

I S S N 0386—5878

土 研 資 料 第1578号

マイクロフィルム 第 号

土 木 研 究 所 資 料

換気塔を含めた沈埋トンネルの地震応答解析

昭和 55 年 3 月

建設省 土木研究所

耐 震 研 究 室

Copyright © 1980 Fiscal year 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 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、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

ま え が き

当研究室では大規模湾岸地域における道路網上の沈埋トンネルの耐震上の技術的な問題点の解明および合理的な耐震設計法を確立するために実験と解析により研究を進めてきた。本報告書は換気塔を含めた全体系モデルを用いた基盤の入力による地震応答解析結果を報告するものである。各年度ごとの調査項目および研究担当者は下記の表のとおりである。

昭和 55 年 3 月

地震防災部長 栗 林 栄 一
耐震研究室
室 長 上 田 治
研究員 羽 立 隆 幸

調査項目及び研究担当者一覧

年度	調 査 項 目	研究担当者（現所属）
50	予備検討：既往研究による沈埋トンネルの動的解析モデルの検討	主任研究員 川 島 一 彦（振動研究室） 研究員 羽 立 隆 幸 宮 田 忠 明
51	本検討 1：沈埋トンネルの動的解析モデルの検討と動的解析用電算プログラムの作成	主任研究員 川 島 一 彦（振動研究室） 研究員 羽 立 隆 幸 柴 田 松 雄
52		研究員 羽 立 隆 幸 干 場 良 信
53	本検討 2：沈埋トンネル部の軸線上の変位および断面力に関する解析	主任研究員 川 島 一 彦（振動研究室） 柴 田 松 雄 干 場 良 信
	本検討 3：沈埋トンネル部の軸線上の変位および断面力に及ぼす可撓性継手の影響の解析	主任研究員 川 島 一 彦（振動研究室） 研究員 羽 立 隆 幸 柴 田 松 雄
54	本検討 4：換気塔を含めた沈埋トンネルの地震応答解析	研究員 羽 立 隆 幸 柴 田 松 雄 干 場 良 信

目 次

まえがき

I	50～53年度の調査概要	1
I-1	調査経緯	1
I-2	50 年 度	1
I-3	51～52年度	1
I-4	53 年 度	2
II	54年度の調査内容	4
II-1	概 説	4
II-2	連動方程式と解析の基本概念	5
(1)	条 件	5
(2)	表層地盤	5
(3)	沈埋トンネル部	7
(4)	換気塔部	9
II-3	対象沈埋トンネル・周辺地盤	10
(1)	対象沈埋トンネル	10
(2)	動的解析モデル	10
(3)	地盤諸定数	11
II-4	入 力	11
(1)	地 震 動	11
(2)	位 相 差	11
II-5	解析結果	12
(1)	計算項目	12
(A)	諸 条 件	12
(B)	計 算 値	13
(2)	計算結果	13
(A)	図 表	13
(B)	固有値と固有ベクトル	14
(C)	各部の地震応答	15
II-6	考 察	19
III	結 論	106

あ と が き		107
参 考 文 献		107
付 図		109
付 表		121
付 記		127

I 50～53年度の調査概要

I-1 調査経緯

沈埋トンネルとは沈埋工法によって建設される沈埋トンネル部と取付部および立坑・換気塔部などの関連構造物とを併せた総称である。一般には、その施工方法は、各エレメントを函体の形で製作し、浮力を利用して現場に曳航し、あらかじめ浚渫したトレンチに沈設し、水中圧接により結合し埋め戻して作る構造物である。このような工法上の特色ならびに建設地点などを含めた設計上の条件から、沈埋トンネルは次のような特徴をもっている。

(1) エレメントは比較的剛な鉄筋コンクリートあるいは鋼殻の構造として作られるために、これらを相互に結合して作られるトンネルエレメントは、幅および高さに比較して軸方向に細長い構造物となる。

(2) 特に長大な沈埋トンネルにおいては、一般に、軸方向に沿って可撓性に富んだ構造物となる。

(3) 沈設後の浮力に対する設計の安全率は一般に1.1～1.3程度に採られることが多いので、見掛けの単位体積重量はその周辺の在来地盤や埋戻しに使用される材料の土砂、礫、等の湿潤単位体積重量よりも一般に小さい。

(4) 開渠による地盤の浚渫が容易に行ない得る場所が多く選定されるために、軟質な地盤条件となることが多い。

このような特徴に即して沈埋トンネルの地震時応力を求めるためのいくつかの解析法が提案されている。^{例えば1) 2)}これらの解析法による計算は「地盤—構造物」系の不規則波の入力に対する直接応答を求めることが多いので電子計算機を用いることが多い。当研究室では51～52年度に動的解析用電算プログラムDAST-Iを開発した。このプログラムの内容の概要は後述するとおりである。

これらのプログラムの解析の基本概念は、簡単に言って、地震時の地盤変位を地盤ばねを介して沈埋トンネルに伝え静的つりあい条件式を解いて沈埋トンネル軸線上の地震時応力を解析しようとするものである。しかしながら、沈埋トンネル部と剛性・質量の大きく異なる立坑・換気塔部を有する沈埋トンネルに関しては、各部のロッキング振動等による影響を受けるために、一般に計画される沈埋トンネルとは可成り異なった応答特性を示すことが予想される。そのため、当研究室では、構造物自身も質量を有し、地盤の質量と連成した振動系として解析できる動的解析用電算プログラムDAST-Mを53年度に開発した。このプログラムは、言わば地下から地上に露出した立坑・換気塔部などの振動性状を取り入れて解析できるように工夫したプログラムであり沈埋トンネル部、立坑・換気塔部、等を含んだ全体系の地震応答解析に有効な手段として用いられている。

53年度は上記のDAST-Iを用いて沈埋トンネル部の軸線上の変位および断面力に関する解析および沈埋トンネル部の軸線上の変位および断面力に及ぼす可撓性継手の影響の解析を行なった。以下に既往年度の調査概要を述べる。

I-2 50 年 度

沈埋トンネルの動的特性と解析モデルに関しては、各所で模型実験および解析などから検討されるとともに比較的小口径の地中埋設管路の地震観測および人工加振源を用いた振動実験などによる調査からも研究されてきている。たとえば、桜井¹⁾は1965年松代群発地震に際して地盤中にパイプを埋設しパイプの変形と地盤の振動を観測した結果、パイプに生じる軸方向ひずみは地盤の変形と密接な関係があることを見出した。また、田村²⁾らは沈埋トンネルおよび周辺地盤をそれぞれゴムおよびゼラチンによって模型化し、加振台を用いた振動実験によって、沈埋トンネルの模型は周辺地盤と同じように振動することを明らかにした。また、岩崎³⁾らは沈埋トンネルおよび周辺地盤をそれぞれアクリル・アマイド系のゲルから成る模型地盤を用いて加振実験を行い、表層地盤の厚さの急変部、人工島斜路部、等において振動が励起され易いことを示した。このほか、青木⁴⁾ら、那須⁵⁾等による多くの研究結果の報告が行われてきており、これらの一連の研究成果から、(1)沈埋トンネルは地震時にそのまわりを取巻く地盤を押しつけて独自の共振状態に陥ることがほとんどないこと、(2)沈埋トンネルに生じる応力は地盤の変化部において大きいこと、などが確認されている。このような沈埋トンネルの動的特性に基づいて、田村²⁾らは、1975年に付図-1に示すような動的解析モデルを提案した。

I-3 51～52年度

〔仮定条件〕

後述する動的解析モデルを検討するための仮定条件は次のとおりである。(1)周辺地盤は工学的基盤（以下、基盤と記す）とその表面を覆う表層地盤とから成る。(2)地震波動は基盤から鉛直方向に入射して表層地盤および沈埋トンネルに振動を生じせしめる。鉛直方向、水平方向の振動応答はそれぞれに独立である。(3)沈埋トンネル周辺の表層地盤の振動応答は、沈埋トンネルの設定した中心軸線上の単位幅のそれによって代表される。

〔動的解析モデル〕

動的解析用電算プログラムを作成するために、次の動的解析モデルを設定した。(1)沈埋トンネル部は、表層地盤に弾性的に支持された梁とする。（付図-2参照）(2)表層地盤は離散型の1自由度せん断振動系とする。（付図-3参照）

〔動的解析用電算プログラム〕

上記に基づいて動的解析用電算プログラムDAST-Iを作成した。その概要および機能は参考文献6)、入力データ等の取り扱いは参考文献7)を参照されたい。プログラムの構成、地震動データ登録機能、プロッター出力機能、インプットデータ入力フローチャートをそれぞれ付表-1、付図-4,5,6,7,に示す。

さらに、動的解析用電算プログラムDAST-Mの解析方法の検討を行った。この解析方法に関してはⅡ章で述べる。

I-4 53 年 度⁸⁾⁹⁾

〔沈埋トンネル部の軸線上の変位および断面力に関する解析〕

(1) 対象構造物

対象構造物は昭和52年度に建設省近畿地方建設局において計画された大阪湾岸道路六甲アイランドーポートアイランド間の沈埋トンネルとした。表層地盤の地質柱状図と併せて、一般縦断面図を付図-8に示す。

(2) 入力条件

入力地震動は根室半島沖地震静内橋加速度波形(1973年, GL-40m), 日向灘沖地震板島橋加速度波形(1968年), 平均応答スペクトル(土木研究所, 1970年, 岩盤)とし基盤面において作用させた。入力条件一覧表を付表-2に示す。

(3) 地盤条件

表層地盤の地質柱状図は付図-8に示したとおりである。この図から判るように、沈埋トンネル計画区間の地盤の成層状態は海底面から順に埋土, 上部粘土層, 上部砂泥互層, 中部粘土層, 中部砂泥互層と続いており地質ボーリング調査の結果に基づく3層の平均的な地盤の諸定数は付表-3に示したとおりである。

(4) 動的解析モデル

1) 断面諸定数: 付表-4参照

2) 質点数: 52個

3) 可撓性継手数: 無, 8箇所

4) 可撓性継手バネ定数: 付表-5の値とそれを $1/10, 1/2, 2, 10, 100$ 倍した値

(5) 解析項目

1) 変位分布

2) 断面力分布

(6) 解析結果

付表-6に示す。

〔沈埋トンネル部の軸線上の変位および断面力に及ぼす可撓性継手の影響の解析〕

(1) 対象構造物・入力条件

対象構造物および入力条件は〔沈埋トンネル部の軸線上の変位および断面力に関する解析〕に同じとした。

(2) 地盤条件

地盤条件は上記の場合よりもさらに詳細に層分けし地盤の諸定数を設定した。すなわち、付表-7に示すとおりである。この表の微少ひずみ時(10^{-6} 時)のせん断弾性係数 G およびせん断弾性波速度 V_s は次式から求めた。

$$G = \frac{\gamma_s}{g} \cdot V_s^2 \quad (1)$$

γ_s : 単位体積重量 (t/m^3)

g : 重力加速度 (m/s^2)

V_s : (2)式による。

$$V_s = \begin{cases} 143 N^{0.0777} & (\text{沖積世粘性土}) \\ 103 N^{0.211} & (\text{ " 砂質土}) \\ 172 N^{0.183} & (\text{洪積世粘性土}) \\ 205 N^{0.125} & (\text{ " 砂質土}) \end{cases} \quad (2)$$

(3) 動的解析モデル

(1) 断面諸定数・土質定数：付表－４， ７参照

(2) 可撓性継手数：無， 8箇所

(3) 可撓性継手バネ定数：付表－８の値とそれを $1/20, 1/4, 1/2, 5, 50$ 倍した値

(4) 解析項目

(1) 変位に及ぼす可撓性継手の影響

(2) 断面力に及ぼす可撓性継手の影響

(5) 解析結果

(1) 可撓性継手に生じる相対変位は一般に継手が軟らかくなるほど大きい。

(2) 可撓性継手を設けることにより一般に断面力は低減する。その低減の割合は一般に軸力および曲げモーメントにおいて著しい。

Ⅱ ５４年度の調査内容

Ⅱ－１ 概 説

５４年度は換気塔を含めた沈埋トンネル全体系モデルによる地震応答解析を行った。着目した点は次のとおりである。

(1) 沈埋トンネル部の質点分布の影響

換気塔を含めた沈埋トンネル全体系モデルによる地震応答計算をするにあたって、沈埋トンネルの質点分布の違いの応答に及ぼす影響を知り、計算時間の短縮化を図る。

(2) 可撓性継手条件の影響

沈埋トンネル部と換気塔部との間に、可撓性継手を設けることにより、沈埋トンネル部の可撓性または伸縮性が高くなる。そのために、沈埋トンネル部と換気塔部との結合条件を剛結合とした場合と柔結合とした場合の２種類のケースについてその断面力等に及ぼす影響を調べる。

(3) 入力地震動の位相差の影響

ある距離離れた地点間相互の地震動記録を比較すると、地点間相互の波形に位相のずれが生じていることが判る。この位相のずれの応答に及ぼす影響は、沈埋トンネルのような軸方向に細長い構造物に大きいと予想される。そのために、入力地震動の位相差の応答に及ぼす影響を調べる。

対象とした沈埋トンネルは東京湾環状道路の一環として昭和 52 年度に建設省関東地方建設局において調査した多摩川河口トンネル（仮称）である。（図－1 参照） このトンネルの中央第 1 種第 2 級部約 3,700 m のうち 1,960 m の区間が沈埋トンネルであり、アプローチ部分も含めて約 2,600 m の区間を解析の対象とした。

II-2 運動方程式と解析の基本概念

(1) 条 件

前節で示した沈埋トンネルの特徴に基づいて沈埋トンネルの地震応答解析の条件を次のように仮定する。
すなわち、

- (イ) 周辺地盤は図－2(a)に示すような離散型のせん断振動系モデルによって表現する、
 - (ロ) 地盤の剛さは拘束圧と地盤に生じるせん断ひずみなどによって変化するといわれているがそのような変化は等価な線形の剛性によって解析に取り入れる、
 - (ハ) 周辺地盤と沈埋トンネル部とは図－2(b)に示すようなばね・ダッシュポットで結ばれた系としてモデル化する、
 - (ニ) 換気塔部は表層地盤質点と換気塔質点との間にばね・ダッシュポット（軸、せん断、回転）を考慮する（図－2(c)参照）、
 - (ホ) エレメント相互間および換気塔と沈埋トンネル部との取り付け部に設けられる可撓性継手はそれらの間の相対的な伸縮もしくは回転運動に比例した線形バネによってモデル化する、
- とする。

(2) 表層地盤

II-2 (1) で仮定した条件に基づいて、沈埋トンネルの軸方向に沿った周辺地盤の地震応答解析を行なう場合の運動方程式と解析の基本概念は次のとおりである。^{8) 10) 11)}

図－2(a)に示した表層地盤の n 質点系の時刻 t における運動方程式は周知のごとく次式で表わされる。

$$M\ddot{U}_t^e + C\dot{U}_t^e + KU_t^e = 0 \quad (3)$$

ここに、 M 、 C 、 K は質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスを表わしており、また、 $\ddot{U}_t^e$ 、 $\dot{U}_t^e$ 、 U_t^e は時刻 t の加速度、速度、変位ベクトルをそれぞれ表わしている。この力学系の全体座標軸すなわち基盤面の設定された直交座標軸が相対的に変位する場合には、表層地盤質点の相対的な変位ベクトル、すなわち U_t^e は次式のように表わされる。

$$U_t^e = \begin{Bmatrix} U_t \\ U_t^b \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 U_t^b は、基盤面における n^b 個の拘束された変位ベクトルであり、 U_t は表層地盤質点の相対変位ベクトルである。

一方、 U_t^e は、便宜的に擬静的相対変位ベクトル U_{st}^e と動的相対変位ベクトル U_{dt}^e に分離して考えること

ができる。すなわち、

$$U_t^e \equiv U_s^e + U_d^e \quad (5)$$

である。

さらに、 U_s^e, U_d^e は

$$U_s^e = \begin{Bmatrix} U_s \\ U_s^b \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$U_d^e = \begin{Bmatrix} U_d \\ U_d^b \end{Bmatrix} \quad (7)$$

のように表現され、ここに

U_s : 擬静的相対変位ベクトル (表層地盤質点)

U_s^b : 擬静的変位ベクトル (基盤)

U_d : 動的相対変位ベクトル (表層地盤質点)

U_d^b : 動変位ベクトル (基盤)

である。

また、動変位ベクトル (基盤) は次のように定義されている。したがって、

$$U_d^b = 0 \quad (8)$$

(3)式の基盤面における n^b 個の拘束された変位ベクトルに合せて、質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスを次のように分解すると、(3)式の運動方程式は次のようになり、

$$\begin{bmatrix} MM^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_t \\ \ddot{U}_t^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C C^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_t \\ \dot{U}_t^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} KK^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_t \\ U_t^b \end{Bmatrix} = 0 \quad (9)$$

さらに、(9)式に(5)式および(8)式を代入すると、基盤面を剛体と仮定した時に、(9)式は次式のように変形する。

$$M\ddot{U}_d + C\dot{U}_d + KU_d = - \begin{bmatrix} MM^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_s^b \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} C C^b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_s \\ \dot{U}_s^b \end{Bmatrix} \quad (10)$$

一方、(10)式の右辺の第2項は第1項に比べて微小であり、また、右辺の第1項の質量マトリックス M^b も無視しうることを仮定すれば、(10)式は、次式のように整理される。

$$M\ddot{U}_d + C\dot{U}_d + KU_d = - M\ddot{U}_s \quad (11)$$

また、擬静的変位ベクトルの定義から

$$KU_s + K^b U_s^b = 0 \quad (12)$$

となるので、 U_s は

$$U_s = -K^{-1}K^b U_s^b \equiv -BU_s^b \quad (13)$$

のように求まる。ここに、 B は、基盤面における拘束された変位ベクトルから擬静的変位ベクトルを計算するためのマトリックスである。

さらに、(11)式に示した運動方程式は、(13)式を(11)式に代入することによって、次式に示すように表わされる。

$$M\ddot{U}_d + C\dot{U}_d + KU_d = MB\ddot{U}_s^b \quad (14)$$

ここで、一般には、基盤面における擬静的変位ベクトル U_s^b は、入力として加速度で与えられる場合が多いから、 U_s^b を求めるためには、次式に示すような擬静的加速度ベクトルの二重積分が必要である。

$$U_s^b = \iint \ddot{U}_s^b dt dt \quad (15)$$

先の(14)式は直接に数値積分するかまたはマトリックスモーダルアナリシスによって解くことができる。そして、表層地盤質点の動的相対変位ベクトル U_d が求まる。

なお、沈埋トンネル設置地点の表層地盤質点における絶対応答変位ベクトル U_g は、上記の解法によって求められた U_d を用いて、次式のように求められる。

$$U_g = U_d + U_s \equiv U_d - BU_s^b \quad (16)$$

(3) 沈埋トンネル部

II-2(2)では、表層地盤の応答は図-2(b)に示す力学モデルによって沈埋トンネル部に伝えられるとした。図-2(b)に示す表層地盤質点応答値 $\ddot{U}_g$ を、後述するように $\ddot{U}_t^{cl}$ に含めて考えた場合には、図-2(b)の力学モデルは U_t^{cl} に関する減衰振動の運動方程式として考えることができる。その場合には、時刻 t における運動方程式は、次のように表わすことができる。

$$m\ddot{U}_t^{cl} + c\dot{U}_t^{cl} + kU_t^{cl} = 0 \quad (17)$$

ここに、 m 、 c 、 k は、それぞれ沈埋トンネル部の質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。

さらに、II-2(2)と同様に、 $\ddot{U}_t^{cl}$ 、 $\dot{U}_t^{cl}$ 、 U_t^{cl} はそれぞれ時刻 t における沈埋トンネル部の加速度、速度、変位ベクトルを表わしている。

上記のように、表層地盤質点の応答を U_t^{cl} に考慮した場合には、沈埋トンネル部の相対変位ベクトル U_t^{cl} は次式のように分離して考えることができる。

$$U_t^{cl} = \begin{Bmatrix} U_t^l \\ U_t^g \end{Bmatrix} \quad (18)$$

ここに、 U_t^l は沈埋トンネル部の動的相対変位ベクトルであり、 U_t^g は表層地盤質点の相対変位ベクトルである。

また、 U_t^l 、 U_t^g は、それぞれ便宜的に擬静的変位ベクトル U_s^{cl} と動的相対変位ベクトル U_d^{cl} とに分離して考えることができる。すなわち、

$$\begin{Bmatrix} U_t^t \\ U_t^g \end{Bmatrix} \equiv U_s^{ct} + U_d^{ct} = \begin{Bmatrix} U_{ts}^t \\ U_{ts}^g \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} U_{td}^t \\ U_{td}^g \end{Bmatrix} \quad (19)$$

U_{ts}^t : 擬静的相対変位ベクトル (沈埋トンネル部)

U_{ts}^g : 擬静的変位ベクトル (表層地盤)

U_{td}^t : 動的相対変位ベクトル (沈埋トンネル部)

U_{td}^g : 動的変位ベクトル (表層地盤)

である。

さらに, U_{ts}^g は, II-2(2)より U_g として与えられているとする。そうすれば, U_{ts}^g は

$$U_{ts}^g = U_g \quad (20)$$

となる。

一方, U_{td}^g を

$$U_{td}^g = 0 \quad (21)$$

と仮定すれば, II-2(2)と同様に, (18)式の U_t^{ct} に併せて質量マトリックス, 減衰マトリックス, 剛性マトリックスを分解すると, (17)式は次式のように表現することができる。

$$\begin{bmatrix} m_p + m_e & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_t^t \\ \ddot{U}_t^g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_p + c_e & -c_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_t^t \\ \dot{U}_t^g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p + k_e & -k_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_t^t \\ U_t^g \end{Bmatrix} = 0 \quad (22)$$

ここで, (22)式に(19), (20), (21)式を代入すると

$$\begin{aligned} (m_p + m_e) \ddot{U}_{td}^t + (c_p + c_e) \dot{U}_{td}^t + (k_p + k_e) U_{td}^t + (m_p + m_e) \ddot{U}_{ts}^t + (c_p + c_e) \dot{U}_{ts}^t - c_e \dot{U}_g \\ + (k_p + k_e) U_{ts}^t - k_e U_g = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

となり,

$$\left. \begin{aligned} m_p + m_e &= m_t \\ c_p + c_e &= c_t \\ k_p + k_e &= k_t \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

とおけば, (23)式は

$$m_t \ddot{U}_{td}^t + c_t \dot{U}_{td}^t + k_t U_{td}^t = -m_t \ddot{U}_{ts}^t - c_t \dot{U}_{ts}^t + c_e \dot{U}_g - k_t U_{ts}^t + k_e U_g \quad (25)$$

となる。

上式において, さらに, 擬静的相対変位ベクトルの定義から

$$-k_t U_{ts}^t + k_e U_g = 0 \quad (26)$$

となるので, (25)式より次のように整理して

$$U_{ts}^t = k_t^{-1} k_e U_g \equiv k_s U_g \quad (27)$$

$$k_s \equiv k_t^{-1} k_e \quad (28)$$

(25)式に(26)式および(27)式を代入すると次式のようになる。

$$m_i \ddot{U}_{id}^t + c_i \dot{U}_{id}^t + k_i U_{id}^t = -m_i k_s \ddot{U}_g + (c_e - c_i k_s) \dot{U}_g \quad (29)$$

ここに、(29)式の右辺の第2項は減衰項である。この項は右辺の第一項に比べて微小であることを考慮すれば、(29)式は

$$m_i \ddot{U}_{id}^t + c_i \dot{U}_{id}^t + k_i U_{id}^t = -m_i k_s \ddot{U}_g \quad (30)$$

となる。

(30)式を、直接に数値積分するかまたはマトリックスモーダルアナリシスによって解けば、沈埋トンネル部質点の動的相対変位ベクトル U_{id}^t が求まる。 $\{U_{id}^t\}$ は次式のような

$$\{U_{id}^t\} = [U_x, U_y, U_z, U_{\theta x}, U_{\theta y}, U_{\theta z}]^T \quad (31)$$

6自由度をもつ変位ベクトルである。

なお、(22)、(23)、(24)、(25)式の $m_p, m_e, c_p, c_e, k_p, k_e$ は

m_p : 質量マトリックス

m_e : 付加質量マトリックス

c_p : 沈埋トンネル部減衰マトリックス

c_e : 沈埋トンネル部・表層地盤間の逸散減衰マトリックス

k_p : 剛性マトリックス

k_e : 沈埋トンネル部・表層地盤間のばねマトリックス

である。

(4) 換気塔部

換気塔の力学モデルを図-2(c)に示す。解法はII-2(3)沈埋トンネル部と同様である。各マトリックスおよび換気塔ロッキング・スウェイ時の座標系をそれぞれ下記および図-3に示す。(図-3参照)

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{p0} + m_{e0} & & & & & \\ & m_{p1} + m_{e1} & & & & 0 \\ & & m_{p2} + m_{e2} & & & \\ & & & \ddots & & \\ 0 & & & & m_{pn} + m_{en} & \\ & & & & & J_0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_0 + \sum_i \sum_j k_{ij} & -\sum_i k_{i1} & -\sum_i k_{i2} & \cdots & -\sum_i k_{in} & \sum_i \sum_j k_{ij} h_{ij} \\ -\sum_j k_{1j} & k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} & -\sum_j k_{1j} h_{1j} \\ -\sum_j k_{2j} & k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} & -\sum_j k_{2j} h_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} -\sum_j^n k_{nj} & k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} & -\sum_j^n k_{nj} h_{ij} \\ \sum_i^n \sum_j^n k_{ij} h_{ij} & -\sum_i^n k_{i1} h_{i1} & -\sum_i^n k_{i2} h_{i2} & \cdots & -\sum_i^n k_{in} h_{in} & k_\theta + \sum_i^n \sum_j^n k_{ij} h_{ij} \\ C_0 + \sum_i^n \sum_j^n C_{ij} & -\sum_i^n C_{i1} & -\sum_i^n C_{i2} & \cdots & -\sum_i^n C_{in} & \sum_i^n \sum_j^n C_{ij} h_{ij} \\ -\sum_j^n C_{1j} & C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} & -\sum_j^n C_{1j} h_{1j} \\ -\sum_j^n C_{2j} & C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} & -\sum_j^n C_{2j} h_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ -\sum_j^n C_{nj} & C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} & -\sum_j^n C_{nj} h_{nj} \\ \sum_i^n \sum_j^n C_{ij} h_{ij} & -\sum_i^n C_{i1} h_{i1} & -\sum_i^n C_{i2} h_{i2} & \cdots & -\sum_i^n C_{in} h_{in} & C_\theta + \sum_i^n \sum_j^n C_{ij} h_{ij} \end{bmatrix} \quad (34)$$

ここに m_{pn} : 質 量

m_{en} : 付加質量

J_0 : 地盤の付加慣性モーメントを含む慣性モーメント

k_0 : バネ常数

k_θ : 回転バネ常数

C_0 : 水平方向減衰係数 (換気塔質点・表層地盤質点間)

C_θ : 回転減衰係数 (換気塔質点・表層地盤質点間)

II-3 対象沈埋トンネル・周辺地盤

(1) 対象沈埋トンネル

解析の対象とした沈埋トンネルは図-1に示したようにその区間の両端にそれぞれ浮島側換気塔、羽田側換気塔が計画されているトンネルである。両換気塔は陸上トンネル部と沈埋トンネル部との接点に設けられており、長さ55m、幅47m、高さ約50mである。沈埋トンネル部は1960mであり、沈埋トンネル部エレメントは122.5mのエレメント16個より構成されている。その断面を図-4に示す。

(2) 動的解析モデル

設定した解析モデルは図-5に示すとおりである。DMモデルはほぼ1エレメントに1～2質点、SM-1モデルはほぼ1エレメントに1質点、SM-2モデルはほぼ1～2エレメントに1質点を配置した。三種類のモデルを設定した理由は質点分布の違いによる影響を予想したためである。DM、SM-1、SM-2の各モデルとも可撓性継手は9箇所を想定した。また当然のことながら、37の地盤質点から沈埋ト

ンネル部、換気塔部の各質点は影響を受けるので解析モデルは連成した系全体として構成した。なお、計算に用いた諸量を表-1~5に示す。

(3) 地盤諸定数

周辺地盤の地質概況を図-6に示す。周辺地盤の状況は海底面から下方に、概ね最上部層(R)、上部粘土層〔上部(Ucl①)、下部(Ucl②)〕、上部砂泥互層(Usm)、中部砂泥互層(Msm)、下部砂層(Ls)、下部礫層(Lcg)と続いており、ボーリング調査の結果による各層の平均的な地盤諸定数は表-6に示すとおりである。

この表に示した地盤のせん断弾性係数(変形係数)Gは、地震時に地盤に生じるせん断ひずみを沖積層で 10^{-4} 程度とした現場実験および室内実験から得られた次式によって計算した値である。

$$G = \frac{\gamma_t}{g} V_s^2 \quad (35)$$

γ_t : 土の湿潤単位体積重量 (t/m³)

V_s : せん断弾性波速度 (m/sec)

$$V_s = \begin{cases} 143 N^{0.0777} & \dots\dots\dots \text{沖積世粘性土} \\ 103 N^{0.211} & \dots\dots\dots \text{" 砂質土} \\ 172 N^{0.183} & \dots\dots\dots \text{洪積世粘性土} \\ 205 N^{0.125} & \dots\dots\dots \text{" 砂質土} \end{cases} \quad (36)$$

g : 重力加速度 (980 cm/sec²)

N : 標準慣入試験の打撃回数 (N値)

なお、耐震計算上の基盤面は下部礫層の下面に設定した¹²⁾また、減衰定数は0.2を仮定した。

II-4 入 力

(1) 地震動

地震動は基盤面において考慮した。入力に用いた地震動の波形は根室半島沖地震(1973, 6, 17, $M = 7.4$)の加速度波形とした。この波形のスペクトルを日向灘沖地震、土木研究所平均応答スペクトルと比較して図-7に示す。

継続時間は図-8の2~14秒の12秒間とした。最大加速度は水平方向 150 gal, 鉛直方向 75 galに正規化して用いた。積分の時間刻みは 0.02 秒とした。入力地震動の作用方向は軸方向およびこれに直交する水平、鉛直の合計3方向とした。

なお、参考として既往沈埋トンネル地震応答解析のための入力波形の実例を表-7に示す。また、静内橋地震動の諸特性については参考文献10)を参照されたい。

(2) 位 相 差

震源を発した地震動は基盤・表層地盤を伝播して沈埋トンネルに伝わる。この地震動は一般に考えられている同一・同時刻の地震動すなわち一様入力地震動とは異なって“位相のずれ”を生じていると考え

られる。この位相のずれを仮に相対的位置関係に伴う地震動の差異として捉えて、ここでは位相差と呼ぶことにする。

位相差は基盤面において考慮する。一般に地震動は基盤となる岩盤では 1,000 m/sec 以上の、また、表層地盤では 50～500 m/sec 程度の伝播速度で進行すると言われている。このような地震動を受けた沈埋トンネルが長大スパンの構造物であればあるほど地震動が到達する時刻の差異により沈埋トンネルの応答に少なからぬ影響があると言われている。また、沈埋トンネルを支持する表層地盤が各地点間において大きく異なっている場合には地震動の波形にも違いが生じる。しかしながら、表層地盤があまり極端に変化していない場合には、各地点間に入力する地震動の波形には大きな違いはないとして、入力地震動の時間遅れのみを考慮すればよい。このような場合を想定して、図-9に示すような左端の地盤質点1から右端の地盤質点*i*+1までの距離に比例した位相差を設けた。なお、地盤質点1～*i*+1間の時間遅れは次式のように表現できる。

$$\lambda_{ii} = \frac{l_i}{V_{sB}} \quad (37)$$

ここに、 λ_{ii} は地盤質点1～*i*+1間の時間遅れ(sec)、 l_i は地盤質点1から地盤質点*i*+1までの距離(m)、 V_{sB} は基盤面を伝播する見掛けのせん断弾性波速度(m/sec)である。また、各質点に関する局所時間座標系と全体時間座標系との関係は図-10に示すとおりであり、全体時間座標系による入力地震動の表現は次式のようになる。

$$\ddot{U}_i(t) = \begin{cases} 0 & t < \lambda_{ii} \\ \ddot{\bar{U}}_i(t - \lambda_{ii}) & t \geq \lambda_{ii} \end{cases} \quad (38)$$

$\ddot{U}_i$: 地盤質点*i*の人力地震動(全体座標系)

$\ddot{\bar{U}}_i$: " (局所座標系)

t : 全体座標系時刻

λ_{ii} : 時間遅れ

II-5 解析結果

(1) 計算項目

(A) 諸条件

1) 力学モデル

DMモデル D (沈埋トンネル質点数: 45)

SM-1モデル S₁ (" " : 35)

SM-2モデル S₂ (" " : 25)

2) 可撓性継手条件(換気塔・トンネルエレメント間可撓性継手)

比較的に柔な結合 柔 (表-2 参照)

比較的に剛な結合 剛 (トンネルエレメント以上の剛性)

上記の比較的な柔な結合の場合のバネ定数については、水平・鉛直方向のせん断バネ定数および軸回りの回転バネ定数についてはトンネルエレメント間可撓性継手バネ定数以上の値とし、軸方向引張バネ定数、水平・鉛直軸回りの回転バネ定数についてはそれ以下の値とした。既往の設計の事例から決めたものである。¹⁴⁾

また、比較的に剛に結合の場合については、トンネルエレメント以上の剛性とし、 10^{15} 以上の値を実際の計算に用いた。

3) 位 相 差

時間遅れ ㊦ ($v_{sB} = 300, 1000, 3000 \text{ m/sec}$)

時間遅れ ㊧ ($v_{sB} = \infty \text{ m/sec}$)

4) 地震波動の作用方向(入力地震動による加振方向)

軸 方 向

鉛 直 方 向

水 平 方 向 (沈埋トンネル軸に直角な水平方向)

(B) 計 算 値

1) 地盤モデル

剛 性 行 列

固有周期および固有ベクトル

刺激係数, 有効質量, 等

変位, 加速度, 等の応答値

2) 沈埋トンネルモデル

剛 性 行 列

固有周期および固有ベクトル

刺激係数, 有効質量, 等

断面力, 変位, 加速度, 等の応答値

(2) 計 算 結 果

(A) 図 表

計算結果の図表を以下に示す。

表-8: 各々の加振方向に対して、地盤のみの場合の各次数毎の固有周期, 刺激係数, 有効質量, 有効質量の比, 累加した有効質量の比(累加有効質量比)を示す。

図-11: 表-8に示した次数に対応する固有ベクトルを示す。

表-9: 各々の加振方向に対して、沈埋トンネルの着目した次数に対応する固有周期, 刺激係数, 有効質量, 有効質量の比, 累加した有効質量の比(累加有効質量比)を示す。

図-12: 表-9の着目した力学モデルおよび次数に対応する固有ベクトルを示す。

図-13~14: 地盤質点, DMモデル, SM-1モデル, SM-2モデルの最大応答変位および最大応答加速度の分布を示す。

表-10~11: 図13~14より沈埋トンネル部の絶対最大応答変位および絶対最大応答加速度を表にまとめて示す。

図-15: 沈埋トンネル部の各々の加振方向に対する次の着目した最大応答断面力を示す。

〔軸方向〕

軸力、曲げモーメント

〔水平・鉛直方向〕

曲げモーメント、ねじりモーメント、せん断力

表-12：沈埋トンネル部の絶対最大応答断面力を示す。

図-16：沈埋トンネル部の力学モデルによる軸方向と水平方向の可撓性継手の最大応答相対変位の比較を示す。

表-13：可撓性継手の最大応答相対変位および最大応答相対回転角を示す。

図-17：沈埋トンネル部の軸方向と鉛直方向の可撓性継手の最大応答相対変位と各モデルの質点数との関係を示す。

図-18：代表的モデルの代表的沈埋トンネル部質点における軸方向加振の場合の時刻歴応答変位（軸方向）を示す。

図-19：代表的モデルの代表的可撓性継手における軸方向加振の場合の時刻歴応答相対変位（軸方向）を示す。

図-20～21：換気塔の最大応答変位および最大応答加速度の分布を示す。なお、NODE No. は①～⑤とした。

表-14～15：図-20～21より換気塔の絶対最大応答変位および絶対最大応答加速度を表にまとめて示す。

図-22：換気塔の最大応答断面力の分布を示す。なお、曲げモーメントは換気塔の中立軸を基準とするそれぞれの内面曲げである。

表-16：換気塔の絶対最大応答断面力を表にまとめて示す。なお、曲げモーメントは換気塔軸を基準とするそれぞれの面内曲げである。

図-23：代表的モデル（SM-2）の代表的換気塔質点・周辺地盤質点の時刻歴応答変位および時刻歴応答加速度（いずれも鉛直方向）を示す。

図-24～25：位相差 $V_{sB} = 300 \text{ m/sec}$ (V_{300}), $1,000 \text{ m/sec}$ (V_{1000}), $3,000 \text{ m/sec}$ (V_{3000}) のそれぞれの入力に対する周辺地盤質点の最大応答変位、最大応答加速度を示す。

図-26：位相差入力に対する代表的モデル（SM-1）の沈埋トンネル部質点の最大応答変位及び可撓性継手最大応答相対変位を示す。

図-27：位相差入力に対する代表的モデル（SM-1）の沈埋トンネル部質点の最大応答加速度を示す。

図-28：位相差入力に対する代表的モデル（SM-1）の沈埋トンネル部の最大応答断面力を示す。

図-29～30：位相差入力に対する代表的モデル（SM-1）の換気塔質点の最大応答変位、最大応答加速度を示す。

図-31：位相差入力に対する代表的モデル（SM-1）の換気塔の最大応答断面力を示す。

(B) 固有値と固有ベクトル（表-8～9, 図-11～12）

着目した振動次数は図表のとおりである。これから次のことが判る。

周辺地盤

- (イ) 地盤のみの固有周期は沈埋トンネル部のそれよりも長い。
- (ロ) 1次の固有周期は水平方向の場合に最も長く地盤の場合で2.7秒程度、沈埋トンネルの場合で1秒程度である。
- (ハ) 軸方向、水平方向、鉛直方向のそれぞれの3～6, 5～10, 7～16の各次で近接する次数の刺激係数の絶対値に差が認められており並進運動が励起されている。
- (ニ) 1～2, 3～4の各次の固有モードの間には逆対称のモードを示している例もあり、着目した次数内でそれらよりも高い次数を無視し得ない場合もある。

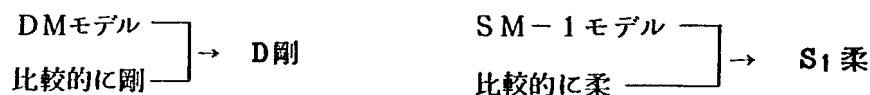
沈埋トンネル部・換気塔部

- (イ) 固有周期に及ぼす質点分布の影響は小さい。
- (ロ) 低次の振動は鉛直方向より軸方向及び水平方向において支配的である。
- (ハ) 可撓性継手条件の違いにより、低次の固有周期が顕著に変化する傾向が認められる。
- (ニ) 刺激係数の符号の違いなどから、可撓性継手条件の比較的に剛な結合の場合と柔な結合の場合において、少なからぬ差異が認められるものの、両者とも並進と回転を伴う運動が生じている。
- (ホ) SM-1モデルの軸方向の場合においては、1次と2次の固有モードはトンネル中央付近を中心とした逆対称のモードを成しており、それぞれに箇所別的に分離した振動をしていることが判る。
- (ヘ) 3次と4次のモードでは可撓性継手条件の影響により換気塔部付近に逆対称のモードが認められる。
- (ト) 5～6次のSM-1モデルの場合においては、羽田側の振動性状に違いが認められる。
- (チ) 水平方向の場合で、換気塔が低次の振動に影響を及ぼしたことは認められるが、高次の振動(11次程度の振動)では、特に、それが支配的であるとは言えない。
- (リ) 鉛直方向の振動は両換気塔間で卓越している。

(C) 各部の地震応答

1) 位相差 $V_{sB} = \infty$ m/sec の場合 (表-10～16, 図-13～23)

II-5の諸条件に基づいて計算した。力学モデル、可撓性継手条件を次の例にしたがった略号で示した図表もある。



また、比較のため、I章に述べた動的解析プログラムDAST-I(①)による値を示した。図表から次のことが判る。

周辺地盤

後述する沈埋トンネル部の図表に併せて示した。地盤のみの振動の場合とそれ程、違いが認められない。

沈埋トンネル部

(イ) 最大応答変位

① 各力学モデルとも、それ程、違いが認められない。

② 各力学モデルとも、陸上トンネル部で大きい。

③ 傾向として DAST-I による値 (I) よりも大きく、さらに、それよりも沈埋トンネル部質点で大きい。

(ロ) 絶対最大応答変位

軸方向、水平方向では、浮島側の陸上トンネル部において大きい傾向が認められており、鉛直方向では羽田側において大きい。

(ハ) 最大応答加速度

① 各力学モデルとも、それ程、違いが認められない。

② 地盤質点のそれよりほとんど大きい。

③ 水平方向の中央付近で大きい。

(ニ) 絶対最大応答加速度

三方向とも中央、側方で大きい。

(ホ) 最大応答断面力

① 軸力の可撓性継手条件、比較的柔な結合の場合において、質点 2, 3, 4, 5, 10, 11 (SM-1 モデル), 2, 3, 4, 9, (SM-2 モデル) で極度に小さくなっている。

② 軸方向の曲げモーメントで可撓性継手の影響が顕著である。

③ 水平方向の曲げモーメント及びせん断力で換気塔直近の質点での値が極度に大きくなっているのが目立つ。

(ヘ) 絶対最大応答断面力

軸力、曲げモーメント、ねじりモーメントとも傾向として側方、浮島側の陸上トンネル部で大きい。また、せん断力も同様である。

(ト) 可撓性継手最大応答相対変位・回転角

① 可撓性継手最大応答相対変位は、換気塔の結合条件を比較的に剛な結合とした場合に、沈埋トンネル部の両端のエレメントに設けられた可撓性継手 C, G に集中する傾向が認められる。

② 可撓性継手最大応答回転角は、軸方向より水平方向、鉛直方向で大きい。

時刻歴応答

(イ) 質点変位応答

① 浮島側の NODE No. 3, 11, 羽田側の NODE No. 25, 33 においてそれぞれ変位差が認められる。

② NODE No. 4 と 10, NODE No. 26 と 32 のそれぞれはほぼ同一位相である。

(ロ) 可撓性継手相対変位応答

① A と B, C 及び G, I と H とではほぼ位相が π だけずれている。

② 7~12 秒間で大きい応答を示している。

換気塔部

(イ) 最大応答変位

- ① 各力学モデルとも、それ程、違いが認められない。
- ② 羽田側と浮島側とでは、若干、羽田側で大きい傾向が認められる。

(ロ) 絶対最大応答変位

軸方向、水平方向では、それ程、違いが認められないが、鉛直方向では羽田側において大きい。

(ハ) 最大応答加速度

- ① 軸方向、水平方向、鉛直方向のいずれの方向においても最大値はNODE No. ①に生じている。
- ② (イ)の分布に比べて、換気塔の底部方向にいて減する傾向が明らかである。
- ③ 鉛直方向の分布では、NODE No. ③、④で屈曲しているのは明らかであり、換気塔の底面の軸方向のバネの影響が認められる。

(ニ) 絶対最大応答加速度

(ロ)の場合より、この場合の鉛直方向の軸方向、水平方向に対する割合が大きい。

(ホ) 最大応答断面力

- ① いずれの場合も最大値はNODE No. ③～⑤で大きい。
- ② ねじりモーメントは換気塔の底部で大きく、換気塔の上部(NODE No. ①～②)ではほとんど生じてない。

(ヘ) 絶対最大応答断面力

浮島側のトンネル軸回りの曲げモーメントが大きな値を示している。

時刻歴応答

(イ) 上部・底部変位応答

上部・底部ともほぼ同位相であり、回転運動より並進運動が支配的である。

(ロ) 底部・周辺地盤変位応答

周辺地盤より底部で大きい。

(ハ) 底部・周辺地盤加速度応答

位相のずれが若干認められる。

なお、上記(イ)、(ロ)、(ハ)の結果は一例としてSM-2モデルの図-23の結果から判るものであるが、ほかのモデルについても同様になることが確かめられた。

2) 位相差 $V_{AB} = 300, 1,000, 3,000 \text{ m/sec}$ の場合(図-24～31)

II-5の位相差の条件に基づいて計算した。前述のように、 $V_{AB} = 300 \text{ m/sec}$ を V_{300} 、 $1,000 \text{ m/sec}$ を V_{1000} 、 $3,000 \text{ m/sec}$ を V_{3000} とし、それぞれの略号で図に示した。計算の対象とした力学モデルはSM-1モデルである。また、計算は可撓性継手の条件を比較的に剛とした場合に限って行った。図から次のことが判る。

周辺地盤

- (イ) 最大応答変位, 最大応答加速度とも, V_{300} が V_{1000} , V_{3000} のいずれの場合よりも小さい。
- (ロ) V_{1000} , V_{3000} が ∞ すなわち $V_{LB} = \infty \text{ m/sec } (V_{\infty})$ の場合に収束する傾向がある。
- (ハ) V_{1000} , V_{3000} については質点 37 近傍で最大応答変位, 最大応答加速度とも増加する傾向がある。

沈埋トンネル部

(イ) 最大応答変位

- ① 周辺地盤と同じ傾向が認められる。
- ② 傾向として, いずれの可撓性継手においても, V_{1000} で大きいのは可撓性継手 E の V_{1000} である。
- ③ 加振方向別で最も小さいのは軸方向の場合である。

(ロ) 最大応答加速度

- ① 周辺地盤と同じ傾向が認められる。
- ② 軸方向, 水平方向の中央付近で大きい値を示している。
- ③ V_{300} の軸方向で小さいのが目立つ。

(ハ) 最大応答断面力

- ① せん断力 (水平方向, トンネル軸直角方向) で質点④～⑤, ⑤～⑩, ②⑥～②⑦, ②⑦～③②で大きく目立っているのが目立つ。換気塔の影響によるものであろう。
- ② 傾向として V_{∞} の場合がやや小さくなっている。
- ③ V_{300} , V_{1000} , V_{3000} の間では, 一定の傾向は認められない。

換気塔部

(イ) 最大応答変位

- ① 鉛直方向の浮島側を除いて V_{300} が最も小さい。
- ② V_{300} の場合が V_{∞} の場合よりも 0.2～0.4 倍程度小さい。
- ③ 各 NODE No. 位置ではほぼ同じ値を示しており, 回転運動より並進運動が支配的である。

(ロ) 最大応答加速度

- ① 浮島側の軸方向を除いて, V_{1000} , V_{3000} の分布が V_{∞} の分布に近似する傾向にある。これは入力方向と換気塔の振動特性の違いによると考えられる。
- ② (イ)と同様に回転運動より並進運動が支配的である。

(ハ) 最大応答断面力

- ① NODE No.③, ④, ⑤で大きな断面力が生じている。
- ② 軸力, 曲げモーメント (水平方向, トンネル軸回り), せん断力の NODE No.③,④,⑤の V_{300} の分布が(イ)の分布の傾向に近似している。

Ⅱ-6 考 察

(1) 固有値と固有ベクトル

1) 換気塔を含めた沈埋トンネル全体系の振動は、沈埋トンネルの各位置での周辺地盤の条件に支配される。固有値計算により得られた地盤のみの一次の固有周期は水平方向2.730秒、軸方向2.660秒、鉛直方向1.614秒であり、換気塔を含めた沈埋トンネル全体系の一次の固有周期より長い。したがって、沈埋トンネルと周辺地盤とは共振しない。

2) 換気塔と比較的に柔な結合にした場合と比較的に剛な結合にした場合とでは、換気塔を含めた沈埋トンネル全体系の固有周期にほとんど差は認められない。したがって、換気塔の可撓性継手条件の固有周期に及ぼす影響はほとんどない。

3) 軸方向、水平方向の低次モードの応答に及ぼす影響は大きい。これは並進運動が卓越していることにもより、また、各方向の累加有効質量比が7次まで95%以上を占めてることからも判る。

4) 換気塔直近の固有モードに着目してみると、低次の振動において、軸方向および水平方向に換気塔が相対的に大きな振動をしていることが判る。これは、換気塔が曲げ変形に対する剛性が大きく、かつ、質量も大きいために周辺地盤に追従したと言うよりはむしろ換気塔自身の振動による変形が卓越したと考えるべきである。

(2) 各部の地震応答

1) 沈埋トンネル部の質点分布による $V_{sB}=\infty\text{m/sec}$ の場合の影響をみたのが図-32である。例外はあるが、概ね、断面力比は0.4~2.5であり、着目した節点位置における質点数の違いによる断面力の変化は少ない。図中に、参考としてDAST-Iプログラムによる計算結果をIの欄に示している。このIの欄の値がほぼ1.0より小さくなる傾向があるのは解析モデルの設定に際して沈埋トンネルの質量を考慮するか否かの影響であり、DAST-Iプログラムによる結果はこの点、沈埋トンネルの質量を無視しており、結果として沈埋トンネルの断面力を過少に計算することとなった。沈埋トンネルの質量を考慮すれば計算断面力は増加する傾向があり、しかも、それは沈埋トンネルの端部の質点位置に集中する傾向のあることが図から明らかである。

なお、この場合の断面力比は、 S_1 柔の場合の断面力を基準とした値である。

2) 可撓性継手条件による沈埋トンネル部の $V_{sB}=\infty\text{m/sec}$ の場合の最大応答断面力の影響をみたのが図-33である。この場合の断面力の比は、1)と同様に S_1 柔の場合の断面力に対する S_1 剛または S_2 剛の場合の断面力の比と定義している。図から判るように、両者の断面力比は両者ともほぼ同じ値を示しており、また、浮島側および羽田側の換気塔直近で著しく減少しているのが目立つ。その範囲は比較的狭い範囲に限られているが、換気塔付近の数エレメントに関しては可成りの断面力の軽減がなされている。

なお、可撓性継手の最大応答相対変位は最大で10cm程度であり、十分、施工継手で吸収可能であるが、換気塔直近に集中する傾向があり、可撓性継手の設計上十分に留意すべき事項と考えられる。また、可撓性継手C、Gの時刻歴応答相対変位に極端な位相のずれが認められるとも興味深い。(図-19参照)

3) ほぼ1エレメントに1質点を配置した計算モデルによる入力地震動の位相差の影響をみたのが図-

34である。この場合の断面力比は、 $V_{sB}=300\text{m/sec}$ 、 $V_{sB}=1000\text{m/sec}$ 、 $V_{sB}=3000\text{m/sec}$ のそれぞれの場合の断面力に対する $V_{sB}=300\text{m/sec}$ の場合の断面力の比と定義している。図から判るように、軸力の質点 20、15 およびせん断力の質点 20 を例外とすれば、 $V_{sB}=1000$ 、 2000m/sec の場合の断面力比より $V_{sB}=300\text{m/sec}$ の場合の断面力比が大きくなっているのが判る。すなわち、 V_{sB} が小さくなれば、各質点に生ずる変位波形に位相差を生じ、その位相差が各質点間の相対変位を増加させ、結果として断面力を増加させることになると考えられる。このように入力地震動に位相差を考慮することは結果として断面力や変位を大きくさせる方向に働き、今後、さらに検討を進めるべき事項の一つであると考ええる。

4) 換気塔の振動は曲げ変形に対する剛性が大きいため、地盤の深さ方向の変位分布に対応して並進運動、回転運動が卓越するが、今回の計算結果では並進運動が卓越した。これは、換気塔の質量が比較的底部ダクト部に集中していたことにもよる。

表-1 断面諸定数-その1(陸上部・沈埋トンネル部)-

場 所 \ 諸定数	コンクリート 縦弾性係数 E(t/m ²)	コンクリート せん断弾性係数 G(t/m ²)	断 面 積 A(m ²)	断面二次モーメント		ねじり定数 J(m ⁴)
				水平方向 I _z (m ⁴)	鉛直方向 I _y (m ⁴)	
陸上部(浮島側)	2.70×10^6	1.17×10^6	205.88	43302	4097	12122
	2.70×10^6	1.17×10^6	185.58	30366	3624	10310
	2.70×10^6	1.17×10^6	177.53	28289	3437	9592
沈埋トンネル部	3.00×10^6	1.30×10^6	137.00	20655	1643	4995
陸上部(羽田側)	2.70×10^6	1.17×10^6	154.62	18452	2720	7430
	2.70×10^6	1.17×10^6	145.54	17119	2492	6820
	2.70×10^6	1.17×10^6	136.54	15817	2276	6223

表-2 可撓性継手バネ定数

バネの種類 \ バネ定数	バ ネ 係 数	
	エレメント間	エレメント・換気塔間
軸方向引張K _x (t/m)	2.68×10^5	1.79×10^5
鉛直方向せん断K _y (t/m)	1.00×10^5	8.91×10^8
水平方向せん断K _z (t/m)	1.00×10^5	1.00×10^5
軸回り回転K _{ox} (t・m/rad)	3.25×10^{10}	3.25×10^{10}
鉛直軸回り回転K _{oy} (t・m/rad)	1.50×10^8	1.00×10^8
水平軸回り回転K _{oz} (t・m/rad)	8.00×10^6	5.00×10^6

表-3 断面諸定数-その2(換気塔部)-

場 所 \ 諸定数 (浮島・羽田側)	縦弾性係数 E(t/m ²)	せん断弾性係数 G(t/m ²)	断 面 積 A (m ²)	断面二次モーメント		ねじり定数 J(m ⁴)
				軸 方 向 I _z (m ⁴)	直角方向 I _y (m ⁴)	
陸 上 部	2.70×10^6	1.17×10^6	229.00	92500	71600	123000
地 中 部	2.70×10^6	1.17×10^6	417.00	188000	122000	234000

表-4 バネ定数(換気塔部)

バネの種類 場所	バネ係数			
	浮島側		羽田側	
	地中上部	地中下部	地中上部	地中下部
軸方向せん断 K_x (t/m)	1.24×10^5	3.59×10^5	1.24×10^5	3.59×10^5
水平方向せん断 K_y (t/m)	—	8.92×10^6	—	8.92×10^6
鉛直方向引張 K_z (t/m)	1.46×10^5	3.59×10^5	1.46×10^5	3.59×10^5
軸回り回転 K_{ox} (t·m/rad)	—	1.62×10^9	—	1.62×10^9
鉛直軸回り回転 K_{oz} (t·m/rad)	—	2.69×10^9	—	2.69×10^9
ねじり K_R (t·m/rad)	—	1.71×10^8	—	1.71×10^8

表-5 換気塔下部慣性

慣性 場所	慣性モーメント (t·m·sec ²)	慣性質量 (t·sec ² /m)
浮島側	3.53×10^6 (2.33)	8.95×10^3
羽田側	3.53×10^6 (2.33)	8.95×10^3

注) () 内数値は SM-2 モデル

表-6 地盤諸定数

区分	地盤諸定数	湿潤単位体積重量 γ (t/m ³)	平均N値	せん断弾性波速度 V_s (m/sec)	変形係数 G (t/m ²)
沖積世	R (最上部層)	1.80	4	138	600 ~ 740 (地下水なし) 600 ~ 1,120 (地下水あり)
	Us (上部砂層)	1.85	10	167	—
	Ucl ① (上部粘土層上部)	1.50	0	110	1200
	Ucl ② (上部粘土層下部)	1.45	0	110	1160
	Usm(C) (上部砂泥互層)	1.70	2	151	2570
	Usm(S) (上部砂泥互層)	1.75	6	150	1490 ~ 1740
洪積世	Msm(C) (中部砂泥互層)	1.75	6	239	8450
	Msm(S) (中部砂泥互層)	1.80	25	307	13460 ~ 14330
	Ls (C) (下部砂層)	1.70	15	282	11480
	Ls (S) (下部砂層)	1.85	50	334	16670 ~ 17940
	Lcg (下部礫層)	1.90	50	334	基盤

注) Us は図-6 の範囲には存在しない。

表-7 沈埋トンネルの動的解析の人力波形の実例

沈埋トンネル 名 称	震 源 表	M	観 測 地 点 震 央 距 離	成分	Zmax gal	年月日	人力加速度 gal	人力波の 加振方向	選 定 理 由	備 考
扇島海底 トンネル (日本鋼管)	Imperial Valley	7.0	El Centro d: 50km	NS	320	1940 5.18	100	軸 直 角 軸 方 向	近距離・中規模	
	十 勝 沖	7.9	青森港 d: 200km	NS		1968 5.16	100	同 上	遠距離・大規模	
東京港トンネル (首都高速 道路公団)	Imperial Valley	7.0	El Centro d: 50km	NS	320	1940 5.18	水平 100 鉛直 100	同 上	近距離・中規模	
	十 勝 沖	7.9	青森港 d: 200km	NS		1968 5.16	水平 100 鉛直 100	同 上	遠距離・大規模	
東京港第2航路 横断トンネル (東 京 都)	Imperial Valley	7.0	El Centro d: 50km	NS	320	1940 5.18	100	同 上	近距離・中規模	
	十 勝 沖	7.9	八戸港 d: 190km	EW NS	188	1968 5.16	EW 100	同 上	遠距離・大規模	
東京港横断 トンネル (関 東 地 建)	根室半島沖	7.4	静内GL-40m d: 305km		41 (45)	1973 6.17	水平 150 鉛直 75	同 上	遠距離・大規模	計画中
	八丈島近海	7.2	観音崎 GL-80m d: 275km		10	1972 12.4	同 上	同 上	同 上	
	越 前 沖	6.9	岩屋 d: 153km		22	1963 3.27	同 上	同 上	中距離・中規模	
	多摩川下流	4.5	川崎 GL-127m d: 8km		6	1970 9.30	同 上	同 上	近距離・小規模	
台場トンネル (鉄 建 公 団)	Imperial Valley	7.0	El Centro d: 50km	NS	320	1940 5.18	170	同 上	近距離・中規模	
	十 勝 沖	7.9	八戸港 d: 8km	EW NS	188	1968 5.16	NS 80	同 上	遠距離・大規模	
川崎港海底 トンネル (運 輸 省)	Imperial Valley	7.0	El Centro d: 50km	NS	320	1940 5.18	100	同 上	慣例に従って	()内は検討用で あることを示す
	十 勝 沖	7.9	八戸港 d: 190km	EW	188	1968 5.16	100	同 上	大規模	
	八丈島近海	7.0	川崎 d: 280km	EW	42 46	1972 2.29	(100)	同 上	川崎での唯一の 記録	
	埼玉県中部 (東松山地震)	6.1	品川 d: 80km	EW	88	1968 7.1	(100)	同 上	近距離	
	宮 崎 沖	6.7	細島 d: 75km	NS	85	1970 7.26	(100)	同 上	地盤構成が似て いる	
大阪湾岸沈埋 トンネル (近 畿 地 建)	根室半島沖	7.4	静内GL-40m d: 305km		41	1973 6.17	水平 150 鉛直 75	同 上	遠距離・大規模	計画中
	日向灘沖	7.5	板島橋 d: 100km		134	1968 4.1	同 上	同 上	中距離・大規模	
東京湾岸多摩川 横断トンネル (関 東 地 建)	根室半島沖	7.4	静内GL-40m d: 305km		41	1973 6.17	同 上	同 上	遠距離・大規模	計画中
	日向灘沖	7.5	板島橋 d: 100km		134	1968 4.1	同 上	同 上	中距離・大規模	
東京湾岸川崎航 路横断トンネル (関 東 地 建)	根室半島沖	7.4	静内GL-40m d: 305km		41	1973 6.17	同 上	同 上	遠距離・大規模	
	日向灘沖	7.5	板島橋 d: 100km		134	1968 4.1	同 上	同 上	中距離・大規模	
備 考	シールドトンネルの動的解析の人力波形の実例 ¹³⁾									
シールドトンネル 名 称	震 源 地	M	観 測 地 点 震 央 距 離	成分	Zmax	年月日	設計加速度 gal	人 力 の 加振方向	選 定 理 由	備 考
三郷浄水場 送水路 (東京都水道局)	伊豆半島沖	6.9	川崎市浮島	NS	47	1974 5.9	150		遠距離・大規模 地盤条件が類似	昭和53年度内 着工予定
	八 丈 島 東 方 沖	7.2	川崎市浮島	NS	68	1972 12.4	150		遠距離・大規模 地盤条件が類似	
	根室半島沖	7.4	静内 d: 305km		41	1973 6.17	150		遠距離・大規模 沈埋トンネルの 比較	
台場トンネル (鉄 建 公 団)	十 勝 沖	7.9	八戸港 d: 8km	EW NS	188	1968 5.16		軸 直 角 軸 方 向		施工中

表-8 固有値計算結果 (地盤)

次数・固有値 作用方向 (加振方向)	次数	固有値				
		固有周期 (sec)	刺激係数	有効質量 (t)	有効質量の比 (%)	累加有効質量比 (%)
軸 方 向	1	2.660	2.5657	1739684.	22.359	22.359
	2	2.474	-2.6402	1653293.	21.249	43.609
	3	2.097	-3.8318	2817258.	36.209	79.818
	4	2.021	2.0332	828953.	10.654	90.473
	5	1.909	1.4909	487089.	6.260	96.733
	6	1.851	0.5058	49052.	0.630	97.364
	7	1.741	-0.8998	173422.	2.228	99.593
水 平 方 向	1	2.730	2.3253	1484681.	19.082	19.082
	2	2.760	-2.3063	1348289.	17.329	36.411
	3	2.269	-1.5615	440827.	5.665	42.077
	4	2.171	1.2885	283561.	3.644	45.721
	5	2.101	-3.6971	2773170.	35.642	81.364
	6	2.011	-0.4141	33376.	0.428	81.793
	7	1.931	-2.1008	1066941.	13.713	95.507
	8	1.874	-0.8624	166483.	2.139	97.646
	9	1.829	-0.7808	134341.	1.726	99.373
	10	1.785	0.1150	2969.	0.038	99.411
	11	1.735	-0.2656	16004.	0.205	99.617
鉛 直 方 向	1	1.614	1.9402	1137310.	14.617	14.617
	2	1.503	-2.0779	1172407.	15.068	29.686
	3	1.491	-1.4589	403772.	5.189	34.875
	4	1.399	1.0724	200556.	2.577	37.453
	5	1.357	0.4819	52014.	0.668	38.122
	6	1.261	0.4825	52859.	0.679	38.801
	7	1.239	0.5768	89473.	1.149	39.951
	8	1.225	-3.3938	2360749.	30.342	70.293
	9	1.197	-0.4050	30181.	0.387	70.681
	10	1.166	-2.0679	846603.	10.881	81.562
	11	1.146	-0.7253	106417.	1.367	82.930
	12	1.142	1.0740	224924.	2.890	85.821
	13	1.125	-1.4695	498101.	6.401	92.223
	14	1.110	-0.9512	196033.	2.519	94.743
	15	1.085	-1.0126	249004.	3.200	97.943
	16	1.068	0.7429	118613.	1.524	99.468
	17	1.051	0.0890	1599.	0.020	99.488
	18	1.034	0.2893	18106.	0.232	99.721

表-9 固有値計算結果(沈埋トンネル)

