下水道埋設管路の地震被害率曲線の構築

庄司 学¹・寺嶋 黎²・永田 茂³

¹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

²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: s1320944@u.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

本研究では、下水道埋設管路の中でも污水管を対象とし、1995年兵庫県南部地震および2011年東北地方太平洋沖地震における被害データから、地震動やそれに伴う液状化による被害の分析を行った。被害延長を敷設延長で除して被害率と定義し、地震動強さを表わす地表面最大速度 PGV および計測震度 IJ と被害率との関係を管種、管径、微地形区分および液状化の影響度の観点から分析した。その上で、被害率と地震動強さの関係を地震被害率曲線としてモデル化した。

Key Words : sewer buried pipeline, seismic damage, liquefaction, damage function, the 1995 Kobe earthquake, the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、水処理系ライフラインとして重要な役割を担う下水道システムにおいて甚大な被害が発生し、社会経済活動に大きな影響をもたらした¹⁾。それらの要因として、津波による甚大な被害に加え、地震動および液状化により、多様な損傷モードの被害が発生したことがあげられる。これらの被害データを統計的に分析し、被害の予測式を構築することは、将来の発生が予測されている東南海・南海等の巨大プレート間地震や首都直下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。これに関しては、例えば、大規模地震による下水道被害想定検討委員会²⁾、下水道地震対策技術検討委員会³⁾、下水道地震・津波対策技術検討委員会⁴⁾、永田ら⁵⁾およびShoji *et al.*⁶⁾などにより検討が行われてきたが、地震動のタイプを考慮した上で、いずれも管種や管径、地盤情報などの要素を包含した高精度な推定には至っていない。

このような状況を踏まえ、本研究においては、1995年兵庫県南部地震および2011年東北地方太平洋沖地震において下水道管渠に生じた実際の被害データを対象とし、地震被害率曲線の構築を行う。兵庫県南部地震の被害データは活断層の破壊近傍での強震動に曝露されたデータとして、東北地方太平洋沖地震の被害データは巨大プ

レート間地震により励起された強震動に曝露されたデータとして取り扱う。地震被害率曲線の構築手順としては、被害延長と敷設延長の比で定義される被害率と地震動強さの関係から、管種、管径、微地形区分および液状化の影響度を考慮した下水道埋設管路の地震被害率曲線を構築する。

2. 本研究の立場

本研究では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被害データの分析を個別に行い、それぞれのデータに関して地震被害率曲線を構築する。

これは、地震の発生メカニズムが異なると発生する地震動の特徴が大きく異なり、その結果、下水道管渠の被害に相違が生じると考えられるためである。兵庫県南部地震は活断層型地震であり、主要動の継続時間が10秒以下のパルスの地震動であったのに対し、東北地方太平洋沖地震は巨大プレート間地震であり、継続時間が300秒を超える長時間および長周期の地震動が観測された。この地震動の違いは下水道管渠に異なる特徴をもった外乱を与えると考えられるため、被害率にそれらが陰に反映されたものとして別々のデータとして扱う。また外乱を受ける下水道管渠のシステム抵抗の観点から見ても、神戸市域と関東地方の下水道管渠では、管種、管径等の属

図-1 被害推定の流れ

性、経年劣化の度合い、敷設された地盤などが後述するように大きく異なるため、それぞれの被害データを独立したデータとして取り扱うことが適切である。このような考え方に基づき、図-1に示すような流れで本研究により得られた地震被害率曲線を被害推定に適用する。

3. 1995年兵庫県南部地震の際の被害の分析

(1) 分析対象とするデータ

兵庫県南部地震における被害の分析対象領域は、神戸市全域とした。下水道管渠の被害データとしては、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」^{7,8)}を用いた。なお、本研究においては、その中で扱われている、管径 $\phi 900\text{mm}$ 以下の污水管の枝線の被害データを分析対象とする。図-2に、対象領域における下水道管渠の被害データ（滞水箇所）を示す。滞水箇所は、物理的な被害や地盤変状などにより下水道管渠内に滞水が生じ、復旧を要したスパンを表す線データである。ここで定義するスパンとは、複数の管が連結された下水道管渠においてそのまとまりを表すものである。以下では滞水箇所の長さを被害延長と定義する。被害延長の総延長は83.782kmであった。下水道管渠の敷設データに関しては、神戸市建設局によるデータを活用した。なお敷設データは、スパンごとに、管種および管径の情報が入力されたものとなっている。データの処理にあたって、被害データと敷設データの質を同一にするため、敷設データの中から管径 $\phi 900\text{mm}$ 以下の污水管の枝線のみを抽出し、分析に用いた。また、敷設データの管種および管径の情報を、同一のスパンにおける被害データに統合した。図-3には、抽出した敷設データの分布を示す。敷設データの総延長は、3,528kmとなった。微地形区分に関しては、J-SHIS⁹⁾による250mメッシュ単位のデータを用いた（図-4）。液状化領域としては、先述の図-2に示した「神戸JIBANKUN」における噴砂の発生範囲を用いた。また、液状化危険度の指標として、PL値¹⁰⁾を用いた。兵庫県南部地震におけるPL値の分布は、

図-2 神戸市における滞水箇所および噴砂領域

図-3 神戸市における管渠網（管径 $\phi 900\text{mm}$ 以下）

図-4 神戸市における微地形区分⁹⁾

ボーリングデータに基づき、地盤の特性を考慮した上で、250mメッシュ単位で算出した（図-5）。

敷設延長 L [km], 被害延長 L_d [km], および、被害延長

図-5 神戸市におけるPL値の分布

L_d を敷設延長 L で除した被害率 R_L [km/km]をそれぞれ算定し、それらを管種、管径、微地形区分および噴砂の有無の観点からクロス集計した。これに当たっては、管種、管径および微地形区分は表-1に示すようなグループ分けを行い、その際、管種に関しては都市ライフラインハンドブック¹¹⁾、管径に関しては永田ら⁵⁾、微地形に関しては磯山ら¹²⁾や若松ら¹³⁾の知見をそれぞれ参考とした。

(2) 地震動分布の推定

地震動強さとしては、Jeon and O'Rourke¹⁴⁾により埋設管の被害との相関が明らかにされているPGVおよび国内において被害想定などで広く用いられている計測震度 IJ を指標として用いた。これらの分布に関しては、既往の研究として、たとえば文献15)~19)のように推定が行われているが、いずれもその領域は海沿いの都市部のみであり、神戸市全域がカバーされていない。本研究では、神戸市全域における均一なメッシュでの地震動分布を得るため、震源データ²⁰⁾から距離減衰式²¹⁾に基づき推定した工学的基盤面における地震動強さを平均値とし、それを神戸市内外の合計45箇所の地震観測点における観測値によりSimple Kriging法²²⁾で空間補間した250mメッシュ単位の推定結果を用いた。その際、PGVの地盤増幅率は藤本、翠川²³⁾の知見、計測震度 IJ の地盤増幅率は末富ら²⁴⁾の知見を用いた。図-6には、得られた地震動分布を示す。

文献15)~19)は神戸市域の最大速度の分布を推定しており、それぞれの最大値は120~150cm/s超程度とされている。それらの分布は長田区から兵庫区の沿岸部および灘区から東灘区の沿岸部に南北方向に1km程度の幅をもって広く分布している。図-6(a)の分布と文献15)~19)による結果を比較すると、西側の灘区から東灘区の沿岸部のPGVの分布は再現されているが、本研究の結果は、ややその空間的な広がりが狭くなっている。一方で、長田区から兵庫区の沿岸部のPGVの分布はよく一致しており、

表-1 神戸市のデータにおける管種、管径および微地形区分のグループ分け

(a) 管種		
分類	略称	管種
ヒューム管	HP	鉄筋コンクリート管
		鉄筋コンクリート半割管
		推進工法用鉄筋コンクリート管
		鉄筋コンクリート特厚管 (1種)
塩化ビニル管	VP	ヒューム管
		硬質塩化ビニル管 (K1)
		硬質塩化ビニル卵形管
		高剛性硬質塩化ビニル卵形管
		高剛性硬質塩化ビニル管
		推進工法用硬質塩化ビニル管
強化プラスチック管	FRPM	硬質塩化ビニル管 (VP)
		強化プラスチック複合管
ポリエチレン管	PP	ポリエチレン管
		軟質ポリエチレン管
		高圧送水用ポリエチレン管
金属管	SP	送水用ポリエチレン管
		銅管
		塩化ビニルライニング鋼管
		鋼管
陶管	TP	ステンレス管 材質 SUS304
		陶管
無筋コンクリート管	CP	無筋コンクリート管
		(現場打ち)
その他	その他	その他

(b) 管径		(c) 微地形区分	
分類	管径[mm]	分類	微地形区分
0 ≤ Φ < 300	75	山地	山地
	100		丘陵
	150	台地	砂礫質台地
	200		谷底低地
	216	沖積平野	扇状地
	250		自然堤防
	300		後背湿地
	319		三角洲・海岸低地
	350		砂洲・砂礫洲
	400	埋立地	埋立地
300 ≤ Φ < 600	406		
	450		
	492		
	500		
	560		
	600		
	700		
	750		
	800		
	850		
600 ≤ Φ < 1000	900		

全体としては既往研究の分布と調和的である。図-6(a)における分布の最大値は158.4cm/sと既往研究よりも大きく算出されているが、震度6強相当の地震動が再現できているものとして以降の分析で用いることとする。

図-6(b)の分布と文献17)を比較すると、神戸市沿岸の強震動の帯は再現されているものの、震度7に相当する計測震度6.5以上の地震動は本研究で算出されていない。これは兵庫県南部地震において、震度7を記録した観測点がなく、それらの観測点のデータを用いて空間補間を

図-6 神戸市における推定地震動分布

行ったことによるものである。本研究ではその対策として、地震動強さの指標を震度階ではなく計測震度とし、その区間幅の0.1刻みで被害率を算出することで、被害推定を試みており、こちらのデータを以降の分析では用いることとする。

(3) 被害率曲線のモデル

以上の各データから、点データおよび線データとして記述された下水道管渠被害データを、面データである推定地震動分布、微地形区分および噴砂データと統合した。その際、2つ以上の統合対象にまたがる線データについては、またがる点で分割を行い、別の識別番号で新たに定義し直したうえで、統合した。

