京都大学防災研究所年報　第35号 B-2　平4．4
Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 35 B-2, 1992

システム間相互連関を考慮した都市ライフライン系の地震リスク評価法

能島　暢呂・加藤　多郎・亀田　弘行

SEISMIC RISK ASSESSMENT OF URBAN LIFELINES UNDER SYSTEM INTERACTIONS

By *Nobuoto* NOJIMA, *Taro* KATO and *Hiroyuki* KAMEDA

Synopsis

A probabilistic method to evaluate the seismic risk of urban lifeline network systems is presented with emphasis on the interactive aspects of lifeline earthquake disaster. The probability of system malfunction caused by damage interaction and the damage to the system itself is assessed. System interaction is quantified on a probability basis in terms of four kinds of importance factors; Birnbaum's structural importance, criticality importance, Fussell-Vesely component importance, and cross impact factor. These factors are conveniently used to compare effectivity of several alternatives of earthquake disaster countermeasures. An illustrative example of seismic risk assessment of water supply system is presented. Taking into account impact of functional disater propagation due to electric power failure, probability of loss of water service is evaluated. Besides, a scenario of establishing a disaster prevention action is shown.

1．序　　論

「システム」は，所定の目的を達成するために構成された要素の集合であり，単なる要素群にはない機能を発揮する反面，一部の構成要素の欠落の影響が，システム全体の機能障害に発展するという弱点を持つ。ライフライン地震工学においては，システムのこうした特質を考慮し，構成要素の強化のみならず，ネットワーク・システムとしての地震時信頼度を向上させる努力がなされ，実際のライフライン系にその成果が取り入れられてきた。

この考えをもう一歩進めると，都市活動を支える都市ライフライン施設も，多種のライフライン系からなる一つのシステムとして捉えることができる。個々のライフライン系は本来の機能を分担するが，相互に物理的・機能的な接点を有するため，広域的に被害が多発する地震時には，各ライフライン系の地震時被害の影響が，お互いに波及するおそれがある。個々のライフライン系を結合している「システム・リンク」，即ち相互の関連の仕方を改善することによって，ライフライン全体系の信頼性を向上させることが重要である。

筆者らは，ライフライン系の地震時相互連関を，(a) 物理的被害波及，(b) 機能的被害波及，(c) 復旧段階での相互影響，(d) システム間代替性によるバックアップ機能，および (e) ライフライン関連の複合災害に分類した[1),2)]。このうち，地震被害発生直後から復旧段階に入るまでのシステム機能に対して

最も直接的に影響を及ぼすのは，システム間の相互依存体系の破綻による機能的被害波及であることが，既往地震の相互連関の分析から明らかにされている[3]。

ライフライン地震工学の分野において，システム信頼性解析は重要な役割を果たしており，数多くの研究の蓄積がある。需給節点の連結性を求める方法としては，グラフ理論や確率論を応用した厳密解法[4),5)]や，モンテカルロ法によるシミュレーション[6)]など，構成要素の地震時信頼度を積み上げるシステム信頼性解析手法が用いられる。さらに，被災ネットワークのフロー特性，例えば漏水によるエネルギー損失を考慮に入れ，より現実に即してライフライン機能の充足率を評価する研究[7)-9)]が行われている。システム信頼性解析の解析量は，システム規模とともに指数関数的に膨大化するが，効率的に高精度の解を求めるアルゴリズムも提案されている[10),11)]。

以上の研究では，ライフライン系の地震時信頼性解析は，単独のシステムを対象として行われている。これは，相互連関を考慮することの必要性が認識されていなかったことと，単一のシステムとして取り扱うことの容易さが優先されたことに原因があると考えられる。

複数のライフラインを対象として，地震時機能障害や復旧過程予測を行った研究は数例挙げられる。和泉ら[12)]は，ガス・電力・上水道システムの復旧プロセスを表現するシステム・ダイナミクス（SD）モデルを構築し，都市機能の回復を総合的に評価した。また星谷らは，FSM（fuzzy structural modeling）を用いてライフライン機能被害の相互連鎖を定性的に構造化し，さらに電力・上水道の供給網を対象とするSDモデルによって復旧予測を行った[13),14)]。しかし，地震時信頼性評価の問題に相互連関を取り入れた研究は，その重要性が指摘されていながら[15)]きわめて少なく，佐藤・伯野[16)]がライフライン・システム相互の影響連関を表にまとめ，相互依存関係にある2システムの単純なモデルを対象とした解析を試みた程度である。

本研究はこのような背景を鑑み，地震時の機能的被害波及を考慮したライフライン系のリスク分析手法を構築し，相互連関を視野にいれた地震防災対策の策定に有用な定量的評価指標を提案するものである。

筆者らは，クロス・インパクト法の概念を応用して，ライフライン系の機能的依存体系が破壊された場合の被害波及について検討し，相互連関のインパクトを確率論的に表現する手法を提案した[1),2)]。システム間の影響度合いを，各ライフラインのシステム特性，被害の規模，および地震防災体制によって規定し，影響波及をクロス・インパクト係数という単一のパラメータで記述した。本研究ではこの手法を一般化し，クロス・インパクト係数を，信頼性解析の分野における重要度係数の一つとして位置づけて改めて定式化するとともに，従来用いられてきたBirnbaumの確率重要度，クリティカリティー重要度，Fussell-Veselyの要素重要度とあわせて，システム間相互連関を多面的に考察する。

以下，**2.** および **3.** で解析手法の具体的な内容について説明し，**4.** ではその適用例を示すこととする。

2．相互連関を考慮したライフライン系の地震リスク分析の手法

あるシステム（システム1とする）が，外部システム（システム2，3，…）の機能に依存している場合，地震時に外部システムの機能がマヒすると，その影響がシステム1に波及する。本研究の目的は，こうしたライフライン・システム間の被害波及の影響を取り入れたリスク分析を行うことである。

本研究で用いる解析フローを **Fig. 1** に示す。簡単のため，外部システムからシステム1への被害波及だけを考慮するものとする。第1段階では，ライフライン系を，ノードとリンクで構成されるネットワークにモデル化する。ただし，外部システムとの接合点を介して波及する被害の影響を考慮するため，システム間の被害波及構造をET（event tree；事象樹木）で記述する。第2段階では，外部システムを取り込んで一体化したネットワークに対して，需給節点連結性を基準とするシステム信頼性解析を行う。ここでは，システム機能喪失の生起モードを最小カット・セット列挙によって記述し，システム機能喪失確率

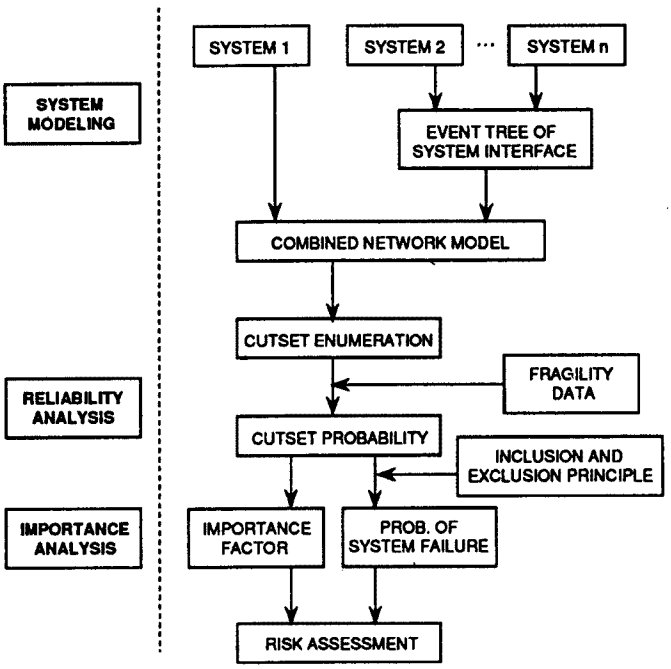


Fig. 1. Flow chart of seismic risk analysis of lifelene systems under system interactions.

