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Ld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IJ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^{2,5} 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⁹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IJ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、標準被害率について分析を行い、被害の詳細について分析を行ったうえで、標準被害率曲線の構築を行った.

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



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%2



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⁽³⁾

		(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		
鋳鉄管		普通鋳鉄管		50	75	de i Li Hiti	火山地		
	DCIP	高級鋳鉄管		80	100	八山地	火山山麓地		
1411	EDDIA	ダクタイル鋳鉄管	0≦Φ<300	105	125	王拓地• 押立地	干拓地		
強化フラスナック官	FRPM	強化ファスナック復合官		150	200	- 「」「」」 「」」「」」 「」」 「」 「	埋立地		
		ヒューム官 鉄筋コンクリート管		216	230		丘陵		
ヒューム管	HP	推進工法用コンクリート管		250			火山性丘陵		
		推進工法用鉄筋コンクリート管		300	319	湖沼	湖沼		
ポリェチレン答	DD	低密度ポリエチレン管		350	380		<u> </u>		
ホリエノレン目	11	高密度ポリエチレン管	_	400	406	<u></u>	砂州・砂礫州		
		亜鉛メッキ鋼管	300≦Ф<600	450	492	<u> </u>	<u> </u>		
金属管	SP	鋼管		500	550	山地	山体地		
		ホリエナレン被復鋼官		560	550		一 一 毘 地 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一		
陶答	ТР	(加倍) (加倍) (加倍) (加倍) (加倍) (加倍) (加倍) (加倍)		600	650	谷底低地・扇状地	后 <u>伏</u> 州		
E PP	VP/VU	セメントモルタル被覆塩化ビニル管	600≦Φ<1000	680	700	沖積平野	自然堤防		
		リブ付硬質塩化ビニル管		750	800		後背湿地		
塩化ビニル管		硬質塩化ビニル管		830	840		旧河道		
		耐衝撃性硬質ポリ塩化ビニル管		850	000		三角州・海岸低地		
		水道用硬質塩化ビニル管		010	900	河原	河原		
その他	その他*	その他の管種		1000	1100	磯・岩礁	磯・岩礁		
BOX, HC, SR, RJ, I	D, H, a,	C, CO, F, g, G2 G3, OW, S, PPLP		1140	1200				
を"その他"として扱っ/	12			1250	1200				
				1230	1290				
			1000 < A	1300	1350				
			$1000 \ge \Phi$	1400	1500				
				1650	1800				
				2000	2520				
				2750	3500				
				4400	4900				

表-1 管種、口径および微地形区分のグループ分け

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,標準被害率および代表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.

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. ここでは、震災後に復旧を要する と判断された管路を被害延長 L_d として定義する. 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.

神戸市においては、庄司ら⁸と同様に兵庫県南部地震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 Φ 900mm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



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La,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La,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,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La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La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, 輪島市で51.29kmであった.

管種, 口径, 微地形区分については表-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[®]や庄司ら[®], 微地形区分に関しては先名・翠川¹³⁾ の知見をそれぞれ参考にした.



図-9 SI値と被害率の関係

(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IJおよびSI値を用いた.SI 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¹⁴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La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¹⁵,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*[km/km]については、被害延 長L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,敷設延長L,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La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^ゆからも明らかである.次いで,*L*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 ており、阿蘇市、益城町、神戸市のHP管が R=0.25[km/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[km/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[km/km]以上と高い被害率を示す.

(2) 口径

被害延長La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.それら 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Laが長く、また、神戸市の非液状化領域における La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[km/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 ロ町、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=0.223~0.156[km/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[km/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[km/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[km/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[km/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[cm/s²] 刻み,PGVは10[cm/s]刻み,計測震度L/は0.1刻み,SI/値は 10[cm/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[km/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のデータのみ得られたのでここに は示していない.

(1) PGAの場合

液状化領域においては、熊本市では PGA=550~900[cm/s²]の範囲に分布し、いずれについても 被害率はR=0.013~0.118[km/km]と相対的に低い. 益城町で は650~1000[cm/s²]および1100~1250[cm/s²]の範囲に分布し ているが, 700~850[cm/s²]の範囲で0.166~0.333[km/km]と, 高い被害率を示しており、その他の範囲では被害は生じ ていなかった. 阿蘇市では300~400[cm/s²]および 500~700[cm/s²]の範囲に被害が生じており、いずれについ ても0.022~0.060[km/km]と低い被害率を示す. 小千谷市で は850~1400[cm/s²]と値が高い範囲に分布しており, 1200~1400[cm/s²]の範囲の被害率は低いものの, 850~1200[cm/s²]の範囲では0.283~0.702[km/km]と非常に高 い被害率を示す.長岡市では,600~900[cm/s²]の範囲にお いて0.081~0.420[km/km]まで被害率が増加する傾向がある. なお, 250~300[cm/s²]の範囲で0.359[km/km], 500~550[cm/s²] の範囲で0.258[km/km]と、PGAの値が低い範囲において も被害率が高くなる傾向を示す. 川口町では 1200~1650[cm/s²]と非常に高い範囲に分布し、被害の生じ

