

2018年北海道胆振東部地震において被災した 下水道埋設管路の被害の傾向

皆川 大雅¹・庄司 学²

¹学生会員 筑波大学 理工学群工学システム学類 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: s1611194@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

2018年北海道胆振東部地震における北海道厚真町、安平町およびむかわ町の下水道埋設管路の被害について、管種、口径および微地形区分の観点から被害率の特徴を明らかにし、地震動強さの空間分布との関係を分析した。また、属性ごとの被害率間の関係性を数量化 I 類による多変量解析から明らかにした。その上で、既往研究での地震被害データに本研究で得られたデータを含めて、被害率曲線を再構築し、整合性を検討した。

Key Words: sewer buried pipeline, seismic damage rate, seismic intensity, the 2018 Hokkaido Iburi Tobu earthquake

1. はじめに

2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震では、下水道システムにおいて甚大な被害が生じ、具体的には、処理施設2箇所、マンホール約280箇所に被害が発生した¹⁾。それらの要因としては、内陸地殻内地震特有の極めて大きな地震動が作用したことやそれに起因する液状化現象が挙げられる。発生した被害のデータを統計的に集計・分析し、下水道埋設管路の被害予測式を構築することは、将来の発生が予測されている首都直下地震や東南海・南海等の巨大プレート間地震などの大規模地震に対して、被害想定とその事前対策の立案の観点から極めて重要である。

既往の研究としては、例えば、磯山ら²⁾は1995年兵庫県南部地震における芦屋市と西宮市の配水管の被害データに基づき、補正係数の算出と標準被害率曲線の構築を試みている。畠山ら³⁾は、2016年熊本地震を含めた1995年兵庫県南部地震、2004年新潟中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震の6つの地震で被災した下水道埋設管路に対して、液状化および非液状化領域ごとに管種、口径および微地形区分に分類して、標準被害率曲線の構築を試みている。

本研究では、北海道胆振東部地震において、下水道埋

設管路の被害が顕著であった北海道厚真町、安平町およびむかわ町を取り上げ、被害の傾向を分析した。さらに、文献3)により明らかにされた6つの地震での被害と比較を行い、これら全てのデータを使用し、地震被害率曲線を再構築した。その上で、既往研究により提示されている下水道埋設管路の地震被害率曲線との整合性の検討を行った。

2. 分析対象データおよび分析方法

(1) 分析対象データ

本研究における北海道胆振東部地震での被害の分析対象領域は、厚真町、安平町およびむかわ町とした。下水道埋設管路に関するデータは、北海道庁により提供された災害査定時のものをを用いた。ここでは、管体や人孔の破損箇所もしくはそれらによる滞水が生じた管路を被害管路と定義し、この被害管路の延長を被害延長 L_d とした。図-1に北海道3地域の分析対象領域における敷設延長 L 、被害延長 L_d および微地形区分を示す。微地形区分に関しては、J-SHIS⁴⁾による250mメッシュ単位のデータを用いた。なお、この3地域においては管種、口径および勾配が全て明らかとなっているデータを分析対象とし

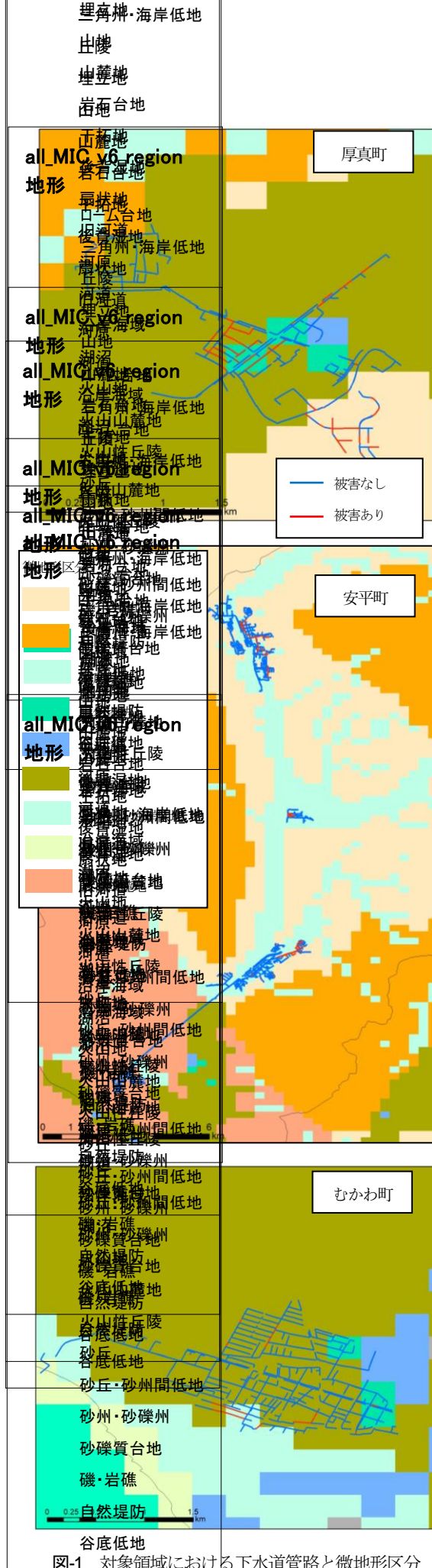


図-1 対象領域における下水道管路と微地形区分

た．各対象地域における総敷設延長は，厚真町が 17.91km，安平町が 68.18km，むかわ町が 29.61km である．総被害延長は，厚真町が 3.54km，安平町が 6.78km，むかわ町が 1.55km となっている．また，被害率 R は被害延長 L_d を敷設延長 L で除したものととして，次式のように定義した．

$$R = \frac{L_d}{L} \quad (1)$$

北海道胆振東部地震において分析を行った 3 地域は液化化領域の判別を行っていないため，既往の地震被害と比較する際には非液化化領域に位置すると仮定した．また，比較を行った既往研究の分析対象データは，熊本地震においては熊本市，益城町および阿蘇市，兵庫県南部地震においては神戸市，新潟中越地震においては小千谷市，長岡市および川口町，能登半島地震においては輪島市，新潟中越沖地震においては柏崎市，岩手・宮城内陸地震においては栗原市とした．

