

被災時復旧優先度による 道路ネットワーク要素の目標信頼性の階層化に関する研究

A study on division of the target reliability of the road network element
by the restoration priority under disastrous situation.

大村寛和*, 佐藤尚次**

Hirokazu OHMURA, Naotsugu SATO

* 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒122-8551 文京区春日 1-13-27)

** 工博 中央大学 理工学部 土木工学科 (同上)

In the past study, damaged link elements of the road network that suffered from the causes such as an earthquake are subjected to the search scheme. The priority of link restoration is determined from a viewpoint of the improvement of the minimum cut which restrains the passage traffic capability of a system. GA is used in the calculation process of the minimum cut. Reflecting this foregoing results, it becomes possible to judge the importance of link element's reliability to the system performance in terms of minimum cut. Rational allocation of design safety level relating with this importance is manipulated in this study. Some numerical results show the effect of the reliability class division of the elements.

Key Words : GA, Network, Minimum cut, Element reliability

1. はじめに

1978年の宮城県沖地震の被害以来ライフライン地震工学は急速に関心を集めてきており、その中でネットワークの信頼性解析が発展してきた¹⁾。被害を受けたネットワーク機能の信頼性解析は連結性を重視するものとネットワークを通過するフローまで考えるものに分類される。道路ネットワーク機能の評価指標は、可到達性、所要時間、最短距離、処理交通量などさまざまなものがあり、被災の状況下での交通機能を詳細に評価するためには、交通生成・発生・集中・配分などの交通工学的な分析が不可欠である。しかし、道路交通の災害時の挙動については、OD交通需要の質的・量的変化や交通手段・経路の変化など不確定要因が多く、未解明の現象が残されている。このことが、フローを物理現象として記述可能な水道や電気よりも機能的被害の予測を困難にしている。

一方、機能信頼性は構造信頼性の上に成り立つものであるから、道路施設の被災状態ならびに保持するサービス水準を確率論的に予測しておくことは、効果的な施設改善計画を検討するために、十分意義深いものと考え

られる²⁾。本研究では、被災時通常の道路網の基本的な性能規範として交通容量が適切と考え、道路ネットワークの最大フローを評価指標とし、被災時の性能低下を確率的に評価する解析を行なう。本研究では道路等で被災状況によって不通、部分開通、全通、という状態があることを考え通過容量能力に着目したフローを含む問題に関心を寄せている。著者のうち佐藤は以前から地震等の原因によって被害を受けた道路ネットワークを想定し、システムの通過交通能力を制約する最小カットの改善という観点から、優先的に修復すべきリンク(破壊箇所)を探索する事を行ってきた。(最小カットの計算過程でGAを用いている。)今回はさらにネットワークの構成要素の重要度の順位付けを、最小カットの構成可能性の大小によって判断し、これに合わせて要素信頼度に大小をつけるシステム設計の合理化を試みた。単に重要度の高いリンク要素に高信頼性を付与するだけでなく、余裕のあるリンクでは信頼度を落としてコストダウンし、トータルバランスへの配慮も加えている。

2. 最大フローに基づく破壊リンクの優先復旧順位の探索
策と重要リンクの探索

2. 1 最小カットの定式化³⁾

理論展開については文献3)に詳しく説明が述べてあるので、ここでは要点のみに触れる。後出の図-1にネットワークの例題が示されている。図に示す入力点(ソース)と出力点(シンク)の間のネットワークフローを考える問題では、通常各リンクに通過容量(流量の上限値)が付与されており、節点に入る流れの量の総和と、出る量の総和は等しい(節点では渋滞なし)という条件が満足されているとき、これを「円滑な流れ」と定義する。この時「最小カット=最大フローの定理」が成立し、カット(ソースとシンクの間の仮想切断面)を横切るリンク容量の総和システム内での最小値に対し、必ずそれと一致する実行可能なフロー解(リンクへの流量配分)が存在し、最大値をも与える。

あるカットを S で表現し、 S に対応するカット定義ベクトル $\{A(S)\}$ を

$$\{A(S)\} = \{1, 0 \text{ or } 1, \dots, 0 \text{ or } 1, 0\} \quad (1)$$

とする。ベクトルの各要素は節点番号に対応し、 S によってソース側に分けられた節点の番号の要素に1、それ以外に0とする。

さらにネットワークの状態を表す容量マトリクス $[Q]$

$$[Q] = [q_{ij}] = \begin{cases} \text{節点 } i, j \text{ 間にリンクがある} \\ \text{時その容量: } q_{ij} \\ \\ i = j, \text{ または } i \neq j \\ \text{でもリンクがないとき: } 0 \end{cases} \quad (2)$$

