

東北地方太平洋沖地震における 宮城県北西部の管路被害分析

鋤田 泰子¹・大野 顕大²

¹正会員 神戸大学准教授 工学研究科市民工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)
E-mail:kuwata@kobe-u.ac.jp

²非会員 関西電力株式会社 (〒530-8270 大阪市北区中之島3丁目6番16号)

東北地方太平洋沖地震による被害は、津波や液状化による被害が顕著であったが、震源断層が巨大であったために広域で強震動が観測され、地震動による被害も少なからず発生した。本研究では、東北地方太平洋沖地震の宮城県北西部を対象にして、水道管路被害のデータベースを構築し、中山間地域を主とする水道管路の被害傾向を把握した。分析の結果、中山間地域に多く敷設されている小口径塩化ビニル管の脆弱性を定量化することができた。さらに、塩化ビニル管については、既往の知見よりも被害が少なくなる結果が示された。

Key Words : *The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, pipeline damage, Miyagi Prefecture*

1. はじめに

2011年3月11日発生した東北地方太平洋沖地震では、太平洋沿岸域の津波被害や、原子力発電所の被害による放射能汚染、東京湾岸や利根川流域での液状化被害が甚大で、数多くの現地調査結果が報告されている¹⁾。一方、震源断層が巨大であったために広域で数多くの強震動が観測されたが、強い加速度や高い計測震度が記録された観測点周辺では建物被害はそれほど大きくなかったことが報告されている²⁾。本研究では、地中管路被害との相関が良いとされている最大速度の分布を参考にして、本震で比較的に強い最大速度が観測された宮城県北西部を対象にして、配水管路の被害状況を明らかにする。

配水管路の被害分析ならびに被害予測式の構築に関する研究は、兵庫県南部地震後に都市域の管路被害データベースが構築され、観測点周辺の管路被害と地震動との関係を明らかにするとともに、管路全体の統計分析によって管路属性による脆弱性や表層地盤の影響が検討されてきた^{3), 4)}。しかし、単一の地震でさらに分析対象地域が神戸・阪神地域に限られていたために、他地域への被害推定などに用いる場合には、地震動や管路属性の適用性について疑問が残っていた⁵⁾。丸山・山崎⁶⁾は兵庫県南部地震以降に発生した2004年新潟県中越地震や2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震の配水管路被害データを加え被害予測式の改良を行っている。さらに、管

路被害予測における地盤条件について、過去の地震の管路被害データから斜面地形⁷⁾や微地形⁸⁾に着目して管路被害への影響度を定量的に分析されている。

本研究の分析対象地域は、宮城県北西部で、震度7が観測されたK-NET築館のある栗原市から震源方向に太平洋沿岸までを包含する範囲である。行政区域では、宮城県大崎市・美里町・松島町・栗原市・塩釜市の5市町が該当する。本地震の調査報告では、分析対象地域で強震動とともに揺れによる地震被害が数多く報告されている⁹⁾。鋤田・岡本¹⁰⁾の調査によると本地震の被災市町の管路被害率(管路の被害件数を管路延長¹¹⁾で除したものの、件/kmとする)は、分析対象地域の市町で表-1に示すように0.2~0.6件/kmである。この値は、液状化が多く見られた茨城県の市町を除けば、他の市町より高く、また新潟や能登での地震被災経験市町の管路被害率とほぼ同じである。つまり、分析対象地域では地震動によって管路に相当な被害があったことを示している。しかし、本地震の分析対象地域の管路被害は詳細にまとめられておらず、その傾向を把握することは重要である。さらに、本研究のように中山間地域を主とする広大な範囲を対象に管路被害分析した事例はなく、神戸・阪神地域のような都市域との違いの有無、また違いがある場合にはその特性を明らかにすることが重要である。そこで、本研究では、GISを用いて当該地域の管路被害データベースを構築し、管路属性による脆弱性の評価を行った。

表-1 分析対象地域の市町の管路被害率^{10), 11)}

市町	配水管延長 (km)*	被害件数	管路被害率 (件/km)
栗原市***	613	196	0.32
大崎市	964	230	0.24
美里町***	206	137	0.67
松島町**	112	56	0.40
塩竈市	288	65	0.23

