

入力変動を考慮したネットワークの 機能評価法による配水管の重要度評価

千葉 利晃¹・西崎 耕造²・浅埜 正人³

¹ 正会員 工博 福山大学教授 工学部土木工学科 (〒729-02 広島県福山市学園町一番地)

² (株) クボタ 鉄管品質保証部 (〒555 大阪市西淀川区西島 2-1-6)

³ (株) クボタ 水情報システム部 (〒661 大阪市浪速区敷津東 1-2-47)

上水道管路の重要度を評価しておくことは、耐震性の低い管路を耐震化する場合とか、地震などにより大被害を被った場合の復旧時の優先順位の決定などに必要となる。本報告はこの管路の重要度評価方法を検討したものである。評価方法は、流量や動水位などを出力とし、管路の流速係数などを入力としたネットワークの入出力を考え、出力を入力の変動量の1次近似としたネットワークの表現法を使用している。簡便であるのみならず復旧対策や将来計画の検討など、応用範囲は広いものと思われる。

Key Word : Network Analysis, Water Supply Network, Degree of Importance

1. まえがき

上水道管路の耐震性を向上させ地震被害を低減するための耐震対策を施す場合、耐震性の低い管路を一度に総て耐震管路にすることは極めて難しい。また、地震により大被害を被った場合、どの管路から先に復旧するかも問題になってくる。これらはすべて重要な管路とそうでない管路を把握しておく必要があることを示している。一般的には配水管に近い幹線管路が重要ではあるが、配水管路はネットワーク構造であり単純ではない。特にブロック化されていず、複数の配水池より構成される場合、管路の重要度を把握することはより複雑な問題となる。

管路の重要度評価については、最短経路問題（ダイクストラ法）を利用した方法を前に発表した^{1, 2)}。また、ある管路が被害を受けたと仮定し、この管路を削除して管網解析を行なってその時の断水率を求めて管路の重要度を評価した。これら両者の比較も行なっている。管網解析を行なって重要度を評価するには、すべての管路に対して1度ずつ管網解析を行わなければならない、非常に煩雑な解析を必要とする。ダイクストラ法による評価法は、重要度の評

価そのものには簡便であり有用であるが、それ以外の応用性は低い。

本報告はこの管路の新しい重要度評価方法を検討したものである。評価方法はネットワークの入力変動を考慮したネットワークの機能評価法を用いている。

2. 配水管の重要度評価法³⁾

以下、上水道管網を例にとりて説明する。詳細は文献3)を参照頂きたい。

ネットワークが m 個の節点および n 個の管路より構成されているものとし（図-1 参照）、各管路の機能を表す流量、流速あるいは動水位などの内のどれかを出力 y_i とする。また、口径、管路長、流速係数などのどれかを入力 a_{ij} とする。ここで、管路の能力が低下した場合を考える。流速係数などのこの入力が平常時の値より能力が低下した量を入力の変動量 (x_{2j}) と考えると、入力と変動量の関係が次のように表せる。

$$y_i = y_{i0} + f_i(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}, \dots, x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pm}) \\ ; i = 1, 2, \dots, n$$

(1)

ここで、 y_{i0} はすべての i, j に対して $x_{ij} = 0$ のときの出力、すなわち、平常時のネットワークの出力である。この入力 α_{ij} が x_{ij} だけ変動した場合のネットワークの出力 y_i を次のように仮定する。

$$y_i = y_{i0} + \alpha_{i11}x_{11} + \alpha_{i12}x_{12} + \cdots + \alpha_{i1n}x_{1n} \\ + \alpha_{i21}x_{21} + \alpha_{i22}x_{22} + \cdots + \alpha_{i2n}x_{2n} \\ \vdots \\ + \alpha_{ip1}x_{p1} + \alpha_{ip2}x_{p2} + \cdots + \alpha_{ipn}x_{pn} \\ ; i = 1, 2, \dots, n$$

(2)

ここで、 α_{ij} は定数である。式 (2) を x_{ij} で偏微分すれば、

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_{kj}} = \alpha_{ikj} \quad ; i = 1, 2, \dots, n \\ ; j = 1, 2, \dots, n \quad ; k = 1, 2, \dots, p$$

(3)

