

京都大学大学院 学生員 西森正至

京都大学工学部 正員 山田善一

京都大学工学部 正員 野田 茂

1. はじめに ライフラインの合理的な復旧・改良計画を策定することは地震防災上重要な課題の一つとなっている。本研究は、システム内の構成要素（リンク）およびカットセットの重要度を時々刻々評価することにより、重要度の高い被災リンクから優先的に修理していく復旧戦略を提案するものである。なお、復旧率は現実に即する様に考えた。また、被害程度の大小に応じた復旧方針を立てることにより、定量的に復旧の過程を検討した。

2. 重要度による復旧過程

前論文¹⁾と同じように、各リンクは数個の要素より構成されているとした。モンテカルロ法を用いることにより、被災リンクと被害位置を決定し、損傷ネットワーク網をシュミレートした。被害程度の状態変化はマルコフ過程に従うものと仮定し、各復旧段階において被害状態ベクトルを解析的に求めた。このとき、被害程度としては、大(Vary Large)、中(Medium)、小(Very Small)、被害とそれらの被害がシステム内の各リンクで一様に生起するケース(Uniform)を定義した。

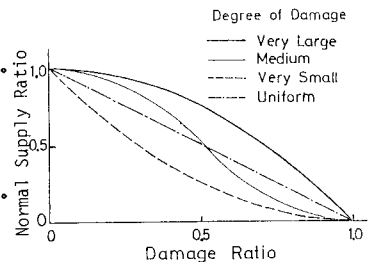


図1 4種類の被害程度に対応した被害率と供給率の関係

図1は、上記の4つの被害程度に対する被害率と供給率の関係を示したものである。これより、各被害程度に応じて、被災リンクの連結性を示す指標を導入した。図2は、大被害が生じたときの被害率の確率密度関数であり、被害状態としては、Minor, Moderate, Majorの3つを考えた。以上の結果から、連結性の尺度を定義することにより、システムの非連結確率を求め、さらに被災リンクの重要度を定量的に評価して修理箇所を決定し、各復旧段階における修復活動を実施した。

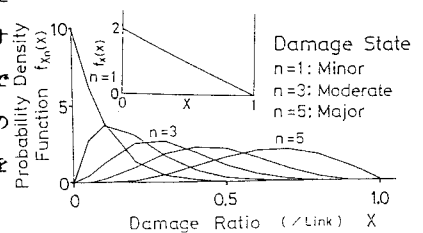


図2 大被害時における被害率の確率密度関数

重要度としては、以下の4種類を用いた²⁾

- 1) 被災リンクの非連結確率を減少させたとき、システムの非連結確率がどれだけ減少するかを表わすBirnbbaumの重要度
- 2) システムに占められる各リンクの非連結確率の重みを考慮したCriticalityの重要度
- 3) 1)の重要度と前論文¹⁾の手法によって算定した破損箇所数の積を復旧開始から各復旧段階まで累加したBarlow-Proschanの重要度
- 4) 被災リンクを含むカットセットがシステムの機能の劣化にどれだけ関与しているかを表わすFussell-VeselyのCut Set重要度

また、前論文¹⁾で提案した復旧方針も採用し、この方法により被災リンクの破損箇所の期待数から復旧リンクを決定した手順と本研究の方針との相互比較を行なった。

震後の時刻 t の復旧率 ν は、図3で示すように、復旧率の最大値 α_p と最大となる時刻 t_p を用いて、

$$\nu(t) = \alpha_p t / t_p \exp(1 - t / t_p)$$

より算定した。

システムの復旧状態を示す指標としては、システム内の需要端と供給端間の非連結確率を採用した。

3. 復旧に伴う非連結確率

前論文¹⁾と同じ仙台市の水道網モデルを対象とし、復旧戦略について考察した。なお、以下の計算は主に大被

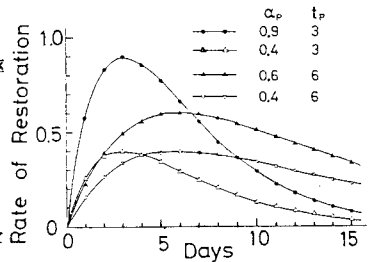


図3 復旧率の経時変化

害時の復旧のシュミレーションを実施した。図

4は、前述の4つの重要度と前論文の手法に基づいて、被災リンクの復旧を進めたとき、システムの非連結確率の変化を示したものである。

同図より、破壊箇所の期待数の変化を用いて、復旧活動を行なった前論文の方法 (Reliability) によれば、早急に平常状態に回復することがわかる。ただし、これは、被災リンクの中で重要度の高位の1リンクに注目した戦略と異なり、1ステップで複数個の被災リンクを同時に復旧

できると仮定したことによる。Birnbaumの重要度を用いると、早急に復旧できるが、修理の難易度を考えていないため、多大な費用を要する可能性があることがわかる。Criticalityの重要度によると、復旧は容易に実施できるが、速やかな復旧が得られていない。Barlow-Proschanの重要度によると、他の復旧戦略に比べて、完全復旧までに1日余分に復旧時間がかかっている。Fussell-VeselyのCut Set 重要度を用いると、これらの中間的な復旧過程を示している。

