

幹線道路網におけるリダンダンシーモデルと災害時対策評価法*

A Redundancy Model at Road Networks and the Evaluation Methods in case of the Disaster

寺田 健児**・青山 吉隆***

by Kenji TERADA, Yoshitaka AOYAMA

1. 研究の背景と目的

現在、阪神・淡路大震災等の経験から、リダンダンシーを確保することの意義や必要性が強調され始めている。しかし、簡便でなおかつ実用的なリダンダンシーの評価法については、客観的なものが定着していないのが現状である。

そこで、本研究は、リダンダンシーを評価するための指標を明確に定義し、現状のネットワークの評価のみならず、リンクの補強や増設等の事前対策による効果や、車両規制や追加レーン等の事後対策による効果も含めて評価できる手法を構築することを目的とする。また、この手法を単純なネットワークに適用した計算例を示す。

2. ODパフォーマンス関数の利用

(1) 本研究の特徴

従来、道路網のリダンダンシーを評価する方法としては、「連結信頼度」の概念が多く用いられてきた。しかし、災害時においては、ある時間までに輸送すべき物資が存在するため、時間制約条件等を考慮に入れる必要があると思われる。本研究では、このため「時間信頼度」の概念（特定のノード間において、所与の時間内に目的地に到着できる確率）を利用し、さらにこの概念に、ODパフォーマンス関数の手法を組み込むことを提案する。このことにより、本手法は交通量配分および物資輸送のための諸条件を考慮に入れた上で、道路網のリダンダンシーを簡便に評価できるという特徴を持っている。

* キーワード：防災計画、配分交通、道路計画

** 学生員 京都大学大学院工学研究科

*** 正員 工博 京都大学大学院工学研究科

(〒606-01 京都市左京区吉田本町 075-753-5139)

また、本研究の手法を用いることにより、リンクの補強・増設といった事前対策の効果や、災害時における交通規制による効果を定量的に算出することが可能である。

(2) ODパフォーマンス関数の利用

本来、パフォーマンス関数とは、図-1aのように、1本の道路についての交通量と所要時間との関係を表す関数である。しかし、図-1bのように、OD間に何本かの経路が存在する場合は、全てのリンクのパフォーマンス関数を重ね合わせることで、OD間を流れる全交通量と、OD間の所要時間との関係を表すことができる(図-1c)。すなわち、ODパフォーマンス関数とは、等時間原則配分によるワードロップ均衡時の全交通量と所要時間を1つの関数で表したものと定義される。

また、ODパフォーマンス関数は、ネットワーク内のリンクが破壊されるとその形状が変化する、という性質を持っている。図-2において、Aで示し

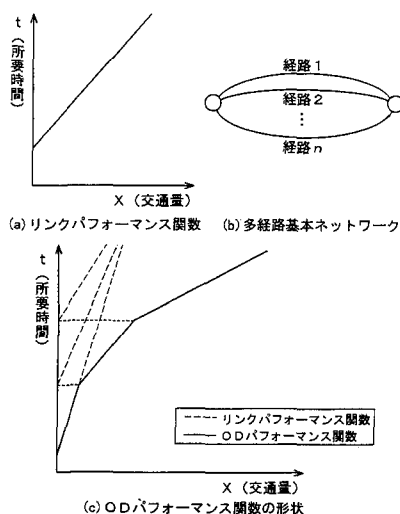


図-1 ODパフォーマンス関数の利用

た線は、3本の経路をもったOD間のODパフォーマンス関数を表しているが、ここである1本のリンクが災害時に破壊されると、関数は残りの2本のリンクの組み合わせとなり、図のA'の位置にシフトすることになる。なお、ODパフォーマンス関数は、所要時間と需要交通量の関係を表す交通需要関数と併用することによって、所要時間と交通量の需給均衡値を求めることのできる関数である。したがって、道路網上のリンクの破壊によって、ODパフォーマンス関数はシフトし、需給均衡値も移動することになる（図-2からは、リンク破壊時に所要時間が上昇し、交通量が減少することが読みとれる）。この性質を用いれば、災害時における道路網への影響を簡便に求めることが可能となる。

