

# プロセス情報を用いた地震時の断水予測法

栗栖 宏充<sup>1</sup>・本間 弘一<sup>2</sup>・瀬古沢 照治<sup>3</sup>・福原 雅之<sup>4</sup>・福島 学<sup>5</sup>

<sup>1</sup>工修 (株)日立製作所 システム開発研究所 (〒215-0013 川崎市麻生区王禅寺1099番地)

<sup>2</sup>工博 (株)日立製作所 システム開発研究所 (〒215-0013 川崎市麻生区王禅寺1099番地)

<sup>3</sup>工博 (株)日立製作所 システム開発研究所 (〒215-0013 川崎市麻生区王禅寺1099番地)

<sup>4</sup>工学 (株)日立製作所 システム事業部 (〒101-8010 東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地)

<sup>5</sup>工学 (株)日立製作所 大みか工場 (〒319-1293 日立市大みか町五丁目2番1号)

近年の相次ぐ災害を契機に、ライフラインの地震被害をリアルタイムに予測するための様々なシステムが開発されている。しかしその多くは、直後の物理的被害を予測するに留まり、その後入手できる新しい情報を反映して予測を更新したり、機能的障害を予測するまでには至っていない。供給継続が強く求められる水道については、そういった機能への必要性が高い。

阪神・淡路大震災下では、流量と水圧というプロセス情報が、水供給の重要な判断材料の一つとして役立っていたという現実を踏まえ、この情報を積極的に予測方法に取り入れることを試みた。これにより、水道における機能障害である断水のリアルタイム予測をシミュレートし、その実用性について検討した。

**Key Words :** waterworks, earthquake, network, damage estimation, water suspension

## 1. まえがき

水道は、日常生活を支える基盤的システムとして必要不可欠である。生活用水だけでなく、消火用水や機器冷却水の供給も担っており、たとえ災害時であっても最大限可能なサービスを継続しなければならない。本稿では、特に地震災害時について、そのための難しい意思決定支援を目的とし、プロセス情報を積極的に利用した断水予測方法を提案する。

近年の地震対策では、予知や予防に加え、発災後の緊急措置をいかに行うか、ということがより重要視されるようになってきた。迅速な初動や復旧ができるためには、的確かつ臨機応変な意思決定が求められる。この判断にもっとも必要となるのが被害状況の把握であろう。阪神・淡路大震災での水道被害の報告からも、面的な分布をしており、大部分が埋設されている管網の状況把握が困難を極め、迅速な対応の障害となったことが明らかになっている<sup>1)</sup>。水道だけでなく、自治体の防災<sup>2)</sup>、鉄道<sup>3)</sup>、ガス<sup>4)</sup>などの分野でも、地震直後の被害状況を即座に把握するためのリアルタイム被害予測システムが開発されており、その必要性の大きさを物語っている。

ライフラインの中でも、ガスは2次元的に広がる埋設管網を持つという点で水道と類似している。東京

ガスによる被害予測システムSIGNALは、すでに実用化の段階に達している。このシステムでは、分布的に配置した地震計群から得たデータおよび、過去の被害統計から分析した地震強度と管路被害率の相関式を用いて、発災直後に管路被害分布を算出する。しかし、システムの主たる目的が、緊急遮断の意思決定支援にあるため、刻々と変化する状況を把握するという機能は備わっていない。

可燃物であるガス供給が、安全確保のための緊急遮断を最重要とするのに対し、水道では供給の継続性がより重視される。従って、地震直後だけでなく、復旧過程での被害状況も随時把握できることが必要である。さらに、単に物理的な被害だけではなく、機能的な被害である断水状況が把握できるということも、応急的な給水を継続させるには重要であろう。断水予測を行うためには、管網を単なる構造物ではなくネットワークとして扱う必要がある。即ち管網解析を施さねばならないが、このためには被害箇所や漏水量の詳細な情報が必要であり、地震時にこれらの情報を正確に得るのは非常に困難である。このため、ある確率分布に従って発生させた想定被害による解析を繰り返してその平均を求めるモンテカルロ法をベースとする手法がこれまで主に採用されてきた<sup>5)</sup>。しかし、このような手法では、事前防災のた

