

道路網の機能的階層性とネットワーク信頼性指標との関連*

Functional Hierarchy of a Road Network and its Relations to Network Reliability

藤原健一郎**, 朝倉康夫***, 柏谷増男****

by Fujiwara Ken-ichiro, Asakura Yasuo and Kashiwadani Masuo

1. はじめに

道路網がその機能を十分に発揮するには、計画機能の階層性を高めることが重要であることは言うまでもない。階層性を持った道路網は平常時においては、円滑な交通を確保する上で非常に有効である。一方、道路網の機能的階層性を強化すると共に、個々のリンクの機能に応じて構造的な頑強性を差別化することにより、災害時においてもネットワークの信頼性を向上させることが期待される。

本研究では、道路網の機能的階層度の指標を提案すると共に、階層化された道路網と災害発生時におけるネットワークの信頼性との関連性について考察することを目的とする。

2. 道路網の信頼度の計算方法⁽¹⁾

(1) 信頼度の定義

ODペア r s 間の信頼度 $R_{rs}(\theta)$ を「平常時のネットワーク上での所要時間に対し、許容できる迂回の範囲内 (θ) の所要時間でトリップを完了することができる確率」と定義する。本研究でいう信頼度指標は、災害時においてもODペア間があるサービス水準以上に保たれて連結している確率である。従来のODペア間の連結度指標は、サービス水準を極めて低く（許容できる所要時間を十分大きく）した場合の信頼度 $R_{rs}(\theta)$ に他ならない。

(2) 状態の発生確率の計算

n 本のリンクからなる連結されたネットワークを考える。障害はリンクのみで発生し、ノードでは発生しない。障害が発生したリンクは物理的に非連結となり、上下線とも完全に通行不可能な状態となる。この

とき、ネットワーク上で発生する可能性のある状態を $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ で表し、状態ベクトル x と呼ぶ。状態ベクトルの要素 x_a は、リンク a が連結され通行可能であれば1、そうでなければ0である。ネットワークに外力 F が作用したとき、ネットワークの状態が x である確率は式(1)となる。

$$P(x|F) = \prod_a p_a(F)^{x_a} (1 - p_a(F))^{(1-x_a)} \quad (1)$$

$p_a(F)$ は外力 F に対するリンク a の物理的連結確率であり、外力 F が非常に大きい場合は $p_a(F) = 0$ 、非常に小さい場合は $p_a(F) = 1$ で、リンク間で相互に独立である。

(3) ODペア間の所要時間の計算

ネットワークの状態が x であるときのネットワークフローを求めて、ODペア間の所要時間を算出する。災害時において、ネットワークの一部のリンクが通行不可能な状態がある程度長期間にわたって継続する場合は、利用者均衡仮説は妥当性を持つと考えてよい。リンクの容量制約とサービス水準の変化による交通需要の変動を考慮するために、リンク容量制約付きのOD需要変動型利用者均衡モデルにより、フローを記述し、所要時間を算出する。

(4) 稼働・停止関数

ネットワークの状態が x であるときのODペア r s 間の稼働・停止関数 $Z_{rs}(\theta, x)$ を式(2)で表す。状態 x のときのODペア r s 間の所要時間 $t_{rs}(x)$ が平常時のODペア r s 間の所要時間 $t_{rs}(x_0)$ に比較して許容できる範囲にあれば、ODペア r s 間は機能していると判断する。ODペアが機能しているとき稼働・停止関数は1であり、そうでなければ0である。

$$Z_{rs}(\theta, x) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_{rs}(x)/t_{rs}(x_0) \leq \theta \\ 0 & \text{if } t_{rs}(x)/t_{rs}(x_0) > \theta \end{cases} \quad (2)$$

ここに θ はODペア間の所要時間に関する判断基準

*keywords : 交通網計画, 交通計画評価, 防災計画

**学生員 愛媛大学大学院博士前期課程土木海洋工学専攻

***正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科

****正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科

(〒790松山市文京町, TEL.089-927-9829, FAX.089-927-9843)

(E-mail. asakura@en1.chime-u.ac.jp)