(2) 地震動強さの空間分布

地震動強さの指標としては，Jeon and O'Rourke⁹⁾により埋設管の被害と相関が明らかになっている地表面最大速度 PGV を適用した．加えて，被害想定などで広く用いられている地表面最大加速度 PGA および計測震度 J も適用した．北海道胆振東部地震での地震動分布は地震動マップ即時推定システム QuiQuake が提供している QuakeMap⁹⁾を使用した．

3. 管路の属性の観点から見た被害傾向

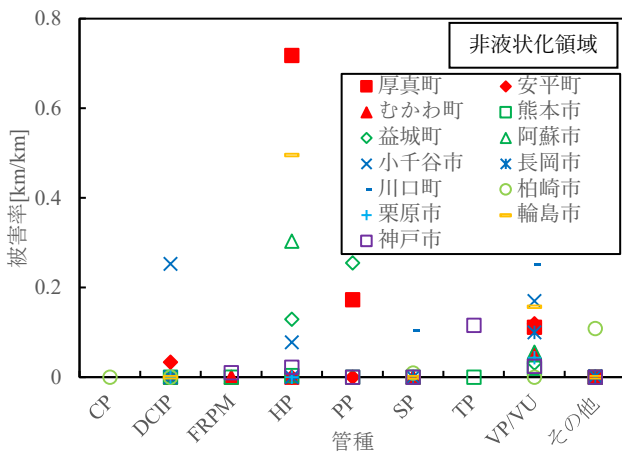
管種，口径および微地形区分については文献 3)の知見を参考として表-1に示すようなグループ分けを行った．

表-1において赤字で示された箇所は北海道胆振東部地震での分析対象の属性である．図-2に分析対象とする領域の被害率を属性ごとに算定した結果を示す．

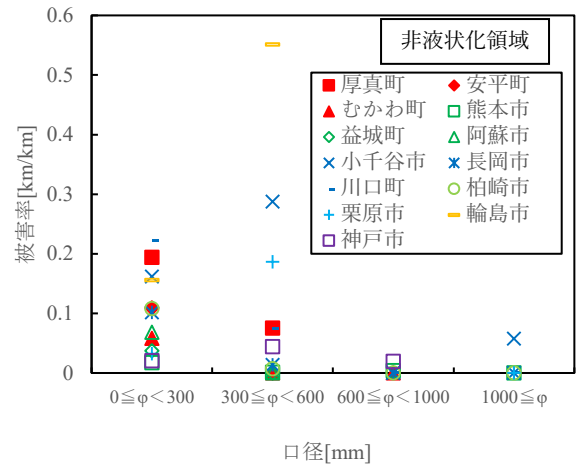
厚真町において，HP 管の被害率が 0.72[km/km]，ローム台地の被害率が 0.49[km/km]と卓越して高い値を示した．口径については，口径 300mm 未満で 0.20[km/km]，口径 300mm 以上 600mm 未満で 0.075[km/km]となり，典型的な被害の傾向を示した．次いで，管種では PP 管で 0.17[km/km]，VP/VU 管で 0.11[km/km]，微地形区分では沖積平野で 0.15[km/km]となっており，比較的高い値を示している．安平町において，被害率が VP/VU 管で 0.12[km/km]，口径 300mm 未満で 0.11[km/km]，ローム台地で 0.10[km/km]および谷底低地・扇状地で 0.15[km/km]となっており，他地域と比較しても高い値を示す．また，ロ

表-1 管種、口径および微地形のグループ分け(赤字は北海道胆振東部地震での分析対象区分)