を求める方法を採用する。第3段階では，**3.** で述べる重要度解析を行い，外部システムの及ぼす影響の度合いや，防災対策の効果などのリスク評価を行う。モデル化の例を次に示す。

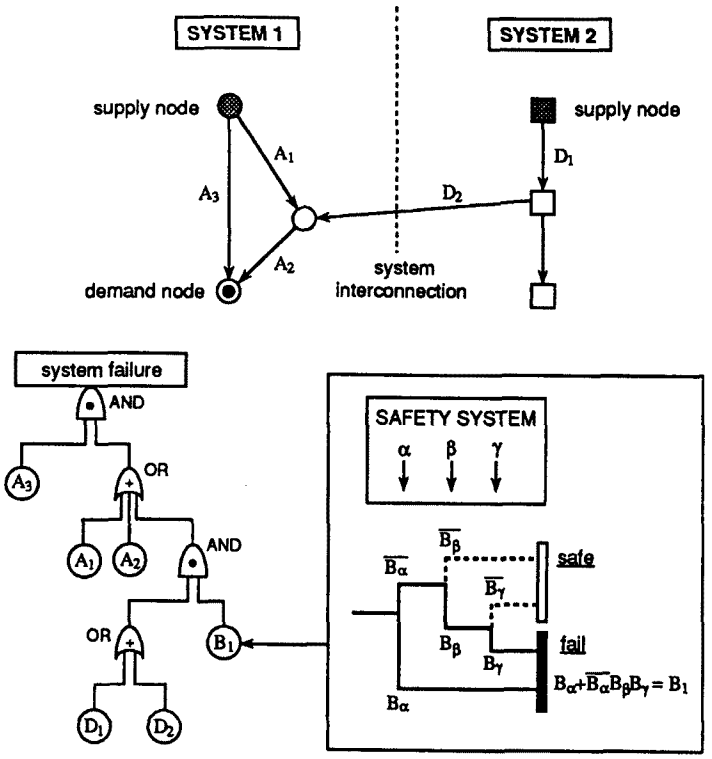
（1） 接続点が単一のモデルの例

Fig. 2 は，他システムに依存しているノードが単一の最も単純なモデルである。システム1の需要ノードにおいて，システム1のサービスが停止することを，「システム機能喪失」と規定する。システム1の供給ノードから需要ノードを結ぶパス $\{A_1, A_2\}$ か $\{A_3\}$ のいずれかが健全であれば，需給ノード間の連結性が満たされる。中継ノードはシステム2の機能に依存しており，システム2からのパスは，$\{D_1, D_2\}$ である。システム2の被害の影響波及を防止するために，中継ノードに3段階の安全装置 α, β, γ が用意されており，α が非作動か，β と γ が同時に非作動となった場合，システム1への影響波及が表面化すると仮定する。安全装置とは，例えばシステム2の機能に対するバックアップ設備をさす。ブール代数で事象 $(B_\alpha+B_\beta B_\gamma)$ と表現される影響波及をまとめて事象 B_1 と表す。ここでブール代数の和と積はそれぞれ論理和，論理積を意味する。

次に，最小カット・セットの列挙を行ってシステム機能喪失確率を算出する。本研究では，最小カット・セットの抽出と確率演算にFTA（fault tree analysis，故障樹木解析）[17] および包除原理（inclusion-exclusion principle）を用いた。さらに，**3.1** に述べる方法で各種の重要度係数を算定し，システム2がシステム1に与える影響を定量的に求める。

（2） 接続点が複数のモデルの例

Fig. 3 は，2つの中継ノードにおいてシステム2の機能に依存するモデルである。ただし，B_1 と B_2 を，両中継ノードにおける機能的障害波及を表す事象とする。また **Fig. 4** は，2つの中継ノードにおいてそれぞれシステム2とシステム3の機能に依存するモデルである。このように，外部システムに依存しているノードが複数の場合でも，接続点が単一の場合と同様の方法に従う。つまり，最小カット・セットの列挙と分離，発生確率の算出，重要度係数の算出を行い，外部システムがシステム1に与える影響を定



- system malfunction at demand node ··· event $(A_1A_3 + A_2A_3 + B_1D_1A_3 + B_1D_2A_3)$
- malfunction of system 2 ··· event $(D_1 + D_2)$
- failure mode due to malfunction of system 2 ··· event $(B_1D_1A_3 + B_1D_2A_3)$
- failure mode due to malfunction of system 1 ··· event $(A_1A_3 + A_2A_3)$

Fig. 2. Two-systems model with a single interconnection.

量的に求める。

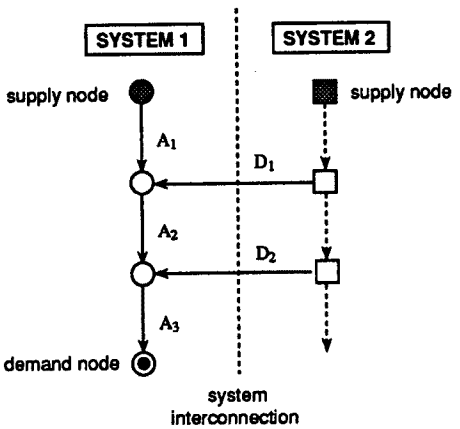
3．重要度係数によるシステム間相互連関の定量化

3.1 重要度係数の定義式

システムの機能喪失確率を効率よく低減するには，ユニット（システム構成要素）の破壊確率$\boldsymbol{P}=(p_1, \cdots p_i, \cdots p_n)$と，システム機能喪失確率$g(\boldsymbol{P})$の関係を知ることが重要である。この関係を表す指標に，重要度係数[18]と呼ばれる指標がある。以下，3つの代表的な重要度係数の特徴をまとめるとともに，新たにクロス・インパクト係数を提案する。

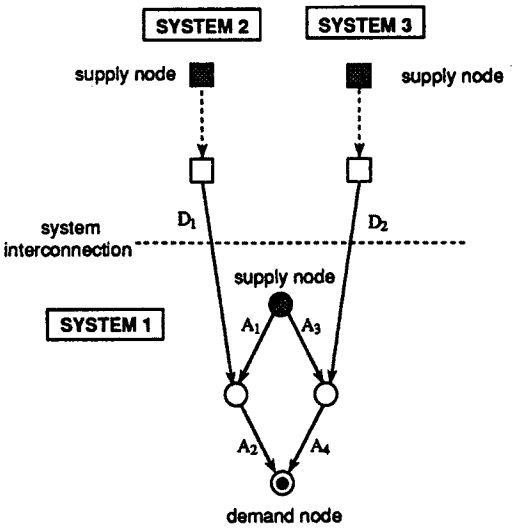
（1） Birnbaumの確率重要度 (Birnbaum's structural importance)

$$\Delta g_i=\frac{\partial g(\boldsymbol{P})}{\partial p_i}=g(1_i, \boldsymbol{P})-g(0_i, \boldsymbol{P})=\frac{g(\boldsymbol{P})-g(0_i, \boldsymbol{P})}{p_i} \quad \cdots\cdots (1)$$



- system malfunction at demand node ···
  event $(A_1 + A_2 + A_3 + B_1D_1 + B_2D_2)$
- malfunction of system 2 ···
  event $(D_1 + D_2)$
- failure mode due to malfunction of system 2 ···
  event $(B_1D_1 + B_2D_2)$
- failure mode due to malfunction of system 1 ···
  event $(A_1 + A_2 + A_3)$

Fig. 3. Two-systems model with multiple interconnections.



- system malfunction at demand node ···
  event $(A_1A_3 + A_1A_4 + A_2A_3 + A_2A_4 + B_1D_1A_3 + B_1D_1A_4 + B_2D_2A_1 + B_2D_2A_2 + B_1D_1B_2D_2)$
- malfunction of system 2 ···
  event $(D_1 + D_2)$
- failure mode due to malfunction of system 2 ···
  event $(B_1D_1A_3 + B_1D_1A_4 + B_2D_2A_1 + B_2D_2A_2 + B_1D_1B_2D_2)$
- failure mode due to malfunction of system 1 ···
  event $(A_1A_3 + A_1A_4 + A_2A_3 + A_2A_4)$

Fig. 4. Three-systems model with multiple interconnections.

