

# 論文 耐久設計に用いる塩害劣化作用の確率モデルに関する基礎的研究

伊東 佑香<sup>\*1</sup>・秋山 充良<sup>\*2</sup>・鈴木 基行<sup>\*3</sup>

**要旨**：コンクリート構造物の環境劣化作用に対する性能照査が導入されてきている。本研究は、この性能照査を信頼性理論に基づく限界状態設計法の枠組みの中で実現するための基礎的研究として、塩害劣化作用を受ける RC 構造物の損傷確率の定量化を試みる。まず、時間的、空間的ばらつきを考慮した確率モデルに基づき、塩害劣化作用のハザード曲線を作成した。また、塩化物イオンの浸透予測に伴うばらつきを考慮したフラジリティカーブを作成し、ハザード曲線と組み合わせることで、RC 構造物で生じる鋼材腐食の発生確率を定量化した。

**キーワード**：塩害, 信頼性設計, 飛来塩分量, 表面塩化物イオン濃度, 塩分浸透予測

## 1. はじめに

仕様書的な技術体系から性能規定に基づく技術体系への転換が求められ、そして国際的には、構造設計においては、その規定された性能や安全性の照査法として、信頼性理論を適用する流れにある。例えば、構造物の信頼性に関する一般原則(ISO2394)<sup>1)</sup>は、コンクリート構造物に対する要求性能規準や設計規準の規格化を行う ISO/TC71 の上位に位置付けられており、今後、コンクリート構造物を対象とする設計規準においても、これに準拠する確率論的な概念を導入した限界状態設計法への移行が必要になると考える<sup>2)</sup>。

こうした背景のもと、著者らは、コンクリート構造物の環境劣化作用に対する性能照査を信頼性理論に基づく限界状態設計法の枠組みの中で実現するための準備を進めている。このような設計法の構築により、(i)コンクリート構造物の耐久性に係る不確定要因のばらつきを低減する努力が安全係数の減少に容易に反映される(例えば、力学モデルに基づき精緻に腐食ひび割れを予測する、またはその予測式の精度の向上が安全係数の低減につながる)、(ii)構造性能に対するアカウンタビリティが求められる流れのなかで、“確率”という共通の尺度を基に供用期間中のコンクリート構造の耐震性や耐久性レベルを規

定することができる、など、このような耐久設計法を構築する意義は大きい。

本研究は、耐久信頼性設計法を構築するための基礎的研究として、耐震信頼性設計法の枠組みを応用し、塩害劣化作用を受ける RC 構造物で生じる鋼材の腐食発生確率(損傷確率)の定量化を試みる。具体的には、環境劣化作用のモデル化は地震ハザード評価<sup>3)</sup>と同様の手法で、また、ある劣化作用に対する鋼材腐食の条件付発生確率は、任意の地震動強さに対する破壊確率を求めるフラジリティカーブの作成法と同様の手法でそれぞれ評価する。両者のモデル化により、RC 構造物の損傷確率が算定される。

## 2. 耐久設計に用いる塩害劣化作用の確率モデル

### 2.1 概説

RC 構造物で生じる鋼材腐食の発生確率を求めるフローの概略を図-1 に示す。図-1 のフローでは、主に次の2つの作業を行う。すなわち、(i)塩害環境を表す指標のひとつである飛来塩分量の確率モデル(ハザード曲線)の作成(図中、step1 と step2)と、(ii)塩化物イオンの拡散を予測し、鋼材位置における塩化物イオン濃度がその腐食発生限界量を超過する確率を求めたフラジリティカーブの作成(図中、step3 と step4)、

\*1 東日本旅客鉄道株式会社 工修 (正会員)

\*2 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 博(工) (正会員)

