

モンテカルロ法を用いた水道管路更新計画の評価

森 正幸¹・稲員 とよの²・小泉 明²・渡辺 晴彦³・沼田 篤男¹

¹首都大学東京大学院・都市環境科学研究科（〒192-0397 八王子市南大沢1-1）/（株）日水コン
E-mail: mori_m@nissuicon.co.jp

²首都大学東京大学院・都市環境科学研究科（〒192-0397 八王子市南大沢1-1）

³（株）日水コン 中央研究所（〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1）

本研究の目的は、次世代を展望した水道管路の更新投資に関する長期的な戦略を提案することである。このために、筆者らは、モンテカルロ法を用いて老朽管のリスクコントロール代替案の費用・便益を算定するための評価モデルを構築した。費用には破損・漏水事故時の緊急修繕費並びに予防保全的対処策としての更新に要する費用が含まれる。便益としては、破損・漏水事故に伴う断減水被害を負の便益として取り上げた。モデルの実用性を検証するために行ったケーススタディでのシミュレーションの結果、事後保全として修繕だけで対応するよりも、予防保全として更新を継続する戦略の方が有利であり、より経済的な更新投資水準が存在することを明らかにした。

Key Words : Monte Carlo method, replacement, water distribution pipeline, cost-benefit analysis, asset management

1. はじめに

(1) 背景

我が国の水道は、普及率が97%を超え、総額40兆円以上（平成17年度末推計）と言われる水道施設（資産）を利用して高水準のサービスを提供している。総資産のおよそ6~7割は水道管路が占めており、全水道事業にとって水道管路は必須の資産である。

しかしながら、水道管路の多くが高度経済成長期に布設されており、今後、法定耐用年数の40年を超える老朽管が年々増加するものと見込まれる。これに対して、水道送配水施設への投資額（建設改良費）は、平成10年度に1.0兆円のピークが出て以降、年々減少しており、平成18年度には0.6兆円にまで落ち込んでいる。老朽管更新の先送りを続けていくと、いつ、どこで起こるかは不確実であるものの、いずれ老朽化に伴う破損・漏水事故などの問題が多発することは明らかである。

現在、水道は都市部などにおいて代替手段の無いサービスであり、場合によっては事故時の断減水に伴って莫大な機会損失費用が発生し、緊急修繕時の道路渋滞等の2次被害も増大することが懸念される。その対応として、将来、水道事業が一斉に修繕工事や更新工事を行うことになると、資金不足や資金調達コストの増大といった財務的な危機に陥る事業体や、工事監理体制整備が困難になる事業体も増える懸念がある。このような現象は、世

代間の負担の不公平性として社会的に大きな問題になることが危惧される。

また、我が国は地震国であることから、概ね10年程度の周期で大地震が発生している。水道は、地震等の災害が発生した場合でも、生命の維持や生活・都市活動に必要な水を安定して供給することが社会から要請されている。東海地震等大地震発生 of 逼迫性が指摘されている中、水道施設、とくに管路の耐震化を進めることが喫緊の課題である。管路の老朽化は地震動に対する脆弱性を高める危惧があり、更新の機会を捉えて耐震化を推進する必要がある。

一方、今後の老朽化が懸念される社会資本について、アセットマネジメントの考え方を適用して国民の利益を最大化しようという動きがあり、我が国においても道路、橋梁等において取り組みが進められつつある。水道事業を所管する厚生労働省では水道ビジョン改訂¹⁾において、中長期の施設整備・更新見通し及び財政見通しを主体的かつ自律的に立案し、施設の効率的な改築更新を実践できるよう、アセットマネジメントの水道事業への活用や行政による効果的な支援・指導体制等について検討を行うとしている。

水道事業におけるアセットマネジメントへの取り組みは緒についたばかりであり、水道事業体、とくに中小事業体においては、その重要性が十分に認識されているとは言い難い状況にある。したがって、アセットマネジ

ントの考え方を利用して、老朽水道管路の更新先送りがもたらす損失を、不確実性を考慮しつつ定量的に評価し、修繕を主体とする事後保全的対処に対して予防保全的更新の優位性を定量的に把握できる手法を開発することが急務であると考えらる。

(2) 研究の目的と本論文の構成

本論文では、水道管路を対象として、故障時期や費用・便益算定を取り巻く種々の不確実性要因の定量化にモンテカルロ法を利用し、事後保全的な保守・更新に対して、アセットマネジメントに基づく予防保全的な更新の優位性を評価する方法論を構築する。すなわち、現在利用可能な知見を利用して、管路更新意思決定方法と予算とをシナリオとして与え、水道事業の費用と便益にどの程度影響するのかを長期的な視点で定量的に評価し、更新意思決定方法の選択を支援する情報を提示する。以下、2. では、水道管路のアセットマネジメントの特徴について述べる。3. では、アセットマネジメントの考え方にに基づき、水道管路の故障時期の予測や断滅水被害想定における不確実性を定量化するため、モンテカルロ法を利用して更新効果を評価（経済性、世代間公平性）する方法を提案する。最後に4. のケーススタディにおいては、3. で提案した評価方法を適用し、その結果を考察して、地域特性に応じた取り組み方針案を提示する。

