

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

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)

水道供給の維持・改善のためには、管路を適切に改良・更新していくことが必要である。膨大な管路から構成される管網の中から改良・更新の対象を選定する場合や、効果的な布設ルートを検討する場合、考え得る全てのケースについて検討を行うことが求められる。しかし管網解析をはじめとする水理解析では実管網への対応が難しく、簡便な代替指標によるアプローチが有効と考えられる。そこで本研究では、管網系の供給能力は管路のつながりに強く規定されることに着目し、ネットワーク構造に基づいた管網系の安定性を表す指標を提案し、同指標を用いた水供給システムの安定性の網羅的な評価手法を提案した。

KEYWORDS : network structure, stability, water supply, evaluation method

1. はじめに

(1)研究の背景

水道の高普及並びに水の大量使用等に伴い、多くの地域で生活・社会活動等に必要の水は水道以外から得ることができない状況となっている。震災時の生命維持や飲料等のためには、ボトルウォーターなどで代用可能であるが、炊事や洗濯、風呂・トイレ用水などは、水道により蛇口からある程度以上の水圧で連続的に供給できることが求められている。水道による水供給が不安定となる状態としては、渇水や水源水質事故など水源系に異常が生じる場合と、地震や管路事故など供給系がしゃ断あるいは機能低下する場合に分けてとらえることができる。水源系の安定化対策としては余裕量の確保や複数化、さらには浄水処理機能の改善などがある。一方、供給系の安定化のためには、安定性の高い配水管ネットワークの構築が必要となる。

現状における多くの水道事業の給水状況は、水源の確保並びに配水管ネットワークの構築において、通常の給水にはほぼ支障がないレベルが確保・維持されている。しかし、供給系については今後の老朽管・経年管の増加並びに他のライフライン系地下埋設物を含めた工事時の管路破損事故発生の危険性の増加などの環境変化を考えた時、劣化した管路の補修・修繕時や破損事故時に対し十分な対応がとれているとは言い難い面がある。

水道管路の設計法は、これまでも青木²⁾、松田³⁾、小出⁴⁾、高桑⁵⁾などにより提案されている。しかし、これらの研究はいずれも格子状のモデル管網をもとにした、いわば理想的な管網形態に関する分析に基づいた最適設計の考え方を示したものであり、既存管網の改良・更新計画に取り入れることはなじまない場合が多い。

そこで著者らは、安定的な水供給のためには、適切に既存の管網を改良・更新することが必要であり、今後到来するであろう大規模な改良・更新時代に限られた財源で対応していく上では改良・更新の優先順位付けが重要となると認識した。そして、水供給へのニーズ並びに需要水量の変化などの環境変化を踏まえて、「配水区域単位」で管路機能を評価し、改良・更新の優先順位付けを行うことを提案した¹⁾。このような管網系全体における配水区域レベルでの改良・更新の優先順位を踏まえて具体的に管路の布設・改良計画を立案するためには、「個々の管路」について配水区域あるいは管網系全体における影響度を評価する必要があると考える。すなわち、“どの管路が破損すると大きな影響が生じるか”を把握することにより、影響の大きな管路から改良を進めることにより全体のレベルアップを図る必要がある。

これまでの管路の布設・改良計画の検討、立案は、管路の属性や管網解析により把握された水理状況に着目する場合が一般的である。すなわち、

管種や布設後の経過年数を基に老朽度を定義し、一律の基準で改良対象管路を選定する場合や、管網解析結果を基に水圧が十分でない地域や流量負荷が大きな管路を把握し、水理的に問題のある地域・管路への対処という観点で管路の増径や新たなルートへの布設を検討する場合が多い。このようなアプローチは、計画立案者の経験や技術に左右される面が見受けられ、断片的な検討に陥る場合もある。