被害率は、式(1)に示す R_L [km/km]と定義した。

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

この被害率を指標として、被害率曲線は、磯山ら¹²⁾による上水道管路の被害予測式を参考に、次式に示す形とした。

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

ここで $R_m^*(x)$ は地震動強さ x における補正後の被害率、 C_p 、 C_d および C_g はそれぞれ、管種、管径および微地形の属性に関する補正係数、 $R^*(x)$ は標準被害率を示す。なお、これらの補正係数は表-1のように分類された管種、管径、微地形区分に関して被害率間の倍率を表す係数である。

(4) 標準被害率曲線の構築

標準被害率曲線は、最尤法に基づきモデル化した。管種に関しては、都市ライフラインハンドブック¹¹⁾や永田ら⁵⁾の知見を参考に塩化ビニル管 VP、管径に関しては、永田ら⁵⁾の知見を参考に管径 $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ 、微地形に関しては、磯山ら¹²⁾の知見を参考に沖積平野を基準の分類とした。これらに該当し、さらに、液状化による被害は下水道管渠被害の中でもメカニズムが異なると考えられるため、噴砂の発生した領域に含まれないデータのみを用いた。また、PGV の場合は 10cm/s、計測震度 II の場合は 0.1 の区間幅をそれぞれ設け、 L および L_d は、その区間幅で集計した値を用いた。被害率曲線のモデルとしては、永田²⁰⁾の知見を参考とし、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。このモデルは、標準正規分布の累積分布関数で表された曲線を平均とし、その上下に、対数正規分布で表された確率密度のばらつきを与えたモデルである。具体的には、地震動強さ x における平均のモデル $R^*(x)$ は、標準正規分布の累積分布関数 $\Phi(\cdot)$ により、対数正規分布あるいは正規分布にパラメーター C を掛け合わせたモデルとして次式のように表される。

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

ここで、 C 、 λ 、 ζ 、 μ 、 σ は未定係数であり、これらを定めることでこの平均のモデルが決まる。一方、地震動強さ x でのばらつきを表す確率密度関数は対数正規分布で

表され、次式のようにになる。

$$f(R(x)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta_v \cdot R(x)} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln R(x) - \lambda_v}{\zeta_v} \right)^2} \quad (4)$$

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。先述したように、このばらつきの平均値を式(3)の $R^*(x)$ とするが、これは $R(x)$ の平均であるため、次式のような変換を行う。

$$\lambda_v = \ln(R^*(x)) - \frac{1}{2} \zeta_v^2 \quad (5)$$

式(3)を式(5)に代入し、その上で式(5)を式(4)に代入することで、ばらつきを表す確率密度関数とした。未定係数は、実被害データに、上述のモデルが最も適合するように定められる。具体的には、最尤法の考え方に基づき、ばらつきのモデルを用いて、実被害データの確率密度の積 $L(C, \lambda, \zeta, R(x))$ もしくは $L(C, \mu, \sigma, \zeta; R(x))$ で表される尤度関数が最大となるように未定係数を定める。これを式で表すと、次式のようにになる。

$$L(R(x)) = \prod_i f(R_i(x_i)) \quad (6)$$

ここで、 x_i は i 番目の区間の実被害データが晒された地震動強さ x を、 $R(x_i)$ は i 番目の区間の実被害データを示す。なお、 $R(x_i)$ が0の場合には式(6)が定義できないため、除外している。ここで、両辺の対数を取り、対数場における尤度を考えると、次式のようにになる。

$$\ln(L(R(x))) = \sum_i \ln(f(R_i(x_i))) \quad (7)$$

本研究においては、式(7)にさらに地震動強さ x_i における敷設延長 $L(x_i)$ を掛け合わせることで重み付けを行った次式を目的関数として最大化することで、未定係数 $C, \lambda, \zeta, \mu, \sigma, \zeta_v$ を定める。

$$g(R(x)) = \sum_i \{\ln(f(R_i(x_i))) \cdot L(x_i)\} \quad (8)$$

なお、最大化の計算手法としては信頼領域法²⁰⁾を用いた。

また、 PGV, IJ のいずれの場合においても C は式(3)における地震動強さ x が大きな値となった場合に漸近する被害率を表している。これらのデータの処理にあたっては PGV は10cm/s、 IJ は0.1ごとに曝露された敷設延長ならびに被害延長を別々に算出しているため、上述した最

尤法に基づく計算の結果として、必ずしも PGV と IJ において同一の C の値が算出されるわけではない。また、パラメーターに制約を与えず信頼領域法による最適化計算を行った場合には、低い地震動において適切なパラメーターの値に収束しない場合が多かったため、パラメーターの値に対して取りうる区間を設定する制約付きの最適化計算を行った。大きな地震動で漸近する被害率の値を表す C の区間を決定する際には、被害率の上限は1.00[km/km]であるため、 $0.00 \leq C \leq 1.00$ という区間を設定する。 PGV の被害率曲線に関するパラメーターである式(3)に示す λ および ζ は、式(9)、(10)を用いて実データの平均値である μ_{PGV} および標準偏差 σ_{PGV} と比較できる形に変換する。

$$\mu_{PGV} = \exp\left(\lambda + \frac{1}{2} \zeta^2\right) \quad (9)$$

$$\sigma_{PGV} = \sqrt{\mu_{PGV}^2 (\exp(\zeta^2) - 1)} \quad (10)$$

なお、 IJ の被害率曲線のパラメーターである μ, σ はそのまま実データの平均値と標準偏差である。

平均値を表す μ_{PGV} および μ の区間は実被害率が生じた区間を挟み込むように設定した。 μ_{PGV} に関しては、実被害率が噴砂なし、 $PL \leq 5$ に共通して30cm/sから160cm/sまで、 μ に関しては実被害率が5.4から7.0まで値を有するため、その区間に適合する上限、下限を以降では設定した。

標準偏差を表す σ_{PGV} および σ の区間は、 PGV および IJ の実データによって求められる実被害率のばらつきのオーダーに適合すると判断できる値を設定した。 σ_{PGV} に関しては被害率のばらつきに応じて、上限を噴砂なしでは89.6cm/s、 $PL \leq 5$ では69.1cm/sに設定した。 σ に関しては、計測震度 IJ の実被害率の標準偏差は1.0を越えることはないと考え、噴砂なし、 $PL \leq 5$ に共通して下限を0.01、上限を1.0に設定した。また全てのパラメーターに関して、設定した上限、下限の区間において計算が収束しない場合はこの区間の幅を調整し、計算が収束する最低限の制約の幅を設定した。以上の信頼領域法におけるパラメーターの制約方法については第4章以降の分析に対しても同様に用いるものとする。

最尤法を用いて噴砂なしのデータにより構築した標準被害率曲線とその回帰定数、制約条件および有効範囲を図-7および表-2に、 $PL \leq 5$ のデータを用いた場合の結果を図-8および表-3に示す。なお、制約条件は先述したパラメータの上限、下限を示し、有効範囲は本研究の被害率曲線が適用できる範囲を示している。曲線の有効範囲は実際に被害データが得られた区間を上限とし、そ

図-7 神戸市のデータによる噴砂なしのデータを用いた場合の標準被害率曲線（管種：VP，管径：300mm 未満，微地形区分：沖積平野）

表-2 神戸市のデータによる噴砂なしのデータを用いた場合の標準被害率曲線の回帰定数

	C	λ	ζ	μ	σ	ζ_v	適用範囲
PGV	0.176	4.735	0.300	119.104	36.551	0.633	$0\text{cm/s} \leq PGV \leq 160\text{cm/s}$
	$0.0 \leq C \leq 1.0$	$3.2 \leq \lambda \leq 5.0$	$0.01 \leq \zeta \leq 0.5$	$24.5 \leq \mu \leq 168.2$	$0.25 \leq \sigma \leq 89.6$	$0.0 \leq \zeta_v \leq 1.0$	
IJ	0.134	-	-	5.000	0.100	0.555	$0 \leq IJ \leq 6.4$
	$0.0 \leq C \leq 1.0$	-	-	$5.4 \leq \mu \leq 7.0$	$0.02 \leq \sigma \leq 1.0$	$0.0 \leq \zeta \leq 1.1$

図-8 神戸市のデータによる $PL \leq 5$ のデータを用いた場合の標準被害率曲線（管種：VP，管径：300mm 未満，微地形区分：沖積平野）

表-3 神戸市のデータによる $PL \leq 5$ のデータを用いた場合の標準被害率曲線の回帰定数

	C	λ	ζ	μ	σ	ζ_v	適用範囲
PGV	0.198	4.805	0.358	130.197	48.130	0.633	$0\text{cm/s} \leq PGV \leq 160\text{cm/s}$
	$0.0 \leq C \leq 1.0$	$3.1 \leq \lambda \leq 5.0$	$0.001 \leq \zeta \leq 0.41$	$22.2 \leq \mu \leq 161.4$	$0.02 \leq \sigma \leq 69.1$	$0.0 \leq \zeta_v \leq 3.0$	
IJ	0.191	-	-	6.097	0.231	0.981	$0 \leq IJ \leq 6.4$
	$0.0 \leq C \leq 1.0$	-	-	$5.4 \leq \mu \leq 7$	$0.01 \leq \sigma \leq 1$	$0.0 \leq \zeta \leq 1.0$	

