管路再構築における管路の自己洗浄性と耐震性の機能確保に関する検討

和田 昌寛¹・山田 武史²・平山 修久³・伊藤 禎彦⁴

¹ 神戸市水道局 (〒 650-8570 神戸市中央区加納町 6-5-1)

E-mail: masahiro_wada2@office.city.kobe.lg.jp

² 京都大学工学部地球工学科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ 正会員 国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター (〒 305-8506 つくば市小野川 16-2)

E-mail: hirayama.nagahisa@nies.go.jp

⁴ 正会員 京都大学大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

水道事業として、水道施設老朽化や人口減少、節水機器の普及による水需要の減少などの外部環境変化に適応するためには、今後、中長期的な視点から水道施設の再構築を検討する必要がある。本研究では、実管網を対象とした管路の縮径と管路形状に関する管網解析を行い、人口減少社会における管網システムのあり方について、管内における濁質の堆積や流速による濁水発生を予防するという管路の自己洗浄性と、災害レジリエンスを確保するという耐震性の2つの機能から検討した。その結果、管路再設計に耐震管路を用いない条件下では、管路の自己洗浄性と耐震性はトレードオフ関係にあることを明らかにした。一方、検討したケースにおいて、150mm 管路を 100mm 管路に変更し、かつ、配水管延長密度を低減した条件下で、自己洗浄性と耐震性のいずれの機能も確保することが可能となる条件が存在することを示し、今後の管路再構築における管路機能高度化のひとつのあり方を示した。

Key Words: renovation of water distribution system, depopulation society, self-cleaning, earthquake resilience

1. はじめに

水道事業を取り巻く環境は大きく変化しており、そのひとつに水道施設の老朽化があげられる。今後、高度成長期に整備された水道施設の更新が必要となり、投資額が対前年度比マイナス1%で推移すると仮定した場合、2025年には更新需要と投資額がほぼ同額となる¹⁾。特に、水道資産の約7割を管路資産が占めており、管路老朽化による漏水や強度不足が深刻化しつつある。

水道施設の老朽化に加えて、人口減少及び節水機器の普及による水需要減少もまた重大な課題である。今後日本の人口は減少する見通しであり、2010年の国勢調査によると総人口は1億2,806万人であるが、2060年には8,674万人になると推計されている²⁾。水使用機器の節水化が進んだ場合、2040年には水需要量は現在の約半分、節水化が進捗しなかった場合でも現在の約4分の3程度に減少することが予測されている³⁾。更新費用の増大、料金収入の減少によって、老朽化施設の更新や耐震化の進捗が困難となりうる。人口減少を踏まえてその規模を

適正化しつつ水道施設を再構築することは、全ての水道事業者が将来直面する課題である⁴⁾。

水需要減少は収益減少による経営環境を悪化させるだけでなく、管内流速低下による管内での粒子の堆積などの管内水質悪化を引き起こすことが懸念される。管内流速と管内濁質との関係性については、いくつかの報告がある^{5),6)}。Blokkerらは、日最大流速が0.20~0.25 m/s以上であれば管内濁質の堆積を防止できると報告している⁷⁾。管内水質悪化の対応策として、小口径による枝状管網により管内流速を大きくし、流れを一方向にすることで、濁質の沈着を防止する自己洗浄機能の付与があげられる⁸⁾。一方、我が国の管網システムには耐震機能の確保が必要不可欠であり、耐震継手を有した耐震管路の導入のみならず、管路のループ化、ブロック化、二重化などの管路設計手法が取り入れられてきた⁹⁾。安全な水を安定供給するという事業活動を通じて、市民生活や社会経済活動を支えるという水道事業のミッションを鑑みれば、今後の管路再構築においては、管路の耐震化のみならず、水質維持機能などの管路機能を高度化、多様化

