

論文 海洋環境下にある RC 橋脚のライフタイムにわたる耐震信頼性評価

松崎 裕*¹・秋山 充良*²・黒田 千砂子*³

要旨：本研究は、海洋環境下にある RC 構造物を対象に、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮して、ライフタイムにわたる耐震信頼性を評価する枠組みを提示するものである。異なる地震危険度および塩害環境にある複数の地点を対象として、提案手法に基づく単柱式 RC 橋脚のライフタイムにわたる耐震信頼性評価例も併せて示している。検討の結果、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者が RC 橋脚の耐震信頼性の経時変化特性に大きな影響を与えること、地震危険度が低い地域であっても、厳しい塩害環境下では RC 橋脚の耐力とじん性の低下が大きくなり、結果として耐震信頼性は顕著に減少することを示した。

キーワード：ライフタイム, 地震ハザード, 塩害環境ハザード, RC 橋脚, 信頼性評価

1. はじめに

構造物の設計は、その建設後に構造物に作用する荷重や環境の影響の予測に伴う非常に大きな不確定性存在下での意思決定問題と言える¹⁾。また、特に厳しい環境作用下では、材料劣化に伴う構造性能の低下を考慮する必要があるが、材料劣化の進展予測や、材料劣化が生じた部材の構造性能評価のいずれにも、大きな不確定性の介在は避けられない。構造物のライフタイムにわたる安全性を確保するためには、こうした各種不確定性を適切に処理する必要があり、信頼性理論の適用はその有効な対処法の一つである²⁾。

近年、材料劣化が生じた RC 構造物が地震荷重を受ける場合の構造信頼性(耐震信頼性)評価に関する研究が精力的に行われている。特徴は、前記の不確定性を信頼性理論により処理することで、建設直後の構造物が有する耐震信頼性と、材料劣化が生じた場合のそれとが年損傷確率の大きさにより比較されている点である^{3)~7)}。しかし、参考文献 3)~7)のいずれの研究も、ある鉄筋腐食量が生じたとの条件下で算定された条件付年損傷確率となっており、さらに、鉄筋腐食の影響は鉄筋の断面減少としてみモデル化されている。腐食量に応じて鉄筋断面積を減少させ、各種設計基準などで示される耐震解析手法を用いても、鉄筋腐食に伴う RC 部材のじん性の低下は表現できないことが既往の実験的研究から指摘されている⁸⁾。これに対して、著者らは、既往の実験事実に基づいて、鉄筋質量減少率が 20%までの範囲であれば、1) 現行の耐震基準で設計された橋脚は、十分な帯鉄筋量を有するため、鉄筋腐食が生じて、破壊モードは曲げ破壊型からせん断破壊型に移行しない、2) 軸方向鉄筋の座屈発生前に、軸方向鉄筋および帯鉄筋の破断は生

じない、3) 鉄筋腐食の空間的不均一分布は考慮しない、などの仮定を設け、鉄筋腐食に伴うじん性の低下を考慮できる耐震解析モデルを構築した⁹⁾。その上で、耐震性能評価に介在する各種不確定性を踏まえ、鉄筋腐食が RC 橋脚の耐震信頼性の減少に及ぼす影響を定量的に明らかにした。しかし、参考文献 9)も、既往の参考文献 3)~7)と同じく、ある鉄筋腐食量が生じたとの仮定の下での耐震信頼性評価となっており、その鉄筋腐食量の発生確率や、耐震信頼性の供用年数に対する経時変化、すなわちライフタイムにわたる耐震信頼性評価は実現できていない。

本研究では、まず、参考文献 9)で提示した、鉄筋腐食が生じた RC 橋脚の耐震信頼性評価法の高度化を図る。具体的には、参考文献 9)の手法に、塩害環境ハザードを考慮した任意の鉄筋質量減少率に到達する確率を評価する、時系列の鉄筋腐食進展評価法を組み合わせる。これにより、海洋環境下にある RC 構造物を対象として、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮した、RC 構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性評価が実現される。また、提案手法の適用例として、塩害環境や地震危険度が異なる、複数の地点にある単柱式 RC 橋脚の耐震信頼性評価を実施し、荷重・環境作用の違いが RC 橋脚のライフタイムにわたる耐震信頼性に及ぼす影響などを検討する。

