
埋設ライフラインパイプの地震時ひずみ

Earthquake-induced Structural in Underground Lifeline Pipes

小池 武(Takeshi Koike)

要旨：

埋設パイプラインの耐震設計法を確立するために地震動によって生起された地盤の最大ひずみから埋設パイプに発生するひずみを推定する一つの方法を提案した。本研究の目的は(1) 直管, 90° ベント管, T 字管に発生するひずみを地盤ひずみから求めるための簡便な変換係数を誘導する, (2) 典型的な埋設パイプラインモデルに対して, それぞれの変換係数を具体的に求めることにより, 耐震解析に必要な判断資料を提供する, ことにある。

Synopsis :

The risk analysis methodology developed for underground pipeline systems makes use of a conversion factor β in order to estimate the structural strain in the underground pipelines induced by the propagating seismic wave. The purposes of this study are (a) to derive a practical procedure to estimate the conversion factor that can be used for straight and bent pipes and tee-junction, and (b) to determine conversion factors for a number of typical cases in order to provide the analyst with the numerical insight as to its values consistent with the physical conditions to which the pipeline system is subjected.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

埋設ライフラインパイプの地震時ひずみ

Earthquake-induced Structural Strains in Underground Lifeline Pipes

小 池 武*

Takeshi Koike

Synopsis:

The risk analysis methodology developed for underground pipeline systems makes use of a conversion factor β in order to estimate the structural strain in the underground pipelines induced by the propagating seismic wave.

The purposes of this study are (a) to derive a practical procedure to estimate the conversion factor that can be used for straight and bent pipes and tee-junction, and (b) to determine conversion factors for a number of typical cases in order to provide the analyst with the numerical insight as to its values consistent with the physical conditions to which the pipeline system is subjected.

1. まえがき

ライフライン¹⁻³⁾というのは、都市におけるエネルギー関連ネットワーク（電力、ガス、オイル）、上下水道パイプライン、交通運輸関連ネットワーク（高速道路、鉄道、航空路、港湾）そして通信ネットワーク（電信、電話、テレビ、ラジオ、その他）などの各種のネットワークシステムの総称である。この言葉は、1971年のSAN FERNANDO地震におけるライフライン関連施設の地震被害に対する関心がたかまって以来、地震工学者の間で盛んに使われだしたいきさつがある。

さて、埋設ライフラインパイプの耐震性を議論する場合に検討しなければならない基本事項には、

- (1) 埋設地盤の地震時挙動
- (2) 埋設パイプの地震時挙動
- (3) ライフラインネットワークシステムの物理的被害推定（例 パイプの破断、漏洩）
- (4) ライフラインネットワークシステムの機能的被害推定（例 末端出口での圧力、流量不足）
- (5) 耐震設計法の改善が考えられる。

本論文は、主に(2)の問題について一つの簡便な計算法を提案するものである。その方法は、地盤内を伝播する地震波によって発生する地盤内最大ひずみが与えられた時、ここで展開する変換係数（conversion factor） β を乗ずることによってパイプの地震時ひずみを推定しようとする手法である。

従来の研究によると、埋設された直線パイプに発生するひずみは、曲げひずみよりも軸ひずみが卓越し、その大きさは、周辺地盤との間にすべりが無い限り、地盤ひずみとほぼ等しい大きさで、慣性力の影響も無視しうる程度であると報告⁴⁾されてきた。たしかに、地震の規模が比較的小さく、その地盤ひずみが 10^{-4} 以下程度であって、周辺地盤とパイプとの間に相対変形がない場合にはこの推論は妥当であろう。しかし、より大規模な地震により、地盤内に $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 程度の地盤ひずみが発生して、周辺地盤とパイプの間にすべりが発生するような場合には、累積された地盤ひずみは結局曲管部やT字部に集中することになり、それらの部分に大きなひずみ集中が発生するものと推測される。

本論文では、すべりはせん断応力 τ_0 が限界せん

* エンジニアリング事業部パイプライン・海洋技術部主査(掛長待遇)
〔昭和54年12月27日原稿受付〕

断応力 $\tau_{cr} = c + \sigma \tan \phi$ を越えた時発生するものと仮定する。ここで、 c は粘着応力、 σ はパイプ表面に作用する垂直応力そして ϕ はパイプと周辺土との間の摩擦角である。

