II-403　配水管事故要因の階層化とその利用に関する研究

神戸市水道局　正員　林　一平
神戸市水道局　正員　安藤 伸雄
神戸市水道局　正員　村尾 正信
神戸大学工学部　正員　宮本 文穂

1．まえがき：配水管事故は、一般的に種々の要因が複雑に絡み合って発生している場合が多く、従来の研究は、要因分析が主であった。しかし、配水管事故に係わる各要因間の相互関係については、ある程度の知見が得られているので、経験・知識等による配水管事故の危険度評価について研究を進めている。今回、その前段階として水道技術者へのアンケート調査を利用して事故要因間の関連性をシステム工学的に階層化し、下位要因の定性的・定量的情報から上位要因に及ぼす影響が推定可能なあいまい階層構造モデル(多層階有向グラフ)[1]（以下階層モデルと略記）を構築した。階層モデルは、事故要因間の相関関係に対して技術者の経験や主観を反映させることができ、これらを階層化して示すものであり、その作成概念図は、図１に示すようになる[2]。

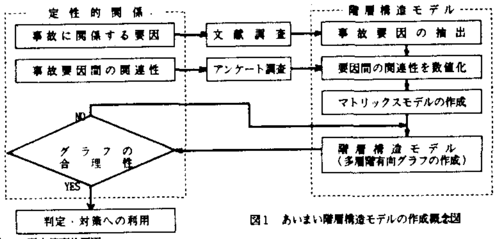

図1　あいまい階層構造モデルの作成概念図

2．配水管事故要因の階層化：まず、図１に示す手順に従って、階層モデルにおいて頂点(接点)となる事故要因を決定する。本研究では、配水管事故の発生において必要と思われるものを全て網羅するように、表１に示す35個の要因を選定した。次に、階層モデルの頂点(接点)間を連結する"線"で表わされる要因間の関連性の強さを、数値f_rで定量化する。ここでf_rは、技術者へのアンケート調査から値域［0,1］で与えるものとした。アンケート調査の回答の選択肢は「0:不明(判断できない)」「1:影響があると断定できる」「2:影響があるとほぼ断定できる」「3:影響があると考えられる」「4:やや影響があると考えられる」「5:影響がない」の６項目とした。本研究では、アンケート調査における選択肢の定義に内在するあいまいさ及び、回答に技術者の経験・主観等によるあいまいさが含まれることを考慮し、各要因間の関連性の強さの合理的決定手法として、Dempster & Shafer理論における基本確率としてこれらを取り扱い、２項間の代表値及びあいまい度を求めた[3]。すなわち、各質問項目ごとに「0:」の回答をあいまい量として除外し、「1:」を100、「2:」を75、「3:」を50、「4:」を25、「5:」を0.0として集計し、その平均値X_{ave}と標準偏差σから、各質問項目が示す状態を式(1)で表現した。これを主観的あいまいさの取り扱いに適用されているファジー集合論の帰属度関数μ(X)と対応させて、基本確率の要素{0} {25} {50} {75} {100}における上界確率として表現すると、式(2)に示すようになる。なお、各要素と基本確率の関係は図２に示すようになる。基本確率の性質から式(3)が得られる。ここで mは、( )内の要素を支持する確率である。定義により各基本確率は､0.0～1.0の実数でなければならないので式(3)より条件式(4)が成立する。ここで基本確率 m({abcde})は、あいまい量が最大になるように、式(4)で与えられる値の最大値をとるものとする。これらの条件の操作により、最終的に15個(図２参照)全ての基本確率を求めることができる。図２で示されるように基本確率は、ある距離を移動しうる確率値であり、移動距離と基本確率の積の総和をあいまい度と定義し、式(5)で表わすものとする。また、要因相互の２項間の関連性の強さa(i,j)を代表値と呼び、代表値は、各基本確率の0.0点からのモーメントの総和とし式(6)で表わすものとする。このようにして得られる各要因間の関連性の強さ(a(i,j))及びそのあいまい度(b(i,j))を行列で表わしたものを、あいまい従属行列と呼び、式(7)のように表わす。ここで、$S_1, S_2 S_3, S_4 \cdots S_n$は、

