

塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量評価

堤 知明¹・白井伸一²・安田 登³・松島 学⁴

¹正会員 工修 東京電力株式会社 電力技術研究所構造研究室主任研究員 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

²正会員 工修 東京電力株式会社 千葉火力建設所次長 (〒260 千葉県千葉市中央区蘇我町2-1367)

³正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所構造研究室主管研究員 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

⁴正会員 工博 東電設計株式会社 技術開発本部耐震技術部課長 (〒110 東京都台東区東上野3-3-3)

塩害劣化を的確に評価するためには、実構造物の劣化データに基づくことに加え地域の格差および構造物の設置場所等の影響を考慮することが必要である。本研究は、地域を東京湾内に限定し、過去20年以上に渡って蓄積された鉄筋コンクリート構造物の劣化データを整理分析し、塩害劣化の主要パラメータである表面塩化物イオン量、拡散係数および鉄筋腐食速度に影響を与える要因について定量的な検討を加えたものである。

Key Words : diffusion coefficient, chloride ion density, data analysis, sampling data in situ, corrosion speed of reinforcement

1. はじめに

海洋環境下に構築されているコンクリート構造物の早期劣化の問題が注目され初めてから10年以上になる¹⁾。そのあいだに各方面の研究者の間で精力的な研究がなされ、コンクリート中の塩化物イオン浸透、鉄筋腐食開始時期について定量的な評価が行われるようになってきた。これらの研究成果を基に耐久性設計に関する提案が既に土木学会²⁾、JCI³⁾からなされている。しかしながら、これらの手法の各種係数の設定についてはなお議論を尽くす余地がある。塩害劣化は地域の格差および構造物の設置場所の影響が大きく、劣化現象の的確な評価のためには設置場所毎の劣化データに基づくことが必要である。しかし、現実には実構造物のデータの整備不良あるいは欠如等によって、室内試験および短期の暴露試験結果が評価の主流になっている。実構造物の塩害劣化データは、大即等⁴⁾が全国11港16施設について塩化物イオン含有量や鉄筋の自然電位等について詳細調査を行っている。また、武若等⁵⁾も全国の諸研究機関が実施した海洋暴露実験あるいは実構造物調査結果を基に塩化物イオン浸透過程に定量評価を行っている。しかしながら、ある地域に限定して設置場所や構造種別毎に劣化データを整理分析し、これら要因の影響度合いまでを検討したものは少ない。

本研究は、検討地域を東京湾内にまた、構造物を臨海部に構築された揚油・石炭桟橋、護岸等の鉄筋コンクリート構造物に限定し、これら構造物の過去20年以上に亘って蓄積された点検補修データを整理分析することから、

東京湾内の塩害劣化に影響を与える要因を検討したものである。塩害劣化は既往の研究⁶⁾から、塩化物イオンが浸透することによる鉄筋の腐食発生までの潜伏期、鉄筋が腐食を始めその膨張圧によって鉄筋軸方向にひびわれを生じる進展期に区分される。それぞれの期間での支配的パラメータは、前者が表面塩化物イオン量および拡散係数であり、後者が鉄筋の腐食速度である。本研究では、これらのパラメータに影響を与える要因について定量的な検討を加えたものである。

2. 塩害劣化に関する影響要因の設定

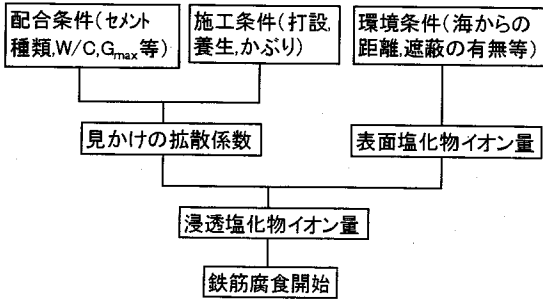
(1) 塩化物イオン浸透に関する影響要因

一般に、塩化物イオン浸透は濃度勾配による拡散現象として、式(1)に示すFickの拡散式で評価されている。

$$C_c(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $C_c(x,t)$: コンクリート表面から深さ x , 浸透開始からの時間 t におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量、 erf : 誤差関数、 D_c : 塩化物イオンの見かけの拡散係数、 x : コンクリート表面からの深さである。

式(1)中の見かけの拡散係数 (D_c) および表面塩化物イオン量 (C_0) により塩化物の浸透度を表現することができる。これら見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量は環境条件あるいはコンクリートの品質等によって変化すると考えられている。このため、これまでにもどのような要因によって見かけの拡散係数および表面塩



