

継手性能を反映した埋設管の被害推定式

鈴木崇伸¹・清水善久²・小金丸健一³・安藤広和⁴

¹正会員 工博 東洋大学助教授 工学部環境建設学科 (〒350 川崎市鯨井 2100)

^{2,3}正会員 東京ガス(株)

⁴正会員 東京ガス(株) 基礎研究所

これまでに収集した埋設管の実被害データをもとにマクロな傾向分析を行い、管種によらず増加傾向は同じ様になる点や、継手の耐震性能によって被害のはじめる地震動が異なる点、液状化によって被害率が数倍になる点を確認してきている。本研究は阪神・淡路大震災のデータまで含めた実被害データをもとにガス導管の被害推定式の定量化を図るものであり、フラジリティカーブを近似した新たな回帰関数を用いて、埋設管ごとの地震動と被害率の回帰式を導いた。被害率の大小に加えて被害の発生しはじめる地震動を加えることでより精度の高い推定式が得られ、実被害とよく対応する結果となっている。

Key Words : Damage ratio of conduits, Fragility, Capacity of joints

1. はじめに

兵庫県南部地震では、地震後の被害把握の遅さや初期対応の遅れが問題となり、現在地震観測網の拡充と初期対応策の整備が各所で進められている。地震被害の1次情報として、地震動の強さから推定される被害量は重要であり、緊急対応の判断の目安になると考えられる。本研究は埋設管の地震被害に着目して、過去の被害統計にもとづいて被害推定式の作成を行っている。

これまでいろいろな研究者によって埋設管被害の分析がなされている。久保、片山の研究は1971年サンフェルナンド地震の水道管被害に着目した結果であり、最大加速度と関連付けてべき関数で被害の増加の様子を表現している。また高田の研究は国内外のいろいろな地震の統計分析から平均的な被害率を最大速度の指数関数の形で与えている。また液状化地域の被害率は増加の傾向が違うとして別の指数関数式を求めている。一方西尾の研究ではいくつかの地震のガス導管被害に着目して、地震動の他に継手の耐震性能と地盤条件によっても被害の増加傾向が異なることを指摘しており、これらを表すパラメータを含めて信頼性工学でよく用いられるフラジリティカーブにあてはめた関係式を提案している。筆者らは被害例のもっとも多いガスネジ鋼管の被害率とSI値に着目してある値からはじまるべき関数で平均的な被害率を与える式を求めている。それぞれの研究で得られた推定式で共通しているのは、地震動が小さいときは被害は無視しうほど小さい点と、基本的には下に凸の関数を用いている点である。

この研究では宮城県沖地震以降の被害データに兵庫県南部地震で得られた多数の被害データを含めて平均的な被害率の推定式を求めた。推定式の統計分析にあたっては管継手や管種・口径による被害の差異を合理的に表現できる関数形を設定している。回

帰分析の結果、耐震性能に優れる管ほど被害の発生は大きな地震動からとなり、また被害率も小さくなることが確認された。

2. フラジリティによる埋設管被害の表現

(1) 被害の増加傾向

筆者らはこれまでに1978年宮城県沖地震以降、1995年兵庫県南部地震までのガス管、水道管の地震による被害率の分析を行っている。地震動の条件、地盤の条件、継手性能の条件による被害率の増減を分析した結果から、以下の点が特徴的であった。

- ・被害の有無の判定にはSI値がむいている。
- ・平均的な被害率は管種によらず等比的に増加する。
- ・継手の耐震性能によって被害の発生しはじめる地震動は異なる。
- ・また耐震性能に優れる管種ほど被害率が小さくなる。
- ・液状化の影響が顕著な場合には被害率が数倍に増大する。

このような被害の特徴をよく表現できる関数形について考えてみる。設備の損傷確率を求める方法として、地震荷重と耐荷性能の確率密度を設定して超過確率を計算する方法がある。この方法によれば耐荷性能による被害の程度を確率的にとりこむことが可能である。しかしながら埋設管の被害は確率値ではなく、単位延長あたりの平均被害件数で表すのが一般的であり、さらに工夫が必要とされる。ここではフラジリティにより被害を表現する方法を改良して、埋設管の被害の増加傾向をうまく表現できる関数を設定する。