\*3 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

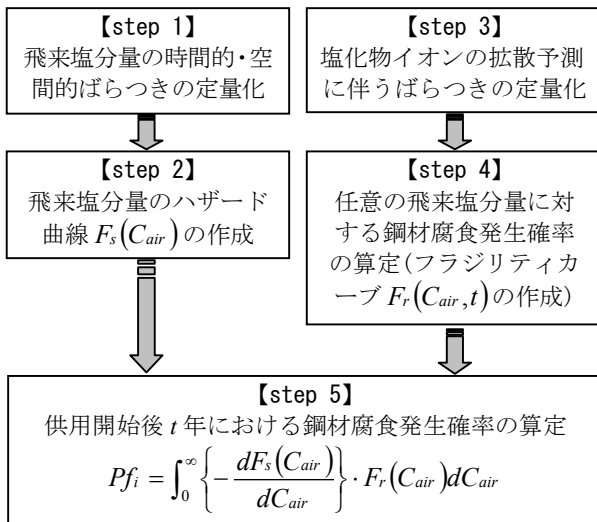


図-1 耐久信頼性評価のフロー

である。本研究では、塩害劣化作用の評価から、塩化物イオンの拡散予測に伴う一連のばらつきが上記の(i)と(ii)の中で考慮され、損傷確率の値に反映される。このような耐久信頼性評価の中では、コンクリート構造物の安全性(損傷確率)に最も影響する不確定要因が明らかとなり、耐久設計の合理化を図る上でより精緻な計算が必要とされる箇所などが特定される。

## 2.2 飛来塩分量の確率モデル(ハザード曲線)

### (1) 飛来塩分量の距離減衰式(水平方向)

塩害劣化作用を表す因子として、本研究では、解析対象構造物地点での飛来塩分量に着目する。この飛来塩分量は、時間的、空間的なばらつきを有することから、地震ハザード評価と同様の手法でその確率モデルを構築する。

まず、海岸線位置の年平均風速  $u$  (m/s)と、海岸線から  $X$  km 離れた位置での飛来塩分量の実測値  $C_{air,e}$  の関係を整理し、その距離減衰式を作成する。飛来塩分量は、対象構造物の置かれる地理的条件により大きくばらつくものになる。ここでは、海岸線からの距離  $X$  で飛来塩分量の変化を表現し、 $u$  と  $X$  の関数となる距離減衰式から求められる  $C_{air,c}$  と  $C_{air,e}$  の比の統計量より空間的ばらつきを評価した。

飛来塩分量のハザード曲線を作成する際には、調査期間 3 年のデータを基にした。すなわち、飛来塩分量の実測値  $C_{air,e}$  は、3 年間の調査結果の平均値を使用し、年平均風速  $u$  も、飛来塩分

量観測地点から最も海岸線に近い位置にある気象台で得られた年平均風速の 3 年間の平均値を用いる。

また、図-1 のフローに示される step3 や step4 において、本研究では、式(1)を用いてコンクリート表面から深さ  $x$  における塩化物イオン量  $C(x,t)$  の予測を行っている。そこで、表面塩化物イオン量  $C_0$  と  $C_{air,e}$  の関係式を作成する際も、飛来塩分量の観測地点で実施された 3 年間のコンクリート暴露試験から求められる  $C_{0,e}$  を用いる。

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

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (2)$$

ここに、 $D_c$  は塩化物イオンの見かけの拡散係数、 $t$  は暴露開始後の経過時間である。

図-1 のフローに関する実測値の調査期間を統一したことにより、ハザード曲線とフラジリティカーブの掛け合わせ(図-1 の step5)が可能となる。なお、調査期間の実測値を 3 年に設定したのは、(i)各暴露期間において実測した塩化物イオン量の深さ方向の分布より求められる表面塩化物イオン量および塩化物イオンの見かけの拡散係数は、暴露後 3 年以降の経時変化が少なくなり、ある一定値に収束し始めること<sup>4)</sup>、(ii)  $C_0$  と  $D_c$  を  $t$  に無関係な定数として扱う場合、耐久信頼性評価の中で時系列的な検討が不要となり、例えばフラジリティカーブを Monte Carlo 法で求める際に、式(1)の  $t$  を変化させるのみでライフタイムにおける鋼材の腐食発生確率を求めることができる、(iii)著者らの知る限り、飛来塩分量の実測を 3 年よりも長期にわたり、日本全国、さらには、海岸線からの様々な距離の大きさに対して求めた調査結果が存在しない、などの理由による。なお、表面塩化物イオン量を経時的に変化させた方が、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布を再現しやすいとの報告もある<sup>5)</sup>。より長期間の飛来塩分量の調査実施とあわせ、今後の検討課題である。

