

上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測

STRATEGY AND PREDICTION OF WATER PIPELINE RESTORATION
FROM EARTHQUAKE DISASTER

星 谷 勝*・宮 崎 正 敏**

By Masaru HOSHIYA and Masatoshi MIYAZAKI

1. 研究目的

地震防災におけるライフライン系構造物の重要性が認識されるようになって、上水道システムの地震危険度解析および被害復旧予測に関する研究が盛んに行われている。東京都水道局^①は行政当事者の立場から区部における送・配水管の被害予測および各種施設の復旧に要する機械、作業員数等の算定を行い将来に備えている。一方、学術的な研究としては磯山^②は東京都区部の水道システムに対してシステムの機能評価に基づく被害および復旧戦略の実際的解析方法を示した。最近では日米科学協力の成果として多くの研究が論文集にまとめられている^③。1981年にはライフラインに関するASCEの特別会議が開かれ、地震防災における上水道システム等の重要性が再認識された^④。

しかし、いまだ決定的な予測解析手法は確立されておらず、なかなか復旧予測に関してはデータ不足、不確定性要因などがあり、十分な研究成果は得られていない。

そこで、著者らは先に本論文報告集No.308^⑤とNo.323^⑥において上水道システムの地震被害予測と復旧過程の予測理論を提案し東京都上水道システムの復旧予測の事例解析結果を発表した。今回、同じ問題を再検討したが、ライフラインの防災対策の予測問題を扱うためには、対象構造系の特性を十分に表現し得るモデル化と被害・復旧予測の理論の確立が必要であり、また過去の震害の復旧に関するデータから得られる情報量に適合した巨視的にとらえたモデル化・被害予測・復旧理論が有用性があると判断したからである。先の論文を否定する意志を表明するのではないが、今回はシステムのモデル化を簡潔にしたこと、初期被害の予測を単純化したこと、

復旧過程の理論を実際によく適合したものに改良してみたことに特徴があると思う。

先の論文と対比すれば、本論文は

(1) システムのモデル化は全体系として扱わず、各浄水場ごとの給水系に分割し、各給水系は基本シリーズモデルから構成されるとした。

(2) リンクとノードから構成されるモデルにおいて、給水はノードを通して行われる。すなわち、ノードに給水人口が従属しているとした。

(3) システムの地震時の初期被害予測は各リンクの被害レベルを考えず、破壊・非破壊の2つの状態のみを考えて簡潔にした。

(4) 復旧予測では、現実に実行されるであろう復旧の戦略を考え、その枠組の中で基本復旧パターンとして上流から下流へとリンクが順次復旧する場合とリンクの位置に関係なく、各リンクに対して同時に復旧作業を開始する場合を考えた。

(5) 機能的復旧、すなわち水のserviceがどこまで回復されたかを浄水場からのリンクの連結性でとらえた。

(6) 管網解析を併用し、システムの信頼性の評価および地震発生後の任意の時間におけるserviceabilityの評価などを検討した。

2. 復旧の基本パターン

上水道システムの主要幹線網の復旧を対象として考えるときには、水が取水場から幹線に沿って下流へ流れることを考えるとネット状システムは枝分れごとに分岐点を始点とした直列システムとして分解していくことが考えられる。そこで、上水道システムは基本的にはいくつかの幹線直列システムに分解できるとする。後の事例研究で復旧の予測をこれらの基本システムを用いてどのように行うかを示すこととするが、ここでは(1)上流か

* 正会員 Ph.D. 武藏工業大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 武藏工業大学大学院修士課程学生

ら下流へと復旧が進む順次復旧の基本パターンAと(2)各リンクに対して復旧作業を同時に開始する基本パターンBを考えた³⁾。

システム全体の復旧は給水系に区分けし、各給水系ごとに復旧の基本戦略を想定し基本パターンAまたはBを適用して予測する方法を採用する。この復旧の基本戦略として3つの異なる戦略を考えたが、これらについては次章で述べる。

さて、復旧には不確定な要因を伴うものであるから、各リンクの復旧時間は確率変数であるとして、基本システムの復旧理論を誘導する。

基本システムは図-1に示すように1つのソース（浄水場）を有する N 個のリンクと、各ノードに連結されたサブシステムから構成される直列システムである。サブシステム自体を基本システムとそれに従属するサブシステムにモデル化することもできる。さらに同様のモデル化を行えば複雑なシステムへと表現できる。上水道システムではソースは取水場もしくは浄水場、リンクは送水管、配水幹線そしてノードは給水所、ポンプ場などとなる。

なお、次節以降の復旧理論は、基本的には Renewal Counting Process¹⁴⁾ を参照して説導するものである。

(1) 順次復旧（基本パターンA）の予測理論

基本システムの復旧をソースに最も近いリンクから順次修復していくものとする。ソースから中間のノードまでの連結性が回復されると、そのノードに連結されているサブシステムの復旧作業が開始されるものとする。これはシステムの流れにそって上流から下流へと復旧させる基本パターンであり、現実に作業能力が有限であるときに実行されるパターンと思われる。

