

地震時のシステム間相互連関を考慮した ライフライン系のリスク評価法

能島 暢呂¹・亀田 弘行²

¹正会員 工博 広島工業大学講師 工学部土木工学科 (〒731-51 広島市佐伯区三宅2丁目1-1)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所都市施設耐震システム研究センター (〒611 宇治市五ヶ庄)

本研究は、ライフライン系の地震時システム間相互連関に着目し、システム間の機能的被害波及を考慮したリスク分析手法を開発したものである。相互連関の様相を類型化するとともに、ETで記述したシステム間の障害波及構造をシステム信頼性解析に組み込んで4種類の重要度係数を算出し、外部システムの影響を多面的に考察することを可能にした。上水道と電力システムを対象とした本評価手法の適用例を示した。

Key Words : *lifeline systems, earthquake disaster, system interactions, risk assessment*

1. 序論

地震時におけるライフライン系の被害は都市型地震災害の典型的な側面の一つであり、ライフライン機能に重度に依存する都市全体への被害波及の影響はきわめて大きい。このためライフライン系施設においては、一部の構成要素の欠落がシステム全体の機能障害に発展するという弱点を考慮し、構成要素の強化やネットワーク冗長性の向上など、種々の方策によってシステム信頼性向上の努力がなされてきた¹⁾。

また同時にライフライン地震工学の分野においては、システム信頼性解析に関して多くの研究が蓄積されている。需給節点の連結性を求める方法としては、タイセット²⁾の適用による解法や、モンテカルロ法による数値実験的解法³⁾、高速演算アルゴリズム⁴⁾などが提案されている。さらに、漏水など被災ネットワークのフロー特性を考慮して、機能の充足率を評価する研究^{5)~7)}が行われている。

こうした研究においてライフライン系は個別システムとして扱われているが、現実には、ライフライン系は相互の有機的な結びつきのもとに全体系として都市機能を支えている。このため災害時には、個々のシステムの被害はシステム内に留まらず、他のシステムへ波及することがある。近年の事例では、台風^{8),9)}や豪雪¹⁰⁾による停電が断水等に発展した例が挙げられる。これらは加害側システムが単一のケースであるが、地震時には複数のライフライン系に被害が同時多発するため、各ライフライン系の地震時被害の相互波及がさらに深刻化する。従っ

て、個々のシステムの地震時信頼性向上を図るのみならず、システム間の相互連関の実態を把握し、ライフライン全体系の信頼性向上を図ることが不可欠である。

複数のライフラインを包括的に対象とした地震時機能評価や復旧過程予測の研究は、その重要性が指摘されていながら¹¹⁾未だ少ない。佐藤・伯野¹²⁾は、相互依存関係にある単純な2システム・モデルの信頼性解析を試みた。和泉ら¹³⁾はガス・電力・上水道システムの復旧過程をSD(system dynamics)でモデル化し、震後の都市機能の総合評価を行った。星谷・大野らはFSM(fuzzy structural modeling)を用いてライフライン機能被害の相互連鎖を構造化し、SDモデルによる復旧予測を行った^{14),15)}。また都市の耐震信頼性向上には、個々のシステムの被害予測・地震対策を超え、システム間・事業者間の相互連関の問題を解決することが要件であるとの認識から、土木学会関西支部においては、各種ライフラインの技術者、大学の研究者、行政関係者らの意見交換・情報交換の場が持たれた¹⁶⁾。海外の研究としては、1989年ロマ・ブリエタ地震の際にWatsonvilleでみられたシステム間相互連関の調査¹⁷⁾や、震害波及予測を行うためのライフライン間の相互依存関係の調査¹⁸⁾が挙げられる。

このように従来は、相互連関の実態把握¹⁹⁾や、シミュレーションによる復旧過程の再現に力点が置かれていたが、ライフライン事業者の地震防災対策に貢献するためには、こうした議論から一歩進めて、システム改善効果の測定が量的に行えるような、被害予測・リスク評価手法の構築が望まれる。本研究はこうした背景を鑑み、地震時のシステム間相互連関構造を解明するとともに、

表-1 地震災害におけるライフライン系のシステム間相互連関

影響 影響	電力	ガス	上水道・ 工業用水道	下水道	ごみ・廃棄物処理	交通		電話	コンピュータ 通信
						道路	鉄道		
電力	*	製造プラント機能停止 ホルダー機能停止 圧送機能停止	浄水場機能停止 取水・配水ポンプ機能停止 漏水機能停止	処理プラント機能停止 ポンプ機能停止	処理プラント機能停止	信号停止 電柱倒壊による 路面閉塞	信号停止 動力喪失	電話局の機能低下	オンラインのマヒ データの喪失
○系統管理・集中制御施設の機能マヒ、光回不足（バックアップ電源が無い場合）									
ガス	熱源代替としての 需要増	*	△復旧作業の遅延 復旧資機材の搬入	△復旧作業の遅延 復旧資機材の搬入	△復旧作業の遅延 復旧資機材の搬入	△復旧作業にとも なう交通規制 爆発による 道路損傷	特になし	特になし	特になし
上水道・ 工業用水道	特になし	△復旧作業の遅延 復旧資機材の搬入 製造プラントの 冷却水不足	*	△復旧作業の遅延 復旧資機材の搬入 水洗付使用不能 下水の増減 (漏水、上水消費)	特になし	△復旧作業にとも なう交通規制 大口径水道管破綻 による冠水	特になし	△交換機の 冷却水不足	△コンピュータの 冷却水不足
○自家発電機の冷却水不足									
下水道		△復旧作業の遅延 復旧資機材の搬入	△復旧作業の遅延 復旧資機材の搬入	*	特になし	△復旧作業にとも なう交通規制 下水による冠水	特になし	△地下ケーブルへの浸水・絶縁不良	
○埋設管・地下ケーブルへの浸水									
ごみ・ 廃棄物処理	特になし	特になし	特になし	特になし	*	△未処理廃棄物の 路上集積	特になし	特になし	特になし
道路	△給電車による 応急供給困難		△給水車による 応急供給困難		△ごみ・廃棄物の 収集・運搬不能	*	△代替システム として利用増	△交通混乱による 電話連絡増	
△復旧活動の遅れ（復旧人員の動員、復旧資材関連の遅れ、復旧班の移動に支障） ○資機材の運搬に支障									
鉄道						△代替システム として利用増	*	△交通混乱による 電話連絡増	
電話		○操業状況の情報伝達不能 ○系統管理・集中制御システムの機能マヒ（無線化されていない場合） ○復旧活動のための情報不足（無線化されていない場合） (作業員参集、復旧指令、需要家からの被害通報・修理依頼、需要家への広報 行政機関→事業者や事業者相互の連携)							
通信								*	△電話回線の 使用不可

