

単純なライフラインネットワークの被害率と 供給率との関係について*

RELATIONSHIP BETWEEN DAMAGE RATIO AND NORMAL-SUPPLY RATIO FOR SIMPLE LIFELINE SYSTEMS

川上 英 二**
By Hideji KAWAKAMI

The connectivity of the lifeline system is studied based on the two ratios : (a) "damage ratio" which is pertaining to the degree of physical damage and is defined as an expected number of failures per unit length; and (b) "normal-supply ratio" which is pertaining to the system connectivity and is defined as the ratio of the length of the portion being connected with the supply node to the total link length of the system. The purpose of this research is (a) to develop a methodology for examining the relationship between the two ratios just after the earthquake and during the recovery period for several simple network systems, and (b) to clarify the change of the reliability of the system in accordance with the change of the scale and configuration of the network due to the growth of the community.

1. 序 文

上下水道・電気・通信・鉄道・道路等のライフラインシステムは、近年、産業および国民生活にとって基本的な機能を果たしており、地震国日本においては、これらシステムの地震時における機能の安全性を保つことが地震災害を減少させるために重要であると考えられている。

近年、ライフラインシステムを構成する個々の構造物たとえば^{1),2)}の信頼性に基づいて、システム全体の機能上の耐震性を評価する研究がいくつか行われるようになってきている^{3)~21)}。供給地点と需要地点との連結性に着目して地震後の安全性を扱ったもの^{3)~10)}、システム内で移動される物の特性を定量的にとらえ、地震後の機能低下を扱ったもの^{10)~14)}、さらには復旧期間中の機能回復の状況を復旧の戦略との関係のうえから求めたもの^{13),15)~21)}などがある。そして、地盤条件、構造物の強度、地震動の激しさの程度等がシステム内の場所により異なるような現実に近い条件をも考慮に入れて、複雑な形状をしたシステムの安全性を推定する方法がいくつか

提案されている。

しかし、比較的複雑なシステムに対する安全性の評価が可能になった反面、比較的単純な形をした基本的なネットワークシステムに対しても、ネットワークシステムの安全性の定性的な傾向が十分に明らかにされているわけではない。比較的単純なシステムに対しネットワークシステムの安全性を検討し、ネットワークを構成させることによるシステム的安全性の変化を推測する直観を養っておくことは実際のシステムを設計するに際して重要なことであると考えられる。

本研究では、システムの物理的な破壊の程度を表わす値として1つのリンクまたは単位長さ当たりの破損箇所数の期待値を表わす「被害率」と、システムの機能の達成の程度を表わす「供給率」という2つのパラメーターに着目した。そして、いくつかの基本的な形状をしたシステムに対するこれら2つのパラメーターの地震直後および復旧期間中における関係を検討するための方法を示すと同時に、都市およびシステムの形状または規模の変化に伴うシステムの安全性の変化を明らかにすることを試みた。

本論文中、2. では、1978年の宮城県沖地震によるガスと上水道のシステムの震害記録を、被害率と供給率との関係の観点からまとめ直した。3. では基本的ないく

* 土木学会年次学術講演会第1部、1983年で一部発表

** 正会員 工博 埼玉大学助手 工学部建設工学科

(〒338 浦和市下大久保 255)

つかのシステムに対して地震直後の被害率と供給率との関係を検討するための方法を展開し、4. ではシステムの形状または規模が変化するに伴いこの両者の関係がどのように変化するかを検討した。5. では、すでに破壊の起きたシステムの復旧に伴うこれら2つのパラメータの変化を扱った。

2. 宮城県沖地震によるシステムの被害率と供給率との関係

本章では1978年宮城県沖地震(マグニチュード7.4、震源金華山東南東60km)におけるライフラインシステムの震害記録を調べ、その被害と復旧過程について考察を加えた。Fig. 1は、片山ら²²⁾により調査報告された結果に基づいてガスまたは上水道システムの復旧の様子を被害率(横軸)と供給率(縦軸)との関係として整理し直したものである。ただし、被害率としては1km当たりの未修理の破損箇所数を示してあり、復旧の進行に伴い減少し、図中の左方へ移動するものである。一方、供給率としては全需要戸数に対する供給戸数の割合を用いており、復旧の進行に伴い増加し、図中の上方へ移動するものである。ただしデータが完全でないため資料中に示された期間中での一様性等のいくつかの仮定のもとでの1つの試算結果を示してある。これを見ると、復旧による被害率の減少に伴う供給率の回復の様子は一様ではなく、“修理-物理的な被害”と“供給-機能上の被害”という2つの概念を分けて考える必要があることを示している。また、これら両者の関係には大きく3つの段階があることが認められる。

- ① 被害率の減少にもかかわらず供給率が上昇しない第1段階、
- ② 被害率の減少とともに順調に直線的に供給率が上昇している第2段階、
- ③ 供給率が100%近くで頭打ちになり供給率の最後のわずかな上昇のために、被害率を大きく減少させなければならない第3段階。

これらの段階を生じさせる原因としてはいくつかの要因が考えられる。①ある地域の被害箇所を修理する時

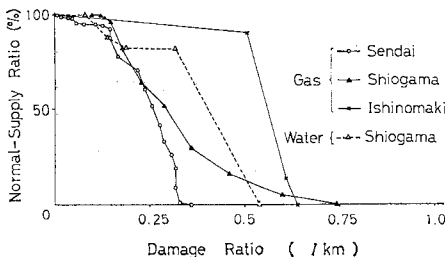


Fig. 1 Relationship between Normal-Supply Ratio and Damage Ratio in Accordance with Restoration of Systems.²²⁾

