

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

細川直行¹・渡辺孝仁¹・清水善久²・小金丸健一²・小川安雄³・北野哲司⁴・磯山龍二⁵

¹東京ガス(株)研究開発部 (〒105-0023 東京都港区芝浦1丁目16-25)

²東京ガス(株)防災・供給センター (〒105-8527 東京都港区1丁目5-20)

³大阪ガス(株)技術部 (〒541-0046 大阪府大阪市中央区平野町4丁目1-2)

⁴東邦ガス(株)供給管理部 (〒456-8511 愛知県名古屋市熱田区桜田町19-18)

⁵日本技術開発(株)環境防災事業部 (〒164-8601 東京都中野区本町5丁目33-11)

低圧ガス導管のうちねじ継手鋼管について兵庫県南部地震での被害分析を行い、被害率予測式を作成した。分析より被害率は①沖積平野を基準とすると人工改変地・谷底平野で大きく、良質地盤で小さくなる、②SI値の増加にともない増加するがSI値が100kineを超えても急激に増加はしない、③液状化が発生すると液状化層厚の増加にともない増加するとの結果を得た。こうした傾向を簡潔に表現する被害率予測式を、SI値を地震動強度とする標準被害率曲線に地盤・液状化層厚の影響を係数として乗じる形式として作成した。標準被害率曲線および各係数は兵庫県南部地震における実被害率にもとづき設定した。このため従来の予測式と比較して、地盤の影響が忠実に反映されていること、SI値100kine以上において精度が向上していることを確認した。

Key Words : earthquake, gas pipe, damage ratio, fragility curve, SUPREME

1. まえがき

1995年の兵庫県南部地震においてガス導管では、ネットワークの根幹をなす高圧輸送導管の被害はなかったものの、ネットワーク末端の低圧導管については、耐震性の劣るねじ継手鋼管の被害が顕著であった¹⁾。

1995年以降、ねじ継手鋼管の新たな埋設は禁止され、耐震性の高い管への取り替えも実施されている。しかしながら、その残存延長は数万kmと多く、今後とも非常に大きな地震動により被害が発生することが予想される。

こうした末端のガス導管に対しては、2次災害防止のために地震発生時の被害状況に応じて適切に供給を停止することが望まれる。ただし供給区域が広くなると被害実数の迅速な把握は困難となる。このため導管埋設状況や地震計などから集計される情報をもとに、被害状況を直ちに推計できるシステムの導入が必要となってくる。

このような地震直後の被害推計や想定地震に対する事前評価を目的に、加速度やSI値といった地震動強度に応じて、単位長さ当たりの被害件数すなわち被害率(件/km)を予測する式が、ねじ継手鋼管についてもいくつか提案されている^{2), 3)}。

ガス導管に限らず既往の埋設管被害率予測式の多くは、兵庫県南部地震より過去の地震での被害実績をもとに、被害率を地震強度に対して指数関数で増加させている。このため当然ながら兵庫県南部地震と同程度の地震動に適用すると、被害率が非常に大きくなり現実的ではなくなる。また被害率の調査自体も市町村単位での集計にとどまっているため、埋設管被害に相関が高いとされる管周辺の細かな地盤条件の影響が予測結果に適切に反映されているとは言い難い。

このうち前者については被害率に上限値を設け対応することが行われている。後者については兵庫県南部地震以降、多くの地震計が設置され、地盤の地震動特性についても詳細な調査が行われるようになってきているにも関わらず、その成果が被害推計結果に反映されにくいという状況をもたらすため、より大きな問題であると考えられる。

こうした背景のもと、兵庫県南部地震において実際にガス供給を停止するほどの地震動が発生した神戸市、芦屋市および西宮市の沿岸部における低圧ガスねじ継手鋼管の被害に対して、特に地盤条件に着目して詳細な分析を実施した。さらに分析より得られた特徴を簡潔に表現する新たな被害率予測式を検討したので報告する。

