

## 冗長性指数による上水道システムの地震リスクの検討

攻玉社工科短期大学 正会員 山本欣弥  
 武蔵工業大学 正会員 星谷 勝  
 攻玉社工科短期大学 フェロー 大野春雄

## 1. はじめに

ライフラインのような工学システムは、一般的に多くの要素から構成されており、構成要素が部分的な破壊を受けた後もその機能を維持できることが望ましい。つまり、構造工学的観点からではなくシステム工学的な意味での保有耐力の大きいシステムが望まれる。このシステム工学的な意味での保有耐力は、すなわちシステムの持つ冗長性のことである。システムの冗長性は、システムの形状、構成要素の強度および荷重の確率的不確定性等によって定まるため、確率論を用いたアプローチが必要である。

本研究の目的は、ライフラインシステムの冗長性を数値によって表し、ライフラインの地震リスクを検討しようとするものである。

2. 冗長性指数  $R_E$ 

図-1 に、 $m$  個の構成要素をもつシステムの破壊事象のベン図を示す。ここで、 $D$  はシステムに何らかの被害が発生する事象の部分集合 (damage),  $ND$  はすべての要素が破壊しない事象の部分集合 (non-damage) で、それぞれ次式で表される。

$$D = \{D_1, D_2, \dots, D_{m-1}, D_F\} \quad (1)$$

$$ND = \{D_0\} \quad (2)$$

また、 $O$  はシステムの機能が保たれている事象の部分集合 (operational),  $NO$  はシステムの機能が破壊した事象の部分集合 (non-operational) である。

また、 $D_0$  は、構成要素が 1 個も破壊しない事象である。 $D_1$  は、構成要素の任意の 1 個のみが破壊しシステムの機能が維持されている事象、同様に  $D_{m-1}$  は、1 個を残してほかの要素がすべて破壊した状態でシステムの機能が維持されている事象である。 $D_F$  は、システムの機能が破壊した状態の事象である。

ここで、事象  $D_0 \sim D_F$  は、互いに排反で全てを尽くしている。また、 $D_F$  には式(3)で示すように、 $d_{F1}$  から  $d_{Fm}$  の事象が含まれている。

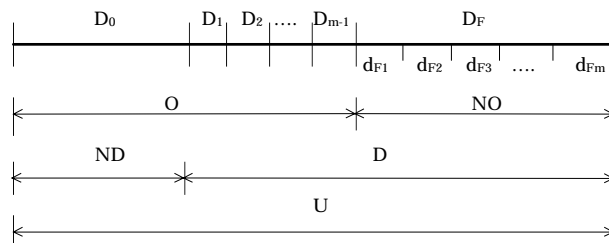


図-1 システムの破壊事象のサンプル場

$$D_F = \{d_{F1}, d_{F2}, \dots, d_{Fm-1}, d_{Fm}\} \quad (3)$$

ここで、 $d_{F1}$  は、構成要素の任意の 1 個のみが破壊してシステムの機能も破壊した事象である。同様に、 $d_{F2}$  は、構成要素の任意の 2 個のみが破壊してシステムの機能が破壊した事象、 $d_{Fm-1}$  は、1 個を残してほかの要素がすべて破壊してシステムの機能が破壊した事象である。 $d_{Fm}$  は、 $m$  個すべての要素が破壊してシステム機能が破壊した事象である。

星谷・山本<sup>1)</sup>は、図-1 に示したシステムの冗長性を測る指標として、次式で定義される冗長性指数  $R_E$  を提案した。冗長性指数  $R_E$  は、Shannon の情報エントロピー<sup>2)</sup>を用いて物理的に定義されている。

$$R_E = H_{D|D} / \log_2(m) \\ = \frac{\{-\sum_{i=1}^{m-1} P_{D_i|D} \log_2 P_{D_i|D} - P_{D_F|D} \log_2 P_{D_F|D}\}}{\log_2(m)} \quad (4)$$

式(4)中の  $H_{D|D}$  は、システムに何らかの被害が発生する事象  $D$  の条件下で、少なくとも 1 個以上の要素が破壊する事象の部分集合の条件付エントロピーである。また、 $P_{D_i|D}$  および  $P_{D_F|D}$  は、それぞれシステムに何らかの被害が発生する条件での、事象  $D_i$  と  $D_F$  の条件付確率であり、事象  $D$  の生起確率を  $P_D$  としたとき、次式で表される。

