

## 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\*

A TIME-DEPENDENT RELIABILITY ANALYSIS OF WATER  
PIPELINE SYSTEMS IN POST-EARTHQUAKE  
PERIODS BY A DECOMPOSITION METHOD

山田善一\*\*・家村浩和\*\*\*・野田 茂\*\*\*\*・小笠原洋一\*\*\*\*\*  
By Yoshikazu YAMADA, Hirokazu IEMURA, Shigeru NODA  
and Yoichi OGASAWARA

### 1. 結 言

本研究は、震災後の復旧段階における上水供給系の信頼性解析を実施するために、連結性と給水機能の回復過程に注目した評価方法を導入している。

空間的広がりをもつ都市内ライフライン系の機能が複雑になるに伴い、地震によるシステムの損傷発生の可能性が増大する。またその損傷が社会・経済的な悪影響を引き起こすのみならず、時には人をも致命的な危険にさらす。したがって多数の各種要素からなる複雑なシステムの信頼性を正しくしかも迅速に評価しておくことが必要である。さらに、都市のもつ諸機能の損失を最小限に止める一方、損失した機能をできるだけ早期に復旧するための方法論を進展させることも重要である。

ライフライン耐震工学は、地盤震動からシステムの信頼性解析に至るまでの多岐にわたる課題を包含している。本研究では、(a)大規模ネットワークの耐震安全性を評価するためのシステム解析法を開発すること、(b)対象上水供給網の地震損傷の発生から復旧作業の進展に伴い所定の給水可能量を真に発揮できるかどうか検討すること、などを目的に、必要な修理パターンを損傷ネットワークに適用しながら、システムの連結性と機能性能に関する時変信頼性解析の有効性を論じたものである。

従来連結性能に関する研究には、Panoussis<sup>4)</sup>から Taleb-Agha<sup>5)</sup> および地盤の影響を考慮した Shinozuka・Takada・Kawakami<sup>6)</sup> に至るタイセット・SSSP の適用

による地震時の信頼性解析、Law<sup>7)</sup> によるカットセットの考えを導入した交通流の予測、Fratta・Montanari<sup>8)</sup> によるブール代数または中島<sup>9)</sup> によるフォールト・ツリーを利用した電気網システムの信頼性評価、潜在的な断層破壊に伴うライフライン系の地震危険度を共通に取り扱ったものに、PNET を用いた Mohammadi・Ang<sup>10)</sup>、Shinozuka・Koike<sup>11)</sup> あるいは Moghtaderizadeh ら<sup>12)</sup>、また田村・川上<sup>13)</sup> によるシミュレーション解法、などがある。いずれも近似解・厳密解によって需給節点間の連結性を確率量（いわゆる terminal reliability）として求めているが、計算時間と精度の観点からして現実の複雑なシステムの解析は容易でない。

これらはシステム工学的視点からおもに物理的損傷を検討したものであるが、地震後の水道ネットワーク網の給水能力を評価基準として論じたものもある。田村・川上<sup>13)</sup> の研究、線震源からの破壊の可能性を含めて発震後の消火活動のための給水性能を対象とした Shinozuka・Tan・Koike<sup>14)</sup> によるシステム地震時機能被害の推定、震災復旧時における修理パターンの優先権を論じた磯山・片山<sup>15)</sup> の研究、さらに多段階の復旧の状況を反映して連結性から各種機能尺度の相違と修理パターンに対する従属度まで取り扱った亀田・後藤<sup>16)</sup> の研究が報告されている。これらの研究では損傷を受けたシステムの流量解析とモンテカルロ法による連結性から機能性推定を実施している。また星谷<sup>17)</sup> は震災後における東京都上水道網の被害状態の回復をマルコフ理論を利用してシミュレーションするとともに、復旧過程の予測として、構造上かつ給水人口上からシステムのサービスを判定している。以上のようにシステムの信頼性に関するソフトな方法論を用いながらも、地震時あるいは復旧段階においてその固有の機能特性を發揮・保持し得るかどうかという基本的問題が研究されつつある。しかし絶対時間上での地震被害箇所の修理や水供給系の機能回復ポテンシャルに及ぼす影響については、定量的な考察が加えられ

\* 本論文は Lifeline Earthquake Engineering, The Current State of Knowledge 1981, ASCE (Oakland 1981)<sup>1)</sup> および第 16 回地震工学研究発表会 (1981.7)<sup>2)</sup> において一部発表したものに新たな計算結果を加え、総合的な取りまとめを行ったものである。

\*\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

\*\*\*\*\* 正会員 工修 大阪府土木部 (元・京都大学大学院学生)

ていないようである。

本研究では、以上のような特徴ゆえに、まず Inclusion-Exclusion principle<sup>(18),(19)</sup> による確率計算を参照して、小次元に分割した部分系相互間の連結確率を伝達の求めていく、比較的簡単でしかも一般性のある厳密な信頼性解析を展開し、計算量・計算時間の節約、種々の状況下での機能推定・全体信頼度の評価が可能なことを示した。次に、地震後における上水道網の機能評価は、被害状態の軽微な破損管路から早急に修理するという復旧方針によって検討した。具体的には、劣化したシステムの復旧段階における給水可能量を管網解析によって追求し、さらに平常運転時の設定値と比べた信頼度の変化に関する定式化を試みた。これらを、理想化した仙台市の上水道網<sup>(20),(21)</sup>に適用して、各種諸量に及ぼす修理パターンの影響、地域的な連結性と機能性の相違などを検討し、本研究の時変信頼性解析の有効性について吟味した。

## 2. システムの信頼度解析のための反復分割法

ネットワークシステムの信頼性算定には、一般的に状態、タイセットあるいはカットセットの列挙を検討することから開始しなければならない<sup>(18),(19)</sup>。これらのアルゴリズムに基づく連結確率の厳密解法には Inclusion-Exclusion 法<sup>(4),(5)</sup>、ブール代数法<sup>(8)</sup>、フォールト・ツリー法<sup>(9)</sup>などを挙げることができる。しかし計算容量と計算時間を大幅に必要とするため、誤差の累積の可能性のみならず効率的に解を得ることが困難である。そこで種々の近似解法(モンテカルロ・シミュレーション<sup>(13)</sup>も含む)が試みられてきた<sup>(7),(10),(18),(19)</sup>。それらに共通した問題点は精度の面と目的に合致したシステム特性の検討が十分でないため、解析結果が必ずしも実際的に有効でないということであろう。この欠点を改善するため、本研究ではシステムの信頼性を比較的容易にかつ系統的に算定する手法を示している。本手法の詳細な取扱いとその特色については文献 1) において述べている。ここでは震災復旧段階に適用するための若干の説明を加える。

なお、電気分野では、システムを分解して信頼度解析を実施するための各種の手法が古くから知られている<sup>(18),(19)</sup>。本方法は、基本的にその1つ<sup>(22)</sup>に類似しているが、それをさらに拡張発展させたものである。ただし、厳密な信頼度の算定に必要な反復分割のための汎用的なプログラムを完成させていること、多点節点ペア間の terminal reliability を求められること、解析の手法が容易なこと、によって文献 22) とは明らかに相違している。

### (1) 算定法

以下の手続は原理的にタイセット列挙法によって評価することにする。システムの連結性はある節点から必要な節点まで少なくとも1つ以上の経路が存在するとき有効である。その連結確率(あるいはシステムの信頼性)  $R$  は Inclusion-Exclusion principle<sup>(18),(19)</sup> によれば、

$$R_{UT} = \sum_{i=1}^{|T|} \left[ (-1)^{i-1} \sum_{\{E \subseteq T \mid |E|=i\}} R_{\cap E} \right] \cdots \cdots (1)$$

で表現される。ここで、 $T$  はタイセット、 $|T|$  はそのセット  $T$  の構成要素数(たとえば節点  $k$  から節点  $l$  へのタイの数  $=n(k, l)$ ) である。 $\{E \subseteq T \mid |E|=i\}$  はタイセットから  $i$  個の任意のタイの組合せとして抽出された代表的なタイの集合  $E$  を意味し、 $R_{\cap E}$  はその  $E$  の積事象の確率である。上式の計算には  $2^{|T|}-1$  項の確率展開を必要とする。

大規模ネットワークになれば上式の算定項はきわめて多大になり、その厳密解を得ることは事実上不可能である。この点を改善するために、本研究ではもとのネットワークを一連の部分系に分解し、それらの伝達経路を見出すことにより、式(1)で示した Inclusion-Exclusion の確率法則を小次元で取り扱うとともに step by step で利用するものである。

厳密解算定のための部分系の分割法は、あるアルゴリズム<sup>(1)</sup>に従属してシステムの各節点をいくつかの集合に分類することから始める。まず Tarjan<sup>(23)</sup>による depth-first-search (DFS) 法を利用して、システム内の各節点を強連結要素に分割した縮小ネットワークを作成する。強連結要素は部分集合内のすべての節点が相互に伝達可能な特性をもつ。そして1つの需要端側から順次各リンクを介して先行節点と後続節点を検出して節点番号付けを繰り返して実施し、最終的に1つの供給端に至るときこの手続を終える。具体例については文献 1) に示している。その結果、各節点は互いに排反な  $Q$  個の部分集合  $S_1 \sim S_Q$  に分割される。 $S_Q$  と  $S_1$  は対象需給端の単一節点から成るとしておく。そのとき供給端  $S_1$  から部分系  $S_q$  内の節点  $s \in S_q$  に至る経路には Fig. 1 に示す2つの方法がある。ただし、 $S_q' (S_q'')$  は  $S_q$  以外の部分系に先行節点(後続節点)を有する  $S_q$  内の節点から構成される部分集合であり、 $S_1' = S_1$ ,  $S_q'' = S_q$  と定義

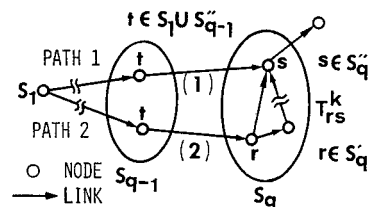


Fig. 1 Source to Node Paths.