ただし，$(1_i, \boldsymbol{P}) = (p_1, \cdots, p_{i-1}, 1, p_{i+1}, \cdots, p_n)$，$(0_i, \boldsymbol{P}) = (p_1, \cdots, p_{i-1}, 0, p_{i+1}, \cdots, p_n)$ である。これは，システム機能喪失確率の変化量の，ユニット i の破壊確率の変化量に対する比，つまりシステム機能喪失確率の感度を表すものである。いいかえると，「ユニット i の破壊がシステム機能喪失を決定づける」状態にある確率である。

（2） クリティカリティー重要度（criticality importance）

$$I^{CR}_i = \lim_{\Delta p_i \to 0} \frac{\dfrac{\Delta g(\boldsymbol{P})}{g(\boldsymbol{P})}}{\dfrac{\Delta p_i}{p_i}} = \Delta g_i \cdot \frac{p_i}{g(\boldsymbol{P})} = \frac{g(\boldsymbol{P}) - g(0_i, \boldsymbol{P})}{g(\boldsymbol{P})} \quad \cdots\cdots (2)$$

システム機能喪失確率の変化率の，ユニット i の破壊確率の変化率に対する比で定義される。具体的には，システム機能喪失が生じたという条件のもとで，ユニット i がクリティカルな状態にある確率を表す。Birnbaum の確率重要度に，p_i に比例した重みをかけた形となっている。

（3） Fussell-Vesely の要素重要度（Fussell-Vesely component importance）

システム機能喪失の発生モードは，特定のユニット i の破壊が関連するモードと，関連しないモードに分割できる。**Table 1** に示すように，i を含む最小カット・セットを $\mathbf{K}_j^i (j = 1, \cdots, k^i)$ とし，i を含ま

Table 1. Separation of minimal cut sets considering the existence of component i

probability	minimal cut set	minimal cut vector
$g_i(\mathbf{P})$	$K_1^i=\{\cdots, i, \cdots\}$ $K_2^i=\{\cdots, i, \cdots\}$ $\vdots$ $K_{k^i}^i=\{\cdots, i, \cdots\}$	$(\cdots, 1_i, \cdots)$ $(\cdots, 1_i, \cdots)$ $\vdots$ $(\cdots, 1_i, \cdots)$
$g_{\bar{i}}(\mathbf{P})=g(0_i, \mathbf{P})$	$K_1^{\bar{i}}=\{\cdots, \cdots\}$ $K_2^{\bar{i}}=\{\cdots, \cdots\}$ $\vdots$ $K_{k-k^i}^{\bar{i}}=\{\cdots, \cdots\}$	$(\cdots, 0_i, \cdots)$ $(\cdots, 0_i, \cdots)$ $\vdots$ $(\cdots, 0_i, \cdots)$

ない最小カット・セットを $\mathbf{K}_j^{\bar{i}}(j=1, \cdots, k-k^i)$ とする。二つに分離された最小カット・セット群のそれぞれの発生確率を $g_i(\boldsymbol{P})$ および $g_{\bar{i}}(\boldsymbol{P})(=g(0_i, \boldsymbol{P}))$ とする。Fussell-Vesely の要素重要度は,

$$I_i^{FV}=\frac{g_i(\boldsymbol{P})}{g(\boldsymbol{P})} \quad \cdots\cdots (3)$$

で定義され, システム機能喪失が生起したという条件のもとで, ユニット i の破壊が関連する破壊モードが生じている確率を表す。つまり, ユニット i の破壊がシステムの機能喪失にどの程度寄与しているかを表す指標である。

(4) クロス・インパクト係数 (cross impact factor)

以上の3つの重要度に加えて, クロス・インパクト係数を次式によって定義する。

$$I_i^{CIF}=\frac{g_i(\boldsymbol{P})}{p_i} \quad \cdots\cdots (4)$$

これは, ユニット i が破壊したという条件のもとで, ユニット i の破壊が関与する破壊モードが生じている確率である。つまり, ユニット i の破壊がシステムの機能喪失に発展する確率を表すから, ユニット i からシステムへの被害波及の可能性を端的に表現している。

式(1)～式(4) の右辺の分子に注目すると, Δg_i と I_i^{CR} はユニット i のクリティカルな状態に注目しているのに対し, I_i^{FV} と I_i^{CIF} はユニット i が関連する破壊モードに注目しているので, ユニット i がクリティカルであるかどうかは問題としない。従って, 次の大小関係が成立することは明らかである。

$$0\leq \Delta g_i \leq I_i^{CIF} \leq 1, \quad 0\leq I_i^{CR} \leq I_i^{FV} \leq 1 \quad \cdots\cdots (5)$$

以上の重要度係数は, 単一のユニットの破壊とシステムの破壊との関連を, 確率論的に表現するものであった。これらを, 着目するユニットが複数である場合に適用できる重要度に拡張する。いま, システムを構成する n 個のユニットの集合 C のうち, m 個のユニットからなる部分集合 $S=\{s_1, \cdots, s_l, \cdots, s_m\}$ に注目する。確率 p_S を, S に含まれるユニットのいずれかが破壊する確率

$$p_S=\coprod_{l=1}^{m} p_{s_l}=1-(1-p_{s_1})(1-p_{s_2})\cdots(1-p_{s_m}) \quad \cdots\cdots (6)$$

と定義する。また, S に含まれる要素についてのみ $p=0$ としたユニットの破壊確率を $(0_S, \boldsymbol{P})$ とする。

集合 S に含まれるユニットを少なくとも一つ含む最小カット・セットの集合を $\mathbf{K}_j^S(j=1, \cdots, k^S)$ とし, それ以外の最小カット・セットの集合を $\mathbf{K}_j^{\bar{S}}(j=1, \cdots, k-k^S)$ とする。**Table 2** に, $S=\{u, v\}$ とした場合の例を示す。以上の記号を用いて, 式(1)～(4) における添字 i を添字 S に変えた表記によっ

Table 2. Separation of minimal cut sets considering the existence of component u and v

probability	minimal cut set	minimal cut vector
$g_S(\mathbf{P})$	$K_1^S=\{\cdots, u, \cdots\}$ $K_2^S=\{\cdots, v, \cdots\}$ ⋮ $K_k^S{}_S=\{\cdots, u, \cdots, v, \cdots\}$	$(\cdots, 1_u, \cdots, 0_v, \cdots)$ $(\cdots, 0_u, \cdots, 1_v, \cdots)$ ⋮ $(\cdots, 1_u, \cdots, 1_v, \cdots)$
$g_S(\mathbf{P})=g(0_S, \mathbf{P})$	$K_1^{\bar{S}}=\{\cdots, \cdots, \cdots\}$ $K_2^{\bar{S}}=\{\cdots, \cdots, \cdots\}$ ⋮ $K_{k-k^S}^{\bar{S}}=\{\cdots, \cdots, \cdots\}$	$(\cdots, 0_u, \cdots, 0_v, \cdots)$ $(\cdots, 0_u, \cdots, 0_v, \cdots)$ ⋮ $(\cdots, 0_u, \cdots, 0_v, \cdots)$

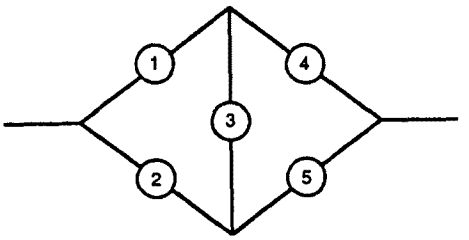


Fig. 5. Reliability graph of a system composed of five components.

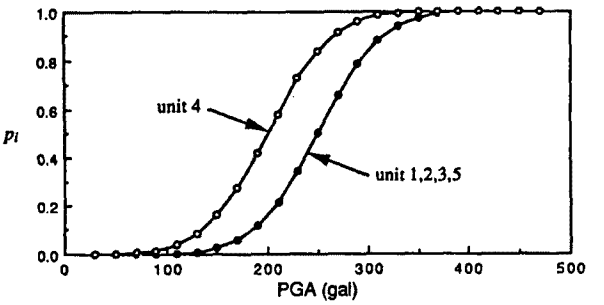


Fig. 6. Fragility curve.

て拡張重要度 Δg_S, I_S^{CR}, I_S^{FV}, I_S^{CIF} を定義する。

本研究では，システム間の相互連関に関する事象に着目して種々の重要度係数を算定し，システム間の影響波及を確率論的に表現する。

3.2 重要度係数の計算例

Fig. 5 の信頼性グラフで表現されるシステムに，**Fig. 6** のフラジリティー曲線を与えた場合のシステム信頼性解析および重要度係数の試算例を以下に示す。フラジリティー曲線の横軸は，便宜的に最大地動加速度（PGA）とした。

まず，ユニット 1 の破壊がシステム両端の連結信頼性に及ぼす影響を見るため，着目するユニットを {1} とした場合を示す。分離したカットセット群 $\mathbf{K}^1$ と $\mathbf{K}^{\bar{1}}$ に対応するシステム機能喪失確率 $g_1(\boldsymbol{P})$, $g_{\bar{1}}(\boldsymbol{P})$ は **Fig. 7** のようになる。**Fig. 8** は 4 種の重要度を比較したものである。PGA が小さくユニットの破壊確率が小さい場合，Δg_1 と I_1^{CIF} および

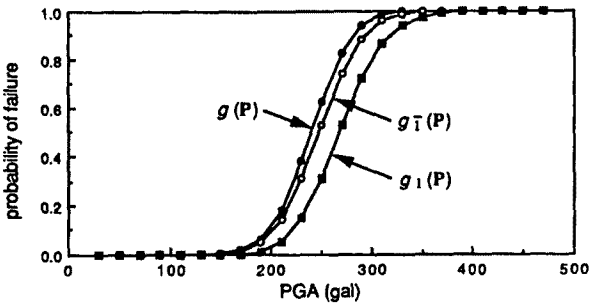


Fig. 7. Probability of system failure.

