
埋設パイプライン異形管部の地震時ひずみ推定法

Seismic Strain Estimates for Buried Pipelines of Arbitrary Configuration

小池 武(Takeshi Koike)

要旨：

パイプラインは直管，異形管そして各種付帯構造物から構成されているが，地震時被害として最も多く見かけるのが，管継手や異形管の破壊であり，構造物・接続管取合部の破損である。そこで，本研究では異形管部の地震時挙動を明確にする目的で異形管，とりわけ分岐管や曲管について地震時発生ひずみ算定式を提案する。とくに，現実の設計上の要請を考慮して，地震波が任意の方向から異形管部に入射する場合，曲管部の接合部がたわみ性を持つ場合，T字管の主管枝管の管寸法が異なる場合等について実務設計に利用しうる形で算定式を誘導した。

Synopsis：

Buried pipelines are often damaged at mechanical joints, connections with branches and interconnections with other structures when a strong earthquake causes severe ground shakings. For the purpose of investigating seismic behaviors of buried complex piping such as tee-junctions and bent pipes, this study provides a calculation formula to estimate the seismic strains of those geometrical structures. Especially for the sake of practical design requirements, arbitrary incident seismic waves, flexibility of bent pipe and different pipe dimensions of tee-junctions are taken into consideration.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

埋設パイプライン異形管部の地震時ひずみ推定法

Seismic Strain Estimates for Buried Pipelines of Arbitrary Configuration

小 池 武*

Takeshi Koike

Synopsis:

Buried pipelines are often damaged at mechanical joints, connections with branches and interconnections with other structures when a strong earthquake causes severe ground shakings.

For the purpose of investigating seismic behaviors of buried complex piping such as tee-junctions and bent pipes, this study provides a calculation formula to estimate the seismic strains of those geometrical structures.

Especially for the sake of practical design requirements, arbitrary incident seismic waves, flexibility of bent pipe and different pipe dimensions of tee-junctions are taken into consideration.

1. 緒 言

埋設パイプラインは都市機能を維持する上で重要な役割を担っている。それだけに、耐震的見地から大いに検討されねばならないシステムである。

一般にパイプラインは直管、異形管そして各種付帯構造物から構成されているが、地震時被害として最も多く見かけるのが、管継手や異形管の破壊であり、構造物・接続管取合部の破壊である。

そこで、異形管部の地震時挙動を明確にするために本研究では、異形管、とりわけ分岐管と曲管について、地震時に発生する管ひずみ、算定式を提案する。とくに、現実の設計上の要請を考慮して、地震波が任意の方向から異形管部に入射する場合、曲管部の接合部がたわみ性 (Flexibility) を持つ場合、T 字管の主管と枝管の管寸法が異なる場合等について利用しやすい形で算定式を誘導した。また、直管の地震時ひずみ算定式についても、弾性波動論を基礎に厳密解を導き、慣用式 (近似式) と比較した。

2. 直管部の地震時ひずみ

2-1 地盤ひずみ

地中埋設管路の耐震設計では、表層地盤内の異なる 2 点間の相対変位振幅を求めることが基本的に重要である。いま、Fig. 1 に示すように、剛な基盤上に厚さ H の表層地盤がのっているものとする。対象地点より Δ km の震央距離の所でマグニチュード M の地震が発生したとすれば、当該地点は地盤特性 S による増幅を受け、地表面では最大加速度 $A_{\max}(M, \Delta, S)$ の地動が発生する。ところで、耐震工学上での基盤として新耐震設計法¹⁾に定義する第 2 種地盤 (記号 S_2 で示す) を用いるならば、Fig. 1 の基盤は、最大加速度 $A_{\max}(M, \Delta, S_2)$ の地震動を受ける可能性がある。このとき、表層地盤をせん断梁とみなして Modal analysis を行い、とくにその第 1 次モードのみに注目すれば、地表面からの深さ、 z における水平変位振幅²⁾ $U_H(z; M, \Delta, S_2)$ は次式で求められる。

* エンジニアリンク事業部ハイフライン海洋技術部主査(掛長)・工博
(昭和56年8月28日原稿受付)

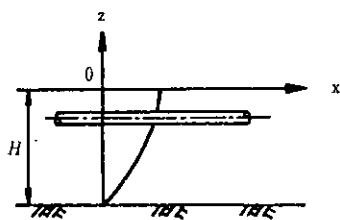


Fig. 1 Surface ground model

$$U_H(z; M, \Delta, S_2) = \frac{2}{\pi^2} S_V(T_G; M, \Delta, S_2) \times T_G \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad \text{.....(1)}$$

ここで、 T_G は表層地盤の固有周期、 S_V は基盤に入力させる加速度波形（最大加速度 $A_{\max}(M, \Delta, S_2)$ ）の速度応答スペクトルである。（1）式の $S_V(T_G; M, \Delta, S_2)$ の代りに新耐震設計法¹⁾に定める速度応答スペクトル $S_V(T_G)$ を代入すれば、埋設管の耐震設計に用いる設計変位振幅が得られる。

表層地盤内を伝播する地震波は、おもに P 波、 S 波の実体波や、Rayleigh 波、Love 波の表面波などから構成され、実地震記録波形に見るような特有の非定常ランダム過程の波形を示す。いま、議論を簡単にするために地震波は Fig. 2 に示すように ξ 軸方向に位相速度 C で伝播する正弦波で近似できるものとする。そして、その変位振幅 $U_G(\xi, t)$ が最大振幅 U_H をもつ進行波 (Travell-

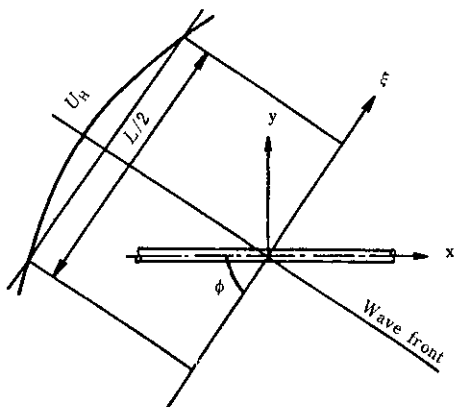


Fig. 2 Configuration of incident wave to the pipe

ing wave) として次式

$$U_G(\xi, t) = f(\xi - Ct) \quad \text{.....(2)}$$

で表わせるものとする。管理設深さでの最大地盤ひずみ ϵ_G (Free field strain) は次式で求められる。

$$\epsilon_G = \left| \frac{\partial u_G}{\partial \xi} \right| = \frac{\dot{U}_H}{C} \quad \text{.....(3)}$$

ここで、 $\dot{U}_H$ は埋設管位置での地盤の水平速度振幅であり次式で与えられる。

$$\dot{U}_H(z; M, \Delta, S_2) = \frac{4}{\pi} S_V(T_G; M, \Delta, S_2) \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad \text{.....(4)}$$

また、進行波を正弦波と仮定しているところから、埋設管位置での水平変位振幅 Δ_G は、地震波波長 L を用いて、

$$\Delta_G = \frac{L}{2\pi} \epsilon_G = U_H \quad \text{.....(5)}$$

で表わすことができる。

変位振幅が進行方向 (ξ 軸) に平行の場合、その進行波を R タイプと呼び、進行方向に垂直かつ水平の場合を L タイプと呼ぶことにする。このとき、管軸方向 (x 軸) の地盤ひずみ $\epsilon_G^R(\phi)$ は次のように与えられる。すなわち、管軸に対する地震波の入射角を ϕ とすると、 $\xi = x \cos \phi = y \sin \phi$ の関係より R タイプの進行波による軸ひずみは、

$$\epsilon_G^R(\phi) = \frac{\dot{U}_H}{C_R} \cos^2 \phi \quad \text{.....(6)}$$

一方、L タイプの進行波による軸ひずみは、

$$\epsilon_G^L(\phi) = \frac{\dot{U}_H}{C_L} \cos \phi \sin \phi \quad \text{.....(7)}$$