となり、式 (2) は次のように表せる。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} y_{10} \\ y_{20} \\ y_{30} \\ \vdots \\ y_{n0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_{11}} & \frac{\partial y_1}{\partial x_{12}} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_{11}} & \frac{\partial y_2}{\partial x_{12}} \\ \frac{\partial y_3}{\partial x_{11}} & \frac{\partial y_3}{\partial x_{12}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_n}{\partial x_{11}} & \frac{\partial y_n}{\partial x_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ \vdots \\ x_{1n} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_{13}} & \cdots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{1n}} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_{13}} & \cdots & \frac{\partial y_2}{\partial x_{1n}} \\ \frac{\partial y_3}{\partial x_{13}} & \cdots & \frac{\partial y_3}{\partial x_{1n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_n}{\partial x_{13}} & \cdots & \frac{\partial y_n}{\partial x_{1n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ \vdots \\ x_{1n} \end{bmatrix}$$

(4)

j 列は j 管路の入力が変化したときの、各管路の出力 y_i ; $i=1, 2, \dots, n$ の変化の割合を示している。したがって、 j 列の縦 Norm を $N_{c,j}$ とすれば、

$$N_{c,j} = \sqrt{\left(\frac{\partial y_1}{\partial x_{kj}}\right)^2 + \left(\frac{\partial y_2}{\partial x_{kj}}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y_n}{\partial x_{kj}}\right)^2}$$

(5)

の大きい列 (管路) ほど重要な管路と考えることができる。

i 行は各管路の入力が x_i ; $i=1, 2, \dots, n$ だけ変化したとき、対象とする行の出力の y_i の変化の割合を示している。したがって、 i 行の横 Norm を $N_{r,i}$ とすれば、

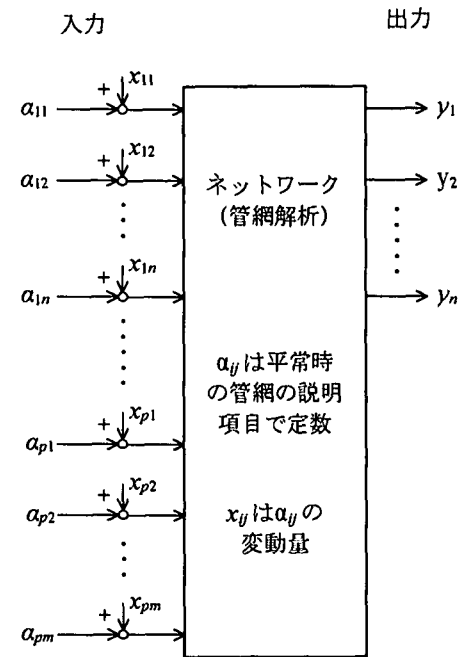


図-1 ネットワークの入出力

$$N_{r,i} = \sqrt{\left(\frac{\partial y_i}{\partial x_{k1}}\right)^2 + \left(\frac{\partial y_i}{\partial x_{k2}}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y_i}{\partial x_{kn}}\right)^2} \quad (6)$$

の大きい管路ほど他の管路の影響を受け易い (感度の高い) ことを示している。

式 (5), (6) より、式 (4) の係数を求めておけば、簡単に各管路の重要度や感度を評価することができよう。

管網解析を用いて管路の重要度を評価しようとする、被害を受けた管路を削除して行なわなければならない。ある管路を削除した場合、孤立管路が存在する場合には、これらの孤立管路を総て削除して管網解析を行なう必要がある。上記機能評価法も管網解析を用いて係数を求めることになるが、管路を削除する代わりに、管路の能力が低下したものとみなして解析を行なっているので、管路を削除する必要が無くプログラムを組む上でも単純であり、一度求めておけばよいという大きな利点がある。

3. 数値解析例

配水池が2つあり、28の管路よりなる簡単な管網のモデル (図-2) を用いて、上記評価法の妥当性を検討する。2つの配水池の地盤高はそれぞれ 45m、40m であり、その容量は1つの配水池のみからでも

必要水量を満たすことが可能な容量をもつものとしている。

まず、ある1つの管路に被害が発生したとして、この管路を削除した場合の各節点の動水位を管網解析を行ない、各節点の取り出し水量が確保できるかを求めた。各節点の動水位が10m以上であれば必要な取り出し水量が確保でき、10m以下であれば完全断水、動水位が10m～20mの間は比例配分によった。この仮定によって確保できる水量と平常時の必要全水量の比で断水率を求めたものが図-3である。図には断水率が大きくなる管路の上位10管路を示している。この図から、管路番号L05が被害を受ける場合が最も断水に与える影響が大きく、断水率は4割を超えている。配水池に直結したL1およびL2管路が最も重要な管路のように思われるが、L05管路などの方が重要度は高いものと評価されている。これは1つの配水池が使用不能になっても、他の配水池より水を供給することができるようバックアップされている結果であろう。

