

利用者便益の視点から見た全国幹線交通ネットワークの耐震信頼性評価 A Reliability Analysis of Nationwide Transportation Network against Earthquake Risk

村木康行**・高橋 清***・家田仁***

By Yasuyuki MURAKI**, Kiyoshi TAKAHASHI*** and Hitoshi IEDA***

1. はじめに

本研究は、地震発生を考慮した場合の全国幹線交通ネットワークにおける弱点箇所を把握を目的とし、交通ネットワークが地震によって被災した際に交通流動が受ける影響を分析するモデルを構築した。モデルのアウトプットとして、影響の度合いを表現するための指標を提案し、様々な視点から地震に対する交通ネットワーク信頼性評価について分析を行った。

すでに交通ネットワークにおける災害時の信頼性を示す指標は数多く提案されており、1)連結信頼性に着目した指標、2)時間信頼性に着目した指標、3)フローの変動に着目した指標、4)ODペア毎の迂回ロスに着目した指標などに分類される¹⁾。しかし、既存の研究は対象ネットワークが地域レベルの道路ネットワークに限定され、かつ、対象が旅客に限られている。今後、災害の広域的な影響を分析するにあたり新たな指標の開発が必要とされている。

そこで本研究が構築したモデルは、複数の交通機関を考慮した全国レベルのネットワークにおいて旅客・貨物の両者の評価分析が可能なモデルとなっている。また、a)日本各地で地震が発生する可能性を考慮、b)各トリップが代替交通機関に迂回する可能性、およびトリップの取りやめを考慮、c)交通流動が被る損失を貨幣タームで算出できること等が特徴となっている。また、ネットワークにおける弱点箇所を把握するために、リンク毎にその途絶がきたす損失を表現する指標として途絶影響度の提案を行った。

2 交通リンク途絶影響評価モデルの構築

図1は本研究で構築したモデルの全体構成を示したものである。本モデルは交通ネットワークの被災状況を再現するサブモデルと、各交通機関別の交通量を算定するサブモデルの2つから構成され、算定されたリンクフローをもとに各評価指標が導出される。

(1) 交通リンク機能・途絶判定サブモデル

本サブモデルは、交通ネットワークを構成する各リンクが発生した地震の位置と規模に応じて、途絶するか否かを判定するものである。

今回対象とする地震は日本周辺で発生した既往地震のうち、発生地点と発生規模について記録が残っているM6.0以上の167回の地震とする。この167回の地震をシミュレーションにより発生させ、全てのリンクについて被害の判定を行うことで、交通ネットワークの被災パターンを想定する。

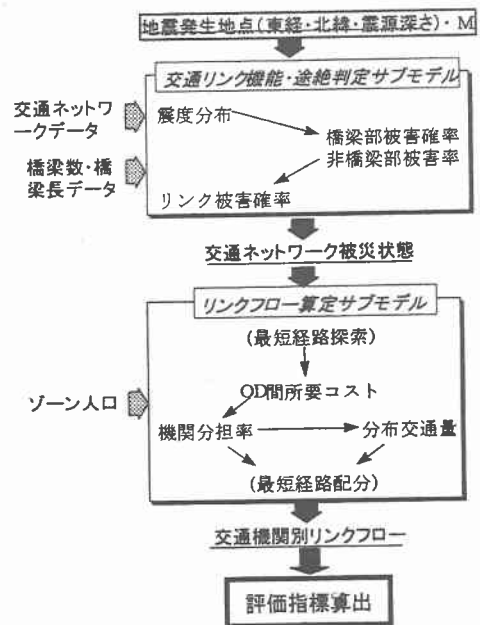


図 1 交通リンク途絶影響評価モデル

*キーワード：防災計画、リスク・マネジメント
耐震信頼性評価

**正員、工修、東日本旅客鉄道(株)

***正員、工博、東京大学大学院社会基盤工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

TEL.03-3812-2111 ext.6116, FAX.03-5800-6868)

リンクの被害判定については以下のプロセスで行う。
 まず、各リンクをいくつかのセクションに分割し、各セクションが位置する地点の震度 I を次の距離減衰式を用いて求める。

$$\Delta \geq 100\text{km} \text{ のとき}$$

$$I = M_k + 2\ln(100/\Delta) - 0.00183(\Delta - 100)$$

$$\Delta \leq 100\text{km} \text{ のとき}$$

$$I = M_k + 2\ln(r_0/r) - 0.01668(r - r_0) \quad (\text{式 } 1)$$

M_k : 河角による地震の規模
 Δ : 震央距離(km) r : 震源距離(km)
 r_0 : $\Delta = 100\text{km}$ における震源距離(km)

