

土木研究所資料

シールドトンネルの耐震性に関する研究

—(その7)曲線部を有する下水道シールド管渠に生じる地震力の検討—

Development of Seismic Resistant Design Procedure
for Shield Tunnels

—Part 7 Dynamic Response of Shield Tunnels for
Sewerage Which Has Curved Part—

平成2年11月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

「Copyright © (1990) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

シールドトンネルの耐震性に関する研究

—(その7)曲線部を有する下水道シールド管渠に生じる地震力の検討—

Development of Seismic Resistant Design Procedure
for Shield Tunnels

—Part 7 Dynamic Response of Shield Tunnels for
Sewerage Which Has Curved Part—

耐震研究室 室 長 川島 一彦
研究員 杉田 秀樹
加納 尚史

要 旨

下水道管路施設は、既往の地震において度重なる被害を受けており、耐震設計法の開発が急務である。

本資料は、曲線部を有する下水道シールド管渠の耐震設計に資することを目的として、地震時に下水道シールド管渠の曲線部に生じる断面力を地震応答解析により検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：下水道シールド管渠，地震応答解析，動的解析，曲線部

ま え が き

上・下水道、電気、電話およびガス等のいわゆるライフライン施設は、都市の機能を支える重要な構造物であり、地震による被害が都市域の生活に及ぼす影響は大きい。なかでも下水道施設は、近年の地震の度に被害を受けており、1)～5)、加えて施設の大部分が地中構造物であることから、被災箇所の把握および復旧がきわめて困難となる特徴を有している。このため、下水道施設の設計に際しては、地震時の検討を十分に行い、耐震性の向上を図ることが重要となる。

本資料は、下水道施設のうち、特に曲線部を有するシールド管渠の耐震設計に資することを目的として、管渠の地震時挙動特性を地震応答解析により検討した結果をまとめたものである。

目 次

まえがき

1. はじめに	1
2. 解析手法の概要	2
3. 解析対象地盤およびシールド管渠	5
3-1 対象地盤	5
3-2 シールド管渠	5
4. 解析モデル	9
4-1 地盤モデル	9
4-2 シールド管渠モデル	11
4-3 解析ケース	12
4-4 入力地震動	12
5. 解析結果	13
5-1 地盤の応答	13
5-2 曲線部がシールド管渠の地震時応答に及ぼす影響	20
5-3 加振方向がシールド管渠の地震時応答に及ぼす影響	31
6. まとめ	39
謝 辞	40
参考文献	41

1. はじめに

下水道シールド管渠は、地上での用地確保、地中での他構造物との空間的な制約などから、曲線部を有する場合が多い。しかしながら、こうした線状地中構造物の曲線部では、地震時に断面力の集中が起こりやすく、十分な地震時安全性の検討が必要とされる。

上記の観点から、ここでは、次に示す項目に関して検討を行うことにした。

- 1) 管渠の線形に曲線部を挿入することが、管渠全体系の地震時挙動に及ぼす影響（直線状シールド管渠の地震時挙動との比較）
- 2) 地震力の作用方向が曲線部を有するシールド管渠の地震時挙動に及ぼす影響

2. 解析手法の概要

地震応答解析の手順を図2-1に示す。本解析手法は、基本的にこれまでシールドトンネルの地震応答解析に用いた手法^{6) 10)}と同様であるが、地盤を3次元のバネ～質点系にモデル化し、地盤の平面的な広がりを考慮する点がこれまでの手法と異なっている。

① 表層地盤の動的応答解析モデルの作成

3次元的な広がりを持つ表層地盤を、図2-2に示すように地表面と基盤面を端面とする土柱に分割し、それぞれの土柱を一質点バネで置換した後、これらの質点を伸縮バネとせん断バネを用いて相互に、平面的に連結する。これにより、シールド管軸直角方向の地盤条件の変化を表現するものである。

② シールド管渠の力学モデル（等価剛性梁モデル）の作成

シールドセグメント、リング継手及び二次覆工からシールド管渠の軸剛性及び曲げ剛性を評価し、管渠の覆工をこれと等価な剛性を有する一様連続な曲がり梁に置換する方法を用いた。ここで、シールド管渠の軸剛性は、引張と圧縮とで異なる非線形性を有するが、本解析ではシールド管渠の引張側に着目し、覆工の引張剛性を用いた線形解析とした。リング継手の軸剛性については、継手金具面板の曲げ剛性から算定することとした。

③ 表層地盤の動的応答解析

表層地盤の動的応答解析を行い、各地盤質点位置での応答変位を計算する。この応答変位は、シールド管渠本体の応答を解析するための入力地震動となるもので、各地盤質点について時系列で算定する。

④ 応答変位法によるシールド管渠の動的応答解析

③により算定された地盤の応答変位のうち、構造物節点位置での応答変位を、地盤とトンネルを結ぶバネを介して静的にトンネルに作用させる。これを時系列で行うことにより、シールド管渠の動的な応答変位を算定する。

ただし、構造物節点位置での地盤の応答は、図2-3に示すように、構造物節点を囲む地盤の4質点の刺激係数を用いて次式により算定される。

$$Z_p(t) = C_{(1)} \times \beta_{(1)} \times Z_{(1)} + C_{(2)} \times \beta_{(2)} \times Z_{(2)} + C_{(3)} \times \beta_{(3)} \times Z_{(3)} + C_{(4)} \times \beta_{(4)} \times Z_{(4)}$$

式(2.1)

$$\begin{aligned} C_{(1)} &= \frac{b}{a+b} \times \frac{d}{c+d} \\ C_{(2)} &= \frac{a}{a+b} \times \frac{d}{c+d} \\ C_{(3)} &= \frac{b}{a+b} \times \frac{c}{c+d} \\ C_{(4)} &= \frac{a}{a+b} \times \frac{c}{c+d} \end{aligned}$$

ここに、 $Z_p(t)$: 構造物板要素節点における地盤の地震動

$Z(t)(t=1-t)$: 地盤質点の地震動

$\beta(t)(t=1-t)$: 地盤質点の構造物位置における刺激係数

⑤ シールド管渠の覆工各部の応力、ひずみの照査

④により算定されたシールド管渠の応答変位から、構造物梁要素に生じる応力及びひずみを算定する。これらの値と覆工各部の許容応力、許容ひずみとを比較し、シールド管渠の耐震安全性を判定する。

なお、本解析には、土木研究所で開発した地中構造物の3次元地震応答解析プログラム「DAST-3 P」を用いた。「DAST-3 P」では、管軸直角方向の地盤条件の変化を考慮して、曲率を有するシールド管渠の動的応答解析を行うことができる。ここに、表層地盤のモデル化手法は参考文献7)に示す通りである。

また、シールド管渠のモデル化手法は参考文献10)に示した通りである。

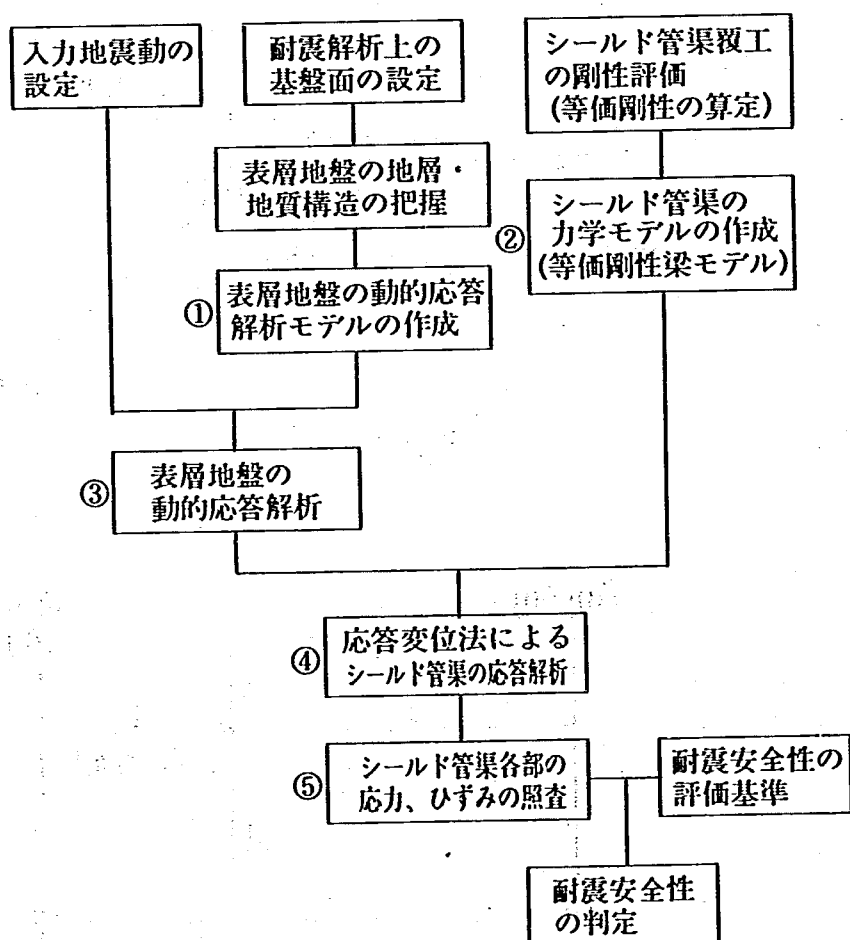


図2-1 シールド管渠の地震応答解析の手順

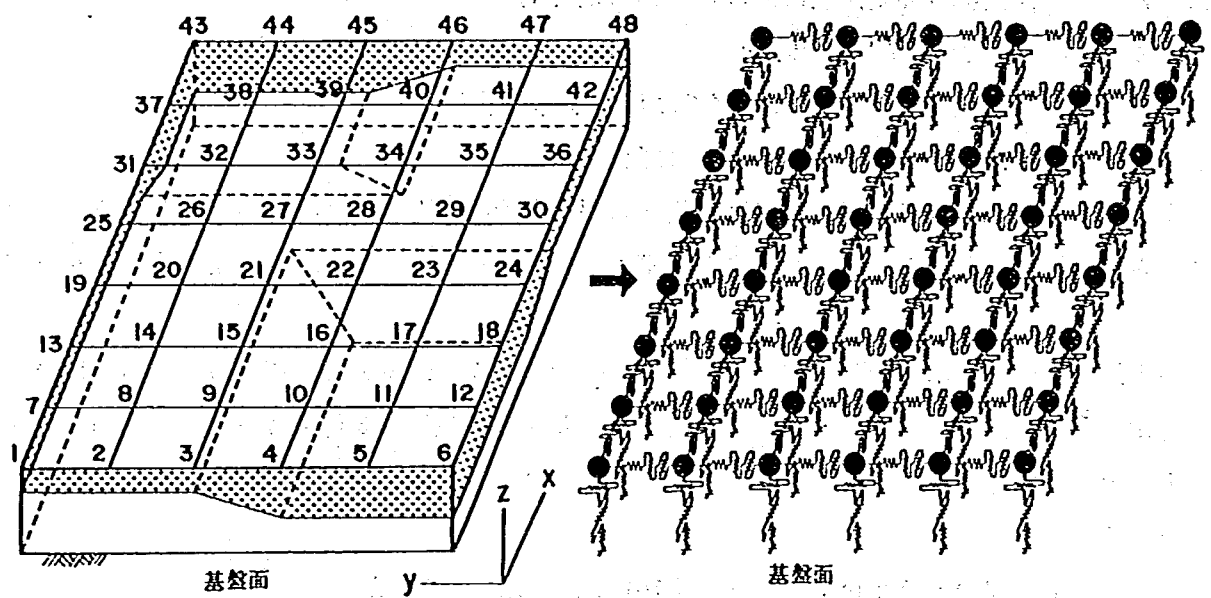


図2-2 表層地盤のモデル化

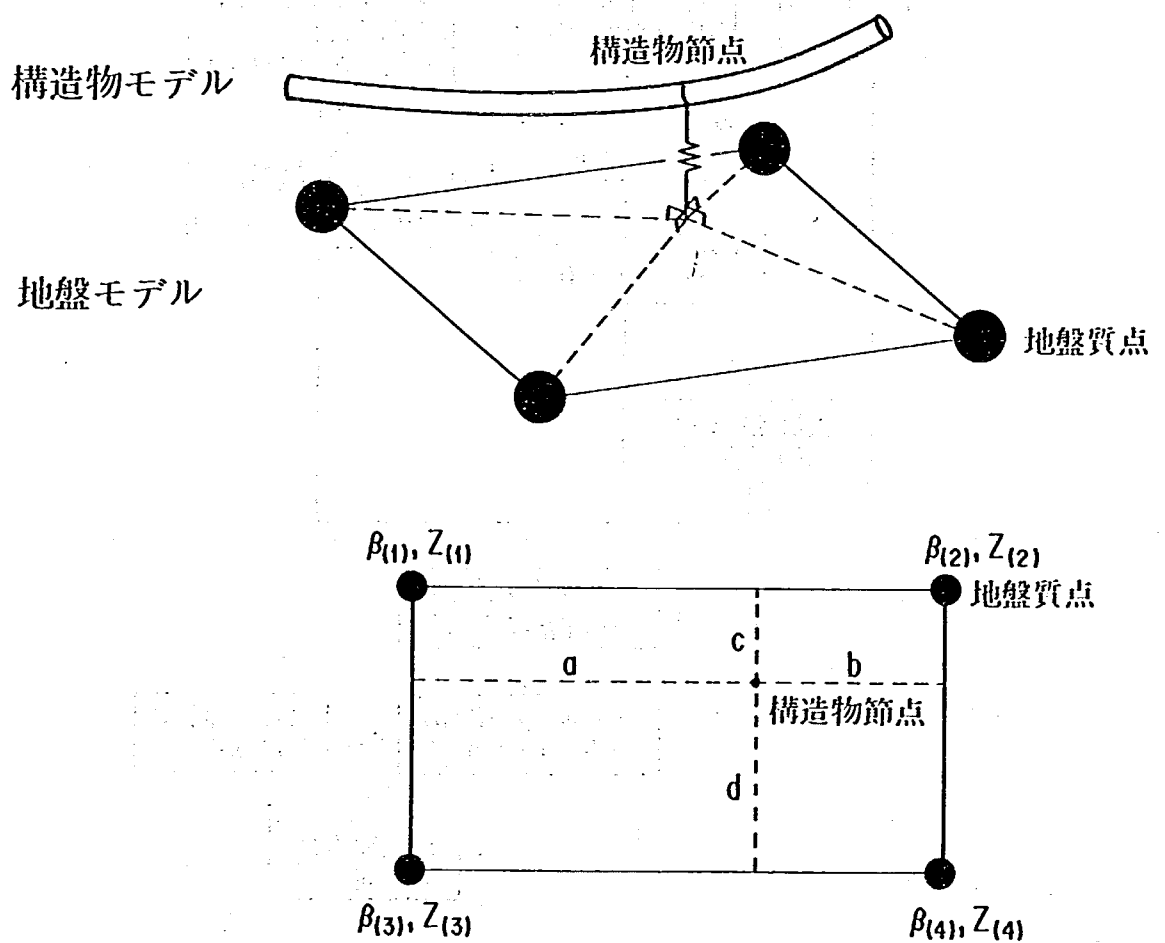


図2-3 構造物節点位置における地盤の応答変位の算定

3. 解析対象地盤及びシールド管渠

3-1 対象地盤

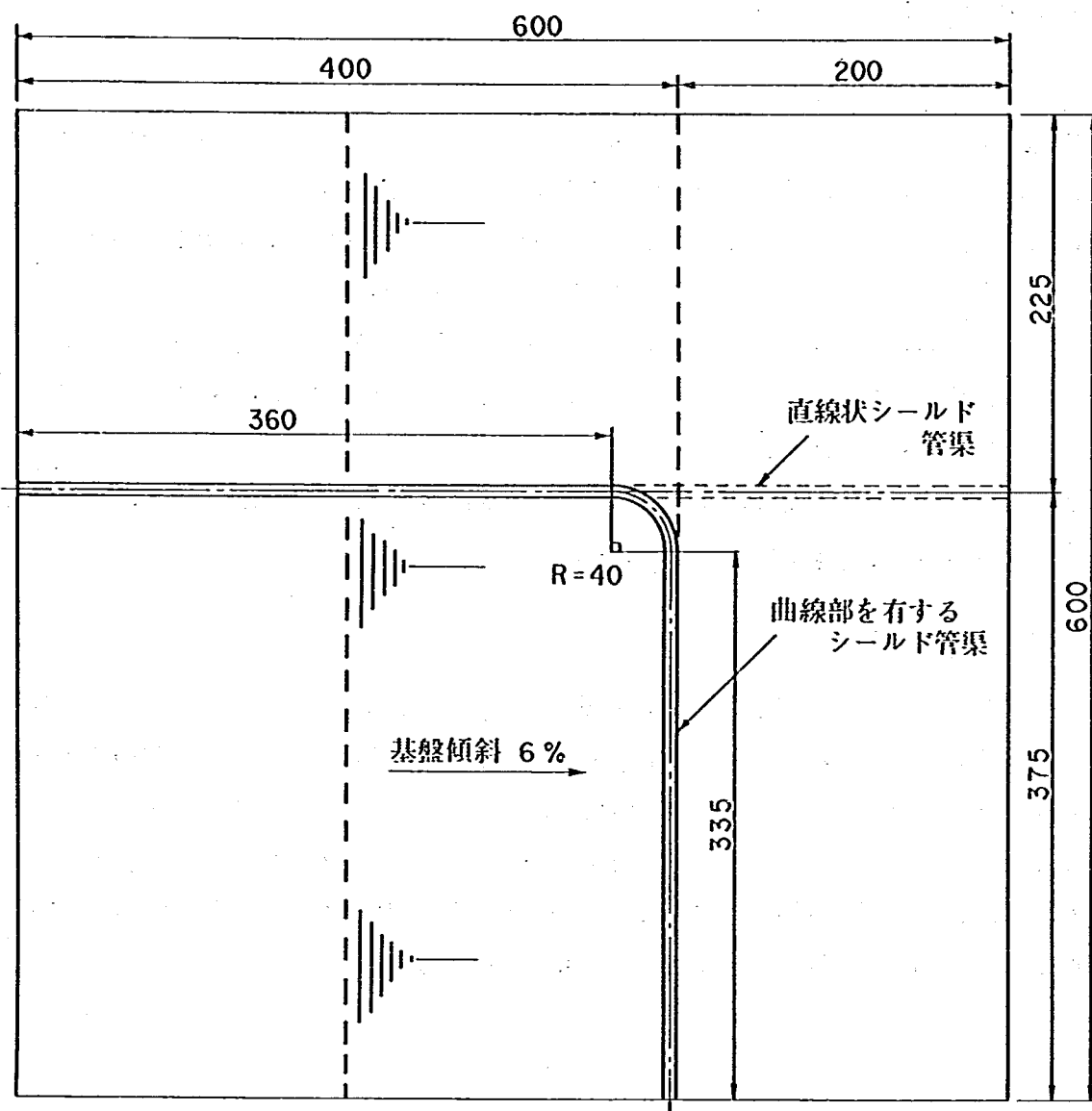
解析の対象とした地盤条件を図3-1に示す。この地盤条件は、参考文献10)で用いた2次元の地盤を3次元的に広げたもので、簡単のため奥行き方向には地盤条件の変化はないものとした。すなわち、地盤は均質一様な表層地盤と基盤からなり、基盤は深さ17.5mと29.5mの水平区間と勾配6%の傾斜区間とから構成されるものとした。解析対象領域は600m×600mとした。

