

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

若林拓史*・飯田恭敬**・井上陽一***

交通量の確率的変動に基づき、その変動特性からリンク信頼度を推定する方法を提案する。具体的には、リンクフローの変動係数を平均需要交通量と交通容量から説明する関数モデルを構築する。リンク信頼度は、平均フローと交通容量およびこの関数モデルから得られる分散から決定できる。1回の交通量配分のみでリンク信頼度が決定でき、データ制約の多い予測や代替案比較に耐えられる信頼性解析法である。シミュレーションを通じて本方法の有効性を検証した。

Keywords : road network, reliability analysis, link reliability estimation, stochastic variation of traffic flow

1. はじめに

信頼性の高い道路網は、自然災害や交通事故・工事・渋滞等によってネットワークの一部が機能を失っても、ネットワーク全体としては常に安定した交通サービスを提供できる。このため、今後の道路計画や交通の管理・運用計画にとって、信頼性は道路のサービス水準を表す新たな指標になると考えられる。

信頼性解析は大きく分けて、(1)システムを構成するユニット(部品)の信頼度を与件としてシステム全体の信頼度を求める問題と、(2)個々のユニットの信頼度を推定する問題の2つから構成される。道路網信頼性解析では、前者の問題はリンク信頼度からノード間信頼度を求める問題であり、後者はリンク特性や交通特性からリンク信頼度を求める問題となる。筆者らは既に、(1)の道路網信頼性解析法として、リンク信頼度が与件であるという条件のもとで、ノード間信頼度を効率的に求める方法としてブール演算法および交点法^{1),2)}を提案している。今後は、(2)のリンク信頼度を推定するモデルを開発し、(1)の方法と組み合わせることで、道路網信頼性解析法の実際への適用性を高めることを目指している。

本研究の目的は、リンク信頼度を規定する主要因が交通量変動であると仮定し、ネットワーク上の交通流の変動をシミュレーションによって再現し、リンク信頼度を推定する方法について考察することである。すなわち本論文では、リンク信頼度を、リンクへの需要量がリンクの交通容量を超えない確率と定義し、交通量の確率的変動にもとづいてリンク信頼度を推定する方法を提案する。

具体的には、リンクフローの需要変動の平均値と分散からリンク信頼度を推定するモデルとする。そのため、本研究の前半部分では、ODフローを確率的に変動させ、交通量配分を繰り返すことによってリンク需要フローの変動パターンを知る。ここでは、現実のODフローの変動を直接知ることは困難があるので、OD間変動に完全相関がある場合、無相関の場合、その中間の場合の3種類の変動パターンを考察した。

この変動パターンより、リンク信頼度は推定可能であるが、①シミュレーションによる計算量が膨大となる、②実際の道路網においては、常時観測地点以外はリンクのフロー変動のみならずフロー値を捕捉することすら困難である、③将来予測では交通需要の平均値を知ることはできてもその変動まで知ることは困難である、等の問題点がある。そこで、本研究の後半部分では、リンクフロー需要の平均値から分散を推定する関数モデルを構築する。そして、リンク需要フローの平均値と推定された分散から、リンク信頼度を計算する。そして、シミュレーションから直接観測されたリンク信頼度と比較し、モデルを検証する。

本モデルの開発による利点は以下のとおりである。本モデルでは、経路交通量の変化がネットワークの信頼度に与える影響を表現することができる。このとき、渋滞現象に起因するリンク信頼度を推定しようとすると、リンクへの交通需要を捉える必要があるが、渋滞領域では実測交通量を需要交通量とすることはできない。したがって、観測交通量からは真の需要交通量を捉えられないこととなる。また、交通量の変動等、実際のネットワーク上では直接観測できないデータ上の制約が多い。したがって、本モデルでは観測交通量と需要交通量を区別し、配分によって得られる需要交通量に基づいてリンク信頼度を求める考えている。また、交通需要の平均値と交通容量等の入手容易な交通指標を利用するので、1

* 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校助教授
建設工学科 (〒572 寝屋川市幸町 26-12)

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科

*** 正会員 工修 東海旅客鉄道

回の交通量配分のみでリンク信頼度が推定できるところに大きな特徴がある。これは、データ制約の多い予測や代替案比較に十分耐えられる信頼性解析法である。

また本研究の分析を通して、OD フローの変動パターンに対するリンクフローの変動パターンの性質に関する知見が得られたことも 1 つの成果である。

2. リンク信頼度の定義と定式化

本研究では、リンク信頼度を、ある期間中リンクにおいて円滑な走行が保証される確率と定義する。リンク信頼度推定方法の構築にあたり、以下の諸前提を仮定する。

(1) リンクの信頼性は交通量変動に起因するものとし、リンク信頼度は、「リンクへの需要がリンクの交通容量を超えない確率」と定義する。交通量の変動は、時間交通量の日変動を対象とする。

(2) リンク需要はOD交通量の変動に従って確率的に変動するものとする。

(3) OD 交通量変動は正規分布に従う。

(4) リンク容量は一定かつ与件である。

以上から、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、

として得られる.

リンクフロー変動に正規分布を仮定すると、フローの変動係数とリシクの混雑度を用いてリンク信頼度は図-1のように求められる。この図より、リンク信頼度は混雑とともに低下することが確認できる。またリンク信頼度は、混雑度の低い場合は変動係数の増大とともに低下し、混雑度の高い場合には変動係数の増大とともに高くなることがわかる。この理由は、交通量の変動が大きい場合には、需要量が交通容量を超える（あるいは下回る）確率も大きいからである。

次に、経路選択が Flow Independent である場合には、リンクフローの分布形は解析的に特定できる。しかし、Flow Dependent の場合には OD フロー変動に正規分布を仮定してもリンクフローが正規分布となるかどうかは明らかでない。そこで、次節で述べるように、交通量配分によって交通状況を再現し、リンクフローの正規分布性を調べることにした。

3. 交通量変動表現のためのシミュレーション

2.(1)で述べたように、リンク信頼度を求めるためには、リンク上の交通需要の変動を知る必要がある。しかしながら、実際のリンク上での交通需要およびその変動を観測することは困難である。そこで本研究では、OI

