

劣化橋梁の地震・積雪複合作用に対する破壊確率評価

中央大学大学院 学生会員 ○佐竹 基治
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

災害大国である我が国では、時として複数の災害に見舞われ、いわゆる複合災害の様相を呈する事例が見受けられる。一般的に複合災害は、単独の災害に比べて被害が深刻化しやすい傾向にある。加えて我が国は地震大国である一方、国土面積の半分以上が豪雪地帯に指定された豪雪大国である。近年、降雪量が増加傾向にあることや、大規模地震が想定されていることから、今後地震と積雪による複合災害が発生する可能性は高い。

現在、我が国は人口減少社会にあり、都市部への人口流入に起因して、地方では人口が減少する傾向にある。

図-1 に雪寒県の将来推計人口を示す。図-1 から雪寒県においては将来的に人口減少が見込まれることがわかる。今後、人口減少に伴う税収減によって地方財政が悪化し「橋梁などの構造物に対して十分なメンテナンスができない」といった問題や、「除雪路線を厳選する」、「除雪を行わずに冬期通行止めとする」といった対策が行われると見込まれる。既に、北海道道では除雪出動基準となる積雪深の基準値引き上げ²⁾が行われており、国土交通省冬期道路交通の確保のあり方に関する検討委員会³⁾の提言においても除雪路線の厳選が提案されている。

上記のような背景から本研究では、「劣化した橋梁に対して冬期通行止め等の理由から積雪が多量に存在する状況で地震力が働いた」事象を考える。これにもとづいて、地震時に橋梁上に積雪が存在することが橋梁の破壊確率にどのような影響を与えるかを作用 (Stress resultant)-耐力 (Resistance) モデル (以下、「R-S モデル」) を用いて評価をすることを目的とする。

2. 現行規定における地震・積雪複合作用

現行の道路橋示方書耐震設計編では、活荷重や雪荷重を地震時に考慮しない荷重としている。その理由として、活荷重などの荷重が満載となる状態が、時間的・空間的に同時発生しにくいことを挙げている。しかし、雪荷重に関しては冬期通行止め路線などにおいて、除雪が行われないために比較的長期間にわたり橋梁に積雪が堆積した状態が継続する可能性が考えられる。一方で多雪地域では、地方整備局や行政の設計要領等において独自基準を定めている。この基準では、地震時の設計積雪荷重を道路橋示方書共通編に示された再現期間 10 年の積雪深の 1/2 としている。その比較を示すため、群馬県藤原のハザードカーブを図-2 に示す。図-2 から、それぞれ破線で示した地震時設計積雪深の年超過確率が 97% という結果となることがわかる。また、他の地域においても、概ね 75% から 90% 以上という設計基準の超過確率としては非常に大きな値となる。他の荷重と組み合わせる作用の一つであることを考慮したとしても、基準値が低いことは明白である。

3. 破壊確率の評価方法

本研究で破壊確率 P_f の導出法として R-S モデルを用いることは既に触れた。R-S モデルを用いた破壊確率 P_f は式(1)のように表される。

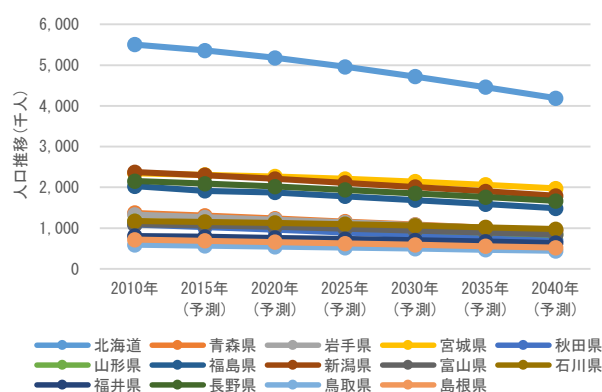
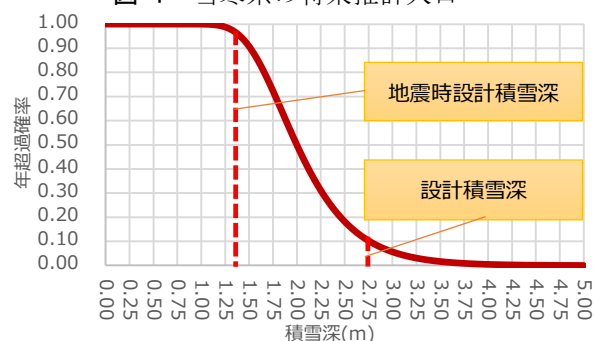
図-1 雪寒県の将来推計人口¹⁾