しておく。同図によれば、供給端  $S_1$  から節点  $t \in S_1 \cup S_{q-1}$  を仲介とし、(1) リンク  $(t, s)$  に沿って、あるいは (2) リンク  $(t, r)$  に沿って節点  $r \in S_{q'}$  に至りさらにタイセット  $T_{rs}$  に沿って、節点  $s$  に伝達する。パス (1) はパス (2) の  $r=s$  なる特別なケースである。節点  $s$  の先行節点はすべて  $S_1 \cup S_{q-1} \cup S_q$  に属している。

供給端  $S_1$  から節点  $s$  への連結確率は、 $S_1$  から節点  $t$  への連結確率と  $S_{q'}$  内の節点  $r$  から節点  $s$  に至るタイセットのすべての経路  $T_{rs}^k (k=1 \sim n(r, s))$  がわかれば、段階的に与えられる。すなわちその厳密な連結確率  $R_{s \in S_{q'}} (2 \leq q \leq Q)$  は  $R_{s_1} = 1$  を与件として次式で表示できる。

$$R_s = P_r \left\{ \bigcup_{t \in S_1 \cup S_{q-1}} \bigcup_{r \in S_{q'}} \prod_{k=1}^{n(r,s)} \left[ (Y_t = 1) \cap \left\{ (X_{tr} \prod_{(i,j) \in T_{rs}^k} X_{ij}) = 1 \right\} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $Y_t = 1, (X_{tr} \prod_{(i,j) \in T_{rs}^k} X_{ij}) = 1$  は、それぞれ供給端  $S_1$  から節点  $t$  に至る少なくとも 1 つのパスの存在事象と、節点  $t$  から節点  $r$  の仲介後  $k$  番目のタイ  $T_{rs}^k$  に属するすべてのリンクが機能して節点  $s$  に至るパスの存在事象であり、Binary Random 変数で表わされる。一般に節点  $i, j$  間の有向リンクの信頼性  $P_{ij} = P_r \{ (X_{ij} = 1) \}$  は地震危険度解析から求められる。上式は Fig. 1 に示した経路の各組合せに対してその概念を具体的に事象の列挙とその確率式で定義したことになる。

ところで、いま供給端  $S_1$  から節点  $t$  へのパスと、 $t$  から  $r$  を通り  $s$  へのパスの存在事象は互いに独立とする。このように設定すれば、式 (2) は式 (1) を用いて展開することによって比較的容易に評価できる。そのために以下の項を求めておけば、すべての必要条件が整ったことになる。すなわち、

$$R_{\cap(V \subseteq S_{q-1})} = P_r \left\{ \bigcap_{t \in (V \subseteq S_{q-1})} (Y_t = 1) \right\} \dots\dots (3)$$

あるいは

$$\begin{aligned} R_{\cup(V \subseteq S_{q-1})} &= \overline{R_{\cap(V \subseteq S_{q-1})}} \\ &= P_r \left\{ \bigcup_{t \in (V \subseteq S_{q-1})} \bigcup_{b \in S_{q-1}} \bigcup_{a \in S_1 \cup S_{q-1}} \prod_{k=1}^{n^*(b,t)} \left[ (Y_a = 1) \cap \left\{ (X_{ab} \prod_{(i,j) \in T_{bt}^k} X_{ij}) = 1 \right\} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし、節点  $b \in S_{q-1}$  から節点  $t$  へのタイセット  $T_{bt}$  は節点集合  $V \subseteq S_{q-1}$  から節点  $t$  を除いた節点を疎通しないタイの集合であり、その総タイ数を  $n^*(b, t)$  とする。また式 (4) の  $\overline{R_{\cap(\dots)}}$  は積の余事象が生起する確率を意味する。上式の展開には式 (1) を適用する。

$S_2$  から  $S_Q$  の部分集合内の節点に式 (2)~(4) を反復的に繰り返しながら求めた最終的な結果  $R_{S_Q}$  が、需

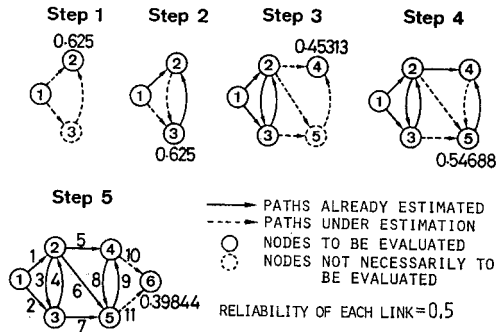


Fig. 2 Step-by-step Schemes for Estimating Terminal Reliability.

給節点間の連結信頼度である。

(2) 適用例

前節で述べたシステムの連結確率算定法について具体的に説明する。以下、システムを構成するリンクの信頼度 (あるいは破壊確率) は前提条件として与えられているものと仮定した。

Fig. 2 に示す比較的単純なネットワークを想定する。節点数は 6 個、節点 2 と 3 および節点 4 と 5 間の 2 重リンクを含めたリンク総数は 11 個である。供給端 1 から 4 個の中継節点を介して需要端 6 に至る連結状態の満足度を調べる。ネットワークは 4 個の部分集合  $S_1 = \{1\}, S_2 = \{2, 3\}, S_3 = \{4, 5\}$  と  $S_4 = \{6\}$  から成る。各リンクが統計的に独立であると仮定すると、これらの各事象に対する解析式は段階的に表現できる<sup>1)</sup>。ただし、 $R_2$  から  $R_6$  は式 (2) を、 $R_{\cup\{2,3\}}$  と  $R_{\cup\{4,5\}}$  は式 (4) を、 $R_{\cap\{2,3\}}$  と  $R_{\cap\{4,5\}}$  は式 (3) を利用し、式 (1) の Inclusion-Exclusion principle を用いて展開している。そのとき各リンクの信頼度  $P_r \{ (X_{ij} = 1) \} = 0.5$  を与件とする各節点の連結確率は Fig. 2 に示したとおりである。結局必要な連結確率は  $R_6 (= 0.39844)$  として効率的に見出すことができる。一連のステップは Fig. 2 のように解釈され、両端を結ぶ必要最小限の経路を有効に取り出して目的を達成したことがわかっていく。

式 (1) に基づく Inclusion-Exclusion 法 (M-1) とプール代数法<sup>2)</sup> (M-2) による厳密解およびシミュレーションによる近似解 (M-3) の結果を相互に比較検討した。M-1, M-2 による解はともに等しかった。しかし、もとのネットワークに対応する SSP の最小タイセットは 12 個で構成され、式 (1) の算定には  $2^{12} - 1 = 4095$  項の確率計算をしなければならない。式 (2)~(4) に含まれる項数が 39 個である<sup>1)</sup>から、本解析法は 1/105 の確率計算でよい。M-2 で、プール積の数は最高 117 にも達し、19 回の繰返し数で収束する。1 万回のシミュレーションで得られる値は 0.3952 と厳密解に近い。計算時間は

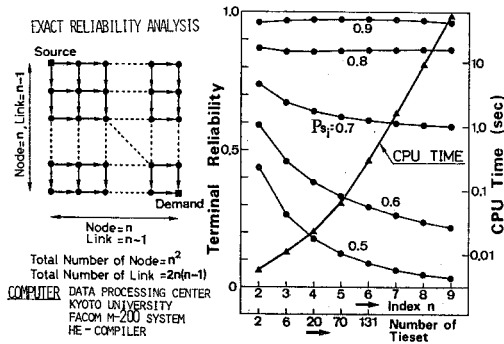


Fig. 3 Terminal Reliability of Water Distribution Systems of Different Size.

本研究, M-1, M-2, M-3 でおのおの 0.056, 11.536, 10.997, 13.297 秒である(京都大学大型計算機センター M-200 システム). 一般に複数個存在する冗長パスの一つの連結性喪失を許容した場合を想定し, システム全体が機能的に満足される条件下で, 各リンクの破壊が全体信頼度に与える影響を調べた結果, SSP との関連からも明らかなように, 冗長性はシステムの信頼度を高めること, さらに需給端に直結した構造破壊はかなり重要であることなどが判明した. これはライフライン系の耐震設計戦略に基本的な情報であろう. 最近, 著者らは連結確率の上・下限を求める計算式を提案したが<sup>1)</sup>, それによっておのおの値は 0.473 27 と 0.349 33 として与えられる. カットセットの列挙による下限推定がこの例において的を射ている. タイセットに依存した従来のシステム破壊確率の近似解法<sup>10), 11)</sup>は安全側の過大評価となり, システムの耐震設計へフィードバックするためには解法の選定に慎重な配慮をしておく必要があると考えられる.