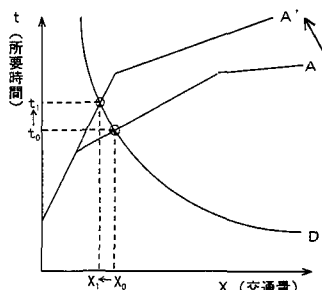


図-2 ODパフォーマンス関数のシフト

3. 信頼度解析法

(1) 災害時交通需要関数の設定

交通需要関数の形状に関してはさまざまなモデルが考えられるが、平常時の交通需要関数には、一般にグラビティモデルが用いられる。グラビティモデルでは、OD間の所要時間と需要交通量の関係は、

$$X = k \frac{N_1^\alpha \cdot N_2^\beta}{t^\gamma} \quad (1)$$

k : 比例係数

N_1, N_2 : 2都市 (OD) の各人口

α, β, γ : パラメータ

と表される。(なお、平常時の場合のパラメータの値として、ここでは、 $\alpha = \beta = 1$, $\gamma = 2$ を用いて考えるものとする。) 災害時の交通需要関数を考える場合、その形状は平常時の需要関数と必ずしも一致しないものと考えられるが、本研究では、災害時の需要関数の形状を、平常時と同様に式 (1) による

グラビティモデルを用いて表現する。すなわち、災害時の交通需要を、平常時需要関数の定数倍として解析を行うものとした。

(2) 各信頼度の定義

ODパフォーマンス関数は、OD間の各リンクが災害時に破壊される確率を与えれば、その形状も確率的に変化する。そこで、時間制約条件を設けた場合は、図-3aのようにその条件を満たしている範囲に需給均衡値が含まれる確率として、「時間信頼度」が定義される。すなわち、「時間信頼度」は基準となる時間(t_A)以内に目的地に到着できる確率($t \leq t_A$ となる確率)を表す指標である。また、同様に、物資輸送車両などの必要交通量を条件として設けた場合は、基準となる輸送量(X_A)以上の交通流が再現される確率($X \geq X_A$ となる確率)として、「物資輸送信頼度」なる指標を定義することも可能である(図-3b)。ただし図-3では、どちらの図も需給均衡点Bがそれぞれの基準を満たしていることを表している。

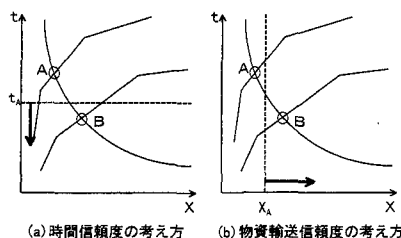


図-3 ODパフォーマンス関数による信頼度の定義

なお、それぞれの信頼度は、次式のように定式化することが可能である。

$$R = \sum_i p_i \cdot z_i \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \sum_i p_i = 1, \quad z_i = \begin{cases} 0 & (t_i > T_A \text{ or } x_i < X_A) \\ 1 & (t_i \leq T_A \text{ or } x_i \geq X_A) \end{cases}$$

R : 時間信頼度または物資輸送信頼度

p_i : 破壊ケース i の発生する確率

t_i, x_i : 破壊ケース i における所要時間および交通量

T_A, X_A : 信頼度の基準時間および基準交通量

4. 災害時における各対策とその評価

本研究の手法は、ODパフォーマンス関数および

交通需要関数の設定や形状などを変化させることにより、災害時の各種対策の効果を定量的に測ることができる。以下は、道路ネットワークを対象に考えられる主な事前対策および事後対策の種類と、その解析法である。

