

(88) 上水道供給支障率の簡易予測法に関する検討

福山大学 千葉利晃
倉敷市役所 請川健一

1. まえがき

上水道の供給支障率は管網解析などの複雑な数値計算を組み込んだものが多いが、星谷らは水道実務経験者の経験的知識を利用した簡易な予測モデルを提案している¹⁾。このモデルは管網解析のような複雑な数値解析を用いないので非常にシンプルなモデルとなっている。しかしながら、実務経験者へのアンケート調査結果（供給支障率あるいは供給率）を用いてモデル化するため、その妥当性は実務経験者へのアンケート実施方法およびその回答に依存する。地震多発地帯の水道局を除き多くの水道局の場合、アンケートへの回答（質問された被害パターンに対する供給支障率の予測）そのものが大変な作業となろう。しかしながら、一度このモデルを構築しておけば、さまざまな被害パターンに対する時々刻々の供給支障率が瞬時に予測できるため、被害復旧過程のシミュレーションや防災計画立案あるいは被害復旧対策などに大いに役立つ。

本研究は福山市上水道管網を対象とし、モデル適用上の問題点を検討したものであるが、アンケート調査を行わず、管網解析を行って得られた供給支障率をアンケート調査結果とみなしている。また、モデル構築において必要となる節点および管路の重要度についても検討を加えたものである。

2. 上水道供給支障率簡易予測モデルの概要

星谷らによって提案されている実用的復旧予測モデルは、物理的被害が直接的な修復作業によって減少して行く過程を求める被害復旧サブモデルと、物理的被害から供給機能の支障率を求める供給支障率予測サブモデルより構成されている。後者の供給支障率予測サブモデルは、次式により表わされている。

$$F_t = b_0 + b_1 \cdot D1_t + b_2 \cdot D2_t + b_3 \cdot D3_t \quad (1)$$

ここで、 F_t は供給支障率、 $D1_t$ は物理的被害率、 $D2_t$ は被害の広がり具合を表わす被害分散度、および $D3_t$ は重要施設の被害率を表わす。式(1)の偏回帰係数 b_k は、被害状況を与えたシステムに対する水道実務経験者(エキスパート)への機能支障に関するアンケート調査結果をデータとし、重回帰分析を行なって決定している。したがって、ネットワークの連結性などの数値解析的な方法を避け、直接式(1)より供給支障率を求めることができる簡略化モデルとなっている。また、上水道管網は管路あるいは節点が存在するメッシュ(オーバーレイメッシュ)で表現する簡略化管網システムを使用している。

このモデルによる供給支障率の予測手順は次のようになっている。①予測対象地域全体を500m×500mのメッシュで区切り、上水道管網の供給経路(管路)と供給分配施設(節点)を管路あるいは節点が存在するメッシュ(オーバーレイメッシュ)で表現する。②エキスパートのアンケート結果より、上水道供給支障率 F_t と被害指標($D1$, $D2$, $D3$)との関係、式(1)、を明らかにしておく。③被害復旧モデルによって求めた管路と節点の復旧件数(メッシュ単位)をもとにして、供給支障率 F_t を式(1)より求める。この③を完全に復旧するまで繰り返すことにより、時々刻々の支障率を知る事ができる。詳細は文献(1)を参照して頂きたい。

3. 福山市上水道管網への適用例(重回帰分析による供給支障率モデルの決定)

今回の研究では管網解析を行ない、その解析結果をエキスパートの予測結果とみなして以下の解析を行っている。管径 250mm以上の管網上に被害を与へ、これらの被害パターンごとの供給支障率を管網解析を行って求めた。ここで、供給支障率とは被害時の供給支障戸数の平常時供給戸数との比である。また、供給支障戸数は節点の平常時基本圧力(m)から評価圧力(m)を差し引いた影響度(m)で評価している。基本圧力とは、{平常時の節点水位(m)－節点の地盤高(m)}であり、評価圧力とは{被害時の節点水位(m)－節点の地盤高(m)}である。この各節点の影響度(m)を表-1に示すように、その節点の全給水戸数の給水がカットされるか、半分の戸数が影響を受けるとみなすか、あるいは平常時と同じく水が供給され全く影響がないかに分けて供給

支障戸数を求めている。

先に報告した解析²⁾では、福山市上水道管網を主に管径 250mm以上の送配水管で構成される簡易管網モデルで表わして管網解析を行なっている。しかしながら、管網のモデル化そのものが難しく、全体を精度良く表現する管網モデルを作成するのは困難である。同じ節点あるいは管路に被害を与へ全管網を用いて管網解析を行なった結果と、先に報告した