解析対象地盤の物性値を表3-1に示す。基盤層はN値50、 $V_{s0}=300\text{m/s}$ の砂質地盤とし、表層地盤はN値5、 $V_{s0}=140\text{m/s}$ の砂質地盤とした。この地盤条件は、参考文献10)で示した「表層地盤Ⅰ」の場合に相当するものである。

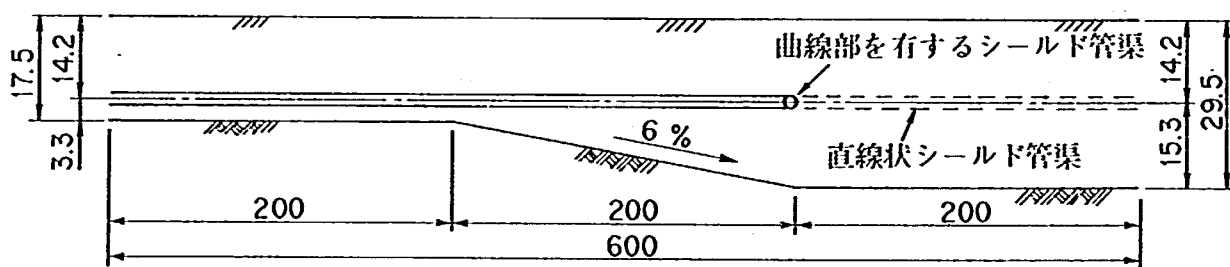
表層地盤の地震時のせん断弾性波速度は、中・大規模地震を想定し、微小ひずみ時のせん断弾性波速度を80%に低減した値を用いた。

3-2 シールド管渠

解析の対象としたシールド管渠の線形を図3-1に併せて示す。シールド管渠は、深度14.2mの水平面内に設置され、基盤の傾斜区間の下端位置で半径40m、中心角90°の円弧状の曲線部を有するもの、及び曲線部を全く有しないものの2種類とした。また、シールド管渠の覆工構造及び継手構造は日本下水道協会規格「下水道シールド工事用コンクリート系セグメント」9)を参考にして、参考文献10)で検討したものと全く同一とした。シールド管渠の断面およびリング継手の形状をそれぞれ図3-2、図3-3に示す。覆工の諸元は表3-2に示す通りである。



(a) 平面図



(b) 断面図

単位 (m)

図3-1 解析対象地盤および構造物

表 3-1 解析対象地盤の物性値

地 盤 種 類	N 値	微小ひずみ 時のせん断 波速度 V_{s0} (m/s)	解析で使用するせん断 波速度 V_s (m/s)	単位体積 重量 γ_t (t/m ³)	せん断弾性 係数 G_s (t/m ²)
基 盤	50	300	300	1.8	16,530
表 層 地 盤	5	140	112	1.8	2,304

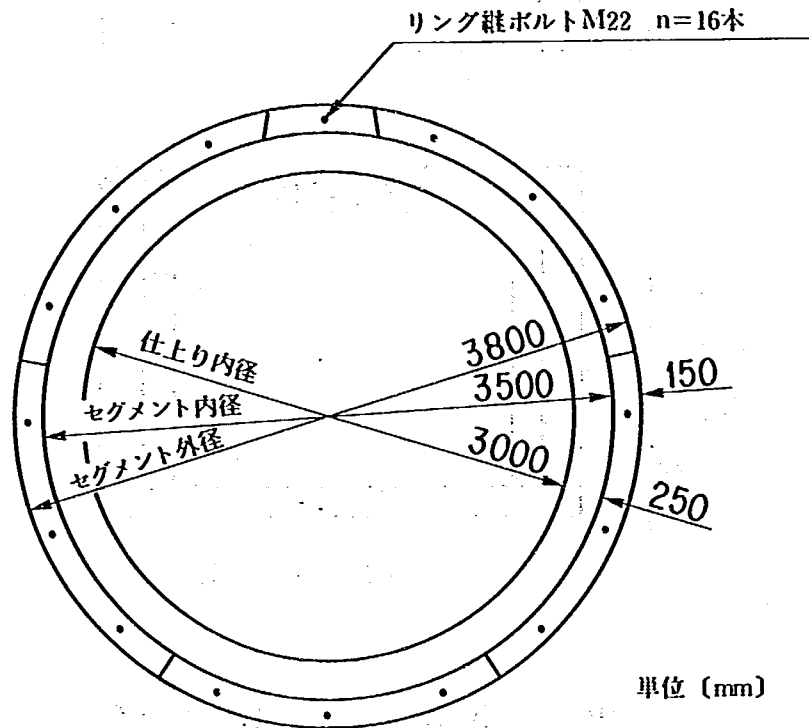
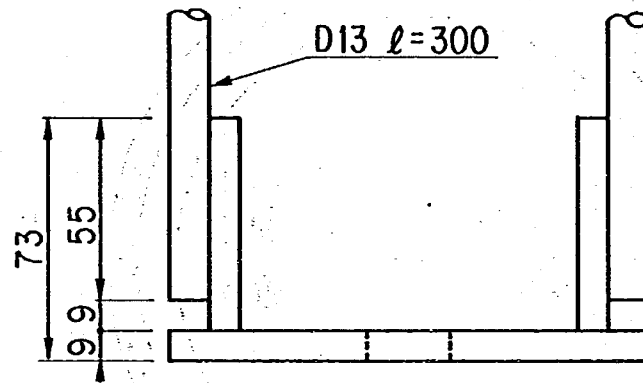
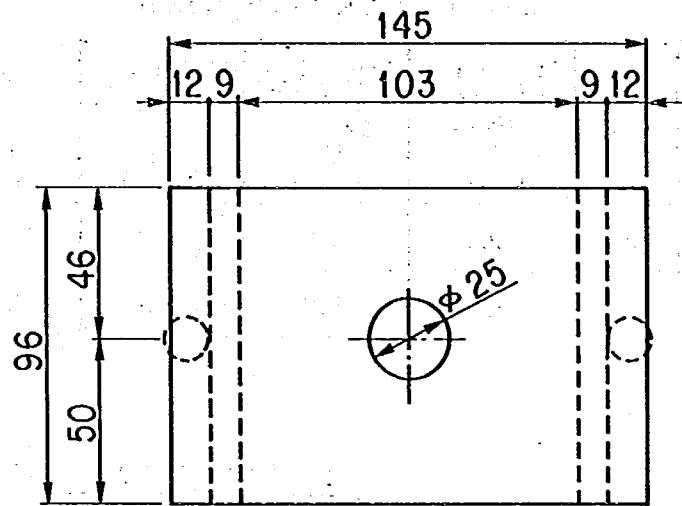


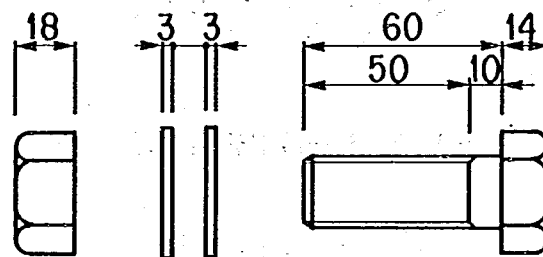
表 3-2 シールド管渠の断面

表 3-2 覆工の諸元

	セグメント	二次覆工
ヤング率E (tf/m ²)	3.6×10^6	2.6×10^6
ポアソン比 ν	0.17	0.17
断面積A (m ²)	1.720	2.553



(a) リング継手金具



単位 (mm)

(b) リング継手ボルト (M22)

図3-3 リング継手金具及びリング継手ボルト

4. 解析モデル

4-1 地盤モデル

地盤の応答解析にあたっては、図4-1に示すように、解析対象の600m×600mを20m×75mの格子状に分割し、合計279個のバネ～質点系にモデル化した。

地盤質点相互を結ぶバネ (K 2) 及び地盤質点と基盤を結ぶバネ (K 3) は、表層地盤が均等一層構造であることから、地盤振動のせん断1次モードを正弦波と仮定した簡便法により算定した。地盤の固有周期及び有効質量を表4-1に示す。

また、地盤の減衰定数は10%とした。

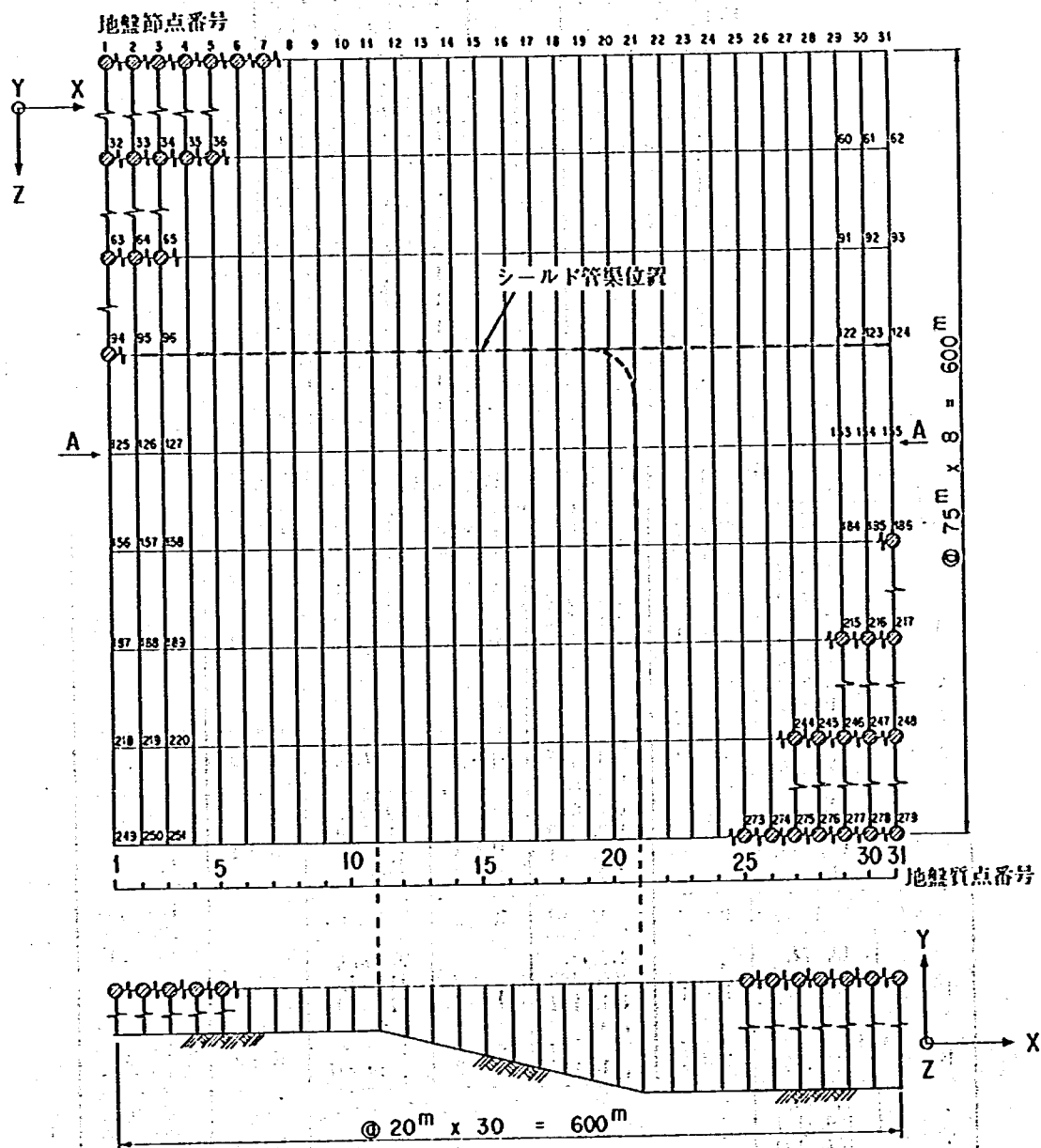


図4-1 地盤モデル図

表 4-1 地盤各節点の固有周期及び有効質量

(a) 固有周期および有効質量

地盤領域 番号	層厚 (m)	Vs (m/s)	固有周期 (s)	有効質量 (t)
A-1	17.5	112	0.625	3,908.1
A-2	17.5	"	0.625	1,954.1
A-3	17.5	"	0.625	1,954.1
A-4	17.5	"	0.625	977.0
B-1	18.7	"	0.66786	4,176.1
B-2	18.7	"	0.66786	2,088.0
C-1	19.9	"	0.71071	4,444.1
C-2	19.9	"	0.71071	2,222.0
D-1	21.1	"	0.75357	4,712.1
D-2	21.1	"	0.75357	2,356.0
E-1	22.3	"	0.79643	4,980.0
E-2	22.3	"	0.79643	2,490.0
F-1	23.5	"	0.83929	5,248.0
F-2	23.5	"	0.83929	2,624.0
G-1	24.7	"	0.88214	5,516.0
G-2	24.7	"	0.88214	2,758.0
H-1	25.9	"	0.925	5,784.0
H-2	25.9	"	0.925	2,892.0
I-1	27.1	"	0.96786	6,052.0
I-2	27.1	"	0.96786	3,026.0
J-1	28.3	"	1.01071	6,320.0
J-2	28.3	"	1.01071	3,160.0
K-1	29.5	"	1.05357	6,587.9
K-2	29.5	"	1.05357	3,294.0
K-3	29.5	"	1.05357	3,294.0
K-4	29.5	"	1.05357	1,647.0

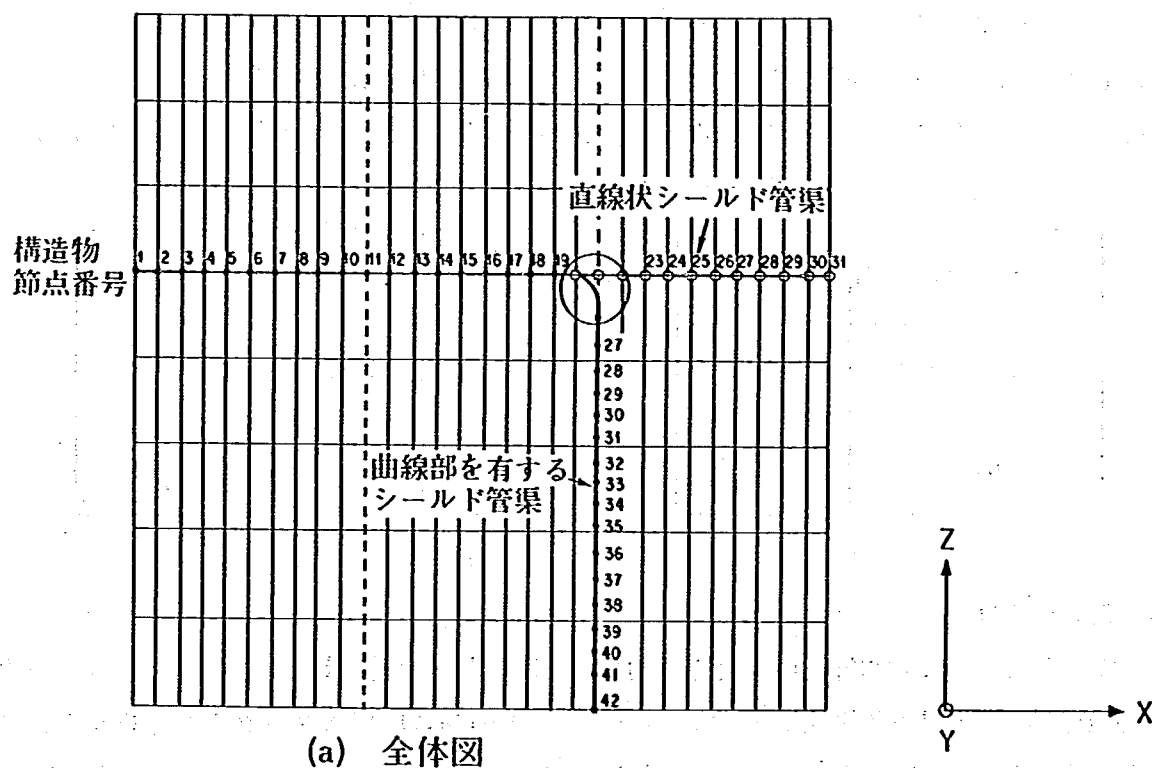
(b) 地盤領域番号と地盤節点番号の対応表

地盤領域番号	節点番号	地盤領域番号	節点番号	地盤領域番号	節点番号	地盤領域番号	節点番号
A-1	33~42 64~73 95~104 126~135 157~166 188~197 219~228	D-1	45, 76, 107, 138 169, 200 231	G-1	48, 79, 110, 191 172, 203 234	J-1	51, 82, 113, 194 175, 206 237
A-2	2~11 250~259	D-2	14,262	G-2	17,265	J-2	20,268
A-3	32, 63, 94, 125 156, 187 218	E-3	46, 77, 108, 139 170, 201 232	H-1	49, 80, 111, 192 173, 204 235	K-1	52~61 83~92 114~123 145~154 176~185 207~216 238~247
A-4	1,249	E-2	15,263	H-2	17,265		
B-1	43, 74, 105, 136 167, 198 229	F-1	47, 78, 109, 190 171, 202 233	I-1	50, 816, 112, 198 174, 205 236		
B-2	12,260	F-2	16,264	I-2	19,267	K-2	21~30 269~278
C-1	44, 75, 106, 137 168, 199 230					K-3	62, 93, 124, 155 186, 217 248
C-2	13,261					K-4	31,279

