

コンクリート補剛部を有する有継手埋設管の地震時 応力と継手変位の解析

後藤尚男・杉戸真太・亀田弘行・磯田厚志

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF JOINT-CONNECTED BURIED PIPELINES INCLUDING CONCRETE-FIXED SECTIONS

By *Hisao GOTO, Masata SUGITO, Hiroyuki KAMEDA*
and *Atsushi ISODA*

Synopsis

Estimation Equations for Strain and joint displacement of joint-connected buried pipes under seismic loads have been proposed. Response analysis of buried pipes for straight and concrete-fixed sections have been carried out with several analytical parameters as incidence wave, incidence angle to longitudinal direction, and pipe diameters. Axial and bending strain, and joint displacement have been represented as a function of ground strain and apparent wave length in longitudinal direction. Further, the effective construction method for concrete-fixed section which reduces bending stress of pipes there has been suggested.

1. 序 論

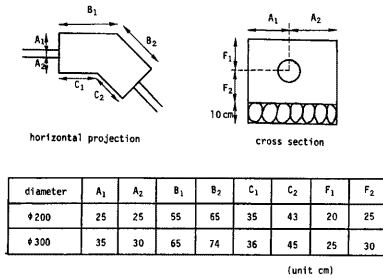
水道・ガス供給システムに代表されるライフライン系の耐震性に関する研究は、埋設管路の地震時挙動に関する多くの実験的^{1),2)}あるいは理論的解析^{3)~7)}や、システムとしての信頼度解析法^{8)~10)}が種々提案され、応用面でも従来からよく指摘されてきた管と地盤とのすべりによる応力低減の効果が「ガス導管耐震設計指針¹¹⁾」に取り入れられるなど、多くの成果を得ている。しかしながら、現実のシステムにおいては施工上あるいは構造上の問題により複雑な構造形式をとる部分も多く、このような個々の特殊な構造形式に対する耐震的検討は十分されているとは言えない。ここでは、このような構造形式の一つであり、主に上水道システムの有継手管の曲り部では例外なく用いられているコンクリート補剛部をとり挙げ、その地震時応力および継手変位に関して検討する。

以下第2章では、上水道配水幹線の曲り部および分岐部において用いられているコンクリート補剛部の構造特性について京都市の例を挙げて説明しその解析モデルを示す。つぎに第3章では、補剛部のない直管部と補剛部を含むモデルに対し、入力の変位振幅、入射角を変化させた応答解析を行い結果の考察を行う。さらに第4章では、補剛部のない部分と補剛部に分けて、入力の地盤ひずみ、波長、管径等と管体応力、継手変位の関係を簡略式で表し、有継手管の地震時応答量の簡易推定法のための基礎的情報とする。また、補剛部付近で発生する曲げ応力低減のための施工上の提言も行う。

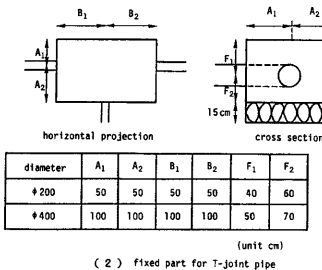
2. 有継手埋設管の曲り部および分岐部における構造特性

2.1 コンクリート補剛部の構造特性

曲り部あるいは分岐部に用いられる異形管は、管の湾曲部において水圧の不平均力および水流の方向の変化による遠心力によって管に移動が生じやすい。このために異形管部には継手部も含めてコンクリートを巻



(1) fixed part for 45° bent pipe



(2) fixed part for T-joint pipe

Fig. 1 Dimensions for Concrete-Fixed Sections of Bent and T-joint Pieps (Kyoto City).

2.2 補剛部を有する埋設管の解析モデル概要

前節で示した補剛部での地震時挙動を知るため、次章で行う応答解析に用いる補剛部の解析モデルを示す。現実のシステムにおいては、補剛部は曲管や丁字管のように管路が方向を変えたり分岐する部分にみられるが、解析結果に一般性を持たせるため、ここでは直管部の一部を補剛したモデルを考える。Fig. 2 に、直管部に補剛を施したモデルを示す。同図において、コンクリート巻厚は 30 cm とし、補剛部端から継手までの距離 l_j は φ200, 400, 800, 1650 に対しそれぞれ $l_j=470, 570, 570, 370$ cm とする。これらの値は各管の管長より 30 cm 短い値である。

3. 有継手埋設管の地震応答解析

3.1 伝達マトリックス法による応答解析手法概要

本研究で行う地震応答解析は、弾性床上の梁理論に基づく静的解析であり、伝達マトリックス法を利用した荷重増分法により管と地盤とのすべり等を考慮した非線形計算を行う。伝達マトリックス法を利用した埋設管の地震応答解析については文献3)によりたい。ここでは、同手法によるコンクリート補剛部における伝達マトリックスおよび補剛部における地盤反力の取り扱い方について述べる。

(1) コンクリート補剛部における伝達マトリックス

本解析で扱う直管部にコンクリートで補剛を施した部分のモデル (Fig. 2) の定式化を行う。解析において次の仮定を設ける。

- a) Fig. 3(a)に示すように、地盤変位は補剛部各部分において異なる値をとるが、入射波の波長が補剛部の管軸方向長に対して非常に長いことから Fig. 3(b)に示すように補剛部中心における地盤変位で一様とする。これは管軸直角方向でも同様とする。

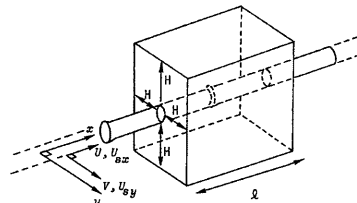


Fig. 2 Concrete-Fixed Model for Response Analysis.

きつけ管の移動・継手部の逸脱を防止する措置がとられている。このような補剛部では地震時において地盤とのすべりが生じにくく、さらに継手部での曲げ応力解放の効果が期待できないため、直管部で生じない曲げ応力が生じたり、補剛部近傍の継手変位が大きくなることが考えられる。Fig. 1 は、京都市上水道システム配水幹線のコンクリート補剛部の一例である。同図に示されるように、底面に敷石を置き巻き厚は 25~30 cm 程度であり、軸方向についても継手より 30 cm 程度のところまで履われている。φ400 以上の口径の大きな管についてもほぼ同様な施工が施されている。

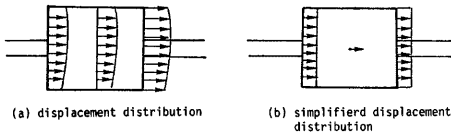


Fig. 3 Displacement Distribution at Concrete-Fixed Section.

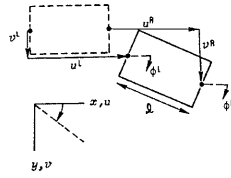


Fig. 4 Equilibrium of Displacement at Concrete-Fixed Section.

b) コンクリート補剛部は剛体とする。

以上の仮定のもとに、補剛部両端に接続する部分の埋設管の状態量（変位・断面力）間の関係を次に示す。Fig. 4 に示すように、補剛部両端における変位の関係は回転角が微小なものととして以下のように表わせる。

x 方向（管軸方向）変位成分

$$u^R = u^L - l \cdot (1 - \cos \phi^L) \doteq U^L \quad \dots\dots\dots (1)$$

y 方向（管軸直角方向）変位成分

$$v^R = v^L + l \cdot \sin \phi^L \doteq v^L + l \cdot \phi^L \quad \dots\dots\dots (2)$$

回転角

$$\phi^R = \phi^L \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに u^L, u^R ; 補剛部左端（添字 L ）、右端（添字 R ）における x 方向（管軸方向）変位成分。(cm)

v^L, v^R ; 補剛部左端、右端における y 方向（管軸直角方向）変位成分。(cm)

ϕ^L, ϕ^R ; 補剛部左端、右端における回転角。(rad)

l ; 補剛部の管軸方向長。(cm)

次に断面力の関係は、Fig. 5 に示す方向を正方向として以下のように表わせる。

軸力

$$N^R = N^L + k_x \cdot (u_{xx} - u^L) \quad \dots\dots\dots (4)$$

曲げモーメント

$$M^R = M^L + k_\theta \cdot \phi^L \quad \dots\dots\dots (5)$$

せん断力

$$Q^R = Q^L + k_x \cdot (u_{yy} - v^L) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 N^L, N^R ; 補剛部左端（添字 L ）、右端（添字 R ）における軸力。(kg)

M^L, M^R ; 補剛部左端、右端における曲げモーメント。(kg・cm)

u_{xx}, u_{yy} ; 補剛部における管軸方向（添字 x ）、管軸直角方向（添字 y ）地盤変位成分 (cm)。両断面において同一の値をとることを仮定している。

k_x, k_θ ; 地盤バネ定数 (kg/cm), (kg・cm/rad)。

式(1)～(6)を用いて、補剛部の両端における状態量間の関係（格間伝達式）は次式で表わされる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ \phi \\ N \\ M \\ Q \\ 1 \end{pmatrix}^R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_x & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & k_x \cdot u_{xx} \\ 0 & 0 & k_\theta & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -k_x & 0 & 0 & 0 & 1 & k_x \cdot u_{yy} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ \phi \\ N \\ M \\ Q \\ 1 \end{pmatrix}^L \quad \dots\dots\dots (7)$$

上式右辺の係数マトリックスが補剛部の両端における状態量の関係を結びつける格間伝達マトリックスであ

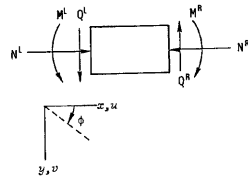


Fig. 5 Equilibrium of Force at Concrete-Fixed Section.

