

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

SEISMIC RISK ANALYSIS ON SYSTEM SERVICEABILITY OF UNDERGROUND LIFELINES

篠塚 正 宣*・小 池 武**

By Masanobu SHINOZUKA and Takeshi KOIKE

1. 緒 論

近代的な都市は上下水道、ガス、オイル、電力、鉄道、道路など一般にライフラインとよばれるネットワークシステムによってその都市機能を維持している。それゆえ、ひとたび大地震に襲われて都市機能に致命的損害が発生したときには、市民生活から産業活動に至る広範囲の分野で多大の被害が生じる可能性がある。したがって、都市内各種ライフラインネットワークシステムの耐震性向上は都市の地震時防災対策上最重要課題の1つといわねばならない。

ところで、地震によるネットワークシステムの被害は、物理的損傷（たとえば、管路の破断・漏洩、高速道路橋の落橋など）の形で発生し、これに従属して、システムの機能損傷（たとえば、出口圧力・流量不足、水質汚染、交通渋滞）という第2の被害をもたらす。しかもこれらの損傷の発生はさまざまな不確定要因の影響下にあるという特性を示す。ネットワークシステムのこのような被害の特性を検討するため、著者らは、すでに文献1)において地震により物理的損傷を受けたネットワークシステムが機能的であるための必要条件、すなわちシステムの連結性能（System Connectivity）について論じた。しかしながら、たとえ供給基地から需要端まで1つまたはそれ以上の経路が存在したとしても、需要端に所定の条件を満足した目的物が輸送されるとは限らない。すなわち都市の地震時防災の観点からは、地震直後の異常事態において、対象とするネットワークシステムが真に防災目的に合致した機能性能を発揮できるのかどうかという、いわゆる十分条件について論じる必要がある。

ここで、言葉の混同を避けるため、以下の本文では、機能性能の十分条件のことを単に機能性能とよぶことにし、その必要条件を意味する連結性能と区別することにする。

本研究はこの主旨に基づいて、都市内埋設ライフラインネットワークシステムの機能性能（System Serviceability）に対する耐震性を評価する目的で、危険度解析の方法論を展開したものである。ただし、危険度解析手法が必要とされる不確定要因としては、次の2要因を考慮した。すなわち、

- ① 地震の発生時期、規模、場所が不確定であること。
- ② ネットワーク内の各点の地盤ひずみがいまだ十分な精度で予測できないこと。ただし、対象地盤に入射する加速度を推定する attenuation 式¹⁾は確定的に与えられているものとする。

ところで、おのおののライフラインがそれぞれ異なる使用目的をもって運転されている結果、当然のことながら対応するシステムの機能性能の内容も異なる。しかしながら、本来いずれのシステムも正常運転時にはその需要を満足して稼働するように、また緊急事態においても所定の限界条件を満足するように設計されているとすれば、システムの機能性能が正常運転時および緊急事態の設定条件をどの程度下回るかという尺度でもって、システムの機能損傷を計量化することができよう。

いま、都市の地震時防災の立場からシステムの機能性能に関する設定条件を考えるならば、人命・財産を保護するための最低必要条件が機能性能に対する1つの設定条件として要請されてくる。たとえば、水道パイプラインの場合なら、地震直後の火災に対処するという目的で、消火活動に必要な消火用水供給能力が問題とされるべきであろうし、また、高速道路網ならば、避難経路における最大交通量が問題とされるべきであろう。

従来この分野の研究は、送電線のネットワークシステムの地震時供給性能を取り扱った柴田・土屋の研究²⁾、

* 正会員 Ph.D. Columbia 大学教授 土木工学・工業力学教室

** 正会員 工博 川崎製鉄(株) エンジニアリング事業部パイプライン・海洋技術部

水道ネットワークの地震時給水性能を論じた川上・田村の研究³⁾、また高速道路網の地震時機能性能を取り扱った Oppenheim や Fenves and Law の研究^{4),5)} などいくつかの研究が報告されているが、それらに共通している問題点は、ネットワークシステムを構成するリンクとノードの破壊確率が与件として初期設定されるなど地震発生から地盤震動、システム要素の破壊に至る物理的破壊のプロセスに対する検討が不十分なため、解析結果にいまひとつ説得力がないという欠点のあったことである。

本研究は、上述の欠点を克服しようとした文献 1) の成果を踏まえ、そこで論じられなかったシステムの機能性能について、その危険度解析を実施することにより、耐震設計戦略に有用な情報を入手する手法を提示しようとしたものである。

解析対象には Los Angeles 市内の水道パイプラインを例として取り上げ、地震時防災の観点から消火活動に対するシステムの機能性能について検討した。

2. システムの機能性能に関する危険度解析

都市内水道ネットワークシステムは、地震直後の消火活動に必要な消火用水をどの程度供給できるのだろうか。本節では、地震直後に発生が予想される火災に対して消火活動に必要な水をシステム内の各需要端から取り出そうとするとき、水圧・水量に関する最低必要条件を満足する水をどの程度取り出せるかという問題を検討す

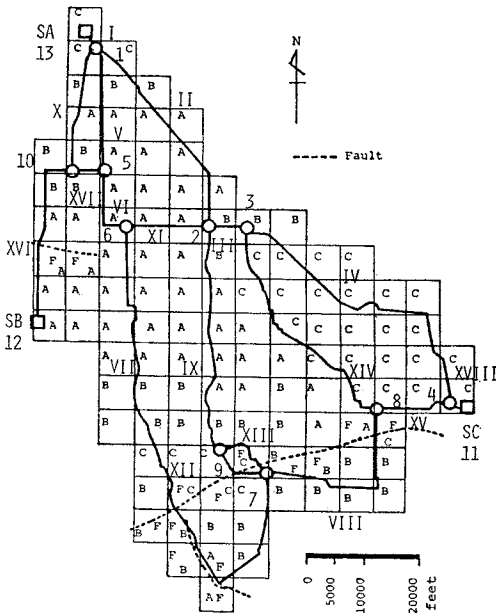


Fig. 1 Water Transmission System and Simplified Soil Map in Los Angeles.

