

下水道埋設管路の地震被害データに対する統一的な整理・分析と解釈

畠山 大治¹・庄司 学²・永田 茂³

¹学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)
E-mail: s1820928@s.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)
E-mail: gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

³正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail: nagata-shigeru@kajima.com

2016年熊本地震をはじめ、強震動を起因とした下水道埋設管路の被害はいずれも甚大なものである。本研究では、熊本地震を含めた過去の地震において、地震動やそれに伴う液状化による下水道埋設管路の被害分析を被災エリアごとに行った。埋設管路の被害延長 L_d を敷設延長 L で除して被害率 R を定義した上で、地震動強さの指標として地表面最大加速度 PGA 、地表面最大速度 PGV 、計測震度 JJ および SI 値に対する被害率 R の特徴を埋設管路の管種、口径および微地形区分の観点から明らかにした。また、標準的な管路の被害率について分析を行い、被害の詳細について考察を行った。

Key Words : sewer buried pipe, seismic damage, liquefaction, damage ratio, seismic intensity, the 2016 Kumamoto earthquake

1. はじめに

2016年4月14日、4月16日に発生した熊本地震では、下水道埋設管路に甚大な被害が発生した¹⁾。また過去に発生した地震によるそれらの被害も甚大なものである²⁾³⁾。これらは強震動および周辺地盤や埋戻し土の液状化を起因として発生しているが、管種、口径などの管路の属性や、埋設された位置の微地形区分および地震動強さによって、被害状況には相違がみられる。このため、過去の地震の際の下水道埋設管路の経験的な被害データに対して、これらの要因を切り分けて統一的に分析することが不可欠となる。また、このような分析を通じて、地震動強さと被害の関係を表す高精度な被害関数の構築に繋がると考えられる。得られた被害関数は、今後起こり得ると考えられている首都直下地震や南海トラフ地震に対する下水道埋設管路の被害を推定する際に、極めて有用な指標となる。

既往の研究としては、永田ら⁶⁾は2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震による下水道埋設管路の被害

を対象として、管路と人孔の被害率曲線を構築している。Shoji et al.⁷⁾は1995年兵庫県南部地震の被害データに基づいて、 PGV および計測震度 JJ と被害の関係を明らかにしている。庄司ら⁸⁾は1995年兵庫県南部地震および2011年東北地方太平洋沖地震の際に被災した埋設管路の被害データに基づく、被害率曲線の構築を行っている。このように、特定の地震被害データに基づく分析や検討は行われてきたが、熊本地震を含め、既往地震による被害データに対して統一的な解釈に至るようなデータ整理には至っていない。

本研究においては、熊本地震で被災した下水道埋設管路を対象とし、液状化および非液状化領域に分類した上で、管種、口径および埋設されている微地形区分の観点から被害状況を明らかにする。さらに、兵庫県南部地震、新潟県中越地震、能登半島地震、新潟県中越沖地震、岩手・宮城内陸地震の5つの被害についても同様に下水道埋設管路の被害状況を明らかにする。管種、口径および微地形区分における基準を決め、その基準に対する被害率間の関係を解明した。さらに、標準的な管路の被害率について分析を行い、被害の詳細について分析を

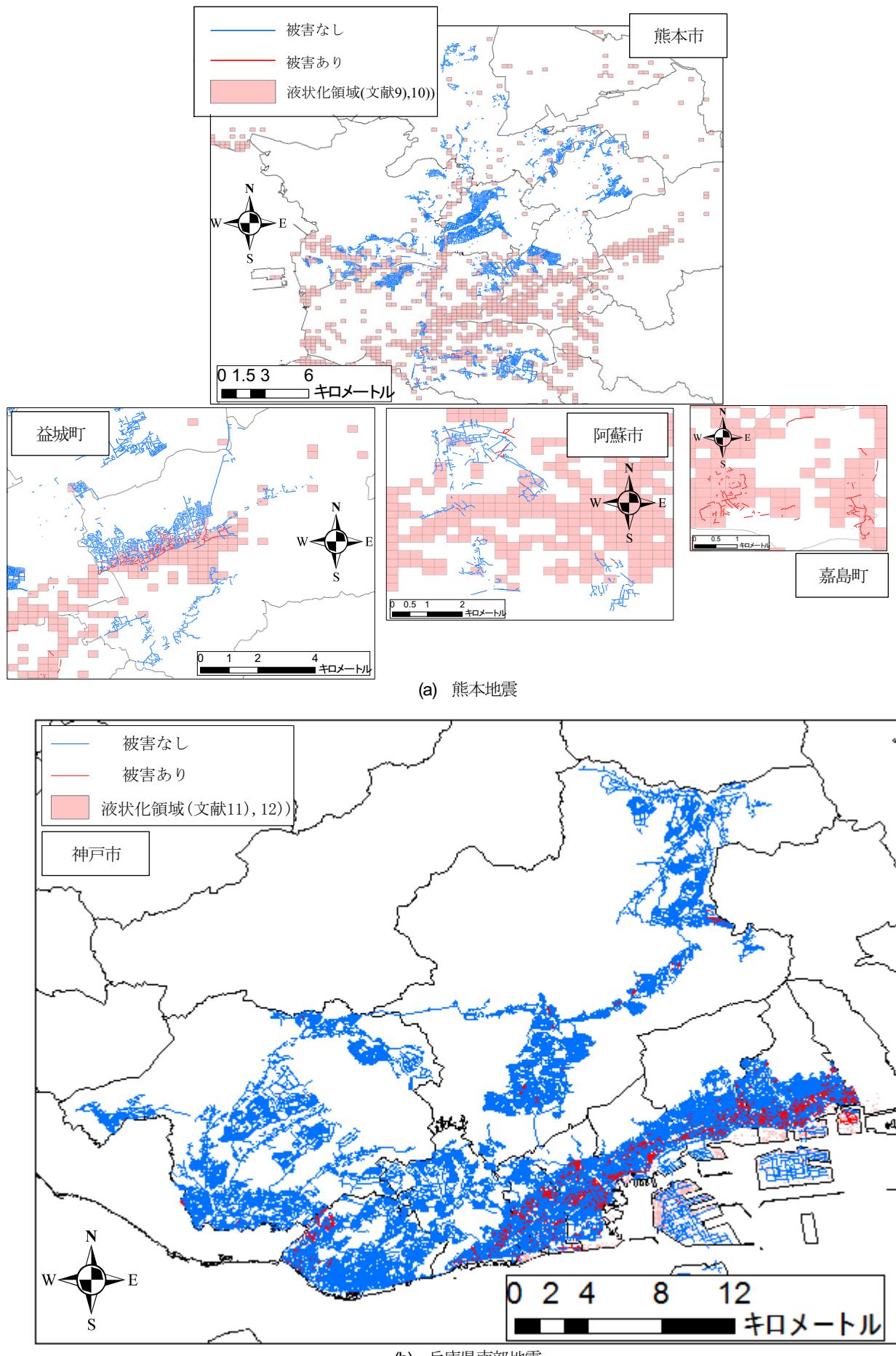


図-1 熊本地震および兵庫県南部地震における下水道埋設管路の被害状況と液状化領域^{9,12)}

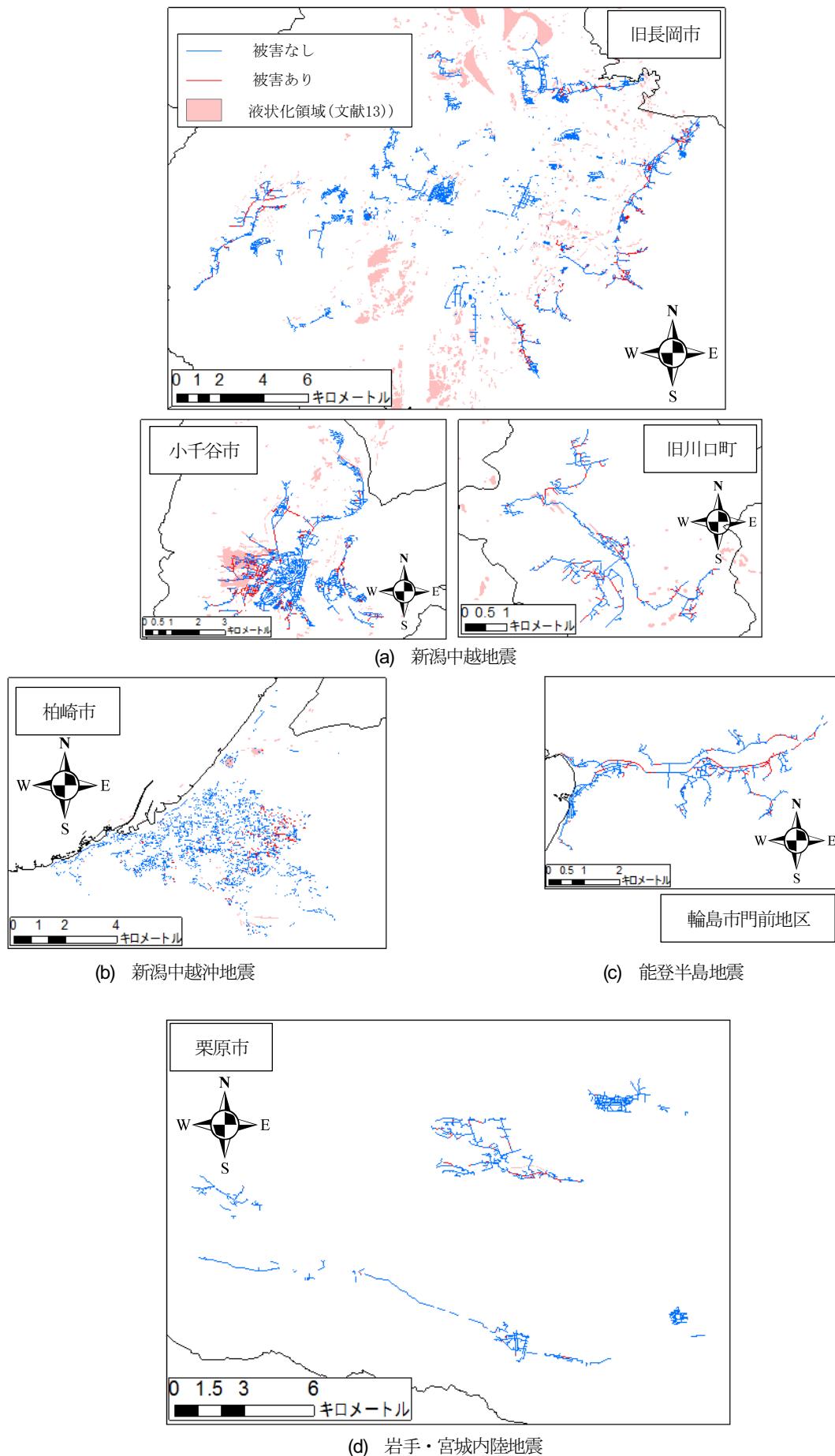


図-2 新潟中越地震, 新潟中越沖地震, 能登半島地震, 岩手・宮城内陸地震における下水道埋設管路の被害状況および液状化領域¹³⁾

表-1 管種、口径および微地形区分のグループ分け

(a) 管種			(b) 口径			(c) 微地形区分	
分類	略称	管種	分類	口径 [mm]		分類	微地形区分
無筋コンクリート管	CP	無筋コンクリート管		30	40	ローム台地	ローム台地
鉄管	DCIP	普通鉄管 高級鉄管 ダクタイル鉄管	0 ≤ Φ < 300	50	75 80	火山地	火山地 火山山麓地
強化プラスチック管	FRPM	強化プラスチック複合管 ヒューム管	105	125	干拓地・埋立地	干拓地 埋立地	
ヒューム管	HP	ヒューム管 鉄筋コンクリート管 推進工法用コンクリート管 推進工法用鉄筋コンクリート管	150	200 216 250	丘陵・火山性丘陵	丘陵 火山性丘陵	
ポリエチレン管	PP	低密度ポリエチレン管 高密度ポリエチレン管	300	319	湖沼	湖沼	
金属管	SP	亜鉛メッキ鋼管 鋼管 ポリエチレン被覆鋼管 ステンレス鋼管	350	380 400 450 500 560	砂丘	砂丘	
陶管	TP	陶管 セメントモルタル被覆塩化ビニル管 リブ付硬質塩化ビニル管	400	406	砂州・砂礫州	砂州・砂礫州	
塩化ビニル管	VP/VU	硬質塩化ビニル管 耐衝撃性硬質ポリ塩化ビニル管 水道用硬質塩化ビニル管	450	492 500 550	砂礫質台地	砂礫質台地	
その他	その他*	他の管種	500	550	山地	山地 山麓地	
*BOX, HC, SR, RJ, D, H, a, C, CO, F, g, G2G3, OW, S, PPLP を"その他"として扱った			560	600 650 680 700	谷底低地・扇状地	谷底低地 扇状地	
			750	800	自然堤防	自然堤防	
			830	840	沖積平野	後背湿地 旧河道	
			850	900		三角州・海岸低地	
			910	980	河原	河原	
			1000	1100	磯・岩礁	磯・岩礁	
			1140	1200			
			1250	1290			
			1300	1350			
			1400	1500			
			1650	1800			
			2000	2520			
			2750	3500			
			4400	4900			

行つたうえで、被害率曲線の構築を行つた。

2. 本研究の立場

本研究では、熊本地震を含め第1章で述べた5つの地震について被害データを個別に分析する。これは、第1章に示したように、それぞれの地震において、震源過程やそれから励起される地震動が異なることが下水道埋設管路の被災メカニズムの相違に繋がると考えられるためである。また、管種、口径などの属性や施工された年代による管路の劣化、敷設された地域の微地形区分が異なるため、被害データを個別に分析することが適切である。このような考え方に基づき、各地域を個別に分析して属性ごとの被害状況を明らかにする。得られた分析結果をもとに、管種、口径および微地形区分に関する補正係数の算出を行い、属性ごとの被害状況を解明する。さらに、被害率曲線の構築を標準的な管種について分析を行い、被害の詳細について分析を行う。