図一 塩化物イオン浸透に関する要因の関係

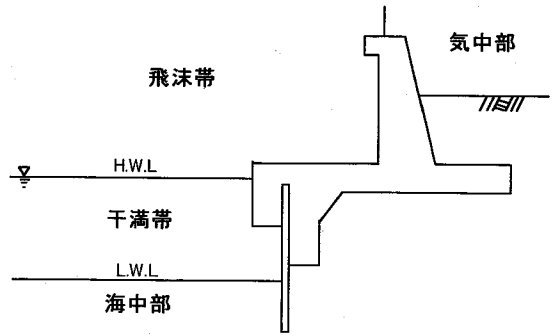
化物イオン量が影響を受けるかを解明する試みがなされてきた⁹⁾。図一に塩化物イオン浸透に関する影響要因の関係を示す。同図のように見かけの拡散係数は、セメント種類等の配合条件および打設方法等の施工条件が影響していると考えられる。また、表面塩化物イオン量は主に海からの距離等の環境条件が影響しているものと考えられる。見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量が配合条件、施工条件および環境条件に影響されることは多くの研究者により指摘されているが⁹⁾、これらの多くは室内、屋外暴露試験によるものであり、実構造物を調査した結果を示しているものは比較的少ない。暴露試験用供試体は施工上の影響が入りにくいこと、暴露供試体では健全な部分が多いのに対し、実構造物では常時荷重による微細なひびわれ、剝離等の変状がある場合が多い。従って、実構造物から得られたデータは暴露試験で得られたデータとは条件が異なるものと考えられる。現実問題として既設構造物のコンクリート配合や施工条件等については不明なケースが多く、図一に示すような配合や、施工条件で表面塩化物イオン量や見かけの拡散係数を評価することは困難な場合が多い。このため、本研究では配合や施工条件に代わる影響要因として、以下に示すように現実に評価可能な5項目を設定し、表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数との関係について検討を加えた。検討に当たっては、構造物の設置位置以外は、データ数が豊富で塩害に対し最も厳しい環境条件となる東京湾内の飛沫体のデータを対象とした。

a) 構造物の設置位置

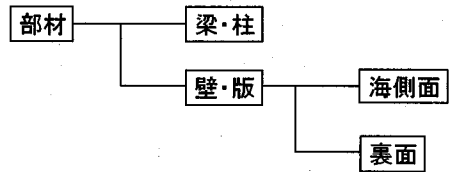
竹田等⁹⁾は、飛沫体、海中および海上大気中に供試体を暴露し塩化物浸透イオン量を測定した結果、表面塩化物イオン量は、飛沫体>海中>海上大気中となることを示している。ここでは、構造物の設置位置について図二に示すように区分した。

b) 部材の種類

コンクリート構造物は基本的に、梁、柱、壁および版の各部材に分けることができる。旧国鉄のPCげたにおける劣化調査によると表面塩化物イオン量は梁の下面に多く、床版の下面は少ない結果が得られている¹⁰⁾。本研究



図二 構造物の設置位置



図三 部材および部材面の区分

では、これらの結果を参考に形状および設置位置により図三に示すように分類した。柱を梁と区分しなかったのは、柱は栈橋の床版や梁よりも下に位置し、海水の飛沫を受ける部材としては梁と同様に厳しいと考えられるからである。また、壁と版では雨水による表面の洗われ方に違いがあり本来ならば区分すべきであるが、本論で用いたデータでは両者の詳細な区分が困難であったため、厳密性には欠けるものの形状が単純で似ている両者を合わせて整理した。データを整理する際には、風向等の影響を除外するため、海側に対し同一方向に位置する部材のみを対象とした。

c) 部材面の位置

表面塩化物イオン量は海水飛沫をどの程度受けているかに左右される。本論とは調査箇所が異なるが、樫野等¹⁰⁾は陸上大気中の飛来塩化物イオン量の調査を行い、遮蔽物などの陰になっている部分の塩化物イオン附着量の差は、海から100m以内では1:0.4程度と報告している。このため構造物の海面側と反対側の面(以下、裏面と呼称する)について検討した。ただし、梁や柱は、本研究の対象構造物の大部分が港湾施設であることから、部材全体が飛沫帯に位置することになる。従って、海側と裏面の区別は困難であることから検討対象から外し、壁、版について図三に示すような区分を行った。この要因に対しても部材種類と同様、風向の影響等を除くために同一面に壁、版の海側、裏側の存在する場合のみを対象とした。

d) 圧縮強度

筆者の一人¹¹⁾は、室内試験により塩化物イオンの浸透性を透過電流量で表現し、圧縮強度との間に負の相関関

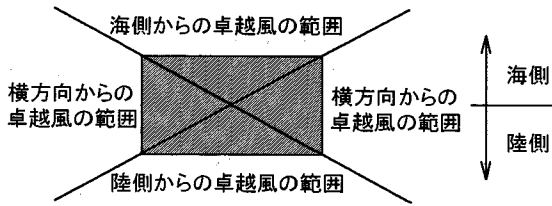


図-4 構造物と卓越風向の関係

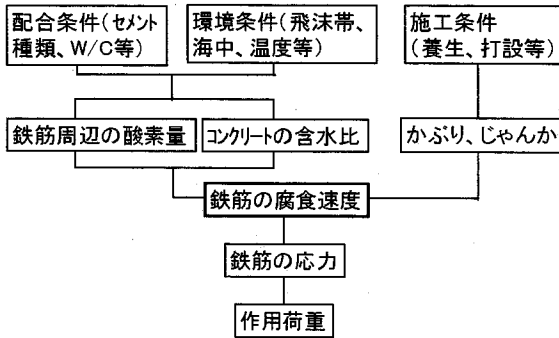


図-5 鉄筋腐食速度に関する要因

係を得ている。圧縮強度は水セメント比の関数であり、塩化物の浸透性は水セメント比に影響されることが知られている⁷⁾。そのため、本研究は圧縮強度を水セメント比の代用要因と考え、見かけの拡散係数との関係について検討を行った。

e) 卓越風向

樫野等¹⁰⁾は、S市における塩化物イオン飛来に対する卓越風向の影響を調査し、飛来塩化物イオンは卓越風向の影響は小さく、昼夜で逆転する海風の影響が大きいことを示している。本研究は、東京湾内における海岸構造物に対する卓越風向の影響を検討するため、卓越風向と構造物の位置関係を図-4に示すように3つに区分した。なお、本要因は表面塩化物イオン量に影響するものと考えられるため、見かけの拡散係数については検討を行なわなかった。