図-2 群馬県藤原 ハザードカーブ

$$P_f = \int F_R(x) \cdot f_S(x) dx \quad (1)$$

ここで、 $f_S(x)$: 作用 x の発生確率

$F_R(x)$: 作用が x である時の条件付破壊確率

式(1)の式を用いて、地震作用のみを考慮した場合の橋梁の破壊確率 $P_{f[E]}$ を式(2)に、積雪作用が働く橋梁の地震作用による破壊確率 $P_{f[E+S]}$ を式(3)に示す。

$$P_{f[E]} = \int F_{R[E]}(s) \cdot f_{S[E]}(s) ds \quad (2)$$

$$P_{f[E+S]} = \int F_{R[E+S]}(s) \cdot f_{S[E+S]}(s) ds \quad (3)$$

著者らは既往研究⁵⁾で地震作用の発生確率 $f_{S[E]}(s)$ と地震と積雪による複合作用の発生確率 $f_{S[E+S]}(s)$ の比較を行った。その結果、前述のように地震時積雪の基準超過確率が 75% から 90% と大きいことから、地震と積雪による複合作用の発生確率は、積雪期の地震作用の発生確率とほぼ同じであることがわかっている。そのため地震と積雪による複合作用に対する破壊確率の評価は耐力側である「冬期の地震作用条件下での破壊確率」と「冬期の地震積雪複合作用条件下での破壊確率」によるといえる。

4. 地震と積雪の複合作用条件下での破壊シナリオ

耐力側の条件付破壊確率の評価を行う場合、どの部材がどのように破壊するのかといった破壊形態を考慮する必要がある。しかし、本研究で対象とする事象は、将来的に発生することが予見される災害であるため、過去の損

傷事例から破壊形態を推定することが不可能である。そのため、雪作用と地震作用において、各々の過去の被害事例や、一般に地震や積雪の作用の影響が大きいと考えられる部材を選定し、破壊形態の推定を行った。推定した破壊形態における破壊とは、限界状態設計法における修復限界(復旧限界)状態を考慮することとする。

4.1 主桁・支承

積雪荷重が載荷された状態の橋梁は、いわゆるトップヘビーな構造となる。そのため、上部構造と下部構造への荷重伝達がなされずに支承が損傷する可能性が考えられる。過去の地震による損傷事例においてもアンカーボルトの破壊やずれなどが見受けられる。また旧基準によって設計された橋梁や、供用開始から補修等が行われず劣化の進んだ橋梁では、主桁においても損傷を生じる可能性が考えられる。近年、東京電力湯沢発電所の崩落事故など、積雪荷重が満載状態となった建築構造物において梁の曲げや面外変形による破壊事例が発生している。

これらの破壊形態は、耐力劣化と積雪作用の複合作用による影響が大きいと考えられる。

4.2 橋台・橋脚

上部構造が重量化することに伴い、地震時にはそれを支える橋脚への影響が大きくなる可能性が考えられる。複合作用条件下においても曲げやせん断といった過去の地震による損傷事例に見られるような破壊形態をとると考えられる。また、橋台においては地震時に桁が衝突し損傷した事例がある。衝突荷重は衝突する桁の重さによることから、積雪があり桁が重量化すると衝突荷重が大きくなる。そのため、積雪が存在しない場合に比べて破壊に至る可能性が高くなると考えられる。

一方で躯体構造物は、劣化によって表面が剥離するなどの事例はあるものの、劣化による耐荷性能の低下は考え難い。このことから、前述の破壊形態は地震・積雪作用による複合作用の影響が大きくなると考えられる。

5. 耐力劣化に関する検討

5.1 劣化要因

橋梁への劣化要因は材料劣化、塩害、疲労などが挙げられる。しかし、これらの劣化要因は橋梁の架設地点の周辺環境に大きく依存する。そのため本研究では、特定の劣化要因を対象とせず、次項に示すような健全度評価手法を用いて劣化を単一の指標で評価することとする。

