

水道管路の更新順序と投資水準の適正化に関する研究

小棚木 修¹・小泉 明²・渡辺 晴彦³

¹正会員 東京都立大学大学院 工学研究科 博士課程 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

²フェロー会員 工博 東京都立大学大学院 工学研究科 教授 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

³正会員 工博 (株)日水コン 環境事業部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-22-1)

わが国における水道管路の多くは昭和30年代から40年代の建設拡張時代に布設されており、経年化が進んできている。管路の経年化に伴い水道供給における障害の発生及び機能低下が予想され、これを予防するためには適切に管路を補修・更新する必要がある。管路更新事業はその効果と給水収益に応じた投資が必要であるが、投資に対する効果についてはこれまで十分な研究がなされていない。本研究では、管路更新による効果を定量化し、管路更新計画を給水収益にもとづく費用制約条件下で計画期間内の総便益を最大化する問題として定式化した。そして、更新対象管路の抽出方法及び更新期の検討方法を提案し、その有効性を確認した。

KEYWORDS : *renewal, network structure, investment, water supply*

1. はじめに

これまで水道事業は、水需要への対応、水供給のレベル向上のため、膨大な施設を整備してきた。特に管路については水道施設全体の6割〜7割程度の資産価値を占めており、1年間の給水収益の10倍程度の資産が構築されている¹⁾。管路の多くは、昭和30年代から40年代の建設拡張時代に布設されたものが多く、経年化が進んできている。経年化に伴う機能障害、機能低下としては、腐食等に伴う耐性劣化による管路破損の危険性の増加、継手部の緩みなどによる漏水の発生、錆こぶの付着・ライニング材剥離による通水能の低下、錆こぶ等の剥離による赤水などの水質障害の発生等を挙げることができる。これらの水道管路の機能障害、機能低下を予防・改良するためには適切に補修・更新を行う必要がある。

これまでの水道管路の更新は、発癌性が懸念されるアスベスト対策としての石綿セメント管の布設替えや、無ライニングの普通铸铁管の錆こぶの除去・防止のためのライニング更正工事及び布設替えなどが中心であった。特に石綿セメント管や布設後20年以上経過した铸铁管などについては、管路近代化事業として国庫補助の対象に指定されたこともあり管路更新が進んできているが、いまだ20年以上経過した管路は18万km(平成10年度)

とわが国の管路総延長の1/3以上を占めている状況にある²⁾。

水道の高普及に伴い給水停止が必要者等に与える影響が大きくなってきていることにより、今後の管路更新はリスク管理の立場から推進する必要性が高くなると考えられる。この場合、法定耐用年数などにより一定以上の経年管を更新対象とすることも考えられるが、水道の高普及時代に一斉に布設された管路が多く、多数の管路が同時期に更新対象となるため、現状の水道料金制度及び水準では財政的な対応が困難になるものと予想される。また、経年数による一律の更新基準では、健全な管も対象とする場合があるほか、経年数が満たなくても状態の悪い管が対象外となる場合もある。さらに、老朽化が原因で生じる断・減水の回避など、管路更新による効果が考慮されないという問題も残る³⁾。これらの問題へのアプローチとしては、水道供給へのニーズの変化・多様化及び給水区域・水需要量などの水道を取り巻く環境の変化を踏まえて各水道管路の重要性等を評価し、この評価結果をもとに更新の優先順位付けを行うことが必要となる。このため、著者らはこれまでの研究においてこれらの視点に立ち、配水系統単位ならびに個別管路の重要度の評価手法を示し、更新に際しての管路の絞り込み方法及び優先順位付

け方法を提案した⁴⁾⁵⁾。

このような更新に係る各管路の優先順位をもとに管路更新事業を計画するに当たっては、更新費用とのバランスを踏まえて適正な投資水準を決定する必要がある。この検討における視点として、まず第一に、投資した費用に対し十分な効果が得られるか、を挙げることができる。すなわち、各管路の重要度に基づく場合、重要度が比較的低い管路の更新においては投資よりも更新により得られる効果が小さい場合が考えられる。このため、投資の効率性に着目して更新対象とする管路群を決定する必要がある。第二の視点としては、期間予算の考慮が挙げられる。費用対効果の視点から更新の意義が認められたとしても、一時期の多大な投資は水道料金の急激な上昇につながるため、水道財政への影響を容認できる範囲内で事業計画を立案する必要がある。この際、水需要量や各管路をいつ更新するかにより更新に係るコスト及び効果は変わってくるため、これらの時間変化を踏まえる必要がある。

