異管種の混在状況を考慮した数値解析に基づく低圧ガス導管網の地震被害に関する検討

EVALUATION OF SEISMIC-INDUCED DAMAGE OF GAS PIPELINES BASED ON NUMERICAL SIMULATION CONSIDERING DIFFERENT PIPE MATERIAL CHARACTERISTICS

22WM1320 木佐貫　康貴
Yasutaka Kisanuki

指導教員 丸山　喜久
劉　ウェン

SYNOPSIS

Most of the damage to gas pipelines caused by the Kobe Earthquake was due to ruptured joints in screw-jointed steel pipes. On the other hand, no damage was observed in polyethylene (PE) pipes, which are earthquake-resistant pipes. For this reason, the use of PE pipes has increased since the Kobe Earthquake. Therefore, it is necessary to consider the installation status of earthquake-resistant pipes when analysing earthquake damage to gas pipelines. In this study, a numerical model of a one-dimensional piping system with various PE pipe installation ratios (PE pipe ratio) was developed to evaluate the relationship between PE pipe ratio and joint rupture rate. A numerical model was also constructed to reproduce the conditions of a pipeline in an area where an actual earthquake had occurred in the past. Ground displacement was calculated from the SI values and given to the model to verify the validity of the numerical simulation.

1.　研究背景と目的

1995 年に発生した兵庫県南部地震では，多くの低圧ガス管導管に被害が発生し，地震後には約 86 万戸が供給停止となった [1]．ガス管の被害の多くは，ねじ継手鋼管の継手部の破断が原因であった．一方，耐震管であるポリエチレン（PE）管の被害は見られなかった．PE 管は耐震性，耐腐食性，柔軟性，施工性に優れており，ガス導管の材料としても理想的であることから，1982 年の導入以来，低圧ガス導管の主材料として年々埋設延長が増加している [2]．

兵庫県南部地震における低圧ガス導管の被害率と地震動強さの関係に基づいた被害予測式 [3]では，被害率の上限は 2.36 件/km となっている．兵庫県南部地震以降，ねじ継手鋼管の新たな敷設量は減少し，PE 管の敷設割合が高まっている．さらに，ガス導管の耐震化率の向上に伴い，2016 年熊本地震，2018 年北海道胆振東部地震など，近年の地震時における低圧ガス導管の被害率は小さくなっている [4), 5)]．このような背景から，ねじ継手鋼管と耐震管である PE 管が低圧ガス導管網で混在した場合，変形性能の高い PE 管が管網全体の地盤変位を吸収し，兵庫県南部地震当時よりもねじ継手鋼管の被害率を低減させる効果があることが期待される．

このように，低圧ガス導管網は鋼管や PE 管など複数の管種から構成されるネットワークとなるため，地震被害を詳細に分析するには，耐震管で変形性能の高い PE 管の敷設状況を考慮する必要がある．しかし，低圧ガス導管網における PE 管の効果を定量的に明らかにした研究は行われていない．そこで本研究では，PE 管の敷設割合（PE 管率）の異なる 1 次元配管系の数値モデルを構築し，PE 管率と鋼管の継手の破断状況の関係性を数値解析的に評価することを目的とする．さらに，既往地震を対象として，被災地域の管路の敷設状況を踏まえた数値モデルを作成し，実際の SI 値に基づく地盤変位を数値モデルに与え，数値解析的な破断状況と実際のガス管の被害状況を比較し，本検討の妥当性を議論する．

2.　1 次元配管系モデルの構築

(1) 配管モデル

本章の 1 次元配管モデルは，ガス管 90 本で構成され全長は約 500 m である．ガス管 1 本の長さは 5.5 m としている．全長を約 500 m としたのは，兵庫県南部地震の最大被害率 2.36 件/km^3)を踏まえると，約 500 m のガス導管に最大 1 箇所の被害が生じると解釈されるためである．配管構成は PE 管を 9 本セット（約 50 m）で配置したパターンを想定した．実際の管路の更新状況を考えると，ガス管 1 本だけを PE 管に置き換えることはなく，ある程度まとまった数が同時に置き換えられる．そのため，実際の配管図等を参考に PE 管を 9 本セットとして配置するパターンを現実に近い 1 次元配管モデルとして検討することとした．PE 管の配置例を図-1 に示す．

