

SI値にもとづく埋設管の地震被害率予測法

西尾 宣明¹

1 正会員 工博 (〒330 埼玉県大宮市東大宮1-97-7)

日本ガス協会は釧路沖地震と兵庫県南部地震におけるガス導管の被害を分析して、中・低圧ガス導管耐震設計指針の考え方が正しいことを示した。この指針は筆者が主幹となり、筆者が提案したモデルをもとに作成されたものである。筆者はその考えを発展させて、地盤変位の不均一度指数と配管系の地盤変位吸収能力の組み合わせから、任意の地震加速度のもとでの埋設管の被害率を予測する方法を提案した。そして、過去の地震被害の状況をきわめてよく説明できることを示した。しかし、一般に地震被害は加速度よりもSI値により強い相関を示す。本文ではSI値をもとにした地盤変位不均一度指数により地盤条件を分類し、地盤条件と地盤変位吸収能力およびSI値の組み合わせに対して被害率を予測する方法を示す。

Key Words: buried pipeline, earthquake, damage ratio, damage ratio prediction, seismic acceleration, SI-value

1. はじめに—日本ガス協会で・低圧ガス導管耐震設計指針の概要

日本ガス協会は釧路沖地震と兵庫県南部地震におけるガス導管の被害を分析して、中・低圧ガス導管耐震設計指針¹⁾の考え方が正しいことを示した。

この指針は筆者が主幹となり、筆者が提案したモデルをもとに作成されたものである。この指針の基本的な構成は次の三項に要約できる。

1. 埋設条件

埋設管が埋設される地域を

- I. 岩盤、洪積層等安定な地盤の地域
- II. 沖積層等の軟弱地盤が厚く堆積する地域
- III. 上記Iに相当する地盤とIIに相当する地盤が相互に入り組み合いあるいは混在する地域の三つに分類し、この条件に応じて埋設管が保有すべき地盤変位吸収能力の値を指定する。

2. 埋設管の地盤変位吸収能力

図1に示すように、管軸方向に相対的に変位する二つの地盤ブロックにまたがって設置された埋設管に漏洩が生じるとき（あるいは管のひずみが指定する値に達するとき）の地盤相対変位の大きさを当該埋設管の地盤変位吸収能力とする。

3. 設計地盤変位

埋設管はその地盤変位吸収能力が上記の埋設条件および管種（主として使用圧力で区分）に応じて指定された設計地盤変位の値を上回るとき必要な耐震性を保有するものと判断される。低圧本・支管の場合、設計地盤変位の値は埋設条件IIIに対して5 cm、IIに対して3.5 cm、Iに対して2.5 cmとされている。これらの数値が示すように、単に軟弱地盤が厚く分布する地域よりも、硬い地盤と

軟弱地盤が入り組んだ地形のほうが、埋設管に被害が生じやすいという判断がなされている。これは、硬軟両地盤が混在する地域では地盤変位の分布の不均一度が大きく、したがって水平方向の地盤のひずみが大きくなる確率が高いという考え方にもとづく。

筆者はこの考えを発展させて、地盤変位の不均一度指数と配管系の地盤変位吸収能力の組み合わせから埋設管の被害率を予測する方法を提案した。そして、過去の地震による被害の状況や配管系の種類による被害率の違いをよく説明できることを示した。

その方法では地盤変位の不均一度指数は地震加速度に比例するものとしている。これは、従来、ほとんどの場合地震の強さが加速度計によって計測されていたからである。しかし、一般に地震被害は加速度よりもSI値により強い相関を示すとされる。そして、最近では速度計あるいは直接SI計による地震の計測も多く行われるようになってきている。そのような環境に対応して、本文ではSI値をもとにした地盤変位不均一度指数により地盤条件を分類し、地盤条件と地盤変位吸収能力およびSI値の組み合わせに対して被害率を予測する方法を提案する。