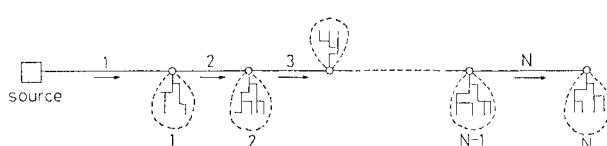


Fig. 1 Fundamental Series Model

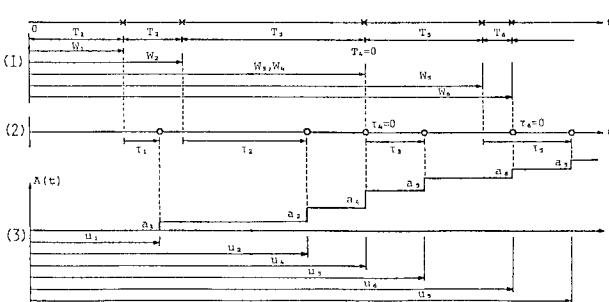


Fig. 2 A Sample Function of Restoration (Pattern-A).

この復旧過程の一例を示したのが図-2である。図において各リンクの復旧に要する経過時間 T_i ($i=1, 2, \dots, N$) と各リンクがソースまで連結されるのに要する経過時間 W_i ($i=1, 2, \dots, N$) が示されている。 T_i を不確定性を考えて確率変数とすれば、 W_i も確率変数となり

で与えられる。

図-2 の例では $T_4=0$ となっているが、これはリンク 4 が無被害で復旧時間が 0 であったことを意味している。

それぞれのリンクがソースまで連結されると、リンク i の右端ノードに連結されているサブシステム i の復旧とリンク $i+1$ の復旧が同時に開始される。図-2 の(2)には各サブシステムの復旧に要する時間 τ_i が示されている。同図の(3)は機能の復旧過程 $A(t)$ が示されている。サブシステム i に従属する給水人口を a_i とし、復旧を全給水人口に対して給水の再開された給水人口の割合で評価することにすれば、連結性の観点から

$$A(t) = \sum_{i=1}^N a_i U(t-u_i) \Bigg/ \sum_{i=1}^N a_i \dots \dots \dots \quad (2)$$

と表わせる.

ただし、 $U(\cdot)$ は unit step function である。また u_i はサブシステム i が復旧するまでに要した時間であり次式で与えられる。

さて、 T_i , τ_i を確率変数として式(1), (2), (3) の諸量に関する確率の理論式を誘導する。

簡単のために被害がリンク線上に沿ってポアソン分布に支配されて発生するとすれば、 i 番目リンクの被害率を ν_i か所/km, リンク管長を l_i km として、 i 番目リンクの被害箇所数 N_i が n 個となる確率は

$$\text{Prob}\{N_i=n\} = \frac{(\nu_i l_i)^n}{n!} e^{-\nu_i l_i} \dots \dots \dots (4)$$

で与えられる。

ゆえに、 i 番目リンクの非破壊・破壊確率はそれぞれ次式となる：

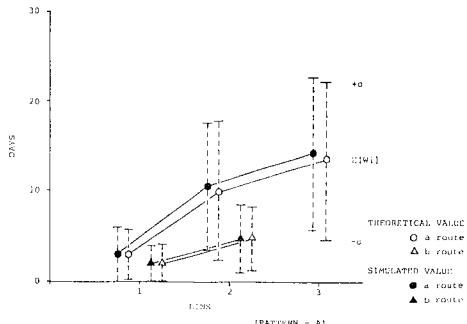
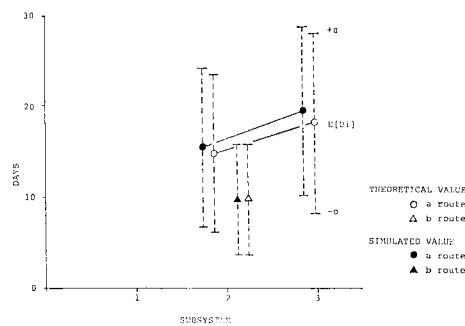
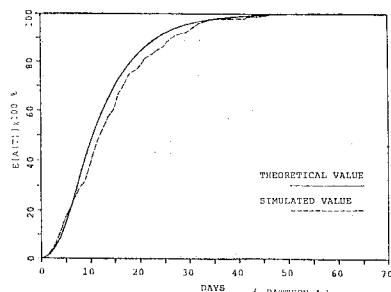
$$\text{Prob}\{N_i=0\}=e^{-\nu_i l_i} \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$\text{Prob}\{N_i \geq 0\} \equiv 1 = e^{-\nu_i l_i}, \dots \dots \dots \quad (6)$$

式(6)のようにリンク内に1か所以上の被害が発生すると被害個数にかかわらず破壊事象として扱えば、 i 番目リンクの復旧時間 T_i に関して次の等式が成り立つ

$$\text{Prob}\{T_i > 0\} = \text{Prob}\{N_i > 0\} = 1 - e^{-\nu_i l_i} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

復旧時間が $T_i \leq x$ となる確率は

Fig. 5 Expectation and Standard Deviation of W_i .Fig. 6 Mean and Standard Deviation of u_i .Fig. 7 Expectation of $A(t)$.