本手法をかなり複雑なループ形式の網目状配水管網に応用した例が Fig. 3 である. これは現実に布設されているシステムに対応する<sup>24)</sup>. 図中の  $n$  をパラメータとして, 指定した供給端と需要端間の信頼性を追跡した. 各有向リンクの信頼度  $Ps_i$  を一律に 0.5 から 0.9 に変化させた結果と計算時間を示している.  $Ps_i$  の値によっては  $n$  の増大とともに必ずしも安定した減速を得るのではなく, 冗長パスの数が多いからといってシステム信頼度は必ずしも高いとはいえない一例である. この結果はシステムの配置計画と設計の検討項目に有用となる. 計算時間は指数関数的に増大するが,  $n=8$  (総節点 64, 総管路 112) としても 10 秒を要しない. 従来の厳密解法ではこの程度の対象ネットワークになるとほとんど算定不可能ということを勘案すれば, 本手法の利点は明白であろう. この手法の有効性については他のシステムを取り扱った文献 1) の成果からも確認している.

### 3. 震災後の上水道網の時変信頼性解析

上水供給網が地震被害を受けるとき, 冗長性ということだけで需要者に必要な水量を供給可能であろうか. 本章では前述したシステムの信頼度解析法, 故障解析を用いた修理パターンの検討および水供給機能の把握を通して, システムの構造・機能関数の定式化を試みた.

#### (1) 解析対象モデル

解析対象モデルには Fig. 4 に示す仙台市の理想化上水道網(総節点  $NN=25$ , 総管路  $NM=34$ )を例にとった. 本システムは仙台市水道施設現況図<sup>20), 21)</sup>から得たものであり, すべての管路は鑄鉄管で構成されているとした. 3 個の供給浄水場(国見, 中原, 茂庭: 節点 2, 3, 4)から配水所(荒巻, 鉤取山, 大年寺山: 節点 6, 7, 0)と各合・分流点を通じて, 自然流下方式(図中の基準方向)で各給水地区に配水される. 各節点は給水管・配水支線に分岐して給水地区の需要水量を分担するものと初期設定しておく. 複数の供給端が同時輸送能力をもち, システムの全体信頼度(overall reliability)の展開を容易にするため, 仮想節点(1, 27)に 100% の信頼度をもつ仮想リンク(1~3, 23~25, 35, 42~44)を介して原節点に連結しておく(以後リンクと管路は同一意味である). 管路は 4 種の土質条件<sup>20), 21)</sup>に分類された地盤内を貫通している. Table 1 には各管路とその上・下流側の節点番号を示す.

#### (2) 損傷ネットワークとその修復化

システムの物理的破壊は各管路の限界ひずみ  $\epsilon_s$  と震動による地盤ひずみ  $\epsilon_g$  の相対関係によって発生すると考えられるが, その状態をモンテカルロ法により形成した. なお, 各節点は簡単のため無被害と仮定する. 総破

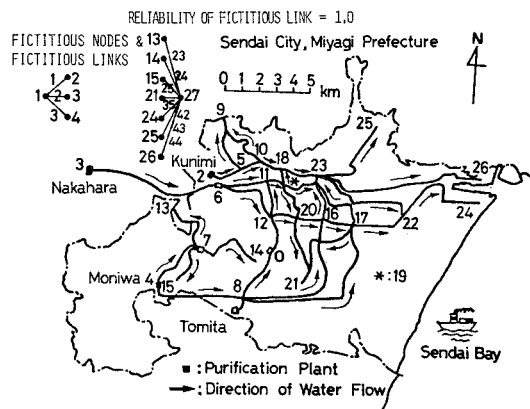


Fig. 4 Simplified Water Distribution System in Sendai City.

Table 1 Pipe and Flow Data.

Link No.	Length L(m)	Node		DIA (m)
		Up	Down	
4	2235	2	5	0.5
5	8468	3	6	0.7
6	3642	4	7	0.5
7	5643	4	8	0.7
8	4042	5	9	0.3
9	1294	5	10	0.5
10	2749	6	11	0.3
11	5760	6	12	0.5
12	4119	7	13	0.3
13	6355	7	14	0.3
14	3062	7	15	0.5
15	5103	8	12	0.7
16	8823	8	16	0.7
17	9526	8	17	0.7
18	2118	10	9	0.3
19	1058	10	18	0.5
20	2352	12	11	0.3
21	1058	11	19	0.3
22	1294	12	20	0.5
26	1648	16	17	0.3
27	6469	17	21	0.5
28	3294	17	22	0.3
29	2236	18	23	0.5
30	588	19	18	0.3
31	2116	19	20	0.3
32	2352	19	23	0.3
33	1529	20	16	0.5
34	4468	20	21	0.3
36	6815	22	24	0.3
37	2589	16	23	0.5
38	4470	17	23	0.5
39	6588	23	22	0.5
40	5294	23	25	0.5
41	9410	23	26	0.3

Allowable Error in Equation for Continuity of Flow at Each Node=0.0001(m<sup>3</sup>/s)  
 Assumed Energy Level at Each Node=45(m)  
 Allowable Pressure Head on Ground Level,  $RP_a=15$ (m)  
 Coefficient of Flow Velocity at Each Link,  $C_H=130$   
 Net Demand Flow,  $p_j=0.3$ (m<sup>3</sup>/s)  
 Allowable Output Flow,  $p_{a,i}=0.5$ (m<sup>3</sup>/s)  
 Factor of Leak,  $c_j=0.0005$   
 Hazen-William Equation:  
 $R_{ij}=0.27853 C_H DIA_{ij}^{2.68} L_{ij}^{-0.54}$   
 Leak Flow:  $A_i=c_i(E_i-G_i)^\kappa, \kappa=1.15$   
 DIA: Diameter of Pipe

壊個数  $N$  は各管路  $m$  の被害状態を表わす初期確率から計算される期待値和で得るものとし、次のように展開できる。ただし、地震発生直後の状況は不安定でかつ不確定と予想されるので、本研究では発震数時間後の状態からモデル化している。

直管と曲管から構成される管路  $m$  は総数  $N_m$  の基本要素に分離される。その信頼度  $\bar{r}_m$  は、星谷の研究<sup>17)</sup>と同様に、各基本要素  $j$  の標準被害個数  $me_j$  を用いた非破壊確率の算術平均値で求め、

$$\bar{r}_m = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} \exp(-me_j) \dots \dots \dots (5)$$

とする。要素内の破壊が定常ポアソン過程に従うと仮定している。他方  $me_j$  は、 $me_j = \sum_{k=1}^{m_j} Pr(\epsilon S_k < \beta \epsilon C_k / \text{変換係数 } \beta, \text{ 地盤, 管種, 地震規模, 伝播特性など}) \cdot mL_j$  であり、要素長  $mL_j$  と損傷基本要素の条件付期待個数  $\sum Pr(\cdot)$  ( $m_j$  は  $j$  要素の細分割数) から検討される。本研究では簡単のため  $\sum Pr(\cdot) = mD_j \cdot mC_j$  と定義する。 $mD_j, mC_j$  はおのおの、要素の単位管長当たりの平均破損個数(個/km)と地盤による局所的な破損被害率補正係数である。これらの諸数値は、1) 地盤種別  $i$  (第1種から第4種地盤) について  $mC_j^i = i (i=1\sim4)$ , 2) 口径 0.075~0.3 m, 0.35~0.6 m, 0.7 m の管被害率  $mD_j$  についておのおの 0.118, 0.04, 0.01<sup>(20), (21)</sup>, 3)  $mL_j$  について約 0.5 km をそれぞれ採用した。

星谷の研究<sup>17)</sup>と同様に、各管路の被害状態は  $mS_1 \dots mS_i \dots mS_M$  の  $M$  個に分類し、非破壊個数  $m x_i$  と  $N_m$  の比から定義する。そのとき、地震後に被害状態  $mS_i$  となる確率は、

$$mP_i(0) = \sum_{m x_i - \text{region}} N_m C_m x_i (\bar{r}_m)^{m x_i} (1 - \bar{r}_m)^{N_m - m x_i} \dots \dots \dots (6)$$

である。上式の  $aCb$  は組合せを意味し、 $m x_i - \text{region}$  は  $[(i-3/2)/(M-1), (i-1/2)/(M-1)]$  となる。したがって、初期状態の確率分布  $mU(0)$  は以下のようである。

$$mU(0) = \{mP_1(0), \dots, mP_i(0), \dots, mP_M(0)\} \dots \dots \dots (7)$$

地震直後の総被害個数は前述したように、

$$N = IN \left[ \sum_{m=1}^{NM} \sum_{i=1}^M (N_m - m x_i) mP_i(0) \right] = IN \left( \sum_{m=1}^{NM} \eta_m \right) \dots \dots \dots (8)$$

として計算する。 $IN(\cdot)$  は整数化を意味する。損傷ネットワークの作成は上式から  $N$  個の乱数を発生させ、モンテカルロ法による破損管路とその位置を検出した。その手続は文献 2) に記述されているので、ここではその説明を割愛する。ただし、地震強度の高い地区、軟弱地盤中のあるいは構造の弱体な埋設管路が破損しやすいのは当然である。

