

(45) 震害後の復旧段階における上水供給系の機能性能の評価

京都大学工学部 山田 善一 ○野田 茂
大阪府土木部 小笠原洋一

1. 緒言

本研究は、震害で機能喪失した配水管網をシミュレートし、文献1)で提示したネットワーク信頼度の反復分割算定法とマルコフ過程論²⁾による有効なシステム・パフォーマンスの導入を試みている。管路の破断・漏洩に伴う震災復旧段階時の使用性指標(水圧・流量不足など)を確率的に追跡する一評価手法を提案するものである。最適な復旧戦略の策定の定量的検討のためにも、劣化したシステムの連結性能と機能状態のマクロな流量バランスの把握は極めて重要な要因である。ネットワークの特性により、地震後の取り出し水量・水圧などの疎通能力は、破損管路の修理作業の経時変化とともにその隣接管路のみならず距離的に遠い破損箇所にも強く影響される。漏水量に左右されて平常運転時よりも取り出し水量の増す節点もあり、復旧の対応によつては長期間給水不足の地域も存在する。時間経緯で捉えた給水機能性と連結性能はかなりの相違を有することもあることが示された。

2. 上水道網の時変信頼性解析

配水管網の供給端からある需要端まで1つ以上の経路の存在性を示す連結性能と区別して、機能性能は正常運転時に比べて所定の給水輸送能の与件さとの程度下回、て稼働するかの使用性尺度で判定するものとして定義する。

解析対象モデルにはFig.1に示す仙台市の理想化上水道網(総節点25, 総管路34)を例にとり、供給端(節点2, 3, 4)からの自然流下を仮定する。全体信頼度(overall reliability)の展開のため、仮想節点(1, 27)に仮想リンク(1~3, 23~25, 35, 42~44)を介して原節点に連結しておく(Fig.1)。各節点は給水地区の需要水量を分担するものとし、各管路は4種の土質条件³⁾に分類された地盤内を貫通している。

地震によるシステムの被害は管路の特性と地盤震動に応じて管路の破断・中損傷を起こし、それに誘発して給水の遮断・漏洩を伴う。その程度(mDR)は各管路の構成基本要素数(N_m)と被害箇所数(y_m)の相対比によって定義し、 $y_m=0; mDR=1, 1 < y_m < N_m/6; mDR=0.9, N_m/6 < y_m < N_m/4; mDR=0.7, N_m/4 < y_m < N_m/2; mDR=0.5, N_m/2 < y_m < N_m; mDR=0$ であり、完全な送水停止又は実質上連結していても漏水量の出現増加を生む。その意味は、 $mDR=0$ で大損傷として管路の完全破断消滅で下流側に疎通しえず原需要端の出入口から流出を累積し、一方中損傷の破損箇所からは破断孔として漏洩するという具合である。復旧活動によつてこの破損箇所は修理されてネットワークの幾何学的条件場合によつてはバルブの開鎖作業も含めた水理学的特性も変化する。このような物理的破壊ネットワークの形成はモンテカルロ法により実行し、総破壊数(N)は各管路の被害状態