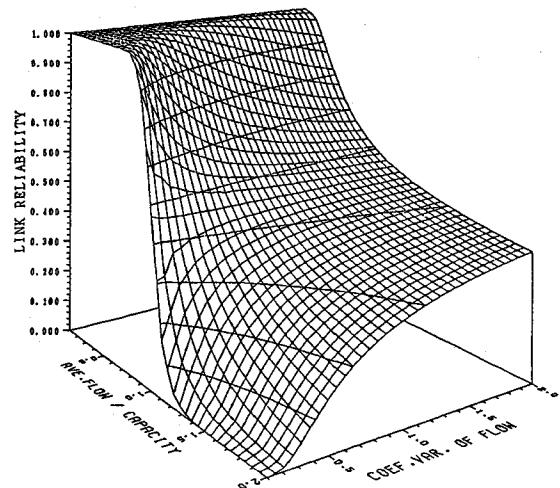


図-1 リンクフロー変動に正規分布を仮定した場合のリンク信頼度

フローを確率的に変動させ、それを配分することを繰り返すシミュレーションによってリンクフローの変動を表現することを考える。配分の手法としては、分割増加配分法を採用した。リンクコスト関数は、修正 B.P.R. 関数を用いた。

信頼性解析におけるリンク信頼度はリンク容量によって決められることになるが、リンク信頼度とはリンクが機能しているかどうかということであり、サービス水準と関係して定義することができる。本研究の場合は、実時間現象としてのリンク最大交通量を対象とするのではなく、一定のサービス水準が提供できる期待値現象としてみたリンクの上限交通量と考えるのがよい。すなわち、この上限交通量は、現実に対応した円滑な交通サービスを提供する最大交通量であり、リンク交通量がこの値を上回ると渋滞が発生し急激にサービス水準が低下する。このため、本研究ではリンク信頼度の決定に交通量配分を使い、交通量とサービス水準の関係をB.P.R.関数を用いて分析するのである。

また、実際の OD 交通量変動の挙動は現在十分には知られていない。そこで本研究では、リンク上のフロー変動を表す手段として、OD 交通量を乱数を用いて確率的に変動させる。この交通量変動を表わす変動パターンとして、以下の 3 つの型を考える。

(1) 各 OD 交通量の変動が完全に相関している場合

この変動パターンでは、各OD交通量の変動が完全に相関している状態を想定しており、ODペア i,j 間の交通量 X_{ij} は、すべてのODペアに共通な正規乱数 ϵ に従って一定の割合で増減する。このとき、 ϵ はネットワークにおける総交通量の変動も表している。 X_{ij} は、次式で示される。

X_{ij} : OD ペア i, j 間の交通量

T_{ij} : OD ペア i, j 間の平均交通量

ε : 平均 0.0, 分散 σ^2 の正規分布に従う乱数

(2) 各 OD 交通量の変動の相関が全くない場合

この変動パターンでは、各OD交通量の変動の相関はまったくない状態を想定しており、OD交通量 X_{ij} は、それぞれのODペアに固有の乱数 ε_{ij} に従って独立に変動する。この結果、OD交通量の増減が相殺し、ネットワークにおける総交通量はほぼ一定となる。 X_{ij} は、次式で示される。

ε_{ij} : 平均 0.0, 分散 σ^2 の正規分布に従う乱数

(3) 各 OD 交通量が相関をもちらながら変動する場合

(1)と(2)は、交通現象の変動を表現する両極端のOD変動パターンである。現実的には、交通は社会活動の派生的現象であることから、交通量の多い日はどのODペアでも交通量は増加し、逆に交通量の少ない日はどのOD交通量も減少することが多いと考えられる。

しかし、その増加あるいは減少の程度は、各 OD 交通量ごとに異なると考えられる。したがって、各 OD 交通量は正の相関を持ちながら変動すると考えられる。本変動パターンはこのような考え方に基づいている。本研究では、上記(1)と(2)の積による結合型を採用した。これは、(1)の総交通量の変動を表す係数と、(2)の OD ペアに個別の変動を表す係数の積で各 OD 交通量の変動を表現する方法である。すなわち、各 OD 交通量は、総交通量の変化に従って変動するが、同時に OD ペアごとの変動にも従うことを表現している。したがって、各 OD 交通量の変動はある程度の相関をもって変動し、(1)の完全相関型と(2)の無相関型の中間にある。 X_{ij} は、次式で表される。

上記の(1), (2), (3)のいずれの変動パターンも、乱数の分布に正規分布を仮定しているため、OD交通量 X_{ij} は正規分布に従う。本研究ではこれらの変動パターンを、(1)を完全相関型、(2)を無相関型、(3)を相関変動型とよぶこととし、これらの3つのパターンについて、それぞれ配分シミュレーションを行っている。

シミュレーションを行うネットワーク形状を図-2に示す。これは、総リンク数 288、総ノード数 81、セントロイド数 13 の仮想の格子型ネットワークで、2000, 4000, 6000, 8000 Veh/h の 4 種類の容量を持つリンクを与えた。各リンクの自由走行時間は、すべてのリンクにおいて 10.0 分とした。シミュレーションの繰り返し回数は 50 回とし、分割配分法における分割数も 50 回とした。

現実の OD 交通量の変動の正確な様子は未知である

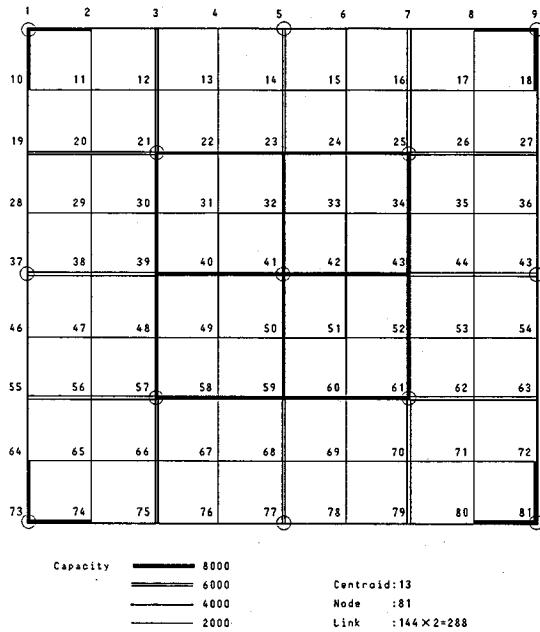


図-2 ネットワーク形状

ので、今回は、完全相関型、無相関型、相関変動型の場合の3つのOD交通量の変動パターンにおいて、平均OD交通量、パラメータ ε 、 ε_{ij} の標準偏差を変化させて計算を行い結果を比較する。以下では、 ε の標準偏差をSDT、 ε_{ij} の標準偏差をSDIJと記述することとした。以上の3パターンにより、変動パターンの種類によってネットワーク上にどのような交通状態が現出するかの一般的傾向を分析できる。

