

## 上下水道管路耐震設計基準に含まれる変動係数の影響に関する パラメトリック分析

### Parametric Analyses on the Effects of Variables Involved in Earthquake Design Standards for Buried Pipelines

岡田 健司      高田 至郎  
Kenji Okada      Shiro Takada

本文では地中管路耐震設計基準に含まれるパラメーターの中で、数値の決定が容易でなく、安全性照査に多大の影響を及ぼすと考えられるファクターについてパラメトリック数値計算により検討を加える。

#### 1. 地中管路の耐震計算法

日本下水道協会の「下水道施設の耐震対策指針と解説、2014年版」<sup>1)</sup>では、地中管路の耐震計算法は下記の手順によっている。管路に作用する地盤の水平変位は式(1.1)で計算される。

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v \cdot T_s \cdot \cos \frac{\pi \cdot z}{2 \cdot H_r} \quad (1.1)$$

ここに、

$U_h(z)$  : 地表面からの深さ  $z$ (m)における地盤の水平変位振幅 (m)  
 $H_r$  : 表層地盤の厚さ (m)  
 $S_v$  : 設計応答速度(m/s)で、レベル1・レベル2の各地震動レベルに  
 応じた設計用応答速度スペクトルより求める  
 $T_s$  : 表層地盤の固有周期 (sec)

$$T_s = a_D \cdot T_G \quad (1.2)$$

$$T_G = 4 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{Si}} \quad (1.3)$$

式(1.3)中の $V_{Si}$ および $H_i$ は表層地盤を構成する各地盤層のせん断弾性波速度および層厚である。式(1.1)における $S_v$ は、図-1.1に示す値が用いられる。

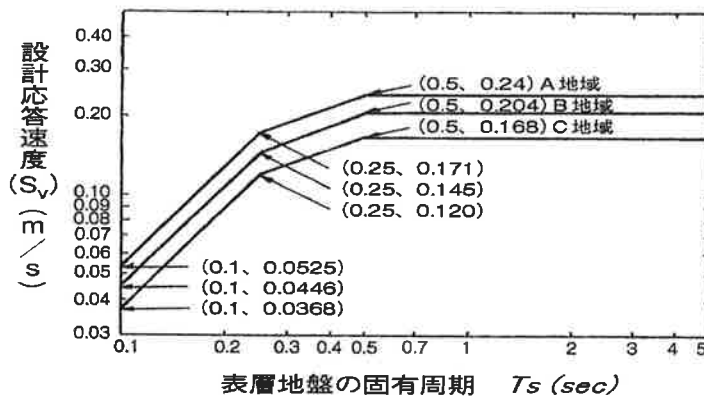


図-1.1 下水道管路の耐震設計に用いられる速度応答スペクトル

さらに、地盤に発生するひずみと、管路に発生する合成応力、軸方向応力および曲げ応力は、式(1.4)～式(1.7)で求められる。

$$\varepsilon_{gd} = \frac{\pi}{L} U_h(z) \quad (1.4)$$

ここに、

- $\varepsilon_{gd}$  : 地震動により地盤に生じるひずみ
- $L$  : 地盤震動の波長 (m)
- $U_h(z)$  : 管きよ布設深度  $z$  (m) における地盤の水平変位振幅 (m)
- $z$  : 管きよ中心の深度 (m)

ここに

$$\sigma_x(x) = \sqrt{\gamma \cdot \sigma_L^2(x) + \sigma_B^2(x)} \quad (1.5)$$

$$\sigma_L(x) = a_1 \cdot \xi_1(x) \cdot \frac{\pi \cdot U_h(z)}{L} \cdot E \quad (1.6)$$

$$\sigma_B(x) = a_2 \cdot \xi_2(x) \cdot \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot U_h(z)}{L^2} \quad (1.7)$$

$\sigma_x(x)$  : 可撓性継手から管軸方向の距離  $x$  (m) の点における管きよの軸方向応力度と曲げ応力度の合成応力度 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$\sigma_L(x)$  : 可撓性継手から管軸方向の距離  $x$  (m) の点における管きよの軸方向応力度 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$\sigma_B(x)$  : 可撓性継手から管軸方向の距離  $x$  (m) の点における管きよの曲げ応力度 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$U_h(z)$  : 管きよ中心深度  $z$  (m) における地盤の水平変位振幅 (m)

一方、地盤ひずみの管体への伝達率 ( $\alpha_1, \alpha_2$ )、地盤の剛性係数 ( $K_{g1}, K_{g2}$ ) は式(1.8)～式(1.10)で表現される。

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L}\right)^2} \quad \alpha_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2 L}\right)^4} \quad (1.8)$$

ここに、

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{K_{g1}}{EA}} \quad (\text{el}/\text{m}) \quad \lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{K_{g2}}{EI}} \quad (\text{el}/\text{m}) \quad (1.9)$$

$$K_{g1} = C_1 \cdot \frac{\gamma_{\text{eq}}}{g} \cdot V_{SD}^2 \quad K_{g2} = C_2 \cdot \frac{\gamma_{\text{eq}}}{g} \cdot V_{SD}^2 \quad (1.10)$$

式(1.10)に含まれる、管軸および管軸直交方向の地盤の剛性係数に対する定数  $C_1$  および  $C_2$  は、一般には  $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$  程度とされており、参考値として、表層地盤厚さ 5~30m、管径 150~3,000 mm に対して、FEM 解析などにより次式が与えられている。

$$C_1 = 1.3H_g^{-0.4} D^{0.25} \quad C_2 = 2.3H_g^{-0.4} D^{0.25} \quad (1.11)$$

ここに、 $H_g$ : 表層地盤厚さ (m)  $D$ : 管径 (cm)

