

(67) 配水管網におけるGIS支援型水供給リスク評価

西澤 常彦^{1*}・稲員 とよの²・小泉 明²・渡辺 晴彦³・荒井 康裕²・森 正幸⁴

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) ジオプラン

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)

⁴ 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:tsunehiko.nishizawa@geoplan.jp

本研究では、配水管網について仕切弁で閉じられる個々の断水領域を需要者ユニットと定義し、その相互関連構造から事故時の水供給リスクの評価をGISの機能を活用して行う方法を提案する。すなわち、ある需要者ユニットの断水事故による管網全体に与える影響の大きさおよび他の全てのユニットの断水事故によって受ける影響の大きさについて、管路事故が起こる可能性を考慮することにより、個々の需要者ユニットの持つ水供給リスクを定量化する方法を示す。これにより、水供給リスクからみた需要者ユニットの相互の位置関係を視覚的に明らかにすることができる。ケーススタディにおいて、モデル配水区を対象に提案方法による検討を行い、今後の管路更新計画策定において新たな視点となることを示した。

Key Words : network structure, water distribution system, water supply shortage, isolation valve, risk assessment,

1. はじめに

わが国の水道事業においては、高度経済成長期の面的な拡張段階に整備された膨大な管路資産の多くが老朽化してきており、計画的な管路施設の更新が大きな課題となっている^{1),2)}。管路更新を計画するに際し、管路評価として管路の壊れやすさと壊れた場合の影響の大きさを把握することは重要となる。壊れやすさは、管路単体の属性として評価できるが、同じ壊れやすさの管路であっても事故による影響が大きいかどうかは配水管網全体の中での果たす役割によって定まる。

管路の管網全体における役割を評価する方法としては、ある管路が断水事故で通水不能となった場合に管網全体での供給可能な水量がどの程度変化するかを管網解析によって定量化する方法^{3),4)}がある。しかし、管網を構成するすべての管路について水理計算を行う必要があるため、計算量が管路数に比例して増大することになるため、この方法は管網を構成する主要管路あるいは配水本管を対象とした場合に適用可能といえる。そこで、筆者らは配水本管から配水支管までの管路数が相対的に多くなる場合を対象に、水理解析による方法の簡便な代替手法としてGIS(地理情報システム)を利用した方法を提案した⁵⁾。ある管路上で発生した断水事故の範囲は、直近の仕切弁

を閉じて作られる断水領域の連結によって表わされる⁶⁾。この断水領域を需要者ユニットと定義すれば任意の管路事故の影響範囲は、需要者ユニットのネットワーク構造によって表現することができる。さらに、任意の需要者ユニットにおける管路事故によって生ずる管網全体としての断水量と減水量を定量化し、これを事故が生じた需要者ユニットの管網全体に対する影響度と定義した。筆者らは、これにより、個々の需要者ユニットの事故における管網全体としての水供給機能からみた位置付け方を提案した。

本研究では、筆者らが提案した管網を構成する需要者ユニットのネットワークと事故時の影響度の考え方を拡張する。まず任意の需要者ユニットの断水事故による全体的な影響を個々のユニットの減断水量に分解し、定量化する。さらに、個々のユニットで事故が起こる可能性(壊れやすさ)を考慮することにより、水供給リスクとして定量化する方法を提案する。これによって、断水事故が生じた管路の管網全体への影響の大きさ(影響度)だけでなく、他の管路の事故によって自身が受ける影響の大きさ(被影響度)も定量化することが可能となる。そして、管路更新における管路の壊れやすさを考慮した減断水被害や更新費用の最小化による検討だけでなく、更新優先順位を検討するに際し、どこを更新すれば、ど

この需要者に影響するかという需要者側からの評価も考慮することが可能となる。

本研究では、まず2.でGISによる配水管網の構造化について述べる。3.では、需要者ユニットを単位とする事故時の影響の大きさを水供給リスクとして定量化する方法について述べる。4.ではケーススタディとして、モデル配水区を対象に本研究で提案した方法によるGISの活用例を示す。この結果、断水事故によって他のユニットに影響を与えやすいユニットや、影響を受けやすいユニットとその位置関係が、GISツールによって視覚的に明らかにできることから、今後の更新計画において需要意識の考慮等の新たな視点を提案する。

