

システム間相互連関と機能的被害波及を考慮した
都市ライフライン系の地震リスクに関する考察

大阪ガス(株) 正員 ○加藤多郎
京都大学防災研究所 正員 能島暢呂
京都大学防災研究所 正員 亀田弘行

1. はじめに 現代の都市機能を全面的に支援するライフラインは、システム個々が単独で機能できるものではなく、相互に依存・補完し合ってサービスを提供している。そのため地震時には相互依存体系が破壊されることによって、様々なシステム間の相互影響が表面化する可能性がある。都市全体系の耐震性向上のためには、個々のシステムの信頼性向上だけでなく、システムインターフェースの効率改善が必要である。本研究では、地震時にライフラインシステム間で生じる相互連関に注目し、外部システムからの機能的被害波及の影響を考慮したライフライン系の地震リスク分析を行い、機能的被害波及の影響を定量的に表現する手法を提案する。さらに事例研究として停電の影響を考慮した上水道システムの地震時機能喪失リスク分析を行う。

2. リスク分析の手法と重要度係数 本研究におけるシステム信頼性解析の流れは、まず注目システムに外部システムを取り込んで一体化したネットワークモデルを作成する。ただし外部システムからの被害波及を考慮するため、システム間の被害波及構造をET(event tree)で記述する。次に一体化したネットワークに対し、FTA(fault tree analysis)を適用し、ミニマルカットセットを抽出してシステム機能喪失確率を求める。さらに以下のような重要度係数を算定し、外部システムが注目システムに与える影響を定量的に求めるものである。システム信頼性理論に基づく種々の重要度係数は、システムを構成する要素の信頼度とシステム全体の信頼度の関係を表す指標である¹⁾。本研究では、依

存関係にある複数ライフラインシステムの信頼性解析において、種々の重要度係数を外部システムの機能障害の影響を確率論的に評価する指標として用いる。さらにシステム間の機能障害波及可能性を表現するものとして、新たにクロスインパクト係数を定義する。いま注目システムが外部システム(iとする)の機能に依存しているとすると、注目システムの機能支障発生を(1)注目システム自体のみに起因するモードと(2)外部システムの機能障害が関係するモードに分離する。(1)、(2)の発生確率をそれぞれ $g(0_i, P)$ 、 $g_i(P)$ で表す。また外部システムの機能喪失確率を p_i 、システム機能喪失確率を $g(P)$ で表す。システム機能喪失確率は(1)と(2)のモードの論理和として得られる。従来から用いられている3種の重要度係数、Birnbauの確率重要度 Δg_i ・クリティカリティ重要度 I_i^{CR} ・Fussell-Veselyの要素重要度 I_i^{FV} は、上記の記号を用いて表1のように定義される。ここではそれらに加えクロスインパクト係数 I_i^{CIF} を定義した。クロスインパクト係数は外部システムの機能支障が生じたという条件のもとでのシステム機能喪失確率を表しており、外部システム機能支障の波及可能性を表現するものである。図1は6要素からなるネットワークにおいて、横軸を地盤最大加速度とするフラジリティー曲線を各要素の生起確率として与えた場合の重要度計算例である。

表1 重要度の定義

Birnbau's structural importance	criticality importance
$\Delta g_i = \frac{g(P) - g(0_i, P)}{p_i}$	$I_i^{CR} = \frac{g(P) - g(0_i, P)}{g(P)}$
cross impact factor	Fussell-Vesely component importance
$I_i^{CIF} = \frac{g_i(P)}{p_i}$	$I_i^{FV} = \frac{g_i(P)}{g(P)}$

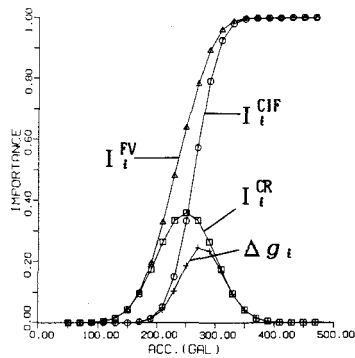


図1 重要度の計算例

3. ケース・スタディ ある都市の上水道配水幹線網を参考にしたネットワークモデルを対象に上述の方法を適用した。ここでは停電の影響を考慮した上水道需要節点の機能喪失を扱った。なお機能喪失とは需給ノード間の連結性が失われるという意味で用いている。管路被害率としては、宮城県沖地震による仙台市の上水道管被害率を基準にして、管種・管径・地盤条件を考慮して補正した数値を与えた。図2はネットワークモデル内のある経路に沿って分布するノードに対して、断水確率を計算し、取水場からの距離を横軸としてプロットしたものである。この経路の末端の5つのノードは高地配水区であり、ポンプアップが必要なため電力依存度が高く、停電の影響による断水確率が急に高くなっている。同図中には、取水・浄水・配水場やポンプ場にバックアップ電源を配備した場合も併記した。特に高地配水区においてバックアップの効果が大いことがわかる。次に4つの重要度を図3に示す。 I_i^{CIF} , I_i^{CR} , I_i^{FV} は「停電発生」という事象に関する値,