(2) 被害の確率表現

地震動の確率分布として対数正規分布がよく用いられている。ここでは地震時に埋設管に作用する地

震動の強さを x が対数正規分布すると仮定する。分布関数を $\Phi(x)$ とすると

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \xi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \lambda)^2}{2\xi^2}\right)$$

$$\bar{x} = E[x], \quad \sigma^2 = V[x], \quad V_x = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

$$\lambda = E[\ln x] = \ln\left(\frac{\bar{x}}{\sqrt{1+V_x^2}}\right), \quad \xi^2 = V[\ln x] = \ln(1+V_x^2)$$

(1)

と表される。埋設管の耐震性能を地震動 x で表現して x_f を超えた部分で被害になると定義すれば、被害確率 P_d は以下の積分で求められる。

$$P_d = \int_{x_f}^{\infty} \Phi(x) dx \quad (2)$$

図 1 にこの計算のイメージを示すが、平均 \bar{x} のまわりに分布する地震動に対して x_f を超えた部分の面積を計算すれば被害確率となる。図からも明らかなように \bar{x} が大きいほど被害確率は大きくなり、また x_f が小さいほど被害確率は大きくなる。

計算式において $t = (\ln x - \lambda)/\xi$ として変数変換を行うと

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_f}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

$$t_f = \frac{\ln x_f - \ln \bar{x} + \xi^2/2}{\xi} = \frac{1}{\xi} \ln\left(\frac{x_f}{\bar{x}}\right) + \frac{\xi}{2} \quad (3)$$

となり、正規分布の超過確率により被害確率が計算できる。この計算式に含まれるパラメータは地震動の平均 \bar{x} とばらつきを表す ξ 、及び埋設管の耐震性能 x_f であり、 ξ あるいは変動係数 V を仮定すれば (\bar{x}/x_f) の関数として被害確率を計算できる。図 2 に ξ を変化させたときの計算例を示している。 $\xi=1$ と仮定したときには $\bar{x}/x_f = 0.1$ ぐらいから曲線は立ち上がり、ゆるやかに増加していく。一方 $\xi=0.5$ と仮定したときには $\bar{x}/x_f = 0.3$ ぐらいから曲線は立ち上がり、急速に増加する曲線となっている。フラジリティ曲線の立ち上がり部分だけをとりだせば、一般的な性質として、ある値からはじめて下に凸な形状で増加していく曲線となることが一般的にいえる。

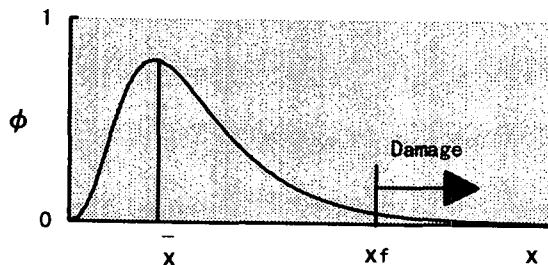


図-1 被害確率の計算イメージ

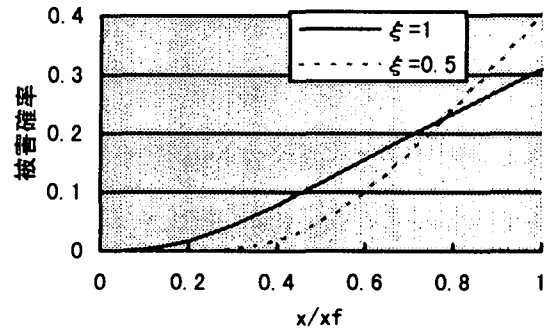


図-2 被害確率の計算例

(3) 被害確率のべき関数近似

先にも述べたように埋設管の被害率は単位延長あたりの被害件数で定義されることが多く、超過確率の計算式をそのまま適用して回帰分析するのは困難である。そこでフラジリティ曲線の立ち上がり部分に注目してこれをべき関数で近似する。べき関数は両対数グラフにおいて比例を表す関数であり、回帰分析をする際に取り扱いが簡単な関数形である。被害データ数が限られていることから、単純な回帰関数を設定して平均的な被害の増加傾向を表現するのが有効と考える。

べき関数の立ち上がり点を x_0 として、このときの超過確率を $0.001(3\sigma)$ 程度と仮定すると、

$$t_f = \frac{1}{\xi} \ln\left(e^{\frac{\xi^2}{2}} \frac{x_f}{x_0}\right) = 3 \quad (4)$$

