水道システムの漏水対策に関する評価モデル

鳥取大学大学院　学生会員　○松岡良彦
鳥取大学工学部　正会員　谷本圭志
鳥取大学工学部　正会員　喜多秀行

1. はじめに

水資源は我々が生活していく上で必要不可欠なものであり，水の安定供給が求められている．そのため，我が国では，明治30年から水道の設備が行われるようになり，昭和30年代から40年代の急速な整備を経て，現在では普及率が96%を超える高普及時代を迎えている．このため，新規に水道を整備することより，既に整備されている施設に重大な故障が起こらないように，また限られた水資源を有効に利用できるように維持管理を行うことの重要性が増してきている．しかし，維持管理を行うにあたって，水道管は地中にあるため，水道管理者は管理区域内の全ての漏水量を把握することはできるが，どの水道管でどれだけ漏水しているかを把握することができない．そこで水道管理者は一年に一度漏水調査を行い，発見した漏水は基本的に全てその時点で防止するといった対策を採っているが，漏水調査には漏水量を把握するための点検や，漏水を発見した場合の修繕のための費用などがかかるため，一年に一度という「点検の間隔」や，発見した漏水は基本的にすべてその時点で修繕するといった「修繕のタイミング」が必ずしも最適である保証はない．また，維持管理の効果は長期に及ぶものであることから，ライフサイクルの観点で評価する必要がある．

そこで本研究では，水道管理者は管理区域内全体の漏水量が把握でき，その情報を用いて，点検や修繕などの維持管理費用と，漏水に伴う（水道管理者および社会が被る）費用によって構成されるライフサイクルコストを最小にする維持管理政策，すなわち，点検間隔や修繕のタイミングを導くモデルを，マルコフ決定仮定[1)]を用いて構築するとともに，実際のデータを用いて，漏水対策を設計する．

2. 想定する維持管理モデル

本研究では配水池から最終需要者までの区間の水供給システムを対象とする．水道管は地中に埋設されていることから，水道管理者は点検を行った期を除いては当該の水道管がどれだけ漏水しているのかを観測できない．点検によって個々の水道管の漏水量を観測した際には，その量に応じてそのまま稼働させるか取替えを行うかを選択することができる．点検しない期においては取替えを行うことができず，次期には漏水量が確率的に成長する．

3. 維持管理モデルの定式化

漏水量を離散値で表し，任意の漏水量を$i\in\{0,1,\cdots,s+1\}$で表記する．ここに0は漏水がない状態であり，$1,\cdots,s+1$は数が大きくなるほど漏水が成長していることを表している．また管理区域内に敷設されている水道管の数をn本とし，管理区域全体の漏水量の分布（以後，「水道システムの状態」と呼ぶ）を$\alpha=(\alpha_0,\alpha_1,\cdots,\alpha_{s+1})$で表す．また，当該の水道管以外の漏水量の分布を$x=(x_0,x_1,\cdots,x_{s+1})$で表す．ここに$\alpha_i$, x_iは漏水量がiの水道管の本数であり$\Sigma_i\alpha_i=n$, $\Sigma_i x_i=n-1$である．今期にiの漏水量がある水道管が次期に漏水量jとなる確率をp_{ij}で表す．点検にはIの費用を要する．点検を行った際には取替えを行うことができ，漏水量がiの水道管を取替える場合には，C_iの費用を要する．点検の後，次回に点検する期を決定する．点検期間をTで表す．時間を離散値で表し，一期当たりの割引因子をβ $(0<\beta<1)$とおくと，ライフサイクルコストを最小とする維持管理政策は以下のように定式化できる．