(2) 鉄筋の腐食速度に影響を及ぼす要因の設定

鉄筋の腐食速度はひびわれ発生時期を推定するための重要なパラメータである。しかしながら、腐食速度は図-5に示すようにコンクリートの配合や環境条件による鉄筋周辺の酸素量、含水比の他、作用荷重による鉄筋応力等様々な要因が複雑に影響しており、現状では限られた条件下での定式化が試みられている状態である。

例えば関等¹²⁾は、鉄筋の腐食形態をカソード支配とし、鉄筋周辺の溶存酸素の質量保存則から腐食速度を定式化する手法を提案している。また、横関等¹³⁾は鉄筋周辺の酸素が全て錆の生成に消費されると仮定して腐食速度を定

式化している。これらはいずれも限られた条件下での理論的な検討にとどまっており、実構造物の腐食速度を評価するまでには至っていない。

そこで腐食速度そのものではなく、鉄筋腐食量に着目し、これと経過時間の関係から腐食速度を評価した。腐食量に影響を及ぼす要因として以下に示す3項目を設定した。

a) かぶり

森永等¹⁴⁾は、発電所放水口の劣化調査から、かぶり厚さ60 mm以下の場合に腐食びびわれが生じ、特に30 mm以下で顕著であると報告している。これは、かぶりの違いにより経過年数や拡散係数が同程度であっても、鉄筋近傍への塩化物の到達時間に差が生じるため腐食発生に時間差が生じることを示唆しているものと考えられる。

b) 経過年数

鉄筋の腐食は酸素と水の十分な供給により成り立っている。従って、これらの供給が安定している場合は、腐食量は経過年数とともに増大することが予想される。

c) その他の影響要因

鉄筋の腐食速度は、前述した要因以外にも部材種類や圧縮強度が影響要因として考えられる。部材種類は、表面塩化物量の違いによりコンクリート品質やかぶりと同程度であっても、同じ経過年数で比較すると腐食量に差が認められると予想される。圧縮強度は、水セメント比の関数であり、コンクリート比抵抗は水セメント比が小さいほど大きくなる傾向にある。そのため、圧縮強度が高いほど比抵抗が大きく腐食量が少ないことが予想される。本研究ではこれらの影響度についても検討した。

3. 解析結果

(1) 表面塩化物量と見かけの拡散係数

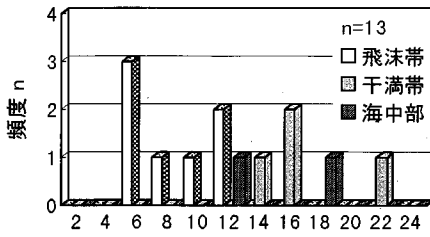
既設構造物を維持管理する場合、日常の巡視に加え、6ヶ月に1回の定期点検を行い補修の要否を検討するため、必要に応じてコンクリートコアを採取する。本研究で用いたデータは、採取されたコンクリートコアの深さ方向の塩化物イオン分布から、拡散係数および表面塩化物イオン量を求めたものである。なお、本論で検討した塩化物イオン量のデータは、電位差滴定法により測定されたものである。

a) 構造物の設置位置

図-6に表面塩化物イオン量の頻度分布を示す。表面塩化物イオン量は海中部および干満帯が飛沫帯に比べて多い傾向が認められるものの、データが少なく明確な傾向を論じるまでには至っていない。

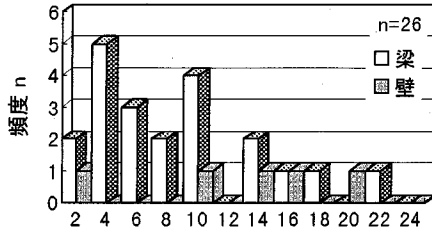
b) 部材の種類

図-7に表面塩化物イオン量の頻度分布を、図-8に見かけの拡散係数の頻度分布を示す。実際の現場で測定



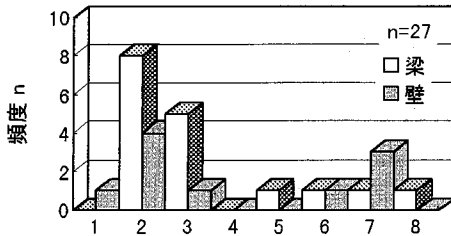
表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m³)

図-6 表面塩化物イオン量



表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m³)

図-7 表面塩化物イオン量



表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m³)

図-8 見かけの拡散係数

されたデータは、その構造物のコンクリートの状態を表していると考えられ、基本的には得られたデータをそのまま使用することが望ましい。しかしながら、局部的に変状が激しく特異データと考えられるものも含まれることから、Grubbsの方法¹⁵⁾を用いて異常データを棄却して検討を行った。ここで、棄却限界値は、表面塩化物イオン量の場合 $n=26$ 、見かけの拡散係数の場合 $n=27$ 、危険率5%として求めた。両図から、表面塩化物イオン量については $1 \text{ kg/m}^3 \sim 21 \text{ kg/m}^3$ と付着量にかなりの差があることがわかる。また、梁に比べ壁のデータが少ないが両者はほぼ同じ様な範囲に分布している。

