

道路交通ネットワークの地震時機能評価モデルの開発

Simulation and Evaluation of Post-Earthquake Performance of Transportation Network

能島暢呂 (岐阜大・工)

Nobuoto NOJIMA, Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193
e-mail: nojima@cive.gifu-u.ac.jp

This study presents a simulation method to evaluate the post-earthquake functional performance of transportation network. The method proposed herein includes procedures (1) to generate a number of damage patterns using Monte Carlo simulation, (2) to load the network with O-D trips using the incremental assignment method, and (3) to assess the network performance in terms of aggregate and disaggregate attributes related to links, cross-sections, centroids, O-D pairs, and the total network. Average values, distributions and correlation of these attributes provide wide scope of traffic behavior under seismic risks. Those performance measures reflect mixed effects attributed to (1) decrease in O-D trips due to overload, (2) increase in trip length due to detouring actions, and (3) increase in travel time due to detouring and congestion.

Keywords: Transportation Network, Post-Earthquake Performance, Monte Carlo Simulation, Incremental Assignment Method

1. はじめに

都市交通が円滑に機能することは地震防災上の重要課題であり、その機能的被害の予測・評価手法の確立が望まれる。筆者らはこれまで、阪神・淡路大震災における高速道路網の機能被害について調査し¹⁾、被災ネットワークのトポロジカルな評価指標²⁾や、交通容量を評価指標としたネットワーク信頼性解析手法³⁾を提案した。これらの評価手法のパラメータは少数であり、簡便な推定が可能である一方、所用時間や走行距離など flow-dependent な特性を反映したネットワーク機能評価を行うには至っていない。道路交通機能の地震時の挙動については、OD 交通の質的・量的変化や交通手段・経路の変化など、未解明な現象が多いため、「四段階推定法」に代表される従来手法を忠実に適用することは困難である。

以上の背景のもとで、本研究では分割配分法に基づいた新たな災害時交通量配分手法を提案し、種々の評価指標によって震災時機能評価を行う簡便手法を提案する。数値計算例として、阪神・淡路大震災において被災した道路ネットワークのモデルを用いて、ネットワーク機能評価を行う。

2. 被災道路ネットワーク機能の評価手法

本研究で提案する評価モデルは以下の3段階よりなる。

2.1 被災パターンの生成

ネットワークを構成する n 本のリンク k ($k = 1, 2, \dots, n$) の状態を、破壊(0)、非破壊(1)の二値変数ベクトル $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ で表し、その期待値としてリンク信頼度を $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} = \{E[x_k]\}$ で定義する。具体的には、被害がランダムに発生すると仮定し、リンク k の長さ d_k と単位長さあたりの期待被害箇所数(被害率) λ_k から、 $p_k = e^{-\lambda_k d_k}$ で算出する。これに基づいて、モンテカルロ・シミュレーションによって多数の被災パターンを生成する。

特定の被災パターンのみを対象とする場合には、この手順を省略するものとする。

2.2 分割配分法による交通量配分

潜在的な OD 交通量は被災前後で変化しないと仮定し、各被災パターンに対して分割配分法を適用して OD 交通量配分を行い、ネットワークが保持しうる最大限の交通機能を推定する。ここでは文献4)で提案された方法の配分終了条件を震災時に適するよう改変した。配分最終時のネットワーク容量は、文献5)の「極限道路網容量」に類似しているが、文献5)では配分計算を行っていない。具体的な手順を以下に示す。

【Step 1】 OD 交通量を N 分割した増分 OD 表を作成し、 $i = 1$ とする。

【Step 2】 それまでのリンク配分交通量(1回目は自由走行状態)に基づいて、走行時間関数よりリンク走行時間を算出する。容量に達したリンクは除去する(所要時間を無限大にする)。