次に、各セクションの被害確率 P_s を求める。ここでいう被害とは、途絶に至るような施設の機能が完全に停止するような被害のことである。

今、被害判定のセクション (長さ l km) が、橋梁部 (平均橋梁長 l_B km/橋、平均橋梁数 n_B 橋/km) とそれ以外の非橋梁部で構成されているとする。また、震度が I のとき、橋梁の被害確率が $p_B(I)$ 、非橋梁部の被害率が $v_{nB}(I)$ 件/km と表されるとする。このとき、各橋梁が同種のものでかつ各橋梁での被害発生が独立であると仮定すると、セクション中の橋梁 $n_B l$ 本のうち x_1 本で被害が発生する確率 $P_B(x)$ は、次式の 2 項分布として表される²⁾。

$$P_B(x_1) = {}_{n_B}C_{x_1} \cdot p_B^{x_1} \cdot (1 - p_B)^{n_B l - x_1} + \varepsilon_1 \quad (\text{式 } 2)$$

また、非橋梁部における被害の発生箇所が全くのランダムかつ独立であると仮定すると、セクション中で x_2 件の被害が発生する確率 $P_{nB}(x_2)$ は次式のポアソン分布として表される。

$$P_{nB}(x_2) = \frac{\{v_{nB}(1 - n_B l_B) \cdot l\}^{x_2}}{x_2! \exp\{v_{nB}(1 - n_B l_B) \cdot l\}} + \varepsilon_2 \quad (\text{式 } 3)$$

ε_1 、 ε_2 は不確定項であり、地震が発生したとき近接した地点でも実際には被害の程度に差があることを考慮する。そして、セクションの被害確率 P_s 、リンクの被害確率 P を次式に従って求め、リンクの被害判定を行う。

$$P_s = 1 - P_B(0) \cdot P_{nB}(0) \quad (\text{式 } 4)$$

$$P = \text{Max}_s P_s \quad (\text{式 } 5)$$

被害の判定はリンクの被災確率がある基準値を超えるか否かにより判定されるが、本研究では基準値を 0.5 とし、基準値以上の被害確率を示したリンクは途絶し

ていると判定することとした。

(2) リンクフロー算定サブモデル

本サブモデルは、(1)で想定された交通ネットワーク被災状態において分布交通量をネットワーク配分し、各リンクのフローを算定するものである。

まず、交通ネットワークの被災状態において各交通機関毎に最短経路探索を行い、OD 間所要コスト X_k を求める。リンクコストには、各種料金と所要時間の組み合わせで構成される一般化費用を用いる。そして、この X_k から、次式のような集計ロジットモデルにより交通機関 k の機関分担率 P_k を求める。式 6 はある交通ネットワークが被災した際のトリップの転換を考慮していることとなる。

$$P_k = \exp(aX_k) / \sum_{k=1}^K \exp(aX_k) \quad (\text{式 } 6)$$

a : パラメータ K : 交通機関選択枝数

次に、交通機関別の所要コスト X_k を、式 7 のように OD 間期待最小コスト EMC としてまとめ、

$$EMC = \ln \sum_{k=1}^K \exp(aX_k) / a \quad (\text{式 } 7)$$

この EMC と発着地のゾーン人口 P_i 、 P_j から、次式のような重力モデルにより、ij 間の分布交通量 n_{ij} を算定する。

$$n_{ij} = k P_i^\alpha P_j^\beta (EMC_{ij})^{-\gamma} \quad (\text{式 } 8)$$

k 、 α 、 β 、 γ : パラメータ

式 8 は交通ネットワークが被災した際、所要コスト EMC_{ij} が増加し分布交通量が減少する、すなわちトリップの取りやめが生じる可能性を示している。

式 7、8 により算定された機関分担率と分布交通量を乗じることで機関別分布交通量を推計する。そして、これを各交通機関の被災後のネットワークに最短経路配分することにより、ネットワーク被災状態のリンクフローが算定される。

(3) 評価指標

算定されたリンクフローをもとに交通ネットワークの信頼性を評価するための指標を、以下のように定義する。いずれの指標も、各シミュレーション結果を集計し発生地震回数により除すことで、発生地震 1 回あたりの期待値として表現されている。