する観点からの検討が必要であると考えられる。

以上を背景として、本研究では、「管内における濁質の堆積や流速による濁水発生を予防する管路機能」という自己洗浄性と「配水システムの災害レジリエンスを確保する管路機能」という耐震性に着目し、今後の人口減少社会における管網システムのあり方について検討することを目的とする。具体的には、実管網を対象とした管網解析を行い、自己洗浄性と耐震性の2つの管路機能から管網システムにおける管路の縮径と管路形状に対する評価を行う。なお、本研究は、あくまでも、管路再構築における管路システム、つまり、口径や管網形状について検討することを目的としている。したがって、再構築の手法自体は解析対象外とし、本検討での管路再設計においては、新設管路や現状から更新する管路については、既存の管種と同じものを想定することとし、耐震管路は導入しないものとした。

2. 方法

本研究では、管網解析により、管路の自己洗浄性と耐震性の観点から、人口減少社会に対応することが可能となる管網システムのあり方について検討する。したがって、管網システムの再構築手法や耐震管路の導入については取り扱わないものとする。管網解析のためには、米国環境保護庁が開発した管網解析ソフト EPANET 2 を用いる。なお、耐震性評価における震災時の管網解析では、管路の被害状況の記述や、管網計算結果での漏水に伴う負圧の処理が可能となるコーネル大学により開発された GIRAFFE (Graphical Interactive Response Analysis for Flow Following Earthquakes) ⁹⁾ を用いた。

(1) 評価指標

a) 自己洗浄性

本研究では、管内における濁質の堆積や流速による濁水発生を予防する管路機能を自己洗浄性と定義する。既往研究より、日最大流速が0.20～0.25 m/s 以上であれば、濁質の沈着を防止できることが報告されている⁷⁾。ここで日最大流速は、オランダにおける自己洗浄機能を考慮した配水管網設計での設計基準のひとつであり、最大流速の最小値を定めている。つまり、この基準以上の流速が定期的に生じれば、低流速時に堆積した粒子を再浮上させ、輸送することで、管路に自己洗浄機能を持たせることができる。本研究では、自己洗浄性の評価指標として、時間最大時の管内流速を計算し、全管路延長に対する管内流速が0.20 m/s 以上となる管路長の割合を用いることとする。

b) 耐震性

震災時における配水管網システムの災害レジリエンス機能を評価する指標として、通水可能率の復旧レジリエンス曲線、ならびに機会損失水量を用いる。通水可能率とは、非常時配水可能水量を平常時配水可能水量で除した値である。事業継続性の観点から、横軸に時間、縦軸に通水可能率をとり、通水可能率の復旧レジリエンス曲線を用いて評価する。なお、通水可能率を算出する際の配水可能条件として、配水池からの経路に問題がないこと、水圧が10m 以上であること、とした。また、機会損失水量は、応急復旧過程における供給不足水量の積分値である。

(2) 震災時の管網解析

震災時の管網解析は GIRAFFE を用いて行う。計算過程は、a) 管路被害率の推定、b) 管路破損箇所の設定、c) 管路破損の種類の設定、d) 水理計算、の4段階からなる。以下にそれぞれの段階の詳細を記す。

a) 管路被害率の推定

水道技術研究センターの管路被害予測式¹⁰⁾を用いて管路被害率を推定した。この管路被害予測式は、管路の属性情報のうち、「管種・継手」「口径」「敷設されている箇所の特徴地形分類」「地面最大速度」から、地震発生時に管路1km に対して、何件の被害が発生するのかを表す管路被害率(件/km)を算出するものである。この管路被害率は管路別に算出した。

b) 管路破損箇所の決定

管路被害予測式から導かれた管路被害率(RR)を平均とするポアソン分布乱数により、管路被害箇所を決定する。具体的には、管路被害率(RR)を平均とする指数分布乱数により、管路破損箇所間の距離 $L_0, L_1, L_2, L_3, \dots, L_k$ を発生させる。つまり、一様乱数 u_n から次式により指数乱数分布に従う L_k を算出する¹¹⁾。