で与えられる。

2.2 変換係数の厳密解

水、油、ガスを輸送するパイプラインに使用されるパイプの管径、板厚の範囲では、管に発生する地震時ひずみは曲げひずみよりも軸ひずみの方が卓越する。そこで、前報³⁾において、地盤ひずみ ϵ_G および地盤変位振幅 Δ_G から、埋設管の軸ひずみ ϵ_S および埋設管と地盤の間の相対変位 Δ_R が、次の関係式

$$\epsilon_S = \beta_S \epsilon_G \quad \text{.....(8)}$$

$$\Delta_R = (1 - \beta_D) \Delta_G \quad \text{.....(9)}$$

により、直接簡便に求まるものとして、変換係数 β_S および β_D を定義した。そして、 β_S 、 β_D の算定式として、次の近似式を提案した。

$$\beta_S = \beta_D = \left\{ 1 + \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 \left(\frac{AE}{K_G} \right) \right\}^{-1} \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 A は管断面積、 E はヤング率そして K_G は管と周辺地盤間のバネ定数に相当する値で、表層地盤のせん断弾性定数 G を用いて $K_G = 2\pi G$ で与えられる。

本節では、Fig. 3 に示すように管路が無限弾性体内に埋設されている場合の変換係数 β_S 、 β_D の弾性解析を誘導する。

いま、管が埋設されていない地盤内を次式で表現される正弦波波動が管軸方向に伝播する場合を考察する。

$$u_G^0(x, t) = U_a \exp[ik_a(x - c_a t)] \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 i は複素記号である。また、 k_a 、 c_a は見掛けの波数と位相速度であり、 L 、 C と入射角 ϕ を介して次式で関係づけられる。

$$k_a = \frac{2\pi}{L} \cos \phi, \quad c_a = \frac{C}{\cos \phi} \dots\dots\dots(12)$$

一方、管が埋設されている地盤の埋設管近傍（管軸から垂直に距離 r の位置）での軸方向地盤変位 $u_G(r, x, t)$ および埋設管そのものの軸方向変位 $u_S(x, t)$ がそれぞれ次式で表現されるものとする。

$$u_G(r, x, t) = u_G^0(x, t) - u_G^1(r, x, t) \dots\dots\dots(13)$$

$$u_S(x, t) = u_G^0(x, t) - u_S^1(x, t) \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 $u_G^1(r, x, t)$ は管剛性と地盤の剛性との相違に基づく周辺地盤の遠隔地盤に対する相対変形量であり、 $u_S^1(x, t)$ は管表面に作用するせん断応力により発生する管の軸方向変位である。Fig. 3 に示す円筒座標系において、地盤変位 u_G^0 および u_G は次の波動方程式を満足しなければならない。

$$\rho_G \frac{\partial^2 u_G^0}{\partial t^2} - G \nabla^2 u_G^0 = 0 \dots\dots\dots(15)$$

$$\rho_G \frac{\partial^2 u_G}{\partial t^2} - G \nabla^2 u_G = 0 \dots\dots\dots(16)$$

ここで、 ρ_G は表層地盤の密度であり、記号 ∇^2 は、

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

を意味する。

一方、地盤と管との接触面での、変位の連続条

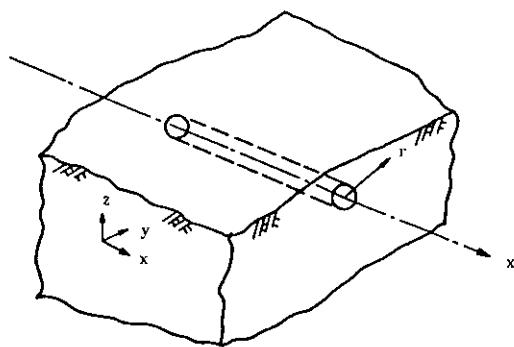


Fig. 3 Buried pipe surrounded by soil media

件と力のつりあい条件から、次の関係が成立しなければならない。

$$u_G\left(\frac{D}{2}, x, t\right) = u_S(x, t) \dots\dots\dots(17)$$

$$\rho_S \frac{\partial^2 u_S}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 u_S}{\partial x^2} = \frac{\tau_G^{ave}}{d} \dots\dots\dots(18)$$

ただし、 τ_G^{ave} は管表面に作用する平均せん断力であり、次式で与えられる。

$$\tau_G^{ave} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} G \frac{\partial u_G}{\partial r} \Big|_{r=\frac{D}{2}} d\theta = G \frac{\partial u_G}{\partial r} \Big|_{r=\frac{D}{2}} \dots\dots\dots(19)$$

ここで、 d 、 ρ_S はそれぞれ管の板厚および密度である。

(13)式を(16)式に代入し、(15)式を参考にすれば、 u_G^1 に関して次式を得る。

$$\rho_G \frac{\partial^2 u_G^1}{\partial t^2} - G \nabla^2 u_G^1 = 0 \dots\dots\dots(20)$$

いま、

$$u_G^1(r, x, t) = U_1(r) \exp[ik_a(x - c_a t)] \dots\dots\dots(21)$$

と変数分離して(20)式に代入すると、 U_1 は次の関係式を満足しなければならない。すなわち、

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_1}{\partial r} + k_G^2 U_1 = 0 \dots\dots\dots(22)$$

ここで、

$$k_G = k_a \sqrt{\left(\frac{c_a}{\sqrt{G/\rho_G}} \right)^2 - 1} \dots\dots\dots(23)$$

(22)式の基本解は第1種、第2種0次ハンケル関数の1次結合で与えられるところから、

$$U_1(r) = C_1 H_0^{(1)}(k_G r) + C_2 H_0^{(2)}(k_G r) \dots\dots\dots(24)$$

ただし、 c_1, c_2 は未定定数、 $H_0^{(i)}(\cdot)$ は第 i 種 ν 次ハンケル関数である。ところで、無限遠からの入力を 0 とする境界条件から $C_2 = 0$ となり、(24) 式は、

$$U_1(r) = C_1 H_0^{(1)}(k_G r) \quad \dots\dots\dots(25)$$

と書き改められる。また、

$$u_S^1(x, t) = U_S^1 \exp[ik_s(x - c_a t)] \quad \dots\dots\dots(26)$$

において、(25)、(26) 式を(17)式に代入すれば、結局、

$$C_1 = \frac{U_S^1}{H_0^{(1)}(k_G \frac{D}{2})} \quad \dots\dots\dots(27)$$

を得る。この C_1 を用いると(19)式の平均せん断応力は次式となる。

$$\tau_G^{ave} = G k_G U_S^1 \frac{H_1^{(1)}(k_G \frac{D}{2})}{H_0^{(1)}(k_G \frac{D}{2})} \quad \dots\dots\dots(28)$$

(26)、(28) 式を(18) 式に代入して整理すると、結局次の関係を得る。

$$\frac{U_S^1}{U_a} = \left\{ 1 + \frac{G k_G}{E dk_E^2} \frac{H_1^{(1)}(k_G \frac{D}{2})}{H_0^{(1)}(k_G \frac{D}{2})} \right\}^{-1} \quad \dots\dots\dots(29)$$

ここで、 k_E は次式で与えられる。

$$k_E = k_a \sqrt{\left(\frac{C_a}{\sqrt{E/\rho_s}} \right)^2 - 1} \quad \dots\dots\dots(30)$$

したがって、変換係数 β_S, β_D は、その定義から、

$$\begin{aligned} \beta_S(\phi) &= \frac{\epsilon_S}{\epsilon_G} = \left| \frac{u_S}{U_a} \right| = \frac{U_a - U_S^1}{U_a} \\ &= \left\{ 1 + \frac{E dk_E^2}{G k_G} \frac{H_0^{(1)}}{H_1^{(1)}(k_G \frac{D}{2})} \right\}^{-1} \quad \dots\dots\dots(31) \end{aligned}$$

$$\beta_D(\phi) = \beta_S(\phi) \quad \dots\dots\dots(32)$$

で表わすことができる。したがって、一般的に X タイプの地震波が入射角 ϕ で埋設管に入射した場合には、方向係数 $\xi_S^S(\phi), \xi_D^S(\phi)$ を用いて、次式により、管ひずみおよび管と地盤の間の相対変位を求めることができる。

$$\epsilon_S(\phi) = \beta_S(\phi) \xi_S^S(\phi) \epsilon_G \quad \dots\dots\dots(33)$$

$$\Delta_R(\phi) = \{1 - \beta_D(\phi)\} \xi_D^S(\phi) \Delta_G \quad \dots\dots\dots(34)$$