表-4 既往研究および自治体等の被害推計で適用されている補正係数

		下水道								上水道		
		宮城県 仙台市 (2002) ²⁷⁾	さいたま市 (2010) ²⁸⁾	川崎市 (2010) ²⁹⁾	福岡県 (2012) ³⁰⁾	青森県 秋田県 広島県 宮崎県 (1997) ³²⁾	札幌市 (1997) ³²⁾	新潟県 (1998) ³²⁾	福井県 (1997) ³²⁾	日本 水道 協会 (1998) ¹²⁾	高田ら (2001) ³¹⁾	
管種 C_p	ヒューム管 HP	2.0	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	-	0.5	-	-	
	塩化ビニル管 VP	1.5	1.5	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2	1.0	1.0	
	強化プラスチック管 FRPM	1.0	1.5	0.1	-	-	-	1.5	-	-	-	
	鋼管 SP	2.0	-	2.0	0.1 (溶接)	-	0.1 (溶接)	2.0	-	0.3 (参考値)	0.3	
	無筋コンクリート管 CP	6.0	-	-	-	1.5	1.5	-	1.2	-	-	
	ダクタイル鋳鉄管 DIP	-	0.2	0.3	0.2	-	0.2	0.2	-	0.3	0.3	
	鋳鉄管 CIP	1.0	-	-	-	-	1.0	1.0	-			
	ポリエチレン管 PP	-	-	-	-	-	-	0.1	-			
	陶管 TP	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-	-	1.6	-	-	
	不明	-	1.0	1.0	-	1.0	-	1.0	-	-	-	
管径 C_d [mm]	$0 \leq \Phi < 100$	1.2	1.2			1.2			1.0	1.6	1.6	
	$100 \leq \Phi < 150$									1.0	1.0	
	$150 \leq \Phi < 200$	0.6	0.6			0.6			0.6	0.6	0.8	0.9
	$200 \leq \Phi < 300$											
	$300 \leq \Phi < 400$											
	$400 \leq \Phi < 500$	0.4	0.4			0.4			0.5 (参考値)	0.5 (参考値)		
	$500 \leq \Phi < 1000$											
	$1000 \leq \Phi < 2000$	0.2	0.2			0.2					0.2	
	$2000 \leq \Phi < 4000$	0.1				0.1					0.1	
	$4000 \leq \Phi$	0.05				0.05					0.05	
	不明	-	1.0			1.0			-	-	-	
地形 C_g	山地	0.4	-							-		
	丘陵地	0.4	-							-		
	段丘・台地	0.4	0.9							1.5		
	沖積平野	1.0	1.0							1.0		
	谷底平野	1.0	1.0							3.2		
	旧水部	-	-							3.2		
	自然堤防	1.0	2.0							-		
	軟弱地盤 後背湿地	2.0	-							-		
	平地部 造成地	2.0	-							-		
	山地部 造成地	2.0	-							1.1		
	その他 良質地盤	-	-							0.4		
	液状化地盤 *: C_l を設定	$5 < PL \leq 20$	$5 < PL \leq 15$							*	*	
		2.9	2.9							*	*	
		$20 < PL$	$15 < PL$							*	*	
		4.7	4.7									
液状化 C_l	$PL = 0$				0.85 + $0.05 * PL$	-	-	-		1.0	1.0	
	$0 < PL \leq 5$					2.9 (秋田県のみ)				2.0	2.7	
	$5 < PL \leq 15$					7.0	7.0	7.0		2.4	4.0	
	$15 < PL \leq 20$											
	$20 < PL$											

表-5 永田ら⁵⁾による補正係数

	液状化地盤			非液状化地盤		
	$0 \leq \Phi < 300$	$300 \leq \Phi < 600$	$600 \leq \Phi$	$0 \leq \Phi < 300$	$300 \leq \Phi < 600$	$600 \leq \Phi$
VP	22.75	33.97	0.00	1.48	1.01	記述なし
その他	0.05	2.87	0.00	0.00	0.00	0.00
全データ	19.24			1.00

図-9 神戸市における微地形を噴砂の有無で分類した場合の多変量解析の結果

れ以上は参考値として灰色で示す．図中のプロットは実データに基づく実被害率を示し，敷設延長が 5km に満たないものは白抜きで示されている．フィッティングにおいては，式(8)のように敷設延長による重みが付けられているため，白抜きのプロットはモデル化の際に寄与度が低いことを意味する．

図-7 より， PGV の場合には 53.3cm/s 付近で標準被害率曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え被害率が立ち上がり始め，有効範囲の上限の 160cm/s において 0.151[km/km] を示した．また，図中の $PGV \leq 200\text{cm/s}$ の範囲では $C=0.176$ [km/km] に漸近しなかった．計測震度 II の場合には 5.6 で曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え立ち上がり始め，有効範囲の上限 6.4 において 0.127[km/km] を示した．また， $6.7 \leq II$ の範囲において $C=0.134$ [km/km] に漸近した．

図-8 より， PGV の場合には 48.7cm/s 付近で標準被害率曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え被害率が立ち上がり始め，有効範囲の上限 160cm/s で 0.153[km/km] を示した．また， $PGV \leq 200\text{cm/s}$ の範囲では $C=0.198$ [km/km] に漸近しなかった．計測震度 II の場合には，5.6 で曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え立ち上がり始め，有効範囲の上限 6.4 において 0.173[km/km] を示した．また， $6.8 \leq II$ の範囲において $C=0.191$ [km/km] に漸近した．

噴砂なしのデータによる図-7，表-2 と $PL \leq 5$ のデータを用いた図-8，表-3 を比較すると，被害率の最大値は，0.215~0.235[km/km] の間に存在し，調和的である．また，標準被害率曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越える地震動強さに関しても， PGV は図-7 では 53.3cm/s，図-8 では 48.7cm/s であり， II に関しては図-7，図-8 とともに 5.6 といずれも調和的な結果となった．しかし，表-2，表-3 より，曲線が漸近する被害率を示す C の値は $PL \leq 5$ の

データの方が大きいことがわかる．これは図-2 と図-5 を比較すると，噴砂の無かった領域が $PL \leq 5$ 以下の領域よりも大きく，噴砂なしのデータに，被害の少なかったデータが $PL \leq 5$ よりも多く含まれた結果，曲線の C の値が小さくなったと考えられる．

(5) 被害率間の倍率の算出

被害率間の倍率を示す係数は，表-1 の分類に従って設定した．その上で，磯山ら¹²⁾の知見を参考に，管種，管径および液状化を含む地形区分のそれぞれを説明変数とした上で，各組合せにおける被害率の比を目的変数として，敷設延長による重み付けを行い，対数場での数量化理論 I 類による多変量解析を行った．基準となる区分としては，管種は塩化ビニル管 VP，管径は $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ ，微地形区分は沖積平野[液状化なし]とした．なお対象データにおいてポリエチレン管 PP，ダクトイル鋳鉄管 DIP，金属管 SP，無筋コンクリート管 CP およびその他の管種に該当するデータは被害率が 0 となっているため，あらかじめ分析から除外している．係数は，以上の解析により統計的に求められた値を，データの質や既往の結果との比較に基づきキャリブレーションした上で決定する．表-4 には，これまでに自治体^{27)~30)}や既往の研究として磯山ら¹²⁾および高田ら³¹⁾により定められた下水道および上水道における被害予測式の補正係数をまとめて示す．なおこれらの中で，宮城県，さいたま市，川崎市および福岡県以外の自治体に関しては，損害保険料率算出機構による資料³²⁾中に記載されている値を用いている．また，表-4 に含まれていない自治体に関しては，被害想定手法

表-6 神戸市における噴砂の有無を考慮した場合の補正係数

分類		補正係数
管種 C_p	HP	1.01
	VP	1.00
	FPRM	0.91
	TP	3.68
管径 C_d [mm]	$0 \leq \Phi < 300$	1.00
	$300 \leq \Phi < 600$	0.96
	$600 \leq \Phi < 1000$	0.72
微地形 C_g	山地	0.11
	台地	0.45
	沖積平野[噴砂なし]	1.00
	沖積平野[噴砂あり]	4.14
	埋立地[噴砂なし]	0.85
	埋立地[噴砂あり]	2.13

図-10 実被害延長と推定被害延長の相関図

が確認できなかった場合があり、また日本下水道協会のマニュアル³³⁾による補正係数を用いない手法を採用しているため、ここには示していない。また、文献5)に基づく補正係数を表-5に示す。

まず、微地形区分と液状化による噴砂の有無の相関を考慮し、液状化地域ゾーニングマニュアル³⁴⁾により液状化が発生する可能性があるとしてされている沖積平野および埋立地をさらに噴砂の有無で分けた上で、多変量解析を行った。多変量解析の結果を図-9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-10に示す。相関図の個々のプロットは、管種、管径、微地形に関して被害が生じた組み合わせによる実被害延長を横軸とし、同一の組み合わせについて、多変量解析の結果から推定された推定被害延長を縦軸としている。図-10の決定係数は0.893となった。

以下に、図-9の値を基準とした場合の補正係数のキャリブレーションを行い、最終的な補正係数の値を表-6にそれぞれ示す。

i) 管種 (基準: VP)

- ・ HP: 表-4での値は0.5から2.0までVPより小さい場合と大きい場合があることから、解析結果に従い、

1.01とした。

- ・ FPRM: 表-4ではVPと同じ場合からVPの1/10まで幅広いが、ここでは解析結果に従い、0.91とした。
- ・ TP: 表-4における最大値2.0より大きな値であるが、安全側の値として、解析結果に従い、3.68とした。

ii) 管径 (基準: $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$)

- ・ $300 \leq \Phi < 600\text{mm}$: 表-4より既往の値は0.6から0.9程度であり、それらと比べ大きな値である。これは、 $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ の管路に比べて、 $300 \leq \Phi < 600\text{mm}$ の管路は震度6強の強い地震動に晒されている割合が倍以上と高いためではないかと考えられる。これを踏まえた上で、基準の $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ に近い値となってしまうが、解析結果に従い、0.96とした。
- ・ $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$: 表-4においては0.4から0.5の範囲の値となっており、比較的大きな値となっている。これは、 $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$ の管路も震度6強の強い地震動に晒されている割合が倍以上と高いためではないかと考えられる。しかしながら、安全側の値として、解析結果に従い、0.72とした。

iii) 微地形 (基準: 沖積平野[噴砂なし])