で定義する。

この時 S に対するカット容量 $C(S)$ は

$$C(S) = \{A(S)\} [Q] \{A^c(S)\} \quad (3)$$

で与えられる。 $\{A^c\} = \{1\} - \{A\}$ は $\{A\}$ の補ベクトル(成分0と1を反転させたもの)である。この式を用いてカット容量を計算していき、最小カットを探索していく。

2. 2 準最小カットを用いた優先修復リンクの発見⁴⁾

ここでは何らかの被害によって欠損したリンクの優先復旧順位を求め、ネットワークにおける重要リンクを探索する。健全時に表-1に示す q_{ij} を持つ図-1のネットワークを例に取る。

次に、何らかの被害によって一部分のリンクに欠損が生じている状態を仮定する。この欠損は完全に流路が塞がれて、 q_{ij} が0になっている場合もあれば、一部の損傷により q_{ij} が減っている場合(道路の片側通行のような状況)もあると考え、修復作業によって全部または一部の機能回復が期待できるものとする。復旧過程を導く手順としては次のようである。

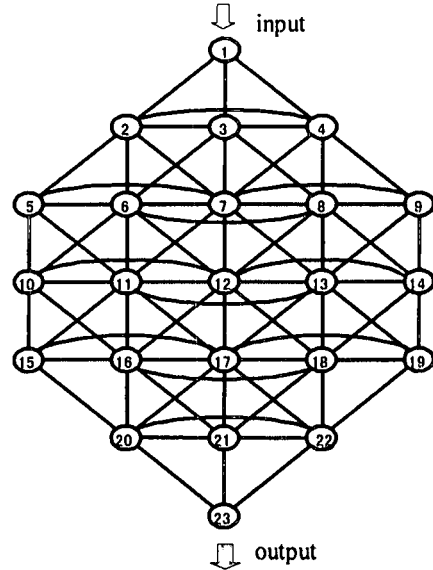


図-1 ネットワーク (23 節点, 77 リンク)

表-1 ネットワークの各リンクの容量

リンク	両端節点(i, j)	q_{ij}	リンク	両端節点(i, j)	q_{ij}	リンク	両端節点(i, j)	q_{ij}	リンク	両端節点(i, j)	q_{ij}
1	1 2	200	21	6 8	10	41	11 13	10	61	16 18	10
2	1 3	350	22	7 9	10	42	12 14	10	62	17 19	10
3	1 4	400	23	5 10	90	43	10 15	90	63	15 20	170
4	2 3	10	24	5 11	70	44	10 16	80	64	16 20	110
5	3 4	10	25	6 10	70	45	11 15	80	65	16 21	110
6	2 4	10	26	6 11	70	46	11 16	80	66	17 20	110
7	2 5	130	27	6 12	50	47	11 17	80	67	17 21	110
8	2 6	110	28	7 11	50	48	12 16	50	68	17 22	50
9	2 7	50	29	7 12	70	49	12 17	50	69	18 21	50
10	3 6	50	30	7 13	70	50	12 18	80	70	18 22	110
11	3 7	110	31	8 12	70	51	13 17	50	71	19 22	120
12	3 8	110	32	8 13	70	52	13 18	80	72	20 21	10
13	4 7	110	33	8 14	70	53	13 19	80	73	21 22	10
14	4 8	110	34	9 13	70	54	14 18	80	74	20 22	10
15	4 9	150	35	9 14	90	55	14 19	80	75	20 23	550
16	5 6	10	36	10 11	10	56	15 16	10	76	21 23	300
17	6 7	10	37	11 12	10	57	16 17	10	77	22 23	100
18	7 8	10	38	12 13	10	58	17 18	10			
19	8 9	10	39	13 14	10	59	18 19	10			
20	5 7	10	40	10 12	10	60	15 17	10			

