

## 水道管路の地震被害予測に関する研究

磯 山 龍 二

日本技術開発(株)地震防災部  
部長代理・工博

石 田 栄 介

日本技術開発(株)地震防災部  
主任・工博

湯 根 清 二

(社)日本水道協会工務部副主幹・技術士

白 水 暢

前(社)日本水道協会工務部長・工博

要旨：地震被害想定において最も基本的な役割を果たす水道管路の地震被害予測手法として、従来、既往の地震被害データに基づく被害推定式が用いられてきたが、これらは宮城県沖地震やサンフェルナンド地震等限られたデータに基づくものであり、その精度は必ずしも満足のいくものではなかった。本研究は、兵庫県南部地震の水道管路被害データベースに基づき、地震動強さの関数である標準被害率曲線と、管種、管径、微地形、液状化の程度等の諸条件を用いた補正係数を組み合わせることにより、より高精度かつ実務的な配水管路の被害推定式の提案を行ったものである。具体的な内容としては、芦屋市、西宮市における地震防災土地条件図を活用した50mメッシュ単位の詳細な被害集計分析と、兵庫県南部地震の全体的な被害集計結果をもとに、標準被害率曲線と各種補正係数の設定を行ったものである。

キーワード：震災対策 (364)、管路診断 (160)、配水管、被害推定式、地震防災土地条件図

分類項目：震災対策一般 (130101)、配水管 (070310)

### 1. まえがき

都市や施設の地震防災対策を的確かつ合理的に策定しようとするれば、想定地震に対する被害推定が必要となる。被害の発生しやすい場所や全体の被害規模を推定し、これに対応して対策の目標水準を定め、事前の予防対策や直後の応急対応、さらに応急復旧対策を計画していくことになる。

日本水道協会では、先に刊行した水道施設耐震工法指針の検討と併せて、既存施設の耐震化及び合理的な震災対応計画の策定を目指して、水道施設の地震被害推定法の検討を行ってきた。兵庫県南部地震の被害分析<sup>1)、2)</sup>、釧路沖及び三陸はるか沖地震の分析<sup>3)</sup>は被害記録を残す意味もあるが、この被害推定法確立のための調査の一環でもあった。

本論は水道施設の地震被害推定で最も基本的で重要な部分である配水管路の地震被害推定式を提案するものである。兵庫県南部地震の被害分析結果<sup>1)、2)</sup>をベースに、芦屋市、西宮市において、新たなかつ詳細な被害分析を行い、これらに基づき、現時点で最も精度の高い、かつ実務的に使い

やすい式を提案することを目標とした。

### 2. 被害推定式

#### 2.1 被害推定の一般的な流れ

地震被害の推定は、昭和53年東京都防災会議が東京都区部の地震被害想定を公表<sup>4)</sup>して以来、多くの自治体等で実施され、地域防災計画策定等の基礎資料として活用されてきた。多くの場合、これらの被害想定には、家屋被害、火災延焼被害等と並んで水道施設（主に管路）の被害想定が含まれ、これに基づき水道担当の部局が対策を計画、実施してきた。近年では水道事業者が独自に詳細な被害想定を行い、対策を計画、実施することも多くなってきている。

図-1に水道施設を想定した一般的な地震被害想定の流れを示す。対象施設に影響を与える地震が想定され、地盤条件を加味して最大加速度等の地震動及び液状化の可能性が推定される。ここまでが前段階（基本項目の推定）であるが、これは地震被害想定で最も手間がかかり、地震に関する専門知識を要する部分である。自治体等により既に被害想定が行われていれば、それを活用するのが

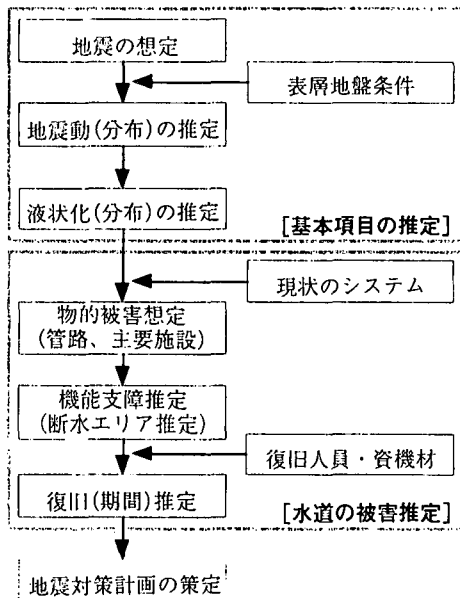


図-1 水道施設地震被害想定の一般的な流れ

一般的で、かつ現実的でもある。本論文の主課題である管路の地震被害推定式も、これらの被害想定の一環として、あらかじめ表層地盤情報や地震動及び液状化推定結果が用意されていることを前提として、これらの想定結果に基づき、対象とする水道施設の直接的な被害を推定するものである。施設の被害の受けやすさは被害確率や被害率等で表わされる（主要施設では定性的に表わされる場合もある）。被害確率、被害率に施設数量を乗ずることにより、全体あるいは地区の被害数量等が算出される。骨格のネットワークを形成する主要配管の場合には、区間ごとの被害が推定される。その他の配水管の場合には、250m または500m などの矩形メッシュ毎に被害推定される場合が多い。

物的被害推定結果に基づき機能支障の推定（地震直後、物的被害によりどの地域が断水するか）が行なわれる。機能支障は、主要管網のネットワーク解析（一般的には確率的なネットワーク解析）等の手法を用いて推定される。さらに、物的被害量と動員可能な人員・資機材量等から復旧に要する日数が推定され、これらの被害推定結果に基づき、地震対策が計画されることになる。

## 2.2 管路の被害推定式

我が国における水道施設の地震被害推定は、先

に述べたように昭和53年に公表された東京都区部の地震被害想定<sup>4)</sup>が最初のものと思われる。その後、磯山・片山<sup>5)</sup>はこの東京都の手法を改良し、水道管路に対して以下に示すような被害推定式を提案した。

$$R_m(\alpha) = C_1 C_2 C_3 \cdots C_n R(\alpha) \quad (1)$$

ここに、 $R_m(\alpha)$ は補正された被害率 [件/km]、 $C_i$ は各種の補正係数 ( $i = 1 \sim n$ )、 $R(\alpha)$ は標準被害率 [件/km]、 $\alpha$ は地震動の最大加速度 [gal] である。

最大加速度  $\alpha$  の関数である標準被害率  $R(\alpha)$  は、一般的な沖積地盤に浅く（1 m 程度）埋設された水道铸铁管（管径は特に規定されていないが、100~200mm程度）の被害率と規定され、1971年ロスアンゼルス近郊で発生したサンフェルナンド地震の最大加速度と被害率の関係を回帰分析することによって次式を得ている。

$$R(\alpha) = 1.698 \times 10^{-16} \alpha^{6.06} \quad (2)$$

被害率補正係数  $C_i$  は管種、管径、地盤条件、液状化の程度等各種のものが考えられ、過去の地震被害データ等から決定されるものである。この式は、例えば主要管路に沿って適用しても良いし（補正係数や最大加速度の条件が変わる場合には、一定の条件となる部分を区切り、各区間にこの式を適用していく）、地盤条件、最大加速度、液状化の程度が与えられたメッシュに対して（メッシュごとの管種、管径ごとの延長データを与え）適用しても良い。

上記の式は、東京都のその後の地震被害想定をはじめ多くの自治体の地震被害想定で用いられてきた。これらにおいては、標準被害率としては上記の磯山・片山のものを用いているが、補正係数については、各々の都市の実状に応じて様々な組合せが採用され、その係数値も、その時々最新のデータに基づき設定されてきている。

上で述べた式は過去の被害に基づく経験式であり、適用が簡易かつ実務的であることから、これまで多くの被害想定で用いられてきた。また、独自の補正係数を用いたい場合や、新しいデータが出てきた場合の修正も比較的容易である。そこで本論においても上記の式の形をそのまま踏襲することとし、標準被害率曲線、補正係数を兵庫県南

部地震の被害分析結果をベースに求めた。なお、補正係数は、データの制約上、また、一般的な使用に配慮して、管種、管径、地盤条件、液状化の4種類に限ることとした。施設の実状に応じてこれ以外の補正係数（例えば埋設深さ等）を用いようとする場合には別途検討が必要である。

### 3. 補正係数

文献<sup>1,2)</sup>における配水管被害分析では、地盤・地形に関しては十分に分析されていたとは言えない。例えば、表層地質が岩や洪積層となっている山側の丘陵地において配水管被害が多発したことについて十分な説明がされていない（特に芦屋市、西宮市）。これは、当時の地盤・地形情報の制約によるものであるが、最近、国土地理院は、阪神地区について1万分の1の詳細な地震防災土地条件図を公開した<sup>6)</sup>。この地図は、神戸地区において一部未整備地域があるものの、現時点では最も精細な地形分類情報及び人工地形情報を提供している。そこで、本研究では、この地震防災土地条件図を地形情報として活用し、地盤・地形条件の変化に富む芦屋市、西宮市を対象に、地形分類を考慮した詳細かつ定量的な分析を行い、この結果を中心として、先の文献<sup>1,2)</sup>による神戸を含む全体的な分析結果を参考にしながら、式(1)の被害率補正係数を定めることとした。

#### 3.1 分析対象地域及びデータベース

本分析に用いるデータベースを表-1に示す。配水管路図及び被害データに関しては、文献<sup>1)</sup>の芦屋市及び西宮市のデータを用いる。地形情報については、上述の地震防災土地条件図の芦屋、西宮