示した。これについても、図-5と同様にシミュレーション解の値が上回った傾向を示した。図-7は復旧過程 $A(t)$ の期待値の復旧曲線である。これによると、シミュレーション解による場合と理論解による場合ではほぼ同一の傾向を示す曲線が得られたが $E[A(t)]$ の値が 30% から 95% の間で 2 つの曲線の間に少し違いが生じている。

以上は基本パターンAによる解の一部を示したに過ぎないが理論式はシミュレーションで検討した限りでは十分に妥当なものであると判断された。以上より、解析においては理論解析もしくはシミュレーション解析のいずれを用いても予測に大差はないと考え、4.(3)ではシミュレーション解析を行うこととした（シミュレーション回数を増やせば理論解に近づくと思われる）。

3. 復旧の戦略

1964 年の新潟地震、1978 年の宮城県沖地震における上水道システムの地震災害の復旧の現状を調査してみると、あらかじめ事前に復旧計画が立てられていてそれに従って復旧作業が行われたのではない。むしろ逐次現状の被害を把握して、いち早く多くの住民へ水を供給できるように復旧作業を行っていく方法が取られてきた。しかし、過去においては小規模であった都市が現在では中規模または大規模な都市に成長し、それに伴って都市機能を維持しているライフラインの巨大化、都市人口の増大、生活様式の多様化、災害に対する住民の意識の増大などが大きく復旧計画に関与するから、ライフラインの復旧を事前に計画することも検討しておく必要がある。

本論では都市における復旧の基本戦略として集中給水計画による戦略と拡散給水計画による戦略を考えた。前節の復旧の基本パターンはそれぞれの戦略の枠組の中で適用され、復旧過程の予測計算を行う。

また、現状直視型の給水計画の戦略も過去の災害復旧例に近い戦略として検討することにした。

以上の 3 つの戦略は必ずしも最適な復旧の戦略とはいえないかもしれないが、復旧過程で考えられる計画方針、すなわち戦略であるとしてここに提案する。

(1) 集中給水計画による戦略

この戦略を Practical Restoration Strategy, Type I (PR-I) とよぶことにする。PR-I の戦略は給水人口の大きなノードや医療機関の集中しているノード等を重要拠点として、これらのノードとソースとを結ぶ最適経路を啓開路線として最初に復旧させる計画に基づく戦略である。啓開路線が多数存在する場合には、それらを同時に復旧開始の作業を進めるものとする。

啓開路線を見出す 1 つの方法にウォーシャルフロイド法⁴⁾を用いた最短経路の決定法があるので、この方法を上水道システムに適用してみる。

図-8 に示すようにソース A の給水系を全体系から取り出して考えてみよう。図にはカッコ内に各ノードの給

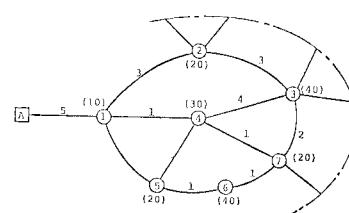


Fig. 8 Partial Graph.

水入口を、またリンクは無向リンクでリンクの長さの評価値が示されている。本論ではリンク長の評価値の算定には次式が適当と考え、後節の事例研究でも採用した。

九二

$L_i = i$ 番目リンクの長さの評価値

$C_i=i$ 番目リンクの k 区画における地盤危険度補正係数²⁾

$V_{i=i}$ 番目リンクの k 区画における液状化危険度補正係数²⁾

$l_i = i$ 番目リンクの k 区画における管長
 \sum_k = リンクが異なる地盤危険度区分 A, B, C と液
 状化危険度区分 A', B', C' にまたがるとき,
 組合せごとにそれぞれの C_i 値と V_i 値を採用
 して計算したものの総和を意味する。文献 2)
 の図 7-8 を参照されたい。

式(18)の評価値はリンク長が短く地盤が安定しているところで小さい値をとることが明らかである。したがって、式(18)を採用して最短経路を求めればよい。図-8でノード3とノード6を重要拠点と設定して、ソースとの最短経路を求めてみると図-9に示すように2つの直列システムが決定される。

PR-I の戦略は以上のように啓開路線を事前に求めておき、順次復旧または同時復旧の予測理論を適用する。啓開路線以外のリンクはソースに近いものから順に復旧されるとして予測を行えばよい。

(2) 拡散給水計画による戦略

PR-II の戦略とよぶことにする。この戦略は PR-I と同様に事前基本計画に基づく復旧の戦略であるが、考え方は正反対であり、地震災害に対する住民意識の増大を重視した戦略である。すなわち、災害時に住民はいち早く自分が生存できる最小限度の水量を確保したい意識をもつて、限られた水量ができるだけ多くの地域に拡散供給できるように計画する戦略である。換言すればネットワークを構成するすべてのノードがいざしからの路線でソースと連結するように計画する。

