

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25420491

研究課題名（和文）上水道システムの地震リスク評価

研究課題名（英文）Estimation of the Seismic Risk of Water Supply System

研究代表者

丸山 収（Maruyama, Osamu）

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：50209699

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は公共事業体が管理運営する上水道システムのリスク評価を定量的に行うことを目的としている。本研究で解析対象としている下層配水管網の多くは、高度経済成長期に建設され、経年劣化による老朽化が進行しており、現在、各自治体において小口径配水管の更新工事を行っているものの、大地震が発生した場合には大規模な被害が生じることが想定される。本研究では、確率的に地震時の構造的被害および機能的被害損失額評価を行うことを提案しており、PML値を指標としたリスク分析を実施している。

研究成果の概要（英文）：The numerous major earthquakes in Japan, such as the Great Hanshin-Awaji earthquake, Tohoku Regional Pacific Coast earthquake caused substantial casualties and property damages. Private companies/public utility enterprises should provide disaster reduction investment as part of risk management and prepare a strategic Business Continuity Plan. The significance of the Business Continuity Plan has been increasingly important in the connection of corporate social responsibility. This study focuses on the seismic risk analysis of the existing water supply system. The probable maximum loss index is employed to evaluate the seismic risk. An alternative method is proposed to evaluate Probable Maximum Loss index of the high order water supply network system.

研究分野：維持管理工学

キーワード：地震リスク 上水道システム 確率論的最大損失 中心極限定理 ネットワークシステム 最小費用流問題

### 1. 研究開始当初の背景

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、人的被害や構造物の破壊など甚大な被害をもたらした。一方新潟県中越地区は、2004年10月23日の新潟県中越地震、2007年7月16日の新潟県中越沖地震により、数年間に2度の地震被害を受けている。さらに、東海地震、東南海地震、南海地震といった巨大地震の発生と、それに伴う広域的な被害が懸念されている。

内閣府の中央防災会議は、防災を平常時の社会システムの一部として定着させていく取り組みを推進している。そして、公共事業体や民間企業の防災力向上に関する様々な方策を検討するとともに、大規模な災害が発生しても自治体または企業が、事業を継続していけるような戦略「事業継続ガイドライン」を公表している。それにともない、防災に関する事業継続計画 (Business Continuity Plan: BCP) の策定は、公共または民間事業体の区別なく急速に社会に浸透してきている。自然災害に対する BCP 策定の目的は、災害の発生に伴って重要な業務が中断しないように、または中断してしまった場合においても、設定した目標復旧時間内に業務を再開できるような事前対策を立案することである。災害時における BCP 策定の根幹は、リスク分析と事業影響度分析を定量的に行うことである。すなわち、現状のリスクを定量的に評価し、事業中断の結果がもたらすインパクトを明確にすることである。

### 2. 研究の目的

本研究では、地震リスクを評価する手法として PML (Probable Maximum Loss) を用いている。対象都市の水道システムの下層配水管配水管網を解析対象として、評価期間 50 年の確率地震を想定する。そして、配水管ネットワークの構造的被害および断水による機能的な損失額を算出し、PML を評価指標とした地震リスクカーブを求める。また、配水管ネットワークの損失額を評価する際に、ネットワークの連結性を考慮した膨大な損傷イベントの組み合わせ問題を効率的に解くことを提案し、ガウス分布で近似される損失額の確率密度関数を求め、それを解析的に積分することにより、PML 指標を算出する。

### 3. 研究の方法

対象地区の上水道システムの地震ハザード情報を地理情報システムにより、メッシュ単位にデータベース化することを行った。本研究課題では、作成したデータベースを基に、地震による構造的被害および機能的被害を合わせた損失の PML を算出することを行う。

構造的な被害に関しては、研究成果として中心極限定理による効果的な評価法を開発した。PML 値を算定する際に、被害の空間相関を考慮することは需要である。この点に関

しては、相関を有するポアソン分布が解析対象地域のメッシュ数が多くなれば、弱相関を有する場合に、相関のある正規分布に収束することを、証明することが必要である。

一方、構造的被害の評価に関しては、水道システムの冗長性を考慮した評価手法が必要である。ネットワーク解析アルゴリズムである最小費用流問題とモンテカルロ法を組み合わせた手法の開発を行う。