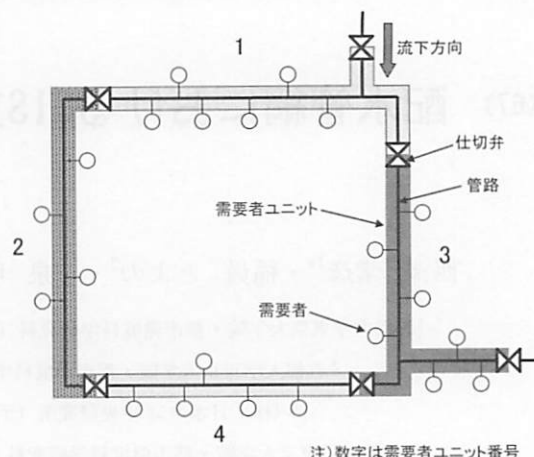


図-1 配水管網と需要者ユニットとの関係

2. 管網の水供給機能の定量化

需要者ユニットとは、任意の管路での断水事故において直近の仕切弁によって閉じられる断水領域であり、管路、仕切弁、需要者によって構成される⁵⁾。図-1は配水管網に対する需要者ユニットによる構成とその需要者ユニットのネットワークとの関係を示したものである。

配水管網のGISでは、配水池等の配水起点から需要者の給水装置までの管路、仕切弁、水道メータ等のすべての設備を相互の接続関係や空間的な位置関係とともにデータベース化している⁷⁾。このため、GISツールの経路探索や経路別集計等の基本機能を用いて、筆者らは図-2の手順で需要者ユニット別分担需要量を算定した⁹⁾。

すなわち、Step1として、GISの基本機能を使って、管網を仕切弁で閉じられる領域に分割し、これを需要者ユニットとして特定する。これにより管網は、需要者ユニットのネットワークとして表現できる。次いでStep2では、需要者ユニットのネットワークについて、口径の大きい管路から小さい管路に水が流れると仮定することで、ユニット相互の関連を表す隣接行列を作成する。これに構造モデリング手法であるISM手法^{8)・9)}を適用することで可到達行列を作成し、さらにユニット間の関連からループや冗長な関係を除くことにより、本質的な上下流関係を示す骨格行列を作成することができる。これにより、あるユニットの事故が他のユニットに及ぼす影響範囲を明確にできる。そこで、Step3として、任意のユニットがその下流を含めてどの程度の需要量を分担しているかを定義し、事故で通水不能となった時、下流側のユニットに生じる減断水の程度を影響度として定量化する。

まず、ユニット i ($i \in N$, N は全体集合)の直上流集合 U_i と直下流集合 D_i を骨格行列から定義する。平常時のユニット i が受け持つ需要量(分担需要量)を E_i 、

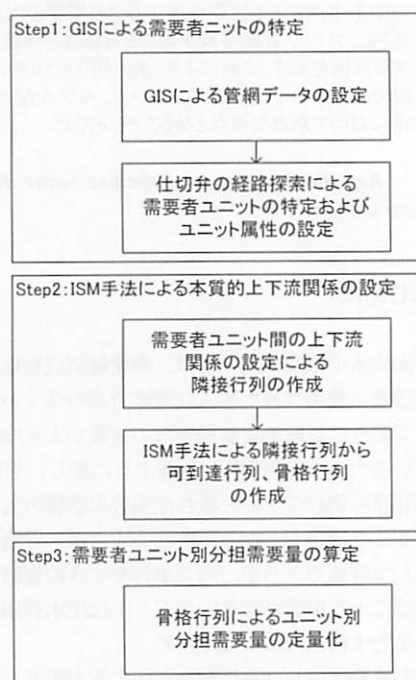


図-2 需要者ユニットによる水供給機能の定量化

ユニット i 自身の需要量 d_i とすると、 E_i は次式で定義される。

$$E_i = d_i + \sum_{j \in D_i} e_i(j) \quad (1)$$

ここで、ユニット i の直上流のユニット $k \in U_i$ は E_i を均等に分担するものと仮定すると、上流側ユニット k はユニット i に対して次式の $e_k(i)$ を分担することになる。