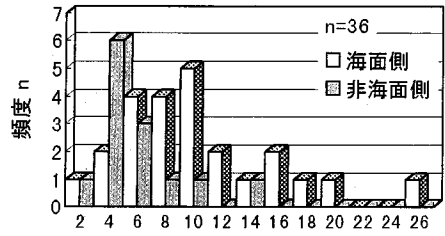
見かけの拡散係数も梁と壁ではデータ数に差があるものの、分布はほぼ同じで、ともに $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の範囲に分布していた。これは大即等⁴⁾の栈橋の調査結果とほぼ一致している。

本調査範囲でのデータが、部材の種類により明確に区分されるべきデータであるのか、または単なるばらつき

表-1 W 検定の結果

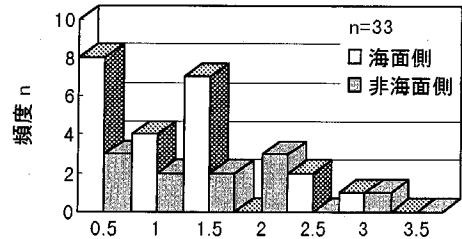
帰無仮説	対立仮説	データ数		結果
		m	n	
梁と壁の表面塩化物イオン量は同一母集団に含まれる	壁の方が表面塩化物イオン量は小さい	5	21	帰無仮説
梁と壁の見かけの拡散係数は同一母集団に含まれる	梁の方が見かけの拡散係数は小さい	9	18	帰無仮説

注) データ数 m: 対立仮説を指示するデータ、n: もう一方のデータ



表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m³)

図-9 表面塩化物イオン量



表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m³)

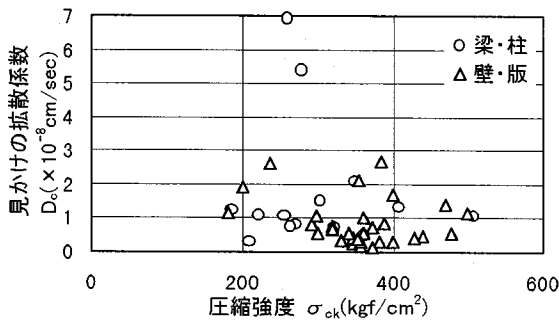
図-10 見かけの拡散係数

の範囲であるのかを検証するためにW検定¹⁶⁾を行った。検定の有意水準は5%とした。その結果を表-1に示す。同表から、表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数とも梁と壁では同じ母集団の属すると判定され、部材の種類の影響はないものと判断される。

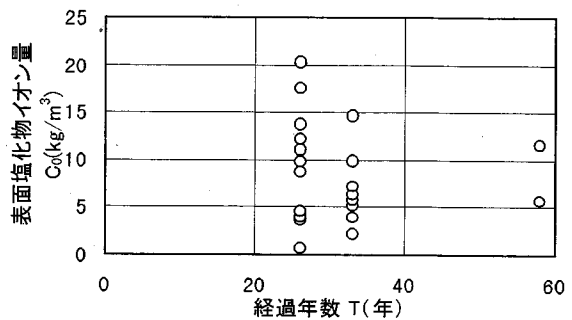
筆者の一人は¹⁷⁾、建設省が実施した全国の海岸近傍のコンクリート橋の劣化調査を分析し、環境条件の厳しい日本海側では部材の違いが表面塩化物イオン量に影響をおよぼしていることを示している。しかしながら、本研究では部材の種類の影響が見られなかった。この理由として、比較的環境条件の穏やかな東京湾内の構造物であり、その要因はデータのばらつきの中に埋もれてしまったものと考えられる。

c) 部材面の位置

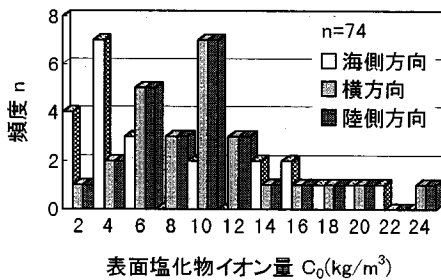
図-9に表面塩化物イオン量の頻度分布を、図-10に見かけの拡散係数の頻度分布を示す。表面塩化物イオン量のばらつきは大きいものの、海面側とその裏面では分布範囲は異なり、海面側が裏面よりも表面塩化物イオン量が多い傾向が認められる。海面側と裏面の比は約1:0.6



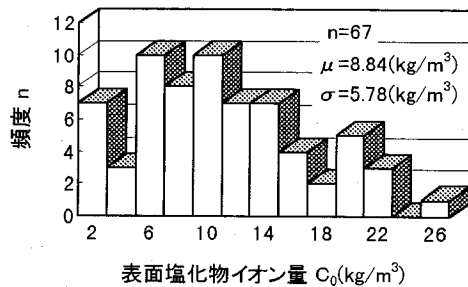
図一11 圧縮強度と見かけの拡散係数の関係



図一13 表面塩化物イオン量と経過年数の関係



図一12 表面塩化物イオン量



図一14 表面塩化物イオン量

である。見かけの拡散係数のデータの範囲は、海側と裏面でほぼ同じ程度であり、その分布形状は対数正規分布で表される。室内試験でのコンクリート供試体のようにひびわれ等の欠陥がなければ、見かけの拡散係数のばらつきは供試体作成時のばらつきのみであり、正規分布となるものと考えられるが、本データの範囲では対数正規であった。これは実構造物データの中には、施工のばらつき、微細なひびわれ等の欠陥により大きな値を示すものが存在するためと考えられる。

