

## 埋設管の地震時被害率予測法に関する一提案

A NEW METHOD OF ESTIMATING DAMAGE RATE OF  
PIPELINES DURING AN EARTHQUAKE

西 尾 宣 明\*

By Nobuaki NISHIO

## 1. ま え が き

ライフラインとよばれる施設の中で、水道やガスの、需要家と結びつく部分は埋設管により構成され、広い地域にわたって張りめぐらされた導管网を形成している。その導管网が地震の際に被害を被る可能性を正しく推定することは、地震災害に対する適切な方策を立案し、二次災害の防止、施設の迅速な復旧を図るなどの目的にとっての重要な前提となる。被害率の推定は導管网の適当な大きさを単位として——統計的に取り扱える程度の単位で、かつ、あまり大き過ぎないまとまりで——それが置かれている地域（地盤）の特性や埋設されている導管の材料の特性を反映してなされるのが理想的である。しかしながら、現実には上の目的に適合するような被害率の予測法はまだ存在しない。東京都防災会議のために久保・片山<sup>1)</sup>が行った東京都23区内の水道管とガス管の被害予測の中で用いられた手法はきわめて興味深く示唆に富むものである。しかし、この手法をそれ以外の地域に対して一般的に用いることは困難と思われる。それにはその地域に過去の地震における被害のデータが存在することを必要とする（久保らの作業では1921年関東地震における被害データが用いられた）。一方、彼らが行った地盤の特性と被害率の相関の分析はかなり本質的なものを示していると思われる。それは、ある地域を構成する地盤性状の分布の不均一さの程度と被害率の間にある相関を表現したものといえることができる。

1978年宮城県沖地震における仙台市など

\* 正会員 東京瓦斯(株)技術研究所 導管技術研究室長

の埋設管被害分布も、定性的には久保らが示した地盤の分類に対応しているものと考えられる。図-1はガス事業大都市調査会（通産省）<sup>2)</sup>の調査による仙台市周辺のガス本管の被害分布状況である。丘陵地の宅地造成地、なかんづく切土、盛土による大規模な地盤の加工を伴った場所での被害が著しいことを示している。仙台平野に連なる軟弱な沖積層の地域での被害は、長町付近の扇状地を除けば顕著でない。図-2は塩釜市の中でも特に被害が集中した港南地区のガス管被害分布を示す。基盤等深線から、洪積層と沖積層が複雑に入り組んだ地盤構成となっていることがわかる。図-1の中で最も被害が集

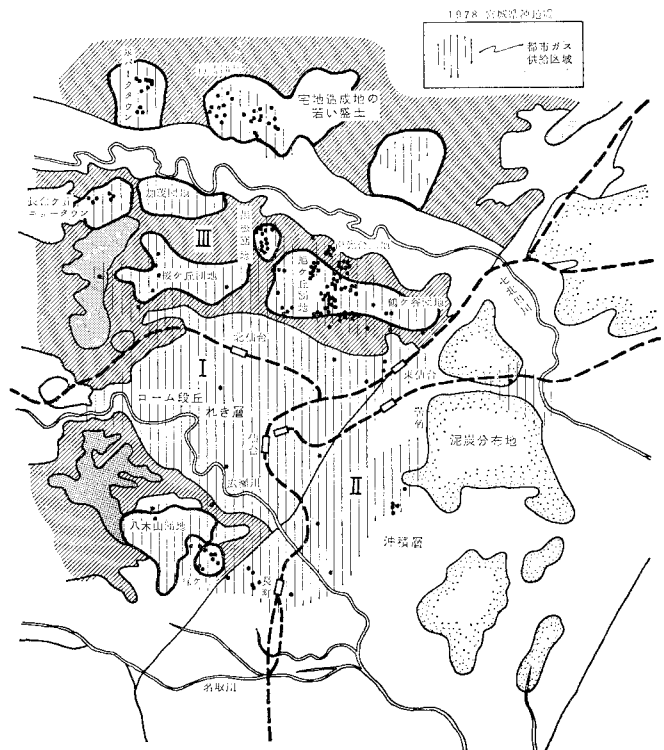


図-1 仙台市周辺ガス本管(40φ以上)被害分布

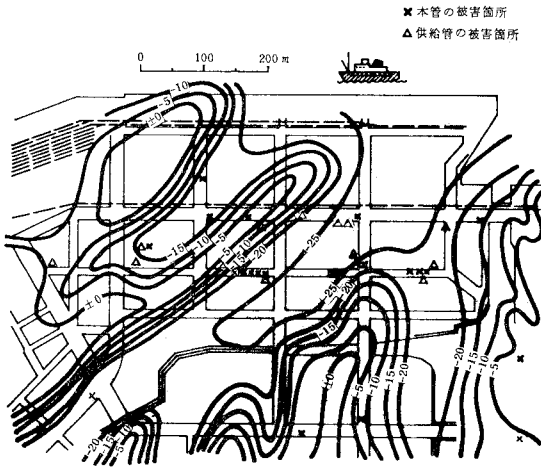


図-2 塩釜市港南地区の基盤等深線図とガス管被害の分布<sup>3)</sup>

中した南光台団地は丘陵の尾根を切り崩して谷を埋めたものであるが、地盤構成の特徴は塩釜港南地区にきわめて類似していると考えられる。平坦な盛土の下に隠された旧丘陵の地形は塩釜港南地区の洪積層の地形よりもさらに複雑に入り組みかつ急峻である。このようにして、宮城県沖地震における埋設管の被害も同様に地盤性状の分布の不均一さの度合に支配されているといえる。