- ・ 山地: 表-4の宮城県および仙台市における値の0.4より小さいが、文献27)より、当該地域では、山地、丘陵地および段丘・台地をまとめて0.4としている。加えて、既往のケースが宮城県の1例のみであるため、解析結果に従い、0.11とした。
- ・ 台地: 表-4の宮城県および仙台市における値の0.4と近い値であることから、解析結果に従い、0.45とした。
- ・ 沖積平野[噴砂あり]: 表-4の $5 < PL \leq 15$ の場合と対応していると考えれば、宮城県、仙台市およびさいたま市における値の4.7と近い値であり、また、上水道のケースではあるが、高田ら³⁰⁾の値とも整合している。以上を踏まえ、解析結果に従い、4.14とした。
- ・ 埋立地[噴砂なし]: 軟弱な地盤にも関わらず、沖積平野[噴砂なし]の値よりも小さい。これは兵庫県南部地震における被害の報告書³⁵⁾より、神戸市の埋立地においては特に耐震化が進められていたためと考えられる。これより、解析結果に従い、0.85とした。
- ・ 埋立地[噴砂あり]: 埋立地[噴砂なし]の場合の0.85の2.51倍である。表-4の $5 < PL \leq 15$ の場合と対応していると考え、上水道のケースではあるが、日本下水道協会における値の2.4とは近い値となっている。加えて、先述の報告書³⁵⁾の記述より、神戸市の埋立地では耐震化とともに液状化対策が進められていたという点を踏まえ、解析結果に従い、2.13とした。

図-11 神戸市における噴砂の有無を考慮した補正係数を掛け合わせた標準被害率曲線と実被害率の比較

表-7 補正係数に用いた PL 値による液状化危険度の判定基準³⁴⁾

PL 値	$PL \leq 5$	$5 < PL \leq 15$	$15 < PL$
液状化危険度	低い	高い	極めて高い

図-12 神戸市における微地形を PL 値で分類した場合の多変量解析の結果

表-8 神戸市における PL 値を考慮した場合の補正係数

分類		補正係数
管種 C_p	HP	1.00
	VP	1.00
	FRPM	0.62
	TP	3.02
管径 C_d [mm]	$0 \leq \Phi < 300$	1.00
	$300 \leq \Phi < 600$	0.88
	$600 \leq \Phi < 1000$	0.34
微地形 C_g	山地	0.14
	台地	0.60
	沖積平野 [$PL \leq 5$]	1.00
	沖積平野 [$5 < PL \leq 15$]	1.70
	沖積平野 [$15 < PL$]	2.38
	埋立地	1.63

図-13 実被害延長と推定被害延長の相関図

なお、図-11には、管種、管径および微地形区分のそれぞれの観点から、得られた補正係数を考慮した標準被害率曲線と、それらに対応する実被害率を示す。

上記の噴砂の有無という指標とは別に、液状化危険度として PL 値を考慮し、噴砂の有無の代わりに採用した場合について、同様に検討を行った。なお、補正係数の

設定にあたり、PL 値による液状化危険度は、液状化地域ゾーニングマニュアル³⁴⁾を参考に、表-7に示すように区分した。この場合の多変量解析の結果を図-12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-13に示す。なお、推定被害延長は図-10と同様に計算し、決定係数は0.880となった。以下に、図-12の値を基準とした場合の補正係数のキャリブレーションの過程を示すとともに、最終的な補正係数の値を表-8に示す。

i) 管種 (基準: VP)

- ・ HP: 表-4での値は0.5から2.0までVPより小さい場合と大きい場合があることから、解析結果に従い、1.00とした。
- ・ FRPM: 表-4での値は宮城県の場合には1.0である。同様に宮城県のVPの値は1.5となっており、VPに対してFRPMが2/3となっている。VPを1.00として考えればFRPMは0.67となることから、解析結果に従い、0.62とした。
- ・ TP: 表-4の最大値2.0より大きな値となっているが、安全側の値として解析結果に従い、3.02とした。

ii) 管径 (基準: $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$)

- ・ $300 \leq \Phi < 600\text{mm}$: 表-4より既往の値は0.6から0.9程度であり、相対的に大きな値となっている。これは、 $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ の管路に比べて、 $300 \leq \Phi < 600\text{mm}$ の管路は、震度6強という強い地震動に晒されている割合が倍以上と高いことが関係していると推察される。これを踏まえた上で、解析結果に従い、0.88とした。
- ・ $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$: 表-4の値とほぼ同等であることから、解析結果に従い、0.34とした。

図-14 神戸市における PL 値を考慮した補正係数を掛け合わせた標準被害率曲線と実被害率の比較

図-15 茨城県神栖市、ひたちなか市および千葉市美浜区におけるPGV及び計測震度IIの空間分布と下水道データ

iii) 微地形 (基準: 沖積平野[$PL \leq 5$])

- ・ 山地: 表-4より, 宮城県および仙台市における値の0.4より小さいが, 当該地域では山地, 丘陵地および段丘・台地をまとめて0.4としていることを踏まえ, 0.14とした。
- ・ 台地: 表-4の値は0.4から0.9とばらつきはあるが, そ

れらの平均値0.65とほぼ同等の値であるため, 解析結果に従い, 0.60とした。

- ・ 沖積平野[$5 < PL \leq 15$]: $5 < PL \leq 15$ の場合の表-4のケースと比べると, 最も近い日本水道協会の値で2.0となっており, その数値よりやや小さめである。しかし, 沖積平野のみを考慮しているという点を踏ま

え、解析結果に従い、1.70とした。

- ・ 沖積平野[$15 < PL$] : $15 < PL$ の場合の表-4のケースと比べると、日本水道協会の値の2.4とほぼ同じであるため、解析結果に従い、2.38とした。
- ・ 埋立地 : 分析は PL 値ごとに分けて行ったが、実際には、 $PL \leq 5$ のメッシュにおいても噴砂が発生していることや、 $PL \leq 5$ および $5 < PL \leq 15$ の場合の敷設延長が12.2kmと相対的に短いこと、 $5 < PL \leq 15$ の場合の被害データが存在しないことを考慮し、埋立地に関しては、 PL 値を考慮しない値を設定することとした。その上で、 $15 < PL$ の場合の解析結果が1.63であることを踏まえ、1.63とした。

図-9と図-12を比較すると、管種に関してはFRPM、管径に関しては $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$ の補正係数に大きな違いがみられる。FRPMに関しては、噴砂の有無でみると、沖積平野[噴砂なし]および埋立地[噴砂なし]でしか被害が生じていないが、これらの微地形による補正係数の値は、いずれも1.0以下となっている。一方で、 PL 値による区分でみると、沖積平野[$5 < PL \leq 15$]、沖積平野[$15 < PL$]および埋立地で被害が生じており、これらの微地形による補正係数の値はいずれも1.0より大きい。このような関係から、噴砂の有無でみた場合には、微地形による補正係数が小さいためFRPMの補正係数が大きくなり、 PL 値による区分でみた場合には、微地形による補正係数が大きいので、FRPMの補正係数が小さくなっていると言える。 $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$ に関しては、敷設延長の長い噴砂なしの場合における被害率の高さを噴砂なしの補正係数で表せていない一方で、 PL 値による区分でみた場合には、 PL 値が大きいほど被害率が大きくなるという関係を PL 値による補正係数で表すことができているため、噴砂の有無でみた場合の方が $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$ の補正係数が大きい。

なお、図-14には、管種、管径および微地形区分のそれぞれの観点から、得られた補正係数を考慮した標準被害率曲線と、それらに対応する実被害率を示す。図-11、図-14に共通する傾向として、 PGV 、 IJ ともに HP の実被害率が曲線を下回る傾向がある。図-11 iii)においては、噴砂の領域が狭く、十分な敷設延長が得られていないため、白抜きの実被害率が多い。しかし、山地および埋立地[噴砂あり]についてみると、山地は $60 \leq PGV < 70\text{cm/s}$ 、 $70 \leq PGV < 80\text{cm/s}$ および $80 \leq PGV < 90\text{cm/s}$ において5km以上の敷設延長があり、実被害率は補正された曲線を上回る傾向がある。埋立地[噴砂あり]は $110 \leq PGV < 120\text{cm/s}$ 、 $120 \leq PGV < 130\text{cm/s}$ において、5km以上の敷設延長があり、実被害率は曲線を下回った。

図-14 iii)の沖積平野[$5 < PL \leq 15$]および沖積平野[$15 < PL$]についてみると、沖積平野[$5 < PL \leq 15$]は PGV につい

図-16 対象市区における微地形区分と下水道データ

ては曲線と調和的である。一方で、沖積平野[$15 < PL$]は IJ について曲線と調和的な結果となった。

表-9 3市区合算の敷設データにおける管種、管径および微地形区分のグループ分け

(a) 管種			(b) 管径		
分類	略称	管種	分類	管径[mm]	
ヒューム管	HP	ヒューム管	0≦Φ<300	50*	1000
		ヒューム卵形管		75	1100**
		ヒューム管（ICP工法）		80*	1200
		ヒューム管（SPR工法）		100	1300**
塩化ビニル管	VP	硬質塩化ビニル管		150	1350
強化プラスチック管	FRPM	硬質塩化ビニル卵形管		180*	1500
無筋コンクリート管*	CP	強化プラスチック複合管		200	1600**
		無筋コンクリート管		230*	1650**
		無筋コンクリート管（ICP工法）		250	1660**
ダクタイル鋳鉄管	DIP	ダクタイル鋳鉄管	300≦Φ<600	300	1800**
石綿管*	ACP	石綿管		350	2000**
鋼管**	SP	鋼管		360**	2100**
コルゲートパイプ**	CRP	コルゲートパイプ		400	2200**
コンクリート管**	CP	コンクリート管		450	2300**
				500	2400**
*神栖市にのみ敷設 **千葉市美浜区にのみ敷設				600	2600**
(c) 微地形区分				700	3200**
分類	微地形区分		600≦Φ<1000	750**	3300**
ローム台地	ローム台地*			800	3400**
砂礫質台地	砂礫質台地			900	3900**
	谷底低地，自然堤防*			*神栖市にのみ敷設	
沖積平野	後背湿地*			**千葉市美浜区にのみ敷設	
	三角州・海岸低地**				
	砂洲・砂礫洲，砂丘				
埋立・干拓地	干拓地**，埋立地				
*ひたちなか市にのみ分布 **神栖市にのみ分布

図-17 3市区合算の敷設データにおける管種、管径および微地形区分の内訳

4. 2011年東北地方太平洋沖地震の際の被害の分析

(1) 分析対象とするデータ

東北地方太平洋沖地震における被害の分析対象領域は、強震動および液状化による被害が顕著であった茨城県および千葉県の市区町村のうち、詳細な情報が入手できた神栖市、ひたちなか市、千葉市美浜区とした。下水道汚