表1　配水管事故要因

1	管体の損傷	10	埋戻し土の種類	19	地下水位	28	管内流水の水質
2	継手のゆるみ	11	地盤状態	20	土壌の通気性	29	管内流水の流速
3	支持条件の変化	12	管基礎の有無	21	地質の差異（変化）	30	鋳造方法
4	土荷重	13	地盤の不同沈下	22	迷走電流	31	鋳鉄材質
5	自動車荷重	14	他工事の有無	23	外面塗装	32	鋳造時の規格
6	内面腐食	15	交通量	24	内面塗装	33	埋設経年
7	外面腐食	16	道路勾配	25	電食対策	34	口径
8	埋設深度	17	管内外の温度差	26	管内流水の水圧	35	継手形式
9	土質	18	土壌の腐食性	27	管内流水の水撃圧		

$$\mu(X) = (1 - m'(\{abcde\}))\exp[-\{(X - X_{ave})/\sigma\}^2] \quad \cdots\cdots (1)$$

m'({abcde})：全回答に占める回答「0」の割合
Xave　：平均値
σ　：標準偏差

$$\begin{aligned} P(\{a\}) &= \mu(0) \\ P(\{b\}) &= \mu(25) \\ P(\{c\}) &= \mu(50) \\ P(\{d\}) &= \mu(75) \\ P(\{e\}) &= \mu(100) \end{aligned} \quad \cdots\cdots (2)$$

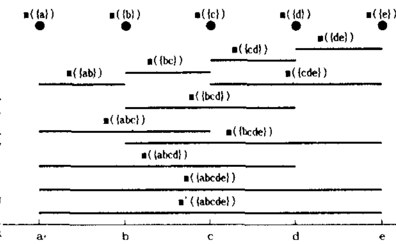

図2　各要素と基本確率

表１に示す事故要因である。a(i,j)は、事故要因S_iが事故要因S_jに与える影響の大きさ(関連性の強さ)を示しており、階層モデルは、有向グラフとなるが階層モデル作成にあたって、行列Ａに次の３条件を満足させることと、代表値閾値Ｐとあいまい構造パラメータλの値を変化させて最も合理的と考えられる階層モデルを選定しなければならない。

：①あいまい非反射律が成立する。②あいまい非対称律が成立する。③あいまい半推移律が成立する。

ここでＰは関係の有無の境界となる値であり、λはファジー補集合、ここでは関係がないという集合$\bar{F}$への帰属度$f_{\bar{F}}(S_i,S_j)$を制御する変数である。$f_{\bar{F}}(S_i,S_j)$はλを用いて式(8)で定義される。

$$
\begin{aligned}
&m(\{a\})+m(\{ab\})+m(\{abc\})+m(\{abcd\})+m(\{abcde\})=P(\{a\})\\
&m(\{b\})+m(\{ab\})+m(\{bc\})+m(\{abc\})+m(\{bcd\})\\
&\qquad +m(\{abcd\})+m(\{bcde\})+m(\{abcde\})=P(\{b\})\\
&m(\{c\})+m(\{bc\})+m(\{cd\})+m(\{abc\})+m(\{bcd\})\\
&\qquad +m(\{cde\})+m(\{abcd\})+m(\{bcde\})+m(\{abcde\})=P(\{c\})\\
&m(\{d\})+m(\{cd\})+m(\{de\})+m(\{bcd\})+m(\{cde\})\\
&\qquad +m(\{abcd\})+m(\{bcde\})+m(\{abcde\})=P(\{d\})\\
&m(\{e\})+m(\{de\})+m(\{cde\})+m(\{bcde\})+m(\{abcde\})=P(\{e\})\\
&m(\{a\})+m(\{b\})+m(\{c\})+m(\{d\})+m(\{e\})+m(\{ab\})\\
&\qquad +m(\{bc\})+m(\{de\})+m(\{abc\})+m(\{bcd\})+m(\{cde\})\\
&\qquad +m(\{abcd\})+m(\{bcde\})+m(\{abcde\})=1-m'(\{abcde\})
\end{aligned}
\quad \cdots\cdots (3)
$$

$$
\begin{aligned}
&\max\{0,P(\{a\})+P(\{e\})-(1-m'(\{abcde\}))\}\leqq m(\{abcde\})\\
&\leqq \min\{P(\{a\}),P(\{b\}),P(\{c\}),P(\{d\}),P(\{e\})\\
&,(P(\{a\})+P(\{b\})+P(\{c\})+P(\{d\})+P(\{e\}))/4\\
&\qquad -(1-m'(\{abcde\}))\}
\end{aligned}
\quad \cdots\cdots (4)
$$

$$b(i,j)=\Sigma(m\cdot L) \quad \cdots\cdots (5)$$

b(i,j)：あいまい度
m ：要素ｉ，ｊの各基本確率の確率値
L ：基本確率mの移動量（$0.0\leqq L\leqq 1.0$）

$$a(i,j)=\Sigma(m\cdot L_o) \quad \cdots\cdots (6)$$

a(i,j)：代表値
m ：要素ｉ，ｊの各基本確率の確率値
L_o ：基本確率mの0.0点からの距離（$0.0\leqq L_o\leqq 1.0$）

$$
\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{cccccc} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & \cdots\cdots & S_n \end{array} \\
A=\begin{array}{c} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ \vdots \\ S_n \end{array} & \left[\begin{array}{c} \\ \\ a(i,j) \\ \text{or} \\ b(i,j) \\ \\ \end{array}\right]
\end{array}
\quad \cdots\cdots (7)
$$

$$f_{\bar{F}}(S_i,S_j)=\frac{1-f_F(S_i,S_j)}{1+\lambda\cdot f_F(S_i,S_j)} \quad \cdots\cdots (8)$$

