

地盤沈下を受ける地中管路の設計式と適用

DESIGN FORMULAE OF BURIED PIPES SUBJECT TO LARGE GROUND SETTLEMENT AND ITS APPLICATION

田邊揮司良*・高田至郎**

By Kishiro TANABE and Shiro TAKADA

The present paper proposed design formulae and equivalent spring constants of ground used for design propose of buried pipelines subject to large ground settlements. The formulae obtained by a beam theory on an elastic foundation can estimate joint rotation angles and joint expansions as well as the maximum bending strains of the pipes. The equivalent spring constants of ground were so determined that calculated values of pipe responses by the design formulae including spring constants were well matched with many experimental values. The determined equivalent spring constants associated with an amount of ground settlements are rather conservative values from a view point of design of buried pipes. Next, resisting capacities of various kinds of pipes to large ground settlements were evaluated by using the proposed design formulae and the equivalent spring constants.

Keywords: buried pipeline, ground settlement, design formulae, ground spring constant

1. はじめに

埋立地の圧密現象や地震時の地盤沈下により、地中管路の機能障害や破壊などの被害がしばしば見受けられる。その大半は管路とマンホールなどの構造物の接合部や地盤の不等沈下部および継手部に集中している。近年、これらの被害挙動を明らかにするため地盤沈下を想定した大規模な埋設管路沈下実験が種々行われており、次のような挙動が明らかとなってきている。

硬質塩化ビニル管(PVP)は良好な沈下追従性を示す^{1),6),7)}。直線管路部での不等沈下よりも構造物際での沈下のほうが管体発生ひずみが大きい⁷⁾。継手屈曲性による応力緩和効果があり^{1),5)}、特にその配置は重要である^{3),6),7)}。地盤の締固度が大きいほど、管体ひずみは大きくなる⁴⁾、などとなっている。

一方、それぞれの実験において実験値をシミュレートするための種々の試みが行われている。まず、等価地盤ばね定数を用いた弾性床さのり理論で線形計算の適用で十分である^{2),3)}として、沈下を受ける管路の管体応力^{2),3)}・継手変位³⁾の設計式が提示されている。また、著

者ら¹⁰⁾の開発した伝達マトリックス法を用いた非線形地盤応答解析プログラム(ERAUL)により、地盤非線形および継手特性を考慮した解析結果は実験値とのよい一致を示している^{3),5)~9)}。さらに、せん断を考慮したはりの曲げ解析プログラムを用い、パイリニアでモデル化した地盤、および管体の剛性低下によりモデル化した継手に対し沈下解析を行い、沈下側の地盤ばね定数を固定側より小さめに見積もることで、実験値とよく対応することも示されている⁴⁾。

また、沈下対策として地盤の沈下を拘束する防止板を用いる場合³⁾や、管体の剛性を高めることにより発生応力を低減する方法^{6),7)}などが提示されている。

しかし、これらの沈下実験は管種、管径、埋設深さ、継手の有無などの種々の条件下で行われており、その結果はその実験条件を満たす管路でしか適用されていない。これでは、敷設しようとする管路種別ごとに沈下実験を行わなければならない。そこで、現行までの沈下実験データから統一的に沈下挙動を取り扱い、設計地盤ばね定数 k 以下、 k :地盤ばね定数(kgf/cm³)、 K :地盤ばね係数(kgf/cm²)、と区別して扱う。ただし、 $K = k \cdot D$ で D は管路の外径である)および設計式を求めることは意義がある。

また、現行の耐震基準での管路の地盤沈下に対する安

* 学生会員 工修 神戸大学大学院自然科学研究科

(〒657 神戸市灘区六甲台町)

** 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科(同上)

全性評価法は、1978年の宮城県沖地震後に定められたガス導管耐震設計指針¹¹⁾（以下ガス指針と略す）において管軸方向、管軸直角方向で配管系の地盤変位吸収能力として検討されている。また、日本水道鋼管協会により圧密などの地盤沈下を受ける管路の具体的設計方法¹²⁾（以下、水道資料と略す）が述べられている。しかし、これらの耐震基準では地盤沈下時の継手の回転角、伸縮量については考慮されていない。

そこで本論文で取り扱う埋設管路の設計式では、継手の回転および伸びも考慮することにした。また、文献3)、5)~9)で行われた沈下実験をシミュレートしている ERAUL プログラムの計算結果とも設計式を比較する。さらに、管体・継手の物理的許容値から逆にどれだけの地盤沈下量に耐え得るかを示し、各実験で使用された管路の地盤変位吸収能力についても言及している。

ここで、実際に地震時に起こる地盤沈下量をどの程度と見積るかは想定した地盤でさまざまであろうが、一般的に次のように考えられている。ガス指針では、鉛直方向変位を水平方向変位 5 cm の 1/2 とし、さらに地域別、管種・埋設条件別の補正係数を乗することにより定めている。また他の文献では、現地調査や室内三軸試験より、Lee ら¹³⁾は盛土地において盛土層厚の 0.25 %、さらに不飽和堆積地盤の地震動による沈下は堆積層厚の 0.5~1 % であると報告している。ならびに、液状化による沈下についても Lee らおよび佐々木ら¹⁴⁾は室内三軸試験結果より粒状沖積土厚の 1~2 % 程度の不等沈下であるとしている。また、1983年日本海中部地震における著者らの現地調査¹⁵⁾より、管路の埋設されている道路表面沈下量は、最大約 20 cm であった。

2. 設計式の誘導

(1) 設計モデル

地盤沈下に対する埋設管路の設計式の誘導にあたり、管路-地盤系を代表的な以下の 4 つの形態にモデル化した (図-1)。

- (a) 管路の一端を基礎の堅固なマンホールや橋台に取り付けられた無継手管路 (Case-1)。
- (b) (a) の条件下で取付端近傍に継手を有する管路 (Case-2)。
- (c) 直線管路部において不等沈下を受ける無継手管路 (Case-3)。
- (d) (c) の条件下で沈下境界部に継手を有する管路 (Case-4)。

ここで、Case-4 において沈下境界部以外には継手モデルを設けていないが、これは設計式の煩雑さを避けるためである。しかし、沈下境界部での継手回転角が最も大きいことを考えれば、付近の継手もその値を目安にし

