

塩害と地震ハザードを考慮した コンクリートラーメン橋梁のライフサイクル信頼性解析

高熊 秀¹・秋山 充良²

¹学生会員 早稲田大学 大学院創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²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）

1. はじめに

コンクリート構造物の安全性は、地震や風、あるいは交通荷重などの力学的な作用により生じる応答 D と、構造物が保有する耐力や変形性能 C の比較に基づき評価される。通常、 D や C の評価には非常に大きな不確定性を伴う。例えば、将来発生する地震の大きさや頻度、地震を受けたときの構造物の応答計算、さらには、既存の実験式などに基づき計算される各種耐力などに介在するモデル誤差である。これらの不確定性を適切に考慮して D と C は比較されるべきである。信頼性理論では、確率変数によりこれらの不確定性を表現し、 $D > C$ となる確率（損傷確率）を求めることになる。従来、この損傷確率の算定では、構造物が持つ耐力や変形性能 C は、構造物のライフタイム内で一定の値を取るものと仮定して計算されてきた。しかし、実際には、日本海沿岸部に架かるコンクリート橋梁で観察されているように、飛来塩分や凍結防止剤の影響により、 C の値は建設後の年数の増加とともに低下していく。つまり、腐食環境にあるコンクリート構造物の安全性評価では、 C の低下を考慮して、逐一、各時刻で D と C の比較が行われなければならない。

本研究では、地震と塩害（海洋）環境にあるプレストレスコンクリート（PC）ラーメン橋梁（橋脚は鉄筋コンクリート（RC）製）を対象として、ライフタイムにわたる損傷確率の経時変化の計算例を提示する。将来発生する地震の大きさと頻度は地震ハザード曲線により評価され、構造物の耐力や変形性能の低下に影響する塩害環境の厳しさは塩害環境ハザード曲線により定量的に表現される。この2つのハザードを受けるコンクリートラーメン橋梁に対して、建設後の時刻における $D(t)$ と腐食の影響を考慮した $C(t)$ を算定し、 $D(t) > C(t)$ となる損傷確率を計算する。解析対象とするコンクリートラーメン橋梁が置かれる塩害環境と地震ハザードの厳しさのそれぞれの組み合わせを考慮することで、 $D(t) > C(t)$ となる損傷確率の大きさやその時間変化を考察する。

2. RC構造物のライフタイムにわたる耐震信頼性評価法

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信頼性解析は、基本的に参考文献1)の手順に従っている。ここでは、計算手順の概略を示す。

(1) 対象地点の選定：解析対象地点が決まることで、地震ハザード曲線と塩害環境ハザード曲線が得られる。塩害環境ハザードは、海岸線からの距離、海風比率（海側から陸側に向かって風が吹く時間の比率）、および平均風速によって評価される。塩害環境ハザードの評価法の詳細は、参考文献2)に示されている。

(2) 鋼材腐食の発生⇒腐食ひび割れの発生⇒鋼材腐食量の増加、の各過程を計算し、さらに、これに塩害環境ハザード曲線を組み合わせることで、建設後 t 年における鋼材腐食量の確率分布を得る。

(3) 鉄筋腐食量の増加によるコンクリート部材の耐力や変形性能の低下を推定する。本研究では、塑性ヒンジで軸方向鉄筋のはらみ出しが発生するとき、あるいは軸方向鉄筋が破断するときを限界状態と定義し、この限界状態に相当する回転角（限界回転角）が鉄筋腐食量の増加に伴い低下する力学モデルを使用する。

(4) Monte Carlo法により、各鉄筋腐食量を持つPCラーメン橋梁のフレンジ曲線を作成する。フレンジ曲線とは、ある地震動強度を持つ地震動群が作用した時に、限界回転角を超過する応答が生じる条件付き損傷確率を表現したものである。

(5) 鋼材腐食量の確率分布、フレンジ曲線、さらに地震ハザード曲線を組み合わせることで、建設後 t 年において、限界回転角を超過する応答が解析対象橋梁で生じる損傷確率を計算する。

