

地震動モニタリングとライフラインの リアルタイム被害推定

REMOTE MONITORING SYSTEM FOR SEISMIC GROUND MOTIONS AND TIMELY
ESTIMATION OF EARTHQUAKE DAMAGES TO LIFELINE SYSTEM

高田至郎*、高谷富也**、小川安雄***、福井真二****

by Shiro TAKADA, Tomiya TAKATANI, Yasuo OGAWA and Shinji FUKUI

Seismic ground motions at arbitrary locations can be quickly obtained within a few minutes after the occurrence of earthquake by seismometer-data observed at each node in a remote monitoring network. Then, a timely estimation of widely spreaded lifeline damages based on the data of the monitoring system is required for emergency actions to lifeline systems. Present paper shows a methodology to estimate the number of damaged locations of lifeline systems taking consideration of liquefaction phenomena. The liquefaction area and the number of damages to lifeline facilities can be synthetically indicated by a PC computer program developed for the present purpose.

Keywords : seismic monitoring system, estimation of seismic ground motion, prediction of earthquake damages

1. はじめに

現在の都市機能や市民生活は、電気、ガス、水道、通信等のライフラインに強く依存しており、今後これらライフラインの規模は、都市活動の拡大や市民生活の発展に伴ってますます増大かつ複雑化の傾向にある。このため、わが国においても1971年のサンフェルナンド地震や1978年の宮城県沖地震以後、ライフライン施設に対する地震被害の重要性が認識され、地震観測、被害予測および防災対策等がさまざまな方面より研究され、多くの重要な成果が公表されている^{1)~4)}。これらの研究成果を受けて、ライフライン事業者および公的機関等は、地震動を早期に把握し、被害予測や震災に対する復旧対策に関する情報を得ることを目的として、都市部およびその周辺地域に地震観測網を巡らし観測を行ってきている⁵⁾。しかしながら、現状では地震計は地震動記録のデータ蓄積のために設置されている場合が少なからずあるが、広域にわたって敷設されているライフライン施設の被害状態を把握するためのモニタリングシステムとして利用されているケースは少ない。

図-1は時間軸をLogスケールで考えた場合における地震発生からライフライン被害の復旧が完了するまでの時間的な流れを示したものである。いま、ライフライン施設におけるガスシステムを取り上げて、地震直後における緊急対応について考えるとき、第1段階としてはガスシステム全体を覆うモニタリングネットワークからの地震情報とそれに基づいてリアルタイムに行う被害推定、システム下部組織からの情報および

*正会員 工博 神戸大学工学部建設学科 教授 (〒657 神戸市灘区六甲台町1)

**正会員 学博 舞鶴工業高等専門学校 講師

***正会員 大阪ガス(株) 供給部供給技術センター

****正会員 工修 清水建設(株) 土木本部設計第2部

マスコミ情報などによってガスシステムにおける被害を大略推定して、さらに詳細な被害状態把握のために、ヘリコプターや調査員の派遣ルートを決める段階がある。この段階は地震発生後30分以内に行われるものと考えられる。次の第2段階では、把握された情報に基づいて被害甚大かつ2次被害を引き起こすと判断される地域

時間	(分)	[数秒] 0.1	[1分] 1.0	[10~15分] 10	[1時間] 100	[半日] 1000	[5日~7日] 10000
	地震発生	早期 シ警 ス報 テム	遠 地隔 震監 計視 情報	気象 震庁 度発 階表	被害 把握 緊急 措置	判断 復旧 作業	完了
緊急対応		第1段階			第2段階	第3段階	

図-1 地震直後の被害把握と緊急対応の時間的流れ

における供給停止措置とブロック化措置が決定される。特に、ガスシステムにおいては供給停止の判断は重要な緊急対応の意志決定となる。この第2段階の対応は地震発生後1~2時間以内で行われるものと考えられるが、本研究で述べるリアルタイムの被害推定は供給停止地域やブロック化のあり方を決めるのに極めて有益な情報を提供するものである。第3段階では、調査員や復旧現場の情報に基づいて供給停止地域の追加やブロック化の拡大を検討することになる。したがって、ライフライン全体を覆う地震動モニタリングはライフライン施設の地震直後の被害把握とその後の緊急対応に重要な役割を果たすことが明らかであろう。

このような状況を考慮して、本研究では、著者らが既に提案している地震動補間法^{8)・9)}を用いて、地震発生後1~2分で得られる限られた地点における地震計によるモニタリング情報よりライフライン供給地域全体の地震動を推定する地震動モニタリングシステムについて述べる。次いで、モニタリングシステムにおいて推定された地震動情報に基づいてライフライン施設の被害状態をリアルタイムに推定するリアルタイム被害推定法の提案を行う。このリアルタイム被害推定法を用いれば、地震発生後1時間位の後にはその他の情報と併せてライフラインシステムの緊急対応や復旧対策に関する重要な資料を得ることができる。

2. 地震動モニタリングシステムについて

本章では、地震動モニタリングの配置設計とその具体例について述べる。なお、地震動モニタリングとは、地震直後におけるライフライン施設の被害早期把握のための情報を提供する地震計による遠隔監視を言う。この地震動モニタリングシステムより得られる地震計情報と既に提案している地震動補間法を用いれば、地震発生後数分でライフライン供給地域全体における地震動を推定することができる。