る。

(1) 対象とするネットワークシステム

Fig. 1 は解析対象にした Los Angeles 市内の水道パイプラインシステムの理想化されたモデルである。その輸送管路は溶接鋼管でできており、その管径は 40 インチ (812.8 mm) から 70 インチ (1625.6 mm) の範囲にわたっている。

本システムは、3 個の供給基地 (SA, SB, SC), 10 個のノード (丸印) そして 18 個のリンクから構成されている。これらのリンクはいずれも輸送本管 (water transmission line) であって、正方形のメッシュで分割された都市内各地には、各ノードに連結された給水ライン (water distribution line) を通じて供給される。本研究ではネットワークシステムの対象を輸送ラインに限定するため、需要端となる各ノードはそのノードが分担する給水地区の総需要水量に等しい水量をそのノードの需要水量としてもつこととする。

また、対象地盤は各部分の土質条件を明確にするために、0.5 マイル (804.5 m) ごとのメッシュに分割されており、そのメッシュ内の土質条件は A, B, C の 3 種類に分類されている。ここで、A は比較的軟弱な地盤を代表し、B は圧密が中程度からかなり進んだ程度の地盤を代表し、C はよく締まった土または岩からできた地盤を代表している。さらにメッシュ内の記号 F はそのメッシュ内を断層が貫通していることを示すものである。

一方、対象とするネットワークシステムはいくつかの断層に囲まれたり、システム内部を貫通されたりしている。そこで本研究は Fig. 2 に示すそれら 4 断層すなわち、SAN ANDREAS 断層、SAN GABRIEL 断層、SANTA MONICA 断層そして NEWPORT-INGLE-

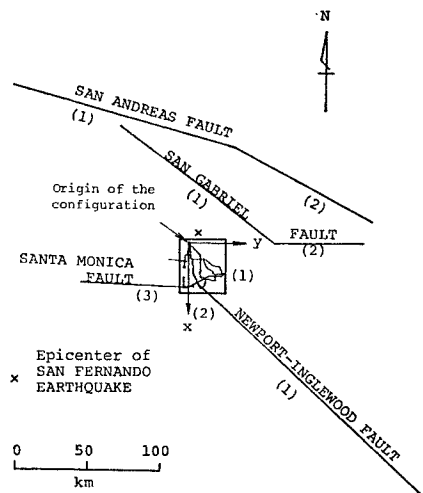


Fig. 2 Fault Locations and Network System.

WOOD 断層を解析対象にした。

(2) 機能損傷の定義

ネットワークシステムが正常運転時および緊急時に所定の設定値を満足して稼働しているとき、そのシステムは有効に機能しているといえる。そこで、もしシステムがなんらかの原因によって所定の機能を満足させることができないとき、そのシステムは機能損傷を発生したと定義する。

地震直後の異常事態では、消火活動に必要な水圧・水量がシステムの緊急時の設定条件となるから、機能損傷の発生の有無は需要端での出口圧力・流量がその設定条件を満足しているかどうかによって判定することができる。

本研究では機能損傷の程度を次の3種類に分類する。すなわち、

- ① 大損傷 S_{kf} (Major damage of system serviceability) : 第 k 需要端の出口圧力・流量が消火活動に必要な最低必要圧力または最低必要流量の少なくともいずれか一方の条件を満足していない状態。
- ② 中損傷 $S_{km} = S_{kf} * \cup S_{ks} *$ (Moderate damage of system serviceability) : 第 k 需要端の出口圧力・流量が小損傷でも大損傷でもない状態。ここで、アステリスク記号 $*$ は元の事象の余事象を意味する。
- ③ 小損傷 S_{ks} (Minor damage of system serviceability) : 第 k 需要端の出口圧力・流量が正常運転時の設定圧力の $e_0\%$ 以上、設定流量の $f_0\%$ 以上という両条件を同時に満足している状態。

Fig. 3 はこれら3つの機能損傷状態を図示したものである。縦軸は機能損傷状態での出口圧力を正常運転時の設定値で除した値を100倍して%表示したものであり、図中の e_{min} は大損傷状態と中損傷状態を区分する最低必要圧力の%表示値である。一方、横軸は機能損傷状態での出口流量を正常運転時の設定値で除した値を100倍して%表示したものであり、図中の f_{min} は最低必要流量の%表示値である。

一方、システムが機能的であるための必要条件として

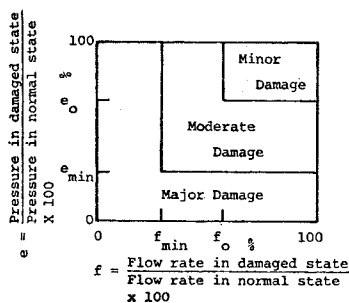


Fig. 3 Criteria for System Serviceability at Node i .

導入されたシステムの連結性能について、その損傷状態を次のように定義¹⁾する。

- ① 大損傷 C_{kf} (Major damage of system connectivity) : いずれかの供給基地から第 k 需要端までのすべての経路が物理的大損傷状態にある。
- ② 中損傷 $C_{km} = C_{kf} * \cup C_{ks} *$ (Moderate damage of system connectivity) : いずれかの供給基地から第 k 需要端までの経路が物理的大損傷または小損傷状態にない状態。
- ③ 小損傷 C_{ks} (Minor damage of system connectivity) : いずれかの供給基地から第 k 需要端までの少なくとも1つの経路が物理的小損傷状態にある。

(3) 物理的損傷と機能損傷の関係

地震によるネットワークシステムの被害はまず管路の破断・漏洩という物理的損傷の形で現われる。この物理的損傷はネットワーク内の供給基地から需要端までの既存の連結経路のいくつかを破壊することによりシステムの機能損傷という第2の被害をもたらす。したがって、システムの機能損傷の問題を解明するには、システムが物理的損傷の結果そのネットワークとしての幾何学的特性および水理学的条件をどう変化させるのかを明確にしなければならない。

文献1)において、システムは基本要素とよばれる直管要素および曲管要素から構成され、リンクはこれらの基本要素の直列システムとみなされた。そして、基本要素の地震時被害は被害程度により、大・中・小損傷の3つに分類された。この分類は管材材料の応力・ひずみ曲線に基づいて設定されたものであり、大損傷は管破断、中損傷はかなりの漏洩、小損傷は微少漏洩または無被害の状態に対応するものと仮定された。

もし、リンク内の1つの基本要素で大損傷が発生したとすると、水は破断口から流出し下流側ノードへは伝達されない。すなわち、その区間のリンクが消滅することになる。また、リンク内の基本要素に中損傷が発生した場合には、その破損孔から水を漏洩させることになる。ところで、リンク内の中損傷発生箇所が多数になると累積された漏洩量が多くなり、下流側ノードへ水を伝達できず実質的には管破断と同様の事態になることも予想される。

一方、もしリンクに沿った各基本要素の3種の損傷状態が確率的にしか与えられないとき、各位置での管破損状況が特定できないため、一般的には Monte Carlo Simulation や 取り扱いモデルの単純化など各種の解析方策が検討されることになる。ところで基本要素の総数が200前後あり、しかもそれぞれが3個の確率値をもつ

