

阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価¹

Post-Earthquake Reliability of Highway Network and Probability Importance in the 1995 Great Hanshin Earthquake

若 林 拓 史²

by Hiroshi WAKABAYASHI

1. はじめに

1995年1月17日午前5:46に発生した阪神淡路大震災(M7.2)では、死者不明6,348名(震災関連死を含む、96/1/16現在)、倒壊建物11万戸以上の被害をもたらした。戦後我が国最大の災害となった。今回の地震では、狭い地域に交通システムが集中していたために、そのほとんどすべてが利用不能となった。これが今回の地震による交通システム被害の最大の特徴である。また、交通システムの冗長性が事前に十分構成されていないと、大都市圏において同様な被害の発生する可能性が高いことも認識された。

本論文では、阪神淡路大震災における交通システムの問題点を議論した上で、道路網の連結信頼性を計算し、信頼性を向上する観点から重要な区間を確率重要度で評価する方法を示す。このため、本論文では次のような構成としている。まず、2では、阪神淡路大震災における交通システムの問題点を整理している。3では、最近の都市地震被害の特徴を分類し、阪神・淡路大震災の位置づけを明らかにしている。4では、道路網信頼性の定義と意義を述べ、5では、信頼性の高い道路網の構築と防災交通計画について考察する。信頼性の計算事例に入る前に、6において信頼性評価に関する従来の研究をレビューする。7では、ブール演算法と確率重要度の方法論を示し、簡単なネットワークにおける立体交差部の確率重要度を計算する。8では、震災時に兵庫県

復興道路網が存在していたとしてその信頼度と確率重要度を計算し、9では、得られた成果と今後の課題をまとめている。

2. 阪神淡路大震災における交通システムの問題点

今回の地震における交通システムの問題点は、(1)都市交通、(2)国土幹線交通、(3)地区内交通とに分けて論ずることができる。また、(4)立体交差部の問題点も指摘された。

(1) 都市交通ネットワーク

まず、都市交通ネットワークは、橋梁や盛り土の被害、斜面崩壊、地盤の液状化などにより寸断されたため、その交通がほとんど不可能となった。交通ネットワークが狭い地域に集中し、さらに鉄道システムも含めその多くが『震災の帯』地域に存在していたことから、交通システムはほぼ全滅状態となり、国道2号等の容量の小さい路線が生き残ったにとどまった。そのことが原因となって地震直後から大渋滞が発生し、消防活動、救出救急救命活動等が大きく阻害され地震被害が拡大することとなった。さらに、緊急物資輸送、復旧活動等にもきわめて大きな支障をもたらした。また、被害地域の交通システムが東西方向に発達し、南北方向には整備されていなかったことにより、代替経路はきわめて制約が大きかった。このため、冗長的に構成される信頼性の高い道路網の必要性が再認識された。

なおこの地震では、高架道路は、出入り制限のために被災地中心部まで緊急物資輸送の円滑な交通が

1 Key Words: 防災計画, 交通網計画, ネットワーク交通流

2 正会員 工博 名城大学都市情報学部 (〒509-02 可児市虹ヶ丘
4-3-3 TEL:0574-69-0131 FAX:0574-69-0155)

保証される長所が再認識された反面、落橋可能性等の短所があること、平面街路は、地震被害が比較的軽微という長所がある反面、アクセス制限がしにくいために大渋滞が発生する短所があることが再認識された。これらから、平面街路、高架道路のバランスのとれた整備が重要であることも教訓となった。

(2) 国土幹線交通ネットワーク

国土幹線交通については、都市交通ネットワークと同じく、主要な交通システムが兵庫県南部に集中していたために、重要な東西基幹交通が長期にわたって遮断され、わが国の物流人流に大きな影響を与えた。特に、中国自動車道および名神高速道路から阪神高速神戸線を経て第二神明道路に接続するルートは、西日本のロジスティクスの動脈であり、経済活動に与えた影響は大きいといえる。中国自動車道や名神高速道路、阪神高速神戸線が復旧中あるいは復興物資輸送ルートに指定され一般車両が通行止めとなっている期間、舞鶴自動車道や国道9号、27号が迂回する交通によって交通量が大幅に増加した。

このことから、議論は(1)と同様となるが、特に国民経済に重要な影響を有する国土幹線交通網は、地質学的に同じ地域を避けて冗長的に構成することの必要性を示唆している。従来、国土幹線交通軸は、採算性や経済性を重視して整備されてきたが、今後は、高い信頼性を維持するための路線整備を考える必要がある。この考え方は、従来交通路整備が進まなかった過疎地域の活性化にもつながるもので、人口の地方分散化にも寄与すると考えられる。また、道路交通と船舶交通等の連携等、異なるモードとの一体的運用も必要であろう。

(3) 地区内交通ネットワーク

建物倒壊によって地区内細街路の閉塞が生じた。これによって、地域住民の避難、避難所との往復、買い物等の日常交通が影響を受けたばかりではなく、水道・ガス・電力の復旧工事に多大の支障が出た。復旧工事では現場への車両の到達性が重要であるにもかかわらず、多数の閉塞によって復旧現場への経路がわからず、ほとんど迷路解き状態となった。このため、迅速な最短経路探索が必要とされた。家屋倒壊等に起因する地区内道路網寸断による影響とそ

