

上水道埋設管システムの震災復旧過程の予測

PREDICTION OF SEISMIC DAMAGE RESTORATION OF UNDERGROUND WATER PIPELINE SYSTEMS

星 谷 勝*・小 池 精 一**・宮 崎 正 敏***

By Masaru HOSHIYA, Seiichi KOIKE and Masatoshi MIYAZAKI

1. ま え が き

ライフラインは、物質・エネルギー輸送、情報伝達等の都市機能を維持するための基幹となる施設であり、われわれが都市生活を営むうえで重要な生命線である。そして、ライフラインは、単体構造の集合体として有機的に連結し、面的に広がる一つのネットワークシステムとしてその機能を果たしている。ライフラインを分類してみると次のように考えられるであろう¹⁾。

交通施設：道路、街路、鉄道
通信施設：電信、電話、郵便
衛生施設：上水道、下水道
エネルギー施設：電力、ガス
空地領域施設：河川、湖沼、公園

これらのライフラインは、過去の震害例をみてもわかるように必ずといってよいほど地震被害を受け、都市生活に大きな影響を与えている。これは、都市の形態や構造が年々複雑化・多様化するに伴い、ライフラインの規模も拡大し、都市生活の大部分がライフラインに強く依存していることが大きな原因であろう。

わが国では、1978年の宮城県沖地震でライフラインの耐震・信頼性が改めて認識され、その防災対策の必要性が指摘されてきた。ライフラインの防災対策を考える場合、その構造的・機能的特性から個々の単体構造の耐震性の向上もさることながら、地震時にシステム全体をいかに機能させるかが重要な課題である。最近では、このような観点からライフラインを一つのシステムと考え、地震時の機能低下や構造被害を扱った研究が盛んに行われるようになってきた^{2)~4)}。しかし、これら一連の研究は、あくまで地震発生時点までのものであり、地震

後の復旧過程も含めた系統的な研究は数えるほどしかない^{5),6)}。また、システムの特性を考慮しているものはほとんどないのが現状である^{7),8)}。

著者らは、文献 5) でライフラインの合理的な防災対策には、地震後のシステムの構造被害や機能低下が時々刻々回復してゆく復旧過程の予測が必要であると指摘し、予測理論を誘導した。これは、ライフラインの規模、社会性、公共性から考えて

- (i) その耐震性の向上には膨大な費用が必要である。
- (ii) 地震後の機能停止に伴う間接的被害の損失が計り知れないほど大きい。

これが容易に想像でき、経済性を十分考慮しなければならないという問題があるからである。本論では復旧過程は戦略的な方針が定まった枠の中であるが、多くの不確定要因が関与してばらつきが生じるものとして確率過程でモデル化する。そしてそれにより復旧作業の進

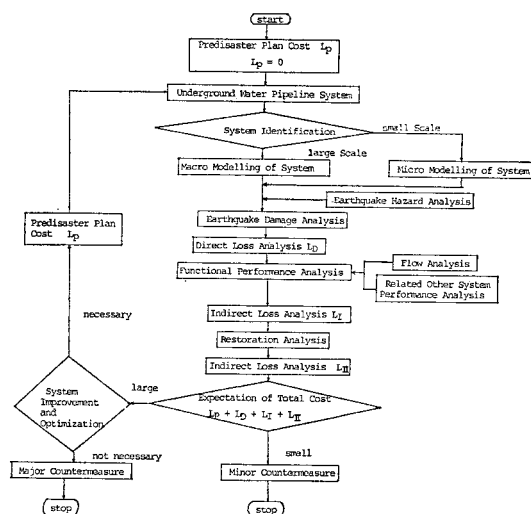


Fig. 1 Flow Chart of Methodology.

* 正会員 工博 武蔵工業大学教授 土木工学科

** 工修 茨城県庁

*** 学生会員 武蔵工業大学大学院修士課程在学中

捗状況を予測できれば地震後の構造的・機能的復旧予測ができ、復旧日数等を事前を知ることができ、それにより、最小の事前対策費用で最大の効果を期待できるような防災対策が可能になる。そこで、このような意味からも復旧過程を含めたライフラインの地震防災の考え方が必要となってくる。

Fig. 1 は上水道システムの地震防災の方法論を示したものである。これは、システムに対して地震発生から完全復旧に至るまでに要する直接的・間接的損失と、さらに事前対策費用を含めた総合的な経済性を評価することにより、合理的な防災対策が可能であるという考え方である。**Fig. 1** は、すでに提案されているライフラインの耐震・防災の考え方⁹⁾と基本的には同じ流れであり、上水道システムだけでなく、他のライフラインシステムにも適用できるものと考えている。

そこで本研究は、**Fig. 1** の復旧過程の 1 部分に注目して、東京都(区部)の上水道システムを対象に、地震時の被害予測と地震後の構造的復旧過程を予測した。被害予測は、東京都防災会議の報告書¹⁰⁾に基づき算定し、構造的復旧過程に対しては、先に誘導した復旧予測モデル⁹⁾、¹¹⁾を用いたモンテカルロ法によるシミュレーションを行った。さらに機能評価については、今までの代表的な評価方法を整理し、上水道システムでいう機能とは何を指すのかを明確にした。そして、従来行われていなかった地震後の機能評価について、その評価方法を提案し予測を試みた。この評価方法は、「水が流れるためには node 間が連結していることが大前提である」という考えから node 間の連結性(connectivity)により評価するもので、システムの特長(エネルギー損失、流れの方向等)を十分考慮したものではない。しかし、著者らは、地震後の上水道システムの機能回復を評価する基本的なモデル式であると考えている。今後、このモデル式にシステムの特長を組み込んでいくことによって、さらに的確な評価ができるものと考え、現在その開発を行っている。

2. 構造的復旧過程 $mS(t)$, $S(t)$ ⁹⁾

構造的復旧 $mS(t)$, $S(t)$ の詳細については、文献 5) を参照されたい。本章では、そのまとめとライフラインの構造的復旧とはどのようなことなのか、さらにシステム全体の構造的復旧 $S(t)$ の評価方法について、新たな考え¹¹⁾も加えて述べることにする。

ライフラインは、一般に多くの単体構造物が集まり、一つのシステムを構成している。そのために、地震による単体構造物の構造的破壊が、そのままシステムの機能停止に結びつくとはいちがいにいえない。たとえば、2

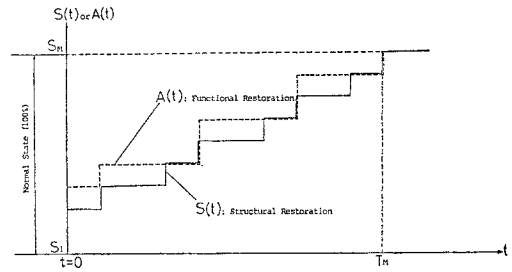


Fig. 2 Restoration Curves of $S(t)$ and $A(t)$.

