

東北地方太平洋沖地震における 首都圏のガス導管被害分析

向後 陽平¹・丸山 喜久²・猪股 渉³

¹学生会員 千葉大学博士前期課程 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail:aana2220@chiba-u.jp

²正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

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

³正会員 東京ガス株式会社 防災・供給部 (〒105-8517 東京都港区海岸1-5-20)

E-mail:inomataw@tokyo-gas.co.jp

2011年東北地方太平洋沖地震では、東京ガス(株)の供給エリアで耐震性の劣る低圧ガス導管に被害が発生した。防災システムSUPREMEが確実に稼働したことで安全を確保するとともに、この地震に関する多くのデータを得た。SUPREMEの被害推定式は、ネジ継手を有する本支管に対して精度が高いことが既往研究によって確認された。一方、供給管や灯外内管に関しては、SI値と被害率の関係性がやや異なっていた。そこで、本研究では、供給管の被害率とSI値との関係性を評価し、被害予測式を構築する。さらに、本支管の被害を継手ごとに整理し、モンテカルロシミュレーションによって被害予測式の地形補正係数に関する分析を行い、被害推定の高度化を図る。

Key Words : *The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake , SUPREME, damage to gas distribution pipes, fragility curve, Monte Carlo simulation*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、水道、ガスなどの埋設管に多くの被害が発生した。東京ガス(株)の供給管エリアでは、耐震性の劣る低圧ガス導管に被害が発生したが、防災システムSUPREME¹⁾³⁾が確実に稼働し安全を確保した。低圧ガス導管における被害数⁴⁾を表-1にまとめる。なお、都市ガスの設備区分は図-1に示す通りである。SUPREMEによって、供給エリア内に設置されている約4000箇所⁵⁾のSIセンサーなどから、この地震に関する多くのデータを得ることができた。

既往研究⁴⁾では、東北地方太平洋沖地震の際に被害の大半を占めたネジ継手の本支管被害率について、SUPREMEに搭載されている被害推定式の精度検証が行われた。本支管のネジ継手に関してはSUPREMEの被害推定式の精度が高いことが確認できたが、供給管や灯外内管のネジ継手に関してはSI値と被害率の関係性が本支管のネジ継手とやや異なっていることが分かった。

そこで本研究では、供給管、灯外内管(埋設部)のネジ継手に関して、東北地方太平洋沖地震の際の被害分析を行う。被害率とSI値の関係性を評価し、被害予測式を

構築する。さらに、本支管の被害を継手ごとに整理し、モンテカルロシミュレーションを通じて、被害予測式の地形補正係数を導出し、被害予測の高度化を図る。本研究の成果によって、首都圏のエネルギーの更なる安全安定供給に貢献することを目指す。

表-1 東北地方太平洋沖地震における東京ガス供給エリアの低圧導管の被害数⁴⁾

道路下	本支管	145箇所
	供給管	131箇所
民地	灯外内管	929箇所

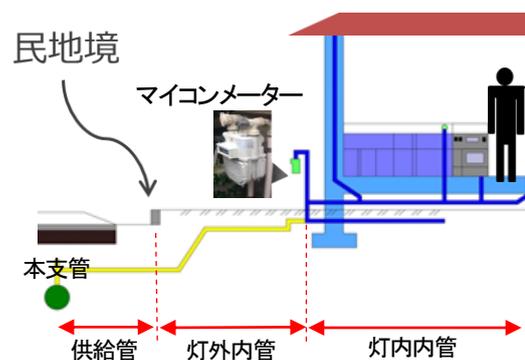


図-1 都市ガス供給の設備区分

2. 分析対象データ

本研究では、東京ガス（株）がとりまとめた東北地方太平洋沖地震の際のガス管の被害データ、50mメッシュごとの管路延長データ、SUPREMEによって推定された50mメッシュのSI値分布（図-2）、PL値分布（図-3）を用いた。なお、図-2には設備区分ごとのガス導管の被害位置も併せて示している。地形区分は、東京ガス（株）が定めている地形区分¹⁾データ（50mメッシュ）を使用した（図-4）。

ガス管の被害は、被害位置、設備区分（本支管、供給管、灯外内管など）、管種、接合方法が、緯度経度で取りまとめられている。また、管種、接合方法ごとにガス導管の延長が50mメッシュ単位でまとめられている。