の対策は、今後の重要な課題となった。GISとの連携を研究することも課題であると考えられる。

(4) 立体交差部分の問題

今回の地震では、路線が輻輳的に構成されていたので、立体交差部分の落橋によって2つの交通システムの共倒れのシステムダウンが多数発生した。これは新しい地震被害の形態である。鉄道システムも含めると、例えば、阪神高速神戸線深江地区の倒壊による国道43号の通行障害、名神高速道路の落橋による市道の通行障害、国道171号門戸高架橋の落橋による阪急電鉄今津線の不通、新幹線高架橋の落橋による同じく阪急電鉄今津線の不通、JR、阪急、阪神電鉄等連続立体化区間の高架橋の落橋や擁壁の崩壊等による横断方向道路の通行障害等、県道市道も含めるときわめて多数であった。こうした立体交差部分の重要度が改めて認識され、設計基準の見直しや、その冗長性をどのように確保するかが重要な問題点として指摘された。

3. 最近の都市地震の分類と阪神淡路大震災の位置づけ

阪神・淡路大震災以外の最近の都市地震として、米国の大都市を襲った1981シルマー地震、1989ロマ・プリエタ地震、1994ノースリッジ地震が挙げられる。これらの都市地震に関して、震後のODパターンの変化の大小、都市の経済活動の回復の早さ、交通ライフラインの損傷の程度に関して概略的に分類すると図-1のようになる。同じ直下型地震であ

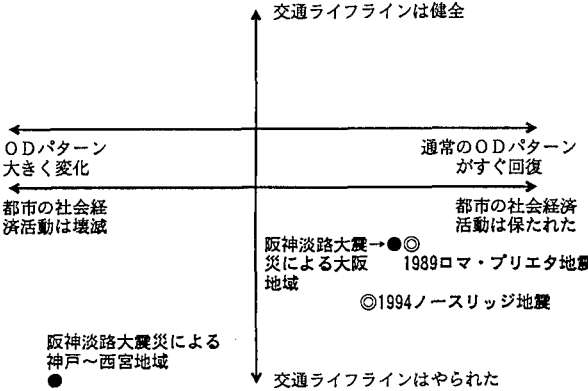


図-1 最近の都市地震の位置づけ

り、1年前の同じ日にロサンゼルスで発生したノースリッジ地震と阪神大震災とは震災の規模が違うことがわかる。最近の地震工学（耐震工学, Earthquake Engineering）が取り組んできた対象は、都市の耐震安全性の向上、および都市の耐震信頼性の向上¹⁾であったから、この対象とする地震被害は、第4象限のものであり、阪神大震災ではこの前提が大きく崩れたといえる。ただし、大阪地区の都市高速道路網の損傷は、ロサンゼルスとほぼ同様と思われる。

以上述べてきたように、今回の地震被害を通じて、ネットワークの一部が機能不全に陥っても、ネットワーク全体としては機能を果たす²⁾ことの重要性が再認識された。また、単なる連結信頼性ではなく、円滑な交通サービスで地域間を連結することの重要性も認識された。さらに、信頼性の高い通路の確保が、救急車や消防車等の緊急自動車の通行に便宜を与え、救出救急救命活動や消防活動によって災害の拡大を防ぐことに大いに貢献する³⁾ことも再認識されたといえる。

4. 道路網信頼性の定義と意義

道路網の信頼性は大きく分けて2つの方法で定義できる³⁾。1つは連結信頼性であり、もう1つは時間信頼性である。連結信頼性とは、所与の期間中、道路網の任意のノード間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率的指標と定義される。この信頼性は代替性の指標であり、ある経路が通行不能となっても、代替経路が確保されて一定のサービス水準以上で目的地へのトリップ可能な程度を表している。時間信頼性とは、所与の時間で目的地へ到達できる確率あるいは、ある確率で到達可能な走行所要時間の上限値（最大許容所要時間）である。この信頼性は、所要時間の安定性を示す指標であり、道路利用者に対し所要時間の正確性と迅速性の情報を提供する。今後、『ある経路の円滑な通行が不可能ならば別の経路が存在する（連結信頼性）』道路網や『〇〇まで確実に〇分で行ける（時間信頼性）』道路体系の整備が望まれる。交通システムの防災計画の第一段階では前者が重要であり、本論文では連結信頼性を対象としている。

5. 信頼性の高い道路システムの構築と 防災交通計画

信頼性の高い道路システム構築のためには以下の2点が重要である。すなわち、

- ① ネットワークに余裕のある道路システム、
- ② 横断面構成に余裕のある道路、

によって達成される。①は、代替路の存在およびその交通容量の余裕により連結性の面から信頼性が確保されることを表している。②は、ネットワークを構成する各道路区間において、余裕のある横断面構成によって当該道路区間における信頼性の向上に寄与するものである。1989年ロマ・プリアタ地震で処理能力の低下したサンフランシスコ湾岸道路網を対象にこの効果が定量化されている⁴⁾。また、平成6年の道路審議会答申においては、広い路肩を確保して車線数を確保することが述べられている⁵⁾。

次に防災交通計画として、耐災性の高い道路システム構築には以下の4点が重要であると考えられる。

- (i) 信頼性の高い道路システム
- (ii) 道路網の階層構成、
- (iii) 柔軟性のある危機管理計画
- (iv) 平常時のシステムへの built-in

(i) は既に述べたとおりである。(ii) は、トリップを大きく分けて、a) 国土幹線交通、b) 都市交通、c) 地区内交通とすると、これらを可能な限り別々に流すことにより、それぞれの独立性を向上させ、結果的に各システムの信頼性を向上させて防災力を高めようとするものである。道路網の階層構成は、平常時においても重要な考え方である。

