

地震・塩害環境下にある鉄筋コンクリート橋脚の ライフタイム信頼性解析

秋山 充良¹・松崎 裕²

¹正会員 博（工）早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²正会員 博（工）東京工業大学助教 大学院理工学研究科土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

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、材料劣化に伴う部材の耐力や変形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耐力や変形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⁾。

本研究では、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。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. ライフタイム信頼性解析の概要

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3)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 $p_{fa}(t_i)$ 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は次の通りである。

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。

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。

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。

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。

1)～4)の各種要素技術を体系化することで、地震・塩害環境に置かれるRC構造物のライフタイムにわたる信頼性が定量化される。各手法の詳細は、参考文献4), 5)にまとめてある。

3. 異なる地震・塩害環境にあるRC橋脚の耐震信頼性の比較

(1) 解析対象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⁶⁾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。

(2) 想定する建設地点と地震・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-SHIS⁷⁾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-1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(5)により年超過確率 p_1 を評価した。

$$p_1 = 1 - (1 - p_{50})^{1/50} \quad (5)$$

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8)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-2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、塩害環境は相対的に穏やかである。

(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

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

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-3 および図-4 に示す。

図-2 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-3 に示した平均値と図-4 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3)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。

(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-5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-5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、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。

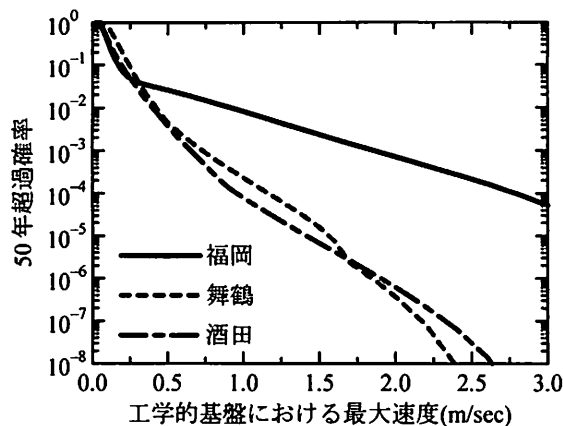


図-1 地震ハザード曲線⁷⁾

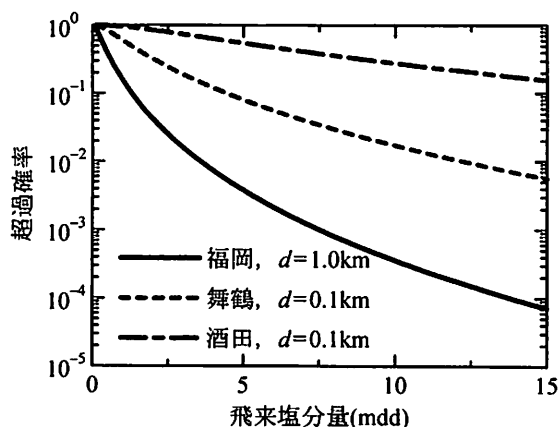


図-2 塩害環境ハザード曲線

(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-6に示す。なお、各図中には、式(6)により求められる、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_{f00} 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。

$$pf_s(t_i) = 1 - (1 - p_{f00})^{t_i} \quad (6)$$

図-6に示されるように、式(2)～式(4)により、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度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