3. 被害データの分析方法

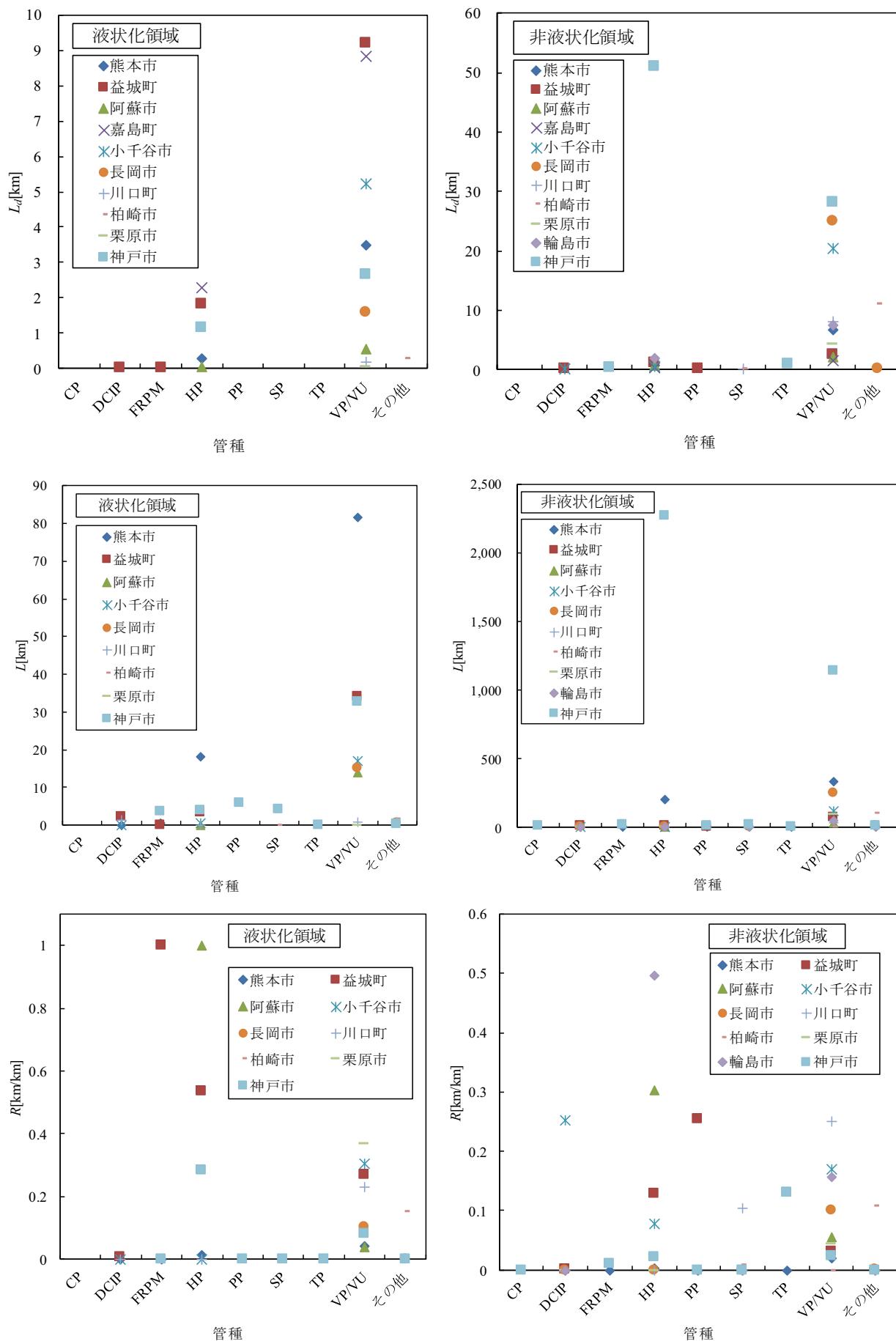
(1) 分析対象とするデータ

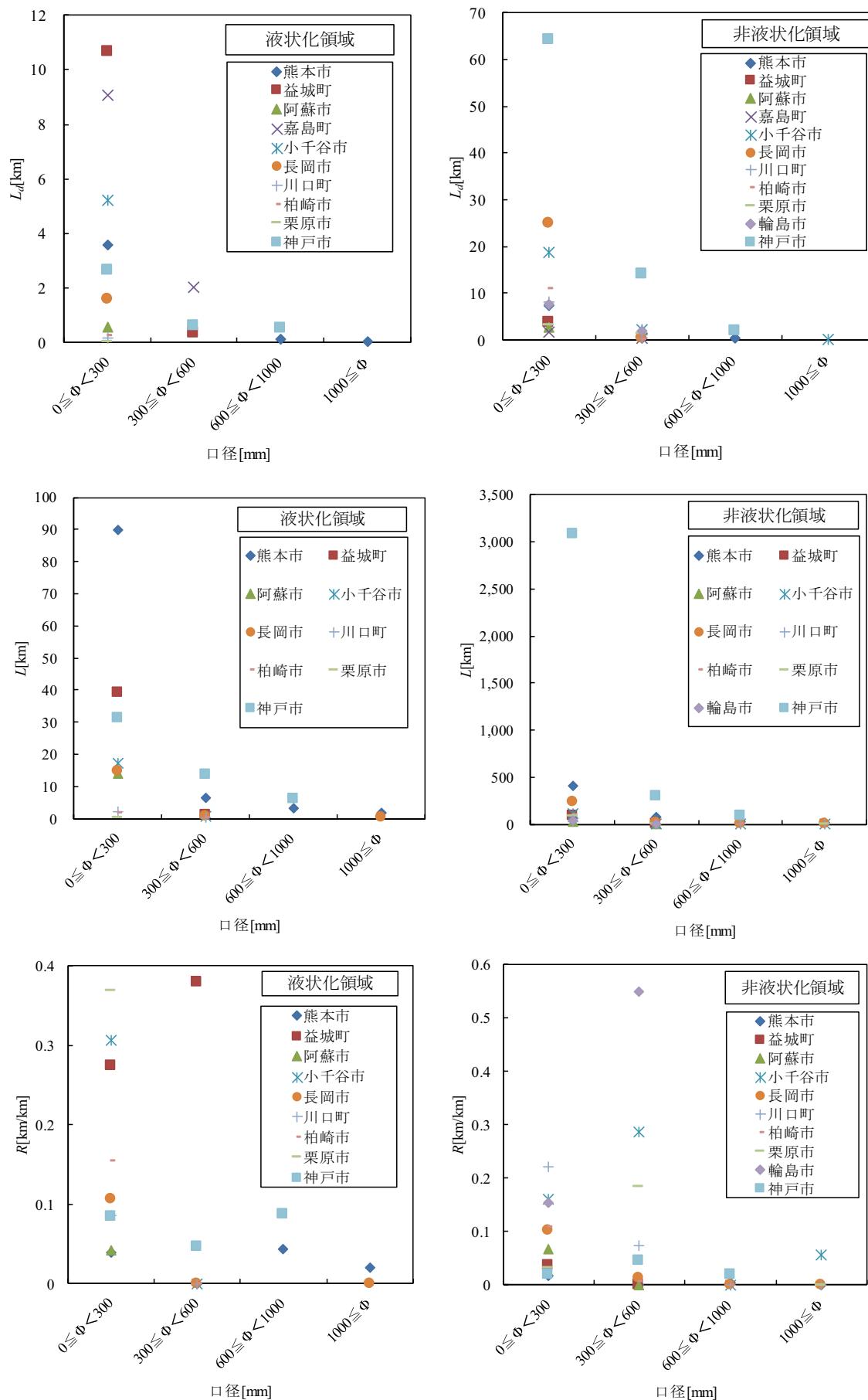
本研究では、熊本地震の熊本市、益城町、阿蘇市、嘉

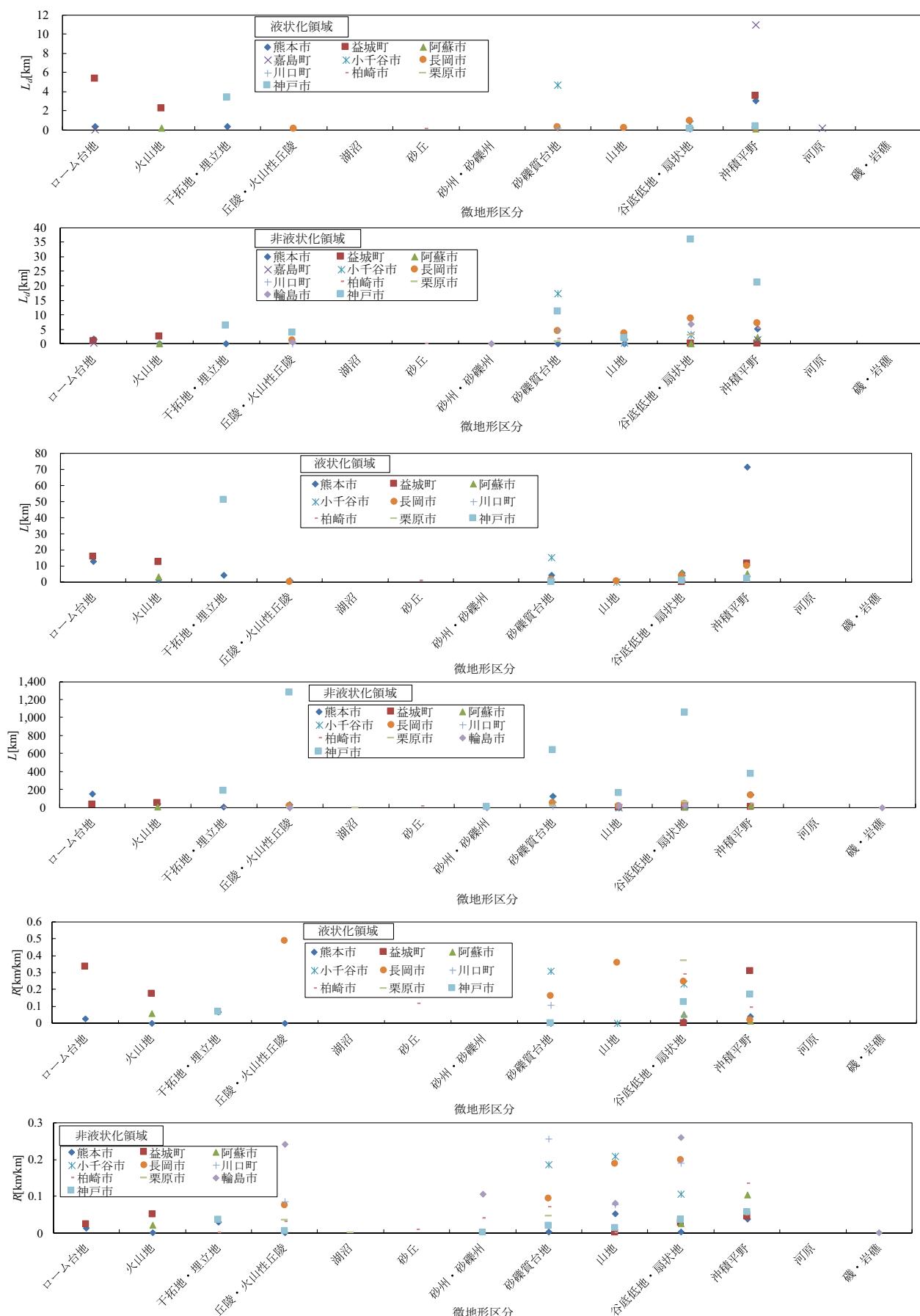
島町、兵庫県南部地震の神戸市、新潟県中越地震の小千谷市、旧長岡市(以下、長岡市)、旧川口町(以下、川口町)、能登半島地震の輪島市門前地区(以下、輪島市)、新潟県中越沖地震の柏崎市、岩手・宮城内陸地震の栗原市、の11地域の下水道管路を対象とする。なお、上記データベースは災害査定の資料に基づくものであり、ここでは破損、亀裂、たるみ、蛇行などの被害モードが確認され、結果として流下機能が損なわれ滯水が生じた管路を被害管路と定義している。それらの延長を被害延長 L_d とする。

熊本地震の4地域においては、枝線であり、かつ、管種、口径、形状、施工年が全て明らかとなっているデータを分析対象とした。なお、嘉島町については被害延長 L_d のデータのみで、敷設延長 L についてのデータは得られていない。液状化領域については、文献9,10)に示された250mメッシュのデータを適用した。図-1(a)に熊本4地域の対象領域における被害延長 L_d と敷設延長 L 、液状化領域を示す。抽出を行った結果、被害延長 L_d は、熊本市で11.12km、益城町で14.49km、阿蘇市で3.09km、嘉島町で12.88kmであった。敷設延長 L は熊本市で641.00km、益城町で132.75km、阿蘇市で50.80kmであった。なお、本研究ではデータ入手の制約の観点から、熊本地震における液状化領域は250mメッシュで定義されたデータであるため、他の地域と比べて液状化領域の広さに相違があることに留意していただきたい。

神戸市においては、庄司ら⁸⁾と同様に兵庫県南部地震

図-3 管種の観点から見た液状化領域、および非液状化領域における被害延長 L_d 、敷設延長 L 、および被害率 R

図-4 口径の観点から見た液状化領域、および非液状化領域における被害延長 L_d 、敷設延長 L 、および被害率 R

図-5 微地形区分の観点から見た液状化領域、および非液状化領域における被害延長 L_d 、敷設延長 L 、および被害率 R

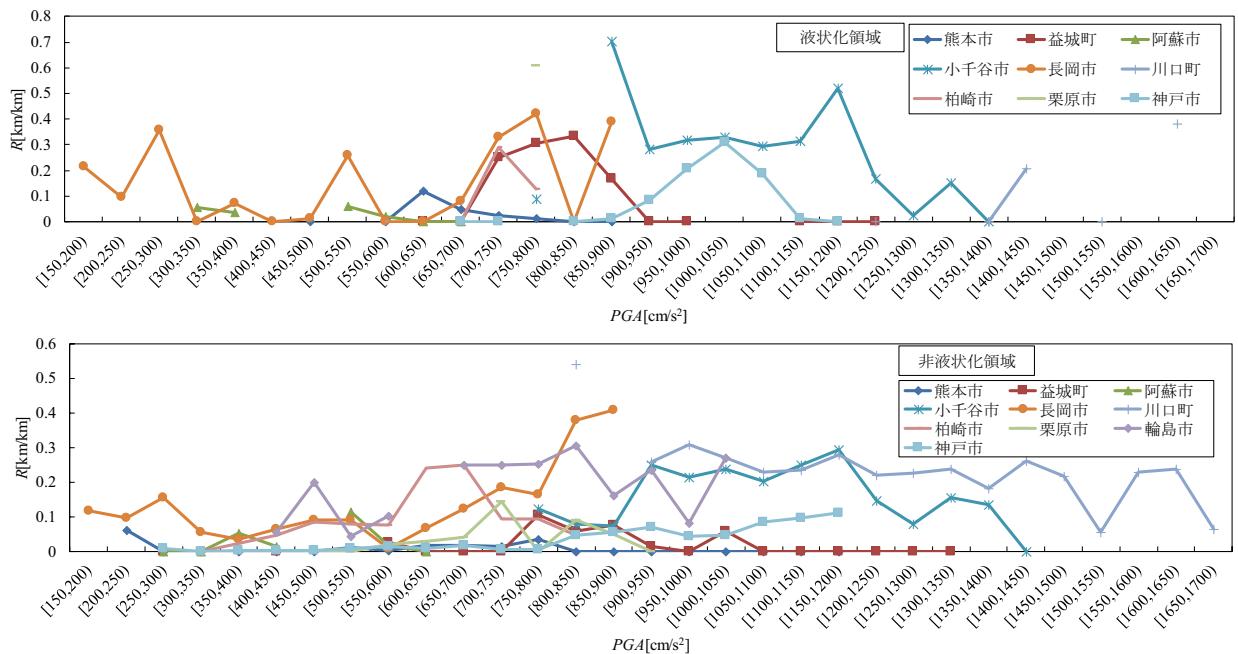


図6 PGAと被害率Rの関係

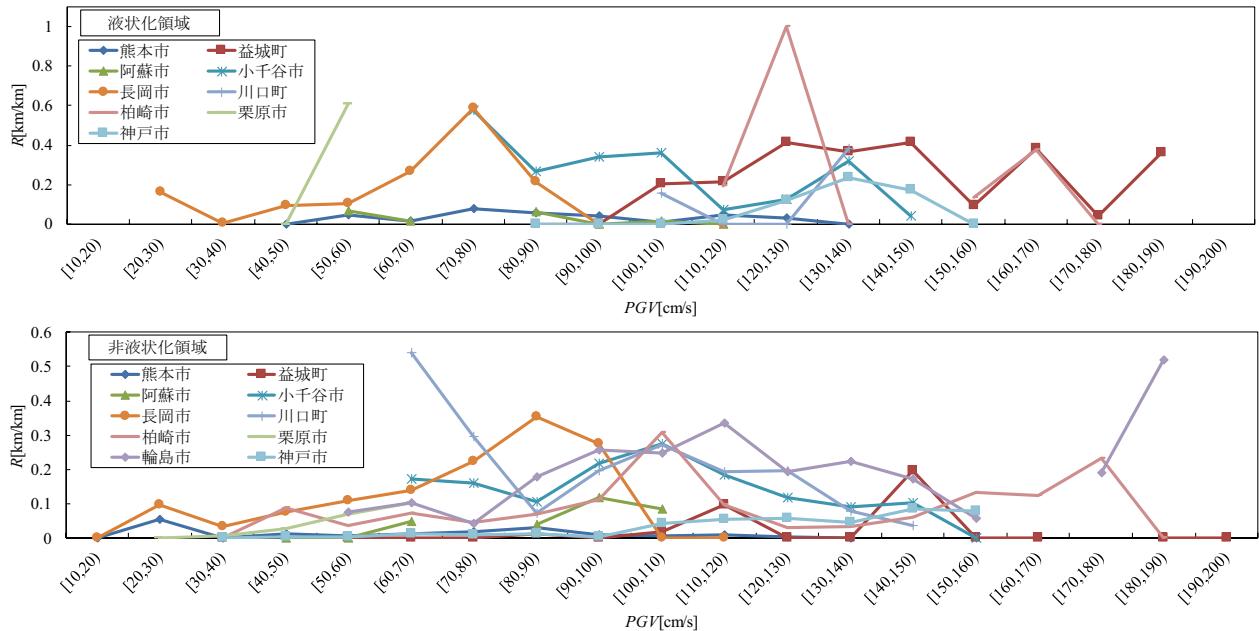


図7 PGVと被害率Rの関係

の際の神戸市内の被害のデータベースである「神戸JIBANKUN」^{11),12)}を用いて分析を行った。なお、その中の口径Φ900mm以下の管路を枝線とみなして分析対象とした。神戸市において管種と口径についてのデータは全て得られていて、形状と施工年についてのデータは得られていない。液状化領域は「神戸JIBANKUN」における噴砂の発生範囲と定義した。図-1(b)に対象領域における被害延長 L_d と敷設延長 L 、液状化領域を示す。抽出を行った結果、被害延長 L_d は83.78km、敷設延長 L は3,527.96kmであった。