2. RC 構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性評価法

2.1 概説

鉄筋腐食の影響を考慮しない場合、地震により RC 構造物に生じる最大応答変位がその終局変位を超える 1 年当たりの確率(年損傷確率)は、供用年数に関わらず一定

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 早稲田大学 理工学部社会環境工学科教授 博(工) (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

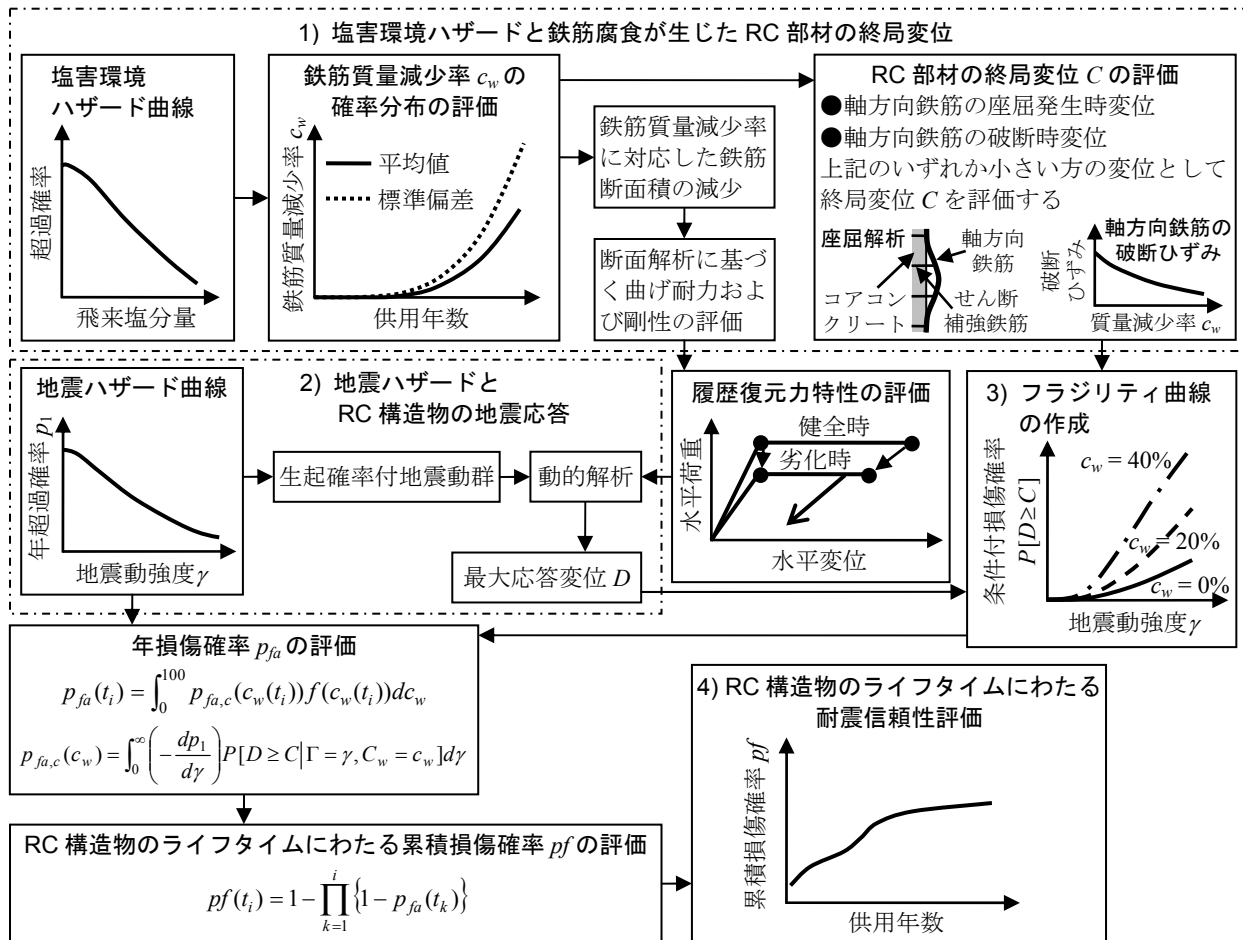


図-1 地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を考慮した RC 構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性評価法

であり、式(1)により評価できる。

$$p_{fa0} = \int_0^{\infty} \left(-\frac{dp_1}{d\gamma} \right) P[D \geq C | \Gamma = \gamma] d\gamma \quad (1)$$