上述の計画立案における問題を回避するために、対象となる管網系において個々の管路が使用不能な場合や考え得る全ての路線に管路を付加した場合を想定し、網羅的に検討を進めることが考えられる。このためには、管路の欠損に伴う影響並びに管路の付加による効果を把握する必要があり、通常、管網解析による水理的な検討が用いられている。管網解析は、計算法の改良及びコンピュータの処理速度・記憶容量等の向上により比較的短時間でできるようになってきている。しかし、実管網について考え得る全てのケースについて解析を行うことは多大な労力・時間を要し、また解析結果の膨大な出力情報を詳細に検討することも難しい面があるため、網羅的な検討を行い難い。

このため、破損による影響が大きな管路、影響を少なくするために効果的な管路を合理的・効率的に探し出すプロセスが有効となると考えられる。

(2)本研究の目的と構成

管網全体の供給能力は個々の管路の通水能力のみに依存するものではなく、管路の配置が重要な要因となる。このため、管路網のネットワーク構造、すなわち管路のつながりに着目することにより、ある程度供給能力を表すことができると考えられる。そして、このようなネットワークの構造のみから導出される簡便な指標により管網系の供給能力の評価が可能であれば、管路の破損や追加に関する網羅的な検討が行えることから、管路の布設・改良計画立案における諸課題への有効なアプローチとなり得ると考えられる。

そこで本研究では、水道管路網のネットワーク構造に着目した管網機能の評価手法を提案することを目的とする。

以下では、まず2.で配水管網の水供給の量的な安定性を、既存の管網系における供給可能水量に対し管路が破損・追加された状態で供給可能な水量の比で表すことを述べ、ついで3.で管網系の水供給の安定性は供給可能な経路の数と各経路の長さ依存することから、管網のネットワーク構造から求められる経路数・経路の長さによる安定性の代替指標を提案し、管網解析との比較によ

り同指標が管網系の水供給の安定性を代替できる指標であることを示す。最後に4.では、ケーススタディを通じた適用事例について述べる。

2. 水供給の安定性指標

水道による水供給は、水質と水圧・水量により表すことができる。このうち、水質は水源の状況と浄水処理施設の機能の問題としてとらえることができる。本研究で対象としている管路網は、浄水の輸送・配分機能を有する施設であることから、ここでは供給系における量的な安定性に着目することとする。

前述のように水道の供給は有圧の連続的な供給を前提としたものである。管路の破損等により管網系全体の通水機能が低下すると、一部の管路への流量負荷の集中により水圧が低下する場合がある。このような場合、水圧低下地区においては取り出し可能水量が低下し、管網系全体の供給水量が低下することとなる。このため、管網系に異常が生じた状態における供給可能水量は、蛇口からの水使用が可能な水圧を確保した状態で供給できる水量として表すことができる。このような認識の基に、本研究では管路欠損時等における水供給の量的な安定性を、管網系全体の通水能力が低下した状態においてどの程度供給可能水量が減少するかよりとらえることとする。すなわち、既存の管網系において供給している総水量に対し一部の管路が無い場合(使用できない場合)の供給可能水量の比が小さい管路が不安定であると考え、同様に管路を追加した状態における供給可能水量の比が大きい管路を効果的な管路と考えることとする。

ここではこの指標を“供給可能水量比”と呼び、(1)式で定義する。なお管網の状態 k における各節点の取出し可能水量 Q_i^k は、全ての節点の水圧 p_i^k が目標水圧以上となるよう各節点の取出し水量を調整して管網解析を繰り返すことにより算出できる。

供給可能水量比

$$Q_{ratio}^k = \sum_{i=1}^n Q_i^k / \sum_{i=1}^n \tilde{Q}_i \quad \cdots \cdots (1)式$$

ただし $p_i^k \geq \bar{P} \quad (i=1,2,\cdots,n)$

ここに

i : 節点を表す添え字 ($i=1,2,\cdots,n$)

k : 管網状態ケースを表す添え字

(管路の破損・追加のケース)

Q_i^k : ケース k における節点 i の取出し可能水量

$\tilde{Q}_i$: 既存管網における節点 i の取出し可能水量

p_i^k : ケース k における節点 i の水圧

(動水位または有効水頭)