- ライフライン間での物理的被害波及……………●
- ライフライン間での機能的被害波及……………○
- 復旧段階における相互影響……………△
- システム間代替機能によるバックアップ機能……………□
- ライフライン関連の複合災害……………■

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て、システム間相互連関を多面的に捉え、地震防災対策の策定に有用な指標を提案するものである。

筆者らはさきに、単純な2つのライフライン系における相互連関の影響を、クロス・インパクト係数という単一のパラメータで確率的に表現する手法を提案した²⁰⁾。本研究ではこの手法を一般化し、複雑な結合形態を持つネットワークに拡張するとともに、信頼性解析の分野において提案されている3種の重要度係数と同一のベースで、クロス・インパクト係数を改めて定式化する²¹⁾、²²⁾。これにより、外部システムからの影響波及とシステムの改善効果を定量的・多面的に論じる。

以下、2.では手法の説明にさきだち、地震災害におけるシステム間相互連関の様相を体系的に整理し、被害波及の構造化を行う。続いて3.では解析手法の概要を説明し、4.ではその適用例を示すこととする。

2. 地震時システム間相互連関構造の分析

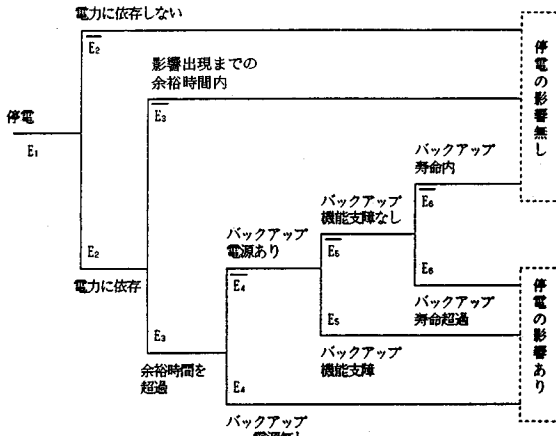
(1) 相互連関の全容とその類型化

表-1は、地震時におけるライフライン系のシステム間相互連関の多面的な様相を一括したものであり、縦の列のシステムが横の行のシステムに与える影響をマトリクス状に整理したものである。表の作成にあたっては、1978年宮城県沖地震、1983年日本海中部地震、1989年ロマ・ブリエタ地震、1923年関東地震の被害報告書と、1993年釧路沖地震の調査結果、および前述の土木学会関西支部調査研究委員会¹⁶⁾での討論などをベースとした。表-1はこれらの資料から得られた結果を網羅的に示しているが、個々の地震においては相互連関の現れ方にはそれぞれ特徴も見られる。具体的には文献¹⁹⁾～²³⁾を参照されたい。表-1のように多岐にわたる相互連関の発生機構に注意し、以下の5項目に類型化した。

a) ライフライン間での物理的被害波及

ライフラインの地中埋設物の大半は、道路地下を占有しているため、近接したライフライン施設の間で物理的被害波及が生じる。道路の損傷による埋設物の被害や、配水管からの漏水による他埋設管の破損箇所への封水・差水、道路の冠水、電線・電話線の絶縁不良など、フロー流出に伴う被害波及などである。

b) システム間での機能的被害波及



図一 1 停電を発端事象とする機能的被害波及構造の ET

個々のライフライン系は、様々な形で他のライフライン系の機能に依存しつつ分担機能を果たしている。こうした相互依存体系は、地震時機能障害がシステム間で波及する原因となる。特に、停電による施設運転用動力の喪失や中枢機能マヒ、通信機能マヒによる情報伝達不能などが最も広範かつ重大な問題である。

c) 復旧段階におけるシステム間での相互影響

災害時には緊急活動や復旧作業が一斉に開始され、作業の錯綜・競合のおそれがあるため、工期・工程等のライフライン間調整が必要となる。また道路交通や通信機能がマヒすると、人員や資機材の動員・調達・搬入、被害・復旧情報の収集・伝達が阻害される。

d) システム間代替性によるバックアップ機能

交通機能を担う道路と鉄道、あるいはエネルギー供給を担う電力とガスというシステム・ペアのどちらか一方の機能が失われた場合、機能が存続している側のシステムに需要が一時的に集中することがある。相互に補完的機能を持つシステムは、災害時にバックアップ機能を果たすといえる。

e) ライフライン関連の複合災害

電力供給が再開した際に、漏れガスの滞留場所ですパークにより着火・爆発したケースなど、個別のライフライン被害が複合的に新たな災害を生み出す場合がある。

(2) ET による機能的被害波及の構造化

上記5つの類型のうち、ライフライン機能に対して最も直接的な影響を及ぼすのは、b) の相互依存体系の破綻による機能的被害波及であり、その出現傾向は、システム相互の物理的・機能的結合度、被害の程度と復旧過程、地震防災体制、の3要因に左右される。こうした影響をリスク分析に取り入れるには、システム間における被害波及構造を解明する必要がある。

