

土 木 研 究 所 資 料

シールドトンネルの耐震性に関する研究 ——（その9）シールドトンネル曲線部 に生じる地震力の検討——

Development of Seismic Resistant Design
Procedure for Shield Tunnels
——Part 9 Seismic Forces Induced in
Curved Shield Tunnels——

平成3年6月

建設省土木研究所
地震防災部 耐震研究室

Copyright © (1991) by P.W.R.I.

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

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

シールドトンネルの耐震性に関する研究 ——（その9）シールドトンネル曲線部 に生じる地震力の検討——

Development of Seismic Resistant Design Procedure for Shield Tunnels ——Part 9 Seismic Forces Induced in Curved Shield Tunnels——

耐震研究室 室 長 川 島 一 彦
研 究 員 杉 田 英 樹
加 納 尚 史
部外研究員 中 島 猛 男

要 旨

近年、既設構造物の基礎等との空間的な制約から、曲線部を有するシールドトンネルの建設が進められている。シールドトンネルの曲線部では、一般の直線部と異なり、地震時に大きな断面力が生じることが懸念されるため、設計に際しては地震の影響に関する十分な検討が必要とされる。

本文は、上記の観点から、曲線部を有するシールドトンネルの合理的な耐震設計法の開発に資することを目的として、曲率半径の大きさや入力地震の直交成分がシールドトンネルの地震時挙動に及ぼす影響を地震応答解析により検討した結果を示すものである。

キーワード：シールドトンネル、耐震設計、曲線部、地震応答解析

は じ め に

最近の大都市地下空間の利用の増加にはめざましいものがある。特に道路部の地下には、公共用のさまざまな施設が埋設されており、上下水道、電力用・通信用ケーブルのための洞道、そして地下鉄などが縦横に走っている。こうした状況のもとで新たに地下鉄を建設しようとする場合には、上に挙げた施設の他、既設構造物の基礎、河川等が存在するために路線の線形には種々の制約が課せられるのが普通である。このため、曲線部の曲率半径を小さくしたり、縦断勾配を大きくしたりせざるを得ない状況にしばしば遭遇する。

施工期間中に地上部に与える影響が少ないなどの理由により、都市部での地下鉄の建設にはシールド工法が多く採用されているが、施工技術の進歩と相まって、上述のように曲率半径の小さな曲線部を有するケースが増加している。曲線部を有するシールドトンネルにおいては、直線部のみのシールドトンネルに比べ、地震時に発生する断面力のうち、せん断力および、曲げモーメントがかなり大きくなることが報告されている¹⁾。

ここでは、地下鉄シールドトンネルの急曲線部において地震時に生じる断面力と曲率半径の大きさとの関係、および曲がり部の大きさとの関係について検討した。また、地震動は本来水平面内において直交する2方向の成分を有するが、動的解析を行なうにあたっては、通常、入力地震動として2成分のうち一方のみを用いるのが普通である。本稿では地震動が本来有する直交成分の影響を考慮すべきか否かについても検討した。

目 次

はじめに

1. 解析手法の概要	1
2. 解析対象地盤および地下鉄シールドトンネル	2
2-1 対象地盤	2
2-2 地下鉄シールドトンネル	2
3. 解析モデル	5
3-1 地盤モデル	5
3-2 地下鉄シールドトンネルモデル	5
3-3 解析ケース	5
3-4 入力地震動	8
4. シールドトンネルの設定位置と発生断面力	13
5. 曲線部の曲率半径の大きさが地震時応答に及ぼす影響	20
6. 曲線部の曲線区間長（曲線部中心角）が地震時応答に及ぼす影響	37
7. 入力地震動の直交成分の影響	46
8. 断面応力度の照査	56
9. 結論	59
参考文献	60

1. 解析手法の概要

本解析に用いた手法は参考文献2)に基づいている。以下に、その手法を示す。

①表層地盤の動的応答解析モデルの作成

表層地盤を地表面と基盤面とを端面とする土柱に分解し、それぞれの土柱を一質点バネで置換する。
この質点を伸縮バネとせん断バネによって相互に連結する。

②シールドトンネルの力学モデル（等価剛性梁モデル）

シールドセグメント、リング継手および二次覆工からシールドトンネルの軸剛性、曲げ剛性を評価し、トンネル覆工をこれと同じ剛性を持つ一様連続な梁に置き換える。軸剛性については引張と圧縮で異なるが、シールドトンネルの長手方向の解析で問題となるのは引張であることから、ここでは引張剛性を用いた線形解析とした。

リング継手の軸剛性はリング継ぎボルトの引張剛性と継手金具面板の曲げ剛性とから算出するものとした。

③表層地盤の動的応答解析

表層地盤の動的応答解析を行い、各地盤質点の応答変位を計算し、時系列で算出する。

④応答変位法によるシールドトンネルの動的解析

③で算出した地盤応答変位により、構造物接点位置での応答変位を、地盤トンネル間のバネを介してトンネルに静的に作用させる。これを時系列で行うことによって、シールドトンネルの動的応答変位を算出する。

⑤シールドトンネルの覆工各部の応力、ひずみの照査

④によって算出されるシールドトンネルの応答変位から構造物梁要素に生じる応力、ひずみを算定する。

本解析では、土木研究所で開発した地中構造物の3次元地震応答解析プログラム「DAST-3C」を用いた。

表層地盤およびシールドトンネルのモデル化手法は参考文献1)に従った。

2. 解析対象地盤および地下鉄シールドトンネル

2-1 対象地盤

解析の対象とした地盤条件を図2-1に示す。これは参考文献1)と同じものである。すなわち、地盤は均質一様な表層地盤と基盤とからなり、基盤は深さ17.5mと29.5mの水平区間と勾配6%の傾斜区間により構成される。また、奥行き方向には地盤条件が変化しないものとしている。解析対象領域は600m×600mである。

対象地盤の物性値は表2-1の通りである。

表層地盤の地震時のせん断波速度は、中・大規模地震を想定して微小ひずみ時のせん断波速度を80%に低減した値を用いた。このようにすると、表層地盤の固有周期は、表層地盤が薄い位置では0.625秒、厚い位置では1.054秒となる。したがって、地盤条件変化部では、固有周期は0.625秒～1.054秒で変化することになる。

表2-1 解析対象地盤の物性値

地盤種類	N値	微小ひずみ時 せん断波速度 (m/s)	解析で使用する せん断波速度 (m/s)	単位体積 重量 (tf/m ³)	せん断弾性 係数 (tf/m ²)
基 盤	50	300	300	1.8	16,530
表層地盤	5	140	112	1.8	2,304

2-2 地下鉄シールドトンネル

解析の対象とした地下鉄シールドトンネルの線形を図2-1に示す。シールドトンネルは深さ14.2mの水平面内に設置され、基盤の傾斜区間内で曲率半径を100m～200mの範囲で変化させたケース、および曲率半径を120mに固定して中心角を30°、60°、90°、120°に変化させたケースを比較することにより、曲率半径および曲線部区間長（曲線部の中心角）の耐震性に及ぼす影響について調べた。また、比較のために曲線部を有しない直線状シールドトンネルについても応答を調べた。

曲線部を有するシールドトンネルの各点について、図2-1に示すような定義を行なう。すなわち、トンネルのX軸に直線部を直線部A、Z軸に平行な直線部を直線部D、直線部Aと曲線部との接続部を接続部B、直線部Dと曲線部との接続部を接続部Cと呼ぶものとする。

シールドトンネルの覆工および継手構造を図2-2、図2-3に示す。

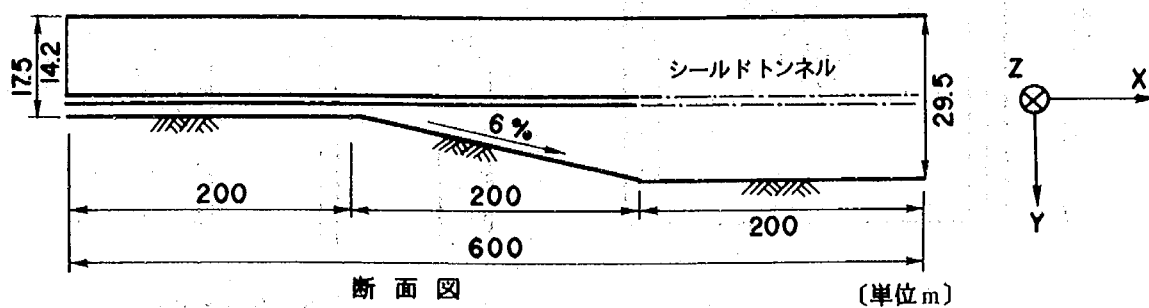
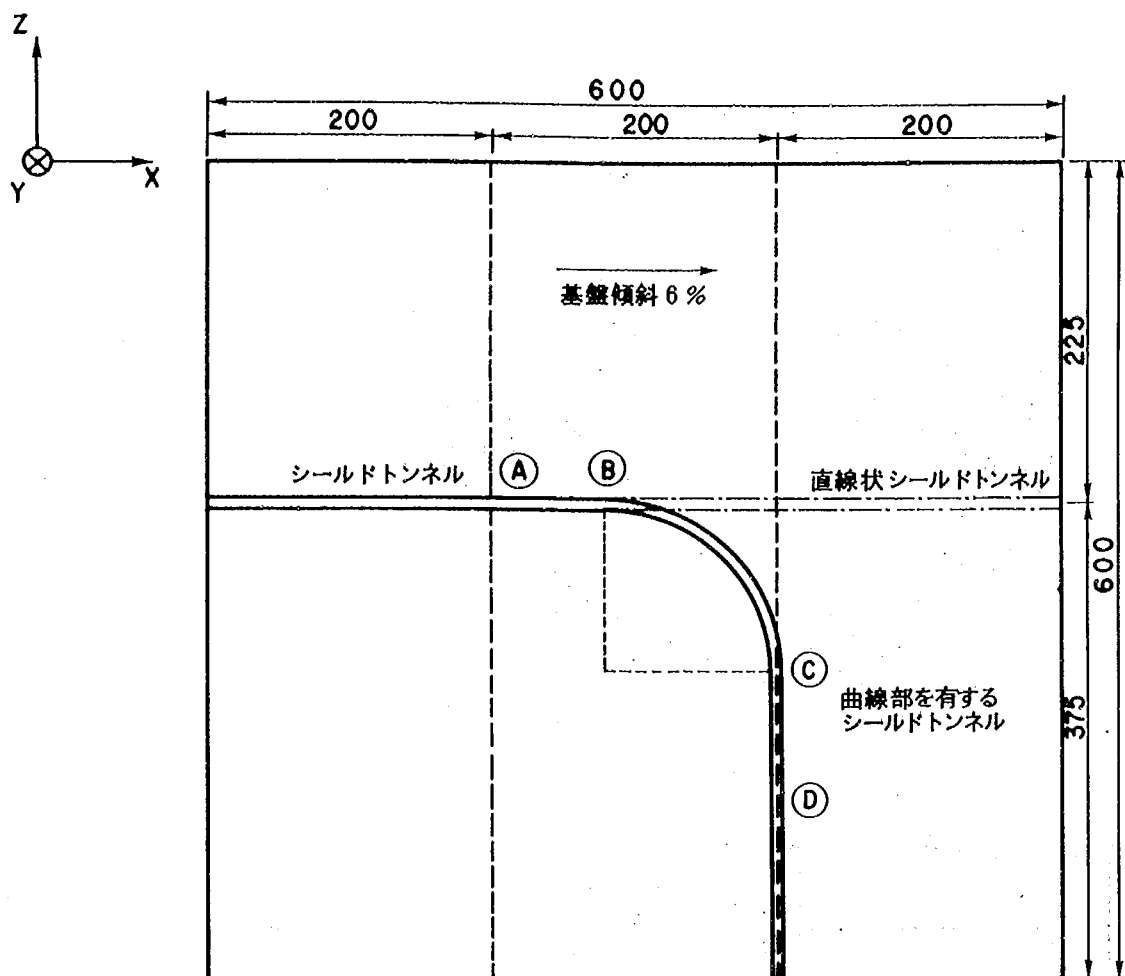


図 2 - 1 解析対象地盤と地下鉄シールドトンネル

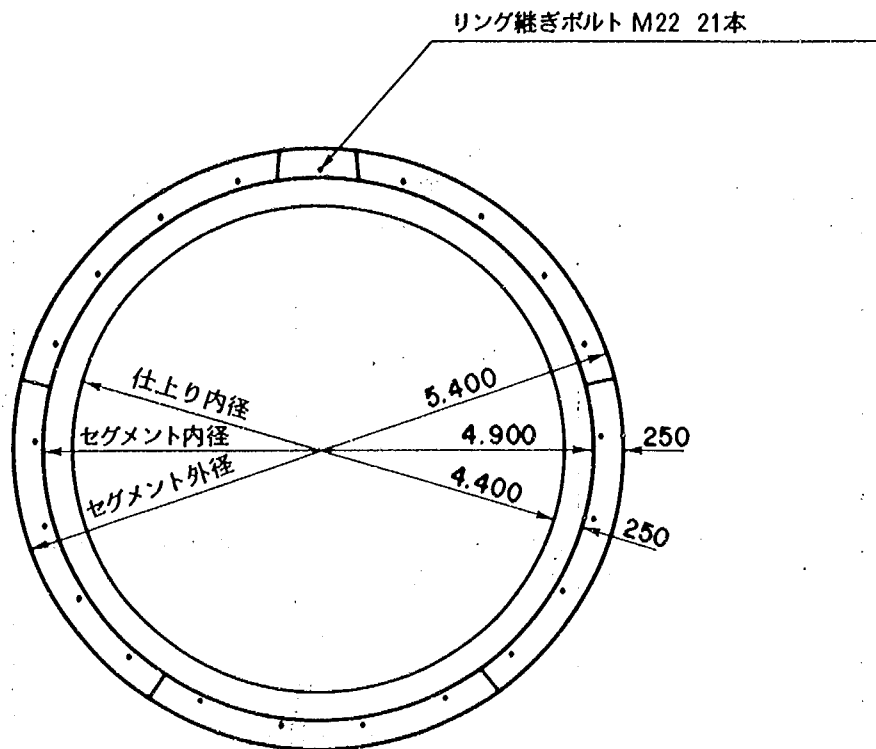
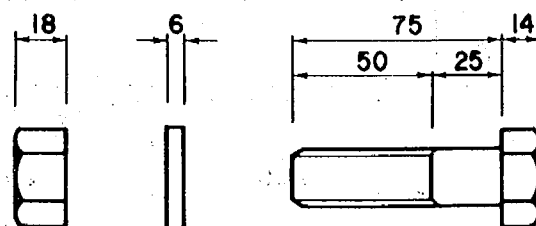
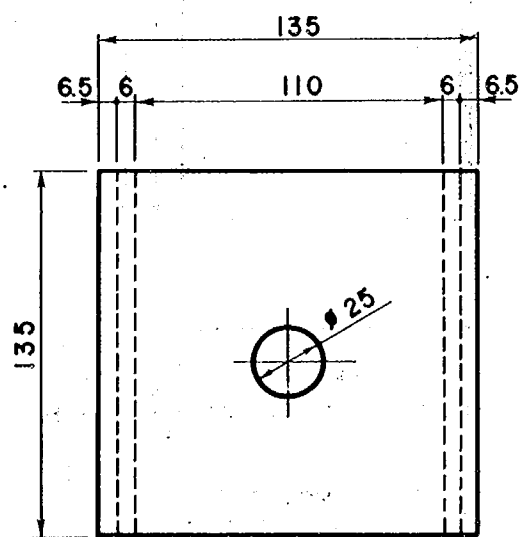
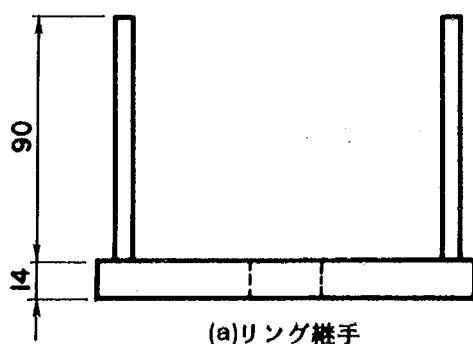


図 2 - 2 シールドトンネル断面



単位 (mm)

(b)リング継ぎボルト (M22)



(a)リング継手

図 2 - 3 リング継手金具および継ぎボルト

3. 解析モデル

3-1 地盤モデル

図3-1に示すように、解析対象の600m×600mの地盤を20m～75mの格子に分割して、合計279個のバネ～質点系にモデル化した。地盤質点相互を結ぶバネ K_2 及び地盤質点を結ぶバネ K_3 は、表層地盤が均等一層構造であることから地盤振動のせん断一次モードを正弦波と仮定した簡便法⁴⁾によって算出した。また、地盤の減衰定数は10%とした。X, Y, Zの各軸の方向は図3-1の通りとした。

3-2 地下鉄シールドトンネルモデル

シールドトンネルは等価剛性梁要素としてモデル化している。シールドトンネルの直線部分は20m毎に分割した。曲線部分については約15.71m毎に分割し、曲線部における梁要素の長さが各ケースで同じになるようにした。地盤とシールドトンネルとを結ぶバネ定数 K_1 は地盤の剛性から次式によって算出した。³⁾

$$K_{1x} = k_1 \cdot G_s \cdot l$$

$$K_{1y} = k_2 \cdot G_s \cdot l$$

$$K_{1z} = k_3 \cdot G_s \cdot l$$

ここに K_{1x} : X軸方向の地盤バネ定数

K_{1y} : Y軸方向の地盤バネ定数

K_{1z} : Z軸方向の地盤バネ定数

k_1, k_2, k_3 : 係数で、ここでは $k_1 = k_3 = 1$, $k_2 = 3$ とした。

G_s : 地盤のせん断弾性係数

l : シールドトンネルの要素長

3-3 解析ケース

(1) 曲線部の設定位置

シールドトンネルの曲線部と地盤条件の変化部との相対的な位置関係により、曲線部には異なった振動が生じると考えられる。そこで、曲率半径120m、曲線部中心角90°の曲線部を有するシールドトンネルを対象に、曲線部の設定位置を変え、地震時に発生する断面力を比較した。シールドトンネルの曲線部の設定位置を図3-2に示す。

設定位置ケース①とは、基盤傾斜部上端で曲線部に接続するケースであり、ケース②とは基盤傾斜区間内で曲がり始め、曲線部に接続する直線部が基盤傾斜部下端に位置するケースである。ケース③では基盤傾斜部下端でシールドトンネルが曲線部に接続するように曲線部を設定する。

また、比較のために直線部分のみで曲線部を有しないシールドトンネルについても地震時応答を調べた。

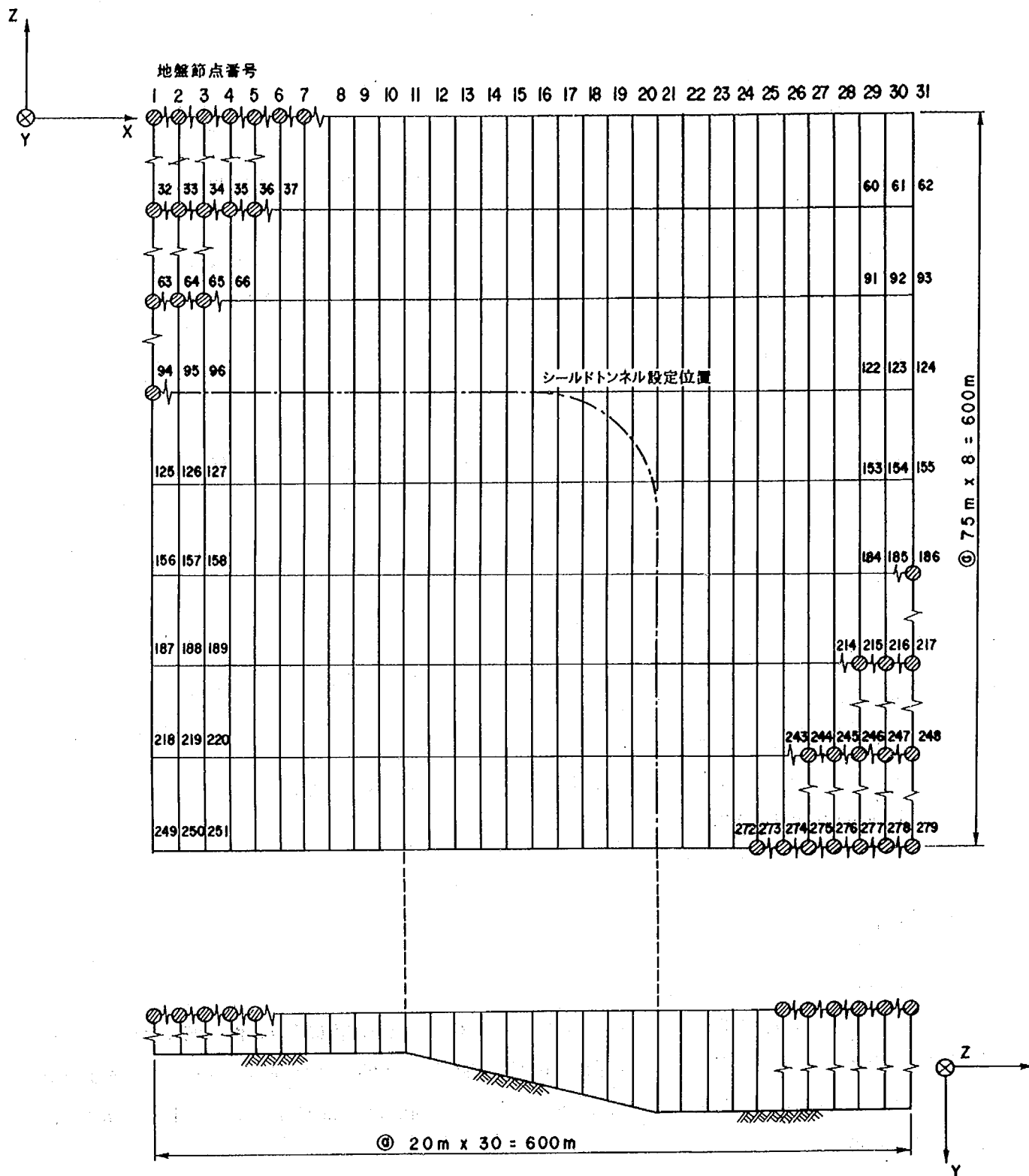


図3-1 地盤モデル図

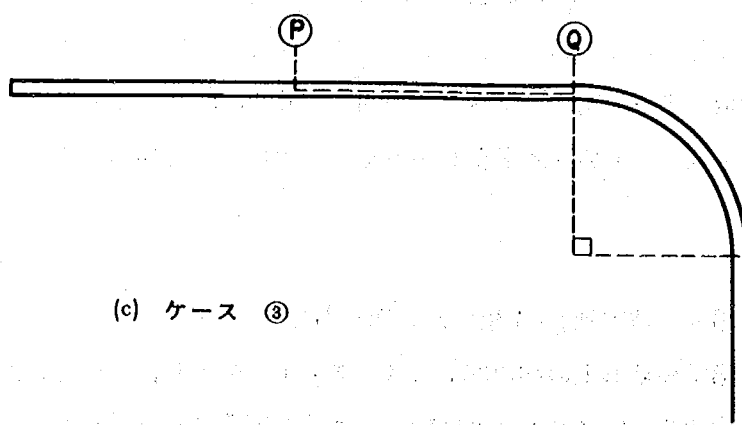
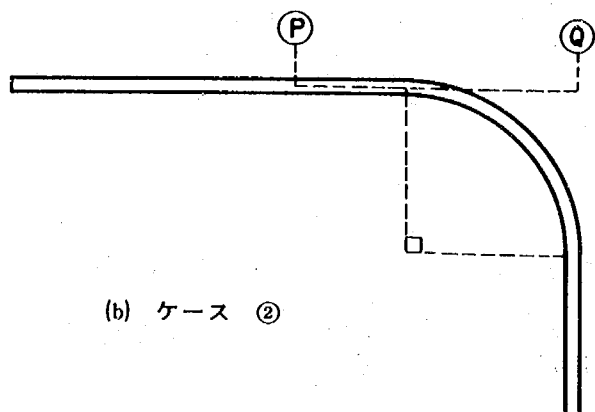
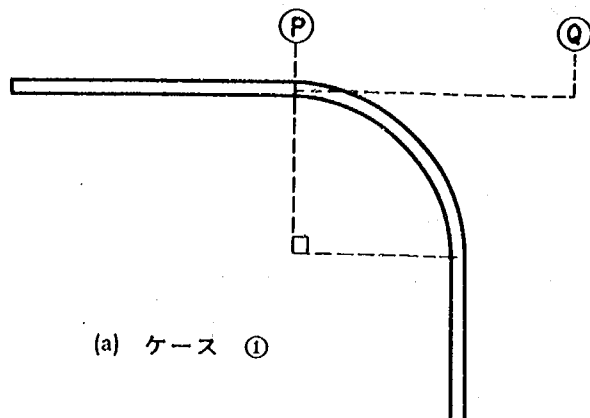
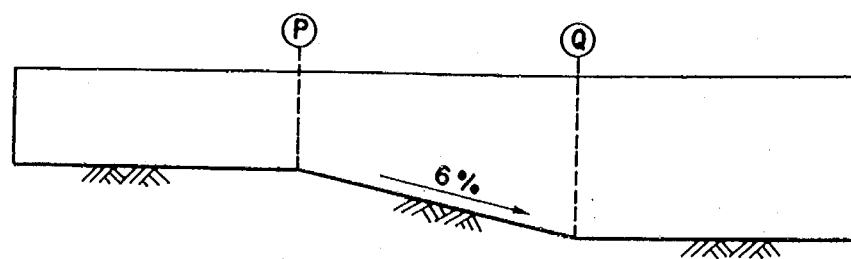


図 3 - 2 曲線部の設定位置

(2) 曲線部半径および曲線部区間長

上述(1)の検討によって、シールドトンネルの各設定位置における発生断面力を把握した上で、曲線部の基本的な設定位置としてケース②を選び、曲率半径の大きさおよび曲線部区間長（曲線部中心角）の違いによる影響を調べた。解析ケースは表3-1に示すように、曲線半径の違いが地震時応答に及ぼす影響を検討する6ケースと曲線部の区間長（曲線部中心角）が地震時応答に及ぼす影響を検討する4ケース、合計10ケースとした。曲率半径を変える場合には各ケースとも曲線部につながる直線部が基盤傾斜部下端に位置するように設定し、曲線部中心角を変える場合には上述の設定位置ケース②と同じ位置で曲がり始めるようにした。各ケースにおけるシールドトンネルの設定位置を図3-3に示す。

表3-1 解析ケース

解析ケース	I	II	III	IV	V	VI
曲線部曲率半径 (m)	100	120	140	160	180	200
曲線部中心角 (°)	90	90	90	90	90	90

