

# 土木研究所資料

## 地盤との絶縁を図ることによる 地下構造物の免震技術に関する研究

(その1) 免震工法の適用と免震効果に関するケーススタディ

平成6年7月

建設省土木研究所  
地震防災部耐震研究室

Copyright © (1994) 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。

地盤との絶縁を図ることによる  
地下構造物の免震技術に関する研究  
(その1)免震工法の適用と免震効果に関するケーススタディ

Development of Innovative Menshin Technique for Underground Structures  
-Part 1- Application of Menshin Technique to Underground Structures  
and Case Study on Menshin Effect

土木研究所

企画部 地下開発研究官 川島一彦  
(前耐震研究室長)

地震防災部耐震研究室 研究員 星隈順一  
長屋和宏

要 旨

本研究は、地下構造物の免震工法として免震材を用いて周辺地盤の変形を伝達しにくくする技術の開発を目的とする。本工法の実現には、免震材料、免震トンネルの施工法や設計法等、免震に固有な技術開発が必要となる。そこで本資料では、トンネルの免震工法開発の基礎的研究として、まず免震材料及び免震施工法に関するフィージビリティースタディを行った。さらに、地盤条件の急変部を通過するシールドトンネルを例として、免震工法を採用した場合に得られる地震力の低減効果を応答変位法により試算した。

キーワード：地下構造物、免震工法、免震材、免震効果

## 目 次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1. まえがき .....                | 1  |
| 2. 免震工法が有効と考えられる適用箇所 .....   | 2  |
| 3. シールドトンネルの免震工法に関する調査 ..... | 4  |
| 3. 1 免震材料の調査 .....           | 4  |
| 3. 2 免震トンネルの施工法 .....        | 9  |
| 4. 免震トンネルの耐震解析 .....         | 13 |
| 4. 1 解析対象としたシールドトンネル .....   | 13 |
| 4. 2 地盤条件 .....              | 14 |
| 4. 3 地震時地盤ばね定数 .....         | 16 |
| 4. 4 応答変位法による耐震解析 .....      | 18 |
| 5. 結論 .....                  | 28 |
| 参考文献 .....                   | 29 |

## 1. まえがき

地震時における地下の振動は一般に地表の振動よりも小さいため、地下は地表よりも耐震性に優れていると言われている。その一方で、都市地域においては地下空間の大深度・高密度利用化が進むにつれて、軟弱地盤や地盤条件が急変するような悪条件の箇所、他の構造物と近接した箇所にシールドトンネルが建設されたり、あるいは将来の新交通軸構想の中には、大規模地震の発生が懸念されている活断層のすぐそばを通過するような海峡横断トンネルもある。

一般に、地下構造物は地震時に生じる地盤変形に追随して動く特徴があり、断面の剛性を高めれば高めるほど、地震時の増分断面力が大きくなってしまう。したがって、耐震計算で構造物の抵抗力が不足した場合には、構造断面の補強等といった従来の耐震設計思想が必ずしも有利とは言えない場合もある。こうした場合、地下構造物に伝達される地盤変形を低減させる手法（以下「地下構造物の免震」と呼ぶ）が有効と考えられる。地下構造物の免震技術としては、以下のような原理がある<sup>1)</sup>。

①地震時の地盤の変形が地下構造物に伝わりにくくする。

②地下構造物のみかけの剛性を小さくして、地震時の地盤の変形に追随しやすくする。

これまでに、実際の沈埋トンネル、共同溝、シールドトンネルに実用化されている免震技術のほとんどは、地下構造物本体に剛性の小さい装置を取り付けることにより、構造物のみかけの剛性を小さくし、地震時の地盤の変形に追随しやすくしたものである。可撓性継手やリング継手の剛性を低減させる手法は、こうした免震技術の一例である。その一方で、地震時の地盤の変形が地下構造物に伝わりにくくする免震技術については、これから実用化が期待されているところである。

そこで、本研究では、地下構造物の免震工法として免震材を用いて周辺地盤の変形を伝達しにくくする技術の開発に重点を置くものである。本工法の実現には、免震材料、免震トンネルの施工法や設計法等、免震に固有な技術開発が必要となる。本資料では、トンネルの免震工法開発の第一歩として、まず免震材料及び免震施工法に関するフィージビリティスタディを行った。さらに、地盤条件の急変部を通過するシールドトンネルを例として、免震工法を採用した場合に得られる地震力の低減効果を応答変位法により試算した。

## 2. 免震工法が有効と考えられる適用箇所

シールドトンネルや沈埋トンネル等の地下構造物では、これまでに震災事例がないため、地震時にどのような損傷形態を示すのかについての経験的な知見がないのが現状である。しかしながら、これまでの多くの解析的な研究から、地震時に想定されるシールドトンネルの被害形態が明らかにされている。その結果を整理したものが図-2.1であり、地盤及び地形条件に関するものと構造条件に関するものに分類されている<sup>2)</sup>。

地盤及び地形条件に関しては、

- ・地震動による地盤のひずみが大きい箇所
- ・地震動により地盤のひずみが急変する箇所
- ・地震により地盤に永久的な大変形（断層や液状化）が発生する箇所

等が想定される。また、構造条件に関しては、

- ・線形が変化する箇所
- ・構造物相互が接続する箇所
- ・構造物が近接する箇所

等が想定される。

こうした考察を踏まえると、シールドトンネルでは、軟弱な地盤と硬質な地盤の境界部や地形の急変する箇所、立坑とシールドトンネルの取付部、他の地下構造物との近接部が耐震設計上注意が必要になるものと考えられる。したがって、免震工法は、このような地震力が集中しやすい箇所に適用することが有効である。免震工法の適用例を示すと図-2.2の通りである。

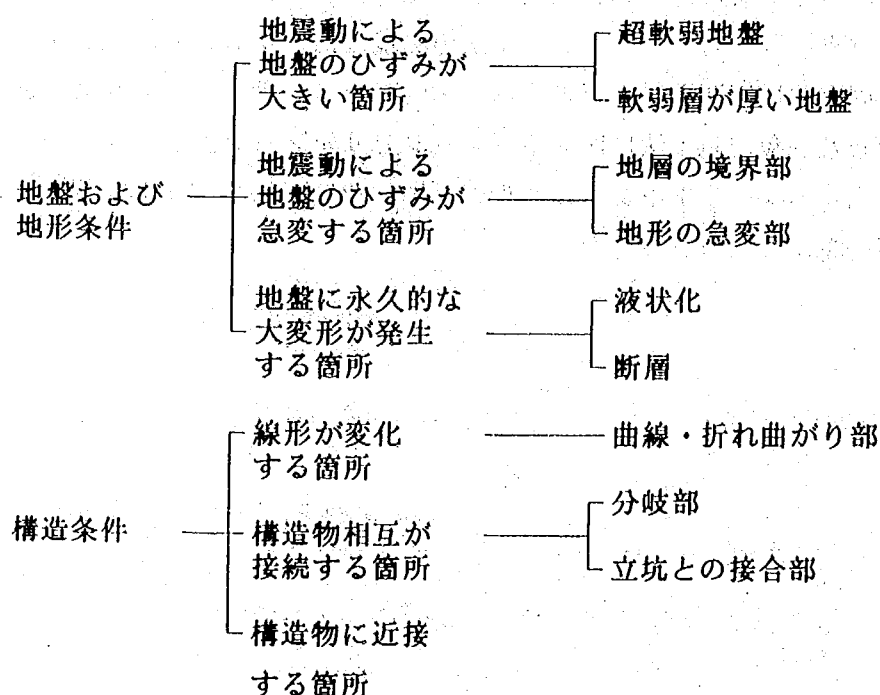
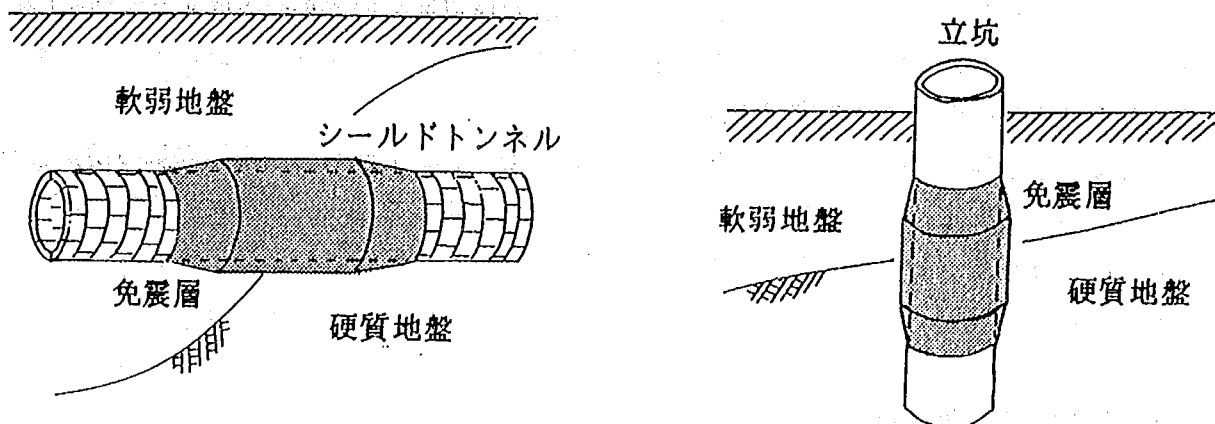
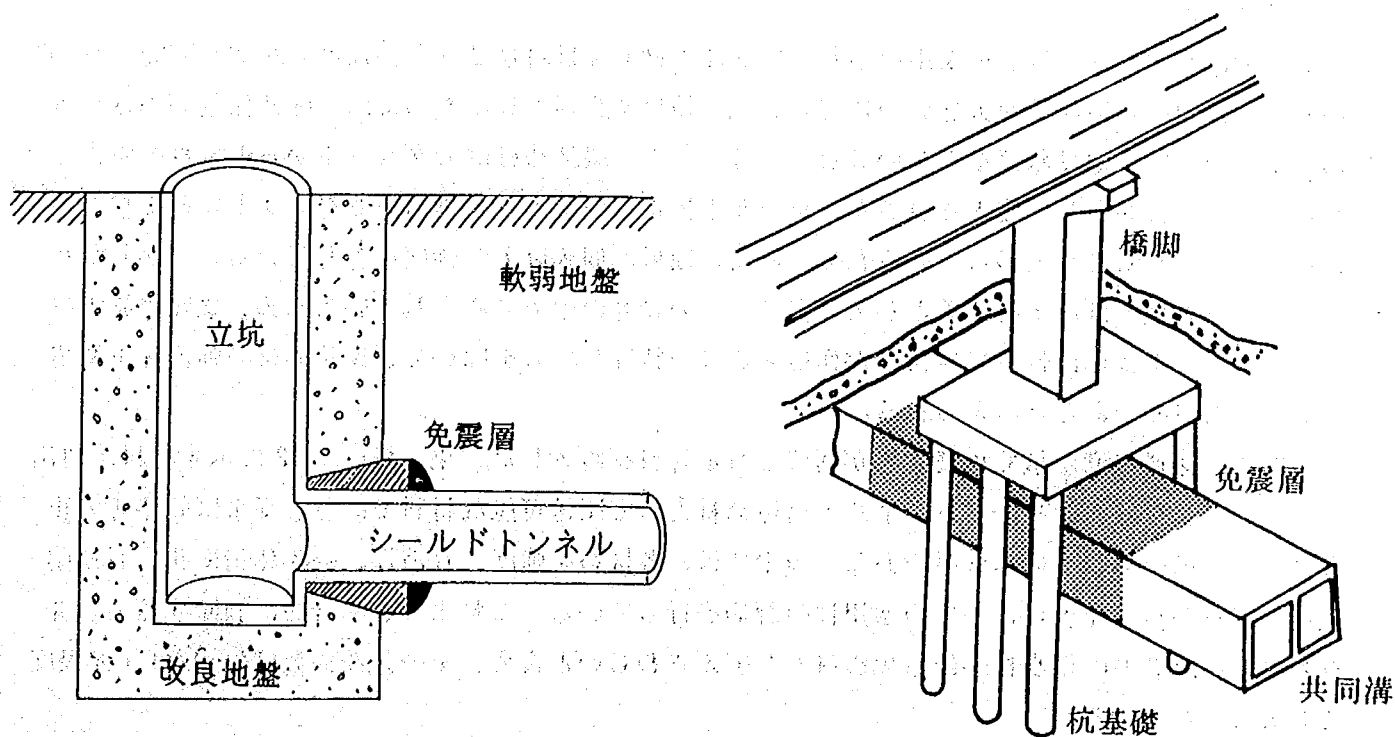


