

京都大学	博士（工学）	氏名	MAHDI FARAJI
論文題目	SEISMIC PERFORMANCE AND DISASTER MANAGEMENT OF INTERDEPENDENT CRITICAL INFRASTRUCTURES（相互依存性を有するクリティカルインフラストラクチャーの地震時性能と地震災害マネジメントに関する研究）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>現代社会において重要かつ不可欠なクリティカルインフラストラクチャーの役割はますます大きくなっている。その中でも、経済的な繁栄や生活の質を維持する核となるサービスであるライフラインの役割は特に重要である。水道、電気、ガス、通信をはじめとするライフラインは単独では機能しない場合が多く、複数のレベルで繋がりを持った相互依存の関係にある。この相互依存性はシステム全体としての機能を向上させるが、一方で連鎖的被害の可能性を増加させ、わずかな障害の影響で壊滅的な被害が生じることもある。</p> <p>本論文は、クリティカルインフラストラクチャーのネットワーク構成要素の被害についての検討、線的・面的に広がるインフラストラクチャーの地震ハザード解析、および相互依存性を有するネットワークの信頼性解析を基に、相互依存性があるライフラインネットワークの地震災害マネジメントの新たな方法論を提案したものであり、8章から成っている。</p> <p>第1章は、序論である。人間社会におけるクリティカルインフラストラクチャーの役割とその重要性の背景の下に、研究の目的と目標を明示し、過去の関連文献のレビューの中で本研究の位置づけを明確にした上で、論文の構成について述べている。</p> <p>第2章では、クリティカルインフラストラクチャーと、それを構成する各要素の特徴をまとめている。クリティカルインフラストラクチャーの中でも特に生活に密接にかかわっている上水道と電力の2つのネットワークを対象に、システムネットワークを構成するリンクやノード等の各要素の地震時性能、ネットワーク間の相互連関、近年の複雑化するネットワークに対するネットワークトポロジーやネットワークダイナミクス、相互連関システムについて詳述している。また、2003年に甚大な物的・人的被害を出したイラン・バム地震の地震動および地震被害の概要と、この地震におけるクリティカルインフラストラクチャーの役割と被害についてまとめている。</p> <p>第3章は、クリティカルインフラストラクチャーのモデル化について論じたものである。ここでは、主にグラフ理論的なアプローチによってモデル化を行った。ここでは、ノードに対して、同種・異種のネットワークの要素を物理的・機能的に結びつける役割を負わせ、ネットワークトポロジーやフローパターンの詳細な記述とともに、直観的に理解し易くまた取り扱い易い形でのアプローチを行っている。本手法により、システムトポロジーや構成要素の脆弱性、地震動強度と構成要素のパフォーマンスレベル（連結性や流量など）がネットワーク全体へ与える影響の評価が可能であることを示すことができた。</p> <p>第4章では、クリティカルインフラストラクチャーの災害マネジメントに欠くことのできない、ライフラインを対象にしたハザード解析手法を提案した。施設や構造物の地震リスクの評価は、一般的に確率論的な地震ハザード解析（PSHA）とシナリオ規定型地震（SE）を用いた二つの基本的なアプローチに大別できる。PSHAは個々の構造物や橋、その他の施設などにおける設計や評価の基本として広く受け入れられている。しかしながら、線的・面的な拮がりをもつインフラ施設の脆弱性評価は、強震動の空</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	MAHDI FARAJI
<p>間的な強度分布のモデル化が必要となる。すなわち、これまでの PSHA による考え方をそのまま適用すると、個々の点における独立なハザードが算出されるため、空間的な拡がりをもつシステムにそのまま適用できない。本研究では、各点で相関を有するようなハザードカーブから、線的・面的に拡がりを持つシステムのハザードカーブを算出する方法論を提示した。すなわち、最大加速度や最大速度のアテニュエーション式や当該地盤の増幅特性を援用したハザード解析に、上記地震動強度の空間相関を取り入れた解析手法を提案している。また、リスク解析のために、それぞれのネットワーク構成要素の脆弱度関数の検討も行った。</p> <p>第 5 章は、クリティカルインフラストラクチャーの信頼性評価について述べたものである。信頼性評価の基本概念を述べるとともに、空間的な相関をもつ地震動入力の下での個々のインフラの信頼性解析を行った。複数のクリティカルインフラストラクチャーの相互関連モデルの構築に際しては、二つの重要な問題、すなわち地震環境下でのネットワーク応答の評価の問題と、ネットワーク間のカップリングによる脆弱性の増大の問題である。前者は本章で、後者は次章で主に検討している。ここで用いた信頼性解析のためのモデルは、GIS を用いて空間的に分布するネットワークで表現され、このモデル化に従ってハザード解析に基づく被災時のネットワークパフォーマンスの評価が行われた。個々のネットワーク施設の地震リスク評価は、地震災害のマイクロゾーニングと構造特性を勘案した脆弱性曲線を基本として適用される。本研究では、独立したネットワークと相互依存したネットワークにおけるシステムの脆弱性曲線の相違を機能指標の観点から提示している。</p> <p>第 6 章では、相互依存性を有するクリティカルインフラストラクチャーシステムのモデル化について検討を行った。人々への水供給における相互依存ネットワークの地震被害の影響を評価するために、ネットワークパフォーマンスを評価するための様々なパラメータを定義した。グラフ理論のトポロジカルな性質を基にしたこれらのパラメータを様々な入力強度に対して計算し、GIS 上に可視化した。本章では、相互依存性を有するネットワークとして電力と水道を取り上げ、ネットワーク間の相互関連挙動は、井戸とポンプ場という取水・送水施設を通じて電力グリッド上で相互に依存するものとして特徴づけた。また、他ネットワークへの依存性に関しては、相互依存度の強度から定義される相互マトリクスでモデル化した。そして、電力供給の変電所と電柱の機械的な構造的脆弱性がどの程度この依存性に寄与するかを明らかにした。</p> <p>第 7 章は、相互依存性を持つクリティカルインフラストラクチャーのリスク評価と災害マネジメントについて述べたものである。この応用として、イラン南東部のバム市をケーススタディとした。2003 年に発生したバム地震 (<math>M_w = 6.5</math>) によってバム市の大半が破壊されている。この地震は、バム市の周辺領域における過去の歴史地震の中で最も破壊的な地震であり、主に震央地域の電力、水道、通信ネットワークに甚大な被害を与えた。バムのインフラデータ (飲料水、電力ネットワーク) を用いて、システム間の相互依存性を有するインフラシステムの機能的被害の評価を行った。ここでは、機能的被害を復旧時間と復旧に投入する労力を指標として表現し、相互依存性がある場合とない場合の違いを明らかにした。これらを基に、相互依存性を有するインフラストラクチャーの地震災害マネジメントに対する提案を行った。</p> <p>第 8 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、クリティカルインフラストラクチャーのネットワーク構成要素の被害とそのモデル化についての検討を行い、線的・面的に広がるインフラストラクチャーの地震ハザード解析の考え方や、インフラストラクチャーの信頼度とネットワークパフォーマンスの考え方を提案するとともに、それに基づいて相互依存性を有するネットワークの信頼度を提示した。そして、上記手法や結果を統合し、実際のケーススタディを通して地震災害マネジメントの重要性を明らかにすることによって、相互依存性を有するインフラストラクチャーの地震災害マネジメントに対する提案を行った。本論文で得られた主な成果は次の通りである。