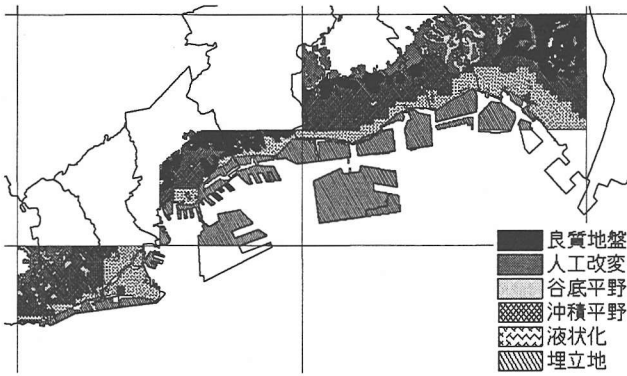


図-1 地盤条件区分(50m メッシュ単位, 実線は行政界)

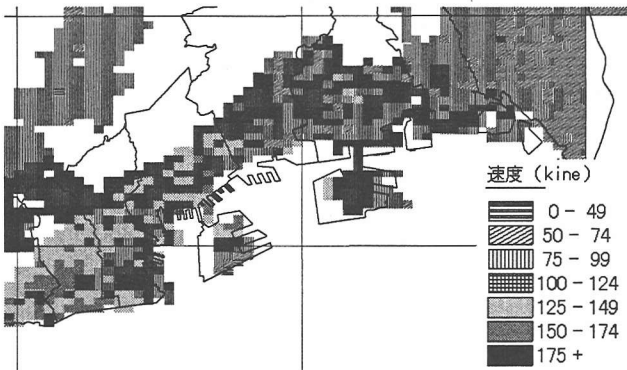


図-2 最大速度分布(250m メッシュ単位, 実線は行政界)

2. 地盤条件, 地震動強度設定および分析対象地域

(1) 地盤条件の設定

地盤条件は地震防災土地条件図⁴⁾および兵庫県南部地震における水道管路被害と地盤条件の相関を詳しく検討した磯山らの結果⁵⁾を参考に、図-1のような6区分とした。各区分のうち「良質地盤」はかなり締まった沖積平野または洪積以前の改変していない丘陵地、「人工改変」は台地・丘陵地の大幅改変地、「谷底平野」は幅数百 m 程度の比較的狭い谷に沿った地形、「沖積平野」は良質地盤でない沖積平野のうち液状化が発生していない箇所、「液状化」は良質地盤でない沖積平野のうち液状化した可能性が高い箇所にそれぞれ相当する。

沖積平野の液状化を、磯山らは航空写真による調査結果⁶⁾にもとづき、噴砂の発生状況によって部分的と全面的に区分している。ただし全面的な液状化に相当する延長が不足していたことから、被害率の分析では両者をまとめて扱っている。本研究においても全面的な液状化に相当する延長が少なかったため、両者を区別せずにまとめて「液状化」とすることとした。

(2) 地震動強度の設定

地震動強度には、加速度よりも埋設管被害率と相関が高いことが確認されている SI 値⁷⁾を用いることとした。SI 値分布は図-2に示す最大速度分布より $SI=1.18 \times \text{最大速度}^7)$ として設定した。

表-1 地盤条件区分ごとの延長および被害率倍率

| | 延長(km) | 沖積平野に対する被害率倍率 |
|------|--------|---------------|
| 良質地盤 | 105 | 0.74 |
| 人工改変 | 83 | 1.34 |
| 谷底平野 | 42 | 1.98 |
| 沖積平野 | 283 | 1 |
| 液状化 | 118 | 2.29 |

(3) 分析対象地域

図-1と図-2の重なる地域を3章以降の分析の対象地域とした。よって地盤条件が未整備のため被害が発生しているにも関わらず、分析の対象とはならない地域も存在する。しかしながら、供給が停止した地区全体の被害率と今回分析の対象とした地域全体の被害率の差は1割程度と小さかったため、今回の分析により強震動による被害率の傾向はおおむね把握できるものと判断した。

3. 低圧ガスねじ継手鋼管の被害率の特徴

(1) 地盤条件の影響

地盤条件区分ごとに延長および被害率を「沖積平野」の被害率に対する倍率として集計した結果を表-1に示す。「埋立地」ではねじ継手鋼管の延長が数 km しかなかったため対象外とした。