つの単体構造物からなるシステムの場合、それが直列システムであるならば、どちらか一要素の破壊がシステムの機能停止につながるが、並列システムの場合は、一要素が破壊しても他の一要素が破壊しない限りシステムの機能停止にはならない。このように、ライフラインはその特性から、復旧過程を本質的に異なる次の 2 つの復旧過程に分けて考えなくてはならない。

- (i) 構造的復旧過程 $S(t)$
- (ii) 機能的復旧過程 $A(t)$

いま、両者の相違を図示すると **Fig. 2** のようになるであろう。両者は一般に、地震発生時点においても復旧途中においても一致しないが、復旧が完全に完了する時刻 T_M においては一致する。そして、これは、ライフラインの種類によっても異なるが、同じライフラインでも、その地域の形状や地震の規模によっても独自の復旧過程をたどるものである。

いま、上水道システムが N 個のリンクから構成されているものとする。個々のリンクの地震後の時刻 $t=idt$ における構造的にみた状態を $kS(idt)$; $k=1, 2, \dots, N$ とし、その m 番目リンク $mS(idt)$ に着目してみる。このリンクのとり得る状態の値は、平常時の状態を維持しているときに S_M 、完全に破壊したときに S_1 とする。たとえば、平常時に S_M に 100 なる数値を与えて平常状態に対して 100% の状態とすれば、完全破壊の状態 S_1 は 0% というようになる。そして、その間は等分した値が与えられることになる。

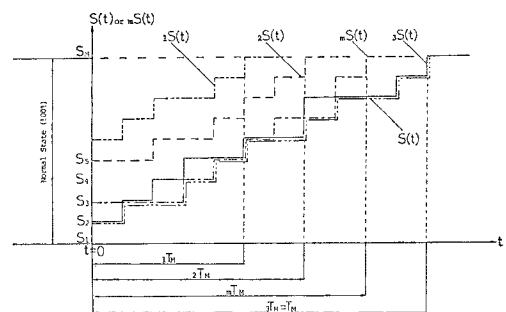


Fig. 3 Restoration Curves of $S(t)$ and $mS(t)$.

次に実際に地震が発生し、このリンクが破壊を受けたとき、その状態はどのような経過をたどり復旧するかを予想してみれば Fig. 3 に示される $mS(t)$ の曲線のようになるであろう。これは、地震発生時 ($t=0$) で S_0 の状態に低下し、その後の復旧活動により時刻 mT_M で完

全に復旧されたことを示したものである。

復旧過程において、時刻 $t=i\Delta t$ から時刻 $t=(i+1)\Delta t$ の微小時間変化 Δt では、 $mS(i\Delta t)$ の状態は変化してもただか1ステップであり、最終的には状態 S_M に吸収される。これをマトリックスで表わしてみると、

$$mP_i(\Delta t) = \begin{bmatrix} 1-m\nu_1(i\Delta t)\Delta t, & m\nu_1(i\Delta t)\Delta t & & & & & & & 0 \\ & , & 1-m\nu_2(i\Delta t)\Delta t, & m\nu_2(i\Delta t)\Delta t & & & & & \\ & & & & & & & & \\ \dots & & \dots & \dots & \dots & & & & \dots \\ 0 & & & & & & & , & 1-m\nu_{M-1}(i\Delta t)\Delta t, & m\nu_{M-1}(i\Delta t)\Delta t \\ & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} ; i=0, 1, 2, 3, \dots \dots\dots(1)$$

ここで、 $mP_i(\Delta t)$ ：時刻 $i\Delta t$ における条件付遷移確率行列、 $m\nu_j(i\Delta t)$ ： m 番目リンクが時刻 $t=i\Delta t$ で状態 $mS(i\Delta t)=S_j$ ； $j=1, 2, \dots, M$ にあるときの単位時間当たりの復旧率。

以上から、時刻 $i\Delta t$ のときの状態確率分布 $m\pi(i\Delta t)$ は、初期分布 $m\pi(0)$ が与えられると、

$$\begin{aligned} m\pi(i\Delta t) &= [mP_1(i\Delta t), mP_2(i\Delta t), \dots, mP_M(i\Delta t)] \\ &= m\pi(0) \cdot mP_0(\Delta t) \cdot mP_1(\Delta t) \cdot mP_2(\Delta t) \dots \\ & \cdot mP_{i-1}(\Delta t) \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

ここで、 $mP_j(i\Delta t) : mS(i\Delta t)=S_j$ となる確率。ただし、 $\sum_{j=1}^M mP_j(i\Delta t)=1$ 、となる。

ライフラインの構造を考えると、多くの場合 node (節点) と link (線) の2つの組合せから構成されているネットワークである。上水道システムの場合、浄水場・給水所・ポンプ場が node にあたり、送水管・配水管などが link に相当する。そして、link はそこから枝分れした配水管網を分担するものと考えれば、さらに小さな要素から構成されることになる。この構造的特性からみて、ライフラインの構造的被害量を定量的に評価するには、各リンク内の要素の破壊を一つの指標とするのが最もわかりやすい評価方法である。たとえば、 m 番リンクが 10 個の要素で構成されている場合、5 個が破壊すれば「 m 番目リンクは 50% の構造的被害を受けた」という具合である。そして、その復旧も要素がどのくらい回復したかによって、その状態を表わせばよいことになる。

それでは、システム全体の構造的復旧過程 $S(t)$ についてはどのように評価すればよいであろうか。

著者らはすでに $S(t)$ について式 (3) を定義した。

$$S(t) = \min[{}_1S(t), {}_2S(t), \dots, {}_NS(t)] \dots\dots(3)$$

式 (3) は、 N 個のリンクからなるシステム全体の復旧状態は、最も遅れているリンクの復旧状態に等しいとしている。言い換えれば、任意の時刻 t におけるシステム全体の復旧状態が $S(t)=S_i$ とすれば、各リンクの復旧状態は少なくとも S_i 以上に復旧されていることを意味

する。式 (3) は安全側の予測を採用したことになり、ある意味では非常に保守的な評価方法である。一方、各リンクの要素の復旧状態を考慮した評価方法をとるとすれば、 $S(t)$ は式 (4) のように定義することができよう。

$$\begin{aligned} S(t) &= \frac{\sum_{j=1}^N n_j \cdot j S(t)}{\sum_{j=1}^N n_j} \dots\dots\dots(4) \\ n_j &: j \text{ 番目リンクの要素数} \end{aligned}$$

