の処理を行った。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を海洋環境の塩化物イオン供給条件の違いから,次の2



つの条件で解いた解を浸透過程の推定に用いた。

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

ここに, C:液相の塩化物イオン量 Dc:塩化物イオンの拡散係数 x:コンクリート表面からの距離 t:時間

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量が一定 と考えられる海中部は式(2)を用いた。また, 干満帯では乾燥湿潤の繰返しが12時間毎と短 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 あると仮定し,干満帯においても海中部と同様 に式(2)を用いた。一方,塩化物イオンの供給 が飛来によることから,コンクリートの表面に 塩化物イオンが付着し浸透すると考えられる飛 沫帯および海岸地域については式(3)を用いた。

[コンクリート表面の塩化物イオン量が一定の場合(海中・干満帯)]

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

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

ここに, C (x, t): 深さ x (cm), 時刻 t (sec) に

おける塩化物イオン量 (kg/m³) C₀:表面における塩化物イオン量 (kg/m³) D:塩化物イオン拡散係数 (cm²/sec) A:単位時間あたりのコンクリート表面 に付着する塩化物イオン量 (kg/m³/sec) erf:誤差関数

次に3点以上の深さ位置の異なる塩化物イオン 量のデータを1組とし,各組ごとにデータと式 (2)あるいは式(3)を最小二乗近似させるこ とによって,各組ごとのコンクリートの塩化物 イオン拡散係数,および海中,干満帯における コンクリートの表面塩化物イオン量あるいは飛 沫帯,海岸地域における付着塩化物イオン量を 求めた。



4. データの分析結果および考察

4.1 塩化物イオン拡散係数について

各種セメントごとの塩化物イオン拡散係数に 関する整理結果を図-3に示した。なお,同図に は,今回調査したデータの近似式,ならびに平 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」に示されている式(4),(5)で 表される塩化物イオン拡散係数と水セメント比 の関係式も併記した。

[普通ポルトランドセメントを用いた場合]

 $\log D = 4.5 (W/C)^2 + 0.14 (W/C) - 8.47$ (4)

〔高炉セメントを用いた場合〕

 $\log D = 19.5(W/C)^2 - 13.8(W/C) - 5.74$ (5)

ここに, W/C:水セメント比

いずれのセメントにおいても、ばらつきが見ら れるものの、塩化物イオン拡散係数は概ね 10⁻⁸ ~10⁻⁶cm²/sec の範囲にあった。また、示方書で 示された式(4)、(5)と同じように、塩化物イ オン拡散係数は水セメント比が大きくなるのに 伴い、放物線的に増加する傾向が認められた。 ただし、今回の調査データから得られた近似式 と示方書で示された式(4)、(5)を比較すると、 いずれのセメントにおいても、水セメント比 60%以下では、今回得られた近似式の方が若干



大きい塩化物イオン拡散係数を示し、水セメン ト比が増えるに従って、今回得られた結果の方 が緩やかな右肩上がりの傾向となることが確認 された。一方、高炉スラグやフライアッシュな どの混和材を用いた混合セメントの場合、同一 の水セメント比における塩化物イオン拡散係数 は、普通ポルトランドセメントの使用の場合に 比べおよそ半分に低減できるようである。

また、分析結果のばらつきを検討するために 統計的な処理を施した結果の一例として、図-4 には、普通ポルトランドセメントにおける水セ メント比ごとの塩化物イオン拡散係数の分布, その分布の中央値,中央値±σ,ならびに示方 書で示された式(4)を示した。水セメント比の いかんに拘らず、標準偏差を考慮しても、その ばらつきの範囲は2桁程度に及ぶことが認めら れる。今後、このばらつきの要因や取扱いにつ いてより詳細に検討する必要がある。

図-5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 30%および水セ メント比 50%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を示した。水セ メント比のいかんに拘らず、単位セメント量が 増えるに従って,塩化物イオン拡散係数が低下 する傾向が認められた。特に,水セメント比 30%の場合には、単位セメント量が増大するの に伴い、急激に塩化物イオン拡散係数が低下し ていた。しかし、水セメント比 50%の場合では 単位セメント量が増えても、30%の場合に比べ ると塩化物イオン拡散係数の低下割合は小さい。 これついては、高水セメント比の場合、単位セ メント量の増加に伴って単位水量も増え、材料 分離等の施工不良が生じやすい状況になり、結 果として、単位セメント量の影響が小さくなる ことが考えられる。

いずれにしてもこの結果から,現在,示方書 に示されている式(4)および(5)のように, 水セメント比から便宜的に塩化物イオン拡散係 数を推定する方法については、今後、水セメン ト比のみではなく、単位セメント量等の影響を 加味し、コンクリートの配合の影響をより適切 に考慮した推定が望まれる。

なお、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、実構造物に関して調査されたデータの みを抽出し、施工年代ごとに塩化物イオン拡散 係数をまとめた結果を図-6 に示した。1955 年以 前については、塩化物イオン拡散係数がおよそ 10⁻⁶cm²/sec と非常に大きい例も見られるが、概 ね10⁻⁷~10⁻⁸cm²/sec 程度と比較的小さい範囲に あり,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1960年頃から 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 10⁻⁸cm²/sec 以下の良質なコンクリートがある一方で, 10⁻⁷cm²/sec 以上の耐久性に乏しいコンクリー