表-1 分析に用いるデータベース

データ名	基となるデータベース	主な属性	入手先
配水管路	配水管路図	管種、管径 布設年代	文献(1) (芦屋市、 西宮市)
被害点	被害地点データベース	被害箇所、被害 形態	
微地形分布	地震防災土地 条件図	地形種別 人工改変種別	建設省 国土地理院
液状化分布	液状化分布図	液状化程度	文献(1)
震度階分布	震度階分布図	震度階 (5~7、超7)	文献(1)

図葉を用いる。従って、分析対象地域は、上記データベースが揃っている図-2に示す部分となる。液状化分布については、文献<sup>1)</sup>の液状化分布図(250mメッシュ)を用いる。震度階分布については、文献<sup>1)</sup>の震度階分布図(ポリゴンデータ)を50mメッシュに変換して用いる。なお、ここで用いるメッシュは、国土地理院の標準地域メッシュに基づいており、第3次地域区画<sup>7)</sup>を縦横それぞれ、4分割したものを250mメッシュ、20分割したものを50mメッシュと呼ぶ。

分析対象地域の配水管路及び被害地点を図-3に示し、被害形態別集計結果を表-2に示す。本論では略号として、ダクタイル鋳鉄管 = DIP、鋳鉄管 = CIP、塩化ビニル管 = VP、鋼管(溶接継手) = SP、鋼管(ネジ継手) = SGP、石綿セメント管 = ACPを用いる。また、空気弁、仕切弁、消火栓等の付属物を総称して属具と呼ぶことにする。DIPには、一般継手(A・K・T)形と耐震継手(S・SII)形があるが、本分析では沿岸埋立地を除外したため(後述)、耐震継手形は殆どなくなり、DIPは一般継手形を指すことになった。管径については、配水管としてφ75以上を対象としている。使用データは、芦屋市に関して全延長176.3kmの内135.8km(77%)、西宮市に関して全延長825.7kmの内385.2km(47%)となった。

地震防災土地条件図<sup>6)</sup>は、地形区分(34区分)と人工改変区分(6区分)の組合せで表現されており、芦屋・西宮図葉においては58組の組合せが実在する。地形区分・人工改変区分の分布を図-4に示し、各組合せの面積を表-3に示す。

#### 3.2 地形区分のグループ化

表-3の地形区分は、係数を設定するには細かすぎるので、この地区のマクロな地盤条件や配水管被害分布等を参考にしながらグループ化を行う。図-5に地震防災土地条件図と配水管被害地点を重ねて示すが、図より以下のことが分かる。

1. 海岸平野や川沿いの扇状地など、沖積低地で被害が多い。
2. 丘陵地(図中左上側)に着目すると、山地や段丘にも被害が出ているが、谷底平野周辺50~100mの範囲内で特に被害が多い。
3. 山地の被害について、図-4の人工改変区分

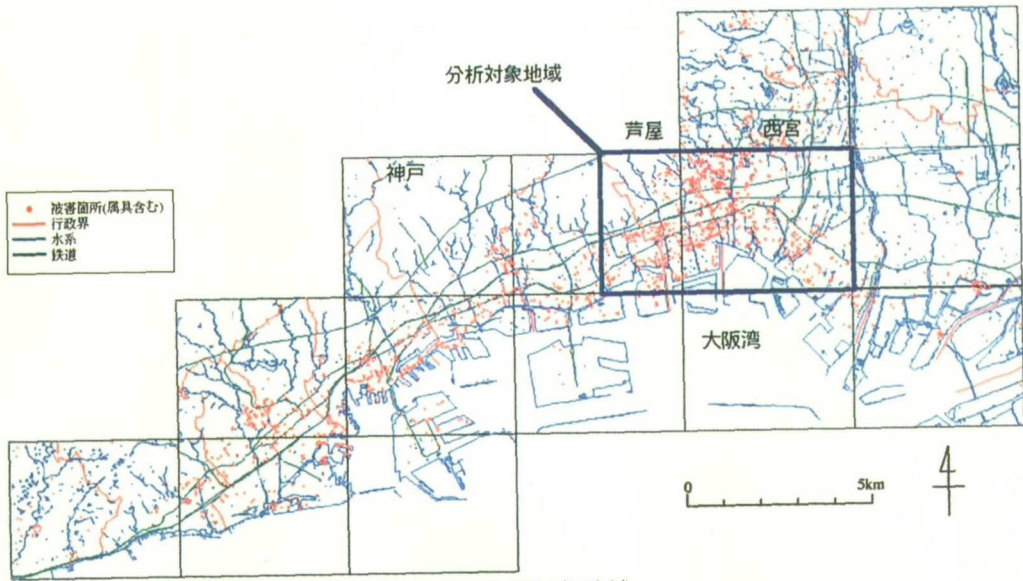


図-2 分析対象地域

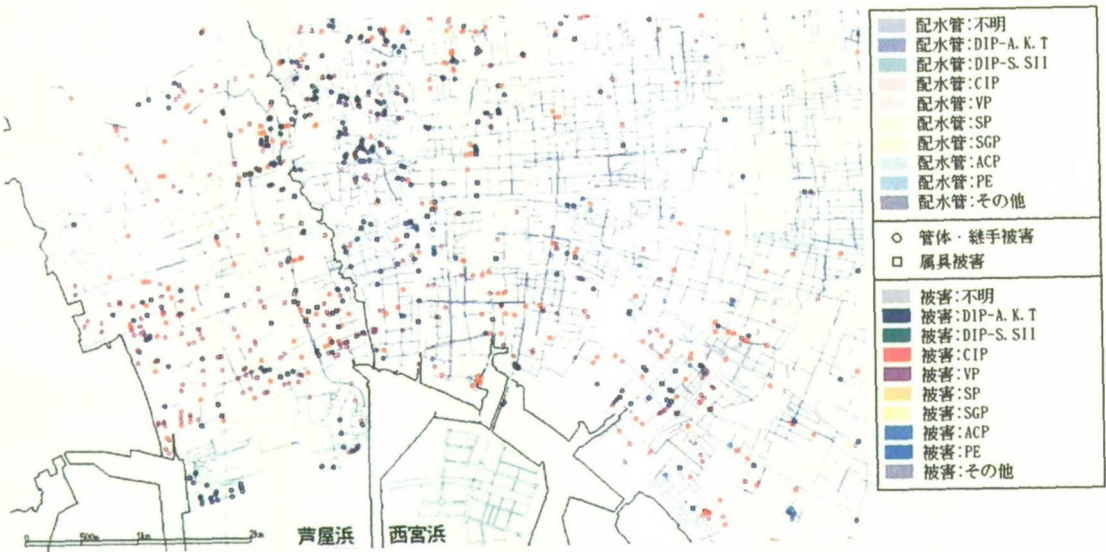


図-3 配水管路及び被害地点

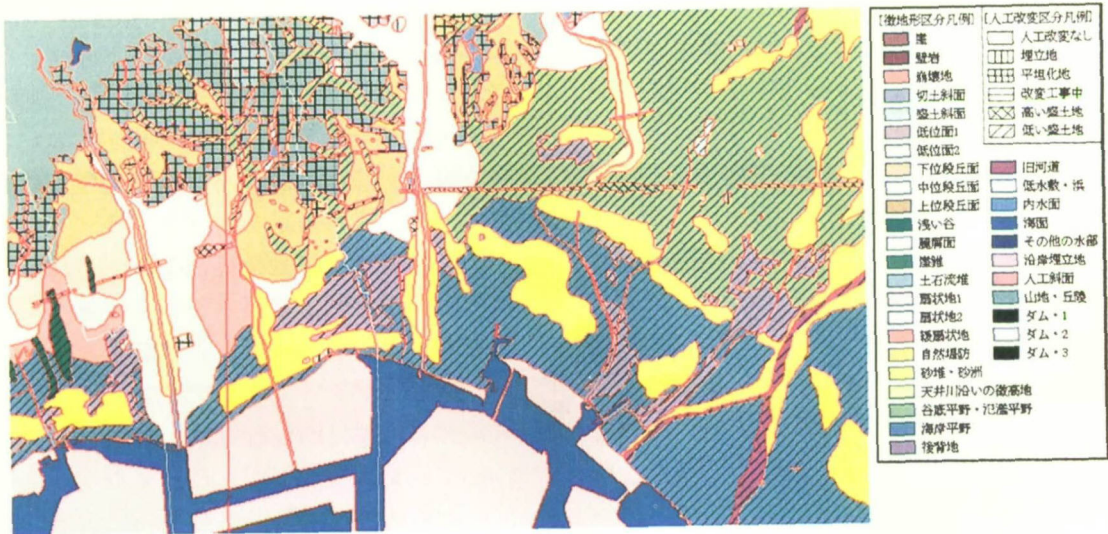


図-4 地形区分及び人工改変区分

表-2 分析対象地域の配水管及び属具の被害集計結果

	管 体				継 手 部								不明	合計	(参 考)		属 具						被害 総合計			
	直管	異形管	不明	小計	抜け直管	異形管	破損直管	異形管	突込み直管	異形管	不明	小計			延長 (km)	被害率 (件/km)	空気弁	仕切弁	消火栓	その他	不明	小計				
芦屋市	DIP	0	0	0	0	50	3	0	0	0	0	3	56	4	60	45.96	1.31									
	CIP	54	13	0	67	3	0	13	0	0	0	0	16	4	87	63.15	1.38									
	VP	13	0	0	13	3	0	27	0	0	0	0	30	1	44	19.40	2.27									
	SP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0.96	1.04									
	SGP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	—									
	AGP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	—									
	その他	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.36	0.00									
	小計	67	13	0	80	56	3	40	0	0	0	4	103	9	192	135.84	1.41	2	40	0	9	0	51			243
西宮市	DIP	0	0	0	0	157	8	2	0	0	0	7	174	0	174	244.88	0.71									
	CIP	36	11	0	47	58	2	2	0	0	0	0	62	0	109	58.78	1.85									
	VP	27	10	0	37	26	8	34	0	1	0	0	69	0	106	63.91	1.66									
	SP	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2.14	0.47									
	SGP	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.07	30.66									
	ACP	22	1	0	23	6	0	2	0	0	0	1	9	0	32	14.99	2.14									
	その他	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.40	0.00									
	小計	87	23	0	110	247	18	40	0	1	0	8	314	0	424	385.15	1.10	6	63	9	17	0	95			519