が成り立つ。管の耐荷性能値 x_f と被害が発生しはじめる地震動 x_0 の比は分布のばらつき具合 ξ によって異なるが、概ね数分の 1 程度の値となる。図 2 では \bar{x}/x_f を変数にとって超過確率を計算したが、横軸を \bar{x}/x_0 に変えても同様のグラフが描ける。このグラフは超過確率が小さい範囲では x_0 から立ち上がるべき関数で近似できると考えられる。そこで $x_0 < \bar{x} < 6x_0$ の範囲で地震動が変化するとき、次のべき関数で超過確率 P_d を近似してみる。

$$P_d = a \left(\frac{\bar{x}}{e^{3\xi} x_0} - \frac{1}{e^{3\xi}} \right)^b \quad (5)$$

ただし a, b は未定係数である。前述の範囲を 100 等分してプロット図をつくり、べき関数にあてはめる計算を行う。 ξ を何通りか変化させて a, b の係数を求めたのが表 1 である。

一例として変動係数 1.0 の場合の近似曲線を図 3 に示すが、べき関数は超過確率として計算した被害確率の増加の様子をよく近似できている。係数 a, b は ξ の変化に比べて大きくは変動せず、特に指数係数 b は 1.4~1.6 程度となっている。

以上の検討により、地震動の増加にともなう被害確率の増加は、ある値から立ち上がるべき関数で近

表-1 近似関数の計算結果

| 変動係数 | ξ | $\exp(3\xi)$ | a | b | 相関係数 |
|------|-------|--------------|-------|------|-------|
| 0.7 | 0.63 | 6.6 | 0.700 | 1.64 | 0.991 |
| 1 | 0.83 | 12.1 | 0.741 | 1.52 | 0.994 |
| 1.3 | 0.99 | 19.5 | 0.783 | 1.41 | 0.998 |

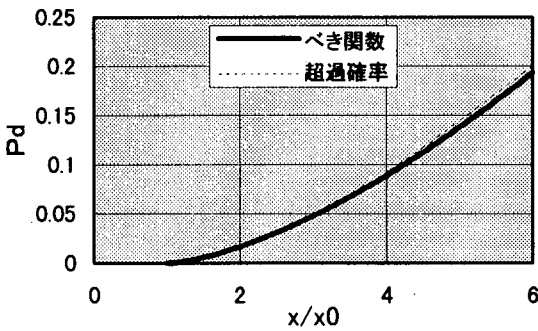


図-3 近似べき関数の計算例 ($\xi=0.83$)

似されることが示された。またべき関数の指数部は1.5乗程度の値となり、地震動の分布が変わってもそれほど変動せず、下に凸でゆるやかな曲線となる。

(4) 地震動の定義と関数形

地震時に埋設管に加わる力と地盤ひずみの関係について考える。地下構造物の設計によく用いられている地盤変位の分布に時間項を加えた形は以下のようになる。

$$u_g(x, t) = u_0 \sin\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (6)$$

ここにLは波長、Tは地震動の周期であり、水平方向をx軸にとっている。速度振幅を v_0 、ひずみ振幅を ε_0 とすれば

$$v_0 = \frac{2\pi}{T}u_0, \quad \varepsilon_0 = \frac{2\pi}{L}u_0, \quad v_0 = \frac{L}{T}\varepsilon_0 = c\varepsilon_0 \quad (7)$$

の関係がある。ここにcは位相速度である。

水平に埋設された変形しない管を考える。上で述べた地盤変位が管軸方向に作用する場合には地盤の剛性を ρc^2 として単位面積あたり $\tau = \rho c^2 \varepsilon$ がはたらく。管径をDとすれば単位長さあたりにはたらく力 $q(x)$ は次式となり、速度に比例した振幅をもっている。

$$q(x) = (\pi D)\rho c v_0 \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \quad (8)$$

管の変形を無視して最大軸力を計算すると

$$N_{\max} = v_0(\rho c)(\pi D)\left(\frac{L}{2\pi}\right) \quad (9)$$

= (速度)・(インピーダンス)・(直径)・(長さ)

となる。地盤振動に関係する項は速度と長さであるが、両方に比例して最大軸力が決まる。

以上の関係式から地盤の最大速度に注目すれば地震時に埋設管に加わる力あるいは管に発生する軸力と関係づけられると考えられる。さらに最大速度とSI値がよい比例関係にあることから、SI値を地震動の尺度とすれば埋設管被害とよい対応が得られると考える。よって地震動xをSI値に置き換えて回帰関数を設定する。