図-4は本手法による評価結果であり、式(4)の偏微分係数を求め、式(5)の縦Normを求めた後、これを重要度の大きい方から順番に15の管路までを示したものである。縦軸はこれらの縦Normの累積であり、1に正規化して示している。縦Normの大きいものほど重要度が高いことを示すので、管

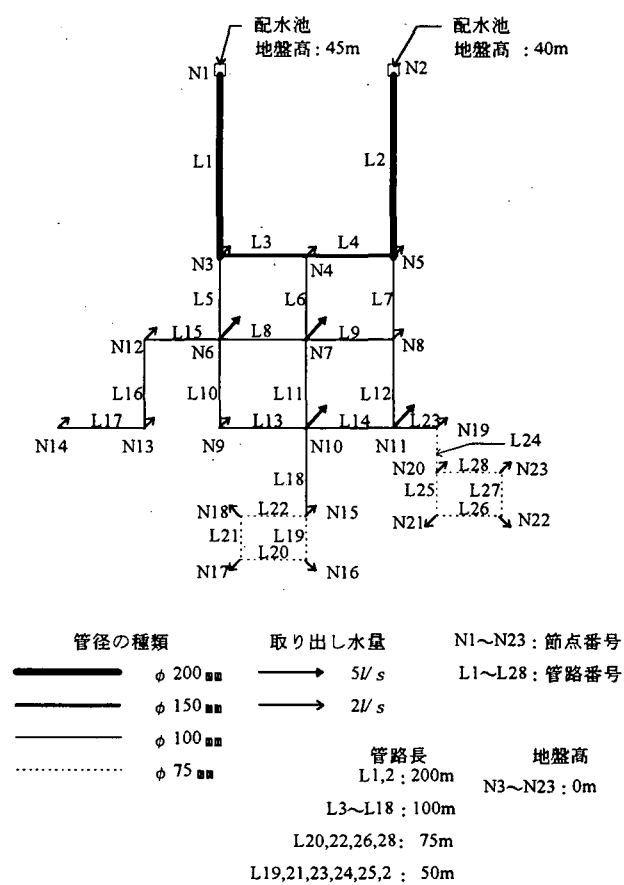


図-2 モデル管網図

路番号L05が最も重要であることを示しており、先の管網解析の結果と一致している。重要な上位5管

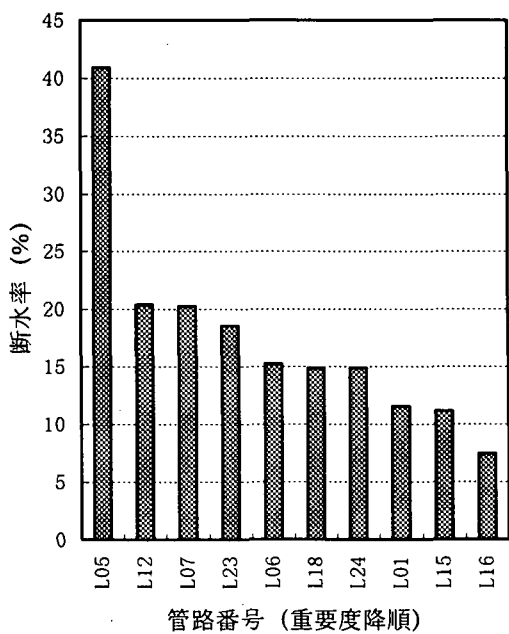


図-3 管路の削除による断水率 (管網解析結果)