り、これを用いることにより補剛部を含む管路系の応答解析が可能となる。

(2) コンクリート補剛部に対する地盤反力の評価

コンクリート補剛部における地盤バネ特性として、次節で示す埋設管に対する地盤バネ特性をそのまま適用することはできない。その理由は、補剛部の形状・表面粗さ等全く埋設管と異なるからである。本研究では、剛体基礎に対する地盤反力の評価法として Barkan¹³⁾ が示した方法を補剛部に適用する。すなわち、以下のように地盤バネ特性を与える。

水平振動に対して

$$k_x = 0.5 \cdot k \cdot A \quad (\text{kg/cm}) \dots\dots\dots (8)$$

回転振動に対して

$$k_\theta = 1.5 \cdot k \cdot I_0 \quad (\text{kg} \cdot \text{cm/rad}) \dots\dots\dots (9)$$

ここに A ; 基礎と地盤との接触面積 (cm^2)

I_0 ; 回転軸に関する断面2次モーメント (cm^4)

k ; 地盤反力係数 (kg/cm^3)

地盤反力係数 k は、「中程度の強度の土」として与えられている¹¹⁾ 3.35~5.47 (kg/cm^3) の中間値 4.41 (kg/cm^3) を応答解析で用いるが、 k の応答量に対する感度を調べるために下限値 ($k=0.441 \text{ kg/cm}^3$) および上限値 ($k=44.1 \text{ kg/cm}^3$) についても一例を用いて解析する。

3.2 応答解析における入力特性と解析モデル

本節では、応答解析で対象とする解析モデルと入力特性に関する各モデルパラメータについて説明する。応答解析に先だち検討すべき項目として、(1)入力地震動、(2)地盤バネ、(3)埋設管の特性、(4)管路系モデル、の4項目がある。以下、これらについて概説する。

(1) 入力地震動

地中に埋設された管体に力を及ぼす地盤震動としては、敷設された管の各点で異なる動きを示す震動が考えられる。このような地盤震動は地表面に沿って伝播する表面波や、地表面に対しある角度をもって入射する実体波により生ずる。本解析では、これらの地盤震動を単一正弦波曲線で表わされる進行性波動として入力地震動に用いる。解析に必要なパラメータとしては、①波動の種類、②波長、③変位振幅、④管軸に対する入射角、⑤位相である。

① 波動の種類

埋設管の応答解析に関する従来の研究では、大部分が波の進行方向に変位する波(縦波)を扱っている。これは一般に波長、振幅が同じ場合には横波よりも縦波の方がより大きな応答を示すからである。しかしながら、Kameda Shinozuka⁹⁾ が指摘するように、管と地盤とのすべりを考慮した場合、横波の方が大きな応答を示す場合がある。したがって本解析では両者を扱うこととした。

② 波長

波長は120mに固定する。ただし、本解析では④で示すように管軸方向に対する地震波の入射角を様々に変化させる。埋設管の直管部の応答量はほとんど入射波の管軸方向成分により決まることを考えると、管軸方向に入射する種々の波長に関して解析することと同じであるため波長を固定しても一般性は失われなると考えられる。

③ 変位振幅

変位振幅は最大8cmまでを解析の対象とする。これより最大地盤ひずみは 4.19×10^{-3} となり、表面波による地盤ひずみとしては十分な値まで考慮することになる。

④ 管軸に対する入射角

管軸に対する入射角は $0^\circ \sim 75^\circ$ まで 5° 刻みの16ケースを対象とする。

⑤ 位相

補剛部における管体の応力および継手変位は補剛部での入力位相によって変化する。このため、合成応

力が最大となる位相（圧縮ひずみ最大）および継手変位最大となる位相（引張ひずみ最大）の両者を扱うこととした。

(2) 地盤バネ

与えられた地盤変位が地盤バネを介して管体に力を及ぼすものとし、管軸方向および管軸直角方向について以下のように与える。

① 管軸方向地盤バネ特性

Fig. 6 はガス導管加重実験¹¹⁾により得られた (a) せん断応力, (b) 限界せん断応力の点での相対変位, (c) 管軸方向地盤ばね定数, についての累積百分率である。この実験はガス導管を対象としているが周辺地盤条件が上水道幹線路とほぼ等しいことから、以下の応答解析における地盤バネ定数を同図より決定する。すなわち、管の応力に大きく影響する限界せん断応力 τ_{cr} を同図の標準値 $\tau_{cr} = 0.15 \text{ kg/cm}^2$ とし、管軸方向単位面積当り地盤ばね定数は $k_1 = 0.6 \text{ kg/cm}^2$ とする。この結果、限界相対変位は 0.25 cm となり、管と地盤との相対変位が 0.25 cm となるとすべりが生じるバネ特性となる。

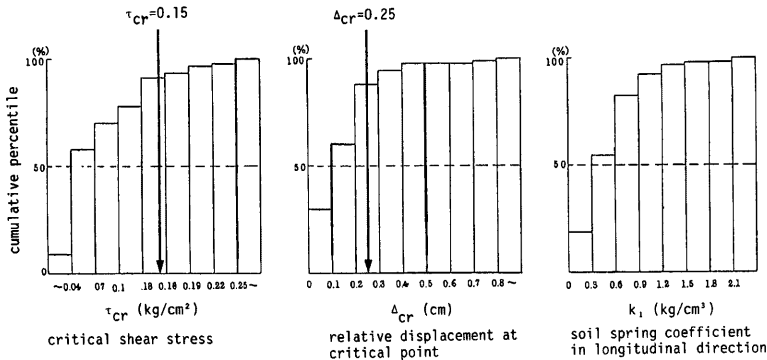


Fig. 6 Experimental Statistics of Soil-Spring Characteristics.¹¹⁾

一方、日本瓦斯協会¹³⁾によれば有継手地中埋設管の地盤バネ特性の大きな特徴として、継手張り出し面積の増加がすべり現象を低減させることを指摘している。すなわち、継手面積 A (cm²)、継手変位量 δ (cm) のとき、継手の張り出し面積によって次のような F (kg) の管体 1 本当り拘束力が発生する。

$$F = 3.49 \times A \times \sqrt{\delta} \quad (\text{kg}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

上式を埋設管の単位面積当りに換算すれば、

$$\frac{F}{\pi DI} = 3.49 \cdot \frac{A}{\pi DI} \cdot \sqrt{\delta} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 D ; 管外径 (cm)

l ; 管 1 本当り長さ (cm)

となり、式 (11) の左辺は継手張り出し面積による管単位面積当りの限界せん断応力の増分値を表わしている。

本解析では前述したガス導管耐震設計指針の標準値で決定される地盤バネ特性に対し式 (11) を用いて、継手張り出し面積の効果を導入する。式 (11) は継手変位をパラメータとした放物線形の関数であるが、本解析では相対変位のレベルによって 2 本の直線でその関係を表わす。すなわち、限界せん断応力の増分を $\Delta\tau$ とすれば、

$$A\pi = \begin{cases} 3.49 \cdot \frac{A}{\pi D l \sqrt{\delta_0}} \cdot \delta & (\delta \leq \delta_0) \\ 3.49 \cdot \frac{A}{\pi D l} \cdot \frac{(\sqrt{\delta_1} - \sqrt{\delta_0})}{\delta_1 - \delta_0} \cdot (\delta - \delta_0) & (\delta \geq \delta_0) \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

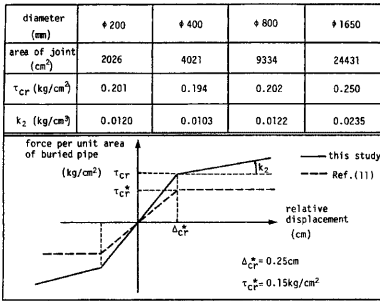
ここに δ_0 ; 管路がすべり始めるときの限界相対変位 (cm)

δ_1 ; すべり始めて以降の曲線を直線で表わすために決定した、曲線と直線が交差する時に対応する相対変位 (cm)

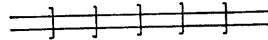
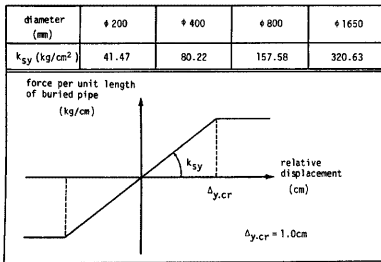
ここでは、すべりによる大きな相対変位を想定して、 δ_1 は比較的大きめの値を採用し、本解析における最大変位振幅に対応する 8cm とした。上記のことを考慮した上で、最終的な地盤バネ特性を Table 1(a) のように設定した。

Table 1 Soil-Spring Characteristics.

(a) soil-spring characteristic in longitudinal direction



(b) soil-spring characteristic in transverse direction



(1) straight pipes



(2) straight pipes with fixed section

Fig. 7 Analytical Models.

