

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

1. はじめに 現代の都市機能は、複数のライフライン系が多重に連結した結合体によって支えられている。このため地震災害時にシステム間の相互依存体系が破綻することによって、機能的障害が被害を受けたシステム内部にとどまらず、他のライフライン・システムへも波及することが知られており、ライフライン系の地震リスク評価を行ううえで、無視できない問題である。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障害波及の影響を考慮した地震リスク分析を行い、重要度係数を用いて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。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の例を示す。

2. リスク評価の方法と重要度係数 本研究のリスク評価法の手順を示す。まずリスク分析の対象とするライフライン・システムを主体として、そのシステムが依存している外部のライフライン・システムも取り込んだネットワーク・モデルを作成する。ただし、異なるシステム間の接続点における被害波及構造については、ET(event tree; 事象樹木)で記述するものとする。次に、このネットワーク・モデルにシステム信頼性解析の手法を適用し、機能障害を発生させる最小カットセットをすべて求める。これらを(1)注目するシステム自体の被害に起因するモードと、(2)依存している外部システム(i とする)の機能障害に起因するモードに分離する。(1)の発生確率を $g(0_i, \mathbf{P})$ 、(2)の発生確率を $g_i(\mathbf{P})$ で表し、 p_i を外部システムの機能喪失確率とする。システム機能喪失確率 $g(\mathbf{P})$ は、両モードの論理和の発生確率によって得られる。重要度係数は、システム信頼度における要素信頼度の感度を表現するものであるが、本研究では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。従来用いられてきた、Birnbaumの確率重要度(Δg_i)、クリティカリティ重要度(I^{CR}_i)、Fussell-Veselyの要素重要度(I^{FV}_i)の3種の重要度係数¹⁾に加えて、クロス・インパクト係数(I^{CIF}_i)を新たに定義した。表1に4種の重要度係数の定義式を示す。 I^{CIF}_i は、外部システムの機能喪失が発生したという条件のもとで、その原因によって注目システムの機能喪失が発生する確率であり、外部システムの影響波及の可能性を端的に表現するものである。図1は5つの要素からなるブリッジ型ネットワークの構成要素に、PGAの関数としてのフラジリティー曲線を与え、要素1を外部システムとみなして重要度係数を試算した例である。 Δg_i および I^{CR}_i の分子は、外部システム i がクリティカルな状態にある確率であるので、PGAの増加に対してピークを持つ形状となる。これに対し、 I^{FV}_i および I^{CIF}_i の分子は、外部システム i に起因する機能喪失の発生確率であるから、PGAの増加に対して単調増加関数となる。

表1 重要度係数の定義式

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

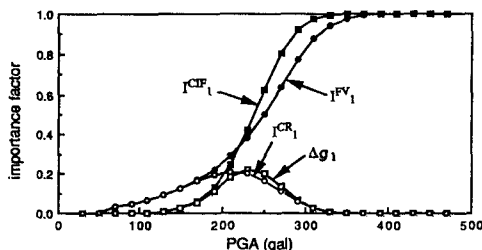


図1 重要度係数の算定例

3. ケース・スタディー 配水管網のネットワーク・モデルに上述の方法を適用し、上水道システムの機能喪失リスクを、停電の影響を考慮して評価した解析例を示す。需要ノードでの断水は、需給ノード間の連結性喪失と停電に起因する断水によって生じるものと仮定した。管路被害率は宮城県沖地震における水道管路網の被害率を基準とし、管種・管径・地盤特性を考慮して補正した数値を与えた。図2は、ある配水幹線に沿う需要ノードの断水確率を、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。末端部の5つの需要ノードは、高地配水区でポンプ・アップが必要のため電力依存度が高く、停電による断水確率が大きい。同図には、電力依存施設にバックアップ電源を配備した場合を併せて示した。バックアップ電源整備の効果は特に高地配水区において著しく、断水確率は最大0.2程度低減されている。次に4種の重要度係数を図3に示す。確率重要度については、「停電発生」と「バックアップ電源無し」という2つの事象に関する値を示し、他については「停電発生」に関する値を示した。クロス・インパクト係数が大きな値を示していることから、停電時には高い確率で断水するといえ、停電に弱いシステムであることがわかる。また「停電発生」に対する確率重要度が高地配水区で非常に大きいことが、このことは受電系統複数化などによって受信信頼性向上を図れば、断水確率を大きく低減できることを示唆するものである。図4は、断水確率の低減目標値を設定し、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。停電の未然防止のために、変電所からの受電を2系統化する対策と、停電発生後の事後策として、バックアップ電源を設置する対策を比較した。重要度係数の比較からもわかるように、受信信頼性を向上させる前者の対策が有効であることがわかる。

4. おわりに 本研究では、ライフラインの地震時相互連関を考慮したリスク分析手法を示すとともに、重要度係数を用いて相互連関の影響を定量化し、地震防災対策の策定の一助とする方法を提案した。今回は対策のためのコストを考慮しなかったが、合理的な対策策定のためには、コスト対リスク低減の効果に関する検討が必須であり、今後の課題としたい。

参考文献 1) Henley, E. J. and Kumamoto, H. : Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall Inc., 1981, pp.418-435.

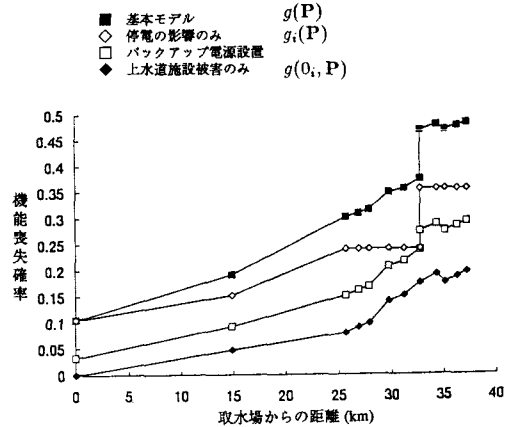


図2 停電の影響を考慮した断水発生確率

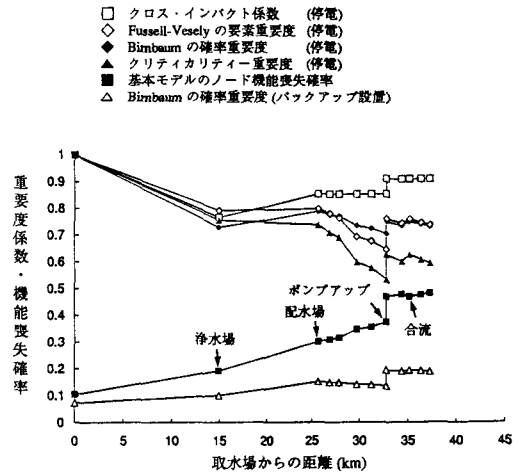


図3 需要ノードにおける重要度係数

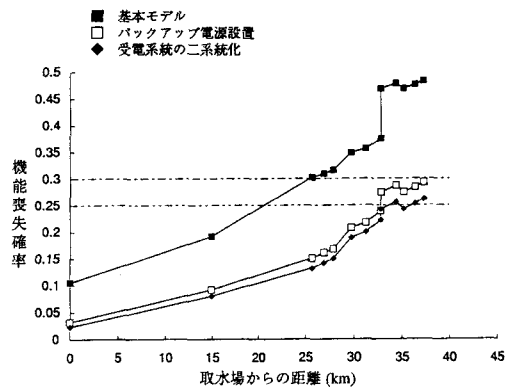


図4 停電対策の実施による断水確率の低減