

数量化理論Ⅰ類に基づく上水道管路の地震時被害率に及ぼす影響要因の分析

EVALUATION OF INFLUENCES ON DAMAGE TO WATER DISTRIBUTION PIPELINES BASED ON THE QUANTIFICATION TYPE I

18WM1317 田口 裕貴
Yuki Taguchi

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

In this study, damage analysis of water distribution pipelines during the 2016 Kumamoto earthquake was performed using Geographic Information System (GIS). The relationship among the pipe material, diameter, topographic condition, seismic intensity and damage ratio of the water distribution pipelines was evaluated. Besides, the damage ratios were compared with the correction coefficients of fragility function of water pipes. In order to reveal the cause of damage to water distribution pipelines during an earthquake, regression analysis based on the quantification type I was performed. To achieve the objective, damage datasets in the five municipalities were employed in this study.

1. はじめに

2016年4月に発生した熊本県熊本地方を震源とする熊本地震では、死傷者は2600人以上にも及び、約19万戸の住宅被害が生じたことに加えて、道路、上下水道、電力、都市ガス等のライフラインシステムの施設にも多大な被害をもたらした。上水道については、震源地である熊本県における被害が最も多く、この地震による断水被害は約44万6000戸発生した¹⁾。

水道や都市ガスなどのライフラインシステムは都市機能や都市生活を維持するうえで必要不可欠である。したがって、これらのライフラインを早期復旧させることは非常に重要である。そのためには、これまでの地震によって発生した被害の特徴を分析し、その分析結果をもとに、将来起こりうる地震に対して対策を講じることは、意義があるものと考えられる。

本研究では、まず熊本地震の際の熊本市と益城町の上水道管路の被害分析を行う。管種・継手、口径、地形区分、地震動強さと被害率の関係性を分析する。また、液状化や地形の境界条件を考慮して被害分析を行う。さらに、熊本地震の分析結果に、東北地方太平洋沖地震の仙台市と福島県いわき市、新潟県中越沖地震の新潟県柏崎市の被害データを加えて、現行の被害予測式との比較を行う。上水道管路の被害率に対する様々な要因の影響度を明らかにするために、これらの被害データを用いて、管路被害率を目的変数とした数量化理論Ⅰ類による回帰分析を行う。本研究の結果に基づき、今後発生が懸念されている南海トラフ地震や首都直下地震に備え、上水道管路の防災対策の立案に役立てたいと考えている。

2. 本研究で利用したデータ

本研究では、地理情報システム(GIS)を用いて分析を行った。3章で対象とするのは、2016年熊本地震における熊本市と益城町の上水道管路の被害である。熊本市と益城町の管路の敷設状況、および被害地点を図-1に示す。なお、微

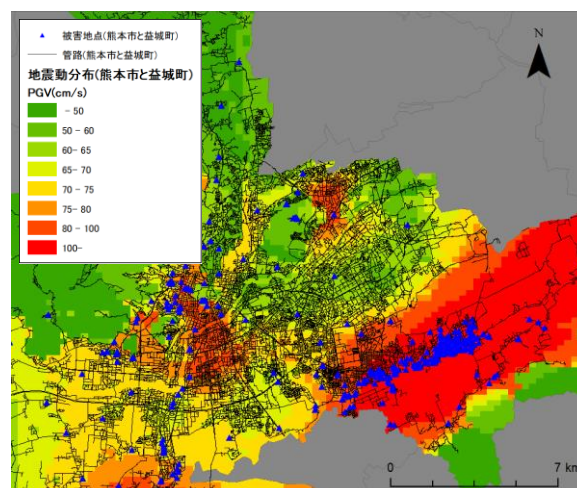


図-1 上水道管路の敷設状況と被害地点および地震動分布（熊本市と益城町）

地形区分、熊本地震の際の液状化発生地点は若松ら^{2), 3)}が取りまとめたデータを用いる。また、熊本地震の際の熊本市、益城町の地震動分布⁴⁾を図-1に併せて示す。