表-2 分析対象全地域における被害のクロス集計

下段	被害率[km/km]														
全	地域	ローム台	火山地	千拓地・	丘陵・火	湖沼	砂丘	砂州・砂	砂礫質台	山地	谷底低地・	沖積平野	河原	磯・岩礁	液状化領
		면		地址地	山江工阪			(宋711	ALC: NO		周田人中也				坝
	0≦φ<300														
	$300 \leqq \phi < 600$														
CP															
	$600\!\leq\!\phi\!<\!1000$														
	$1000 \leq \phi$														
		5 850	2 925		0.566			0.013	2 475	0.415	3 081	1 131			3 663
	$0 \leq \phi \leq 300$	0.000	0.005		0.000			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			0.020
		0.000	0.002		0.000			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			0.005
	$300 \le \phi \le 600$								0.179			0.432			
DCIP									0.554		0.000	0.000			0.000
	$600 \le \phi < 1000$								0.263		0.008	0.000			0.008
									0.000		0.000	0.000			0.000
	1000≦ø										0.341	0.602			
											0.000	0.000			
	$0 \le m \le 300$		0.010	1.012	0.305					0.021	0.389	0.682			0.679
	0Ξψ< 300		0.000	0.000	0.000					0.000	0.000	0.000			0.000
	2005 - < 600			1.000	0.796				0.045		1.434	0.190			0.792
EDD1 (500≧φ<600			0.015	0.000				0.000		0.037	0.000			0.012
FRPM				4.545	3.074				0.085	0.079	1.851	0.342			2.872
	$600 \le \phi < 1000$			0.000	0.000				0.000	0.000	0.000	0.106			0.000
	$1000 \leq \varphi$														
		30.513	8.618	49.207	696.682			2.522	419.239	103.413	569.068	196.192		0.040	13.126
	$0 \leq \phi \leq 300$	0.372	0.965	1.561	2.921			0.000	8.001	1.107	15.806	8.273		0.000	2.449
		19.871	0.112 0.649	11.703	54.399			0.000	68.483	5.724	94.671	41.277		0.000	7.425
	$300 \le \! \phi \le \! 600$	0.085	0.000	0.711	0.108			0.000	0.308	0.134	7.465	5.768			0.164
HP		0.004 7.089	0.000	4.547	0.002			0.000	23.338	2.399	30.277	0.140			3.839
	$600\!\leq\!\phi\!<\!1000$	0.038	0.000	0.813	0.000			0.000	0.052	0.000	0.054	0.910			0.645
		0.005	0.000	0.179	0.000			0.000	0.002	0.000	0.002	0.050			0.168
	$1000 \leq \phi$	0.000							0.000		0.088	0.000			0.000
		0.000	0.160	4.570	1.040				0.000	1 210	0.024	0.000			0.000
	$0 \leq \phi \leq 300$	0.277	0.169	0.000	0.000				0.000	0.000	0.000	0.000			0.000
		0.377	0.000	0.000	0.000				0.000	0.000	0.000	0.000			0.000
	300≤o<600		0.296		0.031			0.073				0.058			0.049
PD			0.000		0.000			0.000				0.000			0.000
	600≤a≤1000			0.308						0.209	0.139				0.061
	000 = \$ \$ 1000			0.000						0.000	0.000				0.000
	1000 < -														
	1000≦φ														
				0.369	2.440			0.010	1.352	0.715	2.766	0.619			0.473
	$0 \ge \phi < 300$			0.000	0.000			0.000	0.000	0.000	0.058	0.000			0.000
		0.028		1.188	1.561			0.011	5.766	0.083	0.842	0.296			1.627
	300≦φ<600	0.000		0.000	0.000			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			0.000
SP		0.000		1.961	0.085			0.000	0.829	0.386	0.049	0.048			1.969
	$600 \leq \phi \leq 1000$			0.000	0.000				0.000	0.000	0.000	0.000			0.000
				0.000	0.000				0.000	0.000	0.000	0.000			0.000
	$1000 \leq \phi$								0.000		0.000				
				0.046					0.000	0.155	0.000	0.362			
	$0 \leq \phi \leq 300$			0.000					0.057	0.083	0.480	0.174			
				0.000	0.373				0.143	0.533	0.099	0.481			0.001
	$300 \leq \!$				0.000				0.000		0.000	0.000			0.000
TP					0.000			+	0.000		0.000	0.000			0.000
	$600 \! \leq \! \phi \! < \! 1000$														
	$1000 \leq \varphi$														
		115 - 11			40.171	0.15									405.51
	0≤ø< 300	118.918 1 847	85.244	49.830	496.712	0.123		3.055	368.019 28 549	6 553	469.631	351.037		0.502	183.815
	0Ξψ<500	0.016	0.020	0.061	0.006	0.000		0.055	0.078	0.085	0.074	0.056		0.000	0.120
	200 < c < 600	0.630	0.339	32.483	23.528			0.494	9.988	2.281	19.202	9.262			11.514
	500≧φ<600	0.000	0.000	0.289	0.103			0.000	0.153	0.000	0.107	0.083			0.795
vP/VU				0.001	0.488				0.076		1.725	0.624			0.003
	ouu≦φ<1000			0.000	0.000			1	0.000		0.000	0.000			0.000
								1	0.009		0.142				0.073
	1000≦φ							1	0.000		0.000				0.036
				5.836	0.413			0.153	0.000	0.288	1.889	2.289			0.500
	$0 \leq \phi \leq 300$			0.000	0.000			0.000	0.000	0.000	0.017	0.000			0.000
		0.005		0.000	0.000			0.000	0.000	0.000	0.009 2.272	0.000		+	0.000
	$300 \leqq \phi \le 600$	0.000			0.000			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			0.000
その他		0.000			0.000			0.000	0.000	0.000	0.000 2.979	0.000 2.114			0.000 0.094
	$600\!\leq\!\phi\!<\!1000$				0.000				0.000	0.000	0.000	0.000			0.000
		0.101			0.000				0.000	0.000	0.000	0.000			0.000
	$1000 \leq \phi$	0.000							0.000		0.000	0.000			0.000
		0.000	1	1				1	0.000		0.000	0.000	1	1	0.000





図-11 対象全地域のデータに対する補正係数

た範囲は1400~1450[cm/s²]および1600~1650[cm/s²]の範囲の みだった.被害率は0.208[km/km]および0.380[km/km]と高 い被害率を示す.柏崎市では550~800[cm/s²]の範囲に分布 しており,700~750[cm/s²]の範囲で0.290[km/km]と卓越し ている.栗原市では750~800[cm/s²]の範囲にのみ被害が生 じており,0.606[km/km]と非常に高い被害率を示す.神 戸市では650~1200[cm/s²]と広い範囲に分布しており,そ の中でも900~1100[cm/s²]の範囲で0.084~0.310[km/km]と相 対的に高い被害率を示しており,1000~1050[cm/s²]の範囲 で最も被害率が高い.