地盤条件の影響は、震源からの距離が同程度で地震動に大差がない比較的限られた地域内で検討するのが本来であろう。ただしそうした場合、各地盤条件ごとに十分な延長が得られない可能性がある。今回対象とした神戸市～西宮市にかけては、おおむね各地盤条件区分は東西方向に列をなしているため、各地盤条件とも SI 値 100kine 前後の地震動強度の延長が多く、ある地盤条件が極端に他の地盤条件と揺れ方が異なっているということにはなかった。つまり表-1の結果にはマクロな地震動の影響は少なく、地盤条件の差異がより反映されていると考えて良い。

こうした考えのもと表-1より被害率倍率を比較すると、「谷底平野」および「液状化」で被害率が特に大きくなっていることがわかる。沈下や流動により地震動よりも大きな地盤ひずみが発生することもあるため、液状化により被害が増加することは理解しやすく、既往の予測式でも液状化の影響を考慮したものは多い。一方、「谷底平野」については、総延長は他の地盤条件区分に比較してやや少ないものの、明らかに被害が増大している。磯山らも指摘しているとおり⁵⁾、「谷底平野」を一般の沖積平野と区別して扱うことの重要性が再確認されたと言える。

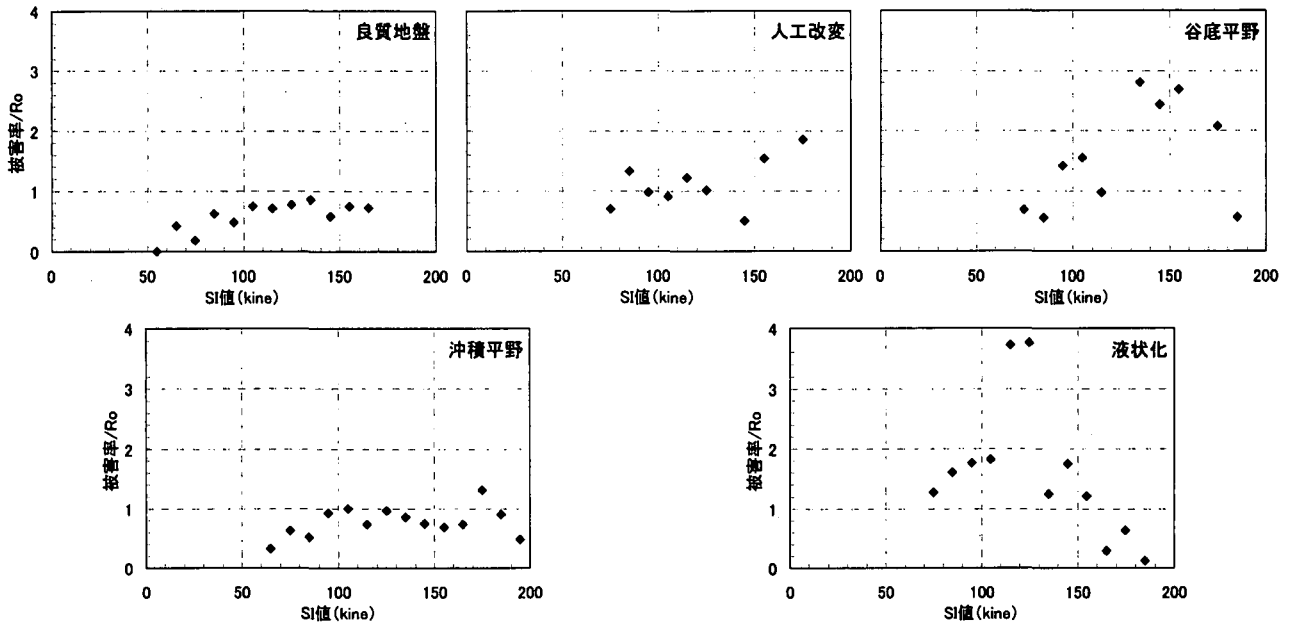


図-3 SI 値 10kine ごとの被害率集計結果(延長が 1km 以上の階級のみ図示)

(2) SI 値の影響

各地盤条件区分で、SI 値 10kine ごとに被害率を集計した結果を図-3に示す。なお被害率は実被害率を4章で検討する被害率予測式において「沖積平野」で見込まれる被害率の最大値 R_0 で除した値として示している。

「液状化」以外では被害率は SI 値の増加とともに増加している。特に「良質地盤」「人工改変」「沖積平野」では SI 値が 100kine を超えると被害率がほぼ一定となっていることがわかる。