刻と機能が回復する時刻とにずれがあるため、②供給率が上昇しやすいような地域から被害箇所を修理するため、または、③システムがネットワーク状をしていることによる影響等が挙げられる。

3. 地震直後の連結性から調べた被害率と供給率との関係の算定方法

2.の結果は、1つの地震に対する結果であり、データの量・質ともに十分ではないため、一般に成立するものであるとは断言することはできない。しかし、ライフラインシステムの被害程度や復旧過程は、その都市のシステムの種類・規模・形状・復旧方法(戦略)などによって異なるものであり、これらの関係を検討しておくことは、ライフラインの形状を設計計画するにあたっての、また、将来発生する地震によるライフラインの機能の被害を調査するにあたっての1つの視点を与えるものであり、意味あることと考えられる。そこで、本論文では単純化のため、まず、システムの連結性のみに着目し、この連結性と被害率との関係がシステムの形状および規模によりどのように変化するかを検討した。この連結性の基準は従来の研究^{9)~10)}が示すようにライフラインの安全性を考えるための第1段階であると考えられる。システムの被害および機能復旧に関して設定した基本的な仮定は次のとおりである。

- ① システムをリンクとノードからなるネットワークと考え、システムの破壊はリンクの破壊により生ずるものとする。また、供給源(インプット)は1つとし、破壊しないものとする。
- ② 破壊の発生確率は、ネットワーク中のどの場所においても等しく、また、発生する破壊はどれも互いに独立である。また、破損箇所は点とみなし得る。
- ③ 被害率を次のように定義する。

$$\text{被害率} = \frac{(\text{1リンクまたは単位長さ})}{(\text{当たりの破損箇所数})} \dots\dots\dots(1)$$

- ④ 供給源からのパスが少なくとも1つは破壊せずに

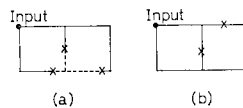


Fig. 2 Definition of Normal-Supply Ratio. (●: Input, ×: Dama-ged Point)

存在している部分を“連結している”部分とよぶことにする。たとえば Fig. 2 に示すシステムに対して×印の箇所で破壊が生じた場合には、図中の実線部分が連結している部分ということになる。

そして、供給率を次のように定義する。

$$\text{供給率} = \frac{(\text{供給源と連結している部分の長さ(供給長さ)})}{(\text{システム内のリンクの全長})} \dots\dots\dots(2)$$

たとえば、Fig. 2 に示す例でいえば、“システム内のリンクの全長に対する実線部分の長さの割合”ということになる。この定義によれば、Fig. 2(b) のような場合には破壊が生じていても供給率は 100% ということになる。

以上の仮定のうちのいくつかは拡張することが可能であるものと考えられる。しかし、本論文ではシステムの形状および規模の影響に主に注目しているため、いたずらに仮定を複雑にすると本質を見失うおそれがあると考え、最も基本的であると考えられる仮定を設定した。以下には基本的なネットワークモデルをいくつか考えて、それぞれのシステムにおける各被害率に対する供給率の密度関数、およびその期待値・分散を算定する方法を展開した。

(1) 供給源を一端とする線状システム

まず最初は、最も基本的な一次元のネットワークモデル、つまり、長さ L の 1 本の線でシステムが表わされ、一端が供給源であるシステムを考えた。このモデルに N 個の破壊が生じた場合に、その中の供給源に近い順から n 番目 ($1 \leq n \leq N$) の破壊の位置が x と $x+dx$ の間にある事象 E の生ずる確率 $p(E)$ を求める。つまり $(n-1)$ 個の破壊は x 以下にあり、 $(N-n)$ 個の破壊が $x+dx$ 以上にある確率は次式で表わされる。

$$p(E) = \frac{N!}{(n-1)!(N-n)!} [F_X(x)]^{n-1} \cdot f_X(x) dx [1-F_X(x)]^{N-n} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $f_X(x)$ および $F_X(x)$ はそれぞれ 1 つの破壊が位置 x で生ずる確率密度関数および分布関数である。式 (3) より n 番目の破壊の位置の確率密度関数 $f_{X_n}(x)$ は

$$f_{X_n}(x) = \frac{N!}{(n-1)!(N-n)!} [F_X(x)]^{n-1} \cdot [1-F_X(x)]^{N-n} f_X(x) \dots\dots\dots (4)$$

と求まる²³⁾。本論文では破壊の発生確率がシステム中どの場所においても等しいことを仮定している（仮定②参照）ため

$$f_X(x) = 1/L \dots\dots\dots (5)$$

$$F_X(x) = x/L \dots\dots\dots (6)$$

よって

$$f_{X_n}(x) = \frac{N!}{(n-1)!(N-n)!} L^N x^{n-1} (L-x)^{N-n} \quad (0 \leq x \leq L) \dots\dots\dots (7)$$

である。したがって、供給源に近い順から数えて n 番目の破壊の位置の期待値および分散はそれぞれ次式で求められる。

$$\bar{x}_n = \int_0^L x f_{X_n}(x) dx = nL/(N+1) \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma_n^2 = \int_0^L (x-\bar{x}_n)^2 f_{X_n}(x) dx$$

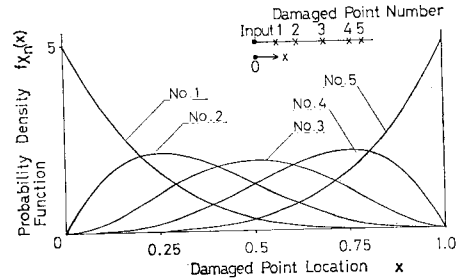


Fig. 3 Probability Density Function of Damaged Point Location.