式 (4) は、システム全体の復旧状態はシステムを構成している要素がどれだけ回復しているかで表わすものであり、平均的な傾向をみる場合に適した評価方法である。式 (4) は式 (3) よりはるかに現実的であると考えられる。

本研究では、式 (3)、(4) のそれぞれについてその復旧過程 $S(t)$ を求め比較検討を行った。

3. 機能評価 $A(t)$

ライフラインの防災対策の考え方の中で機能評価は重要な意味をもつ。なぜならば、地震発生から復旧完了までのシステム全体の機能がどのように回復していくかを予測することは、予想される地震被害に対してその事前対策や復旧対策を立てるために重要な役割を果たすからである。

上水道システムでは、地震発生後水が供給されない地域や断水人口および供給停止期間をある程度予想しておけば、応急給水に必要な人員や車両等をどれだけ準備しておけばよいかをあらかじめ計画できるのである。

機能評価方法に関する研究は、大部分がシステムの信頼性に基づくものであり、その内容をまとめると⁹⁾、

- (1) 現実の複雑なネットワークを簡単なシステムにモデル化 (SSP, PSS) して、注目点が供給停止となる確率を求める^{12),13)}。
- (2) 現場技術者の主観的判断により、システムの機能低下のレベルを確率により表わす。

また、(1)の方法をモンテカルロシミュレーション法により効率よく求めているものもある⁷⁾。しかし、これらはあくまで地震発生時点までのものにすぎず、供給点と需要点との連結性(connectivity)で評価している。システムの特性を考慮しているものは数少ない^{14),15)}。

システムの機能を評価する場合、node と link でモデル化されたシステムにおいて、単に node 間が連結されたからといって serviceability が回復したといえるであろうか。まず、ライフラインの機能評価をする場合、「機能」とは何をいうのかを明確にしておかなければならない。ライフラインは都市生活者に対する一種の service を使命としている。たとえば、上水道システムでは「水を供給する」、都市ガスシステムでは「ガスを供給する」ということである。すなわち、ライフラインの機能とは、その service がどこまで満足されているか(serviceability)を意味しているのである。そして、その評価となる指標は、給水人口やガス供給人口といったような客観的な判断基準を用いるのが適切である。

上水道システムで、その機能評価に影響を与える要因を挙げてみると次のようになる⁹⁾。

- (i) 他のライフライン(電力、道路)との関連
- (ii) 消化作業による水圧の低下
- (iii) 管内の水の流れの方向
- (iv) 浄水場の形態(自然流下かポンプ加圧式)
- (v) 配水における技術者の判断(バルブ操作等)

このように機能評価は、複雑なシステムの特性を検討し connectivity よりむしろ serviceability により評価するのが現実的である。

ところで本研究では、serviceability に関する検討をせず、上水道システムについて従来の論文と同様に node 間の connectivity により評価を行うが、これは link に水が流れるか否かは node 間が連結していることが大前提となるという考えからである。そして、地震発生から復旧完了までの機能の回復を給水人口という指標を用いて示した。以下にその評価方法について述べる。

システムの機能評価 $A(t)$ を式(5)で定義する。

$$A(t) = \frac{\sum_{j=1}^N X_j w_j \cdot j S(t)}{\sum_{j=1}^N w_j} \dots \dots \dots (5)$$

=地震後時刻 t で service を受けている人口/全給水人口

ここで、 X_j : リンク j が平常状態に回復しかつ少なくとも1つの浄水場と連結していれば1を、そうでなければ0の値をとる2進変数

w_j : リンクの給水区域内の給水人口

N : リンク総数

u : 浄水場(供給点)と連結しているリンク数以下、式(5)の機能評価方法について述べる。

- (i) 各リンク(配水幹線)について給水区域を設定する。これは、各需要家は最も近いリンクからその service を受けるという仮定に基づく。これは各リンクに影響範囲の給水人口がはりついていると考えることになる。実際にはノードから枝分れして給水されるのであるから、むしろノードへ給水人口を付加した方がわかりやすいと思われるが、後節4.のモデル化で詳述するように復旧をマクロ的に予測するのに正確さを欠く仮定とは思われない。
- (ii) 地震後、経過日数ごとに各リンクの構造的復旧状態をシミュレートする。
- (iii) もしそのときリンクが平常状態(100%)に回復し、かつ少なくとも一つの浄水場と連結していれば、そのリンクの給水区域内には水が供給されている。
- (iv) (ii), (iii)をシステム全体が復旧完了するまで行う。
- (v) (ii) から (iv) までで1サンプルが抽出でき、これを多数回繰り返すことによりシミュレーション解(たとえば復旧課程の期待値, 分散値)を求めることができる。

4. 上水道システムのモデル化

Fig. 4 は東京都の上水道システムを巨視的にみた場合のモデル化を示したものである。ここでいう巨視的とは、システムを構成している基幹的な構造を対象とする場合を意味する(Fig. 1での large scale の流れ)。ここでは、東京都(区部)全体を対象としているので巨視的なモデル化を行った。システムは、node と link の2要素から構成されている。node は浄水場、給水所等であり、link は送水管、配水本管の幹線をいう。そして link からはさらに管径の小さい配水本管が枝分れして、

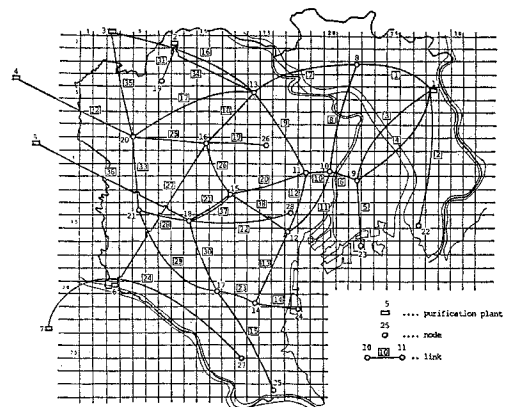


Fig. 4 Water Supply Pipeline System in the City of Tokyo.

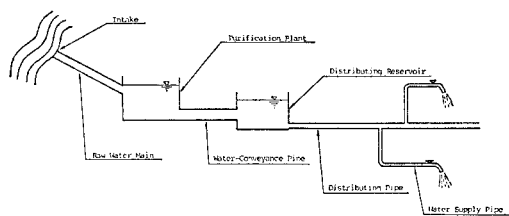


Fig. 5 Conceptual Illustration of Water Supply System.

