

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 Evaluation of isolation risk during earthquakes in target areas assuming road bridge damage considering deterioration

都市人間環境学専攻 松尾 翔太

Civil, Human and Environmental Science and Engineering Course / Shota MATSUO

Key Words : isolated damage, emergency transport route, degradation, Monte Carlo method, minimum cut set

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、特に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及び図-2に示す。選定理由として福井県は図-1より緊急輸送路整備があまり進んでおらず、脆弱であり、地震発生時に孤立集落発生の危険性がある点、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-2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。

対象地震は福井県については東南海地震、千葉県については首都直下地震とし、詳細を表-1¹²⁾に示す。

3. 研究方法

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



図-1 福井県の緊急輸送路図



図-2 千葉県の緊急輸送路図

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	

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ゾーンへのリンクが切れることとする。このゾーンとは各リンクとリンクに近いメッシュの集まりのことである。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。

4. 路線毎の遮断確率の算出

(1) 作用力の設定

本研究では作用力は地震力とする。また、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ため、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。

$$\alpha = 10^{\frac{1}{2}(I-0.94)} \quad (2)$$

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。 X は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 はマグニチュード発生頻度が Gutenberg-Richter 則より、指数分布に当てはまるため、指数分布に従う乱数を発生させ求める。 h は一樣乱数を用いて変動性を与えることとした。

(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るため、補修が重要となる。よって考慮する抵抗力は支承部の抵抗力とし、式(4)を用いて算出する。

$$R = R_b + \mu W \quad (4)$$

ここで R_b は支承部の構造的要因による抵抗力[N], μ は最大摩擦係数, W は上部構造重量[N]である。

支承部の構造的要因による抵抗力とは、地震力を受けた際に水平方向の揺れに対して抵抗するようなせん断力である。対象橋梁の支承は線支承、ピン支承、支承板支承の3種類に分けられ、図-3に示した箇所のせん断力をそれぞれ算出していく。ピン支承と支承板支承に関しては各部材毎の抵抗力の最小値を抵抗力とする。線支承の抵抗力を式(5)、ピン支承と支承板支承を式(6)でそれぞれ算出する。

$$R_b = 0.7(\sigma_1 a_1 N_1 N_2 + \sigma_2 a_2 N_2) \quad (5)$$

$$R_b = \begin{cases} 0.7\sigma_1 a_1 N_1 N_2 \\ \text{or} \\ 0.7\sigma_2 a_2 N_2 \end{cases} \quad (6)$$

ここで σ_1 はボルトの降伏耐力[N/mm²], σ_2 は下凸部の降伏耐力[N/mm²], a_1 はボルトの断面積[mm²], a_2 は下凸部の断面積[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である。そして式(4)の μ の値に関して線支承は0.25, ピン支承と支承板支承は0.15とする。

また本研究では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、劣化による耐力低下の確率モデルを作成する。確率モデルに

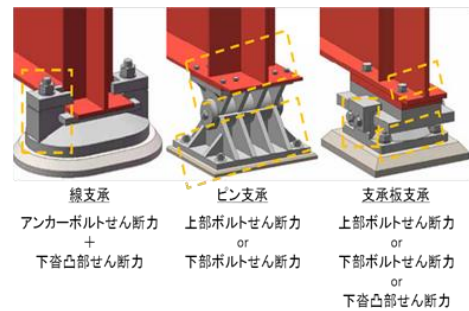


図-3 支承の種類及び抵抗力

表-2 健全度と許容応力度設計法における各種応力の設定

健全度	設定値
I	許容応力度 σ_a の 1.5 倍
II	許容応力度 σ_a の 1.1 倍
III	許容応力度 σ_a の 0.8 倍
IV	許容応力度 σ_a の 0.2 倍

ついては佐竹⁵⁾が作成した Gamma モデルを用いた耐力劣化モデルがある。このモデルを用いるにあたり、使用する健全度と許容応力度設計法における各種応力の設計値を表-2のように設定し、耐力を算出する。

(3) 評価結果

福井県、千葉県、路線毎の遮断確率結果を図-4、図-5にそれぞれ示す。まず福井県は、軸となる路線の遮断確率は低くなっているが、そこから各地域へ広がる路線の遮断確率が高くなる結果となった。次に千葉県は、橋梁の破壊確率は最も低くても85%を超えており、橋梁のある路線の遮断確率は100%に近い確率になっていることが分かる。また、太平洋側と県南部にある路線が多く遮断するような結果となっている。