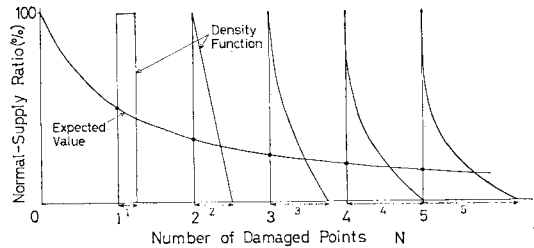


Fig. 4 Probability Density Function and Expected Value of Normal-Supply Ratio as Functions of Number of Damaged Points.

$$= n(N-n+1)L^2 / \{(N+1)^2(N+2)\} \dots\dots\dots (9)$$

Fig. 3 は、式 (7) を用いて、全破損箇所数が 5 が所の場合の 1 番目から 5 番目までの破壊の位置の確率密度関数（縦軸）を供給源からの距離を横軸にとり表わしたものである。ただし、システムの全長 $L=1$ とした。このモデルの場合、供給源から 1 番目の破壊までの区間が連結しており機能している区間であるから、1 番目の破壊位置 X_1 の確率密度関数 $f_{X_1}(x)$ (式 (10)) が供給長さの密度関数であると考えられる。さらにシステムの全長 $L=1$ とおくと供給率と供給長さとは値が等しくなり、供給率の密度関数が得られる。

$$f_{X_1}(x) = N(L-x)^{N-1} / L^N \dots\dots\dots (10)$$

$$\left(\begin{array}{l} L \neq 1 \text{ の場合 } X_1 = \text{供給長さ} \\ L = 1 \text{ の場合 } X_1 = \text{供給長さ} = \text{供給率} \end{array} \right)$$

Fig. 4 には破損箇所数（横軸）を変化させた場合の供給率の密度関数（式 (10)）の変化とその期待値（式 (8)）の変化（縦軸）とを示してある。ただし、破損箇所数 N が整数の場合だけが物理的な意味をもっている（後述の Fig. 6, 12 も同様）。

(2) 供給源から M 本のリンクが出ているシステム

本節では供給源から M 本のリンクが出ているシステムの供給率の確率密度関数、期待値および分散の算定方法を示す。各リンクの長さを L_j ($j=1, \dots, M$) ($\sum_{j=1}^M L_j = L$) とおき、破損箇所の位置関係のパターン（破壊が生じた 2 つのシステムで各リンク中の破壊の個数がそれ

それ等しい場合には、この2つは同一のパターンに属すると考える)をすべて数え上げる。破壊の総数を N 個とおくと

$$I = (N+M-1)! / \{N!(M-1)!\}$$

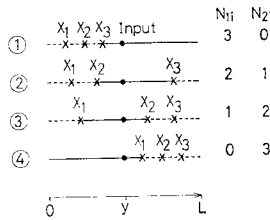


Fig. 5 Patterns of Damaged Points and Normally Supplied Portion.

通りのパターンが存在する ($M=2, N=3$ の場合) のパターンを Fig. 5 に

一例として示す。供給長さが x である確率密度関数 $g(x)$ は各パターンが生じる事象が排反事象であることから次式で与えられる。

$$g(x) = \sum_{i=1}^I p_i g_i(x) \dots\dots\dots (11)$$

ただし p_i はパターン i (M 個のリンクに破壊がそれぞれ $N_{1i}, N_{2i}, \dots, N_{Mi}$ 個 $[\sum_{j=1}^M N_{ji} = N]$ 発生するパターンをパターン i とする) が発生する確率であり、 $g_i(x)$ はパターン i が発生した場合に供給長さが x である確率を表わす密度関数である。これら $p_i, g_i(x)$ はそれぞれ以下に示すように求められる。

$$p_i = N! \prod_{j=1}^M \frac{q_j^{N_{ji}}}{N_{ji}!} \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 N_{ji} はパターン i でリンク j に生ずる破壊箇所数であり、 q_j はある1つの破壊がリンク j に発生する確率である。破壊の発生確率がネットワーク中どの場所でも一様であるという本論文の仮定のもとでは、この値は各リンクの長さに比例し

$$q_j = L_j/L \dots\dots\dots (13)$$

で与えられる。

また、パターン i が生じた場合のリンク j の供給長さ X_j の確率密度関数 $g_{ji}(x_j)$ はそれぞれ (1) で扱った長さ L_j の線状システムに N_{ji} ($\neq 0$) 個の破壊が生じた場合の1番目の破壊の位置の確率密度関数と考えることができる

$$g_{ji}(x_j) = \begin{cases} N_{ji}(L_j - x_j)^{N_{ji}-1} / L_j^{N_{ji}} & 0 \leq x_j \leq L_j \\ 0 & x_j < 0 \text{ または } L_j < x_j \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