佐武<sup>4)</sup>や片山<sup>5)</sup>が示したように、導管の一本一本に着目すれば、その被害は切土と盛土の境界の付近（そして盛土の側に多く）すなわち地盤の性状の変化が著しい場所に多く発生することになるが、ある地域の導管網の被害率を考える場合には、そのような局部的な性質が地域全体の地盤性状の不均一さの度合の中に包含されると考えるのが妥当であろう。このような考え方にに基づき、著者は地盤性状の分布の不均一さの度合と埋設管の被害率の関係を定量化することを試みた。

地盤性状の分布の不均一さに応じて、地震時の地盤応答変位の不均一さが定まると考えられる。それはまた地震動の強さにも支配される（近似的に強さに比例）。ここではその地盤応答変位がある平均値と標準偏差をもつ正規分布に従ってランダムに分布するものと仮定し、その変位分布の中に置かれた埋設管が被害を受ける確率を考察した。地盤応答変位の標準偏差はそのまま不均一さ

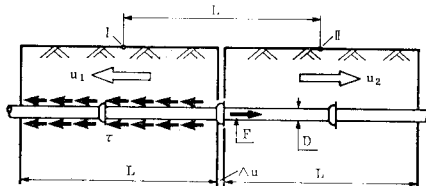


図-3 地盤から管への力の伝達モデル

の指標となるが、これを事前に決定することは困難である。それゆえ、ここでは宮城県沖地震における地盤のタイプと導管被害率の関係から逆に標準偏差の値を推定することとした。

## 2. 埋設管被害率予測式の誘導

### (1) 地盤-埋設管系のモデルに関する諸仮定

地震時の地盤の変位に関して、次の考え方が成り立つものと仮定する。

① 一定の地質構造および地形からなると考えられる一つの地域の中では、地表の地震応答変位は平均値  $\bar{u}$ 、標準偏差  $\sigma$  の正規分布に従って分布するものと仮定する。すなわち、変位を  $u$  とし、その分布を次のように表わす。

$$p(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma^2}\right\} \dots\dots\dots (1)$$

② ある適当な距離  $L$  だけ離れた地表上の任意の2点はそれぞれ独立に式(1)の分布に従って変位するものと仮定する。 $L$ の値をどのようにとっても2点間の相対変位の分布の確率は不変であるが、管路に関しては  $L$ を単位として測られた区間の数が被害を算定するときの母数となるように定めることが必要である。 $L$ の大きさの目安は、管（もしくは継手）を破損（もしくは漏洩を生ずる程度の継手の抜出し）させるのに十分な力を地盤から、管に伝えることのできる長さとするばいであろう。地盤の動きと管のまわりに生ずる力の状態を模式化すれば 図-3 のようになる。 $F$  は管（もしくは継手）を破損させるのに必要な引張力である。その力が管の外表面での地盤のせん断強さ  $\tau$  によって生ずるものとすれば、 $L$ の目安は、

$$\pi D \tau L = F \dots\dots\dots (2)$$

によって与えられる。ここに、 $D$  は管の外径である。

継手をもつ管の場合は  $L$  の距離の中に1個以上の継手が含まれるべきであるから、 $L$ の最小値は継手の平均間隔によって定まる（式(2)による  $L$  がそれよりも小さい場合）。

③ 前記の独立な2点間の変位の差  $\Delta u$  が、その間を結んで埋設されている管の許容変位量  $\delta$  を超えるときに管は破損するものとする。  $\delta$  は、図-3 に示した  $2L$  の区間内に含まれる管が、その一部が破損するに至るまでに、全体として伸縮することができる量を目安とする。それは一般に管（継手）の種類と口径によって異なる。

ここで地表の変位に正規分布を仮定したのは、特に理論的な根拠はなく、単に取扱いが容易なことと、比較的

常識的で受け入れられやすいことを考慮して定めたものである。文献 4) や 5) で指摘されているように、切土と盛土の境界部付近に管の被害が集中しやすい宅地造成地の場合には、隣接する ( $L$  だけ離れた) 任意の 2 点の変位の独立性を仮定することにはやや無理があるかもしれない。しかし、その場合でも、埋設管がどのような経路で布設されるかは、ある程度ランダムな選択 (通過する地点の地盤性状との組合せという意味で) に任せられるとも考えられるので、総合的にみれば地盤変位の正規分布近似はそれほど大きな誤差を含むものではないと期待される。

(2) 被害率計算式

a) 2 点間の相対変位の確率分布

前節の仮定をもとに、隣接する地表上の 2 点間の相対変位  $\Delta u$  の確率分布は次のように計算される。すなわち、地点 I の変位を  $u_1$ 、地点 II の変位を  $u_2$  とすれば、

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

なる関係があるが、 $u_1$  と  $u_2$  が同一母集団  $N(\bar{u}, \sigma)$  に属し、互いに独立であるとの仮定により、 $\Delta u$  は、

$$\overline{\Delta u} = \bar{u}_2 - \bar{u}_1 = 0$$

および、

$$\sigma_{\Delta u} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma^2} = \sqrt{2}\sigma$$

であるような正規分布  $N(0, \sqrt{2}\sigma)$  に属するランダム変数となる。すなわち、

$$p(\Delta u) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\Delta u^2}{4\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (3)$$

である。

b) 管の被害率

前節での仮定 ③ により、管の被害率は式 (3) を  $|\Delta u| > \delta$  について積分して次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \phi(\delta) &= 2C \int_{\delta}^{\infty} p(\Delta u) d\Delta u \\ &= \frac{C}{\sqrt{\pi}\sigma} \int_{\delta}^{\infty} \exp\left(-\frac{\Delta u^2}{4\sigma^2}\right) d\Delta u \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、係数  $C$  は被害の確率を適当な被害率の単位に換算するための係数 (被害数を算定しようとする対象の集団の大きさと同義) で、たとえば被害率を箇所/km という単位で表わすときには、式 (2) で定まる  $L$  を用いて、

$$C = \frac{1000(\text{m})}{L(\text{m})}$$

とすればよい。

ここで、 $\Delta u/\sqrt{2}\sigma = t$  と変数を変換すれば、式 (4) はさらに、

$$\phi(\delta) = \frac{2C}{\sqrt{2\pi}} \int_{\delta/\sqrt{2}\sigma}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \dots\dots\dots (5)$$