(iii) の災害時の危機管理は、今回の震災における盲点であった。地震の発生直後から復旧過程に至るまで、規制・運用・情報提供を含む総合的な交通システム危機管理計画の構築が重要である。この危機管理計画は、震度別、発生時刻別、地域別、対策シナリオ別に策定されることが必要で、さらに時系列的（地震直後、その日の夕方まで、翌日、2～3日後、...）に構築される必要がある。例えば、震度が一定以上であれば、当該自治体のマンパワーは救急・救出活動で手一杯となることを想定して、周辺自治体での通行規制を含む後方支援体制が必要となろう。重要なことは、対策の相乗効果を高めるた

めに一連の危機管理対策はパッケージとして提供すること、規制をしたら迅速に利用者に知らせることである。また、いくら詳細に危機管理計画を策定しても限界はあるから、臨機応変な対応を可能にするため、対策の主旨（マニュアルに載っていないでも対応できる）を明記すべきである。危機管理計画の策定においては、行政の緊急対応の仕方を市民に知らせるべきであり、市民側で対応すべきことも知らせる必要がある。

最後に (iv) これらの防災対策は、平常時のシステムに built-in しておき、平常時と災害時との連続性を保っておくことである。交通に限らず、非常時だけのためのシステムはあまり役に立たず、平常時から運用して慣れていたシステムが、今回の震災で役に立ったことが多かった。これは、今回の震災で多くの関係者が共通に認識した重要な教訓であろう。道路システムにおいても、平常時の道路整備や交通の管理運用策に built-in しておくことが重要である。前者は、事故通行止めや事故・工事車線規制、雪通行止め等、日常的あるいは季節的に発生する可能性の高い交通障害に対して信頼性を高めておくことが災害時にも役に立つ。また、後者は、平常時の交通運用をきめ細かく柔軟にしておくことで、平常時から使い込んでおくシステムが災害時にも役に立ち得ることをいっている。なお、本章では道路システムを中心に論じたが、これ以外に災害時には、他の交通モードとの連携が重要であることはいうまでもない。

6. 信頼性評価に関する従来研究

道路網における初期の信頼性解析は、災害時を対象としたものが多い。これは、土木工学分野での信頼性研究が、当初は防災の観点から行なわれた経緯に依っている。すなわち、パイプライン、電力網、ガス・水道網等のライフラインネットワークに始まり、道路網もその一環として研究されたことに起因している。道路網信頼性解析に関する研究のレビューは、岡田・若林・多々納⁶⁾、若林⁷⁾・⁸⁾で行われている。ここでは、災害時の道路網信頼性評価とそれに関連する研究について簡単にレビューする。

Fenves・Law⁹⁾は、ネットワークの構造物の損害と

サービス能力を地震強度の関数として予測している。そして、ネットワークのフローの期待値の最大値、最小値を求めている。この研究では単一ODを対象に議論を展開しており、多ODへの適用性を課題としている。川上¹⁰⁾は、耐震性の立場から伊豆半島を対象に道路網の連結性をモンテカルロ法と可到達性行列を累乗する方法によって評価している。ここでは、交通容量と断面交通量を用いて、地震前後で変化する道路区間の機能分類を混雑度と犠牲度という2つの指標で評価している。この研究は、グラフ理論に基づく連結性評価に重点があり、その過程では、後に述べる交通の諸特性、特に交通量や利用者の選択経路を明示的に考慮することは必ずしも十分ではなかったといえる。高山¹¹⁾は、災害時における道路網の連結性を対象として、トポロジー変換によりノードを集約し、ネットワークをいくつかの直列のサブネットワークに変換してノード間信頼度を近似計算する方法を提案し、奥能登道路網に適用している。災害の対象は豪雨通行止めである。木俣・石橋¹²⁾は、災害時の緊急路網確保の観点から、緊急車両の基地と需要地点との間の連結信頼度を有向グラフにおけるSAT信頼性（Source to All Terminal Reliability）で解析している。ツリー列挙における『莫大な数の問題』を解決するため、Biconnected（2-連結）という概念でネットワーク分割して計算量を削減する方法を提案している。朝倉・柏谷・為広¹³⁾は、Du・Nicholson¹⁴⁾の方法を援用し、豪雨等による災害や事前規制が行われた場合の信頼性を四国道路網を対象に計算している。この場合、考えられるネットワークの故障状態は 2^N （ N はリンク数）あるが、この故障状態のベクトルのうち確率的に高いものから抽出してBurrell配分を行って、ネットワークの信頼度を求める点に特徴がある。全事象ではなく確率的に生じしやすい事象を対象とする方法は、事象を発生頻度で分類し、発生しやすい事象はすべて対象とし、残りはモンテカルロ法で計算する方法²⁾等他にもいくつか存在し、膨大な事象空間数に対処するための有用な方法である。この方法では交通量配分が、リンク所要時間の平均値と分散を与件としたBurrell配分¹⁵⁾であり、フローの迂回に伴ってネットワークのパフォーマンスが変化する、いわゆる混雑を有するネットワークへの適用を課題としている。