$\bar{P}$: 基準とする目標水圧

3. 水道管路網の安定性の評価手法

(1) 管路網のネットワーク構造に基づく指標

①到達スコア

図1に単純な管路網の例を示す。(b)のループ状管路網は末端の節点間を連絡する管路があるのみでいずれか1本の管路が無い場合でも全節点に水供給が可能であり、(a)の樹枝状管路網に比べて管路欠損に対する安定性が高いと言えよう。

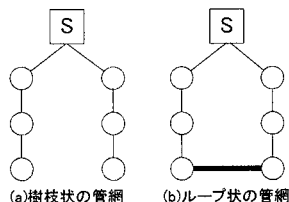


図1 樹枝状管路網とループ状管路網の例

この例に示すように、管路網全体の通水能力は管路のつながりに依存するところが多い。当然、各管路の口径や長さ（距離）、さらには節点の取出し水量（需要水量）により管路系の水理状況は異なることになるが、管路の布設・改良計画の検討においては、まず管路系全体においてネックとなるルートや、効果的な追加ルートの把握・選定が必要となると考えられる。このため、ここでは水道管路網のネットワーク構造のみに着目した管路網の安定性指標の作成を試みることにする。

水道管路網は配水基地（配水池、加圧ポンプ所、配水幹線から配水ブロックへの注入点など）を始点として、各需要地へ水道水を供給する有向グラフとして認識できる。図2に示す管路網モデルは、配水基地Sを始点としてS→b及び①～⑨の10本の管路を介してa～hの8つの節点へ供給するネットワークを示している。S→b、f→g(⑧)、g→h(⑨)の3経路は他の代替経路を持たないが、それ以外はループ構造を成しており、複数管路による流量の分担、ある経路が破損した場合などにおけるルートの代替が可能な形態である。また、①～⑦の7本の管路は両端節点の水圧状況によっては流向が変わることがあり、双方向の流れを考慮することができる。

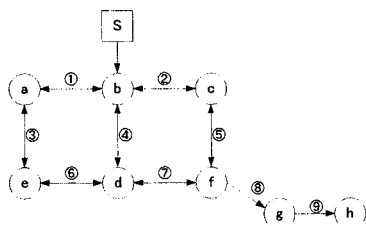


図2 基本管路網

基本管路網について各節点への供給経路は、管路内のエネルギー（水位）収支より同一ループ内での循環はありえないため、双方向の管路については1つの経路中では一方向に限定し、かつ同一節点の通過回数は1回とする。この考え方にもとづくと、例えば配水基地Sから節点aへの供給可能な経路は、下に示す3つの経路となる。また、管路②及び④が同時に破損した状態では、節点aへの供給可能な経路は“S→b→(①)→a”の1経路のみとなる。

【基本管路網における節点aへの供給可能な経路】

S→b→(①)→a
S→b→(④)→d→(⑥)→e→(③)→a
S→b→(②)→c→(⑤)→f→(⑦)→d→(⑥)→e→(③)→a

このように抽出される各供給可能経路については次のように考えることができる。

- ・ある節点への供給可能な経路が複数あれば、供給の安定性は高くなる。
- ・配水基地から節点までの管路の本数が多いほど、当該経路の事故等の危険性は高まる。

この考え方を基に、管路網のネットワーク構造を基にした水供給の安定性を表す指標（到達スコア）を次のように定義し、(2)式で表すこととする。

【到達スコアの定義】

- 各節点に配水基地から至る到達スコアは、各経路の管路の本数に反比例する。
- 配水基地からある節点への経路が複数ある場合の到達スコアは、各経路の到達スコアの和とする。
- 管路系全体の到達スコアは、全節点の到達スコアの総和とする。

到達スコア

$$RS^k = \sum_{i=1}^n \sum_{l \in UI} 1/L_{i,l}^k \cdots \cdots (2) \text{式}$$

ここに i：節点を表す添え字 (i=1,2,……,n)

k：管路状態ケースを表す添え字

(管路の破損・追加のケース)