$$L_k = -\frac{1}{RR} \ln(1 - u_n) \quad (1)$$

そして、その総和が当該管路の延長 $L_{p=1,2,3,\dots,n}$ を越えるまでの k をカウントすれば、その k が求めるポアソン分布乱数となり、 $k>0$ であれば、当該管路に k 箇所の破損が生じたものとし、管路破損箇所とした。

c) 管路破損の種類の設定

次に、それぞれの管路破損箇所における管路破損の種類を決定する。管路破損は、管路断絶と管路漏水に分けられる。管路断絶とは管路の離脱を表す。この場合、水流は完全に断絶され、土壤に浸透する。一方、管路漏水では、水流は維持され、一部は土壤に浸透することとなる。なお、管路漏水には継手の緩み、亀裂など5つの種類がある。

それぞれの管路破損箇所において、どのような種類の

表-1 管種別の各種漏水現象の発生確率

Pipe Material 管種	Type 1: Annular disengagement 継手離脱	Type 2: Round crack 管体破断	Type 3: Longitudinal crack 管体破断（割れ）	Type 4: Local loss of pipe wall 管体破損（穴）	Type 5: Local tear of pipe wall 管体破損（亀裂）
Cast Iron (CIP) 鋳鉄管	0.3	0.5	0.1	0.1	N/A
Ductile Iron (DIP) ダクタイル鋳鉄管	0.8	N/A	0.1	0.1	N/A
Riveted Steel (SP) 鋼管（溶接以外）	0.6	N/A	0.3	0.1	N/A
Welded Steel (SP) 鋼管（溶接）	N/A	N/A	N/A	N/A	1.0
Joined Concrete (CP) セメント管	1.0	N/A	N/A	N/A	N/A

破損が発生するのにかについては、一様乱数によるモンテカルロ法シミュレーションにより決定した。発生確率の条件としては、GIRAFFEの初期値を用いた⁹⁾。つまり、管路破損箇所のうち、一様乱数列 $0 < r_n < 1$ が 0.2 未満の場合に管路断絶とし、0.2 以上の場合に管路漏水とする。つぎに、管路漏水の場合に、その漏水の種類について、一様乱数列 r_n を用いて表-1 に示す管種別の各種漏水現象の発生確率表から管路漏水の種類を決定した。

d) 水理計算

管路破損を内包した配水管網システムを対象とした管網解析を行う。EPANET を用いた管網解析では、正圧と負圧の区別をせずに、水頭差のみに着目して行われる。そのため、地震時の管路破損を内包した管網を対象した管網解析結果では、その解析解として負圧が導かれることがある。しかしながら、管網解析結果で、節点の水圧が負圧となることは、実際には水が流れていない状態である。GIRAFFE では、管網解析を実施し、負圧が生じた箇所を特定し、水が流れていないとして、解析対象から除去する。そして、再度、管網解析を実施し、負圧が生じるかどうか確認する。そして、解析結果に負圧が生じなくなるまで繰り返し管網解析を行った。

(3) 復旧過程モデル

復旧過程における通水可能率の復旧レジリエンス曲線を算出するため、応急復旧作業原単位、投入班数を原単位として用いた復旧過程評価モデルを構築した。

a) 応急復旧作業原単位の設定

ここでは阪神・淡路大震災時の実績を用いることとし、口径 250mm 以下については 2 件/日・班、口径 300mm 以上については 0.63 件/日・班を応急復旧作業原単位とした¹²⁾。