最近では、災害時のネットワーク途絶を如何に防止するかという研究も盛んになっている。まず、この研究分野では、枝村・森津らの先駆的研究が挙げられる。枝村・森津ら¹⁶⁾は、ネットワークにおける対災害信頼性の水準を離散的に表すリンクレベルを設定、予算制約下で総所要時間最小化、到達可能な期待トリップ数最大化になるようなリンクレベルを探索している。梶谷・斉藤¹⁷⁾は、ネットワークにおける各ゾーンの耐震性をもとに、ゾーン間の非類似度行列を作成、クラスター分析によって各ゾーンを空間的に再配置し、各ゾーンの移動困難性および孤立地域の発生状況、交通混雑に遭遇する頻度の高いOD交通等を視覚化している。嶋田・加藤・本田¹⁸⁾は、崩土、落石、冠水等の風水害がネットワーク機能に及ぼす影響を福井都市圏道路網を対象に、時間距離を用いた交流圏域という指標で評価している。南・高野・佐藤¹⁹⁾は、経路数や所要時間を要因とした代替ルートの評価指標として、その指標が満たすべき規範的条件から経路代替性指数を誘導し、その実用的なアルゴリズムを提案した。対象道路網は、積雪・凍結通行止めを考慮した北海道後志地域道路網と空港アクセスにおける代替性評価として山口宇部空港を含む山口県内道路網である。

若林・飯田らは、リンク信頼度からノード間信頼度を効率的に計算する方法として交点法およびプール演算法²⁰⁾を開発した。この方法では、当初リンク信頼度は与件であったが、迂回交通によるネットワークパフォーマンスの変化を考慮するために、リンクの平均交通量と交通容量および交通量の変動を仮定して簡便にリンク信頼度を推定する方法を開発した²¹⁾。このノード間信頼度解析法とリンク信頼度推定法を組み合わせ、ノード間信頼度推定法を内生化した信頼性解析法を提案し、1989 ロマ・ブリエタ地震でベイブリッジが途絶したサンフランシスコ湾岸地域道路ネットワークに適用している¹⁾。

本論文で採用している信頼性解析法は基本的にこの手法の枠組みと同じであるが、異なっている点はノード間信頼性解析法が交点法ではなく、プール演算法である点である。また交通量配分を相当簡略化している。プール演算法には、後述するように、計算の全過程でリンクの機能・停止を表す確率変数の情報を保存できる長所があり、偏微分等の記号処理

を行って確率重要度等を計算できる利点がある。

7. プール演算法と確率重要度

4で述べたように、本論文では、信頼性を所与の期間中、道路網の任意のノード間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率的指標と定義する。同様に、リンク信頼度をそのリンク上においてあるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率と定義する。道路ネットワークの特定のノード間のミニマルパスを P_s とすると信頼度の厳密値 R は、

$$R(r) = E[1 - \prod_{s=1}^p (1 - \prod_{a \in P_s} X_a)], \quad (1)$$

で与えられる²²⁾。ここに P_s は s 番目のミニマルパスセット、 p はパス総数を表している。

X_a は、

$$X_a = \begin{cases} 1, & \text{リンク } a \text{ での走行移動がある} \\ & \text{サービスレベル以上の場合,} \\ 0, & \text{そうでない場合,} \end{cases} \quad (2)$$

で与えられる二値確率変数である。リンク信頼度 r_a は、

$$r_a = E[X_a], \quad (3)$$

で与えられる。式(1)の計算は、すべてのミニマルパスが必要であり、また、同一リンクの確率の重複計算を避けるため、論理積に関するプール演算($X_a \cdot X_a = X_a$)を必要とする。そのため、ネットワークが大規模になると膨大な計算が必要となる。ここで、ミニマルパスに基づく式を具体的に示すと以下のようなになる。ミニマルパスを、

$$\alpha_s = \prod_{a \in P_s} X_a, \quad (4)$$

で表すと、式(1)は、

$$R = E[1 - (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) \cdots (1 - \alpha_p)], \quad (5)$$

となる。式(5)をさらに展開すると項の数は $2^p - 1$ 個となる。そして、これらの項をプール代数で整理しなければならない。したがって、ミニマルパス数が増加すると項の数が指数的に増加して、膨大な計算量となる。

ここで、仮に選択パス数を1個減らせば、この部

分の計算量は理論的にはほぼ 1/2 ですむ。以下同様に、パスの数の減少にしたがって、計算量を 1/2 ずつ指数的に減少させることができる。したがって、信頼度 R の値への寄与が大きい一部のミニマルパスで十分よい近似が得られるならば、非常に効率よく信頼度を計算できることになる。部分的なパス（選択パス数を p' とする）を対象とした場合、 R は信頼度の下限值を与えることがわかっている²⁰⁾。 p' が p に一致すれば R は信頼度の厳密値を与える。

また本手法では、リンク信頼度 r_a を交通量の変化に応じて内生的に得るため、交通量の確率的変動を仮定し、次のような考え方で求めている。リンク a での需要フロー v_a の変動に対し、容量に対する需要の比率すなわち混雑度 $g = v_a / C_a$ (C_a : 交通容量) を求め、 g の確率密度関数 $f(g)$ を得ると、リンク信頼度 r_a は、

$$r_a = \int_0^1 f(g) dg \quad (6)$$

として得られる。この方法は、簡便にリンク信頼度を推定する目的で開発した方法で、交通需要の平均値と交通容量等の入手容易な交通指標から計算できるため、1 回の交通量配分のみでリンク信頼度が推定できる。したがって、交通量の推定手法に組み込んでネットワークの信頼性解析を簡便に行えるという大きな特徴を有しており、ネットワークの交通状態のケース間比較等に効果を発揮する。なお、リンク信頼度のリンク間での従属性は考慮していないが、道路網計画や管理運用策の代替案比較、ネットワークパフォーマンス比較等の相対的な比較指標として用いるなら問題は少なく、実際のニーズにも応えられるとの立場に本研究では立っている²²⁾。

