

## 大容量送水管整備事業の経済評価 —被災リスク軽減機能と通常時のプラットフォーム機能の比較分析—

鳥取大学大学院 学生員 國井 大輔  
神戸市水道局 正会員 松下 眞

鳥取大学工学部 正会員 谷本 圭志  
京都大学防災研究所 正会員 多々納裕一

### 1. はじめに

神戸市への給水は山際を通る送水管に大きく依存しているため、その被災や故障等によって送水が途絶えると莫大な社会的損失が生じる。このため、都市部の地下に耐震性の高い送水管を新設し、既存の送水管に接続する「大容量送水管整備事業」が実施されている。この事業では、震災時における給水機能の確保や配水システムのブロック化を可能とするのみならず、送水システム全体としての送水能力が高まることに伴って既存送水管の給水を停止し、点検などの維持管理を可能にするという通常時におけるプラットフォーム機能が期待されている。そこで本研究では、大容量送水管整備事業を対象として、震災時と通常時におけるそれぞれの機能の経済的な評価をマルコフ決定過程を用いて検討する。

### 2. 水道管理者の行動のモデル化

送水システムの状態を $(i, e, d)$ で表す。ここに $i$ は既存の送水管の劣化状態であり、0を新品同様、1, 2, ...と番号の増加は劣化の進行の程度を表す。劣化の状態は観測しなければ分からない。 $e$ は地震の状態(規模)である。 $d$ は大容量送水管の整備に関する状態であり、 $d=1$ は整備されている、 $d=0$ は整備されていない状態である。

大容量送水管が整備されている場合、水道管理者は大容量送水管の整備によって生じる余剰給水能力を用いて、既存の送水管の点検が可能となる。水道管理者が点検によって送水システムの状態を $(i, e, d)$ と観測したときにとりうる行動は既設の送水管の「補修」、「更新」、「運転を続け $T$ 期後に再点検」の三つであるとし、それぞれの行動を $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3(T)$ と表す。これらの行動を選択できることが大容量送水管のプラットフォーム機能である。水道管理者は通常時においてはこれらの選択肢から適切な行動をとることで、ライフサイクル費用を最小化すると考える。

一方、大容量送水管が整備されていない場合、水道管理者は既存の送水システムの観測を行えない、もしくはその費用が禁止的に高いことから、「運転し続け、 $K$ 期後に大容量送水管を整備す

る」という行動をとらざるを得ず、それを行動 $a_0(K)$ と表す。

### 3. モデルの定式化

送水システムの状態が $(i, e, d)$ であるとき、その後最適な行動をとり続けたときのライフサイクルコスト(LCC)を $V(i, e, d)$ 、社会的損失を $l(i, e, d)$ 、更新コストを $R$ 、補修コストを $r$ 、点検コストを $c$ で表す。任意の時期から次期間に劣化状態の推移は吸収マルコフ過程に従い、その推移確率を $p_{ij}^e$ で表す。任意の期における地震の生起確率を $\mu(e)$ で表す。

#### (1) 大容量送水管が整備されている場合

各行動を選択した場合のLCCは以下のように定式化できる<sup>1)</sup>。

①管理者が $a_1$ を選択したときのLCC

$$V_1(i, e, 1) = r_i + c + \beta \sum_e \sum_{j=0}^i q_{ij} V(j, e, 1) \mu(e)$$

ここに $q_{ij}$ は補修を行う( $a_1$ を選択する)ことに伴う劣化状態 $i$ から $j$ への推移確率である。

②管理者が $a_2$ を選択したときのLCC

$$V_2(i, e, 1) = R_i + c + \beta \sum_e V(0, e, 1) \mu(e)$$

③管理者が $a_3(T)$ を選択したときのLCC

状態 $(i, e, 1)$ から出発して $T$ 期後の総社会的損失を $l(i, e, 1; T)$ で表す。するとLCCは以下のように表すことができる。

$$V_3(i, e, 1; T) = l(i, e, 1; T) + c + \beta^T c + \beta^T \sum_e \sum_{j=0}^i P_{ij}^e(T) V(j, e, 1) \mu(e)$$

なお、 $P_{ij}^e(T)$ は $i$ の劣化状態から $T$ 期間後に地震の状態が $e$ でかつ劣化状態が $j$ である確率のことである。

以上①, ②, ③より大容量送水管が整備された場合の任意の状態の下でのLCCは次式で求められる。

$$V(i, e, 1) = \min \{ V_1(i, e, 1), V_2(i, e, 1), \min_{1 \leq T \leq \infty} V_3(i, e, 1; T) \}$$

#### (2) 大容量送水管が整備されていない場合

大容量送水管が整備されていない場合、水道管

キーワード：送水システム リスクマネジメント  
維持管理政策 マルコフ決定過程

連絡先：〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101  
鳥取大学工学部 Tel 0857-31-5333