ここに、 γ は地震動強度、 p_1 は地震動強度 γ の年超過確率、 D はRC部材の最大応答変位、 C はRC部材の終局変位である。

一方で、鉄筋腐食の影響を考慮する場合には、任意の供用年数 t_i 年における鉄筋質量減少率の確率分布を考慮して、次のように年損傷確率 $p_{fa}(t_i)$ が評価される。

$$p_{fa}(t_i) = \int_0^{100} p_{fa,c}(c_w(t_i)) f(c_w(t_i)) dc_w \quad (2)$$

$$p_{fa,c}(c_w) = \int_0^{\infty} \left(-\frac{dp_1}{d\gamma} \right) P[D \geq C | \Gamma = \gamma, C_w = c_w] d\gamma \quad (3)$$

ここに、 c_w は鉄筋質量減少率、 f は鉄筋質量減少率の確率密度関数、 $p_{fa,c}(c_w)$ は鉄筋質量減少率が c_w の条件下でのRC構造物の条件付年損傷確率である。式(3)は、特定の鉄筋質量減少率に対応する鉄筋腐食が生じた条件下での条件付年損傷確率の算定式であり、式(3)で算定される確率が参考文献9)で論じた損傷確率に対応する。

式(2)で算定された任意の供用年数 t_i 年における年損傷確率 $p_{fa}(t_i)$ を用いることで、 t_i 年までに地震によりRC構造物が損傷する確率 $pf(t_i)$ は、式(4)により評価される。

$$pf(t_i) = 1 - \prod_{k=1}^i \{1 - p_{fa}(t_k)\} \quad (4)$$

本研究で提示する、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮したRC構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性評価法の概要を図-1に示す。図-1に示すように、提案手法は、1) 塩害環境ハザード曲線に基づいて、任意の供用年数における鉄筋質量減少率の確率分布を評価し、当該質量減少率に対応するRC部材の終局変位 C および履歴復元力特性を評価する部分、2) 地震ハザード曲線に基づいて、1)で評価された履歴復元力特性を有するRC構造物の動的解析により、RC部材の最大応答変位 D を評価する部分、3) 1)と2)で評価されたRC部材の最大応答変位 D と終局変位 C の大小関係から、RC部材が限界状態に到達するか否かを判断し、任意の地震動強度に対する条件付損傷確率($D > C$ となる確率であり、 D と C がともに供用年数に依存することから、この条件付損傷確率も時間依存となる)としてフラジリティ曲線を作成する部分、4) 地震ハザード曲線と、フラジリティ曲線により、任意の供用年数までに一度でもRC構造物が地震により損傷する確率を式(2)~式(4)に基づいて評価する部分、の各種要素技術を体系化することで構成されている。

鉄筋質量減少率20%以下の特定の鉄筋質量減少率における耐震信頼性を議論していた参考文献 9)とは異なり、式(2)に示したように、本手法では、任意の鉄筋質量減少率に対応する鉄筋腐食の可能性を考慮しなければならない。鉄筋質量減少率が大きくなると、鉄筋の伸びが低下し、軸方向鉄筋の座屈発生前に、軸方向鉄筋の破断が生じる可能性がある。正負交番荷重を受ける、鉄筋腐食が生じた RC 部材の軸方向鉄筋の破断点を解析的に求めるためには、今後の実験事実の蓄積が必要である。本研究では、現在入手可能な既往の実験事実に基づいて、この軸方向鉄筋の破断を考慮した耐震信頼性評価を試みる。以下では、塩害環境ハザード曲線に基づいて鉄筋質量減少率の確率分布を評価する部分と、鉄筋腐食が生じた RC 部材の耐震解析法について詳述する。

2.2 鉄筋質量減少率の評価法

鉄筋質量減少率の評価は、1) 塩害環境ハザード曲線に基づいて、環境作用の厳しさを定量的に評価する部分、および 2) 環境作用に対する構造部材の応答、すなわち腐食進展を評価する部分の大きく 2 つに分けられる。