本ブール演算法の具体的な計算方法は、式 (1) を記号処理的なアルゴリズムで多項展開し、ブール演算処理を行い、最終段階で数値を代入し信頼度を求めている。したがって、計算過程で多項式の項が大量に発生するが、この項それぞれの構成リンクを記憶する変数に、計算機の 1 ビットを対応させて記憶容量の節約を計っている。

次に、リンク a の確率重要度 IP_a は、

$$IP_a = \partial R(r) / \partial r_a \quad (7)$$

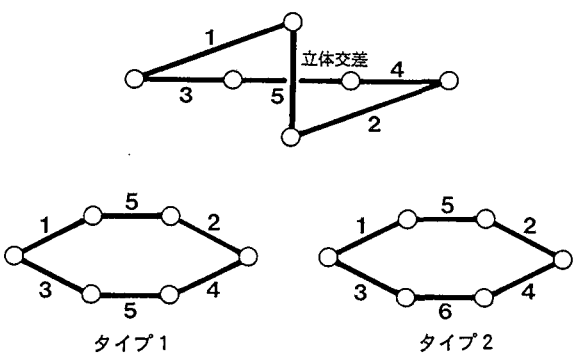


図-2 立体交差とその等価的表現

表-1 立体交差点確率重要度（ケース1）

信 頼 度			確率重要度	
			タイプ1	タイプ2
リンク信頼度	link 1	0.9000	0.1710	0.1710
	link 2	0.9000	0.1710	0.1710
	link 3	0.9000	0.1710	0.1710
	link 4	0.9000	0.1710	0.1710
	link 5	1.0000	0.9639	0.1539
	link 6	1.000 (Type2)	—	0.1539
ノード間信頼度			0.9639	0.9639

表-2 立体交差点確率重要度（ケース2）

信 頼 度			確率重要度	
			タイプ1	タイプ2
リンク信頼度	link 1	0.9000	0.1539	0.2195
	link 2	0.9000	0.1539	0.2195
	link 3	0.9000	0.1539	0.2195
	link 4	0.9000	0.1539	0.2195
	link 5	0.9000	0.9639	0.2195
	link 6	0.900 (Type2)	—	0.2195
ノード間信頼度			0.8675	0.9266

で与えられる²³⁾。確率重要度には $0 \leq IP_a \leq 1$ という性質があり、そのリンクの信頼度の維持（もしくは向上/低下）がノード間信頼度の維持（向上/低下）に与える影響度を知ることができる。確率重要度の高いリンクでは信頼度の維持の重要性がより高く、またそのリンク信頼度の低下がノード間信頼度の低下に大きく寄与するために、冗長性を高める必要性も高いといえる。ブール演算法では計算過程で確率変数の情報が保存されるため、このような解析的な分析が可能である。

図-2 上のような簡単なネットワークで立体交差を表現する。これをリンクの共有（左図）で等価的に表現し、通常の並列システム（右図）とを比較する。表-1に示すようなリンク信頼度を与えると、

最近では、災害時のネットワーク途絶を如何に防止するかという研究も盛んになっている。まず、この研究分野では、枝村・森津らの先駆的研究が挙げられる。枝村・森津ら¹⁶⁾は、ネットワークにおける対災害信頼性の水準を離散的に表すリンクレベルを設定、予算制約下で総所要時間最小化、到達可能な期待トリップ数最大化になるようなリンクレベルを探索している。梶谷・斉藤¹⁷⁾は、ネットワークにおける各ゾーンの耐震性をもとに、ゾーン間の非類似度行列を作成、クラスター分析によって各ゾーンを空間的に再配置し、各ゾーンの移動困難性および孤立地域の発生状況、交通混雑に遭遇する頻度の高いOD交通等を視覚化している。嶋田・加藤・本田¹⁸⁾は、崩土、落石、冠水等の風水害がネットワーク機能に及ぼす影響を福井都市圏道路網を対象に、時間距離を用いた交流圏域という指標で評価している。南・高野・佐藤¹⁹⁾は、経路数や所要時間を要因とした代替ルートの評価指標として、その指標が満たすべき規範的条件から経路代替性指数を誘導し、その実用的なアルゴリズムを提案した。対象道路網は、積雪・凍結通行止めを考慮した北海道後志地域道路網と空港アクセスにおける代替性評価として山口宇部空港を含む山口県内道路網である。

若林・飯田らは、リンク信頼度からノード間信頼度を効率的に計算する方法として交点法およびブール演算法²⁰⁾を開発した。この方法では、当初リンク信頼度は与件であったが、迂回交通によるネットワークパフォーマンスの変化を考慮するために、リンクの平均交通量と交通容量および交通量の変動を仮定して簡便にリンク信頼度を推定する方法を開発した²¹⁾。このノード間信頼度解析法とリンク信頼度推定法を組み合わせ、ノード間信頼度推定法を内生化した信頼性解析法を提案し、1989 ロマ・ブリエタ地震でベイブリッジが途絶したサンフランシスコ湾岸地域道路ネットワークに適用している¹⁾。

本論文で採用している信頼性解析法は基本的にこの手法の枠組みと同じであるが、異なっている点はノード間信頼性解析法が交点法ではなく、ブール演算法である点である。また交通量配分を相当簡略化している。ブール演算法には、後述するように、計算の全過程でリンクの機能・停止を表す確率変数の情報を保存できる長所があり、偏微分等の記号処理