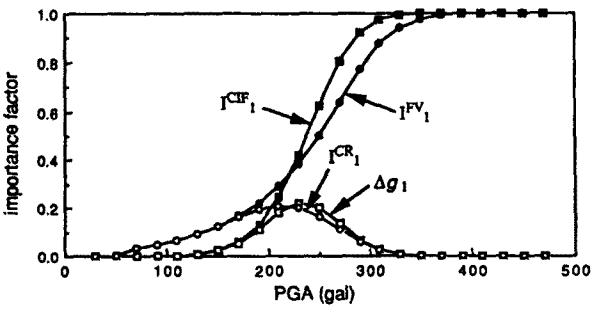


Fig. 8. Importance factors of component 1.

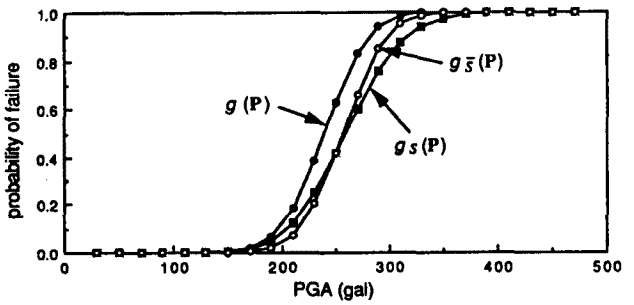


Fig. 9. Probability of system failure.

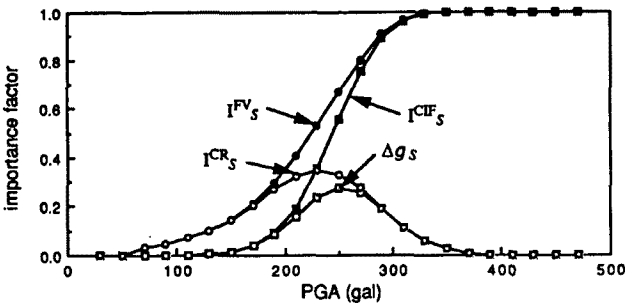


Fig. 10. Importance factors of components 1 and 3.

I_1^{CR} と I_1^{FV} はそれぞれ近い値をとる。しかしPGAが増加し，ユニットの破壊確率が大きくなるに伴って，$g(\boldsymbol{P})$ と $g_{\bar{1}}(\boldsymbol{P})$ はともに1に収束するため，Δg_1 と I_1^{CR} は0に収束する。一方，I_1^{CIF} と I_1^{FV} は，PGAの増加とともに1に収束する。

次に，着目するユニットを $S=\{1, 3\}$ とした場合，$g_S(\boldsymbol{P})$，$g_{\bar{S}}(\boldsymbol{P})$ は **Fig. 9** のようになり，4種の重要度は **Fig. 10** のようになる。おおむね同時の傾向がみてとれるが，Δg_S，I_S^{CR}，I_S^{FV} がそれぞれ Δg_1，I_1^{CR}，I_1^{FV} より大きな値をとっている。

4．停電の影響を考慮した上水道機能の地震リスク分析

4.1 解析対象システムの概要

以上に示したライフライン地震時相互連関の影響評価手法の適用例を示す。水は他に代替物が存在せず，かつ災害時の重要性が高い。また上水道システムを構成する基幹施設の多くで，電力システムに依存しており，既往地震において停電が断水の原因となった事例が報告されている[3]。これらより，本研究では影響を受けるシステムを上水道システム，影響を与えるシステムを電力システムとし，停電の影響を考慮した，上水道機能の地震リスク分析を行った。

現実に近いシステムを想定するため，大阪市上水道システムを参考にして上水道システムのモデルを作成した。管種構成比率は，導・送水管ではダクタイル鋳鉄管（DCIP）53%，溶接鋼管47%，配水管ではダクタイル鋳鉄管（DCIP）66%，鋳鉄管（CIP）32%である。ここで用いる配水管網のモデルを **Fig. 11** に示す。4つの配水区Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳからなる配水システムのうち，導・送水管と配水幹線，および取水場，浄水場，配水場（1次，2次），ポンプ場の基幹施設をモデル化した。500㎜以上の枝管が分岐する125箇所を需要ノードと考え，159本のリンクと134個のノードからなるネットワークとした。各配水区における給水はほぼ独立に行われている。

電力に依存する受電ノードは，取水場（ノード1，70），浄水場（ノード2，23，71），配水場（ノード3，24，31，46，54，110），加圧ポンプ場（ノード10）の計12個のノードである。各受電ノードにおける受電形態は，一回線受電（ノード10，31，46，110），同一変電所からの二回線受電（ノード1，2，3，24，54，70），同一変電所からの四回線受電（ノード23），異なる2つの変電所からの二系統受電（ノード71）の4形態である。

配水区域の中央部（ノード52，53，111～115，121，133，134）は高台であるので，2次配水場（ノード10，31）と加圧ポンプ場（ノード46）でポンプ加圧されたのちに配水される。南西部（ノード32～34，41）は水源から遠いため，2次配水場（ノード31）でポンプ加圧が行われている。

4.2 被害確率の算定

震度Ⅴ程度の地震にみまわれた場合の被害を想定し，宮城県沖地震の仙台市における鋳鉄管（CIP）と

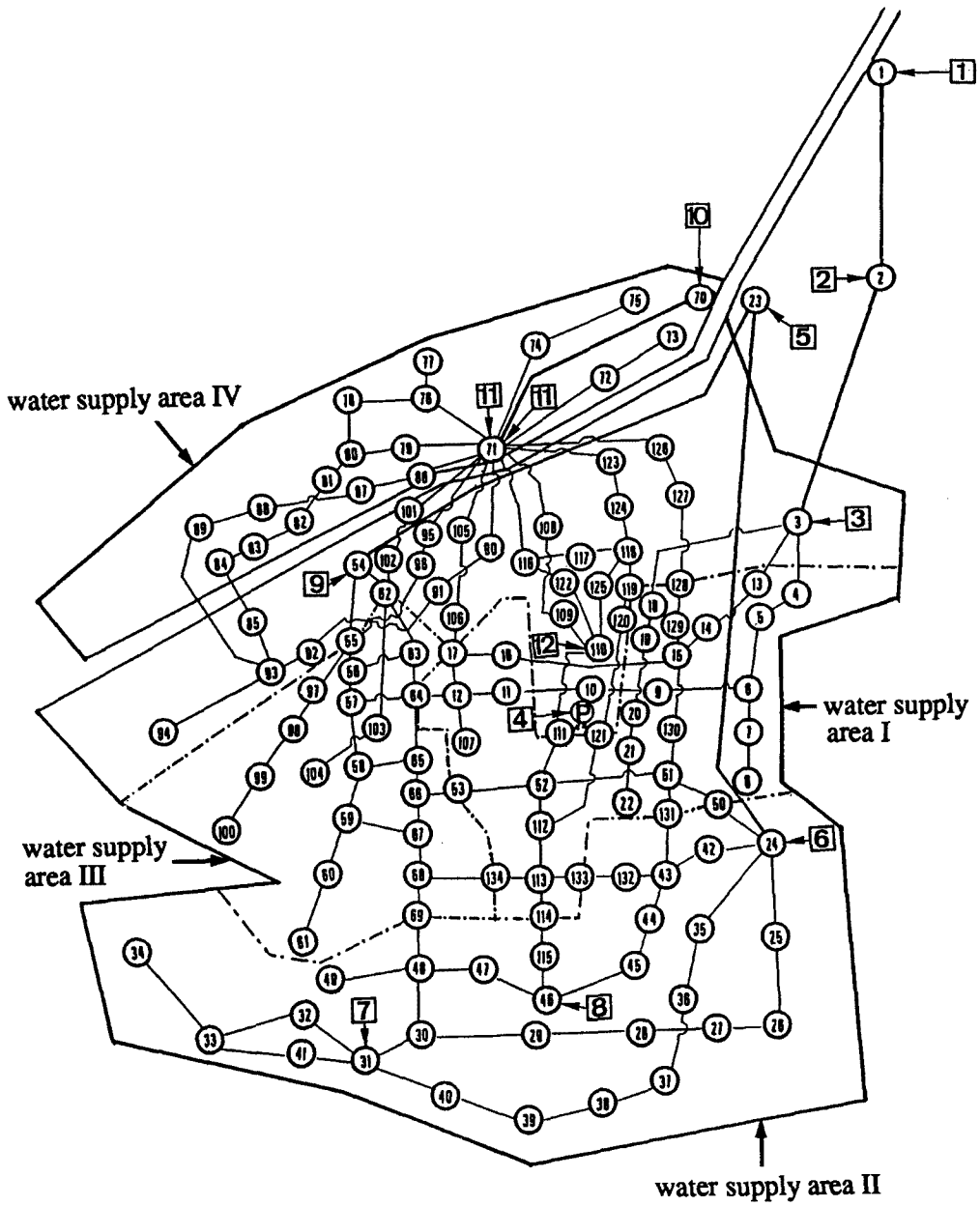


Fig. 11. Network model of a potable water supply system.