解析ケース	VII	VIII	IX	X
曲線部曲率半径 (m)	120	120	120	120
曲線部中心角 (°)	30	60	90	120

(3) 入力地震動の作用方向

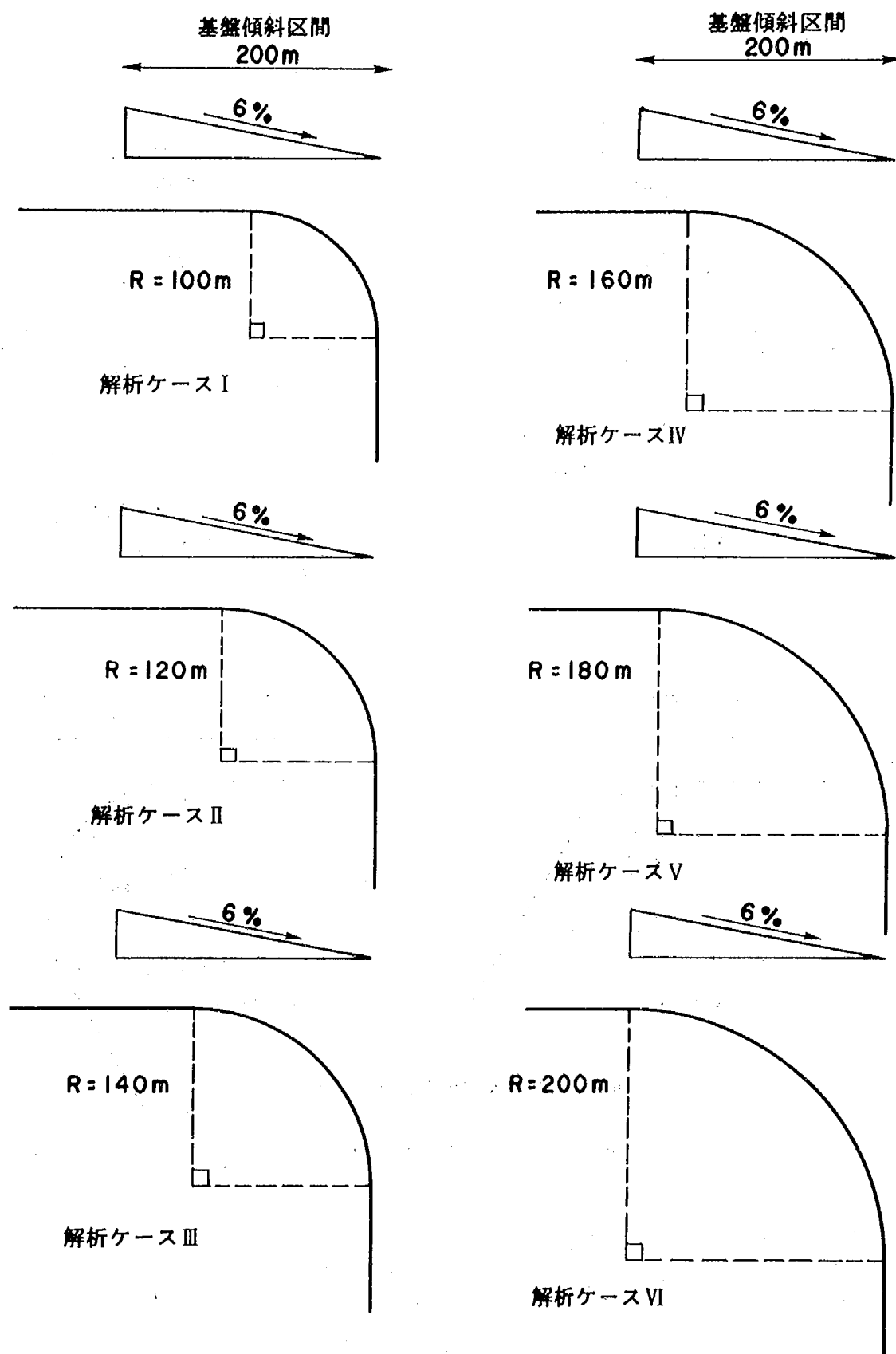
地震波の入力方向は発生断面力に影響を与えるため、図3-4のように定義した加振方向が、 $\theta = 0^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° となるように4通りに変化させることとした。

(4) 直交する水平2方向入力地震動の影響

最後に、入力地震動について検討した。地震動は、本来水平面内において直交する2方向の成分を持っているが、動的解析を行う際には、その一方のみを入力地震動として用いるのが普通である。ここでは、入力地震動として1方向成分のみを用いた場合と2方向の成分を同時に作用させた場合とを比較し、入力地震動として直交方向2成分を考慮する必要があるかどうかについて検討した。

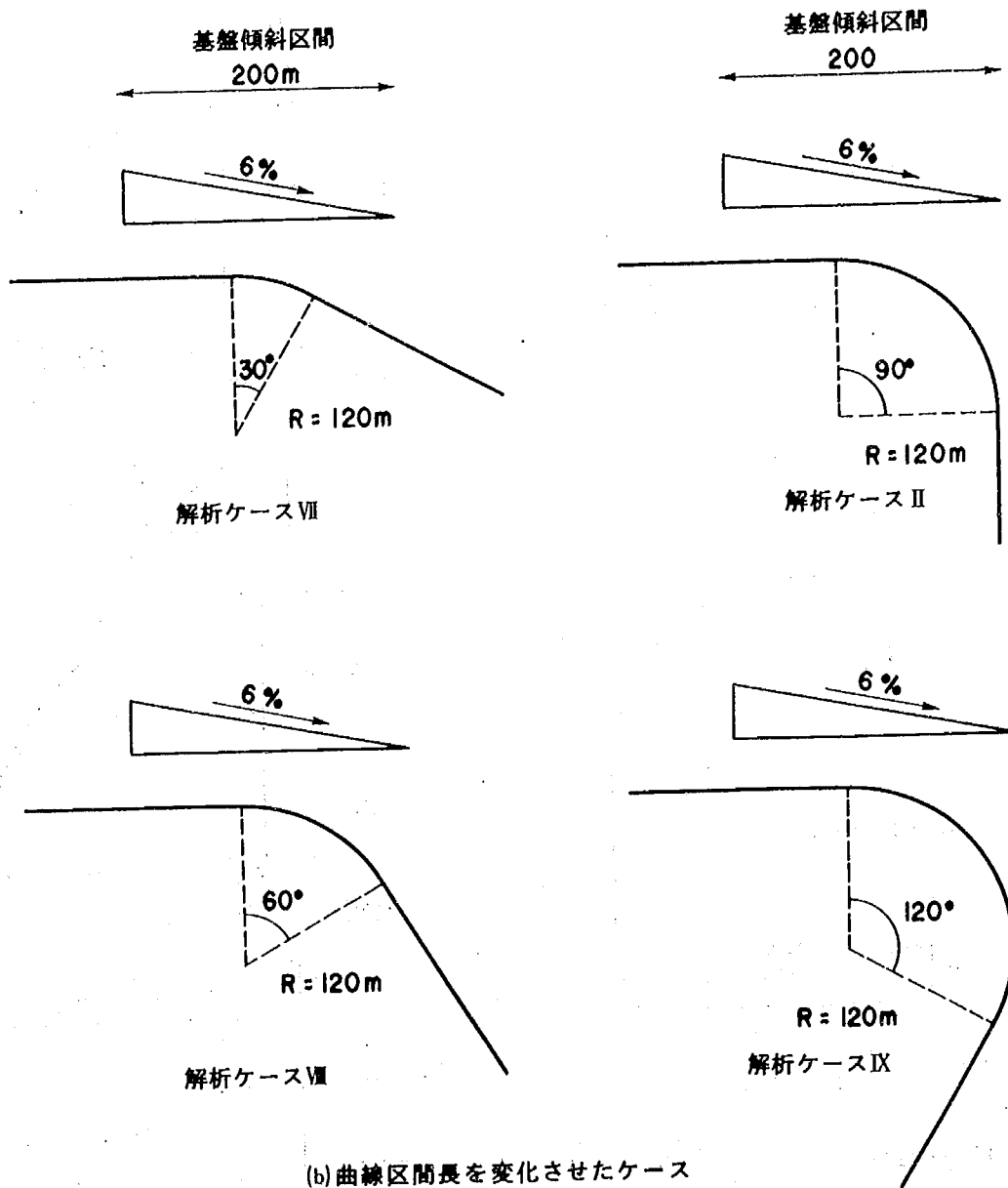
3-4 入力地震動

入力地震動には動的解析用入力地震動 L_2 を用いた。地震動 L_2 はマグニチュード8の地震が震央距離25kmの地点に発生した場合の第1種地盤上の加速度応答スペクトルを推定し、この加速度応答スペクトルと1986年十勝沖地震の際に八戸港で記録された加速度記録の加速度応答スペクトルとが、固有周期0.8~5.0秒の範囲で一致するように周波数領域で振幅調整したものである^{5) 6)}。ここで、0.8秒以下の固有周期においては、振幅調整を行っていないが、この理由は大規模地震時の短周期領域における地震動の特性には、まだ不明の部分も多いことから、この領域では八戸港の記録の特性をそのまま残したものである。



(a) 曲率半径を変化させたケース

図3-3 解析ケース (1)



(b) 曲線区間長を変化させたケース

図 3-3 解析ケース (2)

八戸港における加速度記録には、NS成分とEW成分とがあるが、本解析では、水平2方向の地震動が作用した場合の影響を検討するために、この2方向成分の加速度記録のそれぞれから入力地震動を作成した。このような水平2方向の地震動波形の与え方には、いろいろな考え方をすることができるが、ここでは次のように設定することとした。

- 1) 水平2方向のいずれも固有周期0.8~5.0秒の間は、上述した加速度応答スペクトル特性を有する。
 - 2) 振動特性を周波数領域で調整する波形として、上記八戸港記録のNS成分とEW成分を使用する。
- このようにして、八戸港記録のNS成分をもとに作成した入力地震動を「地震動NS」、EW成分をもとに作成した入力振動を「地震動EW」と呼ぶこととする。

図3—5に地震動NSおよび地震動EWの加速度応答スペクトル ($h = 5\%$) を示す。

1方向成分のみを入力する場合には、地震動NSを用いている。

図3—6に基盤入力地震動 L_2 の波形(地震動NS, 地震動EW)を示す。

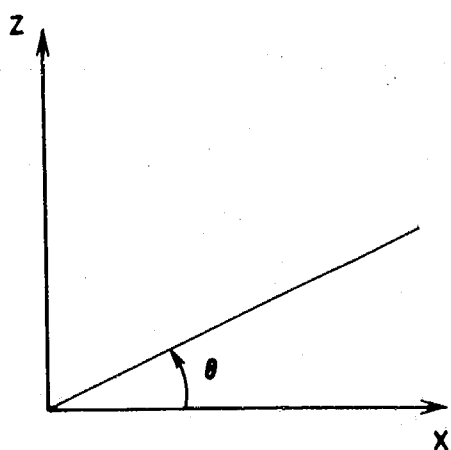


図3—4 加振方向 θ の定義

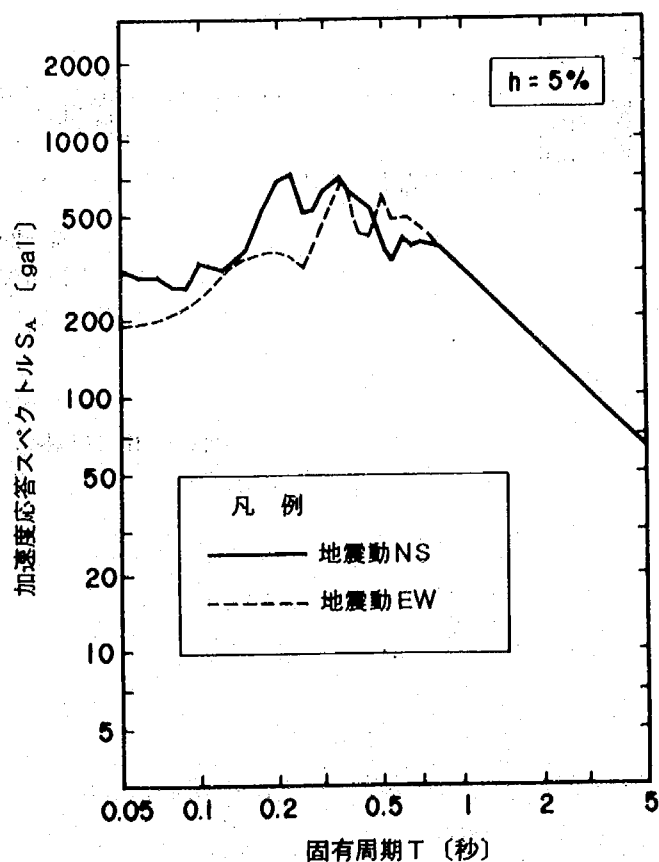


図3—5 入力地震動 L_2 の加速度応答スペクトル

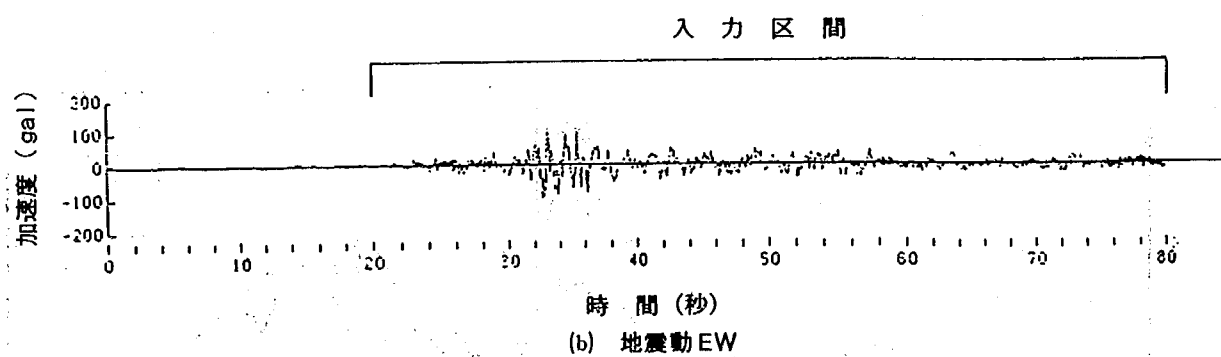
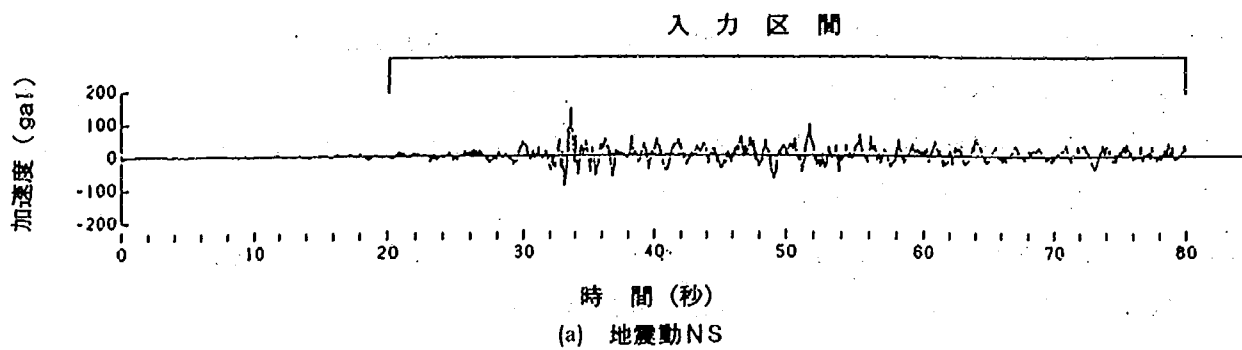


図 3 - 6 基盤入力地震動 I_2

4. シールドトンネルの設定位置と発生断面力

(1) 最大軸力

シールドトンネル曲線部に生じる最大軸力の分布を図4—1に示す。また、参考のために図4—2に直線状シールドトンネル（直線部からのみなる場合）に生じる最大軸力の分布を示す。最大値を比較すると直線状シールドトンネルの方が曲線部を有するケースよりも大きく、その最大値は基盤傾斜区間の下端から傾斜上方に40m程度寄った位置で生じている。図4—3にX軸方向の地盤変位および地盤ひずみの分布を示す。本解析においては、Z軸方向には地盤条件を変化させていないので、地盤応答はZ軸方向にほとんど変化しないことから、ここでは直線状シールドトンネルの設置位置の地盤質点の応答値を示している。図5—3によれば、地盤変位は、表層地盤の薄い地点では約2cm、厚い地点で6cm前後で一定であり、基盤傾斜区間では、その地盤層の厚さが増えるのにつれて単調に増加する。また、地盤ひずみについては、基盤の傾斜区間の下端から傾斜上方に約40～50m寄った地点で最大となる山形の分布である。図5—2に示した直線状シールドトンネルにおける最大軸力の分布形はこのX軸方向の地盤ひずみの分布形に対応していることが分かる。すなわち、トンネルは地盤の振動に追随して変位すると考えられるが、設定地盤条件下では、基盤傾斜区間の下端から傾斜上方約40mの地点で、地盤のX軸方向のひずみが大きくなり、地盤の変位に引きずられるトンネルに大きな軸力が生じているものと考えられる。曲線部を有するケースでは、地盤のX軸方向のひずみが大きくなる地点において、トンネル軸の方向が加振方向と一致せずにある角度を持つことになるため、直線状シールドトンネルに比ベトンネル軸方向のひずみが減少することになり、かえって軸力が小さくなるものと思われる。曲線部を有する3ケースのうちでは、設定位置ケース①で小さく、ケース③で最も大きくなっており、ケース③における最大軸力の分布形状は直線状シールドトンネルによく似た分布形となっている。

(2) 最大曲げモーメント

図4—4に最大曲げモーメントの分布を示す。比較のために、図4—5に直線状シールドトンネルの最大曲げモーメントの分布を併せて示す。直線状シールドトンネルでは、基盤傾斜区間で曲げモーメントが大きな値となっている。全体の傾向としては、基盤傾斜区間の下端から傾斜上方に60m程度寄った地点を頂点とする山形であり、基盤傾斜区間の上端および下端に鋭いピークを持っている。特に、基盤傾斜区間の下端におけるピークは全体での最大値となっている。図4—6に地盤のZ軸方向の変位の分布を示すが、Z軸方向の地盤変位は、表層地盤層の薄い地点では約1cm、厚い地点では約6cmでほぼ一定であり、基盤傾斜区間では、表層地盤層厚が増えるのにつれて単調に増加している。基盤傾斜区間の上・下端においては、Z軸方向の地盤変位が急激に変化することになり、シールドトンネルに大きな曲げモーメントが生じているものと考えられる。曲線部を有するケースについて曲げモーメントの分布をみると、いずれの設定位置についても直線部から曲線部への接続部で大きな値となっている。曲線部設定位置ケース③についてみると、分布の様子は直線状シールドトンネルにおける最大曲げモーメントの分布によく似ているが、直線部と曲線部の接続部に着目すると、地盤の変化部による影響（基盤傾斜部下端）と、トンネルの曲線部による影響（直線部と曲線部との接続部）とが合成されて大きな値となっている。

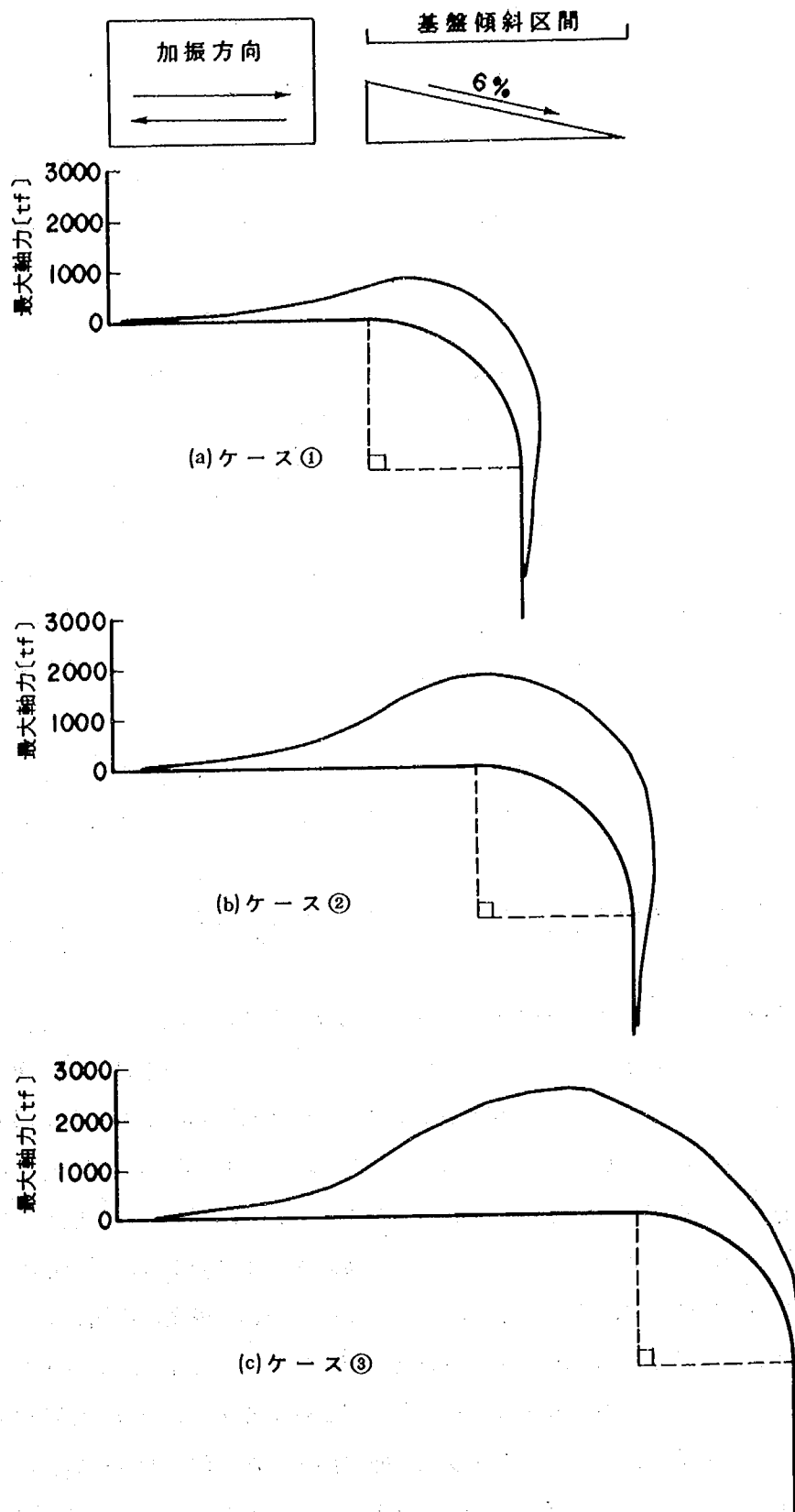


図4-1 曲線部の設計位置と最大軸力の分布（加振方向 $\theta = 0^\circ$ ）

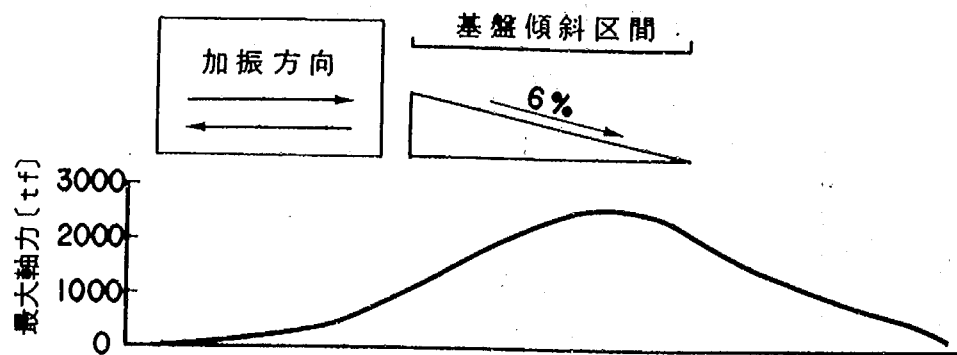


図4-2 直線状シールドトンネルに生じる最大軸力の分布 (加振方向 $\theta = 0^\circ$)

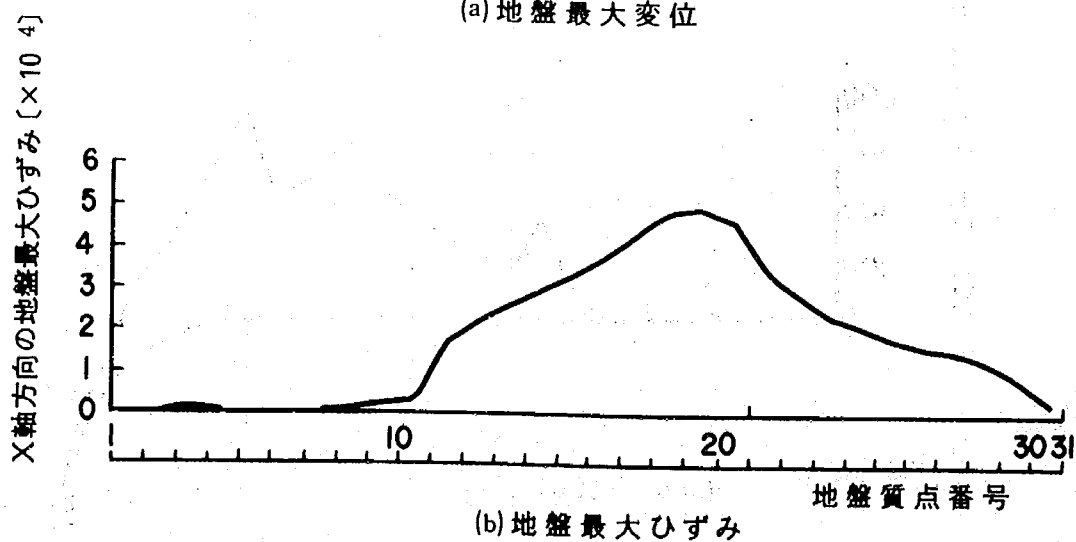
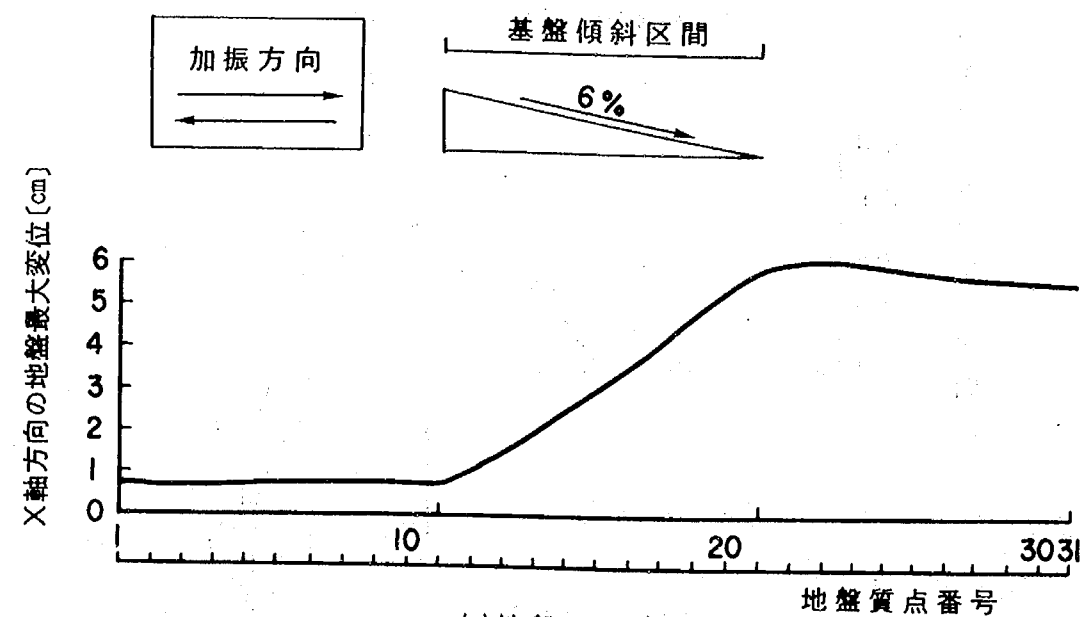


