

上水道システムの地震リスクマネジメント

市東 哲也¹・星谷 勝²

¹学生会員 工修 武蔵工業大学大学院生 工学研究科土木工学専攻 (〒158 東京都世田谷区玉堤1丁目28番地1号)

²正会員 Ph.D. 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科 (〒158 東京都世田谷区玉堤1丁目28番地1号)

この研究は、地震リスクマネジメント(SRM)手法を上水道システムに適用し、地震リスクの定量的評価手法を提案している。SRMにおいて、地震リスクを発生確率と損失の積である期待損失として定義することの意義は、現状のリスクの大きさを認識することができるとともに、防災対策の効果もリスクの低減分として定量的に評価できることである。

この研究では、上水道システムの地震リスクを、構造リスクまたは機能リスク、あるいは両者の和として定義し、それぞれのリスクの定量化方法について述べている。さらに、算出された地震リスクを評価し、最適な防災対策を選択する際の意思決定の方法と手順を考察している。

Key Words : seismic risk, water supply system, risk reduction, cost-benefit, decision making

1. はじめに

新潟地震や San Fernando 地震以来、上下水道、電力、ガス、鉄道をはじめとするライフラインの膨大な被害と社会へおよび影響の大きさから、それらの耐震信頼性が注目されてきた。なかでも上水道は代替がきかず、断水が市民生活に与える影響は非常に大きい。近年、上水道システムの地震危険度解析に関する研究が活発におこなわれている。これらの研究は、地震被害分析¹⁾、システム信頼性^{2), 3)}、震後の対応・復旧予測⁴⁾、機能的被害の定量化⁵⁾、ライフライン系の相互関連⁶⁾、および費用便益分析⁷⁾など多岐にわたる。

この研究は、地震時における上水道システムのリスクを最小にするための事前の方策を見出すことを目的としている。この研究の各段階における「期待損失」や「イベントツリー(ET)」、「ネットワーク信頼性解析」などの手法は、既往の研究で伝統的に用いられている考え方である。しかし、これらの手法は、「リスクを最小にする」という目的のための断片的な過程であり、それらを体系化した総括的な方法論を構築することが望まれる。そこで、この研究は、水谷・中村ら⁸⁾が提唱している地震リスクマネジメント(SRM: Seismic Risk Management)を上水道システムに適用することにより、地震リスクの定量的な評価手法を提案することを第1の目的とする。さらに、図-1に示すように、複数の地震防災対策案

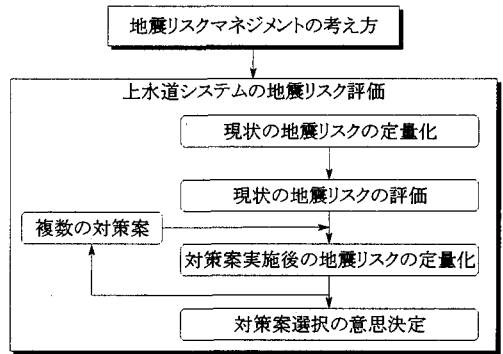


図-1 研究の流れ

のなかから、最適なものを選択するための意思決定の方法と手順を考察することを第2の目的とする。そして、この2つの目的から、上水道システムの地震リスクを最小にするための体系的な方法論を構築することを最終的な目的とする。

なお、この研究で扱う例題は、上の目的を補足説明するための簡易的な仮想モデルによるものであり、使用する発生確率や損失額には仮定した数値を用いている。そのため、算出されるリスクの結果は、あくまでも1つのモデルに対するものである。

2. 地震リスクマネジメント

危険管理は将来における潜在的な危険に対する方

策の総称であり、これは Crisis Management と Risk Management の2つに大きく分類される⁹⁾。まず、Crisis Management とは、「危険事象そのものやそれがもたらす損失をいかに拡散させず、迅速に解消するか」という、危険事象が生じた後の、いわば事後対応のための事前の具体的な対策や方法論を指す。一方、Risk Management とは、「危険事象が発生する前に、科学的にそれらを分析し、損失を未然に最小限に抑える」という危険管理である。これは1927年の世界恐慌を機にアメリカの保険分野から発し、1950年代には保険分野から包括的な危険管理へとその考え方が展開された。大別した2つの危険管理は、まったく別なものではなく、互いに深く関連している。Risk Management は、これら2つを包括して広義に用いる用語でもあるが、この研究は、後者のRisk Management を対象としている。

構造物は、時には壊れるものである。したがって、十分な安全性を確保するというは、壊れないものを造るということではなく、不確定な要因のもとで危険性を許容される範囲内におさめることである。土木工学における研究の多くは計画・設計・施工における危険性の情報を提供することが目標であるといえる。しかし、それには実際的な全ての面において不確定要因が存在する。このような条件下においては、安全性を確率的に定量化する信頼性設計法¹⁰⁾が有効である。

特に、原子力の安全の研究分野^{11), 12)}では、発電施設の各システム要素に信頼性設計法を導入し、原子力発電という大規模かつ重要な施設の危険度評価を実用的なレベルでおこなっている。具体的には、まず、各システム要素の機能喪失が施設全体に与える影響を分析する。他方で、施設の各システム要素に作用する地震応力を解析する。つまり、作用応力が各システム要素の強度を超過する確率が機能喪失の確率となる。最終的に、機能喪失の影響と地震応答解析から各システム要素の強度を設定し、これら2つの条件から施設全体の危険度評価をおこなおうとするものである。

水谷・中村ら⁸⁾は、この確率論的危険度評価を一般構造物に適用した地震危険度の定量的評価(SRM)を提唱しており、石油精製プラントなどの潜在的な危険の大きい構造物への適用をおこなっている。

(1) リスクとは何か？

リスクマネジメントについて述べる時、まず、「リスク(潜在的危険)とは何か?」ということ定義することから始めなければならない。日頃よく使われる「危険」という言葉の意味は¹³⁾、①危険事象そのもの

(peril)、②危険事象を発生させる個別的事実要素やその集合(hazard)、③危険事象の発生確率(probability)、④危険事象の結果の重要性、損失(consequence, loss)、および、⑤危険事象の発生確率と損失の積(expected loss)に分類される。このうち、専門的な用語で用いられる「リスク」が意味するのは③、④および⑤であるが、必ずしもリスクという言葉の定義が統一されていて、同一の概念で用いられているわけではない。

③の定義にしたがえば、損失が同程度の場合、または損失を無視する場合ならば、その比較は容易である。同様に、④の定義にしたがえば、発生確率が同程度の場合、または発生確率を無視する場合ならば、その比較は容易である。

一方、⑤の定義にしたがえば、リスクは次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{(リスク)} &= (\text{危険事象の発生確率}) \times (\text{損失}) \\ &= (\text{期待損失}) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)によれば、発生確率が大きいほど、また損失が大きいほどリスクは大きくなる。SRMでは、地震リスクを期待損失として定義している。地震リスクを期待損失として定量化することの意義は、現状におけるシステムの地震リスクを認識することができるとともに、防災対策を実施した後の地震リスクを再算出することで、その対策の効果を地震リスクの低減分として定量化できることである。つまり、複数の対策案のリスク低減分を比較し、さらにそれらの対策費を検討することにより、最適な防災対策案を選択する際の意思決定に対して、多くの情報を提供することが期待される。言葉としては定性的に解釈されている「リスク」を、期待損失として定量化することにより、多くの人々が、共通の基準で危険度の問題を議論することができる。

(2) 地震リスクの定義とイベントツリー解析

将来における地震による被害もリスクとして捉えることができる。地震リスクの特徴を挙げると、①地震の発生日時とその規模、および被害要因の多くが不明である、②不確定要因が多い、③被害形態の詳細な特定が困難である、④広い範囲で同時に被害を受ける、⑤低頻度大損失事象である、および、⑥低頻度であるため、その対策としてどこまで投資すべきかが困難な問題となる。