② 管軸直角方向地盤バネ特性

管軸直角方向単位長さ当り地盤バネ定数 k_{sy} は、①で示した管軸方向単位面積当りの地盤バネ定数 k_1 (継手張り出し面積を考慮していない値) と次のような関係が実験等²⁾ によって得られている。

$$k_{sy} = \pi D k_1 \quad (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots (13)$$

管軸直角方向については、塑性域に達する限界相対変位 $\Delta_{y,cr}$ を高田・高橋・山部³⁾ に従って次式のように与える。

$$\Delta_{y,cr} = 1 \quad (\text{cm}) \dots\dots\dots (14)$$

Table 1(b) に各管径の管軸直角方向地盤バネ特性を示した。

(3) 解析モデル

上水道システムにおいて現在最も普及しているダクタイル鋳鉄管 (A 型および K 型) を対象とし、管径は配水幹線で主に利用されている φ200, φ400, φ800, φ1650 (単位 mm) の 4 種として解析モデルを設定した。管路系モデルは、Fig. 7 に示す (1) 補剛部を含まない直管管路系、(2) コンクリート補剛部を含む直管管路系の 2 種である。

3.3 数値計算結果と考察

これまで示した各モデルの諸定数により応答解析を行った結果について考察する。解析において以下のような仮定および数値計算上の手法を用いた。

- 1) 埋設管は 1m ごとに分割して伝達計算を行った。

2) 非線形挙動の解析は荷重増分法によって行った。増分のステップ(地盤変位の増分値)は最大0.1cmとした。

3) 各モデルとも、境界では、管は軸方向・軸直角方向のいずれも地盤と同じ動きをするものとし、回転は拘束されないものとした。すなわち、境界条件はヒンジである。

以下に、補剛のない管路とある管路に分けて解析結果を示す。

(1) 直管管路系(補剛のない管路)

Fig. 8, 9 に $\phi 800$ の直管管路系に縦波が入射角 45° で入射した場合の応答分布図を示した。変位振幅4cmの場合(Fig. 9)では地盤と管との間にすべりが生じ、すべりが生じている領域を図中(B)に示した。両図において有継手管特有の応答挙動、すなわち(1)引張ひずみの生じる領域では継手がひき抜け側に変位して軸応力はほとんど発生しない、(2)圧縮ひずみの領域では継手が変位せず軸力が発生する、が明瞭に現れている。

以後の検討においては、管路系の最大継手変位(最大継手抜け出し量)および最大合成応力(軸応力+曲げ応力の最大値)のみに着目することとする。

縦波および横波入力による最大継手変位および最大合成応力を、入射角ごとに $\phi 200$ と $\phi 400$ に対して Fig. 10, 11 に示した。継手変位については、各変位振幅とも縦波の場合は 0° 、横波の場合は 45° の入射角に対し最大値をとり、変位振幅に比例している。また、管1本当りの長さが $\phi 200$ は5m、 $\phi 400$ は6mであり、同一入力条件下においては $\phi 400$ の継手変位が $\phi 200$ の継手変位のほぼ1.25倍の値を示しており、管長比となっている。

一方、最大合成応力は管と地盤とのすべりの影響を受けるため、解析結果は単純でない。まず縦波による結果をみると、変位振幅が2cm程度までは入射角 0° で最大値を示し変位振幅に比例しているが、それ以上になると比例せず、さらに4cm程度以上になると同一変位振幅下での最大合成応力を与える入射角が徐々に大きくなる。横波の場合、変位振幅が2~3cm程度までは最大合成応力は振幅に比例し入射角 45° で最大値を示すが、それ以上に振幅が大きくなると応力は振幅に比例せずさらに同一変位振幅下での最大合成応力を与える入射角が 45° より大きくなる。また、縦波の場合、入力の振幅が大きいと入射角 $0^\circ \sim 50^\circ$ 程度の範囲で最大合成応力は大きく異なるが、横波の場合は依然として入射角に大きく影響を受ける。

次に、同一変位振幅の縦波と横波による応答量を比較する。縦波・入射角 0° と横波・入射角 45° の継手変位を比較すると、縦波の方がほぼ2倍大きく、管軸方向のひずみ振幅と同じ比率になっている。一方、最

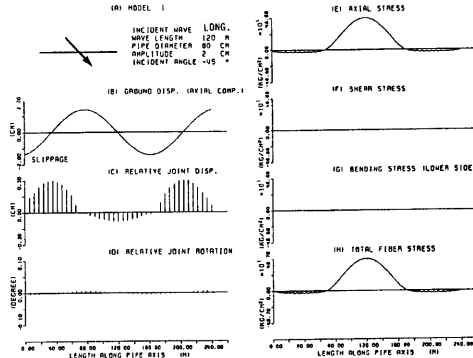


Fig. 8 Distributions of Response Values.

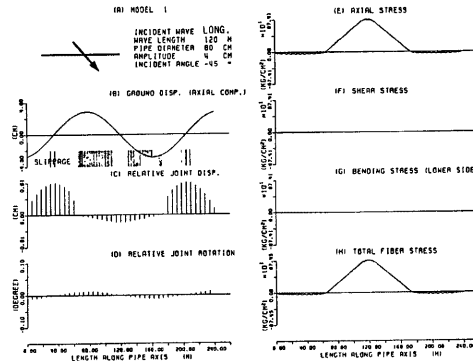
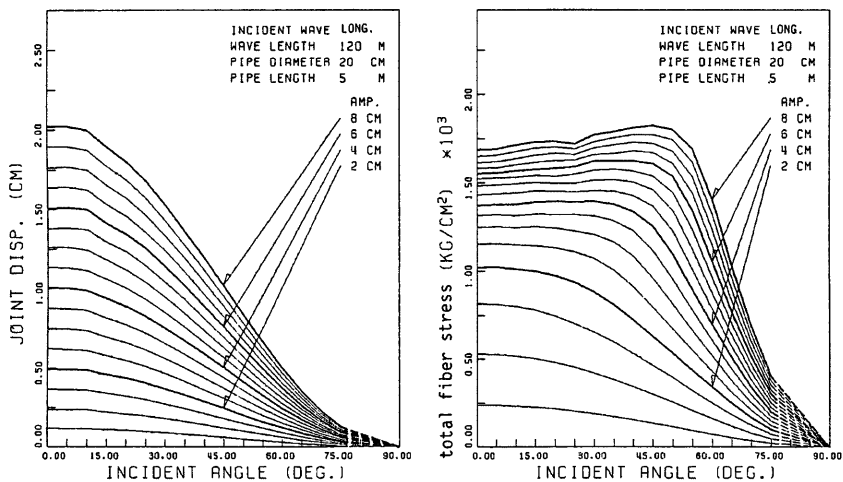
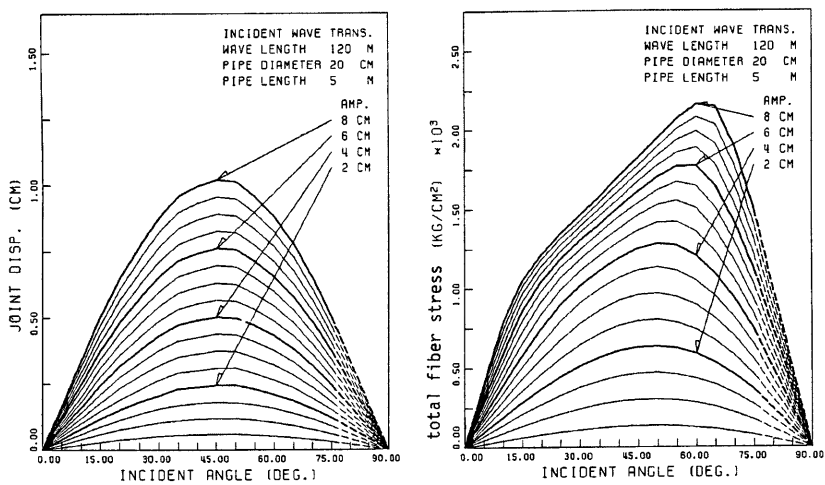


Fig. 9 Distributions of Response Values.



(1) longitudinal wave



(2) transverse wave

Fig. 10 Joint Displacement and Total Fiber Stress versus Incident Angle (straight pipes, $\phi 200$).

大合成応力の各変位振幅における最大値のみを比較すると、変位振幅が4 cm程度までは縦波による方が大きい、さらに変位振幅が大きくなると横波による方が大きくなる。このことは、Kameda, Shinozuka⁵⁾による理論解析結果においても指摘されている。Fig. 12に、各管径ごとに縦波および横波による最大合成応力(最大値を与える入射角における値)を変位振幅に対して示した。