2. 地盤条件と埋設管被害率の対応—釧路沖地震と兵庫県南部地震

日本ガス協会では中・低圧ガス導管耐震設計指針に定められた事項の妥当性を検証するため、標記の二つの地震によるガス導管の被害を分析した。表1は1993年の釧路沖地震によるねじ接合鋼管の、ガス供給停止地区内での地形別被害分布²⁾を示す。表の地形分類は上から順に指針の埋設条件のII、I、

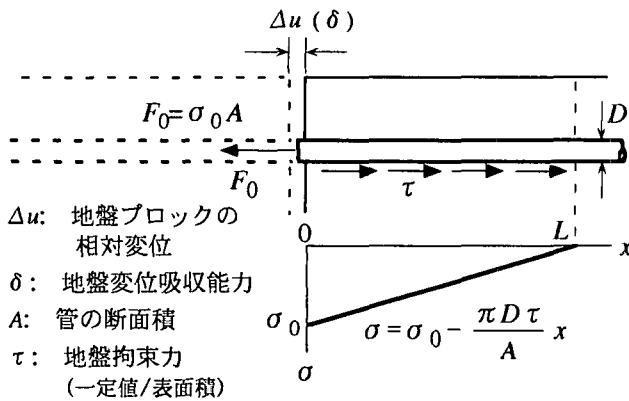


図-1 地盤ブロックモデルと埋設管の応力分布

の地形分類は上から順に指針の埋設条件のⅡ, Ⅰ, Ⅲに該当する. そして, 被害率は埋設条件Ⅲで特に大きいことがわかる.

図2は1995年の兵庫県南部地震による低圧ガス導管の被害のうち, 神戸第4ミドルブロック(復旧用導管網ブロック)について, 地形分類と被害率の対応³⁾を示したものである(1%≒4箇所/km). ここでも, 埋設条件Ⅲの地域とそれ以外の地域の被害率の違いは明瞭である. 図中のSGMは地盤変位吸収能力が5cmを上回る耐震的な継手を持つ铸铁管である. この管の被害率が埋設条件Ⅲの地域でもきわめて小さいことは, 設計地盤変位を5cmと定めた指針の判断が正しかったことを証明している.

3. 地震被害率予測法の概要

ここで, 筆者が提案した地震被害率予測法^{4),5),6)}の概要を述べる.

まず, 許容される引張り荷重が F_0 (もしくはそれに対応する許容ひずみ ε_0) の配管系の地盤変位吸収能力 δ が図-1の地盤ブロックモデルを用いて求められる. そのとき, 同時に, その荷重を発生させるために必要な最小の地盤の拘束長さ(あるいは地盤ブロックの大きさ) L が求められる. これは, 単位長さの配管系(ここでは1kmを単位にとる)のなかで被害を受ける可能性のある場所の数が

$$C = \frac{1,000 \text{ (m)}}{L \text{ (m)}} \quad (1)$$

であることを意味する. この C を被害率母数と名づける.

この C 個の地盤ブロックの地震時変位が平均値 \bar{u} , 標準偏差 σ_A の正規分布にしたがってランダムな値をとるものと仮定する. すなわち, 変位が u の値をとる確率は次式で表されるものとする.

$$p(u) = N(\bar{u}, \sigma_A) \quad (1)$$

表-1 釧路沖地震によるねじ接合鋼管の地形別被害統計(供給停止区域)