以下に、SRMの概要を示す。

地震リスクを算出する際に最も重要なことは、地震の発生により対象とする施設が被害を受けたとき、いったい何がどのくらい困るのか? つまり、損失は

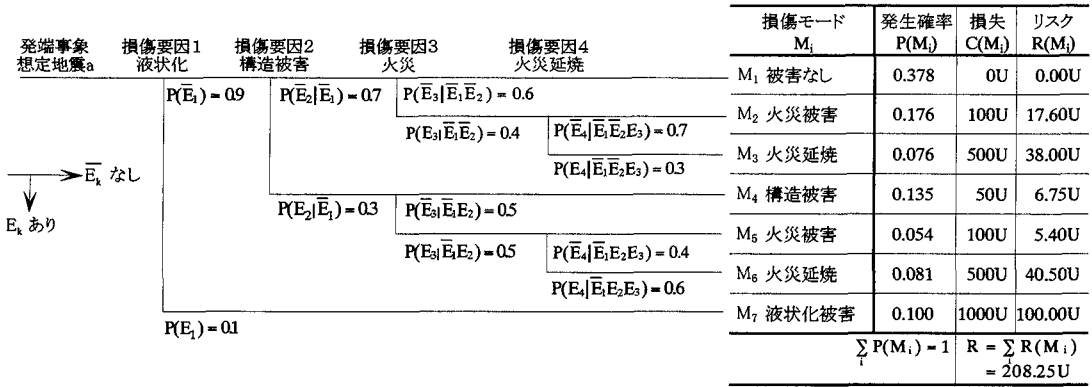


図-2 ETの例

何か? ということである。損失は地震の被害形態により変わってくる。この被害形態を損傷モードと呼び、できる限りの損傷モードを抽出することからリスク算出は始まる。損失は施設に求められている機能が喪失された場合に生じる。施設の機能喪失は、地震による物理的損傷に伴って生じる。そのため損傷モードは、施設の物理的損傷の組合せから抽出される。この物理的損傷を損傷要因と呼ぶ。

SRMでは、損傷モードの抽出を図-2に示すようなETによってモデル化する。図-2はSRMを説明するためのETで、損傷モード M_i ($i=1\cdots7$) は、発端事象である想定地震 a に続く損傷要因の有 (E_k) 無 (\bar{E}_k) ($k=1\cdots4$) の組合せによって分類される。ここでは、想定地震 a は確定的に発生、すなわち発生確率 $P(a)=1$ とし、損傷要因として1液状化、2構造被害、3火災、4火災延焼を挙げた。

損傷要因の発生確率、すなわちETの分岐確率は、ET上流の条件付確率となる。例えば、図-2におけるETの第4の分岐は、損傷要因4火災延焼の有 (E_4) 無 (\bar{E}_4) となるが、火災なし: \bar{E}_3 ならば、明らかに条件付火災延焼発生確率は、 $P(E_4|\bar{E}_1\bar{E}_2\bar{E}_3) = 0$ 、 $P(E_4|\bar{E}_1E_2\bar{E}_3) = 0$ となるため、分岐を示していない。 \bar{E}_1 かつ \bar{E}_2 かつ E_3 ならば、ここでの分岐確率は、 a 、 \bar{E}_1 、 \bar{E}_2 および E_3 の条件付火災延焼発生確率 $P(E_4|\bar{E}_1\bar{E}_2E_3)$ となる。同様に、 \bar{E}_1 かつ E_2 かつ E_3 ならば、分岐確率は条件付火災延焼発生確率 $P(E_4|\bar{E}_1E_2E_3)$ となる。

それぞれの損傷要因の発生確率の算出に関しては、それ自体が大きな研究課題となっているが、過去の地震被害にもとづく統計的方法、または、信頼性理論にもとづく構造解析的方法を用いている。

各損傷モード M_i の発生確率 $P(M_i)$ は、それに至る経路上のすべての損傷要因の発生確率の積となる。例えば、図-2の損傷モード M_3 の発生確率 $P(M_3)$ は、条件付確率の定理から、

$$\begin{aligned}
 P(M_3) &= P(\bar{E}_1 \cap E_2 \cap E_3 \cap \bar{E}_4) \\
 &= P(\bar{E}_1) P(E_2|\bar{E}_1) P(E_3|\bar{E}_1E_2) P(\bar{E}_4|\bar{E}_1E_2E_3) \\
 &= 0.9 \cdot 0.3 \cdot 0.5 \cdot 0.4 = 0.054
 \end{aligned}$$

個々の損傷要因の分岐が排反であるので、分類される損傷モードは互いに排反ですべてを尽くすことになる。すなわち、

$$\sum_i P(M_i) = 1 \quad (2)$$

損失 $C(M_i)$ は、それぞれの損傷モードが生起したときの、システムの復旧費、再建費、および機能停止に伴う困窮度となる。損失の算出には工学的判断のみならず、経済的、社会的な視点に立った議論が必要である。

損傷モード M_i のリスク $R(M_i)$ は、式(1)より、

$$R(M_i) = P(M_i) \times C(M_i) \quad (3)$$

したがって、システム全体の地震リスク R は、それぞれの損傷モード M_i が互いに排反の事象であるので、リスク $R(M_i)$ の総和として次式で定義される。

$$R = \sum_i R(M_i) = \sum_i [P(M_i) \times C(M_i)] \quad (4)$$

ところで、一般の確率的地震危険度評価では、想定地震 a の発生も確率的に取り扱う場合が多い。そのため、式(4)は地震 a の条件付地震リスク $R|a$ と書き替えることができる。つまり、地震ハザードの結果を用いれば、a の発生確率 $P(a)$ と $R|a$ を合積することにより、地震の発生頻度・規模を考慮した年間平均リスク⁸⁾を容易に算出することができる。したがって、以下からは条件付地震リスク $R|a$ にもとづいて議論をすすめることにする。