上記に示すように、地中管路の耐震計算は、管路周辺に作用する水平地盤変位を式(1.1)で計算する。本計算式には、速度スペクトル(図-1.1)の  $T_3$  に対応する値を読み取る必要があるが、地盤特性から決定される  $T_G$  に式(1.2)に示すように  $\alpha_D$  を乗じて求められる。本値は地盤の非線形挙動に対応する変動係数で、1.0~1.25 程度と記されているのみで管体応力値などの結果に与える影響は未解明である。また、式(1.11)の  $C_1$ 、 $C_2$  は 1.5~3.0 程度と概算値が提案されているが、個別管路施設ごとに、FEM 解析を行うことも実務上不可能である。 $C_1$ 、 $C_2$  が変化することによって、式(1.10)の  $K_{g1}$ 、 $K_{g2}$  も変化して、式(1.8)の  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  も変化するので、式(1.6)、式(1.7)の管体応力も変化することになる。さらに、式(1.5)の合成応力の計算では、軸方向応力には  $\gamma$  を乗じて、曲げ応力との2乗平均値を求めて、許容値と比較することになる。 $\gamma$  の値については、1.0~3.12 の値をとることが明示されている。3.12 については、1977年に定められた「石油パイプライン技術基準」<sup>2)</sup> で水平面内および鉛直面内で、管路長手方向と 45 度の交差角で入射する波動を想定していることから、従来、種々の地中管路耐震設計指針で 3.12 が用いられてきたが、過剰な入力波動であるとの議論もあり、現状では、1.0~3.12 が施設の重要度に応じて用いられている。さらに、式(1.6)、式(1.7)に見るように、継手管路の管体応力計算では、 $\xi_1$ 、 $\xi_2$  が連続管路の管体応力に乗じられる。 $\xi_1$ 、 $\xi_2$  は以下に与えられる<sup>3)</sup>。

ここに、

$$\xi_1(x) = \frac{\sqrt{\phi_1(x)^2 + \phi_2(x)^2}}{\exp(v' \cdot \lambda_1 \cdot L') - \exp(-v' \cdot \lambda_1 \cdot L')} \quad \xi_2(x) = \sqrt{\phi_3(x)^2 + \phi_4(x)^2} \quad (1.12)$$

$$\phi_1(x) = \{ \exp(-v' \cdot \lambda_1 \cdot L') - \cos(2 \cdot \pi \cdot v') \} \cdot \exp(\mu' \cdot \lambda_1 \cdot L') - \{ \exp(v' \cdot \lambda_1 \cdot L') - \cos(2 \cdot \pi \cdot v') \} \cdot \exp(-\mu' \cdot \lambda_1 \cdot L') + 2 \cdot \sinh(v' \cdot \lambda_1 \cdot L') \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \mu')$$

$$\phi_2(x) = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v') \cdot \sinh(\mu' \cdot \lambda_1 \cdot L') - 2 \cdot \sinh(2 \cdot \pi \cdot \mu') \cdot \sinh(v' \cdot \lambda_1 \cdot L')$$

$$\phi_3(x) = f_3 \cdot e_3 - f_1 \cdot e_2 - f_4 \cdot e_1 - \sin(2 \cdot \pi \cdot \mu')$$

$$\phi_4(x) = e_4 + f_2 \cdot e_3 - f_2 \cdot e_2 - f_5 \cdot e_1 - \cos(2 \cdot \pi \cdot \mu') \quad (1.13)$$

$$\mu' = \frac{x}{L'} \quad , \quad v' = \frac{\theta}{L'} \quad (1.14)$$

$A$ : 管きよの断面積 ( $\text{m}^2$ )

$I$ : 管きよの断面二次モーメント ( $\text{m}^4/\text{m}$ ) の波長 (m)

$L'$ : 地盤振動のみかけの波長 (m)

$\ell$ : 管きよの可撓性継手間の長さ (m)

表-1.1 継手効率を表す係数值

$f_1$	$\frac{1}{\Delta} [ C_1 \cdot (C_4 - C_1) - C_3 \cdot (C_3 + C_2) - C_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v)  \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} + (C_3 + C_2) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v)]$		
$f_2$	$\frac{1}{\Delta} [C_1 \cdot (C_3 - C_2) - C_4 \cdot (C_3 + C_2) + (C_3 + C_2) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v) + C_1 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v)]$		
$f_3$	$\frac{1}{\Delta} [ C_1 \cdot (C_4 + C_1) - C_2 \cdot (C_3 + C_2) - C_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v)  \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} + (C_3 + C_2) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v)]$		
$f_4$	$\frac{1}{\Delta} [ C_3 \cdot (C_4 + C_1) - C_2 \cdot (C_4 - C_1) + (C_2 - C_3) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v)  \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} - 2 \cdot C_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v)]$		
$f_5$	$\frac{1}{\Delta} [(C_3 - C_2)^2 + 2 \cdot C_1 \cdot C_4 - 2 \cdot C_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v) - (C_2 - C_3) \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} \sin(2 \cdot \pi \cdot v)]$		
$\Delta$	$(C_3 + C_2) \cdot (C_3 - C_2) + 2 \cdot C_1^2$		
$C_1$	$\sin(v \cdot \beta \cdot L) \sinh(v \cdot \beta \cdot L)$	$C_2$	$\sin(v \cdot \beta \cdot L) \cosh(v \cdot \beta \cdot L)$
$C_3$	$\cos(v \cdot \beta \cdot L) \sinh(v \cdot \beta \cdot L)$	$C_4$	$\cos(v \cdot \beta \cdot L) \cosh(v \cdot \beta \cdot L)$
$e_1$	$\sin(\mu \cdot \beta \cdot L) \cdot \sinh(\mu \cdot \beta \cdot L)$	$e_2$	$\sin(\mu \cdot \beta \cdot L) \cdot \cosh(\mu \cdot \beta \cdot L)$
$e_3$	$\cos(\mu \cdot \beta \cdot L) \cdot \sinh(\mu \cdot \beta \cdot L)$	$e_4$	$\cos(\mu \cdot \beta \cdot L) \cdot \cosh(\mu \cdot \beta \cdot L)$
$v$	$\frac{\rho}{L}$	$\mu$	$\frac{x}{L}$
$\beta$	$\sqrt[4]{\frac{K_p \cdot g}{4 \cdot E \cdot I}}$		

継手効率  $\xi_1, \xi_2$  は、継手特性を無視して、管セグメントが独立して直線的に配置された状態に、正弦波動が伝播する場合をモデル化して、セグメント間の開き量（継手変位）を計算するものである。したがって、継手位置では管体応力はゼロとなることを意味している（図-1.2 参照）。実際には継手抜けを防止するために、継手抜け阻止力を耐震設計で想定しているので、耐震設計の考え方に矛盾がある。本文では、継手効率の耐震計算に与える影響についても検討する。