ているとき、基本要素を基礎にしたシステムの損傷状態の組合せ数は最大 3^{200} のオーダーとなることに注意すると、基本要素の損傷状態を基礎にした Monte Carlo Simulation の適用が実際のでないことがわかる。そこで、本研究では物理的損傷を受けたネットワークのモデル化を以下のように単純化することにした。

Fig. 4 は大損傷を受けたリンクのモデル化の例である。Fig. 4 (a) はリンク内のある基本要素に大損傷が発生した状況を示している。このときそのリンクは Fig. 4 (b) のように大損傷を生じた点で破断が生じ多量の水流出が発生させることになる。しかし、本研究では Fig. 4 (c) に示すように大損傷を生じたリンクは両端の出入口の所に設置されているものとするバルブによって閉鎖され、大損傷リンクへの水の流入が入口の所で遮断されるものと仮定する。Fig. 4 (b) と (c) のモデル化の差異は、前者が地震発生直後の状況をモデル化しようとしているのに対し、後者は地震発生後数 10 分経過しバルブの閉鎖等緊急措置が実行された後の状態をモデル化しようとしている点にある。

Fig. 5 は中損傷を受けたリンクのモデル化の例である。同図左側の (1a), (1b), (1c) は中損傷を生じる基本要素数が少ない場合（たとえば、10 か所以下）、同図右側の (2a), (2b), (2c) は逆に中損傷を発生する基本要素数が多い場合（たとえば 10 か所以上）のモデル化の方法を示している。

中損傷箇所が少なければ、リンク途中から漏洩する水量も少なくリンクは実質的に連結されていることになる。本研究では同図 (1c) に示すように中損傷箇所が少

ないリンクは連結を保持するものとし、途中での漏洩については、中損傷箇所数に比例する漏洩量がリンク上流端から漏洩するものとして近似的な取り扱いをする。

一方、中損傷箇所数が多い場合には、リンク内流量の大半が途中で漏洩してしまい下流端へ水を輸送することができなくなり、実質的にはリンクが破断されたのと同じ状態になることが予想される。この場合のリンクは Fig. 4 の大損傷の場合と同様の取り扱いを受けることになる。

Fig. 6 は上記の方法に従って元のネットワークから作成された損傷ネットワークの一例を示したものである。

(4) システムの機能破壊確率

システムが機能的であるためには、必要条件としていずれかの供給基地 (Fig. 1 の SA, SB, SC) から需要端ノードまで少なくとも 1 本の管路が連結されていなければならない。このことを文献 1) ではシステムの連結性能 (system connectivity) が満足されている状態と定義した。しかしながら、連結性の条件はあくまでもシステムの機能性能 (system serviceability) に対する必要条件であって十分条件ではない。すなわち、システムが機能的であるためには、十分条件として需要端ノードでの圧力・流量が所定の設定条件を満足していることが要請される。したがって、システムの機能性能に関する設定条件が満足されないときをもってシステムの機能破壊と定義する。

マグニチュード m (ここでは Richter magnitude) の地震が震央 l で発生した場合のシステムの機能破壊確率は 2. (2) の定義に従って次式で表現することができる。

$$P\{S_{kf}|m, l\} = P\{(H_k \leq H_{cr}) \cup (Q_k \leq Q_{cr})|m, l\} \dots (1)$$

$$P\{S_{ks}|m, l\}$$

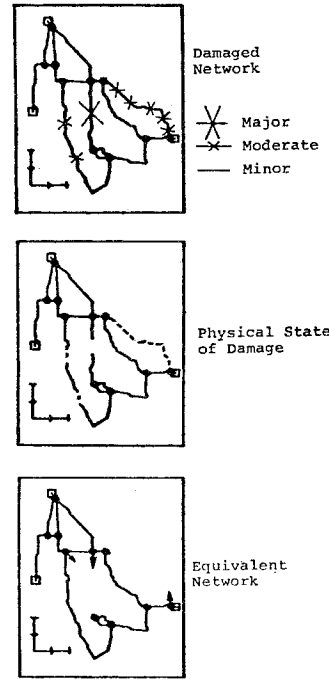


Fig. 6 Illustration of Damaged Network System.

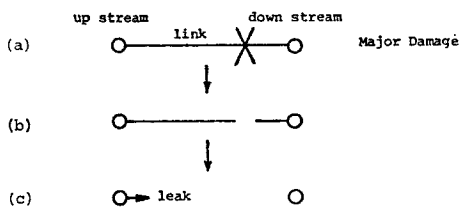


Fig. 4 Simplified Model of Pipe in Major Damage State.

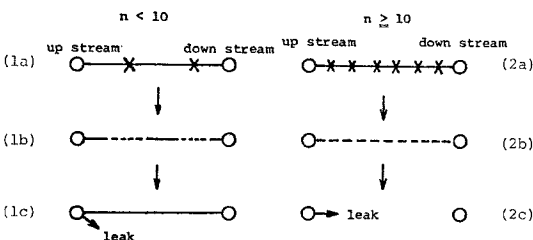


Fig. 5 Simplified Model of Pipe in Moderate Damage State (n =a number of locations of moderate damage).

$$=P\{e_0H_k^N < H_k\} \cap \{f_0Q_k^N < Q_k\} | m, l\} \dots\dots\dots (2)$$

$$P\{S_{km}|m, l\} = 1 - P\{S_{kf}|m, l\} - P\{S_{ks}|m, l\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 H_k, Q_k は第 k ノードの水頭圧力 (m)、流量 (m³/s) であり、 H_{cr}, Q_{cr} は各ノードに対する必要最低圧力・流量である。そして、 H_k, Q_k が H_{cr}, Q_{cr} の値を下回ると第 k ノードにおけるシステム機能が大幅な損傷状態に陥ることになる。また、 H_k^N, Q_k^N は無損傷状態のシステムにおける第 k ノードでの出口圧力と流量を意味している。