非液状化領域においては、熊本市では200~1200[cm/s²] と広い範囲に分布しており、いずれについても 0.002~0.06[km/km]と被害率は相対的に低くなっている. 益城町では550~1350[cm/s²]と広い範囲に分布しているが、 被害率は0.014~0.103[km/km]と相対的に低くなっている. 阿蘇市では250~650[cm/s²]と低い範囲に分布しており、被 害率も0.016~0.113[km/km]と相対的に低くなっている.小 千谷市では750~1450[cm/s²]と高い範囲に分布しており、

1200~1450[cm/s²]の範囲では被害率は低い傾向があるもの の,900~1200[cm/s²]の範囲で0.200~0.293[km/km]と高い被 害率を示す. 長岡市では150~900[cm/s²]と低い範囲に分布 をしており、600~900[cm/s²]の範囲で0.008~0.408[km/km]ま で上昇する.川口町においては800~1700[cm/s²]の非常に 高い範囲に分布しており、0.182~0.541[km/km]と被害率も 非常に高くなっている. 柏崎市では300~850[cm/s²]の範囲 に分布しており,特に600~700[cm/s²]の範囲で 0.239~0.249[km/km]と相対的に高い被害率を示す. 栗原市 では300~950[cm/s²]の範囲に分布し、700~750[cm/s²]および 800~850[cm/s²]での被害率が卓越しており、それぞれ 0.144[km/km], 0.091[km/km]となっている. 輪島市では, 400~1050[cm/s²]と広い範囲に分布しており、特に 650~850[cm/s²]の範囲で0.247~0.303[km/km]と卓越している. 神戸市では、250~1200[cm/s²]と広い範囲に分布しており、 800~1200[cm/s²]の範囲で0.004[km/km]から0.111[km/km]まで 被害率が漸増する.

(2) PGVの場合

液状化領域においては, 熊本市ではPGV=40~140[cm/s] の範囲でR=0.011~0.076[km/km]と相対的に低い被害率を示 す.益城町では100~130[cm/s²]の範囲で被害率が徐々に増 加し, 130~190[cm/s²]の範囲で0.4[km/km]付近と高い被害 率に収束する. 阿蘇市では50~120[cm/s]の範囲で 0.013~0.067[km/km]と相対的に低い被害率を示す. 小千谷 市では70~110[cm/s]および130~140[cm/s]の範囲で 0.574~0.265[km/km]と高い被害率を示す. 長岡市では 80~120[cm/s]の範囲では被害率が減少する傾向があるも のの, 30~80[cm/s]の範囲において0.004~0.589[km/km]まで 右上がりに被害率が増加する.川口町では100~140[cm/s] の範囲に分布しており,100~110[cm/s]および 130~140[cm/s]で被害率はそれぞれ0.115[km/km], 0.380[km/km]と卓越している.柏崎市では110~180[cm/s]の 範囲に分布しており,特に160~170[cm/s]の範囲で 0.379[km/km]と卓越している.また,120~130[cm/s]の範囲 で被害率が1.0[km/km]となっている.栗原市では 40~60[cm/s]の低い範囲に分布しているが,被害率は 50~60[cm/s]の範囲で0.606[km/km]と非常に卓越している. 神戸市では、80~120[cm/s]の範囲で0.02[km/km]以下である が,120~140[cm/s]の範囲で0.223[km/km]まで被害率が大き く増加する.

非液状化領域においては, 熊本市では10~130[cm/s]の 範囲で0.003~0.055[km/km]と相対的に低い被害率を示す. 益城町では50~200[cm/s]と広い範囲に分布しており, 0.014~0.017[km/km]と非常に小さい被害率となっているが, 110~120[cm/s]の範囲で0.096[km/km], 140~150[cm/s]の範囲 で0.195[km/km]と卓越している. 阿蘇市では40~110[cm/s] の範囲に分布しており、被害率は0.039~0.117[km/km]と相 対的に低くなっている.小千谷市では60~150[cm/s]と広 い範囲で0.090~0.274[km/km]と相対的に高い被害率を示す. 長岡市では 40~90[cm/s]の範囲で被害率が 0.030~0.353[km/km]まで右上がりに増加する. 川口町では 60~80[cm/s]の範囲で0.541~0.296[km/km]と被害率が卓越し ており、90~130[cm/s]の範囲でも0.193~0.271[km/km]と被害 率が高くなっている. 柏崎市では30~190[cm/s]と広い範 囲に分布しており、100~110[cm/s]の範囲で0.310[km/km], 150~180[cm/s]の範囲で0.125~0.233[km/km]と卓越している. 栗原市では20~70[cm/s]と相対的に低い範囲に分布してお り,被害率も0.007~0.104[k/km]と相対的に低くなってい る. 輪島市では70~120[cm/s]の範囲で0.042~0.335[km/km]ま で被害率が増加し, 170~190[cm/s]の範囲で 0.191~0.520[km/km]と卓越している. 神戸市では 30~160[cm/s]と広い範囲に分布しており、被害率は 0.002~0.078[km/km]と相対的に低くなっている.

(3) 計測震度 しの場合

液状化領域においては,熊本市では*LJ*=5.7~62の範囲に 分布しており,*R*=0.020~0.079[km/km]と相対的に低い被害 率を示している.益城町では6.1~6.5と高い範囲に分布し ており,6.2~6.5の範囲で被害率が0.216~0.299[km/km]と卓 越している.阿蘇市では5.5~6.0の範囲に分布しており, 0.018~0.048[km/km]と相対的に低い被害率を示す.小千谷 市では6.3~6.7と高い範囲に分布しており,被害率も 0.087~0.425[km/km]と高くなっている.長岡市では4.9~6.1 と広い分布となり,4.9~5.2の範囲で被害率が 0.442[km/km]まで増加し,5.3~5.8の範囲では 0.026-0.103[km/km]と相対的に低い被害率を示すものの, 5.9-6.1の範囲では0.196-0.374[km/km]と被害率が増加している. なお, 5.2の時に0.442[km/km]とUの値が低いが被害率が卓越している範囲があった. 川口町では6.3~6.5と高い範囲に分布しており,特に6.3のときに0.155[km/km] と卓越している. 柏崎市では6.3~6.4の狭い範囲で分布しており,被害率は0.133~0.150[km/km]であった. 栗原市では5.7および5.9に分布しており, 5.7のとき被害は生じていないが, 5.9のときに被害率は0.606[km/km]と卓越していた. 神戸市では6.0~6.4の高い範囲に分布しているが, 被害率は0.008~0.078[km/km]と相対的に低くなっている.