で表わされる。ただし、 $N_{ji}=0$ の場合には Dirac のデルタ関数で

$$g_{ji}(x_j) = \delta(L_j - x_j) \dots\dots\dots (15)$$

と与えられる。供給長さ X は

$$X = \sum_{j=1}^M X_j \dots\dots\dots (16)$$

で与えられ X_j ($j=1, \dots, M$) の独立性よりパターン i が生じた場合の供給長さ X の確率密度関数 $g_i(x)$ は

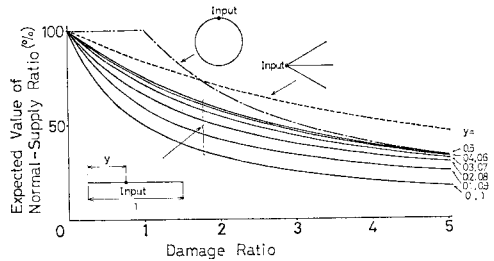


Fig. 6 Relationship between Expected Value of Normal-Supply Ratio and Damage Ratio.

$$g_i(x) = \int_0^{L_{M-1}} \dots \int_0^{L_1} g_{1i}(x_1) g_{2i}(x_2) \dots \dots g_{M-1i}(x_{M-1}) g_{Mi}(x - \sum_{j=1}^{M-1} x_j) dx_1 \dots dx_{M-1} \dots\dots\dots (17)$$

で求められる。以上求めた $p_i, g_i(x)$ を式 (11) に代入することにより、供給長さの密度関数 $g(x)$ が求まり、供給長さの期待値 \bar{x} 、分散 σ^2 はそれぞれ次式

$$\bar{x} = \int_0^L x g(x) dx \dots\dots\dots (18)$$

$$\sigma^2 = \int_0^L (x - \bar{x})^2 g(x) dx \dots\dots\dots (19)$$

で求められる。Fig. 6 には一例として長さ1の線状システムの一端より $y(=0, 0.1, 0.2, \dots, 1.0)$ の地点に供給源があるシステム ($M=2$)、および、供給源より長さ $1/3$ の3本のリンクが出ているシステム ($M=3$) についての供給率の期待値を被害率の関数としてそれぞれ実線および破線で示してある。線状システムでは供給源が中央に近いほど、また、供給源から多数(3本)のリンクが出ているほど、同一の被害率に対する供給率は大きいことが認められる。

(3) 閉曲線システム

次に1つの閉曲線で表わされる circle 状のシステムの供給率の確率密度関数、期待値、分散を算定した。Fig. 7 (a) に示す長さ L の閉曲線システムを供給源で切断すると (b) のような直線システムとなる。ただし、(1) の場合とは両端に供給源を考えるという点において異なっている。破壊が N 個生じた場合、最も左端の破壊位置 X_l の分布 $f_{X_l}(x)$ は式 (10) と同様にして

$$f_{X_l}(x) = N/L \cdot (1-x/L)^{N-1} \dots\dots\dots (20)$$

で、最も左端の破壊位置が x_0 である場合の最も右端の破壊位置の分布 $f_{X_r, X_l}(x|x_0)$ は

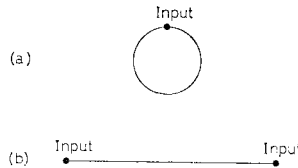


Fig. 7 Loop-type System.

$$f_{x_r|x_l}(x|x_0) = (N-1)/(L-x_0) \cdot \{(x-x_0)/(L-x_0)\}^{N-2} \dots (21)$$

で求められる。したがって最も左端と右端の破壊位置の間隔が y である確率 $f_{x_r-x_l}(y)$ は

$$f_{x_r-x_l}(y) = \int_0^{L-y} f_{x_l}(x) f_{x_r|x_l}(x+y|x) dx = N(N-1)/L \cdot (y/L)^{N-2} \cdot (1-y/L) \dots (22)$$

したがって、供給長さが x である確率密度関数 $f(x)$ は $f(x) = f_{x_r-x_l}(L-x)$

$$= N(N-1)/L \cdot (1-x/L)^{N-2} \cdot x/L \dots (23)$$

これより、供給長さの期待値 \bar{x} および分散 σ^2 は、それぞれ

$$\bar{x} = 2L/(N+1) \dots (24)$$

$$\sigma^2 = 2L^2(N-1)/\{(N+1)^2(N+2)\} \dots (25)$$

で求められる。前と同様 $L=1$ を代入すると式 (24), (25) はそれぞれ供給率の期待値, 分散を表わしている。

Fig. 6 には供給率の期待値を破壊箇所数 (被害率) の関数として一点鎖線で示してある。

(4) ネットワークシステム

(2), (3) と同様の方法を用いればさらに複雑なシステムに対しても供給長さの確率密度関数の厳密解を算定することが可能である。しかし、パターン数が増加するに伴い、式 (17) の重畳積分はべき級数であるので可能ではあるが、容易ではなくなってくる。本節では以上で得られた結果を用いて上述したシステムよりもう少し複雑なシステムの供給長さ x の期待値 $E[x] = \bar{x}$ および分散 $\sigma^2 = E[(x-\bar{x})^2]$ のみの厳密解析解を簡単に算定する方法を示す。