1日交通量の日変動を表す場合、その変動係数（標準偏差／年平均日交通量）は、都市内や都市周辺道路では0.07～0.15、地方部幹線道路では0.06～0.12、地域幹線道路では0.10～0.20、観光道路では0.20～0.30となっている³⁾。本研究では、時間交通量の日変動を取り扱っており、その場合にSDT、SDIJの適当な値を定めることは困難であったので、既存文献^{4), 5)}等を参考に変動の基本値として0.1、少し大きい場合として0.3と、2通りについて計算、考察を行うこととした。相関変動型の場合に対する計算は、 ϵ 、 ϵ_{ij} の両者を含むのでそれぞれに異なる値を与えた場合も考慮するべきであるが、今回の計算では単純化のため、SDT、SDIJは等しく0.1あるいは0.3とした。

平均 OD 交通量については、エントロピー法によつて計算された OD 交通量を基準とした。そして、ネットワークが比較的すいている場合（最も混雑しているリンクでも混雑度は 0.9 程度）として基準 OD 交通量を定め、混雑が中程度の場合として基準 OD 交通量の 1.2 倍、混雑の激しいネットワークに対応する場合として同

表一 シミュレーションのケース

OD変動パターン	ケース	平均OD交通量	SDT	SDIJ
完全相関型の場合	1	1.0倍	0.1	--
	2	1.0	0.3	--
	3	1.2	0.1	--
	4	1.2	0.3	--
	5	1.4	0.1	--
	6	1.4	0.3	--
無相関型の場合	1	1.0	--	0.1
	2	1.0	--	0.3
	3	1.2	--	0.1
	4	1.2	--	0.3
	5	1.4	--	0.1
	6	1.4	--	0.3
相関変動型の場合	1	1.0	0.1	0.1
	2	1.0	0.3	0.3
	3	1.2	0.1	0.1
	4	1.2	0.3	0.3
	5	1.4	0.1	0.1
	6	1.4	0.3	0.3

1.4倍と3通りの平均OD交通量について考察した。

以上のように、SDTとSDIJを2通り、平均OD交通量を3通り与え、これらの組合せ合計6ケースを設定する。これらを3つのOD変動パターン（完全相関型、無相関型、相関変動型）のそれぞれについて計算する。これらのケース設定を表一に示す。

4. リンクフロー変動の正規分布性

高速道路インターチェンジ流入出交通量の変動特性を、 χ^2 検定を用いて調べた飯田・高山⁴⁾の研究によれば、実際のリンクフロー変動はほぼ正規分布に従うことがわかっている。しかし、その研究で対象となったのは都市間高速道路であり、本研究で対象とする都市道路網のような混雑度の高い場合あるいは網構成されたネットワークについては異なるかも知れない。例えば、「混雑度の低いリンクではフローを制限するものが無いので分布は正規分布となるが、混雑度の高いリンクでは容量に抑制されてフローは上方には自由に変動できず、正規分布性は損なわれる」といった仮説が考えられる。したがって本研究では、フロー変動を詳しく調べ、特にリンクの混雑がフロー分布に与える影響を考察する。具体的には、ネットワーク上の各リンクに対し、配分シミュレーションによる全試行のフロー値を対象に χ^2 検定を行い、フロー変動の正規分布性を調べる。このとき、混雑度(v_a/C_a)による影響を知るため、いずれの場合も、

混雑レベル1(0.0≤混雑度<0.5)

混雑レベル2(0.5≤混雑度<1.0)

混雑レベル3(1.0≤混雑度<1.5)

に類別して正規分布性の検定を行った。なお、今回のシミュレーションでは混雑度1.5以上のリンクは存在しな

かった。帰無仮説H（交通量変動は正規分布に従う）を設定し、仮説の検定を行った。検定結果を以下に述べる。

完全相関型の場合、6ケースそれぞれの全リンク平均で、正規分布性が受容されたリンクの割合は、78.8～91.7%（有意水準5%）であった。混雑レベル別の検定結果では、混雑レベル1で79.2～91.7%（同）、混雑レベル2で79.2～93.4%，混雑レベル3で82.5～92.0%となり、レベル間で大きな相違はなかった。

無相関型の場合は、全リンク平均では、90.6～93.3%（有意水準5%）、混雑レベル1で77.6～96.0%，混雑レベル2で90.6～93.2%，混雑レベル3で91.8～100.0%となり、正規分布性の受容率が高いといえる。

相関変動型の場合でも、6ケースそれぞれの全リンク平均で、93.8～97.9%（有意水準5%）、混雑レベル1で89.5～92.3%，混雑レベル2で94.9～98.4%，混雑レベル3で91.3～100.0%となり、正規分布性の受容率が高いといえる。混雑度による影響もほとんど見られないが、強いていえば、正規分布性は混雑度の増加につれてやや向上する傾向がみられる。これは当初の予想とはまったく逆の結果であった。正規分布性が混雑度に依存しない原因としては、「混雑しているリンクのフローは容量によって抑えられているが、同時に、リンクがよく利用される重要なものであるため、ODフローからみたリンク利用率が安定し、その結果変動幅が小さくなつて正規分布性が保たれる」ためと考えられる。

5. リンクフローの分散の推定モデル

2.(1)で述べたように、リンクフローの需要の分布形が特定できると、リンク信頼度はフローが交通容量を超えない確率として計算できる。前節で示したように、リンクフローの需要は正規分布として扱ってよいと考えられる。したがってリンク信頼度は、その平均と分散から式(1)によって決定できる。ここで問題となるのは、いかにしてリンクフローの分散を与えるかということである。リンクフローの分散を得るには、以下に示す困難な問題点がある。