新潟県中越地震、能登半島地震、新潟県中越沖地震、岩手・宮城内陸地震の6地域については、永田ら⁶⁾のデータ

を用いた。これらの6地域については、形状についてのデータはいずれの地域においても得られず、施工年についてのデータは小千谷市においてのみ得られたので、管種と口径がどちらも得られているものを対象領域とした。液状化領域としては、文献13)の液状化発生地点のポリゴンデータを用いた。図-2(a)から(d)にこれらの6地域の被害延長 L_d と敷設延長 L 、液状化領域を示す。抽出を行った結果、これらの6地域の被害延長 L_d は、小千谷市で25.99km、長岡市で26.44km、川口町で8.31km、柏崎市で11.20km、栗原市で4.24km、輪島市で9.22kmとなり、敷設延長 L は、小千谷市で142.29km、長岡市で275.22km、川口町で40.29km、柏崎市で111.00km、栗原市で98.28km、

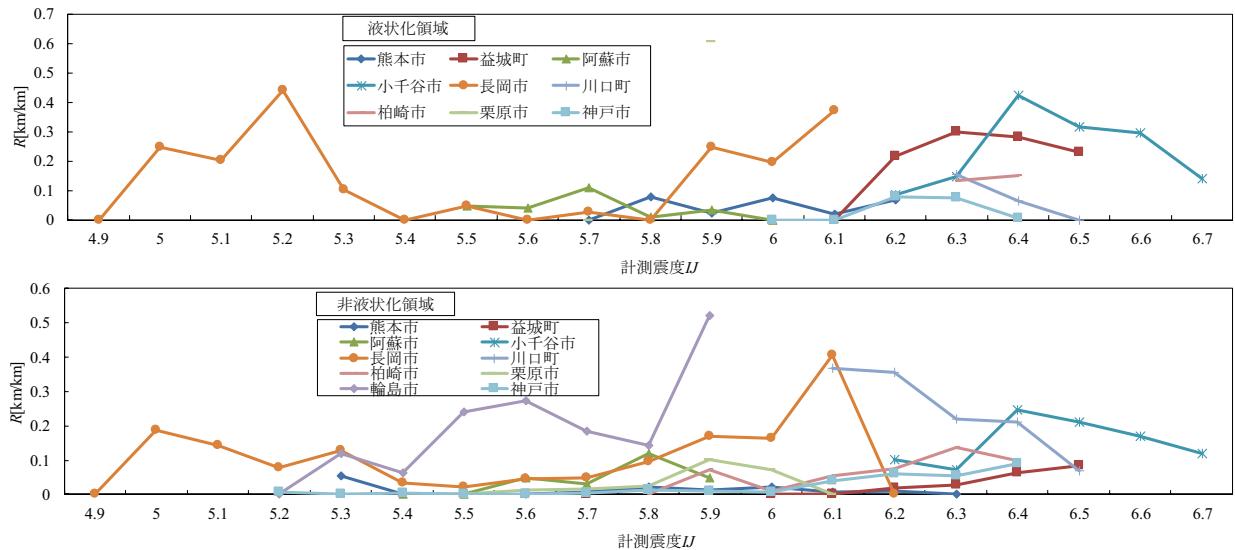
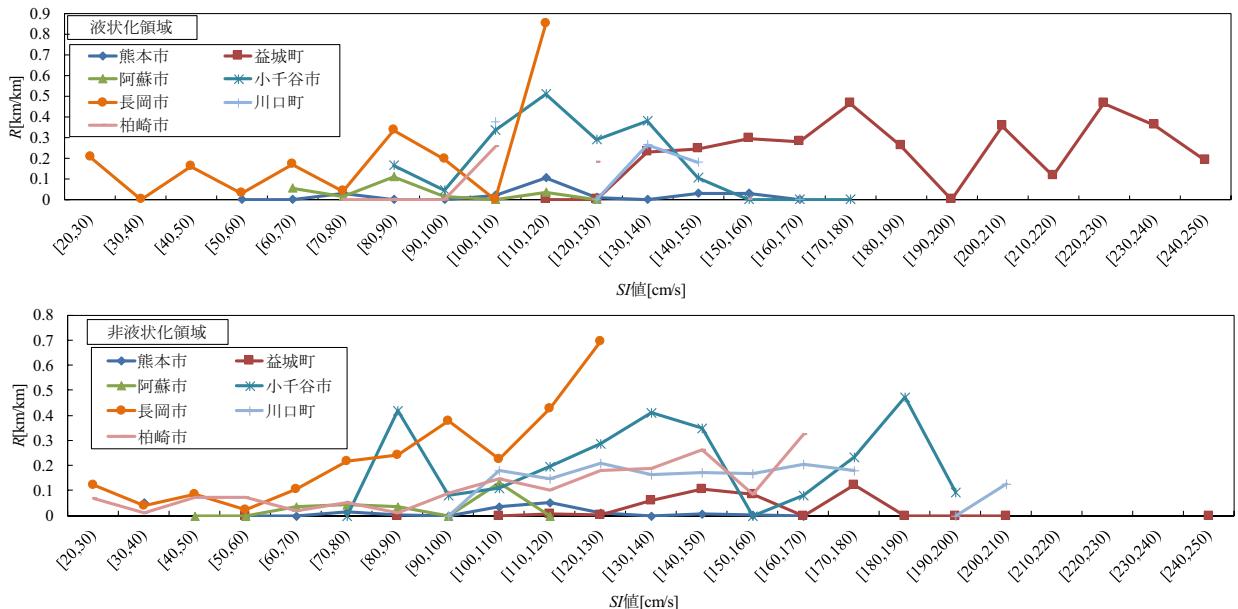
図8 計測震度 J と被害率の関係

図9 S/I値と被害率の関係

輪島市で51.29kmであった。また、上記データベースには施工年度や傾斜が判明している地域もあるが、すべての地域において得られていないため、本研究では以降、管種、口径および微地形区分の観点から分析を行うこととする。

管種、口径、微地形区分について表-1に示すようなグループ分けを行った。その際、管種と口径に関しては永田ら⁶や庄司ら⁸、微地形区分に関しては先名・翠川¹⁴の知見をそれぞれ参考にした。

(2) 地震動強さの空間分布

地震動強さの指標としては、地表面最大加速度 PGA 、地表面最大速度 PGV 、計測震度 J および S/I 値を用いた。 S/I 値については熊本地震についてのみ分析を行った。これらのデータとしては、熊本地震では水越・庄司¹⁵の知

見を、兵庫県南部地震では庄司ら⁸の知見を、その他の地震については永田ら⁶の知見を適用した。

4. 管種、口径および微地形区分の観点から見た被害の特徴

分析に際しては、下水道埋設管路の被害延長 L_d と敷設延長 L のラインデータを、地震動強さの空間分布、微地形区分の250mメッシュデータ¹⁶、液状化領域を表す250mメッシュデータ、および液状化領域のポリゴンデータと統合した。被害率 $R[\text{km}/\text{km}]$ については、被害延長 L_d を敷設延長 L で除して定義した。

図-3から図-5に、対象とする11地域に対して液状化領域と非液状化領域に分類した上で、被害延長 L_d 、敷設延

長 L_d 、被害率 R を属性ごとにまとめた結果を示す。

(1) 管種

被害延長 L_d と敷設延長 L に関して、VP/VU管が対象地域すべてに敷設されている。このことは、国内において小口径管の主要管材としてVP/VU管が広く使われていること¹⁷⁾からも明らかである。次いで、 L_d と L が長い管路としてはHP管である。

被害率 R に関しては、地域によってはVP/VU管よりもHP管の被害率の方が比較的高い傾向を示すことから、HP管の方が地震被害に関して脆弱である地域があることを示している。液状化領域においては、栗原市、小千谷市、益城町、川口町のVP/VU管の被害率 R が高くなっているおり、阿蘇市、益城町、神戸市のHP管が $R=0.25[\text{km}/\text{km}]$ 以上と極めて高い被害率を示している。また、益城町においてFRPM管の被害率が $1.0[\text{km}/\text{km}]$ となっている。非液状化領域をみると、川口町のVP/VU管、輪島市、阿蘇市のHP管、益城町のPP管、小千谷市のDCIP管が $R=0.2[\text{km}/\text{km}]$ 以上と高い被害率を示す。

(2) 口径

被害延長 L_d に関しては、いずれの地域においても口径300mm未満の管路が卓越していることがわかる。それの中でも益城町、嘉島町および小千谷市の液状化領域において L_d が長く、また、神戸市の非液状化領域における L_d も長くなっている。敷設延長 L に関しても同様に、口径300mm未満の管路が支配的である。それらの中でも、熊本市の液状化領域、神戸市の非液状化領域における L が特に長くなっている。

被害率 R に関しては、栗原市、小千谷市、益城町における液状化領域の口径300mm未満の管路の被害率が $R=0.25[\text{km}/\text{km}]$ 以上と極めて高くなっている。また、益城町の液状化領域においては、300mm以上かつ600mm未満の管路の被害率も高い。これは益城町で管路の被害箇所の大部分で液状化が生じたことが原因である。また、川口町、小千谷市、輪島市の非液状化領域における口径300mm未満の管路が $R=0.223\sim0.156[\text{km}/\text{km}]$ と高い被害率を示している。熊本市や神戸市、栗原市、益城町の非液状化領域においては、それらに準じて $R=0.04[\text{km}/\text{km}]$ 以下の被害率となっている。また、輪島市の非液状化領域における300mm以上600mm未満の管路が $R=0.551[\text{km}/\text{km}]$ と極めて高い被害率になっている。

(3) 微地形区分

被害延長 L_d に関しては、液状化領域において、益城町のローム台地、小千谷市の砂礫質台地、嘉島町の沖積平野の L_d が比較的長くなっている。非液状化領域においては、神戸市の谷底低地・扇状地と沖積平野の L_d が特に長

くなっている。

敷設延長 L に関しては、液状化領域において神戸市の干拓地・埋立地、熊本市の沖積平野の L が特に長くなっている。神戸市においては非液状化領域での L が支配的であり、特に丘陵・火山性丘陵、谷底低地・扇状地での L が極めて長くなっている。また、熊本市、益城町、阿蘇市にのみ、ローム台地と火山地に埋設されている管路が存在した。

被害率 R に関しては、液状化領域では、益城町のローム台地と沖積平野、長岡市の丘陵・火山性丘陵と山地小千谷市の砂礫質台地、栗原市の谷底低地・扇状地の被害率がいずれも $R=0.3[\text{km}/\text{km}]$ 以上と卓越している。非液状化領域では、輪島市の丘陵・火山性丘陵の被害率が $R=0.239[\text{km}/\text{km}]$ と卓越している。また、川口町、小千谷市の砂礫質台地、小千谷市、長岡市の山地、輪島市や長岡市、川口町の谷底低地・扇状地の被害率が特に高くなっている。

5. 地震動強さと被害率の関係

図-6から図-9には地震動強さの指標ごとに被害率 R を算定した結果を示した。分析に際して、PGAは $50[\text{cm}/\text{s}^2]$ 刻み、PGVは $10[\text{cm}/\text{s}]$ 刻み、計測震度 II は 0.1 刻み、SI値は $10[\text{cm}/\text{s}]$ 刻みで分析を行った。区間幅は最も分析結果が分かりやすい区間幅を検討して定めた。図-6から図-9においては、敷設延長 L は有するものの被害が生じていない場合を被害率 $R=0[\text{km}/\text{km}]$ としてプロットしており、区間が連続している点を線で繋いで示した。なお、嘉島町については被害延長 L_d のデータのみ得られたのでここには示していない。

PGAに関しては $500[\text{cm}/\text{s}^2]$ 以下、 $500\sim1000[\text{cm}/\text{s}^2]$ 、 $1000\sim1500[\text{cm}/\text{s}^2]$ 、 $1500[\text{cm}/\text{s}^2]$ 以上の4つの帯域の地震動強さに対して液状化領域および非液状化領域のいずれも被害率が高くなる地域に違いが見られた。同様に、PGV、計測震度 II 、SI値の指標においても中程度以下の地震動強さの領域を $50[\text{cm}/\text{s}]$ 以下、 5.4 以下、 $50[\text{cm}/\text{s}]$ 以下、中程度以上の相対的に高い地震動強さの領域を $50\sim100[\text{cm}/\text{s}]$ 、 $5.5\sim5.9$ 、 $50\sim100[\text{cm}/\text{s}]$ 、高い地震動強さの領域を $100\sim150[\text{cm}/\text{s}]$ 、 $6.0\sim6.4$ 、 $100\sim150[\text{cm}/\text{s}]$ 、それ以上の地震動強さの領域を $150[\text{cm}/\text{s}]$ 以上、 6.5 以上、 $150[\text{cm}/\text{s}]$ 以上として、その領域において地域による被害率の違いが明らかになった。また、ある特定の地域における特定の地震動強さに対して卓越した被害率を示す場合がある。

このように地域や地震動強さによるばらつきが多くみられるが、一方で共通してみられる特徴もある。PGAに関してみると、液状化領域および非液状化領域いずれも $500[\text{cm}/\text{s}^2]$ 以下の中程度以下の地震動強さの領域では相対

的に低い被害率を示し, 500~1000[cm/s²]の相対的に高い地震動強さの領域で被害率が増加し, その後増加した被害率のままで横ばいとなる傾向がある。また, 非液状化領域より液状化領域の方が全体的に被害率は高くなっている。同様の傾向がPGV, 計測震度IJおよびSI値についてもみられる。これらの結果を踏まえてうえで, PGVおよびSI値が, PGAおよび計測震度IJと比較して地震動強さと被害率の関係がより明確であった。

PGVに関してその特徴を示すと, ある特定の地域における特定の地震動強さに対して卓越した被害率を示す場合がある。一方で液状化領域および非液状化領域いずれも, 50[cm/s]以下の中程度以下の地震動強さの領域では相対的に低い被害率を示し, 50~100[cm/s]の相対的に高い地震動強さの領域で被害率が増加し, その後増加した被害率のままで横ばいとなる傾向がある。また, 非液状化領域より液状化領域の方が全体的におよそ1.3倍の被害率を示す。