3. 上水道システムの地震リスクの定量化

この研究では、上水道システムの仮想モデルを例題として、地震リスクの定量化方法を説明する。ま

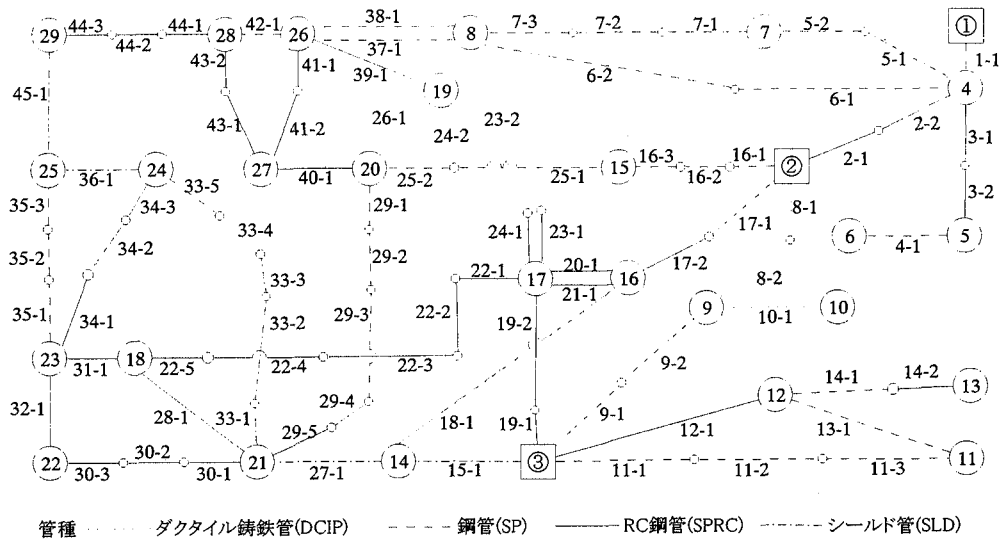


図-3 仮想モデルのネットワーク

表-1(a) Link 諸量

No	区間	管種	地盤種別	延長(km)	No	区間	管種	地盤種別	延長(km)
1-1	①-4	SP	ADS	0.54	24-1	17-19	SPRC	DD	0.49
2-1	②-4	SPRC	DD	0.96	24-2		SPRC	ADC	3.50
2-2		SPRC	ADS	2.00	25-1	15-20	SP	DD	1.00
3-1	4-5	SPRC	ADS	1.04	25-2		SP	ADC	2.20
3-2		SPRC	DD	2.00	26-1	19-20	SPRC	ADC	3.28
4-1	5-6	SP	DD	1.28	27-1	14-21	SLD	DD	7.38
5-1	4-7	SP	ADS	0.55	28-1	18-21	SPRC	ADC	1.20
5-2		SP	DD	3.70	29-1	20-21	SP	ADC	2.20
6-1	4-8	SP	ADS	4.40	29-2		SP	ADS	0.39
6-2		SP	ADC	0.60	29-3		SP	ADC	1.30
7-1	7-8	SP	ADC	0.33	29-4		SP	ADS	0.60
7-2		SP	ADS	1.10	29-5		SP	ADC	0.90
7-3		SP	ADC	0.40	30-1	21-22	SPRC	ADC	1.50
8-1	②-9	DCIP	ADC	1.20	30-2		SPRC	ADS	1.15
8-2		DCIP	DD	0.80	30-3		SPRC	ADC	1.40
9-1	③-9	SPRC	ADC	1.56	31-1	18-23	SPRC	ADC	1.87
9-2		SPRC	DD	0.50	32-1	22-23	SPRC	ADC	0.73
10-1	9-10	DCIP	DD	0.80	33-1	21-24	SLD	ADC	1.10
11-1	③-11	SP	DD	0.75	33-2		SLD	ADS	1.20
11-2		SP	ADC	1.30	33-3		SLD	ADC	2.30
11-3		SP	DD	1.50	33-4		SLD	ADS	1.50
12-1	③-12	SPRC	DD	6.75	33-5		SLD	RL	0.28
13-1	11-12	SP	DD	7.60	34-1	23-24	SPRC	ADC	0.90
14-1	12-13	SP	DD	0.50	34-2		SPRC	ADS	1.10
14-2		SP	ADC	1.50	34-3		SPRC	RL	0.25
15-1	③-14	SLD	DD	6.89	35-1	23-25	SP	ADC	0.50
16-1	②-15	SP	DD	3.40	35-2		SP	ADS	3.30
16-2		SP	ADC	3.00	35-3		SP	RL	0.32
16-3		SP	DD	2.00	36-1	24-25	SLD	RL	4.50
17-1	②-16	SPRC	DD	3.40	37-1	8-26	SP	ADC	7.04
17-2		SPRC	ADC	1.00	38-1	8-26	SP	ADC	7.04
18-1	14-16	SLD	DD	2.34	39-1	19-26	SPRC	ADC	2.32
19-1	③-17	SPRC	DD	4.00	40-1	20-27	SPRC	ADC	2.49
19-2		SPRC	ADC	3.50	41-1	26-27	SPRC	ADC	0.76
20-1	16-17	SPRC	ADC	2.50	41-2		SPRC	ADS	1.50
21-1	16-17	SPRC	ADC	2.50	42-1	26-28	SP	ADC	5.04
22-1	17-18	SPRC	DD	1.00	43-1	27-28	SPRC	ADS	1.10
22-2		SPRC	ADC	5.80	43-2		SPRC	ADC	2.10
22-3		SPRC	ADS	1.30	44-1	28-29	SPRC	ADC	3.30
22-4		SPRC	ADC	1.00	44-2		SPRC	ADS	3.20
22-5		SPRC	ADS	0.57	44-3		SPRC	RL	0.34
23-1	17-19	SPRC	DD	1.00	45-1	25-29	SLD	RL	0.72
23-2		SPRC	ADC	2.50					

表-1(b) Node 諸量

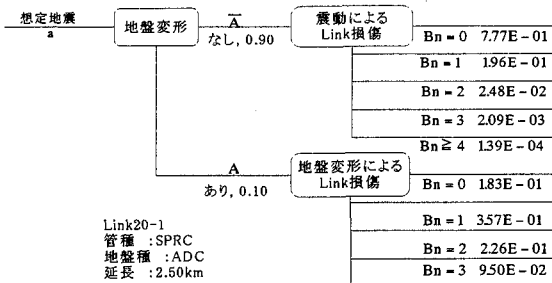
浄水施設	分岐 14,18,20,23,28						
	配水施設 1日平均給水量 W_{in} [m ³ /日]						
4	35,900	10	4,000	17	27,800	26	74,000
5	14,800	11	5,200	19	15,700	27	65,100
6	5,800	12	25,000	21	45,000	29	11,500
7	4,100	13	1,100	22	60,700		
8	24,600	15	8,100	24	5,600		
9	30,700	16	42,400	25	16,200	計	698,681

た、次章では対策決定の際の意思決定の方法と手順を考察する。なお、先にも述べたように、この例題で使用する発生確率や損失はすべて仮定した数値を用いているため、算出されるリスクの結果は、あくまでも1つのモデルに対するものである。

(1) モデルの概要

例題とするシステムを図-3 および表-1 に示す。地盤種別は、①洪積層(DD)、②粘性土を多く含む沖積層(ADC)、③砂質土を多く含む沖積層(ADS)、および④埋立地(RL)の4つに分類した。3つの浄水施設(Node ①②③)を起点として、送水管・配水本管(Link)を通して、配水施設(Node4...29)は需要点、Node14, 18, 20, 23, 28 は分岐点を示し需要点ではない)へ給水がおこなわれる。給水地域を互いに重複しない21の地域に区分し、各地域への給水はNodeを起点にしておこなわれるものとする。地震による物理的損傷は、Linkで確率的に発生するものとし、Nodeの損傷はないものとする。条件地震は、震源および地震動の伝播は考慮せず、対象地域一帯へ最大地表面加速度350gal程度をもたらす地震aとする。

ところで、上水道システムの地震リスク評価は、一般に以下のような順序でおこなわれる。



構造損傷モード Mp _i	発生確率 Pp _i (Mp _i)	損失 [Y] Cp _i (Mp _i)	リスク [Y] Rp _i (Mp _i)
Mp ₁ 損傷なし	6.99E-01	0	0.0
Mp ₂ 震動による Link損傷1件	1.77E-01	20	3.5
Mp ₃ 震動による Link損傷2件	2.23E-02	40	0.9
Mp ₄ 震動による Link損傷3件	1.88E-03	60	0.1
Mp ₅ 震動による Link損傷4件以上	1.25E-04	80	0.0
Mp ₆ 地盤変形はあるが Link損傷なし	2.83E-02	10	0.3
Mp ₇ 地盤変形による Link損傷1件	3.57E-02	30	1.1
Mp ₈ 地盤変形による Link損傷2件	2.26E-02	50	1.1
Mp ₉ 地盤変形による Link損傷3件	9.50E-03	70	0.7
Mp ₁₀ 地盤変形による Link損傷4件以上	3.95E-03	90	0.4
Rp ₍₂₀₋₁₎ =			8.0

図-4 構造損傷モードのET (Link20-1)

[10⁶円]

- ①システムの物理的損傷の予測
- ②供給点と需要点のネットワーク連結性、および流量、水頭を考慮した管網解析
- ③緊急時の供給・復旧戦略を考慮した復旧予測、需要量の不足分の予測
- ④利用者の困窮度の評価
- ⑤Crisis Management, 防災対策への情報提供

この研究では、上水道システムの地震リスクを上記①の物理的損傷のリスク(構造リスクと呼ぶことにする)と、上記④の利用者の困窮度のリスク(機能リスクと呼ぶことにする)の2つに分類した。そして、構造リスクまたは機能リスク、あるいは2つのリスクの和を上水道システムの地震リスクとする。

$$R = R_p + R_s \quad (5)$$

ただし、

- R : 上水道システムの地震リスク
- R_p : 構造リスク;地震によるシステムの物理的損傷(復旧費, 再建費)
- R_s : 機能リスク;物理的損傷がもたらす給水障害(利用者の困窮度)