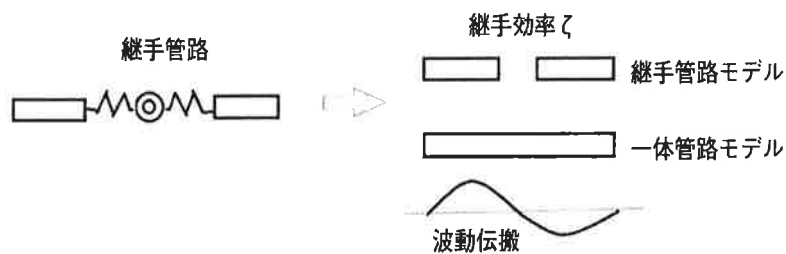


図-1.2 継手管路の耐震計算におけるモデル化

2. 周期係数  $\alpha_D$  に対する影響

(1) 地盤モデル

表-2.1 に検討対象とした管路埋設表層地盤の特性を示している。

表-2.1 表層地盤の特性値

堆積年代	土質	表層地盤厚さ $H_g$ (m)	平均N値	単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )
沖積世	砂質土	50.0	5 または 15	18.0

## (2) 耐震計算管路モデル

表-2.2 に示すK型継手を有するダクタイル鋳鉄管およびRR継手を有する硬質塩化ビニル管を計算対象とした。

表-2.2 ダクタイル鋳鉄管の特性

管種	ダクタイル鋳鉄管 K形管
呼び径	300
外径 $B_c$ (mm)	322.8
計算管厚 $T$ (mm)	5.50
有効長 $l$ (mm)	6,000
断面積 $A$ (cm <sup>2</sup> )	54.83
断面係数 $Z$ (cm <sup>3</sup> )	427.62
断面二次モーメント $I$ (cm <sup>4</sup> )	6,901.81
弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	160,000

管種	硬質塩化ビニル管 K-1
呼び径	300
外径 $B_c$ (mm)	318
内径 $D$ (mm)	298.2
管厚 $t$ (mm)	9.9
有効長 $l$ (mm)	4,000
断面積 $A$ (cm <sup>2</sup> )	95.82
断面係数 $Z$ (cm <sup>3</sup> )	715.85
断面二次モーメント $I$ (cm <sup>4</sup> )	11,381.99
弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	2,942

## (3) 埋設条件

図-2.1 は管路の埋設状況を示す。土被り圧1.361m、表層厚は50.0mである。

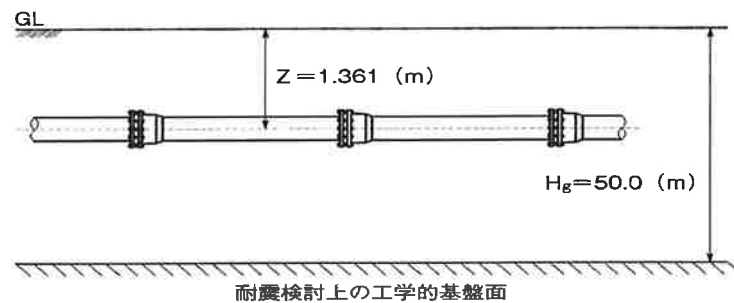


図-2.1 管路の埋設状況

パラメータ $\alpha_D$ は、表-2.3の変動値を用いる。また、ここでは $\alpha_D$ の傾向を確認するため、 $C_1$ および $C_2$ に対する定数は、 $C_1=1.5$ 、 $C_2=3.0$ とし、下水道指針<sup>1)</sup>および水道施設耐震工法指針・解説<sup>3)</sup>(以下、水道指針)の2ケースについて計算を行う。

表-2.3  $\alpha_D$ に対応する地盤ひずみの変動値

$a_D$	1.00	1.11	1.14	1.25	1.43	1.67	2.00	2.50
下水道指針の地盤ひずみによる補正係数	1.0	0.9	★	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
水道指針の対応地盤ひずみ	$10^{-6}$	★	$10^{-4}$	★	★	$10^{-3}$	★	★

表-2.3における★は、下水道指針では、任意地盤ひずみに対して $\alpha_D$ を計算できるが、水道指針では地盤ひずみ $10^{-6}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ のみに対して、 $\alpha_D$ が規定されるので、換算式を用いて逆算した $\alpha_D$ となっている。

① 入力地盤変位振幅および地盤ひずみへの影響

図-2.2には、下水道指針に基づいて、横軸に $\alpha_D$ 、縦軸に $\alpha_D=1.0$ のケース時の波長 $L$ に対する割合(基準化波長)を示した。また、図-2.3には管軸方向の地盤の剛性係数 $K_{gs}$ と $\alpha_D$ の関係を示した。波長 $L$ は $\alpha_D$ が大きくなるにつれて大きくなり、また、 $N$ 値が小さいほど波長 $L$ は短い。一方、剛性係数 $K_{gs}$ は $\alpha_D$ の増加とともに小さくなる。

