PML 指標を用いた上水道システムの地震リスク評価

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝
武蔵工業大学 正会員 丸山 收
武蔵工業大学 正会員 山本欣弥
武蔵工業大学 学生員 ○嶽 仁志

1. はじめに

本研究は，上水道システムを対象として，年間最大損失 PML(Probable Maximum Loss)指標を用いた地震リスクの評価法と解析手順を論じたものである．現在，PML 手法による上水道システムの地震リスクを評価するための基礎研究を行っており，以下に報告する．

2. 上水道システムの地震リスク解析

多震源シナリオ地震: $E_q, q = 1, 2, ,\cdots, m$ による上水道システムの年間構造損失: S_q と給水停止による機能的損失: F_q を確率論的に評価することを行うが，評価指標としては 95%非超過確率に相当する年間最大損失 PML を用いることとする．ここでは，単年度の最大損失の評価を行うものとして議論を進めるが，今後評価対象期間: n 年間へと議論を展開する．また，ネットワークシステムと解析条件に関して以下の仮定を用いる．

- リンクとノードで構成されたネットワークを解析対象とし，リンクの破壊，非破壊のみを確率的に評価する．供給ノード，需要ノードは確定的に非破壊とする．
- 多震源シナリオ地震: E_q は，いずれかの地震が年間で高々1 回発生するものとする．したがって，$E_q, q = 1, 2, ,\cdots, m$ による損失 PML のうちで最大値を採用する．

2.1 解析手順

リンクとノードで構成されたネットワークに影響を与える震源 E_q を考え，その発生確率を $P(E_q)$ とする．地震の発生確率が与えられると，震源 E_q において地震が発生したという条件の下で，最大加速度，最大速度分布などの情報が得られ，地盤条件，管の材質，管径などに依存してリンクの条件付き破壊確率 $P(S_j \mid E_q), j = 1,2,\cdots n$ が算出できる．したがって，地震によるリンクの破壊確率 $P_{j,q}$ は次式で求められる．

$$P_{j,q} = P(S_j \mid E_q)P(E_q), j = 1,2,\cdots, n \quad (1)$$

ここで，S_j : j 番目のリンクであり，n :リンクの総数である．

次に，構造的損失 S_q を求める．構造的損失 S_q はリンクの破壊または非破壊に依存するため，これらを状態ベクトル $\boldsymbol{X}_q = \{x_1, x_2, \cdots x_j, \cdots x_n\}_q$ として抽出する必要がある．また，状態ベクトル $\boldsymbol{X}_q$ の総数は 2^n となる．j 番目のリンクが破壊したならば $x_j = 1$ を，非破壊ならば $x_j = 0$ とすると，状態ベクトル $\boldsymbol{X}_q$ の発生確率は次式で与えられる．

$$P(X_q) = \prod_{j=1}^{n} P_{j,q}{}^{xj}(1 - P_{j,q})^{1-xj} \quad (2)$$

一方，構造的損失 S_q は式(3)で表される．

$$S_q = \sum_{j=1}^{n} x_j s_j \quad (3)$$

ここで，s_j は j 番目のリンクの再調達価格である．ただし，後の計算では，その数値は平時総資産価格に対する比率（%）で表現している．

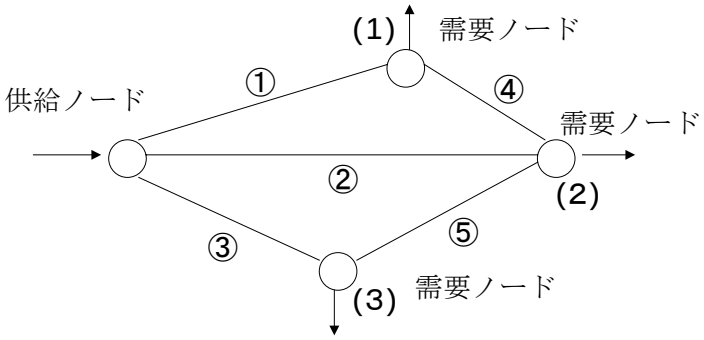
次に，機能的損失 F_q を求める．本研究では供給・需要ノードは非破壊としているため，あるリンクが破壊した場合に水の供給が可能か，不可能になるかを調べる必要がある．各ノードに関する状態ベクトルを $\boldsymbol{Y}_q = \{y_1, y_2, \cdots y_k \cdots y_{mm}\}$ とする．このとき，k 番目のノードに水が供給されない場合は $y_k = 1$ を，供給される場合は $y_k = 0$ とし，mm はノードの数を表している．また，機能的損失 F_q も式(3)と同様に次式で与える．

$$F_q = \sum_{k=1}^{mm} y_k f_k \quad (4)$$

ここで，f_k は k 番目のノードから得られる便益/収益である．ただし，その数値は平時総資産価格に対する比率（%）で表現している．

損失総額: L_q は構造的損失: S_q と機能的損失: F_q の和として求められる．

キーワード 地震リスク，PML，上水道システム，ネットワーク解析
連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1