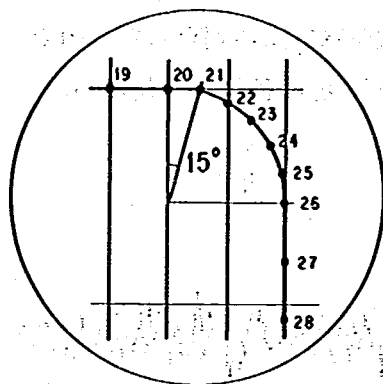
4-2 シールド管渠モデル

シールド管渠は、参考文献10)に示した方法を用いて、等価剛性梁にモデル化した。すなわち、シールド管渠の全長を、直線部は20m毎に、曲線部は中心角 15° 毎に分割して、図4-2に示すような梁要素でモデル化した。梁要素の数は、曲線部を有するシールド管渠が合計41要素、直線状シールド管渠が合計30要素である。梁要素の剛性及び地盤と管渠を結ぶバネ（K1）は地盤の剛性係数から算定するものとした。

シールド管渠の等価剛性を表4-2に示す。



(a) 全体図



(b) 拡大図

図4-2 構造物モデル図

表4-2 シールド管渠の等価剛性一覧

等価軸剛性 (EA) _{eq} [tf]	等価曲げ剛性		等価ねじり剛性 (GJ) _{eq} [tf・m ²]
	(EI _x) _{eq} [tf・m ²]	(EI _z) _{eq} [tf・m ²]	
6.75×10 ⁶	1.27×10 ⁷	1.27×10 ⁷	1.61×10 ⁷

4-3 解析ケース

解析ケースは、表4-3に示すように、加振方向の違いが曲線部を有するシールド管渠の地震応答に及ぼす影響を検討するための7ケースと、シールド管渠の曲線部が地震応答におよぼす影響を比較・検討するために曲線部がないとした場合の2ケース、合計9ケースとした。

なお、表4-3中で加振方向0°とは、直線状シールド管渠の管軸方向(X軸方向、図4-1参照)の加振を、また加振方向90°とは管軸直角方向(Z軸方向、同参照)の加振を指すものである。

表4-3 解析ケース

ケースNo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
モデルの線形	直線梁		直線梁及び曲線梁						
加振方向(°)	0	90	0	15	30	45	60	75	90

4-4 入力地震動

入力地震動としては、動的解析用入力地震動L2を用いた。地震動L2は、マグニチュード8の地震が震央距離25kmの地点に発生した場合の第一種地盤上の加速度応答スペクトルを推定し、これが1968年十勝沖地震の際に八戸港で記録された加速度記録の加速度応答スペクトルと固有周期0.8~5.0秒の範囲で一致するよう、この加速度記録を周波数領域で振幅調整したものである。

本解析では、図4-3に示した60秒間の加速度波形を0.02秒刻みで使用した。

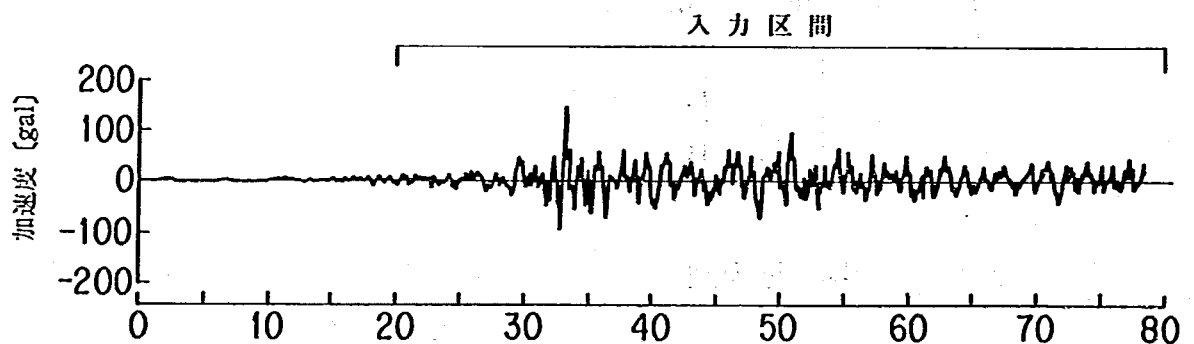


図4-3 基盤入力地震動L2

5. 解析結果

5-1 地盤の応答

X軸方向（直線状シールド管渠の管軸方向：図4-1参照）の地盤各質点における固有周期の分布を図5-1に示す。ただし、本解析ではZ軸方向（直線状シールド管渠の管軸直角方向：図4-1参照）に地盤条件が変化しないものとしているため、Z方向の固有周期の変化はない。図5-1によれば固有周期は、表層地盤が薄い区間で0.625秒、表層地盤が厚い区間で1.054秒程度である。

X軸方向及びZ軸方向加振の場合について、地盤の固有値解析結果を示すと表5-1の通りである。X軸方向には1次～55次モード、Z軸方向には1次～91次モードを考慮することにより、それぞれ99.8%以上の有効質量が得られるため、時刻歴応答解析ではこれらのモードを考慮することにした。ここに、主要な振動モードとして、X軸方向については1次、41次モードを、またZ軸方向については1次、79次モードを図5-2に示す。これによれば、X軸方向加振時及びZ軸方向加振時ともに、Z軸方向の振動モードの形状変化はほとんど認められない。

X軸方向の地盤各点における地表面位置での最大応答変位及び最大応答加速度の分布を示すとそれぞれ図5-3及び図5-4の通りである。ここに、地盤応答はZ軸方向にはほとんど変化がないため、ここでは解析領域中央のX軸方向断面(A-A断面、図4-1参照)での値を示すこととした。

図5-3によれば、最大応答変位の分布形状はその加振方向によらず図5-1に示した固有周期の分布形状によく対応しているのがわかる。X軸方向及びZ軸方向の最大応答変位の最大値は、加振方向によらず基盤の傾斜部の下端で生じており、両方向ともに6.6cm程度である。また、当然ながら加振方向が $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ に移るにつれて、X軸方向最大応答変位は単調減少し、Z軸方向最大応答変位は単調増加している。

図5-4によれば、最大応答加速度の分布は加振方向によらず基盤の傾斜区間において大きな値を生じており、その最大値はX軸方向、Z軸方向ともに250gal程度である。また、当然ながら加振方向が $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ に移るにつれて、X軸方向最大応答加速度は単調減少し、Z軸方向最大応答加速度は単調増加している。

X軸方向及びZ軸方向の地盤の最大応答値を加振方向別にとりまとめると表5-2の通りである。

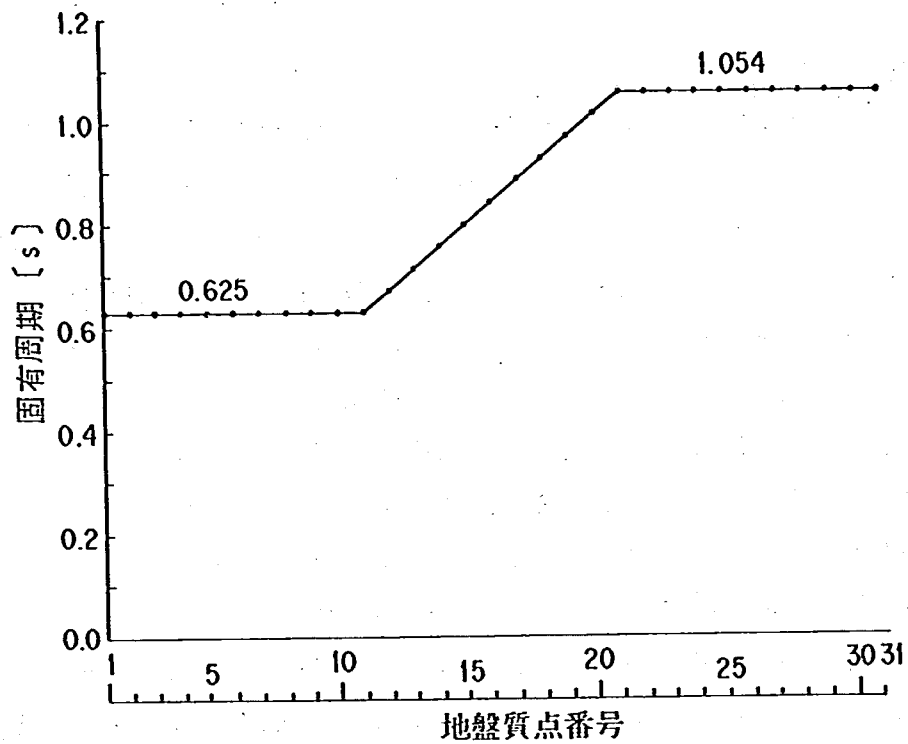


図5-1 地盤の固有周期の分布

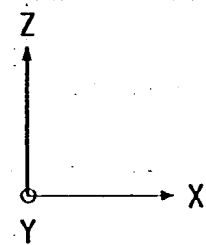
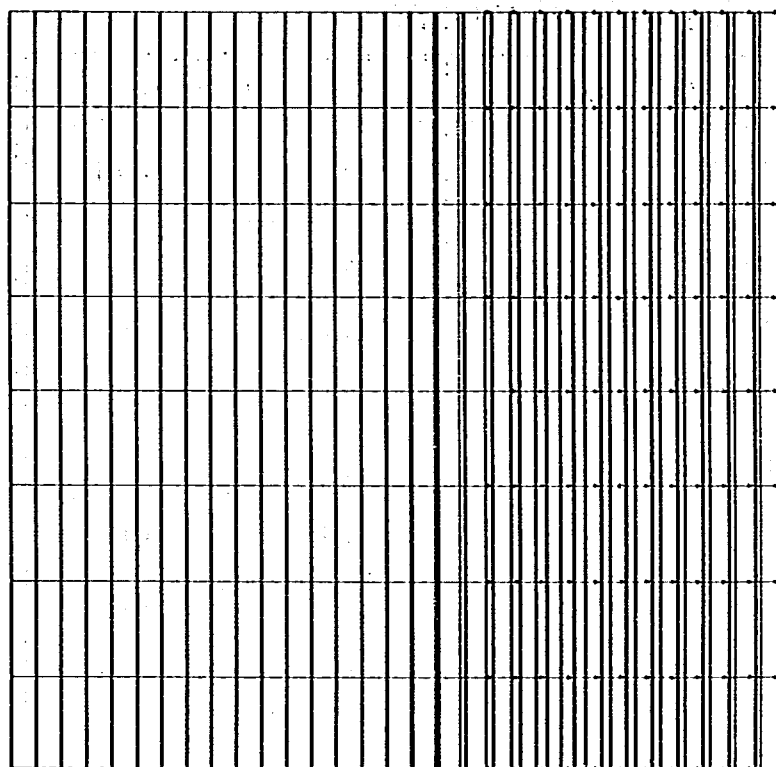
表3-1 地盤の固有値解析結果

加振方向	次数	固有周期 [S]	刺激係数	有効質量比 [%]
X 軸方向	1	1.038	-10.856	51.169
	5	0.936	-4.314	7.923
	12	0.816	-3.918	6.233
	24	0.729	-3.989	6.232
	33	0.659	-4.000	5.928
	41	0.621	9.032	21.721
Z 軸方向	1	1.047	-10.309	45.917
	5	1.000	3.859	6.410
	16	0.928	-3.090	4.050
	26	0.858	-3.245	4.386
	35	0.803	-3.248	4.311
	44	0.753	2.757	3.011
	53	0.711	-2.548	2.542
	63	0.675	2.258	1.926
	71	0.645	-2.821	2.976
	79	0.624	-9.092	22.133

注) 有効質量比が1%以上のモードのみ記載

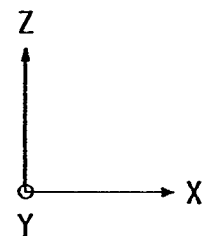
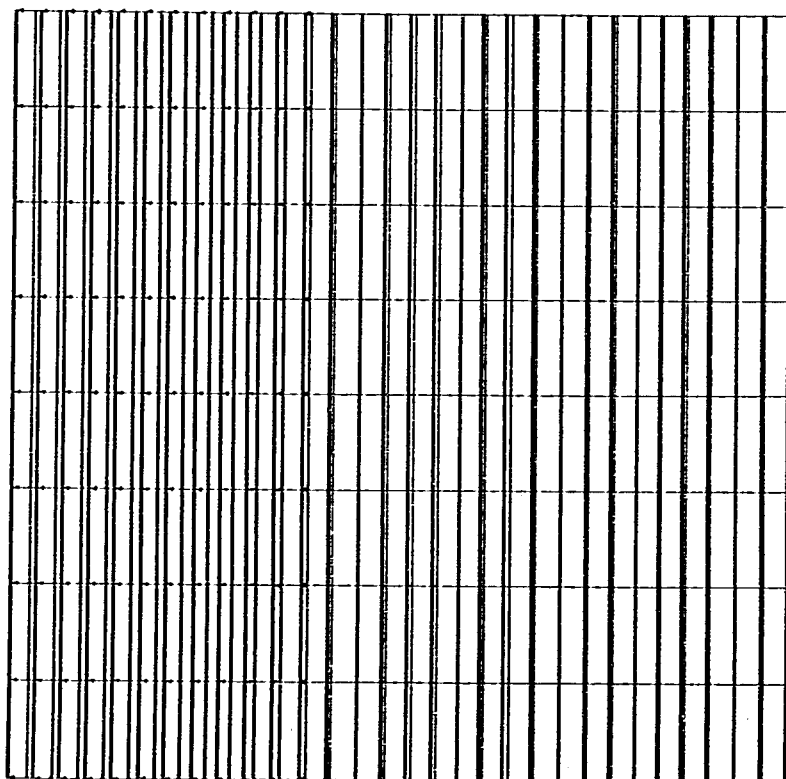
表 5-2 地盤の最大応答値

加振方向	加速度 (gal)		変 位 (cm)	
	X 軸方向	Z 軸方向	X 軸方向	Z 軸方向
0°	256	—	6.63	—
15°	249	66	6.40	1.69
30°	223	128	5.74	3.27
45°	182	181	4.69	4.63
60°	129	222	3.31	5.67
75°	67	247	1.72	6.32
90°	—	256	—	6.55



固有周期 1.038sec
有効質量比 51.17%

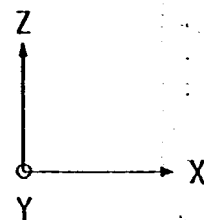
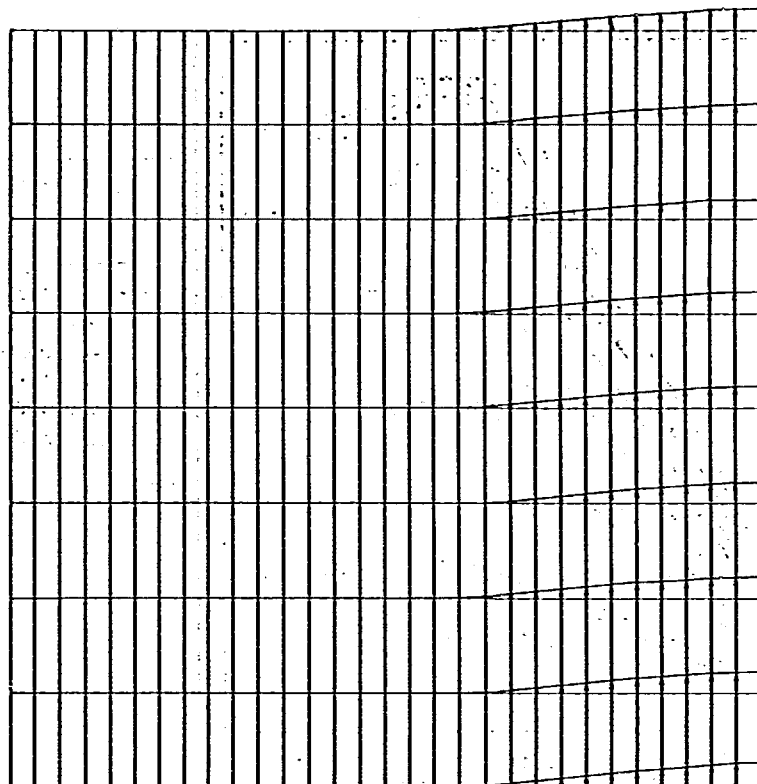
(a) 1次モード (X軸方向加振時)