2. 水道管路のアセットマネジメント

(1) 社会資本のアセットマネジメント

社会資本のアセットマネジメントとは、国民の共有財産である社会資本を、国民の利益の向上のために、長期的視点に立って、効率的、効果的に管理・運営する体系化された実践活動であるとされている²⁾。

現在我が国の道路・橋梁分野で取り組まれているアセットマネジメントのほとんどは、同種の構造物群を対象にライフサイクルコスト（以下、LCCという）に着目し、長期的なコスト削減を主眼とするLCC型マネジメントであると言われている。橋梁の場合のLCC型アセットマネジメントの各ステップと主な構成要素には次のものが含まれる³⁾。Step 1：全体計画（対象資産の選定、基本方針の決定、意思決定基準の決定）、Step 2：目標設定（管理目標、予算目標）、Step 3：中長期予算計画（個別資産マネジメント、資産群マネジメント）、Step 4：中期事業計画、Step 5：事業実施、Step 6：事後評価

(2) 社会インフラとしての水道の特徴

水道は生活用水と都市活動用水並びに消火用水を供給する社会インフラであり、その大量有圧輸送機能につい

ては他に代替的手段がほとんど無い。このため、24時間連続的に供給し、断水した場合にもその期間を可能な限り短くすることが水道の社会的使命となっている。水道は地震等災害時においても、最小限必要な機能が維持できるようにする必要があるため、耐震化を図って被害の発生を抑制するとともに、バックアップの確保によって影響を最小化する必要がある。

水道の大量有圧輸送機能を担っている管路は、そのほとんどが地中に埋設されており、掘り出さない限り直接目視することができず、一般市民は破損事故により大きな影響が発生して初めてその重要性を認識する。先述したように管路資産は水道総資産のおよそ6〜7割を占めているので、水道施設建設改良投資が減少する状況下において管路を健全な状態に維持していくことが今後の大きな課題となっている。

(3) 水道管路アセットマネジメントの特徴

管路の主要母材は現在、ダクタイル鋳鉄であるが、鋳鉄、鋼などの金属材料の他、石綿セメント、硬質塩化ビニル、ポリエチレンなどの非金属材料も用いられている。水道管路の故障時期は周辺環境（土壌、地下水、荷重、他企業工事）や輸送水の影響を受ける。とくに金属管では、その材料特性を維持するための腐食対策としてライニング、塗覆装などが施されているが、その材料にも歴史の変遷がある。これまでは破損・漏水事故や水質問題の顕在化によって、石綿セメント管や鋳鉄管などの管種が明確な更新対象となってきたが、今後は、ダクタイル鋳鉄管が主な更新対象になるものと見込まれる。

水道管路システムは修理系（repairable system）であるが、その経年化によって故障頻度が増えてくれば、全体的な更新の方が経済的に有利となる場合がある。管路のどの部分の老朽化が進んでいるかが判断できれば、効率的な更新も可能となる。ところが、水道管路は地中に埋設されていることが多いため、点検が容易ではなく、予防的な保守作業には制約（掘削費用、道路占有期間）が多い。これらの点はアセットマネジメント導入が先行している道路・橋梁分野と大きく異なる。

また、既設管路の長寿命化にはさまざまな技術が開発されつつあるが、費用対効果の高い技術は実用化・普及していないのが現状である。したがって、現時点で考え得る予防保全的な老朽化対策としては、管路更新（取り替え）しか選択肢がない。我が国では水道創生期を除き、水道管はJIS規格等の国内規格に基づいて工場内で製造されたものが使用されており、現場打ちのコンクリート構造物などに比べると同一仕様製品の品質のバラツキは少ないものと考えられる。そのため、水道管路資産群を健全な状態に維持するための中長期予算計画を検討する際には、全国的な破損・漏水事故事例調査に基づく故障

率曲線⁹⁾が基礎資料として有効に利用できる。

さらに、幹線水道管路の破損・漏水事故は、その様態によっては復旧に予想外の時間を要し、代替管路が無い場合には断減水が当該管路の近傍に止まらず広範囲（とくに下流）に及ぶこともある。このため、破損・漏水事故が発生した場合の修繕費並びに断減水被害等の社会的費用を見込む際にはこのような不確実性を十分に考慮する必要がある。

