

# 報告 塩害を受けたコンクリート構造物の塩化物イオン量の分布状況

小松原 健<sup>\*1</sup>・渡辺 博志<sup>\*2</sup>・古賀 裕久<sup>\*3</sup>・中村 英佑<sup>\*4</sup>

**要旨**：実構造物の塩化物イオン量を測定する場合、位置によって塩分の付着量や侵入性に差があるおそれがあり、その結果、測定結果に基づく評価や将来の劣化予測にも影響が生じる。そこで、塩害環境に供用されたコンクリート橋より多数の試料を採取し、塩化物イオン量の測定を行い、表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数の分布について整理した。その結果、分布状況には風通し等の周辺環境の違いによる傾向が見られた。鉄筋位置での発錆限界値  $1.2\text{kg/m}^3$  に至るまでの本橋竣工時からの経過年数を推定したところ、最小 22 年、最大 208 年となり、橋梁全体では大きな差異が見られた。

**キーワード**：塩害、表面塩化物イオン量、見かけの拡散係数、塩分分布

## 1. はじめに

これまで、実構造物の調査を行う場合には事前に目視点検を行い、その結果、劣化が生じている場合に、劣化の原因や劣化度を把握する目的で詳細調査を行うのが一般的であった。しかし、塩害が想定される地域に位置するコンクリート構造物の維持管理では、構造物中の塩化物イオン量の測定を行い、塩害による鋼材腐食の可能性の検討や、将来の塩分の侵入量の予測を行うなど、計画的な維持管理を行うことが重要である。

「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）」では、塩害による劣化を受けやすい構造物を早期に発見し、コンクリート中の鋼材が腐食する前に予防保全的な補修を行うことを想定している。そこで、外観に変状が無い場合でも何らかの方法で測定位置を定め、塩化物イオン量の測定を実施する必要がある。

しかし、実構造物では、構造物周辺のミクロな環境状況の違いやコンクリートの品質のばらつきから、試料を採取した位置によって、塩化物イオン量の測定結果に違いが生じることも十

分予想される。

ところが、このような構造物中の位置による塩化物イオン量の侵入量の違いについて報告された事例<sup>1)</sup>は多くない。そこで、16 年間塩害環境に供用されたコンクリート橋を対象として、多数のコア試料を採取し、塩化物イオン量の測定を実施した。その結果より、試料採取位置の違いによる測定結果の変動について検討を行った。

## 2. 対象橋梁の概要

対象とする構造物はポストテンション方式 3 径間 PC 単純 T 桁（2 主桁）の側道橋で、本線の道路橋と並んで 16 年の間塩害環境に供用されていた。コンクリート表面には変状が見られず、目視点検では比較的健全と評価される状態であったが、道路橋の架替えにともない撤去された。

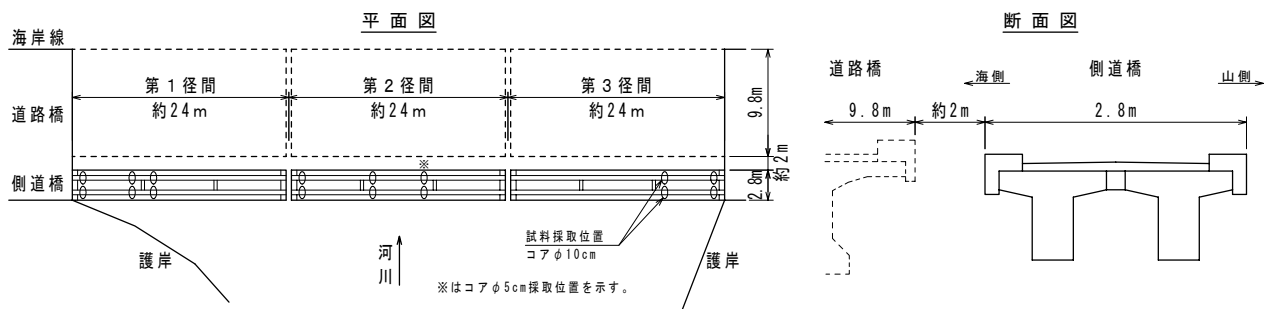
本検討はこの側道橋の主桁部を用いて塩化物イオン量の測定を実施した。側道橋概略図を図 1 に示す。本橋の圧縮強度試験および中性化深さ測定結果は、それぞれ平均で  $73\text{N/mm}^2$  および 1mm 程度であった。