① リンク損壊確率 (リンク毎)

$$\sum_{m=1}^n d_m / n$$

②リンクフロー変動量（リンク毎）

$$\sum_{m=1}^n (f_m - f_0) / n$$

③ODペア損失費用（ODペア毎）

$$\sum_{m=1}^n \Delta C_{ij}^m / n$$

④途絶影響度（リンク毎）

$$\sum_{m=1}^n \sum_i \sum_j \delta_{m,l_k} \delta_{ij,l_k} \Delta C_{ijk}^m / n$$

d_m : m 番目地震発生時の状態 (1=途絶、0=機能)

n : シミュレーション回数

f_m : m 番目地震発生時のリンクフロー

f_0 : 通常時リンクフロー

δ_{m,l_k} : m 番目地震発生時リンク l_k が途絶するとき 1

δ_{ij,l_k} : 通常時リンク l_k を経由する OD ペアについて 1

ΔC_{ijk}^m : 機関 k のネットワークが被災することにより

ij 間 OD ペアが被る損失

①は、複数回行ったシミュレーションによる途絶回数を表現しており、交通ネットワークを構成する各リンクが地震に対して如何なるリスクを保有しているかを示す指標となっている。

②は、交通ネットワークが被災することで変動する交通量の期待値を表している。この値が正となるのは、災害時に代替ルートとして有効に機能するリンクであり、負となるのは災害時にルート変更を余儀なくされる交通量が多いリンクであると考えられる。

③は、図2で示されるように地震 m の発生により ij 間の分布交通量が被る損失額 ΔC_{ij}^m の期待値である。

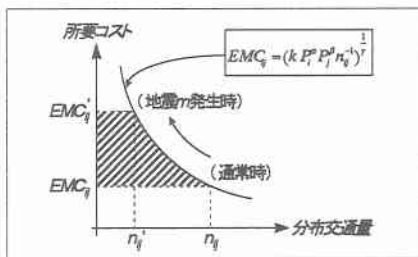


図2 ij間分布交通量が被る損失 ΔC_{ij}^m

最後の指標④はネットワークにおける弱点箇所を示す指標である。ネットワークの弱点箇所とは、途絶するリスクが高いにも関わらず、途絶するとその影響を受ける交通量が多く、また迂回ロスが大きいようなリンクであると考えられる。これは、リンク損壊確率が大きいにも関わらずリンクフロー変動量が大きく負で

あり、通常時そのリンクを利用する OD ペアが被る損失額 ΔC_{ij}^m が大きいことを意味している。この状況を表現しているのが④の指標である。

3. シミュレーションによる現行ネットワークの耐震信頼性評価分析

(1) シミュレーションの設定条件

今回対象とする交通流動は旅客及び貨物とし、それぞれ全国幹線旅客純流動調査データ(H7)、全国貨物純流動調査データ(H7)を全国 169 のゾーン間 OD データに分割したものをを用いた。また、旅客流動については鉄道、道路、航空を、貨物流動については道路を対象交通機関とし、表1に示したネットワークデータを使用した。

表1 ネットワークデータ

交通機関	ネットワーク	ノード数	リンク数
航空	定期路線・空港アクセス	263	2103
鉄道	新幹線・在来線	402	1104
道路	高速道路・一般国道	1038	4354

また、震度 I と橋梁被害確率 p_B 、非橋梁部被害率 v_{nB} の関係式は、過去の地震の被害調査データに基づいて各自治体が行っている地震被害想定等^{3) 4)}を参考に、以下のように設定した。また、平均橋梁長、平均橋梁数データについては、各種統計書⁵⁾⁶⁾に基づいて、県別・路線別の値を用いた。

$$p_B = 0.493I - 2.82$$

$$v_{nB} = 0.490I - 1.94 \text{ (鉄道)}$$

$$v_{nB} = 0.0556I - 0.221 \text{ (道路)}$$

(式9)

(2) シミュレーション結果

以下、シミュレーション結果について考察する。

図3は、貨物流動のリンクフロー変動量を示したものである。なお、リンク毎に変動が正となる場合、負となる場合で分類し、期待値を示している。この結果、通常時に交通量が集中しており、かつ、高い被災リスクを保有している太平洋側の主要幹線から、相対的にリスクの小さい中央自動車道、名神高速道路といった内陸ルートに迂回していく傾向があることが示されている。