図-10 の例題に対して Minimum Tree 法⁴⁾を用いて最短路線を決定してみる。図には無向リンクに沿ってリンク長の評価値が示されている。この方法は最初にリンク A-1 以外のすべてのリンクを取りはずし、長さの小さいグループ順に並べる。

ソースと直接結ばれるリンク A-1 の次に、リンク長の小さいリンクから順に次々と所定のノード間に連結させていき、閉路が生じたら、そのリンクは除外して、最後のリンク長の最大なものまで結んでいく。このようにすると図-11 のような 2 つの直列の啓開路線が決定す

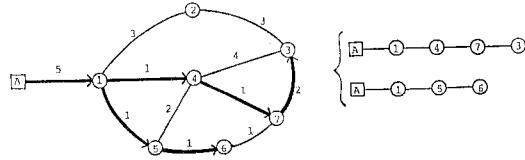


Fig. 9 Minimum Paths and Fundamental Series Model.

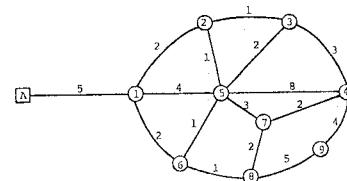


Fig. 10 Partial Graph.

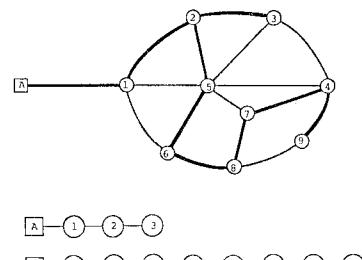


Fig. 11 Minimum Tree and Fundamental Series Model

る。これらはいずれのノードもソースまで連結されている（複数個の Minimum Tree が得られた場合にはそれらを同時に復旧開始の作業を行うこととする）

復旧予測には順次復旧または同時復旧を適用すればよい

(3) 現状復旧の戦略

PR-Ⅲ の戦略とよぶ、前二者の戦略が事前に計画される戦略であるのに対して、PR-Ⅲ は事前計画ではなく、地震発生後の被害状況を判断しながら復旧作業を決定していくものである。従来は復旧作業が逐次現状の被害と断水戸数の解消率とのかねあいでそのつど復旧作業を行っていったとするならば、PR-Ⅲ は今までの復旧過程に近い戦略といえる。そこで本論では PR-Ⅲ の戦略に基づく被害の復旧予測を PR-I, PR-II と同時に検討してみることとした。

PR-III は復旧作業の任意の時間 t において、次に取り得る時間 $t+4t$ における復旧作業は水供給の回復を最も速めるリンクに対して行っていく戦略である。すなわち、時間 t と時間 $t+4t$ 間の復旧曲線の勾配を最大とするようなリンクから復旧していく。

この戦略における予測は次のようなアルゴリズムで行

うこととした。

リンクの指標として次式を考える.

ここで、

au_{ij} = ノード i と j を結ぶリンクの指標

a_j = ノード j に連結している サブシステム の給水人口

t_{uij} = ノード i と j を結ぶリンクおよびノード j に連結しているサブシステムの期待復旧日数の和（実際には復旧率の逆数の和）

次に、管路指標行列を構成する。

$$AP = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ au_{11}, au_{12}, \dots, au_{1n} \\ au_{21}, au_{22}, \dots, au_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ n & au_{n1}, au_{n2}, \dots, au_{nn} \end{bmatrix} \leftarrow \text{ノード番号} \quad \text{ノード番号}$$

ただし、ノード間にリンクがない場合には、その要素は $a_{uij}=0$ とする。リンクの流れ方向は考慮していない。

[手順 1] まず式 (20) の 1 行目に注目する.

$\max\{au_{11}, au_{12}, \dots, au_{1n}\} = au_{1j}$ ならば、最初に復旧するリンクはノード 1 と j を結ぶリンク $1j$ とする。そして、式 (20) で $au_{1j} = au_{j1} = 0$ と置き換える。

[手順 2] 1行目と j 行目に注目する。

$$\max \left\{ \begin{array}{l} au_{11}, au_{12}, \dots, 0, \dots, au_{1n} \\ 0, au_{j2}, \dots, au_{jj}, \dots, au_{jn} \end{array} \right\} = au_{jl}$$

ならば、次に復旧すべきリンクはリンク jl とする。指標行列の要素で $au_{jl} = au_{lj} = 0$ とする。

[手順 3] 1行目, j 行目および l 行目に着目し, 手順 1, 2 と同様な方法を用いて 3 番目に復旧するリンクを決定する.

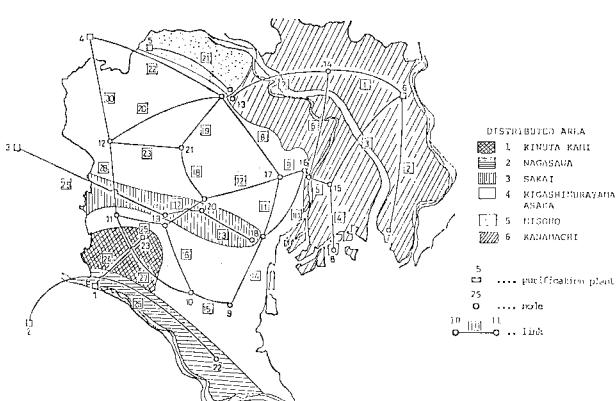


Fig. 12 Water Supply Pipeline System in the City of Tahara.