図-2.1 地震時に被害が発生しやすい箇所



(a)地盤条件の急変部への適用（地震力の低減が期待される）



(b)立坑との接続部への適用  
（地震力の低減が期待される）

(c)他の構造物と近接している箇所への適用  
（近接する構造物の耐震性に悪影響を及ぼさない）

図－2.2 免震工法の適用例

### 3. シールドトンネルの免震工法に関する調査

#### 3. 1 免震材料の調査

シールドトンネルの免震工法においては、免震材は従来裏込め材が注入されている箇所に挿入されることになる。したがって、本工法においては免震材が周辺地盤の変形を吸収すると同時に、裏込め材としての機能も兼ね備えておくことが求められる。そこで、まず既往の裏込め材を対象に免震材としての適用可能性について検討を行った。

裏込め材は、本来地山の緩みと沈下を防ぐとともに、セグメントからの漏水、漏気の防止、セグメントリングの早期安定、さらにシールド推進時のジャッキ推力を地山に円滑に伝達させることを目的として注入される。したがって、注入材には以下のような材料特性が必要とされている。

- ①材料分離を起こさない
- ②流動性を失わない
- ③注入後の容積減少が少ない
- ④水密性に富んでいる
- ⑤早期に地山の強度以上になる

図-3.1は、現在シールドトンネルの施工において裏込め材等に使用されている注入材料系を分類したものであり、表-3.1はその特性を示したものである。一方、免震材として求められる材料特性としては、上記の①~④の他に、以下の項目が考えられる。

- ⑥弾性係数が小さく変形性能に富んでいる
- ⑦耐久性がある

ここで注意すべき点は、従来用いられている注入材では材料強度（圧縮強度）が $10\sim 50\text{kgf/cm}^2$ であり、一般的に弾性係数が大きいものに対し、免震効果を発揮させるためには、弾性係数が小さく変形しやすい材料でなければならないことである。本来、裏込め材はセグメントからの漏水を防止させることを主目的として注入されるが、シールド推進時のジャッキ推力をセグメントのみでなく地盤にも伝達させる役目も担っているため、通常、地盤と同等以上の強度を有している。しかしながら、ジャッキ推力は施工時荷重としてセグメントの設計の中で考慮されているため、急曲線施工においてジャッキ操作に伴って偏荷重が作用する等の特殊な場合を除いて、裏込め材の強度を低減させることも可能であると考えられる。

そこで、材料強度が低く免震効果が期待される材料を調査した結果、表-3.2に示す材料が抽出された。これらは、シールドトンネルの裏込め材として圧送可能な材料であり、従来は管路等の止水材として用いられている材料である。表中では、各材料を強度、経済性、経年体積変化、長期耐久性の観点から、免震材としての適用性の評価を行っている。これより、総合的に判断すると、非ウレタン系溶液型の止水材が最も免震材としてふさわしいと言え、その弾性係数は $1\sim 4\text{kgf/cm}^2$ 程度であることがわかる。

その他にも、発砲スチロールやゴム材料等の適用が考えられるが、いずれもシールドマシンへの同時裏込め注入が難しく、現状のままでは適用は不可能と判定した。これらの材料系の適用に当たっては、材料の面からの新たな技術開発が必要となる。