b) 投入班数の設定

投入班数は被害箇所 1 件につき 1 班とした。

c) 応急復旧優先度の設定

口径の大きな管路から優先して応急復旧を行うこととした。なお、口径が同じ被害管路が複数存在する場合、配水池から近い管路被害箇所から応急復旧を行うものとした。

3. 解析対象地域

神戸市水道局の管網データ、阪神・淡路大震災の地震ハザードデータを用いて、2. 方法で示した手法により、自己洗浄性と耐震性について評価する。解析対象は、神戸市水道局東部センターの配水区域内で、神戸市灘区の市街地に位置し、最も大阪湾に近い灘低層配水区域と、神戸市水道局垂水センターの配水区域内の神戸市西区の西神ニュータウンを中心とした西神低層配水区域をとりあげた。2013 年時点の配水管網データを用いることとし、図-1、図-2 にそれぞれの 2013 年の口径別配水管網図を示す。配水区域における管路延長は、配水区域面積が大きい西神低層が灘低層の 2.7 倍である。一方、口径においては、神戸市ではブロック化により管路整備されてきていることから、配水区域面積が小さい灘低層のほうが配水本管である 300mm 以上の口径の大きな管路延長の割合が大きい。

地表面最大速度については、阪神・淡路大震災時のデータを用いることとした。表-2 に灘低層、西神低層の口径別、地表面最大速度別の管路延長割合を示す。

図-1 灘低層配水区域（2013 年）管網図

図-2 西神低層配水区域（2013 年）管網図

表-2 灘低層，西神低層の口径別地表面最大速度別の管路延長割合

配水区域	管路延長 (m)	口径	地表面最大速度				小計 (%)
			60 cm/s	100 cm/s	140 cm/s	180 cm/s	
灘低層	54,327	75 mm	0.6	0.0	0.2	0.0	0.9
		100 mm	4.0	3.4	4.9	2.1	14.5
		150 mm	9.3	7.3	18.9	5.7	41.2
		200 mm - 250 mm	9.0	4.3	7.2	1.5	22.0
		300 mm -	4.3	4.6	9.9	2.7	21.4
		小計 (%)	27.9	21.5	39.2	11.5	100.0
西神低層	146,976	75 mm	2.2	0.0	0.0	0.0	2.2
		100 mm	24.1	0.0	0.0	0.0	24.1
		150 mm	45.4	0.0	0.0	0.0	45.4
		200 mm - 250 mm	16.2	0.0	0.0	0.0	16.2
		300 mm -	12.1	0.0	0.0	0.0	12.1
		小計 (%)	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0

4. 解析結果と考察

(1) 管路の縮径に関する検討

a) 検討ケースの設定

ここでは、管路の縮径による自己洗浄性と耐震性への影響について検討する。灘低層配水区域，西神低層配水区域のそれぞれについて，以下のケースを設定した。

[CASE 1]：現状管網

[CASE 2]：現状の口径 150mm の管路を口径 100mm の管路に変更

[CASE 3]：現状の口径 150mm，100mm の管路を口径 75mm の管路に変更

[CASE 4]：現状の口径 100mm 以上の管路を 1 規格口径を小さくした管路に変更

それぞれの検討ケースにおける口径別管路延長割合と現状からの増減を表-3 に示す。

b) 管網解析結果及び考察

CASE 1 から CASE 4 までの管網解析により，管内流速，通水可能率による復旧レジリエンス曲線，機会損失

図-3 管路の縮径による管内流速分布への影響

水量を算出した。管路の縮径による管内流速分布への影響を図-3 に示す。CASE1（現状）では，灘低層，西神低層の 0.2 m/s 以上の割合は，それぞれ 9.3%，6.6% と小さいことがわかる。つまり，現状の管網においては，配水管路の大部分は自己洗浄機能を有していないものと推定できる。灘低層，西神低層のいずれの配水区域におい