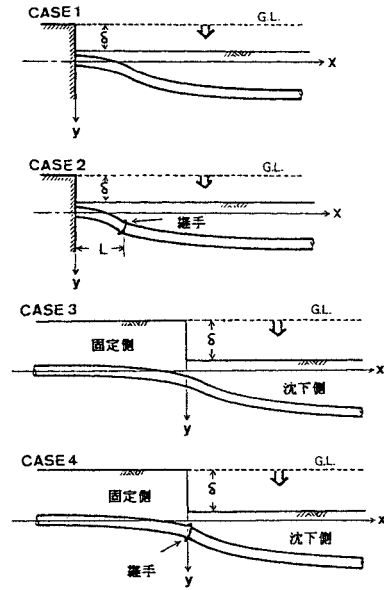


図-1 管路モデル図

て設計し得るので、工学的に妥当なモデルと思われる。各 Case はいずれも弾性床の上のはり理論で定式化され、そのつり合い方程式は次式で示される。

$$EI \frac{d^4 V}{dx^4} + K(V - \delta) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V ：管路の変位 (cm)、 EI ：管路の断面剛性 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}^2$)、 K ：地盤ばね係数 (kgf/cm^2)、 δ ：地盤沈下量 (cm)、である。境界条件は、それぞれの Case で式 (2)~(5) に示される。

Case-1

$$\begin{aligned} x=0 : V=0, V'=0 \\ x \rightarrow \infty : V=\delta, V'=0 \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

Case-2

$$\begin{aligned} x=0 : V=0, V'=0 \\ x=L : V=V_a, V' + \frac{EI}{K_R} V'' = V'_a, \\ V'' = V''_a, V''' = V'''_a \dots\dots\dots (3) \\ x \rightarrow \infty : V_a = \delta, V'_a = 0 \end{aligned}$$

ここに、 V_a ：第 2 番目の管路変位 (cm)、 L ：端部から最初の継手までの距離 (以下、継手距離と略す) (cm)、 K_R ：継手回転特性 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}/\text{rad}$)、である。

Case-3¹¹⁾

$$\begin{aligned} x=0 : V_1 = V_2, V'_1 = V'_2, V''_1 = V''_2, V'''_1 = V'''_2 \\ x \rightarrow \infty : V_2 = \delta, V'_2 = 0 \\ x \rightarrow -\infty : V_1 = 0, V'_1 = 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、添字の 1 は固定側を、2 は沈下側の諸量を表わしている。

Case-4

$$\begin{aligned}
 x=0: V_1=V_2, \quad V_1'+\frac{EI}{K_R} V_1''=V_2', \\
 V_1'''=V_2''', \quad V_1''=V_2'' \\
 x \rightarrow \infty: V_2=\delta, \quad V_2'=0 \\
 x \rightarrow -\infty: V_1=0, \quad V_1'=0
 \end{aligned} \dots\dots\dots (5)$$

(2) 設計式

a) 管体変形算定式

式(1)を式(2)~(5)の境界条件を用いて解くと、管路変位はそれぞれの Case で以下に示される。

Case-1²⁾

$$V = \delta \{1 - \sqrt{2} e^{-\beta x} \cdot \sin(\beta x + \pi/4)\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\beta^4 = K/4EI$ である。

Case-2

$$\begin{aligned}
 V = \delta \left[1 + \frac{e^{\beta x} (A_2 \sin \beta x + B_2 \cos \beta x)}{e^{\beta L} \left(2 + \frac{EI}{K_R} \beta \right) + e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta} \right. \\
 \left. + \frac{e^{-\beta x} (C_2 \sin \beta x + D_2 \cos \beta x)}{\beta |1 + 2 \cos \beta L \cdot (\cos \beta L - \sin \beta L)|} \right] \quad (0 < x < L) \\
 \dots\dots\dots (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V = \delta \left[1 + \frac{e^{-\beta x} (E_2 \sin \beta x)}{e^{\beta L} \left(2 + \frac{EI}{K_R} \beta \right) + e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta} \right. \\
 \left. + \frac{F_2 \cos \beta x}{\beta |1 + 2 \cos \beta L \cdot (\cos \beta L - \sin \beta L)|} \right] \quad (x > L) \\
 \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 A_2 &= e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta (\sin^2 \beta L - \cos^2 \beta L) \\
 B_2 &= -e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta (\cos \beta L - \sin \beta L)^2 \\
 C_2 &= -e^{\beta L} \left(2 + \frac{EI}{K_R} \beta \right) - 2e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta \sin \beta L \cdot \cos \beta L \\
 D_2 &= -e^{\beta L} \left(2 + \frac{EI}{K_R} \beta \right) - 2e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta \cos^2 \beta L
 \end{aligned}$$

$$\epsilon_{\max} = \delta \beta^2 D \frac{e^{\beta L} \left(2 + \frac{EI}{K_R} \beta \right) + e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta |1 - 2 \cos \beta L \cdot (\cos \beta L - \sin \beta L)|}{e^{\beta L} \left(2 + \frac{EI}{K_R} \beta \right) + e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta |1 + 2 \cos \beta L \cdot (\cos \beta L - \sin \beta L)|} \quad (x=0) \dots\dots\dots (14)$$

また、端部の最大曲げひずみ式(14)に対し逆符号の最大曲げひずみは第2番目の管路に発生し、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{\max} = -\delta \beta^2 D e^{-\beta x} \frac{e^{\beta L} (\cos \beta x - \sin \beta x) + 2e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta \cos \beta L \cdot (\sin \beta L \cdot \cos \beta x - \cos \beta L \cdot \sin \beta x) \cosh \beta L}{e^{\beta L} + \frac{EI}{K_R} \beta \cosh \beta L + e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta \cos \beta L \cdot (\cos \beta L - \sin \beta L)} \\
 x = \frac{1}{\beta} \left[\pi - \cos^{-1} \frac{\frac{EI}{K_R} \beta \cos \beta L \cdot (\sin \beta L - \cos \beta L) \cosh \beta L}{\sqrt{e^{2\beta L} + 2 \frac{EI}{K_R} \beta \cos \beta L \cdot \cosh \beta L \left\{ e^{\beta L} (\cos \beta L + \sin \beta L) + \frac{EI}{K_R} \beta \cos \beta L \cdot \cosh \beta L \right\}}} \right] \\
 \dots\dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

$$E_2 = -2e^{\beta L} - 4 \frac{EI}{K_R} \beta \sin \beta L \cdot \cos \beta L \cdot \cosh \beta L$$

$$F_2 = -2e^{\beta L} - 4 \frac{EI}{K_R} \beta \cos^2 \beta L \cdot \cosh \beta L$$

