

196

ISSN 0386-5878

土研資料第1785号

マイクロフィルム第 号

土木研究所資料

地盤変位入力を考慮した埋設直管路の 地震応答解析法

昭和57年2月

建設省土木研究所

耐震研究室

Copyright © - 56年度 - by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ま え が き

本報告書は地盤変位入力を考慮した埋設直管路の地震応答解析法をとりまとめたものである。本法に示す静的解析法および準静的解析法では、弾性床上のはりモデルおよび弾塑性床上的はりモデルによる考え方を採用しており、埋設直管路と周辺地盤との間にすべりを考慮することにより、今まで考えられていた地盤ひずみ等価法などによる応答より若干大き目の応答を解析する結果を得た。今後、本法をさらに改良発展させ、埋設管路の耐震設計法の作成または改訂に寄与するとともに、地中埋設管路等の地震災害の軽減に役立てる考えである。

昭和 56 年 8 月 15 日

招 へ い 研 究 員 L. Ru-Liang Wang

地 震 防 災 部 長 栗 林 栄 一

地震防災部耐震研究室 羽 立 隆 幸

目 次

まえがき

第 I 章 上限解析法	1
I. 1 概 説	1
I. 2 地盤ひずみ等価法	1
I. 3 応答計算簡略化法	2
I. 4 ま と め	10
第 II 章 静的解析法	11
II. 1 概 説	11
II. 2 静的弾性解析法	11
II. 3 静的弾塑性解析法	15
II. 4 ま と め	17
第 III 章 準静的解析法	18
III. 1 概 説	18
III. 2 準静的弾性解析法	18
III. 3 準静的弾塑性解析法	36
III. 4 ま と め	47
第 IV 章 総括と結論	48
謝 辞	51
参考文献	52

第 I 章 上限解析法

I.1 概 説

最近の調査研究によればガス・水道・下水などの埋設管路は地震によって少なからずとも被害を受けることが予想されている。埋設管路において主たる被害は、地すべりや液状化などとともに、地震動による地盤のひずみによって、発生することが明らかにされてきている。さらに重要なこととして地震時の地盤ひずみについては、埋設管路の管軸方向のひずみが支配的であることが明らかにされている。

また、埋設管路の管軸方向の応答において、埋設管路の慣性力は周辺地盤による拘束のために、省略できるぐらいに小さいと考えられている。

埋設管路の耐震設計基準については新耐震設計法などの各種の基準が整備されつつあり、以下、このような基準で考えられている基本的な方法について述べる。

I.2 地盤ひずみ等価法

I.1で述べたように、埋設管路と地盤の相互作用は省略できるぐらいに小さいとするので、埋設管路のひずみは地盤のひずみに等しいと仮定することができ、その値は埋設管路のひずみの上限と考えてよい。また、埋設管路の剛性が地盤の剛性に比べて相対的に小さいとすれば、埋設管路の屈曲も近似的に地盤の変形で置き換えることができる。

一方、地震動のエネルギー損失を考慮しなければ、地盤のひずみ管軸方向の最大値 $\epsilon_{g,max}$ は埋設管路のひずみの管軸方向の最大値 $\epsilon_{p,max}$ に等しいと考えてよく次式によって表わすことができる。

$$\epsilon_{g,max} = \epsilon_{p,max} = V_{g,max} / C_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

$V_{g,max}$: 地盤速度の最大値

C_p : P波の伝播速度

また、地盤の変形の最大値 $X_{g,max}$ は埋設管路の屈曲の最大値 $X_{p,max}$ に等しいと考えてよく、次式によって表わすことができる。

$$X_{g,max} = X_{p,max} = A_{g,max} / C_s^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$A_{g,max}$: 地盤加速度の最大値

C_s : せん断波の伝播速度

いま、仮りに、鋼管などのように溶接継手で管体と同程度の強度で結合されている埋設管路（一体構造管路）において、式 1, 2 によって求めた $\epsilon_{p,max}$ と $X_{p,max}$ が構造条件から決まる許容値（上限基準）を満足するならば、 V_{max} あるいは A_{max} の地震に対して埋設管路は安定しているといえることができる。

また、ダクタイル鋳鉄管などのように 4～6 m 前後の管が継手で結合されている埋設管路（継手構造管路）では、埋設管路のひずみおよび屈曲（継手の伸縮・屈曲の最大値）が設計上重要なパラメータになる。埋設管路の各管体が剛性に富み、各管体の水平・鉛直の中心線の移動が各管体の変位を代表するとしたならば、地盤の 2 点間における変位差の最大値および屈曲の最大値は継手で吸収される。埋設管路の継手の伸縮・屈曲の最大値 $U_{p,max}$ （最大継手伸縮量）・ $\theta_{p,max}$ （最大継手屈曲角）は最終的に次式で表わされる。（図-1, 2 参照）

$$U_{p,max} = \epsilon_{g,max} \cdot L \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\theta_{p,max} = X_{g,max} \cdot L \quad \dots\dots\dots (4)$$

L : 管長

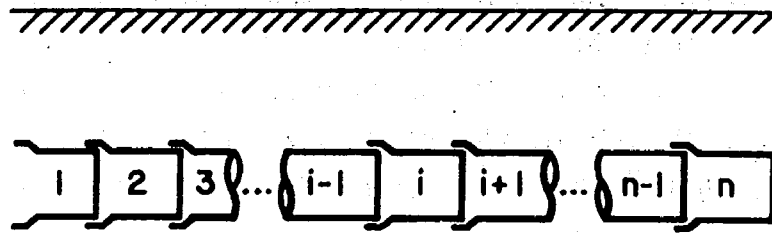


図-1 埋設管路の概念図

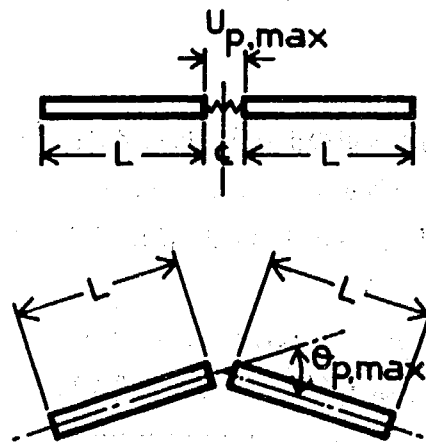


図-2 埋設管路の継手の概念図

1.3 応答計算簡略化法

1.3.1 解析モデル

図-3 に n 個の管から成る埋設管路のモデルを示す。図の座標 $X_{G0}, X_{G1}, \dots, X_{G1}, \dots, X_{Gn}, X_{Gn+1}$ および $X_1, X_2, \dots, X_1, \dots, X_n$ は地盤と埋設管路の相対的な動きを定義する座標であり、 $M_1, M_2, \dots, M_1, \dots, M_n$ および $K_0, K_1, \dots, K_1, \dots, K_n$ ならびに $C_0, C_1, \dots, C_1, \dots, C_n$ は管体等価質量および継手ばね剛性ならびにダッシュポット減衰を示している。なお、ここでは、各管体の長さは一定とせずに、 $L_1, L_2, \dots, L_1, \dots, L_n$ としている。

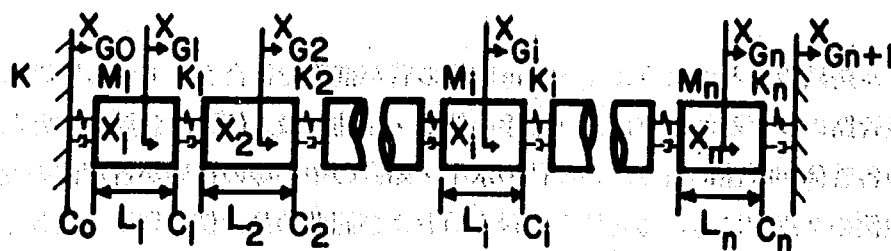


図-3 埋設管路のモデル

図-3の埋設管路のモデルの任意の管体におけるつりあいは図-4に示すとおりであり、式5によって表わされる。

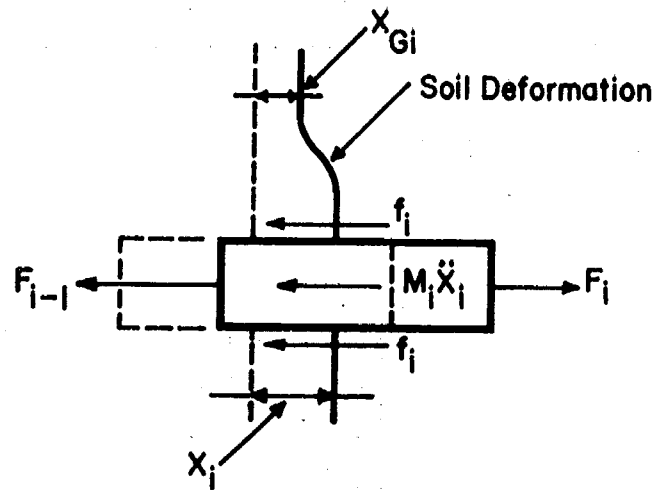


図-4 埋設管路の任意の管体 i におけるつりあい

$$M_i \ddot{x}_i + F_{i-1} - F_i + f_i = 0 \quad \text{..... (5)}$$

$M_i \ddot{x}_i$: 埋設管路の等価質量による慣性力
 F_{i-1} , F_i : 埋設管路の両端における継手の反力
 f_i : 埋設管路の周辺地盤による拘束力

式5の F_i , F_{i-1} , f_i は次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} F_i &= C_i (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + K_i (x_{i+1} - x_i) \\ F_{i-1} &= C_{i-1} (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + K_{i-1} (x_i - x_{i-1}) \quad \text{..... (6)} \\ f_i &= d_i L_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{Gi}) + k_i L_i (x_i - x_{Gi}) \end{aligned}$$

ここに、

d_i : 埋設管路の周辺地盤の単位長さ当りの減衰定数
 k_i : 埋設管路の周辺地盤の単位長さ当りのばね定数

である。

また、全体系の運動方程式は次式のようになる。

$$\begin{aligned} [M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} &= [d] \{\dot{x}_0\} + [k] \{x_0\} + [C'] \{\dot{x}'_0\} \\ &+ [K'] \{x'_0\} \quad \text{..... (7)} \end{aligned}$$

ここに、

$[M]$, $[C]$, $[K]$: 埋設管路の等価質量, 減衰, 剛性の各マトリックス
 $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$: 埋設管路の加速度, 速度, 変位の各ベクトル
 $\{\dot{x}_0\}$, $\{x_0\}$, $\{\dot{x}'_0\}$, $\{x'_0\}$: 埋設管路の周辺地盤の速度, 変位の各ベクトル
 $[d]$, $[k]$, $[C']$, $[K']$: 埋設管路の周辺地盤の減衰, 剛性の各マトリックス

1.3.2 解析法

式7で、最近の地震応答観測結果により、埋設管路の管体自体の動きは省略できるぐらいに小さいことが明らかにされているので、このような観点などから $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$ および $[d]\{\ddot{x}_0\}$, $[C']\{\dot{x}_0\}$ を省略し、さらに簡略化のために管体の長さをすべて一定とすると式7は式8のようになる。

$$[K]\{x\} = [k]\{x_0\} + [K']\{x'_0\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

$[K]$: 三重対角対称行列

$[k]$, $[K']$: 対角対称行列

である。

さらに、式8は

$$\begin{bmatrix} \bar{K}_1 & -K_1 & & & \\ -K_1 & \bar{K}_2 & -K_2 & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & -K_{i-1} & \bar{K}_i & -K_i \\ & & & \cdot & \cdot \\ & & & & \cdot \\ & & & & -K_{n-1} & \bar{K}_n & -K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_i \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 L & & & & \\ & k_2 L & & & \\ & & \cdot & & \\ & & & \cdot & \\ & & & & k_i L \\ & & & & & \cdot \\ & & & & & & k_n L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{G1} \\ x_{G2} \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{Gi} \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{Gn} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (9a)$$

$$+ \begin{bmatrix} K_0 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & \cdot & \\ & & & & \cdot \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \\ & & & & & & & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{G0} \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 0 \\ x_{Gn+1} \end{Bmatrix}$$

$n \times n \qquad n \times 1 \qquad n \times n \qquad n \times 1$

のように表わされる。

ここで、 F_i は

$$K_i = K_{i-1} + K_i + K_i L_i \quad \dots\dots\dots (9b)$$

である。

一方、式7で表わされる埋設管路の応答を調べるためには、埋設管路の周辺地盤の各点における時刻歴の加速度、速度、変位が必要である。いま、各点における時刻歴の加速度、速度、変位の各入力波形が時間経過によらず一定と考えると、入力波形の加速度、速度、変位の各ベクトルに位相ずれ（遅れ時間）を容易に考慮することができる。

埋設管路の一方の端部から入力する地盤変位を次式のように考えると

$$\begin{aligned}
 x_{G0} &= \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \Delta \max h(t) & t \geq 0 \end{cases} \\
 x_{G1} &= \begin{cases} 0 & t - n_1 < 0 \\ \Delta \max h(t - n_1) & t - n_1 \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (10) \\
 x_{Gi} &= \begin{cases} 0 & t - n_i < 0 \\ \Delta \max h(t - n_i) & t - n_i \geq 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

$\Delta \max$: 最大地盤変位入力
 $h(t)$: 地盤変位時間関数
 n_i : 遅れ時間

ここに,

$$n_i = \sum_{j=1}^i L_j / C_j \dots\dots\dots (11)$$

L_j : 管体のjの長さ

C_j : 埋設管路の周辺地盤を伝播する地盤動の速度

式7で表わされる埋設管路の応答を容易に調べることができる。

次に、一般化のため継手ばね、端部ばね、地盤ばねのための各パラメータを定義する。

(1) 継手ばね剛性率

$$\alpha_i = K_i / k_i L \quad i = 1, \dots, n-1 \dots\dots\dots (12)$$

(2) 端部ばね剛性率

$$r_0 = K_0 / k_1 L \dots\dots\dots (13 a)$$

$$r_n = K_n / k_n L \dots\dots\dots (13 b)$$

(3) 地盤ばね剛性率

$$\beta_i = k_i / k_i \quad i = 1, \dots, n \dots\dots\dots (14)$$

上式で表わされるパラメータを式9に代入すると

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} (r_0 + \alpha_1 + 1) - \alpha_1 & & & & \\ -\alpha_1 & (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 + \beta_2) - \alpha_2 \beta_2 & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \\ & & & -\alpha_{i-1} \beta_{i-1} (\alpha_{i-1} \beta_{i-1} + \alpha_i \beta_i + \beta_i) - \alpha_i \beta_i & \\ & & & \cdot & \\ & & & & -\alpha_{n-1} \beta_{n-1} (\alpha_{n-1} \beta_{n-1} + r_n \beta_n + \beta_n) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_i \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{Bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & \beta_2 & & & \\ & & \cdot & & \\ & & & \beta_i & \\ & & & & \beta_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{G1} \\ x_{G2} \\ \cdot \\ x_{Gi} \\ \cdot \\ x_{Gn} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} r_0 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & \cdot & & \\ & & & 1 & \\ & & & & r_n \beta_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{G0} \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \\ \cdot \\ x_{Gn+1} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

となる。

ここに、管体の本数と n の影響を調べるために、次の α 、 β 、 r の値を設定した。

$$\beta_1 = \beta_2 = \cdots \beta_1 \cdots \beta_n = 1 \quad \cdots \cdots \cdots (16)$$

(1) 一様地盤中の埋設管路

$$r_0 = 0 \quad \text{かつ} \quad r_n = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (17)$$

(2) 両端部自由の埋設管路

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \cdots \alpha_1 = \cdots \alpha_{n-1} = \alpha \quad \cdots \cdots \cdots (18)$$

(3) 一様継手強度の埋設管路

式15は、三重対角対称行列および対角対称行列のみを含んでいるので、 $[K]$ に対して対角でない要素を消去すると、backward Substitution 法により解くことができる。

式15の x_i は入力地盤変位の時間刻みに対応して計算されるので、次にこの x_i を用いて式19の2つのパラメータを定義する。

$$\left. \begin{aligned} Y_i &= x_i - x_{Gi} = x_i(t) - x_G[t - n_i] = x_i(t) - x_G[t - (i-1)Dt] \\ \epsilon_i &= (x_i - x_{i+1})/L_i \quad \text{または} \quad U_i = x_i - x_{i+1} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (19)$$

ここに、

$$i = 1, 2, \cdots n$$

Y_i : 埋設管路の管体 i とその周辺地盤の変位差

ϵ_i : 埋設管路の管体 i のひずみ

L_i : 埋設管路の管体 i の長さ

U_i : 埋設管路の継手 i の伸縮

式19のパラメータにより、入力地盤変位および各継手条件等のもとでの埋設管路の応答を算定することができる。

なお、この種の計算はチェンなどによっても行われている。

I. 3. 3 試算結果

次の条件 1) 管体数: 6, 2) 端部条件: 拘束なし, すなわち $r_1 = 0$, $r_n = 0$, 3) 周辺地盤の土質条件: 均質すなわち $\beta = 1, 1, 1, 1, 1, 1$, 4) 遅れ時間(位相差): $DT = 0.1$ 秒, 5) 入力地震動: エルセントロ, 1940. 5. 18, S 90 w (図-5 参照) で計算すると次のようになる。

埋設管路の正規化した継手ばね剛性率 α に対する継手の伸縮の最大値 $U_{\max}$ と管体と周辺地盤の変位差の最大値 $Y_{\max}$ との関係をそれぞれ図-6, 7 に示す。

図-6 から、 $U_{\max}$ は、 $\alpha = 0.1 \sim 0.001$ で約 4 cm, $\alpha \rightarrow \infty$ で 0 に近づく。また、図-7 から、 $Y_{\max}$ は $\alpha = 0.001 \sim 0.1$ で 0 に近づき α が 0.1 を越えると急激に増加する傾向のあることが判る。なお、通常の α は 0.1 付近である。

次に、遅れ時間の増加は増設管路の長さの増加または周辺地盤の剛性の減少によると考えられるので、図-8 に β を変えて DT の $U_{\max}$ に及ぼす影響をみた。図に示すように、硬質の場合より軟質の場合で $U_{\max}$ が大きくなっており、軟質の周辺地盤の埋設管路が大きな被害を受けるとしている各所での報告とよく一致している。