3. コンクリートラーメン橋梁のライフサイクル信頼性解析

解析対象とするPCラーメン橋梁とRC橋脚の断面図を

それぞれ図-1と図-2に示す。構造諸元などは、参考文献3)に示されているPCラーメン橋梁を基本として、鉄筋量等を変更している。RC橋脚の上下端に設けた4つの塑性ヒンジでは、鉄筋腐食の影響を考慮した曲げモーメント-回転角関係を用いており、腐食量により剛性や曲げ耐力を低減させている。腐食が発生していない場合と質

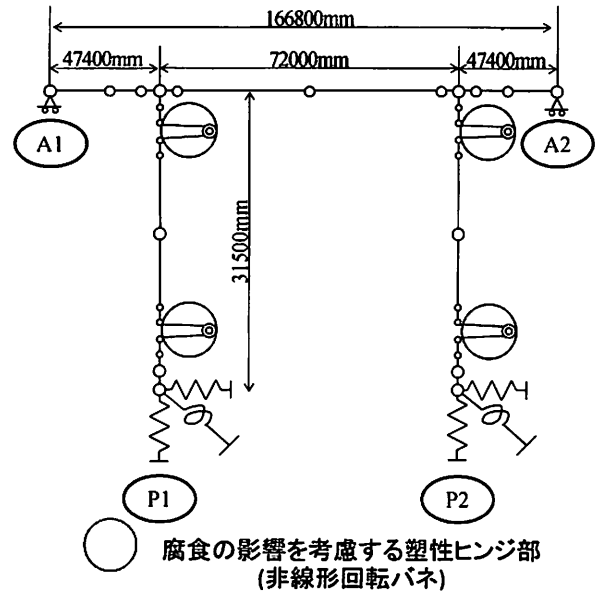


図-1 解析モデル概要図

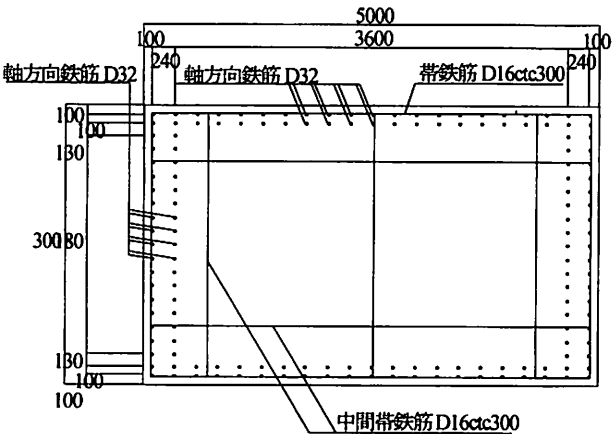


図-2 RC 橋脚の断面図 (単位: mm)

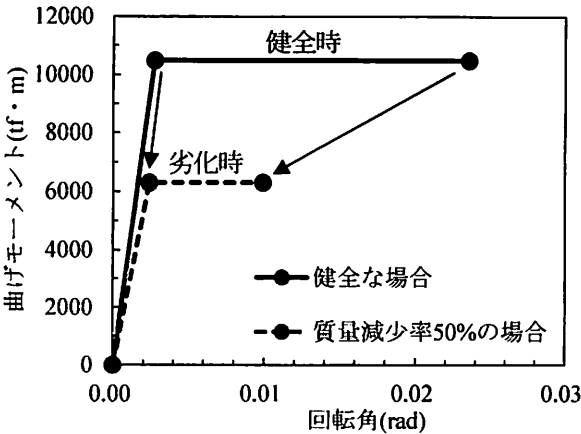


図-3 鉄筋腐食の影響を考慮した RC 部材の曲げモーメント-回転角関係

量減少率が50%となった場合の曲げモーメント-回転角関係を図-3に示す。地盤と支承の条件は、参考文献3)と同じである。また、解析方向は、橋軸方向に限定しており、橋軸直角方向についての照査は行っていない。

