

異常気象時における道路網の連結性能評価法

AN ESTIMATION METHOD OF ROAD NETWORK RELIABILITY BASED ON CONNECTIVITY ANALYSIS IN AN UNUSUAL WEATHER

高山 純 一 *

by Jun-ichi Takayama

In this paper, I propose an efficient and practical method for estimating an approximate value of reliability between a node pair in road network. The estimation process of the proposed approximation method, which is called as topological transformation method, is simplified by the introduction of topological transformation concept. Topological transformation method can drastically save necessary computer memories and computation times, compared with the Boolean algebra method.

Topological transformation method is applied to Noto regional area as a case study in order to estimate the service level of road network system in an unusual weather.

1. はじめに

豪雨や豪雪等の異常気象は大規模な地震の発生に比べて影響範囲が局地的であり、時間的にも一過性である場合が多いが、より日常的に毎年のごとく発生するため、たとえ直接的な被害が生じなくても、異常気象時における道路の通行止めは地域居住者の生活や社会・経済に大きな影響を及ぼすものと考えられる¹⁾。

そこで、本研究では道路管理者によって実施される道路の事前通行規制を対象として、道路網の連結性能からみた信頼性評価を行い、道路の新設・改良計画を含む道路整備計画案の事前評価を試みる。ただし、道路の事前通行規制の影響を評価する方法としては、障害発生頻度やその継続時間など、いわゆ

る時間的要因を用いて評価する方法と道路網の連結性や迂回距離などの空間的要因を用いて評価する方法が考えられるが^{1), 2)}，ここでは後者の道路網の連結性能、特に2点間信頼度を用いて評価を行うことにする。

今回は豪雨、波浪などによる事前通行規制区間の比較的多い奥能登地域（石川県中島町以北）の道路網（一般国道、主要地方道、一般県道）を対象にケース・スタディを行った。そして、特にここでは高規格道路としての能登有料道路およびそれに接続する能登大規模農道（一部の未整備区間、計画区間を含む）の整備効果を道路網の連結性能から評価し、交通需要量の少ない過疎地域における今後の道路建設・整備計画の評価（効果分析）を試みた。なお、従来より提案されている2点間信頼度の厳密解法はネットワーク規模が大きくなると計算時間や計算機記憶容量が指数関数的に増大するため、実際規模の道路網を対象としては、計算不可能な場合が多いの

* 正会員 工博 金沢大学助手 工学部土木建設
工学科 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)

で、本研究では著者が既に提案している2点間信頼度の近似計算法（トポロジー変換法³⁾）を用いることにする。

2. 2点間信頼度に関する従来の研究

2点間の連結確率を計算するための代表的な方法に、最小パス法（Minimal-Pathset Method）・最小カット法（Minimal-Cutset Method）がある⁴⁾。この手法は加算と減算を繰り返して徐々に上限値、下限値の幅を狭めて最適解に近づけていくという方法であるが、ネットワークが大規模となると、パス数（あるいはカット数）が多くなり、計算に必要な演算回数が指数関数的に増大するという問題点をもつ。

また、ネットワークを構成しているあるエッジに着目して、直列結合と並列結合の組み合わせで表現できるサブネットワークをつくり、各サブネットワークの生起確率から、ネットワークの連結確率を求める手法（Edge-Decomposition法⁵⁾）が提案されている。しかし、この方法においても、やはりネットワーク規模の増大に伴うサブネットワーク数の指数関数的増加が問題となる。

Fratta, Montanariはブール代数法⁶⁾（Boolean Algebra Method）を用いて2点間の信頼度を計算する方法を提案している。最小パス法では $2^N - 1$ 項（Nはパス数）の計算が必要であったが、ブール代数法を用いれば、比較的少ない項の和として表すことができる。しかし、パスの集合をブール演算によって整理するときに時間がかかること、またパスの集合を記憶させておくために非常に大きな記憶容量が必要であることの2点が問題となる。

一方、2点間の信頼度を近似的に計算する方法として、以下の方法が提案されている。

田村、川上⁷⁾は、モンテカルロ法を提案し、2点間信頼度の近似解を求めている。この方法を用いれば、従来の厳密解法に比べ、ネットワークの節点数が多い程、節約される計算量が増大するという利点があるが、近似解の有効桁数を増やすためには、非常に多数回の繰り返し計算が必要になるという問題点がある。