以下同様に行い、式(20)の要素がすべて0となるまで行って復旧順序を決定する。

以上のアルゴリズムを用いて現状復旧の戦略がとられる場合の被害の復旧過程の予測を行うことができる。

4. 事例研究 東京都（区部）上水道システム

先の研究^{2), 5), 6)}で考察した東京都上水道システムに対して本論で誘導した復旧過程の戦略と予測理論を適用してみた。上水道システムは地震発生時に相当数の被害が発生すると予想される送・配水管を対象としてモデル化を行い、浄水施設の被害は考慮しないこととした。モデル化は送水管・配水管（ $\phi 800\text{ mm} \sim \phi 2700\text{ mm}$ ）をリンクとし、接合点（給水所、ポンプ場など）をノードとした。配水管（ $\phi 500\text{ mm} \sim \phi 800\text{ mm}$ ）はサブシステムとした。また、おのおのの浄水場には水を供給する区域、すなわち配水系といわれるものが設定されているが、本論ではこれらを十分に考慮して 図-12 に示すモデルを採用した。すなわち、各配水系は互いに独立したシステムになるように、一部のノード間を切断してモデル化している。さらに、各ノードに連結しているサブシステムの配水管が各需要家へ水を供給すると考え、サブシステム自体が給水人口をもつと仮定しておのおののサブシステムの給水区域を設定した。表-2 および 3 にリンクの寸法およびサブシステムにはりつく給水人口を示す。

(1) 初期被害予測

先の研究^{2), 5), 6)}と同様に、東京都防災会議⁷⁾が 1923 年関東大地震級を想定して考案した被害個数の算出法を参考にして予測を行った。

東京都の震度5程度の地震動による平均被害率を設定し、リンクとサブシステムの被害箇所数は 1 km^2 メッシュの地盤危険度マップ⁹⁾と液状化危険度マップ⁹⁾からの補正係数を用いて平均被害率を増減させた。表-4, 5に各リンクおよびサブシステムの被害率 ν_i が所/km と被害箇所数 N_i を示す。

(2) 復 旧 率

復旧予測に必要な復旧率は資材の量、機械、作業人員等の作業能力や復旧計画における作業順位、さらに被害復旧の作業の困難度等に影響される。また、交通施設システムや電力・通信システムなど他のライフラインの被害状況にも深く関連するから、復旧率を定量的に与えることは困難な問題である。

ここでは復旧率は作業人員、管径、被害箇所

数、復旧作業の困難度、復旧の基本パターン（順次・同時復旧）の選択などによって決定されるものとして、東京都水道局が作成した資料⁸⁾を参考にして復旧率を次式で算定することとした。

$$\frac{1}{\lambda_i} = RT_i \times N_i \times \frac{1}{(\frac{AW_i}{SW_i})} \quad \dots \dots \dots (21)$$

ここで、

$\lambda_i = i$ 番目リンクの復旧率

Table 2 Length and Diameter of Links.

Link Number	Node Number	Diameter (mm)	Length (km)	Name
1	6~14	2 200	9.40	Kahama Line
2	6~7	1 350~1 800	10.70	Kasai Line
3	6~15	1 000~1 800	10.80	Terashima Line
4	8~15	1 000~1 200	6.55	Toyosumi Line
5	15~16	2 000	2.60	Tozai Liene
6	14~16	1 100~1 500	10.95	Kouemon Line
7	13~14	1 200~2 000	10.15	Kahama Line
8	13~17	2 200	8.60	Nanboku Line
9	16~17	2 000	2.35	Tozai Line
10	16~18	1 000	7.35	Torigoe-Shiba Line
11	17~18	1 600	5.40	Nanboku Line
12	17~20	1 500~2 000	7.15	Tozai Line
13	18~20	1 100	6.60	Yodobashi-Shiba Line
14	9~18	1 350	6.75	Nanboku Line
15	9~10	1 800~2 000	8.80	Daiichi-Jonan Line
16	10~19	1 800	5.95	Daini-Jonan Line
17	19~20	2 000	4.55	Tozai Line
18	20~21	1 500	6.60	Yodobashi Line
19	13~21	1 100~1 200	6.00	Kahama Line
20	12~13	1 000~1 200	11.95	Nerima Line
21	5~13	1 800	10.20	Misono-Itabashi Line
22	4~13	2 200	14.65	Nanboku Line
23	12~21	2 400	10.05	Johoku Line
24	1~23	1 000~1 100	14.25	Kinuta-Kami Line
25	11~19	1 800~2 400	4.15	Kamiigusa-Itabashi Line
26	2~22	1 350~1 800	6.85	Nagasakiwa Line
27	10~11	2 000~2 200	4.15	Daiichi-Jonan Line
28	11~12	2 700	6.40	Kamiigusa-Izumi Line
29	3~19	1 600~1 970	10.80	Sakai-Wadabori Line
30	4~12	2 700	11.80	Asaka-Kamiigusa Line

Table 4 Data of Links.