地形分類	被害件数	被害率(件/km)	対応する指針の分類
低地	0	0	Ⅱ
台地	17	0.43	Ⅰ
混在地盤 [*]	35	1.47	Ⅲ

^{*} 切土, 盛土, 谷底低地等の混在

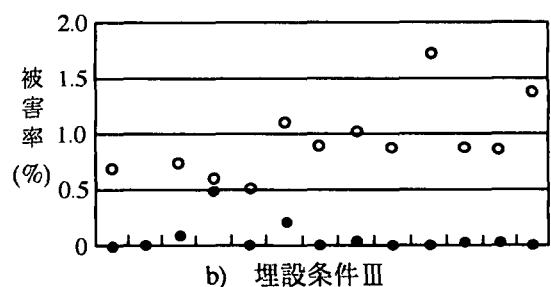
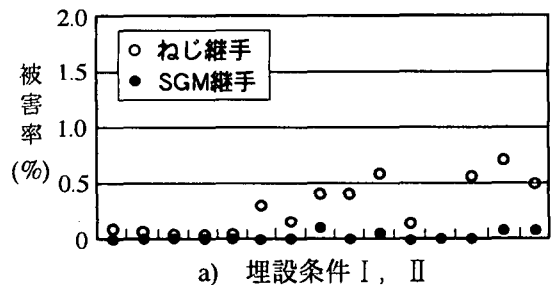


図-2 神戸市第4ミドルブロックの埋設条件別被害状況(横軸の単位は復旧セクター)

ここに, 標準偏差の添字 A は, 地盤の変位の大きさが(したがってその標準偏差も)その地域の地震加速度 A に比例するものであることを意味する. この σ_A を地盤変位の不均一度指数と名づける.

そのとき, 二つの地盤ブロックの相対変位 Δu の大きさは, 平均値が0で標準偏差 $\sqrt{2} \sigma_A$ の, 同じく正規分布にしたがって分布する. すなわち,

$$p(\Delta u) = N(0, \sqrt{2} \sigma_A) \quad (2)$$

二つの地盤ブロックにまたがって埋設された配管系が被害を受ける確率は(2)式の Δu の値が地盤変位吸収能力 δ を上回る確率として次式で与えられる.

$$P(\Delta u \geq \delta) = \int_0^{\infty} p(\Delta u) d\Delta u \quad (3)$$

これより, 単位導管延長当たりの被害箇所数として表した被害率 ϕ の予測値は(3)式に被害率母数 C を乗じて

$$\phi = C P(\Delta u \geq \delta) \quad (4)$$

により与えられる.

ここで

$$t = \frac{\Delta u}{\sqrt{2} \sigma_A}$$

表-2 不均一度指数 $\sigma_{(30)}$ による地盤条件の分類 (案)

不均一度	$\sigma_{(30)}$ (cm)	摘要 (該当する地盤の例)	参考 (実際の例と $\sigma_{(30)}$ の値)
ごく均一	< 0.4	堅固な洪積層地盤、岩盤	
均一	0.4 ~ 0.55	普通の洪積層地盤、礫層、一様な層厚の沖積層地盤	仙台市旧市街地 (~0.5) 仙台市東方沖積平野 (~0.5)
やや不均一	0.55 ~ 0.8	層厚の変化がやや激しい沖積層地盤、沖積扇状地、普通の丘陵宅造地	仙台市長町・郡山地区 (0.6~0.7) 西宮~神戸沖積・扇状地区 (~0.8) 塩釜市 (全域平均) (~0.8)
非常に不均一	0.8 ~ 1.2	層厚変化が著しい沖積層地盤 (河川流域、溺れ谷など)、液状化しやすい地盤をやや含む地域、大規模な切土・盛土 (埋め土) を施した丘陵宅造地	男鹿市 (全域平均) (~0.9) 仙台市南光台 (~1.2)
極度に不均一	1.2 ~ 2.2	きわめて軟弱かつ著しく層厚が不均一な沖積層地盤	塩釜市港南地区 (~1.9)
液状化地盤	1.6 ~ 4.5	液状化しやすい地盤を広く含む地域	男鹿市 (液状化集中地区) (~1.6) 能代市 (全域平均) (~1.7) SF市マリーナ地区 (~1.7)
	4.5 <	液状化による大規模な地盤の流動や傾斜地盤の滑動が予想される地域	1964年当時の新潟市 (液状化集中地区) (~6.2) 能代市 (液状化集中地区) (~6.2)

と変数変換すれば、(4) 式はさらに次のように標準化された正規分布の上側確率を用いて表される。

$$\begin{aligned} \phi &= CP(t \geq t_0) \\ &= \frac{C}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \end{aligned} \quad (5)$$