\*1(独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員（正会員）

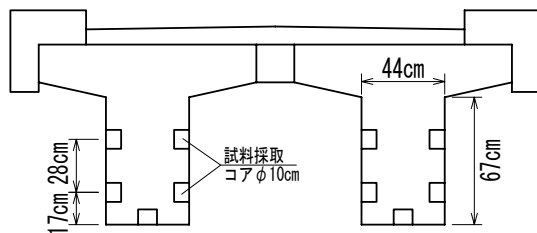
\*2(独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工修（正会員）

\*3(独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 工修（正会員）

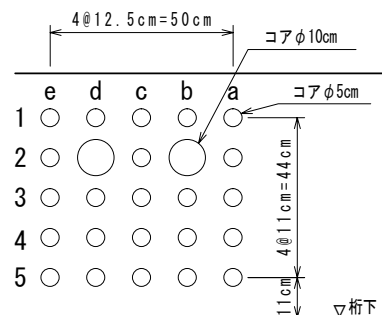
\*4(独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 研究員 工修（正会員）



図－1 側道橋概略図



図－2 コアφ10cm 採取位置図



図－3 コアφ5cm 採取位置図

### 3. 実験方法

#### 3.1 試料の採取方法

橋梁全体の塩化物イオン量の分布状況を把握するため、第1径間、第2径間および第3径間より広範囲にコアを採取(図－1, 図－2)した。コアはφ10cmとし、コンクリート表面から深さ方向に4cmまでを1cmごとに切断した4試料と鉄筋位置(7～8cm)の1試料の計5試料とした。

これに対して、局所的な範囲でも塩分侵入状況が大きく異なりうるものかを把握するため、図－3に示すように、第2径間の海側桁海側ウェブ面にて多数のコアを採取した。ここでは、コアはφ5cmとし、コンクリート表面から深さ方

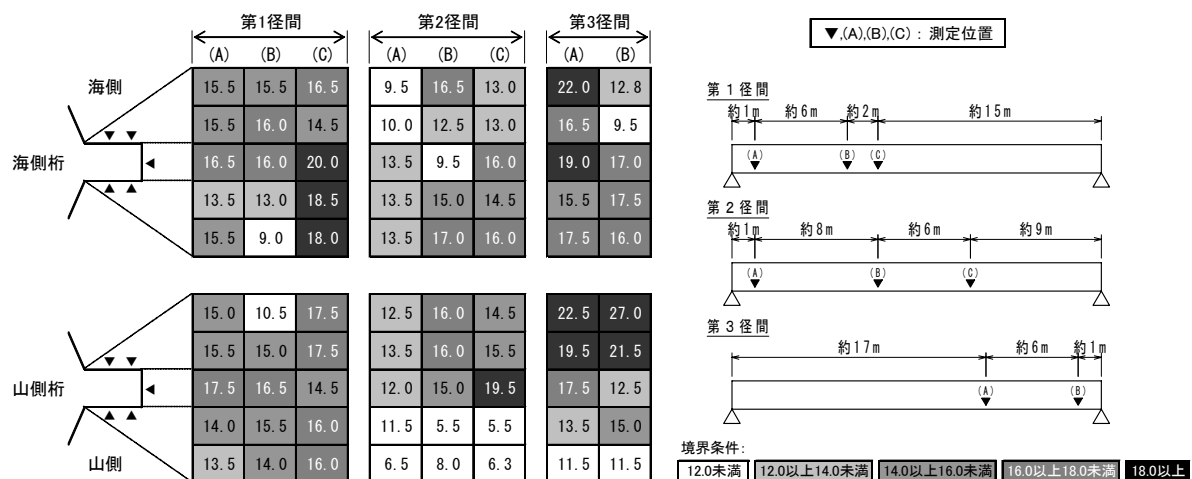
向に2cmまでを1cmごとに切断にした2試料とした。

#### 3.2 試料の分析方法

塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法(JIS A 1154)により、全塩化物イオン量の測定を行った。また、塩化物イオンの侵入がフィックの拡散方程式(1)<sup>2)</sup>にしたがうものと仮定した。

$$C(x,t) = C_0(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}) + C(x,0) \quad (1)$$