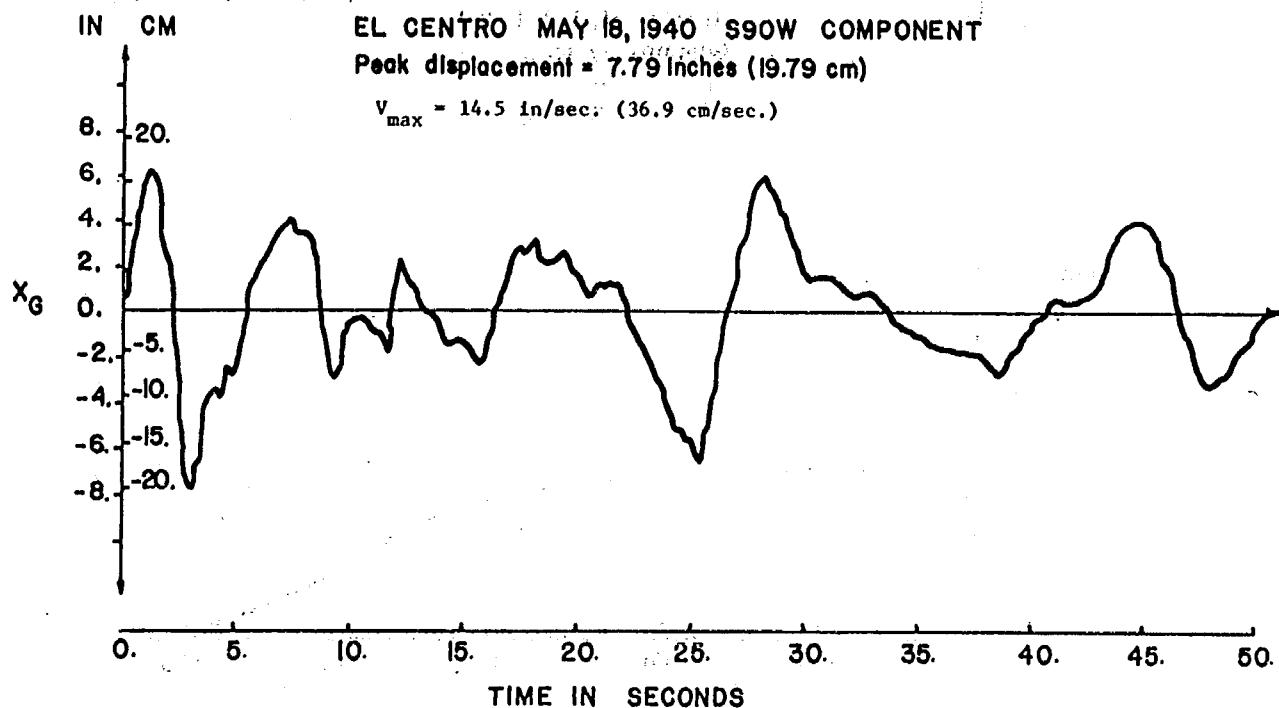
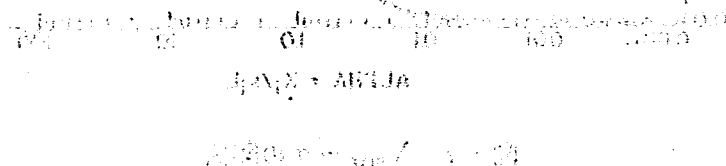


図-5 入力地震動

その他の影響については埋設管路の端部の条件および波形等の影響などがある。しかし、前述したのより影響は小さい。

なお、この試算結果により、継手ばね剛性が大きいほど埋設管路と周辺地盤との間に大きな変位差が生ずることおよび周辺地盤、土質条件と遅れ時間が埋設管路の応答に最も重要なパラメータであることが判った。また、入力地震動の影響については最大ピーク時の振幅および周波数による影響が大きいと考えられるがこの分野においてはさらに研究がなされるべきであると考えられる。



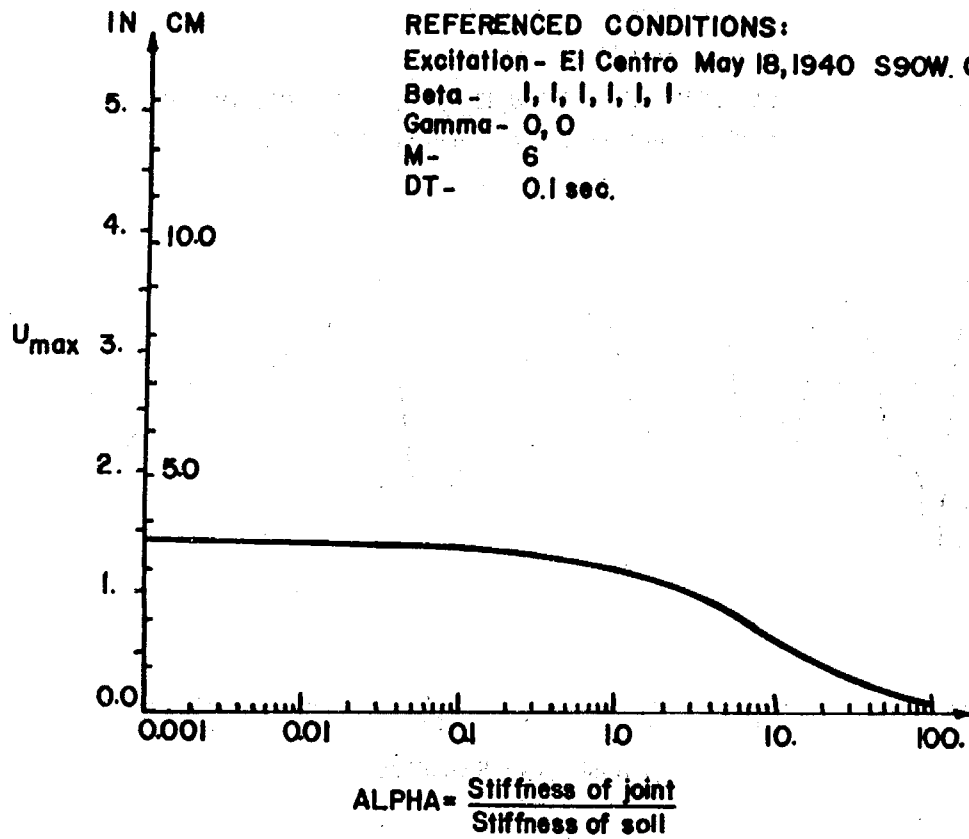


図-6 $U_{max} \sim \alpha$ 関係

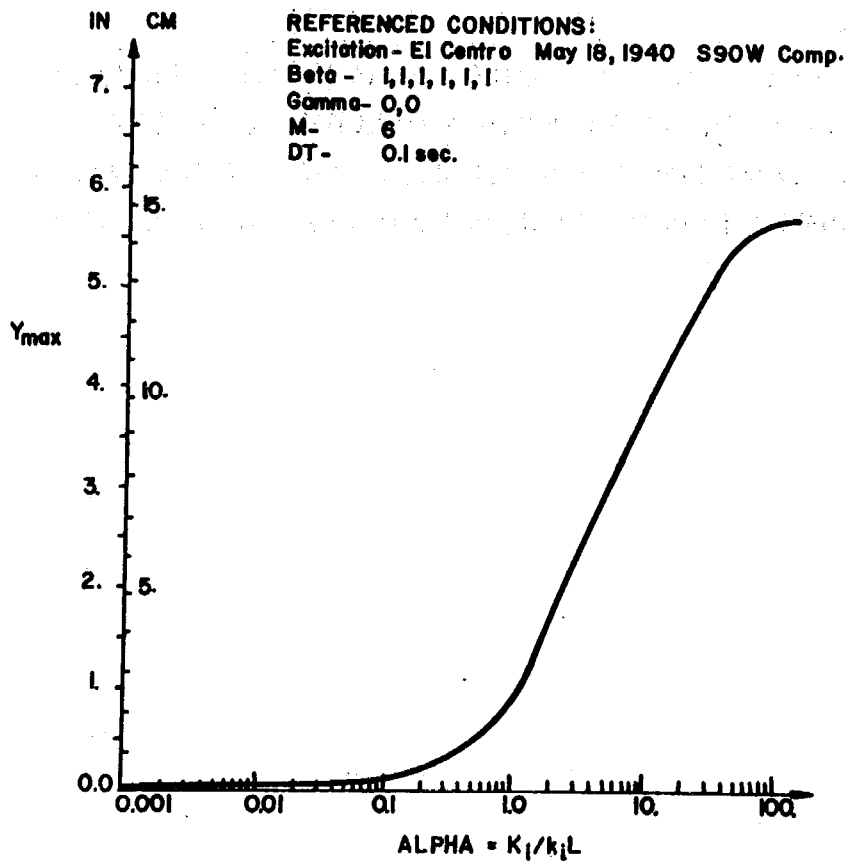


図-7 $Y_{max} \sim \alpha$ の関係

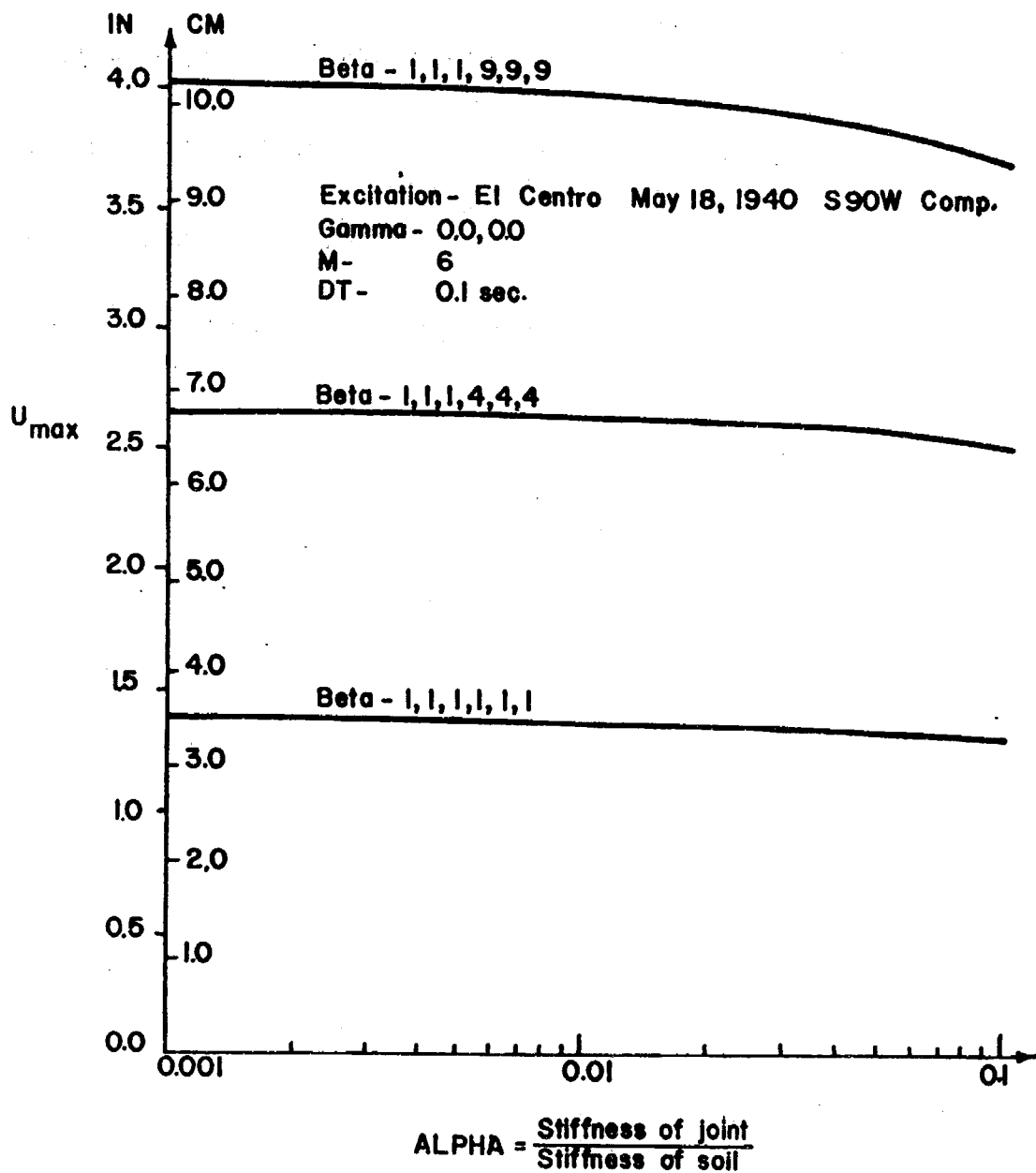


図-8 V_{max} に及ぼす β の影響

I.4 ま と め

上限解析法では、埋設管路のひずみが地盤のひずみに等しいとする方法と埋設管路の慣性力を省略できるぐらい小さいとする方法について述べた。

(1) 埋設管路のひずみが地盤のひずみに等しいとする方法では、埋設管路のひずみは周辺地盤のひずみに、また埋設管路の屈曲も周辺地盤の変形に等しいとした。

この方法では埋設管路のひずみの最大値および埋設管路の屈曲の最大値は式 1 ~ 4 で単一に求まるので、以降に述べる正規化のための基準にしてよい。

(2) 埋設管路の慣性力を省略できるぐらい小さいとする方法では、埋設管路の加速度、速度の各項は無視できるぐらいに小さいとして試算した。

試算の結果、埋設管路のひずみおよび継手の伸縮には境界値があり、この境界値は上記(1)で述べた方法による値に漸近することが判った。

第Ⅱ章 静的解析法

Ⅱ.1 概 説

前章において、埋設管路は周辺地盤に対して柔順に対応し埋設管路の慣性力は省略できるとし、埋設管路の応答の上限を解析する方法について述べた。

この方法を基準として、さらに改良発展させた方法を提案できる。この方法は静的な弾性床土のはりモデルによる方法と弾性塑性土のはりモデルによる方法である。弾性床土のはりモデルによる方法では、埋設管路の管体・継手および周辺地盤は弾性的性質を兼ね備えているとする。

また、弾塑性土のはりモデルによる方法では、埋設管路と周辺地盤との間は弾塑性的性質が兼ね備えられているとする。

Ⅱ.2 静的弾性解析法

Ⅱ.2.1 解 析 法

この解析では、埋設管路の管軸方向の周辺地盤の剛性および埋設管路の管体と継手の管軸方向の剛性の低下を考える。

図-9は管体のひずみと継手の伸縮を模式的に示したものである。この図では、管軸方向の地路のひずみは一定値 ϵ_s に、また、管体および継手の材料の性質は一樣と仮定する。このように考えると、管体の伸びおよび管体と周辺地盤の変位差は各管体で同じとなると考えてよい。

ところで、端部における拘束力 S は

$$S = k_j \Delta_j = 2k_j \left[U_g \left(x = \frac{L}{2} \right) - U \left(x = \frac{L}{2} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (20)$$

k_j : 埋設管路の端部ばね剛性

Δ_j : 埋設管路の継手の伸縮

$U_g(x)$: 埋設管路の管軸上の x の点での地盤変位 (図-9 参照)

$U(x)$: 埋設管路の管軸上の x の点での管体変位 (図-9 参照)

で定式化される。したがって、図-10のつりあい条件を考えることにより、管体と地路のひずみに関するパラメータ Γ_s および継手の伸縮と地盤の変位に関するパラメータ Γ_j を求めることができる。

以下、 Γ_s 、 Γ_j を求める。

図に示すように、管軸方向の力のつり合いは

$$P(x) = P(x+dx) + k_s [U_g(x) - U(x)] dx \quad \dots\dots\dots (21)$$

である。

ここで、軸力 $P(x)$ および $P(x+dx)$ は式 22, 23 で表されるので、

$$P(x) = \sigma(x) A = \epsilon(x) EA = \frac{du}{dx} EA \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$P(x+dx) = \left[\frac{du}{dx} + \frac{d^2u}{dx^2} (dx) \right] EA \quad \dots\dots\dots (23)$$

$\sigma(x)$: x における管体応力

$\epsilon(x)$: x における管体ひずみ

E : ヤング率
 A : 断面積
 k_s : 地盤ばね剛性 $[(\text{力})/(\text{長さ})^2]$

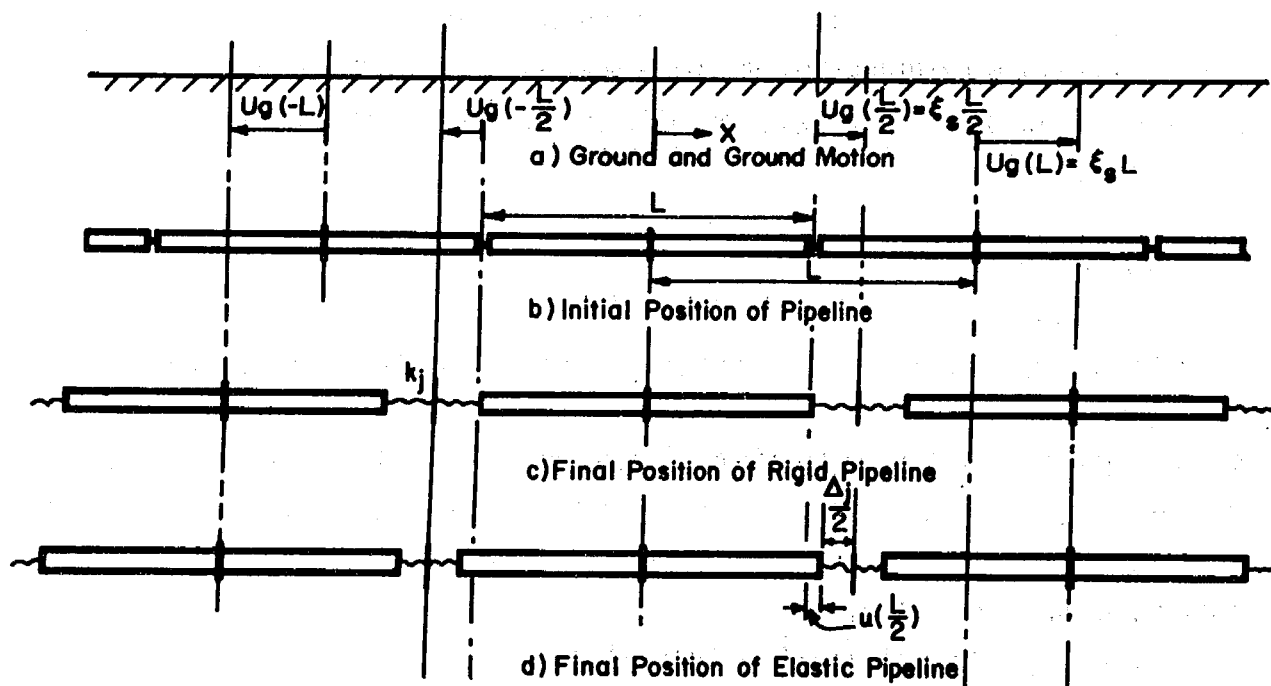


図-9 埋設管路の一樣な地盤のひずみのもとでの管体と継手の変位

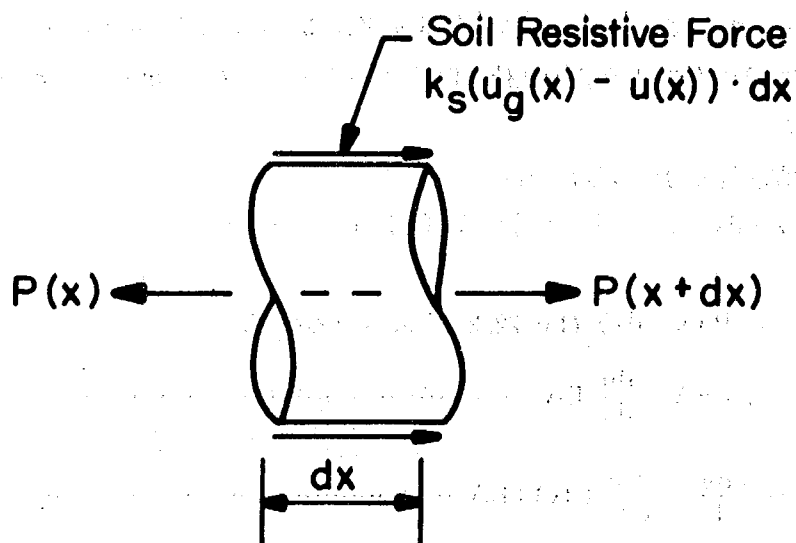


図-10 埋設管路の管体の微少部分における力のつり合い

式 22, 23 を式 21 に代入すると力のつり合いは

$$\frac{d^2u}{dx^2} - \frac{ks}{EA} U(x) = \frac{-ks [Ug(x)]}{EA} \quad \dots\dots\dots (24)$$