飯田、若林等⁸⁾は、分散減少法を用いて従来のモンテカルロ法を改良し、2点間の信頼度の近似解を

求めている。この方法の特徴は一部のミニマルパスを用いて求めた信頼度の下限値と一部のミニマルカットを用いて求めた信頼度の上限値の間だけでサンプリングを行うものであり、このことによって推定値の分散を著しく減少させることが可能となる。この手法を用いればモンテカルロ法の精度を上げることが可能である。また、飯田、若林等⁸⁾は、ミニマルパス、ミニマルカットを用いた信頼度の近似解法（交点法）を提案している。この手法は膨大な計算がネックとなるブール演算を省略し、全てのパスまたはカットを生起確率（あるいは経路距離）で順序づけし、その一部のパスと一部のカットを用いて計算するところに特徴がある。すなわち、選択されるパス数を徐々に増加させれば、ブール演算を省略しているため、最小パス法の値は下限値から上限値へ変化し、最小カット法の値は上限値から下限値へ変化する。そこで、パスによる曲線とカットによる曲線の交点を求め、これを2点間の信頼度の近似解とする方法である。この手法を用いれば大規模ネットワークにおいても2点間信頼度を計算することが可能である。しかし、パスによる曲線とカットによる曲線の交点がどのくらい厳密解に近いかわからないため、その点が問題となる。

また、著者³⁾はトポロジー変換を導入して、ネットワークを互いに直列ないくつかのサブネットワーク（簡略ネットワーク）に変換し、各サブネットワークごとに計算した2点間信頼度とトポロジー変換によるノード集約の影響を補正するノード補正值を掛け合わせることで、2点間信頼度の近似計算を行う方法（トポロジー変換法）を提案している。この方法を用いれば、実際規模のネットワークにおいても2点間信頼度を計算することが可能であり、しかも計算誤差も比較的小さいので、実用計算法として十分有効といえる。しかし、サブネットワークを作るときのトポロジー変換の方法により多少計算結果が異なることが今後の課題である。

3. トポロジー変換による2点間信頼度の近似計算法

トポロジー変換法は、前述したようにネットワークを互いに直列ないくつかのサブネットワーク（簡略ネットワーク）に変換し、各サブネットワークご

とに計算した2点間信頼度（連結確率）とトポロジー変換によるノード集約の影響を補正するノード補正值を掛け合わせるにより、2点間の信頼度を計算する方法であり、計算時間と計算機記憶容量の大幅な節約を実現したところに特徴がある。

トポロジー変換法を用いるためには、まず対象ネットワークをいくつかのサブネットワークに分割して、簡略化する必要がある。

サブネットワークを作成するためのノード集約の方法としては、(1)仮想のリンクを想定し、その仮想リンクを短絡することによりノード集約を行う方法と、(2)現実のリンクを短絡することによりノード集約を行う方法、あるいは、(3)その組合せによりノード集約を行う方法の3通りが考えられる。ここで、リンクの短絡とは着目リンクを除去し、その両端のノードを1つのノード（集約ノード）に集約することをいう。なお、リンクの短絡により生ずる並列の複数リンクは、連結確率が等しい1本のリンク（集約リンク）で置き換える。このようにすることによって、直列に連結するサブネットワークが作成される。

対象とする2点間の連結確率は、各サブネットワークの端点間の連結確率をそれぞれ計算し、それら

を掛け合わせるにより計算される。ただし、この値（第一次近似解）は明らかに厳密解よりも大きい値を持つため、トポロジー変換によるノード集約の影響を補正する必要がある。

トポロジー変換による影響の補正は、リンクの短絡を行った近傍のネットワークを取り出し、短絡を行うリンクの連結確率が実際の値の場合（短絡リンクが仮想リンクである場合は0.0となる）と1.0の場合（リンクを短絡することと同値である）の各端点間の連結確率をそれぞれ計算し、その比（ノード補正值）を第一次近似解に掛け合わせるにより行う。なお、具体的な計算手順については、奥能登地域の道路ネットワークを用いて行う。

4. 奥能登地域におけるケース・スタディ

(1) 対象地域および使用データ

図-1に示すように、奥能登地域の道路網は豪雨による事前通行規制の行われる路線（リンク）をかなり多く含んでおり、集中豪雨が長期間となる場合には、地域社会・経済へ及ぼす影響もかなり大きなものになると予想される。本研究では豪雨の発生確率から各路線の通行規制確率（通行止め確率）を計算し、道路網の信頼性評価を行う。

本来、道路の事前通行規制は路線を管理する各土木事務所（奥能登地域では、珠洲市、輪島市、七尾市）が、そこで得られる気象データに基づいて行うが、今回はそのようなデータを入手するのが困難であったので、対象地域内の気象観測所