現行の水道サービスの受益者は明確であるが更新投資の受益者は将来世代に及ぶ可能性がある。言い換えると現世代の利益に適う更新先送りが将来世代への負担先送りに繋がる恐れがある。負担先送りを回避することも、水道管路のアセットマネジメントにおいて、今後解決すべき大きな課題であると考えらる。

3. 評価方法

(1) 概説

本論文では、管路老朽化への対処方針を事後保全型とするか予防保全型とするかによって、将来時点に到るまでの管路資産群維持のための費用と得られる便益がどのように推移するかを推計する。次いで、費用便益分析の手法を援用して管路更新の経済性並びに世代間の負担の公平性を評価する方法を提案する。その狙いは、水道事業者サイドでの中長期予算計画検討並びに利害関係者との意見交換を容易にすることである。

管路老朽化に対する典型的な対処方針としては、次の3つの方針がある：

- ① 事後保全的保守
- ② 時間基準保全での更新（予防保全的更新）
- ③ 状態基準保全での更新（予防保全的更新）

①の事後保全的保守とは、破損・漏水事故が発生したら緊急修繕で対応し、場合によって、事故当該区間を更新するものであるが、本論文では修繕のみで対応するものとする。

②の時間基準保全での更新は、管種や製造年代毎に管の実質耐用年数を設定し、管路経年数が実質耐用年数に到ったら更新するという考えである。ここでは、資産群マネジメントの考え方に基づいて毎年の更新費用の標準化を図るため、与えた予算枠の中で、布設年度の古い順に管路を更新するという方針を採用する。

③状態基準保全での更新は管路に要求されるさまざまな機能について点検・調査結果等に基づいて健全性を評価し、評価値（総括的健全度）が下限値を下回れば更新するという考えであるが、前述のように点検実施の制約面から長期的な見通しを立てることが難しい。

本論文では、これらのうち、①の事後保全的保守

（破損・漏水事故には緊急修繕のみで対応）を事後保全ケースとし、②の時間基準更新のペースと開始・終了時期オプションを組み合わせた複数のシナリオを予防保全ケースとして費用便益分析を行う。

管路資産群維持の費用としては、修繕費と更新費の2つの費目を取り上げる。

管路更新の便益としては、破損・漏水事故に伴う需要者や一般市民における2次的被害の軽減（外部不経済の内部化）を取り上げる。2次的被害には、前述のように、断減水被害、浸水被害、道路陥没による交通渋滞などが挙げられるが、本論文では、定量化方法が確立されている断減水被害を採り上げる⁹⁾。

次に、管路更新の便益測定を取り巻く不確実性要因として、

A 管路の破損・漏水事故発生頻度

B 管路の破損・漏水事故によって引き起こされる断減水被害の規模と修繕工事費

の2つを採り上げる。Aについては故障率関数を基にモンテカルロ法で故障時期の予測を行う。Bについては断減水被害推定額と修繕費推定額のバラツキをモンテカルロ法により推計する。なお、管路の経年数が、その管路が破損・漏水事故に至った場合の被害規模に影響することを裏付ける統計データは得られていないため、本稿では被害規模は経年数に影響されないものとする。また、需要水量については経年的に変化しないものとして取り扱う。

(2) 費用・便益算定の基本関数形

ここでは、5年を1期として、最終期までの各期における費用と断減水被害額（負の便益）を算定する基本関数形について説明する。

a) 管路サブアイテムの故障時期の予測

管路アイテムを一定長の仮想サブアイテムに分割するモデルを考え、単位長さを主要管種の最小口径の定尺長とし、公表されている故障率曲線⁹⁾の作成時に用いられている4mとする。そして、各サブアイテムの故障に至る期間長を故障率関数によって予測し、故障が起こる期に、破損・漏水事故が発生するものとする。すなわち、ワイブル分布を適用して、管路サブアイテムの時間 t での故障率関数 $h(t)$ （破損・漏水事故を故障と見なす）を、

$$h(t) = kt^c \quad (k, c \text{ は定数}) \quad (1)$$

とする場合、その信頼度関数 $R(t)$ は次式のように表現できる。

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t h(t) dt\right) = \exp\left(-\frac{k}{c+1} \times t^{c+1}\right) \quad (2)$$

一方、経年数 τ の管路サブアイテムの故障率 $\tilde{h}(t)$ を、

$$\tilde{h}(t) = \begin{cases} 0 & t < \tau \\ kt^c & t \geq \tau \end{cases} \quad (3)$$

