

I-B 370

上水道システムの地震リスク評価

武蔵工業大学 学生会員 市東 哲也
 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

1. はじめに

地震被害を最小限に抑えるためにリスクを評価することは地震防災対策上極めて重要であり、多くの議論・研究発表がある。篠塚ら¹⁾が提唱する地震リスクマネジメント(SRM)は、地震に対する潜在的な危険度を、地震による不確定な被害形態(損傷モード(M))の発生確率(P_M)とその損失(C_M)との積で求められる期待損失として定量化し、これを地震リスク(R)と定義している。すなわち、防災対策によって低減される地震リスクをその対策費用とともに比較検討し最適な防災対策を選択することができる。各損傷を考慮したリスクは次式で与えられる。

$$R = \sum_M (P_M \times C_M) \quad \text{ただし } M: \text{損傷モード} \quad (1)$$

本研究は、このSRM手法を上水道システムに適用し、地震リスクの評価の基本体系の構築を試みた。上水道システムでは、そのネットワーク形態の特徴から、システム要素の物的な被害が本来の機能である水の供給被害をもたらすため、地震リスク(R)を構造リスク(R_r)と機能リスク(R_s)の2つに分類し、それぞれを定量化することが望ましい。その際、リスクの同一尺度として貨幣価値への換算を試みた。

2. 上水道システムのモデル化

図-1は階層型ネットワークである上水道システムの基幹的な構造をモデル化したもので、浄水場・給水所を示すNode(S・A・B・C)と送水管・配水本管等の幹線を示すLink(1~4)の2種の要素で構成される。また、各地域の水の需要はそれぞれの給水所(A・B・C)に属することになる。

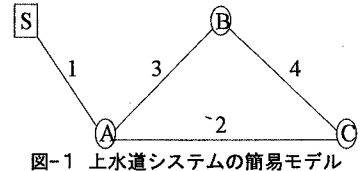


図-1 上水道システムの簡易モデル

3. 地震リスクの算出

図-1のような上水道システムの簡易モデルを例題として本手法の構成を示す。与条件を表-3に示す。ここでは、構造損傷がLinkのみに発生するものとしている。

まず構造リスク(R_r)を算出する。各Linkにおける構造損傷モードの発生をイベントツリー(ET)によりモデル化する。ETは、地震による損傷要因の組み合わせとして損傷モードを説明するものであり、ETによって分類された損傷モードは互いに背反で網羅的なものとなる。ここでは、損傷要因として地盤変形による被害と振動による被害を挙げた。例としてLink1におけるETを表-1に示す。損傷要因の発生確率、すなわちETにおける分岐確率から各損傷モード(M_r)の発生確率(P_{rM_r})を算出し、一方で各モードに対応する構造損失(復旧コスト)(C_{rM_r})も同定する。以上から式(1)によりLink1の構造リスクが求まる。これを他のLinkについても行い、その総和がシステム全体の構造リスク(R_r)となる。

表-1 構造損傷モード(例: Link1におけるET図)

損傷要因		構造損傷モード M_r	発生確率 P_{rM_r}	構造損失 C_{rM_r}	構造リスク $R_{rM_r} = P_{rM_r} \times C_{rM_r}$	復旧日数 D_{rM_r}
地盤被害	振動被害					
想定地震	0.9	1 無	0.720	¥0	¥0	0.0 日
	0.8	2 軽	0.180	¥100,000,000	¥18,000,000	5.0 日
	0.2	3 重大	0.100	¥200,000,000	¥20,000,000	10.0 日
			1.000		¥38,000,000	

次に機能リスク(R_s)を算出する。このモデルでは、供給源(S)と給水所(A~C)が連結されていれば給水が行われるものとする。機能損傷モードは、連結を構成するLink群の構造損傷モードの組み合わせにより表現できる。ネットワークの特徴として、供給源と給水所の連結は通常複数のルートが存在するが、機能リスク算出の対象は、最も早期に復旧するルートになる。供給源と給水所が連結される期待日数は、構造損傷モードに対応してある程度の予測が可能であると考えられる。ここでは順次復旧を考え、簡単のため加算とした。

例として給水所 C におけるルート S-A-C の場合を表-2 に示す。機能損傷モードは、Link1・Link2 の構造損傷モードの組合わせにより 9 つある。各損傷モード (M_s) の発生確率 ($P_{s_{Ms}}$) を算出し、一方で各モードに対応する機能損失 $C_{s_{Ms}}$ も同定する。この機能損失は、水の供給停止による需要家の困窮度を示すもので、工学的判断のみならず社会的・経済的な定量的評価が必要であろう。以上から式(1) により給水所 C の機能リスクが求まる。これを他の給水所についても行い、その総和がシステム全体の機能リスク (R_s) となる。

以上のように構造リスク (R_r) と機能リスク (R_s) の和として地震リスク (R) を算出する。ただしこの場合、ある地震を想定した条件付リスクであることを付記する。

表-2 機能損傷モード (例：給水所 C [ルート S-A-C])