図-1のPCラーメン橋梁は、新潟市あるいは宇和島市に置かれると仮定し、信頼性解析を行う。塩害環境ハザードを求める際、新潟市の場合には、海岸線からの距離を $d=0.1\text{km}$ 、宇和島市の場合には $d=1.0\text{km}$ とした。地震ハザード曲線は、J-SHIS⁴⁾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地震ハザード曲線を用いる。その際、ポアソン過程を仮定することで、年超過確率に変換している。本研究で用いる地震ハザード曲線と塩害環境ハザード曲線をそれぞれ図-4と図-5に示す。両図に示されるように、相対的に、新潟市の地震危険度：小、塩害環境の厳しさ：大、宇和島市の地震危険度：大、塩害環境の厳しさ：小、である。

次に、参考文献1)に示される手法で作成した模擬地震動により得た fragility 曲線を図-6に示す。Monte Carlo法により、適当な間隔で地動最大速度毎に条件付き損傷確率を求め、それから最尤法により対数正規分布のパラメータを定めている。図-6に示される fragility

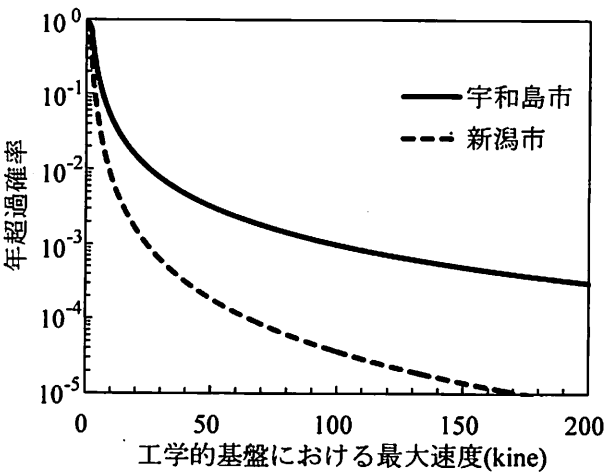


図-4 地震ハザード曲線

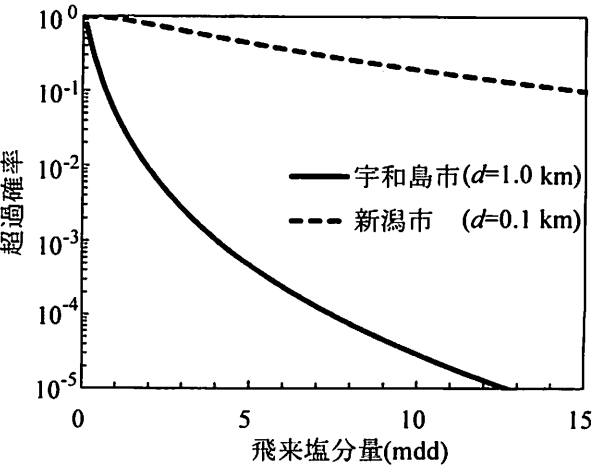


図-5 塩害環境ハザード曲線

曲線は、図-1に示される4つの塑性ヒンジ全てが質量減少率として0%、5%、20%、あるいは40%の腐食が生じたと仮定し、4つの塑性ヒンジのうち1つでも限界回転角に達したらラーメン橋梁としての限界状態に達したと仮定して損傷確率(軸方向鉄筋のはらみ出し、あるいは破断の発生する確率)を求めている。フラジリティ曲線は、ある大きさの質量減少率が発生し、さらにある大きさの地動最大速度を持つ波が作用したとの条件下で作成されている。そこで、塩害環境ハザード曲線からある大きさの質量減少率が生じる確率と、地震ハザード曲線からある大きさの地動最大速度を持つ波が作用する確率を計算することで1年あたりに解析対象ラーメン橋梁で限界回転角を超過する応答が生じる年損傷確率を求めることができる。損傷確率を算定した結果を図-7に示す。図-7の縦軸は、累積損傷確率である。比較のため、鋼材腐食がライフタイムにわたり発生しないとして求めた損傷確率も示している(図中、「鉄筋腐食を考慮しない場合」)。

