

論文 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究

佐藤 広和^{*1}・李 月鳳^{*2}・秋山 充良^{*3}・鈴木 基行^{*4}

要旨：本研究は、コンクリート構造物の環境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ことを目的とした基礎的研究である。沿岸部などの塩害環境に着目し、海洋からの塩分の飛来から鉄筋腐食発生、さらにはその後の腐食ひび割れの発生までの予測に伴う種々の不確定性について、観測・実験データをもとに評価し、耐用期間内に鉄筋腐食や腐食ひび割れが発生する確率を信頼性理論に基づき定量化した。耐久設計をする際の限界状態を鉄筋腐食発生点から腐食ひび割れ発生点に変更することで、ある目標限界状態到達確率を確保するための必要かぶりを大きく低減できる可能性が示された。

キーワード：塩害，信頼性設計，腐食ひび割れ，飛来塩分量，損傷確率

1. はじめに

著者らは、海洋環境下にある鉄筋コンクリート構造物を対象に、信頼性理論を用いることで、地域毎の飛来塩分量の確率論的ハザードを示し、海洋からの塩分の飛来から、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が限界値を超えるかどうかを判定する一連のプロセスにあるバラツキを陽に取り込むことで、耐用期間内の鉄筋腐食発生確率の算定手法を提案した¹⁾。一方、鉄筋腐食が生じた鉄筋コンクリート部材の構造実験結果を見る限り、鉄筋腐食発生点では、構造性能は何ら低下していないと思われ¹⁾、今後は、耐久設計でかぶりなどを決める際に、鉄筋腐食の発生をある程度まで許容するような検討も必要になると考える。

本研究では、参考文献1)に対し、鉄筋腐食発生後の腐食速度と腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量の統計量を追加し、地域や海岸線からの距離による腐食ひび割れ発生確率の違いを定量化できるようにした。そして、耐久設計における限界状態を鉄筋腐食発生点から腐食ひび割れ発生点に変更した際に、ある目標限界状態到達確率を確保するための必要かぶりの差異などを試算した。

2. 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした耐久信頼性評価フロー

2.1 概説

RC 構造物で生じる腐食ひび割れの発生確率を求めるフローの概略を図-1に示す。このフローの中で、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、塩化物イオンの拡散を予測し、鉄筋位置の塩化物イオン濃度がその腐食発生限界量を超過するかを判定するところ(図中、step3)までは、参考文献1)と同じである。本研究では、これに、腐食ひび割れ発生時の腐食減量に関する乾湿繰返実験や、鉄筋腐食速度の定量化を目的とした暴露実験を既往の文献から収集し、腐食ひび割れが発生するまでの予測に関わるバラツキを評価した(図中、step4)。これにより、任意の飛来塩分量に対する鉄筋腐食や腐食ひび割れの発生確率(フラジリティカーブ)が算定される(図中、step5)。最終的に、フラジリティカーブとハザード曲線が求められることで、供用開始後 t 年における鉄筋腐食や腐食ひび割れの発生確率(損傷確率) pf を算定できる(図中、step6)。

*1 鹿島建設(株) 土木設計本部 修(工) (正会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 修(工)