(a) 軸・水平方向

加振方向	次 数	固有周期					刺激係数					有効質量の比 (%)					累加有効質量比 (%)					備 考
		D剛	S ₁ 剛	S ₂ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 柔	D剛	S ₁ 剛	S ₂ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 柔	D剛	S ₁ 剛	S ₂ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 柔	D剛	S ₁ 剛	S ₂ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 柔	
軸 方 向	1	0.849	0.842	0.871	0.904	0.932	-4.06	3.88	-3.45	-2.97	2.84	35.6	36.6	36.2	24.6	25.6	35.6	36.6	36.2	24.6	25.6	
	2	0.803	0.806	0.823	0.827	0.853	4.06	3.84	3.41	-3.57	-3.23	31.8	30.8	32.5	26.0	27.3	67.5	67.3	68.7	50.6	52.9	
	3	0.663	0.663	0.665	0.714	0.740	-3.55	2.93	2.12	2.58	-1.75	32.0	32.1	31.0	14.8	8.85	99.5	99.5	99.7	65.4	61.8	
	4	0.614	0.612	0.613	0.679	0.697	-0.34	0.30	0.162	-2.76	-1.34	0.288	0.336	0.172	2.22	5.25	99.8	99.8	99.8	87.6	67.0	
	5	—	—	—	0.666	—	—	—	—	2.09	2.44	—	—	—	11.2	31.3	—	—	—	98.8	98.3	
	6	—	—	—	0.635	—	—	—	—	-0.593	0.55	—	—	—	1.15	1.62	—	—	—	99.95	99.94	
水 平 方 向	1	0.980	0.980	0.987	0.991	0.994	1.87	-1.88	-1.99	-1.57	-1.71	10.7	10.8	12.0	7.60	9.01	10.7	10.8	12.0	7.60	9.01	
	2	0.857	0.857	0.901	0.887	0.923	2.65	2.54	-2.18	-2.77	-2.35	12.9	12.7	12.1	14.6	14.1	23.6	23.5	24.1	22.2	23.1	
	3	0.843	0.845	0.878	0.859	0.893	3.32	3.25	-2.82	2.96	-2.57	21.8	21.4	21.1	15.5	16.5	45.4	44.9	45.3	37.7	39.7	
	4	0.812	0.813	0.821	0.826	0.836	-0.04	0.148	0.658	1.56	1.43	0.003	0.041	0.861	5.14	4.72	45.4	44.9	46.1	42.8	44.4	
	5	0.714	0.713	0.716	0.740	0.770	2.14	2.02	-1.63	0.624	-0.393	16.0	15.6	16.9	1.00	0.466	61.3	60.5	63.0	43.8	44.9	
	6	0.695	0.690	0.713	0.714	0.734	-0.268	1.72	1.30	2.05	0.325	0.178	9.96	5.84	16.0	0.227	61.5	70.5	68.9	59.8	45.1	
	7	0.694	0.690	0.712	0.704	0.720	1.98	0.083	-0.213	-0.556	1.53	7.66	0.025	0.352	0.728	10.5	69.2	70.5	69.2	60.6	55.6	
	8	0.682	0.681	0.683	0.692	0.715	-3.41	1.57	-0.247	0.178	1.24	25.2	9.12	6.435	0.119	6.66	94.4	79.6	69.6	60.7	62.3	
	9	0.681	0.680	0.682	0.689	0.715	-1.49	2.28	-2.03	1.88	-1.05	5.09	19.8	29.5	12.7	7.75	99.4	99.4	99.1	73.4	70.0	
	10	0.667	0.666	0.668	0.681	0.683	-0.229	0.096	0.017	2.20	0.569	0.132	0.035	0.00215	18.4	2.36	99.6	99.4	99.1	91.8	72.4	
	11	—	0.650	0.657	0.680	0.682	—	-0.183	-0.052	1.43	1.93	—	0.123	0.0165	7.78	27.0	—	99.5	99.2	99.6	99.4	
	12	—	—	0.647	—	0.668	—	—	0.327	0.029	—	—	—	0.440	—	0.0061	—	—	99.6	—	99.4	
	13	—	—	—	—	0.655	—	—	—	-0.137	—	—	—	—	—	0.133	—	—	—	—	99.5	

表-9 固有地計算結果(沈埋トンネル)

(b) 鉛 直 方 向

加振方向	番号	固有周期					刺激係数					有効質量の比(%)					累加有効質量比(%)					備考
		D剛	S ₁ 剛	S ₂ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 柔	D剛	S ₁ 剛	S ₂ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 柔	D剛	S ₁ 剛	S ₂ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 柔	D剛	S ₁ 剛	S ₂ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 柔	
鉛 直 方 向	1	0.417	0.417	0.416	0.417	0.416	-1.60	1.59	-1.03	-1.59	1.03	9.65	9.72	7.87	9.72	7.87	9.65	9.72	7.87	9.72	7.87	
	2	0.403	0.402	0.408	0.402	0.408	1.12	0.757	-0.961	-0.756	0.960	3.17	2.19	5.10	2.19	5.10	12.9	12.0	13.0	12.0	13.0	
	3	0.398	0.398	0.399	0.398	0.399	2.02	1.39	-1.08	-1.39	1.08	7.82	7.37	6.45	7.37	6.45	20.7	19.4	19.4	19.4	19.4	
	4	0.396	0.396	0.396	0.396	0.396	1.48	-1.46	1.08	1.46	-1.08	8.28	8.13	8.53	8.13	8.53	29.0	27.5	28.0	27.5	28.0	
	5	0.395	0.395	0.395	0.395	0.395	-1.93	1.35	-0.842	1.35	0.842	7.47	6.92	5.21	6.93	5.22	36.5	34.4	33.2	34.4	33.2	
	6	0.394	0.394	0.395	0.394	0.395	1.91	1.38	1.060	-1.38	-1.06	7.80	7.24	8.28	7.24	8.28	44.3	41.7	41.5	41.7	41.5	
	7	0.392	0.392	0.391	0.392	0.391	-1.57	-1.15	0.942	-1.15	0.942	5.90	5.07	6.54	5.07	6.54	50.1	46.8	48.0	46.8	48.0	
	8	0.291	0.388	0.320	0.388	0.320	-0.938	0.666	0.994	-0.666	0.995	1.69	1.70	4.04	1.70	4.06	54.6	48.8	52.0	48.8	52.1	
	9	0.289	0.387	0.318	0.387	0.319	-0.756	0.511	0.991	-0.511	-0.995	1.10	1.00	4.02	1.00	4.06	55.7	49.8	56.1	49.8	56.1	
	10	0.219	0.303	0.214	0.303	0.215	1.86	1.00	-2.17	-0.994	-2.22	6.26	3.83	11.9	3.78	12.3	62.1	53.7	68.4	53.6	68.4	
	11	0.219	0.301	0.210	0.302	0.210	-1.99	-1.00	1.85	0.994	-2.21	7.03	3.83	9.44	3.78	12.6	69.1	57.5	77.9	57.4	81.0	
	12	0.201	0.214	0.207	0.220	0.173	1.41	2.03	1.02	1.32	-0.703	3.35	8.12	3.25	3.87	1.74	72.5	65.6	81.1	61.3	82.8	
	13	0.201	0.213	0.170	0.217	0.170	1.42	1.85	1.62	-1.51	1.530	3.41	7.00	7.26	4.93	6.21	75.9	72.6	89.6	66.2	90.0	
	14	0.184	0.188	0.165	0.200	0.165	1.30	1.61	0.705	2.16	0.729	3.59	5.30	2.25	7.94	2.24	79.5	78.0	91.8	74.1	91.8	
	15	0.180	0.185	0.155	0.193	0.155	1.26	1.54	-1.01	1.94	1.04	3.31	4.70	3.65	7.27	3.87	82.8	82.7	95.5	81.4	95.7	
	16	0.170	0.170	0.143	0.170	0.143	-1.08	1.07	1.14	-1.04	-1.02	2.96	2.90	3.78	2.79	3.18	85.8	85.6	99.3	84.2	98.9	
	17	0.166	0.165	0.142	0.166	0.141	-1.06	-1.07	0.513	-1.08	0.862	5.37	5.41	0.462	5.46	1.12	91.2	91.0	99.999	89.7	99.9996	
	18	0.145	0.151		0.162		1.24	-0.584	—	-0.599	—	4.96	1.07	—	1.10	—	97.1	92.1	—	90.8	—	
	19	0.143	0.145		0.157		0.721	-1.24	—	-0.602	—	1.57	5.00	—	1.19	—	98.7	97.1	—	92.0	—	
	20	0.141	0.143		0.145		0.906	0.714	—	1.28	—	1.34	1.54	—	5.39	—	99.995	98.7	—	97.4	—	
	21		0.141		0.143		—	0.908	—	0.673	—	—	1.34	—	1.43	—	—	99.996	—	98.8	—	
	22				0.141		—	—	—	0.878	—	—	—	—	1.22	—	—	—	—	99.9996	—	

表-10 沈埋トンネル部の絶対最大応答変位

トンネル各部・加振方向		絶対最大応答変位(cm)	地盤質点	D 剛	S ₁ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 剛	S ₂ 柔	(地盤のみの振動)
沈埋トンネル部(中央)	軸	22.9	24.6	24.7	24.7	24.7	24.7	24.7	21.9
	水平	23.6	25.6	25.7	25.7	25.7	25.4	25.4	22.8
	鉛直	5.3	5.6	5.7	5.7	5.7	5.6	5.6	5.0
沈埋トンネル部(側方)	軸	25.6	26.1	26.3	26.0	26.0	26.3	26.8	21.8
	水平	26.5	25.8	25.4	26.3	26.3	27.1	27.4	24.1
	鉛直	7.9	6.6	6.8	6.8	6.8	7.0	7.0	6.6
陸上トンネル部(浮島側)	軸	27.2	26.5	26.4	29.9	29.9	27.0	30.5	25.7
	水平	27.1	31.7	31.7	31.4	31.4	31.6	31.3	25.4
	鉛直	7.6	7.5	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.4
陸上トンネル部(羽田側)	軸	26.9	26.6	26.8	28.2	28.2	26.5	28.5	26.0
	水平	27.4	28.8	28.8	28.9	28.9	28.8	28.8	25.9
	鉛直	8.3	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.4

表-11 沈埋トンネル部の絶対最大応答加速度

トンネル各部・加振方向		絶対最大応答加速度(m/sec ²)	地盤質点	D 剛	S ₁ 剛	S ₁ 柔	S ₂ 剛	S ₂ 柔
沈埋トンネル部(中央)	軸	2.51	3.31	3.31	3.31	3.31	3.28	3.28
	水平	2.56	3.75	3.75	3.74	3.73	3.60	3.60
	鉛直	1.29	1.46	1.46	1.47	1.47	1.46	1.46
沈埋トンネル部(側方)	軸	2.27	2.78	2.78	2.30	3.06	3.03	3.06
	水平	2.46	3.75	3.75	3.74	3.73	3.60	3.60
	鉛直	1.37	1.48	1.48	1.46	1.46	1.40	1.40
陸上トンネル部(浮島側)	軸	2.16	2.35	2.35	2.33	2.48	2.42	2.60
	水平	2.00	2.55	2.55	2.56	2.56	2.54	2.52
	鉛直	1.35	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
陸上トンネル部(羽田側)	軸	1.89	2.04	2.04	2.02	2.04	2.06	2.08
	水平	1.88	1.94	1.94	1.94	1.98	2.04	2.08
	鉛直	1.34	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27

表-12 沈埋トンネル部の絶対最大応答断面力

力学モデル トンネル各部・ 断面力・加振方向			D 剛	S ₁ 柔	S ₁ 剛	S ₂ 柔	S ₂ 剛	I ^{注)}
沈埋トンネル部 (中央)	軸 力 (t)		17,670	19,127	18,619	20,169	19,743	15,496
	曲げモーメント (t・m)	水平	108,617	119,771	119,781	65,345	65,322	75,641
		鉛直	5,372	4,891	4,891	682	68	4,728
	ねじりモーメント (t・m)		488	320	327	328	322	1,441
	せん断力 (t)	水平	1,238	1,223	1,224	356	357	742
		鉛直	112	52	53	4	4	34
沈埋トンネル部 (側方)	軸 力 (t)		35,718	19,876	39,036	17,027	38,899	15,516
	曲げモーメント (t・m)	水平	236,441	167,341	287,397	160,202	267,977	134,413
		鉛直	48,029	5,017	19,483	3,867	25,672	11,786
	ねじりモーメント (t・m)		1,702	1,942	1,993	2,358	2,567	1,388
	せん断力 (t)	水平	2,833	1,246	2,800	957	2,162	1,108
		鉛直	1,132	59	175	38	185	90
陸上トンネル部 (浮島側)	軸 力 (t)		37,462	14,631	39,070	14,315	38,043	7,749
	曲げモーメント (t・m)	水平	341,254	237,209	347,817	201,140	335,945	111,553
		鉛直	64,176	40,775	75,695	28,760	70,151	11,402
	ねじりモーメント (t・m)		3,849	2,664	3,818	4,413	6,228	407
	せん断力 (t)	水平	3,210	2,308	3,402	2,570	3,515	1,253
		鉛直	1,886	768	2,152	366	1,395	80
陸上トンネル部 (羽田側)	軸 力 (t)		32,381	11,028	30,700	11,347	34,623	7,167
	曲げモーメント (t・m)	水平	214,560	110,735	157,536	120,286	212,309	63,092
		鉛直	31,477	9,025	26,185	6,944	25,063	5,674
	ねじりモーメント (t・m)		82	56	79	654	877	382
	せん断力 (t)	水平	1,997	1,187	2,107	1,104	1,836	602
		鉛直	426	114	352	91	315	77

注) 動的解析用電算プログラム DAST-1 による結果

表-13 可撓性継手最大応答相対変位・回転角

(a) 可撓性継手最大応答相対変位

(単位: cm)

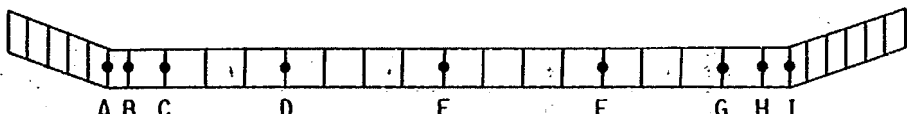
力学モデル 可撓性継手 加振方向		I	D 剛	S ₁ 柔	S ₁ 剛	S ₂ 柔	S ₂ 剛
A	軸	0.85		7.18		7.16	
	水 平	0.58		2.31		2.57	
	鉛 直	0.00		0.00		0.00	
B	軸	0.87		6.56		6.74	
	水 平	0.13		0.73		0.72	
	鉛 直	0.00		0.00		0.00	
C	軸	3.16	8.32	4.14	8.05	4.17	8.10
	水 平	0.57	1.12	0.56	0.69	0.62	0.68
	鉛 直	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04
D	軸	2.63	2.91	2.68	2.86	2.83	2.85
	水 平	0.18	0.50	0.52	0.52	0.36	0.36
	鉛 直	0.00	0.05	0.05	0.05	0.00	0.01
E	軸	2.97	3.04	2.86	2.86	2.06	2.05
	水 平	0.38	0.40	0.35	0.35	0.30	0.30
	鉛 直	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00
F	軸	2.22	3.34	3.11	3.79	3.23	4.12
	水 平	0.72	1.11	1.16	1.17	0.66	0.71
	鉛 直	0.00	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01
G	軸	3.45	9.19	4.06	9.24	3.92	7.54
	水 平	0.62	1.92	0.64	2.10	0.96	1.00
	鉛 直	0.02	0.45	0.02	0.17	0.02	0.04
H	軸	0.88		6.08		6.67	
	水 平	0.06		0.64		0.65	
	鉛 直	0.00		0.00		0.00	
I	軸	0.78		5.99		6.04	
	水 平	0.28		1.19		1.10	
	鉛 直	0.00		0.00		0.00	
備考	可撓性継手配置図 						

表-13 可撓性継手最大応答相対変位・回転角

(b) 最大応答相対回転角

(単位: rad)

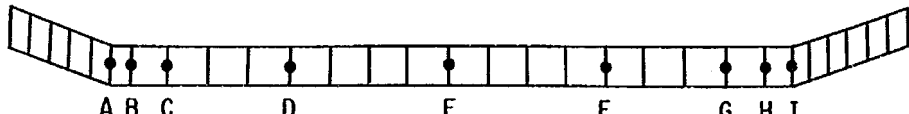
力学モデル 可撓性継手 加振方向		I	D 剛	S ₁ 柔	S ₁ 剛	S ₂ 柔	S ₂ 剛
A	軸	1.08×10^{-8}		8.20×10^{-8}		1.36×10^{-7}	
	水平	7.02×10^{-5}		3.77×10^{-4}		2.47×10^{-4}	
	鉛直	4.25×10^{-5}		1.77×10^{-4}		2.17×10^{-4}	
B	軸	1.07×10^{-8}		5.98×10^{-8}		7.26×10^{-8}	
	水平	2.62×10^{-5}		3.04×10^{-4}		4.90×10^{-4}	
	鉛直	3.81×10^{-5}		1.65×10^{-4}		2.18×10^{-4}	
C	軸	1.07×10^{-8}	3.34×10^{-8}	1.59×10^{-8}	1.74×10^{-8}	1.84×10^{-8}	1.86×10^{-8}
	水平	3.37×10^{-4}	3.69×10^{-4}	4.02×10^{-4}	4.02×10^{-4}	3.90×10^{-4}	4.29×10^{-4}
	鉛直	2.33×10^{-4}	2.87×10^{-4}	1.93×10^{-4}	2.51×10^{-4}	1.71×10^{-4}	2.48×10^{-4}
D	軸	3.99×10^{-8}	4.50×10^{-9}	6.47×10^{-9}	5.37×10^{-9}	9.98×10^{-9}	9.00×10^{-9}
	水平	1.33×10^{-4}	1.41×10^{-4}	1.39×10^{-4}	1.39×10^{-4}	2.06×10^{-4}	2.08×10^{-4}
	鉛直	1.13×10^{-4}	1.43×10^{-4}	1.44×10^{-4}	1.44×10^{-4}	6.29×10^{-5}	6.30×10^{-5}
E	軸	4.01×10^{-8}	4.44×10^{-9}	6.60×10^{-9}	5.44×10^{-9}	1.01×10^{-8}	9.14×10^{-9}
	水平	8.70×10^{-5}	1.23×10^{-4}	1.37×10^{-4}	1.37×10^{-4}	1.27×10^{-4}	1.27×10^{-4}
	鉛直	4.12×10^{-5}	4.54×10^{-5}	4.73×10^{-5}	4.72×10^{-5}	2.98×10^{-5}	2.98×10^{-5}
F	軸	4.33×10^{-8}	7.79×10^{-9}	1.02×10^{-8}	9.82×10^{-9}	9.44×10^{-9}	1.01×10^{-8}
	水平	8.42×10^{-5}	1.18×10^{-4}	1.21×10^{-4}	1.21×10^{-4}	1.30×10^{-4}	1.31×10^{-4}
	鉛直	5.53×10^{-5}	5.07×10^{-5}	7.39×10^{-5}	7.39×10^{-5}	2.94×10^{-5}	2.93×10^{-5}
G	軸	5.46×10^{-9}	3.94×10^{-8}	4.78×10^{-8}	4.13×10^{-8}	1.89×10^{-8}	2.08×10^{-8}
	水平	3.23×10^{-4}	2.39×10^{-4}	3.23×10^{-4}	2.50×10^{-4}	3.47×10^{-4}	3.75×10^{-4}
	鉛直	2.39×10^{-4}	2.21×10^{-4}	1.91×10^{-4}	2.44×10^{-4}	1.73×10^{-4}	2.72×10^{-4}
H	軸	1.01×10^{-8}		4.78×10^{-8}		6.10×10^{-8}	
	水平	1.36×10^{-5}		3.05×10^{-4}		4.55×10^{-4}	
	鉛直	5.31×10^{-5}		1.67×10^{-4}		2.58×10^{-4}	
I	軸	9.89×10^{-9}		1.71×10^{-9}		2.01×10^{-8}	
	水平	3.44×10^{-5}		2.64×10^{-4}		2.59×10^{-4}	
	鉛直	6.99×10^{-5}		1.01×10^{-4}		1.31×10^{-4}	
備考	可撓性継手配置図 						

表-14 換気塔部の絶対最大応答変位

(単位: t・m)

換気塔	I字モデル 加振方向 NODE NO.	D 剛			S1 柔			S1 剛			S2 柔			S2 剛		
		水 平		鉛 直	水 平		鉛 直	水 平		鉛 直	水 平		鉛 直	水 平		鉛 直
		トンネル 軸	トンネル 軸 直 角		トンネル 軸	トンネル 軸 直 角		トンネル 軸	トンネル 軸 直 角		トンネル 軸	トンネル 軸 直 角				
浮島側	①	26.2	26.4	6.01	26.2	27.1	6.18	25.9	26.7	6.19	27.1	27.9	6.23	26.6	27.6	6.23
	②	26.1	26.3	6.00	26.1	27.0	6.18	25.9	26.5	6.19	27.1	27.8	6.23	26.5	27.4	6.23
	③	26.0	26.0	6.00	26.0	26.6	6.18	25.8	26.2	6.19	26.8	27.4	6.23	26.3	27.1	6.23
	④	26.0	25.9	6.00	26.0	26.5	6.17	25.8	26.1	6.17	26.7	27.3	6.21	26.3	27.0	6.22
	⑤	25.9	25.7	5.95	25.9	26.3	6.12	25.7	25.9	6.13	26.6	27.0	6.16	26.2	26.7	6.17
羽田側	①	26.3	26.7	6.87	26.1	27.2	6.95	26.4	26.8	6.95	26.6	27.7	6.99	26.2	27.3	6.99
	②	26.2	26.6	6.87	26.1	27.1	6.95	26.4	26.7	6.95	26.5	27.6	6.98	26.1	27.2	6.98
	③	26.2	26.3	6.87	26.0	26.8	6.95	26.3	26.4	6.95	26.3	27.3	6.98	26.0	26.9	6.98
	④	26.1	26.3	6.86	26.0	26.7	6.94	26.3	26.4	6.94	26.3	27.3	6.98	26.0	26.9	6.98
	⑤	26.1	26.1	6.82	26.0	26.5	6.90	26.3	26.2	6.90	26.2	27.0	6.98	25.8	26.7	6.93

表-15 換気塔部の絶対最大応答加速度

(単位: m/sec²)

換気塔	I字モデル 加振方向 NODE No.	D 剛			S1 柔			S1 剛			S2 柔			S2 剛		
		水 平		鉛 直	水 平		鉛 直	水 平		鉛 直	水 平		鉛 直	水 平		鉛 直
		トンネル 軸	トンネル 軸直角		トンネル 軸	トンネル 軸直角		トンネル 軸	トンネル 軸直角		トンネル 軸	トンネル 軸直角				
浮島側	①	2,365	2,257	1,174	2,405	2,293	1,185	2,345	2,245	1,185	2,533	2,422	1,191	2,443	2,377	1,192
	②	2,359	2,243	1,174	2,400	2,278	1,185	2,340	2,231	1,185	2,521	2,405	1,191	2,435	2,361	1,192
	③	2,345	2,207	1,174	2,388	2,240	1,185	2,325	2,195	1,185	2,491	2,359	1,191	2,411	2,318	1,192
	④	2,343	2,198	1,172	2,385	2,230	1,184	2,322	2,186	1,183	2,483	2,348	1,189	2,406	2,307	1,190
	⑤	2,335	2,170	1,167	2,375	2,202	1,174	2,315	2,160	1,176	2,460	2,314	1,182	2,388	2,275	1,182
羽田側	①	2,046	2,011	1,173	2,048	2,036	1,183	2,033	2,007	1,183	2,114	2,128	1,188	2,086	2,091	1,187
	②	2,044	2,000	1,172	2,046	2,025	1,183	2,030	1,997	1,183	2,106	2,115	1,187	2,079	2,078	1,187
	③	2,035	1,967	1,172	2,037	1,991	1,183	2,023	1,964	1,183	2,082	2,076	1,187	2,059	2,041	1,187
	④	2,034	1,963	1,172	2,036	1,987	1,182	2,022	1,960	1,182	2,079	2,071	1,186	2,056	2,037	1,186
	⑤	2,029	1,943	1,162	2,030	1,964	1,176	2,017	1,939	1,176	2,063	2,045	1,179	2,043	2,012	1,179

表-16 換気塔部の絶対最大応答断面力

(a) 軸力・せん断力

(単位: t)

力学モデル	換気塔 加振方向 断面力 N O D E N O .	浮 島 側			羽 田 側		
		軸	水 平		軸	水 平	
		軸 力	曲げモーメント		軸 力	曲げモーメント	
			トンネル軸 回 り	トンネル軸 直 角		トンネル軸 回 り	トンネル軸 直 角
D 剛	①-②	821	1,625	1,582	816	1,425	1,386
	②-③	821	1,625	1,564	816	1,426	1,397
	③-④	28,027	5,669	4,204	27,216	6,497	2,156
	④-⑤	38,503	23,116	20,762	37,209	19,769	17,360
S1 柔	①-②	829	1,645	1,633	828	1,402	1,470
	②-③	829	1,671	1,613	828	1,426	1,434
	③-④	33,678	5,099	5,908	32,708	4,162	4,975
	④-⑤	44,067	23,068	21,949	43,090	19,417	18,647
S1 剛	①-②	829	1,611	1,593	828	1,391	1,446
	②-③	829	1,629	1,574	828	1,416	1,441
	③-④	34,328	4,576	4,280	32,582	7,161	3,668
	④-⑤	44,717	22,343	20,581	42,981	20,065	17,553
S2 柔	①-②	834	1,723	1,726	830	1,411	1,522
	②-③	834	1,753	1,692	830	1,448	1,501
	③-④	37,453	7,093	8,373	35,361	3,726	7,298
	④-⑤	47,899	25,212	24,588	45,743	20,171	20,528
S2 剛	①-②	834	1,671	1,676	830	1,378	1,501
	②-③	834	1,688	1,663	830	1,438	1,465
	③-④	37,820	5,954	7,218	35,366	5,297	5,015
	④-⑤	48,265	23,984	23,471	45,748	19,284	19,350

表-16 換気塔部の絶対最大応答断面力

(b) ねじり・曲げモーメント

(単位: t・m)

力学モデル	断 面 力 N O D E N O.	浮 島 側			羽 田 側		
		軸	水 平		軸	水 平	
		ね じ り	曲 げ		ね じ り	曲 げ	
			トンネル軸 回 り	トンネル軸 直 角		トンネル軸 回 り	トンネル軸 直 角
D 剛	①—②	—	63 9,429	0 333	—	64 8,380	0 378
	②—③	—	9,334 34,198	333 1,215	—	8,435 33,294	378 1,499
	③—④	120,306	34,541 50,932	362,378 360,431	97,918	33,826 38,353	396,205 395,165
	④—⑤	120,305	56,153 307,376	369,621 363,944	97,918	42,717 252,773	405,480 399,781
S1 柔	①—②	—	129 9,675	2 316	—	162 8,666	1 413
	②—③	—	9,471 35,120	318 1,157	—	8,406 33,928	413 1,641
	③—④	108,090	35,619 58,924	291,095 289,962	81,189	34,732 44,888	369,862 369,150
	④—⑤	108,090	63,987 329,218	298,062 294,965	81,189	48,602 274,227	380,135 376,358
S1 剛	①—②	—	108 9,459	2 306	—	160 8,524	0 368
	②—③	—	9,293 34,315	309 1,123	—	8,287 33,457	368 1,463
	③—④	120,466	33,920 50,675	331,314 329,540	93,743	31,608 39,183	364,629 363,645
	④—⑤	120,465	55,477 304,046	338,453 333,287	93,742	42,648 255,019	374,013 368,621
S2 柔	①—②	—	142 10,215	125 10,462	—	124 9,010	174 8,633
	②—③	—	10,066 36,963	10,666 38,535	—	8,758 35,484	9,050 34,821
	③—④	56,656	38,427 78,681	37,562 65,704	49,671	34,951 50,026	35,632 43,456
	④—⑤	56,656	78,153 375,417	72,527 377,595	49,671	54,155 302,542	48,848 292,831
S2 剛	①—②	—	66 9,990	144 10,120	—	138 8,875	222 8,481
	②—③	—	9,861 36,305	10,328 37,133	—	8,655 34,730	8,900 34,494
	③—④	119,389	37,768 66,488	16,107 7,708	99,578	33,828 44,318	11,489 12,996
	④—⑤	119,389	72,426 355,958	13,041 303,250	99,578	48,715 282,838	17,245 250,524

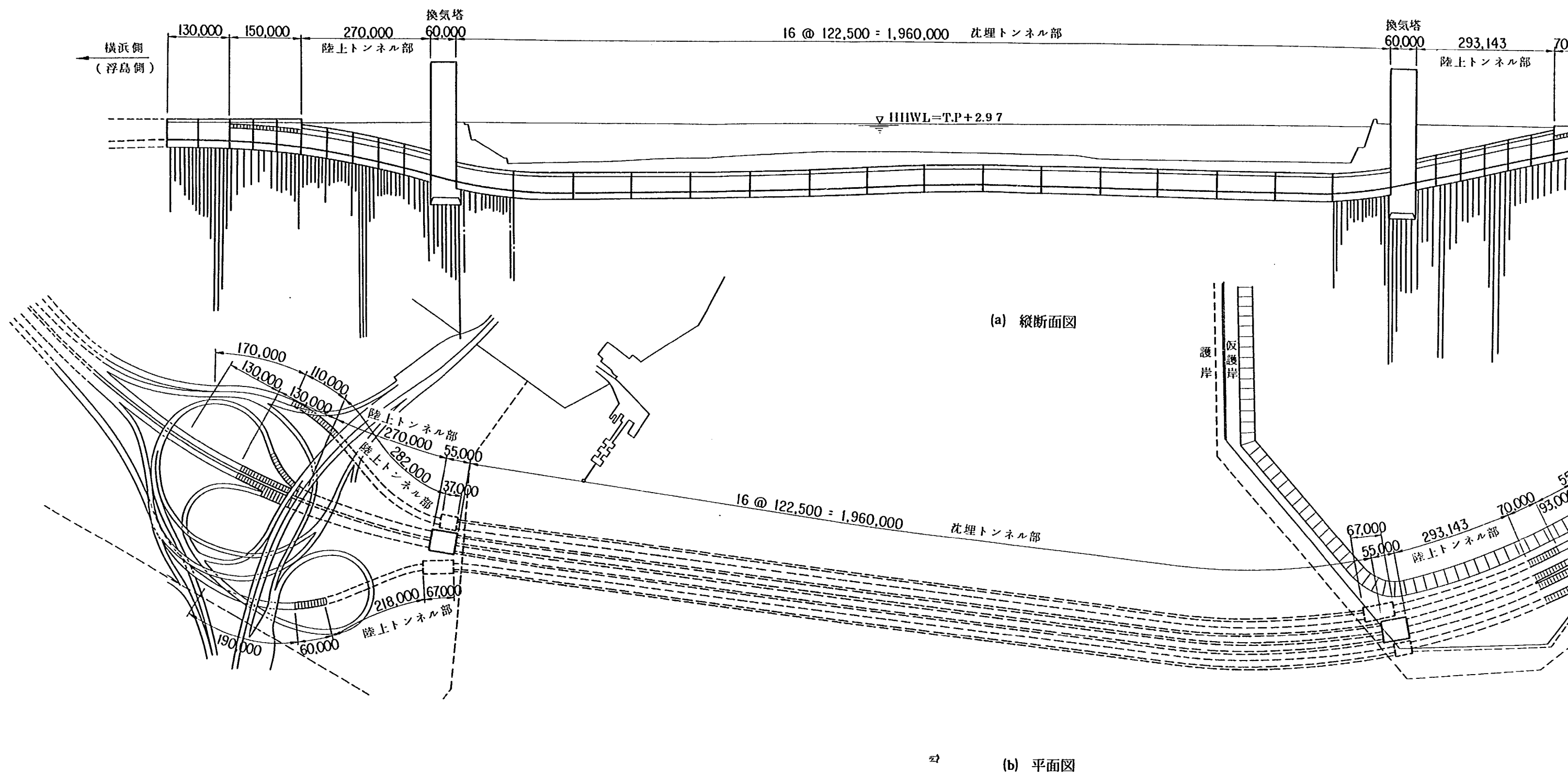


図-1 対象沈埋トンネル一般図(単位:mm)

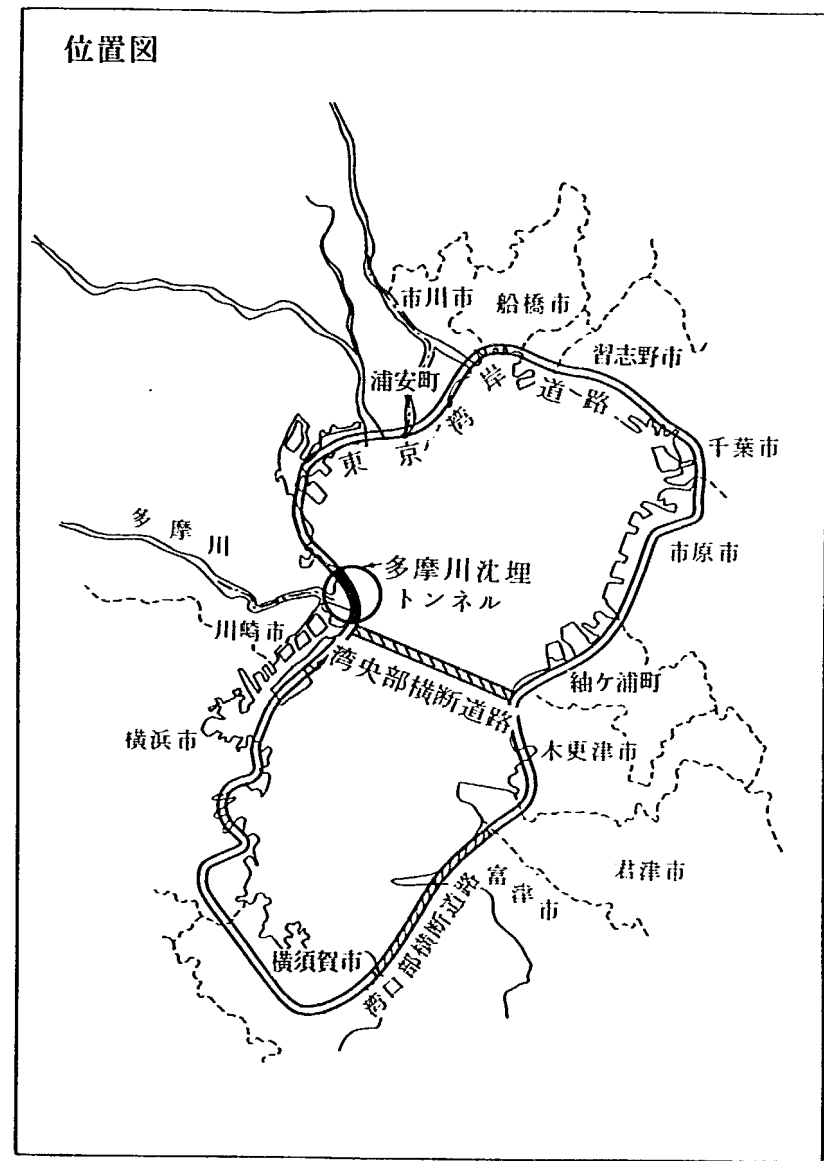
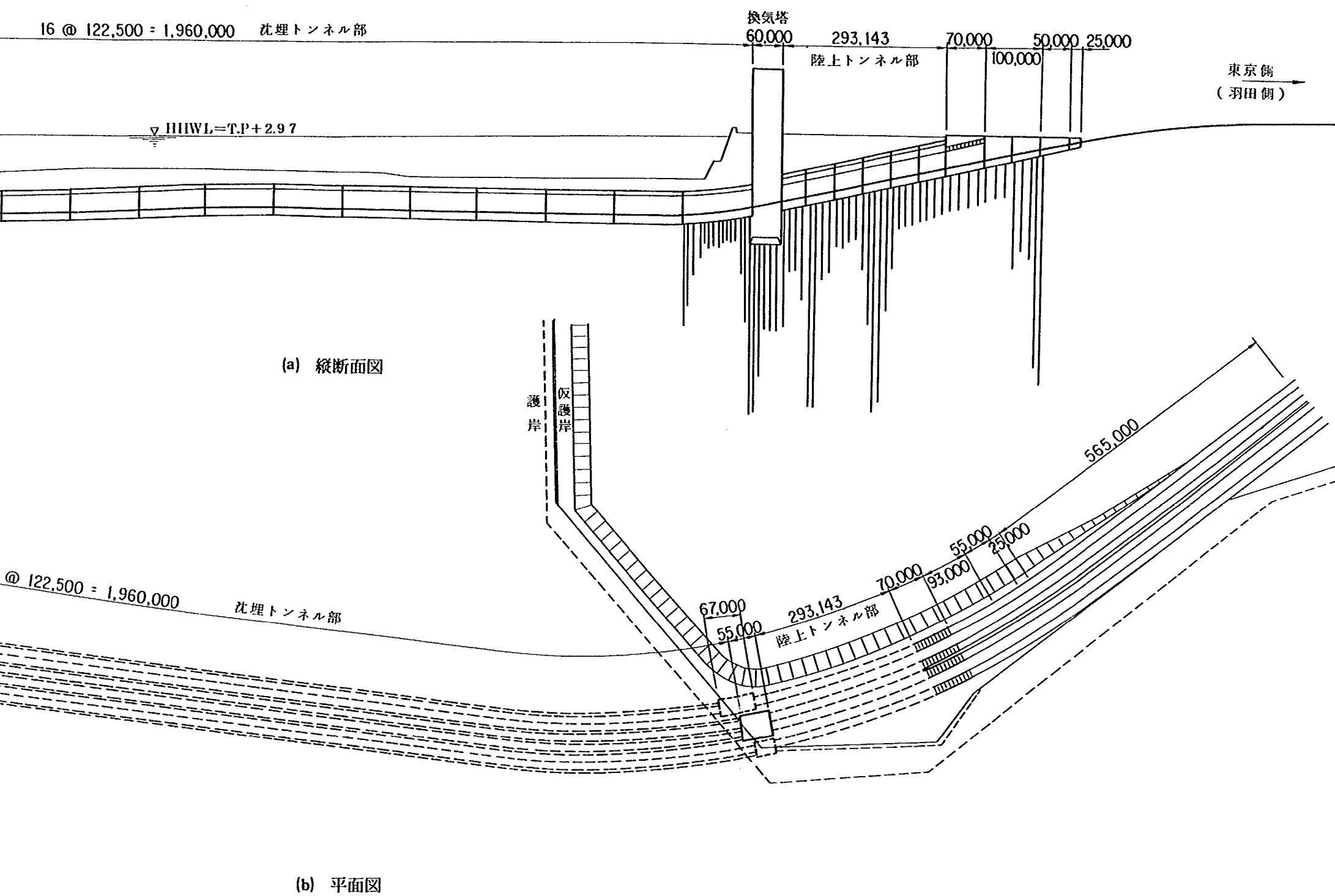


図-1 対象沈埋トンネル一般図(単位:mm)

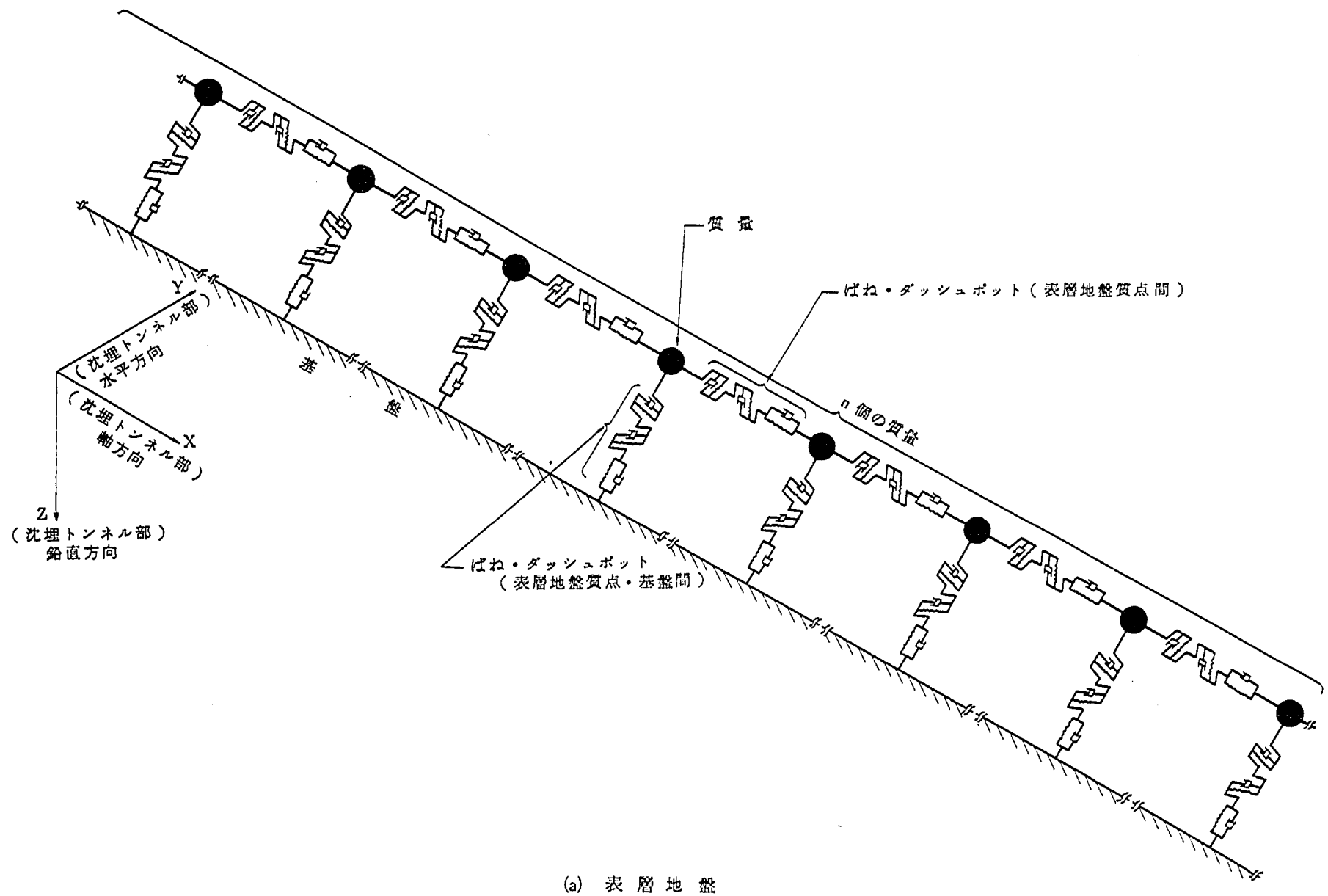
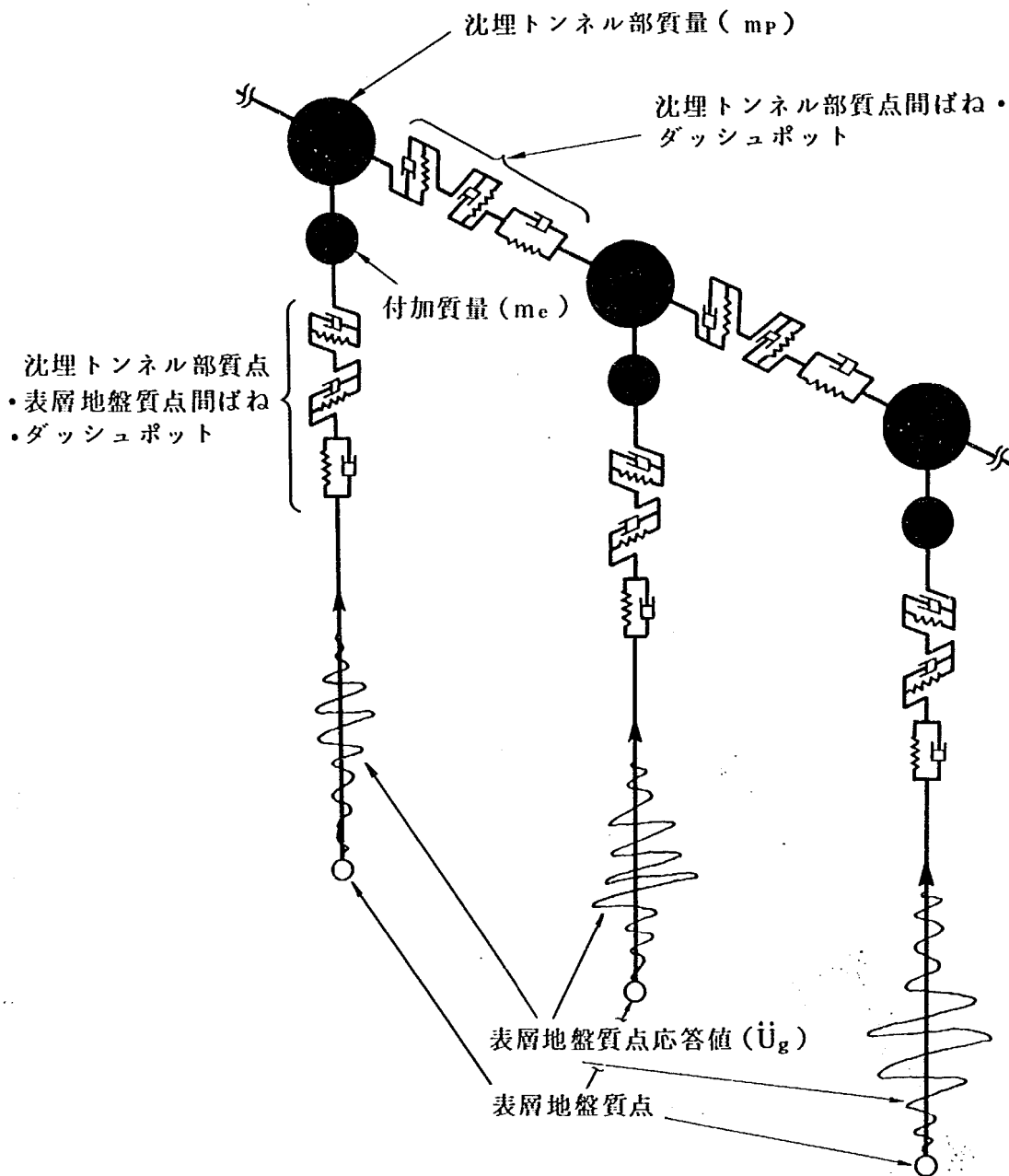
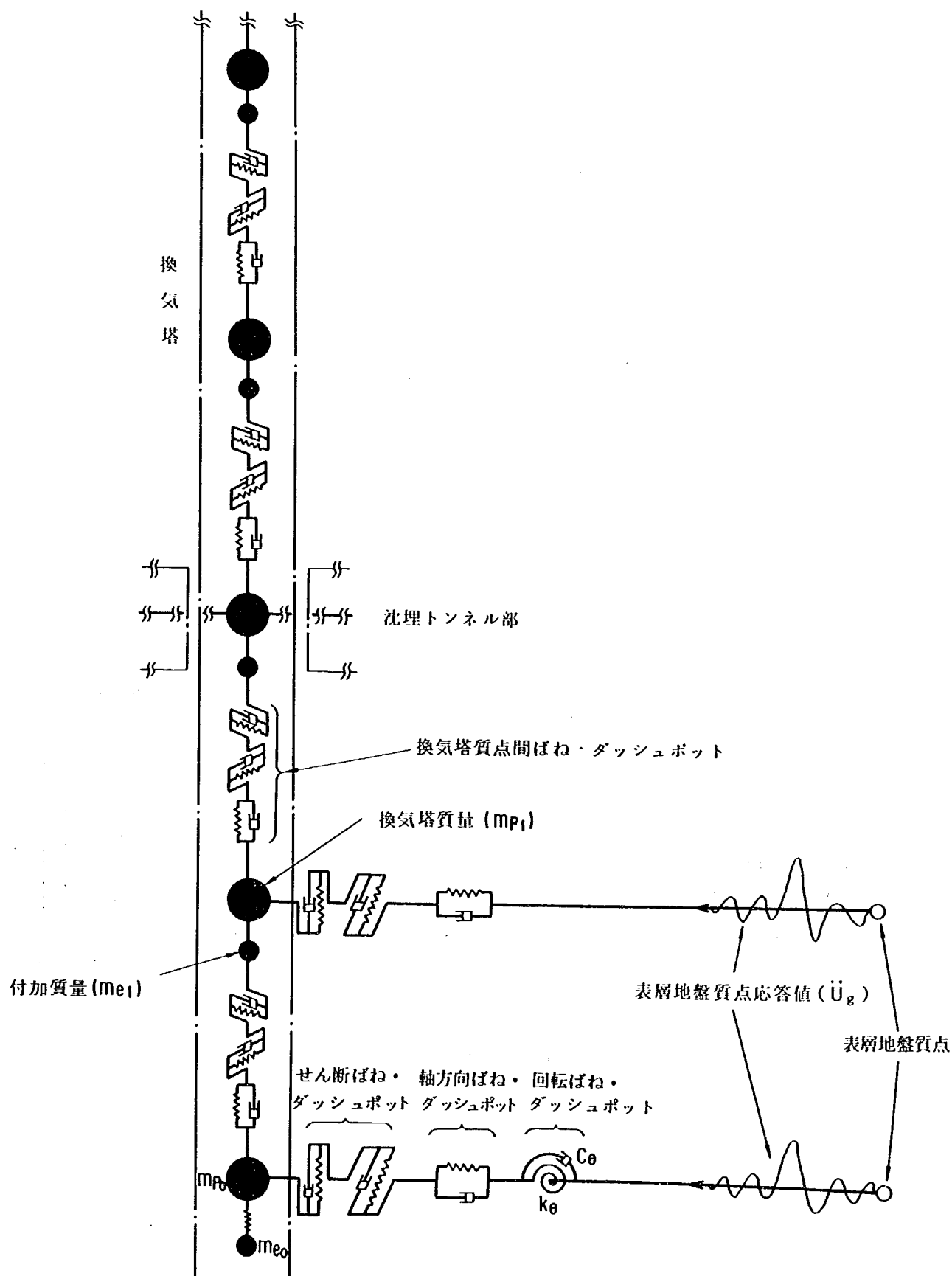


図-2 力学モデル(離散型せん断振動系モデル)



(b) 「沈埋トンネル部—表層地盤」系

図-2 力学モデル(離散型せん断振動系モデル)



(c)「換気塔部—表層地盤」系

図-2 力学モデル (離散型せん断振動系モデル)

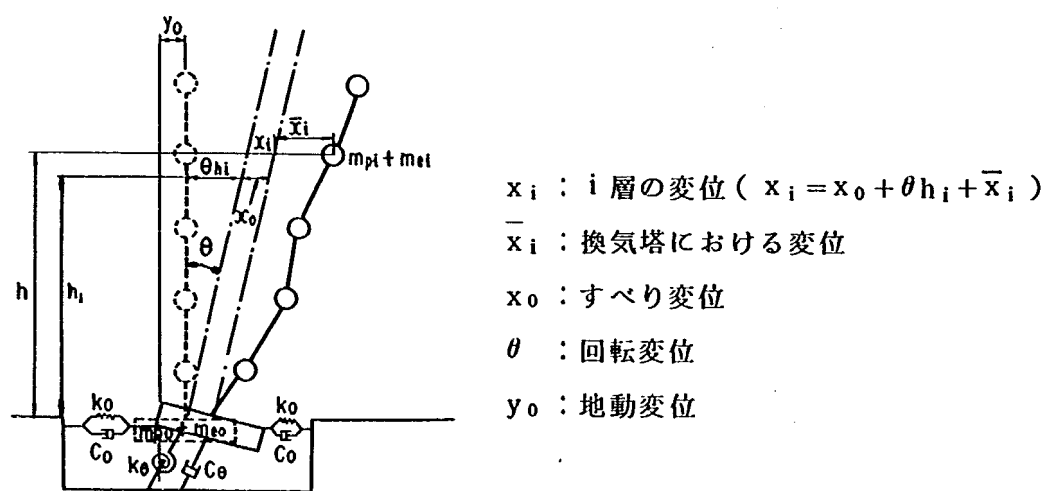


図-3 換気塔ロッキング・スウェイ時の座標系

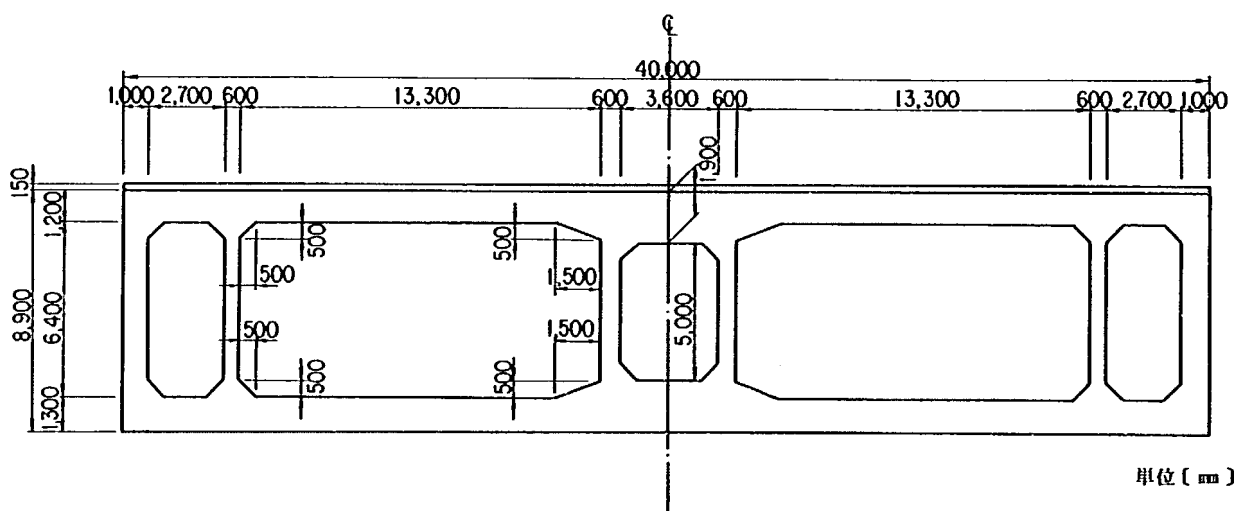
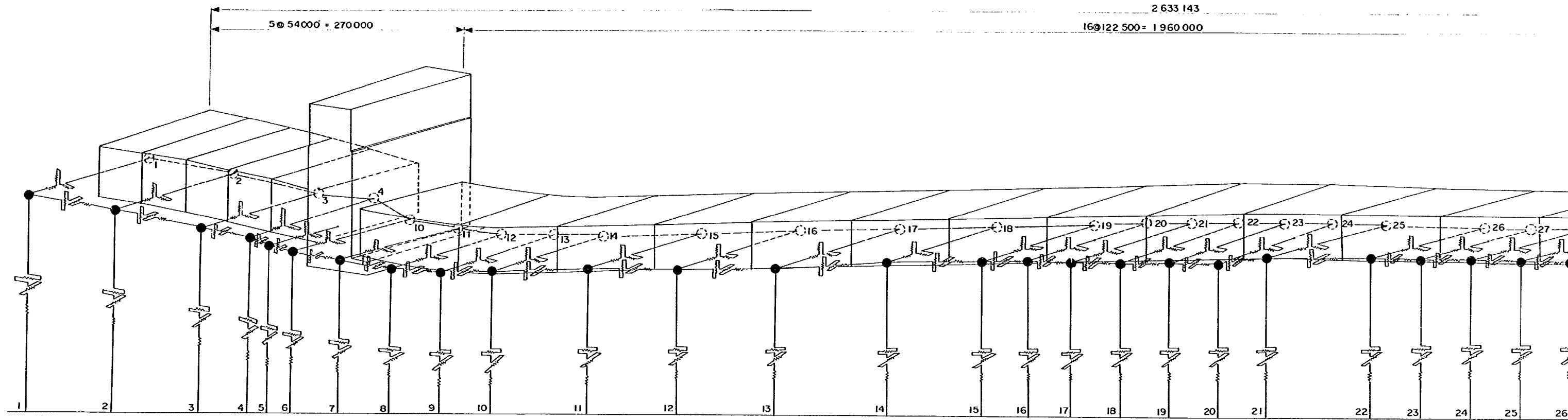


図-4 標準断面図

縮 尺 H=1:2500 単位: mm
V=1:400

付加質量・ダッシュポットは省略してある。



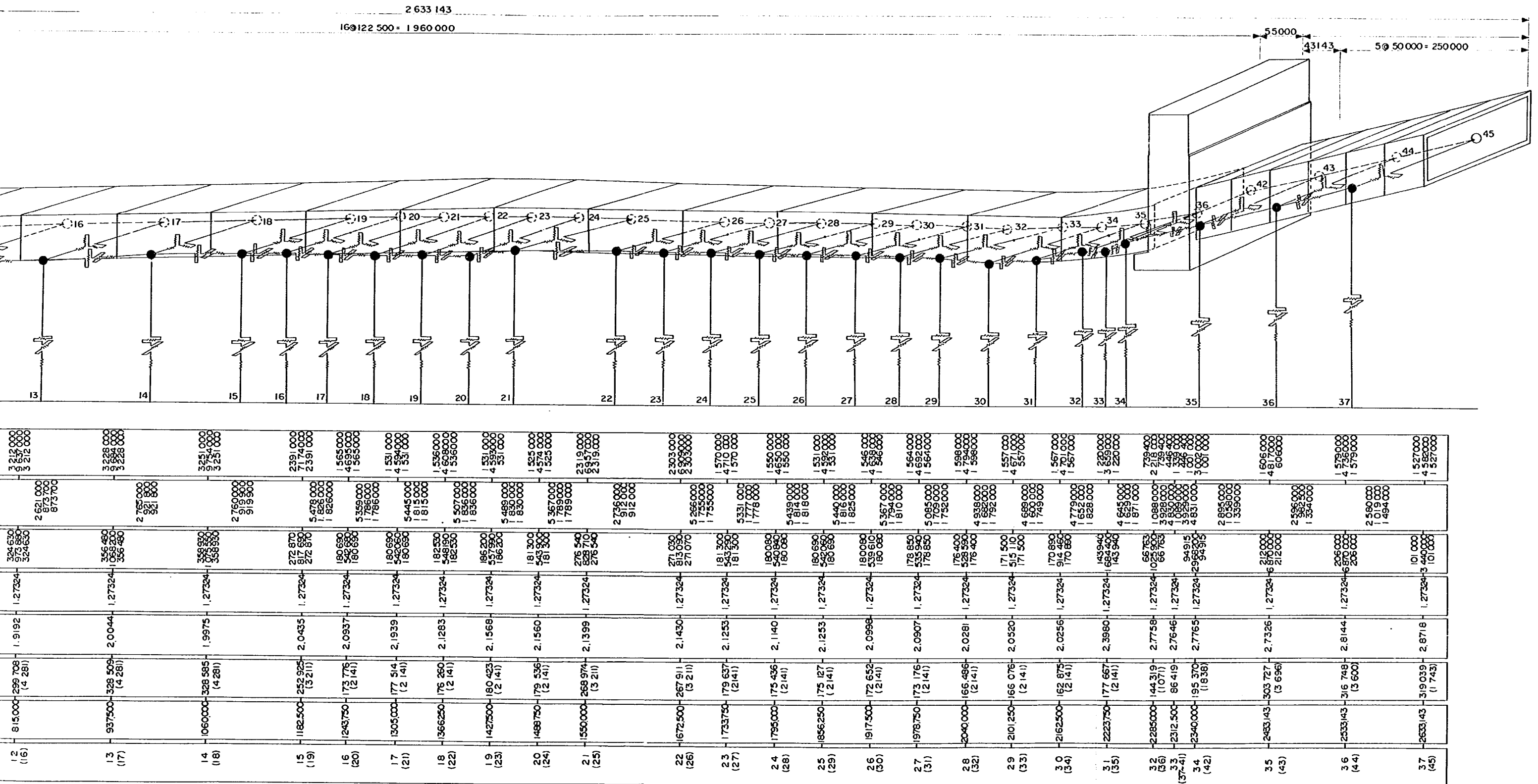
位置番号 (トンネル 節点番号)	追加距離 m	位置座標 (トンネル 節点座標) x, y, z	位置座標 (トンネル 節点座標) x, y, z	位置座標 (トンネル 節点座標) x, y, z	位置座標 (トンネル 節点座標) x, y, z	位置座標 (トンネル 節点座標) x, y, z
1 (1)	0.000	320.500 (2.657)	2.6459	1.27324	385.630 110.160	1.807.000 5.422.000 1.807.000
2 (2)	108.000	320.864 (5.395)	2.6247	1.27324	223.560 709.420 223.560	1.839.000 5.316.000 1.839.000
3 (3)	216.000	242.826 (5.782)	2.6157	1.27324	169.220 579.100 169.220	1.401.000 4.233.000 1.401.000
4 (4)	270.000	124.570 (1.224)	2.6364	1.27324	55.160 1914.500 55.160	707.600 2.123.000 707.600
5 (5-9)	297.500	84.990	2.6304	1.27324	3.884.000 1.485.000 3.884.000	1.485.000 1.485.000 1.485.000
6 (10)	325.000	131.572 (1.071)	2.6095	1.27324	64.000 980.000 64.000	762.800 2.288.000 762.800
7 (11)	386.250	165.826 (2.141)	2.2544	1.27324	139.430 647.600 139.430	1.288.000 3.864.000 1.288.000
8 (12)	447.500	155.558 (2.141)	1.8929	1.27324	170.890 924.260 170.890	1.714.000 5.142.000 1.714.000
9 (13)	508.750	154.074 (2.141)	1.9081	1.27324	168.440 525.700 168.440	1.671.000 5.012.000 1.671.000
10 (14)	570.000	231.360 (3.211)	1.9192	1.27324	252.680 739.890 252.680	2.480.000 7.438.000 2.480.000
11 (15)	692.500	299.404 (4.281)	1.9293	1.27324	320.960 932.880 320.960	3.176.000 3.176.000 3.176.000
12 (16)	815.000	299.708 (4.281)	1.9192	1.27324	324.630 739.890 324.630	3.212.000 3.212.000 3.212.000
13 (17)	937.500	328.509 (4.281)	2.0044	1.27324	356.480 968.200 356.480	3.228.000 3.228.000 3.228.000
14 (18)	1060.000	328.595 (4.281)	1.9975	1.27324	358.930 975.330 358.930	3.251.000 3.251.000 3.251.000
15 (19)	1182.500	252.925 (3.211)	2.0435	1.27324	272.870 817.690 272.870	2.391.000 7.174.000 2.391.000
16 (20)	1243.750	172.776 (2.141)	2.0937	1.27324	180.690 762.880 180.690	1.565.000 4.625.000 1.565.000
17 (21)	1305.000	177.514 (2.141)	2.1939	1.27324	180.690 762.880 180.690	1.531.000 4.594.000 1.531.000
18 (22)	1366.250	176.260 (2.141)	2.1283	1.27324	182.530 548.190 182.530	1.536.000 4.608.000 1.536.000
19 (23)	1427.500	180.423 (2.141)	2.1568	1.27324	186.200 557.290 186.200	1.531.000 4.594.000 1.531.000
20 (24)	1488.750	179.536 (2.141)	2.1560	1.27324	181.300 543.900 181.300	1.525.000 4.574.000 1.525.000
21 (25)	1550.000	268.974 (3.211)	2.1399	1.27324	276.540 828.710 276.540	2.319.000 6.957.000 2.319.000
22 (26)	1672.500	267.911 (3.211)	2.1430	1.27324	271.030 813.050 271.030	2.303.000 6.909.000 2.303.000
23 (27)	1733.750	179.637 (2.141)	2.1253	1.27324	181.300 543.900 181.300	1.570.000 4.710.000 1.570.000
24 (28)	1795.000	175.436 (2.141)	2.1140	1.27324	180.080 540.840 180.080	1.550.000 4.650.000 1.550.000