飛来塩分量の実測値としては、土木研究所の全

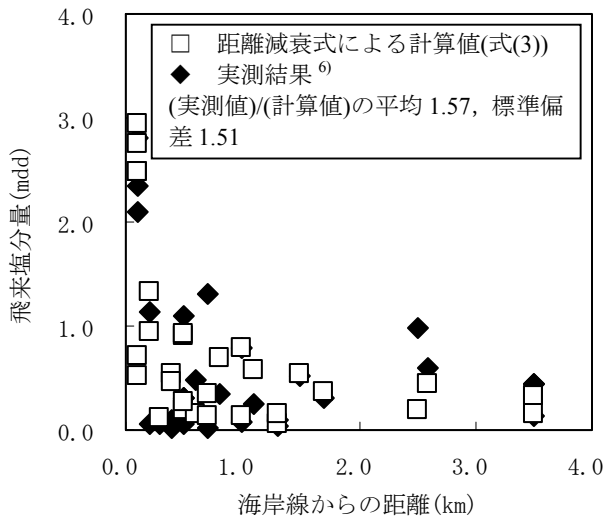


図-2 距離減衰式(水平方向)の精度検証

表-1 地域区分ごとの統計量の相違

	データ数	平均値	標準偏差
(1) 全地域	33	1.57	1.51
(2) 塩害の影響地域	13	1.33	1.02
(3) (2)以外の地域	20	1.58	1.63

国飛来塩分量調査(III)<sup>6)</sup>のうち、調査期間が3年間になる33の観測データを用いた。そして、飛来塩分量の実測値  $C_{air}$  をもとに、 $u$  と  $X$  を用いた回帰分析より得られた距離減衰式を式(3)に示す。

$$C_{air} = 3.17 \times 10^{-2} \cdot u^{2.0} \cdot X^{-0.6} \quad (3)$$

式(3)から求められる飛来塩分量の計算値と、実測値の比較を図-2に示した。33の観測データとの比較から得られる(実測値)/(式(3)の計算値)は、平均値1.57、標準偏差1.51である。

式(3)を求める際には、入手できた観測データが33と少ないこともあり、観測地点の地域性を考慮せずに全データを用いて回帰分析している。そのため、地域毎の耐久信頼性の違いは、年平均風速  $u$  の大きさのみに起因することになる。なお、33の観測データを、道路橋示方書<sup>7)</sup>で規定する塩害の影響地域で得られたデータとその他のデータに区分し、それぞれの区分にあるデータのみを用いて回帰分析を行い距離減衰式を作成した。(観測値)/(計算値)の統計量を区分毎に表-1に示す。表-1を見る限り、距離減衰式の精度は、地域の区分によらない結果となった。ただし、飛来塩分量の空間的ばらつきを現在は海岸線からの距離  $X$  のみで表現しているが、今後は、より詳細な地理的、気象的条件を考慮したパラ

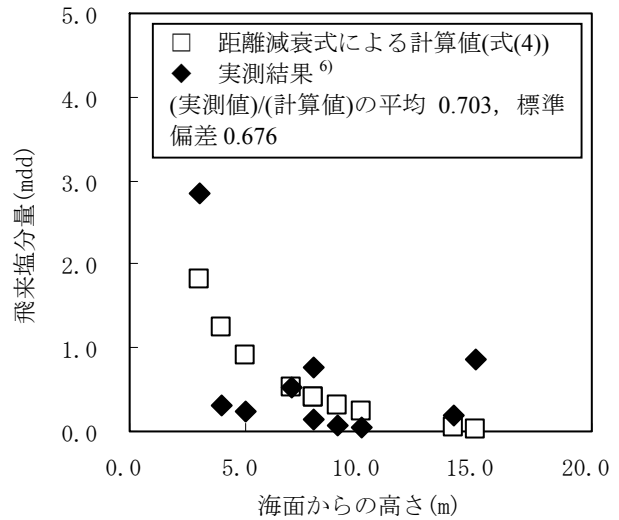


図-3 距離減衰式(垂直方向)の精度検証

メータ、例えば風向の影響などを取り入れ、そのばらつきの低減を検討しなければならない。

### (2) 飛来塩分量の距離減衰式(垂直方向)

式(3)は、 $X=0\text{km}$ での飛来塩分量を算定することができない。そこで本研究では、 $X=0\text{km}$ や汀線付近では、飛来塩分量の減衰を海岸線からの高さ  $h$  (m)の関数で表現する。式(3)と同様に、参考文献6)を参照し、調査期間が3年間および海岸線からの距離が0kmと明示された飛来塩分量の実測値  $C_{air}$  の回帰分析を行い、式(4)を得た。