となる。

ここで、埋設管路の各管体にわたって、地盤のひずみが一樣であると仮定すると、 $Ug(x)$ は

$$Ug(x) = \epsilon_m x \quad \dots\dots\dots (25)$$

ϵ_m : 地盤のひずみ

となるので式 24 の解は

$$U(x) = Be^{rx} + Ce^{-rx} + \epsilon_m x \quad \dots\dots\dots (26)$$

B, C : 未定係数

$$r = \sqrt{\frac{ks}{AE}} \quad \dots\dots\dots (27)$$

となる。

また、管体のひずみ $\epsilon(x)$ は

$$\epsilon(x) = \frac{du}{dx} = rBe^{rx} - rce^{-rx} + \epsilon_m \quad \dots\dots\dots (28)$$

となる。ここに、変位の境界条件は周知のとおり

$$x = 0$$

$$U(0) = 0$$

であるから、式 26 により、 $B + C$ は

$$B + C = 0 \quad \dots\dots\dots (29)$$

となる。さらに、ひずみの境界条件は $x = L/2$ において、

$$\begin{aligned} \epsilon(L/2) &= S(L/2)/AE = 2k_j [Ug(L/2) - U(L/2)] \\ &/EA = -2k_j [Be^{r(L/2)} + rce^{-r(L/2)}] \quad \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

$$\epsilon(L/2) = Be^{r(L/2)} - rce^{-r(L/2)} + \epsilon_m \quad \dots\dots\dots (31)$$

であるから、式 29 ~ 31 により

$$C = -B = \frac{\epsilon_m}{r [e^{-r(L/2)} + e^{r(L/2)}] + \frac{2k_j}{AE} [e^{r(L/2)} - e^{-r(L/2)}]} \quad \dots\dots\dots (32)$$

となる。

このようにして求めた未定係数を式 26 に代入すると埋設管路の変位 $U(x)$ は

$$U(x) = \epsilon_m \left[x - \frac{\sinh(rx)}{r \cosh\left(\frac{rL}{2}\right) + \frac{2k_j}{AE} \sinh\left(\frac{rL}{2}\right)} \right] \quad \dots\dots\dots (33)$$

となり、さらに埋設管路の変位 $U(x)$ を次式により無次元化し

$$U(x) = \epsilon_m L \left[\frac{x}{L} - \frac{\sinh\left(\frac{x}{L} \sqrt{Rs}\right)}{\sqrt{Rs} \cosh\left(\frac{\sqrt{Rs}}{2}\right) + 2 R_j \sinh\left(\frac{\sqrt{Rs}}{2}\right)} \right] \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$R_s = k_s \frac{L^2}{AE} \dots\dots\dots (35)$$

$$R_j = k_j \frac{L}{AE} \dots\dots\dots (36)$$

R_s : 管体と地路のばね定数の比

R_j : 管体と継手のばね定数の比

式 34 により, 各パラメータ Γ_s および Γ_j を求めると

$$\Gamma_s = \epsilon_{pm} / \epsilon_m = 1 - \frac{1}{\cosh \frac{\sqrt{R_s}}{2} + \frac{2R_j}{\sqrt{R_s}} \sinh \frac{\sqrt{R_s}}{2}} \dots\dots\dots (37)$$

$$\Gamma_j = d_j / \epsilon_m L = \frac{2[Ug(\frac{L}{2}) - U(\frac{L}{2})]}{\epsilon_m L} = \frac{\tanh \frac{\sqrt{R_s}}{2}}{\frac{\sqrt{R_s}}{2} + R_j \tanh \frac{\sqrt{R_s}}{2}} \dots\dots\dots (38)$$

となる。

Γ_s , Γ_j を示したのが, 図- 11, 12 である。図中, ϵ_m は V_m / C_e , V_m は地盤速度, C_e は地震動速度である。

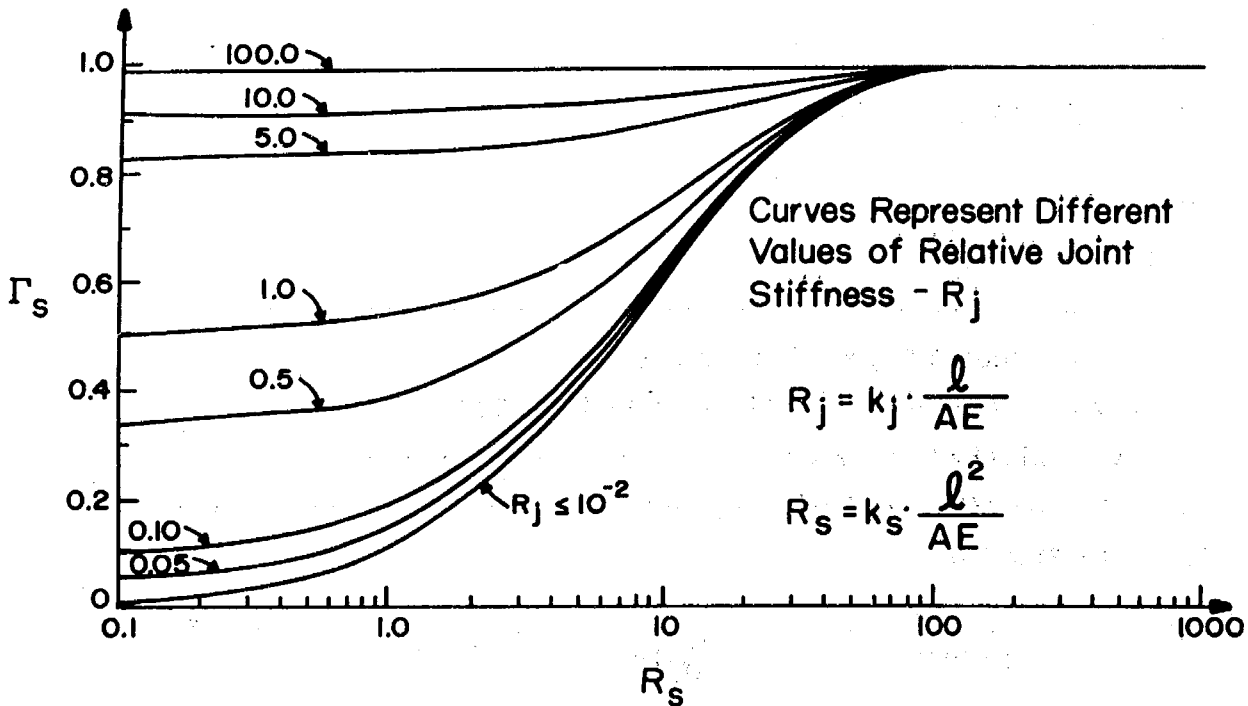


図- 11 $\Gamma_s \sim R_s$ 関係

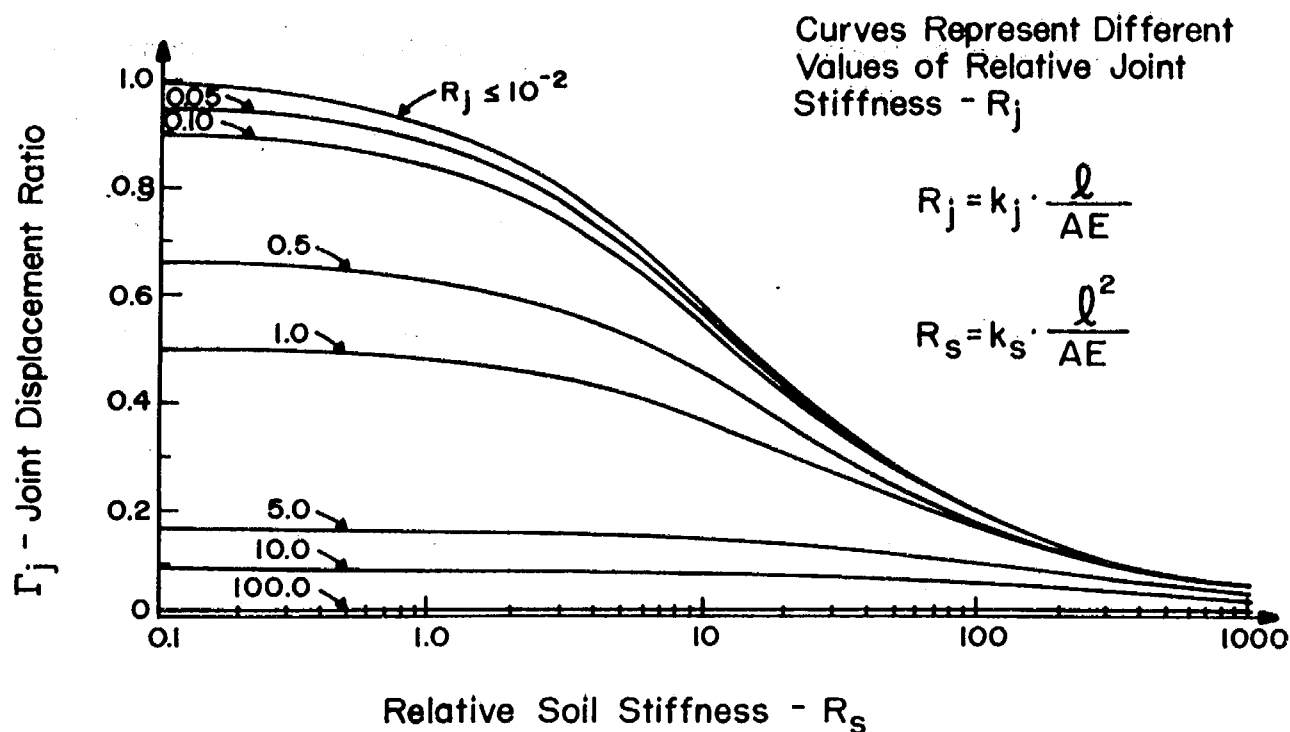


図-12 $\Gamma_j \sim R_s$ 関係

II.2.2 試算結果

次の条件 1) 管種：铸铁管 2) 外径：23cm 3) 管厚：1cm, 4) 断面積：72cm² 5) 長さ：6.1m 6) ヤング率 $984 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 7) ゴムガスケットばね定数：1580kg/cm 8) 地盤ばね剛性：91400kg/cm² 9) 地震本力：264 m/s 10) 地盤速度の最大値：21.6 cm/sで試算すると次のようになる。

地盤の管軸方向のひずみ最大値は $\epsilon_m = \epsilon_{g, \max} = 0.82 \times 10^{-3}$, 継手の伸縮の最大値は $d_m = \epsilon_m L = 0.51 \text{ cm}$ となる。さらに R_s は $R_s = k_s \cdot \frac{L^2}{AE} = 4.8$, R_j は $R_j = K_j \cdot \frac{L}{AE} = 1.4 \times 10^{-2}$ となる。

これらの値を用いて、図-11, 12により、 Γ_s は約0.41, Γ_j は0.72となる。ゆえに、管体のひずみは 0.34×10^{-3} , 継手の伸縮は $d_j = 0.37 \text{ cm}$ となる。

なお、 R_s の値は継手のある埋設管路の場合には通常 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 程度である、また、 R_j の値は、継手の材料にもよるが、一般にゴムガスケットについては、 10^{-1} 程度かあるいはそれ以下の値と考えられる。また、ボルトによるフランジ継手の場合についてはボルトの断面積、有効長さ、ヤング率等により決定する。

II.3 静的弾塑性解析法

II.3.1 解析法

この解析では、比較的規模の大きい地震について精度良い結果を与えるために、埋設管路と周辺地盤のすべりを考える。図-13は埋設管路の管体にすべりを与えた場合のモデルを示したものである。図2.13 a)に示すように、管体は一樣な地盤のひずみ領域にあり、受口部においては管体と地盤が同じに変位する。地盤の変位の総和(管体一本当たり) d_s は一樣な地盤のひずみと ϵ_m と管体の長さ L との積になる。上述したように、受口部においては管体と地盤とが同じに変位するとしているので、相隣る受口部

の変位差 Δs は、継手の伸縮 Δj と管体の伸び Δp との加算によって表わされる (図 2.13 b) 参照)。

つまり、 Δs は $\Delta s = \Delta p + \Delta j$ となる。

ここに、 Δp 、 Δj は

$$\Delta p = \epsilon_m (L - \ell_1) + \frac{f_s \ell_1^2}{2AE} + \frac{k_j \Delta j \ell_1}{AE} \quad \dots\dots\dots (40)$$

$$\Delta j = \frac{\epsilon_m \ell_1 - \frac{f_s \ell_1^2}{2AE}}{1 + \frac{k_j \ell_1}{AE}} \quad \dots\dots\dots (41)$$

ϵ_m : 地盤の管軸方向のひずみ

L : 管体の長さ

ℓ_1 : 式 43, 44 参照

f_s : 周辺地盤拘束力

A : 断面積

E : ヤング率

k_j : 継手剛性

Δj : 継手伸縮

となる。また、 ℓ_1 は管体における力のつりあい式

$$f_s \ell_1 = \epsilon_m AE - k_j \Delta j \quad \dots\dots\dots (42)$$

により

$$\ell_1 = \frac{2AE}{k_j} \left[\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_m k_j}{f_s}} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (43)$$

($k_j > 0$ の場合)

$$\ell_1 = \frac{\epsilon_m AE}{f_s} \quad \dots\dots\dots (44)$$

($k_j \approx 0$ の場合)

となる。なお、 $\ell_1 > L$ の場合については、式 40, 41 は

$$\epsilon_p = \frac{f_s \ell + k_j \Delta j}{AE} \quad \dots\dots\dots (45)$$

($\ell (= \ell_1) > L$ の場合)

$$\Delta j = \frac{\epsilon_m \ell - \frac{f_s \ell^2}{2AE}}{1 + \frac{k_j \ell}{AE}} \quad \dots\dots\dots (46)$$

($\ell (= \ell_1) > L$ の場合)

となる。

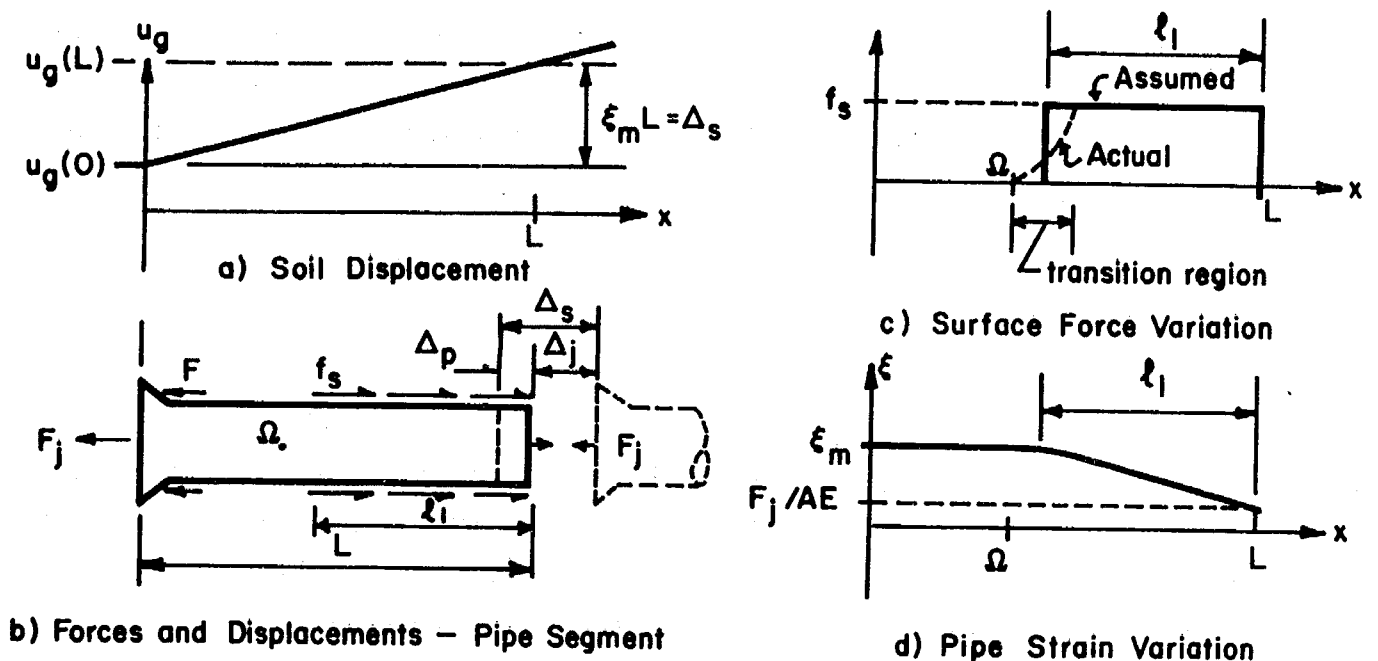


図-13 埋設管路の各管体におけるすべりのモデル化

II.3.2 試算結果

次の条件 1) 管呼び径: 8 インチ, 2) 外径: 23 cm, 3) 管厚: 1 cm, 4) 断面積: 72 cm², 5) 長さ: 6.1 m, 6) ヤング率: $984 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$, 7) ゴムガスケットばね定数: 1580 kg/cm², 8) 地盤の埋設管路の管軸方向のひずみの最大値: 0.82×10^{-3} , 9) すべり力: 約 25 lb/in (44 KN/m), 10) すべり域 (ℓ_1): $\ell_1 = 230 \text{ m}$ (式 43 による), $\ell_1 = 129.5 \text{ m}$ (式 44 による) で試算すると次のようになる。

管体のひずみは $\epsilon_p = 5 \times 10^{-6}$, 継手伸縮は $\Delta_j = 0.48 \text{ cm}$ となる。なお, 埋設管路と周辺地盤のすべりを仮定することは比較的に規模の大きい地盤のひずみに対して良いと考えられている。

II.4 まとめ

静的解析法では埋設管路の管体, 継手および周辺地盤の剛性の変化を考慮し, 周辺地盤のひずみが埋設管路に渡って均一であるとした方法について述べた。この解析法は, 弾性床上のはりモデルによる方法 (静的弾性解析法) と弾塑性床上のはりモデルによる方法 (静的弾塑性解析法) から成る。弾性床上によるはりモデルによる方法では管体のひずみ, 継手の伸縮は双曲線関数を含む比較的簡易な式で表わし管体, 継手および周辺地盤はそれぞれ弾性体の性質を兼ね備えているとした。解析のための計算式はそれほどむずかしくはないが, 地盤特性, 継手特性を考慮できる。弾塑性床上のはりモデルによる方法では管体と周辺地盤の間にすべりを仮定し, すべりが起こる均一な地盤ひずみ ϵ_m を設定し, 力のつりあいにより弾性域の長さ ℓ_1 を求め管体のひずみ, 継手の伸縮を ℓ_1 に関する比較的簡易な式で表わした。この方法ではすべり力の仮定が重要であり今後, この分野における研究が望まれる。

第Ⅲ章 準静的解析法

Ⅲ.1 概 説

前章において、埋設管路の周辺地盤に一樣な地盤変位を入力し、一樣な地盤のひずみのもとにおける弾性床上のはりモデルによる方法と弾塑性上のはりモデルによる方法とについて述べた。

本章では、地盤変位を時間関数として入力し、周辺地盤および埋設管路の継手の弾性的および弾塑性的な挙動を時間領域全体にわたって考慮した方法について述べる。

Ⅲ.2 準静的弾性解析法

Ⅲ.2.1 解 析 法

(1) 解析モデル

一般化したモデルについて：n個の管体から成る十分に長い埋設管路の模式を図-14に示す。図中、 $K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_{n-1}$ は埋設管路の継手ばね、 K_0, K_n は埋設管路の両端部におけるばね、 $x_1, x_2, \dots, x_{2i-1}, x_{2i}, \dots, x_{2n-1}, x_{2n}$ は管体の両端における管軸方向の変位、 $x_{G1}, x_{G2}, \dots, x_{Gn-1}$ は管軸方向の地盤の変位、 x_{G0}, x_{Gn} は埋設管路の端部における地盤の変位、 $L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n$ は管体の長さ、 $k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n$ は管体に沿う地盤ばねをそれぞれ示している。