ここで、リスクを R_p と R_s の2つに分類した理由は、損失を誰が負うのか(当事者)が異なれば、対象とする損失の内容や大きさも異なるという点をふまえたからである。両者の損失は互いに違う性質を持ち、2つのリスクが重複しないため、立場を超えた大きな視点で見れば、両者を加えてもよいと判断した。その際、重みを考慮せずに両者を加えている。この理由は、損失の算出が効用を考慮して貨幣換算されることを前提にしており、損失そのものに重みが含まれていると考えたからである。

なお、この研究は方法論を提示することが目的であるので、ここでは前記②③の詳細な解析を単純化して、給水の大前提である供給点と需要点の連結性

のみの判定によって R_s の評価をおこなう。これは、流量、水頭、流れの方向等のシステムの水理学的特性を十分に考慮したものではない。システムの特性を詳細にSRMに組み込むことによって、さらにSRMを有効に利用できることになる。

(2) 構造リスク

各Linkの構造損傷モード Mp_i の発生を図-4に示すようなETによりモデル化する。図-4は、例としてLink20-1のETである。損傷要因は、地震 a の発生による、Linkが埋設されている地盤の変形、および、地盤変形が発生しないときの地盤震動とする。

ETの第1の分岐確率 P(A) は、

$$P(A) = P(A|a, G_j) \quad (6)$$

ただし、P(A|a, G_j) : 条件付(地震 a, 地盤条件 G_j) 地盤変形発生確率
P(A|a, G_j) を厳密に与えることは困難であるが、表-2のように設定した。

ETの第2の分岐における Link 損傷の発生確率はポアソン分布に従うものとする。地震 a, 地盤条件 G_j, 管種 m のもとで、地盤変形なし: \bar{A} における Link の条件付被害率を $\lambda|\bar{A}, a, G_j, m$ [件/km]、および、地盤変形あり: A における Link の条件付被害率を $\lambda|A, a, G_j, m$ [件/km] とする。延長 L [km] の Link の損傷件数 B_n が n 件になる確率 P(B_n = n | \bar{A})、および、P(B_n = n | A) は、

$$\left. \begin{aligned} P(B_n = n | \bar{A}) &= \frac{[(\lambda|\bar{A}, a, G_j, m) \cdot L]^n}{n!} \cdot \exp[-(\lambda|\bar{A}, a, G_j, m) \cdot L] \\ \text{および、} \\ P(B_n = n | A) &= \frac{[(\lambda|A, a, G_j, m) \cdot L]^n}{n!} \cdot \exp[-(\lambda|A, a, G_j, m) \cdot L] \end{aligned} \right\} (7)$$

ただし、 $\lambda|\bar{A}, a, G_j, m$ 、および、 $\lambda|A, a, G_j, m$ は、久

表-2 条件付地盤変形発生確率の設定

地盤種別			
洪積層 岩盤	沖積層 (粘性土)	沖積層 (砂質土)	埋立地
0.050	0.100	0.250	0.200

表-3 条件付管路被害率の設定

		地盤種別			
		洪積層 岩盤	沖積層 (粘性土)	沖積層 (砂質土)	埋立地
管	SP	0.072	0.162	0.359	0.162
		0.359	0.808	1.796	0.808
	SPRC	0.045	0.101	0.225	0.101
0.225		0.505	1.123	0.505	
種	DCIP	0.090	0.202	0.449	0.202
		0.449	1.011	2.246	1.011
種	SLD	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
		0.0010	0.0010	0.0010	0.0010

上段：震動による管路被害率 下段：地盤変形 [件/km]

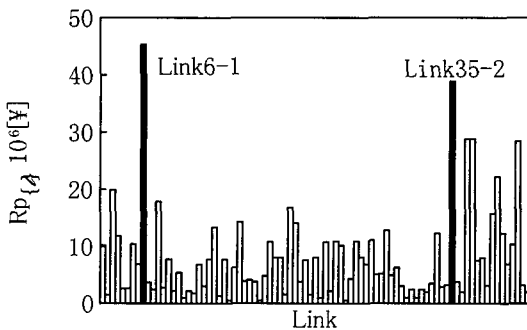


図-5 構造リスクの算出結果

保・片山の経験式⁹⁾から、表-3のように設定した。

Link l における構造損傷モード M_{pi} の発生確率 $P_{p(l)}(M_{pi})$ は、それに至るETの経路上のすべての損傷要因の発生確率の積となる。

構造損失 $C_{p(l)}(M_{pi})$ は、その構造損傷モードが生じた場合の復旧費・再建費として算出される。この例題では、Link 損傷 1 件につき $¥20 \cdot 10^6$ ¹⁴⁾、地盤変形が発生した場合は、さらに $¥10 \cdot 10^6$ を加えた。

Link l における構造損傷モード M_{pi} のリスク $R_{p(l)}(M_{pi})$ は式(3)から、構造リスク $R_{p(l)}$ は式(4)から算出される。すなわち、

$$R_{p(l)} = \sum_i R_{p(l)}(M_{pi}) = \sum_i P_{p(l)}(M_{pi}) \cdot C_{p(l)}(M_{pi}) \quad (8)$$

システム全体の構造リスク R_p は、各 Link の構造リスク $R_{p(l)}$ の総和として算出される。すなわち、

$$R_p = \sum_l R_{p(l)} \quad (9)$$

構造リスクの算出結果を図-5 に示す。式(7)からも明らかのように、Link 損傷の発生確率は地盤種別、

管種および延長距離に大きく影響される。特に、Link6-1、および 35-2 は、比較的延長距離が長く、沖積層(砂質土)に埋設されている鋼管であるため、構造リスクが大きくなっている。

(3) 機能リスク

給水障害の要因は Link の損傷である。その際、1ヶ所の Link 損傷の発生が、それ以降の地域への給水に重大な影響をおよぼすこともあれば、ネットワークの冗長性により給水への影響が軽微になることもある。すなわち、機能リスクの算出は、構造損傷が発生する Link の位置とその件数およびネットワークの形状に大きく依存する。

ある注目する Node への給水の条件は、前述のように、浄水施設 S とその Node の連結性のみとして簡略化する。しかし、連結・非連結の2つの状態の評価だけではSRMの重要な特徴である損失の程度、つまり損傷モードを分類するには不十分である。なぜならば、利用者の困窮度は、非連結の状態(期間)がどのくらい続くのかということが大きな要素となるからである。そのため、非連結の期間を表すために、構造損傷の復旧に対して以下のような仮定を設ける。

- ①ある Link の構造損傷 1 件における復旧時間は、発生した位置、システム全体の損傷総件数によらず一定とする。この例題では、構造損傷 1 件あたり 63 時間¹⁴⁾と設定した。
- ②浄水施設に近い Link 損傷から順次復旧される。上の2つの条件だけでは浄水施設 S と注目する Node の連結がどんなに迂回しても保たれていれば、通常時の給水量と同量の給水が可能という判定になる。これは実際的ではないため、給水に関して以下のような仮定を設ける。
- ③浄水施設 S から注目する Node への給水は、Link 系統を考慮し、経験的判断から仮に 5 番目までの最短経路によるとしている。

以上の3つの仮定は、システムのネットワーク特性、復旧過程を大幅に単純化したことになる。

Node n における各損傷モード M_{sj} (復旧日数)の機能損失 $C_{s(n)}(M_{sj})$ [¥] は、浄水施設 S と Node n の非連結状態が解消される機能復旧日数 $D_{s(n)}(M_{sj})$ [日]、1日の平均給水量 $W_{(n)}$ [m³/日]、および単位水量損失 LPW [¥/m³]より、

$$C_{s(n)}(M_{sj}) = LPW \cdot W_{(n)} \cdot D_{s(n)}(M_{sj}) \quad (10)$$

ここで、 LPW は 1m³の水が供給されなかったときの水の貨幣価値である。白水・友野¹⁵⁾は、給水障害が起こった場合の水の利用価値は通常時よりも高くなるということをうかがい知るために、一般家庭を対