### 4. 研究成果

ハザード解析に必要な情報を地理データシステムに取り込んで、地表面最大速度に対応した、解析対象地域の平均被害個所数を算出した。例として図-1 に 50 年超過確率 0.02 の地震に対する鑄鉄管、管径 200-450 (mm) の平均被害個所数を示す。

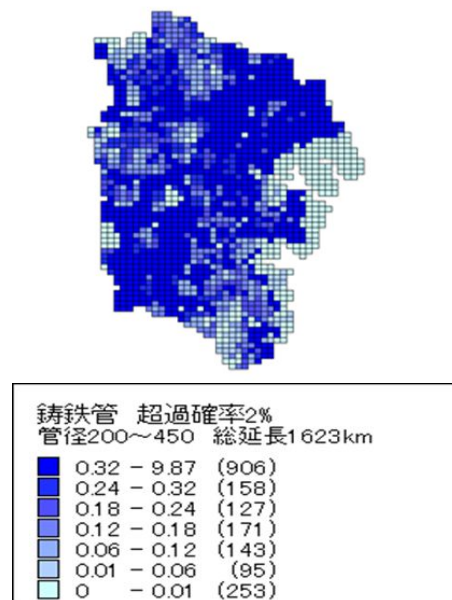


図-1 地震による平均被害個所数

#### (1) 構造的損失の算出

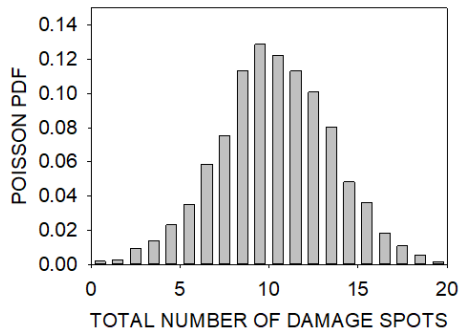
地震動の空間相関を考慮した配水管被害箇所数の確率モデル作成した。被害箇所数の確率モデルに関しては、都市域の大規模な水道システムを対象とする場合、個々のメッシュの被害発生は稀であることから、相関のあるポアソン分布を仮定している。ただし、都市域においては、数千のメッシュ数となることから、中心極限定理による効率的な計算法を提案した。

$$W = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (1)$$

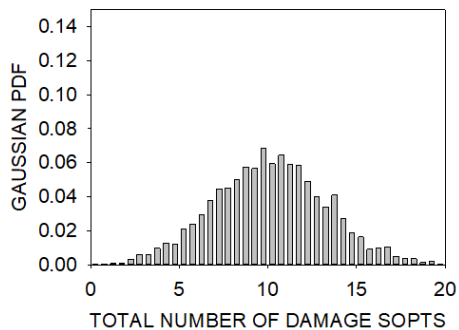
すなわち、式(1)において、被害個所数  $x_i$   $i = 1, 2, \dots, n$  に再調達価格に  $a_i$   $i = 1, 2, \dots, n$  を乗じたものが損失となるが、被害個所数を相関のあるポアソン分布として、メッシュ数が多くなった際に、中心極限定理により相関を有するガウス分布に近似可能であることをマルコフ連鎖モンテカルロシミュレーション

により検証する。

図-2では、平均0.5、分散0.5と仮定し、各メッシュが独立な場合に、モンテカルロシミュレーションを用いて、ポアソン分布およびガウス分布から確率変数をシミュレートして、式(1)において再調達価格を共通に1.0とした場合の計算結果を示している。中心距離が2mのメッシュが20個連続して一直線上に並んでいると仮定し、各メッシュが独立な場合と相関を有する場合に累積確率を算出し、同じ平均値および分散値を有するガウス分布と比較した。