*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

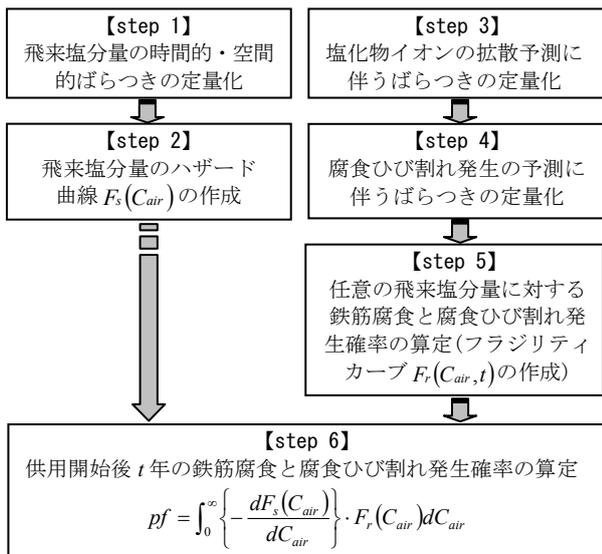


図-1 耐久信頼性評価のフロー

2.2 腐食ひび割れ発生の鉄筋腐食減量

Qi・関²⁾は、円筒モデルを基本算定モデルとして、鉄筋腐食によるひび割れ発生時点の鉄筋腐食量の基本算定式を誘導し、さらに有限要素解析を実施することで、かぶり、鉄筋径、およびコンクリート強度の影響を修正した腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の算定式(式(1))を提案している。鉄筋腐食量に影響する主要な因子を含み、また、非常に簡易に腐食ひび割れ時点の鉄筋腐食量を算定できることから、本研究では、既往のモデルの中で式(1)を採用することにした。

$$W_c = \frac{\rho_s}{\pi(\gamma-1)} \left(\alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \{ (2C+d)^2 + d^2 \}}{E_c(C+d)} f_c^{2/3} + \alpha_1 \beta_1 \frac{C+d}{5C+3d} w_c \right) \quad (1)$$

ここに、 W_c は鉄筋の腐食量(mg/mm^2)、 ρ_s は鉄筋密度、 γ は腐食生成物の体積膨張率、 C はかぶり(mm)、 d は鉄筋直径(mm)、 E_c はコンクリートの弾性係数(N/mm^2)、 f_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm^2)、 w_c はひび割れ幅(mm)、 α_0 、 β_0 、 α_1 、 β_1 は補正係数²⁾である。

式(1)の算定精度を評価するため、既往の乾湿繰返実験^{3)~5)}と電食実験^{6),7)}により得られた腐食減量の実験値と各供試体諸元から計算される W_c から、(実験値)/(式(1)による計算値)の統計量を得た。なお、実験における腐食ひび割れ発生時点では、既にある程度のひび割れ幅が生じており、

統一したひび割れ幅に対応する鉄筋腐食量となっていない。ここでは、腐食ひび割れが確認されたときの最大ひび割れ幅が多くの場合で0.1mm程度⁴⁾であることや、ひび割れ幅が0.1mm以下であれば鉄筋腐食量との相関は小さいとの実験結果^{7),8)}が得られていることから、式(1)を計算する際には $w_c=0.1\text{mm}$ とした。実験結果との比較を図-2と図-3に示す。

(実験値)/(計算値)には、大きなバラツキが認められるが、本研究では、これを腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量の予測に伴う不確定性として扱う。両図の横軸は、コンクリート表面から鉄筋中心までの距離を2倍した長さ D を鉄筋径で除した値であり、田中ら⁵⁾の実験では、 D/d が2.0~3.0でひび割れパターンが変化することが報告されている。しかし、本検討では、 D/d と(実験値)/(計算値)に特に相関は認められなかった。また、電食実験では腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量が小さくなる⁴⁾ことを反映し、図-2と図-3では、(実験値)/(計算値)の平均値が大きく異なる結果となった。本研究では、図-2と図-3のそれぞれの統計量を用いた場合で、腐食ひび割れ発生確率がどの程度異なるのかを算定する。なお、図-2と図-3の実験結果は、相互に異なる実験条件から得られたものであり、それらを式(1)で一律に評価しているため、(実験値)/(計算値)のバラツキは非常に大きくなっている。今後は、腐食ひび割れ発生確率を算定する構造物が位置する環境に近い条件で実施された実験結果に基づき(実験値)/(計算値)を評価したり、式(1)の見直しなども行うなどして、バラツキの低減を図る必要がある。

2.3 鉄筋腐食速度式

コンクリート中の塩化物イオンが経年とともに増加し、乾湿が繰り返されるような海洋構造物と、コンクリート練混ぜ時から加えられる塩化物イオンを含む構造物が内陸の一般の環境に位置する場合は、鉄筋の腐食速度は異なることが指摘されている⁹⁾。しかしながら、現状では、海洋環境下にあるRC構造物の鉄筋腐食速度を