(1) 事前対策

(a) リンクの補強

補強対策には、強度補強（災害時に壊れやすいと思われるリンクの強度を上げる方法）と拡張補強（渋滞が起こると予想される箇所の車線を増設する方法）の2種類が考えられる。本研究の手法を用いれば、信頼度の向上効果を測定することにより、リンクの補強がネットワークに与える影響を定量的に知ることができる。具体的には、式(2)により現状のネットワークの信頼度解析を行った上で、補強後のネットワークの信頼度を同じく式(2)を用いて再計算し、現状と比較すればよい。なお、補強後の信頼度計算においては、強度補強の場合は補強リンクの破壊確率を低下（壊れにくく）させて、また、拡張補強の場合は拡張リンクにおけるリンクパフォーマンス関数の形状を変化（線形関数の場合は傾きを減少）させて、それぞれ対応する。

(b) リンクの増設

リンクの増設による効果の測定は、補強時解析と同様に、現状のネットワーク（リンクの増設を全く行っていない状態）との信頼度の比較によって行うことができる。具体的には、新たに建設するリンクに見込まれる所要時間と交通量を測定し、そのリンクパフォーマンス関数を作成した上で、適当な破壊確率を与えて、新しいネットワークの再計算を行えばよい。ただし、リンク増設後の信頼度計算においては、ODパフォーマンス関数の形状、破壊ケースの数、各ケースの発生確率などがすべて変化するた

め、リンクの数が増えるほど、解析が困難になっていくことに注意が必要である。

(2) 事後対策

(a) 交通規制

前述の通り、災害時の需要関数は成り行きに任せた場合、平常時と似たような形状（主にグラビティモデル）で描くことができるが、交通規制を行った場合はその形状も異なったものとなる。例えば、図-4のように(a)災害時の交通を成り行きに任せた場合、(b)緩い交通規制を行った場合、(c)厳しい交通規制を行った場合の3種類について、各時間信頼度を求めれば、その比較によって交通規制効果を知ることができる。（ただし図-4において X_1, X_2 は規制交通量であり $X_1 > X_2$ とする。）

(b) HOVレーンの追加

HOVレーンを設置した場合、一車両で輸送する人員が増加するため、全体の交通需要量はやや減少するものと思われる。また、リンクの交通容量等に影響が及ぶ場合は、リンクパフォーマンス関数の形状（傾き）も変化する。よって、交通需要関数の形状およびODパフォーマンス関数の形状をともに変化した上で、信頼度を再計算することにより、その効果を算出することができる。このように、本手法はリンク単位および全体の微妙な変化にも対応することができる。

5. ODパフォーマンス関数を用いたリンク診断法

以上の分析法では、信頼度算出のために各リンクの破壊確率等が与えられていなければならないが、本研究においてもこれらを所与と仮定して分析を行っている。ただし、ODパフォーマンス関数の手法を利用する場合、破壊確率の概念を用いなくても、道路網の（容量的に）弱い部分を発見し、整備・補強等を行うときの（ネットワーク内リンクの）優先的順位付けを行うことは可能である。

図-5は、OD間の経路が3本のネットワークの、ODパフォーマンス関数および交通需要関数である。ここでは、縦軸（所要時間）をあえて（一般化）費用的なものであると考える。このとき、リンク破壊における均衡点の移動から、利用者全体の被害額は、

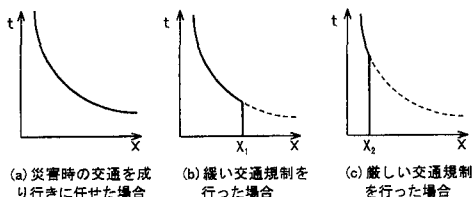


図-4 災害時交通需要関数のモデル化

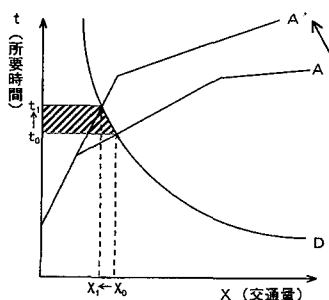


図-5 消費者余剰の減少

消費者余剰減少量、すなわち図の斜線部分の面積で表される。これにより、ある1本のリンクが故障した場合の社会的影響が分析可能となる。

よって、このリンク診断をネットワーク内の全リンクに対して行えば、それぞれのリンクの重要度が定量化できる。また、この値を用いてリンクのウェイト付けをすることにより、本手法は災害時対策のコスト分析に応用することも可能となるであろう。