注) *: 配水管延長は水道統計に基づく

** : 松島町は管径 75mm 以上の被害件数を用いて被害率を計算した。

*** : 栗原市・美里町の被害件数には属具も含む

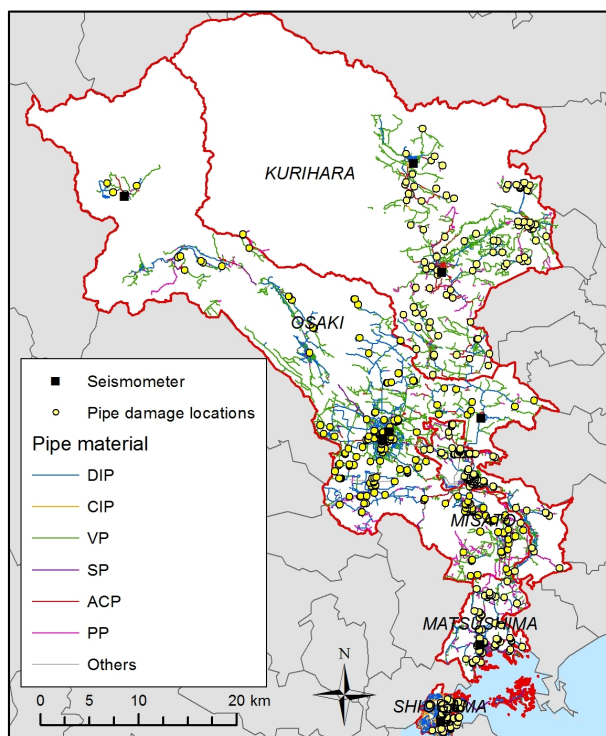


図-1 管路被害分布図

2. 水道管路の被害データベースの構築

本研究では、分析対象地域の5市町の配水管路と被害点の資料を収集し、GIS上で管路被害データベースを構築した。管路データは、まず、各水道事業者から提供された管路の紙地図を大型スキャナで読み込んで画像データとし、GIS上で重ね合わせられた道路のラインデータ¹²⁾を加工・作成した。被害点のデータは、管路データと同様にラスター地図にあるポイントを重ねてデータを作成した。管路、被害点のデータにはそれぞれ、管種、口径、その他(市町により被害モードなど)の属性を与えた。5市町の内、栗原市については山間部の簡易水道供給地域を省いている。図-3は対象地域の配水管路と被害点の位置を示している。鉄道の駅周辺に市街地が広がり、管路の敷設密度が高い地域が局所に存在していることが

表-2 分析対象地域の管路被害クロス集計

管種	口径	φ50	φ75	φ100-150	φ200-450	φ500-	総計
DIP	D(件)	1	15	88	59	2	165
	L(km)	3.7	89.9	461.8	292.3	28.8	876.5
	RR(件/km)	0.27	0.17	0.19	0.20	0.07	0.19
CIP	D(件)	0	18	31	7		56
	L(km)	0.8	10.2	58.8	15.3		85.1
	RR(件/km)	0.00	1.76	0.53	0.46		0.66
VP	D(件)	60	30	103	3		196
	L(km)	248.6	261.3	579.3	14.9		1104.1
	RR(件/km)	0.24	0.11	0.18	0.20		0.18
SP	D(件)	7	5	16	12	0	40
	L(km)	7.8	3.2	25.3	13.0	6.2	55.5
	RR(件/km)	0.89	1.58	0.63	0.92	0.00	0.72
ACP	D(件)	2	18	37	5		62
	L(km)	10.2	41.6	69.8	21.8		143.4
	RR(件/km)	0.20	0.43	0.53	0.23		0.43
PP	D(件)	13	0	1	0	0	14
	L(km)	154.7	16.7	39.4	10.4	0.1	221.3
	RR(件/km)	0.08	0.00	0.03	0.00	0.00	0.06
SUS	D(件)	0	0	0	0		0
	L(km)	0.0	0.2	1.3	0.3		1.9
	RR(件/km)	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00
総計	D(件)	83	86	276	86	2	533
	L(km)	425.8	423.1	1235.7	368.2	35.1	2487.9
	RR(件/km)	0.19	0.20	0.22	0.23	0.06	0.21