それを通して各需要家に水（飲料水）を供給している。すなわち、リンクはそれぞれ給水区域をもっている（以下リンクとはある領域をもっているものと考えていただく）。ただし、送水管はその機能的特性から直接的には給水区域をもたない。

Fig. 5 は上水道システム内の水の流れを概念図として描いたものである。

東京都の場合、多摩川、利根川、相模川の3水系から計7か所の取水口より原水を取水し、8か所の浄水場を経て、総延長13000kmにおよぶ送・配水管により各需要家に水を供給している^{16),17)}。このような大規模なシステムが地震の襲来を受けた場合、機能低下を誘発する構造的被害を分類してみると次のようになる。

(1) 取水・導水・浄水施設の構造的破壊と停電による浄水場の機能停止

(2) 送・配水管網等の地下埋設管の破壊

東京都水道局¹⁸⁾は上下水道施設の耐震性強化の対策として取水・導水施設では、水路の改築・増設・浄水施設については設備の改良・自家発電設備の整備改良を行っている。そして浄水施設に関しては、関東大震災およびその後の被害例からみても機能そのものを停止させたような被害はみられない。このことから、都水道局では、大地震の際に浄水場施設が構造的に致命的な被害を受けることはないと考えている。

一方、送・配水管については耐震信頼性の高いダクタイル鋳鉄管への敷設替等による被害発生数の軽減を図っている。しかし、総延長からみても早急に耐震信頼性を向上させるのは、時間的・経済的にも不可能に近いと考えられ、過去の震害例からみても相当数の被害の発生は避けられないと予想される。

そこで、本研究では次のような仮定条件を設定してモデル化を行った。

- (i) ノード（浄水場も含める）の被害は考慮しない。
- (ii) 取水、導水施設の被害は考慮しない。
- (iii) 地震発生時、少なくとも浄水場からは水は供給されている。
- (iv) 浄水場の施設容量は考慮しない。

モデル化は、送水管（管径が500~800mm）を要素とするネットワークモデルとして考えた。Table 1 にそ

Table 1 Water Supply Pipeline System in the City of Tokyo.

link number	node number	diameter (mm)	length (km)	water supplying population (persons)
1 (66)	1~8	2 200	9.4	223 090
2(115)	1~22	1 350~1 800	12.4	632 553
3 (67)	1~9	1 000~1 800	10.7	456 208
4 (71)	29~30	1 000~1 500	11.6	292 230
5 (65)	9~23	1 000~1 200	6.7	138 904
6 (32)	9~10	2 000	2.7	123 855
7 (63)	8~13	1 200~2 000	10.4	463 528
8 (91)	8~10	1 100~1 500	11.8	555 471
9 (53)	11~13	2 200	9.4	422 374
10 (19)	10~11	2 000	2.4	141 492
11 (87)	10~12	1 000	6.3	1 185 287
12 (18)	11~12	1 600	5.8	285 905
13 (38)	12~14	1 350	7.1	352 454
14 (56)	14~24	1 500	5.6	202 348
15(105)	17~25	800~1 600	11.4	374 872
16 (56)	3~13	2 200	15.7	191 831
17 (95)	13~20	1 000~1 200	13.1	386 378
18 (41)	13~16	1 100~1 200	6.1	272 442
19 (49)	16~26	1 350~1 800	5.7	320 390
20 (69)	11~15	1 500~2 000	7.1	281 219
21 (24)	15~18	2 000	4.4	169 432
22 (54)	13~28	1 500	9.7	661 527
23 (54)	14~17	1 800~2 000	4.1	371 610
24 (89)	7~27	1 350~1 800	34.1	453 222
25 (57)	16~20	2 400	5.8	362 137
26 (54)	15~16	1 500	5.5	637 326
27(115)	6~16	1 000~1 100	13.7	561 920
28 (17)	18~21	1 800~2 400	4.1	93 294
29 (83)	17~21	2 000~2 200	11.8	195 925
30 (28)	17~18	1 800	5.8	129 167
31 (13)	2~19	1 800	3.5	34 287
32 (57)	4~20	2 400	13.7	306 608
33 (13)	20~21	2 700	6.4	0
34 (19)	33~34	1 800	9.3	0
35 (24)	3~20	2 700	11.8	0
36 (22)	5~18	1 600~1 970	10.8	0
37 (12)	31~32	2 100	4.2	0
38 (13)	12~15	1 100	6.5	0

(): Number of Elements

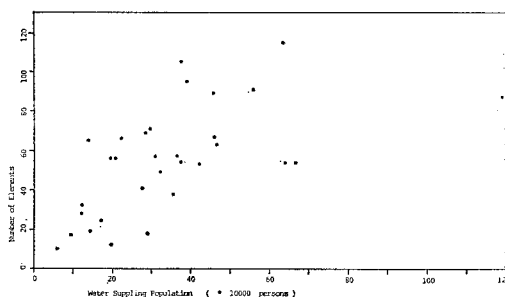


Fig. 6 Correlation between Number of Elements, N_m and Water Supplying Population Each Link.

れを示す。リンクの給水人口は、昭和50年の国勢調査¹⁹⁾をもとに算出した。人口は昼間人口指数（夜間人口を100としたときの昼間人口）が150以上の7区については昼間人口を用いた。Fig. 6は、要素数と給水人口の相関を示したものである。これから給水人口が増加す

ると要素数も増加する傾向にある。両者間の相関係数は0.7である。

5. 被害予測 $m\pi(0)$

地震発生時にシステムが受ける構造的被害量を推定することは、ライフラインの耐震信頼性解析の重要なテーマである。

本研究での $m\pi(0)$ は、地震発生時に各リンクの状態が平常時（地震発生前）の状態と比較して、どの程度のレベルまで低下するのかを確率により表わすものである。管の被害とは要素の破損・継手抜出しおよび管体折損を対象とし、要素の被害=要素の破損とみなす。そしてこの算定は、昭和53年5月に発表された東京都防災会議が提出した報告書¹⁰⁾による。これに基づいて地震

Table 2 Verage Damage Rate Due to Breakage.

material	diameter (mm)	average damage rate (number/km)
steel and cast iron	50~350	0.22
	400~	0.16
asbestos cement		1.00

は、過去東京都に被害をもたらした地震の中で最大の「関東大震災」級の地震を想定し、想定地震動による区部の平均被害率をまず設定した。そしてリンクの給水区域内の各要素の被害箇所数は、1km²メッシュの地盤危険度マップ (Fig. 7) と液状化危険度マップ¹⁰⁾ (Fig. 8) からの補正係数で平均被害率を増減することにより求める。補正係数は、地盤危険度 A, B, C についてそれぞれ 2.0, 0.9, 0.4, 液状化危険度 A', B', C' についてはそれぞれ 2.0, 1.44, 1.11 である。平均被害率は Table 2 に示す。ここで対象としている管は管径が 500 mm 以上の送水管・配水管で、しかも材質は鋼管または铸铁管であるから平均被害率は 0.16 か所/km となる。これを用いて各リンクの要素について式 (6) により被害箇所数を求める。

$$l_{m_j} = \sum_k (D \times C_{m_j} \times V_{m_j} \times Q_{m_j}),$$

$$m_j = 1, 2, 3, \dots, N_m \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 l_{m_j} : m 番目リンクの m_j 番目要素の被害箇所数

