

上水道下層配水管網の地震 PML 算定

○横浜市役所 正会員 嶽 仁志

武蔵工業大学 正会員 丸山 収

(株)イー・アール・エス 正会員 山本欣弥

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝

1. はじめに

内閣府の中央防災会議は、最重要課題として大規模地震による被害低減に関する「事業継続計画」を推進している。事業継続計画の策定内容は多岐にわたるが、その根幹は現状のシステムに対する定量的なリスク分析と事業影響度分析にある。本研究は公共事業体が運営する上水道下層配水管網を対象として、確率地震を外乱とする PML 値を指標とした地震リスク評価を行うことを目的としている。以下に解析手法を示し、計算例は講演時に示す。

2. 解析手法

本研究では、川崎市上水道下層配水管網を解析対象として地震動、配水管路、地盤種別、人口などのデータをメッシュ単位でデータベース化して解析を行う。管路の被害予測は、式(1)および式(2)を用いて行う。これらの推定式は、1995年に発生した兵庫県南部地震における水道管路の被害データより求められたものである¹⁾。

$$R_m(V) = C_p \times C_d \times C_g \times C_l \times R(V) \quad (4)$$

$$R(V) = 3.11 \times 10^{-3} \times (V - 15)^{1.30} \quad (5)$$

ここで、 $R_m(V)$ ：平均被害率(箇所/km)、 $R(V)$ ：標準被害率、 C_p ：管種補正係数、 C_d ：管径補正係数、 C_g ：地盤補正係数、 C_l ：液化化補正係数、 V ：地表面最大速度(kine)である。

実際に存在する管種、管径の組み合わせは15通りであるため、配水管を、 $pipe_j : j = 1, 2, \dots, 15$ とする。

配水管の被害は、延長方向にポアソン分布に従って発生すると考える。配水管の総延長 L 、平均被害率 $R_m(V)$ として、 x 箇所被害が発生する確率は次式で与えられる。

$$P(X=x) = \frac{(R_m(V) \cdot L)^x}{x!} e^{-R_m(V) \cdot L} \quad (6)$$

確率地震 E_q の発生を条件として、配水地区 i が、 n 個のメッシュで構成されているとする。メッシュ k 内の j 番目配水管 $pipe_{j,k} : k = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, 15$ の条件付被害発生確率は式(7)で表される。

$$PF_{j,k} = PF(pipe_{j,k} | E_q) \quad (7)$$

次に、メッシュ内 k 内の配水管 $pipe_{j,k}$ の平均被害箇所数： $n_{j,k}$ は式(8)で表される。

$$n_{j,k} = v_{j,k} \times L_{j,k} \quad (8)$$

ここで、 $v_{j,k}$ は、メッシュ k 内の配水管 $pipe_{j,k}$ の平均被害率($R_m(V_k) = v_{j,k}$)、 $L_{j,k}$ は、メッシュ k 内の配水管 $pipe_{j,k}$ の延長である。

式(8)の平均被害箇所数を用いて、被害箇所数の発生がポアソン分布に従うと仮定すると、式(7)は次式で与えられる。

$$PF(pipe_{j,k} | E_q) = \sum_{x=1}^{\infty} P(X_{j,k} = x | E_q) = \sum_{x=1}^{\infty} \frac{(n_{j,k})^x}{x!} \exp(-n_{j,k}) \quad (9)$$

各メッシュ単位の被害発生が独立であると仮定すると、配水地区 i 全体での配水管 $pipe_j : j = 1, 2, \dots, 15$ の被害非発生確率は次式で与えられる。

$$PS(area_{j,i} | E_q) = \prod_{k=1}^n (1 - PF(pipe_{j,k} | E_q)) \quad (10)$$

次に、配水地区 i 内の $pipe_j : j = 1, 2, \dots, 15$ の、平均被害箇所数 $n_{j,i} : i = 1, 2, \dots, 15$ をパラメータとする被害箇所数 x の発生確率は次式で与えられる。

$$P(X_{j,i} = x | E_q) = \frac{(n_{j,i})^x}{x!} \exp(-n_{j,i}) \quad (11)$$

式(11)において $x=0$ とおく。

$$P(X_{j,i} = 0 | E_q) = \exp(-n_{j,i}) \quad (12)$$

式(12)は、式(10)と等価であるので、配水地区内の $pipe_j : j = 1, 2, \dots, 15$ の平均被害発生箇所数 $n_{j,i}$ を、次式のように求めることができる。

$$n_{j,i} = -\log_e PS(area_{j,i} | E_q) \quad (13)$$

キーワード： 事業継続計画、地震リスク、上水道システム、PML

連絡先：〒158-8557 世田谷区玉堤 1-28-1 TEL: 03-3703-3111 E-mail: omaruya@sc.musashi-tech.ac.jp

以上により、配水地区ごとにポアソン分布による管種、管径別の被害箇所数に関する確率モデルを得ることが出来る。したがって、以上の議論を拡張して、川崎市下層配水ネットワーク全体の、配水管の管種・管径別の平均被害箇所数 $n_{j,all}$ を算出して、確率モデルを求めることが出来る。