UI：配水基地から節点iに至る経路の集合

l：経路を表す添え字

$L_{i,l}^k$ ：ケースkにおける配水基地から節点iに至るl番目の経路の総管路数

②到達スコアの算定方法

到達スコアは、配水基地から各節点に到達する全経路について、それぞれの管路数を数え上げることににより算定できる。この数え上げは、管路内の管路の流向を考慮した節点間の隣接行列を作成し、これをもとに配水基地Sから1経路で到達する節点を探索し、次に当該節点から1経路で到達する節点を順次探索してゆき、この探索を最下流となる節点に至るまで繰り返すことにより求める

ことができる。

$$A = \begin{array}{c|cccccccc} & \text{下流側} & & & & & & & \\ & S & a & b & c & d & e & f & g & h \\ \hline S & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ d & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ e & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

上流側

図3 隣接行列の表示例(基本管網)

図2の基本管網を基に作成した図3の隣接行列を例にとれば、まず配水基地Sから1経路で到達する節点として節点bが探索され、次に2経路で到達する節点として節点bの下流側節点となる節点a,c,dが探索されることとなる。さらに3経路で到達する節点は、節点aに対しては節点e、節点cに対しては節点f、節点dに対しては節点eとfが探索される。このとき、節点bは節点a,c,dの下流側と位置づけられるが、前項①での定義により同一経路中において2回通過するため(例)S→b→a→b)除外されることとなる。図3の隣接行列より各節点への管路数ごとの経路数を求めた結果が表2であり、これより同表最下段に示すように到達スコアが算定できる。

なお、管路破損時の到達スコアの算定は図3の隣接行列において破損箇所の管路について隣接関係をオフに(1を0に)することにより対応できる。同様に管路追加時には節点の隣接関係をオンに(0を1に)することにより求めることができる。

表2 到達スコアの算定例(基本管網)

	各経路の 管路数	節点名							
		a	b	c	d	e	f	g	h
経路数	1本		1						
	2本	1		1	1				
	3本					2	2		
	4本	1		1	2			2	
	5本					1	1		2
	6本	1		1				1	
	7本								1
到達スコア		0.92	1.00	0.92	1.00	0.87	0.87	0.67	0.54
到達スコア 総合計		6.776							

(2)到達スコアの有効性の検証

ここでは、(2)式で定義した到達スコアと(1)式で提案した水供給の安定性指標となる供給可能水量比を比較し、到達スコアの有効性を検証する。検討の対象とした管網は、図2の基本管網を基に①～⑨の各管路が1本ずつ破損した場合、及び同時に2本が破損した場合の46ケースを取り上げた。また、配水基地Sからbに至る管路については、破損しないものとして取り扱っている。なお、管網解析においては、各節点の取出し水量を $q=10$

ℓ/sとし、各管路の口径、長さ、流速係数はそれぞれ $D=\phi 200\text{mm}$ 、 $L=500\text{m}$ 、 $C=110$ とした。

到達スコアと供給可能水量比のプロットは図4の通りとなり、両指標の相関係数は $r=0.77$ となった。また、同図に示すように到達スコアの大小関係は供給可能水量比の大小関係ともかなりの割合で合致している。これより、到達スコアは管網解析による水理的特性を十分に表しており、管網の構造のみに着目した指標によっても管網系の水供給の安定性を代替できると判断できる。

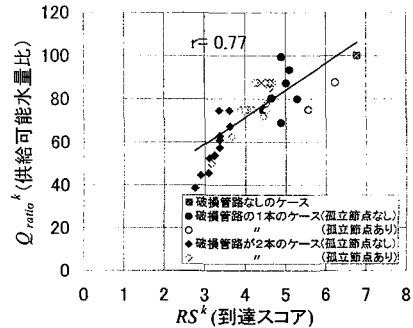


図4 基本管網を基にした到達スコアと管網解析による供給可能水量比のプロット

なお、管網の形態は図1に示したように樹枝状管網とループ状管網に区分でき、またループ状管網はループの構成から口型、日型、田型などに分けてとらえることができる。図2で示した基本管網は、これらのうち樹枝状管網と日型のループ状管網を組合せたものであり、一般的な管網を単純化したものとして取上げている。また、田型管網(管網数4のループ状管網)についても図4と同様の検討をした結果、相関係数 $r=0.74$ を得ている。