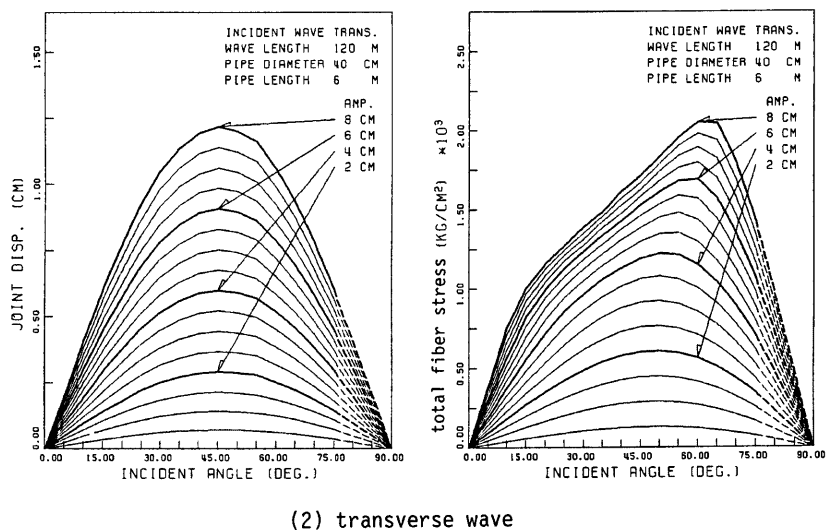
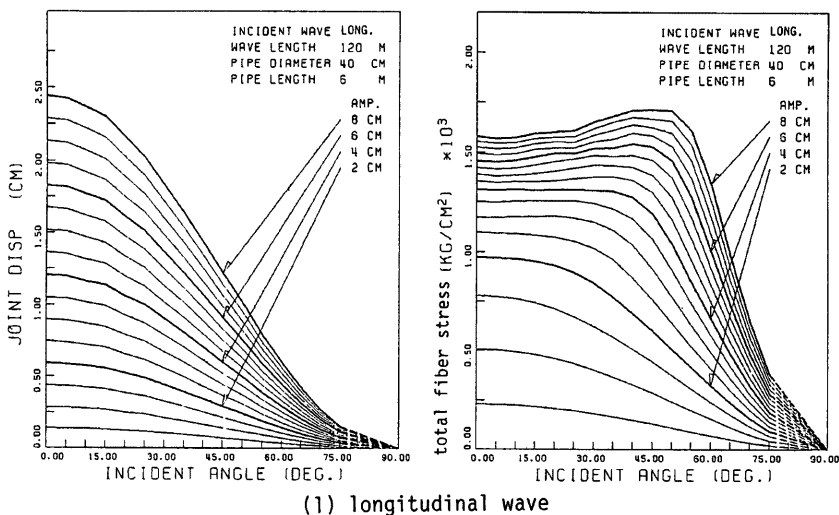


Fig. 11 Joint Displacement and Total Fiber Stress versus Incident angle (straight pipes, $\phi 400$).

(2) コンクリート補剛部を含む管路系

縦波および横波入力による最大継手変位および最大合成応力を、入射角ごとに $\phi 200$, $\phi 400$ に対して Fig. 13, 14 に示した。ただし、最大継手変位はコンクリート補剛部において引張りずみ最大となる位相、また最大合成応力は補剛部において圧縮ひずみ最大となる位相でそれぞれ入力した場合の値であり、これらは同一

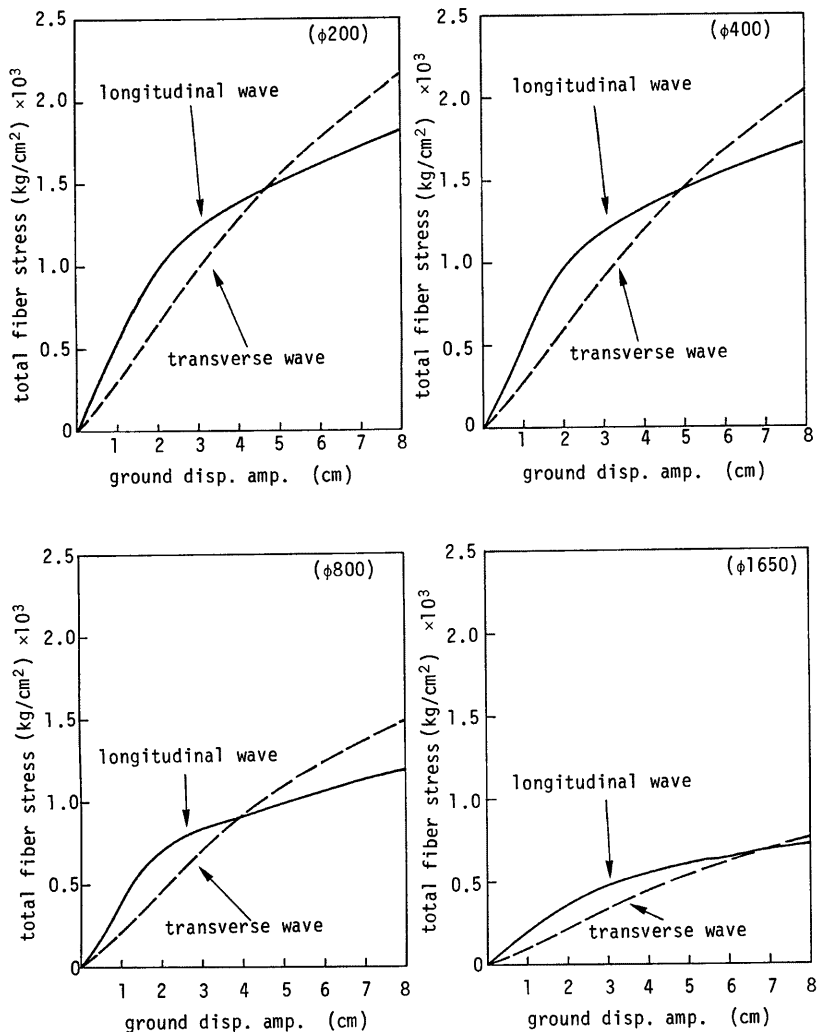
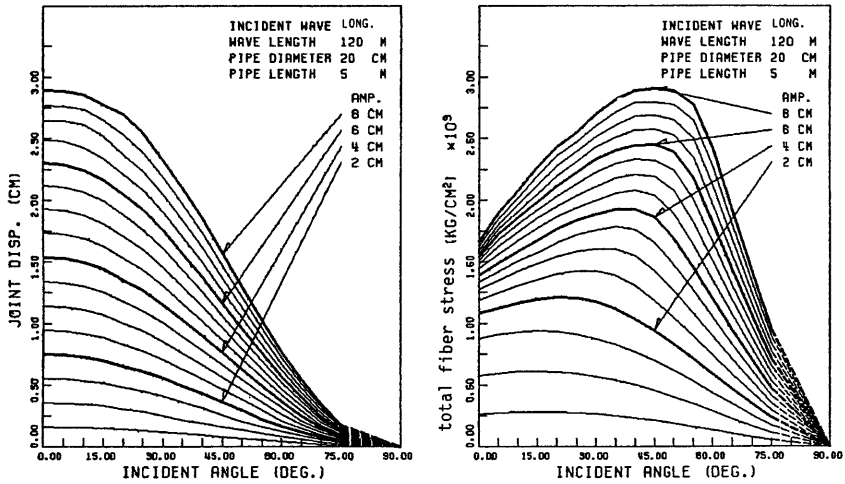
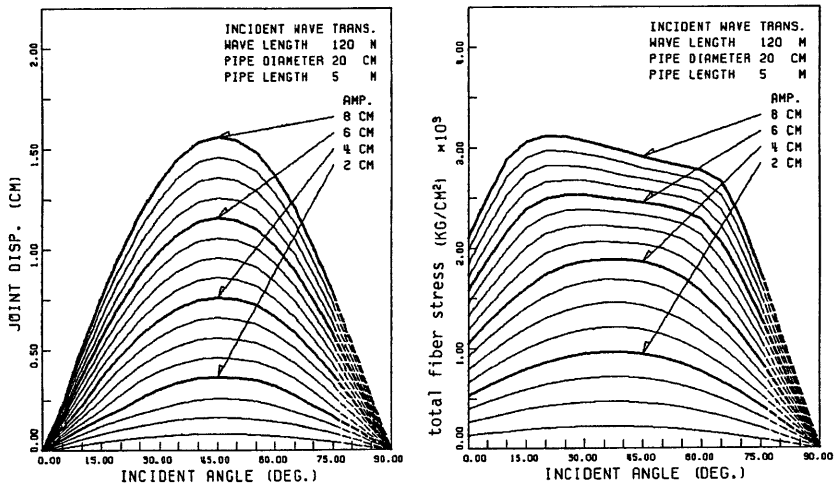


Fig. 12 Total Fiber Stress versus Displacement Amplitude (straight pipes).

変位振幅における継手変位，合成応力の最大値を与える位相である。継手変位は Fig. 10, 11 (1) 補剛のない場合)と同様変位振幅に比例するが，(1) の場合より大きな値となっている。これは補剛部両端の継手間の距離が一般に管一本当りの長さより長くなるからである。最大合成応力も，補剛部付近に発生する曲げ応力の影響を受け，補剛部のない場合と比べてさらに複雑な傾向を示している。補剛部がある場合においては， $\phi 200$ (Fig. 13)， $\phi 400$ (Fig. 14) とともに変位振幅が 3 cm 程度までは縦波の方が最大合成応力の最大値