$$e_k(i) = \frac{E_i}{|U_i|}, \text{ for } k \in U_i \quad (2)$$

ここで、 $|U_i|$ は直上流集合 U_i に含まれるユニット数を示す。もし $D_i = \phi$ (ϕ は空集合) なら下流端であり、 $E_i = d_i$ となる。上記の定義より、すべてのユニットの分担需要量は、最下流から配水起点に向かって順に計算することによって求められる⁵⁾。例えば、注目する需要者ユニットについて、式(2)より上流側ユニット集合 U_i の構成数が多くなれば、それだけ影響が分散されることから分担需要量は減少することになる。また、式(2)で需要者ユニットの管路容量など属性を考慮した分担割合を想定することもできるが、本研究では簡便化のために均等とした。

3. 管網の水供給リスクの定量化

任意の需要者ユニットで断水事故が生じた場合の各ユニットの水供給リスクの定量化の方法を図-3に示す。

(1) 事故時需要者ユニット別減断水量の算定

任意のユニットに注目したとき、そのユニットの直上流あるいは直下流で事故が生じた場合、注目しているユニットと事故のユニットとの接続がなくなるため、直上流集合 U あるいは直下流集合 D が変化する。このため、あるユニットの直上下流の集合に含まれるユニットが事故で断水となった時、式(1)の事故時の分担需要量も変化する。

図-3で E_j^i は、ユニット i の事故で需要量 d_j を供給出来なくなった時のユニット j の事故時分担需要量で、 ΔE_j^i は平常時のユニット j の分担需要量 E_j^0 との差である。超過分 $\Delta E_j^i > 0$ となる場合は、ユニット j の下流側で減水が生じるとみなせる。

すなわち、管網上のある管路(ユニット)が断水すれば、全体的な管の通水能力は低下する。このため、管網内の水の流れの偏りにより局所的な部分において水圧が上がることもあり得るが、全体的には各節点の水圧が下がることになると考えられる。このため、各節点の水圧を平常時と同じにするためには各節点の需要量を減少させなければならない。つまり、あるユニットの断水に伴う流量の変化によって、流量が平常時を超過した場合にそれを解消することは、水圧低下を解消するための需要量を減少させることに対応すると考えられる。

いま、ユニット i の事故による超過分 ΔE_j^i を下流側ユニットの需要量の節水で解消するためには、ユニット j を含む下流側のユニットの集合を D_j^i とすると、節

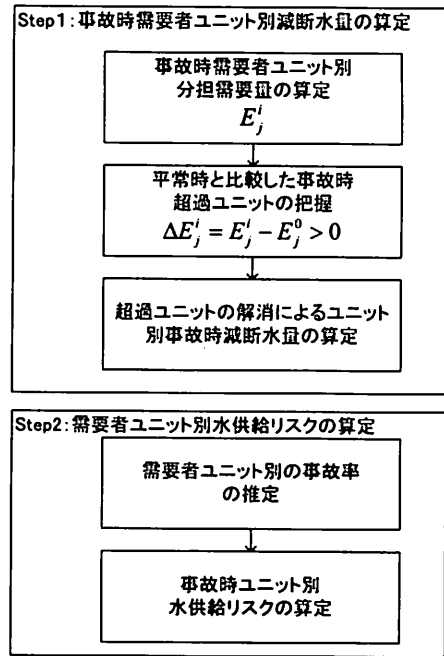


図-3 水供給リスクの定量化手順

水後のユニット j および下流側ユニット k の需要量 d_k^i は、次式で求められる。

$$d_k^i = \frac{E_j^0}{E_j^i} \times d_k \quad \text{for } k \in D_j^i \quad (3)$$

したがって、 D_j^i のユニットについて最下流側から式(3)による節水を各ユニットに対して行うことにより超過分を解消することができる。これにより、ユニット i の事故に対応したすべてのユニットの需要量 d_j^i を求めることができる。あるユニット i に注目すれば、そのユニットが事故時においてユニット j は、断水する、減水する、断水も減水もしない、のいずれかとなるため、ユニット i が事故の場合のユニット j における減断水量 $q_{i,j}$ は、次式となる。

$$q_{i,j} = \begin{cases} d_j & j \in V_i \\ d_j - d_j^i & j \in W_i \\ 0 & j \notin V_i \text{ and } j \notin W_i \end{cases} \quad (4)$$