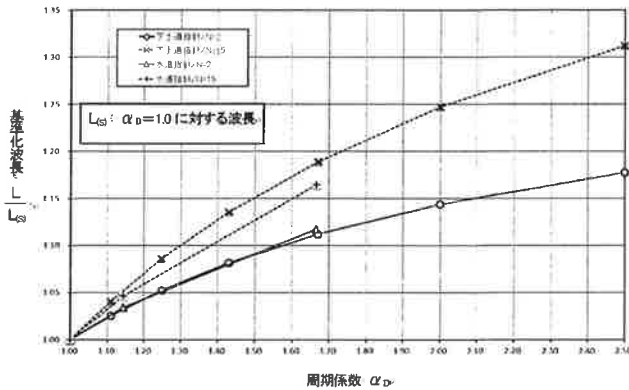


図-2.2  $\alpha_D$ と基準化波長の関係

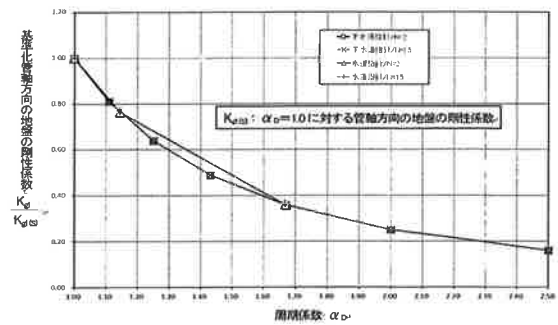


図-2.3 地盤の剛性係数 $K_{gs}$ と $\alpha_D$ の関係

地盤ひずみ $\epsilon$ ( $=\epsilon_{gra}$ )に関しては、図-2.4に示すように、 $\alpha_D$ が大きくなるにつれて大きくなり、また、 $N$ 値が小さいほど大きくなる。管路応答は入力地盤ひずみに直接関係するため、慎重な $\alpha_D$ 値の選択が必要である。また、図-2.5に入力地盤ひずみの絶対値を示しているが、水道指針による応答値は下水道指針による応答値より10~15%程度高く、埋設地盤の $N$ 値の影響も大きい。

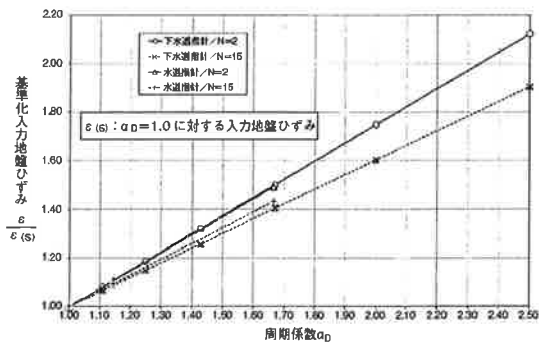


図-2.4 基準化地盤ひずみ

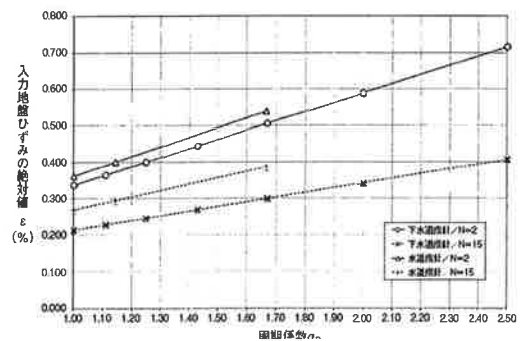


図-2.5 地盤ひずみの絶対値

② 管体応力への影響

図-2.6および図-2.7に示すように $\alpha_1$ および $\alpha_2$ （地盤ひずみの管路への伝達率）に関しては、 $\alpha_D$ が大きくなるにつれて表層地盤の $K_{q1}$ 、 $K_{q2}$ が小さくなる関係で、基準化 $\alpha_1$ も小さくなる。また、N値が大きい場合には、 $\alpha_1$ および $\alpha_2$ は増大する。 $\alpha_2$ に関しては、 $\alpha_D$ は大きな影響を与えず、管材と $K_{q1}$ および $K_{q2}$ の影響が大きい。

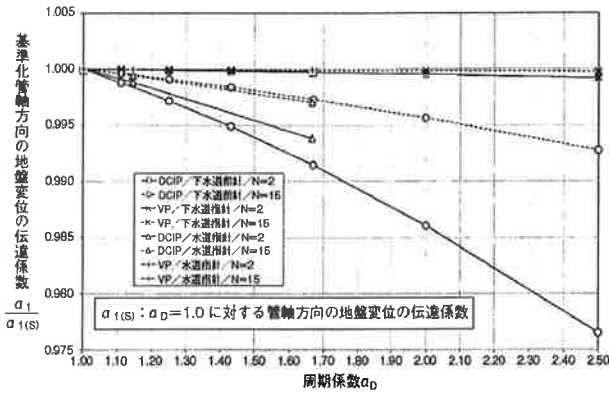


図-2.6 地盤変位の伝達係数 $\alpha_1$ と $\alpha_D$ の関係

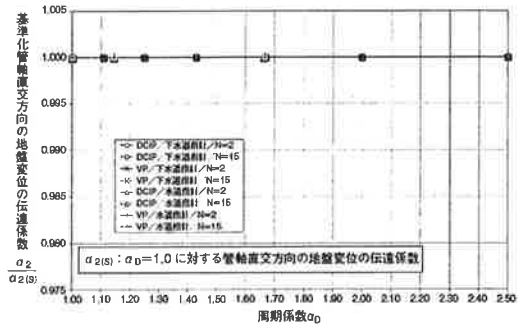


図-2.7 地盤変位の伝達係数 $\alpha_2$ と $\alpha_D$ の関係

図-2.8に、 $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮（継手構造）した場合の合成応力 $\sigma_x$ の絶対値および図-2.9に基準化合成応力と $\alpha_D$ の関係を示す。ダクトイル鋳鉄管DCIPは、 $\alpha_D$ が大きくなるにつれて合成応力 $\sigma_x$ も小さくなり、また、N値が大きいほど大きな値を示す。一方、硬質塩化ビニル管VPは $\alpha_D$ が大きくなるにつれて固い地盤の場合は合成応力 $\sigma_x$ が大きくなり、柔らかい地盤の場合は小さくなる傾向にある。合成応力の絶対値は下水道指針による計算が水道指針による場合より大きな値となっている。