塩害環境ハザード曲線では、対象地点における平均風速や海風比率、海岸線からの距離に応じて、海洋からの飛来塩分量の超過確率として、塩害環境が定量的に評価される。ここでは、海岸線からの距離により減衰する飛来塩分量の予測や、解析対象地点の風速の予測に伴う不確実性が考慮される。解析対象構造物に塩分が飛来した後の塩化物イオンの浸透、あるいは鉄筋腐食発生や腐食ひび割れの発生、さらには、その後の鉄筋腐食進展については、それらの予測に伴う種々の不確実性を考慮し、参考文献 9)で提示した手法に基づいて評価する。そして、任意の供用年数における鉄筋質量減少率 $c_w(t_i)$ の確率分布を得る。 $c_w(t_i)$ の大きさは、塩害環境、コンクリートの水セメント比やかぶり、また鉄筋径などに依存し、そのバラツキの程度は、 $c_w(t_i)$ の評価に関係する個々の確率変数が持つ変動係数(標準偏差)により決定される。

2.3 鉄筋腐食が生じた RC 部材の耐震解析法

鉄筋腐食が進展するとともに、軸方向鉄筋の伸びが低下し、正負交番荷重を受ける RC 部材では、軸方向鉄筋の座屈発生前にその破断が生じる可能性がある。本研究では、この影響を考慮するため、参考文献 10)に示される実験データに基づき、軸方向鉄筋の破断ひずみ ε_{rup} を質量減少率 c_w の関数として、式(5)のように与える。

$$\varepsilon_{rup} = 0.29 \exp(-0.091c_w) \quad (5)$$

引張側の最外縁軸方向鉄筋のひずみが式(5)で評価される破断ひずみに到達したとき、RC 部材の塑性ヒンジ部の曲率 $\phi_{u,rup}$ は、式(6)で表すことができる。

$$\phi_{u,rup} = \frac{\varepsilon_{rup}}{d - x_n} \quad (6)$$

表-1 解析対象 RC 橋脚の諸元

断面幅	断面高さ	橋脚高さ	軸方向鉄筋比	横拘束筋体積比	橋軸方向固有周期
5.3m	3.4m	15m	0.93%	0.53%	0.57sec

* 耐震設計上の地盤種別：I 種地盤

ここに、 d は断面の有効高さ、 x_n は圧縮縁から中立軸までの距離である。

参考文献 9)に基づいて評価される軸方向鉄筋の座屈発生時曲率を $\phi_{u,buc}$ と表すと、終局曲率 ϕ_u は、軸方向鉄筋の破断時曲率および座屈発生時曲率のいずれか小さい方の曲率として、式(7)のように与えられる。

$$\phi_u = \min\{\phi_{u,buc}, \phi_{u,rup}\} \quad (7)$$

式(7)により与えられる終局曲率 ϕ_u を参考文献 9)と同様に仮定した曲率分布に基づき終局変位へと変換し、鉄筋腐食が生じた RC 部材のじん性を評価する。RC 部材の履歴復元力特性を決定するために必要となる曲げ耐力や剛性の評価法は、参考文献 9)と同様である。

なお、参考文献 9)において、提案した耐震解析モデルの精度検証に用いた全供試体(供試体総数：27 体、軸方向鉄筋の質量減少率：0~21.5%、帯鉄筋の質量減少率：0~74.9%)を対象として、軸方向鉄筋の破断時曲率 $\phi_{u,rup}$ を算定した。いずれの供試体においても、 $\phi_{u,rup}$ は軸方向鉄筋の座屈発生時曲率 $\phi_{u,buc}$ よりも大きく、実験事実と同様に、終局変位が軸方向鉄筋の座屈発生で決定されることを確認している。なお、後述の信頼性評価例に示されるように、塩害環境の厳しい地域では、 $\phi_{u,rup}$ の大きさが耐震信頼性の経時変化に影響を与える。本研究の第一の目的は、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮したライフタイムにわたる耐震信頼性評価法の構築にあるが、今後、そこで用いる耐震解析法、特に鉄筋質量減少率が大きい場合の付着劣化の影響を含む RC 部材の耐荷力やじん性評価法の高度化が必要である。

3. RC 橋脚のライフタイムにわたる耐震信頼性評価

3.1 解析対象とする RC 橋脚

2)で提案した手法を単柱式 RC 橋脚の信頼性評価に適用する。解析対象とする RC 橋脚は、現行の道路橋示方書¹¹⁾に従って耐震設計された表-1 に示す諸元を有する RC 橋脚である。普通ポルトランドセメントの使用を想定し、水セメント比は W/C=45%、軸方向鉄筋は D32、コンクリート表面と最外縁軸方向鉄筋の中心間距離は 100mm とした。なお、以降に示す RC 橋脚の耐震信頼性の評価例は、橋軸方向のみを検討対象とする。