C_{m_j} : m 番目リンクの m_j 番目要素の k 区画における地盤危険度補正係数

V_{m_j} : m 番目リンクの m_j 番目要素の k 区画における液状化危険度補正係数

Q_{m_j} : m 番目リンクの m_j 番目要素の k 区画における管長 (km)

D : 東京都の平均被害箇所数 (0.16 か所/km)

N_m : m 番目リンクの要素数

k : A, B, C および A', B', C'

次にリンク要素の被害の発生が定常ポアソン過程に従うものとすれば、 m_j 番目の要素の信頼性 r_{m_j} は式 (6) を用いて、

$$r_{m_j} = \exp(-l_{m_j}) \dots \dots \dots (7)$$

で与えられる。 m 番目リンクには、 N_m 個の要素があり、それぞれの要素について一般に r_{m_j} は異なるが、ここでは式 (8) によるリンクの要素の平均信頼性 \bar{r}_{m_j} を用いることとする。

$$\bar{r}_{m_j} = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} r_{m_j} \dots \dots \dots (8)$$

いま、 N_m 個の要素のうち、 x 個が被害を受けない確率、 $r_m(x|N_m)$ は二項定理を用いれば式 (9) で与えられる。

$$r_m(x|N_m) = N_m C_x \bar{r}_{m_j}^x (1 - \bar{r}_{m_j})^{N_m - x} \dots \dots \dots (9)$$

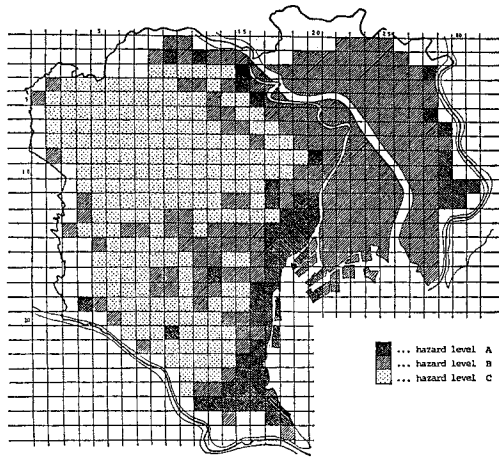


Fig. 7 Macro Zoning Map of Seismic Ground Shaking Hazard (1*1 km²).

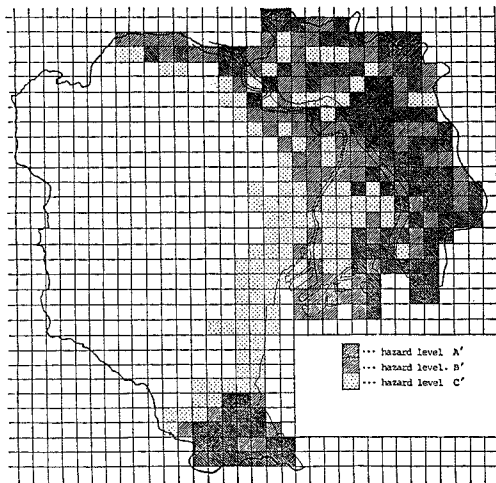


Fig. 8 Macro Zoning Map of Seismic Liquefaction Hazard (1*1 km²).

これより、 m 番目リンクが地震発生時 ($t=0$) で状態 S_l をとる確率 ${}_mP_l(0)$ はリンクのとり得る状態 S_l : $l=1, 2, \dots, M$ と被害を受けない個数 x とが線形であると考えれば

$$\begin{aligned} {}_mF_l(0) &= \text{Prob}[{}_mS(0) = S_l] \\ &= \text{Prob}[N_m(l-3/2)/(M-1) \\ &\leq x < N_m(l-1/2)/(M-1)] \\ &= \sum_x r_m(x|N_m) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

により求めることができる。

ただし級数 \sum_x は式 (10) の中央の式で示される x の範囲を満足する整数値 x に関する総和を意味する。

ここで、リンクを要素に分割する際の考え方を以下に述べる。いま、状態分割数を $M=11$ と考え、同じ長さの2つのリンク A, B を考える。A リンクの要素数を1個、B リンクの要素を10個とする。ここで A, B リンクに対して、おのおの1個の破壊が生じたとき、A リンクの構造状態は $S_1=0\%$ 、B リンクの構造状態は $S_{10}=90\%$ となり、同じ破壊の状態であるのに対して矛盾がでてくる。そこで、本論では上記のことを考慮して1要素の管路長を一定(本論では500m)として考えた。本論で1要素500mとしたのは、おのおののリンクの受け持つ管路長(径500mm以上の管路)の中で最も短いリンクに対して $M=11$ に分割した際、少なくとも、 N_m (m 番目リンクの要素数) ≥ 11 となるように決定したものである。ただし1要素500mというのは厳密にリンクの信頼性確率を求めたことにはならないが、そのリンクが、どの状態になり得るかという、すなわち状態確率を求める計算においては少なくとも矛盾はないと思われる。しかし最適要素数の問題は今後の本論の重要な課題であると考えられ現在検討中である。このように本論では要素の分割法を考え各リンクにおける ${}_mS(0) = S_l$

の期待値を求めマップを作成した。それを Fig. 9 に示す。当然のことであるが地盤危険度や液状化危険度の高い地域のリンクが被害を受けやすく、これらのリンクの地震発生時の構造的被害のレベル低下が大きいことがわかる。区部全体では東側地域の被害が大きいと予想され、特にリンク1, 2, 4, 15のレベル低下が顕著である。

6. 復旧予測

復旧予測における復旧率は、資材・機械・人員等の作業能力や復旧計画における作業順位などに大きく関与しているとともに、資材輸送のための交通施設システム、電力供給のためのエネルギー施設システム、震災の情報交換のための通信施設システム等のライフラインと関連している。このように復旧率の考え方においてはライフライン間の関係などを考えねばならなくなり、復旧率を定量的に求めるということは非常に難解な問題である。

そこで本論において復旧率 ${}_m v_j(i \Delta t)$ は、おのおののリンクごとに(たとえばリンクの材質や重要度)、また、どの復旧状態にあるか、そして地震発生後の経過時間の3つの要因で決定されるものとし、東京都水道局が作成した震災対策¹⁹⁾をもとに送・配水本管の復旧方針を考慮して復旧率を推定した。その考え方を以下に述べる。