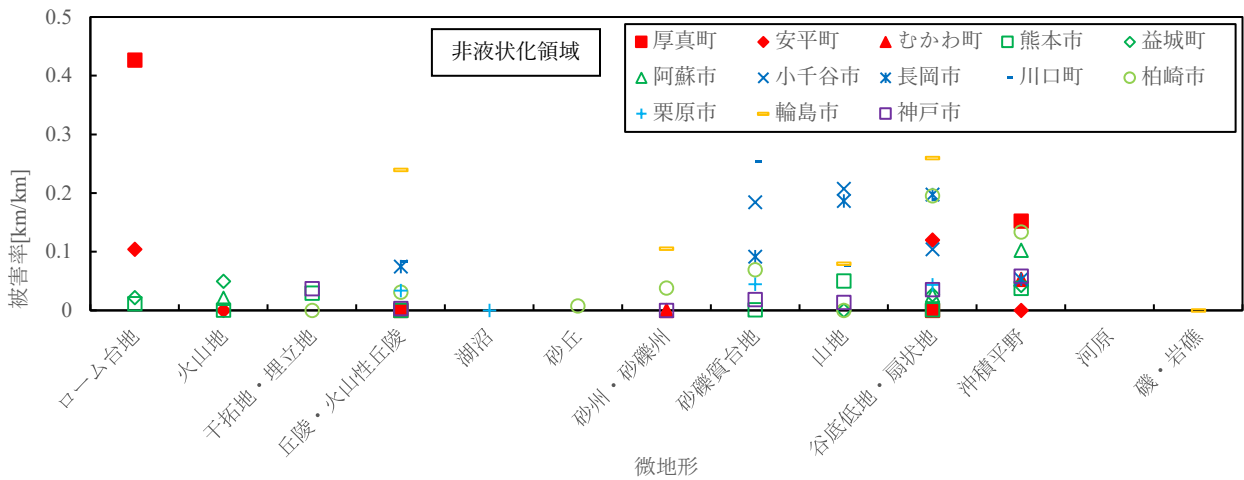
(a) 管種			(b) 口径			(c) 微地形区分		
分類	略称	管種	分類	口径[mm]		分類	微地形区分	
無筋コンクリート管	CP	無筋コンクリート		30	40	ローム台地	ローム台地	
铸铁管	DCIP	普通铸铁管	0 ≤ φ < 300	75	80	火山地	火山地	
		高級铸铁管		105	125	火山山麓地	火山山麓地	
		ダクタイル铸铁管		200	216	干拓地・埋立地	干拓地 埋立地	
強化プラスチック管	FRPM	強化プラスチック管	250					
ヒューム管	HP	ヒューム管	300 ≤ φ < 600	300	319	350	丘陵・火山性丘陵	丘陵
		鉄筋コンクリート管		380	400	406	湖沼	湖沼
		推進工法用コンクリート管		450	492	500	砂丘	砂丘
		推進工法用鉄筋コンクリート管		550	560			
ポリエチレン管	PP	ポリエチレン管	600 ≤ φ < 1000	600	650	680	砂州・砂礫州	砂州・砂礫州
		高密度ポリエチレン管		700	750	800	砂礫質台地	砂礫質台地
		リップ付ポリエチレン管		830	840	850	山地	山地
		ダクタイル鉄管		900	910	980	山地	山麓地
金属管	SP	亜鉛メッキ鋼管	1000 ≤ φ	1000	1100	1140	谷底低地・扇状地	谷底低地
		鋼管		1200	1250	1290		
		ポリエチレン被覆鋼管		1300	1350	1400		
陶管	TP	ステンレス鋼管	1500	1650	1800	沖積平野	自然堤防 後背湿地	
		陶管	2000	2520	2750		旧河道	
		硬質塩化ビニル管	3500	4400	4900		三角州・海岸低地	
塩化ビニル管	VP/VU	凍結防止用アラミドがい装ポリエチレン管					河原	河原
		リップ付硬質塩化ビニル管						
		セメントモルタル被覆塩化ビニル管						
		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								
その他	その他	その他の管種						