地震動モニタリングの配置設計は、次に述べる手続きにより進めることができる。

- ①地域社会の特性・経済効果・ライフライン施設の特性等を考慮して、地域毎に地震計設置間隔を決定する。
- ②既設の地震計を有効活用するために、地震計の新設設置点よりも既設設置点の優先性を考慮したモニタリングネットワークを構成する。
- ③地震計設置候補地点は、用地の確保、テレメーター施設の有無、ライフラインの重要施設位置等を配慮して決定する⁹⁾。
- ④将来の施設拡充も考慮したライフライン施設全体を覆う地震計によるネットワークは、地盤、地形、過去の震央位置および地震動補間の精度等を考慮してサブ・ネットワークに分割する。

地震計の設置間隔の決定に関する1つの方法としては、地域特性と経済効果の面から決定できる^{8)・9)}。そこでは、地震計の設置や維持管理などに関する費用および2次災害や不必要な供給停止などによる経済損失額を考慮した目的関数を最小あるいは最大にするような設置間隔を地震計の「最適配置間隔」と呼ぶこと

ができる。

また、地震計の設置間隔が決定されれば、次に設置位置と優先度が問題となる。この場合、ライフライン被害の発生しやすい地点の地震動をモニタリングシステムにより把握することが重要と考えられる。そこで、著者らは、ライフライン被害に影響を及ぼすと考えられる要因として、地盤特性、地形特性、地盤急変部、活断層、管路網の敷設密度、管路強度、地震動強度などを考慮して、文献8)においてこれらをニューラルネットワークにより推定する手法を提案した。文献8)によれば、これらの要因の持つ重みは階層構造を持つニューラルネットワークにより推定し、地震計の設置間隔の半径内に含まれる地域の重みの総和によって設置順位が決定できる。

図-2は、約4000km²の地域に600万人にガス供給をしているライフライン施設について、上記の手続きに従って設計した地震動モニタリングシステムを示したものである。図中の●および○印はそれぞれ既設のテレメーター付き地震計の設置地点および設置候補地点である。また、図-3は上記地震計により得られた仮想地震動情報によって、文献8)で提案された手法により補間的に求められた他地点での地震動分布を示したものである。この地震動の推定は、1946年の南海道地震(M=8.1)を例に取り、パーソナル・コンピューターにより実行されたものであるが、地震動分布状態を描き出すのに要した時間は1分以内である。

3. リアルタイム被害推定法について

従来、ライフライン施設の被害予測は、過去の地震発生を確率統計的に評価してハザード危険率を与えるか、あるいは震源位置と地震規模を想定したシナリオ地震によって、アテニュエーション式を導入して被害予測を行ってきた³⁾、⁴⁾。これらの手法には不確定要因も多いが、ライフラインの信頼性向上のために事前被害予測を行って地震対策を進める上では効果的と判断される。しかしながら、緊急対応のために被害状態を把握するには、得られた地震情報を基に、直ちに被害推定を実行する必要がある。本研究では、計測実地震動をベースに行う被害推定法を『リアルタイム被害推定』と呼んで、従来の予測法と区別している。しかも、本推定手法は極短時間で実行する必要があるため、解析時間

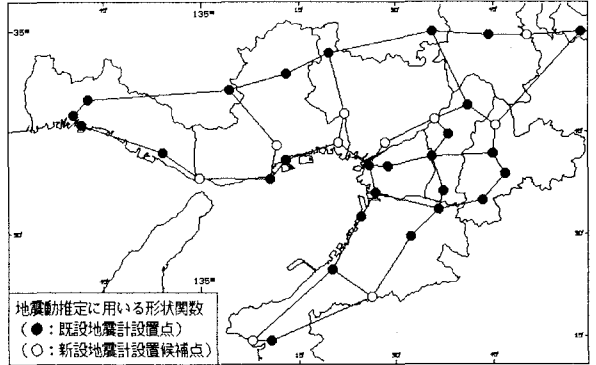


図-2 ガス供給施設に対する地震動モニタリング・ネットワーク

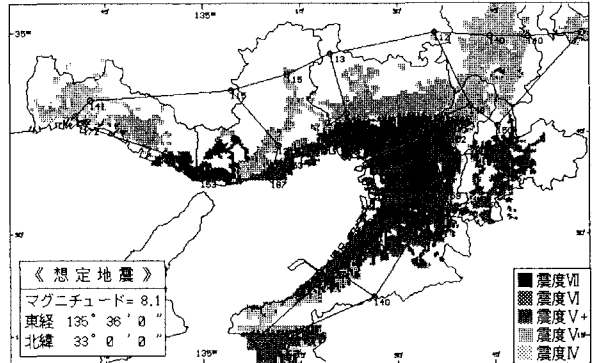


図-3 地震動モニタリング・ネットワークに基づいた地震動分布

- ①地震動情報の取得 ← 地震動モニタリングシステム
- ②地震動補間法を用いたメッシュ毎の地震動強度（最大加速度 A_{max} 、最大速度 V_{max} ）の推定 ← メッシュ毎の地盤情報データベース
- ③メッシュ毎の P_L 値の算定
- ④メッシュ毎の A_{max} 、 V_{max} からの強度区分の決定
- ⑤非液状化メッシュ、液状化メッシュの判定
 - a. 最大加速度 A_{max} から求めた強度区分が1
 - b. 面積割合最大の微地形区分がC
 - c. 面積割合最大の地盤種別が1種
 - d. P_L 値 < 5
 上記 a.~d.のいずれかに該当するメッシュ → 非液状化メッシュ
 上記 a.~d.のいずれにも該当しないメッシュ → 液状化メッシュ
- ⑥液状化メッシュにおける液状化面積率Sの算定
- ⑦メッシュ単位の被害件数の算定
- ⑧予測地域全体における被害集計および管種・管径別の被害集計