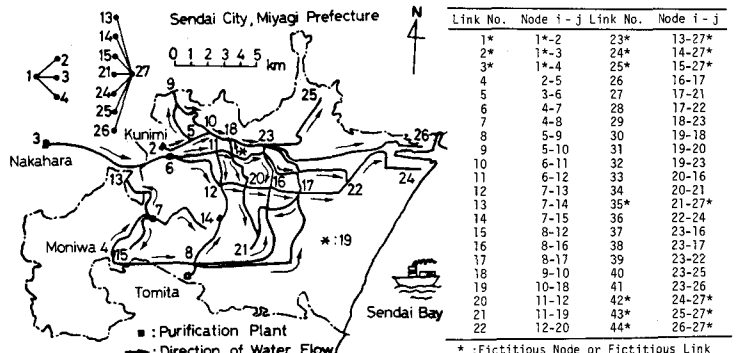
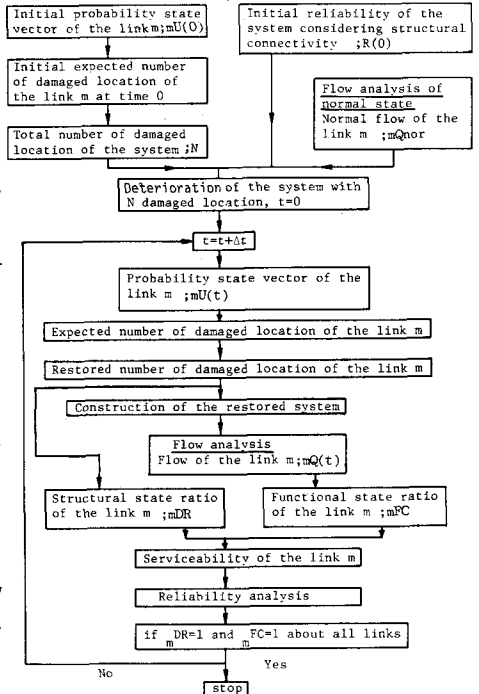


Fig.1 Water Supply Pipeline System in Sendai City (Simplified Model)

Table 1 Flow Chart proposed in This Study



を表す初期確率ベクトル $mU^{(0)}$ の期待値和で求めた。

復旧予測に関して, Barlow⁴⁾, Henley⁵⁾らは電気系の修理状況をマルコフ過程で取扱い, 同じく屋谷はこれを離散時刻毎に処理する方法を提案している²⁾。ここでは基本的に後者の方法

を応用し, 文献2)を参照した。管路 m の復旧時刻 Δt における構造的被害状態確率ベクトル $mU(\Delta t)$ は, 地震直後の初期状態確率 $mU^{(0)}$ と復旧回復推移確率行列 $mP(\Delta t)$ によって,

$$mU(\Delta t) = mU^{(0)} \cdot \prod_{k=1}^{\Delta t} P(k, 1, \Delta t), \quad mU^{(0)} = \{mP_1^{(0)}, \dots, mP_n^{(0)}\}$$

$$mP_n^{(0)} = \sum_{X\text{-region}} \sum_{N_m, X} \bar{F}_m^X (1 - \bar{F}_m)^{N_m - X}, \quad \bar{F}_m = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} \exp(-e_{mj}) \quad (2)$$

となる。 e_{mj} は管路 m の m_j 番目の基本要素の期待平均破壊回数で平均被害率・地盤条件などを勘案して決定した。 $P(\cdot)$ は被害・漏洩の初期調査, 消火・給水の緊急活動, 停電・資材の解消, 操作の停止から本格的修理作業に致する人的・物的対策をもとに時変復旧率(or 方針)を要因として決定する。他方, 平常時の各管路の非破壊確率 $R^{(0)} = \{r_1, \dots, r_n\}$ は式(2)から,

$$mP^{(0)} = (\bar{F}_m)^{N_m} \quad (3)$$

を構成成分と考えて推定した。

破壊ネットワークの状態は各復旧時刻毎に式

Fig. 4 Transition Probabilities of Restoration State of Typical Pipes

(1)の確率ベクトルから破壊箇所 X の期待数を求め, 1ステップ以前のそれと比較して, 復旧時の修理箇所(Fig.5のX印)を決定した。この方針に沿った物理的損傷の修復に従属してネットワークの幾何学的特性が一意的に決まる。同時に, この損傷ネットワークにおいて漏水と水圧不足を考慮した流量解析を高桑の手法によって実施した。このとき中損傷状態の破損孔は漏洩を生じるので, 仮節節点として初期設定した。給水機能の劣化には mDR_t の経時特性を用いて, 指定した破損孔に管路口径の随時変化を要請した。その結果, 復旧毎に破損位置も含めた各節点の水圧 E_i , 漏水量 λ_i , 取り出し水量 ρ と各管路の流量 mQ が求まる。