以下の各節において、直管に発生するひずみをすべりがある場合とない場合に対して求め、その後、曲管、T字管のひずみについて検討することにする。

2. 変換係数 β の定義

パイプに発生する最大軸ひずみ ϵ_S は、次に定義する変換係数 β を使って最大地盤ひずみ ϵ_G から得られる。

$$\epsilon_S = \beta \epsilon_G \quad \dots\dots\dots (1)$$

この係数の誘導にあたっては、次の五つの条件が成立するものと仮定する。

- (1) 地盤ひずみ $\epsilon_G(x, z, t)$ は、パイプが含まれない地盤のひずみ (free field strain) であり、パイプ要素の軸方向 (z 軸) に波長 L で伝播する正弦波で表現できる。ここで、波長 L は対象地盤に入射する表面波の波数スペクトルの卓越波数の逆数として求めたものである。
- (2) パイプ表面に作用する力は、土とパイプの接触面における土のせん断応力によって伝達される (Fig. 1 参照)。
- (3) 周辺地盤内のせん断応力 τ_G とせん断ひずみ γ_G とは、Fig. 2 に示す関係をもっている。
- (4) すべりは、パイプ近傍の土のせん断ひずみが限界せん断ひずみ γ_{cr} (限界せん断応力 τ_{cr} を土のせん断弾性係数 G で除した値) を越えた時に発生する。

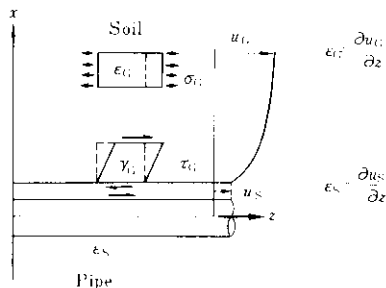


Fig. 1 Pipe and soil stresses and strains

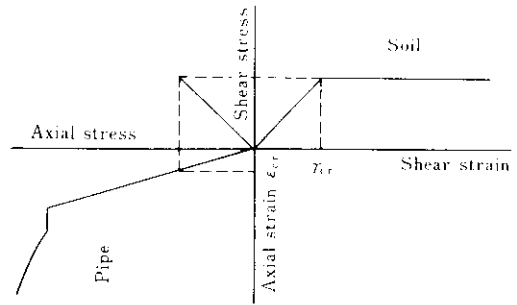


Fig. 2 Schematic stress-strain relationship for soil and pipe

- (5) パイプは、単位面積あたり平均円周抵抗力 k (kgf/cm²) をもつ無限弾性地盤内に埋設されている。

3. すべりを無視した直管部の地震時ひずみ

3-1 周辺地盤のせん断応力

前述の仮定(1)より、パイプ周辺の地盤変位は正弦波関数を用いて次式で与えられる。

$$u_G(x, z, t) = U(x) \epsilon_G \frac{L}{2\pi} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{L} z \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 L : 波長

ω : 地震波の円振動数

$U(x)$: パイプ軸に直交する x 軸方向の地盤変形係数であり次の性質をもつ。

$$\lim_{x \rightarrow \infty} U(x) = 1$$

この地盤変形係数は、周辺地盤とパイプとの剛性の差、土の強度特性、パイプ表面の物理的および環境条件によってその関数形が決定される。

パイプ周辺地盤のせん断ひずみは(2)式の u_G を x で微分することにより次式で与えられる。

$$\gamma_G(x, z, t) = \frac{\partial u_G}{\partial x} = \frac{\partial U(x)}{\partial x} \epsilon_G \frac{L}{2\pi} \times \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{L} z \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

したがって、 τ_G に対応するパイプ周辺地盤のせん断応力はせん断弾性定数 G を用いて次式で与えられる。

$$\tau_G(z, t) = G \gamma_G \left(\frac{D}{2}, z, t \right)$$

$$= G \gamma_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{L} z \right) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 D : パイプの外径

γ_0 : パイプ表面に作用する最大せん断ひずみで

次式で与えられる。

$$\gamma_0 = \left[\frac{\partial U(x)}{\partial x} \right]_{x=D/2} \cdot \epsilon_G \frac{L}{2\pi} \dots\dots(5)$$

3.2 運動方程式

今、Fig. 3 に示すパイプの断面についてその釣り合いを考える。この断面に作用する慣性力、内力および表面力に対して D'Alembert の原理を適用すると次式の関係を得る。

$$A \left(\sigma_s + \frac{\partial \sigma_s}{\partial z} dz \right) + \pi D \tau_G dz = A \sigma_s + \rho A dz \frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 d : パイプの板厚

σ_s : パイプの軸応力

A : パイプの断面積

ρ : パイプの質量

u_s : パイプの変位

である。

(6)式を、 $\sigma_s = E \partial u_s / \partial z$ に注意して整理すると次式を得る。ただし、 E はパイプの Young 率とする。

$$\rho \frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 u_s}{\partial z^2} = \frac{\tau_G}{d} \dots\dots\dots(7)$$