(3)管路の追加による到達スコアの変化の検討

つづいて、管路の追加による到達スコアの変化について検討する。ここでは図2の基本管網において管路1本を追加するケースとして、配水基地Sからbを除く7つの節点到管路を追加する7ケース(⑪～⑰)を設定し、各ケースにおいて全管路が存在している状態及び①～⑨の既存管網の内いずれか1本が破損した状態を想定した。

各ケースの到達スコアは図5の通りとなる。同図に示すように、⑪～⑰管路の追加によりいずれの管路破損ケースにおいても到達スコアは向上しており、新たな管路の追加により水供給の安定性が向上することがわかる。また、管路破損ケースの中では、⑧、⑨のケースの到達スコアはほとんどの管路追加ケースにおいて①～⑦に比べて高く、管網末端部分の破損が管網系全体に与える影響が小さいことが把握できる。

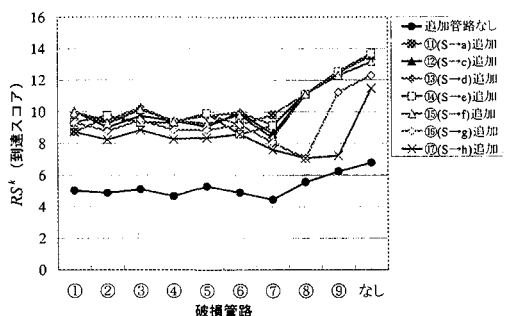


図5 管路の追加による到達スコアの変化

さらに、g あるいは h への直接経路を確保する⑩ならびに⑪の管路追加は、⑧管路破損時、⑨管路破損時においても g、h への水供給経路を確保することとなるが、管網系全体の安定性向上の視点では効果が小さく、網目状管網を形成する節点 a～f への直接経路を確保する場合の効果が高いことが把握できた。

4) 水供給システムの安定性の評価手順

以上を基に、水供給システムの安定性の評価手順を示すと図6となる。この手順の中で、管路破損ケース、管路追加ケースの設定は、基本的には機械的に管網モデルの全管路を対象として行うことが考えられるが、極端に管路数が多い場合はモンテカルロ・シミュレーションにより行うことや、同一グループと見なせる節点・管路群が存在する場合は検討ケースを絞ることも有効と考える。さらに事前に配水ブロック化⁶⁾を検討し、幹線管網と支管網に階層分割しておくことも有効と考える。

なお、管路追加ケースで到達スコアが同等程度のケースについては、費用対効果の視点から布設延長の短いルートを採用するなどの配慮が必要と考える。

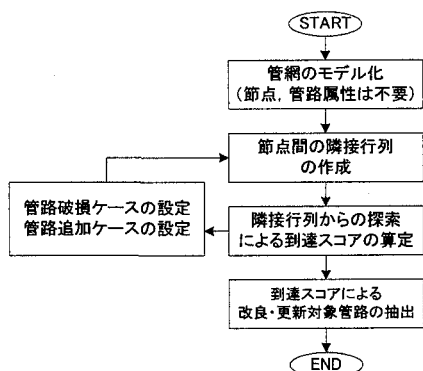


図6 到達スコアを用いた評価手順

4. ケーススタディ

A 市 B 配水区を対象としてケーススタディを行った。対象とした配水区は、一日当たり配水量が 20,000m³/日であり、図7に示すような形状となっている。作成した管網モデルはφ150mm～φ500mmの管路で構成されており、節点数は47、管路数は57である。事前に行った管網解析では、節点30の動水位が最も低く、配水基地Sから約10mの損失水頭が生じている。また有効水頭は節点4が最小であり、16mとなっている。

まず、管網モデルより節点間の隣接行列を作成し、57本の管路それぞれ1本が破損した状態での到達スコアを算定した。図7には各管路の破損時における到達スコアをランクごとに区分して示している。同図に示すように配水基地S付近の到達スコアが低く、管網上流部の管路の破損が管網系全体に与える影響が大きいたことが示されている。また27→20の管路は、大きなループを構成する位置づけにあり、この管路の破損による到達スコアの低下が大きいたことが特徴的である。

