

(46) 地震後の各復旧段階における上水道配水管路網の信頼度解析

京大工学部 正会員 ○亀田弘行 京大工学部 正会員 後藤尚男  
 大阪市 正会員 浅岡克彦

1. まえがき 地震発生後の復旧段階を考慮した水道配水管路網の地震時信頼度解析を行った。特に注目した事項として、広域避難地への非常給水を想定した配水幹線の連結信頼度、および都市機能の回復過程を通しての生活維持水確保のための給水可能量に関する信頼度を取上げ、シミュレーションモデルを開発した。京都市営水道の新山科低区配水区を対象としてケース・スタディを実施した。

2. 地震後の各復旧段階で要求される機能水準と需要水量

地震による被災から復旧に至る過程で水道システムが果たすべき役割を、ここでは次の4段階に大別して考える。すなわち、第Ⅰ段階(発震直後の消火用水確保)、第Ⅱ段階(広域避難地等での飲料・炊事・医療用水の確保)、第Ⅲ段階(最低限の都市生活可能水準の維持)、第Ⅳ段階(平常の都市機能の維持)の各段階である。第Ⅰ段階については未だ不確定な問題が多いので今後の課題とし、ここでは第Ⅱ段階～第Ⅳ段階の問題を扱う。

第Ⅱ段階では災害救助法の基準水量である3ℓ/(人日)の確保を目安とし、広域避難地等への配水幹線の連結信頼度を重点的に考える。第Ⅲ段階では市民は可能な限り家庭に戻るが、配水支管や給水管からの漏水により、必要量の給水を行いうるかが問題となる。この段階での必要水量は105ℓ/(人日)という値が試算されており、これを最小値として種々のレベルを設定した。

3. 配水管路のネットワーク特性

3.1 一般的特性 図-1は、ケース・スタディの対象とした京都市上水道新山科低区配水区の概要を示したものである。浄水場の配水池からの自然流下方式による配水幹線(実線)がネットワークを構成しており、要所々々の分岐点から配水支線(点線で省略表示)を通じて各給水区域への水供給が行われる。同図中のA～Fで示した場所は、京都市により指定されている広域避難地であり、G～Jはその他安全な空地とみなされる場所である。

3.2 連結信頼度解析における冗長パスと擬冗長パス 配水池から需要点に至る配水経路は図-1からわかるように一般に複数個ある。それらは冗長パスと呼ばれ、その数が多いほどネットワークとしての信頼度は高