図-4 地中ライフライン施設の被害推定手順

短縮のために種々の工夫が必要とされる。以下に、地中ライフラインのリアルタイム被害推定法について述べる。

本研究で提案するライフラインの被害推定の手順は、図-4 となる。まず、ライフライン供給地域全体をある大きさのメッシュに分割し、地震動モニタリングシステムより得られた計測実地震動より補間法を用いて各メッシュ中央での地震動強度を推定する。次いで、地震動強度と埋設管路の被害率の関係を考慮することにより各メッシュ毎に埋設管路の被害件数を推定するものである。なお、各メッシュ毎に埋設管路および地形・地質に関する資料がデータベースとして保存されており、これらの情報を用いて被害推定に必要な地震動強度、液状化の判定、液状化面積率などが算定される。以下、図-4 に示す被害推定手順に従って詳細な説明を行う。

ステップ①では、地震発生後1～2分後に地震動モニタリングネットワークを構成している地震計設置地点からテレメーターでライフラインの中央管理室に送られてくる地震動モニタリングの情報を取得する。

次に、ステップ②では、文献8)に示す地震動補間法を用いて得られた地震動モニタリング情報より各メッシュ毎に最大加速度 A_{max} および最大速度 V_{max} の地震動強度の推定を行う。なお、地震動モニタリングネットワークより、1)最大加速度と最大速度が得られる場合および2)最大加速度のみが得られる場合があるため、本推定法では、最大加速度のみが得られる場合については、沢田ら¹⁰⁾が提案している加速度と速度の最大振幅比と加速度スペクトルの平均振動数の関係を用いて、最大加速度より最大速度を推定している。また、地震動の補間法よりメッシュ中央点での地震動強度を推定する際に必要となるメッシュ毎の地理、地形・地質などの地盤情報を各メッシュ毎にデータベースとして予め保存しておく必要がある。

ステップ③の「メッシュ毎の P_L 値」の算定方法については、地質ボーリングデータのあるメッシュとボーリングデータのないメッシュで算定方法が異なる。これは、 P_L 値と地質ボーリングデータの間に強い相関があるためである。このため、考えているメッシュ内にいくつかのボーリングデータが存在する場合には、それらのデータを用いた P_L 値の算定を行う。すなわち、各ボーリングデータを用いて地表面最大加速度 A_{max} と P_L 値の関係を求め、最小自乗法により次式に示す一次直線で近似し、係数 a 、 b をメッシュ毎にデータとして保存しておく。

$$P_L = a \cdot A_{max} + b \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 P_L 値は液状化指数¹¹⁾であり、次式で与えられる。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5Z) dZ \quad \dots\dots (2)$$

ただし、 F_L は土の要素の液状化に対する安全率であり、 $F_L > 1$ の場合は $(1 - F_L)$ は0である。なお、微地形区分毎に集められた約250地点のデータを整理して得られた係数 a 、 b は表-1 のとおりである¹²⁾。また、図-5 は微地形Aにおける氾濫平野、旧河道、河川敷、人工地形を代表する4つのボーリングデータを用いて、地表面における最大加速度 A_{max} に対して算定された P_L 値および最小自乗法より求めた一次直線を示したものである。

表-1 微地形区分毎の係数 a 、 b の値

微地形区分	a	b
A 氾濫平野、旧河道、河川敷、人工地形	0.10	-16.26
B 扇状地、自然堤防、砂州	0.11	-22.32
C 山地、段丘	0.09	-22.37

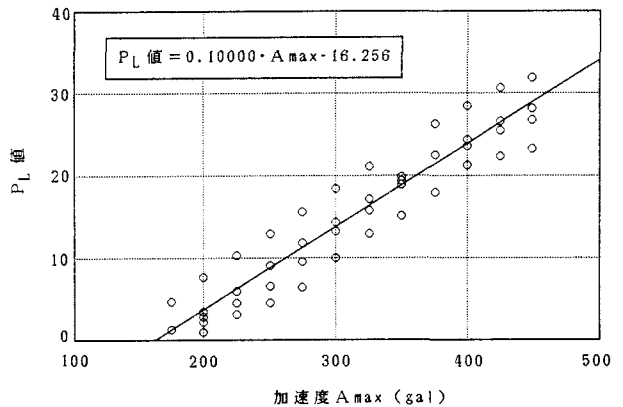


図-5 地表面最大加速度 A_{max} と P_L 値の関係(微地形A)

一方、メッシュ内にボーリングデータが存在

しない場合には、次式に示すようにメッシュにおける各微地形区分の面積率 A, B, C (%) を考慮した P_L 値の算定を表-1に示す各微地形区分毎の数値を用いて行う。

$$P_L = \frac{A}{100} (0.10A_{max} - 16.26) + \frac{B}{100} (0.11A_{max} - 22.32) + \frac{C}{100} (0.09A_{max} - 22.37) \quad \dots\dots(3)$$

ただし、各微地形別の P_L 値が負となる場合は0とする。

ところで、これまでの数多くの地震被害に関する調査、報告書などにより、地震強度、地盤変状と埋設管路被害の3者間にはお互いに強い相関がある。そこで、次に被害推定をする際に考慮しなければならない地震動強度と地盤変状との関係について検討する。