- I. 得られた被害情報を基に、容量行列 $[Q]$ を再構成する。
- II. これに対し、2. 1で述べた最小カット探索を実施する。
- III. 計算の試行は十分多くの回数を行う。このとき、各回の試行の結果は、正解であるなしにかかわらず記憶し、 C の小さい順に並べておく。この結果、第1最小カット、第2最小カット、...が、 C の値と $\{A\}$ の形の情報をもって与えられる。
- IV. リンクについても $\{A\}$ 同様に、カットを表す遺伝子イメージベクトル $\{L\}$ を定義する。

$$\{L\} = \{L(U)\} = \{0 \text{ or } 1, \dots, 0 \text{ or } 1\} \quad (4)$$

U はカット上にあるリンクであり、(リンクの部分集合 U に属する番号の要素に1、属さないものに0)このとき、 S と U の間には1対1の対応が成り立つことは自明であるので、 k 番目のリンクの両端の節点を $i(k)$ 、 $j(k)$ と書くものとする。

- V. $\{L\}$ の要素 L_k を $\{A\}$ の要素 a_i 、 a_j を用いて表す。

$$L_k = a_{i(k)} \cdot (1 - a_{j(k)}) + (1 - a_{i(k)}) \cdot a_{j(k)} \quad (5)$$

Ⅵ. (4)式のCをこの l_k を用いて表す.

$$C = \sum q_k \cdot l_k = \sum q_{i(k),j(k)} \cdot l_k \quad (6)$$

Ⅶ. 被害を受け修理により容量を増加させるリンクを選び出し、その修復によるCの変化を式に表す.

$$C(n) \rightarrow C(n) + l_m \cdot \Delta q_m \quad (7)$$

(n : カットの小さいほうからの順位)

(m : 容量を変化させるリンク番号)

(Δq_m : 修復の結果による容量変化分)

ここで、(7)式の操作は、 $C(1)$ を増加させなければ意味がない。すなわち最小カット断面に含まれるリンクの中から m を選ばなければならない。 Δq_m は大きいほうが効果的であるが、これが $U(2)$ に含まれなければ、 $C(2)$ が最小カットになるだけであるから、 Δq_m の大きさだけで優先順位が決まるわけでもない。出来るだけ上位の $U(n)$ に共通に含まれるリンクで Δq_m の大きいものが望ましく、論理的には新たな最小カットを最も大きくするような m を最優先補修リンクとするのが解である。以下同様の順位変動操作の論理で第2、第3...の順位の優先補修リンクが決まっていく。

また、一時的に塞ぐ余裕のあるリンクとは、人工的に $\Delta q_m < 0$ を付加して(7)式の操作を行ったときに上位の順位変動に影響をおよぼさないリンクで、修復の過程でそのつど $\Delta q_m < 0$ の付加を考えてみて、最小のCの挙動にアクティブに効くかどうかを判定する。

Ⅷ. (7)式を用いて順次、優先補修リンクを探索していく。

3. 要素信頼度の階層化

3. 1 計算の方針

2. 2節で示した理論はいろいろな例題に適用可能であり現実を反映したモデルに応用することも出来る。一方あるシステムをこれから設計（あるいは現状に対する補強）する際の方針決定をすることにも使う。もし各リンクが地震等の原因で、ある確率で破壊し容量低下を起こすものとすれば、それらの中で常に修復優先度の高いところに現れるリンクとそれほどでもないリンクが分かれるはずである。前者のリンクは最小カットへの影響が大きい重要リンクであって、信頼性が大きくなる（損傷確率が小さくなるような）ような設計をすべきである。そのプロセスとしてはまず第1に各リンクに均一の信頼性を与え2章のシミュレーションを行い、この結果からリンクの重要度の判定を行い、その結果を反映させてどの要素信頼度を上げるべきかを定め、この試行に対し再度シミュレーションを行い要素信頼度の振り分けた前後での結果を比較するといった感じである。そこで、以下に順を追って、計算例を示す。

3. 2 計算例1：均一に信頼性を与えた場合

ここでは各リンクが10%の確率で全壊、30%の確率で半壊、60%の確率で無傷ということにし、(ここでこの状態を「均一な信頼性」と名づける。)この一連の操作を一つのシミュレーションとし、1万回の計算を行い、最優先修復リンクになった割合から各リンクの重要度を示す。その結果が図-2である。入口と出口付近のリンク容量が高く設定されている為その付近が重要となる結果となった。また被災時に最小カット容量がどれだけ下がったか計算を行い、それを示したのが図-3である。