表-3 管路の縮径における検討ケース別の口径別管路延長割合

配水区域	ケース	管路延長 (m)	口径別管路延長割合 (%)				
			75 mm	100 mm	150 mm	200 mm – 250 mm	300mm –
灘低層	CASE 1 (現状)	54,327	0.9	14.5	41.2	22.0	21.4
	CASE 2	54,327	0.9 (0.0)	55.8 (+41.2)	0.0 (-41.2)	22.0 (0.0)	21.4 (0.0)
	CASE 3	54,327	56.6 (+55.7)	0.0 (-14.5)	0.0 (-41.2)	22.0 (0.0)	21.4 (0.0)
	CASE 4	54,327	15.4 (+14.5)	41.2 (+26.7)	22.0 (-21.2)	13.1 (-8.9)	8.3 (-13.1)
西神低層	CASE 1 (現状)	146,976	2.2	24.1	45.4	16.2	12.1
	CASE 2	146,976	2.2 (0.0)	69.5 (+45.4)	0.0 (-45.4)	16.2 (0.0)	12.1 (0.0)
	CASE 3	146,976	71.2 (+69.0)	0.0 (-24.1)	0.0 (-45.4)	16.2 (0.0)	12.1 (0.0)
	CASE 4	146,976	26.3 (+24.1)	45.4 (+21.3)	16.1 (-29.3)	7.2 (-9.0)	5.0 (-7.1)

ても管路の縮径により、現状の CASE 1 よりも管内流速が 0.1 m/s を越える管路延長の割合が大きくなっている。また、管内流速が 0.2 m/s 以上に着目すると、灘低層ではそれぞれのケースで 93%, 108%, 125%, 19.1% であり、西神低層では、それぞれ 66%, 94%, 14.2%, 17.5% であった。CASE 2 と CASE 3 で、口径 75mm の管路延長の割合は、CASE 3 のほうが、灘低層、西神低層で、それぞれ現状から +55.7%, +69.0% とより増大していることから、CASE 3 での管内流速 0.2 m/s 以上の割合がより大きくなっていることがわかる。また、CASE 4 で、口径 75mm, 100mm の管路延長の割合が他のケースと同程度であるにもかかわらず、管内流速 0.2 m/s 以上の割合が大きくなっているのは、口径 200 mm – 250 mm や口径 300mm 以上の管路延長の割合が小さくなったことによると考えられる。また、灘低層のほうが、西神低層と比べて管内流速 0.2 m/s 以上の割合が大きく増加している。このことは、図-1 に示すように、灘低層のほうが、配水管本管によるブロック化、ループ化による管路整備がなされていることによるものと推察できる。

図-4 に管路の縮径による通水可能率の復旧レジリエンス曲線への影響を示す。これより、灘低層、西神低層のいずれにおいても、CASE 2 において、震災初期の通水可能率とその後の復旧回復が早く、災害レジリエンスが高いといえる。一方、CASE 4 では、震災初期の通水可能率が他のケースよりも小さくなっており、かつ、復旧過程においても、一度上昇したのちに下降するという特徴がみられる。これは、本稿での検討では、管路の縮径において耐震管路ではなく現状と同じ管種を用いており、管路の縮径により、水道管路被害予測における口径による補正係数は口径が小さいほど大きくなっているために、管路被害に用いる管路被害率が大きくなったことにより、ブロック管網やループ管網を構成している配水

図-4 管路の縮径による通水可能率の復旧レジリエンス曲線への影響

図-5 管路の縮径による機会損失水量への影響

本管においても管路被害が生じるためと考えられる。

また、震災による機会損失水量の結果を図-5 に示す。これより、CASE 1 の現状と比べて CASE 2 で機会損失水量が小さくなっている。これは、本検討においては、管路の縮径に伴う管路変更においては管種の変更は行って

いないことから、口径 150mm から口径 100mm への管路の縮径後においても口径による補正係数が同じであることから、管路被害率は変わらない。しかしながら、管路破損による漏水量は、口径が小さくなるほど減少することから、CASE 2 における機会損失水量が小さくなったものと考えられる。一方、CASE 3、CASE 4 での機会損失水量は、現状の CASE 1 と比較して大きくなっている。CASE 3 では、口径 100mm、150mm の管路を口径 75mm 管路により縮径を行っていることから、水道管路被害予測における口径による補正係数は 1.0 から 2.0 となり、導出される管路被害率が 2 倍となる。つまり、配水区域内の管路被害件数が増大したことにより、図 -4 の復旧レジリエンス曲線に示すように、復旧日数が大きくなり、災害レジリエンスが低下したことによると考えられる。また、CASE 4 については、耐震管路を用いない管路の縮径に伴い、管路被害に用いる管路被害率が大きくなったことにより、ブロック管網やループ管網を構成している配水本管においても管路被害が生じている。このことから、通水可能率の復旧レジリエンス曲線で示されているように、災害レジリエンスの減少、ならびに、機会損失水量の増大という耐震性の低下につながったと推察できる。