$$C_{air} = -0.425 + 6.72/h \quad (4)$$

式(4)から求められる飛来塩分量の計算値と、実測値の比較を図-3に示した。12の観測データとの比較から得られる(実測値)/(式(4)の計算値)は、平均値0.703、標準偏差0.676である。なお、式(4)についても、参考文献6)以外で報告されているデータを活用し、今後、そのばらつきの低減を図る必要がある。

### (3) 飛来塩分量の時間的ばらつき

式(3)では、海岸線位置の年平均風速  $u$  により、 $C_{air}$  が変動する。飛来塩分量の実測期間は、最長3年であることから、飛来塩分量の時間的ばらつきは、過去数十年のデータの入手が容易な  $u$  の統計量を基に考慮する。

本研究の年平均風速  $u$  は、年平均風速の3年間の平均値であり、その確率密度関数  $f_u(u)$  は、正規分布で良好に近似された。一例として、石垣地域(沖縄県)、輪島地域(石川県)、および小名

浜地域(福島県)における年平均風速  $u$  の変動を 図-4 に示した。

#### (4) 飛来塩分量のハザード曲線の算定例

これまでの検討により、解析対象構造物位置で飛来塩分量が特定の値  $c_{air}$  を超過する確率は、式(5)で求めることができる。

$$F_s(c_{air}) = \int_0^{\infty} [P(C_{air} > c_{air} | u, X = a) f_u(u)] du \quad (5)$$

ここで、 $P(C_{air} > c_{air} | u, X = a)$  は、年平均風速が  $U = u$  のもとで、構造物位置(海岸線からの距離  $a$ )での飛来塩分量  $C_{air}$  が  $c_{air}$  を超過する確率である。

石垣地域( $a=0.50\text{km}$ )、輪島地域( $a=0.20\text{km}$ )、および小名浜地域( $a=0.35\text{km}$ )を対象に得られた飛来塩分量のハザード曲線を 図-5 に示した。ハザード曲線は、 図-4 に示される各地域の平均風速の違いを反映して、石垣地域、輪島地域、そして小名浜地域の順に厳しい塩害環境と評価されている。なお、2.2 (1)に示した理由により、 図-5 で求められたハザード曲線は、塩化物イオンの拡散予測の期間長さに関らず使用する。

### 3. 塩害劣化作用を受ける RC 構造物の耐久信頼性評価の一例

#### 3.1 概説

以降では、 図-5 のハザード曲線と、 図-1 の step3 と step4 で求めるフラジリティカーブから、塩害劣化作用を受ける RC 構造物における鋼材腐食の発生確率の算定例を提示する。

なお、本研究では、任意の飛来塩分量の作用に対し、鋼材位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度を超える確率を算定する。つまり、限界状態式は、 $g=(\text{鋼材腐食発生限界濃度}) - (\text{鋼材位置の塩化物イオン濃度})$ であり、 $C_{air}$  を横軸に、 $g < 0$  となる確率を縦軸に表したものがフラジリティカーブ  $F_r(C_{air})$  である。なお、 $g < 0$  となる確率は、Monte Carlo 法により算定する。