ダクタイル鋳鉄管（DCIP）の被害率（1 kmあたりの被害箇所数）[19] を参考にして，管路の被害確率を以下のように定めた。

仙台市内の沖積層厚が 20 m程度の地盤における管径 500 mm以下の配水管の被害率は，管種別に CIP で 0.07，DCIP で 0.03 であった。これを管被害率の基準値とする。まずネットワークがカバーする地域の沖積層厚さが薄い順に，地盤種を A，B，C の 3 種類に分類した。上記の被害率の基準値を採用した仙台市の地盤を，ここでは地盤 B に対応すると仮定し，地盤 A の被害率には1/3，地盤 C の被害率には 3 の補正係数を率じた。管径については，500 mm以下を基準として，管径 500 ～ 1,000 mm，1,000 ～ 1,500 mm，1,500 mm以上のそれぞれに対して，0.8，0.6，0.4 の補正係数を乗じた。導・送水管は，溶接鋼管とダクタ

Table 3. Damage ratio of water transmission pipelines (number/km)

ground condition	pipe dimeter			
	～500㎜	500～1,000㎜	1,000～1,500㎜	1,500㎜～
A	0.010	0.008	0.006	0.004
B	0.030	0.024	0.018	0.012
C	0.090	0.072	0.054	0.036

Table 4. Damage ratio of water distribution pipelines (number/km)

ground condition	pipe dimeter			
	～500㎜	500～1,000㎜	1,000～1,500㎜	1,500㎜～
A	0.015	0.012	0.009	0.006
B	0.044	0.035	0.026	0.018
C	0.132	0.106	0.079	0.053

イル鋳鉄管の被害率が等しいと仮定し，被害率を**Table 3**のように与えた。配水管については，DCIPとCIPの構成比を考慮して，地盤Bで管径500㎜以下の場合の被害率を0.044とし，**Table 4**のように被害率を仮定した。被害確率は，被害が管路上で一様かつランダムに発生すると仮定して，被害率をもとに算定した。

次に，停電の影響波及を表すプロセスについては，宮城県沖地震の事例を参考として，**Fig. 12**に示すETで表現した。これは，停電を発端事象として，（1）電力依存の有無，（2）停電の施設余裕時間超過の有無，（3）自家発電機などのバックアップ電源の設置の有無，（4）バックアップの破壊の有無，（5）停電のバックアップの寿命時間超過の有無，の5つの条件に応じて分岐し，停電の影響が水道システムに波及するか，波及が阻止されるか，の2つの結果事象に至るまでの過程を構造化したものである。

宮城県沖地震の際に，仙台市においては約半数の需要家が停電を被ったが，これを教訓として基幹施設を中心に電力施設の耐震性向上の対策が強化された。そこで，上水道システムにおける一回線受電の場合の停電生起確率を0.15と仮定した。各受電ノードの受電形態やETに基づいて規定した係数を乗じ，各受電ノードにおいて停電によって機能喪失が発生する確率を**Table 5**に示すように定めた。以下，その算出方法について説明する。

受電形態については，一回線受電，複数回線受電，複数系統受電の順に信頼性は低いと考えられる。そこで，二回線受電，四回線受電，二系統受電に対応する停電確率低減係数を，それぞれ0.7，0.5，0.15と仮定した。宮城県沖地震の事例では，電力供給機能は数時間～一日程度で復旧し，中でも上水道施設は重要施設として優先された。停電によって浄水機能が失われても，配水機能に支障がない場合には，浄水場の停電によって断水が発生するまで，ある程度の施設余裕時間が存在すると考えられる。このモデルでは，自然流下配水を行うI配水区の浄水場（ノード2）が5時間程度の余裕時間を持つと考え，停電がこの余裕時間を超過する確率を0.5と仮定した。停電時の配水機能維持を目的としてバックアップ電源を備えているのは，ノード24のみである。バックアップ電源の破壊確率を0，停電継続時間が自家発電機寿命時

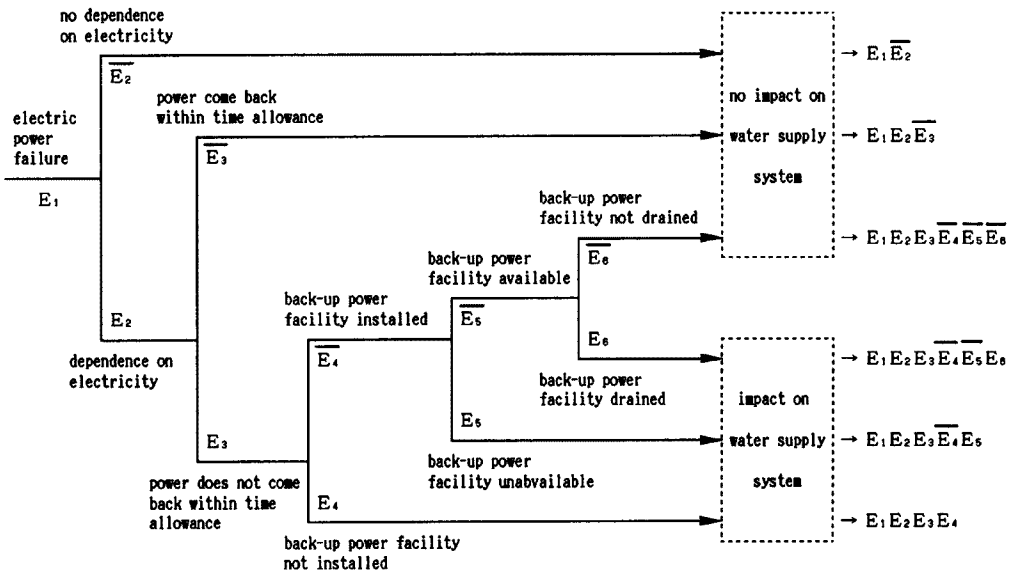


Fig. 12. Event tree of functional disaster propagation initiated by electric power failure.

Table 5. Probability of failure of nodal functions due to electric power failure

water supply area	node No.	facilities	prob. of electric power failure (a)	reduction factor related to condition of power supply (b)	prob. of exceedance of time allowance (c)	prob. of unavailability of back-up facility (d)	prob. of failure of nodal functions due to electric power failure (a)×(b)×(c)×(d)
I	1	water intake station	0.150	0.70**	1.0	1.0	0.105
	2	purification plant		0.70**	0.5	1.0	0.053
	3	distribution plant		0.70**	1.0	1.0	0.105
	10	pump station		1.00*	1.0	1.0	0.105
II	23	purification plant		0.50***	1.0	1.0	0.075
	24	distribution plant		0.70**	1.0	0.3	0.032
	31	distribution plant		1.00*	1.0	1.0	0.150
	46	distribution plant		1.00*	1.0	1.0	0.150
III	54	distribution plant		0.70**	1.0	1.0	0.105
IV	70	water intake station		0.70**	1.0	1.0	0.105
	71	purification plant		0.15****	1.0	1.0	0.023
	110	distribution plant		1.00*	1.0	1.0	0.150

* : 1 route from 1 substation
** : 2 routes from 1 substation
*** : 4 routes from 1 substation
****: 2 routes from 2 substations

間を超過する確率を0.3として，バックアップ電源の非有効作動確率を0.3と仮定した。これは，自家発電機の寿命を数時間～十数時間として概算したものである。

4．3 計算結果

（1） 配水区別の機能喪失確率

以上に述べた方法論とシステム・モデルを用いて，各ノードの機能喪失確率を計算し，配水区別に**Fig. 13**に示した。横軸は，供給ノード（取水場）からの距離とした。信頼性解析ではカット・セット数が増加すると，膨大な計算時間を要する。事象を5個以上含むカット・セットは生起確率が10^{-8}程度となるので無視し，カット・セット数を抑制した。

