

表-1 水道の地震対策の影響

	効果	費用
住民	生活用水獲得便益	
都市	都市活動用水獲得便益	
事業体	復旧工事費用削減、応急給水費用削減	対策実施費

表-2 生活用水の用途別水量とその給水便益

用途	使用量	代替物	1日当たり	水量当たり	累積
飲料水	2L	ボトルウォーター	200円/日	100円/L	200円
台所用水	70L	持ち帰り弁当	1500円/日	21.43円/L	1700円
風呂用水	80L	銭湯	300円/日	3.75円/L	2000円
洗濯用水	55L	コインランドリー	200円/日	3.63円/L	2200円
水洗便所用水	43L			3.49円/L	2350円

は住民を考慮した地震対策を検討するために、地震対策が住民に及ぼす便益を計量化することを試みる。

生活用水により得られる便益を用途別に表-2のように給水停止時にその代替物で得ようとしたときに必要となる価格で計測する。代替物の価格を水量で割ることにより、その用途に対する水量当たりの便益とした。水洗便所用水としては適切な代替物がなかったため、最も水量当たり便益の小さい洗濯用水と同じとし、総便益の値を丸めるために3.49円/Lとした。

以上の評価方法とシミュレーションモデルを組み合わせることで地震対策について検討した。

3. 地震対策の評価例

表-3に示すようなモデル都市を取り上げて各種の地震対策を評価した。水道協会の管路被害推定式を用い、震度7を想定して最大速度140kineとし、地盤は沖積平地、液状化は発生しないとして、管体、属具の破損件数を求めた。浄水場は破損しないが配水池には管路50箇所分に相当する破損が発生するとした。復旧工事費は管修繕1カ所当たり80万円、応急給水費は1日あたり120万円とした。

表-4に示すような6つの対策を実施しその効果を検討した。対策1、2、4についてはその費用も求めたが、他については十分な根拠を持って求めることはできなかった。

対策の効果として図-4に管破損箇所数の経日変化を、図-5に1人当たりの平均獲得水量の経日変化を示す。配水管を更新することにより当初の破損発生件数が大幅に減少している。導送水管の耐震化や配水池の耐震化により、現状より配水管の修繕が早まっている。道路交通対策によりやはり修繕効率が高まり、復旧が早くなる。

獲得水量では、配水管を更新してブロック化することが本モデル地区では最も有効である。つづいて道路交通対策の有効性が見られる。給水拠点に水槽を配備することで復旧段階の前半では配水管を更新するより1人当たりの水量は大きくなる。

表-3 モデル都市の概要

給水人口	500000人		
給水区域面積	50km ²		
浄水場～給水区域	7 km		
配水池～給水区域	5 km		
配水池容量	30000m ³		
導水管	φ500	C I P	10 km
送水管	φ500	C I P	2 km
配水管	φ450	C I P	100 km
	φ450	D I P	100 km
	φ150	C I P	300 km
	φ150	D I P	100 km
	φ150	A C P	50 km
	φ75	C I P	250 km
	φ75	A C P	100 km

表-4 検討した対策とその内容

対 策	内 容
対策1 導送水管の耐震化	導水管, 送水管を全て耐震継ぎ手のDIPに更新する. 1m当たりの更新費は161千円, 総費用は1932百万円. 導送水管の破損率が現状の1.0件/kmから0になる.
対策2 配水管の更新	φ450CIPを全てDIPに, φ150CIPのうち150kmをDIPに, φ150ACPを全てDIPに, φ75ACPを全てCIPに更新する. 平均破損発生率が2.2件/kmから1.8件/kmになる. φ450DIPへの更新費は121000円/m, φ150DIPへの更新費は39000円/m, φ75CIPへの更新費は31000円/mとすると, 総費用は230億円.
対策3 配水管の更新とブロック化	配水管の更新を対策2と同様に行うとともに, φ450DIP200kmをクラスA, φ150DIP300kmをクラスB, その他をクラスCとして階層化する. 上位クラスより順次修理を行い, 復旧した配水管を拠点として応急給水を行う. クラスA, クラスB, クラスCそれぞれの配水管を拠点とした場合の運搬距離は, 250m, 100m, 10mとする.
対策4 配水池の耐震化	配水池を耐震化することにより現状では管路50箇所分の破損発生があるが0になる. 費用は30億円と仮定.
対策5 給水拠点に水槽を配備	給水車による給水拠点に水槽を配備する. 給水車は各個人に給水するのではなく水槽に水を移すだけであるので拠点での所要時間が節約できる. 給水車の拠点における作業時間を2時間から0にする.
対策6 道路交通対策	交通対策を行い応援のために流入してくるための道路, 被災地域内での応急給水や応急復旧のための移動をしやすくする. モデル上は域内交通係数, 流入交通係数を大きくする.