ここで、

$$\xi_S^R = \cos^2 \phi, \xi_D^R = \cos \phi \quad \dots\dots\dots(35)$$

$$\xi_S^L = \cos \phi \sin \phi, \xi_D^L = \sin \phi \quad \dots\dots\dots(36)$$

2-3 すべりを生じる場合の変換係数

前報³⁾において、すべりを生じる場合の変換係数の誘導を詳述したので、ここではその結果のみをまとめる。

前報³⁾によると、すべりを考慮した場合の埋設管の管ひずみおよび埋設管地盤との間の相対変位は(33)式(34)式に対応する形で次式により表現できる。

$$\epsilon_S(\phi) = \xi_S^X(\phi) \beta_{SS}(\phi) \epsilon_G \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$\Delta_R(\phi) = (1 - \beta_{DS}(\phi)) \xi_D^X(\phi) \Delta_G \quad \dots\dots\dots(38)$$

ここで、

$$\beta_{SS}(\phi) = q \frac{\tau_{cr}}{\tau_G^{ave}} \beta_S(\phi) \quad \dots\dots\dots(39)$$

$$\beta_{DS}(\phi) = q^* \frac{\tau_{cr}}{\tau_G^{ave}} \beta_D(\phi) \quad \dots\dots\dots(40)$$

ただし、

$$q = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{4l^*}{L_a} \right) + \frac{\tau_G^{ave}}{\tau_{cr}} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{2\pi}{L_a} l^* \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(41)$$

$$\begin{aligned} q^* &= \frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{4l^*}{L_a} \right) \left(1 + \frac{4l^*}{L_a} \right) + \frac{\tau_G^{ave}}{\tau_{cr}} \sin \left(\frac{2\pi}{L_a} l^* \right) \\ &\quad - \frac{\tau_G^{ave}}{\tau_{cr}} \frac{2\pi}{L_a} l^* \cos \left(\frac{2\pi}{L_a} l^* \right) \quad \dots\dots\dots(42) \end{aligned}$$

ここで、 τ_{cr} はすべり開始せん断応力、 L_a は見掛けの地震波波長、そして l^* はすべり開始区間を示す長さでありそれぞれ次式で与えられる。

$$L_a = L / \cos \phi \quad \dots\dots\dots(43)$$

$$l^* = \frac{L}{2\pi} \arcsin \left(\frac{\tau_{cr}}{\tau_G^{ave}} \right) \quad \dots\dots\dots(44)$$

3. 異形管部の地震時ひずみ

3-1 基本仮定

前報³⁾では、接合部が剛である場合について R タイプの地震波が管軸 ($\phi = 0$) に沿って入射する時の、90° 曲管や T 字管の材端最大ひずみを求める算定式を誘導した。一方、現実の設計上の要請として、地震波が任意の方向から異形管部に入射する場合、曲管部の接合部がたわみ性を持っている場合、曲管部の曲率半径を変更した場合、また

T字管の主管と枝管の管寸法が異なる場合についての同様の算定式が要求されることが多い。本論文では次の前提条件の下で、異形管部地震時ひずみ算定式を誘導した。

前提条件

- (1) 地震波は直管に対し入射角 ϕ で入射する正弦波とする。
- (2) 異形管に接続する直管は他端が無限遠に伸びた弾性床上の梁として取扱う。したがって、第 j 番目部材の直管のたわみは弾性床上の梁に関する4階の微分方程式 $v_j^{(IV)} + 4\lambda_j^4 v_j = 0$ を片側無限遠の境界条件で解くことにより、未定定数 A_j, B_j を用いて次式で与えられる。

$$v_j(x) = e^{-\lambda_j x} \{ A_j \cos(\lambda_j x) + B_j \sin(\lambda_j x) \} \quad \dots\dots\dots(45)$$

ここで、 λ_j は管と周辺地盤の間の相対的剛性を示す係数であり次式で与えられる。

$$\lambda_j = \sqrt[4]{\frac{k_j}{4EI_j}} \quad \dots\dots\dots(46)$$

ただし、 k_j, I_j はそれぞれ第 j 直管を支持するバネ定数および断面2次モーメントである。

- (3) T字管の連結部は剛結とする。
- (4) 埋設曲り部のたわみ係数 n 、応力集中係数 i は架空配管系曲管部の n, i に等しいものとする。したがって、溶接エルボの場合は次式で求められる。

$$i = \frac{0.9}{h^{2/3}} \quad \dots\dots\dots(47)$$

$$n = \frac{1.65}{h^{5/6}} \quad \dots\dots\dots(48)$$

ここで、 h はたわみ特性値 (Pipe factor) であり次式で表わされる。

$$h = \frac{dR}{r^2} \quad \dots\dots\dots(49)$$

ただし、 R および r は曲管の曲率半径および管半径である。

- (5) 異形管部材端の軸方向引張力 S による直管の伸び Δ_s は Fig. 4 に示すアンカー拘束と周辺地盤による摩擦拘束の二つの場合を対象とする。すなわち、

(a) アンカー拘束の場合：

$$\Delta_s = \frac{L}{4 \cos \phi} \cdot \frac{S}{AE} \quad \dots\dots\dots(50)$$

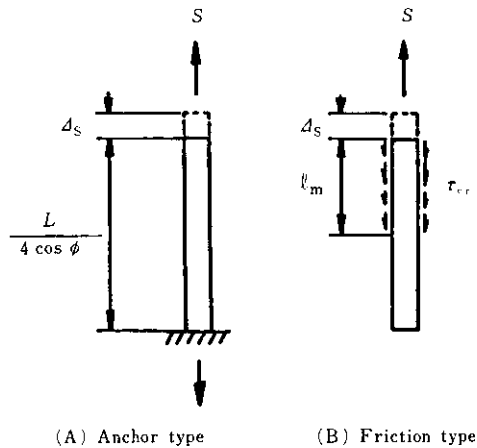


Fig. 4 Pipe elongation in the different supporting systems

(b) 摩擦拘束の場合：

$$\Delta_s = \frac{l_m}{2} \frac{S}{AE} = \frac{1}{2\pi D \tau_{cr}} \frac{S^2}{AE} \quad \dots\dots\dots(51)$$

ここで、 l_m は摩擦拘束区間長であり、次式で与えられる。

$$l_m = \frac{S}{\pi D \tau_{cr}} \quad \dots\dots\dots(52)$$

この二つの拘束条件は、管拘束条件の両極端の場合と考えられるが、取扱いの簡潔さから両方法を採用した。

- (6) 異形管接合部には、地震波 (正弦波) による最大地盤変位とそのときの直管部変位の差すなわち (34) 式または (38) 式で与えられる相対変位が強制的に作用する。このとき、Fig. 5, 6 に示すように矢印の方向から地震波が入射するとき、異形管部は材端に作用する曲げモーメントおよびせん断力により異形管自体の変形 Δ_F 、隣接直管の曲げ変形 Δ_B そして直管の伸び Δ_s を生じる。たとえば Fig. 5 に示す 90° 曲管では、相対変位 Δ_R が作用したとき、変形前に A, B の位置にあったものが、変形後それぞれ C, D の位置に変位する。すなわち、A 点での隣接直管で Δ_B の伸びが生じ、B 点での隣接直管で Δ_B の曲げ変形が生じ、AB 間の曲管部で Δ_F の変形が生じる。これらの変形の合計が Δ_R に等しい。したがって次の関係が成立する。