SI値に関してその特徴を示すと, PGVの場合と同様にある特定の地域における特定の地震動強さに対して卓越した被害率を示す場合がある。一方で液状化領域では50~100[cm/s]の相対的に高い地震動強さの領域まで増加し, その後増加した被害率のままで横ばいとなる傾向がある。非液状化領域では50[cm/s]以下の中程度以下の地震動強さの領域で相対的に低い被害率を示すものの, その後150~200[cm/s]の高い地震動強さの領域まで緩やかに増加する傾向がある。また, 非液状化領域より液状化領域の方が全体的におよそ1.2倍の被害率を示す。

ここでは対象地域の管路全てについて分析を行ったが, 地域によるばらつきが顕在化しているため, これ以降は管路の属性ごとに基準となる分類を決め, その分類との被害率間の関係の考察および標準的な管路の被害率曲線の構築を行う。

6. クロス集計に基づく被害率間の関係

それぞれの属性ごとの被害率間の関係を定量化するにあたっては, 管種, 口径および微地形区分ごとに分類をしてクロス集計を行った。各地域についてクロス集計を行った後に全地域のデータを合算し, 全地域についてのクロス集計も同様に行った。なお, 柏崎市については管種の区分においてその他に分類される管路が多かったためデータを除外した。分類方法としては, 管種と口径については表-1と同様の分類を用いた。微地形区分については, 非液状化領域のデータに対しては表-1と同様に分類を行い, 液状化領域のデータに対しては微地形区分による分類を行わず, まとめて液状化領域とした。合算したデータについて行ったクロス集計の結果を表-2に示す。

得られたクロス集計をもとに, 被害率間の倍率となる補正係数の算出を行う。算出方法は以降に示す。式(1)に基づく被害率を指標として, 庄司ら⁸や磯山ら¹⁸による被害予測式を以下のように定める。この予測式における被害率Rには*を上付きで付与し表すものとする。

$$R_m^* = C_p C_d C_g R_s^* \quad (1)$$

ここで, R_m^* は管種, 口径および微地形区分のそれぞれの組合せのうちある特定の組合せをmとし, その組合せmにおける地震動強さxに対する補正被害率であり, C_p , C_d および C_g は管種, 口径および液状化の有無を考慮した微地形区分における補正係数, R_s^* は属性ごとの基準となる区分における標準被害率である。補正係数の算出には庄司ら⁸の手法と同様に, 式(2)を基に対数場での数量化理論L類を適用する。なお, 補正係数は R_m と R_s の実被害データに基づいて求められるため, R_m^* は0以上1以下となる。また, 対数場での計算を行うため被害率が0となるデータは除外している。式(2)より得られる R_m^* と, 管種, 口径および微地形区分のそれぞれの組み合わせmに対する実データの被害率 R_m のそれぞれに自然対数をとった $\ln R_m^*$ と $\ln R_m$ の残差平方を求めた上で, 組み合わせmに対する敷設延長 L_m で重み付けを行った目的関数 $f(R_m)$ を式(2)のように定める。この目的関数を最小化するように C_p , C_d および C_g を決定する。

$$f(R_m) = \sum_{m=1}^N (\ln R_m - \ln R_m^*)^2 \cdot L_m \quad (2)$$

基準となる区分としては, 庄司ら⁸の知見を基に, 管種はVP/VU管, 口径は $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$, 微地形区分は熊本市, 益城町, 阿蘇市, 神戸市, 長岡市では沖積平野を基準に, 小千谷市, 川口町, 栗原市, 輪島市では沖積平野が存在していなかったので, 次いで安定してデータが得られた谷底低地・扇状地を基準としている。なお, 本研究において式(1)の R_s^* はこの基準となる区分に分類される管路の被害率を示す。各地域における補正係数を図-10に, 合算したデータに対する補正係数を図-11に示す。さらに図-11に示す解析結果に基づく推定被害延長と実被害延長の相関図を図-12に示す。相関図は管種, 口径および微地形区分のそれぞれの組合せによる実被害延長(表-2)を横軸に, 同一の組合せにおいてクロス集計の結果から式(1)に基づき推定された推定被害延長を縦軸としている。図-12の決定係数は0.9178となったことから, 算出した補正係数は十分妥当であることが言える。なお図-10に関しては, 各地域において基準とする管種, 口

表-2 分析対象全地域における被害のクロス集計

		敷設延長[km]	被害延長[km]	被害率[km/km]	ローム台地	火山地	干拓地・埋立地	丘陵・火山性丘陵	湖沼	砂丘	砂州・砂灘州	砂礫質台地	山地	谷底低地・局状地	沖積平野	河原	磯・岩礁	液状化領域	
		全地域																	
CP	0≤φ<300																		
	300≤φ<600																		
	600≤φ<1000																		
	1000≤φ																		
DCIP	0≤φ<300	5.850 0.000 0.000	2.925 0.005 0.002		0.566 0.000 0.000				0.013 0.000 0.000	2.475 0.000 0.000	0.415 0.000 0.000	3.081 0.000 0.000	1.131 0.000 0.000					3.663 0.020 0.005	
	300≤φ<600										0.179 0.099 0.554					0.432 0.000 0.000			
	600≤φ<1000										0.263 0.000 0.000		0.008 0.000 0.000	1.745 0.000 0.000				0.008 0.000 0.000	
	1000≤φ												0.341 0.000 0.000	0.602 0.000 0.000					
FRPM	0≤φ<300		0.010 0.000 0.000	1.012 0.000 0.000	0.305 0.000 0.000						0.021 0.000 0.000	0.389 0.000 0.000	0.682 0.000 0.000				0.679 0.000 0.000		
	300≤φ<600			1.000 0.015 0.015	0.796 0.000 0.000						0.045 0.000 0.000		1.434 0.037 0.026	0.190 0.000 0.000				0.792 0.012 0.015	
	600≤φ<1000				4.545 0.000 0.000	3.074 0.000 0.000					0.085 0.000 0.000	0.079 0.000 0.000	1.851 0.000 0.000	0.342 0.106 0.310				2.872 0.000 0.000	
	1000≤φ																		
HP	0≤φ<300	30.513 0.372 0.012	8.618 0.965 0.112	49.207 1.561 0.052	696.682 2.921 0.004					2.522 0.000 0.000	419.239 8.001 0.019	103.413 1.107 0.011	569.068 15.806 0.028	196.192 8.273 0.042				0.040 0.000 0.000	13.126 2.449 0.187
	300≤φ<600	19.871 0.085 0.004	0.649 0.000 0.000	11.703 0.711 0.061	54.399 0.108 0.002					0.127 0.000 0.000	68.483 0.308 0.005	5.724 0.134 0.023	94.671 7.465 0.079	41.277 5.768 0.140				7.425 0.164 0.022	
	600≤φ<1000	7.089 0.038 0.005	0.243 0.000 0.000	4.547 0.813 0.179	16.195 0.000 0.000					0.280 0.000 0.000	23.338 0.052 0.002	2.399 0.000 0.000	30.277 0.054 0.002	18.319 0.910 0.050				3.839 0.645 0.168	
	1000≤φ	1.611 0.000 0.000										9.190 0.000 0.000		3.733 0.088 0.024	0.652 0.000 0.000				1.698 0.000 0.000
PP	0≤φ<300	0.277 0.104 0.377	0.169 0.000 0.000	4.579 0.000 0.000	1.049 0.000 0.000						3.230 0.000 0.000	1.210 0.000 0.000	1.460 0.000 0.000	2.041 0.000 0.000				5.693 0.000 0.000	
	300≤φ<600		0.296 0.000 0.000		0.031 0.000 0.000					0.073 0.000 0.000				0.058 0.000 0.000				0.049 0.000 0.000	
	600≤φ<1000		0.308 0.000 0.000								0.209 0.000 0.000	0.139 0.000 0.000						0.061 0.000 0.000	
	1000≤φ																		
SP	0≤φ<300		0.369 0.000 0.000	2.440 0.000 0.000					0.010 0.000 0.000	1.352 0.000 0.000	0.715 0.000 0.000	2.766 0.058 0.021	0.619 0.000 0.000				0.473 0.000 0.000		
	300≤φ<600	0.028 0.000 0.000		1.188 0.000 0.000	1.561 0.000 0.000				0.011 0.000 0.000	5.766 0.000 0.000	0.083 0.000 0.000	0.842 0.000 0.000	0.296 0.000 0.000				1.627 0.000 0.000		
	600≤φ<1000		1.961 0.000 0.000	0.085 0.000 0.000						0.829 0.000 0.000	0.386 0.000 0.000	0.049 0.000 0.000	0.048 0.000 0.000				1.969 0.000 0.000		
	1000≤φ										0.080 0.000 0.000		0.035 0.000 0.000						
TP	0≤φ<300		0.046 0.000 0.000							0.399 0.057 0.143	0.155 0.083 0.533	4.856 0.480 0.481	0.362 0.174 0.481						
	300≤φ<600			0.373 0.000 0.000					0.294 0.000 0.000		0.330 0.000 0.000	0.030 0.000 0.000					0.001 0.000 0.000		
	600≤φ<1000																		
	1000≤φ																		
VP/VU	0≤φ<300	118.918 1.847 0.016	85.244 1.721 0.020	49.830 3.045 0.061	496.712 2.972 0.000	0.123 0.000 0.000			3.055 0.167 0.055	368.019 28.549 0.078	77.430 6.553 0.085	469.631 34.621 0.074	351.037 19.506 0.056				0.502 0.000 0.000	183.815 22.076 0.120	
	300≤φ<600	0.630 0.000 0.000	0.339 0.289 0.009	32.483 0.289 0.009	23.528 0.105 0.004				0.494 0.000 0.000	9.988 1.532 0.153	2.281 0.000 0.000	19.202 2.045 0.107	9.262 0.771 0.083				11.514 0.793 0.069		
	600≤φ<1000		0.001 0.000 0.000	0.488 0.000 0.000						0.076 0.000 0.000		1.725 0.000 0.000	0.624 0.000 0.000				0.003 0.000 0.000		
	1000≤φ										0.009 0.000 0.000		0.142 0.000 0.000				0.073 0.036 0.500		
その他	0≤φ<300			5.836 0.000 0.000	0.413 0.000 0.000				0.153 0.000 0.000	0.865 0.000 0.000	0.288 0.000 0.000	1.889 0.017 0.009	2.289 0.000 0.000				0.148 0.000 0.000		
	300≤φ<600		0.005 0.000 0.000		0.786 0.000 0.000				0.042 0.000 0.000	0.892 0.000 0.000	0.014 0.000 0.000	2.272 0.000 0.000	6.133 0.000 0.000				0.481 0.000 0.000		
	600≤φ<1000			0.051 0.000 0.000					0.641 0.000 0.000	0.024 0.000 0.000	2.979 0.000 0.000	2.114 0.000 0.000				0.094 0.000 0.000			
	1000≤φ	0.101 0.000 0.000							0.047 0.000 0.000		0.117 0.000 0.000	0.267 0.000 0.000				0.139 0.000 0.000			

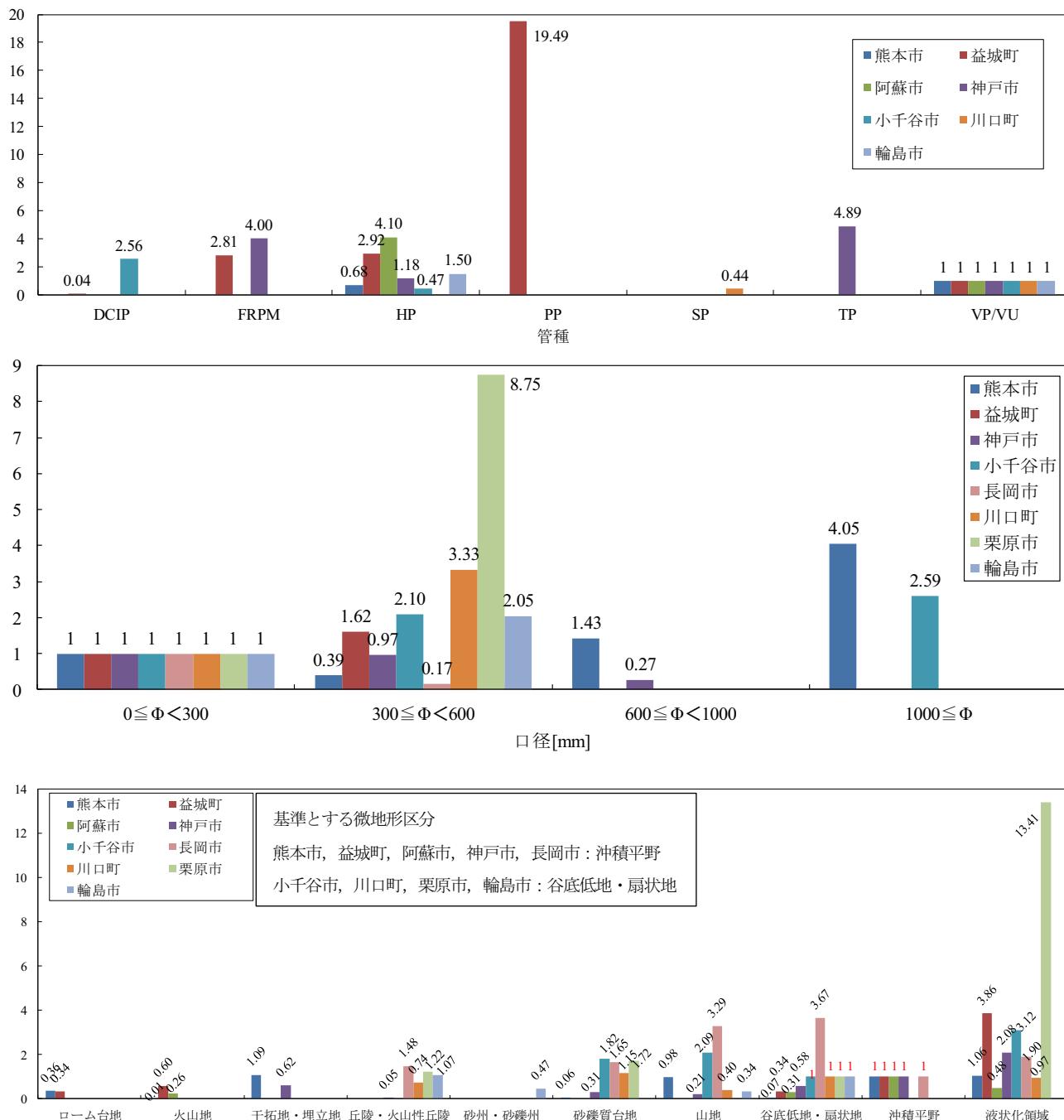


図-10 対象地域における管種、口径および微地形区分ごとの補正係数

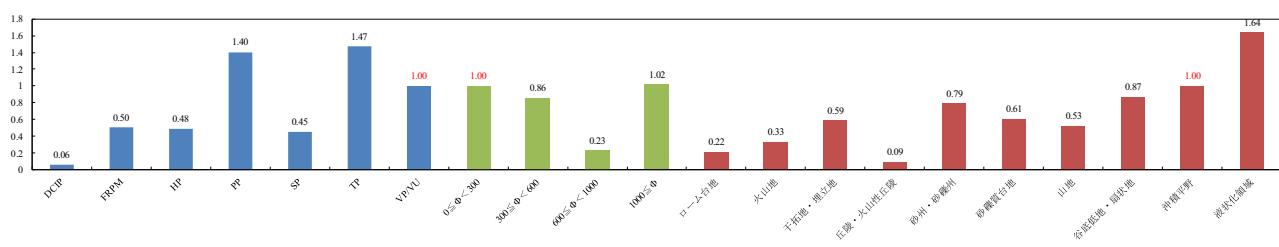


図-11 対象全地域のデータに対する補正係数

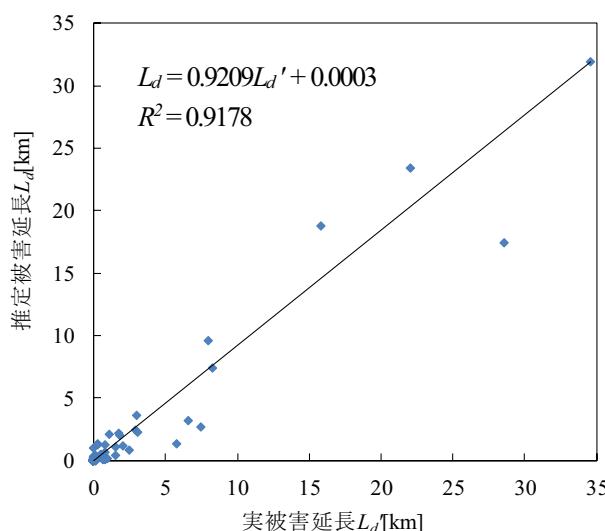


図-12 実被害延長と推定被害延長の相関図

径、微地形区分については補正係数1を赤字で示している。

(1) 各地域における補正係数

管種に関しては、DCIP管は小千谷市での補正係数が高い一方で、益城町では非常に低い値となった。FRPM管は益城町と神戸市にのみ存在したものの、補正係数は非常に高い値となった。HP管は熊本市と小千谷市では地震被害に対して強靭であり、一方で阿蘇市、益城町、輪島市の順で補正係数が高いことから、これらの地域では脆弱であるといえる。神戸市についてはVP/VU管と同程度の被害であるといえる。PP管は益城町での補正係数が非常に卓越しているが、これは益城町のPP管、口径300mm未満のローム台地において被害率 $R=0.436[\text{km}/\text{km}]$ と非常に卓越していたことが原因である。SP管は川口町にのみ存在しており低い値を示しているため、地震被害に対して強靭であったと言える。TP管は神戸市にのみ存在しており高い値を示すことから脆弱であったといえる。