（本来5箇所あるが、1箇所のデータが一部欠落している）、ここでは珠洲市、輪島市、富来町、門前町の4箇所のデータを用いた）における気象観測データ（6月～8月の夏期におけるアメダス10年間の毎時降水量デ

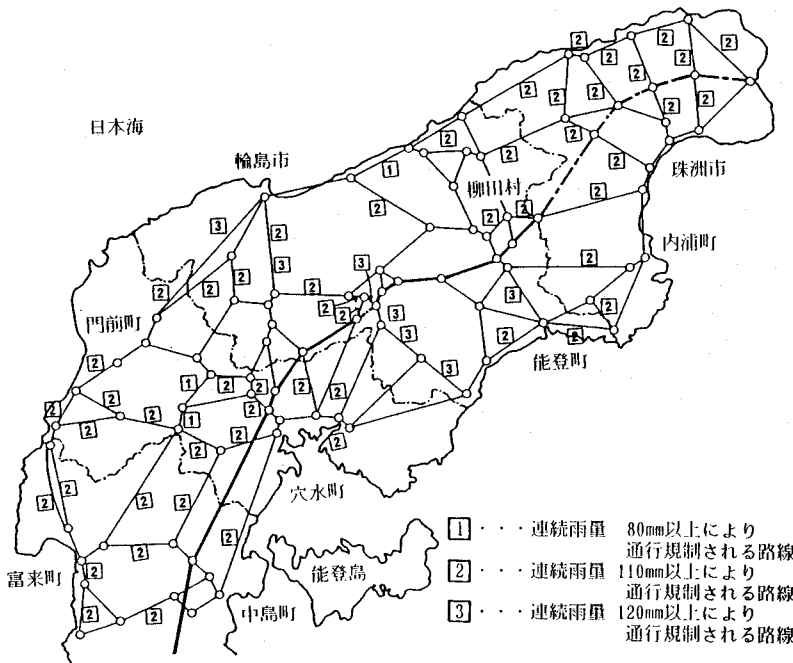


図-1 奥能登地域の道路網と通行規制路線（リンク）

ータ)を用いて、式(1)により通行止め確率を与えるものとする。ただし、通行規制の対象となっている各路線は、それぞれ表-1に示す3ランクの基準により、事前通行規制が実施される。ここで、表-1は各気象観測所におけるアメダスデータより求めた各通行規制ランク別の通行可能確率(=1.0-通行止め確率)を示したものである。

通行止め確率=
10年間における夏期の通行止め回数
10 (年間) (1)

本研究では、表-1に示す通行可能確率を用いて主要市町村間(富来町-珠洲市、富来町-輪島市、中島町-珠洲市、中島町-輪島市など)の2点間信頼度を計算し、能登有料道路および能登大規模農道(図-1の図中、太い実線——は既存道路を示し、太い一点鎖線----は計画路線を示す)の建設整備の効果分析を行う。ただし、解析に用いた道路ネットワーク(図-2に示す)は図-1に示す実際のネットワークを多少簡略化したものであるが、ノード数が59個、リンク数が109本の実際規模のネットワークである。

(2) 富来町-珠洲市間を対象としたトポロジー変換法の適用方法

富来町-珠洲市間の2点間連結確率を計算する場合は、先ずなるだけサブネットワークに含まれるリ

表-1 連続雨量の発生確率より求めた通行可能確率

気象観測所	通行規制の基準値(連続雨量)		
	80mm以上	110mm以上	120mm以上
珠洲市	0.4	0.7	0.8
輪島市	0.3	0.8	0.9
富来町	0.3	0.8	0.8
門前町	0.4	0.5	0.8

ンク数が等しくなるようにリンク短絡線(図-3、この場合は3箇所)を設定する。次に、短絡線上のリンクを短絡し、ノード集約を行うことにより、全体ネットワークをサブネットワーク(4個)に分割する。そして、図-4に示すようなサブネットワークが直列に結合した簡略ネットワークを作成する。ここで、各サブネットワークごとに端点間の連結確率($P_{T,H}$, $P_{H,I}$, $P_{I,J}$, $P_{J,S}$)を計算し、それらを式(2)のように掛け合わせれば、2点間(富来町-珠洲市間)の連結確率の第一次近似解が計算される。ただし、各端点間の連結確率の計算は厳密解法の一つであるブール代数法により行う。

$RS_{T,S} = P_{T,H} \times P_{H,I} \times P_{I,J} \times P_{J,S}$ (2)

