

地震災害時の道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価： 阪神間道路網を例として¹

Post-Earthquake Reliability of Highway Network and Probability Importance

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6,055名、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。簡単なネットワークを対象に、今回の地震で問題となった立体交差部の確率重要度が他の区間の確率重要度と大きく異なることを示し、さらに、兵庫県の復興ネットワークでの信頼性および確率重要度を試算する。

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、都市交通と国土幹線交通とに分けて論ずることができる。

(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になった。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。このような経験を通じて、都市交通ネットワークを平時からどのように構成するかが問題となっている。すなわち、

1) 大地震が発生しても交通システムの損傷は最小限に食い止められ、かつ交通システム全体としてはその代替性、冗長性が発揮されて交通の流れには極大影響が及ばないよう、道路網信頼性の向上策をはかることが重要である。

2) 地震の発生直後から復旧過程に至るまでに発生する緊急的交通をいかに処理管理し、交通システムが麻痺しないように運用する、交通規制・道路網運用・情報提供を含む総合的な交通システムの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、シナリオ別、メニュー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、1週間後、2～3週間後、1カ月後、...）に構築される必要がある。

3) 2)と関連して、道路網上を流れる交通の種類に応じて、交通システムを機能別に階層化することも重要である。これは、大きく分けて、① 地域外から地域内に向かう緊急物資輸送や救出救急救命活動等の交通と、② 地域内での避難（この場合の自動車の使い方には議論が必要であるが）や端末的物資輸送のための地区内交通とを分離することが重要で、そのためには長期的展望に立って道路網の階層的構築を進める必要がある。

(2) 国土幹線交通

国土幹線交通については、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

1 Key Words: 交通網計画, 防災計画, 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)

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。

このことから、議論は上記 1)2) 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。密接関連性指標のうちの代替性機能をより広域に適用し、例えばある重交通路線の交通量が容量に対して一定基準を超えると、新たな代替路の整備を考えるという観点が必要になると考えられる。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) 立体交差部分の問題

今回の地震では、交通システム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。

こうした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。本論文では、この問題にも触れている。

(4) 最近の都市地震被害の特徴

阪神・淡路大震災以外の最近の都市地震として、

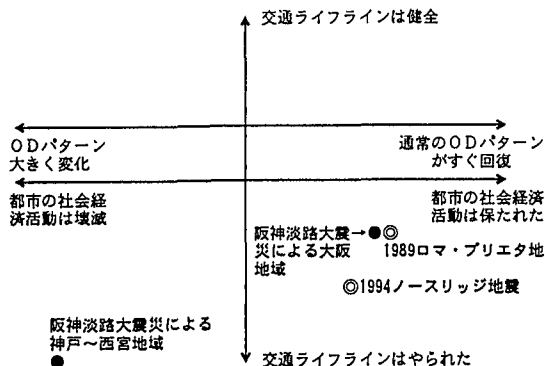


図-1 最近の都市地震の位置づけ

米国の大都市を襲った1981シルマー地震、1989ロマ・ブリエタ地震、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地震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。

3. ブール演算法と確率重要度

ネットワークにおけるノード間信頼度 R をブール演算法⁴⁾で計算する。ノード間信頼度 R は、各リンクの信頼度ベクトル r の関数であり、

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

で与えられる。ここに X_a は、リンク信頼度 r_a を $E[X_a] = r_a$ で与える確率変数であり、 P_s は s 番目のミニマルパスセット、 p は選択パス数である。 p がノード間のすべてのパス数とすると R は信頼度の厳密値を与え、部分的なパスであれば下限値を与える⁴⁾。リンク信頼度のリンク間での従属性は考慮していない。本ブール演算法では、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

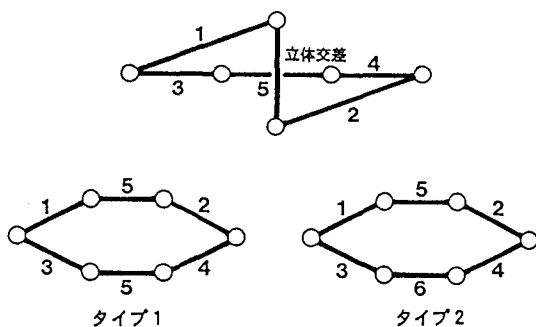


図-2 立体交差とその等価的表現

表-1 立体交差部確率重要度

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
	link 2	0.9000	0.1710
	link 3	0.9000	0.1710
	link 4	0.9000	0.1710
	link 5	1.0000	0.9639
	link 6	1.000(Type2)	0.1539
ノード間信頼度		0.9639	0.9639