そこで本研究では、水道管路の更新事業計画を立案するに当たっての計画情報を作成することを目的として、適正な投資水準の決定方法を提案する。以下では、まず2. で管路更新による効果を定義し、この定量化を行う。つづいて3. では、

管路更新の問題を、費用制約条件下で更新により得られる効果を最大化する線形計画問題として定式化し、最適な更新対象管路群の抽出方法を示す。そして、4. では、ケーススタディを通じて期間予算を考慮した期間内の各期の適正投資水準を分析し、管路更新事業の計画策定方法を提案する。

2. 管路更新による効果の定量化

水道管路の経年化等に伴う機能障害・機能低下による被害としては、管路破損による断・減水や漏水の発生、赤水などの水質障害の発生等が挙げられる。管路更新による効果は、これらの被害発生の抑制・緩和と捉えることができる。本研究では、管路更新による効果を便益として捉えた上で分析するため、定量的に効果が把握可能な管路破損に伴う断・減水被害に着目することとする。

表1に管路破損による被害内容を、需要者と水道事業者に区分して示す。表1に示すように、需要者の被害は、①一般市民が断・減水の代替行動、回避行動を行うことによる損失と、②事業所等での断・減水の回避行動に伴う出費と業務の停止・縮小により生じる損失を挙げることができる。また、水道事業者の被害としては、③破損した管路の修繕に要する費用を挙げることができる。

表1 管路破損に伴う断・減水による被害の内容

区分	被害の内容	断・減水被害の定量化方法
需要者	一般市民 (家庭)	水を得るための代替行動（ボトルウォーターの購入、風呂の残り湯の再利用など） $LD=P \times UD(S)$ P ：断・減水を受ける影響人口（人）， S ：断・減水による不足率（%） $UD(S)$ ：不足率 S ごとの一人一日当たり被害額原単位 ⁹⁾ （円/人・日）
		水使用を伴う行動の回避（洗濯→クリーニング、食事→調理済食品の購入・外食など）
		心理的ダメージ
	事業所、工場等	水を得るための代替行動 $LU=Q \times S \times UU(S)$ Q ：水需要量（ m^3 /日）， S ：断・減水による不足率（%） $UU(S)$ ：不足率 S ごとの $1m^3$ /日当り付加価値額原単位 ⁹⁾ （円/ m^3 /日）
水道事業者	給水収益の減少*	
	破損箇所修繕	$LR=C(\phi) \times L(\phi)$ $C(\phi)$ ：管路口径 ϕ ごとの布設単価（千円/m） $L(\phi)$ ：管路口径 ϕ ごとの単位管路長（m）……5m/本 α6m/本
	断水世帯・地域へのタンク車による給水	
	断水広報	
	後始末（お詫びなど）	

注) は、被害の定量化が困難なため除外した項目。
「給水収益の減少*」は、内部移転費用のため除外した。

なお、水道事業者の被害項目として断・減水による給水収益の減少が考えられるが、これは需要者と水道事業間での内部移転費用であるため、被害項目から除外することとする。さらに、これら3項目以外の被害として、水道水が供給されないことに対する不安感などの心理的ダメージや、水道事業者が断・減水世帯や事業所等へ行う広報などの対応もあるが、ここでは被害の金銭化が困難なため除外するものとする。

上述の①～③の被害項目は、表1に示したように断・減水による不足率 S の関数となる。この不足率 S は、需要 Q の関数であるとともに、管路が破損した場合にネットワーク構造に基づいて算定される供給可能水量比⁴⁾の関数である。つまり、不足率は水需要量と管網の供給能力との比として定義できることとなり、ある管路が破損した場合の供給能力を一定とした場合、水需要量の増減に応じて不足率も増減する。一方、管路の破損可能性については管種と布設後の経過年数による関数として表わすことができ⁹⁾、これらは更新を行うか否かにより変化する。このため、 t 期に管路 i を更新するかしないかを表す0-1変数 x_i^t を導入して、管路更新による効果を定式化すると(1)式となる。すなわち、管路 i の更新による効果は、 t 期まで管路更新を行わない場合に生ずる被害額期待値 $L_i^t(0^t)$ と管路更新の履歴ベクトル x_i^t に基づく被害額期待値 $L_i^t(x_i^t)$ との差であり、これは管路更新により管路の破損率を改善することで低減できる被害削減額の期待値となる。また、 t 期に管路 i が破損した場合の被害額 LD_i^t, LU_i^t は水需要量並びに給水人口の関数であり、 $L_i^t(0^t)$ 及び $L_i^t(x_i^t)$ も水需要量の動向により変化するため、管路更新を行う時期により効果の発現に差が生じることとなる。

$$L_i^t(0^t) - L_i^t(x_i^t) = (LD_i^t + LU_i^t + LR_i) \cdot (d_i^t(0^t) - d_i^t(x_i^t)) \cdot l_i \quad (1)式$$

