

下水道管路横断面設計と周面せん断力の影響評価

Influence of hoop shear force on a cross section design of sewage pipelines

高田至郎*, 上田智宏**, 鎌田泰子***, 岡田健二****

Shiro Takada, Tomohiro Ueda, Yasuko Kuwata and Kenji Okada

*工博, 神戸大学教授, 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**修士 (工学), 神戸大学自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

***博士(工学), 神戸大学助手, 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

****工学士, (株) シビルソフト開発代表 (〒101-0026 東京都千代田区神田佐久間河岸 67)

Present paper treats the effect of shear stress acting on the hoop of cross section of a buried sewage pipe for the aseismic design. Current seismic design neglects the shear stress for circular section pipes under the assumption of conventional response displacement method. The effect is evaluated quantitatively by comparing response values obtained by two methods of the current displacement method and the response seismic intensity method taking consideration of slippage and separation behavior between pipe and surrounding soil. The results show that the larger diameter sewage pipe than 800 mm needs to be considered the effect of shear stress under the general given conditions used for design parameters. Formulae to estimate bending moment and shear force of the pipe are proposed when the shear stress is considered.

Key Words: Sewage pipe, seismic design, hoop shear force

キーワード: 下水道管, 耐震設計, 周面せん断力

1. はじめに

本研究では下水道管路横断面を対象として耐震計算における周面せん断力の影響を評価した。現行の耐震計算法¹⁾では、円管横断面の応答変位法計算に関しては周面せん断力による影響は小さいということから、その影響は無視されている¹⁾。しかし、本来地震にともなう外力は地盤変位に対応する地震水平力のみならず周面せん断力が作用することは明らかである²⁾。定量的に評価することを目的として、周面せん断力の影響について解析的検討をおこなった。応答変位法との比較のため、準動的 FEM 解析手法である応答震度法^{3), 4)}の解析プログラムを開発し、同時に滑り・剥離現象を考慮できるジョイント要素の導入によって、非線形応答震度法の静的耐震計算を実施した。

構造物と周辺地盤の滑り・剥離性を取り扱う手法として内田ら⁵⁾は三次元有限要素法を用いて、原子炉建屋基礎と地盤との間の浮き上がりに伴う回転ばね特性を求め、地震応答特性を調べている。Kennedy ら⁶⁾、および Takemori ら⁷⁾も半無限弾性地盤と剛な板との間のインピーダンス比から非線形ばね特性を近似的に決定する手法を提案している。さらに Wolf^{8)~10)}は浮き上がり現象とともに滑り現象も表現しうる解析手法を提案している。本研究では土

岐ら^{11)~13)}によって提案されたジョイント要素を導入することにより、接触面における滑り・剥離現象も含めて、周面せん断力の影響を検討している。

2. 周面せん断力の取扱い

2.1 下水道設計指針による周面せん断力

現在、下水道施設の管渠の耐震設計法には応答変位法を用いている。矩形渠では地震時周面せん断力を考慮する必要があるが、円形管においては考慮する必要はないこととなっている¹⁾。

地震時周面せん断力を考慮する場合は、原則として「駐車場設計・施工指針同解説」¹⁴⁾を準用して式(1)によりせん断力を求めている。

$$\tau_x = \tau_y = \frac{G_D}{\pi H} S_V T_s \sin\left(\frac{\pi}{2H}\right) \quad (1)$$

ここに、 τ_x , τ_y : 地震時周面せん断力 (kN/m²)、周面せん断力は地盤のせん断強度 $\tau_{\max}$ を上限値としており、 $\tau_{\max} = c + \sigma_n \tan \phi$ で与えられる。 c : 粘着力 (kN/m²)、 σ_n : 有効上載圧 (kN/m²)、 ϕ : 内部摩擦角(rad)、 G_D : 地盤の動的せん断弾性係数 (kN/m²) で次式にて求められる。

$G_D = E_D / 2(1 + \nu_D) = E_D / 3 \cdot \nu_D$, E_D , N : 地盤の動的ポアソン比 ($=0.5$), 地盤の動的変形係数 (kN/m^2) $=2800N$, N は準貫入試験値である. H , S_v , T はそれぞれ, 表層地盤の層厚, 設計速度応答スペクトル, 表層地盤の卓越周期である.

地震時周面せん断力が働くとき, リング円周に作用する垂直応力度(σ)とせん断応力度(τ)は式(2)で求められる.

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= -\frac{\tau_x + \tau_y}{2} \sin 2\theta \\ \tau &= \frac{\tau_x - \tau_y}{2} + \frac{\tau_x + \tau_y}{2} \cos 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2.2 応答震度法と周面せん断力

応答震度法は, 1次元重複反射理論から得られる同時刻加速度分布を慣性力(物体力)として2次元有限要素地盤モデルに作用させるものである. 図-1に応答震度法に用いたジョイント要素解析手法モデルを示す. 応答震度法は片山ら^{3), 4)}によって提案され, 準動的解析手法として用いられている. 入力基盤波形は, スペクトル適合法を用いて下水道施設の耐震計算に用いられる設計応答速度に対応する模擬地震動を作成し, この模擬地震動を工学的基盤面に入力し, 管路頂部・底部の相対変位が最大となる時刻における各層の応答加速度分布を算出した.