非液状化領域においては、熊本市では5.3~6.3と広い範 囲に分布しており、0.006~0.054[km/km]と相対的に低い被 害率を示す. 益城町では6.0~6.5と高い範囲に分布してお り, 0.020~0.085[km/km]まで漸増している. 阿蘇市では 5.5~5.9の範囲で0.050~0.120[km/km]と相対的に低い被害率 を示している.小千谷市では6.2~6.7の範囲に分布してお り, 0.101~0.246[km/km]と相対的に高い被害率になってい る.長岡市では4.9~6.2の広い範囲に分布しており, 5.4~6.1の範囲で0.022~0.407[km/km]まで増加している.川 口町では6.1~6.5と高い範囲に分布し、 0.070~0.367[km/km] と相対的に高い被害率を示している. 柏崎市では5.8~6.4 の範囲に分布しており、5.9に対する被害率が 0.071[km/km] と卓越しているが, 全体的に 0.071~0.138[km/km]まで増加している. 栗原市では5.5~6.1 の範囲に分布しており全体的に低い被害率を示すが, 5.9~6.0の範囲で0.103[km/km]および0.072[km/km]と卓越し ている.輪島市では5.2~5.9の範囲に分布しており、特に 5.4~5.9の範囲では0.143~0.520[km/km]と高い被害率を示す. 神戸市では5.2~6.0の範囲で0.02[km/km]以下であるが, 6.1~6.4の範囲で0.089[km/km]まで漸増する傾向がみられ る.

(4) S/値の場合

液状化領域では、熊本市ではSI=50~170[cm/s]の範囲で 分布しており、R=0.030~0.108[km/km]と相対的に低い被害 率となっている.益城町では110~250[cm/s]と高い範囲で 分布しており、190~200[cm/s]と210~220[cm/s]の範囲を除 く範囲において0.193~0.468[km/km]と被害率も高くなって いる.阿蘇市では60~130[cm/s]の範囲で分布しており、 0.016~0.110[km/km]と相対的に低い被害率を示す.小千谷 市では100~140[cm/s]の範囲で、0.291~0.509[km/km]と高い 被害率を示している.長岡市では被害率が低い範囲があ るものの、20~120[cm/s]の範囲で0.206~0.852[km/km]まで増 加している.川口町においては100~110[cm/s]および 130~150[cm/s]の範囲で、0.183~0.375[km/km]と高い被害率 を示していた.柏崎市においては、70~100[cm/s]の範囲 に被害は生じなかったものの, 100~110[cm/s]の範囲で 0.256[km/km], 120~130[cm/s]の範囲で0.182[km/km]と卓越 していた.

非液状化領域においては,熊本市では30~170[cm/s]の 広い範囲に分布しており,0.003~0.054[km/km]と相対的に 低い被害率であった.益城町では80~210[cm/s]および 240~250[cm/s]と非常に高い範囲に分布しているが,被害 率はいずれも0.002~0.124[km/km]と相対的に低い値となっ ている.阿蘇市では40~120[cm/s]と相対的に低い範囲に 分布しており,0.034~0.130[cm/s]と相対的に低い被害率と なった.小千谷市では90~140[cm/s]の範囲で 0.082~0.411[km/km]まで増加し,140~160[cm/s]の範囲で減 少するものの,160~190[cm/s]の範囲で0.080~0.472[km/km] まで増加している.長岡市では60~130[cm/s]の範囲で 0.025~0.694[km/km]まで急激に増加している.川口町では 100~180[cm/s]の範囲で0.149~0.207[km/km]と横ばいの高い 被害率を示す.

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

$$R_m^*(x) = C_p C_d C_a R^*(x) \tag{1}$$

ここで、 $R_m^*(x)$ は組み合わせ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 係数を示す.また、 R^* 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 80 の 手法と同様に、式(2)を基に対数場での数量化 I 類を適 用する.式(2)より得られる $R_m^*(x)$ と、管種、口径および

る被害予測式を以下のように定める.

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.

$$f(R_m) = \sum_{m=1}^{N} (\ln R_m - \ln R_m^*)^2 \cdot L_m$$
 (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≦Φ<300mm、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.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.なお図-10に関しては、各地域において基 準とする管種、口径、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[km/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 害率が高くなっ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ったが,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-12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-13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=150~300[cm/s]の範囲では長岡市の被害率に支配さ れている.また、長岡市においてこの範囲で相対的に高 い被害率を示しているが、これは長岡市で山地、谷底低 地・扇状地での被害率が高かったことが原因である.全 地域において300~500[cm/s2]の範囲で被害率が相対的に低 くなっているが、これは阿蘇市と長岡市での被害率が低 いことが影響している. その後500~550[cm/s²]の範囲では 長岡市の被害が卓越しており、阿蘇市でも一定以上の被 害率を示すため、全地域において被害率が高くなってい る.一方で、550~750[cm/s²]の範囲では敷設延長が卓越し ている熊本市および阿蘇市での被害率が相対的に低いた め、益城町と長岡市で相対的に被害率が高いものの、全 地域において相対的に低い被害率を示している. その後, 750~850[cm/s²]の範囲では益城町,長岡市,栗原市での被 害率が高いことに加え、益城町において熊本市よりも敷 設延長が長いことから相対的に被害率が高い. 850~1000[cm/s²]の範囲では神戸市で被害率が漸増してお り、小千谷市で被害率が卓越しているものの、神戸市の ほうが敷設延長が卓越しているため全地域においても被 害率が漸増する傾向を示す. 1000~1200[cm/s²]の範囲では 小千谷市での被害率が卓越しており、神戸市より敷設延 長が長いため神戸市の被害率に支配されている. その後 1250~1350[cm/s²]の範囲では小千谷市, 1350~1400[cm/s²]の

範囲では小千谷市と川口町, 1400~1450[cm/s²]および 1600~1650[cm/s²]の範囲では川口町でのみ被害が生じていた.