管体のひずみエネルギー：図-15に示すように、管端に作用する反力と線形に分布する地盤の拘束力とを受ける管体においては、変位関数 $\phi_i(x)$ 、ひずみ関数 $\epsilon_i(x)$ 、応力関数 $\sigma_i(x)$ はそれぞれ

$$\phi_i(x) = \left[\left(1 - \frac{x^3}{L_i^3} \right) \frac{x^3}{L_i^3} \right] \left\{ \frac{x_{2i-1}}{x_{2i}} \right\} \dots\dots\dots (47)$$

$$\epsilon_i(x) = d\phi_i(x)/dx = \left[\frac{-3x^2}{L_i^3} \frac{3x^2}{L_i^3} \right] \left\{ \frac{x_{2i-1}}{x_{2i}} \right\} \dots\dots\dots (48)$$

$$\sigma_i(x) = E_i \epsilon_i(x) = E_i \left[\frac{-3x^2}{L_i^3} \frac{3x^2}{L_i^3} \right] \left\{ \frac{x_{2i-1}}{x_{2i}} \right\} \dots\dots\dots (49)$$

となる。

管体のもつひずみエネルギー U_{pipe}^i は

$$U_{pipe}^{total} = \frac{1}{2} \int_v \sigma_i^t \epsilon_i dv = \frac{1}{2} \int_0^{L_i} \sigma_i^t \epsilon_i A_i dx \dots\dots\dots (50)$$

σ_i^t : σ_i の転置行列

となるので、式 48, 49 を式 50 に代入し積分すると次式が得られる。

$$U_{pipe}^i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_{2i-1} & x_{2i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{9E_i A_i}{5L_i} & -\frac{9E_i A_i}{5L_i} \\ -\frac{9E_i A_i}{5L_i} & \frac{9E_i A_i}{5L_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2i-1} \\ x_{2i} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (51)$$

故に、各管体のひずみエネルギーの総和は

$$U_{pipe}^{total} = \sum_{i=1}^n U_{pipe}^i = \frac{1}{2} \{x\}^t [K_{pipe}] \{x\} \dots\dots\dots (52)$$

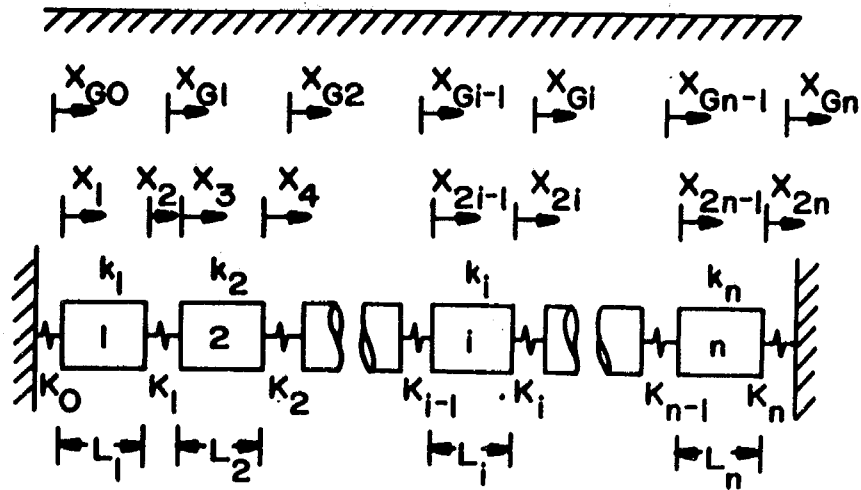


図-14 埋設管路の準静的モデルの模式図

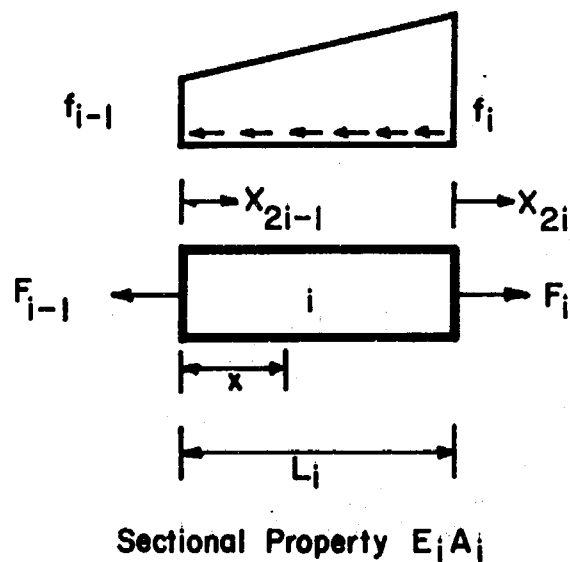


図-15 地盤の拘束力の分布

$$\{x\}^t = [x_1, x_2, \dots, x_3, x_4, \dots, x_{2i-1}, x_{2i}, \dots, x_{2n-1}, x_{2n}] \quad \dots \quad (53)$$

$$[K_{\text{pipe}}] = \frac{9}{5} \begin{bmatrix} \frac{E_1 A_1}{L_1} & -\frac{E_1 A_1}{L_1} & & & \\ -\frac{E_1 A_1}{L_1} & \frac{E_1 A_1}{L_1} & 0 & & \\ & 0 & \frac{E_2 A_2}{L_2} & -\frac{E_2 A_2}{L_2} & \\ & & -\frac{E_2 A_2}{L_2} & \frac{E_2 A_2}{L_2} & 0 \\ & & & \ddots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & \frac{E_1 A_1}{L_1} & -\frac{E_1 A_1}{L_1} & & & \\ & -\frac{E_1 A_1}{L_1} & \frac{E_1 A_1}{L_1} & 0 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & 0 & \frac{E_n A_n}{L_n} & -\frac{E_n A_n}{L_n} \\ & & & & -\frac{E_n A_n}{L_n} & \frac{E_n A_n}{L_n} \end{pmatrix}$$

$2n \times 2n$ (54)

となる。

継手ばねのひずみエネルギー：継手ばねの伸びと継手に作用する反力は式 55, 56

$$D_i = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \quad \text{..... (55)}$$

$$F_i = \begin{bmatrix} -K_i & K_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \quad \text{..... (56)}$$

によって表わされる (図-16 参照) ので、継手ばねのひずみエネルギーは

$$\begin{aligned} U_{\text{spring}}^i &= \frac{1}{2} F_i^t D_i \\ &= \frac{1}{2} [x_{2i} \ x_{2i+1}] \begin{bmatrix} k_i & -k_i \\ -k_i & k_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \quad \text{..... (57)} \end{aligned}$$

で表わされる。ここで、埋設管路の両端部においては、この展開の特殊なケースとして取り扱い、初端部 $i = 0$ においては $x_0 = x_{G0}$ と仮定して、後端部 $i = n$ において $x_{2n+1} = x_{Gn}$ と仮定して、両端部におけるばねのひずみエネルギー $U_{\text{spring}}^{\text{initial}}$, $U_{\text{spring}}^{\text{end}}$ を求めれば

$$U_{\text{spring}}^{\text{initial}} = \frac{1}{2} [x_{G0} \ x_1] \begin{bmatrix} k_0 & -k_0 \\ -k_0 & k_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{G0} \\ x_1 \end{Bmatrix} \quad \text{..... (58)}$$

$$U_{\text{spring}}^{\text{end}} = \frac{1}{2} [x_{2n} \ x_{Gn}] \begin{bmatrix} k_n & -k_n \\ -k_n & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2n} \\ x_{Gn} \end{Bmatrix} \quad \text{..... (59)}$$

となる。

故に、各継手ばねにおけるひずみエネルギーの総括は

$$\begin{aligned} U_{\text{spring}}^{\text{total}} &= \sum_{i=0}^n U_{\text{spring}}^i \\ &= \frac{1}{2} \{\bar{x}\}^t [\bar{K}_{\text{spring}}] \{\bar{x}\} \quad \text{..... (60)} \\ \{\bar{x}\}^t &= [x_{G0} \mid x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{2i-1} \ x_{2i} \ \cdots \ x_{2n-1} \ x_{2n} \mid x_{Gn}] \end{aligned}$$

$$[\bar{K}_{spring}] = \left(\begin{array}{c|cccccccc} K_0 & -K_0 & & & & & & \\ -K_0 & K_0 & 0 & & & & & \\ & 0 & K_1 & -K_1 & & & & \\ & & -K_1 & K_1 & 0 & & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & & & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & & & 0 & K_1 & -K_1 & \\ & & & & & -K_1 & K_1 & 0 \\ & & & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & & & & 0 & K_{n-1} & -K_{n-1} \\ & & & & & & & -K_{n-1} & K_{n-1} & 0 \\ & & & & & & & & 0 & K_n & -K_n \\ & & & & & & & & -K_n & K_n \end{array} \right) \quad (2n+2)(2n+2) \quad \dots\dots\dots (61)$$

となる。

なお、式 60 における行列を分割すると、

$$U_{spring}^{total} = \frac{1}{2} K_0 x_{G0}^2 + \frac{1}{2} K_n x_{Gn}^2 + \{x\}^t \{\bar{K}ba\} x_{G0} + \{x\}^t \{\bar{K}bc\} x_{Gn} + \frac{1}{2} \{x\}^t [K_{spring}] \{x\} \quad \dots\dots\dots (62)$$

$$\{\bar{K}ba\} = \begin{bmatrix} -K_0 & 0 & 0 & \dots\dots & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (63)$$

$1 \times 2n$

$$\{\bar{K}bc\} = \begin{bmatrix} 0 & \dots\dots\dots 0 & -K_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (64)$$

$1 \times 2n$

$$[K_{spring}] = \left(\begin{array}{cccccccc} K_0 & 0 & & & & & & \\ 0 & K_1 & -K_1 & & & & & \\ -K_1 & K_1 & 0 & & & & & \\ 0 & K_2 & -K_2 & & & & & \\ -K_2 & K_2 & 0 & & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & & \\ 0 & K_1 & -K_1 & & & & & \\ -K_1 & K_1 & 0 & & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & & \\ 0 & K_{n-1} & -K_{n-1} & & & & & \\ -K_{n-1} & K_{n-1} & 0 & & & & & \\ 0 & K_n & & & & & & \end{array} \right) \quad \dots\dots\dots (65)$$

$2n \times 2n$

となる。

地盤ばねのひずみエネルギー：図-17 は地盤による拘束力の分布と座標を示したものである。図より地盤ばねにおける変位と拘束力（単位長さ当り）は次式で表わされるので、

$$y(x) = \left[\left(1 - \frac{x}{L_i}\right) \frac{x}{L_i} \right] \begin{Bmatrix} (x_{2i-1} - x_{Gi-1}) \\ (x_{2i} - x_{Gi}) \end{Bmatrix}$$

$$= \left[\left(1 - \frac{x}{L_i}\right) \frac{x}{L_i} - \left(1 - \frac{x}{L_i}\right) \frac{-x}{L_i} \right] \begin{Bmatrix} x_{2i-1} \\ x_{2i} \\ x_{Gi-1} \\ x_{Gi} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (66)$$

$$R(x) = \left[k_i \left(1 - \frac{x}{L_i}\right) \frac{k_i x}{L_i} - k_i \left(1 - \frac{x}{L_i}\right) \frac{-k_i x}{L_i} \right] \begin{Bmatrix} x_{2i-1} \\ x_{2i} \\ x_{Gi-1} \\ x_{Gi} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (67)$$

管体に沿う地盤の拘束力によるひずみエネルギーは

$$U_{soil}^i = \frac{1}{2} \int_0^{L_i} R^t(x) y(x) dx \dots\dots\dots (68)$$

となる。

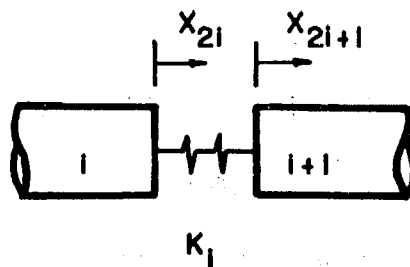


図-16 継手ばねのモデル化

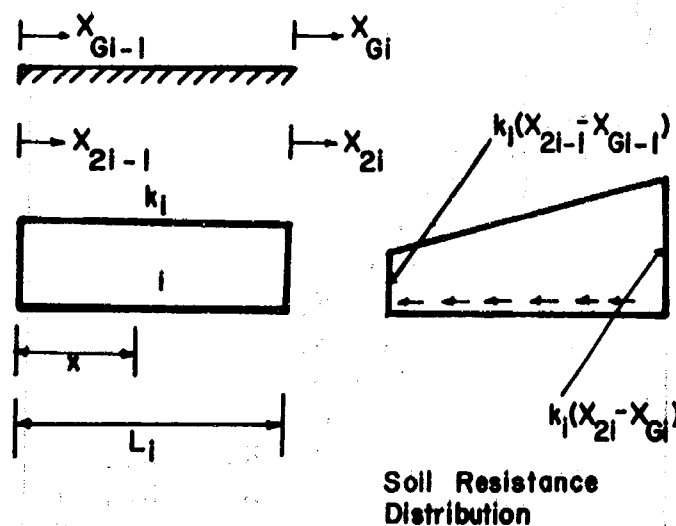


図-17 地盤の拘束力の分布と座標

ここで、式 66 および式 67 を式 68 に代入し、積分すると

$$U_{\text{soil}}^i = \frac{1}{2} [x_{2i-1} \ x_{2i} \mid x_{G1-1} \ x_{G1}] \begin{pmatrix} \frac{k_1 L_1}{3} & \frac{k_1 L_1}{6} & -\frac{k_1 L_1}{3} & -\frac{k_1 L_1}{6} \\ \frac{k_1 L_1}{6} & \frac{k_1 L_1}{3} & -\frac{k_1 L_1}{6} & -\frac{k_1 L_1}{3} \\ -\frac{k_1 L_1}{3} & -\frac{k_1 L_1}{6} & \frac{k_1 L_1}{3} & \frac{k_1 L_1}{6} \\ -\frac{k_1 L_1}{6} & -\frac{k_1 L_1}{3} & \frac{k_1 L_1}{6} & \frac{k_1 L_1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{2i-1} \\ x_{2i} \\ x_{G1-1} \\ x_{G1} \end{pmatrix} \quad \dots\dots (69)$$

となる。さらに、式 69 における行列を分割すると

$$\begin{aligned} U_{\text{soil}}^i &= \frac{1}{2} [x_{2i-1} \ x_{2i}] \begin{pmatrix} \frac{k_1 L_1}{3} & \frac{k_1 L_1}{6} \\ \frac{k_1 L_1}{6} & \frac{k_1 L_1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{2i-1} \\ x_{2i} \end{pmatrix} \\ &+ \frac{1}{2} [x_{G1-1} \ x_{G1}] \begin{pmatrix} \frac{k_1 L_1}{3} & \frac{k_1 L_1}{6} \\ \frac{k_1 L_1}{6} & \frac{k_1 L_1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{G1-1} \\ x_{G1} \end{pmatrix} \\ &- [x_{2i-1} x_{2i}] \begin{pmatrix} \frac{k_1 L_1}{3} & \frac{k_1 L_1}{6} \\ \frac{k_1 L_1}{6} & \frac{k_1 L_1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{G1-1} \\ x_{G1} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (70) \end{aligned}$$

となる。

故に、地盤ばねにおけるひずみエネルギーの総和は、

$$\begin{aligned} U_{\text{soil}}^{\text{total}} &= \sum_{i=1}^n U_{\text{soil}}^i \\ &= \frac{1}{2} \{x\}^t [K_{\text{soil}}] \{x\} + \frac{1}{2} \{x_G\}^t [K_{\text{soil}}] \{x_G\} - \{x\}^t [K_{\text{soil}}] \{x_G\} \quad \dots (71) \end{aligned}$$

$$\{x_G\}^t = [x_{G0} \ x_{G1} \mid x_{G1} \mid x_{G1} \ \dots\dots x_{Gn-1} \mid x_{Gn-1} \ x_{Gn}] \quad \dots\dots\dots (72)$$

$$[K_{\text{soil}}] = \begin{pmatrix} \frac{k_1 L_1}{3} & \frac{k_1 L_1}{6} & & & & \\ \frac{k_1 L_1}{6} & \frac{k_1 L_1}{3} & 0 & & & \\ & 0 & \frac{k_2 L_2}{3} & \frac{k_2 L_2}{6} & & \\ & & \frac{k_2 L_2}{6} & \frac{k_2 L_2}{3} & 0 & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \ddots \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}
 0 & \frac{k_1 L_1}{3} & \frac{k_1 L_1}{6} & & \\
 & \frac{k_1 L_1}{6} & \frac{k_1 L_1}{3} & 0 & \\
 & \cdot & \cdot & \cdot & \\
 & & \cdot & \cdot & \cdot \\
 & & 0 & \frac{k_n L_n}{3} & \frac{k_n L_n}{6} \\
 & & & \frac{k_n L_n}{6} & \frac{k_n L_n}{3}
 \end{pmatrix}
 \quad 2n \times 2n \quad \dots\dots\dots (73)$$

となる。

以上、管体のひずみエネルギー、継手ばねのひずみエネルギー、地盤ばねのひずみエネルギーについて述べた。以下には、地盤・埋設管路系における全ひずみエネルギー、埋設管路におけるつりあいを述べ、特定管路（一体構造管路、継手構造管路）に適用した結果について述べる。

地盤・埋設管路における全ひずみエネルギー：地盤と埋設管路の相互作用系における全ひずみエネルギーは

$$U_{\text{system}}^{\text{total}} = U_{\text{spring}}^{\text{total}} + U_{\text{soil}}^{\text{total}} \quad \dots\dots\dots (74)$$

によって表わされるので最終的には

$$\begin{aligned}
 U_{\text{system}}^{\text{total}} = & \frac{1}{2} \{x\}^t [K_{\text{pipe}}] \{x\} \\
 & + \frac{1}{2} K_0 x_{G0}^2 + \frac{1}{2} K_n x_{Gn}^2 \\
 & + \{x\}^t \{ \bar{K}_{ba} \} x_{G0} + \{x\} + \{ \bar{K}_{bc} \} x_{Gn} \\
 & + \frac{1}{2} \{x\}^t [K_{\text{spring}}] \{x\} \\
 & + \frac{1}{2} \{x\}^t [K_{\text{soil}}] \{x\} + \frac{1}{2} \{x_0\}^t [K_{\text{soil}}] \{x_0\} \\
 & - \{x\}^t [K_{\text{soil}}] \{x_0\} \quad \dots\dots\dots (75)
 \end{aligned}$$

となる。

埋設管路におけるつりあい：変分原理により、つりあっている系のポテンシャルエネルギーは変化しないから

$$\frac{\partial v_{\text{system}}^{\text{total}}}{\partial \{x\}} = \frac{\partial v_{\text{system}}^{\text{total}}}{\partial \{x\}} + \frac{\partial v_{\text{spring}}^{\text{total}}}{\partial \{x\}} + \frac{\partial v_{\text{soil}}^{\text{total}}}{\partial \{x\}} = 0 \quad \dots\dots\dots (76)$$