4章と5章では、熊本市と益城町の被害データに加えて、2011年東北地方太平洋沖地震における仙台市といわき市、2007年新潟県中越沖地震における柏崎市の被害データを対象に分析を行った。

3. 熊本地震における被害分析

熊本地震における熊本市と益城町の上水道管路の被害率を算出した。なお、被害率は件/kmと定義した。普通铸铁管(CIP)、ダクタイル铸铁管(DIP)、耐震継手を有するダクタイル铸铁管(DIP(耐震))、ポリエチレン管(PE)、溶接継手鋼管(SP(溶接))、溶接継手以外の鋼管(SP(その他))、塩化ビニル管(VP)を対象に分析を行う。熊本市と益城町を合わせ

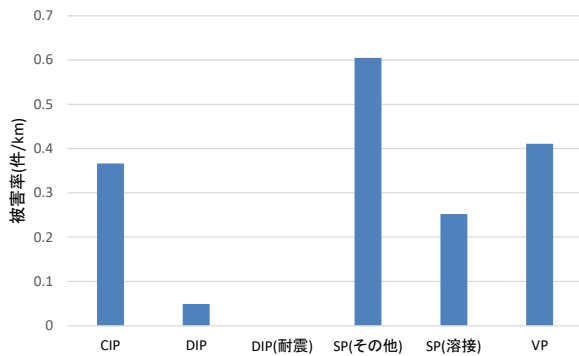


図-2 管種別の被害率(熊本市と益城町)

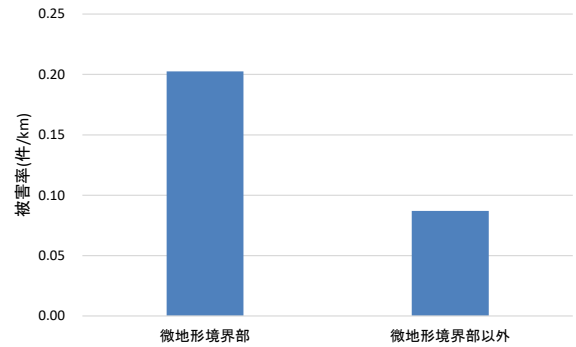


図-4 微地形境界部と境界以外の被害率(熊本市と益城町)

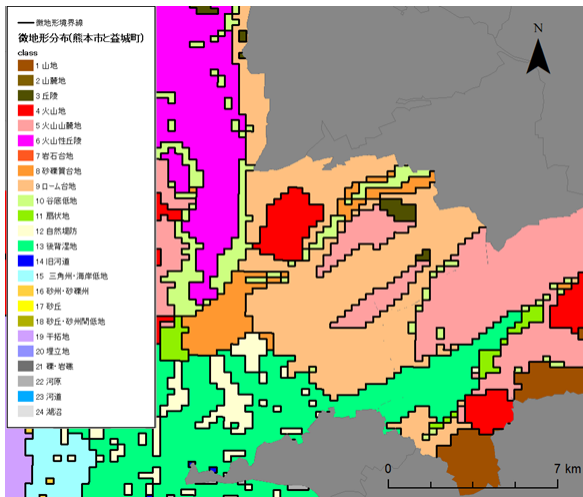


図-3 微地形分布図と微地形の境界線(熊本市と益城町)

た管種別の被害率を図-2 に示す。SP(その他)の被害率が最も高く、次いで VP の被害率が高い。また、DIP(耐震)では被害が発生していない。

さらに、微地形境界部と境界以外の管路被害率を算出し、それらを比較することで、微地形分布図の境界部における管路被害の特徴を把握する。微地形の境界部に着目するために、まず、図-3 に示すように地理情報システム (GIS) で微地形の境界線を表示し、その境界線を中心に 250 m 以内を微地形境界部と設定した⁹⁾。図-4 に、微地形境界部と境界以外の全管種の被害率を示す。熊本市と益城町の微地形境界部の被害率は 0.20 件/km であり、境界以外の被害率よりも 2.2 倍高い値を示した。微地形境界部の被害率は、境界以外の被害率よりも高くなる傾向が認められた。

