

## 1 はじめに

道路ネットワークの潜在的な問題箇所を把握するために、機能低下が発生した際のネットワークに与える影響の大きい道路区間 (Critical Link) を特定する方法論を構築する。

## 2 ネットワーク脆弱性評価手法の構築

### 2.1 道路ネットワーク形状からの脆弱性評価手法

本研究では、N-edge-connected の概念に基づき、道路ネットワーク形状評価のため、辺連結度および最小カットを求める手法として、永持らのアルゴリズムを採用した。

### 2.2 ネットワーク容量に基づく脆弱性評価モデル

#### (1) ネットワーク容量に基づく脆弱性モデルの構築

本研究では、ネットワーク容量に着目し、道路の機能低下により、多様な道路利用者の経路選択行動の変化を表現し、大規模ネットワークへの適用するために、簡略化したモデルの提案を行う。簡略化のためには、Clark and Watling の提案した、Probit 型確率的利用者均衡配分 (Probit 型 SUE) の経路選択確率のリンクコストに対する偏微分値を解析的に求める方法を用いることとする。

ネットワーク上の総交通量を最大化しようとするネットワーク容量問題モデルは、以下のように定式化される。

$$REG \begin{cases} \text{Max}_{(\theta)} Z \equiv \sum_{rs} q_{rs}(\theta) \\ \text{s.t.} \\ \mathbf{x}^*(\theta) \leq \mathbf{s} \quad (1) \\ \mathbf{a} \leq \theta \leq \mathbf{b} \quad (2) \end{cases} \quad \text{式 1}$$

制約条件(1)は SUE 条件下のリンク交通量がリンク容量を超えないことを表しており、ネットワーク需要の変化により均衡条件下のリンクフローも変化するので、新たな均衡状態を求めるため、各道路区間が機能低下するたびに均衡条件を毎回解く必要がある。本研究では、その簡便法として感度分析の考え方を活用した。

SUE 均衡条件における経路選択確率を以下のようにテイラー近似を用い線形化する。

$$\mathbf{P}(\theta, \mathbf{s}) = \mathbf{P}(\theta_0, \mathbf{s}_0) + \nabla_{\theta} \mathbf{P}(\theta_0, \mathbf{s}_0) \cdot (\theta - \theta_0) + \nabla_{\mathbf{s}} \mathbf{P}(\theta_0, \mathbf{s}_0) \cdot (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)$$

$(\theta_0, \mathbf{s}_0)$  は初期点、 $\nabla_{\theta} \mathbf{P}$  および  $\nabla_{\mathbf{s}} \mathbf{P}$  は  $(\theta_0, \mathbf{s}_0)$  における  $\theta$  および  $\mathbf{s}$  に関する SUE 経路選択確率のヤコビアンである。元の問題 REG を SUE 経路選択確率の  $(\theta, \mathbf{s})$  に関する線形式を用いて式 2 のように再定式化した。L-REG から、ネッ

トワーク脆弱性評価に用いる問題を以下のように定式化する (VAP)。VAP の主な目的は、あるリンクの機能低下がネットワーク容量の低下に最も大きな影響を与える  $n$  本の Critical Link の特定である。

$$L-REG \begin{cases} \text{Max}_{(\theta)} \Psi \equiv \sum_{rs} q_{rs}(\theta) \\ \text{s.t.} \\ \mathbf{0} \leq \mathbf{x}(\theta, \mathbf{s}) \leq \mathbf{s} \\ \mathbf{x}(\theta, \mathbf{s}) = \Delta \cdot (\Omega \cdot \mathbf{q}(\theta)) \otimes \mathbf{P}(\theta, \mathbf{s}) \\ \mathbf{a} \leq \theta \leq \mathbf{b} \end{cases} \quad \text{式 2}$$

$$VAP \begin{cases} \text{Min}_{(y)} \psi \equiv \mathbf{q}_0^T \cdot \Phi \cdot \theta \\ \text{s.t.} \\ \mathbf{s} = (\mathbf{1}_{|A|} - \alpha \mathbf{y}) \otimes \mathbf{s}_0 \\ \mathbf{1}_{|A|}^T \cdot \mathbf{y} \leq n \\ \mathbf{y} = \{1, 0\} \\ \psi = \arg \max \{L-REG(\mathbf{s})\} \end{cases} \quad \text{式 3}$$