このため、1978年宮城県沖地震における停電を事例として、上・下水道、ガス、情報通信、道路交通の各システムに及ぼした影響と各事業者の停電対応の時系列展開を調べて、システム間での影響波及に関わる要因を整理した。停電の影響を受ける側のシステム特性としては、(i) 電力依存の有無、および(ii) 停電の影響出現までの余裕時間が挙げられる。(ii) は停電により製造能力を失っても貯蔵施設から供給可能である場合など、システム内在の緩衝機構による時間的余裕をさす。防災体制としては、(iii) 停電対策用の自家発電機・蓄電池等のバックアップ電源設置の有無が挙げられ、その有効な作動に関連するのは、(iv) 破損等による機能支障の有無、(v) バックアップ寿命時間(燃料の保有量)である。(ii) や(v) が停電の継続時間を上回れば停電の影響は現れない。

以上に基づき、ET(Event Tree; 事象樹木)を用いて停電の影響波及プロセスを図一1のように構造化した。停電を発端事象とし、上記(i)~(v)の5条件を誘引事象として分岐して、各ライフライン施設の機能が停電の影響を受けたか否かを、ETの経路で表現したものである。

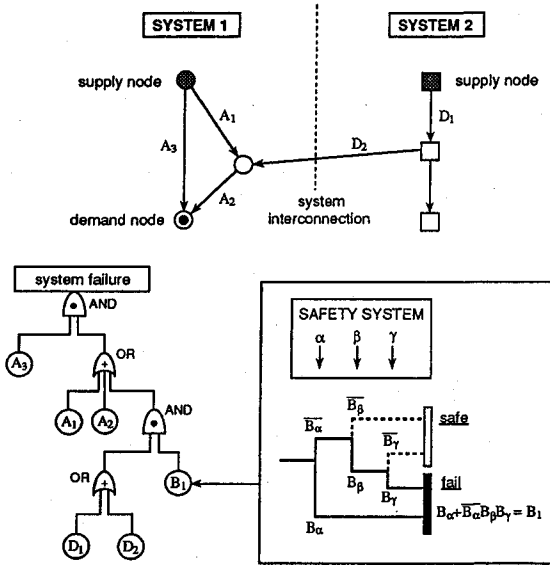
3. 相互連関を考慮したライフライン系の地震リスク分析の手法

(1) 解析の手順

あるシステム(システム1)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、外部システムの地震時機能マヒの影響がシステム1に波及する。こうしたライフライン間の被害波及の影響を取り入れたリスク分析の解析フローを以下に示す^{21), 22)}。

簡単のため外部システム間相互の被害波及を考慮せず、システム1の需要ノードにおけるサービス停止をシステム機能喪失と規定する。(i) 第1段階では、外部システムからの被害波及構造を、図一1のようにETで記述する。(ii) 第2段階では、需給節点連結性を基準とするシステム信頼性解析を適用する。(iii) 第3段階では(2)に述べる重要度解析を行い、外部システムの影響の度合いや、防災対策の効果などのリスク評価を行う。これらのうち、第2段階の解析では、単一システムのリスク解析が用いられ、その方法については1.で紹介したような多くの研究が行われている。本研究の方法は、これに第1段階と第3段階を組み合わせることににより、システム相互連関を考慮したリスク評価を行うところに特色があると考えている。

図一2で本手法の概略を説明する。システム1の供給ノードと需要ノードを結ぶパス{A₁, A₂}か{A₃}が連結していれば機能が満たされる。中継ノードはシステム2の機能に依存しており、そのパスは{D₁, D₂}である。システム2の被害の影響波及をETで構造化し、影響波



- システム機能喪失…
事象 $(A_1 A_2 + A_2 A_3 + B_1 D_1 A_3 + B_1 D_2 A_3)$
- 中継ノードにおけるシステム2の機能喪失…
事象 $(D_1 + D_2)$
- システム2が関与する破壊モード…
事象 $(B_1 D_1 A_3 + B_1 D_2 A_3)$
- システム2が関与しない破壊モード…
事象 $(A_1 A_3 + A_2 A_3)$

図-2 外部システムの機能に依存するシステムのモデル

及を事象 B_1 に集約しておく。図-2のETは、具体的には図-1のような形をとる。最小カットセットの抽出と確率演算のため、FTA(fault tree analysis, 故障樹木解析)²⁴⁾を適用し、(2)に述べる重要度係数を算定して、システム2がシステム1に与える影響を定量的に評価する。

複数のノードにおいて、複数の外部システムの機能に依存している場合でも、接続点が単一の場合と同様の方法が適用できる。

(2) 重要度係数によるシステム間相互連関の定量化

ユニット(システム構成要素)の破壊確率 $\mathbf{P} = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$ と、システム機能喪失確率 $g(\mathbf{P})$ の関係を表す指標に、重要度係数がある²⁵⁾。ライフライン地震工学の分野への応用例としては、文献^{26)~28)}などが挙げられる。従来の研究では、単一システム内において、構成要素の重要度を相対比較するために重要度分析が適用されていた。これに対して本研究では、システム間の相互連関に関する事象に着目して、次のような4種類の重要度係数を算定し、システム間の影響波及を多面的に捉えるための確率論的尺度として用いる。