配管モデルのケース数は PE 管率が 10%と 20%の場合は，鋼管と PE 管のすべての組み合わせについて検討し，PE 管率が 30%以上の場合は，それぞれ 1000 ケースずつ解析を行った．

本研究の 1 次元配管モデルは，ねじ継手鋼管と PE 管の組み合わせとして構成されている．この理由は，兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震で被害のあった低圧ガス導管はねじ継手鋼管が中心であり，その他の耐震性の低いガス管の被害は軽微なものが大半であった [6), 7)]．そのため，本研究では，ねじ継手鋼管と PE 管で構成される配管について考えることとした．

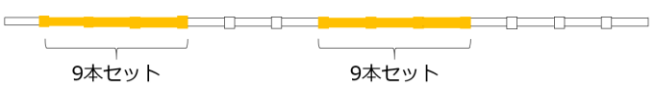


図-1　PE 管の配置例（黄色は PE 管）

ガス管ははり要素，継手はファイバー要素としてモデル化している．ファイバー要素は，材断面を微少要素に分割し，その各要素における垂直応力と垂直ひずみ関係をもとに計算される．部材軸方向の塑性化については，部材を材軸方向に分割することにより表現し，部材を細かく要素ごとに分割することで，材軸方向の塑性化の進展をより正確に表現することができる [8]．

(2) 部材の力学特性

本研究では，口径 50 mm のガス管を対象として数値モデルを作成した．管の外径と断面積はそれぞれ 60.5 mm，677 mm^2 である [9]．

鋼管は，管体よりも継手の方が小さな引張荷重で破断することから，管体自体は弾性としてモデル化する．弾性係数には，一般的なガス管に用いられている鋼材の値である 206000 MPa を仮定した．鋼管のねじ継手と PE 管の力学特性を図-2 に示す．ねじ継手は中圧ガス導管耐震設計指針に掲載されている実験データ [10]，PE 管は 2008 年に志村・富永らによって行われた実験データ [2]を参照し，応力－ひずみ関係をバイリニアモデルで近似している．ねじ継手は，ひずみが約 0.022 に達したところで破断する．

(3) 想定した地盤変位と地盤ばね

管路の数値モデルに与える地盤変位は図-3 のように正弦波の 1 波長分となるようにした．振幅は 70 mm，波長は管路の数値モデルの長さと同じ約 500 m である．地盤変位の振幅を 70 mm としたのは，全長 500 m のガス管がすべて鋼管で構成されるときに，2 箇所以上の被害が発生しない範囲で，最も大きな振幅値を設定したためである．兵庫県南部地震の被害実績により構築された低圧ガス導管の被害予測式では最大被害率が 2.36 件/km となっている．つまり，約 500 m のガス導管で最大 1 箇所の被害が生じることが想定されるため，地盤変位分布をこのように仮定した．

地盤中に埋設されている構造物の地震応答は，地盤と構造物の動的相互作用を考慮して求められる．しかし，管路は単位長さ当たりの質量が小さく，その固有周期は対象とする地震波の卓越周期よりもかなり短いため動的影響が少ない．そのため，地中管路の地震応答解析では，まず管路埋設地点の地盤変形を求め，地盤ばねを介して力を管路に伝達させる解析法が用いられる．この手法は応答変位法 [11), 12)]と呼ばれ，本研究でもこの手法を用いた．本研究では，地震によるねじ継手鋼管の継手部分の破断についてのみをガス導管の被害として考えているため，地盤ばねとして管軸方向ばねを考えている．地盤ばねは中低圧ガス導管耐震設計指針 [10)]と高圧ガス導管耐震設計指針 [13)]を参考に，地盤ばね係数を 6.0×10^{-3} N/mm^3 ，等価地盤拘束力を 1.96×10^{-2} N/mm^2 とし，図-4 のような地盤ばねを仮定した．