ここに

$$t_0 = \frac{\delta}{\sqrt{2} \sigma_A}$$

である。

もし、地震加速度 A_0 における地盤変位の不均一度指数 σ_{A_0} の値が知られていれば、任意の加速度 A に対する地盤変位の不均一度指数は

$$\sigma_A = \frac{A}{A_0} \sigma_{A_0} \quad (6)$$

により求められる。これを上の t_0 に代入して、任意の加速度における被害率を予測することができる。

4. SI値を基準にした地盤変位の不均一度指数 $\sigma_{(SI)}$ と地盤の分類

地震被害の発生は加速度よりもSI値に強い相関を示すと言われるが、被害が生じた地震だけを取り上げれば、加速度値とSI値にはかなり密接な相関がある。その例を図3に示す(清水⁷⁾による)。図中、兵庫県南部地震に対するデータは土木学会の報告(土岐)⁸⁾と地盤工学会の調査資料(佐藤)⁹⁾の中から神戸市の被害集中地区について筆者が整理して付け加えたものである。

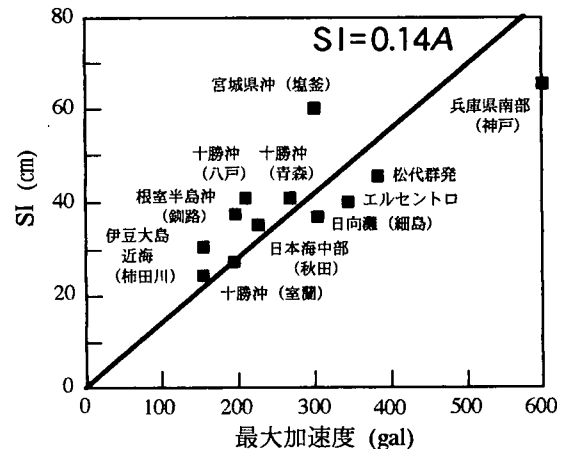


図-3 被害地震の最大加速度とSI値の関係

ここでは加速度とSIが正比例するものと仮定して分散値が最小となる直線を求め、

$$SI = 0.14 A \quad (7)$$

を得る。この関係を(6)式に適用すれば、容易に σ_A を $\sigma_{(SI)}$ に読み替えることができる。

筆者はすでに $A_0 = 275$ gal に対応する σ_{275} を基準にした地盤の分類を提案している。 $A_0 = 275$ gal としたのは宮城県沖地震における仙台市での加速度が 250~300 gal とされていることによるが(筆者はこの被害率予測法を、主に宮城県沖地震における被害データを用いて検証した)、(6)式および(7)式により地盤変位(と、その不均一度指数)が加速度やSIと比例関係にあると仮定できるならば、基準とする A_0 や SI_0 はどのような値であっても問題ない。そこで、ここでは

$$SI_0 = 30 \text{ cm/s}$$

と定め、先の地盤分類を $\sigma_{(30)}$ の値に読み替えて書

表-3 4種類の配管系の地盤変位吸収特性

配管系の種類	呼び径 (mm)	地盤変位吸収能力 δ (cm)	被害率母数 C (L)
①ねじ接合鋼管	50	2.7	33 (30m)
②LM型継手鋼管	50	12.1	83 (12m)
③TM型継手 鋳鉄管	150	5.6	83 (12m)
④改良A-II型 (水道型) 鋳鉄管	150	4.0	200 (5m)

き直し、表2に示す。任意のSI値に対する $\sigma_{(SI)}$ の値は(6)式のA と A_0 をそれぞれSIと SI_0 (=30) に置き換えて求められる。手順をより具体的に示せば、(7)式により275 gal が38.5cm/sに対応することから、

$$\sigma_{275} = \sigma_{(38.5)}$$

$$\sigma_{(30)} = \frac{30}{38.5} \sigma_{275} = 0.78 \sigma_{275}$$

となる。こうして得られた $\sigma_{(30)}$ を参考に不均一度の区分を調整した。

5. 被害率予測への応用例

ここで、地盤変位吸収能力 δ と被害率母数 C が既知の配管系4種類(表3)の被害率を予測する例を示す。これらの配管系は筆者の論文(4,5,6)にすでに例示しているので数値の詳細な説明は省略する。