一方、「液状化」については、被害率と SI 値の間に右上がりのような単純な関係は認められない。これには液状化による地盤応答の非線形化、沈下や流動といった現象が関係していると考えられる。そこでより詳細に被害率と液状化の程度の関係について次節で検討する。

(3) 液状層厚の影響

液状化程度の指標として液状化層厚 H を用いる。「沖積平野」または「液状化」に該当し、詳細な地盤条件が入手できたメッシュに対して、道路橋示方書('96)により設計水平震度を 0.8 として H を計算した。震度を一定としたのは地震直後に実際の H を求めることは困難な場合が多いためである。よって本研究での H とは、ある地点での液状化ポテンシャルに相当する量と捉えるべきである。

各 H ごとの被害率を、 $H=0m$ の被害率に対する倍率として整理した結果を図-4に示す。 H が求まったメッシュ数が少ないため、各階級の延長が少なくとも 1km 以上となるように階級幅を変化させて集計した。 H の増加とともに、被害率が増加する傾向が認められる。

図-4には H に応じた被害率の増加を式(1)の形で表現した結果もあわせて示している。式(1)により H による被害率の増加傾向がおおよそ表現されている。

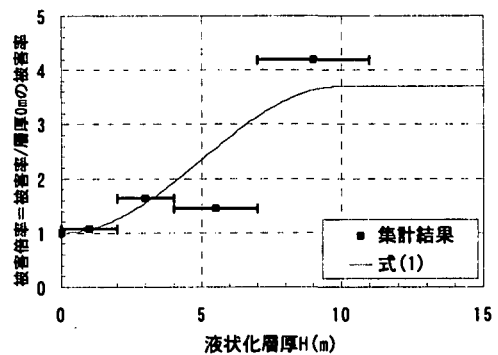


図-4 被害率と液状化層厚 H の関係(横棒は各階級幅)

$$\begin{aligned}
 & 2.35 - 1.35 \cos\left(\frac{\pi H}{10}\right) \quad (0m < H < 10m) \\
 & 3.7 \quad (H \leq 10m)
 \end{aligned} \quad (1)$$

(4) 口径の影響

延長の多い「沖積平野」について、各口径ごとに被害率と SI 値の関係を集計した。その結果、口径によって被害率に明瞭な差は認められなかった。これはねじ継手鋼管は直径が 100mm 以下の小口径であり、各口径の差が 10mm 程度と小さかったためであると考えられる。

4. 被害率予測式の検討

3章で明らかにした兵庫県南部地震におけるねじ継手鋼管の被害率の特徴を、できる限り簡潔に表現するために被害率予測式は式(2)の形とした。

$$R = C_1 \cdot C_2 \cdot \phi(SI) \quad (2)$$

ここに R は被害率予測値(件/km)、 C_1 は地盤条件区分に応じて、 C_2 は液状化の程度に応じてそれぞれ被害率を増

表-2 地盤条件区分による係数 C_1

| | 良質地盤 | 人工改変 | 谷底平野 | 沖積平野 |
|-------|------|------|------|------|
| C_1 | 0.87 | 1.65 | 2.24 | 1 |

減させる係数である。φ(SI)は基準となる地盤条件での被害率で、SIはSI値である。本研究ではφ(SI)は延長の多い「沖積平野」に対して設定した。

C_1 は表-1の結果に、ねじ継手鋼管以外の管種の被害率を勘案して表-2のように設定した。液状化が発生するとSI値に対する被害率の関係が不明瞭となるため、液状化の影響は別途 C_2 として取り込むこととしている。 C_2 には式(1)をそのまま適用することとした。

標準被害率φ(SI)は式(3)の形とした。

$$\phi(SI) = R_0 \int_0^{SI} \frac{1}{\sqrt{2\pi x\xi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \lambda)^2}{2\xi^2}\right) dx \quad (3)$$

式(3)ではSI値に換算したガス導管の耐力は対数正規分布し、被害率はSI値が耐力を上回る確率すなわち被害率に、被害率の取りうる最大値を乗じて求まることを仮定している。ここに R_0 は「沖積平野」で見込まれる被害率の最大値、 λ 、 ξ は対数正規分布の平均と分散である。式(3)により被害率はSI値の増加とともに増加し、SI値が大きくなると R_0 に漸近する性質を持つ。 R_0 、 λ 、 ξ は図-3の「沖積平野」の結果にSI値が60kine以下のデータとして参考文献2)で調査された地震のうち沖積平野に該当するデータを加え、回帰分析を行い設定した。