(a) DMモデル

図-5 対象沈埋トンネルの動的解析モデル概念図

縮 尺 $H=1:2500$
 $V=1:400$ 単位: mm

付加質量・ダッシュポットは省略してある。

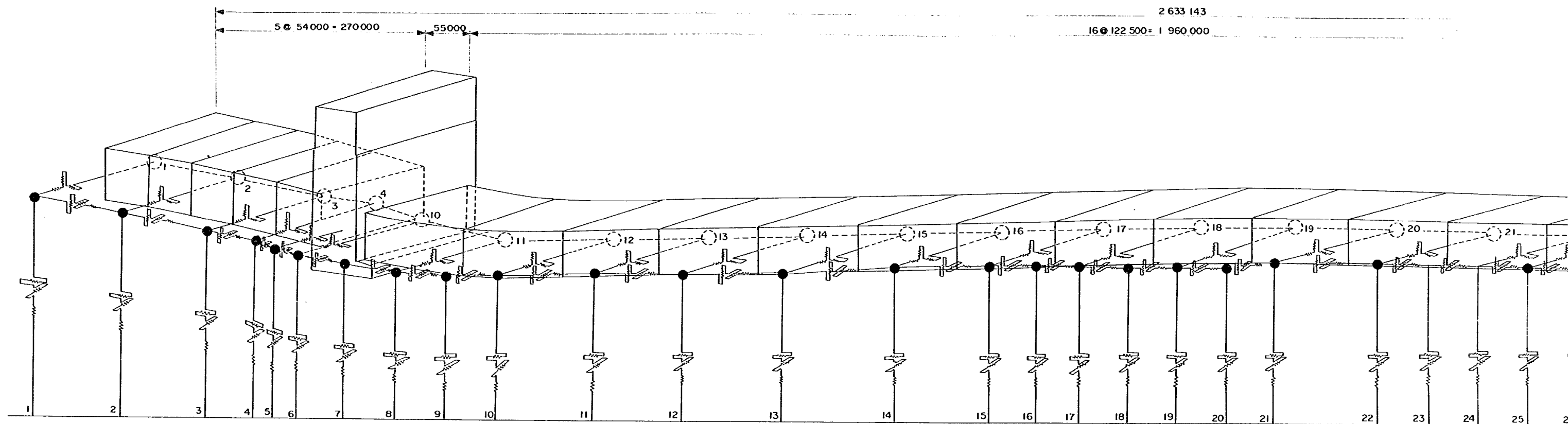


(a) DMモデル

図-5 対象沈埋トンネルの動的解析モデル概念図

縮尺 $H=1:2500$ 單位: mm
 $V=1:400$

付加質量・ダッシュポットは省略してある。

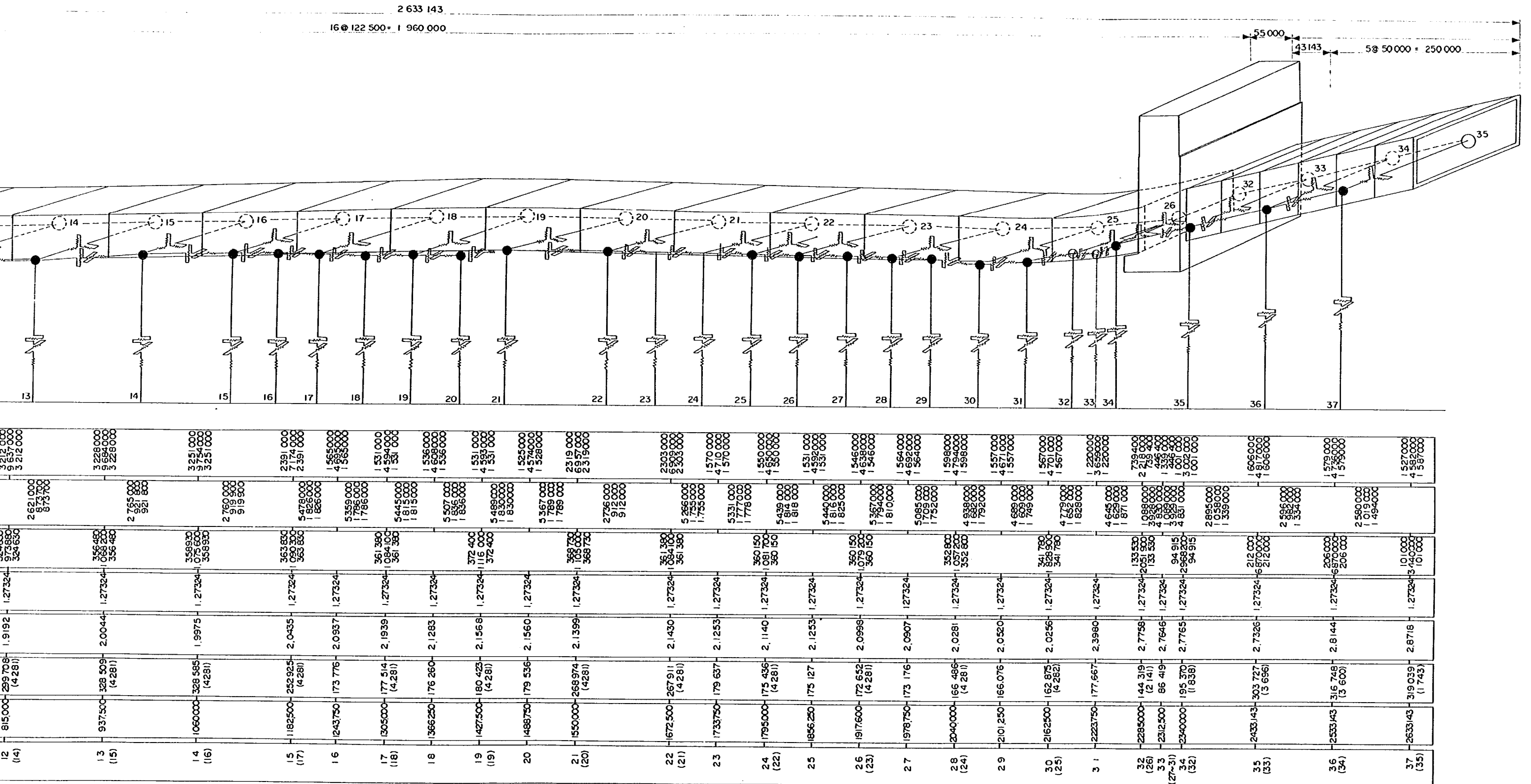
[illegible]

(b) SM-1モデル

図-5 対象沈埋トンネルの動的解析モデル概念図

縮 尺 H=1:2500 単位: mm
V=1:400

付加質量・ダッシュポットは省略してある。

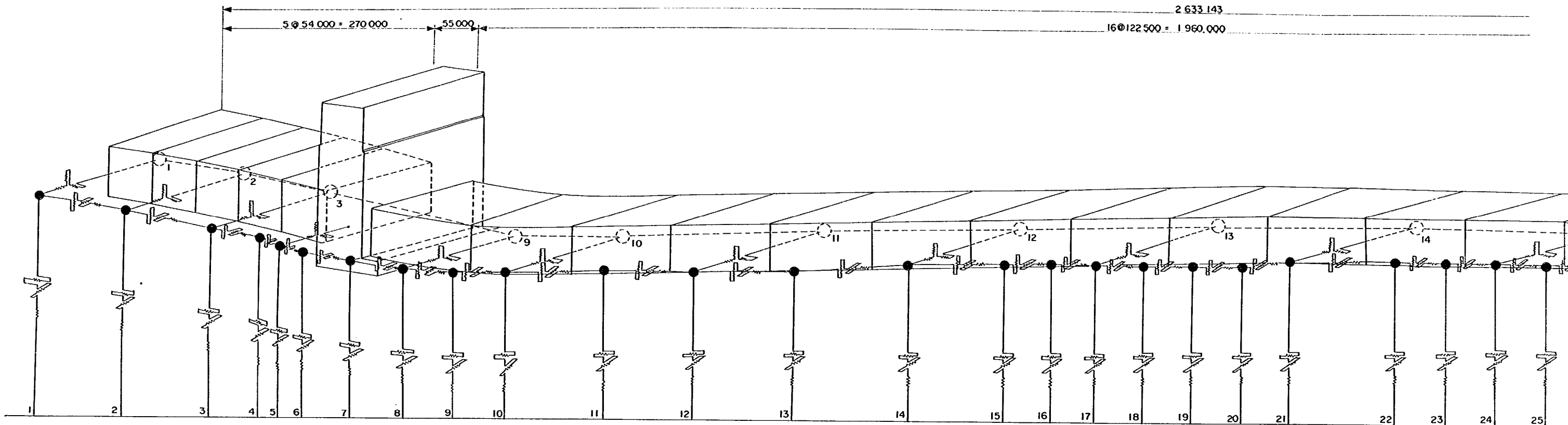


(b) SM-1モデル

図-5 対象沈埋トンネルの動的解析モデル概念図

縮 尺 H=1:2500 単位: mm
V=1:400

付加質量・ダッシュポットは省略してある。



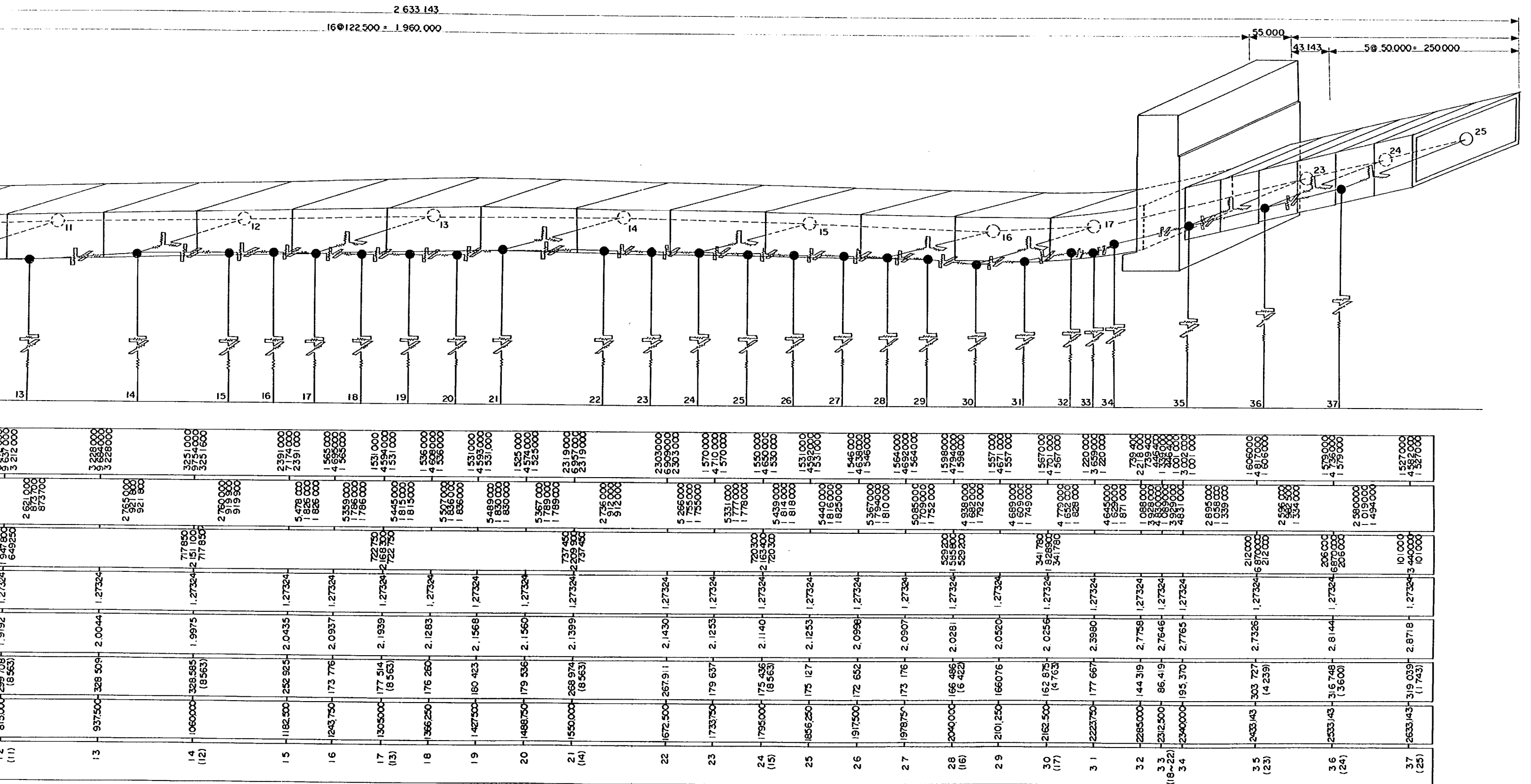
位置 番号 (トンネル 番号)	追加距離 m	埋設深度 (トンネル埋 込深さ) m	埋設面 T 90C	制振係数	埋設面 T 90C 埋込深さ m	埋込深さ m	埋込深さ m	埋込深さ m
1 (1)	0.000	320.500 (2.837)	2.6459	1.27324	110.160 3.85560 110.160	2.823.000 9.555.000 1.040.000	1.807.000 5.422.000 1.807.000	
2 (2)	108.000	320.864 (5.395)	2.8247	1.27324	223.560 7.795.000 223.560		1.839.000 5.516.000 1.839.000	
3 (3)	216.000	242.826 (4.406)	2.6157	1.27324	169.280 5.759.100 169.280	2990.000 1.010.000 1.050.000	1.401.000 4.203.000 1.401.000	
4 (4)	270.000	124.570	2.6364	1.27324		1.970.000 2.167.000 2.167.000	707.800 2.167.000 2.167.000	
5 (5)	297.500	84.990	2.6304	1.27324		1.850.000 2.167.000 2.167.000	484.800 1.435.000 1.435.000	
6 (6)	325.000	131.572	2.6095	1.27324		3.978.000 3.978.000 3.978.000	1.828.000 2.762.800 2.762.800	
7	386.250	165.826	2.2544	1.27324		5.455.000 5.455.000 5.455.000	1.288.000 3.864.000 1.288.000	
8 (8)	447.500	155.558 (4.763)	1.8929	1.27324	341.780 5.485.000 341.780	5.158.000 1.720.000 1.720.000	1.714.000 5.142.000 1.714.000	
9	508.750	154.074	1.9081	1.27324		5.455.000 5.455.000 5.455.000	1.671.000 5.012.000 1.671.000	
10 (10)	570.000	231.360 (6.422)	1.9192	1.27324	505 5.05310	5.245.000 1.748.000 1.748.000	2.480.000 7.439.000 2.480.000	
11	632.500	299.404	1.9293	1.27324		2.578.000 8.593.000 8.593.000	3.176.000 9.527.000 3.176.000	
12 (11)	815.000	299.708 (8.563)	1.9192	1.27324	649.250 9.475.000 649.250	2.423.000 8.078.000 8.078.000	3.212.000 3.212.000 3.212.000	
13	937.500	328.508	2.0044	1.27324		2.621.000 8.737.000 8.737.000	3.228.000 3.228.000 3.228.000	
14 (12)	1060.000	328.585 (8.563)	1.9975	1.27324	717.850 2.151.100 717.850		3.251.000 9.754.000 3.251.600	
15	1182.500	252.925	2.0435	1.27324		2.765.000 9.218.000 9.218.000	2.391.000 7.174.000 2.391.000	
16	1243.750	173.776	2.0937	1.27324		2.760.000 9.199.000 9.199.000	1.555.000 4.608.000 1.555.000	
17 (13)	1305.000	177.514 (8.563)	2.1939	1.27324	722.750 2.168.300 722.750	5.359.000 1.786.000 1.786.000	1.531.000 4.594.000 1.531.000	
18	1366.250	176.260	2.1283	1.27324		5.445.000 1.815.000 1.815.000	1.536.000 4.608.000 1.536.000	
19	1427.500	180.423	2.1568	1.27324		5.507.000 1.836.000 1.836.000	1.531.000 4.594.000 1.531.000	
20	1488.750	179.536	2.1560	1.27324		5.489.000 1.830.000 1.830.000	1.525.000 4.574.000 1.525.000	
21 (14)	1550.000	268.974 (8.563)	2.1399	1.27324	737.450 2.209.800 737.450	5.367.000 1.789.000 1.789.000	2.319.000 6.909.000 2.319.000	
22	1672.500	267.911	2.1430	1.27324		2.736.000 9.120.000 9.120.000	2.303.000 6.909.000 2.303.000	
23	1733.750	179.637	2.1253	1.27324		5.266.000 1.755.000 1.755.000	1.570.000 4.710.000 1.570.000	
24	1795.000	175.436	2.1140	1.27324	720.300 2.163.400 720.300	5.331.000 1.777.000 1.777.000	1.550.000 4.650.000 1.550.000	

(c) SM-2モデル

図-5 対象沈埋トンネルの動的解析モデル概念図

縮 尺 H=1:2500 単位: mm
V=1:400

付加質量・ダッシュポットは省略してある。



(c) SM-2モデル

図-5 対象沈埋トンネルの動的解析モデル概念図

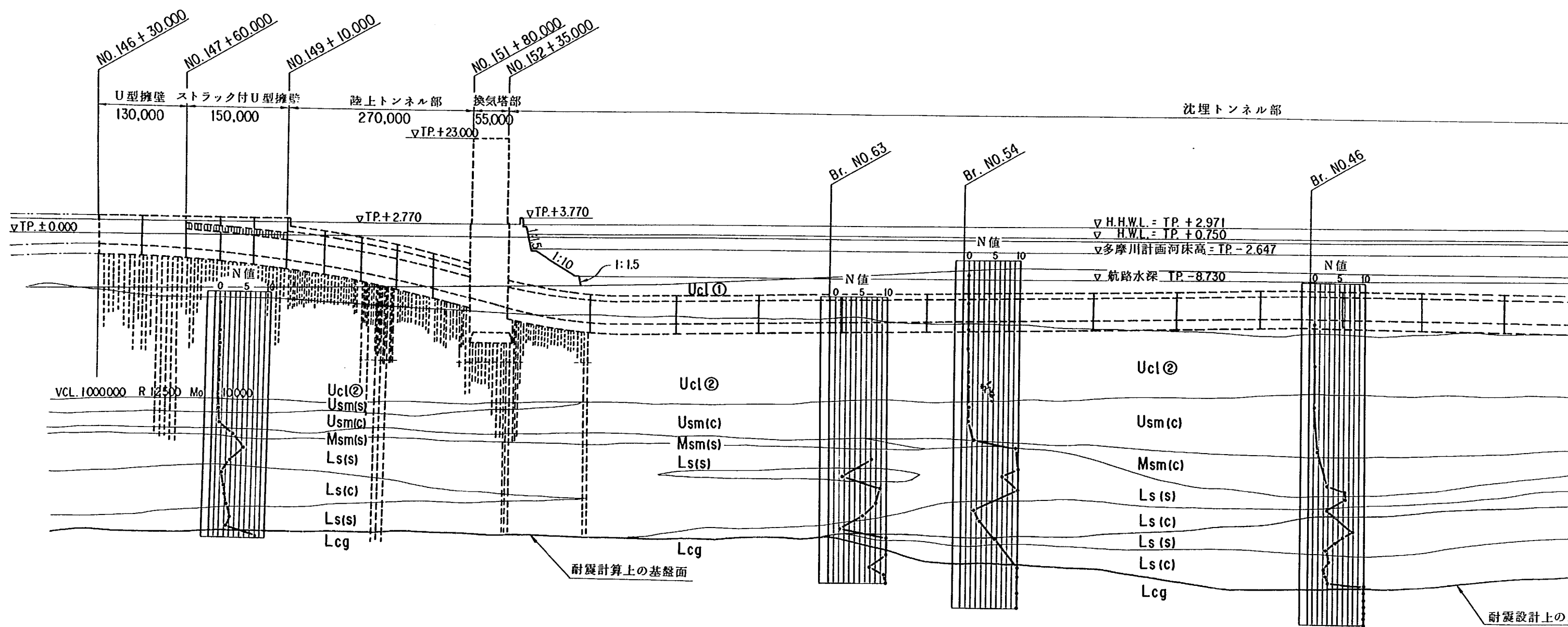


図-6 地質概況

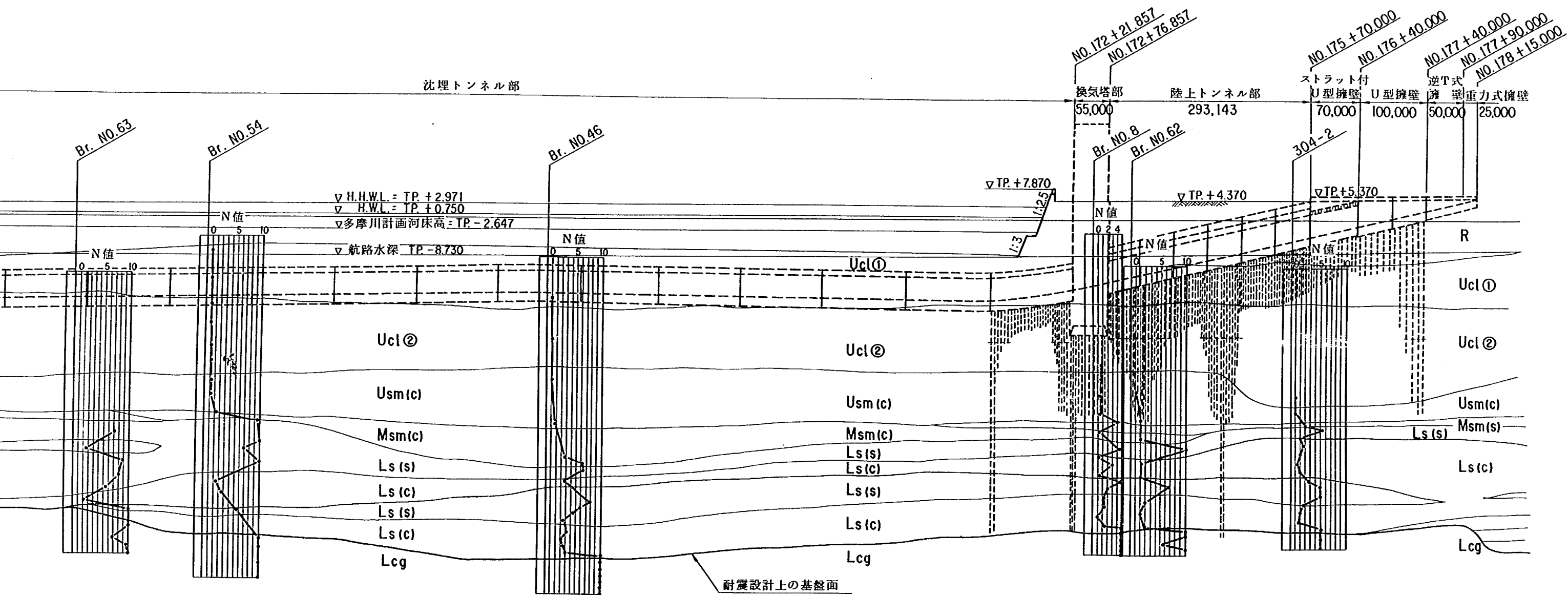


図-6 地質概況

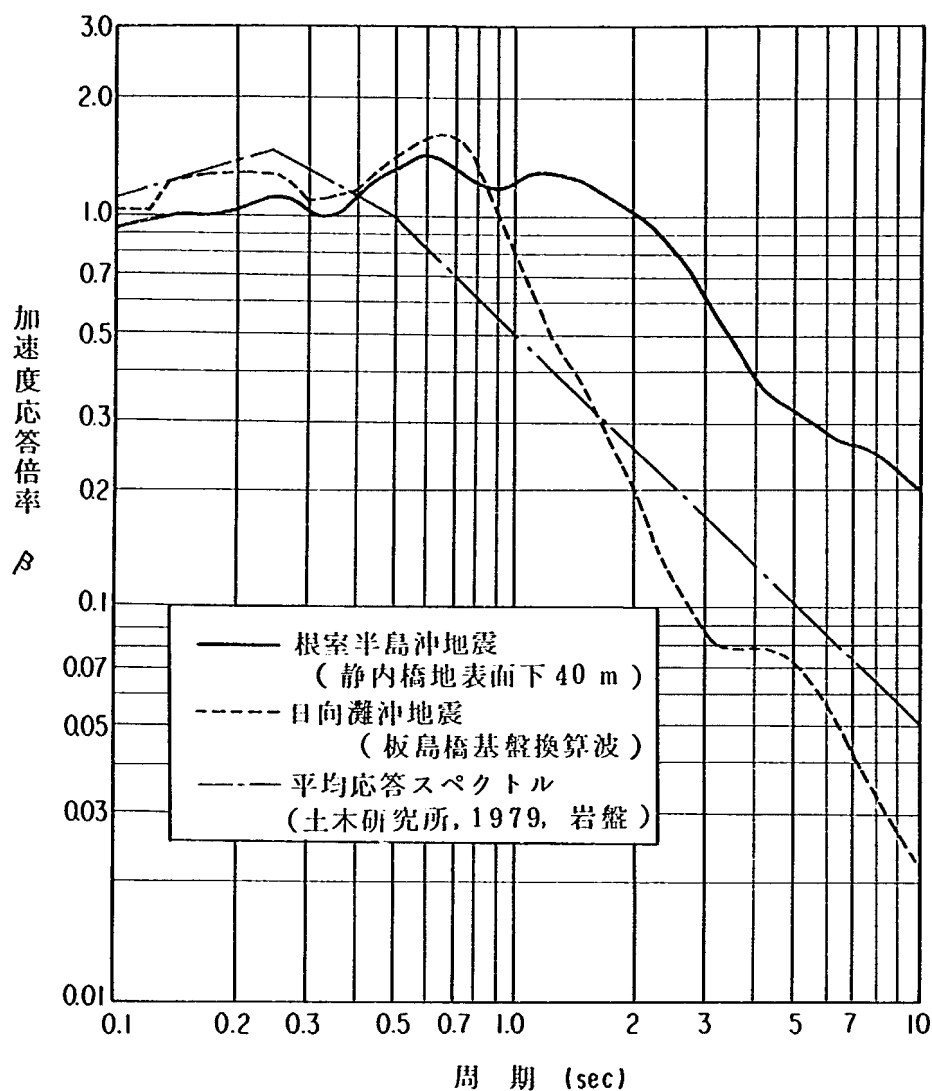


図-7 入力地震動加速度応答スペクトル ($h = 20\%$)

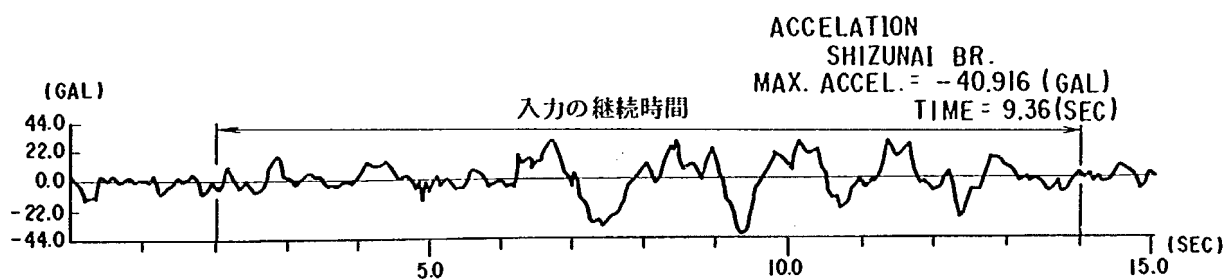


図-8 入力波形 (根室半島沖地震静内橋加速度波形)

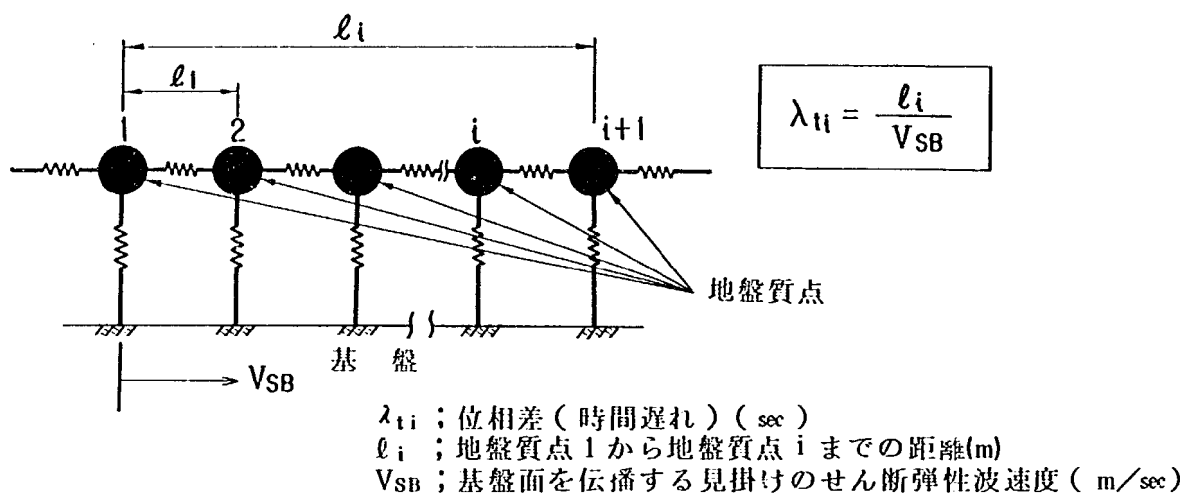
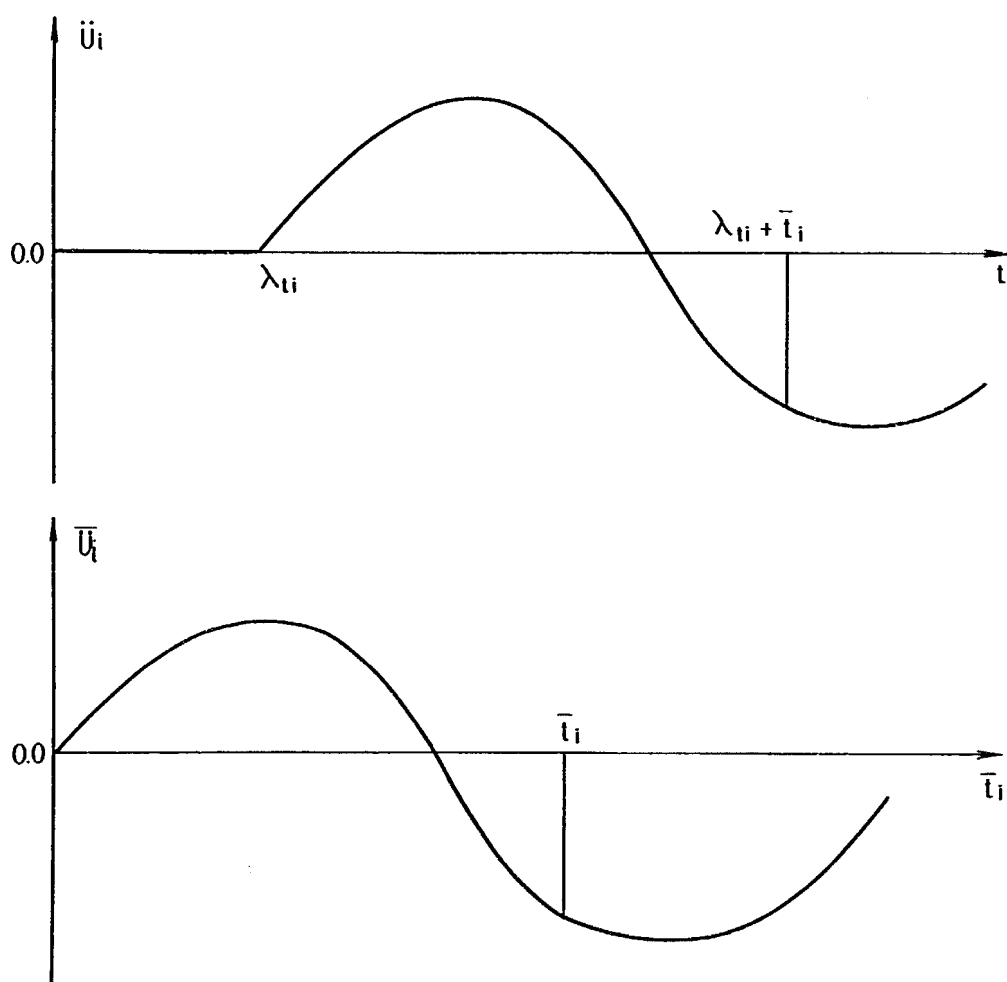
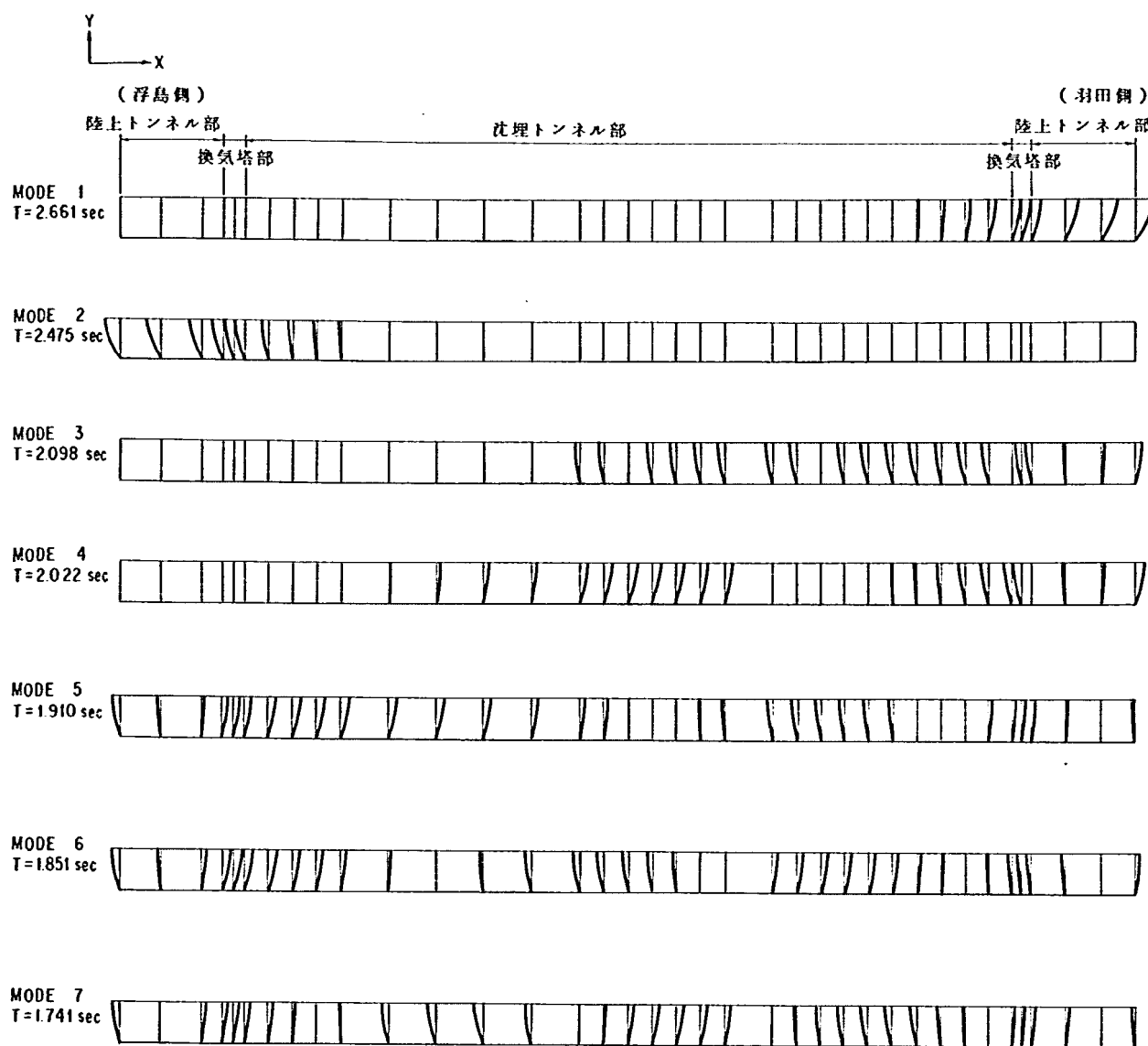


図-9 入力の位相差 (概念図)



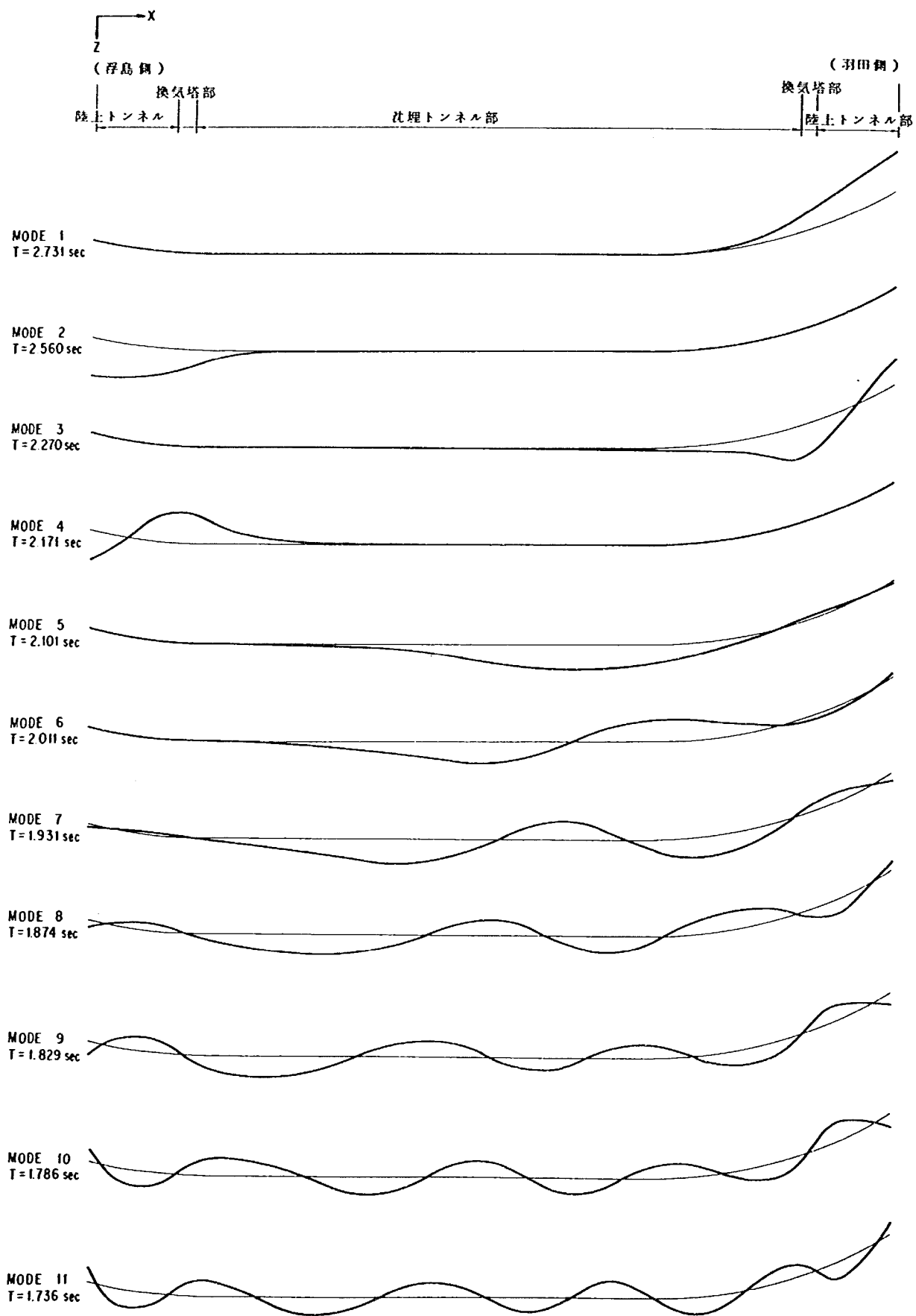
注) $\bar{t}_i$ は局所座標系による時刻を表わす。

図-10 時間座標系 (概念図)



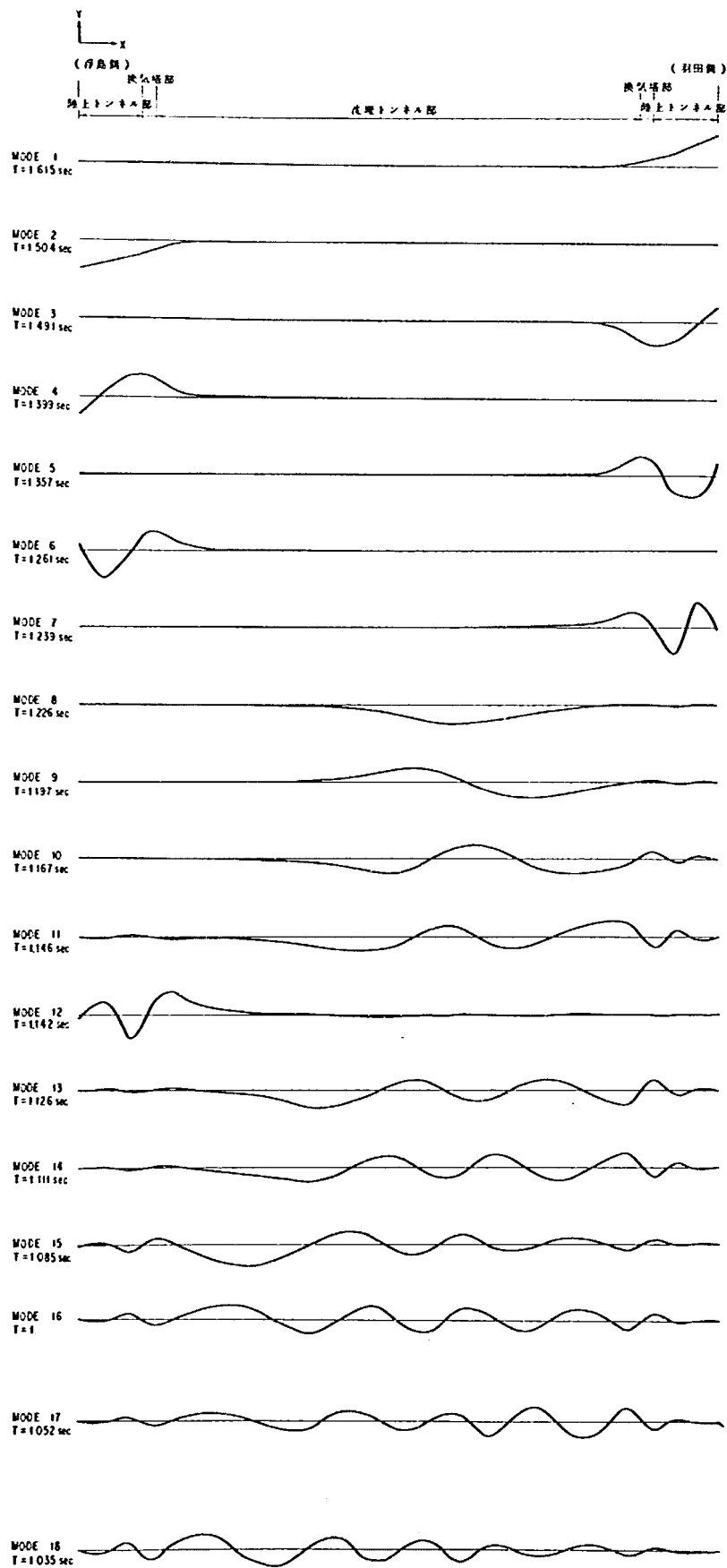
(a)軸方向

図 - 11 固有ベクトル (地盤)



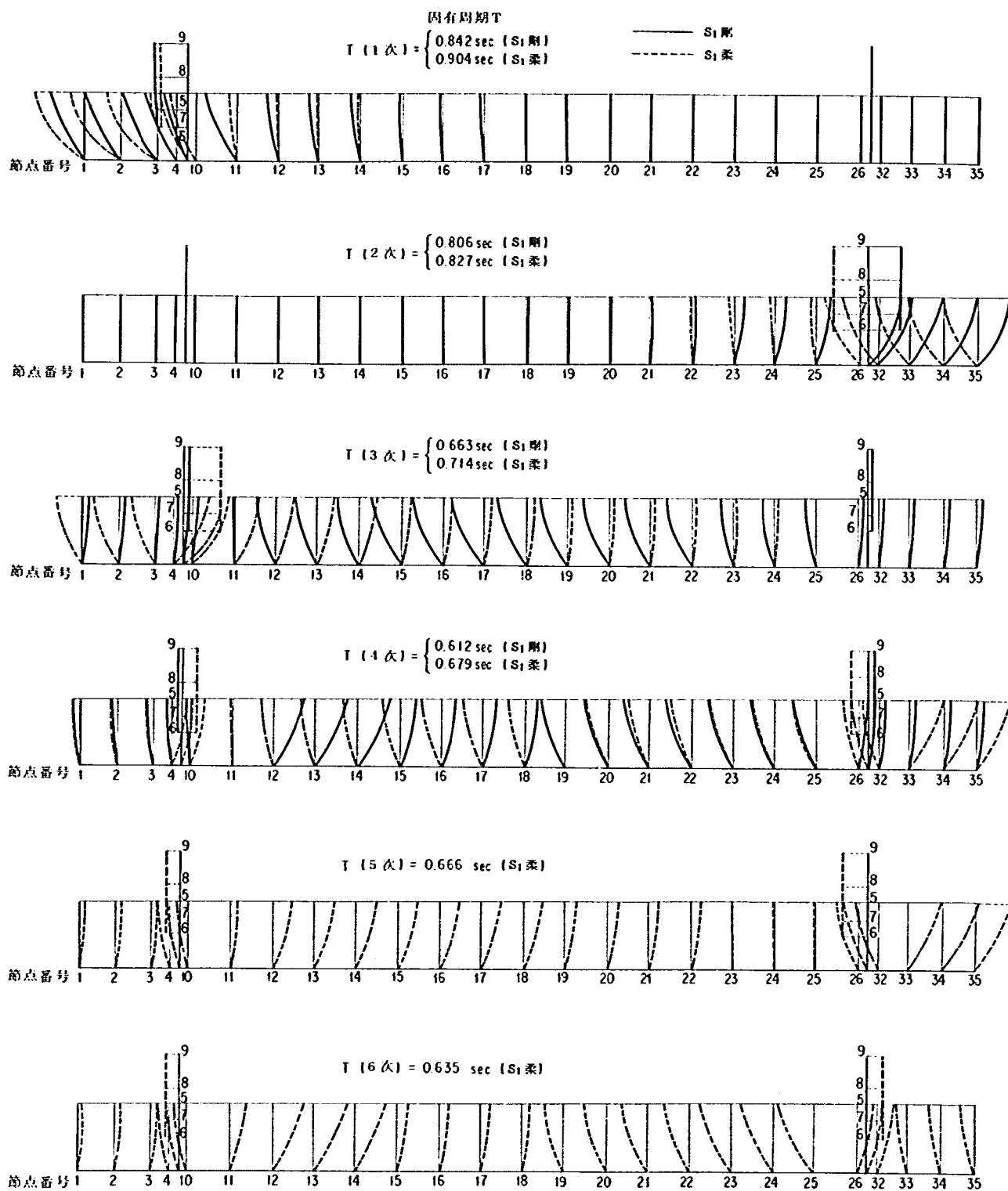
(b) 水平方向

図-11 固有ベクトル(地盤)

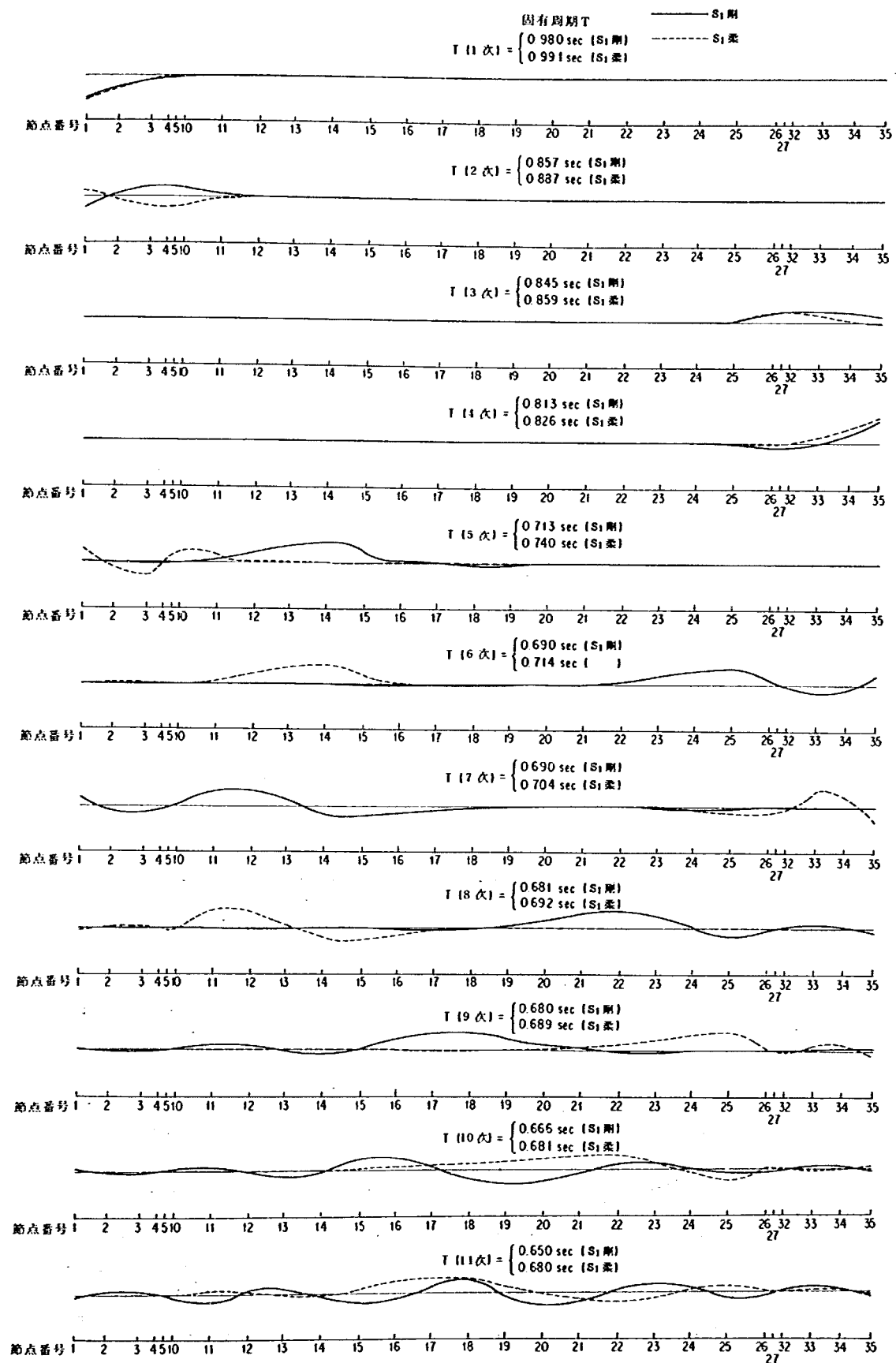


(c) 鉛直方向

図-11 固有ベクトル(地盤)

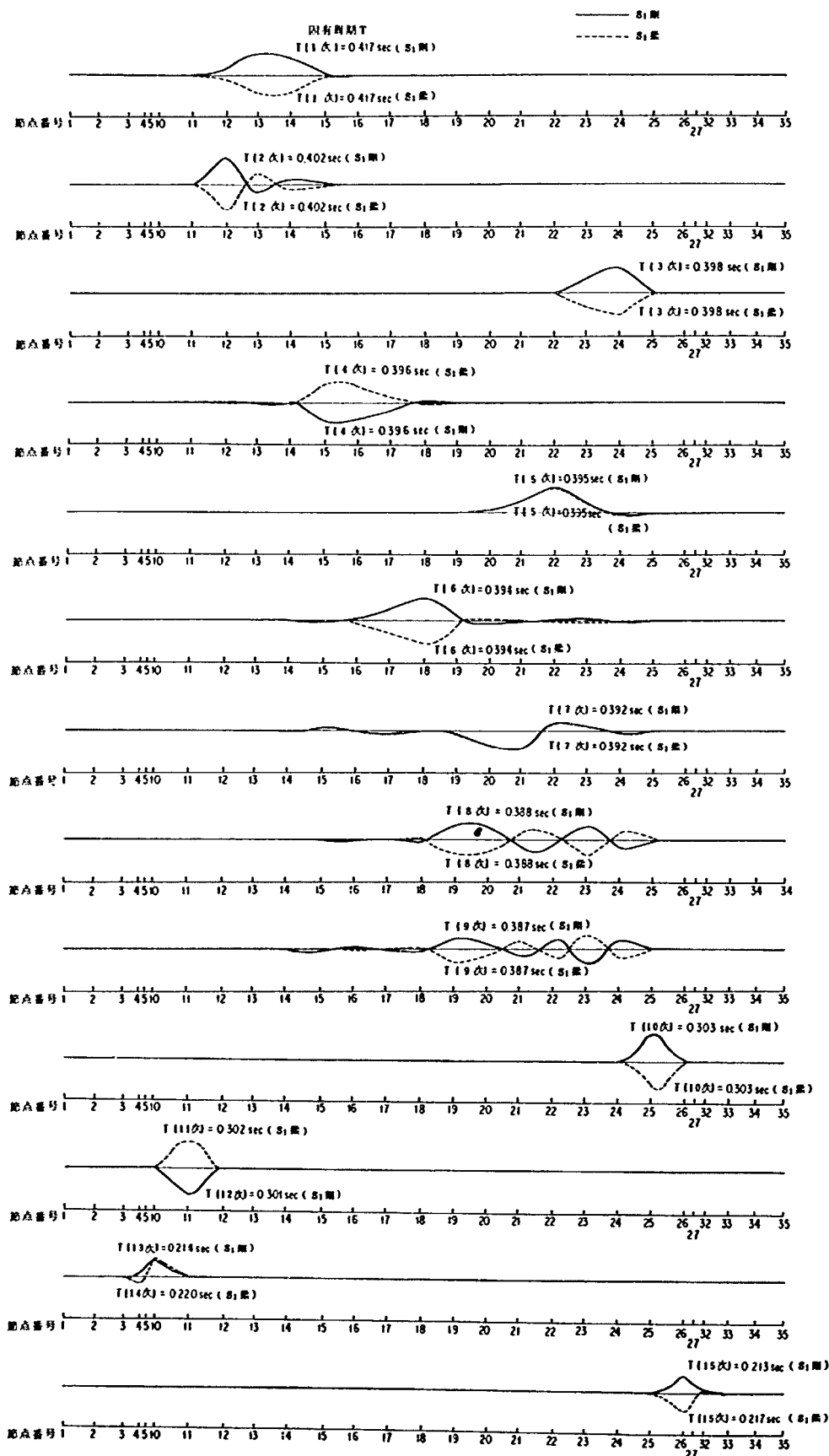


(a) 軸 方 向
 図-12 固有ベクトル(沈埋トンネル)



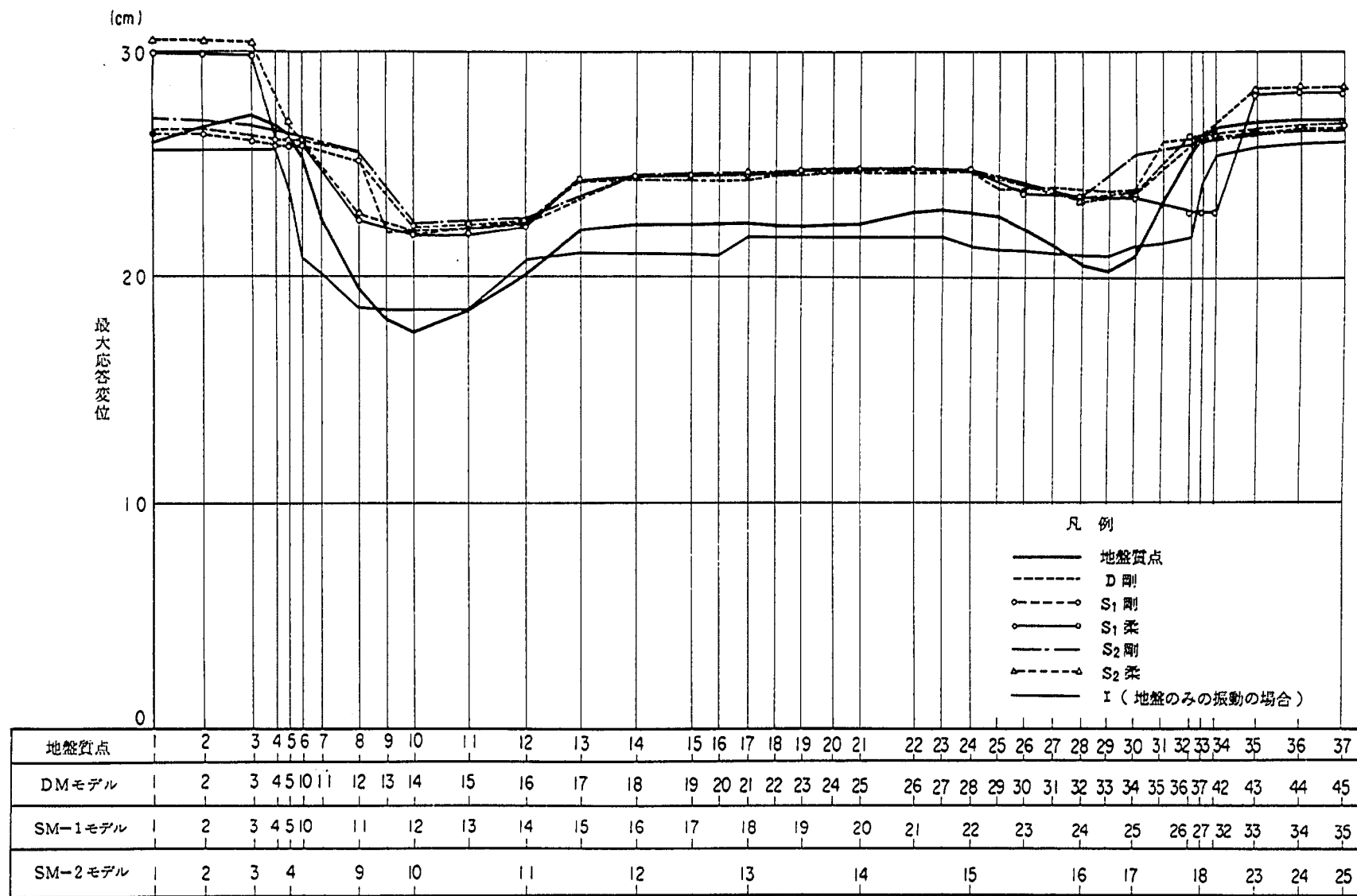
(b) 水平方向

図-12 固有ベクトル(沈埋トンネル)



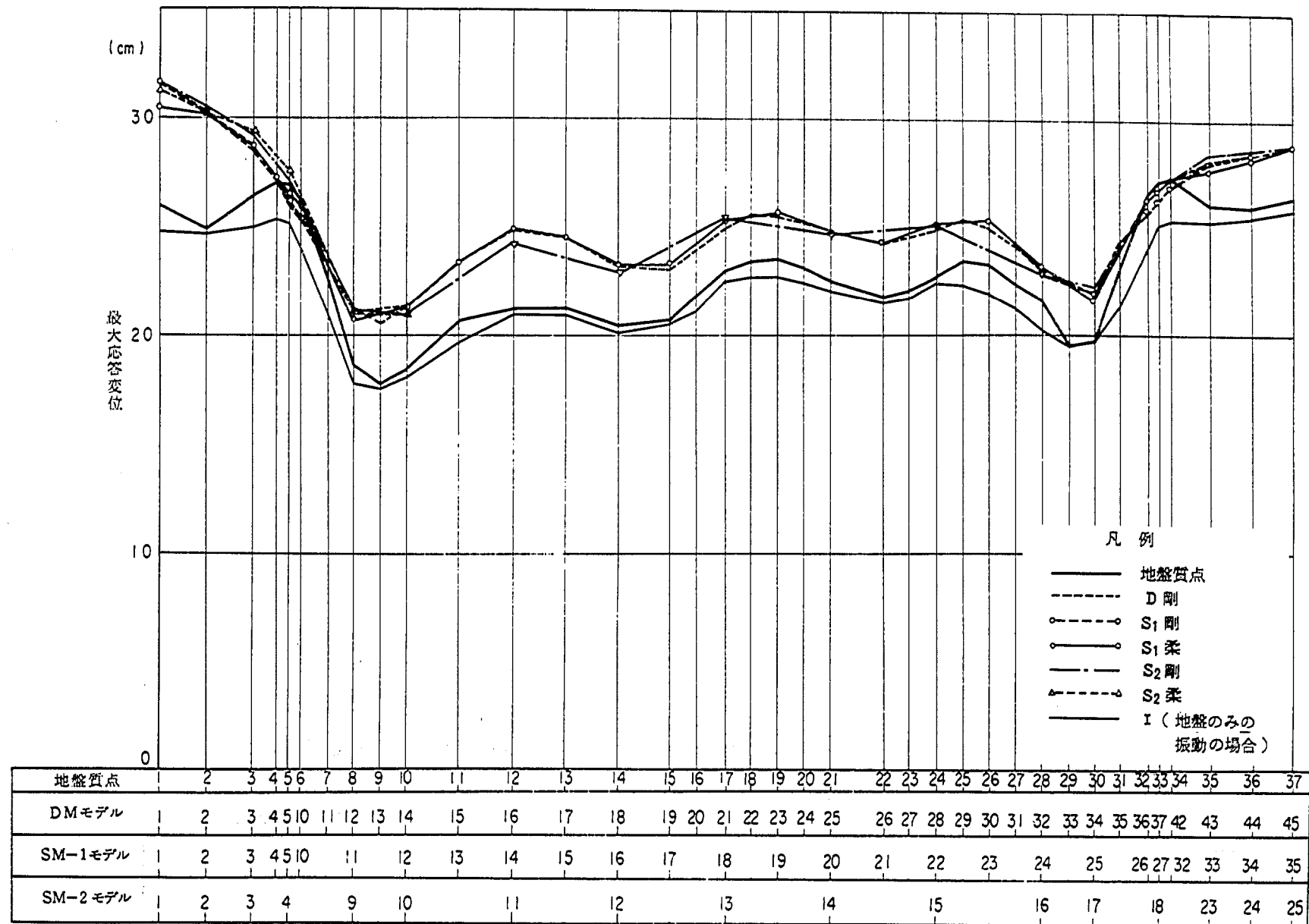
(c) 鉛直方向

図-12 固有ベクトル(沈埋トンネル)