水管の被害データおよび敷設データは、各市区により提供されたものを用いた。図-15に、各市区における下水道汚水管の被害データと後述の地震動分布の関係を示す。被害データは、前章で示した神戸市の被害データと同様に、下水道汚水管の管体や人孔の破損に伴って滞水が発生し、復旧を要した管路延長を表す。各対象地区における総敷設延長は、神栖市が242km、ひたちなか市が452km、千葉市美浜区が412kmである。総被害延長は、

神栖市が16.216km, ひたちなか市が10.362km, 千葉市美浜区が12.336kmとなっている。また, 微地形区分に関しては, J-SHIS⁹⁾による250mメッシュ単位のデータを用いた(図-16)。

管種, 管径, 微地形区分の分類は表-9のように行った。先述の三市区のデータを合算し, その内訳を表-9の分類に基づく円グラフで図-17に示す。地域別にみると, 管種の観点からは, 神栖市はVPが敷設延長の76.1%を占め, ひたちなか市および千葉市美浜区はHPがそれぞれ敷設延長の48.6%, 58.4%を占め, 支配的であった。また, HPのシェアが最も多いひたちなか市および千葉市美浜区においても, VPは2番目に多く敷設されているため, 3市区の敷設延長を合算した場合においてはVPが図-17(a)のように最大の割合となる。管種の観点からは神栖市, ひたちなか市および千葉市美浜区において $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ の小口径管がそれぞれ84.1%, 90.3%および49.6%で支配的であった。神栖市およびひたちなか市に関しては8割以上が小口径管であるが, 千葉市美浜区に関してはシェアの一番少ない $1000\text{mm} \leq \Phi$ の大口径管も12.6%敷設されており, 他の地区に比べ管径に偏りの無いことが特徴である。微地形区分の観点からは, 神栖市は敷設延長の96.5%が沖積平野に, 千葉市美浜区は96.8%が埋立・干拓地に存在する。一方でひたちなか市はローム台地に存在する敷設延長が81.2%で支配的ではあるが, 沖積平野にも敷設延長が18.7%存在し, 他の地区にはない特徴をもつ。各地区の敷設データはこのような特徴を有し, その上で被害が生じていることから以降の分析においては実被害データにこのような特徴が陰に反映されている。

地震動の分布に関しては, PGVおよびIJを空間補間によって推定した結果を用いている。空間補間にあたっては, K-NET, KiK-net³⁰⁾の573観測点, 気象庁³⁷⁾の43観測点, 国土技術政策総合研究所³⁸⁾(以下, 国総研)の134観測点により得られた強震観測波形ならびに青森県, 岩手県, 宮城県, 山形県, 福島県, 茨城県, 栃木県, 群馬県, 埼玉県, 千葉県, 神奈川県, 新潟県, 山梨県および長野県の地方公共団体の364観測点³⁷⁾により得られた強震観測波形を適用した。また, 震源の情報は気象庁³⁷⁾のデータに基づき定めた。その上で末富, 福島³⁹⁾, 産業技術総合研究所⁴⁰⁾, 櫻井ら⁴¹⁾などの手法を参考に, Simple Kriging法による空間補間を適用し, PGVおよびIJを250mメッシュ単位で推定した。

下水道污水管が曝露された地震動の特徴を地域別にみると図-15より, 神栖市はPGVでは19.8cm/sから50.8cm/s, IJでは5.0から5.6の地震動に晒された。ひたちなか市はPGVでは32.8cm/sから76.0cm/s, IJでは5.6から6.1, 千葉市美浜区はPGVでは22.3cm/sから24.2cm/s, IJでは5.0から5.3の地震動に晒された。三市区の中で, 下水道管渠が曝露された地震動の幅が最大であったのは, PGVに関しては

図-18 対象市区における液状化に晒された管渠の分布

ひたちなか市, IJに関しては神栖市であり, 千葉市美浜区は曝露されていた地震動の幅が最も狭かった。

分析にあたり, 液状化領域の判定を行った。ひたちなか市および千葉市美浜区に関しては, 国土交通省関東地方整備局・地盤工学会による報告書⁴²⁾に掲載された液状化領域の画像データを参考にし, 液状化領域に重なる敷設および被害データは液状化ありと目視で判断した。なお, 報告書においては, 液状化領域として, 噴砂や噴水

などを目視により観測した点データおよび道路における液状化などを表す線データに加えて、専門家が現地調査と地形・地質情報から推定した液状化発生領域の面データが示されている。本研究では、この中で、液状化領域の線データおよび面データと重なる管路を液状化ありと判断した。また、神戸市に関しては、築地ら⁴³⁾によって同定された液状化領域を用いる。これは上述の文献⁴²⁾による情報に、液状化に関わる罹災証明が交付された建物データから推定した液状化領域を加えたものである。具体的には、まず液状化被害により罹災証明が交付された建物の1,762件のデータからGoogle Mapsにより住所と座標の対応関係が得られた1,018件のデータを峻別した上で、罹災証明が交付された建物に関してはその建物および敷地に面する配水管も液状化したと仮定している。その上で、建物の重心位置から最近傍の配水管までの距離を求め、そのヒストグラムの特徴を踏まえて罹災証明が交付された建物の重心位置から半径30m以内に位置する配水管については液状化したと判断している。以上より神戸市については文献⁴²⁾および罹災証明の建物データに対する分析により得られた液状化領域の和集合をポリゴン化したものを本研究における神戸市の液状化領域として取り扱う。図-18には、各市区における液状化の判定結果を示す。

各市区において敷設延長 L 、被害延長 L_d 、および、被害率 R_L を表-9に示す管種、管径、微地形区分および先述した液状化の有無の観点から集計した。

(2) 標準被害率曲線の構築

標準被害率曲線の構築にあたり、第3章では液状化の無かった地域のみについて標準被害率曲線を構築したが、先述した東北地方太平洋沖地震における3市区の下水道管路被害については、非液状化領域と液状化領域の両方について標準被害率曲線を構築する。

神戸市の場合と同様に、標準被害率曲線は補正係数による補正を行うが、微地形区分に関する補正係数は非液状化領域および液状化領域についてそれぞれ基準(1.00)とする区分を定める。

神戸市の場合と同様に、管種に関してはVP、管径に関しては $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ 、微地形区分に関しては沖積平野を基準の分類とした。また、PGVの場合は 10cm/s 、 IJ の場合は 0.1 の区間幅をそれぞれ設け、 L および L_d はその区間幅ごとに集計した値を用いた。

神戸市の場合と同様に、第3章4節に示した最尤法に基づき標準被害率曲線を構築した。その際、先述した管種、管径、微地形区分の市区ごとの特性を反映させるため、各対象地区の実被害データに基づく被害率は合算せず、そのまま市区ごとの実被害率を用いて曲線の構築を行った。実被害率のデータは神戸市の場合と同様にフィッ

ティングの際、重み付けの寄与度が低い敷設延長 5km 未満のデータを白抜きで示した。曲線の有効範囲は実際に被害データが得られた区間を上限とし、それ以上は参考値として灰色で示す。

非液状化領域におけるデータのみを用いた場合の結果を図-19および表-10、液状化領域におけるデータのみを用いた場合の結果を図-20および表-11にそれぞれ示す。

図-19より、非液状化領域のデータでは、PGVの場合には 5.8cm/s で標準被害率曲線の平均値が $10^3 [\text{km/km}]$ を越え被害率が立ち上がり始め、 15cm/s 以上で $0.028[\text{km/km}]$ に漸近した。 IJ の場合には 5.2 で曲線の平均値が $10^3 [\text{km/km}]$ を越え立ち上がり始め、 5.2 以上で $0.040[\text{km/km}]$ に漸近した。

図-20より、液状化領域のデータでは、PGVの場合には 4.2cm/s で標準被害率曲線の平均値が $10^3 [\text{km/km}]$ を越え被害率が立ち上がり始め、 16cm/s 以上で $0.247[\text{km/km}]$ に漸近した。 IJ の場合には、 4.1 で曲線の平均値が $10^3 [\text{km/km}]$ を越え、 5.1 以上で $0.239[\text{km/km}]$ に漸近した。

図-19と図-20の比較を行うと、PGVの観点からは、被害率曲線の平均値が $10^3 [\text{km/km}]$ を越える被害の立ち上がりを示す点は非液状化領域、液状化領域ともに 5cm/s 前後であり、地震動強さの増加とともに被害率が C に漸近する点についても液状化の有無に関わらず 15cm/s 程度と調和的である。一方で漸近する被害率 C の値は非液状化領域のデータにおいて $0.028[\text{km/km}]$ であるのに対し、液状化領域のデータにおいて $0.247[\text{km/km}]$ と 8.8 倍であった。 IJ の観点からは、地震動強さが大きくなり曲線が一定値に漸近する点は調和的であった。一方で曲線の平均値が $10^3 [\text{km/km}]$ を越え立ち上がり始める点は非液状化領域のデータにおいては $IJ = 5.2$ に対し、液状化領域の被害データにおいては $IJ = 4.1$ となった。これは、液状化領域のデータにおいては IJ の区間に対応した被害データが少ないことに加え、敷設延長が長く $IJ \leq 5.1$ の低い地震動強さにおいて被害率の低いプロットが少なかったことが原因と考えられる。曲線が漸近する被害率 C の値は非液状化領域で $0.040[\text{km/km}]$ に対して液状化領域で $0.239[\text{km/km}]$ と 6.0 倍であった。

(3) 被害率間の倍率の算出

神戸市、ひたちなか市、千葉市美浜区の3市区におけるデータを合算して、多変量解析を行った。分類は表-9に基づいて行い、基準とする分類は、管種がVP、管径が $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ 、微地形に関しては、磯山ら¹²⁾により液状化の有無で分類された沖積平野に加え、液状化による被害が多く発生した埋立・干拓地を液状化の有無で分け、沖積平野[液状化なし]を基準とした。