（ただし、$-1<\lambda<\infty$）

階層モデル作成の具体的実行は、まずアンケート調査に先だち、上層階要因の関連を図３のように設定する。すなわち、配水管事故は、最終的に「管体の損傷」と「継手のゆるみ」を生ずる可能性で評価するものとする。次いで、式(7)の各要因間の関連性の強さを表わす行列を種々のＰ、λのもとで上述の３条件を満足するように修正を繰返し各要因の従属関係を得ることにより、図３の下位にくる要因をグラフ化する。以上の階層モデル構築の過程で次の点が明らかになった。すなわちあいまい行列Ａはアンケート調査に基づいているが、アンケート調査は各行に対して調査したため、あいまい従属行列Ａの列内の合理性は、行内の合理性に比較してやや欠ける傾向が見受けられた。このため、最上層が図３に示す要素番号以外にも生じた場合、次に定義するあいまい度閾値Ｒを導入した。

すなわち、$\max(\overset{34}{\underset{i=1}{\vee}}(a(i,j))=N<P)$ $(8\leqq i\leqq 16、18\leqq i\leqq 30、32\leqq i\leqq 34)$のとき、a(i,j)=Ｎとなる要素のうちのあいまい度の最小値をＢとすると、あいまい度閾値Ｒにより$b(i,j)\leqq B+R$となる要素a(i,j)をa(i,j)＝Ｐに修正する。

あいまい度閾値Ｒ、代表値閾値Ｐとあいまいパラメータλを種々変化させて作成した有向グラフのうち、最も合理的と考えられる有効グラフを図４に示し、これを配水管事故階層モデルとした。

３．まとめ：本研究では、アンケート調査を利用して配水管の事故発生要因間の関連性の強さを求め、システム工学的に階層化することにより、下位の要因から配水管の損傷事故あるいは、継手のゆるみ等に至る階層モデルを作成した。ここで、「17:管内外の温度差」「26:管内流水の水圧」「27:管内流水の水撃圧」の各要因が、階層グラフに反映されない結果となった。この原因として約20°Ｃの温度差で発生する内部応力は、$\sigma=2.9kgf/mm^2$程度であり[4]また繰返回数も少いため、温度差による疲労は発生しないと考えられる。すなわち温度差による内部応力の増加は、破損の引き金になるが主因とはならないと考えられる。また水圧・水撃圧は、神戸市の給水方法が層別ブロック別給水(自然流下方式)を採用していることに起因していると考えられる。本研究においては、要因間の関連性については、技術者に対するアンケート調査に基づいているが今後事故に至るメカニズムを明かにすることにより階層モデルの検証を行う必要がある。さらに、この階層グラフを利用して、配水管事故の危険度評価システムを作成し、管路診断及び事故の発生原因の推定に用いることができる。

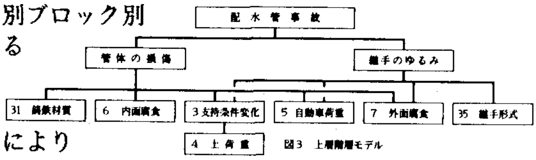

図３ 上層階層モデル

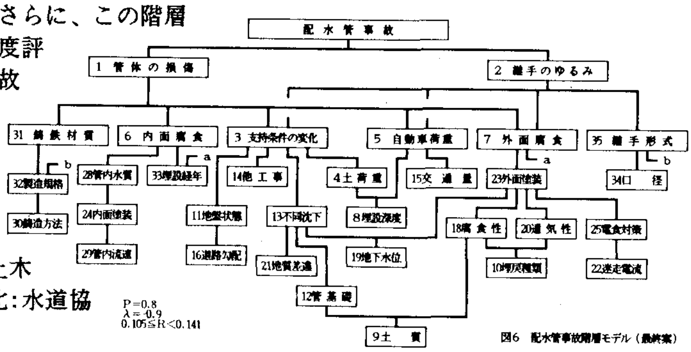

図６ 配水管事故階層モデル（最終案）

参考文献：1)例えばTazaki & Amagasa:Information Journal for Fuzzy Sets and Systems,Vol.2,No.1,1979.1 2)西村ほか:土木学会論文集,第378号,Ⅴ-6,1987.2 3)西村ほか:土木学会第42回年講論文集,1987.11 4)川北:水道協会雑誌,第55巻,第5号, 1986.5