d) 圧縮強度

図一11に圧縮強度と見かけの拡散係数の関係を示す。ここで、圧縮供試体は、拡散係数測定用供試体の近傍で採取したものをを用いた。同図に示したように、測定値は大きくばらつき、圧縮強度と見かけの拡散係数の相関関係はあまり明確ではない。筆者の一人¹⁴⁾が行った室内実験では、両者の間に負の相関関係を得ているが、実構造物の調査結果では室内実験ほど明確な関係は認められなかった。この理由として、対象構造物が既に供用開始して20年以上経過しており、常時受ける荷重により微細なひびわれが生じている可能性があること、データを収集した構造物がそれぞれ異なり、施工により本来の品質にばらつきの影響の方が卓越したものと考えられる。

e) 卓越風向

図一12に表面塩化物イオン量の頻度分布を示す。ここで、卓越風向は、構造物近傍に設置されている風向風速計の通年データを基に設定した。同図から、データの分

布範囲は海側方向、横方向、山側方向ともほとんど同じで卓越風向の影響は認められなかった。これは、使用したデータが東京湾内位置し、卓越風向が北陸や東北の日本海側に比べ大きくないため影響が現れなかったものと考えられる。

f) 東京湾内の表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数

これまでの結果をまとめるに先立ち、表面塩化物イオン量が経過年数とどのような関係にあるか調べるために、梁部材を対象に整理した。その結果を図一13に示す。同図より、データにばらつきと数に偏りがあるものの経過年数との間には明確な関係が認められなかった。以上の検討結果を踏まえ、表面塩化物イオン量は飛沫帯でかつ海側のデータ、見かけの拡散係数は飛沫帯のみのデータに限定し、東京湾内におけるRC構造物の表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数の頻度分布をまとめた。その結果をそれぞれ図一14および15に示す。カイ二乗検定により表面塩化物イオン量は正規分布に、見かけの拡散係数は、対数正規分布に適合する結果が得られた。この理由としては、表面塩化物イオンが構造物の設置されている環境に影響されるのに対し、見かけの拡散係数は、前述したようにコンクリート中の潜在的欠陥を含んだデータに影響され、値の大きなデータが卓越するためと考えられる。それぞれの分布状況は、表面塩化物イオン量が最大24.3 kg/m³、最小0.14 kg/m³、平均8.84

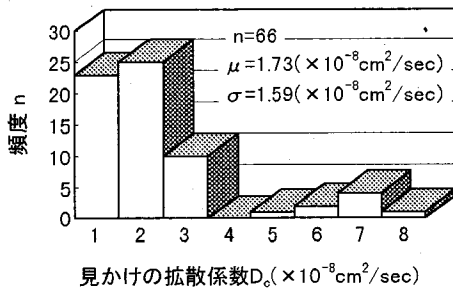


図-15 見かけの拡散係数

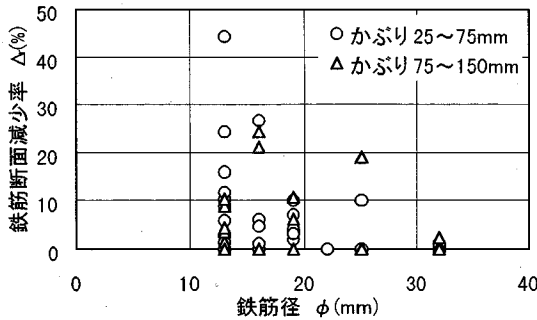


図-16 鉄筋径と鉄筋減少率の関係

kg/m³標準偏差 5.78 kg/m³(データ数 67 個)である。見かけの拡散係数は、最大 $7.52 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、最小 $1.48 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、平均 $1.73 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、標準偏差 $1.59 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ (データ数 66 個) である。

(2) 鉄筋の腐食速度

本研究では、鉄筋の腐食速度を、式(2)で定義される鉄筋断面減少率を経過年数で割った断面減少率速度 C_s で評価した。

$$C_s = \frac{\Delta_r}{T} = \frac{1 - A_d/A_s}{T} \quad (2)$$

ここで、 Δ_r ：鉄筋断面減少率、 A_d ：ノギスで計測した鉄筋径から求まる腐食鉄筋の断面積、 A_s ：公称断面積、 T ：経過年数である。データの整理に先立ち、かぶりが 25 mm 以下のものおよび 150 mm 以上のものは、検討データから除外した。

a) 鉄筋径の影響

本来、腐食速度の評価は年間の断面減少量で評価すべきものであるが、減少率で評価した理由は用いた調査データの多くが式(2)から求まる減少率で報告されているためである。減少率で評価したことにより、計算上では同一減少率でも鉄筋径が太いものほど腐食速度を大きく見積もることになる。このため、調査データの一部を用いて鉄筋径と断面減少率の関係を求めた。その結果を図-16に示す。なお、かぶりの影響を考え、75 mm を境に 2 つに区分した。図に示すように調査データはばらつ

