

2007 年新潟県中越沖地震における埋設管被害率と地震動強さの関係
**RELATIONSHIP BETWEEN DAMAGE RATIO OF BURIED PIPES AND
SEISMIC MOTION IN THE 2007 NIIGATA-KEN CHUETSU-OKI,
JAPAN, EARTHQUAKE**

君島康太¹⁾, 丸山喜久²⁾, 山崎文雄³⁾

Kota KIMISHIMA¹, Yoshihisa MARUYAMA², Fumio YAMAZAKI³

1) 千葉大学大学院工学研究科, 博士前期課程

¹ Graduate Student, Graduate School of Engineering, Chiba University

e-mail : k.kimishima@graduate.chiba-u.jp

2) 千葉大学大学院工学研究科, 准教授 博士 (工学)

² Associate Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

e-mail : ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

3) 千葉大学大学院工学研究科, 教授 工学博士

³ Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

e-mail : fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

ABSTRACT: This study investigates the relationship between the damage ratios of buried pipes and seismic motion intensity after the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake. The damage ratios are compared with the fragility curves that were empirically obtained after the 1995 Kobe earthquake. Furthermore, the damage ratios in the entire Kashiwazaki city are investigated with respect to the estimated seismic motion intensities. Based on the result, regression analyses are performed to reveal the characteristics of damage incidents to buried pipes during the event.

キーワード: 2007年新潟県中越沖地震, 埋設管被害率, 被害率曲線, 地震動強さ, GIS

1. はじめに

上水道の地震被害想定調査においては、礫山らによって構築された被害予測式¹⁾や、自治体によって設定された式²⁾、もしくは、それをもとにした修正式³⁾が多く用いられている。また、東京ガス(株)の地震防災システム⁴⁾では、地震直後の供給停止判断に三津谷らが構築した被害予測式⁵⁾などが用いられている。水道管、ガス低圧導管ともに、被害予測式は兵庫県南部地震の被害データをもとに構築されている。兵庫県南部地震時は地震計の数が少なく、被害率と地震動強さの対応をとることが困難な場合も見られた。しかし、兵庫県南部地震以降、地震計の数が大幅に増加したことや、利用可能な空間基盤データの整備が進んできた状況をふまえると、最近の地震被害データを整理、分析することが可能になっている。また、兵庫県南部地震以降、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震、能登半島地震など、埋設管に被害が生じている地震が複数発生している。そのため、近年の地震での被害データを既往式に組み入れ、普遍性を高めることが望ましいと考えられる。

そこで本研究では、新潟県中越沖地震における埋設管被害と地震動分布の関係を整理し、既往式と比較する。具体的には、柏崎市に設置されている地震計の半径2kmを対象領域とし、GISを用いてそれぞれの

領域内の沖積平野に該当する埋設管の被害率の算出を行う。その被害率と地震観測記録を用いて既往式と比較する。また一方で、推定地震動分布を用いて、柏崎市全域（旧高柳町は除く、ガス低压管に関しては刈羽村も含む）での被害率をまとめ、回帰分析により、地震動と埋設管被害率の傾向の分析を行う。

2. 新潟県中越沖地震における地震被害統合GIS

地理情報システム（GIS）は、地震時のライフライン被害の分析に用いられることが多く^{例えば6), 7)}、本研究においてもGISを用いた。

本研究では、対象エリアは、旧高柳町を除く柏崎市とし、ガス低压管に関しては、さらに、刈羽村も含めた。本研究で使用した、配水管、ガス低压管のデータの諸元を表1に示す。各種データの統合GIS化には、ESRI社のArcGIS ver.9.3を使用した。地形データには、竹内・川畑が編集した中越柏崎—東頸城地域の5万分の1数値地質図⁸⁾を用いた。なお、この地質図は沖積平野と谷底低地が同じ分類であったため、谷底低地を分類するために、若松らが構築した日本の地形・地盤デジタルマップ⁹⁾も一部用いた。各種データの統合GIS化したものを図1に示す。