建設直後は地震ハザードの違いを反映して、宇和島市に解析対象ラーメン橋梁が置かれた場合に大きな損傷確率が算定される。しかし、図-3に示されるように、宇和島市の塩害環境は厳しいものではなく、鋼材腐食の発生を考慮しても、考慮しない場合の損傷確率と大差ない結果となる。一方、解析対象ラーメン橋梁が新潟市に置かれた場合には、建設直後は宇和島市の場合に比べ非常に小さい損傷確率であるが、鋼材腐食の進展により、急激に損傷確率が増加する。最終的には、50年経過時に宇和島市の場合と同程度の損傷確率となる。

4. 橋梁内に生じる塩害劣化の不均一さを考慮したライフサイクル信頼性解析

建設後30年以上経過したRC栈橋から得られた鉄筋腐食の空間分布データ⁵⁾をもとに、構造物の部材箇所ごとの劣化の不均一さを考慮した信頼性解析を行う。コンクリート中の塩化物イオン浸透性状は、同じ環境に曝露されていても部材箇所で異なるため、鉄筋の質量減少率も同一の構造物内で部材箇所ごとに大きなバラツキと有することになる。参考文献5)に示される実測値より質量減少率の平均値と変動係数を求めたところ、平均値は3.67%、変動係数は230%と非常に大きな値であった。

3. では4つの塑性ヒンジ全てに同一の鉄筋質量減少率が生じたと仮定してフラジリティ曲線を求めた。本章では、塑性ヒンジ毎の質量減少率の大きさが異なる場合の信頼性解析を行う。具体的には、塑性ヒンジで生じる鉄筋質量減少率は、塩害環境ハザード曲線から算定される平均値と、これに参考文献5)から評価した変動係数230%を持つ確率変数で表現する。そして、各塑性ヒンジの鉄

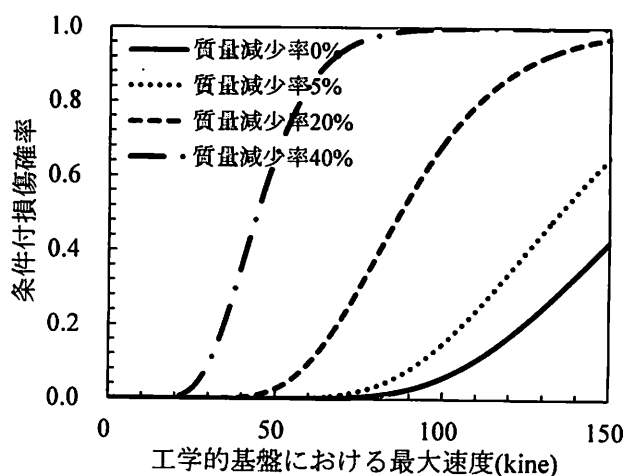
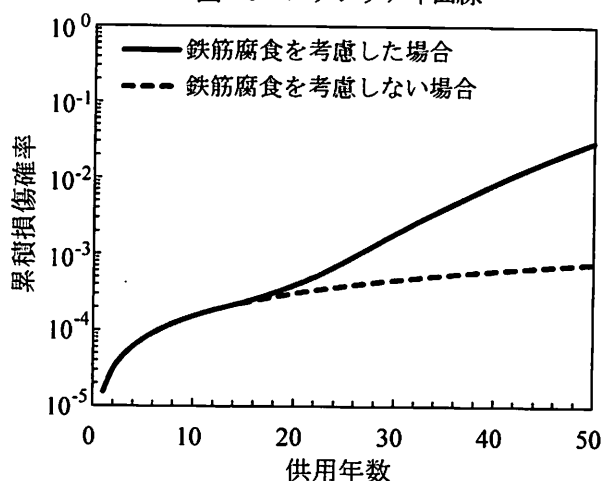
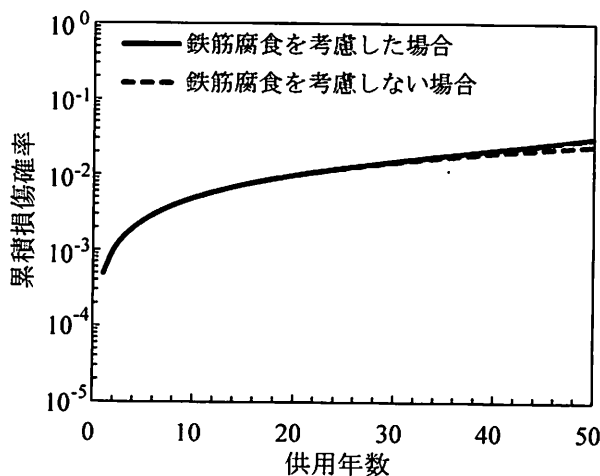