Link <i>i</i>	Damage Rate γ_i	Number of Damage Spots N_i	Link <i>i</i>	Damage Rate γ_i	Number of Damage Spots N_i
1	0.30	2.84	16	0.10	0.59
2	0.29	3.14	17	0.10	0.47
3	0.22	2.36	18	0.06	0.42
4	0.16	1.06	19	0.08	0.46
5	0.18	0.47	20	0.08	0.95
6	0.23	2.51	21	0.16	1.68
7	0.26	2.61	22	0.18	2.60
8	0.07	0.54	23	0.07	0.68
9	0.16	0.38	24	0.09	1.29
10	0.31	2.29	25	0.11	0.44
11	0.27	1.46	26	0.07	0.45
12	0.13	0.91	27	0.11	0.44
13	0.12	0.82	28	0.07	0.45
14	0.18	1.20	29	0.11	1.14
15	0.08	0.74	30	0.17	1.39

$RT_i = i$ 番目リンクにおける被害箇所 1 件に対して作業班の 1 つが復旧作業を行うときの復旧日数。なお、1 作業班の人員は 28 人とした。

$N_i = i$ 番目リンクの被害箇所数

$AW_i = i$ 番目リンクの復旧に従事する作業員数

$SW_i = i$ 番目リンクの被害箇所 1 件当たりの必要作業員数

式 (21) は期待復旧日数 $1/\lambda_i$ が被害件数 N_i に比例し、従事する作業班の数 AW_i/SW_i に反比例するとして提案したものである。

さて、実際の復旧作業は先に述べた戦略 PR-I～PR-III のいずれかが採用され、PR-I または PR-IIにおいては順次復旧または同次復旧がとられる。全体の作業員数は有限であるので、1 つのリンクの復旧作業に従事できる作業員数 AW_i は当然のこととして採用する復旧のパターンで異なるものである。

順次復旧（基本パターン A）に対して

$$AW_i = \text{全作業員数}/\text{基本システム数} \dots \dots \dots (22)$$

を採用して復旧予測を行うこととした。

同時復旧（基本パターン B）に対しては全作業員数を被害個数、管の口径、施工の難易度によって員数を分割し、各リンクの復旧率を等しくできるように考え

Table 3 Water Supplying Population and Length of Subsystems.

Sub System	Length (km)	Water Supplying Population (Persons)	Sub System	Length (km)	Water Supplying Population (Persons)
1	0.00	0	13	63.44	964 191
2	0.00	0	14	50.87	732 590
3	0.00	0	15	49.58	1 011 197
4	0.00	0	16	48.38	1 003 054
5	0.00	0	17	19.14	565 495
6	0.00	0	18	28.35	911 824
7	47.00	632 553	19	63.44	964 191
8	13.00	69 452	20	27.79	543 989
9	15.15	362 032	21	40.96	635 953
10	30.10	348 352	22	37.80	453 222
11	19.25	144 610	23	43.05	561 920
12	66.78	677 566			

Table 5 Data of Subsystems.

Sub System <i>i</i>	Damage Rate γ_i	Number of Damage Spots N_i	Sub System <i>i</i>	Damage Rate γ_i	Number of Damage Spots N_i
1	0.00	0.00	13	0.16	10.35
2	0.00	0.00	14	0.25	12.46
3	0.00	0.00	15	0.24	11.97
4	0.00	0.00	16	0.25	11.94
5	0.00	0.00	17	0.19	3.66
6	0.00	0.00	18	0.30	8.37
7	0.32	15.04	19	0.16	10.35
8	0.11	1.37	20	0.09	2.46
9	0.16	2.44	21	0.08	3.31
10	0.09	2.82	22	0.19	7.11
11	0.08	1.52	23	0.09	3.77
12	0.09	6.15			

Table 6 Data of L_i and λ_i .

Link i	L_i	λ_i (PR-I)	λ_i (PR-II)	Link i	L_i	λ_i (PR-I)	λ_i (PR-II)
1	0.059	0.171	0.228	16	0.302	1.104	0.662
2	0.065	0.548	0.329	17	0.303	1.037	0.830
3	0.072	0.546	0.437	18	0.315	4.081	2.449
4	0.086	1.952	1.171	19	0.370	4.493	2.696
5	0.088	1.031	0.824	20	0.376	2.187	1.312
6	0.114	0.686	0.411	21	0.417	0.289	0.231
7	0.174	0.593	0.475	22	0.455	0.186	0.149
8	1.178	0.844	1.125	23	0.476	0.947	0.947
9	0.178	1.271	1.695	24	0.480	1.198	0.958
10	0.179	0.903	0.542	25	0.545	1.461	1.461
11	0.184	1.180	0.708	26	0.601	2.903	2.322
12	0.194	0.707	0.424	27	0.705	1.096	1.461
13	0.211	1.900	1.520	28	0.735	1.067	0.854
14	0.220	1.433	0.860	29	0.830	0.425	0.340
15	0.293	0.874	0.524	30	0.162	0.347	0.463