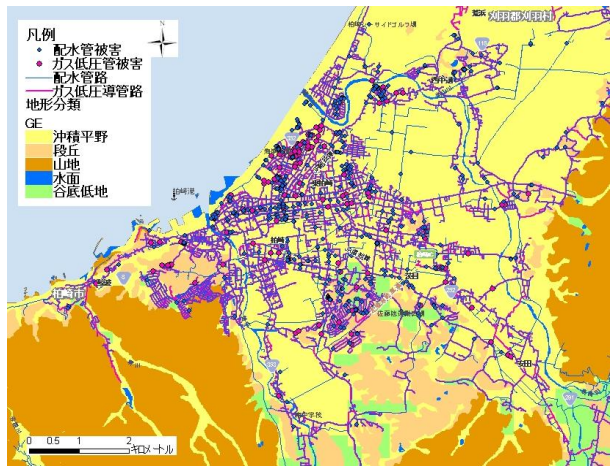


表 1 埋設管データの諸元

埋設管	被害件数	埋設延長 (km)	データソース
配水管	554	852.6	柏崎市ガス水道局
ガス低压管	158	653.2	被害：日本ガス協会 管路：柏崎市ガス水道局

図 1 柏崎市における統合 GIS

3. 埋設管地震被害予測手法

3.1 水道管地震被害予測手法

磯山ら¹⁾は水道管路の被害率 R_m (件/km) の推定式を以下のように提案している。

$$R_m(v) = C_p C_d C_g C_l R(v) \quad (1)$$

ここで、 C_p は管種係数、 C_d は管径係数、 C_g は地形・地盤係数、 C_l は液状化係数、 v は地動最大速度 (PGV) である。 $R(v)$ は標準被害率曲線であり、式(2)のような関数形である。

$$R(v) = c(v - A)^b \quad (2)$$

標準被害率とは、標準的な管路が一般的な条件で埋設されている場合の被害率のことであり、磯山らは铸铁管 (CIP)、管径 $\phi 100-150\text{mm}$ 、沖積地盤に埋設された場合を設定している¹⁾。磯山らは兵庫県南部地震の被害データに基づき、 $R(v)$ に式(3)を設定している。

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

また、この $R(v)$ に関しては、東京都²⁾や高田ら³⁾によって、式(4)、(5)が提案されている。

$$R(v) = 2.24 \times 10^{-3} (v - 20)^{1.51} \quad (4)$$

$$R(v) = 6.33 \times 10^{-5} v^{2.10} \quad (5)$$

本研究では、これらの式と新潟県中越沖地震における配水管被害率を比較する。対象とする管種は铸铁管、塩化ビニル管 (VP)、ダクタイル铸铁管 (DIP)とした。磯山ら¹⁾によると、兵庫県南部地震における被害データの多変量解析結果ではVPの管種係数 C_p は1.0、DIPの管種係数 C_p は0.3と定められている。そのため、本研究では、新潟県中越沖地震における配水管被害率は、VPについては式(3)-(5)と比較し、DIPについては式(3)-(5)に0.3を乗ずることで比較することとする。

3.2 ガス低圧管地震被害予測手法

清水ら⁴⁾はガス低圧導管の被害率 R_m (件/km) の推定式を以下のように設定している。

$$R_m(SI) = C_p C_g C_l R(SI) \quad (6)$$

ここで SI は SI 値である。推定式の構成は水道管とほぼ同じであるが、ガス低圧管では管径係数 C_d は用いない。 $R(SI)$ は水道管と同様、標準被害率曲線であり、式(7)のような関数形である。

$$R(SI) = C\Phi((\ln SI - \lambda)/\zeta) \quad (7)$$

ここで、 Φ は標準正規分布の確率分布関数であり、 C 、 λ 、 ζ は回帰で得られる定数である。清水らは、標準被害率として、ねじ継手鋼管が沖積地盤に埋設された場合を設定し、兵庫県南部地震の被害データに基づき、 $R(SI)$ に式(8)を設定している⁴⁾。