ネットワークシステムの故障状態の復旧予測に関し、Barlow<sup>18)</sup>, Henley<sup>19)</sup> らは電気系の修理状況としてマルコフ過程で故障解析を取り扱い、同じく星谷<sup>17)</sup>はこれを離散時刻ごとに処理する方法を提案している。本研究では基本的に後者の方法論を拡張した。文献 17) によれば、管路  $m$  の復旧時刻  $idt$  における構造的被害状態確率ベクトル  $mU(idt) = \{mP_1(idt), \dots, mP_i(idt), \dots, mP_M(idt)\}$  は、式 (7) の  $mU(0)$  と復旧回復推移確率行列  $mP(idt)$ <sup>17)</sup> によって、

$$mU(idt) = mU(0) \cdot \prod_{k=1}^i mP([k-1] \cdot dt) \dots \dots (9)$$

で表現されることになる。  $mP(\cdot)$  は震災後の多段階における各種の復旧活動から求まる項で、一般に人的・物的な範囲な対策をもとに時変復旧率  $m\nu_j(i\Delta t)^{17)}$  を要因として決定される。本研究では、管路  $m$  が復旧時刻  $i\Delta t$  で被害状態  $mS_j$  (あるいは非破壊要素数  $mX_j$ ) にあるときの単位時間当たりの復旧率として  $m\nu_j(i\Delta t)$  を解釈した。

復旧活動は発生したすべての破損箇所について同時に取りかかるとしたが、各復旧時刻ごとにどの破損管路を修理すべきか判定することが必要である。修復化の挙動は、各復旧時刻ごとに式(9)の確率から破損箇所の期待数を求め、管路  $m$  の生存要素数を以下のように算出することから検討した。

$$\xi_m(i\Delta t) = N_m - \sum_{l=1}^M (N_m - mX_l) mP_l(i\Delta t) \dots (10)$$

これと1ステップ以前の  $\xi_m([i-1]\cdot\Delta t)$  の比較および構成要素の配置状態から、復旧管路を決定した。

$$IN \left[ \sum_{l=1}^n \xi_m(l\Delta t) - n \cdot \xi_m(i\Delta t) \right] \geq 1$$

のとき少なくとも1個以上の破損箇所の復旧には  $(n-1)\Delta t$  時間を要するか、  $IN[\xi_m([i-1]\cdot\Delta t) + 0.5] \geq N_m$  のとき  $i\Delta t$  時刻に管路  $m$  が平常状態への回復に至るという具合である。なお、同一管路に多数の破損箇所を有する場合には上流端側から修理を進めていく戦略を取った。

### (3) 連結性と機能性の水準

配水管網のいずれかの供給端からある対象需要端まで少なくとも1つ以上の冗長経路が存在するとき、システムの連結性能は満足される。その余事象は連結性の喪失を意味し、破壊を与える。他方、機能性能は、正常運転時に比べて所定の給水輸送能をどの程度下回って稼働するかの使用性尺度で判定するものと定義する。地震によるシステムの被害は管路の破断・抜出し・漏洩を起こし、その状態によっては大損傷・中損傷あるいは無被害の事態が予測される。この現象に誘発して需要端で水圧・水量不足あるいは逆流による水質汚濁を伴い、地震直後の消火活動・生活可能水準の確保が満足されないことになる。したがって震災復旧段階の問題を解明するには、有限な広がりを持つシステムの機能的損傷の尺度で計量化していく必要がある。

#### a) 連結性の尺度 $mDR(t)$

機能損傷を解明するには、まず物理的損傷の程度を一意的に決めておかねばならない。その程度  $mDR(t)$  は、各管路  $m$  の構成基本要素総数  $N_m$  とモンテカルロ法で得られた初期のあるいは復旧時刻  $t$  での被害箇所数  $y_m$  の相対比により、以下のように定義した。すなわち、①  $y_m=0$ ;  $mDR=1$ , ②  $1 \leq y_m < N_m/6$ ;  $mDR=0.9$ , ③

$N_m/6 \leq y_m < N_m/4$ ;  $mDR=0.7$ , ④  $N_m/4 \leq y_m < N_m/2$ ;  $mDR=0.5$ , ⑤  $N_m/2 \leq y_m \leq N_m$ ;  $mDR=0$ .

これらは無被害、小・中損傷、大損傷に対応する。構成基本要素の半分以上が破壊するならば、管路は完全に破断(消滅すると同義)した大損傷の非連結事態になり、下流側に疎通し得ず原需要端(分岐合流点)から流出量を累積する。中損傷の場合、その管路は連結性を保持するが、いくつかの破損箇所からは破断孔として漏洩するという具合である。

#### b) 損傷ネットワークの流量解析

正常運転時および損傷時におけるシステムの給水機能を確認するために、漏洩と水圧不足を考慮した多点注入管網解析式<sup>24)</sup>をエネルギー法に基づき算出した。中損傷状態の破断孔は漏洩を生じるので、仮想節点として初期設定する。ここでは損傷管路の管径を指標  $mDR(t)$  で補正して管内流量・漏洩量を調整し、水圧不足に伴う現象の再現に努めた。

$NN$  個の原節点と  $N(t)$  個の破損箇所から3個の供給端を引いた節点集合  $INR(t)$  につき、隣接節点または破損箇所  $ij$  間において、節点  $i$  で成立する方程式は、

$$\sum_j Q_{ij}(t) + P_{i,r}(t) + A_i(t) = 0 \quad (i \in INR(t)) \dots \dots \dots (11)$$

である。ここで、節点  $ij$  間の管内流量  $Q_{ij}$ 、節点  $i$  での取出し水量  $P_{i,r}$  と漏洩水量  $A_i$  は次式から得られる。

$$\textcircled{a} \quad Q_{ij}(t) = R_{ij}(t) |E_i(t) - E_j(t)|^{-0.46} (E_i(t) - E_j(t)) \dots \dots \dots (12)$$

ここで Hazen-William 式;

$$R_{ij}(t) = 0.27853 C_H \{mDR(t) mD_{ij}\}^{2.63} mL_{ij}^{-0.54} \dots \dots \dots (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \textcircled{b} \quad & P_{i,r}(t) \geq \underline{p}_i \text{ のとき, } P_{i,r}(t) = \underline{p}_i \\ & P_{i,r}(t) < \underline{p}_i \text{ のとき, } \\ & P_{i,r}(t) = p_{a,i} (E_i(t) - G_i) / \sqrt{RP_a} |E_i(t) - G_i| \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

ただし、 $E_i(t) \leq G_i$  において  $P_{i,r}(t) = 0$

$$\textcircled{c} \quad A_i(t) = c_i (E_i(t) - G_i')^\kappa \cdot H(E_i(t) - G_i') \dots (15)$$

上の5式において、 $E_i$  と  $E_j$  は節点  $i$  とその隣接点  $j$  のエネルギー位(水圧)を、 $E_i - E_j$  は管路の損失水頭を、 $C_H$ 、 $mD_{ij}$ 、 $mL_{ij}$  は流速係数、管径、管路長を示す。 $\underline{p}_i$ 、 $p_{a,i}$ 、 $RP_a$  は需要水量、許容取出し水量と許容地盤上残存水頭、 $G_i$ 、 $G_i'$  は地盤高さ、管中心高さ、 $c_i$  と  $\kappa$  は漏水項に関連したパラメーターである。破損箇所も節点に含めて考えているから、管路  $ij$  は破損箇所間の、原節点と破損箇所間の管路あるいは無被害の管路  $m$  を代表するので、 $mD_{ij}$ 、 $mL_{ij}$ 、 $G_i$  と  $G_i'$  は管路  $m$  内の破損位置によって適宜補間して算出している。なお式(15)の  $H(\cdot)$  は Heaviside の単位ステップ関数である。

漏水量と残存水頭 ( $E_i - G_i'$ ) の関係は末石・雄倉<sup>25)</sup> の実験的研究によっている。各物理量には復旧時刻を示すパラメーター  $t=idt$  を導入した。平常運転時の状態は  $t \rightarrow \infty$  に対応するが、このとき  $INR(\infty)$  のデータ数  $= NN - 3$ ,  $mDR(\infty) = 1$  である。復旧活動によって時刻  $t$  でいくつかの破損箇所  $i (\in INR(t))$  が修理されるから、ネットワークの幾何学的特性および水圧不足に伴う給水管の取出し水量の調整<sup>24)</sup>も含めた水理学的特性はかなり変化することになる。ただし、漏洩を問わずバルブ設定による閉鎖作業の状態変化はないと仮定している。式 (11) については Newton-Raphson 法を用いた非線形反復計算により解を求めている。

e) 機能性の尺度  $mFC(t)$

連結性に依存した機能損傷の尺度は、各復旧過程を通して所定の水量を供給可能かどうか、であると定義しておく。そのとき給水機能の稼働判定には以下の指標  $mFC(t)$  を導入して、正常運転時と損傷時の管内水量  $mQ_{nor}$  と  $mQ(t)$  より推定した。ただし、1) 需要水量は時間的かつ地域的に変動し、その予測には不確定性を伴うこと、2) 緊急時の状況下で機能損傷状態を比較的簡単に表示すること、を考慮した。確率量としての特性をもつ管内流量の不規則変動はガウス分布 (平均値  $= mQ_{nor}$ , 標準偏差  $= mQ_{nor}/6$ ) に従うとしている。

$$mFC(t) = Pr(mQ_1 < mQ(t) \leq mQ_i) / Pr(mQ(t) \leq mQ_{nor}) \dots\dots\dots (16)$$