て、次式を採用した。

$$AW_i = WM \times \frac{N_i \cdot DP_i \cdot K_i}{\sum_{j=1}^{NN} N_j \cdot DP_j \cdot K_j} \quad \dots (23)$$

ただし、

WM =全作業員数

$DP_i = i$ 番目リンクの口径ごとに与えられる係数⁸⁾

$K_i = i$ 番目リンクの施工難易度によって与えられる係数⁸⁾

NN =同時復旧におけるリンク総数

DP_i と K_i の数値は東京都水道局作成の資料で与えられた表を採用している。詳細は文献 8) を参照してほしい。

(3) 復旧過程の予測結果

東京都水道局の資料⁸⁾を参考し、リンクの復旧作業員総数 1500 人、サブシステムの復旧作業員総数 3300 人として、2. および 3. の復旧予測理論および戦略を適用して予測の数値解析を行った。なお、各リンクおよびサブシステムの復旧時間の確率密度関数形は先の例題で用いた式 (16), (17) をそれぞれ用いた。

図-13 は戦略 PR-I による復旧予測におけるモデルであり、重要ノード番号を 10, 13, 16, 18, 22, 23 と選んだ場合の啓開路線（最重要路線として最初に安全が確保されるべき路線）とそれらを基本直列システムとして示したものである。この場合の重要ノードは給水人口の大きいノードと全体のバランスを考えて決定した。特に各給水系に分解したときに直列システムになる場合には末端ノードも重要なノードとしている。

図-14 は戦略 PR-I の復旧曲線のサンプルを示したものであり、実線が順次復旧、破線が同時復旧の場合である。

これらは 1 サンプル曲線であるが、両者はほぼ同じよ

Table 7 Data of ρ_i .

Node i	ρ_i
7	0.126
8	0.126
9	0.126
10	0.126
11	0.126
12	0.126
13	0.126
14	0.126
15	0.126
16	0.126
17	0.126
18	0.126
19	0.126
20	0.126
21	0.126
22	0.126
23	0.126

うな復旧をたどり、15 日程度で 90% の復旧を達成している。

図-15 は戦略 PR-I による復旧曲線の期待値を示したものである。順次復旧と同時復旧の両者を比べると、復旧の初期から中期においては、ソースとの連結性の回復が確実に行われる順次復旧（実線）が増加するが、中期から末期の段階では同時復旧は連結性が急速に回復され両者が入れかわる。図-15 は両者の特徴をよく表わしていると思われる。

図-16 は戦略 PR-II における各給水系別に分解して Minimum tree を示したものである。

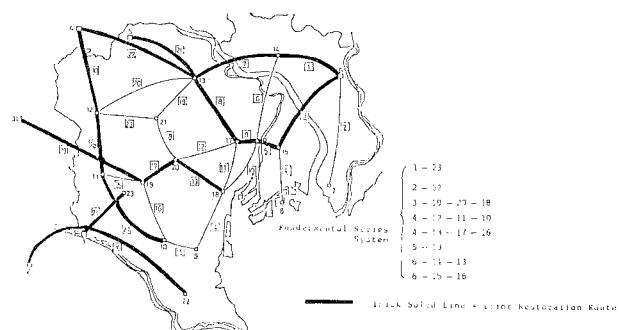


Fig. 13 Restoration Route and Fundamental Series Model (PR-I).

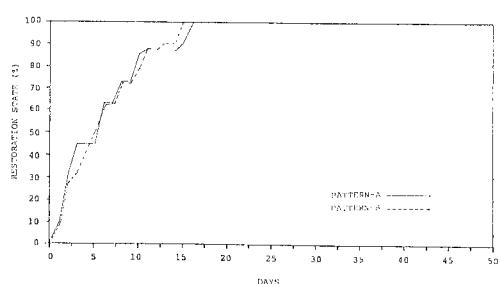


Fig. 14 Simulated Sample Function of $A(t)$ (PR-I).

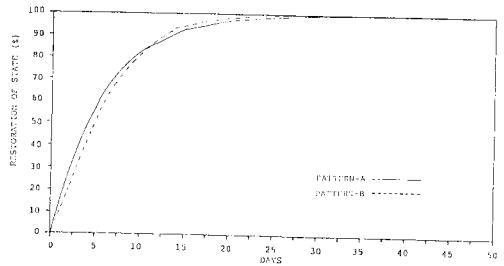
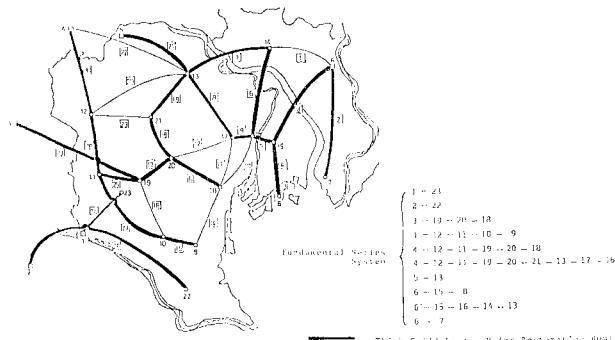


Fig. 15 Expectation of $A(t)$ (PR-I).