以上のことから、管路変更において管種の変更を行わない場合、管路の縮径は、管網システムにおける管内流速の増大に寄与する、つまり、管路の自己洗浄性が向上する一方で、機会損失水量が増大するなど耐震性を低下させることがわかる。特に、配水本管などの大口径の管路の縮径は、管内流速分布ならびに耐震性に大きな影響を及ぼすといえる。一方、検討対象とした灘低層、西神低層においては、CASE 2 のような管路の縮径条件下では、管路の自己洗浄性、耐震性のいずれも向上しうること示した。

(2) 管網形状に関する検討

a) 検討ケースの設定

ここでは、CASE 1 を現状管網とし、以下の 2 つの管網形状を再構成したケースについて検討した。

[CASE 5]: 現状管網における配水支管の配水管延長密度を減少させた管網

[CASE 6]: 現状管網の配水支管を枝状とした管網

図 -6 に、灘低層配水区域における現状管網、現状管網における配水支管の一部を取り除き配水管延長密度を減少させた管網、現状管網の配水支管のループ管を除き枝状とした管網を、管網形状の再構成例として示す。また、それぞれのケースにおける灘低層、西神低層の管路延長、口径別管路延長割合を表 -4 に示す。

b) 管網解析結果および考察

CASE 5、CASE 6 の検討ケースについて、管路の自己洗浄性、耐震性について評価を行った。

図 -7 に、現状管網と CASE 5、CASE 6 の管路形状の再構成による管内流速分布への影響を示す。これより、管内流速 0.2 m/s 以上の割合は、灘低層において、それ

図 -6 検討する管網形状の例

表 -4 管網形状における検討ケース別の口径別管路延長割合

配水区域	ケース	管路延長 (m)	口径別管路延長割合 (%)				
			75 mm	100 mm	150 mm	200 mm - 250 mm	300mm -
灘低層	CASE 1 (現状)	54,327	0.9	14.5	41.2	22.0	21.4
	CASE 5	49,357 (-4,970)	0.6 (-0.3)	11.2 (-3.3)	40.6 (-0.6)	24.3 (+2.3)	23.3 (+1.9)
	CASE 6	44,569 (-9,758)	0.6 (-0.3)	12.4 (-2.1)	36.8 (-4.4)	25.6 (+3.6)	24.6 (+3.2)
西神低層	CASE 1 (現状)	146,976	2.2	24.1	45.4	16.2	12.1
	CASE 5	143,206 (-3,770)	2.2 (0.0)	22.8 (-1.3)	46.0 (+0.6)	16.6 (+0.4)	12.4 (+0.3)
	CASE 6	131,595 (-15,381)	2.2 (0.0)	20.8 (-3.3)	45.6 (+0.2)	17.9 (+1.7)	13.5 (+1.4)

それぞれのケースで93%, 98%, 11.6%, 西神低層では、それぞれ6.6%, 6.9%, 8.8%であった。いずれの配水区域においても、給水区域面積当たりの配水管延長である配水管延長密度 (km/m^2) を減少させた CASE 5, さらにループを構成する配水管を除いた配水支管を枝状管網とした CASE 6 の順で管内流速が増大する傾向にあるといえる。これは、オランダにおける自己洗浄機能を有する管網設計の考え方と同様であるといえよう。