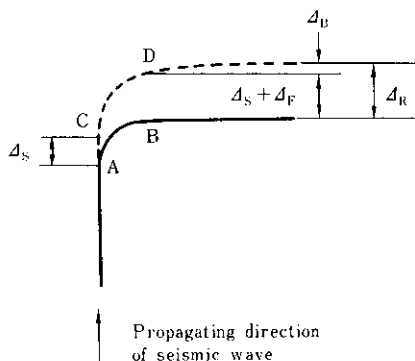


Fig. 5 Deflections of bend pipe developed by forced displacement Δ_R

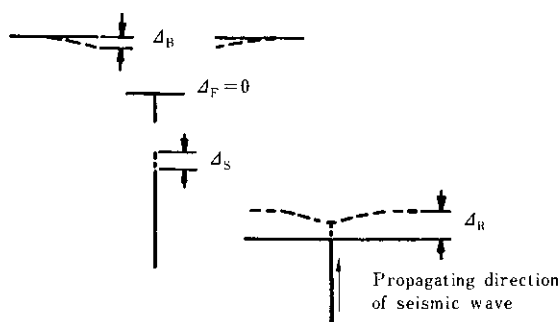


Fig. 6 Deflections of Tee-junction developed by forced displacement Δ_R

$$\Delta_R = \Delta_F + \Delta_B + \Delta_S \quad \dots\dots\dots(53)$$

ただし、 Δ_F は剛結条件の接合部（T字部）では0となり、たわみ性をもつ接合部（曲管部）では0とならない。

(7) 曲管，T字管に対する変換係数はそれぞれ次式で定義されるものとする。

$$\beta_B(\phi) = \frac{\epsilon_B(\phi)}{\epsilon_G} \quad \dots\dots\dots(54)$$

$$\beta_T(\phi) = \frac{\epsilon_T(\phi)}{\epsilon_G} \quad \dots\dots\dots(55)$$

3.2 T字管部の地震時ひずみ

Fig. 7に示すように地震波がT字管枝管(1)に対し入射角 ϕ で入射する場合を考える。Fig. 7に示す、地震波の振動成分を管軸(1)、(2)に沿った2方向成分に分解すれば、接合部の各々軸方向に Δ_R^1 、 Δ_R^2 の相対変位が強制的に作用することになる。Fig. 7のモデル(A)は Δ_R^1 が作用した場合のT字部の変形挙動を示したものであり、枝管(1)を中心にして対称性を示す。一方モデル(B)は Δ_R^2 が作用した場合のT字部の変形挙動を示しており、主管の(2)と(3)は接合部を中心に点対称性を示す。したがって、一般に入射角 ϕ で入射する地震波によるT字管部材端に発生する管ひずみはモデル(A)、(B)それぞれの管ひずみの重ね合せにより求められる。

Fig. 8, 9はモデル(A)、(B)におけるT字部材端の曲げモーメント M 、せん断力 S を図示したものである。T字管の解析結果を一覧表にして、Table 1に示す。同表では(A)、(B)各々の場合の①境界条件、②変換係数 $\beta_D(\phi)$ 、③相対変位 Δ_R 、④曲げ変位 Δ_B 、⑤材端曲げモーメント、せん断力、⑥Fig. 7のモデル(A)およびモデル(B)における入射角0の場合のT字管材端I、IIでの

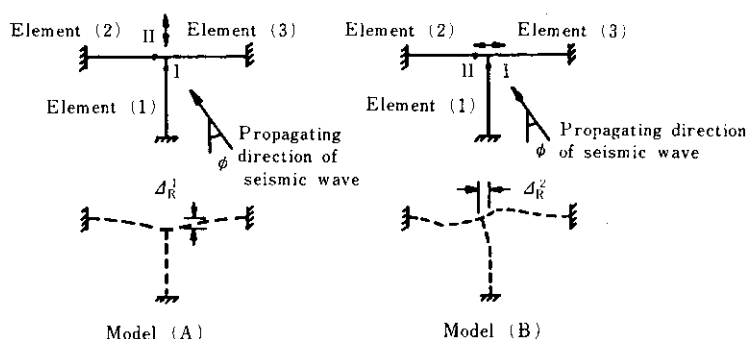


Fig. 7 Typical deflection modes of Tee-junction

Table 1 Calculation formula of pipe strains in tee-junctions

No.	Model (A)	Model (B)
(1)	Boundary conditions $v_2(0) = \Delta_R^1$ $\theta_1(0) = \theta_2(0) = 0$ $M_1(0) = 0$ $S_2(0) = S_3(0)$ $M_2(0) = M_3(0)$	Boundary conditions $v_1(0) = \Delta_R^2$ $v_2(0) = v_3(0) = 0$ $\theta_2(0) + \theta_3(0) = 0$ $\theta_1(0) = \theta_3(0)$ $M_1(0) - M_2(0) + M_3(0) = 0$
(2)	Conversion factor for relative disp. $\beta_B^1(\phi) = \text{given in eq. (32)}$ or $\beta_{BS}^1(\phi) = \text{given in eq. (40)}$	Conversion factor for relative disp. $\beta_B^2\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \text{given in eq. (32)}$ or $\beta_{BS}^2\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \text{given in eq. (40)}$
(3)	Relative displacement $\Delta_R^1 = [1 - \beta_B^1(\phi)] \xi_B^X(\phi) \Delta_G$	Relative displacement $\Delta_R^2 = [1 - \beta_B^2\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)] \xi_B^X\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \Delta_G$
(4)	Bending deflection (i) Anchor support $\Delta_B^1 = \frac{\Delta_R^1}{1 + \frac{2LI_2\lambda_2^3}{A_1\cos(\phi)}}$ (ii) Friction support $\Delta_B^1 = (\sqrt{b_2^2 + 4b_1b_3} - b_2)/(2b_1)$ where $b_1 = 8I_2\lambda_2^3k_2/(\pi A_1D_1\tau_{cr})$ $b_2 = 1$ $b_3 = \Delta_R^1$	Bending deflection (i) Anchor support $\Delta_B^2 = \frac{\Delta_R^2}{1 + \frac{LI_1\lambda_1^3}{4A_2\sin(\phi)} \frac{1+4(\lambda_1/\lambda_2)^3}{1+2(\lambda_1/\lambda_2)^3}}$ (ii) Friction support $\Delta_B^2 = (\sqrt{b_2^2 + 4b_1b_3} - b_2)/(2b_1)$ where $b_1 = \frac{I_1\lambda_1^2k_1}{8\pi A_2D_2\tau_{cr}} \frac{1+4(\lambda_1/\lambda_2)^3}{1+2(\lambda_1/\lambda_2)^3}$ $b_2 = 1$ $b_3 = \Delta_R^2$
(5)	Bending moment and shear force $S_1 = 0$ $S_2 = S_3 = -4EI_2\lambda_2^3\Delta_B^1$ $M_1 = 0$ $M_2 = M_3 = 2EI_2\lambda_2^2\Delta_B^1$	Bending moment and shear force $S_1 = -2EI_1\lambda_1^3\Delta_B^2C_1$ $S_2 = S_3 = -2EI_2\lambda_2^3\Delta_B^2C_2$ $M_1 = 4EI_1\lambda_1^2\Delta_B^2C_2(\lambda_1/\lambda_2)^2$ $M_2 = M_3 = 2EI_2\lambda_2^2\Delta_B^2C_2$ where $C_1 = \frac{1+4(\lambda_1/\lambda_2)^3}{1+2(\lambda_1/\lambda_2)^3}, \quad C_2 = \frac{\lambda_1/\lambda_2}{1+2(\lambda_1/\lambda_2)^3}$
(6)	Pipe strains $\epsilon_T^1 = -2S_2/(A_1E)$ $\epsilon_T^{11} = M_2D_2/(2EI_2)$	Pipe strains $\epsilon_T^2 = M_1D_1/(2EI_1)$ $\epsilon_T^{12} = M_2D_2/(2EI_2) - S_1/(2A_2E)$
(7)	Resultant pipe strains for incident angle ϕ $\epsilon_T^1(\phi) = \epsilon_T^1 + \epsilon_T^2$ $\epsilon_T^{11}(\phi) = \epsilon_T^{11} + \epsilon_T^{12}$	