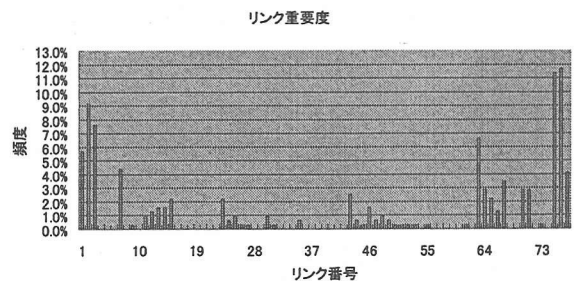


図-2 各リンクの優先修復リンクとなった割合(1万回)

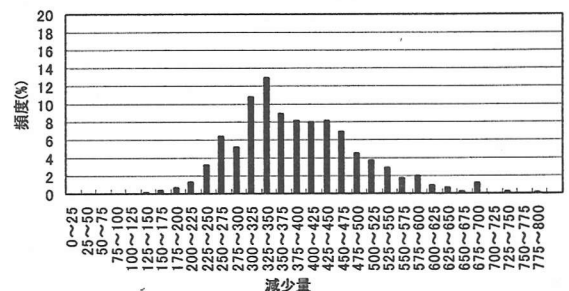


図-3 均一な状態での最小カット容量の減少量の頻度

3. 3 リンク信頼度配分の試行例

次に3. 2の結果を用い、各リンク要素に信頼度の階層化を試みる。重要度<復旧優先度>の高いリンクに、高い信頼性<小さい破壊確率>を付与してやることにより被災時の最小カットの減少を抑え、システムとしての信頼性も上げようとしている、ということである。比較のために、先の「均一な信頼性」の状態を基準にして今回は表-2のような3段階の信頼度を設け各リンクに振り分ける。ただし、ここである制約を与える。今、 ij を両端に持つリンクの番号を $n(ij)$ と書くとする。この時 n 番目のリンクのコスト C_{on} をそのリンクの無損傷の確率 P_{on} とその要素信頼度を与えた各リンクの容量 $q_{ij}=q_n$ を掛け合わせたものと考え、

$$C_{on} = P_{on} \times q_n \quad (8)$$

表-2 階層化したリンクの等級と損傷確率

	全壊	半壊	無損傷
Grade1	5%	15%	60%
Grade2	10%	30%	60%
Grade3	20%	60%	20%

とすると、トータルのコスト C は

$$C = \sum C_{on} \quad (9)$$

となる。このトータルのコストが大きく変わらないような(増減は最大で5%以内に納めるような)制約を与える。

表-3 は今回 4.1 節の結果を用いて各リンクにどの要素信頼度を振り分けたかを示したものである。

表-3 要素信頼度の状態

リンク番号	始点	終点	Grade	リンク番号	始点	終点	Grade
1	1	2	Grade1	41	11	13	Grade3
2	1	3	Grade1	42	12	14	Grade3
3	1	4	Grade1	43	10	15	Grade1
4	2	3	Grade3	44	10	16	Grade3
5	3	4	Grade3	45	11	15	Grade3
6	2	4	Grade3	46	11	19	Grade3
7	2	5	Grade1	47	11	17	Grade3
8	2	6	Grade3	48	12	16	Grade1
9	2	7	Grade2	49	12	17	Grade1
10	3	6	Grade3	50	12	18	Grade2
11	3	7	Grade3	51	13	17	Grade1
12	3	8	Grade3	52	13	18	Grade3
13	4	7	Grade2	53	13	19	Grade2
14	4	8	Grade2	54	14	18	Grade3
15	4	9	Grade1	55	14	19	Grade2
16	5	6	Grade3	56	15	16	Grade3
17	6	7	Grade3	57	16	17	Grade3
18	7	8	Grade3	58	17	18	Grade1
19	8	9	Grade3	59	18	19	Grade3
20	5	7	Grade3	60	15	17	Grade3
21	6	8	Grade3	61	16	18	Grade2
22	7	9	Grade3	62	17	19	Grade3
23	5	10	Grade2	63	15	20	Grade1
24	5	11	Grade1	64	16	20	Grade1
25	6	10	Grade1	65	16	21	Grade1
26	6	11	Grade1	66	17	20	Grade2
27	6	12	Grade1	67	17	21	Grade1
28	7	11	Grade1	68	17	22	Grade3
29	7	12	Grade3	69	18	21	Grade1
30	7	13	Grade3	70	18	22	Grade1
31	8	12	Grade3	71	19	22	Grade1
32	8	13	Grade3	72	20	21	Grade3
33	8	14	Grade3	73	21	22	Grade1
34	9	13	Grade3	74	20	22	Grade3
35	9	14	Grade3	75	20	23	Grade1
36	10	11	Grade3	76	21	23	Grade1
37	11	12	Grade3	77	22	23	Grade1
38	12	13	Grade3				
39	13	14	Grade3				
40	10	12	Grade3				