東京都水道局の送・配水本管の復旧基本方針は、管路の重要度によって第1次、第2次、第3次路線を指定し、原則としてこの順位に従いながら復旧を進めることにしている。

- a) 第1次指定路線 274.9 km
送水管および主要配水幹線で給水上重要な管路
- b) 第2次指定路線 266.9 km
第1次指定路線に準ずる管路および避難場所へ至る管路
- c) 第3次指定路線 868.8 km
第1次・第2次指定路線以外の管路

モデル化では、ノード間を幹線とそれから枝分れしている配水本管とで一つの給水区域を設定しそれをリンクと考えていることから、おのおののリンクの構造的な重要度は同じであるとして前述の都水道局の復旧基本方針の重要度で a) のみを対象としていることになり、またリンクの被害個数に応じて作業員、資材などを増減して作業を行うことを前提とすればほぼすべてのリンクの復旧速度は同一レベルであろうとし復旧率を変えることはせず、すべて等しい値とした。さらに復旧の基本的な流れとして、地震発生直後から数日間は被害量の調査等の状況把握あるいは人員や復旧資材の確保をまず行うことになり、その後本格的な復旧作業が開始される。しかし、始めは道路・通信等の他のライフラインの被害の影

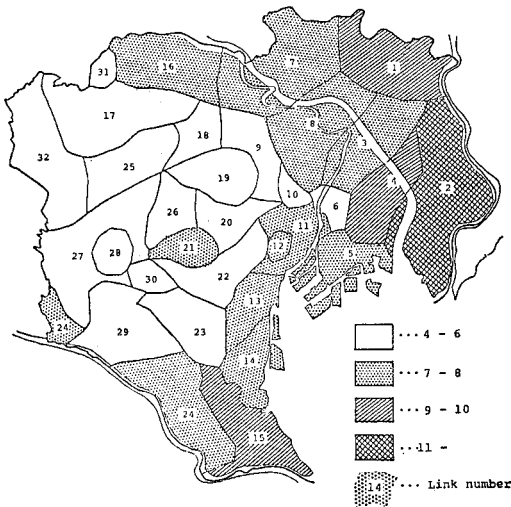


Fig. 9 Expection of ${}_mS(0)$.

Table 3 Restoration Rate $m_{ij}(idt)$ (Time Dependent).

time (days)	restoration rate (number of steps/day)
0~ 5	0.185
6~14	0.628
15~19	0.4
20~	0.172

響を受け、人員や資材の輸送の遅れ等によりスムーズな復旧は行われないであろう。このように、復旧率はリンクがどの復旧状態にあるかということよりも、むしろ地震後の経過日数といった時間に支配されるものと思われる。

そこで、本研究では復旧率は時間 t に依存すると考え、東京都水道局が作成したケーススタディーでの復旧曲線¹⁸⁾を参考として復旧率を **Table 3** に示すように推定した。ただしこの復旧曲線は東京都上水道システムにのみ有効であると考ええる。

7. 解析結果

東京都上水道システムの構造的復旧 $S(t)$ と機能的復旧 $A(t)$ を次の2つのタイプについてモンテカルロ法によるシミュレーションを行った。ただしシミュレーション回数は100回とし、精度上の誤差としては本研究における復旧過程がマクロ的であると考え考慮していない。

(タイプI)：各リンクの構造的復旧 $mS(t)$ が互いに独立して復旧する場合

(タイプII)：各リンクの構造的復旧 $mS(t)$ が完全に相関して復旧する場合

Fig. 10 は、タイプIの1サンプル関数である。ここでは $A(t)$ 、式(3)による $S(t)$ が10日で約90%に復旧している。また、式(4)による $S(t)$ は同時刻にほぼ地震前の状態に回復しているのがわかる。完全復旧日数は11日であり、その間の $A(t)$ の20%、60%、80% 復

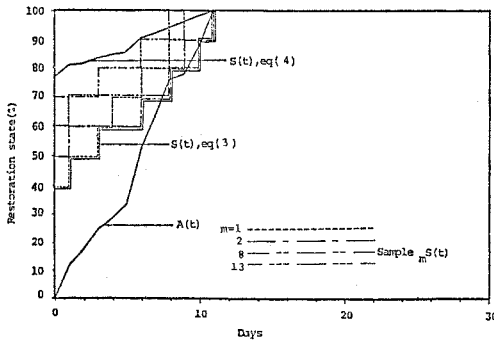


Fig. 10 Simulated Sample Function $S(t)$, $mS(t)$ and $A(t)$ (Mutual Independence of $iS(t)$ $i=1, \dots, N$).

旧状態をマップ上に描いたものを **Fig. 11** から **Fig. 13** に示した。給水区域の広がりは西から東へと延びているのがわかる。この傾向はすべてのサンプル関数について同様であった。この結果は本研究で提案した手法を用いることにより給水人口という面から水道施設の復旧状況

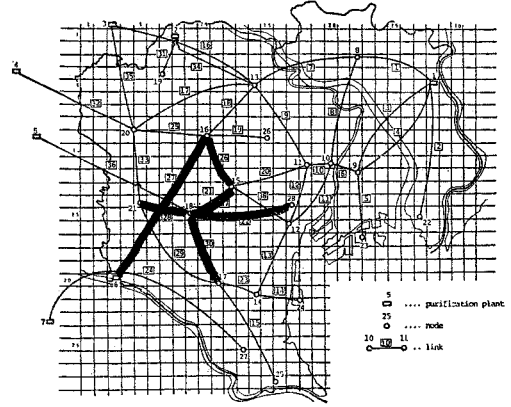


Fig. 11 $A(idt)=20\%$ Restoration ($i=3$).

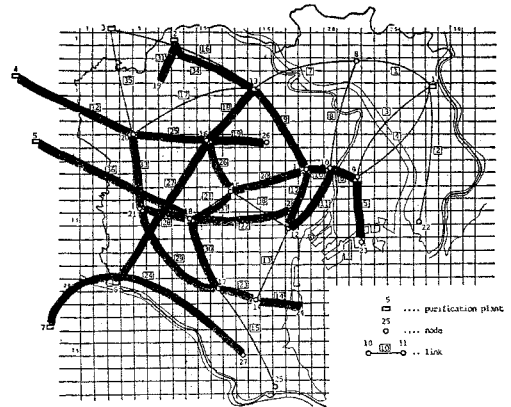


Fig. 12 $A(idt)=60\%$ Restoration ($i=7$).