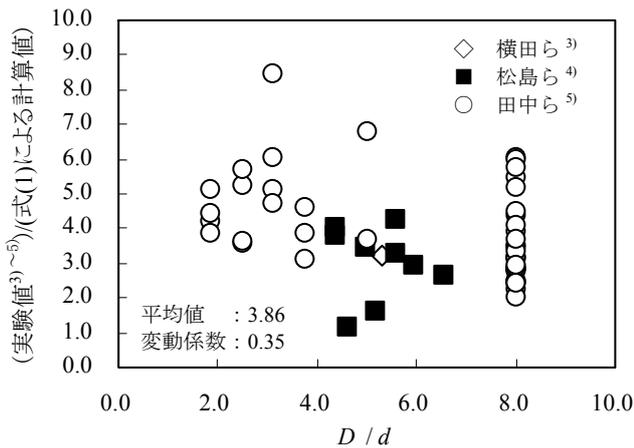


図-2 鉄筋腐食量の計算値と実験値(乾湿線返)

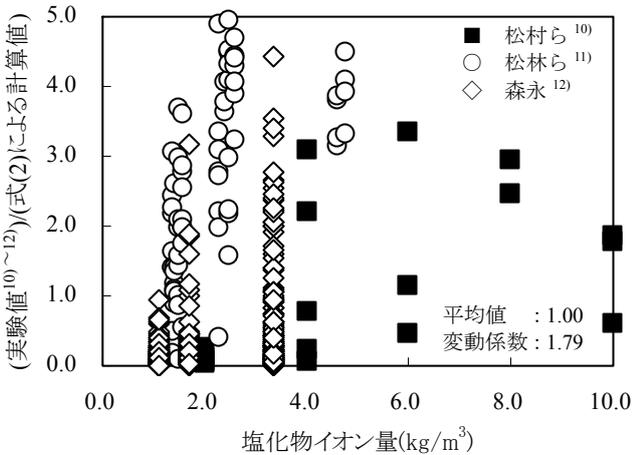


図-4 腐食速度式(式(2))の計算値と実験値

暴露試験から評価した実験は少なく、十分なサンプル数に基づき統計量を評価できない。そこで、本研究では、練混ぜ時から塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋の腐食速度を実験的に評価した既往の文献を収集し、回帰分析を行うことで腐食速度式を構築した。そして、それを沿岸部の実構造物や暴露実験に適用し、腐食速度の実測値との比較を行うことで、構築した鉄筋腐食速度式の妥当性を検証することにした。

用いた実験結果は参考文献 10)~12)であり、回帰分析する際は、実験値との整合が良い松林ら¹¹⁾の関数形を用いた。鉄筋腐食速度 $V(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年})$ の回帰式を式(2)に示す。なお、実験結果を収集する際は、参考文献 9)を参考に、かぶりは 10mm 以上、塩化物イオン濃度 $1.12\text{kg}/\text{m}^3$ 以上、水セメント比 40%以上、および中性化深さが鉄筋位置に達しているデータは除くとする各条件を設けた。これらは式(2)の適用条件でもある。

$$V = 2.718 \cdot e^{(0.0038W/C+0.1693)Cl^-} \cdot C^{-0.5} \quad (2)$$

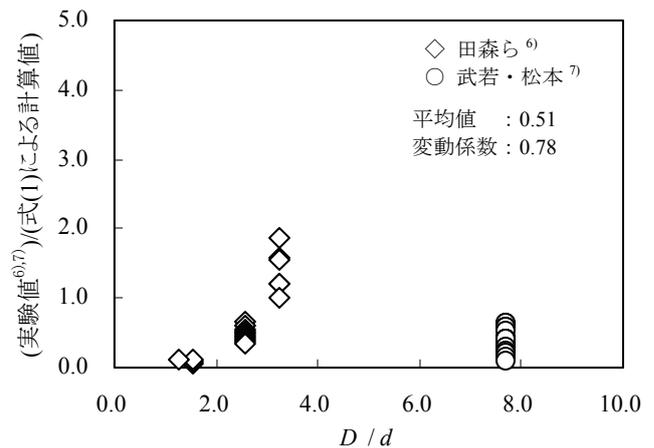


図-3 鉄筋腐食量の計算値と実験値(電食)