4. 被害予測式と近年の地震被害における管路被害率の比較

本章では、被害予測式⁹⁾の補正係数と近年の地震被害における管路被害率を比較する。ここでは、前述の熊本地震における熊本市と益城町の被害データに加えて、東北地方太平洋沖地震における仙台市、いわき市の被害データ、新潟県中越沖地震における柏崎市の被害データを用いる。ここで、図-9 に仙台市、いわき市、柏崎市の総管路延長、被害率を示す。これらの 3 都市においても、熊本市、益城町と同様にデータを収集した。

表-1 既往の被害予測式⁹⁾の補正係数

管種・継ぎ手	C_p	口径	C_d	微地形	C_g
DIP-A	1.0	φ50-80	2.0	山地、山麓地、丘陵、火山地、火山山麓地、火山性丘陵	0.4
DIP-K	0.5	φ100-150	1.0	砂礫質台地、ローム台地	0.8
CIP	2.5	φ200-250	0.4	谷底低地、扇状地、後背湿地、三角州、海岸低地	1.0
VP	2.5	φ300-450	0.2	自然堤防、旧河道、砂洲、砂礫洲、砂丘	2.5
SP(溶接)	0.5/0	φ500-900	0.1	埋立地、干拓地、湖沼	5.0
SP(その他)	2.5				

被害予測式の補正係数の基準となる標準管種・継手 (DIP-A)、標準口径 (φ100-150)、標準微地形 (谷底低地、扇状地、後背湿地、三角州・海岸低地) の被害率に対する他の管種・継手、口径、微地形の被害率の比を算出し、それらを補正係数と比較する。なお、益城町といわき市の被害データにおいて、DIP の継手別の被害が不明であったため、この 2 都市においては、標準管種・継手を DIP とする。

現行の被害予測式を式(1)に示す。

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

ここで、 R_m は上水道管路の被害率 (件/km)、 C_p は管種・継手補正係数、 C_d は口径補正係数、 C_g は微地形補正係数、 $R(v)$ は標準被害率 (件/km) である。各補正係数の値は、表-1 の通りである。被害予測式の標準口径 (φ100-150) および標準微地形 (谷底低地、扇状地、後背湿地、三角州・海岸低地) において、標準管種・継手 (DIP-A) の被害率と他の管種の被害率を比較した (図-5)。標準口径かつ標準微地形における管種・継手別の被害率は、DIP-A の被害率を基準とすると、CIP と SP(その他) の被害率の比が大きな値を示した。SP(その他) と CIP は管路延長が短いこともあって、このような極端に高い値を示したと考えられる。

管種・継手補正係数の検証と同様に、標準口径の被害率と他の口径の被害率を比較した (図-6)。式(1)の補正係数とは異なるケースもみられたが、口径が大きくなるに従い、被害率の比も補正係数と同様に小さくなる傾向が概ね確認できた。

微地形補正係数 C_g の評価のため、標準管種・継手かつ標準口径において、標準地形区分の被害率と他の地形区分の被害率の比率と微地形補正係数の値を比較した (図-7)。微地形区分は被害予測式の補正係数の値ごとにグループ分けを行い、グループ A は、山地、山麓地、丘陵、火山地、火山山麓地、火山性丘陵、グループ B は砂礫質台地、ローム