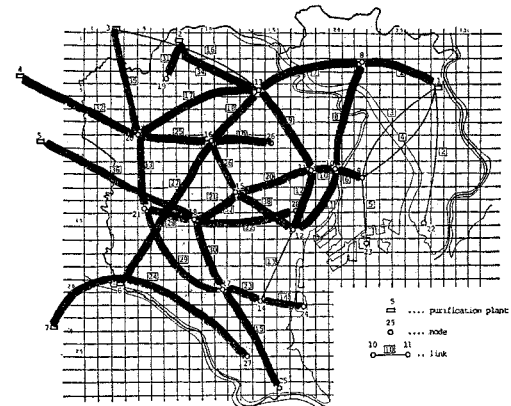


Fig. 13 $A(idt)=80\%$ Restoration ($i=9$).

を考察できるという実際上の利点を提示したものである。

Fig. 14 には、同じ初期状態のときのタイプIIの1サンプル関数が示されている。復旧曲線のレベルはタイプIに比べて多少上がっている。このときの復旧日数は9日であった。

Fig. 15 は、タイプI、タイプIIの $A(t)$ と $S(t)$ の平均値を描いたものである。初めに $A(t)$ に関しては、両タイプでの相違はほとんどみられない。地震発生直後1% とかなりのレベル低下がみられるが、構造的復旧に伴い約10日で90%の状態に回復し、地震発生後約20日で復旧の完了することが予測された。さらに注意してみると、5日目まで曲線の傾きが急に変化しているのがわかる。これは、

- (i) 構造的復旧が5~8日で完了するリンクが多い。
- (ii) (i)によりリンクと浄水場との連結が増大する。
- (iii) これらのリンクは比較的給水人口が多い。

などが影響しているためである。この要因としては、東京都上水道ネットワークの形状が大きく影響していると考えられるが、本研究で6日目から14日目までの復旧率がそれ以前の復旧率に比べ急に大きくなっていることも一つの要因ではないかと思われる。

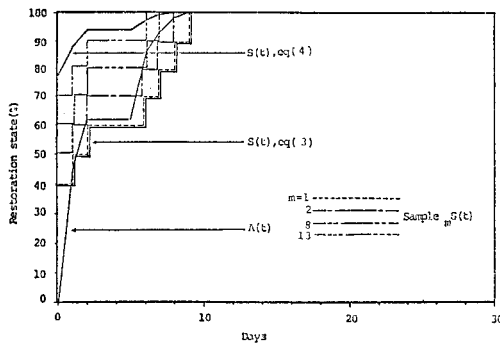


Fig. 14 Simulated Sample Functions $S(t)$, $mS(t)$ and $A(t)$ (Mutual Perfect Correlation of $iS(t)$ $i=1, \dots, N$).

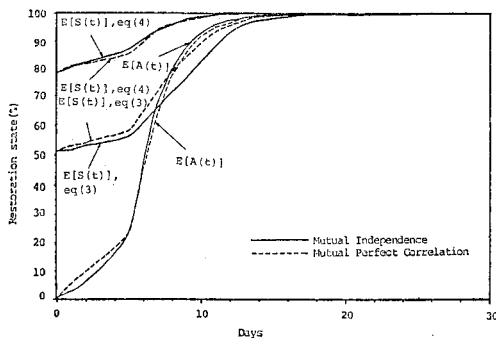


Fig. 15 Expectations of $S(t)$ and $A(t)$.

一方 $S(t)$ はタイプIとタイプIIとは式(4)の場合にはほぼ同じ曲線を示しているが、式(3)の場合差がみられる。これは式(3)が $mS(t)$ の最小値を採用することからタイプIIの場合は復旧状態のレベルの増加は各リンクで同じであるのに対してタイプIではレベルの増加が復旧されないリンクの状態に支配されるため全体的にタイプIIより曲線が下がる傾向にある。

また、 $A(t)$ と $S(t)$ 関係を調べてみると、式(3)の場合の $S(t)$ の初期値が $S(0)=51\%$ であるのに対して

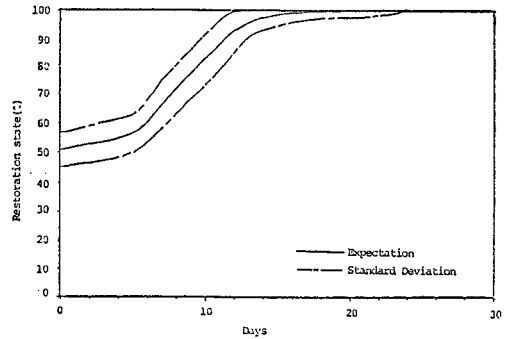


Fig. 16 Expectation and Standard Deviation of $S(t)$, eq (3) (Mutual Independence of $iS(t)$ $i=1, \dots, N$).

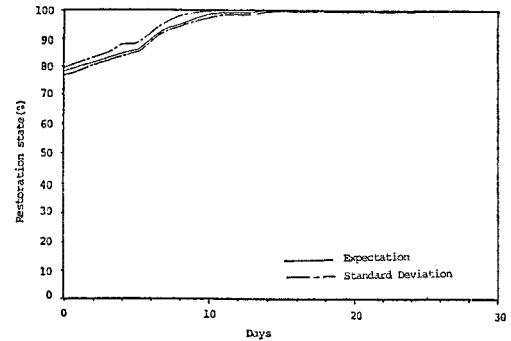


Fig. 17 Expectation and Standard Deviation of $S(t)$, eq (4) (Mutual Independence of $iS(t)$ $i=1, \dots, N$).

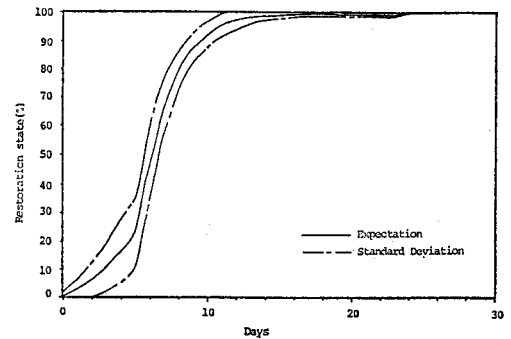


Fig. 18 Expectation and Standard Deviation of $A(t)$ (Mutual Independence of $iS(t)$ $i=1, \dots, N$).