上水道の簡易管網モデルを用いて行なった管網解析結果を比較すると、表-2のようになる。この表よりわかるように、全管網を用いた解析結果と簡易モデルを用いた結果ではかなり支障率に差がある場合がある。これは、管網は非常に複雑に連結されたネットワーク構造をしているため、単に管径の大きな管のみで管網を表現できないことを示している。したがって、今回は全管網を用いて再度管網計算を行なって 式(2)に示す関係式を求めた。29種類の被害パターンを用いており、重相関係数は0.9328であった。

$$F_t = -0.053 + 4.293 \cdot D1_t + 8.888 \cdot D2_t + 2.200 \cdot D3_t \quad (2)$$

一方、簡易管網システムの場合には、

$$F_t = -0.029 + 3.916 \cdot D1_t + 2.329 \cdot D2_t + 0.536 \cdot D3_t \quad (3)$$

であり、重相関係数は0.9061であった。式(3)は25種類のデータを用いて推定しており、使用した被害パターンにも若干の違いはあるが、同一の被害パターンではD1、D2、D3ともに同一の値となるので、式(2)の結果の方が式(3)によるものより、被害分散度D2および重要施設被害率D3の影響が4倍程度大きく出ていることがわかる。

ところで、D3は重要施設の被害率を表わしている。重要施設が被害を受ければ支障率は大きくなるはずであるから、D3の偏回帰係数もまた大きい方が妥当であろう。D3の偏回帰係数は式(3)の場合0.536と小さく、式(2)の場合は 2.2と大きくなっているので、全体の管網を用いた式(2)の方が、より妥当性があるものと思われる。

ところで、式(2)および式(3)を求める重回帰分析ともに、偏相関係数 b_1 、 b_2 あるいは b_3 が負になったり、重相関係数が低かったりして、良好な重回帰分析が行われない場合がある。特にある点に被害を与えるとその先には水が供給されない、すなわち迂回路が全く存在しない直列結合の管路などに被害があるなど、被害形態が大きく異なる被害パターンが混入されている場合には、重相関係数が非常に小さくなったり、偏相関係数が負になったりし易い。また、今回の想定システムでは管路等の重要度の分類を大きく2つに分けているが、実際の場合には同じ管径であっても管路等によって重要度が大きく異なり、単純に2つに分けることにも無理があろう。したがって、直列結合成分等は削除節点の給水戸数を別途考慮したり、重要度の分類をもう少し実状にあうように設定するなどの改良が必要であろう。アンケート調査を行う際にも、被害パター

表-1 節点の影響度（供給支障戸数）

節点種別	影響度 I_s (m)	各節点での影響給水戸数
一般節点	$I_s \geq 20m$	影響なし
	$10m \leq I_s < 20m$	1/2の戸数が影響を受ける
	$I_s < 10m$	全戸数が影響を受ける
加圧節点	$I_s \geq 5m$	影響なし
	$0 \leq I_s < 5m$	1/2の戸数が影響を受ける
	$I_s < 0$	全戸数が影響を受ける

表-2 管網モデルによる支障率（被害率）の比較

No.	被害パターン	被害件数 通常箇所	被害件数 重要箇所	被害率 全体モデル	被害率 簡易モデル
1	AF-1	1	0	0.0024	0.0030
2	AF-5	0	1	0.0011	0.0004
3	AF-6	1	0	0.0066	0.0075
4	BF-3	2	0	0.0088	0.0071
5	BF-4	2	0	0.0011	0.0
6	BF-5	1	1	0.0584	0.0346
7	BF-6	2	0	0.0035	0.0047
8	CF-1	3	0	0.0011	0.0
9	CF-2	2	1	0.0	0.0015
10	CF-4	3	0	0.0088	0.0071
11	CF-5	3	0	0.0027	0.0037
12	DF-1	4	1	0.1863	0.1938
13	DF-2	2	3	0.0578	0.0244
14	DF-6	3	2	0.0440	0.0112
15	EF-4	4	3	0.0471	0.0175
16	EF-5	7	0	0.0052	0.0169
17	EF-6	3	4	0.2353	0.1418
18	FF-6	6	4	0.2154	0.2289
19	FF-7	8	2	0.0711	0.1026
20	FF-8	5	4	0.0576	0.0609
21	GF-5	9	6	0.3153	0.1372
22	GF-6	11	4	0.4957	0.4868
23	HF-7	13	7	0.3206	0.2392
24	HF-8	12	7	0.4464	0.3867
25	HF-9	15	5	0.5538	0.5320
26	IF-1	19	6	0.1152	0.4495
27	IF-2	17	8	0.5541	0.4086