PGVとの関係を見ると、PGV=20~40[cm/s]の範囲では長 岡市の被害率に支配されている. 40~70[cm/s]の範囲では 熊本市での敷設延長が卓越し阿蘇市で相対的に低い被害 率を示すため、長岡市や栗原市で被害率が卓越している ものの、全地域においては0.1[km/km]弱の相対的に低い 被害率を示す. 70~80[cm/s]の範囲では長岡市に加えて小 千谷市でも被害率が卓越しており、熊本市でも相対的に 高い被害率を示すため、全地域において相対的に高い被 害率を示す. 80~100[cm/s]の範囲では熊本市での敷設延 長が卓越しており、阿蘇市で相対的に低い被害率を示す ため,長岡市や小千谷市で被害率が卓越しているものの, 全地域においては熊本市と阿蘇市に支配された 0.113~0.125[km/km]の被害率を示す. 100~130[cm/s]の範囲 では益城町および川口町で被害率も卓越しているが、熊 本市、阿蘇市、神戸市において被害率が 0.012~0.135[km/km]となり、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は 0.092~0.143[km/km]となっている. 130~140[cm/s]の範囲で は益城町と小千谷市での敷設延長が熊本市と神戸市より も長く、被害率が卓越しているため、全地域において 0.316[km/km]と高い被害率を示す. 140~160[cm/s]の範囲で は神戸市よりも益城町と小千谷市での敷設延長が長いた め、全地域において相対的に高い被害率を示す.また、 150~190[cm/s]の範囲では益城町での被害率に支配されて いる.

IJとの関係を見ると、IJ=4.9~5.4の範囲では長岡市での 被害率に支配されている. 5.5~5.6の範囲では阿蘇市で被 害が生じ始めており,長岡市,阿蘇市ともに被害率が相 対的に低いため、全地域においても被害率が相対的に低 い. 5.7~5.9の範囲では熊本市で被害が生じ始めており、 5.9のときに栗原市と長岡市において被害率が卓越して いるものの、熊本市と比べると敷設延長が非常に短いう えに阿蘇市での被害率が相対的に低いため、5.7~5.9の範 囲で全地域における被害率は0.028~0.086[km/km]となって いる.また、6.0~6.2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、全地域における被害率も熊本市 と神戸市に支配されている. 6.3~6.4の範囲では益城町, 6.4~6.5の範囲では小千谷市での敷設延長が長く、川口町 でも高い被害率を示すため、被害率が高くなっている. なお、6.6~6.7の範囲では小千谷市での被害に支配され、 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=300~450[cm/s²]の範囲では阿蘇市において被害が生

じているものの、長岡市での敷設延長が支配的であり、 栗原市でも被害が生じていないため全地域において相対 的に低い被害率を示す. 450~500[cm/s²]の範囲では長岡市 において敷設延長が卓越しており、相対的に高い被害率 を示すため全地域において相対的に高い被害率を示す. 500~750[cm/s²]の範囲では全地域において相対的に低い被 害率で横ばいとなっている. これは500~600[cm/s²]の範囲 では熊本市や阿蘇市において被害率が卓越しているもの の、長岡市での敷設延長が最も長く被害率が相対的に低 いため全地域において0.05[km/km]程度の相対的に低い被 害率を示す. また600~750[cm/s²]の範囲では長岡市や輪島 市において卓越した被害率を示すものの、熊本市での敷 設延長が卓越しており、栗原市における被害率も相対的 に低いため、全地域において相対的に低い被害率を示す. 750~850[cm/s²]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 率を示すことに加え、地域ごとの敷設延長に大差がない ため、全地域において被害率が高くなっている. 850~1050[cm/s²]の範囲では全地域において相対的に低い 被害率を示す. これは輪島市で被害率が高いものの, 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 が影響している. 1050~1150[cm/s²]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いことに併せて、敷 設延長が支配的である神戸市での被害率が 1100~1150[cm/s²]の範囲で特に卓越していることから,全 地域においても被害率が卓越している. 1150~1200[cm/s²] の範囲では川口町における被害率が卓越していて敷設延 長が比較的長いため、全地域における被害率も高くなっ ている. その後1200~1400[cm/s²]の範囲では川口町におい て被害率が高い場合があるものの、川口町よりも小千谷 市での敷設延長が長いため、小千谷市の被害率が支配的 である. 1400~1450[cm/s²]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、全地域においては相対的に高い被害 率となっている. 1400~1700[cm/s²]の範囲では川口町での 被害が支配している.

PGVとの関係を見ると、PGV=10-90[cm/s]の範囲では全地域において被害率が漸増している.これは長岡市での被害率が漸増する傾向を示すことに加え、20-70[cm/s]の範囲では栗原市、60-90[cm/s]の範囲では熊本市で被害率が漸増していることが影響している.一方で、90-140[cm/s]の範囲では全地域において0.05[km/km]程度の相対的に低い被害率を示す.これは輪島市、川口町、小千谷市で被害率が高い傾向を示し阿蘇市でも相対的に高い被害率を示すものの、熊本市および110-140[cm/s]の範囲では神戸市において被害率が小さく、いずれも敷設延長が長いためである.140-150[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いこ

とに併せて、神戸市での敷設延長が長いため全地域において被害率が増加している。一方で150~160[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、地域ごとの敷設延長に大差がなく、益城町と小千谷市において被害が生じていないため、全地域において相対的に低い被害率を示す。160~170[cm/s]の範囲では益城町、170~190[cm/s]の範囲では輪島市にのみ敷設されているためこれらのデータに支配されている。