(a) 管種

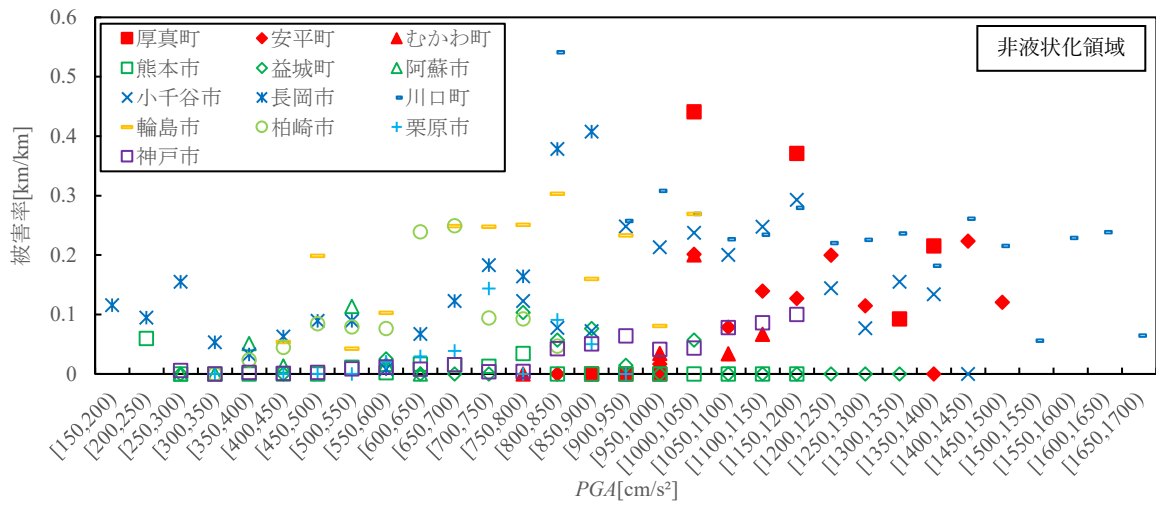


(b) 口径

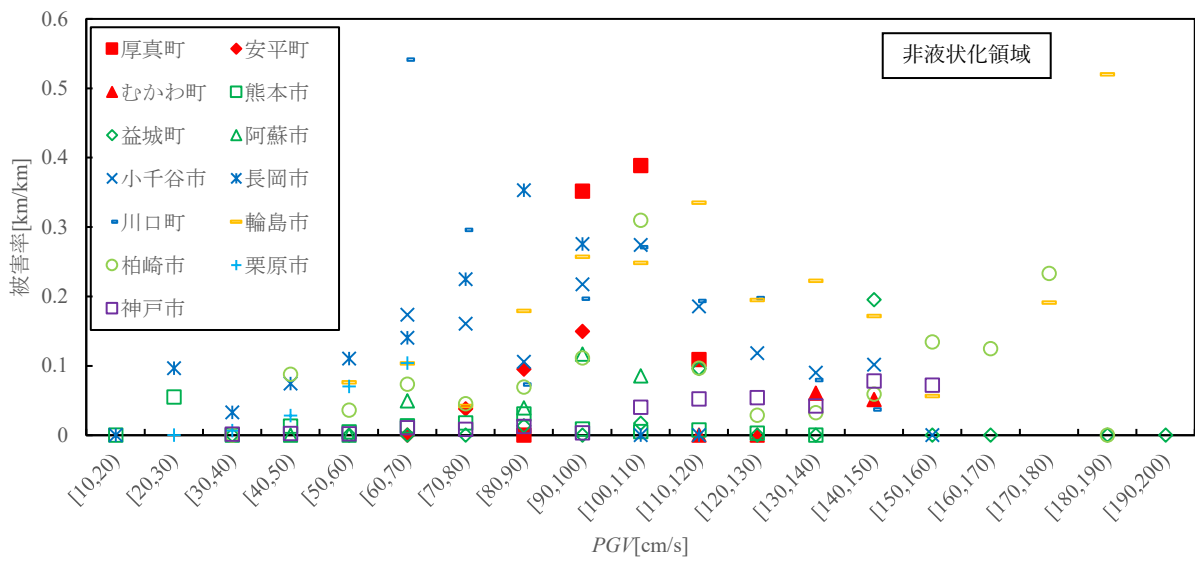


(c) 微地形区分

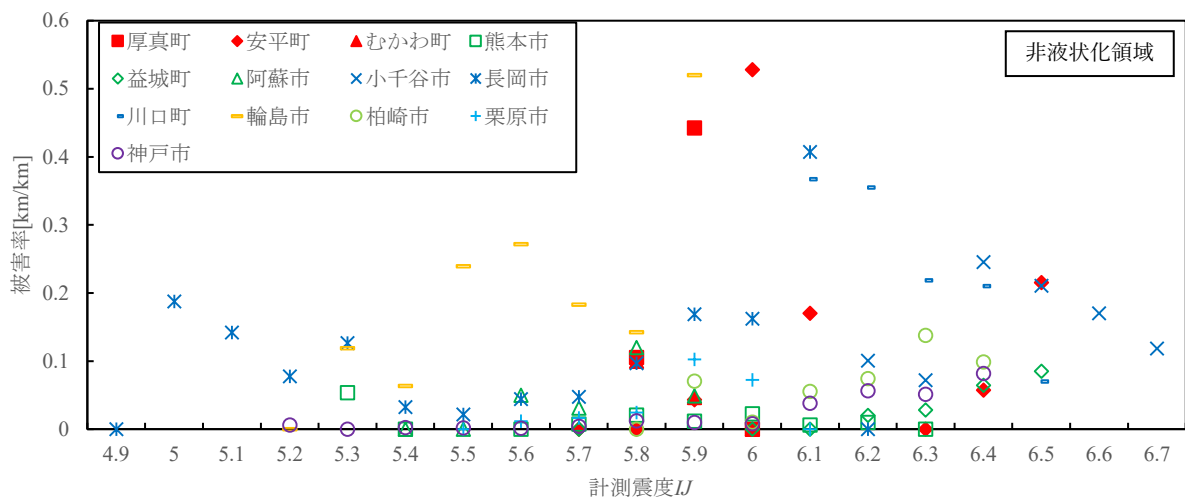
図-2 管種、口径および微地形区分の観点から見た被害率



(a) PGA



(b) PGV



(c) 計測震度IJ

図-3 PGA, PGVおよび計測震度IJと被害率の関係

ーム台地に関しては厚真町に次いで高い値を示した。むかわ町において、VP/VU 管、口径 300mm 未満、沖積平野でのみ被害が見られ、全ての属性で被害率は 0.050[km/km]付近の低い値を示した。

4. 地震動強さと被害率の関係

図-3に分析対象とする領域の被害率を地震動強さの指標ごとに算定した結果を示す。分析に際して、地震動強さの区間幅は文献3)の知見を参考として定めた。

PGAに関して、厚真町では被害率が 1000~1050[cm/s²]で 0.44[km/km]、1150~1200[cm/s²]で 0.37[km/km]と他地域と比較しても高い値を示した。安平町では、被害率が 0.20[km/km]を超える高い値が 1000~1050[cm/s²]と 1400~1450[cm/s²]の 2つの帯域で見られ、2つの帯域の間においても 0.10[km/km]以上の高い値を示している。むかわ町では、1000~1050[cm/s²]で被害率 0.20[km/km]となり、被害延長がこの帯域に集中していたため、高い値を示した。

PGVに関して、厚真町では90~100[cm/s]と 100~110[cm/s]で被害率が 0.35[km/km]以上を示し、他地域と比較して最大の値となった。安平町では、同様に 90~100[cm/s]で被害率 0.15[km/km]と高い値を示し、PGAの場合と比較して狭い範囲に被害が集中していた。むかわ町では、被害率が最大で 0.061[km/km]となり、厚真町や安平町と比べると小さい値であった。