($1 \leq \theta < \infty$) であり、その値は外生的に与えられるものとする。

(5)信頼度の近似解法⁽²⁾

ODペア r, s 間の信頼度の厳密解 $R_{rs}(\theta)$ は稼働・停止関数の期待値として式(3)で与えられる。

$$R_{rs}(\theta) = \sum P(x|F) Z_{rs}(\theta, x) \quad (3)$$

厳密解を求めるためには全ての状態ベクトルを抽出しなければならないので、大規模ネットワークでは計算コストが膨大となる。そこで、発生確率の大きい方から J 番目の状態ベクトルに対する稼働・停止関数の値を計算する。その値を用いて信頼度の上、下限値を求め、信頼度を近似計算する。発生確率の大きい方から J 番目の上限値 $R_{rs,J}^U(\theta)$ 、下限値 $R_{rs,J}^L(\theta)$ はそれぞれ以下のように計算できる。

$$R_{rs,J}^U(\theta) = \sum_{j=1}^J P(x_j) Z_{rs}(\theta, x_j) + (1 - \sum_{j=1}^J P(x_j)) \quad (4.a)$$

$$R_{rs,J}^L(\theta) = \sum_{j=1}^J P(x_j) Z_{rs}(\theta, x_j) \quad (4.b)$$

上、下限値の平均値を信頼度の近似解とし、式(5)で表す。

$$R_{rs}(\theta) = \{R_{rs,J}^U(\theta) + R_{rs,J}^L(\theta)\} / 2 \quad (5)$$

収束判定は、式(6)で与えた上、下限値の差が十分小さい正の数 ε 以下であるかどうかで判断する。

$$R_{rs,J}^U(\theta) - R_{rs,J}^L(\theta) \leq \varepsilon \quad (6)$$

3. 道路網の階層性

道路の機能は、交通機能、土地利用誘導機能、空間機能に大別される。道路計画にあたっては、多種多様な機能を持つ道路で構成される道路網を体系的、統一的に整備していく基本的な軸として道路の機能分類を考える。この考え方にに基づき、道路の規格、構造を決定しなければならない。ネットワーク特性と交通特性により、道路区間（リンク）を機能的に分類すると、例えば、主要幹線、幹線、補助幹線、区画道路などのカテゴリーに分けることができる。道路区間に期待される機能が十分に発揮されるには、階層的かつ有機的

なネットワーク構成とすることが重要である。幹線は幹線らしく利用され、生活道路は生活道路らしく利用されるために、階層構造を採用することが必要である。

階層化されたネットワークでは、リンクの機能別にネットワークを構成した場合にも機能的であるはずである。そこで本研究では、道路網の階層度を「道路区間に期待される機能ランク別にネットワーク化したとき、それぞれのランクのネットワークにおいて機能しているODペア数の割合の積」と定義した。階層度 H は式(7)で表される。

$$H = \prod_{i=1}^n \frac{s_i}{S_i} \quad (7)$$

ここに s_i はランク i ($i=1, \dots, n$) のネットワークにおいて機能しているODペアの数、 S_i はネットワーク内の全ODペア数である。階層度 H の値の大きいネットワークほど階層的なネットワークであるとした。

図-1に示す3種類のネットワークを考える。3種類のネットワークは図の左側から順番に、(1)リンクの機能に差を設け階層性を期待したネットワーク、(2)リンクの機能に全く差のないネットワーク、(3)リンクの機能に差はあるが構成がランダムなネットワークであり、それぞれ階層ネットワーク、プレーンネットワーク、ランダムネットワークと呼ぶことにする。道路区間の機能を便宜的に、機能の高いリンク ($i=1$)、中程度のリンク ($i=2$)、機能の低いリンク ($i=3$) の3段階のランクに分ける。3種類のネットワークのそれぞれをリンクの機能ランク別にネットワーク化（図-2）して階層度を求めると、階層ネットワークでは、 $H=0.0214$ 、プレーンネットワークでは $H=0.0$ 、ランダムネットワークでは $H=0.0027$ となる。

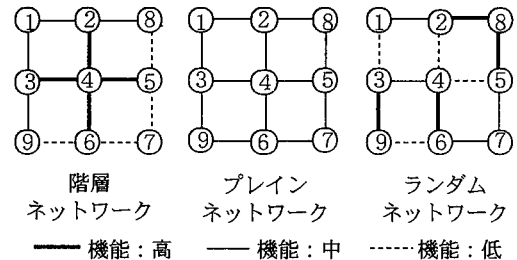


図-1 ネットワーク図

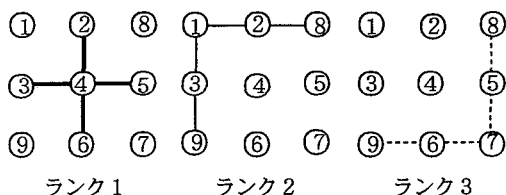


図-2 リンクの機能ランク別ネットワーク
(階層ネットワークの例)