$$R(SI) = 2.36\Phi((\ln SI - 4.305)/0.509) \quad (8)$$

また、 $R(SI)$ は三津谷らにより式(9)の修正式が提案されている⁵⁾。

$$R(SI) = 2.36\Phi((\ln SI - 4.30)/0.39) \quad (9)$$

水道管と同様、本研究では、これらの式と、新潟県中越沖地震におけるガス低圧導管被害率を比較する。対象とする管種はダクタイル鋳鉄管(DIP)とした。清水ら⁴⁾によるとダクタイル鋳鉄管(DIP)の管種係数 C_p は0.27と設定されている。そのため、本研究では、新潟県中越沖地震におけるガス低圧管被害率は、DIPは式(8)、(9)に0.27を乗ずることで比較することとする。なお、標準被害率として設定されているねじ継手鋼管は対象領域における埋設管路長が短かったため、本研究では、比較対象から外した。

4. 新潟県中越沖地震における埋設管被害率と地震動強さの関係

4.1 地震計周辺における埋設管被害率

標準被害率曲線は、兵庫県南部地震における強震観測地点で得られた地震記録と観測点周辺2km四方の領域内での被害率を用いて最小二乗法によって設定されている。この構築条件を踏まえ、地震観測地点から半径2km以内の領域内の埋設管被害率と被害予測式を比較する。対象とした地震計及び、地震計から半径2kmの領域を図2に示す。なお、図2のNo.10の刈羽村役場の地震計は、ガス低圧管の場合にのみ対象とした。被害率算出に当たっては、領域内の沖積平野に該当する被害、管

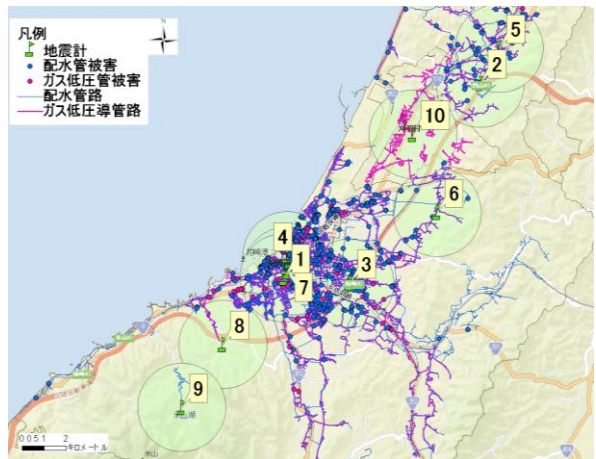


図2 柏崎市と刈羽村における地震計設置位置

表2 対象地震計と周辺2km以内の地域での埋設管被害率

図-2 の No.	地震計	PGV (cm/s)	SI値 (cm/s)	配水管									ガス低圧管		
				CIP			VP			DIP			DIP		
				被害 件数	管路長 (km)	被害率 (件/km)	被害 件数	管路長 (km)	被害率 (件/km)	被害 件数	管路長 (km)	被害率 (件/km)	被害 件数	管路長 (km)	被害率 (件/km)
1	JR柏崎駅	95.1	92.3	13	3.22	4.04	68	44.08	1.54	60	105.05	0.57	19	61.95	0.31
2	西山IC	75.1	101.9	0	0.00	-	1	6.41	0.16	7	16.21	0.43	0	4.04	0.00
3	柏崎IC	92.0	110.0	0	0.00	-	31	31.27	0.99	48	75.47	0.64	14	35.66	0.39
4	K-NET柏崎	126.1	131.3	13	3.22	4.04	93	45.56	2.04	78	104.18	0.75	23	61.45	0.37
5	旧西山町役場	83.5	93.8	0	0.00	-	8	5.21	1.53	7	13.04	0.54	0	1.10	0.00
6	吉井鉾場	83.2	94.7	0	0.00	-	2	6.77	0.30	1	14.25	0.07	0	4.25	0.00
7	鏡町供給所	113.7	113.4	13	3.22	4.04	83	47.53	1.75	72	107.47	0.67	18	63.35	0.28
8	川内ダム	31.8	40.1	0	0.00	-	0	0.61	0.00	0	1.71	0.00	0	0.00	-
9	谷根ダム	28.6	18.2	0	0.00	-	0	2.02	0.00	0	1.74	0.00	0	0.00	-
10	刈羽村役場	156.2	108.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	4.37	0.00