Δg_i は、「停電発生」と「バックアップ電源無し」という2事象に関する値をそれぞれ計算した。クロスインパクト係数が大きな値を示しており、停電が生じれば断水につながる可能性が非常に大きいといえる。また高地配水区において Δg_i が一段と大きな値になっているが、これは特に高地配水区において、受電形態の多重化やバックアップ電源配備の効果が大いことを示唆するものである。図4は一定の改善目標値を設定し、停電の影響に注目した地震対策を行った場合の断水確率を示す。 I_i^{CIF} や Δg_i は改善効果を定量的に示し、地震対策の策定の判断基準の指標として有用であると考えられる。

4. まとめ 本研究で得られた成果を要約する。種々の重要度を導入すると共にクロスインパクト係数を定義し、外部システムからの機能的被害波及を考慮したライフライン系の地震リスク評価手法を提案した。これによりシステム間の被害波及の影響を定量的に求めることができた。また事例研究を通じ、機能的被害波及を考慮したライフライン地震対策策定において、注目すべきノード属性を明らかにし、重要度係数の有用性を示した。今後は各要素の破壊確率の妥当性を向上させることや、地震対策検討の際に大きな問題となるコストを考慮に入れることなどが必要だと考えている。

参考文献

- 1) Ernest J. Henley, Hiromitsu Kumamoto : RELIABILITY ENGINEERING AND RISK ASSESSMENT, Prentice-Hall Inc., 1981, pp. 418-435

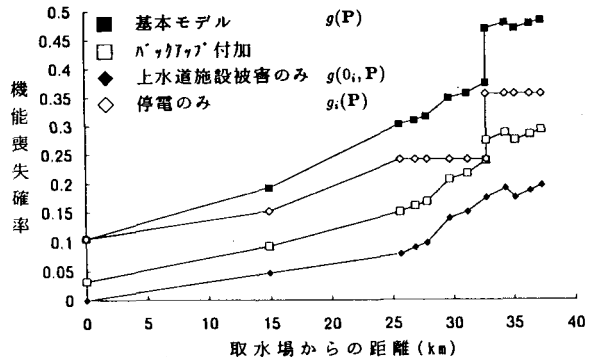


図2 停電の影響を考慮した断水確率

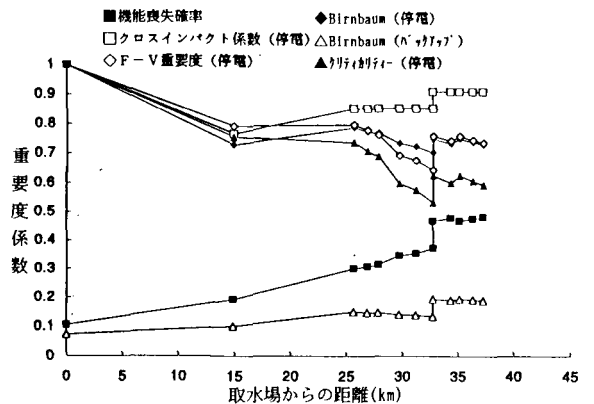


図3 各ノードにおける重要度係数

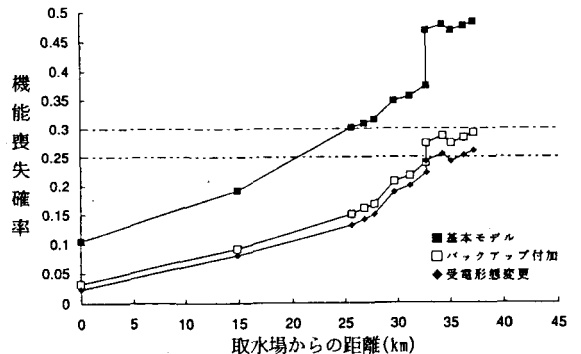


図4 地震対策による断水確率の低減