Case-3¹⁾

固定側 ($x < 0$)

$$V_1 = e^{\beta_1 x} \delta \frac{\lambda^2}{(1+\lambda^2)} \left(\frac{1-\lambda}{1+\lambda} \sin \beta_1 x + \cos \beta_1 x \right) \dots\dots (9)$$

ここに、 $\lambda = \beta_2/\beta_1$ である。

沈下側 ($0 < x$)

$$V_2 = \delta \left\{ 1 - e^{-\beta_2 x} \frac{1}{(1+\lambda^2)} \left(\frac{1-\lambda}{1+\lambda} \sin \beta_2 x + \cos \beta_2 x \right) \right\} \dots\dots\dots (10)$$

Case-4

固定側 ($x < 0$)

$$V_1 = e^{\beta_1 x} \delta \frac{A_4 \cdot \sin \beta_1 x + B_4 \cdot \cos \beta_1 x}{(1+\lambda^2) \frac{2EI}{K_R} \beta_2 + (1+\lambda^2)(1+\lambda^2)} \dots\dots (11)$$

沈下側 ($0 < x$)

$$V_2 = \delta \left\{ 1 - e^{-\beta_2 x} \frac{C_4 \cdot \sin \beta_2 x + D_4 \cdot \cos \beta_2 x}{(1+\lambda^2) \frac{2EI}{K_R} \beta_2 + (1+\lambda^2)(1+\lambda^2)} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、

$$A_4 = \lambda^2 (1 - \lambda^2), \quad B_4 = \lambda^3 \frac{2EI}{K_R} \beta_2 + \lambda^2 (1 + \lambda^2),$$

$$C_4 = (1 - \lambda^2), \quad D_4 = \frac{2EI}{K_R} \beta_2 + (1 + \lambda^2)$$

b) 管体曲げひずみ算定式

式(6)~(12)より求められる各 Case の最大曲げひずみは次式で与えられる。

Case-1

$$\epsilon_{\max} = \delta \beta^2 D \quad (x=0) \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 D : 管路の外径 (cm)

Case-2

ただし、式(15)の x の値が $x < L$ となった場合は、最大曲げひずみは第1番目の取付管路に発生し、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} &= -\delta\beta^2 D \frac{e^{\beta x}(A_2 \cos \beta x - \beta_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x}(D_2 \sin \beta x - C_2 \cos \beta x)}{2 \left\{ e^{\beta L} + \frac{EI}{K_R} \beta \cosh \beta L + e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta \cos \beta L \cdot (\cos \beta L - \sin \beta L) \right\}} \\ x &= -\frac{1}{\beta} \sin^{-1} \frac{-e^{\beta L} \left(2 + \frac{EI}{K_R} \beta \right) - e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta \cos \beta L \cdot (\sin \beta L + \cos \beta L)}{\sqrt{2e^{2\beta L} \left(\frac{EI}{K_R} \beta \right)^2 \cos^2 \beta L + \left(2 + \frac{EI}{K_R} \beta \right) \left[2e^{2\beta L} + \frac{EI}{K_R} \beta (e^{2\beta L} + 2 \cos \beta L \cdot (\sin \beta L + \cos \beta L)) \right]}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(16)$$

Case-3

固定側

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} &= \frac{\delta\beta_2^2 D}{(1+\lambda)\sqrt{1+\lambda^2}} e^{\beta_1 x} \\ x &= -\frac{1}{\beta_1} \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{1+\lambda^2}} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(17)$$

沈下側

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} &= \frac{\delta\beta_2^2 D}{(1+\lambda)\sqrt{1+\lambda^2}} e^{-\beta_2 x} \\ x &= -\frac{1}{\beta_2} \sin^{-1} \left(\frac{-1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(18)$$

Case-4

固定側

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} &= \delta\beta_2^2 D e^{\beta_1 x} \\ &= \frac{(1-\lambda^2) \cos \beta_1 x - \left\{ (1+\lambda)^2 + \lambda \frac{2EI}{K_R} \beta_2 \right\} \sin \beta_1 x}{(1+\lambda^2) \frac{2EI}{K_R} \beta_2 + (1+\lambda)^2 (1+\lambda^2)} \\ x &= -\frac{1}{\beta_1} \sin^{-1} \frac{\lambda \frac{EI}{K_R} \beta_2 + \lambda(1+\lambda)}{\sqrt{2 \left(\lambda \frac{EI}{K_R} \beta_2 \right)^2 + (1+\lambda)^2 \left(2\lambda \frac{EI}{K_R} \beta_2 + 1 + \lambda^2 \right)}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(19)$$

沈下側

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} &= \delta\beta_2^2 D e^{-\beta_2 x} \\ &= \frac{(1-\lambda^2) \cos \beta_2 x - \left\{ (1+\lambda)^2 + \frac{2EI}{K_R} \beta_2 \right\} \sin \beta_2 x}{(1+\lambda^2) \frac{2EI}{K_R} \beta_2 + (1+\lambda)^2 (1+\lambda^2)} \\ x &= -\frac{1}{\beta_2} \sin^{-1} \frac{-\left(\frac{EI}{K_R} \beta_2 + 1 + \lambda \right)}{\sqrt{2 \left(\frac{EI}{K_R} \beta_2 \right)^2 + (1+\lambda)^2 \left(2 \frac{EI}{K_R} \beta_2 + 1 + \lambda^2 \right)}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(20)$$

c) 継手回転量算定式

Case-2

$$\begin{aligned} \theta_{\text{rot}} &= \frac{2\delta\beta^2 (\cos \beta L)}{e^{\beta L} \frac{K_R}{EI} + \beta \cosh \beta L} \\ &= \frac{-\sin \beta L}{+ e^{-\beta L} \cos \beta L \cdot (\cos \beta L - \sin \beta L)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(21)$$