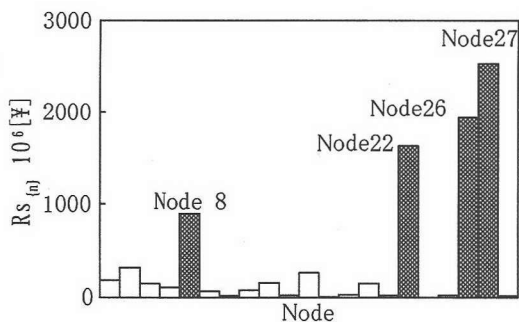


図-6 機能リスクの算出結果

象として「大湧水や大地震で安全な水が欠乏したとき、20ℓの水に対していくら支払ってもよいか」というアンケート調査をおこなった。アンケートの結果は、「¥200 くらいまで」という回答がもっとも多く、「¥500 くらいまで」「¥1000 以上」がそれに続く。これらの回答は、通常時の水の価値が約¥1.6/20ℓ（東京都水道料金¥700/10m³）であることに比べ、緊急時の水の価値は非常に高くなることを示している。この研究では、以上のアンケート結果を引用して LPW=¥10,000/m³（¥200/20ℓ）と設定した。

機能損傷モード Ms_j の発生確率 $Ps_{(n)}(Ms_j)$ は、各 Link の構造損傷モード Mp_i の発生を独立と仮定し、 Mp_i の組合せから算出する。最終的に、各 Node の各損傷モードのリスク $Rs_{(n)}(Ms_j)$ は、式(3)から、機能リスク $Rs_{(n)}$ は式(4)から算出される。すなわち、

$$Rs_{(n)} = \sum_j Rs_{(n)}(Ms_j) = \sum_j Ps_{(n)}(Ms_j) \cdot Cs_{(n)}(Ms_j) \quad (11)$$

システム全体の機能リスク R_s は、各 Node の機能リスク $Rs_{(n)}$ の総和として算出される。すなわち、

$$R_s = \sum_n Rs_{(n)} \quad (12)$$

構造損傷モードのすべての組合せ計算をおこなうことは事実上不可能であるため、この例題では、モンテカルロシミュレーション法により機能リスクを算出した。その際、10⁶回のシミュレーションで機能リスクが収束したと判断された（計算機 PC-9821 Xa16, 計算時間約6分）。例題における機能リスクの算出結果を図-6に示す。Node8, 26, 27は、Link6-1を通して給水がおこなわれることから、必然的に機能損傷の発生確率が大きくなる大頻度事象と認識される。また、Node22, 26, 27は通常時の1日平均給水量 $W_{(n)}$ が大きいことから、断水の影響が顕著に現れる大損失事象であると認識される。

最後に、上水道システム全体の地震リスク R は、式(5)で示したように構造リスク R_p と機能リスク R_s の和として定量化される。

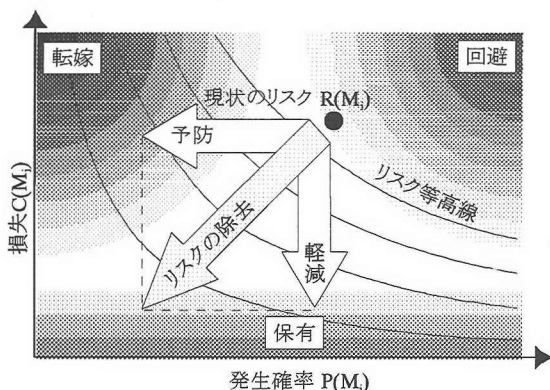


図-7 リスクの特徴と除去の概念図

4. 地震リスク評価と意思決定

(1) 現状リスクの評価

システムの現状の地震リスクを低減するためには、何らかの対策を施さなければならない。対策を効率よく立てるためには、まず、定量化された現状の地震リスクの評価をおこない、対策の方向性を見出すことが重要である。地震リスクを発生確率と損失の積である期待損失として定量化したことにより、

- ① 現状の地震リスクの大きさを認識できる。
- ② 発生確率と損失の大きさにより、地震リスクの特徴を把握することができる。

図-7の概念図を参考にしてこのことを考えてみる。図-7は、横軸に発生確率、縦軸に損失をとり、等高線はリスクの大きさを表す。右上にいくほどリスクが大きくなる。算出された現状のリスクを、損傷モードごとにプロットする。まず、リスクの分布領域から、リスクの特徴を考察し、次に、認識されたリスクを除去するための方向性を上水道システムの特徴と照らしあわせて考察する。

a) リスクの特徴¹³⁾

発生確率と損失の分布領域から、現状のリスクの特徴を定性的に考察する。

図-7の低損失近辺の「保有」の領域にプロットされたリスクについて説明する。「保有」とは、低損失のリスクを低減することを試みずに保有していた方が経済的に有利な場合を指す。つまり、リスクを低減するための対策費がそのリスクに比べて非常に大きい場合や、そのぶんの対策費を別の対策につぎ込む方が得策な場合である。

次に、低頻度大損失の「転嫁」の領域にプロットされているリスクについて説明する。保険分野におけるリスクマネジメントでは、この領域のリスクに対しては一般的に共済・補償・保険などの手段で万一の損失を転嫁するという対処がおこなわれる。つ

まり、この領域は損失が重大であるのに発生確率が非常に小さいため、リスクに対応できない、あるいは費用便益的にみて対応しない方が有利な場合である。近年、政府や保険会社、学会などにおいても地震損害保険についての議論がされている。しかし転嫁という手段に依存する前に、認識されているリスクを低減していくことは事業者の義務であり、リスク除去(後述)の対象とするべきであると考えられる。

最後に、大頻度大損失の「回避」の領域にプロットされているリスクについて説明する。一般の経営型リスクマネジメント(損失の発生の表裏の関係で利益を得る機会を内在する場合のリスクマネジメント)では、このリスクに対しては、その活動を放棄・断念することにより、リスクを回避するという方法がある。地震リスクの場合は、システムの初期建設時に耐震性・安全性を考慮しているため、この領域はある程度回避されているといえる。本来は建設されていないはずではあるが、もしも存在するならば最優先にリスクを低減するべきである。

b) リスクの除去

認識されたリスクを低減する手段は、発生確率を小さくする予防対策、および損失を小さくする軽減対策である。

予防とは、発生確率を低減することを指す。地震自体の発生は予防できないが、損傷要因の発生確率を低減する、つまり地盤の改良や管路を鋼管や継手をフレキシブル継手に更新するなどの構造的な耐震強化をすることがこれにあたる。多くの構造物、施設に求められる最も基本的な条件ではあるが、ある程度以下の発生確率にするには膨大な費用を必要とする。

軽減とは、損失を低減することを指す。資材補強、緊急時の人材確保等による復旧作業の早期化や、応急給水の準備の徹底や効率化をはじめ、各利用者の日常の水の貯えなどがこれにあたる。これには、Crisis Management との関わりが非常に大きい。また、万一の損失を集中せずに分散することも軽減となる。上水道の個々の施設・管路の構造損失の分散は困難であるが、ネットワークの冗長性を高めることにより機能損失の分散は可能である。

以上のように、現状のリスクの発生確率と損失がどの程度なのかによって、リスクの大きさだけでなくその特徴を把握することができる。一般に、発生確率が低いものほど、その構造的な耐震強化には技術的、経済的に困難が伴う。そのため低頻度大損失事象の場合、発生確率の低減と損失の低減では、同程度の地震リスクの低減をするための困難度を比較すると、損失の低減の方が有利な場合が十分にあり