【Step 3】 すべての OD ペアについて時間的な最短経路を求め、到達可能な OD ペアについては最短経路に含まれるすべてのリンクに増分 OD を加算する。

【Step 4】 到達不能となった OD ペアは、この回以降の配分対象から除外する。

【Step 5】 すべての OD ペアが到達不能となるか、 $i = N$ ならば **【Step 7】** へ。

【Step 6】 $i < N$ ならば $i = i + 1$ として **【Step 2】** へ。

【Step 7】 分割配分を終了し、リンク走行時間を算出してネットワーク評価を行う。

2.3 評価指標の算出

配分終了後、以下の評価指標を算出する。(a)、(b)はリンク指標、(c)は断面指標で添字 m は断面番号を表す。(d)、(e)は OD 指標で添字 i, j はセントロイド番号を表す。また(f)、(g)、(h)はネットワーク全体の指標で、「充足トリップ数」は道路網全体の交通処理能力を表し、「延べ走行距離」は充足 OD 交通の内訳と迂回の度合いを反映し、「延べ走行時間」はこれに加えて混雑の度合いを反映した指標である。

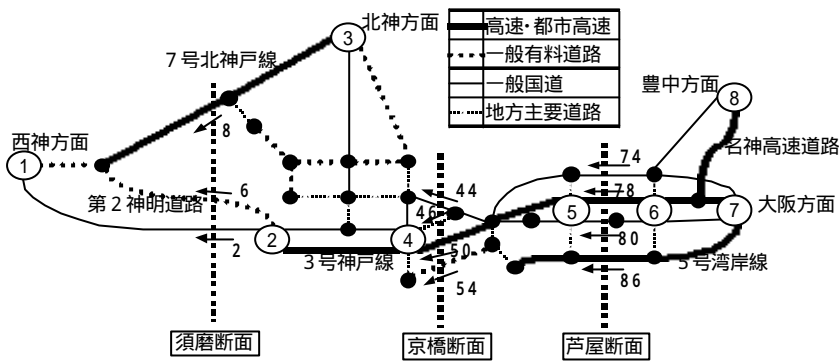


Fig.1 Network model for numerical example (numbers in circles represent centroid ID, numbers attached to links represent link ID)

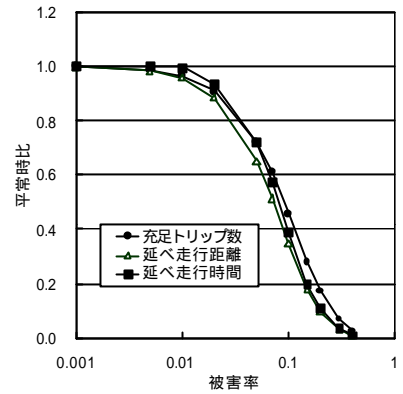
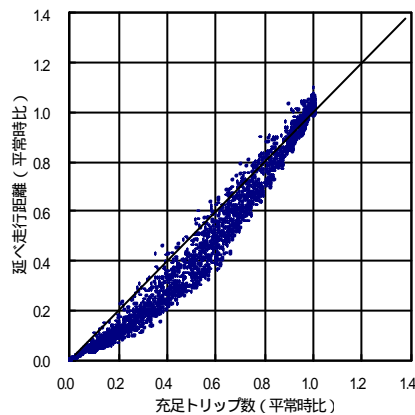
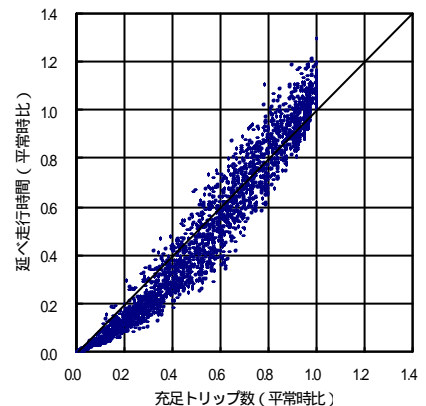


Fig.2 The total network performance measures Q , D and T for various I (normalized to pre-quake level)

- (a) リンク配分交通量 h_k
- (b) リンク走行時間 t_k
- (c) 断面交通量 $Q_m^s = \sum_{k \in S_m} h_k$
- (d) OD 別充足トリップ数 q_{ij}
(発生・集中可能交通量)
- (e) セントロイド別充足トリップ数
 $Q_i^C = \sum_j (q_{ij} + q_{ji})$
- (f) 充足トリップ数 $Q = \sum_i \sum_j q_{ij}$
- (g) 延べ走行距離 $D = \sum_k h_k d_k$
- (h) 延べ走行時間 $T = \sum_k h_k t_k$