ここで、離散値  $mQ_i$  は  $mQ_1$  から  $mQ_{nor}$  までを 10 等分して得られる初期設定値であり、 $mQ_i = mQ_{nor} (0.25 + 0.75(i-1))$  としておく<sup>2)</sup>。このように定義すると、 $mQ(t)$  が最低必要水量  $mQ_1 (= mQ_{nor}/4)$  以下で周辺地域に供給不可能な大損傷となり、完全復旧時 ( $mQ(t) = mQ_{nor}$ ) には  $mFC(t) = 1$  となる。システム全体のバランス上、 $mQ(t) > mQ_{nor}$  のケースも考えられるが、この場合には各給水区域への水供給が十分満たされているものと仮定した。なお損傷を受けた管路  $m$  は、b) で指摘したようにいくつかの破損管路の直列系として構成される。その損傷状態を基礎とすると管内流量の一部が途中の破損節点で漏洩してしまうので、式 (16) の  $mQ(t)$  には管路  $m$  の最下流端側における破損管路水量を採用した。

(4) 地震後の復旧段階におけるネットワーク特性の回復ポテンシャル

各管路の物理的損傷状態  $mDR(t)$  と機能損傷状態  $mFC(t)$  を用いて、復旧過程におけるシステムの連結性能と機能性能に関する信頼度算定法について述べる。

システムの機能性は、ある供給端からある需要端まで少なくとも 1 つの経路の連結性が保持され、かつその需要端での給水 (水圧) 能力が所定の条件を実現すること

によって満足される。そのためには各経路(タイセット)の構成管路にこれら必要十分条件を要請しなければならない。この規定より、本研究では復旧時刻  $t$  における各管路  $m$  の機能確率を次式で表現した。

$$mP(t)_{t=idt} = Pr\{(mX_{kl}(t)=1) \cap (mQ(t) \geq mQ_1)\} = Pr\{(mQ(t) \geq mQ_1) / (mX_{kl}(t)=1)\} \cdot Pr\{(mX_{kl}(t)=1)\} \dots\dots\dots (17)$$

ここで  $mX_{kl}$  は管路  $m$  の両端  $k, l$  間の連結状態を代表する Binary Random 変数である。上式の第 1 項の条件付確率は  $mFC(t)$  で、第 2 項は  $R_m(0) \cdot mDR(t)$  で近似的に展開できる。 $R_m(0)$  は平常時における各管路の非破壊確率  $R(0) = \{\dots, R_m(0), \dots\}$  を構成要素とし、式 (6) から

$$R_m(0) = (\bar{r}_m)^{N_m} \dots\dots\dots (18)$$

として推定した。その結果、システムの物理的破壊に從属した管路  $m$  の機能確率  $mP(t)_{FUNC}$  と連結確率  $mP(t)_{CON}$  はおのおの次式で表現できる。

$$mP(t)_{FUNC} = mFC(t) \cdot \{R_m(0) \cdot mDR(t)\} \dots\dots\dots (19)$$

$$mP(t)_{CON} = R_m(0) \cdot mDR(t) \dots\dots\dots (20)$$

他方、システムに要請される連結性あるいは機能性は、2. で示したネットワーク信頼度解析のための反復分割算定式 (式 (2)~(4)) に  $mP(t)_{CON}$  あるいは管路相互に從属した  $mP(t)_{FUNC}$  をおのおの作用させることに

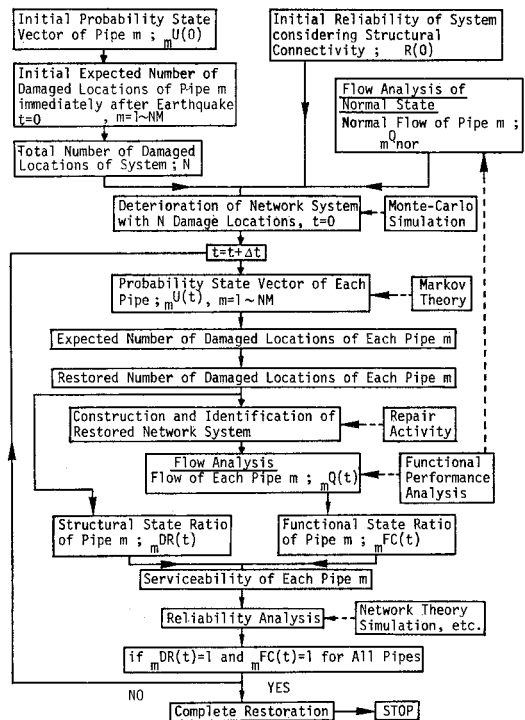


Fig. 5 Flow Chart of System Performance Evaluation proposed by This Study.

より、比較的容易に計算できる。上記手続はすべての損傷管路が  $mDR(t)=1$  かつ  $mFC(t)=1$  の平常時の状態に回復するまで離散復旧時刻ごとに繰り返し、最終的にシステム全体の完全復旧時間は  $T_M$  となる。

地震後の各復旧段階における所定の特徴は Fig. 5 のフローチャートにまとめており、上記解析はこれを反復的に実行することによって検討していった。

### 4. 数値計算例および考察

#### (1) 使用数値と一般的特性

##### a) 水理学的諸元

対象としたシステム (Fig. 4) の各管路長と口径は Table 1 のように設定し、各節点近傍の地盤は水平基準面から Fig. 6 (a) に示す高度にあり、埋設管中心はそれより 2 m 以深を貫通しているものとした。仮想の管路長は管路 1~3 で 1 km、管路 23~25, 35 と 42~44 で 100 km とし、その口径は一様に 0.7 km を仮定した。仮想供給水源 1 の仮定エネルギーと地盤高さはおのおの 55 m, 25 m とし、仮想節点 27 での地盤高さと同中心高さは 20 m, 18 m と仮定した。これらの仮定は、全体的な機能信頼度の把握およびもとのシステムの節点と管路条件を根拠としているが、最終的な結果に多大な影響を与えない。各節点での仮定エネルギー位、許

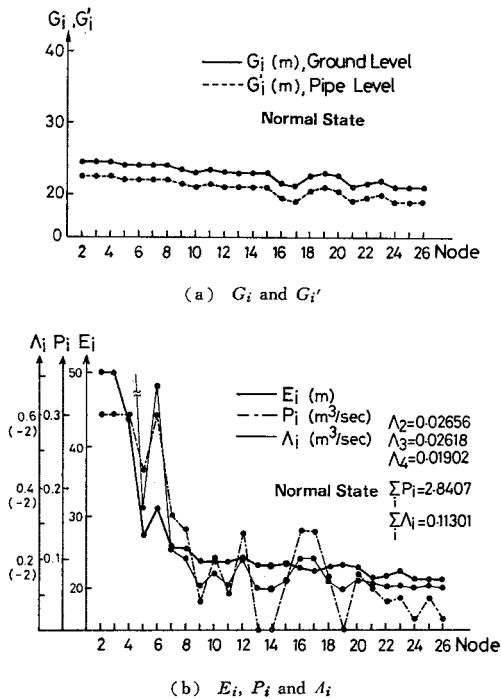


Fig. 6 Flow Characteristics at Demand Nodes associated with the Original Undamaged System.

容取出し水量、許容地盤上残存水頭と需要水量は 45 m, 0.5 m<sup>3</sup>/s, 15 m, 0.3 m<sup>3</sup>/s としている。地震後における各水源の水圧は平常時と同一であると仮定する。流速係数はすべての管路につき  $C_H=130$  とし、各節点からの漏水項に関するパラメーター  $\kappa$  と  $c_i$  は一律に 1.15 と 0.0005 とした。なお損傷時の漏水率は平常運転時に比べて増すであろうから、各管路の破壊箇所からの流出水量自体を一種の漏水量として採用した。

Fig. 6 (b) は平常運転時における流量解析の結果を示している。節点 13, 14 と 19 では必要水量を取り出すことが不可能であり、漏洩水量の方が卓越している。平常運転時の管内流量は Fig. 4 に示す矢印の基準方向に自然流下するものとして解析した。必要水量が 100% 給水可能なのは、水圧が許容値以上に保持されているときである。

##### b) 地震時における損傷状態の発生

各管路の被害状態を示す初期確率ベクトル  $mU(0)$  を式 (7) から求めた<sup>2)</sup>。管路の構造強度と局所的な地盤特性に応じて、いくつかの管路 (15, 19, 22, 9 など) の非破壊確率は平常状態  $S_{11}(M=11)$  でかなり高い値であった。他方、管路 41, 36, 39, 28, 13, 16 の被害確率分布は  $S_0$ 、あるいは  $S_{10}$  でピークを保持し、損傷状態に陥りやすいことが確認された。各管路の単位距離当たりの損傷率  $BR_m$  は、式 (8) の  $\eta_m$  と管路長  $L_m$  から  $BR_m = \eta_m L_m$  (個数/km) ..... (21) として定義し、想定地震による被害の局地的な分布状態を調べた。

Fig. 7 は各管路に関する  $\eta_m$ 、構成基本要素数  $N_m$  と式 (18) の  $R_m(0)$  を示しており、解析的に求めた  $BR_m$  は 0.02~0.50 の範囲に分布している。1971 年 San Fernando 地震時における Los Angeles 市の 0.48 km メッシュごとの配水管被害率<sup>26)</sup>を参考にすると、仙台市が 250~350 gal 程度の最大加速度を受けたと考えると少

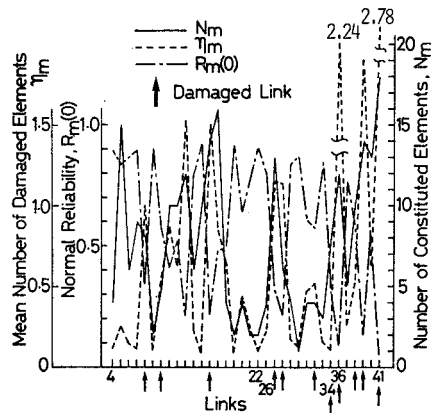


Fig. 7 Relation between Normal Reliability and Mean Number of Damaged Elements at Each Link.