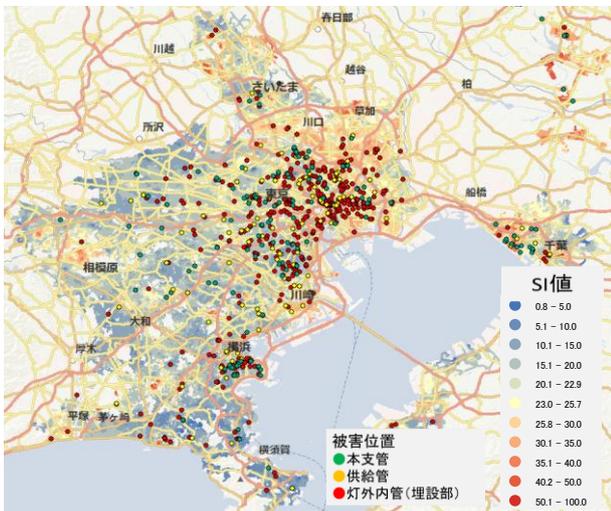


図-2 50mメッシュごとのSI値分布とガス導管被害位置

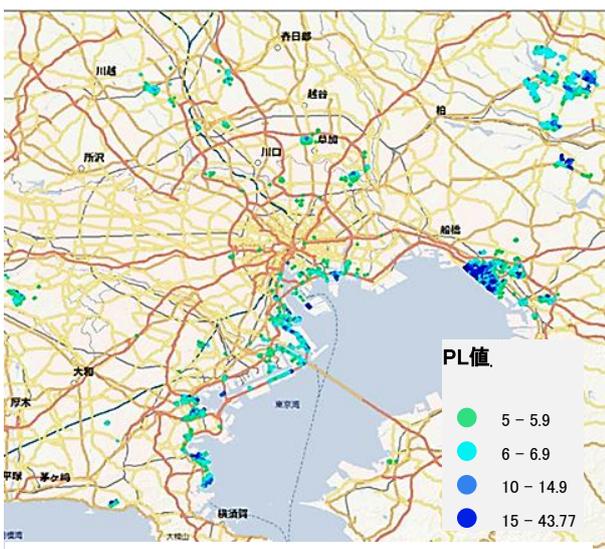


図-3 50mメッシュごとのPL値分布図



図-4 50mメッシュごとの地形区分

3. 供給管・灯外内管（埋設部）の被害分析

(1) 被害率の算出

GISを用いて、ガス管の被害データと50mメッシュごとの管路延長データに、SI値分布、PL値分布のデータを結合した。ネジ継手の供給管、灯外内管（埋設部）の被害箇所数と管路延長のデータをSI値が1cm/sごとに集計し、被害率を算出した。被害率は、管路1kmあたりの被害箇所数で定義している^{1),5)}。さらに、PL値5.0以上のメッシュで液状化が発生しているものと大別^{6),7)}し、非液状化地域のみを対象に被害率を算出した（図-5）。

ネジ継手の供給管と灯外内管（埋設部）の被害率は、SI値が10 cm/s程度のときおよそ0.1件/kmを示しており、ネジ継手の本支管の被害率よりも大きい。また、供給管と灯外内管（埋設部）の被害率は、SI値に対してあまり大きな違いは見られなかった。これは供給管と灯外内管の区別が、民地との境界線を隔てて名称が異なるだけで、基本的な構造は同じであるためと考えられる（図-1）。そこで、本研究では供給管と灯外内管（埋設部）の被害率は区別せず、まとめて被害予測式を構築する。

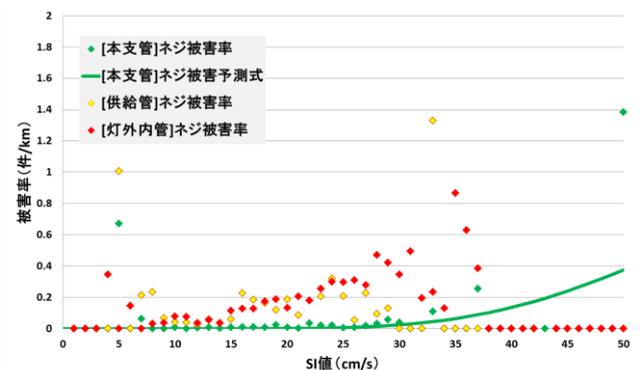


図-5 非液状化地域におけるネジ継手のガス導管の被害率とSI値の関係

(2) 被害予測式の構築

ネジ継手を有する供給管、灯外内管（埋設部）の被害予測式は、SUPREMEが搭載している本支管（ネジ継手）の被害予測式を変形することで構築した。本支管の被害予測式の関数形は式(1)のようであるが、このうちパラメータ λ を管路延長 w を重みとした誤差の2乗 ε を最小化するように定めた（式(2)）⁹⁾。