計測震度 *I*に関して、厚真町では計測震度 5.9で被害率が 0.44[km/km]、安平町では計測震度 6.0で被害率が 0.53[km/km]となり、卓越して高い値を示した。次いで、安平町では計測震度 6.1と 6.5で 0.20[km/km]付近の高い値が示された。また、厚真町とむかわ町で計測震度 5.8で約 0.10[km/km]を示した。

5. 補正係数の算出

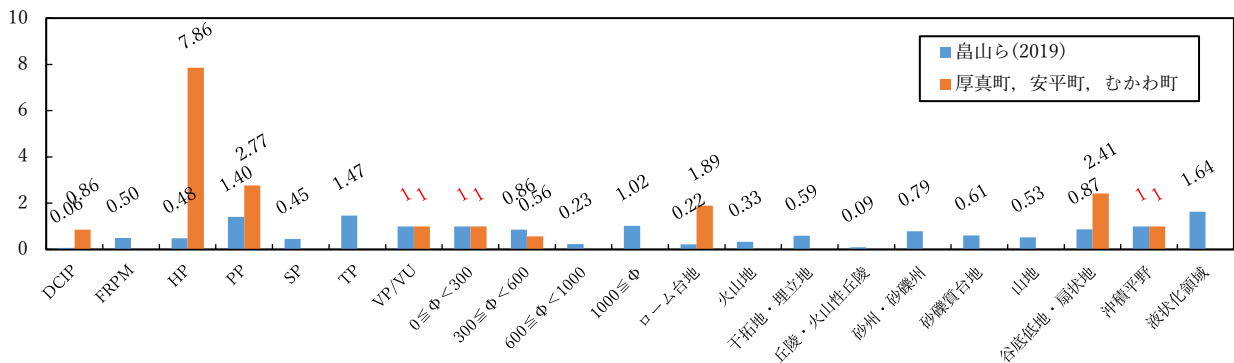


図-4 対象地域のデータに対する補正係数

(1) 数量化 I 類による多変量解析

磯山ら²⁾により提案された配水管の被害予測式を参考にし、地震被害率曲線を次式のように定めた。

$$R_m^*(x) = C_p C_d C_g R_s^*(x) \quad (2)$$

ここで、 $R_m^*(x)$ は地震動強さ x における補正された被害率 (補正被害率)、 C_p 、 C_d および C_g は管種、口径および微地形区分の属性に関する補正係数、 $R_s^*(x)$ は標準被害率を表す。補正係数を算出するにあたっては、数量化 I 類を適用した。管種、口径および微地形区分のある組み合わせ m 、組み合わせ総数を N と定義し、組み合わせ m でのみ 1 となるダミー変数 x_{ijm} を導入することで、質的データを数値化し、組み合わせ m に対する補正被害率 R_m^* を算出する。管種、口径および微地形区分をアイテム i とし、アイテム内のそれぞれの種別をカテゴリ j と定義する。以上より、式(2)をダミー変数 x_{ijm} 、アイテム i およびカテゴリ j を用いて表すと次式のようになる。

$$R_m^*(x) = \prod_{i=1}^{N_i} \prod_{j=1}^{N_{ij}} C_{ij}^{x_{ijm}} \cdot R_s^*(x) \quad (3)$$

ここで、 N_i はアイテム i の数、 N_{ij} はアイテム i に依存したカテゴリ j の数、 C_{ij} はカテゴリ数量と定義する。次式のように、組み合わせ m に対する R_m^* と実データの被害率 R_m のそれぞれの自然対数 $\ln R_m^*$ と $\ln R_m$ の残差平方を求め、組み合わせ m に対する敷設延長 L で重み付けを行った目的関数 $f(R_m)$ を最小化するようにカテゴリ数量 C_{ij} を決定する。

$$f(R_m) = \sum_{m=1}^N (\ln R_m - \ln R_m^*)^2 \cdot L \quad (4)$$

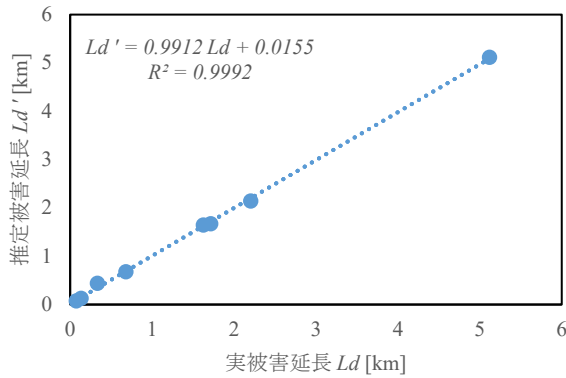


図-5 実被害延長と推定被害延長の相関図

基準となる区分は文献3)の知見を参考として、管種は塩化ビニル管 VP/VU、口径は口径 $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ 、微地形区分は沖積平野を基準とした。北海道3地域のみを集計して算出された補正係数と文献3)による補正係数を図-4に示す。なお、基準とする管種、口径および微地形区分については補正係数1を赤字で示している。さらに図-4に基づく北海道3地域の推定被害延長と実被害延長の相関図を図-5に示す。図-5の決定係数は0.9992となったことから、算出した補正係数は十分妥当であると考えられる。