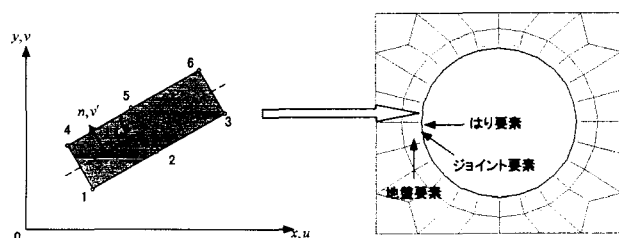


図-1 ジョイント要素

構造物と地盤の接触面のせん断特性に関する実験^{15), 16)}データより, せん断強度は, Mohr-Coulomb式で与えた. 一方, ジョイント要素の法線方向に発生した垂直応力 σ が, その深さにおいて法線方向に作用している土圧 σ_v より大きくなると剥離現象が発生するものと仮定している.

なお, 応答変位法に用いた要素ははり要素・地盤ばね要素を用いており, 応答震度法に用いた要素は地盤要素・管路要素・ジョイント要素を用いている. ジョイント要素は法線方向剥離と接線方向すべりを考慮できるものである^{17), 18)}.

3. 周面せん断力の影響評価

本節では, 地震水平力を与えた応答変位法, さらに周面せん断力を加えた応答変位法の耐震計算を行い, 一方で, 静的有限要素解析手法である応答震度法を用いて, 滑り・剥離を考慮した非線形解析をおこない, 応答変位法で周面せん断力を考慮する必要の有無をパラメトリック解析によって検討した. 表-1に荷重条件と解析ケースを示す.

表-1 解析ケース

ケース	解析手法	荷重条件
1	応答変位法	地震水平力
2		地震水平力+周面せん断力
3	応答震度法	滑り・剥離考慮しない
4		滑り・剥離考慮する

3.1 解析諸条件

3.1.1 管路および地盤特性

管路および地盤条件について述べる. 対象地中管路は, 下水道推進用ヒューム管(1種管)でその特性を表-2に示す.

表-2 管路諸元

口径(mm)	800	1,400	2,000
管厚(mm)	55.0		
管長(m)	2.43		
ヤング係数(kN/m^2)	3.3×10^7		
単位体積重量(kN/m^3)	25.0		
断面積(m^2)	0.055		
断面2次モーメント(m^4)	1.38×10^{-5}		

口径 800mm, 1400mm, 2000mm の3タイプについて表-1の各ケースに対してそれぞれ解析をおこなった. 地盤諸定数は指針¹⁾に従って求め, 表-3に示すとおりである. 管位置は, 推進工法のため土被りが深いものとして管中心土被り 12.1mとした. なお, 周面せん断力の影響評価をおこなうために表層の地盤条件は極力単純なものとして単層地盤を用いた. 単層表層地盤は平均 N 値が 1~10 までの 10 ケースとした.

降伏条件は, Mohr-Coulomb の破壊基準を採用し, また地盤は滑り・剥離現象が発生しやすいものとして, 粘着力, 内部摩擦角は指針¹⁾に従って表-4に示すものを用いた.

表-3 地盤条件

層	土質	層厚(m)	単位体積重量(kN/m^3)	せん断弾性係数(10^3kN/m^2)	平均 N 値	粘着力(kN/m^2)	内部摩擦角(度)	備考
第1層	砂質土	24.7	17.3	表-4 参照		0	10	管位置
第2層	軟岩	—	20.4	500	50	—	—	基盤下

表-4 単層地盤の各平均 N 値に対する地盤特性

平均 N 値	せん断弾性波速度 $V_s(\text{m/s})$	固有周期(s)	せん断弾性係数(10^3kN/m^2)	水平方向地盤反力係数 $K_n(10^4 \text{kN/m}^3)$	せん断地盤反力係数 $K_s(10 \text{kN/m}^3)$
1	80	1.54	1.11	0.76	0.23
2	101	1.22	1.76	1.51	0.45
3	115	1.07	2.30	2.27	0.68
4	127	0.97	2.79	3.03	0.91
5	137	0.90	3.30	3.78	1.13
6	145	0.85	3.66	4.54	1.36
7	153	0.81	4.05	5.30	1.59
8	160	0.77	4.43	6.05	1.82
9	166	0.74	4.79	6.81	2.04
10	172	0.72	5.12	7.57	2.27

3.1.2 ジョイント要素のばね特性

つぎに、図-1に対応するジョイント要素に用いるせん断ばね（滑り方向）と垂直ばね（剥離方向）のばね係数 G_s 、 E_n については、シールドトンネルの外周面にジョイント要素を導入している研究例¹⁹⁾ などがあるが、ジョイントのばね係数が、構造物に与える影響が大きいことから、本研究においては、ばね係数によるパラメトリック解析を実施して、滑り・剥離の現象が生じる値を探索した。図-2、3の解析結果に示すように、せん断ばね（滑り方向）係数 G_s は $1.0 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ 、垂直ばね（剥離方向）係数 E_n が $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ の時に、滑り・剥離を考慮する応答震度法が、滑り・剥離を考慮しない応答震度法の応答値に収束していることが分かる。実際には、滑り・剥離を考慮した応答震度法は滑り・剥離を生じていないことから両者は同じ応答値を示す必要があるため、数値解析上不都合が生じないせん断ばね係数・垂直ばね係数として $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ を採用した。