本研究では、地震外力として、波動、沈下、亀裂および近年注目されてきている側方流動に関するものとして管軸方向流動、管軸直交方向流動（液状化沈下）の5つの地盤変状を考える。著者らの行った埋設管路に対する地震被害調査・解析^{13)・14)}を踏まえて、これら5つの地盤変状と地震動強度の間には表-2に示すように、非液状化地域については、波動のみが最大速度と関係し、沈下および亀裂の地盤変状は最大加速度が関与するものと仮定し、また液状化地域については、管軸方向流動および管軸直交方向流動が最大加速度と強い相関があるものと見なす。このため、波動の強度区分は最大速度 V_{max} より決定し、沈下、亀裂、管軸方向流動、管軸直交方向流動（液状化沈下）の強度区分は最大加速度 A_{max} より決定する。したがって、ステップ④における「強度区分」は、表-3に示すように非液状化地域に対しては、波動、沈下および亀裂が速度振幅、伝播速度および軟弱層厚などと強い相関があり、液状化地域については、管軸方向流動、管軸直角方向流動が加速度振幅と沖積砂層厚に相関があるとして決定している¹⁵⁾。なお、強度区分1、2、3、4および5は、それぞれ気象庁震度階IV(～80gal)、V⁻(80～150gal)、V⁺(150～250gal)、VI(250～400gal)、VII(400gal～)に相当している。

本研究における被害推定では、表-4に示すように非液状化地域および液状化地域別に考慮する地震外力をある強度区分の範囲に限定する。これは、過去の埋設管路に対する地震被害事例を参考にしたものである。非液状化地域における沈下および亀裂の地盤変状は強度区分が3以上でないと発生しないものとし、また液状化地域における管軸方向流動および管軸直角方向流動はそれぞれ強度区分4以上および2以上でないと発生しないものとする。

次に、ステップ⑤においては、メッシュ毎の地震動強度や P_L 値などの情報を基にして、当該メッシュに対して図-4に示す4つの条件より「液状化メッシュ、非液状化メッシュの判定」を行う。これらの条件も過去の地震被害に関する資料整理に基づいて決定している¹⁴⁾。

次のステップ⑥では、ステップ⑤において「液状化メッシュ」と判定されたメッシュについてのみ「液状化面積率 S (%)」を算定する。以下に、液状化面積率について述べる。

表-2 地震動強度と地盤変状の関係

地震動強度指標	地盤変状	
	非液状化地域	液状化地域
最大速度 V_{max}	波動	
最大加速度 A_{max}	沈下、亀裂	管軸方向流動 管軸直交方向流動 (液状化沈下)

表-3 地震動強度による強度区分と地盤変状量

(非液状化地域)					
強度区分	1	2	3	4	5
速度 (kine)	5以下	5～15	15～25	25～40	40以上
波動(変位振幅)(cm)	0～1	1～2	2～3	3～4	4～5
(液状化地域)					
強度区分	1	2	3	4	5
加速度 (gal)	80以下	80～150	150～250	250～400	400以上
沈下 (cm)	0～5	5～15	15～30	30～50	50～80
亀裂 (cm)	0～1	1～5	5～10	10～20	20～30
(液状化地域)					
強度区分	1	2	3	4	5
加速度 (gal)	80以下	80～150	150～250	250～400	400以上
管軸方向流動(cm)	0～10	10～30	30～60	60～100	100～150
管直交方向流動(cm)	0～10	10～30	30～60	60～100	100～150

表-4 強度区分と地震外力の関係

		強度区分				
		1	2	3	4	5
非液状化地域	波動	←				→
	沈下			←		→
	亀裂			←		→
液状化地域	管軸方向				←	→
	管軸直交方向		←			→

いま、近年起きた地震による被害事例の調査・解析より得られた液状化面積率 S と P_L 値の間には次式の関係がある¹⁸⁾。

$$S = c \cdot P_L \quad \dots\dots(4)$$

ただし、 P_L は被害地点の P_L 値である。また、上式中の係数 c を微地形区別に表-5に示す。

微地形区分		c
A	氾濫平野、旧河道、河川敷、人工地形	2.9
B	扇状地、自然堤防、砂州	1.9
C	山地、段丘	0.5

したがって、微地形区分AおよびBにおいて液状化が発生するとすれば、「液状化メッシュ」と判定されたメッシュの液状化面積率 S (%) は、次式より算定される。

$$S = 2.9 \cdot P_L \cdot \frac{A}{100} + 1.9 \cdot P_L \cdot \frac{B}{100} \quad \dots\dots(5)$$

ただし、 P_L は当該メッシュの P_L 値、 A 、 B はそれぞれ微地形区分AおよびBの面積割合 (%) である。なお、液状化面積率 S が70%以上の場合には、これまでの地震被害事例より $S = 70$ (%) とする。

最後のステップ⑦の「メッシュ毎の被害件数の算定」においては、管種、管径別に被害件数を推定する。なお、ステップ⑤において判定された「非液状化メッシュ」と「液状化メッシュ」では被害件数の計算式が異なる。

非液状化メッシュの被害件数 N_n (件) については、次式より計算する。

$$N_n = \sum_{i=1}^m \beta_{ni} \cdot \alpha_n \cdot L_i \quad \dots\dots(6)$$

一方、液状化メッシュについては、液状化面積率 S を考慮して、非液状化地域と液状化地域別に分けて次式より求める。

$$N_L = \left(1 - \frac{S}{100}\right) \sum_{i=1}^m \beta_{ni} \cdot \alpha_n \cdot L_i + \frac{S}{100} \sum_{i=1}^m \beta_{Li} \cdot \alpha_L \cdot L_i \quad \dots\dots(7)$$

ここで、上式の右辺第1項が非液状化地域における被害件数を、また右辺第2項が液状化地域における被害件数を表わす。また、 β_{ni} 、 β_{Li} はそれぞれ非液状化地域および液状化地域の管種 i のねじ管に対する被害倍率、 α_n 、 α_L はそれぞれ非液状化地域および液状化地域のねじ管の被害率(件/km)、 L_i は当該メッシュにおける管種 i の延長距離(km)、 m は管種および管径数である。