あるネットワークシステムに N 個の破壊が生じたとする。(2) で行ったと同様に N 個の破壊箇所の配置のパターンをすべて $[I = (N+M-1)! / \{N!(M-1)!\}]$ 通り (M : リンク数) 数え上げる。 $i(=1 \sim I)$ 番目のパターンが生ずる確率を p_i , パターン i が生じた場合の供給長さの期待値を $E_i[x] = \bar{x}_i$ で表わすと

$$\bar{x} = \sum_i p_i \bar{x}_i \dots (26)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= E[(x-\bar{x})^2] \\ &= \sum_i p_i E_i[(x-\bar{x})^2] \\ &= \sum_i p_i E_i\{[(x-\bar{x}_i) + \bar{x}_i - \bar{x}]^2\} \\ &= \sum_i p_i [E_i[(x-\bar{x}_i)^2] + \bar{x}_i^2 - \bar{x}^2] \dots (27) \end{aligned}$$

さらに、パターン i 内の供給長さの平均値 \bar{x}_i を 2 項の和

$$\bar{x}_i = w_i + s_i \dots (28)$$

w_i : パターン i の配置の破壊が生じた場合に、そのリンク内に破壊箇所が含まれず、かつ、機能しているようなリンクの長さの合計、

s_i : パターン i の配置の破壊が生じた場合に、そのリ

ンク内に破壊箇所が存在するため、リンクの一部が機能しているようなリンクの部分の長さの合計の期待値、

$$E_i[(x-\bar{x}_i)^2] = E_i\{[(x-w_i) - s_i]^2\} = E_i[(x-w_i)^2] - s_i^2 \dots (29)$$

と表わされ、したがって

$$\bar{x} = \sum_i p_i (w_i + s_i) \dots (30)$$

$$\sigma^2 = \sum_i p_i [E_i[(x-w_i)^2] - s_i^2 + \bar{x}_i^2] - \bar{x}^2 \dots (31)$$

ここで、各パターンについてリンクの性質を以下のように分類して考える。リンクの片端のみが供給源と連結している場合にはこのリンクは (1) で扱った線状システムと考えることができ供給長さ x の期待値, 分散はそれぞれ式 (8), (9) の $n=1$ の場合で表わされる。

一方、リンクの両端とも供給源と連結している場合には、このリンクは (3) で扱った閉曲線システムと考えることが可能であり、供給長さ x の期待値, 分散はそれぞれ式 (24), (25) で表わされる。したがって、各リンクの長さを $L_j (j=1, \dots, M)$, パターン i でリンク j に生じる破壊の箇所数を N_{ji} とおくと、式 (30), (31) の各項は次のように求められる。

$$w_i = \sum_{j=1}^M \begin{cases} \text{破壊が存在せず、かつ、供給源と連結しているリンク} & \rightarrow L_j \\ \text{破壊が存在するか、または、供給源と連結していないリンク} & \rightarrow 0 \end{cases} \dots (32)$$

$$s_i = \sum_{j=1}^M s_{ji} \begin{cases} \text{リンクに破壊が1つ以上存在してリンクの両端とも供給源と連結しているリンク} & \rightarrow 2L_j/(N_{ji}+1) \\ \text{リンクに破壊が1つ以上存在してリンクの片端のみ供給源と連結しているリンク} & \rightarrow L_j/(N_{ji}+1) \\ \text{リンクに破壊が1つ以上存在してリンクの両端とも供給源と連結していないリンク} & \rightarrow 0 \\ \text{リンクに破壊が1つも存在しないリンク} & \rightarrow 0 \end{cases} \dots (33)$$

$$E_i[(x-w_i)^2] = \sum_{j=1}^M \begin{cases} \text{リンクに破壊が1つ以上存在してリンクの両端とも供給源と連結しているリンク} & \rightarrow 6L_j^2/\{(N_{ji}+1)(N_{ji}+2)\} \\ \text{リンクに破壊が1つ以上存在してリンクの片端のみ供給源と連結しているリンク} & \rightarrow 2L_j^2/\{(N_{ji}+1)(N_{ji}+2)\} \\ \text{リンクに破壊が1つ以上存在してリンクの} & \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{両端とも供給源と連結していないリンク} \\ \rightarrow 0 \\ \text{リンクに破壊が1つも存在しないリンク} \\ \rightarrow 0 \end{cases}$$

$$+2 \sum_{j>k} s_{ji} \times s_{ki} \dots\dots\dots (34)$$

また、式 (30), (31) 中の p_i はパターン i が発生する確率であるが、ここでパターン i を M 個のリンクに破壊がそれぞれ $N_{1i}, N_{2i}, \dots, N_{Mi}$ 個 ($\sum_{j=1}^M N_{ji} = N$) 発生したパターンであると考え、 p_i は式 (12) で求められる。式 (32)~(34) を用いれば式 (30), (31) より供給長さの期待値、分散が求められることになる。システムの全長を1として各式の L_j の代わりに $L_j / \sum_{j=1}^M L_j$ とおけば供給率の期待値、分散が求まることは前と同様である。

4. システムの形状または規模の変化に伴う被害率-供給率の関係の変化

3. で扱ったシステムよりさらに複雑なネットワークシステムの場合には、供給率の分布、期待値、分散の厳密解を算定することは計算時間、記録容量のうえで困難なので、多数回のシミュレーションに基づき近似解を算