も含めて考えると、自然山地では被害が殆ど出ていない。

4. 図中右上側の氾濫平野では被害が少ない。

これらを考慮して、地形区分を、[改変山地]、[段丘]、[谷・旧水部]、[沖積平地]、[その他]の5区分にグループ化した。結果を表-4に示す。表-4の[その他]は、地盤が良質であったり、延長が殆ど無い等の理由で、被害発生が少ない地形区分グループとなっている。延長が殆どない区分は、分析結果に殆ど影響を与えないので、実際には[その他]の値は、氾濫平野や段丘低位面等、人工改変量が微少で締った沖積及び洪積平地と見て良い。

地震防災土地条件図では、谷底平野と氾濫平野を区別せずに扱っているが、配水管の被害傾向が著しく異なることから、本分析では、両者を区別して扱っている。また、分析及び被害想定の際の簡便さを考慮してメッシュ変換を行ったが、谷地形等を十分表現するため、50mメッシュを単位とした。この時、50mメッシュ内に、少しでも谷または旧水部が含まれる場所は、[谷・旧水部]のグループに含めることとし、谷・旧水部を25m～50m程度広く評価することにした。

なお、本分析では、沿岸埋立地を分析対象から除外した。主な理由は次の通りである。まず、芦屋市の埋立地では、耐震継手(SII)形のDIPが布設されていたが、異形管のSII形の耐震継手が開発されていなかった当時の技術事情により、異形管部分に特殊押輪を使用しており、ここに被害が発生している(図-3芦屋浜参照)。このため、被害地点の管種属性が一般継手(A・K・T)形DIPであるにも関わらず、対応する配水管の管種属性が耐震継手形DIPになっている等、今回提案する被害率[件数/延長]の分析には不適切と考えられる。一方、西宮市の埋立地では、耐震継手形DIPが殆どを占めており、被害は一箇所も発生していない(図-3西宮浜参照)。なお、今回の地震では、被災地全体を通して耐震継手形DIPには被害が発生していない。これらの理由により、芦屋浜、西宮浜のデータをそのまま回帰分析で使用すると、沿岸埋立地の被害率を過小評価する危険性があるので、沿岸埋立地における配水管の被害分析は別途行うこととし、本分析からは外すべきであると判断した。グループ化した地形区分と被害地点との関係を図-6に示す。図中の沖積平地では液状化程度による細区分を行っている

表-3 各地形区分の面積（芦屋、西宮圏葉）

[km<sup>2</sup>]

	人工改変区分						計
	改変なし	埋立	平坦化	改変工事中	高い盛土	低い盛土	
崖	1.5						1.5
壁崖	14.6						14.6
崩壊地	0.54						0.54
切上斜面	25.9						25.9
盛上斜面	1.8						1.8
低位面1	8.5		32.7				41.2
低位面2	1072.1		53.4		2.8		1128.3
下位段丘面	86.4						86.4
中位段丘面							
上位段丘面	1093.1		101.1		0.35		1194.5
浅い谷			0.4		5.9	480.7	487.0
麓斜面	9.5						9.5
崖錐							
上石流堆	16.9		137.5				154.4
扇状地1	3110.6		54.9		18.9	24.4	3208.8
扇状地2							
緩扇状地	1104.8		31.4		14.5	2.9	1153.5
自然堤防	876.2				1.3		877.5
砂堆・砂州	1444.3						1444.3
天井川沿い微高地	409.9		99.0		3.0		511.9
谷底平野					20.9	439.4	460.3
氾濫平野					59.7	3599.7	3659.5
海岸平野	5.1				1.9	4243.0	4249.9
後背地	0.09					822.2	822.3
旧河道						132.5	132.5
低水敷・浜							
内水面	346.8						346.8
海面	1794.8						1794.8
旧水部・旧溜池		69.4	4.2		3.5	35.0	112.2
沿岸埋立地	2903.9						2903.9
(人工斜面)							
山地	6643.2		2253.3	11.0	44.1	26.8	8978.4
ダム・堤堰1							
ダム・堤堰2							
ダム・堤堰3							
計	20970.5	69.4	2768.0	11.0	176.9	9806.5	33802.2

が、[無し]、[部分的]、[全体的] は、それぞれ文献<sup>1)</sup>の、[0%]、[50%]、[100%] に対応している。メッシュ化の工夫により、丘陵地の被害の殆どが谷・旧水部上に含まれたことが分かる。

### 3.3 クロス集計

前節のグループ化地形区分に加えて、管種については、[DIP]、[CIP]、[VP]、[SP]、[SGP]、[ACP]、[その他]（不明も含む）の7区分に、管径については、[φ75]、[φ100~150]、[φ200~400]、[φ500以上] の4区分に、震度階につい

表-4 地形区分のグループ化

Group名	改変山地	段丘	谷・旧水部	沖積平地	その他
内容	切土斜面、土石流堆、人工山地	下位段丘面、中位段丘面、上位段丘面	谷底平野、旧水部・旧溜池	扇状地、緩扇状地、自然堤防、砂堆・砂州、天井川沿い微高地、海岸平野、後背地、旧河道	崖、壁岩、麓斜面、崖錐、土石流堆、内水面、海面、自然山地、盛土斜面

ては、[4以下]、[5]、[6]、[7]、[超7] の5区分に分類し（図-7）、クロス集計を行った。表-5にクロス集計結果を示す。なお、表中の被害形態以外の項目では、属具を外した集計値を示している。属具は、材質等が様々であり、材質ごとに被害傾向が異なることが予想されるが、属具自身の材質に関する属性がないため、傾向の分析が困難である。このため、属具の被害分析は別途行うこととし、本分析からは除外することにした。

管種、管径、震度階、液状化については、文献<sup>1)</sup>の神戸市・芦屋市・西宮市全体のクロス集計表（表-4-2-4）とほぼ同じ傾向がうかがえる。一方、地形については、明らかに、谷・旧水部で被害が大きい。沖積平地では、液状化が無ければ被害はそれほど大きくないことが分かる。

### 3.4 多変量解析

上記のクロス集計結果を踏まえ、多変量解析を行った。式(1)では地震動増大に伴い被害率が増加する曲線をイメージしているのに対し、表-5及び図-7における震度階は、震度階増加に被害率増加が伴っておらず、正当に評価するのは困難と考えられるため、震度階区分は解析に用いなかった。液状化については、延長が不足している等の理由により、[無し]（0%）、[有り]（50%、100%）の2区分に分け、沖積平地のみに適用した。管種については、十分な延長がないSGP、ACPを[不明]に含めた。管種、管径、グループ化地形区分の組合せ毎の集計結果を表-6に示す。この組合せを説明変数、各々の被害率を目的変数として、延長による重み付けを行い、対数場での数量化理論（I類）による多変量解析を行った。解析結果の各係数を図-8に示す。図-8では、管種、管径、