次に、非液状化および液状化地域別のねじ管の被害率 α_n と最大速度 V_{max} の関係式として、表-6に示

表-6 管路被害調査の地震とその調査地域

番号	地震名	年月日	M	調査地域
1	関東地震	1923. 9. 1	7. 9	東京、横浜
2	福井地震	1948. 6. 28	7. 1	福井市とその周辺の市町村
3	新潟地震	1964. 6. 16	7. 5	新潟市
4	十勝沖地震	1968. 5. 16	7. 9	青森市、八戸市、室蘭市、苫小牧市
5	San Fernando地震	1971. 2. 9	6. 6	ロスアンゼルス市
6	海域地震	1975. 2. 4	7. 3	海城市とその周辺の市町村
7	唐山地震	1976. 7. 28	7. 8	唐山市とその周辺の市町村
8	宮城県沖地震	1978. 6. 12	7. 4	仙台市、塩釜市、古川市、石巻市
9	日本海中部地震	1983. 5. 26	7. 7	秋田市、能代市とその周辺の市町村
10	Mexico地震	1985. 9. 19	8. 1	メキシコ市
11	Whittier Narrows地震	1987. 10. 1	5. 9	ロスアンゼルス市
12	千葉県東方沖地震	1987. 12. 17	6. 7	東金市とその周辺の市町村
13	Loma Prieta地震	1989. 10. 17	7. 1	サンフランシスコ市、サタカニス市、ワソソビレ市

す過去における13の地震による都市部周辺地域における埋設管路の被害率(件/km)について調査¹³⁾・¹⁴⁾して得られた次式に示す関係式を用いる。すなわち、非液化化地域における埋設管路の被害率 α_n (件/km)について、

$$\alpha_n = 10^{0.057V_{max}-2.24} \quad \dots\dots (8)$$

一方、液化化地域における被害率 α_L (件/km)については、

$$\alpha_L = 10^{0.009V_{max}+0.814} \quad \dots\dots (9)$$

を用いる。なお、参考として、式(8)および(9)を用いて算定した最大速度 V_{max} に対する被害率 α_n および α_L の関係を図-6に示す。また、非液化化地域および液化化地域における管種 i のねじ管に対する被害倍率 β_{ni} および β_{Li} は、管径、強度区分、地盤種別(道路橋示方書・同解説 V耐震設計編¹⁷⁾における地盤種別)および微地形区分によって値が異なるため、BRAULプログラム¹⁸⁾(地中管路の地震時非線形応答解析)による解析結果より得られる管種、管径、管形状(直管、曲管、T字管)別の破壊確率を管種、強度区分、地震外力毎に平均化して破壊確率の表として与えておく。この破壊確率は、波動伝播に伴う地盤ひずみあるいは地盤変状量などの地震外力が正規確率分布をするものとみなして、確定的な地震応答量から算定される。図-7はこの概念を示したものである。この図より、地震応答解析からA曲線が得られ、管路の耐久度から許容値 σ_B が決まると、A曲線に対応する地震外力 S_B が求められる。 S_B と正規曲線で囲まれる面積が破壊確率を与えることになる¹⁹⁾。一例として、非液化化地域における曲管の破壊確率を表-7に示す。なお、曲管については種々の曲げ角度についての解析を行い、最大の破壊確率となる管路のものをを用いている。

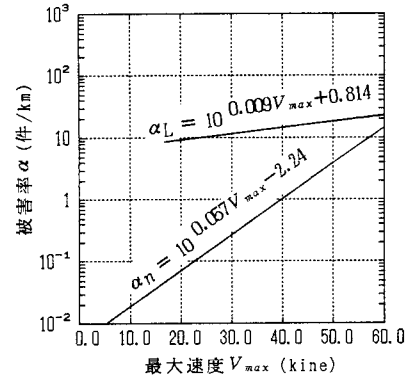


図-6 最大速度 V_{max} と被害率 α の関係

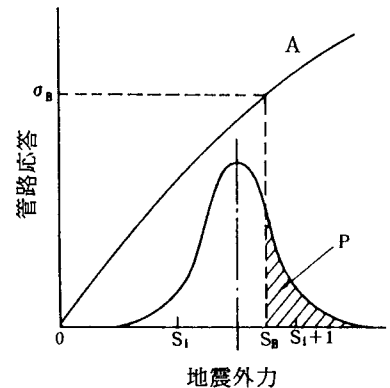


図-7 破壊確率の算定¹⁹⁾

表-7 曲管の破壊確率(非液化化地域)

管種	最大加速度 A_{max} による強度区分					
	3		4		5	
	沈下	亀裂	沈下	亀裂	沈下	亀裂
铸铁管(印籠型150A)	0.0063	0.8958	0.4510	0.9834	0.9435	1.0000
ねじ管(50A)	0.0000	0.9982	0.0000	0.9984	0.0000	1.0000

次に、非液化化地域および液化化地域におけるねじ管に対する各管種別の被害倍率 β_{ni} , β_{Li} の算定方法について説明する。

a. 非液化化地域のねじ管に対する被害倍率 β_{ni}

表-4に示す強度区分と地震外力の関係より、最大加速度 A_{max} や最大速度 V_{max} の強度区分によって考慮すべき地震外力が異なるため、強度区分が1、2の場合と強度区分が3、4、5の場合に分けて、ねじ管に対する被害倍率 β_{ni} を考える。