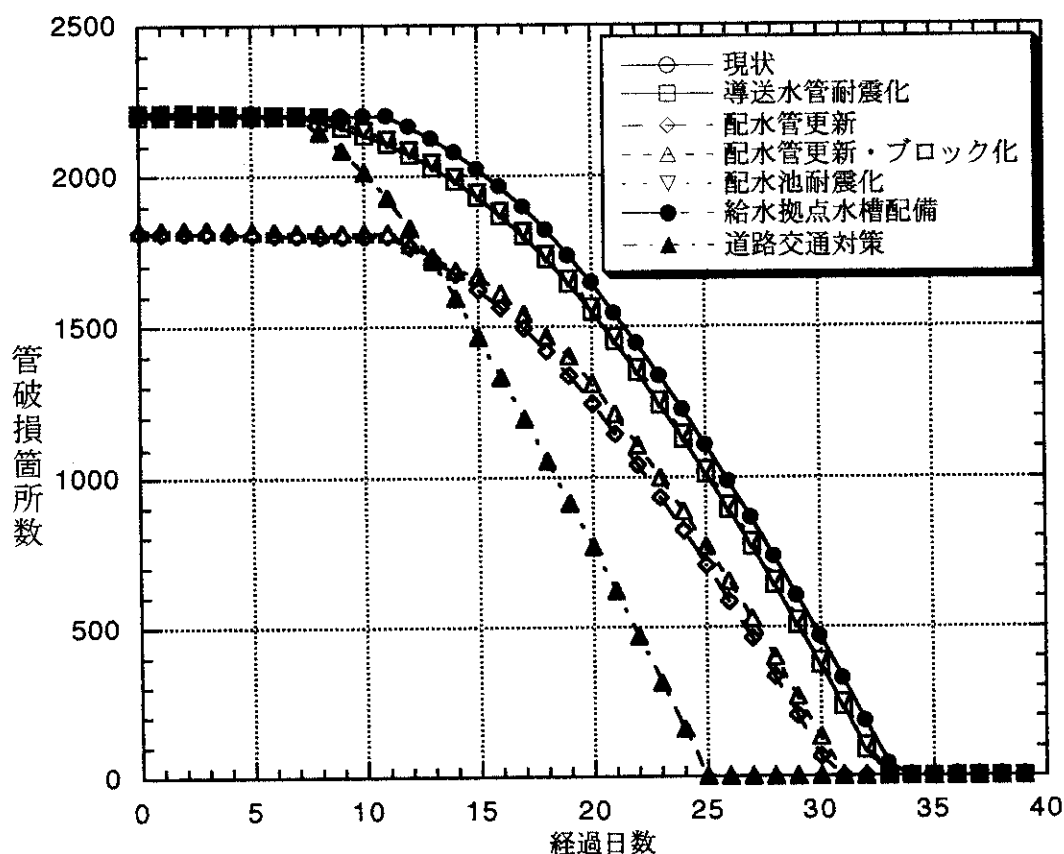


図-4 管路破損箇所数の経日変化

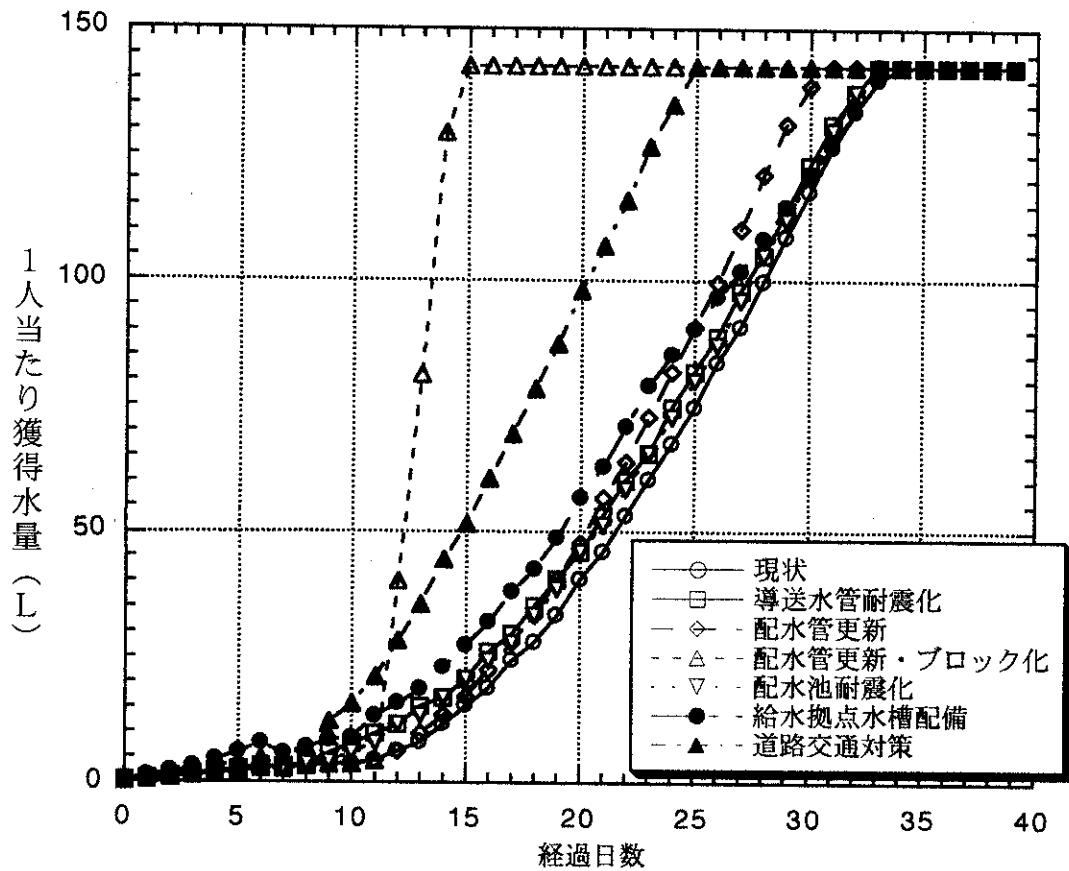


図-5 1人当たり獲得水量の経日変化

図-5の結果より1人当たりの獲得した水の便益を表-2を用いて計算した。表-2では1日の必要水量を250Lとしている。これに不足している場合水量単価の高い用途から順次使用するものとして計算した。給水人口全員の40日間にわたる便益を計算し、各対策実施時と現状との差を取ってその対策による便益とした。その結果を表-5に示す。ここでは生活用水についてのみ考慮している。また住民による獲得水量も徒歩を前提として運搬距離により決まるようにしている。車等を使えば住民が獲得する水量はさらに多くなり便益も増加する。

表-5 各対策の効果

	住民便益増加	復旧工事費削減	応急給水費削減	合計	費用
導送水管耐震化	1,026	10	1	1,037	1,932
配水管更新	1,038	320	4	1,362	23,000
配水管更新・ブロック化	7,287	312	23	7,622	
配水池耐震化	860	0	1	861	3,000
給水拠点水槽配備	2,439	0	0	2,439	
道路交通対策	5,717	0	11	5,728	

(単位 百万円)

リアルタイム地震防災の現状と 被害把握に関する基礎研究

平成12年3月

金沢大学工学部

宮島 昌克

第1章 緒 論

1-1 研究の目的

本報告書は、(財)水道技術研究センターから金沢大学工学部に委託された、「リアルタイム地震防災の現状と被害把握に関する基礎研究」についてとりまとめたものである。本研究の目的は、(財)水道技術研究センターが研究開発中の震災時水道施設復旧支援システムにおける、漏水、破断などの被害箇所を被災直後に把握し、復旧活動に反映させるリアルタイム被害検知を行うための基礎研究として、リアルタイム地震防災とリアルタイム被害把握に関する技術開発の現況を調査することである。

1-2 研究の構成

本研究報告書は4章から構成されている。

第1章は緒論である。

第2章では、リアルタイム地震防災の現状について紹介している。代表的なリアルタイム地震防災システムを、震源推定による地震情報システムと早期被害推定システムに分け、センシング方法や、情報処理方法、情報伝達方法などについて整理している。

第3章では、上水道施設におけるリアルタイム被害把握システムについて考察している。本研究では、一提案として地震被害ポテンシャルマップに基づく、効率的被害探査のためのモニタリングについて検討した。

第4章は結論であり、本研究の成果と今後の課題を整理してまとめた。

第2章 リアルタイム地震防災の現状

2-1 概説

兵庫県南部地震以後、国や自治体、ライフライン事業者などが地震防災対策の見直しを進めている。そうした中で、1つの柱としてリアルタイム地震防災が注目されている。リアルタイム地震防災は、兵庫県南部地震の発生初期において被害情報がなかなか集まらず、救助・救援活動が後手に回ったという反省から、その重要性が認識されてきたものである。リアルタイム地震防災の基本的な考え方は、地震動をモニタリングし、その情報を基に地震発生直後の震源推定、あるいは、ライフラインや建物の被害、さらには火災の発生などを推定することで、緊急対応や初動体制の確立を支援し、2次災害防止、軽減の対応をいち早く開始しようとするものである。

リアルタイム地震防災は、震源推定による地震情報システムと早期被害推定システムの2つに大別できる。前者の場合には、地震計ネットワークと情報伝達が重要であり、後者の場合には、地盤や構造物などのデータベースの構築と地震動分布の即時推定が重要である。図2-1にこの2つのシステムの概要を示す。