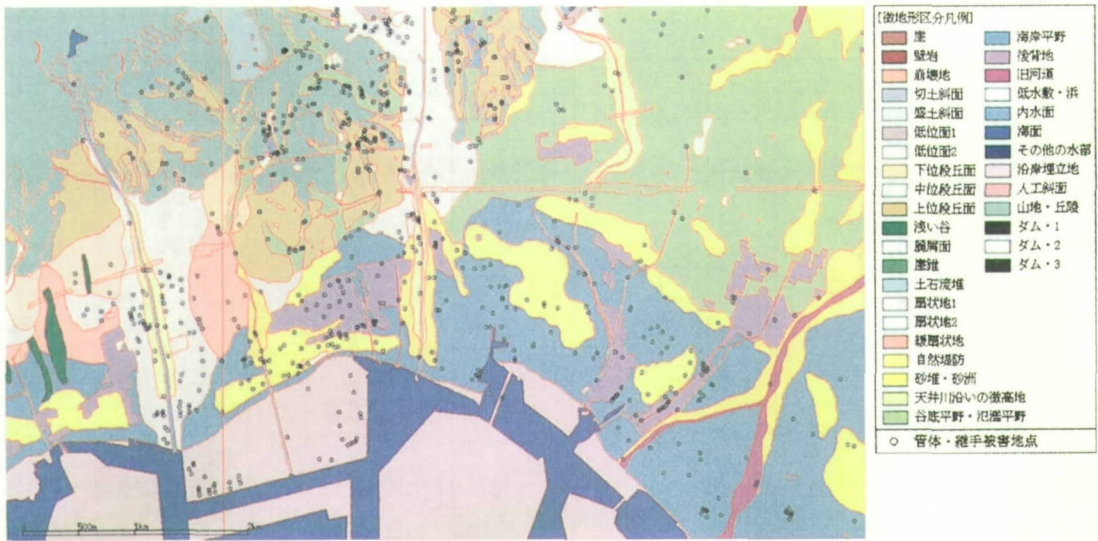


図-5 地形区分と被害地点

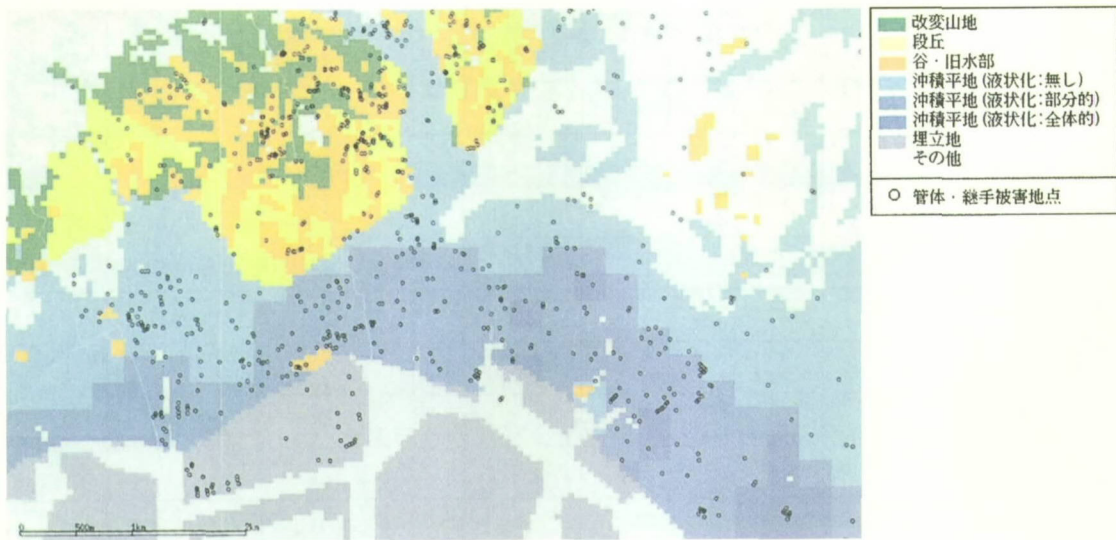


図-6 グループ化地形区分(50mメッシュ)と被害地点

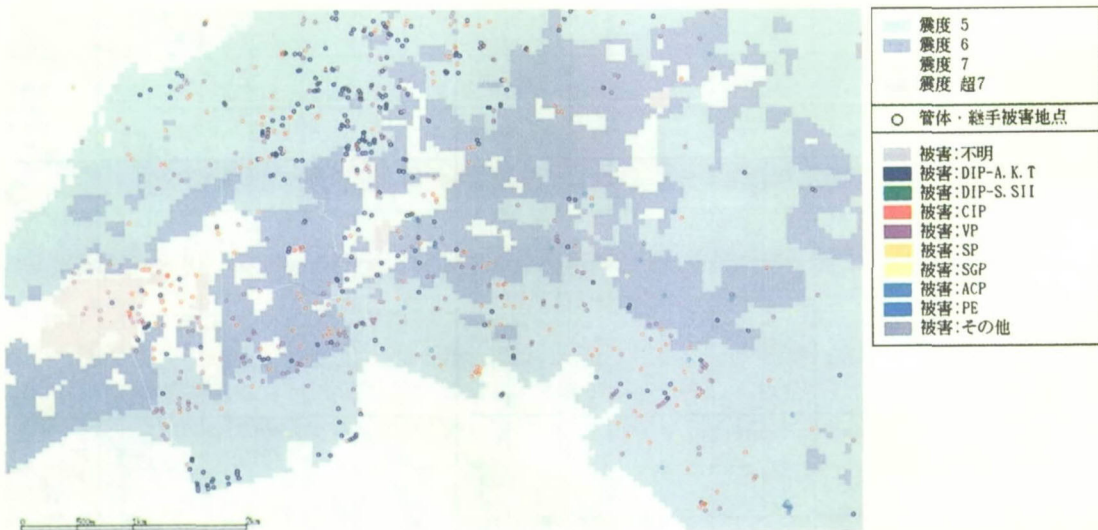


図-7 震度階の分布(50mメッシュ)と被害地点





表-5 対象地域における被害のクロス集計表

上段：箇所数(件)  
 中段：延長(km)  
 下段：被害率(件/km)

被害形態	被害形態							管種							管径				
	直管部 破損	異形管 部破損	継手部 抜け	継手部 破損	継手部 突込み	継手部 不明	器具 破損	その他	DIP	CIP	VP	SP	SGP	ACP	その他	75	100 ~150	200 ~450	500 ~800
被害形態	直管部 破損	154 521 0.296							0 290.8 0	90 121.9 0.738	40 83.31 0.48	1 3.106 0.322	1 15.33	22 14.99 1.468	0 6.759 0	61 88.39 0.69	81 314.2 0.258	12 108.3 0.111	0 10.17 0
	異形管 部破損	36 521 0.069						0 290.8 0	24 121.9 0.197	10 83.31 0.12	0 3.106 0.067	1 15.33	1 14.99 0.067	0 6.759 0	14 88.39 0.158	17 314.2 0.054	5 108.3 0.046	0 10.17 0	
	継手部 抜け			324 521 0.622				218 290.8 0.75	63 121.9 0.517	37 83.31 0.444	0 3.106 0	0 14.99 0	0 6.759 0.4	6 88.39 0.656	58 314.2 0.63	198 108.3 0.63	68 108.3 0.63	0 10.17 0	
	継手部 破損				80 521 0.154			2 290.8 0.007	15 121.9 0.123	61 83.31 0.732	0 3.106 0	0 14.99 0.133	2 6.759 0	0 88.39 0.419	37 314.2 0.118	37 108.3 0.118	6 108.3 0.055	0 10.17 0	
	継手部 突込み					1 521 0.002		0 290.8 0	0 121.9 0	1 83.31 0.012	0 3.106 0	0 14.99 0	0 6.759 0.011	0 88.39 0.011	1 314.2 0.011	0 108.3 0	0 108.3 0	0 10.17 0	
	継手部 不明						12 521 0.023	10 290.8 0.034	0 121.9 0	0 83.31 0	1 3.106 0.322	0 14.99 0.067	0 6.759 0	1 88.39 0.011	1 314.2 0.022	7 108.3 0.022	4 108.3 0.037	0 10.17 0	
	器具 破損						146 521 0.28	85 290.8 0.292	41 121.9 0.336	16 83.31 0.192	0 3.106 0	1 14.99 0.2	3 6.759 0.067	0 88.39 0.188	54 314.2 0.611	59 108.3 0.188	33 108.3 0.305	0 10.17 0	
	その他							9 290.8 0.017	4 121.9 0.014	4 83.31 0.033	1 3.106 0.012	0 14.99 0.065	0 6.759 0	0 88.39 0	0 314.2 0.023	4 108.3 0.013	3 108.3 0.028	0 10.17 0	
	管種	DIP						234 290.8 0.805								32 30.02 1.066	151 197.9 0.763	51 53.17 0.959	0 9.738 0
CIP								196 121.9 1.608							37 10.31 3.588	114 61.08 1.866	45 50.33 0.894	0 0.12 0	
VP									150 83.31 1.8						82 40.4 2.03	68 42.91 1.585	0 0 -	0 0 -	
SP										2 3.106 0.644					1 0.321 3.115	0 0.54 0	1 2.246 0.445	0 0 -	
SGP											2 0.065 30.66				2 0 -	0 0.065 0	0 0 -	0 0 -	
ACP													32 14.99 2.135		20 5.85 3.419	11 6.886 1.597	1 2.05 0.488	0 0.199 0	
その他														6.759 0	1.484 0	4.776 0	0.48 0	0.02 0	
管径		75														174 88.39 1.969			
	100 ~150															344 314.2 1.095			
	200 ~450																98 108.3 0.905		
	500~																	0 10.17 0	
	深度階	~4																	
5																			
6																			
7																			
超7																			
地形	改変 山地																		
	段丘																		
	谷・ 川水部																		
	沖積 平地																		
	その他																		
液状化	液状化 なし																		
	部分的 液状化																		
	全面的 液状化																		

表-5 (続き)

上段：箇所数(件)  
中段：延長(km)  
下段：被害率(件/km)