定することとした。Fig. 8, 9 は得られた結果の一例として、それぞれ図中上部に示したネットワークモデルに対する、各被害率における供給率の密度関数の概略の形を表わしたものである。またその期待値を太実線で重ねて示してある。

Fig. 8, 9 より供給率の分布は、被害率の増加に伴い供給率の減少方向に移動していることがわかる。しかし、供給率の分布は本例の場合のような基本的なネットワークに対してもピークが1つの単純な分布を示すわけではなく、たとえば Fig. 9 のシステムの場合では供給率が0%付近と100%付近に2つのピークが存在し、この2つのピークはあまり位置を変えずに被害率の増加に伴い前者のピークは成長し、後者のピークは減衰する。被害率の増加に伴い供給率が減少方向に移動するようなピークは認められるものの、その大きさは小さく、供給率が30~70%程度となる確率は非常に小さいことが認められる。なお、供給率0%付近のピークは供給源に直接接続するようなリンクの破壊に伴い発生しており、被害率が小さくても供給率が著しく小さくなる危険性が無視できないことを示している。この結果は、従来直観的に認められている結論——供給源近傍のリンクの安全性がシステムの安全性に著しい影響を及ぼすことがしばしばあること——を示しているものと考えられる。

Fig. 10 は、図中に示すようにシステムが基盤目状に成長してネットワークが複雑になった場合、被害率と供給率の期待値との関係がどのように変化するかを示した図である。ただし○●で示したシステムはそれぞれ前章3.の(1)および(3)の方法により、□■は3.(4)の算定法とシミュレーション(1000回)との両方で確認し、△▲×はシミュレーションのみ(それぞれ1000, 100, 50回)により算定した。第1に気付くことは、どのシステムも被害率が小さい場合には供給率が大きく、被害率が1リンク当たり0.4か所以下では約80%以上の供給率であり、被害率の増加に伴い供給率は減少し、1リンク当たり平均1か所の破壊が生じた場合には、せいぜい50%程度の供給率であることが認められる。以

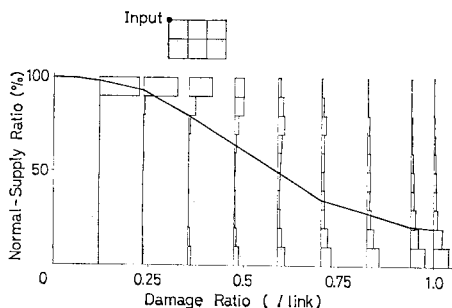


Fig. 8 Probability Density Function and Expected Value of Normal-Supply Ratio as Functions of Damage Ratio (1000 Simulations).

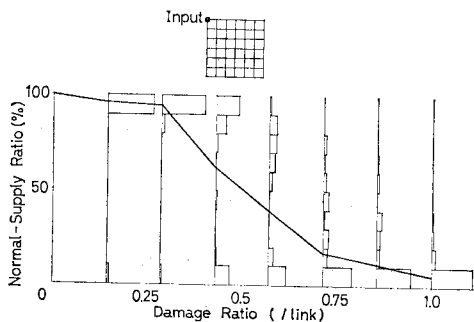


Fig. 9 Probability Density Function and Expected Value of Normal-Supply Ratio as Functions of Damage Ratio (50 Simulations).

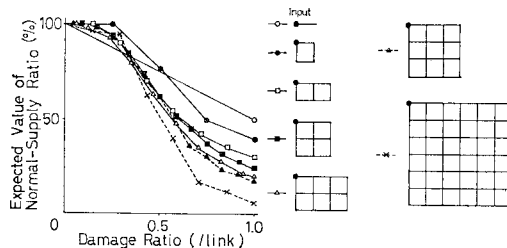


Fig. 10 Changes of Relationship between Damage Ratio and Expected Value of Normal-Supply Ratio with Growth of System in Network-type.

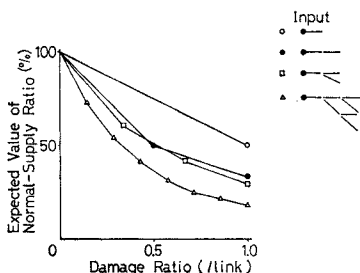


Fig. 11 Changes of Relationship between Damage Ratio and Expected Value of Normal-Supply Ratio with Growth of System in Series.

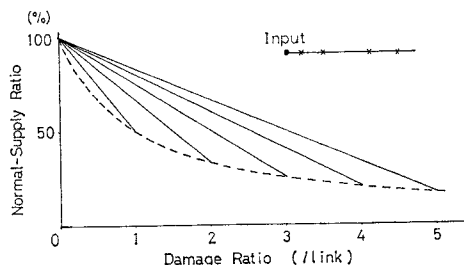


Fig. 12 Change of Normal-Supply Ratio in Accordance with Restoration of Damaged Points.