4. 階層性と信頼度の関連⁽³⁾

ネットワークの信頼度を向上させるためには、外力 F に対して個々のリンクが構造的に機能する確率であるリンク信頼度 $p_i(F)$ を高めることが有効である。しかし、経済的制約を考慮すると、全てのリンクの構造的頑強性を同一水準に保ったままで一様に高めることはかなり困難である。そこで、外力の大きさが同じであれば、期待される交通機能が上位のリンク（具体的には主要幹線）ほど信頼度が高くなるように交通機能に応じてリンクの頑強性の水準を差別化する（図-3）。このとき同時に、ネットワークを階層化することによって、ネットワーク（ODペア間）信頼度の向上を期待するのである。

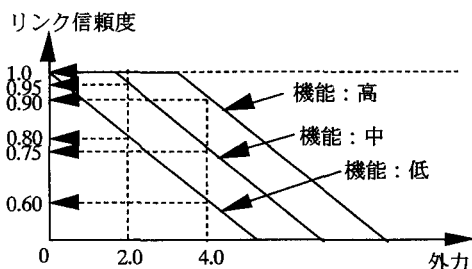


図-3 機能に応じたリンク信頼度

階層性と信頼度の関係を定性的に理解するために、図-1 に示した3種類のネットワークを考える。リンクに作用する外力が小さい場合は、頑強性が低いリンクを含む階層ネットワークは中程度の頑強性のリンクのみで構成されているプレインネットワークに比べて信頼度が低くなることが予想される。しかし、外力が小さいために、頑強性が低いリンクでも通行不可能となる確率が小さいので、階層ネットワークでも著しく信頼度が小さくなることは考えられない。

一方、外力が大きき場合は、頑強性が高いリンク以

外は、ほとんどのリンクで通行不可能となる。したがって、すべてのリンクが中程度の頑強性であるプレインネットワークの信頼度は小さくなる。しかし、頑強性の高いリンクを含む階層ネットワークは、ある程度高い水準の信頼度を確保できるだろう。また、外力の大きさにかかわらず、道路機能がランダムに入り交じったランダムネットワークよりも、階層構造を持った階層ネットワークの信頼度は高いと考えられる。

5. 小規模ネットワークでの数値計算例

図-3 に示すリンク信頼度、および、図-1 に示す3種類のネットワークを用いた数値計算により、ネットワークの階層性と信頼度の関係を調べる。走行時間関数、需要関数は文献(1)と同様なものを使用し、信頼度の収束判定基準 $\varepsilon=0.01$ 、所要時間の判断基準 $\theta=3.0$ として計算を行った。

(1) 外力が小さい場合 ($F=2.0$)

表-1 に外力が小さい場合の主なODペア間の信頼度を示す。

階層ネットワークとプレインネットワークの信頼度を比較する。階層ネットワークのほうが信頼度が高いODペアは、全ODペア(72ペア)中30ペア(全ODペアの42%)で、外力が小さい場合は、プレインネットワークのほうが信頼度が高いことがわかる。階層ネットワークの各ODペア間の信頼度はほとんどが0.9以上の値を示している。特に、セントロイド2から6にかけてのODペアでは高い信頼度を確保している。セントロイド7から9にかけてのODペアでは、プレインネットワークのほうが信頼度が高い。これは階層ネットワークでは頑強性の低いリンクが、セントロイド7、8、9に連結されているためである。同じく、頑強性の低いリンクに連結しているセントロイド5、6は、頑強性の高いリンクによっても連結されているので、同様な傾向を示さなかった。セントロイド7は頑強性の低いリンクのみで連結されている。その影響により、ODペア⑤⇔⑦、⑥⇔⑦では信頼度が0.65となり、特に信頼度が低くなったと考えられる。

階層ネットワークとランダムネットワークを比較する。全ODペア中48ペア(全ODペアの67%)のODペアで階層ネットワークのほうがランダムネットワークよりも信頼度が高い。リンクの頑強性に差を設けても、階層的にネットワークが構成されていなければ、信頼度の値は低くなる。しかし、ランダムネットワークでも信頼度の値は高い水準を確保しており、外力が