2-2 震源推定による地震情報システム

地震情報システムとしては、JRのユレダスがそのパイオニアといえる。ここでは、ユレダスのシステムについて主として述べる。

鉄道は、地震が発生した場合、列車を緊急停止させるなど、最も迅速な対応を要求される。しかし、高速で走っている列車をすぐに停止させることはできない。そこで、ユレダスでは、観測されたP波（縦ゆれ）初動部より、地震のマグニチュード、震央位置、震源深さをほぼリアルタイムで推定し、S波（横揺れ）が到着する前に、被災の可能性のある地域に対し警報を発令し、新幹線などの列車を減速・停止しようというものである。ユレダスでは、単一観測点毎に情報の処理を行っており、これにより地震情報の1次推定をP波検知後3秒以内に行い、対象地点のうちのどこが危険地域に入っているかを判定し、関係地点に対しP波検知後4秒以内に警報が届くようになっている。また、S波到来直後に、より精度の良い2次推定結果を発信する。つぎに、各ユレダスが推定した地震緒元をユレダスセンターに集約し、更に精度の高い地震情報を求める。そしてその情報は、ヘラスと呼ばれる被害予測・復旧支援システムに送られ、地震後の合理的な対応のために利用される。ヘラスについては2-3-4で述べる。1989年から1990年にかけて5観測地点からなる首都圏のユレダスネットワークが構築され、また、1992年より14観測地点からなるシステムが東海道新幹線に導入され現在稼動中である。

2-2-1 ユレダスの動作原理

(a) 地震規模

地震規模（マグニチュード M ）は，地震の初動周期から推定できるものと期待されることから，微積分波形の平滑化振幅を使って，周期変動をリアルタイムで検出する方法をユレダスでは開発し，採用している．これは，地震動の卓越振動数の変動を連続的に捉え，地震波初動直後の卓越周期を初動周期として捉えるものである．この方法により検出した初動周期とマグニチュードの関係より地震規模の推定を行う．

(b) 震央方位

ユレダスでは，P波初動の波形は3成分とも相似であることを利用して，震央方向をリアルタイムに推定している．これは，水平2方向の各成分振幅と上下成分振幅との時間差0の相互相関を連続的に算出することにより，震央方向を時系列的に算定している．算定された震央方向は，時間的に変動し，P波到来時にシフトし，その後安定し，S波到来時に再びシフトする．これより，P波到来後に震央方向が安定するところが震央方位であるとしている．

(c) 震央距離と震源深さ

ユレダスでは，上下動及び水平動の二乗振幅を平滑化した後，両者の振幅比を算定し，これと震源距離に対する震央距離や震源深さの比を対比したのから震央距離と震源深さを大まかに推定している．

(d) 震源距離

震源距離の推定は，S波の到達時点がわかれば，初期微動継続時間より震源距離を精度良く把握することができる．しかし，ユレダスの1次警報では，S波の到着を待っているわけにはいかないので，精度は劣るが次のような方法によりP波初動部の情報だけで震源距離を推定している．すなわち，(a)の方法により求められた地震規模の値と震央距離との比較によって震源距離を求める．

(e) 警報発令

警報の発令は，これまでの鉄道被害事例を，横軸に地震規模（ M ），縦軸に震央距離（ Δ ）にとった $M-\Delta$ グラフにプロットし，この図を基に警報すべき地域を決定し，警報を発令する．

2-2-2 余裕時間と防災効果

余裕時間とは，検知点における初期微動継続時間に検知点から警報受信箇所までの主要動の伝播時間を加えたものから警報受信までの処理時間（3～4秒）を差し引いたものである．

ここでは，東北新幹線の場合を考える．東北新幹線が海岸線から約70km内陸を走り，大地震が海岸線から約100km沖合で発生したとする．従来のS波検知による警報システムである海岸線検知システムでは，獲得できる余裕時間は，検知点と沿線各点のS波到達時間差であり，平均17秒となる．海岸線における検知システムがユレダスに置き換わっ

たとすれば、獲得できる余裕時間は、海岸線検知システムより約 9 秒多い約 26 秒となる。

つぎに、獲得される余裕時間により、列車の走行安定性がどの程度向上するかについてであるが、警報受信直後に 240km/h から 270km/h で走向する列車に非常制動をかけるとすると、海岸検知システムおよびユレダスにより、それぞれ約 50km/h、80km/h だけ減速されることになる。

2-2-3 情報配信

首都圏に設置されたユレダスによって検知され、推定された地震情報は、テスト的に約 50 のユーザーに配信されている。これは一般公衆回線を使った FAX による送信であり、情報配信に要する時間は P 波検知後 4~5 分である。現在 JR では、P 波情報については 4~5 秒、地震情報については FAX を用いても 2~3 分で伝達できるように検討中である。

2-2-4 CUBE

CUBE は、南カリフォルニアに設置されてある約 250 地点の地震観測点からの情報を地震研究所に集め、地震情報（地震発生時間、震央位置、深さ、規模）を関係機関に自動配信するシステムである。ユレダスのような早期警報を発信することはできないが、専用回線を使用し、ポケットベルに配信するため、情報配信に要する時間は、2~3 分であり、ユレダスより少し早い。

2-3 早期被害推定システム

早期被害推定システムとは、地震直後にライフラインや建物の被害、火災の発生などを推定し、緊急対応や初動体制の確立に利用しようとするシステムである。早期被害推定システムは、自治体の防災機関やライフライン事業者によって様々に提案され、実用化されつつある。ここでは、代表的な早期被害推定システムとして、東京ガスの SIGNAL、北海道開発局の WISE、建設省の SATURN、JR のヘラスについて述べる。

2-3-1 東京ガス SIGNAL

(a) 東京ガスの地震時緊急対策

地震時における緊急対策については、末端の需要家レベルでは感震器を内蔵したマイコンメーターによって、震度 5 程度以上の揺れに対しガス供給を自動停止することになっている。また、需要家に直接ガスを送る低圧導管網は、需要家 3 万~10 万件を単位として常時低圧ブロックを形成し、地区ガバナに取り付けられた SI センサーが SI=30cm/s を感知すると、供給を自動遮断する仕組みになっている。この自動遮断用の SI センサーは、各低圧ブロックごとに約 30 箇所、全供給区域で約 3000 箇所が設置されている。さらにガバナステーションやガスホルダーと地区ガバナを結ぶ中圧導管網については、数十万件の需要家を含む大きな地域でブロック化（中圧ブロック）しており、地震時に供給停止が行えるようになっている。

(b) SIGNAL の構成

上記の緊急対応のうち中圧導管網の供給停止は、中圧導管網の被害確認情報に基づいて判断し、東京ガスの防災・供給センターから遠隔操作によって行われている。ところが、被害確認に時間を要する恐れがあり、地震動のモニタリング結果から地震被害を推定し、警報を発令するようなシステムとして SIGNAL が開発された。SIGNAL は、地震動と地理情報システムのデータより、埋設管や需要家建物の被害を推定し、地震発生後 10 分程度で警報発令することを目指したシステムである。図 2-2 に SIGNAL の全体構成を示す。