6. 単純なネットワークを用いた計算例

本研究では、以上の理論のうち、信頼度解析の手法を用いて、近畿地方の6府県の都市を対象に規制効果の計算を行った。なお、ネットワークの形状としては、8種類のODペアを対象に、主要経路と2～3本の代替経路を用いた幹線道路網を使用した。各経路のリンクパフォーマンス関数にはBPR曲線を使用し、災害時の交通需要量は平常時の0.7倍とした。また、ルートの破壊確率は全て30%とし、時間信頼度基準は平常時の所要時間以内、規制交通量は平常時交通量の1/2(緩い規制の場合)、1/4(厳しい規制の場合)としている。ここでは、これらの仮定により、表-1に示すような計算結果を得ることができた。この表からは、大阪～神戸間のような交通需要の多いODペアほど、交通規制による大きな信頼度向上効果が期待できることがわかる。

また、上述のネットワークのうち、大阪～神戸間のみ補強・増設効果の計算を行った。ただし、強度補強を行ったリンクの破壊確率は10%とし、ここでの物資輸送信頼度基準は、平常時交通量の1/2以上としている。これにより、表-2に示すような計算結果を得ることができた。ここでは、リンクの補

表-1 時間信頼度および規制効果の算出例(近畿6府県)

対象とする ODペア	規制の程度		
	規制なし	緩い規制	厳しい規制
京都～大阪	63.7%	70.0%	84.7%
大阪～神戸	54.9%	78.4%	95.4%
大阪～奈良	63.7%	70.0%	91.0%
京都～大津	63.7%	70.0%	84.7%
大阪～和歌山	49.0%	70.0%	91.0%
京都～奈良	49.0%	70.0%	91.0%
京都～神戸	70.0%	70.0%	70.0%
奈良～和歌山	70.0%	70.0%	70.0%

表-2 補強・増設効果の算出例(大阪～神戸間)

補強・増設の有無	時間信頼度	物資輸送信頼度
現状(補強なし)	54.9%	93.5%
リンク①補強	70.6%	97.8%
リンク②補強	60.8%	96.0%
リンク③補強	60.8%	96.0%
リンク④補強	60.8%	96.0%
全リンクを補強	87.5%	99.7%
リンク⑤を増設	78.8%	98.1%

(注) リンク① … 主要経路(高速道路)
 リンク②～④ … 代替経路(国道等)
 リンク⑤ … 新規(架空)の高速道路

強・増設といった事前対策が、信頼度向上のうえで非常に有用であることがわかる。

7. 最後に

本研究の成果としては、ODパフォーマンス関数を用いて「信頼度」の定義を行ったこと、また、これにより、物資輸送における制限時間・必要車両数を考慮に入れた上で、幹線道路網の簡便な評価を可能にしたこと、さらに交通規制による事後対策効果の評価法に加えて、リンクの補強・増設等の事前対策の効果をあらかじめ算出するための手法を確立したことが挙げられる。なお、今回はリンクの重要度をあらかじめ診断する方法についても触れているが、これらの理論を災害時対策のコスト最適化問題へと発展させることが、今後の課題として考えられる。

〈参考文献〉寺田健児・青山吉隆：パフォーマンス関数を用いた都市間幹線道路網のリダンダンシーの評価法，平成9年度関西支部年次学術講演会，1997.5