注) DIP : ダクタイル鋳鉄管, CIP : 鋳鉄管, VP : 塩化ビニル管, SP : 鋼管, ACP : 石綿管, PP : ポリエチレン管, SUS : ステンレス管, D : 被害数 (件), L : 管路延長 (km), RR : 被害率 (件/km)

わかる。また、表-2は管路被害の口径・管種クロス集計を示している。簡易水道の延長や資料のない一部の簡易水道を省いた対象地域の管路総延長は2,488kmである。表-1に比べて総延長がデータの方が多いのは簡易水道の管路網や一部の送水管(地域によっては配水管と属性が変わらないものもあるため)も含んでいるためである。本研究のデータベースは、兵庫県南部地震時に分析された高田ら⁴⁾の2,716kmの管路データや磯山ら¹³⁾の2,114kmの管路データに匹敵するもので、既往の同種の管路被害分析と比べて統計的にも十分な管路延長を有している。さらに、対象地域が中山間地のため、既往の都市域の管路データと比べて塩化ビニル管が多く、ダクタイル鋳鉄管とはほぼ同量ある。また、φ50以下の小口径管路の延長が長いことが特徴である。

東北地方太平洋沖地震による分析対象地域の管路被害の特徴として、塩化ビニル管よりもダクタイル鋳鉄管の被害が多かった。ダクタイル鋳鉄管の被害箇所は、河川沿いや海岸周辺で地盤変状により同一幹線上に連続して複数被害を受けているケースが散見した。鋼管の被害はねじソケット継手の被害が多く、ポリエチレン管で発生している被害は耐震性のある熱融着継手ではない管路による被害であった。

3. 管路属性による脆弱性分析

管路属性の脆弱性を明らかにするため、本研究では、日水協³⁾から示されている管路被害予測式である式(1)を参照にしながら、本地震の管路被害に合った管路属性の補正係数を求める。

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

ただし、 $R_m(\alpha)$ ：地震動 α （最大加速度または最大速度）に対する被害率（件/km）、 C_p 、 C_d 、 C_g 、 C_l ：管種、口径、地形、液状化に関する補正係数、 $R(\alpha)$ ：標準被害率（件/km）

分析対象地域において250m四方のメッシュよりも詳細な微地形データを有していないことと、広域な分析対象地域で液状化発生場所を網羅できず、さらに一部液状化・全面液状化の分類で液状化程度を判断できないことを踏まえ、式(1)の液状化や地形の補正係数 C_g 、 C_l を省いた式に基づいて分析を行う。式(1)の補正係数は、各項目が独立した変数として算出されたもので、入力する地震動に表層地盤の影響が含まれていることから地形の補正係数を含まない予測式も提案されている⁴⁾。また、液状化による補正係数を含めない代わりに液状化に相当する被害データの削除を行った。著者らの研究で、液状化による管路被害集中域では1.0件/km以上の管路被害率になり、同一管路上に隣接して複数件の被害が発生することが明らかになっている¹⁴⁾。そのため、1メッシュで同じ管種・口径で100m程度の管路延長に連続して3件以上被害点がある場合は、液状化等の局所的な地盤変状によるものと考えて、1件の被害点と見なしてデータベースの加工を行った。この加工方法には別の基準を設定することも可能であるが、実際の被害点の分布で狭い範囲で連続した箇所は限られており、1ヵ所とみなす場合には方法によって結果はほとんど変化しない。また事業体によって被害区間として1ヵ所と数えている場合もある。

まず、各市町で管種（6区分）、口径（5区分）のそれぞれの組み合わせ（6×5=30通り）について、被害件数・管路延長を集計し被害率を求めた。さらに、この被害率をもとに、対数場での数量化理論第Ⅰ類による多変量解析を行った。基準となる管路属性については、管種はダクタイル鋳鉄管（DIP）、口径はφ100-150の区分とした。基準管路属性の管路被害率に対する管種・口径の組み合わせの管路被害率の比を目的変数、その管種・口径を説明変数とした。基準管路属性の選定理由は、DIPの延長が十分得られており、敷設されている口径区分の幅も広い。