このとき、 V_i はユニット i の事故で断水するユニットの集合、 W_i はユニット i の事故の影響で減水するユニットの集合である。

式(4)のユニット i の事故によるユニット j の減断水量 $q_{i,j}$ により、任意の需要者ユニットについて、自身の断水事故による管網全体に与える影響の大きさ(影響度)および他の全てのユニットの断水事故によって自身が受け

る影響の大きさ(被影響度)は、それぞれ以下のように定量化できる。

$$\text{ユニット} i \text{ の影響度} = \sum_{j \in N} q_{i,j} \quad (5)$$

$$\text{ユニット} j \text{ の被影響度} = \sum_{i \in N} q_{i,j} \quad (6)$$

なお、筆者らはモデル管網を用いた研究⁵⁾により、影響度の大小関係と水理解析の結果との間に高い相関があることを確認している。

(2) 需要者ユニット別水供給リスクの算定

各需要者ユニットにおける管路の老朽化等に伴う壊れやすさの研究については、メッシュデータをを用いた評価方法^{10),11)}や管路寿命を考慮した評価方法¹²⁾等がある。ここでは、各ユニットにおける事故の発生可能性を経年別の事故率(件/km/年)¹³⁾で表わすことにより、各ユニットの事故に伴う水供給リスク(㎥/年)を定量化する。すなわち、事故が生じた時に減断水が一日継続するとした場合の影響の大きさを需要量(㎥/年)で表すものとする。

ユニット*i*の属性から現時点での推定事故率 y_i (件/km/年)、管路延長を l_i (km)、ユニット*i*の事故によるユニット*j*の減断水量 $q_{i,j}$ (㎥/日)とすると、ユニット*i*の事故の発生可能性による影響度は、式(5)より、以下となる。これを影響度リスク(㎥/年)と呼ぶ。

$$\alpha_i = \sum_{j \in N} y_i \times l_i \times q_{i,j} \quad (7)$$

また、*j*ユニットが他のユニットにおける事故の発生可能性による被影響度は式(6)より、以下となる。これを被影響度リスク(㎥/年)と呼ぶ。

$$\beta_j = \sum_{i \in N} y_i \times l_i \times q_{i,j} \quad (8)$$

これらの影響度、被影響度の指標によって影響を与えるユニットと影響を受けるユニットを、影響度リスク、被影響度リスクによって影響を与えやすいユニットと影響を受けやすいユニットを、それぞれGISツールによって、その位置関係とともに視覚化することができる。これにより、更新順位の決定において、単なる経年数だけでなく、各ユニットの空間的な依存関係も考慮することが可能となる。空間的な依存関係はユニット間の需要者相互の関係となるため、その関係性を需要者の意識として更新計画のための情報とすることができる。

4. ケーススタディ

モデル配水区の管網は175の需要者ユニットで構成されており、給水栓数 1,250栓、総管路延長 17.6km、日平均需要量 1,488㎥/日である。管路の敷設年度では全体の6

表-1 モデル配水区の管路属性

管種 口径(mm)	CIP	DIP	SP	VP	計(km)	構成比(%)
50			0.5	2.3	2.8	15.7
75	0.1	0.0			0.1	0.7
100	0.6	5.0			5.5	31.3
150		4.6			4.6	26.3
200		1.9			1.9	10.6
250		1.8			1.8	10.3
350		0.9			0.9	5.1
計(km)	0.7	14.2	0.5	2.3	17.6	100.0
構成比(%)	3.9	80.4	2.6	13.1	100.0	

注) CIP: Cast-Iron Pipe (普通鉄管),

DIP: Ductile Cast-Iron Pipe (ダクタイル鉄管)

SP: Steel Pipe (鋼管)

VP: Vinyl Chloride Pipe (硬質塩化ビニール管)