なくとも基本的には妥当であろう。同図から、管路 41, 36 と 39 の被害が集中的に生起する状況を呈している。 $\eta_m$  と  $R_m(0)$  のデータは地域的な地盤震動の激しさと実際の地震被害の推定あるいは管路補強その他の事前対策に有用な資料となろう。

モンテカルロ法で得た損傷ネットワークの 1 サンプルが Fig. 8 ( $t=0$ ) である。同図から、破損箇所 (合計 23) の強・烈震地域の被害実態がよく再現されていることがわかる。

(2) 復旧作業に伴う修理の進展

ケース・スタディとして、各管路の復旧率  $m\nu_j(idt)$  を一律に、 $dt$  を 1 日に選び、(a)  $m\nu_j(0\sim5 \text{ 日})=0.2$ ,  $m\nu_j(6\sim8 \text{ 日})=0.5$  と、(b)  $m\nu_j(0\sim14 \text{ 日})=0.1$ ,  $m\nu_j(15 \text{ 日})=0.2$ , の 2 つのデータを採用し、両者の相違として多段階の修理作業の遅延を考慮した。これらの復旧率を用いた解析の結果、システムの完全復旧時間  $T_M$  は、おおよそ (a) 8 日と、(b) 15 日であった。

Fig. 9 は式 (9) から求めた被害確率分布の推移の代表例 ( $T_M=8$ ) を示したものである。同図中には式 (6), (8) と (10) の算定に必要な各状態  $S_j$  における非破壊要素数  $m x_j$  もプロットした。管路 13 と 36 に被害を生じるならば復旧作業の稼働に伴って破壊要素が修復さ

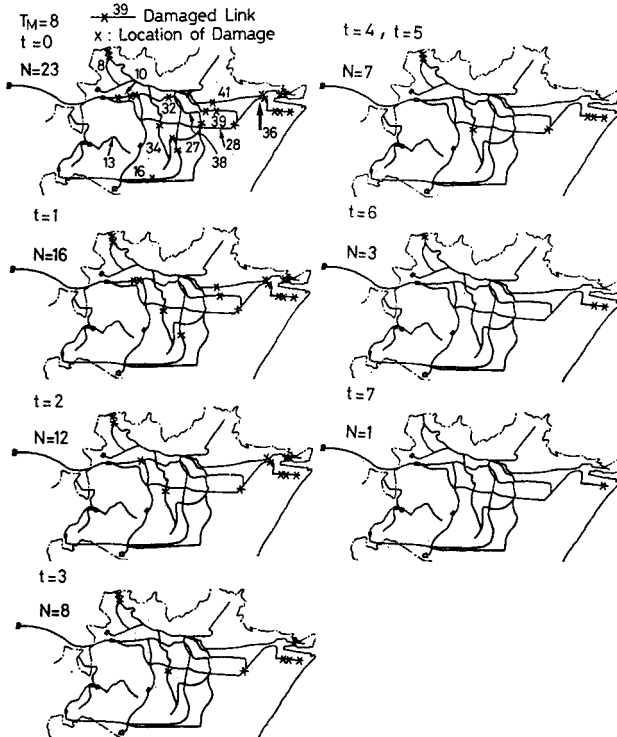
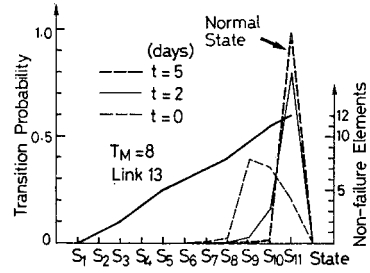
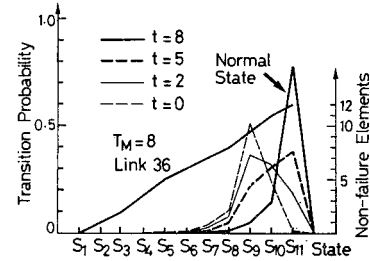


Fig. 8 Restoration of Pipeline Performance with Progress of Repair.



(a) Link 13



(b) Link 36

Fig. 9 Transition Probabilities of Restoration State at Typical Links.

れ、随次平常状態に移行していき、最終的におおよそ 5 日と 8 日で復旧する様子が理解される。しかし、地震直後 ( $t=0$ ) の損傷ネットワーク (Fig. 8) からわかるように、無被害の管路 13 は Fig. 9 (a) の状態変化に直接関与しない。

式 (10) から、各管路の生存要素数  $\epsilon_m(t)$  の経時変化は Fig. 10 のように求められた。一般的な特徴として、被害程度の大小にかかわらず同時に修理しても被害の大きい箇所への修理には長時間を要し、被害程度の軽微なすなわち修

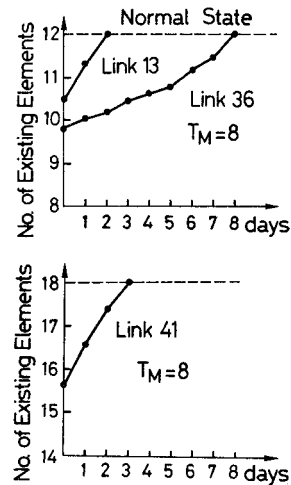


Fig. 10 Number of Existing Elements at Typical Link during Restoration.

理の容易な破損管路から復旧作業を終えた傾向がうかがえる。特に平常状態  $S_{i1}$  付近における初期確率  $mP_i(0)$  の大きい管路の回復率が高い。同図から推定された復旧箇所 の進展状況が Fig. 8 であり、1日ごとに7, 4, 4, 1, 4, 2, 1個が修理されている。4日目から5日にかけての作業は未修理というよりもむしろ次段階への橋渡しとしての不完全状態を意味する。3.(2) で述べた復旧方法および本解析に固有の地盤条件と被害程度から、管路8と36の修理は遅く、総じてシステム内の需要末端側からよりもむしろ供給端からの優先的な修復活動を発揮している。重要度の高いあるいは不足水量の大きな配水区域から修理を開始せず、上記修理パターンを採用したのは1978年宮城県沖地震での復旧作業の教訓<sup>20), 21)</sup>を生かすためである。

(3) 連結性能と機能性能を表わす尺度

Fig. 11 は2つの指標  $mFC(t)$  と  $mDR(t)$  の経時変化を、特に発震直後と復旧後2日, 6日目に對して示したものである。  $t=0$  に注目すると、管路10は3か所の破損で大損傷となり、実質的に信頼度=0で下流側への疎通能力をもたないことがわかる。その結果、供給端から節点11, 19に至る連結性能と機能性能は必然的に零となる(後述の Fig. 14)。管路8, 36, 41, 28, 32は連結性能が中損傷であっても機能性能が悪く、Fig. 8の破損位置に左右されて給水機能の極端な劣化の可能性を示している。管路34と38は連結性能が悪いわりに機能性能がよく、この程度の小損傷では水源2と3から完全に給水可能な特徴もっている。ただし、この現象はここで指定した損傷ネットワークの一サンプルに固有のものであることを指摘しておく。 $t=0$ で管路10の消滅による幾何学的形状の変化はその後の復旧段階でみられず、すべての管路は給水能力を有している。復旧作業に伴い、両性能面上で各管路の特性は変化していき、漸次平常機能に戻っていく様子が理解されよう。

(4) 流量解析による給水可能量の回復状況

以上の諸特徴を踏まえて、Fig. 4の各節点(6, 8, 16, 20, 21, 24)における物理量 ( $E_i, A_i, P_i, \dots$ ) の復旧時の挙動を Fig. 12 によって検討した。破損箇所の修復活動および破損孔の漏洩に伴う2次災害と機能劣化相互間の影響は、おもに次の3つに大別される。

㊤ 発震後水圧と漏水量は平常時よりも増大するが、復旧によってしだいに低減し回復していく。一方、取出し水量は需要水量と給水管内流量の大小関係による設計条件から許容値を保持している(節点6)。

㊦ 水圧不足はあまり大きくないが、取出し水量と漏水量は上流側の破損状態とシステムの供給バランスによ

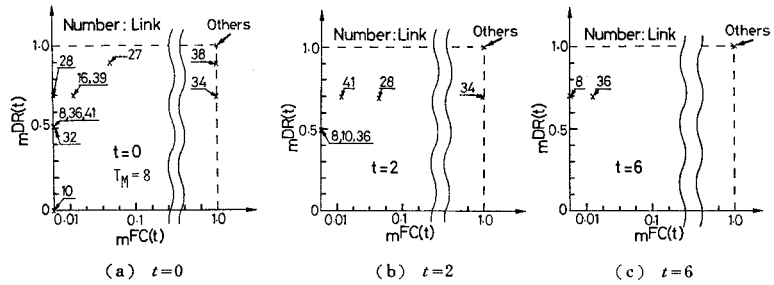


Fig. 11 Variation of Serviceability Measures defined by Present Analysis.