(a) ポアソン分布



(b) ガウス分布

図-2 被害個所が独立な場合

図-3には、累積確率関数を示している。図-3より、中心極限定理が成立していることが分かる。

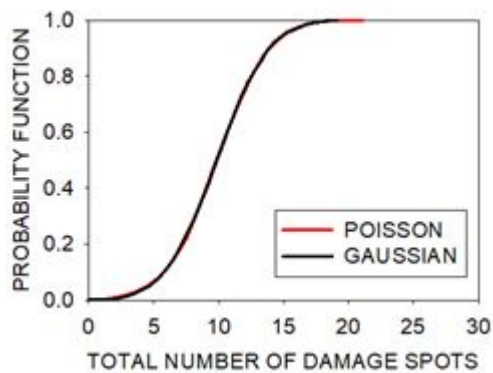


図-3 累積確率関数

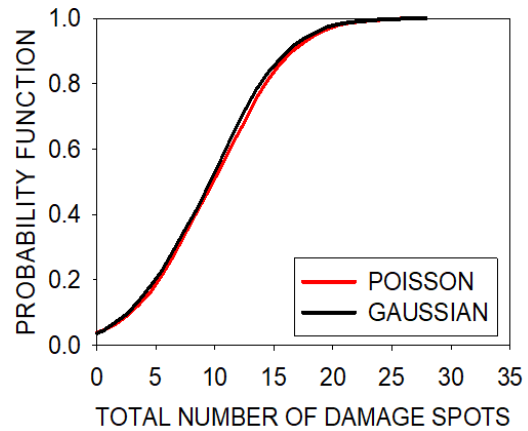


図-4 相関のある場合

次に、相関を有する場合のポアソン分布、ガウス分布の累積確率関数を図-4に示す。相関を有する場合にも、両者は、一致していることが分かる。すなわち、相関を有するポアソン分布の和は、概ね相関のあるガウス分布に近似できるものと考えられる。ただし、相関の程度など、今後詳細な検討が必要とされる。

図-5には、相関を有する場合の累積確率率を表している。図に示すように平均値は両者とも同じ値となっているが、相関を有することで、90%超過確率であるPML値が異なっていることが分かる。したがって、上水道システムのPML算出に関して、被害個所の空間相関を考慮することが必要であることが分かる。

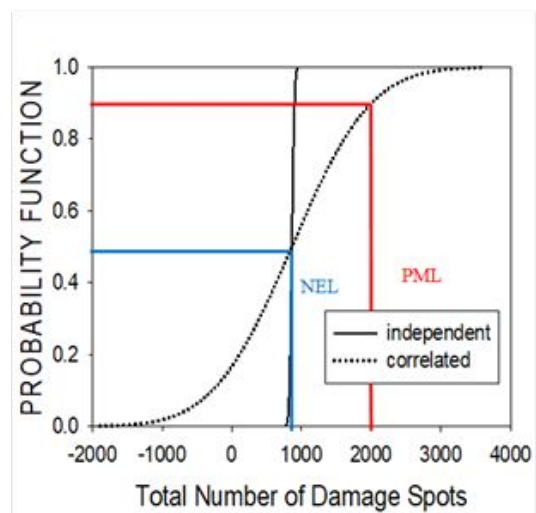


図-5 相関のある累積確率関数

## (2) 機能的損失の算出

機能的損失は地震により管路が破損した際にどの程度断水するかにより評価する。用いるデータとしては式(4)で求めた平均被害箇所数である。算定した一部のメッシュの平均被害箇所数を抽出し、その値が平均となるような乱数をモンテカルロ法

より発生させ、そのいくつかの被害箇所数を各リンクに与え、その状態で供給ノードより水を流し、断水率の算定を行う。この際、リンクの被害箇所数が1箇所以上発生するとその管は通水不可能とする。