ここに、

i : 管路番号を表す添え字 ($i=1,2,\dots,m$)

t : 期間番号を表す添え字 ($t=1,2,\dots,T$)

x_i^t : t 期までの管路 i の更新履歴ベクトル

$$x_i^t = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^t)$$

$0^t = (0,0,\dots,0)$: t 期まで更新しないことを示す0ベクトル

$L_i^t(0^t)$: t 期まで管路 i を更新しない場合の、

t 期の管路 i 破損時の被害額期待値

$L_i^t(x_i^t)$: t 期までの管路 i の更新履歴 x_i^t に基づく、

t 期の管路 i 破損時の被害額期待値

LD_i^t : t 期の管路 i 破損時の生活被害額

LU_i^t : t 期の管路 i 破損時の都市活動被害額

LR_i : 管路 i 破損時の管路修繕費(各期共通)

$d_i^t(0^t)$: t 期まで管路 i を更新しない場合の、

t 期の管路 i の破損率

$d_i^t(x_i^t)$: t 期までの管路 i の更新履歴 x_i^t に基づく、

t 期の管路 i の破損率

l_i : 管路 i の長さ

ここで、管路の破損率の概念は図1のように考えることができる。管路の破損率を規定する主要因は管種と布設後の経過年数の2要因であり、各管種ごとに経過年数が増すにつれ破損率は上昇していく傾向がある⁹⁾。管路更新を行わない場合は、管種は現時点($t=0$)における管種と同じまま経過年数が1期増加する分破損率が高くなる(図1の①の状態)。これに対し更新する場合は、現時点で得られる耐久性等の優れた管材・継手を採用する場合は一般的であり、更新前に比べてより破損率の低い管種を採用することになる。図1においては管種3が新たな管種となり、経過年数もリセットされるため、図1②のように管路の破損率は更新前に比べて減少することとなる。

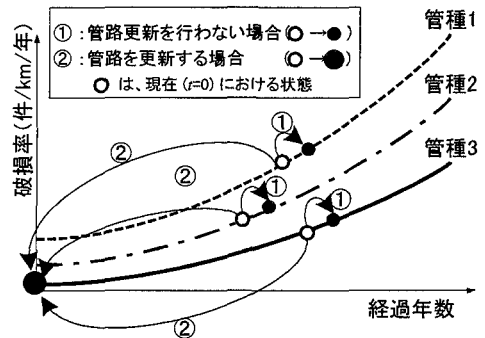


図1 管路更新の有無による破損率の推移の概念

x_i^t を用いて管種が k ($k=1,2,\dots,K$)かどうかを表す変数 u_{ki}^t と布設年度 y_i^t を(2)式、(3)式のように定義すると、これらの漸化式は $(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^t)$ に関する t 次式となり、図1に示した破損率は(4)式

で定義できる。(4)式より、管路 i の t 期における破損率は t 期に管路 i を更新するかどうかだけではなく、過去の更新履歴が関連していることが分かる。したがって、 $d_i^t(x_i^t)$ をもとに導出される $L_i^t(x_i^t)$ も管路更新の履歴が反映されることとなる。

$$\begin{aligned} u_{ki}^t &= u_{ki}^{t-1} \cdot (1 - x_i^t) + \hat{u}_k \cdot x_i^t \\ &= u_{ki}^0 \cdot \prod_{\tau=1}^t (1 - x_i^\tau) + \hat{u}_k \cdot \sum_{\tau=1}^{t-1} x_i^\tau \cdot \prod_{\omega=\tau+1}^t (1 - x_i^\omega) + \hat{u}_k \cdot x_i^t \end{aligned} \quad (2)式$$

$$\begin{aligned} y_i^t &= y_i^{t-1} \cdot (1 - x_i^t) + t \cdot x_i^t \\ &= y_i^0 \cdot \prod_{\tau=1}^t (1 - x_i^\tau) + \sum_{\tau=1}^{t-1} \tau \cdot x_i^\tau \cdot \prod_{\omega=\tau+1}^t (1 - x_i^\omega) + t \cdot x_i^t \end{aligned} \quad (3)式$$

$$d_i^t(x_i^t) = \sum_k f_k(u_{ki}^t, t - y_i^t) = \sum_k f_k(x_i^t) \quad (4)式$$