図4-3 X軸方向の地盤変位および地盤ひずみ (加振方向 $\theta = 0^\circ$)

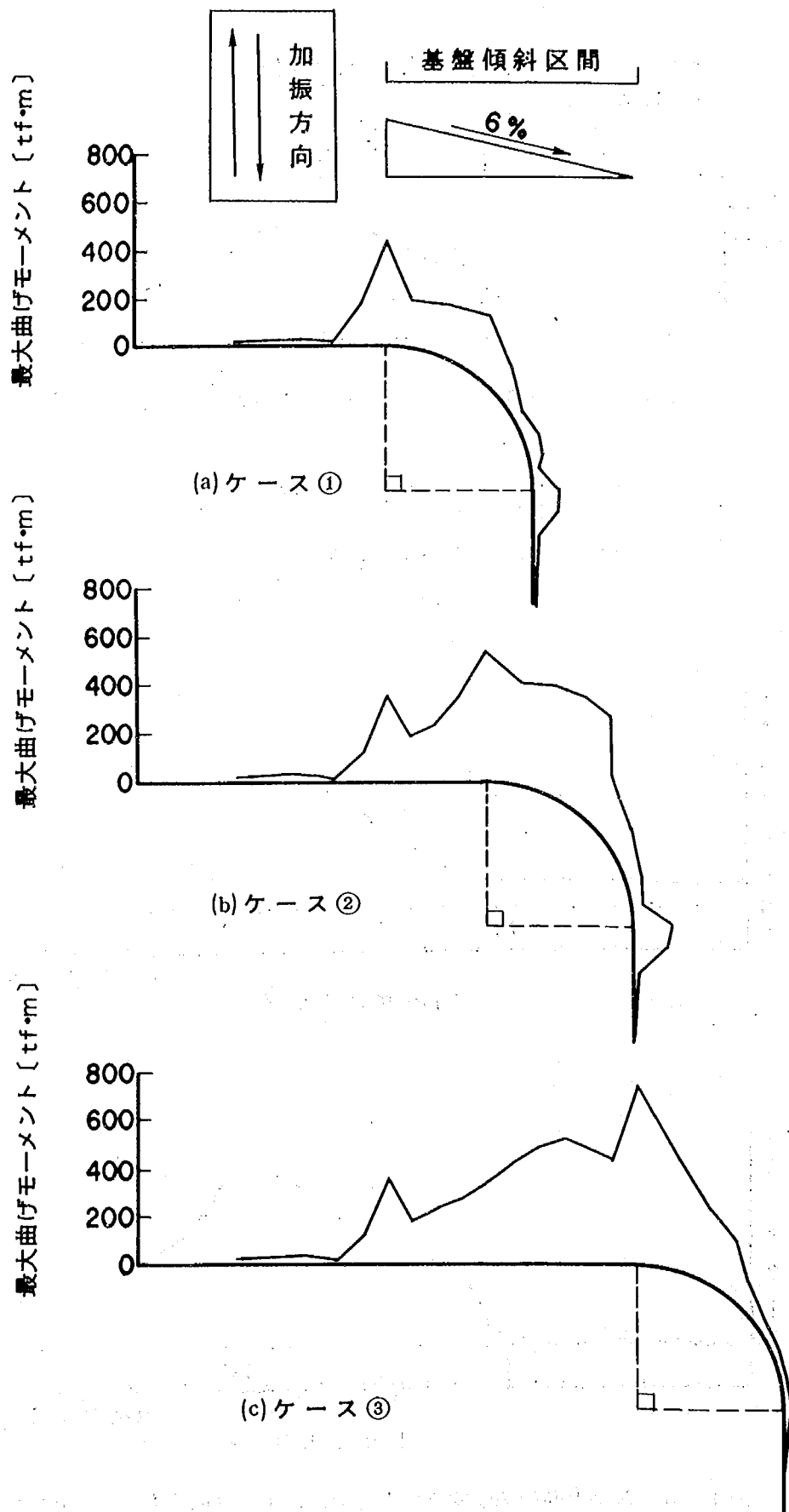


図4-4 曲線部の設定位置と最大曲げモーメントの分布（加振方向 $\theta = 90^\circ$ ）

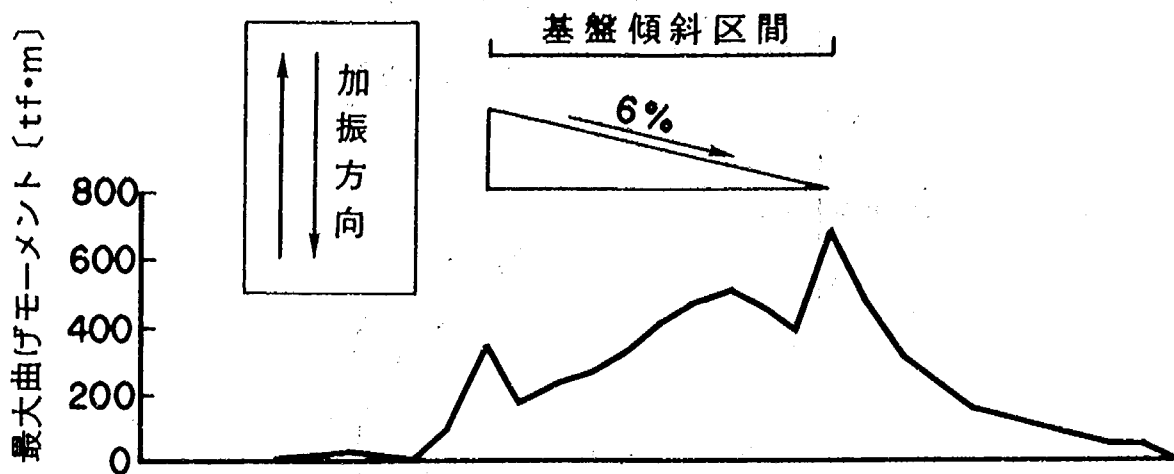


図4-5 直線状シールドトンネルに生じる最大曲げモーメントの分布（加振方向 $\theta=90^\circ$ ）

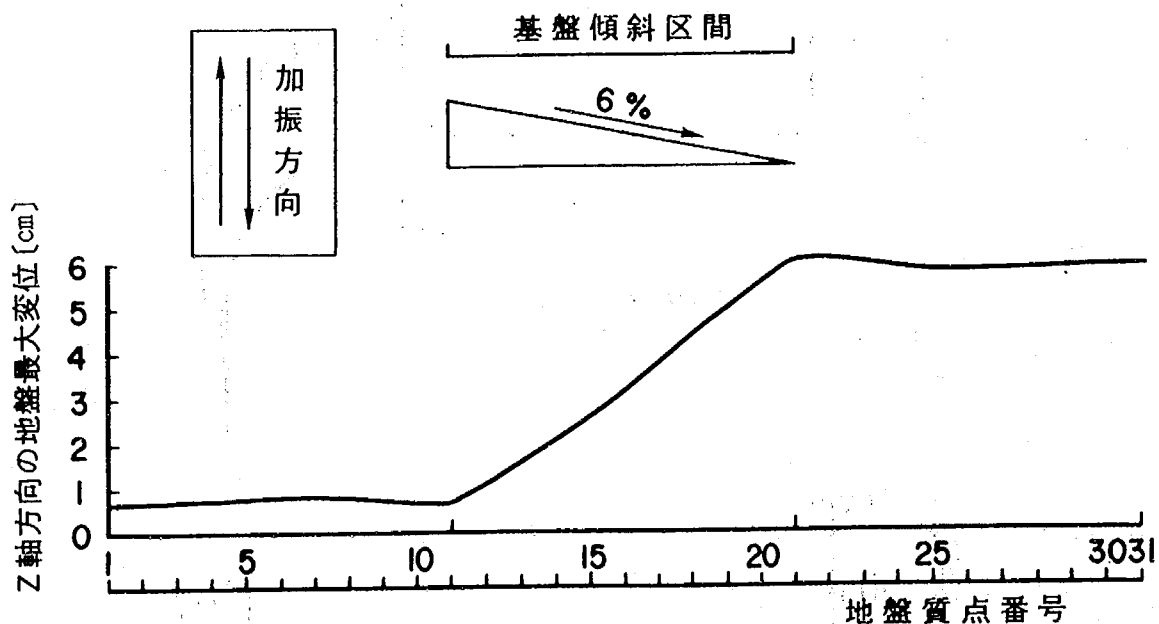


図4-6 Z軸方向の地盤変位（加振方向 $\theta=90^\circ$ ）

(3) 最大せん断力

図4-7に最大せん断力の分布を示す。図4-8に直線状シールドトンネルについて、同様に最大せん断力の分布を示す。トンネル軸方向の加振では、せん断力は生じないので、軸直角方向に加振した場合について示しているが、せん断力はほとんど生じていない。これに比べ、曲線部を有するケースでは、最大で140tf程度の大きなせん断力が生じている。せん断力はほぼ曲線部でのみ生じており、直線部から曲線部へ接続する境界部で最大となっている。シールドトンネル設定位置については、ケース②で最も大きな値となっている。

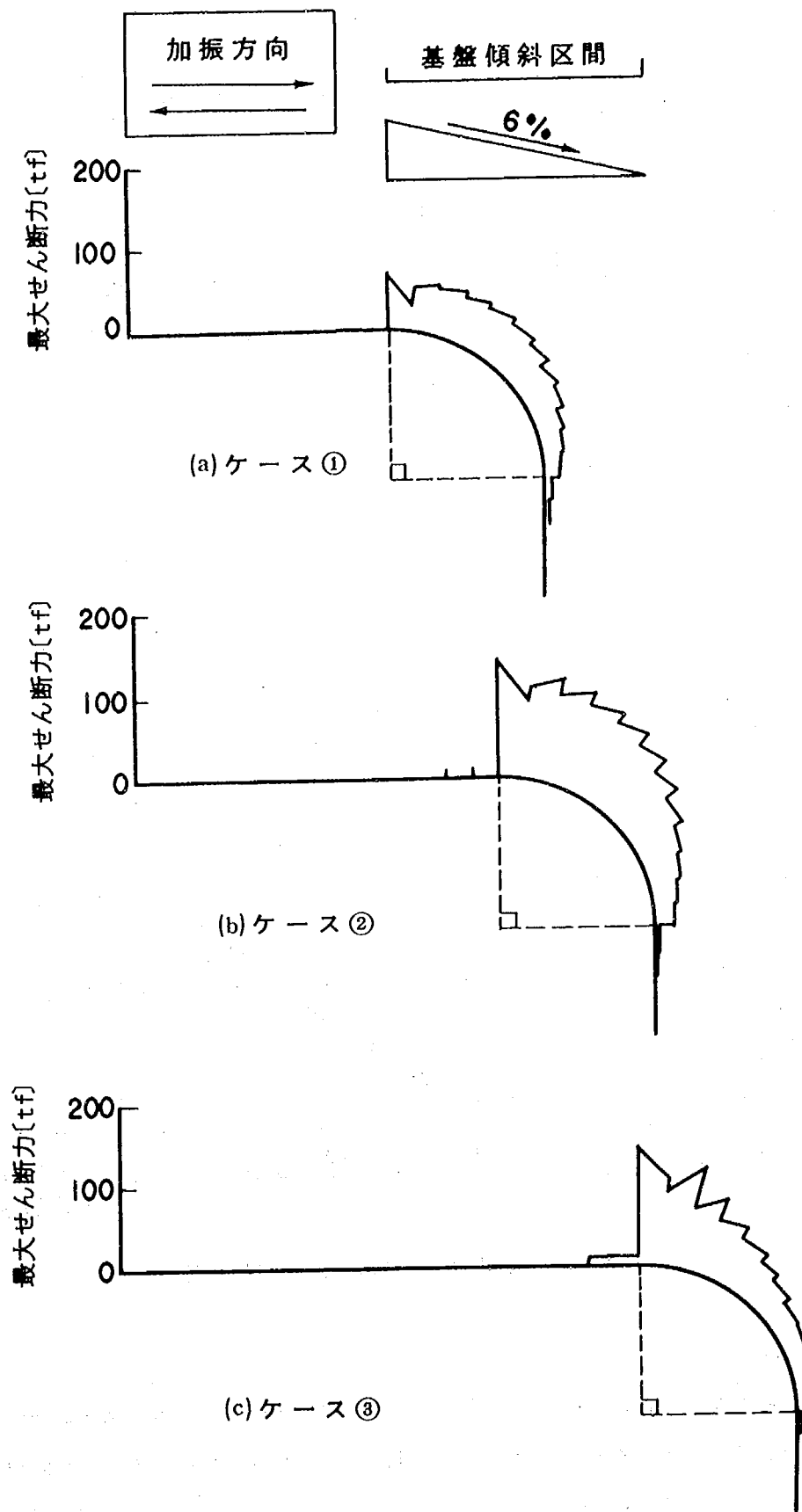


図 4-7 曲線部設定位置と最大せん断力の分布 (加振方向 $\theta = 0^\circ$)

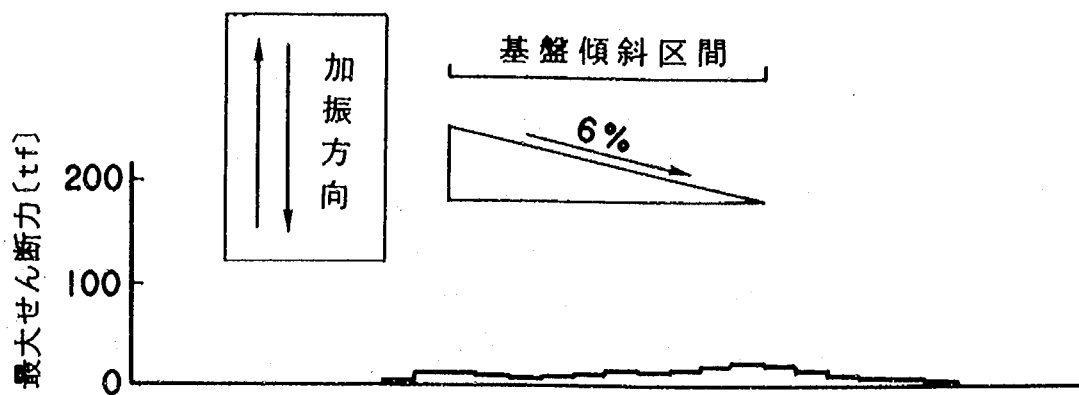


図4-8 直線状シールドトンネルに生じる最大せん断力の分布 (加振方向 $\theta = 90^\circ$)

以上から、次のことがわかった。

- ① 軸力については、曲線部を有するケースの方が直線部のみのケースよりもかえって小さな値となる。
設定地盤条件下では、基盤が傾斜する方向の地盤のひずみが最も大きくなり、これがトンネルに軸力を生じさせるが、曲線部を有するケースにおいては、地盤のひずみが大きくなる方向とトンネル軸の方向が一致しないため、軸力が小さくなるものと考えられる。曲線部の設定位置を基盤傾斜区間の下端の方向に移動させていくと、直線状シールドトンネルにおける軸力の分布に近づく。
- ② 曲げモーメントは地盤条件変化部の境界、および直線部と曲線部との境界において大きくなる。両者の影響が重なるような位置に曲線部を設定すると、700tfを超える大きな曲げモーメントが発生する。
- ③ せん断力は、ほぼ曲線部でのみ生じ、特に直線部と曲線部との境界で大きな値となる。設定位置については、直線部と曲線部との接続部が基盤傾斜区間の下端に位置するケースで最も大きくなる。地盤のひずみが最も大きくなる地点において、トンネルの軸直角方向がひずみの方向と一致すると、地盤に引きずられるトンネルには軸直角方向に大きなひずみが生じ、これがせん断力を発生させるものと考えられる。上記の直線部と曲線部の接続部が基盤傾斜区間の下端に位置するケースにおいては、トンネルの軸直角方向が、地盤のひずみの方向に最も近いものと思われる。

5. 曲線部の曲率半径の大きさが地震時応答に及ぼす影響

(1) 最大応答変位および最大応答回転角

① X軸方向最大変位

加振方向が $\theta = 0^\circ$ の場合は、X軸方向の最大変位は図5—1に示すようにトンネル軸に沿って直線部Aおよび曲線部で単調に増加し、直線部Dにおいては、ほぼ一定となる。この傾向は $R = 100\text{m}$ 、 $R = 200\text{m}$ の両ケースでほとんど同様である。図5—1にはトンネル設置深さにおける地盤の変位も併せて示している。表層地盤層の薄い区間では、トンネルの変位は地盤の変位よりも大きく、基盤傾斜区間の上端から約70mの地点から基盤傾斜区間の下端にかけては、トンネルの変位は地盤の変位よりも小さくなっているが、トンネルのD区間ではトンネルの変位は地盤の変位と同程度になっている。

加振方向が $\theta = 90^\circ$ の場合については、X軸方向の変位は加振方向と直交するため、この方向の最大変位は非常に小さい。分布は接続部BとCのそれぞれ曲線部寄りに2つの頂点をもつ山形であり、曲線部中央付近ではむしろこれよりも小さな値となる。この傾向は曲率半径によらない。

② Z軸方向最大変位

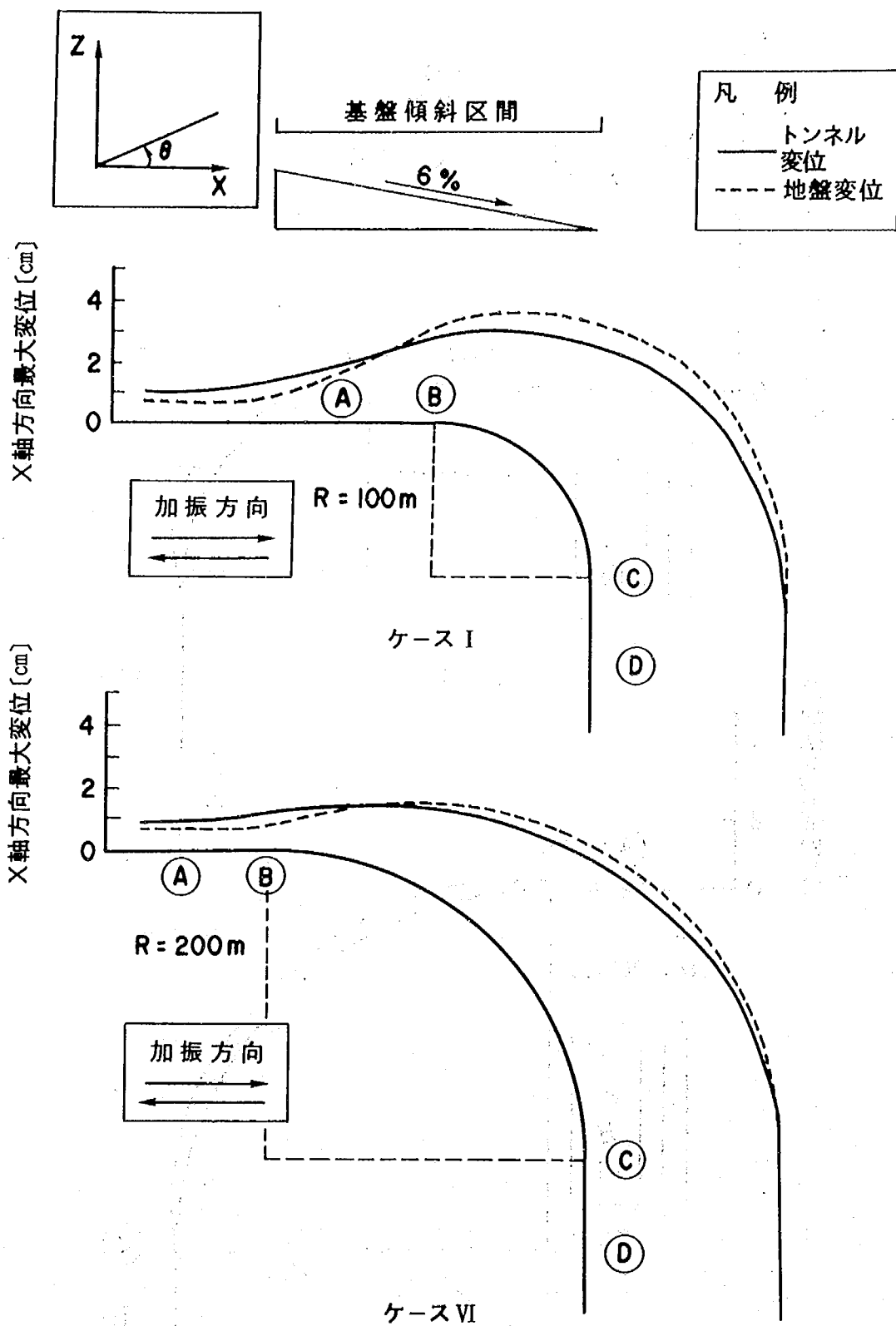
図5—2に示すように、加振方向を $\theta = 0^\circ$ とした場合には、加振方向と直交するため、Z軸方向の最大変位は非常に小さい。その分布は上述した、 $\theta = 90^\circ$ の方向に加振した場合のX軸方向の最大変位と同様である。

$\theta = 90^\circ$ の方向に加振した場合には、トンネルの変位は、直線部Aではあまり大きな値ではなく、曲線部で増加し、直線部Dではほぼ一定となっている。同図中に併せて示した地盤の変位と比較すると、トンネルの変位はほぼ全区間にわたり、地盤の変位に等しく、トンネルは地盤の変位と全く同様に振動していることが分かる。

③ 鉛直軸まわりの最大回転角

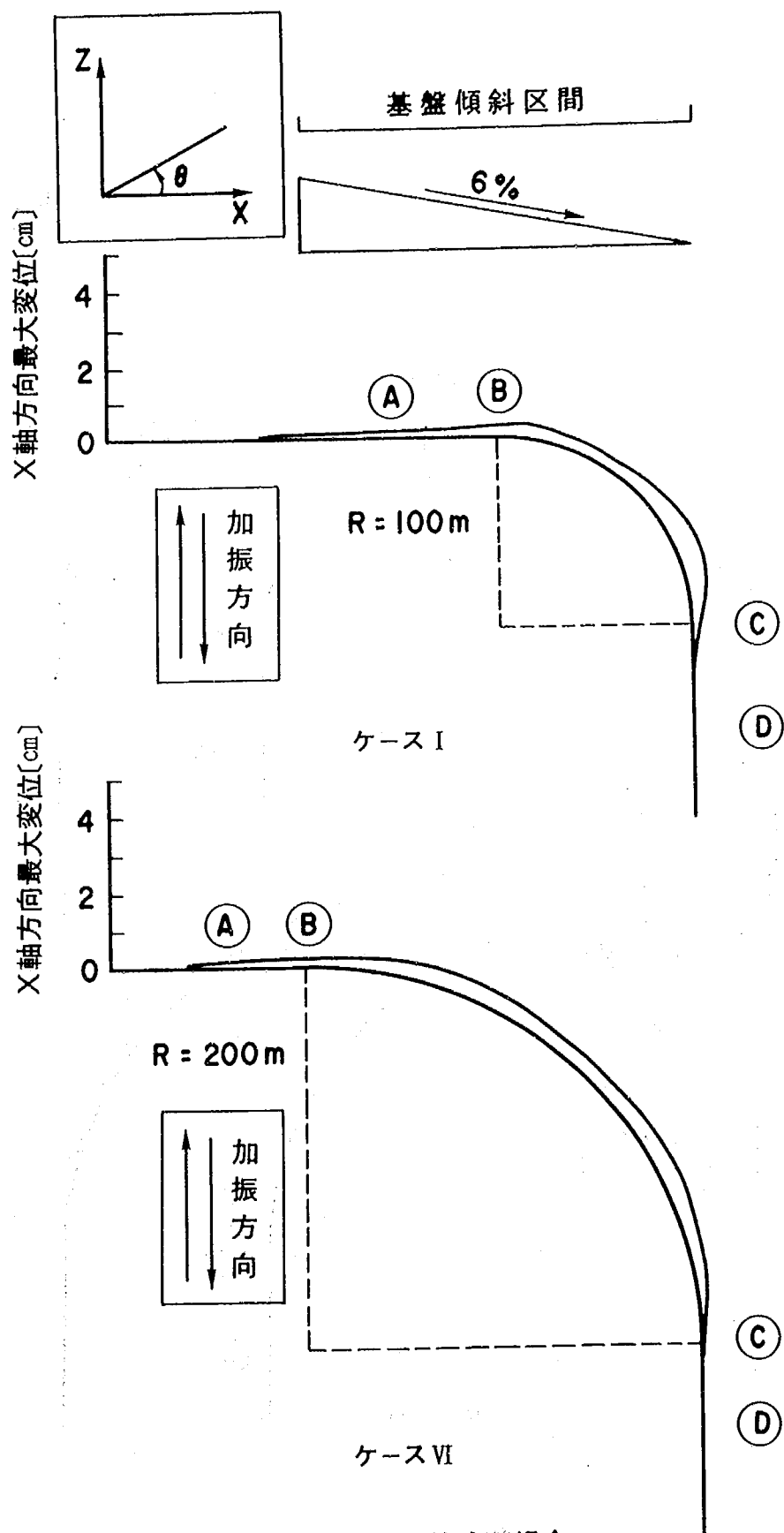
図5—3に示すように、加振方向を $\theta = 0^\circ$ とした場合には、鉛直軸回りの回転角はほぼ曲線部においてのみ生じている。曲線部の中でも中央付近で最大値を有しており、直線部が曲線部に移行するB点付近でも大きくなる。この分布の形は曲率半径が100mでも200mでも同様であるが、最大回転角の値は曲率半径の小さい $R = 100\text{m}$ のケースの場合が $R = 200\text{m}$ の場合に比べてやや大きい。