ノード集約による影響の補正は、各短絡線の近傍のネットワークを図-5に示すように取り出し、短絡線を挟む任意の2点間の連結確率を、前述したように短絡するリンクの連結確率を実際の値とした場合と1.0とした場合の2通りについて計算し、その比を各ノード補正值として、第一次近似解に掛け

合わせれば、対象とする2点間の近似解が計算される。ここで、近似解の精度を上げるためには、各ノード補正值の計算において、短絡線を挟む複数組の2点間について補正值を計算し、その平均値をノード補正值とすればよい。たとえば、集約ノードHに対するノード補正值Q(H)の求め方としては、ノードN-W間、ノードI-W間ノード2-3間のように任意の複数組の2点間について、短絡リンク h_1 , h_2 (仮想リンク), h_3 の連結確率(通行可能確率)を実際の値とした場合の各2点間の信頼度 $P_{N,W}$, $P_{I,W}$, $P_{2,3}$ と h_1 , h_2 , h_3 の連結確率をすべて1.0とした場合の各2点間信頼度 $P_{N,W}^*$, $P_{I,W}^*$, $P_{2,3}^*$

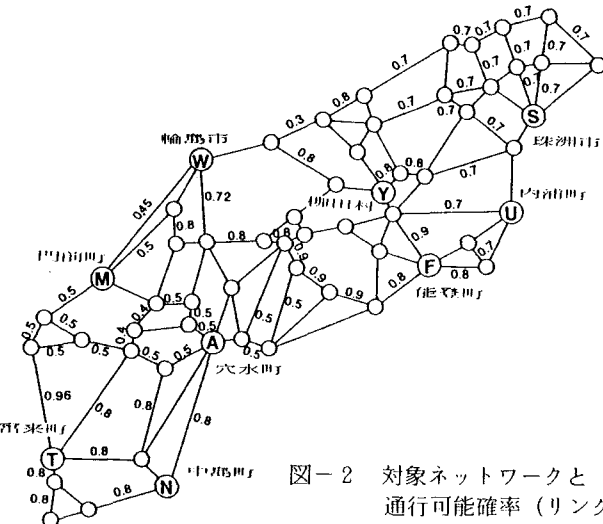


図-2 対象ネットワークと通行可能確率(リンク)