なお、 $C(x,t)$ : 深さ  $x(\text{cm})$ , 時刻  $t(\text{年})$  における塩化物イオン量( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_0$ : 表面塩化物イオン量( $\text{kg/m}^3$ ),  $D$ : 塩化物イオンの見かけの拡散係数



図－4 表面塩化物イオン量( $\text{kg/m}^3$ )分布図

( $\text{cm}^2/\text{年}$ ),  $C(x,0)$ : 初期含有塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )である。ここで、初期含有塩化物イオン量  $C(x,0)$  の値は、全試料の測定結果から最も塩化物イオン量が小さい値を採用し、測定結果によく近似するように試行錯誤のうえ表面塩化物イオン量  $C_0$  および見かけの拡散係数  $D_c$  を推定した。表面の塩化物イオンは外部の影響により、式(1)で近似し難い場合もあるが、本橋梁は表面の影響は少なく、式(1)によって比較的良好に近似値を得ることができた。

#### 4. 塩分分布に関する検討

##### 4.1 表面塩化物イオン量の分布状況

表面塩化物イオン量  $C_0$  (以下、表面塩分量) の推定結果を図-4 に示す。橋梁全体の広い範囲で見ると、表面塩分量の変動係数は 25.4% であり、最小値で  $5.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、最大値で  $27.0 \text{ kg}/\text{m}^3$  を示し、5 倍程度と大きなばらつきが生じていた。

ここで、径間ごとの表面塩分量を整理したものを表-1 に示す。径間ごとで比較をすると、平均値は第1径間と第3径間がほぼ同程度で、第2径間が最も小さくなっており、径間ごとで差異が生じていた。

次に、径間ごとに桁の断面方向の位置の違いにおける平均値を算出し、比較を行った結果を図-5 に示す。

第3径間で3割程度の差のある箇所があるものの、ウェブ面上側と下側で概ね同じ値となっており、測定位置 28cm の高低差によって著しく塩分の飛来状況が異なるような傾向はなかった。

海側ウェブ面、桁下面および山側ウェブ面を比較すると、橋梁全体を通して見ると、特定の面で表面塩分量が多い／少ないという傾向は見られず、既往の研究事例のように、山側ウェブ面が海側ウェブ面より表面塩分量が多くなる<sup>3)</sup>あるいは小さくなる<sup>4)</sup>という傾向は見られなかった。しかし、径間ごとに注目すると、第2径間や第3径間のように、山側桁の山側ウェブ面は、道路橋や隣接する桁に面している他のウェ

表-1 表面塩化物イオン量

|      | 平均値<br>( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 標準偏差 | 変動係数<br>(%) |
|------|-----------------------------------|------|-------------|
| 橋梁全体 | 14.7                              | 3.74 | 25.4        |
| 第1径間 | 15.4                              | 2.19 | 14.2        |
| 第2径間 | 12.7                              | 3.65 | 28.7        |
| 第3径間 | 16.8                              | 4.35 | 25.9        |