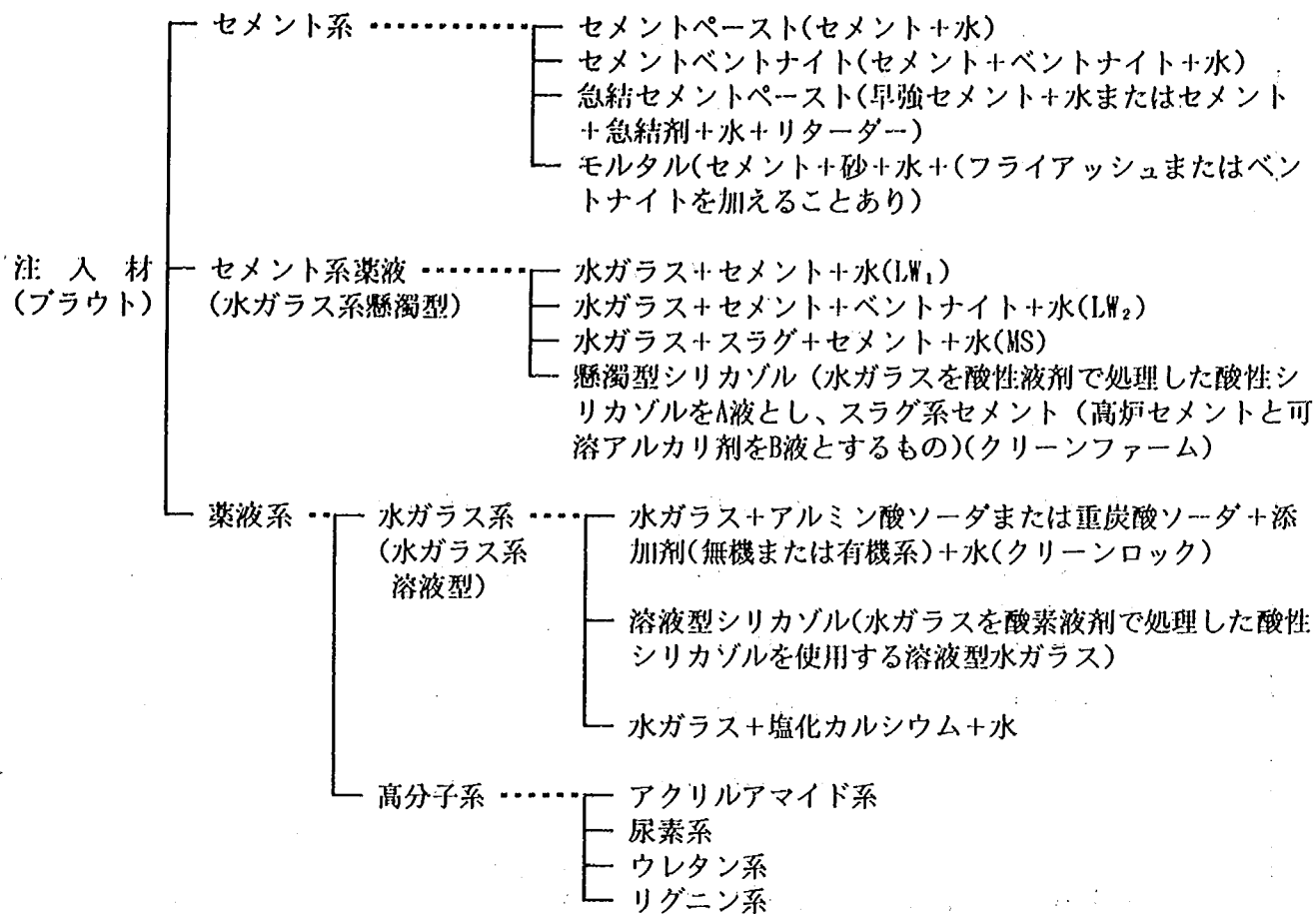


図-3.1 現状の注入材の分類

表-3.2(a) 現状の裏込め材の特性

|         | 種 別                | 1 液タイプ                                           |                                                              | 2 液タイプ                                                       |
|---------|--------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|         |                    | 砂・モルタル                                           | エアーモルタル                                                      | 急結エアーモルタル                                                    |
| 物<br>性  | 物性及び特徴             |                                                  |                                                              |                                                              |
|         | 流動性                | あまり良くない                                          | 良い                                                           | 良い                                                           |
|         | 充填性                | やや良い<br>注入圧力高くなると<br>脱水分離を起こし充<br>填率が低下          | 良い                                                           | 良い                                                           |
|         | 材料分離               | 起き易い                                             | 気泡が安定しており<br>少ない                                             | 起きにくい                                                        |
|         | ゲルタイム              | 2～3 時間                                           | 3～4 時間                                                       | 数秒～数分で調整可                                                    |
|         | 圧縮強度 $\sigma_{28}$ | 20～50kg/cm <sup>2</sup>                          | 10～30kg/cm <sup>2</sup>                                      | 20～50kg/cm <sup>2</sup>                                      |
|         | 早期強度               | 小さい                                              | 小さい                                                          | 大きい                                                          |
|         | 希釈性                | され易い                                             | され易い                                                         | 少ない                                                          |
|         | 止水性                | あまり良くない                                          | 良い                                                           | 充填性が良い場合は<br>止水性も良い                                          |
|         | シールド機への付着性         | 掘進中は少ない                                          | 掘進停止中は付着し<br>易い                                              | 掘進中・停止中にか<br>かわらず付着しやす<br>い                                  |
| 特<br>徴  | 圧送距離               | 注入台車運搬                                           | 1,200m                                                       | 1,200m                                                       |
|         | 注入時期               | 掘進と競合するため<br>注入時期が遅れる。<br>(後方注入)                 | 掘進と並行作業可能<br>であるが、テールか<br>ら漏れる場合は掘削<br>後注入する。(即時<br>または後方注入) | 掘進と並行作業可能<br>であるが、テールか<br>ら漏れる場合は掘削<br>後注入する。(即時<br>または後方注入) |
|         | 注入作業性              | 混練、輸送に人手を<br>要する。坑内に注入<br>台車を持ち込むため<br>作業性は良くない。 | 圧送できるので良い                                                    | 圧送できるので良い                                                    |
|         | 配管清掃               | 注入完了後直ちに                                         | 注入完了後直ちに                                                     | 注入完了後直ちに                                                     |
|         | 適用地盤               | 軟弱土層、湧水地盤<br>を除く                                 | 軟弱土層、湧水地盤<br>を除く                                             | 軟弱土層を除く                                                      |
|         | 経済性                | 11,000円/m <sup>3</sup>                           | 12,000円/m <sup>3</sup>                                       | 12,500円/m <sup>3</sup>                                       |
| 総 合 評 価 |                    | 経済的である。<br>強度を調整できる。<br>施工性は比較的良                 | 一般のクレーサンド<br>粒度分布は<br>粒度分 70～80%<br>砂 分 20～30%               | 2 液タイプの急結裏<br>込材ではセグメント<br>からの同時注入は困<br>難である。                |

表-3.2(b) 現状の裏込め材の特性

|        | 種 別<br>物性及び特徴      | 2液タイプ                                        |                                        |                               |
|--------|--------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
|        |                    | ケミカル・グラウト                                    | 可塑性注入材(TAC)                            | 可塑性注入材(TGS)                   |
| 物<br>性 | 流動性                | 良い                                           | 良い                                     | 良い                            |
|        | 充填性                | やや良い                                         | 良い                                     | 良い                            |
|        | 材料分離               | 起き易い                                         | 起きにくい                                  | 起きにくい                         |
|        | ゲルタイム              | 数秒～数分で調整可                                    | (モルタル可使時間は6時間)瞬間的にホモゲル化する              | (主材可使時間は25時間)瞬間的にホモゲル化する      |
|        | 圧縮強度 $\sigma_{28}$ | 10～30kg/cm <sup>2</sup>                      | 20～30kg/cm <sup>2</sup>                | 20～30kg/cm <sup>2</sup>       |
|        | 早期強度               | 大きい                                          | ホモゲル時間を調整                              | ホモゲル時間を調整                     |
|        | 希釈性                | 少ない                                          | ほとんどない                                 | ない                            |
|        | 止水性                | 充填性が良い場合は止水性も良い。                             | 良い                                     | 良い                            |
|        | シールド機への付着性         | 掘進中・停止中にかかわらず付着しやすい。                         | ホモゲル状で注入されるので付着は少ない。                   | ホモゲル状で注入されるので付着は少ない。          |
|        | 圧送距離               | 1,200m                                       | 1,000～1,500m                           | 1,500～2,000m                  |
| 特<br>徴 | 注入時期               | 掘進と並行作業可能であるが、テールから漏れる場合は掘削後注入する。(即時または後方注入) | 掘進と並行作業可能(同時・即時・後方注入)                  | 掘進と並行作業可能(同時・即時・後方注入)         |
|        | 注入作業性              | 圧送できるので良い                                    | 圧送するので良い                               | 圧送するので良い                      |
|        | 配管清掃               | 注入完了後直ちに                                     | ホモゲルが硬化するまでにミキシングパイプ内を水洗いする(ケイ酸は1日1回度) | 通常停止時にはミキシングパイプ内の硬化に注意する。     |
|        | 適用地盤               | 軟弱土層、湧水の多い砂・砂礫                               | 全土層                                    | 全土層                           |
|        | 経済性                | 33,000円/m <sup>3</sup>                       | 29,000円/m <sup>3</sup>                 | 22,000円/m <sup>3</sup>        |
|        | 総 合 評 価            | 止水効果大<br>施工費が高い。                             | 止水効果大、ホモゲルは永久構造物、早期強度大、施工費がやや高い。       | 止水効果大、ホモゲルは永久構造物、早期強度大、やや小さい。 |

表-3.2 免震材の特性

| 種 別                      | 瞬結無機材        | 非ウレタン系溶液型<br>止水材 | 親水性 <sup>※</sup> ウレタン<br>止水材      | ウレタン樹脂<br>(衝撃吸収材)  |
|--------------------------|--------------|------------------|-----------------------------------|--------------------|
| タイプ                      | 2液           | 2液               | 1液                                | 2液                 |
| 用 途                      | 地盤強度増強<br>止水 | 小口径下水管補修         | シート <sup>※</sup> 坑内止水<br>小口径下水管補修 | スポーツ用具や<br>精密機器の防振 |
| 強度(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 0.3          | 0.5              | 1.5                               | 0.09~4.8           |
| 経済性                      | ◎            | ○                | △                                 | ×                  |
| 経年体積変化                   | ×            | ○                | ○                                 | ○                  |
| 長期耐久性                    | ○            | ○                | △                                 | ○                  |
| 総合評価                     | △            | ◎                | △                                 | △                  |

### 3. 2 免震トンネルの施工法

トンネルの免震材の施工法としては、トンネル掘進時と同時に施工、掘進前に施工、掘進後に施工の3ケースが考えられる。このうち、シールドトンネルの免震工法において、最も施工が容易でかつ適切と考えられるのは、トンネル掘進と同時に免震材を施工する手法である。シールドトンネル掘進時に同時に免震材を施工する場合には、次の手法が考えられる。

①セグメントに予め免震材を取り付ける方法

②シールド施工と同時に裏込め注入する方法

このうち、①セグメントに予め免震材を取り付ける方法としては、図-3.2に示す袋注入方式や、図-3.3に示す特殊ウレタン併用方式(PREFORM工法)が適用可能と考えられる。一方、②シールド施工と同時に裏込め注入する方法としては、図-3.4に示すように免震層を注入する箇所で余堀厚を大きくする手法や、図-3.5に示すように厚さの異なるセグメントを設置することにより得られる段差に免震材を注入する手法が考えられる。いずれの施工法も、免震工法を導入することに伴って新たな技術開発(シールド掘削機の改良等)が必要な項目もあるが、実現性はかなり高いものと考えられる。以下に、各工法の概要を示しておく。