(c) 地震動モニタリングシステム

地震動モニタリングの中核をなすものは、全域で 331 箇所の観測点を有する SI センサーネットワークである。この SI センサーでは、地震動の SI 値と最大加速度を観測し、無線で観測情報を防災・供給センターに送信する。また、地震の震源やマグニチュードを独自に迅速に推定することを目的とし、供給エリア外周部に 5 箇所の地震計を設置している。さらに、液状化の危険性が高い地域には液状化センサーを 20 箇所設置している。

(d) 地盤ゾーニングと基本データ

SIGNAL では、地震センサーの配置が密であるので、観測点間における地震動強さの補間などは行わず、各 SI センサーの観測値は、センサー近傍での同種の地盤での地震動強さを代表すると考える。したがって地盤ゾーニングを行い、各 SI センサーの分担区域を決めておく。地盤分類は、地形により台地と沖積低地（谷底低地を含む）の二つに分類した後、沖積低地については更に固有周期によって 3 つに区分し、計 4 通りの地盤分類としている。また、観測 SI 値と液状化層厚の関係を地図として準備している。

一方、被害推定の基本データとしては、埋設管については中圧導管と低圧導管の延長、管種、管径などを、また需要家建物については契約数を用意している。

(e) 被害推定システム

SIGNAL では、SI センサーより得られる SI 値と最大加速度を用いて、建物被害と埋設管被害を推定する。建物の被害推定においては、液状化などの地盤被害による建物被害を考慮するために、液状化による被害を震動被害に増加率を乗じることによって評価している。増加率は、液状化層厚の関数として与える。すなわち、液状化が起こらない場合は増加率が 1.0 となり、液状化が 10m の厚さで発生した場合には 10.0 となる連続的な三角関数である。

埋設管路については、過去の被害例より求められた被害率と SI 値の関係より被害を推定している。なお、埋設管路被害における液状化の影響も、建物と同様に被害率を増加させる方法で考慮されている。

(f) 震源推定システム

震源推定システムは、つぎの 5 つのステップよりなる。1) 逐次型同定手法による観測記録の初動時間の決定、2) 半無次元地盤構造における震源情報の概略推定、3) 多層地盤構造における理論走時と震源位置に関する偏微分係数の算定、4) 2) の結果を初期値とした非負の深さを考慮した重み付き最小自乗法による震源位置と発震時刻の決定、および 5) 気象庁の算定基準に準じたマグニチュードの推定である。

(g) スペクトル評価システム

スペクトル評価システムでは、5 地点からの加速度波形より加速度応答スペクトルを求め、また、主要動の継続時間も計算する。これらの結果より地震動の破壊力の大きなイメージをつかむ。ただしここでの結果は、意志決定において参考程度に扱うものである。

(h) 意志決定システム

このシステムでは、建物被害率と埋設管被害率に対し供給停止の場合と供給継続の場合で期待効用の大きさを比較し、「供給停止」、「様子を見る」、「供給継続」の3段階で判断を下す。しかし実際には、効用関数を定めるのは難しいため、現在のガス事業者の判断基準などを参考にし、震源推定結果とスペクトル評価結果を加え、更に実被害情報、ガスの圧力、流量などを考慮し、供給責任者により判断が下される。

2-3-2 北海道開発局 WISE

北海道開発局の地震情報伝達システム WISE は、北海道での三大地震（1993 年釧路沖地震、1993 年北海道南西沖地震、1994 年北海道東方沖地震）で得られた教訓である被害の早期把握、情報連絡網の保持を主眼としているシステムである。

(a) システムの構成

WISE では、地震が発生すると 121 地点に設置された速度型地震計が地震動を感知し、直ちにその地点での最大加速度、速度、SI 値、震度を計算し、道路、河川施設を管理している事務所に送信する。感知後約 4 分間、30 秒ごとに更新し、逐次送信する。各事務所は、各地震計から送られてきた強震情報を即時に開発局土木研究所に送信する。研究所では、最初に送られてきた強震情報から 2 分後までの強震情報をひとつの地震とみなし、1 次被害予測を行う。算出された結果は、各事務所に送信される。また、気象衛星「ひまわり」から、震源位置、マグニチュードを取り込み、再度、被害予測（2 次被害予測）を行い、その結果を再び各事務所に送信する。なお、これらの解析は全て自動で行われる。

(b) 被害予測

WISE では、上述した過去の三大地震のデータより求めた、最大加速度による被害の規模別発生確率に基づき被害発生範囲を決定する。また、各地点での最大加速度の算出については、まず集められた強震情報を基に震源地、マグニチュードを推定し、つぎに距離減衰の回帰式により加速度を求める。ただし、地盤種別ごとの減衰を考慮していない。

2-3-3 建設省 SATURN

建設省の即時震害予測システム SATURN は、震災直後の情報の少ない段階において管理施設の被災状況を大まかに予測し、管理者の意志決定をサポートするシステムである。

(a) システム構成

SATURN は、東京、神奈川、千葉、埼玉、茨城、栃木、群馬、山梨、長野の 1 都 8 県を対象としたシステムであり、地震計ネットワークは、管理施設に沿って 20km~40km 間隔で離散的に配置した約 100 箇所の強震計を、マイクロ回線でネットワークするものであ

る。

SATURN では、地震計ネットワークから得られる最大加速度及び SI 値に基づき、橋梁などの構造物位置での地震動強度を推定し、さらに構造物の被災危険度を概略推定する。

(b) 被害予測

橋梁の被害予測には、SI 値を用いる。SI 値の分布予測は以下の手順で行われる。1) 観測地点（約 100 箇所）の地盤データに基づき、工学的基盤位置での SI 値を予測する。2) 予測地点下での SI 値を空間補間により予測する。3) 予測地点の地表面位置における SI 値を予測地点の地盤データから算出する。地盤の増幅特性は、SHAKE の計算結果から設定する。ただし、SATURN では、標準的な応答倍率をあらかじめ求めておくことで、被害予測の迅速化を図っている。

2-3-4 JR ヘラス

ヘラスは、地震緒元の入力を受けることにより、各地点にどの程度の災害が発生しているのかを自動推定するシステムである。災害発生予測手法の違いにより 1 世代ヘラス、2 世代ヘラスがある。

(a) 1 世代ヘラス

1 世代ヘラスの被害推定は、地表面における推定最大加速度に対する各種構造物の被害発生確率に基づいて行われる。被害発生確率は、1923 年の関東大地震から 1987 年の千葉県東方沖地震までの主な 6 被害地震についての構造物被害調査結果に基づいて決定されている。地表面最大加速度の推定では、まず、中村・富田式により各地点における基盤加速度を求め、それに各地点の表層地盤の増幅倍率を乗じて地表面最大加速度を算出する。さらに地震規模を考慮した実効加速度に変換する。実効加速度とは、マグニチュードが小さい場合、加速度が大きくても破壊力はそれ程大きくないという経験に基づき、マグニチュードが小さくなるほど、推定最大加速度に小さな係数を乗じたものである。