$$P = C\Phi((\ln SI - \lambda)/\zeta) \quad (1)$$

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

ここで、被害率 P は、SI値に関する対数正規分布に倍率 C が乗じられた関数形で表されている。本支管（ネジ継手）の被害予測式では、 C は2.36、 λ は4.298、 ζ は0.387と定められている。また、 P_R は実被害率を表す。

本研究では、式(1)の C 、 ζ 、 λ のうち、 λ のみを回帰分析によって定めた。式(1)の λ を変化させることは、曲線を平行移動させることと等価である。本研究で扱った供給管および灯外内管（埋設部）の被害データは、SI値が概ね50 cm/s以下の範囲である。ネジ継手の本支管の被害関数のもととなっている兵庫県南部地震のSI値と比べ、値が小さくバラつきも大きくない。このため、被害率の上限を表す C は、このデータセットだけをを用いた回帰分析で求めることがあまり適当でないものと判断した。さらに、対数正規分布のバラツキを表す ζ は本支管の被害関数と等しいものと仮定した。 P_R に供給管、灯外内管（埋設部）について算出した被害率を代入したところ、式(2)の ε を最小にする λ は3.73となった。構築したネジ継手を有する供給管と灯外内管（埋設部）の被害予測式と実際の被害率を比較したものを図-6に示す。

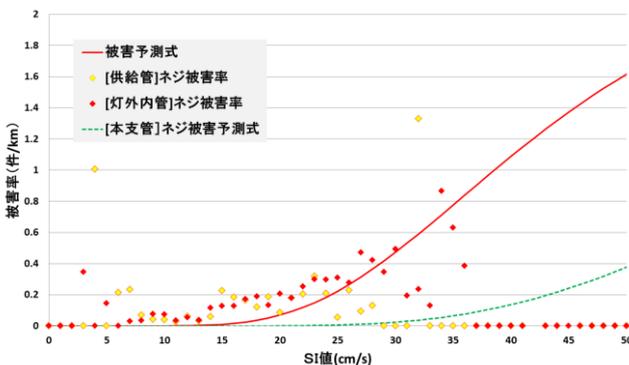


図-6 ネジ継手の供給管、灯外内管（埋設部）の被害予測式

4. 本支管の地形区分ごとの被害分析

本研究では、被害予測の高度化を目指し、非液状化地域の本支管ネジ継手の被害を地形区分ごとに分析する。メッシュごとの被害数をモンテカルロシミュレーション^{10) 11)}によって推定し、東北地方太平洋沖地震の際の実測値と比較を行う。この成果は、ガス導管の被害予測式に導入されている補正係数の再検討や継手別のガス導管の耐震性能評価に貢献できる。

(1) 数値シミュレーションの手法

ガス導管の被害の発生が、ポアソン過程に従うものと仮定する^{12) 13)}。このとき、メッシュごとの被害数は、以下のように書ける。

$$p(X = x_k) = (N_{ck})^{x_k} \cdot \exp(-N_{ck}) / x_k! \quad (x_k = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

ここで、 k はメッシュコード、 $p(X = x_k)$ はメッシュ内の被害数が x_k である確率を表す。 N_{ck} はメッシュごとの平均被害数であり、以下のように仮定した。

$$N_{ck} = 2.36\Phi((\ln SI_k - 4.298)/0.387) \times C' \times l_k \quad (4)$$

すなわち、ネジ継手の本支管の被害関数を基準としたときの被害率に、メッシュごとの管路延長 l_k を乗じている。また、地形区分別の補正係数として C' を導入している。 SI_k はメッシュごとのSI値を表す。