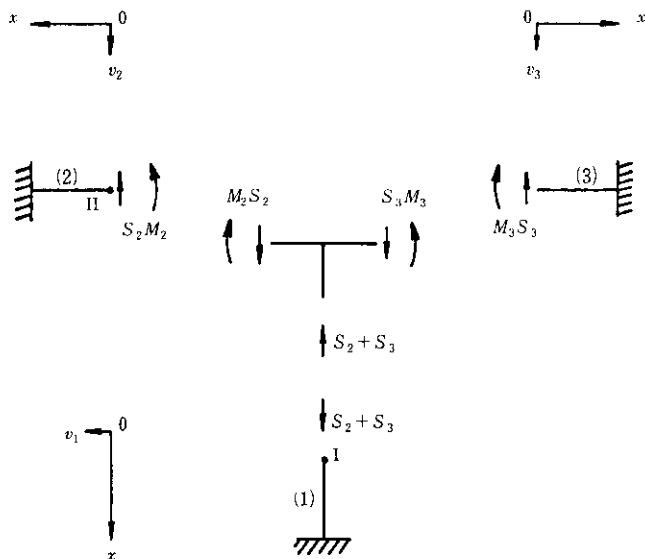


Fig. 8 Bending moments and shear forces of Tee-junction for model (A)

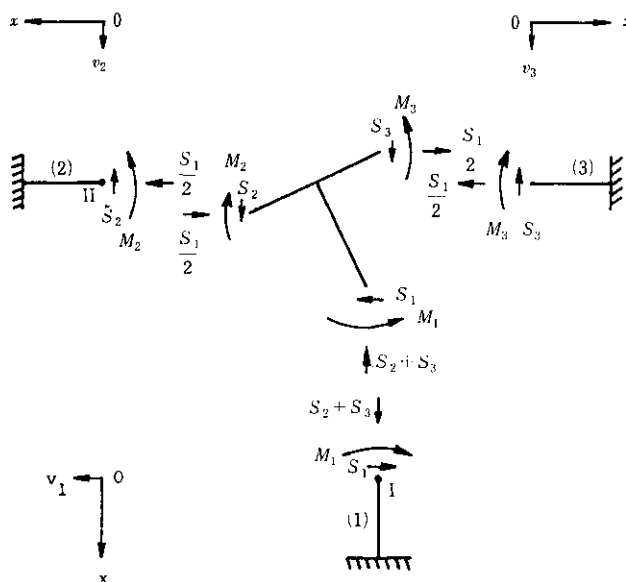


Fig. 9 Bending moments and shear forces of Tee-junction for model (B)

合成ひずみ、そして⑦入射角 ϕ のときの材端合成ひずみの算定式をまとめてあり、 Δ_B を計算すればその他の必要な諸量が簡便に算定できるようになっている。

3.3 曲管部の地震時ひずみ

地中に埋設されている曲管は周辺地盤により変形が拘束される。もし、その拘束が完全であれば

曲管部のたわみ性解析 (Flexibility analysis) を行うことは無意味となる。しかし、実際には土の弾塑性の性質のため、埋設曲管部もまた何らかの変形が許される程度に土の拘束は不完全である。このとき、埋設曲管部の変形挙動および応力集中の評価はたわみ性解析によって求められる。ところで、地上配管系の曲管部の応力集中評価に用いられるたわみ係数 n 、応力集中係数 i は非拘束配管に対してのみ適用されるべきものである。しかし、埋設曲管に関する実験⁵⁾によれば、埋設曲管部の応力集中評価が上記 n 、 i を用いて近似的に推定できると報告されていることから、本解析では埋設曲管部のたわみ性解析に上記 n 、 i の数値を用いた。

曲管部の変形挙動が周辺地盤によってどの程度拘束されるかを検討するため、曲管部が弾性支床としてモデル化された。周辺地盤に支持されている場合と、曲管部が周辺地盤によってまったく支持されていない二つの場合を考察する。両者の結果の差は、曲管部を土で拘束したことの影響そのものといえよう。

まず、Fig. 10 に示すように 90° 曲管が周辺地盤の拘束を受けていない場合について検討する。いま、地震波が曲管部要素(1)に沿って入射し、

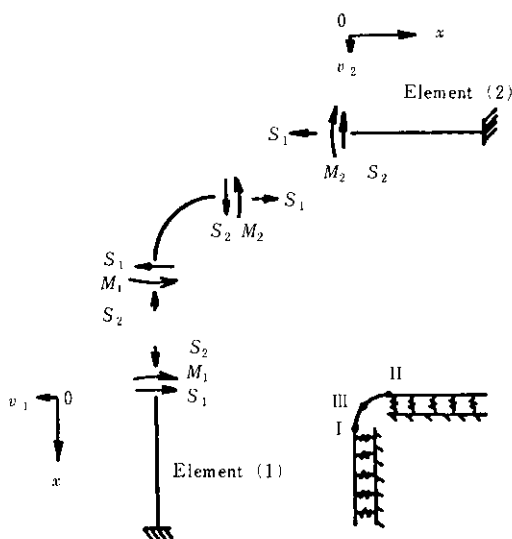


Fig. 10 Bending moments and shear forces of 90° -bend partially supported by elastic foundation

その材端に Δ_B^I の相対変位 (Fig. 5 参照) が生じる場合を考える。曲管部材端には同図に示すようなせん断力 S 、曲げモーメント M が作用している。その境界条件は、

$$\begin{aligned} v_1(0) &= 0, \quad v_2(0) = \Delta_B^I, \quad \theta_1(0) - \theta_2(0) = \theta_B, \\ M_1(0) + M_2(0) - R\{S_1(0) + S_2(0)\} &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(56)$$

となる。ここで、 θ_B は曲管部材端の曲げモーメントにより発生する曲管自体のたわみ角変化量である。曲管部の扁平化の影響をたわみ係数 n で評価し、Casteliano の定理を用いると、結局 θ_B は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \theta_B &= \frac{\pi}{2} \frac{nR}{EI} \{M_2(0) + RS_1(0) \left(\frac{2}{\pi} - 1\right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{\pi} RS_2(0)\} \quad \dots\dots\dots(57) \end{aligned}$$

(45)、(57) 式を (56) 式に代入して、未定定数 A_j 、 B_j ($j=1, 2$) を求めると、材端曲げモーメント、せん断力は曲げ変形 Δ_B をパラメータとして次式で求められる。

$$M_1(0) = M_1 = 2\lambda^2 EI b_1 \Delta_B \quad \dots\dots\dots(58)$$

$$M_2(0) = M_2 = 2\lambda^2 EI b_2 \Delta_B \quad \dots\dots\dots(59)$$

$$S_1(0) = S_1 = -2\lambda^3 EI b_1 \Delta_B \quad \dots\dots\dots(60)$$

$$S_2(0) = S_2 = -2\lambda^3 EI (1 + b_2) \Delta_B \quad \dots\dots\dots(61)$$

ただし、

$$b_1 = -\frac{1 + 2R\lambda + (\pi - 2)nR^2\lambda^2}{(1 + R\lambda)\{2 + \pi nR\lambda + (4 - \pi)nR^2\lambda^2\}} \quad \dots\dots\dots(62)$$

$$b_2 = \frac{1 - 2nR^2\lambda^2 - (4 - \pi)nR^3\lambda^3}{(1 + R\lambda)\{2 + \pi nR\lambda + (4 - \pi)nR^2\lambda^2\}} \quad \dots\dots\dots(63)$$

したがって、管軸(1)に沿った方向からの地震波による曲管部材端 I、II およびベンド部 III における曲げひずみと軸ひずみの合成ひずみは、

$$\begin{aligned} \epsilon_B^I &= \left| \frac{DM_1}{2EI} \right| + \left| \frac{S_2}{AE} \right| = \{D\lambda^2 |b_1| + \frac{2\lambda^3 I}{A} \times |1 + b_2| |\Delta_B^I| \} \quad \dots\dots\dots(64) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_B^{II} &= \left| \frac{DM_2}{2EI} \right| + \left| \frac{S_1}{AE} \right| = \{D\lambda^2 |b_2| + \frac{2\lambda^3 I}{A} |b_1| |\Delta_B^I| \} \quad \dots\dots\dots(65) \end{aligned}$$

$$\epsilon_B^{III}(\alpha) = \left| \frac{DM(\alpha)}{2EI} \right| + \left| \frac{S(\alpha)}{AE} \right| \quad \dots\dots\dots(66)$$