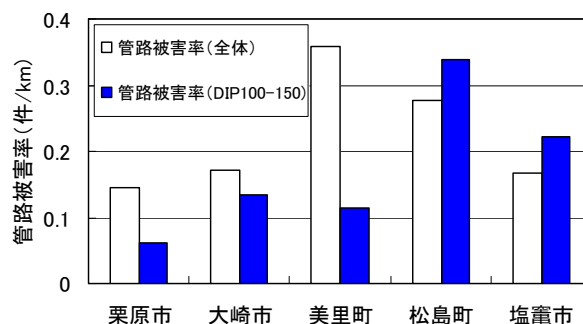


図-2 市町別のデータ加工後の管路被害率

図-2は市町別に上述した液状化に相当する被害データの加工を行った後の市町全体の管路被害率とDIPのφ100-150の管路被害率を比べている。表-1に比べて管路本体や継手以外の属具などの被害と液状化による加工で被害件数そのものは減少している。全体の管路被害率とDIP φ100-150の管路被害率と2倍以上の差がある栗原市と美里町では、配水管の1割程度が石綿管であり、またφ75以下の口径が多いために全体の管路被害率が高く算出されたと考えられる。以上を考慮すると、管路全体の管路被害率とDIP φ100-150の管路被害率との相対関係は適当であると考えられる。なお、DIPの中には耐震継手のある管路も含まれているが、地図資料から場所が特定できないものがあることと、水道統計¹¹⁾によって耐震継手のあるDIPの管路延長が塩竈市で9%含まれているが、それ以外の他市町では2%以下であったことから耐震継手のあるDIPの影響は少ないと見なした。

これにより、データベースから松島町の小口径管路被害データを省き、被害件数がある口径・管種の組み合わせのデータセットの管路延長は2,341km、被害件数は457件となった。

多変量分析の結果、相関係数は0.76が得られた。各補正係数の分析結果を図-3に示す。本地震での管路被害と既往の管路被害補正係数を比較すると、口径に関しては従来の知見とほぼ同様な数値で口径が大きくなるほど被害率は小さくなる傾向を示した。前述の先行研究^{3), 4), 14)}では市街地域の管路被害分析であったために口径φ75までの分析に留まっていた。その点で、本研究でφ50以下の管路の脆弱性が定量的に明示されたことの意義は大きく、小口径管路が多い中山間地域の管路被害予測にも適用されることが期待できる。分析結果をもとに本研究で提案する管路属性の補正係数を表-3に示す。補正係数の設定には、回帰分析の結果の他に、クロス集計結果や日水協の補正係数を参考にした。なお、日水協の補正係数³⁾は、兵庫県南部地震の被害の他に、過去の地震を反映して決定されている。

各項目の補正係数について設定根拠を説明する。管種

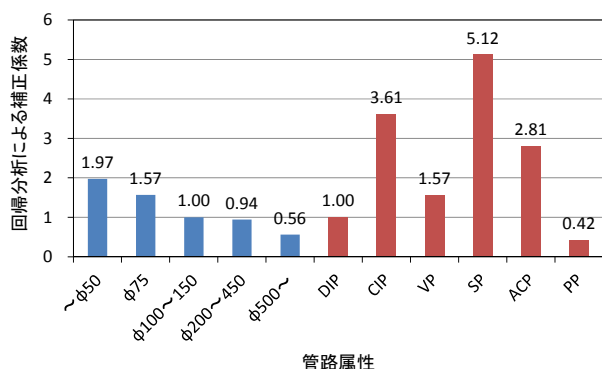


図-3 各補正係数の分析結果

表-3 管種・口径による補正係数

	属性	回帰分析結果	提案する補正係数	日水協の補正係数*
管種	DIP	1.00	1.0	1.0
	CIP	3.61	3.6	3.3
	VP	1.57	1.6	3.3
	SP	5.12	5.0	1.0(3.3**)
	ACP	2.81	2.8	4.0
	PP	0.42	0.4	—
口径	~φ50	1.97	2.0	—
	φ75	1.57	1.6	1.6
	φ100-150	1.00	1.0	1.0
	φ200-450	0.94	0.9	0.8
	φ500—	0.56	0.5	0.5