3.2 想定する建設地点と地震および塩害環境ハザード

異なる地震および塩害危険度が RC 橋脚のライフタイムにわたる耐震信頼性に及ぼす影響を検討するため、表-1 に示す諸元を有する RC 橋脚が、酒田市の海岸線か

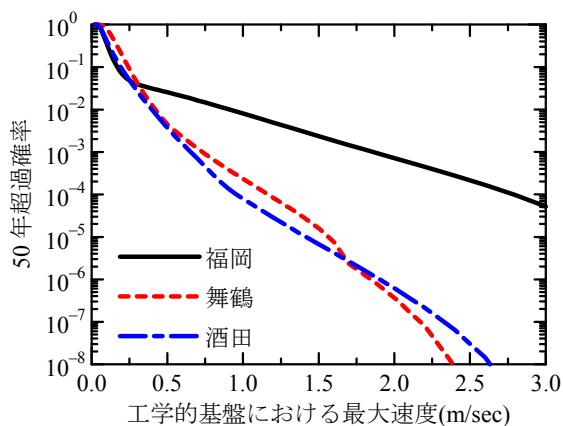


図-2 地震ハザード曲線¹²⁾

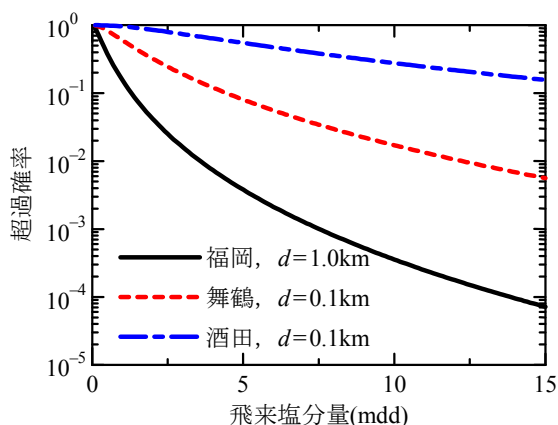


図-3 塩害環境ハザード曲線

らの距離 $d=0.1\text{km}$ 地点、舞鶴市の $d=0.1\text{km}$ 地点、福岡市の $d=1.0\text{km}$ 地点の3地点にあることを想定する。

本研究では、各3地点において、J-SHIS¹²⁾で公開されている工学的基盤での最大速度を地震動強度の指標とした、50年超過確率 p_{50} で評価された図-2に示す地震ハザード曲線を用いる。図から明らかなように、この例題で対象とする3地点の中では、福岡の地震危険度が最も高く、舞鶴と酒田は同程度の地震危険度である。なお、式(3)を用いて条件付年損傷確率を評価するためには、年超過確率で評価された地震ハザード曲線が必要である。いずれの3地点についても、再現期間の長い内陸の活断層の寄与により地震ハザードがほぼ決定されていることから、近似的にポアソン過程を用いて式(8)により年超過確率 p_1 を評価した。

$$p_1 = 1 - (1 - p_{50})^{1/50} \quad (8)$$

以上の地震ハザードに対応させた生起確率付地震動群については参考文献13)と同様に与える。続いて、対象とする3地点において評価した塩害環境ハザード曲線を図-3に示す。舞鶴と酒田の対象地点は、ともに海岸線からの距離が 0.1km と同一でありながら、冬季の厳しい季節風の影響のため、舞鶴よりも酒田の方が塩害環境は厳しく評価される。また、建設地点が福岡の場合は、海岸線からの距離を 1.0km と設定したこともあり、塩害

