

論文 コア採取による塩分浸透性状の評価および腐食開始時期の予測に関する考察

古谷 宏一^{*1}・横田 弘^{*2}・橋本 勝文^{*3}・加藤 絵乃^{*4}

要旨 : 40年間供用された栈橋床版からコアを30本採取し、確率・統計的評価手法を用いて塩分浸透性状を評価した。特に、栈橋床版の塩分浸透性状を表す指標として表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数を算出し、腐食開始予測時期を算定した。その結果、コアの採取本数の増加による表面塩化物イオン量、見かけの拡散係数の平均値誤差および腐食開始時期の予測誤差の減少を定量的に示すことができた。また、塩分浸透性状の評価および腐食開始時期の予測に関して、表面塩化物イオン量、見かけの拡散係数の分布適合度および採取本数による誤差を考慮した適切な評価手法を提案した。

キーワード : コア採取, 塩化物イオン, 栈橋床版, 腐食開始時期

1. はじめに

各種要因により構造物に生じる劣化現象は多様性に富み、同一構造物内においても様々な様相を呈することが広く知られている^{1), 2)}。コンクリート構造物は塩害などにより内部の鉄筋が腐食し、性能が低下していく場合がある。安全かつ長期的に使用するためには、適切な維持管理をする必要がある。構造物の維持管理を効率的に行うためには、環境的要因や材料的要因等の劣化現象に関わる不確定要因を工学的に処理しながら、性能評価および予測を精度よく行う手法の開発が必要であると考えられる。特に、鉄筋コンクリート構造物においては、塩分浸透性状の適切な評価を行い、鉄筋腐食の開始時期を適確に予測することで、適切な時期に補修等を行うことが重要である。

維持管理の実務において、構造物からコンクリートコア(以下、コアという)を数本採取することで、塩分浸透性状の評価が一般的に行われている。すなわち、コンクリート中への塩化物イオンの浸透を拡散現象とみなし、硬化コンクリート中に含まれる全塩化物イオン量を測定し、Fickの第二法則を適用することにより、表面塩化物イオン量(C_0)および見かけの拡散係数(D_{app})により塩分浸透性状を評価するものである。しかしながら、塩分浸透性状はコア採取場所の構造条件や塩分供給条件により、大きくばらつくことが報告されている^{3), 4), 5)}。また、構造物の劣化性状は、様々な不確定要因により、同一構造物や部材内においても非一様である。したがって、コンクリート構造物の劣化に関する不確定要因を工学的に処理し、既設構造物の性能評価や将来予測の精度を向上させる必要がある。

材料の損傷統計に関して、寿命予測の必要性が強調され、腐食現象を確率・統計的手法により評価する手法が用いられるようになった⁶⁾。ここで、腐食現象の基本分布として、正規分布や対数正規分布が一般的に用いられる。また、腐食現象の極値分布として Gumbel 分布や Weibull 分布が広く適用される^{7), 8)}。一方、コンクリート構造物の保有耐力や塩分浸透性状および鉄筋腐食の発生について確率・統計的評価手法が検討されている^{9), 10)}。しかしながら、コア採取により評価される塩分浸透性状に関して、確率・統計的評価手法を用いて塩分浸透性状評価に関する信頼性を定量的に検討した事例は稀少である。また、塩分浸透性状評価におけるばらつきを定量的に示すことは、構造物の性能評価および予測に基づき適切な維持管理を行う上で非常に有意義であると考えられる。

以上の知見に基づき、本論文では、40年間供用された栈橋床版の400×1500mmの領域からコアを30本採取し、全塩化物イオン量を測定した。各コアについて、栈橋床版の塩分浸透性状として C_0 および D_{app} を推定し、腐食開始時期を算定した。本論文では、正規分布、対数正規分布、Weibull分布およびGumbel分布について、K.S.検定により D_{app} および C_0 が従う分布の適合度を検討した。さらに、モンテカルロシミュレーションにより設定したコア採取本数に基づいて乱数を発生させ、コア採取本数が C_0 および D_{app} の平均値誤差および腐食開始時期の予測誤差に及ぼす影響を定量的に検討した。これより、塩分浸透性状のばらつきを考慮した適切なコア採取本数および面積に関する検討を行った。