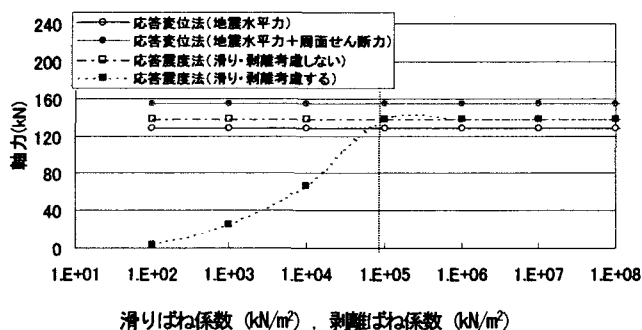


図-2 軸力

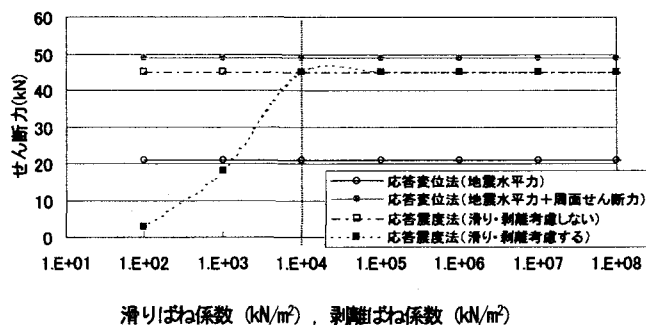


図-3 せん断力

3.1.3 荷重および解析モデル

本研究ではレベル2地震動を対象として、作用荷重は下水道耐震計算指針に従い、設計応答速度から地盤相対変位、地震水平力を算出した。解析モデルを図-4に示す。本モデルは指針に採用されているものと同一である。

つぎに、応答震度法に用いる作用荷重・解析モデルについて記述する。スペクトル適合法により作成した模擬地震動（設計地震動）は図-5に示すとおりで、対象とした設計スペクトルに対して図-6に示すように精度よく収束している事がわかる。

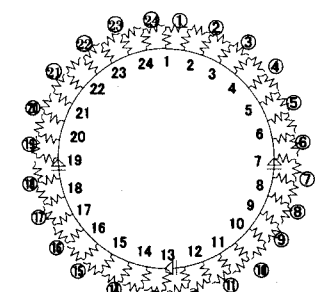


図-4 応答変位法解析モデル

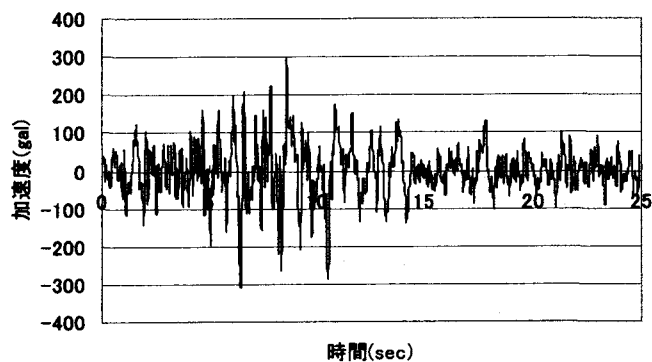


図-5 設計地震動

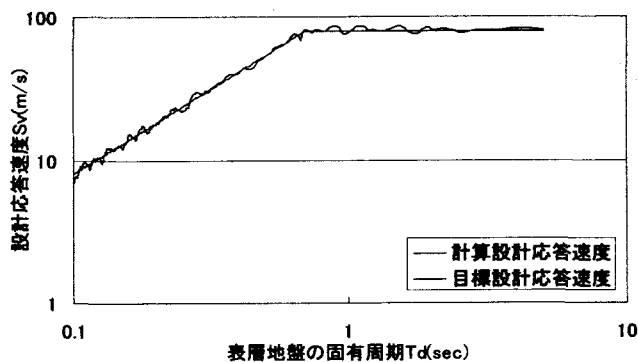


図-6 設計応答速度

次に、管路口径それぞれにおいて管路位置の地盤の相対変位が最大となる時刻における加速度分布を図-7の有限要素モデルに入力した。ただし、各平均 N 値における加速度分布は、滑り・剥離を考慮していない応答震度法の計算値と、地震水平力と周面せん断力、両者を作用させた応答変位法の計算値が同じレベルになるように合わせている。

3.2 解析結果と考察

本項においては、地震水平力のみを作用させた応答変位法を応答変位法（地震水平力）、地震水平力にさらに周面せん断力を加えたものを応答変位法（地震水平力+周面せん断力）、滑り・剥離を考慮しない応答震度法を応答震度法（滑り・剥離考慮しない）、滑り・剥離を考慮する応答震度法を応答震度法（滑り・剥離考慮する）と以下記述する。