注) *: 日水協の管種の補正係数は CIP を基準にしているが、DIP=1.0 を基準に換算したもの。 **: ねじ形の継手の場合

はDIPを基準にした場合、CIPの回帰分析結果の補正係数は3.61で、日水協が定める補正係数はDIPを基準にすれば3.3であることから、分析結果は妥当な結果であるといえる。補正係数は3.6とした。一方、VPの補正係数は、回帰分析では1.57が得られており、日水協の係数よりも低い。兵庫県南部地震の被災地域ではVPが少なかったことや、VPの敷設率の高い中山間地域の地震被害でもDIPとほぼ同じ被害率であることから、分析結果は妥当と判断し、1.6とした。SPの分析結果は5.12であり、日水協の係数の3.3よりも高い。本地震による被害はねじ継手の被害が多かったため、全体の被害の傾向を踏まえてねじ継手鋼管の参考値として5.0とした。ACPとPPの補正係数は、SPと同様に分析結果を優先して決定した。

口径については、φ75の補正係数は、回帰分析では1.57、日水協の係数では1.6であることから、φ100の脆弱性に対して相対的に妥当な結果が得られたと判断し、1.6と設定した。φ50以下とφ200~450については、回帰分析の結果を優先して設定した。φ500以上については、他の口径と比べて管路延長が短かったために、回帰分析とクロス集計の結果と日水協の補正係数を参考にし、0.5とした。

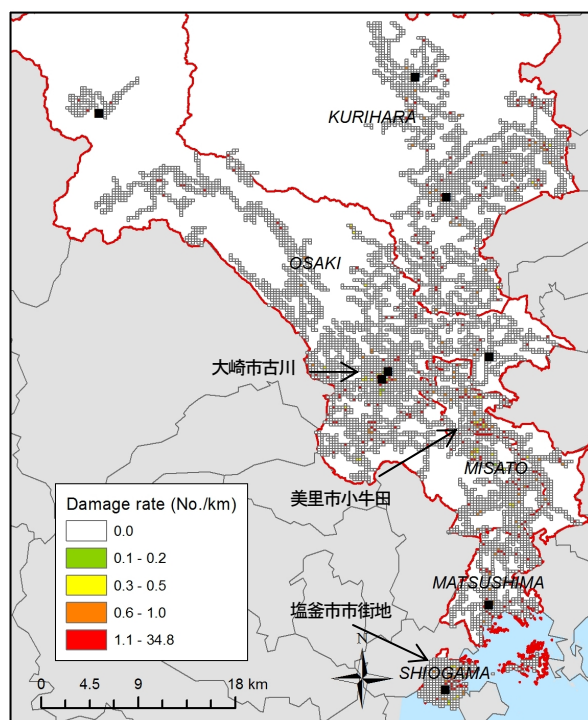


図-4 管路属性補正後の管路被害率分布 (■印は観測点)

4. 分析対象地域の管路被害率分布

本研究では、3.で求めた管路の脆弱性を表す補正係数を用いて、対象地域の管路被害率の空間的な分布を求める。被害率は4分の1の基準地域メッシュ（約250mメッシュ）を基準としてメッシュの管路被害率（メッシュ内の管路延長あたりの被害件数、単位は件/kmとする）で評価する。メッシュ内の管路属性（管種や口径）による管路被害率のばらつきを補正するために、表-3で提案した補正係数を用いて、ダクタイル鋳鉄管、口径φ100-150mmの管路被害率が基準となるように、各メッシュの被害件数を属性ごとに補正係数で除すことによって補正被害件数とし、メッシュ毎に管路被害率を算出した。メッシュの管路属性の補正を行った管路被害率分布を図-4に示す。