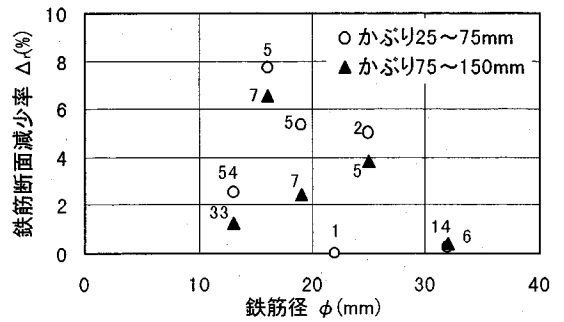


図-17 鉄筋径と鉄筋減少率の関係(平均値)

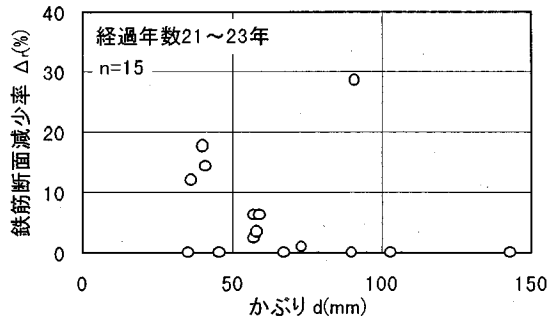


図-18 かぶりと鉄筋断面減少率の関係

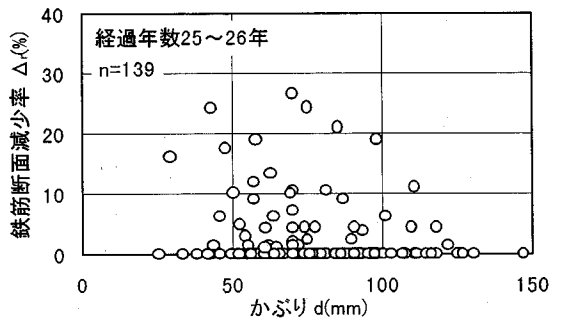
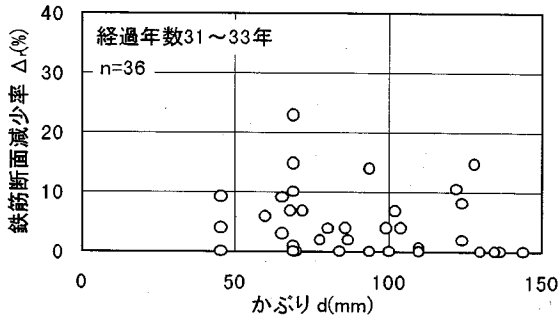


図-19 かぶりと鉄筋断面減少率の関係

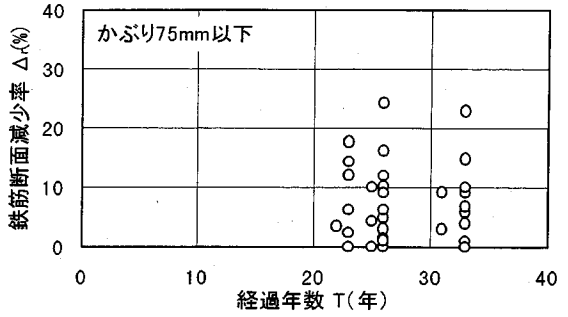
きが大きく、鉄筋径と断面減少率の間には計算上から考えられるような明確な関係が認められない。同一鉄筋径を一つのグループと考え、グループ毎の鉄筋断面減少率の平均値と鉄筋径の関係を整理したものを図-17に示す。同図においても鉄筋径が断面減少率に及ぼす影響は明確ではなかった。このため、鉄筋径が 10~25 mm 程度では腐食断面減少率を経過年数で除した断面減少率速度で評価しても実用上は問題ないと考えられる。

b) かぶり

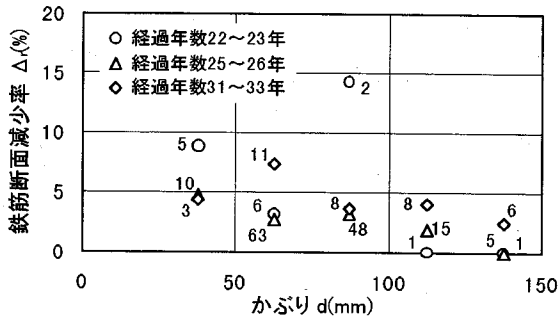
図-18~20に経過年数別に区分したかぶりと鉄筋断面減少率の関係を示す。図に示すようにばらつきは大きいものの、かぶりが大きくなるにつれ断面減少率が減少する傾向が見える。これは、かぶり 50~100 mm の範囲