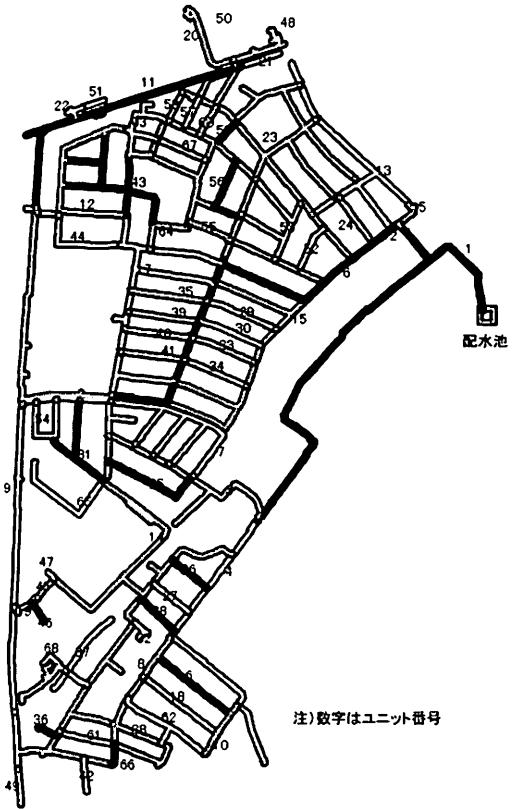


図-4 需要者ユニットの構成

割が1960年からの10年間に布設されている。管路の管種別口径の構成は、表-1のとおりである。

モデル配水区の管網は、GISツールを用いることにより、管網上の仕切弁によって175の需要者ユニットに特定された。

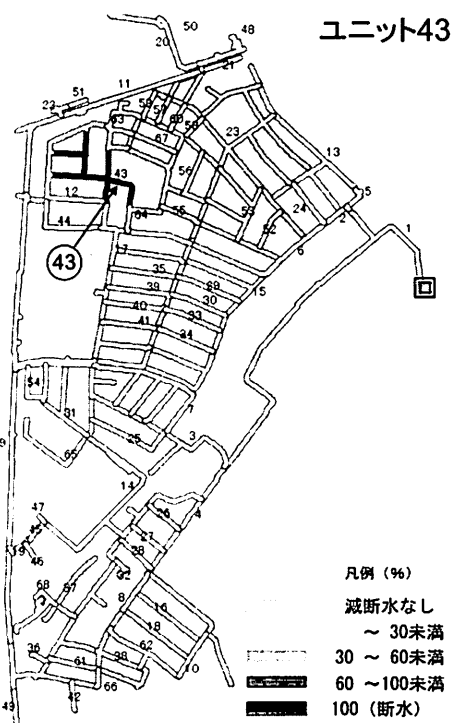
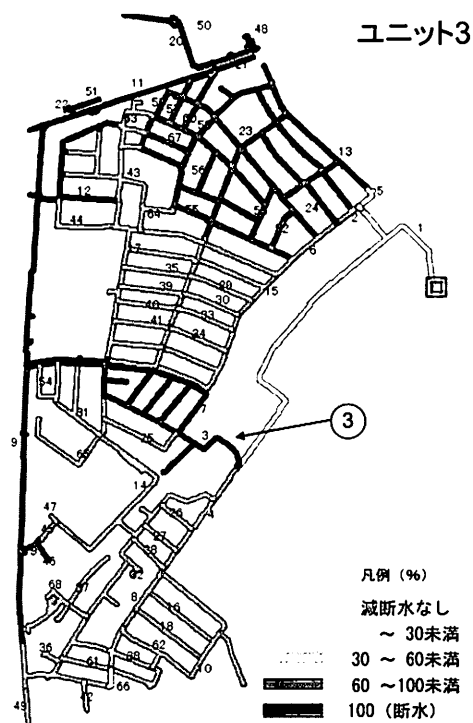


図-5 需要者ユニットの断水事故による影響 (ユニット3, ユニット43の場合)