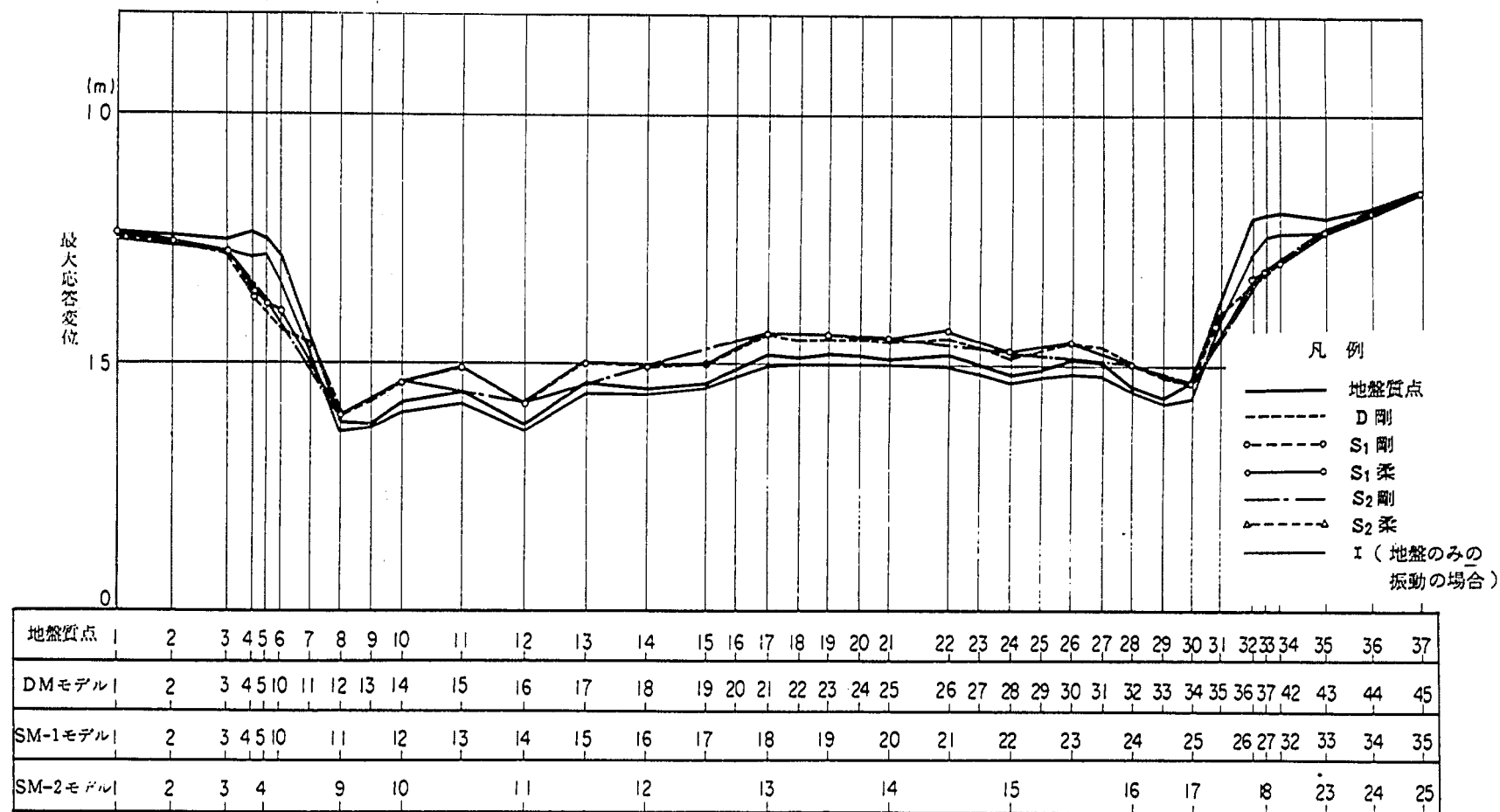
(a) 軸方向

図-13 地盤及び沈埋トンネル部の最大応答変位の分布図



(b) 水平方向

図-13 地盤及び沈埋トンネル部の最大応答変位の分布図



(c) 鉛直方向

図 - 13 地盤及び沈埋トンネル部の最大応答変位の分布図

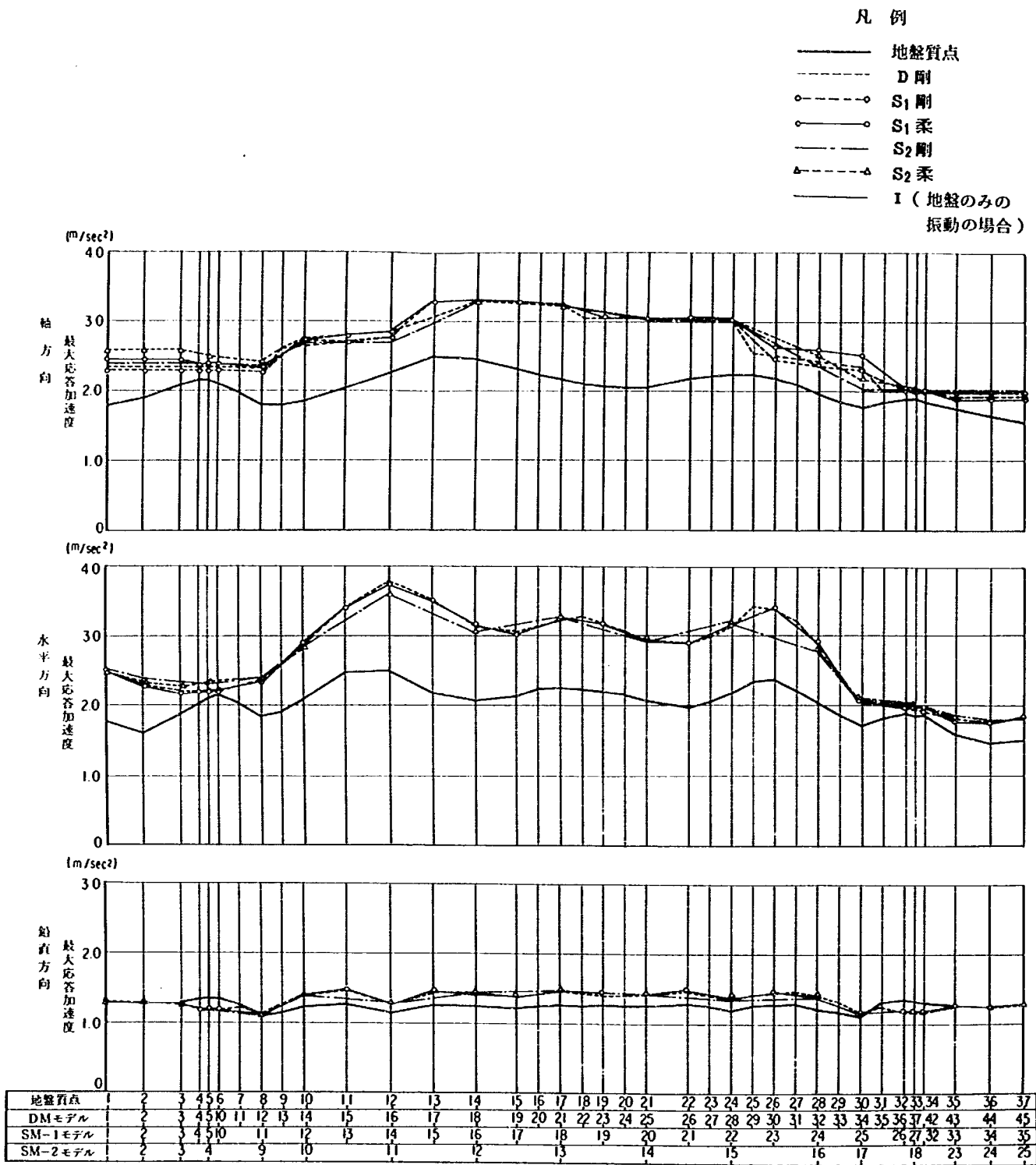
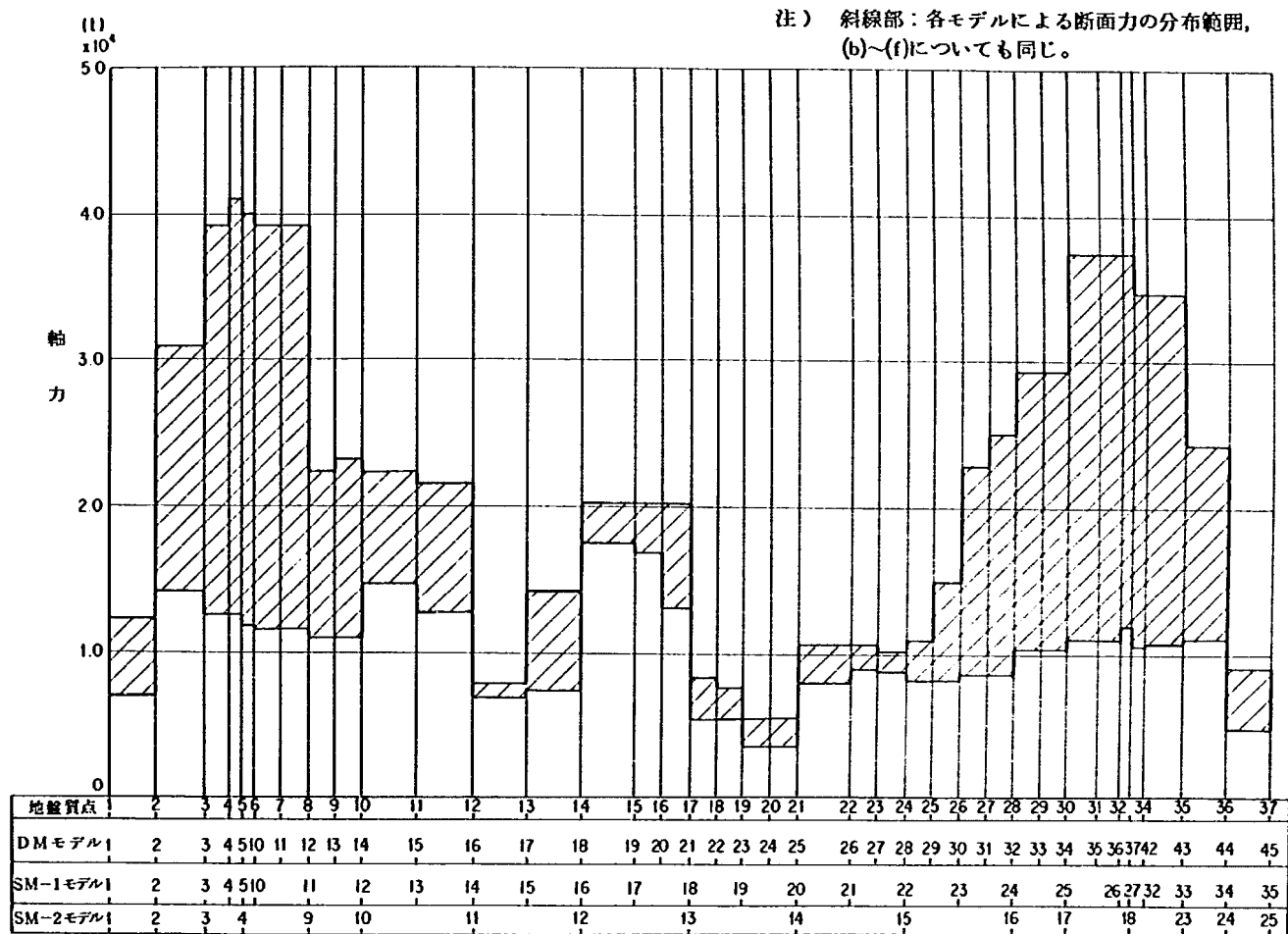
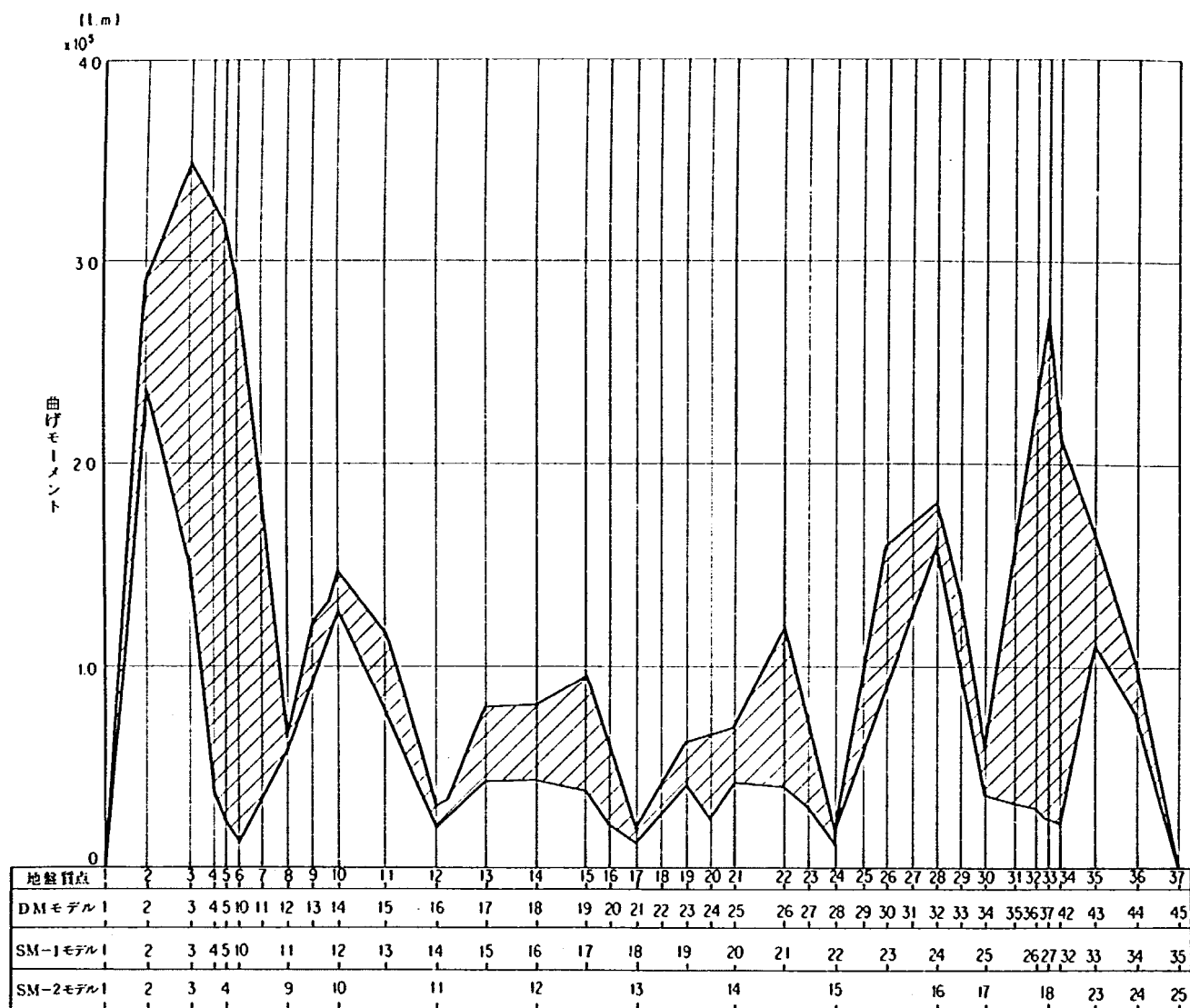


図-14 地盤及び沈埋トンネル部の最大応答加速度の分布図

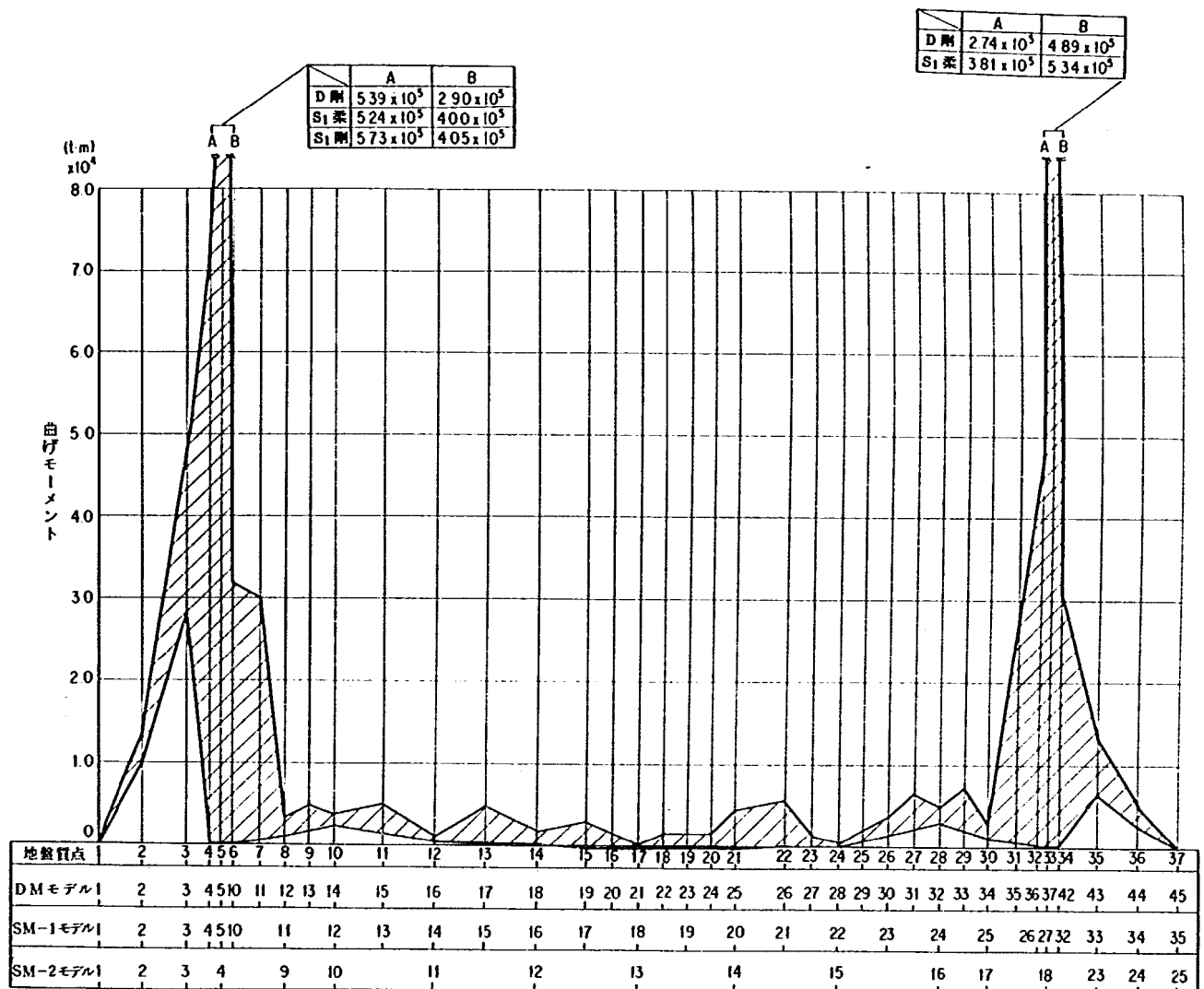


(a) 軸力 (軸方向)

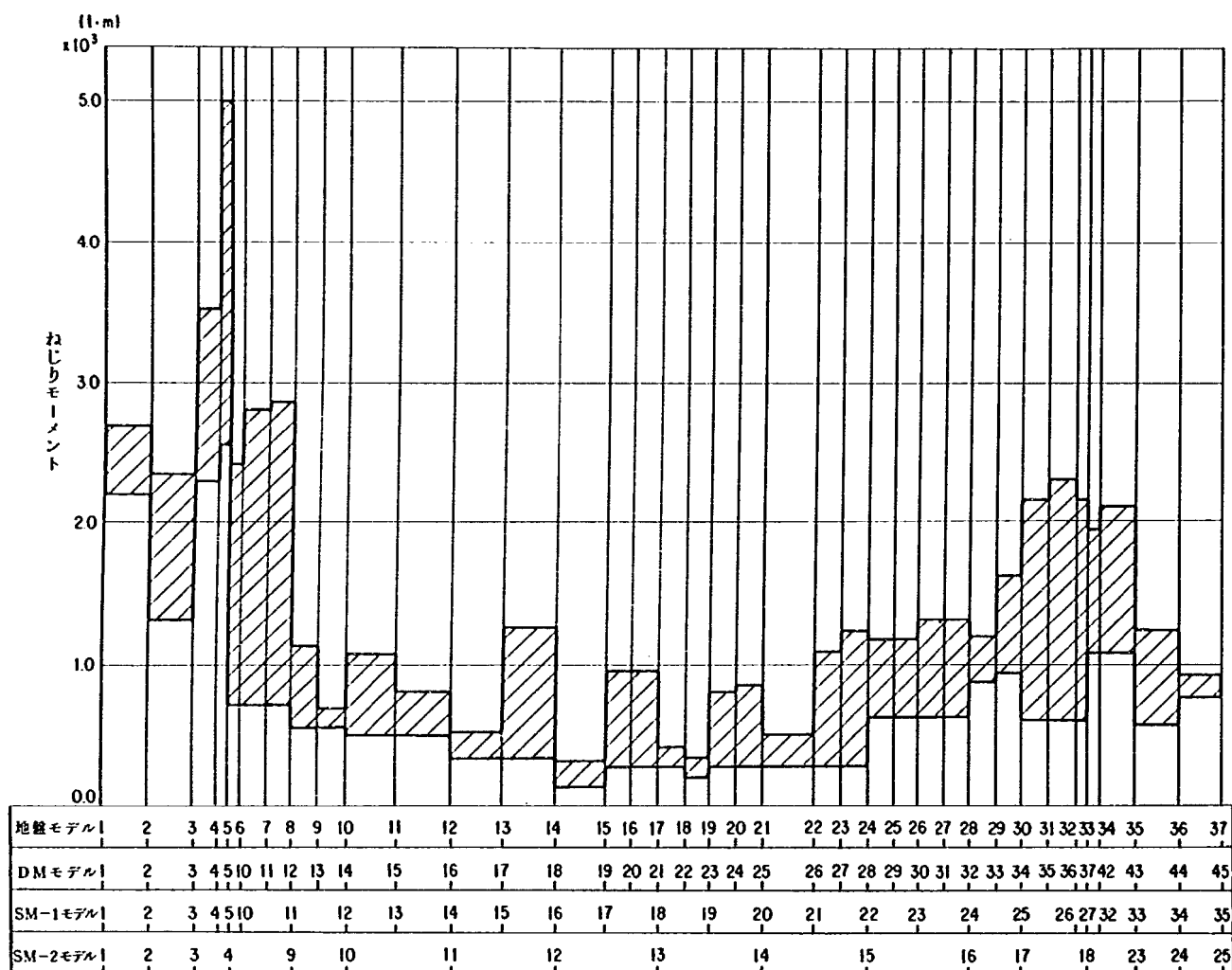
図-15 沈埋トンネル部の最大応答断面力の分布図



(b) 曲げモーメント(軸方向)
図-15 沈埋トンネル部の最大応答断面力の分布図

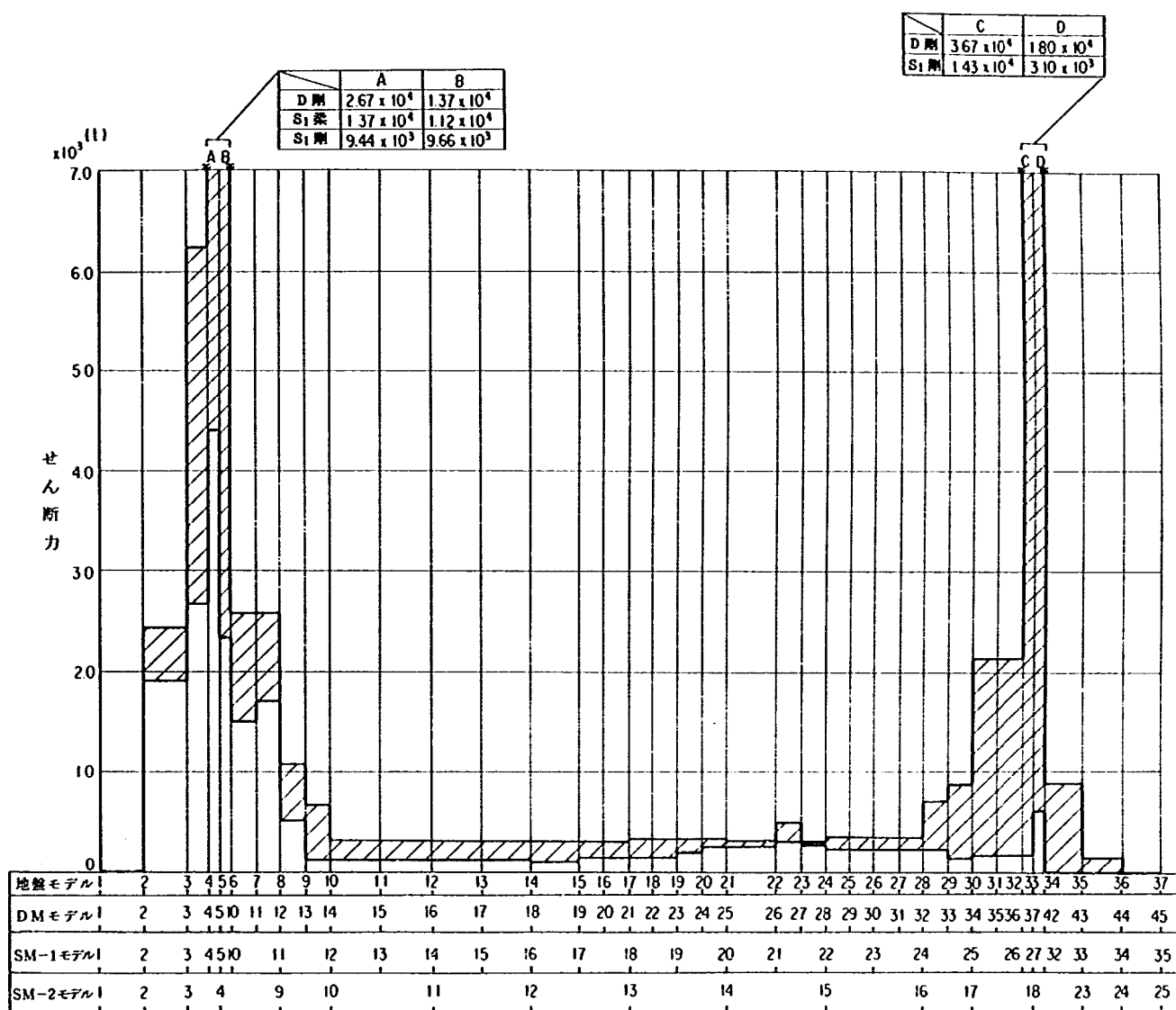


(c) 曲げモーメント (水平方向)
 図-15 沈埋トンネル部の最大応答断面力の分布図



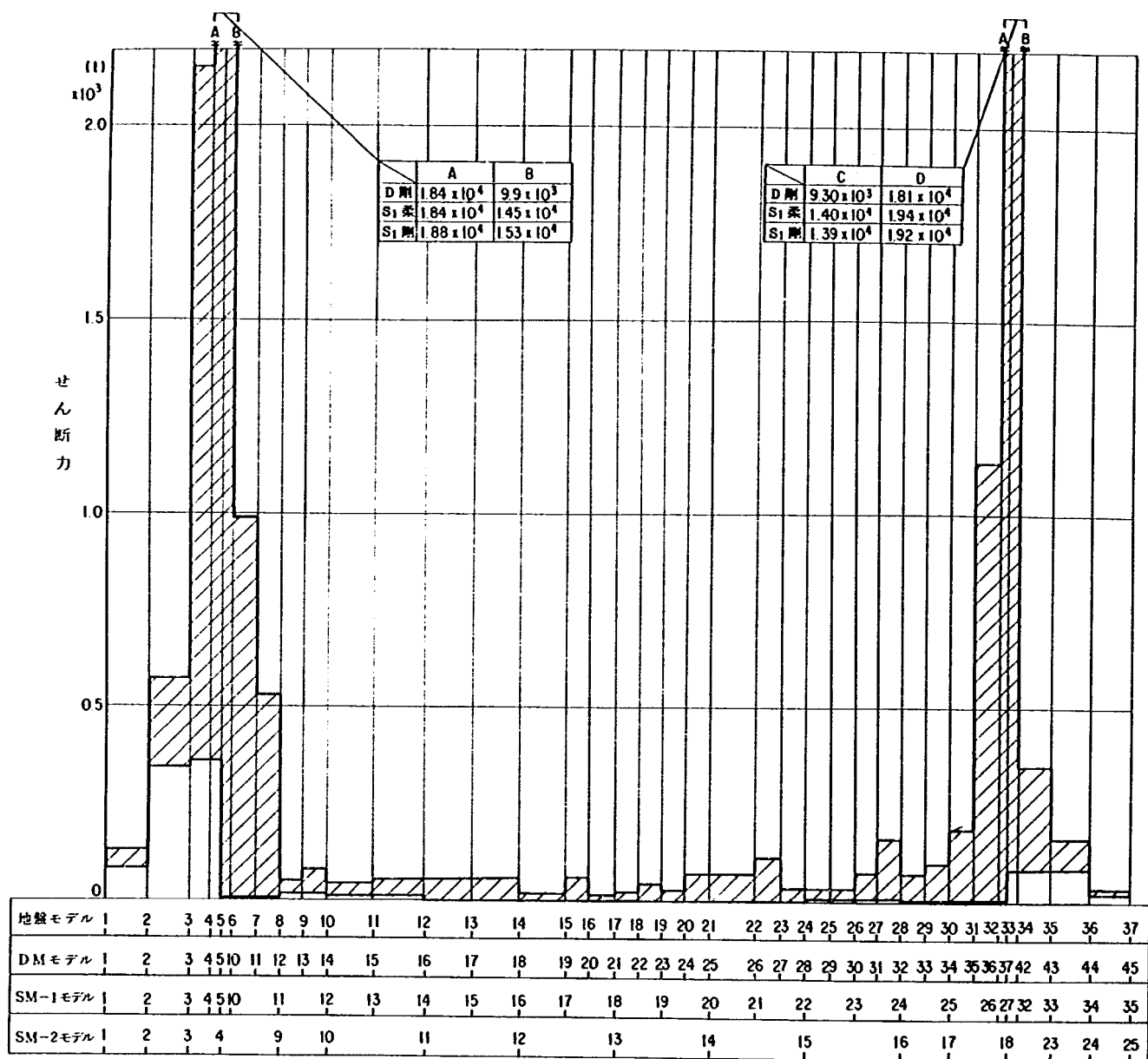
(d) ねじりモーメント (鉛直方向)

図-15 沈埋トンネル部の最大応答断面力の分布図



(e) せん断力 (水平方向)

図-15 沈埋トンネル部の最大応答断面力の分布図



(f) せん断力 (鉛直方向)
 図-15 沈埋トンネル部の最大応答断面力の分布図

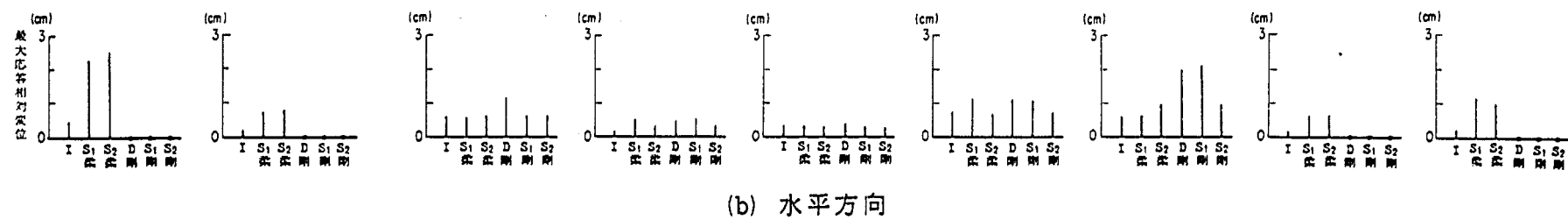
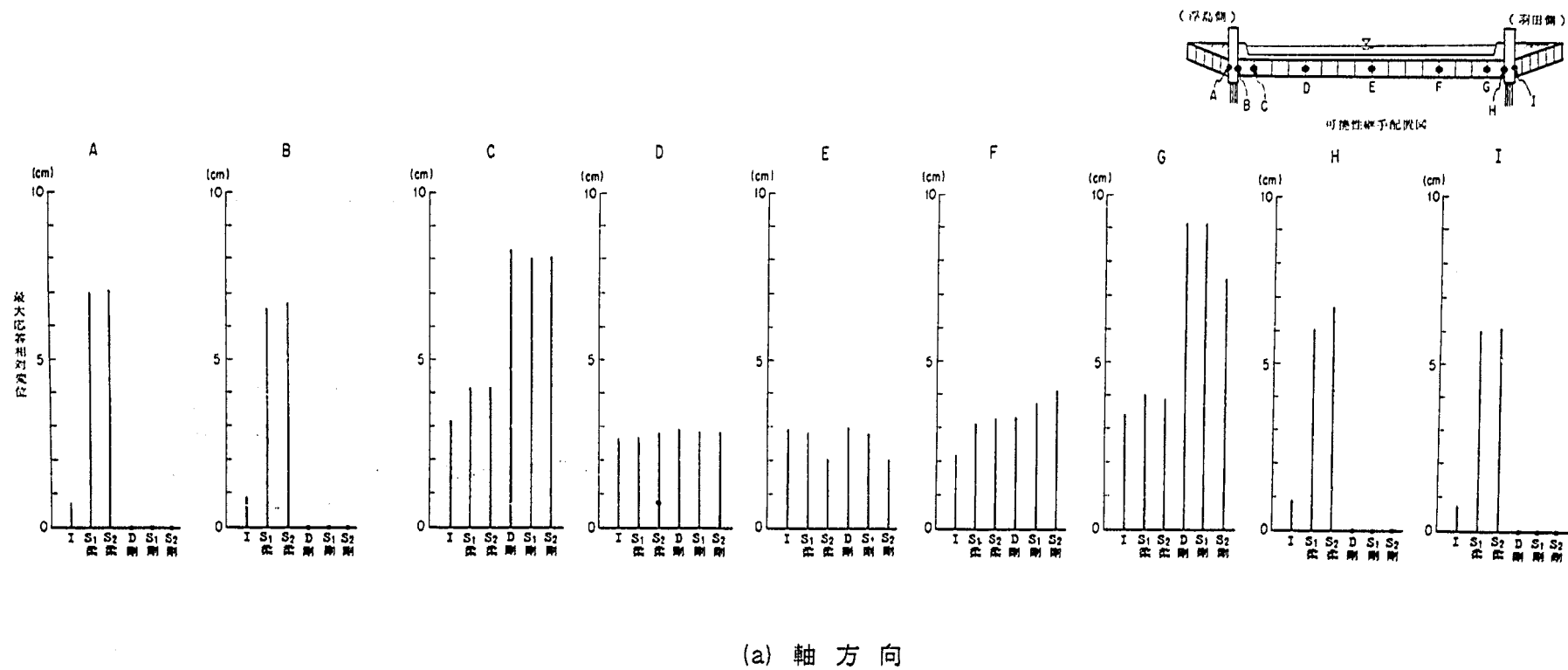


図 - 1 6 可撓性継手の最大応答相対変位の比較図

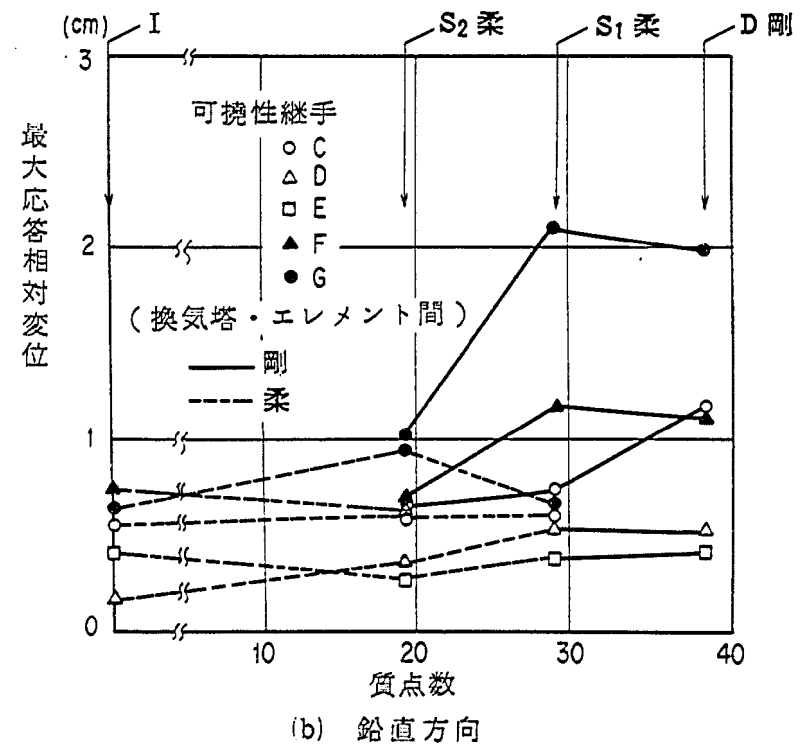
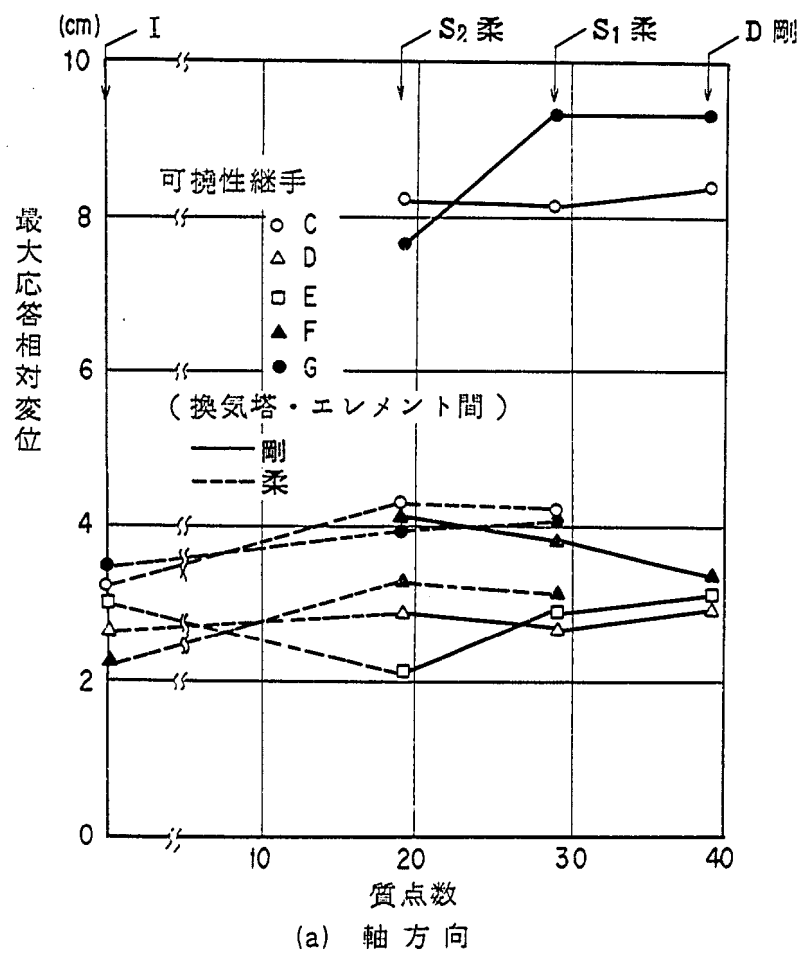
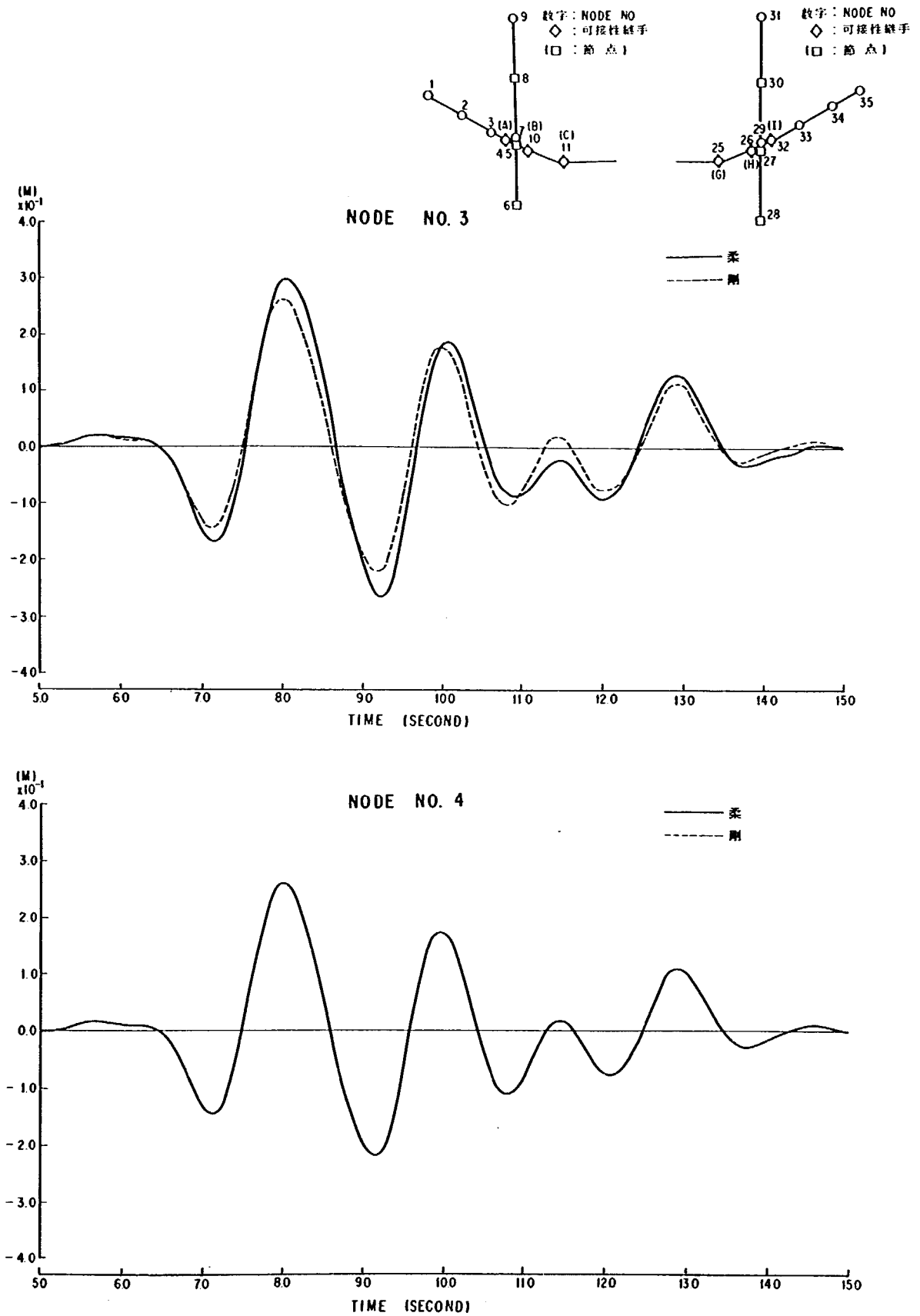
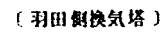
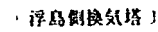


図-17 沈埋トンネル部の可撓性継手最大応答相対変位と質点数との関係



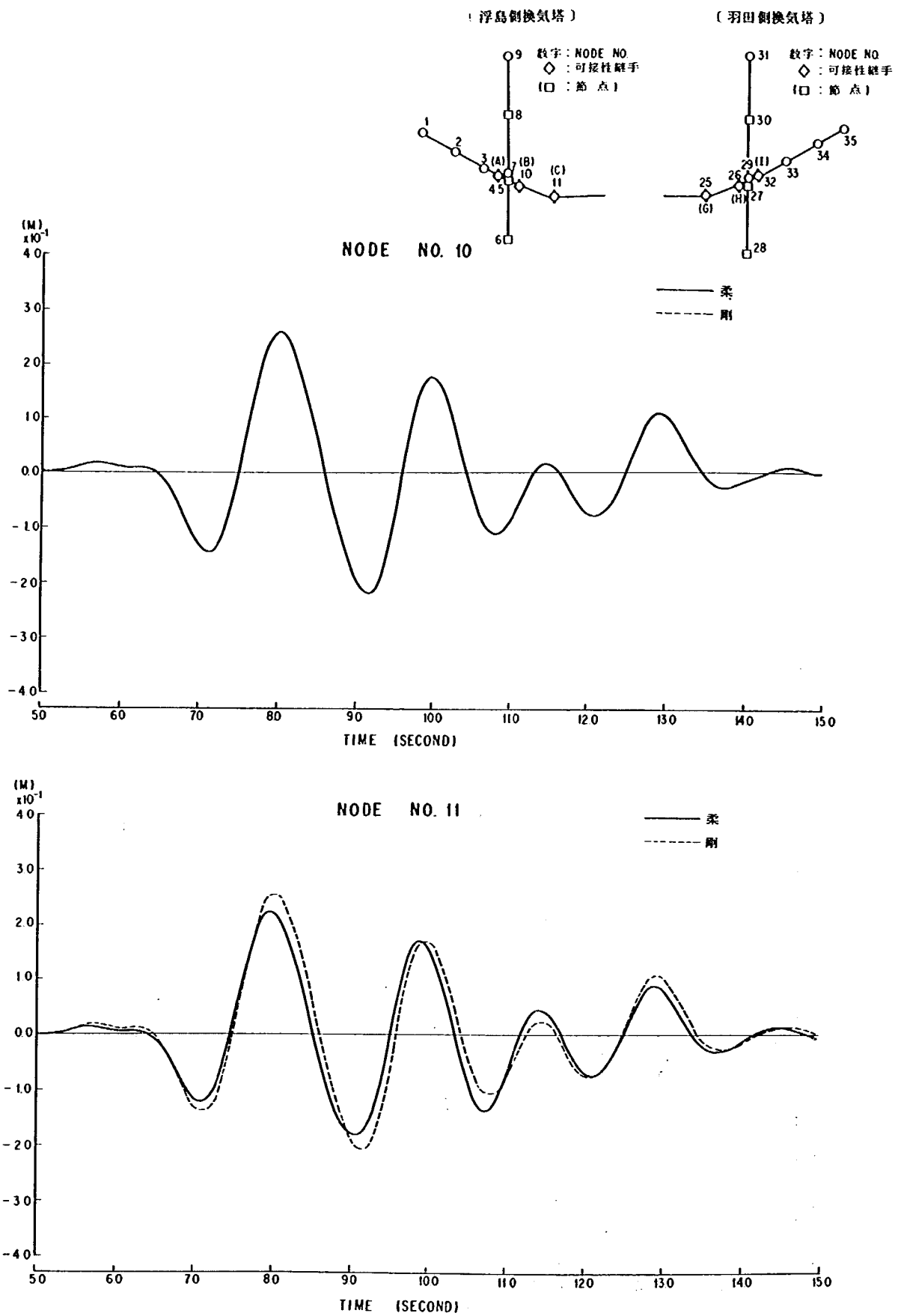
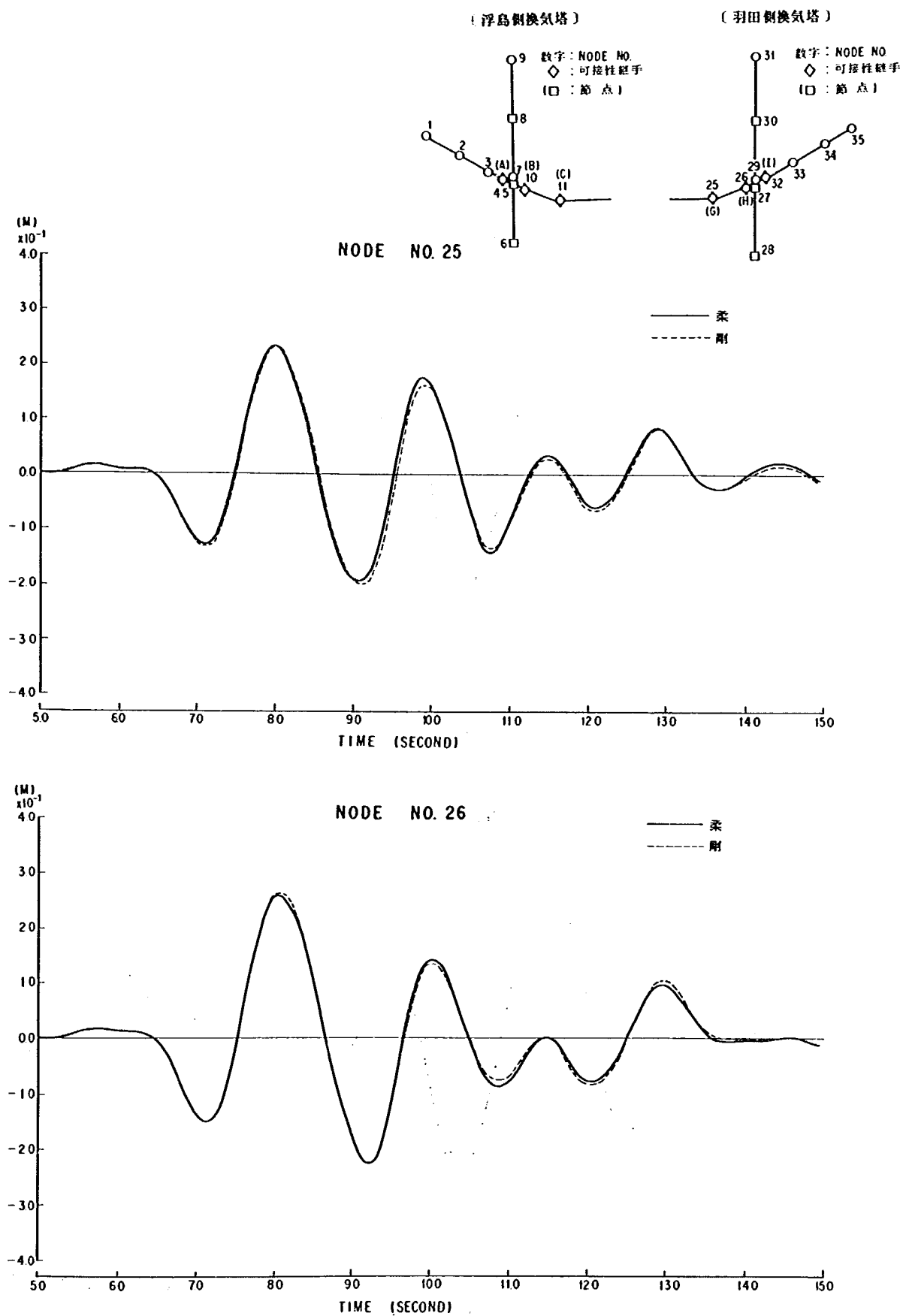


図-18 SM-1モデルの代表的質点の時刻歴応答変位(軸方向) (2)



(図-18) S.M-1モデルの代表的質点の時刻歴応答変位(軸方向) (3)

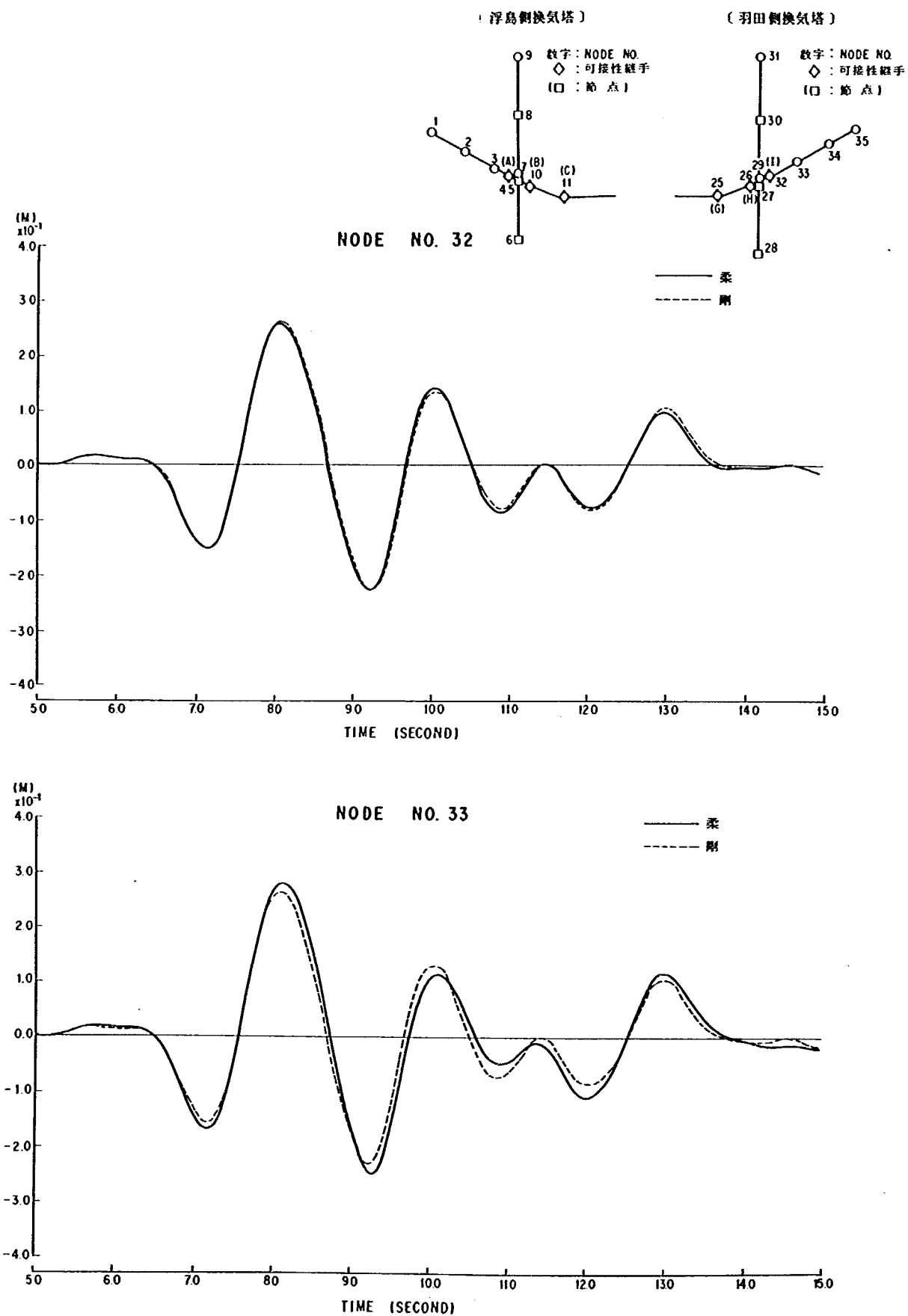


図-18 SM-1モデルの代表的質点の時刻歴応答変位(軸方向) (4)

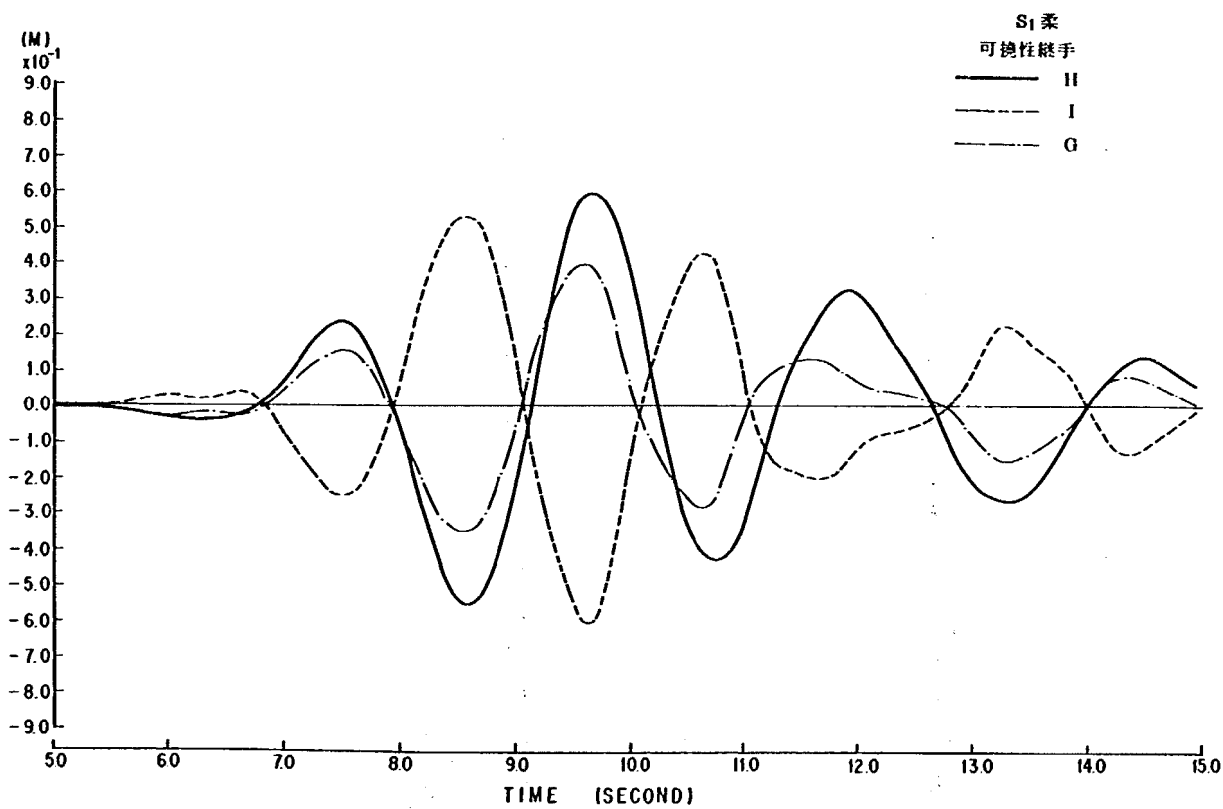
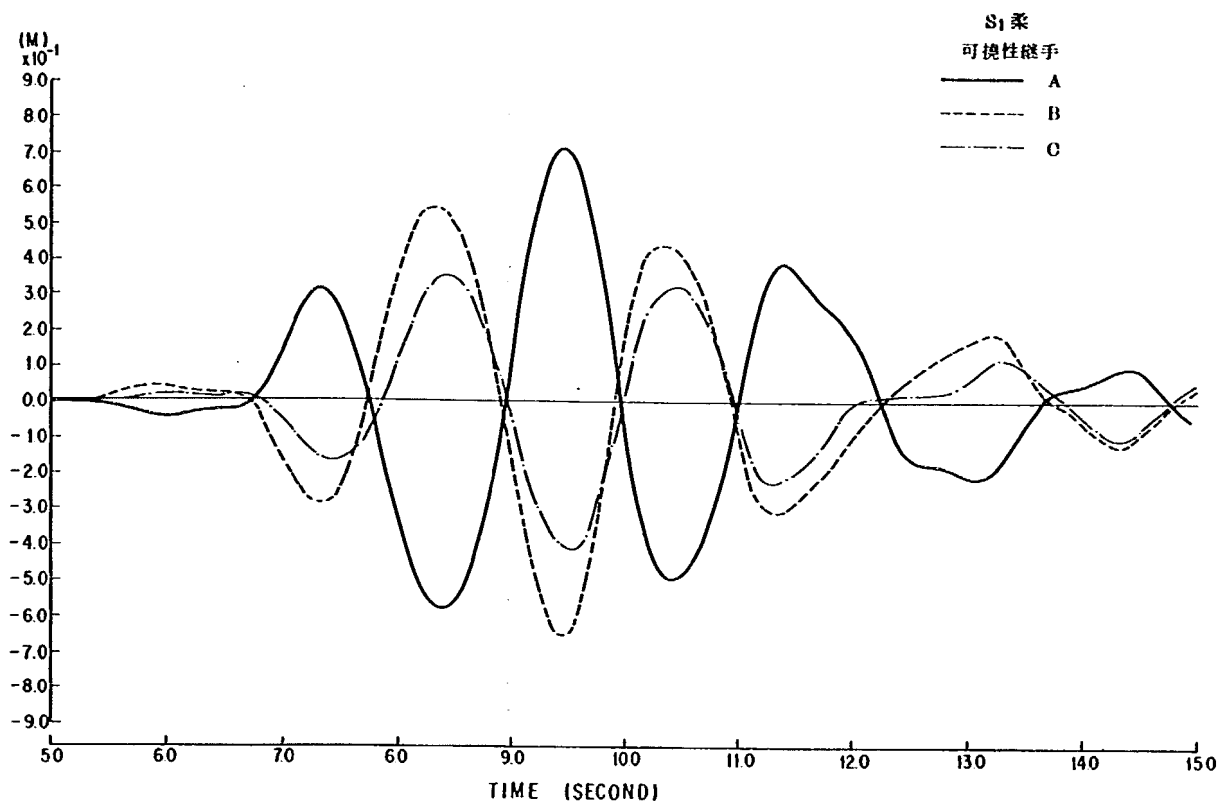
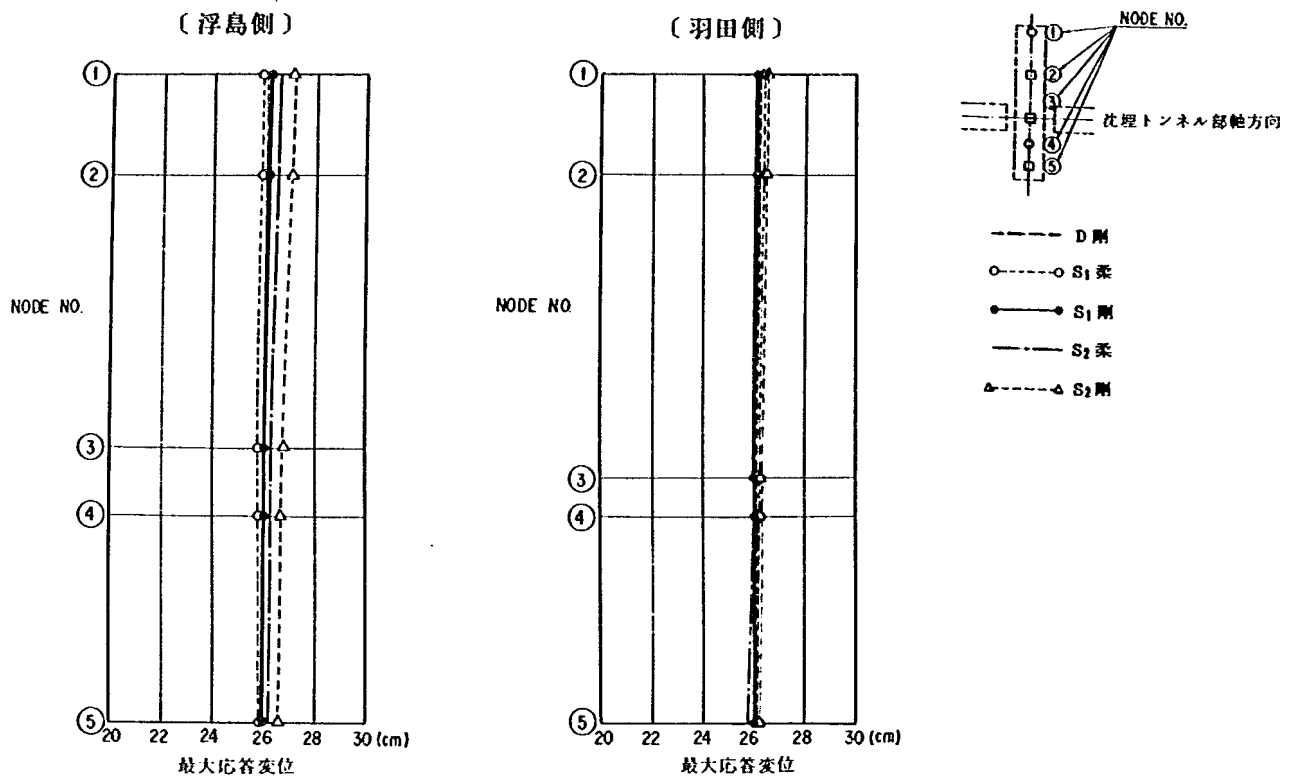
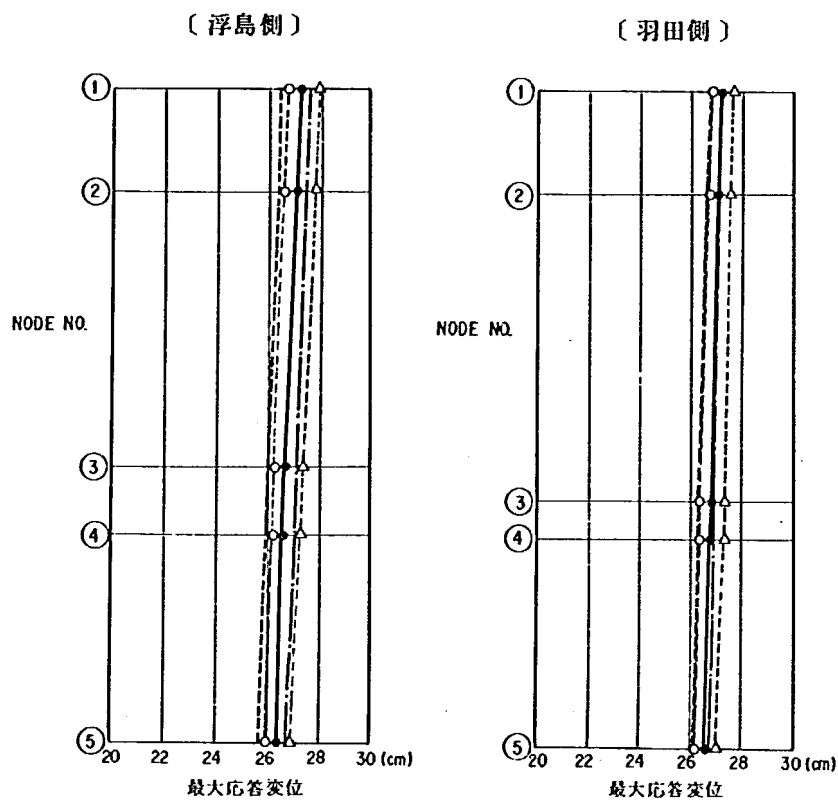