(2) 北海道対象地域に対する補正係数

管種に関して、HP管で補正係数が卓越して高く、次いで、PP管が高くなった。これは、HP管およびPP管において図-2に示す通り、唯一被害のあった厚真町での被害が共に甚大であったためである。また、DCIP管については安平町での被害が反映されたため、既往研究の値よりも比較的高い値となった。

口径に関して、被害のあった300mm未満、300mm以上600mm未満の順で補正係数が小さくなっており、口径が大きくなると被害率が小さくなり、信頼性が高くなる傾向が見られた。これは、既往研究の結果とも調和的であった。

微地形区分に関して、谷底低地・扇状地、ローム台地の順で補正係数が卓越して高くなっている。その要因は、谷底低地・扇状地については安平町において敷設延長が支配的で被害率がある程度高かったためであり、ローム台地については厚真町および安平町での被害が甚大であったためである。

6. 標準被害率曲線の更新

(1) データ解析の手法

標準被害率曲線のモデルとして最尤法に基づく被害率

のばらつきを考慮した予測式を適用した。地震動強さ x における被害率の平均のモデル $R^*(x)$ は、標準正規分布の累積分布関数 $\Phi()$ に基づき、対数正規分布あるいは正規分布で、次式のようにモデル化する。

$$R^*(x) = C \cdot \Phi\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right) \quad (x : PGA, PGV)$$

$$R^*(x) = C \cdot \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \quad (x : IJ) \quad (5)$$

ここで、 C 、 λ 、 ζ 、 μ 、 σ は未定係数である。次式のように、ある地震動強さ x_i における被害率の平均モデル $R^*(x_i)$ と実被害率 $R(x_i)$ の残差平方を求めて、その地震動強さ x に対する敷設延長 L で重み付けを行った目的関数 $f(R^*(x))$ を最小化するようにパラメータを決定する。

$$f(R^*(x)) = \sum_{i=1} (R^*(x_i) - R(x_i))^2 \cdot L_i \quad (6)$$

一方、地震動強さ x でのばらつきを表す確率密度関数は次式のように対数正規分布でモデル化する。

$$f(R(x)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta_v \cdot R(x)} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln R(x) - \lambda_v}{\zeta_v} \right)^2} \quad (7)$$

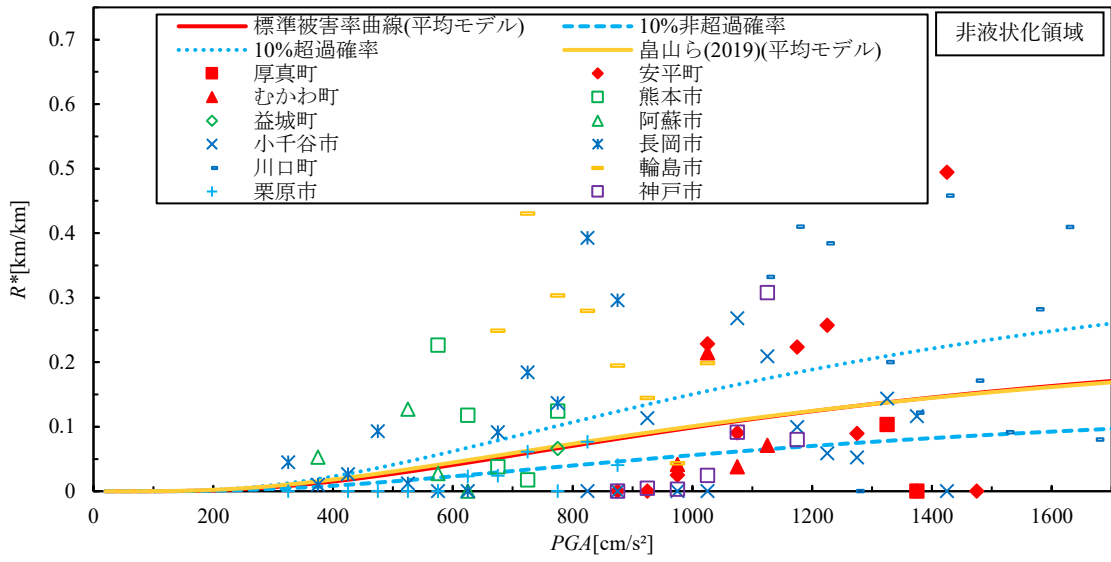
ここで、 λ_v は $\ln R(x)$ の平均値、 ζ_v は $\ln R(x)$ の標準偏差である。なお、この確率密度関数は10%超過確率および10%非超過確率として表した。構築した標準被害率曲線、確率密度関数および文献3)によって構築された標準被害率曲線の平均モデルを図-6に、パラメータとその変動幅の値を表-2に示す。また、基準とした微地形区分は厚真町、むかわ町、熊本市、益城町、阿蘇市、神戸市、長岡市では沖積平野、安平町、小千谷市、川口町、栗原市、輪島市では沖積平野が存在していなかったため、谷底低地・扇状地とした。