Uとの関係を見ると、U=5.4~5.8の範囲では長岡市と栗 原市での被害率が相対的に低い被害率を示し、長岡市に おいて敷設延長が長く、次いで栗原市での敷設延長が長 いため、輪島市で卓越して被害率を示すものの全地域に おいて相対的に低い被害率を示す.5.9~62の範囲では長 岡市での被害率が高いが、栗原市で相対的に低い被害率 を示すことに加え、熊本市での敷設延長が長岡市より長 いため熊本市の被害率が支配的である.6.2~6.3の範囲で は益城町や川口町での被害率が卓越しているものの、神 戸市で敷設延長が長く被害率が相対的に低いため、全地 域において神戸市の被害率に支配されている.6.4~6.5の 範囲では、敷設されている地域が川口町、小千谷市、神 戸市のみでいずれも被害率が高いため、全地域において 被害率が高くなっている.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=350~400[cm/s²]の範囲では阿蘇市での被害率が 1.0[km/km]となっている. 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存在して いたためである. 550~700[cm/s²]の範囲では熊本市,神戸 市において敷設延長が確認され、熊本市での敷設延長が 卓越しているため、全地域における被害率も熊本市に支 配されている. 700~750[cm/s²]の範囲では益城町の被害率 が卓越しているものの,神戸市では被害が生じておらず, 熊本市では敷設延長が卓越して相対的に低い被害率を示 すため、全地域において熊本市の被害率が支配的である. 750~900[cm/s²]の範囲では益城町での被害率が卓越し, 750~850[cm/s²]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も高い被害率を示す.また, 850~900[cm/s²]の範囲では益城町と神戸市において同程度 の敷設延長であり相対的に高い被害率を示すため、全地 域においても0.288[km/km]と高い被害率を示す. 900~1200[cm/s²]の範囲では神戸市でのみ敷設が確認され, 1250~1300[cm/s²]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=40~60[cm/s]の範囲では、



(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-12 VP/VU管, 口径300mm未満の管路における被害延長L₆ 敷設延長Lおよび被害率Rと地震動強さの関係



(a) 液状化領域における被害率Rと地震動強さの関係

5.8 IJ

5.9

6.1

6.4

6.3

6.6

5.7

5.4

5







(b) 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 HP管、口径300mm未満の管路における被害延長Ld、敷設延長Lおよび被害率Rと地震動強さの関係

熊本市において敷設のみ確認されて被害は生じていない. 60~70[cm/s]の範囲では熊本市において敷設のみ確認され て被害が生じていないものの、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0.1[km/km] 程度の被害率を示す. 70~110[cm/s]の範囲では熊本市と 神戸市において被害が生じており、いずれも相対的に低 い被害率を示すものの, 90~100[cm/s]の範囲では熊本市 での被害率が卓越している. ゆえに全地域において相対 的に低い被害率を示すが90~100[cm/s]の範囲では卓越し た被害率を示す. 110~140[cm/s]の範囲では熊本市と小千 谷市において被害が生じていないが、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、全地域においても被害率が増 加している. 140~160[cm/s]の範囲では神戸市にのみ敷設 延長が確認されたが,被害は生じていない. 160~190[cm/s]の範囲では益城町での被害が支配的であり, 170~180[cm/s]の範囲で被害が生じていないものの, 160~170[cm/s], 180~190[cm/s]の範囲では被害率は卓越して いる.

IJとの関係を見ると、阿蘇市において先述のPGAの 350-400[cm/s²], PGVの60-70[cm/s]の範囲と同様に、IJ=5.6 のときに被害率が1.0[km/km]となっている.5.7および 5.9-6.1の範囲では熊本市および神戸市での敷設延長が卓 越しており、いずれも低い被害率を示すため、全地域に おいて被害率が低くなっている.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0.4[km/km]程度の高い被害率を示す. 6.3-6.5の範囲では神戸市よりも益城町での敷設延長が卓 越しているため、全地域において高い被害率を示す. 6.7のときには小千谷市において敷設のみ確認されたが 被害は生じていない.

非液状化領域においては、PGAとの関係を見ると、 250~750[cm/s²]の範囲において阿蘇市や輪島市で相対的に 高い被害率を示す場合があるものの、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、全地域において低い被害率で横ばいとなっ ている.750~1200[cm/s²]の範囲では益城町や輪島市、小 千谷市で高い被害率を示すものの、神戸市での敷設延長 が卓越しており、0.118[km/km]まで漸増しているため、 全地域においても漸増している.その後は、 1200~1250[cm/s²]の範囲では益城町、1250~1300[cm/s²]の範 囲では益城町と小千谷市、1300~1350[cm/s²]の範囲では小 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、神戸市において30~160[cm/s]と 広い範囲に分布している.この範囲で神戸市での敷設延 長が卓越しており、次いで熊本市において敷設延長が長 くなっているため、相対的に低い被害率を示し漸増して いる.また,阿蘇市では60~70[cm/s],90~110[cm/s]の範囲 で被害率が卓越している.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て, 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100~120[cm/s] の範囲に敷設が確認され,110~120[cm/s]の範囲に被害が 生じていた.小千谷市では110~150[cm/s]の範囲に敷設が 確認され,120~130[cm/s]の範囲で被害率が卓越している.

Uとの関係を見ると、神戸市においてU=5.2~64の広い 範囲に分布している.この範囲で神戸市の敷設延長が非 常に卓越していて、次いで熊本市において敷設延長が長 くなっているため、5.2~64の範囲で全地域において 0.066[km/km]まで漸増している.また、阿蘇市において 5.6,5.8のときに被害が卓越している.輪島市においては 5.4,5.7~5.9の範囲に敷設が確認され、5.8のときにのみ被 害が生じていた.川口町においては6.1~6.2,6.4~6.5の範囲 に敷設が確認されたが被害は生じていない.益城町にお いては6.4~6.5の範囲で相対的に高い被害率を示す.小千 谷市では6.5~6.6の範囲に敷設が確認され、6.6のときに非 常に高い被害率を示す.

(3) 被害率曲線の構築

図-12および図-13に示す標準被害率データに対して被 害率曲線の構築を行った. 地震動強さxにおけるモデル を式(3)のように表す.

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

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.