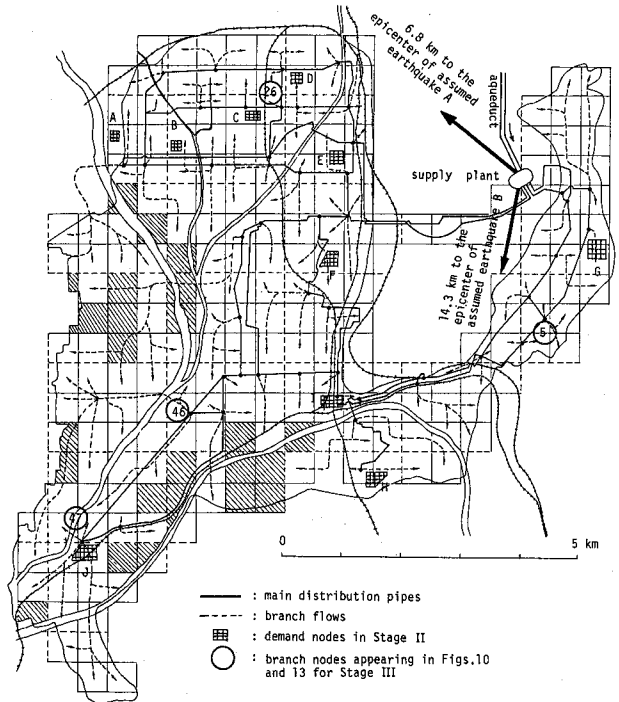


図-1 京都市上水道新山科低区配水区の概要

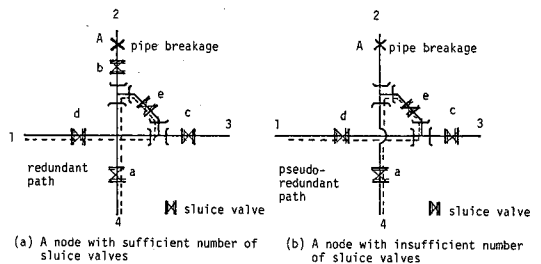


図-2 制水弁の配置と冗長パスおよび擬冗長パス

くなる。ところで、実際の配水幹線の交差部は図-2のような構造になっている。A点で管路が破壊した場合、図-2(a)では制水弁を閉鎖することによりルート4→1は冗長パスとして機能するが、図-2(b)では漏水を防ぐためには制水弁αを閉鎖することになり、ルート4→1は冗長パスとなり得ない。このような場合を擬冗長パスと呼び、第Ⅱ段階における連結信頼度解析においては、両者を区別して扱う必要がある。

3.3 流量解析のためのネットワーク特性—第Ⅱ段階における給水量に関する信頼度解析では、配水幹線(図-1の実線)の被害はすべて復旧(少くとも応急修理)されており、配水支管以降での漏水が問題になるものとする。このような仮定をおく理由は、(1)配水幹線の破壊は、漏水の激しさから発見が容易であること、(2)配水幹線の修理は最も優先的に行われるであろうこと、(3)配水幹線の管路は、支管と比べて耐震的で、破壊カ所数も比較的限定されるであろうことなどである。

#### 4. 解析に用いた地震動入力

4.1 地域相関を持つ地震動のマイクロゾーニングとシミュレーション—配水管路網は広い地域に広がるため、それら各地点で同時に発生する地震動を推定する必要がある。そこでは、異なる地点での地震動が部分相関を持つことと、地盤条件によるマイクロゾーニングを行うこととの、2つの問題を解決しなければならない。ここでは、入力地震動として用いる地動速度 $\dot{V}$ について、次式によりシミュレーションを行った。詳細は文献2)によられたい。

$$\dot{V} = U_{TV} U_{Lv} C_{mv}^{S_{lv}} \bar{V}(M, \Delta) \quad \text{----- (1)}$$

ただし、

$$S_{lv} = \left[ \int_0^{d_a} \exp\{-\gamma_1 N(x)\} \exp\{-\gamma_2 x\} dx - \beta \right] / (1/\gamma_2 - \beta) \quad \text{----- (2)}$$

$$\bar{V} = \begin{cases} 1.17 \times 10^{0.232M} / (\Delta + 30)^{0.300} & (\text{line}), \Delta > \Delta_0(M) \\ 1.34 \times 10^{0.152M} & (\text{line}), \Delta \leq \Delta_0(M) \end{cases} \quad \text{----- (3)}$$

$$\Delta_0(M) = 0.629 \times 10^{0.267M} - 30 \text{ (km)}, M > 6.3; \Delta_0(M) = 0, M \leq 6.3$$

ここに、 $N(x)$ は深さ $x$ (m)における $N$ 値(深さ $d_a$ まで得られている)、 $\gamma_1 = 0.044$ 、 $\gamma_2 = 0.134$ 、 $\beta = 3.58$ 、 $C_{mv} = 2.898$ であり、 $M$ は地震のマグニチュード、 $\Delta$ は震央距離である。式(1)の $\bar{V}(M, \Delta)$ はアテニュエーション式、 $C_{mv}^{S_{lv}}$ は地盤条件による補正係数を表す。 $U_{TV}$ と $U_{Lv}$ は、地震動予測の不確定性を表すメディアン=1、変動係数がそれぞれ0.355、0.406なる対数正規変量で互に独立とする。異なる地点間では $U_{TV}$ は完全相関を持ち、 $U_{Lv}$ は独立とする。これにより、地震動速度の地域相関係数は0.433となる。

4.2 ケース・スタディに用いた想定地震と地盤ひずみの算定—ケース・スタディにおける想定地震としては、京都盆地北部に震央を持つ $M=6.4$ なる地震Aと京都盆地南部に震央を持つ $M=6.8$ なる地震Bの2通りとした。また、第Ⅱ段階における解析では地盤のひずみ $E_g$ が必要となるが、これは $E_g = V/\alpha$ から算出した。ただし、 $\alpha$ は水平方向の見かけの復動伝播速度で、文献3)を参考に $\alpha = 200 \text{ m/sec}$ と $\alpha = 600 \text{ m/sec}$ の2つの場合を設定した。