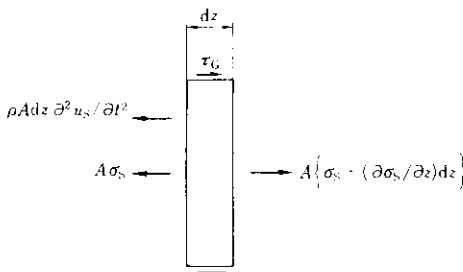


Fig.3 Free body diagram of a pipe segment

3.3 パイプのひずみ

式(2),(4),(7)から、パイプの変位 u_s もま

た正弦波関数で表されることがわかる。したがって、 u_s を求めるため未知数 B と正弦波関数の積として u_s を次式で与えることにする。

$$u_s(z, t) = B \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{L} z \right) \dots\dots\dots(8)$$

(8)式を(7)式に代入して整理すると結局、パイプの変位 u_s およびひずみ ϵ_s はそれぞれ次式で表現される。

$$u_s(z, t) = \hat{\beta}_0 \epsilon_G \frac{L}{2\pi} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{L} z \right) = \hat{\beta}_0 u_G(\omega, z, t) \dots\dots\dots(9)$$

$$\epsilon_s(z, t) = \hat{\beta}_0 \epsilon_G \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{L} z \right) \dots\dots(10)$$

ここで、

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\left(\frac{L}{2\pi} \right)^2 \frac{G}{Ed} \left[\frac{\partial U(x)}{\partial x} \right]_{x=D/2}}{1 - (\omega/\hat{\omega})^2} = \frac{\beta_0}{1 - (\omega/\hat{\omega})^2} \dots\dots\dots(11)$$

$$\hat{\omega} = \frac{2\pi}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots(12)$$

(11)式を使うと、パイプと周辺地盤間の最大相対変位 Δ が半波長ごとに次の形で得られる。

$$\Delta = u_G \left(\infty, \frac{L}{4}, \frac{\pi}{\omega} \right) - u_s \left(\frac{L}{4}, \frac{\pi}{\omega} \right) = (1 - \hat{\beta}_0) \epsilon_G \frac{L}{2\pi} \dots\dots\dots(13)$$

3.4 地盤変形係数

変換係数 β を具体的に求めるには、まず地盤変形係数 $U(x)$ の形を決定しなければならない。厳密に $U(x)$ を決定するには埋設パイプを含む半無限弾性体に対する境界値問題を解かねばならないが、簡便な β の計算法を求めるうえから上述の数学的厳密さを避け、パイプと地盤の接触面上でのせん断応力・変位の連続条件のみを用いると、 $U(x)$ が次のように求められる。

$$U(x) = 1 - \exp \left(- \frac{2\pi}{L} \zeta x \right) \dots\dots\dots(14)$$

ここで、

$$\zeta = \frac{2\pi}{L} \frac{Ed}{G} \dots\dots\dots(15)$$

(14),(15)式を(11)に代入すると、

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\exp\left(-\zeta \frac{2\pi}{L} \frac{D}{2}\right)}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \frac{AE}{K_G} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{\hat{\omega}}\right)^2} \quad (16)$$

ここで、 $K_G = 2\pi G$, $A = \pi Dd$, $\omega_0 = \sqrt{K_G/(\rho A)}$ である。(10)式で与えられるパイプひずみの最大値 $\epsilon_s = \hat{\beta}_0 \epsilon_G$ を(1)式に代入することにより、(16)式で与えられる $\hat{\beta}_0$ が直管におけるすべりが無い場合の変換係数であることがわかる。

3.5 $\hat{\beta}_0$ に関する数値計算例

Table 1に、A、B、C 3種類の地盤条件に対する変換係数 $\hat{\beta}_0$ の(16)式による計算例が示されている。ここで、地盤種別 A は軟弱地盤（せん断波速度 $C=150\text{m/s}$ ）、C は岩質地盤（ $C=500\text{m/s}$ ）、B はその中間の地盤（ $C=300\text{m/s}$ ）と仮定している。地震波長は $L=400\text{m}$ と 150m の両方の場合を検討した。計算結果によれば、変換係数 $\hat{\beta}_0$ はほぼ 1 に近く、パイプは地盤の動きに追随していることがわかる。