補正係数 C' の値を適宜変化させ、式(3)に従う乱数（ポアソン乱数）を各メッシュ1000個発生させ、これをメッシュごとの被害数とみなした。この結果と東北地方太平洋沖地震の際のガス導管の被害数を比較し、地形区分別の補正量を定めた。

(2) 数値シミュレーションの結果

図-7に、モンテカルロシミュレーションの結果として、補正係数 C' と全メッシュのポアソン乱数の合計値（推定被害数）の平均値および標準偏差を示す。図中では、東北地方太平洋沖地震の際の実際の被害数を併せて示している。たとえば、ネジ継手の本支管では、人工改変地で5件の接合部および管体のうち亀裂、折損の被害が発生している。この被害数は、補正係数を0.82~1.98とすると、平均値±標準偏差の範囲で再現できる。

ネジ継手の本支管に関して、同様の検討を地形区分ごとに行った。得られた補正係数の範囲を図-8に示す。平

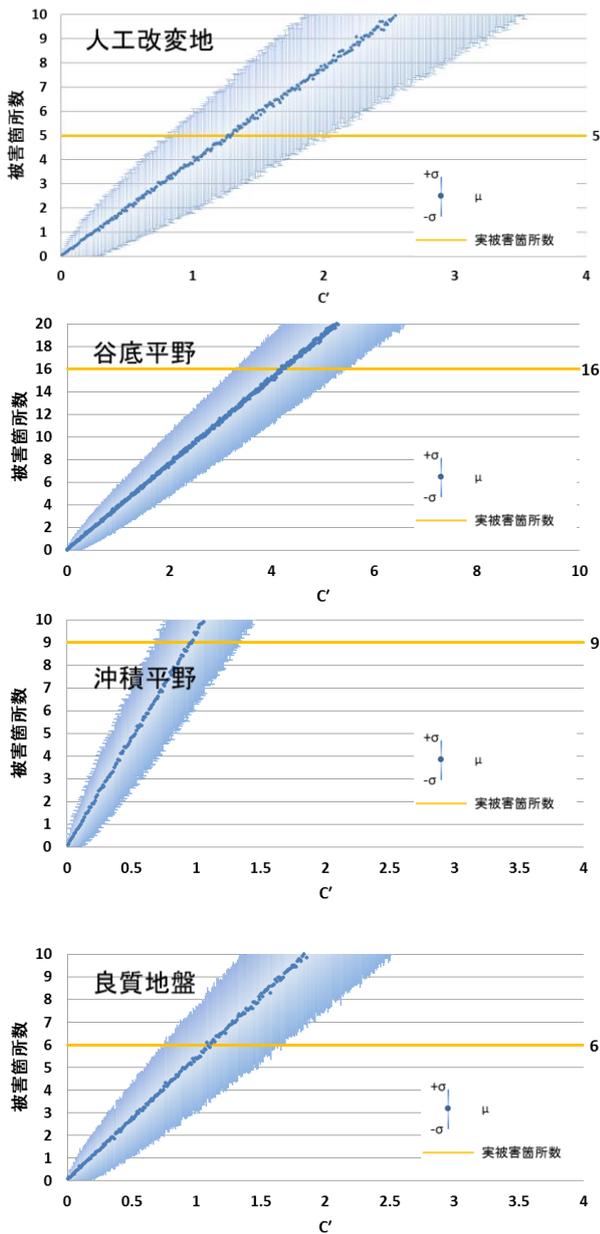


図-7 モンテカルロシミュレーションに基づく非液状化地域における本支管（ネジ継手）の地形区分ごとの補正係数の評価

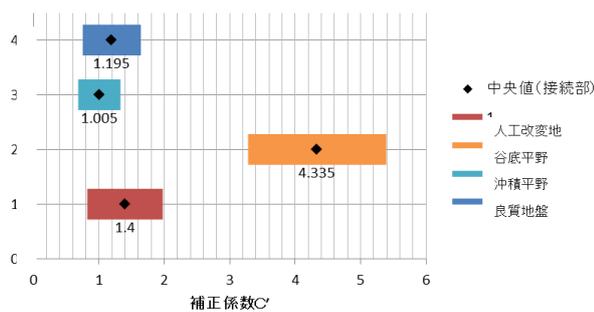


図-8 地形区分ごとの補正係数（本支管ネジ継手）

均的には、補正係数は沖積平野、人工改変地、良質地盤の順に大きくなるが、それほど顕著な違いはない。一方、谷底平野の補正係数はほかの3つの地形区分と比べてやや大きい傾向が見られた。