埋設管の1kmあたりの被害率rと超過確率 P_d が比例関係にあると仮定し、比例係数をKとする。 $SI = 2SI_0$ のとき()内は1となり、このときの基準被害率を R_0 とすると

$$r = R_0 \left(\frac{SI}{SI_0} - 1\right)^b, \quad R_0 = \frac{Ka}{e^{3\frac{b}{\xi}}} \quad (10)$$

なる式が得られる。bは大きく変化しないと考えられるため、管種毎に SI_0 と R_0 の値が決まれば被害率が推定計算できることになる。

3. 被害率の回帰分析

Ansary 他 の SI 値の距離減衰式の研究成果によれば、マグニチュードと距離が与えられたとき、 $\log SI$ の標準偏差は0.257となる。ある地域を代表するSI値のばらつきに関してさらに距離が若干増減する影響を見込めば標準偏差0.3程度と考えられる。このとき $10^{0.3} = 2.0$ となることから変動係数 $V=1.0$ 程度となる。よって $\xi=0.83$ 、 $b=1.52$ とした曲線を基準に使えば、適当な被害率推定式が求められると考える。

$$r = R_0 \left(\frac{SI}{SI_0} - 1\right)^{1.52} \quad (11)$$

計算にあたってはまず液状化の影響が大きいデータを除き、被害率0のデータを回避すると、特定の区間のSI値に影響されないように、ある区間で

表-2 区分ごとの平均被害率 (件/km)

| 区分 | 代表SI | ガスSP | ガスメカ | SGM | ガスDIP | GM | 水道CIP | 水道DIP |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20-24 | 22 | 0.004 | | 0.000 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 24-29 | 26.4 | 0.033 | 0.040 | 0.000 | 0.043 | 0.000 | 0.035 | 0.101 |
| 29-35 | 31.7 | 0.140 | 0.017 | 0.000 | 0.009 | 0.000 | 0.328 | 0.021 |
| 35-42 | 38.0 | 0.061 | | 0.033 | | 0.000 | 0.112 | 0.018 |
| 42-50 | 45.6 | 0.257 | 0.065 | 0.021 | 0.024 | 0.000 | 0.065 | 0.030 |
| 50-60 | 54.7 | 0.503 | 0.112 | 0.000 | 0.370 | 0.000 | 0.377 | 0.051 |
| 60-72 | 65.7 | 1.487 | | 0.196 | | 0.045 | 0.885 | 0.175 |
| 72-86 | 78.8 | 2.520 | | 0.123 | | 0.053 | 2.140 | 0.180 |
| 86-103 | 94.6 | 1.901 | | 0.070 | | 0.000 | 1.110 | 0.280 |
| 103- | 113.5 | 1.572 | | 0.035 | | 0.033 | 2.290 | 0.450 |

ータを層別し、区間ごとの平均被害率を用いて回帰計算を行うこととする。表2に区分ごとの平均被害率を示す。阪神のデータでは100カインを超えたところで被害率が減少傾向になる管種もあったが、安全サイドの評価を行う目的から表中の103カイン以上のデータを無視して回帰計算を行っている。

SI_0 と R_0 を計算した結果を表3に示す。表中には管継手の耐震性能の相対的な目安も示している。表中に示した係数から明らかに管の耐震性能によって被害率は異なっており、耐震性能が高い管ほど SI_0 は大きくなり、 R_0 は小さくなっている。図4は継手性能の違いによって被害率がどのようになるかを示したグラフである。継手性能が低い管ほど小さな地震動からカーブが立ち上がり、被害率の増加の割合も大きくなっている。

図5は液状化の影響が顕著なデータを除いたガスネジの被害率のプロット図に今回計算した推定式を書き入れたグラフである。今回計算された推定式は筆者らが以前に求めたべき関数式とときわめて近いものとなっている。また同図中に推定値を2倍した線と、半分にした線も加えているが、推定結果の倍半分の範囲で大方予測できると判断される。ただし、地震動のあてはめにやや難のあった30カイン前後のデータや阪神の50カインでも被害がなかった例などはこの範囲にはいてこないで今後の検討を要する。

同様に水道铸铁管について描いたのが図6である。図5と同様に倍半分の線を加えているが、大方この範囲で予測可能と判断される。しかしガスネジ鋼管と同様に被害が起こりはじめる20~30カインのあたりには突出したデータが何点もあり、平均値では的確にとらえられていない。