3. 1 次元配管モデルの解析結果

図-5 に，地盤ひずみと累積破断率の関係を示す．最初に被害が発生したのは，すべてのガス管が鋼管のときと同じ地盤ひずみ（地盤ひずみ 0.0774%）のときであった．また，PE 管率が上昇すると累積破断率が減少している．地盤ひずみが 0.0874%のとき，PE 管率が 10%で累積破断率は約 85%，PE 管率が 50%で累積破断率は約 30%と 3 分の 1 程度に減少している．PE 管率が 80%まで上昇すると，地盤ひずみが 0.0874%のときの累積破断率は 7.1%となり，PE 管率が 10%のときの累積破断率と比べて 10 分の 1 以下まで減少している．また，PE 管率が 90%以上のときには破断するケースはなく，破断率は 0%となった．

図-6 に PE 管率と累積破断率の最大値の関係を示している． PE 管率の増加に対する累積破断率の減少割合に注目すると，PE 管率が 10%～40%のときはほぼ一定の割合で累積破断率が減少しているが，PE 管率が 40%から 50%に上昇したときの破断率の減少割合が特に高い．このことから，PE 管が敷設されていることで，管網系として地盤変位を吸収し，地震被害を低減しているものと考えられる．

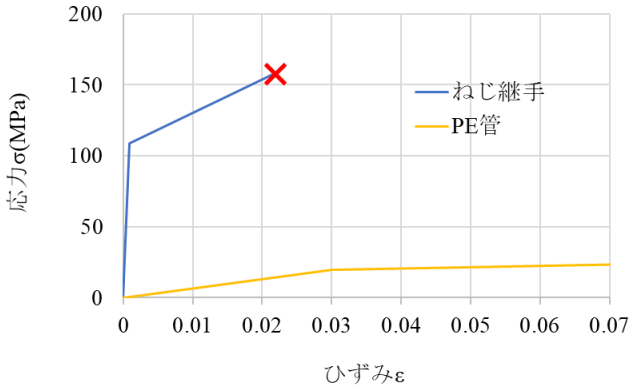


図-2 ねじ継手と PE 管の応力－ひずみ関係

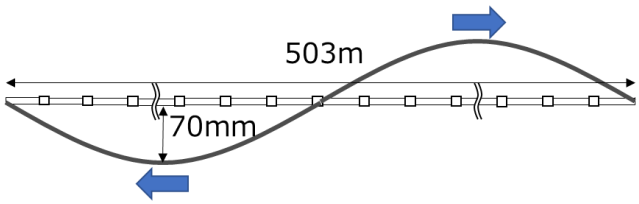


図-3 配管モデルに与える地盤変位分布

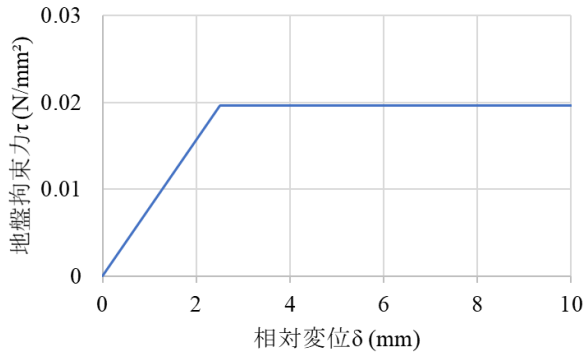


図-4 本研究で仮定した地盤ばね

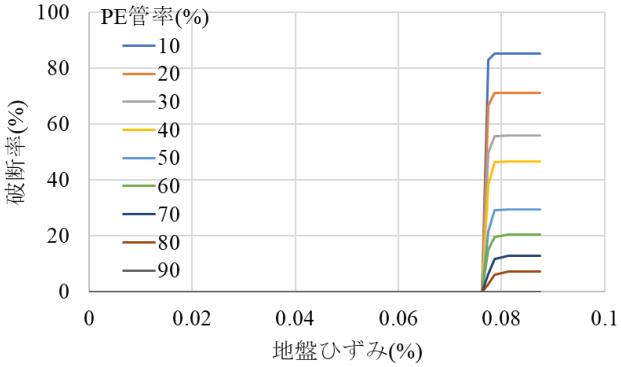


図-5 地盤ひずみと累計破断率の関係

本研究の配管構成は現実に近い敷設状況を想定したものである．図-6 によると，低圧ガス導管の地震被害を低減させるには，PE 管率を一定以上（本解析結果では少なくとも 50%以上）に十分に上昇させることが非常に重要であると考えられる．また，鋼管のみの管路延長ができるだけ短くなるように施工することや，既往研究 [14),15)]で地盤変位が大きくなると予想される盛土造成地や谷底平野のような地点の PE 管率を高めるように敷設することが必要である．