さて、2.(2) で議論したようにシステムの機能破壊がシステムの物理的破壊に從属していることから、式 (1) ~ (3) はシステムの物理的損傷状態すなわちシステム内の全基本要素 (記号 E で代表する) の損傷状態に依存して次のように展開できる。

$$P\{S_{kf}|m, l\} = \bigcup_{\pi(E) \in \Pi} P\{H_k \leq H_{cr}\} \cup \{Q_k \leq Q_{cr}\} | \pi(E)\} \cdot P\{\pi(E)|m, l\} \dots\dots\dots (4)$$

$$P\{S_{ks}|m, l\} = \bigcup_{\pi(E) \in \Pi} P\{(e_0H_k^N < H_k) \cap (f_0Q_k^N < Q_k)\} | \pi(E)\} \cdot P\{\pi(E)|m, l\} \dots\dots\dots (5)$$

$$P\{S_{km}|m, l\} = 1 - P\{S_{kf}|m, l\} - P\{S_{ks}|m, l\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\pi(E)$ は基本要素ごとに指定されたネットワークの物理的損傷状態の 1 つの実現値を示し、 $P\{\pi(E)|m, l\}$ はマグニチュード m の地震が震央 l で発生した場合に、システム内の基本要素ごとに指定された損傷発生確率に基づいて実現されるネットワークの損傷状態 $\pi(E)$ の発生確率を示す。そして、 Π は損傷ネットワーク $\pi(E)$ のすべての集合である。一方、 $P\{A|\pi(E)\}$ は損傷ネットワークの状態下で事象 A が発生する確率を示している。しかし、本研究では H_{cr}, Q_{cr} はともに確定値であると仮定しているので、損傷ネットワークが指定されれば事象 A は一意的に決まる。すなわち、 $P\{A|\pi(E)\}$ は次式で定義されることになる。

$$P\{A|\pi(E)\} = \begin{cases} 1: \text{損傷ネットワーク } \pi(E) \text{ のもとで事象 } A \text{ が発生する場合} \\ 0: \text{損傷ネットワーク } \pi(E) \text{ のもとで事象 } A \text{ が発生しない場合} \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

ところで、2.(3) でも指摘したようにシステムに含まれる基本要素の数が 200 個前後になることから損傷ネットワーク $\pi(E)$ の組合せ数は最大 3²⁰⁰ のオーダーになるため、Monte Carlo Simulation による式 (4)~(6) の実行は非現実的と考えられる。そこで、基本要素の直列システムとして構成されるリンク (記号 L で代表する) の損傷状態を基礎とするより簡単化されたネットワ

ークモデルを用いてシステムの機能破壊確率を計算することにする。このとき、式 (4)~(6) は次式のように書き換えられる。

$$P\{S_{kf}|m, l\} = \bigcup_{\pi^*(L) \in \Pi^*} P\{(H_k \leq H_{cr}) \cup (Q_k \leq Q_{cr}) | \pi^*(L)\} \cdot P\{\pi^*(L)|m, l\} \dots\dots\dots (8)$$

$$P\{S_{ks}|m, l\} = \bigcup_{\pi^*(L) \in \Pi^*} P\{(e_0H_k^N > H_k) \cap (f_0Q_k^N > Q_k)\} | \pi^*(L)\} \cdot P\{\pi^*(L)|m, l\} \dots\dots\dots (9)$$

$$P\{S_{km}|m, l\} = 1 - P\{S_{kf}|m, l\} - P\{S_{ks}|m, l\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\pi^*(L)$ はリンクごとに指定されたネットワークの物理的損傷状態の 1 つの組合せである。

したがって、第 j 断層 ($j=1\sim 4$) に対する第 k ノード ($k=1\sim 10$) に関するシステムの機能破壊確率は次式で表現されることになる。

$$P^{(j)}\{S_{kp}\} = \int_M \int_L P^{(j)}\{S_{kp}|m, l\} f^{(j)}_{M|L}(m|l) \cdot f^{(j)}_L(l) dm dl \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 p は f, m, s を示すパラメーターである。そして、 $P^{(j)}\{S_{kp}|m, l\}$ は、式 (8)~(10) が第 j 断層に対して求められたものであることを示しており、また $f^{(j)}_{M|L}(m|l), f^{(j)}_L(l)$ はそれぞれ第 j 断層におけるマグニチュードと震央位置に関する確率密度である (文献 1) の式 (7), (10) 参照)。

さらに、本研究では、

- $j=1$: San Andreas 断層
- $j=2$: San Gabriel 断層
- $j=3$: Santa Monica 断層
- $j=4$: Newport-Inglewood 断層

としている。

また、地震の発生が Poisson 過程であると仮定でき、第 j 断層における地震発生率が ν_j で与えられるとき、継続時間 T 内に対象とする 4 断層 (Fig. 2 参照) のどこかで地震が発生した場合のシステムの機能上の大損傷状態に対する破壊確率は Poisson 分布に從うところから、単位時間当たりの被害発生率 $\sum_{j=1}^4 \nu_j P^{(j)}\{S_{kf}\}$ を用いて次式で与えられる。

$$P\{S_{kf}; T\} = 1 - \exp\left[-T \sum_{j=1}^4 \nu_j P^{(j)}\{S_{kf}\}\right] \dots\dots\dots (12)$$

ただし、

$$\nu_j = \exp(\alpha_j' - \beta_j' \cdot 5) \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 α_j', β_j' は第 j 断層に沿った地震発生頻度に関するパラメーターである。

一方、システムの連結性能に関する各損傷状態の発生確率を算定する手法については、すでに文献 1) に詳述されているので、ここではその説明を割愛する。ただ

し、4. でのちほど議論される $P^{(k)}\{C_{kf} \cup C_{km}\}$ について説明すると、これは第 j 断層に沿って地震が発生した場合に、システム内のいずれかの供給基地から第 k 需要端までのすべての経路が物理的大損傷または中損傷の状態になっている確率を意味している。

3. 損傷を受けたシステムの流量解析

流量解析を実行するために、Fig. 1 のネットワークを Fig. 7 の形に変換する。図中の丸印 1~10 がノードであり、No. 11, 12, 13 のノードは供給基地を示す。各ノード間はリンクで連結されており、そのリンク内を流れる水は矢印の方向に流れているものと初期設定する。なお、3か所の供給基地も、それら自身が湧き出し口であることから仮想リンクで結ばれていることになる。そして、いくつかのリンクとノードから構成される閉回路、特にそれ自身内部に閉回路をもたない、いわゆる要素巡回路については、図示するような基準方向を設定する。

本システムの場合、ノード数 $N=13$ 、リンク数 $J=18$ 、要素巡回路数 $K=8$ 、そして供給基地 $M=3$ であり、それらの間には Euler の定理⁶⁾ に基づく次の関係が成立している。

$$J=N+K-M \dots\dots\dots (14)$$

ネットワークシステムの流量解析⁹⁾ は基本的には次の3種類の基礎方程式を解くことによって実現することができる。すなわち、

- ① 各管路の流量 Q を損失水頭 H で表現するための流量式 (J 本)
- ② 各節点に接続する管路の Q が満たすべき節点方程式 ($N-M$ 本)
- ③ 各要素閉管路を構成する管路の H が満たすべき閉管路方程式 (K 本)

本解析では、水の流量解析で一般的に使用されている次の Hazen-Williams 式を用いることにする。

$$Q=0.27853 C_H I^{0.54} D^{2.63} \text{ (m}^3/\text{s)} \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 C_H は流速係数、 I は動水勾配、 D (m) は管内

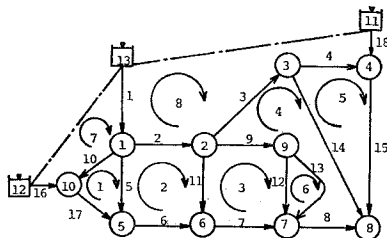


Fig. 7 Flow Network Transformed from the Original System.