図-19 SM-1モデルの代表的可撓性継手の時刻歴応答相対変位(軸方向)

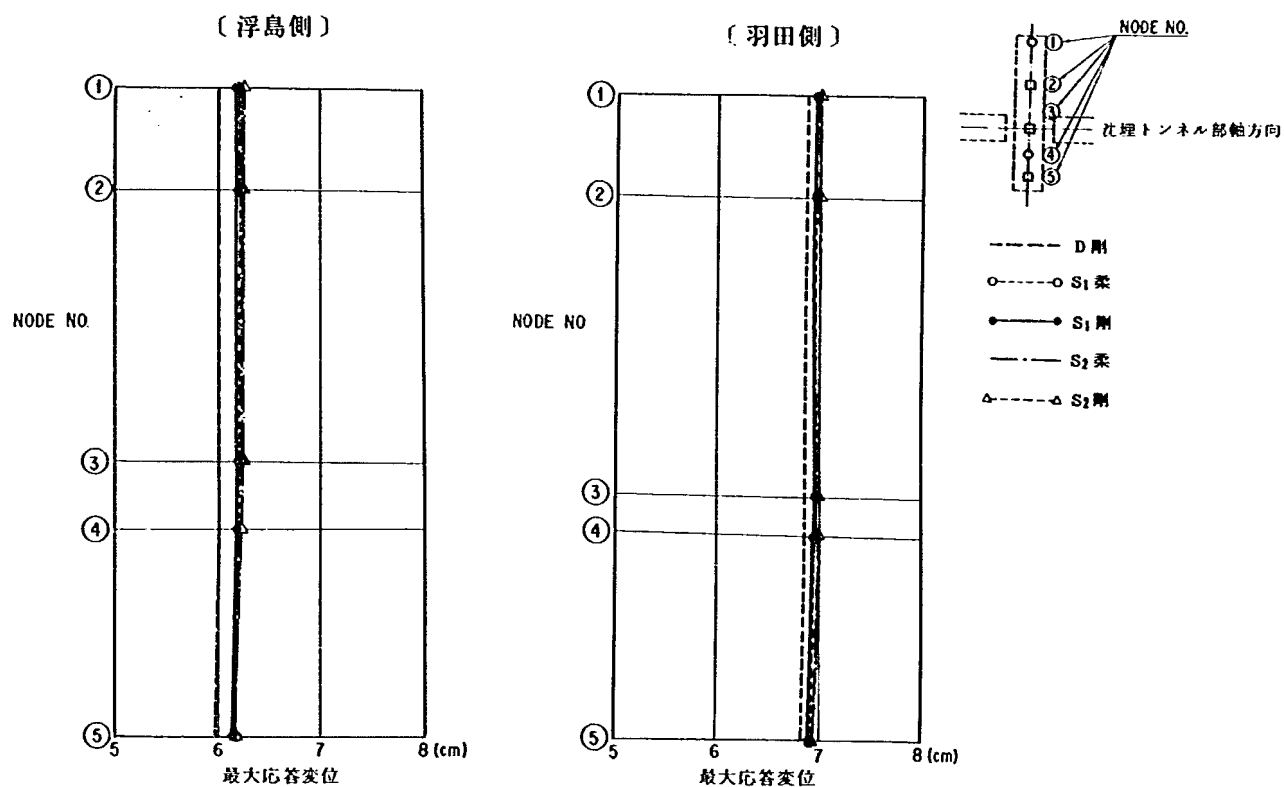


(a) 軸 方 向



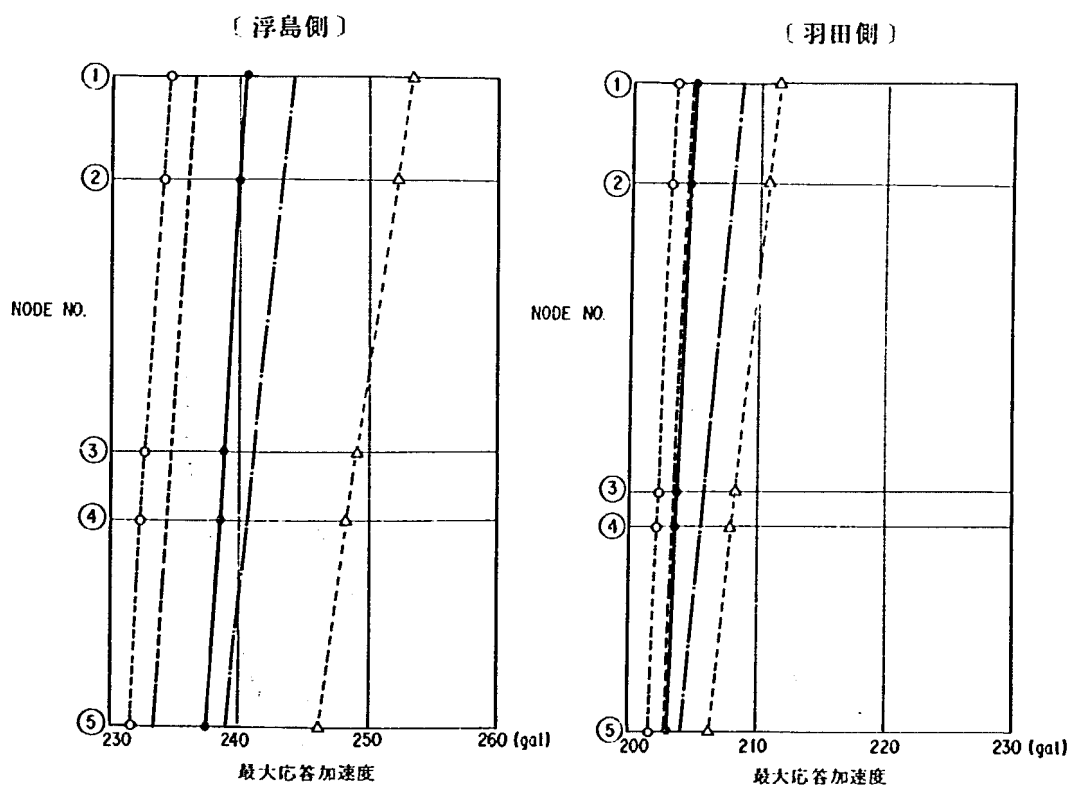
(b) 水平方向

図-20 換気塔の最大応答変位



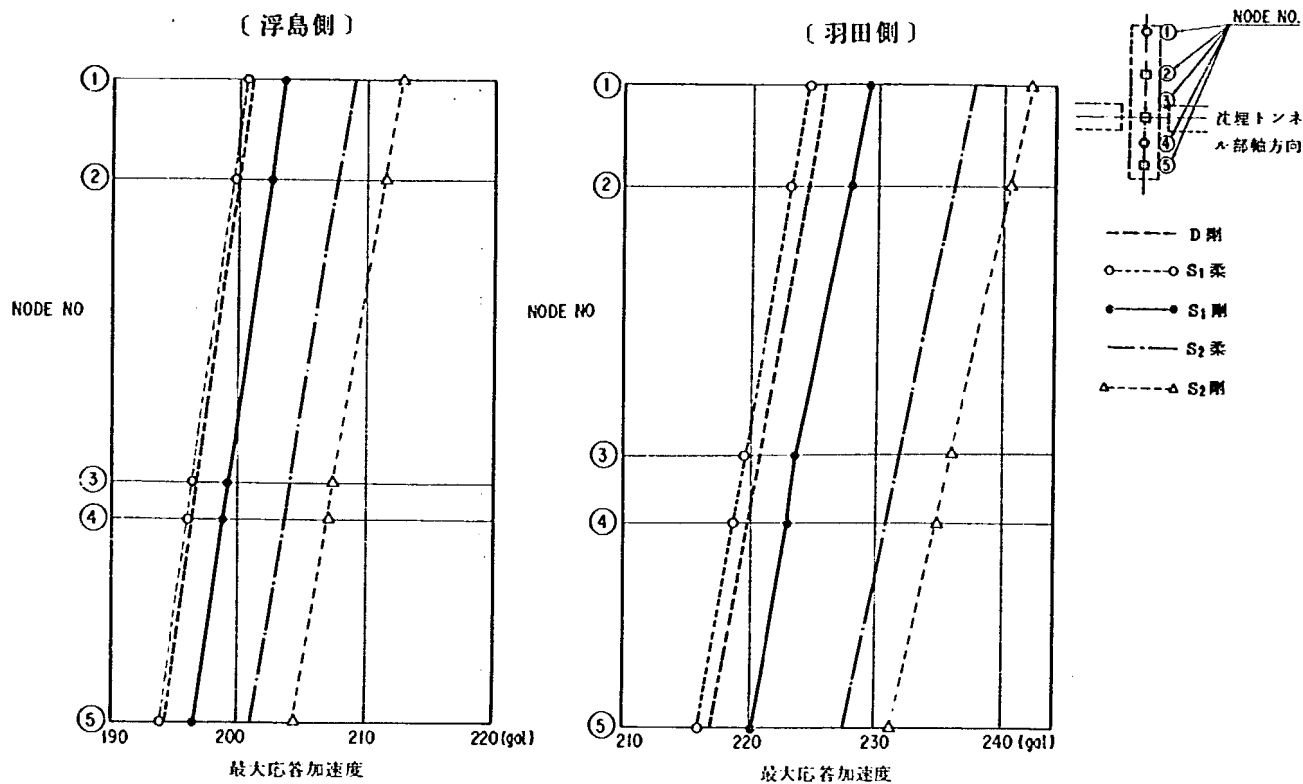
(c) 鉛直方向

図-20 換気塔の最大応答変位

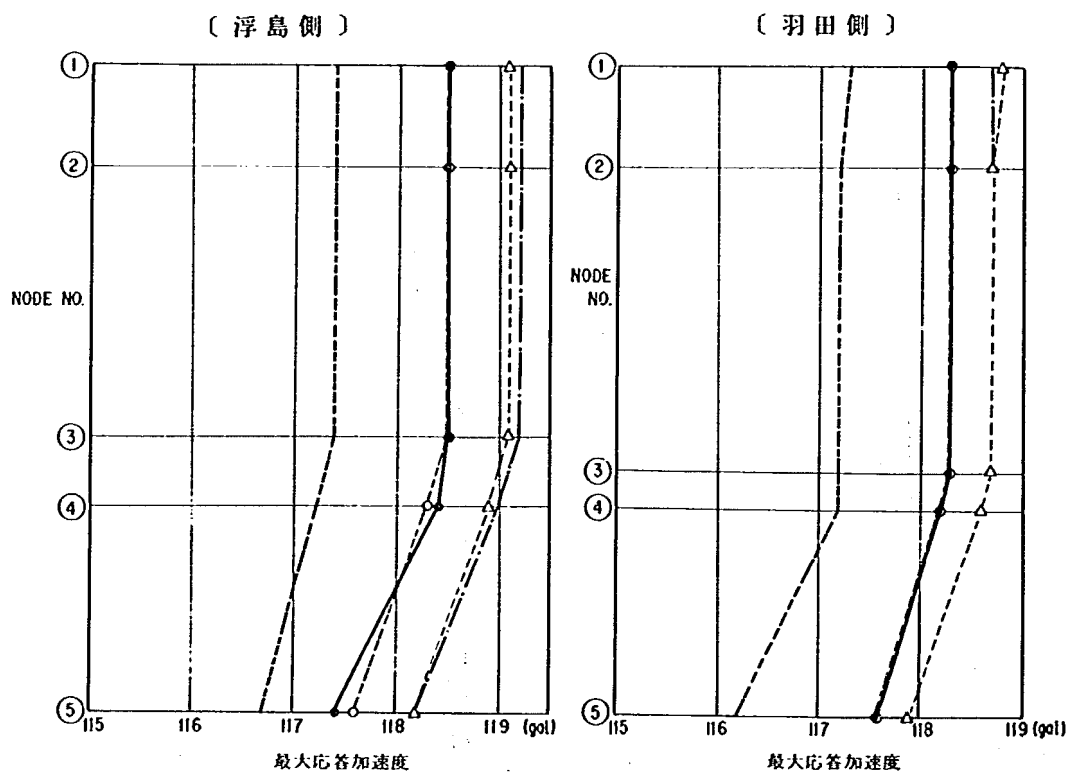


(a) 軸方向

図-21 換気塔の最大応答加速度

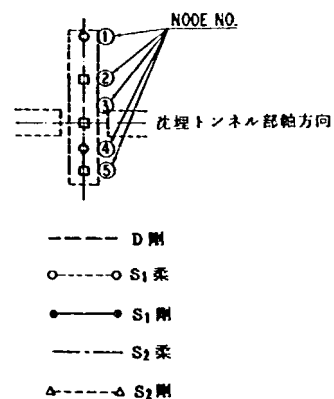
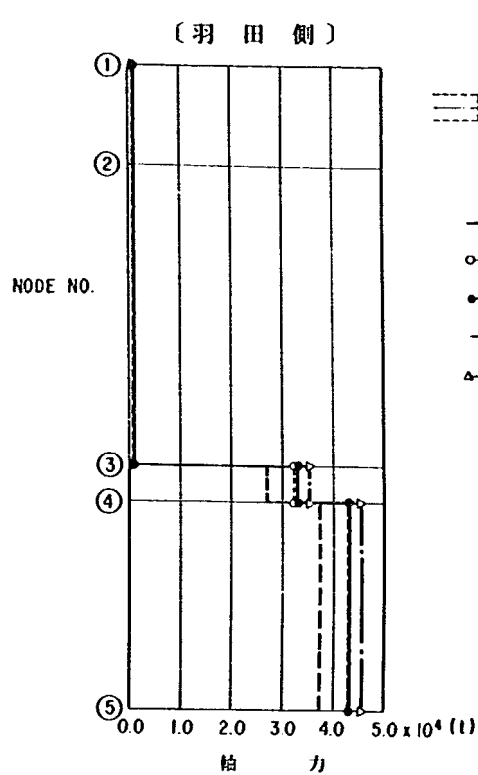
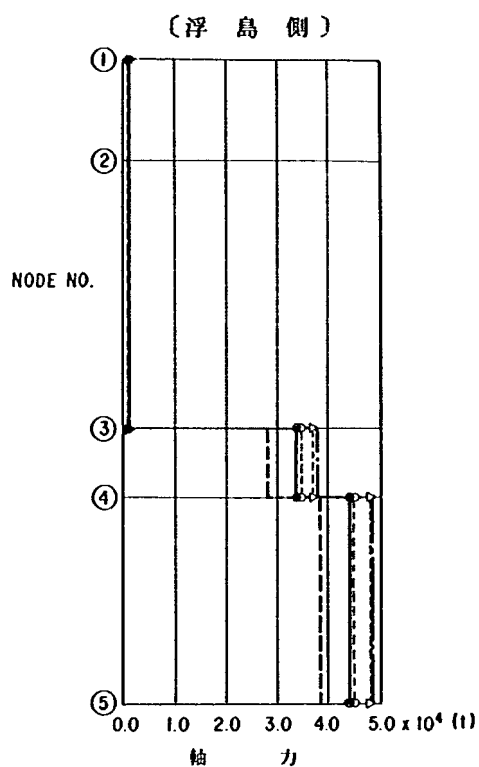


(b) 水平方向

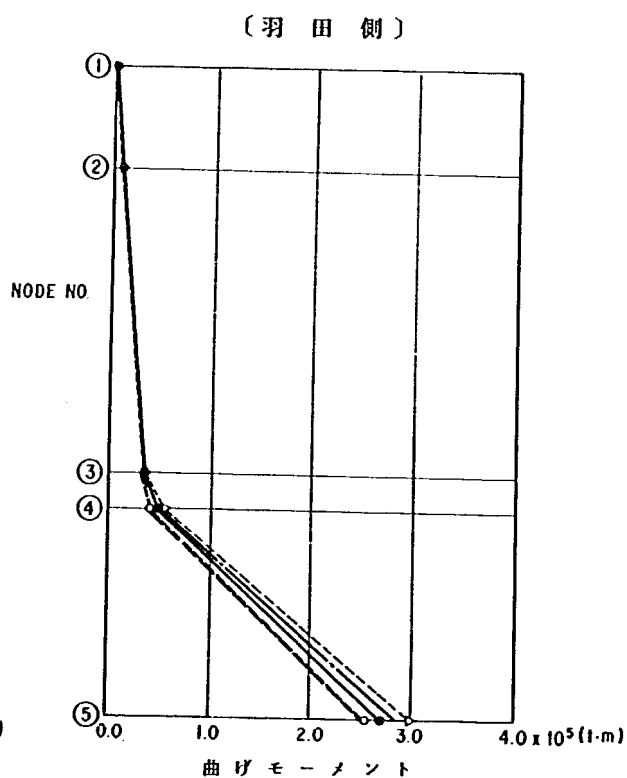
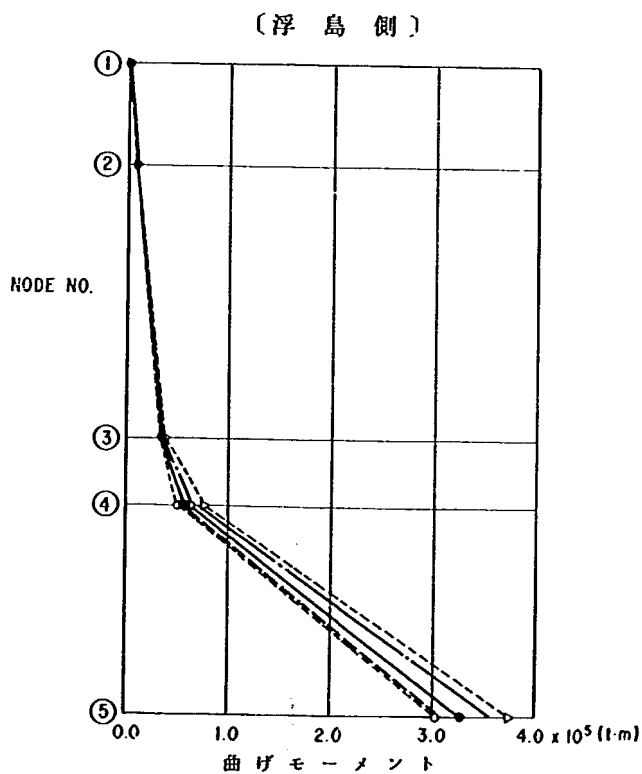


(c) 鉛直方向

図-21 換気塔の最大応答加速度

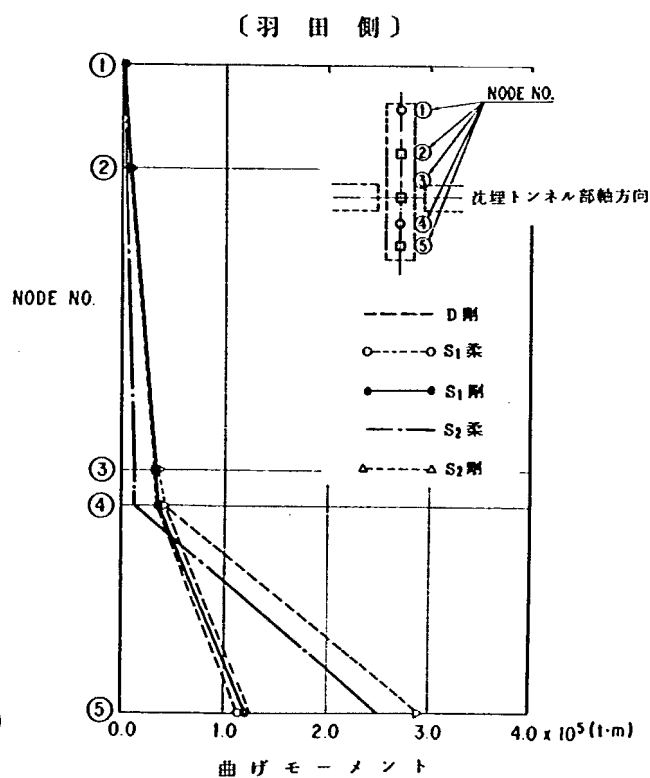
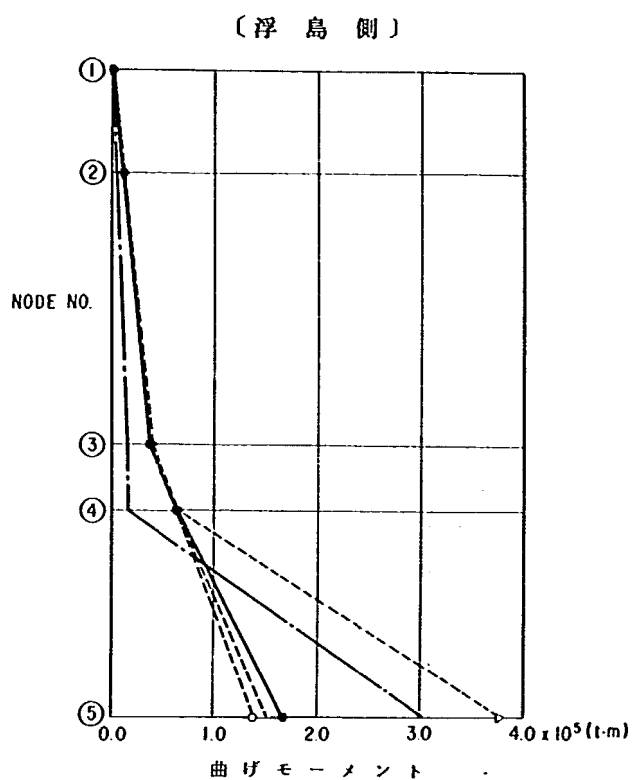


(a)軸力

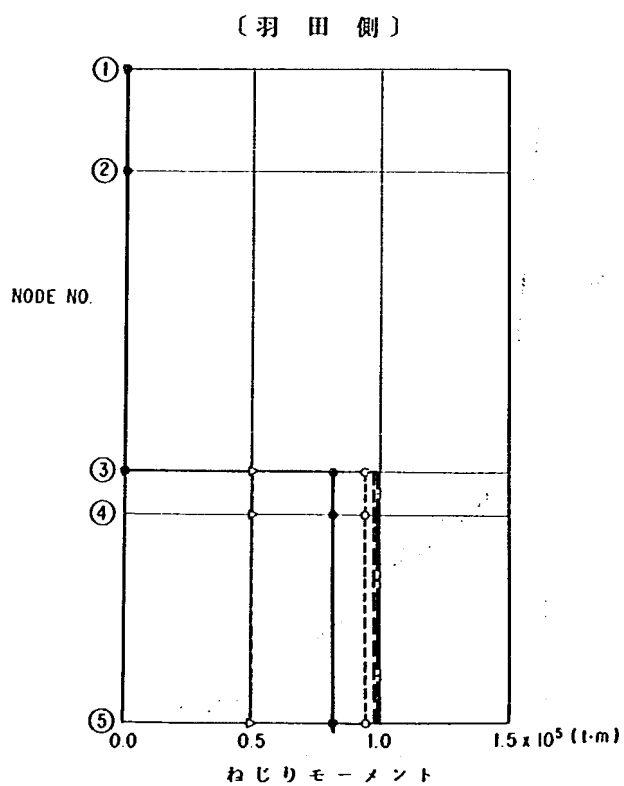
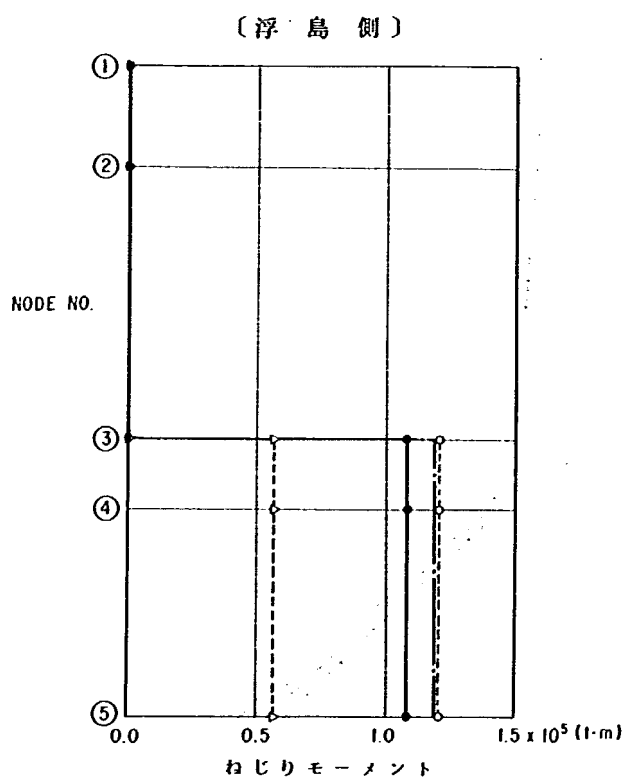


(b)曲げモーメント(水平方向, トンネル部軸回り)

図-22 換気塔の最大応答断面力



(c) 曲げモーメント (水平方向, トンネル部軸直角回り)



(d) ねじりモーメント

図-22 換気塔の最大応答断面力

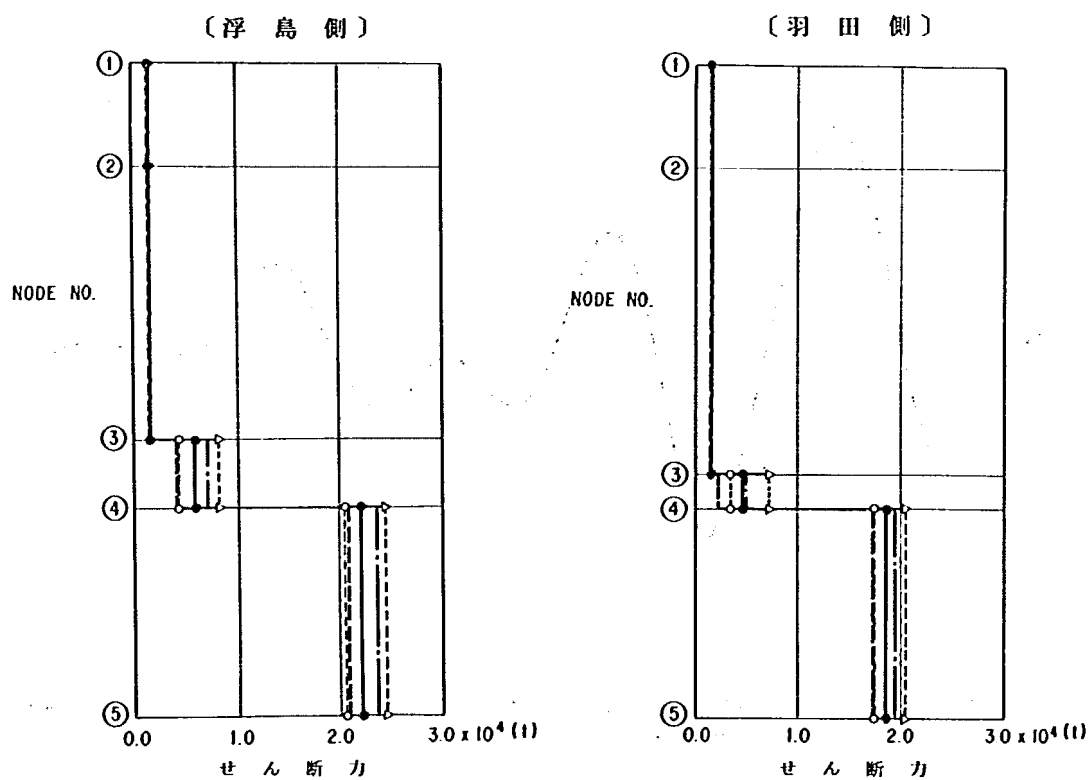
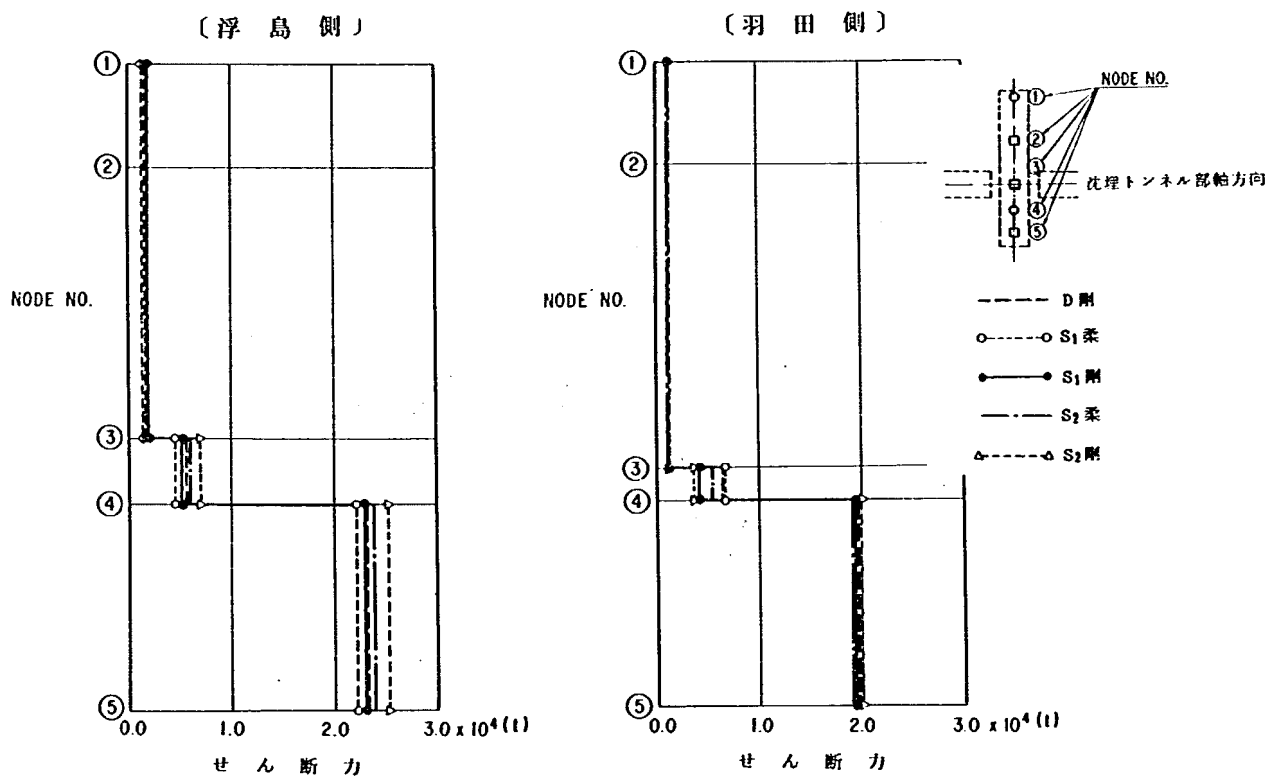


図-22 換気塔の最大応答断面力

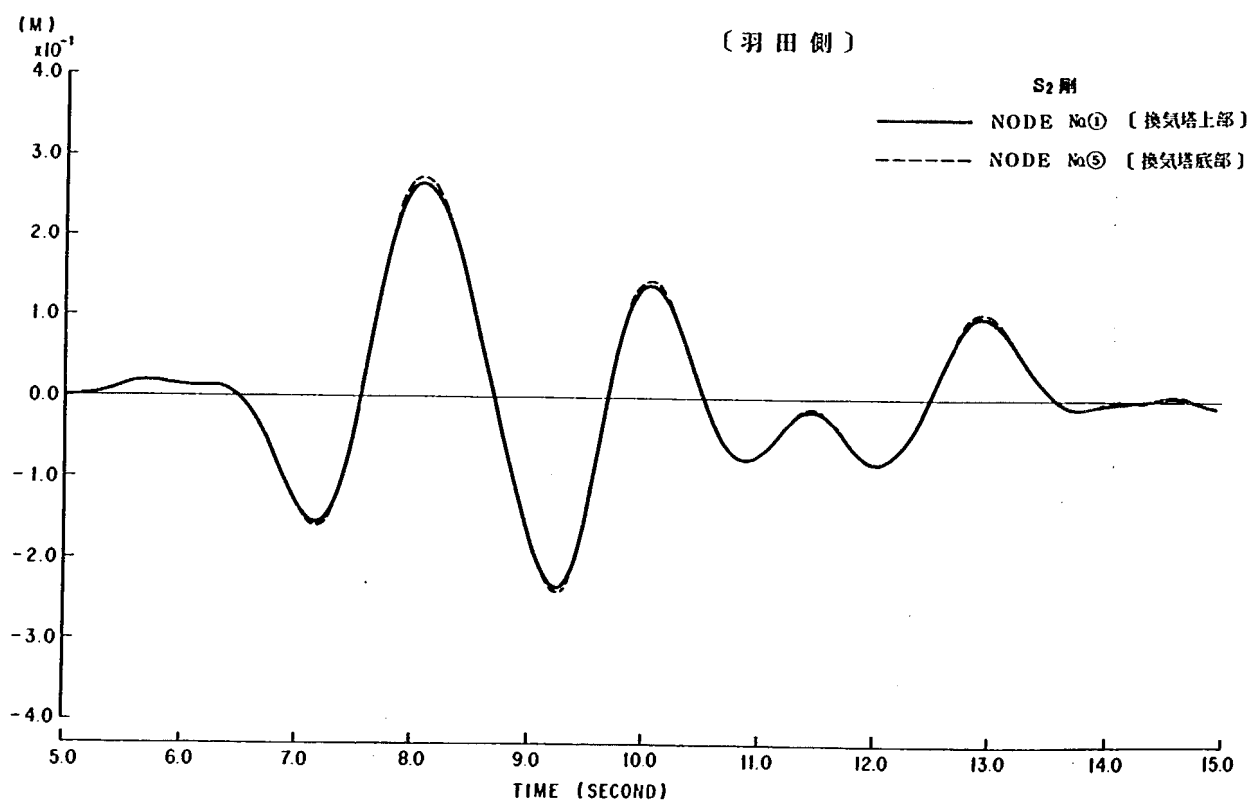
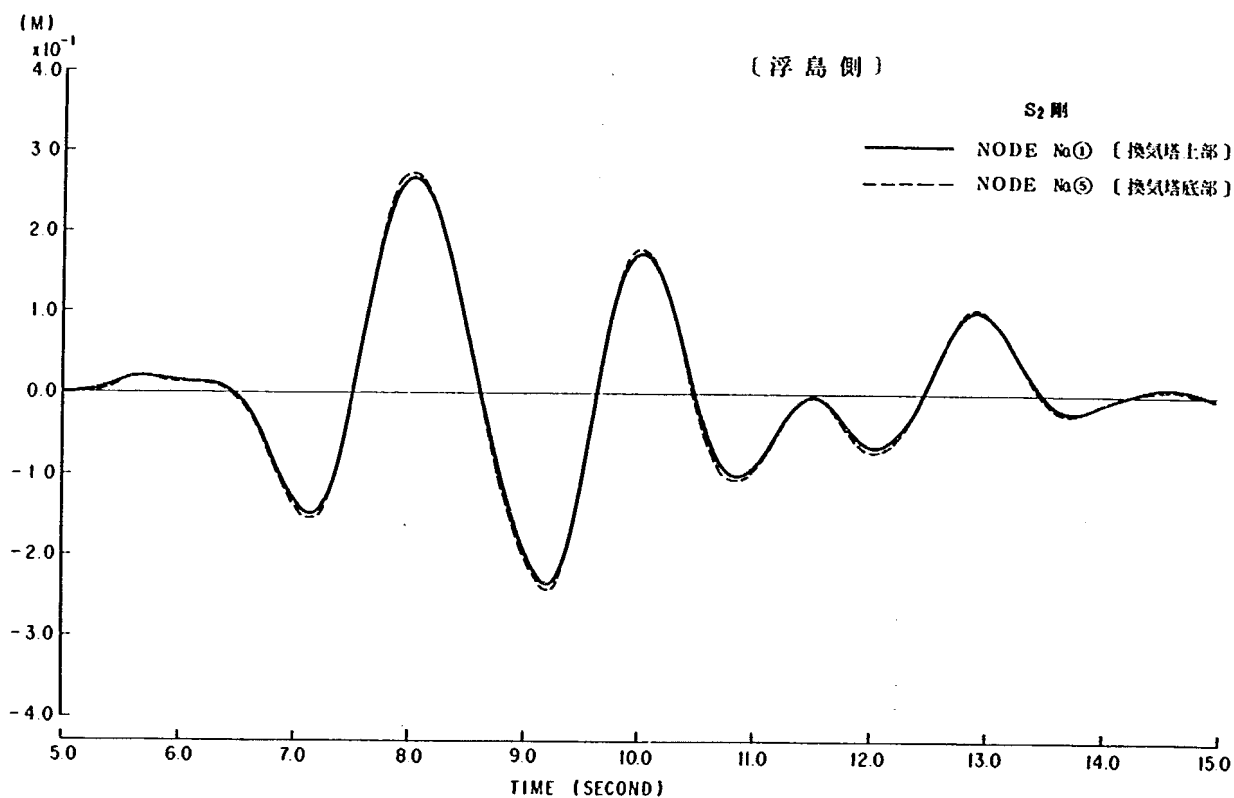


図-23 SM-2モデルの代表的換気塔質点の時刻歴応答変位(鉛直方向)

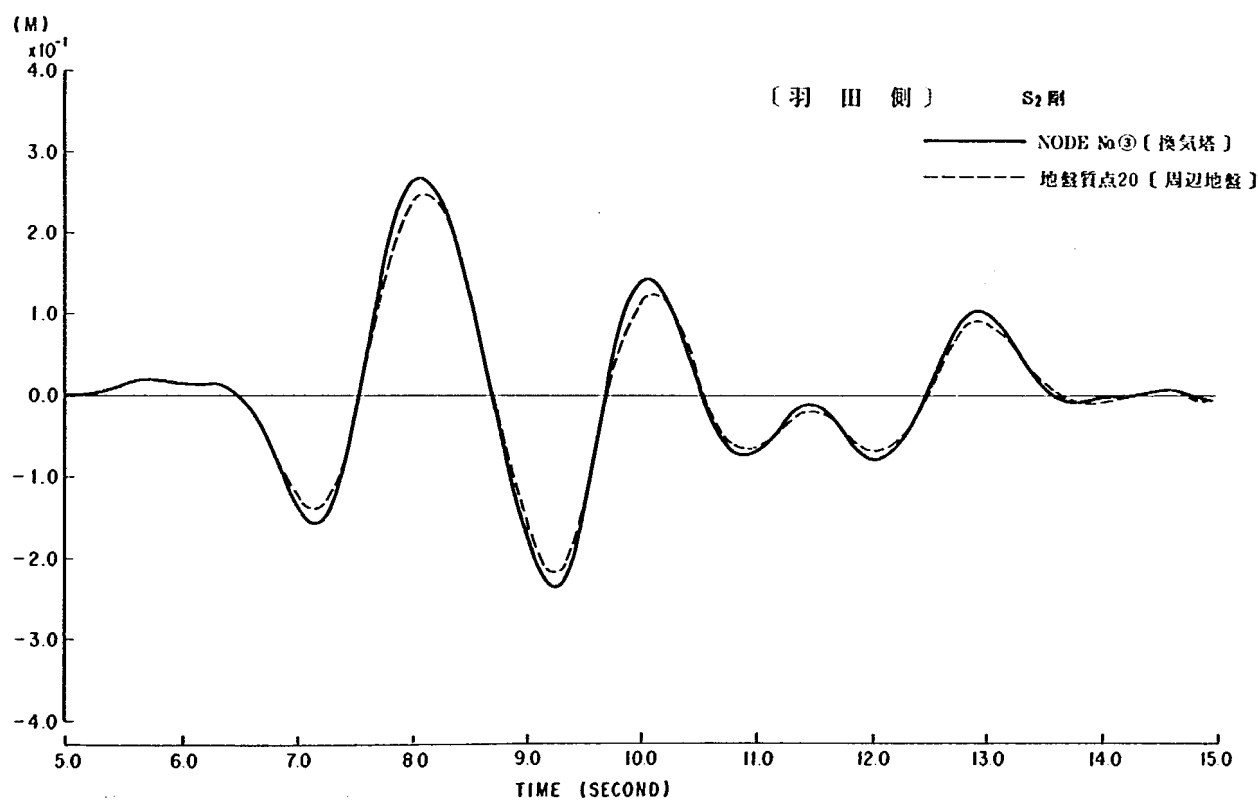
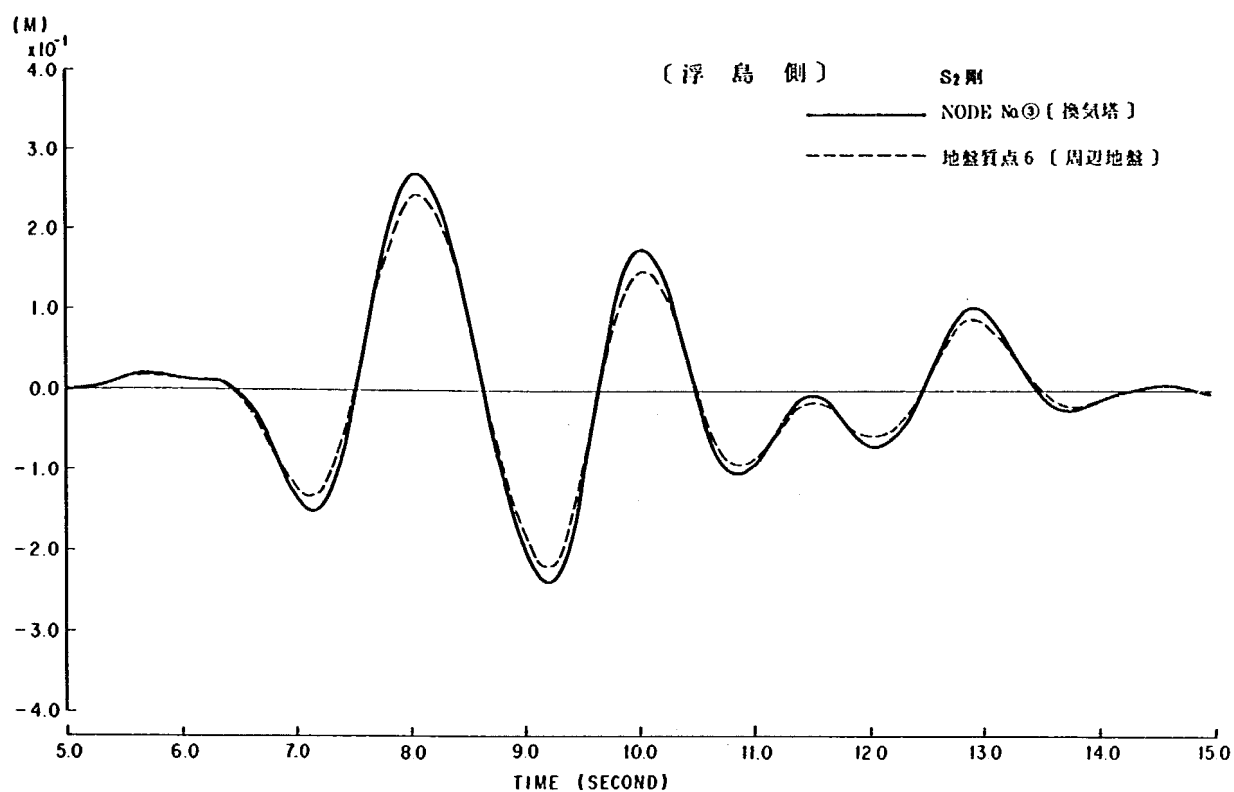


図-23 SM-2モデルの代表的換気塔質点の時刻歴応答変位(鉛直方向)

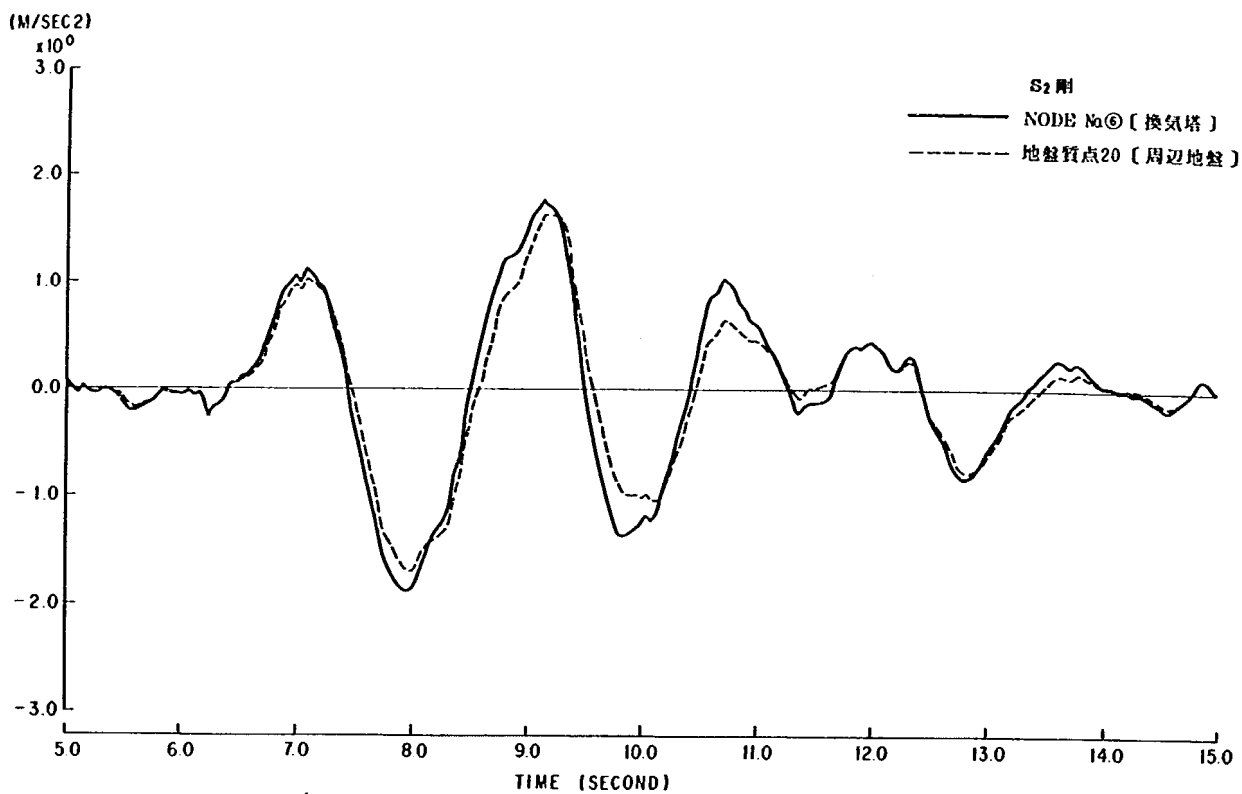


図-23 SM-2モデルの代表的換気塔質点の時刻歴応答変位（鉛直方向）

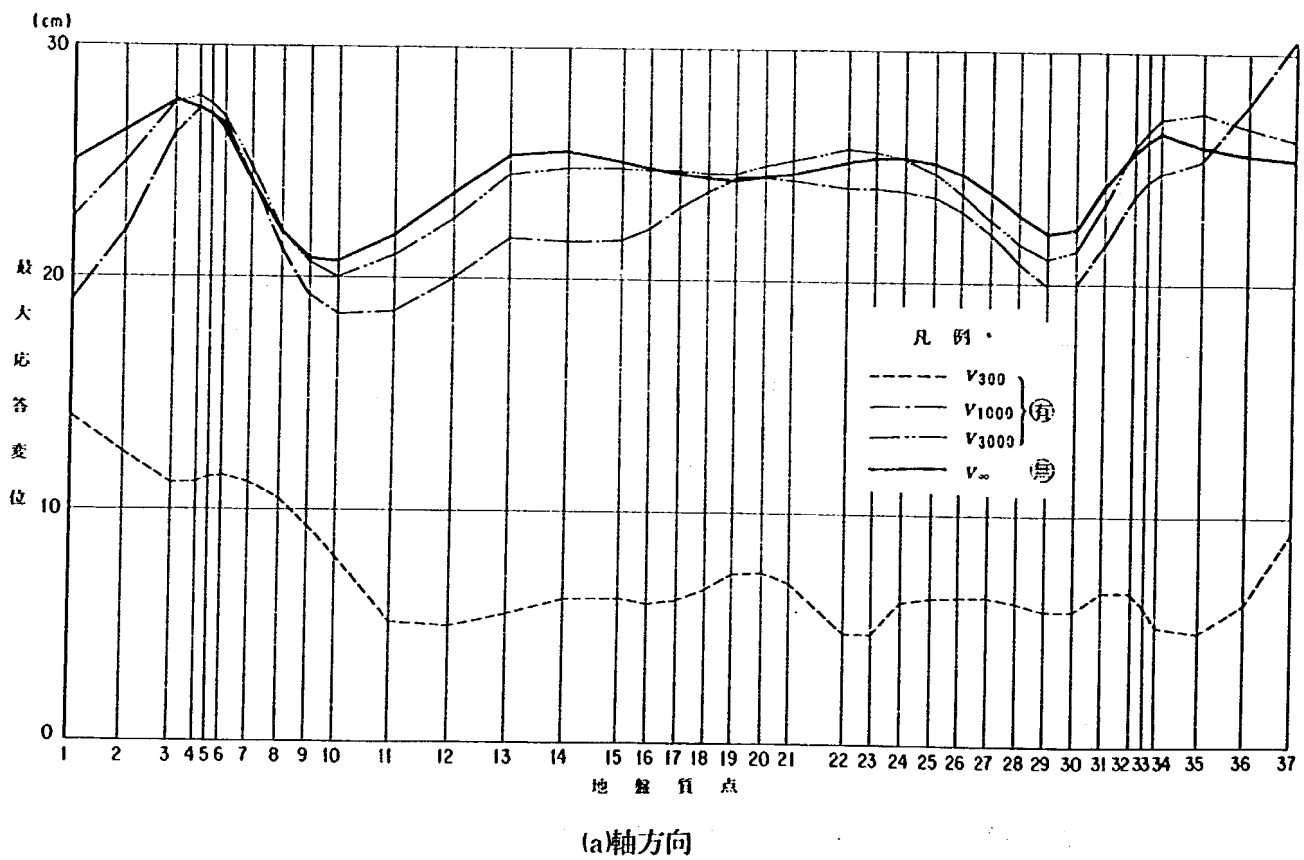


図-24 位相差入力に対する周辺地盤質点の最大応答変位

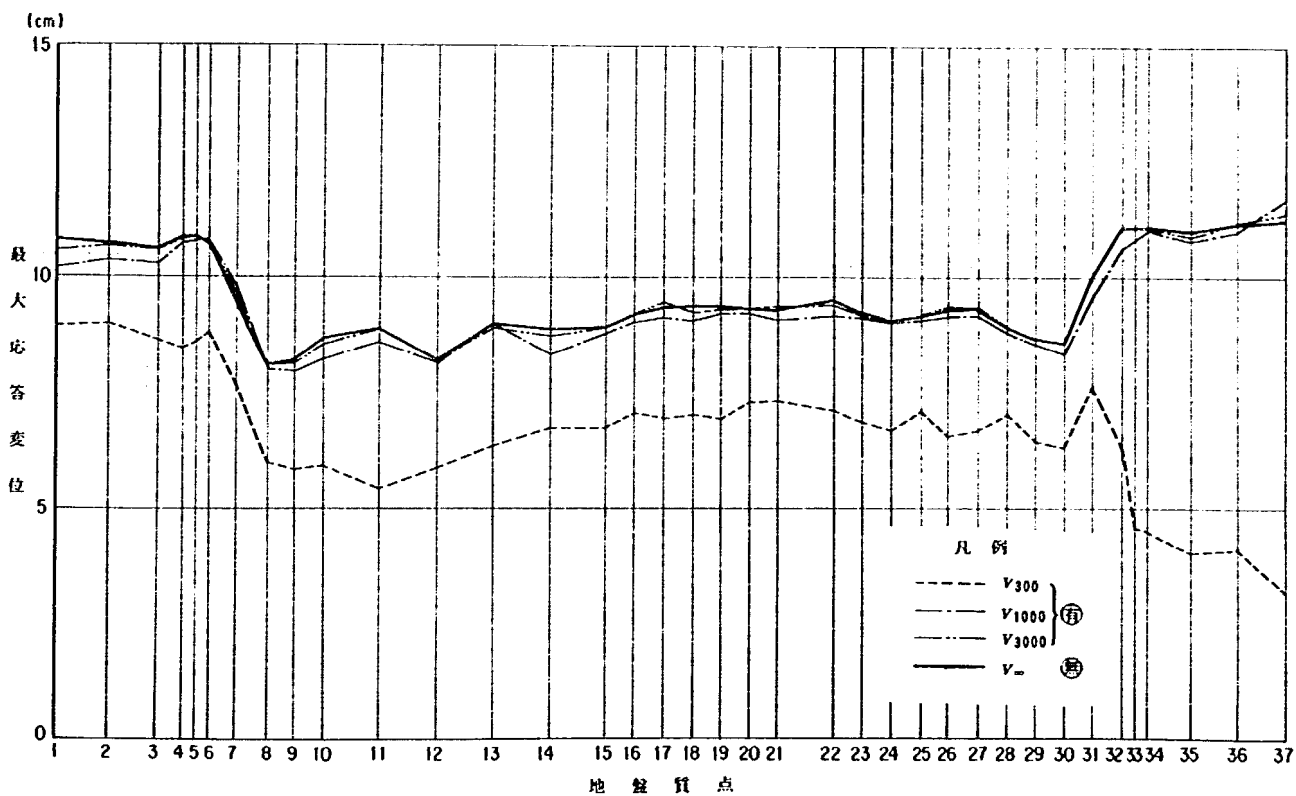
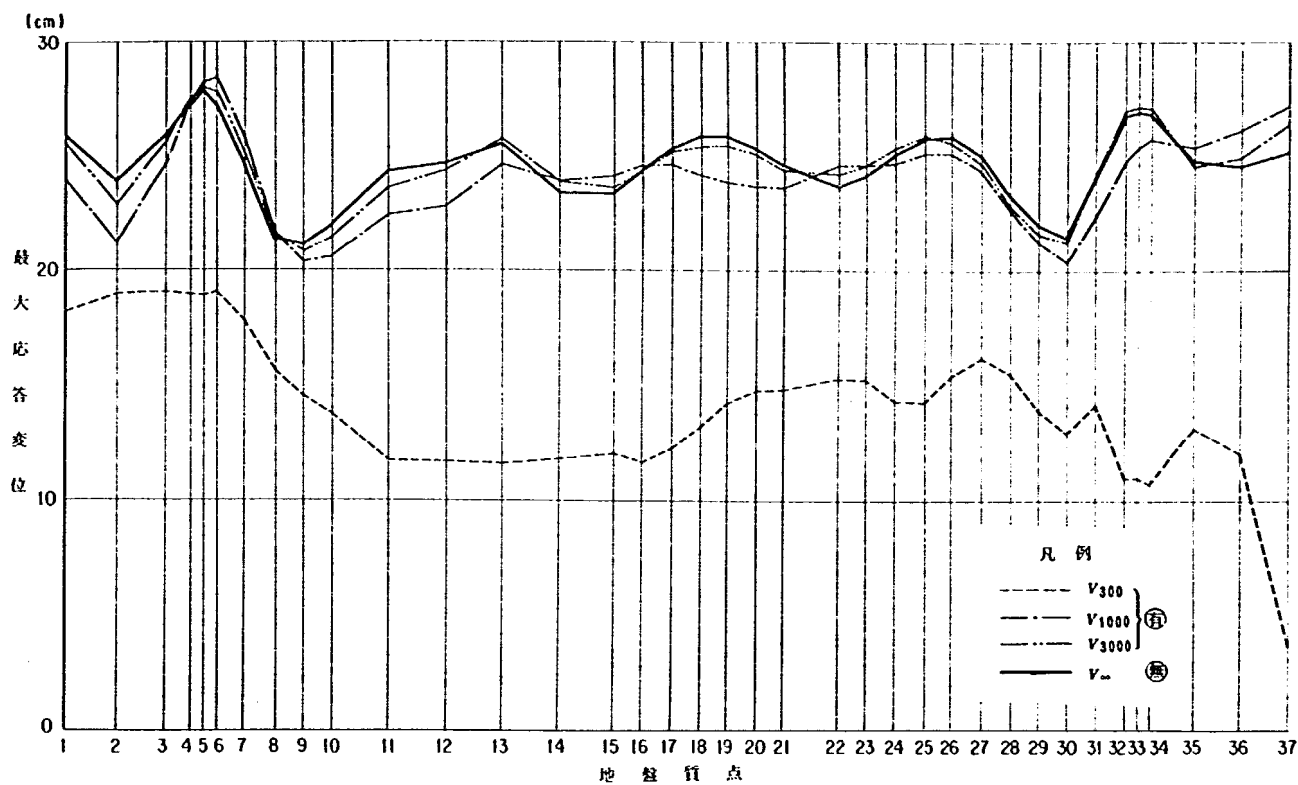