つづいて、到達スコアを改善するためにはどこに新たなルートを布設すべきかについて検討するために、管路破損時の到達スコアが小さかった37→19管路及び27→20管路破損時について検討を行った。

図8にそれぞれのケースにおいて到達スコアの改善効果の高かった6ルートについての結果を示している。両ケースに共通して効果の高かったのは②(37→5)であり、既存2管路の破損により供給経路が減少する節点1～18等への供給を補完・改善できるルートとなる。また①(37→20)の追加は、節点20への供給を確保するバイパス管として位置づけられるが、いずれのケースにおいても既存管網よりも到達スコアが改善されている。さらに①、②ルート以外では、③(37→25)を追加する場合は、37→19管路破損時に対しては既存管網と同等程度の到達スコアであるが、27→20管路破損時に対しては到達スコアが2ポイント以上向上し、安定性向上の効果が高くなる。これは、③管路の追加により管網図右側の節点群への供給経路が確保できることによると考えられる。また、④(37→22)の追加は、27→20管路破損時に対して効果が高いが、37→19管路破損時に対しては、既存管網の到達スコアより低い結果となった。これは、④ルートは37→19管路の機能を補完・代替できないことを示すものであり、限られたケースに対し効果的なルートといえる。

このような検討により、管網のネットワーク構

造に着目した検討によって、事故時や補修・修繕時など管路が使用できない場合に水供給に大きく影響する管路の抽出並びに効果的な管路布設ルート
 の検討が行い得ることが示されたと考える。