1976

- ~85



トがかなり多く施 工されていること がわかる。特に 1970年代後半か ら 1980年代にか け て は , 10^{-8} cm²/sec を下 回る塩化物イオン 拡散係数を有する コンクリートはほ とんど見当たらな



い結果となっている。この結果は, コンクリー トの配合のみではなく, コンクリートの施工状 態が塩化物イオン拡散係数に大きく影響してい ることを予想させるもので, 逆にこの影響を加 味することによって, コンクリートの塩化物イ オン拡散係数をより良好に推定できる可能性を 示唆している。

4.2 表面塩化物イオン量について

図-7には海中, 干満帯におけるコンクリート 表面の塩化物イオン量の推定結果を示した。こ の推定結果にはかなりのばらつきが見られるが, その平均的な値を見ると、海水と接するコンク リート表面の塩化物イオン量は水セメント比に 拘らず, 10~20kg/m³となった。また, 今回の分 析結果では早強ポルトランドセメントを使用し た場合は、普通ポルトランドセメントおよび混 合セメントを用いた場合に比べ、コンクリート 表面の塩化物イオン量がおよそ 5kg/m³ 大きい 結果も得られた。また、普通ポルトランドセメ ントを用いた場合における, コンクリート表面 の塩化物イオン量を干満帯と海中で比較した結 果を図-8に示した。この推定結果においてもか なりのばらつきが見られるが、表面塩化物イオ ン量の平均は海中,干満帯のいずれも約16kg/m³ であり、今回の調査データからは干満部におけ る乾燥湿潤の繰返しの影響はほとんど認められ なかった。このことから、少なくとも見かけ上 は、干満帯においても海中と同じように表面塩 化物イオン量が一定であると仮定し、塩化物イ



オン拡散係数を推定しても差し支えないと思われる。

4.3 付着塩化物イオン量について

今回調査データの中から,環境条件が飛沫帯, 海上大気中ならびに海岸線からの距離が明記し てあるデータのみを抽出し,式(3)を用いて推 定したコンクリートの表面に単位時間あたりに 付着する塩化物イオン量と海岸線からの距離と の関係を求めた。図-9は、日本全国から得られ たこれらのデータを一まとめにして示したもの である。ここで、飛沫帯および海上大気中につ いては海岸線からの距離を 0m とした。その結果, 飛沫帯やその周辺では、約 10⁻⁸~10⁻⁶kg/m³/sec の塩化物イオンが付着し,海岸線から 100m 以内 の沿岸地域でも、10⁻⁷kg/m³/sec の付着塩化物イ オンがあることが認められた。また、海岸線か ら離れるに従って、付着塩化物イオン量は指数 関数的に減少する傾向も確認された。

一方, 図-10 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と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の付着塩化物 イオン量を比較して示した。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10-8 ~10⁻⁶kg/m³/sec の付着塩化物イオン量があり, 有意な差異は認められない。また、地域のいか んに拘らず海岸線から離れるのに従って、いず れも付着塩化物イオン量は指数関数的に減少し ている。ただし、この減少傾向については、太 平洋側に比べ日本海側の方が小さい。 例えば, 海岸線から約 50m 離れた箇所の日本海側の付着 塩化物イオン量は、太平洋側の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物語っ ているとともに、付着塩化物イオン量が地域の 気象や地形などの地理的環境条件に大きく影響 を受け、地域ごとに適切な表面塩化物イオン量 を設定する必要があることも示している。

5. まとめ

本研究では,我が国で過去27年間に調査・報告された181文献の中から約1500組にのぼる海洋コンクリートの塩化物イオン量調査データを整理・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,これまでの分析結果から,次のことを確認した。

- コンクリート中への塩化物イオンの浸透に
 関するデータベースを作成し、今後、塩化
 物イオンの浸透過程の推定に有効活用でき
 る資料とすることができた。
- 同一の水セメント比における塩化物イオン 拡散係数は、普通ポルトランドセメントの 使用の場合に比べ、混合セメントを用いた 場合にはおよそ半分に低減できる。
- 3) 水セメント比が同じ場合でも単位セメント 量が増えるに従って、塩化物イオン拡散係



数が小さくなり,この傾向は,低水セメン ト比において顕著である。

- コンクリートの配合だけでなく、コンクリ ート構造物の施工年を加味することによっ て、コンクリートの施工状態を考慮したよ り精度の高い塩化物イオン拡散係数が推定 できる可能性がある。
- 5) 海水と接するコンクリート表面の塩化物イ オン量は、平均的には使用セメントの種類 や水セメント比に拘らず、10~20kg/m³の範 囲にある。
- 6) コンクリート表面の付着塩化物イオン量は 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、その値は地域の気象や地 形などの地理的環境条件に大きく影響を受 けるため、地域ごとに適切な表面塩化物イ オン量を設定する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書,維持 管理編,2001年制定
- 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,pp36~37,1988.10