

N-11 給水区域内の人口減少を考慮した水道配水管の更新計画

○天野 圭子^{1*}・細井 由彦¹・篠原 宏尚²

¹鳥取大学（〒680-8550鳥取市湖山町南4-101）

²長野県庁飯田建設事務所（〒395-0034飯田市追手町）

* E-mail: k.amano@adm.tottori-u.ac.jp

1. はじめに

老朽化が進む水道管路については、費用と破損の発生確率あるいは破損発生時の被害の規模などを考慮して更新計画が策定される。ここでは人口減少のパターンの違いによる配水管の更新順位の違いを検討することに重点をおき、簡略化した線形計画法による更新モデルを提案する。それをもとに、人口減少と管路年齢が最適な管路の更新順序に及ぼす影響について、ケーススタディにより検討する。

2. 管路更新順序決定モデル

t 期における管 i の破損の発生期待値 $b_{i,t}$ 、破損による影響の大きさを $a_{i,t}$ とする。破損によるリスクを $f_{i,t}$ とすると、次のように表される。

$$f_{i,t} = a_{i,t} b_{i,t} \quad (1)$$

評価期間全体の総破損リスクは

$$TF = \sum_t \sum_i a_{i,t} b_{i,t} \quad (2)$$

と表すことができる。

管路 i の更新費用を c_i とし、 t 期における更新管の集合を PR_t とする。 t 期における総更新費用はつぎのようになる。

$$C_t = \sum_{j \in PR_t} c_j \quad (3)$$

管路の更新は、所定の期間における破損リスクを最小にすることを目的とすると、つぎの条件を満たすように PR_t を決定することとなる。

$$\text{目的関数} \quad \min_{PR_t} \sum_{t,i} a_{i,t} b_{i,t} \quad (4)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{j \in PR_t} c_j \leq \bar{C}_t \quad (5)$$

$\bar{C}_t$: t 期における更新予算

ネットワーク管路においては、破損した管路区間がバ

ルブにより遮断され、その他の管路においては平常通りの給水が続けられるものとする。そこで管路の破損の影響を、所定の管路区間のみとし、かつその大きさはその管路から給水を受けている人口に比例するものとする。

ここで変数 $z_i = \{z_{i,t}\}$ を導入する。 $z_{i,t}$ は管路の更新が実施される前には 1 を、更新後には 0 の値を持つ。

$$\begin{aligned} z_{i,t} &= 1 & t \leq t_{R,i} \\ &= 0 & t > t_{R,i} \end{aligned} \quad t_{R,i} : \text{更新時期}$$

これにより式(4)、(5)は次のように書き直される。

$$\text{目的関数} \quad \min_{z_i} \sum_{t,i} a_{i,t} b_{i,t} z_{i,t} \quad (6)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_i (z_{i,t} - z_{i,t+1}) c_i \leq \bar{C}_t \quad (7)$$

$$z_{i,t-1} \geq z_{i,t} \quad (8)$$

ここにおいて変数は $z_{i,t}$ のみであり、これは $z_{i,t}$ に関する線形計画問題となり、解法が容易になる。

3. ケーススタディによる検討

(1) ケーススタディの概要

給水人口が20万人の都市を考える。市内を4地区に区分し、時期をずらせてそれぞれの地区に水道管の敷設が行われたものとする。1期を5年とする単位で考える。総管路延長は800kmとした。4地区において、1期ずつ遅れて、6期間、30年をかけて各期20, 40, 60, 50, 20, 10kmの順に合計200kmの管路が建設されたものとする。期別延長は図1となる。

人口減少パターンの設定にあたっては、国立社会保障人口問題研究所の、総人口がほぼ20万人である全国の市の2005年から2035年までの将来推計の人口変化パターンを参考に図2のように設定した。

埋設年数が t の管路の管路 1 km あたり年間の破損発生件数は次式を用いて求める。

$$x_t = C_1 \times C_2 \times C_3 \times a \times t^b \quad (9)$$

C_1, C_2, C_3 はそれぞれ管の仕様, 管の口径, 地盤条件による補正係数で, いずれも 1 とした. a, b は管種によって決まる係数で, ここではダクタイル鋳鉄管に関する値, $a=1.38 \times 10^{-4}$, $b=1.307$ を用いる.