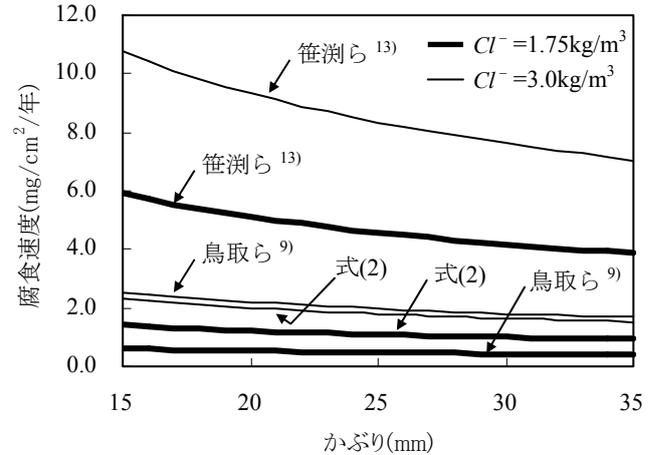


図-5 既往の腐食速度式との比較(W/C=60%)

ここに、W/C は水セメント比(%), Cl^- は塩化物イオン濃度(kg/m^3), C はかぶり(mm)である。

式(2)を用いた場合の(実験値)/(式(2)による計算値)を図-4に示す。また、W/C=60%としたときの既往の鉄筋腐食速度式との比較の一例を図-5に示す。複数の実験結果をもとに式(2)の精度を評価したため、(実験値)/(計算値)は非常に大きなバラツキを有する結果となった。中性化の影響が小さくない実験結果に基づく笹渕ら¹³⁾の式よりも平均的に小さな腐食速度を算定し、鳥取ら⁹⁾の式よりも塩化物イオン濃度が腐食速度に与える影響は小さく評価されるのが式(2)の特徴である。

なお、式(2)は、初期塩化物イオンを含むコンクリートから鉄筋の腐食速度を求めた結果である。そこで本研究では、次の手順により、海洋環境にある RC 構造物の腐食速度を算定する。i) 参考文献 1)と同じく、Fick の拡散方程式を解くことで、鉄筋位置の塩化物イオン濃度を予測する。その際、鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン

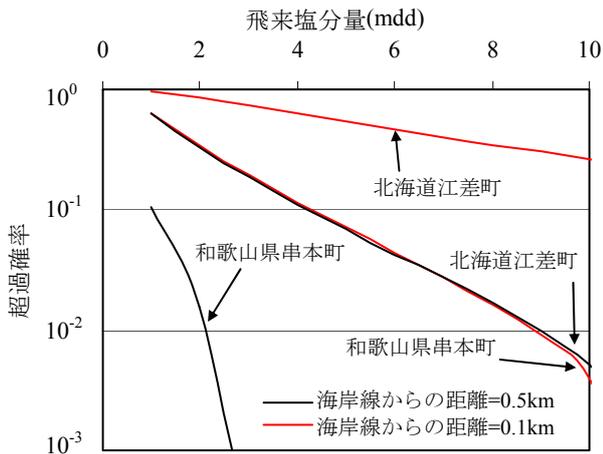


図-6 飛来塩分量のハザード曲線

濃度、Fick の拡散方程式による塩化物イオンの拡散予測、かぶり、および塩化物イオンの見かけの拡散係数のバラツキを考慮する。それらの平均値や変動係数、確率分布形は参考文献 1)と同じとする。ii)鉄筋腐食の発生以降、経時的な塩化物イオン濃度 Cl^- の上昇を 1 年毎に計算し、そのときの Cl^- を用いて腐食速度を式(2)より計算する。iii)鉄筋腐食量を腐食速度の時間積分値として計算する。iv)鉄筋腐食量が式(1)で求められる腐食ひび割れ発生時点の鉄筋腐食量に達するまで鉄筋腐食発生以降の年数を大きくし、ii)~iii)を繰り返す。なお、ii)と iii)の計算では、適合度の検定から、図-2~図-4 に示す(実験値)/(計算値)は対数正規分布に従うと仮定するのが良く、そのパラメータを図-2~図-4 に示す統計量から決定した。