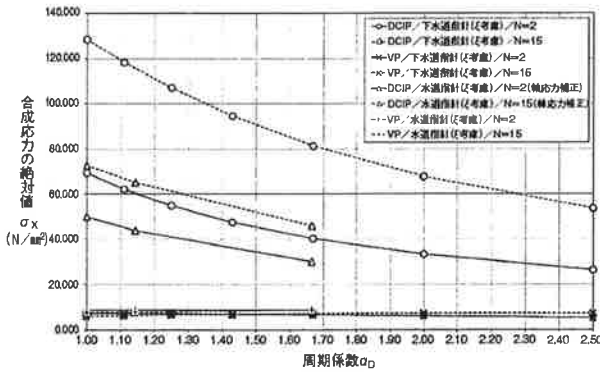


図-2.8 合成応力の絶対値

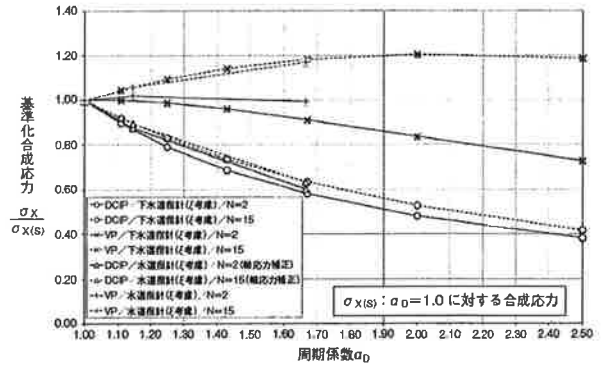


図-2.9 基準化合成応力

基準化継手伸縮量 $U_j$ あるいは基準化継手屈曲角 $\theta$ と $\alpha_D$ の関係を図-2.10および図-2.11に示した。 $\alpha_D$ の増大とともに、継手伸縮量、継手屈曲角度とも大きくなる傾向にある。ダクトイル鋳鉄管DCIPの継手伸縮量が硬質塩化ビニル管より大きくなるが、 $\alpha_D = 2.5$ の場合でも9mm程度であり、継手屈曲角度は極めて小さい。

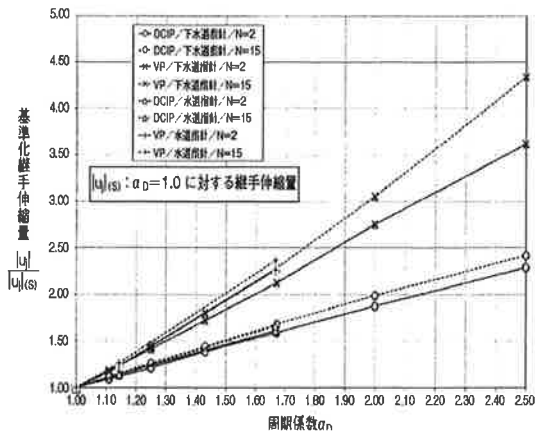


図-2.10 基準化継手伸縮量

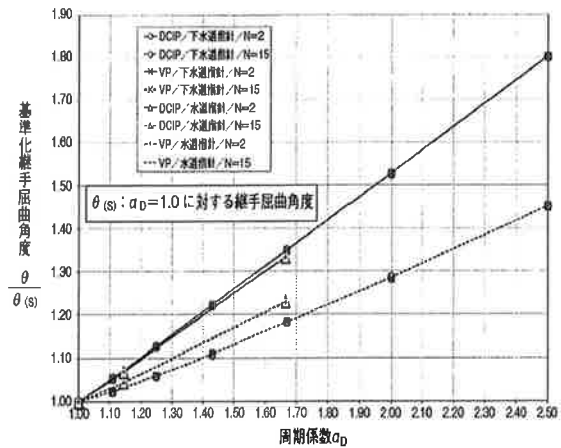


図-2.11 基準化継手屈曲角

3. 重畳係数および地盤の剛性係数に対する定数  $C_1$ 、 $C_2$  に関する影響

下水道指針では波動の重畳係数  $\gamma$  を 1.0 ~ 3.12 に変化させて、重要度に応じて選択することになっている。重要な施設には多くの波動成分を考慮しているとも考えられる。軸心力  $\sigma_L$  と曲げ応力  $\sigma_B$  の大小によって、 $\gamma$  の影響が異なる。大口径管で  $\sigma_B$  が大きくなる場合には  $\gamma$  の影響は小さくなる。 $\gamma$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  の影響検討を目的に、表層地盤でのせん断ひずみを  $10^{-3}$  レベルと仮定して下記のモデルを用いて数値計算を実施した。設計条件は以下の通りである。

(1) 地盤モデル

埋設地盤モデルを表-3.1 に示す。地盤層厚は3種類、平均N値は2種類に変化させている。

表-3.1 埋設地盤モデル

堆積年代	土質	表層地盤厚さ $H_g$ (m)	平均N値	単位体積重量 $\gamma_i$ (kN / m <sup>3</sup> )
沖積世	砂質土	10.0、20.0、50.0	2、15	18.0

(2) 耐震計算管路モデル

表-3.2 に示すように、K型継手ダクタイル管およびRR型継手硬質塩化ビニル管を対象とした。

表-3.2 解析対象管路

管種	ダクタイル鋳鉄管 K形管
呼び径	150、300、450、600、800、1,000、1,200、1,500、1,800、2,200、2,600
有効長 $l$ (mm)	6,000
弾性係数 $E$ (N / mm <sup>2</sup> )	160,000

※ 呼び径  $\phi$ 150、1,800、2,200 の有効長  $l$  は実際には 5,000 (mm) であるが、ここでは比較のため 6,000 (mm) を設定  
 ※ 呼び径  $\phi$ 2,600 の有効長  $l$  は実際には 4,000 (mm) であるが、ここでは比較のため 6,000 (mm) を設定  
 ※ 上記以外の呼び径の有効長  $l$  は、実際の 6,000 (mm) を設定

管種	水道用硬質ポリ塩化ビニル管 RR管
呼び径	100、150、200、250、300
有効長 $l$ (mm)	5,000
弾性係数 $E$ (N / mm <sup>2</sup> )	3,334



(3) 埋設条件

埋設条件は図-3.1に示す通りである。DCIP φ150~2,600 に対して、重量係数 $\gamma$ を1.0、1.5、2.0および3.12の4タイプ、また、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ および管径 $D$ 、表層地盤厚さで $H_g$ により決定される $C_1$ 、 $C_2$ の2タイプによる軸方向の軸力補正係数 $\xi_1$ および軸直交方向の曲げ補正係数 $\xi_2$ を考慮(継手構造)した合成応力 $\sigma_x$ を管径毎に算出した。