*1 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (学生会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 教授 博士(工) (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 助教 博士(工) (正会員)

*4 (独) 港湾空港技術研究所 構造研究領域構造研究チーム 主任研究官 博士(工) (正会員)

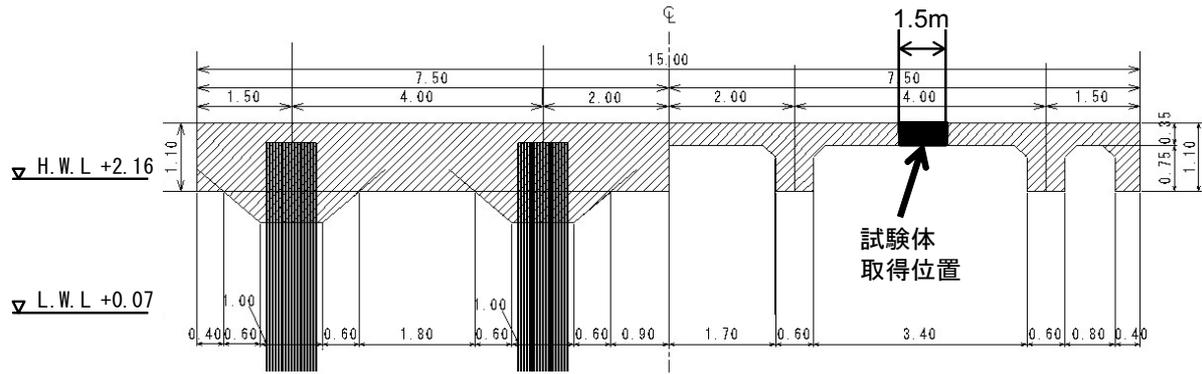


図-1 栈橋断面図

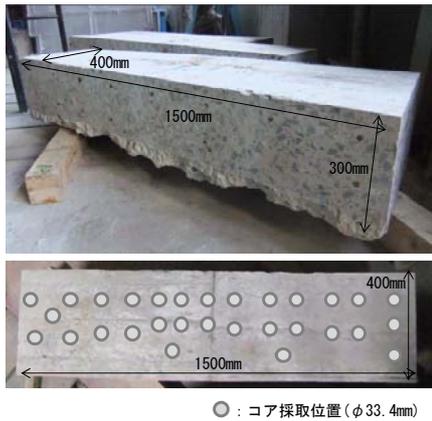


図-2 採取した床版およびコア採取位置

2. 概要

2.1 対象栈橋床版

コア採取した構造物は、1970年に供用が開始された(供用期間：40年)鋼管杭式横栈橋である。床版から1500×1500×300mmの部分を取り去り、中央部(400×1500×300mm)をコア採取の母材としてワイヤーソーにより切出した(図-1および図-2参照)。なお、かぶりは50mm、骨材最大寸法は25mm程度である。目視により当該床版にはひび割れなどの変状がないことを確認した。また、フェノールフタレイン溶液を噴霧することで計測した中性化深さは0～2mm程度であり、中性化の影響は小さい。

2.2 コア採取および塩分浸透性評価方法

既設コンクリート構造物の維持管理を目的とした検査および診断のためには、径100mmのコア採取を行うのが一般的である。しかしながら、構造物に与える損傷を考慮し、近年では径50mm以下の小径コアを用いた試料採取および分析に関する検討がなされている¹⁾。本研究では、切り出した床版から乾式コアドリルを用いて径33.4mmのコアを約10cm間隔で10cmの深さまで30本採取した。なお、構造物に与える損傷として、母材面積に対するコア取得面積の割合はコア1本あたり0.15%程度である。採取したコアを、暴露面から1cmごとにスライスした後、ボールミルにより粉砕して粉末試料(40μm以

下)を作製した。コンクリート中に含まれる全塩化物イオン量はJIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して測定した。ここで、式(2)にフィッティングさせることで、 D_{ap} および C_0 を算定した。