加振方向を $\theta = 90^\circ$ の場合については、鉛直軸回りの最大回転角の分布は上述した $\theta = 0^\circ$ の場合と同様に、曲線部を中心として分布しているが、 $R = 100\text{m}$ の場合には曲線部だけでなく、基盤が傾斜しているA区間においても生じている。



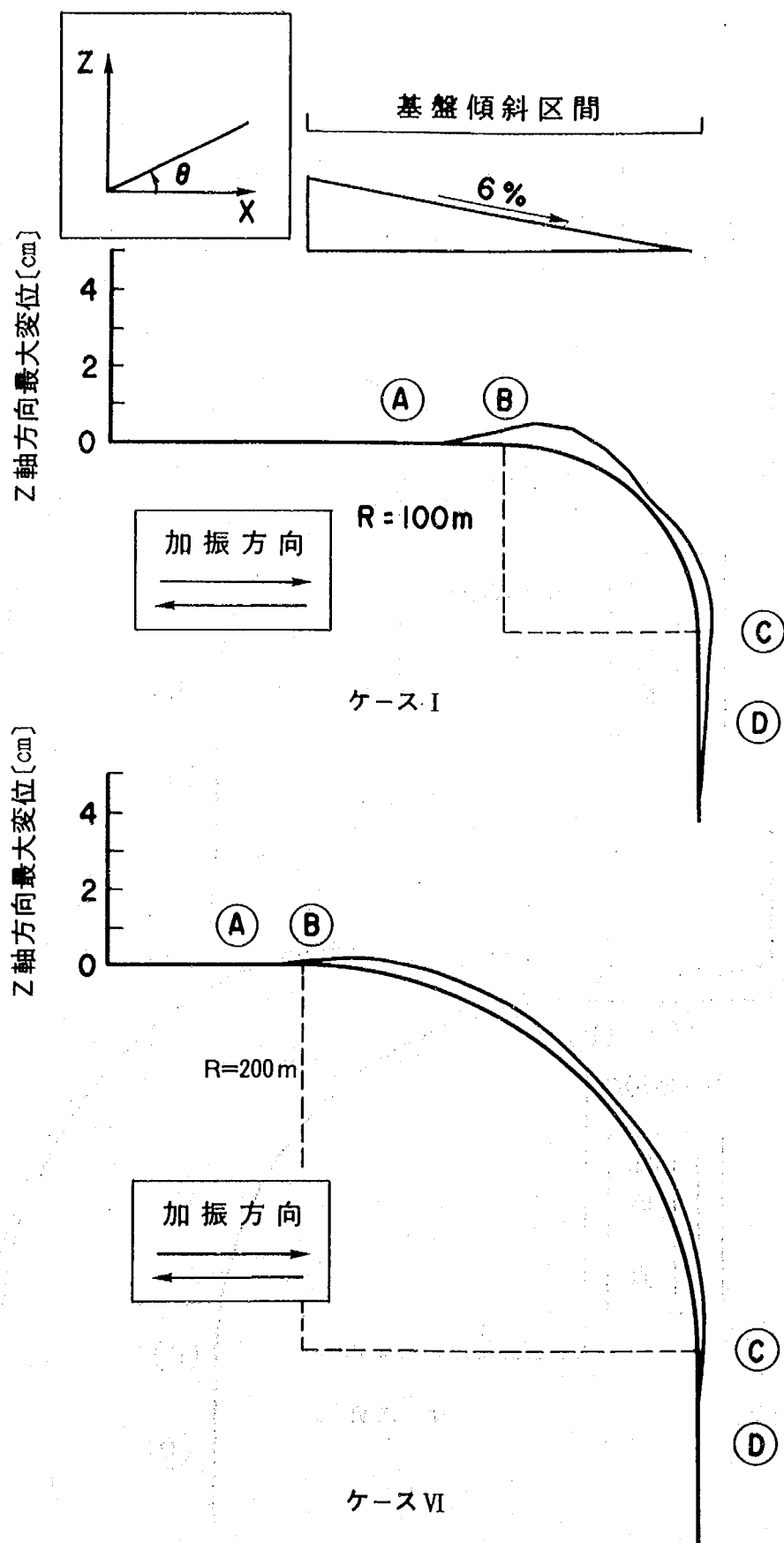
(a) 加振方向 $\theta = 0^\circ$ の場合

図 5-1 トンネルに生じる X 軸方向最大変位 (1)



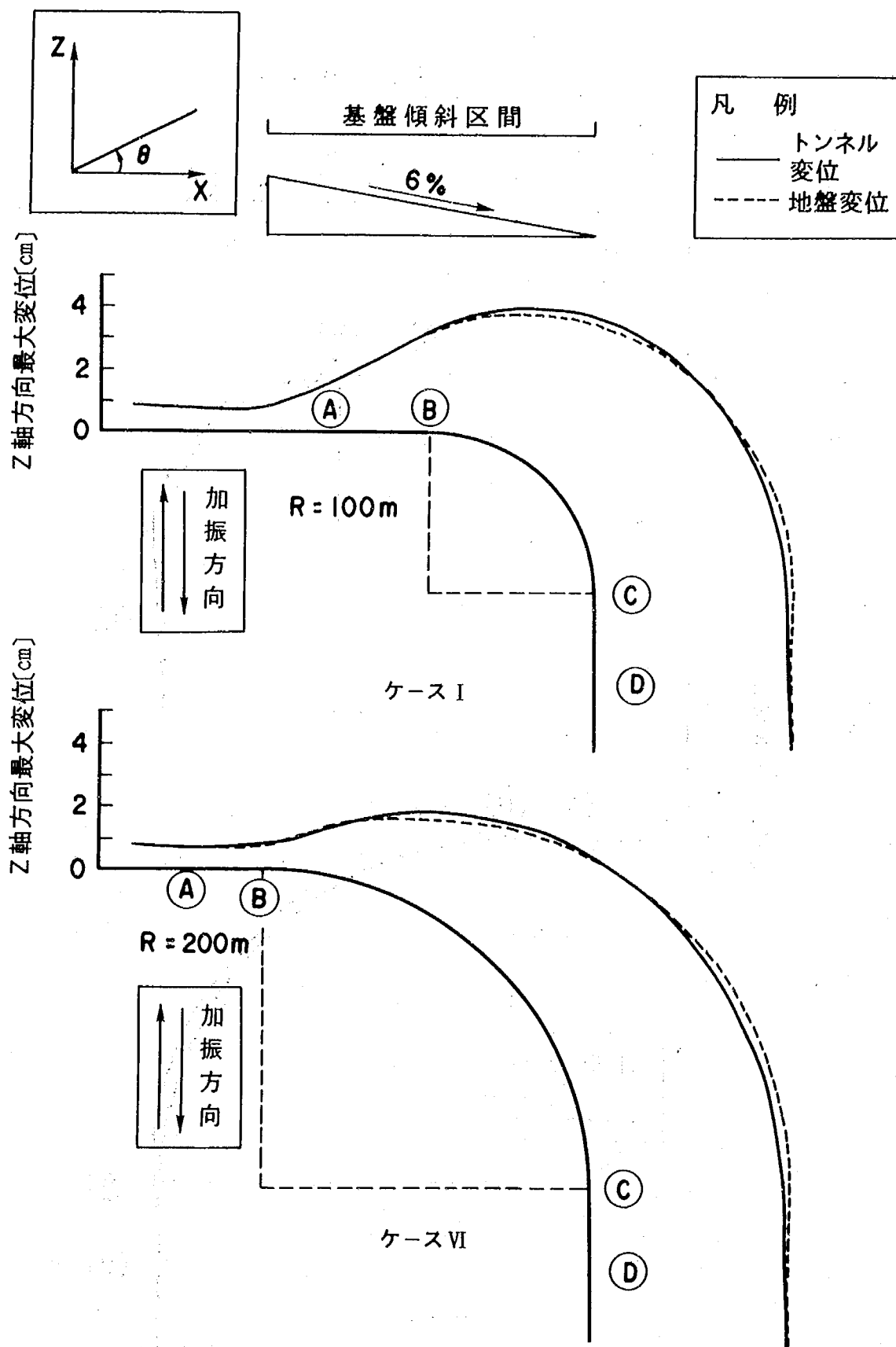
(b) 加振方向 $\theta = 90^\circ$ の場合

図5-1 トンネルに生じるX軸方向最大変位 (2)



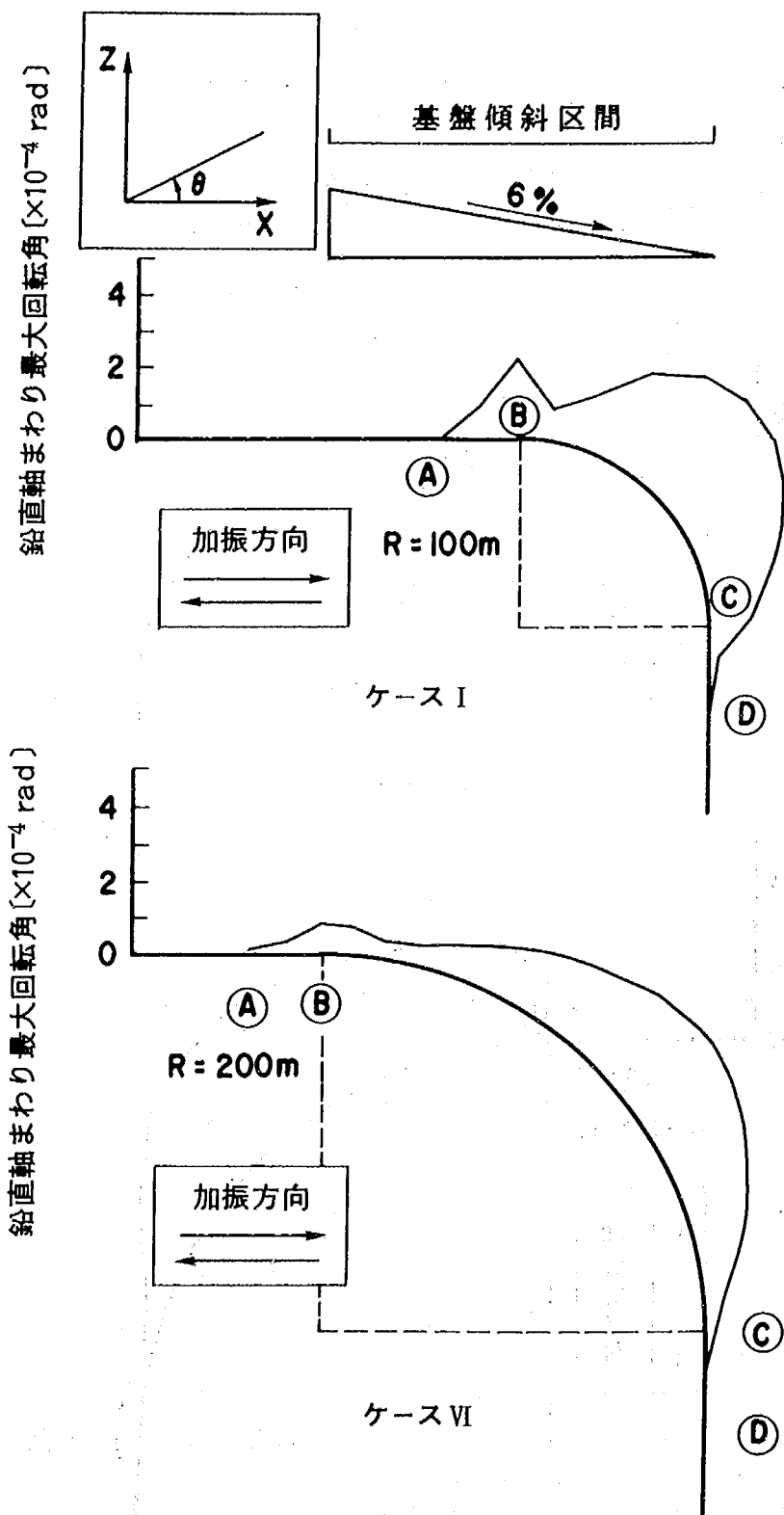
(a) 加振方向 $\theta = 0^\circ$ の場合

図 5-2 トンネルに生じる Z 軸方向最大変位 (1)



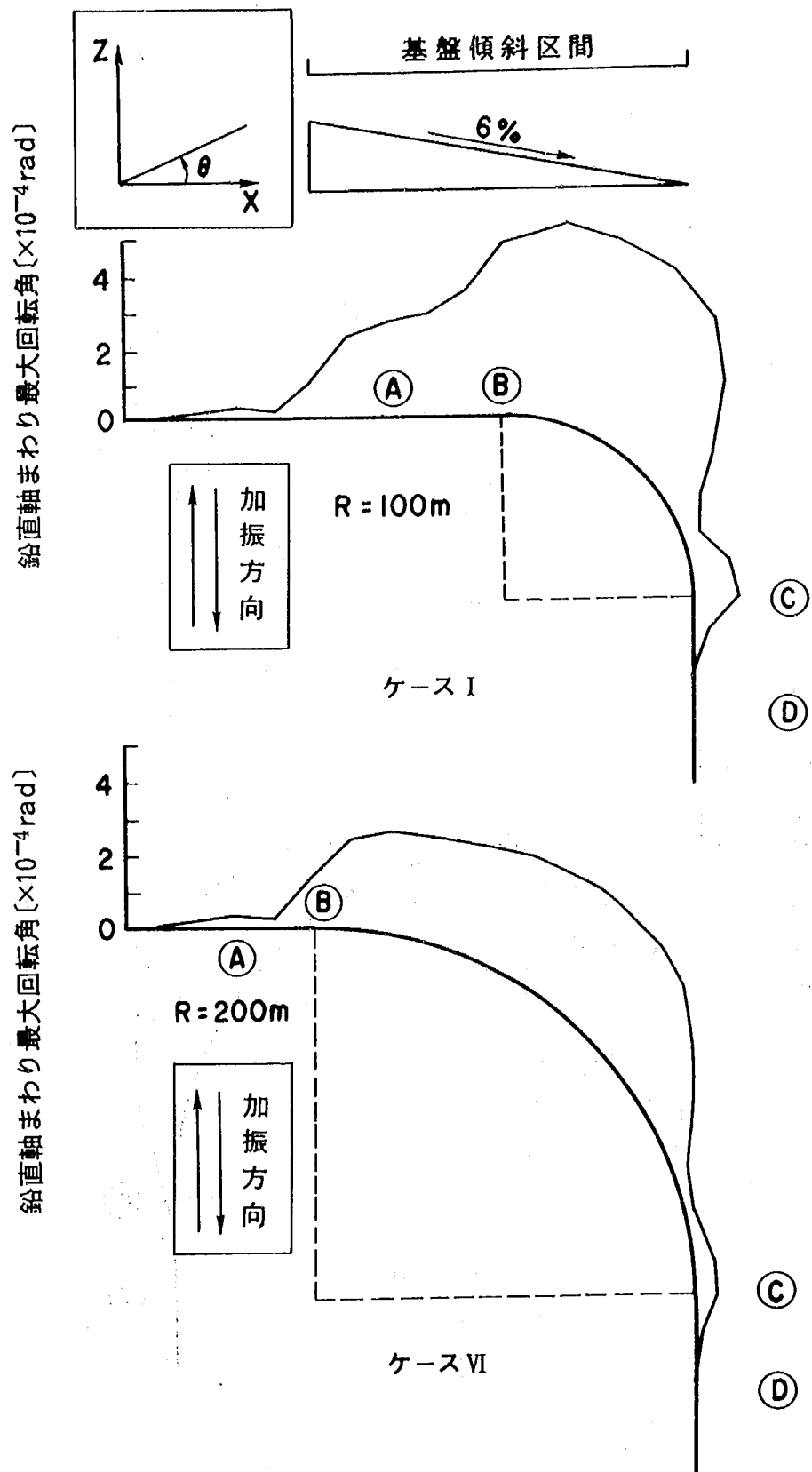
(b)加振方向 $\theta=90^\circ$ の場合

図5-2 トンネルに生じるZ軸方向最大変位 (2)



(a) 加振方向 $\theta = 0^\circ$ の場合

図 5-3 トンネルに生じる鉛直軸まわり最大回転角 (1)

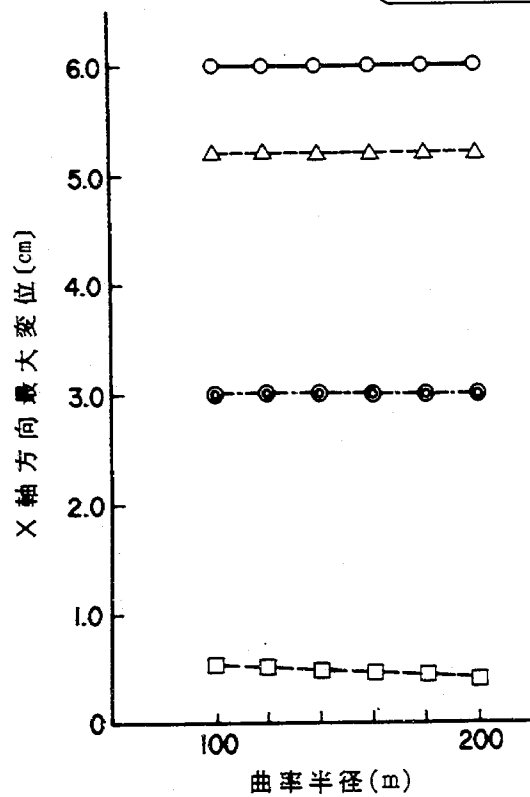
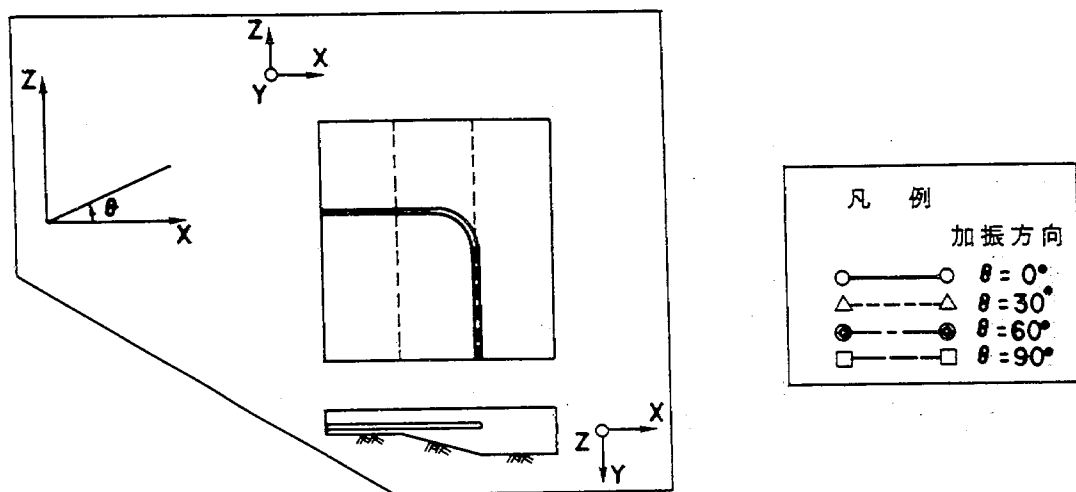


(b) 加振方向 $\theta = 90^\circ$ の場合

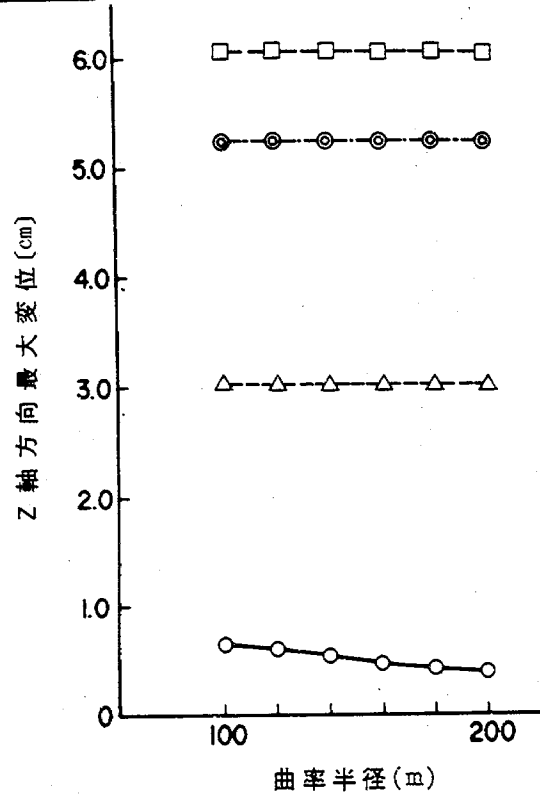
図 5-3 トンネルに生じる鉛直軸まわり最大回転角 (2)

次に、曲線部に生じる最大応答変位が加振方向 θ や曲率半径 R によってどのように変化するかを示すと図5—4のようになる。これによると、曲線部に生じるX軸方向の最大変位やZ軸方向の最大変位は曲率半径に依存して変わることはない。加振方向に対しては、当然、加振方向がX軸もしくはZ軸と平行に近くなるほど、それぞれX軸およびZ軸方向の変位は大きくなる。これは、トンネルは地盤に引きずられて振動しているが、地盤の変位はどちらのケースについても同じであるので、曲率半径の大きさによる違いが生じないためである。

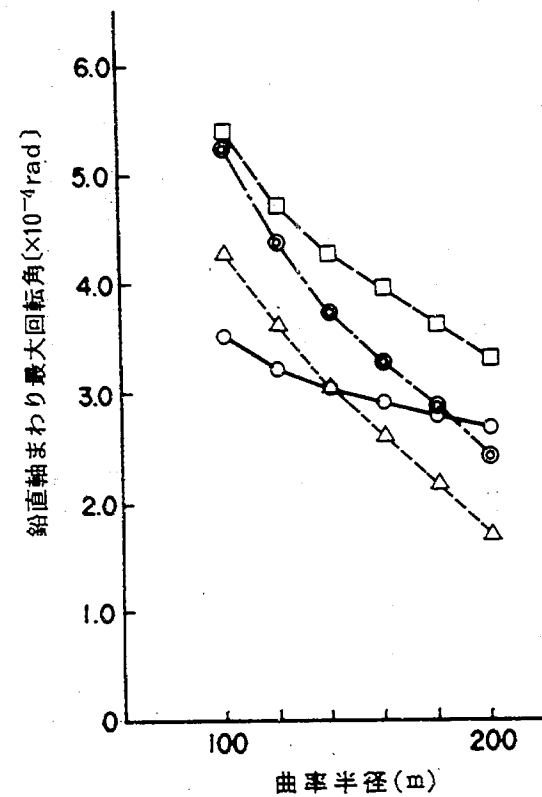
一方、曲線部に生じる鉛直軸まわりの最大回転角は曲率半径が小さくなるにつれて大きな値となる。前述したように、トンネルは地盤の変位とほぼ同様に振動しているが、たとえば、加振方向 $\theta = 0^\circ$ の場合を例にとると、X軸方向の地盤変位量は表層地盤層の厚い基盤傾斜区間の下端で大きく、基盤傾斜区間の上端では小さい。さらに、基盤傾斜区間の上端では軸方向にトンネルが変形するため、地盤からトンネルに伝わる変位伝達率が小さいのに対して、基盤傾斜区間の下端ではトンネルが曲げ変形するため、地盤からトンネルに伝わる変位伝達率が大きい。その結果として、X軸に平行な直線部分ではトンネルの変位が小さく、Z軸に平行な直線部分ではトンネルの変位が大きくなる。この曲線部両端におけるトンネルの変位の差によって、曲線部には回転が生じるが、曲率半径が大きい場合にはこの回転変位の差を長いトンネル長で負担するのに対して、曲率半径が小さい場合には短い区間で回転変位の差を負担しなければならないため、回転角が大きくなるものと考えられる。



(a) X軸方向最大変位



(b) Z軸方向最大変位



(c) 鉛直軸まわり最大回転角

図5-4 曲率半径, 最大変位および最大回転角

(2) 最大断面力

① 最大軸力

図5-5は最大軸力の分布を示したものである。 $R=100\text{m}$ 、 $R=200\text{m}$ の両ケースともに、最大軸力は基盤傾斜部の中央付近を中心とする山形に分布するが、加振方向が $\theta=0^\circ$ の場合には直線部A、 $\theta=90^\circ$ の場合には直線部Dというように、加振方向に平行な直線部の方に寄った分布形となっている。