図-6 フラジリティ曲線



(a) 新潟市に対象橋梁がある場合



(b) 宇和島市に対象橋梁がある場合

図-7 損傷確率の経時変化

筋質量減少率は、相互に独立であると仮定し、Monte Carlo法を用いる。これにより、同じ塩害環境ハザード曲線を用いる場合でも、同一橋梁内の塑性ヒンジで生じる鉄筋質量減少率はバラツキを有することになる。このほかの確率計算の方法は、図-7を求める際と同じである。鉄筋質量減少率の空間分布(塑性ヒンジ毎の質量減少率の違い)を考慮した場合のフラジリティ曲線と損傷確率の経時変化を図-8と図-9に示す。図-8に示すフラジリ

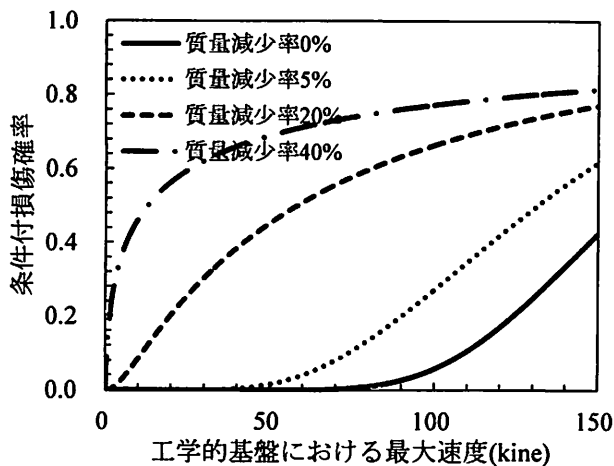
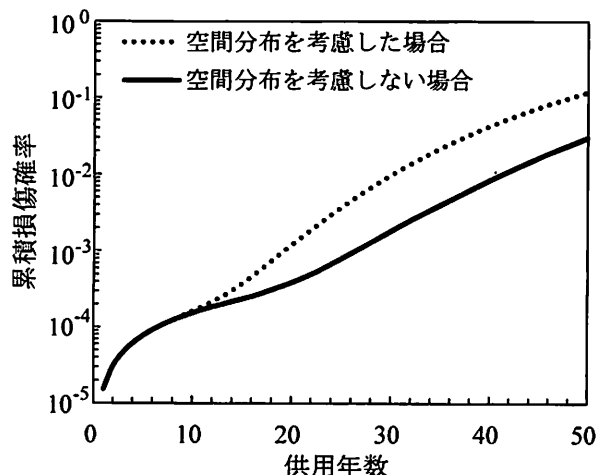
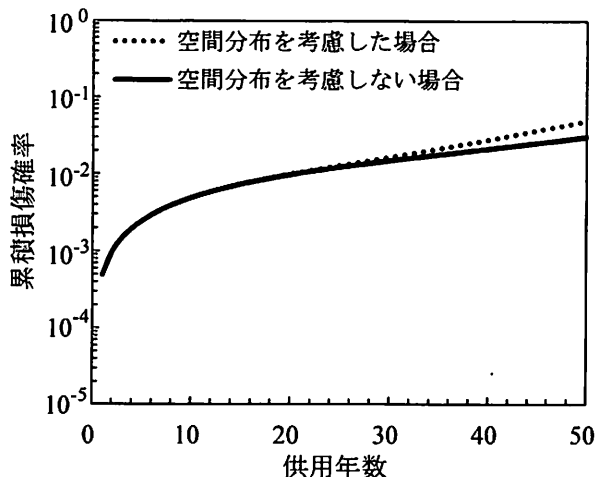