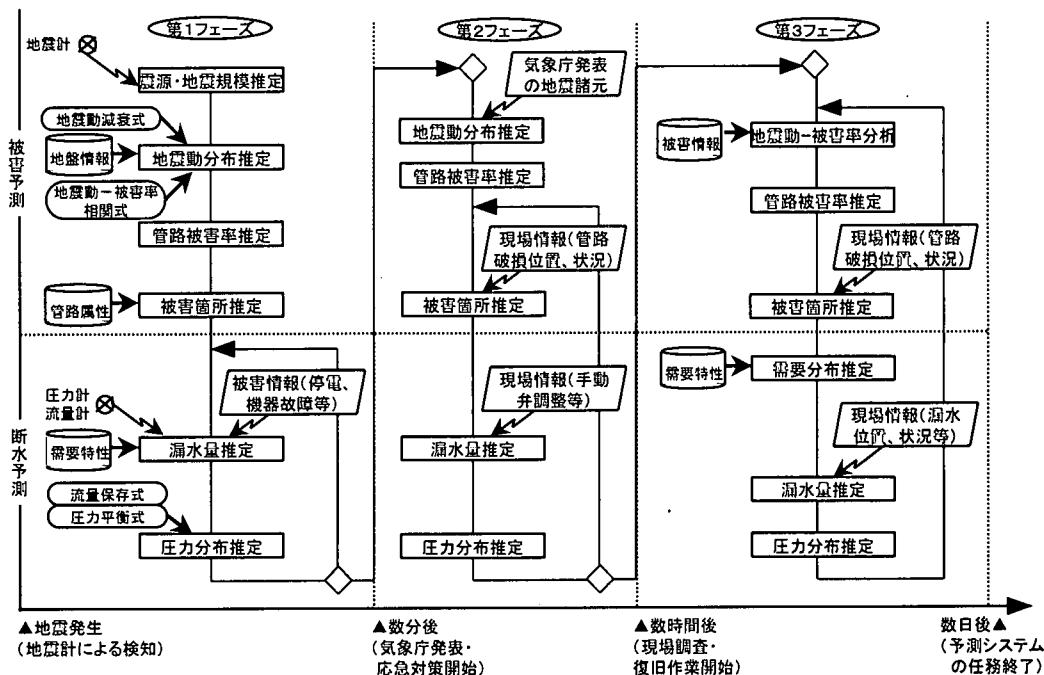


図-1 予測手法全体の処理フロー

めの信頼度評価としては非常に有効であるが、地震発生時の意思決定支援には、必ずしも適用可能とは限らない。

本研究では、できるだけ想定をせずに、地震発生後に集まってくる被害や復旧に関する情報を随時取り入れて、常に更新できるような被害予測を行った。そして、水量と水圧というリアルタイムのプロセス情報を利用することによって、把握が困難な漏水を見積もり、断水予測を試みた。従来の予測方法は、すべて地震情報のみを用いて行うものであった。しかし、阪神・淡路大震災の時でも概ねテレメータは機能し、かつ有効な判断材料となったと報告されている<sup>9)</sup>。プロセス情報を利用するという考え方は、この事実に基づくものである。

以下、2章では、予測の更新ということに重点をおいた被害予測と断水予測のアルゴリズムについて述べる。3章では、実際のデータを用いてシミュレーションした結果を示し、4章で考察を述べる。

## 2. アルゴリズム

地震発生から復旧に至る過程では、被害状況だけでなく、得られる情報の質や量が時間とともに大きく変化するため、予測の前提条件やアルゴリズムも一貫したものとはなり難い。阪神・淡路大震災で課

題となった迅速な初動を支援できるシステムを提供するという立場から、本稿で提案するアルゴリズムは、復旧体制が整うまでの数時間程度を主たる対象とする。このようなフェーズで、断水予測のための管網解析を行うに十分な情報を得るのは、きわめて困難である。具体的には、供給源でのエネルギー位、管路の接続状態、そして漏水を含んだ需要分布、が必要となる。それぞれ、以下のような前提およびアプローチを基本としている。

供給源でのエネルギー位は、配水池の水位あるいはポンプの吐出圧力であるが、これらについては常に計測データが得られているものとした。

管路の接続状態については、地震動による被害の影響が不確定である。これについては、従来から行われてきたように、過去の被害統計から得られる地震動と被害率の関係式に基づく方式を採った。但し、管網解析を行うには具体的な被害箇所を特定する必要がある。そこで、算出される被害率に基づいて、より尤もらしい箇所を初期値として割り付け、逐次集められる確認情報で即時修正できる方法を採用した。

需要分布は、管網内の数点で得られている計測データを用いて同定するという考え方を導入した。漏水量については、地震発生後しばらくは純粋な需要量にあまり変化がないと仮定し、発災直前からの送出総量の増分から見積もった。

## (1) 予測手法の全容と提案アルゴリズムの位置づけ

本研究では、地震発生後刻々変化する状況を3つのフェーズにわけて予測手法を考えており、本稿で提案するアルゴリズムは、第2フェーズまでをカバーしている。図-1に地震後の経過時間との関係で処理フローを示す。各フェーズでの処理は、被害箇所を割り付けるための被害予測、漏水量を推定してから圧力分布を計算する断水予測、の2つからなる。

第1フェーズは、地震発生から応急対策が開始されるまでである。まず、管路の物理的被害を予測するために、観測された地震情報から地震動分布を求める。このフェーズでは、停電や通信路の切断等を得られる情報がきわめて限定される。従って、外部情報に頼らない自己完結型に近づけるため、1点のみのデータから震源と地震規模を推定し、それに基づいて地震動分布を求める方式とした。そして、地震動と被害率の相関式を用いて管路被害率を求め、さらにこれと管路長から被害箇所数を求め、材質や敷設年度から考えて最も損害を受けやすい地点に割り付ける。断水予測は、地震発生直前の需要量をまず与えて管網解析により得られる圧力と、計測されている圧力との差を利用して、逆に需要分布を推定する。この時、需要の補正量が漏水量と考え、これを被害箇所に割り付け、再度管網解析により、圧力分布を求める。圧力が不十分な地域を予測された断水領域と見なす。地震発生後、緊急遮断弁の作動やポンプ故障による送水停止等、即時確認できる被害情報は随時反映させながら、計測データのサンプリング周期毎に繰り返し実行していく。