ここに、

u_{ki}^t : t 期の管路 i の管種が k であるときに 1 となる 0-1 整数変数

$\hat{u}_k$: 管路更新後に採用する管種 k が K のとき 1 となるベクトル

$(\hat{u}_1, \dots, \hat{u}_K) = (0, \dots, 0, \dots, 1)$ の要素

y_i^t : t 期の管路 i の布設年度

$f_k(x_i^t)$: 管種 k の破損率を表す関数

3. 予算制約を考慮した更新計画の評価モデル

2. で整理した管路破損に伴う被害額期待値の算出方法に基づき、図 2 に示すモデル管網 (35 節点、40 管路、現在給水人口 71,400 人、現在給水量 28,800m³/日) について、 $t=0$ における各管路の破損による被害額期待値 $L_i^0(0)$ を算出した。なお、管路の管種は、昭和 40 年代当初まで採用されていた普通铸铁管及び石綿セメント管(管種 1)と、それ以降に採用されているダクタイル铸铁管(管種 2)の 2 区分とした。

図 3 は年当り被害額期待値の大きい順に管路を並べ、年当り被害額期待値及び管路更新費用の累積額をプロットしたものである。また図 4 は、被害額期待値が大きな管路を管網図上に太線で示している。図 3 に示すようにモデル管網における年当り被害額期待値の合計額は約 1 億 2,800 万円(内訳は生活被害額が 71%(9,100 万円)、都市活動被害額が 27%(3,500 万円)、管路修繕費が 2%(200 万円))

であるが、このうち約 1 億 900 万円は管路 3、管路 6、管路 1、管路 8、管路 34、管路 5 の 6 本の管路により生じている。これらの管路はいずれも配水池 R に近い管路が該当している。

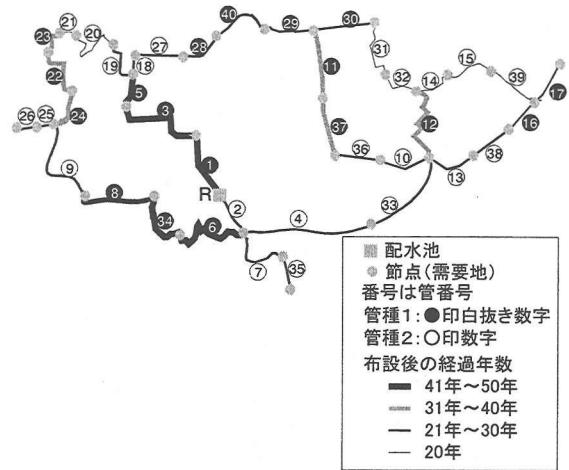


図 2 モデル管網図

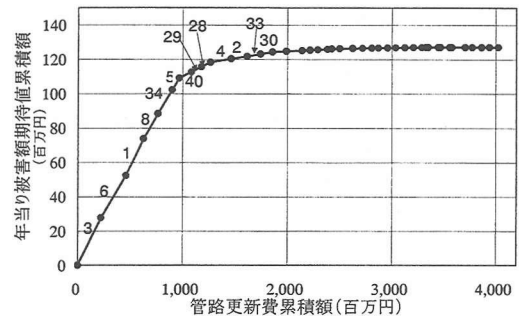


図 3 年当り被害額期待値と管路更新費用のプロット

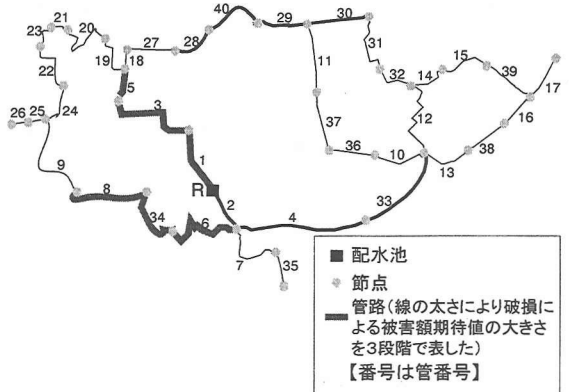


図 4 モデル管網における各管路の被害額期待値

一方、更新費用は、全管路の更新費用 40 億円に対し前記 6 管路の更新費用は 9 億 7,000 万円である。つまり、全管路を更新する場合に対し約 1/4 の更新費用で、管路破損に伴う被害を約 86% 軽減できることになる。他の管路は、更新費用に対し年当り被害額期待値の減少は非常に小さいものとなる。

このような各管路の被害額期待値の大きさに基づき更新対象管路を選定する考え方は、現状の管路の重要性に着目したものである。つまり、重要性が高い、言い換えれば管路更新の効果が高い管路についてはリスク管理の立場から事前に更新する必要性があり、効果が低い管路は破損事故等の発生後に事後対応として補修又は更新することが適切と位置づけられる。