1. クリティカルインフラストラクチャーの中でも特に生活に密接にかかわっている上水道と電力の2つのネットワークを対象に、システムネットワークを構成するリンクやノード等の各要素の地震時性能、ネットワーク間の相互連関、近年の複雑化するネットワークに対するネットワークトポロジーやネットワークダイナミクスについて統合的に分析し、相互連関システムのモデル化に必要な要素技術を明示した。
2. クリティカルインフラストラクチャーの災害マネジメントに欠くことのできない、ライフラインを対象にしたハザード解析手法に関して、各点で相関を有するようなハザードカーブから、線的・面的に拡がりを持つシステムのハザードカーブを算出する方法論を提示した。
3. 地震環境下でのネットワーク応答の評価の問題と、ネットワーク間のカップリングによる脆弱性の増大の問題を解決するために、独立したネットワークと相互依存したネットワークにおけるシステムの脆弱性曲線の相違を機能指標の観点から明らかにした。
4. 相互依存性を有するクリティカルインフラストラクチャーシステムのモデル化に基づいて、相互依存ネットワークの地震被害の影響を評価するための指標を提示した。そして、ネットワークノードとしての電力供給の変電所と電柱の構造的脆弱性がどの程度この依存性に寄与するかを明らかにした。
5. 2003年イラン・バム地震(Mw6.5)によってその大半が破壊されたバム市をケーススタディとして、リスク解析を行った。機能的被害を復旧時間と復旧に投入する労力を指標として表現し、相互依存性がある場合とない場合の違いを明らかにした上で、相互依存性を有するインフラストラクチャーの地震災害マネジメントに対する提案を行った。

以上より、本論文は、相互依存性を有するネットワーク型インフラストラクチャーの地震災害マネジメントの実装に関して、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年8月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。