①ネジ接合鋼管は従来国内で広く使われていたものである。②はそれに変わるものとして東京ガス(株)が開発したもの。③は旧来の鋳鉄管に代えて、同じく同社が開発したもの。そして④は宮城県沖地震当時、仙台市で用いられていたもので、他のガス事業者にも広く採用されていた。

図3は $SI=70$ cm/s(加速度500gal相当)のとき、それぞれの配管系の地盤の不均一度による被害率の違いを表したものである。 $\phi \leq 0.01$ がおおむね十分な耐震性の基準とみなされる。

①ネジ接合鋼管の被害率は $\sigma_{(30)}=0.8$ cmの地盤(神戸市沖積・扇状地相当?)で約5箇所/kmで、兵庫県南部地震における被害率に近い。④改良A-II型鋳鉄管は地盤条件が悪くなると被害率が著しく増大する。③TM型継手鋳鉄管は前二者よりすぐれてはいるが、この大きなSI値のもとではなお大きな被害率が予想される。②LM型継手鋼管は、不均一度がかなり著しい地盤まで十分な耐震性が保証される。

6. むすび

埋設配管系の地盤変位吸収特性(地盤変位吸収能

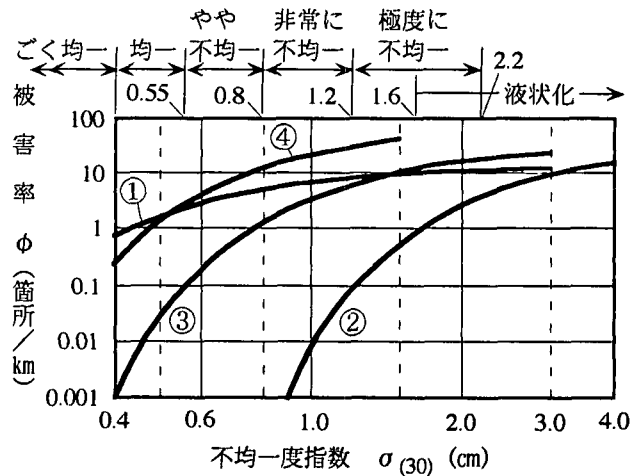


図-3 4種類の配管系に対する地盤条件と被害率の関係 (SI=70 cm/s)

力 δ と被害率母数 C が既知の配管系の被害率が、地震動の強さ(SI値で表す)と地盤の不均一度によってどのように異なるかを定量的に評価する例を示した。被害地震について加速度とSI値の関係のデータが蓄積されれば、本文の提案の信頼性をさらに向上させることができるであろう。

参考文献

- 1) 日本ガス協会：一般(中・低圧)ガス導管耐震設計指針，1982。
- 2) 日本ガス協会：釧路沖地震，北海道南西沖地震と都市ガス，pp.56-67,1994。
- 3) 日本ガス協会：阪神・淡路大震災と都市ガス，pp.121, 1997。
- 4) 西尾宣明：埋設管の地震被害率予測法に関する研究(学位論文)，1989。
- 5) 西尾宣明：埋設管の地震被害率予測法とその応用，東京ガス(株)基礎技術研究所報告 Vol.36, pp.73-82, 1991。
- 6) Nishio, N.: Seismic Damage Ratio Prediction for Buried Pipelines Considering Nonuniform Ground Displacement, Proc. of JSCE No. 450/I-20, pp.63-74, 1992。
- 7) 清水善久：ライフラインの地震防災対策②・東京ガスの地震対策，非開削技術 No.14, 1996。
- 8) 土木学会(土岐憲三)，阪神大震災震害調査緊急報告会資料，pp.5-12, 1995。
- 9) 地盤工学会(佐藤忠信)：小特集，阪神・淡路大震災(その1)，土と基礎，pp.35-37,1996。