#### (2) モデルの検証

本研究で提案した手法は、Probit 型 SUE を線形近似しているが、最適解からの微小変動を前提とした解法であり、変動が大きいケースにおいては、Probit 型経路選択確率の非線形性により解が大きく乖離する可能性がある。

図 2.1 に示す 5 リンク・4 ノードから成る簡易なネットワークに脆弱性評価モデルを適応し、元の REG 問題と解の値を比較することで、モデルの検証をおこなう。OD ペアセットは、ノード 1 から 4 および、ノード 1 から 3 である。基本ケースでの総需要は共に 10 とし、各リンク容量もそれぞれ 10 とする。

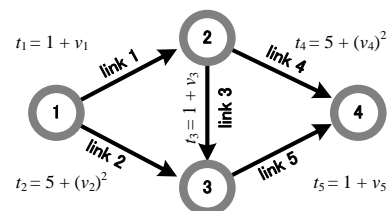


図 2.1 モデル検証ネットワーク

上記のネットワークにおいて、機能低下リンクおよびリンクの容量減少率を変化させたケースを考え、(a)すなわちすべてのケースについて Probit 型 SUE を解き、ネットワーク容量乗数  $\theta$  を求めたものと、(b)本研究で提案している線形近似手法を用いてネットワーク容量乗数  $\theta$  を求

めたものを比較した。各リンクの容量を 0.25, 0.5, 0.75, 1 の割合で機能低下させた結果を図 3.2 に示す。図 2.2, 2.3 よりネットワーク容量の低下に大きな影響を与えるリンクの特定に関して、両モデルにおいて同じ結果が得られた。本研究で提案したモデルの、Critical Link 特定に対する有用性が示せたといえる。