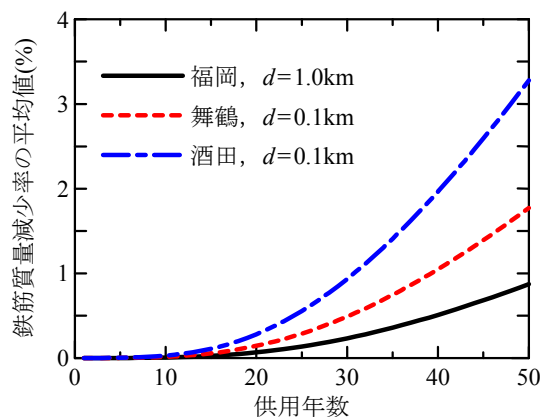


図-4 供用年数と鉄筋質量減少率の平均値の関係

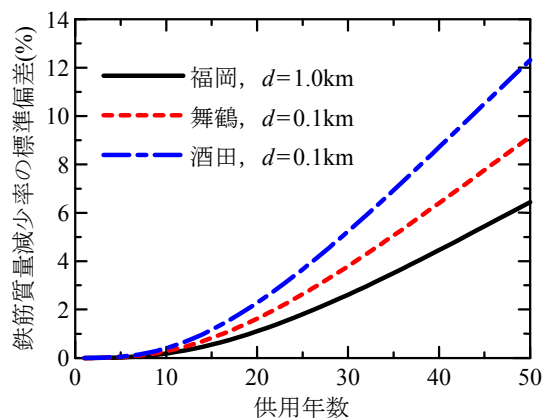


図-5 供用年数と鉄筋質量減少率の標準偏差の関係

環境は相対的に穏やかである。

3.3 鉄筋質量減少率の経時変化

各解析対象地点において、任意の供用年数における鉄筋質量減少率の確率分布を評価し、それらに基づいて算定した鉄筋質量減少率の平均値と標準偏差のそれぞれを供用年数との関係として、図-4および図-5に示す。

図-3の塩害環境ハザード曲線からも容易に予想されるように、塩害環境ハザード曲線がより上方にある地点、すなわち塩害環境が厳しい地点ほど、当然ながら、同一の供用年数において生じる鉄筋質量減少率は大きい。また、図-4に示した平均値と図-5に示した標準偏差とを比較すると、標準偏差の方がはるかに大きい。これは、参考文献9)に示されているように、例えば見かけの拡散係数のモデル化誤差を表す確率変数((実験値)/(見かけの拡散係数の算定式から得られる計算値)から統計量を評価)の変動係数は184%であるなど、鉄筋腐食進展評価に用いるいずれの確率変数も大きな変動係数を有しているためである。

3.4 フラジリティ曲線

解析対象 RC 橋脚に対して、任意の鉄筋質量減少率を想定し、鉄筋腐食が生じた RC 橋脚の耐震信頼性評価に係る各種不確定性を考慮した上で、前記した入力地震動群を用いた動的解析に基づくモンテカルロ・シミュレー

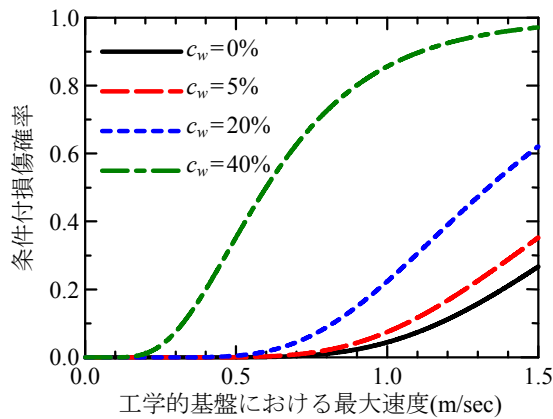


図-6 フラジリティ曲線

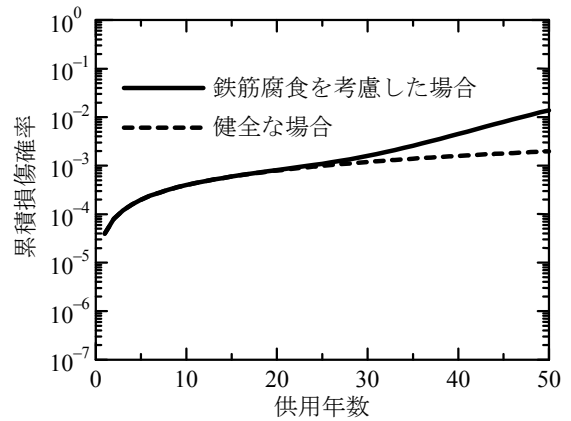
ション(以降, MCS と呼ぶ)によりフラジリティ曲線を算定した。解析結果の一例を図-6 に示す。条件付年損傷確率に影響の大きい地震動強度領域で離散的に条件付損傷確率を算定し, それらの分布を対数正規分布の累積分布関数で近似したものを示している。なお, 離散的に算定された条件付損傷確率と対数正規分布の累積分布関数の対応は良好であることを確認している。また, MCS の試行回数は 5,000 回であるが, 試行回数をこれ以上増やしても, 式(2)で評価される年損傷確率は変化しないことを確認している。