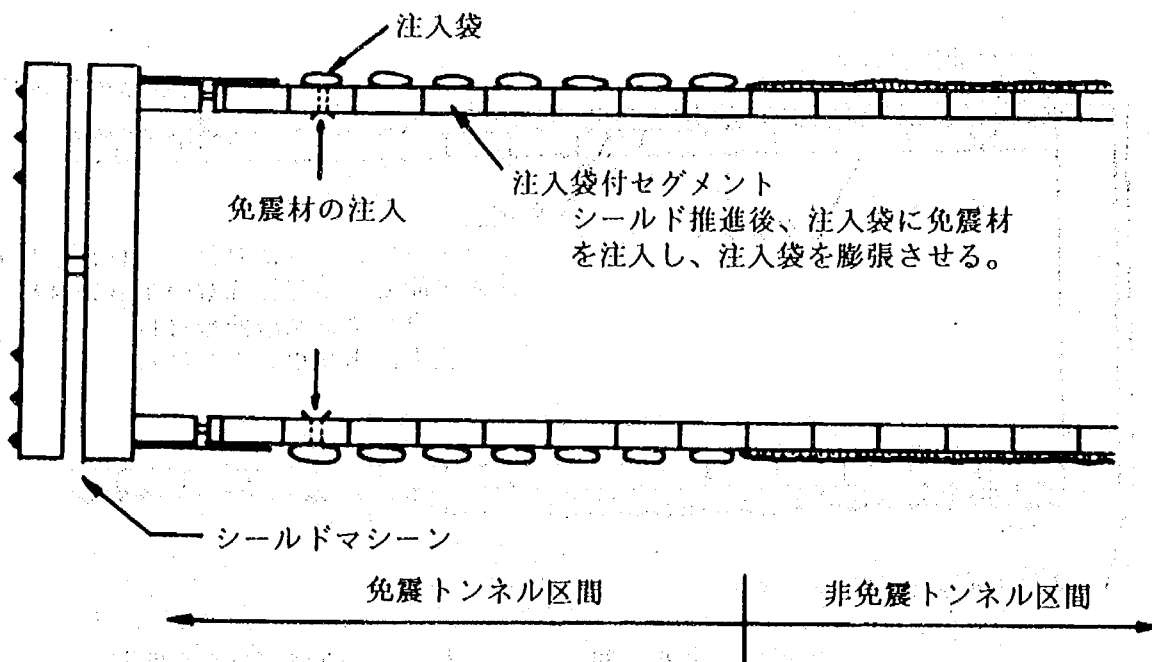


図-3.2 袋注入方式による免震工法

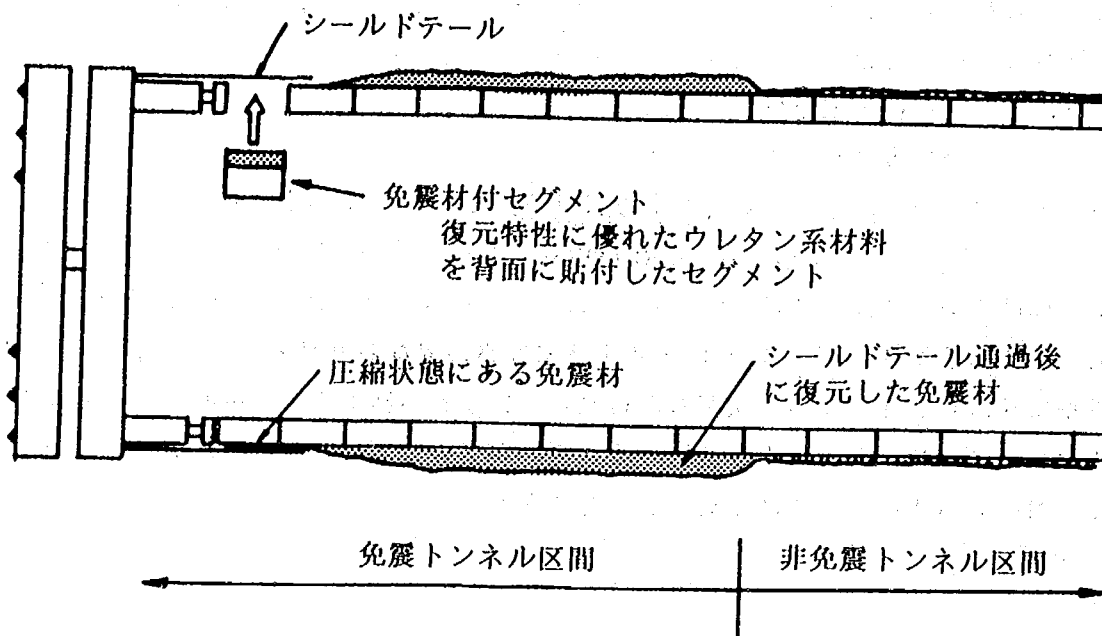


図-3.3 特殊ウレタン併用方式による免震工法

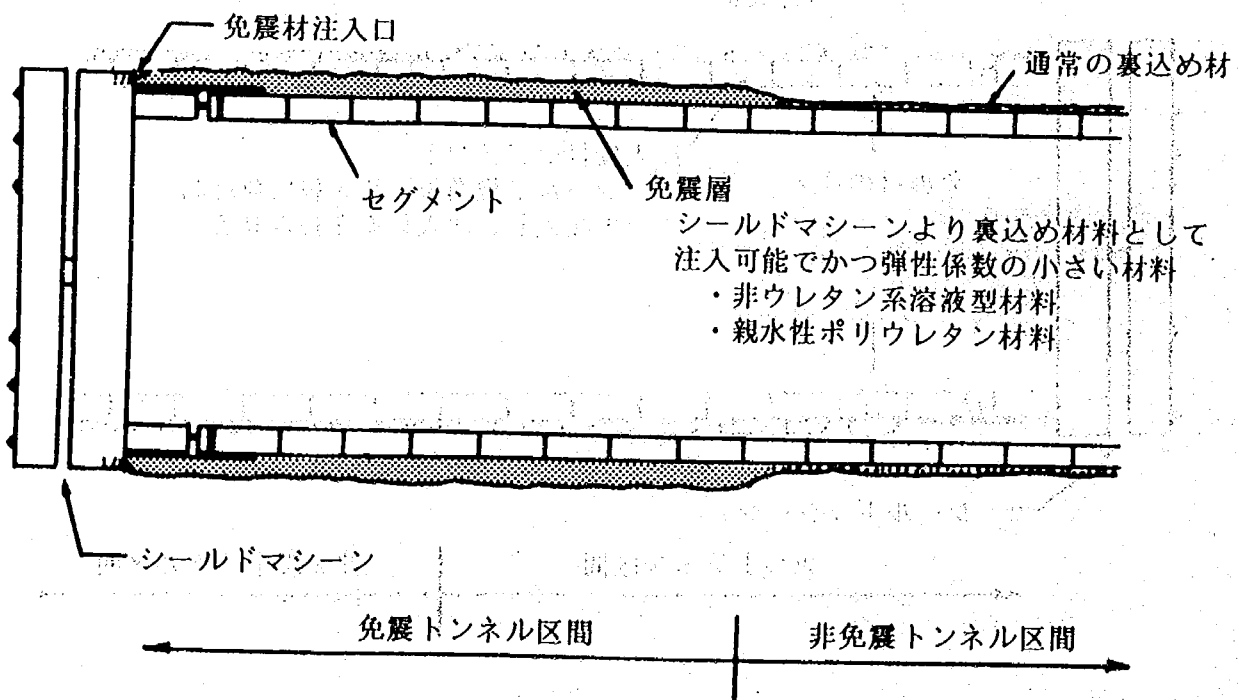
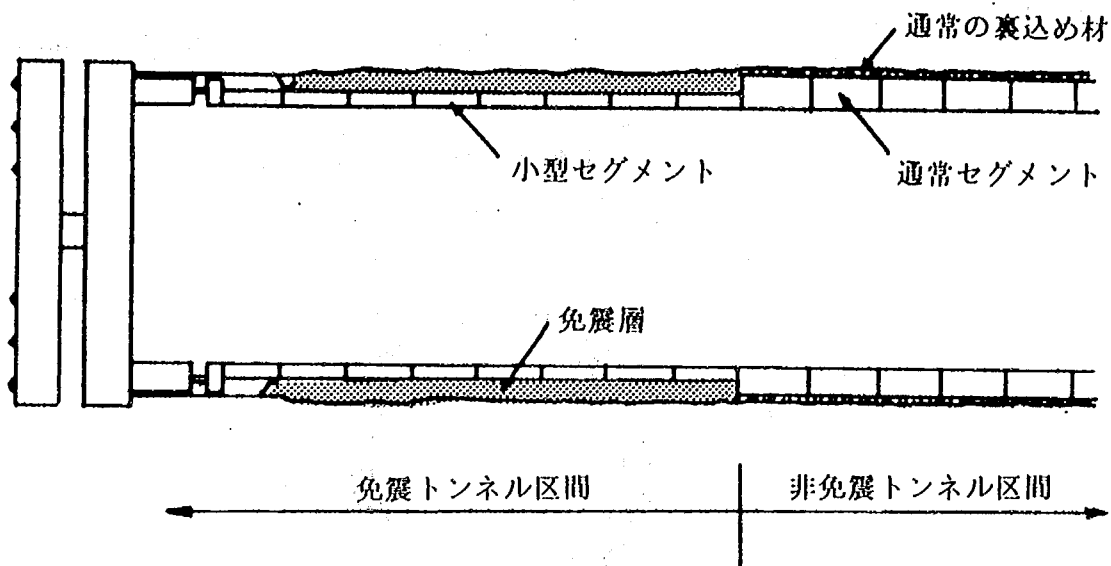


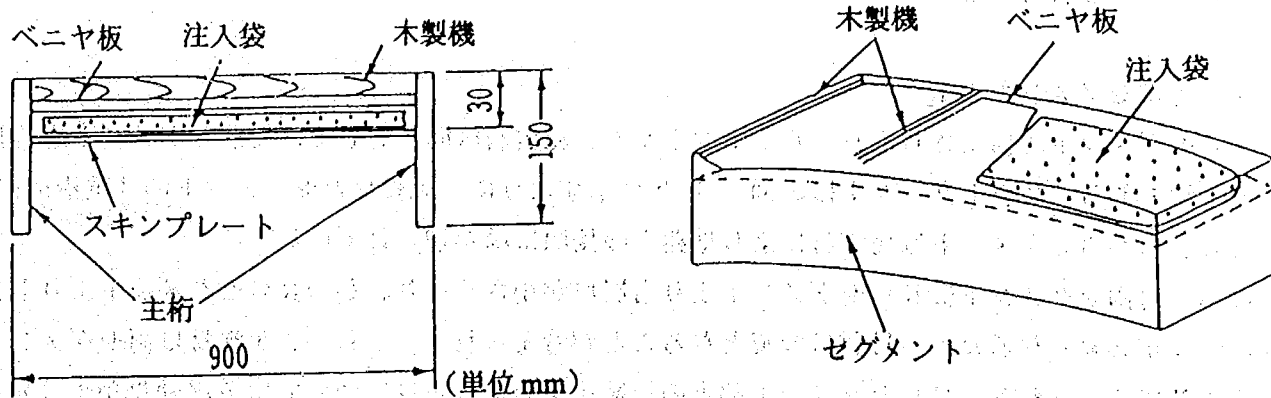
図-3.4 余堀り拡大による免震工法



図－3.5 免震セグメントによる免震工法

#### (1) 袋注入方式

袋注入方式は、図－3.6に示すように、セグメント背面にあらかじめ裏込め用注入孔と連結した注入袋を折りたたみ装着しておき、シールド推進後注入袋に免震材などを注入する方式である。注入袋注入方式は、従来建造物防護、土被りの浅い場合の地盤沈下防止等に使われている。特殊な方式であるが、地盤沈下防止に対しては有効な方法とされている。



図－3.6 注入袋付きセグメント

## (2) 特殊ウレタン併用方式 (PREFORM 工法)

PREFORM 工法は、図-3.7に示すように、セグメント工場において、ウレタンをあらかじめ接着剤にてセグメント背面に貼布しておき、ウレタン貼布のセグメントを組み立て、シールドテール通過後、テール内で圧縮状態にあったウレタンが即時に復元して免震層を形成する工法である。

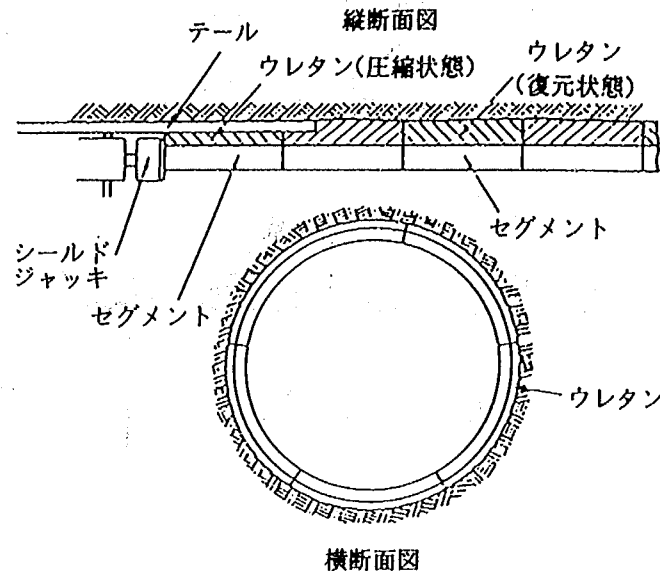


図-3.7 特殊ウレタン併用方式

## (3) 余堀り拡大工法

従来のシールド掘削機では、セグメントの外側に設ける余堀り厚が約7cm程度であり、この空間に裏込め材が注入されている。しかしながら、免震層を確保する場合、少なくとも20cm程度以上の層厚が必要と考えられる。免震層の施工法としては、シールド外径を途中で変化させる拡大シールド工法の応用が考えられる。拡大シールド工法は、現在開発の途上であるが、技術的問題点が多くまだ実用化には至っていない。