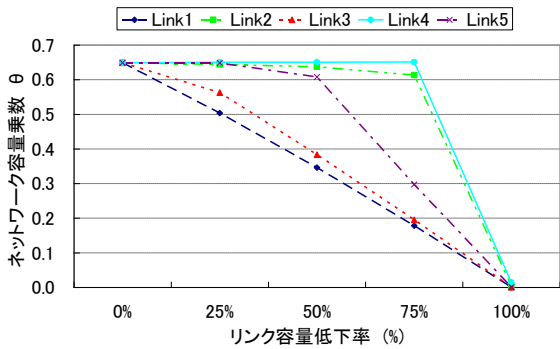


図 2.2 (a) L-REG 適用結果

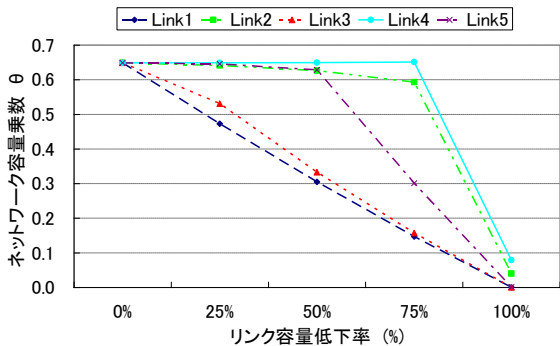


図 2.3 (b) REG 適用結果

### 3 京阪神ネットワークにおける脆弱性評価

#### 3.1 ネットワーク形状による脆弱性評価

京阪神の主要道路からなるネットワークに対し、形状に着目した脆弱性評価をおこなった結果を図 3.1 に示す。

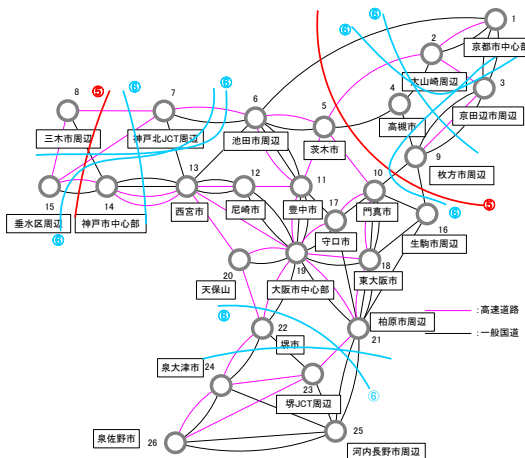


図 3.1 ネットワーク形状による脆弱性評価結果

図 3.1 から、大阪中心部と京都方面、神戸方面、大阪南部方面それぞれとの間の断面がネットワーク形状から

みて連結性に劣ると結論づけることが可能である。

#### 3.2 ネットワーク容量に着目した脆弱性評価

京阪神の主要道路からなるネットワークにおける、初期状態での混雑度の高い 10 リンクと各リンク容量を 50%減少させた場合のネットワーク容量乗数の小さい 4 リンクを図 3.2 に示す。混雑度が高いリンクと Critical Link が必ずしも一致しないことがわかった。

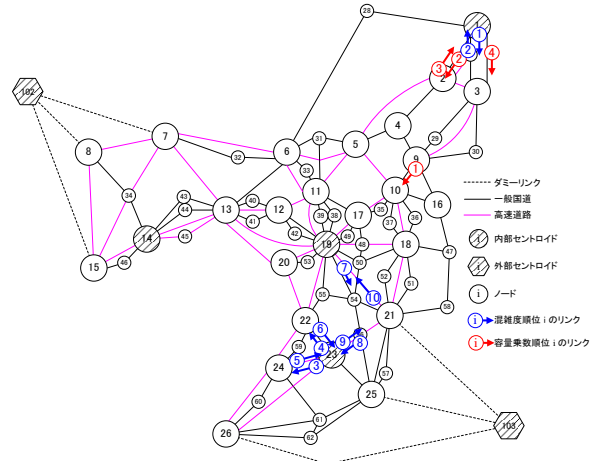


図 3.2 混雑度と影響度の差異

次に、機能低下リンク数が、1, 2, 3 本の場合の Critical Link 群を図 3.3 に示す。

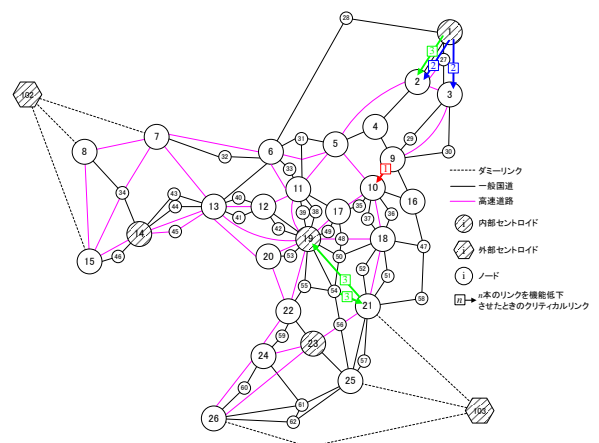


図 3.3 機能低下リンク数による差異

1 リンクが機能低下した場合の Critical Link が、2, 3 本のリンクが機能低下した場合の Critical Link 群に含まれるとは限らないことがわかった。

#### 4 おわりに

Critical Link 特定のためのネットワーク形状および容量に着目した脆弱性評価手法を提案し、京阪神ネットワークの脆弱性評価を行ない、次のような知見が得られた。

- Critical Link と混雑度の高いリンクは一致するわけではなく、潜在的重要度の高いリンクの特定が可能である。
- 機能低下本数により、Critical Link 群は異なる。