図-24 位相差入力に対する周辺地盤質点の最大応答変位

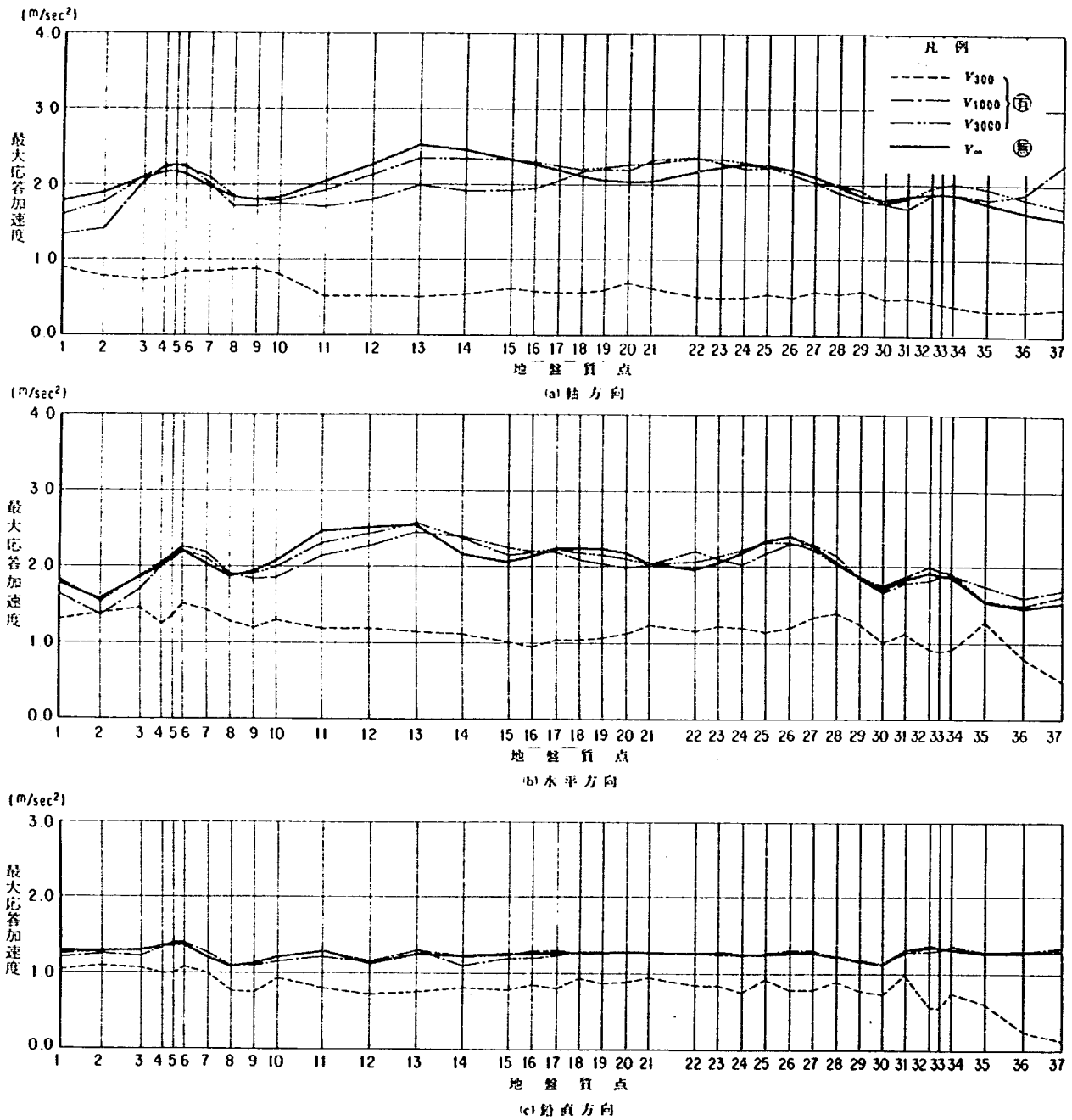


図-25 位相差入力に対する周辺地盤質点の最大応答加速度

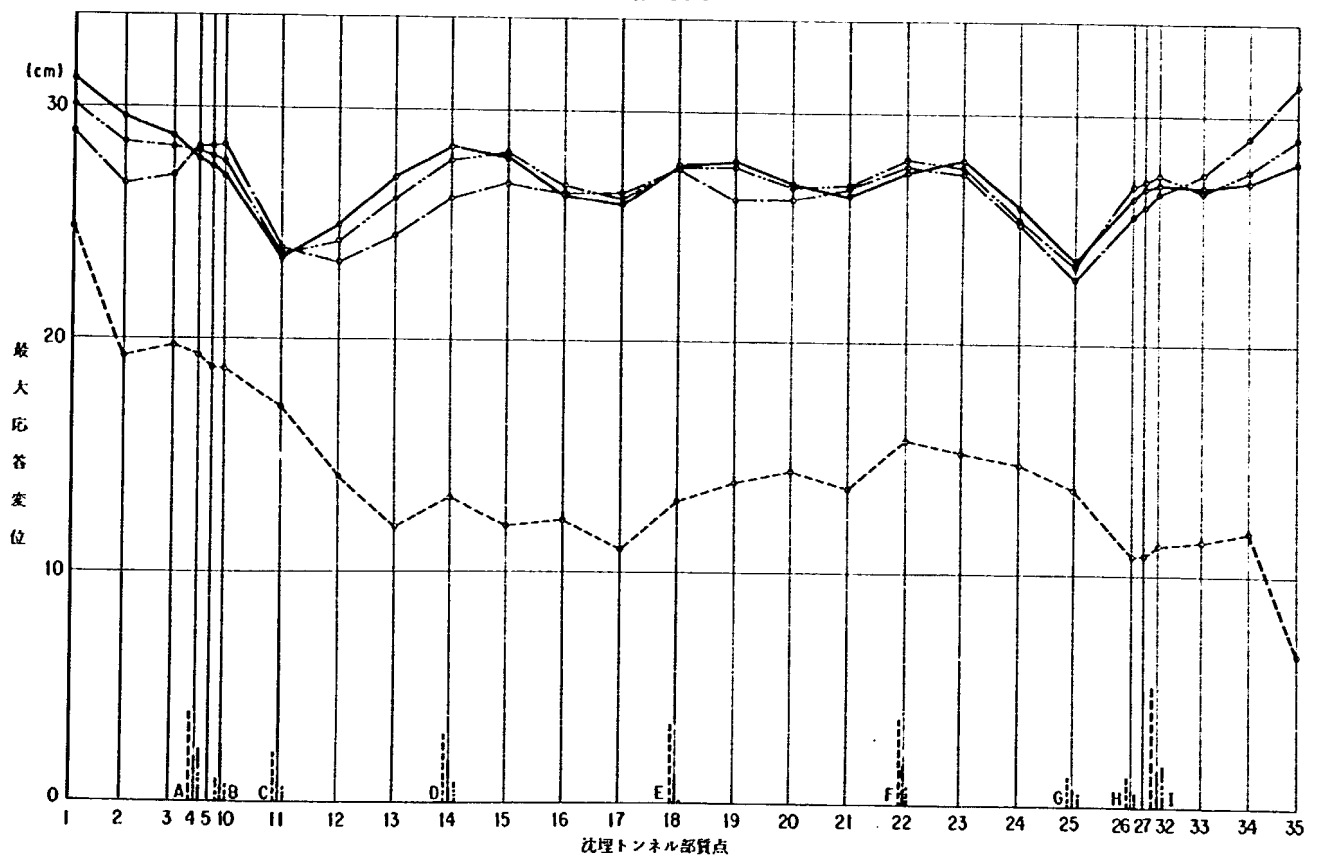
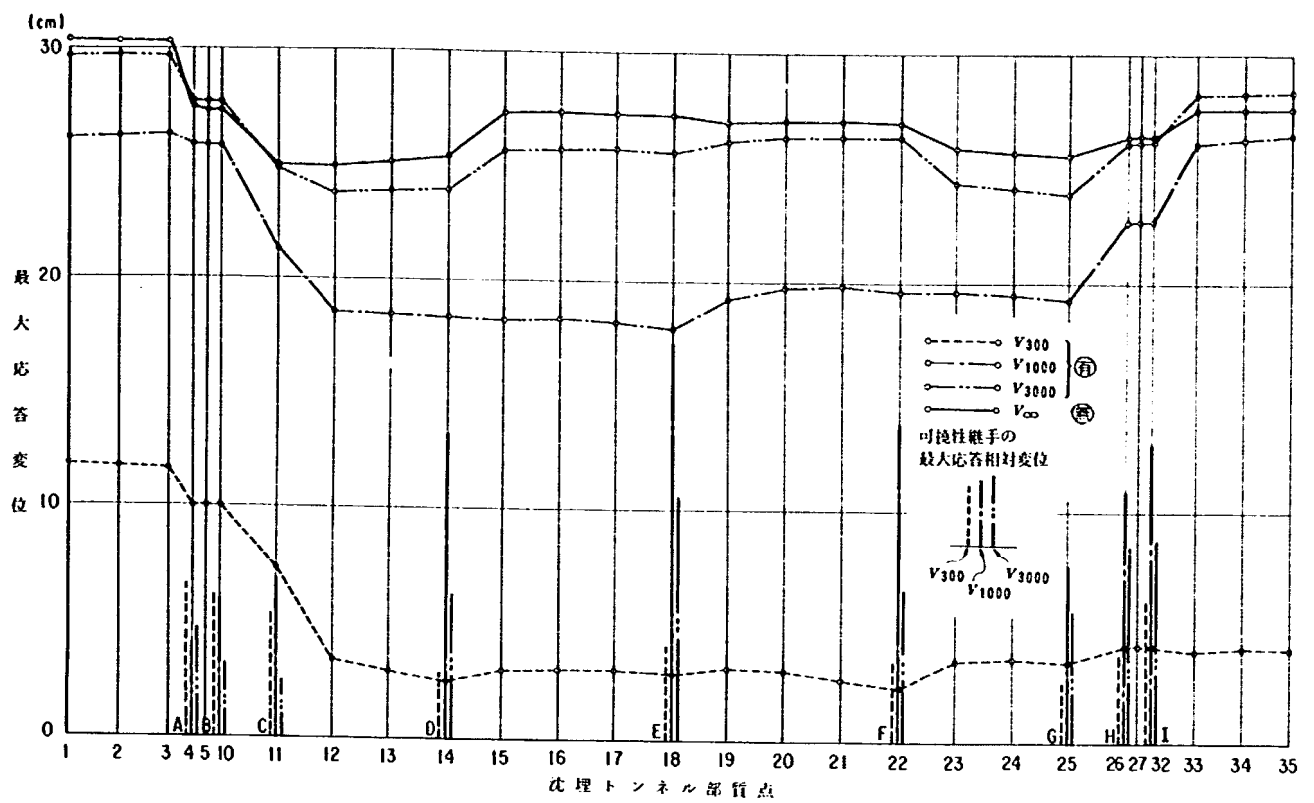
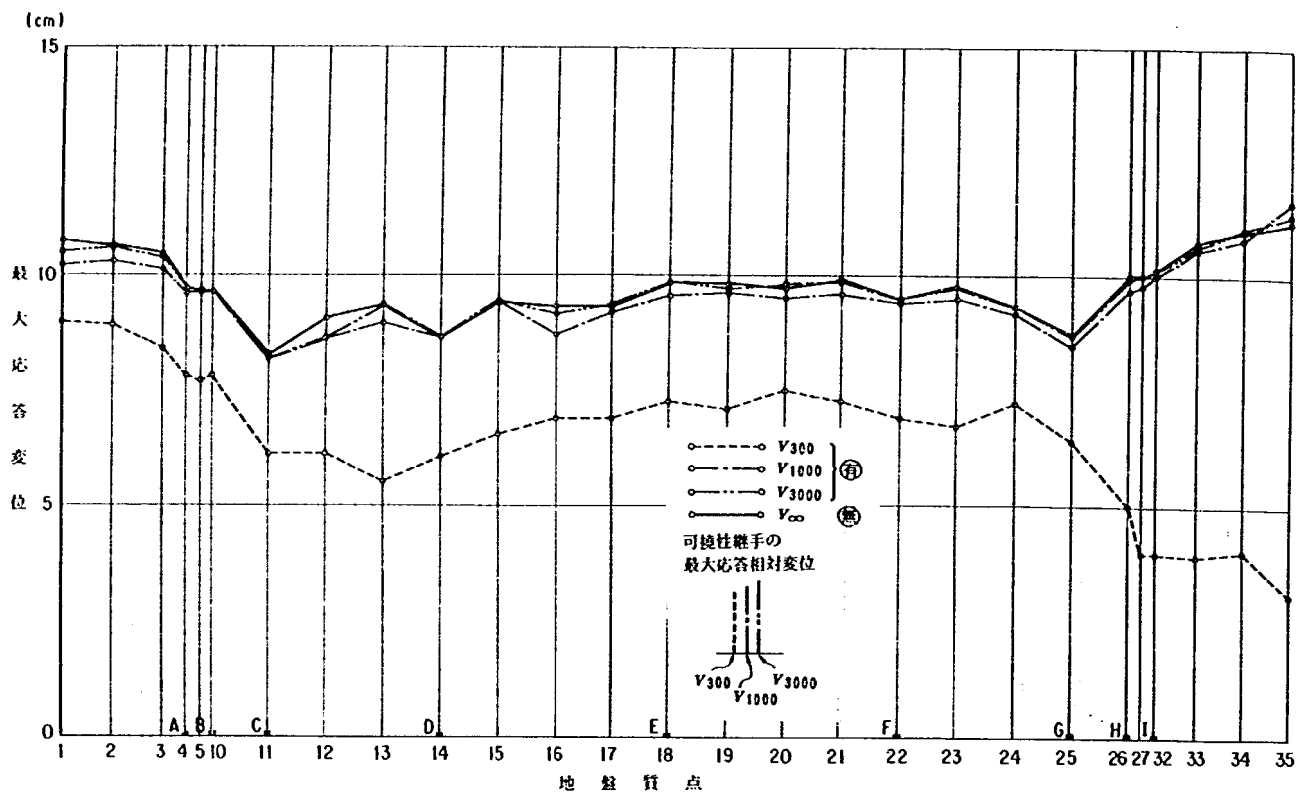


図-26 位相差入力に対する沈埋トンネル部質点・可撓性継手の最大応答変位 (SM-1モデル)



(c)鉛直方向

図-26 位相差入力に対する沈埋トンネル部質点・可撓性継手の最大応答変位 (SM-1モデル)

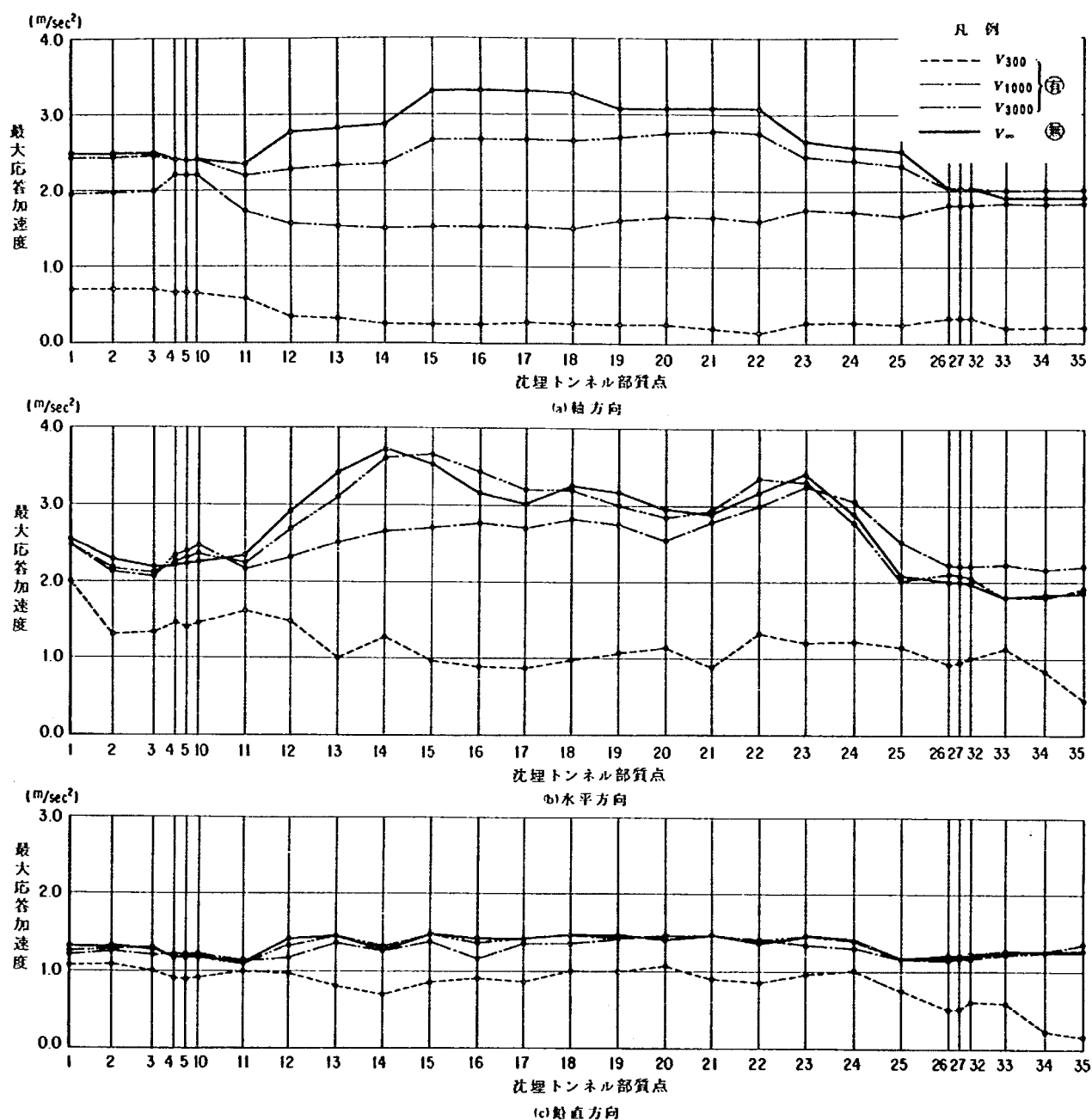
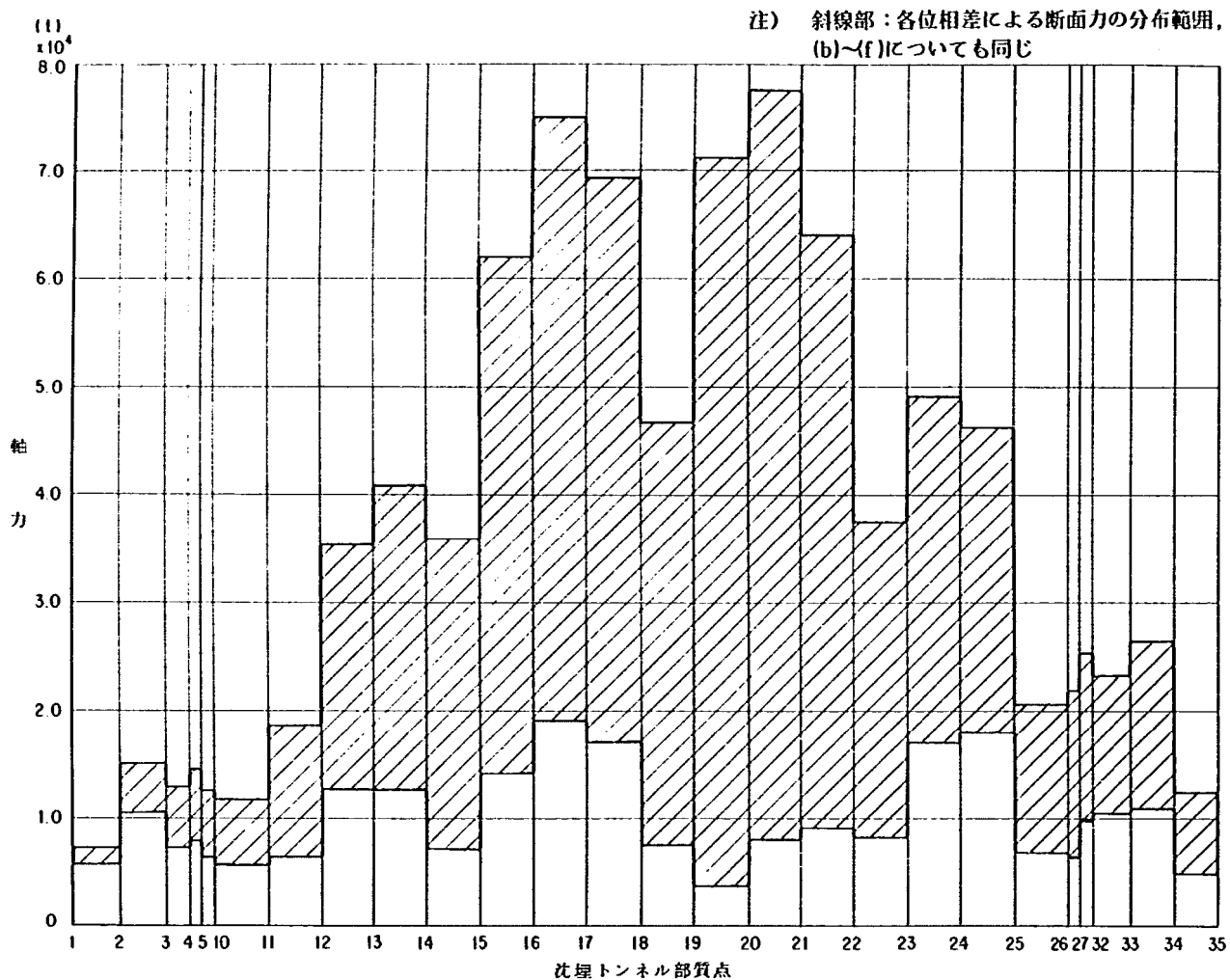
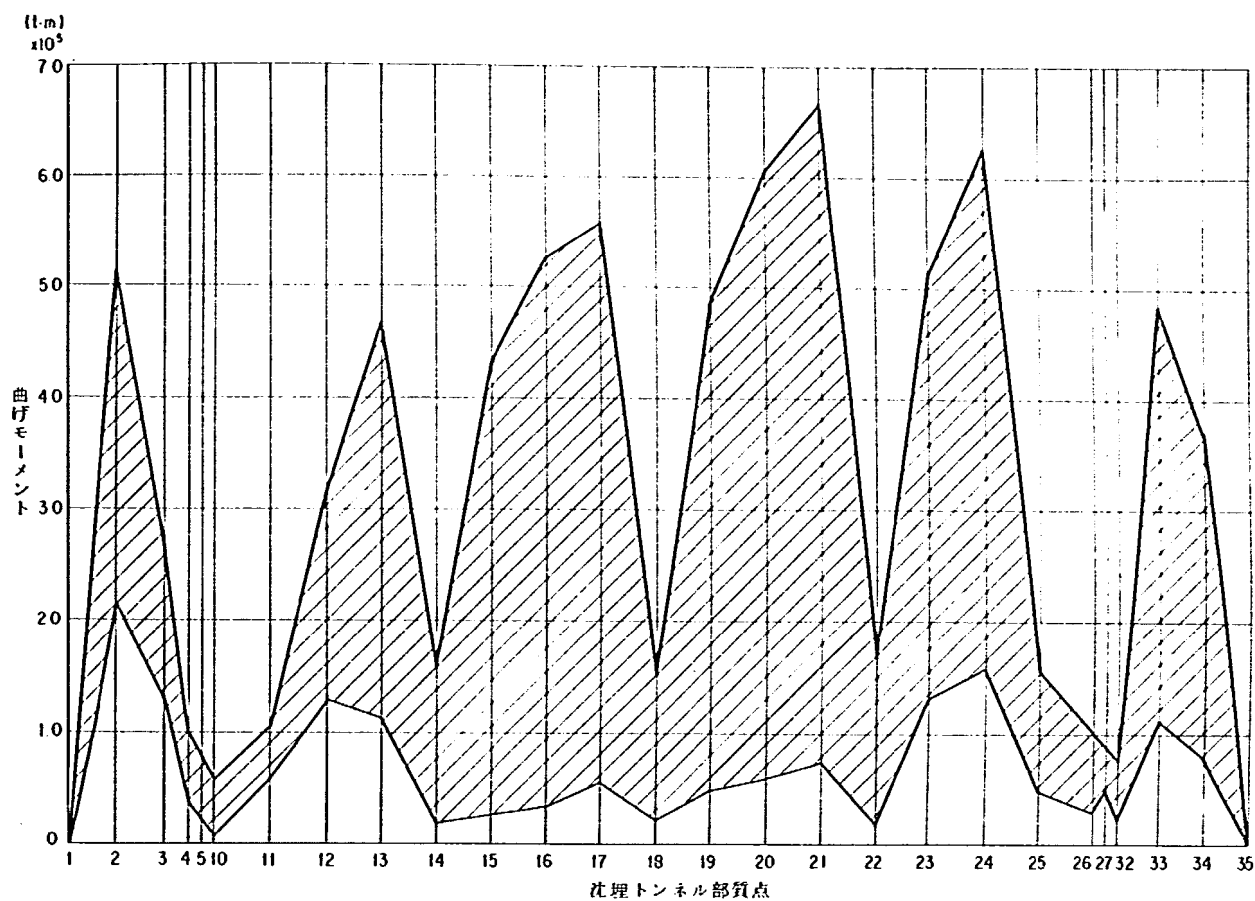


図-27 位相差入力に対する沈埋トンネル部質点の最大応答加速度



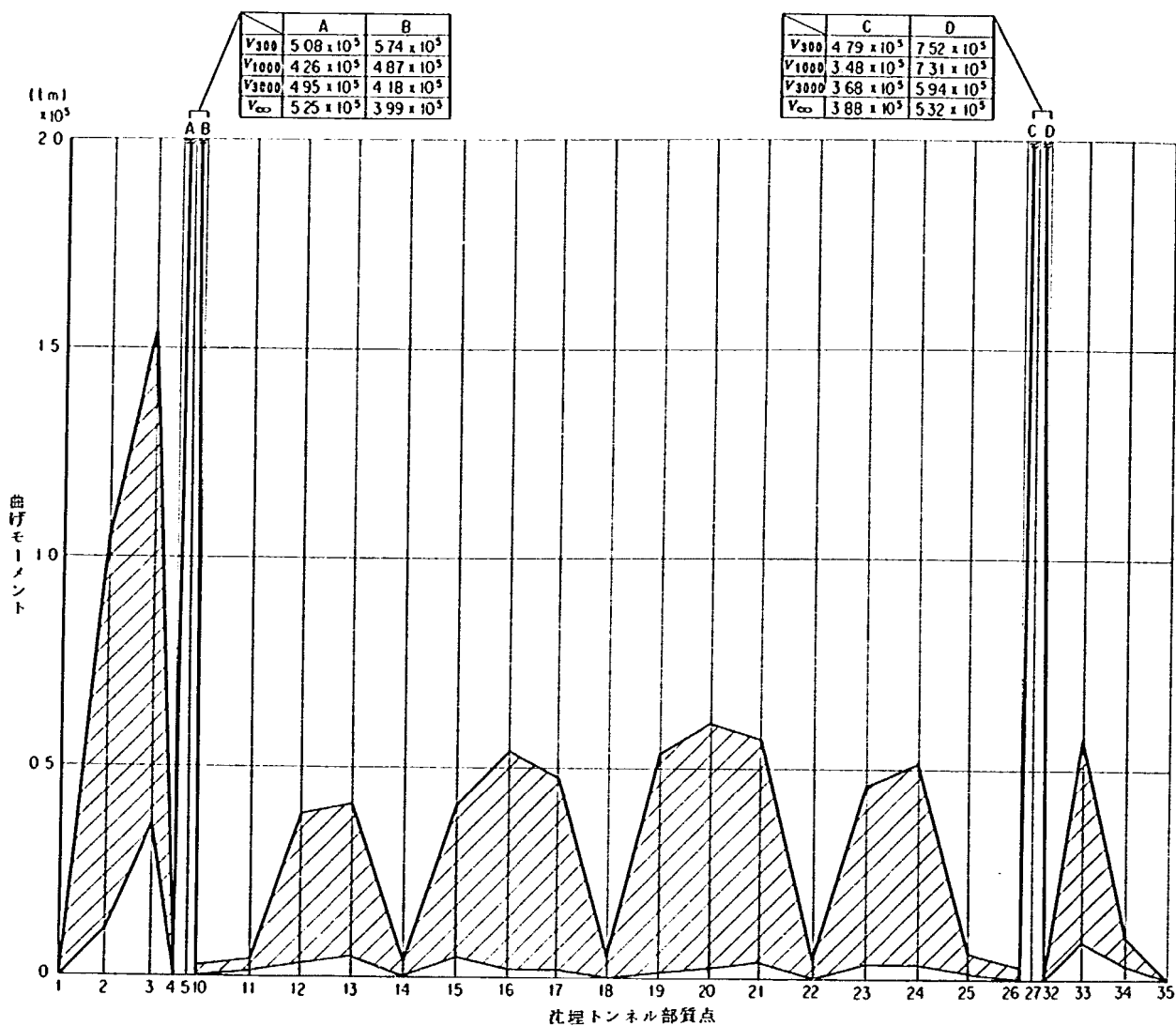
(a) 軸 力

図-28 位相差入力に対する沈埋トンネル部質点の最大応答断面力



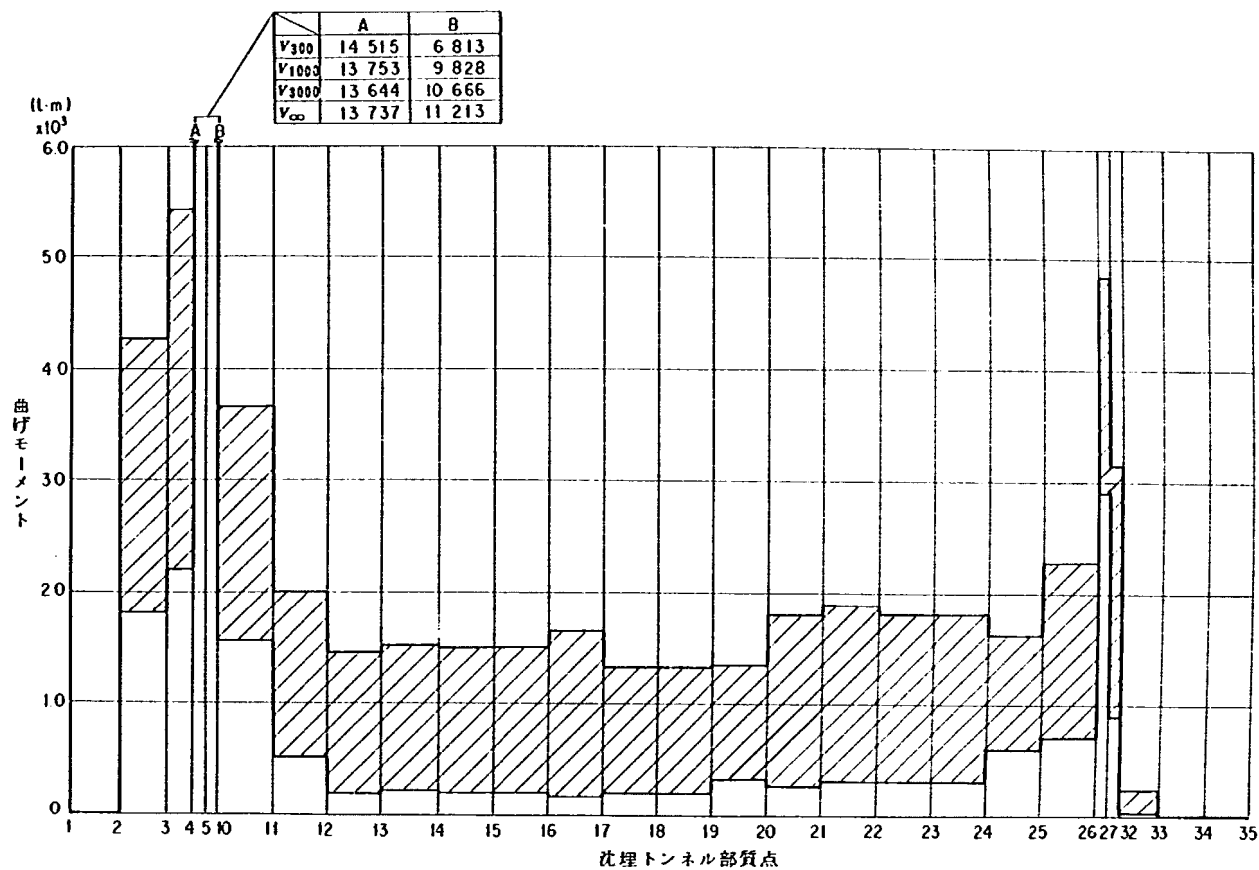
(b) 曲げモーメント (水平方向回り)

図-28 位相差入力に対する沈埋トンネル部質点の最大応答断面力



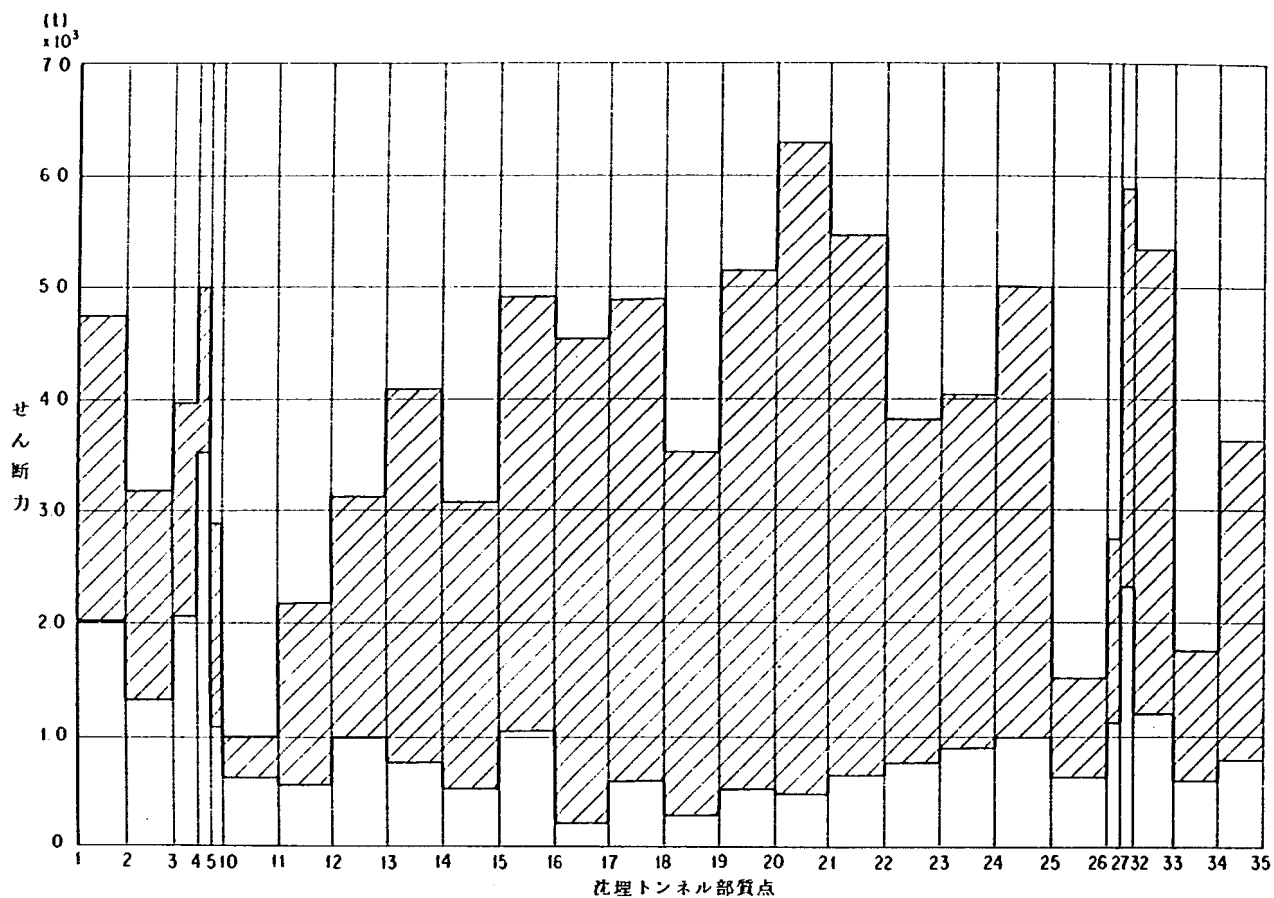
・ (c) 曲げモーメント (鉛直回り)

図-28 位相差入力に対する沈埋トンネル部質点の最大応答断面力



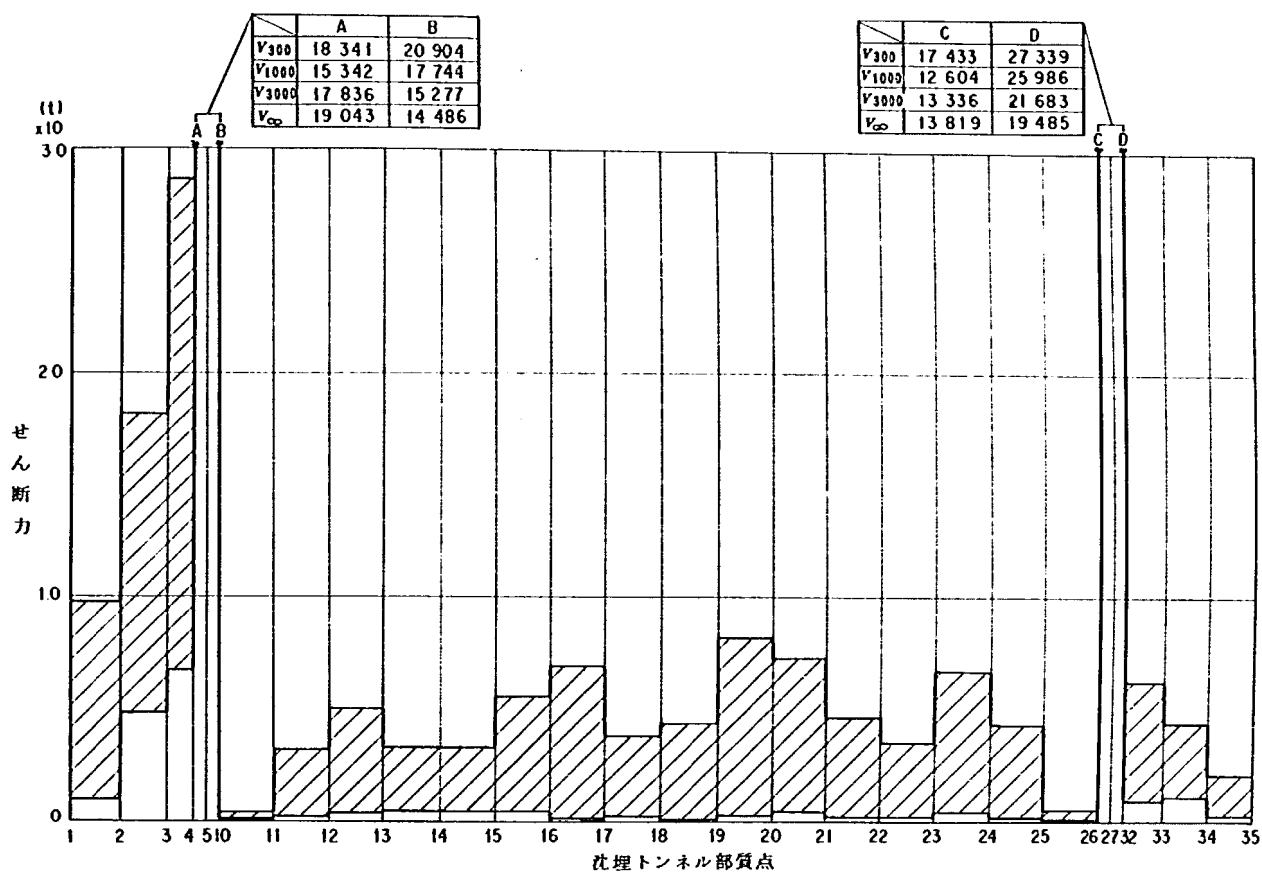
(d) ねじりモーメント

図-28 位相差入力に対する沈埋トンネル部質点の最大応答断面力



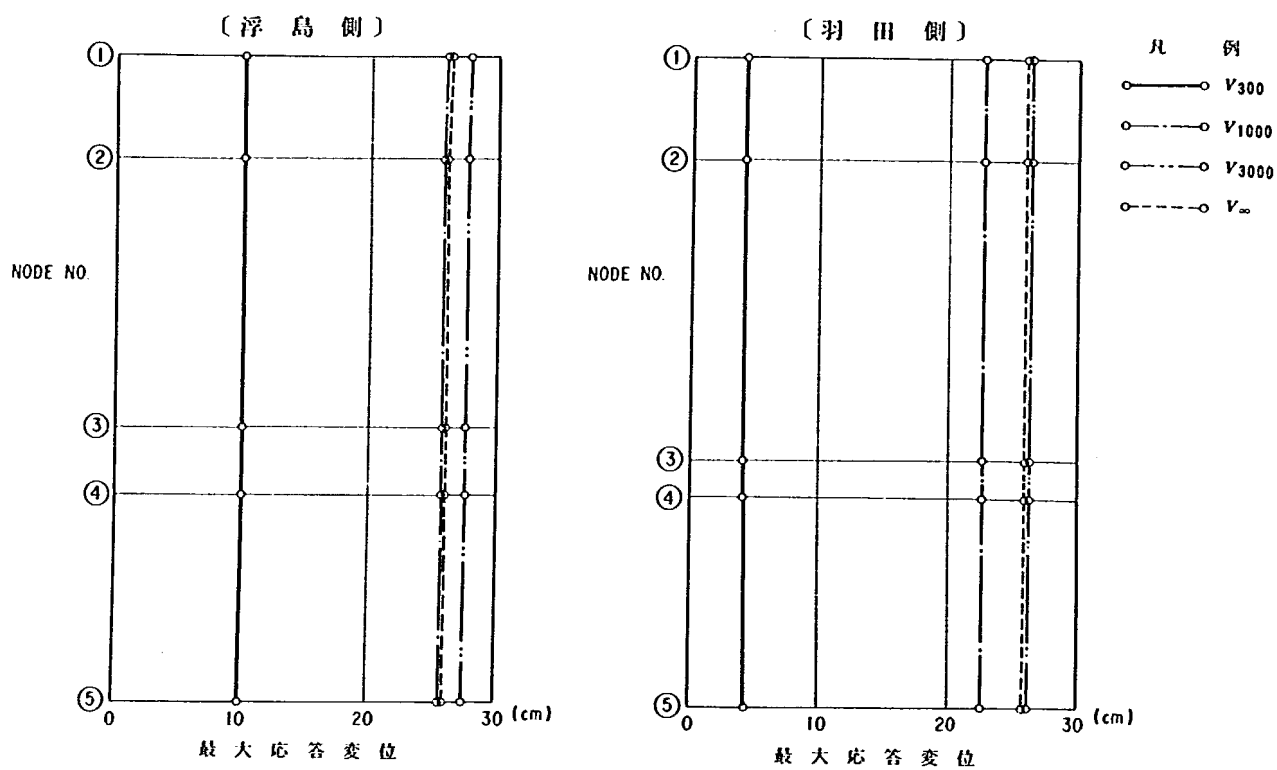
(e) せん断力 (水平方向, トンネル軸方向)

図-28 位相差入力に対する沈埋トンネル部質点の最大応答断面力

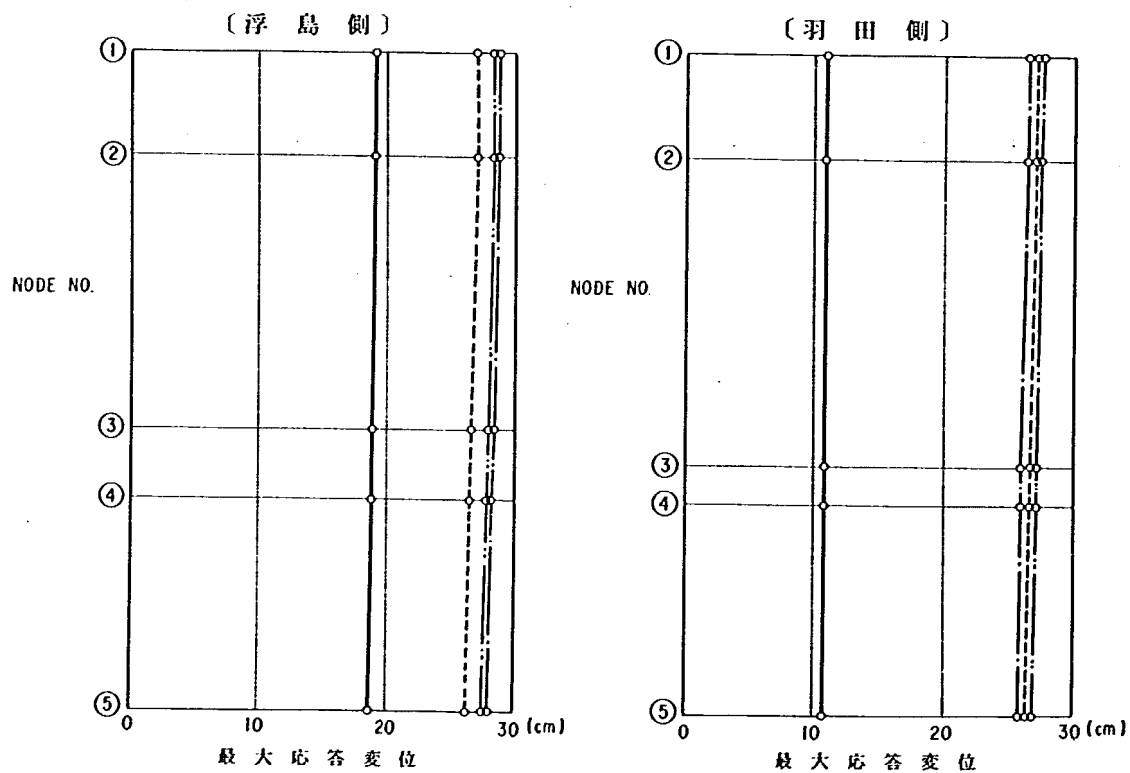


(f) せん断力 (水平方向, トンネル軸直角方向)

図-28 位相差入力に対する沈埋トンネル部質点の最大応答断面力

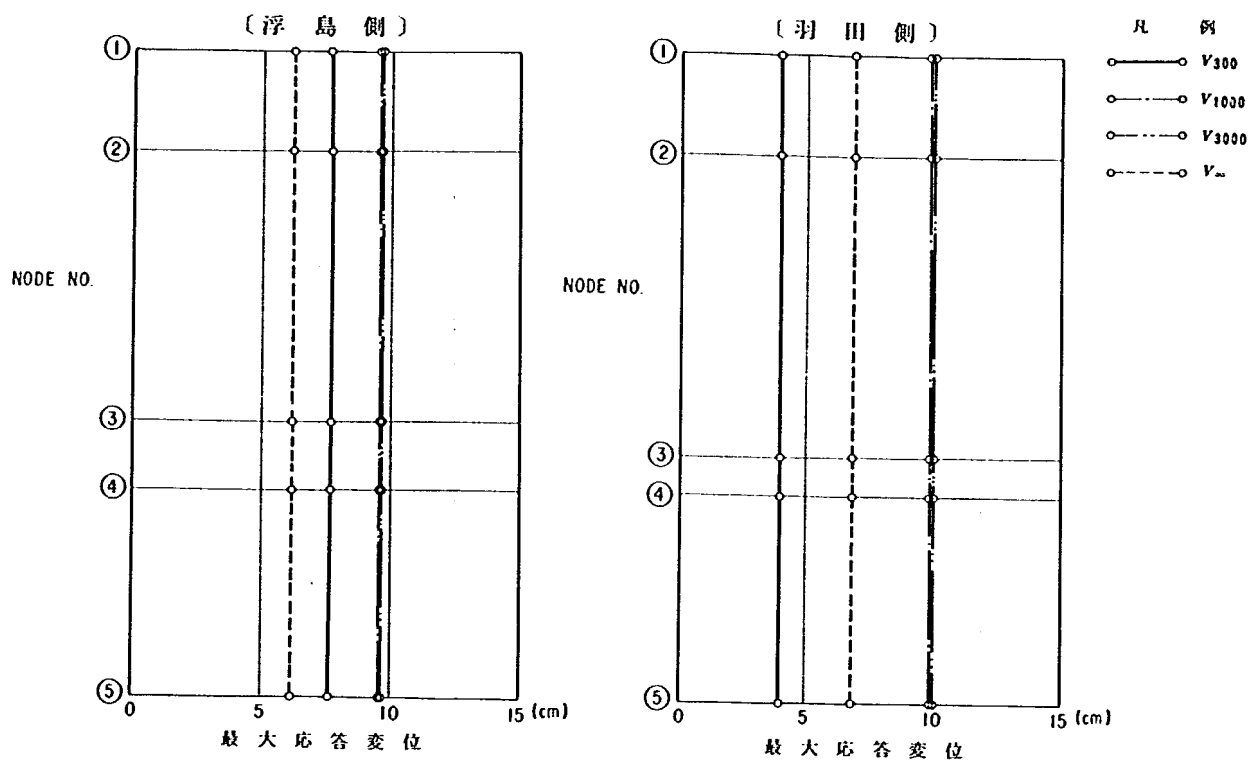


(a) 軸方向



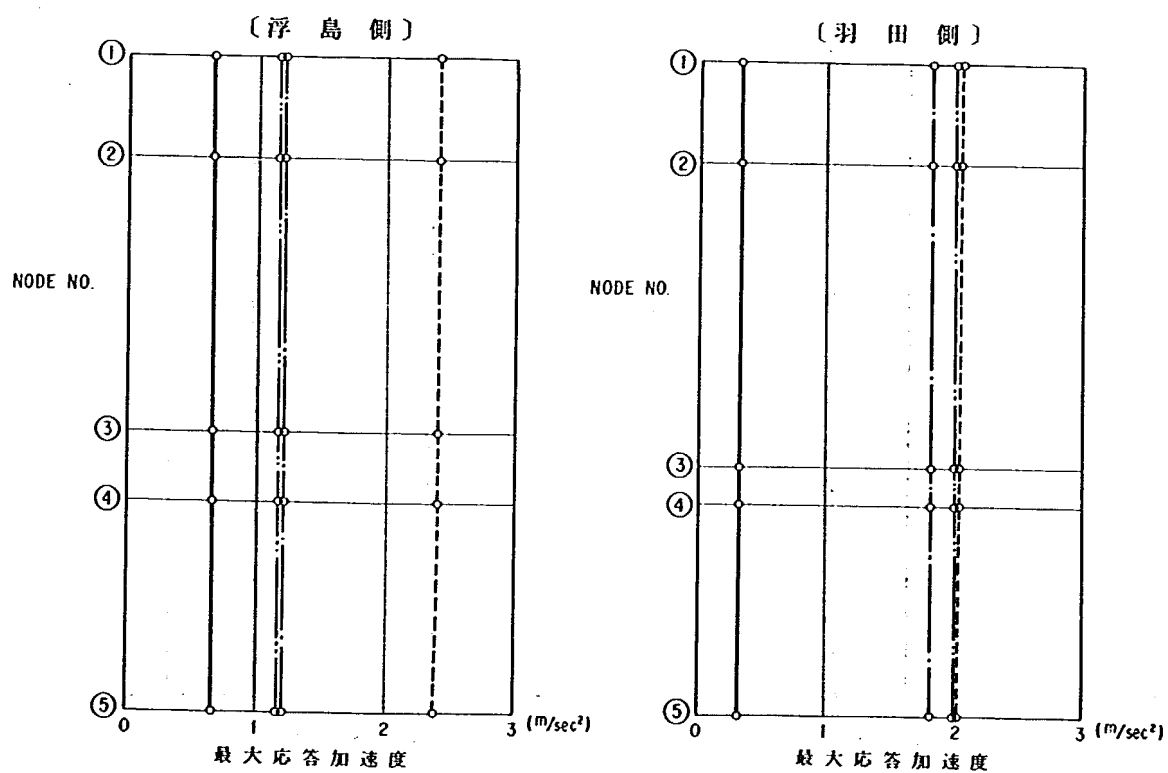
(b) 水平方向

図-29 位相差入力に対する換気塔質点の最大応答変位



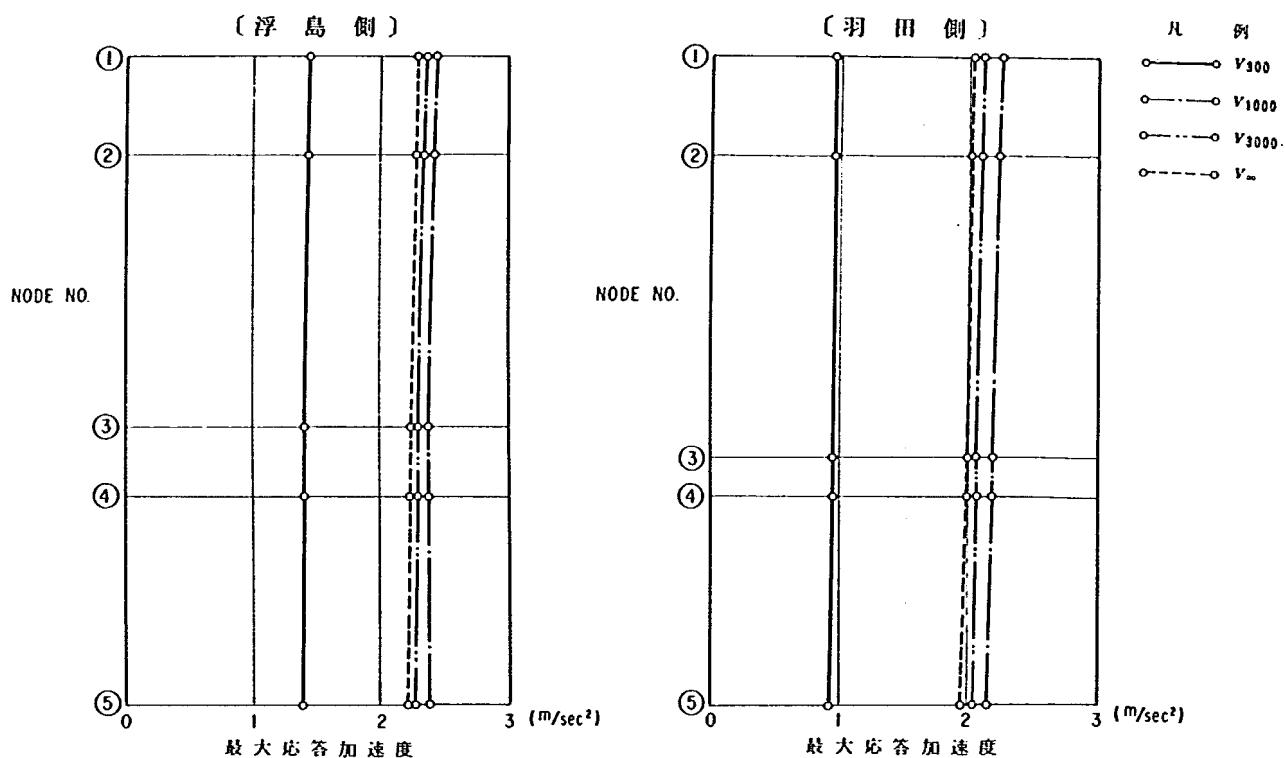
(c) 鉛直方向

図-29 位相差入力に対する換気塔質点の最大応答変位

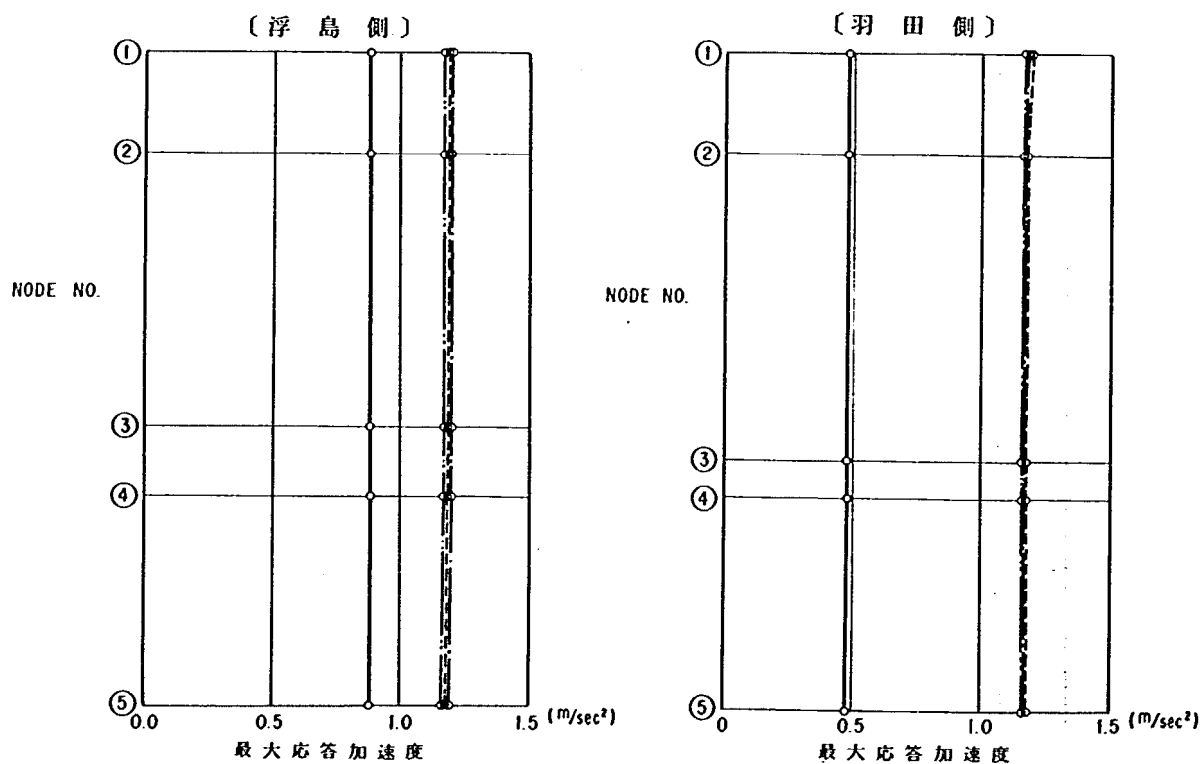


(a) 軸方向

図-30 位相差入力に対する換気塔質点の最大応答加速度



(b) 水平方向



(c) 鉛直方向

図-30 位相差入力に対する換気塔質点の最大応答加速度

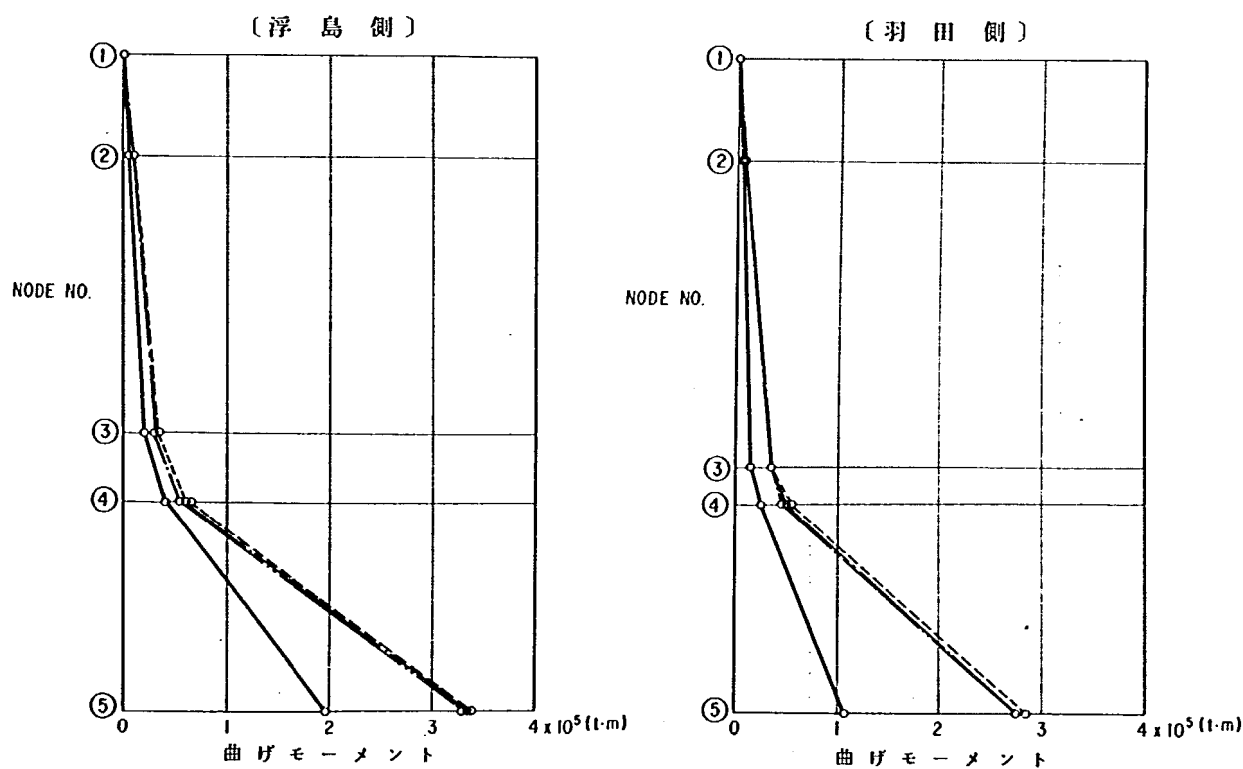
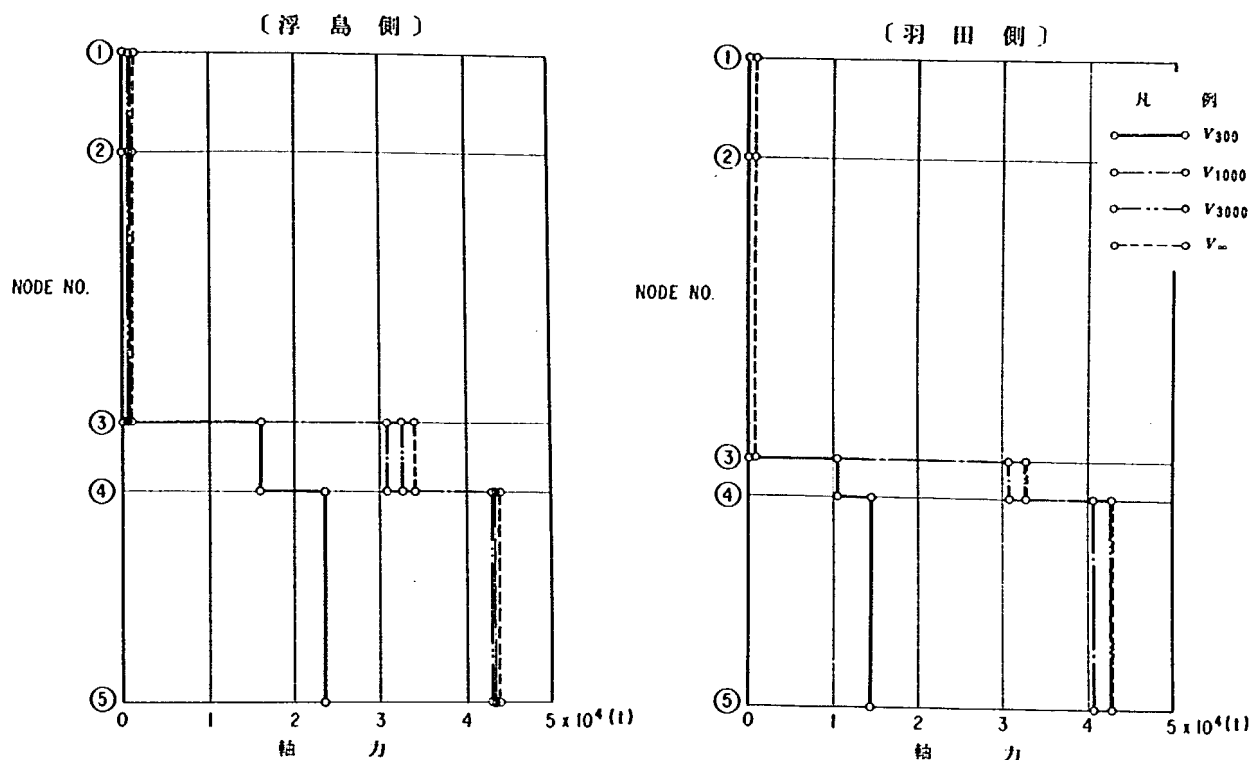
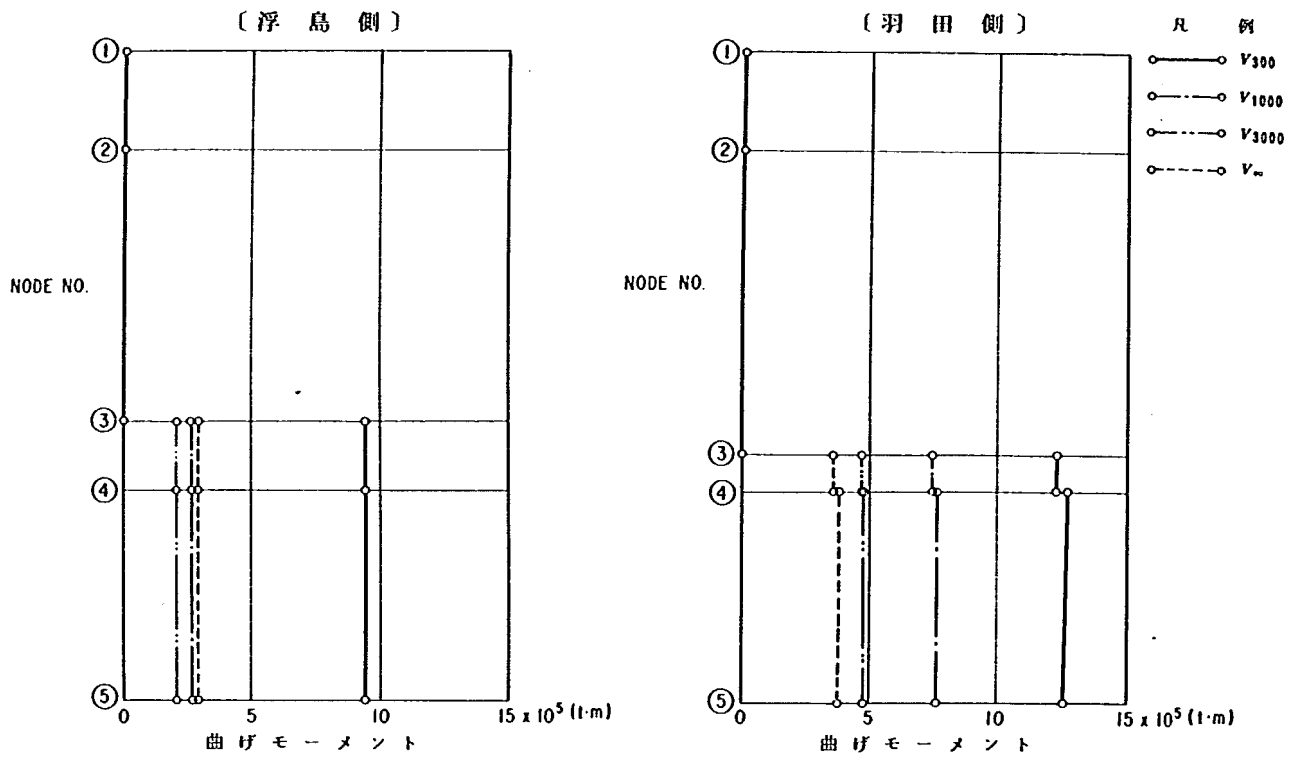
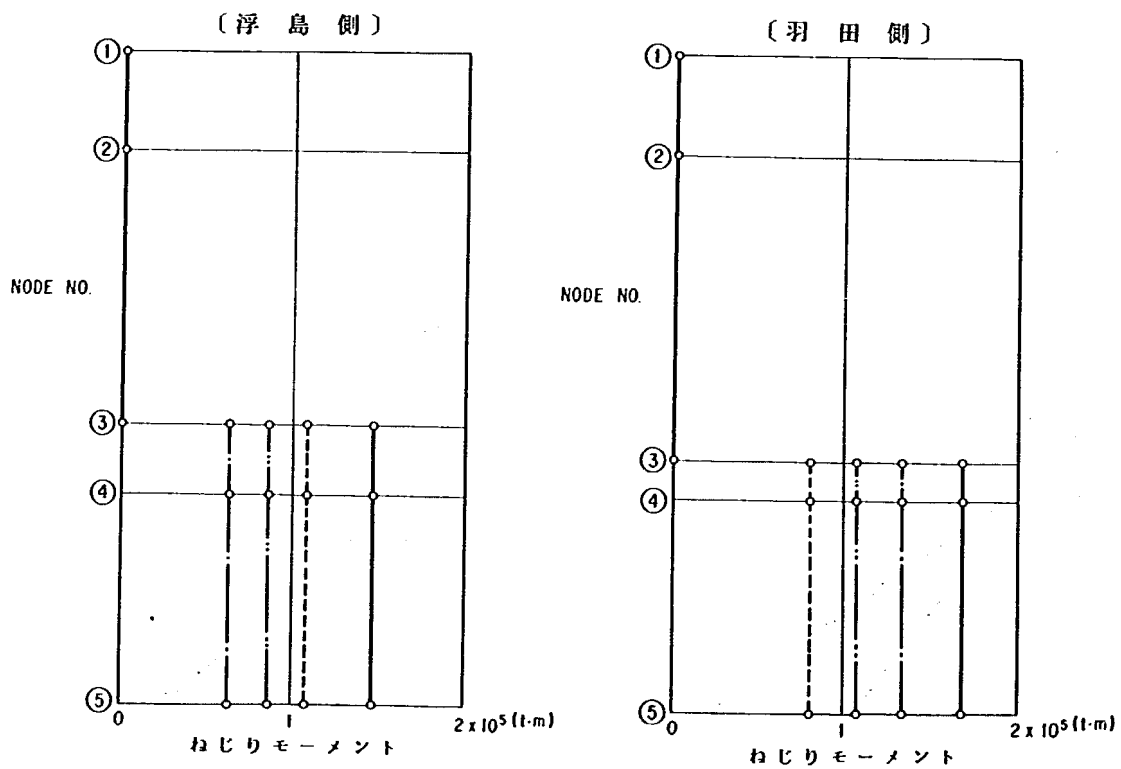