他に考えられる工法としては、シールド掘削機の改良により余堀り厚を掘削途中で拡大させる手法がある。この手法では、シールドテールの強度を向上させる必要があるが、将来的に実現性は高いものと考えられている。

## (4) 免震セグメント工法

RCセグメントで構築されるシールドトンネルで、免震層区間に対しては免震セグメントを適用する工法である。免震セグメントは、図-3.5に示すように、免震材とセグメントの2重構造になっており、内側のセグメントは免震材により地盤との接触は縁が切られている。

なお、内側セグメントはRCセグメントよりも層厚が小さくなり、かつRCセグメントよりも大きな強度が必要となるため、材質は鋼製となることが考えられる。そして、免震材は両セグメントの段差部に注入される。RCセグメント部との連結箇所の構造細目については免震効果が十分発揮できるように、別途検討が必要となる。

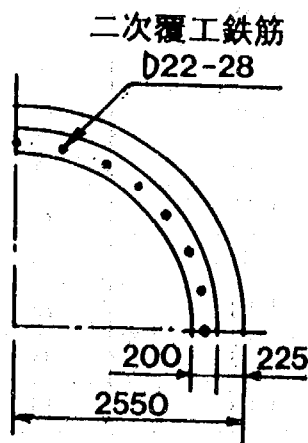
## 4. 免震トンネルの耐震解析

### 4. 1 解析対象としたシールドトンネル

解析対象としたシールドトンネルの諸元を表－4. 1 及び図－4. 1 に示す。トンネル外径は5.1mであり、共同溝程度のシールドトンネルを想定したものである。また、二次覆工厚は20cmであり、「大規模地下構造物の耐震設計ガイドライン(案)<sup>3)</sup>」に規定される最小鉄筋量が配筋されている。

表－4. 1 シールドトンネルの構造諸元

|                                      |                    |
|--------------------------------------|--------------------|
| 一次覆工セグメント外径(mm)                      | 5,100              |
| 一次覆工セグメント厚(mm)                       | 225                |
| 一次覆工セグメント分割数                         | 6                  |
| 一次覆工セグメント幅(mm)                       | 1,000              |
| 一次覆工セグメントヤング率(kgf/cm <sup>2</sup> )  | $3.75 \times 10^5$ |
| 二次覆工コンクリート厚(mm)                      | 200                |
| 二次覆工コンクリート設計強度(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 210                |
| 二次覆工コンクリートヤング率(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $2.35 \times 10^6$ |
| 二次覆工鉄筋材質                             | SD345              |
| 二次覆工鉄筋量                              | 28-D22             |
| トンネル仕上がり内径(mm)                       | 4,250              |



図－4. 1 解析対象としたシールドトンネル

#### 4. 2 地盤条件

解析に用いた地盤条件及び土質定数を図-4.2、表-4.2に示す。解析対象区間は1600mであり、トンネル軸線の深度は地盤面から21mである。また、シールドトンネルは解析区間のほぼ中間地点で沖積層と洪積層の境界点を通過している。地下水位は地表面位置にあり、表層部分は軟弱な沖積地盤が幅広く堆積し、平均N値が50以上の砂礫層(Dg層)の上面まで約60m程度である。なお、液状化の判定照査の対象となる層はない。耐震設計上の基盤面は、N値が50以上の洪積層である砂礫層(Dg層)の上面とした。

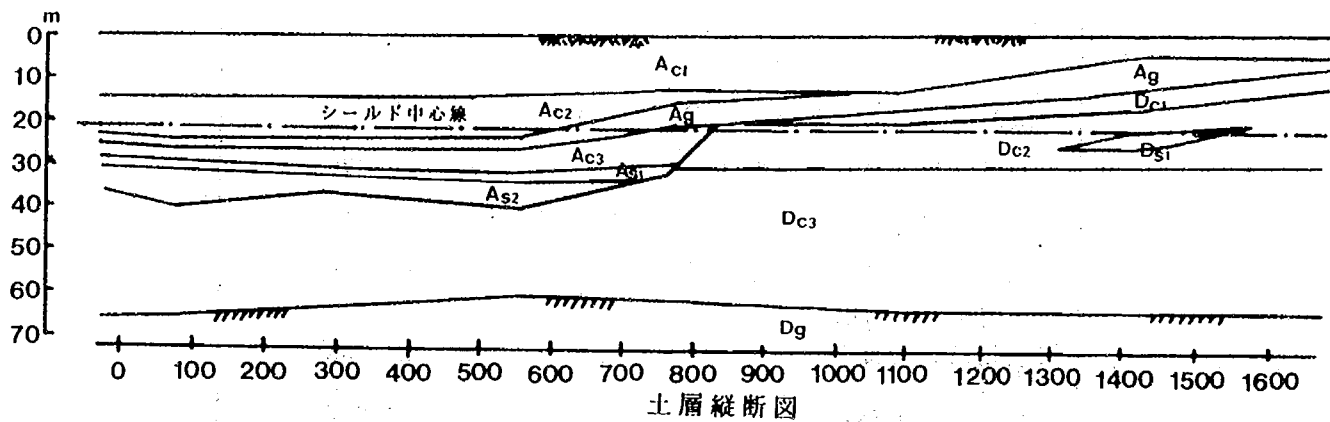


図-4.2 解析に用いた地盤構成図

表-4.2 土質定数一覧

| 土 質 区 分     |          | 土質記号           | 土粒子の単位体積重量<br>$\gamma_t(t/m^3)$ | 平均N値 | せん断弾性波速度<br>$V_{s0}(m/sec)$ | 備 考                        |
|-------------|----------|----------------|---------------------------------|------|-----------------------------|----------------------------|
| 沖<br>積<br>層 | 沖積第1粘性土層 | $\Lambda_{c1}$ | 1.58                            | 1    | 100                         | $V_{s0}=100 \cdot N^{1/3}$ |
|             | “ 第2 “   | $\Lambda_{c2}$ | 1.63                            | 2    | 126                         | “ $=100 \cdot N^{1/3}$     |
|             | “ 砂礫層    | $\Lambda_g$    | 1.90                            | 18   | 210                         | “ $=80 \cdot N^{1/3}$      |
|             | “ 第3粘性土層 | $\Lambda_{c3}$ | 1.69                            | 4    | 159                         | “ $=100 \cdot N^{1/3}$     |
|             | “ 第1砂質土層 | $\Lambda_{s1}$ | 1.87                            | 12   | 183                         | “ $=80 \cdot N^{1/3}$      |
|             | “ 第2 “   | $\Lambda_{s2}$ | 1.88                            | 13   | 188                         | “ $=80 \cdot N^{1/3}$      |
| 沖<br>積<br>層 | 沖積第1粘性土層 | $D_{c1}$       | 1.59                            | 12   | 229                         | “ $=100 \cdot N^{1/3}$     |
|             | “ 第1砂質土層 | $D_{s1}$       | 1.86                            | 34   | 259                         | “ $=80 \cdot N^{1/3}$      |
|             | “ 第2粘性土層 | $D_{c2}$       | 1.68                            | 14   | 241                         | “ $=100 \cdot N^{1/3}$     |
|             | “ 第3 “   | $D_{c3}$       | 1.69                            | 20   | 271                         | “ $=100 \cdot N^{1/3}$     |
|             | “ 砂礫層    | $D_g$          | 2.10                            | > 50 | ( $V_{s0}=350$ )            | 東京礫層(基盤)                   |

地盤種別は、大規模地下構造物の耐震設計ガイドライン(案)に規定される判定を行った結果、Ⅲ種地盤となった。表層地盤の固有周期と地盤の特性値の分布を示すと、図-4.3の通りである。

解析ケースは、免震層を設けない場合、免震層の層厚をトンネル外径の0.01, 0.1, 1.0倍とした場合の4ケースとした。なお免震層は、地盤条件の急変点付近から洪積層側へ100m(トンネル延長800~900m)の区間に設定した。