第2フェーズは、応急対策が開始されるであろう数分後から、現場調査や復旧対策が開始されるであろう数時間後までである。このフェーズでは、気象庁による正確な震源情報が発表されていると考えられる。第1フェーズで推定した震源情報を修正し、再度被害予測を実行する。さらに、応急対策で管路被害に関して新しい情報が得られていれば、被害箇所推定から再度実行し、実際に確認されている被害箇所を差し引いた数を同様にして割り付ける。断水予測は、手動弁調整など管路に対してなされた応急対策を管網データに反映させ再度解析を実行する。その他の入力条件は第1フェーズと同じである。

第3フェーズは、復旧対策開始後から数日後までである。それ以降は、断水状況を把握するのに十分な情報が収集され予測を行う必要性が徐々に薄れていくと考えられる。このフェーズでは、調査によって得られた被害情報が蓄積し、被害率推定式そのものの再計算が可能となってくる。また、この時期になると、断水予測において地震直前の需要をベースに管網解析を行うのは無理があり、被災状況下での

需要分布を推定するモデルが必要となる。

本稿では、上記第3フェーズは今後の課題として対象外とする。なお、第1フェーズと第2フェーズの違いは、震源情報の与え方および追加される被害情報内容のみである。従って、次節以降のアルゴリズムに関する説明はフェーズの区別無く記述する。

## (2) 被害予測アルゴリズム

最初に、ある1地点における地震計の3方向の波形成分から以下の考え方に則って震源位置と規模を推定する<sup>7)</sup>。まずP波S波到達時間差からそれに比例する震源距離 $R$ を求め、これと初動速度振幅 $V_p$ およびマグニチュード $M$ の関係式、

$$M = 1.59(\log R + \log V_p) \quad (1)$$

より、マグニチュードを求める。続いて、震源深さ $h$ と震源距離 $R$ の比 $h/R$ 、鉛直成分と水平成分の振幅比 $V/H$ について以下の関係が過去のデータから導かれており、これを用いて震源深さを求める<sup>8)</sup>。

$$h/R = 1.742 \log(V/H) \quad (2)$$

最後に、縦波であるP波の振動方向が震央方位であることから、初動波形の鉛直成分と東西、南北それぞれの成分との相関から震央方位を求める。これと、震源距離、震源深さより震源位置が確定する。

続いて、以下の距離減衰式から計算される基盤での地震動に表層地盤種別<sup>9)</sup>毎の増幅率を乗じることによって各メッシュの地震動を算出する。なお、距離減衰式は、安中らが導出した以下の式を用いた<sup>9)</sup>。

$$\log V_{\max} = 0.795M + 0.0055h - 2.065 \log D - 0.607 \quad (3a)$$

$$D = R + 0.35e^{0.65M} \quad (3b)$$

ここに、 $V_{\max}$ は最大速度、 $M$ はマグニチュード、 $h$ は震源深さ、 $R$ は震源距離をそれぞれ表す。一方、翠川らは、地盤別に同定した距離減衰式の比較から増幅特性を分析し、地形による要因が大きいとの結果を得ている<sup>10)</sup>。第三紀あるいはそれ以前の丘陵地は、ほとんどがそれ以降の層の堆積地盤となっていることから、このカテゴリーを基盤とみなして増幅率を算出した。表-1に地盤分類と増幅率を示す。

次に、地震動-被害率相関式から管路被害率（被

表-1 地盤種別毎の地震動増幅率

地質区分	地形区分	増幅率
沖積層	埋立地	2.63
	三角州	2.00
	砂州・自然堤防	1.78
	扇状地	1.32
洪積層	ローム台地	1.32
	砂礫台地	1.29
	丘陵地	1.41
第三紀以前	丘陵地	1.00

害箇所数/Km)を求める。ここでは、以下の高橋らが導出したSI値と鋼管（SP）の被害率の相関式を用いた<sup>11)</sup>。

$$D_{sp} = \begin{cases} 0 & (SI < 30) \\ 0.0340(SI - 30)^{1.12} & (SI > 30) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 $D_{sp}$ は鋼管の被害率、SIはSI値をそれぞれ表す。この式の精度について高橋らは、解析に用いたデータ点数が少なく相関度も高くないため信頼性にやや劣るとの見解を示している。しかしながら、阪神・淡路大震災の被害データの分析からは、埋設管被害とSI値はよい相関があるという結果が得られている<sup>12)</sup>。なお、SI値と最大速度 $V_{max}$ との間に相関係数0.971の強さで以下の関係があることが報告されている<sup>13)</sup>。従って、地震動分布計算から得た最大速度の分布と、式(5)よりSI値の分布を求めることができる。

$$SI = 118V_{max} \quad (5)$$

式(5)は鋼管の被害率についてのみを表しているが、管種や敷設年度によって被害率が異なることから、これらの要因を予測に反映させることを試みた。まず管種別の被害率を被害実績<sup>14), 15), 16)</sup>の平均から求め、鋼管に対する倍率 $C_i$ を以下に示すように比例係数とすることにより管種別の管路被害率とした。

$$D_i = C_i \cdot D_{sp} \quad (6)$$

さらに、敷設年度の要因を反映させる。得られている被害報告の範囲では、管種・敷設年度別に纏められたものがないため、今回は管種別の被害率から条件付き確率を算出した。管種が $i$ である事象を $type_i$ 、敷設年度グループが $j$ である事象を $age_j$ とし、管路が被害を受ける事象を $damage$ とする。事象 $X$ に含まれる