区分の中で砂礫質台地は、敷設延長が 4.8km と短くな

図-19 3市区のデータによる最尤法に基づく非液化化領域での標準被害率曲線（管種：VP，管径：300mm未満，沖積平野[液化化なし]）

表-10 3市区のデータによる最尤法に基づく非液化化領域での標準被害率曲線の回帰定数

	C	λ	ζ	μ	σ	ζ_v	適用範囲
PGV	0.028	2.114	0.201	8.450	1.716	0.549	$0\text{cm/s} \leq PGV \leq 80\text{cm/s}$
	$0.0 \leq C \leq 1.0$	$2.1 \leq \lambda \leq 4$	$0.01 \leq \zeta \leq 1.0$	$8.18 \leq \mu \leq 83.5$	$0.08 \leq \sigma \leq 44.5$	$0.0 \leq \zeta_v \leq 1.1$	
IJ	0.040	-	-	5.127	0.010	0.745	$0 \leq IJ \leq 6.1$
	$0.0 \leq C \leq 1.0$	-	-	$5 \leq \mu \leq 7$	$0.01 \leq \sigma \leq 1$	$0.0 \leq \zeta \leq 1$

図-20 3市区のデータによる最尤法に基づく液化化領域での標準被害率曲線（管種：VP，管径：300mm未満，沖積平野[液化化あり]）

表-11 3市区のデータによる最尤法に基づく液化化領域での標準被害率曲線の回帰定数

	C	λ	ζ	μ	σ	ζ_v	適用範囲
PGV	0.247	2.041	0.236	7.916	1.894	0.522	$0\text{cm/s} \leq PGV \leq 60\text{cm/s}$
	$0.0 \leq C \leq 1.0$	$2.0 \leq \lambda \leq 6.0$	$0.01 \leq \zeta \leq 0.3$	$7.39 \leq \mu \leq 422.0$	$0.07 \leq \sigma \leq 129.5$	$0.0 \leq \zeta_v \leq 1.0$	
IJ	0.239	-	-	4.475	0.179	0.622	$0 \leq IJ \leq 5.8$
	$0.0 \leq C \leq 1.0$	-	-	$3 \leq \mu \leq 7$	$0.01 \leq \sigma \leq 1$	$0.0 \leq \zeta \leq 1$

図-21 3市区合算の被害データに基づく多変量解析の結果

図-22 実被害延長と推定被害延長の相関図

っている。砂礫質台地における被害は、液状化ありの分類でのみ生じているが、砂礫質台地においては液状化の発生する可能性が低い³⁴⁾。この地域は、銚田、池尻⁴⁰⁾による分析における神栖市知手地区に該当し、もともとは良質な砂礫層であったが、土木建築材料として上層が採取された後の埋め戻し土において液状化が発生した可能性があると報告されている。以上を踏まえ、砂礫質台地を分析から除外した。管種および管径が[不明]となっている区分のデータに関しては、あらかじめ解析から除外している。得られた解析結果を図-21に示し、既往の補正係数との比較の上、キャリブレーションに基づき決定した。その過程を以下に示す。

i) 管種 (基準: VP)

- ・ HP: 神戸市の結果である表-6、表-8 における 1.01, 1.00 よりやや小さいが、表-4 と比較すれば 0.5 としている自治体も多いため、妥当であると考え、解析結果に従い、0.71 とした。
- ・ CP: 神栖市においてのみ該当する区分である。表-4 より CP の既往の補正係数は 1.5 から 6.0 とばらつきがあるが、管種の中でも最大またはそれに次ぐ値となっている。解析結果はそれらの値の間にあり、管

種についての解析結果の中でも最大であるため、1.99 とした。

ii) 管径 (基準: $0 \leq \Phi < 300$ mm)

- ・ $300 \leq \Phi < 600$ mm: 基準の管径より太いにも関わらず、値が 1.00 より大きくなっている。これは、神栖市においては液状化地盤でのみこの管径の被害が生じたことに加え、千葉市美浜区においては、この管径の HP 管が多く敷設されていたことが原因と考えられる。これらを踏まえた上で、解析結果に従い、1.93 を採用した。
- ・ $600 \leq \Phi < 1000$ mm: 表-4 の場合と比べて大きな値となっているが、3 市区合算の総敷設延長は 78.4 km と充分であることから、解析結果に従い、0.97 とした。
- ・ $1000 \text{ mm} \leq \Phi$: 表-4 より自治体で採用されている値は 0.2 以下である場合が多い。それらと比較して若干大きな値を示しているものの、これらの値に近いことから妥当であると判断し、解析結果に従い、0.30 とした。

iii) 微地形 (基準: 沖積平野[液状化なし])

- ・ ローム台地: 敷設延長は 364.5 km と十分に長いことに加え、表-4 のさいたま市の値である 0.9 に近いことから解析結果に従い 1.01 とした。
- ・ 沖積平野[液状化あり]: 表-4 より、自治体では PL 値が 15 を越える場合の補正係数を 7.0 としている場合が多い。加えて敷設延長も 332.2 km と長いことから妥当と判断し、解析結果に従って 9.21 とした。
- ・ 埋立・干拓地[液状化なし]: 表-4 の 0.9 と比べると大幅に小さな値になっている。この区分のデータは、ほぼすべてが千葉市美浜区における値であるが、当該地区においては、液状化ありの地盤における被害が支配的であったものの、液状化なしの地盤の中には改良が施された健全な地盤が多いことが原因として考えられる。これらを踏まえた上で、解析結果に

図-23 3市区合算の被害データに基づく PGV を指標とした場合の標準被害率曲線 (補正係数含む) と実被害率の比較

図-24 3市区合算の被害データに基づく I を指標とした場合の標準被害率曲線 (補正係数含む) と実被害率の比較

従い、0.28とした。

- ・埋立・干拓地[液状化あり]: 神戸市の結果である表-5における2.13と比べると大きい、近い値となった。敷設延長は短い解析結果に従い、2.52とした。

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-22に示す。解析結果に基づく決定係数は0.983となった。また、図-23および図-24には、管種、管径および微地形区分のそれぞれの観点から、得られた補正係数を考慮した標準被害率曲線と、それらに対応する実被害率を示す。なお、液状化領域の標準被害率曲線は沖積平野[液状化あり]を図-24(b) iii)において基準(1.00)としている。具体的には、埋立・干拓地[液状化あり]の曲線は図-21における沖積平野[液状化あり]の係数2.52を埋立・干拓地[液状化あり]の係数9.21で除した0.274倍されている。図中に白抜きで示されたプロットは敷設延長が5km未満のデータである。概ねモデルに基づき推定された被害率曲線と実被害率を表すプロットは同程度の値となっている。しかし、十分な敷設延長がありながら曲線と実被害率の値に開きがある場合、局所的な要因が存在する可能性があるため、以下の考察を行うこととする。

図-23(a) iii)より、 $30 \leq PGV < 40 \text{ cm/s}$, $40 \leq PGV < 50 \text{ cm/s}$ においてローム台地の実被害率が曲線を大きく下回っている。これは、先述のようにローム台地が存在するひたちなか市の敷設データにおいてHPがVPより多くの割合を占めることが原因と考えられる。図-21から明らかなように、HPはVPよりも被害を受けにくく、これがローム台地の実被害率を引き下げたと考えられる。 $70 \leq PGV < 80 \text{ cm/s}$ においては沖積平野[液状化なし]の実被害率が曲線を大きく上回っている。これは、ひたちなか市の $70 \text{ cm/s} \leq PGV$ における $600 \leq \Phi < 1000 \text{ mm}$ の実被害率が $0.236 [\text{km/km}]$ と大きく、これが全体の実被害率を引き上げたためである。

図-24(a) i)より、 $IJ=5.2$ において、VPの実被害率が大きく曲線を上回っている。これは図-19(b)と比較すると明らかなように、主に神戸市の被害を反映している。 $IJ=5.2$ に晒された地域は神戸市北部に広く分布し、N値が地下水位以下で10未満と極めて小さいとされた深芝地区⁴³⁾が含まれている。この深芝地区の被害データが被害率を引き上げたと考えられる。

図-24(a) iii)より、 $IJ=5.2$, 6.0 において沖積平野[液状化なし]の実被害率が曲線を大きく上回っている。 $IJ=5.2$ の実被害データは先述の深芝地区の被害が影響し、実被害率が高くなっている。 $IJ=6.0$ はひたちなか市のデータであり、管種別に被害率を見るとHPが $0.214 [\text{km/km}]$ であり、この要因が実被害率を引き上げていると考えられる。

図-24(b) iii)より、 $IJ=5.6$ において沖積平野[液状化あり]

の実被害率が曲線を大きく上回っている。これは、液状化被害が甚大であると報告された神戸市堀割地区⁴³⁾を含んでいるため、高い被害率となったと考えられる。

(4) 兵庫県南部地震の被害データにより得られた知見との比較

第2章で先述したように兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震による下水道管渠被害には、それらの強震動の違いに起因した被害の特徴が生じていると考えられる。両地震の被害データより得られる地震動強さごとの被害率、標準被害率曲線および被害率間の倍率である補正係数を以下では比較し、強震動の違いに起因した特徴を考察する。

まず神戸市の被害データに基づく図-7、図-8と三市区の被害データによる図-19の実被害率を比較する。神戸市のデータは噴砂なしおよび $PL \leq 5$ の被害データであるが、三市区の非液状化領域の被害データと同じ条件であるとして考える。

PGVの観点からは、神戸市の被害データは $31.3 \sim 158.4 \text{ cm/s}$ までの地震動に曝露された管路が存在し、最大の被害率は、図-7の噴砂なしの場合において 105 cm/s で被害率 $0.215 [\text{km/km}]$ を示し、図-8の $PL \leq 5$ の場合において 115 cm/s で $0.235 [\text{km/km}]$ を示している。図-7、図-8は被害データにおいてともに 100 cm/s 以上の区間において、少なくとも2区間で $0.1 [\text{km/km}]$ を越える高い被害率を示している。一方で、三市区の被害データにおいて図-19は、非液状化領域の場合には $19.8 \sim 76.0 \text{ cm/s}$ の地震動に曝露された管路が存在している。図-19の被害データの被害率は、 55 cm/s で最大の $0.038 [\text{km/km}]$ (ひたちなか市)を示し、 $20.1 \sim 70.0 \text{ cm/s}$ において5区間が被害率 $0.010 [\text{km/km}]$ を越えている。神戸市の被害データと比較して三市区の管路は曝露された地震動が $10 \sim 80 \text{ cm/s}$ と相対的に低いため、最大の被害率は、神戸市の被害データにおいて噴砂なしの領域で $0.215 [\text{km/km}]$, $PL \leq 5$ の領域で $0.235 [\text{km/km}]$ を示すのに対し、 $0.038 [\text{km/km}]$ と1桁オーダーが低い。しかし、神戸市と三市区の被害データを $10 \sim 80 \text{ cm/s}$ の区間で比較すると、神戸市の被害データにおいて被害率の最大値は図-7の噴砂なしのデータでは 75 cm/s で $0.0102 [\text{km/km}]$ を示し、図-8の $PL \leq 5$ のデータでは 75 cm/s で $0.0103 [\text{km/km}]$ を示すのに対し、図-19の非液状化領域の被害データでは、 50 cm/s 以下の地震動が相対的に低い区間で、かつ液状化が発生していない場合においても被害率が $0.01 [\text{km/km}]$ を越えるデータが3区間存在する。