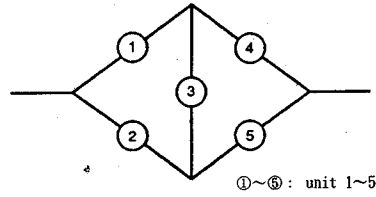


図-3 5要素からなるネットワーク・モデル

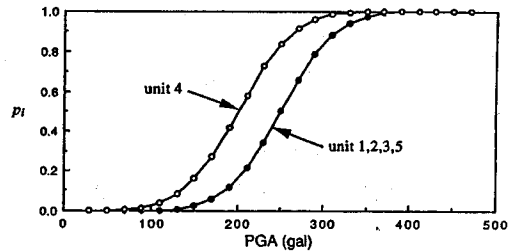


図-4 フラジリティー曲線

a) Birnbaumの確率重要度 Δg_i

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

ただし、 $(1_i, \mathbf{P}) = (p_1, \dots, p_{i-1}, 1, p_{i+1}, \dots, p_n)$, $(0_i, \mathbf{P}) = (p_1, \dots, p_{i-1}, 0, p_{i+1}, \dots, p_n)$ であり、システム信頼度向上に対する p_i の低減効果を表す。システム機能喪失確率の、ユニット i の破壊確率 p_i に対する変化率で定義され、 p_i の値には依存しない。

b) クリティカリティ重要度 I^{CR}_i

$$I^{CR}_i = \lim_{\Delta p_i \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta g(\mathbf{P})}{g(\mathbf{P})}}{\frac{\Delta p_i}{p_i}} = \frac{g(\mathbf{P}) - g(0_i, \mathbf{P})}{g(\mathbf{P})} \quad (2)$$

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を表す。 Δg_i に $p_i/g(\mathbf{P})$ を乗じた形であり、 p_i が大きい場合よりも小さい場合の方が、これを低減することが困難であるという一般的性質を、ユニット i の破壊確率の低減効果に加味したものである。

c) Fussell-Veselyの要素重要度 I^{FV}_i

システム機能喪失の発生モードを、特定のユニット i の破壊に関連するモードと関連しないモードに分離し、 i を含む最小カットセットの和集合の生起確率を $g_i(\mathbf{P})$ とすると、

$$I^{FV}_i = \frac{g_i(\mathbf{P})}{g(\mathbf{P})} \quad (3)$$

で定義される Fussell-Veselyの要素重要度は、システム機能喪失という条件下で、 i の破壊に関連する破壊モードが生じている確率を表す。

d) クロス・インパクト係数 I^{CIF}_i

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。

$$I^{CIF}_i = \frac{g_i(P)}{p_i} \quad (4)$$

これは、ユニット i の破壊という条件下で、 i が関与する破壊モードが生じている確率であり、 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)~(4)の諸量の間、

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

なる大小関係が成立することは、

$$g(P) \leq g(0_i, P) + g_i(P) \quad (6)$$

より明らかである。

次に、単一のユニット i に関する重要度係数を、複数ユニットの重要度係数に拡張する。システムを構成する n 個のユニットのうち、 m 個からなる部分集合 $S = \{s_1, \dots, s_m\}$ に注目する。確率 p_S を、これらのいずれかが破壊する確率と定義する。また、集合 S の要素について $p = 0$ としたユニット破壊確率を $(0_S, P)$ とする。 S のユニットを少なくとも一つ含む最小カットセットの和集合の生起確率を $g_S(P)$ とする。以上の記号を用いて、式(1)~(4)の添字 i を添字 S に変えた表記によって拡張重要度 $\Delta g_S, I^{CR}_S, I^{FV}_S, I^{CIF}_S$ を定義する。

(3) 重要度係数の計算例

4種の重要度係数の定量的な特性と相互の関係を示すため、図-3のシステムの左右端の連結信頼性を考え、図-4のフラジリティー曲線を与えた場合の試算例を以下に示す。フラジリティー曲線の横軸は最大地動加速度(PGA)とした。ユニット1に着目した場合の4種の重要度を比較したものが図-5である。ユニット破壊確率が小さい領域では、 Δg_1 と I^{CIF}_1 および I^{CR}_1 と I^{FV}_1 はそれぞれ近い値をとるが、ユニットの破壊確率が大きくなるに伴って、 Δg_1 と I^{CR}_1 は0に、 I^{CIF}_1 と I^{FV}_1 は1に収束する。着目するユニットを $S = \{1, 3\}$ とした場合の4種の重要度を図-6に示す。図-5とおおむね同様の傾向がみとれる。

4. 停電の影響を考慮した上水道機能の地震リスク分析

(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簡単な適用例を示す。水は生活用水として他で代替できないうえ、災害時には消火用水などのためニーズ

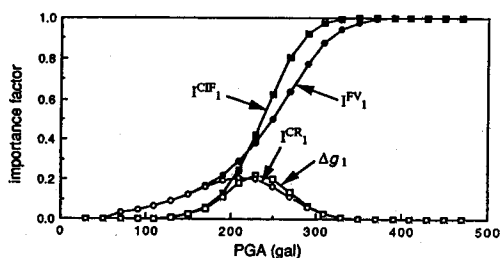


図-5 要素1に関する重要度係数

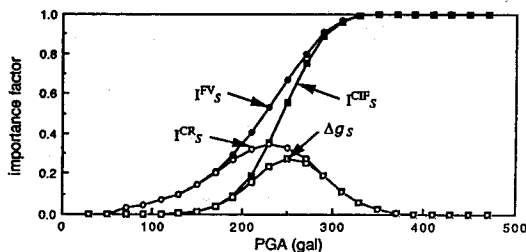


図-6 要素1と要素3に関する重要度係数

が増大する。一方、上水道の基幹施設の多くが電力システムに依存しており、地震・台風・積雪などによる停電が直接的原因となった断水の事例が多く報告^{8)~10)}されている。これらより、本研究では影響を受ける側を上水道、影響を与える側を電力とし、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。

現実的な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たネットワーク・モデルを図-7に示す。枝管の分岐点を需要ノードとし、取水・浄水・配水・ポンプ場と、導・送水管および配水幹線をモデル化した。一点鎖線で境界線が示されている4つの配水区では、給水が互いに独立に行われている。