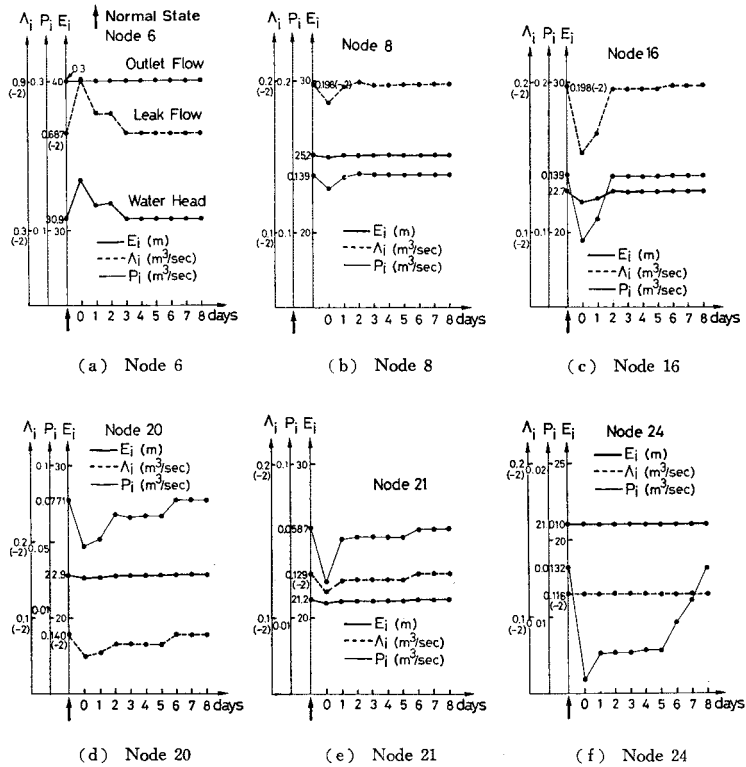


Fig. 12 Variation of System Performance Capability at Each Demand Node during Restoration.

ってかなり低下する（節点 8, 16, 20, 21）。

㉔ 水圧と漏水量は平常時と同じだが、取出し水量の不足が著しく、システムの完全復旧時刻まで回復しない（節点 24）。この影響は管路 36 における破損箇所での漏洩にかなり起因していると推察される。

水源 3 からの流下水量の分流点が節点 6 であり、しかもその分流管路 10 が管破断と同事態の大損傷によって多量の水流出を発生し、2 日目まで疎通性を失ったことが上記 ㉔ と関連している。全般的な特徴として、速度水頭と圧力水頭がともに零に近いことにより水圧変化の鈍感な結果を生み、破損箇所近くの需要端の水量不足が著しい。供給端に近い上流部での破損箇所ほど漏洩量も多く、これらがシステム全体の給水機能に悪影響を与えている。地震直後において節点 9, 11, 21~24, 26 と 16, 17, 20, 特に前者の 7 節点は平常時機能の 50% にも満たず、緊急用消火活動などのために最低必要限の水量を確保することは不可能であったであろうと推定される。

(5) 地震後の連結信頼度と機能性信頼度

システムの完全復旧時間  $T_M$  が 8 日と 15 日の 2 ケースにつき、Fig. 13 には 3 つの供給端から需要末端 (21,

24~26) への機能性 (実線) と連結性 (破線) を確率量として表示し、平常運転時からの劣化傾向と復旧段階時における回復状況を的確に反映させている。同図 (a) はシステムの全体信頼度を確認したものであり、他は各給水地区間の信頼度の差異を局所的に示している。需要末端 (13~15) は水源 4 から独立に水量を供給され、給水能力と構造的な連結状態とも平常時と同じ特性を發揮した。Fig. 8 に示す修理パターンとも関連して、各復旧曲線は特徴的な結果を生み出している。各特徴を列挙すると以下のようである。

㉕ 平均最大加速度 300 gal の被災に対して、システムの全体信頼度は 90% 程度の高い性能を示している。水源 4 から節点 13~15 および水源 2 から節点 25 への連結性が完全に保持されており、機能の喪失も他の破壊位置にあまり影響を受けない。復旧曲線は (b)~(e) のそれと比較して、節点 21 と互いに相似しており、節点 21, 26, 25, 24 の順に占有する割合が大きい。

㉖ 逆に地域的な復旧状況 ((b)~(e)) から判断すると、3 つの水源からの有効なタイセットの数と各管路の破損程度に応じて、復旧時刻上における連結性能と機能性能の相違が互いに明確に現われている。両性能が完全

に一致する地域的な復旧時刻は異なる。供給端と対象需要点間における並列系のパスは直列系のそれらに比べて需要点における水圧が高く、かつ必要水量もある程度確保されて破損箇所での漏洩も少ない。その結果が供給機能の被害状況の回復に著しい差異を招いたものと推察される。

㉗ 各復旧曲線に共通する特徴として、システムの復旧率あるいは  $T_M$  の相違による影響は初期段階における修理作業に明瞭に現われており、その後はお互いに比較的相似な状況を示している。復旧率と接続管路の修理経過に応じて、需要に対し供給水量の少ない大損傷の期間が長い様相を呈している。この側面は、給水再開に時間を要す破損箇所あるいは機能性の波及を強く受ける遠距離の地域から、比較的集中して修理していくパターンも戦略的に重要なことを示唆している。

㉘ 需要端 21, 24, 26 の機能破壊は連結性の喪失よりも著しく、円滑な復旧よりも多段階に進展する特色をもっている。この意味から、被災性の高いポテンシャル (節点 24 と 26 の信頼度は平常時でも数%) のこれら末端は管路補強などの耐震対策をすべき最も重要な地区といえよう。管路 36 の破損修理に長時間を要するため (Fig. 8, 10), 特に節点 24 のサービスはシステムの完全復旧時刻まで実現されない。

㉙ 節点 25 での両性能の復旧曲線は他のそれ

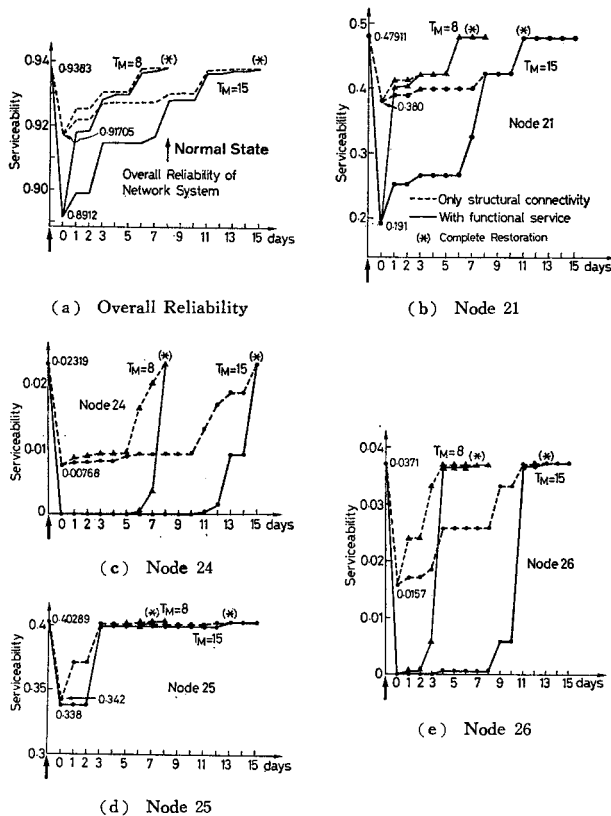


Fig. 13 Comparison between System Connectivity and Functional Serviceability at Each Restoration Stage ( $T_M=8$  and 15 days).

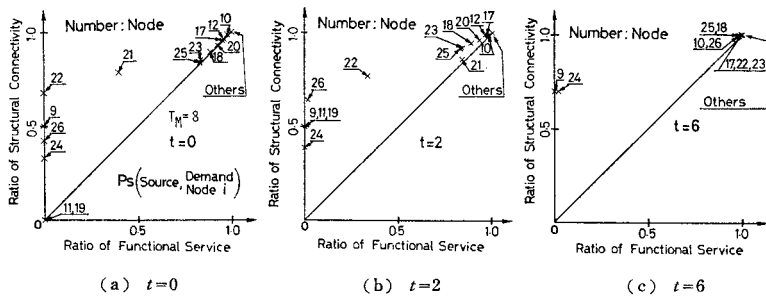


Fig. 14 Correlation between Loss of Connectivity and Unserviceability.