と書ける。そして  $\delta$  と  $\sigma$  が与えられれば、 $\phi(\delta)/2C$  の

値は正規分布表から容易に求められる。

3. 1978 年宮城県沖地震における仙台市周辺地域のガス管被害データへの適用例

表-1 は日本瓦斯協会<sup>9)</sup> が調べた仙台市周辺におけるガス本管の被害に関する資料を管種別および地盤別にまとめたものである。ここでは、与えられた被害率をもとに、 $C$  および  $\delta$  を既知として式 (5) により  $\sigma$  の値を逆算し、その値について吟味することとする。なお、表-1 の被害はすべて低圧管に生じたもので、溶接接合による鋼管を用いた中圧管 (圧力 1 kgf/cm<sup>2</sup> 以上 10 kgf/cm<sup>2</sup> 未満) には管体の被害が皆無であったので本文の考察には含まれない。

(1) C および  $\delta$  の値

表-1 のように分類された管種に用いられている継手のうち、大半を占める代表的なものを図-4 に示す。これらの継手の特性値として、破損時の引張荷重や変位量などの値を表-2 にまとめた。铸铁管の大半は水道型およびその改良型のメ

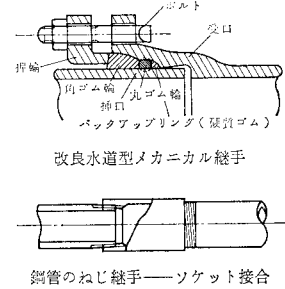


図-4 代表的なガス導管の継手型およびその改良型のメ

表-1 仙台市およびその周辺の管種別・地盤別ガス本管被害率 (単位: 箇所/km)

地盤のタイプ 管種	I	II	III
	段丘地	沖積地	丘陵宅造地
铸铁管	(2) 0.013	(2) 0.025	(10) 0.027
		長町・郡山 (扇状地) (3) 0.12	南光台 (3) 0.16
鋼管 (ねじ継手)	(9) 0.05	(14) 0.18	(181) 0.50
		長町・郡山 (6) 0.36	南光台 (62) 3.4
		その他 (8) 0.13	黒松 (26) 1.2
		塩釜市* (67) 1.09	押監 (19) 0.80 緑ヶ丘 (8) 0.57 その他 (66) 0.23

注) 1. 管種別欄の上段は全体の数字で下段はその中のおもな地域の数字である。  
2. ( ) 内は被害の箇所数を示す。  
\* 塩釜市全域の数字で、沖積地以外の地域のデータも含まれている。また、この数字は上段の数字に含まれない。

表-2 管種別ガス管特性値 (仙台市)

管種	継手型式	平均口径 D (mm)	破損荷重 F (kgf)	破損時変位量 $\phi_0$ (mm)
铸铁管	水道型および改良水道型	150 (外径約 170)	約 5000	約 40
		50 (外径約 60)	約 13000	約 25

カニカル継手により接合されており、両者それぞれ約半数ずつ用いられている。鋼管はほとんど全部がねじ接合によるものであった。

a)  $C$  の値について

表-2 の平均口径 ( $D$ ) と破損時荷重 ( $F$ ) を式 (2) に用いて  $L$  を計算すると次のようになる。ただし、ここでは地盤の強さを  $\tau=0.2\sim 0.4 \text{ kgf/cm}^2$  と仮定した。

鋳鉄管： $L_c=230\sim 470 \text{ cm}$

鋼管： $L_s=1700\sim 3500 \text{ cm}$

ここに、添字  $c$  は cast iron の、 $s$  は steel の略である。これによれば鋳鉄管の  $L_c$  は  $150\phi$  の鋳鉄管1本の標準の長さである  $5 \text{ m}$  に満たないが、仮定②で述べた理由により  $5 \text{ m}$  をもってその値と定める。 $L_s$  は上記の中間をとり  $25 \text{ m}$  を定めることにする。これより  $C$  の値はそれぞれ次のように定まる。

$$L_c=5 \text{ m} \rightarrow C_c=200$$

$$L_s=25 \text{ m} \rightarrow C_s=40$$

b)  $\delta$  の値について

各管種の許容変位量  $\delta$  は表-2 に示したように定めることとする。表中鋳鉄管の  $\delta_c$  は継手一口の許容抜出量で、改良水道型継手の構造図から推定した。 $\delta_s$  の値は、 $F=13000 \text{ kgf}$  によって管体に生ずるひずみが  $\epsilon \approx 10^{-3}$  に相当し、これが  $L_s=25 \text{ m}$  にわたって分布すると考えることにより  $25 \text{ mm}$  と定まる。

## (2) 管種、地盤別の $\sigma$ の推定と考察

前節で仮定した  $C$  および  $\delta$  の値と、表-1 の被害率のデータとにより式 (5) を用いて  $\sigma$  の値を逆算した結果を表-3 に示す。ただし、塩釜市の  $\sigma$  の値は直接逆算して得たものに  $275/300$  を乗じて補正したのとなっている。これは塩釜市での地震動が仙台市よりも強く、平均  $300$  ガルであったと仮定し、加速度と  $\sigma$  の関係について後述するところにより仙台市と同じ基準に合わせるよう補正したものである。式 (5) の性質から考えて当