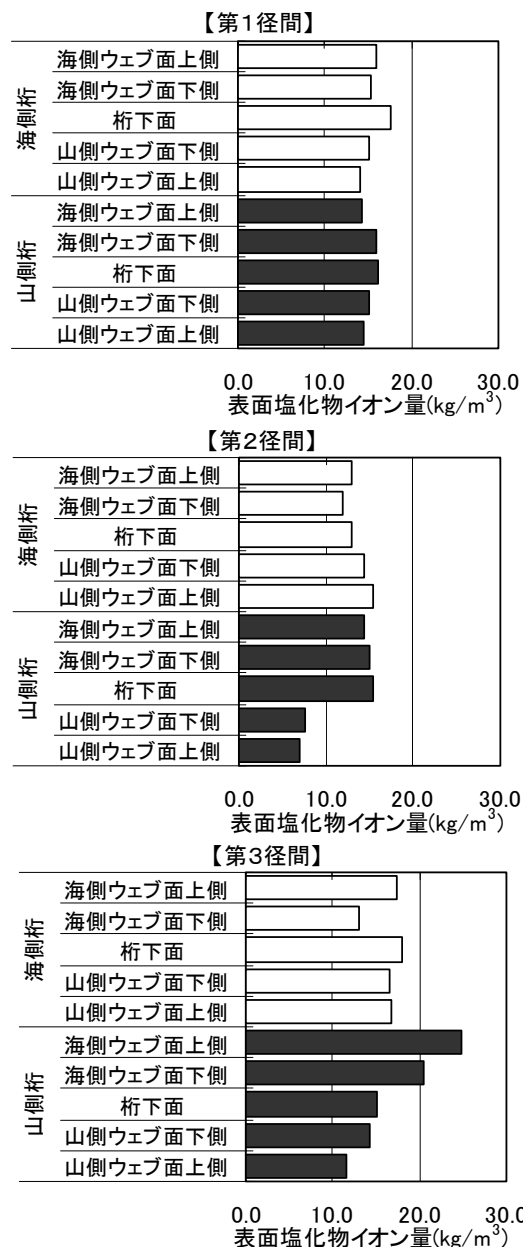


図-5 桁断面方向における表面塩分量の平均値

ブ面に比べて、塩分が少ないという傾向が見られる箇所もあった。

以上の結果をもとに調査対象の橋梁の周辺環境を見ると、第1径間では護岸が接近しており風通しが悪く、海風の吹き溜まりとなっていたため、位置の違いによる飛来塩分量の違いが少

なかったと推測される。また、他の 2 径間は風通しの良い条件に位置しており、特に山側桁の山側ウェブ面に飛来する塩分が少ない傾向となったと推測される。

このことから、一橋梁内であっても径間や海面・山面、周囲の構造物という条件の違いによって、飛来する塩分に差異が生じると考えられる。

#### 4.2 局所的な塩化物イオン量の分布状況

局所的な範囲におけるばらつきを把握するために、第 2 径間海側桁海側ウェブ面の縦 44cm×横 50cm の範囲で、コンクリート内部（1～2cm）の塩化物イオン量（以下、塩分量）を測定した結果を図－6 に示す。この範囲の塩分量は最小値で 3.91 kg/m<sup>3</sup>、最大値で 9.22 kg/m<sup>3</sup>を示し、2 倍程度の違いがあった。上下左右でばらつきが生じており、その分布に一定の傾向は見られなかった。ここで、橋梁全体と局所的な範囲の塩分量測定結果を比較したものを図－7 および表－2 に示す。母体数が異なるものの、塩分量のばらつきは橋梁全体と局所的な範囲で異なっており、橋梁全体の塩分分布の違いは、局所的な範囲における測定結果のばらつきより大きいと考えられる。