まず，停電の影響がないものと仮定して，各ノードの機能喪失確率を計算したのが図中の◆である。各配水区においては，下流部のノードほど機能喪失確率が高い傾向が顕著であるが，ばらつきがあるのは，パス（供給経路）が2本以上あるノードでは冗長性のために機能喪失確率が低くなるためである。配水距離の長いⅠ配水区の需要ノードと，Ⅲ配水区のうちパスが一本しかない需要ノードにおける機能喪失確率が高い。

次に，停電による断水確率を考慮して機能喪失確率を算出したのが図中の■である。本研究では，上水道施設被害と停電の両者を含めて，相互連関を考慮した場合のモデルを「基本モデル」と呼ぶ。◆と比較すると，機能喪失確率が0.08～0.25程度の範囲で増加している。各配水区の下流部分は上流部分よりも増加幅が大きい。これは，上流に位置する取水場，浄水場，配水場などの基幹施設の停電がすべて下流ノードに影響することと，ポンプ・アップが必要なノードで停電の影響が顕著に現れていることに原因がある。Ⅱ配水区の機能喪失確率の増加幅が比較的小さいのは，配水場（ノード24）にバックアップ電源

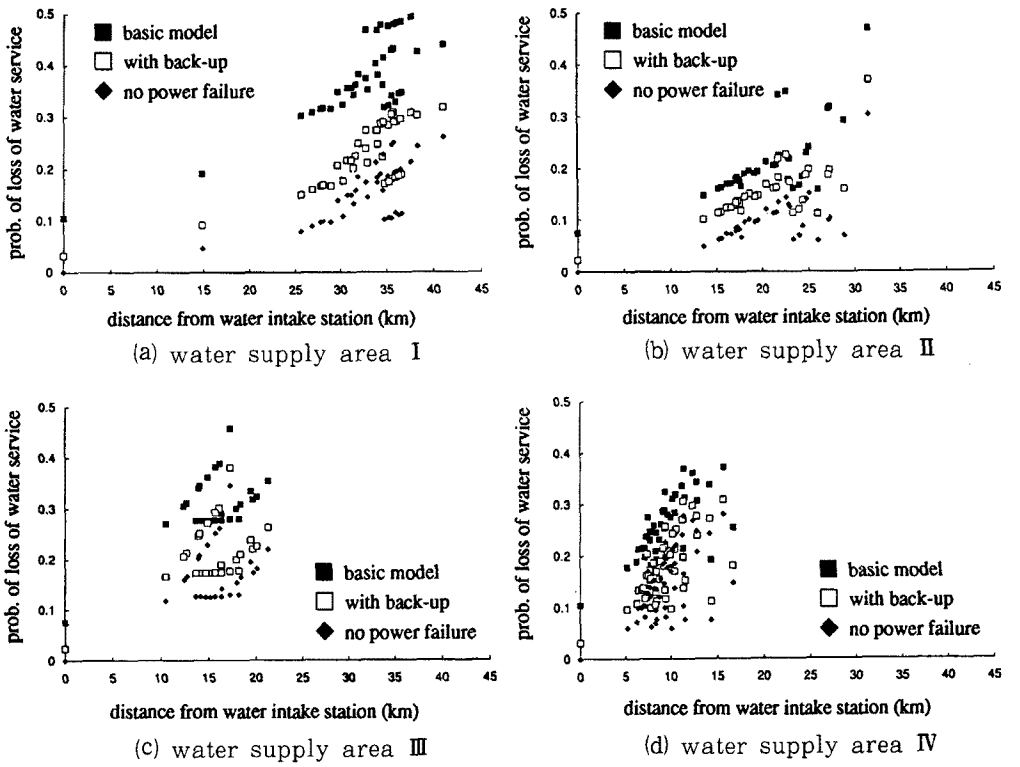


Fig. 13. Probability of loss of water service at demand nodes.

を設置しているためである。

□は，全ての受電ノードにバックアップ電源を設置した場合である。■と比較すると，機能喪失確率が0.06～0.20程度の範囲で低減されている。

（2） 特定の経路に注目した機能喪失確率

以下，特定のパス（ノード1→2→3→4→5→6→9→10→111→52→112→113→114）に注目した議論を行う。受電ノードはノード1, 2, 3, 10の4つである。**Fig. 14** は，横軸を取水場からの距離として，機能喪失確率を図示したものである。この配水経路において，他経路から合流するのはノード112のみであり，ノード・リンクがほぼ直列に接続された形態となっているので，取水場からの距離が増加するにつれ，機能喪失確率が単調に増加している。停電による機能喪失確率に注目すると，高地配水区となるノード10でポンプ・アップされるところで，停電による機能喪失確率が急増している。これを反映して，基本モデルでもノード111以降の機能喪失確率は高い値をとっている。上水道施設の被害による機能喪失確率（◆）と，停電による機能喪失確率（◇）を比較すると，このパスにおいては後者が支配的なモードであることがわかる。

（3） 重要度係数

Fig. 15 は，上述のパスの各ノードにおける重要度係数を図示したものである。ここでは，「停電発生」という事象に対する，Birnbaum の確率重要度（◆），クリティカリティー重要度（▲），Fussell-Vesely の要素重要度（◇），クロス・インパクト係数（□），および「バックアップ電源の有無」に関する Birnbaum の確率重要度（△）を算定した。

まず「停電発生」に対する重要度係数に関する考察を行う。クロス・インパクト係数（□）が高い値を示していることから，停電が生じた場合にはほぼ確実に断水するといえ，停電に対して弱いシステムであることがわかる。これは，このパスの受電ノードは全てバックアップを備えていないことと，浄水場（ノード2）以外は施設余裕時間をもたないことによる。Birnbaum の確率重要度（◆）が末端で約0.7と非常に大きく，受電系統の複数化などの対策によって受電信頼性向上を図れば，機能喪失確率を大きく低減できることを示唆している。Fussell-Vesely の要素重要度（◇）は0.6以上の値となっており，機能喪失確率における停電の寄与度が高いことを反映した結果が得られた。クリティカリティー重要度（▲）も同様に，パス全体で高い水準となっていることがわかる。

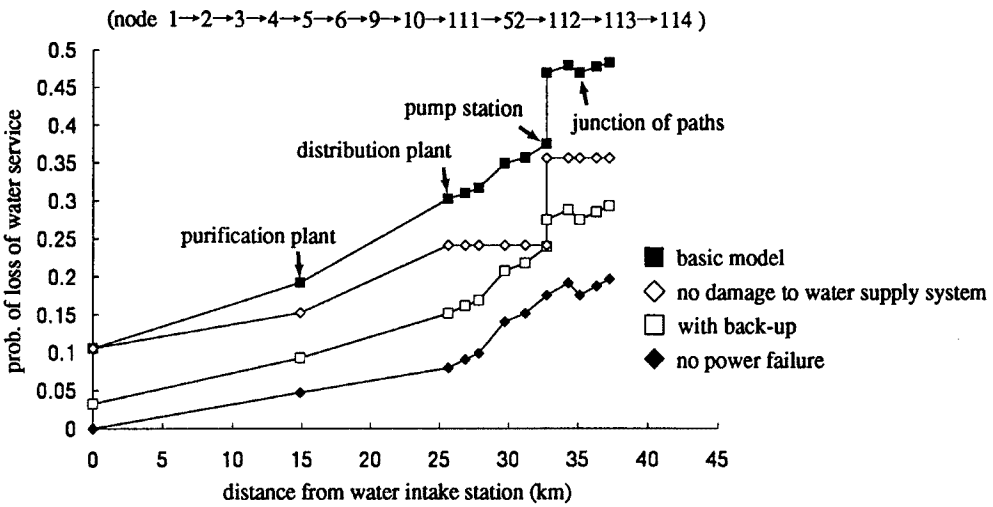


Fig. 14. Probability of loss of water service at demand nodes along a specific path (node 1～114).