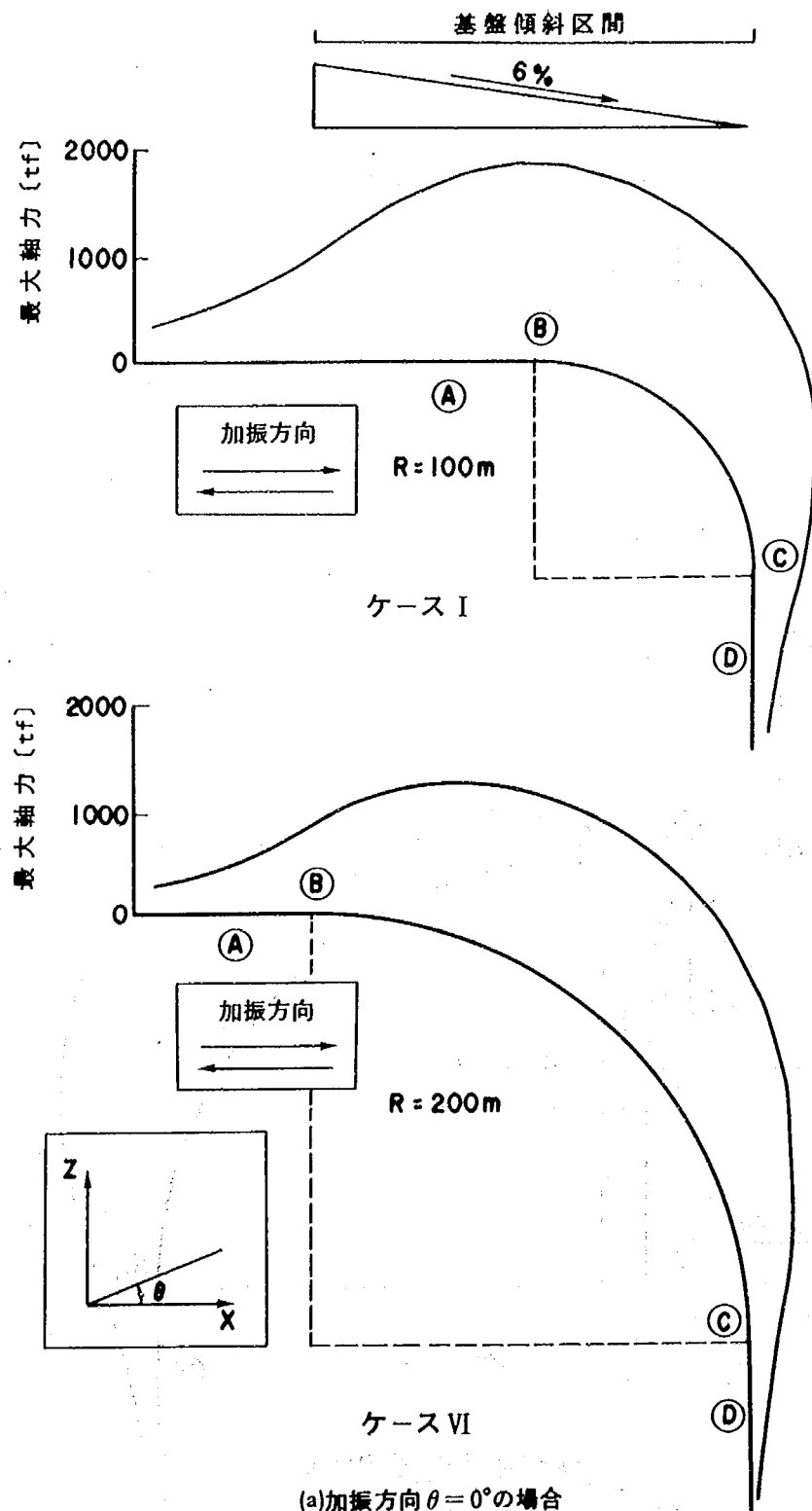
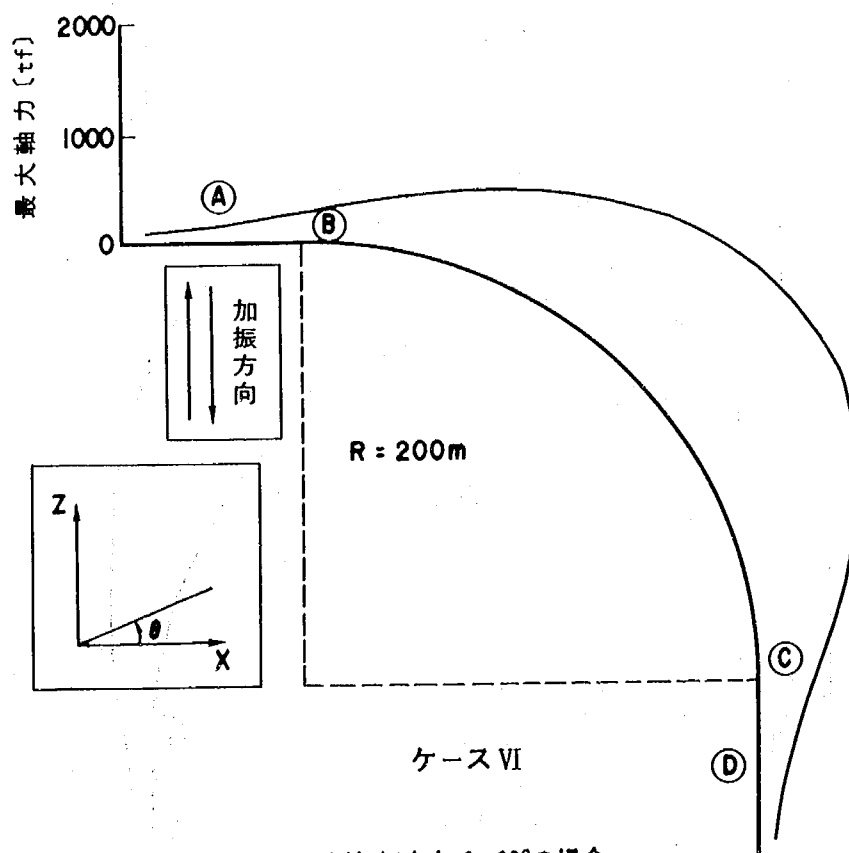
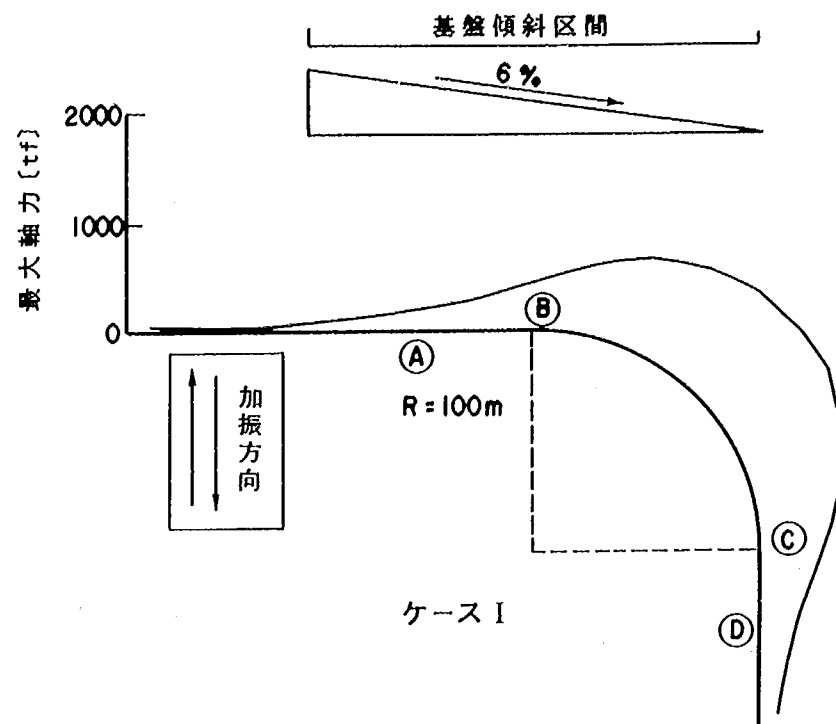


図5-5 トンネルに生じる最大軸力 (1)

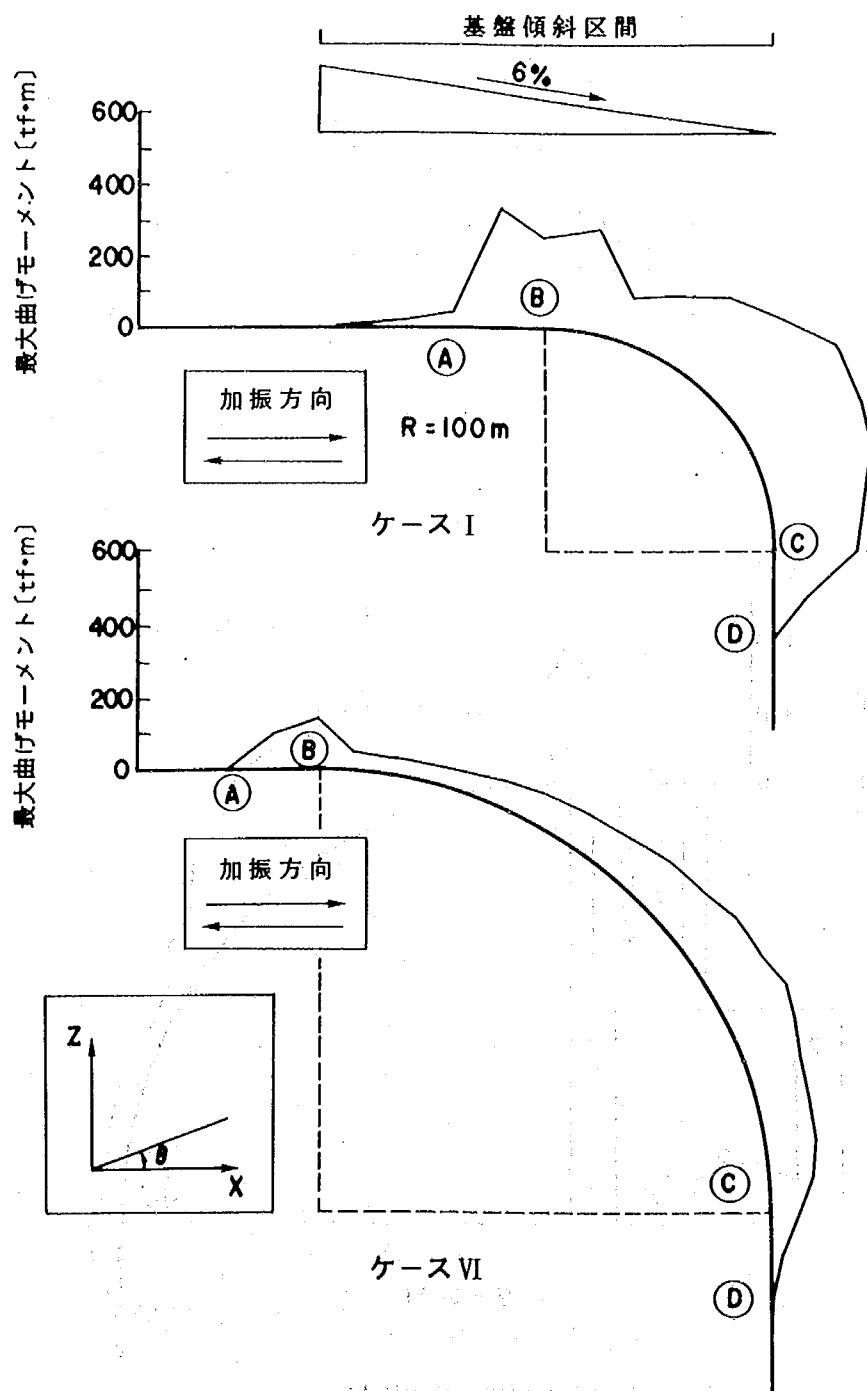


(b) 加振方向 $\theta = 90^\circ$ の場合

図 5-5 トンネルに生じる最大軸力 (2)

② 最大曲げモーメント

図5-6に示すように、加振方向が $\theta = 0^\circ$ の場合には、曲げモーメントは曲線部で大きくなり、接続部Bにおいても大きくなっている。加振方向を $\theta = 90^\circ$ とした場合には、 $\theta = 0^\circ$ の場合に比べて曲げモーメントはより大きな値となっており、基盤傾斜部の上端からB点に至る間で大きい。ただし、曲率半径 $R = 200\text{m}$ のケースでは、基盤傾斜部の上端とB点が一致するため、曲げモーメントはこの位置において最も大きくなる。また、 $R = 100\text{m}$ のケースでは直線部と曲線部の接続部でのピークが非常に大きい。



(a) 加振方向 $\theta = 0^\circ$ の場合

図5-6 トンネルに生じる最大曲げモーメント (1)

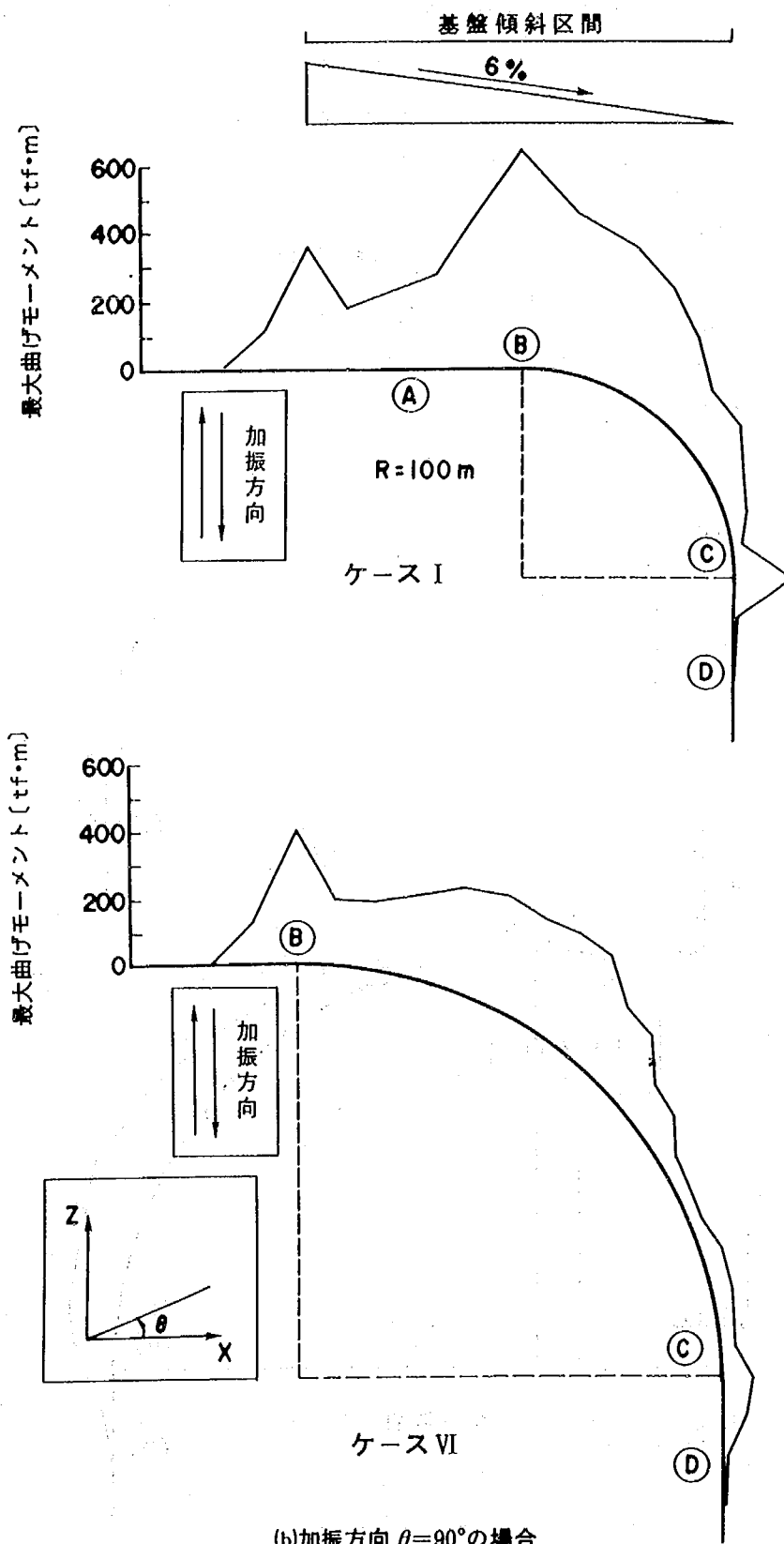


図 5-6 トンネルに生じる最大曲げモーメント (2)

③ 最大せん断力

図5—7に示すように、せん断力は、曲率半径の大きさによらず、加振方向が $\theta = 0^\circ$ の場合にも $\theta = 90^\circ$ の場合にも、ほぼ曲線部でのみ発生している。加振方向や曲率半径によって異なるが、特に曲率半径 $R = 100\text{m}$ のケースにおいて、 $\theta = 0^\circ$ の方向に地震動を作用させた場合には、直線部と曲線部との接続部Bにおいて大きなせん断力が発生する。

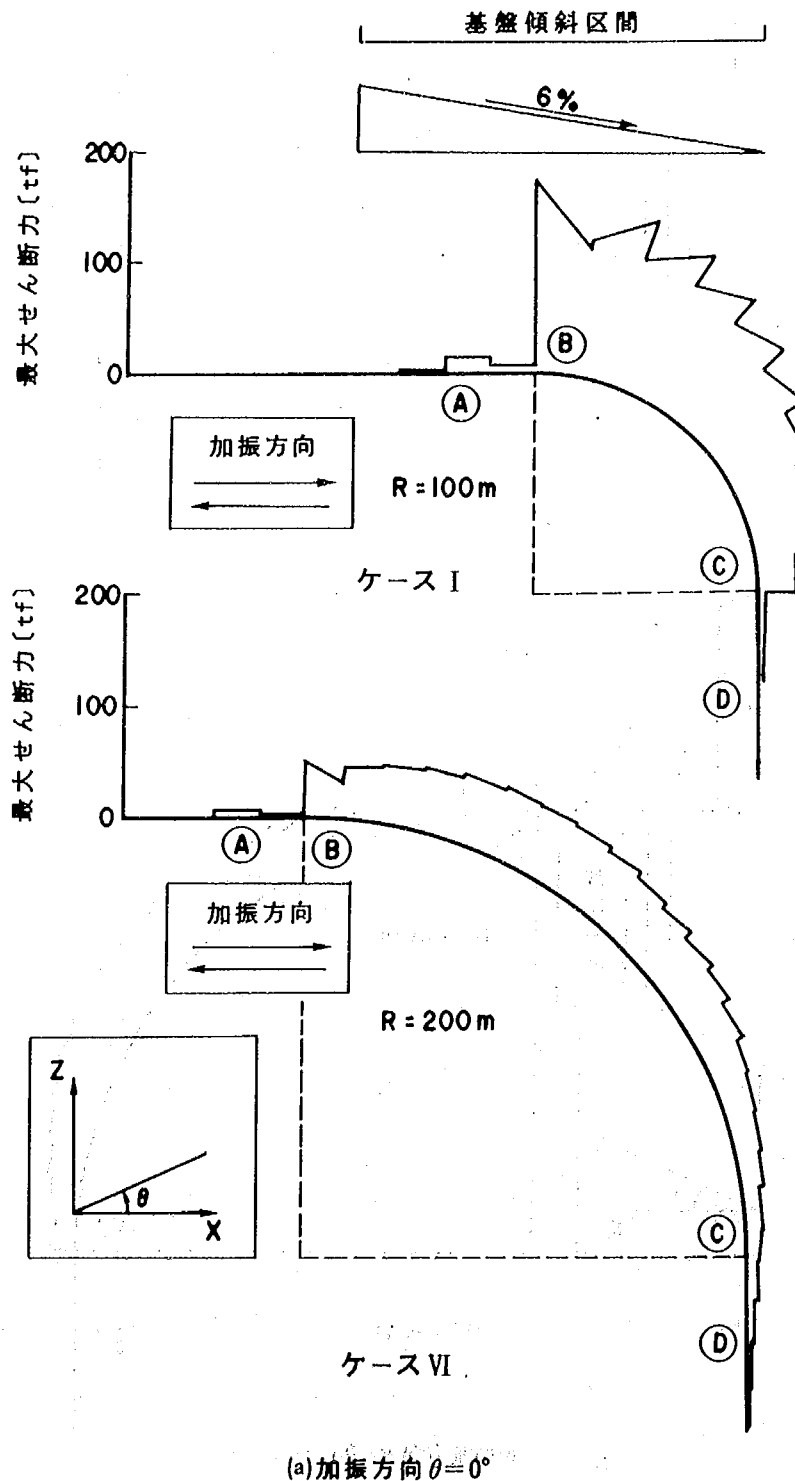
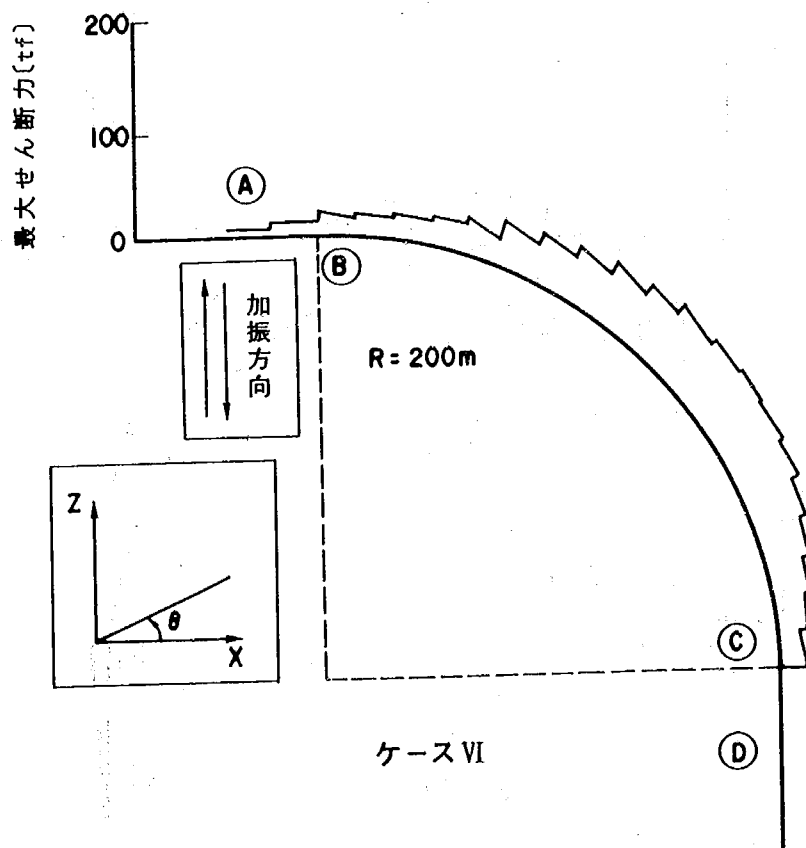
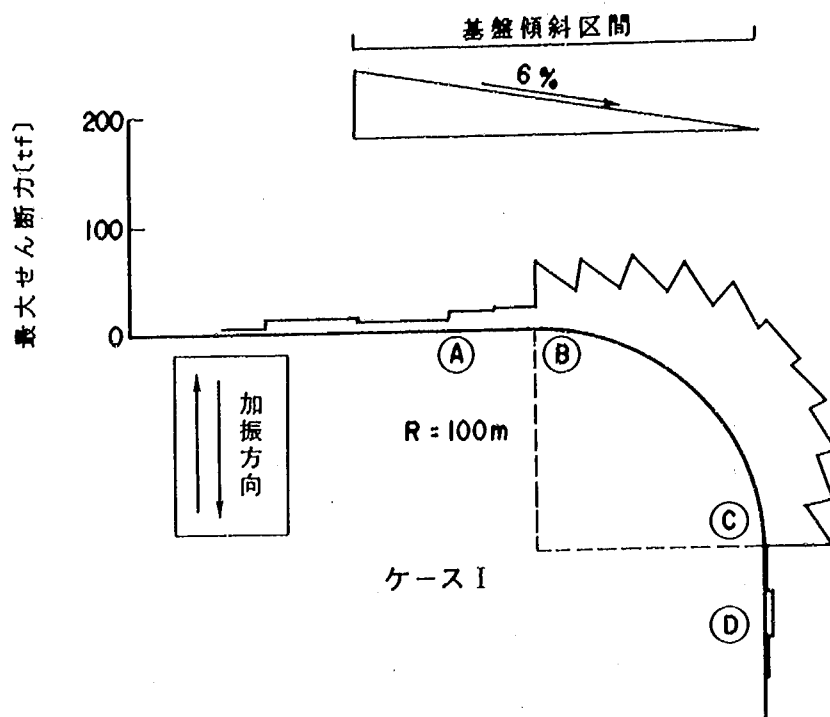


図5—7 トンネルに生じる最大せん断力 (I)



(b) 加振方向 $\theta = 90^\circ$

図 5-7 トンネルに生じる最大せん断力 (2)

次に、曲線部に生じる最大断面力が加振方向 θ および曲率半径 R によってどのように変化するかを示すと図 5—8 のようになる。断面力が最大となる加振方向は曲率半径の大きさによって異なるので、ここでは 4 方向の加振方向のうちで生じた断面力のうちの最大値の包絡線に着目することとする。

図 5—8 によれば、軸力については曲率半径の大きさによらないといえる。軸力は、隣接するトンネル要素間に生じる軸方向の相対変位に起因して発生するが、トンネルは地盤に引きずられる形で振動すると考えられることから、トンネルが位置する地点における、地盤要素間の相対変位が最大となる方向を加振方向に選べば、曲率半径によらず、最大軸力が等しくなるものと思われる。

最大曲げモーメントについては、曲率半径が小さくなると増大する。前述の最大回転角の項で述べたように、基盤傾斜部の上端では地盤変位が小さく、基盤傾斜部の下端では大きい。加振方向を $\theta = 0^\circ$ とした場合を例にとると、X 軸に平行な直線部では X 軸方向の変位が小さく、Z 軸に平行な直線部では変位が大きい。このトンネル曲線部両端の変位の差を曲線部で負担することになるが、曲率半径が大きい場合には長いトンネル長で負担するが、曲率半径が小さい場合には変位の差を負担する曲線長が短いために、曲率半径の小さい場合の方がより大きな曲げモーメントが生じるものと思われる。

最大せん断力は、曲率半径が小さくなるとともに大きくなる。トンネルの、軸直角方向の相対変位によってせん断力が生じるが、曲率半径が小さい場合には、相対変位を負担するトンネル長が短くなることから、トンネルの単位長さ当りで負担する変位が大きくなる。このため、曲率半径が小さい場合には、せん断力が大きくなると考えられる。

以上の点をまとめると、次のようになる。

- (1) 曲線部を有するシールドトンネルでは、曲線区間において鉛直軸回りの最大回転角が大きくなる。
- (2) 曲線部を有するシールドトンネルでは、直線部と曲線部との境界でせん断力、曲げモーメントが大きな値となるが、その影響は曲率半径が小さくなると増大する。