行って信頼度を求めている。

リンク a の確率重要度 IP_a は、

$$IP_a = \partial R(r) / \partial r_a \quad (2)$$

で与えられる⁴⁾。確率重要度には $0 < IP_a \leq 1$ 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リンクの共有（左図）と通常の並列システム（右図）を比較すると、ノード間信頼度は同じであるのに、確率重要度が大きく異なっていることがわかる（表-1）。このように、確率重要度を用いることで、立体交差部の重要度を計量化できることがわかる。

4. 兵庫県復興道路網における信頼度と確率重要度

図-3は新聞等で発表された復興ネットワークと

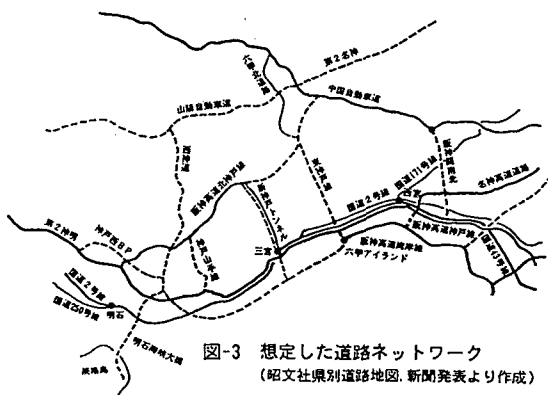


図-3 想定した道路ネットワーク
(昭文社県別道路地図、新聞発表より作成)

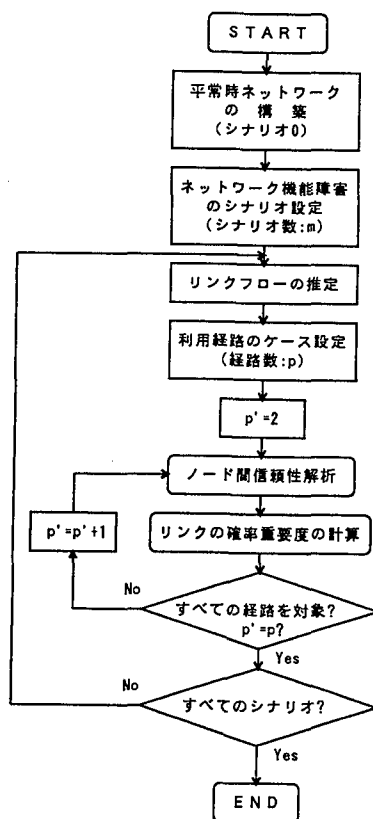


図-4 ネットワーク信頼性評価のフロー

される道路網である。このネットワークの特徴は、従来は神戸市内は主に東西間交通路のみで構成され、南北軸交通路が不足していたのに対し、六甲山北部の東西道路と南北方向道路によって接続し信頼性を高めようとしている点である。このネットワークに対しノード間信頼度（大阪～三宮間）の信頼度と確

表-2 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)

率重要度を計算する。交通量等のデータは地震直後の諸状況を考慮し，自力入手容易なものとして土木学会緊急報告会資料⁵⁾，阪神高速道路交通量調査資料⁶⁾，『高速道路と自動車』⁷⁾等の交通量データ(1994年10月実績値)を用いた。将来ネットワークに対しても同じ交通量を用いている。計算のフローは図-4に従っている。

本分析の特徴は，

- ① 交通量を考慮した信頼性解析であること，
- ② 確率重要度を計算していること，
- ③ いくつかのルートが寸断された場合を設定し（シナリオ設定法），その場合の信頼性解析を迂回交通量を考慮し，数種のケース間比較を行っていること（ただし，交通量配分は行なわない簡略な考慮である），
- ④ ネットワーク形状の代替案を考え，その信頼度と確率重要度も計算していること，
- ⑤ 信頼度計算が簡便であり，将来予測や代替案比較に耐えられる点である。

なお，リンク信頼度 r_a の推定は，交通量変動に起因するものとし，文献8)の方法によった。交通

量変動値は大阪地域で観測された値⁹⁾を用いた。詳細な計算条件や計算結果は講演時に発表するが，得られた結果(表-2)の概要は，

- (1) 六甲山北部ルートによって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ている。

参考文献：

- 1) 若林拓史・亀田弘行：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, pp.103-110, 1992.
- 2) 飯田恭敬・若林拓史：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, pp.9-19, 1988.
- 3) 若林拓史・飯田恭敬：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), pp.51-54, 1991.
- 4) 飯田恭敬・若林拓史：ブ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, pp.75-84, 1988.
- 5) 土木学会：阪神大震災震害調査緊急報告会資料，pp.53-61, 1995.
- 6) 阪神高速道路起終点交通量調査報告書，阪神道路公団.
- 7) 高速道路統計月報，高速道路と自動車，Vol.38, No.1, 92-95, 1995.
- 8) 若林拓史・飯田恭敬・井上陽一：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, pp.35-44, 1993.
- 9) 寺田幸紀・西村 昂・日野泰雄：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, 1991.