① リンクフローの変動を、常時観測点のデータから得ようとしてもその数には限りがあるので、すべてのリンクフローの分散を直接知ることができない。

② 滞滯領域での観測交通量は、必ずしも需要交通量ではないので、常時観測点であっても真の需要の変動を捉えることはできない。

③ したがって、リンクの需要変動を知るには、前節で行ったようにODフローに変動を与え交通量配分を繰り返す必要がある。しかし、この方法でリンクフローの分散を得るには膨大な計算量が必要となる。

④ 将来のネットワーク計画に対して信頼性解析を行

う場合には、交通量の予測が必要となる。この場合のリンクフローの平均値は、将来OD表を将来ネットワークに配分することで容易に得ることができる。しかし、将来ネットワークのフローの分散を得るには、③で述べたような大がかりな方法が必要となる。将来ばかりではなく現況のネットワークに対し、信頼性の観点からの交通管理運用計画の代替案評価を行う場合もこれと同様の問題が発生する。

以上の理由により、リンクフローの分散を簡単な方法で計算することができれば、ネットワークの信頼性解析に対し非常に有効であると考えられる。そこで本研究では、リンクフローの平均値と交通容量からリンクフローの分散を推定する方法を提案する。この方法が確立されれば、平均フローを求めるための交通量配分を1回行うだけでフローの変動を知ることができ、その結果、リンク信頼度の推定も容易となる大きな利点がある。

飯田・高山の研究によると、リンクフローの平均 \bar{v}_a と分散 σ_a^2 との間には、

p, q : パラメータ

なる関係が存在し、その相関は高いことがわかっている。このモデルを用いると、パラメータ p , q を実測データなどを利用して決定しさえすれば、リンクフローの平均値から簡単にフローの分散を計算することができる。このモデルを以下モデル1とする。

モデル1は構造が非常に単純であるという長所をもつが、関係式の中にリンクの特性を表わす項が存在しないため、リンクの混雑度の影響を明示的に考慮することができない（この考慮はパラメータ p , q でなされていると考えられる）。したがって、リンクの混雑度 (\bar{v}_a/C_a) がフローの変動に影響するとすれば、リンクの混雑度を明示的に考慮したモデルが望ましいことになる。また、分散 σ_a^2 は変動の大きさを表す絶対的なメジャーであり、相対的なものではない。したがって、 σ_a^2 のかわりに、平均フローで規準化された変動係数 (σ_a/\bar{v}_a) を被説明変数とするのがよいと考えられる。以上から、混雑度からフローの変動係数を導くモデルを提案する。実際には、リンクフローの変動係数は混雑度のみならず、リンクの幹線性、昼夜率、休日係数、市街地性、交通の目的、平均リンクフロー、リンク容量など様々な要因に左右されていると考えられる。特に、幹線性、昼夜率、休日係数、市街地性などは実際の交通変動に影響すると考えられるが、モデルに組み込むことが困難になるため、これらは今回の研究では省くこととした。また、シミュレーションから得られたフローの変動係数と混雑度の関係をリンク容量別にみると、いずれの容量に対してもグラフは似た形となり、容量は変動係数にあまり影響を与えないこ

とがわかった(図-3参照)。したがって、リンクの容量もモデルから省いた。さらにこのグラフは、例えば容量が8000 Veh/hで混雑度が0.5つまり4000 Veh/hの平均フローをもつリンクと、容量が2000 Veh/hで混雑度が0.5つまり1000 Veh/hの平均フローをもつリンクとで、変動係数に大差はないことを示している。つまり、同一の混雑度では平均フローが異なっても変動係数に大差はない。変動係数と混雑度との関係は、当初「混雑度が小さいと変動係数が大きくなるが、その変化は容量や平均フローに依存する」ことを予想していた。そうならなかった理由は、ODフローからみたリンク利用率が安定しているためであると考えられる。その結果、総交通量の変動に対し、リンク間での交通量変動の相対的变化が少ないために、変動係数が混雑度以外には容量や平均フローへそれほど依存しなくなると考えられる。つまり、フローが容量に対し余裕があるために変動が大きくなるのではなく、フローはリンク利用率に規定されて変動すると考えられる。したがって本研究では、フローの平均値もモデルから省き、平均フローと容量の比である混雑度のみを説明変数として変動係数を表現することを考える。図-3をみると、混雑度と変動係数は逆相関関係にあり、混雑度が高い場合には変動係数はほぼ一定になることがわかる。この逆相関関係は、一般的に知られている事実と一致する。その理由は先述した通りである。したがって本研究では、変動係数と混雑度の関係を表わすモデルとして、次のような負の指數型の関係式を提案する。

α, β, r, δ : パラメータ

g ：混雜度

COV : 変動係数

α 等のパラメータの意味は紙幅の関係から省略するが、特に δ の意味は以下のとおりである。すなわち、 δ が大きい場合には曲線は左方向に移動し、混雑度がある値以上となる部分では変動係数は混雑度に対しほば一定となる。また δ が小さい場合には、曲線の左方向への移動は少なく、混雑度がある値以下となる部分では曲線の勾配は大きく、変動係数は混雑度に対して負の相関を示す。すなわち δ は、変動係数が混雑度に対して一定となる領域と、負の相関となる領域の境界を表している。このモデル（以下モデル 2 とする）により変動係数が求めれば、それに平均フロー値を乗じることによりフローの標準偏差 σ_1 および分散 σ_1^2 が求められる。

ここでは、完全相関型、無相関型、相関変動型の3つのOD変動パターンのシミュレーションそれぞれ各6ケースに対して、モデル2により推定された変動係数がシミュレーションによる変動係数と最も良く一致するよ