図-6 に示すように, 鉄筋質量減少率が 20% を超過すると, 条件付損傷確率が急激に大きくなっている。これは, 鉄筋質量減少率 30% 程度を境にして, より低い鉄筋質量減少率では軸方向鉄筋の座屈発生で決定されていた終局変位が, 軸方向鉄筋の破断で決定されるようになることと, 式(5)に示すように, 軸方向鉄筋の破断ひずみは鉄筋質量減少率が大きくなるほど, 指数関数的に小さくなることに起因している。なお, 式(2)により年損傷確率を算定する際は, 各鉄筋腐食量が生じる確率を考慮する。各鉄筋腐食量が生じる確率は, 塩害環境ハザードに依存している。例えば, 塩害環境が厳しくない場合には, 大きな鉄筋腐食量が生じる確率は相当に小さくなり, 軸方向鉄筋の破断を考慮した耐震解析法を用いても, それを考慮しない場合と大差のない年損傷確率が得られることになる。

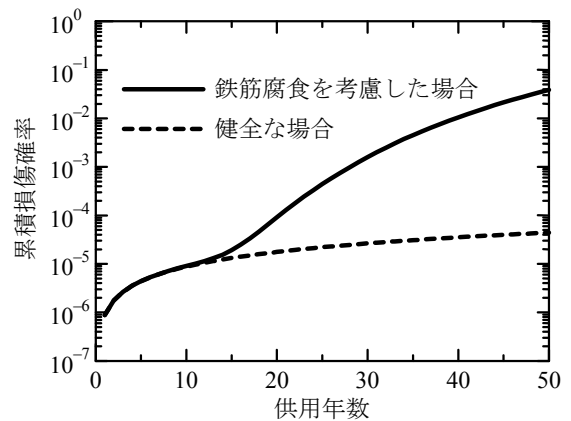
3.5 耐震信頼性の経時変化

各解析対象地点において, 任意の供用年数における鉄筋質量減少率の確率分布を考慮して式(2)により年損傷確率を評価し, それらを式(4)に代入して得られる累積損傷確率を図-7 に示す。なお, 各図中には, 式(9)より求められる, RC 橋脚のライフタイムにわたって鉄筋腐食が生じないと仮定した(式(1)により算定される p_{fa0} を用いた)場合の任意の供用年数 t_i 年における累積損傷確率 pf_s も併せて示している。

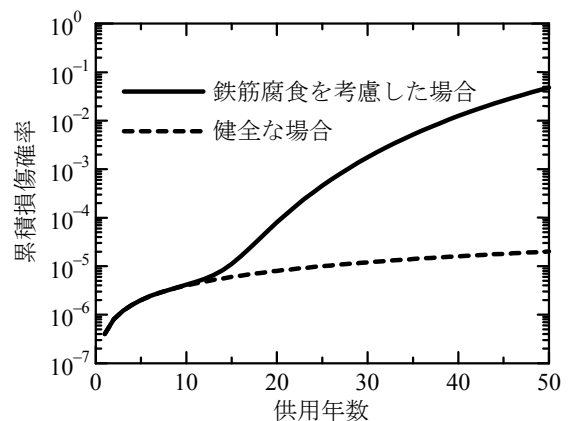
$$pf_s(t_i) = 1 - (1 - p_{fa0})^{t_i} \quad (9)$$



(a) 福岡, 海岸線からの距離 $d=1.0\text{km}$ の場合



(b) 舞鶴, 海岸線からの距離 $d=0.1\text{km}$ の場合



(c) 酒田, 海岸線からの距離 $d=0.1\text{km}$ の場合

図-7 供用年数と累積損傷確率の関係

図-7 に示されるように, 図-1 のフローに従うことで, 地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を考慮した耐震信頼性(累積損傷確率)の経時変化を予測することができる。供用開始直後は, 地震危険度により RC 橋脚の耐震信頼性の大きさが決定されるが, その後は, RC 橋脚が置かれる塩害環境の厳しさの程度を反映して累積損傷確率は変化する。我が国の沿岸部に建設される RC 橋脚の安全性に影響を与える主たるハザードは, 地震と塩害であるが, 本研究で提示したフローを用いることで, その両者を同時に考慮した安全性評価が実現される。また, 今回の耐震信頼性の評価例では, 相対的に地震危険