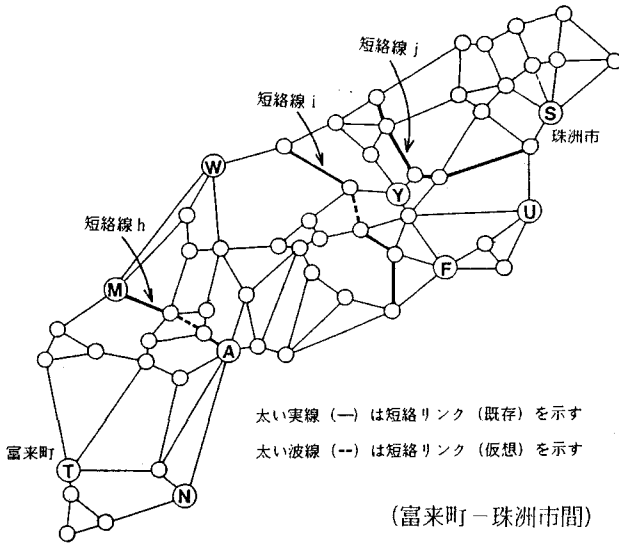


図-3 トポロジー変換のための短絡リンクの位置

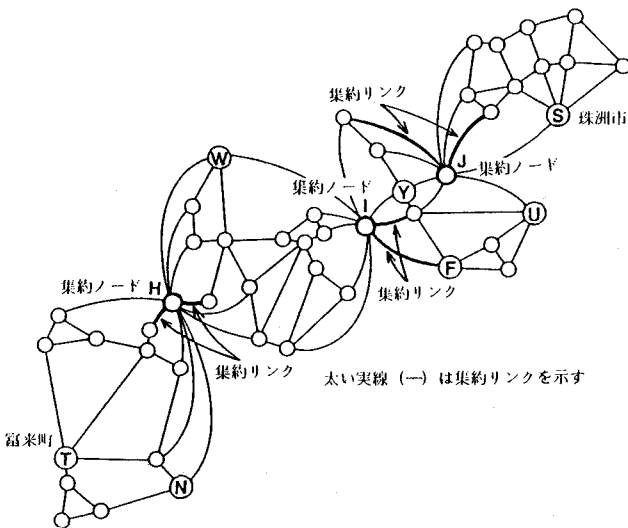
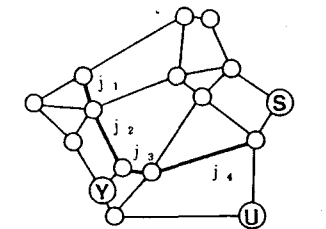
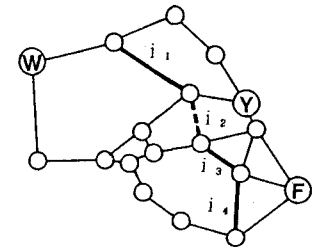
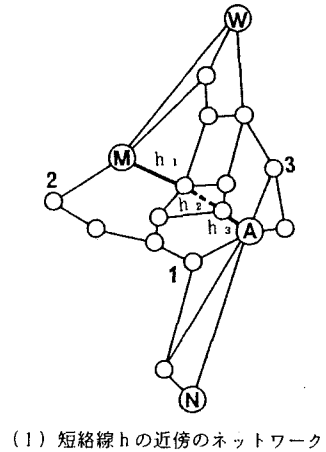


図-4 直列連結のサブネットワーク (富来町—珠洲市間)



(富来町—珠洲市間)

図-5 短絡リンク近傍のネットワーク

を計算し、その比の平均値 (式 (3)) をノード補正值とすればよい。

$$Q(H) = \frac{1}{3} \left\{ \frac{P_{N,w}}{P_{N,w}^*} + \frac{P_{1,w}}{P_{1,w}^*} + \frac{P_{2,3}}{P_{2,3}^*} \right\} \quad (3)$$

(3) 計算結果と考察

ここでは、9市町村間の36ODペアのうち、任意の12ODペアについて、異常気象時 (豪雨時)

における2点間信頼度 (連結確率) を計算し、その結果をもとに能登有料道路および能登大規模農道の整備効果の分析を行った。分析結果を表-2、表-3、表-4に示す。ただし、ここではODペアごとにある程度対象とするネットワークを限定して計算を行っている。これは、地震時などの非常時とは異なり、一般に非現実的な遠回りは行わないと考えられるためである。

表-2は富来町—珠洲市、中島町—珠洲市、富来

表－2 異常気象時における2点間信頼度の比較

	能登有料道路および能登大規模農道	
	整備前	整備後
富来町－珠洲市	0. 8 1 3 4	0. 9 5 7 0
中島町－珠洲市	0. 8 0 9 9	0. 9 7 2 7
富来町－輪島市	0. 9 1 5 8	0. 9 7 3 3
中島町－輪島市	0. 9 3 2 2	0. 9 9 5 1

町－輪島市、中島町－輪島市の間の各2点間信頼度を示したものであり、それぞれトポロジー変換によるノード補正值の計算方法を3通り設定し、その平均値により求めた値である。この表より、富来町－珠洲市間も、また中島町－珠洲市間も、それほど異常気象時における2点間信頼度に差はなく、能登有料道路および能登大規模農道の整備により、約15%信頼度が上昇することがわかる。そして、その結果2点間の信頼度が1. 0に近づくことにより、かなり道路整備の効果が見られるといえる。また、この傾向は富来町－輪島市間および中島町－輪島市間の各2点間信頼度についても同様である。

表－3 異常気象時における2点間信頼度の比較

	能登有料道路および能登大規模農道	
	整備前	整備後
穴水町－輪島市	0. 9 8 4 6	0. 9 8 4 6
門前町－輪島市	0. 9 8 4 6	0. 9 8 4 6

表－4 異常気象時における2点間信頼度の比較

	能登有料道路および能登大規模農道	
	整備前	整備後
門前町－富来町	0. 5 4 6 0	0. 5 6 0 2
門前町－中島町	0. 5 2 8 3	0. 5 5 3 1
門前町－穴水町	0. 5 1 9 8	0. 5 5 8 0
富来町－穴水町	0. 8 8 1 3	0. 9 6 5 0
富来町－中島町	0. 9 6 3 0	0. 9 6 4 7
中島町－穴水町	0. 9 1 2 2	1. 0 0 0 0