表-2 管種・敷設年度別被害率の算出に用いた係数

管種	倍率 ( $C_i$ )	老朽管の割合 ( $r_{ij}$ , $R_{ij}$ )	新設管の割合 ( $r_{ij}$ , $R_{ij}$ )
ACP	1.92	1.000, 1.000	-
VP	1.86	0.636, 0.435	0.364, 0.565
CIP	0.75	0.999, 0.393	0.001, 0.607
DCIP	0.25	0.682, 0.407	0.318, 0.593
SP	1.00	0.297, 0.262	0.703, 0.738

ものの個数を $N(X)$ とすると、管種が $i$ で敷設年度グループが $j$ である管路の被害率は、

$$\begin{aligned} D_{ij} &= P(\text{damage} | \text{type}_i \wedge \text{age}_j) \\ &= \frac{N(\text{type}_i \wedge \text{age}_j \wedge \text{damage})}{N(\text{type}_i \wedge \text{age}_j)} \\ &= \frac{N(\text{type}_i \wedge \text{damage})}{N(\text{type}_i)} \cdot \frac{N(\text{type}_i)}{N(\text{type}_i \wedge \text{age}_j)} \quad (7) \\ &= \frac{N(\text{type}_i \wedge \text{age}_j \wedge \text{damage})}{N(\text{type}_i \wedge \text{damage})} \\ &= D_i \cdot (1/r_{ij}) \cdot R_{ij} \end{aligned}$$

となる。ここで、 $r_{ij}$ は管種 $i$ に占める敷設年度グループ $j$ の割合で、管網データより算出できる。 $R_{ij}$ は被害のあった管のうち、管種 $i$ に占める敷設年度グループ $j$ の割合で、過去の被災データから被害数を集計することによって得られる値で仮定した。なお、管種は石綿セメント管(ACP)、塩化ビニル管(VP)、鋳鉄管(CIP)、ダクタイル鋳鉄管(DCIP)、鋼管(SP)の5種、敷設年度グループは耐震性診断のための年度区分<sup>14)</sup>で、ACPは区分なし、VP, CIP, DCIPについては、敷設後20年以前/以降で老朽管グループと新設管グループ、SPは敷設後35年以前/以降で老朽管グループと新設管グループに区分した。それぞれの管種・敷設年度グループの係数および割合を表-2に示す。

以上より任意の地点での被害率が計算でき、これに管種・敷設年度別の管路延長を乗じることによって被害箇所数を得る。しかし、この計算をそれぞれの管路についてそのまま実行すると、0.5箇所というような実数値での被害箇所数を得たときに、どのように判定するかという問題がでる。そこでまずそれら実数値の被害箇所数の総合計を四捨五入したものを被害箇所の総数とし、この数との整合性をとりながら被害箇所を推定していく以下の方法を採用した。

地理情報を計算機で扱う場合、矩形のメッシュ単位で処理をする。この方式との関係上、被害箇所の

総数を、まずメッシュ毎の被害箇所数に配分する。管種・敷設年度グループ別のメッシュ内管路延長に式(6)、(7)によって得られるそれぞれの被害率を乗じることによって、実数値で被害箇所数が得られるが、これらの全域にわたる総和を丸めて整数とした値を被害箇所総数とする。実数値のメッシュ毎被害箇所数を単にそれぞれ四捨五入しただけでは、それらの合計値と総数が一致しないなどの矛盾が起きる。そこで、比例代表制選挙において、政党毎の得票数から議席数を公平に決定するためのアルゴリズムであるQuota法<sup>17)</sup>を適用した。政党が割り当てるべきメッシュに、得票数が実数値で算出されたメッシュ内被害箇所数に、それぞれ対応する。実数値の被害箇所数を指標に、この値が最も高いメッシュに被害箇所を1つ割り当て、そのメッシュの実数値から1を減じる。これを被害箇所総数に等しい回数だけ繰り返す。メッシュ毎の被害箇所数が確定したら、全く同様の方法で被害箇所を割り当てる。即ち、被害箇所数算出の際に一つの単位とした同一管種、敷設年度が連続する各部分について、実数値の被害箇所数を指標にメッシュ内の総数を配分する。

以上一連の処理により、被害予測の初期値が得られる。その後は、確認された被害箇所情報の入力をトリガーとして被害箇所の割当てが再計算される。即ち、確認箇所を優先的に割当て、被害箇所総数から減じた上で同じ処理を実行する。なお、被害箇所数自体は変化しない。前述したように、被害情報が蓄積してくる第3フェーズにおいては、それらを用いた被害推定式そのものの更新によって被害箇所数を真値に近づけることが考えられるが、この有効性を実証するのは現時点ではきわめて困難であり、本稿の適用外とする。

### (3) 断水予測アルゴリズム

管路被害の推定結果を利用し、管網解析をベースに断水領域および断水人口を見積る。即ち、管網を構成するすべての節点と管路それぞれで成立する以下の流量収支式(8a)と圧力平衡式(8b)を、流量と圧力に関する連立方程式として解くことによって流量、圧力分布を得る<sup>18)</sup>。

$$\sum_{j \in A^-(i)} x_j - \sum_{j \in A^+(i)} x_j = \begin{cases} -w_i & (i \in N_{IN}) \\ y_i & (i \in N) \end{cases} \quad (8a)$$

$$P_{s(j)} - P_{e(j)} = r_j |x_j|^{1.85} \operatorname{sgn}(x_j) \quad (8b)$$

ここに、 $N$ は節点の集合、 $N_{IN}$ は流入点の集合、 $x_j$ は管路 $j$ の流量、 $w_i$ 、 $y_i$ はそれぞれ節点 $i$ の流入量、流出量、