Configuration of Underground Pipe

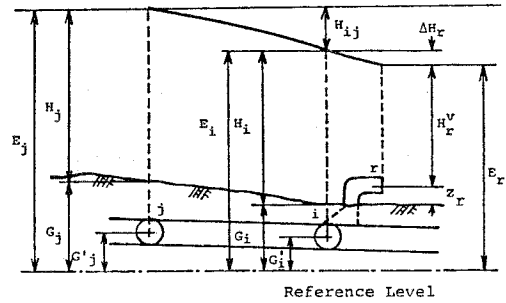


Fig. 8 Configuration of Underground Pipe.

径を示す。

Fig. 8 は第 i ノードでのエネルギー位 E_i 、水頭 H_i 、地盤高 G_i 、パイプ位置 G_i' を示したものである。

さて、第 i, j ノードを結ぶ管路の損失水頭 H_{ij} が両端のエネルギー位 E_i, E_j の差であることから、次式を得る。

$$H_{ij}=E_i-E_j \text{ (} J \text{ 本)} \dots\dots\dots (16)$$

このとき、式 (15) は式 (16) を用いると次式のように書き換えられる。

$$Q_{ij}=R_{ij}|E_i-E_j|^{a-1}(E_i-E_j) \text{ (} J \text{ 本)} \dots\dots\dots (17)$$

$$R_{ij}=0.27853 C_H D^{2.63} L_{ij}^{-0.54} \dots\dots\dots (18)$$

$$a=0.54 \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 L_{ij} はノード i, j 間の管路長である。

このとき、第 i ノードで成立する節点方程式は、

$$\sum_j Q_{ij} + \hat{q}_i + l_i = 0 \text{ (} N-M \text{ 本)} \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 \hat{q}_i, l_i はそれぞれ第 i ノードでの需要水量および漏洩水量であり、後者は末石・雄倉⁷⁾ の実験的研究により、

$$l_i = d_i (E_i - G_i')^\kappa \dots\dots\dots (21)$$

という関係で残存水頭 $E_i - G_i'$ に結びつけられる。ここで、 d_i, κ は実験定数である。

以上より、式 (17)、(20) はそれぞれ基礎方程式である流量式 (J 本) および節点方程式 ($N-M$ 本) に対応するものであり、さらに式 (16) において、損失水頭が各節点のエネルギー位に置換されることにより、各要素閉回路に関する閉管路方程式が自動的に満足されることとなり、流量解析に必要なすべての基礎方程式が準備できたことになる。

さて、ネットワークが損傷を受けた場合、各ノードから必要なだけの水量を取り出すことができるであろうか。このような状況下での流量解析について、高桑⁹⁾ の方法を用いることにする。すなわち、第 i 節点の地盤上残存水頭 H_i が許容値 H_a に等しいときには $\hat{q}_{a,i}$ だけ取り出せるようにネットワークが当初から設計されて

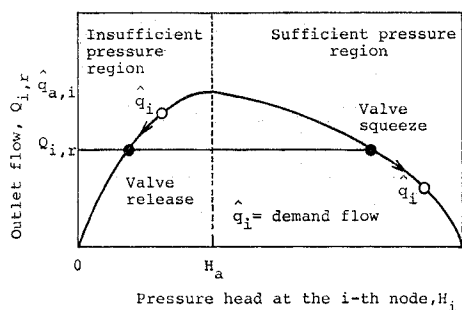


Fig. 9 Outlet Flows in Two Different States on Pressure Head.

いるものとする。したがって、

$$Q_{i,r} = \hat{q}_{a,i} \dots\dots\dots (22)$$

$$E_i - G_i = H_a \dots\dots\dots (23)$$

ここで、 $Q_{i,r}$ は第 i ノードからの取り出し水量である。このとき、需要水量 \hat{q}_i と管内流量 $Q_{i,r}$ との間に Fig. 9 に示す関係を仮定する。すなわち、 $Q_{i,r}$ が \hat{q}_i よりも大きいときは、バルブを絞って \hat{q}_i だけ取り出し、一方、 $Q_{i,r}$ が \hat{q}_i よりも小さい、すなわち需要水量を下回る水量しか取り出せないときはバルブをできるだけ開放して取り出し水量の増大を図るという考え方である。以上のことを式で表現すると次のようになる。

$$Q_{i,r} \geq \hat{q}_i : Q_{i,r} = \hat{q}_i \dots\dots\dots (24)$$

$$Q_{i,r} < \hat{q}_i : Q_{i,r} = \frac{\hat{q}_{a,i}(E_i - G_i)}{\sqrt{H_a(E_i - G_i)}} \dots\dots\dots (25)$$

4. 数値計算例と考察

(1) 使用数値

断層、埋設地盤および埋設管に関するパラメーターはいずれも文献 1) の値をそのまま使用した。そこで、それ以外の水理的条件に関するパラメーターおよび機能破壊基準に関するパラメーターについて説明する。

a) 水理的条件に関するパラメーター

対象とするネットワークシステムは基準面より 10 m の高度の水平地盤から 2 m の深さの所に埋設されているものとする。各ノードでの限界取り出し流量 $\hat{q}_{a,i}$ 、そのときの水頭 H_a および需要水量 \hat{q}_i を次のように仮定する。

$$\hat{q}_{a,i} = 3.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_a = 15.0 \text{ m}$$

$$\hat{q}_i = 2.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

また、供給基地 SA, SB, SC の水位はいずれも等しく 200 m に保持されているものとする。さらに、流速係数 C_H については、すべてのリンクで等しく 100.0 と仮定する。一方、各ノードからの漏洩水量に関する式 (20)

のパラメーター κ, d_i についてはそれぞれ次の数値を用いた。

$$\kappa = 1.15$$

$$d_i^N = 0.0005$$

$$d_i^D = 0.005$$

ここで、 d_i^N は正常運転時の第 i ノードからの漏洩水量に関するパラメーターである。一方、 d_i^D は中損傷を生じたリンクの漏洩水量を近似するために導入されたパラメーターであり、中損傷が 1 か所生じるとにリンク上流端に d_i^N の 10 倍の漏洩水量が付加されるものと仮定して上記の値 0.005 を採用した。

Table 1 はシステム各ノードに関する設定条件を示し、Table 2 は各リンクに関する管路条件を示している。また、Table 3, 4 は正常なネットワークの場合の流量解析結果を示している。

b) 破壊基準に関するパラメーター

Table 1 Numerical Conditions on Pipe and Flow at Each Node.

