

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

早稲田大学 学生会員 ○高熊 秀
早稲田大学 正会員 秋山 充良

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。信頼性理論に基づき構造物の安全性を評価する場合、確率変数により各種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、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、コンクリート構造物が腐食環境に置かれる場合、 C の値は建設後の年数の増加とともに低下していく。

本研究では、地震と塩害環境に置かれるコンクリートラーメン橋梁を対象として、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により表現される。この2つのハザードを受ける橋梁について、建設後の時刻 t 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の厳しさの大小、および地震ハザードの厳しさの大小のそれぞれの組み合わせにより、 $D(t) > C(t)$ となる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の手順は、基本的に参考文献1)に従っている。ここでは、計算手順の概略を次に示す。

(1) 対象地点の選定：解析対象地点が決まることで、地震ハザードと塩害環境ハザードが得られる。塩害環境ハザードは、海岸線からの距離、海風比率(1日の中で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。

(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) 鋼材腐食の進展により、構造物の耐力や変形性能が低下するモデルを構築する。本研究では、塑性ヒンジ部で軸方向鉄筋のはらみ出し(座屈)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、この限界回転角が鋼材腐食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コンクリート構造物の fragility 曲線を作成する。fragility 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する。

(5) 鋼材腐食量の確率分布、fragility 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

解析対象とするコンクリートラーメン橋梁を図

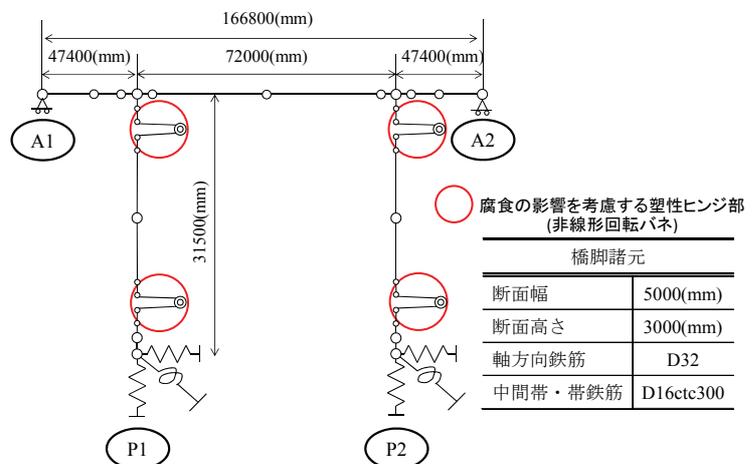


図-1 解析モデル概要図

Key Words : ライフサイクル, 地震ハザード, 塩害環境ハザード, コンクリート構造物, 信頼性評価
連絡先: 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学創造理工学部社会環境工学科 TEL:03 (5286)2694

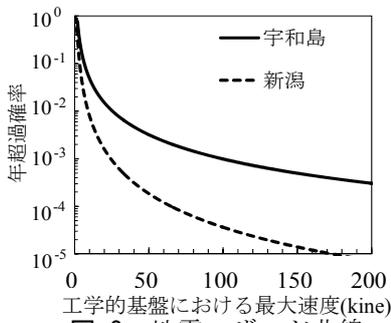


図-2 地震ハザード曲線

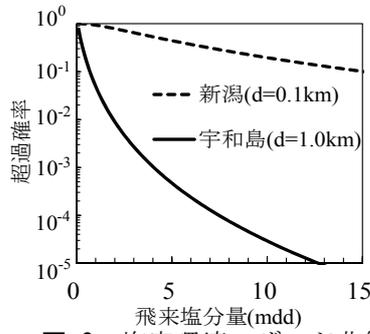


図-3 塩害環境ハザード曲線

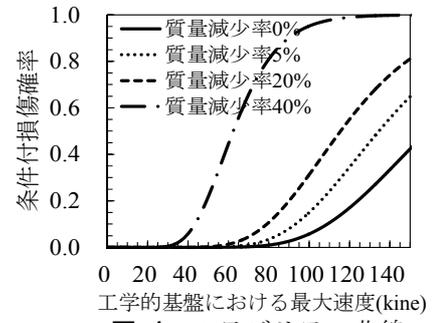


図-4 フラジリティ曲線

-1)に示す。上部工はPC3径間連続箱桁であり、橋脚はRC構造である。構造諸元などは、参考文献2)に示されているラーメン橋梁を基本として、鉄筋量等を変更している。なお、地盤と支承の条件は、参考文献2)と同じである。図-1のコンクリートラーメン橋梁は、新潟と宇和島に置かれると仮定した。塩害環境ハザードを求める際、新潟の場合には、海岸線からの距離 d を $d=0.1\text{km}$ 、宇和島の場合には $d=1.0\text{km}$ とした。地震ハザード曲線は、J-SHIS³⁾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。なお、ポアソン過程を仮定することで、地震ハザード曲線の縦軸は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図-2および図-3にそれぞれ示す。両図に示されるように、相対的に、新潟は地震危険度：小、塩害環境の厳しさ：大、宇和島は地震危険度：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られるフラジリティ曲線を図-4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。フラジリティ曲線は、図-1に示される4つの塑性ヒンジ全てが軸方向鉄筋の質量減少率として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の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)を求めている。質量減少率の増加とともに、小さい地動最大速度で限界回転角に達することが確認される。図-4に対し、各地動最大速度が生じる確率、および各質量減少率が生じる確率を考慮することで、1年あたりにラーメン橋梁で限界回転角が生じる年損傷確率を求めることができる。結果を図-5に示す。図-5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、「健全な場合」)。

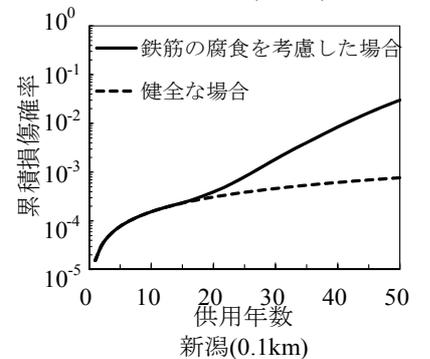
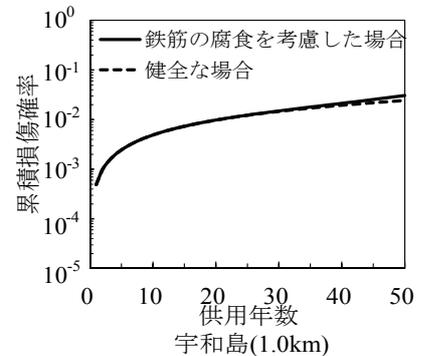


図-5 損傷確率の経時変化

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. 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試算結果となった。今後は、塩害環境ハザードの高度化と、構造物内の腐食の不均一さ(空間分布)を考慮した信頼性解析を実施する予定である。

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) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1998. 1月. 3) 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/>