(a) Q and D



(b) Q and T

Fig.3 Correlation among total network attributes (5000 samples normalized to pre-quake level)

3. 対象モデルと解析条件

阪神・淡路大震災における被災道路網を Fig.1 のようにモデル化した。ノード数 30 (うちセントロイド数 8), リンク数は 100 で, それぞれの道路規格に基づいて設計交通容量と自由走行速度を定めた⁶⁾. 走行時間関数は BPR 曲線における係数を $a=0.96$, $b=1.2$ とし⁷⁾, 可能交通容量⁶⁾ (設計交通容量の 1.113 倍と仮定) に達したリンクへの配分は行わないとした. OD 交通量は阪神高速道路公団における平成 6 年度センサスを参考にして求めた. このモデルでは, 地震前のトリップ総数 $Q=33,200$ (台/時), 延べ走行距離 $D=803,389$ (km・台), 延べ走行時間 $T=24,637$ (時間・台) である.

被害率 I_k を全体で一様と仮定して, モンテカルロ・シミュレーションによりランダムな被災パターンを生成した. 被害率は 0.005 ~ 0.4 の範囲で 10 種類設定し, それぞれ 500 回, 延べ 5000 回の被害パターンに対する配分計算を行った.

4. ランダムな被害パターンにおける道路機能評価

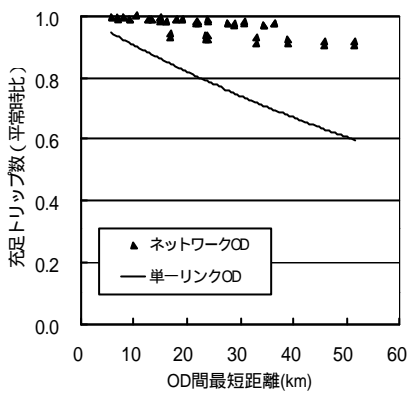
4.1 ネットワーク全体の機能評価

Fig.2 は, 各被害率における 500 回のシミュレーション試行で算出された (f), (g), (h) の評価指標の平均値 (平常時の値で基準化) である. 被害率が 0.02 を超えると著しい機能低下が生じていることがわかる. Fig.3(a) は 5000 回のシミュレーション結果を用いて充足トリップ数と延べ走行距離の相関関係を示したものである. 被害率が高い領域 (図左下) で

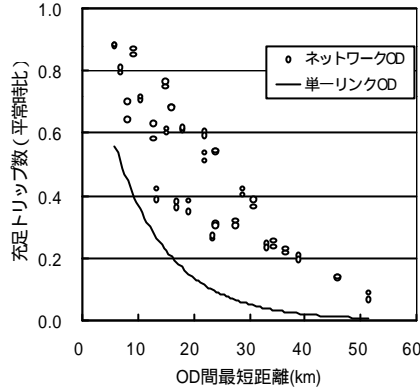
は, 長距離トリップの充足率が低下するため 1:1 線の下方に集中している. 一方, 被害率が低い領域 (図右上) では, 充足トリップ数の低下に加えて迂回による延べ走行距離の増加が認められる. Fig.3(b) は充足トリップ数と延べ走行時間の相関である. 全体的に, 縦軸の値の下限値は Fig.3(a) とほぼ同じであるが, 上限値は Fig.3(b) の方が広いばらつきを示す. 特に被害率が低い領域 (図右上) では 1:1 線の上方のプロットが多く, 迂回と混雑の影響がより顕著に現れている.