表-3 被害率から逆算した  $\sigma$  の値

		(単位：mm)		
地盤のタイプ	I	II	III	
管種	段丘地	沖積地	丘陵宅造地	
鋳鉄管	(7.09)	(7.37)	7.40	
		(長町・郡山 8.25)	(南光台 8.44)	
鋼管 (ねじ継手)	5.54	6.22	7.07	
		長町・郡山 6.77	南光台 10.3	
		その他 6.01	黒旭ヶ丘 } 8.15	
		塩釜市 8.00	浮ヶ丘 7.59	
			緑ヶ丘 7.22	その他 6.40

注) 1. ( ) を付した値は被害の総数が少ないため信頼性が低いと思われる。

2. その他、表-1 の注) 1 および \* に準ずる。

然の結果ではあるが、被害率の大きさの順に  $\sigma$  の値も大きいという傾向が明瞭に現われている。表中 ( ) を付した値は、被害の総数が少ないために結果の信頼性が低いと思われるものである。結局、鋳鉄管についてはタイプⅢの地盤に関するものだけが有効となるが、鋼管に対しては地盤のタイプによる被害率の相違をよく反映した  $\sigma$  の値が得られる。

管種と  $\sigma$  の関係についてみれば、埋設される環境(道路)は管種によって変わるものではないから、地盤のタイプが同じであれば管種による  $\sigma$  の相違は少ないはずである。タイプⅢの地盤に対して得られた鋳鉄管と鋼管の2つの  $\sigma$  の値には若干の相違はあるが、管の許容伸縮量  $\delta$  や地盤の強さ  $\tau$  などに関する仮定の粗さを考慮すれば、かなりよい一致とみることができよう。

次に  $\sigma$  の推定値の大きさそのものについて簡単な考察を加える。ある地震において最大加速度  $\alpha$ 、卓越周期  $T$  であったとすれば、最大変位は近似的に、

$$u = \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \alpha$$

により見積ってよいであろう。

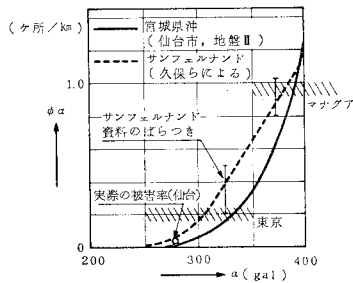
いま、仮に、ある地域の地震動の卓越周期が  $0.4 \text{ 秒}$ 、 $0.5 \text{ 秒}$  および  $0.6 \text{ 秒}$  の3つの部分に分かれて混在し、その面積比が  $1:2:1$  となるように(平均卓越周期  $0.5 \text{ 秒}$ ) 分布しているものと仮定する。その地域に生じた加速度を  $275$  ガルで一定と仮定するとき(実際には、同一の地震でも地盤の固有周期によって応答加速度も変化するが)、上の式から求められる変位の分布は表-4 の例(A) のようになる。同じく平均卓越周期を  $0.7 \text{ 秒}$  としたときの例(B) もあわせて示した。結果はそれぞれ  $4.9 \text{ mm}$ 、 $6.9 \text{ mm}$  という  $\sigma$  の値となるが、これらの値は表-3 に得られた各地盤の逆算値と同じオーダーである。例に示したような卓越周期とそのばらつきは実際にも十分にあり得るものであるから、それから推定される  $\sigma$  の値と被害率から逆算した値のオーダーの一致は、式(5)を導くために設定した各仮説、特に地盤変位の不均一さと被害率を結びつける基本的な考え方がきわめて妥当なものであることを示すものと思われる。

## 4. 加速度と被害率の関係

前章で例示したように、周波数特性が同じであれば、地盤の変位はおおよそ加速度に比例すると考えることができる。したがって変位のばらつき ( $\sigma$ ) も同様である。このことは、表-3 に求めた  $\sigma$  の値もある特定の加速度に対応するものであり、その加速度の値を明確にしない限り、宮城県沖地震の被害データから得られた結果を一般化して応用に供することができないことを意味してい

表—4 地盤の卓越周期の分布に基づく変位分布の計算例

ケース	卓越周期 $T$ (s)	変位 $u$ (cm)	面積比	$T$ の分布 (s)	$u$ の分布 (cm)
A	0.4	1.11	1	$\bar{T}=0.5$ $\sigma_T=0.07$	$\bar{u}=1.77$ $\sigma_u=0.49$
	0.5	1.74	2		
	0.6	2.50	1		
B	0.6	2.50	1	$\bar{T}=0.7$ $\sigma_T=0.07$	$\bar{u}=3.45$ $\sigma_u=0.69$
	0.7	3.41	2		
	0.8	4.46	1		



図—5 加速度と被害率：铸铁管，サンフェルナンドとの比較

る。

田村<sup>7)</sup>によれば、宮城県沖地震における仙台市の洪積層地盤の加速度は250~300ガルであったと推定される。ここでは、その中間の値をとり、275ガルをもって仙台市の加速度の代表値と定め、表—3の $\sigma$ の値はそれに対応するものと考えことにする。そのとき、任意の加速度 $a$ に対しては、 $\sigma$ の値は次のように定められる。