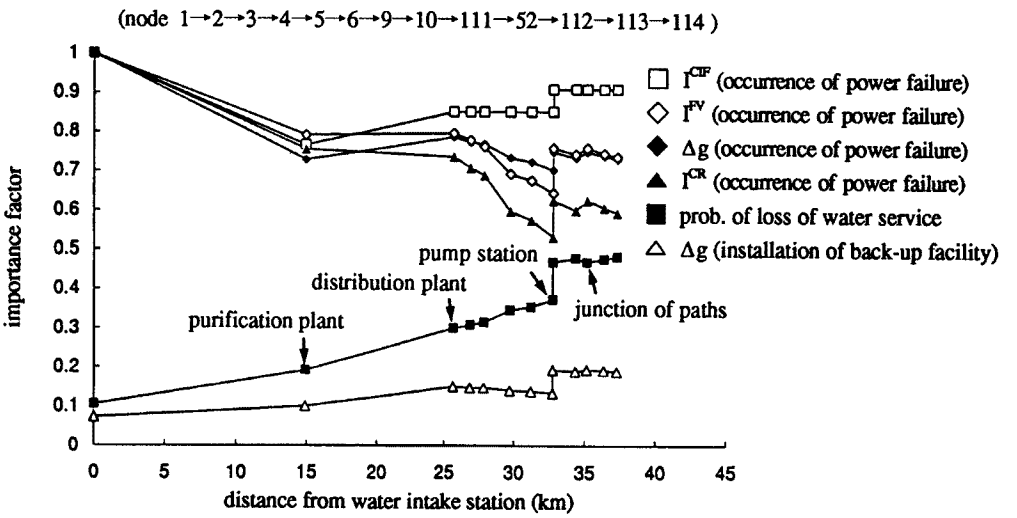


Fig. 15. Importance factors at nodes along a specific path (node 1～114)

次に「バックアップ電源の有無」に関するBirnbaumの確率重要度（△）は，高地配水区の5つのノードで約0.2となっているが，この値はバックアップの設置による機能喪失確率の低減幅をあらわし，**Fig. 14**の「基本モデル（■）」と「バックアップ付加（□）」の差に相当するものである。

（4） 重要度係数を用いた地震防災対策の検討

機能喪失確率をある目標値まで低減するために，どのような地震対策を講じるのが有効かを重要度係数を用いて検討する。ここでは，**3.** までに述べた手法の有用性を検討することを目的としており，リスク・費用・便益の観点から最適な地震対策を示すのではない。本研究で提案した定量的評価指標を意思決定にどのように反映させるかという点に関する説明を重点的に行うこととする。（2） で取りあげたパスの現状の機能喪失確率は，**Fig. 14** に示したように下流部の高地配水区で0.5程度である。全ノードでの機能喪失確率が，目標値0.3を下回るようにまず機能喪失確率を低減し，これが達成されるとさらに目標値0.2を下回るように，段階的に地震防災対策を進めるものとする。地震対策の選択肢として，次の3種類を考える。

(a) 連絡管設置による冗長化

(b) 受電系統の二系統化

(c) バックアップ電源の設置

このシステムではダクタイル鋳鉄管の構成比率が高いので，管種の改善による物理的強化策はすでに実現されているものとし，上記の3対策を選んだ。

Fig. 14 に示したように，ノード3より下流の全てのノードで機能喪失確率の目標値0.3を上回っている。下流の5つのノードでは，停電のみのモードで機能喪失確率が0.3を超過するのに対し，上水道施設被害のみのモードは0.2程度の機能喪失確率を示すにすぎない。また **Fig. 15** のクロス・インパクト係数が大きな値を示すことから，上記 (b), (c) の方法で停電対策を最初に施すのが適当であると判断できる。このことは，**Fig. 16** に示した「停電の発生」および「上水道施設被害」に対するFussell-Veselyの要素重要度において，停電の影響がパス全体で支配的であることを示していることからも明らかである。これらの対策の結果，**Fig. 17** に示すように (b), (c) のいずれの方法でも目標である機能喪失確率0.3以下を達成できるが，受電形態の二系統化（◆）の方がわずかに効果が大きいことがわかる。この段階では受電形態の二系統化を採用し，改めて算出したFussell-Veselyの要素重要度を **Fig. 18** に示す。停電による機能喪失確率が低減されたために，上水道施設被害による機能喪失確率の寄与度（◆）が相対的に高まっ

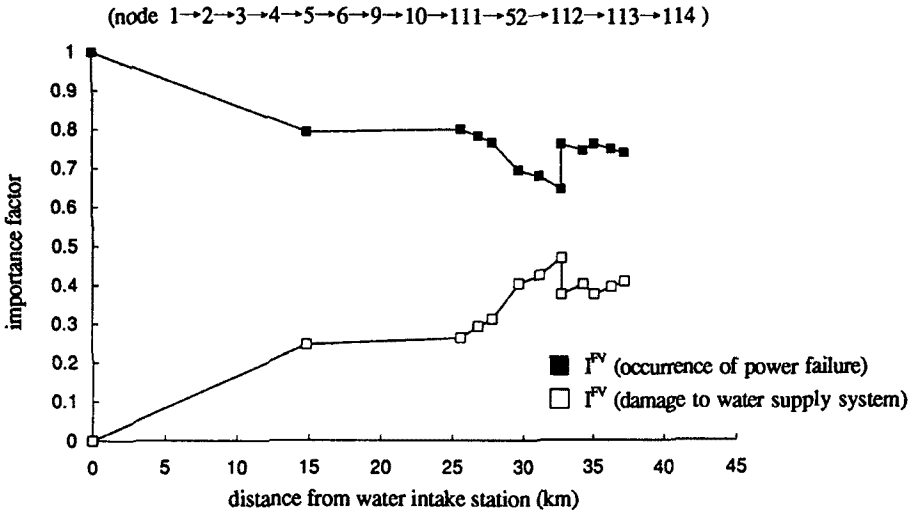


Fig. 16. Fussell-Vesely component importance of two events : electric power failure and physical damage to water supply system.

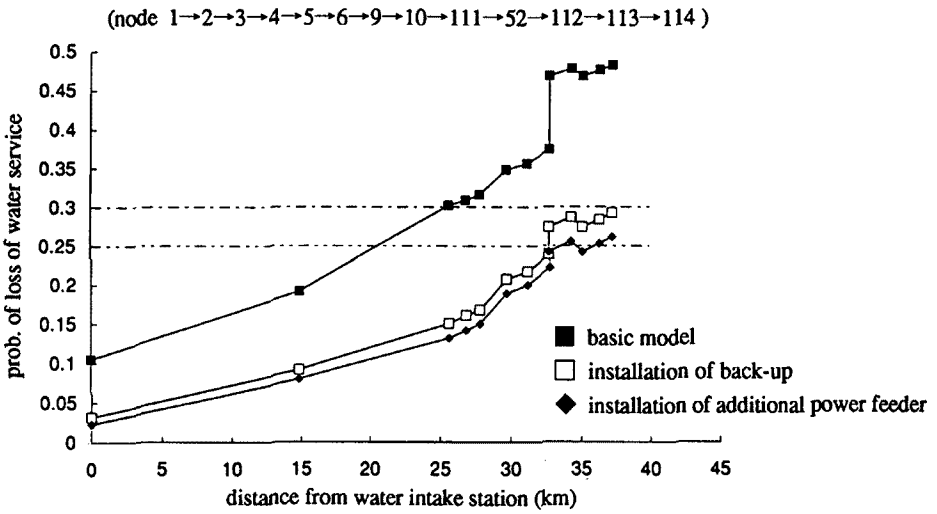


Fig. 17. Reduction of probability of loss of water service by installing additional power feeder line or back-up facility.

ている。受電系統の二系統化は，停電が発生した場合の影響波及防止策ではなく，停電確率そのものを低減する対策である。そのため，停電に関するクロス・インパクト係数は依然大きな数値を示すにもかかわらず，Fussell-Vesely 要素重要度は低減されている。従って，このうえバックアップの電源の設置を施しても効果は小さく，上水道施設の改善によって連結性を増す方が効果的であると予想される。

次の目標は機能喪失確率を 0.2 以下にすることである。受電形態二系統化の後にも目標値 0.2 を超過するノード 10 を，別系統のノード 15 と連結する対策と，ノード 10 にバックアップ電源を設置する対策を比較したものを **Fig. 19** に示す。重要度係数から予想されたように，バックアップの設置を第 2 段階の対策として採用した場合（◇）には目標が達成されず，連結管を設置した場合（◆）には目標が達成される結果となった。ただしバックアップの設置も受電系統複数化と同様に有効な対策であることは，**Fig. 18**

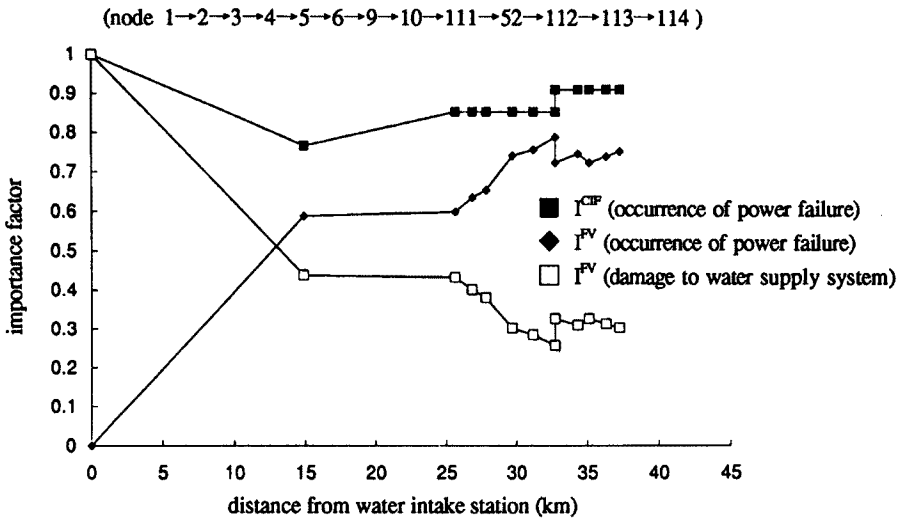


Fig. 18. Fussell-Vesely component importance of two events : electric power fallure and physical damage to water supply system.