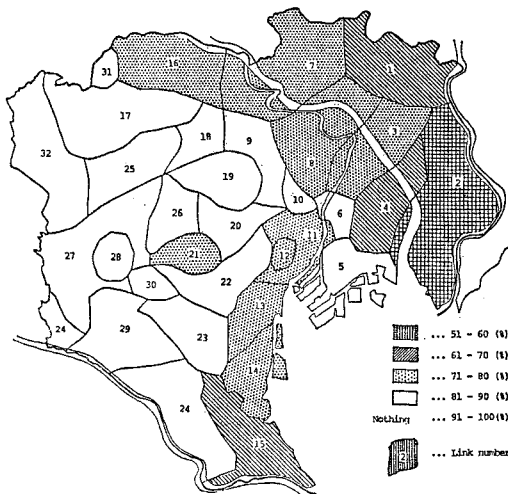


Fig. 19 Restoration Days Each Link.

$A(t)$ の初期値は $A(0)=1\%$ とかなりのレベル低下がみられるが、これは本研究における機能評価方法がノード間の連結性を考えていることによる。

Fig. 16~18 はタイプ I の平均値とその標準偏差の曲線を示したものである。式 (3) による $S(t)$ のばらつきが非常に大きい。

Fig. 19 はタイプ I の場合の各リンクの平均復旧日数を示したものである。Fig. 9 における地震発生時点の構造的状態のレベル低下の度がそのまま Fig. 19 の平均復旧日数に現われているのがわかる。これは今後各リンクの復旧計画を立案するとき有用であると思われる。

8. 結 論

本研究は参考文献 11) を検討し、より現実に即した復旧予測を行うために、被害予測算法、モデル化、復旧率の再検討を行った。次に東京都上水道システムに対して事例研究を行った結果以下のことが予測された。

(1) 将来、関東大震災級の地震襲来を受けた場合 90% 復旧には約 10 日、また完全復旧にはおよそ 20 日が必要である。

(2) 地震発生時点においては構造的被害が 50% のレベルにあるのに対して、機能的レベルはほぼ停止の状態となる。

(3) 各リンクの給水区域内の復旧日数は特に都の東側のリンクで日数がかかる。

(4) 地震発生直後の構造的被害は地盤危険度および液化危険度の高い地域で多く発生すると予想され、これら地域の埋設管の耐震性の向上が防災対策上重要である。

以上は文献 10) に基づいて、関東大震災級の地震に對するある一つのケーススタディーとして実施した結果であり、絶対的なものではない。今後の検討事項として理論解による検証、システムの特性を組み込んだ機能評価 $A(t)$ の開発、モデル化の再検討があり現在これらの課題について研究を行っている。

付 録

参考文献 5) より誘導した復旧理論に基づいてシミュレーション解を求める場合をまとめてみる。

(1) 要素の復旧過程 $mS(t)$

はじめに一様乱数と $m\pi(0)=[mP_1(0), mP_2(0), \dots, mP_M(0)]$ とを用いて初期状態 $mS(0)=S_i$ を抽出する (ステップ 1)。次に式 (1) の条件付遷移確率行列 $mP_i(dt)$ の要素である $1-m\nu_i(0)dt$, $m\nu_i(0)dt$ を用いて状態の推移を決定する。すなわち、 $mS(t)$ は S_i にとどまるかまたは、 S_{i+1} の状態が抽出される (ステップ 2)。以下同様にステップ 2 を繰り返し行い、状態 $mS(t)=S_M$ になるまで行う。以上で $mS(t)$ の 1 つのサンプル関数が抽出される。

(2) システム全体の復旧過程

復旧が要素間で独立のときには、各要素ごとに独立の乱数を用いて上記の操作を行う。 $S(t)$ の 1 つのサンプル関数は、式 (3) による、 $S(t)=\min[S_1(t), S_2(t), \dots, S_N(t)]$ と式 (4) による、 $S(t)=\frac{\sum_{j=1}^N n_j \cdot j S_j(t)}{\sum_{j=1}^N n_j}$ とすればよい。完全相関の場合には、共通の乱数を用いて各要素の復旧過程 $mS(t)$; $m=1, 2, \dots, N$ を抽出すればよい。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所：地震対策の現状と課題，土木研究所資料，1341 号，1978.2.
- 2) Whitman, R.V., C.A. Cornell and G. Taleb-Agha: Analysis of Earthquake Risk for Lifeline Systems, Proc. U.S. Natl. Conf. Earthquake Eng., 1975.
- 3) Taleb-Agha, G.: Seismic Risk Analysis of Lifeline Networks, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 67, No. 6, pp. 1625~1645, December, 1977.
- 4) Shinozuka, M., S. Takada and H. Ishikawa: Some Aspects of Seismic Risk Analysis of Underground Lifeline Systems, Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, No. 78-WA/PVP-6, 1979.
- 5) 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, 1981.4.
- 6) Tsuneo Katayama and Ryoji Isoyama: Seismic Performance Evaluation of Water Supply Systems, A Paper Prepared for Review Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Research Seismic Risk Analysis and Its Application to Reliability-Based Design of Lifeline Systems, Honolulu, January, 1981.

- 7) 田村・川上：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，東京大学生産研究所報，生産研究，Vol. 30, No. 7, 第 346 号。
 - 8) 伯野・斉藤：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，1979.7.
 - 9) 片山・磯山：ライフラインの地震防災，考え方と現状報告，東京大学生産研究所報，生産研究，Vol. 32, No. 6, 1980.6.
 - 10) 東京都防災会議：東京都区部における地震被害の想定に関する報告書，1978.5.
 - 11) Hoshiya, M. : Seismic Damage Restoration of Underground Water Pipelines, A Paper prepared for Review Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Research Seismic Risk Analysis and Its Application to Reliability-Based Design of Lifeline Systems. Honolulu, January, 1981.
 - 12) Ghight Taleb-Agha : Seismic Risk Analysis of Networks, SDDA—Report No. 22, M.I.T., Dept. of Civil Eng. Report R 75-43, Nov., 1975.
 - 13) Shinozuka, M., S. Takada and H. Kawakami : Risk Analysis of Underground Lifeline Network Systems, Technical Report, No. CU-3, Dept. of Civil Eng., Columbia University, August, 1977.
 - 14) Shibata, H. and M. Tsuchiya : Seismic Reliability Analysis of Lifeline Systems [1], Seisan Kenkyu, Vol. 30, No. 7, July, 1978.
 - 15) 川上・田村：上水道管網システムの機能上の耐震性の評価，土木学会第 34 回年次講演会，1979.10.
 - 16) 東京都水道局：東京都水道配水系統図，1977.10.
 - 17) 東京都水道局給水部管理課：配水設備統計，1979.3.
 - 18) 東京都水道局：東京都水道局震災対策，一予防計画及び応急対策—（昭和 53～57 年度），1979.3.
 - 19) 東京都：昭和 50 年国勢調査による昼間人口，1978.6.
(1981.5.18・受付)
-