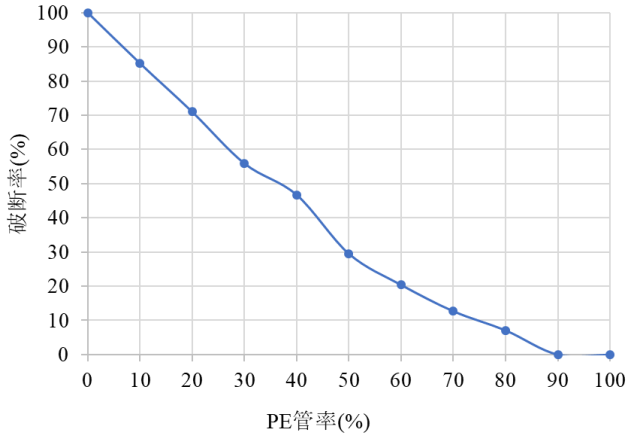


図-6　PE 管率と累積破断率の最大値の関係

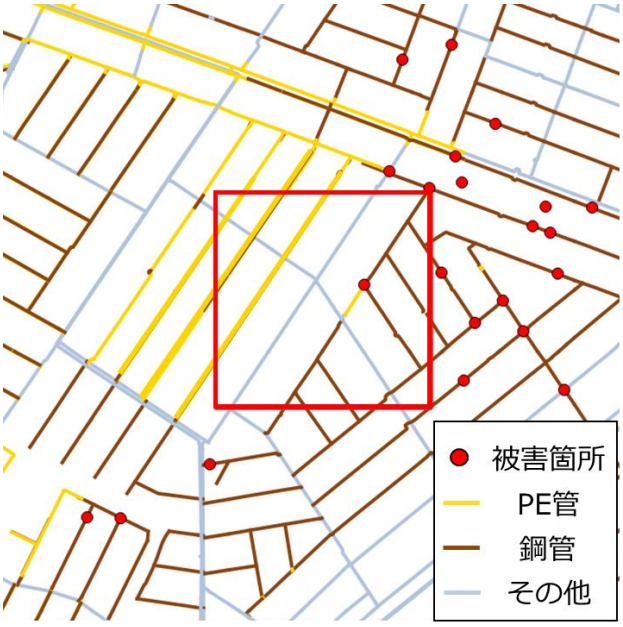


図-7　仙台市泉区南光台南の管路図

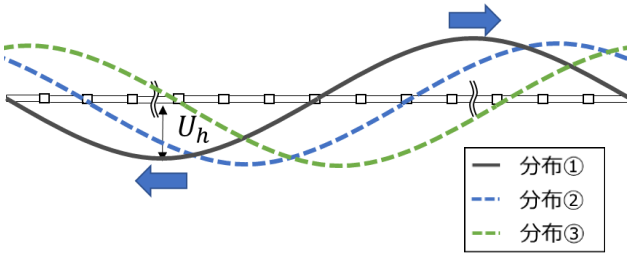


図-8　地盤変位分布の作用方法

4.　実際の配管状況を踏まえた数値解析

(1) 対象地域の選定

前章で行った数値解析の妥当性を検証するために，既往地震の被災地域で管路の数値モデルを構築する．実際に被害があった管路と，被害がなかった管路の累積破断率を比較し，実際の管路被害状況を説明することができるか検討を行う．

対象とした地域は宮城県仙台市，対象地震は東北地方太平洋沖地震とした．この地震によって仙台市ガス局の供給区域では，高中圧ガス導管等の重要設備の被害は極めて軽微なものであったが，低圧ガス導管においてねじ継手鋼管をはじめとする非耐震管が甚大な被害を受けている．本章での解析対象地域は，鋼管と PE 管が混在している場所を選んだ．その後，対象地域の管路について数値解析を行い，累積破断率を求めた．図-7 に仙台市泉区南光台南の配管図（赤枠が対象地域）を示す．図内の赤枠は 250m 四方である．また、仙台市の推定平均 SI 値は約 70 cm/s である．