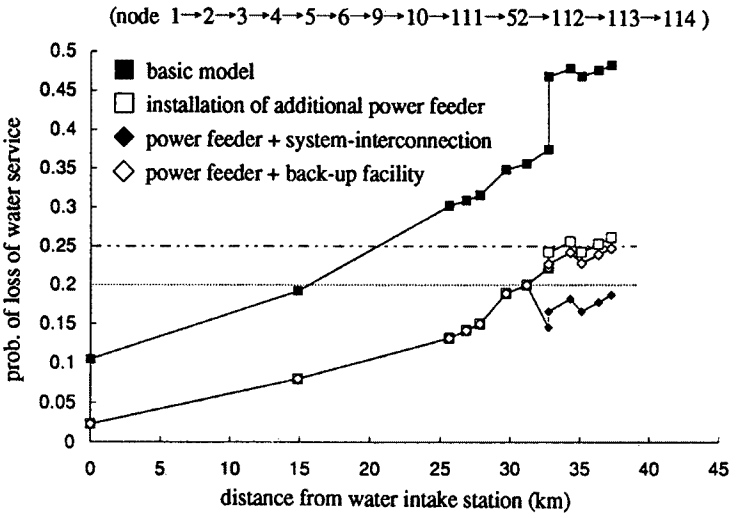


Fig. 19. Reduction of probability of loss of water service by installing back-up power facility and system-interconnection pipeline.

でみたとおりである。

5．結　　語

本研究では，ライフライン系のシステム間相互連関を考慮した地震リスク分析の手法を示し，さらに重要度係数を判断材料として地震対策を合理的に進めるための方法を提示した。以下に，本研究のまとめを箇条書きにする。

（1） 重要度係数を用いて外部システムの影響を評価する方法を提案した。システム間の影響波及をETを用いて構造化し，これをシステム信頼性解析に組み込み，最小カット・セットの列挙と破壊モードの分離を行って，機能喪失確率および各種の重要度の算定を行うものである。

（2） 従来用いられてきたBirnbaumの確率重要度，クリティカリティー重要度，Fussell-Veselyの要素重要度に加えて，被害波及の可能性を端的に表現するクロス・インパクト係数を，重要度の一つとして定義した。これにより，外部システムの影響を多面的に考察することが可能となった。

（3） 重要度係数は本来，システム構成要素中の任意の1つのユニットに対して定義されていたが，本研究では，複数のユニットに対する重要度係数を，拡張重要度係数として定義した。ライフライン・システム間の結合形態が複雑な場合にも4つの重要度係数を容易に求め，外部システムの影響を評価することができる。

（4） 上水道システムと電力システムを対象としたケース・スタディーを行い，防災対策を戦略的に推進するシナリオの一例を示し，本研究で提案した評価手法が有用であることを明らかにした。

システム間の相互連関を改善する方策には，結びつきを緊密にする方法（システム一体化）と，遮断する方法（システム自立化）がある。前者の例が，受電回線・受電系統の複数化であり，ライフライン全体系を，より堅固にする対策である。後者の例がバックアップ電源の設置であり，フェイル・セーフの理念に基づいてシステム信頼度を高める対策である。今後，投入するコストに対するリスクの低減効果を測り，数々の代替案を合理的に組み合わせる方法論の構築が望まれる。

また地震情報や被害情報の交換など，組織的連携の強化や，埋設物の共同溝一括収容のように，異種システムが共同して推進すべき対策も重要である。行政レベルでは，地域防災計画などを事業者間の連携が図られてきたが，研究の面でも，関連機関が一堂に会してライフライン地震防災を議論する必要性が認識されるようになっている[20]。

謝　辞

本研究のケース・スタディーを行うにあたり，大阪市水道局工務部計画課計画係係長河谷幸生氏および山野一弥氏に，有益な資料提供と御助言を頂いた。記して感謝の意を表する次第である。

なお本研究の一部は，平成3年文部省科学研究費補助金（総合研究（A））02302060の援助を得て行ったものである。

参考文献

1） 能島暢呂・亀田弘行：クロス・インパクト法によるライフライン系の地震時相互連関のモデル化，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，1990. 4，pp. 25－37.

2） Nojima, N. and Kameda, H.: Cross Impact Analysis for Lifeline Interactions, Proc. of the Third U. S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, Los Angeles, August, 22－23, 1991, pp. 629－638.

3） 加藤多郎・能島暢呂・亀田弘行：都市ライフラインの地震被害とライフラインシステム間の相互連関の分析，京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告別冊第3号，1990. 4，pp. 22－28.

4） Taleb-Agha, G.: Seismic Risk Analysis of Networks, SDDA Report No. 22, MIT, Dept. of Civil Eng., R 75－43., 1975.

5） Shibata, H. and Tsuchiya, M.: Fundamental Concept of Aseismic Design of Earthquake Resistant Lifeline Systems and Industrial Facilities, ASCE, The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, 1977, pp. 354－367.

6） 田村重四郎・川上英二：モンテカルロ法による地中埋設管システムの耐震性の評価方法，土木学会論文報告集，第311号，1981. 7，pp. 37－48.
7） 篠塚正宣・小池武：埋設ライフラインシステムの機能性能に関する地震危険度解析，土木学会論文報告集，第311号，1981. 7，pp. 25－35.
8） 磯山龍二・片山恒雄：大規模水道システムの地震時信頼度評価法，土木学会論文報告集，第321号，1982. 5，pp. 37－48.
9） Kameda, H., Goto, H., and Kasuga, T.: System Reliability and Serviceability of Water Supply Pipelines under Seismic Environment, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco Vol. VII, 1984, pp. 491－498.
10） 山田善一・家村浩和・野田茂・小笠原洋一：反復分割法による震災後の上水供給系の時変信頼性解析，土木学会論文報告集，第326号，1982. 10, pp. 1－13.
11） 佐藤忠信・土岐憲三・濱田尚人：大規模ライフラインの地震時における信頼性解析法，土木学会論文集，No. 437/I-17, 1991. 10, pp. 153－161.
12） 和泉正哲・野村季晶・牧瀬研二：ガス・電力・上水道システムの震害復旧シミュレーション，第6回日本地震工学シンポジウム，1982, pp. 2025－2032.
13） 星谷勝・大野春雄・山本欣弥：あいまい理論によるライフライン機能の震災影響波及の構造化，土木学会論文集，第344号/I-1，1984. 4，pp. 323－331.
14） 星谷勝・大野春雄：震害時ライフラインの相互影響を考慮した復旧過程の機能評価法，土木学会論文集，第386号/I-8，1987. 10, pp. 387－396.
15） 磯山龍二・片山恒雄：ライフラインの地震防災，現代のエスプリ，181都市と災害，至文堂，1982. 8，pp. 78－96（新日本製鉄（株）刊「季刊カラム」に1980. 4所収）.
16） 佐藤尚次・伯野元彦：障害波及を考慮したライフライン設計への一考察，第16回地震工学研究発表会講演概要集，1980. 6，pp. 185－188.
17） 井上紘一：FTAの基礎理論と数値的解析法，井上威恭監修，総合安全工学研究所編，「FTA安全工学」第2章，日刊工業新聞社，1979, pp. 69－118.
18） Henley, E. J. and Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, Ch. 10 Importance, Prentice Hall Inc., 1981, pp. 418－435.
19） 土木学会東北支部：1978年宮城県沖地震調査報告書，1980. 4.
20） 例えば，土木学会関西支部 都市地震防災からみたライフライン系の相互連関と災害情報システムに関する調査研究委員会：平成3年度講習会「より安全な都市を目指して―ライフライン系の地震防災から―」テキスト，1991. 11.