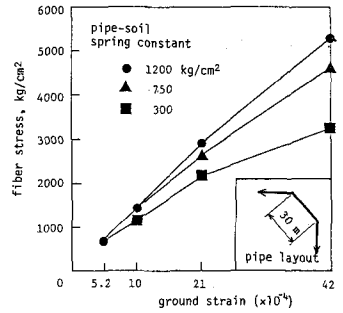


図-3 曲管を含む管路の最大応力 ( $\phi = 400 \text{ mm}$ )

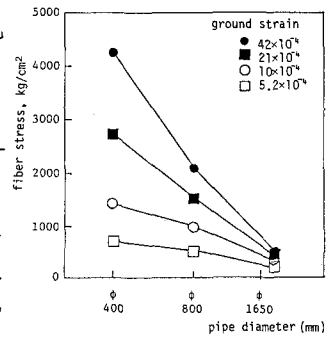


図-4 最大応力に対する管径の影響 (図-3と同じ平面構成、ばね定数=750 kg/cm²)

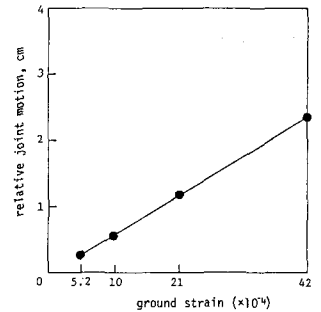


図-5 継手抜け出し量 ( $\phi = 400 \text{ mm}$ ,  $l = 6 \text{ m}$ , ばね定数 = 300~1200 kg/cm²)

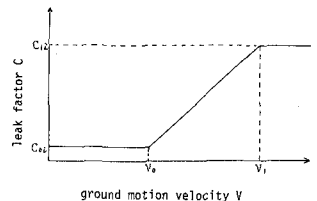


図-6 漏水係数と地震動の関係

5. 信頼度解析のためのシミュレーションモデル

5.1 連結信頼度解析(第Ⅱ段階)のシミュレーションモデル—第Ⅱ段階における最低限の需要水量は平常時の1/100程であるから、浄水場と需要点A~Jが配水幹線のいずれかのルートで連結されておれば必要水量を供給できるものとする。ここでは、4.の方法によって地震動速度と地盤ひずみを算出し、これを配水幹線管路への入力として管路の応答値を求め、破壊基準と比較することによって管路の震害のシミュレーションを行った。図-1の配水幹線の大部分に用いられているダクタイル鋳鉄管に対する地震応答解析<sup>4)</sup>を用いて、管路の応答特性を図-3~5のように定める。すなわち、管路の最大応力は曲管部で生じ、φ=400mmの管路については図-3から、その他については図-3と図-4の結果を掛け合わせて得られるとした。直管部での破壊は継手の抜け出しによるものとし、抜け出し量を図-5から求める。破壊基準はダクタイル鋳鉄管の破壊応力を平均値4600 kg/cm<sup>2</sup>、変動係数0.08なる正規変量で表し、継手の抜け出しは2cmを限度とした。

モンテカルロシミュレーションによって配水幹線上の管路の破壊箇所を抽出し、制水弁の操作で漏水を防いだ後に冗長パスとして有効に機能する経路を明らかにし、これによって浄水場と需要点A~Jの連結性が保たれているかどうかを調べた。これを多数回くり返すことにより、各需要点の連結信頼度(地震後も連結性が確保される確率)を求めることができる。

表-1 浄水場から需要点への連結信頼度

demand nodes	no. of redundant paths	no. of pseudo-redundant paths	probability of connectivity			
			M=6.8	M=7.2	M=7.6	M=8.0
A	14	0	0.991	0.981	0.959	0.923
B	8	0	0.991	0.979	0.957	0.919
C	16	0	0.987	0.974	0.944	0.904
D	24	8	0.990	0.979	0.953	0.912
E	2	0	0.991	0.981	0.961	0.927
F	1	0	0.984	0.971	0.941	0.896
G	4	0	0.996	0.988	0.975	0.947
H	28	7	0.980	0.955	0.917	0.848
I	24	11	0.993	0.983	0.964	0.928
J	72	68	0.989	0.976	0.943	0.889