理者は  $a_0(K)$  の行動をとらざるを得ない。大容量送水管の工期を  $N$  で表すと、LCC は次式で表される。

$$V_0(i, e, 0; K) = l(i, e, 0; K + N) + \beta^K \frac{(1 - \beta^N) \Delta}{(1 - \beta) N} + \beta^{K+N} \sum_{e=0}^{s+1} P_{ij}^e(K + N) V(j, e, 1) \mu(e)$$

初期には大容量送水管が整備されていないとする。すると、大容量送水管を初期に整備した場合 ( $K=0$ ) の LCC, 次期以降に整備した場合のそれはそれぞれ次式で求められる。

$$V_0(i, e, 0; 0) \tag{1}$$

$$\min_{1 \leq K \leq \infty} V_0(i, e, 0; K) \tag{2}$$

よって、劣化状態  $i$ , 地震の状態  $e$  の下で初期に大容量送水管を整備したときの全ての機能に関する経済価値の合計（これを (#) で表す）は (2) 式 - (1) 式により導出される。

ここで、通常時におけるプラットフォーム機能の価値は、地震が生起する確率が 0 として導出される (2) 式 - (1) 式（これを (b) で表す）で得られる。すると、地震時において発揮される諸機能は、(#) 式 - (b) 式で得ることができる。その機能によって減じられる LCC によって評価することができる。

#### 4. 実証分析

劣化状態として「0：新品同様の状態」, 「1：構造体としての強度が期待できる状態」, 「2：構造体としての強度が期待できない状態」, 「3：故障状態」を想定する。地震の状態を「0：100 ガル未満」, 「1：100 ガル以上 300 ガル未満」, 「2：300 ガル以上」と想定する。各行動に伴うコストは神戸市水道局へのインタビューに基づき推定した。なお、各状態の下での社会的損失の構成を図-1 に示す。

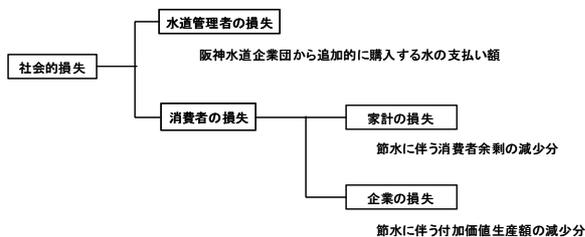


図-1 社会的損失の構成

水道管理者は、劣化に伴う漏水によって通常の給水事業によって給水するのみでは需要を満たしえない場合、即座に消費者に節水を求めるので

はなく、阪神水道事業団から追加的に水を購入して不足分を充当するものとする。その支払いに必要な金額を水道管理者の損失とする。家計の損失は、代替法によって推計した需要曲線<sup>2)</sup>を用い、節水の程度に応じた消費者余剰の減少分をもって与える。企業の損失は、産業連関表から付加価値生産関数を推計し<sup>2)</sup>、節水に伴う付加価値額の減少分をもって与える。その際、コブ・ダグラス型生産関数を用いる。

以上の考え方の下で推計した各行動の下での費用及び社会的損失を与え、また現在の劣化状態や劣化の推移に関する確率などを与えることにより、諸機能の合計の経済的価値を推計した。その際、供用開始時における既存の送水管の状態が新品であるとして「50年後30%の確率で既存の送水管が少なくとも構造的に安全である場合」, 「50年後50%の確率で既存の送水管が少なくとも構造的に安全である確率」の二つの劣化に関する推移確率を想定した。それらをそれぞれ Case1, Case2 と呼ぶ。

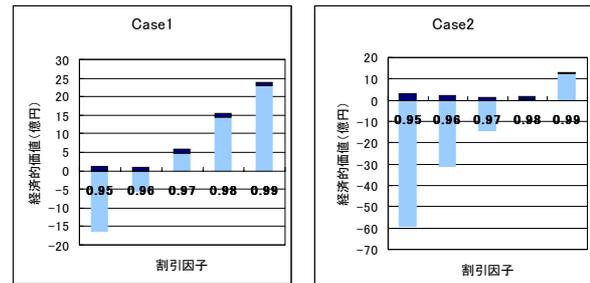


図-2 大容量送水管の経済的価値

(淡：プラットフォーム機能, 濃：被災リスク軽減機能)

分析結果を図-2 に表す。グラフにおける淡色は通常時におけるプラットフォーム機能を、濃色は地震時におけるブロック化や給水機能の向上に伴う被災リスク軽減機能の経済的価値である。この結果より、価値の多くが通常時におけるそれによって構成されていることがわかる。

#### 5. おわりに

今後は、別途検討されているリスクプレミアムの推計結果を用いるなどして、推計をより精緻化していきたい。

<参考文献>

- 1) M. Matsushita, K. Tanimoto, H. Tatano, and N. Okada: Upgrading Municipal Water Supply Systems: Kobe's Challenge, Paper presented at Forum on Recent Challenges in Integrated Disaster Management, 2001.
- 2) 飯田奈穂: 給水事業の費用と便益に関する研究, 鳥取大学修士論文, 2002