Case-4

$$\theta_{\text{rot}} = \frac{\delta(1-\lambda^2) \frac{2EI}{K_R} \beta_2^2}{(1+\lambda^2) \frac{2EI}{K_R} \beta_2 + (1+\lambda)^2 (1+\lambda^2)} \quad \dots\dots\dots(22)$$

d) 継手伸量算定式

式(1)は管軸直角方向の管路のつり合い方程式であるため管軸方向の変形量および継手伸縮量を求めることができない。また、図-2に示す不等沈下時の継手伸縮量データをみると、同様の継手配置にもかかわらず最大引抜けが沈下境界部の継手で発生する場合と、沈下境界部以外の継手で発生する場合がある。これは、ある1つの継手がいったん引き抜け始めるとその継手に引き抜けが集中するためと考えられる。そこで、継手の引き抜け量の算定にあたっては、管路の変形状態から管路の伸び量を算出し、それを管路軸方向ひずみとしては考慮せず、すべて継手変位により吸収されるとした。そしてこの値を継手の最大変位量とすることにした。Case-2, 4における継手算定式を次式に示す。

Case-2

$$\Delta = \sqrt{L^2 + V^2} - L + \sqrt{L_a^2 + (\delta - V)^2} - L_a \quad \dots\dots\dots(23)$$

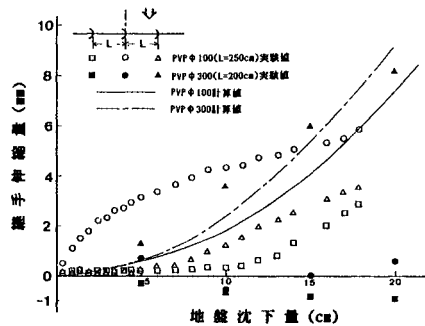


図-2 地盤沈下量と継手伸縮量の関係 (Case-4)

ここに、 Δ ：継手伸量 (cm)， L ：継手距離 (cm)， V_j ：継手部の変位量 [式 (24)] (cm)，である。また、 L_d は Case-2 のモデルでは定義していないが、実管路における端部から第1継手と第2継手間の管路長である。

$$V_j = \delta \left\{ 1 - e^{-\beta L} \frac{e^{\beta L} (\sin \beta L + \cos \beta L)}{e^{\beta L} + e^{-\beta L} \frac{EI}{K_R} \beta \cos \beta L} + \frac{2EI}{K_R} \beta \cos \beta L \cosh \beta L \right. \\ \left. \frac{(\cos \beta L - \sin \beta L) + \frac{EI}{K_R} \beta \cosh \beta L}{(\cos \beta L - \sin \beta L) + \frac{EI}{K_R} \beta \cosh \beta L} \right\} \dots (24)$$

Case-4

$$\Delta = \sqrt{L_1^2 + V_j^2} - L_1 + \sqrt{L_2^2 + (\delta - V_j)^2} - L_2 \dots (25)$$

ここに、 L_1 ：沈下境界部から固定側第1継手までの距離 (cm)， L_2 ：沈下境界部から沈下側第1継手までの距離 (cm)， V_j ：沈下境界部の継手変位量 [式 (26)] (cm)，である。

$$V_j = \delta \frac{\lambda^3 \frac{2EI}{K_R} \beta_2 + \lambda^2 (1 + \lambda)^2}{(1 + \lambda^2) \frac{2EI}{K_R} \beta_2 + (1 + \lambda)^2 (1 + \lambda^2)} \dots (26)$$

3. 沈下等価地盤ばね定数の推定

(1) 等価地盤ばね定数推定手法

a) 端部固定管路の沈下等価地盤ばね定数

沈下等価地盤ばね定数推定にあたり、まず端部固定有継手管路において、式 (14) で示した設計式に対し地盤沈下量を代入し、地盤ばねを逐次変化させながら計測管体最大曲げひずみと一致する沈下量ごとの等価地盤ばね定数を求めた。さらに、継手回転角についても同様の手順を用い各沈下量ごとの等価地盤ばね定数を求めた。その値を図-3に示すように両対数グラフ上にプロットした。なお、実験データは文献7)、8) による。各実験に用いられた管体等の諸元を表-1に示す。

図-3より、曲げひずみの実験データから推定された地盤ばね定数は沈下量の小さい段階ではばらついている

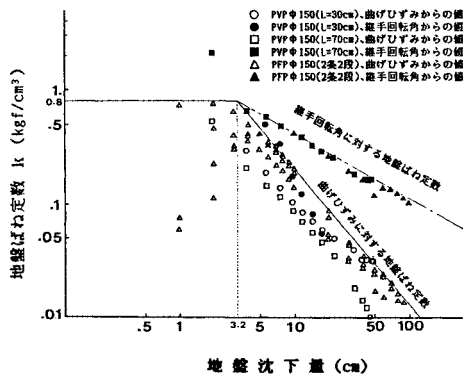


図-3 等価地盤ばね定数 (Case-2)

表-1 管体および継手の諸元

諸元	ダクタイル鉄管 (DIP)			鋼管 (ST)			塩化ビニル管 (PVP)			ポリコン管 (PPP)		
	150	300	150	150	300	600	100	300	150	150		
外径(mm)	173.6	330.2	169.0	165.2	318.5	609.6	114.0	318.0	170.5	174.0		
内径(mm)	155.6	309.2	152.0	155.2	304.7	590.6	100.0	285.6	150.9	150.0		
肉厚(mm)	9.0	10.5	8.5	5.0	6.9	9.5	7.0	16.2	9.8	12.0		
断面2次モーメント (cm ⁴)	1580.0	1.35E4	1384.0	808.1	8202.0	8.06E4	338.0	1.75E4	1600.0	2014.5		
弾性係数 (kgf/cm ²)	1.65E8			2.1E8			3.0E4	2.7E4	3.0E4	1.5E5		
許容応力 (kgf/cm ²)	2600.0			2400.0			330.0			430.0		
継手の名称	M1		M2	RR								
固有特性 (kgf-cm/rad)	2.15E8	7.89E5	7.86E5	7.41E4						3.44E5	3.51E5	1.913E5 ^{注1} 1.576E5 ^{注2}
許容回転角 (deg)	10.0	4.5	4.5 [*]	1.0						2.2	4.0	12.0
許容伸縮量 (cm)	1.7	1.7	2.7	3.0 [*]						3.0 [*]	3.0 [*]	8.0
資料出典	文献(4),(9)						文献(3)	文献(5)	文献(7)	文献(8)		