電力機能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個である。それらの受電形態は、一回線受電(ノード10, 31, 46, 110), 二回線受電(ノード1~3, 24, 54, 70), 四回線受電(ノード23), 二変電所からの二系統受電(ノード71)である。配水区域中央部の高台と、水源から遠い南西部へは配水経路の途中でポンプ加圧が行われている。

また、多くのビルや集合住宅は、小容量の受水槽を経由しポンプ再増圧が必要な受水形態をとっており、停電の直接的影響を受けやすい⁸⁾。この点については解析の対象外とするが、需要家側で生じるシステム間相互連関も、災害時に大きな問題となる可能性が高い。

なお、この解析モデルは大阪市上水道システムを参考に作成したが、本研究が同システムの直接的なリスク評

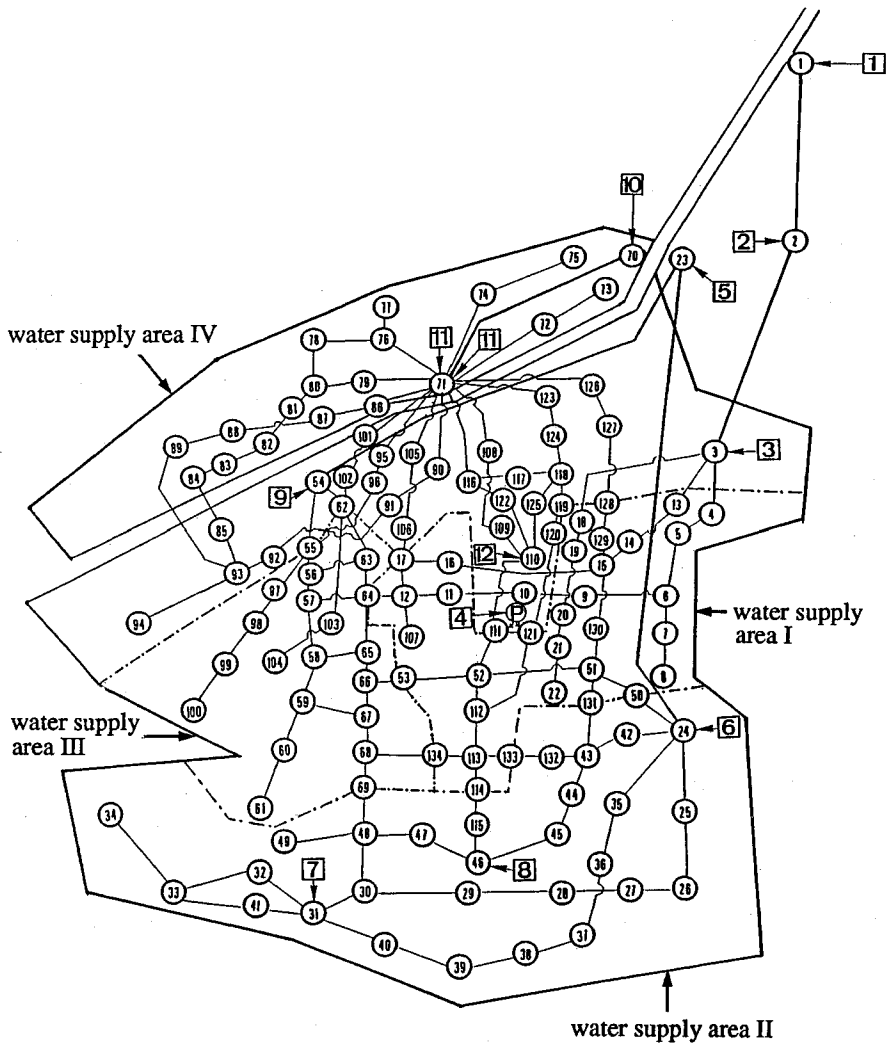


図-7 ケース・スタディーの対象とした上水道の配水幹線ネットワーク・モデル

価を目的とするものではない。以下の数値計算は、できる限り現実に近い問題設定のもとに、本研究の方法の適用性を議論するために実施したものである。

(2) 被害確率の算定

震度 V 程度の地震被害を想定し、宮城県沖地震の仙台市における被害を参考にして、要素被害確率を以下のように定めた。

管路被害に関しては、仙台市における配水管の被害率(被害箇所数/km) CIP 0.07, DCIP 0.03 を基準値とした²⁹⁾。解析対象地域の地盤種を、沖積層厚が薄い順に A, B, C に分類し、上記の被害率基準値に、それぞれ 1/3, 1, 3 の係数を乗じて、各地盤種での被害率とした。管径については 500mm 以下を基準とし、500~1,000mm,

1,000~1,500mm, 1,500mm 以上に対してそれぞれ 0.8, 0.6, 0.4 の係数を乗じた。導・送水管および配水管の管種構成比を考慮して被害率を求め、リンクの被害確率を算定した。

受電ノードの停電生起確率については、一回線受電を基準として 0.15 と仮定した。仙台市内においては宮城県沖地震の直後、26.9 万戸で停電が発生したが、これ以降、電力の基幹施設の耐震性が強化されたことを考慮し、比較的低い停電確率を仮定した。二回線受電、四回線受電、二系統受電に対応する低減係数を、それぞれ 0.7, 0.5, 0.15 とした。ノード 2 では自然流下配水を行っているので、配水池容量に対応する余裕時間を停電継続時間が上回る確率を 0.5 と仮定した。さらにノード 24 では自家発電機を備えており、地震時破壊確率を 0、停電継続時