図-31 位相差入力に対する換気塔の最大応答断面力

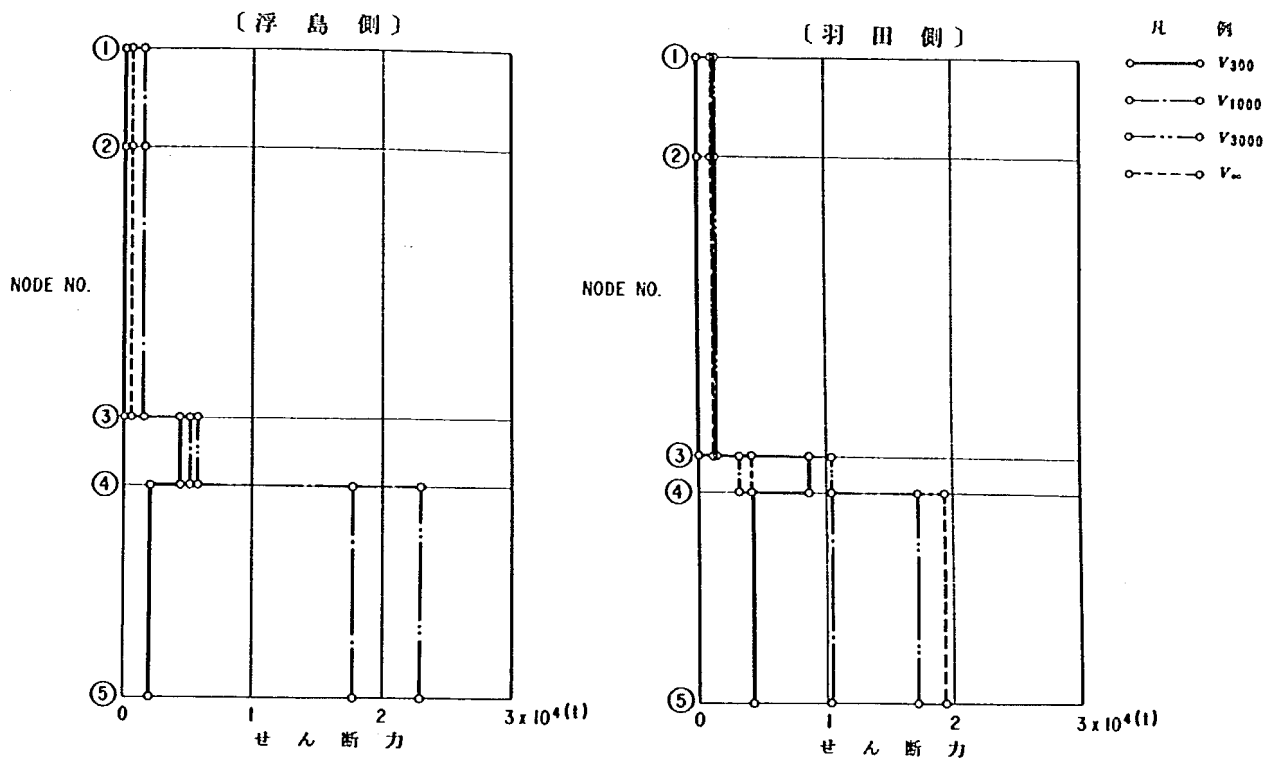


(c) 曲げモーメント (水平方向, トンネル軸直角回り)

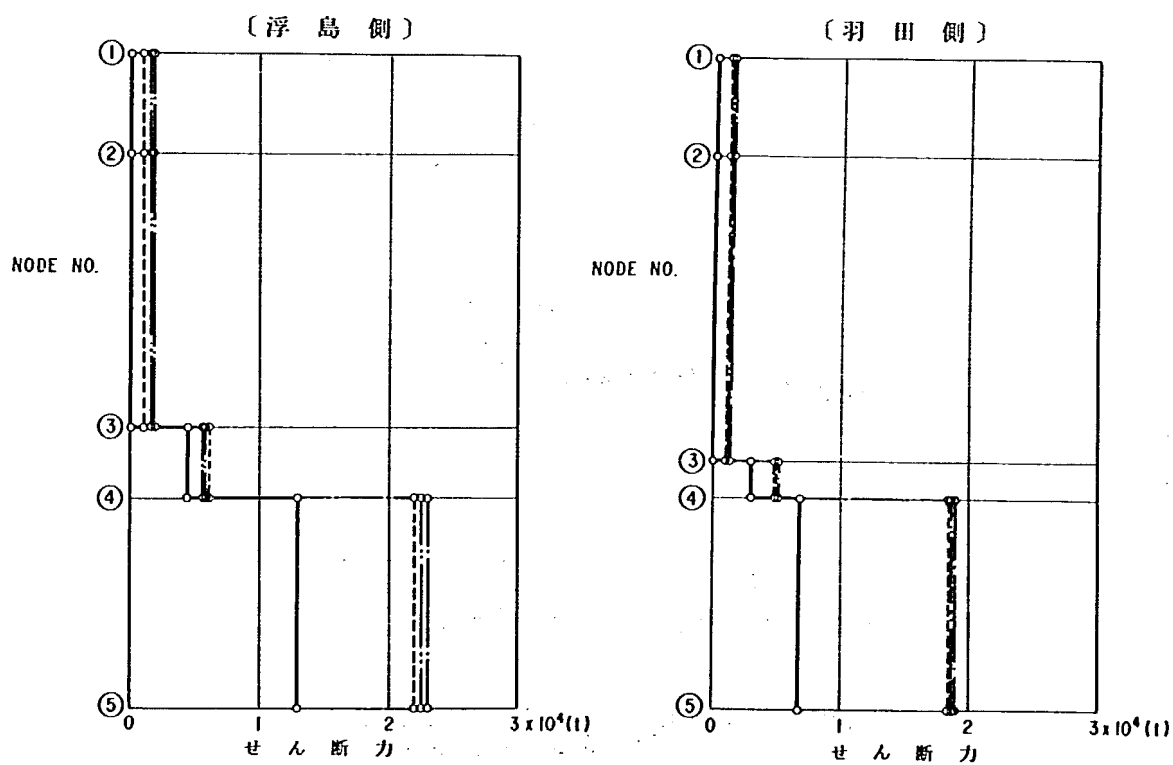


(d) ねじりモーメント

図-31 位相差入力に対する換気塔の最大応答断面力



(e) せん断力 (水平方向, トンネル軸回り)



(f) せん断力 (水平方向, トンネル軸直角回り)

図-31 位相差入力に対する換気塔の最大応答断面力

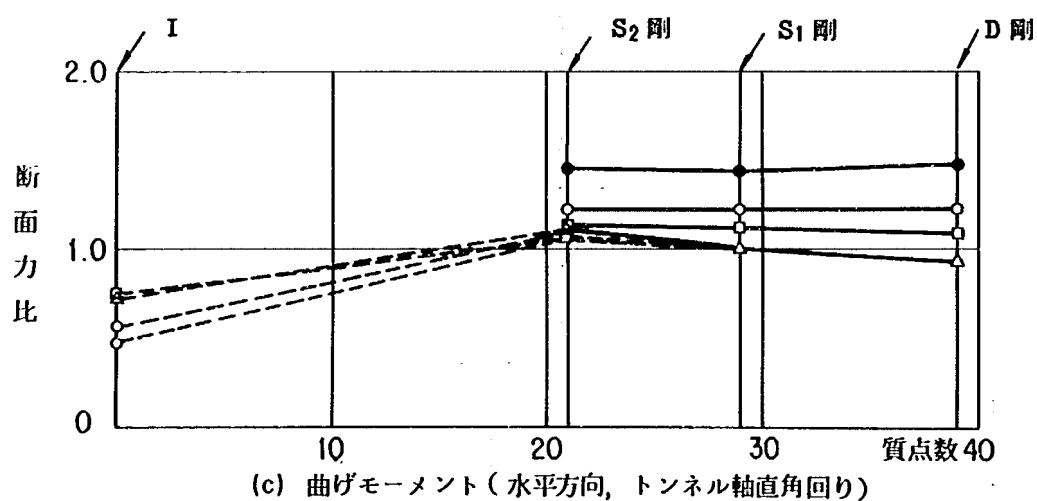
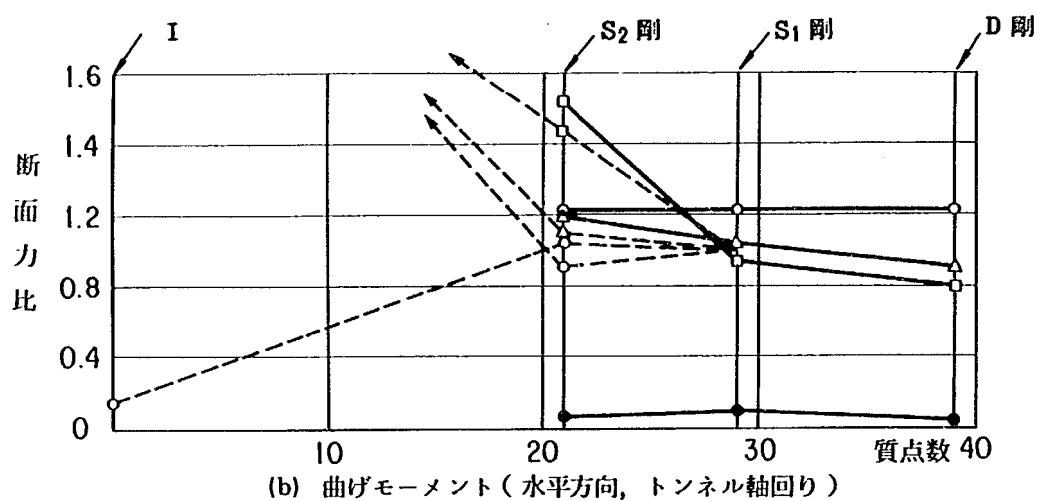
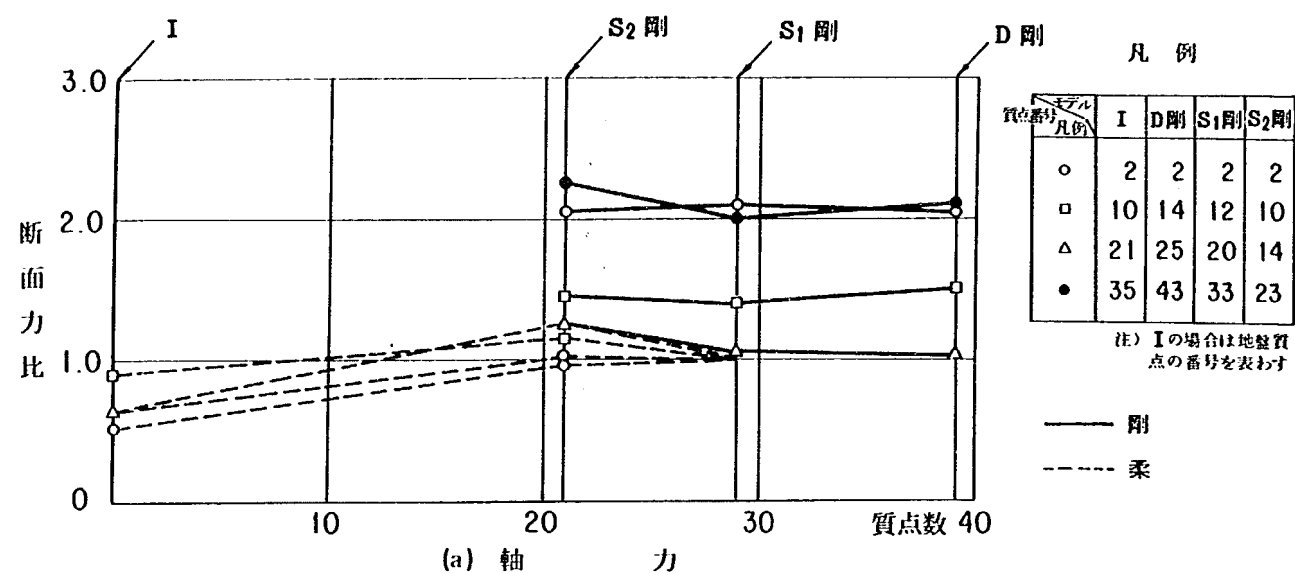


図-32 質点分布と断面力比 $\left(= \frac{\text{各場合の断面力}}{\text{S1柔の場合の断面力}} \right)$

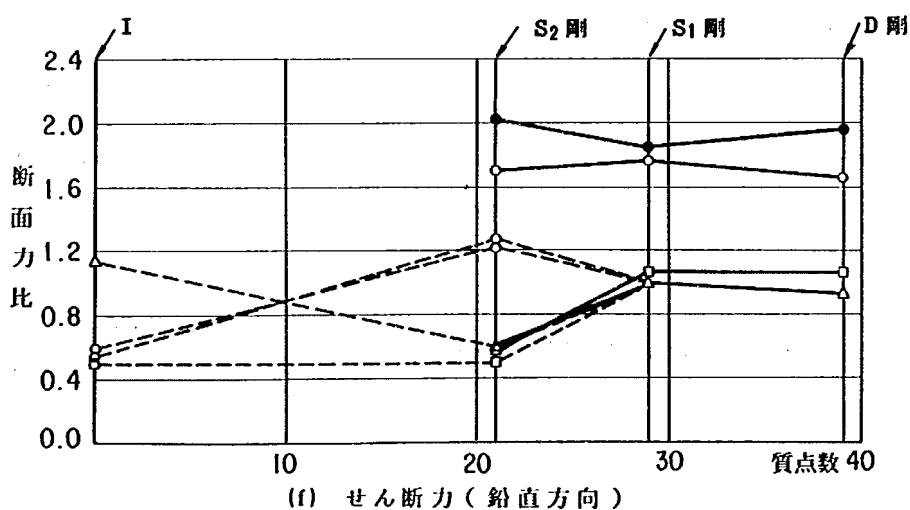
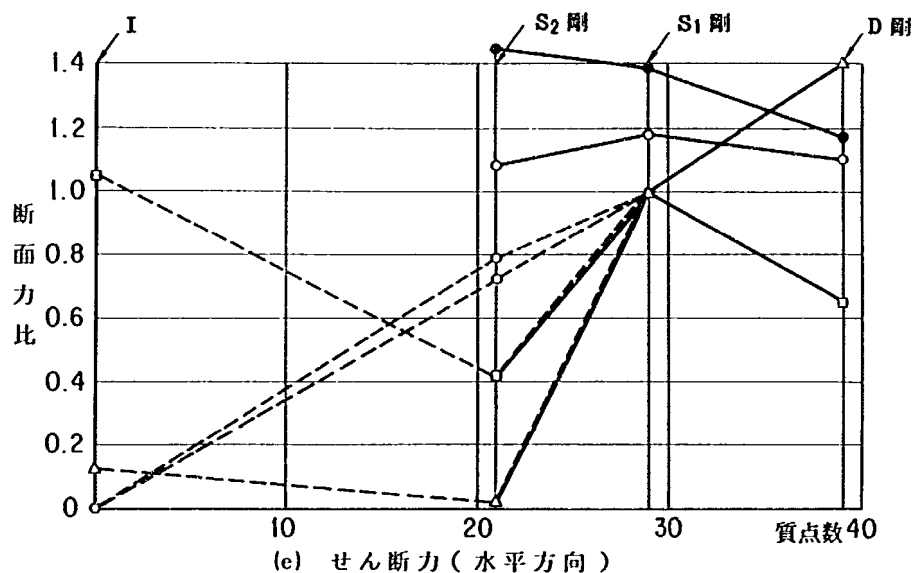
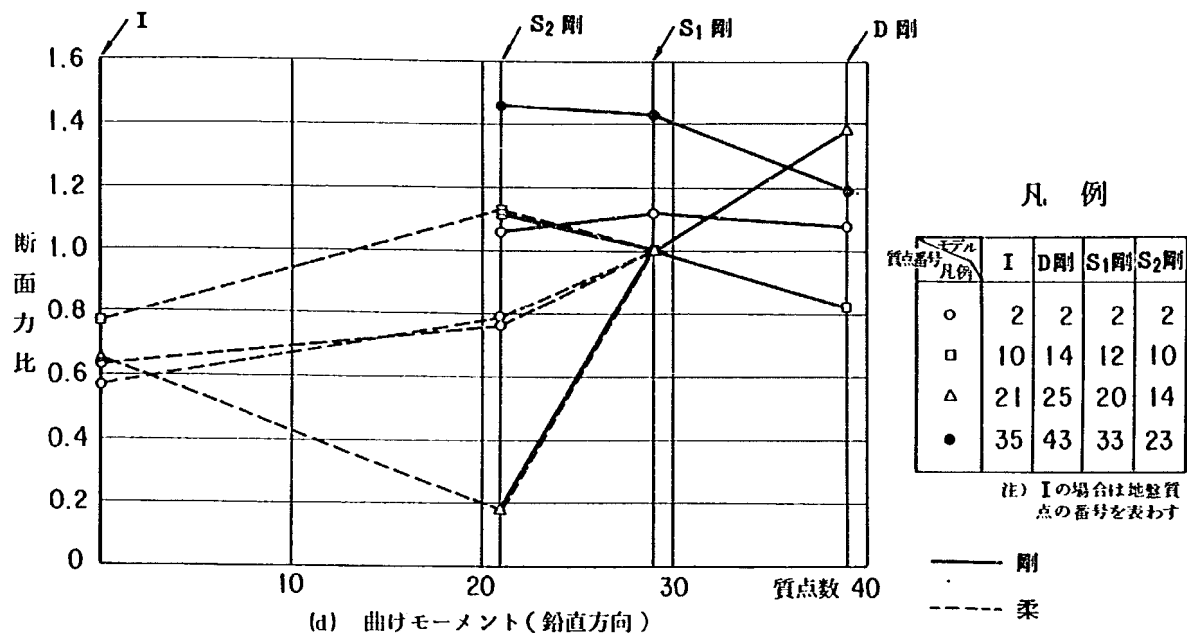


図-32 質点分布と断面力比 $\left(= \frac{\text{各場合の断面力}}{\text{S}_1 \text{ 柔の場合の断面力}} \right)$

凡 例

—— S_1 柔 / S_1 剛
 - - - S_1 柔 / S_2 剛

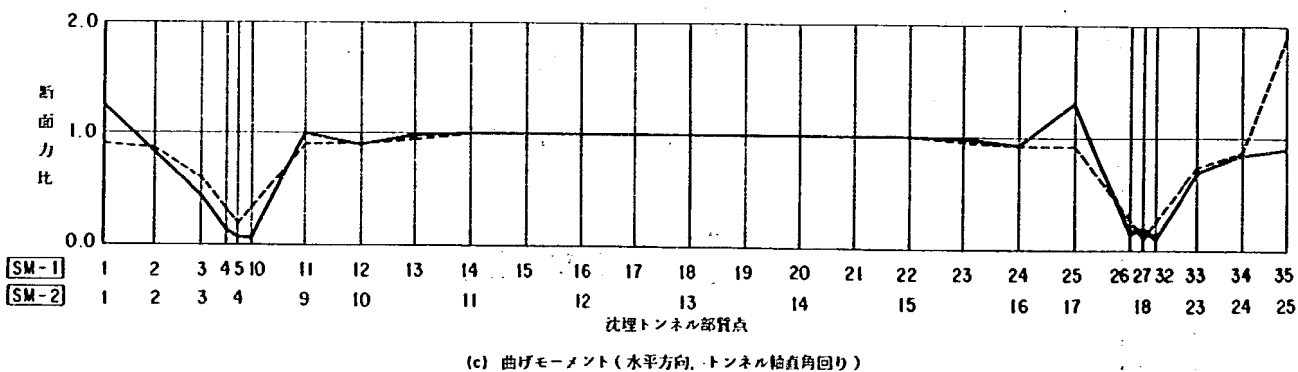
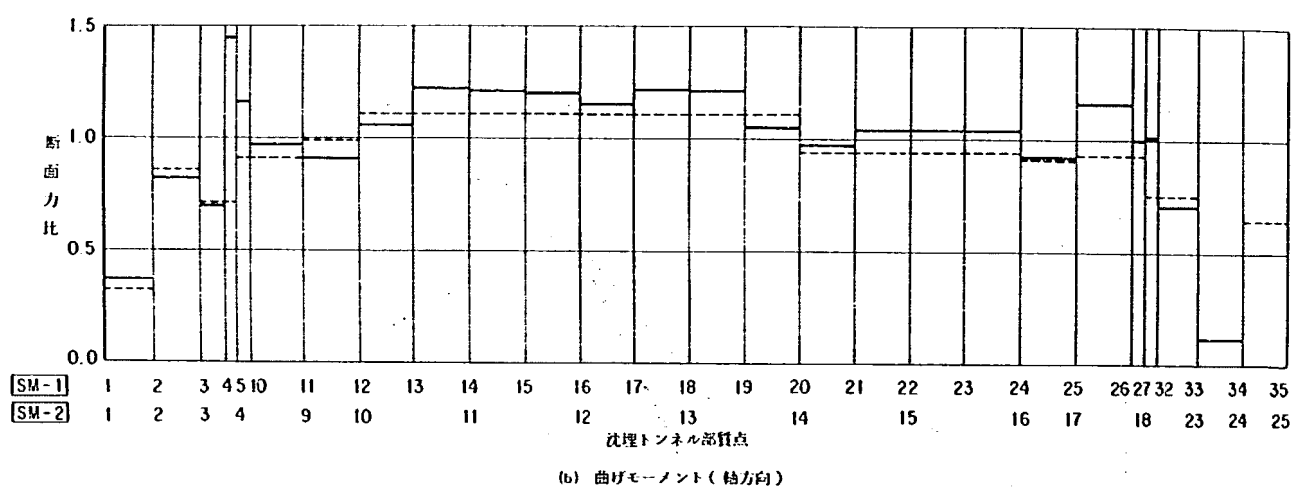
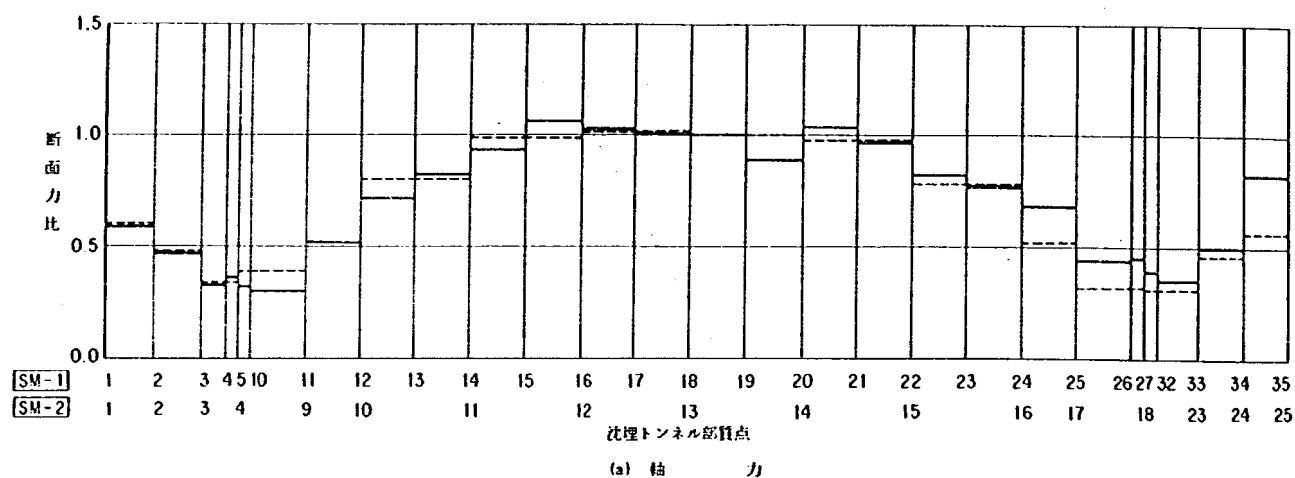
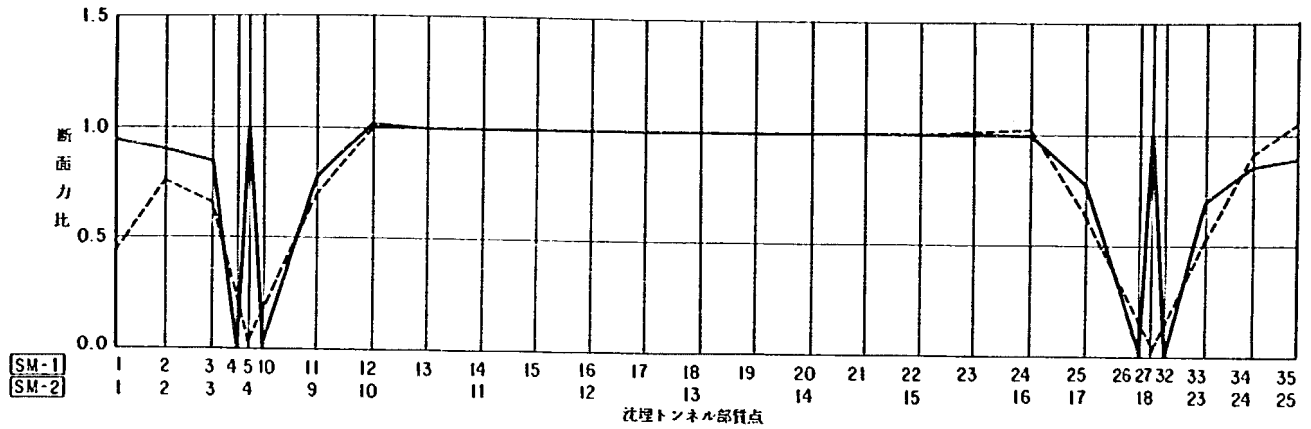


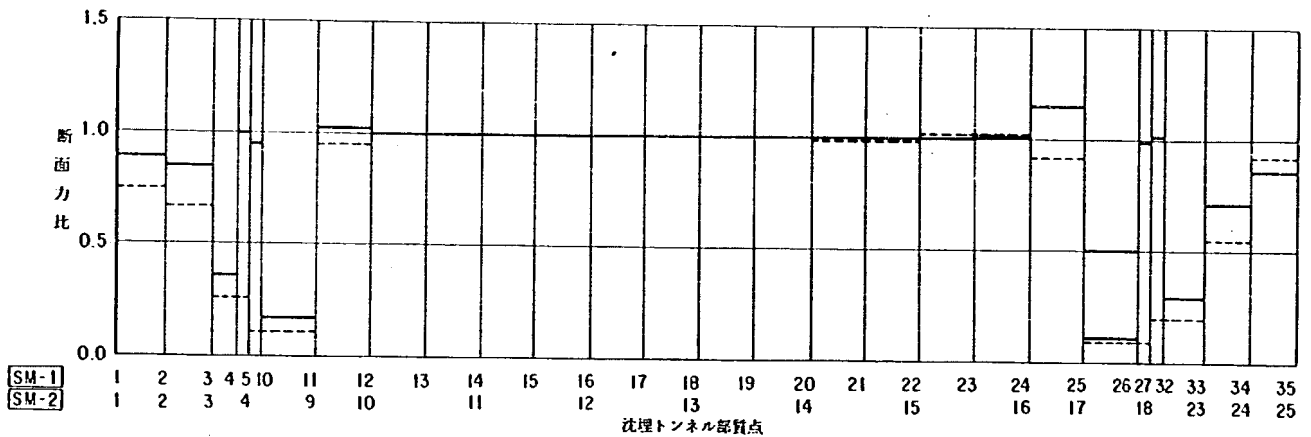
図-33 可撓性継手条件による最大応答断面力の影響 (断面力比 = $\frac{S_1 \text{ 柔の断面力}}{S_1 \text{ 剛または } S_2 \text{ 剛の場合の断面力}}$)

凡 例

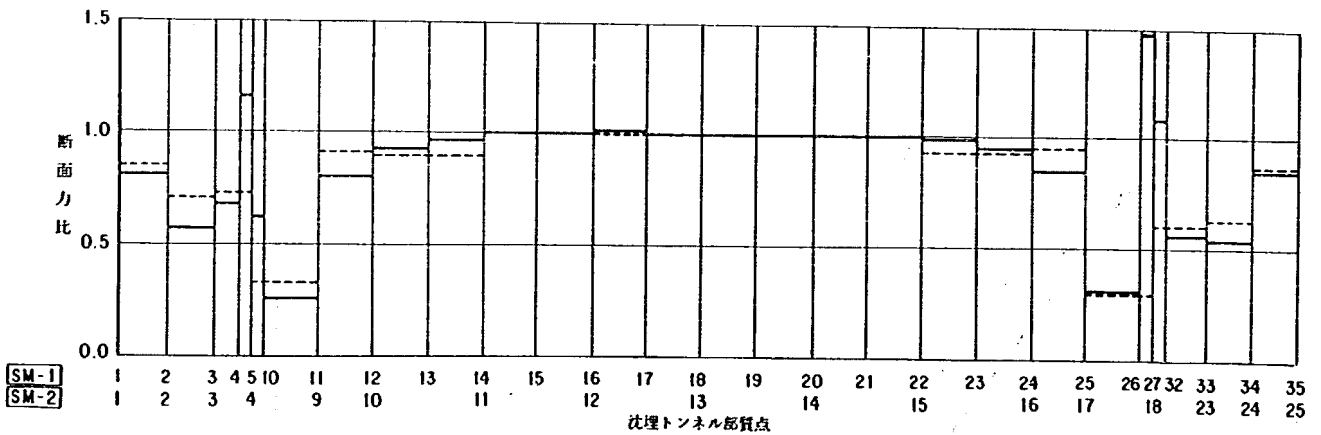
—— S₁ 柔 / S₁ 剛
 - - - S₁ 柔 / S₂ 剛



(d) 曲げモーメント (鉛直方向)

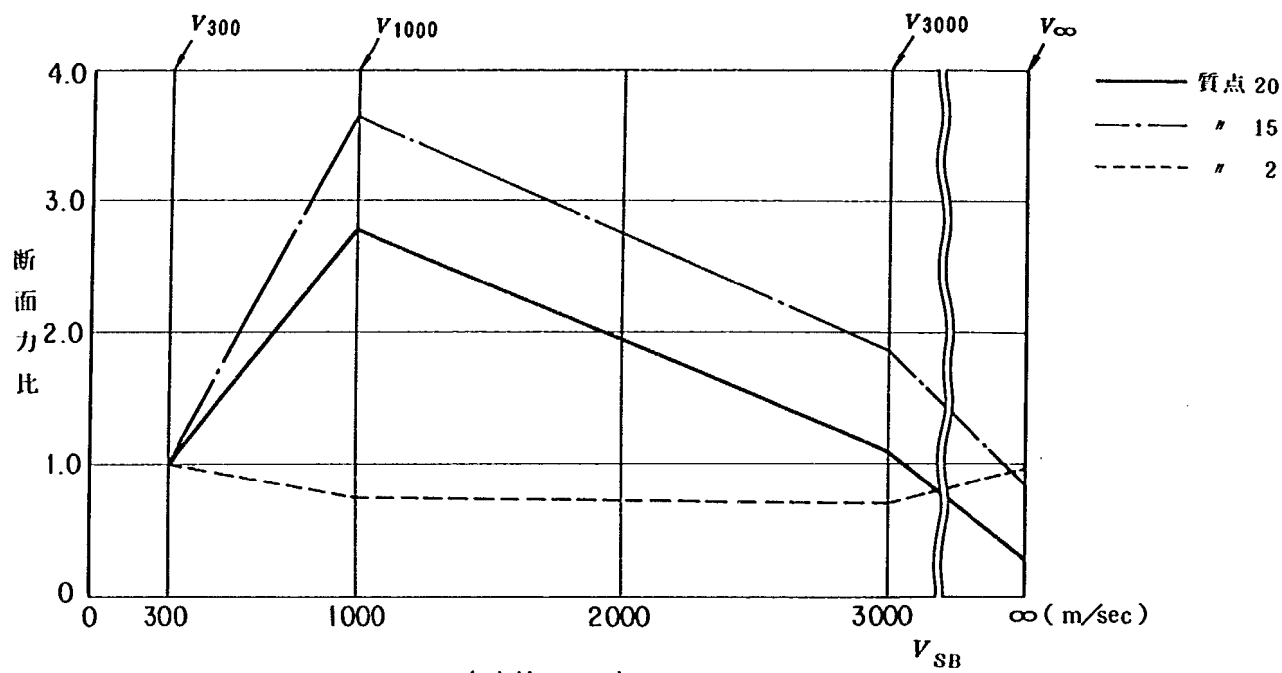


(e) せん断力 (水平方向)

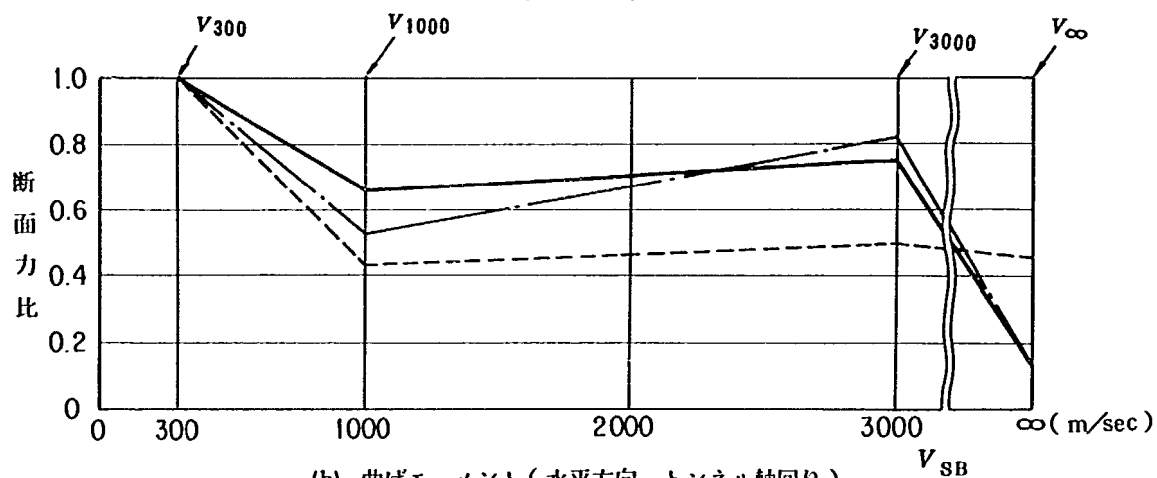


(f) せん断力 (鉛直方向)

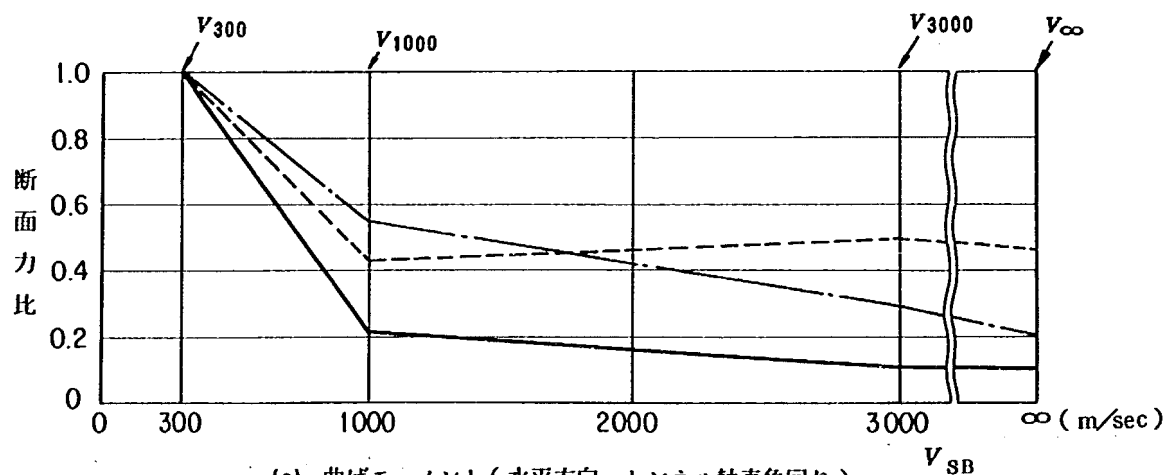
図-33 可撓性継手条件による最大応答断面力の影響 (断面力比 = $\frac{S_1 \text{ 柔の断面力}}{S_1 \text{ 剛または } S_2 \text{ 剛の場合の断面力}}$)



(a) 軸 力



(b) 曲げモーメント (水平方向, トンネル軸回り)



(c) 曲げモーメント (水平方向, トンネル軸直角回り)

図-34 位相差と断面力比 $\left(= \frac{\text{各場合の断面力}}{V_{300} \text{ の場合の断面力}} \right)$

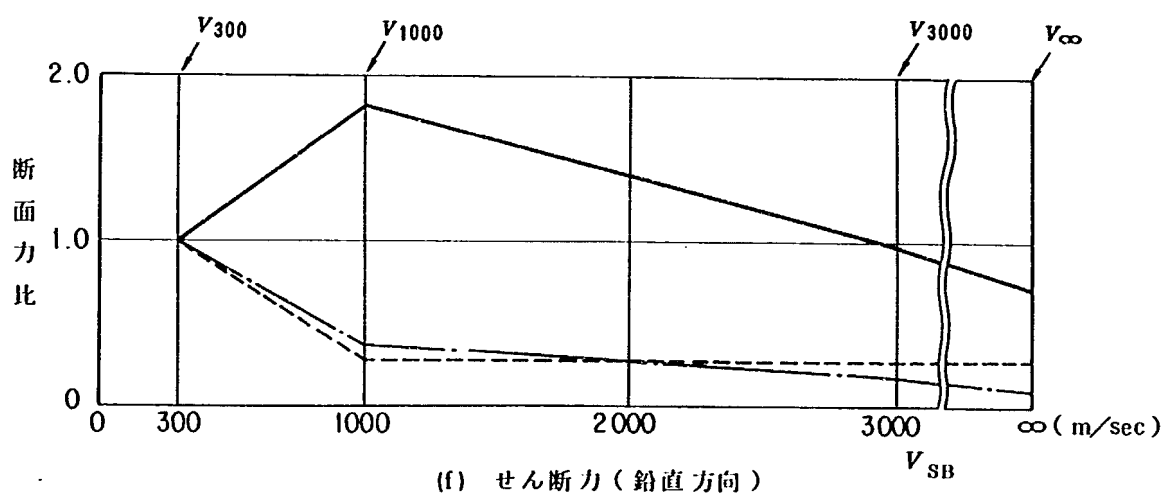
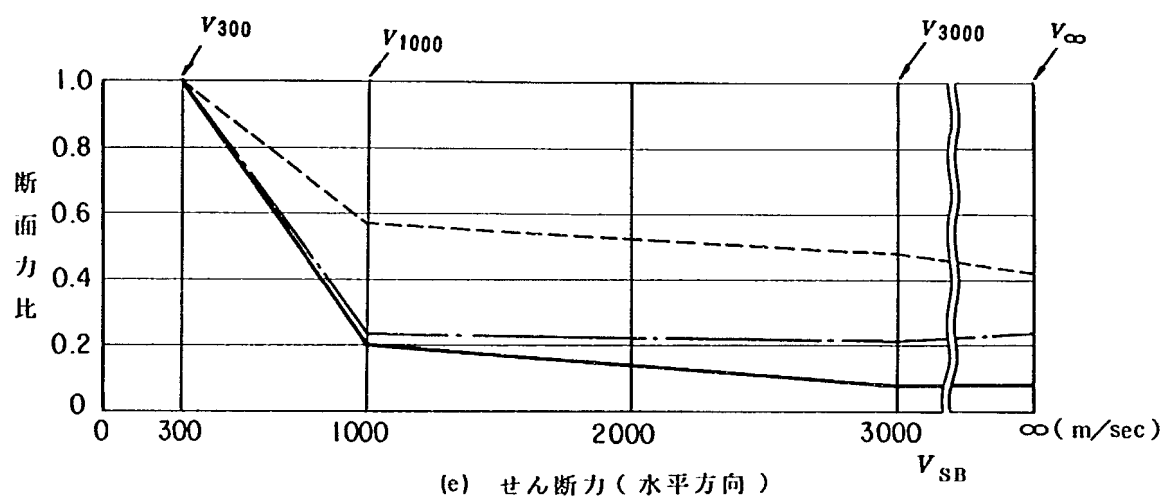
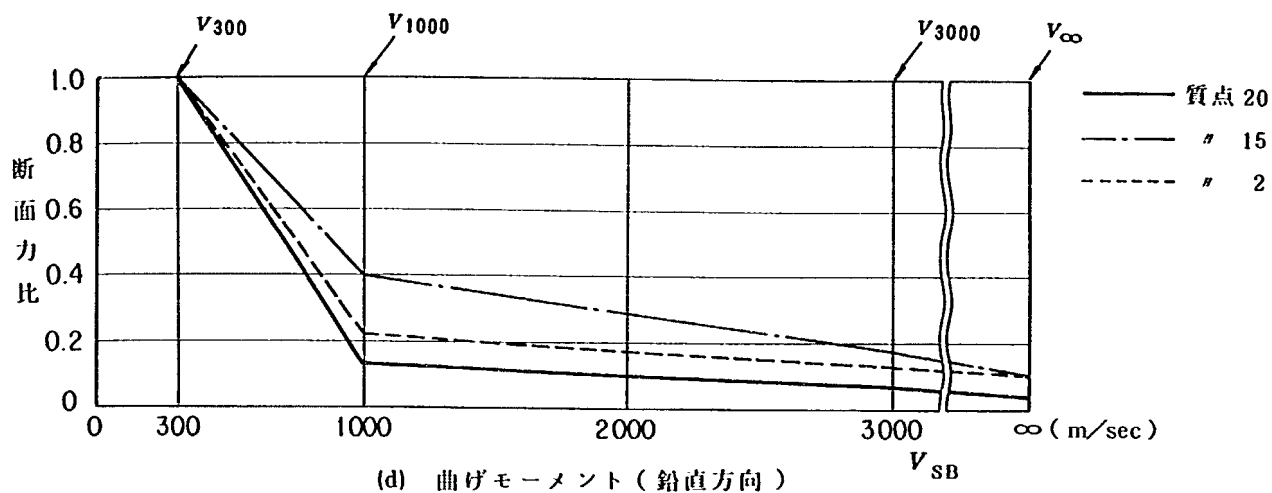


図-34 位相差と断面力比 $\left(= \frac{\text{各場合の断面力}}{V_{300} \text{ の場合の断面力}} \right)$

Ⅲ 結 論

(1) 既往年度の調査では予備検討と本検討の一部を実施した。予備検討では動的解析のためのモデル化を行ない動的解析用電算プログラムの作成、変位・断面力の解析、可撓継手の影響の解析などを行なった。その結果は、54年度の調査に際して、極めて参考になった。例えば、既往年度の可撓性継手の影響の解析では、可撓性継手の剛性を任意に変化させてその変位・断面力に及ぼす影響を解析したが、これは54年度の調査に際しての可撓性継手のバネ定数の設定等に有意義な示唆を与えることとなった。

(2) 54年度の調査では本検討の一部として換気塔を含めた沈埋トンネルの地震応答解析を行なった。その結果、得られた結論は下記のとおりである。

1) 本解析では、周辺地盤の質点分布は一定にして沈埋トンネル部の質点分布を3種類(質点数:25, 35, 45)に変化させて解析を行なった。その結果、この程度(2~4割)の質点間引きであれば、全体系の応答にそれ程顕著な影響は認められないことが判った。

2) 換気塔を剛結合とする場合と柔結合とする場合とでは、後者の場合で可成りの断面力の軽減が図られることが判った。しかしながら、その効果は比較的狭い範囲に限られているので実際の沈埋トンネルの設計にあたっては沈埋トンネル部の可撓性継手の位置、間隔、個数とともにその接合形式も工夫する必要がある。

3) 位相差として沈埋トンネルの質点間の距離に比例した位相差(時間遅れ)を設けると、 $V_s=300$ m/secとした時間遅れの場合で最大応答断面力が大きくなることが判った。今後の解析としては振幅などの波形特性も考慮した位相差の入力による解析が望まれており、この解析結果を知ることは沈埋トンネルの地震時における安全性を確認する意味からも重要と考えられる。

あ と が き

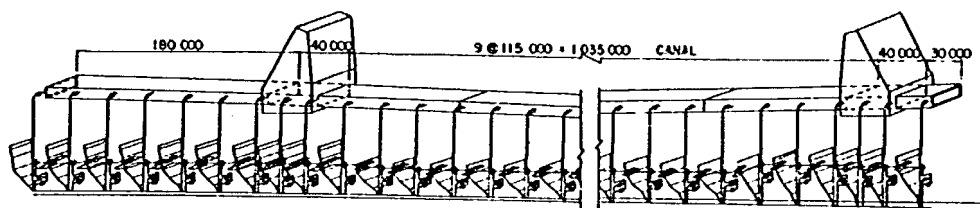
本調査は道路事業調査費関連の研究課題「トンネルに関する試験調査、耐震調査」で実施したものである。一応ここに結論を得たので当研究室羽立研究員の担当する調査項目は終了することとなった。本調査を実施するにあたって関東地方建設局東京湾岸道路調査事務所の調査課の皆様を始めとする多くの方々に親切丁寧なる御指導を頂いた。特に地震応答計算とその結果の整理には日本技術開発株式会社 佐伯光昭氏の御協力に負うところが大きい。末筆ながら、ここに深い感謝の意を記すとともに、関係各位に厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

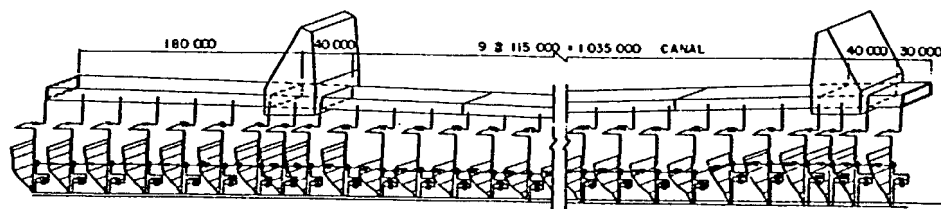
- 1) 桜井彰雄：埋設パイプラインの耐震性の研究，昭和46年
- 2) Tamura, C., Okamoto, S. and Hamada, M.: Dynamic Behavior of A Submerged Tunnel during Earthquake, Report of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Vol.24, No. 5, 1975.
- 3) 岩崎敬男，川島一彦：沈埋トンネルの動的解析—模型実験と動的解析—，土と基礎，22巻3号，昭和49年
- 4) 青木，土田肇，林：沈埋トンネルの野外模型振動実験，港湾技術研究報告，11巻3号，昭和47年
- 5) 那須信治：沈埋管の振動実験，土と基礎，20巻1号，昭和47年
- 6) 栗林栄一，川島一彦，柴田松雄：地中構造物の地震応答解析プログラム DAST-I(その1)，土木研究所資料第1312号，昭和52年
- 7) 栗林栄一，川島一彦，柴田松雄：地中構造物の地震応答解析プログラム DAST-I(その2)，土木研究所資料第1312号，昭和52年
- 8) 栗林栄一，川島一彦，柴田松雄：沈埋トンネルの軸線上の断面力および変位の地震応答解析手法に関する研究，土木研究所資料第1193号，昭和52年
- 9) 栗林栄一，川島一彦，柴田松雄：沈埋トンネル軸線上の変位および断面力に対する可撓性継手の影響の解析，土木研究所資料第1272号，昭和53年2月
- 10) 栗林栄一，川島一彦，宮田忠明：地震動入力の設定法に関する研究，土木研究所資料第1192号，昭和52年2月
- 11) 岩崎敏男，川島一彦，高木義和：橋脚の地震応答に及ぼす周辺地盤の影響およびその解析，土木研究所資料1372号，昭和53年3月
- 12) 日本道路協会：東京湾横断道路技術調査報告書，日本道路協会東京湾横断道路技術調査特別委員会，昭和49年3月

- 13) 国土開発研究センター：トンネル耐震継手技術基準(案)，昭和54年3月
- 14) 建設省関東地方建設局東京湾岸道路調査事務所：東京湾環状道路多摩川横断トンネルの地震応答解析業務，昭和53年3月
- 15) 本州四国連絡橋公団：耐震設計指針剛体基礎の安定計算法(案)，昭和47年11月
- 16) 栗林栄一：振動問題における応用例，土木学会関東支部，昭和45年12月

付 図



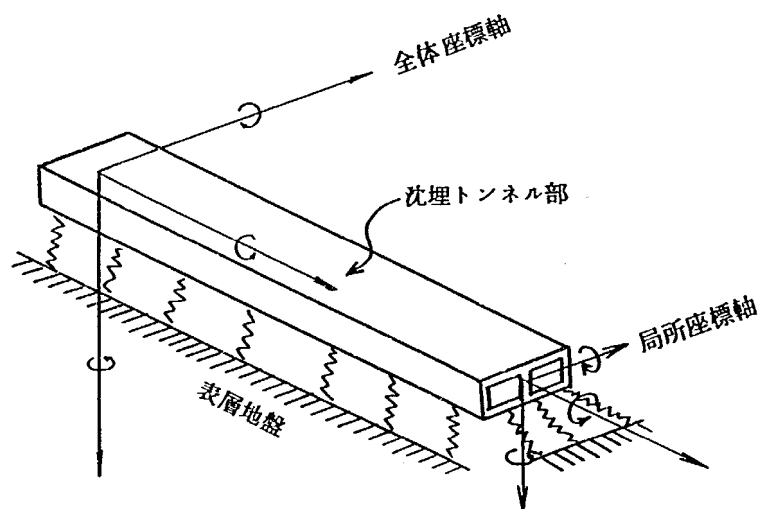
(a) 軸 方 向



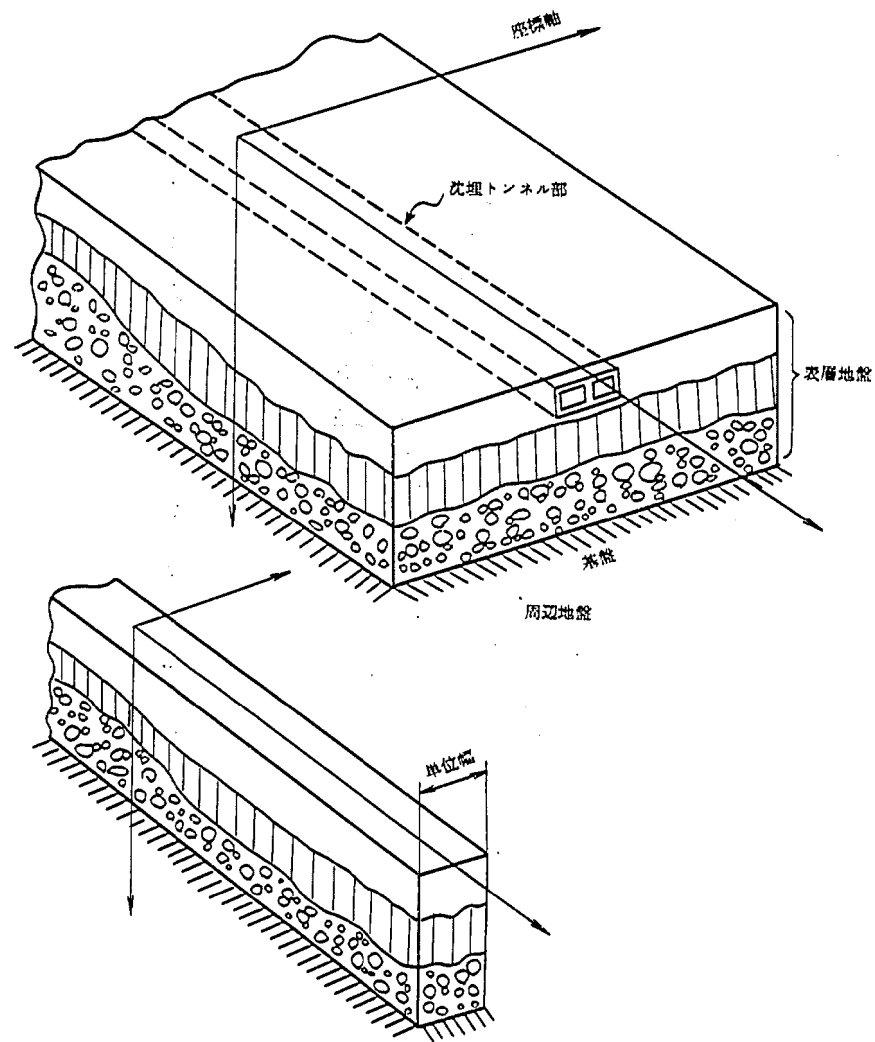
(b) 水 平 方 向

(単位：mm)

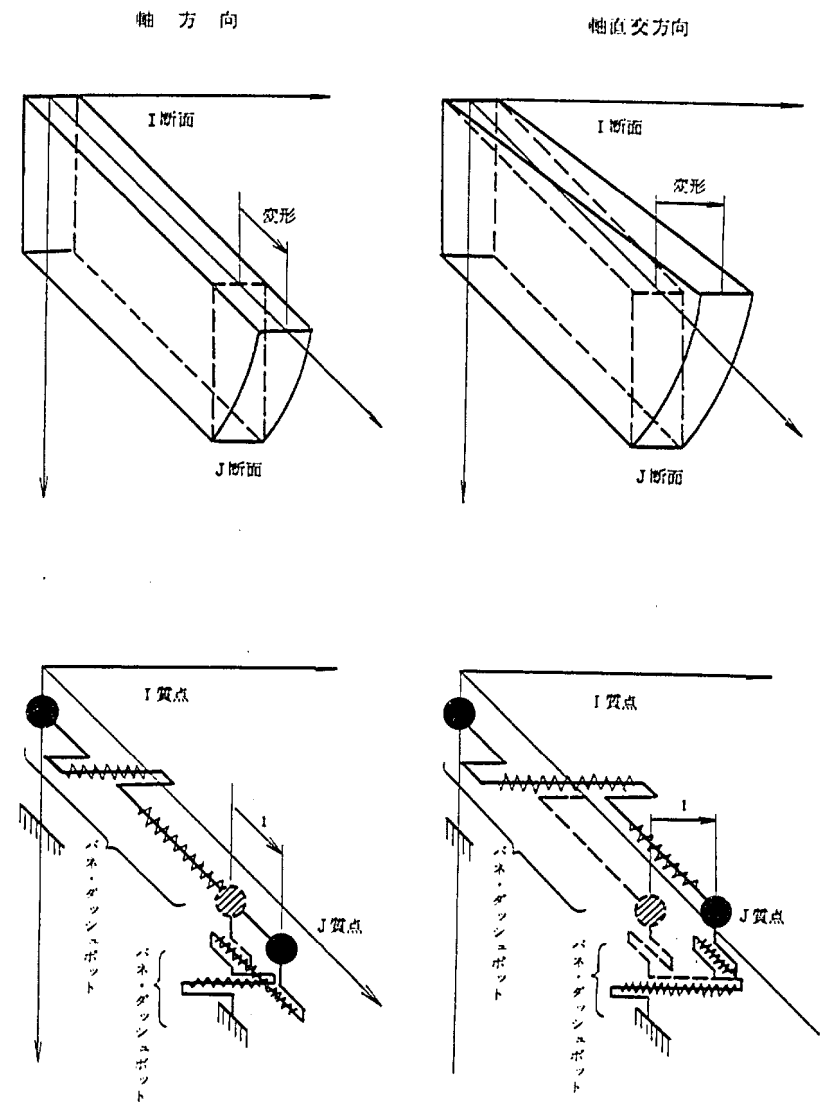
付図-1 田村・岡本・浜田²⁾による動的解析モデル概念図(東京港トンネル、1975年)



付図-2 51～52年度の動的解析モデル概念図(梁モデル)

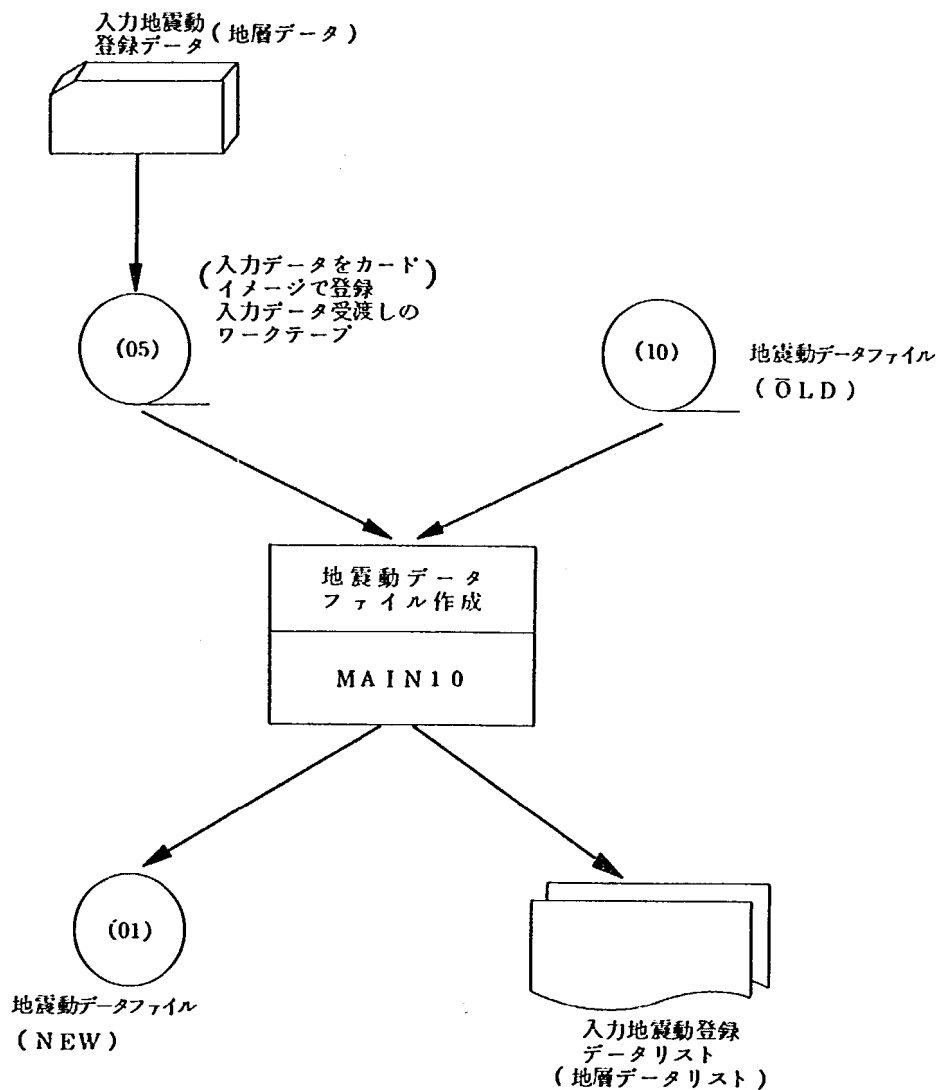


(a) 表層地盤概念図

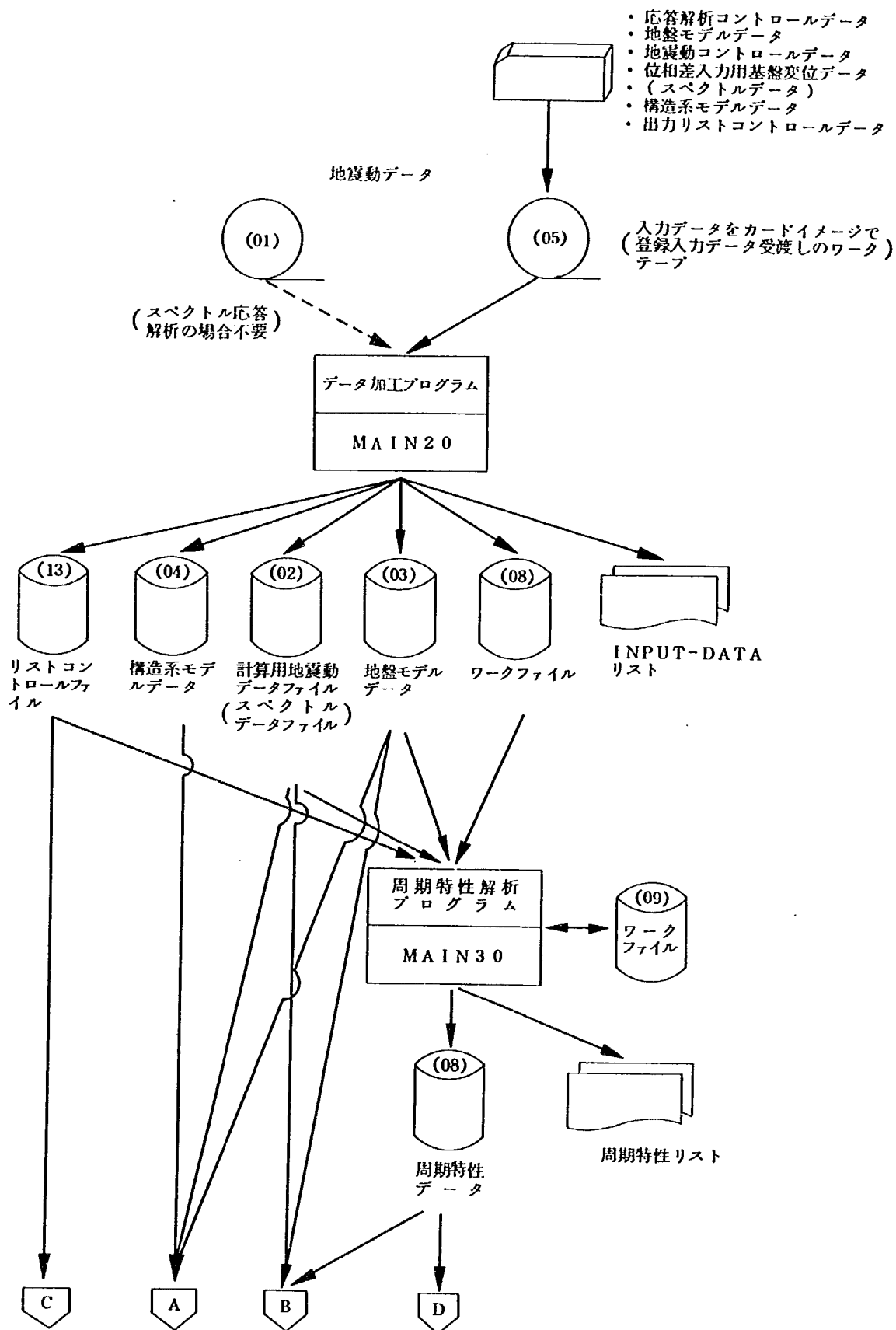


(b) 1自由度せん断振動系モデル概念図

付図-3 周辺の表層地盤のモデル化

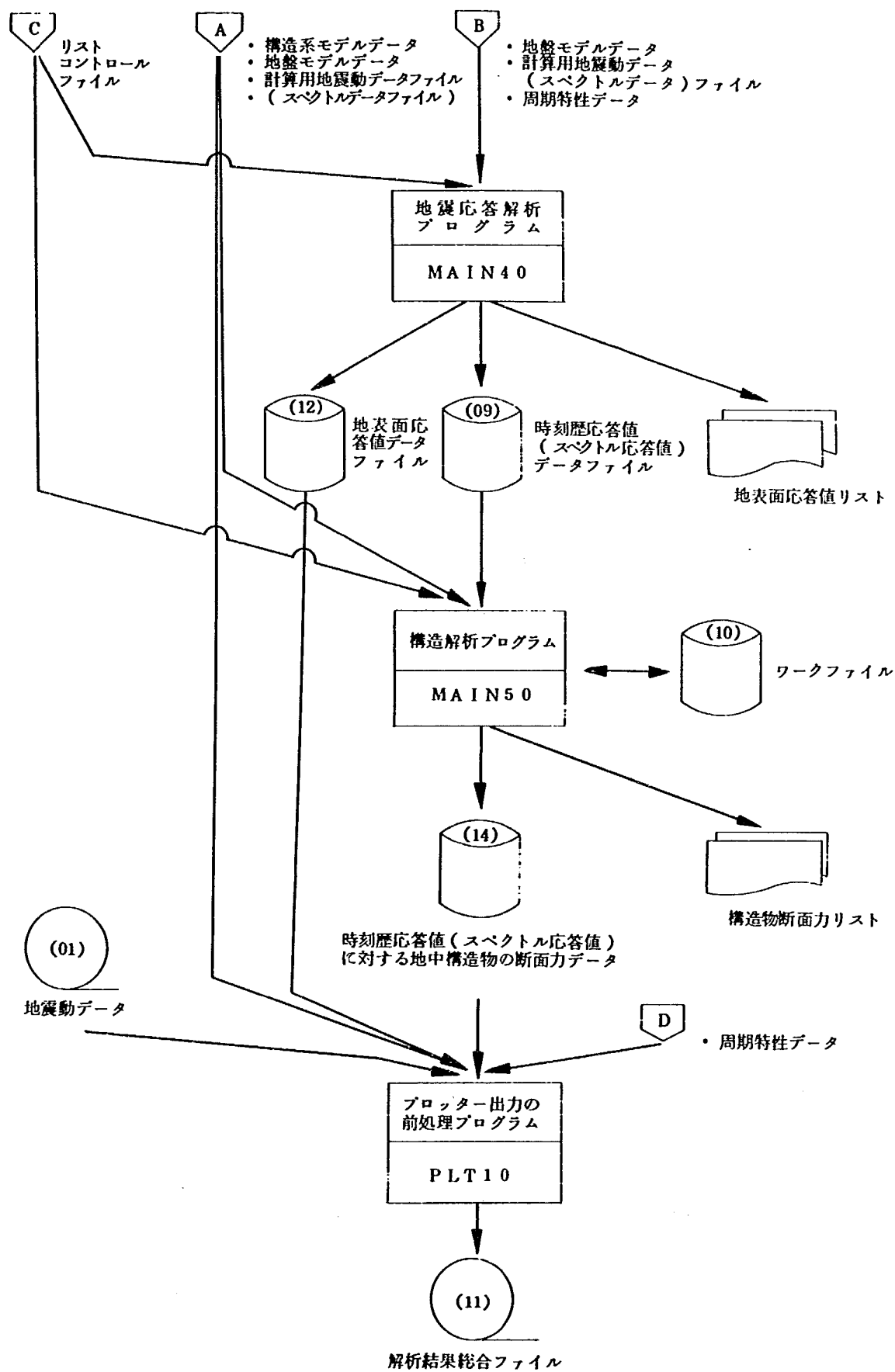


付図-4 地震動データ登録機能 (ジョブ名: RUN10)