### 5. 見かけの拡散係数に関する検討

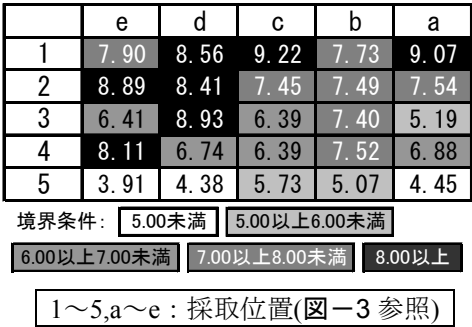
#### 5.1 見かけの拡散係数の分布状況

本橋梁における見かけの拡散係数  $D_c$ （以下、拡散係数）を整理したものを図－8 に示す。

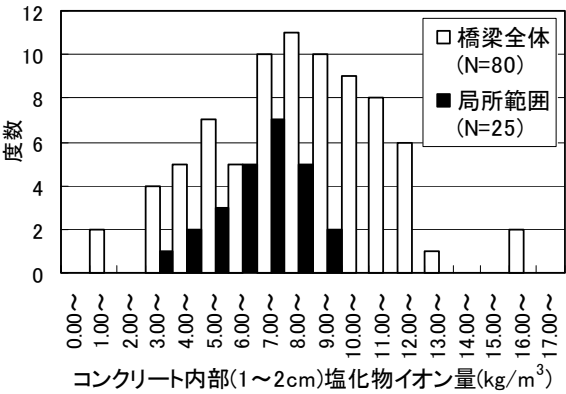
拡散係数はコンクリートの組織構造や乾湿繰返しによる水の移動に関係した値であり、橋梁単位あるいは径間単位で大きく異なることは無いと考えられる。

しかし、拡散係数は同径間あるいは同桁であっても一定の値となっておらず、変動係数は 40%程度であり、最小値で 0.05cm<sup>2</sup>/年、最大値で 0.40cm<sup>2</sup>/年を示し、約 8 倍の違いがあった。

この拡散係数のばらつきは、コンクリート品質が同様と考えられる（試料採取高さが同じで、試料採取面が海山で異なる）位置であっても生



図－6 コンクリート内部（1～2cm）塩化物イオン量（kg/m<sup>3</sup>）分布図



図－7 内部塩化物イオン量のヒストグラム

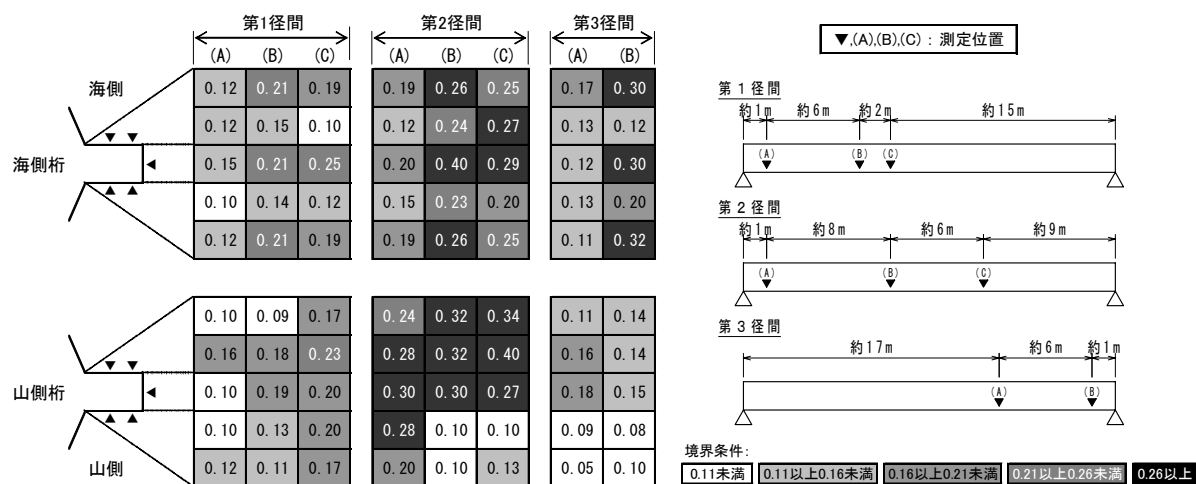
表－2 内部塩化物イオン量

|      | 平均値<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 標準偏差 | 変動係数<br>(%) |
|------|-----------------------------|------|-------------|
| 橋梁全体 | 8.52                        | 3.07 | 36.0        |
| 局所範囲 | 7.03                        | 1.55 | 22.0        |

じていることから、コンクリートの品質のばらつきが直接拡散係数のばらつきに関係しているとは考えがたい。

また、図－8 を見ると、第 2 径間に拡散係数の大きい箇所が多くあり、第 1 径間では拡散係数の小さな箇所が多かった。先にも述べたように第 2 径間は風通しの良い箇所に位置するため、コンクリート表面が乾湿の繰返しの影響を受けて拡散係数が大きくなり、逆に第 1 径間は風通しの悪い吹き溜まりになっているため、乾湿の繰返しの影響が少なく、拡散係数は大きくななかったと推測される。