$A^-(i)$ 、 $A^+(i)$ は節点 $i$ を始点とする管路および終点とする管路の集合である。また、 $p_i$ は節点 $i$ の圧力、 $s(j)$ 、 $e(j)$ は管路 $j$ の始点、終点、 $r_j$ は管路 $j$ の抵抗、 $\operatorname{sgn}(x)$ は $x$ の符号をそれぞれ表す。さらに $r_j$ は、ヘーゼンウィリアムスの実験式より、

$$r_j = 10.666 C_j^{-1.85} D_j^{-4.87} L_j \quad (9)$$

より得られる。ここに、 $C_j$ 、 $D_j$ 、 $L_j$ はそれぞれ管路 $j$ の流速係数、管径、管路長である。

上記方程式中、流入点の圧力および節点の流出量を既知量として与えると、未知数と方程式数が一致して一意に解が求められる。流入点の圧力は、配水池の水位もしくは送出ポンプの吐出圧力で、計測値を用いるものとする。節点の流出量は、需要量と漏水量の和で、以下に述べるように流量と圧力の計測値から収束計算により求める。

まず流入量は計測によって既知とし、その総和を検針データから得られる通常時の振り分け比率に従って各節点に割り付けたものを流出量の初期値として設定し、式(8)、(9)を解いて流量、圧力を求める。震災時は、多量の漏水が発生し、需要も通常と異なっているはずであるから、当然のことながら解析の結果得られた圧力と計測点での圧力は一致しない。この差を利用して、逆に需要分布を推定する<sup>19)</sup>。すなわち、差が最小となるように、節点の流出量を補正する。しかし、計測点に比べて、節点は非常に多いため、これらを計測点数と同じオーダの数にグルーピングして一律に変化させる。このグループ単位を配水エリアとする。この結果、配水エリア毎の推定流出量が算出される。

この推定流出量と需要量の差を漏水量と考える。エリア毎の需要量は、地震直前の需要量に給水装置の非被害率を乗じたものとする。従って、エリア毎の漏水量は、以下の式(10)により見積もる。

$$y_{leak} = y_{supply} - y_{demand} \times (1 - D_{equip}) \quad (10)$$

ここに、 $y_{leak}$ 、 $y_{supply}$ 、 $y_{demand}$ はエリア毎の漏水量、推定流出量、地震直前の需要量、 $D_{equip}$ は給水装置の被害率である。給水装置とは、配水管から分かれて家庭まで引き込まれた給水管やこれに取り付けられた蛇口などの給水用具の総称である。その被害率は、全給水戸数に対して給水装置に被害を受けた戸数の占める割合と定義する。なお、本稿の範囲では表-3に示すように阪神・淡路大震災の統計<sup>20)</sup>を参考に、給水装置に被害を受けた戸数を、道路上給水管と宅地内の

表-3 阪神・淡路大震災での漏水修繕件数（神戸市）

全給水戸数（H6 年度末時点）	651,689
漏水修繕件数 （H7.3.31 までの累計）	
道路上給水管	11,823
宅地内	50,504
修繕件数／給水戸数	0.0956

漏水修繕件数の和で代用し、全域一律に0.1とした。

こうして求めた漏水量を、被害箇所での管路断面面積に比例して配分する。この被害箇所毎の漏水量を最寄りの節点の純需要に加算し、再び式(8)、(9)を用いて管網解析を行うことによって、発災直後の圧力分布を求める。

このモデルでは、管路が破損してもその地点から漏水が発生するが、下流へも水は流れ、完全な切断はないことになる。完全な切断は、その後の調査や弁操作の実行の情報を入力することで表現することとし、発災直後は起きないと仮定している。

最後に、人口分布データを利用して断水人口を求める。地理情報システムとの親和性の点から、算出された節点毎の圧力をメッシュ毎のデータにする。節点と節点の間は線形補完によって圧力を求め、メッシュ内の平均圧力をもって代表圧力とする。断水は配水管路網と各需要者とを接続する給水装置の被害に起因するものと、給水装置は無事であっても、配水管路網の圧力不足で水が取り出せないのが原因のものに分類される。これまでの計算で得られた圧力分布の結果圧力不足と判定されたメッシュは、すべて断水人口、それ以外のメッシュについては、給水装置被害率に比例した断水人口が発生すると考える。これらを加えることにより、断水人口分布を求めることができる。

以上の断水予測は、前段の被害予測結果の更新を反映しつつ、プロセス情報のサンプリング周期毎に再計算される。前述したように、提案アルゴリズムは、最初の2フェーズまで、即ち地震発生直後から数時間後程度までをカバーするものとしている。従って断水の長期化による需要の変化、必要送水量の不足などの現象は適用外となる。