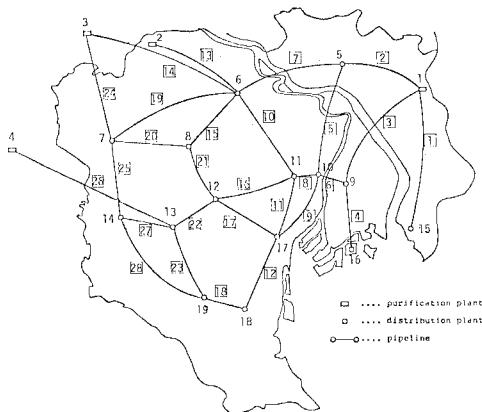


Fig. 20 Water Supply Pipeline System in the City of Tokyo (Model for Pipe Network Analysis).

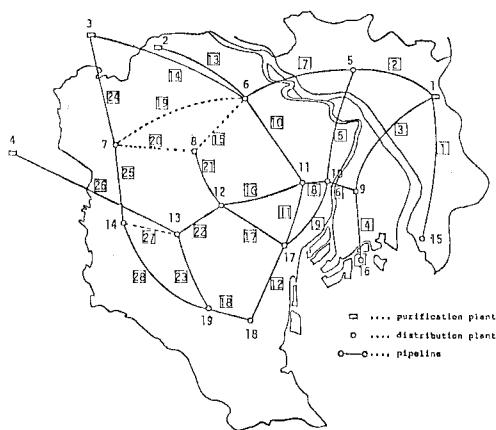


Fig. 21 Restoration State (Damage Links=15, 19, 20, 27).

解析が可能となるようにモデルを作ったので一部でノーダルポイント、リンクの番号を書きかえてある(図-20)。ここでは詳細を避け結果の一部を示すこととする。図-21は戦略 PR-I の復旧過程のある時間経過における起こり得る1つの状態を示している。この復旧状態においてはいまだにリンク 15, 19, 20, 27 が破壊の状態を示している。この状態における各ノードの水量不足を示したのが図-22である。連結性のみから評価すれば $A(t)=100\%$ であるが、Serviceability では 91.3% となっていることがわかる。これは特に水不足のノード 8, 12, 13 の影響がでていることは明らかである。

5. 結論

以下のとおりである。

(1) 上水道システムの復旧予測に復旧の戦略を考慮し、順次復旧および同時復旧を適用する予測理論を組み

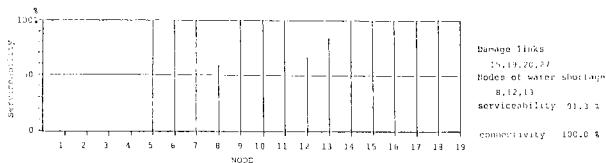


Fig. 22 Serviceability of Nodes.

立てた。

(2) 結論(1)を用いて東京都上水道システムの地震災害復旧の予測計算を行った。

(3) 結論(2)の数値解析結果から、集中給水計画による戦略、拡散給水計画による戦略、現状復旧の戦略の相互間の復旧特性の相違を検討した。

(4) 事例研究の復旧予測結果は先の研究²⁾の予測とほぼ同じオーダーの数値を得たが、復旧戦略を考慮したこと、復旧理論を単純化し適用性を改善したことなどは重要な結論の1つである。

参考文献

- 星谷・小池：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、pp. 25~35、1981年4月。
- 星谷・小池・宮崎：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323号、1982年7月。
- 星谷：地震災害を受けたライフラインの復旧の予測理論について、土木学会第36回年次学術講演会、第1部、1981年10月。
- 伊理・古林：ネットワーク理論、ORライブラリー12、日科技連、1976年9月。
- Hoshiya, M.: Seismic Damage Restoration of Underground Water Pipe Lines, US-Japan Cooperative Research of Seismic Risk Analysis, Honolulu, Jan., 1981.
- Hoshiya, M. and M. Miyazaki: Basic Patterns of Lifeline Restoration in Earthquake Destruction, ASCE Spring Convention, Las Vegas, April, 1982.
- 東京都防災会議：東京区部における地震被害の想定に関する報告書、1978年5月。
- 東京都水道局：区部における送・配水管の被害箇所の想定並びに送・配水管及び給水装置の応急復旧に関するケーススタディ、1978年6月。
- 高桑：配水管網の解析と設計、森北出版、1978年8月。
- Isoyama, R.: Seismic Performance Evaluation of Urban Utility Systems, 東京大学博士学位論文、1980年12月。
- Smith, D.J., Jr. Edited: Lifeline Earthquake Engineering, Proc. of 2nd Specialty Conf. of the Tech. Council on Lifeline Earthq. Eng., Aug., 1981.
- 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, Jan., 1981.
- 東京都水道局震災対策—予防計画及び応急対策（昭53~57年度）、東京都水道局。
- Parzen, E.: Stochastic Processes, Holden-Day Inc. (1982.3.27・受付)