4.2 ODペア・セントロイド別の機能評価

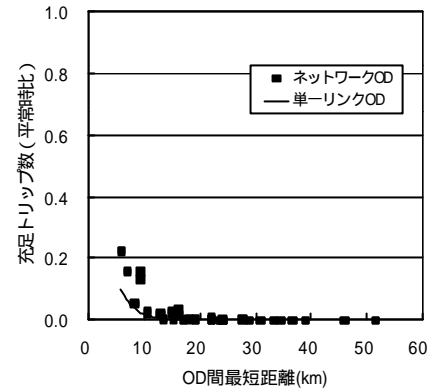
Fig.4(a)-(c) に OD ペアの平常時最短距離を横軸とした充足トリップ数 (平常時の値で基準化) を示す. OD 距離が長いほど充足トリップ数が低下する傾向にある. OD 経路を単一の直列リンクとした場合, OD 交通の充足率の期待値は図中の実線のように OD 距離に対して指数関数的に減少するが, 縦軸上方にばらつくのは OD ペア間のリダンダンシー効果によるものである. Fig.5 に OD 2~4, OD 4~7, OD 1~4, OD 1~7 について被害率と充足トリップ数 (平常時の値で基準化) の関係を図示した. OD 4~7 と OD 1~4 はトリップ長がほぼ等しいにもかかわらず, 充足トリップ数に大きな差が認められる. OD 1~4 の経路はセントロイド 1 付近で弱点が生じやすいが, OD 4~7 については並列的なリンクが至る所に存在するため目立ったボトルネックはなく, リダンダンシーがバランス良く分布しているためである.



(a) $I=0.01$



(b) $I=0.1$



(c) $I=0.4$

Fig.4 Rate of satisfaction of O-D trips with various trip length (averaged over 500 samples)

Fig.6 はセントロイド別の充足トリップ数(平常時の値で基準化)で、最も機能を高く保っているのはセントロイド6を起終点とするトリップである。この理由としては、OD交通量の多いOD6~7が最短距離で8.1kmと短く通行不能となりにくいことと、セントロイド6には上下線各6本のリンクが接続しリダンダンシーに富むことが考えられる。最も機能低下が著しいセントロイド1と8は、いずれもネットワークの終端部に位置し接続リンクが少ない(上下線各2本)ため、リダンダンシーに乏しく孤立しやすい。

4.3 断面別機能評価

Fig.1 に示した須磨断面、京橋断面、芦屋断面における西向き交通量に注目した分析を行う。Fig.7 は断面交通量の平均値(平常時の値で基準化)である。Fig.8 は芦屋断面を構成するリンクの配分交通量が断面交通量に占めるシェアを表している被害率の増加に伴って、リンク86からリンク80と74へ交通が転換する傾向がわかる。次に、芦屋断面と京橋断面の断面交通量の相関関係をFig.9(a)(b)に示す。被害率0.01での相関係数は0.99と高いが、被害率0.1では0.85に低下している。長距離トリップの充足率が低下するために有机的連結が失われたものと考えられる。

4.4 リンク別機能評価

Fig.1 に示す西向きの11本のリンク(2, 6, 8, 44, 46, 50, 54, 74, 78, 80, 86)の配分交通量の相関関係に注目する。被害率0.01の場合についてリンク配分交通量の相関を調べた結果、負の相関を示すペアは同一断面に属するリンクであり、正の相関を示すペアは異なる断面に属するリンク

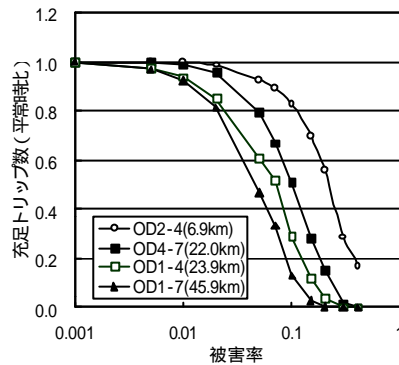


Fig.5 Rate of satisfaction of O-D trips for various I (averaged over 500 samples)

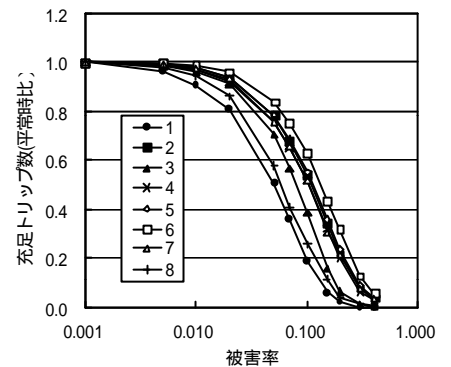


Fig.6 Rate of satisfaction of eight centroids for various I (averaged over 500 samples)