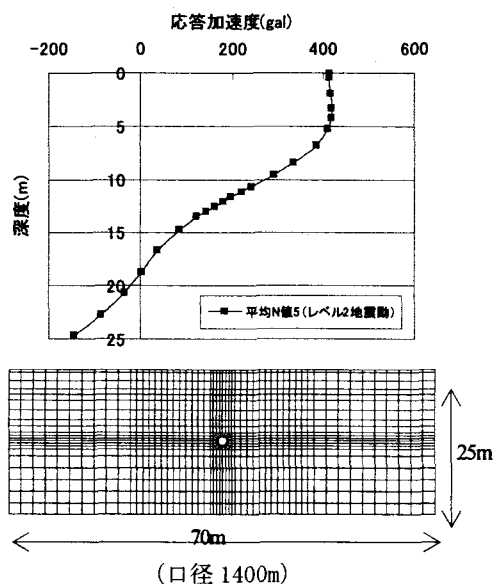


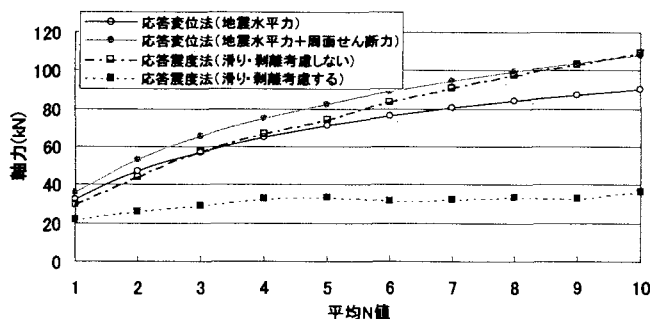
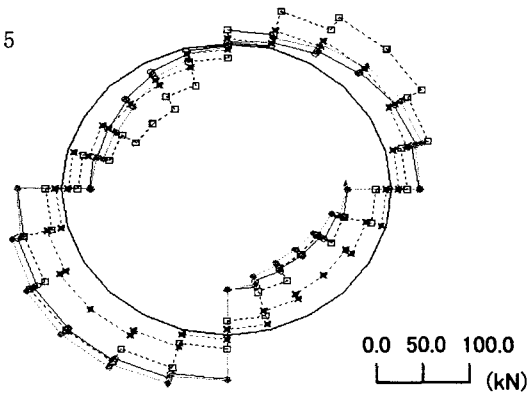
図-7 応答震度法解析モデル作用荷重

3.2.1 表層 N 値の影響 (口径 800mm)

図-8 に口径 800mm の各ケースにおける軸力・せん断力・曲げモーメントの断面力の分布を示している。図中の下図は、地盤の平均 N 値の変化に対する管路応答の変化を表した。上図は、 N 値 5 における断面力の分布を示す。なお、軸力・曲げモーメントは図-4 における節点 16, せん断力は 19 における断面力を示す。

○ 応答変位法(地震水平力) ● 応答変位法(地震水平力+周面せん断力)
 □ 応答震度法(滑り・剥離考慮しない) ■ 応答震度法(滑り・剥離考慮する)

平均 N 値 5

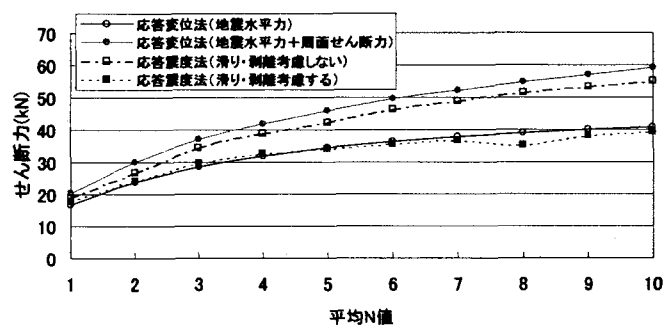
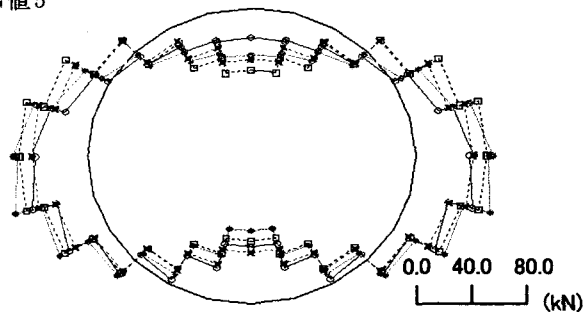


(a) 軸力

図によると、各ケースともに平均 N 値の増加に伴い、断面力が増加する。また、興味深いのは、せん断力・曲げモーメントは応答変位法(地震水平力+周面せん断力)と応答震度法(滑り・剥離考慮しない)と同程度応答を示すのは当然として、応答震度法(滑り・剥離考慮する)が応答

○ 応答変位法(地震水平力) ● 応答変位法(地震水平力+周面せん断力)
 □ 応答震度法(滑り・剥離考慮しない) ■ 応答震度法(滑り・剥離考慮する)

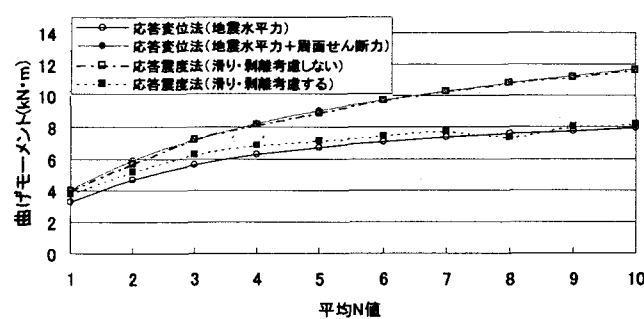
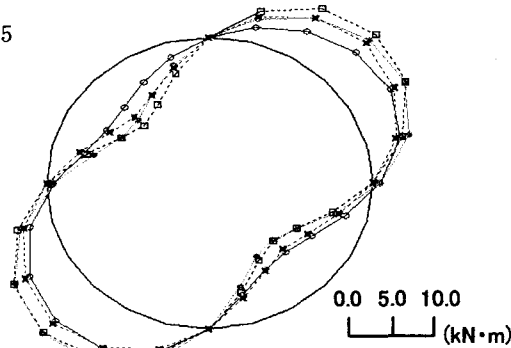
平均 N 値 5



