【土木計画学研究・講演集 No.21 (1) 1998年11月】

平常時と災害時における最適道路ネットワーク構成の比較 *

Comparison of Optimal Road Networks in Ordinary and Degraded Conditions

越智大介**，朝倉康夫***，柏谷増男****

by Daisuke Ochi and Yasuo Asakura and Masuo Kashiwadani

1. はじめに

従来の信頼性評価に関する研究[1]は，pure network でのネットワークが連結であるか否かを表す連結性と，flow network での許容される所要時間の範囲内でトリップ可能か否かを表す時間信頼性の両面から行われてきた．藤原他[2]は「許容される範囲内の交通処理能力を維持した状態での連結性」に着目し，道路ネットワークの災害時の信頼性評価モデルを構築した．

村橋[3]は災害時に強いネットワークを構築するためだけの投資では説得力がなく，平常時に良質の整備をすれば自ずと災害に強いネットワークが整備されると述べている．しかし著者らの知るところでは，平常時・災害時のネットワーク最適整備の研究事例はあっても，お互いの関係についての研究事例は多いとは言えない．

本研究では，「平常時・災害時において最適なネットワーク整備とその関係」を明らかにすることを研究の目的としている．

以下，２では道路ネットワークの前提条件について述べる．３，４では平常時，災害時のネットワーク評価指標とその計算法を示す．５では数値計算例よりそれらの関係について考察する．

2. 道路ネットワークの前提条件

（１）比較の考え方

平常時と災害時における最適道路ネットワークの比較のためには，いくつかの前提条件を設ける必要がある．平常時の最適ネットワーク問題（Network Design Problem）でさえも，あるネットワークパターンに対するフローの計算によりパフォーマンス（評価関数）を評価する場合には相当な計算コストが必要である．災害時のネットワーク評価問題では，あるネットワークパターンにおいて個々のリンクが機能する場合としない場合に分けてフローを求めてパフォーマンスを評価する必要がある．したがって，「災害時の最適ネットワーク問題」を定式化することはできても，それを厳密に解くことはほとんど不可能である．

本研究では，ネットワークへの総投資費用が一定である「代替案比較型」の最適化問題を考える．すなわち，整備対象となる複数のリンクの整備費用の和が一定であるという条件の下で組み合わせ的に複数のネットワーク代替案を用意し，それらのパフォーマンスを比較して順位付けするのである．同じ組み合わせのネットワークパターンに対して平常時と災害時のパフォーマンスをそれぞれ求め，比較しようというものである．したがって，真に最適なネットワークを得ることが目的ではなく，複数のネットワークの比較を通して，「平常時に良好なパフォーマンスを示すネットワークは，災害時にもその優位性を保ち続けるか？」を検討することにある．

（２）交通流の記述

平常時の場合，すべての利用者がすべての経路について完全な情報を得ていれば，利用者均衡仮説は妥当性をもつと考えられる．災害時においてネットワークの一部の機能停止の状態がある程度長期間にわたって継続する場合も同様に考えられる．

本研究では，リンク容量制約付き OD 需要変動型利用者均衡配分モデルを用いてネットワークフローを求める．このモデルは，ネットワークのサービス水準によって交通需要の変化が記述できる利点を持ち，災害時の交通需要の減少を記述できる．また，リンクの容量制約を明示的に設けることにより，容量制約のない均衡問題に比較して，特定経路に交通が集中した場合

---

*keywords：交通網計画，防災計画，信頼性評価

**学生員 愛媛大学大学院博士前期課程土木海洋工学専攻
（〒790-8577松山市文京町，TEL.089-927-9829，FAX.089-927-9843）

***正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科

****フェロー 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科

のボトルネックの発生とサービス水準の低下を表現しやすい.

3．平常時のネットワーク最適化問題

平常時におけるネットワーク全体のサービス水準の指標として，利用者均衡モデルにより求まるネットワーク全体の消費者余剰を用いる．第 l 番目のネットワーク案 $\boldsymbol{x}^l$ に対する OD ペア rs 間の消費者余剰 $CS_{rs}(\boldsymbol{x}^l)$ は（式-1）で表される.

$$CS_{rs}\left(\boldsymbol{x}^l\right)=\int_0^{q_{rs}\left(\boldsymbol{x}^l\right)} D^{-1}(\zeta)d\zeta - q_{rs}\left(\boldsymbol{x}^l\right)\cdot t_{rs}\left(\boldsymbol{x}^l\right) \qquad (1)$$

ここに，$\boldsymbol{x}^l$：ネットワーク案 l，$q_{rs}(\boldsymbol{x}^l)$：ネットワーク $\boldsymbol{x}^l$ 時の OD ペア rs 間の交通量，$D^{-1}(\zeta)$：逆需要関数，$t_{rs}(\boldsymbol{x}^l)$：ネットワーク $\boldsymbol{x}^l$ 時の OD ペア rs 間の所要時間である.