固有周期 0.621 sec
有効質量比 21.72%

(b) 41次モード (X軸方向加振時)

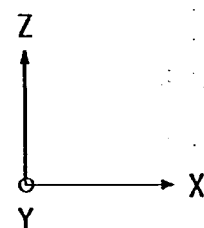
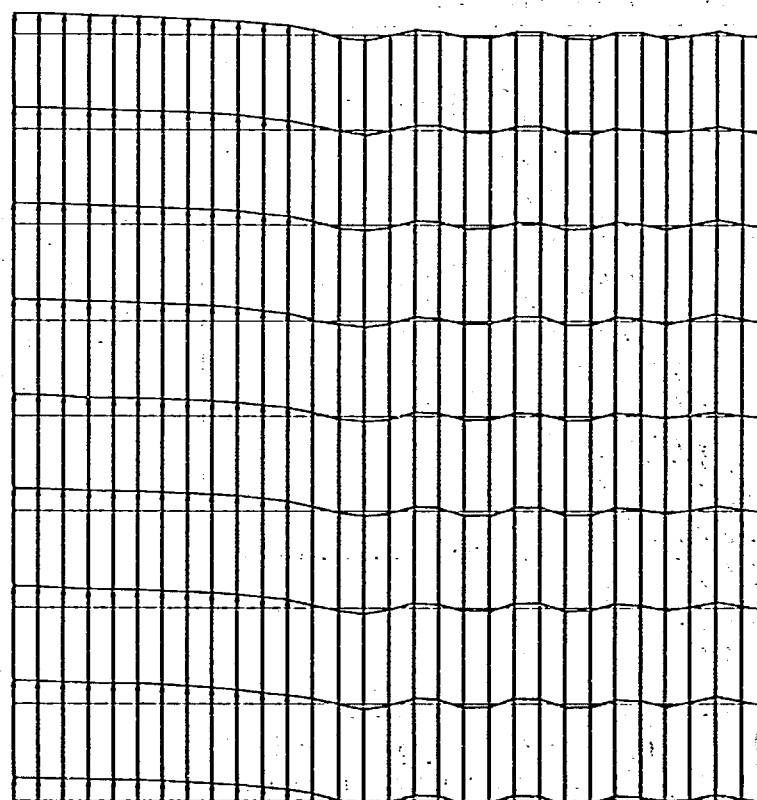
図5-2 地盤の主要振動モード



固有周期 1.047 sec

有効質量比 45.92%

(c) 1次モード (Z軸方向加振時)

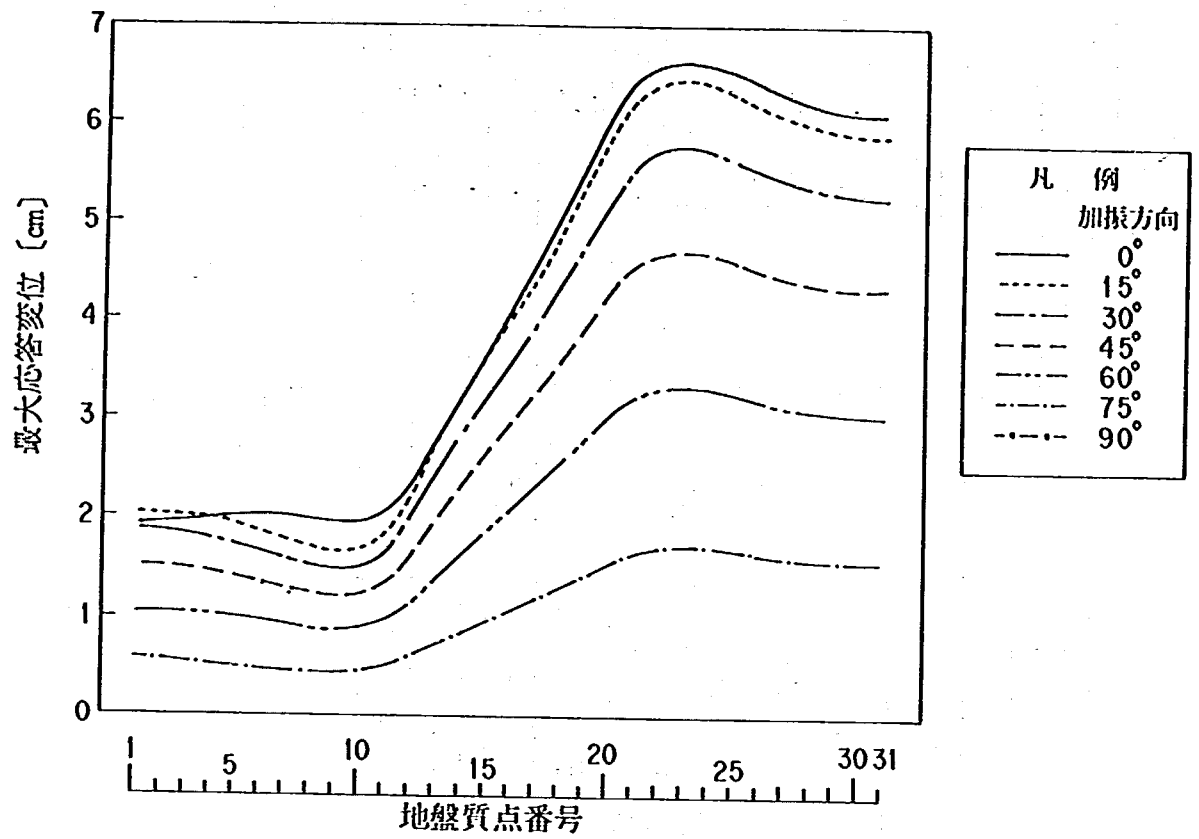


固有周期 0.624 sec

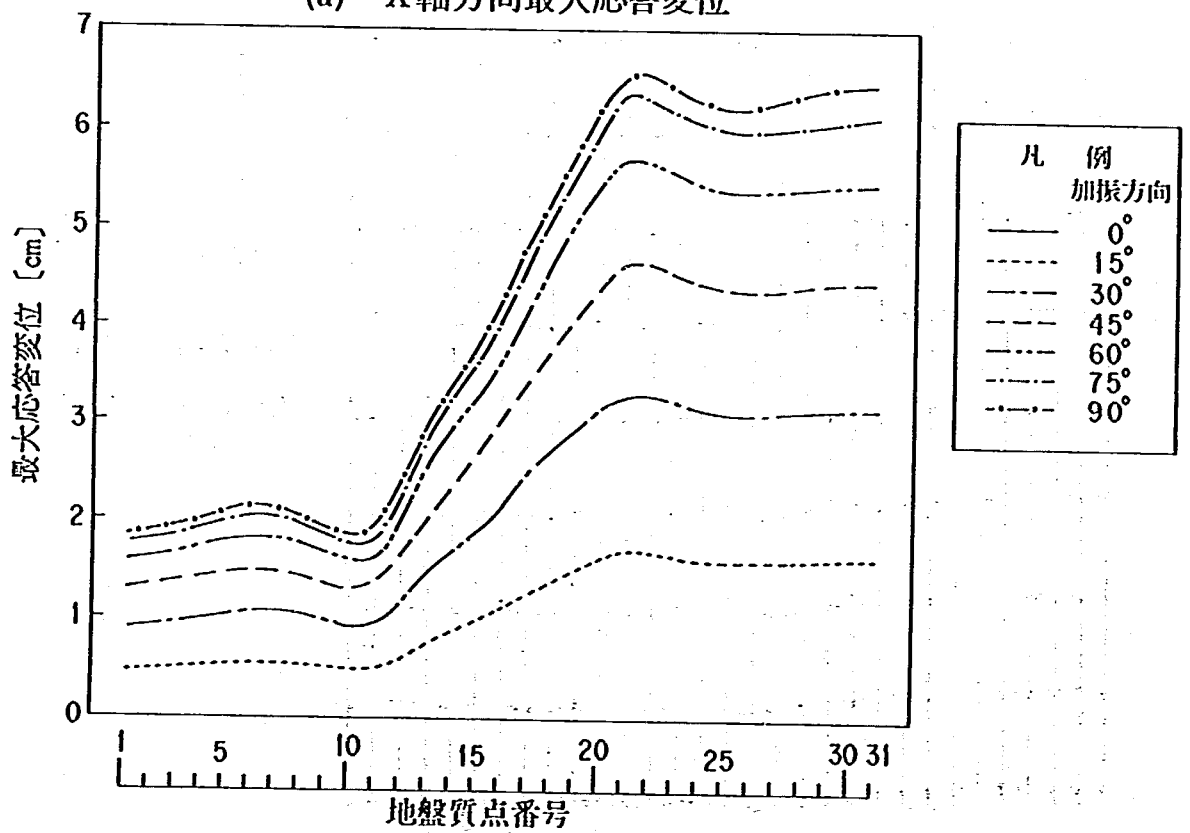
有効質量比 22.13%

(d) 79次モード (Z軸方向加振時)

図5-2 地盤の主要振動モード

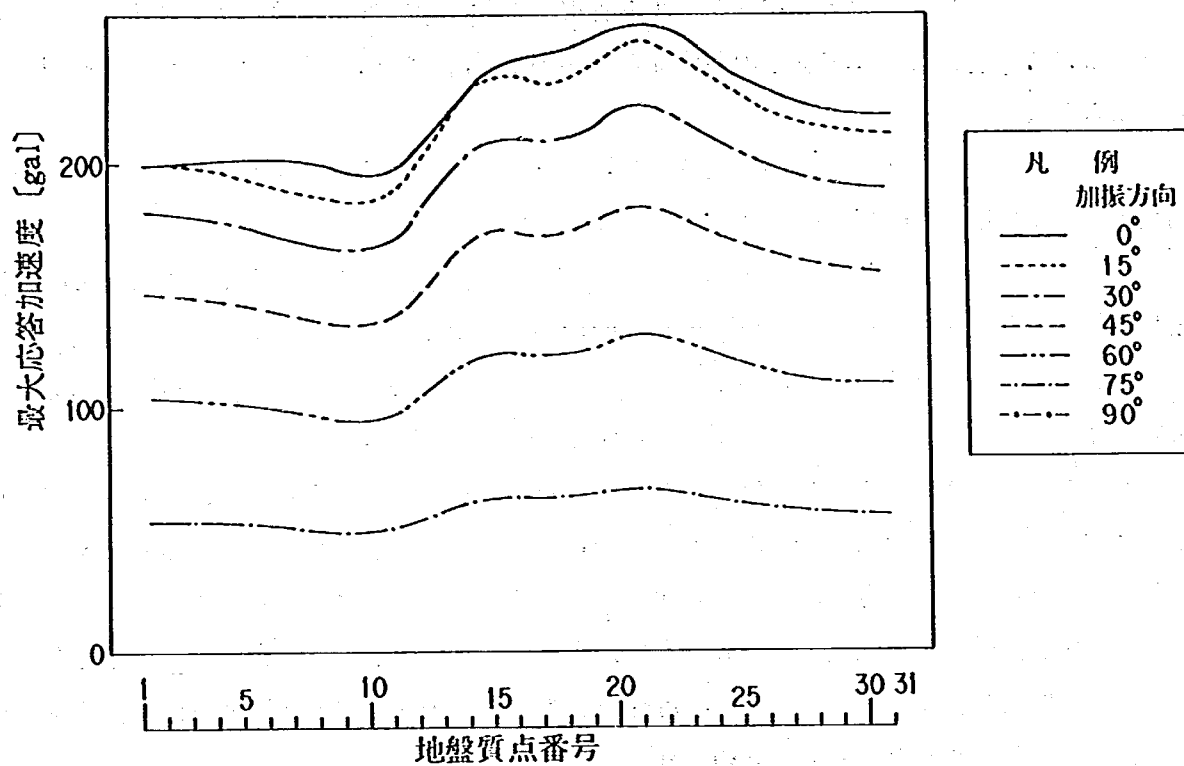


(a) X軸方向最大応答変位

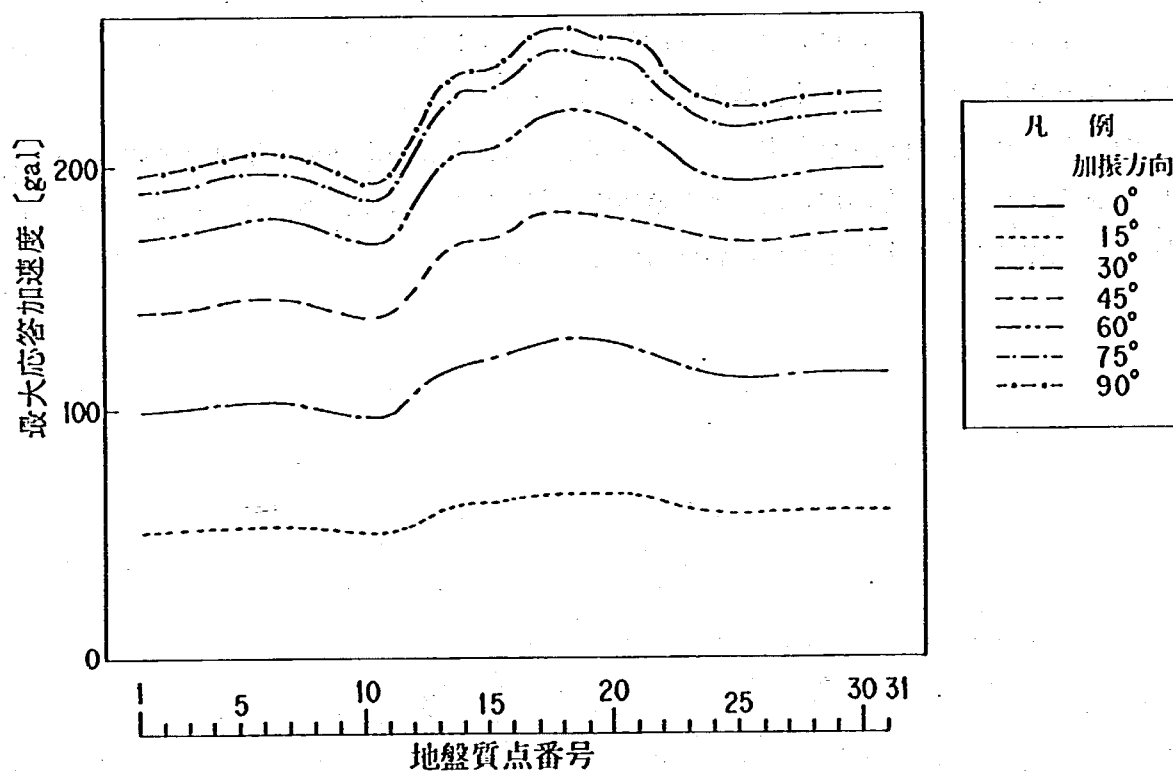


(b) Z軸方向最大応答変位

図5-3 地盤の最大応答変位



(a) X軸方向最大応答加速度



(b) Z軸方向最大応答加速度

図5-3 地盤の最大応答加速度

5-2 曲線部がシールド管渠の地震時応答に及ぼす影響

曲線部を有するシールド管渠と直線状シールド管渠とで、その応答を比較（ケース1、2、3及び9）することによって、シールド管渠の曲線部が管渠の地震時応答に及ぼす影響について検討する。

(1) 最大応答変位

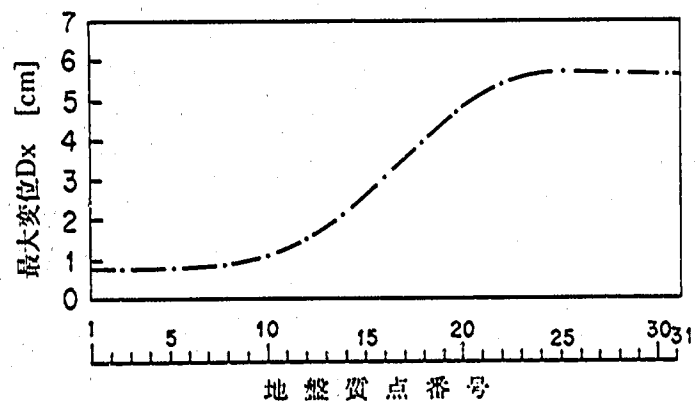
まず、両シールド管渠のX軸方向最大応答変位 D_x の分布を示すと図5-5の通りである。また、Z軸方向最大応答変位 D_z の分布を示すと図5-6の通りである。

図5-5によれば、まず、X軸方向の変位は、直線状シールド管渠では当然ながらX軸方向加振時のみ生じ、Z軸方向加振時には生じていないが、曲線部を有するシールド管渠ではZ軸方向加振時にも生じている点が着目される。これは曲線部を有するシールド管渠では、管渠のX軸方向部分とZ軸方向部分が互いに挙動を拘束し合って、曲線部が図5-7に示すように変形するためである。