(b) 地盤の地震動特性の推定

ヘラスでは、表層地盤の地震動特性をボーリング調査から推定するのではなく、常時微動の観測結果を用いて地震動特性を求める方法を開発、採用している。これは、地盤の地震動特性を水平動と上下動のスペクトル比で近似するものであり、QTS と呼ばれている。この QTS を用いることで、レイリー波の影響の大小に関わらず、常時微動により 1 次固有振動数と振幅倍率を求めることができる。

(c) 2 世代ヘラス

2 世代ヘラスの被害予測では、各地点の基盤における最大加速度の算出までは 1 世代と同様である。2 世代ヘラスでは、この後、地盤や構造物に生じる地震時ひずみによる被災しやすさ指数 K 値を用いて、被害予測を行う。

K 値は、地盤、盛土、高架橋の橋脚のそれぞれに対して定義されるが、それぞれの固有振動数と増幅倍率より求めることができる。さらに K 値と基盤加速度を乗じることで、それぞれのひずみを算出することができる。求められたひずみの大小で被害の程度を推定する。

2-4 結言

本章では、リアルタイム地震防災システムの現状について概観した。表2-1に早期被害推定システムの比較を示す。

地震計ネットワークについては、それぞれのシステムにおいてできるだけ高密度に地震計を配置しようとしているが、時間や費用面からの制約が多いようである。地震計の最適配置の問題についてはほとんど示されていないので、地震計ネットワークを構築するにあたっては、より効率のよい地震計の配置法を確立していく必要がある。

一方、被害予測については、被害予測した地域について実際に被害確認が行われた場合、その情報により予測結果の更新を逐次行い、リアルタイムで精度を向上することのできるシステムについても今後検討されていかなければならない。

川崎市の震災対策システムや東京消防庁の地震被害予測システムなど先進的な試みがまだ多くあるが、ここでは触れることはできなかった。なお、水道事業者によるこうしたリアルタイム地震防災システムはほとんど目に付かなかった。水道事業のリアルタイム地震防災への取り組みの遅れを示しているものと考えられる。

参考文献

- 1) 山崎文雄：研究展望，リアルタイム地震防災システムの現状と展望，土木学会論文集，No.577，pp1-15，1997.
- 2) 山崎文雄：リアルタイム地震防災のための地震動モニタリング，第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，土木学会リアルタイム地震防災研究小委員会，pp.5-12，1999.
- 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.331-340，1996.
- 4) 山崎文雄，片山恒雄，野田 繁，吉川洋一，大谷康昭：大規模都市ガス網の地震時警報システムの開発，土木学会論文集，No.525，pp.331-340，1995.
- 5) 小林 将，中井健司，島田 武，佐藤昌志：北海道開発局の地震情報伝達システムの被害推定に関する現状と課題，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1281-1284，1997.
- 6) 濱田 禎，杉田秀樹，金子正洋：地震動特性分布の即時予測手法に関する研究，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.193-196，1997.
- 7) 富田健司，山下彰彦，中村 豊：“HERAS（ヘラス）”の災害発生予測手法，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1165-1168，1997.
- 8) 高田至郎：研究展望，ライフライン地震工学における研究体系と今後の展開，土木学会論文集，No.640，pp.1-18，2000.

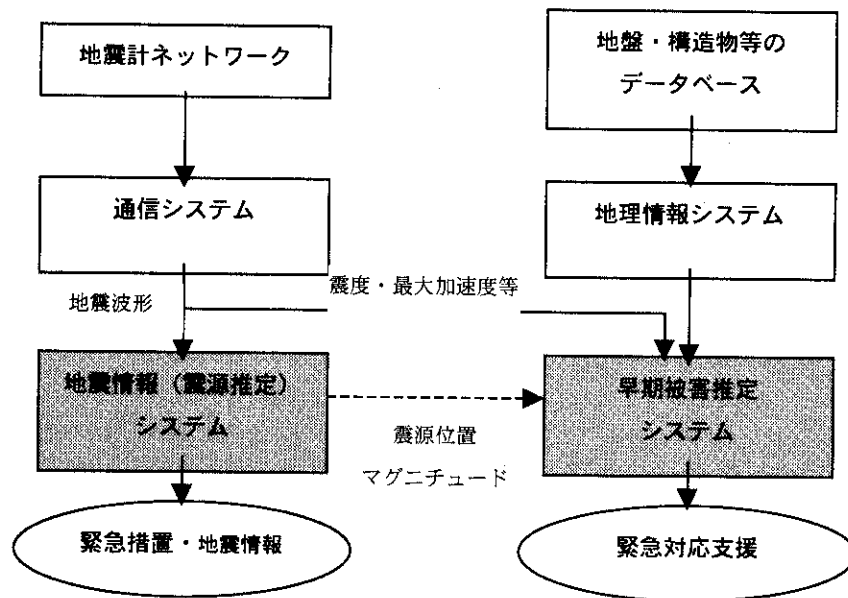


図 2-1 リアルタイム地震防災の分類概要

表 2-1 早期被害推定システムの比較

	SIGNAL	WISE	SATURN	1 世代ヘラス	2 世代ヘラス
対象地域	東京ガス供給地域	北海道内	関東(1都8県)		
地震計ネットワーク	331箇所 SIセンサー	121箇所 速度地震計	20km～40km 間隔, 約100箇所 強震計		
通信回線 (地震計～情報処理施設)	無線	一般回線	マイクロ回線	専用回線	専用回線
被害予測評価指標	SI値	最大加速度	SI値	実効加速度	K値
地震動特性分布推定法	観測値で周辺地盤の値を代表	距離減衰式	地表面-基盤-地表面 (SHAKEによる応答倍率, 空間補間)	常時微動によるQTS	常時微動によるQTS