ネットワーク全体の総消費者余剰 $TOCS(\boldsymbol{x}^l)$ は（式-2）の通りである.

$$TOCS\left(\boldsymbol{x}^l\right)=\sum_{r,s} CS_{rs}\left(\boldsymbol{x}^l\right) \qquad (2)$$

様々なネットワーク $\boldsymbol{x}^l$ （l =1,2,…）の中で総消費者余剰 $TOCS(\boldsymbol{x}^l)$ が最大なものを平常時の最適ネットワークとする.

4．災害時のネットワーク最適化問題

（1）総消費者余剰期待値の定義

従来の信頼性の研究では，OD ペア rs 間の時間信頼度を「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の所要時間でトリップを完了する確率」と定義してきた．しかし，OD ペア rs 間の時間信頼度はネットワーク全体を評価するには必ずしも適していない．そこで，平常時の場合と同様にネットワーク全体の消費者余剰に着目する．災害時には，ひとつのネットワーク案に対しても，複数のネットワークの状態が生起しうる．本研究では，総消費者余剰の期待値を災害時の評価指標とする.

（2）ネットワークの状態と発生確率

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機能を完全に停止して，片側交互通行などで運用されることはないものとする．このとき，ネットワークに含まれるリンクの状態は，状態ベクトル $\boldsymbol{x}=\{x_1,\cdots,x_a,\cdots,x_n\}$ で表すことができる．状態ベクトルの要素 x_a は，リンク a が機能しているとき $x_a=1$，機能していないとき $x_a=0$ である.

各リンクの通行可能確率は与件であり，それぞれのリンクごとに障害はランダムに発生し，その確率はリンク間で相互に独立であると仮定する．リンク a が機能している確率を $p_a(a=1,\cdots,n)$ とすると状態ベクトル $\boldsymbol{x}$ の発生確率 $P(\boldsymbol{x})$ は次式のように示される.

$$P(\boldsymbol{x})=\prod_a p_a^{x_a}(1-p_a)^{1-x_a} \qquad (3)$$

（3）総消費者余剰期待値の近似解法[4)]

ネットワーク案 $\boldsymbol{x}^l$ がであるとき，このネットワークに対する総消費者余剰の期待値の厳密解は次式で与えられる.

$$TOCE(\boldsymbol{x}^l)=\sum_{j=1}^{2^n} P(\boldsymbol{x}_j^l)TOCS(\boldsymbol{x}_j^l) \qquad (4)$$

ここに $\boldsymbol{x}_j^l$ はネットワーク案 $\boldsymbol{x}^l$ について発生しうる状態 j のネットワークを表す．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，Lam and Li の方法[5)]を使って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総消費者余剰の値を計算する．その値を用いて総消費者余剰期待値の上，下限値を求め，期待値を近似計算する．以下の手順で近似解を求める.

【step 0】初期設定

平常時の状態ベクトル $\boldsymbol{x}_0^l$ に対し，利用者均衡モデルを解いて総消費者余剰期待値 $TOCE\,(\boldsymbol{x}_0^l)$ を求めておく．繰り返し回数 $J=1$ とおく.

【step 1】状態ベクトルの抽出

Lam and Li の方法より状態発生確率 $P(\boldsymbol{x}^l)$ の大きい方から J 番目の状態ベクトル $\boldsymbol{x}_j^l$ を取り出す.

【step 2】総消費者余剰の計算

$\boldsymbol{x}_j^l$ に対して利用者均衡モデルを解いて，ネットワークの総消費者余剰 $TOCS\,(\boldsymbol{x}_j^l)$ を求める.