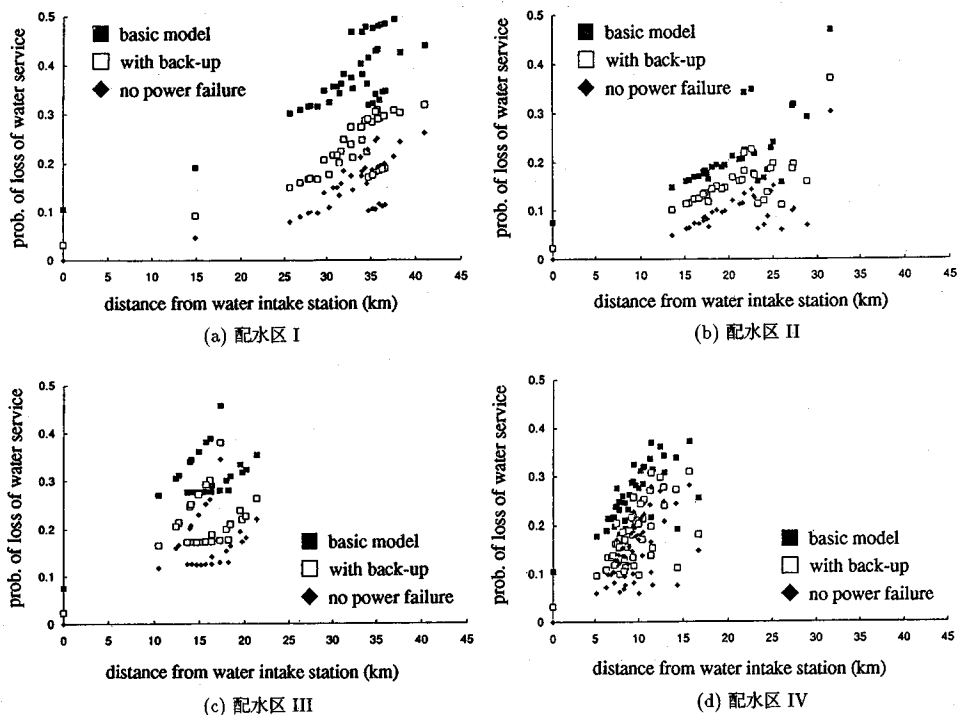


図-8 配水区別のノード機能喪失確率

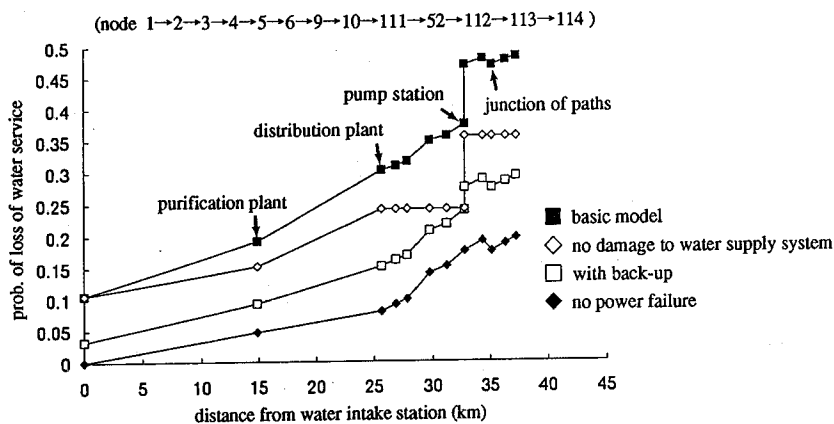


図-9 モード別にみたノード機能喪失確率

間がバックアップ寿命時間を上回る確率を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。

(3) 解析結果と考察

a) 配水区別の断水確率

需給ノードの連結性喪失確率を断水確率と考え、各需給ノードの断水を頂上事象とするFTと、停電からの影響波及を表すETを組み合わせて、信頼性解析を行った。確率計算にはカットセット・アプローチを適用した。概

ね5個以上の事象を含むカットセットは、カットセット生起確率が 10^{-8} 程度となるため、無視しても精度が保たれることを確認し、計算時間の節約のため除外した。

図-7の各配水池内の需給ノードにおける断水確率を図-8に示す。これ以降の図においては、取水場からの距離を横軸としており、図中のプロットが各ノードの計算結果に対応している。上水道システム単独の原因による断水確率を示したのが図中の◆である。各配水区にお