Table 1 Numerical Example of conversion factor
 $L=400\text{m}$

Parameters		Geological site conditions		
		A	B	C
C	m/s	150	300	500
G	kgf/cm ²	344.4	1 377.6	3 826.5
K_G	kgf/cm ²	2 164	8 656	24 043
ζ	-	1.15	0.287	0.103
T	s	2.67	1.33	0.8
ω	rad/s	2.356	4.712	7.85
ω_0	rad/s	844.8	1 689.7	2 816.0
$\hat{\omega}$	rad/s	80.4	80.4	80.4
$(\omega/\omega_0)^2$	-	0.08×10^{-4}	0.08×10^{-4}	0.08×10^{-4}
$(\omega/\hat{\omega})^2$	-	8.65×10^{-4}	34.35×10^{-4}	95.33×10^{-4}
$(2\pi/L)^2 \cdot AE/K_G$	-	90.63×10^{-4}	22.66×10^{-4}	8.16×10^{-4}
β_0	-	0.991	0.999	0.999
$\hat{\beta}_0$	-	0.992	1.001	1.009

$L=150\text{m}$

Parameters		Geological site conditions		
		A	B	C
C	m/s	150	300	500
G	kgf/cm ²	344.4	1 377.6	3 826.5
K_G	kgf/cm ²	2 164	8 656	24 043
ζ	-	3.07	0.765	0.275
T	s	1.0	0.5	0.3
ω	rad/s	6.28	12.57	20.95
ω_0	rad/s	844.8	1 689.7	2 816.0
$\hat{\omega}$	rad/s	214.5	214.5	214.5
$(\omega/\omega_0)^2$	-	0.55×10^{-4}	0.55×10^{-4}	0.55×10^{-4}
$(\omega/\hat{\omega})^2$	-	8.57×10^{-4}	34.34×10^{-4}	95.39×10^{-4}
$(2\pi/L)^2 \cdot AE/K_G$	-	644.48×10^{-4}	161.14×10^{-4}	58.03×10^{-4}
β_0	-	0.939	0.984	0.994
$\hat{\beta}_0$	-	0.940	0.988	1.004

4. すべりを考慮した直管部の地震時ひずみ

まえがきで述べたように、埋設パイプと周辺地盤の間のすべりは、地震規模が十分大きく、パイプと土との間のせん断応力 τ_G が、限界せん断応力 $\tau_{cr} = c + \sigma \tan \phi$ を越える時に発生すると仮定した。

今、(5)式に与えたパイプ周辺地盤の最大せん断ひずみ γ_0 および限界せん断ひずみ γ_{cr} を用いてすべり発生条件を表現すると、

- (1) $\gamma_0 < \gamma_{cr}$: すべりは発生しない。
- (2) $\gamma_0 > \gamma_{cr}$: すべりが発生する。

たとえば Fig. 4 に示すような1波長 L のパイプ部分を考えて、すべりは $(l^*, L/2 - l^*)$ および $(L/2 + l^*, L - l^*)$ の間で発生することになる。ただし、 l^* は、次式で与えられるものである。

$$l^* = \frac{L}{2\pi} \arcsin \left(\frac{\gamma_{cr}}{\gamma_0} \right) \quad \dots\dots\dots(17)$$

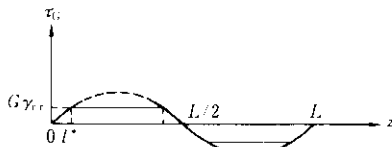


Fig. 4 Shear stress distribution along the pipe at the interface

4.1 すべりを生じる場合の変換係数 β_{cr}

パイプ軸に沿ったある部分ですべりが発生する場合の変換係数 β_{cr} を次式で定義する。

$$\beta_{cr} = \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_G} \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここで、 ϵ_{cr} はすべりが発生した場合のパイプの軸ひずみである。 ϵ_{cr} はすべりの発生区間が広がるに従って大きくなり、パイプの全区間にわたってすべりが発生した時(すなわち、 $l^* = 0$ の時)最大になる。 $l^* = 0$ の場合のパイプに発生する最大軸ひずみは次のようにして求めることができる。

いまの場合、パイプ表面上のせん断応力はどこでも限界せん断応力に等しいからせん断応力 $\tau_G = \tau_{cr}$ がパイプ軸の半波長ごとに一様に分布してい

ることになり次式が成立する。

$$\tau_G(z, t) = \tau_{cr} f \left(\omega t - \frac{2\pi}{L} z \right) \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここで、 $f(\xi)$ は周期関数で次のように表される。

$$f(\xi) = \begin{cases} 1, & 0 < \xi < \pi \\ -1, & -\pi < \xi < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(20)$$

(19)式を(7)式に代入して、 u_S に関して解けば次式を得る。

$$u_S(z, t) = \frac{L}{2\pi} \hat{\beta}_0 \epsilon_G \frac{\gamma_{cr}}{\gamma_0} \cdot g \left(\omega t - \frac{2\pi}{L} z \right) \quad \dots\dots\dots(21)$$