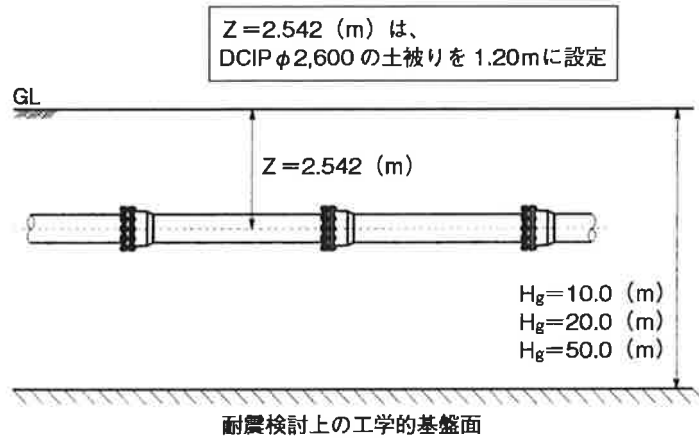


図-3.1 計算対象とした表層地盤厚さと管路モデル

①  $H_g = 10.0$  (m)、 $N$ 値=2に対して、 $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮(継手構造)したDCIPの基準化合成応力 $\sigma_x$ の計算値について $\gamma$ をパラメーターとして口径を横軸とって図-3.2に示す。 $\gamma$ は1.5、2.0、3.12である。波動成分重量による管体応力への影響は小口径では $\sqrt{\gamma}$ で影響している。しかし、2,600 mmの大口径になると、曲げ応力 $\sigma_B$ が大きくなるために、合成応力度も大きくなる。600 ~ 800 mmでは合成応力 $\sigma_x$ は極めて小さくなり、波動成分重量の影響は少なくなる。なお、表-3.3は図-3.2に用いているパラメーターの説明である。

表-3.3 パラメーター  $C_1$ 、 $C_2$  の意味合い

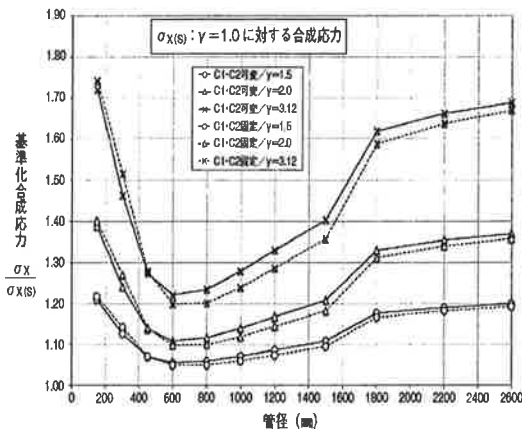


図-3.2 重量係数 $\gamma$ の影響

$C_1 \cdot C_2$ 可変 <sup>a</sup> / $\gamma = 15$	$H_g = 10.0$ mによる各管径の $C_1$ および $C_2$ 、 $N$ 値=2に対して、 $\gamma = 15$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出、また、 $\gamma = 1.0$ の $\sigma_x$ を基準値とした割合を算出
$C_1 \cdot C_2$ 可変 <sup>a</sup> / $\gamma = 20$	$H_g = 10.0$ mによる各管径の $C_1$ および $C_2$ 、 $N$ 値=2に対して、 $\gamma = 20$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出、また、 $\gamma = 1.0$ の $\sigma_x$ を基準値とした割合を算出
$C_1 \cdot C_2$ 可変 <sup>a</sup> / $\gamma = 3.12$	$H_g = 10.0$ mによる各管径の $C_1$ および $C_2$ 、 $N$ 値=2に対して、 $\gamma = 3.12$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出、また、 $\gamma = 1.0$ の $\sigma_x$ を基準値とした割合を算出
$C_1 \cdot C_2$ 固定 <sup>b</sup> / $\gamma = 15$	$H_g = 10.0$ m、 $C_1 = 15$ 、 $C_2 = 3.0$ 、 $N$ 値=2に対して、 $\gamma = 15$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出、また、 $\gamma = 1.0$ の $\sigma_x$ を基準値とした割合を算出
$C_1 \cdot C_2$ 固定 <sup>b</sup> / $\gamma = 20$	$H_g = 10.0$ m、 $C_1 = 15$ 、 $C_2 = 3.0$ 、 $N$ 値=2に対して、 $\gamma = 20$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出、また、 $\gamma = 1.0$ の $\sigma_x$ を基準値とした割合を算出
$C_1 \cdot C_2$ 固定 <sup>b</sup> / $\gamma = 3.12$	$H_g = 10.0$ m、 $C_1 = 15$ 、 $C_2 = 3.0$ 、 $N$ 値=2に対して、 $\gamma = 3.12$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出、また、 $\gamma = 1.0$ の $\sigma_x$ を基準値とした割合を算出

② 表層厚 $H_g = 50.0$  (m)、 $N$ 値=15に対して、 $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮(継手構造)したDCIPの基準化合成応力 $\sigma_x$ の計算値を図-3.3に示した。表-3.4には $C_1$ と $C_2$ の組み合わせの内容詳細を示している。上記①のケースとの違いは、 $H_g$ が10 mから50 mに変化し、 $N$ 値が2から15に変動している。 $H_g = 10.0$  mに対する各管径毎の $C_1$ および $C_2$ の組み合わせについて、 $N$ 値=2、 $\gamma = 2.0$ の場合の $\sigma_x$ を算出した。ここでは、 $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮していない。また、 $\gamma = 1.0$ の $\sigma_x$ を基準値として比率で示している。 $H_g$ の増大によって地盤変位は大きくなるが、DCIPの継手伸縮で地盤ひずみを吸収できること、 $N$ 値の増大で、軸直交方向のひずみ伝達率 $\alpha_2$ が小さくなるので、大口径管路においても、曲げひずみが極端に大きくならないので、合成応力 $\sigma_x$ は管路口径の影響を大きく受けないことが知られた。