次に、断水率を求める際に使用する断水量の算定方法について述べる。本研究では以下の式より断水量を算定する。

$$\text{断水量} = \text{平常時給水量} - \text{震災時 給水量} \quad (2)$$

本研究では最小費用流問題とモンテカルロ法を用いて断水量の算定を行う。解析対象のネットワーク1を、図-6に示す。

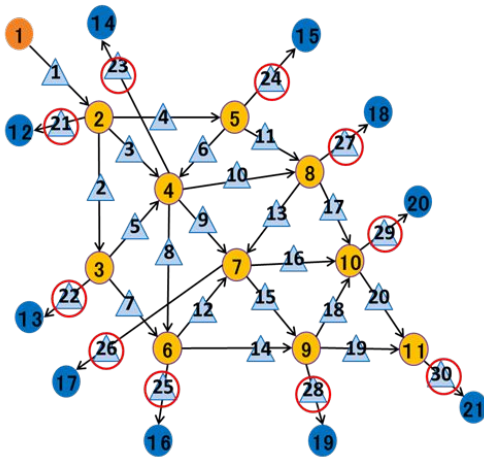


図-6 解析対象ネットワーク1

本研究では赤い丸で囲われたリンクが需要ノードに直接繋がるリンクであることから、これらのリンクに平常時と震災時にどれだけ水が流れるかを比較することでネットワーク全体の断水率を算定する解析を行っている。

図-7は、50年超過確率0.02の地震に対する断水率の分布である。また、図-8は、図-7から計算した累積確率関数であり、非超過確率0.9,すなわちPMLの値を示している。