連結性に依存した機能性の十分条件は周辺地域に所定の流量を供給可能かの条件定義から, 正常運転時の設定値(mQ_{nor})と比較して需要水量の不確定性を考慮し, 以下の指標を導入して予測した。ここで流量 Q の不規則変動はハウス分布に従うとしている。

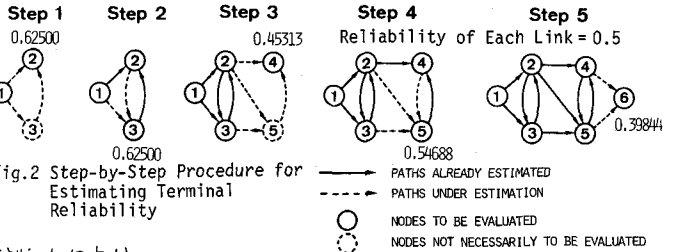


Fig. 2 Step-by-Step Procedure for Estimating Terminal Reliability

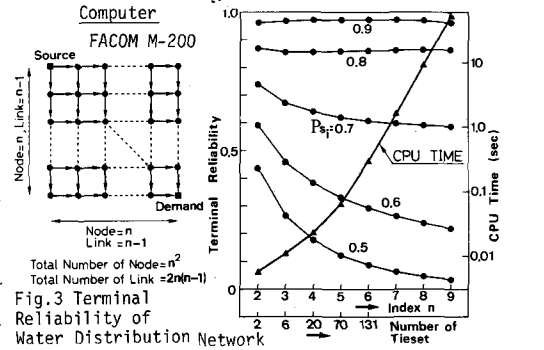


Fig. 3 Terminal Reliability of Water Distribution Network

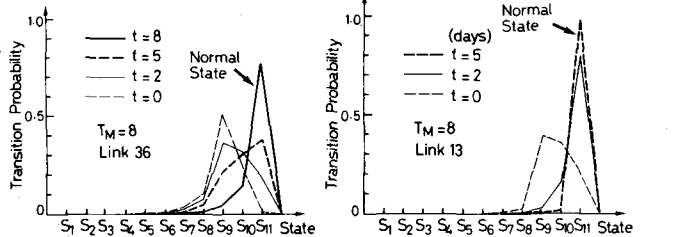


Fig. 4 Transition Probabilities of Restoration State of Typical Pipes

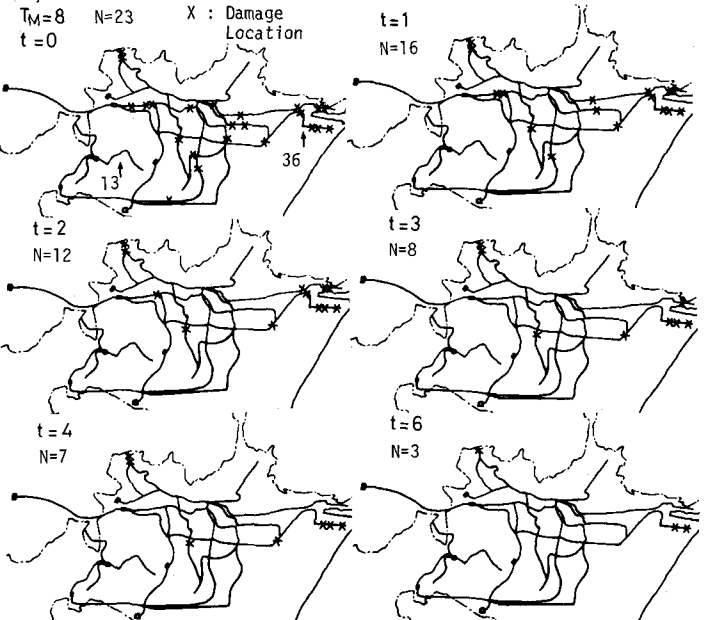


Fig. 5 Restoration of Damage Locations of Pipelines

$$mFC_t = P_r(mQ_i < mQ(t) \leq mQ_o) / P_r(mQ(t) \leq mQ_{nor}) \quad (4)$$

さらに必要十分条件としての復旧状態における各管路 m の機能確率は、

$$mP(t) = P_r\{(mX_{ij}=1) \cap (mQ \geq mQ_a)\}_t = P_r\{(mQ \geq mQ_a) / (X_{ij}=1)\}_t \cdot P_r\{X_{ij}=1\}_t$$