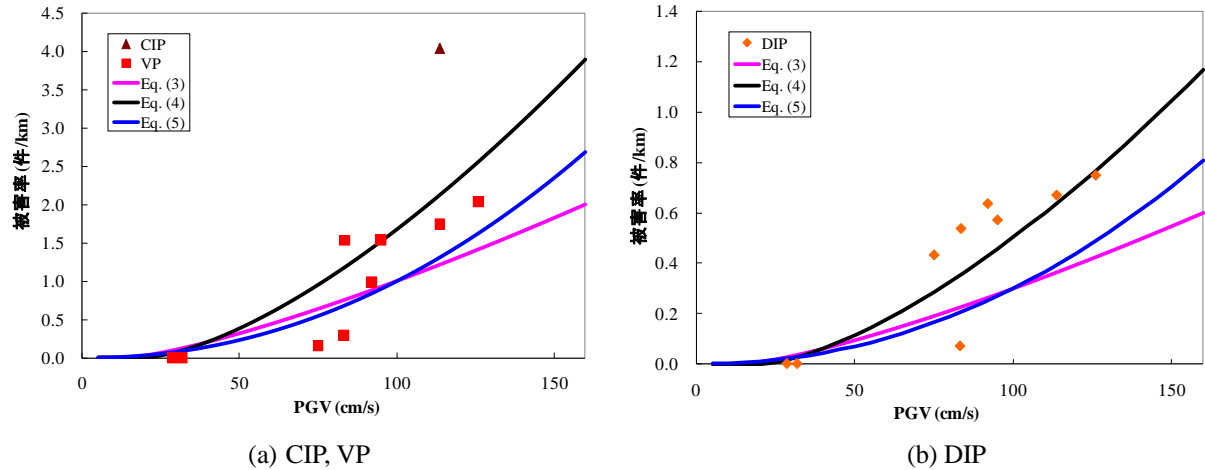


図3 配水管被害率と既往被害予測式

路長を抽出し、被害率(件/km)を算出した。対象地震計周辺における、PGV、SI、被害件数、埋設管路長、配水管およびガス低圧管の被害率を表2に示す。

表2より、配水管のCIPは3観測点とも同じ被害件数、管路長、被害率を示している。これは、柏崎市では市内のごく限られた地域でのみCIPが敷設されているため、被害率の算出領域が市内中心部に設置されている3つの地震計の周辺でオーバーラップしているためである。そのため、3観測点のうち鏡町供給所の値を比較対象とした。

算出した被害率と既往の被害予測式を比較したものを、配水管については図3(a)(b)に、ガス低圧管は図4に示す。配水管のうちCIPおよびVPについては、PGVが約80cm/s以下では既往の式よりも被害率が低く、80cm/s以上になると、式(3)、(5)よりも高い被害率であった。式(4)は一部の被害率を除いて過大評価する傾向にある。配水管DIPについては、全体的に既往の式よりも高い被害率を示した。ガス低圧管のDIPについては、全ての地震観測点周辺の被害率が既往の式よりも低かった。

種々提案されている被害予測式による推定被害率と新潟県中越沖地震の埋設管の実被害率の誤差を式(10)により評価した。

$$\varepsilon = \sum (P_R - R)^2 w \quad (10)$$

ここで、 P_R は表2に示した実被害率、 R は被害予測式から得られる推定被害率であり、 w は管路延長比率である。実被害率と推定被害率の誤差を算出した結果を配水管については表3、ガス低圧管については表4に示す。その結果、配水管はCIP、VPおよびDIPとも式(4)の差が小さいことが分かった。また、ガス低圧管は式(8)の方が、差が小さいことが確認できた。

