

劣化を考慮した道路橋被害を想定した対象地域における地震時の孤立危険性評価

中央大学大学院 学生会員 ○松尾 翔太 中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

我が国は地震大国であり、近年では大規模地震による道路被害が多発し、集落が孤立する事例が発生している。その中で東北太平洋沖地震（2011年3月）において「くしの歯作戦」という道路啓開が行われ、素早く道路網の復旧がなされたことから集落の孤立を解消した事例があり、緊急輸送路の重要性が再認識された。

また現在、橋梁の劣化が全国各地で問題となっているが、橋梁の補修が追いついていないのが現状である。緊急輸送路内の橋梁において補修が行われずに損傷が発生することで、集落の孤立危険性が高まる他、避難や救助活動にも影響を及ぼす。

これらの背景を踏まえ、緊急輸送路内の橋梁について補修を効率的に行っていくことが必要である。そこで本研究では緊急輸送路を対象として、地震時の道路橋被害について劣化状態を考慮した上で評価し、道路ネットワーク評価を行い、対象地域における孤立被害発生の評価、検討を行い、最終的により効率的な橋梁の補修優先度について検討していく。

2. 対象地域・橋梁・地震

対象地域として福井県と千葉県を選定し、緊急輸送路網を図-1に示す。選定理由として福井県は緊急輸送路整備があまり進んでいない点、そして日本海側に位置しており、塩害による劣化が進行している点から選定した。千葉県は図-1(b)より緊急輸送路整備がある程度進んでいるが、房総半島の先端部に行くほど道路ネットワークが疎となっており、脆弱性が見られる。また地形として県境に江戸川及び利根川が流れており、県として孤立危険性がある点から選定した。

対象橋梁は対象地域における第一次及び第二次緊急輸送路内の橋長15m以上かつ2径間以上の橋梁とする。

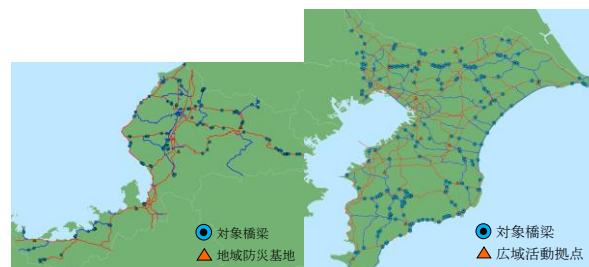
対象地震は福井県は東南海地震、千葉県は首都直下地震とし、詳細を表-1²⁾に示す。

本研究ではネットワークが疎な福井県と比較的密な千葉県の評価結果の比較も行っていく。

3. 研究手法

本研究は、2段階に分けて行っていく。1段階目は抵抗力と作用力をそれぞれ算出し、モンテカルロ法により、各対象橋梁の破壊確率を算出した後、その結果を用いて路線毎に遮断確率を算出する。2段階目は最小カットセットにより、道路ネットワーク評価を行い、孤立被害の発生を評価する。孤立の定義については各対象地域の災害時に救助活動や物資輸送の拠点となる広域活動拠点から各地域へのリンクが切れることとする。また、人口データを用いて各橋梁を補修した際の孤立人数期待値の変化を算出し、劣化状態のみを考慮した場合と劣化状態に加えて孤立人数期待値の変化を考慮した場合の補修優先度の比較を行う。

また、今回は劣化状態のみの補修優先度と劣化状態



(a)福井県 (b)千葉県

図-1 対象地域の緊急輸送路図

表-1 対象地震の詳細

	マグニチュード	震源深さ
東南海地震	7.0~9.0	20~40km
首都直下地震	6.7~7.3	

に加えて孤立人数期待値の変化を考慮した場合の補修優先度の比較の評価を行う。

4. 路線毎の遮断確率の算出

4-1. 作用力の設定

本研究では作用力は地震力とし、今回は水平方向のみを考慮し、震度法を用いて式(1)で算出する。

$$S = \frac{\alpha_h}{g} W = k_h W \quad (1)$$

ここで α_h は地震によって地盤が受ける水平加速度[cm/s²]、 g は重力加速度[cm/s²]、 W は重量[N]である。式(1)で加速度を用いるが、対象地震は加速度データが存在しない。そこで、加速度を算出するために、計測震度と地震加速度の関係を示した式(2)³⁾を用いる。

$$\alpha = 10^{(I-0.94)/2} \quad (2)$$

ここで α は地震加速度[cm/s²]、 I は計測震度である。また、震度は式(3)の距離減衰式⁴⁾を用いて算出する。

$$I = 1.36M_J - 4.03 \log_{10}(X + 0.00675 \times 10^{0.5M_J}) + 0.0155h + 2.05 + C_i \quad (3)$$