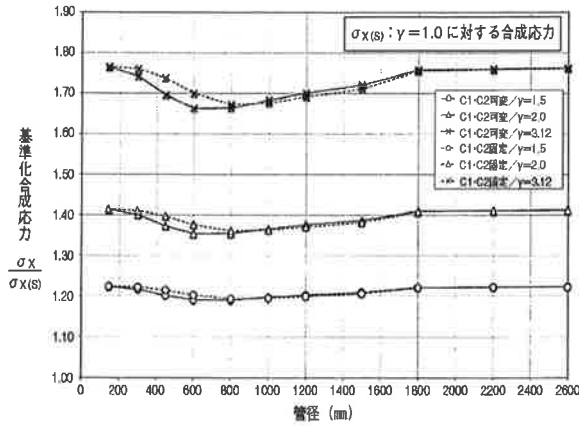


図-3.3 基準化合成応力 $\sigma_x$ に与える重畳係数 $\gamma$ の影響

次に、N値=2に対して、 $\xi_1$  および  $\xi_2$  を考慮（継手構造）したDCIP の合成応力  $\sigma_x$  ( $N/mm^2$ ) の計算値を図-3.4 に示し、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ 、N値=2またはN値=15 による  $\sigma_x$  を基準値とした割合を図-3.5 に示す。

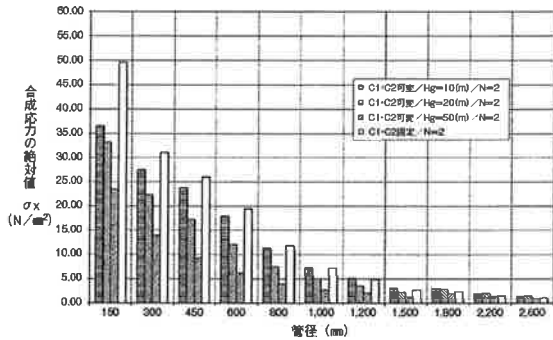


図-3.4 継手構造管路DCIP の合成応力 $\sigma_x$ の絶対値

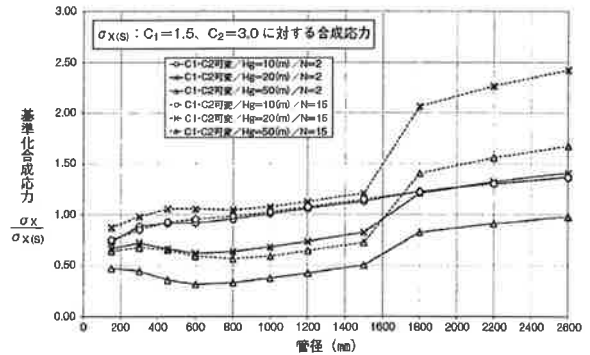


図-3.5 継手構造管路DCIP の基準化合成応力

継手構造管路の $C_1$  は管軸方向の地盤変位の伝達係数 $\alpha_1$ および $\xi_1$ に、 $C_2$  は管軸直交方向の地盤変位の伝達係数 $\alpha_2$ 、 $\xi_1$  および  $\xi_2$  に影響を与えるため、 $C_1$ は軸応力 $\sigma_L$ に、 $C_2$ は軸応力 $\sigma_L$ および曲げ応力 $\sigma_B$ の両方に影響する。 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\xi_1$ および $\xi_2$ は、大口径になるにつれて小さくなるため、合成応力 $\sigma_x$ は小さくなる。さらに、N値=2に対して、 $\xi_1$ および $\xi_2$ を無視（一体構造）したDCIPの合成応力 $\sigma_x$  ( $N/mm^2$ ) について、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ 、N値=2またはN値=15による $\sigma_x$ を基準値とした割合を図-3.6に示す。一体構造管路の $C_1$ は管軸方向の地盤変位の伝達係数 $\alpha_1$ に、 $C_2$ は管軸直交方向の地盤変位の伝達係数 $\alpha_2$ に影響を与えるため、 $C_1$ は軸応力 $\sigma_L$ に、 $C_2$ は曲げ応力 $\sigma_B$ に影響する。 $\alpha_1$ および $\alpha_2$ は、大口径になるにつれて小さくなるため、基本的には合成応力 $\sigma_x$ も小さくなるが、口径1,600mmで合成応力 $\sigma_x$ が大きくなるのは、すべりを考慮した速度応答スペクトル $S_v$ を用いて計算するためである。 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ による固定 $C_1$ 、 $C_2$ と、管径 $D$ 、 $H_g$ により決定する可変 $C_1$ 、 $C_2$ による合成応力 $\sigma_x$ を比較した場合、 $H_g = 20.0$  m、 $50.0$  mの合成応力 $\sigma_x$ は、管径 $D$ およびN値によりばらつきがみられるが、 $H_g = 10.0$  mの合成応力 $\sigma_x$ は、管径 $D$ およびN値の影響がほとんどない。また、可変 $C_1$ 、 $C_2$ による合成応力 $\sigma_x$ は、固定 $C_1$ 、 $C_2$ に比べ、 $H_g = 10.0$  mでは1.0 ~ 1.1倍に対し、 $H_g = 20.0$  mでは1.3 ~ 4.5倍、 $H_g = 50.0$  mで1.3 ~ 6.8倍となる。

表-3.4 パラメーター  $C_1$ 、 $C_2$  の意味合い

$C_1 \cdot C_2$ 可変/ $\gamma = 1.5$	$H_g = 50.0$ mによる各管径の $C_1$ および $C_2$ 、N値=15に対して、 $\gamma = 1.5$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 可変/ $\gamma = 2.0$	$H_g = 50.0$ mによる各管径の $C_1$ および $C_2$ 、N値=15に対して、 $\gamma = 2.0$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 可変/ $\gamma = 3.12$	$H_g = 50.0$ mによる各管径の $C_1$ および $C_2$ 、N値=15に対して、 $\gamma = 3.12$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 固定/ $\gamma = 1.5$	$H_g = 50.0$ m、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ 、N値=15に対して、 $\gamma = 1.5$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 固定/ $\gamma = 2.0$	$H_g = 50.0$ m、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ 、N値=15に対して、 $\gamma = 2.0$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 固定/ $\gamma = 3.12$	$H_g = 50.0$ m、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ 、N値=15に対して、 $\gamma = 3.12$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を考慮したDCIPの各管径毎の $\sigma_x$ を算出

