袴田 健太

復旧支障の原因となるライフラインの近接被害発生に関する確率論的考察

1. はじめに

電気・ガス・水道等のライフラインは、平常時に相互 に依存して機能しているばかりではなく、地震時に様々 な相互連関を生じることが知られている。例えば複数の ライフラインの物理的被害が近接した地点で発生すると、 それらの復旧作業が錯綜することになり、互いに悪影響 を及ぼすため、復旧作業の調整等が必要になる。そこで 本研究では、こうしたライフラインの近接被害の発生に ついて確率論的に検討し、想定される地震においてどの ような状況となるか、事前に評価するための基礎的検討 を行うものである。

2. 微小区間における同時被害についての検討

ここでは多数あるライフラインから2つに限定し,面 的広がりを持つこれら2つのライフラインシステムを図 1の様に一次元に伸長した線上構造物としてモデル化す る.被害は各システムの全長で一様・独立・ランダムに発 生すると仮定し,被害率をそれぞれ ν₁, ν₂で表す.両シ ステムは十分に近接しており,被害位置は共通に,一次 元座標で表せるとする.また,被害発生はシステム間で 互いに独立とする.



事象の発生率が ν の時,事象発生間隔を確率変数 $X \ge$ すると,発生間隔の非超過確率は,指数分布 $P(X < x) = 1 - e^{\nu x}$ で表される.ここで、システム1側から見て任意の被害箇所から微小区間左右 $x(=\frac{l}{2})$ 以内にシステム2の 被害が発生している確率は $P(X < x) = 1 - e^{-2\nu_{2}x} \ge cx$ る.従って、同時被害発生率は、 $\nu_{1}(1 - e^{-2\nu_{2}x}) \ge cx$ り、 $e^{-2\nu_{2}x} \approx 1 - 2\nu_{2}x \ge 0$,式(1)で近似できる.

$$\nu_1(1 - e^{-2\nu_2 x}) = 2\nu_1\nu_2 x = \nu_1\nu_2 l \tag{1}$$

これより、有限長さLにおいて、長さl以内での両シ ステムの同時被害の平均発生数は $\nu_1\nu_2 lL$ で表される.ま た、その同時被害発生数は式(3)のポアソン分布に従う. なお、システム2から見た場合も同様の結論に至る.

$$P(k) = \frac{(\nu_1 \nu_2 lL)^k e^{-\nu_1 \nu_2 lL}}{k!}$$
(2)

3. 被害が同時発生するセグメント数の検討

上記の検討では、l が微小区間であることを前提とした.ここでは任意の区間長に適用できるように拡張する. 図2のように、全長Lのシステムを、長さ $l = \frac{L}{N}$ のセグメントの集合と考える.このセグメント内にシステム 1 および2の被害が少なくとも1箇所生じる事象をそれ 岐阜大学工学部 正会員 能島 暢呂

ぞれ, E_1 , E_2 とすると、両システム同時に被害が発生 する事象 E_1E_2 の確率 $P(E_1E_2) = p_S$ は、式(4)となる.

岐阜大学大学院



$$p_S = P(E_1)P(E_2) = \{1 - e^{-\nu_1 l}\}\{1 - e^{-\nu_2 l}\}$$
(3)

N 個のセグメントで同時被害発生するかしないかは, 発生確率 p_S で試行回数 N 回のベルヌーイ試行列を構成 する.またベルヌーイ試行列において,全長 $L = N \cdot l \circ 0$ うち同時被害発生しているセグメント数 N_S は式 (5) の 二項分布に従う.

$$B(N, N_S, p_S) = \binom{N}{N_S} (p_S)^N \{1 - p_S\}^{N - N_S}$$
(4)

 $N: セグメント数, p_S: 同時被害発生確率 <math>N_S: 被害が同時発生しているセグメント数$

数値計算例として、全長L = 100、セグメント数N = 1~50、被害発生率 $\nu_1 = \nu_2 = 0.1$ とした結果を図3に示 す. 横軸にセグメント数N、縦軸に同時被害発生してい るセグメント数 N_S をとる. バブルの大きさは二項分布 の確率関数を表す.