ここで、 $g(\xi)$ は周期関数で次の形で表される。

$$g(\xi) = \begin{cases} -\frac{\pi\xi}{2} + \frac{\xi^2}{2}, & 0 < \xi < \pi \\ -\frac{\pi\xi}{2} - \frac{\xi^2}{2}, & -\pi < \xi < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(22)$$

(21)式を z で微分しその最大値をとることにより、パイプの軸方向最大ひずみ ϵ_{cr} は次式で求められる。

$$\epsilon_{cr} = \frac{\pi}{2} \frac{\gamma_{cr}}{\gamma_0} \hat{\beta}_0 \epsilon_G \quad \dots\dots\dots(23)$$

一方、部分的にすべりを生じている場合(すなわち、 $0 < l^* < L/4$ の場合)のパイプの軸方向最大ひずみは次のようにして求めることができる。すなわち、Fig. 4 からパイプ表面に作用するせん断応力は、時間軸を $t = \pi/\omega$ に固定しても議論の一般性が失なわれないことに注意すると次式で与えられる。

$$\tau_G \left(z, \frac{\pi}{\omega} \right) = \begin{cases} G\gamma_0 \sin \left(\frac{2\pi}{L} z \right); & 0 < z < l^* \\ G\gamma_{cr} f \left(\frac{\pi}{\omega} - \frac{2\pi}{L} z \right); & l^* < z < L/4 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(24)$$

そして、パイプの軸方向ひずみに関する境界条件すなわち、すべり区間端でのひずみの連続性およびひずみ分布の対称性から、

$$\epsilon_S \left(l^*, \frac{\pi}{\omega} \right) = \epsilon_S \left(l^*, \frac{\pi}{\omega} \right) \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$\frac{\partial \epsilon_S}{\partial z} \Big|_{z=l^*} = \frac{\partial \epsilon_S}{\partial z} \Big|_{z=l^*} \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$\epsilon_S \left(\frac{L}{4}, \frac{\pi}{\omega} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(27) \quad = (1 - \beta_{cr}^*) \epsilon_G \frac{L}{2\pi} \quad \dots\dots\dots(31)$$

の関係式を得る。

(24)式を(7)式(ただし、慣性項=0)に代入し、(25)~(27)式を考慮すれば結局、パイプの最大軸方向ひずみとして次式が得られる。

$$\epsilon_{cr} = a \frac{\gamma_{cr}}{\gamma_0} \hat{\beta}_0 \epsilon_G \quad \dots\dots\dots(28)$$

ただし、

$$a = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{4l^*}{L} \right) + \frac{\gamma_0}{\gamma_{cr}} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{2\pi}{L} l^* \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(29)$$

(29)式のaが、 $l^* = 0$ で $\pi/2$ 、 $l^* = L/4$ で γ_0/γ_{cr} となり、(23)式の場合も含んでいることから、(28)式を(18)式に代入すれば変換係数 β_{cr} が次式となる。

$$\beta_{cr} = \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_G} = a \left(\frac{\gamma_{cr}}{\gamma_0} \right) \hat{\beta}_0 \quad \dots\dots\dots(30)$$

部分的にすべりを生じている場合のパイプと地盤の間の最大相対変位 Δ は

$$\Delta = u_G \left(\infty, \frac{L}{4} + \frac{\pi}{\omega} \right) - \int_0^{L/4} \epsilon_S \left(z, \frac{\pi}{\omega} \right) dz$$

で求めるとき、変換係数 β_{cr}^* は次のように求められる。

$$\beta_{cr}^* = a^* \left(\frac{\gamma_{cr}}{\gamma_0} \right) \hat{\beta}_0 \quad \dots\dots\dots(32)$$

ただし、

$$a^* = \frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{4l^*}{L} \right) \left(1 + \frac{4l^*}{L} \right) + \frac{\gamma_0}{\gamma_{cr}} \sin \left(\frac{2\pi}{L} l^* \right) - \frac{\gamma_0}{\gamma_{cr}} \frac{2\pi}{L} l^* \cos \left(\frac{2\pi}{L} l^* \right) \quad \dots\dots\dots(33)$$

4.2 $\hat{\beta}_0, \beta_{cr}, \beta_{cr}^*$ に関する数値計算例

Table 2は各種地盤A, B, Cに対する各種変換係数について、地震波長 $L=400m$ および $150m$ 、地盤ひずみ $\epsilon_G=10^{-4} \sim 10^{-2}$ 、限界ひずみ $\gamma_{cr}=10^{-3}$ の場合に対して検討したものである。

この結果によれば、地盤B, Cではすべりが発生しないため、その変換係数 $\hat{\beta}_0$ はほぼ1に近い値を示しているが、地盤Aでは、地盤ひずみが 10^{-3} から 10^{-2} へと大きくなるにしたがって β_{cr}, β_{cr}^* ともに急激に1より小さくなっていく。