5.2 劣化予測

構造物の維持管理において補修対策等の是非を判断する指標として健全度が用いられる。健全度の判定区分の例を表-1に示す。竹田ら⁹⁾は複合的な劣化を考慮するためにマルコフ遷移確率行列と橋梁健全度指標を用いた劣化予測を行っている。竹田らは多雪地域である北海道の橋梁点検データから式(4)に表されるようなマルコフ遷移確率行列 P を作成し、式(5)に示すような n 年後の健全度の導出方法を提案し劣化予測を行った。

$$P = \begin{bmatrix} 0.930 & 0.070 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.500 & 0.500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.630 & 0.370 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.500 & 0.500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$H_{n+1} = P^n \cdot H_n \quad (5)$$

ここで、 H ：任意の年における健全度行列
値は主桁の遷移確率行列

表-1 健全度判定区分の例

健全度	状態
OK	損傷無し
IV	損傷は軽微であり対策不要
III	状況に応じて早めに補修
II	早急に補修・補強が必要
I	緊急対応を要する

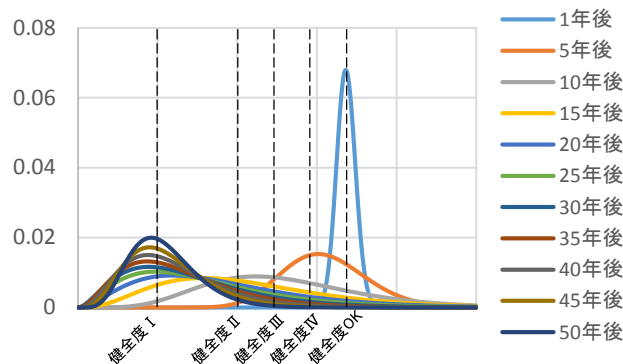


図-3 耐力劣化を表す確率モデル

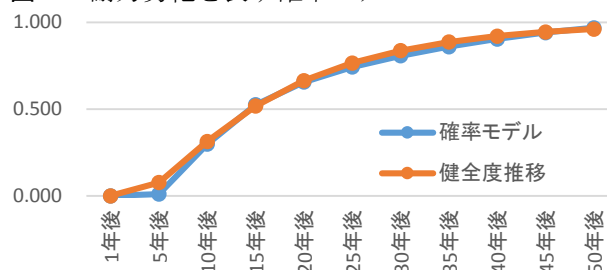


図-4 健全度II以下となる割合の
確率モデルと健全度推移における比較

5.3 耐力劣化モデルの作成

前項の橋梁各部材の劣化予測による健全度の推移を、破壊確率の計算を行うために確率分布として表す必要がある。そこで、耐力側の設計値を健全度OK、作用側の設計値を健全度IIとして、図-3に示すようなGamma分布を提案する。図-4に確率モデルと遷移確率行列から導出した健全度推移における健全度II以下の割合の比較を示す。図-4から劣化の進行による耐力の低下を良く表しているといえる。

6. おわりに

劣化橋梁の地震積雪複合作用条件下の破壊確率に必要な条件の導出を行った。複合作用条件下において損傷の可能性を有する部材とその破壊形態の推定を行なった。また、竹田らの提案した遷移確率行列から、推定した各部材の耐力劣化を良く表す確率分布モデルを作成した。

今後は、地震積雪複合作用条件下での劣化橋梁の破壊確率を導出し、発表会当日に報告の予定である。

出典・参考文献

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所「日本の地域別将来推計人口(平成25年3月推計)」2013年
- 2) 北海道建設部道路課「道道の除雪に関するご理解とご協力について」
- 3) 国土交通省「冬期道路交通の確保のあり方に関する検討委員会 提言(案)」2013年1月
- 4) 福島県「福島県橋梁点検調査マニュアル(案)付録-2」2013年3月
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/41035c/manuaru-jissiyouryou.html>
- 5) 佐竹基治「道路橋における地震と積雪による複合作用発生確率の検討」2013年度中央大学卒業論文
- 6) 竹田俊明ら「橋梁実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討」土木学会構造工学論文集 vol.51A, 2005年3月