とすると、その後 Δ 年間で故障する確率 P は次式によって表すことができる。

$$\begin{aligned} P &= Pr(\tau, \tau + \Delta) = 1 - \tilde{R}(\tau, \tau + \Delta) \\ &= 1 - \exp\left(-\int_{\tau}^{\tau+\Delta} \tilde{h}(t) dt\right) \\ &= 1 - \exp\left[-\frac{k}{c+1} \times \left\{(\tau + \Delta)^{c+1} - \tau^{c+1}\right\}\right] \end{aligned} \quad (4)$$

経年数 τ の管路サブアイテムの故障に至る期間長 Δ は、埋設土壌環境や輪荷重、近接工事などさまざまな不確実性によって左右される。また、 P は0～1の範囲で分布する。そこで、確率分布関数の特性を利用し、モンテカルロ法を適用して発生させた一様乱数[0-1]を式(4)の逆関数である式(5)の P に代入して Δ を求め、 Δ 年後には破損・漏水事故が発生すると考える。

$$\Delta = \left\{ \tau^{c+1} - \frac{(c+1) \cdot \ln(1-P)}{k} \right\}^{\frac{1}{c+1}} - \tau \quad (5)$$

破損・漏水事故が発生したサブアイテムは、修繕によって経年数が0年の新しいサブアイテムに取り替えられ、その時点から新たな経年化過程が始まると考える。

b) 修繕費

各期における管路の修繕費は、その期に起こるサブアイテムの破損・漏水事故に伴う修繕費を集計することによって算定する。破損・漏水事故1件当たりの修繕費は口径並びに管種の関数として与えるが、設計実務者からの聴き取り情報から、通常更新工事の延長単価(1m当たり)に比較して概ね5倍～15倍の範囲にあるものと見込まれる。事故様態による不確実性を考慮するため、この倍数值(確率変数)を、最小値と最頻値を5、最大値を15とする三角形分布を与えたモンテカルロ法を実施して求める。なお、修繕費を増加させる複数の要因(例、漏水による近傍地下埋設物への影響、工事時間帯規制)が同時に発生する確率は低く、倍数值の確率分布は右に歪んだ分布になっていると想定し、代表的な分布として直角三角形分布を採用した。

c) 更新費

管路アイテムの更新事業費を管路更新単価と更新対象管路の延長の積で算定する。管路更新単価は口径並びに管種の関数として与える。時間基準更新における各管路アイテムの更新時期は、経年数降順(同経年数は口径降順；同口径は延長降順)に全管路アイテムの更新事業費を整理し、各期の管路更新事業予算の枠内で更新事業を編成するものとして決定する。

これらの更新事業により、管路アイテムの全サブアイテムは経年数が0年で、新管種の新しい管路に取り替えられるが、その時点から新たな経年化過程が始まると考えられる。そこで、同様に乱数によって故障時期を求め、その期には破損・漏水事故が発生するものとして、修繕費並びに断減水被害額の算定に反映させる。

d) 断減水被害額

平常時に破損・漏水事故が発生した場合の断減水被害額については、さまざまな想定方法⁵⁾⁶⁾が提案されているが、給水制限率を説明変数とする被害原単位に基づくものである。被害原単位については生活用と都市活動用水それぞれについて既往マニュアル⁹⁾を利用して算定するものとし、給水制限率については小棚木らの方法⁶⁾に基づいて算定するものとする。なお、断減水被害額算定において、事故様態による影響範囲・影響期間の不確実性を考慮するため、上記の方法による算定額に乗じる倍数値を、最小値を0、平均値を1、最大値を2とする二等辺三角形分布を与えたモンテカルロ法を実施して求める。なお、0は条件に恵まれて断減水被害に至らない場合(例えば、予定していた他の工事時に故障発見)を表し、2は最悪条件となった場合に相当する。

(3) 費用便益算定手順と評価項目

a) 費用便益算定手順

アセットマネジメントの考え方を適用し、次の手順で費用便益算定と評価作業を行うものとする。

- ① 管路資産リストの作成
- ② 重要度評価(事故時断減水被害額)
- ③ 劣化予測(故障率関数による故障時期予測)
- ④ 老朽化対処方針シナリオの設定
- ⑤ シナリオ別費用便益算定(管路資産群の更新費、破損・漏水事故修繕費、断減水被害額)

b) 経済性評価

先述のように全国水道事業者における水道管路の更新率中央値は1%弱であり、この水準のままで推移するとすれば、耐用年数として100年程度を期待しているとも言える。水道管路更新事業は終わりのない事業であるが、後述のように将来世代への負担先送りの不公平性を評価するためにも100年分について、事後保全ケースと予防保全ケースそれぞれの更新事業費と修繕費(ともに費用)、並びに、断減水被害額(負の便益)の期間累計値を算定し、その和によって評価する。これは費用(C)から便益(B)を差し引いた値を評価することに相当し、費用便益比よりも費用・被害の大きさをイメージしやすいものである。

c) 世代間公平性評価

人間のほぼ一世代に相当する25年毎に期間を切って25、50、75並びに100年の四世代分について、近い将来期間

(例:第一世代＝1～5期分)と遠い将来期間(例:第四世代＝16～20期分)での費用＋被害額(負の便益)を比較することによって世代間公平性を評価する。

なお、超長期における便益の評価はそれぞれの世代の価値観に依存するものと考えられる。その価値観は各世代間で同じ水準にあるものと仮定し、また、被害を回避する費用も相対的に同じ水準にあるものとする。そのため、本稿では、物価は一定の水準を保つものとし、割引率は0と設定している。