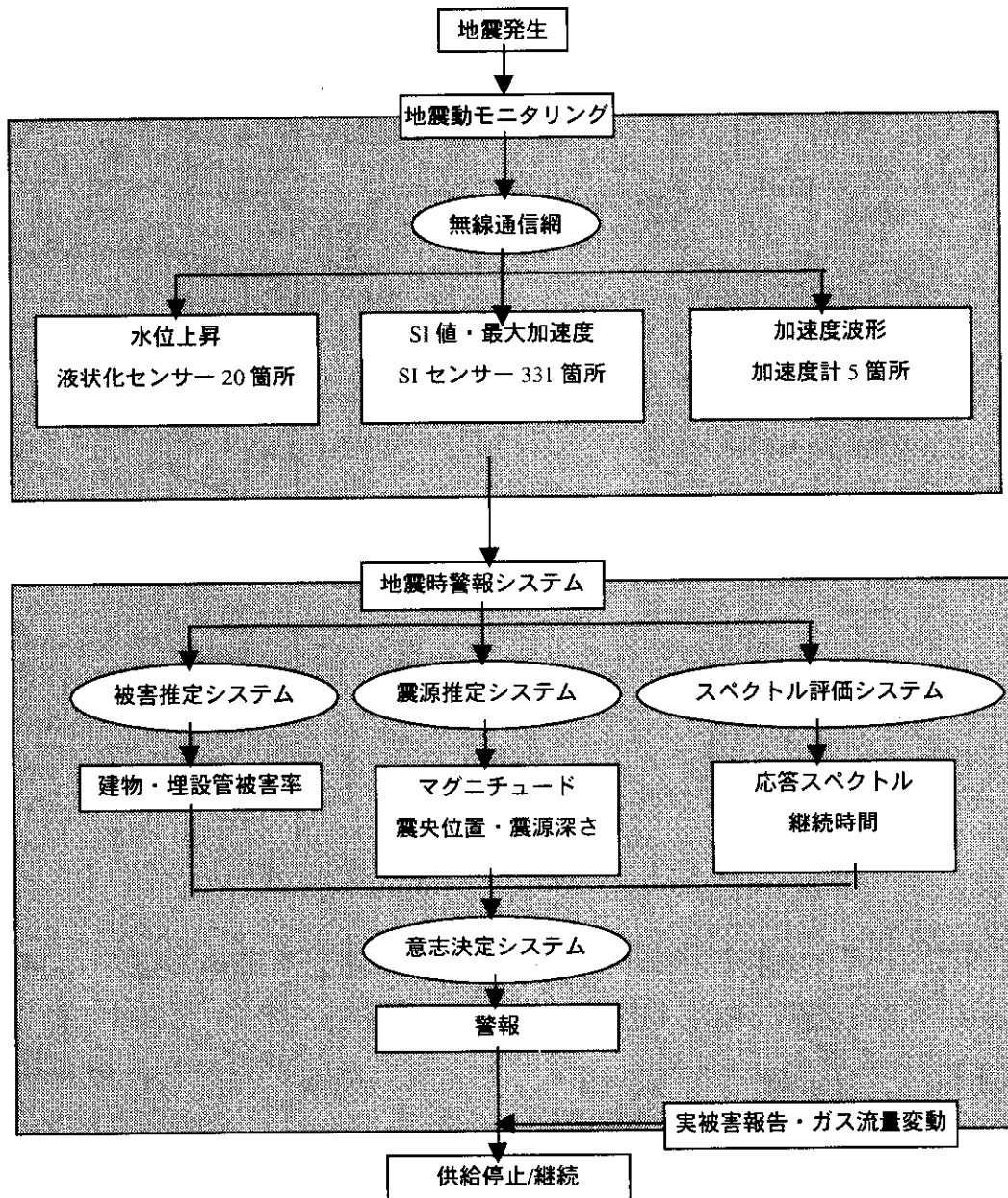


図 2-2 SIGNAL の全体構成図

第3章 上水道施設におけるリアルタイム地震把握の一提案

3-1 概説

近年、埋設管路の被害探査技術が各種開発されている。地震直後に被害状況を早期に把握し、応急復旧作業を促進することにより、被災後の市民生活の混乱を短期間に解消することに、これらは大きく寄与するものである。しかし、管路の敷設延長は膨大であるので、被害探査を全ての管路について地震直後に行うことは不可能である。そこで、効率的な被害探査を行うための対象地域の優先順位付けが必要となってくる。

このような観点から本章では、効率的被害探査のためのモニタリングについて検討し、モニタリング位置の決定のための地震被害危ポテンシャルマップについて、神戸地域を例に考察する。

3-2 効率的被害探査のためのモニタリングの考え方

まず、本研究で対象とする水道事業体規模について検討する。水道事業体規模を大きく分けると、以下の3つに分けることができる。すなわち、水道管路網のブロック化が既になされており、いくつもの大ブロックを有している大規模事業体、ブロック化はされておらず、給水人口も少ないので、地震時の管路被害による影響人口も少ない小規模事業体、その中間の、ブロック化はされていないが、地震時の影響人口が少なくなく、大都市の大ブロックの1つに相当するような中規模事業体である。本研究では、ブロック化が行われていないことから地震後の水供給、復旧作業の効率化が切に求められる中規模事業体を対象とすることにする。

つぎに、効率的な被害探査を行うための対象地域の優先順位付けについて考える。配水池に設置されている流量計などで、配水管路の被害が甚大であるか否かについては地震直後にある程度検知できる。しかし、どの地域において被害が甚大であり、被害把握のための被害探査を行えば良いかまでは知ることができない。そこで、幹線管路において常時からモニタリングすることにより、地震時に被害状況を即座に把握することを考える。モニタリングについても多くの箇所で行うに越したことはないが、経済的理由により現実的ではない。限られた地点でモニタリングを行い、被害状況を面的に把握するための方策について考えなければならない。そこで本研究では、面的な被害把握のためのモニタリング位置の決定方法について、まず検討することにする。

埋設管路の地震被害には、地盤条件が一つの支配的要因であることが知られている。また、管種、管径、継手の種類によっても平均被害率は異なってくる。もちろん、地震の強さによって液状化などの地盤破壊の状況も大きく異なるので、地震動の強さによって被害の程度は大きく異なる。地震動の強さは地震が起こらなければわからないが、その他の要因は地震が起こる前からわかっているものである。そこで、これらの情報をもとに、地震が来る前に、各地域の地震被害ポテンシャルをランク分けして求めておき、地震被害ポテンシャルマップを予め作成する。地震動の強さは地震が起こって初めてわかる要因だが、

各地震被害ポテンシャルレベルの地域におけるモニタリングにより被害を把握することにより、どの被害ポテンシャルレベルまで被害が生じているのかを地震直後に検知し、面的な被害把握に結びつけることができるものと考えられる。

次節では、神戸地域を例に、地盤情報だけを用いた地震被害ポテンシャルマップを示すことにより、面的な被害把握のためのモニタリング位置の決定方法について考察する。

3-3 地盤情報に基づく地震被害ポテンシャルマップ

本研究では、地盤情報として表層 N 値、液状化危険度、微地形、活断層を取り上げた。地盤が軟弱な地域で管路被害が多く発生することは周知のことである。とくに、埋設深さ付近の N 値の影響が大きいという指摘があるので、ここでは、地表面から5mまでの平均 N 値に注目した。表層 N 値、液状化危険度、微地形の3要因は、お互いに独立ではなく、管路被害にもそれぞれが絡み合っており関与していると考えられるが、ここではそれについては特に考察せず、それぞれの要因における地震被害ポテンシャルマップを作成し、それらを重ね合わせることにする。また、兵庫県南部地震の際には、活断層地域における管路被害率が高かったという指摘があるので、活断層に基づく地震被害ポテンシャルマップの作成も試みる。

本研究では、神戸市とその周辺地域を対象とし、 $1\text{km}\times 1\text{km}$ のメッシュごとに、上述した地盤情報を整理するとともに、管路の被害率を算出し、地震被害ポテンシャルマップについて考察する。

3-3-1 表層 N 値に基づく地震被害ポテンシャルマップ

図3-1に、神戸市とその周辺地域における地表面から地下5mまでの平均 N 値の分布を示す。これは、各メッシュに存在する複数のボーリングデータから N 値を平均したものである。同図には、各メッシュにおける管路の平均被害率も示されている。これは文献1のデータをもとに、各メッシュの被害箇所数を各メッシュの管路延長で除して求めたものであり、管種、管径は考慮されていない。