#### 3.2 考慮する不確定要因

##### (1) 表面塩化物イオン濃度

飛来塩分量  $C_{air,e}$  の実測を行った位置でのコンクリートの暴露試験(暴露期間 3 年)から求められた塩化物イオン濃度測定値の深さ方向の分布と、

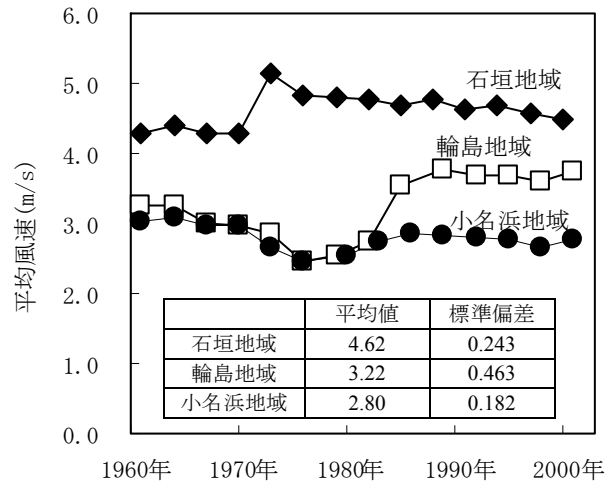


図-4 年平均風速の時間的変動

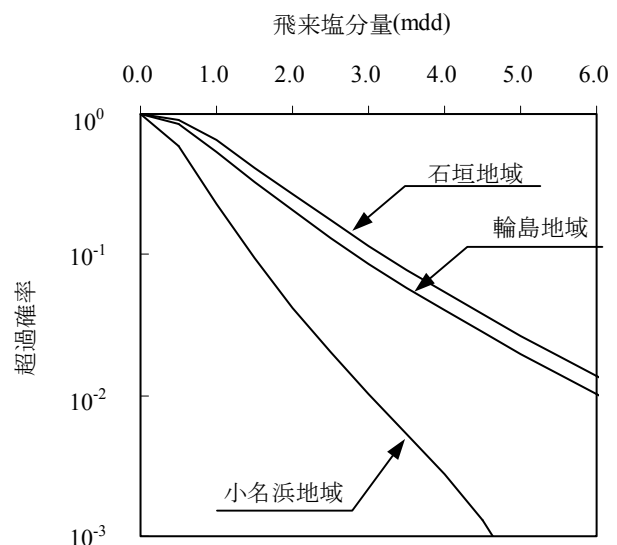


図-5 飛来塩分量のハザード曲線

式(1)による算定値の差が最小となる表面塩化物イオン量  $C_0$  が求められている<sup>8)</sup>。ここで、 $C_{air,e}$  と  $C_0$  の関係を回帰分析したところ、式(6)を得た。

$$C_0 = 0.491 \cdot C_{air}^{0.363} \quad (6)$$

この換算式による(観測値)/(式(6)による計算値)は、平均値 1.43、標準偏差 1.58 であった。Monte Carlo 法を行う際には、この平均値と標準偏差を持つ対数正規分布により、表面塩化物イオン量  $C_0$  の評価に伴うばらつきを考慮した。

##### (2) 見かけの拡散係数

見かけの拡散係数は、セメント種類や水セメント比の関数となり、それらの回帰式も提案されている<sup>9)</sup>。しかし、本研究では、入手できた統計量が限られたことから、式(6)を作成する際に併せて求められた見かけの拡散係数  $D_e$  の平均値と標準偏差をそのばらつきとして使用し、確率

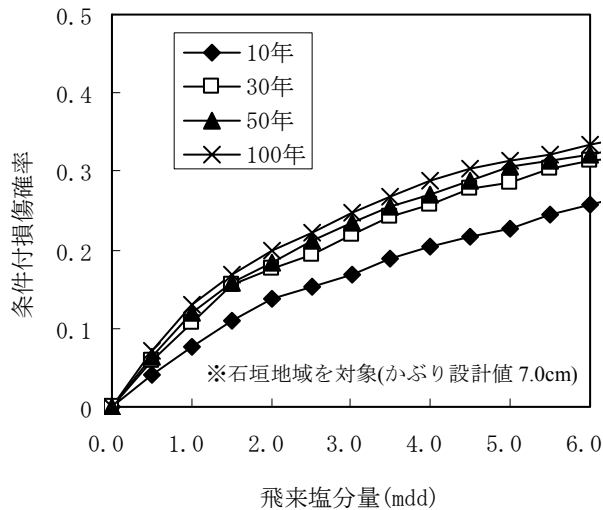


図-6 フラジリティカーブの算定例

分布形としては対数正規分布を仮定した。

### (3) 拡散方程式

コンクリートの暴露試験から求められた塩化物イオン濃度の深さ方向の分布を再現できるように式(1)の  $C_0$  と  $D_c$  を定めても、実験結果と完全に一致することはない。そこで、参考文献(6)にあるデータを基に、(深さ 0~10cm 位置の塩化物イオン濃度)/(式(1)の計算値)の比を計算したところ、平均値 1.43、標準偏差 1.58 が得られた。Monte Carlo 法を行う際には、対数正規分布を仮定し、拡散方程式が有するばらつきを考慮した。