(2) 地盤変位分布

本章の数値解析で管路モデルに作用させる地盤変位分布を図-8 に示す．地盤変位分布の波長は地下構造に依存するものであるが，ここでは前章と同様に約 500 m と仮定した．また，地盤変位分布の振幅 U_h は，高圧ガス導管耐震設計指針に記載されているレベル 2 地震動（ガス導管の供用期間中に発生する確率は低いが，非常に強い地震動で，内陸型地震と海溝型地震が想定されている）に関する表層地盤変位U_hを算定する式(1)から定めた．なお，本研究で対象としている地震が東北地方太平洋沖地震のため，海溝型地震の算定式を用いている．

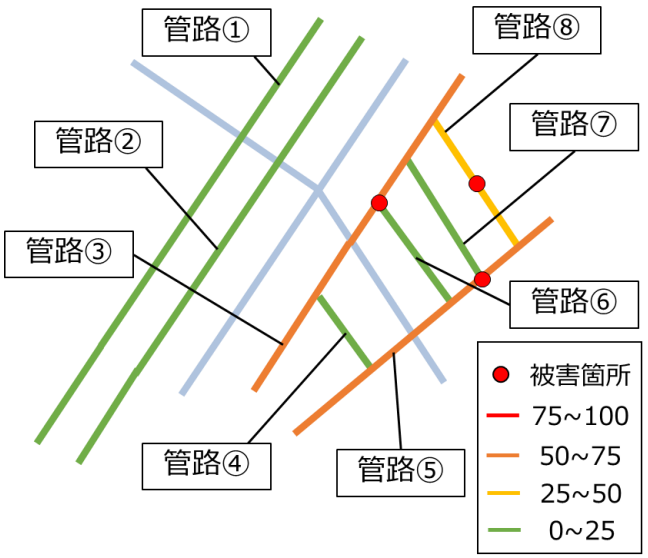
$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \cdot T \cdot S_{v\,II} \cdot \nu \cdot \cos\frac{\pi \cdot z}{2H} \qquad (1)$$

Tは表層地盤の固有周期（s），S_{vII}は設計地震動IIの応答速度（m/s），νは地域別補正係数，zは導管の埋設深さ（mm），Hは表層地盤の厚さ（mm）である．なお，本研究では設計地震動II（レベル 2 地震動に対する耐震設計のために，海溝型地震を対象として，過去の地震観測記録をもとに定められた地震動）の応答速度S_{vII} を推定平均 SI 値に置き換えて算定している．仮定した変数値を表-1 にまとめる．

地盤変位分布は，図-8 の分布①～③のように継手ごとにずらしながら管路モデルに作用させ，様々な地盤変位分布のもとで管路モデルの破断率（すべてのケースのうち破断したケースの割合）を算出する．なお，本研究で対象とした管路の長さはすべて地盤変位分布の波長（約 500m）より短いので，地盤変位分布のケース数はすべての管路で 90 ケースにそろえた．

表-1　表層地盤変位を求めるのに用いた値

	対象地域
表層地盤の固有周期(s)	0.57
推定されたSI値(cm/s)	70
地域別補正係数	0.8
表層地盤の厚さ(m)	10.05
与える地盤変位の振幅(mm)	63.5



※数字は破断率(%)

図-9　対象管路の破断率と管路番号

表-2　被害の有無と破断率

	管路長(m)	PE管率(%)	実際の被害の有無	破断率(%)
管路①	463.9	76.1	無	0.0
管路②	464.7	77.0	無	0.0
管路③	346.5	12.9	有	62.2
管路④	83.8	0.0	無	13.3
管路⑤	318.5	0.0	有	57.8
管路⑥	118.0	0.0	無	20.0
管路⑦	128.5	0.0	無	22.2
管路⑧	145.3	0.0	有	25.6