Node	Ground level (m)	Pipe level (m)	Flow capacity (m ³ /s)	Demand (m ³ /s)	Factor of leak
1	10.0	8.0	3.0	2.4	0.0005
2	10.0	8.0	3.0	2.4	0.0005
3	10.0	8.0	3.0	2.4	0.0005
4	10.0	8.0	3.0	2.4	0.0005
5	10.0	8.0	3.0	2.4	0.0005
6	10.0	8.9	3.0	2.4	0.0005
7	10.0	8.0	3.0	2.4	0.0005
8	10.0	8.0	3.0	2.4	0.0005
9	10.0	8.0	3.0	2.4	0.0005
10	10.0	8.0	3.0	2.4	0.0005
11	10.0	8.0	—	0.0	0.0
12	10.0	8.0	—	0.0	0.0
13	10.0	8.0	—	0.0	0.0

Table 2 Numerical Conditions on Pipe and Flow at Each Link.

Link	Node		Diameter (m)	Length (m)	Roughness of internal pipe surface
	up	down			
1	13	1	1.52	531.30	100.0
2	1	2	1.83	6134.10	100.0
3	2	3	1.22	1030.40	100.0
4	3	4	1.30	8428.35	100.0
5	1	5	1.52	3397.10	100.0
6	5	6	1.52	2068.85	100.0
7	6	7	1.37	14490.00	100.0
8	7	8	1.52	5385.45	100.0
9	2	9	1.68	5957.00	100.0
10	1	10	1.37	3453.45	100.0
11	2	6	1.52	2245.95	100.0
12	9	7	1.45	1698.55	100.0
13	9	7	1.02	1843.45	100.0
14	3	8	1.55	6971.30	100.0
15	4	8	1.73	2109.10	100.0
16	12	10	1.55	5119.80	100.0
17	10	5	1.32	861.35	100.0
18	11	4	1.73	466.90	100.0

Table 3 Numerical Result at Each Node of the Simulated Flow in the Underground Network.

Node	Energy level (m)	Flow capacity (m ³ /s)	Demand (m ³ /s)	Output flow (m ³ /s)	Leak flow (m ³ /s)
1	187.94	3.0	2.4	2.4	0.1961
2	178.40	3.0	2.4	2.4	0.1841
3	179.01	3.0	2.4	2.4	0.1849
4	194.00	3.0	2.4	2.4	0.2037
5	182.01	3.0	2.4	2.4	0.1886
6	178.25	3.0	2.4	2.4	0.1840
7	175.08	3.0	2.4	2.4	0.1800
8	183.30	3.0	2.4	2.4	0.1902
9	174.94	3.0	2.4	2.4	0.1798
10	184.86	3.0	2.4	2.4	0.1922
11	200.00	—	—	—	—
12	200.00	—	—	—	—
13	200.00	—	—	—	—

Table 4 Numerical Result at Each Link of the Simulated Flow in the Underground Network.

Link	Flow in a link (m ³ /s)	Head loss in a link (m)	Link	Flow in a link (m ³ /s)	Head loss in a link (m)
1	10.92	12.06	10	1.44	3.09
2	4.15	9.54	11	0.47	0.15
3	- 0.84	- 0.60	12	- 0.46	- 0.14
4	- 1.80	-14.99	13	- 0.17	- 0.14
5	2.73	5.93	14	- 1.63	- 4.29
6	2.79	3.76	15	6.76	10.70
7	0.68	3.18	16	3.80	15.14
8	- 2.54	- 8.22	17	2.65	2.84
9	1.94	3.47	18	11.17	6.00

ネットワークの各ノードにおいて消火活動に必要な水量を算定するために、以下の条件が成立しているものと仮定する。すなわち、ネットワークを区分する0.5マイル四方の正方形区画内には等しい密度で消火栓が分布しているものとする。そして、消火栓1基が必要とする流量を次のように設定する。

$$q_{HYD}=1.0 \text{ m}^3/\text{min}/\text{hydrant}$$

Fig. 10 に示す消火栓配置を仮定すると、斜線区域に対して2基の消火栓が必要になり、結局1正方形区画当たりの必要流量は、

$$q_{GRID}=2.13 \text{ m}^3/\text{s}/\text{grid}$$

となる。

いま、ネットワーク領域全体の $a\%$ の地区で地震時に火災が発生し、そのうち $b\%$ の地区で消火活動が可能であるとすれば、各ノードが均等に分担する場合の流量は、

$$q_{NODE}=2.52 ab \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{node}$$

となる。本数値例では、

$$a=10 (\%)$$

$$b=25 (\%)$$

の値を仮定した。したがって、

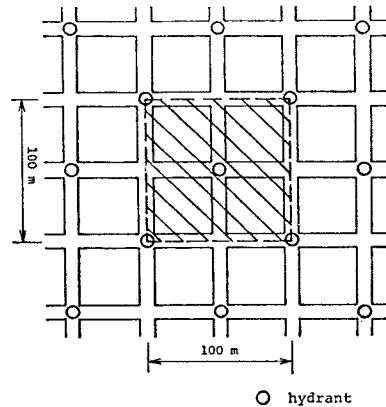


Fig. 10 Locations of Hydrants.

$$q_{NODE}=0.63 \text{ m}^3/\text{s}/\text{node}$$

すなわち、各ノードにおいて消火活動に最低必要な限界流量 Q_{cr} は、

$$Q_{cr}=0.63 \text{ m}^3/\text{s}$$

となる。一方、このときの各ノードでの最低必要水頭は $H_{cr}=15.0 \text{ m}$ と仮定する。

また、機能破壊に関する中・小損傷の領域を区分するパラメーター (**Fig. 3** 参照) を一例として、

$$e_0=50\%$$

$$f_0=70\%$$

と仮定する。

さらに、1つのリンク内に10か所以上の物理的中損傷を生じた場合には、そのリンクは実質的には物理的大損傷を生じているとみなして、**Fig. 4** に示すような物理的大損傷の場合の取り扱いをした。