4. ケーススタディ

(1) 対象地域の管路資産

本論文の対象とする地域は、給水開始後数十年以上経過し、給水人口は30,700 人、一日最大配水量は18,700 千 m³、管路総延長は約148 kmであり、主要管路の配置は図-1、管種別・口径別延長構成は図-2のとおりである。本論文では、いずれの管種も更新時には耐震継手有するダクタイル鋳鉄管に取り替えるものとする。この場合の再取得価格総額は119億円と見込まれる。

(2) 費用・便益算定と老朽化対処方針評価

a) 劣化予測

水道管路の故障率曲線については、全国の水道事業者を対象に実施された送配水管路に係る漏水事故の実態調査アンケートデータを基礎に求められたものが公表されている⁴⁾。本論文においてはこれを基にダクタイル鋳鉄管について故障率関数[1/年](式(1)～(3)参照)の係数(*k*, *c*)を(1.38×10^{-8} , 2.68)と設定する。なお、鋳鉄管の係数(*k*, *c*)については、既往調査等⁷⁾⁸⁾を参考に、ダクタイル鋳鉄管の5倍の*k*値を仮定し、(6.9×10^{-8} , 2.68)と設定する。これらの設定に基づき、先述の方法(3.(2)a))に従って管路サブアイテムの故障時期予測を行った。サブアイテムの故障を当該管路アイテムにおける破

損・漏水事故発生と見立てた場合の期別事故発生件数分布の算定例を図-3に示す。実線は経年数42年のダクタイル鋳鉄管φ400×1000m(サブアイテム数250個)を更新せずに破損・漏水事故時には修繕のみで対応する場合の分布を示し、破線は1期目(初期～5年後の間)と14期目

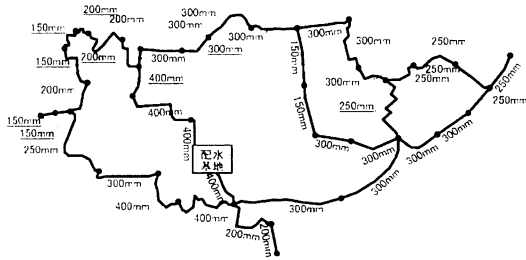


図-1 主要管路の配置

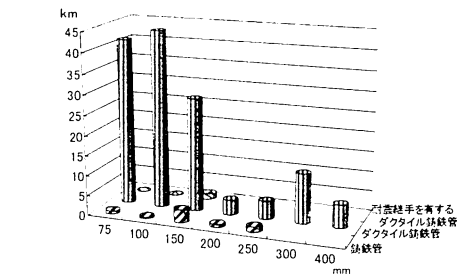


図-2 管種別口径別延長

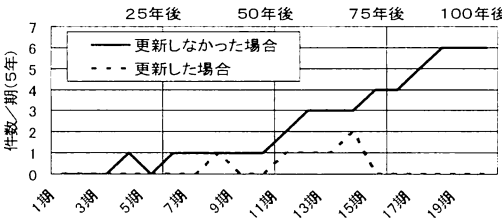


図-3 破損・漏水事故件数分布の算定例

表-1 老朽化対処シナリオの一覧表

老朽化 対処方針	シナリオ名	概要	更新予算枠
事後保全	シナリオ1	修繕のみ	—
予防保全	シナリオ2	時間基準更新＋修繕	1.0%/年
	シナリオ3	時間基準更新＋修繕	1.5%/年
	シナリオ4	時間基準更新＋修繕	2.0%/年
	シナリオ5	時間基準更新＋修繕	2.5%/年
	シナリオ3-1	修繕のみ25年間、その後時間基準更新＋修繕	1.5%/年
	シナリオ3-2	修繕のみ50年間、その後時間基準更新＋修繕	1.5%/年
	シナリオ3-3	時間基準更新25年間＋修繕、その後修繕のみ	1.5%/年
	シナリオ3-4	時間基準更新50年間＋修繕、その後修繕のみ	1.5%/年