5.2 給水可能量に関する信頼度(機能性信頼度:第Ⅱ段階~第Ⅳ段階)のシミュレーションモデル—ここでは配水支管と給水管の破壊による漏水を問題としているから、配水幹線から支管への分岐点(図-1参照)において、その分岐点からの給水区域の人口に比例する取出し水量とその区域における漏水量の和に等しい水量が流出するとして流量解析とシミュレーションを行った。

流量解析はエネルギー法<sup>5)</sup>を用いて行ったが、その際のような仮定をおいた。一般に分岐点iからの流出水量には、

$$\text{流出水量 } P_i = \text{漏水量 } A_i$$

$$+ (\text{需要者による}) \text{ 取出し水量 } Q_i$$

の関係があるが、(1)  $Q_i$  は需要水量  $P_{di}$  を超えないものとする。すなわち、 $P_{di}$  を限度とする節水が守られるとする。(2)  $P_i$  は配水支管の容量に応じた流量  $P_{ai}$  (ここでは45ℓ/(人時)を基準に算出)を超えないとする。(3) 漏水係数  $C_L$  は、図-6のように最小値  $C_{oi}$  (平常時で15%漏水に対処)、最大値  $C_{il}$  (550ℓ/(人日)に対処する水量がすべて失われる場合を想定して算出)を定め、それらに対処する地盤速度を、それぞれ  $V_0=10 \text{ kine}$ ,  $V_1=30 \text{ kine}$  とした。

Epicenter is located in the same way as the assumed earthquake B.

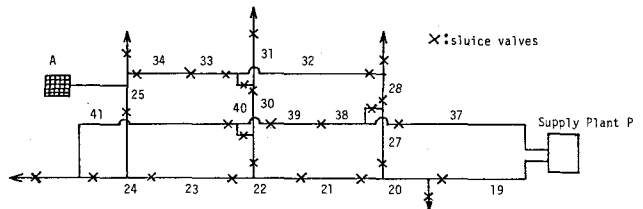


図-7 浄水場から需要点Aへの管路構成

表-2 需要点Aへの連結性が失われたときの各管路リンクの条件付破壊確率

link no.	damage probability	link no.	damage probability	link no.	damage probability
19	0.495	27	0.378	37	0.961
20	0.701	28	0.156	38	0.148
21	0.188	30	0.245	39	0.076
22	0.012	31	0.221	40	0.005
23	0.120	32	0.299	41	0.198
24	0.109	33	0.167		
25	0.029	34	0.029		

Link no. is identified in Fig.9.

## 6. シミュレーションの結果

6.1 連結信頼度—表-1に、配水管線の連結信頼度を示した。同表は地震Bを対象としているが、想定されたマグニチュード $M=6.8$ から順次 $M=8.0$ に増加させてもなお、90%程度の高い信頼度を示している。

図-7は、需要点Aへの管路網を示しており、制水弁の間をリンクとして番号を付してある。A点への連結性が失われた状態で各リンクが破壊している条件付確率を表-2に示した。破壊力所の検出その他の行動計画の資料として有用であろう。

6.2 機能性信頼度—機能性を表す尺度として次の3程を定義する。

イ. (需要水量)充足率:  $r_{gi} = \frac{\sum_{k=1}^{n_s} Q_i^{(k)}}{\sum_{k=1}^{n_s} P_{di}}$  ----- (4)

ロ. (需要水量)達成確率:  $r_{ni} = (Q_i = P_{di} \text{となるシミュレーション回数}) / n_s$  ----- (5)

ハ. 総必要給水量:  $W_t = \sum_{k=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_f} P_i^{(k)} T / n_s = \sum_{k=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_f} (Q_i^{(k)} + A_i^{(k)}) T / n_s$  ----- (6)

ただし、 $n_s$  はシミュレーションの回数(ここでは2000回)、 $P_i^{(k)}$ 、 $Q_i^{(k)}$ 、 $A_i^{(k)}$  は $k$ 回目のシミュレーションにおける $P_i$ 、 $Q_i$ 、 $A_i$ の値、 $n_f$ は分岐点の数(ここでは42)、 $T$ は1日の長さである。