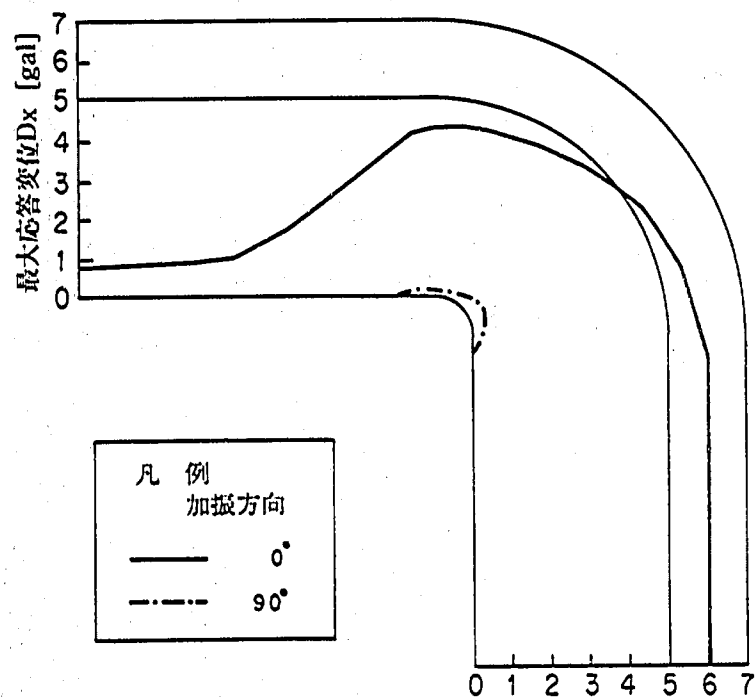
次に、X軸方向加振時の最大応答変位の分布形状は両シールド管渠で大差なく、その最大値は双方共に5.7cm程度である。これは、今回用いたような地盤条件では、管渠のZ軸方向部分はX軸方向に一樣に挙動するために、X軸方向部分の挙動がほとんどZ軸方向部分に拘束されなかったことによるものと考えられる。従って、地盤条件がZ軸方向に大きく変化する場合には、X軸方向部分とZ軸方向部分が拘束し合うことによって、曲線部を有するシールド管渠の応答変位は直線状シールド管渠の応答変位とかなり異なってくるものと考えられる。

図5-6によれば、Z軸方向最大応答変位についてもX軸方向と同様の傾向が認められる。すなわち、曲線部を有するシールド管渠ではX軸方向加振時にもZ軸方向変位が生じており、また変位の分布形状は両シールド管渠で大差なく、最大値は共に6.0cm程度である。

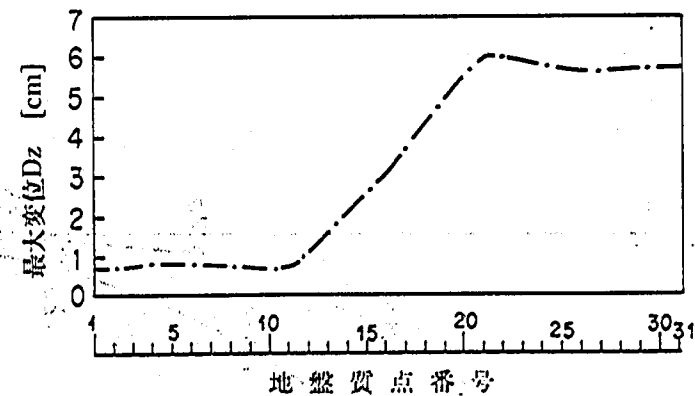
以上の検討によれば、曲線部を有するシールド管渠には、X軸方向部分の挙動とZ軸方向部分の挙動の相互干渉が生じるが、今回用いたような地盤条件下ではその程度は小さいと考えられる。応答変位に限れば、直線状シールド管渠との違いは明確ではない。



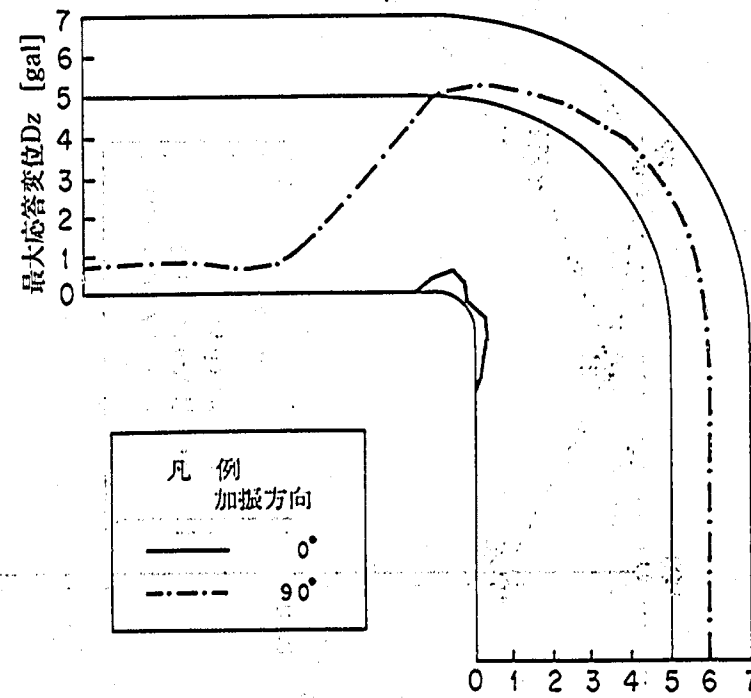
(a) 直線状シールド管渠



(b) 曲線部を有するシールド管渠



(a) 直線状シールド管渠



(b) 曲線部を有するシールド管渠

図5-5 シールド管渠のX軸方向最大応答変位

図5-6 シールド管渠のZ軸方向最大応答変位

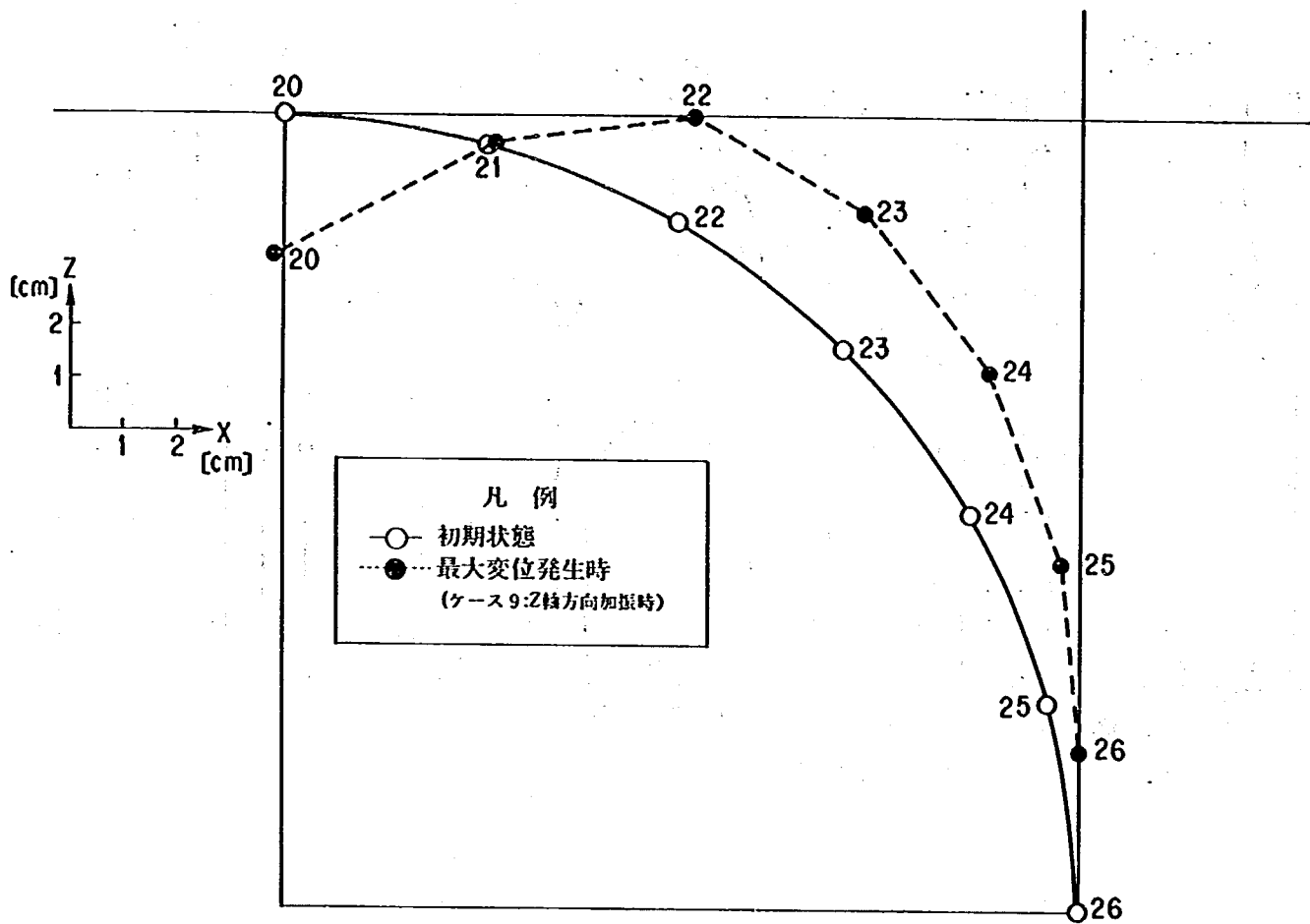


図5-7 曲線部分の変形状況

(2) 最大応答変位角

両シールド管渠には、X軸及びZ軸回りの回転は生じず、Y軸回りの回転のみが生じた。両シールド管渠に生じたY軸回りの最大応答変位角 R_y の分布を示すと図5-8の通りである。

図5-8によれば、Y軸回りの変位角は、直線状シールド管渠では当然ながらZ軸方向加振時にのみ生じ、X軸方向加振時には生じていないが、曲線部を有するシールド管渠ではX軸方向加振にも生じている点が着目される。その最大値は $5.76 \times 10^{-4} \text{ rad}$ であり、Z軸方向加振時に直線状シールド管渠に生じる最大変位角の90%程度である。

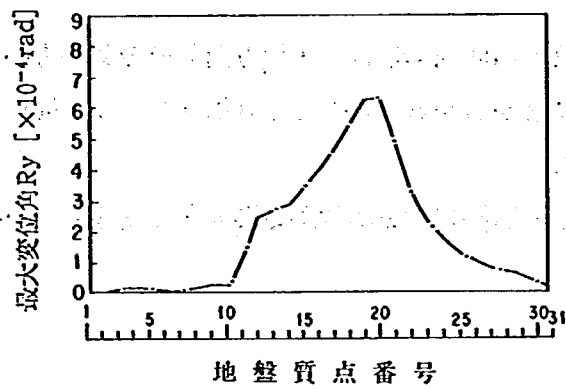
両シールド管渠で、Z軸方向加振時の分布を比較すると、その形状は大差ないが、応答値は全体に曲線部を有するシールド管渠の方が大きく、特に曲線部で両者の差は顕著である。最大値は両者とも基盤傾斜部の下端で生じており、曲線部を有するシールド管渠では直線状シールド管渠の約1.2倍である。

以上の検討によれば、シールド管渠の曲線部には、X軸方向部分とZ軸方向部分の相互干渉によってY軸回りの変位角が励起されることがわかる。ただし、直線状シールド管渠との違いは、応答変位の場合と同様にそれほど顕著ではない。

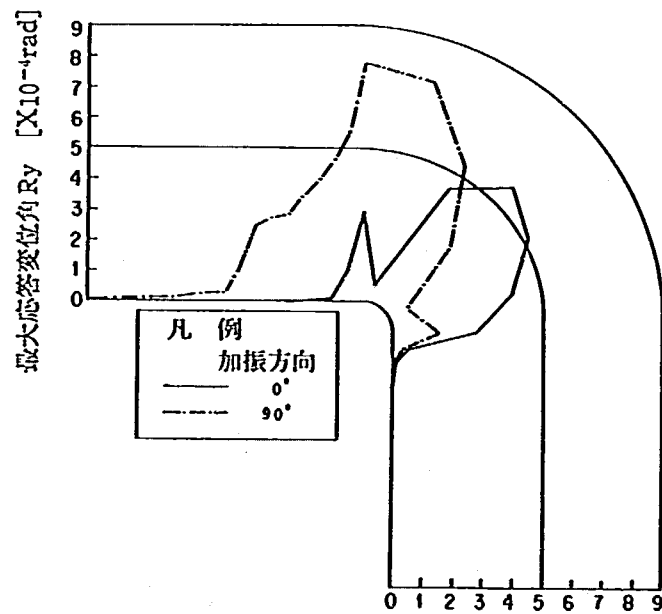
両シールド管渠に生じた最大応答変位及び最大応答変位角をとりまとめると表5-3の通りである。

表5-3 シールド管渠の最大応答変位及び変位角

管渠の種類	加振方向	変位(cm)		Y軸まわりの変位角($\times 10^{-4}$ rad)
		X軸方向	Z軸方向	
直線状管渠	0°	5.74	—	—
	90°	—	6.04	6.32
曲線部を有する管渠	0°	5.80	0.63	5.76
	90°	0.39	5.98	7.80



(a) 直線状シールド管渠



(b) 曲線部を有するシールド管渠

図5-8 シールド管渠のY軸まわりの最大応答変位角

(3) 最大断面力

両シールド管渠ともに、Y軸方向のせん断力およびX軸、Z軸回りの曲げモーメントは生じず、軸力、水平面内のせん断力及びY軸回りの曲げモーメントだけが生じた。軸力、水平面内のせん断力及びY軸回りの曲げモーメントの分布を示すとそれぞれ図5-9、図5-10及び図5-11の通りである。

まず図5-9によれば、シールド管渠の曲線部には、応答変位及び応答変位角と同様に、Z軸方向加振時にも軸力が発生している。この大きさは、曲線部の中央位置で370tfであり、同じ位置で直線状シールド管渠に生じた軸力の23%程度である。

X軸方向加振時に両シールド管渠で生じた軸力の分布を比較すると、形状はほぼ同様であるが、応答値は全体に曲線部を有するシールド管渠の方が小さく、最大値は直線状シールド管渠の場合の83%程度で、1680tfである。曲線部を有するシールド管渠のZ軸方向部分では当然ながら発生する軸力は極めて小さいが、曲線部では軸力が増加する傾向が認められる。

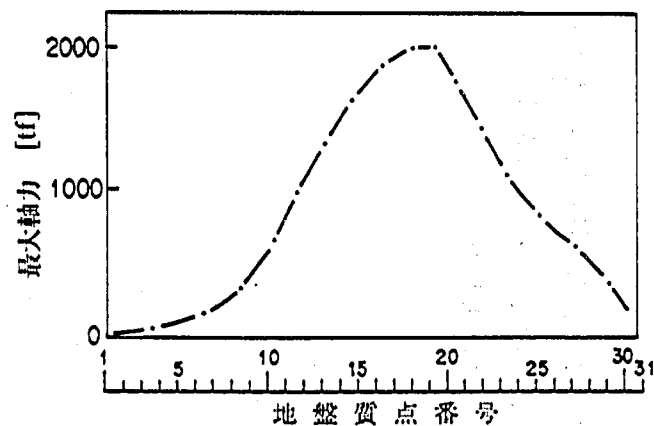
次に図5-10によれば、曲線部を有するシールド管渠に生じたせん断力は、加振方向に関わらず曲線部で極めて大きな値を示し、最大せん断力は207tfである。この大きさは、同じ位置で直線状シールド管渠に生じたせん断力の23倍程度にも達する。また、Z軸方向部分では当然ながらせん断力はほとんど生じていない。

次に図5-11によれば、曲線部を有するシールド管渠に生じたY軸回りの曲げモーメントは、せん断力と同様に加振方向に関わらず曲線部で大きな値を示し、最大曲げモーメントは409tfである。この大きさは、同じ位置で直線状シールド管渠に生じた曲げモーメントの1.6倍程度である。また、Z軸方向部分では当然ながら曲げモーメントはほとんど生じていない。

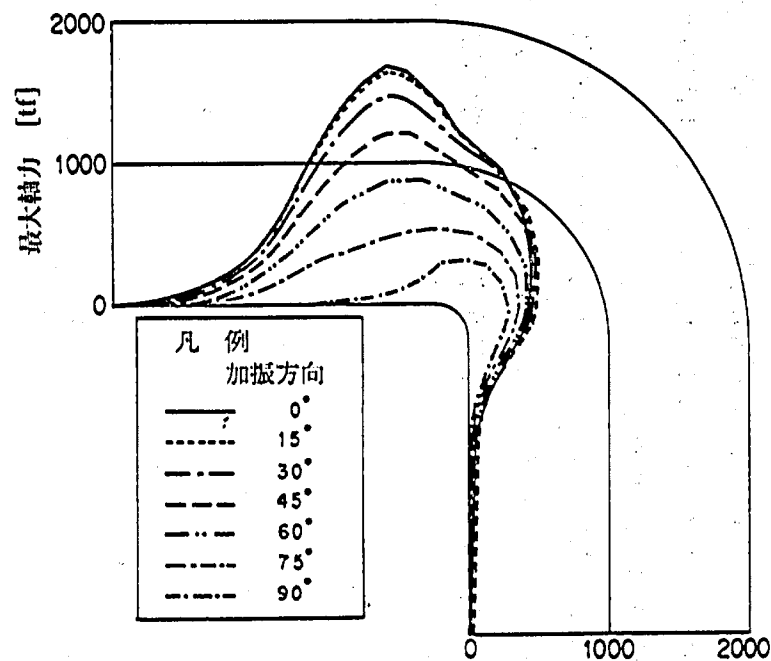
両シールド管渠に生じた最大断面力を取りまとめて示すと表5-4の通りである。

また、曲線部を有するシールド管渠の直線部分と曲線部分（図4-2参照）について、各断面力波形を示すと図5-12の通りである。

以上の検討によれば、管渠のX軸方向部分とZ軸方向部分の相互干渉が管渠の地震応答に与える影響は、変位、変位角ではほとんど認められなかったのにも関わらず、断面力については顕著である。特にせん断力及び曲げモーメントは直線状シールド管渠に比べて著しく増大した。