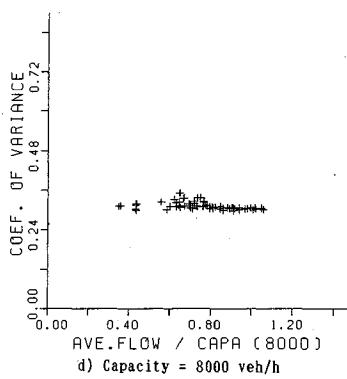
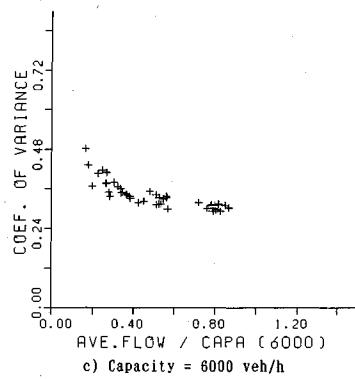
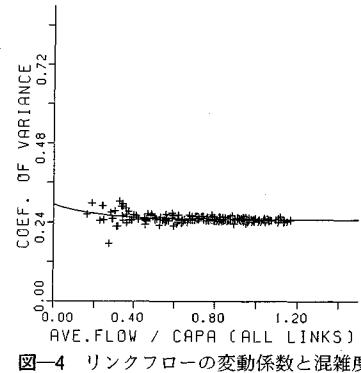
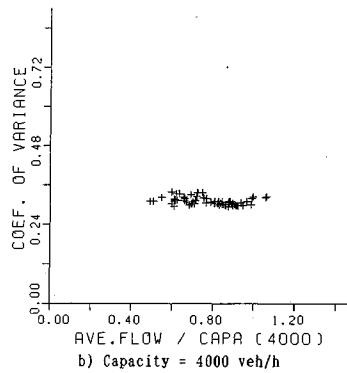
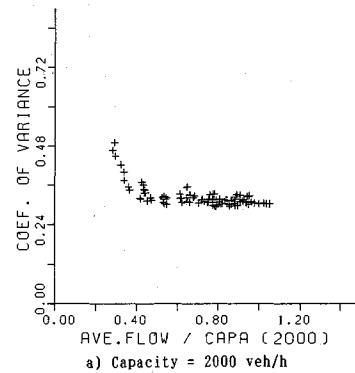


図-3 リンクフローの変動係数と混雑度（リンク容量別）
(相関変動型, ケース 4)

図-4 リンクフローの変動係数と混雑度
(完全相関型, ケース 4)

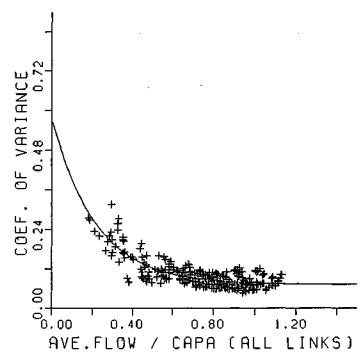


表-2 変動係数推定モデルと分散推定モデルのパラメータと相関係数

OD 变動 パターン	ケース	モデル 1			モデル 2					
		p	q	相関係数 ①	α	β	γ	δ	相関係数 ②	③
完全相関 型の場合	1	0.014	1.921	0.999	0.808	3.942	0.084	1.027	0.274	0.999
	2	0.080	1.968	0.999	0.433	2.485	0.246	1.296	0.250	0.999
	3	0.016	1.905	0.998	0.467	7.988	0.085	0.230	0.349	0.998
	4	0.087	1.959	0.999	0.955	4.595	0.248	0.657	0.323	0.999
	5	0.019	1.883	0.997	0.334	2.407	0.083	1.128	0.348	0.997
	6	0.099	1.944	0.998	0.540	2.608	0.246	0.976	0.335	0.998
無相関 型の場合	1	0.167	1.364	0.797	0.713	5.796	0.028	0.225	0.800	0.825
	2	0.335	1.527	0.792	1.034	5.761	0.073	0.115	0.835	0.822
	3	0.231	1.338	0.795	0.811	4.573	0.028	0.329	0.792	0.825
	4	0.351	1.531	0.788	0.922	4.569	0.071	0.136	0.830	0.824
	5	0.286	1.324	0.789	0.812	3.927	0.028	0.382	0.791	0.823
	6	0.326	1.548	0.780	0.893	3.948	0.072	0.152	0.827	0.821
相関変動 型の場合	1	0.029	1.874	0.996	0.997	7.465	0.100	0.249	0.734	0.996
	2	0.235	1.891	0.997	0.904	7.692	0.307	0.089	0.799	0.997
	3	0.032	1.864	0.996	0.738	6.915	0.101	0.183	0.760	0.997
	4	0.241	1.891	0.997	0.914	6.147	0.307	0.123	0.803	0.997
	5	0.037	1.851	0.996	0.854	4.571	0.100	0.412	0.701	0.996
	6	0.245	1.891	0.997	0.832	5.482	0.308	0.103	0.817	0.997

N=288

①: モデル 1 による分散の相関係数, ②: モデル 2 による変動係数の相関係数, ③: モデル 2 による分散の相関係数

うに、パラメータ α , β , γ , δ を最小二乗法を用いて決定する。モデル 1 のパラメータ推定法も同様である。パラメータが決定された後、各ケースにつき以下の 3 つの比較を行い、それぞれのモデルの有効性を検討する。