図3-1に基づいて表層以下5mまでの平均 N 値と管路の被害率の関係を求めたものが、図3-2である。同図を全体的に見れば、平均 N 値が大きくなるほど、被害率が低くなっていることがわかる。ただし、平均 N 値が5以下のメッシュにおいては、被害率が0.29件/kmと極めて低い値となっている。これは、平均 N 値の低い六甲アイランドやポートアイランドでは、液状化対策として耐震継手を用いたダクタイル鋳鉄管が敷設されており、これが効果を発揮して被害率を下げたためであると考えられる。

図3-2に基づいて、表層 N 値に基づく地震被害ポテンシャルマップの作成を考える。本章では、地盤情報として表層 N 値、液状化危険度、微地形、活断層の4要因を取り上げているので、それぞれの要因によるポテンシャルレベルを細分化しなくても、それらを総合化することによりいくつものレベルに分けることができるので、それぞれについては2段階に分類することとした。表層 N 値については、図3-2を参考にして表層 N 値21以上を危険度1、表層 N 値20以下を危険度2とした。図3-3に表層 N 値に基づく地震被害ポテンシャルマップを示す。同図に管路の平均被害率もプロットしたが、危険度2の地域が広いこと、管路被害と危険度との対応が明瞭には把握できない、そこで、危険度1の地域と

危険度2の地域のそれぞれの管路被害率を求め、図3-4に表層N値と管路被害率の関係を示した。同図によれば、表層N値に基づく地震被害ポテンシャルと管路被害率がよく対応していることが分かる。

3-3-2 液状化危険度に基づく地震被害ポテンシャルマップ

図3-5に、神戸市とその周辺地域における液状化程度の分布を示す。図3-5と同様に、各メッシュにおける管路の平均被害率も図3-5に示されている。ここで、液状化程度とは、濱田らによる調査結果²⁾をメッシュ化したものである。すなわち、航空写真によりメッシュ内に噴砂が見られなかった地域を液状化程度0%、メッシュ内が完全に噴砂で覆われていた地域を液状化程度100%、メッシュ内の一部で噴砂が見られた地域を液状化程度50%としている。同図によれば、海岸線沿いの埋め立て地の液状化程度100%の地域に管路被害率5件/km以上が多く分布していることがわかる。一方、六甲アイランドやポートアイランドでは管路被害率5件/km以上が見られないが、これは前述したように液状化対策として耐震継手を用いたダクタイル鋳鉄管が多く敷設されていたためであると考えられる。

液状化程度50%および100%を液状化有り、液状化程度0%を液状化無しとして、それぞれにおける管路被害率を求め、図3-6に示す。同図より、液状化の有無が管路被害に大きく関与していることがわかる。したがって、液状化の可能性の有無で液状化危険度に基づく地震被害ポテンシャルマップを作成したらよいことが分かる。そこで、簡易に液状化の予測を行い、液状化危険度に基づく地震被害ポテンシャルマップを作成することをつぎに考える。

液状化しやすい土層とは、地下水位以下にある緩い砂質土層である。地下水位以下であるか、砂質土層であるかという情報はボーリングデータから得ることができる。緩いか否かについてもN値から判断することができる。N値を用いた簡易液状化予測法には、大別して限界N値法と F_L 値法の2通りがある。ここでは、より簡易な手法である限界N値法を用いることにする。限界N値法とは、過去の地震による被災例に基づき、液状化するかどうかの限界のN値を定め、N値と粒度分布から液状化の判定を行うものである。この予測法における液状化しやすい粒度分布の基準³⁾の一例を図3-7に、限界N値を図3-8³⁾に示す。液状化の程度には、液状化しやすい層の厚さもさらに関係してくる。図3-9は、関東地震における液状化の程度と砂層厚さの関係⁴⁾を示している。同図によれば、砂層の厚さが4m以上あると、液状化に起因する地盤災害の確率が50%を越えていることがわかる。そこで本研究では、地下水位以下に限界N値よりも小さいN値の砂層が5m以上あるボーリングデータを液状化の可能性有りとして判断した。ボーリング本数が限られていることから、1メッシュ内に液状化の可能性のあるボーリングデータが1本でもあれば、そのメッシュは液状化の可能性の有るメッシュと判断した。

図3-10に、液状化危険度に基づく地震被害ポテンシャルマップを示す。図3-5の実際に観察された液状化程度比べて、液状化危険度の高い地域が広がっている。これは、上述したように、1メッシュ内に液状化の可能性のあるボーリングデータが1本でもあれば、そのメッシュは液状化の可能性の有るメッシュと判断したためであると考えられる。図3-10をもとに各危険度における管路被害率を求め、図3-11に示す。同図によれば、液状化危険度に基づく地震被害ポテンシャルと管路被害率がよく対応していることがわかる。

3-3-3 微地形に基づく地震被害ポテンシャルマップ

図3-12に、微地形区分図に管路の平均被害率をプロットしたものを示す。微地形区分図は、米軍が撮影した1万分の1の空中写真および明治時代中頃に作成された2万分の1の地形図を基に、兵庫県南部地震後に地質調査所緊急調査グループが作成したもの⁵⁾である。微地形区分については1km×1kmのメッシュ分析に馴染まないため、ここではメッシュを用いなかった。図3-12をもとに、各微地形における管路被害率を求め、図3-13に示す。同図より、埋め立て地で管路被害の大きいことがわかる。一方、山地斜面、高位扇状地段丘、低位扇状地段丘で被害率が小さくなっている。これらについては、兵庫県南部地震の起こった季節や気象条件をはじめとする独自の条件によることもあるので、この結果を一般化することはできないと考えられる。

しかし、微地形に基づく地震被害ポテンシャルマップの例示ということで、図3-12、図3-13を参考にして、微地形に基づく地震被害ポテンシャルマップを作成することにす。ここでは、管路被害率の低い山地斜面、高位扇状地段丘、低位扇状地段丘を危険度1、その他を危険度2とした。図3-14に、このようにして作成した微地形に基づく地震被害ポテンシャルマップを示す。また、微地形による危険度と管路被害率の関係を図3-15に示す。

3-3-4 活断層に基づく地震被害ポテンシャルマップ

図3-16に、活断層分布図⁶⁾に管路被害率をプロットしたものを示す。兵庫県南部地震がこれまでの地震と異なる特徴的な点は、淡路島から神戸市にかけての断層が活動するという、直下型地震であったことにある。これまでの地震であれば、地盤条件として先に述べた3つの要因で被害をほぼ説明することができる。しかし、兵庫県南部地震についてはそれだけでは十分に説明できない点がある。図3-16によれば、会下山断層、大月断層、五助橋断層付近で管路被害率が高くなっていることがわかる。これらの断層の活動が管路の被害を大きくしたとも考えられる。断層運動による管路被害については、現在研究段階にあるが、直下型地震を想定地震に考える場合には、活断層に基づく地震被害ポテンシャルマップも重要になってくると考えられる。