図-8 空間分布を考慮した場合の fragility 曲線



(a) 新潟市に対象橋梁がある場合



(b) 宇和島市に対象橋梁がある場合

図-9 空間分布を考慮した場合の累積損傷確率

ティ曲線は、図-1にある4つの塑性ヒンジの鉄筋質量減少率の平均値が0%、5%、20%、あるいは40%になったと仮定し、その上で塑性ヒンジ箇所ごとの鉄筋質量減少率のバラツキを考慮した場合の条件付損傷確率である。図-7に示す損傷確率の経時変化に示されるように、宇和島市に解析対象橋梁があると仮定した場合には、空間分布の考慮の有無による損傷確率の差異は小さいものであった。一方、新潟市に解析対象橋梁があると仮定した場合

には、その差異は大きなものとなった。宇和島市は、塩害環境ハザードが厳しいものではなく、ライフタイムにわたって生じる鉄筋質量減少率の増加は小さい。その結果として、図-9に示されるように、鉄筋質量減少率の空間的な変動を考慮するように鉄筋質量減少率の計算方法を変更してもそれが累積損傷確率の変化となって表れ難い。一方、新潟市の場合には、図-7に示されるように、供用開始後、20年近く経つと鉄筋腐食の影響が表れる。鉄筋腐食の空間分布を考慮することは、考慮しない場合に比べ、鉄筋腐食の進展予測にさらに大きな不確定性を付与することと同じであるから、非常に大きな鉄筋腐食量が発生する可能性がより高くなる。そのため、図-9に示されるように、空間的な変動を考慮することで、早期に累積損傷確率は増加するようになり、その値も大きなものとなる。

5. まとめ

地震ハザードと塩害環境ハザードの両者を同時に考慮することで、ライフサイクル信頼性解析が可能となる。コンクリート構造物が厳しい塩害環境に置かれる場合には、その耐震信頼性を評価する際に、単に地震ハザードだけではなく、塩害環境ハザードの考慮が特に重要となる。さらに、鉄筋腐食進展の橋梁内の空間的な変動を考慮すると、考慮しない場合に比べその耐震信頼性は小さく評価される結果となる。海洋構造物からの鉄筋腐食の実測、あるいは実験データの蓄積などにより、鉄筋腐食進展の空間分布モデルの高度化^{6,7)}が必要であり、塩害環境が厳しい地域では、それを反映したライフサイクル解析が求められる。

参考文献

- 1) 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*, Vol. 40, No. 15, pp. 1671-1687, 2011.
- 2) Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Suzuki, M.: Integration of the effects of airborne chlorides into reliability-based durability design of R/C structures in a marine environment, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 125-134, 2012.
- 3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1998.
- 4) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション，<http://www.j-shis.bosai.go.jp>
- 5) 港湾空港技術研究所：建設後30年以上経過した栈橋上部工から切り出したRC部材の劣化性状と構造性能，2006.
- 6) Stewart M.G. and Suo Q.: Extent of spatially variable corrosion damage as an indicator of strength and time-dependent reliability of RC beams, *Engineering Structures*, Vol. 31, No.1 pp. 198-207, 2009.
- 7) Stewart M. G.: Mechanical behavior of pitting corrosion of flexural and shear reinforcement and its effect on structural reliability of corroding RC beams, *Structural Safety*, Vol. 31, pp. 19-30, 2009.