Table 2 Conversion factor for straight pipes ($\gamma_{cr}=10^{-3}$)

Site conditions		Strains			Conversion factors			
Site	Seismic wave length	Free field strain	Shear strain	Critical axial strain	Static	Dynamic	For strain	For displacement
X	L m	ϵ_G $\times 10^{-4}$	γ_0 $\times 10^{-4}$	ϵ_{cr} $\times 10^{-4}$	β_0	$\hat{\beta}_0$	β_{cr}	β_{cr}^*
C	400	1.0	0.103	97.1 ~ 152.5	0.999	1.009	-	-
	150	1.0	0.275	36.4 ~ 57.2	0.994	1.004	-	-
B	400	5.0	1.44	34.8 ~ 54.7	0.998	1.001	-	-
	150	5.0	3.38	13.6 ~ 21.4	0.984	0.988	-	-
A	400	10.0	11.5	8.8 ~ 13.8	-	-	0.88 ~ 1.0	0.88 ~ 1.0
	150	10.0	30.7	3.25 ~ 5.1	-	-	0.33 ~ 0.51	0.33 ~ 0.4
A	400	100.0	115.0	8.8 ~ 13.8	-	-	0.09 ~ 0.14	0.09 ~ 0.1
	150	100.0	307.0	3.25 ~ 5.1	-	-	0.03 ~ 0.05	0.03 ~ 0.04

5. 曲管部の地震時ひずみ

5.1 90°ベント管

地震波が地盤内を伝播するとき、直管と地盤との相対変位はベント管に付加的応力を発生させる。とくに Fig. 5 に示すような 90°ベント管の場合には、地震波が要素 (1) に沿って z 軸方向に入射する時隅角部 (z=L/4) に最大の相対変位 Δ が生じる。ここで、ベント管の二つの要素はともに無限の長さをもっており、周囲は側方地盤反力係数 k₀ をもつ地盤内に埋設されているものとする。

直管と地盤との間の相対変位は、すべりを伴わない場合は (13) 式によって、すべりを伴う場合は (31) 式によって求めることができる。しかしながら、要素 (2) のせん断力 S₂ が要素 (1) に対して軸

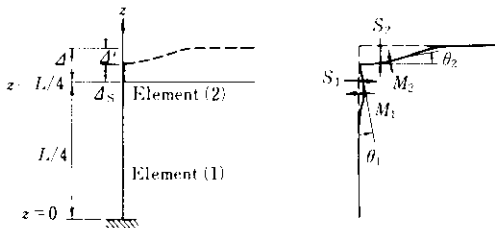


Fig. 5 Internal forces in a bent pipe

力として作用するところから、曲管部要素 (1) の伸び Δ_S が次式のように発生する。

$$\Delta_S = \frac{L}{4} \frac{S_2}{AE} \quad \dots\dots\dots(34)$$

したがって、曲管部での相対変位は結局次式で与えられる。

$$\Delta' = \Delta - \Delta_S \quad \dots\dots\dots(35)$$

このとき、ベント管の両要素の各せん断力 S₁, S₂, 曲げモーメント M₁, M₂ および回転角 θ₁, θ₂ はそれぞれ次式となる。

$$S_1 = \frac{1}{4} \frac{k}{\lambda} \Delta', \quad S_2 = 3S_1$$

$$M_1 = M_2 = \frac{1}{4} \frac{k}{\lambda^2} \Delta', \quad \theta_1 = \theta_2 = \frac{1}{2} \lambda \Delta'$$

.....(36)

ここで、

$$k = \pi D k_0 \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$\lambda = \left(\frac{k}{4EI} \right)^{1/4} \quad \dots\dots\dots(38)$$

$$\Delta' = \frac{L}{2\pi} \frac{1-\beta}{1+W} \epsilon_G \quad \dots\dots\dots(39)$$

$$\epsilon_{S_1} = \frac{M_1}{EI} \frac{D}{2} + \frac{S_2}{AE}$$

$$= \frac{Q + \frac{2}{\pi} W}{1+W} (1-\beta) \epsilon_G \quad \dots\dots\dots(40)$$

$$\epsilon_{S_2} = \frac{M_2}{EI} \frac{D}{2} = \frac{Q}{1+W} (1-\beta) \epsilon_G \quad \dots\dots\dots(41)$$

$$\beta_{1B} = \frac{Q + \frac{2}{\pi} W}{1+W} (1-\beta) \quad \dots\dots\dots(42)$$

$$\beta_{2B} = \frac{Q}{1+W} (1-\beta) \quad \dots\dots\dots(43)$$

ただし、

$$\beta = \begin{cases} \hat{\beta}_0 : \text{すべりを生じない場合} \\ \beta_{cr}^* : \text{すべりを生じる場合} \end{cases}$$