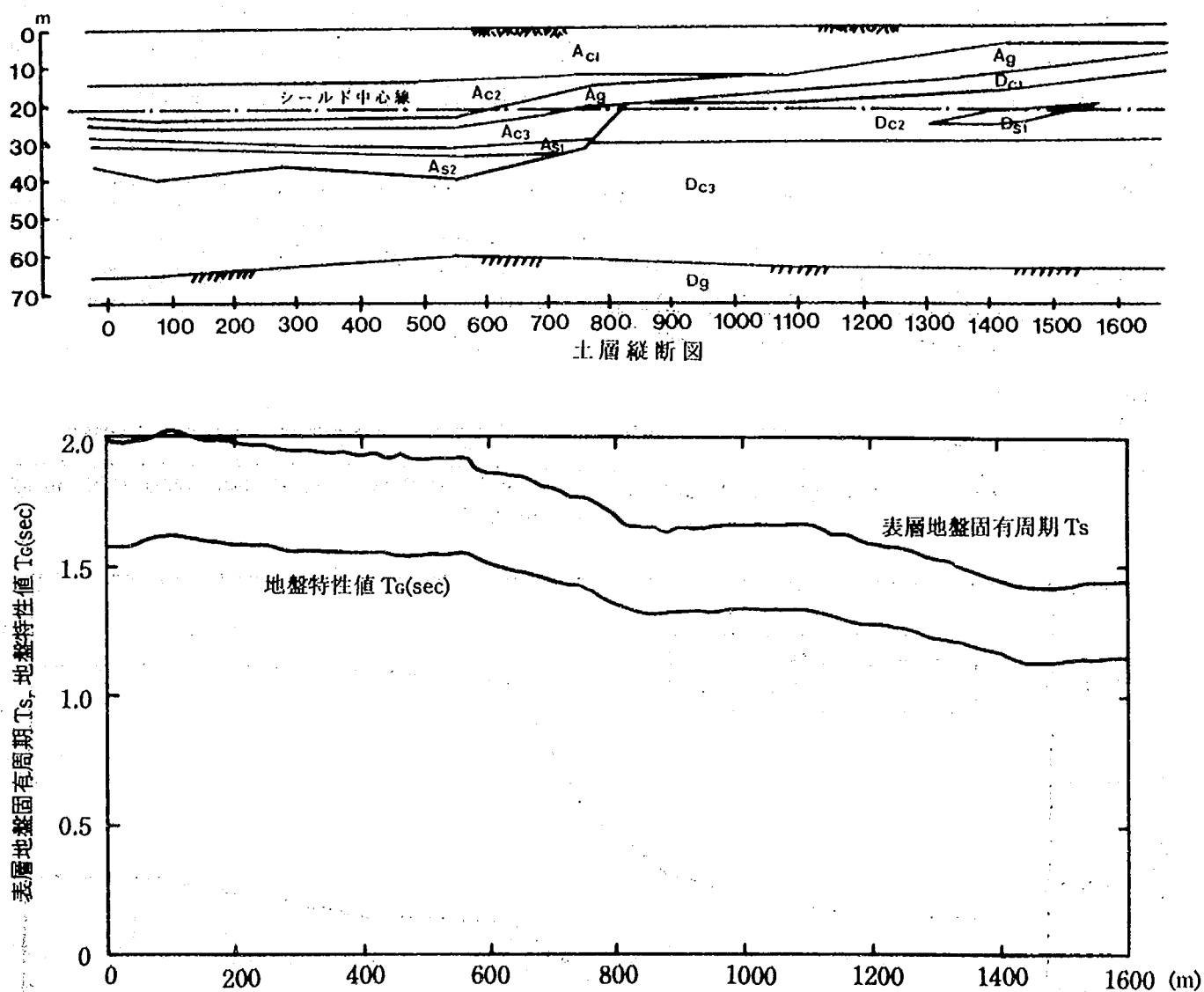


図-4.3 地盤の固有周期の分布図

#### 4. 3 地震時地盤ばね定数

トンネル軸方向及び軸直角方向の地震時地盤ばね定数は、静的な有限要素法により、単位の強制変位をトンネル構造体に作用させ、その反力より算定した。ここで、トンネル構造体は剛体と仮定し、トンネル軸方向には2次元の平面有限要素モデル、トンネル軸直角方向には3次元の立体有限要素法モデルを用いた。地震時地盤ばね定数の解析は、地盤条件の変化を適切に耐震解析に反映できるように、トンネル延長で300, 600, 720, 840, 1100, 1400mの6地点で行った。また、免震層設定区間での地震時地盤ばね係数は、トンネル延長840mの地点を対象として解析した。その際、免震材の弾性係数は前章での材料調査の結果を基に $5\text{kgf/cm}^2$ と仮定した。その結果、トンネル周辺の地盤( $E_g=1773\text{kgf/cm}^2$ )との弾性係数比は約0.003となった。

地震時地盤ばね定数の解析結果を図-4.4及び表-4.3に示す。また、図-4.5は、免震層厚と地震時地盤ばね定数の低減率の関係を示したものである。これより、本解析条件では、免震層厚をトンネル外径の0.01倍(5.1cm)に設定すると、地震時地盤ばね定数は非免震の場合の約1/10まで低減し、免震層厚を大きく設定するほど地震時ばね定数が対数的に低減していくことがわかる。

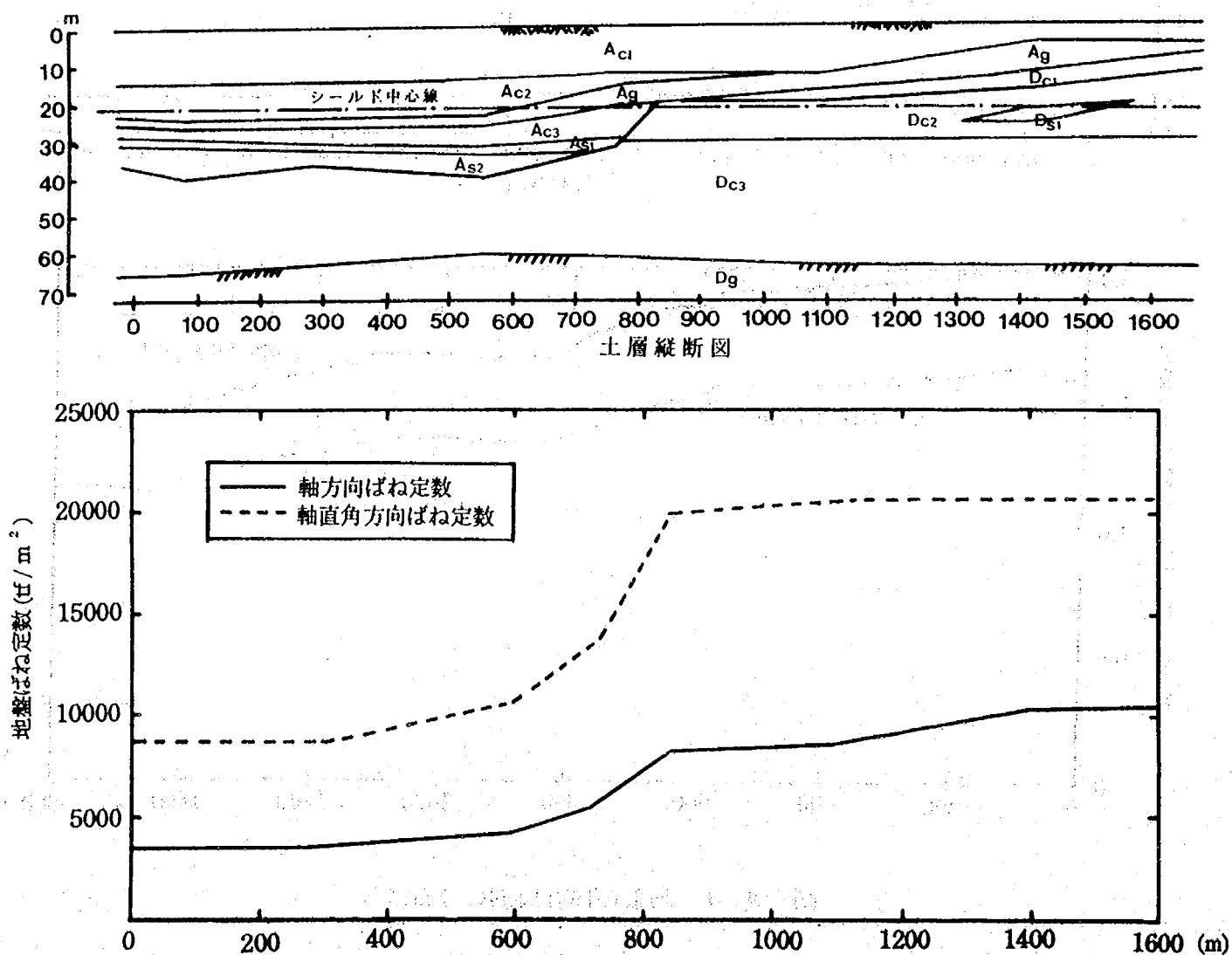


図-4.4 地盤ばね定数のトンネル軸方向分布

表-4.3 免震層を考慮した地盤ばね定数の解析結果

| 解析方向  | トンネル外径<br>D (mm) | 免震層の厚さ<br>t (mm) | 免震層比率<br>t / D | 地盤定数<br>K (tf/m <sup>2</sup> ) | 地盤定数比率<br>(K / K <sub>o</sub> ) |
|-------|------------------|------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 軸方向   | 5,100            | 0                | 0              | 8474                           | = 1.0                           |
|       | 5,100            | 51               | 0.01           | 872                            | ≒ 0.1                           |
|       | 5,100            | 510              | 0.1            | 79                             | ≒ 0.01                          |
|       | 5,100            | 5,100            | 1.0            | 6                              | ≒ 0.001                         |
| 軸直角方向 | 5,100            | 0                | 0              | 20032                          | = 1.0                           |
|       | 5,100            | 51               | 0.01           | 2404                           | ≒ 0.1                           |
|       | 5,100            | 510              | 0.1            | 250                            | ≒ 0.01                          |
|       | 5,100            | 5,100            | 1.0            | 25                             | ≒ 0.001                         |