表-4 対策案 A_k と対策費 Y_k

	対策内容	対策費 Y_k
A_1	<予防> 構造リスクの大きい Link6,35を, SP管からSPRC管へ変更	400
A_2	<予防> 機能リスクの大きい地区への給水経路である Link5, 7, 37, 42を, SP管からSPRC管へ変更	800
A_3	<予防> 機能リスクの大きい地区への給水経路である Link6, 38を, SP管からSPRC管へ変更	600
A_4	<軽減> 機能リスクの大きい Node22, 26, 27に対する 応急給水態勢の強化(単位水量損失を10%低減)	750
A_5	<軽減> 資材補強, 人材補強により, Link損傷の 復旧早期化(Link損傷1件の復旧を5%早期化)	700

[10⁶円]

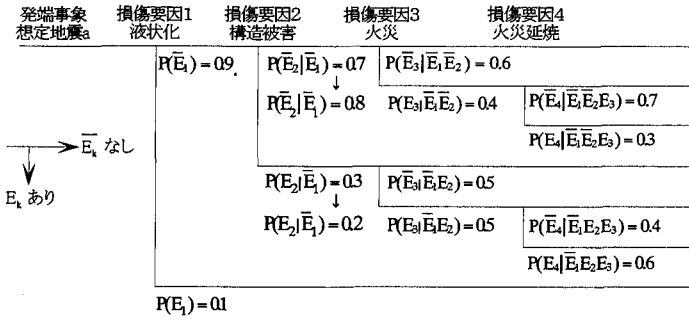
得る。このような特徴をふまえてリスク低減手段を選択することは極めて説得力がある。現在までに蓄積されたリスク低減手段のノウハウと併用することによって、より効率的でかつ分析的な意思決定の情報を提供することができる。

(2) 対策案選択の意思決定

次に、4.(1)のようなリスク評価をふまえて構成された複数の対策案の中から、最適なものを見出すことを考察する。なお、これ以降しばしば用いる「選好」という言葉は「preference」を意味する。

3.において、現状の地震リスク $R_0(=Rp_0+Rs_0)$ が定量化された。ここで、添え字 0 は、「現状」を意味する。この R_0 を低減するための対策案 $A_k(k=1\cdots 5)$ が表-4 に示すように立案されたものとする。ただし、それぞれの対策費は Y_k である。仮定した対策は、 A_1, A_2, A_3 が Link の構造的強化(予防)を、また A_4, A_5 が Node の機能損失の軽減を考慮したものである。

対策案 A_k 実施後の地震リスク $R_k(=Rp_k+Rs_k)$ を再算出し、現状の地震リスクと対策後の地震リスクの差(リスクの低減分)を算出する。例として、図-8 に対策案 A_1 による Rp_0 の低減の様子を示す。図-8 は、図-7 の概念図をふまえたものである。ここでの注意点として、対策案 A_1 を実施することにより、リスクの大きい損傷モードの発生確率は低減される(図中のリスクが←方向へ移動する)が、そのぶんリスクの小さい損傷モードの発生確率は逆に増加する(→方向へ移動することになる。これは、対策 A_1 の実施により式(7)における条件付被害率 $\lambda|A, a, G_j, m$, $\lambda|A, a, G_j, m$ が小さくなるためであるが、式(2)で示したように、分類される損傷モードが互いに排反ですべてを尽くしていることには変わりがないので、発生確率の総和は 1 となる。



損傷モード M _i	発生確率P(M _i)	
	対策前	対策後
M ₁ 被害なし	0.378	0.432 (↑)
M ₂ 火災被害	0.176	0.202 (↑)
M ₃ 火災延焼	0.076	0.086 (↑)
M ₄ 構造被害	0.135	0.090 (↓)
M ₅ 火災被害	0.054	0.036 (↓)
M ₆ 火災延焼	0.081	0.054 (↓)
M ₇ 液状化被害	0.100	0.100 (-)
	$\sum P(M_i) = 1$	$\sum P(M_i) = 1$

図-9 対策による発生確率の変化の例

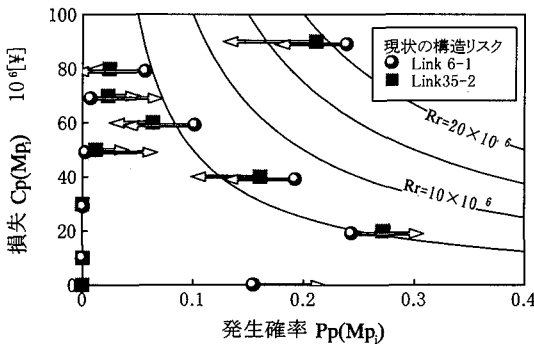


図-8 対策案 A₁ による構造リスクの低減の様子

ここで疑問となるのは、対策を実施すれば「被害なし」の損傷モードの発生確率が大きくなるだけで、他の損傷モードの発生確率は変化しないか、あるいは減少するのではないかという点である。この疑問の理解を容易にするために、図-9 のET(図-2と同じ)を用いて説明する。いま、損傷要因2 構造被害の発生確率を次のように低減できたと仮定する。

$$\begin{aligned} P(\bar{E}_2|\bar{E}_1) = 0.7 &\rightarrow P(\bar{E}_2|\bar{E}_1) = 0.8 \\ P(E_2|\bar{E}_1) = 0.3 &\rightarrow P(E_2|\bar{E}_1) = 0.2 \end{aligned}$$

このとき、他の損傷要因の条件付発生確率は不変である。その結果、図-9 に示すように対策後の「被害なし」以外の損傷モードにおいても発生確率が大きくなる場合があることが分かる。

対策選択決定者は、それぞれの対策案の利点と欠点を見定め、最適なものを選択したい。さて、最適な対策、つまり「最も満足のいく結果」とはいったい何であろうか。この研究では、対策案選択の意思決定を、a) 対策の目的、b) 効果、c) 経済性の3つの選好から考察する。

a) 対策の目的

構造リスク R_p の低減は機能リスク R_s の低減につながるという特徴がある。かと言って、R_p 低減に固

執ると R_s 低減をもたらすあらゆる対策の可能性を見失いがちになる。水道システムの本来の目的は水の供給という機能であるから、対策は R_s を低減するためにおこなわれるべきである。対策の目的による選好は、①構造リスク R_p の低減、②機能リスク R_s の低減、および③地震リスク R=R_p+R_s の低減の3つを考慮する。

b) 効果

現状のリスクと対策後のリスクの差であるリスクの低減分を対策の効果として捉えることができる。ここでは、対策の効果として、最大リスクの低減分、リスク(期待損失)の低減分を考察する。

まず、各対策 A_k における構造最大リスク、および機能最大リスクの低減分の比較を考える。構造最大リスク、および機能最大リスクを次のように定義する。

$$R_{p_k \max} = \text{Max}_k \left\{ \text{Max}_i [R_{p_{k(i)}}(M_{p_i})] \right\} \quad (13)$$

$$R_{s_k \max} = \text{Max}_k \left\{ \text{Max}_j [R_{s_{k(j)}}(M_{s_j})] \right\} \quad (14)$$

ただし、R_{p_k max} : 対策 A_k 実施後の構造最大リスク
R_{s_k max} : 対策 A_k 実施後の機能最大リスク
構造最大リスク R_{p_k max} は、各 Link の損傷モードのなかで最大のリスクを比較し、それらのなかで最大のリスクを、対策 A_k 実施後のリスクの代表値としたものである。機能最大リスクについても同様である。

現状の構造最大リスク R_{p₀ max} と R_{p_k max} の差、および、現状の機能最大リスク R_{s₀ max} と R_{s_k max} の差が、この基準による対策 A_k の効果であるから、これを最大とする対策が選好される。すなわち、

$$\text{Max}_k \left\{ \dots, (R_{p_0 \max} - R_{p_k \max}), \dots \right\} \quad (15)$$