強度区分が1、2の場合には、考慮すべき地震外力は波動のみであるため、管種 i のねじ管に対する被害倍率 β_{ni} を次式により算定する。

$$\beta_{ni} = \frac{P_{i1}}{P_{o1}} \quad \dots\dots (10)$$

ただし、 P_{o1} はねじ管の波動による破壊確率、 P_{i1} は管種 i の波動による破壊確率である。

一方、強度区分が3、4、5の場合には、地盤種別、微地形区分によっては、波動の他に沈下、亀裂を地震外力として考慮する必要が生じてくるため、表-8に示す2つのケースのうちどちらかを選択して被害推定を行う。

地震外力として波動のみを考える場合には、管種*i*のねじ管に対する被害倍率 β_{ni} が式

(11)より算定される。一方、地震外力として波動、沈下、亀裂を考える場合には、波動、沈下、亀裂の地盤変状の重複を避けた発生割合をそれぞれ w_1, w_2, w_3 とすれば、管種*i*のねじ管に対する被害倍率 β_{ni} は次式より算定される。

$$\beta_{ni} = \frac{w_1 p_{i1} + w_2 p_{i2} + w_3 p_{i3}}{w_1 p_{o1} + w_2 p_{o2} + w_3 p_{o3}} \quad \dots\dots(11)$$

ただし、 p_{o2}, p_{o3} はそれぞれねじ管の沈下、亀裂による破壊確率、 p_{i2}, p_{i3} はそれぞれ管種*i*の沈下、亀裂による破壊確率である。なお、波動、沈下、亀裂の地盤変状の重複を避けた発生割合については後述する。

b. 液状化地域のねじ管に対する被害倍率 β_{Li}

液状化地域は、地盤種別と微地形区分の組み合わせから考えると、(II, A)、(II, B)、(III, A)、(III, B)の4つである。また、表-4に示す強度区分と地震外力の関係より、最大加速度 A_{max} による強度区分、地盤種別、微地形区分によって考慮すべき地震外力が異なるため、強度区分が2、3の場合と強度区分が4、5の場合に分けて、ねじ管に対する被害倍率 β_{Li} を考える。

強度区分が2、3の場合には、考慮すべき地盤変状が管軸直角方向流動のみであるため、管種*i*のねじ管に対する被害倍率 β_{Li} を次式により算定する。

$$\beta_{Li} = \frac{p_{i5}}{p_{o5}} \quad \dots\dots(12)$$

ただし、 p_{o5} はねじ管の管軸直角方向流動による破壊確率、 p_{i5} は管種*i*の管軸直角方向流動による破壊確率である。

一方、強度区分が4、5の場合には、地盤種別、微地形区分によっては、管軸直角方向流動の他に管軸方向流動を地盤変状として考慮する必要が生じてくるため、表-9に示す2つのケースのうちどちらかを選択して被害推定を行う。

また、管軸方向流動と管軸直角方向流動の被害倍率の大きい方を採用する場合の管種*i*のねじ管に対する被害倍率 β_{Li} は次式より算定される。

$$\beta_{Li} = \max \left\{ \frac{p_{i4}}{p_{o4}}, \frac{p_{i5}}{p_{o5}} \right\} \quad \dots\dots(13)$$

ただし、 p_{o4} はねじ管の管軸方向流動による破壊確率、 p_{i4} は管種*i*の管軸方向流動による破壊確率である。また、式中の記号 $\max \{ \}$ は大きい方を取ることを意味する。

c. 波動、沈下、亀裂の発生割合について

表-8 地盤種別・微地形区分と地震外力の関係 (非液状化地域)

	地盤種別と微地形の組合せ	地震外力
case1	地盤種別Ⅲかつ微地形区分A	波動、沈下、亀裂
	上記以外の組み合わせ	波動のみ
case2	地盤種別Ⅱかつ微地形区分A 地盤種別Ⅲかつ微地形区分A 地盤種別Ⅲかつ微地形区分B	波動、沈下、亀裂
	上記以外の組み合わせ	波動のみ

表-9 地盤種別・微地形区分と地震外力の関係 (液状化地域)

	地盤種別と微地形の組合せ	地震外力
case1	地盤種別Ⅲかつ微地形区分A	管軸方向、管軸直交方向の大きい方
	上記以外の組み合わせ	管軸直交方向のみ
case2	地盤種別Ⅱかつ微地形区分B	管軸直交方向のみ
	上記以外の組み合わせ	管軸方向、管軸直交方向の大きい方

非液化化地域において地震時に発生すると考えられる地盤変状として波動、沈下、亀裂を考慮しているが、地震時の地盤変状によって埋設管路の被害確率が異なるため、地盤変状の発生割合が、ねじ管の被害率 α に対する被害倍率 β を算定する場合に必要となる。以下に各地盤変状の発生割合について述べる。

波動は地震が発生すれば、非液化化地域全体に発生すると考えられるので、波動の発生確率 p_1 は次式となる。

$$p_1 = \pi_1 \quad (\pi_1 = 1.0) \quad \dots\dots(14)$$

また、沈下については文献20)に従い、沈下発生確率 p_2 は液化化発生率に上下限を設けて推定した値の平均値を採用し、次式を用いる。

$$p_2 = \pi_2 \quad (\pi_2 = 0.16) \quad \dots\dots(15)$$

さらに、亀裂の発生確率 p_3 についても、文献20)に示されている断層変位が発生する確率の算定方法に従う。すなわち、導管上に亀裂が生じる事象がポアソン分布に従うものとするれば、導管上に亀裂が発生する確率 p_3 は、次式のように少なくとも1箇所の亀裂が導管上に発生する確率として求められる。