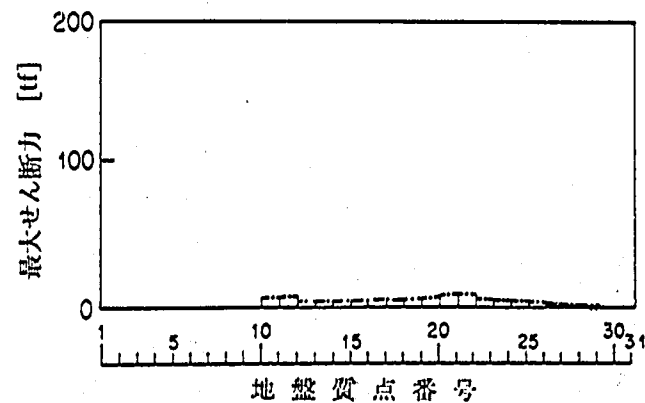


(a) 直線状シールド管渠

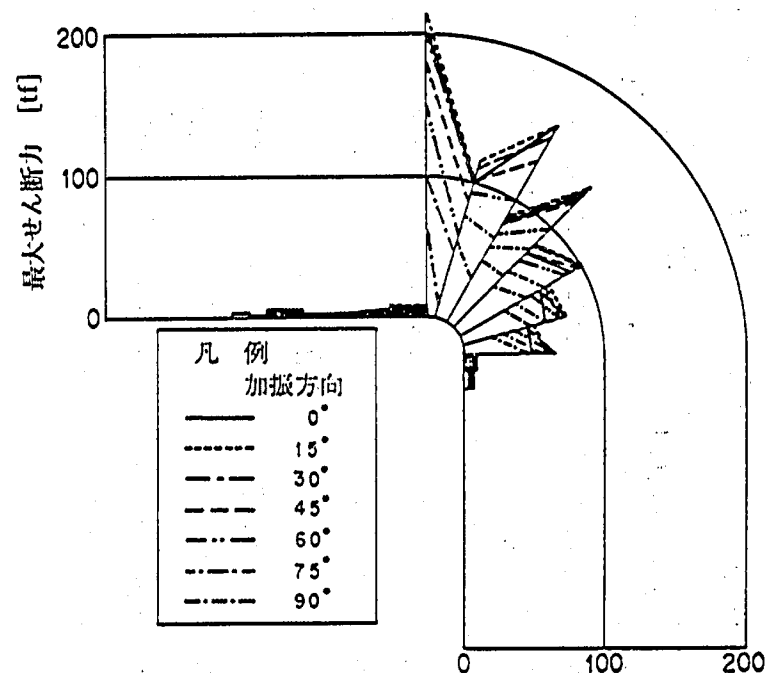


(b) 曲線部を有するシールド管渠

図5-9 シールド管渠に生じた最大軸力



(a) 直線状シールド管渠

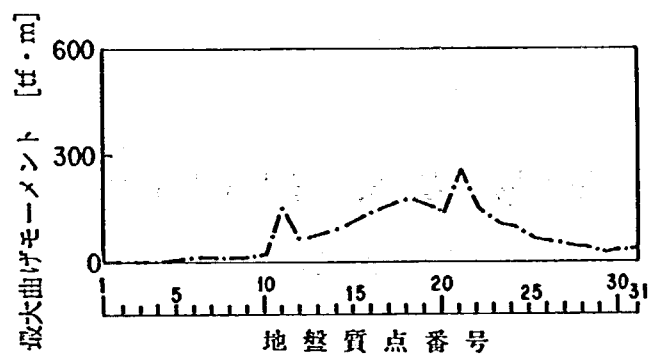


(b) 曲線部を有するシールド管渠

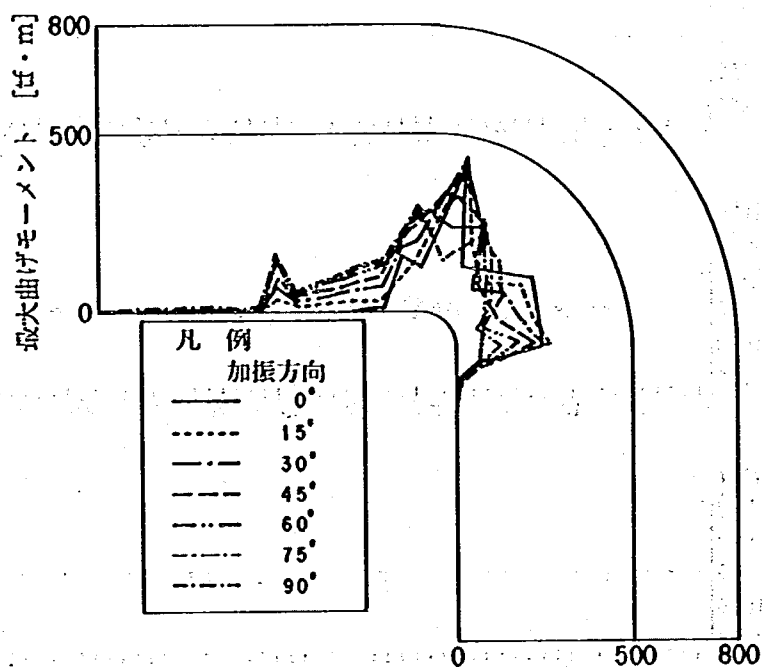
図5-10 シールド管渠に生じた水平面内の最大せん断力

表5-4 シールド管渠に生じた最大断面力

管渠の種類	加振方向	軸力 [tf]	水平面内のせん断力 [tf]	Y軸まわりの 曲げモーメント [tf・m]
直線状管渠	0°	2038	—	—
	90°	—	9.2	248
曲線部を有する管渠	0°	1206	207	409
	90°	370	68	280



(a) 直線状シールド管渠



(b) 曲線部を有するシールド管渠

図5-11 シールド管渠に生じたY軸まわりの最大曲げモーメント

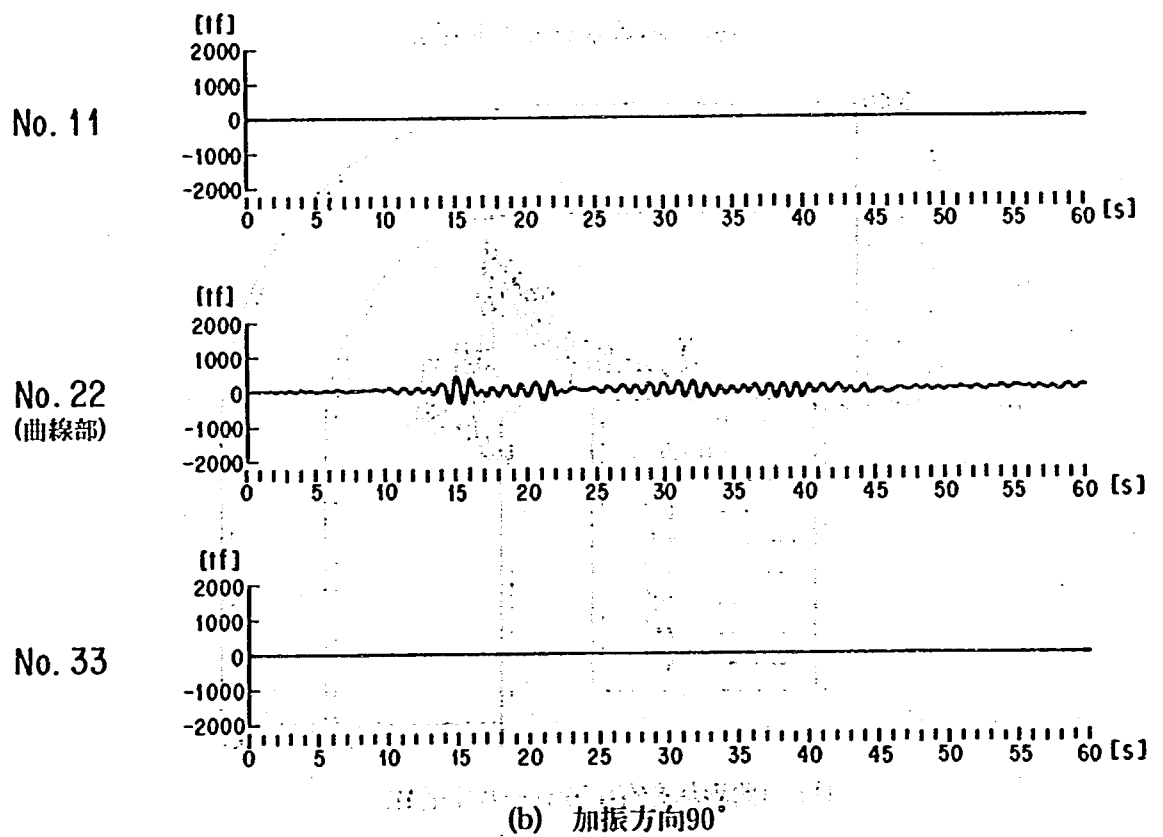
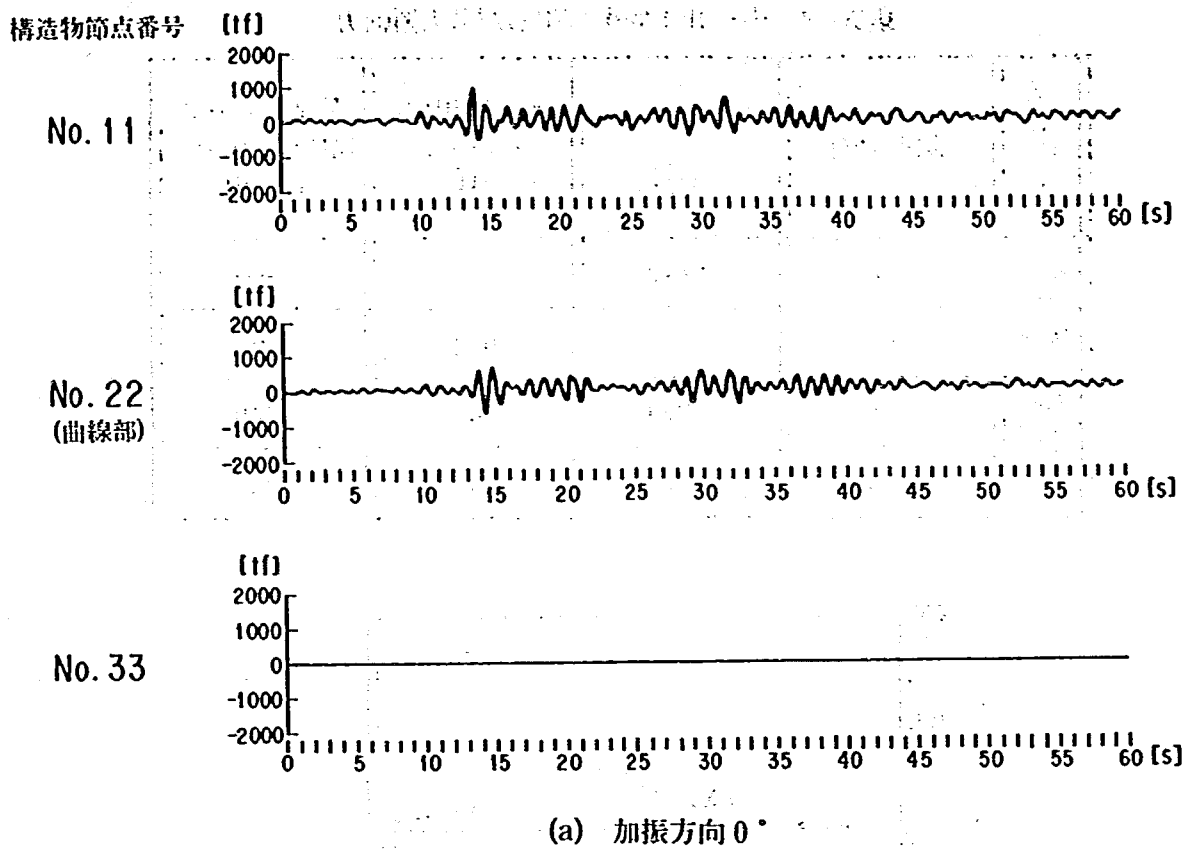
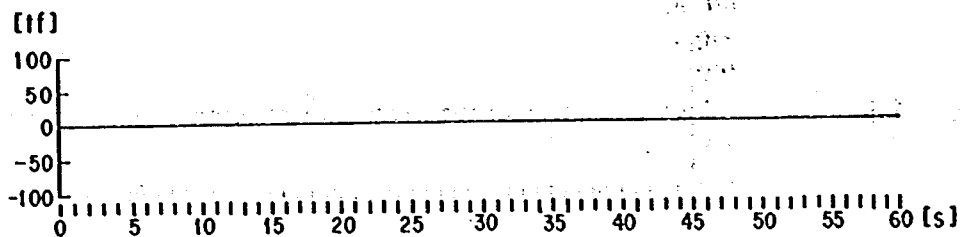


図5-12(1) 曲線部を有するシールド管渠の軸力波形

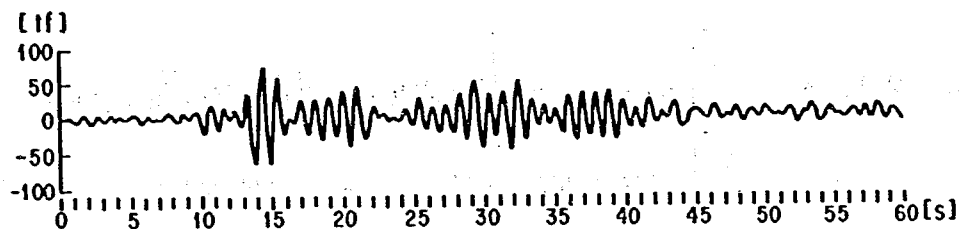
構造物節点番号

No. 11

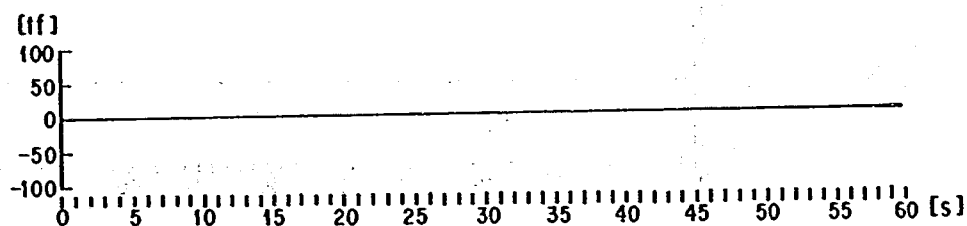


No. 22

(曲線部)

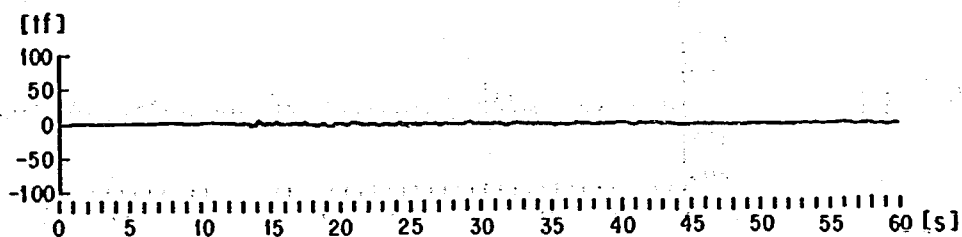


No. 33



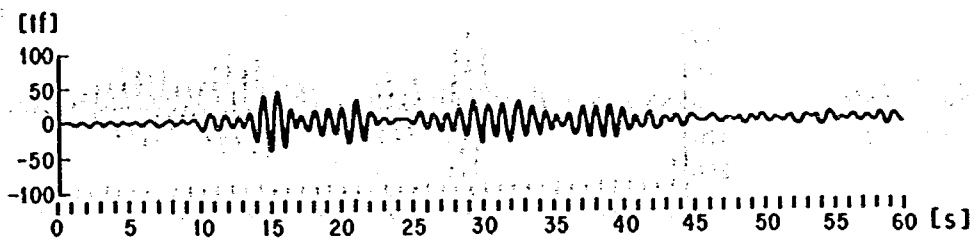
(a) 加振方向 0°

No. 11

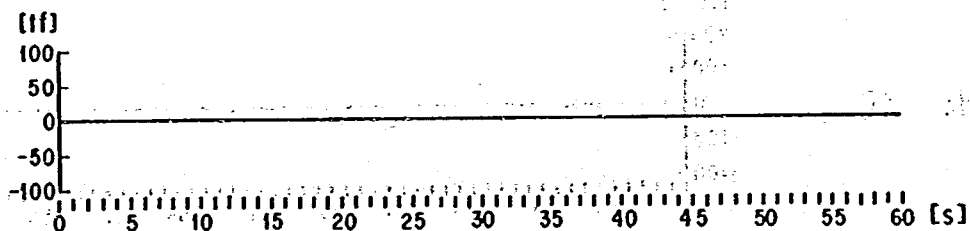


No. 22

(曲線部)