図－1 解析対象ネットワーク

$$L_q = S_q + F_q \qquad (5)$$

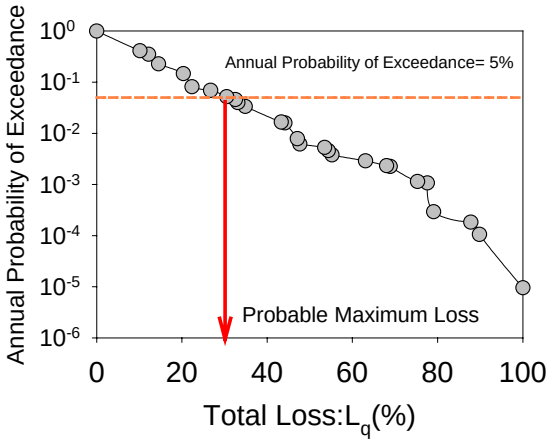
以上により，単一のシナリオ地震に対する損失総額: L_q と発生確率: $P(X_q)$ を算出し，その中で最悪なPMLを求めることができる．

3. 解析例題

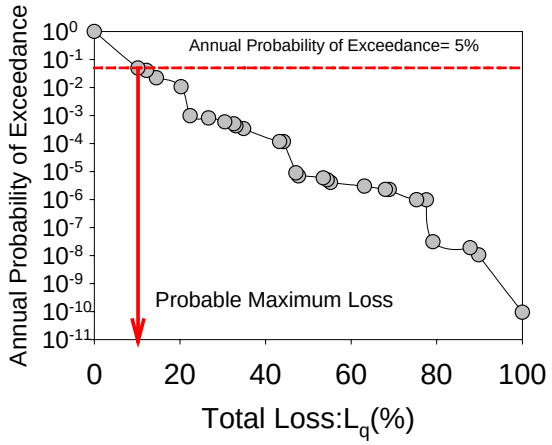
本解析では，図-1のように①～⑤で表された 5 本のリンクと4つのノードのモデルを用いて，以下に示すシナリオ1～3の3通りの解析をした．図-1において，左端のノードが供給ノードであり，(1)から(3)が需要ノードである．シナリオ 1 は，基本のシナリオである．地震発生確率 $P(E_q)$ を 0.2 に，リンクの条件付き破壊確率 $P(S_1 \mid E_q)$～$P(S_5 \mid E_q)$ をそれぞれ 0.6，0.5，0.4，0.45，0.55 とし，リンクの再調達価格 s_1～s_5 をそれぞれ 50，70，42，35，42 万円に，ノードから得られる便益/収益 f_1～f_3 を 35，40，30 万円と設定した．

シナリオ 2 は地震発生確率 $P(E_q)$ のみをシナリオ 1 の 1/10 とした．シナリオ 3 はノードから得られる便益/収益 f_q をシナリオ 1 の 4 倍に設定した．また今回は，震源数を 1 つとし，単年度での評価とした．

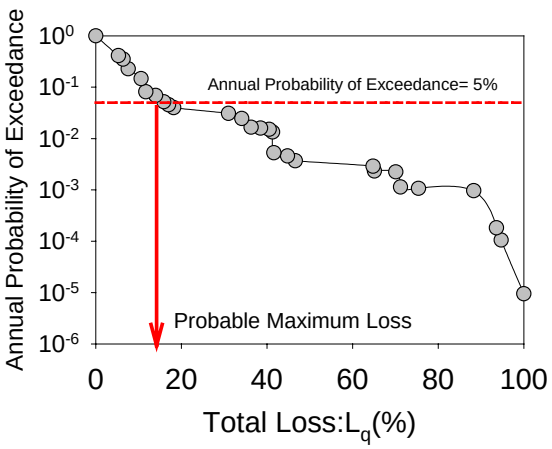
ここでは，図－1のネットワークを対象に解析する際に，$2^5 = 32$ ケースの全ての事象を列挙し，破壊確率，損失の計算を行っている．したがって，得られる結果は理論解である．シナリオ 1 から 3 の 95%の非超過確率に相当する PML の試算結果を図-2から図-4に示した．シナリオ 2(図-3)の解析結果から，地震発生確率 $P(E_q)$ を極端に小さくすると，95%の非超過確率を満たすことが出来なくなってしまった．ここで示した試算結果より，リンクの破壊確率，損失額の変動が，95%非超過確率の計算に影響を与えることが分った．またネットワークが複雑となり，冗長性が増す場合に非常に計算が困難となることが容易に推測できる．



図－2 シナリオ 1 による解析



図－3 シナリオ 2 による解析結果



図－4 シナリオ 3 による解析結果

4. まとめ

今後の課題としては，1)複雑なネットワークを対象とする場合に 95%の非超過確率を効率的に算出する手法，2)多震源や複数年においての評価も考慮する必要性，3)ハザードの情報を工学的な知見を基に与えることなどがあり，講演時に詳細を報告する．