を行って確率重要度等を計算できる利点がある。

7. ブール演算法と確率重要度

4で述べたように、本論文では、信頼性を所与の期間中、道路網の任意のノード間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率的指標と定義する。同様に、リンク信頼度をそのリンク上においてあるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率と定義する。道路ネットワークの特定のノード間のミニマルパスを P_s とすると信頼度の厳密値 R は、

$$R(r) = E[1 - \prod_{s=1}^p (1 - \prod_{a \in P_s} X_a)], \quad (1)$$

で与えられる²²⁾。ここに P_s は s 番目のミニマルパスセット、 p はパス総数を表している。

X_a は、

$$X_a = \begin{cases} 1, & \text{リンク } a \text{ での走行移動がある} \\ & \text{サービスレベル以上の場合,} \\ 0, & \text{そうでない場合,} \end{cases} \quad (2)$$

で与えられる二値確率変数である。リンク信頼度 r_a は、

$$r_a = E[X_a], \quad (3)$$

で与えられる。式(1)の計算は、すべてのミニマルパスが必要であり、また、同一リンクの確率の重複計算を避けるため、論理積に関するブール演算($X_a \cdot X_a = X_a$)を必要とする。そのため、ネットワークが大規模になると膨大な計算が必要となる。ここで、ミニマルパスに基づく式を具体的に示すと以下のようなになる。ミニマルパスを、

$$\alpha_s = \prod_{a \in P_s} X_a, \quad (4)$$

で表すと、式(1)は、

$$R = E[1 - (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) \cdots (1 - \alpha_p)], \quad (5)$$

となる。式(5)をさらに展開すると項の数は $2^p - 1$ 個となる。そして、これらの項をブール代数で整理しなければならない。したがって、ミニマルパス数が増加すると項の数が指数的に増加して、膨大な計算量となる。

ここで、仮に選択パス数を1個減らせば、この部

表-3 兵庫県復興ネットワークの信頼度と確率重要度の高いリンク（連結信頼度：大阪～三宮，時間係数0.10）

想定ケース	追加経路	国道2号+国道43号	+阪高神戸線	+阪高湾岸線	+名神・阪高	+中国・北神戸・TN	+中国・東神戸・43
BASE	全リンク健全	0.4849	0.4849	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	確率重要度	2号(0.6046)	2号(0.6046)	湾岸(0.5151)	湾岸(0.5151)	湾岸(0.0793)	湾岸(0.0097)
CASE1	神戸線のみ不通 代替：2号，湾岸 (43号余力なし)	0.0095	0.0095	0.2800	0.2800	0.5735	0.5735
	確率重要度	43号(0.0392)	43号(0.0392)	湾岸(0.4776)	湾岸(0.4776)	中国道(0.5868)	中国道(0.5868)
CASE2	神戸線・43号不通 代替：2号，湾岸	0.000006	0.000006	0.000006	0.000006	0.00005	0.00005
	確率重要度	2号(0.0001)	2号(0.0001)	2号(0.0001)	2号(0.0001)	中国道(0.0062)	中国道(0.0062)
CASE3	神戸線・43号1/2不通 代替：2号，湾岸	0.0021	0.0021	0.0063	0.0063	0.0237	0.0237
	確率重要度	43号(0.0097)	43号(0.0097)	湾岸(0.0378)	湾岸(0.0378)	中国道(0.2207)	中国道(0.2210)
CASE4	湾岸線のみ不通 代替：神戸線	0.4849	0.4849	0.4849	0.4849	0.5522	0.5522
	確率重要度	2号(0.6046)	2号(0.6046)	2号(0.6046)	2号(0.6046)	2号(0.5256)	2号(0.5256)
CASE5	中国道のみ不通 代替：湾岸線	0.000006	0.000006	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
	確率重要度	2号(0.0001)	2号(0.0001)	湾岸(0.0476)	湾岸(0.0476)	湾岸(0.0476)	湾岸(0.0476)
CASE6	神戸・湾岸・43・中国全滅 代替：2号	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	確率重要度	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)

(4) 6でも述べたようにこの種の計算では膨大な事象数を対象とする必要がある。この問題を回避するため、本研究では事故解析の手法すなわち、ネットワークの損傷ケースとしていくつかのルートが寸断された場合を設定した（シナリオ設定法）。

(5) リンク信頼度 r_a の推定に用いる交通量変動値は大阪地域で観測された値²⁸⁾を用いた。なお、この計算過程で、交通容量（時間単位）とリンク交通量（1日単位）の単位が異なるため、時間係数を用いてリンク交通量を時間交通量に変換している。それぞれの数値は、交通容量が2000v/h/車線（高速道路），1000v/h/車線（平面街路），時間係数は0.10を用いてラッシュ時の想定としている。

震災時におけるネットワーク評価法には、震災直後のOD交通量の推定、その後の変化等にはじまり未解明の問題が多い。このため、以上の諸前提を設定した。その結果、地震前後の交通需要は変化せず、観測されたリンクフロー値を用いて、現実が発生した損傷ケースの他に仮想的な種々のネットワーク損傷ケースを比較計算していることになる。すなわち、通常交通需要が通常交通変動のもとで損傷したネットワークに殺到した場合を想定し、ネットワーク増強による信頼度向上効果を評価している。