口径に関しては、300mm以上600mm未満の管路は熊本市、長岡市で被害は300mm未満の管路に比べて小さかったといえる。一方で、栗原市、川口町、小千谷市、輪島市、益城町の順で被害が300mm未満の管路に比べて甚大であり、特に栗原市での被害が甚大であったといえる。神戸市については300mm未満の管路と同程度の被害であった。600mm以上1000mm未満の管路は小千谷市、熊本市の順で高い値となっていて、神戸市では非常に低い値となっている。なお、栗原市の300mm以上600mm未満の管路と、熊本市の1000mm以上の管路に対する補正係数が卓越しているが、いずれも集中的な被害によって被害率が高くなつたことが原因である。

微地形区分に関しては、ローム台地では、熊本市と益

城町にのみ存在していて、いずれについても沖積平野に比べて被害は小さかったといえる。火山地では、熊本市、益城町および阿蘇市にのみ存在しており、同様にいずれも被害は小さかった。干拓地・埋立地では、熊本市と神戸市にのみ存在していて、熊本市では沖積平野と同程度の被害、神戸市については比較的小さい被害であるといえる。丘陵・火山性丘陵では、神戸市での被害が沖積平野より小さかった一方で、長岡市、栗原市、輪島市で沖積平野および谷底低地・扇状地と同程度、あるいはそれ以上の被害が生じたといえる。砂州・砂礫州では、輪島市にのみ存在していて被害は谷底低地・扇状地より小さかった。砂礫質台地では、熊本市と神戸市では沖積平野に比べて被害が小さかった一方で、小千谷市、長岡市、栗原市の順で沖積平野および谷底低地・扇状地と比べて被害が大きいといえる。山地では、長岡市、小千谷市の順で沖積平野および谷底低地・扇状地と比べて被害が甚大であったといえ、神戸市、川口町、輪島市では比較的小さい被害であるといえる。谷底低地・扇状地においては、長岡市の補正係数が卓越している一方で、熊本市、阿蘇市、益城町、神戸市の順で沖積平野に比べて被害が小さかった。液状化領域では、栗原市、益城町、小千谷市、神戸市、長岡市の順で補正係数が比較的高くなっていることから、液状化による被害が甚大であったといえる。一方で川口町と熊本市では沖積平野と同程度の被害であり、阿蘇市では液状化による被害は小さかったといえる。

(2) 対象全地域のデータに対する補正係数

管種に関しては、TP管、PP管の順で補正係数が卓越している。これは前述の通りPP管については益城町での被害、TP管については神戸市での被害がそれぞれ甚大であったためである。FRPM管、HP管およびSP管はそれぞれ同程度の補正係数で低い値となり、DCIP管については非常に低い値となった。

口径に関しては、300mm未満、300mm以上600mm未満、600mm以上1000mm未満と、口径が大きくなるにつれて補正係数が小さくなることから、口径が大きくなると被害が小さくなり信頼性が高くなるといえる。1000mm以上の管路については前述の通り熊本市の液状化領域に被害が集中していたことにより補正係数が高く算出されている。

微地形区分に関しては、丘陵・火山性丘陵、ローム台地、火山地の順に特に補正係数が低かった。次いで、山地、干拓地・埋立地、砂礫質台地、砂州・砂礫州、谷底低地・扇状地の順で補正係数が低くなつたが、沖積平野に比べて一定以上の被害が生じているといえる。また、液状化領域の補正係数が卓越していることから、一般に液状化による下水道埋設管路への被害は甚大となる可能

性が高いと言える。

7. 標準被害率およびそのモデル化

各地域についての標準被害率およびそれに準ずる被害率について分析を行った。それぞれの地域において基準とした微地形区分の、非液状化領域および液状化領域全域を対象とし、VP/VU管かつ口径が300[mm]未満である管路に絞り込み、地域ごとに分析した結果が図-13である。また、VP/VU管の次に広く用いられているHP管についても同様の分析を図-14のように行なった。HP管については、データ数が少なくなるため、微地形区分に関する抽出は行わず、口径300[mm]未満である管路を液状化領域と非液状化領域に分類して分析を行った。なお、ここで指標とする地震動強さは、全地域についてデータが得られたPGA, PGV, 計測震度IJを用いた。

(1) VP/VU管、かつ口径300[mm]未満の管路

液状化領域においては、PGAとの関係を見ると、 $PGA=150\sim300[\text{cm/s}^2]$ の範囲では長岡市の被害率に支配されている。 $300\sim500[\text{cm/s}^2]$ の範囲では全地域において阿蘇市と長岡市の影響から被害率が $0.011\sim0.046[\text{km/km}]$ と相対的に低い。 $500\sim550[\text{cm/s}^2]$ の範囲では長岡市、阿蘇市において一定以上の被害率を示すため、全地域において $0.112[\text{km/km}]$ と被害率が高い。一方で、 $550\sim750[\text{cm/s}^2]$ の範囲では熊本市および阿蘇市での被害率が相対的に低く、敷設延長が比較的長いため、全地域において $0.012\sim0.106[\text{km/km}]$ と相対的に低い被害率を示す。 $750\sim850[\text{cm/s}^2]$ の範囲では益城町において敷設延長が比較的長いため $0.219[\text{km/km}]$ と被害率が高い。 $850\sim1000[\text{cm/s}^2]$ の範囲では神戸市で被害率が漸増しており、敷設延長が卓越して長いため全地域においても被害率が $0.211[\text{km/km}]$ まで漸増する。 $1000\sim1200[\text{cm/s}^2]$ の範囲では小千谷市での被害率が支配的であり、 $1250\sim1650[\text{cm/s}^2]$ の範囲では小千谷市および川口町でのみ被害が生じていた。

PGVとの関係を見ると、 $PGV=20\sim40[\text{cm/s}]$ の範囲では長岡市の被害率に支配されている。 $40\sim70[\text{cm/s}]$ の範囲では熊本市での敷設延長が卓越しているため、全地域においては $0.012\sim0.087[\text{km/km}]$ と相対的に被害率が低い。 $70\sim80[\text{cm/s}]$ の範囲では全地域において $0.228[\text{km/km}]$ と高い被害率を示し、 $80\sim100[\text{cm/s}]$ の範囲では熊本市と阿蘇市に支配された被害率を示す。 $100\sim130[\text{cm/s}]$ の範囲では神戸市において敷設延長が卓越しているため、全地域において被害率が $0.143[\text{km/km}]$ まで漸増する。 $130\sim190[\text{cm/s}]$ の範囲では益城町での被害率が卓越しているため全地域において被害率が高い。

IJとの関係を見ると、 $IJ=4.9\sim5.4$ の範囲では長岡市での

被害率に支配され、 $5.5\sim5.8$ の範囲では全地域においても $0.028\sim0.049[\text{km/km}]$ と相対的に被害率が低い。また、 $6.0\sim6.2$ の範囲において益城町、長岡市での被害率が卓越している場合があるが、熊本市と神戸市での敷設延長が長いためこれらの地域の被害率が支配的である。 $6.3\sim6.5$ の範囲では益城町および小千谷市での敷設延長が長く、川口町でも被害率が高いため $0.258\sim0.301[\text{km/km}]$ と被害率が高い。 $6.6\sim6.7$ の範囲では小千谷市での被害に支配され、 $0.164\sim0.306[\text{km/km}]$ と高い被害率を示す。

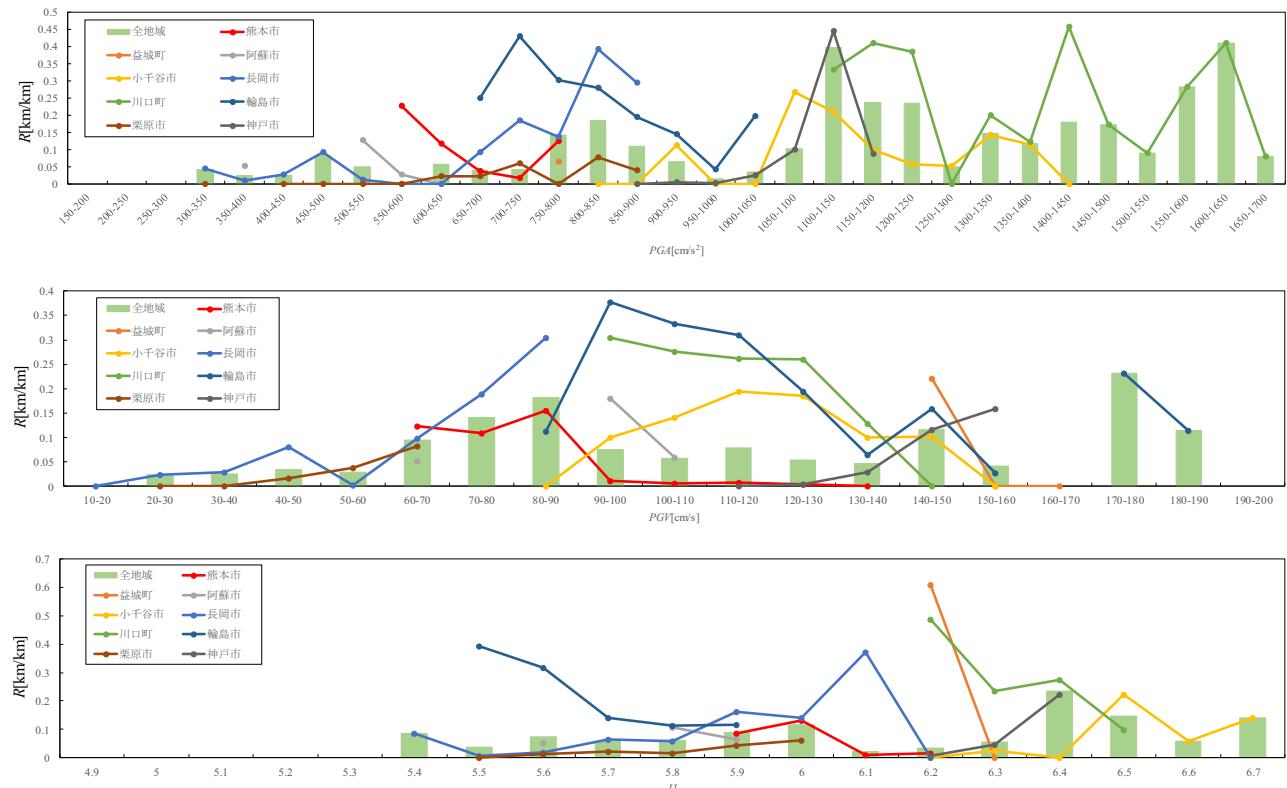
各地域で基準とする微地形区分における非液状化領域においては、PGAとの関係を見ると、 $PGA=300\sim750[\text{cm/s}^2]$ の範囲では卓越した被害率を示す地域があるものの、その地域での敷設延長が比較的短いため、全地域において $0.005\sim0.083[\text{km/km}]$ と相対的に低い被害率で横ばいである。 $750\sim850[\text{cm/s}^2]$ の範囲では熊本市、長岡市、輪島市での被害率が卓越していて栗原市と益城町でも一定以上の被害率を示すため、全地域においても $0.143\sim0.185[\text{km/km}]$ と被害率が高い。 $850\sim1050[\text{cm/s}^2]$ の範囲では小千谷市や栗原市、神戸市での被害率が相対的に低いことにより、全地域において $0.014\sim0.109[\text{km/km}]$ と相対的に被害率が低い。 $1050\sim1250[\text{cm/s}^2]$ の範囲では神戸市や小千谷市および川口町での被害率が高く、神戸市および川口町で敷設延長が支配的であるため全地域においても $0.103\sim0.397[\text{km/km}]$ と被害率が高い。 $1250\sim1400[\text{cm/s}^2]$ の範囲では小千谷市の被害率が支配的であり、 $1450\sim1700[\text{cm/s}^2]$ の範囲では川口町での被害が支配している。なお、 $1400\sim1450[\text{cm/s}^2]$ の範囲では川口町での被害率が非常に卓越しているが、小千谷市においては被害が生じていなかったため、全地域においては $0.172[\text{km/km}]$ と被害率が相対的に高い。

PGVとの関係を見ると、長岡市、熊本市で被害率が漸増しているため、 $PGV=10\sim90[\text{cm/s}]$ の範囲では全地域において $0.182[\text{km/km}]$ まで被害率が漸増する。一方で、 $90\sim140[\text{cm/s}]$ の範囲では輪島市、川口町、小千谷市で高い被害率を示すものの、熊本市、神戸市において敷設延長が比較的長いため全地域において $0.046\sim0.078[\text{km/km}]$ と相対的に被害率が低い。 $140\sim150[\text{cm/s}]$ の範囲では、益城町、輪島市、神戸市、小千谷市での被害率が相対的に高く、神戸市での敷設延長が長いため全地域において $0.116[\text{km/km}]$ と相対的に被害率が高い。一方で $150\sim160[\text{cm/s}]$ の範囲では神戸市で相対的に高い被害率を示すものの、益城町と小千谷市において被害が生じていないため、全地域において $0.042[\text{km/km}]$ と被害率は相対的に低い。 $160\sim190[\text{cm/s}]$ の範囲では益城町、輪島市のデータに支配されている。

IJとの関係を見ると、 $IJ=5.4\sim5.8$ の範囲では輪島市で卓越して被害率を示すものの敷設延長が比較的短いため、全地域において $0.038\sim0.086[\text{km/km}]$ と被害率は相対的に低