IJ の観点からは、神戸市の被害データは $5.3 \sim 6.4$ までの地震動に曝露された管路が存在し、最大の被害率は、図-7の噴砂なしのデータにおいて6.1で $0.222 [\text{km/km}]$ であり、図-8の $PL \leq 5$ のデータにおいて6.4で

0.217[km/km]であった。図-7、図-8 の被害データはともに、6.1 以上で、4 区間のうち 3 区間において 0.1[km/km]を越える高い被害率を示した。一方で、三市区のデータにおいて、非液化化領域の被害データは 4.9-6.1 の地震動に曝露されている。実被害率は、図-19 の非液化化領域において 5.2 で最大の 0.097[km/km] (神戸市) を示し、5.2-6.0 において 6 区間で被害率 0.010[km/km]を越えている。最大の被害率は、神戸市の被害データにおいて噴砂なしでは 0.222[km/km]、 $PL \leq 5$ では 0.217[km/km]に対して 0.097[km/km]と 1/2 以下であり、この区間を除くと PGV に関する被害データの傾向と同様に、実被害率は 1 桁オーダーが低い。しかし、 IJ が 6.0 以下の区間に限定し、比較を行うと、図-7、図-8 の被害データにおいては実被害率が 0.01[km/km]を越える区間はともに 1 区間しか存在しないのに対して、図-19 の被害データでは IJ が 5.2-6.0 の低い地震動強さにおいて 6 区間で実被害率が 0.01[km/km]を越えている。

PGV, IJ のデータともに $PGV \leq 50\text{cm/s}$, $IJ \leq 6.0$ という相対的に低い地震動に曝露された管路は、神戸市よりも三市区の方が高い被害率を示している。図-7、図-8 および図-19 は、液化化が発生していない領域のデータであることを踏まえると、この被害率の差異には地震動の長い継続時間が影響していると考えられる。地震動の時系列において最大値が同じであっても、活断層型地震によるパルス的な地震波であれば管路が外乱に晒される時間は短かく、対照的に、地震動の継続時間が長い巨大プレート間地震では、外乱の振幅が小さくとも継続時間が長い場合、その作用過程で管路被害の発生が助長されることが考えられる。

このような被害データの傾向は、相対的に弱い地震動である $PGV \leq 50\text{cm/s}$, $IJ \leq 6.0$ の範囲における神戸市のデータと、三市区の被害データおよび被害率曲線の形状にも影響している。先述したとおり、神戸市の被害データにおける被害率は、100cm/s 以上の区間において、少なくとも 2 区間が 0.1[km/km]を越える高い被害率を示した。その高い被害率のデータに影響され、地震動強さの増加とともに曲線が漸近する C の値は噴砂なしのデータで表-2 によれば PGV において 0.176[km/km]、 IJ では 0.134[km/km]となる。一方で、三市区の被害データに基づく C の値は表-10 によれば PGV で 0.028[km/km]、 IJ では 0.040[km/km]とオーダーが 1 桁低い。また被害率曲線が 10^3 [km/km]を越えて被害が生じ始める地震動強さは異なっている。神戸市の被害率曲線は $PGV \leq 50\text{cm/s}$, $IJ \leq 6.0$ の範囲で被害率が高い区間がなく、その区間を過ぎてから被害が生じ始めるモデルとなっているのに対し、相対的に弱い地震動の区間から 0.01[km/km]のオーダーを越える被害率が発生している 3 市区の被害率曲線は PGV, IJ とともに弱い地震動から被害が生じ始めるモデル

となっている。

補正係数についても神戸市と三市区の被害データに基づいた結果の比較を行う。神戸市の被害データに基づく、図-9、図-12 と三市区の被害データに基づく図-21 を比較すると、管種においては HP の値が神戸市の噴砂の有無を考慮したデータでは 1.01, PL 値を考慮したデータでは 1.00 であるのに対し、三市区のデータでは 0.71 となり、神戸市のデータと比較するとやや小さいものの近い値となった。管径においては $300 \leq \Phi < 600\text{mm}$ の値が神戸市の噴砂の有無を考慮したデータでは 0.91, PL 値を考慮したデータでは 0.88 であるのに対し、三市区のデータでは 1.93 となり、2 倍以上の大きい値となる。これは三市区別に管径による被害率を分析すると、 $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ が最大の被害率となっているのは神戸市のみであり、ひたちなか市は $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$ が、千葉市美浜区では $300 \leq \Phi < 600\text{mm}$ が最大の被害率を示していることが原因である。また、微地形区分に関しても神戸市の沖積平野[噴砂あり]が 4.14, 沖積平野[15 < PL]が 2.38 であるのに対し、三市区の沖積平野[液化化あり]は 9.21 と 2 倍以上大きな値となっている。これは主に神戸市における液化化による被害率の甚大さを反映した結果である。

5. 結論

本研究では、下水道管渠の污水管を対象とし、1995 年兵庫県南部地震における神戸市および 2011 年東北地方太平洋沖地震における茨城県神栖市、ひたちなか市および千葉市美浜区における被害データを分析することで、管種、管径、液化化を含む微地形区分の観点から被害率間の関係を補正係数として明らかにした上で、下水道埋設管路の地震被害率曲線の構築を行った。具体的には、被害延長を敷設延長で除した値を被害率と定義し、地震動強さの指標として地表面最大速度 PGV および計測震度 IJ を採用した上で、それらと被害率の関係を対数正規および正規分布の確率分布関数でモデル化した。

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 兵庫県南部地震の被害データに対する分析
 - ・ 噴砂の有無から液化化ならびに非液化化を選別したデータおよび PL 値の大きさにより液化化危険度を選別したデータから最尤法に基づく標準被害率曲線を構築した。噴砂なしの領域のデータにおいて、PGV の場合には 53.3cm/s で標準被害率曲線の平均値が 10^3 [km/km]を越え被害が立ち上がり始め、有効範囲の上限である 160cm/s で被害率が 0.151[km/km]を示した。計測震度 IJ の場合には、 IJ が 5.6 で曲線の

平均値が 10^3 [km/km] を越え, IJ が 6.7 以上で 0.134[km/km] に漸近した.

- ・ $PL \leq 5$ のデータにおいて, PGV の場合には 48.7cm/s で標準被害率曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え被害が立ち上がり始め, 有効範囲の上限である 160cm/s で 0.153[km/km] を示した. IJ の場合には, IJ が 5.6 で曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え, IJ が 6.8 以上で 0.191[km/km] に漸近した.
 - ・ 補正係数の基準(1.00)とする区分は, 管種, 管径については VP, $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ とした. 微地形区分の基準(1.00)とする区分は, 噴砂なしの場合は沖積平野[噴砂なし], $PL \leq 5$ の場合は沖積平野[$PL \leq 5$]とした. 補正係数の値は, 管種に関しては, 陶管 TP が 3.68, ヒューム管 HP が 1.01, 強化プラスチック管 FRPM が 0.91 となり, 管径に関しては, $300 \leq \Phi < 600\text{mm}$ が 0.96, $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$ が 0.72 となった. 微地形に関しては, 沖積平野[噴砂あり]が 4.14, 埋立地[噴砂あり]が 2.13, 埋立地[噴砂なし]が 0.85, 台地が 0.45, 山地が 0.11 となった. また, 液状化の指標として PL 値を用いた場合には, 管種に関しては, TP が 3.02, HP が 1.00, FRPM が 0.62 となり, 管径に関しては, $300 \leq \Phi < 600\text{mm}$ が 0.88, $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$ が 0.34 となった. また, 微地形に関しては, 沖積平野[$15 < PL$]が 2.38, 沖積平野[$5 < PL \leq 15$]が 1.70, 埋立地が 1.63, 台地が 0.60, 山地が 0.14 となった.
- (2) 東北地方太平洋沖地震の被害データに対する分析
- ・ 神戸市, ひたちなか市および千葉市美浜区の三市区におけるデータの合算値から最尤法に基づく標準被害率曲線を構築した. 非液状化領域のデータでは, PGV の場合には 5.8cm/s で標準被害率曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え被害が立ち上がり始め, 相対的に低い地震動である PGV が 15cm/s 以上で 0.028[km/km] に漸近した. IJ の場合には, 同様に相対的に低い地震動である 5.2 で曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え被害が立ち上がり始め, IJ が 5.2 以上で急激に 0.040[km/km] に漸近した. 液状化領域のデータでは, PGV の場合には 4.2cm/s で曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え, 16cm/s 以上で 0.247[km/km] に漸近した. IJ の場合には, IJ が 4.1 において曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え, IJ が 5.1 以上で 0.239[km/km] に漸近した.
 - ・ 3市区のデータの合算値に基づき, 液状化の有無により微地形を区分した上で, 補正係数の値を求めた. 補正係数の基準(1.00)とする区分は, 管種, 管径については VP, $0 \leq \Phi < 300\text{mm}$ とした. 微地形区分の基準(1.00)とする区分は, 非液状化領域に関し

ては沖積平野[液状化なし], 液状化領域に関しては沖積平野[液状化あり]とした. 補正係数の値は管種に関しては, コンクリート管 CP が 1.99, ヒューム管 HP が 0.71 となり, 管径に関しては, $300 \leq \Phi < 600\text{mm}$ が 1.93, $600 \leq \Phi < 1000\text{mm}$ が 0.97, $1000\text{mm} \leq \Phi$ が 0.30 となった. 液状化を含む微地形区分に関しては, 沖積平野[液状化あり]が 9.21, 埋立・干拓地[液状化あり]が 2.52, ローム台地が 1.01, 埋立・干拓地[液状化なし]が 0.28 となった.