(b) せん断力

○ 応答変位法(地震水平力) ● 応答変位法(地震水平力+周面せん断力)
 □ 応答震度法(滑り・剥離考慮しない) ■ 応答震度法(滑り・剥離考慮する)

平均 N 値 5



(c) 曲げモーメント

図-8 地盤条件と管路応答の関係 (口径 800mm)

変位法（地震水平力）の応答レベルまで減少していることが知られ、口径 800mm のような小口径においては、周面せん断力を考慮する必要が無いことが考えられる。軸力は滑りにより応答変位法（地震水平力）の最大 40～50% 近くまで減少している。なお、剥離現象は生じていない。

3.2.2 表層 N 値の影響（口径 2000mm）

図-9 に口径 2000mm の各ケースにおける軸力・せん断力・曲げモーメントと表層地盤平均 N 値との関係を示している。口径 800mm に比較して応答変位法は周面せん断力による影響が大きいことが分かる。一般的に N 値が大きくなれば断面力も増加するが、周面せん断力を考慮していない応答変位法では、正しく計算していないので異なった応答を示す。軸力については応答震度法（滑り・剥離考慮する）が滑りによる断面力の低下が見られるが、一方、せん断力・曲げモーメントは滑りによる断面力の低下がほとんど見られないことから、口径 2000mm のような大口径においては、とくに周面せん断力を考慮する必要があることが分かる。なお、剥離現象は生じていなかった。

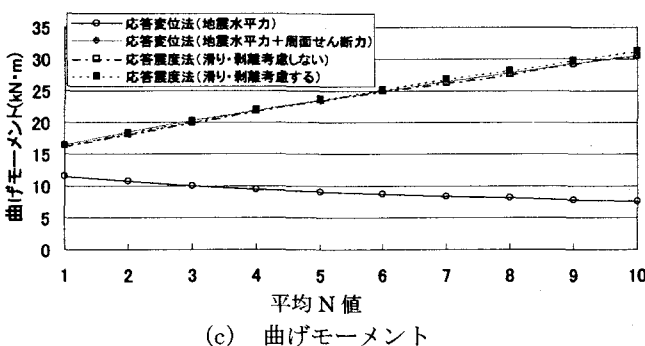
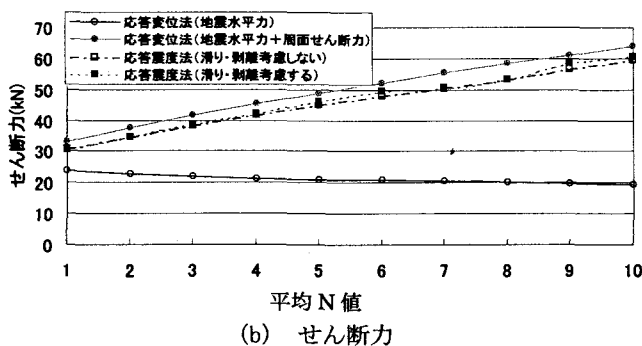
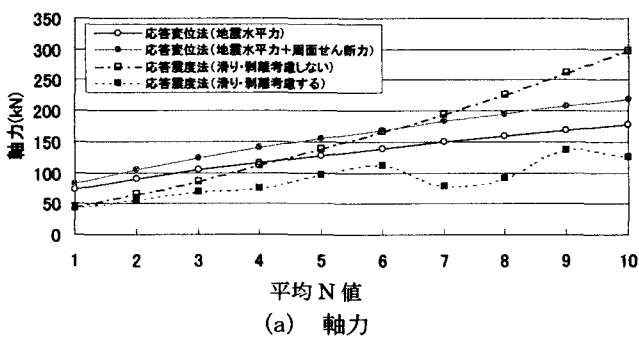


図-9 地盤条件と管路応答の関係（口径 2000mm）

3.2.3 口径と周面せん断力の影響

地盤条件を平均 N 値 5 の一定として、口径を 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000mm の 10 タイプを用いて計算した。管路諸元は表-2 に示している特性値と同一である。

断面力是指針¹⁾で応力度の照査に用いられる曲げモーメント外側最大値・曲げモーメント内側最大値・せん断力について、それぞれ図-10 に示す。

曲げモーメント外側・内側、せん断力ともに口径が増加するにつれて断面力が増加することが分かる。曲げモーメント外側・内側最大は、口径 200～800mm くらいまでは応答震度法（滑り・剥離考慮する）が滑りによる断面力の低下で応答変位法（地震水平力）まで減少していることが分かる。そして、口径 800～1400mm の区間は、応答変位法（地震水平力）と応答変位法（地震水平力+周面せん断力）