となる。

式 75 から次のつりあい式を得ることができる。

$$\begin{aligned}
 & [K_{\text{pipe}}] \{x\} + [K_{\text{spring}}] \{x\} + [K_{\text{soil}}] \{x\} \\
 = & [K_{\text{soil}}] \{x_0\} - \{ \bar{K}_{ba} \} x_{G0} - \{ \bar{K}_{bc} \} x_{Gn} \quad \dots\dots\dots (77)
 \end{aligned}$$

さらに、式 77 より

$$\begin{matrix} [K_{\text{system}}] \{x\} = [\bar{K}_{\text{soil}}] \{x_0\} \dots\dots\dots (78) \\ 2n \times 2n \quad 2n \times 1 \quad 2n \times 2n \quad 2n \times 1 \end{matrix}$$

が得られ、ここで、 $[K_{\text{system}}]$ と $[K_{\text{soil}}]$ は

$$[K_{\text{system}}] = \begin{bmatrix} \left(\frac{9E_1 A_1}{5L_1} + \frac{k_1 L_1}{3} + K_0 \right) & \left(\frac{-9E_1 A_1}{5L_1} + \frac{k_1 L_1}{3} \right) & & & \\ \left(\frac{-9E_1 A_1}{5L_1} + \frac{k_1 L_1}{6} \right) & \left(\frac{9E_1 A_1}{5L_1} + \frac{k_1 L_1}{3} + K_1 \right) & -K_1 & & \\ & -K_1 & \left(\frac{9E_2 A_2}{5L_2} + \frac{k_2 L_2}{3} + K_1 \right) & \left(\frac{-9E_2 A_2}{5L_2} + \frac{k_2 L_2}{6} \right) & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & K_{2i-1, 2i-2} & K_{2i-1, 2i-1} & K_{2i-1, 2i} \\ & & & K_{2i, 2i-1} & K_{2i, 2i} & K_{2i, 2i+1} \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (79)$$

$$K_{2i-1, 2i-1}^{\text{system}} = \frac{9E_1 A_1}{5L_1} + \frac{k_1 L_1}{3} + K_1 - 1; 1 \leq i \leq n \quad \dots\dots\dots (80 a)$$

$$K_{2i-1, 2i}^{\text{system}} = K_{2i, 2i-1}^{\text{system}} = -\frac{9E_1 A_1}{5L_1} + \frac{k_1 L_1}{6}; 1 \leq i \leq n \quad \dots\dots\dots (80 b)$$

$$K_{2i, 2i}^{\text{system}} = \frac{9E_i A_i}{5L_i} + \frac{k_i L_i}{3} + K_i; 1 \leq i \leq n \quad \dots\dots\dots (80 c)$$

$$K_{2i, 2i+1}^{\text{system}} = K_{2i+1, 2i}^{\text{system}} = -K_i \quad 1 \leq i \leq n-1 \quad \dots\dots\dots (80 d)$$

$$[K_{\text{soil}}] = \begin{bmatrix} \left(\frac{k_1 L_1}{3} + K_0 \right) \frac{k_1 L_1}{6} & & & & \\ \frac{k_1 L_1}{6} & \frac{k_1 L_1}{3} & 0 & & \\ & 0 & \frac{k_2 L_2}{3} & \frac{k_2 L_2}{6} & \\ & & \frac{k_2 L_2}{6} & \frac{k_2 L_2}{3} & 0 \\ & & & 0 & \frac{k_1 L_i}{3} & \frac{k_1 L_i}{6} \\ & & & & \frac{k_1 L_i}{6} & \frac{k_1 L_i}{3} & 0 \\ & & & & & 0 & \frac{k_n L_n}{3} & \frac{k_n L_n}{6} \\ & & & & & & \frac{k_n L_n}{6} & \left(\frac{k_n L_n}{3} + K_n \right) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (81)$$

$$\text{soil } \bar{K}_{1, 1} = \frac{k_1 L_1}{3} + K_0 \quad \dots\dots\dots (82 a)$$

$$\text{soil } \bar{K}_{2n, 2n} = \frac{k_n L_n}{3} + K_n \quad \dots\dots\dots (82 b)$$

$$\text{soil } \bar{K}_{2i-1, 2i-1} = \text{soil } \bar{K}_{2i, 2i} = \frac{k_i L_i}{3}; 1 \leq i \leq n \quad \dots\dots\dots (82 c)$$

$$\text{soil } \bar{K}_{2i, 2i+1} = \text{soil } \bar{K}_{2i+1, 2i} = 0; 1 \leq i \leq n-1 \quad \dots\dots\dots (82 d)$$

$$\text{soil } \bar{K}_{2i-1, 2i} = \text{soil } \bar{K}_{2i, 2i-1} = \frac{k_i L_i}{6}; 1 \leq i \leq n \quad \dots\dots\dots (82 e)$$

である。

一体構造管路と継手構造管路におけるつりあい：一体構造管路においては継手ばねは比較的剛なので $x_{2i} = x_{2i+1} = x_{i+1}$ となる。さらに、 n 個の管体とするので、自由度は $n+1$ となる。

よって、式 78 の $\{x\}$, $\{x_G\}$ は

$$\{x_{\text{cont}}\} = [x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n, x_{n+1}] \quad \dots\dots\dots (83)$$

$1 \times (n+1)$

$$\{x_{G\text{cont}}\} = [x_{G0}, x_{G1} \dots x_{Gi} \dots x_{Gn-1}, x_{Gn}] \quad \dots\dots\dots (84)$$

$1 \times (n+1)$

となる。ここで、式 78 の第 $(2i)$ 行と第 $(2i+1)$ 行は

$$\begin{aligned} & \left(\frac{-9E_i A_i}{5L_i} + \frac{k_i L_i}{6} \right) x_{2i-1} + \left(\frac{9E_i A_i}{5L_i} + \frac{k_i L_i}{3} + K_i \right) x_{2i} - K_i x_{2i+1} \\ & = \frac{k_i L_i}{6} x_{G1-i} + \frac{k_i L_i}{3} x_{Gi} \quad \dots\dots\dots (85) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -k_i x_{2i} + \left(\frac{9E_{i+1} A_{i+1}}{5L_{i+1}} + \frac{k_{i+1} L_{i+1}}{3} + K_i \right) x_{2i+1} + \left(\frac{-9E_{i+1} A_{i+1}}{5L_{i+1}} + \frac{k_{i+1} L_{i+1}}{6} \right) \\ & \cdot x_{2i+2} = \frac{k_{i+1} L_{i+1}}{3} x_{Gi} + \frac{k_{i+1} L_{i+1}}{6} x_{Gi+1} \quad \dots\dots\dots (86) \end{aligned}$$

であり、さらに、 $x_{2i} = x_{2i+1} = x_{i+1}$; $x_{2i-1} = x_i$; $x_{2i+2} = x_{i+2}$ とおき、式 85 と式 86 を加算することにより、一体構造管路のつりあい式を得る。すなわち、

$$\begin{aligned} & \left(\frac{-9E_i A_i}{5L_i} + \frac{k_i L_i}{6} \right) x_i + \left(\frac{9E_i A_i}{5L_i} + \frac{9E_{i+1} A_{i+1}}{5L_{i+1}} + \frac{k_i L_i}{3} + \frac{k_{i+1} L_{i+1}}{3} \right) \\ & x_{i+1} + \left(\frac{-9E_{i+1} A_{i+1}}{5L_{i+1}} + \frac{k_{i+1} L_{i+1}}{6} \right) x_{i+2} = \frac{k_i L_i}{6} x_{G1-i} + \frac{1}{3} \\ & (k_i L_i + k_{i+1} L_{i+1}) x_{Gi} + \frac{k_{i+1} L_{i+1}}{6} x_{Gi+1} \quad \dots\dots\dots (87) \end{aligned}$$

である。

なお、この式は $1 \leq i \leq n-1$ で有効であり、 $i=0$ の初端部と $i=n$ の後端部においては

$$\begin{aligned} & \left(\frac{9E_1 A_1}{5L_1} + \frac{k_1 L_1}{3} + K_0 \right) x_1 + \left(\frac{-9E_1 A_1}{5L_1} + \frac{k_1 L_1}{6} \right) x_2 \\ & = \left(\frac{k_1 L_1}{3} + K_0 \right) x_{G0} + \frac{k_1 L_1}{6} x_{G1} \quad \dots\dots\dots (88) \end{aligned}$$

および

$$\begin{aligned} & \left(\frac{-9E_n A_n}{5L_n} + \frac{k_n L_n}{6} \right) x_n + \left(\frac{9E_n A_n}{5L_n} + \frac{k_n L_n}{3} + K_n \right) x_{n+1} \\ & = \frac{k_n L_n}{6} x_{Gn-1} + \left(\frac{k_n L_n}{3} + K_n \right) x_{Gn} \quad \dots\dots\dots (89) \end{aligned}$$

になることに注意を要する。また、式 88 と式 89 において、初端部と後端部において自由と仮定するならば式中の K_0 と K_n は省略されることとなり、また、固定と仮定するならば $x_1 = x_{G0}$, $x_{n+1} = x_{Gn}$ となり、式 87 を $(n-1)$ 個の式に書き直すことができ、したがって、式 88 と式 89 の両式は不要になることに注意を要する。

継手構造管路においては $x_1 = x_2 \cdots x_{2i-1} = x_{2i}$ の関係が成り立ち、また、 n 個の管体とするので

$$\{x_{\text{rigid}}\} = [x_1, x_2 \cdots x_1 \cdots x_n] \cdots \cdots (90)$$

$$\{x_{G, \text{rigid}}\} = [x_{G0}, x_{G1} \cdots x_{G1} \cdots x_{Gn-1}, x_{Gn}] \cdots \cdots (91)$$

となる。

ここで、式 78 の第 $(2i-1)$ 行と第 $(2i)$ 行は

$$\begin{aligned} & -K_{i-1} x_{2i-2} + \left(\frac{9E_i A_i}{5L_i} + \frac{k_i L_i}{3} + K_{i-1} \right) x_{2i-1} \\ & + \left(\frac{-9E_i A_i}{5L_i} + \frac{k_i L_i}{6} \right) x_{2i} = \frac{k_i L_i}{3} x_{G1-i} + \frac{k_i L_i}{6} x_{G1} \cdots \cdots (92) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{-9E_i A_i}{5L_i} + \frac{k_i L_i}{6} \right) x_{2i+1} + \left(\frac{9E_i A_i}{5L_i} + \frac{k_i L_i}{3} + K_i \right) x_{2i} - K_i x_{2i+1} \\ & = \frac{k_i L_i}{6} x_{G1-i} + \frac{k_i L_i}{3} x_{G1} \cdots \cdots (93) \end{aligned}$$

であり、さらに、 $x_{2i-1} = x_{2i} = x_i$; $x_{2i-2} = x_{i-1}$; $x_{2i+1} = x_{i+1}$ として、式 92 と式 93 を加算することにより、継手構造管路のつりあい式を得る。

すなわち、

$$\begin{aligned} & -K_{i-1} x_{i-1} + (k_i L_i + K_{i-1} + K_i) x_i - K_i x_{i+1} \\ & = \frac{1}{2} k_i L_i x_{G1-i} + \frac{1}{2} k_i L_i x_{G1} \cdots \cdots (94) \\ & (2 \leq i \leq n-1) \end{aligned}$$

$i=1$, $x_0 = x_{G0}$ に対応するつりあい式の第一行は

$$(k_1 L_1 + K_0 + K_1) x_1 - K_1 x_2 = (K_0 + \frac{1}{2} k_1 L_1) x_{G0} + \frac{1}{2} k_1 L_1 x_{G1} \cdots \cdots (95)$$

である。

なお、この式で、 $i=n$, $x_{n+1} = x_{Gn}$ の最終行は

$$\begin{aligned} & -k_{n-1} x_{n-1} + (k_n L_n + K_{n-1} + K_n) x_n \\ & = \frac{1}{2} k_n L_n x_{Gn-1} + \left(\frac{1}{2} k_n L_n + K_n \right) x_{Gn} \cdots \cdots (96) \end{aligned}$$

になることに注意を要する。

(2) 入力地震動

入力地震動は、伝播する地震動波形が、埋設管路の全長にわたって一定であると仮定する。つまり、初端部から伝播する時空的に変化する入力地盤変位は、次のようになる。

（注）この地震動は、時刻 t における変位 $x_G(t)$ であり、 $x_G(t) = x_G(t - \tau)$ である。

$$x_{G0} = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \Delta \max h(t) & t \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (97 a)$$

$$x_{Gi} = \begin{cases} 0 & t - \Delta T_i < 0 \\ \Delta \max h(t - \Delta T_i) & t - \Delta T_i \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (97 b)$$

$$x_{Gi} = \begin{cases} 0 & t - \Delta T_i < 0 \\ \Delta \max h(t - \Delta T_i) & t - \Delta T_i \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (97 c)$$

ここに、 $\Delta \max$ は 1 個の地震記録の最大変位であり、 ΔT_i は初端部から管体 i の初端部に向う波動の位相差で反対側の端部における

$$\Delta T_i = \sum_{j=1}^i L_j / C_j \dots\dots\dots (98)$$

C_j : 管体 j の周辺地盤の伝播速度

で求めるとする。

(3) 計算方法の概要

1 個の地震動の変位 $x_{G1}(t_1)$, $x_{G2}(t_2)$ が、与えられたとするならば、埋設管路の応答値 $x_1(t)$, $x_2(t)$ $x_i(t)$ を計算することができる。この計算において、各点における埋設管路の変位 x_i は入力地震動の時々刻々の変化に対して、ガウス消去法により計算することができる。

この計算については参考文献 12 に詳しく述べられているので、ここでは省略するが、結果的に得られる埋設管路の変位 $\{x\}$ は、4 つの設計のためのパラメータと 1 つの地盤抵抗のパラメータとを決定するために用いられ、それぞれ式 99 と式 100 および式 101, 式 102 によって表わされる。

$$\epsilon_i = (x_{2i} - x_{2i-1}) / L_i \dots\dots\dots (99)$$

$$U_i = x_{2i+1} - x_{2i} \dots\dots\dots (100)$$

$$Y_i = x_{0i} - x_{2i} \text{ または } Y_i = x_{G1} - x_{2i+1} \dots\dots\dots (101)$$

ϵ_i ; 埋設管路の管体 i のひずみ

U_i ; 埋設管路の管体 i の継手の伸縮

Y_i ; 埋設管路の管体 i の周辺地盤の相対変位

$$\sigma_i = E_i \epsilon_i \dots\dots\dots (102)$$

$$F_i = K_i V_i$$

σ_i ; 埋設管路の管体 i の応力

E_i ; 埋設管路の管体 i のヤング率

F_i ; 埋設管路の継手の反力

K_i ; 埋設管路の継手のばね剛性

Ⅲ.2.2 試算結果

次の条件 1) 管種 : 鋳鉄管, 鉄筋コンクリート管, ダクタイル鋳鉄管, 2) 外径 : 45.70 cm, 3) 管厚 : 1.37 cm, 4) 断面積 : 95.35 cm², 5) 長さ (管体) : 3.05, 6.10, 12.20 m, 6) ヤング率 : $984 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$, 7) 管体数 : 20, 8) 継手ばね定数 : $1.79 \times 10^{11} \sim 1.79 \times 10^8 \text{ kg/cm}$, 9) 拘束なし : $K_0 = 0$, $K_{n+1} = 0$, 10) 地盤ばね剛性 : 239 kg/cm², 11) 地震波伝播速度 : 240 m/s, 12)

地盤速度の最大値：36.9 m/s 13) 地盤変位の最大値：19.80 cmで継手構造管路について試算すると次のようになる。

埋設管路の長さとは各管体の長さの影響を図-18に示す。この図より、埋設管路と各管体の長さが長いほど応答値が大きく、また、埋設管路の継手ばね剛性が大きくなるほど継手の伸縮の最大値が小さくなる傾向がある。また、各管体のひずみと各管体と地盤の相対変位の最大値についてはいずれについても大きくなる傾向がある。

外径の影響を図-19に示す。埋設管路の継手ばね剛性が大きくなると管体のひずみおよび管体と地盤の相対変位の最大値が大きくなると言えよう。

しかし、継手の伸縮に対しては外径による影響はほとんどない。また管種の違いによる影響(図-20参照)はいずれについても小さく、端部条件の違いによる影響は固定-固定の条件が大きなひずみおよび大きな継手の伸縮を与える結果となった(図-21参照)。

次の条件 1) 管種：鋼管, 2) 外径：45.72 cm, 3) 管厚：0.64 cm, 4) 断面積：90.59 cm², 5) 長さ(管体)：6.10 m, 6) 拘束なし： $K_0 = 0$, $K_{n+1} = 0$, 7) 地盤ばね剛性：表-1 参照, ただし $k_s \sim 0.2G$ (G ：地盤せん断弾性定数, $246 \sim 246 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$), 8) 地震波伝播速度：表-1 参照, ただし $V_s \sim \sqrt{G/\rho}$ (ρ ：地盤密度, 一定), 9) 地盤速度の最大値：36.9 cm/s, 10) 地盤変位の最大値：19.80 cm で一体構造管路について試算すると次のようになる。