となる。ここで、 α は ϵ_S^{III} の位置を指定する角度であり、次の関係が成立する。

$$M(\alpha) = M_2 - S_1 R (1 - \sin \alpha) - S_2 R \cos \alpha \quad \dots\dots\dots(67)$$

$$S(\alpha) = S_1 \sin \alpha - S_2 \cos \alpha \quad \dots\dots\dots(68)$$

地震波が入射角 ϕ で入射した場合の、曲管部材端に発生するひずみは、曲管部要素(1)と(2)に沿った方向成分をもつ地震時相対変位 Δ_R^1 , Δ_R^2 を用いて、各材端に発生するひずみを重ね合わせるによって求まることから、次式を得る。

$$\epsilon_B^I(\phi) = \{ D\lambda^2 | b_1 | + \frac{2\lambda^3 I}{A} | 1 + b_2 | \} \Delta_B^1 + \{ D\lambda^2 | b_2 | + \frac{2\lambda^3 I}{A} | b_1 | \} \Delta_B^2 \quad \dots\dots\dots(69)$$

$$\epsilon_B^{II}(\phi) = \{ D\lambda^2 | b_2 | + \frac{2\lambda^3 I}{A} | b_1 | \} \Delta_B^1 + \{ D\lambda^2 | b_1 | + \frac{2\lambda^3 I}{A} | 1 + b_2 | \} \Delta_B^2 \quad \dots\dots\dots(70)$$

$$\epsilon_B^{\text{III}}(\phi, \alpha) = i D\lambda^2 | b_2 + \lambda R (1 - \sin \alpha) b_1 + \lambda R \cdot \cos \alpha (1 + b_2) | \Delta_B^1 + i D\lambda^2 | b_2 + \lambda R (1 - \cos \alpha) \cdot b_1 + \lambda R \sin \alpha (1 + b_2) | \Delta_B^2 + \frac{2\lambda^3 I}{A} | b_1 \sin \alpha - (1 + b_2) \cos \alpha | \Delta_B^1 + \frac{2\lambda^3 I}{A} | b_1 \cos \alpha - (1 + b_2) \sin \alpha | \Delta_B^2 \quad \dots\dots\dots(71)$$

ここで、曲げ変位 Δ_B^i は(50), (51), (52)式より次式で与えられる。

(i) アンカー拘束の場合：

$$\Delta_B^i = \frac{\Delta_R^i}{1 + \frac{L I \lambda^3}{2 A \xi^i} | 1 + b_2 | + b_3} \quad \dots\dots\dots(72)$$

ただし、

$$b_3 = n R^3 \lambda^3 \left| \frac{\pi}{2} + \frac{\pi I}{2 n A R^2} + \left(1 - \frac{I}{n A R^2} \right) b_1 + \left(\frac{2}{R \lambda} + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi I}{2 n A R^2} \right) b_2 \right| \quad \dots\dots\dots(73)$$

$$\xi^1 = \cos \phi, \xi^2 = \sin \phi \quad \dots\dots\dots(74)$$

(ii) 摩擦拘束の場合

$$\Delta_B^i = \frac{\sqrt{b_5^2 + 4 b_4 \Delta_R^i - b_5}}{2 b_4} \quad \dots\dots\dots(75)$$

ここで、

$$b_4 = \frac{2 \lambda^6 E F^2 (1 + b_2)^2}{\pi D A \tau_{cr}} \quad \dots\dots\dots(76)$$

$$b_5 = 1 + b_3 \quad \dots\dots\dots(77)$$

次に、Fig. 11 に示すように曲管部が周辺地盤によりバネを介して拘束されている場合を考察する。

曲管部の変形を $w(\alpha)$ とすると、これは次のつりあい条件式を満足する。

$$\frac{d^4 w}{d\alpha^4} + \frac{n k R^4}{EI} w = 0 \quad \dots\dots\dots(78)$$

境界条件は、材端での変位とたわみ角の連続性より次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} v_1(0) &= -w(0), v_2(0) = \Delta_B^1, \\ \theta_1(0) &= \frac{w'(0)}{R}, \theta_2(0) = -\frac{w'(x)}{R} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(79)$$

ここで、 w' , w'' は w の α に関する 1 個および 2 回微分を意味している。

(78)式的一般解と(45)式を(79)式に代入して未定定数を消去すれば、結局材端曲げモーメント、せん断力は次のマトリックス式により算定できる。

$$X = H \left(\frac{\pi}{2} \right) Y \quad \dots\dots\dots(80)$$

ここで、

$$X = \{ \eta M_1, \eta M_2, \frac{\eta}{\lambda_n} S_1, \frac{\eta}{\lambda_n} S_2 \}^T \quad \dots\dots\dots(81)$$

$$Y = \{ 0, n \left(\frac{\lambda}{\lambda_n} \right)^2 \Delta_B^1, 0, -2n \left(\frac{\lambda}{\lambda_n} \right)^3 \Delta_B^1 \}^T \quad \dots\dots\dots(82)$$

$$H(\psi) = [I - R W(\psi) E(\psi)^{-1}]^{-1} \quad \dots\dots\dots(83)$$

ただし、 ψ は、Fig. 11 に示すように曲管の角度であり、ここでは $\psi = \frac{\pi}{2}$ である。

さらに、

$$R = \begin{bmatrix} 0 & , & n \left(\frac{\lambda}{\lambda_n} \right)^2 & , & 0 \\ 0 & , & 0 & , & n \left(\frac{\lambda}{\lambda_n} \right)^2 \\ -n \left(\frac{\lambda}{\lambda_n} \right)^3 & , & -n \left(\frac{\lambda}{\lambda_n} \right)^3 & , & 0 \\ 0 & , & 0 & , & -n \left(\frac{\lambda}{\lambda_n} \right)^3 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(84)$$

$$W(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & , & 1 & , & 0 & , & 0 \\ 1 - \frac{\lambda_n}{\lambda} & , & 1 + \frac{\lambda_n}{\lambda} & , & -\frac{\lambda_n}{\lambda} & , & \frac{\lambda_n}{\lambda} \\ \frac{\lambda_n}{\lambda} e^{-\Gamma} (\cos \Gamma + \sin \Gamma) & , & \frac{\lambda_n}{\lambda} e^{\Gamma} (\sin \Gamma - \cos \Gamma) & , & \frac{\lambda_n}{\lambda} e^{-\Gamma} (\sin \Gamma - \cos \Gamma) & , & -\frac{\lambda_n}{\lambda} e^{\Gamma} (\sin \Gamma + \cos \Gamma) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (85)$$

$$F(\psi) = \begin{bmatrix} 0 & , & 0 & , & 1 & , & -1 \\ -e^{-\Gamma} \sin \Gamma & , & e^{\Gamma} \sin \Gamma & , & e^{-\Gamma} \cos \Gamma & , & -e^{\Gamma} \cos \Gamma \\ -1 & , & 1 & , & -1 & , & -1 \\ e^{-\Gamma} (\cos \Gamma - \sin \Gamma) & , & e^{\Gamma} (\sin \Gamma + \cos \Gamma) & , & -e^{-\Gamma} (\cos \Gamma + \sin \Gamma) & , & -e^{\Gamma} (\cos \Gamma - \sin \Gamma) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (86)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_n &= \sqrt[4]{\frac{nR}{4EI}} \\ \eta &= \frac{n}{2EI\lambda_n^2} \\ \Gamma &= \lambda_n R \psi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (87)$$

最後に、曲げ変位 Δ_B^1 は次式で与えられる曲管のため Δ_F^1 を用いて以下のように求められる。

$$\Delta_F^1(\alpha) = (e^{-H} \cos H, e^H \cos H, e^{-H} \sin H, e^H \sin H) H(\psi) Y = -b_6(\psi, \alpha) \Delta_R^1 \dots\dots\dots (88)$$

$$\text{ただし、} H = \lambda_n R \alpha \dots\dots\dots (89)$$

すなわち、

(i) アンカー拘束の場合：

$$\Delta_B^1 = \frac{\Delta_R^1}{1 + \frac{LI\lambda^3}{2A\xi^1} |b_7| + |b_6| \left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right)} \dots\dots\dots (90)$$