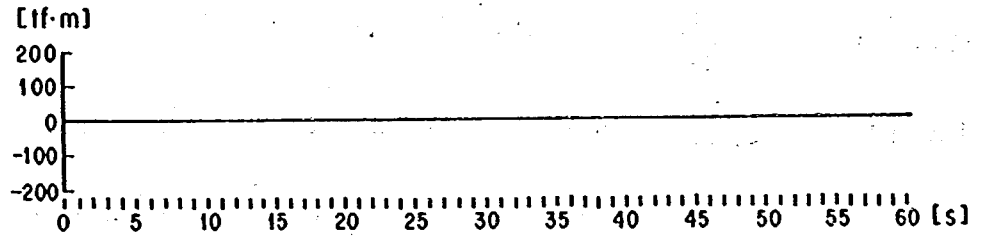
No. 33



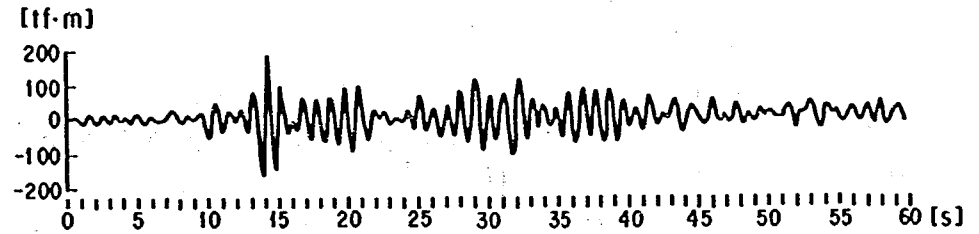
(b) 加振方向 90°

図5-12(2) 曲線部を有するシールド管渠のせん断力波形

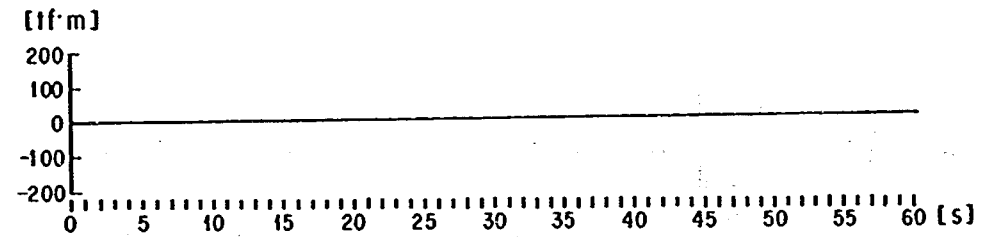
No. 11



No. 22
(曲線部)

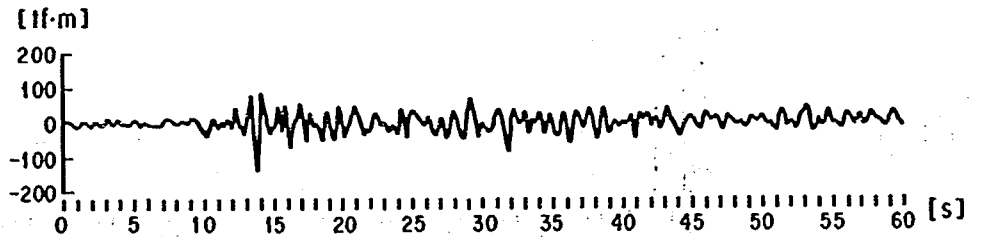


No. 33

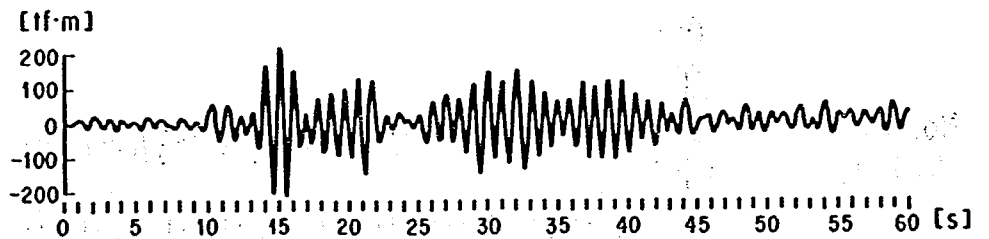


(a) 加振方向 0°

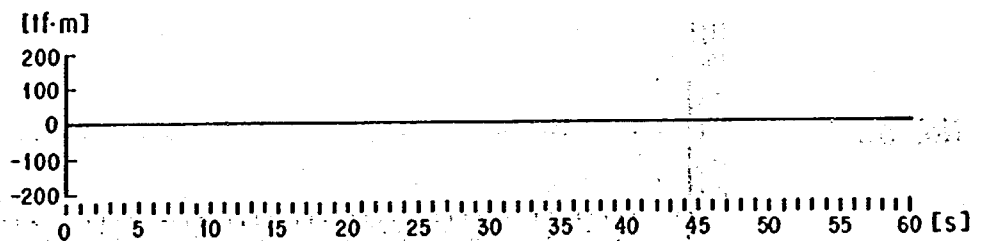
No. 11



No. 22
(曲線部)



No. 33



(b) 加振方向 90°

図5-12(3) 曲線部を有するシールド管渠の曲げモーメント波形

5-3 加振方向がシールド管渠の地震時応答に及ぼす影響

曲線部を有するシールド管渠について、加振方向を変化させた7ケース（ケース3～ケース9）を比較することにより、加振方向の違いが管渠の地震時応答に及ぼす影響について検討する。

(1) 最大応答変位

いずれの加振方向においても、シールド管渠にはY軸方向変位は全く生じず、X軸方向変位及びZ軸方向変位のみが生じた。シールド管渠のX軸方向及びZ軸方向の最大応答変位の分布を示すと図5-13及び図5-14の通りである。

図5-13によれば、X軸方向の最大応答変位は、加振方向が $0^\circ \sim 90^\circ$ に変化するのにつれて、当然ながら全区間で一様に単調減少している。また、加振方向が 15° ずつ増えることによって減少する最大応答変位の大きさは、加振方向が小さいほど小さく、加振方向が大きいほど大きい。これは入力地震動が同じであれば、シールド管渠のX軸方向変位は入力地震動のX軸方向成分の大きさに対応して決まることを示すものである。すなわち、加振方向が α° の場合のX軸方向変位を $X(\alpha)$ とすれば、加振方向の β° の場合のX軸方向変位 $X(\beta)$ は図5-15に示すように次式で与えられる。

$$X(\beta) = \frac{X(\alpha)}{\cos(\alpha)} \times X \cos(\beta)$$

ただしこの考え方によれば、加振方向が 90° の場合にはX軸方向変位 $X(90^\circ)$ は0となるはずであるが、図5-13では前述したように曲線部でX方向変位が生じている点が注目される。

図5-14によれば、シールド管渠に生じたZ軸方向の最大応答変位は、加振方向が $0^\circ \sim 90^\circ$ に変化するのにつれて、当然ながら全区間で一様に単調増加している。これは前述したように、シールド管渠のZ軸方向変位は入力地震動のZ軸方向成分の大きさに対応して決まることを示すものである。また、加振方向が 0° の場合にもZ軸方向変位が生じており、X軸方向変位の場合には曲線部だけであったのに対して、この場合には曲線部と隣接する直線部にまで曲線部の影響が及んでいる点が注目される。

(2) 最大応答変位角

いずれの加振方向においても、シールド管渠にはX軸回り及びZ軸回りの変位角は生じず、Y軸回りの変位角のみが生じた。シールド管渠に生じたY軸回りの最大応答変位角の分布を示すと図5-16の通りである。

図5-16によれば、シールド管渠に生じたY軸回りの最大応答変位角は、シールド管渠の位置によって2つの相異なる傾向を持っている。すなわち、シールド管渠のX軸方向部分から曲線部にかけては加振方向が $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ に変化するにつれて変位角は単調増加するのに対し、曲線部分からZ軸方向部分にかけては変位角は単調減少している。一般に、X軸方向に直線状シールド管渠が置かれた場合には前者の傾向を、Z軸方向に置かれた場合には後者の傾向を示すことから、本検討で対象としているような直角に折れ曲がったシールド管渠では、両者の傾向が同時に現出したものと考えることができる。両者の傾向が重ね合わされることになる曲線部分での最大変位角は $5.76 \times 10^{-4} \text{ rad}$ (加振方向 0° の場合)であり、これは同じ位置で直線状シールド管渠に生じる最大変位角の120%程度である。

シールド管渠に生じた最大応答変位および最大応答変位角を加振方向別にとりまとめて示すと表5-4の通りである。

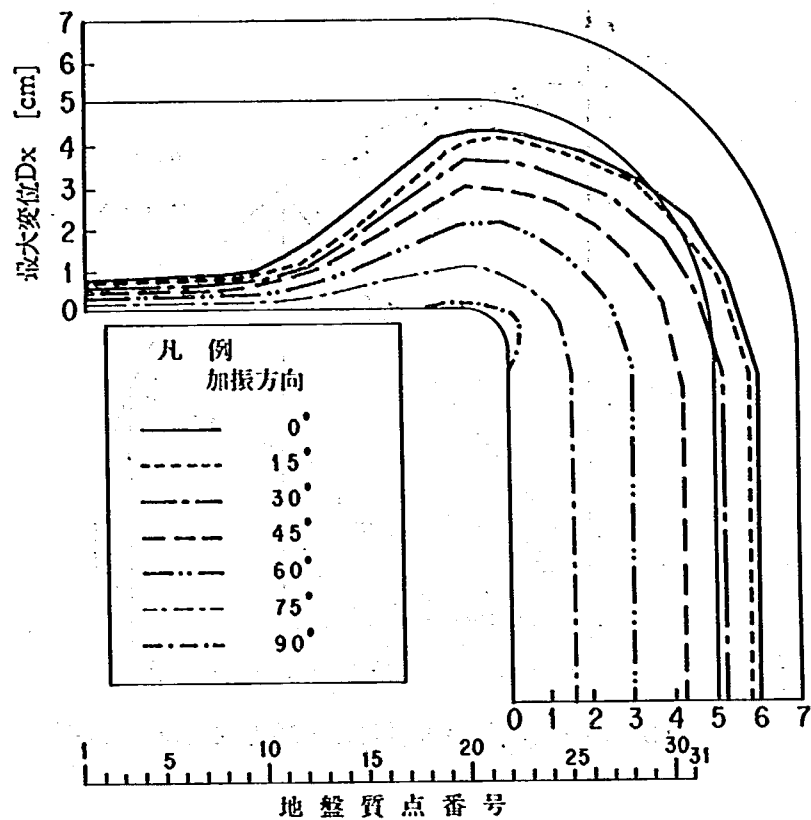


図5-13 曲線部を有するシールド管渠のX軸方向最大変位

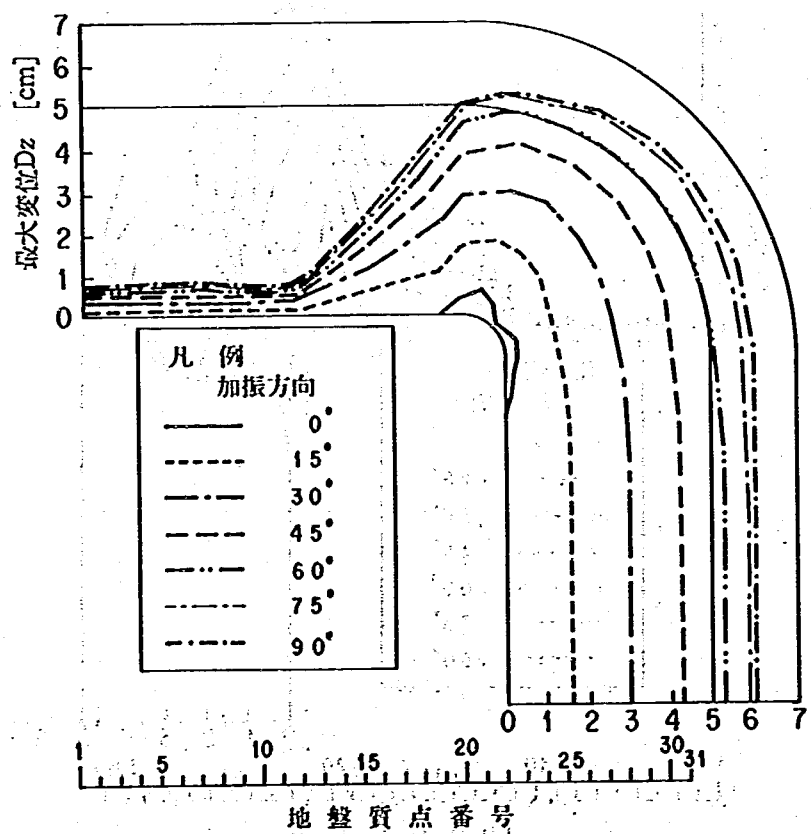


図5-14 曲線部を有するシールド管渠のZ軸方向最大変位

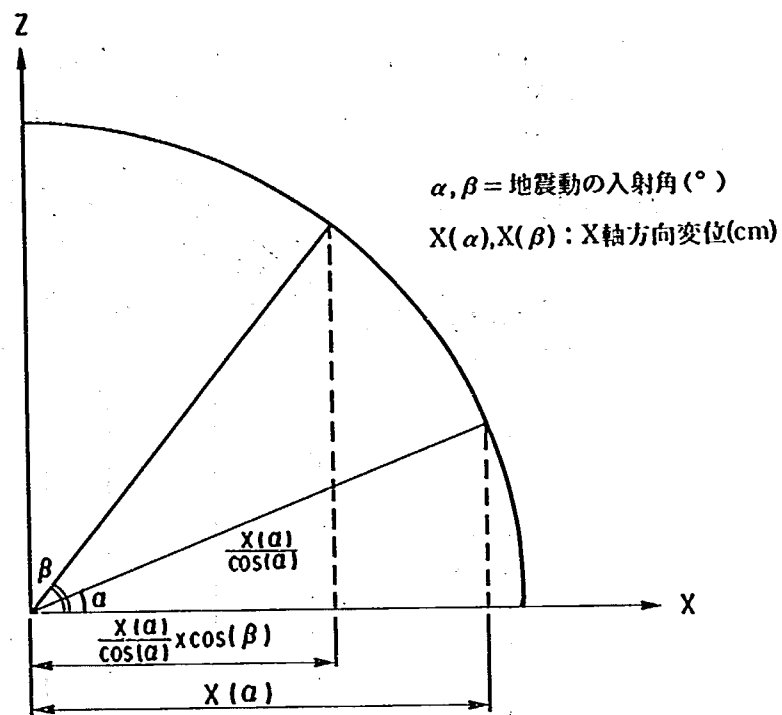


図5-15 地震動の入射角とX軸方向変位との関係

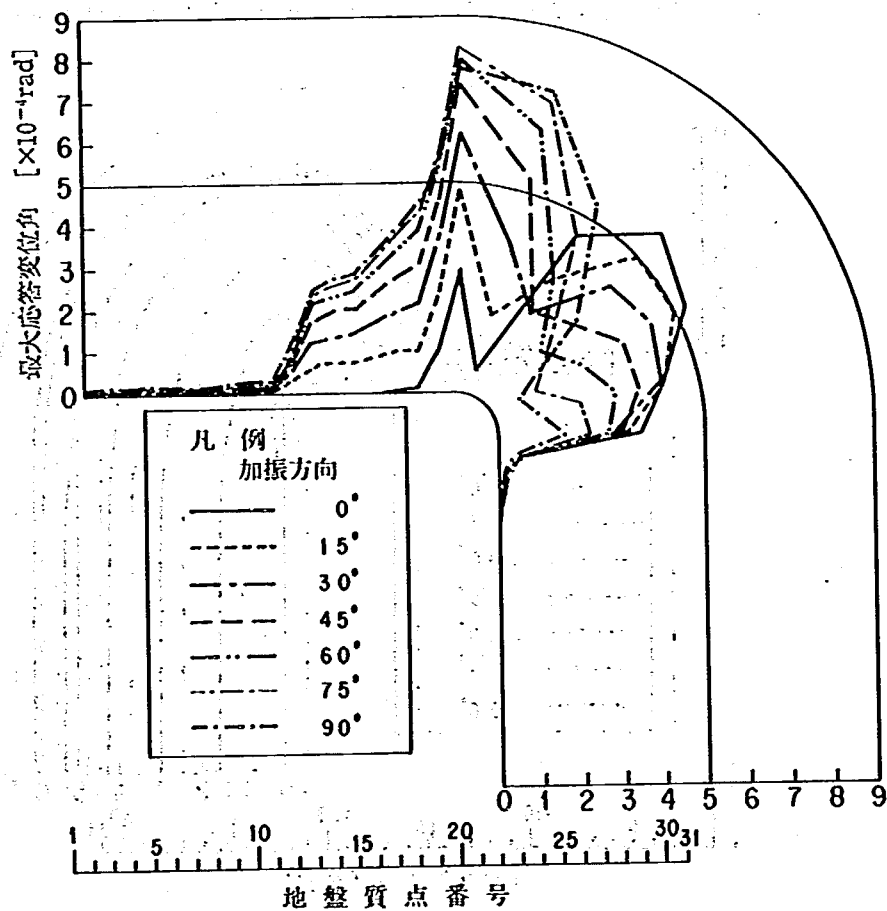


図5-16 曲線部を有するシールド管渠のY軸回りの最大応答変位角

表 5-4 曲線部を有するシールド管渠の最大応答変位及び変位角

加振方向	変 位 (cm)		Y軸まわりの 変位角 [$\times 10^{-4}$ rad]
	X方向	Z方向	
0°	5.80	0.63	5.76
15°	5.59	1.91	5.09
30°	4.99	3.17	6.25
45°	4.05	4.30	7.41
60°	2.84	5.14	8.07
75°	1.43	5.71	8.20
90°	0.39	5.98	7.80