(3) 解析結果

図-9 に対象管路の破断率と管路番号，表-2 にそれぞれの管路ごとの実際の被害の有無と数値解析による破断率を示す．対象地域の推定平均 SI 値は 70 cm/s であり，実際に被害があった管路③, ⑤, ⑧の破断率はそれぞれ 62.2%, 57.8%, 25.6%となった．被害がなかった管路と比較すると，管路③, ⑤, ⑧の破断率は被害のなかった管路の破断率（すべて 25%未満）よりも高い．特に鋼管のみの長さが長い管路③と⑤はほかの管路に比べて破断率が 2 倍以上大きくなっている．一方，被害のなかった管路のうち PE 管率が 75%以上の管路①, ②では両方とも破断率が 0%となり，実際に被害がなかったことを説明できた．これは，PE 管が敷設されていることで地盤変位を吸収し，地震被害を低減させていることの表れであると考えられる．また，鋼管のみの管路であるが実際に被害がなかった管路④，⑥，⑦は破断率がすべて 25%以下となり，実際に被害があった管路と比べて小さくなった．以上のように，実際の配管状況を踏まえた管路モデルを作成し検討した結果，実際に被害のあった管路モデルの破断率が相対的に高く，実現象と調和的な結果が得られた．

5.　まとめと今後の展望

本研究では，1 次元配管系の力学モデルを構築し，PE 管の配置状況がガス導管被害に与える影響を数値解析的に検討した．PE 管を 9 本ごとに固めて配置した場合について評価した結果，被害が発現する地盤ひずみはすべてのガス管が鋼管の場合と同じであり，PE 管率が上昇すると破断率が減少する傾向がみられた．　PE 管率が 10%～40%のときはほぼ一定の割合で累積破断率が減少しているが，PE 管率が 40%から 50%に上昇したときの破断率の減少割合が特に高い．したがって，実際の管路の地震被害を低減するためには，PE 管率を十分に上昇させ，鋼管のみの管路延長をできるだけ短くすることが重要であることがわかった．

仙台市の対象地域について，実際の管路の敷設状況を踏まえた数値モデルを作成し，東北地方太平洋沖地震で観測された地震動強さに相当する地盤変位をモデルに作用させた．得られた結果と実際のガス導管の被害状況を比較すると，実現象に概ね調和的な解析結果が得られた．

本研究では低圧ガス導管網を 1 次元でモデル化し，地盤変位を作用させている．そのため，道路下の本支管から直角に分岐している供給管の影響は考えていない．また，切土と盛土が複雑に入り組んだ地域では，地盤の不整形性を解析に反映させる必要がある．これらの点は，今後の課題と考えている．

参考文献

1) 能島暢呂：阪神・淡路大震災における電力・ガス施設の被害と復旧，安全工学，阪神・淡路大震災特集号(その 2)，pp.50-56, 1996.
2) 志村俊樹，富永直人：ガス用ポリエチレン管の耐震性に関する研究，PipeTech ,Vol. 12，2008.
3) 猪股渉，丸山喜久：超高密度な地震観測記録に基づく低圧ガス導管被害予測システムの高精度化，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 76, No. 3, pp. 424-441, 2020.
4) 経済産業省 ガス安全小委員会：平成 28 年熊本地震を踏まえた都市ガス供給の地震対策検討報告書，2017.
5) 土木学会：地震被害調査シリーズ No.2　2018 年北海道胆振東部地震被害調査報告書，第 9 章ライフラインの被害，丸善，2019.
6) 資源エネルギー庁ガス地震対策検討会：ガス地震対策検討会報告書，1996.
7) 経済産業省ガス安全小委員会災害対策ワーキンググループ：東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策報告書，2012.
8) 野中哲也，吉野廣一：パソコンで解くファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析，丸善出版，2010.
9) 西尾宣明：ポリエチレン管の耐震性評価と寿命評価，配管技術，1997.
10) 一般社団法人日本ガス協会：中低圧ガス導管耐震設計指針，2020.
11) 高田至郎：ライフライン地震工学，共立出版，1997.
12) 宮島昌克，戸島敏雄：上水道パイプライン地震工学，水道産業新聞社，2022.
13) 一般社団法人日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，2020.
14) 猪股渉，丸山喜久：宮城県仙台市の被害データに基づく盛土造成地における低圧ガス導管の地震時被害分析，日本地震工学会論文集　第 19 巻，第 5 号（特集号），pp. 294-303, 2019.
15) 細川直行，渡辺孝仁，清水喜久，小金丸健一，小川安雄，北野哲司，磯山龍二：地盤条件を考慮した大規模地震における低圧ガスねじ継手鋼管の被害率予測式の検討，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1333-1336,2001.