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

ここで、 $C(x,t)$ ：深さ x (cm)、時刻 t (年)における塩化物イオン量(kg/m^3)、 C_0 ：コンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m^3)、 D_{ap} ：塩化物イオンの見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 erf ：誤差関数

なお、かぶりを50mmとして、鉄筋表面の塩化物イオン量⁵⁾が $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ に達するまでの時間を腐食開始予測時期として算定した。

2.3 K.S.検定

K.S.検定は、標本分布がある特定の理論分布と一致するか否かを検定する適合度検定法の一つであり、観測された標本データ $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$ が仮定した確率密度関数 $f(x)$ と一致しているかどうかを判断する手法である。

帰無仮説を「標本 x が確率密度関数 $f(x)$ から発生している」とし、標本データ $(x_1 \sim x_n)$ から標本の累積分布関数 $S_n(x)$ および推定された(仮定した分布における)累積分布関数 $F(x)$ を得る。さらに、式(2)および式(3)により、 D_{\max} がK.S.検定統計量以上となることにより、帰無仮説を棄却し、仮定した分布と一致しないと結論付けることができる。

$$D_i = |S_n(x) - F(x)| \quad (2)$$

$$D_{\max} = \max[D_1, D_n] \quad (3)$$

ここで、 D_i および D_{\max} ：標本の累積分布関数と推定された累積分布関数の差および差の最大値、 $S_n(x)$ ：標本の累積分布関数、 $F(x)$ ：推定された累積分布関数

本論文では、正規分布、対数正規分布、Weibull分布お

よびGumbel分布について、K.S.検定により D_{ap} および C_0 が従う分布の適合度を検討した。

2.4 モンテカルロシミュレーション

K.S.検定において、 D_{max} が最小となる分布を採用し、モンテカルロシミュレーションにより C_0 および D_{ap} が最も適合する分布に従う乱数(乱数発生回数:10000回)を設定した採取本数(各組のコア採取本数は1, 2, 3, 4, 6, 10, 20および30本の8水準)に基づいて発生させ、コア採取本数が C_0 および D_{ap} の平均値誤差および腐食開始時期の予測誤差に及ぼす影響を定量的に示した。なお、モンテカルロシミュレーションにおける一様乱数の発生には疑似乱数生成アルゴリズムであるMersenne Twisterを用いた。

3. 塩分浸透性状および腐食開始時期

表面塩化物イオン量 C_0 と見かけの拡散係数 D_{ap} の関係を図-3に示す。同図では、1本のコアから測定結果1点をプロットすることができる。これより、同一構造物、部材内でも C_0 と D_{ap} で表される塩分浸透性状は大きなばらつきを有することが確認された。

図-4に C_0 の度数分布を示す。これより、 C_0 は概ね13.0~16.0 kg/m^3 の範囲に多く分布するが、最大値は20.6 kg/m^3 、最小値は4.9 kg/m^3 となり、同一構造物、部材内において最大で4倍以上の差異が確認された。

図-5に D_{ap} の度数分布を示す。これより、 D_{ap} は0.3~0.9 $\text{cm}^2/\text{年}$ の範囲に多く分布するが、最大値は1.88 $\text{cm}^2/\text{年}$ 、最小値は0.11 $\text{cm}^2/\text{年}$ となり、同一構造物、部材内において最大で16倍以上の差異が確認された。 D_{ap} の変動が大きくなった原因は部材中のコンクリートの配合に空間的ばらつきがあること、および式(2)による C_0 および D_{ap} の算出方法におけるフィッティング特性が影響していると推測される。

図-4および図-5に示した表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数により、30本のコア採取により算定される腐食開始予測時期 T の度数分布を図-6に示す。これより、 T は20~40年の範囲に多く分布するが、最大値は92年、最小値は7.8年となり、同一構造物、部材内において最大で11倍以上の差異が確認された。