$$\min_T v(\alpha;T;0)=\sum_{i=0}^{s+1}\alpha_i V(i,\alpha-e_i;T;0) \tag{1}$$

ここに$V(i,\alpha-e_i;T;t)$は，任意の水道管の漏水量がi,その他の水道管の漏水量の分布が$\alpha-e_i$であり，次回までの

点検期間がTである場合に前の点検時期からt時間経過した時期を初期とした場合のその水道管のライフサイクルコストである．$v(\alpha;T;t)$は水道システムの状態がαであり，次回までの点検期間がTである場合に点検時期から，t期間経過した時期の管理区域内における各水道管のライフサイクルコストの和を表している．e_iはi成分のみが1で，その他は0であるベクトルである．$V(i,x;T;0)$は以下のように定義される．

$$V(i,x;T;0) = \min\left[\,C_i + H(0,x';T;0),\ H(i,x;T;0)\,\right] \tag{2}$$

(2)式の右辺の第一項は取替えを行った場合のライフサイクルコストであり，第二項の$H(i,x;T;0)$は取替えを行わなかった場合のそれである．第一項のHにおいて漏水量が0となっているのは，取替えによって漏水量が0になることを表している．$H(i,x;T;0)$は次式のように定式化できる．

$$H(i,x;T;0) = L_i + \sum_{t=1}^{T-1}\beta^t \sum_{j=i}^{s+1}\sum_{y\in \overline{Y}_j} p_{ij}(t)q_i(y|x')(t)L_j + \sum_{t=1}^{T}\beta^t \sum_{j=i}^{s+1}\sum_{y\in Y_j} p_{ij}(t)q_i(y|x')(t)\{I + V(j,y;T;0)\} \tag{3}$$

ここに，L_iは漏水量がiであるときの水道管理者および社会が被る損失である．$q_i(y|x')(t)$は当該の水道管の当期の漏水量がiでありかつその他の水道管の漏水量の分布がx'であるときに，t期まで点検をせず，t期後に当該の水道管以外の漏水量の分布がyとなる確率である．

以上より，(1)式において求められるTが水道システムの状態がαである場合の（ライフサイクルコストを最小にするという意味で）最適な点検間隔であり，(2)式において"min"の中の第一項が第二項よりも小さくなる漏水量iが取替えを行うべき漏水量であり，その逆の場合が取替えを行わず，そのまま稼働を続けるべき漏水量である．

4. 実証分析

実証分析として，ある都市の水道局から入手した漏水データを用いて，その都市に属する二つの区域の給水管を対象として漏水対策を設計した．なお，分析にあたって，給水管は全て同質であるものと仮定する．また構成要素数は2,000世帯を1要素（水道管の単位）とし，1期間は4ヶ月と設定した．個別の水道管の漏水量を「$0:0\le l\le 5\,(\mathrm{m}^3/日)$」，「$1:5<l\le 20\,(\mathrm{m}^3/日)$」，「$2:20<l\le 50\,(\mathrm{m}^3/日)$」，「$3:l>50\,(\mathrm{m}^3/日)$」の4状態に分類した．各種コスト，推移確率は漏水データを用いて推定した．以下に推定したデータを基に計算した結果を記す．

表1. 最適政策と点検期間の数値計算の例

α	漏水量			
	0	1	2	3
(4,3,1,2)	4	4	4	4
(4,13,1,1)	3	3	3	3

結果として，最適政策はA区域，B区域ともに状態0，つまり$5\mathrm{m}^3$/日以下の漏水が観測された水道管に関しては，取替えは行わずそのまま稼働させ，状態1，2，3，つまり$5\mathrm{m}^3$/日を超える漏水が観測された水道管に関しては取替えを行うという結果が得られた．また，最適な点検間隔に関しては，A区域では4期（1年)後，B区域では3期（9ヶ月)後に再点検を行うことが最適であることが導かれた．

5. おわりに

本研究ではデータ数が少なかったため，推移確率などが十分な精度をもって推定することができなかった．今後はデータ数を増やし，より精度の高い分析をしていく必要がある．

謝辞

本研究の遂行においては，広島市水道局，仙台市水道局に多大な協力を得た．ここに感謝の意を表する．

【参考文献】

1) 三根久，河合一；信頼性・保全性の数理，朝倉書店，1982.