得られた結果を表-3に示す。この結果はピーク時交通に対応している。平常時の信頼度 (BASE) お

よび、神戸線・湾岸線・43号（の1/2容量）・中国道が通行不能となり2号が代替経路となって迂回交通を引き受けた場合 (CASE 6：今回の地震に相当する），およびその中間的な被害想定について信頼度を計算している。この表では、横方向に追加していく経路を表現している。例えば、BASE ケースでは、国道2号，43号のみでは連結信頼度は約0.49であり、これに阪神高速神戸線が追加されても信頼度に大きな変化がない。これは、2号，43号，神戸線では渋滞が発生し、平常時でも連結信頼度あまり高くないことがわかる。さらに阪神高速湾岸線を経路として追加すると、同線に容量的な余裕があるために信頼度が1.0となり、信頼度が格段に向上することがわかる。表の右2列は、これらの経路に中国道から六甲山北側ルートを使用した経路を加えた場合である。また、確率重要度はきわめて多数（ケース毎にリンクの数だけ）算出されるため、最も高く算出された経路のみを示している。また、CASE1では、六甲山北部ルートによって信頼性は向上するが、そのルートが中国自動車道の信頼度に大きく依存するため中国道の確率重要度が大きく算出され、何らかの対策が必要等のことが明らかとなった。また、CASE2以下では、迂回交通量が大きいために、六甲山北部ルートによっても信頼性は大きくは向上しないことがわかる。しかしこの場合も、

中国道の確率重要度は大きく算出されるので、このルートの信頼度を維持することが重要である。

このように、信頼性指標と確率重要度を用いることでネットワークのサービスの質的水準が評価できることがわかる。確率重要度の高いリンクでは、そのリンク信頼度の低下がノード間信頼度の低下に大きく寄与するために、信頼度の維持の重要性がより高いといえる。すなわち、この指標を耐震強化の基準や費用制約のもとでの優先度の決定に用いることができる。また、当該区間の冗長性を高める必要性もあるといえる。

9. まとめ

本論文では、阪神淡路大震災における交通システムの問題点を議論した上で、道路網の連結信頼性を計算し、信頼性を向上する観点から重要な区間を確率重要度で評価する方法を示した。本論文での成果は以下のようにまとめられる。

(1) 阪神淡路大震災における交通システムの被害特色は、都市交通と国土幹線交通の両交通システムが狭い地域に集中していたため、地域レベルおよび全国レベルで大きな影響がもたらされたこと、また、立体交差部分の落橋が2つの交通システムの同時共倒れのシステムダウンを多数引き起こした点である。これらを、都市交通ネットワーク、国土幹線交通ネットワーク、地区内交通ネットワークに分類して議論した。

(2) 日米における最近の都市地震を、経済活動への影響度とネットワークの損傷の程度の2軸で分類し、阪神・淡路大震災の位置づけを明らかにした。

さらに、道路網における信頼性の重要性を述べ、信頼性の高い道路網構築のための要件を整理した。

(3) 信頼性解析に関する従来の研究をレビューした後、交通フローの変化を内生化して道路網の信頼性解析を行う方法を示した。ノード間信頼度とリンクの相対的重要度を示す確率重要度解析を算定する方法を示した。この方法は、リンクの平均交通量と交通容量からリンク信頼度を簡便に推定でき、1回の交通量配分のみでノード間信頼度が推定できる構造となっている。このため、交通量の推定手法に組み込んでネットワークの信頼性解析を簡便に行える

という大きな特徴を有している。ネットワークの交通状態のケース間比較、交通管理運用策の代替案比較等に有用である。

(4) 簡単なネットワークの立体交差部の重要度を定量化し、さらに兵庫県の実況および復興道路網に対し、被害想定シナリオを多数設定し、信頼性と確率重要度の計算を行った。得られた結果の概要は、

① 六甲山北部ルートによって神戸市への連結信頼性は向上するが、② ①のルートが中国自動車道の信頼度に大きく依存するため中国道の重要度が大きく算出され、何らかの対策が必要等が明らかとなったことである。

提案した方法を現実の道路網に適用した結果、方法論の妥当性、適用可能性が認められたが、残された問題も存在する。以下に今後の課題を整理する。

(1) 災害時のOD交通量推定の問題がある。図-1での第4象限に位置づけられる地震災害では、大きなOD交通量変動は期待できないが、第2、第3象限で示される大災害では、直後のOD交通需要に大きな変化が予想され、これの推定は容易なことではない。道路網が理想的条件を備えたとしても、地震直後には渋滞が発生することを想定するべきである。OD交通推定の問題は、TDMと同時に行為されるべきであり、方法論の検討が必要である。

(2) 従属故障についての検討が必要である。本論文で示した方法論は、システム工学における信頼性グラフ解析法に源があり、従属故障の考慮はシステム工学の分野でも問題となっている。道路網の場合は、従属性の原因は主に交通量に依存するため、交通量変動分析などによる交通流の従属性の分析が必要である。

最後に、今回の地震での教訓は、道路網と道路構造は平常時からもっと余裕のある計画を実現する必要があることである。わが国の道路網は、その容量ぎりぎりの状態で運用されているといつてよく、またリーズナブルな代替経路はあまりない。また、大量輸送機関も混雑した状態で運行がなされており、道路交通を代替する余力はあまりない。このようなわが国の状況においては、予めよく計画された道路網運用策を構築しておかないと、災害時には再度、交通の大混乱が予想される。効果的な防災交通計画のため、災害時交通計画の体系的な研究が望まれる。