と異なるモードとなっている。地震直後における両者の劣化は同程度である。水源3からの断水と非連結を含むが、水源2から完全に水量を確保できるからである。3日目にほぼ復旧するが、これには管路10と32の修理による連結性の回復が大きく寄与している。その後の両性能の微小な差は、他地域における水供給のバランスの影響を受けるからであろう。

上記諸特徴は Fig. 12 で指摘した事項とも調和的である。

Fig. 14 は、他の節点も含めて復旧時の両性能を平常運転時の設定値 (Fig. 7 の  $R_m(0)$ ) で除した  $t=0, 2, 6$  日目の結果である。45°の直線上に位置する節点は連結性と機能が等しいことを意味する。震災後 ( $t=0$ ) における節点9, 21, 22, 24, 26からもわかるように、破壊パターンに従属してシステムの連結性能が中損傷であっても、給水機能性能は大損傷に陥ることがある。節点9と24の機能損傷は管路8と36の修理状況に依存している。右下半面に位置しないのは、平常時に都市内への配分量を十分に満足した供給機能を稼動するように設定したからにほかならない。同図は有限な広がりをも有するシステムの特徴をよく再現している。

最後に、2. で示したシステムの反復分割法を適用して、 $T_M=8$  日、15日の機能信頼度の完全復旧曲線を得るにはおのおの69, 120秒の計算時間を必要とした。

## 5. 結 言

本研究では、震災で機能喪失した都市内配水管網の破損管路の修復活動をシミュレートし、給水機能の回復過程に注目した時変信頼性解析を実施した。すなわち、管路の物理的損傷(破断・漏洩)に伴う震災復旧段階における使用性使標(水圧・水量不足)を用いて、給水性能の回復過程を確率的に追跡するための一評価手法を提案したものである。最適な復旧戦略の検討のためにも、劣化したシステムの連結性能と機能状態のマクロな把握は重要な項目と考えられる。ネットワークの連結信頼性解析として文献1)で論じた手法を応用し、Fig. 5の流

れに従って復旧段階における機能性の評価を取り上げている。数値計算例には仙台市の理想化上水道モデルと地盤特性を採用し、損傷ネットワークは種々の条件を設定してモンテカルロ法から得た。

得られたおもな成果をまとめると以下ようになる。

### (1) 反復分割による信頼度

算定法は、大規模ネットワークに対しても比較的容易に厳密解を得ることが可能であり、他の手法と比較して計算時間と計算容量の低減に役立つことが確認された。これより部分系分解による反復法の利点が明らかになった。

(2) 各破損管路の単位時間当たりの復旧率を同一に選び、被害軽微な破損箇所から修理するという復旧方針をとれば、需要末端側よりも重要度の高い供給端側から機能喪失を修復でき、給水機能の達成を良好に実現することができた。

(3) 時間経緯でとらえたシステムの連結性能と給水機能はかなりの相違を有することがある。供給端からの連結性が中損傷であっても、長期間給水不足の地区も存在し、この損傷の程度は供給端から遠距離の需要末端であるほど著しい。しかも、システムの形状・被害箇所と修理の進展に応じて、両性能の回復状態は地域的にかなり異なる様相を示すのが特徴的である。

(4) 地震後の取出し水量・水圧などの給水能力は破損管路の修理作業の経時変化とともに復旧していくが、システムの供給バランスによってその隣接管路のみならず遠距離の破損箇所にも強く影響される。また破損孔の漏洩量に左右されて平常運転時よりも取出し水量の増す節点もあった。

(5) 機能損傷、連結損傷ともに多段階の復旧形態を定量的に示しており、水圧不足と漏洩およびネットワーク特性を反映させた本研究の有効性が確認された。

なお、本研究の数値計算は京都大学大型計算機センターのFACOM M-200 (HE-Compiler) によったことを付記する。

## 6. あとがき

本原稿完成後、上水道系の地震災害復旧過程に関する予測理論が星谷によって提案された(第16回地震工学研究発表会講演概要, pp. 173~176, 1981.7)。同論文は、幹線直列系とそれから分岐したサブ系に分解して上流から下流への順次復旧あるいは同時復旧の2つの基本

パターンを考え、確率モデルを用いて理論的に復旧予測を検討しようとしたものである。本文中で言及しなかったが、本研究の修理パターンは同論文の内容とも関連が深いため、追記しておく。

#### 参 考 文 献

- 1) Noda, S., Y. Yamada, H. Iemura and Y. Ogasawara : A decomposition method for lifeline risk analysis, *Lifeline Earthquake Engineering, The Current State of Knowledge 1981*, ASCE, pp. 171~186, August 1981.
- 2) Noda, S., Y. Yamada and H. Iemura : Restoration of serviceability of a pipeline system, *Lifeline Earthquake Engineering, The Current State of Knowledge 1981*, ASCE, pp. 225~240, August 1981.
- 3) 山田善一・野田 茂・小笠原洋一 : 震害後の復旧段階における上水供給系の機能性能の評価, 第16回地震工学研究発表会講演概要, pp. 177~180, 1981年7月.
- 4) Panoussis, G. : Reliability of lifeline networks, SDDA Report No. 15, MIT, Dept. of Civil Engg., September 1974.
- 5) Taleb-Agha, G. : Seismic risk analysis of networks, SDDA Report No. 22, MIT, Dept. of Civil Engg., November 1975.
- 6) Shinozuka, M., S. Takada and H. Kawakami : Risk analysis of underground lifeline network systems, Technical Report No. CU-3 under NSF Grant ENV-76-09838, Columbia University, Dept. of Civil Engg. and Engg. Mech., August 1977.
- 7) Law, K.H. : Seismic performance of a transportation system, MS Thesis, Dept. of Civil Engg., Carnegie-Mellon University, November 1978.
- 8) Fratta, L. and U.G. Montanari : A Boolean algebra method for computing the terminal reliability in a communication network, *IEEE Trans. on Circuit Theory*, Vol. CT-20, No. 3, pp. 203~211, May 1973.
- 9) Nakashima, K. : Studies on reliability analysis and design of complex systems, The Dissertation for Ph. D. at Kyoto University, March 1980.
- 10) Mohammadi, J. and A.H-S. Ang : A method for the analysis of seismic reliability of lifeline systems, SRS No. 474, University of Illinois at Urbana-Champaign, Dept. of Civil Engg., February 1980.
- 11) Shinozuka, M. and T. Koike : Seismic risk of underground lifeline systems resulting from fault movement, *Proc. of the 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engg.*, Stanford CA, pp. 663~672, August 1979.
- 12) Moghtaderizadeh, M., R.K. Wood, A. Der Kiureghian, R.E. Barlow and T. Sato : Seismic reliability of flow and communication networks, *Lifeline Earthquake Engineering, The Current State of Knowledge 1981*, ASCE, pp. 81~96, August 1981.
- 13) 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, pp. 37~48, 1981年7月.
- 14) Shinozuka, M., R.Y. Tan and T. Koike : Estimation of the serviceability of underground water transmission network systems under seismic risk, Technical Report No. NSF-PFR-78-15049-CU-6, Columbia University, Dept. of Civil Engg. and Engg. Mech., December 1980.
- 15) Isoyama, R. and T. Katayama : Seismic performance evaluation of water supply systems, *Proc. of Review Meeting of U.S.-Japan Cooperative Research on Seismic Risk Analysis and Its Application to Reliability-Based Design of Lifeline Systems*, Honolulu, pp. 173~205, January 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性解析, 第16回地震工学研究発表会講演概要, pp. 181~184, 昭和56年7月.
- 17) Hoshiya, M. : Seismic damage restoration of underground water pipelines, *Proc. of Review Meeting of U.S.-Japan Cooperative Research on Seismic Risk Analysis and Its Application to Reliability-Based Design of Lifeline Systems*, Honolulu, pp. 229~244, January 1981.
- 18) Barlow, R.E. and F. Proschan : *Statistical Theory of Reliability and Life Testing; Probability Models*, Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1975.
- 19) Henley, E.J. and H. Kumamoto : *Reliability Engineering and Risk Assessment*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1980.
- 20) 仙台市水道局 : 1978年宮城県沖地震による被害とその対策の記録, 昭和53年10月.
- 21) 導管本部 : 1978年宮城県沖地震と都市ガス, 一その1. ガス供給設備の震害調査報告一, 一その2. ガス供給設備の復旧作業について一, 昭和53年8月.
- 22) Shogan, A.W. : A decomposition algorithm for network reliability analysis, *Networks*, Vol. 8, pp. 231~251, 1978.
- 23) Tarjan, R. : Depth-first search and linear graph algorithms, *SIAM J. Comput.*, Vol. 1, No. 2, pp. 146~160, June 1972.
- 24) 高桑哲男 : 配水管網の解析と設計, 森北出版株式会社, 1978年8月.
- 25) 末石富太郎・雄倉幸昭 : 漏水量と水圧の関係, 第17回全国水道研究発表会講演集, pp. 118~119, 1966年5月.
- 26) 久保慶三郎・片山恒雄 : 地震時の地下埋設管被害に関する調査, 東京都防災会議, 昭和49年.

(1981.8.24・受付)