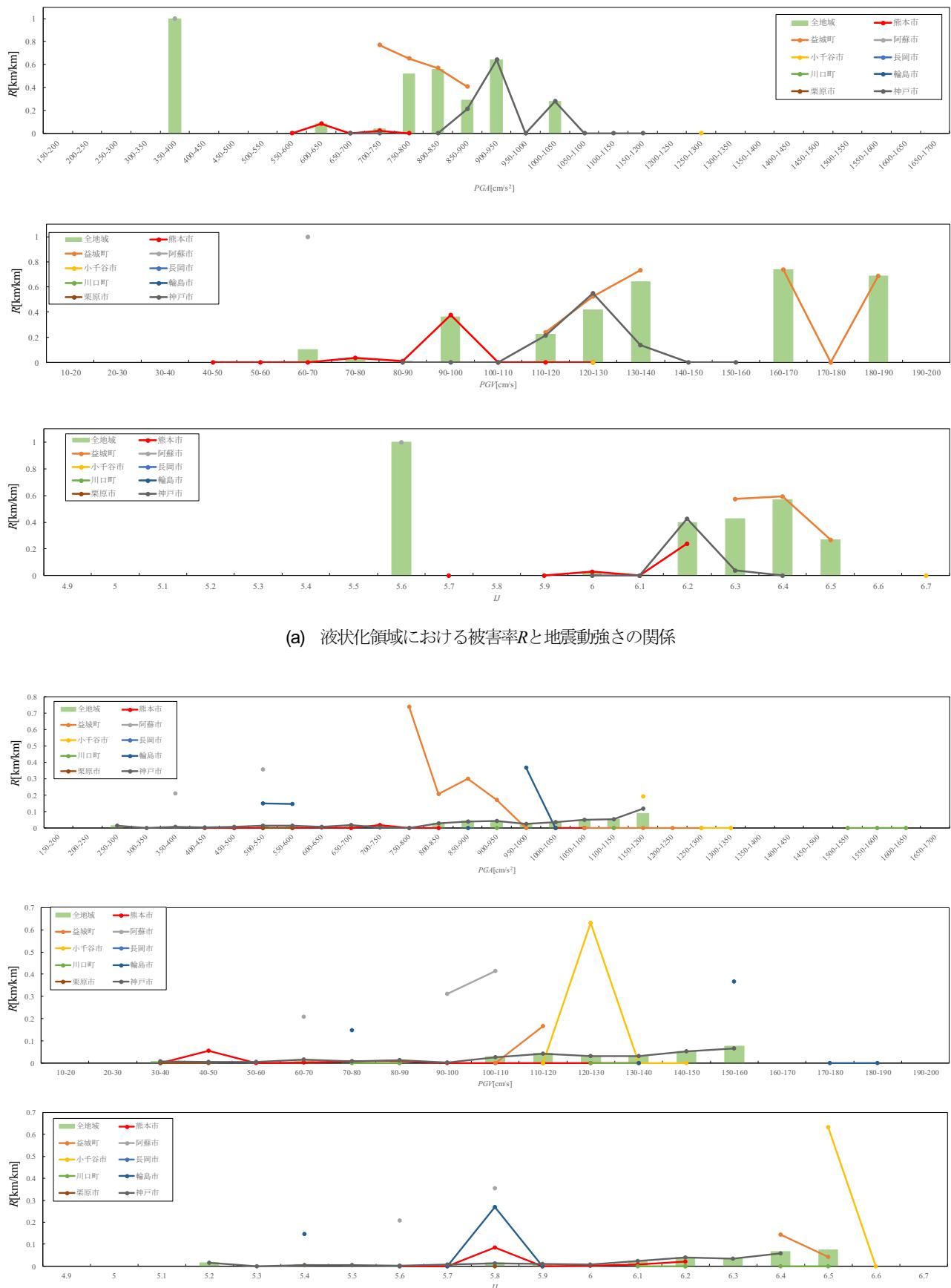


(a) 液状化領域における被害率Rと地震動強さの関係



(b) 基準とする微地形区分の非液状化領域における被害率Rと地震動強さの関係

図-13 VP/VU管, 口径300mm未満の管路における被害率Rと地震動強さの関係



い. 5.9~6.2の範囲では熊本市の被害率が支配的であり, 6.2~6.3の範囲では神戸市の被害率が支配的である. 6.4~6.5の範囲では, 川口町, 小千谷市, 神戸市のいずれも被害率が高いため, 全地域において0.147~0.234[km/km]と被害率が高い. 6.6~6.7の範囲では小千谷市の被害率に支配されている.

(2) HP管, かつ口径300[mm]未満の管路

液状化領域においては, PGA との関係を見ると, $PGA=350\sim400[\text{cm/s}^2]$ の範囲では阿蘇市での被害率が1.0[km/km]となっているが, これは阿蘇市において自然堤防に埋設される管路における被害が対象領域に生じていたためである. $550\sim750[\text{cm/s}^2]$ の範囲では全地域における被害率は熊本市が支配的である. $750\sim950[\text{cm/s}^2]$ の範囲では益城町および神戸市での被害率が卓越しているため全地域においても0.221~0.551[km/km]と被害率は高い. $900\sim1200[\text{cm/s}^2]$ の範囲では神戸市でのみ敷設が確認され, $1250\sim1300[\text{cm/s}^2]$ の範囲では小千谷市にのみ敷設が確認された.

PGV との関係を見ると, $PGV=40\sim90[\text{cm/s}]$ の範囲では, 熊本市での被害率が支配的であるため, 全地域において0.015~0.020[km/km]と被害率は低い. 一方で $60\sim70[\text{cm/s}]$ の範囲では阿蘇市において被害率が1.0[km/km]となっているため, 全地域において0.094[km/km]と被害率は相対的に高い. $90\sim100[\text{cm/s}]$ の範囲では熊本市での被害率が卓越していることから, 全地域において0.362[km/km]と卓越した被害率を示す. $100\sim110[\text{cm/s}]$ の範囲では被害は生じていないが, $110\sim140[\text{cm/s}]$ の範囲では益城町および神戸市での敷設延長が支配的であり, 特に益城町において被害率が増加しているため, 全地域においても0.437[km/km]まで被害率が増加する. $140\sim160[\text{cm/s}]$ の範囲では被害は生じておらず, $160\sim190[\text{cm/s}]$ の範囲では益城町での被害が支配的である.

IJ との関係を見ると, 阿蘇市において先述の PGA , PGV の場合と同様に, $IJ=5.6$ のときに被害率が1.0[km/km]となる. 5.7および5.9~6.1の範囲では熊本市および神戸市においていずれも被害率が低いため, 全地域において0~0.013[km/km]と被害率が低い. 一方で6.2のときには熊本市と神戸市いずれについても高い被害率を示すため, 全地域においても0.252[km/km]程度の高い被害率を示す. 6.3~6.5の範囲では益城町での敷設延長が卓越しているため, 全地域において0.271~0.500[km/km]と被害率が高い. 6.7のときには小千谷市において被害が生じていない.

非液状化領域においては, PGA との関係を見ると, $250\sim800[\text{cm/s}^2]$ の範囲において高い被害率を示す地域があるものの, 熊本市と神戸市において低い被害率を示し, 神戸市での敷設延長が卓越しているため, 全地域において0.002~0.015[km/km]と低い被害率で横ばいとなる.

750~1200[cm/s²]の範囲では神戸市での敷設延長が卓越しているため, 全地域においても0.090[km/km]まで漸増する. その後は1200~1350[cm/s²]の範囲では益城町および小千谷市, 1500~1650[cm/s²]の範囲では川口町でのみ敷設が確認されたが, いずれも被害は生じていない.

PGV との関係を見ると, 30~160[cm/s]の範囲で神戸市での敷設延長が支配的であるため, 0.075[m/km]まで相対的に低い被害率で漸増する. また阿蘇市では60~70[cm/s], 90~110[cm/s]の範囲で, 輪島市では70~80[cm/s], 150~160[cm/s]の範囲で被害率が卓越していた. 170~190[cm/s]の範囲では輪島市にのみ敷設が確認されたが, 被害は生じていなかった. 益城町では110~120[cm/s]の範囲に被害が生じていた. 小千谷市では120~130[cm/s]の範囲で被害率が卓越している.

IJ との関係を見ると, 神戸市において $IJ=5.2\sim6.4$ の広い範囲に分布し, 敷設延長が非常に卓越しているため全地域において0.066[km/km]まで漸増する. また5.6~6.2の範囲では熊本市での敷設延長も支配的であった. 阿蘇市においては5.6, 5.8のときに被害が卓越し, 輪島市においては5.8のときにのみ被害が生じていた. 川口町においては被害は生じておらず, 益城町においては6.4~6.5の範囲で0.066~0.074[km/km]と被害率が相対的に高い. 小千谷市では6.6のときに非常に被害率が高い.

(3) 被害率曲線の構築

図-13および図-14に示す被害率データから, 液状化領域および非液状化領域に区分した上で, 全地域の被害データに対して被害率曲線の構築を行った. 地震動強さ λ におけるモデルを式(3)のように表す.

$$\begin{cases} R^*(x) = C \cdot \Phi\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right) & (x: PGA, PGV) \\ R^*(x) = C \cdot \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) & (x: IJ) \end{cases} \quad (3)$$

ここで $R^*(x)$ はモデル化された推定被害率であり, IJ の被害率曲線のパラメータである λ および ζ は実データの平均値および標準偏差である. PGA と PGV においては対数正規分布でモデル化するので, 実データと比較できるように次式に基づいて変換を行っている.

$$\mu = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right) \quad (4a)$$

$$\sigma = \sqrt{\mu^2(\exp(\zeta^2) - 1)} \quad (4b)$$

式(3)の C , λ , ζ , μ , σ は未定係数である. これらは式(2)のように, 式(3)より推定される被害率 R^* と実被害率 R

の残差の二乗に敷設延長 L' をかけあわせた目的関数を、非線形最小二乗法を用いて最小となるように定めた。なお、地震動強さ x の区間幅を、 PGA は $50[\text{cm/s}^2]$ 刻み、 PGV は $10[\text{cm/s}]$ 刻み、 IJ は 0.1 刻みとし、区間幅ごとに被害率を算定する。 A は地震動強さ x が大きくなるにつれ漸近する被害率と仮定し、 $0.00 \leq A \leq 1.00$ とした。他のパラメータについても、地震動強さ x の指標毎に計算が収束するように初期条件とパラメータの変動幅を設定した。それらの基準としては、実データの地震動強さ x の指標の平均値と標準偏差を参考に設定した。また、ある特定の地震動強さ x におけるばらつきを表す確率密度関数を次式のような対数正規分布で表した。

$$f(R^*(x)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta_v \cdot R^*(x)} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln R^*(x) - \lambda_v}{\zeta_v}\right)^2} \quad (5)$$

ζ_v および λ_v は $\ln(R^*(x))$ の平均値および標準偏差である。ここで、ある特定の地震動強さ x におけるばらつきの平均値を式(3)の $R^*(x)$ とするが、これは実被害率 $R(x)$ の平均値であるため、以下の式によって変換する。

$$\lambda_v = \ln(R^*(x)) - \frac{1}{2}\zeta_v^2 \quad (6)$$

具体的には式(3)を式(6)に代入し、そのうえで式(6)を式(5)に代入することでばらつきを表す確率密度関数とした。なお、この確率密度関数は10%超過確率および10%非超過確率として表した。

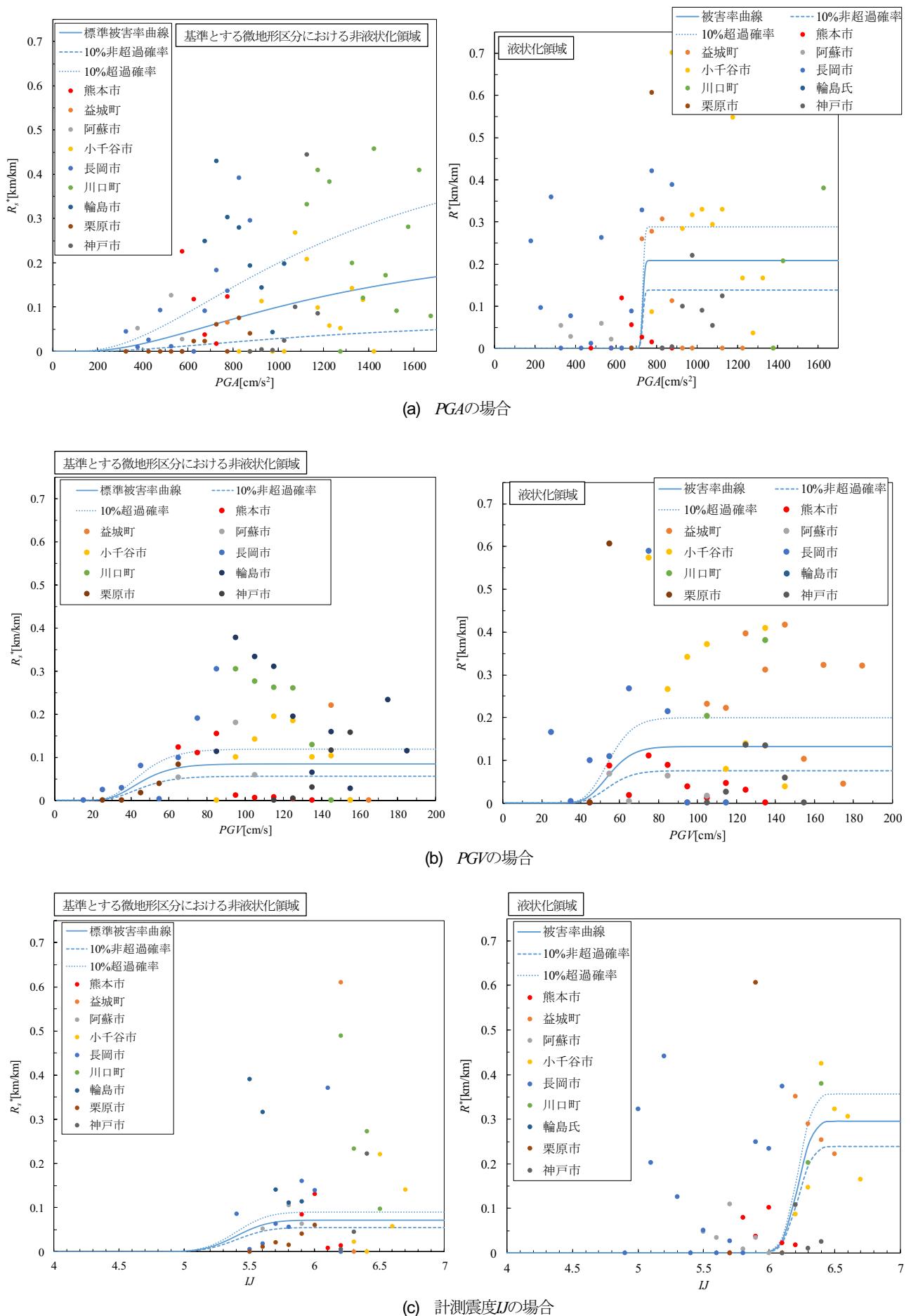
構築した被害率曲線を図-15および図-16に、パラメータとその変動幅、および最小となった目的関数 $f(R_m)$ の値を表-3および表-4に示す。図-16について非液状化領域では長岡市、液状化領域では長岡市、川口町、輪島市、栗原市に対象管路が存在しなかった。さらに、文献6)から8)で提案されている被害率曲線の中で、図-15および図-16において対象としている管路と同等の分類である管路についての被害率曲線と、全地域の被害データを合算し算出した被害率を図-17および図-18に示す。まず文献6) (図中の永田ら(2010)) では、第1章で述べた地震における噴砂が生じていない非液状化領域を対象に、VP/VU管でかつ口径300mm未満の管路について標準被害率曲線を構築している。液状化領域については、算出された微地形区分に関する補正係数5.79をかけて算定される。文献7) (図中のShoji et al.(2011)) では、同様に第1章で述べた地震における噴砂が生じていない非液状化領域を対象に、管種、口径を区分せずに標準被害率曲線を構築している。文献8) (図中の庄司ら(2014)) では、第1章で述べた地震の中でも兵庫県南部地震についての結果を