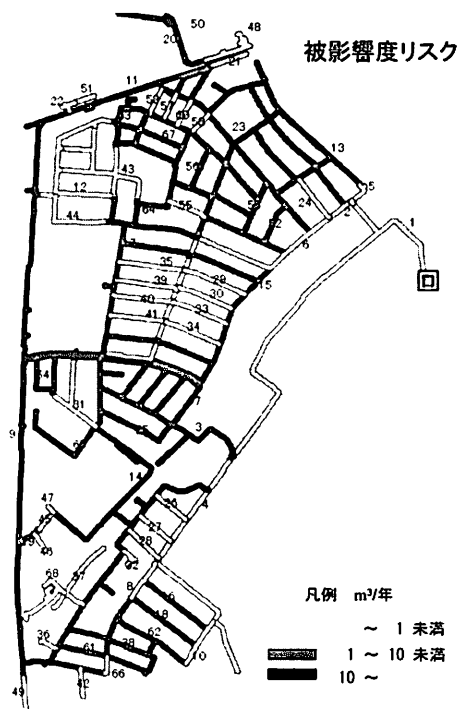
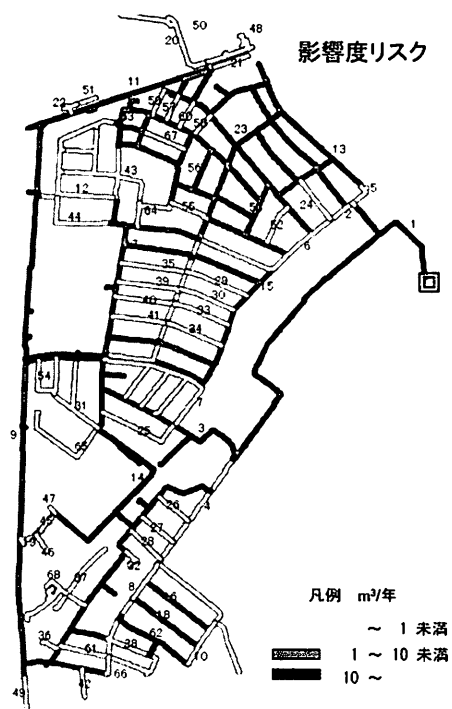


図-6 需要者ユニット別水供給リスク (影響度, 被影響度)

次いでユニット間の流向を仮定することで得られたユニット相互の関連を示す隣接行列にISM法を適用することにより、175の需要者ユニットのネットワークは、ユニット間のループや冗長な経路を省略した本質的な関係を表す68の需要者ユニットのネットワークに縮約された。図-4はモデル配水区の管網と縮約後の需要者ユニットの大きさと位置を表すために68個のユニットを5色で色分けしたものである。

図-4に示す需要者ユニットによる配水管網について、任意の需要者ユニットの事故時における各ユニットの減断水量を求めれば図-5となる。同図はユニット3とユニット43で断水事故が生じた場合のそれぞれ他のすべてのユニットの減断水量の平常時との比率（減断水率）によって影響の広がりを示したものである。これよりユニット3は広範囲に、ユニット43は局所的に、影響を及ぼしていることがわかる。

次に、断水事故の起こりやすさを考慮した事故の影響を評価するために各ユニットの管路の事故率を考慮する。管路の壊れやすさについては、事業体での過去の事故情報の統計解析から得られた研究成果¹³⁾を用いれば、経年数 t の時の事故率 y は次式で表される。

$$y = c \times a \times t^b \quad (9)$$

ここで a, b は管種別事故率曲線のパラメーターで c は口径、継手等の仕様、地盤条件にそれぞれ対応した補正係数である。ここでは簡単化のために口径に対する補正係数のみを用いる。本研究で用いた式(9)のパラメータ値を表-2に示す¹³⁾。

式(9)によるユニット別の事故率を用いて式(7)、式(8)によるユニット別の影響度リスクおよび被影響度リスクを求め、各ユニットの位置関係をGISツールで表示すれば、図-6となる。すなわち、需要者は配水管網上のどこに位置するかで、断水事故による影響の程度が変わることになり、これは、需要者側から見れば、どのユニットの管路が更新されるかによって自身のユニットの水供給リスクが影響を受けることを意味している。

例えば図-6に示すように影響も被影響も大となっているユニットもあるため、管路更新の優先順位付けにおいては壊れやすさの評価や更新費用の評価だけでなく、更新計画案によって需要者が受ける、あるいは他の需要者に与える事故時の水供給リスクの変化も考慮した更新順位を考えることができる。

表-2 事故率曲線のパラメーター

係数	DIP	CIP	SP	VP
a	1.38×10^{-4}	1.91×10^{-12}	5.28×10^{-4}	1.27×10^{-5}
b	1.307	6.502	1.359	2.907