そして

$$Q = \frac{LD\lambda^2}{4\pi} \quad \dots\dots\dots(44)$$

$$W = \frac{3}{16} \frac{kL}{AE\lambda} \quad \dots\dots\dots(45)$$

(40), (41) 式に与えられる ε_{S1} および ε_{S2} は曲げモーメントとせん断力により曲管部要素 (1), (2) に発生する合ひずみであり、β_{1B}, β_{2B} は地盤ひずみ ε_G から ε_{S1}, ε_{S2} への変換係数である。これらの変換係数を取りまとめて示したのが Table 3 である。

5.2 T 字管

一つの典型的な T 字管の形を Fig. 6 に示す。

いま一例として、地震波が T 字管要素 (1) に平行に入射する場合を考える。このとき T 字管の対称性から、明らかに次の関係が成り立つ。

$$M_1 = S_1 = \theta_1 = \theta_2 = 0 \quad \dots\dots\dots(46)$$

一方、せん断力 S₂ および曲げモーメント M₂ は、

$$S_2 = \frac{1}{2} \frac{k}{\lambda} \Delta', \quad M_2 = \frac{1}{2} \frac{k}{\lambda^2} \Delta' \quad \dots\dots\dots(47)$$

さらに、相対変位 Δ' は次式で与えられる。

Table 3 Conversion factors for bent pipes and tee-junctions

Structure	No slippage $\gamma_{cr} > \gamma_0$	Slippage $\gamma_{cr} \leq \gamma_0$
Straight	$\hat{\beta}_s$	β_{cr}
Bent	(1) $\frac{Q+(2/\pi)W}{1+W} (1-\hat{\beta}_s)$	$Q \cdot \frac{(2/\pi)W}{1+W} (1-\beta_{cr}^*)$
	(2) $\frac{Q}{1+W} (1-\hat{\beta}_s)$	$\frac{Q}{1-W} (1-\beta_{cr}^*)$
Tee junction	(1) $\frac{8W/(3\pi)}{1+(4/3)W} (1-\hat{\beta}_0)$	$\frac{8W/(3\pi)}{1-(4/3)W} (1-\beta_{cr}^*)$
	(2) $\frac{2Q}{1+(4/3)W} (1-\hat{\beta}_0)$	$\frac{2Q}{1-(4/3)W} (1-\beta_{cr}^*)$

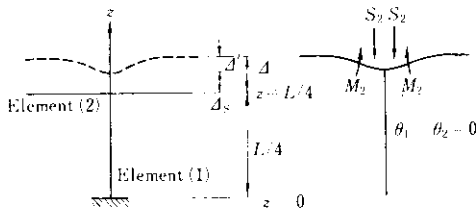


Fig. 6 Internal forces in a tee junction

$$d' = \frac{L}{2\pi} \frac{1}{1 + \frac{4}{3}W} (1-\beta) \epsilon_G \quad \dots\dots\dots(48)$$

したがって、T字管要素(1)および(2)に対する変換係数は、Table 3に示すように次式で与えられる。

$$\beta_{1T} = \frac{8}{3\pi} \frac{W}{1 + \frac{4}{3}W} (1-\beta) \quad \dots\dots\dots(49)$$

$$\beta_{2T} = \frac{2Q}{1 + \frac{4}{3}W} (1-\beta) \quad \dots\dots\dots(50)$$

5.3 曲管の変換係数に対する数値計算例

Table 4は、90°ベント管およびT字管に対する変換係数を(43)(44)(49)(50)式に基づいて β_{cr}^* 、 $=\hat{\beta}_0 = 0.1, 0.5, 0.9, L=400m, 150m$ の場合について求めたものである。この表から、ベント管およびT字管の変換係数は $\hat{\beta}_0 = \beta_{cr}^*$ の値が小さい時ほど大きい値をとることがわかる。これは、 $\hat{\beta}_0$ または β_{cr}^* が小さいほどより大きな相対変位を発生

Table 4 Numerical examples of conversion factor
L=400m

	$\hat{\beta}_0, \beta_{cr}^*$	Element (1)	Element (2)
Straight	0.1	0.1	—
	0.5	0.5	—
	0.9	0.9	—
Bent	0.1	1.87	1.29
	0.5	1.04	0.72
	0.9	0.20	0.14
Tee junction	0.1	1.14	2.22
	0.5	0.63	1.23
	0.9	0.13	0.25