$$\sigma_a = \frac{a}{275} \sigma_{275} \dots\dots\dots (6)$$

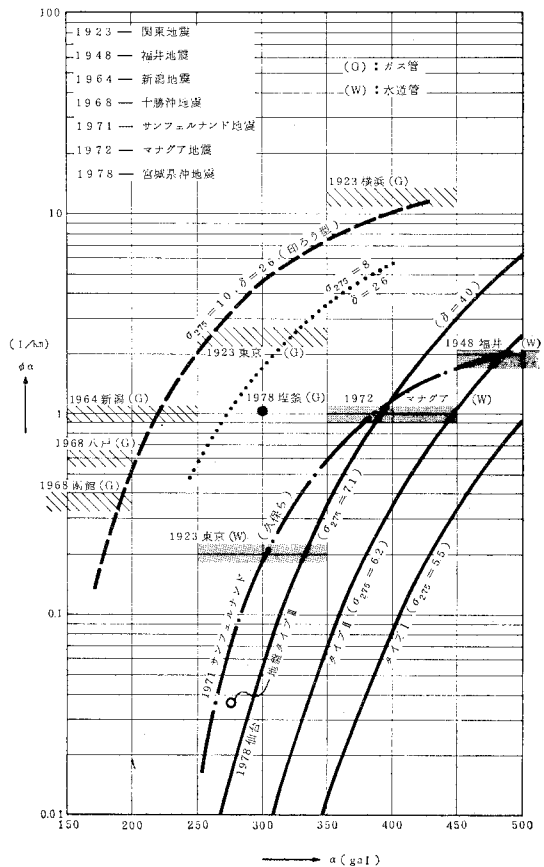
ここに、 $\sigma_{275}$ は表—3の値である。

この $\sigma_a$ を式(5)に用いて計算すれば、任意の加速度における管の被害率を求めることができる。このようにして求めた加速度と被害率の関係を図—5から図—7に示す。

図—5は仙台市のタイプⅢの地盤における铸铁管(改良水道型)の被害率と加速度の関係である。ただし、ここでは被害数が多く、より信頼性が高いと思われる鋼管に対する $\sigma_{275}$ の値(=7.1mm)を用いているので、実際の被害率を示す点は曲線から外れている。同図には久保ら<sup>8)</sup>がサンフェルナンド地震における配水本管(铸铁管)の被害を解析して求めた曲線も示した。この配水本管に用いられている継手の形式は仙台市のガス管とやや異なり、また地盤の条件も互いに異なると思われるが、2つの曲線はきわめて類似した関係にある。すなわち、両者ともに250ガル以上の加速度で被害が生じ始めることを示し、被害率の値も同じオーダーである。式(5)から求めた曲線の方が加速度の増加に伴う被害率の増加が急激であるが、これは地盤の変位と加速度が比例すると仮定したためであり(式(6))、実際には大きなひずみを

受けるときの地盤が非線形性を示すことを考慮すれば被害率の増加はより緩やかになって、久保らの曲線との類似がより明瞭になるであろう。

図—6に仙台市の3つのタイプの地盤における铸铁管(改良水道型)の被害率曲線を示す。ここでは各地盤の $\sigma$ の値として表—3に得られた鋼管に対するものをそれぞれ用いた。図にはあわせて久保らの報告書<sup>1)</sup>と文献<sup>2)</sup>に記された铸铁管の被害率のデータをプロットした。これによれば、水道管の被害率は仙台市のガス管の被害率の曲線によく一致しているが、関東地震(1923)、新潟地震(1964)および十勝沖地震(1968)でのガス管の被害は仙台市の曲線から大きく外れている。これらの被害について共通に認められることは、①ガス管は古い铸铁管で、管体の折損が生じやすく、また継手も鉛を封じた印ろう型で変位吸収能力が乏しい、②記録によれば、道路の異常な陥没や地割れがはなはだしく、それらは地盤の液状化もしくはそれに近い地変によるものと推測されるが、それらの地域とガスの普及地域とがほとんど一致していたと考えられる(たとえば土田<sup>9)</sup>等)。したがって、これらのデータのグループは仙台市のデータとは別のものに属するものと考えられる。図中の破線は $\delta =$



図—6 加速度と被害率の関係：铸铁管

26 mm,  $C=50$  (これらの値については 5.(2) を参照) および  $\sigma_{275}=10$  mm と仮定して計算した場合の加速度と被害率の関係で、上に述べたような特殊性を考慮することにより、それらのデータのグループとよく一致させられることが示される。

東京に対しては  $\sigma_{275}=8$  mm とすることによりおおよそ一致させることができる。当時の横浜市 (海岸の沖積地・埋立地が中心となっていた) や新潟市に比較して東京の地盤の方がやや安定であったことが容易に推測されるので、このような取扱いは妥当であろう。図-5 の久保らの曲線も併記したが、前述のようにそれは仙台市のタイプⅢの地盤に近いものとなっている。久保らの解析は震源地からの距離と被害率の関係をもとになされており、地盤の種類についてはまったく考慮されていない。久保らの曲線を本文の予測式に則して解釈すれば、それは震源に近い比較的均一な地盤 ( $\sigma_{275}$  が 6 mm 程度) から、より市街地に近いやや不均一な地盤 ( $\sigma_{275}$  が 7.5 mm 程度) までのデータを 1 つの曲線でまとめたものとみることが出来る。