【step 3】上，下限値の計算

上限値 $TOCE_J^U(\boldsymbol{x}^l)$，下限値 $TOCE_J^L(\boldsymbol{x}^l)$ はそれぞれ以下のように計算できる.

$$TOCE_J^U(\mathbf{x}^l)=\sum_{j=1}^{J}P(\mathbf{x}_j^l)TOCS(\mathbf{x}_j^l)+\left\{1-\sum_{j=1}^{J}P(\mathbf{x}_j^l)\right\}TOCS(\mathbf{x}_0^l) \tag{5}$$

$$TOCE_J^L(\mathbf{x}^l)=\sum_{j=1}^{J}P(\mathbf{x}_j^l)TOCS(\mathbf{x}_j^l) \tag{6}$$

【step 4】収束判定

十分に小さい正の数 ε に対し,

$$TOCE_J^U(x^l)-TOCE_J^L(x^l)\le\varepsilon \tag{7}$$

なら近似解 $TOCE(\mathbf{x}^l)$ を

$$TOCE(\mathbf{x}^l)=\left\{TOCE_J^U(\mathbf{x}^l)+TOCE_J^L(\mathbf{x}^l)\right\}/2 \tag{8}$$

として計算終了. そうでなければ, $J=J+1$ として【step 1】へ.

これらより, すべての状態ベクトルを抽出すると上限・下限値は厳密解に収束することは明らかである.

5. 小規模ネットワークでの数値計算例

(1) 数値計算の前提条件

数値計算に負荷をかけないため, ネットワーク代替案の作成においては, (1) ネットワークは平常時において少なくとも連結網であること, (2) リンクの整備費用はいずれも一定であること, (3) リンクの属性(自由走行時間, 容量, 通行可能確率) はすべて一様であることとしている.

図1に示すリンク 12 本, ノード 9 個の基礎ネットワークより, 図2に示したようにランダムにネットワーク案を 50 設定する. ただし, 整備コストはリンク 9 本分とする. つまり, 12 本のうち 9 本が整備されうる複数の連結ネットワークを 50 通り用意するということである. 整備したリンクの属性は一定で表1に示す. また, 各セントロイド間に OD 交通量の上限として 3000 台を与えている.

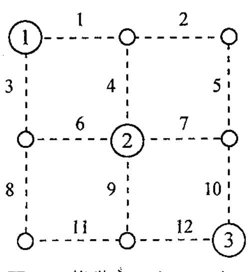

図1 基礎ネットワーク

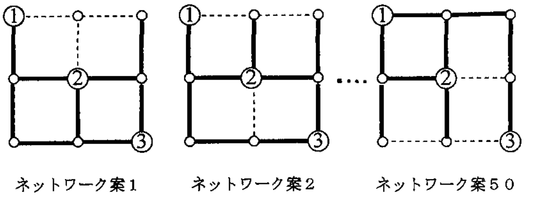

図2 整備ネットワーク案
(コスト一定, リンク9本)

表1 リンク属性

リンク長	リンク速度	リンク容量	通行可能確率
50	60	6000	0.9

走行時間関数, 需要関数はそれぞれ次式に示すものである.

$$\text{走行時間関数}: t_a(V_a)=t_a^0\left(1+\frac{JV_a}{C_a-V_a}\right) \tag{9}$$

$$\text{需要関数}: D_{rs}(t_{rs})=D_{rs}^U\left\{-\gamma(t_{rs}-t_{rs}^0)\right\} \tag{10}$$

ここに t_a^0 はリンク a の自由走行時間, C_a はリンク a の容量, V_a はリンク a の交通量, J はパラメータ ($0<J\leqq1$) である. t_{rs} は OD ペア rs 間の所要時間, t_{rs}^0 は自由走行時の OD ペア rs 間の所要時間, D_{rs}^U は OD 交通量の上限値, γ はパラメータである. ここでは, J=0.5, γ=0.02, 総消費者余剰期待値の収束判定基準は ε=0.02 として計算を行った.

(2) 平常時の場合

ネットワーク案 1~50 について平常時の総消費者余剰の大きい順に並べたものを表2に示す.

表2 ネットワーク案の整備順位 (平常時)

順位	案	*TOCS*	整備ベクトル
1	37	538544.5	1.1.1.0.1.1.1.0.1.1.0.1.
2	30	490362.6	1.1.0.1.1.1.1.0.1.1.0.1.
3	49	482663.2	1.0.1.1.1.1.1.0.1.1.0.1.
4	39	462511.1	1.1.1.0.1.1.1.1.1.1.0.0.
5	44	457368.2	1.1.1.1.1.0.0.1.0.1.1.1.
⋮	⋮	⋮	⋮
25	13	387974.2	1.0.0.1.1.1.1.1.1.0.1.1.
⋮	⋮	⋮	⋮
49	3	263798.0	0.1.1.0.1.0.1.1.1.1.1.1.
50	15	245072.9	1.0.1.0.0.1.1.1.1.1.1.1.