図4は、鉄道ネットワークの途絶影響度を示したものである。東海道・山陽新幹線をはじめとして、東北新幹線、根室本線、北陸本線、紀勢本線等の途絶影響

度の値が大きくなっている。また、途絶影響度は3つの要因から構成されている指標であるが、そのいずれが決定要因となっているかを示したのが図中のレーダーチャートである。根室本線、紀勢本線は有効な代替ルートがないため、また、東北新幹線は一度途絶するとその影響を受ける交通量が多いため途絶影響度の値が大きいものとなっている。さらに東海道新幹線はいずれの要因値も大きく、このことが途絶影響度最大の路線であるという結果につながっているものと考えられる。

一方、道路ネットワークの途絶影響度を表したのが図5である。旅客流動に対する途絶影響度では、東名高速道路の値が最大となるが、貨物流動分も合わせると兵庫県湾岸の4リンク（阪神高速及び第2神明道路リンク）の値が甚大なものとなる。このうちの2リンクは、兵庫県南部地震によって途絶したものである。また、複数回行ったシミュレーションから、兵庫県南部地震を取り除いて計算した結果においても、これらのリンクの途絶影響度が相対的に高いことが示された。このことは兵庫県南部地震における被災地域が、高速道路は湾岸に集中しており、地震が発生すると同時に途絶してしまう可能性が高く、さらにこれらが途絶した際、迂回のための損失が小さくて済むような代替ルートが整備されていないことを示している。

参考文献

- 1) 高橋、田中：地震リスクを考慮した全国ネットワークにおける交通流動量の影響分析，土木計画学研究・講演集 20(1), pp507-510, 1997
- 2) 小林正美：道路交通網の地震時信頼度解析に関する研究，昭和 56 年度都市計画別冊(16), pp.205, 1981
- 3) 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書（被害想定手法編），1997
- 4) 埼玉県：大規模地震被害想定調査報告書、1992
- 5) 運輸省鉄道局：鉄道統計年報、1996
- 6) 全国道路利用者会議：道路統計年報、1996

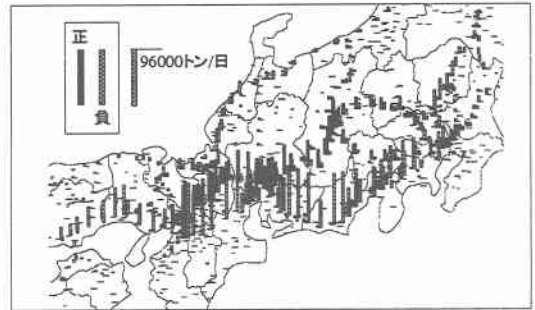


図 3 リンクフロー変動量(道路・貨物)

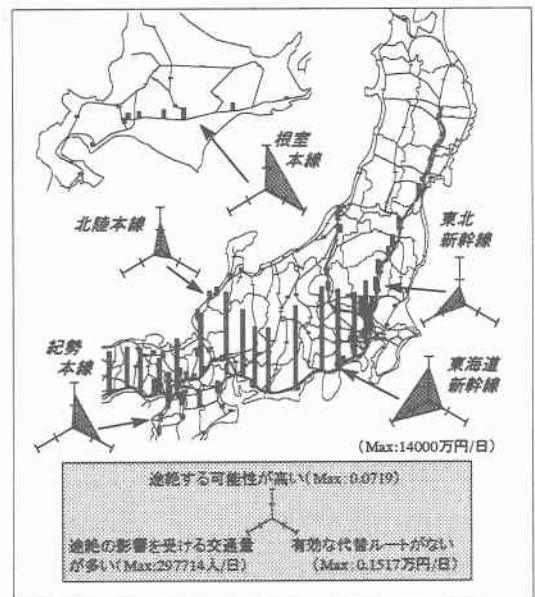


図 4 途絶影響度(鉄道)

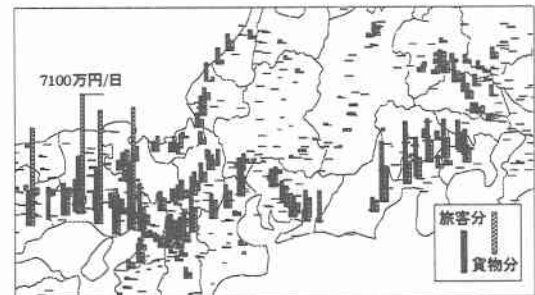


図 5 途絶影響度(道路)