図-7 は鋼管の被害率と加速度の関係を示す 3 つの地盤に

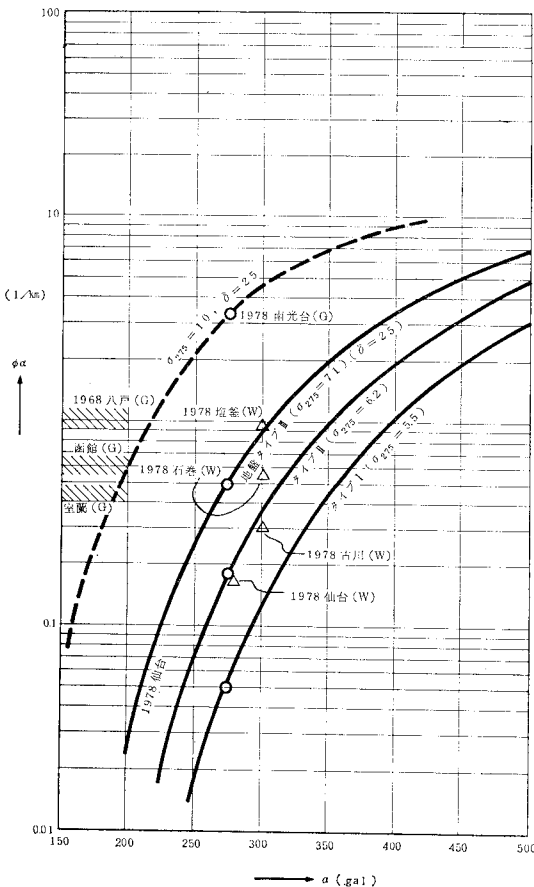


図-7 加速度と被害率の関係：鋼管

ついて計算したものである。既往の地震における被害率と宮城県沖地震での各地の水道管の被害率<sup>2)</sup>もあわせて記した。鋼管の場合はガスと水道とでほとんど同一の規格が用いられているので被害率にも大きな差はない。十勝沖地震での被害は铸铁管と同様、別のグループを形成するようにみえる。図中の破線は  $\delta=25$  mm,  $C=40$  (以上、仙台市の場合と同じ値) および  $\sigma_{275}=10$  mm (図-6 の破線の場合と同じ値) としたときの計算値である。ねじ継手による鋼管の規格は時代による変遷も少ないので、被害率の相違は地盤性状 ( $\sigma$  で代表される) の相違だけに支配されることになるが、図に示した結果はその考えが妥当であることを裏付けているように思われる。特に  $\delta$  の値が異なる铸铁管と鋼管に対して同一の  $\sigma_{275}(=10$  mm) を与えることにより、両者の被害率がそれぞれの計算曲線で説明されることは注目に値するであろう。

### 5. 補足的説明および考察

以上、地盤変位の確率モデルによる埋設管被害率の予測方法と、実際の被害データを用いた分析の例を示したが、ここでは、さらに以下の3点について補足することにする。

#### (1) 一体構造管路に適用する場合の考え方

溶接により接合される鋼管路や熱融着により接合されるポリエチレン管路のように、部分的な弱点をもたず、全体の強度が一樣な場合には許容変位量  $\delta$  をどのように定めればよいか問題となる。その場合、次のように考えればよいであろう。すなわち、管に許容される応力 ( $S$ ) やひずみ ( $\epsilon$ ) の限界値が与えられる場合、式 (2) は次のように書き直される。

$$\pi D \tau L = F = A S_{allow} \text{ もしくは } A E \epsilon_{allow}$$

ここに、 $A$  は管の断面積、 $E$  はヤング率である。これにより、

$$L = \frac{A S_{allow}}{\pi D \tau} \text{ もしくは } \frac{A E \epsilon_{allow}}{\pi D \tau} \dots\dots\dots (7)$$

となるが、材料が弾性限界内にあれば管ひずみの分布は、

$$\epsilon = \frac{L-x}{L} \epsilon_{allow}$$

により直線的に分布するので、平均ひずみは  $\epsilon_{allow}/2$  となる。ここに、 $x$  は力  $F$  の荷重点を  $x=0$  とし、管軸に沿ってとった座標である。これにより、図-3 に示すような力のつり合い系の区間  $2L$  に含まれる管の許容伸び量は、

$$\delta = L \epsilon_{allow} \dots\dots\dots (8)$$

により求められる。

ねじ継手鋼管の場合も、ねじ部が破損するまでは全体が一樣な構造物としての挙動をするので、この考え方がそのまま適用できる。3. (1), b) で鋼管の許容変位量を求めたその方法はこの考え方に従ったものである。

$\epsilon_{allow}$  が塑性領域内にある場合の  $\delta$  の決定はやや複雑となる。図-3 のような単純化した力のつり合い系をモデルとする場合には、材料(管)はある程度の加工硬化を考慮したバイリニアモデルなどで表現したうえで応力分布(ひずみ分布)を解析し、区間  $2L$  にわたってひずみを積分することにより所要の  $\delta$  を求めることになる。

(2) 継手をもつ管系の許容変位量の一般的考え方

3. の考察では、仙台市で用いられていた鋳鉄管について、 $2L$  という長さの中で管系が吸収し得る変位量  $\delta$  は継手一口の許容変位量に等しいと判断された。しかし、一般には  $2L$  の距離には複数の継手が含まれ得ることを考慮する必要がある。

図-8 のように、中央の継手に  $F_0$  なる荷重が加えられる場合を考える。これから地盤の拘束力による減衰を差し引いて、隣の継手には、

$$F_1 = F_0 - \pi D \tau l$$

なる力が伝わる。さらに隣の継手には同様にして、

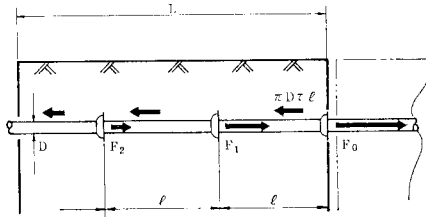


図-8 埋設管の荷重の伝達

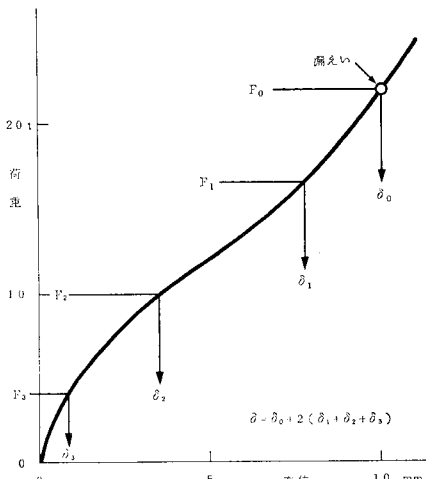


図-9 印ろう型継手の荷重-変位曲線(例)