ンに直列結合成分を含ませるか否か、含ませる場合にはそれを以後どのように取り扱うべきか考えておく必要がある。

4. 上水道管網の重要度評価

4.1 1 節点被害による供給支障率

今回解析の対象とした福山市上水道管網内の全363個の節点の内、無作為に104種類の節点を抽出し1つの節点に被害を与えたときの供給支障率を管網解析を行なって求めた。供給支障率と被害を与えた節点に接続している管路の管径の平均との関係を示したものが図-1である。この図からもわかるように接続管路の管径の平均が25cm以下の場合、被害率は非常に小さくほとんど影響がないことが分かる。したがって、接続管路の管径の平均が25cm以上の節点(21節点)を対象として、重回帰分析を行った。

なお、供給支障率としては、被害を与えた節点の供給戸数は完全に断水することは明らかであるので、管網解析を行って求めた実供給支障率からこの供給戸数分の支障率を差し引いている。このようにして求めた供給支障率は、節点を取り除くことにより影響を受ける他の節点の給水戸数の支障率を意味する。目的変数には、この補正支障率を用いている。実際の供給支障率は、この補正支障率に、(被害節点の給水戸数/全戸数)を加えたものになる。

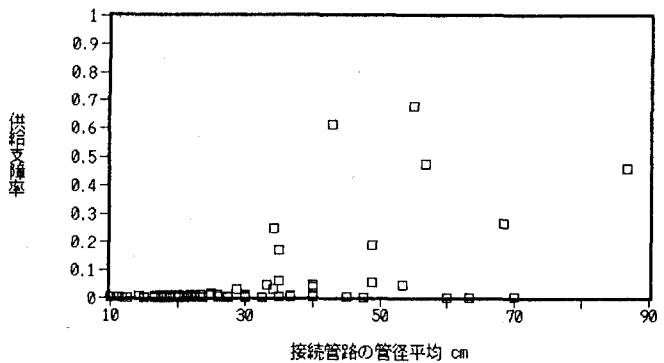


図-1 1 節点被害による供給支障率と
接続管路の管径平均との関係

説明変数は、①接続管路の管径の平均:ND、②配水池からの最短距離:L、③接続管路の本数:NM、および④節点密度:NC(当該節点を中心とする1km²の円内に存在する節点数)であるが、これらはすべて最大値で正規化して使用している。得られた重回帰式を式(4)に示す。このときの重相関係数は0.8804、決定係数は0.7752である。

$$\text{推定供給支障率(1節点)} = -0.0147 + 0.4582 \cdot ND - 0.9358 \cdot L + 0.8225 \cdot NM - 0.4850 \cdot NC \quad (4)$$

式(4)より、被害率は配水池よりの直線距離に大きく作用され、距離が短いほど、すなわち配水池に近い節点が被害を受ければ受けるほど、被害率が大きくなることがわかる。また、接続管路の本数にも関係が深いことがわかる。

4.2 1 管路被害による供給支障率

福山市上水道管網全601本の管路の内、任意の158種類の管路を抽出しその内の1つの管路に被害を与えたときの供給支障率を管網解析を行なって求めた。得られた供給支障率と管径との関係を図-2に示す。この図から、管路の管径が40cm以下の場合には、ほとんど影響がないことが分かる。したがって、今回は管径が40

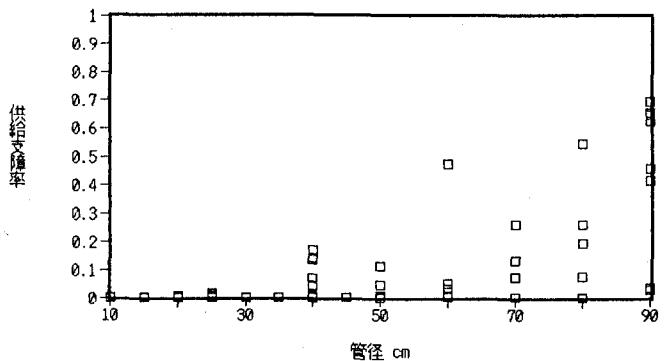


図-2 1 管路被害による供給支障率と管径との関係

cm以上の管路(33管路)を対象として重回帰分析を行なった。目的変数は供給支障率、説明変数は、①管路の直径:LD、②配水池からの最短直線距離:L、および③管路両端の節点に接続している管路数の合計:LM、の3個とした。これらは1節点被害の場合と同様にすべて最大値で正規化して使用している。重回帰分析結果を式(5)に示す。重相関係数は0.9116、決