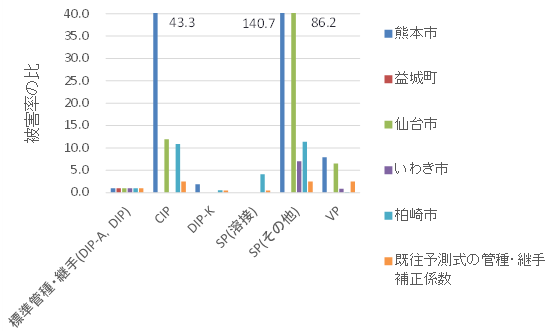


図-5 管種・継手補正係数と被害率の比の比較

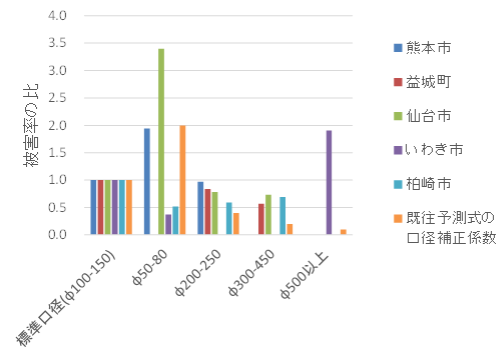


図-6 口径補正係数と被害率の比の比較

台地，グループ C(標準地形区分)は谷底低地，扇状地，後背湿地，三角州・海岸低地，グループ D は自然堤防，旧河道，砂洲・砂礫洲，砂丘，グループ E は埋立地，干拓地とした．グループ A においては，仙台市の被害率の比が 2.7 倍と，補正係数 (0.4) よりも大きな値を示したが，その他の被害データでは，補正係数と概ね近い値を示した．また，グループ B では，補正係数の値よりも大きく，グループ D では補正係数の値よりも小さくなる傾向がみられた．グループ E では，被害が確認された熊本市，柏崎市で補正係数と近い値を示した．なお，益城町では，標準微地形の被害率が最も大きかったため，グループ A，B の被害率の比が小さな値を示している．

5. 数量化理論 I 類に基づく管路被害率に対する影響度の分析

管路属性や微地形の境界条件などの各要因が上水道管路の被害率に与える影響度を定量化するため，本研究の結果を踏まえて仮定した式(2)に基づいて数量化理論 I 類による回帰分析を行う⁷⁾．

$$R_m = C_p \times C_d \times C_g \times C_v \times C_l \times C_b \times R_0 \quad (2)$$

ここで， R_m は推定被害率(件/km)， R_0 は標準被害率(件/km)， C_p ， C_d ， C_g ， C_v ， C_l ， C_b は管種，口径，微地形，PGV，液状化，微地形の境界条件に関する補正係数である．本研究では式(2)の両辺の常用対数を取り，数量化理論 I 類による線形重回帰分析を行う．したがって，被害率 0 のデータを考慮できない．そこで，本研究では補正係数の絶対値を評価するのではなく，大小関係について主に検討することとする．

4章と同様に熊本地震における熊本市と益城町，東北地方太平洋沖地震における仙台市，いわき市の被害データ，新

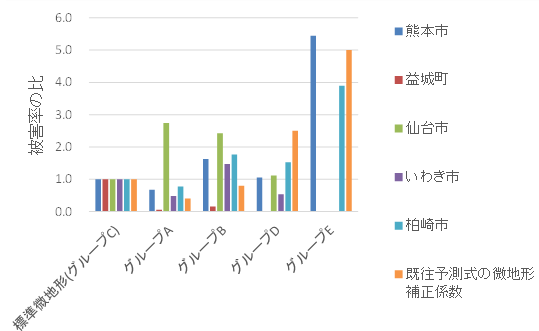


図-7 微地形補正係数と被害率の比の比較

潟県中越沖地震における柏崎市の被害データを対象に分析を行う．なお，これらの被害データは地震による区別を行わず，各属性における管路延長と被害数を統合して分析を行う．また，管路延長がほとんどないようなデータの混入は，被害率の信頼性が低く⁸⁾回帰分析に悪影響を与える可能性が高いため，延長が 1 km 未満の被害データは除外する．