ここで M_J はマグニチュード、 X は震央距離[km]、 h は震源深さ[km]、 C_i は岩盤相当の地震動に補正する係数(=0.416)である。予測震源域で過去に発生した地震の震央位置を基に範囲を設定し、その範囲内で震央位置を変化させ、不確実性を考慮した。また、 M_J は指数分布、 h は一様乱数を用いてそれぞれ変動性を与えることとした。

4-2. 抵抗力の設定

地震発生時に橋梁が損傷する箇所は、主に支承、橋脚である。特に支承の損傷は交通機能に影響を及ぼす他、その他の部材の機能に影響を及ぼし、最悪の場合、落橋に繋がる恐れがあり、補修が重要となる。よって抵抗力は支承部の抵抗力とし、式(4)で算出する。

$$R = 0.7\sigma a N_1 N_2 + \mu W \quad (4)$$

ここで σ はボルトの降伏耐力[N/mm²]、 a はボルトの断面積[mm²]、 N_1 は1支承当たりのボルトの数、 N_2 は1径間

当たりの支承の数, μ は最大摩擦係数, W は上部構造重量[N]である。

劣化状態を考慮する上で, 地方自治体で行われる定期点検の結果を用いて, 劣化による抵抗力低下の確率モデルを作成する。確率モデルについては佐竹⁵⁾が作成した Gamma モデルを用いた抵抗力劣化モデルを使用して劣化を考慮した抵抗力を算出する。

5. 孤立危険性評価

孤立危険性評価を行うにあたり, 道路ネットワーク評価を行う。道路ネットワークの各リンクは直列システムと考え, リンク i の破壊確率 P_{fi} はリンク内の各橋梁の破壊確率 B_k を用いて式(5)で算出する。

$$P_{fi} = 1 - \prod_{k=1}^X (1 - B_k) \quad (5)$$

ここで, X はリンク内の橋梁数である。道路ネットワークの破壊確率は, 最小カットセットを用いる。最小カットセットとは, 組み合わせに含まれる全ての要素が故障したときに, システムの故障を引き起こす最小の組み合わせのことである。道路ネットワークの破壊確率 P_f は, 一般化した式(6)で算出する。

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - \prod_{1 \in T} P_{fi}) \quad (6)$$

ここで, M はカットセット数, T は1つのカットセットに含まれるリンク集合である。

6. 孤立人数減少数

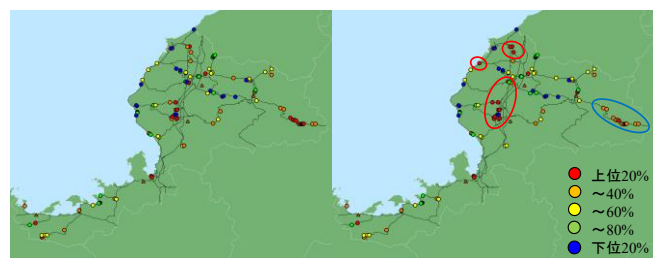
本研究ではより効率的な補修優先度の提案として, 橋梁の破壊確率に加えて補修前後での孤立人数減少数を指標として考慮して, 橋梁の補修優先度の変化を見る。破壊確率と孤立人数減少数を考慮した場合について, その指標を I_b とすると式(7)で算出する。