$$p_3 = 1 - e^{-\lambda L} \quad \dots\dots(16)$$

ここに、 λ は導管上に亀裂の発生する平均出現率(箇所/km)、 L は導管延長(km)である。いま、1983年の日本海中部地震における能代市の非液化化地域での被害事例の整理の結果 $\lambda = 0.0345$ (箇所/km)が得られているので、被害推定を行う供給地域に対する1メッシュ当たりの平均的な導管延長 $L = 1.87$ (km)を考慮して、1メッシュ当たり導管上に亀裂が発生する確率 p_3 は次式となる。

$$p_3 = \pi_3 \quad (\pi_3 = 0.06) \quad \dots\dots(17)$$

したがって、上述した波動、沈下、亀裂の地盤変状の発生確率から、式(11)より非液化化地域における管種 i のねじ管に対する被害倍率 β_{ni} を算定する場合には、地盤変状の重複を避ける意味から、各地盤変状の発生割合の比は次式となる。

$$w_1 : w_2 : w_3 = (\pi_1 - \pi_2 - \pi_3) : \pi_2 : \pi_3 \quad \dots\dots(18)$$

4. 具体例について

本研究では、上述したリアルタイム被害推定法の適用例として、図-3に示す地震動モニタリング・ネットワークより得られた地震動情報に基づいて、大阪市内のあるガス供給地域の被害予測について述べる。

図-8、9は、それぞれ地震動モニタリング・データに対して地震動補間法を適用して得られた震度階分布および最大速度分布を示したものである。なお、想定地震は1946年の南海道地震(M=8.1)であり、地震動モニタリング地点における地震動強度は、

亀田らによる地盤増幅特性を考慮した地表面における加速度および速度のアテニュエーション式²¹⁾を用いて算定した値を使用した。これら図より、埋立地域を含む軟弱地盤層を有する地域では大きな加速度値および速度値となっていることがわかる。また、図-10は各メッシュ毎の液化化面積率分布を図示したものである。この図からも明らかなように、臨海地域および河川周辺に液化化が見られ、液化化面積率が大きな値となっているこ

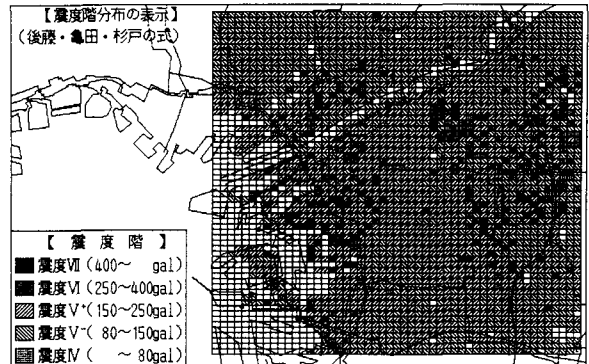


図-8 震度階分布(南海道地震)

とがわかる。

図-11は、低圧導管網に対する被害件数分布を示したものである。なお、推定された被害件数は、ミドルブロック毎、管種・管径毎に集計され、被害状態の確認作業のための人員派遣および復旧作業に対する基礎資料を提供するものである。なお、PCコンピュータ上でモニター地震動が取り込まれて5分以内にすべての結果を出力することができる。

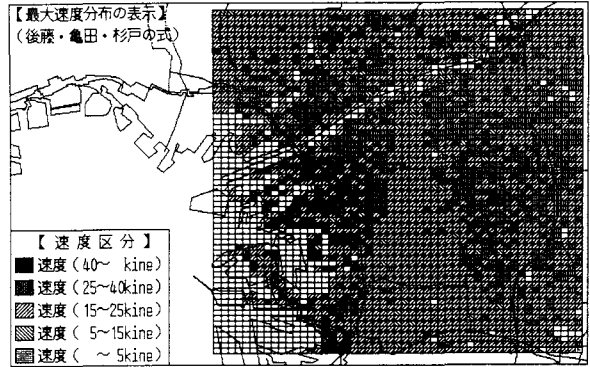


図-9 最大速度分布(南海道地震)

5. おわりに

本研究は、地震直後における緊急対応の観点より、ライフライン全体を覆う地震動モニタリングシステムおよびそれより得られる地震動情報に基づいてライフライン施設のリアルタイム被害推定法について提案し、その説明を行った。ライフライン全体を覆う地震動モニタリングシステムおよびリアルタイム被害推定法を用いることは、ライフライン施設の地震直後の被害把握とその後の緊急対応に重要な役割を果たすものと考えられる。なお、本研究では、被害推定法において、あらゆるデータが収納されているメッシュの大きさは約300m×400mで、そのメッシュ数は約30,000である。

ところで、本研究で用いられた地震動補間法は、地震動モニタリングシステムから提供される情報に基づいているため、モニタリングネットワークの節点を構成する地震計からの情報の欠損が生じた場合については今後の検討課題となろう。

また、提案したリアルタイム被害推定法

において「液状化の判定」および「地震動強度と管路被害率の関係」については、推定法の根幹をなす重要な部分であるため、液状化判定あるいは管路被害率の算定違いは被害推定の精度を左右するものとなる。このため、推定精度および推定誤差がもたらすその後の緊急対応や復旧対策への影響を評価することは非常に重要である。今後、推定精度や誤差が及ぼす影響について研究を進める必要があろう。本研究では、過去の埋設管路に対する地震被害を詳細に検討して得られた「液状化の判定規準」を近畿圏を中心とした供給地域に対して修正したものを採用しているため、近畿圏およびその周辺地域に対して採用した判定規準が正しい