$$\equiv mFC_t \times (mP(0) \times mDR_t) \quad (5)$$

よって近似的に表現した。ここに mX_{ij} は管路 m の両端 i, j 間の連結状態を代表するBinary Random変数、 mQ_a は必要最低流量である。

任意の供給端から各需要端への機能確率と連結確率は各管路 m に式(5)とそれに $mFC_t=1$ と置いた式を算定して求めていく。ただし周知のように、大規模ネットワークの状態(or タイセット, カットセット)の総数を 2^L のオーダーの計算を要するので、その厳密解を得ることは事実上不可能である。本研究ではこの点を改善するために文献1)で示した手法を適用している。これは原ネットワークを一連のサブシステムに分割し、それらの伝達経路を見出すことにより、Inclusion & Exclusionの確率法則を小次元で利用するものである。具体的にはFig.2のようにstep by stepに供給端1と需要端6間の信頼性を追跡するもので、全ての管路が0.5の信頼度を有すると最終的に0.39844に陥る。またFig.3のループ形式の網目状配水管網で $n=8$ (総節点64, 総管路112)としても計算時間は10秒も要しない。本研究では復旧時刻毎の破壊ネットワークにこの手続を両性能に施すので計算容量と時間の低減を計ることが要求され、そこでこの手法を採用した。

上記解析の流れを示したのがTable 1のフローチャートであり、全ての管路が $mDR_t=1, mFC_t=1$ の平常時状態に回復するまで繰返し、各復旧段階における所定の特徴を検討していく。最終的にシステム全体の完全復旧時間は T_M となる。

3. 数値計算例および考察

埋設管システムの節点と管路の水理学的諸元及び機能破壊基準パラメータを設定し、各管路の初期確率ベクトル $mU(0)$ を計算した

が、いくつかの管路では平常状態 S_{11} でかなり高い非破壊確率を有していた。復旧率 $m\nu(\Delta t)$ は各管路とも同一、 Δt に1日を採用し、 $T_M=8$ には $m\nu(0\sim5)=0.2$, $m\nu(6\sim14)=0.5$ を、 $T_M=15$ には $m\nu(0\sim14)=0.1$, $m\nu(15\sim19)=0.2$ を要し、両者の相違として多段階の修理作業の遅延を考慮した。

Fig.4は式(1)で求めた $T_M=8$ における状態確率分布の推移の代表例である。管路13と36に被害を生じるならば各々5日と8日で復旧し、工事の稼働とともに平常状態へ移行している。しかし、地震直後($t=0$)の破壊ネットワークのシミュレーション結果(Fig.5, $N=23$)からもわかるように構造と地盤強度の弱い箇所では損傷を受け易く、管路13は無被害でありFig.4の状態変化に直接関与し