L=150m

	$\hat{\beta}_0, \beta_{cr}^*$	Element (1)	Element (2)
Straight	0.1	0.1	—
	0.5	0.5	—
	0.9	0.9	—
Bent	0.1	0.86	0.71
	0.5	0.48	0.39
	0.9	0.10	0.08
Tee junction	0.1	0.19	1.29
	0.5	0.11	0.72
	0.9	0.02	0.14

させることによる。さらに、変換係数は地震波長が短い(L=150m)場合よりも長い場合(L=400m)の方が一般的に大きな値を示している。これは、パイプに発生する軸ひずみが等しくても、長い波長ほど半波長内に累積する相対変位量を増大させ、結果的にベント管やT字管の変換係数を大きくするからである。

Fig. 7は地盤ひずみ ϵ_G を横軸に、直管に対する変換係数 $\hat{\beta}_0, \beta_{cr}^*$ を縦軸に、そして波長Lをパラメータとして曲管部の変換係数 β_{1B}, β_{2T} を図中に示したものである。たとえば、 β_{1B} については、波長L=150mの地震波がA種地盤に入射した時の地盤ひずみが 6.8×10^{-4} (点Q')とすると、その時直管の変換係数は0.48(点Q)、同時に90°ベント管の変換係数 β_{1B} は0.5(点Q')となることがわ

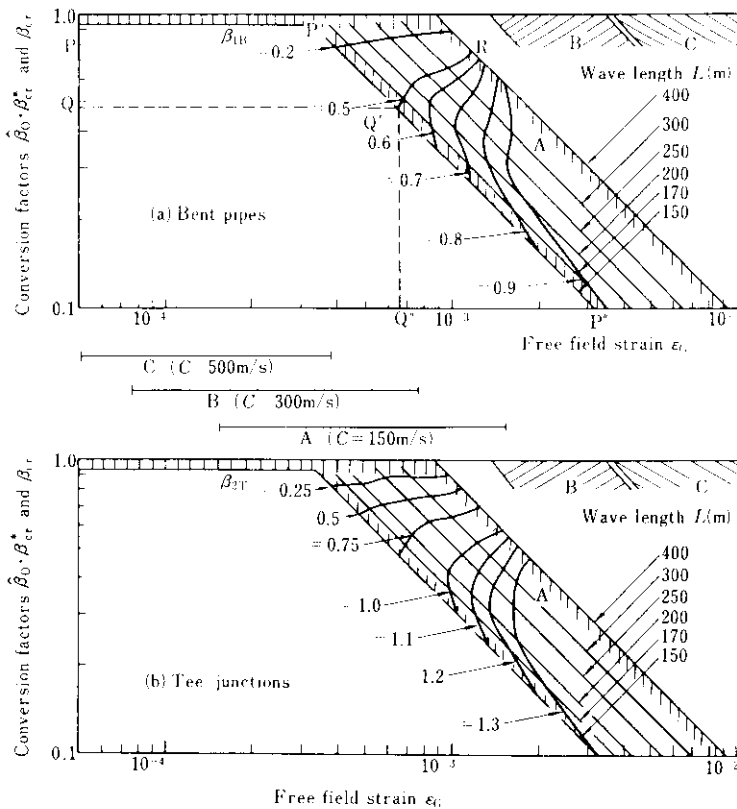


Fig. 7 Conversion factors ($\gamma_{cr}=10^{-3}$)

かる。

6. あとがき

本論文は、筆者が1978年から翌年にかけて、米国コロンビア大学留学中篠塚正宜教授の指導の下

に行った地震環境下での埋設ライフラインの危険度解析に関する研究の一部である。

今後、本研究をさらに進めていくには、(2)式で導入した地盤変形係数の関数形の決定をはじめ、いくつかの仮定についてそれぞれ検討を加えていくことが必要であろう。

参考文献

- 1) Shinozuka, M. and T. Koike: "Estimation of Structural Strains in Underground Lifeline Pipes," Lifeline Earthquake Engineering Buried Pipelines, Seismic Risk, and Instrumentation Edited by T. Ariman, S. C. Liu and R. E. Nickell, published by ASME, New York, 1979, 31-48
- 2) Shinozuka, M. and T. Koike: "Seismic Risk of Underground Lifeline Systems Resulting from Fault Movement," 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Stanford University, California August 1979, 663-672
- 3) Duke, C. M. and D. F. Moran: "Guidelines for Evolution of Lifeline Earthquake Engineering," U.S. Japan Seminar, November 1976, 367-376
- 4) Sakurai, A. and Takahashi, T.: "Dynamic Stresses of Underground Pipelines During Earthquakes," Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, B 4, Santiago, Chile, 1969, 81-95