中川ら¹⁴⁾は、沿岸部の実構造物の調査や暴露実験から、腐食ひび割れ発生前の腐食速度に関して、平均値 $V_{\mu,1}=0.19\%/年$ 、変動係数 0.63 を報告している。海洋構造物の鉄筋腐食速度の数少ない実測例である。ここでは、中川らの実構造物の情報を用いて、i)~iv)の過程を Monte Carlo 法(試行回数 $n=2,000$)により繰返し、腐食ひび割れ発生時点の腐食量を鉄筋腐食から腐食ひび割れが発生するまでの期間で除した鉄筋腐食速度 $V_{\mu,2}$ の統計量を得る。それを中川らの実測値と比較する。その際、構造物位置の飛来塩分量 C_{air} (mdd)は、対象構造物が満潮面から 3m 以内であることを考慮して、 $C_{air}=5.77$ の確定値とし¹⁾、鉄

筋径は全ての場合で 15.6mm、水セメント比は 50%とした。なお、本検討では、式(1)の(実験値)/(計算値)は、乾湿繰返実験から作成した図-2よりパラメータを決めた対数正規分布に従うとした。Monte Carlo 法で得られた $V_{\mu,2}$ の平均値は 0.21%/年、変動係数は 1.70 となった。i)~iv)の予測値と実構造物の実測値の変動係数を比較することは意味をなさないが、 $V_{\mu,1}$ と $V_{\mu,2}$ は概ね一致したことから、式(2)により海洋環境下の RC 構造物の鉄筋腐食速度を評価できると判断した。

3. 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性評価

3.1 解析対象地点と飛来塩分量のハザード曲線

北海道江差町と和歌山県串本町にある RC 構造物を対象に腐食ひび割れ発生確率などを算定する。参考文献 1)の確率モデルから求めた飛来塩分量 C_{air} のハザード曲線 $F_s(C_{air})$ を図-6 に示す¹⁾。海風比率や平均風速の違いから、江差町は大変に厳しい塩害環境にあると評価される。

3.2 フラジリティカーブ

ある与えられた C_{air} を参考文献 1)にある関係式から表面塩化物イオン濃度 C_0 に変換し、その後、2.3 の i)~iv)のフローに従い、供用期間 t 年における鉄筋腐食と腐食ひび割れの条件付発生確率を算定する。 C_{air} と、 C_{air} が作用したとの条件付で求めた発生確率の関係がフラジリティカーブ $F_r(C_{air}, t)$ である。条件付発生確率は、限界状態式 g を $g=R-S$ で定義した場合、 $g < 0$ となる確率を表しており、本研究では、 R は鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン濃度か腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量、 S は鉄筋位置の塩化物イオン濃度か鉄筋腐食量となる。ここでは、水セメント比 45%、Monte Carlo 法における試行回数 n を $n=2,000$ とし供用期間 50 年の $F_r(C_{air}, t)$ を評価した。鉄筋腐食および腐食ひび割れ発生に対するフラジリティカーブをそれぞれ図-7 および図-8 に示す。

両図より、図-2 に示すバラツキの存在下でも、乾湿繰返実験に基づき式(1)の(実験値)/(計算値)を評価した場合には、鉄筋腐食発生の確率に比

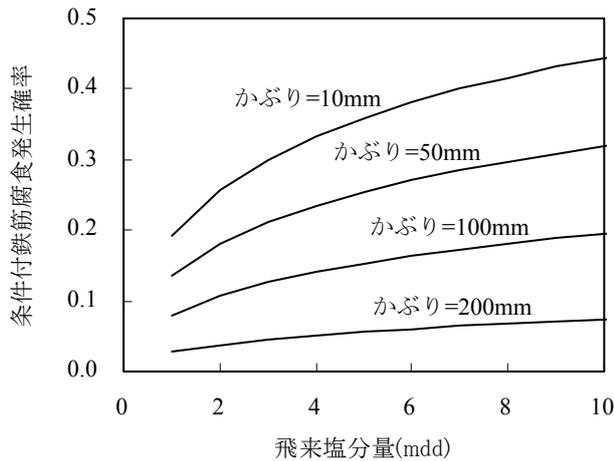


図-7 フラジリティカーブ(鉄筋腐食発生)