ただし、

$$b_7 = n \left(\frac{\lambda_n}{\lambda} \right) H_{42} - 2nH_{44} \dots\dots\dots (91)$$

ここで、 H_{42} 、 H_{44} は $H \left(\frac{\pi}{2} \right)$ の (4, 2)、(4, 4)

成分の値である。

(ii) 摩擦拘束の場合：

$$\Delta_R^1 = \frac{\sqrt{b_8^2 + 4b_8\Delta_R^1 - b_9}}{2b_8} \dots\dots\dots (92)$$

ただし、

$$b_8 = \frac{1}{2\pi A E D \tau_{cr}} \left(\frac{n\lambda^2}{\eta\lambda_n} \right)^2 (H_{42} - 2\frac{\lambda}{\lambda_n} H_{44})^2 \dots\dots\dots (93)$$

$$b_9 = 1 + b_6 \left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \dots\dots\dots (94)$$

以上により、(80)式の計算に必要なすべての量が算定できる。したがって、曲管部の合成ひずみ

は(80)、(81)式で得られる曲げモーメント、せん断力を用いて(64)～(66)式の場合と同様の方法で求めることができる。ただし、(66)式に用いる $M(\alpha)$ 、 $S(\alpha)$ は次式を用いる必要がある。

$$M(\alpha) = -\frac{EI}{nR^2} w''(\alpha) \dots\dots\dots (95)$$

$$S(\alpha) = -\frac{EI}{nR^3} w'''(\alpha) \dots\dots\dots (96)$$

ただし、

$$w''(\alpha) = 2(R\lambda_n)^2 [e^{-H} \sin H, -e^H \sin H, -e^{-H} \cos H, e^H \cos H]$$

$$F^{-1} \left(\frac{\pi}{2} \right) H \left(\frac{\pi}{2} \right) Y \dots\dots\dots (97)$$

$$w'''(\alpha) = 2(R\lambda_n)^3 [e^{-H} (\cos H - \sin H), -e^H (\sin H + \cos H), e^{-H} (\sin H + \cos H), e^H (\cos H - \sin H)]$$

$$F^{-1} \left(\frac{\pi}{2} \right) H \left(\frac{\pi}{2} \right) Y \dots\dots\dots (98)$$

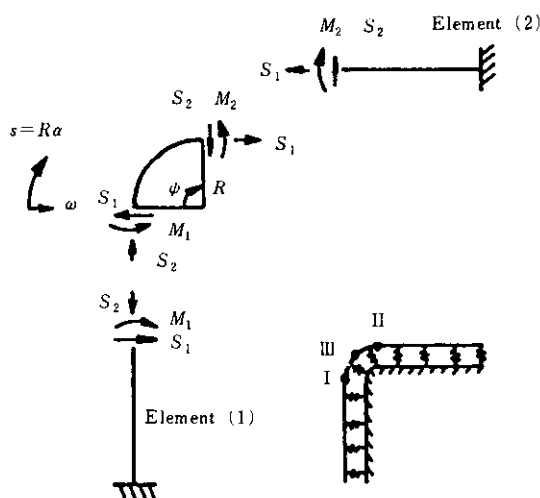


Fig. 11 Bending moments and shear forces of 90° bend fully supported by elastic foundation

4. 数値計算例と考察

数値計算にあたって、Table 2 に示す諸量を用いた。すなわち、対象地盤として新耐震設計法に規定する4種類の地盤 (S_1, S_2, S_3, S_4) を想定し、速度応答スペクトル値は、同基準に定める値を使用した。また、埋設パイプラインの諸元としては、Table 3 に示す値を採用した。

Table 3 Pipe dimensions for calculation

Diameter,	D (mm)	611.3
Thickness,	d (mm)	10.3
Radius of curvature,	R (mm)	$1.5 \times D$
Pipe factor,	h	0.1011
Stress intensification factor,	i	4.147
Flexibility factor,	n	16.32

4.1 直管に対する変換係数の特徴

Fig. 12 は直管に対する変換係数 β_s を求める近似式(10)式と厳密式(31)式を比較したものである。近似式が若干大きな値を示すが、全般的に両者が良い一致を示している。しかし、Fig. 13 に示すように、地震波長が長くなると、地盤と埋設管の比 Δ_R/Δ_G は近似式のほうが過小評価の傾向を示す。

4.2 T字管に対する変換係数の特徴

Fig. 14 はT字管の変換係数に及ぼす地震波長の影響を示したものである。波長150~400m区間で第2~4種地盤に対する曲線が急増しているのは、その区間で直管にすべりが発生し、T字管部に大きな相対変形 Δ_R が作用したためである。

Fig. 15 はT字管が埋設されている弾性梁のバネ

定数を与える地盤反力係数 k_0 の効果を示したものである。同図は k_0 が大きく、すなわち、バネ剛性が大きくなる(周辺地盤による管の変形拘束が大きくなる)にしたがって、変換係数も増大する(管に発生するひずみも増大する)傾向を示している。Fig. 16 はT字管の主管の管径 D_1 と枝管の管径 D_2 が変化した場合の影響を検討したものである。管厚は $d_2=10.3\text{mm}$ ($D_2=318.5\text{mm}$, 611.3mm), $d_2=8.2\text{mm}$ ($D_2=216.3\text{mm}$) を使用した。同図によれば、枝管径が小さくなるにしたがって、枝管に発生するひずみが増大する傾向にあること、しかもその傾向は剛な地盤ほど著しいことを示している。逆に、軟弱な地盤では D_2 が小さくなるにしたがって主管のひずみが小さくなる傾向が見られる。Fig. 17 ではT字管に入るRタイプおよびLタイプの地震波の入射角 ϕ を 0° から 90° まで変化させた場合の変換係数 $\beta_T(\phi)$ の特徴を検討した。同図ですべり開始ひずみ τ_{cr} が 0.1kgf/cm^2 と小さい値の場合T字管枝管部のひずみは大きく現われるが、 τ_{cr} が 0.5kgf/cm^2 以上になると τ_{cr} の値の大きさに関係なく同一の傾向を示し、主・枝管の両ひずみ共相対的に小さな値を示す。

4.3 曲管に対する変換係数の特徴

Fig. 18 は曲管部のたわみ性と拘束条件の関係を比較したものである。同図によれば、Fig. 10 に示した部分的非拘束条件の曲管 (Elexible corner, $n>1$) では管端ひずみが最小を示し、Fig. 11 に示した全面的弾性支床拘束条件の曲管 (Imbedded flexible corner) では管端ひずみが剛結条件 (Rigid, $n=0$) に次いで大きな値を示す。このことより、埋設された曲管では周辺地盤による変形拘束のためのたわみ性は相対的に小さく、むしろ剛

Table 2 Ground surface conditions for calculation

Ground surface conditions		Classification of ground surface			
		S_1	S_2	S_3	S_4
Typical period,	T_G (s)	0.1	0.3	0.5	1.0
Shear velocity,	V_S (m/s)	500	300	200	150
Velocity response spectrum,	S_V (cm/s)	17.5	62.32	80	80
Wave length,	L (m)	50	112	142	231
Unit weight of soil,	ρ_G (kgf/cm ³)	0.002	0.0019	0.0017	0.0015
Lateral soil reaction,	k_0 (kgf/cm ³)	500	100	50	10
Critical shear stress,	τ_{cr} (kgf/cm ²)	0.1	0.1	0.1	0.1

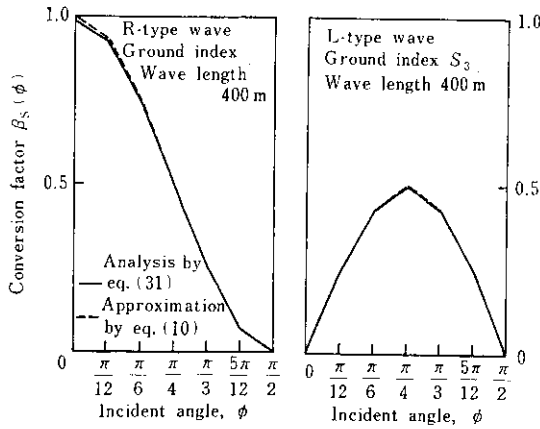


Fig. 12 Conversion factors for straight pipe derived from analytical and approximation methods