注1：不等沈下実験に用いられた継手特性
注2：端部固定沈下実験に用いられた継手特性
※：継手構造からの推定値

が沈下量が大きくなるにつれて右下がりの一定の傾向を示している。設計に使用する等価地盤ばね定数には安全側評価を与える上界線 (図-3 中の実線) を用いることにした。また、地盤沈下量が小さい段階の等価地盤ばね定数を文献10)、11) を参考にし $k=0.8 \text{ kgf/cm}^3$ とし、式 (27)、(28) との交点の地盤沈下量 3.2 cm を地盤の破壊開始点としている。以下に等価地盤ばね定数算定式を示す。

$$k=0.8 \quad (\delta < 3.2 \text{ cm}) \dots (27)$$

$$\log_{10} k = -1.21 \cdot \log_{10} \delta + 0.52 \quad (3.2 \text{ cm} < \delta)$$

また、各沈下量ごとの継手回転角より推定した等価地盤ばね定数は図-3の黒印で表わされる。これらは、曲げひずみより推定した値よりも大きくなっており、継手回転角を安全側の評価として与える等価地盤ばね定数は次式で示される。

$$k=0.8 \quad (\delta < 3.2 \text{ cm}) \dots (28)$$

$$\log_{10} k = -0.58 \cdot \log_{10} \delta + 0.20 \quad (3.2 \text{ cm} < \delta)$$

式 (27) を用いて継手回転角の値を評価すると過小に回転角を見積ることになる。逆に、式 (28) を用いて曲げひずみの値を評価すると過大に曲げひずみを見積ることになる。これは、設計式が地盤を一樣とみなしているのに対し、実際の沈下現象では端部近傍の地盤が主に破壊し管路長手方向に対し地盤ばね定数は一樣でないために、管体最大曲げひずみと与えられる端部と、それより離れた継手位置とでは地盤ばね定数が異なるためと考えられる。そこで、端部固定管路の地盤沈下に用いる等価地盤ばね定数は曲げひずみ (応力) 算定の際は式 (27) を、継手回転角算定の際は式 (28) を用いることにする。

b) 直線管路部に不等沈下を受ける管路の等価地盤ばね定数

ガス指針などにおける直線管路部の不等沈下の地盤ば

ね定数の取り扱い、地盤沈下側と固定側との地盤ばね定数は同じ値であるとしている。しかし、明らかに地盤沈下部と固定部では地盤の破壊の度が異なる。また、沈下境界部に継手を考慮した場合には沈下部と固定部の地盤ばね定数に違いがなければ理論的には継手に回転が生じない。そこで、本論文では、沈下部と固定部の地盤ばね定数に違いをもたせて設計式を誘導している。

実験データと一致するように沈下部と固定部の異なった等価地盤ばね定数を同時に満足する値は、数値解析上2つの未知数を同時に満たす最適解を得る問題を解かねばならず、条件を満たす解を得られない場合があり得る。そこで、3. (1), a) で求めた端部固定管路曲げひずみのための等価地盤ばね定数を、不等沈下時の沈下側の等価地盤ばね定数と等しいと仮定することにより固定側の等価地盤ばね定数を求めた。実験データは文献3)~5), 8), 9) を用いている。

図-4に、管体の最大曲げひずみデータより算出された固定側の等価地盤ばね定数を白印および黒印でプロットしている。また、その上界線を破線で示している。なお、実線は沈下側の等価地盤ばね定数を示している。さらに、図-5に沈下境界部の継手回転角より算定された固定側の等価地盤ばね定数をプロットしている。実線と

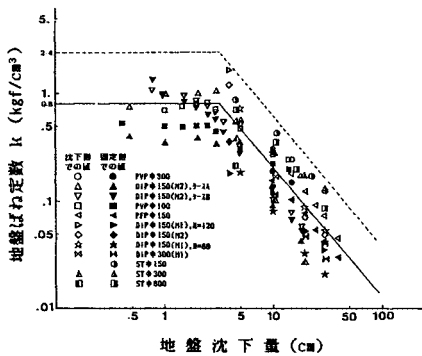


図-4 曲げひずみからの等価地盤ばね定数 (Case-4)

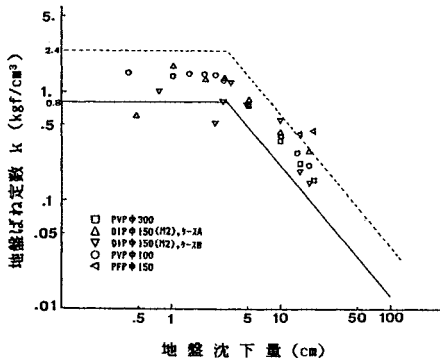


図-5 継手回転角からの等価地盤ばね定数 (Case-4)

破線は、それぞれ沈下側と固定側の等価地盤ばね定数を表わしている。図-4, 5より安全側の曲げひずみおよび継手回転角を与える固定側の等価地盤ばね定数は、沈下側のその約3倍と考えられる。なお多条多段管路の計算では、管路の断面二次モーメントおよび継手回転特性は単管の本数倍とし、また地盤ばね定数を求めるための管路直径は多条多段管の両外管の距離を使用した。

(2) 算定された等価地盤ばね定数の検討

図-6に、ガス指針¹¹⁾および水道資料¹²⁾に用いられている地盤沈下時の等価地盤ばね定数と本論文で求められたそれを比較している。ガス指針では、直径30cmの平板載荷試験より求められた地盤ばね定数 K_{30} を基準として地盤の非線形性を考慮した定数 (1/3) を乗じ、さらに管径による補正を行っている。また、水道資料においても地盤ばね定数を平板載荷試験より求め、さらに地盤と管路の最大相対変位量が1cm以上の場合は沈下量の平方で除した値を用いている。それに対し本論文では実際の沈下実験データより逆に等価地盤ばね定数を求めている。また、実験データは埋設深さ1m前後、管径φ150のものであり、設計時に安全側となる等価地盤ばね定数を各実験資料の上界値として定めている。管径の影響は等価地盤ばね定数に変換する際に導入しており、等価地盤ばね定数は管径によらず図-6を与えている。また、現実の地中管路の標準的な埋設深さに対するものであり、特別な深度では別途検討する必要がある。さらに、