3. 4 計算2

次に表-3 のように要素信頼度を振り分けた時の被災時の最小カット容量の減少量を計算する。現在までに得られた結果としてある一例を図-4 に示す。

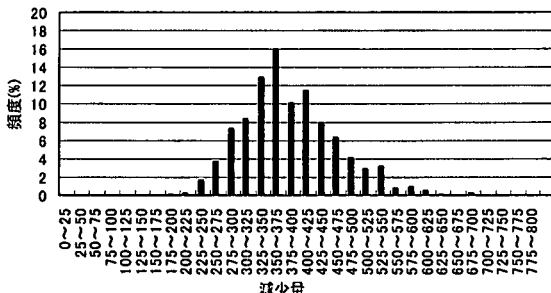


図-4 階層化後の最小カット容量の減少量の頻度

3. 5 計算結果への考察

ここではある一例として結果を示したが他にも多くの計算を行ってきたので、その結果から要素信頼度の振り分け方について言えることを少し述べてみる。どのリンクにどの要素信頼度を与えるかにより、ヒストグラムの形は異なるが、入口付近と出口付近の要素信頼度を上げた場合、どのリンクの要素信頼度を下げることとも問題になり、誤った下げ方を行なうとシステムとしての信頼性は上がるばかりでなく下がってしまう場合もある。また「入口と出口付近の多くのリンク」の信頼度を上げすぎると、他の多くのリンクの信頼度を下げなくてはならない。その結果システムとしての信頼性が下が

ってしまうことがある。以上のことに注意しながら階層化を行っていくと、均一な状態に比べ階層化後のほうが、図-4 のように減少量のヒストグラムのばらつきが無くなり、平均値も下がっている。このことから階層化することにより信頼性が上がったといえる。

4. 考察とまとめ

今回の研究によって階層化を行うことで全体の信頼性を幾らか上げることが出来た。しかしながら均一な状態と比べ階層化後にグラフが左にずれるような高信頼性の結果が得られなかった。ある程度までは信頼性は上げられるが、もっと高信頼性の結果を得るためには幾らかコストを上げてやる必要がありそうである。ここでは「均一な信頼性の場合」を一つの設計オプションとし、それとコストが変わらない条件で対比するため、一部のリンクの信頼度を高めるために、必ず、他のどこかのリンクの信頼度を落とすという操作を行っている。落とす方のリンクの選択も重要度を考慮して行っているが、信頼度を上げるリンクを増やすと、下げるリンクの数も増えることになるので、その兼ね合いが難しい問題になる。問題の設定を、「均一な信頼性の場合」を基準とし、そこに一定の予算のもとで補強を行なう（すなわち q_{on} は大きくなるばかりで、小さくなるリンクは無い）ような問題設定であれば、その効果は更に顕著に見ることが出来るであろう。また今回は破壊確率を大きめに与えてきた為、実際に重要リンクが破壊してしまっている場合が数多くあるであろう。そこで今後の試みとして、もし小数回の修復で、性能が顕著に上がるのであれば効果があったといえるのではないかということを考え「ひとつのリンクのみ修復した後の最小カット容量」で比較を行ないたいと考えている。またさらに現実に近い反映したモデルを用いて計算を行ってみようと考えている。

5. 謝辞

なお本研究には文部省科学研究費補助会基盤研究 (C) (2)、課題番号 11650477 の補助を受けた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 高田至郎：ライフライン地震工学、共立出版、1991 年 9 月
- 2) 能島暢呂、山中敏裕：道路ネットワークの地震時機能信頼性解析に基づく施設改善の重要度評価、第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集、No. J-12, pp. 3205-3210, 1998 年 11 月
- 3) 佐藤尚次：GA によるネットワークフローの最小カット探索、第 4 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp83-88, 1995 年 12 月
- 4) 佐藤尚次：ネットワーク機能回復のための優先修復リンクの GA 探索、第 5 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp231-236, 1997 年 12 月