$$F_2 = F_0 - 2\pi D \tau l$$

$n$  番目の継手には、

$$F_n = F_0 - n\pi D \tau l$$

の力が伝わることになる。  $F_n > 0$ ,  $F_{n+1} \leq 0$  とすれば式(2)で定まる  $L$  の範囲内には  $n$  個の継手が含まれ、それぞれが地盤変位の吸収に参加できることになる。いま継手の荷重と変位の関係が図-9のように与えられたとする。  $F_0$  がちょうど継手が破損(もしくは漏洩)するときの荷重である。図の例では  $2L$  の区間に含まれる継手の数は7個 ( $n=3$ ) で、それらの継手の変位の合計の

$$\delta = \delta_0 + 2(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)$$

がこの管系の許容変位量の目安を与えることになる。ただし、実際にはあまり遠方の継手まで理想的に荷重が伝達されると期待すべきではなく、 $\delta_1$  の項までぐらいに止めて考えるべきであろう。4. で旧式の印ろう型継手に対して与えた  $\delta$  の値は図-9の曲線に対して、

$$F_0 = 22\,000 \text{ kgf}, \delta_0 = 10 \text{ mm}$$

の数値を与え、また、 $D=17 \text{ cm}$ ,  $l=500 \text{ cm}$  および  $\tau=0.2 \text{ kgf/cm}^2$  として上の手順で求めたものである。式(2)から定まる  $L$  の値も改良水道型メカニカル継手に対して求めたものと当然異なり、 $L \approx 20 \text{ m}$  となる。これを用いて  $C=50$  と定めたものである。

このように理想化した地盤から管への力の伝達が、実際にも常に生ずるとはいえないであろうが、前章までの考察を総合すれば、このようにして定めた  $\delta$  や  $L$  を用いる被害率予測モデルは、実際の震害が示す管種別の傾向を十分よく反映していると考えられる。

(3) 口径と被害率の関係

片山ら<sup>9)</sup>によれば、宮城県沖地震における宮城県下の水道管被害のうち、鋼管の被害率は口径の増加に伴い著しく減少するが、鋳鉄管にはそのような傾向が認められ

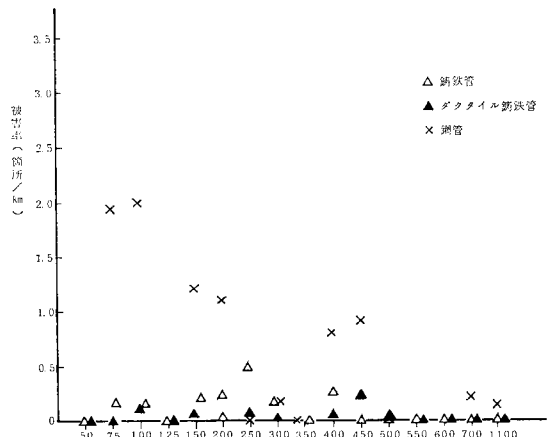


図-10 宮城県下における管径別の水道管被害率

ない(図-10)。

本モデルを用いれば、これらの事実は次のようにして説明することができる。

a) 鑄鉄管

鑄鉄管継手の引張強さは口径にほぼ比例し、破損時の抜出量は口径によらずほぼ一定であるという一般的傾向が認められる。一例として 図-11 に筆者ら<sup>10)</sup>の実験結果を示す。このとき、式(2)において  $F/D=$ 一定、したがって  $L$  (したがって  $C$  も) は口径によらず一定の値をとることになる。また、 $\delta$  も一定であるから、式(5)により、被害率は口径によって変わらないことが示される。

b) 鋼管

鋼管(ねじ継手を含む)の場合、 $L$  は式(7)で求められるが、断面積  $A$  は、

$$A \approx \pi D t \quad (t \text{ は管厚})$$

であるから、結局  $L$  は  $t$  に比例することになる。管厚は口径が大きいほど厚くなるのが普通であるから、 $L$  は口径が大きいほど大きく、逆に  $C$  は小さくなる。また許容変位量  $\delta$  は式(8)により  $L$  に比例するので、口径が大きいほど大きくなる。 $C$  と  $\delta$  に関するこの傾向は式(5)の中で相乗的に作用し、口径が大きいほど被害率は小さくなることが示される。