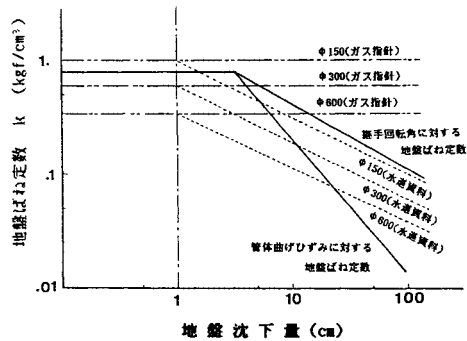


図-6 等価地盤ばね定数の比較

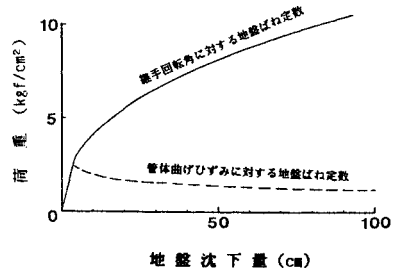


図-7 荷重-地盤沈下量関係

図-7に本研究で求めた等価地盤ばね定数に沈下量乗じて荷重-変位曲線形式で表わしている。図中の破線は、一般的な平板載荷試験でみられるような変位の増大とともに荷重が増大するという傾向を示さず、ある変位量を境として変位の増大とともに荷重が低下する傾向を示している。これは、平板載荷試験の荷重方向が地盤下向きであるのに対し、沈下現象では管路が地盤を上向きに押し上げており、ある程度の変位量を越えると地盤が破壊するためと考えられる。

4. 設計式の有効性

設計式の有効性を検討するために、最大曲げひずみ、継手回転角、継手伸量に関する設計式に、式(27)、(28)で与えられる沈下等価地盤ばね定数および地盤沈下量を代入することにより実験値と比較する。図-8~図-14にその比較例を示す。

図-8, 9に、それぞれCase-2におけるφ150の有継手PVPの最大曲げひずみおよび継手回転角を、ERAULプログラムを用いた地盤の非線形解析結果と比較して示している。図-8では、設計式による曲げひずみが実験値に比べ大きく安全側の評価となっているが、設計式による計算値は端部での値であるのに対し、実験値は端部から若干離れた位置での結果であり、端部で実際に計測されていれば設計式による値に近くなると考えられる。また、継手回転角に関しては、設計式によ

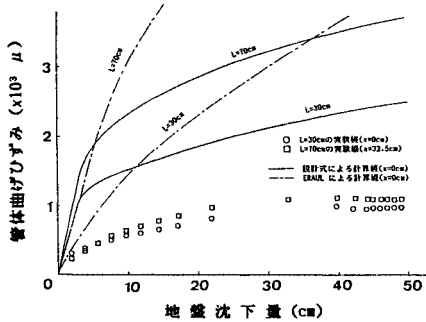


図-8 管体曲げひずみと地盤沈下量の関係 (Case-2)

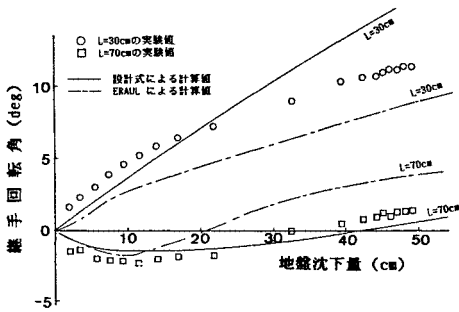


図-9 継手回転角と地盤沈下量の関係 (Case-2)

る値と実験値とがほぼ一致している。さらに、図-10に地盤沈下量15cmのときの応力分布の比較を示している。これらより、最大曲げひずみ、継手回転角のいずれにおいても実験値よりも設計式で求められた値が大きく安全側の評価を与えていると考えられる。

また、図-11にCase-3における無継手ST管路の最大曲げひずみの結果を示している。図より、固定側の最大曲げひずみは沈下側のそれよりも大きいが、有継手管路では図-12に示すように沈下側の最大曲げひずみは固定側より大きい値を生ずる。これは、設計式を用いた場合も実験の場合も同様の結果を示す。

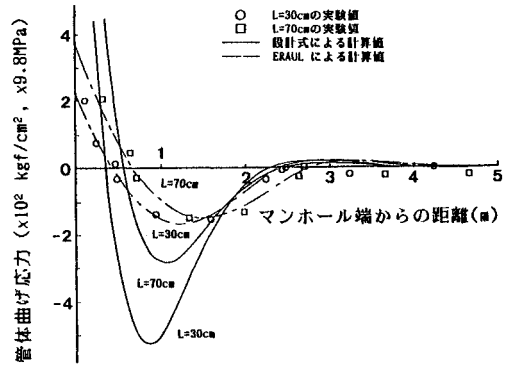


図-10 沈下量15cmのときの管体応力分布 (Case-2)

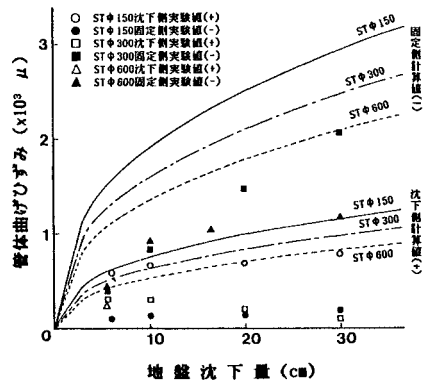


図-11 管体曲げひずみと地盤沈下量の関係 (Case-3)

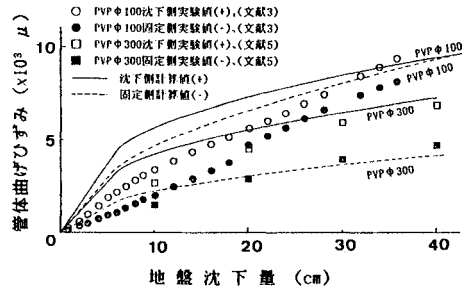


図-12 管体曲げひずみと地盤沈下量の関係 (Case-4)

図-12, 13に、それぞれCase-4における有継手PVPの最大曲げひずみおよび継手回転角の結果を示している。曲げひずみに関しては、地盤沈下量が小さい段階で設計式を用いた値が実験値よりも大きい値を示しているが、沈下量が大きくなるとそれらの値はほぼ一致している。また、継手回転角に関しては、設計式を用いた値が実験値より大きく安全側の評価を示している。

図-14に端部固定PVPでの継手伸縮量を示している。実験値は端部側の第1継手と次の第2継手の伸量である。第1継手の値は設計式による値とほぼ対応している。また、不等沈下に関しては図-2にその結果を併記してあるが、やはり実験値と設計式による値はほぼ一致している。これより、管路変形状態から算出される管体伸量を最大継手伸量として評価することは妥当と考えられる。