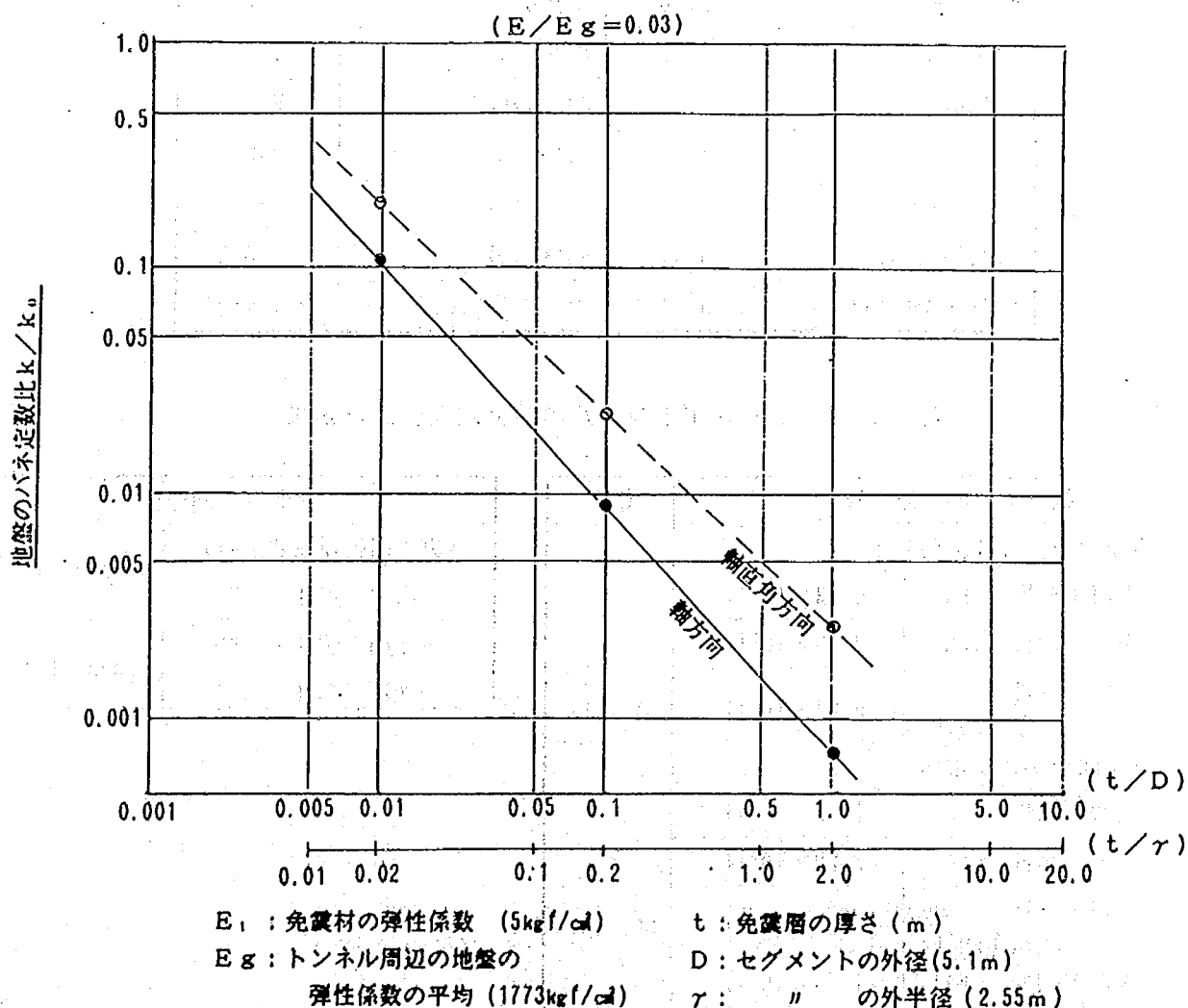


図-4.5 免震層厚と地盤ばね定数比の関係

#### 4. 4 応答変位法による耐震解析

##### (1) トンネル本体の等価剛性の評価

シールドトンネルの覆工剛性は、一次覆工と二次覆工の剛性を並列ばねとしてモデル化して算出した。ここで、一次覆工の剛性評価は、大規模地下構造物の耐震設計法ガイドライン(案)に準拠して行ったが、リング継手の剛性については、継手面板金具の曲げ剛性から算出する手法を採用した。また、二次覆工の剛性評価については、二次覆工にコンクリートの引張強度以上の鉄筋が配筋されており、地震時には損傷が一箇所に集中せず分散されることから、コンクリート断面を無視した鉄筋のみの引張剛性でモデル化することとした。表-4.4は、一次覆工の構造諸元を示したものであり、算定されたシールドトンネルの等価剛性をまとめる表-4.5に示すとおりである。

表-4.4 一次覆工の構造諸元

| コンクリートセグメント                     |                    | リング継ぎボルト                        |                   |
|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------|
| 直径(mm)                          | 5100               | 本数n                             | 21                |
| 内径(mm)                          | 4650               | ボルトピッチ(mm)                      | 714               |
| 分割数                             | 6                  | ねじの呼び                           | M24               |
| 幅 $l_s$ (mm)                    | 1000               | 有効断面積(mm <sup>2</sup> )         | 353               |
| 厚さt(mm)                         | 225                | 首下長さ(mm)                        | 75                |
| 断面積 $A_s$ (m <sup>2</sup> )     | 3.45               | 強度区分                            | 10.9              |
| ヤング率 $E_s$ (tf/m <sup>2</sup> ) | $3.75 \times 10^6$ | ヤング率 $E_b$ (tf/m <sup>2</sup> ) | $2.1 \times 10^7$ |

表-4.5 シールドトンネルの等価剛性の計算結果

| 軸 方 向 剛 性               |                    |                               | 備考            |
|-------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------|
| 引<br><br>張<br><br><br>時 | (継手面板弾性変形時)        |                               |               |
|                         | 一次覆工剛性 : $EA^1$    | $6.73 \times 10^5 \text{ tf}$ |               |
|                         | 二次覆工剛性 : $EA^2$    | $2.28 \times 10^6 \text{ tf}$ |               |
|                         | 一次覆工剛性<br>+ 二次覆工剛性 | $9.01 \times 10^5 \text{ tf}$ | $EA_1 + EA_2$ |
|                         | (継手面板塑性変形時)        |                               |               |
|                         | 一次覆工剛性 : $EA^1$    | $1.75 \times 10^5 \text{ tf}$ |               |
|                         | 二次覆工剛性 : $EA^2$    | $2.28 \times 10^6 \text{ tf}$ |               |
|                         | 一次覆工剛性<br>+ 二次覆工剛性 | $4.03 \times 10^5 \text{ tf}$ | $EA_1 + EA_2$ |
| 圧<br><br>縮<br><br>時     | 一次覆工剛性 : $EA^1$    | $1.29 \times 10^7 \text{ tf}$ |               |
|                         | 二次覆工剛性 : $EA^2$    | $6.57 \times 10^6 \text{ tf}$ |               |
|                         | 一次覆工剛性<br>+ 二次覆工剛性 | $1.95 \times 10^7 \text{ tf}$ | $EA_1 + EA_2$ |

| 曲げ方向剛性      |                                    |
|-------------|------------------------------------|
| (継手面板弾性変形時) | $4.795 \times 10^6 \text{ tf-m}^2$ |
| 一次覆工剛性 : EI |                                    |
| (継手面板塑性変形時) | $1.425 \times 10^6 \text{ tf-m}^2$ |
| 一次覆工剛性 : EI |                                    |

## (2) 地盤条件の変化部に対する解析法

応答変位法による解析は、一般的には表層地盤が一様な場合にトンネル本体に生じる地震時増分断面力を算定するものであり、地層構成が変化する箇所では、地震時増分断面力を適切に評価できない。そこで、地盤条件の変化の影響を応答変位法による解析に考慮するために、地盤間に生じる地震時水平変位の相対差に相当する変位を強制変位として地盤ばねを介してトンネル本体に作用させることとした。ここで、地震時水平地盤変位は、大規模地下構造物の耐震設計法ガイドライン(案)に準拠して次式により算定した。

$$u(z) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_u \cdot T_s \cdot \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (1)$$

$$S_u = c_s \cdot S_{u0} \quad (2)$$

$$T_s = 1.25 \cdot T_G \quad (3)$$

ここに、 $u(z)$  : 地表面から深さ  $z$  (m)における地震時水平地盤変位(m)

$z$  : 地表面からの深さ(m)

$S_u$  : 基盤面における速度応答スペクトル(m/sec)

$S_{u0}$  : 基盤面における標準速度応答スペクトル(m/sec)

$c_s$  : 地域別補正係数

$T_s$  : 表層地盤の固有周期(sec)

$T_G$  : 地盤の特性値(sec)

図-4.6は、洪積地盤の1460m地点を基準として算定される地震時水平変位の相対変位分布を示したものである。これより、地盤条件の変化するトンネル延長800m付近の地点から、地盤間に生じる相対変位が大きくなることがわかる。

## (3) 解析結果

図-4.7及び4.8は、シールドトンネル本体に生じる地震時増分軸力及び曲げモーメントの分布を、通常の場合と免震層を設定した場合とで比較して示したものである。免震層の設定の有無に関わらず、断面力は地盤条件の変化点付近で最大値を示しているが、免震層を設けることにより最大断面力がピークカットされ、耐震設計上有利な断面力分布になることがわかる。

免震工法による断面力の低減効率をまとめると表-4.6の通りであり、地震時地盤ばね定数比と断面力の低減効率の関係は図-4.9に示すようになる。本解析条件下では、免震工法を採用することにより、地盤条件の変化点に生じる断面力が、軸力で約60%、曲げモーメントで約75%低減できることがわかる。ただし、地震時地盤ばね定数比が0.001の場合の曲げモーメントの低減効率は、それが0.01の場合よりも悪くなっている。これは、地震時地盤ばね定数をあまりに小さく設定すると、最大断面力の発生位置が地盤条件の変化点から洪積層と免震層の境界点へと移行するためである。したがって、免震効果を効率的に発揮させるためには、免震層厚を適切に設定することが重要と言える。