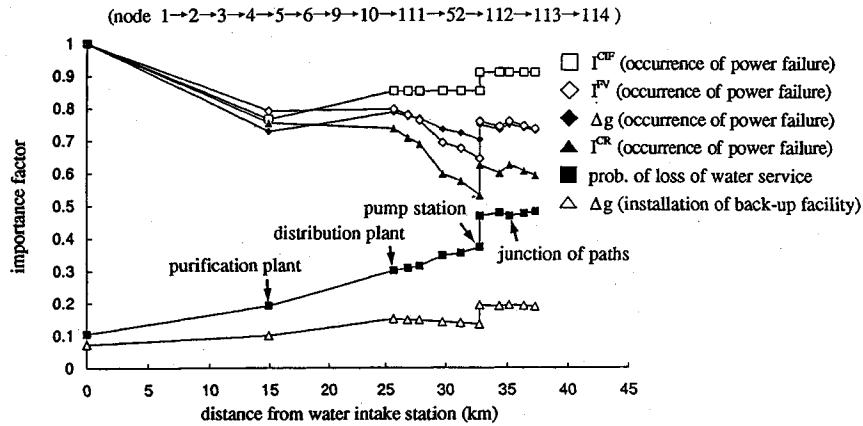


図-10 各ノードにおける重要度係数

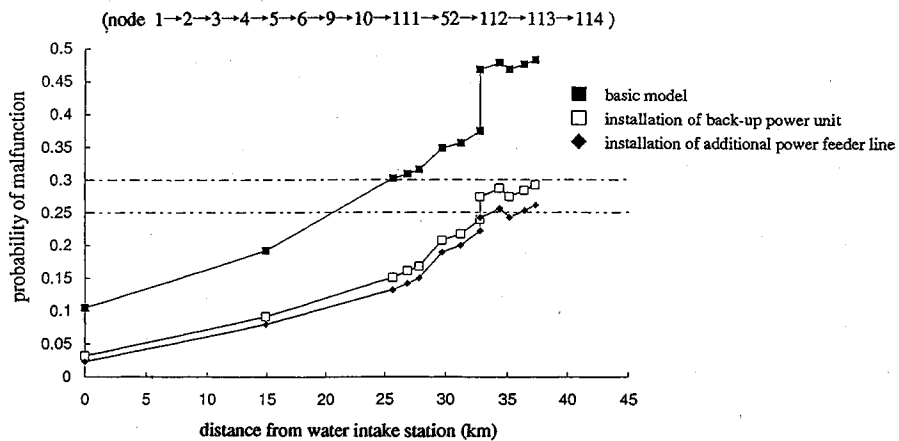


図-11 受電系統の二系統化およびバックアップ電源の設置による機能喪失確率の低減

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、供給経路が2本以上ある場合の冗長性の効果による。配水距離の長いI配水区のノードと、III配水区のうちパスが1本しかないノードにおける機能喪失確率が高い。■は、停電による断水を付加的に考慮した場合(基本モデル)であり、◆と比較して特に下流部分で増加幅が大きいのは、上流側に位置する全ての受電ノードの停電の影響を受けるためである。配水区IIでの増加幅が比較的小さいのは、ノード24のバックアップ電源の効果である。図中の□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り、■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。

b) 特定の経路に注目した断水確率

図-9の上部に示した、ノード1からノード114に至るパス(全13ノードの内、受電ノードは1, 2, 3, 10)

に注目した結果について考察する。このパスのリンクの破壊確率は、0.009から0.034の範囲にある。直列に近い形態であるので、取水場からの距離とともに断水確率が単調に増加している。ここでの解析の前提条件のもとでは、上水道施設被害による断水確率(◆)より停電による断水確率(◇)の方が支配的であり、停電による断水確率はノード10より下流の高地配水区で急増している。

c) 重要度係数

図-10は、上述のパスの各ノードにおいて、「停電発生」という事象に対する4種の重要度係数と、「バックアップ電源の有無」に関するBirnbbaumの確率重要度を算定したものである。以下に、それぞれの意味と結果の解釈を示す。

「停電発生」に関するBirnbbaumの確率重要度 Δg (◆)は、受電信頼性向上による断水確率の低減効果を表す。パス全体約0.7を上回っていることから、受電信頼

性向上の効果がきわめて高いことを示唆している。

「停電発生」に関するクリティカリティ重要度 I^{CR} (▲)は、式(2)で示したように、 Δg に、停電確率の改善の行い易さを加味したものであり、バス全体で0.5を超える高い水準となっている。

「停電発生」に関するFussell-Veselyの要素重要度 I^{FV} (◇)は、停電に起因する断水確率が、断水確率全体に寄与する割合を表す。ここでは、バス全体において0.6以上と高い値を示しており、図-9において、上水道施設被害よりも停電による断水確率が高いことを反映している。

「停電発生」に関するクロス・インパクト係数 I^{CIF} (□)は、停電が発生した場合、それによって断水が引き起こされる確率を表す。バス全体において0.75を上回り、停電が断水に直結する確率が高いといえる。このバスにはバックアップ電源が設置されておらず、ノード2の施設余裕時間以外に停電の影響を防止する手段が無いためである。

「バックアップ電源の有無」に関するBirnbbaumの確率重要度 Δ は、バックアップの設置による断水確率の低減幅に相当し、バスの末端部分で0.2程度の値となっている。

d) 地震防災対策の効果に関する評価法の検討

注目バスにおける下流部の断水確率は0.5程度である。バス全体での断水確率の目標値を0.3として地震防災対策を考える。

前項では、停電の影響がバス全体で支配的であること(I^{FV})、停電が断水の直接原因となる確率が高く(I^{CIF})、しかも受電信頼性向上の効果が高いこと(Δg , I^{CR})、バックアップの設置による断水確率低減は、末端部分で0.2程度見込まれること(Δg)、などを定量的に示した。

これらの議論から、断水確率の低減においては、停電対策が有効な手段であると判断される。対策の選択肢を受電系統の二系統化(◆)とバックアップ電源の設置(□)とする。図-11に示すように、いずれの方法でも目標断水確率0.3以下を達成できるが、受電系統の二系統化の方がわずかに効果が大きい結果となった。ただし実際には、経済効率や運用・維持の容易さなどを含めて、リスク低減効果を総合的に検討する必要がある。

以上のように、複合システムにおけるリスク評価を行う場合、種々の重要度係数を用いて相互連関の影響を多面的に分析し、防災対策の効果の測定を可能とする方法論を示した。

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開発し、以下の成果を得た。

- (1) ライフライン地震時相互連関の様相を体系的に整理した。すなわち、システムのペアごとに波及事象をまとめ、それらを5項目に類型化した。また停電を対象として、他ライフラインへの障害波及のシーケンスをETに構造化し、機能的被害波及を考慮したリスク分析のための基礎的考察を行った。
- (2) ライフライン間の機能的被害波及の影響を取り入れた地震リスク評価法を提案した。ETに構造化されたシステム間の影響波及特性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。
- (3) 従来用いられてきたBirnbbaumの確率重要度、クリティカリティ重要度、Fussell-Veselyの要素重要度の3種類の重要度に加えて、被害波及の可能性を端的に表現するクロス・インパクト係数を新たに定義した。これらの重要度係数を、複数のユニットに対する重要度係数に拡張し、外部システムの影響を多面的に考察することを可能とした。
- (4) 上水道と電力システムを対象としたケース・スタディーを行って、本研究で提案した評価手法の適用例を示した。

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・セーフの考えに基づいた対策である。被害・復旧情報の共有などの組織的連携の強化や、共同溝建設のように異種システムが共同して推進すべき対策を含めて、投入する費用対リスク低減効果のバランスから、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。

なお本論文は、文献^{19)~22)}をもとに加筆・再編したものであることを付記する。

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、資料提供と有益な御助言を頂いた。また数値計算にあたっては、大阪ガス(株) 加藤多郎氏(当時京都大学大学院)の全面的協力を得た。記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Nojima, N., Kameda, H. and Shinozuka, M.: Fundamental Structure of Earthquake Disaster Countermeasures in Lifelines, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.12, No.1, pp.29-47, 1990.