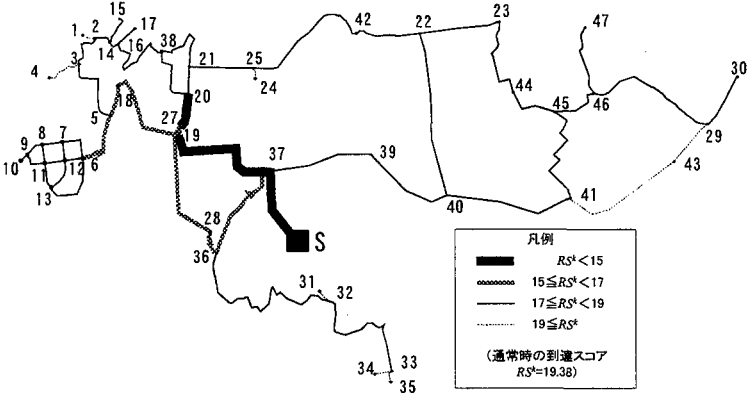


図7 ケーススタディ対象管網と各管路破損時の到達スコア

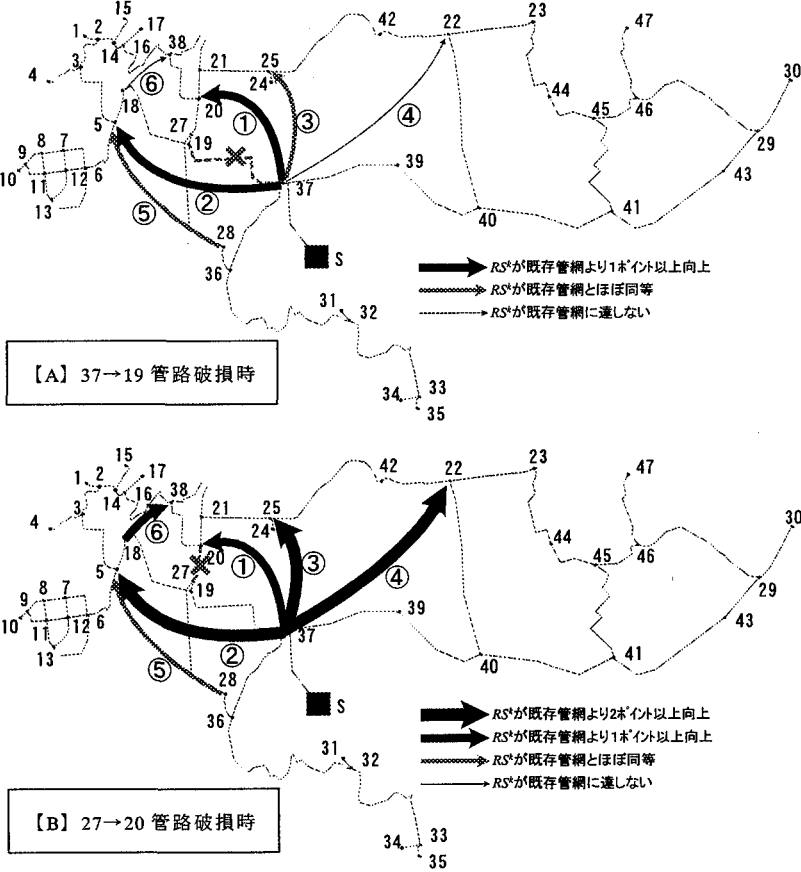


図8 管路破損時に対し効果的な追加ルート

5. おわりに

管路の改良・更新計画を検討・立案する上では、多数の管路・ルートの中から、まず、管網系全体においてネックとなるルートや効果的な追加ルートの把握・選定が重要である。このため本研究では、管網系の供給能力を規定する重要な要因である管路のつながりに着目した指標により、網羅的に水道の水供給システムの安定性を評価するための評価方法を提案した。

まず、水道の水供給に求められる安定性の概念について述べ、これを表す水理的な指標を定義した。そして、管網の隣接関係のみに着目した安定性指標として“到達スコア”を提案し、同指標と管網解析より得た水理指標を比較することにより、到達スコアによって管網系の水供給の安定性を代替できることを示した。さらに、到達スコアを用いた評価手順として、節点の隣接行列より到達スコアを総当たりの求め、検討することにより改良・更新の対象とする管路を抽出する手順を示した。

ケーススタディでは節点数 47、管路数 57 の A 市 B 配水区の管網に同手順を適用し、破損等による管路欠損時に影響の大きい管路群を抽出した上で、これらのネックとなる管路欠損時に対し水供給の安定性を向上させることができた。

本研究の次のステップとしては、管路の老朽

度や埋設環境などの事故や破損につながる要因を取込んだ確率的なアプローチが考えられる。また、管路の口径や長さをリンクの重みとして扱うことも課題と考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(株)日水コン・大石哲司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) 小棚木, 小泉, 渡辺: 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
- 2) 青木: 上水道の配水管網の設計に関する研究 (I), 水道協会雑誌, Vol.310, pp.43-46, 1960
- 3) 松田: 上水道送配水管路の設計法と計算例, pp.157-162, 1972
- 4) 小出: 配水管の作業と配水管のあり方, 新潟県水道コンサルタント協会, 1987
- 5) 高桑: 配水管網の解析と設計, pp.278-298, 1978
- 6) 今田, 小棚木, 山田: 配水ブロックシステムの計画手順とブロック境界の設定に関する研究, 水道協会雑誌, Vol.71 No.810, pp.2-18, 2002

A Study on Evaluation Method for Stability of Water Supply System based on Network Structure

Osamu ODANAGI, Akira KOIZUMI, Haruhiko WATANABE

Sustaining water supply requires appropriate improvement and renewals in actual pipe network system. In case of selecting a target pipe to improve or renew from enormous pipes and finding an effective additional route, it is desirable to examine all possible cases. Although hydraulic pipe network analysis gives information about hydraulic illness of the system under the given condition, it does not support enumerating all possible cases of condition. Therefore systematic enumeration approach using simple and easy way substituting for hydraulic evaluation is required.

This paper assumes that water supply performance is strongly described by connection structure of pipe network, and discusses new index that shows water supply stability of network system. Assumption is verified by correlation with hydraulic index. Methodology for seeking pipe to be improved is shown through explicit enumeration process.