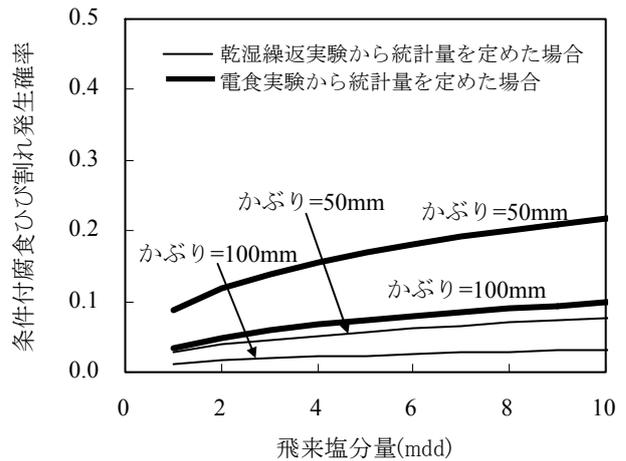


図-8 フラジリティカーブ(腐食ひび割れ発生)

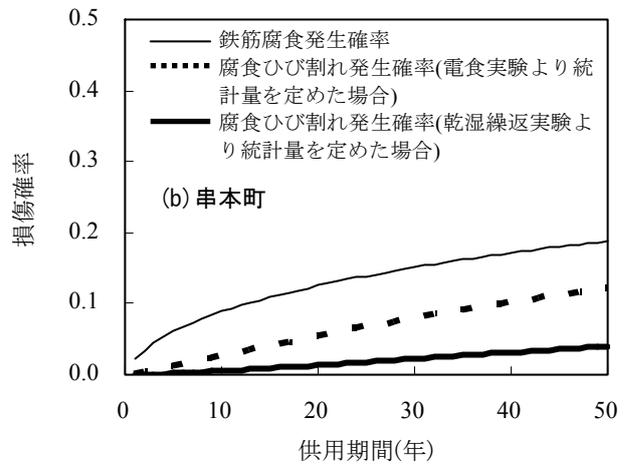
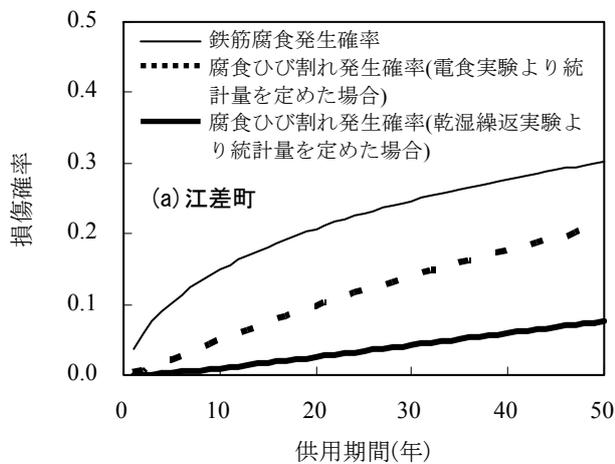


図-9 損傷確率と供用期間の関係(W/C=45%, かぶり 50mm の例)

べ、供用期間 50 年以内に腐食ひび割れが発生する確率は大きく低減される。一方、電食実験に基づき式(1)の(実験値)/(計算値)を評価した場合には、図-3 に示されるように、(実験値)/(計算値)の平均値が小さく評価され、また、その変動係数が図-2 の場合に比べ大幅に大きくなることから、ある飛来塩分量に対し、かぶりと水セメント比が同じ場合には、鉄筋腐食と腐食ひび割れの条件付発生確率の差は小さいものとなる。実構造物における腐食ひび割れ発生時点の鉄筋腐食量の大きさに関しては、今後もさらなる実験的、解析的研究が必要であるが、本研究のような信頼性理論を用いた検討により、その統計量の改善が RC 構造物の耐久信頼性に及ぼす影響を定量的に把握できるようになる。