グラフは省略するが他の管種についても被害率プロットと推定式の対比を行ったところ、耐震性能が中程度の管種は比較的良好に一致する結果となったが、耐震メカとよばれる継手性能が高い管種は推定線からばらつくデータが多く、地震動以外の局地的な地盤変状等の要因もあわせて検討する必要がある。

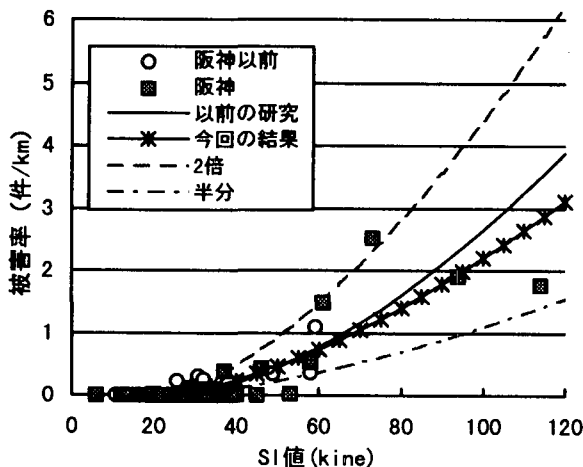


図-5 低压ガス用ネジ鋼管の被害率と回帰結果

表-3 回帰係数の計算結果

| | ガスSP | ガスメカ | SGM | ガスDIP | GM | 水道CIF | 水道DIP |
|---------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| 耐震性能 | 低 | 中 | 高 | 中 | 高 | 低 | 中 |
| SI_0 (kine) | 22 | 26 | 38 | 27 | 46 | 22 | 27 |
| R_0 (件/km) | 0.321 | 0.118 | 0.0646 | 0.125 | 0.0202 | 0.271 | 0.082 |

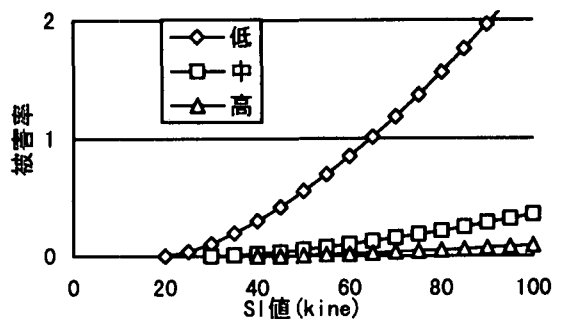


図-4 平均被害率の耐震性能による差異

4. まとめ

宮城県沖地震以降の実被害データにもとづいて地震動と平均的な被害率の関係式を導いた。統計分析にあたり、被害の増加を表す関数としてフラジリティ曲線をべき関数で近似した曲線を用いて、継手性能の差異を式の中に織り込んだ。計算の結果、ばらつきはあるものの倍半分程度の精度で計算できる推定式が得られた。今後は液状化などによる地盤変状の影響の分析や被害の有無の判断について研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 久保、片山、佐藤：埋設管の地震被害の定量的分析、第4回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.655-662、1975
- 2) 高田他3：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.1139-1150、1994
- 3) N. Nishio：Sismic damage ratio prediction for buried pipelines considering nonuniform ground displacement、Proc. Of JSCE No.450/I-20、pp.63-74、1992
- 4) 鈴木他3：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)
- 5) 鈴木他3：埋設管被害と地震動・地盤との関連について、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、1997
- 6) Ansary, Yamazaki & Katayama: Statistical analysis of peaks and directivity of earthquake ground motion, EESD Vol. 24, 1995

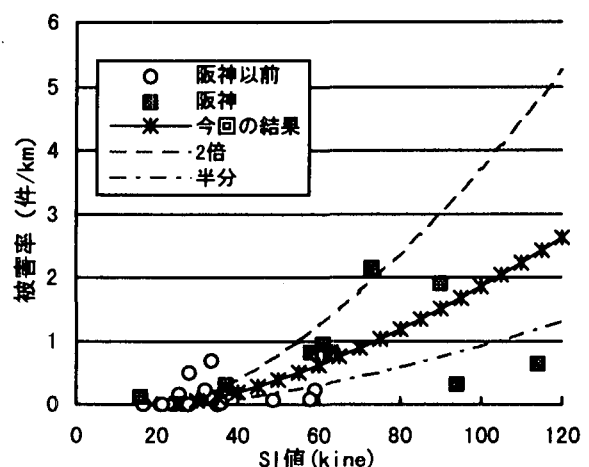


図-6 水道用铸铁管の被害率と回帰結果