(3) 地形区分ごとの被害予測

前項で得た補正係数を用いて、地形区分ごとに被害予測を行った。図-8に示した補正係数の中央値を、各地形区分の補正係数と仮定し、メッシュごとに被害数を推定した。具体的には、式(3)に従うポアソン乱数を各メッシュ1回だけ発生させ、結果を図-9に比較した。推定された被害数は人工改変地で13箇所、谷底平野で23箇所、沖積平野で26箇所、良質地盤で25箇所の合計87箇所が推定された。実被害箇所数は人工改変地で13箇所、谷底平野で24箇所、沖積平野で26箇所、良質地盤で25箇所の合計88箇所となった。このような一連の検討を、本支管または供給管の継手別に行えば、ガス導管の地震時脆弱性を定量的に評価することが可能となる。



図-9 実被害箇所と推定された被害箇所の比較

5. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震において被害が多かったネジ継手の供給管、灯外内管に関して、SI値と被害率の関係性を評価した。さらに回帰分析を行うことで被害予測式を構築した。また、本支管のネジ継手を対象として、モンテカルロシミュレーションによって被害予測式の地形補正係数に関する検討を行った。

今後は、各設備区分における液状化地域でのSI値と被害率の関係性を評価する。さらに、モンテカルロシミュレーションを通じて、本支管や供給管、灯外内管の継手別、地形別の地震時脆弱性評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 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, pp.283-296, 2003.
- 2) 東京ガス: 超高密度リアルタイム地震防災システム「SUPREME」
http://www.tokyo-gas.co.jp/techno/stp397c1_j.html
- 3) 東京ガス: ガバナに関して
<http://www.tokyo-gas.co.jp/encyclopedia/dictionary/dictionary40.php>
- 4) 猪股渉, 乗藤雄基, 石田栄介, 塚本博之, 山崎文雄: 東日本大震災における東京ガスの設備被害の概況と超高密度観測情報に基づく低圧ガス導管被害推定の精度検証, 日本地震工学会論文集, Vol. 13, No. 2, pp.37-44, 2013.
- 5) 丸山喜久, 伊藤智大, 若松加寿江, 永田茂: 東北地方太平洋沖地震における宮城県仙台市の水道管路被害状況の分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 3, pp.377-388, 2014.
- 6) 石田栄介, 末富岩雄, 安田進, 細川直行: リアルタイム地震防災システムにおける液状化危険度分布の即時推定法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 65, No. 1, pp. 596-605, 2009.
- 7) (社) 日本ガス協会: 高圧ガス導管液状化耐震設計指針, 2001.
- 8) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 208-216, 2008.49)
- 9) 神足史人: Excel で操る! ここまでできる科学技術計算, 丸善, 2009.
- 10) 伏見正則, 逆瀬川浩孝: モンテカルロ法ハンドブック, 朝倉書店, 2014.
- 11) 中川健治: モンテカルロシミュレーション基礎—推定精度評価の問題点とその克服—, 通信ソサイエティマガジン, 電子情報通信学会, pp. 6_11-6_20, 2008.
- 12) Federal Emergency Management Agency: Hazus-MH 2.1 Technical Manual, 2015.
- 13) 永田茂, 丸山喜久, 庄司学: 既往の上水道配水管の地震被害予測式の予測精度に関する検討, 第 34 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, Paper No. B22-636, CD-ROM, 12p, 2014.

DAMAGE TO GAS DISTRIBUTION PIPES IN TOKYO METROPOLITAN AREA AFTER THE 2011 GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE

Yohei KOGO, Yoshihisa MARUYAMA and Wataru INOMATA

This study investigates the damage ratios of gas distribution pipelines in Tokyo Metropolitan area after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. The relationship between the damage ratios and spectrum intensities (SI), which were observed by a real-time earthquake monitoring system, SUPREME, operated by Tokyo Gas Co., Ltd., is evaluated. A fragility function is newly developed by this study. The effects of topographical conditions on the damage situations of gas pipelines are also investigated through a series of Monte Carlo simulations. More damage incidents to gas pipes are expected in the valley bottom lowland.