このことから、表面塩分量と同様に、一橋梁内であっても径間や海面・山面、周囲の構造物という条件の違いによって、塩分の侵入のしやすさにも差異が生じると考えられる。



図－8 見かけの拡散係数(cm²/年)分布図

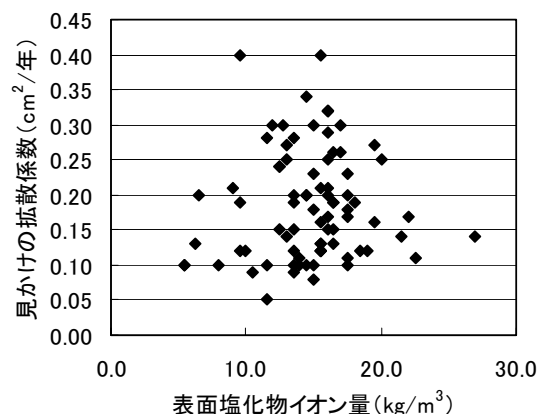
## 5.2 見かけの拡散係数と表面塩分量の関係

本来、表面塩分量と拡散係数は独立した性質をもった値である。しかし、図－4 と図－8 を比較すると、表面塩分量と拡散係数の間に一見関係があるようにも見うけられる。そこで、両者を比較したものを図－9 に示す。

個々の測定値について見ると、表面塩分量と拡散係数の関係は明確でない。したがって、予測において、例えば、コンクリート表面付近の塩分量が多い箇所では、表面塩分量が大きく拡散係数は小さい、などとなるような傾向は無い。橋梁全体を通して拡散係数に違いがあるのは、環境条件の違いによるものであり、表面塩分量との関係は無いと考えられる。

## 6. 将来予測の精度に関する検討

先に述べたように、表面塩分量や拡散係数には測定位置による違いがあり、かつ橋梁全体において必ずしも表面塩分量が多い箇所が拡散係数の大きな箇所ではない。そこで、劣化予測を行ううえで、表面塩分量と拡散係数のどちらがより将来予測に影響するか確認した。鉄筋位置での塩化物イオン量が  $1.2\text{kg/m}^3$  を越える本橋竣工時からの経過年数（以下、経過年数）を推定し、表面塩分量および拡散係数と比較した結果を図－10、図－11 に示す。経過年数との関係は、表面塩分量が多いほど、拡散係数が高いほど、経過年数は小さくなった。しかし、その影響は、



図－9 表面塩分量と拡散係数の比較

表面塩分量よりも拡散係数の方がより明確であった。ここで、表面塩分量と拡散係数の平均値を用いた場合の経過年数を標準とし、表面塩分量と拡散係数に±10%の変動を見込んだ場合の影響を比較すると、拡散係数の方が経過年数に与える影響が大きくなっており、これにより相関性の違いが現れたと考えられる（表－3）。本橋の測定結果に関しては、拡散係数の方が表面塩分量より測定位置による違いが大きく、かつ経過年数に与える影響が大きいため、鉄筋位置での塩分量が腐食を生じさせる限界値までに早期に到達する可能性がある箇所をコンクリート表面付近のみの塩分量の測定結果から、特定することは難しいと考える。

ここで、本橋梁における経過年数が最小値、平均値および最大値となるケースを整理したものを表－4 に示す。経過年数は22年から208年の範囲で差が生じており、位置の違いによって