5. 孤立危険性評価

(1) 道路ネットワーク評価

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(7)で算出する。

$$P_{fi} = 1 - \prod_{k=1}^X (1 - B_k) \quad (7)$$

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(8)で算出する。

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - \prod_{t \in T} P_{fi}) \quad (8)$$

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。

(2) 評価結果

福井県及び千葉県の孤立危険性を示した結果を

図-6, 図-7 にそれぞれ示す。まず福井県は県北部の日本海側と石川県, 岐阜県の県境付近で孤立危険性が高まっていることが分かる。これらの地域は中山部であり, ネットワークがあまり整備されていない地域であるため孤立危険性が高まる結果となった。次に千葉県は県北西部と太平洋側の地域で孤立危険性が高まっていることが分かる。北西部は広域活動拠点周辺に橋梁があることでその拠点が管轄するエリア全域というよりその拠点自体が孤立しやすいという結果となった。北西部は全体的に見るとネットワークが密であり整備されているが, この結果から部分的にはネットワークが脆弱であることが分かる。太平洋側は沿岸部へ接続する路線の多くが遮断確率の高い路線であり, 遮断確率の低い路線もあるが, その周辺の路線は遮断確率が高いため, 結果的に孤立危険性の高い地域が広がってしまう結果となった。この結果より全体としてネットワークが整備されているとしても部分的に脆弱な箇所が拠点付近にあることで孤立被害に繋がることから, 全体のネットワークだけでなく, 部分的なネットワークでの評価も必要である。また, 路線内に橋梁数が多く, ネットワークも脆弱な箇所はネットワークの強化も必要である。

6. 孤立人数減少数

(1) 孤立人数減少数の考慮

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。

(2) 評価結果

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結果を福井県, 千葉県についてそれぞれ図-8, 図-9 に示す。まず福井県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り, また日本海側へ繋がる路線内の橋梁優先度も多少高まっている。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