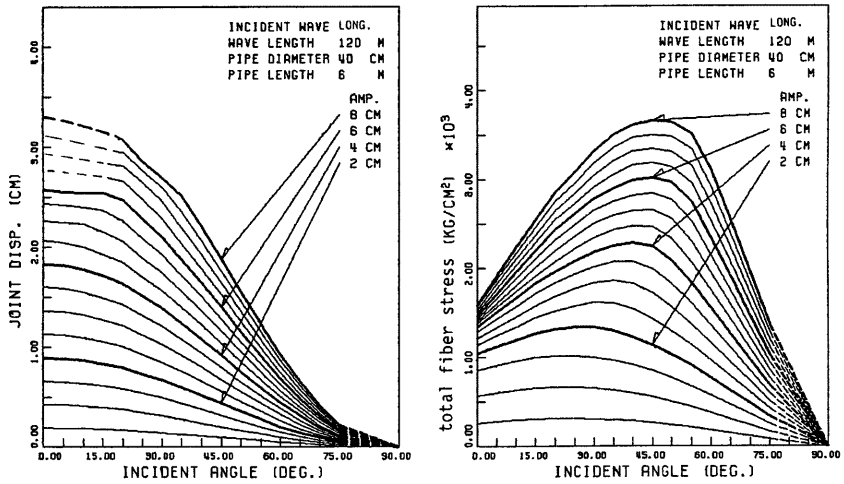
(1) longitudinal wave



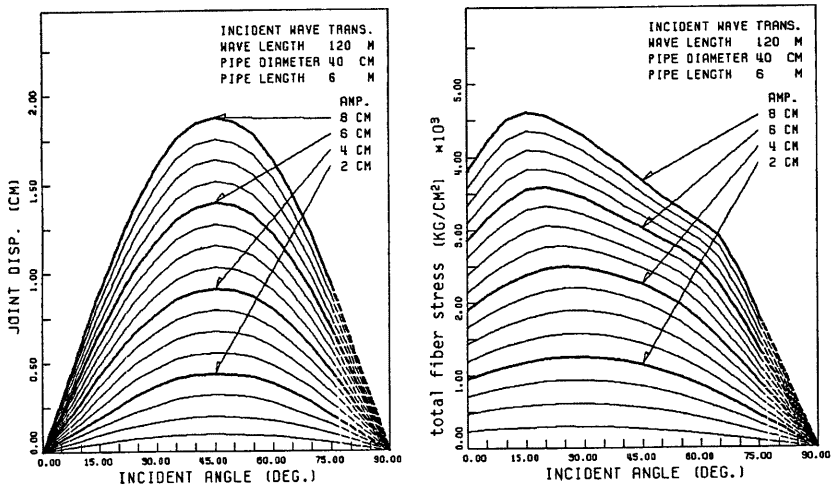
(2) transverse wave

Fig. 13 Joint Displacement and Total Fiber Stress versus Incident Angle (concrete-fixed section, $\phi 200$).

(各入射角における最大値) が大きく、それより変位振幅が大きくなると横波の方が大きい。補剛がある場合の合成応力は、補剛がない場合の合成応力（この場合曲げ応力はほとんど発生しない）に補剛部で生じる曲げ応力を加えたものと考えてよい。そこで、Fig. 15, 16 に $\phi 200$ および $\phi 400$ の場合の最大合成応力に寄与する軸応力と曲げ応力の割合を示した。一般に縦波よりも横波の方が最大合成応力に対する



(1) longitudinal wave



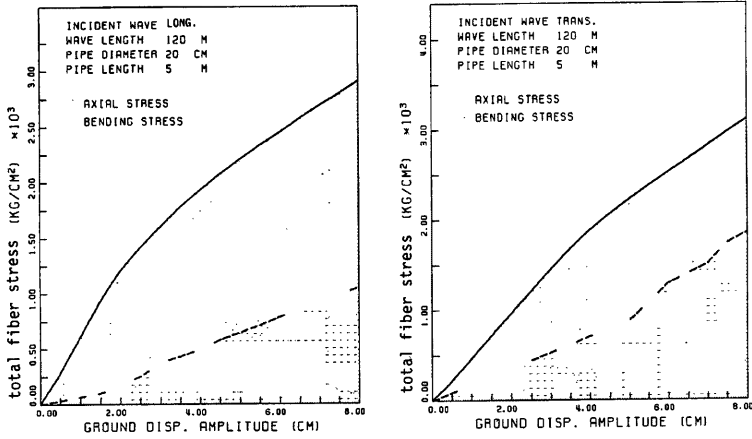
(2) transverse wave

Fig. 14 Joint Displacement and Total Fiber Stress versus Incident Angle (concrete-fixed section, $\phi 400$).

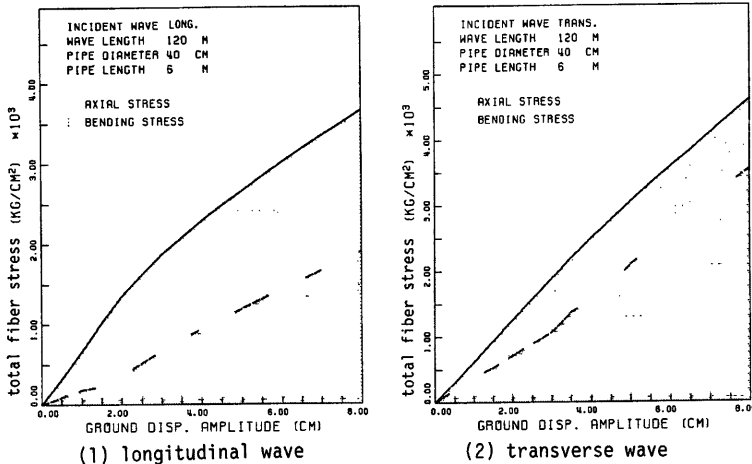
曲げ応力の寄与が大きいことがうかがえる。

これまでに得られた結果を簡単にまとめると以下のようになる。

- 1) 継手変位は管体一本当りの長さのみで決まる。補剛部がある場合は、局部的に継手のない長い管を敷設したのと同じ効果が働き継手変位が大きくなる。



(1) longitudinal wave (2) transverse wave
 Fig. 15 Axial Stress and Bending Stress versus Displacement Amplitude (concrete-fixed section, $\phi 200$).



(1) longitudinal wave (2) transverse wave
 Fig. 16 Axial Stress and Bending Stress versus Displacement Amplitude (concrete-fixed section, $\phi 400$).

- 2) 最大合成応力を与える入射角は、変位振幅が小さい場合には縦波の場合 0° 、横波の場合 45° であり、変位振幅が大きくなると管と地盤とのすべりが生じ、それぞれすべりが生じないときに比べ大きな入射角となる。補剛がある場合には大きな曲げ応力が生じるため、最大合成応力を与える入射角は補剛がない場合と異なる。
 - 3) 一般に補剛がある場合の方がない場合に比べ継手変位および合成応力が大きい。とくに、横波の場合、合成応力の差が大きい。
- 以上の結果より、コンクリート補剛部が耐震的に弱点となることが明らかとなった。次章では、これまで

の結果をまとめ、最大地盤ひずみと最大継手変位、最大合成応力との関係を補剛のある場合とない場合とに分けて示し、有継手管より成る埋設ライフライン系の地震時信頼度解析に有効に利用しうる埋設管応答量の簡易推定法について述べる。

4. 有継手埋設管の地震時応答量の簡易推定法と補剛部曲げ応力低減に関する提言

4.1 地震時地盤ひずみと有継手埋設管の応力・継手変位の関係

埋設管に入力される地震外力は、地すべり・沈下・液化化等局所的な地盤変化と、地震波動伝播による地盤の相対変位とに大別できる。これまでの解析はすべて後者の地震外力によるものであり、主に変位振幅、入射角等と応答量との関係について考察した。

ところで、将来を襲する地震動の埋設管への入射角を推定することは不可能であり、また震害予測の立場からは最も不利な条件を考慮すべきであろう。したがって、これまでの結果を地盤ひずみ（管軸方向および管軸直角方向）、波長と管の応答量との関係としてまとめ有継手埋設管の地震時応答量の簡易推定式を以下に示す。

これまでの解析より明らかなように、補剛部を含まない直管管路系では曲げ応力はほとんど発生しない。したがって、合成応力はほとんど軸応力によるものである。また、補剛部での最大軸応力は、同一の入力条件のもとでの直管管路系の最大軸応力とほぼ等しく、補剛部で発生する曲げ応力の分だけ最大合成応力が大きくなる。したがって、1) 直管管路系の継手変位、2) 補剛部での継手変位、3) 直管管路系の軸応力、4) 補剛部での曲げ応力、の4つの応答量について、管軸方向および管軸直角方向に入力される地盤ひずみとの関係を示す。この場合、縦波であるか横波であるかの区別をする必要はなく、簡便である。

縦波による応答解析結果のうち $\phi 200$ および $\phi 400$ をとりあげ、上に述べた4つの応答量と管軸方向地盤ひずみとの関係を管軸方向のみかけの波長ごとに Fig. 17, 18 に示した。また、横波入力の場合の同様の結果を Fig. 19, 20 に示した。継手変位および補剛部における曲げ応力は管軸方向および管軸直角方向の地盤ひずみのみに依存しているのに対し、軸応力は管軸方向の地盤ひずみが等しくても波長が長いほど大きな値となり、とくに管と地盤との間にすべりが生じるとその差が大きい傾向にある。このような応答特性は $\phi 800$ および $\phi 1650$ についても同様にみられる。また、このように管軸方向および管軸直角方向の地盤ひずみについて応答量をまとめると、入力の縦波および横波の区別が必要ないことがわかる。

以上の結果に基づき、継手変位、軸ひずみ、および曲げひずみと地盤ひずみとを結びつける変換係数 (conversion factor) β が以下のように得られる。

1) 継手変位

継手変位 d_j (cm) は管体一本当りの長さを $l=l(\phi)$ (単位: cm) として次のように表現できる。

$$d_j = \begin{cases} \beta_j \cdot \epsilon_{sj} \cdot l(\phi) & (\text{補剛のない部分}) \\ \beta_{jR} \cdot \epsilon_{sj} \cdot l(\phi) & (\text{補剛部}) \end{cases} \quad (15)$$