管路長の影響は図-22に示すとおりである。この図より、地盤ばね剛性が小さいほど、長い埋設管路で応答値が大きくなっている。

次に、図-23に外径の影響を示す。この図より、地盤ばね剛性が小さいほど大きなひずみを示し、しかも、それは外径の小さい埋設管路ほど顕著になっている。

なお、埋設管路の端部の条件の影響については、無視できるぐらいに小さいことが判る。

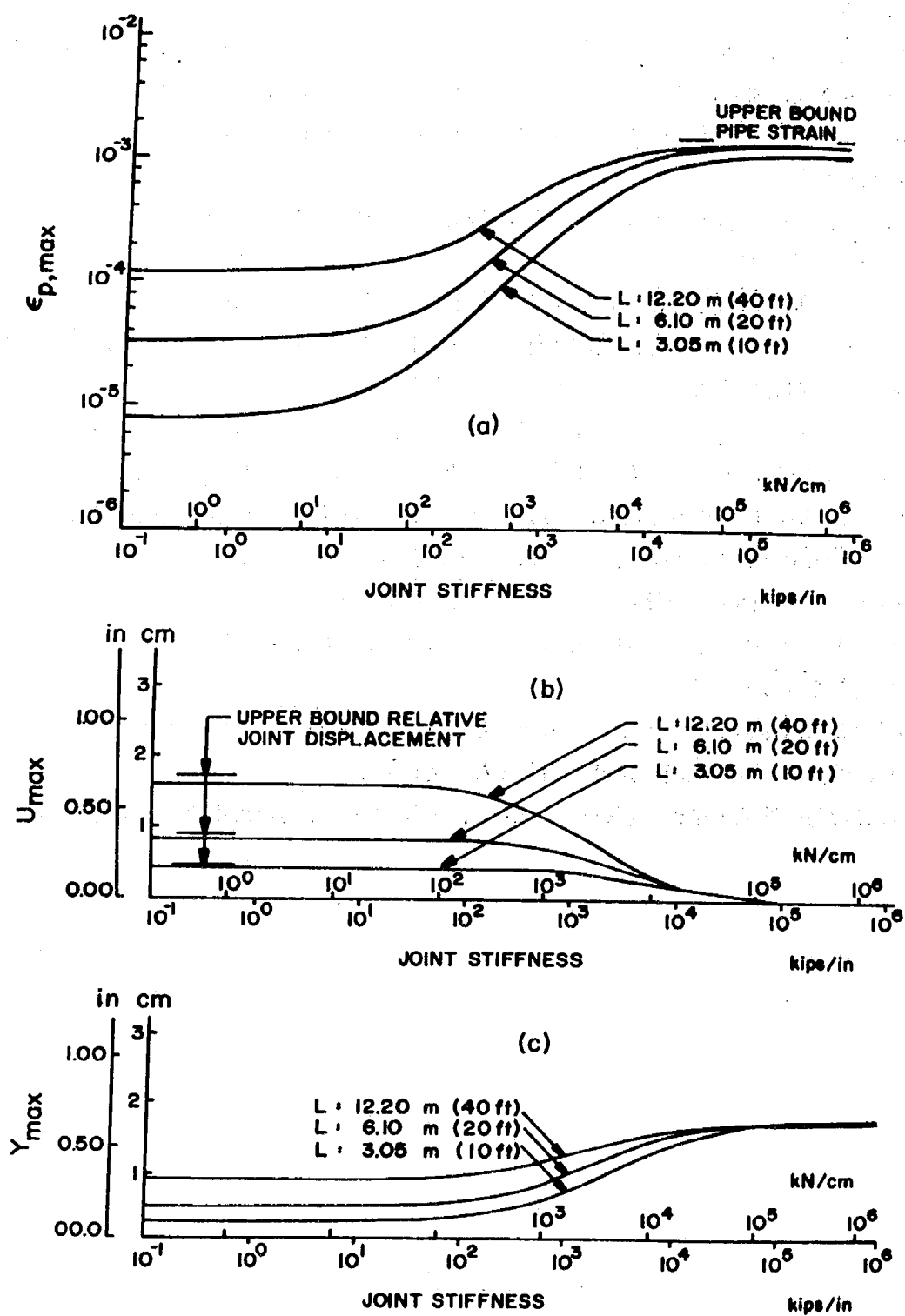


図-18 埋設管路の長さと言体の長さの影響

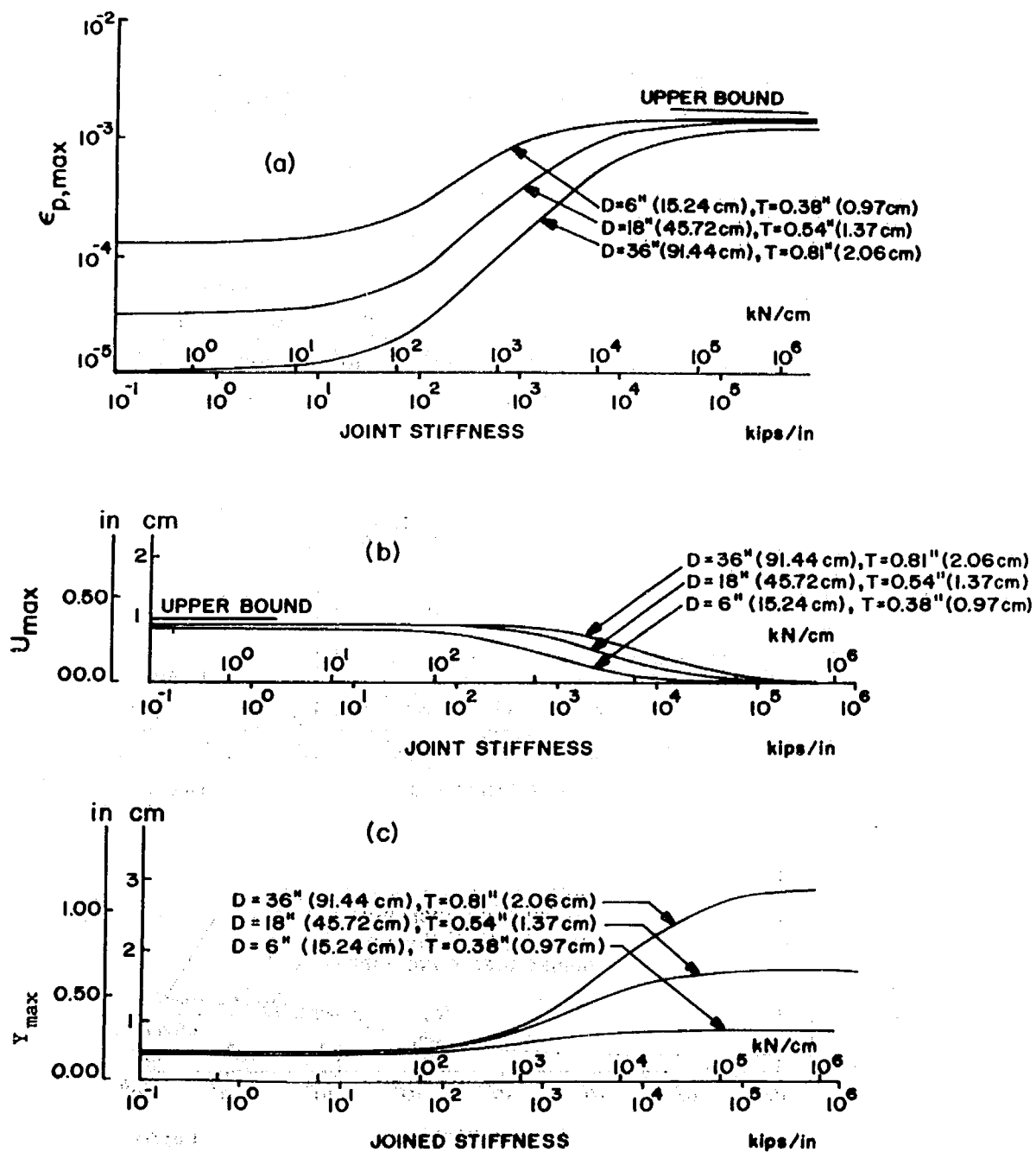


図-19 埋設管路の口径の影響

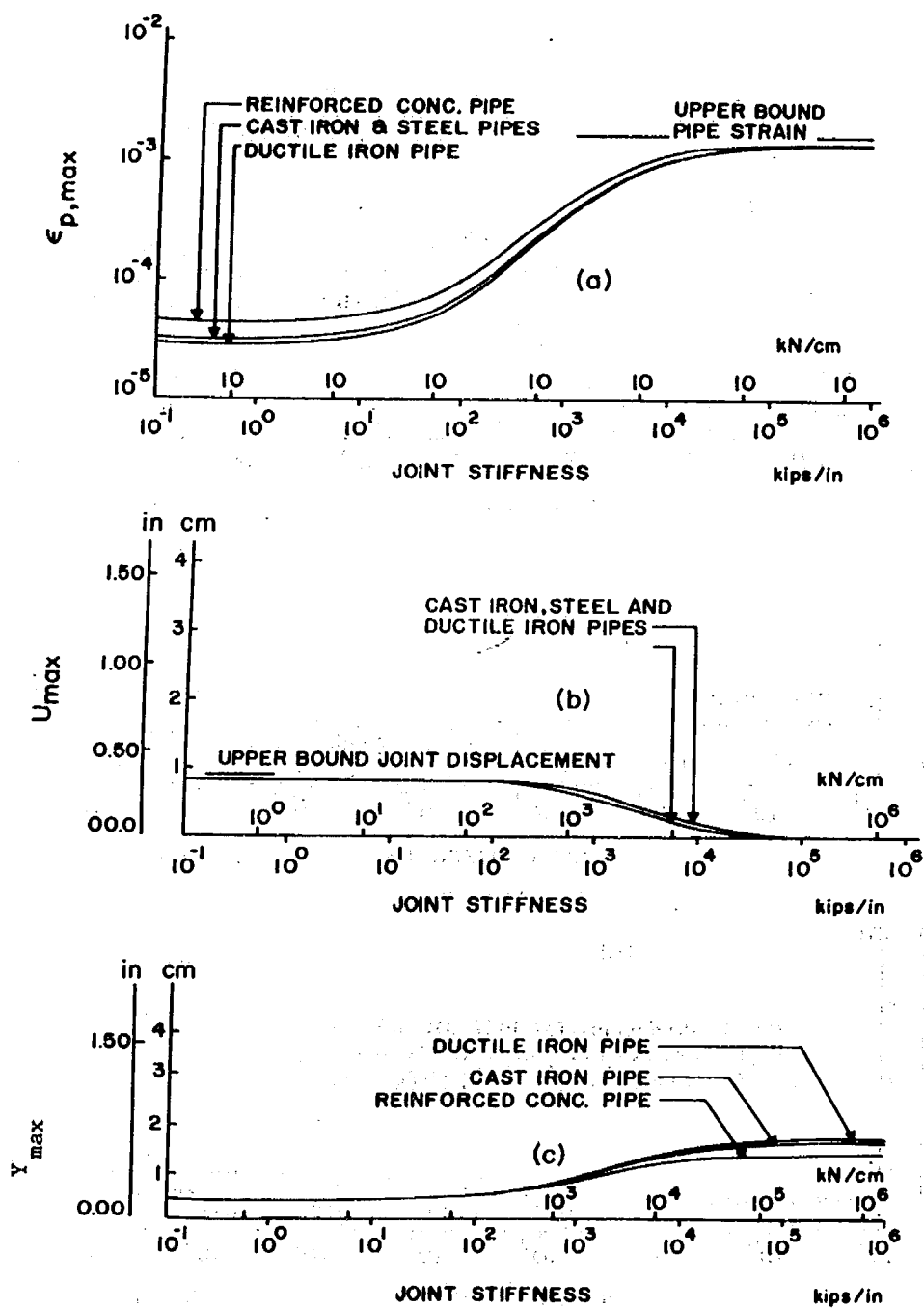


図-20 埋設管路の管種の違いによる影響

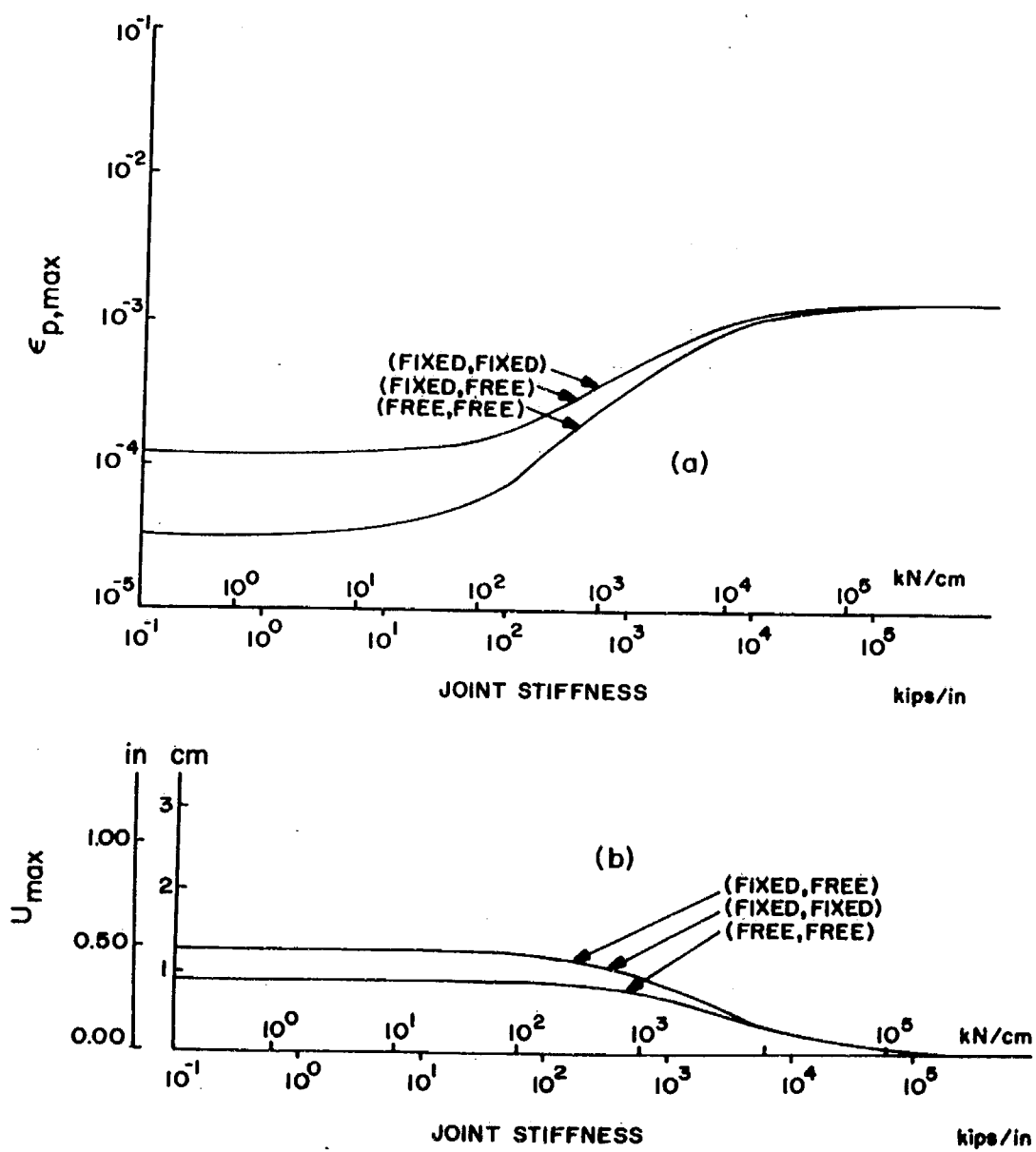


図-21 埋設管路の端部条件の違いによる影響

表-1 試算に用いた地盤ばね剛性 k_s と地震波伝播速度 V_s

k_s	(kg/cm^2)	V_s	(m/sec)
39.7		100	
79.4		140	
159.9		200	
239.0		245	
397.2		315	
478.0		335	
794.4		445	
1,195.0		550	
2,390.0		760	
3,578.0		945	
4,078.0		930	

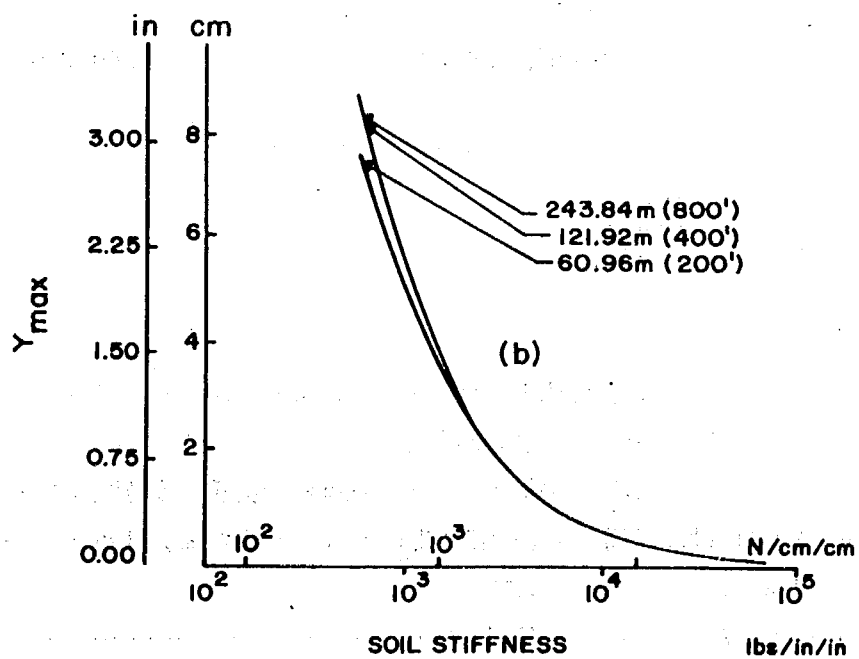
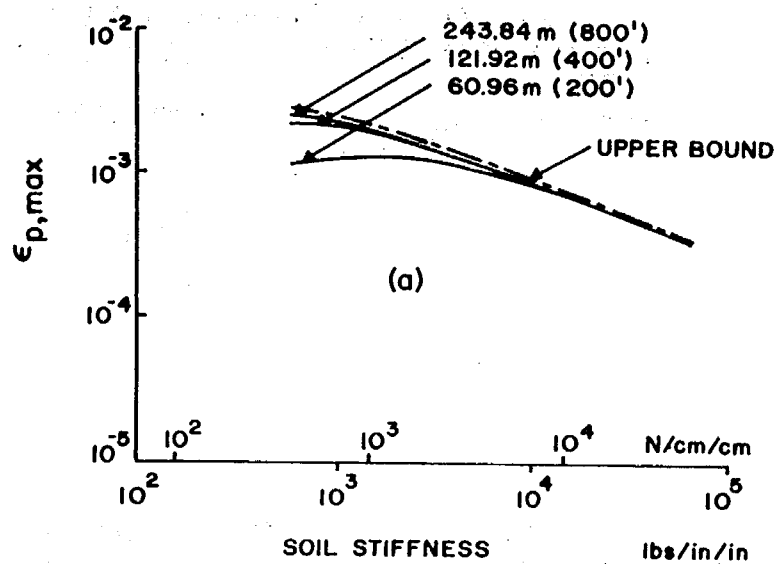


図-22 埋設管路の長さの影響

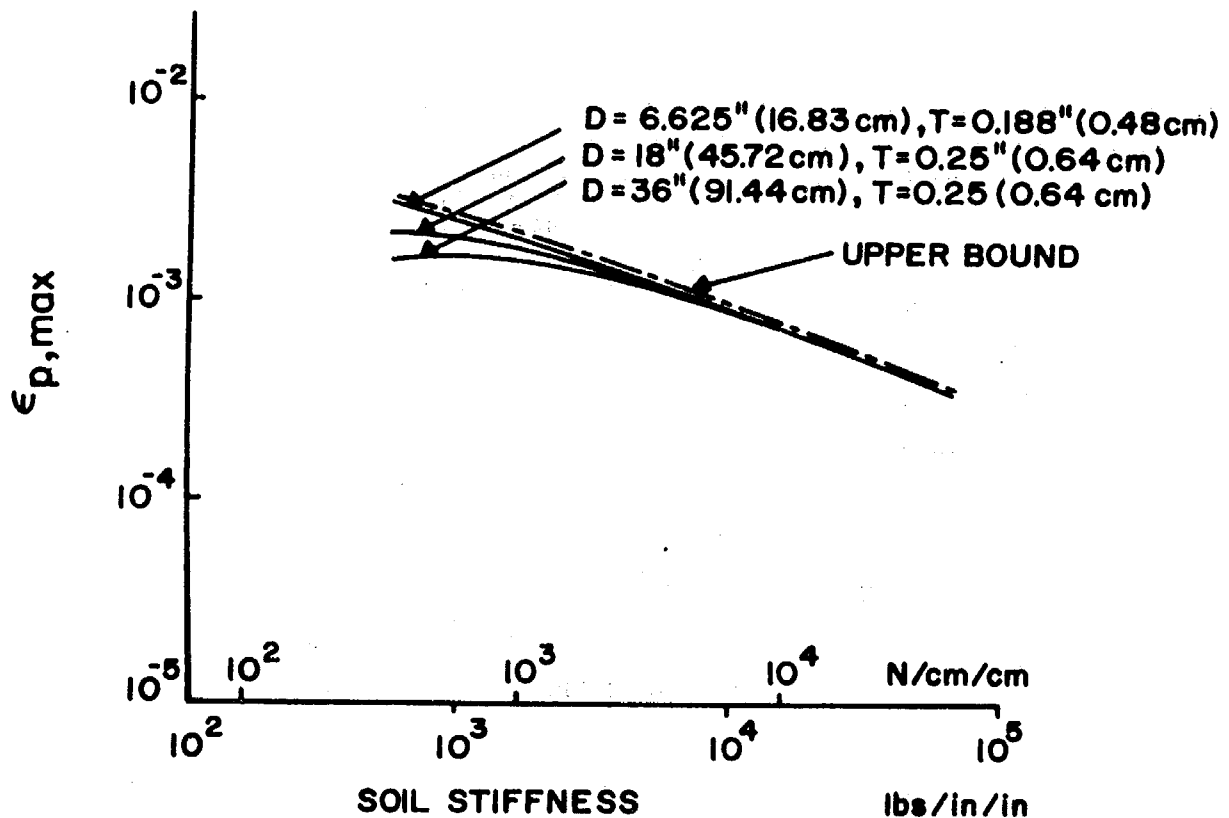


図-23 埋設管路の口径の影響

Ⅲ.3 準静的弾塑性解析法

Ⅲ.3.1 解析法

(1) 解析モデル

一般化したモデルについて：前述の弾性床上のはりモデルによる方法と同じであるが、ただし、以下に述べるひずみエネルギーの各式を修正する必要がある。

継手ばねのひずみエネルギー：埋設管路の継手 i の弾塑性ばねの荷重—変位関係を図-24に示す。継手ばねのひずみエネルギーは弾性、弾塑性の各条件で別々に定式化される弾性条件では継手の伸縮 δ は図-24の変曲点における δ_p の値より小さいので

$$|\delta| \leq |\delta_p| \text{ または } |F| \leq |F_p| \quad \dots\dots\dots (103)$$