- ① モデル 1 による分散とシミュレーションによる分散の比較。
- ② モデル 2 による変動係数と、シミュレーションによる変動係数の比較。

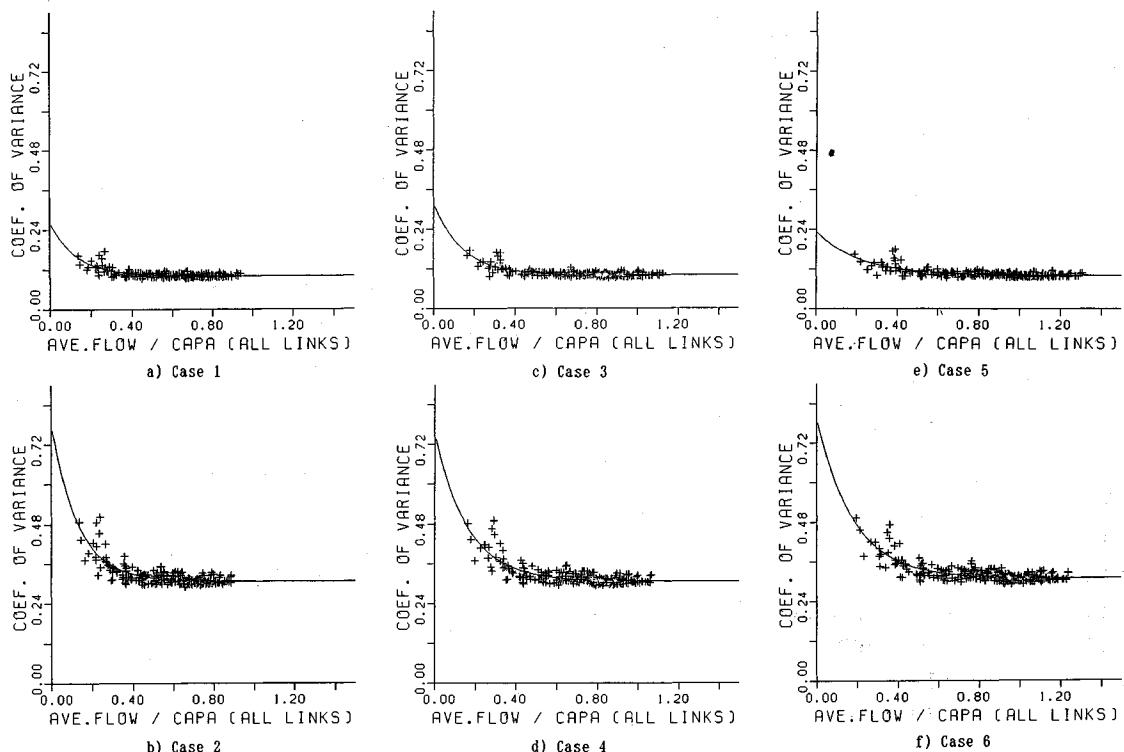


図-6 リンクフローの変動係数と混雑度（相関変動型）

③ モデル 2 による変動係数に平均フローを乗じて推定した分散と、シミュレーションによる分散の比較。

それぞれのケースに対して、決定されたパラメータと相関係数を表-2 に、決定されたパラメータによる式(6)の曲線を図-4~6 に示す。

分散や変動係数の推定プロセスでは、以下に述べるように、それぞれの OD 変動パターン毎に興味深い特性を示す。しかし、最終的に必要な分散の推計精度は、各 OD 変動モデルおよび各ケースを通じていずれも高く、パラメータの安定性も高いことが明らかとなっている。

(1) 完全相関型の場合

モデル 1 による分散の相関係数は、最高で 0.999、最低で 0.997 となり、モデル 1 の説明力はかなり高いことがわかる。モデル 2 では、変動係数の相関係数は最高で 0.349、最低で 0.250 と低くなっている（相関係数②）。この理由は、代表的な例としてケース 4 を示すが（図-4）、変動係数の値が混雑度の低い部分を除いてほぼ一定となっているため、変動係数の値を観測値（シミュレーションから直接得られる値）-理論値（式(6)から得られる値）座標上にプロットすれば 45° 軸上のある一点付近に集中してしまうからである。完全相関型では、総交通量の変動とともにすべての OD 交通量が同時に増減するため、各リンクのフロー変動も総交通量変動に比例

すると考えられる。すなわち、OD 交通量が変動しても経路選択率があまり変化しないと考えられる。このため各リンクフローの変動の様子は似通ったものになり変動係数がほぼ一定値となると考えられる。ただし変動係数がほとんど一定であるため、標準偏差の値は交通量にはほぼ比例することとなる。したがって、変動係数に交通量を乗じて推計した分散の相関係数は最高で 0.999、最低で 0.997 となり（相関係数③）、モデル 2 の精度はモデル 1 と同様きわめて高くなる。また、完全相関であるために各 OD フローの変動 ϵ が直接リンクフローの変動に伝達されるため、OD フローの変動係数が大きくなるとリンクフローの変動係数も大きくなる。

(2) 無相関型の場合

この場合には、各 OD ごとのフローの変動がリンク上で打ち消し合うと考えられるので、それぞれの配分に対しリンクフローはほぼ一定となる。リンクフローの変動係数も OD フローの変動係数よりも小さく算出される。比較のため同じケース 4 での結果を示すと（図-5）、変動係数は完全相関型の場合に比べて小さくなっていることがわかる。また、完全相関型の場合では、混雑度にかかわらず変動係数は一定となつたが、無相関型では混雑度と変動係数間に明らかな逆相関関係が見られる。モデル 1 による分散の相関係数は、最高で 0.797、最低で 0.780 と完全相関型の場合よりも低くなっている。モ

ル2では、変動係数の相関係数（表—2の②）は最高で0.835、最低で0.791と、完全相関型の場合よりもかなり高くなっている。また、モデル2による分散の相関係数（表—2の③）は最高で0.825、最低で0.821と、モデル1によるものよりも高い推計精度が得られる。これらより、混雑度により変動係数を推定する方法は有効であるといえる。

(3) 相関変動型の場合

これは、完全相関型と無相関型の中間的な場合に相当する。変動係数の推定状況を示す図—6より、混雑度と変動係数の間の逆相関関係が確認できる。この図からわからることは、変動係数の値は完全相関型に近く、変動の型は無相関型に近いことである。この理由は、各ODフローは正の相関をもしながら変動するが、その変動の程度はOD毎に無相関に与えているからと考えられる。モデル1による分散の相関係数は、最高で0.997、最低で0.996と高くなっている。モデル2では、変動係数の相関係数（表—2の②）は最高で0.817、最低で0.701と比較的高く、この結果は無相関型の結果と同様である。また、分散の相関係数（表—2の③）は最高で0.997、最低で0.996と、モデル1によるものと同程度となっている。したがって相関変動型の場合にも、混雑度により変動係数を推定する方法は有効であると考えられる。

また、相関変動型では、混雑度が比較的高い（式(6)による曲線が水平状態になる状況下で、図—6から判断して混雑度が概ね0.5以上の部分）場合に、リンクフローの変動係数とODフローの変動係数とが一致する。完全相関型の場合と同様に、各ODフローの共通する変動 ϵ がリンクフローの変動に伝達されるからと考えられる。ODフロー変動がこの型の場合には、リンクフローの需要の変動を観測すればODフロー変動 ϵ を推定できることとなる。

(4) 考 察

予測においてはパラメータの安定性が重要である。モデル1では、混雑度の考慮が p , q に潜在的に含まれている。この場合、 p がSD (SDT および SDIJ を指す) の変化に対して敏感に変化しており、 q は安定している。したがって、予測に用いるには、交通量変動が大きく変化しないことが前提となると考えられる。また、モデル1には、構造が簡単で推計精度も高いという長所があるので、交通の変動特性 (SD値) に大きな変化がない場合の交通量変動の推計（空間的に異なる場所の予測等）にも有効であると考えられる。