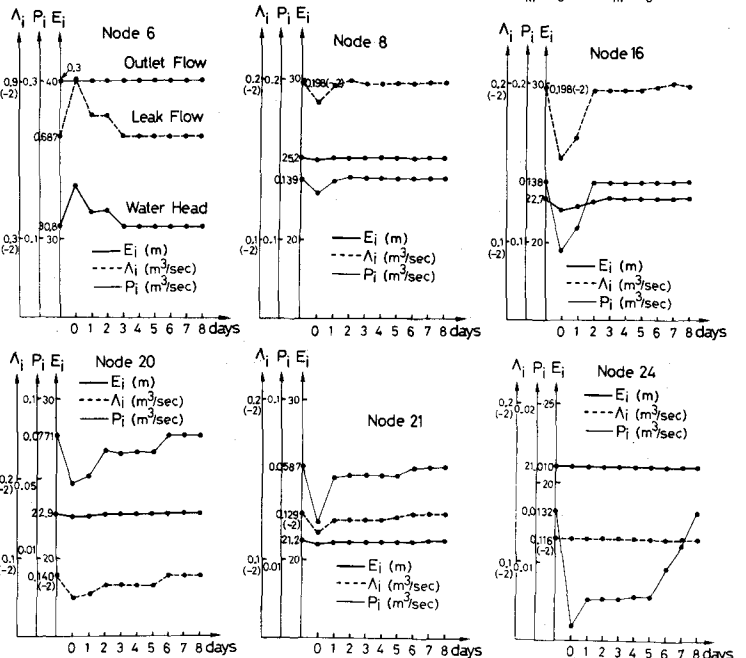


Fig.7 Time-dependent Results of Flow Analysis at Each Node

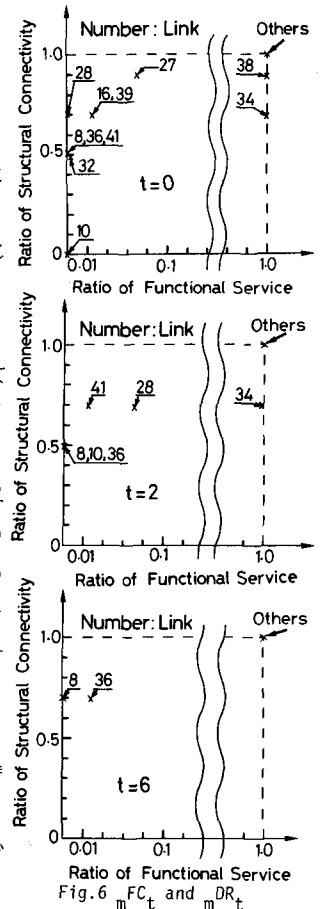


Fig.6 mFC_t and mDR_t

ない。復旧箇所_tの進展状況を示した Fig.5 から、管路 8 と 36 の修理は遅く、総じてシステム内の需要末端側よりもむしろ供給端側からの優先的な修復活動を發揮している。

本研究で定義した 2 つの指標 mFC_t と mDR_t の経時変化 ($t=0,2,6$) は Fig.6 のようになる。管路 34 と 38 は連結性能が悪いわりに機能性能が良く、Fig.5 の破壊位置に左右されてシステムの供給バランスがくみれたことを示唆する。原節点の物理量 (E_i, A_i, P_i) の時刻歴は Fig.7 の挙動を呈し、N 個の破壊孔の漏洩に伴う二次災害と機能劣化で、取り出し水量又は漏水量あるいは両者とも低下している。特に節点 24 で水量不足が著しく、完全復旧時まで破壊箇所 (Fig.5) の漏水現象に起因して回復しない。他方、節点 6 の E_i, A_i は地震直後に増加するが、管路 10 の破壊で断面収縮によって疎通しない不足水量が節点 6 に流出して平常時よりも超過したからで、逆に P_i は需要水量と給水管内流量の大小によるバルブの開閉操作の設計条件から許容値を保持している。

2 ケース ($T_M=8, 15$) につき、Fig.8 には任意の供給端から各節点への機能性 (実線) と連結性 (破線) を確率量で表示した。各水源からの同時給水能力と節点間の構造的な連結状態の尺度は他の末端 (13-15) において平常時と同じ特性を發揮した。同図から、Fig.5 の復旧状況で判断すると、3 つの水源からの機能的なタイセットの数と各管路の破壊程度に応じて、復旧時刻上の両性能の相対的な相違が明確に現れている。並列系のパスは直列系のそれらに比べて需要点における水圧が高く必要水量もある程度確保され破壊箇所での漏洩も少なく、その結果供給機能に対する軽微な被害状況を反映している。節点 25 での両性能にあまり相違を有さないのは水源 2 から完全に水量を確保できるからである。復旧率と接続管路の修理経過に応じて、需要に対し供給水量の少ない期間が長い様相を呈す。この傾向より、水源から遠くて震災時の機能性の波及を強く受ける地域で比較的集中して修理することも戦略的に重要であろう。他の節点も含めて復旧時の両性能を正常運転時の設定値で除した値は Fig.9 のようになる。破壊と修理パターンに従属して、システムの連結性能が中損傷であっても給水機能性能は大損傷に陥ることがある。空間的な拮抗りを有するシステムの機能損傷の尺度で耐震上計量化していく意義があろう。