小さい場合には信頼度にあまり差がみられない。

表ー1 外力が小さい場合のODペア間の信頼度

ODペア	階層	プレイン	ランダム
3⇔4	0.99	0.94	0.94
4⇔5	0.99	0.94	0.94
2⇔6	0.99	0.98	0.94
5⇔7	0.65	0.94	0.94
6⇔7	0.65	0.97	0.97

(2)外力が大きい場合 (F=4.0)

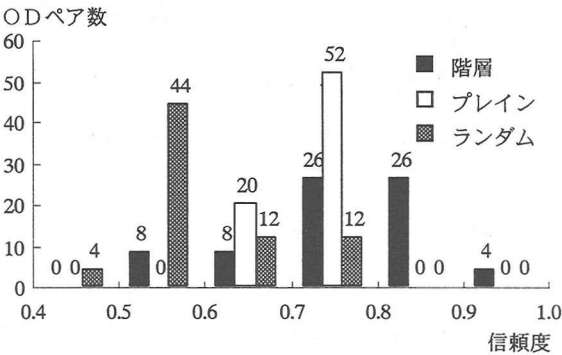
表ー2に外力が大きい場合の主なODペア間の信頼度を示す。図ー4には信頼度のヒストグラムを示す。

階層ネットワークとプレインネットワークを比較する。全ODペア中44ペア(全ODペアの61%)で階層ネットワークのほうがプレインネットワークより信頼度が高く、全般的には、階層ネットワークのほうが信頼度が高いといえるだろう。もちろん、階層ネットワークでは信頼度が0.6未満のODペアが8ペア存在しており、必ずしも、階層ネットワークのほうが信頼度が高いとはいえない。しかし、階層ネットワークでは信頼度が0.8以上のODペアが30ペアあるのに対し、プレインネットワークでは信頼度0.8以上のODペアは存在しない。このようなことから、階層ネットワークのほうがプレインネットワークよりも全体的に信頼度が高くなるといえるのではないと思われる。

階層ネットワークとランダムネットワークを比較する。全ODペア中62ペア(全ODペアの86%)で階層ネットワークのほうがランダムネットワークよりも信頼度が高い。また、ランダムネットワークは信頼度が0.7以上のODペアが12ペアしかなく、0.6未満のODペアが48ペアもある。このような理由により、外力が大きい場合についても、階層ネットワークのほうが信頼度が高いことがわかる。階層ネットワークとランダムネットワークの各ODペア間の信頼度の差も大きく、外力が大きい場合はランダムネットワークは特に脆弱なネットワークであるといえる。

表ー2 外力が大きい場合のODペア間の信頼度

ODペア	階層	プレイン	ランダム
3⇔4	0.90	0.68	0.70
4⇔5	0.87	0.68	0.62
2⇔6	0.82	0.64	0.60
5⇔7	0.53	0.72	0.70
6⇔7	0.53	0.76	0.69



図ー4 信頼度のヒストグラム

6. おわりに

本研究では、道路網の階層性の指標を提案し、階層性と信頼度の関連性について考察を行った。

提案した階層度指標にしたがって、小規模ネットワークで数値計算を行った。その結果、外力の大きさにかかわらず、階層ネットワークのほうがランダムネットワークよりも信頼度が高くなることがわかった。外力が小さい場合は、階層ネットワークはプレインネットワークよりも信頼度が小さくなる。しかし、階層ネットワークでも著しく信頼度が低くなることはない。外力が大きい場合は、階層ネットワークのほうがプレインネットワークよりも信頼度は大きくなる。しかし、階層ネットワークは、外力が大きい場合には、信頼度が著しく小さくなるODペアが存在し、必ずしもプレインネットワークよりも信頼度が高くなるとはいえない。3種類の異なるネットワークの信頼度をどのような方法で適切に比較するかは今後の課題となるであろう。

階層度の定義については既に階層度を定義する段階で連結性がある程度記述されており、課題が残っている。今後はこれらの課題について十分に検討を行う必要がある。

参考文献

1)朝倉康夫, 柏谷増男, 藤原健一郎: 交通ネットワークにおける災害時のフローの変化を考慮したODペア間の信頼度の指標, 土木計画学研究講演集, No.18(2), pp.737-740, 1995
2)Du, Z-P. and Nicholson, A.: Degradable Transportation Systems Performance, Sensitivity and Reliability Analysis, Research Report 93-8, Dept. of Civil Eng., University of Canterbury, NZ, 1993
3)朝倉康夫, 柏谷増男, 藤原健一郎: 道路ネットワークの階層性と信頼度の関係についての一考察, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要IV, 1996