および、 $\text{Max}_k \left\{ \dots, (R_{s_0 \max} - R_{s_k \max}), \dots \right\}$

この基準は、対策を実施することによって現状で認識されている最大リスクをどの程度低減できるの

かということに着目している。システム全体の総期待損失をリスクと定義するなかで、部分的に突出した最大リスクにあえて着目する理由は、コンピュータではなく人間である意思決定者が、いろいろな判断基準のなかで主基準・副基準を適宜採用することがよいのではないかと考えたからである。この基準はリスク低減の焦点を絞った効果基準になると考えられる。

次に、各対策 A_k における構造リスク R_p 、機能リスク R_s 、および地震リスク R の低減分の比較を考える。 R_{p0} と R_{pk} の差、 R_{s0} と R_{sk} の差、および、 R_0 と R_k の差が、この基準による対策 A_k の効果であるから、これを最大とする対策が選好される。すなわち、

$$\left. \begin{array}{l} \text{Max}\{\dots, (R_{p0} - R_{pk}), \dots\} \\ \text{および、} \text{Max}\{\dots, (R_{s0} - R_{sk}), \dots\} \\ \text{および、} \text{Max}\{\dots, (R_0 - R_k), \dots\} \end{array} \right\} \quad (16)$$

c) 経済性

この研究のここまでの議論では、対策費に関してはまだ触れていない。地震対策の意思決定は、低頻度大損失事象のリスクの低減のために、どの程度の対策費をつぎ込むのかという、効果と対策費の相反する選好をどう満足すればよいか問題となる。これは工学的な判断のみによらず、社会的、経済的、さらに政策的な判断をも必要とし、安全哲学の重要な問題であることは言うまでもない。

今日広く知られている経済性の基準として期待総建設費最小の基準がある。

$$TC_0 = Y_0 + \sum_i P_0(M_i) C_0(M_i) = Y_0 + R_0 \quad (17)$$

ただし、

- TC_0 : 初期建設時の期待総建設費
- Y_0 : 初期建設費
- $P_0(M_i)$: 現状の損傷モード M_i の発生確率
- $C_0(M_i)$: 現状の損傷モード M_i の損失(復旧費, 再建費, 困窮度)
- R_0 : 現状のリスク

この研究では、初期建設時ではなく既存施設の地震対策時を対象としているため、対策時の期待総建設費は、

$$TC_k = Y_0 + Y_k + \sum_i P_k(M_i) \cdot C_k(M_i) = Y_0 + Y_k + R_k \quad (18)$$

ただし、

- TC_k : 対策時の期待総建設費
- Y_k : 対策費
- $P_k(M_i)$: 対策後の損傷モード M_i の発生確率
- $C_k(M_i)$: 対策後の損傷モード M_i の損失(復旧費, 再建費, 困窮度)

R_k : 対策後のリスク

初期建設時において、 Y_0 は構造物を新築するために確定的に支払われる費用であり、 R_0 には含まれない。つまり、 $C_0(M_i)$ に含まれるものは地震による構造物の損傷、破壊が起こったときの復旧費、再建費と困窮度である。同様に、対策時において、 Y_0 および Y_k は構造物を新築および改善するために確定的に支払われる費用であり、 R_k には含まれない。つまり、 Y_k と引き替えにリスク低減分($R_0 - R_k$)、すなわち効果がもたらされることになる。したがって、 TC_0 と TC_k の差 $E1_k$ を最大にする対策が選好される。

$$E1_k = TC_0 - TC_k = \{Y_0 + R_0\} - \{(Y_0 + Y_k) + R_k\} = (R_0 - R_k) - Y_k \quad (19)$$

$$\text{Max}\{\dots, E1_k, \dots\} \quad (20)$$

ここで、 $E1_k$ を相対効果と呼ぶことにする。一般の経営型リスクマネジメントと比べて、低頻度重大損失事象である地震リスク低減問題が大きく違う点は、 $E1_k < 0$ はやむを得ないというところにある。 $R_0 - R_k < Y_k$ という理由で対策 A_k が破棄されることは少ないと考えられる。

同様に、構造リスク R_p 、機能リスク R_s 、および構造最大リスク $R_{p \max}$ 、機能リスク $R_{s \max}$ の低減の相対効果 $E1_{pk}$ 、 $E1_{sk}$ 、 $E1_{pk \max}$ 、 $E1_{sk \max}$ は、式(19)の右辺($R_0 - R_k$)を、それぞれの効果に置き換えることにより算出される。

対策の経済性は、以上のような相対効果のみではなく、効率という側面も重要な判断要素と考えられる。

$$E2_k = \frac{R_0 - R_k}{Y_k} \quad (21)$$

$$\text{Max}\{\dots, E2_k, \dots\} \quad (22)$$

ここで、 $E2_k$ は単位対策費あたりのリスク低減分であるので、対策効率と呼ぶことにする。

同様に、構造リスク R_p 、機能リスク R_s 、および構造最大リスク $R_{p \max}$ 、および機能リスク $R_{s \max}$ の低減の対策効率 $E2_{pk}$ 、 $E2_{sk}$ 、 $E2_{pk \max}$ 、 $E2_{sk \max}$ は、式(21)の右辺($R_0 - R_k$)を、それぞれの効果に置き換えることにより算出される。

5つの対策の比較評価を表-5、図-10をもとにおこなうと、

- A_1 : 構造リスク低減の経済性がよい。機能リスク低減の効果、経済性は優れない。
- A_2 : 予防対策のなかでは最も機能リスク低減の効果がよく、全対策のなかでも最も地震リスク低

表-5 対策の効果および経済性の比較評価

対策	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
(a)構造最大リスク					
効果	5.1		2.5		
相対効果	-394.9		-597.5		
対策効率	0.013		0.004		
(b)構造リスク					
効果	22.9	28.5	20.5		
相対効果	-377.1	-771.5	-579.5		
対策効率	0.057	0.036	0.034		
(c)機能最大リスク					
効果		20.7	19.2	89.2	54.0
相対効果		-779.3	-580.8	-660.8	-508.9
対策効率		0.026	0.032	0.119	0.077
(d)機能リスク					
効果	260.1	591.2	474.2	609.9	562.9
相対効果	-139.9	-208.8	-125.8	-140.2	-137.1
対策効率	0.650	0.739	0.790	0.813	0.804
(e)地震リスク					
効果	283.0	619.7	494.7	909.9	562.9
相対効果	-117.0	-180.3	-105.3	-140.2	-137.1
対策効率	0.707	0.775	0.824	0.813	0.804

(空白はリスク低減なし) 効果, 相対効果; 10⁶円

減の効果がよい。経済性は悪い。

A₃:効果のみに注目するとA₂に支配される(劣)。

機能リスク低減の相対効果がよい。

A₄:対策の性質上、構造リスク低減はない。機能リスク低減の効果、対策効率がよい。

A₅:対策の性質上、構造リスクの低減はない。機能最大リスク低減の相対効果がよい。

この研究では、最終的な対策案を決定することは回避する。なぜならば、対策案選択の意思決定において最も重要なことは、「なぜその選択がなされたのか(Accountability)」であり、最終的な対策案の選択は決定者の判断に依存されるからである。この研究は、それ自体が意思決定過程を体系化する方法論であり、意思決定に有用な情報を明確に提供するといえる。

5. まとめ

この研究で得られた結果を以下に示す。

- ① 確率論的危険度評価法であるSRMについて、損傷要因分析方法の1つであるETを用いる方法を示し、リスクを期待損失として定義、算出する方法を明確にした。
- ② SRMを上水道システムに適用し、上水道システムの仮想モデルによる例題を用いて、地震リスクの定量化方法を示した。その際、地震リスクを、物理的損傷によるシステムの復旧費、再建費である構造リスクと、その物理的損傷がネットワーク