ネットワーク案37と案15を比較すると，総消費者余剰の値が 2.20 倍の差がある．整備コストが一定でもどのリンクを整備するかによってネットワークのサービスが大きく異なることがわかる．

（3）災害時の場合

ネットワーク案1～50について総消費者余剰の期待値$TOCE\,(x')$の近似解法を使って求める．Lam and Liの方法を使うことによりおよそ 0.20 倍（100/512）の計算コストで求められる．

ネットワーク案1～50について災害時の総消費者余剰期待値の大きい順に並べたものを表3に示す．

ネットワーク案37と案24を比較すると，総消費者余剰期待値が 2.12 倍と差がある．平常時と同様にネットワークの構成，整備の違いによってネットワーク全体が持つサービス水準が大きく変わることがわかる．

表3　ネットワーク案の整備順位（災害時）

順位	案	*TOCE*	整備ベクトル
1	37	405303.4	1.1.1.0.1.1.1.0.1.1.0.1.
2	30	398824.7	1.1.0.1.1.1.1.0.1.1.0.1.
3	49	398535.4	1.0.1.1.1.1.1.0.1.1.0.1.
4	23	343058.9	1.0.1.1.1.1.1.1.0.1.0.1.
5	39	337834.3	1.1.1.0.1.1.1.1.1.1.0.0.
⋮	⋮	⋮	⋮
25	28	277870.6	1.1.0.1.1.0.1.1.1.0.1.1.
⋮	⋮	⋮	⋮
49	15	193559.8	1.0.1.0.0.1.1.1.1.1.1.1.
50	24	191583.4	1.1.0.0.1.1.0.1.1.1.1.1.

（4）平常時と災害時の比較

ネットワーク整備における平常時，災害時それぞれの関係について図3に示す．

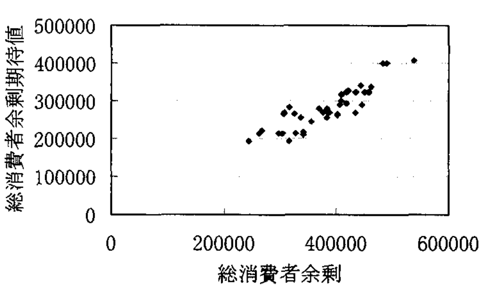

図3　平常時・災害時の関係

平常時・災害時の関係について相関係数を求めると 0.89 とかなり高い正の相関を得た．このことより，平常時の最適なネットワーク整備は災害時に対してもサービスの良いネットワーク持つと言える．

6．おわりに

本研究では，平常時・災害時それぞれのネットワーク全体を評価する指標を提案し，平常時にネットワークを最適に整備することが災害時にも最適なネットワークであるか検証した．

今後の展開として「階層性[6]を含めた平常時・災害時の関係」が挙げられる．本研究では整備したリンクの属性はすべて一定であるような「プレインネットワーク」を考えてきたが，それぞれのリンクを機能区分した「階層ネットワーク」での平常時・災害時の関係を調べる必要がある．

【参考文献】

1）岡田憲夫，若林拓史，多々納祐一（1993）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．土木学会論文集，No.464/IV-19，pp.33-42

2）藤原健一郎，朝倉康夫，柏谷増男（1995）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)，pp737-740

3）村橋正武（1997）研究討論会・新しい防災計画の視点．土木学会誌，Vol.82,No.1,pp.35-38

4）Du,Z.P. and Nicholson,A.J.(1993) Degradable Transportation Systems Performance, Sensitivity and Reliability Analysis. Research Report， No.93-8,Dept.of Civil Eng.,University of Canterbury,NZ.

5）Lam, Y.F. and Li, V. O. K.（1986） An Improved Algorithm for Performance Analysis of Networks with Unreliable Components. IEEE Transacations on Communications,Vol.COM-34,No.5,pp.496-497

6）朝倉康夫，柏谷増男，藤原健一郎（1998）道路網の機能的階層性と災害時の時間信頼性との関連．土木学会論文集，No.583/IV-38,pp.51-60