しかし、管路の物理的な寿命は数十年以上あり、管路の寿命期間内において各地区の水需要の増減が生じるほか、現時点では破損率が高くない管路も破損率が上昇し、管路破損による被害額期待値が大きくなる状態も想定される。また、更新による効果も一時点のものではなく、管路の寿命年数に対応する長期間の累積値としてとらえる必要がある。したがって、更新対象管路を抽出するにあたっては計画期間全体での効果に着目することが必要であるとともに、各管路をいつ更新すると効果的かを明らかにする必要がある。すなわち、この問題は費用制約下における計画期間内の総便益の最大化問題としてとらえることができ、(5)式の目的関数を(6)式及び(7)式の制約条件の下で最大化する問題として定式化できる。

【非線形整数計画問題としての定式化】

目的関数

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T (L_i^t(\mathbf{0}^t) - L_i^t(\mathbf{x}_i^t)) \quad (5)式$$

制約条件

$$x_i^t = 0 \text{ or } 1 \quad (i = 1 \cdots m, t = 1 \cdots T) \quad (6)式$$

$$\sum_{i=1}^m C_i \cdot x_i^t \leq \tilde{C}^t \quad (t = 1 \cdots T) \quad (7)式$$

ここに、

C_i : 管路 i の更新費

$\tilde{C}^t$: t 期における管路更新費用の制約値

上記で定義した問題は、目的関数の $L_i^t(\mathbf{x}_i^t)$ が(1)～(4)式に示すように非線形であることから、非線形整数計画問題となる。この管路破損率は x_i^t 以外は定数と見なせるため x_i^t のみを変数とする最大化問題としてとらえることができ、解の可能性は 2^N 個 (N =管路数 m ×総期間数 T) で有限個となり、組合せ問題を解くことにより最適解を導くことが原理的には可能となる。しかし、水道管路の管路数は非常に多く、かつ管路の寿命から考えると計画期間も長くとることが必要であることから、 N は膨大な数となる。したがって、問題の解法としては解の範囲を規定した形で近似解を得ることが現実的と考える。

ここで、事業計画期間と管路の物理的寿命の関係は管路の物理的寿命の方が長いと考えることができるため、計画期間内での更新回数はせいぜい 1 回以内とすることができる。この関係を(8)式として定義し、管路 i に対するスラック変数を s_i とすると(8')式となる。

制約条件の緩和

$$\sum_{t=1}^T x_i^t \leq 1 \quad (i = 1 \cdots m) \quad (8)式$$

$$\sum_{t=1}^T x_i^t + s_i = 1 \quad (i = 1 \cdots m) \quad (8')式$$

このとき、 $\sum_{t=1}^T L_i^t(\mathbf{x}_i^t) = L_i^1(x_i^1) + L_i^2(x_i^1, x_i^2) + \cdots$ の

各項について書き出すと、

$$\begin{aligned} L_i^1(x_i^1) &= L_i^1(1) \cdot x_i^1 + L_i^1(0) \cdot (1 - x_i^1) \\ &= L_i^1(1) \cdot x_i^1 + L_i^1(0) \cdot \left(\sum_{t=1}^T x_i^t + s_i \right) \end{aligned} \quad (9)式$$

$$\begin{aligned} L_i^2(x_i^1, x_i^2) &= L_i^2(1,0) \cdot x_i^1 + L_i^2(0,1) \cdot x_i^2 \\ &\quad + L_i^2(0,0)(1 - x_i^1 - x_i^2) \\ &= L_i^2(1,0) \cdot x_i^1 + L_i^2(0,1) \cdot x_i^2 \\ &\quad + L_i^2(0,0) \left(\sum_{t=1,2}^T x_i^t + s_i \right) \end{aligned} \quad (10)式$$

と線形化が可能となり、(11)式のように表わせる。

$$\sum_{t=1}^T L_i^t(\mathbf{x}_i^t) = \sum_{t=1}^T \tilde{L}_i(t) \cdot x_i^t + \sum_{t=1}^T L_i^t(\mathbf{0}^t) \cdot s_i \quad (11)式$$

ただし, $\tilde{L}_i(t) \equiv L_i^1(0) + L_i^2(0,0) + \dots$

$$+ L_i^1(0,0,\dots,1) + \dots + L_i^T(0,0,\dots,1,\dots,0) \quad (12)式$$

(1 は t 個目のみ, 他は 0 となる)

(11)式より, (5)式~(7)式で定義した問題は(13)式~(15)式と書き改めることができ, (6)式の整数条件をはずすことにより下記の線形計画問題に変形できる.