配水管網形状による通水可能率の復旧レジリエンス曲線への影響の算出結果を図-8に示す。これより、灘低層では、いずれの検討ケースにおいても、震災初期における通水可能率は同程度であるが、枝状管網である CASE 6 のみ、その後の復旧レジリエンス曲線の立ち上がりが遅れている。一方、西神低層においては、枝状管網の CASE 6 が震災初期の通水可能率が小さくなっており、その後の復旧レジリエンス曲線は他の検討ケースと同様の立ち上がりとなっている。図-2の西神低層配水区域の管網図より、その配水区域が広域であり、灘低層と比べて明確なブロック化やループ状の管路が少ないことから、通水可能率の復旧レジリエンス曲線において、枝状管網よりもブロック管網、ループ状の管網のほうが災害レジリエンスの向上には有利であるといえよう。

図-9に管網形状による機会損失水量への影響を示す。CASE 5については、いずれの配水区域においても、現状の CASE 1 よりも機会損失水量が小さくなっている。これは、配水支管の一部を取り除いたことにより、管路延長が短くなることで、管路被害予測結果における管路被害箇所が減少している一方で、ブロック化やループ状の管路によりバックアップ効果が機能していることによると考えられる。しかしながら、枝状管網である CASE 6 については、管路延長が灘低層で約18%、西神低層で約11%短くなっているが、配水支管を枝状管網としたことにより、ブロック管網やループ状管網で構築された現状で機能していたバックアップ効果が低下したことにより、機会損失水量が大きく増大する結果となったといえる。以上のことから、ブロック管網やループ状管網は、災害レジリエンスの向上や機会損失水量の低減など耐震性の向上に寄与する一方で、管路の自己洗浄機能を有する管内流速の確保が困難であるといえる。しかしながら、配水支管を枝状管網により構築することが、管内流速の増大に寄与する一方で、耐震性が低下しうる、といえた。つまり、管路の自己洗浄性と耐震性とは、管路形状や管路の縮径による影響を受け、お互いがトレードオフ関係にあることを示した。そして、本稿で検討したケースでは、管路再構築に耐震管路を用いないという条件下で、管路の自己洗浄機能を付与しつつ、耐震性を現状管網と同程度に確保することが可能となる再構築後の管網システムが存在するといえた。

図-7 管路形状の管内流速分布への影響

図-8 管路形状による通水可能率の復旧レジリエンス曲線への影響

図-9 管路形状の機会損失水量への影響

本稿では、自己洗浄性と耐震性の2つの管路機能面から管網システムにおける管路の縮径と管路形状に対する評価する手法を示した。ここでは、あくまでも、再構築後の管路システムについて検討することを目的としたことから、再構築の手法自体について解析対象外とし、新設管路や現状から更新する管路は、既存の管種と同じものとし、耐震管路は導入していない。しかしながら、実際上の管路再構築においては、新設管として耐震管が導入されているなど、管路更新、管路耐震化、ダウンサイ

ジグなどのさまざまな施策や事業と関連付けて推進することが求められる。したがって、今後は、中長期的な視点から人口減少社会に適応することが可能となる管路再構築の実際的手法を示すことが必要であるといえよう。また、本稿で構築したモデルは、管路被害予測において、米国コーネル大学で構築されたモデルやパラメータを用いていることから、我が国の管網システムでの適用範囲の検証や、管路の自己洗浄性や耐震性に対する重み付けを考慮した評価方法なども今後の課題としてあげられる。

5. 結言

管路の自己洗浄性と耐震性の2つの管路機能面から、今後の人口減少社会における管網システムのあり方について、実管網を対象とした管網解析により検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 管内における濁質の堆積や流速による濁水発生を予防するという管路の自己洗浄性と、災害レジリエンスを確保するという耐震性との2つの管路機能から管網システムにおける管路の縮径と管路形状に対する評価する手法を示した。その結果、管路の自己洗浄性と耐震性がトレードオフ関係にあることを示した。
- 2) 管路の縮径に伴う管路変更において、管種の変更を行わない場合、管路の縮径が、管網システムにおける管内流速の増大により自己洗浄性を向上させる一方で、機会損失水量が増大するなど耐震性を低下させることを示した。また、配水本管などの大口径の管路の縮径は、管網システムの管内流速分布ならびに耐震性の評価結果に大きな影響を及ぼすといえた。
- 3) ブロック管網やループ状管網は、耐震性の向上に寄与するが、管路の自己洗浄機能を有する管内流速の確保が困難であるといえる。一方、配水支管