被災形態	震度階						地形						液状化		
	~4	5	6	7	超7	変 山地	段 丘	谷・ 旧水部	沖積 平地	その他	液状化 なし	部分的 液状化	全面的 液状化		
被災 形態	直管部 破損	2 7.838 0.255	84 283 0.297	42 174.3 0.241	19 47.34 0.401	7 8.44 0.829	6 27.14 0.221	9 39.74 0.227	28 57.24 0.489	91 271.5 0.335	20 125.4 0.16	101 401.2 0.252	42 108.6 0.387	11 11.25 0.976	
	異形管 部破損	1 7.838 0.128	22 283 0.078	11 174.3 0.063	2 47.34 0.042	0 8.44 0	0 27.14 0	2 39.74 0.05	27 57.24 0.035	5 271.5 0.099	11 125.4 0.04	24 401.2 0.027	1 108.6 0.021	1 11.25 0.089	
	継手部 抜け	4 7.838 0.51	229 283 0.809	57 174.3 0.327	31 47.34 0.655	3 8.44 0.355	30 27.14 1.106	33 39.74 0.83	108 57.24 1.887	132 271.5 0.486	21 125.4 0.168	243 401.2 0.606	74 108.6 0.682	7 11.25 0.622	
	継手部 破損	0 7.838 0	49 283 0.173	15 174.3 0.086	13 47.34 0.275	3 8.44 0.355	2 27.14 0.074	4 39.74 0.101	15 57.24 0.262	54 271.5 0.199	5 125.4 0.04	47 401.2 0.117	31 108.6 0.286	2 11.25 0.178	
	継手部 突込み	0 7.838 0	1 283 0.004	0 174.3 0	0 47.34 0	0 8.44 0	0 27.14 0	0 39.74 0	0 57.24 0	1 271.5 0.004	0 125.4 0	0 401.2 0	0 108.6 0.009	0 11.25 0	
	継手部 不明	0 7.838 0	6 283 0.021	5 174.3 0.029	1 47.34 0.021	0 8.44 0	0 27.14 0.037	2 39.74 0.05	2 57.24 0.035	7 271.5 0.026	0 125.4 0	0 401.2 0	9 108.6 0.022	3 11.25 0.028	
	器具 破損	0 7.838 0	77 283 0.272	52 174.3 0.298	16 47.34 0.338	1 8.44 0.118	3 27.14 0.111	7 39.74 0.176	23 57.24 0.402	99 271.5 0.365	14 125.4 0.112	84 401.2 0.209	58 108.6 0.534	4 11.25 0.356	
	その他	0 7.838 0	4 283 0.014	0 174.3 0	5 47.34 0.106	0 8.44 0	1 27.14 0.037	0 39.74 0	1 57.24 0.016	7 271.5 0.026	0 125.4 0	7 401.2 0.017	2 108.6 0.018	0 11.25 0	
	管種	DIP	3 2.063 1.454	161 152.8 1.053	43 107.2 0.401	24 25.53 0.94	3 3.188 0.941	26 12.68 2.05	26 20.15 1.291	84 29.68 2.831	86 148.3 0.58	12 80.07 0.15	190 228.5 0.832	41 56.65 0.724	3 5.678 0.528
		CIP	4 4.345 0.921	119 67.61 1.76	44 34.88 1.261	22 12.75 1.726	7 2.347 2.983	4 9.808 0.408	14 14.04 0.997	54 19.27 2.802	105 55 2.802	19 23.81 0.798	123 93.51 1.315	70 25.15 2.784	3 3.27 0.918
VP		0 0.27 0	94 47.99 1.959	31 25.48 1.217	22 6.995 3.145	3 2.583 1.162	10 2.65 3.774	9 4.255 2.115	18 5.779 3.115	99 53.34 1.856	14 17.29 0.81	85 63.55 1.338	58 18.72 3.099	7 1.044 6.704	
SP		0 0.611 0	2 2.029 0.986	0 0.186 0	0 0.232 0	0 0.049 0	0 0 2.029	0 0.493 0	1 0.146 0	0 1.745 0.573	0 0.723 0	0 1.518 1.318	2 1.277 0	0 0.312 0	
SCP		0 0 -	2 0.065 30.66	0 0 -	0 0 -	0 0 -	0 0 -	0 0 -	0 0 15.33	0 0.065 -	1 0 -	2 0 -	0 0.04 -	0 0.021 0	
ACP		0 0 -	17 9.88 1.721	12 4.545 2.641	3 0.562 5.336	0 0 -	0 1.043 0	0 0.299 0	0 0.967 0	0 10.18 2.652	0 2.496 2.003	5 8.591 1.863	16 5.485 1.459	8 0.911 8.782	
その他		0 0.55 0	0 2.635 0	0 2.026 0	0 1.274 0	0 0.274 0	0 0.954 0	0 0.505 1.396	0 2.928 0.977	0 5.499 0	0 1.242 0	0 0.018 0	0 0 0	0 0 0	
管径		75	0 1.226 0	105 45.54 2.306	30 28.18 1.065	30 9.778 3.068	9 3.658 2.461	9 6.206 1.45	11 8.889 1.238	26 9.996 2.601	109 42.94 2.539	19 20.36 0.933	114 71.59 1.592	49 15.25 3.213	11 1.541 7.139
		100 ~150	5 3.483 1.436	227 167.8 1.353	76 109.9 0.692	32 28.54 1.121	4 4.504 0.888	23 15.74 1.461	33 22.37 1.475	94 30.62 3.07	169 172.6 0.979	25 72.88 0.343	236 240.2 0.983	100 68.99 1.449	8 5.009 1.597
		200 ~450	2 3.129 0.639	63 63.27 0.996	24 33.15 0.724	9 8.441 1.066	0 0.279 0	8 4.813 1.662	6 7.984 0.752	36 13.48 2.67	41 53.07 0.773	7 28.93 0.242	68 80.23 0.848	28 23.44 1.195	2 4.607 0.434
	500~	0 0 -	0 6.439 0	0 3.145 0	0 0.582 0	0 0 -	0 0.38 0	0 0.496 0	0 3.136 0	0 2.958 0	0 3.196 0	0 9.19 0	0 0.88 0	0 0.097 0	
	震度階	~4	7 7.838 0.893												
地形	変 山地						40 27.14 1.474				40 27.14 1.474				
	段 丘							50 39.74 1.258			50 39.74 1.258				
	谷・ 旧水部							156 57.24 2.726			155 56.58 2.74				
	沖積 平地								319 271.5 1.175		125 153.3 0.815	173 107.5 1.610	21 10.69 1.965		
	その他										51 125.4 0.407	48 124.4 0.385	3 0.733 4.095	0 0.246 0	
	液状化	液状化 なし										418 401.2 1.042			
部分的 液状化												177 108.6 1.63			
全面的 液状化													21 11.25 1.866		

表-6 管種、管径、グループ化地形区分の組合せ毎の集計

上段：箇所数(件)  
中段：延長(km)  
下段：被害率(件/km)

	全管種					DIP					CIP					VP					SP					不明																																		
	全管種	75	100	150	200	全管種	75	100	150	200	全管種	75	100	150	200	全管種	75	100	150	200	全管種	75	100	150	200	全管種	75	100	150	200																														
全地形	616	174	344	98	0	234	32	151	51	0	196	37	114	45	0	150	82	68	0	0	2	1	0	1	0	34	22	11	1	0	521	88.4	314	108	10.2	291	30	198	53.2	9.74	122	10.3	61.1	50.3	0.21	83.3	40.4	42.9	0	0	3.11	0.32	0.54	2.25	0	21.8	7.33	11.7	2.53	0.22
改変山地	40	9	23	8	0	26	3	16	7	0	4	0	3	1	0	10	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27.1	6.21	15.7	4.81	0.38	12.7	2.39	7.25	2.79	0.26	9.81	1	6.94	1.75	0.12	2.65	1.7	0.95	0	0	0	0	0	0	0	2	1.12	0.6	0.28	0
段丘	50	11	33	6	0	26	5	17	4	0	14	2	11	1	0	9	4	5	0	0	1	0	0	0	0	39.7	8.89	22.4	7.98	0.5	20.1	3.6	13.1	2.98	0.5	14	1.88	7.67	4.49	0.4	2.5	3.04	1.21	0	0	0.49	0	0.49	0	0	0	0.8	0.37	0.41	0.02					
谷・旧水路	156	26	94	36	0	84	12	52	20	0	54	7	31	16	0	18	7	11	0	0	0	0	0	0	0	57.2	10	30.6	13.5	3.14	29.7	4.4	15.2	7.01	3.04	19.3	1.73	11.3	6.13	0.09	5.78	3.09	2.69	0	0	0.15	0.1	0	0.05	0	2.36	0.67	1.39	0.29	0.01					
沖積平地・液状化無し	134	55	67	12	0	43	5	32	6	0	38	13	19	6	0	40	27	13	0	0	1	1	0	0	0	163	30.5	104	26.8	2.09	89.7	9.59	63.5	14.5	2.09	30.3	3.36	14.9	12	0	36.6	15.7	20.9	0	0	0.5	0.23	0.04	0.6	0.09	1.65	4.26	0.18	0	0					
沖積平地・液状化有り	194	60	104	30	0	43	5	26	12	0	71	12	42	17	0	64	33	31	0	0	0	0	0	0	0	118	16.7	73.2	27.5	0.87	61.4	3.41	45.1	12	0.87	28.1	0.92	13.5	13.7	0.19	7	9.98	9.74	0	0	1.24	0.16	1.09	0	0	2.08	4.2	1.09	1.38	0					
その他	42	13	23	6	0	12	2	8	2	0	15	3	8	4	0	9	5	4	0	0	0	0	0	0	0	116	16.1	68.5	27.7	3.2	77.2	6.64	53.7	13.9	2.99	20.4	1.42	6.73	12.3	0.14	6.94	7.41	0	0	0	0.72	0.15	0.57	0.2	0.85	1.14	0.46	1.04	0.21	0					
	0.36	0.81	0.34	0.22	0	0.16	0.3	0.15	0.14	0	0.73	2.11	1.19	0.33	-	0.63	0.72	0.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-															

グループ化地形のそれぞれについて、[CIP]、 $[\phi 100\sim 150]$ 、[沖積平地・液状化無し]を基準とした時の相対的な倍率で表わしている。基準区分の選定理由は以下の通りである。

管種 [CIP]：延長が十分得られていると共に被害率が安定している。小さな地震動レベルでも被害があるので、後述の標準被害率曲線を求める際有利である。

管径  $[\phi 100\sim 150]$ ：延長が最も多く、被害率が全体の平均的被害率とほぼ同じである。

地形 [沖積平地・液状化無し]：延長が最も多く、被害データが安定して得られている。液状化補正係数と組み合わせる際、沖積平

地を基準とするのが有利である。また、他の地形区分との相対倍率を議論する場合、液状化無しを基準にしておくのが有利である。

なお、回帰結果における基準の組合せでの被害率は0.96 [件/km]であった。予測被害件数と実被害件数の相関図を図-9に示すが、相関係数は0.87であり、両者が高い相関を示していることが分かる。管径  $[\phi 500\text{以上}]$ については、本分析対象における実際の被害件数が0であるため、本分析のみでは係数を決定できない。また、管種 [SP]も十分な延長が得られておらず、係数設定ができるような結果には至らなかった。