参考文献：

- 1) 若林拓史・亀田弘行 (1992)：ロマ・ブリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域の交通サービスへの被害分析と交通運用策の評価，土木計画学研究・論文集 10, 103-110.
- 2) 飯田恭敬・若林拓史 (1988)：ODパターンと道路網パターンの相違による道路網信頼性のマクロ的考察，交通工学，Vol.23, No.3, 9-19.
- 3) 若林拓史・飯田恭敬 (1991)：交通管理運用策による道路システムの信頼性向上効果，土木計画学研究・講演集 14(2), 51-54.
- 4) 若林拓史・亀田弘行 (1995)：ロマ・ブリエタ地震後のサンフランシスコ湾岸地域の道路網運用の効果分析と災害時の道路網計画，都市計画論文集，No.30, 91-96.
- 5) 建設省道路局企画課 (1995)：道路審議会答申『21世紀に向けた新たな道路構造のあり方』-新時代の“道の姿”をもとめて-について，道路交通経済，1995-1, No.70, 21-22.
- 6) 岡田憲夫・若林拓史・多々納裕一 (1993)：レビュー研究：社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析的アプローチ-水利用と道路利用問題を対象として，土木学会論文集，No.464/IV -19, 33-42.
- 7) 若林拓史 (1989)：道路網の信頼性解析に関する基礎的研究，京都大学学位論文，第1章.
- 8) 若林拓史 (1995)：交通管理運用面からみた広域道路網信頼性の実用的評価法，文部省科学研究費一般研究 (C)No.04650490，成果報告書，第2章.
- 9) Fenves, S.J. and Law, K.H. (1979). Expected Flow in a Transportation Network. Proceedings of the 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 673-682.
- 10) 川上英二 (1982)：道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法，土木学会論文報告集，No.327, 1-12.
- 11) 高山純一 (1989)：異常気象時における道路網の連結性能評価法，土木計画学研究・講演集 12, 559-565.
- 12) 木俣 昇・石橋 聡 (1988)：地震時緊急路網のシステム信頼性評価に関する基礎的研究，土木計画学研究・論文集 6, 145-152.
- 13) 朝倉康夫・柏谷増男・為広哲也 (1995)：災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の信頼性評価モデル，土木計画学研究・論文集 12, 475-484.
- 14) Du, Z.P. and Nicholson, A.J. (1993). Degradable Transportation

- Systems Performance, Sensitivity and Reliability Analysis. Research Report 93-8, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- 15) 土木学会編 (1987)：交通ネットワークの分析と計画，第18回土木計画学講習会テキスト，46-47.
- 16) 枝村俊郎・森津秀夫・土井元治・中川勝一郎 (1980)：交通ネットワークにおける対災害信頼性の最適配分，第3回土木計画学研究発表会講演集，391-403.
- 17) 榎谷有三・斎藤和夫 (1991)：震災時における道路交通システムの構造の視覚化，交通工学，Vol.26, No.6, 13-20.
- 18) 嶋田喜昭・加藤哲男・本田義明 (1995)：自然災害を考慮した道路網評価に関する基礎的考察-福岡都市圏におけるケーススタディー，都市計画論文集，No.30, 97-102.
- 19) 南 正昭・高野伸栄・佐藤馨一 (1996)：道路網における代替ルートの整備水準の一評価法に関する研究，土木学会論文集，No.530/IV -30, 67-77.
- 20) 飯田恭敬・若林拓史・福島 博 (1989)：道路網信頼性の近似解析方法の比較研究，土木学会論文集，No.407/IV -11, 107-116.
- 21) 若林拓史・飯田恭敬・井上陽一 (1993)：シミュレーションによる道路網の交通量変動分析とリンク信頼度推定法，土木学会論文集，No.458/IV -18, 35-44.
- 22) 飯田恭敬・若林拓史 (1988)：プール代数を用いた道路網ノード間信頼度の上・下限値の効率的算出法，土木学会論文集，No.395/IV -9, 75-84.
- 23) 溝上章志・若林拓史・飯田恭敬・若林拓史・飯田恭敬・井上陽一共著“シミュレーションによる道路網の交通量変動分析とリンク信頼度推定法”への討議・回答，土木学会論文集，No.494/IV -24, pp.147-151, 1994.
- 24) Transportation research Board (1985). Highway Capacity Manual 1985. Special report 209.
- 25) 土木学会 (1995)：阪神大震災震害調査緊急報告会資料，53-61.
- 26) 阪神高速道路起終点交通量調査報告書，阪神道路公団.
- 27) 高速道路統計月報，高速道路と自動車，Vol.38, No.1, 92-95, 1995.
- 28) 寺田幸紀・西村 昂・日野泰雄 (1991)：感知器データによる自動車交通量の変動特性の分析，平成3年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集，pp. IV -10.

阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価

若林拓史

阪神淡路大震災における地震被害を通じて，① 代替経路および交通システムの分散化による交通ネットワークの信頼性の向上，② 立体交差部等の重要区間の耐震性のさらなる強化，等の必要性が再認識された。

本論文では，これらの問題を論じた上，道路網信頼性解析と確率重要度解析に基づいて，立体交差部の重要度を定量化した。さらに兵庫県の現況および復興道路網に対し，被害想定シナリオを設定し，信頼性と確率重要度の計算を行った。得られた結果の概要は，(1) 六甲山北部ルートによって神戸市への連結信頼性は向上するが，(2) (1)のルートが中国自動車道の信頼度に大きく依存するため中国道の重要度が大きく算出され，何らかの対策が必要等が明らかとなった。

Post-Earthquake Reliability of Highway Network and Probability Importance in the 1995 Great Hanshin Earthquake

by Hiroshi WAKABAYASHI

The Great Hanshin Earthquake hit Hanshin Area on January 17, 1995. Almost all transportation systems were damaged, including grade separation intersections. In this paper, firstly, the effect and subject for the future are presented. Next, the reliability analysis for highway network system and the method for estimating node-to-node reliability and probability importance of grade separation intersection is presented. Finally, reliability analysis and probability importance analysis are carried out for the Hyogo revival highway network.