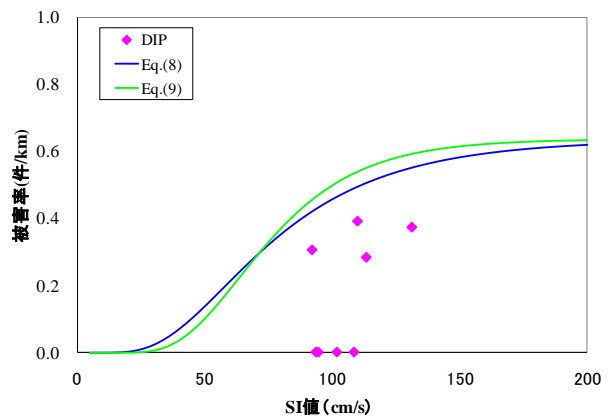


図4 ガス低圧管(DIP)被害率と既往の被害予測式

表3 配水管の実被害率と既往式の誤差($\times 10^{-2}$)

管種	Eq. (3)	Eq. (4)	Eq. (5)
配水管CIP, VP	9.36	5.51	7.63
配水管DIP	5.02	0.79	4.53

表4 ガス低圧管の実被害率と既往式の誤差($\times 10^{-2}$)

管種	Eq. (8)	Eq. (9)
ガス低圧管DIP	1.41	2.01

4.2 柏崎市全体における埋設管被害率

前節では、標準被害率曲線の構築条件を踏まえ、地震計半径2kmの領域内の被害率を既往式と比較した。本節では、推定地震動分布を用いて埋設管被害率を広域に算出し、回帰分析により柏崎市全体における埋設管の被害傾向を分析する。

推定地震動分布はMaruyama *et al.*¹⁰⁾が計算したものを使用した。用いた推定地震動分布の地震動指標はPGVであるため、ガス低圧管の被害率を評価する場合には童らの関係式¹¹⁾を用いてSI値へ換算した。柏崎市における推定PGV分布を示したものを図5に示す。また、推定地震動を用いて算出した埋設管被害率を表5、表6に示す。被害率算出に当たっては、前節同様、沖積平野に該当する被害数、管路長を対象とし、被害率(件/km)を定義した。回帰分析は、関数形には、配水管、ガス低圧管ともに、式(7)のように、標準正規分布の確率分布関数を設定し、パラメータ C 、 λ 、 ζ は、式(10)の目的関数 ε を最小化することで求めた。解法には、準ニュートン法による非線形最小二乗法を用いた。関数形に標準正規分布の確率分布関数を設定した理由は、被害率の頭打ちの傾向を表現出来ること、また式(2)のような指数関数形を用いると埋設管に被害が発生し始める地震動の下限値を設定する必要があるが、標準正規分布の確率分布関数ではその必要がないためである。回帰分析により得られたパラメータ C 、 λ 、 ζ を表7に示す。また、回帰分析結果と既往予測式を比較したものを図6、図7に示す。配水管CIP、VPについては、PGVが約70cm/s程度までは式(4)とほぼ同じ程度の推定被害率を示し、さらにPGVが大きくなると被害率が頭打ちする傾向が見られる。配水管DIPについては、PGVが約120cm/sまでは既往予測式よりも高い被害率を示し、約140cm/sで被害率の頭打ちの傾向を見ることが出来た。また配水管の被害率の立ち上がり始めの地震動強さについては、既往予測式とほぼ同等であることが見受けられた。ガス低圧管DIPについて

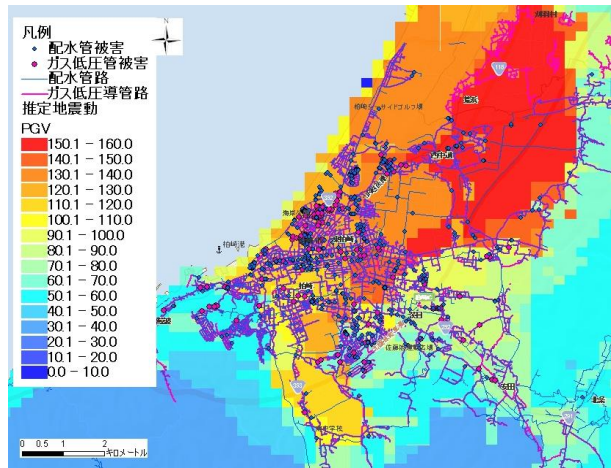


図-5 推定地震動分布 (PGV)