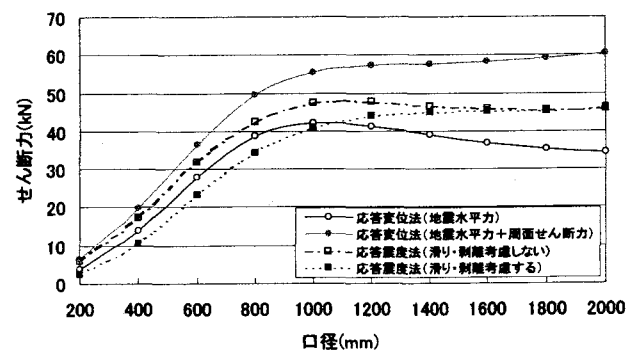
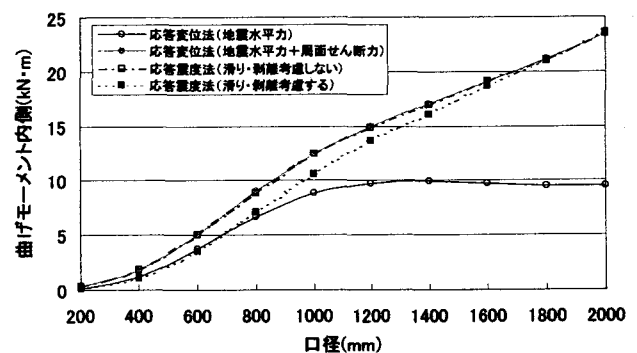
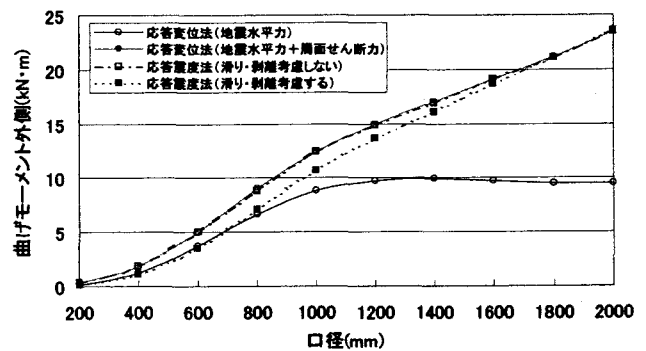


図-10 口径と管路応答の関係（平均 N 値 5）

の中間値となり、口径 1400～2000mm のように大口径になるにつれて応答震度法（滑り・剥離考慮する）と応答変位法（地震水平力+周面せん断力）がほぼ同じ値で、滑りによる断面力の減少（低下）が見られない。つまり、周面せん断力を考慮する必要を示している。

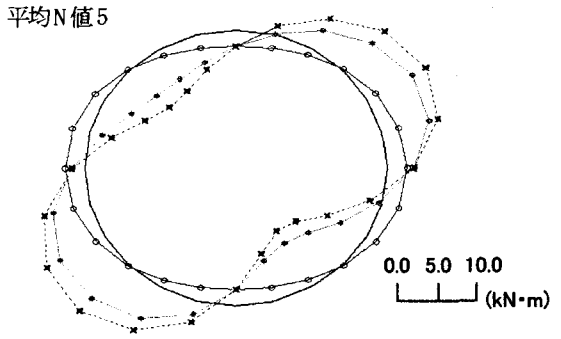
つぎに、せん断力は口径 200～1000mm くらいまでは応答震度法（滑り・剥離考慮する）が滑りによる断面力の低下で応答変位法（地震水平力）の 80～90%に減少している。そして、口径 1000～2000mm の区間は、応答変位法（地震水平力）と応答変位法（地震水平力+周面せん断力）の間となりほぼ一定値をたどる。少なくとも、地震水平力のみを作用させる外力では不十分な口径範囲であると云える。

3.3 管路応力度の照査

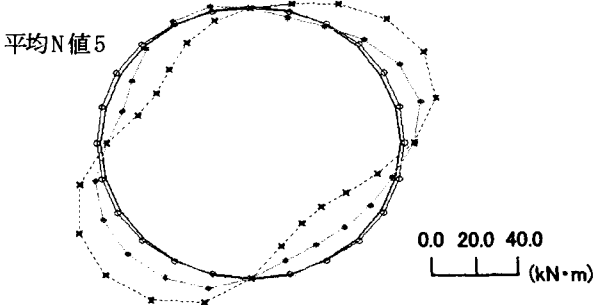
レベル 2 地震動における部材応力度の照査には、限界状態設計法の終局限界状態が用いられている。応力度の照査には、曲げモーメントの外側・内側の最大位置および最大せん断力が生じる位置での照査をおこなう¹⁾。照査は、応答変位法による計算値を用い、管路口径が 800mm と 2000mm の 2 タイプで地盤は平均 N 値 5 の条件でおこなった。

ただし、耐震設計時の照査に用いる断面力は地震水平力と常時荷重を作用させたものである。前項までに示した耐震計算は地震水平力と周面せん断力のみであるので、上記のケースについて常時荷重を作用させた耐震計算をおこなった¹⁾。図-11 中に一例として 800, 2000 mm の曲げモーメント図を示す。

○— 応答変位法（地震水平力） ●— 応答変位法（地震水平力+周面せん断力）
 - - □ - - 応答震度法（滑り・剥離考慮しない） ■ 応答震度法（滑り・剥離考慮する）