【線形計画問題としての定式化】

目的関数

$$\max \sum_{i=1}^m \left(\sum_{t=1}^T L_i^t(0^t) \cdot (1-s_i) - \sum_{t=1}^T \tilde{L}_i(t) \cdot x_i^t \right) \quad (13)式$$

制約条件

$$\sum_{i=1}^m C_i \cdot x_i^t \leq \tilde{C}^t \quad (t=1 \dots T) \quad (7)式$$

$$s_i + \sum_{t=1}^T x_i^t = 1 \quad (i=1 \dots m) \quad (8')式$$

$$0 \leq x_i^t \leq 1 \quad (i=1 \dots m, t=1 \dots T) \quad (14)式$$

$$0 \leq s_i \leq 1 \quad (i=1 \dots m) \quad (15)式$$

4. 適正投資水準を考慮した更新対象管路の分析

モデル管網に下記の前提条件を与え, (13)式の目的関数を(7)式, (8')式, (14)式, (15)式の制約条件の下で最大化する線形計画問題として解いた.

【ケーススタディの前提条件】

- 更新対象管路数: 40 本 (32km)
- 計画期間: 10 期 (1 期=5 年)
- 水需要量, 給水人口: case1 と case2 の 2 ケース (水需要量の増減傾向は図 5 を参照)
現状: 28,800m³/日, 71,400 人
- 管路破損率: 管種を 2 種類とし, それぞれの破損率を図 6 で与えた (6), (7), (8), (9)
- 費用制約条件: 各期の給水収益の 3% を管路更新に充当する費用の上限とした

ここで, ケーススタディは, 水需要量及び人口の減少が管路更新にどのような影響をもたらすかを検討するため, 現時点での予測に基づく標準ケース(case1)と, 今後人口及び水需要量が急減するシナリオを採用したケース(case2)の 2 ケースを設定した. また, 各管路の流量は現状の流量配分をもとに配分したが, 更新する場合の管路口径は, 現状と同口径とした.

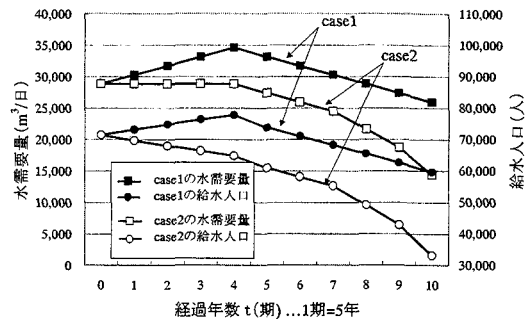


図 5 需要水量の想定ケース

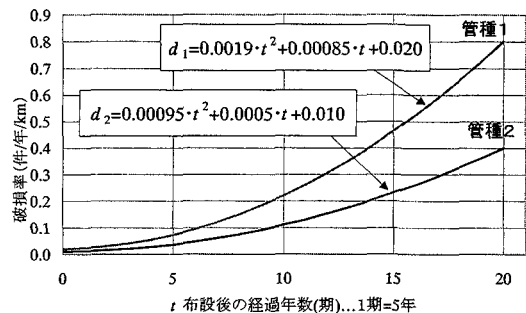


図 6 管路破損率

計算結果より, 各ケースの更新対象管路及び更新期を図示すると図 7 となる.

図 3 に示した現況($t=0$)において被害額期待値の大きな 6 本の管路は, 図 7 における両ケースにおいても 1 期~5 期の期間の更新対象管路として選定されており, 現況での重要管路は早期に更新する効果が高いことが分かる. また, 管路 30 については, 現況の被害額期待値では上位 12 番目に位置しているが, case2 においては更新対象外となっており, 単一時点のみの評価では更新の優先順位の高い管路が, 計画期間内の総便益の最大化の観点からは優先順位が低くなる場合がある. さらに, case1 と case2 を比較すると, 更新期及び更新対象管路にずれまたは差異があり, 水需要量等の将来動向及び給水収益を考慮した費用制約が影響していることが把握できる.