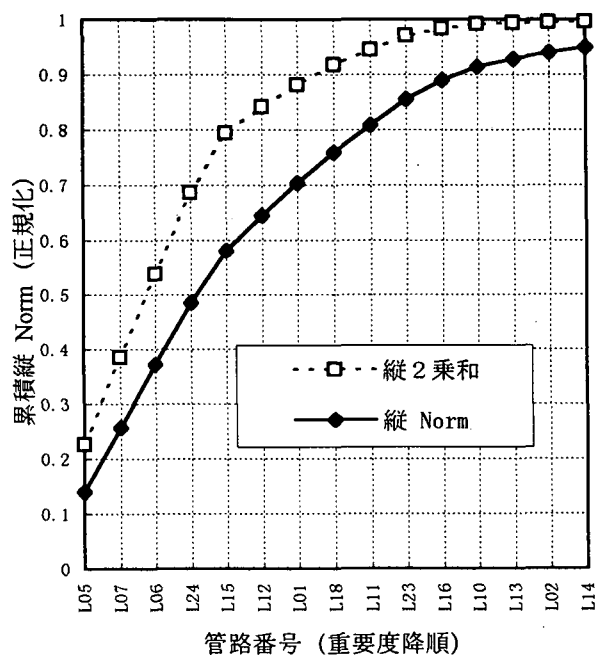


図-4 偏微分係数の縦Normと縦2乗和

路は L05, L07, L06, L24, L15 である。一方、管網解析による重要な上位 5 管路は L05, L12, L07, L23, L06 であり、これらを示したものが図-5 である。L05, L07, L06 の 3 つの管路は、本手法によっても管網解析によっても上位 5 位以内に入る重要な管路とみなされている。本手法による L23 の重要度は 10 番目であり L24 は 4 番目であるが、管網解析による重要度評価はそれぞれ 4 番目および 7 番目となっている。両手法ともこれらの管路の重要度はかなり高いものと評価しているとみなしてよかろう。また、これらの管路は隣り合う直列管路でもあり、本手法による重要度評価は管網解析による評価と大差ないものと考えられよう。一方、本手法による L15 の重要度は 5 番目であり L12 は 6 番目であるが、管網解析による重要度評価はそれぞれ 9 番目および 2 番目となっている。若干重要度の順位に差は見うけられるが、重要な管路であると評価されているとみなせよう。実際のより複雑な管網を解析して検討を加える必要はあるが、今回のような複数の配水池よりなる配水管網についても、管路の重要度評価を本手法によって行なうことができると結論してもよさそうである。

図-4 はまた、10 管路数程度で全体の 9 割近い情報を含んでいることを示している。したがって、実際の配水管網の解析においては、本手法を用いて解析用管網の簡素化も行なえることを示していよう。また、紙面の都合で省略したが、本手法により、他の管路の影響を受け易い管路も推定できるなど、応用範囲は広い。

4. あとがき

配水管はネットワークで構成されており、その重要度を評価する簡便な方法が望まれている。本手法は、平常時の管網より式(4)の係数行列を求めておけば、管路の重要度だけでなく、影響を受け易い管路などの評価も行なえる。係数行列は管網解析により求めることになるが、平常時の管網に対して求めておけばよく、管路を削除して管網解析を行なう必要はなく、自動化が可能である。都市によって

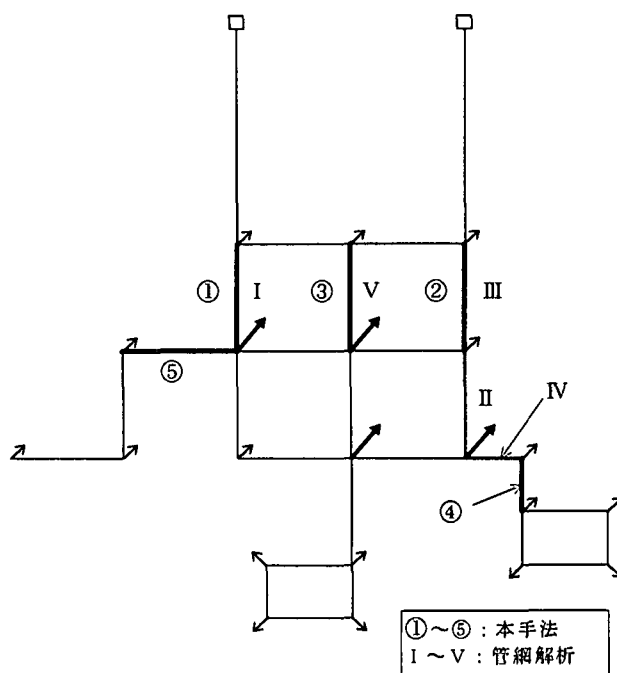


図-5 本手法および管網解析による重要度の比較

は配水管網はブロック化されておらず、複数の配水池より水を供給している場合がある。このようなネットワークに対しても、重要度の評価などが可能である。したがって、管網の耐震化の検討や将来の管網の改善策の検討など、応用範囲は広く、有用性は高いといえよう。

参考文献

- 1) 千葉、清水：水道管網の重要度評価と供給支障率予測，第22回地震工学研究発表会講演概要，土木学会耐震工学委員会，1993. 7，pp. 739-742
- 2) Chiba, Shimizu : "Forecasting of Supply Interruption Rate Under Multiple Damages in Water Supply Network", P. D. Spanos, Y.-T. Wu (Eds.), Probabilistic Structural Mechanics: Advances in Structural Reliability Methods, 1994, pp. 120-133
- 3) 丸山、西崎、浅埜、千葉：「入力変動を考慮したネットワークの機能評価法」、水道協会雑誌，pp. 20～28，1996. 8