外側曲げモーメント（800mm）



外側曲げモーメント（2,000mm）

図-11 3 ケースにおける曲げモーメント分布図

表-5 に応力度照査結果を示す。表中のカッコ内は(常時荷重+地震水平力+周面せん断力)を表し、カッコの前に

表-5 応力度照査結果（レベル 2 地震動）

口径			800mm			2000mm		
検討項目			曲げ外側	曲げ内側	せん断力	曲げ外側	曲げ内側	せん断力
節点番号			5(5)	11(11)	19(19)	6(5)	11(11)	18(18)
断面寸法	B	m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	H	m	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
断面力	Md	kN・m	6.97(9.02)	7.34(9.39)	1.70(1.70)	11.3(22.3)	8.70(21.2)	4.77(11.8)
	Nd	kN	107(116)	11.7(20.7)	44.7(43.3)	283(280)	26.6(5.88)	278(286)
	Qd	kN	8.78(15.8)	3.89(10.9)	44.7(56.2)	43.9(36.0)	3.23(13.9)	57.9(84.1)
	d1	m	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
鉄筋量	As1	cm ²	6-D13	6-D13	6-D13	6-D13	6-D13	6-D13
			7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60
	d2	m	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	As2	cm ²	6-D13	6-D13	6-D13	6-D13	6-D13	6-D13
			7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60
	合計	cm ²	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
断面耐力	Mud	kN・m	14.6(13.5)	9.59(9.75)	19.6(19.3)	19.1(13.3)	10.0(9.24)	21.5(18.7)
	Nud	kN	225(175)	15.3(21.5)	514(492)	478(167)	30.6(2.56)	1258(453)
安全性	γi・Md/Mud		0.47(0.66)	0.76(0.96)	0.08(0.08)	0.59(1.67)	0.87(2.29)	0.22(0.63)
判定			OK(OK)	OK(OK)	OK(OK)	OK(OUT)	OK(OUT)	OK(OK)
せん断補強筋	Aw	cm ²	-	-	-	-	-	-
	Ss	mm	-	-	-	-	-	-
コンクリートのせん断耐力	βd		1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
	βp		1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
	βn		2.00(2.00)	2.00(2.00)	2.00(2.00)	2.00(1.77)	2.00(1.56)	2.00(2.00)
	fcd	N/mm ²	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
	Qcd	kN	111(111)	111(111)	111(111)	111(99.2)	111(87.4)	111(111)
	Qcd	kN	-	-	-	-	-	-
補強筋のせん断耐力	fwyd	N/mm ²	-	-	-	-	-	-
せん断耐力	Qsd	kN	-	-	-	-	-	-
安全性	γi・Qd/Qyd		0.07(0.14)	0.03(0.09)	0.40(0.50)	0.39(0.36)	0.02(0.03)	0.51(0.75)
判定			OK(OK)	OK(OK)	OK(OK)	OK(OK)	OK(OK)	OK(OK)

*カッコ内は、（常時荷重+地震水平力+周面せん断力）

記載している値は(常時荷重+地震水平力)である。口径 800mm については(常時荷重+地震水平力)、(常時荷重+地震水平力+周面せん断力)ともに耐力以内に収まることが確認され、また弾性範囲内であることが分かった。一方、口径 2000mm については(常時荷重+地震水平力)は口径 800mm と同様に許容値内であることが確認されたが、(常時荷重+地震水平力+周面せん断力)は曲げモーメント外側・曲げモーメント内側で曲げ耐力を越え、同時に材料塑性領域に移っていることが分かった。前項までの結果と合わせて考察すると、口径 2000mm については周面せん断力を考慮する必要がある、応力度の照査結果から周面せん断力を考慮すると許容耐力を満たさないことになる。

3.4 周面せん断力による影響評価

図-12 に滑り・剥離を考慮した応答震度法のせん断力・曲げモーメントの計算値を示した。2段階回帰法を用いて求めた。これらの曲線は、式(3)、(4)で表される。なお曲げモーメントを M 、せん断力を Q 、口径 ϕ とする。なお、相関係数 R^2 は 0.99 が得られている。

$$M = 3.16\phi^4 - 15.7\phi^3 + 26.6\phi^2 - 3.73\phi + 0.487 \cdot \phi^{2.53} \cdot (N-5)^{0.68} \quad (3)$$

$$Q = 29.8\phi^4 - 125\phi^3 + 150\phi^2 - 13.6\phi + 2.05 \cdot \phi^{1.22} \cdot (N-5)^{0.72} \quad (4)$$

なお、周面せん断力を考慮した場合の曲げモーメントせん断力算出式を提案したが、本式は本研究で対象とした管路や地盤条件において適用されることは言うまでもない。

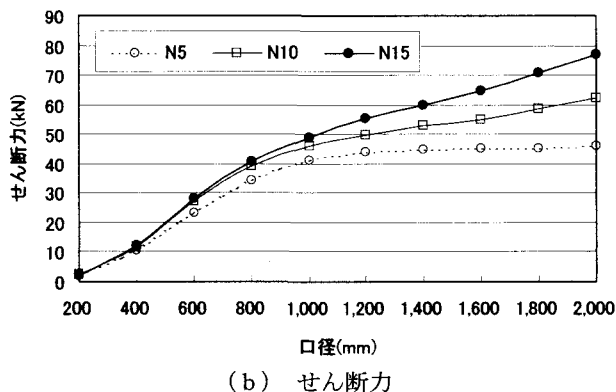
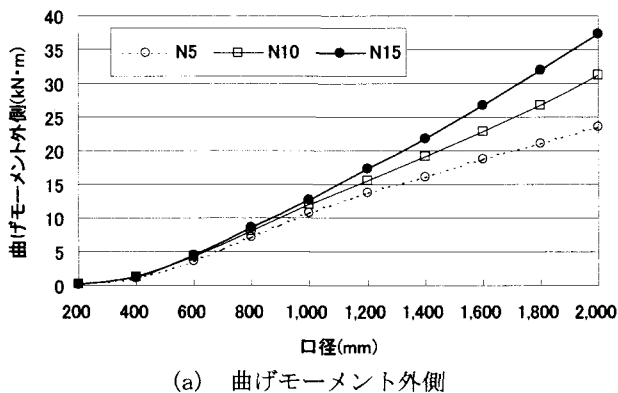