### (4) かぶりとかぶりの施工誤差

道路橋示方書<sup>7)</sup>では、建設地域の塩害の影響度合いに応じた最小かぶりを規定している。本研究では、この最小かぶりを設計値とし、参考文献(10)に示される施工誤差を考慮して、対象構造物のかぶりの平均値と標準偏差を設定し、その変動は正規分布に従うと仮定した。施工誤差としては、参考文献(10)のラーメン高架橋柱側面の実測から得られた統計量を用いた。

### (5) 鋼材腐食発生限界濃度

上記の(1)~(4)により、限界状態式 g における鋼材位置の塩化物イオン濃度を算定することができる。一方、鋼材腐食発生限界濃度  $C_{lim}$  については、十分な統計データを集めることができなかった。そこで、参考文献(11)などを参考に、 $C_{lim}$  は 1.2~2.5  $\text{km}^3$  の値をとり、Monte Carlo 法を行う際には、 $C_{lim}$  はこの範囲の値を等しい確

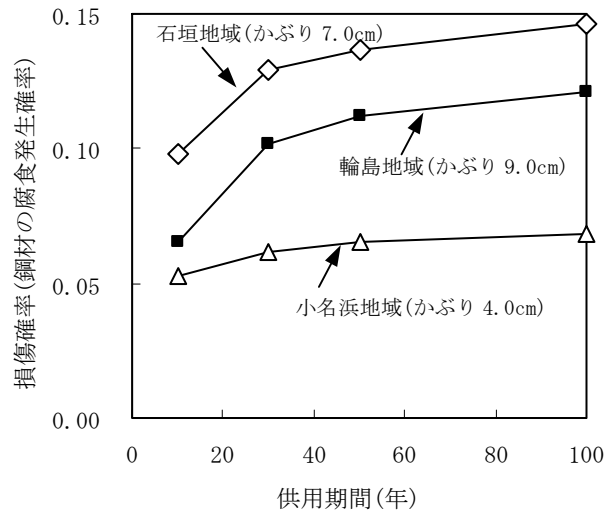


図-7 損傷確率と供用期間の関係

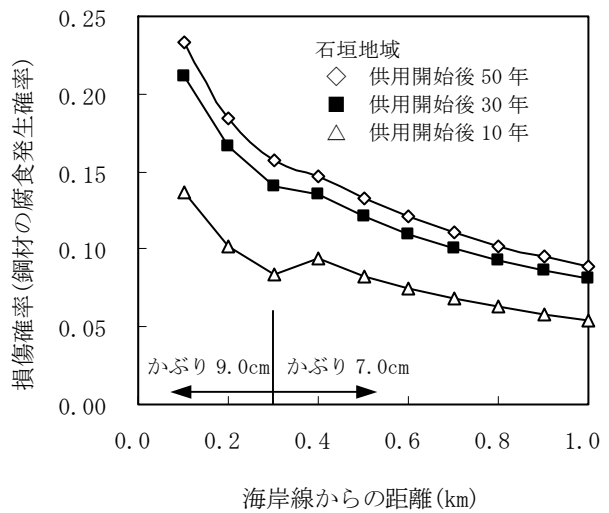


図-8 損傷確率と海岸線からの距離の関係

率で取り得ると仮定した。

### 3.3 フラジリティカーブの算定例

図-5 の石垣地域( $a=0.50\text{km}$ )にある構造物を想定して算定したフラジリティカーブ  $F_r(C_{air})$  を図-6 に示す。解析対象構造物では、参考文献(7)から、かぶりの設計値を 7.0cm に設定している。

### 3.4 RC 構造物の耐久信頼性評価

飛来塩分量のハザード曲線  $F_s(C_{air})$  (図-5)と、フラジリティカーブ  $F_r(C_{air})$  (図-6)から、式(7)により、解析対象 RC 構造物の損傷確率  $pf$  (腐食発生確率)を求める。

$$pf = \int_0^{\infty} \left( -\frac{dF_s(C_{air})}{dC_{air}} \right) \cdot F_r(C_{air}) dC_{air} \quad (7)$$

