

第IV部門

道路ネットワーク耐震化優先順位付けのためのリンク重要度評価指標

京都大学工学部

学生員 ○船瀬 悠太

京都大学防災研究所

正会員 多々納 裕一

長岡科学技術大学

正会員 土屋 哲

1. はじめに 大規模地震による交通網の断絶は被災地域住民の生活に甚大な影響を及ぼす。道路ネットワークの損傷による影響を最小限にとどめるために、道路ネットワークの耐震安全性水準の効率的な向上を図っていくことが要請されている。このためには、道路ネットワーク内のどのリンクを優先的に耐震化すべきであるかを合理的に判断するための計画情報の作成が不可欠となる。

本研究では、効率的な耐震補強計画を策定するために各道路リンクに対して耐震化の優先順位付けを行うための評価指標を提案する。耐震化の効果は、地震時の期待被害の減少額で表される。この期待被害の変化を求めるには、リンクが被災したときに生じる潜在的被害、及び耐震化による被災率の変化を考慮する必要がある。リンク被災時のコスト増加をリンクの経済的重要度、さらに耐震化の被災率の変化を構造脆弱性の改善率とし、これらの指標を計量化することで耐震化の優先順位付けを行う。

2. 本研究の方法と特徴

最適な耐震化戦略とは、その計画の純便益が最大となるように計画されるべきであるが、これはネットワークの大きさや計画案などの多様性から計算が困難な為、より簡便で実用的な手法として、1 リンクのみを耐震化を対象とした便益の変化に着目する。

既存の研究では各リンクが被災した時の被害額からリンクの重要度を求めてきたが、周辺リンクの被災状況が反映されていなかった。ネットワーク上での道路が晒されている地震リスクを厳密に反映させるには、他のリンクの被災度も考慮したネットワーク状況の作成が必要となる。本研究では地震シナリオをもとに被災パターンを作成し、被害額を求める。

道路構造物に関するコストのうち、地震発生後に大きく影響を受けるのは道路復旧に関わる復旧コスト及び道路利用者の移動コストを示すユーザーコストである。ユーザーコスト増加は被災地域の生活に大きな影

響を与え、復旧コスト以上の被害額が生じることが考えられる。そこでリンク被災時のユーザーコストの変化を経済的重要度とし、耐震化の評価指標とする。また、より効果的な耐震化を行うためには地震発生確率、地震源、外力分布、被災率、周辺リンクの被災状況といった道路の被災に影響する各段階での要因を統合して考えなければならない。そのための指標を定式化し、分析を行うことを目的とする。

3. 道路ネットワークの耐震化のための評価指標の定式化

(1) ユーザーコスト：ユーザーコスト $UC(A)$ を個々のネットワーク利用者が負担する旅行費用の総和として定義する。総旅行費用とは利用者の総旅行時間に時間価値をかけたものとする。ただし、 A :リンクの集合である。

(2)被災時の道路ネットワーク状態：地震発生時には、道路構造物が損傷を受けネットワークを構成するリンクが使用出来ない場合が生じる。リンク a の地震による損傷状況を ε_a で表し、通行可能である場合に $\varepsilon_a = 1$ 、通行不可能な場合に $\varepsilon_a = 0$ をとるとする。被災後のリンク集合を $\tilde{A}$ で表す。

ここで、それぞれの地震シナリオを $\omega_h (h=1, \dots, n)$ とし、各リンクに生じる外力は $s_a(\omega_h)$ で一意に定めるとする。各リンクの耐震性能である fragility を $f_a(s_a(\omega_h))$ とし、リンクが被災する確率は $p_a(1|\omega_h) = 1 - f_a(s_a(\omega_h))$ 、また被災しない確率は $p_a(0|\omega_h) = f_a(s_a(\omega_h))$ で与えられる。このとき、地震シナリオ ω_h の下で、利用可能なリンクの集合が $\tilde{A}$ となる確率は次式で与えられる。

$$p(\tilde{A}|\omega_h) \equiv \prod_{a \in A} p_a(\varepsilon_a(\tilde{A})|\omega_h) \quad (1)$$

ここで、 ε_a : リンク a の損傷状況、 $p_a(\varepsilon_a(\tilde{A})|\omega_h)$: 地震 ω_h 発生時にリンク a の損傷状況が ε_a となる確率である。

ここで地震シナリオを所与としても、各リンクの損傷

は不確実でありネットワーク形状も不確実となるので、ユーザーコストは一意には定まらない点に留意すべきである。

(3)ユーザーコスト変化：被災によるユーザーコスト変化は $\Delta UC(\tilde{A}) = UC(\tilde{A}) - UC(A)$ で与えられる。地震シナリオを所与として、被災に伴うユーザーコスト変化の期待値 $E[\Delta UC|\omega_h]$ は以下のように定式化される。

$$E[\Delta UC|\omega_h] = \sum_{\tilde{A} \subseteq A} \Delta UC(\tilde{A}) p(\tilde{A}|\omega_h) \quad (2)$$