### 3. シミュレーション

実システムに近いレベルでプロトタイプを試作し、その上でシミュレーションを行った。データは、実在の都市の管網および阪神・淡路大震災発生時に観測された地震データ<sup>21)</sup>を用いた。以下にプロトタイプのシステムの構成とシミュレーション結果を示す。

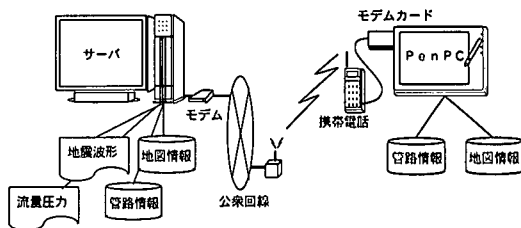


図-2 プロトタイプのシステム構成

#### (1) プロトタイプおよびシミュレーションの前提

プロトタイプの構成を図-2に示す。システムは、拠点のサーバと現場のモバイル端末とによるクライアントーサーバ構成である。プロトタイプでは、サーバ、クライアントともWindows95をOSとするPC 1 台とし、広域通信を模擬するためにそれらを電話回線で接続する構成とした。但し、クライアント機は、携帯端末から無線通信でのアクセスを模擬するため、PenPCと携帯電話のセットとした。

管路情報、地図情報は、給水人口数十万人規模のある都市の実データを用いており、サーバPC、PenPCの双方に記憶させた。従って、これらの情報についてサーバクライアント間で行われる通信内容は、差分情報のみである。地震データは、阪神・淡路大震災時に大阪で観測された波形データを予めサーバに記憶しておいて用いる。また、流量や圧力といったプロセスデータも、同様にしてサンプルを予めサーバに記憶させておく。図-3に管網図および強震計測点、プロセス計測点を示す。なお、この都市では各配水池からのポンプ吐出圧と送出流量および管網上の節点圧力は実際に集中監視しているが、強震計測点は仮想のものである。今この都市で、阪神・淡路大震災時の大阪での地震波形が観測されたと仮定する。そして、地震直後には総配水量が1.5倍になり、東部で極端な圧力低下があり、表-4に示すようなプロセスデータが得られたと仮定する。

#### (2) 被害予測の結果

まず、表-5に震源推定結果を示す。震源深さの誤差が大きいが、式(3a)右辺における各変数の定義域と係数を勘案すれば、変数 $h$ の誤差影響は他の変数とほぼ同程度である。また、本推定が正確な震源情報が得られるまでの補完的位置づけであることから、推定結果は許容範囲とする。

図-4は2章で述べたアルゴリズムに基づく管路の被害予測結果である。地震動分布推定では、軟弱地盤を多く含む市の中心部でより強い地震動になるという推定を出しており、この影響で中心部に若干多くの被害が出ている。

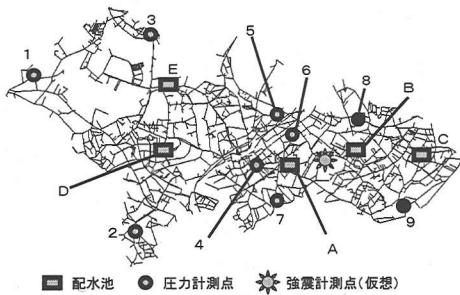


図-3 管網および計測点

表-4 シミュレーションに用いたプロセスデータ

総配水量 ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	地震直前	6000	監視圧力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	計測点1	2.3
	地震直後	9998		計測点2	1.5
吐出圧力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	配水池A	2.77		計測点3	2.9
	配水池B	2.41		計測点4	1.0
	配水池C	2.50		計測点5	1.3
	配水池D	2.72		計測点6	2.0
	配水池E	2.39		計測点7	1.7
				計測点8	0.1
				計測点9	0.1

次に、現場で応急対策を実施して確認された被害情報を刻々と収集する過程を、前項で述べたプロトタイプを用いて模擬した。図-5は、現場のモバイル端末の画面例である。画面には、サーバで計算された予測被害箇所が地図上に表示されている。この結果を参考に作業者は現場へ向かい、確認された被害を画面上左下のウィンドウを介して入力し、即時サーバへ送信する。サーバ側では、図-6に示されるように、確認済みの情報を整理して表示するとともに、再計算できるようにデータが登録される。再計算では、予測被害箇所数から確認済みの被害数を差し引き、それらを再度同じアルゴリズムで割り付ける。この都市で実際に地震が起きたわけではないため、更新による予測精度向上の検証は不可能であるが、携帯端末と無線を介して収集情報の整理や予測計算への取り込みが迅速に実行可能なことは確認できた。

### (3) 断水予測の結果

図-7は、需要推定による配水エリア毎の需要増加率を示している。計測点8および9で圧力低下があったことを反映し、配水エリアⅡおよびⅢで需要増加が見られる。増加分を配水エリアの全体漏水量と見なす。

図-8は、エリア毎の漏水量を被害推定結果より得

表-5 震源推定結果

	震源距離 $R(\text{km})$	震源深さ $h(\text{km})$	マグニチュード $M$
推定値	43.2	24.6	7.3
気象庁発表値	44.1	14.0	7.2
誤差	-0.9	+10.6	+0.1