表 5 推定地震動を用いた配水管被害率

(a) CIP,VP

PGV 区間	重み付平均 PGV(cm/s)	被害件数	管路長 (km)	被害率 (件/km)
-50	37.2	4	19.68	0.20
50-60	54.8	17	19.08	0.89
60-70	64.7	11	17.20	0.64
70-80	75.7	2	6.73	0.30
80-90	85.7	7	9.47	0.74
90-100	92.4	3	7.10	0.42
100-110	106.4	2	9.78	0.20
110-120	115.2	41	16.89	2.43
120-130	124.4	56	31.04	1.80
130-140	133.5	25	15.71	1.59
140-150	145.8	12	8.09	1.48
150-	155.1	7	6.84	1.02

(b) DIP

PGV 区間	重み付平均 PGV(cm/s)	被害件数	管路長 (km)	被害率 (件/km)
-60	40.4	8	60.89	0.13
60-70	64.7	11	26.69	0.41
70-80	75.3	14	22.52	0.62
80-90	85.9	6	19.54	0.31
90-100	92.8	5	16.82	0.30
100-110	105.9	4	18.18	0.22
110-120	115.6	32	45.56	0.70
120-130	124.4	51	58.98	0.86
130-140	133.5	32	45.96	0.70
140-150	145.3	17	21.86	0.78
150-	155.0	11	23.70	0.46

表 6 推定地震動を用いたガス低圧管 (DIP) 被害率

SI 区間	重み付平均 SI(cm/s)	被害件数	管路長 (km)	被害率 (件/km)
-70	58.4	1	16.4	0.06
70-90	80	3	15.4	0.20
90-120	102.6	2	24.1	0.08
120-140	131.9	3	32.7	0.09
140-160	148.9	19	51.6	0.37
160-	173.5	7	30.2	0.23