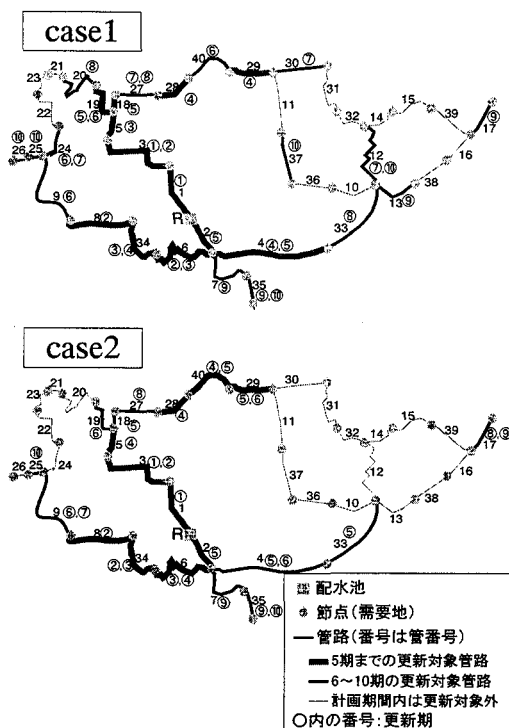


図7 各ケースの更新対象管路及び更新期

つづいて、期ごとの管路更新費と更新により得られる便益（被害額期待値の削減額）の関係をみるために、それぞれの累積額を図8にプロットした。計画期間合計の費用便益比は case1: 5.23, case2: 3.92 であり、総費用に対し 4 倍～5 倍の総便益が得られている。両ケースとも 4 期程度までは便益累積額が大きく上昇するが、6 期または 7 期からは費用累積額の上昇に対し便益累積額の増加は小さいものとなっている。これは、本モデル管網においては、破損率が高くかつ破損した場合の影響が大きな配水池周辺の管路更新が 4 期までにほぼ完了するため、5 期以降の管路更新による効果が相対的に小さくなるためと考えられる。

また、case1 について各期の費用制約条件を標準ケースの 50%～140%まで 10%ごとに変更し、便益の変化を図9にプロットした。図9に示すように、費用制約が緩和されるにつれ便益累積額は上昇するが、上昇の幅は徐々に小さくなっており、本モデルにおいては費用制約の標準ケース以上の投資は効果的でないことが分かる。

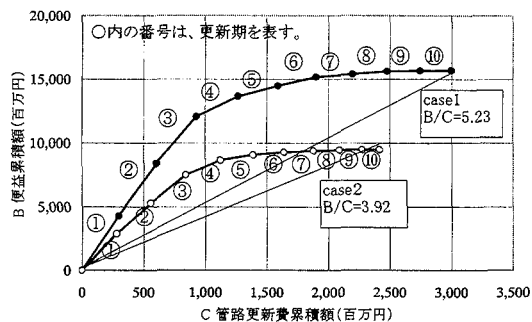


図8 管路更新費と便益の比較

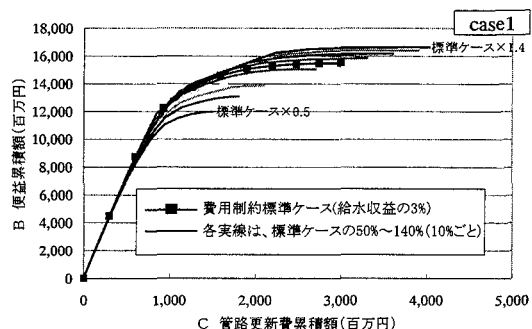


図9 費用制約の変更に伴う便益の変化

さらに、本稿で提案した線形計画法による管路更新順序の検討手順の有効性を検証するために、LP による解と①布設年度の古い順に更新する場合、②現況における年当り被害額期待値の大きな管路から順に更新する場合を比較した。この比較検討においては、管路更新費の費用制約は各ケース、各期とも LP と同様とした。比較結果を図 10 に示す。

まず、布設年度の古い順に更新する場合との比較については、case1 では 2 期まで、case2 では 3 期までは LP とほぼ同様の結果となっているが、それ以降は便益累積額のかい離が大きくなっている。これより、布設年度のみに着目した管路更新順序の決定は、更新による効果の発現を損なう可能性が高いと考えることができる。つぎに、現況の年当り被害額期待値の大きい順に更新する場合との比較については、1 期～2 期において若干の差異があるものの LP の解との顕著な差異が認められなかった。これは、本モデル管網においては少

数本の管路に破損による被害発生が集中しており、かつ計画期間とした 50 年間ではこれらの管路の重要度が大きく変化しなかったためと考えられる。一方、この結果を LP 解の有効性の観点からみると、総便益の最大化を目的変数とした LP 解においても重要となる管路から順に更新対象が選定されており、管路更新順序の検討に線形計画法を適用できることが検証されたと見ることができよう。さらに、より長期にわたる検討を行う場合や、市街地再開発などにより需要地内での水需要分布が大きく変化し、各管路の重要性が変わる場合などに対しては、現況における管路の重要性のみでは更新対象管路を選定し難いため、本稿で提案するような計画の全期間についての総便益を最大化するアプローチが必要かつ有効となると考える。