度が低い地点ほど、鉄筋腐食を考慮しない場合に対する鉄筋腐食に伴う累積損傷確率の増加割合が大きくなっている。このことは、鉄筋腐食の影響を考慮すると、それが RC 橋脚の耐荷性能やじん性を低下させ、引いては構造物の安全性に及ぼす影響が、地震危険度の低い地域でより顕在化することを意味している。この要因については、鉄筋腐食が進展して、図-6 のようにフラジリティ曲線が左方へと移動することで、条件付年損傷確率に影響を与える地震動強度領域についても、より小さい方へと移動することに起因している。図-2 の地震ハザード曲線からも明らかのように、フラジリティ曲線が左方へと同じだけ移動すれば、地震ハザード曲線の超過確率の変化幅としては、地震危険度が低い地点の方が相対的に大きくなるためである。

本研究で提示した手法を用いることで、例えば、かぶりやコンクリートの品質(水セメント比など)が RC 構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性に及ぼす影響を種々の不確定性の存在を陽に考慮した上で定量的に明示できる。また、既存構造物を対象とする場合には、許容される損傷確率の大きさ¹⁴⁾と比較することで、補修・補強の実施時期を決定するための判断材料となる。このように、地域毎の地震危険度と塩害環境の厳しさに応じた RC 構造物の設計や維持管理を本手法は可能にする。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 海洋からの飛来塩分の作用を受ける RC 構造物を対象として、地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮した RC 構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性評価法の枠組みを構築した。
- 2) RC 橋脚のライフタイムにわたる耐震信頼性は地震ハザードと塩害環境ハザードの両者の影響を大きく受けるため、これらを適切に設計段階で考慮する必要があることを示した。相対的に地震危険度の低い地域であっても、鉄筋腐食進展の可能性を考慮すると、鉄筋腐食が RC 橋脚の耐荷力やじん性の低下をもたらす、引いては耐震信頼性の減少がより顕著に表れることを示した。

参考文献

- 1) 松尾稔：地盤工学—信頼性設計の理念と実際—，技報堂出版，1984.
- 2) Akiyama, M. and Frangopol, D. M.: On life-cycle reliability under earthquake excitations of corroded reinforced concrete structures, Proceedings of IALCCE 2010 (Second International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering), keynote lecture, pp. 1-11, Taipei, Taiwan, Oct. 2010.

- 3) Choe, D. E., Gardoni, P., Rosowsky, D. and Haukaas, T.: Probabilistic capacity models and seismic fragility estimates for RC columns subject to corrosion, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 93, No. 3, pp. 383-393, Mar. 2008.
- 4) Kumar, R., Gardoni, P. and Sanchez-Silva, M.: Effect of cumulative seismic damage and corrosion on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 38, No. 7, pp. 887-905, Jun. 2009.
- 5) Li, J., Gong, J. and Wang, L.: Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket, Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 7, pp. 2653-2663, Jul. 2009.
- 6) Simon, J., Bracci, J. M. and Gardoni, P.: Seismic response and fragility of deteriorated reinforced concrete bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 136, No. 10, pp. 1273-1281, Oct. 2010.
- 7) Ghosh, J. and Padgett, J. E.: Aging considerations in the development of time-dependent seismic fragility curves, Journal of Structural Engineering, ASCE, Jun. 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000260
- 8) 大屋戸理明：腐食した鉄筋コンクリート部材の力学性能の評価，筑波大学学位論文，2007.3
- 9) 秋山充良，松崎裕，佐藤広和，内藤英樹，鈴木基行：塩害環境下にある RC 橋脚の耐震安全性確保の観点から定めた限界鉄筋腐食量とその耐久設計法に関する確率論的考察，土木学会論文集 E, Vol. 64, No. 4, pp. 541-559, 2008.10
- 10) Hattori, A. and Miyagawa, T.: Prediction of degradation and performance in RC beams subjected to chloride attack by corrosion monitoring, Proceedings of 7th International Conference on Inspection, Appraisal, Repair & Maintenance of Buildings & Structures, pp. 81-88, Sep. 2001.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.
- 12) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 13) Akiyama, M., Matsuzaki, H., Dang, T. H. and Suzuki, M.: Reliability-based capacity design for reinforced concrete bridge structures, Structure and Infrastructure Engineering, Taylor & Francis, Aug. 2010. DOI: 10.1080/15732479.2010.507707.
- 14) Sarja, A. and Vesikari, E.: Durability design of concrete structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, 1994.