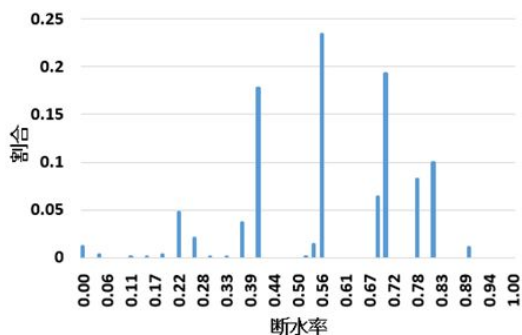


図-7 断水率の分布

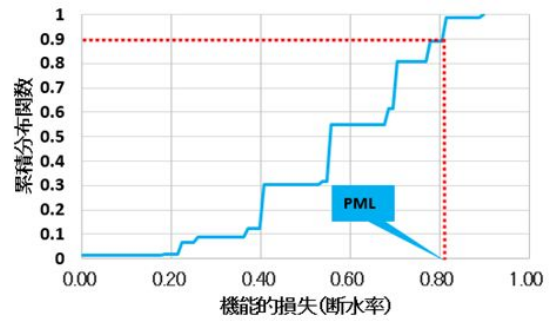


図-8 累積超過確率

同様に、図-9および図-10は、50年超過確率0.39に地震に対する断水率および累積確率関数である。

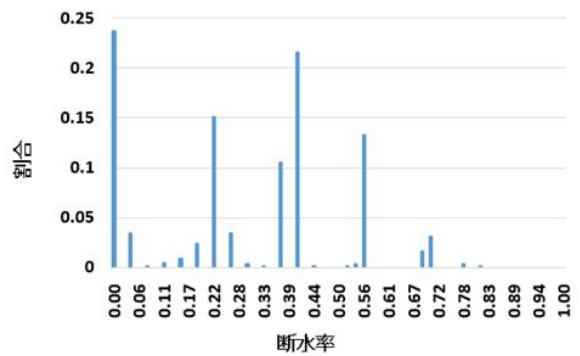


図-9 断水率の分布

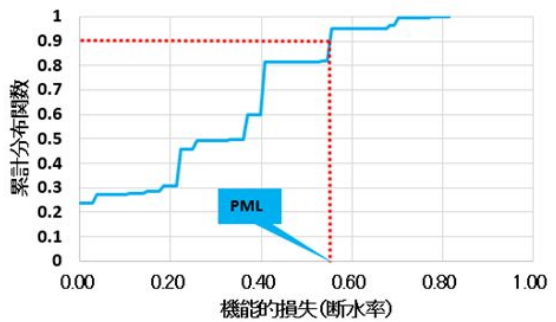


図-10 累積超過確率

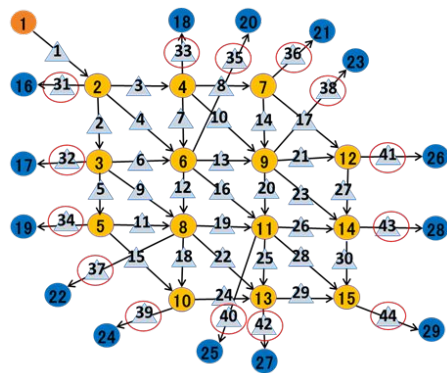


図 11 解析対象ネットワーク 2

次に、図-11 に示す解析対象ネットワーク 2 に対して、同様な計算を行った。

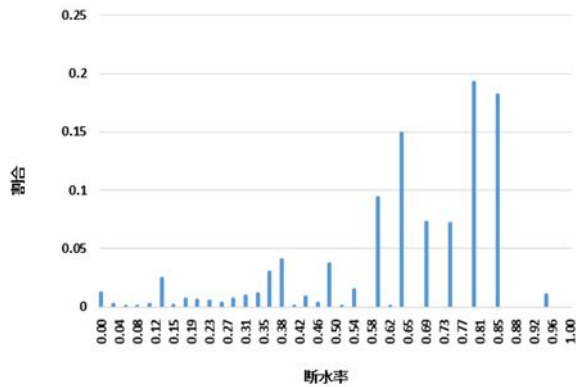


図-12 断水率の分布 (50年超過確率 0.02)

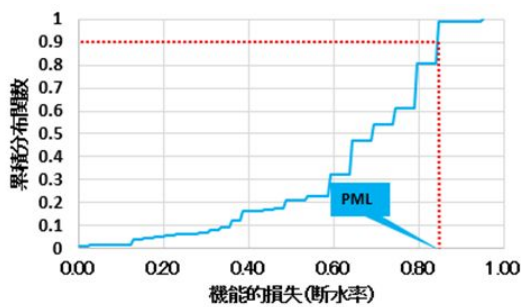


図-13 累積超過確率 (50年超過確率 0.02)

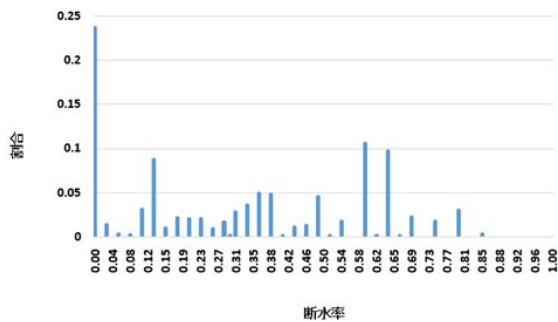


図-14 断水率の分布(50年超過確率 0.39)

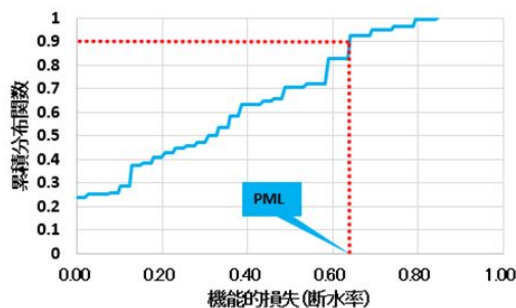


図-15 断水率の分布(50年超過確率 0.02)

断水による機能的損失の評価に関しては、当然のことながらネットワーク形状による影響が大きい。今回使用した小規模なネットワークであれば、累積分布関数を用いる事で PML 値の算定も可能である。しかしながら、大規模ネットワークに適用するためには、十分な成果となっていない。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

Maruyama, O. and Komatsu, R., 2013, Seismic Damage Prediction of Water Supply System With PML Index, The thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Sapporo, Hokkaido, Japan.

Maruyama, O., 2015, Estimation of Probable Maximum Loss Index of Water Supply System, The fifth International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2015), Rotterdam, Netherland.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸山 收 (MARUYAMA Osamu)

東京都市大学・工学部都市工学科・教授  
研究者番号：50209699

(2) 研究分担者

なし ( )

(3) 連携研究者

なし ( )

(4) 研究協力

なし ( )