表 7 回帰分析により得られたパラメータ C 、 λ 、 ζ

埋設管	ζ	λ	C
配水管CIP・VP	0.72	4.58	2.42
配水管DIP	0.47	4.27	0.76
ガス低圧管DIP	1.28	6.46	1.95

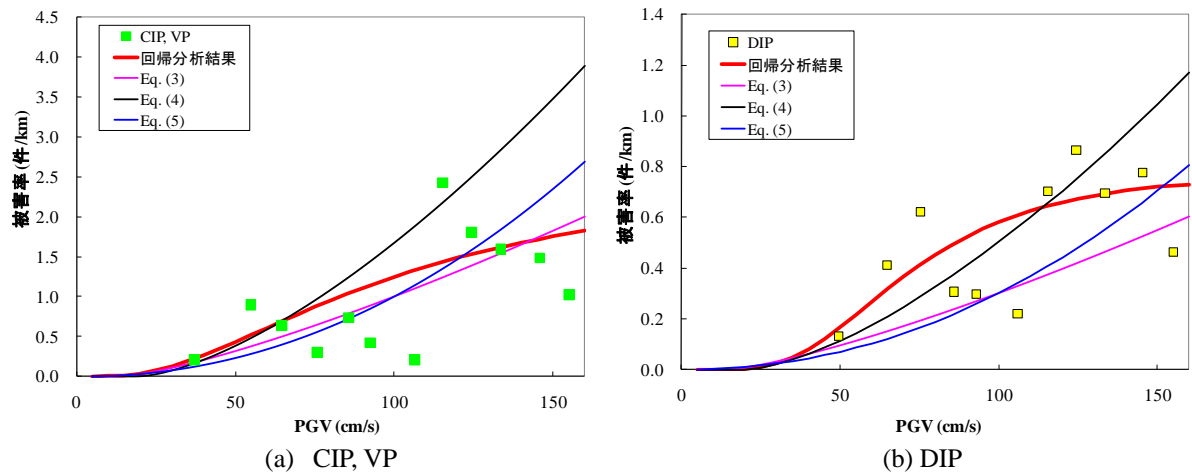


図6 配水管における回帰分析結果と既往被害予測式

は、既往予測式よりも小さい被害率を示し、SI値が200cm/sに達しても頭打ちの傾向を見ることが出来なかった。また、被害率の立ち上がり始める地震動強さが既往予測式よりもやや小さいように思われる。ただし、これらの結果は地震動分布の推定精度に依存するものと考えられ、信頼性の高い被害曲線を得るためには、新潟県中越沖地震の地震動分布に関する更なる研究が必要になると考えられる。

5. まとめ

本研究では、新潟県中越沖地震における地震計から半径2km内の領域の埋設管実被害率と既往被害予測式との比較を行った。また、推定地震動分布を用いて、柏崎市全体の埋設管被害率の傾向を既往予測式と比較した。配水管DIPにおいては既往の被害予測式よりも被害率が高く、ガス低圧管DIPにおいては、既往の被害予測式よりも被害率が低いことが分かった。

本研究の結果や、同様な埋設管と地震強さの関係の分析を積み重ねることで、埋設管の地震被害予測式の高精度化が期待出来ると考えられる。

謝辞

本研究で使用した配水管被害、管路データ、ガス低圧管路データは、柏崎市ガス水道局が取りまとめたものを使用した。ガス低圧管被害データは社団法人日本ガス協会が取りまとめたものを使用した。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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761号, 1999, pp.25-40.
- 2) 東京都: 東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書, 1997.
- 3) 高田至郎, 藤原正弘, 宮島昌克, 鈴木康博, 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, Vol. 70, No. 3, 2001, pp. 21-37.
- 4) 清水善久, 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 小金丸健一, 中山渉: 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用, 土木学会論文集 No.738/I-64, 2003,

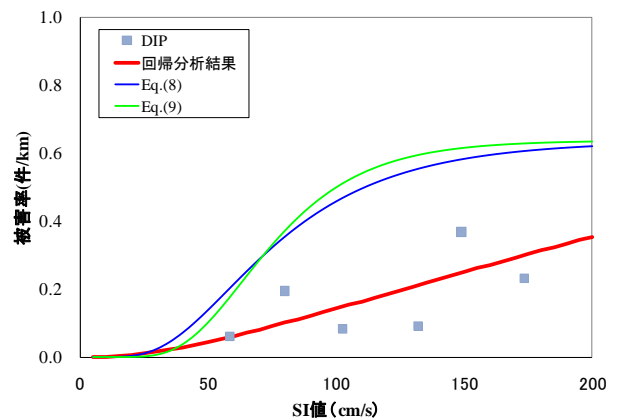


図7 ガス低圧管(DIP)における回帰分析結果と既往被害予測式

pp.283-296.

- 5) 三津谷維基, 坂上貴士, 細川直行 : 兵庫県南部地震の被害実績に基づく低圧ガス導管網の被害予測, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, 2006, pp. 1250-1253.
- 6) Kuwata, Y., Blard, J. and Takada, S. : Damage Analysis of the Water Supply System of in Case of the 2007 Niigataken Chuetsu-Oki Earthquake. *Memoirs of Construction Engineering Research Institute* Vol. 50, 2004, pp.155-164.
- 7) 小川安雄, 清水謙司, 山本浩司, 富倉暢宏 : 兵庫県南部地震ガス導管被害の要因分析GISシステムの構築, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, 1997, pp.1301-1304.
- 8) 竹内圭史, 川畑大作 : 中越柏崎－東頸城地域の5万分の1数値地質図, 産業技術総合研究所地質調査総合センター研究資料集, No. 464, 2007, CD-ROM.
- 9) 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, 2004, pp.213-232.
- 10) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y. and Yogai, H. : Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, 2010, No. 11, pp. 1158-1167.
- 11) 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾 : 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集2, 1994, pp.2299-2304.