損傷確率の算定結果の一例を図-7 および図-8 に示す。図-7 は、石垣地域( $a=0.50\text{km}$ )、輪島地域( $a=0.20\text{km}$ )、および小名浜地域( $a=0.35\text{km}$ )

を対象に供用期間毎の損傷確率を求めたものである。ここに示す解析では、参考文献 7)に従いかぶり厚さの設計値を決めており、石垣地域は 7.0cm、輪島地域では 9.0cm、および小名浜地域では 4.0cm の各かぶりを想定し、損傷確率を算定している。現行規準の最小かぶりをかぶり厚さとして用いたことから、損傷確率はそれほど大きな値とならず、また、図-5 の石垣地域と小名浜地域のハザード曲線の差に比べ、両地域の損傷確率の差は小さくなっている。しかし、ある目標損傷確率を確保するようにかぶり厚さを変更した場合、この損傷確率の差を是正するためにはかぶり厚さの大きな変更が必要になると思われる。今後、図-7 のような損傷確率を基に、均一な耐久信頼性を確保できる最小かぶりの規定の見直しなどを行う必要がある。

図-7 は、地域ごとの損傷確率の相違を示したものであるのに対し、図-8 は、同一地域内(石垣地域)の損傷確率の相違を示している。海岸線からの距離(図-8 では 0.3km)に応じて最小かぶりが変化していることにより、海岸線からの距離が小さい領域で、極端に損傷確率が大きくなることを避けることができている。しかし、海岸線からの距離が、例えば、0.1km と 1.0km では損傷確率に有意な差が生じており、今後、本研究のような距離減衰式をもとに飛来塩分量の空間的なばらつきを考慮し、塩害の対策範囲などの見直しを検討する必要がある。

#### 4. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 地震ハザード評価と同様の手法を用いることで、時間的・空間的ばらつきを考慮した飛来塩分量のハザード曲線の算定手法を提示した。飛来塩分量の空間的ばらつきを単に海岸線からの距離のみで表現するなど、改善すべき点が多いが、既往の耐久設計とは異なり、耐久信頼性設計では、考慮したばらつきの統計量を明確に提示し、その上で、各地域の塩害環境の相違がハザード曲線で定量化される。
- (2) ハザード曲線とフラジリティカーブを用いることにより、RC 構造物の鋼材腐食の損傷確率

を算定した。本手法を用いることにより、地域ごと、また同じ地域でも、海岸線からの距離などによらず、等しい耐久信頼性を有する RC 構造物を設計できる可能性があることを示した。

今後は、地理的、気象的条件を考慮した飛来塩分量のハザード曲線の算定や、Monte Carlo 法などを行うことなく、所定の耐久信頼性を確保できる安全係数ベースの耐久設計法などを提案していきたい。

#### 参考文献

- 1) ISO : International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures 1998
- 2) 秋山充良 : コンクリート構造物の信頼性設計法に関する研究, コンクリート工学, Vol.41, No.6, pp.61-66, 2003.6
- 3) 例えば, 土木学会 : 動的解析と耐震設計 [第 1 巻] 地震動・動的特性, 技報堂出版, 1989
- 4) 竹田宣典ほか : 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp.91-104, 1998.8
- 5) 佐伯竜彦ほか : コンクリート表面における塩化物イオン濃度に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.985-990, 1999.7
- 6) 建設省土木研究所 : 土木研究所資料 飛来塩分量全国調査(III) - 調査結果およびデータ集 - , 土木研究所資料, 第 2687 号, 1988
- 7) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 下部構造編, 2002
- 8) 建設省土木研究所 : 土木研究所資料 飛来塩分量全国調査(IV) - 飛来塩分量の分布特性と風との関係 - , 土木研究所資料, 第 3175 号, 1988
- 9) 前田聡ほか : 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, 土木学会論文集, No.760/V-630, pp.109-120, 2004.5
- 10) 川村力ほか : 実態調査に基づく鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する研究, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.253-266, 2004.8
- 11) 大即信明ほか : 塩害(I), 技報堂出版, 1986