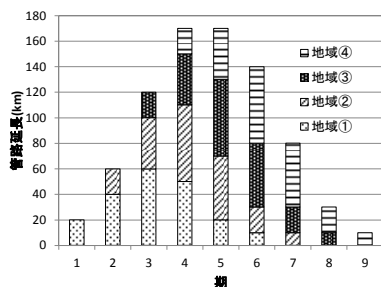


図1 期別の管路建設延長

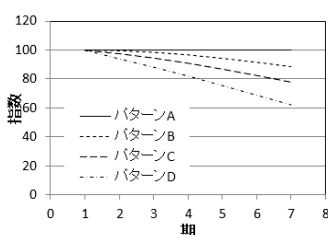


図2 人口の変化パターン

(2) 検討するケース

図3には既に述べた各地区の管路建設期間と更新を開始する期間を示した. 更新を開始するのは, 最初に建設された管が 40 年になる第 9 期と, 最後に建設した管が 40 年になる第 17 期の 2 つのケースを考える. 更新を始めるときからそれぞれの地区は図2に示される人口の変化が始まるとする.



図3 管路建設時期と更新開始時期

表2 検討するケース

	更新		人口変化
	開始	終了	
CASE I-A	9	15	(1)
CASE I-B	9	15	(2)
CASE II-A	9	28	(1)
CASE II-B	9	28	(2)
CASE III-A	17	23	(1)
CASE III-B	17	23	(2)

表1には各地区の人口変化パターンの設定について示している. 人口変化(1)は管路の建設が早かった地区ほど人口の減少は少ないパターン, すなわち早くから開発された市街地に人が集まっているパターンを, 逆に人口変化(2)は管路の建設の早いところほど人口減少が著し

い, すなわち旧市街地が衰退し新しい地区に人口が集まるパターンを示している.

表2は検討する更新スケジュールと人口変化のパターンを示している. CASE I, CASE III は更新開始時期がそれぞれ第 9 期, 第 17 期と異なるが, 更新期間はいずれも将来の人口変化が予測されている 7 期間である. CASE II は現在の我が国の更新ペースを考え, 20 期間, 100 年をかけて更新する場合を示している. 人口については更新開始後 8 期目以降は一定であるとする.

(3) 人口減少の影響

図4に CASE I-A, 図5に CASE I-B の地区別更新時期と更新管路の延長を示す. CASE I-A の場合は, 第 9 期に地域①, ②から更新が始まり, 地域③は第 10 期, 地域④は第 12 期から, 終了するのが地域①では第 13 期, 地域②は第 14 期であり, 地域③, ④は第 15 期になる. 地域①が最も管が古く地域④に向かうにつれ新しく, 人口は地域①が最も多く, 地域④が最もよく減少する. そのため, 地域①から地域④へと順次更新が行われている.

これに対して CASE I-B の場合には, 地域①, ②, ③において第 9 期から, 地域④においても第 10 期から更新が始まる. 終了するのはいずれの地域も第 15 期である. すなわち地域①のように古い管の多いところにおいても, 人口の減少が著しく破損時の影響がそれほど多くないために, 更新の優先度が下がってしまっている. 一方, 地域④は最も新しく管が敷設されている地域であるが, 人口が減らないために更新が早くから行われる.

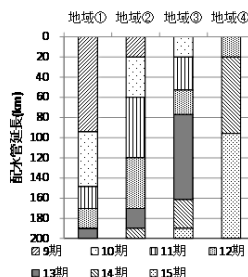


図4 CASE I-A の更新順序

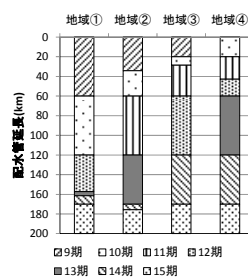


図5 CASE I-B の更新順序

(4) 更新期間の影響

図6, 図7には 20 期間かけて更新を行う CASE II-A, CASE II-B の結果を示している. CASE II-A では地域①は第 9 期, 地域②では第 10 期から, 地域③では第 16 期から, 地域④では第 23 期からと, 1 期あたりの更新延長が少なくなるために, CASE I-A に比べて, 老朽化が進む地域①や地域②の優先度が上がり, 地域③, ④の更新の開始は遅れている. 地域①の更新が終了してから地域④の更新が始められる. 1 期あたりの更新延長が短いため更新に時間がかかり, その間に最も古い地域①での老

朽度が進みかつ人口は減らないために、この地域の更新の優先性が相対的に高くなっている。

CASE II-B においては、更新期間が延びていずれの地域もかなりの老朽化が進むために、人口が減らない地域④が最も早く更新が終了している。すなわち、老朽化が進んで破損事故発生確率はどこも高く、人口の影響の方が重視される結果となった。