最後に、Monte Carlo Simulation における繰り返し回数は計算時間の都合から100回とした。

(2) 数値計算例と考察

Fig. 11 は解析の対象とした4断層 (SAN ANDREAS 断層, SAN GABRIEL 断層, SANTA MONICA 断層, NEWPORT-INGLEWOOD 断層) に沿った断層線上の各点 l でマグニチュード m の地震が発生した場合のシステムの機能破壊確率、特に第9ノードに対する大損傷モードの破壊確率 $P^{(j)}\{S_{of}|m, l\}$ をその震央上にプロットしたものである。そのプロットの方法は各点 l 上で毎回、垂線 (縦軸) を立て、図中左下に示す目盛に従って破壊確率 $P^{(j)}\{S_{of}|m, l\}$ の値をプロットするものである。数値計算に使用した地盤および埋設管に関する値はすべて文献1)の場合と等しいものを使用した。

Fig. 11 の図の読み方について、同図の右下に一直線

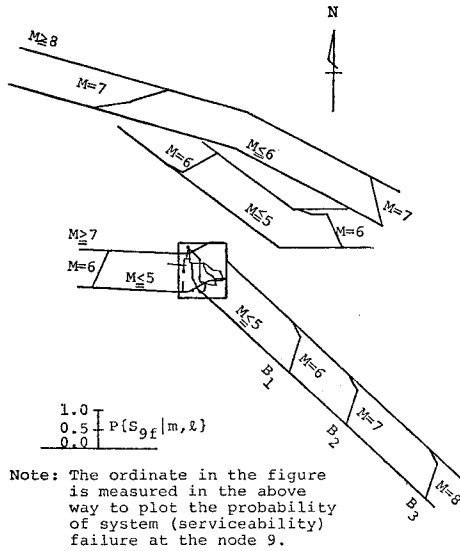


Fig. 11 Probability of System Serviceability Failure in Major Damage along the Four Faults.

に延びる NEWPORT-INGLEWOOD 断層を用いて説明する。マグニチュードが5以下 ($M \leq 5$) の地震がこの断層のどの点で発生してもシステムの機能破壊確率は0に等しいこと、 $M=6$ の場合は、ネットワークの中心から B_1 点までの区間で地震が発生した場合 B_1 点近傍を除いてその破壊確率は1に等しく、 B_1 より外側の B_1 から B_3 の区間で $M=6$ の地震が発生したときその破壊確率は0であることを示している。同図と連結性能に関する同様の図(文献1)の Fig. 5 参照)とを比較すれば、両者の全体的傾向がほぼ一致していることが理解されよう。ただし、対応する破壊確率曲線を指定するマグニチュードの大きさが異なる点に注意しなければならない。たとえば、機能性能に関連した破壊確率曲線とそれとほぼ同位置にある連結性能に関連した破壊確率曲線のマグニチュードを比較すると前者は $M=6$ であり後者は $M=7$ となっている。すなわち、ある地点で地震が発生したとき、システムの連結性能が大損傷に陥らなくても機能性能が大損傷に陥る可能性のあることを示しているといえよう。ただし、この推論は本数値例に用いた破壊基準の組合せに対する場合に限定されることはいうまでもない。

次に、これら4断層において発生した地震がシステムの連結性能と機能性能に与える影響は互いに等しいのかそれとも4断層それぞれとネットワークシステムとの地理的關係の差異による影響が認められるのかどうかを検討する。ところで、Fig. 1 に示すように、SAN ANDREAS 断層と SAN GABRIEL 断層とはいずれもシステムの北東部にあって、北西から南東に向けて断層は横たわっている。一方、SANTA MONICA 断層はシ

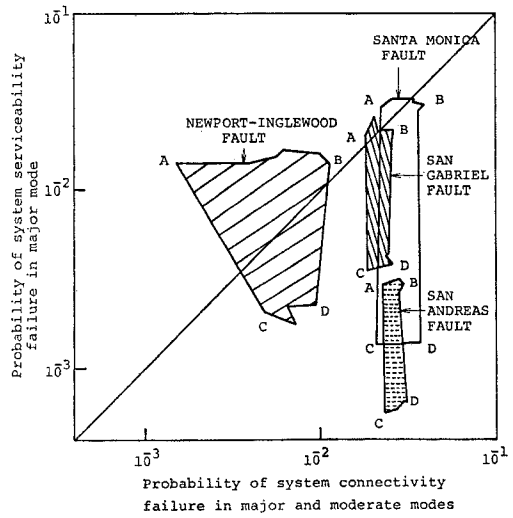


Fig. 12 Comparison between System Serviceability and Connectivity in the Probabilities of System Failure of the Four Faults.

ステム内を東西に横断しており、震央と各ノードとの位置が最も近くなるという特徴をもっている。また、NEWPORT-INGLEWOOD 断層はシステム内のノード7に近い所から南東方向に張り出しており、強い方向性をもつ断層ということができよう。Fig. 12 はこれら4断層 ($j=1\sim 4$) と両性能との関係を10個の需要端ノード ($k=1\sim 10$) について図示したものである。すなわち、同図縦軸には式(11)で与えられるところの第 j 断層に対する第 k ノードに関するシステムの機能破壊確率 $P^{(j)}\{S_{kf}\}$ をとり、横軸にはそれに対応する連結性能に関する破壊確率 $P^{(j)}\{C_{kf} \cup C_{km}\}$ をとった。ただし、 $j=1\sim 4, k=1\sim 10$ 。ここで連結性能に対して大中両損傷の破壊確率を用いたのは、流量解析用の損傷ネットワークモデルを作成する際に大中両損傷状態が関係したこと、および結果的に C_{kf} と C_{km} の和集合と S_{kf} との組合せがそれ以外の組合せよりも有意義であったからである。

Fig. 12 には4断層に対応する4つの閉曲線が示されている。これらの閉曲線は、各ノード (k) に対応する点 ($P^{(j)}\{C_{kf} \cup C_{km}\}, P^{(j)}\{S_{kf}\}$) を互いに交差しないように結んだものであり、各断層ごとに特徴的な形状を示している。その特徴を列挙すると、

- ① NEWPORT-INGLEWOOD 断層 ($j=4$) に対する閉曲線は、他の3断層の閉曲線に比較して、その形状および占有する位置が異なる。
- ② 逆に、NEWPORT-INGLEWOOD 断層以外の3断層はいずれも長方形を示し、占有する位置も連結性能に関してはほぼ等しい。
- ③ SAN ANDREAS 断層 ($j=1$) と SAN GA-