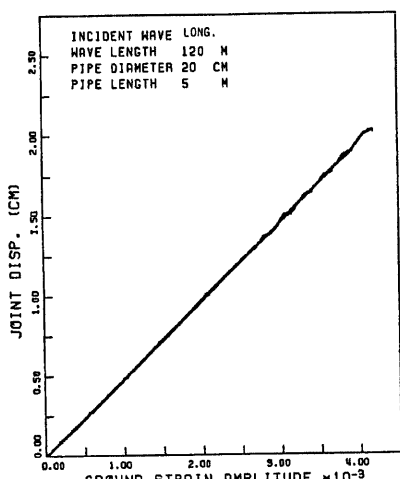
ここに、 ϵ_{sj} = 管軸方向地盤ひずみ、 β_j = 変換係数 (補剛のない部分)、 β_{jR} = 補剛部の変換係数である。Table 2 に、 β_j および β_{jR} の値を示した。

2) 軸ひずみ

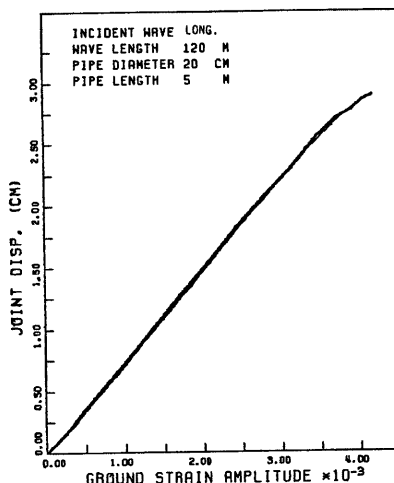
本解析結果により、軸応力は波長の関数であり、しかもすべりの影響により軸応力～地盤ひずみ間の単一の線形関係は得られないことがわかった。そこで軸ひずみの推定式に限り次のような表現法をとる。すなわち、ある波長に対して決まる管体軸ひずみ～地盤ひずみの関係を表わす曲線を3本の直線で近似することによって表現する。管体軸ひずみを ϵ_N 、管軸方向地盤ひずみ振幅を ϵ_{s1} 、変換係数を β_N として、

$$\epsilon_N = \beta_N(L_{11}, \epsilon_{s1}, \phi) \cdot \epsilon_{s1} + c(L_{11}, \epsilon_{s1}, \phi) \quad (16)$$

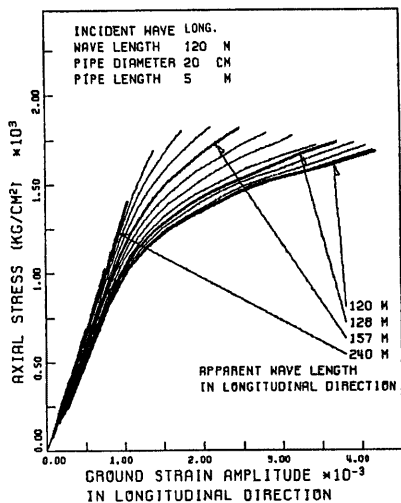
ここに、変換係数 β_N は管軸方向の見かけの波長 L_{11} 、管軸方向の地盤ひずみ振幅 ϵ_{s1} 、及び管径 ϕ の関数となり、その地盤ひずみの管体ひずみへの変換率を示していることになる。また、 $c(L_{11}, \epsilon_{s1}, \phi)$ はその条件下における直線の管体ひずみ軸の切片を表わす定数である。Table 3.1～3.4 に変換係数 β_N および定数 c を示した。



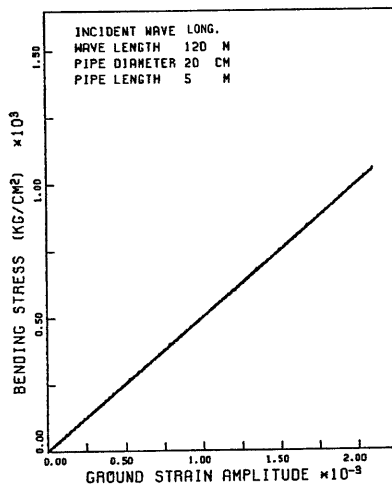
(1) joint displacement in straight pipes



(2) joint displacement in fixed section

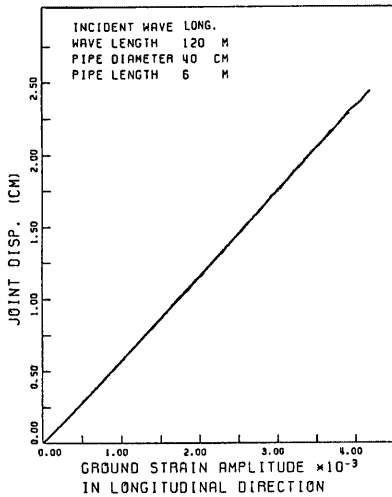


(3) axial stress in straight pipes

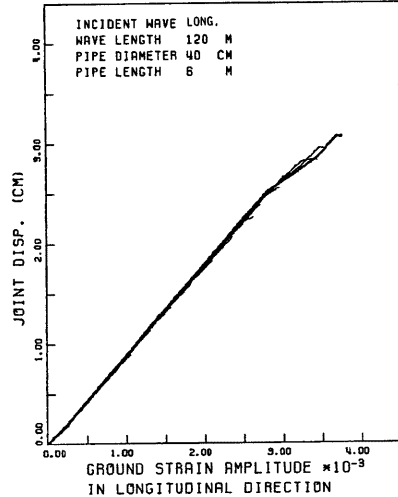


(4) bending stress in fixed section

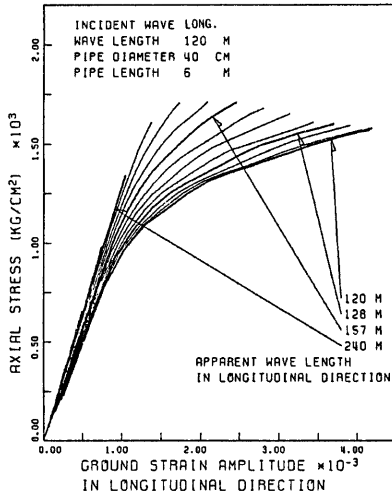
Fig. 17 Peak Response Values versus Ground Strain Amplitude in Longitudinal and Transverse Directions ($\phi 200$, longitudinal wave).



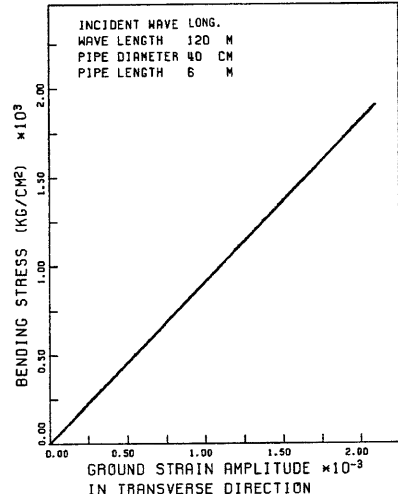
(1) joint displacement in straight pipes



(2) joint displacement in fixed section

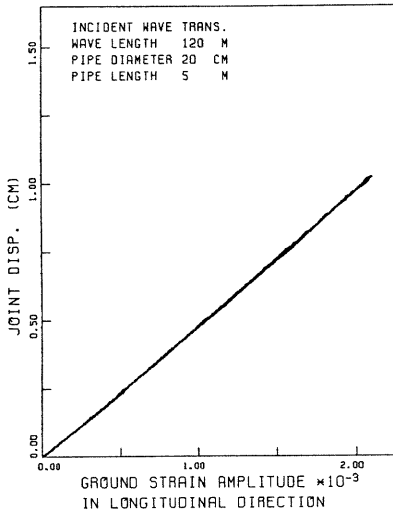


(3) axial stress in straight pipes

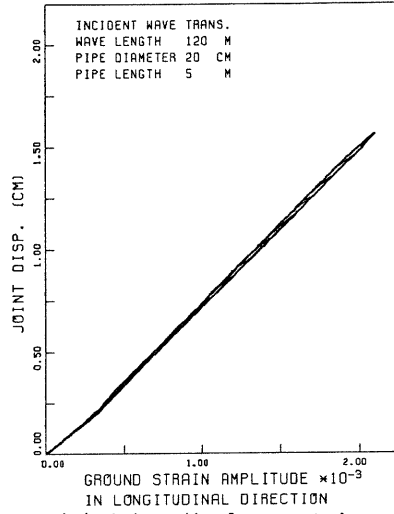


(4) bending stress in fixed section

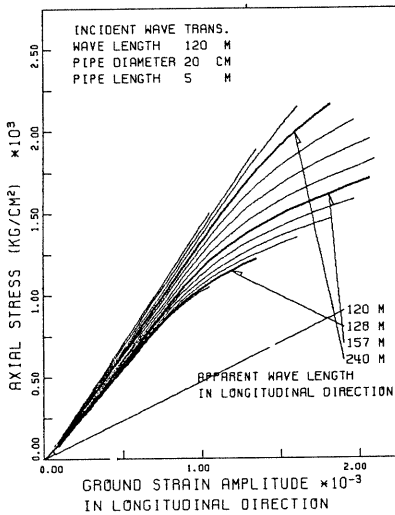
Fig. 18 Peak Response Values versus Ground Strain Amplitude in Longitudinal and Transverse Directions ($\phi 400$, longitudinal wave).