図-8に充足率と達成確率の例を示した。図-9は総必要給水量を示したもので、これが浄水場の能力を超えると時間給水などの処置が必要となる。

6.3 復旧作業による機能回復—図-10は、復旧作業の進展に伴って総必要給水量が減少する様子を示している。復旧のパターンIは不足水量(ロ)× $P_{di}(1-r_{gi})$ が大きい(不満度が高い)区域から順に修理する場合、パターンIIは逆の順序で(簡単なところから)修理する場合である。パターンIの方が機能回復が速いようであるが、被害が大きい場所では修理に長時間を要するであろうから、横軸に絶対時間をとれば両者の差は小さくなる。おし、図-11のように修理の進展に伴い、未修理の区域ではむしろ充足率が低下し、その度合はパターンIの方が激しいから、パターンIIの方が望ましい場合もありうると考えられる。

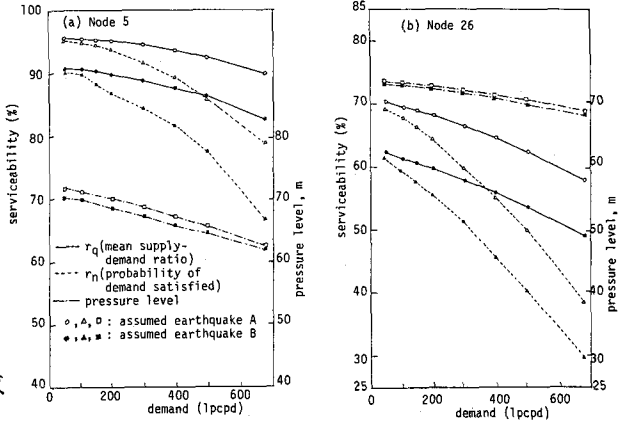


図-8 給水可能量に関する機能性信頼度(lpcpd=l/(人日))

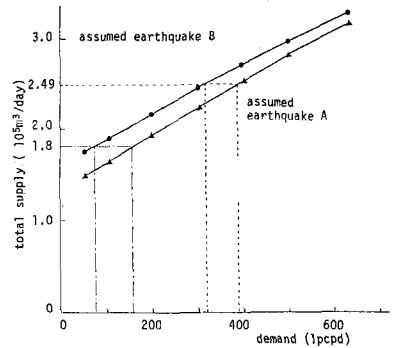


図-9 浄水場からの総必要給水量

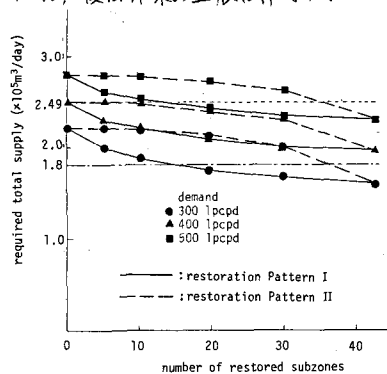


図-10 復旧作業の進展に伴う総必要給水量の変化

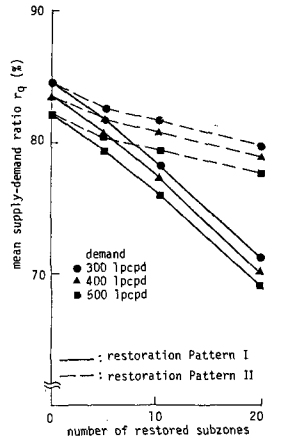


図-11 復旧作業の進展に伴う機能性信頼度の変化(分岐点46)

1) 市瀬都市開発建設: 大阪大都市域における防災都市構造強化計画策定調査, 昭.54.11. 2) 亀田・杉戸・石川: 地震動のアテニュエーション特性とマイクロゾーニングに関する2,3の問題, 第36回土木学会全国大会第I部, 昭.56.10. 3) 後藤・杉戸・亀田・磯田: 埋設管の震害予測のためのマイクロゾーニングについて, 第16回地震工学研究発表会, 昭.56.7. 4) 石川・杉戸・亀田: 曲り部を含む埋設管の地震応答解析, 第36回土木学会全国大会, 第I部, 昭.56.10. 5) 高森: 配水管網の解析と設計, 森北出版, 昭.53.8.