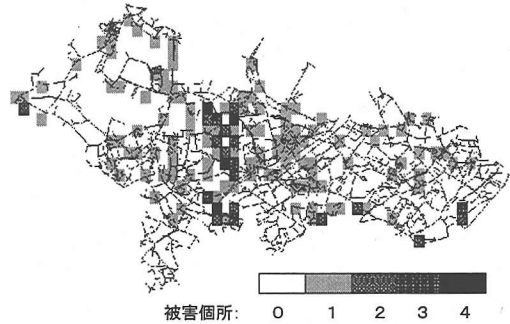


図-4 被害予測結果

られた箇所に割り付け、再び式(8)、(9)による管網解析を行った結果得られた断水予測結果である。なお、圧力が $0.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下の地域を圧力不足による断水とみなした。さらに、メッシュあたり人口から断水人口の分布を表示したものが、図-9である。

一方、計算時間については、被害予測、断水予測を通じて3分以内でできることを確認した。地理情報のメッシュは $375\text{m} \times 250\text{m}$ で約900、管網は、口径75mmまでの管路を対象とし、節点数約2400、管路数約3000である。使用したCPUは、Pentium-Pro 200MHzである。

## 4. 考察

図-4と図-8, 9を比較すると、管路被害と断水領域は必ずしも一致していない。これは、単に管路被害を予測するのみでは、地震直後の意思決定の支援としては不十分であることを示している。もちろんこれは、地震動が市の中心部でやや大きかったにもかかわらず、東部で極端な水圧低下があったとした仮定を反映したものである。しかし例えば東部の配水を受け持つポンプの電源系統の不具合など、このようなケースは十分発生し得る。また、計測点の圧力低下という情報からだけでも大まかな断水は想像できるが、このケースでは配水エリアⅡとⅢで同じ圧力低下度合いでも断水状況は異なっており、管網の接続状態や配水池との位置関係などが、管網解析を

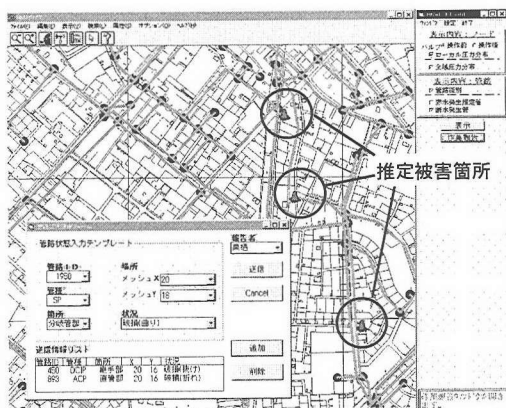


図-5 携帯端末の画面

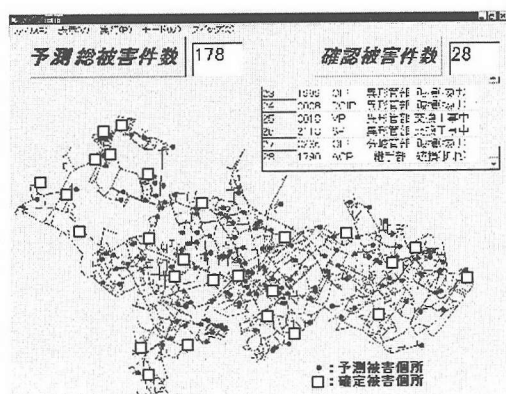


図-6 サーバの画面

行うことによって加味され、より定量的な断水予測がなされている。配水、飲料水運搬の目安として3リットル/day・人とされているので、例えば標準的な給水車の運搬可能量が2tとすれば、図-9の結果からさらに、必要給水車数約57台と算出できる。これは、単なる被害予測に比較し、意思決定にとって、より直接的な判断材料となっているといえる。

実用性の観点から今後検討すべき点としては、本稿の範囲外と前述した第3フェーズの実現も含め、以下のものが挙げられよう。

- 被害予測の更新手法として、単に確定情報を除外して被害箇所を再割り付けする方法を提案したが、その更新が真値へと漸近していくか否かの検証や、予測式そのものの再計算等、より豊富な実績データとの付き合い合わせによる検討が必要である。
- 需要量は、地震発生直前のものが継続するとして計算した。直後はそれで良いが、地震が大規模で復旧が長期におよぶ場合は、最低必要水量と通水戸数