3.3 耐久信頼性評価

ハザード曲線 $F_s(C_{air})$ とフラジリティカーブ $F_r(C_{air}, t)$ から、図-1 にある算定式を用いること

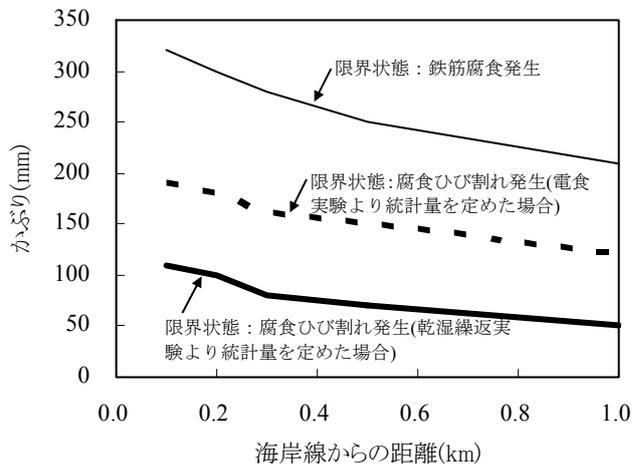


図-10 目標信頼性指標の確保に必要なかぶり

で、供用期間 t 年における鉄筋腐食および腐食ひび割れ発生確率が算定される。海岸線からの距離を 0.1km としたときの供用期間と各損傷確率の関係を図-9 に示す。飛来塩分量のハザード曲線の差から、北海道江差町の損傷確率は何れの場合も大きく算定されることが確認される。

次に、信頼性指標 $\beta=2.0$ (信頼性指標 β と損傷確

率 pf には $\beta = -\Phi^{-1}(pf)$ (Φ : 標準正規分布の累積分布関数) の関係があり, $pf = 2.28 \times 10^{-2}$ に相当する) を確保するための必要かぶりを北海道江差町を例に海岸線からの距離ごとに算定した。結果を図-10 に示す。図-9 から推察されるように, 鉄筋腐食の発生確率を $\beta = 2.0$ となる程度まで小さくするためには, 海岸線からの距離が 1.0km 離れた位置の構造物でも 210mm 程度の大きなかぶりが必要となる。一方, 供用期間内の鉄筋腐食の発生を許容し, 腐食ひび割れが生じる確率を目標値以下となるような耐久設計を実施すれば, かぶりを相当に小さくでき, 特に図-2 から腐食ひび割れ発生時点の鉄筋腐食量を評価すると, 鉄筋腐食の発生を限界状態とする場合に比べ必要かぶりを 1/3 程度にできることが確認される。なお, 塩害環境にある構造物の耐久設計上の限界状態をどのように定めるのかは, 鉄筋腐食程度と構造性能との関係の整理などが必要であり, 今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 海洋からの塩分の飛来から, 腐食ひび割れの発生を判定する一連のプロセスに介在するパラメータを既往の実験結果などにに基づき陽に取り込み, 地域や海岸線からの距離による腐食ひび割れの発生確率の違いを定量化した。
- (2) 耐久設計上の限界状態を鉄筋腐食発生点から腐食ひび割れ発生点に変更し, 腐食ひび割れ発生時点の鉄筋腐食量の統計量を乾湿繰返実験に基づき定めることができるならば, ある目標信頼性指標(目標限界状態到達確率)を確保する必要かぶりを相当に小さくできる可能性を示した。

参考文献

- 1) 秋山充良, 伊東佑香, 鈴木基行: 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, 2006.6
- 2) Lukuan QI, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.161-171, 2001.2

- 3) 横田優ほか: 塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1041-1046, 2004
- 4) 松島学, 横田優, 関博: 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1669-1674, 2004
- 5) 田中大博, 横田優, 松島学: 腐食ひび割れ発生の限界腐食減量に関する実験的研究, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 5-179, 2006.9
- 6) 田森清美ほか: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988
- 7) 武若耕司, 松本進: コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.177-180, 1984
- 8) 榊田佳寛ほか: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 435 号, pp.19-27, 1992.5
- 9) 鳥取誠一, 宮川豊章: 初期塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.157-170, 2005.2
- 10) 松村卓郎ほか: 海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.303-314, 1999.11
- 11) 松林裕二ほか: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する屋外暴露実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp.9-15, 2000.10
- 12) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位論文, 1986
- 13) 笹渕優樹ほか: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する暴露試験: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.317-322, 1998
- 14) 中川貴之ほか: 海洋環境下における RC 構造物の鉄筋腐食速度の評価, コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム, pp. 325-330, 2004.10