上の傾向はネットワークの複雑さによらず、類似した傾向を示している。

しかし、詳細にみても、システムのネットワークの複雑さによってこの傾向は異なっている。つまり、システムが複雑になると、ある限界（約 0.3 か所/link）以下の被害率に対する供給率は同程度かやや大きく、ある限界以上の被害率での供給率は相対的に著しく小さいことがわかる。以上のことより、基盤目状に成長した複雑なネットワークシステムは被害率が小さい場合は単純なシステムと比べ相対的に機能上安全だが、被害率が増加するに伴い機能上の信頼性が逆に著しく低下していることがわかる。

一方、**Fig. 11** はシステムがトリー状に成長していく場合の被害率—供給率の関係の変化を示したものである。ただし、○●で示したシステムは 3.(1)の方法により、□△は 500 回のシミュレーションにより算定した。どのシステムの場合でも被害率の増大に伴い供給率の期待値は減少するが、この傾向は特にシステムが成長するほど著しいことがわかる。また、**Fig. 10** に示したネットワーク状のシステムと比較して特に被害率が 0~0.3 か所/link での供給率の減少の程度が著しいことがわかる。

5. 復旧過程における被害率と供給率との関係

3., 4. では主にライフラインシステムが地震により破壊した直後の問題を扱ってきたが、ライフラインの耐震性を考える場合には、地震直後の被害のみでなく、復旧過程における機能達成の推移の様子をも検討することが重要な意味をもつことは明らかである^{15)~21)}。本章では復旧過程に上述の結果を応用した結果を示す。

復旧過程を扱う際に、復旧の優先順序を決定することは重要な課題である。星谷・小池・宮崎^{15), 17), 21)}、磯山・片山¹⁹⁾らは復旧戦略に関するいくつかの研究を行っている。本研究では復旧戦略に関しては基本的な仮定を設定し、被害率—復旧率の関係が復旧過程でどのように扱わ

れるかを示した。

(1) 供給源を一端とする線状システム

まず 3.(1) **Fig. 3** で扱った供給源を一端とする線状システムの場合を考えた。この復旧順序としては、供給源に近い破壊箇所から順次修理していく方法が、連結性の観点からは最善の方法である。地震直後においては供給源から 1 番目の破壊までの区間が連結しており機能している区間であるから、1 番目の破壊位置の密度関数が供給率の密度関数であることは前述したとおりである。さらに、供給源に 1 番近い破壊箇所を修理すると供給区間は供給源から No. 2 の破壊までの区間となり、したがって、供給率の分布は No. 2 の破壊の位置の分布となる。同様に、2 番目の破壊も修理した場合、供給率の分布は No. 3 の破壊の位置の分布となる。

Fig. 12 には破壊箇所総数が 1~5 か所であった場合それぞれに対して破壊箇所の修理に伴う被害率の減少（横軸）と、供給源との連結区間の増加に伴う供給率の期待値の増加（縦軸）との関係の厳密解を実線で表わしてある。復旧優先順序がランダムな場合の復旧曲線は地震直後の被害率と供給率との関係 (**Fig. 4** および **Fig. 12** 破線) と一致するはずである。供給源に近い破壊箇所から修理をすることにより、地震直後の関係曲線から抜け出して、供給率の期待値は被害率の減少に伴い直線的に増加していることがわかる。この理由は、**Fig. 3** に示す密度関数の期待値 (式 (8) 参照) が破壊箇所番号 n に比例しているからである。

(2) ネットワークモデル

直線システムより複雑なシステムの場合には復旧優先順序が機能の復旧過程に影響を及ぼす。しかし、ここでは簡単化のため復旧は供給率の増加する修理箇所——つまり、その破壊箇所の片側は供給源と連結しており、もう 1 つの側は非連結であるような破壊箇所——であれば、それらの中では優先順序をつけずにランダムに修理する場合を想定した。

Fig. 13 は **Fig. 8** と同じシステムの場合であり、実線または破線は、被害率がそれぞれ 1.0 または 0.47 か

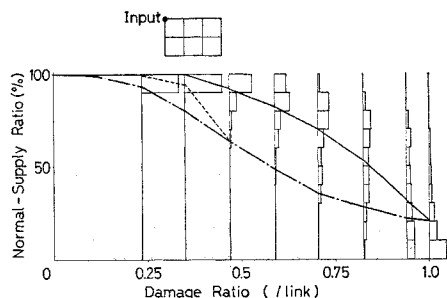


Fig. 13 Change of Density Function and Expected Value of Normal-Supply Ratio in Accordance with Restoration of Damaged Points (1000 Simulations).

ら復旧させた場合の供給率の分布とその期待値の変化をシミュレーションにより求めたものである。復旧が進むに伴い供給率の分布はそのピークが移動するように変化しており、地震直後の被害率—供給率の関係 (Fig. 8 参照) において供給率が零の近傍で認められたピークは復旧の進展に伴いすぐに消滅していることがわかる。また、(1) の線状システムの場合と同様に供給率の期待値は被害率の減少に伴い、地震直後の関係曲線から抜け出して急激に増加している。以上の結果は、Fig. 1 に示した震害調査結果と矛盾しないものと考えられる。

6. 結 論

本論文では「被害率」と連結性に基づいた「供給率」という2つのパラメーターに着目して、基本的な形状をした規模の異なるいくつかのシステムに対するこれら2つのパラメーターの地震直後および復旧期間中における関係を検討するための方法を示すとともに、システムの形状および規模の変化に伴うシステムの安全性の変化を検討することを試みた。

本論文で得られた主な結論は次のとおりである。

(1) 宮城県沖地震 (1978) によるガスと上水道システムの震害記録を、被害率と供給率との関係から整理し直し、この両者を区別して考えることが妥当であることを示した。