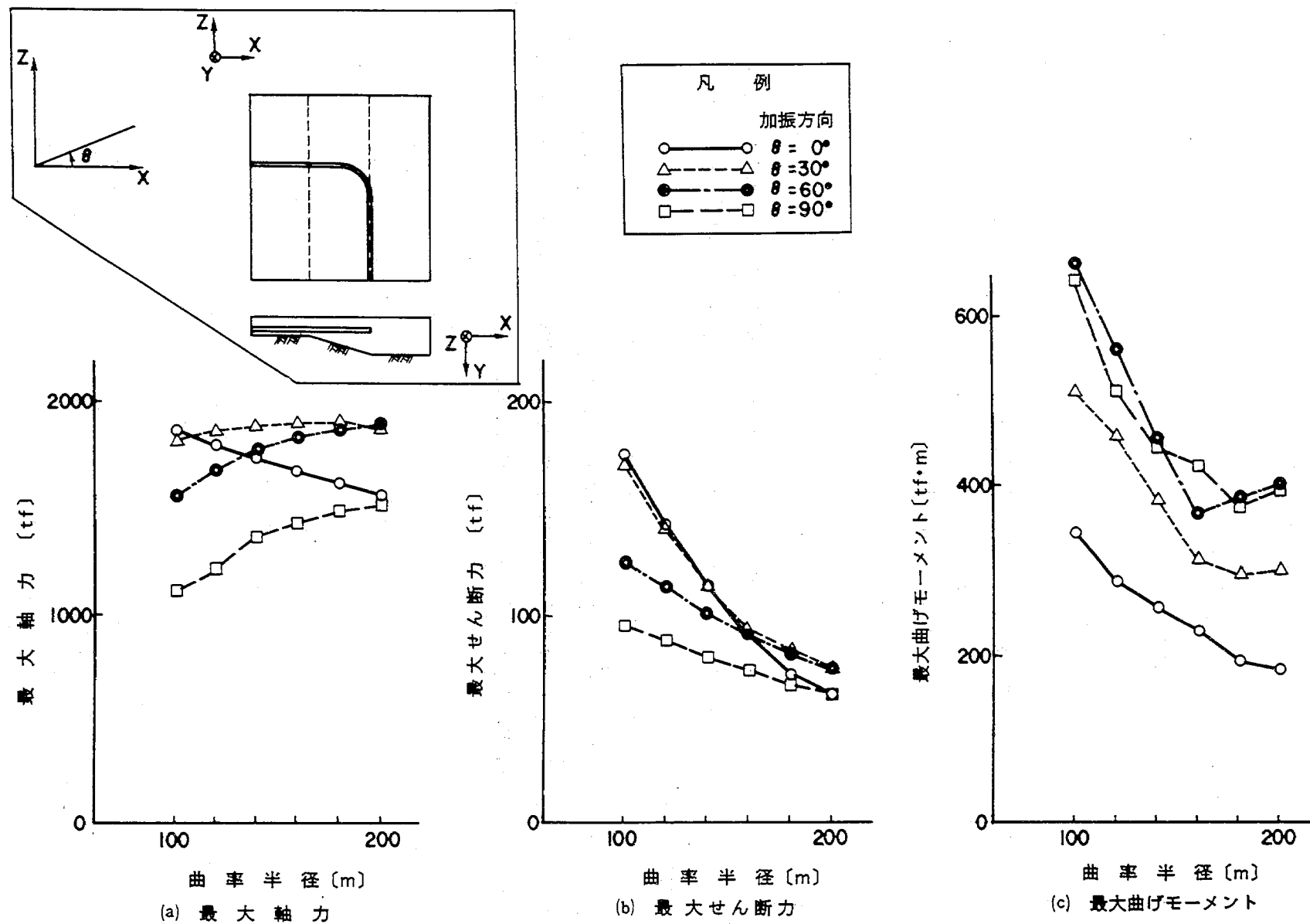


図 5-8 曲率半径と最大断面力

6. 曲線部の曲線区間長（曲線部中心角）が地震時応答に及ぼす影響

(1) 最大変位および最大回転角

① X軸方向最大変位

図6—1にX軸方向の最大変位を示す。当然のことではあるが、加振方向が $\theta=90^\circ$ のときにはX軸方向の最大変位は小さく、加振方向を $\theta=0^\circ$ としたときに最も大きくなることがわかる。加振方向を $\theta=0^\circ$ とした場合についてみると、X軸方向の最大変位は、直線部Aから曲線部にかけて単調に増加し、約6.0cmとなったところではほぼ一定となっている。こうした分布のようすは曲線部中心角の異なる各ケース間で差異はみられず、中心角によってX軸方向の最大変位が増加することはない。これは、トンネルが地盤に追従して振動しているためである。

② Z軸方向最大変位

図6—2に示すように、Z軸方向の最大変位は、X軸方向の最大変位とは逆に、加振方向 $\theta=0^\circ$ のときに最も小さく、加振方向 $\theta=90^\circ$ のときに最も大きくなる。変位の分布の特徴はX軸方向最大変位と同様であり、直線部Aから曲線部にかけてZ軸方向の最大変位は単調に増加し、最大となった後一定となる。曲線部中心角の大きさによる差異はみられない。

③ 鉛直軸まわり最大回転角

図6—3に示すように、鉛直軸まわりの最大回転角は、曲線部で大きくなっている。ただし、曲線部中心角 $\phi=30^\circ$ のケースについては直線部で最大値をとっている。これは、曲線部をもたない直線状シールドトンネルの場合の最大回転角に近いのである。曲線部中心角 $\phi=90^\circ$ のケースに注目すると、加振方向を $\phi=0^\circ$ としたときは、直線部Dに近い部分で大きくなり、 $\phi=90^\circ$ のときには直線部Aの方に偏った地点で大きくなっている。この傾向は中心角の異なるいずれのケースについても同様である。曲線部中心角 $\phi=120^\circ$ のケースについても、分布は中心角 $\phi=90^\circ$ のケースと比べて大差なく、中心角が大きくなることによって最大回転角が大きくなることはない。

(2) 最大断面力

① 最大軸力

図6—4に示すように、中心角 $\phi=90^\circ$ （以下、これを基準ケースと呼ぶ。）の場合について最大軸力の分布をみると、加振方向をX軸方向（ $\theta=0^\circ$ ）としたときは直線部Aに近い曲線部で大きくなる形となっており、Z軸方向に加振する（ $\theta=90^\circ$ ）と直線部D付近で大きくなる。曲線部の中心角を大きくしたケース（ケースIX： $\phi=120^\circ$ ）をみると、基準ケースとの共通部分についてはほとんど同様の分布をしていることがわかる。ただ、中心角が 120° のケースでは直線部Dが基盤傾斜区間内に位置するため、直線部Dにおいても軸力が発生しており、特に加振方向が $\theta=90^\circ$ のときには、割合大きな値となっている。中心角を小さくしたケースの分布は、中心角に相当する部分を基準ケースから切り出した形となっている。

② 最大曲げモーメント

図6—5に示すように、基準ケースについてみると、X軸方向に加振した場合($\theta=0^\circ$)には曲線部のうちC点に近い位置において曲げモーメントが大きくなり、加振方向をZ軸方向とした場合($\theta=90^\circ$)には、曲線部のうちB点に近い位置において曲げモーメントが大きくなる。中心角 ϕ が 120° や 60° の場合もこのような特徴はほぼ同じである。しかし、中心角 ϕ が 30° となると、曲げモーメントが500tf程度より大きくなる区間はB点の近傍のみとなる。いずれのケースについても直線部と曲線部との接続部B付近において、最大曲げモーメントが大きい。ただし、このB点付近において生じる最大曲げモーメントの値は各ケースとも600tf程度であり、ほぼ同じである。

③ 最大せん断力

図6—6に示すように、せん断力はいずれのケースにおいても、ほぼ曲線部でのみ発生している。中心角 $\phi=120^\circ$ のケースを基準ケースと比べると、分布はほとんど変わらないといえる。また、中心角の小さいケースについては、基準ケースから中心角に相当する部分を切り出した形であるが、直線部と曲線部との接続部BおよびCで大きな値を生じている。

次に、図6—7に曲線部に生じる最大断面力と曲線部中心角 ϕ および加振方向 θ との関係を示す。全体としては、中心角が小さくなると最大断面力が微増する傾向がある。ただし、細かくみれば、中心角 $\phi=30^\circ$ で加振方向 $\theta=90^\circ$ の場合のように、中心角が小さくなるにつれて、最大軸力、最大せん断力が減少する場合もある。しかしながら、4方向の加振方向の中の最大の断面力に注目すると、最大断面力はいずれについても、中心角の大きさが変わっても著しい変化は生じない。

以上、曲線区間長(曲線部の中心角)が、シールドトンネルの地震時応答に及ぼす影響について検討した。曲線部を有するシールドトンネルは、曲線部の存在により、地震時の応答としてせん断力が新たに生じたり、曲げモーメントが大きくなったりするが、そうした曲線部の影響は中心角がある程度以上の曲線部が存在すると現れる。今回検討した曲線区間長の長い、中心角 $\phi=120^\circ$ の場合でも地震時に生じる断面力は、中心角 60° 、 90° のケースとほとんど変わらなかった。曲線区間長が長い場合についても、そのことによる断面力の増加に対する検討は、特に必要がないといえる。

以上から、地下鉄の平面線形で通常想定される程度の曲線部区間長の範囲であれば、曲線部に生じる変位および断面力は曲線区間長による影響をほとんど受けないといえる。ただし、曲線区間長が変わると、全体としての平面線形が変わることになるので、他の種々の条件(地盤条件変化部とシールドトンネル曲線部との位置関係、曲率半径・縦断勾配等の線形、近接する他構造物との関係等)については総合的に検討を加える必要がある。

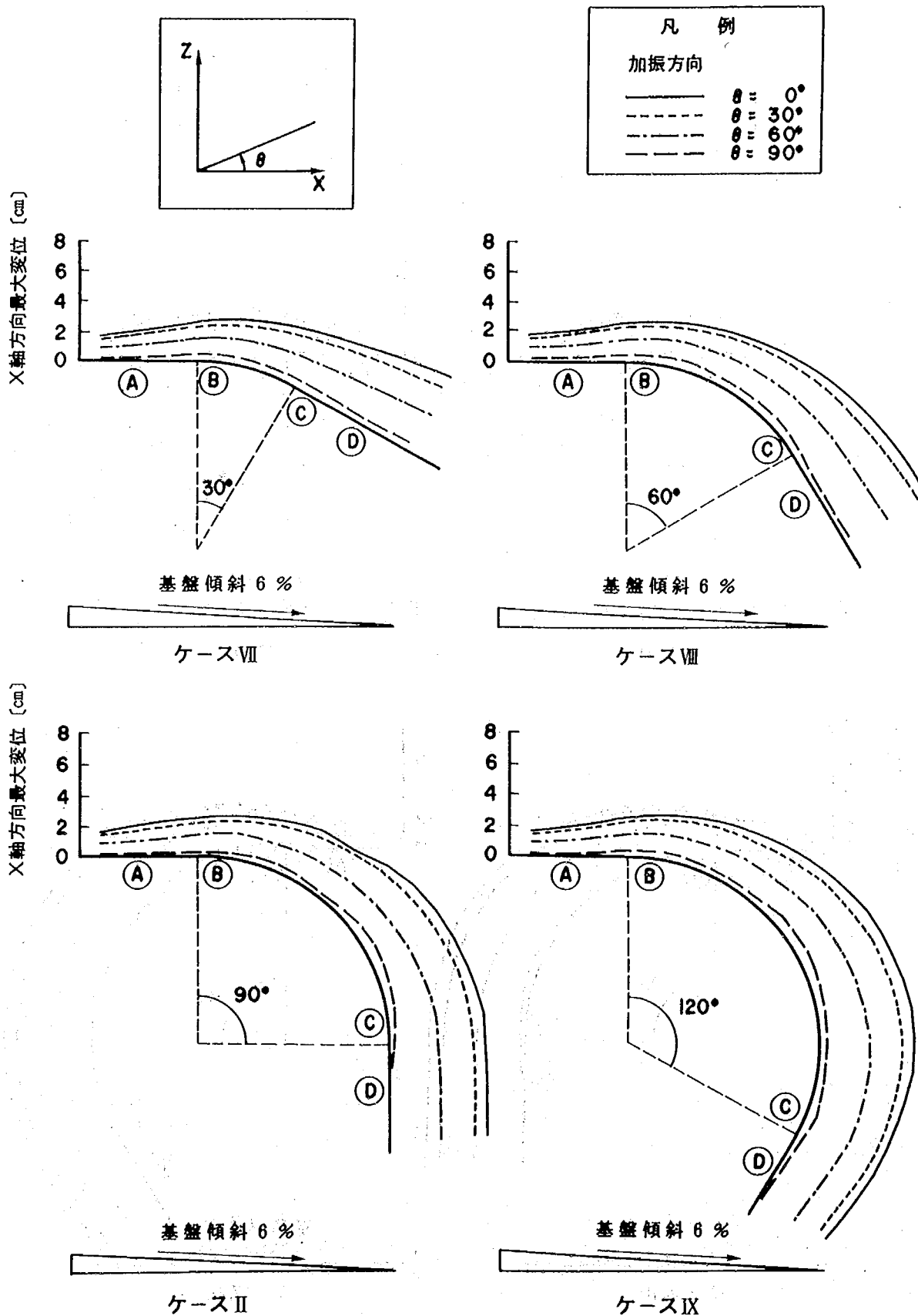


図 6 - 1 曲線部における X 軸方向の最大変位の分布

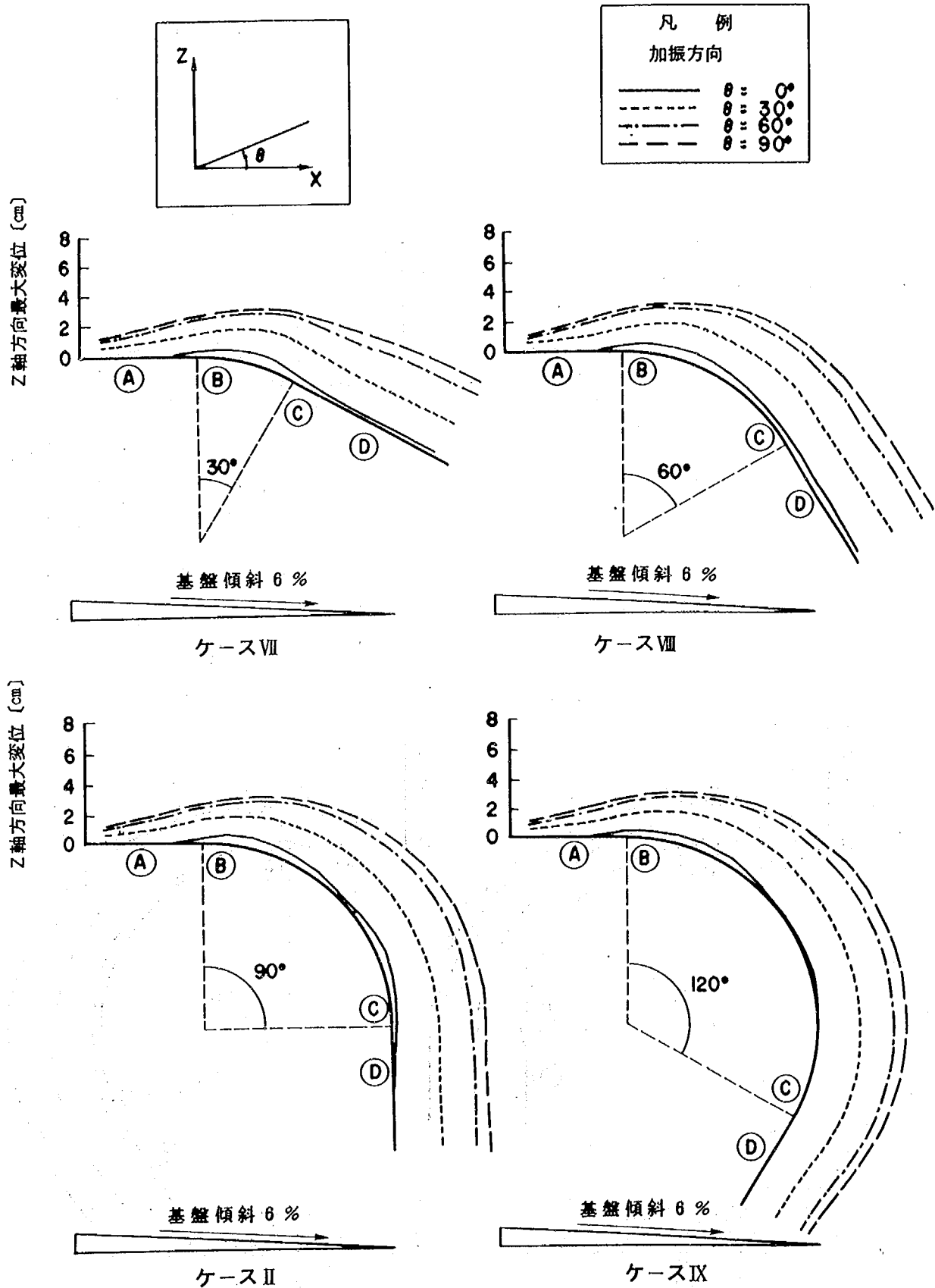
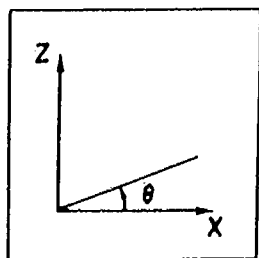
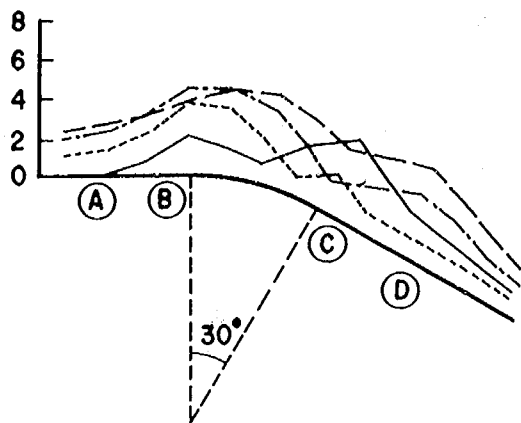


図 6-2 曲線部における Z 軸方向の最大変位の分布

鉛直軸まわり最大回転角 [$\times 10^{-4}$ rad]

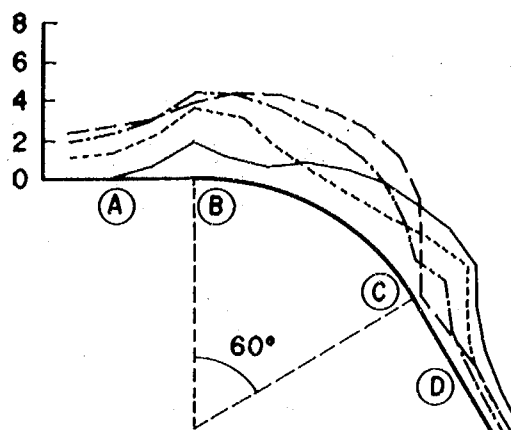


凡 例	
加振方向	
————	$\theta = 0^\circ$
- - - - -	$\theta = 30^\circ$
· · · · ·	$\theta = 60^\circ$
— · — · —	$\theta = 90^\circ$



基盤傾斜 6 %

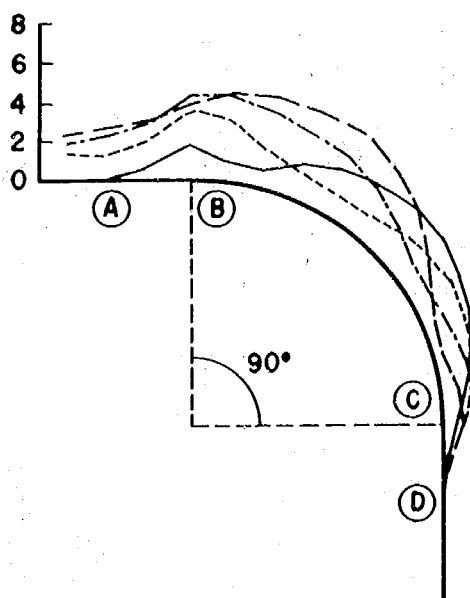
ケース VII



基盤傾斜 6 %

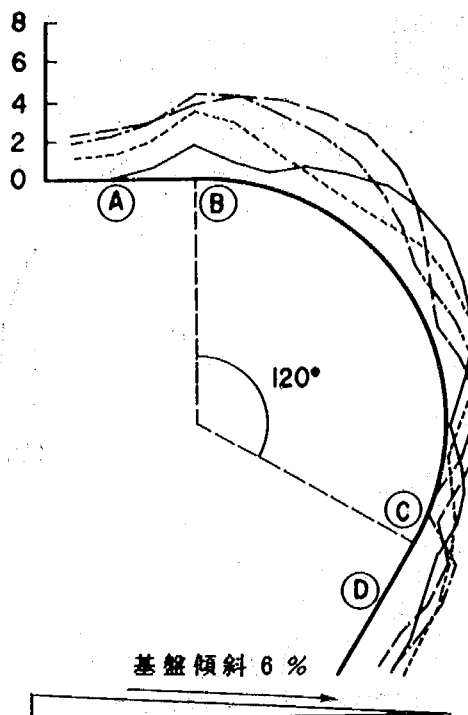
ケース VIII

鉛直軸まわり最大回転角 [$\times 10^{-4}$ rad]



基盤傾斜 6 %

ケース II



基盤傾斜 6 %

ケース IX

図 6-3 曲線部における鉛直軸まわりの最大回転角の分布

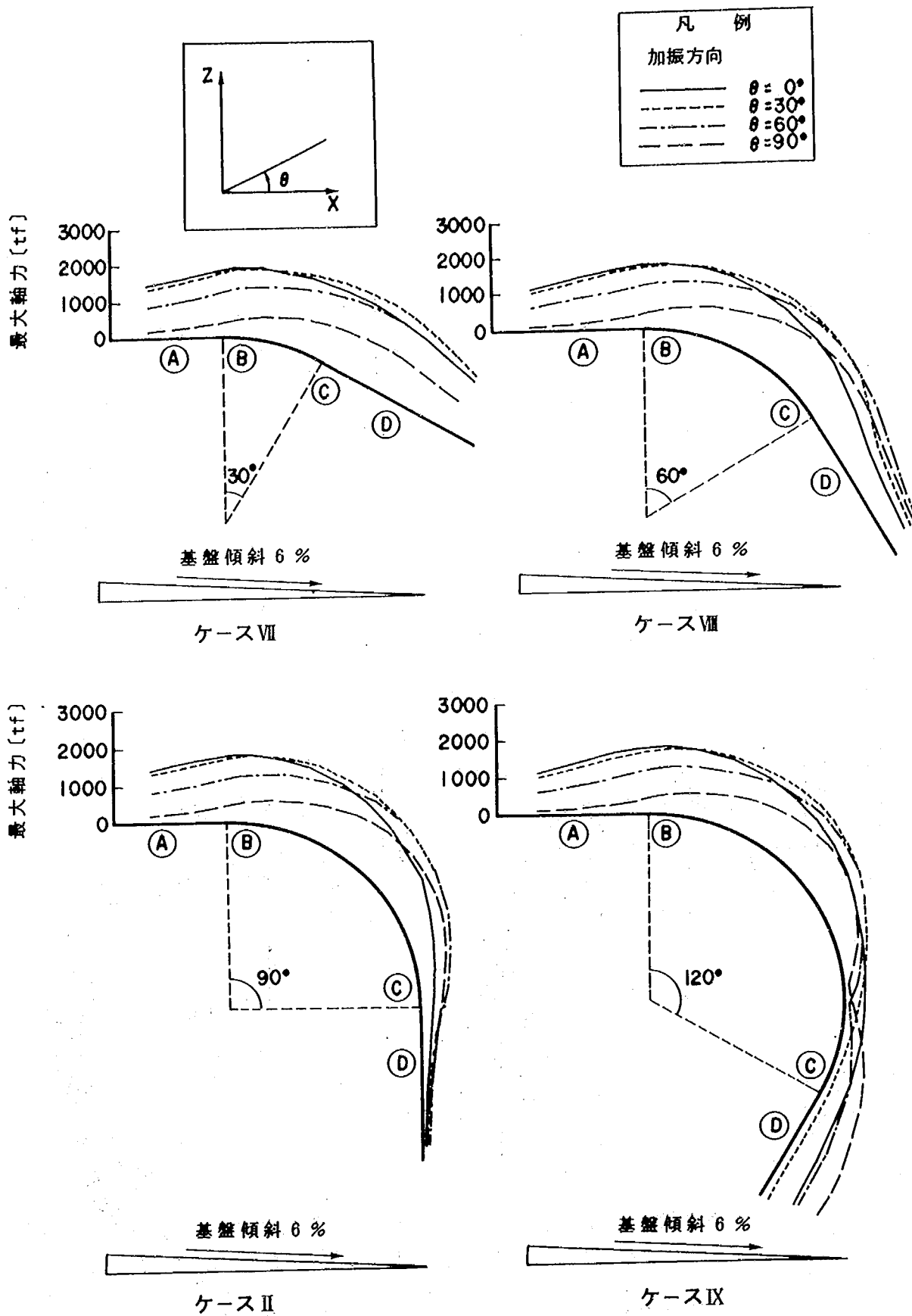
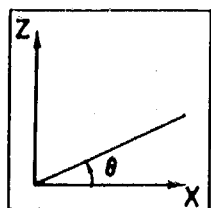


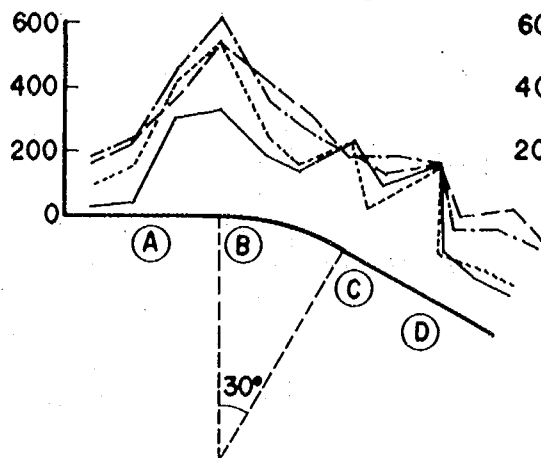
図6-4 曲線部における最大軸力の分布

最大曲げモーメント (tf・m)

最大曲げモーメント (tf・m)

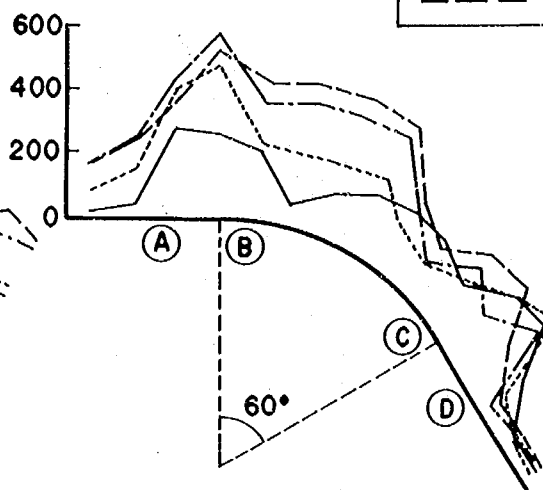


凡 例	
加振方向	
——	$\theta = 0^\circ$
- - - -	$\theta = 30^\circ$
— · — ·	$\theta = 60^\circ$
·····	$\theta = 90^\circ$