これに対してモデル2では、混雑度を明示的に考慮する構造となっているため、表—1に示すOD変動パターンおよびケース間でのパラメータ変動は、モデル1に比較して小さくなるという長所がある。したがって、将来ネットワークや交通政策の代替案比較において、リンク

信頼度を計算する上で必要となる各リンクフローの分散値は、モデル2を利用することにより容易に求めることが可能となる。ただここで注意すべきことは、以上の考察はシミュレーションが現実をよく反映しているという仮定に基づいているということである。したがって今後、現実の需要変動のデータを解析しモデルを再検証する必要があろう。

6. 交通量変動によるリンク信頼度推定法

前節までで、リンクフローの需要分布はほぼ正規分布とみなせることがわかった。本節では、シミュレーションから求めたリンクフローの平均と分散を用いて需要変動の正規分布の確率密度関数を決定し、式(1)の積分計算によりリンク信頼度を計算する。さらにその結果を、シミュレーションから直接求めたリンク信頼度と比較する（この比較を比較Aとよぶことにする）。この比較は、リンクフローが完全に正規分布に従うのならば不必要的ものであるが、実際には完全な正規分布でないので、このことがリンク信頼度にどの程度影響するのかを検討するためのものである。さらに、2.で示した平均交通量とその分散から決定できる確率密度関数からリンク信頼度を推定する方法の妥当性を確認するためのものである。結果を簡単に述べると、推計されたリンク信頼度とシミュレーションから直接観測されたリンク信頼度との間の相関係数は、完全相関型で0.987～0.995、無相関型で0.978～0.999、相関変動型で0.982～0.998ときわめて推計精度の高いものであった。

実際の道路網を対象とした信頼性解析を行う場合や将来的の道路計画では、すべてのリンクの分散を得ることは困難であるので、交通量配分から得られる平均的交通量のみからリンク信頼度が計算できればきわめて有用である。したがって最後に、本研究の目的であるリンクフローの平均値のみからリンク信頼度を推定する方法の検討を行う。ここでは、このリンク信頼度推定法の考え方の妥当性を検証する意味から、リンクの混雑度を明示的に取り扱えるモデル2を用い、各パラメータ α , β , γ , δ は各OD交通変動パターン（完全相関型、無相関型、相関変動型）の各ケース（1～6）ごとの値を用いた。そして上述と同様にこの結果をシミュレーションより直接求めたリンク信頼度と比較する（これを比較Bとよぶことにする）。比較Aと比較Bの違いは、分散 σ_a^2 がシミュレーションから直接得られた値か、平均交通量 \bar{n}_a から推計された値かの違いである。

比較Bの結果を以下に述べるが、結果は比較Aとほとんど同じであった。リンク信頼度の推計値とシミュレーションからの観測値の散布図を、相関変動型の全ケースについて図—7に示す。推計されたリンク信頼度とシミュレーションから直接観測されたリンク信頼度と

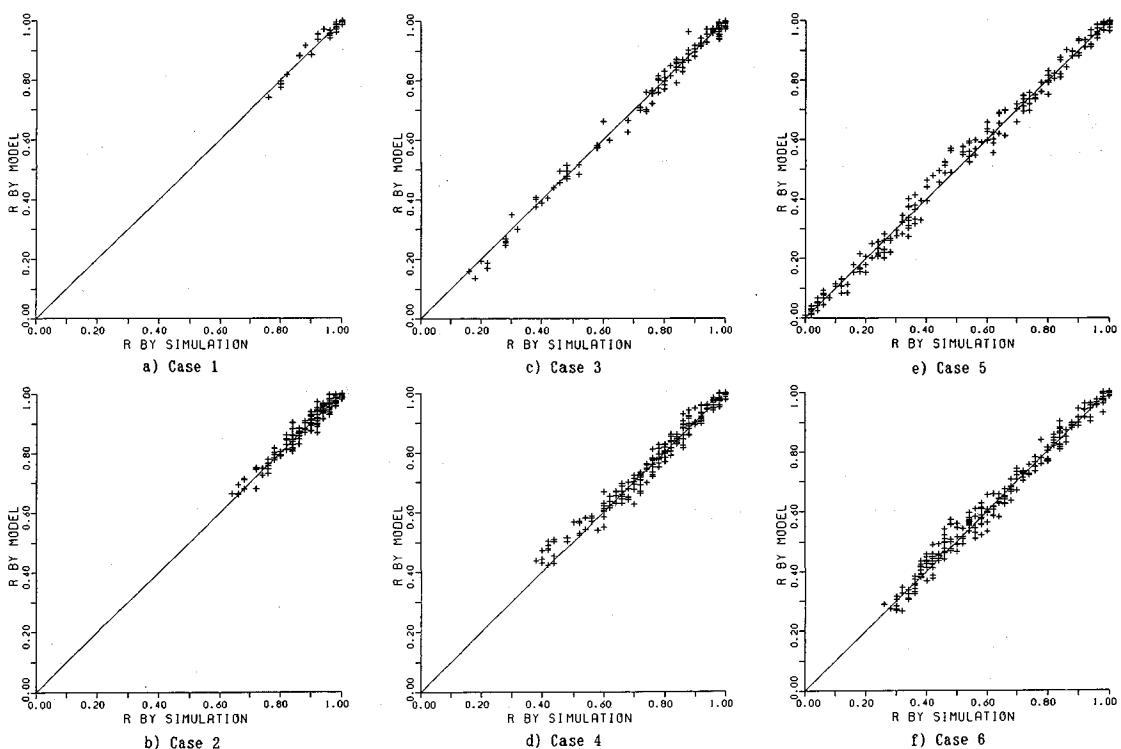


図-7 モデルとシミュレーションによるリンク信頼度の比較（比較B、相関変動型）

の間の相関係数は、完全相関型で0.986～0.996、無相関型で0.941～0.990、相関変動型で0.984～0.998と同様に推計精度の高いものであった。リンク信頼度の推計精度については、混雑度別に相対誤差を用いた検討も行った。その結果は、混雑レベル3で推計精度が若干悪化した程度であった。この理由は、混雑度が高くなつてくると、シミュレーションによるリンク信頼度はゼロになり得るが、正規分布に基づく方法ではゼロとはならない（式(1)の積分計算の性質によりゼロに近い正值となる）ことに起因しているからである。以上述べたように、比較Bでは、比較Aと同程度の推計精度が得られた。この理由は、前節で述べた平均フローからの分散の推定が精度良くなされているからである。