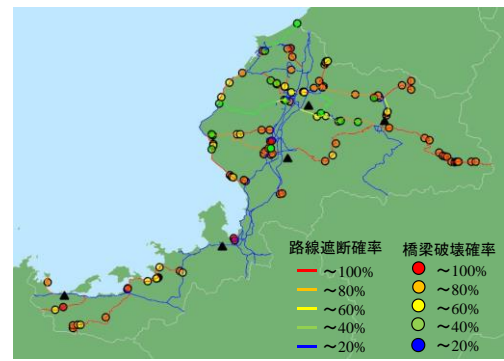


図-4 福井県の路線毎の遮断確率

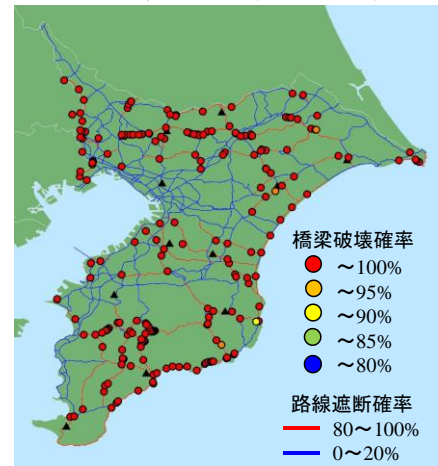


図-5 千葉県の路線毎の遮断確率

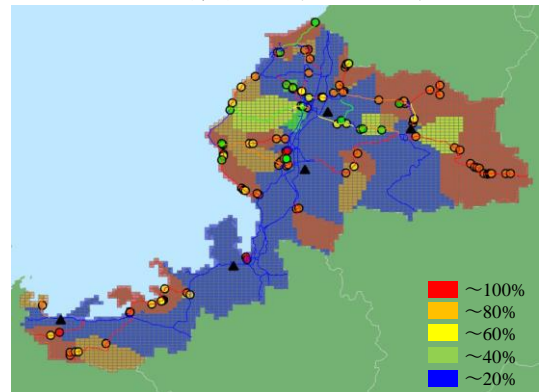


図-6 福井県の孤立危険性

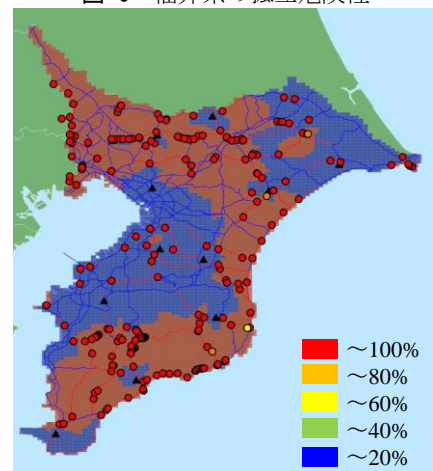


図-7 千葉県の孤立危険性

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。北西部は広域活動拠点周辺の橋梁が減少数に大きく影響するため、その他の橋梁の減少数への影響が小さいことから拠点付近の橋梁の優先度は高いままであり、その他の橋梁の優先度は低下したと考えられる。勝浦、鴨川市周辺は比較的人口が少なく、被害を受ける人数が少ないため優先度が低下している。太平洋側はネットワークが疎であり、路線1本の重要度が高くなっているため優先度が高まったと考えられる。木更津市周辺については孤立危険性が高い地域は見られないが、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、相対的に優先度が上昇したと考えられる。

また両県の結果より、日本海側、太平洋側それぞれに繋がる路線（道路啓開ルート）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、補修や場合によっては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。

これらの結果より、孤立人数を考慮することで劣化状態や破壊確率が同程度の橋梁についても補修の優先順位付けが可能となった。また β を変化させることでどの現象に対して重点を置いて補修を行うかを地域の特徴などに応じて変化させて順位付けを行うことができるため、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が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。しかし、千葉県に関しては地震力が大きいいため、劣化による影響が見られないことから地震の違いによるさらなる検討が必要である。

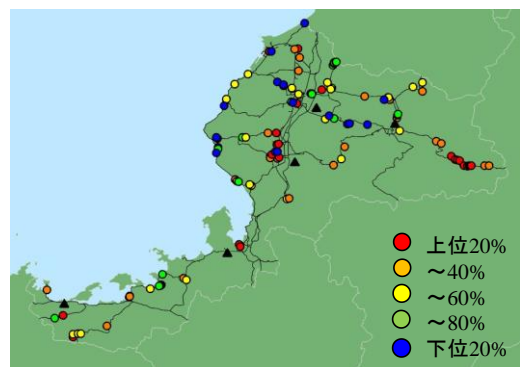
7. おわりに

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。

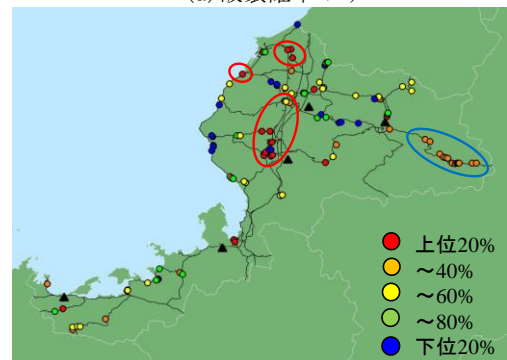
今後の課題として、妥当性の検討、孤立被害の要因の1つである土砂災害を考慮した検討、支承以外の部材の評価、そして本研究では対象地震として発生確率が高いとされる地震を選んだが、発生確率は低いにより被害を及ぼす地震もあるため、そうした地震についての評価も行っていくこととする。

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

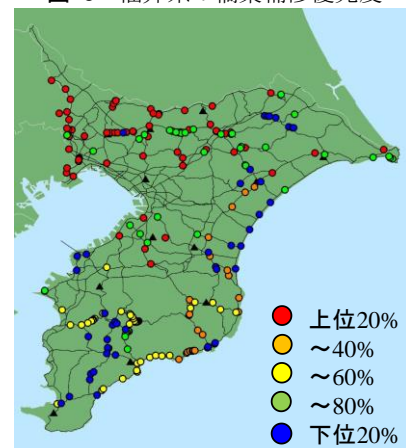


(a) 破壊確率のみ

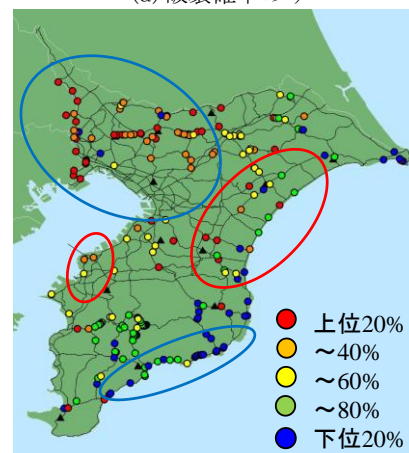


(b) I_b による評価

図-8 福井県の橋梁補修優先度



(a) 破壊確率のみ



(b) I_b による評価

図-9 千葉県の橋梁補修優先度