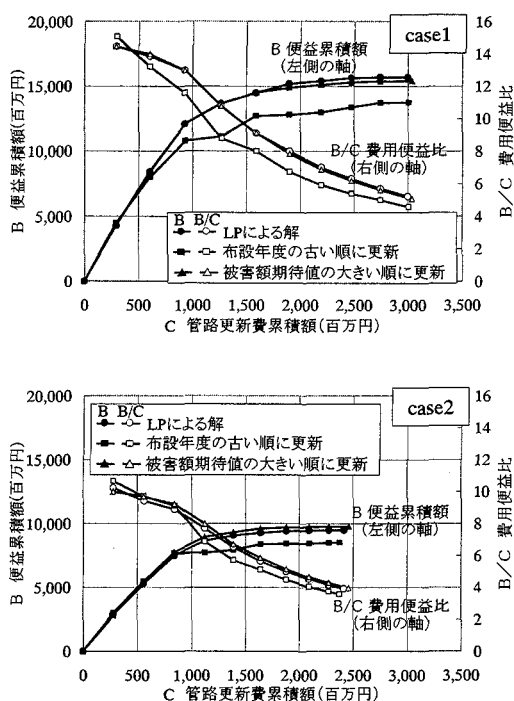


図 10 費用便益比

5. おわりに

本研究では管路更新計画を費用制約条件の下で、計画期間内の総便益を最大化する問題として定式化し、管路更新計画立案方法を提案した。すなわち、まず、管路更新による効果を管路破損に伴う断・減水の回避として捉え、これを定量化した。

つぎに、基本的には非線形整数計画問題である管路更新計画を計画期間内の更新回数に関する制約条件を緩和することで線形計画問題として定義した。そして、水需要等のシナリオ及びいくつかの費用制約条件下での分析を行い、更新対象管路の抽出及び更新時期を検討する手順を示した。

本研究の今後の課題としては、より複雑な管路網を対象として GA (Genetic Algorithm) を用いた最適組合せ問題¹⁰⁾としての定式化、解法の開発が考えられる。また、地域的な水需要及び給水人口の動向の違いに対応した更新後の管径の変更や、新たなルートへの布設等を考慮したアプローチも必要であると考えている。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京都立大学大学院修士課程の朝倉安佳氏には計算等に関し多大な協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平成 12 年度地方公営企業年鑑：地方公営企業経営研究会編、第 48 集、2002
- 2) 平成 12 年度水道統計(施設・業務編)：(社)日本水道協会、第 83-1 号、2002
- 3) 水道事業の費用対効果分析マニュアル：(社)日本水道協会、2001
- 4) 小棚木修・小泉明・渡辺晴彦：水道管路網の改良・更新計画のための評価手法に関する研究、土木学会環境システム研究論文集、Vol.29, pp.361~368, 2001
- 5) 小棚木修・小泉明・渡辺晴彦：ネットワーク構造に着目した水供給システムの安定性の評価に関する研究、土木学会環境システム研究論文集、Vol.30, pp.257~263, 2002
- 6) 小林康彦：水道管路の破損と機能劣化、(財)水道管路技術センター、技術レポート No.1, 1988
- 7) 水道維持管理指針：(社)日本水道協会、1988
- 8) 川北和徳：配水管破損事故における季節変動の実態とその分析、水道協会雑誌、Vol.55, No.5, pp.14~24, 1986
- 9) 細井由彦・村上仁士・香西正夫・鎌田圭朗・奥田義郎：徳島市における配水管の破損特性に関する研究、水道協会雑誌、Vol.57, No.8, pp.2~11, 1988
- 10) 小泉明・稲貝とよの・吉井恭一郎・工藤大：配水システムの残留塩素濃度に関する GA 最適制御モデル、土木学会第 58 回年次学術講演会第 VII 部門、2003

A Study on Appropriate Renewal Scheduling and Investment Level of Water Supply Networks

Osamu ODANAGI, Akira KOIZUMI, Haruhiko WATANABE

Most of water supply pipes have constructed in 1960's - 1970's in Japan, and they are becoming too superannuated. Those aged pipes may cause obstruction and/or decline in water supply performance. Appropriate improvement and renewal in pipe network system is necessary to prevent accidents of water supply performance. Although pipes renewal investment should be balanced both with its effects and revenues on water supply, renewal effects had been insufficiently quantified.

This paper quantifies the effects of renewal in pipe network system, and formulates the scheduling problem to maximize benefits of water supply performance in the planning period under the revenue constraints of water supply. And we propose the new methodology of how to select the target pipes to renew and how to decide the renewal timing, and examine usefulness of this approach.