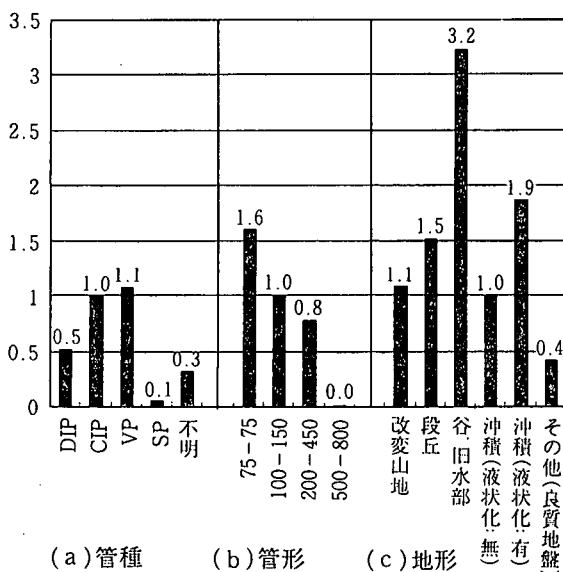


図-8 数量化理論I類による解析結果の各係数

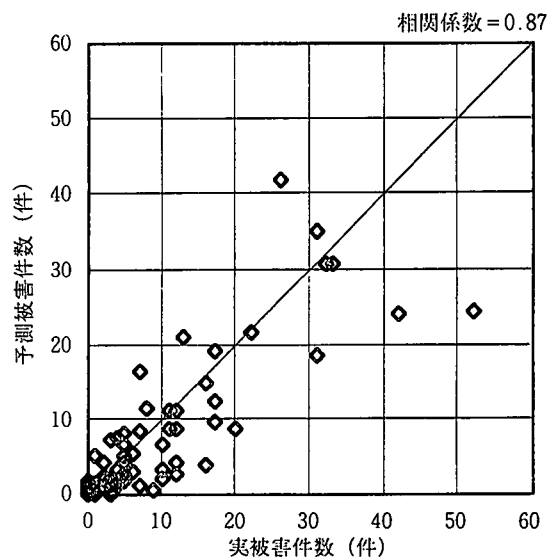


図-9 予測被害件数と実被害件数の相関

### 3.5 補正係数の設定

今回の分析では、局所的な対象地域における数量化を行っているのですが、母集団が十分に得られていない区分等があり、局所的な被害特性が出ている危険性もある。従って、補正係数設定の際には、神戸市を含む被災地域全体の被害率を睨んで設定する必要がある。

表-7に今回の分析により設定した補正係数を一覧する。以下に各項目の設定値について概略を説明する。ここで用いる数値は、各基準区分との倍率を示している。説明文中の「全体」は、被災地域全体の被害率を指し、文献<sup>1)</sup>の神戸市、芦屋市、西宮市全体のクロス集計表(表-4-2-4)を参考にしている。

[管種：基準=CIP]

DIP：回帰結果及び表-5では0.5、全体では0.3。CIPとDIPでは被害発生形態が異なるため厳密には設定できないが、ここでは全体の傾向から判断して0.3を設定。

VP：回帰結果は1.1、表-5では1.1、全体では0.9。VPは小口径が大多数を占めるため、全体的にCIPより被害率が大きくみえるが、管径ごとに比較すれば、ほぼ同等の被害率となっている。よって1.0を設定。

SP：回帰結果は0.05、表-5では0.4、全体では0.3。延長が短いため、回帰結果から判断するのは困難。0.3程度にしている事業者が多く、ここでは0.3を仮設定するが参考程度とする。

ACP：延長が短いため回帰からは除外。表-5では1.3、全体では1.2。全体傾向から1.2を仮設定するが参考程度とする。

[管径：基準=φ100-150]

φ75：回帰結果は1.6、表-5では1.8、全体では

2.2。回帰の際、延長が十分得られているので、回帰結果の1.6を設定。

φ200-450：回帰結果、表-5共に0.8、全体では1.0。一般的に管径の増大に伴い被害率の減少が期待できるので回帰結果の0.8を設定。

φ500-800：回帰結果は0.008、表-5では0、全体では0.5。芦屋、西宮では被害が出ていないので、全体の0.5を仮設定するが参考程度とする。

[地形：基準=沖積平地]

改変山地：回帰結果は1.1、表-6では1.8。延長が十分得られていないため誤差が大きいですが、ここでは回帰結果の1.1を設定。

段丘：回帰結果、表-6共に1.5。なお、図-4や表-3では、[改変なし]が段丘の大半を占めているが、実際には、対象地域の段丘の殆どは平坦化等の改変が施されていると考えられるので、ここでの値は[改変段丘]として扱う必要があると思われる。

谷・旧水部：回帰結果は3.2、表-6では3.3。回帰結果の3.2を設定。

その他(良質地盤)：回帰結果の0.4を設定。段丘低位面や氾濫平野等、もともと平らで人工改変量が微少な締った地盤は、この値を使って良い。

[液状化：基準=液状化無し]

部分的液状化：回帰結果は1.9、全体の沖積層と液状化度合いのクロス集計では2.0。実際にはもっと大きくなることが見込まれるが、ここでは多きい方の2.0を採用。

全体的液状化：表-5、文献<sup>1)</sup>共に、沖積平地と液状化度合いのクロス集計で、液状化無しの2.4倍程度になっていることから、2.4を設定。

なお、沿岸埋立地、耐震継手形DIP、φ75未満の管体等、今回除外した区分については、別途検

表-7 補正係数一覧

管種 $C_p$	管径 $C_d$	地形 $C_g$	液状化 $C_l$
DIP	0.3 φ75	1.6 改変山地	なし
CIP	1.0 φ100-150	1.0 段丘	部分的
VP	1.0 φ200-450	0.8 谷・旧水部	全体的
SP	(0.3) φ500-	(0.5) 沖積平地	
ACP	(1.2)	その他	

( ) は延長不足のため決め切れていない値。

討を要する。管種 [SP]、[SGP]、[ACP]、管径 [φ500以上] 等、延長が十分に得られなかった区分については、神戸も含めた広域的な検討が望まれる。

#### 4. 標準被害率曲線

標準被害率曲線は、観測地点で得られた地震動強さと観測地点周辺 2 km 四方の領域内の配水管被害率より被害関数形状を定め、係数を調節することにより、補正係数との整合性を図る。地震動強さとしては、ここでは自治体の地震被害想定から得られやすい最大加速度を考えるが、最大速度の方が被害率との相関が高いことも予想されるので、最大速度を用いた被害率曲線も作成する。

##### 4.1 観測地点における被害率曲線

用いるデータは、文献<sup>1,2)</sup>と同様であるが、強震観測地点をいくつか追加し、各観測地点周辺の被害率の見直しを行っている。図-10に観測地点位置と周辺 2 km 四方の領域を示し、表-8に強震観測地点、観測値、水道管の被害率をまとめる。表中のDIP、CIPの被害率は、属具被害を含まない被害率である。図-11、12に、CIP及びDIPについて最大加速度と被害率の関係をプロットした図を示す。図には、次式の関数を最小二乗法でフィッティングした曲線を重ねている。

$$R(\alpha) = c(\alpha - A)^b \quad (3)$$

ここに、 $R(\alpha)$ は観測データに基づく被害率 [件/km]、 $\alpha$ は地震動の最大加速度 [gal]、 $b$ 、

$c$ はフィッティングのための変数である。 $A$ は被害が発生し始める加速度を意味し、0~300 [gal] まで50 [gal] 刻みで変化させて検討した結果、100 [gal] が妥当であると判断した。なお、ここで求める曲線は、標準被害率の作成を目的としているため、周辺地盤の液状化が激しい観測地点や谷地形の影響で被害率が増加したと思われる観測地点は除外しており、図中では白抜きマークで示している。回帰結果を式(4)、(5)に示す。

$$\text{CIP: } R(\alpha) = 2.88 \times 10^{-6} (\alpha - 100)^{1.97} \quad (4)$$

$$\text{DIP: } R(\alpha) = 4.58 \times 10^{-7} (\alpha - 100)^{1.93} \quad (5)$$

参考までに、図-11には従来用いられていた式(2)の被害率曲線も重ねて示している。式(2)は400 [gal] を超える領域で極めて高い被害率を与えていたことが分かる。

同様に、最大速度についても被害率曲線を作成した。回帰結果を式(6)、(7)に示す。

$$\text{CIP: } R(v) = 3.11 \times 10^{-3} (v - 15)^{1.30} \quad (6)$$

$$\text{DIP: } R(v) = 7.03 \times 10^{-6} (v - 15)^{2.19} \quad (7)$$

ここに、 $R(v)$ は被害率 [件/km]、 $v$ は地震動の最大速度 [kine] である。被害が発生し始める速度として、0~30 [kine] まで5 [kine] 刻みで変化させて検討し、15 [kine] が妥当であると判断した。図-13、14に最大速度とCIP、DIPの被害率の関係を示す。