一方、表－3および表－4はそれぞれ穴水町－輪島市、門前町－輪島市および門前町－富来町、門前町－中島町、門前町－穴水町、富来町－穴水町、富来町－中島町、中島町－穴水町の間の2点間信頼度をトポロジー変換法を使わずに、厳密解法（ブル代数法）により求めたものである。表－3より、穴水町－輪島市、門前町－輪島市間の信頼度は現状においても非常に高く、能登有料道路および能登大規模農道の整備効果はないといえる。また、表－4より門前町－富来町、門前町－中島町、門前町－穴水町の各2点間の信頼度が他のODペアに比較して、非常に低く、能登有料道路および能登大規模農道の整備効果もほとんどないといえる。したがって、今後の道路整備の1つの方向性としては、門前へ通じる道路の整備が必要になると考えられる。ただし、門前町－輪島市間の信頼度が高いので、当然のことながら輪島市を経由すれば問題はないが、かなりの迂回となるため、ここでは輪島市経由の経路は考慮していない。なお、富来町－穴水町間および中島町－穴水町間は能登有料道路の建設により信頼度が非常に高くなったといえる。

5. まとめと今後の課題

本研究では道路管理者によって実施される道路の事前通行規制を対象として、道路網の連結性能からみた信頼性評価を行った。特に、従来実際規模の道路網に対して、その適用が困難であったブル代数法にトポロジー変換の概念を導入してネットワークを簡略化し、計算時間と計算機記憶容量の大幅な節減を可能にするトポロジー変換法を提案した。そして、豪雨、波浪などによる事前通行規制区間の比較的多い奥能登地域の道路網を対象にケース・スタディを行い、高規格道路の整備効果を道路網の連結性能から評価し、交通需要量の少ない過疎地域における今後の道路建設・整備計画の効果分析を試みた。

結果をまとめると、次のようになる。

(1) トポロジー変換法を用いれば、実際規模の道路網に対しても、十分2点間信頼度を計算することが可能である。

(2) 対象とするODペアによって、多少効果の大きさは異なるが、集中豪雨時における2点間の交通確保という観点から、能登有料道路および能登大規

模農道の整備効果がある程度認められた。

(3) 地域間の連結性能を評価することにより、連結確率の高いODペアと低いODペアが明らかとなる。そうすれば、その結果をもとに現状の道路網のサービスレベル評価が可能となるため、今後の道路整備の方向性がある程度明らかとなる。

しかし、今後に残された課題も多い。前述したように、道路の持つ機能は連結性能のみではなく、多種多様であるため、連結性能の他に、時間的な要因(障害発生頻度やその継続時間など)や迂回距離などの空間的要因をも考慮して評価する必要がある。

また、今回はデータ入手の関係から、気象観測所の降雨記録より、各路線の通行止め確率を計算したが、本来、過去において実際に行われた通行規制回数やその継続時間、あるいは実際の土砂崩れなどによる通行止めの記録などにより、通行止め確率を計算する必要がある。これらの課題については、今後さらに検討していきたい。

最後に、研究を進めるにあたり金沢大学工学部助教授川上光彦先生より貴重なコメントを頂いた。また、本研究は平成元年度文部省科学研究費・一般研究C(代表者、北浦 勝)により行われた研究成果の一部である。ここに記して感謝したい。

6. 参 考 文 献

1) 深井俊英, 建部英博, 林寿郁; 異常気象時にお

ける道路網の信頼性評価手法について, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集, IV, pp.13~14, 昭和61年11月

2) 深井俊英, 建部英博, 林 寿郁; 信頼性による道路網の評価について, 第16回日本道路会議特定課題論文集, pp.4~6, 昭和60年10月

3) 高山純一, 大野 隆; 連結性能から見た道路網の信頼性評価法, 土木計画学研究・講演集, No.11, pp.251~258, 1988年11月.

4) 井上紘一, 稲垣敏之; 大規模システムの信頼性解析へのグラフ理論の応用, システムと制御, Vol.20, No.12, pp.641~648, 1976年.

5) A.Agrawal, R.E.Barlow ; A Survey of Network Reliability and Domination Theory, Operations Research Vol.32, No.3, pp.479~492, 1984.

6) L.Fratta, U.G.Montanari ; A Boolean Algebra Method for Computing the Terminal Reliability in Communication Network, IEEE Transactions on Circuit Theory, Vol.CT-20, No.3, May 1973.

7) 田村重四郎, 川上英二; モンテカルロ法による地中埋設管システムの耐震性の評価方法, 土木学会論文報告集, 第311号, pp.37~48, 1981年7月.

8) 飯田恭敬, 若林拓史, 福島 博; 道路網信頼性の近似解析法の比較研究, 土木学会論文集, 第311号/IV-11, pp.107~116, 1989年7月.