以上の結果より、本論文で提案した設計式および等価地盤ばね定数は、実験値に対し最大曲げひずみ、継手回転角・伸量をやや安全側に評価するが、地盤沈下を受ける地中管路の設計に十分使用できるとと思われる。

5. 設計式の適用

埋設管路の管材質により許容曲げひずみ（応力）、継手特性により許容継手回転角が存在する。現行までの指

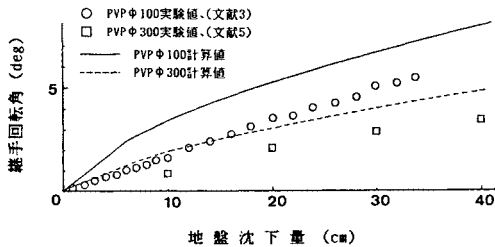


図-13 継手回転角と地盤沈下量の関係 (Case-4)

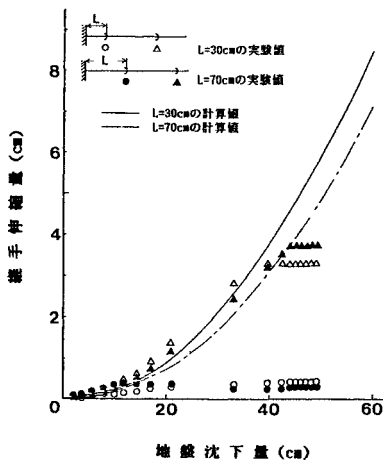


図-14 継手伸縮量と地盤沈下量の関係 (Case-2)

針においては管材の許容ひずみまたは応力によりその管路の地盤変位吸収能力を評価していた。しかし、ガス管、電力管などのように、許容継手回転角を上回る地盤沈下を受けた場合、管体自体は被害を受けていないが継手部でガス漏れ、管内のケーブルの接損などの機能被害をもたらすことが考えられる。そこで、本論文で提案する設計式より管体曲げひずみ、継手回転角、継手伸量の許容値より耐地盤沈下量吸収能力を各実験管路について比較する。

(1) 不等沈下を受ける地中管路の地盤変位吸収能力

不等沈下を受ける管路の設計式と等価地盤ばね定数を用い、管体の最大曲げひずみ（応力）および継手回転角・伸量を算定し、それぞれの許容値に達するときの地盤変位吸収能力を図-15に示す。有継手管路での地盤変位吸収能力が、管体許容曲げひずみ、継手許容回転角または継手許容伸量により決定されるかはそれぞれの管路の諸特性に依存している。たとえば、PVP φ100のように許容継手回転角が1°と小さい場合は、地盤変位吸収能力が約1.5 cm とさほど沈下量を吸収しないことがわかる。一方、DIP φ150 (M1) では許容継手回転角が10°とかなり大きく、計算上100 cm 以上の地盤沈下に耐える可能性がある。しかし、この場合1.7 cm という許容継手伸量により、約27 cm の地盤変位吸収能力であると判断できる。また、PFPにおいては許容継手回転角が大きいので、管体許容ひずみで地盤変位吸収能力が規定される傾向にある。

(2) 端部固定有継手管路の最適継手位置の推定

端部固定有継手管路の沈下では、継手距離の違いによ

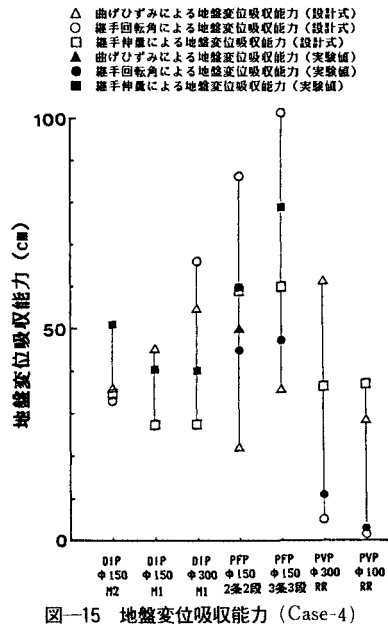


図-15 地盤変位吸収能力 (Case-4)

り端部に発生する最大曲げひずみおよび継手回転角が著しく変化する。そこで、不等沈下のときと同様に地盤変位吸収能力を算定するにあたり、この継手距離を変化させ許容曲げひずみ（応力）および許容継手回転角・伸量の制限内で、最大の地盤変位吸収能力を有する継手位置を定めることは管路設計をするうえで重要と思われる。図-16, 17に、それぞれPVP $\phi 150$ およびPFP $\phi 150$ の継手距離を考慮した地盤変位吸収能力の計算結果を示す。

図-16よりPVP $\phi 150$ では、継手距離が小さい段階で許容継手回転角（ 4° ）により、また継手距離が20~30 cm 以上になると許容曲げひずみ（11 000 μ ）により地盤変位吸収能力が規定されることがわかる。さらに、図には許容曲げひずみを22 000 μ 、許容回転角を 2° に仮定した場合も併記している。なお、許容継手伸量による地盤変位吸収能力の制限は問題となっていない。また、図-17のPFP $\phi 150$ では許容継手特性が強いため地盤

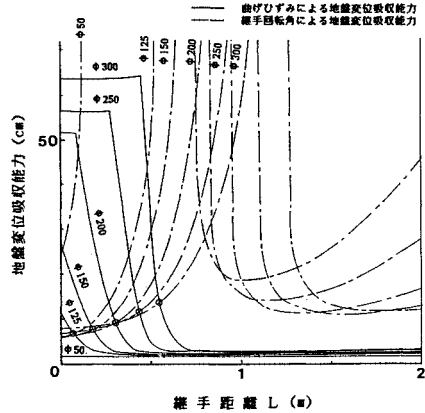


図-18 管径の違いによる地盤変位吸収能力と継手距離の関係 (PVP)

変位吸収能力は許容曲げひずみにより規定される。

また図-18は、Case-2でPVPの管径をパラメータとして許容曲げひずみ、許容継手回転角に達するまでの地盤変位吸収能力を継手位置に対して示している。ここで、管径の変化に対して材質・継手特性は変化しないと仮定している。図より、管径が大きくなると、曲げひずみが小さくなるので地盤変位吸収能力は高まる。一方継手回転角の制限により、管径が大きくなると最適継手距離は徐々に長くなる傾向にある。さらに、両制限を満足する最大地盤変位吸収能力を○印で示した。これより、大きな地盤沈下量を吸収するためには管径を大きくし、かつそれに見合った継手距離をもたなければならないことがわかる。