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

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

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[cm/s²]刻み,*PGV* は10[cm/s]刻み,*IJ*は0.1刻みとし,区間幅ごとに被害率



図-14 VP/VU管, 口径300[mm]未満の管路の被害率曲線



図-15 HP管, 口径300[mm]未満の管路の被害率曲線

表-3 図-14の被害率曲線のパラメータ

		С	λ	ζ	μ	σ	$f(R_m)$	適用範囲	
PGA	非液状領域	0.249	7.090	0.754	1594.408	1395.125	- 2 665	1501 (²) CDC1 (17001 (²)	
	変動幅	$0.00 {\leq} C {\leq} 1.00$	$5.01 \leq \lambda \leq 7.44$	$0.01 \leq \zeta \leq 0.85$	$150.0 \leq \mu \leq 1700.0$	$16.15 \le \sigma \le 916.15$	- 2.885		
	液状化領域	0.208	6.597 0.012 732.946 8.796		8.796	2 1 4 7	$150[\text{cm/s}] \ge PGA \ge 1/00[\text{cm/s}]$		
	変動幅	$0.00 \! \leq \! C \! \leq \! 1.00$	$5.01 \leq \lambda \leq 7.44$	$0.003 \leq \zeta \leq 1.424$	$150.0 \leq \mu \leq 1700.0$	$20.85 {\leq} \sigma {\leq} 870.85$	- 2.147		
	非液状領域	0.085	3.805	0.295	46.923	14.149	- 2 642		
PGV	変動幅	$0.00 \! \leq \! C \! \leq \! 1.00$	$2.30 \leq \lambda \leq 5.30$	$3.4 \times 10^{-5} \le \zeta \le 3.39$	$10.0{\leqq}\mu{\leqq}200.0$	$3.55 \leq \sigma \leq 106.45$	2.042	$10[cm/s] \leq PGV \leq 200[cm/s]$	
	液状化領域	0.130	4.000	0.179	55.480	10.011	2 805		
	変動幅	$0.00 \! \leq \! C \! \leq \! 1.00$	$2.30 \leq \lambda \leq 5.30$	$5.0 \times 10^{-5} \le \zeta \le 1.763$	$10.0{\leqq}\mu{\leqq}200.0$	$4.32 {\leqq} \sigma {\leqq} 84.32$	- 2.893		
	非液状領域	0.093	-	-	5.508	0.724	- 2 027	$4.9 \leq IJ \leq 6.7$	
IJ	変動幅	$0.00 \! \leq \! C \! \leq \! 1.00$	-	-	$4.9 \le \mu \le 6.7$	$0.02 \leq \sigma \leq 0.72$	2.937		
	液状化領域	0.295	-	-	6.217	0.090	1.066		
	変動幅	$0.00 {\leq} C {\leq} 1.00$	-	-	$4.9 \leq \mu \leq 6.7$	$0.002 \leq \sigma \leq 1.20$	- 1.000		

表-4 図-15の被害率曲線のパラメータ

		С	λ	ζ	μ	σ	$f(R_m)$	適用範囲	
PGA	非液状化領域	0.120	7.134	0.535	1446.804	832.877	0 602		
	変動幅	$0.00 {\leq} C {\leq} 1.00$	$5.01 \leq \lambda \leq 7.44$	$0.01 \leq \zeta \leq 0.91$	$150.0{\leqq}\mu{\leqq}1700.0$	$18.83 \leq \sigma \leq 918.83$	0.093	$150[\text{cm/s}^2] \le PGA \le 1700[\text{cm/s}^2]$	
	液状化領域	0.470	6.616	0.030	0.030 747.288 22	22.424	0.454		
	変動幅	$0.00 {\leq} C {\leq} 1.00$	$5.01 \leq \lambda \leq 7.44$	$0.03 \leq \zeta \leq 0.69$	$150.0 \le \mu \le 1700.0$	$19.98 \leq \sigma \leq 519.98$	- 0.434		
	非液状化領域	0.158	5.298	0.651	247.127	179.530	- 0.442		
PGV	変動幅	$0.00 \! \leq \! C \! \leq \! 1.00$	$2.30 \leq \lambda \leq 5.30$	$0.003 \leq \zeta \leq 0.89$	$10.0{\leqq}\mu{\leqq}200.0$	$3.99 \leq \sigma \leq 96.01$	0.442	$10[cm/s] \leq PGV \leq 200[cm/s]$	
	液状化領域	0.563	4.772	0.075	118.488	8.899	0.222		
	変動幅	$0.00 \! \leq \! C \! \leq \! 1.00$	$2.30 \leq \lambda \leq 5.30$	$0.030 \leq \zeta \leq 0.78$	$10.0{\leqq}\mu{\leqq}200.0$	$2.25 \leq \sigma \leq 82.25$	- 0.332		
	非液状化領域	0.078	-	-	6.242	0.319	- 0 202	40<11<67	
IJ	変動幅	$0.00 \! \leq \! C \! \leq \! 1.00$	-	-	$4.9 \le \mu \le 6.7$	$0.04 \leq \sigma \leq 0.76$	0.392		
	液状化領域	0.492	-	-	6.170	0.041	0 187	4.9 <i>≧1</i> J <i>≧</i> 0.7	
	変動幅	$0.00 \le C \le 1.00$	-	-	$4.9 \le \mu \le 6.7$	$0.04 \leq \sigma \leq 0.56$	- 0.18/		

を算定する. C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、 $0.00 \le C \le 1.00$ 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. 構築した被害率 曲線を図-14および図-15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. なお、図-15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.

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⁶⁸⁾ 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, PGA, PGV,計測震度IJのそれぞれに 対して考察を行なうものとする.

図-14よりPGA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、7.(1)で述べたよ うに実被害率データは全体的に右上がりの傾向を示して おり、被害率曲線は、PGA=163[cm/s²]となると R=0.001[km/km]の被害率を示し始め、1700[cm/s²]まで緩や かに増加する挙動を示す.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 液状化領域と比べて被害率は全体的に高くなっている. 被害率曲線は710[cm/s²]となると0.001[km/km]の被害率を 示し始め、760[cm/s²]まで急激に増加する.その後 760[cm/s²]以上の範囲で0.208[km/km]に収束する.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[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[cm/s]となる とR=0.001[km/km]の被害率を示し始め、100[cm/s]付近ま で増加する傾向を示し、その後0.085[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[cm/s]となると 0.001[km/km]の被害率を示し始め、その後0.132[km/km]に 収束する. U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 1J=5.5~6.7の範囲でR=0~0.611[km/km]の間に被害が生じて いる. 被害率曲線は, 5.0となると0.001[km/km]の被害率 を示し始め、5.0~6.0の間で緩やかに増加する挙動を示す. その後6.0以上の範囲で0.071[km/km]に収束する. 液状化 領域においては、5.4以上の範囲で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IJ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. 被害率曲線を見ると, 6.0となると0.002[km/km] の被害率を示し始め、11=6.0~6.5の範囲で増加する. その 後6.5以上の範囲で0.295[km/km]に収束する.