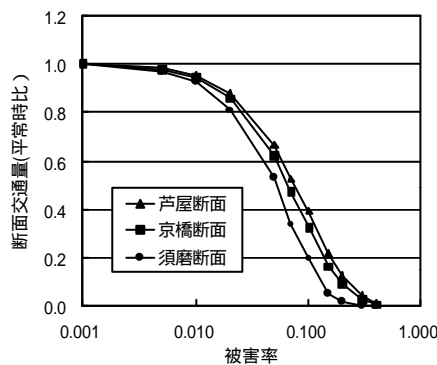


Fig.7 Cross sectional traffic volumes for various I (averaged over 500 samples normalized to pre-quake level)

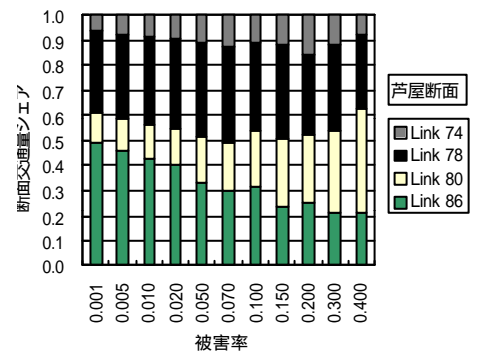


Fig.8 Share of link flow at Ashiya cross section for various I

であった。Fig.10(a)は高い正の相関を示すリンクペア8~44(相関係数0.77)の相関図である。これらは直列的な接続形態で同一の経路に含まれ交通の流れを形成するリンクペアで、正の相関を示すと考えられる。一方Fig.10(b)は負の相関を示すリンクペア6~8の相関図である。これらは合流・分岐・並列の関係にあり相互補完的に機能することから、負

の相関関係を示すと解釈できる。このように、配分交通量の相関関係から、リンク群がネットワーク内で果たす連携的な役割を明らかにできる。川上⁸⁾は阪神・淡路大震災における高速道路網の被災パターンに関して交通量配分を行い、同様のことを指摘している。

ところが被害率の場合 0.1 については、Fig.11(a)(b)にみられるように相関関係は極端に弱くなる。被害率が高くなると交通ネットワークが分断されるため、断片的な交通が部分的に満たされるのみとなる。従って、ネットワーク全体の有機的な結合が失われ、連携的機能を果たさなくなることが、相関関係が弱くなるという形で現れるものと解釈できる。

5. 結語

本研究では、道路網の地震時機能評価手法を提案し、被災に伴う交通挙動として「トリップの中止」、「迂回による走行距離増加」、「混雑による走行時間の増加」を考慮した評価指標を算出し、道路機能のマクロ的な評価を行った。また OD 距離と OD 充足率の関係を明らかにし、ネットワークのリダンダンシーと関係を考察した。さらに、断面交通量およびリンク交通量の相関関係を用いて、ネットワーク内での連携的機能について考察した。今後、評価モデルと対象モデルに改良を加え、施設のハード/ソフト面の改善や、交通の管理・運用策に有用となるよう検討を行う方針である。

参考文献

- 1) 能島暢呂：高速道路網の地震災害による交通機能への影響評価，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，1997.11，pp.431-434.
- 2) Chang, S. E. and Nojima, N., "Measuring Lifeline System Performance: Highway Transportation Systems in Recent Earthquakes," The 6th National Conference on Earthquake Engineering, 1998, paper No.70.
- 3) 能島暢呂・山中敏裕：道路ネットワークの地震時機能信頼性解析に基づく施設改善の重要度評価，第10日本地震工学シンポジウム，1998.11（印刷中）.
- 4) 飯田恭敬：道路網の最大容量の評価法，土木学会論文報告集，第205号，1972.9，pp.121-129.
- 5) 梶谷有三・斎藤和夫：道路交通システムの震後機能性能