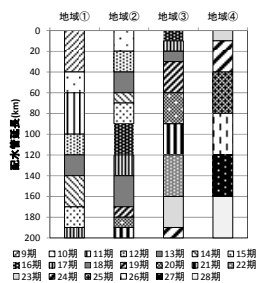


図6 CASE II-Aの更新順序

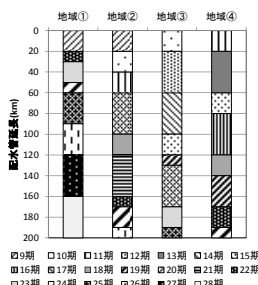


図7 CASE II-Bの更新順序

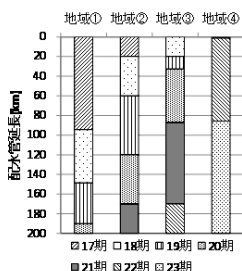


図8 CASE III-Aの更新順序

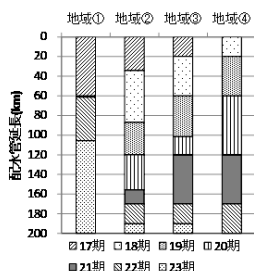


図9 CASE III-Bの更新順序

(5) 更新開始時期の影響

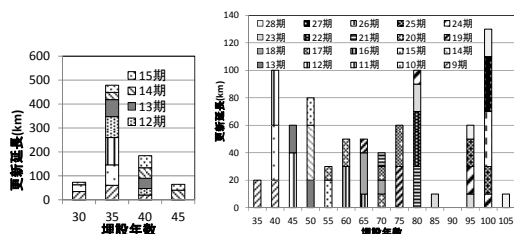
更新を始める時期が遅い CASE III-A、CASE III-B の結果をそれぞれ図8、図9に示す。

CASE III-A において更新期間は、地域①では17～20期（CASE I-A では9～13期）、地域②では17～21期（同9～14期）、地域③では18～22期（同10～15期）、地域④では22～23期（同12～15期）であり、地域①、②、③では CASE I-A より更新開始後からの相対的な更新時期が早くなり地域④では遅くなる。すなわち CASE I-A に比べて相対的に老朽化が進んでおり、より古い管の更新が急がれる結果となっている。

CASE III-B においては CASE III-A と比較すると、地域①、②、③の終了が遅れ、人口が減らない地域④の更新は開始も終了も早まっている。CASE I-B と比較しても、地域④だけは更新の開始時期は同じであるものの終了時期は早くなっている。すなわち、地域間の相対的な管の老朽化の進み方は両ケースで同じであるものの、CASE III-B の方が更新開始時期が遅くなっているために、老朽化の程度が大きく、かつ人口が減少しない地域④の更新が早くなっている。

(6) 更新期間と更新管路齢

図10に更新時の更新管路の埋設年数を示す。更新を早く始め、かつ更新期間が7期間である CASE I-A においては、40年未満で更新される管路が551kmと全体の7割にのぼる。20期間かかる CASE II-A では20kmである。1期あたりの期待被害人口は CASE I-A で5,485人、CASE II-A で9,214人となる。すなわち平準化期間を延ばすほど耐用年数に到らずに更新される管路の距離は短くなるが破損被害リスクは高まっている。



(i) CASE I-A

(ii) CASE II-A

図10 更新時の管路埋設年数

(7) 人口変化の不確定さへの対応

図11はCASE I-AとCASE I-Bに関して、第9期と10期の10年間の各地区の更新延長を示している。いずれも地域①、②、③においては更新が行われている。したがって、人口変化がどのようになるかはっきり分からない段階においては、両パターンに共通する管、すなわち最初の10年間にひとまず地域①においては古い管から120km、地域②においては60km、地域③においては20kmの更新を実施して、人口変化の様子を見守るという方策も考えられる。

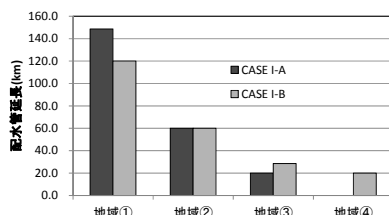


図11 CASE I-AとCASE I-Bのはじめの10年管の更新管路

4. あとがき

人口減少が進む中での老朽配水管の優先順位の決定について検討を行い、地域別の水道の建設時期と人口の減少の違いが、最適更新時期に及ぼす影響を示すことができた。式(9)において無視した埋設土壌の影響等も考慮することでより現実的な検討ができる。

参考文献

- 1) (財)水道技術研究センター：持続可能な水道サービスのための管路技術に関する研究報告書，2011。