に更新した場合の分布を示している。

b) 老朽化対処シナリオ

典型的な予防保全ケースである時間基準更新の予算枠としては、検討対象地域の全管路資産の再取得価格をベースに毎年の支出をその1.0%/年、1.5%/年、2.0%/年、2.5%/年とする。対処方針変更等の複合的シナリオ（3-1～3-4）も含め、表-1に示すシナリオと予算枠を設定する。以下ではこの予算枠を更新率と称する。

なお、本論文での費用便益算定にはモンテカルロ法を利用し、各シナリオについて100回ずつ試行した結果を評価する。

c) 経済性評価

破損・漏水事故に際してはすべて修繕で対応する典型的な事後保全方針のシナリオ1と時間基準更新の代表例としてシナリオ3について、期間累計費用と期間累計断減水被害額を算定した結果を図-4に示す。25年累計の費用・被害和は、全試行結果においてシナリオ1の方が小さく、シナリオ3よりも経済的であることがわかる。50年累計の費用・被害和は、シナリオ3の平均値がシナリオ1の平均値よりも小さく、シナリオ3での試行結果がシナリオ1での試行結果を下回る確率は96%である。75年累計と100年累計の費用・被害和は、全試行結果においてシナリオ3の方が小さく、シナリオ1よりも経済的であり、平均値はそれぞれ約1/2と1/3である。総括すると、更新事業の経済的効果は数十年後に顕在化し、その効果は拡大する傾向にあることがわかる。

次に、図-5はシナリオ3の派生シナリオ（更新事業開

始時期・終了時期）の費用・被害図である。シナリオ3と3-1、3-2を比べると、対処方針の変更（修繕のみ→時間基準更新）は早い方が望ましいことがわかる。また、シナリオ3と3-3、3-4を比べると、事業終了による影響は数十年後に顕在化するので、更新事業は継続的に実施することが重要であることがわかる。

時間基準更新のシナリオ2～5について結果を比較した図-6を見ると、再取得価格ベースの更新率が1.5%/年のシナリオ3がもっとも経済的な対処方針であることがわかるが、これも数十年以上経過してから顕在化する。

d) 世代間公平性評価

図-7はシナリオ1～5について費用・被害と期待値の世代間累計値比較を示したものである。これによるとシナリオ1では後世代になるに従って負担が倍増する。シナリオ2でも後世代になるに従って徐々に負担が大きくなる傾向があり、被害額（外部費用）増大の影響が大きい。シナリオ3～5では世代間に大きな差がないが、更新率が高いほど、世代間公平性が高くなる。長期的な視点で最も経済的なシナリオ3では、第三世代の負担がやや重く、第四世代ではやや軽減する。

5. おわりに

本論文では、水道管路資産群を対象に、中長期予算計画検討の基礎資料となる老朽化対処方針（予算枠と更新意思決定方法）評価方法を提案した。本研究で得られた主な成果を示す。

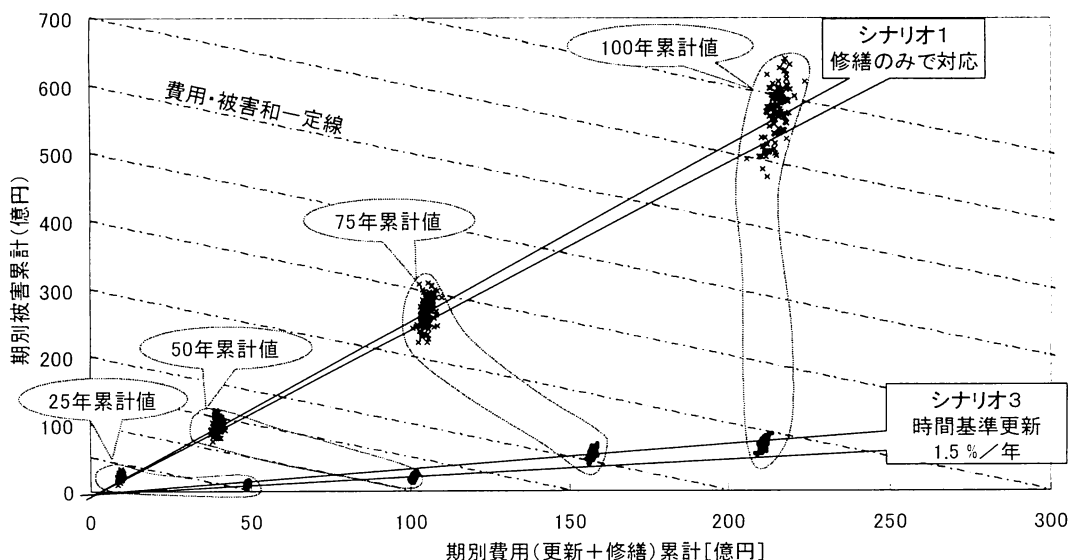


図-4 シナリオ1とシナリオ3の比較
(各シナリオでの試行100回分のプロット)