3. 構造的損失および機能的損失による PML 指標

本研究における PML 値は損失総額＝構造的損失＋機能的損失の 90%非超過確率に相当する値とする。

構造的損失に関する PML を算出するには、各管種・管径の被害箇所数に関する全ての組み合わせを考え、最大損失額から上位 10%超過確率に相当する損失を計算しなければならないが、現実的には困難である。

そこで、本研究では被害発生箇所数 $n_{j,all} \rightarrow \infty$ のときに、ポアソン分布が、ガウス分布に漸近するという性質を用いて解析をする。ポアソン分布の平均値 $n_{j,all}$ 、分散 $n_{j,all}$ であり、 $n_{j,all} \rightarrow \infty$ のときにガウス分布 $N(n_{j,all}, n_{j,all})$ に漸近するということが理論的に証明される。したがって、以下の議論では被害発生箇所数 x は、ガウス性の確率変数として考える。

下層ネットワーク全体における管種・管径別の配水管の被害箇所数 $x_{j,all} : j=1,2,\dots,15$ に、1 箇所当たりの再調達価格 V_j を乗じた構造的損失額のガウス性確率変数 $S_{j,all}$ を考える。

$$S_{j,all} = V_j \cdot x_{j,all} \quad (14)$$

$S_{j,all} : j=1,\dots,15$ がそれぞれに独立なガウス性変数であるとする、ネットワーク全体の構造的損失額の評価は次式で与えられる。

$$S_q = \sum_{j=1}^{15} S_{j,all} = S_{1,all} + S_{2,all} + \dots + S_{15,all} \quad (15)$$

式(15)において、 $S_{j,all} : j=1,2,\dots,15$ の平均 $E[S_{j,all}]$ 、分散 $E[(S_{j,all} - \bar{S}_{j,all})^2]$ は、次式で与えられる。

$$E[S_{j,all}] = \bar{S}_{j,all} = V_j \cdot n_{j,all} \quad (16)$$

$$E[(S_{j,all} - \bar{S}_{j,all})^2] = \sigma_{j,all}^2 = V_j^2 \cdot n_{j,all} \quad (17)$$

従って、 S_q の平均 $\bar{S}_q$ 、分散 σ_q^2 も容易に求められ、 $W = (S_q - \bar{S}_q) / \sigma_q$ と正規化を行う。 W は、標準ガウス分布 $N(0,1)$ であるから累積超過確率 P は次式を計算すればよい。

$$P = 1 - \int_{-\infty}^{\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{W^2}{2}\right) dW \quad (18)$$

式(18)の超過確率が 0.1 となる α を求め、構造的損

失額の PML を次式で算出する。

$$S_{q,PML} = \alpha \sigma_q + \bar{S}_q \quad (19)$$

次に機能的損失 F_q の評価を考える。機能的損失額は断水期間中の水道料金収入の減少額として算出する。はじめに、式(13)と同様に、管種、管径を問わずに配水地区 i 内の平均被害箇所数 n_i を算出し、各配水地区に案分されたすべての管種、管径の管総延長 L_i から、配水管の平均被害率 v_i (被害箇所数/km) を求める。

$$v_i = n_i / L_i : i=1,\dots,15 \quad (20)$$

地震発生直後の配水地区 i の断水率 y_i が配水管の被害率 r_i の関数として、川上が提案する近似式を用いて以下のように与える²⁾。

$$y_i = \frac{1}{(1 + 0.0473 \times (r_i)^{-1.61})} \quad (21)$$

式(21)において、 $r_i = v_i$ として配水地区内の断水率を確定的に求め、配水地区内の平常時一日あたりの総配水量を乗じることで、地震発生直後の断水量を算出する。ここで、機能的損失は断水期間中の水道料金収入の減少分を考えている為、地震発生直後に断水してから管路が完全復旧するまでの復旧日数を算出する必要がある。本研究では、川崎市全体で計 150 社の企業が復旧作業に参加するとして、各社からそれぞれ 1 班ずつ、計 150 班が復旧作業に従事するものとした。配水地区ごとの復旧班数は、各配水地区の人口で案分した。

地震発生直後の被害箇所を平均被害箇所として、復旧作業を行うが、配水地区内に展開した復旧班数により、確定的に復旧に必要な日数が求められる。

以上より、下層ネットワーク全体の機能的損失 F_q は、次式で与えられる。

$$F_q = \sum_{i=1}^{15} \frac{D_{loss,i}}{D_{total,i}} \times I_i \quad (22)$$

ここで、 $D_{loss,i}$ は、配水地区 i の総断水量、 $D_{total,i}$ は、平常時における配水地区 i の 1 日当たりの総配水量、 I_i は、配水地区 i の 1 日当たりの水道料金収入である。したがって、式(15)と式(22)により、損失総額＝構造的損失＋機能的損失の PML 値を算出することが出来る。

参考文献：1) (社)日本水道協会：地震による水道管路の被害予測、1998.10., 2) 川上英二：第 1 回都市直下地震災害総合シンポジウム、1996。