図-12 口径と管路応答の関係 (平均 N 値 5, 10, 15)

4. まとめ

本研究では、地中管路横断面の耐震計算における周面せん断力の影響を検討するため、応答変位法と応答震度法の比較をととして定量的評価を試みた。本論文の要旨は以下の通りである。

- (1) 応答変位法および非線形応答震度法の耐震計算プログラムを開発した。
- (2) 本研究で対象とした地盤条件においては、平均 N 値による影響より、口径が大きくなれば周面せん断力の影響が大きいたことが知られた。曲げモーメントについては、口径 200~800mm は滑り・剥離による断面力の減少が確認され、周面せん断力を考慮する必要のないことが分かった。そして 1400~2000mm については断面力の減少は見られず周面せん断力を考慮する必要がある。一方、せん断力については、口径 200~1000mm は滑り・剥離による断面力の減少が確認され、周面せん断力を考慮する必要のないことが分かった。そして 1000~2000mm については断面力の減少は見られず周面せん断力を考慮する必要がある、と考えられる。
- (3) 応力度照査結果から本研究で対象とした口径 2000mm の管路については、周面せん断力を考慮する必要がある、また曲げ許容耐力を満たさず、材料塑性領域に移っていることが知られ、管路の非線形性を考慮した解析の必要性も示唆される。
- (4) 滑り、剥離を考慮した応答震度法による計算結果を用いて、周面せん断力の影響を配慮した曲げモーメント、せん断力の算定式を提案した。
- (5) 概して、口径 800mm 以下の管路は周面せん断力の影響は小さいが、それ以上の口径に対しては、現行の指針を再考する必要がある。

参考文献

- 1) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説，日本下水道協会，1997.10.
- 2) 立石章：応答変位法における地震荷重の作用方法に関する研究，土木学会論文集 No.441/I-18，pp.157-166，1992.1
- 3) 片山幾夫，足立正信，嶋田穰，都築富雄，瀬下雄一：地下埋設構造物の実用的な準動的解析手法「応答震度法」の提案，第 40 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 1 部，pp.737-738，1985.
- 4) Katayama, I. : Studies on fundamental problems in seismic design analyses of critical structures and facilities, Chap.4, pp.188-237, 京都大学博士論文，1990.
- 5) 内田一義，宮下丘，永田修一：円形基礎をもつ原子力発電所の非線形ロッキング振動，鹿島建設技

- 術研究所年報 第21号, pp.673-678, 1973.
- 6) Kennedy, R.P., S.A. Short, D.A. Wesley and T.H. Lee : Effect on non-linear soil-structure interaction due to base slab uplift on the seismic response of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR), Nuclear Engineering and Design 38, North-Holland publishing company, pp.323-355, 1976.
 - 7) Takemori, T., K. Sotomura and M. Yamada : Non-linear dynamic response of reactor containment, Nuclear Engineering and Design 38, North-Holland publishing company, pp.463-474, 1976.
 - 8) Wolf, J.P. : Soil-structure interaction with separation of base mat from soil (lifting-off), Nuclear Engineering and Design 38, North-Holland publishing company, pp.357-384, 1976.
 - 9) Wolf, J.P. : Seismic response due to traveling shear wave including soil-structure interaction with base mat uplift, Earthquake engineering and structural dynamics Vol.5, pp.337-363, 1977.
 - 10) Wolf, J.P. and Skrikerud : Seismic excitation with large over-turning moments, Nuclear Engineering and Design 50, North-Holland publishing company, pp.305-321, 1978.
 - 11) 土岐憲三, 佐藤忠信, 三浦房紀 : 強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動, 土木学会論文報告書 302号, pp.31-41, 1980.10.
 - 12) 土岐憲三, 三浦房紀 : 地盤-構造物系の非線形地震応答解析, 土木学会論文報告書 317号, pp.61-68, 1982.1.
 - 13) 土岐憲三, 三浦房紀, 大竹敏雄 : 3次元ジョイント要素による地盤-構造物系の非線形振動解析, 土木学会論文報告書 322号, pp.51-61, 1982.6.
 - 14) 日本道路協会 : 駐車場設計・施工指針同解説, 1992.3.
 - 15) 三浦房紀 : 強震時における剛構造物の耐震安定性の評価, 第6回日本地震工学シンポジウム, 1986.
 - 16) Potyondy, J.C. : Skin friction between various soils and construction materials, Geotech., M.E., 1961.
 - 17) 上田智宏 : 応答変位法を用いた地中構造物の耐震計算法と作用荷重評価, 神戸大学修士論文, 2002.3.
 - 18) 高田至郎, 上田智宏, 岡田健司 : 管路横断面に作用する周面せん断力の影響評価, 建設工学研究所報告第44-B号, 2002.11.
 - 19) 大塚良治 : 大深度・大断面シールドトンネルの横断面内地震時挙動と耐震設計に関する基礎的研究, 神戸大学修士論文, 1994.3.

(2004年9月17日 受付)