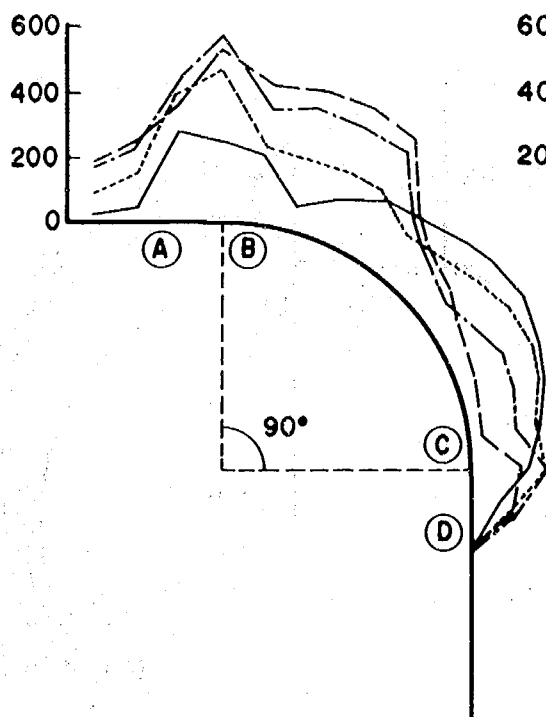
基盤傾斜 6 %

ケースⅦ



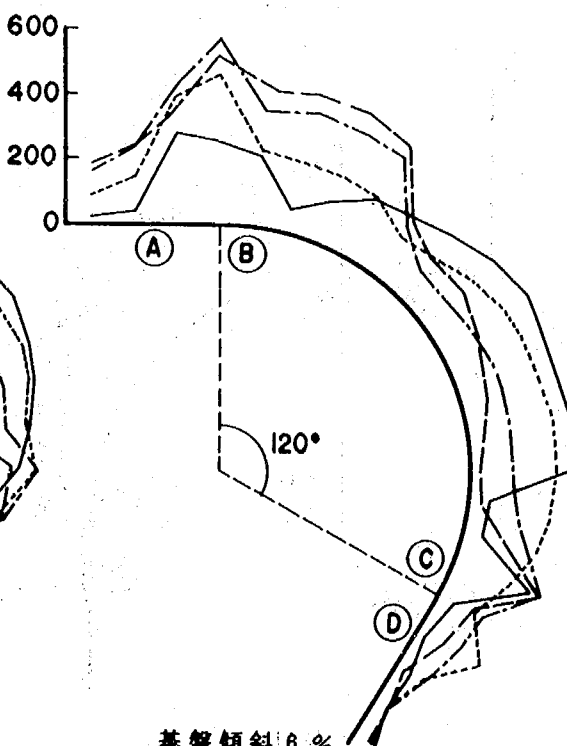
基盤傾斜 6 %

ケースⅧ



基盤傾斜 6 %

ケースⅡ



基盤傾斜 6 %

ケースⅨ

図 6-5 曲線部における最大曲げモーメントの分布

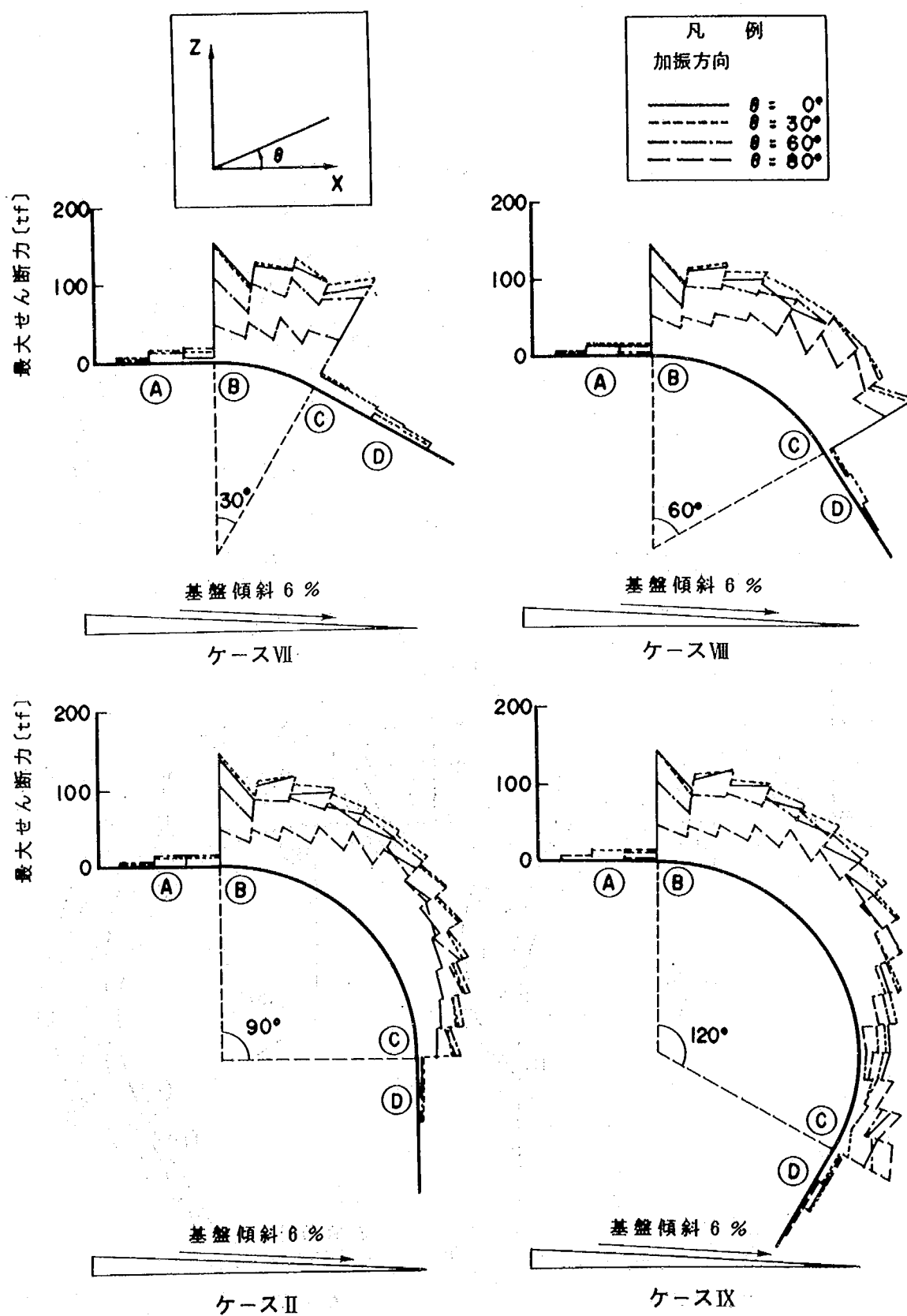


図 6-6 曲線部における最大せん断力の分布

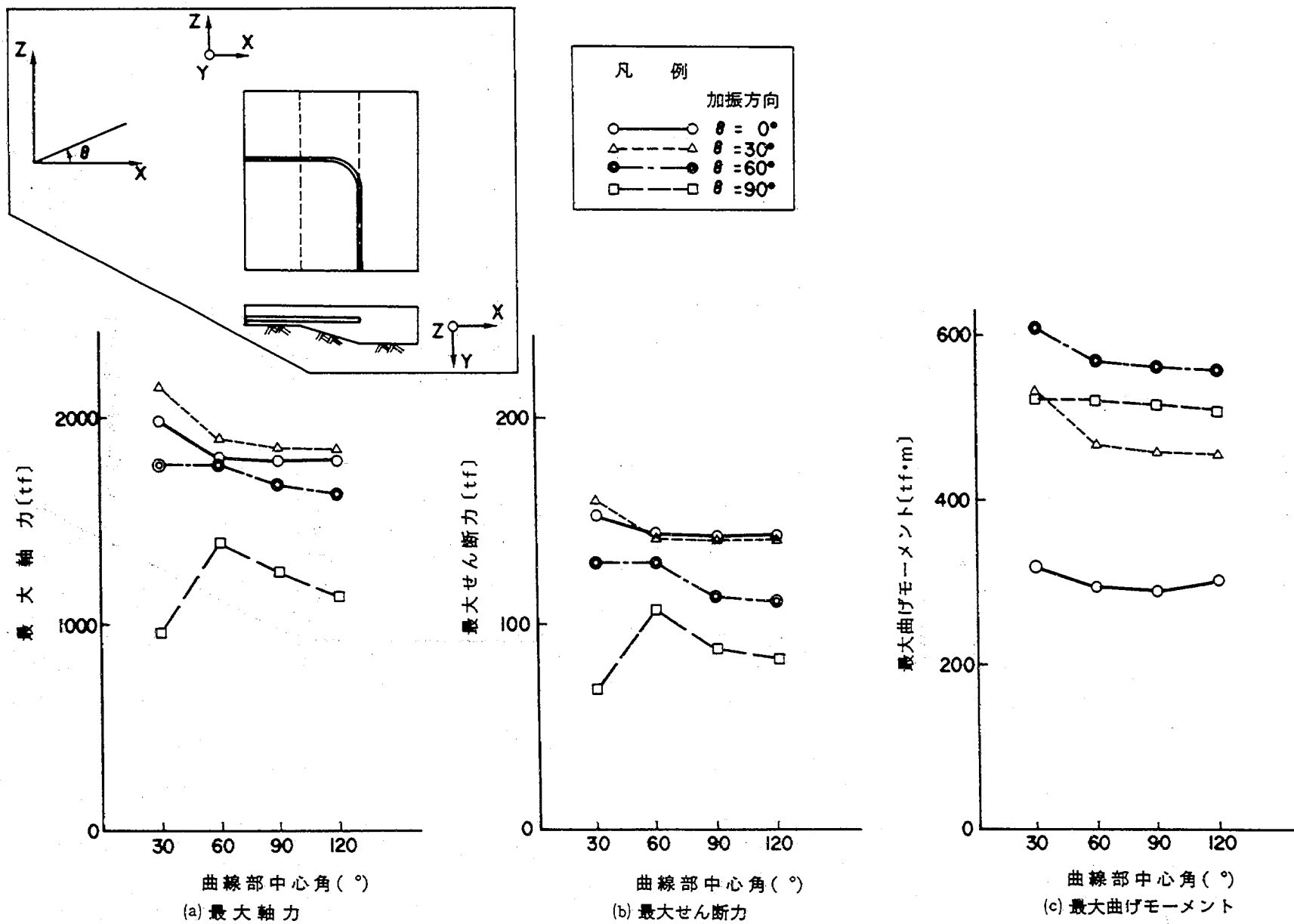


図 6-7 曲線部の中心角と最大断面力

7. 入力地震動の直交成分の影響

本来、地震動は水平面内に直交する2方向の成分を有しているが、従来の耐震設計では、入力地震動として、そのうちの一方のみを用いているのが普通である。直線状の構造物の最大応答を算出するのは異なり、曲線部を有する構造物の場合には、本来、いずれの方向に入力地震動を作用させるべきかも含めて、2方向地震動の同時作用の影響を検討することが必要とされる。このため、ここでは地震動の直交する2方向成分のうち一方のみを入力した場合の応答と、直交する2方向成分を同時に作用させた場合の応答とを比較することにより、入力地震動として直交する2成分を考慮した場合の影響について検討した。

入力地震動としては、1986年十勝沖地震の際に八戸港で記録された加速度記録のNS成分の記録を振幅調整して作成した地震動NSと、EW成分から作成した地震動EWを用いた。

検討の対象としたのは、直線状シールドトンネルおよび曲率半径 $R=120\text{m}$ の曲線部（中心角 90° ）を有するシールドトンネルである。直交する2方向成分を同時に作用させた場合の応答は、地震動NSによる応答とこれと直交する方向に作用させた地震動EWによる応答を別々に計算し、時刻歴で両者を重ね合わせることで算出した。また、図7-1に示すように地震動NSの加振方向とX軸とのなす角 θ で加振方向を表すものとし、加振方向は $\theta = 0, 30, 60, 90^\circ$ の4通りとした。

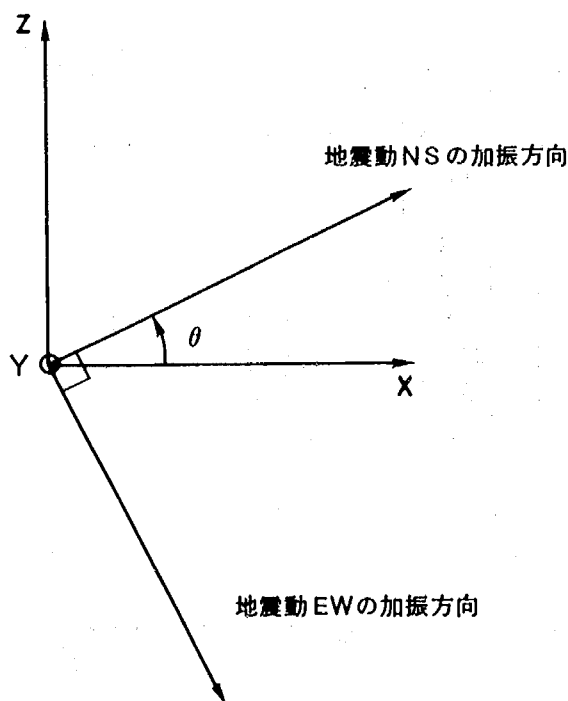


図7-1 加振方向 θ の定義

(1) 直線状シールドトンネル

図7-2に2方向の地震動を同時に作用させた場合の最大断面力の分布を各加振方向について示す。

- ① 軸力は、 $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 90^\circ$ の場合が大きな値となっており、 $\theta = 30^\circ$ 、 60° の場合には小さい。最大値に着目すれば、 $\theta = 90^\circ$ の場合が4方向に地震動を作用させた中では最大となるが、全区間にわたって最大であるわけではない。
- ② 曲げモーメントは、基盤傾斜部の下端付近において最大値をとる。また、この位置における曲げモーメントの最大値は、 $\theta = 30^\circ$ の場合が最も大きく、 $\theta = 90^\circ$ の場合が最も小さい。
- ③ せん断力については、4加振方向のいずれの場合にも全区間にわたって小さな値であり、加振方向による違いははっきりしない。

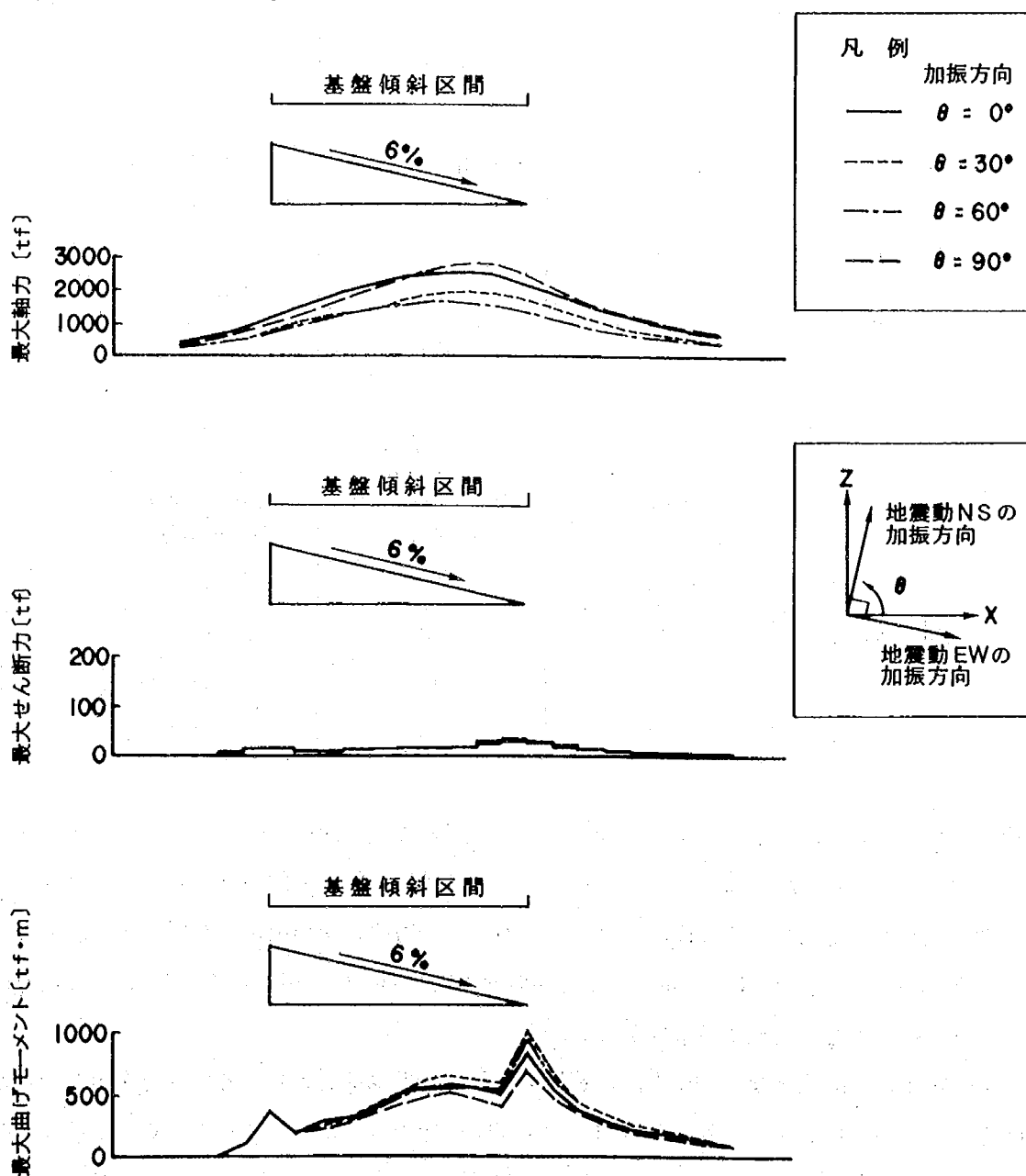


図7-2 2方向成分を同時に作用させた場合の最大断面力

直線状シールドトンネルについて水平2方向の地震動を同時に作用させた場合の発生断面力の最大値(合成値)を表7-1に示す。

表7-1 水平2方向の地震動による最大断面力

(a) 最大軸力

	地震動NSによる 発生断面力	地震動EWによる 発生断面力	2方向成分入力時 の発生断面力
$\theta = 0^\circ$	2526	0	2526
$\theta = 30^\circ$	2191	1380	1924
$\theta = 60^\circ$	1265	2390	1641
$\theta = 90^\circ$	0	2751	2751

(b) 最大曲げモーメント

	地震動NSによる 発生断面力	地震動EWによる 発生断面力	2方向成分入力時 の発生断面力
$\theta = 0^\circ$	0	808	808
$\theta = 30^\circ$	338	700	987
$\theta = 60^\circ$	586	404	945
$\theta = 90^\circ$	677	0	677

(c) 最大せん断力

	地震動NSによる 発生断面力	地震動EWによる 発生断面力	2方向成分入力時 の発生断面力
$\theta = 0^\circ$	0	32	32
$\theta = 30^\circ$	12	28	36
$\theta = 60^\circ$	20	16	32
$\theta = 90^\circ$	24	0	24

直線状シールドトンネルでは、トンネル軸方向に加振した際には曲げモーメントが生じず、トンネル軸直角方向に加振した際には軸力は生じない。したがって、軸力は加振方向が $\theta = 0^\circ$ または $\theta = 90^\circ$ のときには水平2方向の地震動を同時に作用させてもそのうち一方のみを作用させた場合と変わらない。また、加振方向が $\theta = 30^\circ$ および $\theta = 60^\circ$ の時は、2方向の地震動を同時に作用させることにより、軸力がかえって小さくなっていることに注意する必要がある。

表7-1で断面力が最大となる加振方向に着目すると、軸力は地震動の一方のみを作用させた場合は、加振方向 $\theta = 0^\circ$ の時に最大となり、2方向成分を同時に作用させた場合にも $\theta = 0^\circ$ で最大となる。曲げモーメントは、一方のみを作用させた場合は $\theta = 90^\circ$ (トンネル軸直角方向加振)で最大となるが、2方向成分作用時には $\theta = 30^\circ$ で最大となっている。せん断力は、一方のみの場合にはトンネル軸方向加振時に最大となるが、2方向成分作用時には $\theta = 30^\circ$ の時に最大となっている。

1方向成分のみを作用させた場合と2方向成分を同時に作用させた場合とで4方向の加振方向のうちの最大断面力を比較すると表7-2のようになる。ここで、表7-2に示している、2方向成分作用時の応答の1方向成分作用時の応答に対する割合は、地震動NS作用時の応答に対する割合と地震動EW作用時の応答に対する割合の平均をとっている。

表7-2 2方向成分を同時に作用させた際の断面力の増加割合

	1方向成分作用の場合		2方向成分同時作用の場合	1方向成分作用時に対する割合
	地震動NS	地震動EW		
最大軸力 (tf)	2526	2751	2751	1.04
最大曲げモーメント (tf・m)	677	808	987	1.33
最大せん断力 (tf)	24	32	36	1.29

表7-2に示したように、2方向の地震動を同時に作用させた場合の1方向成分のみを作用させた場合に対する割合は軸力で1.04、曲げモーメントで1.33である。せん断力についてはもともと大きな値ではないが、2方向成分を作用させた場合には1.29倍となる。

(2) 曲線部を有するシールドトンネル

図7-3に地震動NSと地震動EWによる最大断面力および2方向成分を同時に作用させた場合の最大断面力の分布を示す。加振方向は、地震動NSについてはX軸方向、地震動EWについてはZ軸方向としている。

① 最大軸力

地震動NSによる軸力の分布は、曲線部のX軸に平行な直線部より、地震動EWによる軸力の分布はZ軸に平行な直線部より頂点を有する山形であるが、地震動の2方向成分を同時に作用させた場合には、曲線部の中央付近を頂点とする山形の分布となる。トンネルのいずれの地点においても地震動の2方向成分を同時に作用させた場合には地震動の1方向の成分のみを作用させた場合に比べて大きな値となっている。

② 最大曲げモーメント

2方向の地震動成分を同時に作用させることによって、1方向成分のみを作用させた場合よりもかえって応答が小さくなる地点もあるが、曲げモーメントの最大値は地震動NSのみによる応答の最大値と同様に、直線部と曲線部との接続部で生じており、その値は、1方向の地震動による応答の最大値よりも大きくなっている。

③ 最大せん断力

せん断力については、地震NSと地震動EWの各々による応答が合成され、曲線部のいずれの地点においても一方のみの応答よりも大きくなっている。

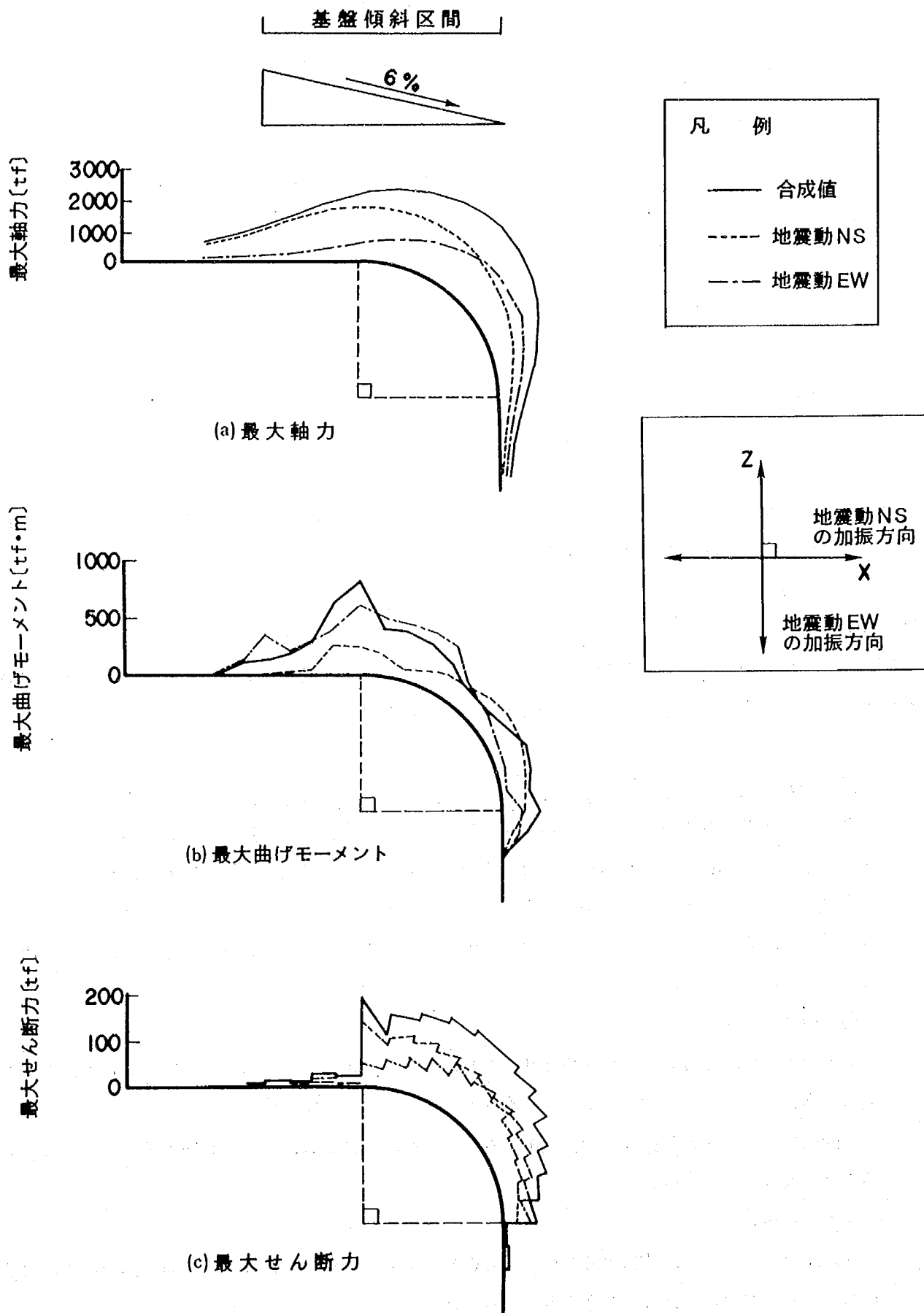


図 7-3 直交 2 方向成分による合成断面力の分布

曲線部を有するシールドトンネルについて、水平2方向の地震動を同時に作用させた場合の断面力の最大値と地震動NSおよび地震動EWのみを作用させた場合の最大値を表7-3に示す。

表7-3 水平2方向の地震動による最大断面力

(a) 最大軸力

	地震動NSによる 発生断面力	地震動EWによる 発生断面力	2方向成分入力時の 発生断面力
$\theta = 0^\circ$	1784	1407	2706
$\theta = 30^\circ$	1857	666	2280
$\theta = 60^\circ$	1677	1319	1750
$\theta = 90^\circ$	1209	1736	1517

(b) 最大曲げモーメント

	地震動NSによる 発生断面力	地震動EWによる 発生断面力	2方向成分入力時の 発生断面力
$\theta = 0^\circ$	288	607	826
$\theta = 30^\circ$	459	450	739
$\theta = 60^\circ$	562	345	601
$\theta = 90^\circ$	516	317	480

(c) 最大せん断力

	地震動NSによる 発生断面力	地震動EWによる 発生断面力	2方向成分入力時の 発生断面力
$\theta = 0^\circ$	142	100	190
$\theta = 30^\circ$	141	56	161
$\theta = 60^\circ$	113	101	125
$\theta = 90^\circ$	88	137	120

断面力が最大となる加振方向に着目すると、軸力は地震動の一方のみを作用させた場合は、加振方向 $\theta = 30^\circ$ の時に最大となり、2方向成分を同時に作用させた場合には $\theta = 0^\circ$ で最大となる。曲げモーメントは一方のみを作用させた場合は、 $\theta = 0^\circ$ で最大となり、2方向成分作用時にも $\theta = 0^\circ$ で最大となっている。せん断力は、一方のみを作用させた場合には $\theta = 0^\circ$ の時に最大となり、2方向成分作用時にも $\theta = 0^\circ$ の時に最大となっている。地震動の2方向成分を同時に作用させた場合には、発生断面力のいずれについても、加振方向 $\theta = 0, 30, 60, 90^\circ$ の順に小さくなっている。