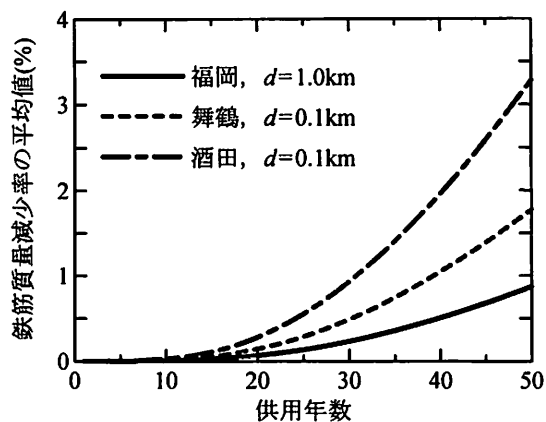


図-3 供用年数と鉄筋質量減少率の平均値の関係

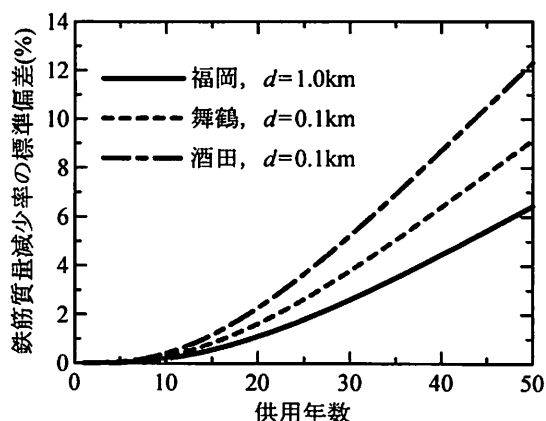


図-4 供用年数と鉄筋質量減少率の標準偏差の関係

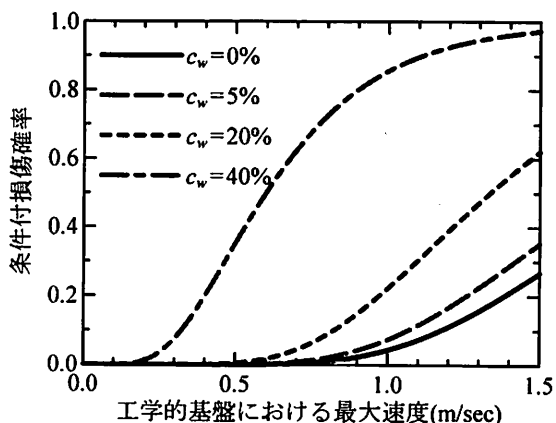
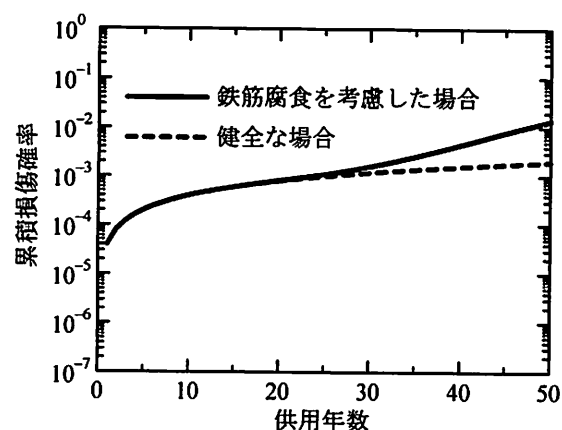


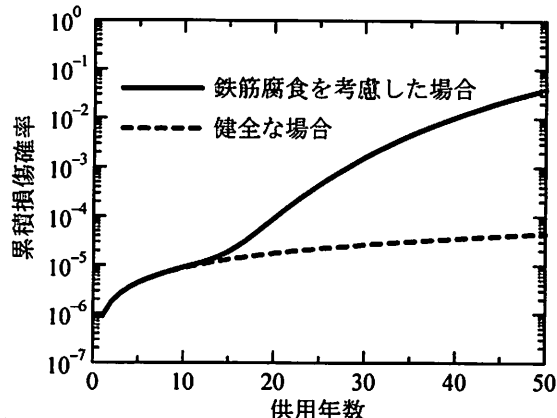
図-5 フラジリティ曲線

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。これは、鉄筋腐食が進展して、図-5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-1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。

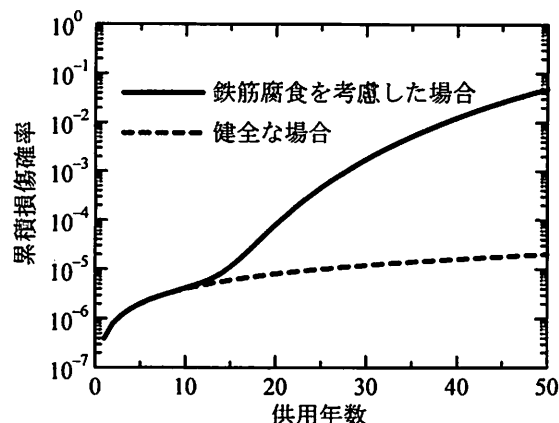
本研究で提示した手法を用いることで、例えば、かぶりやコンクリートの品質(水セメント比など)が



(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-6 供用年数と累積損傷確率の関係

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⁹⁾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的作用を受ける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し、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。

2011年3月の東北地方太平洋沖地震では、津波により沿岸部にある橋梁構造に大きな被害が生じた。本研究では、沿岸部にある構造物の主たるハザードとして、地震と塩害の2つのみを対象とした。既に津波高さのハザード評価や津波作用に対する構造物の脆弱性評価の研究も行われており、これらを参照することで、地震・津波・塩害の3つのハザードを同時に考慮したライフタイム解析は可能である。今後の重要な検討項目としたい。

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, 2010.
- 3) 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。
- 4) Akiyama, M., Frangopol, D. M. and Matsuzaki, H.: Life-cycle reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011. DOI: 10.1002/eqe.1108
- 5) 松崎裕，秋山充良，黒田千砂子：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，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 2，pp. 877-882，2011。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2002。
- 7) 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/>
- 8) 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, 2010. DOI: 10.1080/15732479.2010.507707.
- 9) Sarja, A. and Vesikari, E.: Durability design of concrete structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, 1994.