図5にはBirnbaumの重要度に基づく復旧過程の、復旧率 (α_p と t_p の3つの組合せ) による相違を示した。これによれば、初期段階にできるだけ早急に修理を行なう戦略をとることにより、システムの機能が速やかに回復できることを示している。図6 被害程度が復旧過程に

図6は被害程度による復旧過程の相違を示したものである。小被害から大被害まで一様に被害が生じた場合、地震直後にシステムの機能が最も悪くなっており、復旧作業も手間どっている。しかし、大・中・小の各被害が生じた場合、被害が小さいほど早く平常状態に回復し易いが、完全に復旧する日数は一致している。この結果から判断すると、被害状態を小さくするためにシステムの耐震性を図って多大な投資をしておく、復旧の初期段階において連結性能が早く回復することがわかる。しかし、最終的には、完全復旧に要す時間を短縮するためには十分な効果があるとは限らない。

4. 重要度の経時変化

図7は、Birnbaumの重要度に基づく被災リンクの重要度の順位の経時変化および、修理リンクを示したものである。図中の●・▲・◇は各復旧時に被災リンクについて修理した要素数を示している。また図8は、被災リンク36に着目したときの各被害程度に応じたBirnbaumの重要度の経時変化を、一方図9は復旧率の相違による重要度の経時変化を示したものである。これらの結果は、復旧率、被害程度や被害の状態、修理リンクの決定法の相違によ

って、復旧の様相が異なってくることを示唆している。そのため、これらの特徴を考慮して、それに見合った復旧戦略をたてる必要がある。しかし初期の段階に復旧作業を集中的に行なうと、復旧効果をより一層高めることが可能であることがわかる。

参考文献 1) 山田、家村、野田、小笠原：土木学会論文報告集、第326号、1982.10
2) Henley, E.J. and Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, 1981

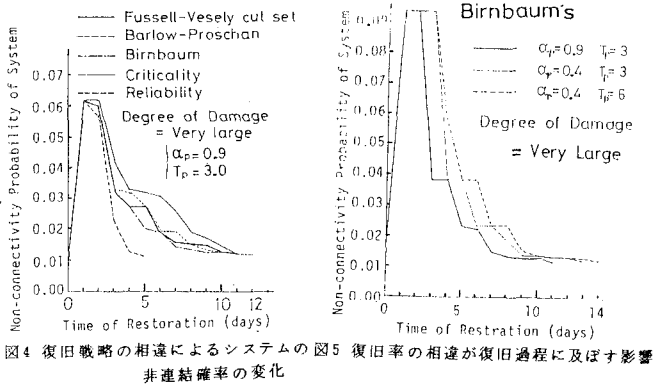


図4 復旧戦略の相違によるシステムの非連結確率の変化

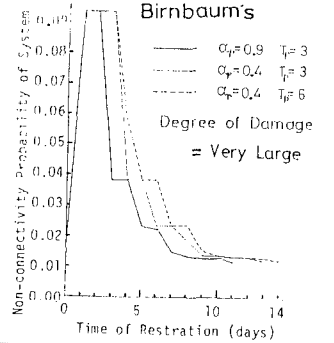


図5 復旧率の相違が復旧過程に及ぼす影響

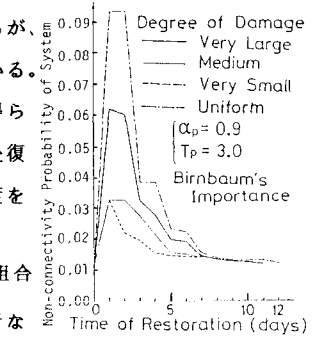


図6 被害程度が復旧過程に及ぼす影響

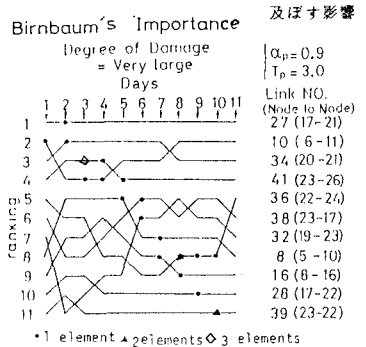


図7 重要度に基づく被災リンクのランキングの経時変化

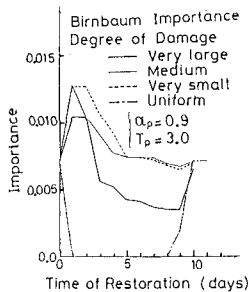


図8 被害程度による被災リンク36の重要度の経時変化

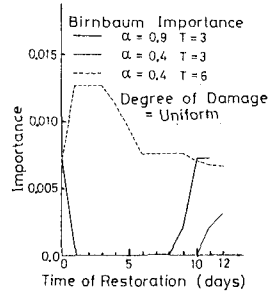


図9 復旧率の相違による被災リンク36の重要度の経時変化