4. 分布適合度に基づく塩分浸透性状評価

4.1 概要

本論文では、正規分布、対数正規分布、Gumbel分布およびWeibull分布のうち、K.S.検定により、 C_0 および D_{ap} が最も適合する分布の適合度を検討した。本論文においてコアを30本採取し、有意水準を5%として設定し分布適合度を検討した。そのため、 D_{max} (式(3)参照)が0.2417以下となれば仮定した分布に適合することになる。

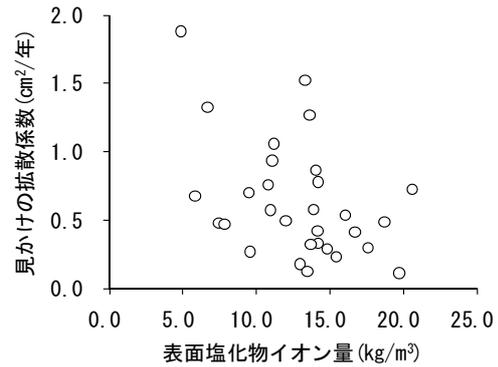


図-3 表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数の関係

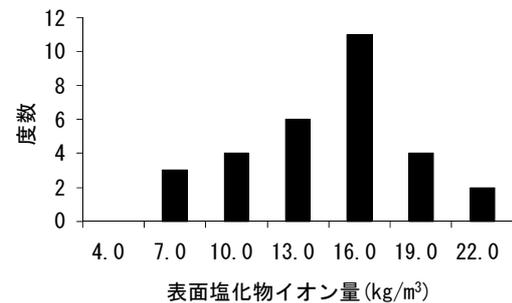


図-4 表面塩化物イオン量 C_0 の度数分布

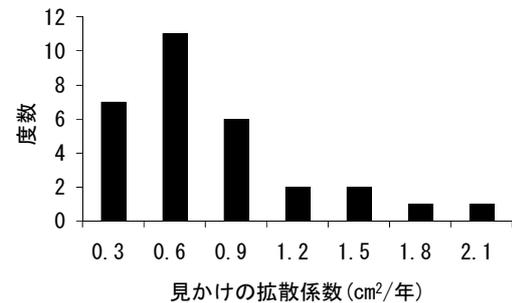


図-5 見かけの拡散係数 D_{ap} の度数分布

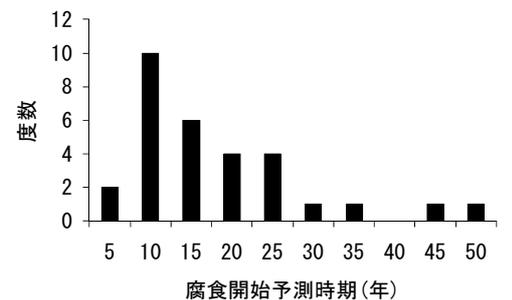


図-6 腐食開始予測時期 T の度数分布

塩分浸透性状を表す C_0 および D_{ap} の標本データは、平均ランク法により累積確率 $F(x_i)$ として表すこととした。すなわち、得られた C_0 および D_{ap} を小さい順に並べた順序統計量 x_i に対して、累積確率 $F(x_i)$ は式(4)により求められる。