このようにして作成した予測式による被害率の予測値と実被害率を比較した結果を図-5に示す。SI値が100kineの被害率を上限値とした参考文献2)の予測式による結果もあわせて示す。式(2)による予測結果は実被害率と良好な一致を示している。特に地盤条件による被害率の増大や、SI値が100kineより大きな領域での被害率の増加の鈍化傾向をより合理的に表現している。

5. まとめ

兵庫県南部地震における低圧ガスねじ継手鋼管の被害に対して分析を行い、地盤条件および液状化層厚の影響を取り込んだ被害率予測式を作成し、既往の被害率予測式と比較して特に地震動が大きな領域で精度が向上していることを確認した。ただし、液状化層厚に応じて被害率を増加させる手法は非常に限られたデータに対しての結果であり、液状化の影響の取り込み方については更なる検討を行う余地があるものと考えている。

なお今回作成した予測式は、東京ガスにおいて2001年夏より稼働を開始する超高密度地震防災システム SUPREME に適用する予定である。

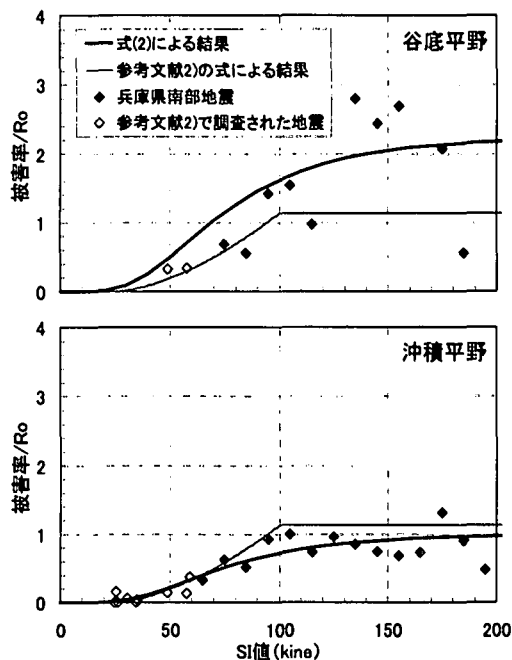


図-5 予測被害率と実被害率の比較

また今後は以下の検討を加えてゆく考えである。

- SI値が60kine以下の実被害率として、地震動の比較的小さかった大阪市周辺での被害を加える。これにより今回は未検討である被害が発生し始めるSI値等を設定する。
- 2000年鳥取県西部地震および2001年芸予地震におけるガス導管被害の有無を調査し、今回作成した被害率予測式の式作成とは無関係の地震への適用性を検証する。

謝辞：地盤条件の整理では日本技術開発(株)の石田栄介氏に、予測式の作成では東京ガス(株)の小林実央氏、大阪ガス(株)の清水謙司氏、東邦ガス(株)の小島清嗣氏に多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) ガス地震対策検討会編：ガス地震対策検討会報告書，1996。
- 2) 高橋正洋，鈴木崇伸，磯山龍二，吉川洋一：埋設管被害と地震動強度の関係について，第9回日本地震工学シンポジウム，pp.2083-2088，1994。
- 3) 高田至郎，高谷富也，小川安雄，福井真二：地震動モニタリングとライフラインのリアルタイム被害推定，構造工学論文集 Vol.40A，pp.1139-1149，1994。
- 4) 国土交通省国土地理院：1/10,000 地震防災土地条件図，1996。
- 5) 磯山龍二，石田栄介，湯根清二，白水暢：1995年兵庫県南部地震に基づく水道管路の地震被害推定式，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.3175-3180，1998。
- 6) Masanori Hamada, Ryoji Isoyama, and Kazue Wakamatsu: The 1995 Hyogoken-Nambu (kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement and Soil Conditions in Hanshin Area, (財)地震予知総合研究振興会，1995。
- 7) 童華南，山崎文雄，佐々木裕明，松本省吾：実地震被害例による家屋被害推定式の構築，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集共通セッション，pp.284-285，1994。