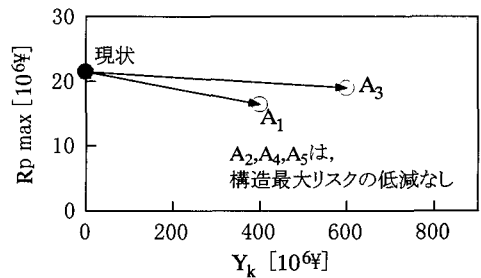


図-10(a) 構造最大リスクによる対策の評価

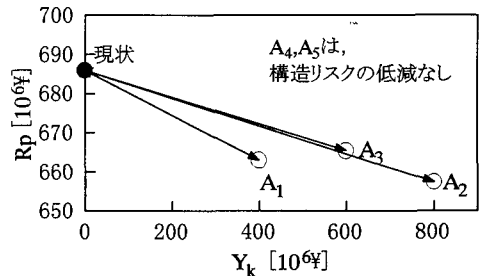


図-10(b) 構造リスクによる対策の評価

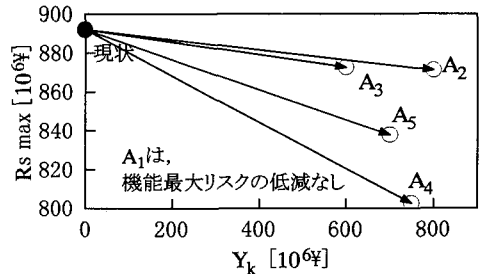


図-10(c) 機能最大リスクによる対策の評価

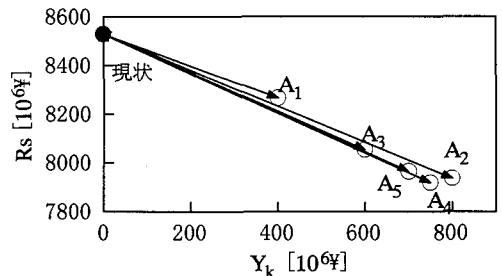


図-10(d) 機能リスクによる対策の評価

を通してもたらす給水障害である機能リスクに区別し、構造リスク、または機能リスク、あるいはは両者のリスクの和を上水道システムの地震リスクとした。

- ③ 地震リスクを低減するための対策選択の際の意思決定の方法と手順について考察した。損傷モードの発生確率と損失の大きさからリスクの特徴を

定性的に考察した。また、複数の対策を選択する際の意思決定基準を、対策の目的、効果、経済性の3つの視点から考察した。

この研究で述べた確率論的危険度評価は、

- ① リスクを期待損失として定量的に分析できる。
- ② 解析に用いる仮定および結果が明示されるとともに、危険度解析の問題点を指摘できる。
- ③ 具体的な対策を定量的に評価できる。
- ④ 貨幣価値という共通の尺度で危険度の議論ができる。

などの利点があり、将来の危険度解析として一般的に利用されることが望まれる。

最後に、例題を通して明らかになった研究の問題点を整理し、この研究の今後の課題を述べる。

①構造損傷要因の発生確率

例題では、管路の損傷要因の発生確率に対しては仮定した数値を用いている。2. で述べたように、この確率は損傷要因間の相関性を考慮した、ET上流の条件付確率となる。低頻度で発生する地震被害の発生確率を統計的な方法によって推定するためには、データ不足のために、現状では困難なものとなっている。管路損傷のメカニズムを解明していくために、信頼性解析による条件付管路被害率の算出の研究が望まれる。

②機能リスクの算出

地震はライフラインをはじめとする多数の施設の被害を同時に発生させる。そのため、上水道システムの機能停止のみによる損失や、人々が受ける精神的なダメージなどをどこまで考慮・整理し、どう貨幣換算するのかという判断が容易でない。また、損失そのものの不確定性が大きいと、算出されるリスクがどこまで妥当なのかという判断も難しい。機能損失の算出には、工学的な見地を越えた議論が望まれる。また、構造損傷に伴う機能損傷の波及を追求していくことが求められるが、これは、システムの水理学的特性やネットワーク形態に大きく左右される。既往の研究と比べ、この研究が大きく違う点は、損傷モードという損失の程度によって機能性能の評価をおこなうことである。つまり、機能リスクの算出には、復旧過程、Crisis Managementとの関わりが非常に大きい。復旧早期化などの損失軽減対策を、具体的に数値として表す研究をしていくことによって、対策選択の意思決定に対して、より明確な情報を提供することが期待できる。

この研究は方法論を構築することが目的であるため、設定した発生確率や損失の数値の評価をおこなっていない。実際の解析においては、リスクを算出した後に設定した数値の感度分析¹⁰⁾をおこない、

リスクに大きく影響する因子を見いだすことが必要であると考えられる。

今後は、この研究を実災害や事例解析に適用し、方法論の妥当性を検証していきたい。特に、収益減、代替供給費用、利用者困窮度などの損失を明確に整理・算出することを重要課題として研究を進めていきたい。

最後に、この研究は第2著者による問題提起を受け、第1著者がおこなったものである。しかしながら、基本構想と考え方の調整は両者が共同でおこなったものである。

参考文献

- 1) 例えば、日本水道協会：1995年兵庫県南部地震における水道管路の被害と分析、1996.8.
- 2) 例えば、篠塚正宣、小池武：埋設ライフラインシステムの連結性能に関する地震危険度解析、土木学会論文報告集、第311号、pp.13-24、1981.7.
- 3) 例えば、磯山龍二、片山恒雄：大規模水道システムの地震時信頼度評価法、土木学会論文報告集、第321号、pp.37-48、1982.5.
- 4) 例えば、星谷勝、宮崎正敏：上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測、土木学会論文報告集、第331号、pp.45-54、1983.3.
- 5) 例えば、能島暢昌：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.
- 6) 例えば、星谷勝、大野春雄：地震による被害波及構造と機能相互連関に基づくライフライン系システムの防災性に関する研究、(財)トヨタ財団助成金研究論文、1988.3.
- 7) 例えば、Isoyama, R. and Shah H.C.: Seismic Risk-Investment Analysis for Water Supply Systems, *Proc. of the Sixth Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.2033-2040, 1982.
- 8) 水谷守、中村孝明：確率論的アプローチによる地震リスクマネジメント(SRM)手法の提案、土木学会第51回年次学術講演会、I-B369、1996.9.
- 9) 現代用語の基礎知識：自由国民社、1994.
- 10) 星谷勝、石井清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1985.5.
- 11) Fullwood, R.R. and Hall, R.E.: *Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Power Industry; Fundamentals and Applications*, Oxford, Pergamon, 1988.
- 12) USNRC: *PRA Procedures Guide*, NUREG/CR-2300, 1983.
- 13) 亀井利明：現代リスクマネジメント事典、同文館出版、1988.5.
- 14) 山田善一(研究代表者)：地震時におけるライフライン系を含む都市機能の防災と復旧過程に関する研究、1987.3.
- 15) 白水暢、友野勝義：水道のリスクに対する需用者の認

識, 水道協会雑誌, 第 745 号, pp.15-25, 1996.10.

16) Ang, A.H-S. and Tang, W.H.: *Probability Concepts in Engineering Planning and Design ; Vol.I Basic Principles,*

John Wiley & sons, 1975. (伊藤・亀田: 土木建築のための確率・統計の応用, 丸善, 1988 年.)

(1997.3.25 受付)

SEISMIC RISK MANAGEMENT OF WATER SUPPLY SYSTEM

Tetsuya SHITO and Masaru HOSHIYA

This study applies a standard method of the Seismic Risk Management (SRM) to a water supply system. The SRM assessment deals with seismic damages represented by an event tree, and defines a seismic risk as expected loss (a product of loss and its probability). Taking into account the properties of the network of a water supply system, its seismic risk should be classified into a physical risk and a serviceability risk. The difference between a potential risk after reduction and a present risk of a system is recognized as an effect of a measure. The SRM would offer valuable information to the decision making of seismic measures.