5. おわりに

本研究では GIS を活用した管路事故による水供給リスクを評価する方法を提案した。すなわち、ある需要者ユニットの断水事故による管網全体に与える影響の大きさおよび他の全てのユニットの断水事故によって受ける影響の大きさについて、管路事故が起こる可能性を考慮することにより、個々の需要者ユニットの持つ水供給リスクを GIS を利用して定量化する方法を提案した。そして、ケーススタディにおいてどのユニットの事故が他のユニットの水供給リスクに影響を与えるかをユニット相互の位置関係をもとに GIS によって視覚的に表わした。これにより、管路更新の優先順位によって需要者側の水供給リスクが変化するため、今後の管路更新計画においては、経年管の評価だけでなく、需要者側からの評価も考慮することが可能となる。

なお、本研究では需要者ユニットの壊れやすさについて、管路の材質や口径を考慮したが、GIS データの活用の観点からは、埋設環境についても考慮することが可能である。また、需要者ユニットおよびその本質的な上下流関係の定義より、水供給リスクの改善のためには、管路の更新だけでなくユニットの大きさを変える、ユニットの上下流関係を変える等も施策として考慮することが考えられる。

謝辞：本研究を遂行するに際し、(株)ジオプランの小町谷常孝氏、児玉敦氏にGISデータの編集や計算等に関し、多大な協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水道施設更新指針，日本水道協会，2005。
- 2) 水道事業におけるアセットマネジメント(資産管理)に関する手引き(案)，厚生労働省，2009。
- 3) 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，環境システム研究論文集，Vol.30，pp.257-263，2002。
- 4) 森正幸・稲員とよの・小泉明・渡辺晴彦・沼田篤男：将来の水需要減少を考慮した水道管路の経済的更新計画に関する一考察，環境システム研究論文発表会講演集，Vol.38，pp.107-113，2010。
- 5) 西澤常彦・稲員とよの・小泉明・渡辺晴彦・森正幸：GIS を利用した水道管路ネットワーク構造評価，環境システム研究論文発表会投稿中，2011。
- 6) Walski, T. M. : Water Distribution System Reliability, Proceedings of the AWWA Annual Convention, New York, 1994。
- 7) 西澤常彦：水道 GIS 入門，水道，Vol.48，pp.1-15，2003。
- 8) Warfield, J. N. : Structuring Complex Systems, Battel Monograph, 1974。
- 9) 吉川和広編：土木計画学演習，森北出版，pp.14-19，1985。

- 10) 小泉明・荒井康裕・稲員とよの・新谷政秋・中野直樹：数量化理論を用いた水道管路システムの安全性評価に関する研究，環境システム研究論文集，Vol.35, pp.163-171, 2007.
- 11) 小泉明・荒井康裕・稲員とよの・国寶蒼治・馬野仁史・有吉寛記：水道管路の安全性を評価するメッシュ診断モデルに関する研究，環境システム研究論文集，Vol.36, pp.115-123, 2008.
- 12) 荒井康裕・小泉明・稲員とよの・渡辺晴彦・国寶蒼治・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，環境システム研究論文集，Vol.36, pp.125-130, 2008.
- 13) 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（e-Pipe プロジェクト）報告書，水道技術研究センター，2011.

(2011.5.30 受付)

GIS SUPPORTED RISK ASSESSMENT OF WATER SUPPLY FOR DISTRIBUTION NETWORK

Tsunehiko NISHIZAWA¹, Toyono INAKAZU², Akira KOIZUMI²,
Haruhiko WATANABE³, Yasuhiro ARAI² and Masayuki MORI⁴

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Metropolitan University/ Geoplan Co., Ltd.

²Department of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Metropolitan University

³Central Research Institute, Nihon Suido Consultants Co., Ltd.

⁴Department of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Metropolitan University/ Nihon Suido Consultants Co., Ltd.

This study proposes a method to evaluate risks of water supply shortage in case of pipeline accidents, using GIS (Geographic Information System) from the graph structure of relevant consumer units which are defined as an area of water distribution network enclosed by isolation valves. This study shows a method to quantify the risks of water supply shortage for the each consumer unit, such as total impact on the whole network by the accident in a unit, and separated impact on each consumer units. With this approach, we can visually clarify the relationship among the consumer units in view of the risks of water supply shortage. Finally, case study illustrates the evaluation for this approach applying to a model area and shows a new perspective for a basis of future rehabilitation planning.