(3) 最大断面力

いずれの加振方向においても、Y軸方向のせん断力およびX軸、Z軸回りの曲げモーメントは生じず、軸力、水平面内のせん断力およびY軸回りの曲げモーメントだけが生じた。軸力、水平面内のせん断力およびY軸回りの曲げモーメントの分布を示すとそれぞれ図5-17、図5-18および図5-19の通りである。

まず図5-17によれば、シールド管渠に生じた軸力は、加振方向が $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ に変化するにつれて全区間でおおむね一様に単調減少している。ただし、曲線部ではわずかな差によって最大値を与える加振方向が 15° となっている点が注目される。また、加振方向が 15° ずつ増えることによって減少する最大応答変位の大きさは、加振方向が小さいほど小さく、加振方向が大きいほど大きい。この傾向は前述した最大応答変位に良く対応している。

次に図5-18によれば、シールド管渠に生じた水平面内のせん断力は、加振方向が $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ に変わるにつれて全区間で一様に単調減少している。この傾向は軸力と同じように最大応答変位の傾向に対応するものである。

次に図5-19によれば、シールド管渠に生じたY軸回りの曲げモーメントは、シールド管渠の位置によって2つの相異なる傾向を持っている。すなわち、管渠のX軸方向から曲線部にかけては加振方向が $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ に変化するにつれて曲げモーメントは単調増加するのに対し、曲線部分からZ軸方向部分にかけては、多少の例外はあるものの概ね単調減少している。この傾向は前述した最大応答変位角の傾向に対応するものである。

シールド管渠に生じた最大断面力を加振方向別にとりまとめて示すと表5-5の通りである。

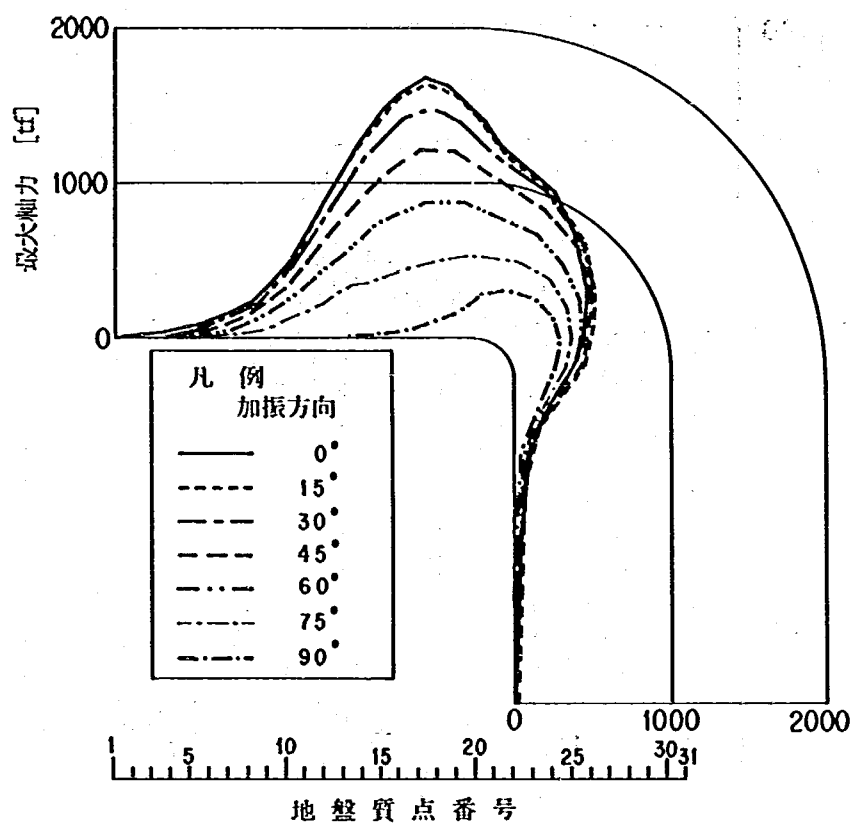


図5-17 曲線部を有するシールド管渠に生じた最大軸力

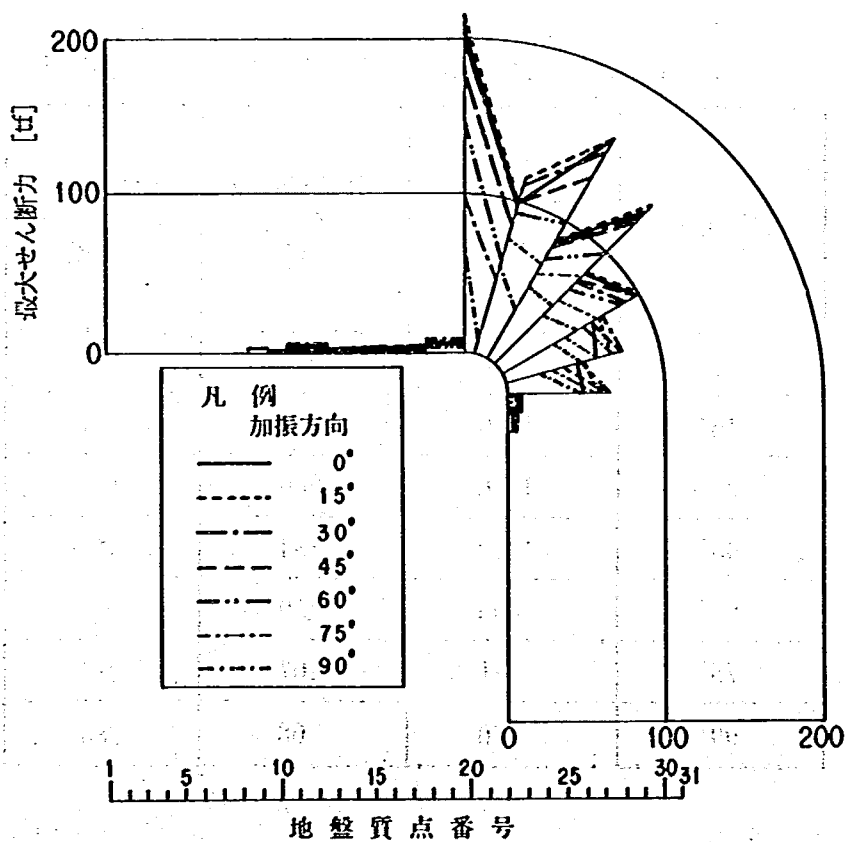


図5-18 曲線部を有するシールド管渠に生じた最大せん断力

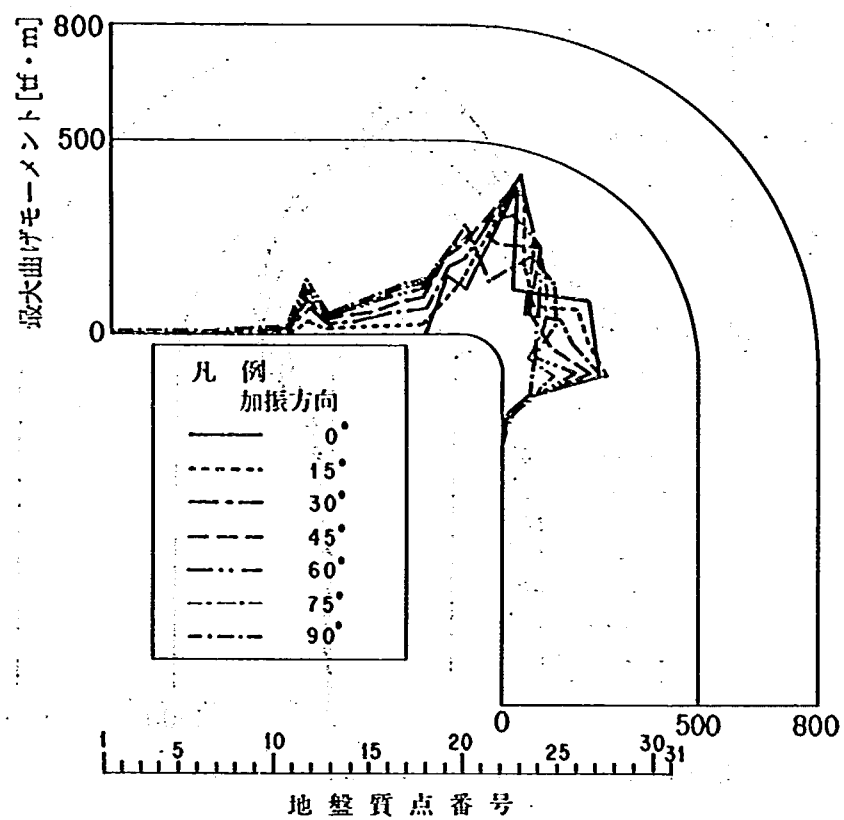


図5-19 曲線部を有するシールド管渠に生じた最大曲げモーメント

表5-5 曲線部を有するシールド管渠に生じた最大断面力

加振方向	軸力 [tf]	水平面内の せん断力 [tf]	Y軸まわりの 曲げモーメント [tf·m]
0°	1206	207	409
15°	1229	214	434
30°	1116	206	425
45°	1013	184	387
60°	803	150	323
75°	541	107	284
90°	370	68	280

6. まとめ

曲線部を有する下水道シールド管渠について、曲線部がシールド管渠の耐震性に及ぼす影響を、直線状シールド管渠の地震応答解析結果との比較を行うことによって、また、加振方向の違いが曲線部を有するシールド管渠の地震応答に及ぼす影響を、加振方向を7段階に変化させた地震応答解析を行うことによって検討した。本検討により得られた結論をとりまとめると以下の通りである。

(1) 曲線部がシールド管渠の耐震性に及ぼす影響

1) 曲線部の両端に接続されたシールド管渠は、地盤特性・加振方向等各種の条件により相異なる振動特性を示す。両者の相互干渉により、シールド管渠の曲線部には直線状シールド管渠に比べて大きな応答変位および応答変位角が励起される。本検討で用いたシールド管渠および地盤条件の場合には、曲線部に生じた最大応答変位角は直線状のシールド管渠に生じた最大応答変位角の約1.2倍であった。ただし、本検討で用いた地盤条件はZ軸方向(図4-1参照)に変化しておらず、このような条件下では曲線部の両端に接続されたシールド管渠は同じような挙動をするため、両者の相互干渉の程度は比較的小さいものである。地盤条件が3次元的に変化するような場合には、本検討で用いたシールド管渠でもさらに大きな応答変位および応答変位角が生ずるものと考えられる。

2) 曲線部を有するシールド管渠には、Y軸方向のせん断力およびX軸、Z軸回りの曲げモーメントは生じず、軸力、水平面内のせん断力およびY軸回りの曲げモーメントだけが生じた。上述したように、相互干渉の程度は小さかったのにも関わらず、曲線部に生じた断面力は極めて大きく、最大せん断力は207tf(直線状シールド管渠の同じ位置で生じたせん断力の約23倍)、またY軸回りの最大曲げモーメントは409tf・m(直線状シールド管渠の同じ位置で生じた曲げモーメントの約1.6倍)であった。

(2) 加振方向の違いが曲線部を有するシールド管渠の地震応答に及ぼす影響

1) シールド管渠に生じる応答値には、加振方向に関して2つの異なった傾向が認められる。すなわち、管渠のX軸方向部分から曲線部にかけでは加振方向が $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ と変化するのにつれて応答値は単調増加するのに対し、曲線部からZ軸方向部分にかけては単調減少している。両者の傾向が重ね合わされる曲線部では、応答変位、応答変位角ともに直線状シールド管渠の場合に比べると大きめの値を生じており、特に最大応答変位角が生じたのは、加振方向が 0° の時で $5.76 \times 10^{-4} \text{ rad}$ (直線状シールド管渠の同じ位置で生じた応答変位角の約1.2倍)であった。

2) シールド管渠の断面力は、加振方向に関して応答変位および応答変位角が示す傾向に対応して生じている。曲線部において、軸力、水平面内のせん断力およびY軸回りの曲げモーメントの最大値が生じたのは、加振方向が 15° の時であった。

謝 辞

本検討を進めるにあたり、横浜市下水道局建設部の方々に御協力を頂いた。ここに記して厚く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 川島一彦・大日方尚巳・後藤勝志・加納尚史：昭和58年日本海中部地震による下水道管路施設の被害調査——(その1) 被害の特徴——・土木研究所資料、第2244号、昭和60年3月
- 2) 川島一彦・大日方尚巳・後藤勝志・加納尚史：昭和58年日本海中部地震による管路施設の被害調査——(その2) 被害状況写真集——・土木研究所資料、第2237号、昭和60年3月
- 3) 川島一彦・大日方尚巳・加納尚史：日本海中部地震による下水道管渠被害の解析、下水道協会誌、VOL. 23 NO. 271、昭和61年12月
- 4) 川島一彦・大日方尚巳・後藤勝志・加納尚史：日本海中部地震による下水道管渠被害の特徴、土木技術資料、第28巻、第6号、昭和61年6月
- 5) 川島一彦・大日方尚巳・後藤勝志・加納尚史：日本海中部地震による下水道管渠被害の解析、土木技術資料、第29巻、第1号、昭和62年1月
- 6) 川島一彦・大日方尚巳・後藤勝志・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究——(その1) シールドセグメントの等価剛性の評価および応答変位法の適用——・土木研究所資料、第2262号、昭和60年10月
- 7) 川島一彦・大日方尚巳・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究——(その4) トンネル軸直角方向の地盤条件の変化を考慮した併設シールドトンネルの地震応答解析——・土木研究所資料、第2496号、昭和62年2月
- 8) (財)日本道路協会：共同溝設計指針、昭和61年3月
- 9) (財)土木学会・(財)日本下水道協会共編：シールド工事用標準セグメント、昭和57年11月改訂
- 10) 川島一彦・杉田春樹・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究——(その8) シールド管渠の地震応答に及ぼす立坑の影響——・土木研究所資料、第2815号、昭和63年2月

The first part of the paper discusses the importance of the study of the history of the United States. It is argued that a knowledge of the past is essential for a full understanding of the present. The author then proceeds to discuss the various factors that have shaped the development of the United States, including the role of the government, the influence of the economy, and the impact of the culture. The author concludes by stating that the study of the history of the United States is a task of great importance, and that it is one that should be undertaken by all who are interested in the future of the country.

The second part of the paper discusses the role of the government in the development of the United States. It is argued that the government has played a central role in the shaping of the country, and that its actions have had a profound impact on the lives of the people. The author then discusses the various ways in which the government has influenced the development of the country, including through its policies, its laws, and its actions. The author concludes by stating that the government is a powerful force in the development of the United States, and that it is one that should be carefully monitored and controlled.

The third part of the paper discusses the influence of the economy on the development of the United States. It is argued that the economy has played a central role in the shaping of the country, and that its actions have had a profound impact on the lives of the people. The author then discusses the various ways in which the economy has influenced the development of the country, including through its policies, its laws, and its actions. The author concludes by stating that the economy is a powerful force in the development of the United States, and that it is one that should be carefully monitored and controlled.

The fourth part of the paper discusses the impact of the culture on the development of the United States. It is argued that the culture has played a central role in the shaping of the country, and that its actions have had a profound impact on the lives of the people. The author then discusses the various ways in which the culture has influenced the development of the country, including through its policies, its laws, and its actions. The author concludes by stating that the culture is a powerful force in the development of the United States, and that it is one that should be carefully monitored and controlled.

シールドトンネルの耐震性に関する研究
—(その7)曲線部を有する下水道シールド管渠に生じる地震力の検討—
Development of Seismic Resistant Design Procedure
for Shield Tunnels
—Part 7 Dynamic Response of Shield Tunnels for
Sewerage Which Has Curved Part—

ISSN 0386-5878
土研資料第 2920 号
1990 年 11 月
地震防災部耐震研究室
川島一彦・杉田秀樹
加納尚史

要 旨

下水道管路施設は、既往の地震において度重なる被害を受けており、耐震設計法の開発が急務である。

本資料は、曲線部を有する下水道シールド管渠の耐震設計に資することを目的として、地震時に下水道シールド管渠の曲線部に生じる断面力を地震応答解析により検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：下水道シールド管渠、地震応答解析、動的解析、曲線部

郵便はがき

切手をは
て下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

耐震研究室 御中

No. 016

No. 016

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第 2920 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

⑩

土木研究所資料第 2920 号

シールドトンネルの耐震性に関する研究

○ —(その7)曲線部を有する下水道シールド管渠に生じる地震力の検討—

Development of Seismic Resistant Design Procedure
for Shield Tunnels

—Part 7 Dynamic Response of Shield Tunnels for
Sewerage Which Has Curved Part—