##### 4.2 標準被害率曲線の作成

4.1節で求めた被害率は、被災地域全体におけ

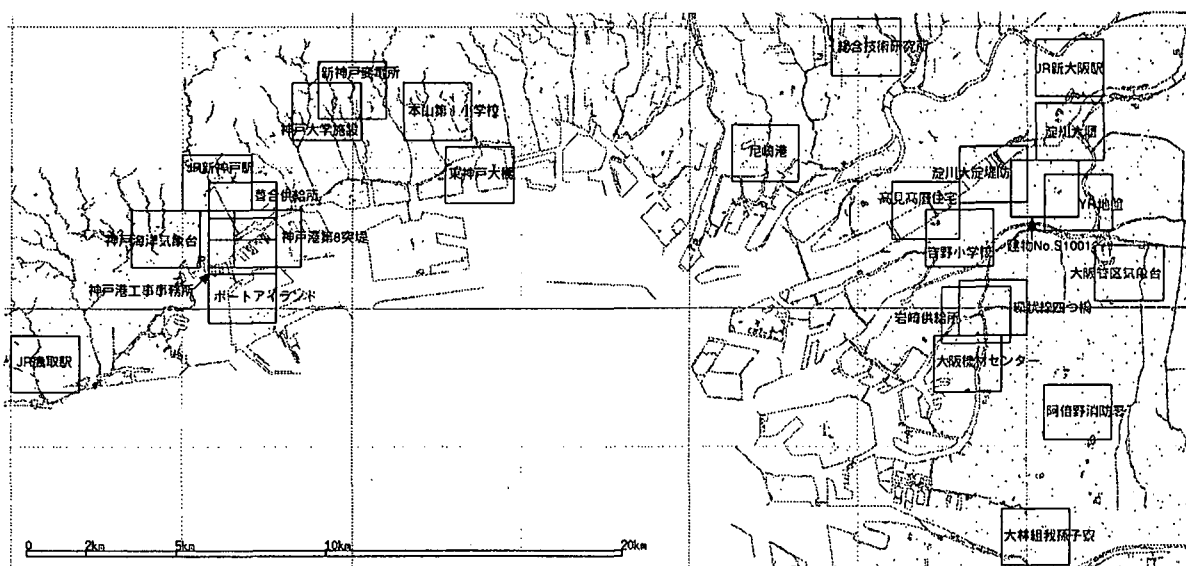


図-10 観測地点と周辺 2 km 四方の領域

表-8 1995年兵庫県南部地震における強震観測地点の最大加速度<sup>8)</sup>と周辺の配水管被害率

観測場所名	設置地点	最大加速度 [gal]	最大速度 [kine]	配水管被害率〔件/km〕		
				DIP	CIP	属具
YR 地盤	GL -1m	50.3	(7.9)	0.00	0.05	0.00
大阪管区气象台	地表面	80.9	(18.9)	0.00	0.12	0.00
大林組我孫子寮	1FL	-114.5	16.7	0.00	0.08	
淀川大堰	GL	138.2	(16.3)	0.00	0.00	0.00
岩崎供給所	地表面	(173.0)	24	0.00	0.24	0.00
大阪機材センター	地表面	(201.8)	27.6	0.00	0.04	0.01
大阪市立吉野小学校	1F	(211.4)	31	0.00	0.31	
淀川大淀堤防	GL	221.4	(34.7)	0.00	0.29	0.04
阿倍野消防署	地表面	(226.3)	29	0.00	0.00	0.00
JR 新大阪駅<新幹線>	GL	228.9	(34.4)	0.00	0.08	0.01
高見高層住宅	GL	266	(34.6)	0.00	0.23	0.00
建物 No. S1001	GL -1m	267.4	(28.9)	0.00	0.05	0.01
* 神戸大学土地造成研究施設	トンネル-10m	(305.0)	55.1	0.46	2.45	0.28
* 東神戸大橋	GL	327.3	(91.1)	4.15	17.18	0.55
環状線四つ橋	GL	329.6	(31.2)	0.00	0.12	0.00
ポートアイランド	GL 0m	341.2	(85.2)	1.20	1.35	0.15
尼崎第三発電所	地表面	353.6	(58.0)	0.69	8.94	0.19
尼崎港	地表面	471.9	(58.3)	1.66	1.86	0.07
* 神戸港工事事務所	地表面	<b>【502】</b>	<b>【103】</b>	1.27	6.08	0.43
JR 新神戸駅	GL	530		0.02	0.41	0.08
* 新神戸変電所	地表面	584.2	(78.0)	0.40	2.59	0.13
総合技術研究所	地表面	<b>【647.5】</b>	(48.3)	0.01	0.20	0.01
JR 鷹取駅	GL	657	(127.0)	0.25	0.92	0.41
* 神戸港第8突堤	構造物	683.1	(184.8)	1.45	7.57	0.54
神戸市立本山第1小学校	1F	<b>【777】</b>	<b>【40】</b>	0.14	2.59	0.32
葎合供給所	地表面	802	(122.8)	0.16	2.03	0.27
神戸海洋气象台	地表面	818	(91.0)	0.11	0.66	0.17

\*は、液状化等の理由により解析から除外した観測地点  
【 】は振り切れ、( ) 計算値

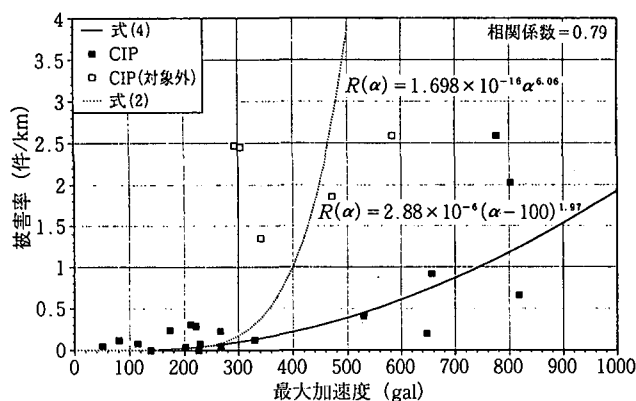


図-11 最大加速度とCIP被害率の関係

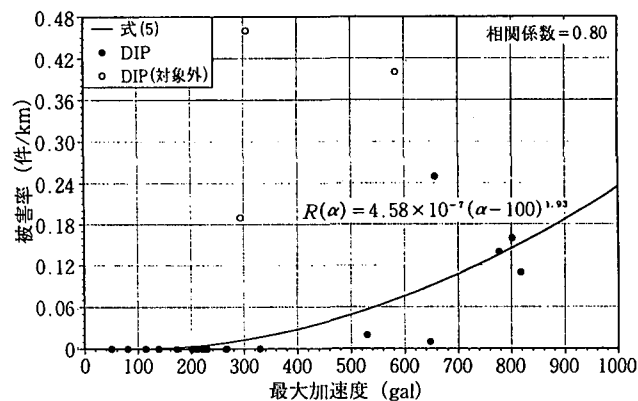


図-12 最大加速度とDIP被害率の関係

る平均的な被害率であり、基準カテゴリーにおける標準被害率とは若干意味合いが異なる可能性がある。ここでは、図-7の震度階区分を用いて、式(6)を例に4.1節で求めた被害率と標準被害率の関

係を確認する。図-7の震度階区分の〔4以下〕、〔5〕、〔6〕、〔7〕、〔超7〕に対して、最大速度20、60、100、140、180 [kine] がほぼ対応していると仮定し、式(6)よりそれぞれの被害率を計算

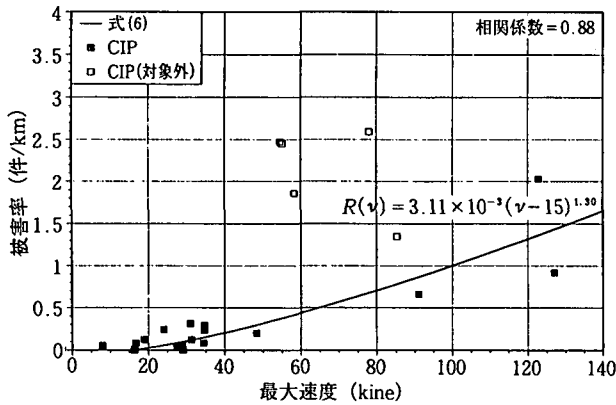


図-13 最大速度と CIP 被害率の関係

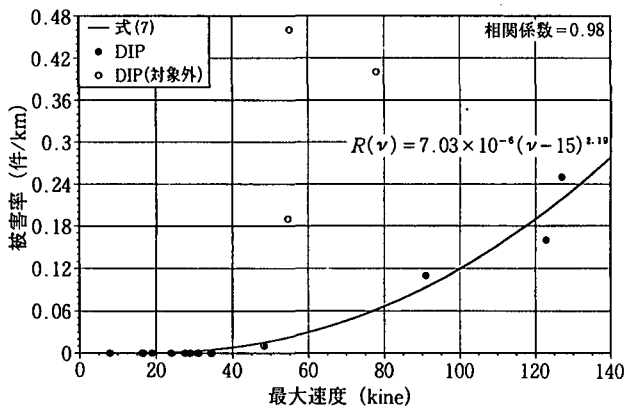


図-14 最大速度と DIP 被害率の関係

する。一方、震度階分布より、それぞれの震度階区分について、基準組合せ [CIP] & [φ100~150] & [沖積平地・液状化無し] の延長を求めると、0、4.39、5.46、3.54、1.51 [km] であった。これらの値を用いて基準組合せの平均被害率を求めると1.17 [件/km] となる。これに対し、数量化解析結果における基準組合せの被害率は、0.96 [件/km] である。2割程度安全側であるが、この確認に用いた仮定等と比べれば誤差範囲であると判断し、CIPについては特に修正せずそのまま標準被害率曲線として式(4)、(6)を用いることにした。