謝辞 本研究の遂行に当り京都大学工学部・家村浩助教に謝意を表す。

参考文献 1) Noda, S., Yamada, Y., Iemura, H. and Ogasawara, Y., "A Decomposition Method for Lifeline Risk Analysis," A paper submitted to TCLEE/ASCE Specialty Conference in Oakland, CA, August 1981. 2) Hoshiya, M., "Seismic Damage Restoration of Underground Water Pipelines," A paper prepared for Review Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Research, Honolulu, January 1981. 3) 仙台市水道局, "1978 年宮城県沖地震による被害とその対策の記録," 昭 53.10. 導管本部, "1978 年宮城県沖地震と 3 号カス一その 1. カス供給設備の震害調査報告書," 昭 53.8. 4) Barlow, R.E. and Proschan, F., "Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models," Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1975. 5) Henley, E.J. and Kumamoto, H., "Reliability Engineering and Risk Assessment," Prentice-Hall, 1980. 6) 高桑哲男, "配水管網の解析と設計," 森北出版社, 1978.8.

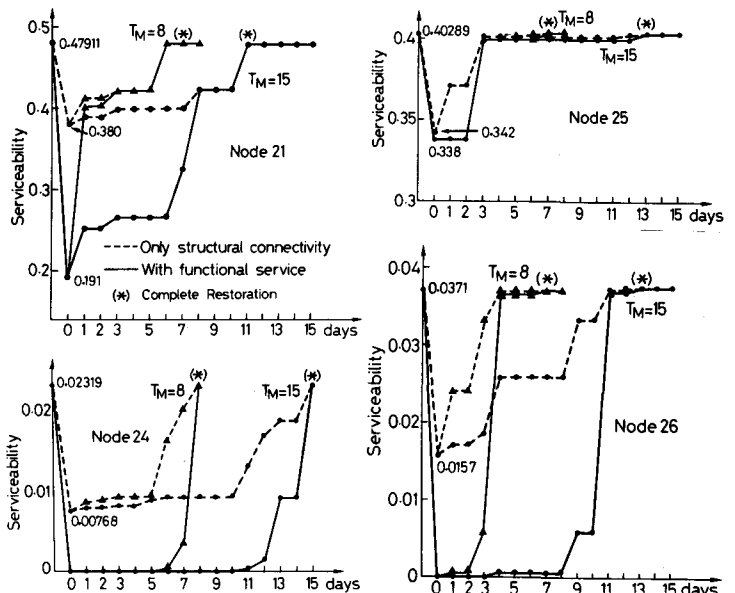


Fig.8 Comparison Between System Serviceability and Connectivity in the Restoration Stages (: Probabilities)

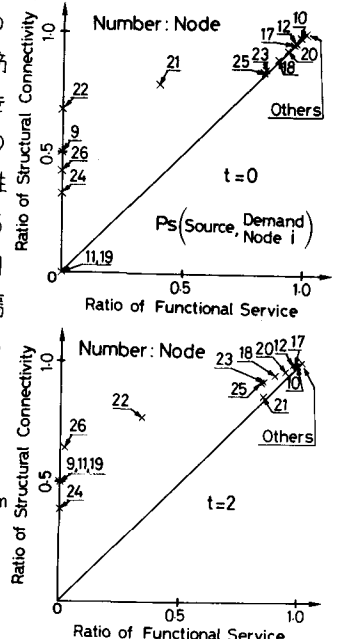


Fig.9 Correlation Between Loss of Connectivity and Unserviceability compared with Normal State