本研究の回帰分析では式(2)に基づいて，目的変数は被害率(件/km)，説明変数は管種，口径，微地形，PGV，微地形の境界条件，液状化とする．管種はDIP，CIP，PE，SP(溶接)，SP(その他)，VPの6区分，口径はφ40 mm以下，φ50-75 mm，φ100-150 mm，φ200-250 mm，φ300-450 mm，φ500-900 mmの6区分，微地形は，被害予測式¹⁴⁾と同じ区分で，A(山地，山麓地，丘陵，火山地，火山性山麓地，火山性丘陵)，B(砂礫質台地，ローム台地)，C(谷底低地，扇状地，後背湿地，三角州・海岸低地)，D(自然堤防，旧河道，砂洲・砂礫洲，砂丘)，E(埋立地，干拓地，湖沼)の5区分，PGVは30 cm/s未満，30-40 cm/s，40-50 cm/s，50-60 cm/s，60-70 cm/s，70-80 cm/s，80-90 cm/s，90-100 cm/s，100-110 cm/s，110-120 cm/s，120-130 cm/s，130 cm/s以上の12区分，微地形の境界条件は微地形境界部と微地形境界以外の2区分，液状化は液状化範囲と非液状化範囲の2区分とした．

数量化理論 I 類では，管路被害予測式の基準属性に倣って，管種はDIP，口径はφ100-150 mm，微地形はC区分を基準属性とする．また，PGVは30-40 cm/s，境界条件は微地形境界部以外，液状化は非液状化範囲を基準属性とした．対数場で求めた補正係数を真数に戻し，補正係数の比較を行う．また，説明変数の各区分の対数場での補正係数の最大値と最小値の差から，説明変数ごとにレンジ⁹⁾を算出する．レンジが大きい説明変数は，目的変数(被害率)への影響が大きい重要な説明変数と解釈できる．

数量化理論 I 類で得られた補正係数を図-8，各項目のレンジを図-9に示す．決定係数は0.66であった．図-8によると，CIP，PGV100 cm/s以上の補正係数が非常に大きな値を示した．これは，これらの要因が被害率を高くすることに大きく影響していることを意味する．CIPについては，基準のDIPの9.5倍の値となっており，被害率が大きくなりやすいことが確認できた．PGVにおいては，100 cm/s以上のときに急激に補正係数が大きくなっている．さらに，PGVが大きくなるに従って補正係数が大きくなる傾向も見られた．微地形境界部の補正係数が境界以外の補正係数よりもやや大きな値を示した．液状化の補正係数は，非液状化のもの5.1倍の値を示した．図-9に基づき説明変数のレンジを比較すると，PGVのレンジが最も大きく，次いで管種，液状化の順で大きな値を示した．微地形，微地形境界条件のレンジはほぼ同程度であるが，微地形の方がやや大きな値を