以上のように、本文の被害率予測モデルにより推測さ

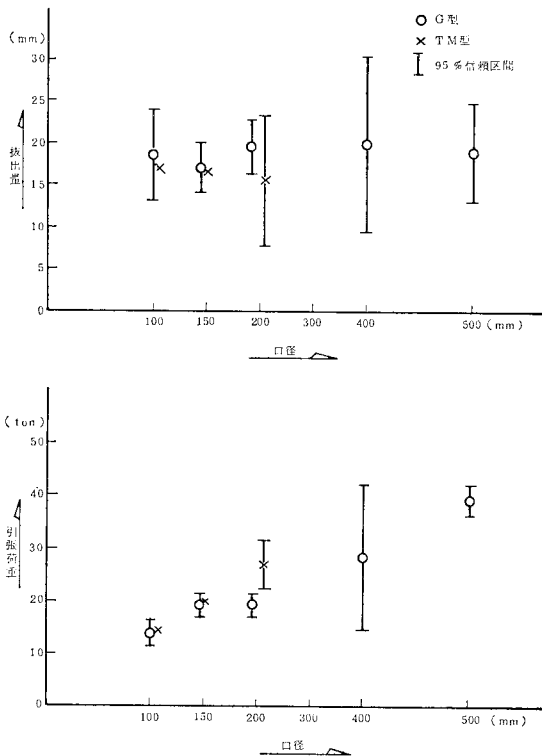


図-11 鑄鉄管継手部漏洩発生時の引張荷重と抜出量

れる管種と口径の影響は、実際の震害に現われる傾向とすべての点で一致している。

6. むすび

ランダムな正規分布を仮定した地盤変位モデルと、地盤の拘束力と管(継手)の強さ(変形能力)とから定まる許容変位量の考え方を組み合わせて、埋設管の被害率を予測する方法を提案した。このモデルは、地盤のタイプと管種(および口径)の組合せに応じて、実際に生じた震害における埋設管の被害率の傾向を非常によく反映しているように思われる。このことを支持すると考えられる主要な事実は以下のようである。

(1) このモデルから予測される加速度と被害率の関係は、サンフェルナンド地震における配水管の被害データから久保らが解析した結果ときわめてよく一致している。

(2) このモデルから予想される、管径と被害率の関係の材料(鋼管と鑄鉄管)による相違は、片山らが調査した実際の被害が示す傾向と一致している。

(3) このモデルを実際の震害例に適用して逆算される地盤変位分布の標準偏差は、実際の地盤について常識的に推測される値と同じオーダーであり、その大きさの順序も常識的に判断される地盤性状の分布の不均一さの順序に対応している。

このモデルに残されている一つの問題は任意の地盤のタイプに対して事前に  $\sigma$  の値を決定することが困難なことである。しかしながら、当面、多少の粗さを許容するならば、宮城県沖地震における震害のデータなどを用いて判断し、実用に供することが可能と思われる。一例として、表-3の  $\sigma$  や 4. の考察を総合して、表-5のような地盤タイプの分類とそれに対応する  $\sigma$  の値を示

表-5  $\sigma_{275}$  による地盤の分類の例

不均一さの程度	$\sigma_{275}$ (mm)	摘 要	例: ( ) 内は $\sigma_{275}$ の推定値
非常に一	$\leq 5$	堅固な洪積層地盤、岩盤	
均 一	5~6	普通の洪積層地盤、均一な沖積層地盤	仙台旧市街地 (5.5) 仙台市東方の沖積平野 (~6)
やや不均一	6~8	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	長町・郡山 (~7)
非常に不均一	8~10	河川流域、おぼれ谷などの非常に不均一な沖積層、大規模な切土、盛土の造成地	塩釜港南地区 (8~9) 南光台 (~10)
極度に不均一	10 $\leq$	地盤の流動化が予想される場所、広い範囲にわたるがけ崩れ等が予想される場所	1964年当時の新潟市低地 1923年当時の横浜市街地



すことができる。

管の許容変位量  $\delta$  に関しては、一般に継手の形式ごとに実験を行って定める必要がある。 $\delta$  もまた、あるばらつきをもつ分布量として取り扱うのが正しい方法と考えられるが、本文では地盤変位のばらつきに比して  $\delta$  のばらつきが小さいので定数として取り扱った。もしも、そのばらつきが非常に大きい場合には式(5)に相当するもの誘導について、より詳細な吟味が必要となるであろう。

本文では道路に沿って線状に埋設される、いわゆる本管の被害率予測について述べたが、本管から分岐して需要家に結ばれる、いわゆる供給管の被害もかなりの量に上るのが常であり、その被害予測もきわめて重要である。これについても本管とほぼ同様な手法を与えることができるが、その概要についてはすでに文献11)に示したところである。

謝 辞：本提案をまとめるにあたって、東北大学工学部 佐武正雄教授ならびに同研究室の諸氏のご討議とご助言をいただいたことを深く感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 久保慶三郎・片山恒雄：地下埋設管の被害，東京区部における地震被害の想定に関する報告書（別刷）（東京都防災会議の同名報告書，第5章）。
- 2) 通商産業省（ガス事業大都市対策調査会）：宮城県沖地震ガス施設被害調査報告書，昭和53年12月。
- 3) Kubo, K., H. Ishida and S. Wakazawa: Recent Advances in Lifeline Earthquake Engineering in Japan—An Aseismatic Research Project of Japan Gas Association Sponsored by the Ministry of International Trade and Industry, Pressure Vessel and Piping Technology Conference, ASME, Aug., 1980.
- 4) 佐武正雄・岸野佑次・浅野照雄：1978年宮城県沖地震によるガス埋設管の被害について，第15回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，1978.10.
- 5) 片山恒雄・増井由春・磯山龍二・甚内郁郎：1978年宮城県沖地震による都市供給施設の被害と復旧——上水道施設（その1），生産研究，第31巻，第4号，昭和54年4月。
- 6) 日本瓦斯協会：宮城県沖地震と都市ガス，昭和54年4月。
- 7) 田村重四郎：構造物の震害と耐震性，土木学会誌，Vol. 64=増刊号，1979.
- 8) 久保慶三郎・片山恒雄・佐藤暢彦：地下埋設管震害の定量的解析，第4回日本地震工学シンポジウム講演集，1975.11.
- 9) 土田 孝・唐木邦明・加室 昂：'68十勝沖地震被害状況調査報告書（2）（ガス・水道供給施設），東京瓦斯（株），昭和47年4月。
- 10) 西尾宣明・吉田賢太郎：鋼管および各種鋳鉄管の強度について，東京瓦斯（株）総合研究所報告，第21号，昭和51年12月。
- 11) 西尾宣明：地盤の変位の確率モデルによる埋設管の震害の考察，第16回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，1979.9.

(1979.10.23・受付)