将来の劣化度が異なると予想される。

## 7. まとめ

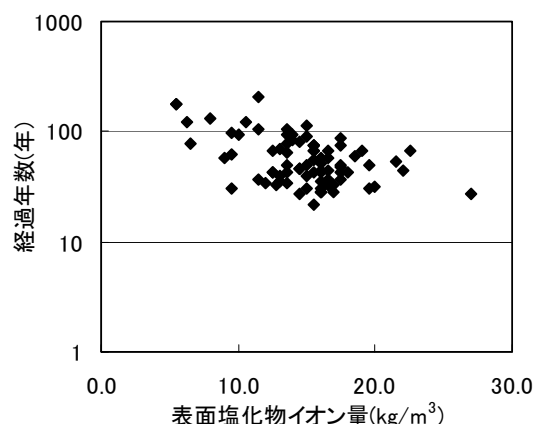
実構造物の塩化物イオン量の測定を行った結果より得られた知見を以下に示す。

- (1)表面塩分量分布状況は架設位置の環境条件によって異なり，風通しの良い径間で少なく，風通しの悪く吹き溜まりとなる径間で多い傾向となった。
- (2)ウェブ面の高低差（28cm 程度）による表面塩分量に違いは見られなかった。
- (3)橋梁全体のコンクリート内部の塩分量の位置による違いは，局所的な範囲（縦 44cm×横 50cm）のコンクリート内部の塩分量を測定した結果より大きかった。
- (4)拡散係数の分布状況は乾湿の繰返しの影響を受けやすい風通しの良い径間で大きく，風通しの悪く乾湿の影響を受けにくい径間で小さい傾向があった。
- (5)劣化予測を行ううえでは，測定箇所による表面塩分量の違いよりも拡散係数の違いの方の影響が大きかった。

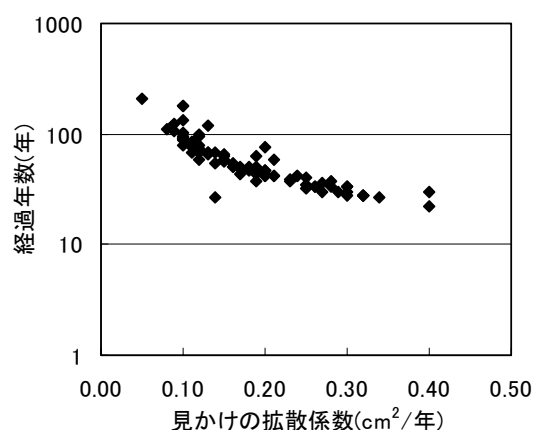
上記のように，構造物中の位置によって測定結果に差異が生じることを考慮したうえで試料採取位置を決定する必要がある。しかし，現状では明確な決定方法が無く，位置の違いによる影響や鉄筋腐食が部材としての構造性能に及ぼす影響を考慮して評価することも必要と考えられる。なお，本文で示した知見は一橋梁の測定結果であるため，今後，他の橋梁についても検討を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 例えば，青山實伸ほか：海岸部コンクリート構造物の塩化物イオンの表面濃度と拡散係数，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.683-688，2003
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，pp.100-102，2001
- 3) 田中孝和ほか：ランダムウォーク法による飛



図－10 経過年数と表面塩分量の関係



図－11 経過年数と拡散係数の関係

表－3 経過年数に与える影響

|                   | 表面塩化物イオン量が与える影響 | 見かけの拡散係数が与える影響 |
|-------------------|-----------------|----------------|
| 表面塩化物イオン量 (kg/m³) | 14.7 ± 10%      | 14.7           |
| 見かけの拡散係数 (cm²/年)  | 0.19            | 0.19 ± 10%     |
| 経過年数(年)           | 48 ± 5%         | 48 ± 10%       |

表－4 経過年数の推定結果

| 経過年数(年)           | 最小   | 平均   | 最大   |
|-------------------|------|------|------|
|                   | 22   | 62   | 208  |
| 表面塩化物イオン量 (kg/m³) | 15.5 | 9.5  | 11.5 |
| 見かけの拡散係数 (cm²/年)  | 0.40 | 0.19 | 0.05 |

来塩分の拡散シミュレーションに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.789-794，2004

- 4) 徳光 卓ほか：弁天大橋の塩化物イオン含有量測定結果に基づく調査方法の一提案，セメント・コンクリート論文集，No.56，pp.378-383，2002