DIPについて同様の確認を行うと、[DIP] & [φ100~150] & [沖積平地・液状化無し] の震度階区分それぞれの延長は、0、21.9、31.7、8.6、1.34 [km] であり、式(7)を用いて平均被害率を計算すると0.12 [件/km] となる。先に式(6)で求めた CIP 平均被害率1.17 [件/km] の0.1倍となっており、3.5節で設定した CIP に対する DIP の補

正係数0.3とは大きく隔たる。この理由としては、今回用いた観測地点のうち、大きな地震動が得られた地点の周辺領域に、比較的締った良質な沖積平地が多く含まれていることが考えられる。大きな地震動は、いずれも神戸市内で得られているが、神戸市内の液状化していない沖積平地は、比較的締った地盤であり、地盤変状は少ない。文献<sup>1)</sup>でも報告しているが、DIP 被害は地盤ひずみ0.2~0.4%を境に被害が発生し始める傾向があるので、神戸市内の沖積層では、地震動強さの割に DIP 被害は小さい。実際、文献<sup>1)</sup>の神戸市被害のクロス集計表で、沖積層における DIP と CIP の被害率比を見ても0.11となっている。逆に、表-5の地形区分と管種のクロス集計を見ると、丘陵地や液状化地域における DIP と CIP の被害率比は0.25~1.0となり、地盤ひずみが激しいところでは、DIP も CIP と同等レベルまで被害率が上がることが分かる。より精度の高い推定を行うためには、地盤ひずみを考慮した被害推定式を設定する必要があるが、現状では地盤ひずみの予測自体が困難であり、ここでは簡易性と実用性を重視して、式(1)の形の被害推定式を作成している。DIP については、式(5)、(7)をそのまま用いると、良質な沖積平野では合うが、地盤変状の大きな丘陵地や液状化地域においては過小評価となる。そこで、3.5節で設定した DIP の補正係数0.3と調和するように係数調整を行った。結果を次式に示す。

$$\text{DIP: } R(\alpha) = 1.32 \times 10^{-6} (\alpha - 100)^{1.93} \quad (5')$$

$$\text{DIP: } R(v) = 2.03 \times 10^{-5} (v - 15)^{2.19} \quad (7')$$

良質な沖積平地を対象とする場合は、式(5)、(7)を用いて良いが、地形の変化に富むような領域全体に適用する場合は、式(5')、(7')を用いるのが好ましい。式(4)に前節の DIP の補正係数0.3を乗じると式(5')とほぼ重なる。他の管種については、式(4)、(6)に各々の管種補正係数を組み合わせて利用するものとする。

#### 4.3 属具の標準被害率曲線

属具に関しても、最大加速度、最大速度に対する被害率曲線を作成した。最大加速度、最大速度と属具被害率のプロットを図-15、16に示し、回帰結果の式を以下に示す。

$$\text{属具: } R(\alpha) = 3.90 \times 10^{-5} (\alpha - 100)^{1.33} \quad (8)$$

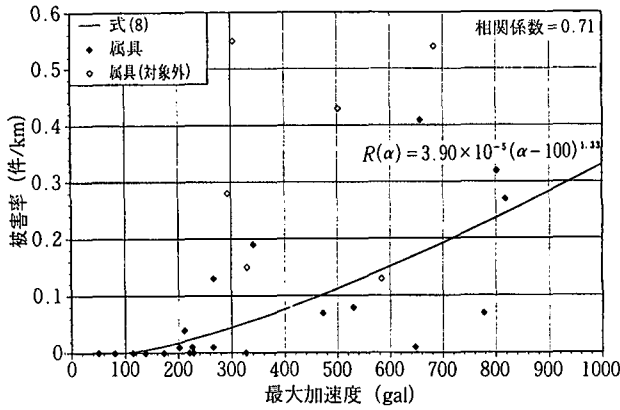


図-15 最大加速度と属具被害率の関係

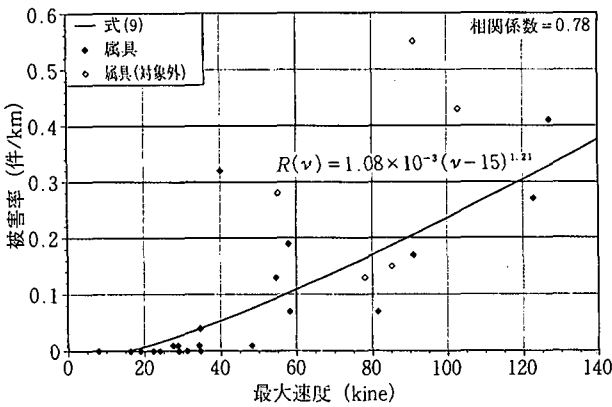


図-16 最大速度と属具被害率の関係

属具:  $R(v) = 1.08 \times 10^{-3} (v - 15)^{1.21}$  (9)

属具について4.2節と同様の検討を行うと、液状化無しの沖積平地において、震度階区分それぞれの延長は、0、40.9、45.4、14.2、3.29 [km]であり、式(9)を用いて平均被害率を計算すると0.22 [件/km]となる。これに対し、数量化解析を行った結果は0.18 [km]となったので、2割程度安全側だが、このまま標準被害率曲線として用いることにする。管種以外の補正係数については、管体と同じく、表-7を利用して良いものとする。

### 5. まとめ

本論では、兵庫県南部地震における水道管の被害特性に関して、地形の影響による被害が特徴的な芦屋市、西宮市を対象を絞って分析を行った。

地形と被害率との関係をGISを用いて定性的に分析し、地形を数種類の代表的なグループに分類した上で数量化を行った。数量化結果を基に、被災地の全体的な集計結果も考慮しながら補正係

数を設定した。管種、管径、地形区分、液状化程度に関して、基準カテゴリーを定め、観測地点で得られた地震動強さと周辺の水道管被害率から標準被害率曲線を設定した。被害推定式を式(10)、(11)に示し、利用方法を取りまとめる。

$$R_m(\alpha) = C_p C_d C_g C_l R(\alpha) \quad (10)$$

$$R_m(v) = C_p C_d C_g C_l R(v) \quad (11)$$

最大加速度  $\alpha$  から水道管被害率  $R_m(\alpha)$  を推定する場合は式(10)、最大速度  $v$  から水道管被害率  $R_m(v)$  を推定する場合は式(11)を用いる。最大加速度  $\alpha$  に対する標準被害率曲線  $R(\alpha)$  として式(4)、最大速度  $v$  に対する標準被害率曲線  $R(v)$  として式(6)を用い、管種  $C_p$ 、管径  $C_d$ 、地形  $C_g$ 、液状化度合い  $C_l$  には、表-7の各値を用いる。DIPについては、 $C_p R(\alpha)$  の代わりに式(5')、 $C_p R(v)$  の代わりに式(7')を用いても良い。属具については、 $C_p R(\alpha)$  の代わりに式(8)、 $C_p R(v)$  の代わりに式(9)を用いる。

本分析では、国土地理院の地震防災土地条件図を利用することにより、地形と水道管被害との関係を広域かつ精度良く分析することができた。芦屋市、西宮市は、地形特性が極端であり、より一般的な被害推定式を作成するためには、神戸市も含めた広域的な解析が望まれるが、国土地理院の地震防災土地条件図は、現状では神戸市全体をカバーするには至っていない。今後の整備に期待するところである。また、地震防災土地条件図では、谷底平野と氾濫平野を同じ区分として扱っているが、埋設管被害への影響は、両地形で大きく異なることが本分析で明らかとなった。今後は、両者を分けて整備することが望まれる。

旧地形図等があれば、地盤の改変状況や切盛境界情報等を整備できるが、これらが無い場合に、国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)や国土数値情報(水系や地形分類図)等を組み合わせ、地形情報をどの程度の精度で導出できるかを今後検討していく必要がある。

震度階については、丘陵地や海岸平野が震災の帯から離れるため震度階が低くなっているが、地形特性により、被害率が数倍に大きくなるため、表-5では、震度階増加に伴い被害率が大きくなるという結果にはならなかった。本分析では補正係



数設定時に震度階の差異を考慮に入れなかったが、地震動強さの減少に伴う被害率減少を付加条件として与えた場合、地形による補正係数の差はさらに大きくなることも考えられる。

今後は、神戸市も含めて被災地全体に本手法を適用し、より一般的な係数へと修正していく必要がある。また、釧路や三陸はるか沖地震など、他の地震の配水管被害と照らし合わせ、本式の実務的な利用方法について検討していく。

#### 謝 辞

本研究において、配水管路及び配水管被害は、芦屋市水道部、西宮市水道局より提供頂いたデータに基づいた。また、地形情報は、国土地理院より提供頂いた地震防災土地条件図とそのデジタルデータによった。ここに記して謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本水道協会：1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析、1996.5
- 2) 日本水道協会工務部：[資料] 阪神・淡路大震災における水道管路の被害と分析、水道協会雑誌、第65巻、第1号(第737号)、1996.2
- 3) 日本水道協会工務部：[資料] 水道管路の地震時被害予測に関する調査・研究、水道協会雑誌、第66巻、第6号(第753号)、1997.6
- 4) 東京都防災会議：東京区部における地震被害の推定に関する報告書、1978.5
- 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、第321号、1982.5
- 6) 国土地理院：1/10,000地震防災土地条件図、1996.8
- 7) 建設省国土地理院：数値地図ユーザーズガイド(改訂版)、(財)日本地図センター、p.3、1994.9
- 8) 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集、1996.1

(平成9年11月7日受付)