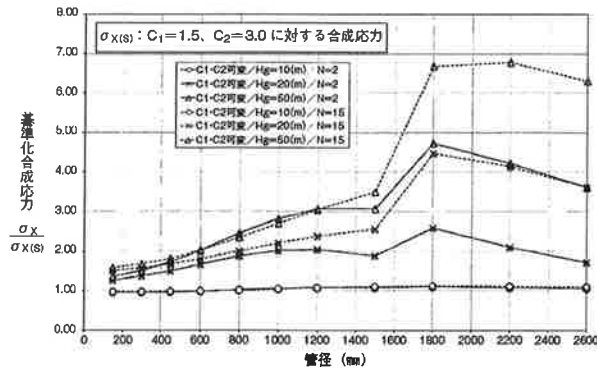


図-3.6 一体構造管路の基準化合成応力 ( $\xi_1$  および  $\xi_2$  を無視)

上記の計算例から知られるように、 $C_1$ 、 $C_2$  の影響は大きく、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$  による固定  $C_1$ 、 $C_2$  と、管径  $D$ 、 $H_g$  により決定する可変  $C_1$ 、 $C_2$  を用いて算出した合成応力  $\sigma_x$  には、管径  $D$ 、 $H_g$  または  $N$  値により大きい差異が発生するケースがみられる。

4. 継手効率  $\xi$  (可撓継手がある場合の応力補正係数) と継手抜け出し阻止力の影響

継手効率  $\xi$  は地下埋設管路耐震継手の技術基準 (案) (1997年)<sup>4)</sup> (以下、継手基準) に初めて導入された。とくに、設計者が選択すべき任意の係数はなく、波長、管長、管継手間の位置によって決定される。口径が大きくなれば、極端に  $\xi$  は小さな値となり、継手伸縮量が大きな値を示すので、管体応力は小さくなる。 $H_g = 10.0$  (m)、 $N$  値 = 2 に対して、 $\xi_1$  および  $\xi_2$  を無視 (一体構造) した DCIP の基準化合成応力  $\sigma_x$  の計算値を図-4.1 に示した。表-4.1 は  $C_1$ 、 $C_2$  の組み合わせの詳細内容を示している。 $\xi$  を 1.0 とした場合の結果である。 $\gamma$  に対する影響は上記ケースと同様であるが、継手効率の影響は極めて大きい。 $H_g = 50$  m、 $N = 2$  の図-3.6 と比較すると口径が大きい場合には、合成応力の傾向は異なる。すなわち、水道指針では、継手特性を考慮せずに、管体応力や継手伸縮量、継手屈曲角度を算出しており、安全性照査に対して継手の特性を考慮している現状にある。

表-4.1  $C_1$ 、 $C_2$  の意味合い

$C_1 \cdot C_2$ 可変 / $\gamma = 15$	$H_g = 100$ m による各管径の $C_1$ および $C_2$ 、 $N$ 値 = 2 に対して、 $\gamma = 15$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を無視した DCIP の各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 可変 / $\gamma = 20$	$H_g = 100$ m による各管径の $C_1$ および $C_2$ 、 $N$ 値 = 2 に対して、 $\gamma = 20$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を無視した DCIP の各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 可変 / $\gamma = 312$	$H_g = 100$ m による各管径の $C_1$ および $C_2$ 、 $N$ 値 = 2 に対して、 $\gamma = 312$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を無視した DCIP の各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 固定 / $\gamma = 15$	$H_g = 100$ m、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ 、 $N$ 値 = 2 に対して、 $\gamma = 15$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を無視した DCIP の各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 固定 / $\gamma = 20$	$H_g = 100$ m、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ 、 $N$ 値 = 2 に対して、 $\gamma = 20$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を無視した DCIP の各管径毎の $\sigma_x$ を算出
$C_1 \cdot C_2$ 固定 / $\gamma = 312$	$H_g = 100$ m、 $C_1 = 1.5$ 、 $C_2 = 3.0$ 、 $N$ 値 = 2 に対して、 $\gamma = 312$ とした $\xi_1$ および $\xi_2$ を無視した DCIP の各管径毎の $\sigma_x$ を算出

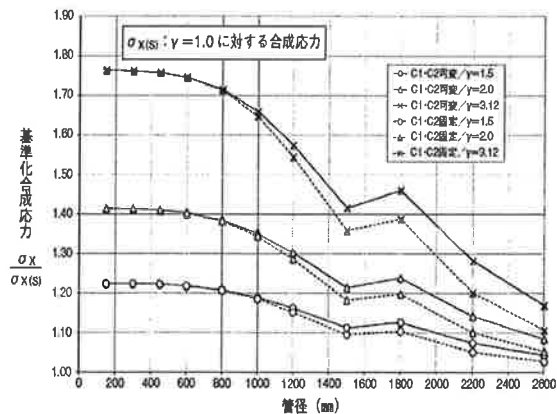


図-4.1 一体構造管路の重量係数の影響 ( $\xi_1$  および  $\xi_2$  を無視)

一方、ダクトイル継手管 DCIP では、継手抜け出し阻止力  $F$  として、継手基準以降、式 4.1 が与えられている。

$$F = 3D \text{ kN} \tag{4.1}$$

本式は、土のせん断力 $\tau$ が $10 \sim 20\text{kN}/\text{m}^2$ 、 $L = 100\text{ m}$ とし、余裕（安全率） $4.0 \sim 2.0$ を見込んで導かれている。管路設計では、 $F$ の作用時に管体応力が許容値内に収まる必要がある。一方、耐震計算結果によって、継手伸縮量が大きくなれば、管体応力は極端に低下するので、 $F$ は小さくて済む。波動入力計算時の管体応力は、 $F$ に伴う管体応力より、はるかに小さい値と考えられる。 $F$ は、地盤変状や液状化現象に対応するものである。上記を考慮すると、合理的な設計のためには、波動耐震計算のモデル化（継手特性の導人など）に工夫が必要と思われる。

#### 参 考 文 献

- 1) (公社) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説、2014年版、2014年
- 2) (社) 日本道路協会：石油パイプライン技術基準（案）、1974年
- 3) (社) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説2009年版 II各論、2009年
- 4) (財) 国土開発技術研究センター：地下埋設管路耐震継手の技術基準（案）、1977年

#### 著 者

岡田 健司 ㈱シビルソフト開発、工学士 下水道工学  
高田 至郎 所員、工学博士、地震工学