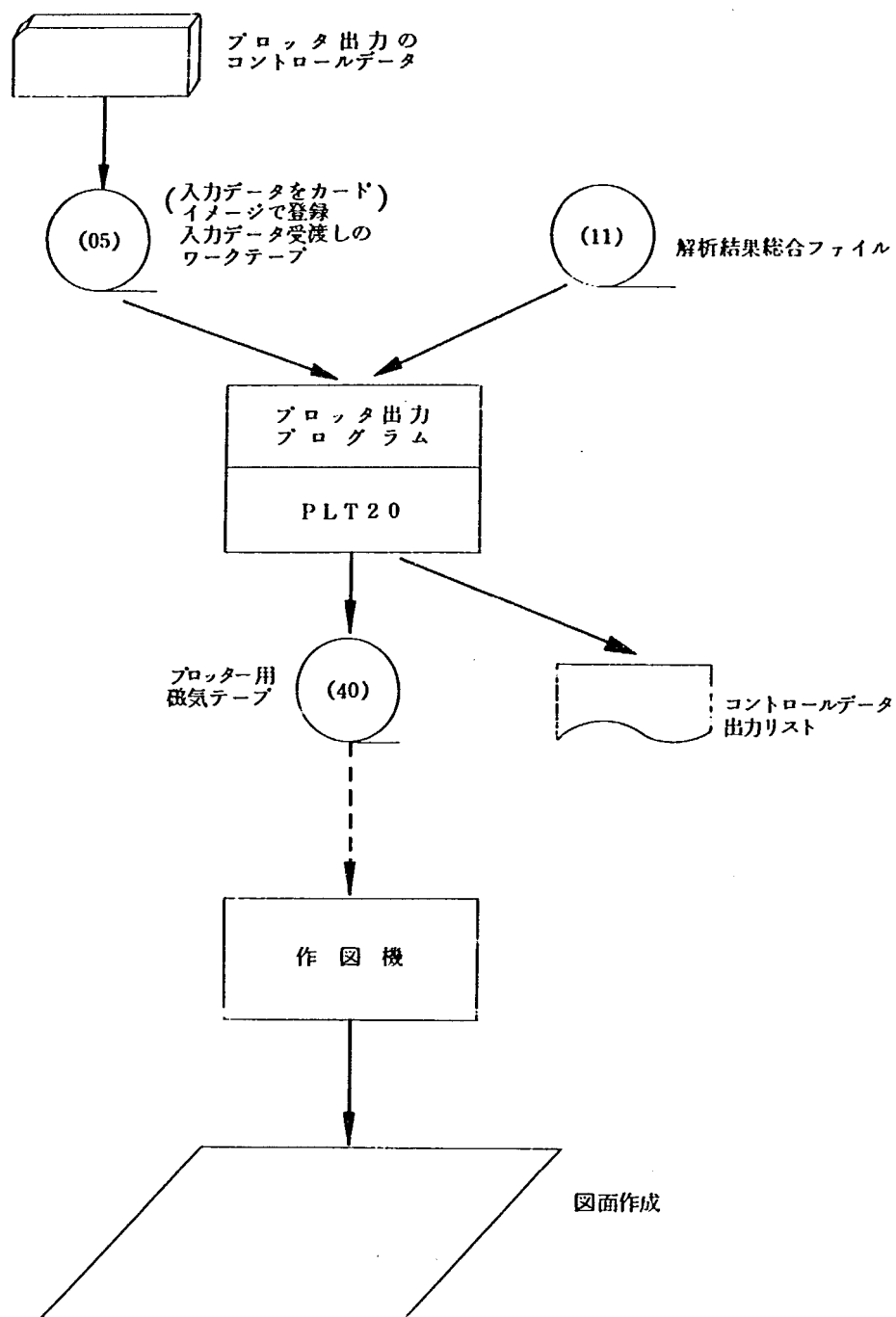


次頁に続く

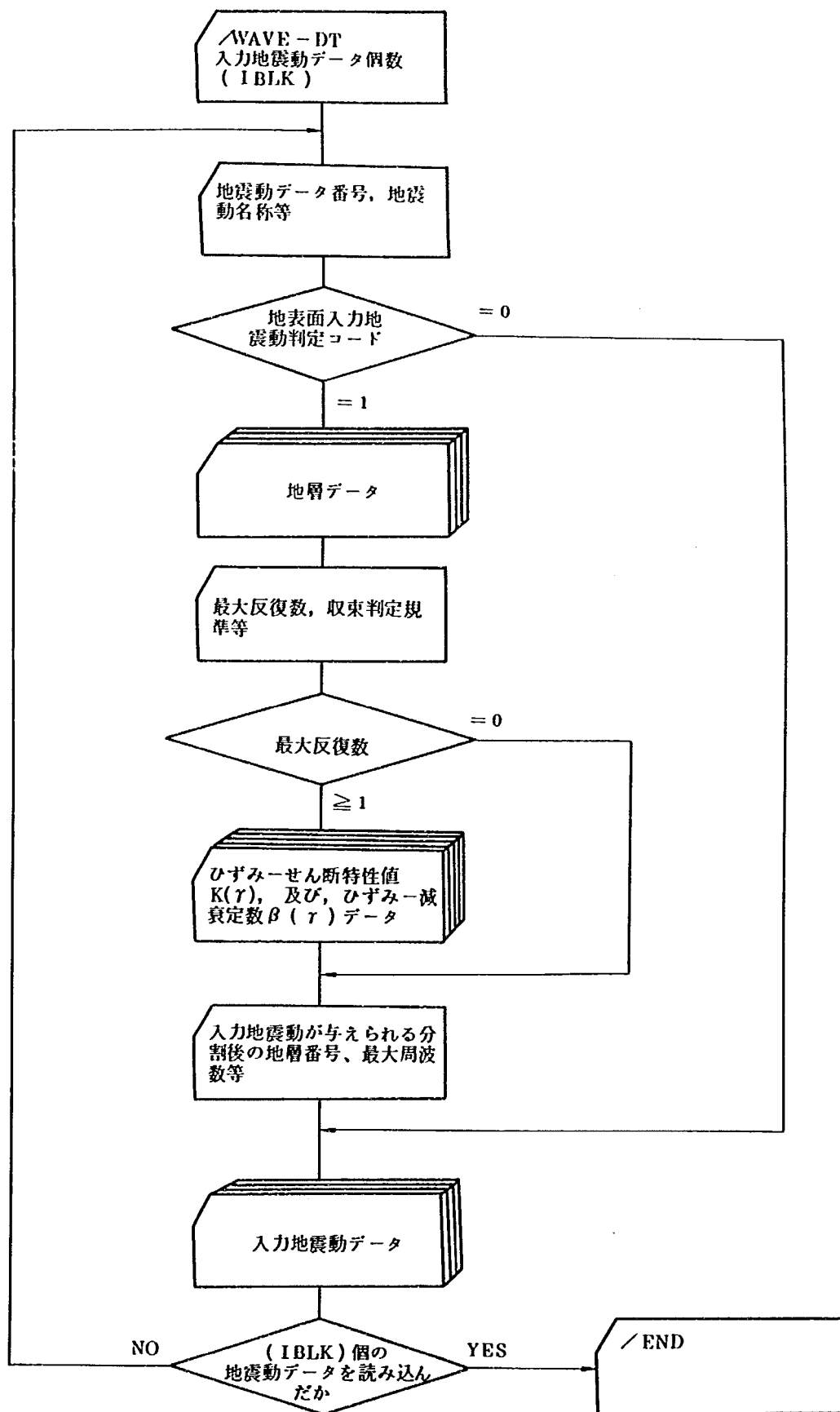
付図-5 地震応答解析機能(ジョブ名: R2050)



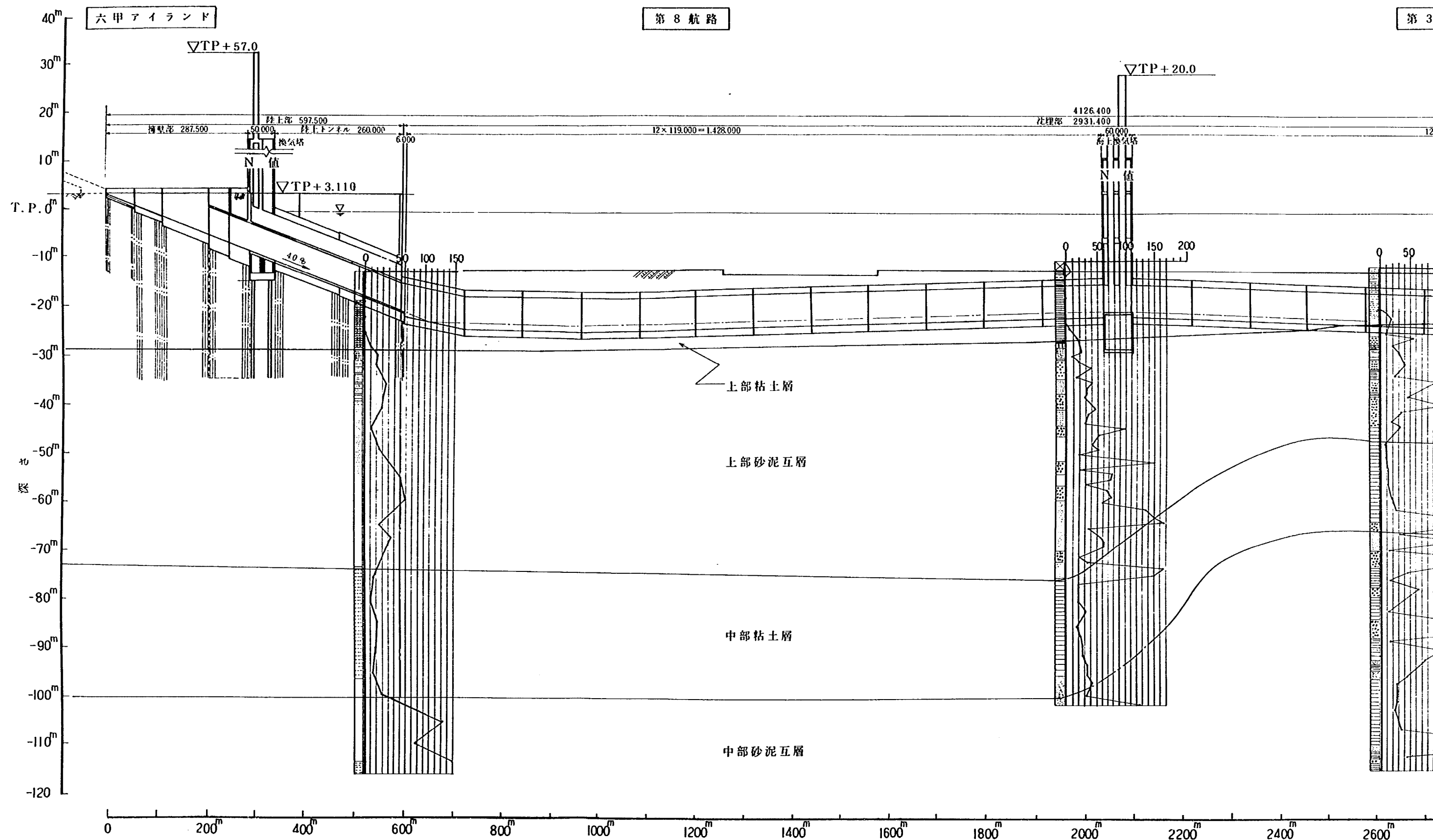
付図-5 地震応答解析機能(ジョブ名:R2050)



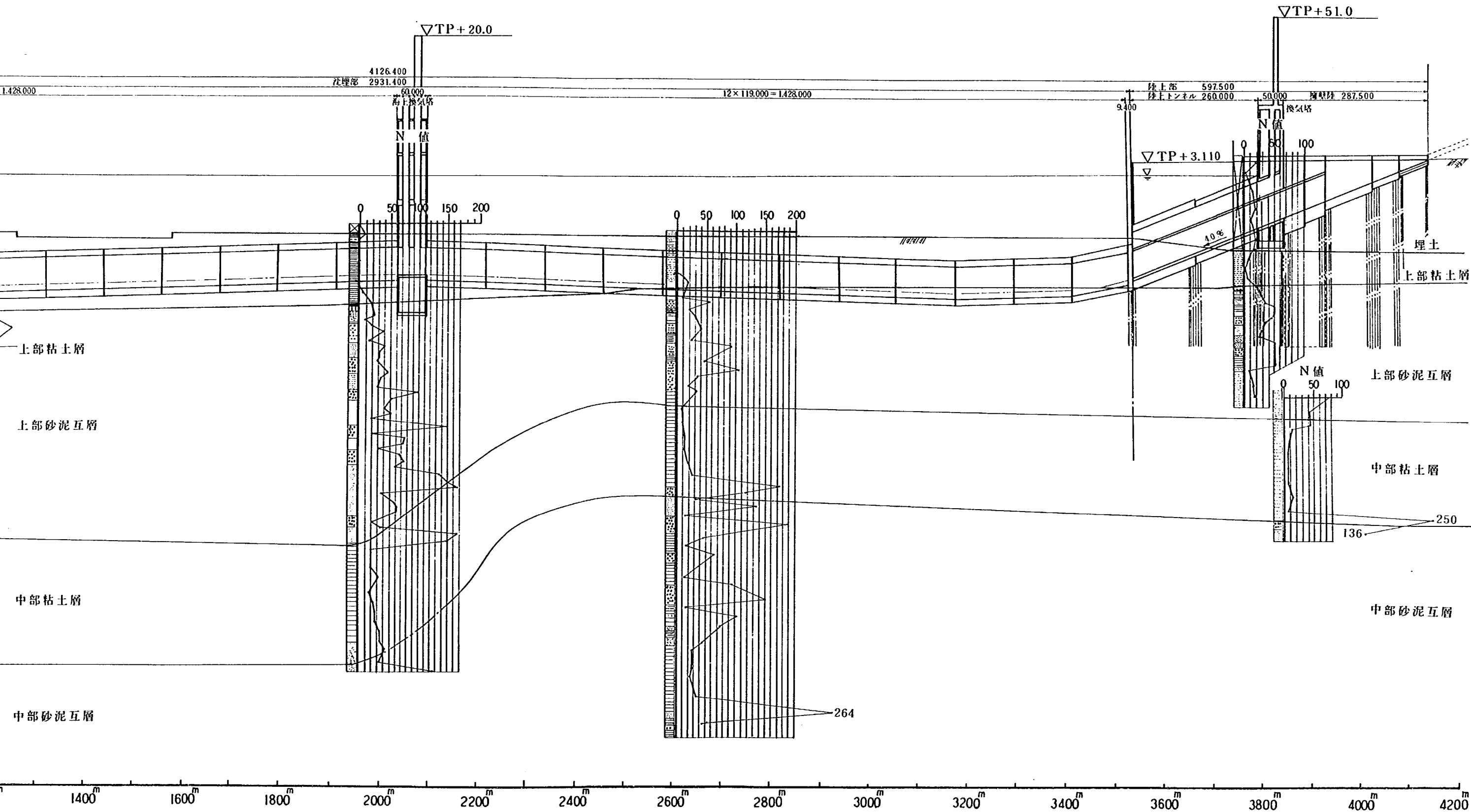
付図-6 プロッター出力機能(ジョブ名: PLT20)



付図-7 インプットデータ入力フローチャート(ジョブ名: RUN10)



付図-8 大阪湾岸道路六甲アイランドーポートアイランド間沈埋トンネル一般縦断面図



付図-8 大阪湾岸道路六甲アイランドーポートアイランド間沈埋トンネル一般縦断面図

付 表

付表-1 DAST-Iプログラムの構成

ジョブ名	含まれるメインプログラム	主 内 容
RUN10	MAIN 10	地震動データのマスターファイルの作成
R2050	MAIN 20	入力データをもとに、応答解析用の各種のデータファイルを作成し、入力データリストをプリント出力する。
	MAIN 30	地中構造物周辺の地盤の固有値解析を行なう。固有値をプリント出力する。
	MAIN 40	地中構造物周辺の地盤の時刻歴応答解析またはスペクトル応答解析を行なう。結果をプリント出力する。
	MAIN 50	変位法により地中構造物の節点変位、材端断面力を計算し、プリント出力する。
	PLT 10	プロッター出力のための前処理（ファイル作成）を行なう。
PLT20	PLT 20	解析の結果をプロッター出力する。

付表-2 入力条件一覧表

地震名	年月日	マグニチュード	観測地点	記録最大 加速度	入力加速度	作用時間	入力方向	選定理由	備考
			震央距離						
根室半島沖	1973. 6. 17	7.4	静内橋	41 gal	水平：150 gal 鉛直：75 gal	12 秒	軸 方 向 軸直角方向	中規模・ 遠 距 離	* h = 20 %
			Δ : 305 Km						
日向灘沖	1968. 4. 1	7.5	板島橋	134 gal	水平：150 gal 鉛直：75 gal	40 秒	軸 方 向 軸直角方向	大規模・ 中 距 離	
			Δ : 100 Km						
平均応答スペクトル* (土木研究所、1970年、岩盤)					水平：150 gal 鉛直 75 gal	—	軸 方 向 軸直角方向		

*地盤減衰定数

付表-3 平均的な地盤の諸定数(その1)

諸定数	地 層		
	上部砂泥互層	中部粘土層	中部砂泥互層
N 値	53	18	100
単位体積重量 $[t/m^3]$	2.0	1.7	2.0
せん断弾性波速度 $[m/sec]$	305	280	335
せん断弾性係数 $[t/m^2]$	19,000	13,600	22,900

注) せん断弾性波速度およびせん断弾性係数はともに微小せん断ひずみ時の推定値である。

付表-4 断面諸定数

エレメントの弾性係数		E	3.5×10^6	t/m^2
断面2次モーメント	軸直角方向	I_y	1500	m^4
	鉛直方向	I_z	15500	m^4
断面積		A	124.3	m^2
エレメントのせん断弾性係数		G	1.52×10^6	t/m^2

付表-5 可撓性継手バネ定数(その1)

		エレメント間	沈埋トンネル 始 終 端 部	摘 要
軸方向バネ係数 K_3 (t/m)		2.3×10^5 (5.3×10^{-5})	1.2×10^5 (2.8×10^{-5})	()内は 本体剛性との比 を表わす。
回転バネ係数 ($t \cdot m/rad$)	水平面内 $K_{\theta z}$	3.0×10^7 (5.5×10^{-5})	3.0×10^7 (5.5×10^{-5})	
	鉛直面内 $K_{\theta y}$	7.5×10^6 (1.4×10^{-4})	3.0×10^6 (5.6×10^{-5})	
せん断バネ係数 (t/m)	水平面内 K_y	2.0×10^5 (1.1×10^{-5})	2.0×10^{-5} (1.1×10^{-5})	
	鉛直面内 K_z	2.0×10^{-5} (1.1×10^{-5})	本体剛性と同様とする。	
ねじりバネ係数 K_r		本体剛性と同様とする。		

付表－6 解析結果一覧表

応答 入力波	地盤絶対最大変位 (cm)		沈埋トンネル部絶対最大変位(cm)				沈埋トンネル部絶対最大断面力					
	軸方向	軸直角方向	軸方向		軸直角方向		軸方向		軸直角方向			
			継手 ④	継手 ⑤	継手 ⑥	継手 ⑦	軸力(t)		せん断力(t)		曲げモーメント(t・m)	
							継手 ④	継手 ⑤	継手 ⑥	継手 ⑦	継手 ⑧	継手 ⑨
根室 半島沖	7.0	6.5	185	20.0	25.0	25.0	30,000	65,000	1,100	1,400	77,000	130,000
日向灘沖	4.0	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0	7500	20,000	500	600	38,000	42,000
平均応答 スペクトル	6.5	8.0	3.5	5.0	8.0	8.0	12,000	35,000	650	750	65,000	95,000

付表－7 平均的な地盤の諸定数(その2)

地質年代	沖積層		洪積層		
地層名	埋土層	最上部粘土層	上部砂泥互層	中部粘土層	中部砂泥互層
平均 N 値	16	1	53	18	100
単位体積重量〔t/m ³ 〕	1.9	1.5	2.0	1.7	2.0
せん断弾性波速度〔m/sec〕	185	143	337	292	365
せん断弾性係数〔t/m ² 〕	6,630	3,130	23,100	14,800	27,100

付表－8 可撓性継手バネ定数(その2)

		エレメント間	沈埋トンネル 始 終 端 部	摘 要
回軸方向バネ係数 K_3 (t/m)		2.3×10^5 (5.3×10^{-5})	1.2×10^5 (2.8×10^{-5})	()内は本体剛性との比を表わす。
回 転バネ係数 (t・m/rad.)	水平面内 $K_{\theta z}$	3.0×10^7 (5.5×10^{-5})	3.0×10^7 (5.5×10^{-5})	
	鉛直面内 $K_{\theta y}$	7.5×10^6 (1.4×10^{-4})	3.0×10^6 (5.6×10^{-5})	
せん断バネ係数 (t / m)	水平面内 K_y	2.0×10^5 (1.1×10^{-5})	2.0×10^5 (1.1×10^{-5})	
	鉛直面内 K_z	2.0×10^5 (1.1×10^{-5})	2.0×10^5 (1.1×10^{-5})	
ね じ り バ ネ 係 数 K_r		本体剛性と同様とする。		

付 記

付 記

有限要素法による水平方向の周辺地盤の解析

I 概 説

(1) 目 的

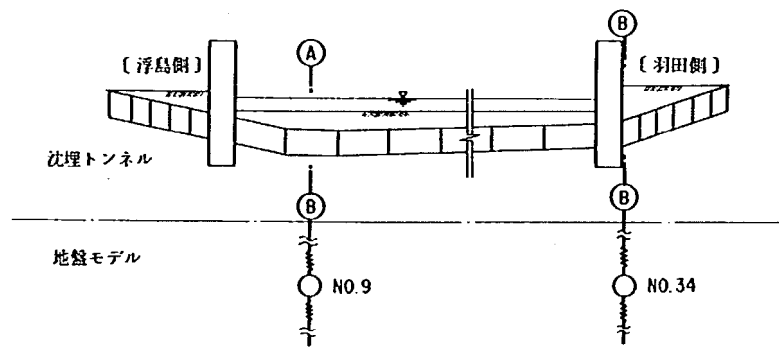
周辺地盤を含めた連続体としての地震時の挙動を把握する。具体的には水平方向の周辺地盤の固有値、固有モード、最大応答変位、最大応答加速度を求める。

(2) 対象断面

本文に示した地盤モデルの質点No. 9, No. 34を含む沈埋トンネル軸直角水平方向の面とする。(付記-図-1)に示すとおりである。

(3) 計算の内容

- (1) 固 有 値
- (2) 最大応答変位(動的載荷)
- (3) 最大応答加速度(動的載荷)
- (4) 最大主応力(自重載荷状態+動的載荷)
- (5) 最大主せん断応力(自重載荷状態+動的載荷)



付記-図-1 解析対象断面概念図

II 方法の要旨

有限要素法による地盤および構造物の解析に関する方法については多くの文献がある。ここでは参考文献10)を引用してその方法の要旨を述べる。

まず、有限要素法の基本的な考え方および手順は次のとおりである。

- (1) 連続体を仮定の境界線または面によってある数の「有限要素」に分割する。
- (2) 「有限要素」はその境界上に位置する有限個の節点において連結されているものとする。なお、これらの節点の変位は求めようとする基本的なパラメータとなる。
- (3) ある数の「有限要素」内の変位の状態が各々の節点の変位の関数として一義的に決定されるように一組の関数を選んで変位関数と定義する。
- (4) 上に述べたような変位関数によって、「有限要素」内のひずみ状態は節点変位の関数として一義的に決定される。このようにして得られた有限要素内ひずみは、初期ひずみ構成方程式で表わされる材料の性質等により、要素内の応力状態、または要素境界上の応力を定めることになる。

(5) 境界上の応力および物体力（任意の分布荷重）につり合った形で節点集中力を定め、次式のような要素に関する剛性方程式を定めて、通常の構造解析手法により、その後の解析を行なう。

$$\{F\}^a = [K]^a \{\delta\}^a + \{F\}_r^a + \{F\}_{\epsilon 0}^a$$

ここに

$\{F\}^a$: 要素 a に作用する節点力

$[K]^a \{\delta\}^a$: 節点変位による力

$\{F\}_r^a$: 要素 a に作用する物体力と釣合う

ために必要な節点力

$\{F\}_{\epsilon 0}^a$: 初期ひずみ状態における節点変位拘束のために必要な節点力

以下、自重状態と動的載荷に関する計算法について述べる。

〔A〕 自重載荷状態の計算法

(イ) 計算フロー

付記一図-2に示すとおりである。

(ロ) 剛性マトリックス

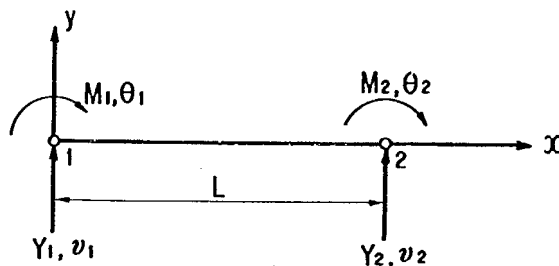
① 曲げひずみ状態

付記一図-3において節点1, 2に力 Y とモーメント M が作用し Y に対応する変位を v , 回転を θ とする。この曲げ部材長が L で曲げ剛性が EI の場合の剛性行列を従来周知の変形法と、有限要素法に縁の深いエネルギー法の2つから求めておこう。

まず、 $v_2 = \theta_2 = 0$ のような片持ばりの場合に
は、 Y_1, M_1 によって v_1, θ_1 が発生し

$$v_1 = \frac{Y_1 L^3}{3EI} + \frac{M_1 L^2}{2EI}$$

$$\theta_1 = \frac{Y_1 L^2}{2EI} + \frac{M_1 L}{EI}$$



したがって、

付記一図-3 はりの要素（変形法）

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ M_1 \end{Bmatrix} = EI \begin{bmatrix} \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix}$$

また、反力 Y_2 と固定モーメント M_2 は

$$Y_2 = -Y_1$$

$$M_2 = -LY_1 - M_1$$

$$\begin{Bmatrix} Y_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -L & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_1 \end{Bmatrix} = EI \begin{bmatrix} -\frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix}$$

逆に、 $v_1 = \theta_1 = 0$ の場合には、 $Y_2 = M_2$ によって

$$v_2 = \frac{Y_2 L^3}{3EI} - \frac{M_2 L^2}{2EI}$$

$$\theta_2 = -\frac{Y_2 L^2}{2EI} + \frac{M_2 L}{EI}$$

したがって

$$\begin{Bmatrix} Y_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = EI \begin{bmatrix} \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}$$

$$Y_1 = -Y_2$$

$$M_1 = LY_2 - M_2$$

同様に

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ M_1 \end{Bmatrix} = EI \begin{bmatrix} -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}$$

以上を総合して

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ M_1 \\ Y_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = EI \begin{bmatrix} \frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} & -\frac{12}{L^3} & -\frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} & \frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} \\ -\frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} & \frac{12}{L^3} & \frac{6}{L^2} \\ -\frac{6}{L^2} & \frac{2}{L} & \frac{6}{L^2} & \frac{4}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}$$

⑩ 平面ひずみ状態

節点変位 $r(x, y)$ を

$$\{r(x, y)\} = [S(x, y)] \{\alpha\}$$

とあらわす。変位関数 $S(x, y)$ は要素境界上での適合条件を満足するようにする。いま要素内で応力が一様とすると,

$$u(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y$$

$$v(x, y) = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y$$

と表現でき,

$$\{r\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix} = [S] \{\alpha\}$$

節点 i, j, k の変位群に対しては,

$$\{r\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ v_i \\ v_j \\ v_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_k & y_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix} = [T] \{\alpha\}$$

となり、未定係数 $\{\alpha\}$ は

$$\{\alpha\} = [T]^{-1} \{r_i\}$$

となる。

ひずみ $\{\epsilon(x, y)\}$ は

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix} = [B] \{\alpha\}$$

であり、応力 $\{\sigma(x, y)\}$ は平面ひずみ状態で弾性法則より

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2(1-\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$= [D] \{\varepsilon\}$$

$$\therefore \{\sigma\} = [D][B]\{\alpha\}$$

となる。

したがって、要素内の主応力はモールの応力円の関係を用いて、次式のように求められる。

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} |\sigma_1 - \sigma_3|$$

なお、

$$\tan 2\theta_{\max} = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

[B] 動的載荷時の計算法

(1) 運動方程式と解析の基本概念

① 運動方程式

有限要素内の地震時における $x-y$ 平面での運動方程式は、周知のごとく次式で表わされる。

$$[M]\{\ddot{r}\} + [C]\{\dot{r}\} + [K]\{r\} = -\{R(t)\}$$

ここに、

$[M]$: 質量マトリックス

$[C]$: 粘性減衰マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックス

$\{r\}$: 節点変位のベクトル

$\{R(t)\}$: 地震荷重ベクトル

であり、 t は時刻、 $\dot{r}$ および $\ddot{r}$ は t に関する一回および二回の微分形を示している。また、地震荷重は一般に次式で与えられるとする。

$$\{R(t)\} = \{M_x\} \ddot{Z}_x(t) \text{ and/or } \{M_y\} \ddot{Z}_y(t)$$

ここに,

$$\{M_x\} = \begin{Bmatrix} M_1 \\ 0 \\ M_2 \\ 0 \\ \vdots \\ M_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \{M_y\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ M_1 \\ 0 \\ M_2 \\ \vdots \\ 0 \\ M_n \end{Bmatrix} \quad \text{但し } M_i : \text{節点 } i \text{ に集中する質量}$$

$n : \text{全節点数}$

$\ddot{Z}_x(t)$: 水平動 (x 方向) の地動加速度

$\ddot{Z}_y(t)$: 鉛直動 (y 方向) の地動加速度

有限要素モデルの地震応答解析は一般には上記第1式を直接に数値積分することによっても実施できるが、今取扱う二次元弾性体の面内振動の場合においては、下記の固有振動解析にもとづくモーダル・アナリシス法によるものが多い。もとよりこの方法はベクトルと位相からみればあらゆる場合に忠実であるとはいえない。しかしながら、演算時間を短縮できかつ解析が比較的安定しているという利点を有していることでこの種の解析においてはしばしば利用されている。

⑩ 固有振動解析

固有振動の解析においてはいうまでもなく前項の第1式の外力を $\{R(t)\} = 0$ とおきさらに粘性減衰 $[C]$ を無視する。すなわち,

$$[M]\{\ddot{r}\} + [K]\{r\} = 0$$

ここで、節点変位を

$$r(x, y, t) = \phi(x, y) e^{-ipt}$$

但し、 p : 固有円振動数 ϕ : 固有ベクトル

とおき、これを上記第1式に代入すると、

$$[K - p^2 M]\{\phi\} = 0$$

が得られる。変位 r が 0 以外の値を取るための条件として

$$|K - p^2 M| = 0$$

が得られる。これは p^2 (これを固有値という) に関する $2n$ 次 (n : 節点数) の固有方程式で、 $2n$ 箇の固有値を与える。この結果を上記第3式に代入すると $2n$ 元の連立一次方程式が $2n$ 組得られて、これらを独立に解いて固有ベクトル ϕ を求める。しかし電子計算機を用いる演算にあたっては、上記第3式から直接に固有値と固有ベクトルを同時に求める方法 (Jacobi の回転法など) が用いられる場合が多い。

但し、

$$M_r : \{\phi_r\}^T [M] \{\phi_r\}$$

$$p_r^2 M_r = \{\phi_r\}^T [K] \{\phi_r\}$$

$$2 h_r p_r M_r = \{ \phi_r \}^T [C] \{ \phi_r \}$$

$$P_r = - \{ \phi_r \}^T \{ M_x \} \ddot{Z}_x(t), \quad \{ \phi_r \}^T \{ M_y \} \ddot{Z}_y(t)$$

となる。ここでサフィックス r は r 次モードに対する諸量を示し、 h は粘性減衰定数（臨界減衰に対する比）である。

$2n$ 箇の独立な微分方程式を解き、 $\{ Y_r \}$ を求めて、さらに、各節点の変位 $\{ r_r \}$ を求めて、これらをモードに関して合成することによって応答値を算定する。各要素のひずみ、応力なども同様の手順で計算しうる。なお、主応力については前述の(ロ)⑩を参照されたい。

(ロ) 各種マトリックスの算定

各種マトリックスの説明は次のとおりである。

① 質量マトリックス $[M]$

有限要素の各節点に集中する質量系を仮定する。ある節点の質量は、当該節点に関連する全ての要素から供給されるものとし、各要素においてはその質量を当該要素がもつ節点数で除して関係する節点に均等に配分する。質量マトリックス $[M]$ は

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & & & & \\ & M_1 & & & \\ & & M_2 & & \\ & & & M_2 & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & M_n \\ & & & & & & M_n \end{bmatrix}$$

なる $2n$ 元の対角マトリックスとして表わす。ここに、 M_i は節点 i における質量を示し、 n は全節点数を示す。

⑩ 粘性減衰マトリックス $[C]$

粘性減衰マトリックスをいかなる形で与えれば最も合理的であるかについては現在のところ定説がない。仮りに何らかの形で与えることができたとしても、それを対象とする構造物に対して適切であるか否かの検証が難しい。このことは前述の(イ)①の第1式を直接に解析することの困難性の一因ともなっている。しかし、ここではモーダル・アナリシス法によるため、粘性減衰マトリックス $[C]$ を直接与える代りに、上式の h_r の形で構造物の減衰効果を見込むことができる。減衰定数 h は物理的意味がある程度に明確であり、現実の構造物に関して実測も可能な量である。このような手法によれば、ベクトルと位相は共に前述の(イ)①の第1式を近似的に満足するにすぎないことになる。

実在する減衰性と減衰マトリックス $[C]$ との関係は、今後に明らかにしていく必要のある問題の一つであると考えられる。

⑪ 剛性マトリックス $[K]$

剛性マトリックスは

$$[K] = [a]^T [K_e] [a]$$

ここで、

$[K]$: 系全体の剛性マトリックス

$[K_e]$: 要素の剛性マトリックス

$[a]$: 変位変換マトリックス

$[a]^T$: $[a]$ の転置マトリックス

で与えられ、静力学的に定まる $2n$ 元 (n : 節点数) の正方マトリックスである。これらのマトリックスの算定については前述の(ロ)を参照されたい。

Ⅲ 計算結果

計算結果を付記一図-4~9, 付記一表-1に示す。これらの図表から次のことが判る。

- (1) 1次の固有周期は1.66秒であり本文に示した表-8の値より1.07秒程短くなっている。
- (2) 1, 2次では、水平方向のモードが卓越しており、4, 5, 7, 8次では、トンネル断面付近のモードが複雑に変化しており水平、鉛直方向のモードが複雑に重ね合わさっている。
- (3) 最大応答変位、最大応答加速度ともトンネル断面付近(側面)で大きな値を示しており、それぞれ3 cm, 100galを越えている。
- (4) 最大主応力、最大主せん断応力は基盤面に近い要素で大きい。トンネル断面付近(側面)ではその方向の包絡線は滑り線に近以する傾向にある。
- (5) 自重状態ではY方向(鉛直方向)の主応力が大きい。また、動的载荷の最大主せん断応力の方向にバラツキが少ないことも目立つ。

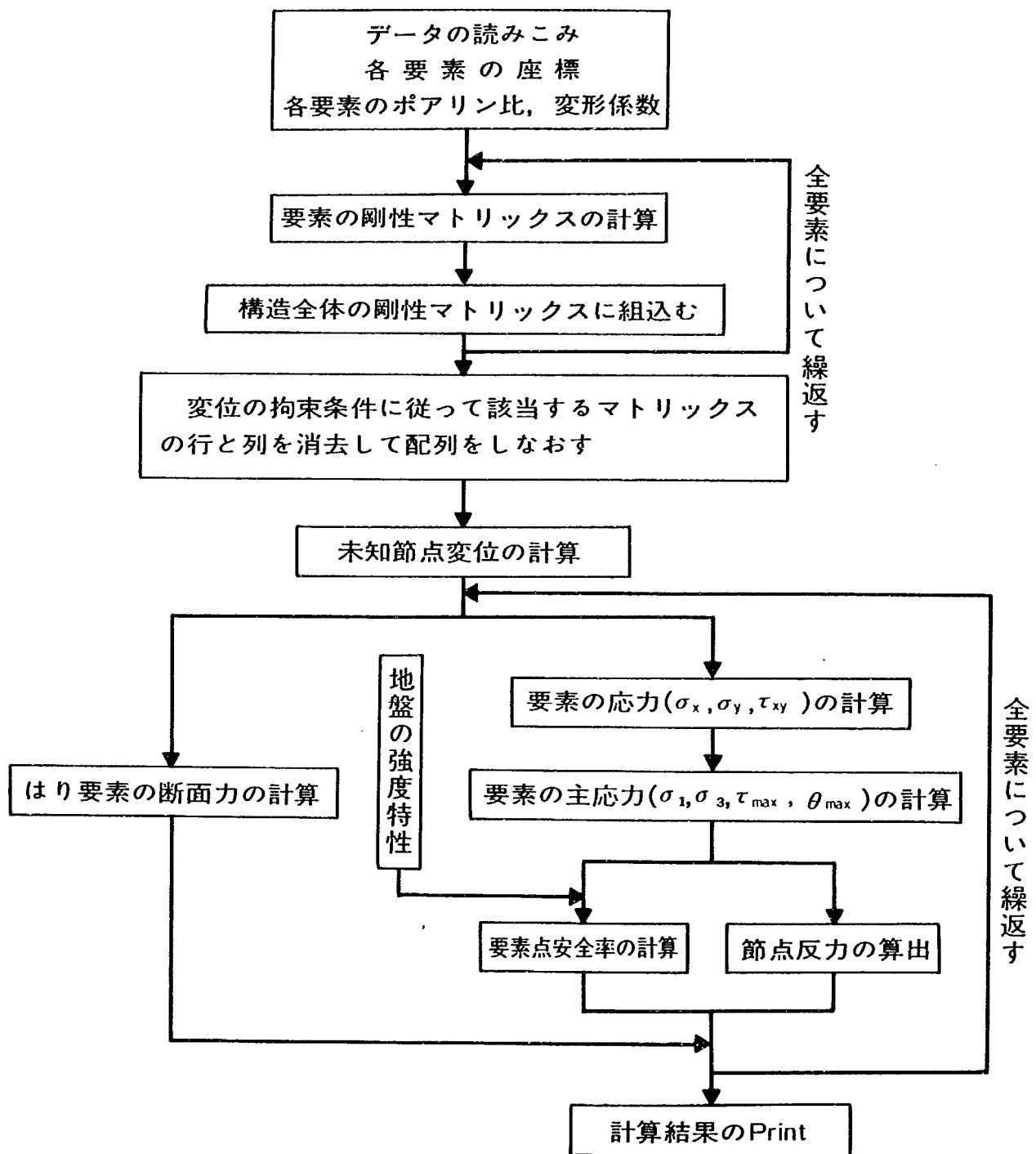
Ⅳ 考 察

- (1) 有限要素法による1次の固有周期がバネ-マス系モデルによる値(本文の表-8に示す値)より小さくなっているのはトンネル断面付近(側面)の埋戻し土の影響と解析モデルの相違(有限要素モデルでは幅が有限であること)によると思われる。
- (2) 計算結果は現実の現象を可成り単純にモデル化して得た数値計算例の結果ではあるが、実際の設計に際して、これから得られる留意事項はあると思う。

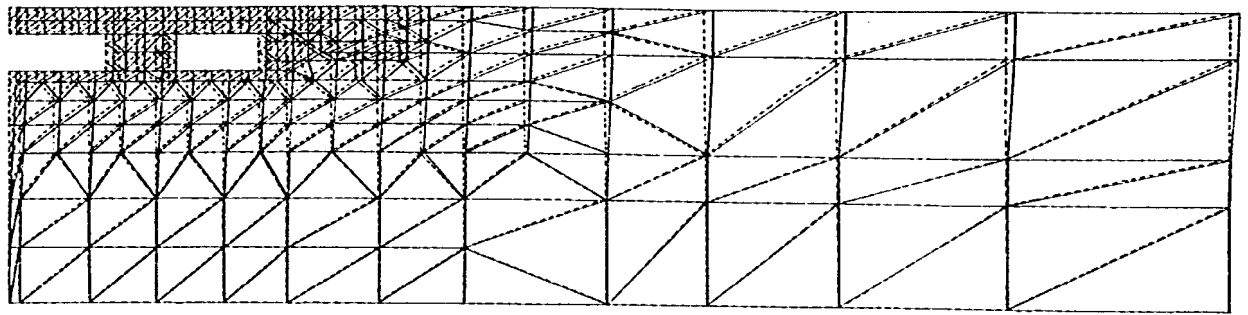
付記-表-1 固有値

振動 次数	固有周期 (SEC)	刺激係数		有効質量(TON)		有効質量比(%)	
		水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向
1	1.661709	34206699	- 0.137334	1170.0983	0.0189	0.552 (0.552)	0.000 (0.000)
2	1.380805	- 4.107717	- 4.842658	16.8733	23.4513	0.008 (0.560)	0.012 (0.012)
3	0.916439	0.830577	- 1.174362	0.6899	1.3791	0.000 (0.561)	0.001 (0.013)
4	0.687162	1.261541	4.424822	1.5915	19.5790	0.001 (0.561)	0.010 (0.023)
5	0.607384	- 18.651497	6.029528	347.8783	36.3552	0.164 (0.726)	0.019 (0.042)
6	0.584117	- 1.082067	3.399504	1.1709	11.5566	0.001 (0.726)	0.006 (0.048)
7	0.548411	8.154175	2.280467	66.4906	5.2005	0.031 (0.758)	0.003 (0.051)
8	0.532170	- 9.766607	- 7.830718	95.3866	61.3201	0.045 (0.803)	0.032 (0.083)

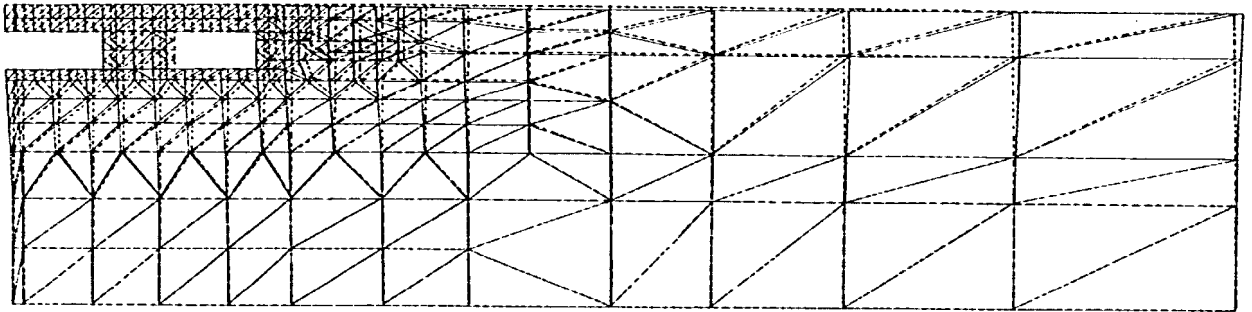
注) カッコ内は累加有効質量比を表わす。



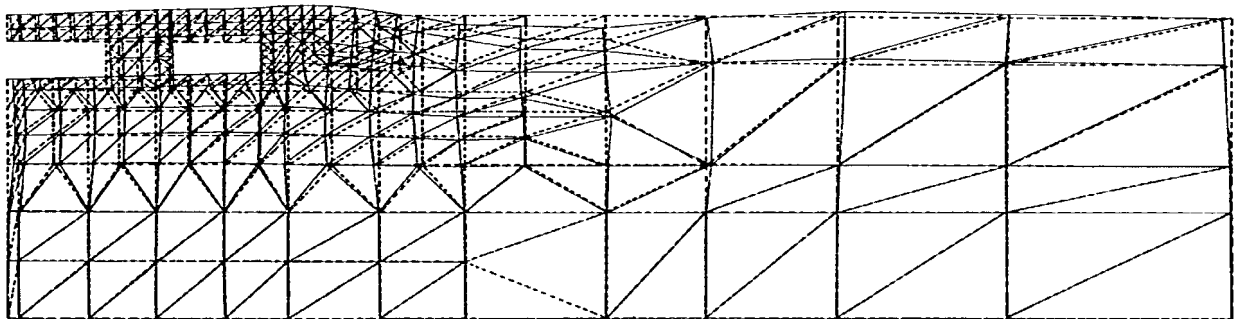
付記一図—2 有限要素法による静的二次元
計算のフロー



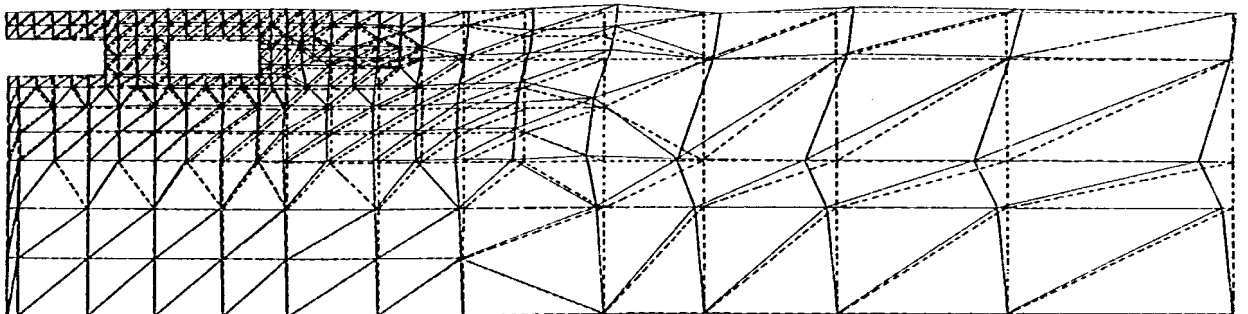
(a) 1次($T=1.662\text{sec}$)



(b) 2次($T=1.381\text{sec}$)

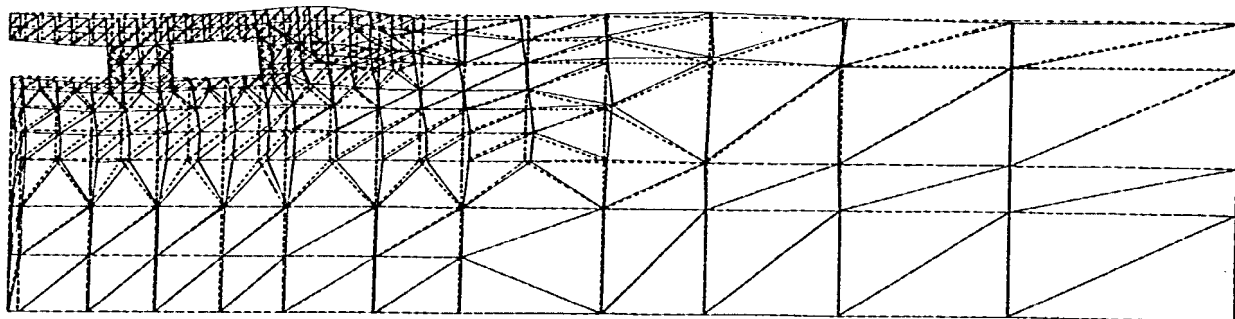


(c) 4次($T=0.687\text{sec}$)

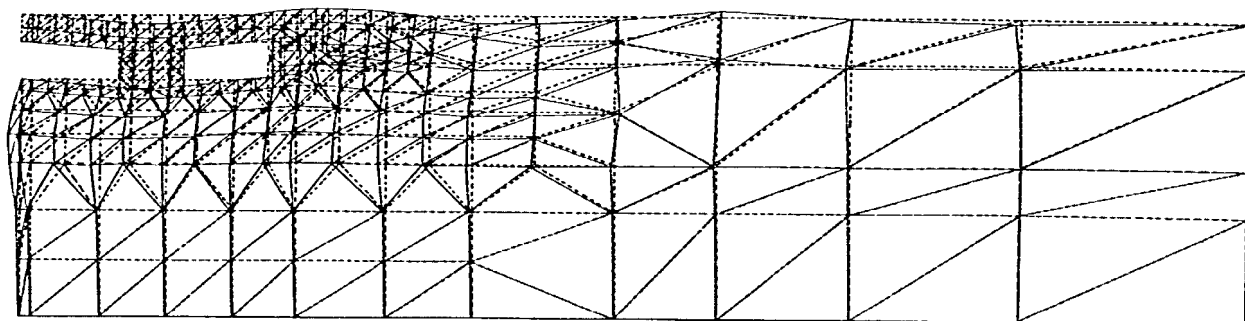


(d) 5次($T=0.607\text{sec}$)

付記一図—4 固有モード

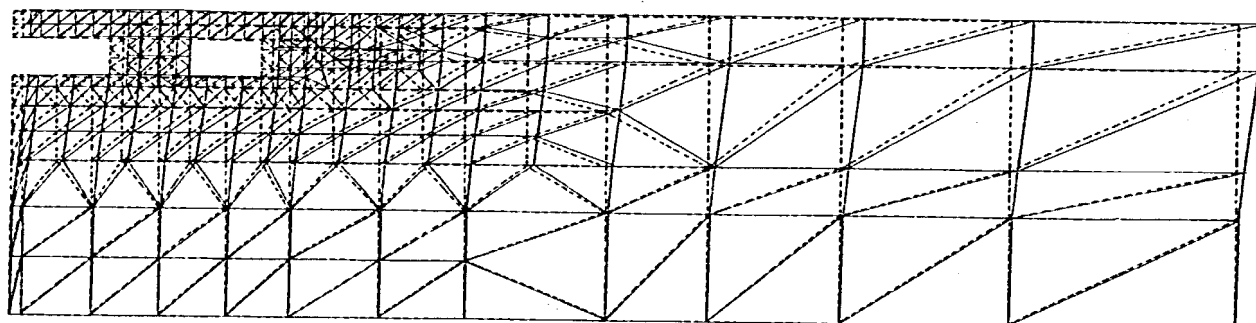


(e) 7 次($T=0.548\text{sec}$)

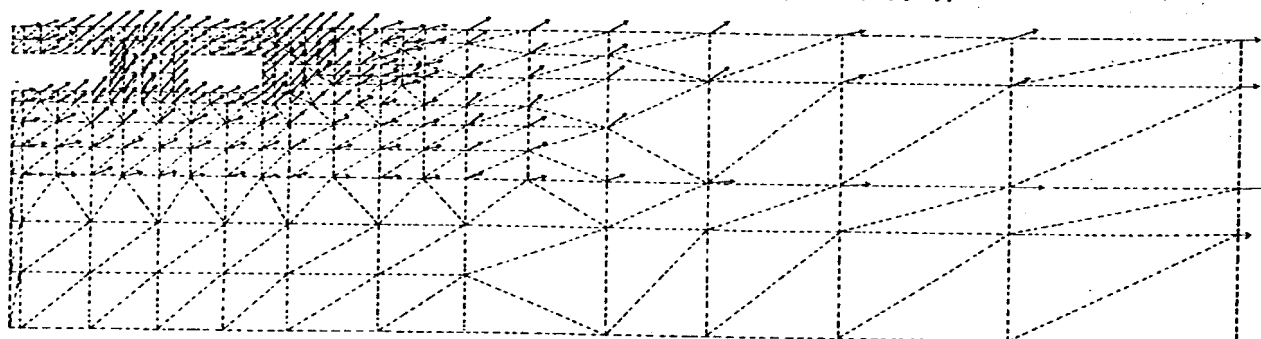


(f) 8 次($T=0.532\text{sec}$)

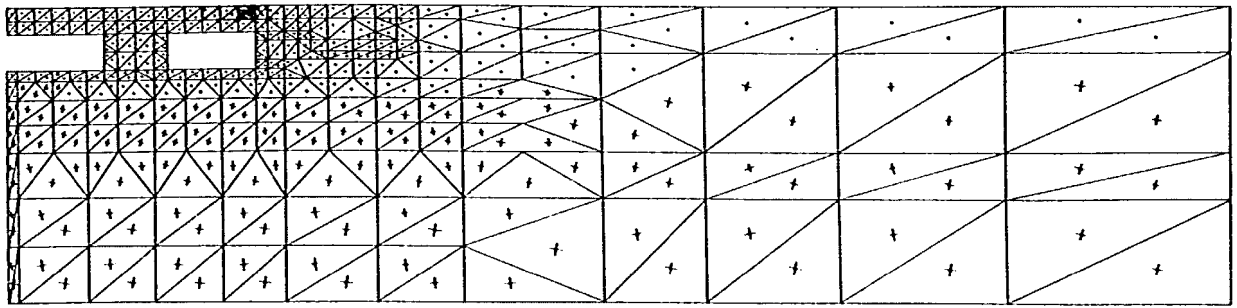
付記一図一4 固有モード



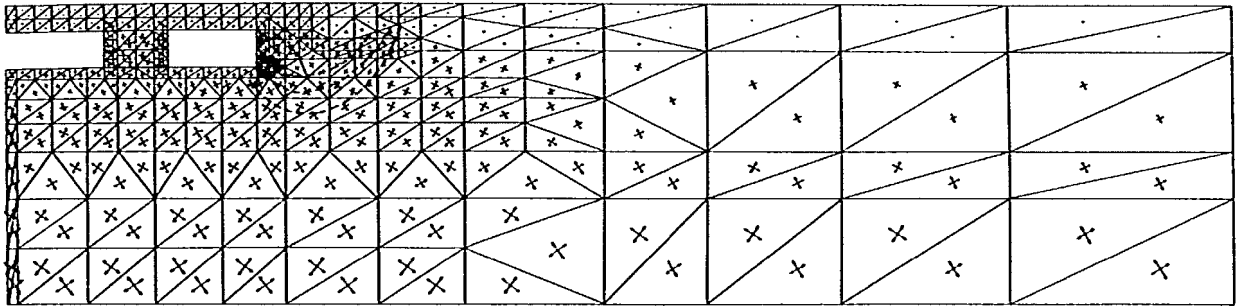
付録一図一5 最大応答変位 (動的載荷時)



付記一図一6 最大応答加速度 (動的載荷時)

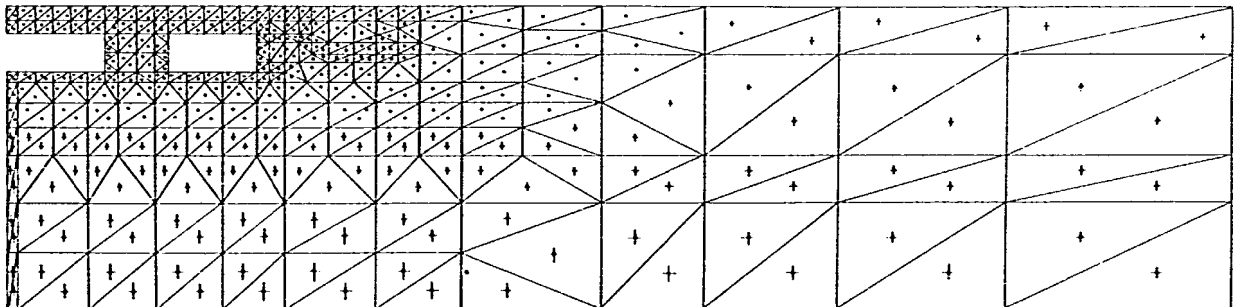


(a) 最大主応力 (自重载荷状態+動的载荷)

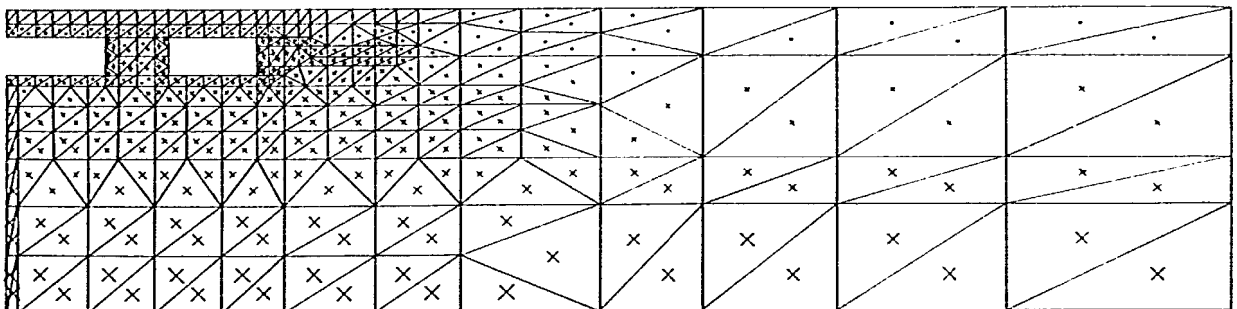


(b) 最大主せん断応力 (自重载荷状態+動的载荷)

付記一図-7 自重载荷状態に動的载荷の時の最大主応力と最大主せん断応力

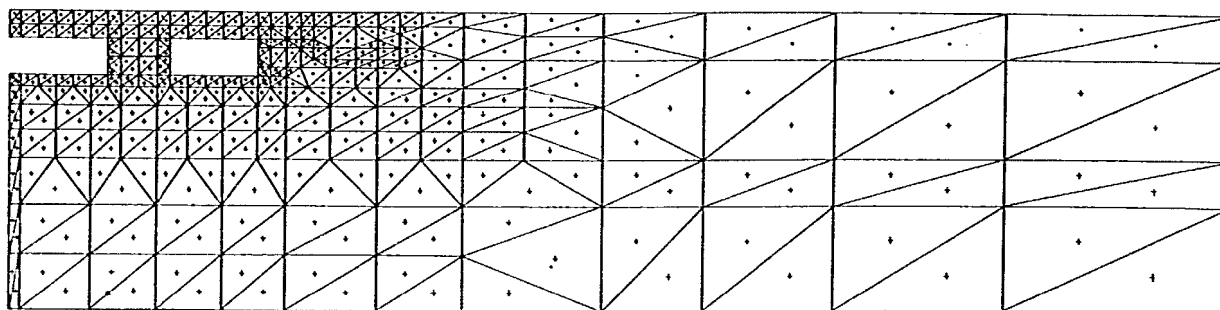


(a) 最大主応力 (自重载荷状態)

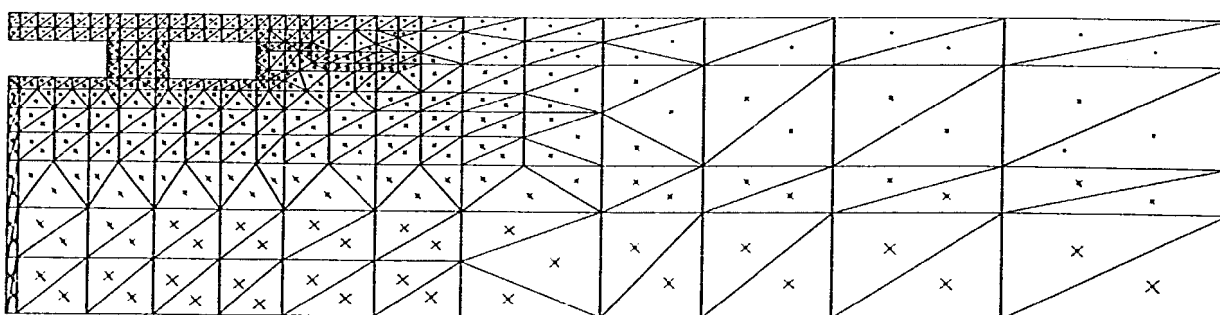


(b) 最大主応力 (動的载荷)

付記一図-8 自重载荷状態と動的载荷別の最大主応力



(a) 最大主せん断応力（自重載荷状態）



(b) 最大主せん断応力（動的載荷）

付記一図－9 自重載荷状態と動的載荷別の最大主せん断応力

換気塔を含めた沈埋トンネルの
地震応答解析

ISSN 0386-5878
土研資料第1578号
昭和55年3月(1980年)

建設省土木研究所耐震研究室

キーワード 換気塔・質点分布・位相差入力

要 旨

換気塔、沈埋トンネル部、周辺地盤の連成した全体系地震応答解析モデルを用い、可撓性継手剛性の変化及び質点分布の違い並びに位相差入力の沈埋トンネル地震応答に及ぼす影響を解析した。



郵便はがき

3 0 5 - □ □

20円切手
をはいて
下さい

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地
建設省土木研究所
耐震研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 1578 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