- (3) 兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震の被害データの比較
- ・ 神戸市の標準被害率曲線は, PGV の場合において噴砂なしおよび $PL \leq 5$ の液状化を考慮しないデータに基づく, それぞれ 53.3cm/s, 48.7cm/s で曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え被害が立ち上がるのに対し, 三市区の非液状化領域の被害データにおける曲線は, PGV が 5.8cm/s と神戸市の被害データよりも低い地震動において曲線の平均値が 10^3 [km/km] を越え被害が立ち上がり始めた. IJ の場合においても神戸市の噴砂なしおよび $PL \leq 5$ の液状化を考慮しないデータに基づく曲線は IJ が 5.6 で平均値が 10^3 [km/km] を越えるのに対し, 三市区の被害データにおける曲線は IJ が 5.2 で平均値が 10^3 [km/km] を越えるため, これより PGV , IJ ともに三市区の標準被害率曲線は相対的に低い地震動から被害率が生じ始める.
 - ・ これは神戸市と三市区において実被害率の値が $PGV \leq 50\text{cm/s}$ および $IJ \leq 6.0$ の区間で大きく異なるためである. PGV に関しては神戸市の被害データでは 50cm/s 以下で被害率 0.01[km/km] を越えるデータが存在しないが, 三市区の被害データにおいては 3 点の実被害率のデータが存在する. この被害率の差異には地震動の継続時間が影響していると考えられる. 活断層型地震による地震波であれば管路が外乱に晒される時間は短く, 対照的に地震動の継続時間が長い巨大プレート間地震による地震動では, 外乱の振幅が小さくとも管路被害の発生を助長する可能性が示唆される.
 - ・ 標準被害率曲線の適用に当たっては活断層型地震を想定すると, 管種, 管径, 液状化を考慮した微地形区分の観点から神戸市のデータの属性と符合するか検討した上で, 神戸市の被害データより得られた標準被害率曲線を適用する. 液状化が予想されない地域の被害推定には噴砂なし, または $PL \leq 5$ の標準被害率曲線を適用し, 一方で液状化が予想される場合は液状化に関わる補正係数を乗じることとする. 巨大プレート間地震を想定する場合は管種, 管径, 液状化を考慮した微地形区分の観

点から三市区のデータの属性と符合するか検討した上で、三市区の被害データより得られた標準被害率曲線を適用する。これらの標準被害率曲線は、非液状化領域、液状化領域についてそれぞれ得られているため、液状化が予想されない地域については前者を、予想される地域については後者を適用する。

謝辞：本研究を実施するにあたり、元筑波大学的那波悟志氏、水野陽介氏、築地拓哉氏、及び、岸太陽氏より多大なご協力を頂きました。また、被害データの収集に関して神戸市、神栖市、ひたちなか市および千葉市美浜区の下水道関連部局の皆様にはデータの提供のみならず貴重なご助言を頂きました。本研究は、国土交通省・建設技術開発助成(平成21年度から平成22年度)「下水道システムの地震被害応急復旧戦略シミュレータの開発」(研究代表者：永田茂、鹿島建設(株)技術研究所)、加えて、筑波大学東日本大震災復興支援プログラム(研究代表者：金久保利之准教授、研究分担者：庄司学)、及び、筑波大学プロジェクト「巨大地震による複合災害の統合的リスクマネジメント」(研究代表者：八木勇治准教授、研究分担者：庄司学)の一部助成を得て実施されたものです。以上のプロジェクトに関係する全ての皆様方に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：東日本大震災の記録—国土交通省の災害対応—, <http://www.mlit.go.jp/common/000194077.pdf> (2013年11月15日閲覧)。
- 2) 大規模地震による下水道被害想定検討委員会：大規模地震による被害想定手法及び想定結果の活用方法に関するマニュアル, 国土交通省, 2006。
- 3) 下水道地震対策技術検討委員会：下水道地震対策技術検討委員会報告書, 国土交通省, 2008。
- 4) 下水道地震・津波対策技術検討委員会：下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書, 国土交通省, 2012。
- 5) 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。
- 6) 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. *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。
- 7) JIBANKUN とは： <http://www.kobetoshiseibi.or.jp/matisen/jibankun/jibankun.htm> (2013年11月15日閲覧)。
- 8) 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。
- 9) 防災科学技術研究所：J-SHIS, <http://www.jshis.bosai.go.jp/> (2013年11月15日閲覧)。
- 10) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進：地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol.28, No.4, pp.23-29, 1980。
- 11) (社)土木学会：都市ライフラインハンドブック, 丸善出版, 2010。
- 12) 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。
- 13) 若松加寿江, 松岡昌志, 久保純子, 長谷川浩一, 杉浦正美：日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.213-232, 2004。
- 14) 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。
- 15) 翠川三郎, 藤本一雄：墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.111-118, 1996。
- 16) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第502号, pp.61-68, 1997。
- 17) 山口直也, 山崎文雄：1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.325-336, 1999。
- 18) 松島信一, 川瀬博：1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第534号, pp.33-40, 2000。
- 19) 松島信一, 川瀬博：1995年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動と木造建物被害の再評価, 構造工学論文集, Vol.55B, 日本建築学会, pp.537-543, 2009。
- 20) Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwata, T., Kakehi, Y. and Hoshiba, M.: Minute locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion records, *Journal of Physics of the Earth*, Vol.44, pp.473-487, 1996。
- 21) 司宏俊, 翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.63-70, 1999。
- 22) Cressie, N. A. C.: *Statistics for Spatial Data*, John Wiley & Sons, pp.356-359, 1993。
- 23) 藤本一雄, 翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学論文集, 第6巻, 第1号, pp.11-22, 2006。
- 24) 末富岩雄, 石田栄介, 磯山龍二：空間補間による地震動分布推定の高精度化のための一検討, 第28回土木学会地震工学論文集, CD-ROM, 2005。
- 25) 永田茂：地震時のライフライン機能支障による企業の事業影響の簡易評価手法について, 第2回相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp.54-59, 2010。

- 26) Moré, J.J. and Sorensen, D.C.:Computing a trust region step, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, Vol. 3, pp 553–572, 1983.
- 27) 宮城県：宮城県第三次地震被害想定報告書, <http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kikitaisaku/ks-sanzihigai-houkoku.html> (2013年11月15日閲覧).
- 28) さいたま市：さいたま市被害想定調査, <http://www.city.saitama.jp/001/011/004/p011051.html> (2013年11月15日閲覧).
- 29) 川崎市：川崎市における地震被害想定について, <http://www.city.kawasaki.jp/160/page/0000017669.html> (2013年11月15日閲覧).
- 30) 福岡県：福岡県地震に関する防災アセスメント調査報告書, <http://www.pref.fukuoka.lg.jp/gyosei-shiryo/jisinasesu.html> (2013年11月15日閲覧).
- 31) 高田至郎, 藤原正弘, 宮島昌克, 鈴木泰博, 依田幹雄, 戸島敏雄：直下型地震災害特性に基づく管路被害予測手法の研究, 水道協会雑誌, 第70巻, 第3号, pp.21-37, 2001.
- 32) 損害保険料率算出機構：自治体の地震被害想定における被害予測手法の調査, 2006.
- 33) (社) 日本下水道協会：下水道の地震対策マニュアル, 2006.
- 34) 国土庁防災局震災対策課：液状化地域ゾーニングマニュアル, 1999.
- 35) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会編：阪神・淡路大震災調査報告 ライフライン施設の被害と復旧, 土木学会, 1997.
- 36) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク K-NET, KiK-net, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2013年11月15日閲覧).
- 37) 気象庁：強震波形(平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震), http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/110311_tohokuchiho-taiheiyouki/ (2013年11月15日閲覧).
- 38) 国土交通省国土技術政策総合研究所：最新地震リンク, <http://edpdiv.nilim.go.jp/html/eqnew.htm> (2013年11月15日閲覧).
- 39) 末富岩雄, 福島康宏：2011年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)における地震動分布の推定, 土木学会第66回年次学術講演会, I-475, pp.949-950, 2011.
- 40) 産業技術総合研究所：QuakeMap, <https://gbank.gsj.jp/QuakeMap/> (2013年11月15日閲覧).
- 41) 櫻井俊彰, 庄司学, 高橋和慎, 中村友治：2011年東北地方太平洋沖地震における斜面に関わる道路構造物の被害分析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4(地震工学論文集第31-b巻), pp.I_1315-I_1325, 2012.
- 42) 国土交通省関東地方整備局・地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書, 2011.
- 43) 築地拓哉, 寺嶋黎, 庄司学, 永田茂：2011年東北地方太平洋沖地震において被災した上水道配水管網の被害の傾向—茨城県潮来市および神栖市の事例分析—, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.4(地震工学論文集第32巻), pp.I_260-I_279, 2013.
- 44) 楢田泰子, 池尻大介：鹿島地域の液状化による管路被害集中地域と地形変遷, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第4号(特集号), pp.249-262, 2012.

(2013.11.15 受付, 2014.2.13 修正, 2014.2.22 受理)

DEVELOPMENT OF DAMAGE FUNCTIONS ON SEWER BURIED PIPELINES SUBJECTED TO AN EXTREME GROUND MOTION FROM DAMAGE ASSESSMENT BASED ON THE DATA IN RECENT EARTHQUAKES

Gaku SHOJI, Ray TERAJIMA and Shigeru NAGATA

The dependency of damage of sewer buried pipelines on the seismic hazards in the 1995 Kobe earthquake and in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake was discussed focusing on the damage at Kobe city for the Kobe earthquake and at Kamisu city, Hitachinaka city, Mihama ward in Chiba city for the Tohoku earthquake with quantifying damage ratio R_L defined by the ratio of disrupted lengths L_d divided by total lengths L of the pipelines. R_L data dependent on scales of peak ground velocity PGV and instrumental seismic intensity I were evaluated in terms of diameter, material of pipes, microtopography and occurrence of liquefaction, and the associated damage functions were proposed for anticipating the pipelines damage distributed in targeted regional areas.