以上まとめると、本研究で提案したリンク信頼度推定法は、相関係数が高く説明力が高いという結論が得られた。現実のODフローの変動は、相関変動型の変動パターンで説明できると考えられる。この場合にもフローの変動係数を混雑度から推定するモデルによって正規分布の確率密度関数を決定し、この関数の積分計算によりリンク信頼度を求める方法の精度は高いといえる。

7. 結 論

本研究では、交通量変動に起因する道路網の信頼性を解析するために、道路網上での交通量変動の特性を分析

するとともに、リンク信頼度を推定する方法を提案した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) 提案した方法では、リンク信頼度を決定する支配的要因を交通量変動とし、リンク信頼度は、リンクへの需要がリンクの交通容量を超えない確率であると定義した。データ制約の多い予測や代替案比較に耐えられるようするため、本方法では、リンク需要フローの平均値（配分計算から得られる）とリンク容量のみからリンク信頼度を推定する構造とした。

(2) OD交通量変動を説明する2つの要因をとりあげ、3つのOD交通量変動パターンを検討した。2つの要因とは、OD間の交通量変動が完全相関か無相関かであり、OD交通量変動パターンは、完全相関型と無相関型、両者の中間型である相関変動型である。そして、等時間原則に基づく配分シミュレーションの結果より、リンク需要変動の分布はOD交通変動の様子に関係なく正規分布と見なせることを確認した。

(3) リンクの平均需要交通量と交通容量を説明変数としてリンク需要フローの変動係数を推定する関数モデルを提案した。まず、OD交通量の変動パターンによって変動係数の特性が異なることを明らかにした。すなわち、完全相関型では、各ODフローが完全な相関をもつて同時に増減するため、経路選択率がほぼ固定されて、その結果リンクの変動係数は混雑度に関係なくほぼ一定

値となる。無相関型では、増減がリンク上で打ち消しあうため、リンクフローの変動係数は小さく算出される。相関変動型では、各ODフローが正の相関をもちらながら変動し、かつ変動の程度はOD毎に無相間に与えていることが原因となって、変動係数の値は完全相関型に近く、変動の型は無相関型に近いことが明らかとなった。このように、変動係数の特性はOD交通量変動パターンにより異なるが、変動係数から推定されるフローの分散推定モデルは、いずれのケースに対しても説明力が高いことが明らかとなった。また、シミュレーションに基づく比較から、この関数モデルによる分散の推定精度は、従来の関数モデルよりも推定精度が高いことが明らかとなった。この関数モデルは、混雑度を明示的に考慮しているので混雑度の変化にも対応でき、従来モデルに比較してパラメータの安定性も高いことが明らかとなった。なお、完全相関型と無相関型は非現実的な変動パターンであるが、現実の交通量変動の要因を抽出した両極端な変動パターンであると考えられる。この2つの変動パターンと両者の中間的な変動パターンを分析することにより、OD変動に対するリンクフローの変動パターンの性質に関する知見が得られた。

(4) 以上の結果に基づいて、交通需要の変動に起因するリンク信頼度推定法を構築した。シミュレーション結果との比較により、リンク信頼度の推定精度が高く、本手法の有効性を示すことができた。この方法では、ネットワーク上の平均交通量を用いるため、1回の交通量配分計算のみでリンク信頼度を推定することが可能である。本方法を用いることにより、各リンクフローの変動が未知である将来ネットワークについても、各リンク信頼度を容易に推定することができる。したがって、この方法の開発により、従来の道路網信頼性解析で課題となっていた各リンクの信頼度を交通条件に応じて決定する問題が解決できる。さらに、本方法と、リンク信頼度

からノード間信頼度を推定する信頼性解析法とを結合させることにより、交通フローを明示的に考慮した道路網信頼性解析法を構築でき、交通制御や規制等の道路網管理運用策の検討に利用可能となる。

今後の課題としては、本研究で得られた成果を現実道路網に適用する場合の検討が必要である。すなわち、本研究では現実の格子状ネットワークから抽出されたデータを参考としてモデルを構築したが、シミュレーションで得られた結果が現実に適用可能かどうか、 α , β , γ , δ の値としてどのような値を利用すべきか、他の形状のネットワークへの適用性はどうであるか等の問題が残っている。本研究では、現実とモデルの間で最短経路選択というドライバーの交通行動に規範的同一性が成立するという立場に立っているが、これが実際に成立するかの検討が今後必要である。また、 α 等のパラメータが比較的安定していることは本研究の成果であるが、現実道路を対象とした場合の検証に課題を残している。

参考文献

- 1) 飯田恭敬・若林拓史・吉木 務：ミニマルバス・カットを用いた道路網信頼度の近似計算法、交通工学、Vol. 23, No. 4, pp. 3~13, 1988.
- 2) 飯田恭敬・若林拓史・福島 博：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, pp. 107~116, 1989.
- 3) 交通工学研究会：交通工学ハンドブック（第4章）、技報堂出版、pp. 131~142, 1984.
- 4) 飯田恭敬・高山純一：高速道路における交通量変動特性の統計分析、高速道路と自動車、Vol. 24, No. 12, pp. 22~32, 1981.
- 5) 朝倉康夫・柏谷増男・熊本伸夫：交通量変動に起因する広域道路網の信頼性評価、土木計画学研究・論文集7, pp. 235~242, 1989.

(1992.1.10受付)

ANALYSIS OF TRAFFIC VARIANCE IN ROAD NETWORK AND LINK RELIABILITY ESTIMATION METHOD ATTRIBUTED TO STOCHASTIC TRAFFIC VARIATION

Hiroshi WAKABAYASHI, Yasunori IIDA and Yoichi INOUE

This paper presents a link reliability estimation method for road network reliability analysis. Link reliability is assumed to be the result of stochastic variations in link flow, and link reliability is defined as the probability that the demand flow on the link does not exceed the link capacity for a given time period. When link flow variation is identified as a probability density function, link reliability can be determined from demand flow and link capacity. Three OD flow variation patterns are introduced and the variance of link flow is analyzed through traffic assignment. Variance estimation model (VEM) of link flow and link reliability estimation method based on VEM are developed. Numerical operations is executed verifying that the method provides sound estimators.