図7-4に加振方向を $\theta = 0, 30, 60, 90^\circ$ として、2方向の地震動を同時に作用させた場合の最大断面力の分布を示す。

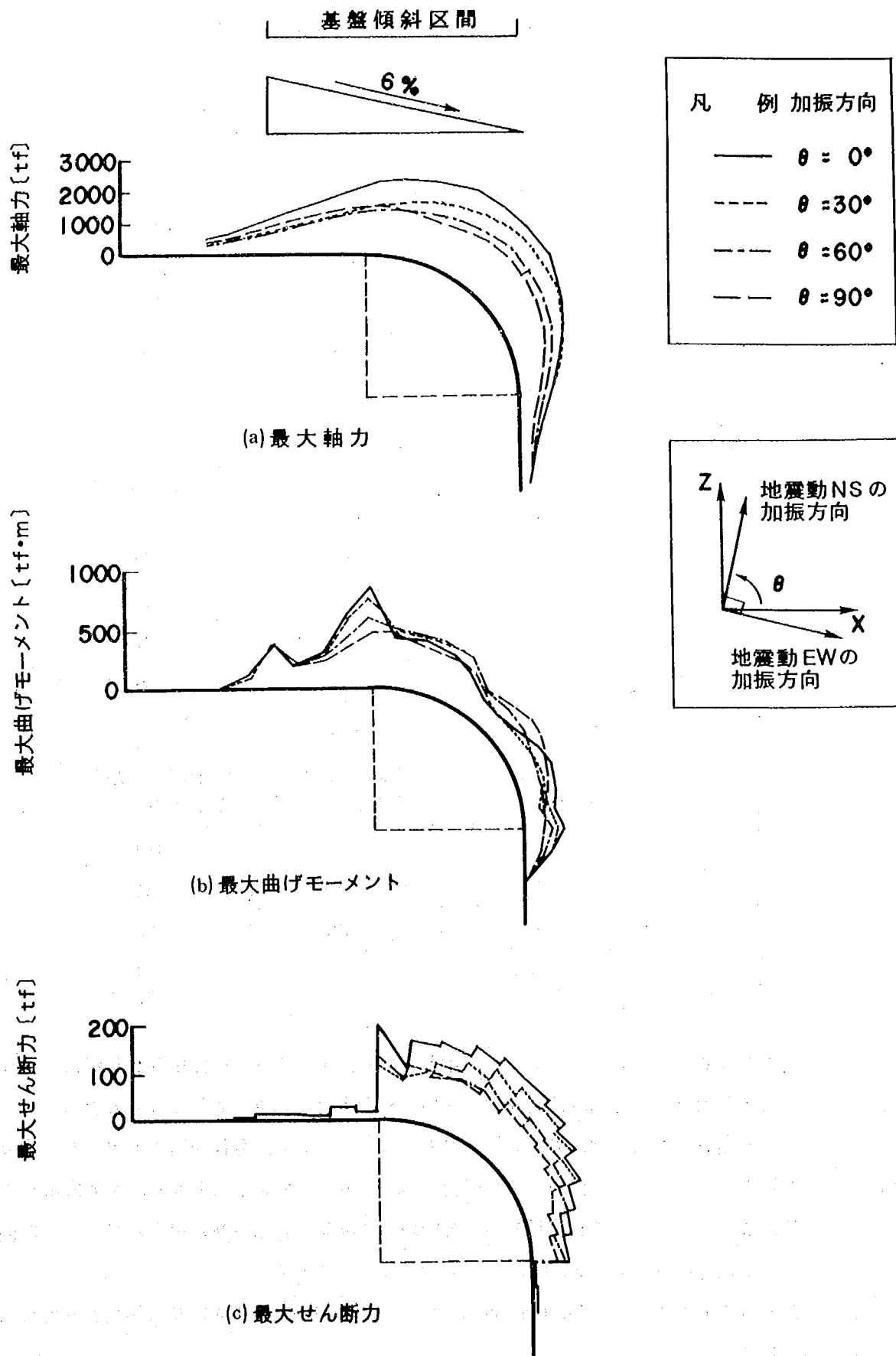


図7-4 2方向成分を同時に作用させた場合の最大断面力

軸力およびせん断力については、ほぼ曲線部の全区間にわたり、概ね加振方向が $\theta = 0^\circ$ の場合が最も大きくなっており、 $\theta = 90^\circ$ の場合が最も小さくなっている。曲げモーメントについては、最大となる加振方向は曲線部の各地点によって異なり一概に言えないが、各加振方向について最大値をとっている、トンネルの直線部と曲線部の接続部に着目すると、 $\theta = 0^\circ$ の場合が最大であり、 $\theta = 90^\circ$ の場合が最小となっている。

1 方向成分のみを作用させた場合と 2 方向成分を同時に作用させた場合とで、4 方向の加振方向のうちの最大断面力を比較すると表 7—4 のようになる。表 7—4 に示している、2 方向成分作用時の応答の 1 方向成分作用時の応答に対する割合は、地震動 NS 作用時の応答に対する割合と地震動 EW 作用時の応答に対する割合の平均値である。

表 7—4 2 方向成分を同時に作用させた場合の断面力の増加割合

	1 方向成分作用の場合		2 方向成分同時作用の場合	1 方向成分作用時に対する割合
	地震動 NS	地震動 EW		
最大軸力 (tf)	1857	1736	2706	1.51
最大曲げモーメント (tf・m)	562	607	826	1.42
最大せん断力 (tf)	142	137	190	1.36

表 7—4 に示したように、曲線部を有するシールドトンネルにおいて、2 方向の地震動を同時に作用させた場合の 1 方向成分のみを作用させた場合に対する割合は、最大軸力で 1.51、最大曲げモーメントでは 1.42、最大せん断力については 1.36 となっている。

地震動の 2 方向成分を同時に作用させた場合に発生する断面力が最大となる地点を選び、その地点における地震動 NS による発生断面力、地震動 EW による発生断面力、および 2 方向成分を同時に作用させた場合の発生断面力の時刻歴波形を描くと図 7—5 のようになる。

地震動が水平面内において有する直交する 2 方向の成分について、その一方を動的解析の入力地震動とした場合と 2 方向成分を同時に作用させた場合とで、地震時に発生する断面力を比較した。

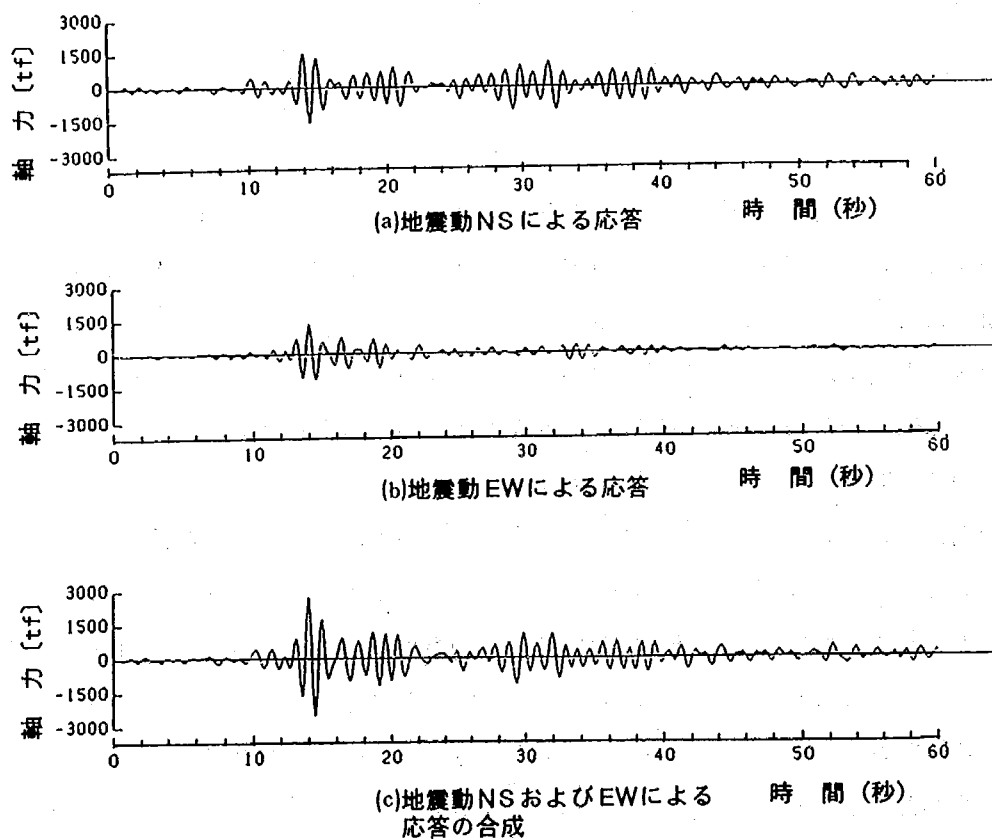
直線状シールドトンネルにおいては、軸力については、一方のみを考えた場合と 2 方向成分を考えた場合との間でほとんど違いはみられない。また、せん断力についてはもともと値そのものが小さいため特に問題はないといえる。曲げモーメントについては 2 方向成分による応答を合成することにより、一方のみの場合に比べて、約 30% 大きな値となった。曲線部を有するシールドトンネルについては、地震動の直交する 2 方向の成分を同時に作用させることにより、軸力、曲げモーメント、およびせん断力のいずれについても一方のみの応答に比べ、30~50% 大きくなった。

8 章で後述するように、シールドトンネル掘削に生じる断面応力のうち問題となるのは、二次掘削およびリング継ボルトの軸引張応力、そしてリング継ボルトのせん断応力である。軸引張応力の発生は、軸力および曲げモーメントに起因するが、曲げモーメントによる寄与分は軸引張応力全体の 1/5 程度である。

直線状シールドトンネルについては、直交成分による応答を合成しても最大軸力の大きさは変わらない

ので、仮に曲げモーメントが合成によって30%大きくなるとしても軸応力としては6%程度大きくなるだけである。このため、直線状シールドトンネルについては、地震動の直交成分による断面応力の増加は見込まなくともよいと思われる。

一方、曲線部を有するシールドトンネルについては地震動の直交成分を考慮することにより、1方向成分のみを考えた場合に比べ、軸引張応力の発生の主たる原因となる軸力が約50%大きくなり、また曲げモーメントについても約40%大きくなる。曲線部を有するシールドトンネルにおいては、地震動の直交成分それぞれによる応答が重ね合わされることによって、1方向の成分のみを考えた場合に比べ、軸引張応力が大きくなることを考慮する必要がある。また、4章で示したように曲線部では直線部に比べ、相当大きなせん断力が生じるが、地震動の2方向成分を同時に作用させるとさらに30%以上も大きくなるため十分な注意が必要である。



(a) 軸 力

図 7 - 5 発生断面力の時刻歴波形 (1)

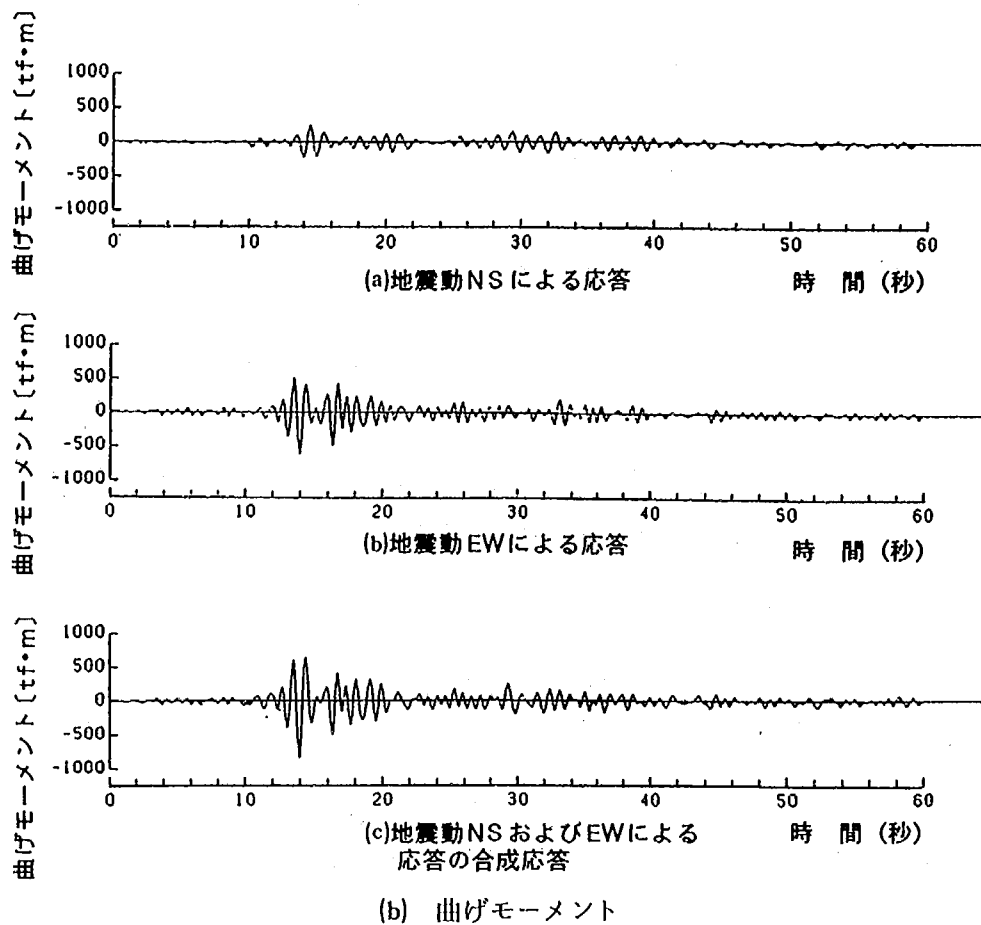


図7-5 発生断面力の時刻歴波形 (2)

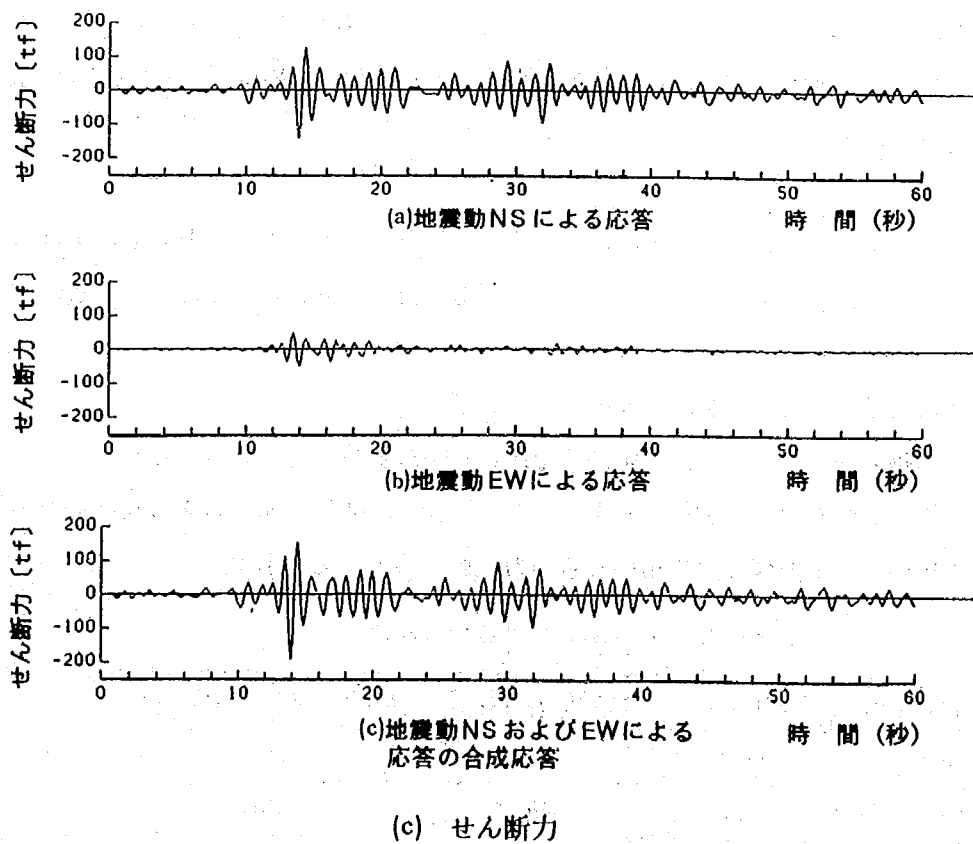


図7-5 発生断面力の時刻歴波形 (3)

8. 断面応力度の照査

5章で検討した曲率半径 $R=100\text{m}$ および $R=200\text{m}$ の2つのケースについて曲線部に生じる断面応力度の照査を行う。本検討で対象とするシールドトンネルは、セグメントおよび二次履工からなり、二次履工は無筋コンクリートである。

本検討ではセグメント、リング継手および二次履工からシールドトンネルの軸剛性、曲げ剛性を計算し、さらにトンネル履工をこれと同じ剛性を持つ一様連続な梁に置き換えている。一様連続な梁に置き換えた際のシールドトンネルの等価剛性は表8-1の通りである。

表8-1 シールドトンネル等価剛性

軸 剛 性 (tf)	9.15×10^6
曲 げ 剛 性 (tf・m)	4.07×10^7

(1) 断面応力度の計算方法

シールドトンネル履工各部に生じる断面応力度は以下のようにして求める。

① 軸力による軸応力

シールドトンネルに作用する軸力を軸剛性に応じて、一次履工、二次履工に分担する。

② 曲げモーメントによる軸応力

曲げモーメントに対して、圧縮側はセグメントと二次履工が、引張側はセグメント、リング継手および二次履工がそれぞれ抵抗するものとし、各々の剛性、中立軸から作用位置までの距離を考慮して分担する力を求める。

③ せん断応力

一次履工と二次履工がシールドトンネルに作用するせん断力をどのように分担するのは明らかでないため、一次履工および二次履工が各々全てのせん断力を負担とした場合のせん断応力を算定する。

(2) シールドトンネルに生じる応力度に及ぼす曲率半径の影響

シールドトンネルの軸方向については、引張剛性を用いた線形解析としていることから、引張応力のみを考えた。計算に用いる断面力は、加振方向を $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の4方向とした中で最大となったときの値を用いた。応力度計算に用いた断面力の値を表8-2に示す。

表8-2 曲線部における最大断面力

曲率半径 (m)	軸力 (tf)	せん断力 (tf)	曲げモーメント (tf・m)
100	1859	175	665
200	1887	75	401

表8—2に示した最大断面力から曲線部においてシールドトンネルの覆工各部に生じる断面応力度を計算すると表8—3の通りとなる。地震時に生じる断面力は軸力や曲げモーメントによる断面応力の合成となので、ここではそれぞれの成分の合成値も示している。但し、計算に用いた各断面力は発生時刻および加振方向が必ずしも同一ではない。

表8—3 シールドトンネルの覆工に生じる応力

(a) 軸応力 (引張)

曲率半径 (m)	軸応力を発生 させる断面力	セグメント応力 (kgf/cm ²)	二次覆工応力 (kgf/cm ²)	リング継ぎ ボルトの応力 (kgf/cm ²)
100	軸 力	1.9	48.8	1230.4
	曲げモーメント	0.5	12.7	326.6
	合成値	2.4	61.5	1557.0
200	軸 力	2.0	49.5	1248.9
	曲げモーメント	0.3	7.6	196.4
	合成値	2.3	57.1	1445.3

(b) せん断応力

曲率半径 (m)	セグメント応力 (kgf/cm ²)	二次覆工応力 (kgf/cm ²)	リング継ぎ ボルトの応力 (kgf/cm ²)
100	4.3	4.8	2750.3
200	1.8	2.0	1170.8

上記の表8—3より、曲率半径 $R=100\text{m}$ のケースと $R=200\text{m}$ のケースとで発生する応力度を比較すると以下の点が指摘される。

① 軸応力

セグメントに生じる軸引張応力は曲率半径 $R=100\text{m}$ のケースで 2.4kgf/cm^2 、 $R=200\text{m}$ のケースで 2.3kgf/cm^2 であり、ともにセグメントコンクリートの引張耐力を下まわっている。

二次覆工コンクリートに生じる軸引張応力度は $R=100\text{m}$ で 61.5kgf/cm^2 、 $R=200\text{m}$ で 57.1kgf/cm^2 となり、いずれも二次覆工コンクリートの引張耐力 18kgf/cm^2 を大きく上まわっている。本検討では、二次覆工は無筋コンクリートとしているので、二次覆工にはひび割れが生じることになる。

リング継ボルトに生じる引張応力度は $R=100\text{m}$ で 1557.0kgf/cm^2 、 $R=200\text{m}$ で 1445.3kgf/cm^2 であり、リング継ボルトの許容引張応力度 2400kgf/cm^2 を下まわっており、問題はない。

軸引張応力度を比較すると、曲率半径 $R=100\text{m}$ のケースでは、 $R=200\text{m}$ のケースより大きくなっているが、その差はセグメントで4%、二次覆工および継手ボルトで8%程度である。

② せん断応力

二次覆工に生じるせん断応力度は曲率半径 $R=100\text{m}$ のケースで 4.8kgf/cm^2 、 $R=200\text{m}$ で 2.0kgf/cm^2

であって、ともに許容応力度を下まわっている。

リング継ボルトに生じるせん断応力度は $R=200\text{m}$ では 1170.8kgf/cm^2 であり、許容せん断応力度 1800kgf/cm^2 を下まわっているが、 $R=100\text{m}$ では 2750.3kgf/cm^2 となり、許容せん断応力度を上まわる。

以上の応力照査の結果をまとめると、次のようになる。

- ① 曲率半径 $R=100\text{m}$ と 200m の両ケースとも、軸引張応力によって二次履工コンクリートにひび割れが発生する。
- ② 軸引張応力を比較すると、曲率半径 $R=100\text{m}$ のケースと $R=200\text{m}$ のケースでは、それほど大きな違いはない。
- ③ 曲率半径 $R=100\text{m}$ のケースにおけるせん断応力度は $R=200\text{m}$ のケースでの値の約2.3倍もなっており、 $R=200\text{m}$ のケースではリング継ぎボルトの許容せん断耐力を下まわっているが、 $R=100\text{m}$ のケースでは、許容応力度を上まわる。

9. 結 論

地下鉄シールドトンネルの曲線部について、曲率半径の大きさおよび曲線区間長（曲線部中心角）が耐震性に及ぼす影響について検討した。本解析から得られた結論をまとめると以下のようになる。

(1) 曲率半径の大きさが耐震性に及ぼす影響

- ① 曲率半径が小さくなると、せん断力及び曲げモーメントが増大する。曲率半径 $R=200\text{m}$ のケースに比べ、曲率半径 $R=100\text{m}$ のケースではせん断力は約2.3倍に、曲げモーメントは約1.7倍となった。
- ② 軸引張応力度は $R=100\text{m}$ のケースでは $R=200\text{m}$ のケースでの8%増程度であり、曲率半径の小さな曲線部を有することによる影響はそれほど大きくない。しかし、せん断応力度は約2.3倍にもなり、曲率半径が大きい場合には許容応力度以下であったリング継ボルトのせん断応力度が、曲率半径が $R=100\text{m}$ になると許容応力度を上まわることになる。

(2) 曲線区間長が耐震性に及ぼす影響

曲線区間長が長く、中心角が 90° をこえる場合でも、地下鉄の平面線形において通常想定される曲線部の曲率の範囲であれば、曲線部に生じる変位および断面力に及ぼす影響は小さい。

(3) 地震動の直交成分の影響

- ① 直線状シールドトンネルでは、耐震設計に支配的な軸力は水平2成分を同時に作用させても、いずれか一方のみを作用させた場合に比べて平均4%程度しか増加しない。同様に水平2成分を合成することによる断面力の増加率は曲げモーメントで1.33、せん断力で1.29である。一般的に、地下鉄用シールドトンネルでは曲げモーメントで断面力が決まる場合は少ないため、水平2成分の地震動を考慮することは、あまり重要ではないと考えられる。
- ② 曲線部を有するシールドトンネルでは、水平2成分を合成することによる断面力の増加率は軸力では1.51、曲げモーメントでは1.42、せん断力では1.36となる。耐震設計に支配的な軸力に対して断面力の増加率が大きいため、曲線部を有するシールドトンネルについては水平2成分の合成の影響が耐震設計上重要となる。
- ③ 上記①が従来の耐震設計において伝統的に水平2方向の地震動を独立に構造物に作用させてきたことに対する解釈になると考えられる。しかしながら、曲線部では耐震設計に支配的な軸力の増加率が大きく、このため、曲線部の耐震設計においては、水平2成分を同時に作用させることが必要である。

参 考 文 献

- 1) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究—（その7）曲線部を有する下水道シールド管渠に生じる地震力の検討—，土木研究所資料，第2920号，平成2年11月
- 2) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究—（その8）シールド管渠の地震応答に及ぼす立坑の影響—，土木研究所資料，第2815号，昭和63年2月
- 3) (株)日本道路協会：共同溝設計指針，昭和61年3月
- 4) 建設省土木研究所：新耐震設計法（案），土木研究所資料，第1185号，昭和52年3月
- 5) 荒川直士・川島一彦・相沢 興・応答スペクトル特性を調整した時刻歴応答地震解析用入力地震動波形，土木技術資料，Vol.26—7，pp.392—397，1984.7
- 6) 荒川直士・川島一彦：動的解析入力用地震動の設定法，土木研究所資料，第2120号，昭和59年3月

シールドトンネルの耐震性に関する研究
— (その9) シールドトンネル曲線部に生じる
地震力の検討—

ISSN 0386-5878
土研資料 第3007号
平成3年6月(1991)

耐震研究室 室 長 川島 一彦
研 究 員 杉田 秀樹
加納 尚史
外部研究員 中島 猛男

要 旨 近年、既設構造物の基礎等との空間的な制約から、曲線部を有するシールドトンネルの建設が進められている。シールドトンネルの曲線部では、一般の直線部と異なり、地震時に大きな断面力が生じることが懸念されるため、設計に際しては地震の影響に関する十分な検討が必要とされる。

本文は、上記の観点から、曲線部を有するシールドトンネルの合理的な耐震設計法の開発に資することを目的として、曲率半径の大きさや入力地震の直交成分がシールドトンネルの地震時挙動に及ぼす影響を地震応答解析により検討した結果を示すものである。

キーワード：シールドトンネル、耐震設計、曲線部、地震応答解析

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい。

建設省土木研究所

地震防災部・耐震研究室 行

茨城県つくば市旭一番地

No. 010

No. 010

配布先住所

配布先氏名

○

土木研究所資料 第3007号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

○