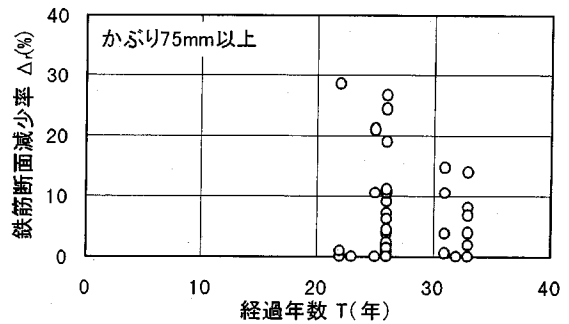
図一20 かぶりと鉄筋断面減少率の関係



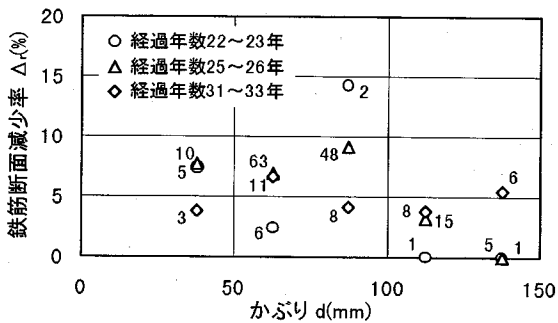
図一23 経過年数と断面減少率の関係



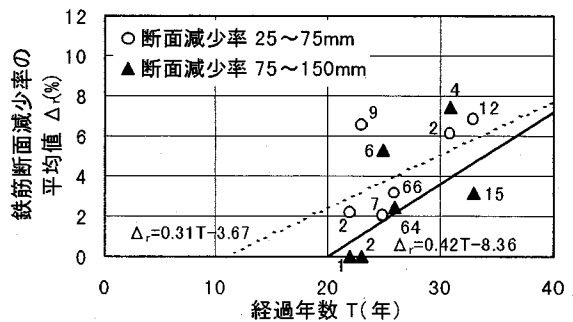
図一21 かぶりと鉄筋断面減少率の関係 (平均値)



図一24 経過年数と断面減少率の関係



図一22 かぶりと鉄筋断面減少率の関係 (標準偏差)



図一25 経過年数と断面減少率の関係 (平均)

のデータ数は 100 mm を越えるデータ数に比べ多いため、調査データの中に、平均値から大きく離れたデータが出現する可能性が高くなったためと考えられる。そこで、かぶりを 25 mm 毎に区分し、各区分毎の鉄筋断面減少率を一つのグループと考え、その平均値とかぶりの関係を経過年数毎に整理した。その結果を図一21 に示す。同図には、平均値を求めたデータの個数も合わせて示した。同図からかぶりが大きくなると断面減少率が低くなる傾向が認められる。この結果は、大即等の調査結果⁹⁾と同様であった。

図一22 には経過年数毎の断面減少率の標準偏差とかぶりの関係を示した。標準偏差はかぶりに影響されず、ほぼ一定の値を示す傾向が認められる。

以上の検討から、かぶりは鉄筋断面減少率に影響し、かぶり大きいほど断面減少率が小さくなるといえる。

c) 経過年数

かぶり 75 mm を境に、せん断補強筋などの比較的浅い位置に配置されている鉄筋と主筋など比較的深い位置に配置されている鉄筋の 2 つの区分に限定し、経過年数と断面減少率との関係で整理した。その結果を図一23 および 24 に示す。両図とも 21~23 年で既にかかなりの断面減少率の増加が認められることから、腐食が 20 年以前から始まっていることが推測される。データのばらつきは大きいものの、各経過年数のデータを一つのグループとして扱い、その平均値と標準偏差を求めた。その結果をそれぞれ、図一25 および 26 に示す。両図中には平均値を

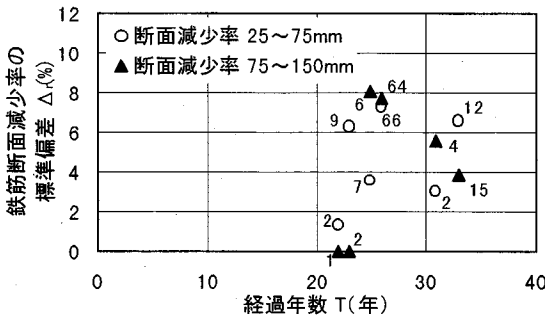


図-26 経過年数と断面減少率の関係 (標準偏差)

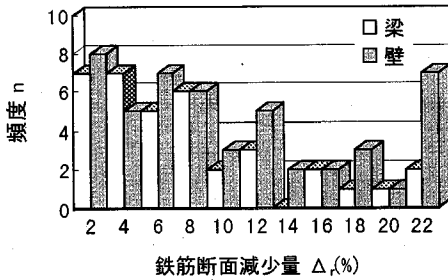


図-27 部材種類と鉄筋断面減少率の関係

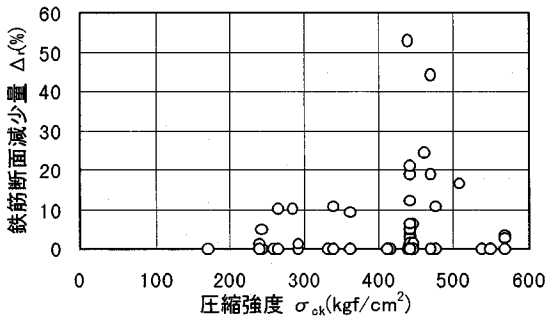


図-28 圧縮強度と鉄筋断面減少率の関係

求めたデータの個数も合わせて示した。両図に見られるように、経過年数が経つにつれて断面減少率の平均値は大きくなる傾向にあるが、標準偏差は経過年数との間に明確な関係は見られなかった。

d) その他の要因

図-27 および 28 にそれぞれ部材種類、圧縮強度と断面減少率の関係を示す。両図から、ばらつきが大きく部材種類、圧縮強度とも断面減少率との間に明確な関係は認められない。鉄筋の腐食の観点からは、これらの因子も影響をおよぼすものと考えられるが、データのばらつきが大きく、その中に埋もれてしまったものと考えられる。

e) 東京湾内の鉄筋の腐食速度

これまでの検討結果から、鉄筋腐食断面減少率はかぶり

りが小さく、経過年数が長くなるほど大きくなる傾向にある。ここでは、図-25 に示す回帰直線と経過年数との交点を腐食開始時期とし、勾配を断面減少率速度と仮定した。これによると、かぶり 25~75 mm で腐食開始時期が 10 年程度、75~150 mm で 20 年程度となりかぶりが大きいほど腐食開始時期が遅くなる傾向にある。断面減少率速度はかぶり 25~75 mm で 0.31%/yr 程度、75~150 mm で 0.42%/yr 程度となるが、データのばらつき等を考えるとかぶりに関係なくほぼ同程度の値と判断される。このため、本研究で用いたデータから、東京湾内における断面減少率速度の平均的な値である 0.35%/yr 程度であると言える。