F, F_p ：弾性ばねおよび弾塑性ばねに加わる力となる。

さらに、式 103 の弾性ばねの変形と弾性ばねに加わる力は次のように表わされる。

$$\delta_i = [-1, 1] \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (104)$$

$$F_i = [-K_i, K_i] \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (105)$$

よって、継手ばねのひずみエネルギーは

$$U_{elesti}^i = \frac{1}{2} F_i^t \delta_i$$

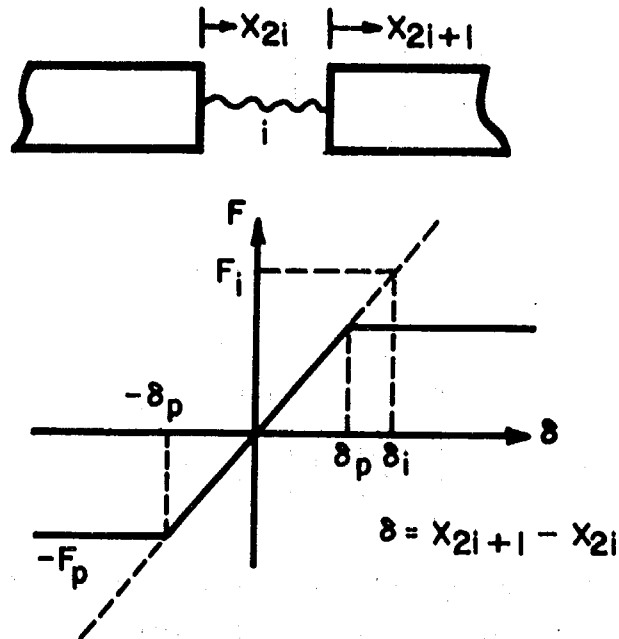


図-24 埋設管路の継手の弾塑性モデル

$$= \frac{1}{2} [x_{2i} \ x_{2i+1}] \begin{bmatrix} K_i & -K_i \\ -K_i & K_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (106)$$

となる。

一方、弾塑性の条件では継手の伸縮 \$\delta\$ は、図-24 の変曲点より大きく

$$\delta \geq \delta_p \quad \text{または} \quad F \geq F_p \dots\dots\dots (107)$$

となる。図の正の領域に着目して、継手ばねのひずみエネルギーは、

$$\begin{aligned} U_{el-pl}^{i+} &= \frac{1}{2} F_i \delta_i - \frac{1}{2} (F_i - F_p) (\delta_i - \delta_p) \\ &= K_i \delta_i \delta_p - \frac{1}{2} F_p \delta_p \dots\dots\dots (108) \end{aligned}$$

$$F_i = k_i \delta_i [-K_i \ K_i] \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (109)$$

$$\delta_i = [-1 \ 1] \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (110)$$

$$F_p = k_p \delta_p = \frac{1}{2} [K_i \ K_i] \begin{Bmatrix} \delta_p \\ \delta_p \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (111)$$

$$\delta_p = \frac{1}{2} [1 \ 1] \begin{Bmatrix} \delta_p \\ \delta_p \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (112)$$

となるので、式109および式112を式108に代入すると、継手のひずみエネルギーは

$$\begin{aligned} U_{el-pl}^{i+} &= \delta_p^t \cdot F_i - \frac{1}{2} \delta_p^t F_p \\ &= \frac{1}{2} [\delta_p \ \delta_p] \begin{bmatrix} -K_i & K_i \\ K_i & -K_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{8} [\delta_p \quad \delta_p] \begin{bmatrix} K_i & K_i \\ K_i & K_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_p \\ \delta_p \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (113)$$

となる。但し、式 112 は $\delta = x_{2i-1} - x_{2i} > 0$ の場合のみであるので、 $\delta = x_{2i-1} - x_{2i} \leq 0$ の場合については、

$$\delta_p = -\frac{1}{2} [1 \quad 1] \begin{Bmatrix} \delta_p \\ \delta_p \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (114)$$

$$U_{el-pl}^i = -\frac{1}{2} [\delta_p \quad \delta_p] \begin{bmatrix} -K_i & K_i \\ -K_i & K_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2i} \\ x_{2i+1} \end{Bmatrix} \\ -\frac{1}{8} [\delta_p \quad \delta_p] \begin{bmatrix} K_i & K_i \\ K_i & K_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_p \\ \delta_p \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (115)$$

となる。

地盤ばねのひずみエネルギー：周辺地盤の拘束力—変位の弾塑性モデルを図-25 に示す。図の 2 つの変曲点間の拘束力—変位の関係は線形であるが、地盤の拘束力は図で示されるようにばね定数 k_i と変曲点における y_p で表わされる。図に示す空間座標 z を用いれば、管軸方向の変位および抵抗力は次式で表わされる。

$$y(z) = \left[\left(1 - \frac{z}{L_i} \right) \frac{z}{L_i} \right] \begin{Bmatrix} x_{2i-1} & -x_{Gi-1} \\ x_{2i} & -x_{Gi} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (116)$$

$$R(z) = \left[\left(1 - \frac{z}{L_i} \right) k_i \cdot \frac{z}{L_i} k_i \right] \begin{Bmatrix} x_{2i-1} & -x_{Gi-1} \\ x_{2i} & -x_{Gi} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (117)$$

上式を用いると弾性および弾塑性の条件における管体に沿う地盤ばねのひずみエネルギーは次のように導かれる。

弾性の条件では周辺地盤の管軸方向の変位差 $y(z)$ が変曲点 y_p より小さい時の管体 i に対する弾性の地盤ばねは次式のように表わされる。

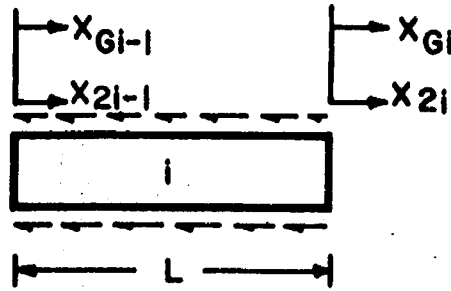
$$U_{soil, el}^i = \frac{1}{2} \int^L R^i(z) y(z) dz \dots\dots\dots (118)$$

ここで、式 118 に式 116 とおよび式 117 を代入すると式 118 は

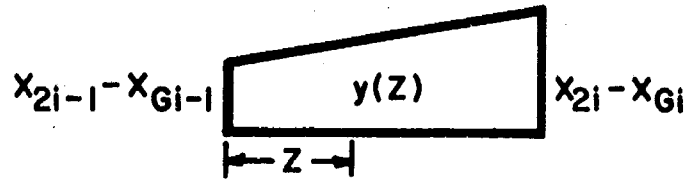
$$U_{soil, el}^i = \frac{1}{2} [x_{2i-1} \quad x_{2i} \mid x_{Gi-1} \quad x_{Gi}] \begin{bmatrix} \frac{k_i L_i}{3} & \frac{k_i L_i}{6} & -\frac{k_i L_i}{3} & -\frac{k_i L_i}{6} \\ \frac{k_i L_i}{6} & \frac{k_i L_i}{3} & -\frac{k_i L_i}{6} & -\frac{k_i L_i}{3} \\ \hline -\frac{k_i L_i}{3} & -\frac{k_i L_i}{6} & \frac{k_i L_i}{3} & \frac{k_i L_i}{6} \\ -\frac{k_i L_i}{6} & -\frac{k_i L_i}{3} & \frac{k_i L_i}{6} & \frac{k_i L_i}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2i-1} \\ x_{2i} \\ \hline x_{Gi-1} \\ x_{Gi} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (119)$$

となる。

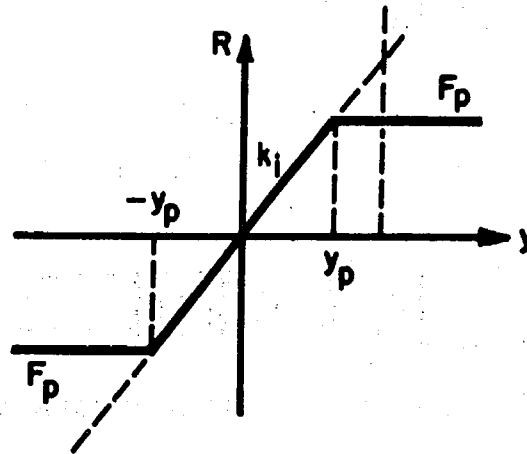
一方、弾塑性の条件では、管軸方向の管体と周辺地盤との変位差が変曲点を越えた時、地盤ばねには弾塑性ひずみエネルギーが蓄積されるので、そのひずみエネルギーは、図-26 に示す種々の地盤抵抗に



a) Pipe Segment and Coordinates



b) Relative Displacement Between Pipe and Ground



c) Soil Resistance - Displacement Diagram

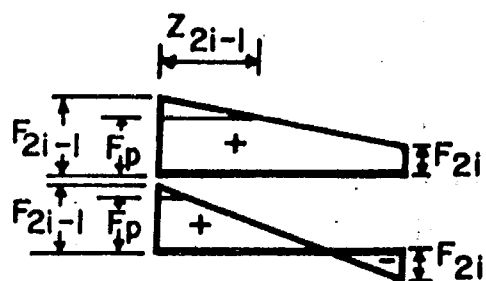
図-25 周辺地盤の拘束力-変位の弾塑性のモデル

よる条件に対して次のように求まる。

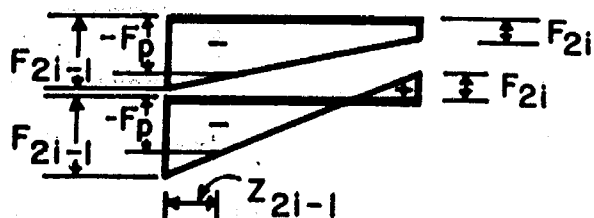
a) 管体の初端部において、地盤抵抗が正の変曲点 y_p を越えしかも管体の終端部が弾性を保っている場合。

$$z_{2i-1} = \frac{F_{2i-1} - F_p}{F_{2i-1} - F_{2i}} L_i \quad \dots\dots\dots (120)$$

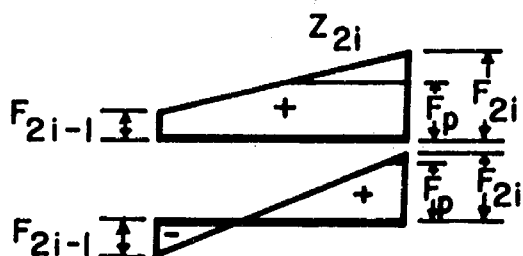
$$\begin{aligned} U_{\text{soil, el-pl}}^{(a)} &= \frac{1}{2} \int_0^{L_i} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2i-1}} [R(z) - F_p]^t [y(z) - y_p] dz \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{L_i} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2i-1}} R^t(z) y(z) dz + \int_0^{z_{2i-1}} F_p^t y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2i-1}} F_p^t y_p dz \\ &\quad (F_{2i-1} > F_p, -F_p < F_{2i} < F_p) \quad \dots\dots\dots (121) \end{aligned}$$



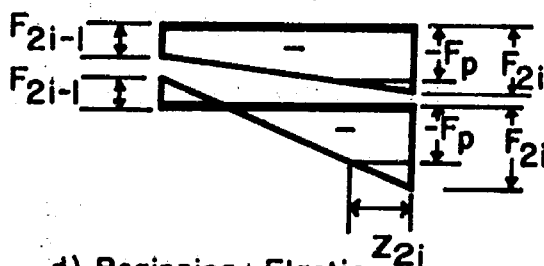
a) Beginning: Positive Plastic
End: Elastic



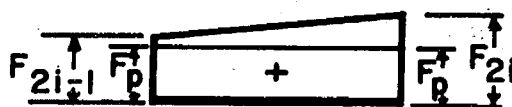
b) Beginning: Negative Plastic
End: Elastic



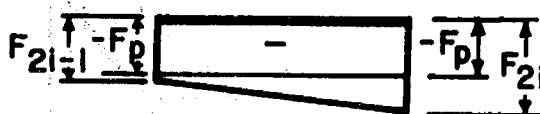
c) Beginning: Elastic
End: Positive Plastic



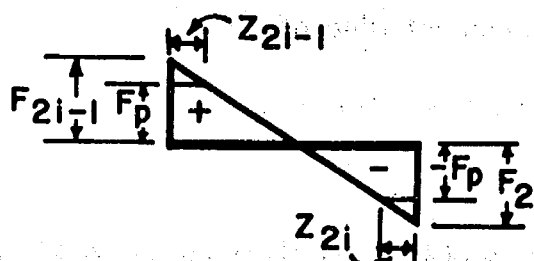
d) Beginning: Elastic
End: Negative Plastic



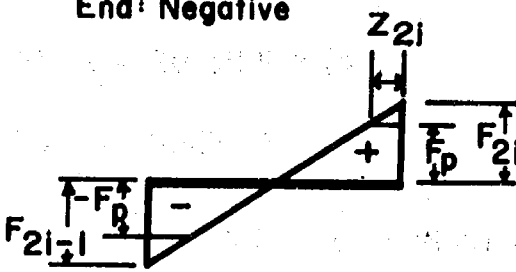
e) Beginning: Positive Plastic
End: Positive Plastic



f) Beginning: Negative Plastic
End: Negative



g) Beginning: Positive Plastic
End: Negative Plastic



h) Beginning: Negative Plastic
End: Positive Plastic

図-26 埋設管路の管体の地盤抵抗のモデル化

b) 管体の初端部において、地盤抵抗が負の変曲点 $-y_p$ を越えしかも管体の終端部で弾性を保っている場合。

$$U_{\text{soil, el-pl}}^{(b)} = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{21-1}} R^t(z) y(z) dz \\ - \int_0^{z_{21-1}} F_p^t y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{21-1}} F_p^t y_p dz \quad \dots\dots\dots (122) \\ (F_{21-1} < -F_p, -F_p < F_{21} < F_p)$$

c) 管体の終端部において、地盤抵抗が正の変曲点 y_p を越えしかも管体の初端部で弾性を保っている場合。

$$z_{21} = \frac{F_{21} - F_p}{F_{21} - F_{21-1}} L_1 \quad \dots\dots\dots (123)$$

$$U_{\text{soil, el-pl}}^{(c)} = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_{L_1-z_{21}}^{L_1} [R(z) - F_p]^t \\ [y(z) - y_p] dz = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_{L_1-z_{21}}^{L_1} R^t(z) y(z) \\ dz + \int_{L_1-z_{21}}^{L_1} F_p^t y(z) dz - \frac{1}{2} \int_{L_1-z_{21}}^{L_1} F_p^t y_p dz \quad \dots\dots\dots (124)$$

または

$$U_{\text{soil, el-pl}}^{(c)} = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{21}} R^t(\bar{z}) y(\bar{z}) d\bar{z} + \\ \int_1^{z_{21}} F_p^t y(\bar{z}) d\bar{z} - \frac{1}{2} \int_{L_1-z_{21}}^{L_1} F_p^t y_p dz \quad \dots\dots\dots (127)$$

$$y(\bar{z}) = \left[\frac{\bar{z}}{L_1} \left(1 - \frac{\bar{z}}{L_1} \right) \right] \left\{ \begin{matrix} x_{21-1} & -x_{G1-1} \\ x_{21} & -x_{G1} \end{matrix} \right\} \quad \dots\dots\dots (125)$$

$$R(\bar{z}) = \left[\frac{\bar{z}}{L_1} k_1 \left(1 - \frac{\bar{z}}{L_1} \right) k_1 \right] \left\{ \begin{matrix} x_{21-1} & -x_{G1-1} \\ x_{21} & -x_{21} \end{matrix} \right\} \quad \dots\dots\dots (126) \\ (-F_p < F_{21-1} < F_p, F_{21} > F_p)$$

d) 管体の終端部において、地盤抵抗が負の変曲点を越えしかも管体の初端部で弾性を保っている場合。

$$U_{\text{soil, el-pl}}^{(d)} = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{21}} R^t(\bar{z}) y(\bar{z}) d\bar{z} \\ - \int_0^{z_{21}} F_p^t y(\bar{z}) d\bar{z} - \frac{1}{2} \int_{L_1-z_{21}}^{L_1} F_p^t y_p dz \quad \dots\dots\dots (128) \\ (-F_p < F_{21-1} < F_p, F_{21} < -F_p)$$

e) 管体の初端部および終端部において、地盤抵抗が正の変曲点 y_p を越えた場合。

$$U_{\text{soil, el-pl}}^{(e)} = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{L_1} [R(z) - F_p]$$

$$[y(z) - y_p] dz = \int_0^{L_1} F_p^t y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{L_1} F_p^t y_p dz \quad \dots\dots\dots (129)$$

$$(F_{2l-1} > F_p, F_{2l} > F_p)$$

f) 管体の初端部および終端部において、地盤抵抗が負の場合。

$$U_{soil, el-pl}^{(f)} = - \int_0^{L_1} F_p^t y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{L_1} F_p^t y_p dz \quad \dots\dots\dots (130)$$

$$(F_{2l-1} > F_p, F_{2l} < -F_p)$$

g) 管体の初端部において、地盤抵抗が正の変曲点 y_p を越えしかも終端部において地盤抵抗が負の変曲点 $-y_p$ を越える場合。

$$z_{2l-1} = \frac{F_{2l-1} - F_p}{F_{2l-1} - F_{2l}} L_1 \quad \dots\dots\dots (131)$$

$$z_{2l} = \frac{F_{2l} - F_p}{F_{2l} - F_{2l-1}} L_1 \quad \dots\dots\dots (132)$$

$$\begin{aligned} U_{soil, el-pl}^{(g)} &= \frac{1}{2} \int_0^{L_1} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l-1}} [R(z) - F_p]^t \\ &\quad [y(z) - y_p] dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l}} [R(\bar{z}) + F_p]^t [y(\bar{z}) + y_p] d\bar{z} \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{L_1} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l-1}} R^t(z) y(z) dz \\ &\quad + \int_0^{z_{2l-1}} F_p^t y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l-1}} F_p^t y_p dz \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l}} R^t(\bar{z}) y(\bar{z}) d\bar{z} - \int_0^{z_{2l}} F_p^t y(\bar{z}) d\bar{z} \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l}} F_p^t y_p d\bar{z} \quad \dots\dots\dots (133) \\ &\quad (F_{2l-1} > F_p, F_{2l} < -F_p) \end{aligned}$$

h) 管体の初端部において、地盤抵抗が負の変曲点 $-y_p$ を越えしかも管体の終端部において正の変曲点 y_p を越える場合。

$$\begin{aligned} U_{soil, el-pl}^{(h)} &= \frac{1}{2} \int_0^{L_1} R^t(z) y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l-1}} R^t(z) y(z) dz \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l-1}} F_p^t y(z) dz - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l-1}} F_p^t y_p dz \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l}} R^t(\bar{z}) y(\bar{z}) d\bar{z} + \int_0^{z_{2l}} F_p^t y_p(\bar{z}) d\bar{z} \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_0^{z_{2l}} F_p^t y_p dz \quad \dots\dots\dots (134) \\ &\quad (F_{2l-1} < F_p, F_{2l} > F_p) \end{aligned}$$