$$P_{D_i|D} = \frac{P(D_i)}{P_D} \quad (5)$$

$$P_{D_F|D} = \frac{P(D_F)}{P_D} \quad (6)$$

(キーワード) 冗長性, ライフライン, 情報エントロピー, 信頼性, 地震リスク

(連絡先) 〒 141-0031 東京都品川区西五反田 5-14-2 TEL 03-3493-5671 FAX 03-3495-4071

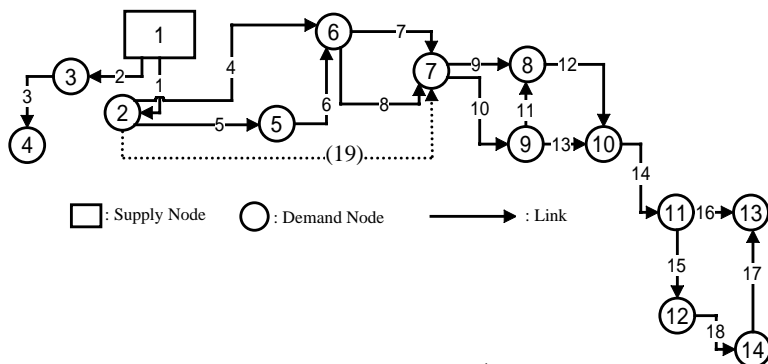


図-2 解析用上水道モデル

表-1 リンクデータ

Node No.	管径(mm)	延長(Km)	管種	Pf
1	1000	0.360	SP	0.015
2	900	2.887	SPRC	0.562
3	700	1.378	SPRC	0.002
4	1200	6.601	SP	0.449
5	1000	4.329	SP	0.632
6	1500	2.000	SP	0.121
7	1200	6.211	SP	0.925
8	1000	6.374	SP	0.939
9	1300	2.008	SPRC	0.452
10	1000	1.138	SP	0.348
11	1100	0.711	SPRC	0.049
12	1000	3.228	SPRC	0.225
13	1000	4.064	SP	0.417
14	1000	2.235	SPRC	0.152
15	1200	0.535	SLD	0.043
16	1000	4.108	SPRC	0.393
17	1800	1.362	SLD	0.077
18	800	4.092	SP	0.986
19	1500	15.000	SLD	0.050

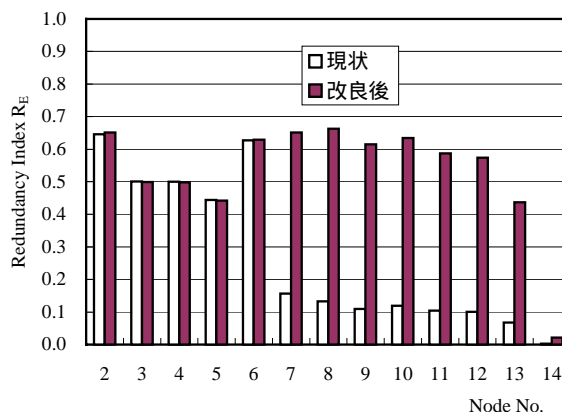


図-3 解析結果

冗長性指数  $R_E$  は、 $H_{D/D}$  を最大値  $\log_2(m)$  で除して、0 から 1 の間の値をとるように基準化している。 $R_E$  は、その値が 0 のときシステムの冗長性が最小であることを示し、1 のときシステムの冗長性が最大であることを示す。

3. 解析モデルおよび解析結果

図-2 および表-1 に上水道システムの解析用モデルを示す。現状のシステムは、Supply Node 1 から、No.2 から No.14 までの Demand Node に、実線矢印で表される 18 本のリンクによって水を供給している。水は、矢印の方向にのみ流れる。

表-1 中の Pf は、管種、管径および埋設場所の地盤種等の各データと、解析用モデルの近傍に震源を設定したシナリオ地震による地表面最大加速度を用いて算出した、各リンクの条件付被害発生確率である。表-1 により、システムの中ほどに位置する No.7 と No.8 のリンクの被害発生確率 Pf がそれぞれ、0.925、0.939 と非常に大きいことがわかる。解析モデルは、シナリオ地震が発生した場合、No.7 から No.14 の Demand Node が Supply Node 1 と分断され、これらのノードへの水の供給が不可能となる危険性が高い。このシステムの持つ危険性を改良する目的で、No.2 と No.17 の Demand Node を、破線矢印で示すリンク 19 によってバイパスする。表-1 に示したリンク 19 に関するデータは、計算のために設定した仮の数値である。

現状のシステムと、リンク 19 を追加した改良後のシステムの各ノードに関する冗長性指数  $R_E$  の計算結果を図-3 に示す。リンク 19 を追加する以前の、現状のシステムでは、リンク 7 および 8 の破壊の影響を受ける No.7 から No.14 の Demand Node の冗長性指数  $R_E$  の値が非常に低くなっている。リンク 19

を追加した改良後のシステムでは、No.7 から No.13 の Demand Node における  $R_E$  の値が非常に大きくなっており、冗長性が高くなったことがわかる。

No.14 の Demand Node に関しては、現状のシステムの  $R_E$  は 0.002 であり、リンク 19 を追加したシステム改良後も  $R_E$  は 0.02 という非常に小さな値を示しており、冗長性がほとんどないことがわかる。この原因は、表-1 に示したリンク 18 の被害発生確率 Pf が 0.986 と非常に大きな値をとるからであり、リンク 19 の布設によるシステムの改善の影響を受けないためである。

4. おわりに

冗長性指数  $R_E$  の値を用いて、ライフラインシステムの改良対策の評価を行うことが可能であることがわかった。今後の課題として、冗長性指数  $R_E$  を短時間で算出する手法を開発することがあげられる。

参考文献

1) 星谷勝, 山本欣弥: 情報エントロピーを用いたシステムの信頼性と冗長性の検討, 土木学会論文集, No.654 / -52, pp.355 ~ 366, 2000年7月., 2) Shannon, C.E. and Weaver, W.: The Mathematical Theory of Communication, Univ. of Illinois Press, 1949.