また,同時被害発生するセグメント数の期待値と標準 偏差はそれぞれ式(6),式(7)となる.図3と同様の条件 で得られた結果を図4に示す.

図 3, 図 4 より,分割数が少ないと,セグメント長が 十分に長くなり,同時被害発生確率が高くなるが,セグ メント数そのものは少なく, N_S は小さい.分割数が増え ると, N_S が増加すると共に,ばらつきが生じる.分割数 がさらに増えると,セグメント長が非常に短くセグメン ト内での同時被害発生確率が低くなるが,セグメント数 は多くなるため,最終的に $0\sim3$ 個程度に収束する.

$$\mu_{N_S} = N \cdot p_S = N \{ 1 - e^{\frac{-\nu_1 L}{N}} \} \{ 1 - e^{\frac{-\nu_2 L}{N}} \}$$
(5)

$$\sigma_{N_S} = \sqrt{N \cdot p_S \{1 - p_S\}} \tag{6}$$



図4 同時被害となるセグメント数の期待値と標準偏差

4. 首都圏における同時被害の検討

数値計算例として,東京都における2システムの同時 被害を対象とした例を示す.ここでは,「上水道ネットワー クの広域復旧戦略シミュレータ(簡易版)¹⁾」を利用する. このシミュレータは,地震動,管路情報,地盤情報等から, 選択した地震における対象地域の水道の被害箇所数等を 3次メッシュ単位で算出できる.本研究では,立川断層帯 と関東平野北西縁断層帯による地震を対象とした例を示 す.

図5に立川断層帯地震,図6に関東平野北西縁断層帯 地震における東京都での上水道配水管被害箇所数を示す. 被害箇所数が多くなるのは,地震による揺れが大きいメ ッシュまたは,管路延長の長いメッシュとなる.



図6 関東平野北西縁断層帯地震による被害箇所数

図5,図6の黒枠で示したメッシュ内の被害率 ν_1 を図 7に示す.他方のライフラインシステムについては,適切 なデータが得られなかったことから,仮に,上水道と同一 のネットワークがもう一つ布設されている状況を設定し た.すなわち $\nu_1 = \nu_2$ と仮定し,システムの延長距離 *L*についても同様であるとした.式(6)に ν_1 , ν_2 を代入し, 1セグメントあたりの長さl = 100mとした時の,抽出し たメッシュ内の同時被害発生数を図8に示す.



また,東京都のメッシュ全体における同時被害発生数 の平均値を図9に示す.なお,図9の横軸はセグメント 長1であり,ここではパラメトリックに変化させている. 実際には,復旧の際に支障をきたすと考えられる長さに 対する値を参照すればよい.例えば*l*=100m以内に同時 被害が発生すると支障をきたす場合,東京都全域で,立 川断層帯で約25箇所,関東平野北西縁断層帯で約36箇 所の同時被害が発生すると予想される.



図9 セグメント長を変化させた時の同時被害発生数

5. おわりに

本研究では、2つのライフラインの同時被害について 確率論的に検討し、実際に首都圏における仮想的な2シ ステムの同時被害発生数について東京都を対象に評価を 行った.これにより、復旧過程において、復旧スケジュー ルを相互に調整する必要が生じる箇所数についておおよ その予測が出来る.今後は、復旧に支障をきたす具体的 な距離を求めるため、実際に既往地震での復旧従事者よ り情報を収集する.本研究では、2システムにおけるラン ダム被害が重複して生じる偶発的な同時被害を扱ったが、 今後、盛土崩壊等の共通原因事象に起因する必然的な同 時被害についても分析を進める方針である.

参考文献

山本欣弥,永田茂,景山耕平:上水道システムの広域復旧戦略シミュレータ(簡易版)の開発,第58回全国水道研究発表会,平成19年5月