$$F(x_i) = \frac{i}{N+1} \quad (4)$$

ここで、 i : データの順位、 N : データ数

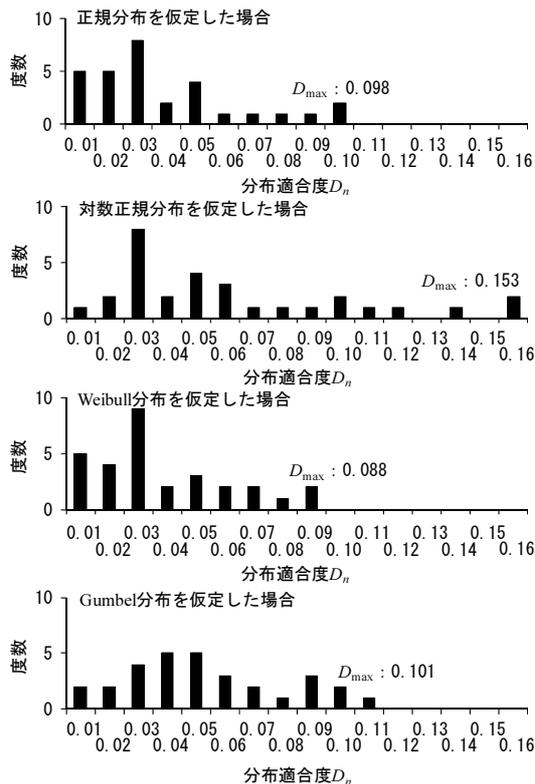


図-7 C_0 の分布適合度に対する度数

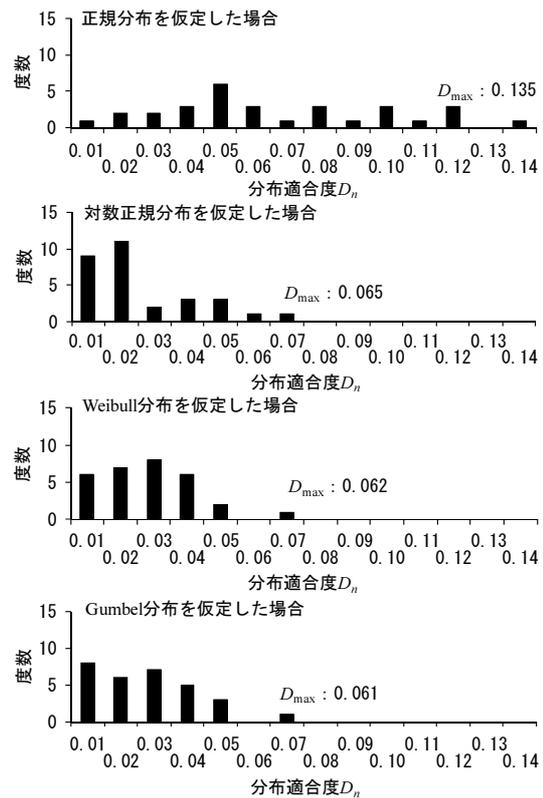


図-8 D_{ap} の分布適合度に対する度数

分布のパラメータは各分布の累積確率と式(4)から得られる累積確率の差の2乗和が最小となる値を繰返し計算により算定した。

4.2 表面塩化物イオン量の分布適合度

図-7に各分布と表面塩化物イオン量 C_0 の分布適合度を評価する D_{max} を示す。これより、何れの分布を仮定した場合でも D_{max} は有意水準を5%として設定した場合のK.S.検定統計量以下となることが確認された。特に、Weibull分布を仮定した場合に D_{max} は最も小さく(0.088)、仮定した分布のうち、 C_0 はWeibull分布に最も適合した。一方で、正規分布を仮定した場合に D_{max} は0.098、Gumbel分布を仮定した場合に D_{max} は0.101となり、 C_0 は正規分布およびGumbel分布に概ね適合することが確認された。

4.3 見かけの拡散係数の分布適合度

図-8に各分布と見かけの拡散係数 D_{ap} の分布適合度を評価する D_{max} を示す。これより、何れの分布を仮定した場合でも D_{max} は有意水準を5%として設定した場合のK.S.検定統計量以下となることが確認された。特に、Gumbel分布を仮定した場合に D_{max} は最も小さく(0.061)、仮定した分布のうち、 D_{ap} はGumbel分布に最も適合した。一方で、Weibull分布を仮定した場合に D_{max} は0.062、対数正規分布を仮定した場合に D_{max} は0.065となり、 D_{ap} はWeibull分布および対数正規分布に概ね適合することが確認された。

以上の分布適合度評価結果に基づき、以下のコア採取本数による表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数の誤差算定において、表面塩化物イオン量はWeibull分布、正規分布およびGumbel分布、見かけの拡散係数はGumbel分布、Weibull分布および対数正規分布に基づいて誤差を算定した。