Ⅲ.3.2 試験結果

次の条件 1) 管体数：20， 2) 継手数：21， 3) 内径：17.5cm， 4) 外径：18.0cm， 5) 断面積：13.94cm²， 6) 長さ：240m， 7) ヤング率：300 × 10⁸kg/cm²， 8) 継手剛性（継手ばね定数）：10³kg/cm， 9) 継手の変位差の最大値：端部継手1， その他継手10， 10) 地盤ばね剛性：565kg/cm²， 11) 地盤速度の最大値：39.6 × 10²cm/s， 12) 弾性領域における地盤変位の最大値：0.30cm， 13) エルセントロ地震波：2.30秒から13.00秒， 14) 時間刻み：0.10秒 で試算すると次のようになる。

表-1に，各管体における周辺地盤との変位差（初端部側），表-2に，各管体における地盤との変位差（終端部側）をそれぞれ示す。また表-3に管体のひずみの最大値，表-4に継手の変位差の最大値をそれぞれ示す。これらの表より，各管体と周辺地盤との変位差は塑性域にあり，各管体のひずみと各継手伸縮はそれぞれ10⁻⁵， 10⁻¹cmのオーダーであることが判る。

表-1 埋設管路と地盤の変位差
（初端部側正・負方向）

管 体	相対変位（初端部側正方向）	時 刻	相対変位（初端部側負方向）	時 刻
	× 10 ¹ cm	秒	× 10 ¹ cm	秒
1	0.329 *	11.8	- 0.429 *	2.3
2	0.301	11.8	- 0.400	2.5
3	0.326	11.9	- 0.425	2.4
4	0.297	12.0	- 0.411	2.5
5	0.322	12.0	- 0.421	2.5
6	0.327	12.1	- 0.425	2.6
7	0.297	12.1	- 0.398	2.8
8	0.326	12.2	- 0.425	2.7
9	0.302	12.3	- 0.413	2.8
10	0.319	12.3	- 0.417	2.8
11	0.327	12.4	- 0.425	2.9
12	0.293	12.4	- 0.398	3.0
13	0.326	12.5	- 0.425	3.0
14	0.307	12.6	- 0.416	3.1
15	0.315	12.6	- 0.414	3.1
16	0.327	12.7	- 0.425	3.2
17	0.290	12.7	- 0.401	3.3
18	0.326	12.8	- 0.425	3.3
19	0.312	12.9	- 0.418	3.4
20	0.309	12.9	- 0.407	3.4

注) * 最大値

表-2 埋設管路と地盤の変位差
(終端部側正・負方向)

管 体	相対変位 (初端部正方向) $\times 10^1 \text{ cm}$	時 刻 秒	相対変位 (終端部負方向) $\times 10^1 \text{ cm}$	時 刻 秒
1	0.421	2.3	- 0.324	11.8
2	0.401	2.3	- 0.302	11.8
3	0.425	2.4	- 0.326 *	11.9
4	0.410	2.5	- 0.295	12.0
5	0.422	2.5	- 0.323	12.0
6	0.425	2.6	- 0.326 *	12.1
7	0.410	2.8	- 0.298	12.1
8	0.425	2.7	- 0.326 *	12.2
9	0.412	2.8	- 0.300	12.3
10	0.419	2.8	- 0.319	12.3
11	0.425	2.9	- 0.326 *	12.4
12	0.410	3.0	- 0.294	12.4
13	0.425	3.0	- 0.326 *	12.5
14	0.415	3.1	- 0.306	12.6
15	0.415	3.1	- 0.316	12.6
16	0.425	3.2	- 0.326 *	12.7
17	0.400	3.3	- 0.291	12.7
18	0.426 *	3.3	- 0.326 *	12.8
19	0.417	3.4	- 0.311	12.9
20	0.415	3.4	- 0.314	12.9

注) * 最大値

表-3 埋設管路のひずみの最大値

管 体	管体最大ひずみ (引張) $\times 10^{-4}$	時 刻 秒	管体最大ひずみ (圧縮) $\times 10^{-4}$	時 刻 秒
1	0.121	2.3	- 0.103	11.8
2	0.120	2.5	- 0.098	11.8
3	0.123 *	2.4	- 0.105 *	11.9
4	0.122	2.5	- 0.097	12.0
5	0.123 *	2.5	- 0.104	12.0
6	0.123 *	2.6	- 0.105 *	12.1
7	0.120	2.8	- 0.097	12.1
8	0.123 *	2.7	- 0.105 *	12.2
9	0.122	2.8	- 0.098	12.3
10	0.123 *	2.8	- 0.103	12.3
11	0.123 *	2.9	- 0.105 *	12.4
12	0.120	3.0	- 0.096	12.4
13	0.123 *	3.0	- 0.105 *	12.5
14	0.122	3.1	- 0.100	12.6
15	0.122	3.1	- 0.102	12.6
16	0.123 *	3.2	- 0.105 *	12.7
17	0.120	3.3	- 0.095	12.7
18	0.123 *	3.3	- 0.105 *	12.8
19	0.123 *	3.4	- 0.101	12.9
20	0.119	3.4	- 0.100	12.9

注) * 最大値

表-4 埋設管路の継手の変位差の最大値

管 体	継手相対変位 (引張側) $\times 10^1 \text{ cm}$	時 刻 秒	継手相対変位 (圧縮側) $\times 10^1 \text{ cm}$	時 刻 秒
1	0.429	2.3	-0.329	11.8
2	0.820	2.3	-0.624 *	11.8
3	0.817	2.4	-0.586	11.9
4	0.200	2.4	-0.601	11.9
5	0.833 *	2.5	-0.618	12.0
6	0.803	2.6	-0.576	12.0
7	0.821	2.6	-0.623	12.1
8	0.820	2.7	-0.591	12.2
9	0.800	2.9	-0.598	12.2
10	0.830	2.8	-0.619	12.3
11	0.805	2.9	-0.573	12.3
12	0.817	2.9	-0.620	12.4
13	0.822	3.0	-0.596	12.5
14	0.796	3.2	-0.594	12.5
15	0.829	3.1	-0.620	12.6
16	0.808	3.2	-0.570	12.6
17	0.814	3.2	-0.616	12.7
18	0.825	3.3	-0.601	12.8
19	0.794	3.5	-0.591	12.8
20	0.824	3.4	-0.620	12.9
21	0.415	3.4	-0.314	12.9

注) * 最大値

Ⅲ.4 ま と め

準静的解析法では周辺地盤の変位の時刻歴波形が入力できるとともに、地盤のひずみは埋設管路にわたって一様とせず、時間とともに変化するとした方法について述べた。この解析法は、ひずみエネルギー式に基づいた弾性床上のはりモデルによる方法（準静的弾性解析法）とひずみエネルギー式に基づいた弾塑性床上のはりモデルによる方法（準静的弾塑性解析法）とから成る。ひずみエネルギー式に基づいた弾性床上のはりモデルによる方法では、管体、継手、管体と周辺地盤に貯えられるひずみエネルギーの和を不変とし、各管体の慣性力を省略し、ひずみエネルギーを微分して得られるつりあいの条件によって得た。

弾塑性床上のはりモデルによる方法では、管体の一部または全部にわたってすべりを考え、管体、継手、周辺地盤に貯えられるひずみエネルギーの和を不変とし、各管体の慣性力を省略し、ひずみエネルギーを微分して得られるつりあいの条件によって得た。今後とも、この解析法を吟味・検討し、種々のケースについて解析をすることが望まれる。

第IV章 総括と結論

本報告書は地震時地盤変位入力を考慮した埋設直管路の地震応答解析法をとりまとめたものである。
ここで述べた方法は

- (1) 上限解析法
- (2) 静的解析法
- (3) 準静的解析法

である。以下に、各方法の骨子と特徴について述べる。

(1)は、単純であるが安全側の結果を得、その境界値は(2)、(3)による応答値の正規化のための基準になり得る。

(2)は、(1)より高度な方法であり、この方法では、埋設管路の特性はもちろん地盤の特性をも考慮に入れた方法である。また、現実には記録された地震時地盤変位波形を入力することにより、地盤の変位の変化をも考慮できる。解析のための計算式の展開において、各時刻におけるつりあいは本質的には静的であるが、地盤変位が時間とともに変化する擬静的解析をとっており、しかも、ひずみエネルギー式に基づいた弾塑性床土のはりモデルによる方法では周辺地盤と埋設管路との間にすべりを考えておりより現実的な方法である。

以上、3種類の地震応答解析法の骨子と特徴について述べた。

以下、試算結果よりみた埋設管路の地震応答について総括する。

- (1) 埋設管路の地震応答は地盤の速度、加速度に支配されずに地盤の変位に支配される。
- (2) 埋設管路の管体のひずみと継手の伸縮は受ける地盤変位に対して一括して論ぜられる。すなわち埋設管路の管体のひずみの最大値は埋設管路が一体構造の時に生じ、埋設管路の継手の伸縮の最大値は管体の剛性が無限に大きい時に生じる。
- (3) 周辺地盤の軟弱な地盤条件の箇所で埋設管路の応答が大きくなるというのは、軟弱な地盤条件の箇所では、埋設管路を伝播する波動の速度が遅くなるために、埋設管路の初端部より終端部に沿って位相差が生じるからである。
- (4) 埋設管路と周辺地盤との間にすべりが生じない場合、埋設管路の地震応答は一般により大きくなると考えられる。しかし、すべりが生じると管体のひずみと継手の伸縮は一般にともに小さくなると考えられる。

最後に、各章で述べたまとめを記して本報告書の結論とする。

- (1) 上限解析法では、埋設管路のひずみが地盤のひずみに等しいとする方法と埋設管路の慣性力を省略できるぐらいに小さいとする方法について述べた。

埋設管路のひずみが地盤のひずみに等しいとする方法では、埋設管路のひずみは周辺地盤のひずみに、また、埋設管路の屈曲も周辺地盤の変形に等しいとした。この方法では、埋設管路のひずみの最大値および埋設管路の屈曲の最大値は式1～4で単一に求まるので、以降に述べる正規化のための基準としてよい。

埋設管路の慣性力を省略できるぐらいに小さいとする方法では、埋設管路の加速度、速度の各項は省略できるぐらいに小さいとして試算した。

試算の結果、埋設管路のひずみおよび継手の伸縮には境界値があり、この境界値は上記(1)で述べた

方法による値に漸近することが判った。

(2) 静的解析法では、埋設管路の管体、継手および周辺地盤の剛性を考慮し、周辺地路のひずみが埋設管路に渡って均一であるとした方法について述べた。この解析法は、弾性床上のはりモデルによる方法（静的弾性解析法）と弾塑性床上のはりモデルによる方法（静的弾塑性解析法）から成る。弾性床上によるはりモデルによる方法では管体のひずみ、継手の伸縮は双曲線関数を含む比較的簡易な式で表わし管体、継手および周辺地盤はそれぞれ弾性体の性質を兼ね備えているとした。解析のための計算式は、それほどむずかしくはないが、地盤特性、継手特性を考慮できる。弾塑性床上のはりモデルによる方法では管体と周辺地盤の間にすべりを仮定し、すべりが起こる均一な地盤ひずみ ϵ_m を設定し、力のつりあいにより弾性域の長さ l_1 を求め管体のひずみ、継手の伸縮を l_1 に関する比較的簡易な式で表わした。この方法ではすべり力の仮定が重要であり今後、この分野における研究が望まれる。

(3) 準静的解析法では周辺地盤の変位の時刻歴波形が入力できるとともに、地盤のひずみは埋設管路にわたって一様とせず時間とともに変化するとした方法について述べた。この解析法は、ひずみエネルギー式に基づいた弾性床上のはりモデルによる方法（準静的弾性解析法）とひずみエネルギー式に基づいた弾塑性床上のはりモデルによる方法（準静的弾塑性解析法）とから成る。ひずみエネルギー式に基づいた弾性床上のはりモデルによる方法では管体、継手、管体と周辺地盤に貯えられるひずみエネルギーの和を不変とし各管体の慣性力を省略しひずみエネルギーを微分して得られるつりあいの条件によって得た。

弾塑性床上のはりモデルによる方法では、管体の一部または全部にわたってすべりを考え、管体、継手、周辺地盤に貯えられるひずみエネルギーの和を不変とし、各管体の慣性力を省略し、ひずみエネルギーを微分して得られるつりあいの条件によって得た。今後とも、この解析方法を吟味・検討し種々のケースについて解析をすることが望まれる。

謝 辞

本研究を実施するにあたって、前地震防災部耐震研究室長上田治氏ならびに地震防災部耐震研究室長岩崎敏男氏、同研究室干場良信技官の御協力を頂いた。ここに記して厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) Katayama, T., Kubo, K. and Sato, N., "Earthquake Damage to Water and Gas Distribution Systems", Proc. of U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Ann Arbor, Mich., EERI, 1975, pp. 396-405.
- 2) Kachadoorian, R., "Earthquake : Correlation Between Pipeline Damage and Geologic Environment", Journal of AWWA, March 1976, pp. 165-167.
- 3) King, P. V. and Betz, J. M., "Earthquake Damage to a Sewer System", Journal of Water Pollution Control Federation (WPCF) , May 1972, pp. 859-867.
- 4) Kubo, K., "Behavior of Underground Waterpipes During an Earthquake", Proc. of 5th World Conference on Earthquake Engineering, IAEE, Rome, 1973, pp. 569-578.
- 5) Okamoto, S. and Tamura, C., "Behavior of Subaqueous Tunnel During Earthquakes", Int. Jour. of Earthquake Engr. and Struct. Dynamics, Vol. 1, No.3, Jan.-Mar. 1973, pp. 253-266.
- 6) 桜井彰雄他, "松代地震観測に基づく地盤振動特性の検討" 土木学会論文報告集 186 号, 昭和 46 年
- 7) Kubo, K., Katayama, T. and Ohashi, A., "Present State of Lifeline Earthquake Engineering in Japan", Proceedings, Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, Aug. 1977, pp. 118-133.
- 8) Wang, L. R. L. and O'Rourke, M. J., "State of the Art of Buried Lifeline Earthquake Engineering", Proceedings of ASCE Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Conference, Los Angeles, CA, Aug. 1977, pp. 252-266.
- 9) Wang, L. R. L. and O'Rourke, M. J., "Overview of Buried Pipelines under Seismic Loading", ASCE Journal of Technical Councils, Nov. 1978, pp. 121-130.
- 10) Pikul, R. R., "Buried Pipeline Analysis/Design for Earthquakes", D. Eng. Thesis, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, August 1979.
- 11) Wang, L. R. L., "Some Aspects of Seismic Resistant Design of Buried Pipelines", Lifeline Earthquake Engineering, ASME Specialty Publication PVP-34, June 1979, pp. 117-131.
- 12) Conte, S. D. and de Boor. C., "Elementary Numerical Analysis", McGraw-Hill, Inc., 1972.
- 13) Cheng, K. M., "Response Analysis of Buried Pipelines", Master of Engineering Project, Civil Engineering Dept., Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N. Y., May 1978.

- 14) Wang, L. R. L. and Cheng, K. M., "Seismic Response Behavior of Buried Pipelines", Journ. of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol. 101, No. 1, Feb. 1979, pp. 21-30.
- 15) 堀内孝英他, "埋設管の震害の影響と要因分析"第14回土質工学研究発表会, 昭和54年.
- 16) Kratky, R. G. and Salvadori, M. G., "Strength and Dynamic Characteristics of Gasket-Jointed Concrete Water Pipelines", Grant Report No.5, Weidlinger Associates, Menlo Park, California, June 1978.
- 17) Shah, H. H. and Chu, S. L., "Seismic Analysis of Underground Structural Elements", J. Power Division, ASCE, Vol. 100, No. P-1, July 1974, pp. 53-62.
- 18) Goodling, E. C., "Flexibility Analysis of Buried Pipe", Preprint of ASME/CSME Pressure Vessels Piping Conference, Montreal, Canada, April 1976.
- 19) Crandall, S. J., "Engineering Analysis", McGraw-Hill Book Co., 1956.
- 20) Pipes, L. A., "Matrix Methods for Engineering", Prentice-Hall, 1963.
- 21) Serna, R. A., "Elasto-Plastic Quasi-Static Analysis of Buried Pipelines", Mater of Engineering Project Report, Dept. of Civil Engineering Rensselaer Polytechnic Institute, in preparation.
- 22) DeSalvo, G. J. and Swanson, J. A., "ANSYS-Engineering System User's Manual", Swanson Analysis System Inc., Huston, PA, July 1979.
- 23) Fok, E. S. L., "Quasi-Static Seismic Computdr Analysis of Buried Pipelines", Master of Eng. Project Report, Dept. of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Jan. 1979.
- 24) Newmark, N. M., "Problems in Wave Propagation in Soil and Rock", Proc. Int. Symposium on Wave Propagation And Dynamic Properties of Earthquake Materials, Albuquerque, N. M., Aug. 1967.
- 25) Wang, L. R. L., "Quasi-Static Analysis Formulation Straight Buried Piping Systems", Technical Memorandum (SVBDUPS Project) No. 3, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, July 1978.
- 26) Wang, L. R. L., and Fok, E. S. L., "Quasi-static Seismic Analysis of Buried Pipelines" Proceedings of 7th Canadian Congress of Applied Mechanics, Sherbrook, Canada, May 28-June 1, 1979, Vol. 1, pp. 461-462

- 27) Wang, L. R. L., "Parametric Seismic Response of Buried Pipelines", Preprint of ASME Pressure Vessel and Piping Division Annual Conference, San Francisco, CA, August 1980. (Accepted for presentation)
- 28) 西尾宣明他, "埋設管の地震応力に関する研究(第1報)" 技研報告第22号抜刷, 東京瓦斯株式会社技術研究所, 昭和52年.
- 29) 西尾宣明他, "埋設管の地震応力に関する研究(第2報)" 技研報告第24号抜刷, 東京瓦斯株式会社技術研究所, 昭和54年.
- 30) 栗林栄一, "導管の耐震設計"配管, 昭和49年.
- 31) 大久保忠良, "石油パイプラインの耐震技術基準", 道路, 昭和48年.
- 32) 建設省土木研究所, "新耐震設計法(案)" 建設省土木研究所, 昭和52年.

地盤変位入力を考慮した埋設直管路
の地震応答解析法

I S S N 0386—5878
土木研究所資料 第1785号
マイクロフィルム 第 号
昭和57年2月 (1982)

L. Ru-Liang Wang, 栗林栄一, 羽立隆幸

キーワード：埋設直管路, 地盤変位入力, 地震応答解析法

要 旨

本報告書は, 地中埋設直管路の地震応答解析法をとりまとめたもので上限解析法, 静的解析法, 準静的解析法などから構成されている。

○

郵便はがき

40円切手
をはって
下さい。

3 0 5 — □ □

耐震研究室 御中

建設省土木研究所

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

○

配布先住所

○

土木研究所資料第1785号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

⑩

○