- 2) Taleb-Agha, G. : Seismic Risk Analysis of Networks, *SDDA Report No.22*, MIT, Dept. of Civil Eng., R75-43., 1975.
- 3) 田村重四郎, 川上英二: モンテカルロ法による地中埋設管システムの耐震性の評価方法, 土木学会論文報告集, 第311号, pp.37-48, 1981年7月.
- 4) 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, pp.153-161, 1991年10月.
- 5) 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, pp.25-35, 1981年7月.
- 6) 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, pp.37-48, 1982年5月.
- 7) Kameda, H., Goto, H. and Kasuga, T. : System Reliability and Serviceability of Water Supply Pipelines under Seismic Environment, *Proc. of 8th World Conf. on Earthq. Eng.*, Vol.VII, pp.491-498, 1984.
- 8) 林春男: 台風9119号によるライフライン災害に対する広島市民の対応, 京都大学防災研究所年報, 第35号B-1, pp.259-270, 1992年4月.
- 9) 目黒公郎, 永田茂, 立川貴重, 片山恒雄: 台風19号による大規模停電の都市機能への被害波及に関する調査研究—広島地域における大規模停電の影響—, 生産研究 第44巻4号, pp.194-201, 1992年4月.
- 10) 神奈川県衛生部他: 昭和61年3月雪害停電による断水事故報告書, 水道協会雑誌, 第57巻第3号(第642号), pp.2-19, 1988年3月.
- 11) 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, pp.78-96, 1982年8月.
- 12) 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, pp.185-188, 1980年6月.
- 13) 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, pp.2025-2032, 1982年.
- 14) 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, pp.323-331, 1984年4月.
- 15) 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, pp.387-396, 1987年10月.
- 16) 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(平成元~2年度, 委員長: 亀田弘行): 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年11月.
- 17) Isenberg, J., Phipps, M. T. and Scawthorn, C. : Watsonville Regional Study : Interaction among Damaged Lifelines, *Putting the Pieces Together - The Loma Prieta Earthquake One Year Later (A National Conference)*, Hyatt Regency San Francisco Airport, Oct. 15-18, pp.119-128, 1990.
- 18) Hopkins, D. C., Lumsden, J. L. and Norton, J. A.: Wellington's Lifelines in Earthquake Project, An Outline of a Major Review, *Proc. of 3rd U.S. Conf. on Lifeline Earthq. Eng.*, pp.774-804, Aug. 1991.
- 19) 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年4月.
- 20) Nojima, N. and Kameda, H. : Cross Impact Analysis for Lifeline Interactions, *Proc. of 3rd U.S. Conf. on Lifeline Earthq. Eng.*, pp.629-638, Aug. 1991.
- 21) 能島暢呂, 加藤多郎, 亀田弘行: 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, 京都大学防災研究所年報, 第35号B-2, pp.525-542, 1992年4月.
- 22) 加藤多郎, 能島暢呂, 亀田弘行: 相互連関を持つ都市ライフライン系の地震被害波及と構造とリスク評価法に関する研究, 京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告別冊第10号, 1992年9月.
- 23) 能島暢呂, 亀田弘行: 1993年釧路沖地震における都市ライフライン系のシステム間相互連関について, 第22回地震工学研究発表会講演概要集, pp.427-430, 1993年7月.
- 24) 井上統一: 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, pp.69-118, 1979年.
- 25) Henley, E. J. and Kumamoto, H. : *Reliability Engineering and Risk Assessment*, Ch.10 Importance, Prentice Hall Inc., pp.418-435, 1981.
- 26) Yamada, Y. and Noda, S. : Optimum Post-Earthquake Recovery of Lifeline Systems by Importance Analysis, *Proc. of 8th World Conf. on Earthq. Eng.*, Vol.VII, pp.585-592, 1984.
- 27) Kusano, N., Sunasaka, Y. and Suda, K. : Reliability Importance Measures of Lifeline Network Components and Their Application, *Proc. of 9th World Conf. on Earthq. Eng.*, Vol.VII, pp.141-146, 1988.
- 28) 佐藤忠信, 清水謙司: 構成要素の破壊確率特性を考慮した大規模ライフラインシステムの地震時信頼性向上, 土木学会第46回年次学術講演会, pp.1260-1261, 1991年9月.
- 29) 土木学会東北支部: 1978年宮城県沖地震調査報告書, 1980年4月.

(1993.8.16 受付)

SEISMIC RISK ASSESSMENT OF URBAN LIFELINES UNDER SYSTEM INTERACTIONS

Nobuoto NOJIMA and Hiroyuki KAMEDA

A probabilistic method to evaluate the seismic risk of urban lifeline network systems is presented with emphasis on the aspect of system interactions among lifelines. First, the outline of interaction-related problems in lifeline earthquake disaster is discussed. Next, the probability of system malfunction due to functional damage propagation 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, which can be conveniently used to compare effectivity of alternatives of earthquake disaster countermeasures. An illustrative example of seismic risk assessment of water supply system is presented, taking into account impact of electric power failure.