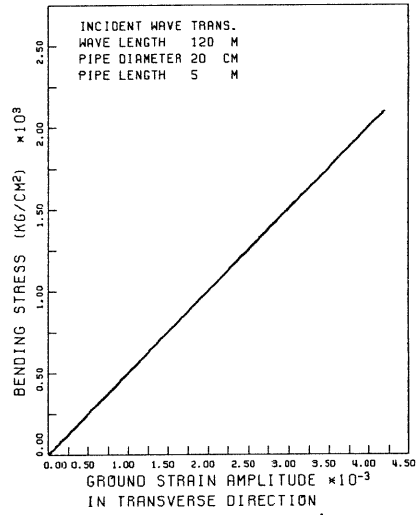
(1) joint displacement in straight pipes



(2) joint displacement in fixed section

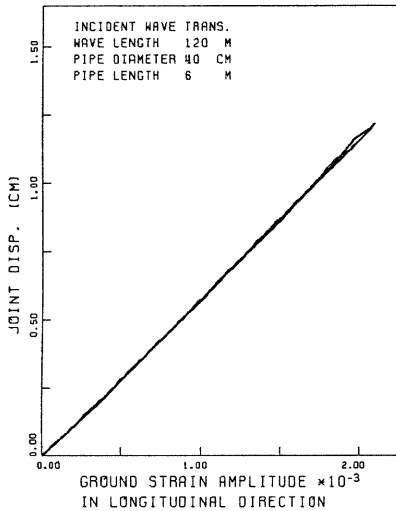


(3) axial stress in straight pipes

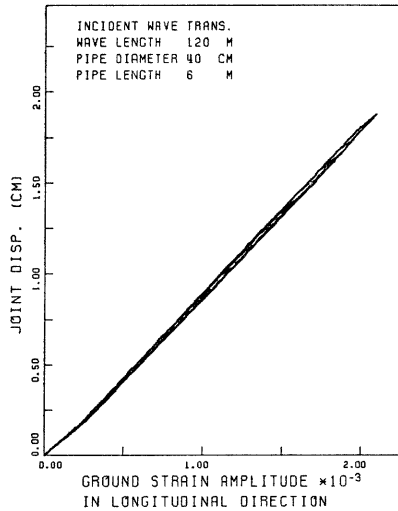


(4) bending stress in fixed section

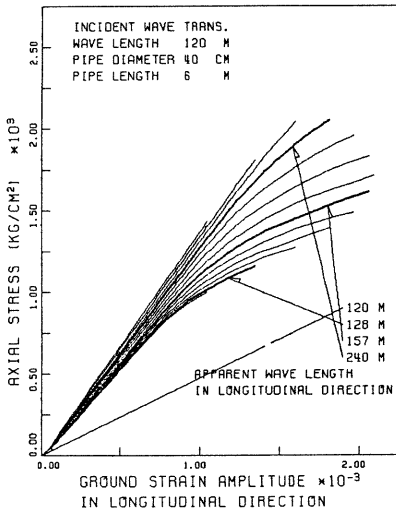
Fig. 19 Peak Response Values versus Ground Strain Amplitude in Longitudinal and Transverse Directions ($\phi 200$, transverse wave).



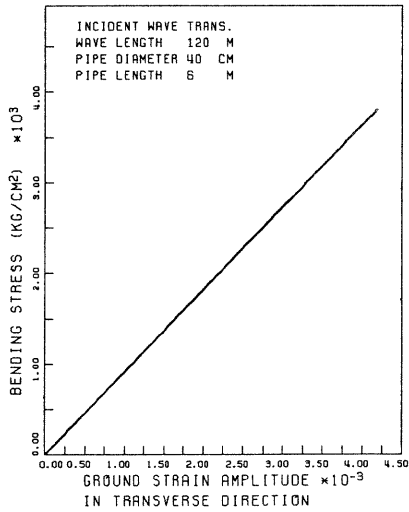
(1) joint displacement in straight pipes



(2) joint displacement in fixed section



(3) axial stress in straight pipes



(4) bending stress in fixed section

Fig. 20 Peak Response Values versus Ground Strain Amplitude in Longitudinal and Transverse Directions ($\phi 400$, transverse wave).

3) 曲げひずみ

補剛部での曲げひずみを与える変換係数 β_M は、補剛部における管軸直角方向地盤ひずみを ε_{st} として次のように得られる。

$$\beta_M = \beta_M(\phi) = \begin{cases} 0.4 & (\phi=200) \\ 0.6 & (\phi=400) \\ 1.8 & (\phi=800) \\ 1.0 & (\phi=1650) \end{cases}$$

Table 2 Conversion Factor β_J and β_{JR} .

diameter	β_J	β_{JR}
$\phi 200$	1.0	1.5
$\phi 400$		1.5
$\phi 800$		1.6
$\phi 1650$		1.7

Table 3.1 Conversion Factor β_N and Constant c ($\phi 200$).

wave length L_t (m)	ground strain amplitude in longitudinal direction ε_{st} ($\times 10^{-3}$)				
	1.0	1.3	1.7	2.0	2.5
120	$\beta_N=0.63$ $c=0.0$	$\beta_N=0.187$ $c=0.443$			$\beta_N=0.087$ $c=0.693$
140	$\beta_N=0.68$ $c=0.0$	$\beta_N=0.260$ $c=0.420$		$\beta_N=0.130$ $c=0.680$	
160	$\beta_N=0.72$ $c=0.0$	$\beta_N=0.400$ $c=0.320$		$\beta_N=0.162$ $c=0.725$	
190	$\beta_N=0.78$ $c=0.0$	$\beta_N=0.733$ $c=0.047$	$\beta_N=0.286$ $c=0.629$		
240	$\beta_N=0.86$ $c=0.0$				

Table 3.2 Conversion Factor β_N and Constant c ($\phi 400$).

wave length L_t (m)	ground strain amplitude in longitudinal direction ε_{st} ($\times 10^{-3}$)				
	1.0	1.3	1.7	2.0	2.5
120	$\beta_N=0.6$ $c=0.0$	$\beta_N=0.173$ $c=0.427$			$\beta_N=0.08$ $c=0.66$
140	$\beta_N=0.65$ $c=0.0$	$\beta_N=0.26$ $c=0.39$		$\beta_N=0.105$ $c=0.7$	
160	$\beta_N=0.68$ $c=0.0$	$\beta_N=0.357$ $c=0.323$		$\beta_N=0.192$ $c=0.603$	
190	$\beta_N=0.75$ $c=0.0$	$\beta_N=0.633$ $c=0.117$	$\beta_N=0.314$ $c=0.531$		
240	$\beta_N=0.78$ $c=0.0$				

Table 3.3 Conversion Factor β_N and Constant c ($\phi 800$).

wave length L_t (m)	ground strain amplitude in longitudinal direction ε_{st} ($\times 10^{-3}$)				
	1.0	1.3	1.7	2.0	2.5
120	$\beta_N=0.41$ $c=0.0$	$\beta_N=0.107$ $c=0.303$			$\beta_N=0.06$ $c=0.42$
140	$\beta_N=0.47$ $c=0.0$	$\beta_N=0.12$ $c=0.38$		$\beta_N=0.08$ $c=0.46$	
160	$\beta_N=0.50$ $c=0.0$	$\beta_N=0.22$ $c=0.279$		$\beta_N=0.107$ $c=0.474$	
190	$\beta_N=0.58$ $c=0.0$	$\beta_N=0.317$ $c=0.263$	$\beta_N=0.185$ $c=0.434$		
240	$\beta_N=0.61$ $c=0.0$				

Table 3.4 Conversion Factor β_N and Constant c ($\phi 1650$).

wave length L_i (m)	ground strain amplitude in longitudinal direction ε_{s1} ($\times 10^{-3}$)				
	1.0	1.3	1.7	2.0	2.5
120	$\beta_N=0.22$ $c=0.0$	$\beta_N=0.10$ $c=0.12$			$\beta_N=0.043$ $c=0.262$
140	$\beta_N=0.235$ $c=0.0$	$\beta_N=0.135$ $c=0.10$		$\beta_N=0.07$ $c=0.23$	
160	$\beta_N=0.245$ $c=0.0$	$\beta_N=0.164$ $c=0.018$		$\beta_N=0.098$ $c=0.194$	
190	$\beta_N=0.26$ $c=0.0$	$\beta_N=0.25$ $c=0.01$	$\beta_N=0.164$ $c=0.121$		
240	$\beta_N=0.275$ $c=0.0$				

Table 4 Conversion Factor β_M .

diameter	β_M
$\phi 200$	0.4
$\phi 400$	0.6
$\phi 800$	1.8
$\phi 1650$	1.0

これより補剛部での管体の曲げひずみ ε_M は次式で得られる。

$$\varepsilon_M = \beta_M(\phi) \cdot \varepsilon_{s1} \dots \dots \dots (17)$$

上式の変換係数 β_M は、 ε_{s1} が直ひずみ（縦波）およびせん断ひずみ（横波）によらず同じ値となる。Table 4 に、 β_M の値を示した。

式(15)～(17)を用いた有継手埋設管路系の地震時応答量を簡易的に推定する手順を示す。

- ① 想定された地震規模、震央距離、および着目地点の地盤条件より、各地点における入力地震動の特性値（波動種別、振幅、波長）を決める。
- ② 各地点における直管部および補剛部での継手変位を式(15)により算出する。縦波の場合は管軸方向の入射を考える。横波の場合は 45° 入射とし、その場合の管軸方向地盤ひずみを用いて算出する。
- ③ 各地点での補剛部における曲げひずみを式(17)により算出する。この場合、縦波は 45° 、横波は 0° 入射の場合の管軸直角方向の地盤ひずみを用いる。
- ④ 軸ひずみについては、その最大値を与える入射角が入力条件によって異なるため、種々の入射角を想定して各々の入力条件下での管軸方向地盤ひずみと管軸方向のみかけの波長を用いて式(16)により軸ひずみを算出し、その最大値より軸応力を算出する。
- ⑤ 各地点での直管部での最大合成応力は④での軸応力とし、補剛部での最大合成応力は③で得られる曲げ応力と④で得られる軸応力の和とする。