そこでここでは、直下の活断層により被害が大きくなったと思われる地区を推定し、危険度2とし、図3-17に示すような活断層に基づく地震被害ポテンシャルマップを作成した。これの作成方法については、今後の研究が期待される場所である。

3-3-5 地形情報を総合した地震被害ポテンシャルマップ

地盤情報として表層N値、液状化危険度、微地形、活断層を取り上げて、それぞれの地震被害ポテンシャルマップを作成した。ここでは、それらの危険度を足しあわせて地震被害ポテンシャルマップを作成する。各地震被害ポテンシャルマップが危険度1と2で示されていたので、足しあわせることにより、危険度4から8までの5ランクに分類されるが、ここでの例では危険度8の地域は現れなかった。図3-18にこのようにして作成した総合地震被害ポテンシャルマップを示す。管路被害率も重ねて示しているが、地震被害ポテンシャルランクの高い地域と大きな管路被害率に対応していることが見て取れる。各ポテンシャルランクにおける管路被害率を求め、図3-19に示す。簡易的に求めた地形情報を総合した地震被害ポテンシャルランクと管路被害率が良い対応をしていることがわかる。

3-4 地震被害ポテンシャルマップを用いたモニタリング

既存の地盤情報を整理することにより、簡易ではあるが地盤情報に基づく地震被害ポテンシャルマップを作成することができた。ここでは、地盤に関する4要因を取り上げ、各要因を2つの危険度に分けて整理したので、それらを足しあわせることにより、5ランクの地震被害ポテンシャルに分類することになった。さらに地盤情報を付け加えたり、管路条件による地震被害ポテンシャルマップを作成することにより、総合地震被害ポテンシャルのランクを多くすることができる。また、各要因の危険度を2ランクではなく、細かく分けることもできる。

このようにして作成した地震被害ポテンシャルマップにおける同じ地震被害ポテンシャルランクにおいては、地震時の被害程度が等しいと考えることができる。前述したように、地震動の強さは地震が起こらないとわからないが、地震が起こったとき、どのポテンシャルランクの管路が壊れたかを知ることにより、被害程度を面的に把握することができるものと考えられる。すなわち、各地震被害ポテンシャルランクにおいて数点ずつのモニタリングを行い、地震直後にどのポテンシャルランクの管路まで破壊したかを知ることができれば、それよりもポテンシャルランクの高い管路では、ランクが高いほど被害程度が大きくなっており、それよりもポテンシャルランクの低い管路ではほとんど被害が生じていないということがわかる。

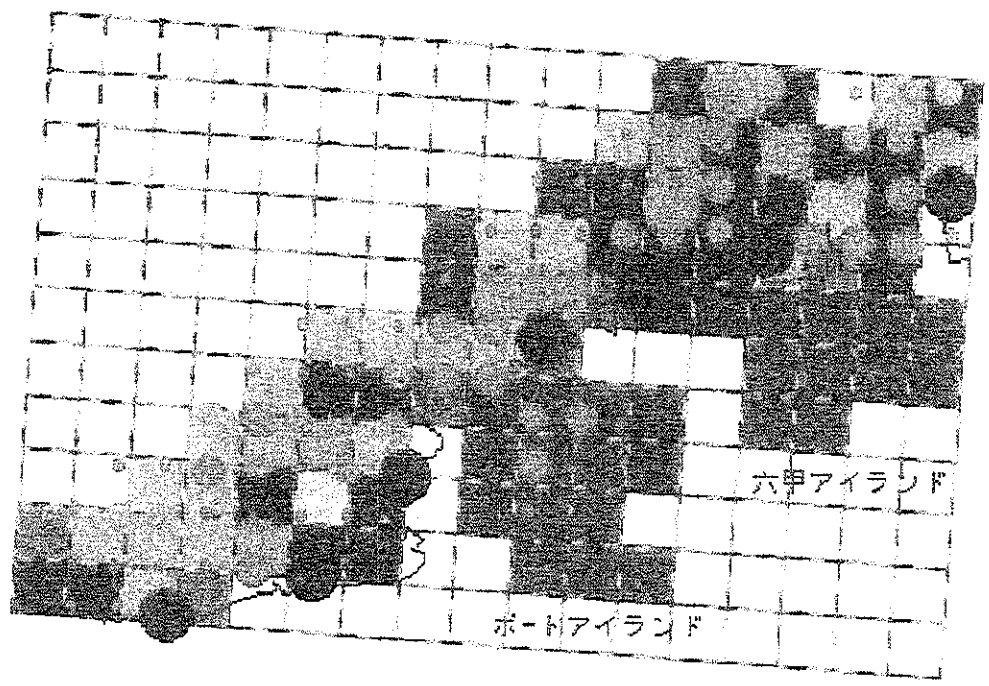
なおここでは、兵庫県南部地震における管路の被害データが既に存在していたので、それを用いてポテンシャルランクの分類が容易にできたが、各要因のランク分けをはじめとする定量的検討について、今後の研究が必要である。

3-5 結言

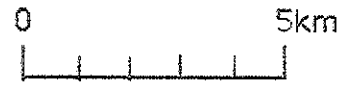
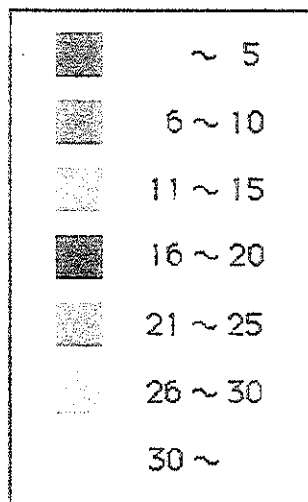
本章では、上水道施設におけるリアルタイム被害把握システムについて考察した。効率的被害探査のためにモニタリングが重要であることを示し、地震被害ポテンシャルマップに基づくモニタリング位置決定の考え方を示すとともに、神戸地区を例示取り上げ、地盤情報を用いた地震被害ポテンシャルマップの作成を行った。ここでは、既存のデータのみを用いて簡易に作成し、方法について理解を深めることに重点を置いたので、定性的な検討に留まっている。今後は、細かな点に至るまで考察を進め、定量的な評価手法として確立する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 神戸市都市整備公社：神戸の地盤，神戸市企画局総合調査課，1980.
- 2) Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K.: The 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement and Soil Conditions in Hanshin Area, (財)地震予知総合研究振興会，1995.
- 3) 安田 進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，pp.104-105，1993.
- 4) 東京都土木技術研究所：東京低地の液状化予測，1987.
- 5) 日本地質学会・日本応用地質学会：阪神大震災緊急合同報告会，1995.
- 6) 活断層研究会編：新編 日本の活断層，東京大学出版会，1991.



表層以下5(m)までの平均N値



被害率 (件/km)

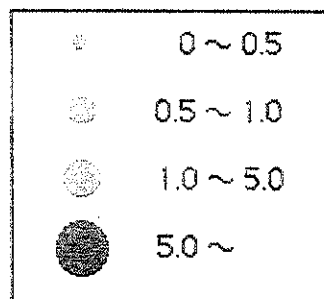


図3-1 表層以下5mまでの平均N値の分布