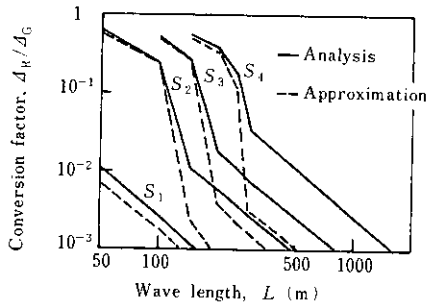


Fig. 13 Travelling wave length affecting conversion factors for relative displacement derived from analytical and approximation methods

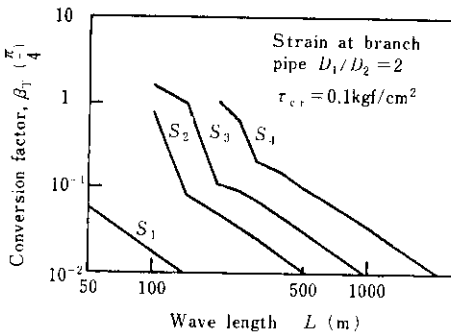


Fig. 14 Travelling wave length affecting conversion factor of Tee-junction

結に近い挙動をしているものと推察される。

Fig. 19 は曲率半径を管直径の 1.5 倍, 3 倍, 5 倍, 10 倍と変化させた時の曲管部変動係数の影響を示したものである。部分的非拘束, 全面的弾性

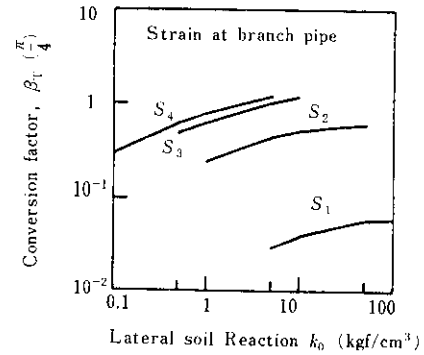


Fig. 15 Lateral soil reaction affecting conversion factor of Tee-junction

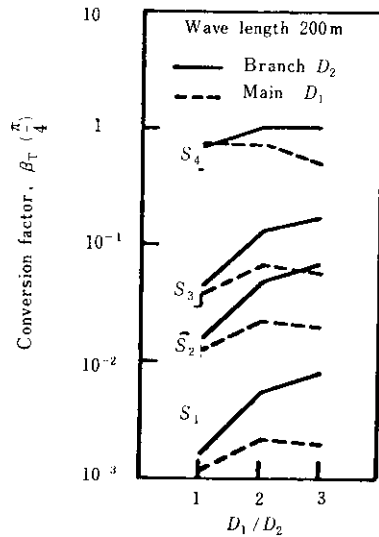


Fig. 16 Conversion factor for Tee-junction with two different pipe diameters

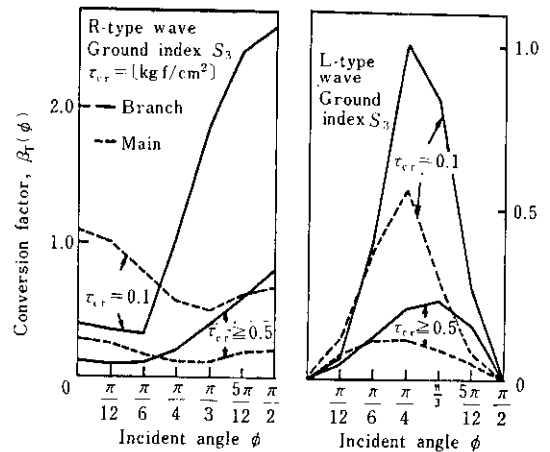


Fig. 17 Conversion factor for Tee-junction influenced by incident angle of travelling wave

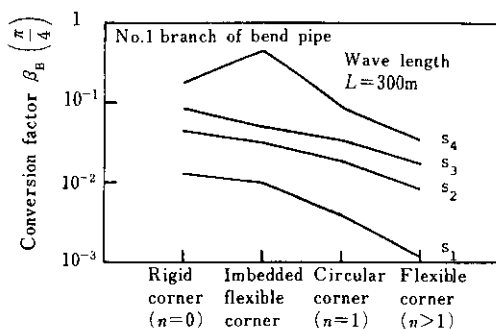


Fig. 18 Comparison of different analytical methods for conversion factor of bend pipe

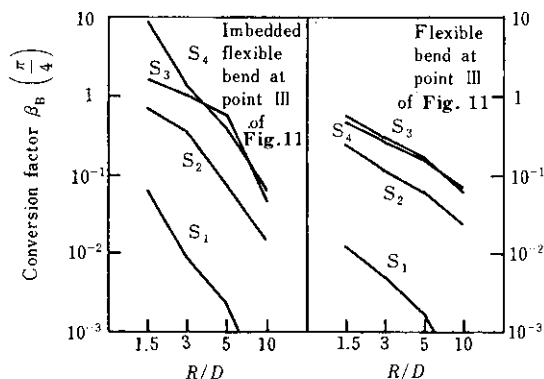


Fig. 19 Radius of curvature affecting conversion factor for 90° bend

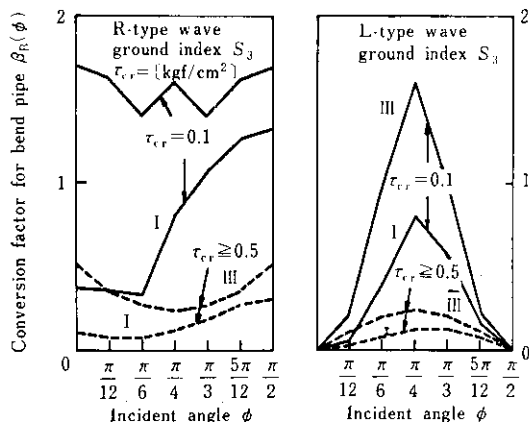


Fig. 20 Conversion factor of 90° bend influenced by incident angle of travelling wave

支床拘束の両条件の曲管とも、曲率半径の増大とともにそのひずみ集中を急速に減じていることがわかる。

Fig. 20 は、地震波の入射角 ϕ を 0° から 90° ま

で変化させたときの曲管部材端(I)と中心部(III)の変動係数の変化を検討したものである。Fig. 17に示すT字管の場合と同様の特徴を示しており、 $\tau_{cr}=0.1\text{kgf/cm}^2$ のすべりやすい埋設条件のとき、曲管のひずみが急増する可能性のあることを示している。

5. 結 論

本研究は、地震時に多くの被害をこうむっている埋設パイプライン異形管部の地震時ひずみ評価式を誘導したものである。日常の耐震設計計算に供しうるように、いくつかの簡易計算式を提案しその精度、適用性について検討した。以下に得られた成果を列挙する。

- (1) 直管の軸ひずみを推定する変換係数は、近似式と厳密式でよい一致を示した。しかし、地盤と管との相対変位は、波長が長いと近似式が過小評価する傾向を示した。
- (2) T字管は、短波長が卓越する地震波によって比較的大きなひずみを発生しやすい。また、地盤反力係数が大きい程、そして枝管径が小さい程、ひずみは大きくなる傾向を示す。
- (3) 埋設曲管のたわみ性は、周辺地盤による拘束のため、地上にある曲管のたわみ性よりも小さい
- (4) 曲率半径を大きくすることは、曲管部中央のひずみ集中を減少させるのに有効な手段である。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木技術研究所：「新耐震設計法(案)」昭和52年3月、土木研究所技術資料、第1185号
- 2) 木岐憲三：「構造物の耐震解析」、技報堂、昭和56年4月、pp.54-55.
- 3) 小池 武：「埋設ライフラインパイプの地震時ひずみ」、川崎製鉄技報、Vol.12, No.2, 1980, pp.106-114.
- 4) 宮島信雄・宮内二郎・大隈史郎：「パイプライン曲管部の埋設時挙動に関する実験的研究」、第13回土質工学研究発表会、No.323, 1978, pp.1289-1292.