5. コア採取本数による誤差の定量化

5.1 概要

モンテカルロシミュレーションにより、Mersenne Twisterを用いて一様乱数 $U(0\sim 1)$ を発生させ、コア採取本数による C_0 および D_{ap} の平均値の誤差を定量的に検討した。コア採取本数により得られる平均値誤差 E の算定式を式(5)に示す。なお、 C_0 の平均値誤差 E^C および D_{ap} の平均値誤差 E^D について検討した。

$$E_j = \frac{1}{10000} \sum_{i=1}^{10000} |\mu_{30} - \mu_{i,j}| \quad (5)$$

ここで、 E : 平均値誤差、 μ_{30} : コアを30本採取した場合の平均値、 $\mu_{i,j}$: 乱数 i 組目の平均値(コアを j 本採取した場合) 正規分布、対数正規分布に基づき、Box-Muller法を用いて標準正規乱数へ変換した。すなわち、一様乱数 U_1 および U_2 を式(6)により表される変換式を用いて変換した。

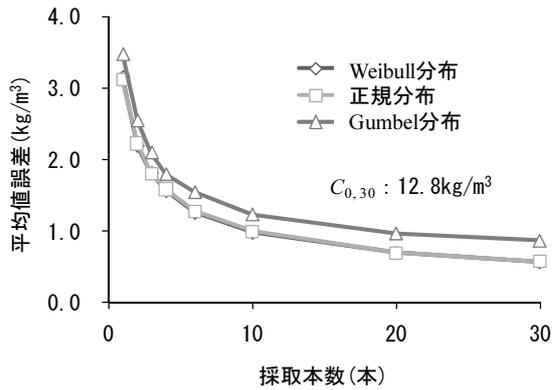


図-9 表面塩化物イオン量の平均値誤差

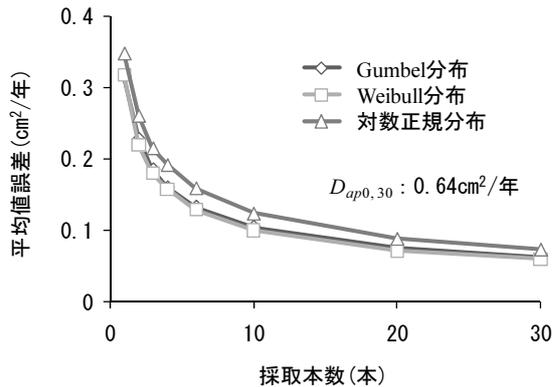


図-10 見かけの拡散係数の平均値誤差

$$Z = \sqrt{-2 \ln U_1} \cdot \sin(2\pi U_2) \quad (6)$$

ここで、 U_1 および U_2 : 一様乱数、 Z : 標準正規乱数

さらに、標本データを式(7)および式(8)により得られる変換式を用いて正規乱数および対数正規乱数に変換した。

$$x_N = \sigma \cdot Z + \mu \quad (7)$$

$$x_{\ln} = \exp(\delta \cdot Z + \zeta) \quad (8)$$

ここで、 x_N および x_{\ln} : 正規および対数正規分布の標本データ、 μ : 平均値、 σ : 標準偏差、 δ : 対数平均値、 ζ : 対数標準偏差

また、Weibull 分布および Gumbel 分布に基づき、標本データを逆関数法により得られる式(9)および式(10)により変換した。

$$x_w = \beta \left(\ln \frac{1}{1-U} \right)^{1/\alpha} \quad (9)$$

$$x_g = \alpha - \beta \ln \ln \frac{1}{U} \quad (10)$$

ここで、 x_w および x_g : Weibull および Gumbel 分布の標本データ、 U : 一様乱数(0~1)、 α および β : 分布のパラメータ

30 本採取した場合の C_0 および D_{ap} の平均値($C_{0,30}$ および $D_{ap,30}$)を式(2)に代入(かぶり : 5cm)することにより腐