(2) 基本的な形状をしたいくつかのシステムに対し、地震直後の被害率に対する供給率の密度関数、期待値、分散を算定する手法を展開した。

(3) 本研究で扱った基盤目状のシステムでは、地震直後の供給率の分布に0% 近くのピークが存在する場合があります。供給源の近くの破壊により全システムの機能破壊が生ずる可能性が、被害率が小さい場合でも顕著に認められることを示した。

(4) システムの成長に伴う被害率と供給率との関係の変化を調べた結果、システムが複雑になると、ある限

界以下の被害率では供給率は同程度かやや高くなり、逆に、ある限界以上の被害率での供給率は著しく低くなるということが認められた。

(5) 基本的な復旧方法の仮定を設け、システムの復旧過程に本理論を適用した結果を示した。供給率は修理に伴い地震直後の被害率—供給率の関係から抜け出し、被害率の減少とともにほぼ直線的に回復し、その後、供給率が頭打ちになり、供給率の最後のわずかな上昇のために被害率を大きく減少させなければならなくなるという定性的性質が確認できた。この結果は Fig. 1 の震害調査結果と矛盾しない。

また、以上示した被害率—供給率の関係は著者が提案している⁹⁾「システムの形状の関数」の1つであると考えられることができるため、「構造物の強度の関数」と組み合わせることにより、システムの信頼性を算定することができるものである。また、得られた結果はネットワークの形状、破壊位置の独立性、連結性能を機能と仮定したこと、復旧方法の仮定等数多くの単純な仮定のもとでの試算結果であり、さらに検討すべき点も多く残っている。しかし、仮定が簡単であり基本的であるほど、得られた結果はシステムの特性的一面を表わしているものと考えられる。

謝 辞：本研究中の数値計算に関しては埼玉大学建設基礎工学科の学生であった山端祐子君 (現・大日本コンサルタント) に、また、図面の作成にあたっては埼玉大学文部技官の堀野浩美君にご協力をいただいた。末筆ながら深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 岡本舜三：耐震工学，オーム社，1971。
- 久保慶三郎：地震と土木構造物，鹿島出版会，1981。
- Panoussis, G. : Seismic reliability of lifeline networks, Seismic Design Decision Analysis—Report No. 15, MIT, Dept. of Civil Eng. Res. Rep. R 74-57, 1974.
- Shinozuka, M., Takada, S. and Kawakami, H. : Risk analysis of underground lifeline network systems, US-South East Asia Symposium on Engineering for Natural Hazards Protection. Manila, Philippines, Sept. 1977.
- 田村重四郎・川上英二：ライフラインのネットワークシステムの耐震性の一評価方法について，生産研究，30巻7号，1978。
- Shinozuka, M., Takada, S. and Ishikawa, H. : Seismic risk analysis of underground lifeline systems with the aid of damage probability matrix, 第5回地震工学シンポジウム，1978。
- 伯野元彦・斎藤嘉則：ライフ・ラインの耐震性に影響する因子，第15回地震工学研究発表会講演概要，1979。
- 篠塚正宣・小池 武：埋設ライフラインシステムの連結性能に関する地震危険度解析，土木学会論文報告集，第311号，1981。
- 川上英二：少数種類の構造物からなるライフラインシステムの耐震性の評価，土木学会論文報告集，第312号，

- 1981.
- 10) 沢田博司・佐武正雄・浅野照雄：ガス配管網の耐震信頼性の一評価方法について，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，第1部，1982.
- 11) 篠塚正宜・小池武：埋設ライフラインシステムの機能性能に関する地震危険度解析，土木学会論文報告集，第311号，1981.
- 12) 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，1981.
- 13) 磯山龍二・片山恒雄：大規模水道システムの地震時信頼度評価法，土木学会論文報告集，第321号，1982.
- 14) 川上英二：道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法，土木学会論文報告集，第327号，1982.
- 15) 星谷勝・小池精一：ライフラインの地震災害における復旧予測モデル，土木学会論文報告集，第308号，1981.
- 16) 亀田弘行・後藤尚男・浅岡克彦：地震後の各復旧段階における上水道配水管路網の信頼度解析，第16回地震工学研究発表会講演概要，1981.
- 17) 星谷勝・小池精一・宮崎正敏：上水道埋設管システムの震災復旧過程の予測，土木学会論文報告集，第322号，1982.
- 18) 山田善一・家村浩和・野田茂・小笠原洋一：反復分割法による震災後の上水供給系の時変信頼性解析，土木学会論文報告集，第326号，1982.
- 19) 和泉正哲・野村希晶・牧瀬研二：ガス・電力・上水供給システムの震害復旧シミュレーション，Proc. of the 6th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1982.
- 20) 鈴木操・岸野佐次・浅野照雄：震害を受けたライフラインシステムの復旧過程の解析，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，第1部，1982.
- 21) 星谷勝・宮崎正敏：上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測，土木学会論文報告集，第331号，1983.
- 22) 片山恒雄・増井由春・磯山龍二・甚内郁郎：1978年宮城県沖地震による都市供給施設の被害と復旧，都市ガス施設，上水道施設(その1)(その2)，生産研究，東京大学生産技術研究所，第31巻，第2，4，6号，1979.
- 23) Mann, N.R., Schafer, R.E. and Singpurwalla, N.D. : Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data, Wiley-interscience, 1974.

(1983.8.31・受付)