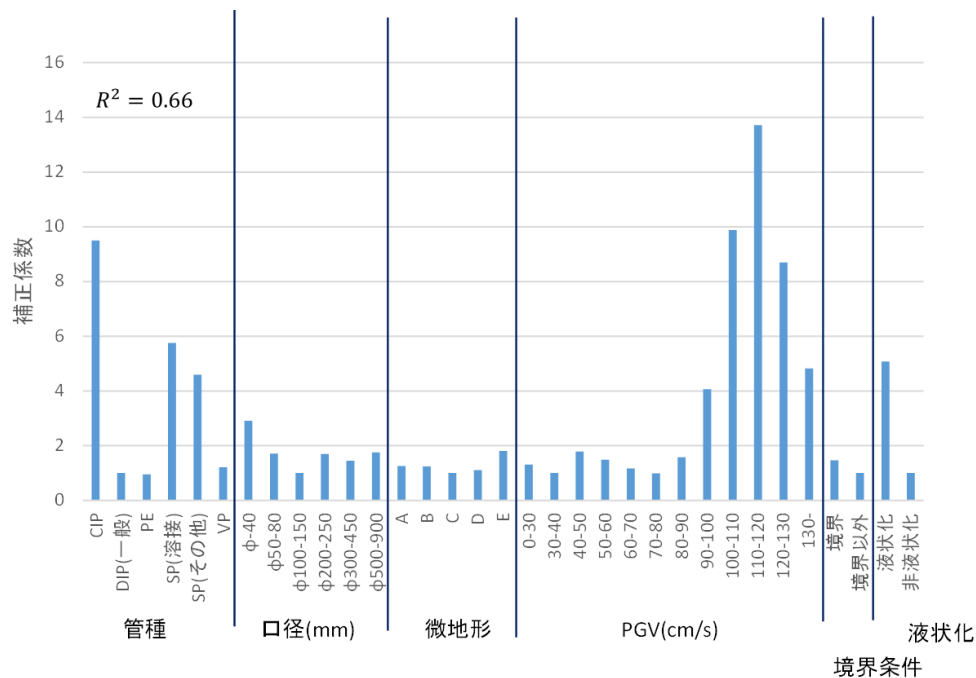


図-8 数量化理論Ⅰ類で得られた補正係数

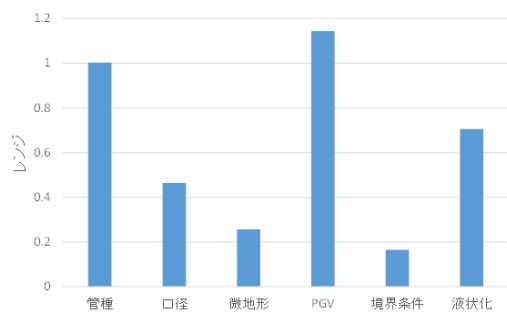


図-9 説明変数のレンジの比較

示した。このことから、上水道管路の被害率に大きく影響するのはPGV、管種、液状化の有無と評価できる。本研究では被害率0のデータを考慮できていないため、補正係数の値そのものを定義するには至らなかった。今後の研究でこれらの説明変数の補正係数の値を評価できれば、被害予測の高度化につながるものと考えられる。また、地震後早期にPGVや液状化の発生を高精度に予測することは、上水道管路被害の即時予測に非常に有効である。

6. 結論

本研究では、まず熊本地震の際の熊本市と益城町の上水道管路の被害分析を行った。微地形の境界条件に着目して被害率を算出し、微地形境界部に敷設されている管路の被害率が大きいことが認められた。

熊本地震における被害に加えて、近年の地震被害も考慮し、現行の被害予測式の補正係数の評価を行った。本研究の結果と既往の予測式の口径補正係数、微地形補正係数は近い値となったが、管種・継手補正係数に関しては一致しない場合もあった。さらに、微地形境界、液状化を数量化理論Ⅰ類の説明変数に加え、管種や口径などの他の要因と同時に解析し、被害率に対する影響度を評価した。その結果、PGVの影響度が最も大きく、次いで、管種、液状化の

影響度が大きいという結果になった。微地形、微地形境界条件の影響度はほぼ同程度で、あまり大きくなかった。

今後の課題として、説明変数の妥当性も含めて、データの見直しを行う必要がある。また、補正係数の値を評価するために、被害率が0のデータを考慮できるような分析方法を用いる必要がある。

参考文献

- 1) 厚生労働省：平成 28 年(2016 年)熊本地震水道施設被害等現地調査団報告書, 2016.
- 2) 若松加寿江, 松岡昌志：全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用, 日本地震工学会誌, No.18, pp. 35-38, 2013.
- 3) 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.
- 4) 松岡昌志：強震観測記録に基づく 2016 年熊本地震の地震動分布の推定, 地域安全学会梗概集, No. 42, pp. 23-26, 2018.
- 5) 七郎丸一考, 宮島昌克：微地形分類の境界条件を考慮した水道管被害率の一考察, 第 4 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.82-89, 2012.
- 6) 水道技術研究センター：平成 28 年熊本地震を踏まえた「地震による管路被害予測式」の見直しに関する検討, 2016.
- 7) 石田栄介, 磯山龍二：東日本大震災における仙台市水道管の分析, 日本地震工学会論文集, Vol. 19, No. 1, pp. 1-20, 2019.
- 8) 能島暢呂, 杉戸真太：被害発生率指標の不確定性を考慮したシステム信頼性解析, JCROSSAR2000 論文集 (第 4 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム), pp. 217-224, 2000.
- 9) 大村平：評価と数量化のはなし, 日科技連出版社, 2016.