ここで示す。これは神戸市において噴砂が生じていない非液状化領域を対象に、本研究と同様にVP/VU管でかつ口径300mm未満の管路について標準被害率曲線を構築している。液状化領域およびHP管についての被害率曲線は、文献6)と同様に管種および微地形区分に関する補正係数 $C_p=1.01$, $C_g=4.14$ を標準被害率曲線にかけて算定される。さらに、文献6)では PGV 、文献7)および8)では PGV および IJ のみを指標とした被害率曲線の構築を行っている。

表-3および表-4の $f(R_m)$ の値については、式(2)に基づくためVP/VU管とHP管との比較はできず、同様の管種について相対的に比較が可能となる。 $f(R_m)$ の値を比較すると、表-3について非液状化領域では、 PGV のときに $f(R_m)$ の値が最も小さく、次いで PGA , IJ のときに同程度の値となっている。液状化領域では、 IJ のときに $f(R_m)$ の値が最も小さく、次いで PGA , PGV のときに同程度の値となっている。一方、表-4については非液状化領域において、 IJ のときに $f(R_m)$ の値が最も小さく、次いで PGV , PGA の順に小さい値となる。液状化領域においては、同様に IJ のときに $f(R_m)$ の値が最も小さく、次いで PGV , PGA の順に小さい。このようにデータのばらつきを相対的に評価すると、計測震度 IJ の被害率に対する説明性が最も高いとも言えるが、 $f(R_m)$ の値の大小関係の相違は根本的にはない。すなわち、既往の研究^{6,8)}で説明されている下水道埋設管路の地震被害に関するメカニズムを考慮すると、 PGV の被害率に対する説明性は一定の精度で担保できると考えられる。このような論拠を踏まえ、以降、 PGV に対して考察を行なうものとする。

図-15よりVP/VU管について PGV との関係を見ると、基準とする微地形区分における非液状化領域においては、実被害率データは $PGV=60[\text{cm/s}]$ 以上になると被害率が高い点が増える傾向が見られ、全体的に右上がりの傾向を示す。被害率曲線は $24[\text{cm/s}]$ となると $R=0.001[\text{km/km}]$ の被害率を示し始め、 $100[\text{cm/s}]$ 付近まで増加、その後 $0.085[\text{km/km}]$ に収束する。液状化領域においては、実被害率データは全体的に右上がりの傾向を示すものの、非液状化領域に比べて PGV の値が低い範囲にも被害が生じており、全体的に被害率も高くなっている。被害率曲線は $36[\text{cm/s}]$ となると $0.001[\text{km/km}]$ の被害率を示し始め、その後 $0.132[\text{km/km}]$ に収束する。

図-16よりHP管について PGV との関係を見ると、非液状化領域においては、実被害率データは全体的に右上がりの傾向を示し、相対的に高い被害率を示す点が多く見られる。被害率曲線は $PGV=40[\text{cm/s}]$ となると $R=0.001[\text{km/km}]$ の被害率を示し始め、 $200[\text{cm/s}]$ まで漸増する。液状化領域においては、実被害率データは非液状化領域と同様に右上がりの傾向を示すものの、被害率は卓越している点がより見られる。被害率曲線を見ると、 $95[\text{cm/s}]$ となると $0.001[\text{km/km}]$ の被害率を示し始め、



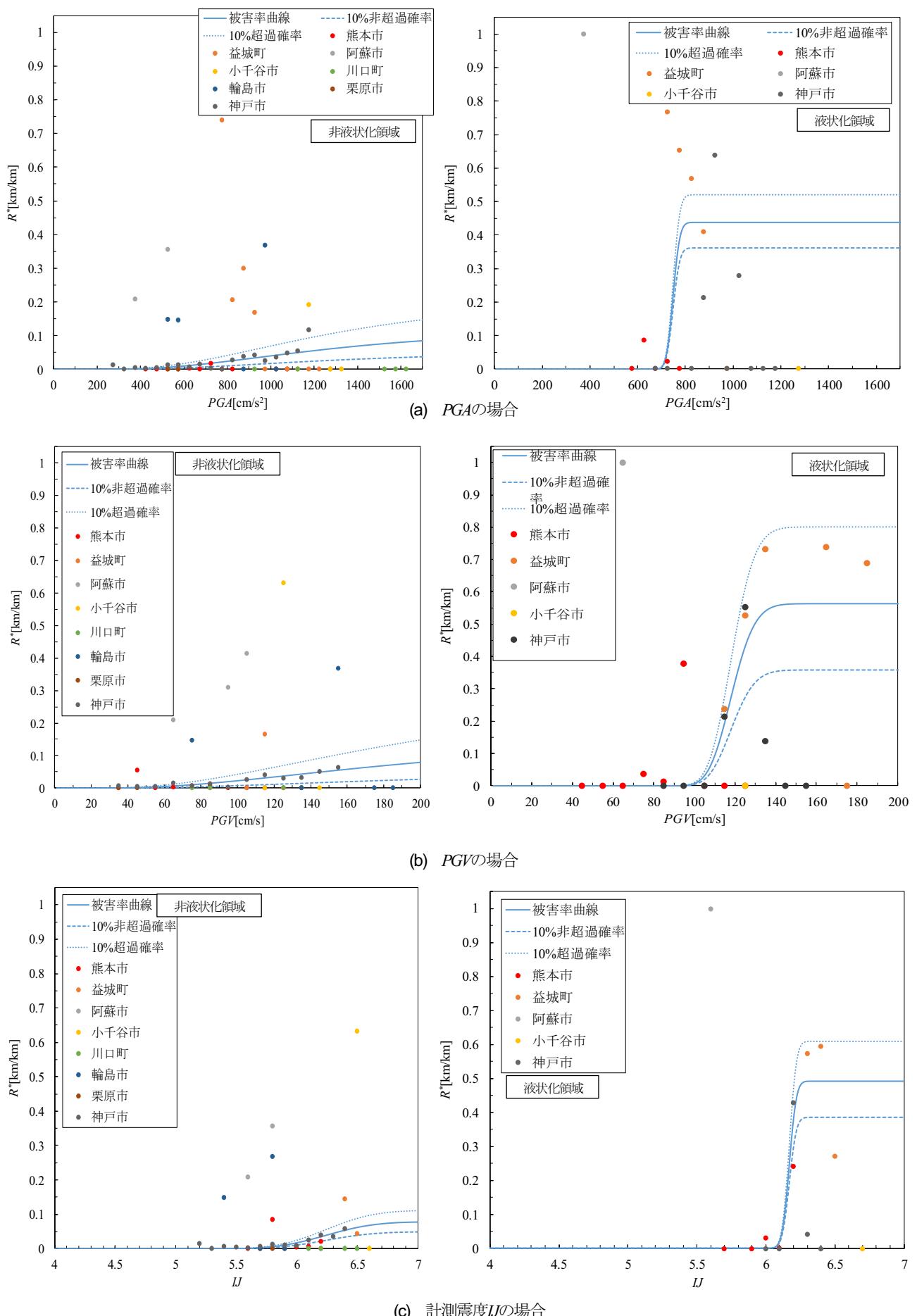


図-16 HP管, 口径300[mm]未満の管路の被害率曲線

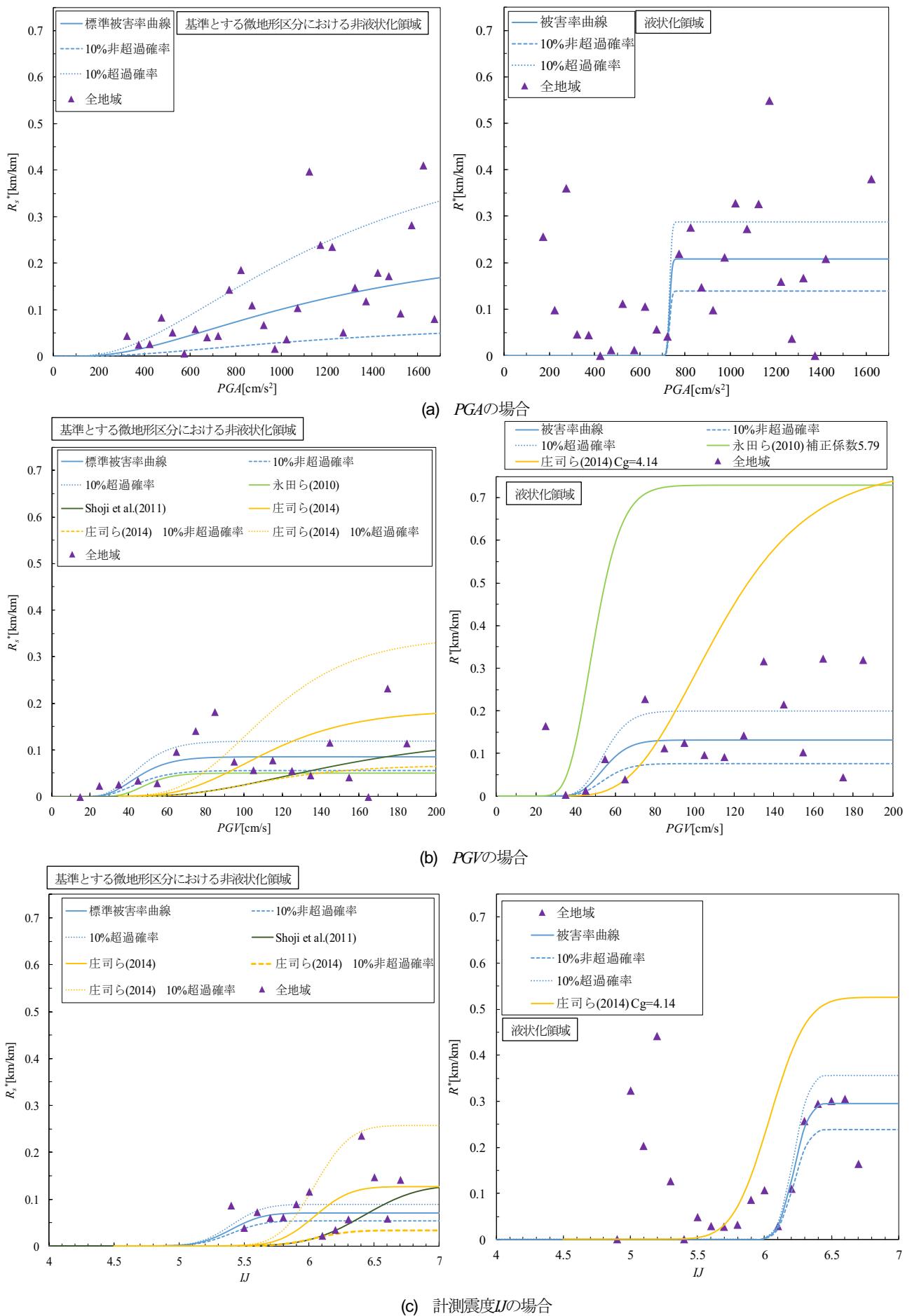


図-17 全地域の合算データにおける被害率と被害率曲線の比較 (VP/VU管, 口径300[mm]未満の管路の場合)

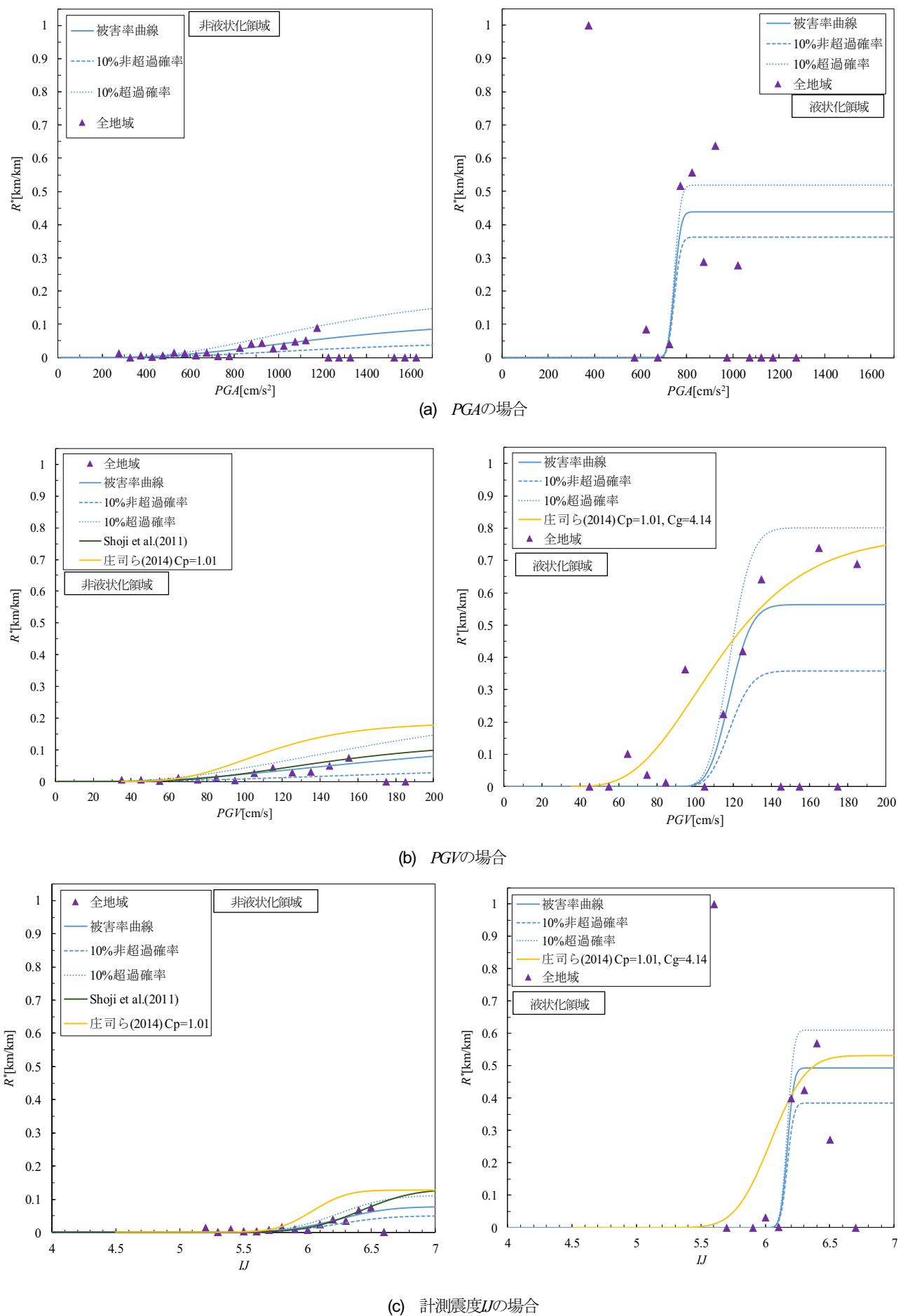


図-18 全地域の合算データにおける被害率と被害率曲線の比較 (HP管, 口径300[mm]未満の管路の場合)