定係数は0.8311である。

$$\text{推定供給支障率 (1 管路)} = -0.4303 + 0.9621 \cdot LD - 0.5062 \cdot L + 0.2353 \cdot LM \quad (5)$$

式(5)を見ると、管路の場合は管径が供給支障率に大きく影響していることがわかる。

4.3 同時複数被害による供給支障率

複数ヶ所の節点や管路に同時に被害が発生した場合の供給支障率を目的変数とし、①節点ごとの供給支障率の合計;SND と②管路ごとの供給支障率の合計;SLD の2つの項目を説明変数として重回帰分析を行った。ここでいう節点および管路の支障率とは、1 節点あるいは1 管路に被害がある場合の供給支障率であり、管網解析を行って得られた支障率である。

重回帰分析結果を式(6)に示す。重相関係数は0.9098であり、決定係数0.8277である。

$$\text{推定供給支障率 (同時複数被害)} = 0.0272 + 0.6564 \cdot \text{SND} + 0.8541 \cdot \text{SLD} \quad (6)$$

式(6)からも判るように、1つの節点あるいは1つの管路に被害が発生したときの供給支障率のデータが揃ってさえおれば、複数ヶ所の節点や管路が同時に被害を受けた場合でも、管網解析を行わずに上述の重回帰式から供給支障率を高い精度で予測できることが判ろう。

5. あとがき

正確な予測値を求めるには管網解析などを行えばよいが、例えば、復旧戦略を考慮すべきとか、様々なケースでの予測を行ったり被害(支障率)の程度を知ろうとしたとき、管網計算を行えば気の遠くなるような計算時間を必要とする。今回計算に用いたPC9801RAとPC9801VXでは1種類の被害データの管網計算に30~40分必要であった。これを時々刻々の復旧過程を管網計算で追求して行けば、例えば大型計算機を用いたとしても、かなりの時間が必要である。したがって、種々な被害パターンを想定し、それぞれの被害パターンごとの復旧過程を追求して行くことは困難になる。今回の予測モデルは、その点パソコン・レベルでも簡単に時々刻々の復旧過程を追求できる。このように、精度はある程度犠牲にせざるを得ないが、視覚的にも、また、時間的にもすぐれた面を持ってしよう。

1 節点あるいは1 管路の被害による供給支障率は、かなりの精度で推定できることを示した(式(4)および式(5))。これらの結果を用いれば、全管網の各節点あるいは各管路に被害が発生したときの供給支障率を推定できる。したがって、どの節点が重要であるか、あるいはどの管路が重要であるかを供給支障率の面から容易に推定できる。また、1つの節点被害あるいは1つの管路被害であっても、6割前後の支障率が出ること、管路の場合は管径が400mm未満の場合、節点にあっては持続管路の平均管径が250mm未満の場合には、供給支障率は無視できることを示した。また、同時に複数の節点あるいは管路が被害を受けたときの供給支障率を予測する回帰式を導いた。これらの結果を使い、メッシュの重要度をも供給支障率の面から評価すれば、本供給支障率簡易予測モデル決定のための重回帰分析の不安定さもある程度改良されるものと期待できよう。この点は今後検討を加えたい。

今回は、福山市上水道管網についてのみ解析を行なった。他の都市での上水道管網においてこの方法があてはまるか否かについての検討を行ない、より一般性のある予測式を求める必要がある。また、実際の被害では被害の程度も問題になろう。今回の研究では、1つの被害はその節点あるいは管路の100%の断水を意味するが、実際の被害では、不完全ながらも使用に耐える程度の極軽微な被害から、今回仮定しているような完全なる被害(100%断水)まで色々である。復旧予測を行う場合、このような被害の程度をどのように考慮すべきか、またどの様に復旧させていくべきか、つまり、適切な復旧戦略をどう設定するかについての検討も今後必要であろう。

[謝辞] 本研究の機会を与えて頂いた武蔵工業大学星谷勝教授、管網解析プログラムならびにデータを提供頂いた福山市水道局の丸山高司氏に感謝致します。

[参考文献] 1) 大野、星谷、土木学会論文集、No.422/I-14,1990.10,PP.353-360 2) Hoshiya, et al., Proc. of ICOSAR'89, Vol.1, pp.685-692