4. まとめ

東京湾内の臨海部に設置された鉄筋コンクリート構造物の点検データを基に、表面塩化物イオン量、見かけの拡散係数および鉄筋の腐食速度に影響を及ぼす要因について検討を加えた。本研究の範囲で以下の点が明らかとなった。

(1) 表面塩化物イオン量に影響をおよぼす要因は部材面の位置のみであり、見かけの拡散係数は圧縮強度をはじめとする全ての要因で影響は認められない。

(2) 東京湾内の表面塩化物イオン量はほぼ正規分布で表され、その平均値は 8.84 kg/m³、標準偏差は 5.78 kg/m³であった。また、見かけの拡散係数は、対数正規分布で表され、平均値は 1.73×10^{-8} cm²/sec、標準偏差は 1.59×10^{-8} cm²/sec である。

(3) 鉄筋の断面減少率と鉄筋径の間には明確な関係が認められず、かぶりが小さく、経過年数が長いほど大きくなる傾向にある。また、部材種類および圧縮強度が鉄筋断面減少率に及ぼす影響は明確ではない。

(4) 経過年数と鉄筋断面減少率の関係を求め、腐食開始時期および鉄筋の断面減少率速度を推定した。その結果、データのばらつきが大きいものの、腐食開始時期はかぶりが大きいほど遅くなる傾向があり、鉄筋の断面減少率速度は 0.35%/yr 程度と推定される。

謝辞：本研究を進めるに当たり常に貴重なご助言を頂きました早稲田大学関博教授、データの解析で多大なるご協力を頂きました東電設計(株)耐震技術部福田靖大氏、中川貴之氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、海洋コンクリート構造物の防食指針(案)、日本コンクリート工学協会、1983. 2.
- 2) コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)、土木学会、1998, 12.

- 3) 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方, 日本コンクリート工学協会, 1991, 5.
- 4) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 棧橋コンクリート上部工劣化実態詳細調査報告, 港湾技研資料, No.627, 1988.
- 5) 武若耕司, 松本進: コンクリート中への塩分拡散過程の推定に関する研究, 土木学会第41回年次学術講演会第5部, pp.569-570, 1986, 11.
- 6) 宮川豊章: 塩分雰囲気中におけるコンクリート構造物の寿命予測と耐久性について, コンクリート構造物の寿命予測と耐久性に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.47-54, 1988, 4.
- 7) 例えば, 枅田佳寛, 友沢史紀, 安田正雪, 原謙治: コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, pp.493-498, 1988.
- 8) 太田利隆, 佐々木真一, 堺孝司, 高柴保明: 海岸に暴露したコンクリートへの塩分浸透について, コンクリート工学論文報告, 13-1, pp.589-594, 1991.
- 9) 竹田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸: 海洋暴露試験に基づく各種コンクリートの塩分浸透量の推定, コンクリート工学年次論文報告 13-1, pp.595-600, 1991.
- 10) 大即信明, 樫野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章: コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 塩害(I), 技報堂出版, 1986, 4.
- 11) Tsutsumi, T. Yamamoto, A. Misra, S. and Motohashi, K.: Effect of composition and age on chloride permeability of concrete, 6th, Durability of building materials and components, 1993.
- 12) 関博, 山本英夫: コンクリート中鉄筋における腐食速度の解析に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告 9-1, pp.381-386, 1987.
- 13) 横関康祐, ミスラースディール, 須田久美子, 本橋賢一: かぶり厚さが腐食ひびわれ発生期間に及ぼす影響, 土木学会第47回年次学術講演会第5部, pp.396-397, 1992.
- 14) 森永繁, 入野一男, 太田達見, 土本凱士: 腐食による鉄筋コンクリート構造物の寿命予測, コンクリート工学論文集, 第1巻第1号, pp.177-188, 1990.
- 15) 日本規格協会: JISハンドブック「品質管理」 pp.653-659, 1984.
- 16) T.H. ウォナコット, R.J. ウォナコット: 統計学序説, 培風館, pp.339-342, 1985, 3.
- 17) 松島学: 塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計への確率論的手法の適用に関する研究, 学位論文, 1994.

(1995. 2. 27 受付)

EVALUATION ON PARAMETERS OF CHLORIDE INDUCED DAMAGE BASED ON ACTUAL DATA IN SITU

Tomoaki TSUTSUMI, Shin-ichi SHIRAI, Noboru YASUDA
and Manabu MATSUSHIMA

Since chloride induced deterioration of structures are mainly governed by the local atmosphere where target structures are located, the parameters need to be obtained by using actual data in situ.

The data of deterioration obtained from existing concrete structures of thermal power plants over 20 years along Tokyo Bay are analyzed and studied in this paper.

Then, the parameters such as chloride ion density, diffusion coefficient and corrosion speed of reinforcement to chloride induced damage are investigated.