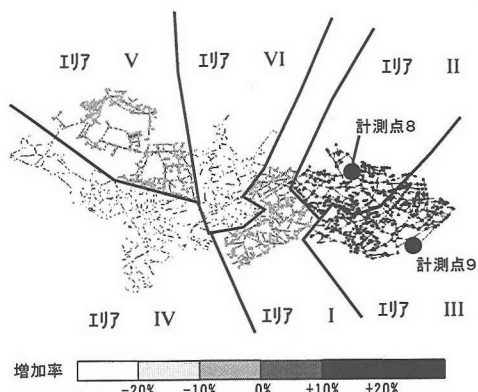


図-7 配水エリアと需要増加率

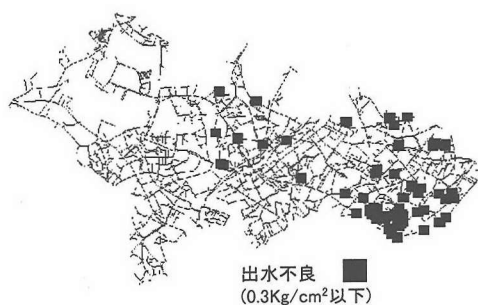


図-8 断水予測結果

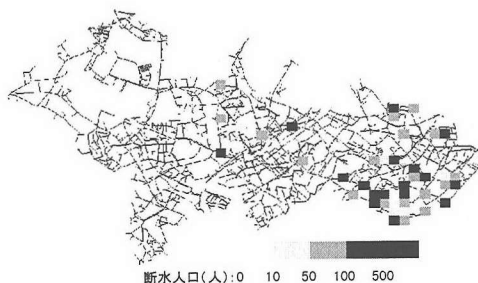


図-9 断水人口分布

などから見積もった需要量を割り当てていく必要がある。

- 携帯端末からの無線通信手段として携帯電話を用いたが、電話が輻輳する大災害時でも使用可能とするには専用の無線手段でも通信できるようにする必要がある。

## 5. むすび

地震発生後にリアルタイムで被害予測を行うことが最近の流れである。継続性が要求される水道では、



この予測が常に更新されていくことが必要であろう。これについては、被害情報を迅速に収集・整理するシステムのプロトタイプを構築し、収集データを即時反映した予測を実現していくための課題を明らかにした。

さらに重要なことは、物理的損壊だけでなく、その影響を把握できることである。そこで、プロセス情報を即時取り入れて、地震時の断水予測をする方法を提案した。計測圧力と計算圧力との差を利用して、把握が困難な漏水量を見積もる方法である。これについて、実在する水道管網のデータを用いて、シミュレーションを行い、意思決定のためにより直接的な判断材料を提供できるという意味で、その有用性を示した。

#### 参考文献

- 1) 神戸市水道局: 神戸市水道施設耐震化基本計画, 1995.
- 2) 篠崎功, 山田富美夫, 下川原忠彦: 総合防災情報システム, 東芝レビュー, Vol.51, No.5, pp.26-30, 1996.
- 3) 中村豊: 研究展望:総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集, No.531, pp.1-33, 1996.
- 4) 清水善久: 早期地震時被害推定システム-SIGNAL, 計測自動制御学会誌, Vol.36, No.1, pp.41-44, 1997.
- 5) 磯山龍二, 片山恒雄: 大規模水道システムの地震時信頼度評価法, 土木学会論文報告集, No.321, pp.37-48, 1982.
- 6) 野良英, 長倉祐之, 嶋内繁行, 斎藤仁, 蓮本了遠, 末田誠, 加藤高敏, 八重樫淳, 森研一, 内藤茂之: 緊急時情報通信システム, 水道協会雑誌, Vol.167, No.11, pp.29-40, 1998.
- 7) 宇津徳治: 地震学, 共立全書, pp.42-58, 1984.
- 8) 建設省国土地理院: 土地分類に関する数値情報, fileID KS-156-1, file名表層地質・地形分類・土壌, (財)日本地図センタ, 1996.
- 9) Annaka, T. and Nozawa, Y.: A Probabilistic Model for Seismic Hazard Estimation in the Kanto District, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, pp.107-112, 1988.
- 10) 翠川三郎, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集第442号, pp.71-78, 1992.
- 11) 高栖正洋, 鈴木崇伸, 磯山龍二, 吉川洋一: 埋設管被害と地震動強度の関係について, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.2083-2088, 1994.
- 12) 鈴木崇伸, 清水善久, 小金丸健一, 安藤広和: 埋設管被害と地震動・地盤との関連について, 第2回 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.163-170, 1997.
- 13) 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾: 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.2299-2304, 1994.
- 14) (財)水道管路技術センター: 水道の地震対策マニュアル, 1993.
- 15) 土木学会東北支部: 1978年 宮城県沖地震調査報告書, pp.325-344, 1980.
- 16) 土木学会: 1983年 日本海中部地震震害調査報告書, pp.642-659, 1986.
- 17) 有沢誠: 種々の比例代表制アルゴリズムの比較について, 第30回プログラミングシンポジウム, pp.75-81, 1990.
- 18) 宮岡伸一郎, 松本邦顕: 最小費用流計算による管網解析法, 電気学会論文誌, Vol.101-D, No.5, pp.261-268, 1981.
- 19) 福本恭, 栗栖宏充, 瀬古沢照治, 筒井和雄, 國井衛: 水需要特性を動的に考慮した管網解析方法, 電気学会論文誌, Vol.118-C, No.7/8, pp.1183-1189, 1997.
- 20) 神戸市水道局: 阪神・淡路大震災 水道復旧の記録, pp.121, 1996.
- 21) 気象庁: 平成7年(1995年)兵庫県南部地震の気象庁87型電磁式強震計の記録, 1995.

(1999. 1. 13 受付)

## A METHOD TO ESTIMATE WATER SUSPENSION CAUSED BY SEISMIC DAMAGE WITH REALTIME PROCESS INFORMATION

Hiromitsu KURISU, Koichi HOMMA, Teruji SEKOZAWA,  
Masayuki FUKUHARA and Manabu FUKUSHIMA

Most of seismic damage estimation systems do not update their result according to the data coming one after another. Neither do they estimate functional damage caused by physical damage. In case of water supply these features are very important because continuous supply is highly required even in a disaster. On the other hand it is reported that process data was one of the most important information for measures and recovery in the Kobe earthquake. This has lead us to propose a method to estimate water suspended area making use of pressure and flow data as well as seismic information. A result of simulation and consideration about practicality are shown.