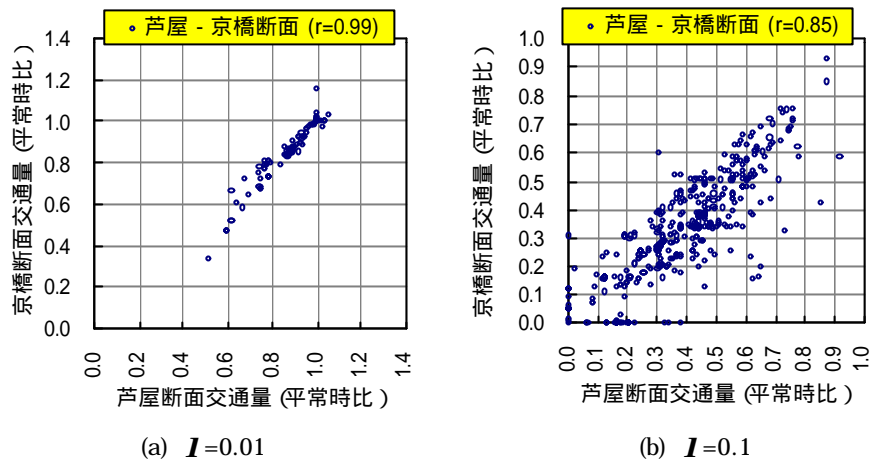


Fig.9 Correlation of traffic volumes at Ashiya and Kyobshi section (normalized to pre-earthquake level)

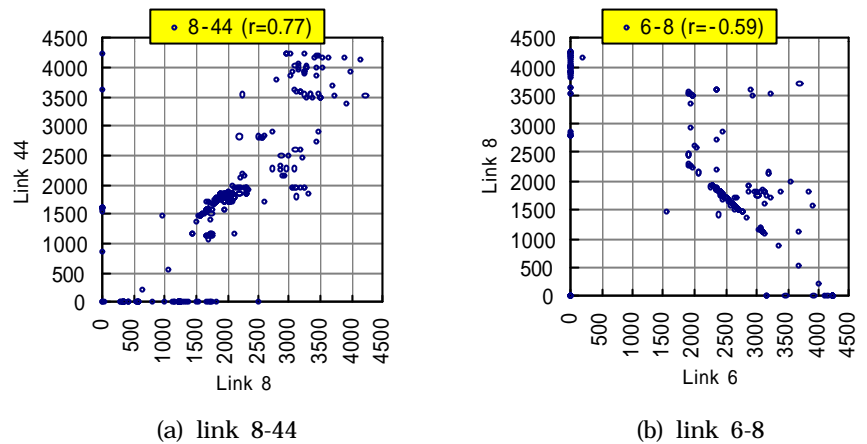


Fig.10 Correlation between link flow on two links (500 samples at $I=0.01$)

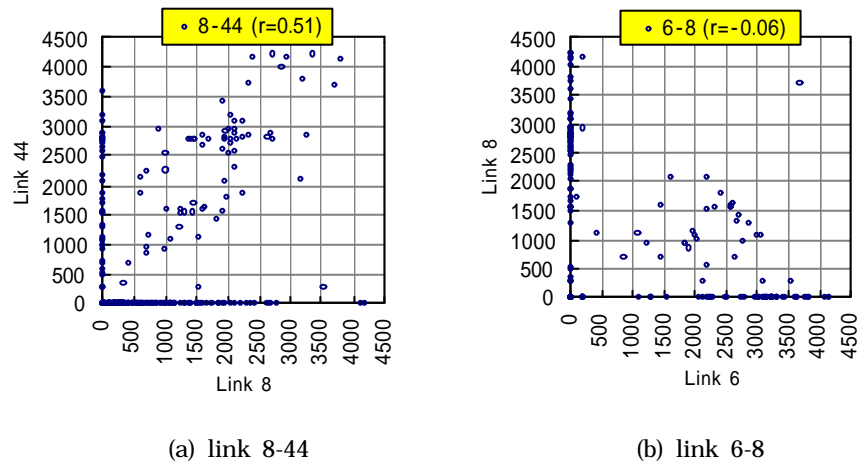


Fig.11 Correlation between link flow on two links (500 samples at $I=0.1$)

- の評価法，土木計画学研究・講演集，No.11，1988.11，pp.283-290.
- 6) 竹内伝史・本多義明・青島縮次郎：交通工学，鹿島出版会，1995.2，pp.166-169.
- 7) 森杉壽芳・宮城俊彦編著：都市交通プロジェクトの評価，コロナ社，1996.5，pp.26-29.
- 8) 川上英二：道路交通システムの機能上の耐震性の一検討，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，1997.11，pp.435-438.