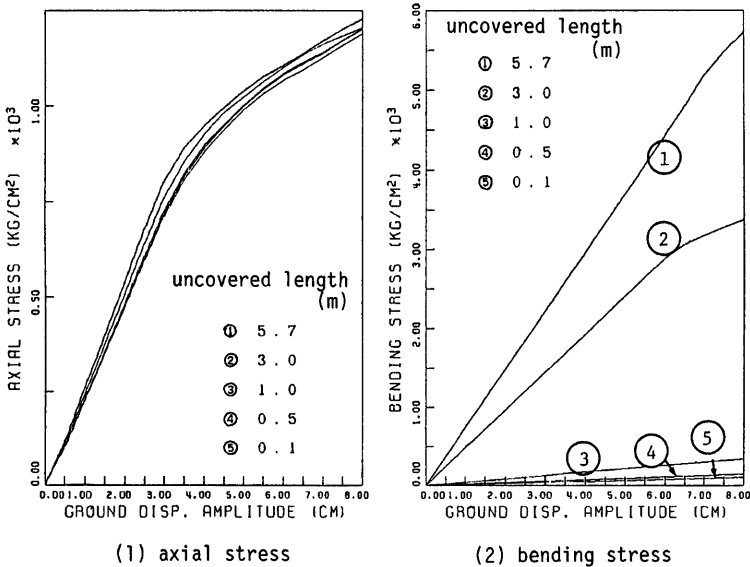
以上、①～⑤により、想定地震に対する各地点での直管部および補剛部の継手変位、管体応力が得られる。ただし、⑤において軸応力と曲げ応力を加えて合成応力としているが、この場合の両者を与える入射角は一般には一致せず、⑤における値は最も安全側の評価となる。

4.2 コンクリート補剛部の曲げ応力低減に関する提言

これまでの解析で明らかになったように、管路にコンクリート補剛を施すと、その拘束効果によってかなりの曲げモーメントが発生する。しかもモーメントは管径の大きくなる程増加する傾向がある。そして管径 $\phi 800$ 、 $\phi 1650$ ではひずみレベルに関係なく曲げ応力が合成応力の大半を占める。

埋設管路の補剛部の地震時挙動に関しては従来あまり関心が持たれていなかったが、本研究の解析結果を踏まえれば、現状の施工法によるコンクリート補剛部は管路系システムの耐震信頼度を大幅に下げる要因であると考えられる。

そこで、補剛部での曲げモーメントを低減させるための施工方法について検討を加えた。継手構造管路の特徴として、管体に生じた引張力に対しては継手変位で吸収するという大きな特徴が挙げられるが、曲げ



(1) axial stress (2) bending stress
 Fig. 21 Effect of Uncovered Length of Pipe on Response Values (φ800).

モーメントに対しても継手が回転することによって吸収することがある程度可能である。本解析において、大きな曲げモーメントが発生しているのは、コンクリート補剛部から張り出している管の断面のみであり、継手を隔てた隣接する管にまでは波及していない。このことを考慮すれば、コンクリート補剛部から管が張り出した直後に継手を設けて、その継手部で曲げモーメントを逃がしてやるのが1つの手段として考えられる。そこで、コンクリート補剛部から隣接する継手までの距離（以下、張り出し距離とする）をパラメータとして、曲げモーメントの低減効果を検討した。管径 φ800 の補剛を含む管路系に、入射角 45° で波長 120m の縦波を入力した場合の各張り出し距離に対する軸応力と曲げ応力を Fig. 21 に示した。張り出し距離は現実の施工法と同様な 5.7m に加えて 3m, 1m, 0.5m, 0.1m である。軸応力は張り出し距離の影響をあまり受けないのに対し、曲げ応力は張り出し距離の変化に非常に敏感であり、通常の 5.7m の場合と 0.1m の場合とを比較すれば50倍以上の違いがあることがわかる。さらに、曲げ応力の低減効果は張り出し距離 1m でも標準の場合の1/20程度までになる。

以上の検討から、張り出し距離を小さくすること、言い換えれば切管等を用いてコンクリート補剛部から張り出した管の管長を短くし、補剛部のごく近くに継手部を設けることが曲げモーメントを低減させる方法として非常に有効な手段であることがわかる。同時に、補剛部に接続する管長を小さくすることは、その継手部における引き抜け変位を低減させる効果も考えられる。なお、最近では異形管部周辺、及びマンホール・地上構造物等との境界部付近に可とう性の優れた継手を設置することがあるが、これは地震時の曲げ応力解放に有効な手段の1つであると考えられる。

5. 結 論

本研究では、有継手埋設管路の異形管の部分にみられるコンクリート補剛部をとり挙げ、地震応答解析を行うことにより補剛のない部分と比較する形でその応答特性を検討した。得られた成果を以下に示す。

- 1) 補剛のない継手埋設管路に対し、縦波および横波による任意入射角による応答解析を行い、入力条件(波動の種類、波長、振幅、入射角)に対する継手変位、管体応力の関係を明かにした。
- 2) コンクリート補剛部を含む管路に対し、1)と同様の解析を行い、とくに補剛部付近での継手変位、管体応力が補剛のない場合に比べて大きくなることを示した。
- 3) 以上の結果に基づき、入力される地震動表面波の波長、地盤ひずみと継手変位、管体応力との関係を、補剛のある場合とない場合に分けて推定式として示した。
- 4) コンクリート補剛部において発生する曲げ応力を低減させるための施工法として、補剛部直前に切管を配置して継手を設けることの有効性を示した。

ここで扱ったようなコンクリート補剛を有する有継手埋設管路は、耐震設計指針¹⁴⁾では触れられていないにもかかわらず現実の上水道配水システムの曲り部や分岐部ではほとんど例外なく見られる構造形式である。このような部分での応答特性を補剛のない直管部と比較検討し、耐震的観点からは弱点となる可能性が高いことを示したところに本研究の意義がある。今後、震害例の詳細な調査を実施することが必要であり、4.2に示したような補剛部での応力低減を目的とした設計指針を検討すべきであろう。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、有継手管のコンクリート補剛に関する貴重な資料を頂き、また御討議頂いた京都市水道局配水課および仙台市水道局漏水防止課の方々に深謝致します。さらに、本研究における応答解析には、神戸大学高田助教授による解析プログラム ERAUL (1) に数種の機能を追加したものを用いたことを記し、感謝の意を表する次第である。なお、本研究における数値計算には京都大学大型計算機センターの FACOM M382 システムを用いたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 桜井彰雄・高橋 忠・栗原千鶴子・矢島 浩：地震時土の歪より見た埋設パイプラインの耐震性(超高圧地中電線路埋設管路の耐震研究, その2), 電力中央研究所技術研究所報告 No. 69087, 昭45. 4.
- 2) 宮島信雄・宮内二郎・青野雄司：埋設鋼管における地震時挙動, 第14回地震工学研究発表会講演概要, 昭. 51. 7, pp. 189-192.
- 3) 高田至郎・高橋俊二・山部泰男：硬質塩化ビニル管の地震時挙動シミュレーション, 水道協会 雑誌第547号, 昭. 55. 4, pp. 27-39.
- 4) 鶴飼恵三・山口柏樹：埋設管の地震時挙動に関する理論的研究, 第5回日本地震工学 シンポジウム 講演集, 昭. 53. 11, pp. 433-440.
- 5) Kameda, H., and Shinozuka, M., "Simplified Formula for Axial Strains of Buried Pipes Induced by Propagating Seismic Waves," *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University*, Vol. XLIV, Part2, April, 1982, pp. 287-308.
- 6) Goto, H., Sugito, M., Kameda, H., Ishikawa, Y., "Seismic Response Analysis of Joint-Connected Buried Pipelines Including Bent Sections," *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University*, Vol. XLIV, Part1, January, 1982, pp. 182-221.
- 7) 河野一徳・後藤尚男・杉戸真太：曲り部を有する地中埋設管の地震応答解析について, 土木学会第36回年次学術講演会概要集, I-295, 昭57. 10, pp 588-589.
- 8) H. Kameda, H. Goto, M. Sugito, K. Asaoka, "Seismic Risk and Performance of Water Lifelines", *Symposium on Probabilistic Methods in Structural Engineering, ASCE. EMD/STD, St. Louis, Oct. 1981.*
- 9) Ryoji Isoyama, Tsuneo Katayama, "Practical Performance Evaluation of Water Supply Networks During Seismic Disaster", *Lifeline Earthquake Engineering, The Current State of Knowledge, ASCE, Aug. 1981, pp. 111-126.*

- 12) Barkan, D.D., "Dynamics of Bases and Foundations (translated from the Russian by L. Drashevskaya, and translation edited by G. P. Tschebotarioff), McGrawHill Book Co. (New York), p. 434
- 13) 社団法人日本ガス協会：ガス工作物設置基準調査について，昭. 56. 3, pp. 91-93.
- 14) 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法設計施針・解説，1979年版.
- 10) 星谷 勝・宮崎正敏：上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測，土木学会論文報告集，No, 331, 昭. 58. 3, pp. 45-54.
- 11) 社団法人日本ガス協会：ガス導管耐震設計規準（案），昭. 57. 3.