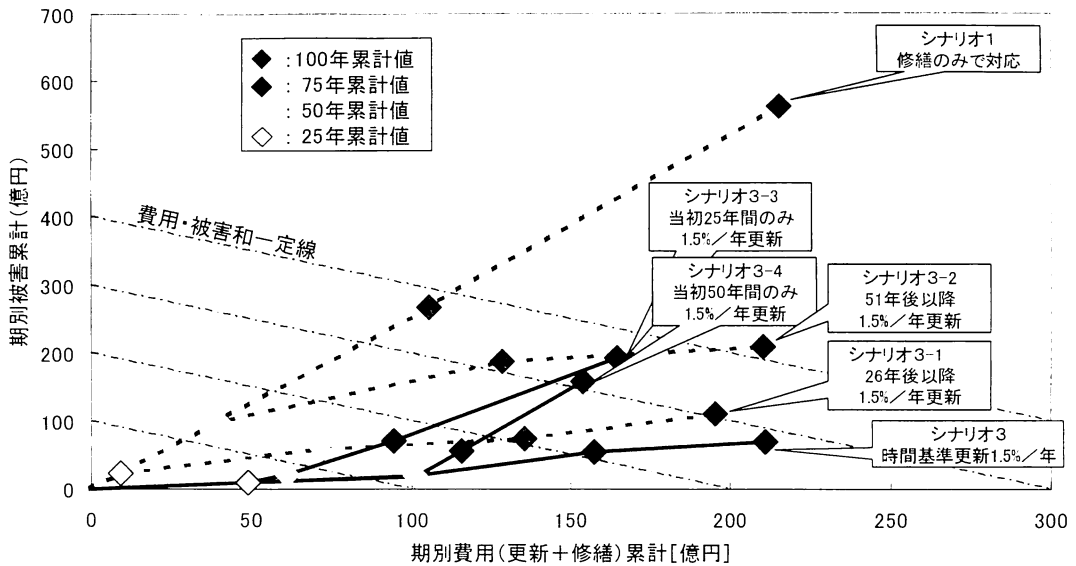


図-5 シナリオ1、3と派生シナリオ3-1～3-4の比較
(各シナリオでの試行100回の平均値)

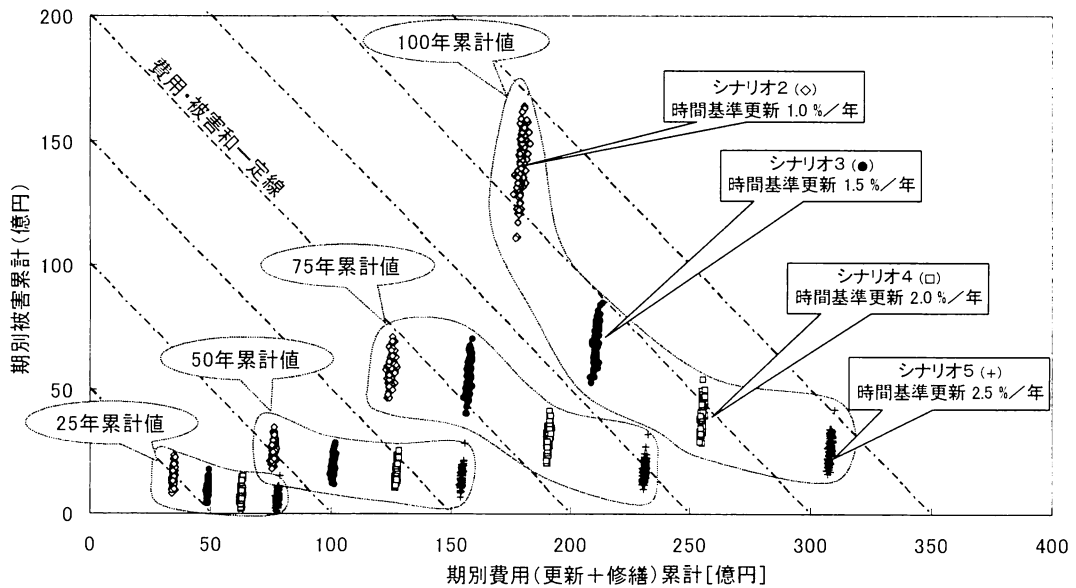


図-6 更新率の影響分析
(各シナリオでの試行100回のプロット)