食開始時期 T_{30} を求めた。すなわち、本論文の範囲内では、 T_{30} は腐食開始時期の真値であると言える。腐食開始限界塩化物イオン量 C_{limit} は 2.0 kg/m^3 とした。さらに、モンテカルロシミュレーションにより得られた平均値誤差を考慮し、 $C_{0,30} \pm E^C$ および $D_{ap,30} \pm E^D$ を用いて腐食開始時期を求めた。 $C_{0,30} + E^C$ および $D_{ap,30} + E^D$ を用いて求めた腐食開始時期を予測の上限値、 $C_{0,30} - E^C$ および $D_{ap,30} - E^D$ を用いて求めた腐食開始時期を予測の下限値とした。一般に、径 100mm 程度のコアを一部材から 1~2 本程度採取し、コンクリート中の塩化物イオン浸透性状を評価することが多いが、径 25mm 以下の小径コア採取による塩分量の測定に関して、3~5 本採取する必要があることが報告されている¹¹⁾。本論文では、1, 2, 4, 6 本採取を想定した場合の結果について示す。

5.2 表面塩化物イオン量の平均値誤差

図-9 に採取本数による C_0 の平均値誤差を示す。同図では、最も適合することが確認された Weibull 分布、概ね適合することが確認された正規分布および Gumbel 分布を仮定した場合の平均値誤差を示している。このうち、Weibull 分布および正規分布を仮定した場合と比較して、適合度の低い Gumbel 分布を仮定した場合では誤差が 10%程度大きくなった。また、Weibull 分布および正規分布を仮定した場合は、誤差は概ね等しい。さらに、採取本数の増加に伴い、誤差が減少することが確認された。特に、1 本採取と 4 本採取、2 本採取と 6 本採取を比較すると誤差は半分程度となる。2 本採取の誤差は $2.0 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ (30 本採取した場合の平均値の 20%程度)、4 本採取の誤差は $1.5 \sim 1.8 \text{ kg/m}^3$ (30 本採取した場合の平均値の 15%程度)、6 本採取の誤差は 1.2 kg/m^3 程度(30 本採取した場合の平均値の 10%程度)であった。

5.3 見かけの拡散係数の平均値誤差

図-10 に採取本数による D_{ap} の平均値誤差を示す。同図には、最も適合することが確認された Gumbel 分布、概ね適合することが確認された Weibull 分布および対数正規分布を仮定した場合の平均値誤差を示す。このうち、Gumbel 分布および Weibull 分布を仮定した場合と比較して、適合度の低い対数正規分布では誤差が 10%程度大きくなった。また、Gumbel 分布および Weibull 分布を仮定した場合は、誤差は概ね等しい。さらに、 C_0 と同様に採取本数の増加に伴い、誤差が減少することが確認された。特に、1 本採取と 4 本採取、2 本採取と 6 本採取を比較すると誤差は半分程度となる。2 本採取の誤差は $0.20 \sim 0.26 \text{ cm}^2/\text{年}$ (30 本採取した場合の平均値の 40%程度)、4 本採取の誤差は $0.15 \sim 0.19 \text{ cm}^2/\text{年}$ (30 本採取した場合の平均値の 30%程度)、6 本採取の誤差は $0.13 \sim 0.16 \text{ cm}^2/\text{年}$ (30 本採取した場合の平均値の 20%程度)であった。採取本数による平均値誤差の割合は、 D_{ap} の方が C_0 と比較して大