表-3 図-14の被害率曲線のパラメータ

	C	λ	ζ	μ	σ	$f(R_m)$	適用範囲
PGA	非液状化領域 変動幅	0.249 $0.00 \leq C \leq 1.00$	7.090 $5.01 \leq \lambda \leq 7.44$	0.754 $0.01 \leq \zeta \leq 0.85$	1594.408 $150.0 \leq \mu \leq 1700.0$	1395.125 $16.15 \leq \sigma \leq 1749.91$	2.885
	液状化領域 変動幅	0.208 $0.00 \leq C \leq 1.00$	6.597 $5.01 \leq \lambda \leq 7.44$	0.012 $0.003 \leq \zeta \leq 1.424$	732.946 $150.0 \leq \mu \leq 1700.0$	8.796 $0.0051 \leq \sigma \leq 870.85$	2.147
	非液状化領域 変動幅	0.085 $0.00 \leq C \leq 1.00$	3.806 $2.30 \leq \lambda \leq 5.30$	0.295 $3.4 \times 10^{-5} \leq \zeta \leq 3.39$	46.970 $10.0 \leq \mu \leq 200.0$	14.163 $3.55 \leq \sigma \leq 106.45$	2.642
PGV	液状化領域 変動幅	0.132 $0.00 \leq C \leq 1.00$	3.998 $2.30 \leq \lambda \leq 5.30$	0.179 $8.7 \times 10^{-6} \leq \zeta \leq 6.661$	55.369 $10.0 \leq \mu \leq 200.0$	9.991 $4.32 \leq \sigma \leq 84.32$	10[cm/s] $\leq PGV \leq 200[cm/s]$
	非液状化領域 変動幅	0.071 $0.00 \leq C \leq 1.00$	- -	- -	5.400 $4.9 \leq \mu \leq 6.7$	0.195 $0.02 \leq \sigma \leq 0.72$	2.964
	液状化領域 変動幅	0.295 $0.00 \leq C \leq 1.00$	- -	- -	6.217 $4.9 \leq \mu \leq 6.7$	0.090 $0.002 \leq \sigma \leq 1.20$	1.066 $4.9 \leq IJ \leq 6.7$

表-4 図-15の被害率曲線のパラメータ

	C	λ	ζ	μ	σ	$f(R_m)$	適用範囲
PGA	非液状化領域 変動幅	0.120 $0.00 \leq C \leq 1.00$	7.134 $5.01 \leq \lambda \leq 7.44$	0.535 $0.01 \leq \zeta \leq 0.91$	1446.804 $150.0 \leq \mu \leq 1700.0$	832.877 $18.83 \leq \sigma \leq 918.83$	0.911
	液状化領域 変動幅	0.438 $0.00 \leq C \leq 1.00$	6.616 $5.01 \leq \lambda \leq 7.44$	0.030 $0.03 \leq \zeta \leq 0.69$	747.288 $150.0 \leq \mu \leq 1700.0$	22.424 $19.98 \leq \sigma \leq 519.98$	150[cm/s] $\leq PGA \leq 1700[cm/s]$
	非液状化領域 変動幅	0.158 $0.00 \leq C \leq 1.00$	5.298 $2.30 \leq \lambda \leq 5.30$	0.651 $0.003 \leq \zeta \leq 0.89$	247.127 $10.0 \leq \mu \leq 297.7$	179.530 $3.99 \leq \sigma \leq 327.2$	0.454
PGV	液状化領域 変動幅	0.563 $0.00 \leq C \leq 1.00$	4.772 $2.30 \leq \lambda \leq 5.30$	0.075 $0.030 \leq \zeta \leq 0.78$	118.488 $10.0 \leq \mu \leq 200.0$	8.899 $2.25 \leq \sigma \leq 82.25$	10[cm/s] $\leq PGV \leq 200[cm/s]$
	非液状化領域 変動幅	0.078 $0.00 \leq C \leq 1.00$	- -	- -	6.242 $4.9 \leq \mu \leq 6.7$	0.319 $0.04 \leq \sigma \leq 0.76$	0.332
	液状化領域 変動幅	0.492 $0.00 \leq C \leq 1.00$	- -	- -	6.170 $4.9 \leq \mu \leq 6.7$	0.041 $0.04 \leq \sigma \leq 0.56$	0.392 $4.9 \leq IJ \leq 6.7$

150[cm/s]まで増加し、その後150[cm/s]以上の範囲で0.563[km/km]に収束する。

以上VP/VU管およびHP管について実被害率データと被害率曲線の考察を行ったが、図-11においては、HP管よりもVP/VU管のほうが被害率が高くなる可能性があるという結果になっている。しかし、図-15および図-16を比較すると、被害率曲線の観点から液状化領域においてHP管のほうが被害率が高くなる傾向にあると考えられる。これはデータの抽出を行ったことによる影響だと考えられる。図-11は全地域の管路を対象として属性による区別を行わずに計算した結果であるため、HP管よりも敷設延長が長いVP/VU管のデータが支配的となった。一方で図-15および図-16では、VP/VU管およびHP管のいずれについてデータを抽出している。その結果、図-15ではVP/VU管が広く使われている熊本市のデータが支配的となり、図-16ではHP管が広く使われている益城町のデータが支配的となる結果となった。

図-17および図-18から被害率曲線の精度を検証すると、基準とする微地形区分における非液状化領域でVP/VU管について標準被害率曲線を構築した場合には、 PGA に関しては全28点のうち75.0%にあたる21点が、 PGV に関しては全18点のうち55.6%にあたる10点が、 IJ に関しては全

14点のうち50.0%にあたる7点が適用範囲内にある。また、HP管について被害率曲線を構築した場合には、 PGA に関しては全25点のうち60.0%にあたる15点が、 PGV に関しては全15点のうち60.0%にあたる10点が、 IJ に関しては全15点のうち46.7%にあたる7点が適用範囲内にある。ゆえに基準とする微地形区分における非液状化領域においては PGA および PGV の説明性が相対的に高いといえる。一方で液状化領域でVP/VU管について被害率曲線を構築した場合には、 PGA に関しては全27点のうち37.0%にあたる10点が、 PGV に関しては全17点のうち52.9%にあたる9点が、 IJ に関しては全19点のうち31.6%にあたる6点が適用範囲内にある。また、HP管について被害率曲線を構築した場合には、 PGA に関しては全15点のうち20.0%にあたる3点が、 PGV に関しては全15点のうち46.0%にあたる7点が、 IJ に関しては全10点のうち50.0%にあたる5点が適用範囲内にある。ゆえに液状化領域においては PGV の説明性が相対的に高いと言えるが、被害率曲線の立ち上がりが遅い。このことから地震動強さが低い範囲での被害率を考慮しきれていないため、基準とする微地形区分における非液状化領域での被害率曲線と比べると精度は劣ると位置づけられ、これに関しては今後の課題とする。

本研究で構築された被害率曲線と既往研究との比較を行うと、文献6)で示された非液状化領域における標準被害率曲線は本研究で得られた標準被害率曲線と類似する挙動を示すが、兵庫県南部地震および熊本地震の被害データを含んでいないことから被害率を低く見積もっている。一方で液状化領域における被害率曲線は被害率を過大評価しているため、いずれも本研究で得られた被害率曲線が好ましいと考える。文献7)に関しては、先述の通り管種および口径について区分していないため参考としての比較となるが、非液状化領域においては地震動強さが高い場合の被害率の説明性は高い。一方で、地震動強さが低い場合の被害率については説明性が低いため、本研究で得られた被害率曲線が好ましいと考える。文献8)に関しては、VP/VU管の非液状化領域および液状化領域いずれも、地震動強さが高い場合の被害率の説明性は高いが、地震動強さが低い場合の被害率については説明性が低い。HP管については神戸市において敷設延長が支配的であったことから、非液状化領域においては過大評価であるものの説明性は高く、液状化領域においては被害率の値も妥当であり説明性が高い。ゆえに非液状化領域においては本研究で得られた被害率曲線が相対的に好ましいと考える。

以上の結果から、非液状化領域については実被害率および既往研究と比較すると、本研究で得られた被害率曲線の推定精度が最も高いと考えられるが、液状化領域については実被害率のばらつきを十分考慮できているとは言えないため今後の課題である。また、これらを踏まえたうえで実被害率のばらつきを最も考慮できる地震動強さの指標はPGVであるといえる。

8. 結論

本研究では、熊本地震を含む既往地震の下水道被害データを用いて、PGA、PGV、計測震度IIおよびSI値の地震動強さに対する被害率Rの特徴を、管種、口径および微地形区分の観点から明らかにし体系的な考察をした。

以下、本研究で得られた知見を示す。

(1) 属性の観点からの被害の特徴

管種に関しては、液状化領域および非液状化領域ともに地域によって被害率が高かった管種には偏在が見られた。数量化理論I類に基づいて分析した結果、地域によらない統一的な知見としては、VP/VU管はHP管より被害が大きくなる可能性が高い。DCIP管は極めて被害が生じにくく耐震的であり、FRPM管は相対的に被害が低くなる可能性が高い。SP管は低い被害率を示す傾向があり、PP管、TP管は相対的に高い被害が生じる可能性

が高い。

口径に関しては、液状化領域および非液状化領域ともに300mm未満の管路の被害率が高いが、地域によっては300mm以上600mm未満の比較的大きい管路で高い被害率を示す。数量化理論I類に基づいて分析した結果、一般には口径が大きくなるにつれて被害が小さくなり、耐震的に信頼性が高くなると言える。

微地形区分に関しても同様に地域による相違が見られた。数量化理論I類に基づいて分析した結果、一般には沖積平野と比べて丘陵・火山性丘陵、ローム台地、火山地で被害が低くなる可能性があり、それに準じて相対的に低いのは山地、干拓地・埋立地、砂礫質台地である。一方で砂州・砂礫州、谷底低地・扇状地では被害が高くなる可能性がある。液状化領域においては、被害が甚大となる可能性が高い。

(2) 地震動強さと被害率の関係

管種、口径、微地形区分を区別せずに地震動強さの傾向を分析した結果、PGVおよびSI値の説明性が相対的に高く、地域による被害率の違いが明らかになった。一方で液状化領域および非液状化領域いずれも、中程度以下の地震動強さの領域では相対的に低い被害率を示し、相対的に高い地震動強さの領域で被害率が増加、その後増加した被害率のままで横ばいとなる共通してみられる傾向がある。また、非液状化領域より液状化領域の方がおよそ1.2~1.3倍の被害率を示し、地震動強さが低い場合でも被害が生じる可能性がある。

(3) 標準被害率の特徴と被害率直線の構築

最も一般的な管種であるVP/VU管について、口径300mm未満に絞った上で、微地形区分は非液状化領域と液状化領域の2区分として被害データを精査した。その上で被害率データに基づき被害率曲線をモデル化し、同様の分析をHP管についても行った。それらのデータの全体的な傾向としては、地震動強さが高まると被害率も高まるとともに、液状化領域においては地震動強さが低い場合も被害率が高く、全体的に非液状化領域より被害率が高い傾向を示した。

本研究で得られた被害率曲線は、非液状化領域については実被害率および既往研究と比較すると、本研究で得られた被害率曲線の推定精度が最も高いと考えられる。一方で、液状化領域については実被害率のばらつきを十分考慮できているとは言えないため今後の課題である。また、これらを踏まえたうえで実被害率のばらつきを最も考慮できる地震動強さの指標はPGVであるといえる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、熊本県土木部土木技術管理課および熊本市上下水道局に熊本地震における管

渠被害データの提供をして頂きました。また、関東学院大学理工学部土木学系の若松加寿江先生、東京工業大学の松岡昌志先生、防災科学技術研究所の先名重樹博士には熊本地震の液状化メッシュマップ、および微地形区分データの提供をして頂きました。ここに関係各位に対して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：熊本県熊本地方を震源とする地震について（第 28 報），<http://www.mlit.go.jp/common/001130271.pdf>(2017年4月4日参照)
- 2) 国土交通省：新潟中越地震における下水道施設の被害状況等について，http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/gyosei/seiken16th/20041210_61.pdf(2017年4月9日参照)
- 3) 下水道地震対策技術検討委員会：能登半島地震・新潟県中越沖地震の総括と耐震対策の評価および下水道の担うべき機能を継続的に確保する方法の考え方，<http://www.mlit.go.jp/common/000026846.pdf> (2017年4月9日参照)
- 4) 国土交通省：平成 20 年岩手・宮城内陸地震において被害を受けた下水道管路施設の状況について，<http://www.mlit.go.jp/common/000145188.pdf> (2017 年 4 月 9 日参照)
- 5) 国土交通省：東日本大震災における下水道施設被害の総括，<http://www.mlit.go.jp/common/000193183.pdf> (2017年4月9日参照)
- 6) 永田茂、石田寛、日下彰宏、濱田政則、庄司学、山本欣弥：近年の被害地震の被災データに基づく下水道管路網の地震被害率曲線の構築、第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 1765-1772, 2010.
- 7) Shoji, G., Naba, S. and Nagata, S.: Evaluation of seismic vulnerability of sewerage pipelines based on assessment of the damage data in the 1995 Kobe earthquake, In: *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, Faber, M. H., Köhler, J. and Nishijima, K. eds., Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-66986-3, pp. 1415-1423, 2011.
- 8) 庄司学、寺嶋黎、永田茂：下水道埋設管路の地震被害率曲線の構築、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4 (地震工学論文集第 33 卷), pp. I_921-I_946, 2014.
- 9) 防災科学技術研究所：J-SHIS Historical Liquefaction Map：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/labs/liqmap/> (2017 年 12 月 21 日参照)
- 10) 若松加寿江、先名重樹、小澤京子：平成 28 年(2016 年)熊本地震による液状化発生の特性、日本地震工学会論文集, 第 17 卷, 第 4 号, pp. 81-100, 2017.8.
- 11) JIBANKUN とは：<http://www.kobetoshiseibi.or.jp/matisen/jibankun/jibankun.htm> (2017 年 12 月 16 日参照)
- 12) 沖村孝、鳥居宣之：高密度地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」の構築とその活用事例、土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 4, pp. 1001-1019, 2007.
- 13) 若松加寿江：日本の液状化履歴マップ 745-2008, DVD, 東京大学出版会, 2011.
- 14) 先名重樹、翠川三郎：地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定、日本地震工学会論文集, 第 9 卷, 第 4 号, pp. 4_11-4_25, 2009.
- 15) 水越湧太、庄司学：2016 年熊本地震において強震動の作用を受けた道路ネットワークの被害分析、土木学会第 72 回年次学術講演会概要集(DVD-ROM), pp. 171-172, 2017.9.
- 16) 防災科学技術研究所：J-SHIS, <http://www.jshis.bosai.go.jp/> (2017 年 12 月 22 日閲覧)
- 17) 塩化ビニル管・継手協会：管渠関連施設・工法：<http://www.suidou.co.jp/library/dictionary-sewer/PDFs/p002.pdf> (2017 年 12 月 16 日参照)
- 18) 磯山龍二、石田栄介、湯根清二、白水暢：水道管路の地震被害予測に関する研究、水道協会雑誌, 第 67 卷, 第 2 号, pp. 25-40, 1998.

(2018.10.29 受付, 2019.1.25 修正, 2019.2.17 受理)

DAMAGE ASSESSMENT OF SEWER BURIED PIPES SUBJECTED TO GROUND MOTIONS AND LIQUEFACTION IN PREVIOUS EARTHQUAKES

Daichi HATAKEYAMA, Gaku SHOJI and Shigeru NAGATA

In this study, we analyzed the damage of sewer buried pipes by strong ground motions and liquefaction in the past earthquakes: the 1995 Kobe earthquake, the 2004 Niigata Chuetsu earthquake, the 2007 Noto Hantou earthquake, the 2007 Niigata Chuetsu-oki earthquake, the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, and the 2016 Kumamoto earthquake. After we defined the damage ratio R by dividing the damage length L_d of the buried pipe length L , we revealed the characteristics of the damage ratio to the peak ground acceleration PGA , the peak ground velocity PGV , the instrumental seismic intensity IJ and the SI value as an index of the ground motion intensities from view of points of pipe types, diameter and classification of microtopography. We further analyzed the dependency of the damage ratio on the ground motion intensities and revealed the trend of damage ratio data classified by VP/VU pipe type, diameter of $\Phi < 300$ mm, and non-liquefaction.