(2) 更新前後の標準被害率曲線

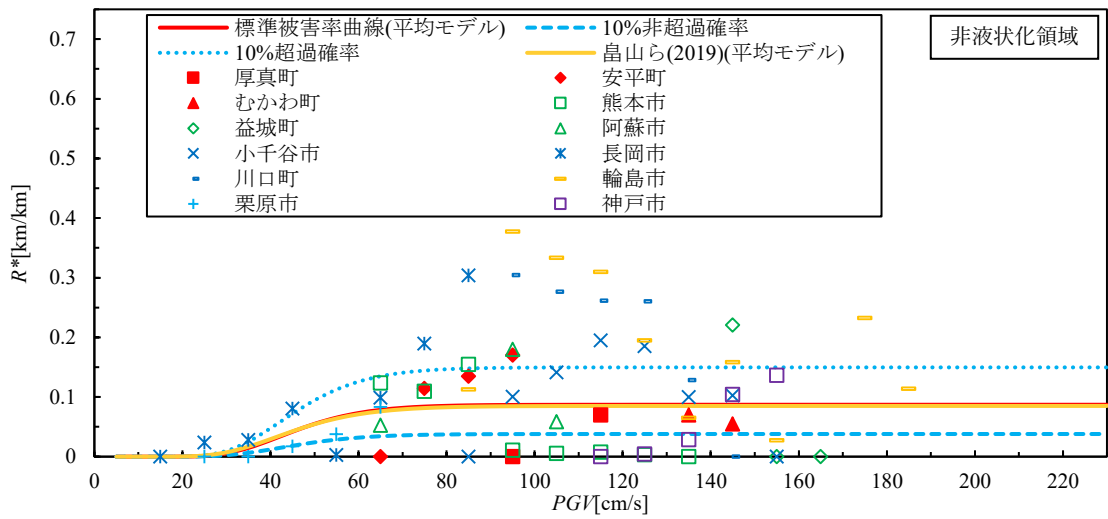
文献3)によって構築された標準被害率曲線に北海道胆振東部地震での被害データを加えて、標準被害率曲線を更新した。全ての地震動強さの指標において、更新前後で標準被害率曲線のモデルは大局的には変化しなかった。

PGAの観点からは、0~1300 [cm/s²]の範囲で更新前の標準被害率曲線の値よりも被害率が低い点が多く存在するため、更新後はこのPGAの範囲で低い曲線となった。それ以降のPGAの範囲では安平町で1400~1450 [cm/s²]の範囲に0.49 [km/km]の高い被害率が存在するため、更新前よりも高い曲線となった。

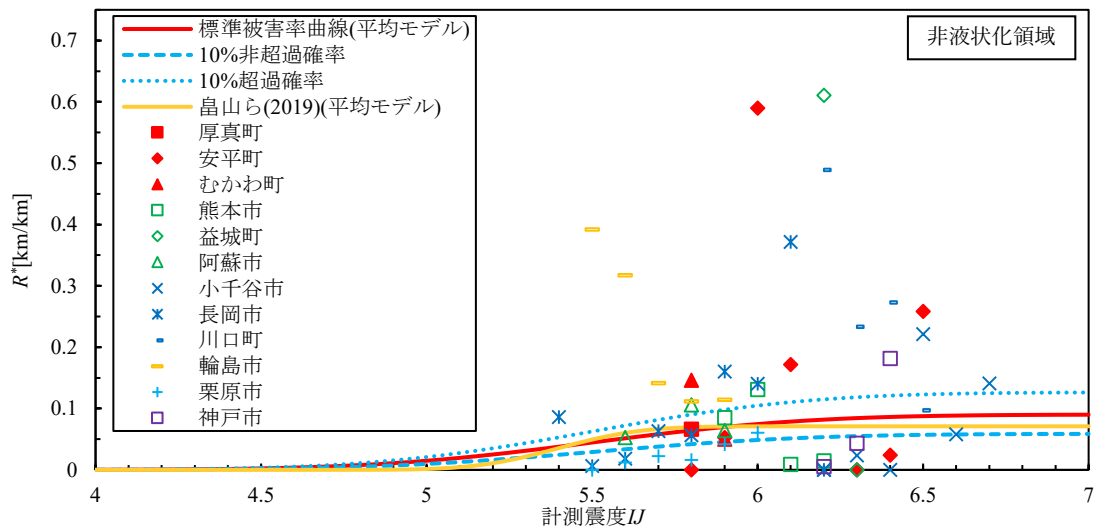
PGVの観点からは、70~100 [cm/s]の範囲で更新前の標



(a) PGAの場合



(b) PGVの場合



(c) 計測震度 IJ の場合

図-6 VP/VU管, 口径 300mm未満, 基準微地形区分における管路の標準被害率曲線

表-2 図-10の被害率曲線のパラメータ

	C	λ	ζ	μ	σ	適用範囲	
PGA	変数	0.25	7.10	0.71	692.70	256.15	$150[\text{cm/s}^2] \leq PGA \leq 1700[\text{cm/s}^2]$
	変動幅	$0.00 \leq C \leq 1.00$	$5.01 \leq \lambda \leq 7.44$	$0 \leq \zeta \leq 0.71$	$150.0 \leq \mu \leq 1700.0$	$0 \leq \sigma \leq 409.60$	
PGV	変数	0.09	3.82	0.28	190.68	37.14	$10[\text{cm/s}] \leq PGV \leq 200[\text{cm/s}]$
	変動幅	$0.00 \leq C \leq 1.00$	$2.30 \leq \lambda \leq 5.30$	$0 \leq \zeta \leq 1.00$	$10.0 \leq \mu \leq 200.0$	$0.92 \leq \sigma \leq 57.65$	
IJ	変数	0.09	-	-	5.51	0.52	$4.9 \leq IJ \leq 6.7$
	変動幅	$0.00 \leq C \leq 1.00$	-	-	$4.9 \leq \mu \leq 6.7$	$0 \leq \sigma \leq 0.52$	