管路被害率の高いメッシュは大崎市古川や美里町小牛田、塩竈市の市街地近辺に高い被害率の分布があることがわかる。地震計の観測点は図-4に示すように限られているが、管路被害率の分布はローカルな地盤の影響を受けていることが考えられ、今後地震動や地盤特性をあわせてこれらの要因を整理する必要がある。

また、分析対象地域の多くは中山間地であるためにメッシュ内の延長が短いために管路被害率が非常に高く算出されているところもある。管路敷設密度が低い地域において管路被害率を評価するときに適当な範囲やその延長については精査しておくことも重要である。

5. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震における宮城県北西部の管路被害状況を明らかにするため、管路被害データベースを構築して分析を行った。本研究の結論は以下の通りにまとめられる。

- 中山間地域特有の小口径管路の脆弱性を定量化し、塩化ビニル管は既往の知見よりも強く、ダクタイル鋳鉄管よりも若干弱いことがわかった。
- 基準となる管路属性に補正して管路被害率分布を示したところ、大崎市古川や美里町小牛田、塩竈市の市街地近辺に高い被害率があることがわかった。

今後、地震動や地盤特性と合わせて管路の被害状況について分析していく予定である。

謝辞： 本研究の遂行にあたり、宮城県の5市町の水道事業体の皆様には、貴重な資料を提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、土木学会地震工学委員会：第23回地震工学研究発表会概要集，2011.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査 白河市，須賀川市，仙台市における RC 造，S 造，非構造部材を中心とした建築物被害調査（速報），2011.
- 3) (社)日本水道協会：地震による水道管路の被害予測，1998.
- 4) 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798号，pp.21-37，2001.
- 5) Yasuko Kuwata, Jerom Blard, Shiro Takada: Damage analysis of the water supply system of Kashiwazaki-City in the case of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake, 建設工学研究所論文報告集, 第 50 号, pp.155-164, 2008.
- 6) 丸山喜久，山崎文雄：近年の地震被害データを加味したマクロな配水管被害予測式の改良，土木学会論文集A1, Vol.65, No.1, pp.565-574, 2009
- 7) 鉄田泰子，高田至郎，勤息義弘，M. B. Javanbarg：斜面地形による水道管路被害への影響評価～2004 年新潟県中越地震の管路被害分析～，日本地震工学会論文集 5 巻, 4 号, pp.1-14, 2005
- 8) 熊木芳宏，宮島昌克，降矢拓也：水道管路の耐震性検討のための地盤条件に関する一考察，土木学会論文集 A1, Vol.66, No.1, pp.397-402, 2010.
- 9) 後藤浩之，高橋良和，鉄田泰子，高橋章浩，盛川仁：地震動による地盤と構造物の被害，自然災害科学, Vol. 30, No. 1, pp.49-53, 2011.
- 10) 鉄田泰子，岡本祐：東北地方太平洋沖地震における断水長期化要因の解明：地域安全学会論文集, No.17, 2012.
- 11) (社)日本水道協会：水道統計，2007.
- 12) 国土地理院：数値地図25000（空間データ基盤）宮城，2003.
- 13) 磯山龍二，石田栄介，湯根清二，白水暢：水道管路の被害予測に関する研究，水道協会雑誌 第761号 pp.25-40, 1998年.
- 14) 鉄田泰子，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・東日本大震災特集号第12巻，第4号（特集号），pp.249- 262, 2012.

(2012.9.1 受付)

ANALYSIS ON PIPELINE DAMAGE IN THE NORTHWEST OF MIYAGI PREFECTURE DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Yasuko KUWATA and Akihiro OHNO

This study focuses on the water-supply pipeline damage in northwestern Miyagi Prefecture, where the seismic ground motion is predominant cause rather than tsunami and liquefaction. The information on damage to water pipeline was collected from 5 cities and towns; Osaki, Misato, Matsushima, Kurihara and Shiogama. The pipeline damage information was compiled in the GIS. Fragility due to pipe diameter and pipe material was confirmed to be similar as one in the previous study. Especially the fragility of small diameter vinyl pipeline which is commonly used in the rural area is useful for damage estimation in the future.