(4)耐震化のための評価指標：まず、リンクのシナリオ依存型経済的重要度を定義する。これは地震シナリオ ω_h が発生した条件付きで、そのリンクが被災した時と被災していない時の期待ユーザーコストの差によって表すこととする。したがって、シナリオ依存型経済的重要度 $EL_a(\omega_h)$ は次式で表される。

$$EL_a(\omega_h) = \sum_{\tilde{A} \subseteq A} \Delta UC(\tilde{A}) \cdot p(\tilde{A}|\omega_h) \Big|_{\varepsilon_a=0} - \sum_{\tilde{A} \subseteq A} \Delta UC(\tilde{A}) \cdot p(\tilde{A}|\omega_h) \Big|_{\varepsilon_a=1} \quad (3)$$

これは、地震シナリオごとのリンク被災時のコスト増加期待値を表すもので、各地震シナリオに対してそのリンクが被災するとどれほどの損失が生じるかを計る指標となる。

次に耐震化の効果を計量化する指標の一つとして構造脆弱性の改善率を定義する。道路構造物はそれぞれ固有のフラジリティを持っており、耐震化による構造脆弱性の変化も異なる。リンクに対して改善の余地の有無を検討する指標としての構造脆弱性の改善率 $\Delta f_a(s_a(\omega_h))$ は次式で表される。

$$\Delta f_a(s_a(\omega_h)) = f_a^0(s_a(\omega_h)) - f_a^1(s_a(\omega_h)) \quad (4)$$

この耐震化による構造脆弱性の変化をフラジリティカーブ上で表すと図1のようになる。図のように、耐震化によってフラジリティカーブがシフトしても被災率の変化は与えられる外力によって大きく異なり、地震リスクの地域的特性も考慮するために、この指標は重要となる。

次にこれらの指標と耐震化による被害の軽減額との関係を検討する。リンク a の耐震化に伴う(ユーザーの)被害軽減額 $\Delta L_a(\omega_h)$ は

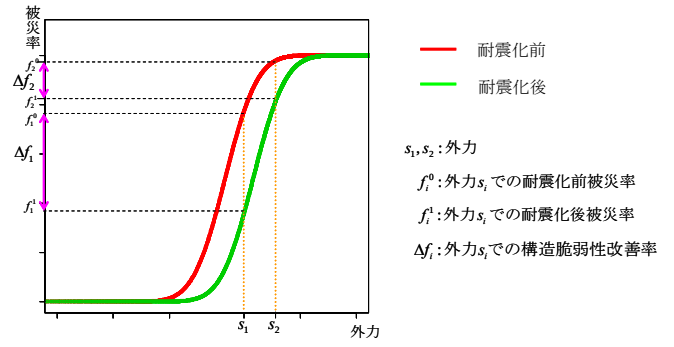


図1：耐震化による構造脆弱性の改善率

$$\Delta L_a(\omega_h) = E[\Delta UC|\omega_h]_{before} - E[\Delta UC|\omega_h]_{after} \quad (5)$$

で表すことができる。これは若干の式変形を行うと

$$\Delta L_a(\omega_h) = EL_a(\omega_h) \cdot \Delta f_a(s_a(\omega_h)) \quad (6)$$

と表され、耐震化による被害の軽減額が経済的重要度と構造的脆弱性の改善率との積として与えられることを示すことが出来る。また、地震シナリオに依存しない耐震化の期待被害軽減額は地震シナリオの生起確率 $q(\omega_h)$ を用いて求めることが出来る。期待被害軽減額 $E[\Delta L_a(\omega_h)]$ は次式で表される。

$$E[\Delta L_a(\omega_h)] = \sum_{\omega_h \in \Omega} EL_a(\omega_h) \cdot \Delta f_a(s_a(\omega_h)) q(\omega_h) \quad (7)$$

この期待被害軽減額は、各道路リンクに対して晒されている地震リスクの地域的特性を考慮した、耐震化による期待効果を表したものである。

4. 道路ネットワークへの適用

本研究では実ネットワークへの適用として、大阪府の道路交通網データを用いて、前章で定式化した指標を計算し分析を行う。地震シナリオについては大阪府付近の地域で想定されている地震シナリオを用い、それぞれの地震シナリオ依存型でのリンクの優先順位を決定する。

計量結果については講演時に譲る。

5. まとめ

本研究では効率的な耐震補強計画を策定するために各道路リンクに対して耐震化の優先順位付けを行うための評価指標としてリンクの経済的重要度、及びこれに構造脆弱性の改善率と掛け合わせることで得られた被害軽減額を定義した。これらの指標をネットワークに適用した所、耐震化の効果を計量化するには経済的重要度だけでなく構造脆弱性の改善率も含めて考慮することが重要であることがわかった。