準被害率曲線の値よりも被害率が高い点が存在するため、更新後は曲線が立ち上がった後の一定の被害率に漸近するまでの勾配が急になっている。それ以降の PGV の範囲では、更新前よりも高い被害率に漸近した。

計測震度 IJ の観点からは、5.8-5.9の範囲で更新前の標準被害率曲線の値よりも被害率が低い点が高い点よりも多く存在し、被害率が $0[\text{km/km}]$ の点も存在したため、更新後は曲線が立ち上がった後の勾配が緩やかになっている。それ以降の計測震度 IJ の範囲では、被害率が標準被害率曲線の値と比較してかなり被害率の高い点が存在したため、更新前よりも高い被害率に漸近した。

7. 結論

本研究では、北海道胆振東部地震の地震被害データを既往地震の被害データに加えて、 PGA 、 PGV および計測震度 IJ 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た。以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) 厚真町において、HP 管およびローム台地での被害率が卓越しており、ともに補正係数は既往研究と比較して HP 管で 7.86、ローム台地で 1.89 となり、大きい値を示した。また、PP 管、VP/VU 管および沖積平野での被害率は他地域と比較しても高い値を示した。安平町において、管種では VP/VU 管、微地形ではローム台地および谷底低地・扇状地での被害率が $0.10[\text{km/km}]$ 以上の比較的高い値を示した。また、谷底低地・扇状地において安平町での被害を反映したため、補正係数が 2.41 と高い値を示した。口径については、既往研究の結果と調和的な被害の傾向が示された。

(2) PGA の観点からは $750\sim 1500[\text{cm/s}^2]$ までの地震動に管路が曝され、最大の被害率は厚真町において $1000\sim 1050[\text{cm/s}^2]$ で $0.44[\text{km/km}]$ を示した。 PGV の観点からは $60\sim 150[\text{cm/s}]$ までの地震動に管路が曝され、最大の被害率は厚真町において $100\sim 110[\text{cm/s}]$ で $0.39[\text{km/km}]$ を示した。計測震度 IJ の観点からは $5.7\sim 6.5$ までの地震動に管路が曝され、最大の被害率は安平町において計測震度 6 で

$0.44[\text{km/km}]$ を示した。以上で示した最大被害率は他地域のいずれよりも高い被害率を示した。

(3) 更新後の標準被害率曲線は文献 3)における標準被害率曲線と大局的には変化しなかった。具体的には、 PGA においては $1300[\text{cm/s}^2]$ 以上の範囲で、 PGV においては $50[\text{cm/s}]$ 以上の範囲で、計測震度 IJ においては $4.0\sim 5.4$ および $6.0\sim 7.0$ の範囲で、更新後の標準被害率曲線が更新前よりも高い被害率を示した。

謝辞：本研究で活用した資料やデータの一部は、土木学会平成 30 年北海道胆振東部地震緊急調査団（団長：東京大学生産技術所清田隆准教授）の活動の一環として、岐阜大学・能島暢呂教授並びに千葉大学・丸山喜久教授、および、北海道大学・松本高志教授、北見工業大学・宮森保紀准教授、土木技術研究所寒地土木研究所・佐藤京氏、(株)開発工営社・青地知也氏とのヒアリング共同調査により得られたものです。北海道建設部まちづくり局都市環境課をはじめ、北海道建設部の皆様方には厚真町、安平町、むかわ町、及び、日高町の上下水道関連部局への資料並びにデータの提供の照会・取りまとめをお引き受けいただきました。併せて、厚真町、安平町、むかわ町、及び、日高町の上下水道関連部局の皆様方におきましては、冬季における災害対応が継続する中、下水道施設被害並びに応急復旧に係る貴重な資料並びにデータを御提供いただきました。ここに、記して関係各位に謝意を表し、深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 内閣府：平成 30 年北海道胆振東部地震に係る被害状況等について(平成 31 年 1 月 28 日 15:00 現在), http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin_hokkaido/pdf/310128_jishin_hokkaido.pdf
- 2) 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 巻, 第 2 号, pp.25-40, 1998.
- 3) 畠山大治, 庄司学, 永田茂：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, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.75, No.4, 2019 年.
- 4) 防災科学技術研究所：J-SHIS, <http://www.j->

shis.bosai.go.jp/ (2019年8月15日閲覧)

15日閲覧)

- 5) Jeon, S.S. and O'Rourke, T.D. : Northridge earthquake effects on pipelines and residential buildings, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.95, No.1, pp.294-318, 2005.
- 6) 産業技術総合研究所 : QuakeMap , <https://gbank.gsj.jp/Quake/QuakeMap/> (2019年8月

(Received ?)
(Accepted ?)

DAMAGE ASSESSMENT ON SEWER BURIED PIPELINES IN THE 2018 HOKKAIDO IBURI TOBU EARTHQUAKE

Taiga MINAKAWA and Gaku SHOJI

We analyzed seismic damage data on sewer buried pipelines at Atuma, Abira and Mukawa in Hokkaido subjected to strong ground motions in the 2018 Hokkaido Iburi Tobu earthquake. We revealed the characteristics of the damage ratio to the ground motion intensities from view of points of pipe types, diameter and classification of microtopography, and the relations of multi-variates on the damage ratio. Further we analyzed the dependency of the damage ratio on the ground motion intensities and modeled the trend of damage ratio data by using *PGA*, *PGV* and instrumental seismic intensity *IJ*.