BRIEL 断層 ($j=2$) に対する閉曲線は互いに相似であるが、前者の機能破壊確率は相対的に小さい。

- ④ SANTA MONICA 断層 ($j=3$) の閉曲線は ③ の 2 つの閉曲線と相似形であるが、それらよりも大きい。これは、連結性能、機能性能の両性能について各ノードの破壊確率が互いに前二者の場合以上にばらついていることを示している。
- ⑤ 4 断層に共通する特徴として線分 AB 上にノード $k=1, 2, 5, 6, 7, 9$ に対応する点が載り、線分 CD 上にノード $k=3, 4, 8, 10$ に対応する点が載り、両線分の間隔が AC, BD 間の間隔より大きく隔てられている特色をもつ。このことは、各ノード間における破壊確率のばらつきは、機能性能の方が連結性能よりも大きいことを示している。またノード 3, 4, 8, 10 の機能破壊の可能性がどの方向からの地震に対しても比較的小さいことを示している。
- ⑥ SAN ANDREAS 断層で発生する地震はその他の断層の場合に比較して、システムの機能性能よりも連結性能の破壊可能性を大きくする傾向を示している。

以上の諸特徴と前述の 4 断層の地理的配置の特徴を比較してみると、NEWPORT-INGLEWOOD 断層の著しい方向性が ① の特徴と関連しており、SAN ANDREAS 断層と SAN GABRIEL 断層の平行的配置が ③ の特徴を生み、前者が後者よりもシステムに対して遠距離にあることが、⑥ の特徴を生み出したものと考えられる。また、SANTA MONICA 断層がネットワーク内を貫通していることにより震央と各ノード間の震央距離が小さくなって各ノード間の差異を際立たせることになり、④ の結果を招いたものと推察される。以上より、断層とネットワークシステムの相対的な位置関係の差がシステムの破壊確率に的確に反映されることが確認された。これは空間的広がりをもつシステムに固有のものであることに注意しなければならない。

Fig. 13 は SAN FERNANDO 地震の場合を simulate したものである。ネットワーク内のノード (黒丸)

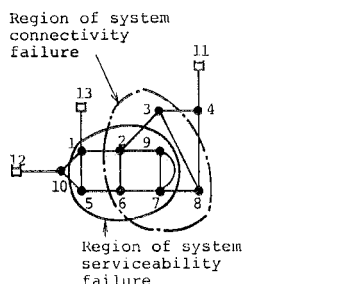


Fig. 13 Comparison between System Serviceability and Connectivity in the Simulated Result of SAN FERNANDO Earthquake.

を囲む実線と一点鎖線はそれぞれ機能損傷 $\{S_{kf}\}$ と連結性能の損傷 $\{C_{kf} \cup C_{km}\}$ に対応しており、その破壊確率が相対的に大きなノードを囲むように描いたものである。全体的な特徴として、両曲線の囲む範囲は必ずしも完全には一致しないことである。一方、2 つの曲線の囲むノードの中で共通しているのは、2, 6, 7, 9 のノードで、これらはいずれも 3 つの供給基地 (11, 12, 13) から最も遠いところに位置している。この共通領域内のノードは前述の考察 ⑤ の結果からも推察できるように、どこで地震が発生しても、機能損傷と連結性能に関する損傷の両方を同時に発生しやすい地区であることを示している。その意味で、耐震対策上最も検討されるべき地区といえよう。

5. 結 論

本研究は都市内埋設ライフラインネットワークシステムの機能性能に対する耐震性を評価する目的で、危険度解析の方法論を展開したものである。

地震時防災の観点からは地震直後の火災に対する消火活動を保証することが重要であるが、この活動を支える水道ネットワークシステムの地震時の給水性能について本研究で展開した危険度解析手法を適用した。数値計算例として Los Angeles 市内の水道パイプラインネットワークシステムを採用し、その理想化されたモデルに対する地震時被害の推定を Monte Carlo Simulation によって実行した。

地震によるネットワークシステムの被害は、管路の破断・漏洩という物理的損傷の形で発生し、これに従属してシステムの機能損傷という第 2 の被害をもたらす。前者および機能性能に関する必要条件についてはシステムの連結性能の問題としてすでに文献 1) で論じているので、本研究ではそこでの結果を与件として後者のシステムの機能性能の問題を主題として取り上げた。得られた成果をまとめると次のとおりである。

(1) 空間的広がりをもつネットワークシステムでは、地震が発生する断層とネットワークとの相対的位置関係によってシステムの破壊確率が的確に変化することが確認された。

(2) システムの連結性能と機能性能の地震時の危険度が比較検討された。その結果、両者は完全には一致せず、両方の損傷を被るのは供給基地から最も遠いノードの集まる地区であった。これらの情報は耐震対策をとるべき地区の選定に有用な判断資料を与えることになろう。

本研究では、米国西海岸地帯の地震環境をモデル化して取り扱ったが、本研究の手法を日本国内の主要都市の

ライフラインシステムに対して適用してゆくとき、必ずしも地震の発生源となるべき断層位置を明確に決定できない場合が想定される。

その際には、断層線の代わりに、2次元的な広がりをもった潜在的地震発生地域ごとに面積分を式(11)において実施することによって同様の解析を実施することができよう。

以上の研究を通して得られた各種の情報は、今後、ライフラインシステムの耐震設計法を改善してゆくうえで有用な情報を提供してゆくものと信じる。しかしながら本研究で採用したさまざまな仮定やモデル化の方法について十分に再検討し、より合理的な危険度解析の方法論を展開することなど数多くの課題が残されているといわねばならない。

最後に、本研究が米国科学財団の資金援助(Grant No. NSF-PFR-78-15049)によって実現できたことに對し、同財団に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Shinozuka, M. and T. Koike : Seismic Risk of Underground Lifeline Systems Resulting from Fault Movement, Proceedings of the 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Stanford University, California, pp. 663~672, August, 1979.
- 2) Shibata, H. and M. Tsuchiya : Fundamental Concept of Aseismic Design of Earthquake Resistant Lifeline Systems and Industrial Facilities, The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, pp. 354~367, 1977.
- 3) 川上英二・田村重四郎 : 上水道管網システムの機能上の耐震性の評価方法について, 第34回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp. 340~341, 1979年10月.
- 4) Oppenheim, I.J. : Vulnerability of Transportation and Water Systems to Seismic Hazard Methodology for Hazard Cost Evaluation, The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, pp. 394~409, 1977.
- 5) Fenves, S.J. and K.H. Law : Expected Flow in a Transportation Network, Proceedings of the 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Stanford University, California, pp. 673~682, August, 1979.
- 6) 高桑哲男 : 配水管網の解析と設計, 森北出版(株), 東京, 1978年.
- 7) 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.

(1980.2.12・受付)