図-15よりPGA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PGA=250~1650[cm/s²]の範囲で R=0~0.054の間に被害が生じている. また, 350~1200[cm/s²]の範囲で0.118~0.368の間に複数の被害が生 じている. 被害率曲線は, 349[cm/s²]となると 0.001[km/km]の被害率を示し始め、1700[cm/s²]まで緩やか に増加する. 液状化領域においては、実被害率データは、 非液状化領域に比べて被害箇所が少なく、その中でも被 害が比較的高い点が多く見られる.被害率曲線は, 687[cm/s²]となると0.001[km/km]の被害率を示し始め, 850[cm/s²]まで急激に増加し、その後0.438[km/km]に収束 する. 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[cm/s]となるとR=0.001[km/km]の被害率を示し始 め, 200[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[cm/s]となると0.001[km/km]の被

害率を示し始め、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. *IJ*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すが、相対的に低い被害率を示す 点が多く見られる.被害率曲線は、*IJ*=5.5となると *R*=0.0008[km/km]の被害率を示し始め、7.0まで緩やかに増 加する.液状化領域においては、実被害率データは、非 液状化領域に比べてデータ数が少ないものの、*IJ*の値が 高い範囲において被害が生じている.被害率曲線を見る と、6.0のときに0.880×10⁶[km/km]であるが6.1のときには 0.022[km/km]と急激に被害が生じ始める.その後6.3まで 急激に増加し、6.3以上の範囲で0.492[km/km]に収束する.

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IJおよびSJ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 に被害率が高かった管種には偏在が見られた. 液状化領 域では栗原市,小千谷市,益城町,川口町のVP/VU管の 被害率が高く、益城町においてFRPM管の被害率が 1.0[km/km]であった. 非液状化領域では, 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管が高い被害率を示した.以上の傾向を 数量化理論I類に基づいて分析した結果,一般にVP/VU 管はHP管より被害が大きくなる可能性が高い. また小 千谷市では被害率が高かったものの、一般にDCIP管は 極めて被害が生じにくく耐震的であるといえる. 同様に 益城町では被害率が高かったものの,一般にFRPM管は 相対的に被害が低くなる可能性が高い.SP管, PP管, TP管は特定の地域にのみ敷設されていたが、SP管につ いては低い被害率を示す傾向があり,一方で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.例えば液状化領域 では栗原市,小千谷市,益城町で被害率が極めて高かっ た.非液状化領域では川口町,小千谷市,輪島市で高い 被害率を示した.一方で熊本市,神戸市,栗原市,益城 町では相対的に低い被害率であった.300mm以上600mm 未満の比較的大きい管路では,益城町の液状化領域およ び輪島市の非液状化領域で極めて高い被害率を示した. 以上より数量化理論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って相違が見ら れた.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・扇状地の被害率が相対的に高い. 非液状化領域では輪島市の丘陵・火山性丘陵の被害率が 相対的に高い.敷設延長を考慮したうえで数量化理論I 類に基づいて分析すると、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、一般に下水道埋設管路への被害が 甚大となる可能性が高い.

(2) 地震動強さと被害率の関係

次に管種, 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. PGAに関しては500[cm/s²]以下, 500~1000[cm/s²], 1000~1500[cm/s²], 1500[cm/s²]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IJ, 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[cm/s]以下, 5.4以下, 50[cm/s]以下, 中程度以上の相対的に高い地震動強さの 領域を50~100[cm/s], 5.5~5.9, 50~100[cm/s], 高い地震動強 さの領域を100~150[cm/s], 6.0~6.4, 100~150[cm/s], それ以 上の地震動強さの領域を150[cm/s]以上, 6.5以上, 150[cm/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. その結果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、ある特定の地域の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 ある特定の地域の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.

(3) 標準被害率の特徴と被害率直線の構築

地震動強さと被害率の関係についての分析を管種、ロ 径,微地形区分の観点から区別し,更に詳細な分析を 行った.具体的には、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 を精査して標準被害率と定義した. その上で標準被害率 データに基づき被害率曲線をモデル化した. それらの データの全体的な傾向としては、先述の(2)と同様に地 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. PGVを地震動強さの指標とした場合の被害率曲線は,非 液状化領域ではPGV=24[cm/s]となるとR=0.001[km/km]の 被害率を示し始め、その値は100[cm/s]付近まで増加し、 その後R=0.085[km/km]に収束する傾向を示す.また,液 状化領域ではPGV=36[cm/s]となるとR=0.001[km/km]の被 害率を示し始め、その値は80[cm/s]付近まで増加し、そ の後R=0.132[km/km]に収束する傾向を示す.

さらに、VP/VU管に次いで広く用いられているHP管の被害データについても、口径300mm未満に絞り、非液状化領域と液状化領域の2区分のみとして被害率データを精査した。その結果上記の傾向と同様に、被害データはいずれの場合も右上がりの傾向を示す。液状化領域では地震動強さが低い場合も被害率が高く、全体的に被害率が高い傾向を示した。PGVに関してその特徴を示すと、非液状化領域ではPGV=40[cm/s]になるとR=0.001[km/km]の被害率を示し始め、その値は200[cm/s]まで漸増する。液状化領域ではPGV=95[cm/s]になるとR=0.001[km/km]の被害率を示し始め、その値は150[cm/s]まで増加して0.563[km/km]に収束する。

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

- 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).

- 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,国土交通省, http://www.mlit.go.jp/common/000026846.pdf (2017年4月9日参照).
- 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.
- E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 巻), ppI_921-I_946, 2014.

- 9) J-SHIS Historical Liquefaction Map : http://www.jshis.bosai.go.jp/labs/liqmap/ (2017年12月21日参照).
- 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巻,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).
- 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
 巻,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, 20179.
- 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) 2014 下水道資機材_管渠関連施施工法.indd: http://www.suidou.co.jp/library/dictionary-sewer/PDFs/p002.pdf(2017年12月16日 参照).

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

Gaku SHOJI, Daichi HATAKEYAMA 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 Chuetsuoki 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 Φ <300 mm, and nonliquefaction.