$$I_b = (1 - \beta)B_k + \beta \frac{d}{d_{\max}} \quad (7)$$

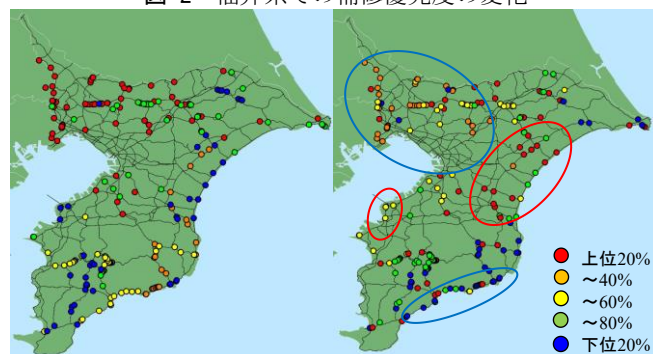
ここで, B_k は各橋梁の破壊確率, β は対象地域の人口分布のばらつきを表した指標, d は対象橋梁補修時の孤立人数期待値減少数, $d_{\max}$ は対象地域内全橋梁内での孤立期待値最大減少数である。 β は福井県では0.40, 千葉県では0.89となった。

橋梁の破壊確率のみを考慮した場合と破壊確率と孤立人数減少数を考慮した I_b を用いた場合の橋梁補修優先度の違いを表した結果を福井県, 千葉県についてそれぞれ図-2, 図-3に示す。まず福井県については孤立人数減少数を考慮することで, 赤丸部の福井市周辺, 北部の一部の橋梁の補修優先度が高まっていることが分かる。また, 日本海側へ繋がる路線内の橋梁優先度も多少増加している。これは日本海側へ繋がるネットワークが疎であり, その路線の孤立被害への影響度が高いことが理由であると考えられる。しかし青丸部の優先度があまり低下していないことから, ある程度孤立人数減少数が高い橋梁の優先度が高まっており, その他は破壊確率の高い橋梁の補修を行っていくような優先度の結果となった。

次に千葉県については破壊確率のみの場合では北部の優先度が高い結果となったが, 孤立人数減少数を考慮することで, 太平洋側と木更津市付近の優先度が高まり, 北西部及び勝浦, 鴨川市周辺の優先度が低下した結果となった。この理由として, 北西部はネットワークが整備されており, 橋梁を補修することでの孤立人数の変化にあまり影響を及ぼさないこと, 太平洋側のネットワークが疎であり, 路線としての重要度が高くな



(a)破壊確率のみ (b) I_b による評価
図-2 福井県での補修優先度の変化



(a)破壊確率のみ (b) I_b による評価
図-3 千葉県での補修優先度の変化

っていることが挙げられる。木更津市周辺については孤立危険性が高い地域が見られないにも関わらず優先度が高まっている。これは孤立人数減少数の考慮により, 他の橋梁の優先度が低下したことにより, 繰り上げられたためである。勝浦, 鴨川市周辺は上記で出てきた地域に比べて人口が少なく, 影響を受ける人数が少ないため優先度が低下している。そして両県の比較として, 日本海側, 太平洋側それぞれに繋がる路線の優先度が高まる結果となった。沿岸部へ繋がるネットワークが脆弱であり, 補修やネットワークの強化を行うことが必要であると考えられる。

この結果より, 孤立人数減少数を指標として補修優先度に考慮することで道路ネットワークに加えて各県の人口分布の特徴を考慮できおり, より効率的な補修を行う指標として有効であることが考えられる。

7. おわりに

本論文では, 福井県と千葉県を対象に各対象地震による作用力, 劣化状態を考慮した支承部の抵抗力の算出を行い, 支承の損傷確率から各路線の遮断確率の算出をし, 各地域の孤立危険性評価を行った。その後, 人口データを考慮した補修優先度について評価をそれぞれ行った。

今後の課題として, 妥当性の検証や孤立被害の多くの要因である土砂災害についての検討, 支承以外の部材の評価を行っていくこととする。

参考文献

- 1) 南海トラフ地震で想定される震度や津波の高さ, 気象庁, 2013年
- 2) 首都の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書, 内閣府, 2013年
- 3) 計測震度の算出方法, 気象庁
- 4) 断層近傍まで適用可能な震度の距離減衰式の開発, 松崎伸一ら, 2006年
- 5) 劣化橋梁の地震・積雪複合作用に対する破壊確率評価, 佐竹基治, 2015年度中央大学修士論文