機能損傷モード M_s	Link 1 Link 2		発生確率		$P_{s_{Ms}}$	機能復旧日数			機能損失 $C_{s_{Ms}}$ = ¥200 × 人 × $D_{s_{Ms}}$	機能リスク $R_{s_{Ms}}$ = $P_{s_{Ms}} \times C_{s_{Ms}}$
	Link 1	Link 2	Link 1	Link 2		Link 1	Link 2	$D_{s_{Ms}}$		
1	無	無	0.720	0.595	0.428	0.0 日	0.0 日	0.0 日	¥0	¥0
2	無	軽	0.720	0.255	0.183	0.0 日	7.0 日	7.0 日	¥70,000,000	¥12,852,000
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
8	重大	軽	0.100	0.255	0.026	10.0 日	7.0 日	17.0 日	¥170,000,000	¥4,335,000
9	重大	重大	0.100	0.015	0.015	10.0 日	14.0 日	24.0 日	¥240,000,000	¥3,600,000
					1.000	期待復旧日数 5.8 日				¥57,850,000

4. 地震リスクの評価

表-3 の与条件により算出される地震リスクを現状として、この地震リスクを低減することを考える。まず、対策 1 として損傷確率を低減する。ここでは、全ての Link に対して地盤変形による被害の発生確率を 10% 低減する場合 (対策 1-1)、全ての Link に対して振動による被害の発生確率を 10% 低減する場合 (対策 1-2)、および Link 1 のみに対して双方を 15% 低減させる場合 (対策 1-3) を挙げた。また対策 2 として、全ての Link に対して資材補強・人員増強などにより復旧日数を 10% 短縮する。なお、このときの構造損失は不変とした。以上の 4 つの対策に関して地震リスクを再算出した結果を表-4 に示す。

ここで、対策により低減される地震リスクとその対策費用について簡単な考察をする。これら 4 つの対策費用が ¥15,000,000 で全て等しいものとする、対策 1-1・1-2 は効果的であり、対策 2 は総合的にみて ¥1,684,000 の損失 (低減リスクと対策費用の差が負となる) であるといえよう。しかし、上水道システムの本来の機能である水の供給を考慮したとき、つまり機能リスクをみたときは、対策 2 が最も効果的であるという側面をもつことがわかる。

このように、本手法は上水道システムの防災対策の意思決定手段として有効である。なお、ここでの貨幣価値への換算はあくまでも試算の域を出ないことをあらかじめ付記しておく。

表-3 与条件

		Link 1	Link 2	Link 3	Link 4
損傷要因	地盤被害	0.100	0.150	0.100	0.200
発生確率	振動被害	0.200	0.300	0.250	0.350
復旧日数	1 無	0.0 日	0.0 日	0.0 日	0.0 日
	2 軽	5.0 日	7.0 日	5.0 日	6.0 日
	3 重大	10.0 日	14.0 日	10.0 日	12.0 日
構造損失	1 無	¥0	¥0	¥0	¥0
	2 軽	¥100,000,000	¥150,000,000	¥100,000,000	¥120,000,000
	3 重大	¥200,000,000	¥300,000,000	¥200,000,000	¥240,000,000
		給水所 A	給水所 B	給水所 C	
人口		70000人	60000人	50000人	
機能損失		200 / 人・日 ⁴⁾			

表-4 計算結果

	構造リスク R_r	機能リスク R_s	地震リスク $R=R_r+R_s$
現状	¥245,350,000	¥133,160,000	¥378,510,000
対策 1-1	¥234,140,000	¥126,610,000	¥360,750,000
低減リスク	¥11,210,000	¥6,550,000	¥17,760,000
低減率	4.57%	4.92%	4.69%
対策 1-2	¥234,240,000	¥126,440,000	¥360,680,000
低減リスク	¥11,110,000	¥6,720,000	¥17,830,000
低減率	4.53%	5.05%	4.71%
対策 1-3	¥239,950,000	¥123,320,000	¥363,270,000
低減リスク	¥5,400,000	¥9,840,000	¥15,240,000
低減率	2.20%	7.39%	4.03%
対策 2	¥245,350,000	¥119,844,000	¥365,194,000
低減リスク	¥0	¥13,316,000	¥13,316,000
低減率	0.00%	10.00%	3.52%

<参考文献>

- 1) Seismic Risk Management 方法論及び適用例：(株)篠塚研究所，東京海上火災(株)，1995. 8.
- 2) 能島暢呂：地震災害における都市ライフライン系のリスク評価に関する研究，京都大学博士論文，1992. 9.
- 3) Isoyama, R. and Shah, H. C. : Seismic Risk-Investment Analysis for Water Supply Systems, Proc. of the Sixth Japan Earthquake Engineers Symposium, pp. 2033-2040, 1982.
- 4) Oppenheim, I. J. : Simulation of Water System Seismic Risk, Jour. of the Technical Councils of ASCE, Vol. 105, No. TC2, Dec. 1979.