を枝状管網により構築することで、管路の自己洗浄性は向上するが、耐震性は低下する、といえた。

- 4) 管路再構築に耐震管路を用いないという条件下において、管路の自己洗浄機能を付与しつつ、耐震性を現状管網と同程度に確保することが可能となる再構築後の管網システムが存在することを指摘した。

謝辞：本研究の実施に当たり、神戸市水道局には配水管網に関するデータを提供頂くとともに、実務的な観点からのさまざまな助言を賜った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 厚生労働省：水道ビジョン，2004。
- 2) 国立社会保障・人口問題研究所：人口統計資料 2013 年版，2013。
- 3) 植村哲士，宇都正哲，福地学，中川宏之，神尾文彦：2040 年の日本の水問題（上）人口減少下における水道事業の存立基盤確保の必要性，知的資産創造，2007。
- 4) 厚生労働省：新水道ビジョン，2013。
- 5) 水道技術研究センター：水資源の有効利用に資するシステムの構築に関する研究（Epoch プロジェクト），2005。
- 6) Vreeburg, J. H. G. : Discolouration in Drinking Water Systems: a particular approach, *Technische Universiteit Delft*, Delft, 2007。
- 7) Blokker, E. J. M., et al. : The Self-cleaning Velocity in Practive, *Water Distribution Systems Analysis* 2010, 2010。
- 8) 厚生省：配水ブロック整備手法に関する調査，1993。
- 9) Cornell University : GIRAFFE user's manual, 2008。
- 10) 水道技術研究センター：地震による水道管路被害予測の手引き，2011。
- 11) Ross, S. M. : Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Academic Press, 2009。
- 12) 榊恭平，田中孝昌，松田康孝，平山修久，伊藤慎彦：水道事業体における耐震化施策効果の統合的評価手法の開発，環境衛生工学研究，Vol.27, No.3, pp.63-66, 2013。

(2014. 7. 10 受付)

SELF-CLEANING FUNCTION AND EARTHQUAKE RESILIENCE IN RECONSTRUCTING WATER DISTRIBUTION SYSTEM

Masahiro WADA, Takefumi YAMADA, Nagahisa HIRAYAMA and Sadahiko ITOH

The integrated and multi-functional pipeline system should require quality, quantity, and reliability in water supply. This paper describes how to redesign the drinking water distribution system including both self-cleaning function and disaster resilience. In this study, distribution network analyses in some Kobe City distribution areas were conducted in case of downsizing and redesigning of water distribution system, and self-cleaning function of pipeline was evaluated by the frequency of pipe flow velocity, because the pipe flow velocity more than 2.0 m/s could prevent degradation of water quality in pipelines such as the composure of suspended substance. Also, disaster resilience was evaluated by recovery resistance curves in water supply and opportunity loss in recovery period. As a result, a trade-off between self-cleaning function and disaster resilience was pointed out. It was shown that earthquake resistance should be reduced, while smaller diameter pipe should improve self-cleaning property due to increasing of pipe flow velocity in the distribution network system. In addition, it was indicated that blocking pipe network would contribute to earthquake-resistant improvement, but its network should make security of self-cleaning function of pipelines difficult. It was said that branch-formed pipe network might improve self-cleaning function, but could decrease earthquake resisting. Consequently, it was indicated that, under a condition not to replace with earthquake-resistant pipeline in restructuring water distribution network system, a redesigning water distribution system would ensure both self-cleaning function and earthquake resilience in its networking system.