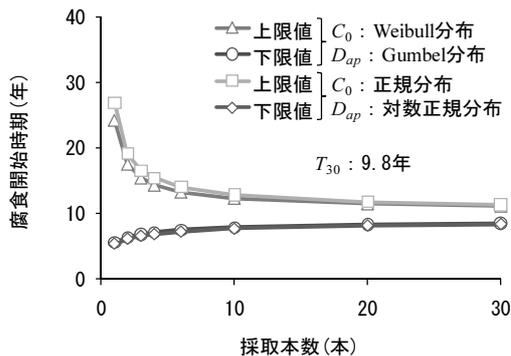


図-11 腐食開始時期の予測誤差

きい結果となった。

5.4 腐食開始時期の予測誤差

図-11に腐食開始時期の予測誤差を示す。採取本数の増加に伴い、腐食開始時期の予測誤差は減少することが確認された。特に、1本採取と4本採取、2本採取と6本採取を比較すると、上限値と下限値の差は半分程度となった。2本採取の誤差は上限値および下限値ともに T_{30} の50%程度、4本採取の誤差は上限値および下限値ともに T_{30} の40%程度、6本採取の誤差は上限値および下限値ともに T_{30} の30%程度であった。さらに、表面塩化物イオン量はWeibull分布、見かけの拡散係数はGumbel分布に従うと仮定した場合と比較して、表面塩化物イオン量は正規分布、見かけの拡散係数は対数正規分布に従うと仮定した場合の誤差は最大で(誤差が最大となる1本採取の場合)10%程度大きくなるに過ぎない。したがって、平均値および標準偏差により標本データを容易に整理できる分布の簡便性を考慮すると表面塩化物イオン量は正規分布、見かけの拡散係数は対数正規分布に従うと仮定するとともに、腐食開始時期を予測することが望ましいと言える。

6. まとめ

本論文で得られた主要な結論は次のとおりである。

- 1) 同一構造物、部材内でも塩分浸透性状は大きなばらつきを有することが確認された。特に、表面塩化物イオン量は最大で4倍以上、見かけの拡散係数は最大で16倍以上、腐食開始予想時期は最大で11倍以上の差異が確認された。
- 2) 表面塩化物イオン量はWeibull分布、見かけの拡散係数はGumbel分布に最も適合することが確認された。しかしながら、実用的には表面塩化物イオン量は正規分布、見かけの拡散係数は対数正規分布に近似できるものと考えられた。
- 3) コア採取本数の増加に伴い、塩分浸透性状の評価誤差は低下することが確認され、採取本数の増加による表面塩化物イオン量、見かけの拡散係数の平均値

および腐食開始時期の予測誤差の減少を定量的に示すことができた。

今後、様々な環境に暴露されたコンクリート部材の調査を行うことで、塩分浸透性状に関する情報を蓄積し、現場でのコアの採取本数の提案に関する定量的な検討を行う。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究B(20360195)の助成を受けたものである。実験を遂行するにあたり、北海道大学大学院修士課程中村一貴君に多大なるご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 加藤絵万, 濱田洋志, 横田弘, 濱田洋志, 審良善和：供用40年を経過したコンクリート部材の塩分浸透性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.837-842, 2008.
- 2) 大即信明：既設栈橋上部工の定量的な塩害劣化予測手法および入力パラメータの設定方法に関する研究, 平成19年度財団法人港湾空港建設技術サービスセンター研究開発助成報告書, pp.1-23, 2009.
- 3) 網野貴彦, 羽淵貴士, 守分敦郎：構造条件や波浪条件の違いが栈橋上部構内の空間的な腐食環境に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 7, pp. 225-230, 2007.
- 4) 網野貴彦, 大即信明, 斎藤豪, 羽淵貴士：構造形式や波の作用の影響を考慮した栈橋上部工部材の表面塩化物イオン濃度の推定方法に関する提案, コンクリート工学論文集, pp. 1-11, 2010.
- 5) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2007.
- 6) Evans, U. R. Mears, P. B. and Queneau, P. E.: Corrosion Probability and Corrosion Velocity, *Engineering*, Vol. 136, pp. 689, 1933.
- 7) 橋本操：高力ボルトの遅れ破壊, 腐食防食シンポジウム資料, Vol.35, pp.30-37, 1981.
- 8) 三浦周敏：地上置きタンク底板外面の極値解析による最大孔食深さの推定, 腐食防食シンポジウム資料, Vol.41, pp.22-28, 1982.
- 9) 加藤絵万, 川端雄一郎, 岩波光保, 横田弘：港湾RC構造物の確率論に基づく保有性能評価の試行, 土木学会論文集E2, Vol. 67, No. 1, pp.150-159, 2011.
- 10) 秋山充良, 鈴木基行, 伊東佑香：塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.385-401, 2006.
- 11) 伊藤始, 水川靖男, 野永健二, 佐原 晴也：小径コアによる塩化物イオン量の測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1665-1670, 2002.