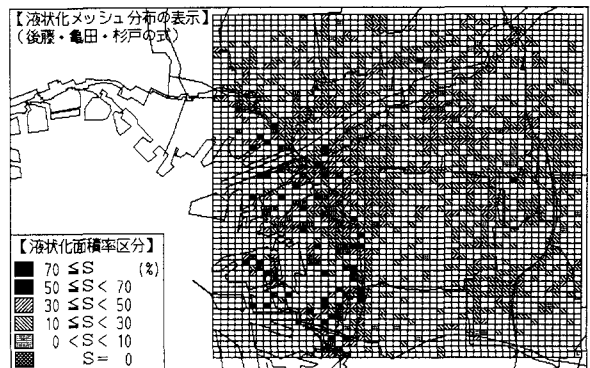


図-10 液状化面積率分布(南海道地震)

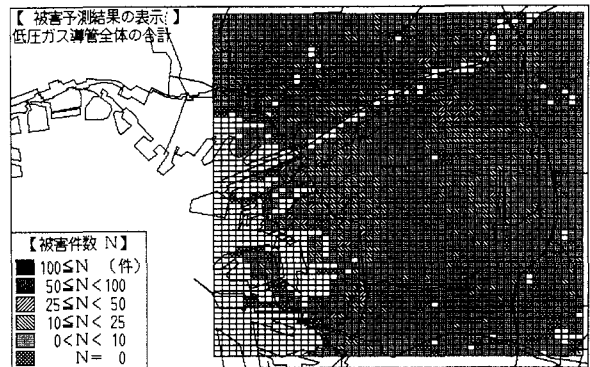


図-11 被害推定結果(低圧導管)

かどうかを何らかの別の方法で確かめることが必要となるであろう。また、他地域へ提案した被害推定法を適用する場合には、対象とする地域の地盤、地形・地質特性を考慮する必要がある。さらに、各メッシュ毎の地盤・ガス導管に関するデータベース構築がシステム全体の作業の大半を占めるため、ライフライン事業者のみならず官公庁などが中心となって、共同利用可能な都市部およびその周辺地域における地盤情報データベースの早期構築が望まれる。

参考文献

- 1) 志賀敏男(研究代表者)：大地震時における都市生活機能の被害予測とその保全システムに関する研究、自然災害特別研究計画研究、1984.3.
- 2) 後藤尚男(研究代表者)：地震時におけるライフライン系の被害予測と復旧・改良計画策定に関する研究、総合研究、1984.3.
- 3) 山田善一(研究代表者)：地震時におけるライフライン系を含む都市機能の防災と復旧過程に関する研究、自然災害特別研究計画研究、1987.3.
- 4) 佐武正雄(研究代表者)：都市供給施設における震害の防止・軽減並びに復旧対策に関する研究、重点領域研究、1990.3.
- 5) 平成3年度講習会テキスト：より安全な都市を目指して－ライフライン系の地震防災－、土木学会関西支部、1991.11.
- 6) 高田至郎、高谷富也、福家貞二、福井真二：被害早期把握のための地震強度の推定および遠隔監視地震計の配置について、第19回地震工学研究発表会講演概要集、pp.349～352、1991.
- 7) 高田至郎、高谷富也：形状補間関数による地震動の推定について、土木学会第46回年次学術講演会、I-620、1991.
- 8) Takatani, T., S. Takada, T. Fuke and S. Fukui : An Estimating Method of Predicted Seismic Ground Motions and Arrangement of Remote Monitoring Seismographs for Early Detection of Earthquake Damages, Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. IX, pp.5569-5575, July 19-24, Madrid, 1992.
- 9) Takada, S., T. Fuke and J. Ueno : Seismic Monitoring and System Control for Lifeline, U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, PWRI, pp.481-502 oct.26-27, 1992
- 10) 沢田 勉、平尾 潔、山本英史、川手 訓：地震動の最大振幅比 (a/v , a_d/v^*) とスペクトル特性及び継続時間の関係、第21回地震工学研究発表会講演概要集、pp.41～44、1991.
- 11) 安田 進：液状化の調査から対策工まで、鹿島出版会、pp.231.
- 12) 大阪ガス(株)：液状化発生加速度とPL値・微地形の関係、モニタリングシステムの開発研究グループ提出資料、1991.12.
- 13) 高田至郎、高谷富也、小川安雄、岡正治郎：液状化地域における地中埋設管路被害率、平成3年度土木学会関西支部年次学術講演会、I-57、1991.
- 14) 高田至郎、高谷富也、小川安雄：液状化地域における地中埋設管路被害率(その2)、平成4年度土木学会関西支部年次学術講演会、I-28、1992.
- 15) 田邊揮司良：地震時地盤変状を受ける地中管路の耐震性評価と設計法に関する基礎的研究、神戸大学博士論文、1988年1月.
- 16) 基礎地盤コンサルタント(株)・大阪ガス(株)：埋設管被害と地震動の関係についての検討、モニタリングシステムの開発研究グループ提出資料、1991.8.
- 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1980.
- 18) 高田至郎、高橋俊二、山部泰男：硬質塩化ビニル管の地震時挙動シミュレーション、水道協会雑誌、第547号、pp.27-39、1980.
- 19) 高田至郎：ライフライン地震工学、共立出版株式会社、pp.177-183、1991.
- 20) 地震予知総合研究振興会：地中設備大規模地震被害想定作業報告書、1986.4.
- 21) Kameda, H., M. Sugito and H. Goto : Microzonation and Simulation of Spatially Correlated Earthquake Motions, Proceedings of Third International Earthquake Microzonation Conference, Vol.3, pp.1463-1474, Seattle, 1982.

(1993年9月16日受付)