以上のように、用途によりあらかじめ各管種・管径・継手特性をパラメータにした地盤変位吸収能力をグラフ化しておけば、管路敷設条件などに合わせた管路の選択が可能と思われる。

6. 結 論

本研究では、地盤沈下を受ける4 Caseの地中管路を弾性床の上のはり理論でモデル化し、管路最大曲げひずみ、継手回転角、最大継手伸量を算定する設計式を提案した。また、その設計式に用いる等価地盤ばね定数を実験結果より求めた。さらに、その設計式を継手をも考慮した既存管に適用し、沈下地盤変位吸収能力について述べている。以下、本研究より得られた知見を要約する。

(1) 埋設管路の沈下形態として沈下形式で2種類、継手の有無で2種類の合計4 Caseに分類し、それぞれの解析解から最大曲げひずみ、継手回転角の設計式を誘導した。さらに、継手伸量は管路の変形から算定式を誘導した。

(2) 沈下実験データと最大曲げひずみおよび継手回

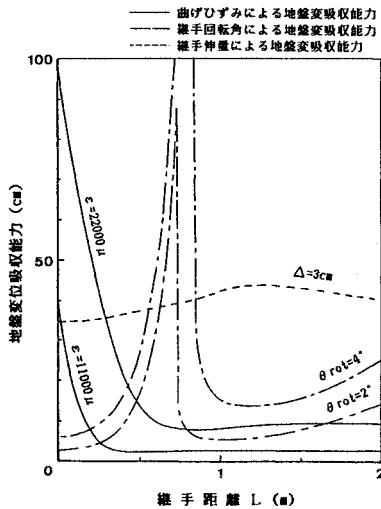


図-16 地盤変位吸収能力と継手距離の関係 (PVP)

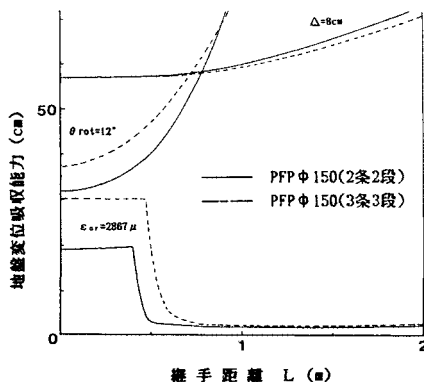


図-17 地盤変位吸収能力と継手距離の関係 (PFP)

転角の設計式より、地盤沈下量をパラメーターとした等価地盤ばね定数を求めた。この値は地盤沈下量が小さい段階では従来の地盤ばね定数とはほぼ同じであるが、地盤沈下量が増大すると急激に低下し始める。これは、沈下量増大に伴い管路が地盤を押し上げて地盤を破壊しているためと考えられる。

(3) 提案した設計式を地盤非線形を考慮した埋設管路解析プログラム ERAUL の解および実験値と比較したが、等価地盤ばね定数を用いた設計式の適用で、やや安全側の設計ができる。

(4) 地盤沈下に対しては、許容継手伸縮・回転能力の比較的小さい管路 (DIP, PVP) においては許容曲げひずみによる制約よりも、継手特性による制約で地盤変位吸収能力が規定される傾向にある。反対に、無継手管 (ST) や許容継手特性の大きい管路 (PFP) では、管体許容ひずみによる制約で地盤変位吸収能力が規定される。

(5) 端部固定管路の地盤沈下においては端部の曲げひずみが大きい、端部近傍に継手を配置することでひずみを低減できる。しかし逆に継手を用いると、継手回転角が増大するという傾向を示し、その継手の位置をどこに配置するかは重要であり、各管種ごとに設計式より求める必要があろう。

参 考 文 献

- 1) 菊池征也・安延信一・伊原陽二：地中管路の強制沈下実験について、第 36 回土木学会年次学術講演会、pp. 466～467, 1981. 10.
- 2) 大石 博：地盤沈下を受ける埋設管路の挙動に関する二、三の考察、土木学会論文報告集、第 356 号、pp. 379～386, 1985. 4.
- 3) 高田至郎・山部泰男：沈下土槽による埋設管路の大変形挙動実験とその解析、土木学会論文報告集、第 323 号、pp. 55～65, 1982. 7.
- 4) 日本ガス協会：ガス工作物設置基準調査委員会資料 (大口径軸直角方向沈下実験報告)、pp. 119～140.
- 5) 水道用塩ビ管の技術研究会：ゴム輪形硬質塩化ビニル管の埋設試験等に関する研究報告書、1984. 6.
- 6) Hazama, Y., Ito, T., Yamajyo, K., Irioka, H., Takada, S. and Ueno, T. : Development of Manhole Fitting Unplasticized Polyvinyl Chloride Pipeline System Resisting to Ground Subsidence, P.V.P. Conference, Vol. 98-4, pp. 55～60, 1985.
- 7) 高田至郎・田邊揮司良・狭間祐二・入岡博明：マンホール埋設管路の沈下挙動実験と対策管路の開発、土木学会論文報告集、第 374 号、pp. 575～582, 1986. 10.
- 8) 関西電力：大地震時復旧システム策定に関する研究資料 (地中 Working Group 沈下実験データ報告)、1985.
- 9) 岡 孝則：地盤変位を受ける埋設管路の動的挙動に関する基礎的研究、神戸大学卒業研究、1983. 2.
- 10) 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、pp. 27～32, 1980.
- 11) 日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針、pp. 350～421, 1982. 3.
- 12) 日本水道鋼管協会：水道用埋設鋼管路不同沈下の計算方法と対策、日本水道鋼管協会技術資料 019, pp. 5～7, 1982. 5.
- 13) Lee, K.L. and Albaisa, A. : Earthquake Induced Settlement in Saturated Sands, J. Geo. Eng. Div., ASCE, Vol. 100, No. GT 4, pp. 397～406, April, 1974.
- 14) 佐々木勉・龍岡文夫・山田真一：液状化による砂地盤の沈下予測法について、第 17 回土質工学研究発表会、pp. 1661～1665, 1982.
- 15) 高田至郎・田邊揮司良・札木秀明：1983 年日本海中部地震におけるガス・水道管の被害調査報告、pp. 8～9, 1983. 7.

(1986. 4. 2・受付)