- 1) 管路を4m長の仮想サブアイテムに分割することによって水道管路を修理系と捉え、破損・漏水事故の修繕をサブアイテムの取り替えと見なす費用・断減水被害額算定シミュレーションモデルを構築した。当該モデルは、故障時期予測等における不確実性を考慮するためにモンテカルロ法を利用して、老朽化対処シナリオ毎の更新費、修繕費並びに断減水被害額の期間累計値を算定することができる。
- 2) ケーススタディの対象とした数十年程度の歴史を有する水道での100年間の費用・断減水被害額算定シミュレーションに基づく管路更新の経済性評価において、最小の費用・被害和を与える更新率の存在が推察された。
- 3) 対処方針変更時期については、管路老朽化への対処方針を「修繕のみ」から「時間基準更新」へ変更する時期については当該対象地域ではできるだけ早い

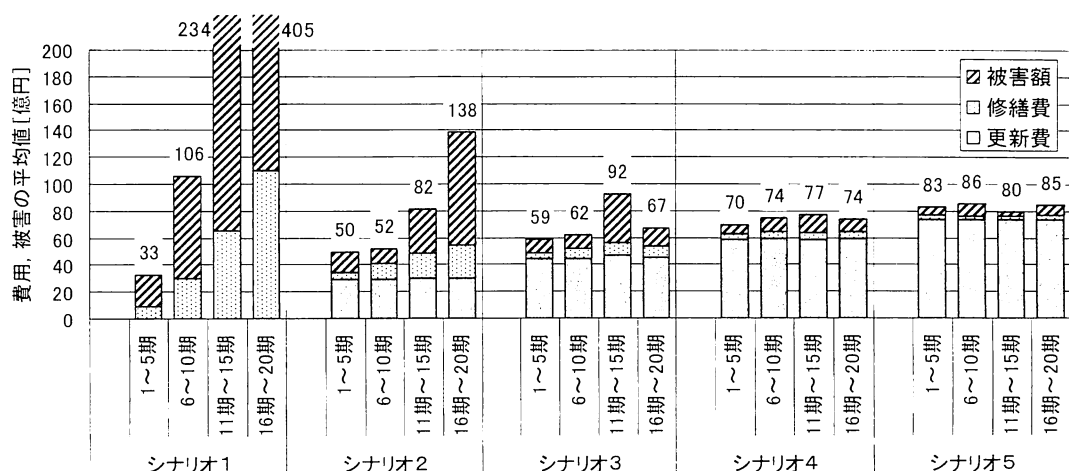


図-7 世代間比較

方が望ましいという結果となった。

- 4) 同様に、当該対象地域では、世代間公平性評価において、更新率が高いほど世代間公平性が高くなる傾向が得られた。

なお、本論文では管路更新を単純な取り替えとしてモデル化した。バックアップ管路整備による断減水被害軽減も組み入れた効率的・効果的な老朽化対処方針シナリオにも対応できる評価方法に発展させることが今後の課題である。また、重要路線の更新ペースを速めるなどの集中的投資シナリオについても今後の課題としたい。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、(株)日水コンの小棚木修博士、平尾末廣氏並びに大石哲司氏にはデータ分析に関する助言などさまざまな面で協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：水道ビジョン（平成20年7月改

訂），pp.17-18, 2008.

- 2) 社団法人土木学会編：アセットマネジメント導入への挑戦，p.4, 2005.

- 3) 前掲2)，pp.57-65.

- 4) 荒井康裕・小泉明・稲員とよの・渡辺晴彦・国實誉治・林光夫：送配水管路事故の実態調査アンケートデータによる故障率曲線の推定方法，土木学会環境システム研究論文集，Vol.36，pp.125-130, 2008.

- 5) 厚生労働省健康局水道課：水道事業の費用対効果分析マニュアル，2007.

- 6) 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.

- 7) 細井由彦・村上仁士・香西正夫・鎌田圭朗・奥田義郎：徳島市水道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.

- 8) 社団法人日本水道協会：水道施設更新指針，p.63, 2005.

AN EVALUATION METHOD OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM REPLACEMENT BASED ON MONTE CARLO METHOD

Masayuki MORI, Toyono INAKAZU, Akira KOIZUMI, Haruhiko WATANABE and Atsuo NUMATA

The purpose of this study is to propose a long-term strategy on water distribution pipeline replacement investment. For this purpose, we built an evaluation model for cost-benefit estimate of risk control option against aging pipeline, using Monte Carlo method for uncertainty. The cost included repair-work-cost shortly after break/leakage accident and replacement-cost of aging pipeline for preventive maintenance. We focused on negative benefit of water shortage caused by pipeline break/leakage accident. As a result of simulation to examine the usefulness of the model in a case study, it was revealed that continual-replacement-strategies for preventive maintenance had an advantage over only-repair-strategy for corrective maintenance and there was economical replacement rate.