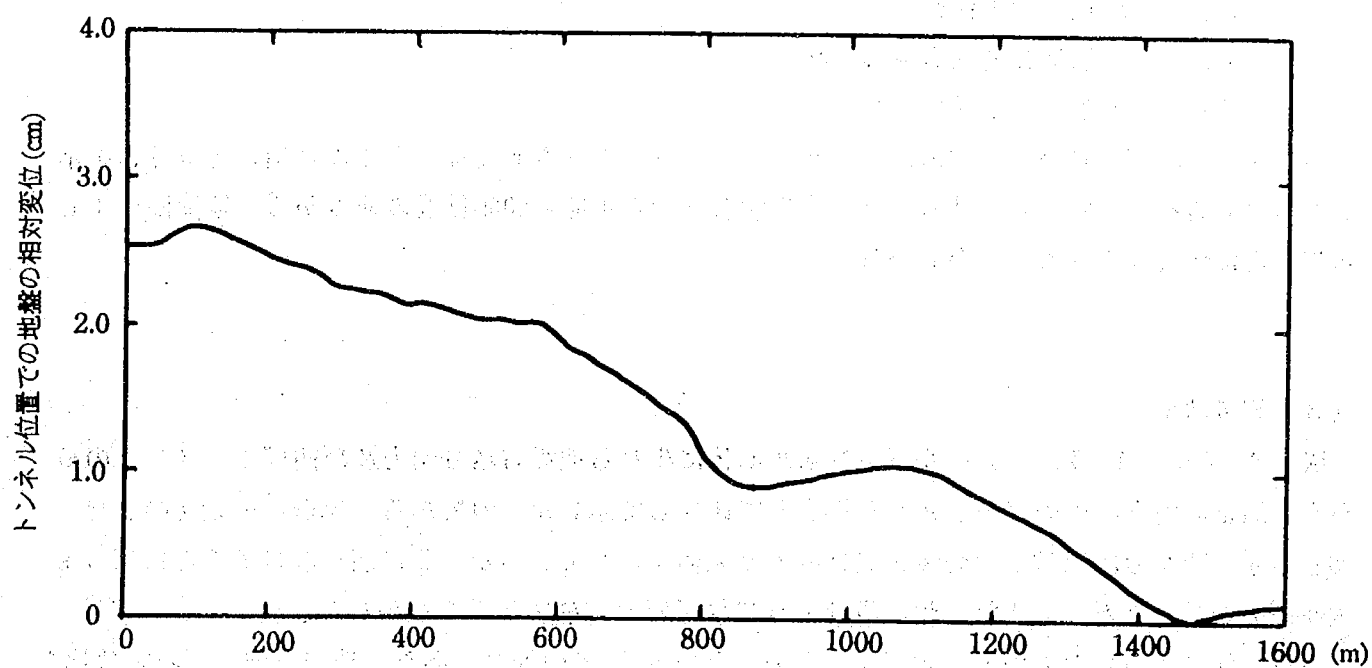
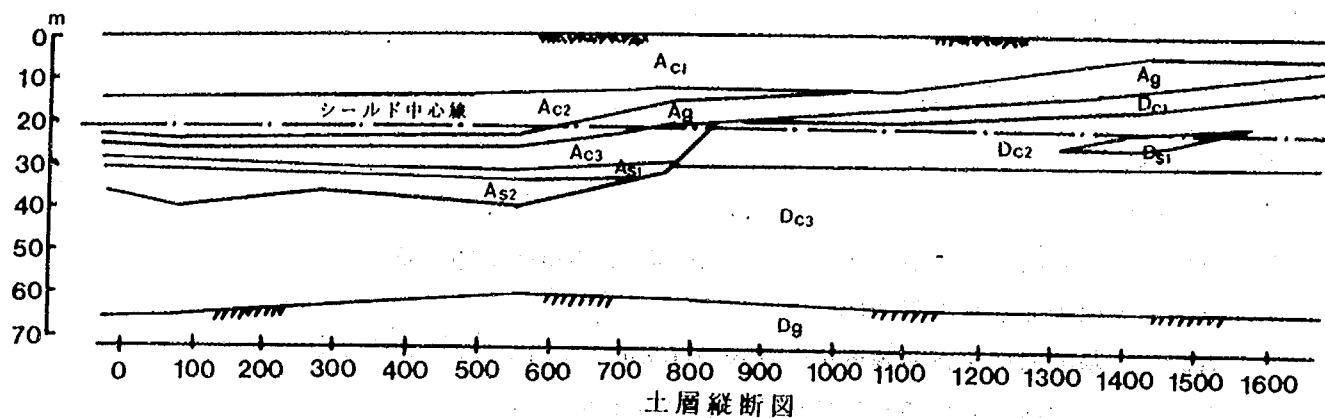


図-4.6 地震時水平変位の相対変位分布

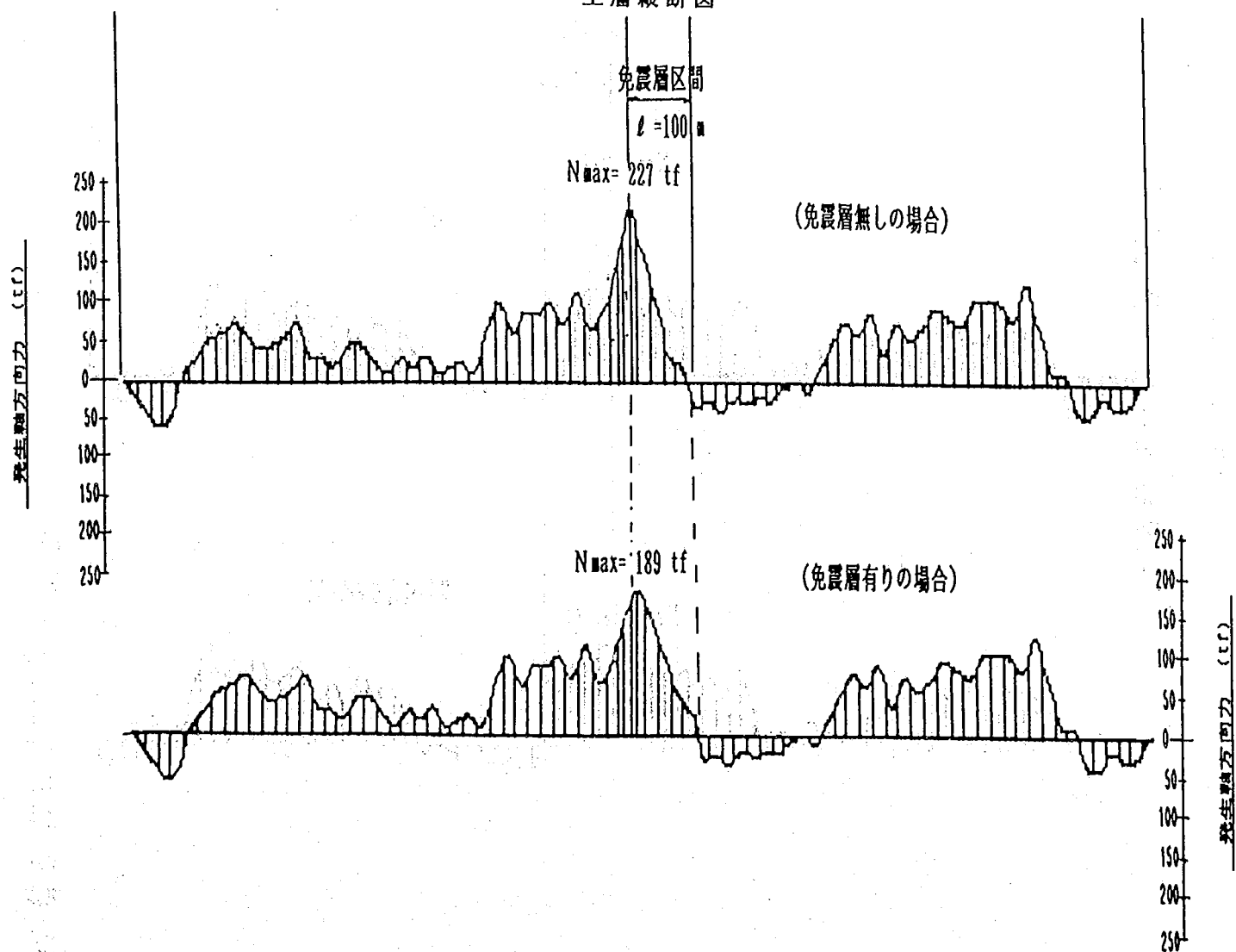
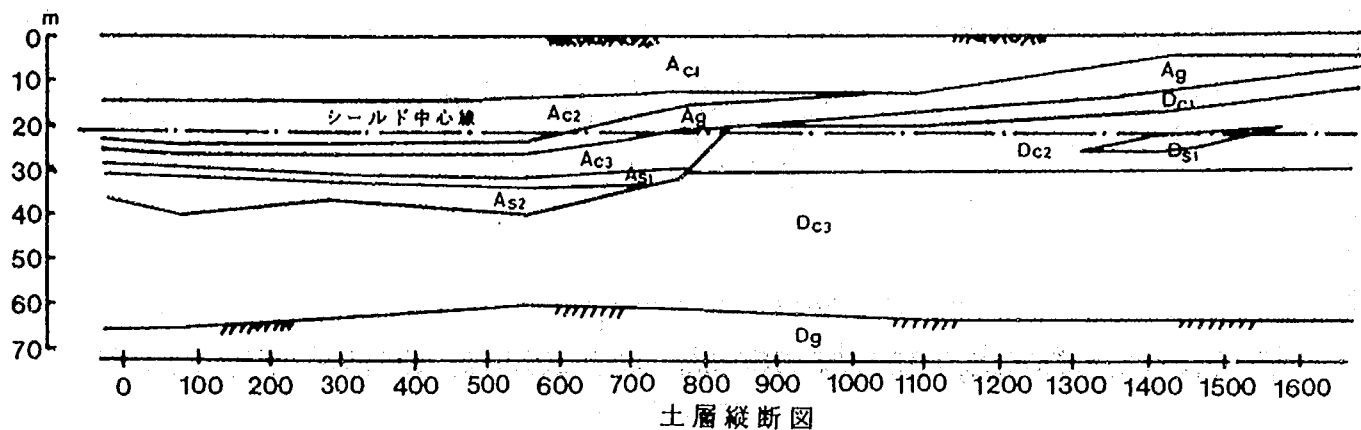
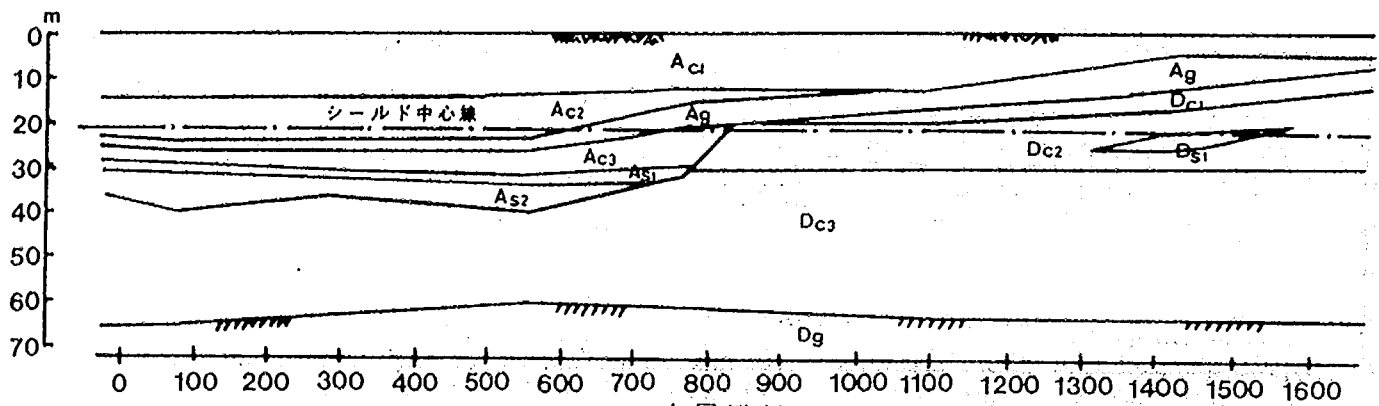


図-4.7(a) 地震時増分軸力の分布図 (免震層厚51mm)



土層縦断面図

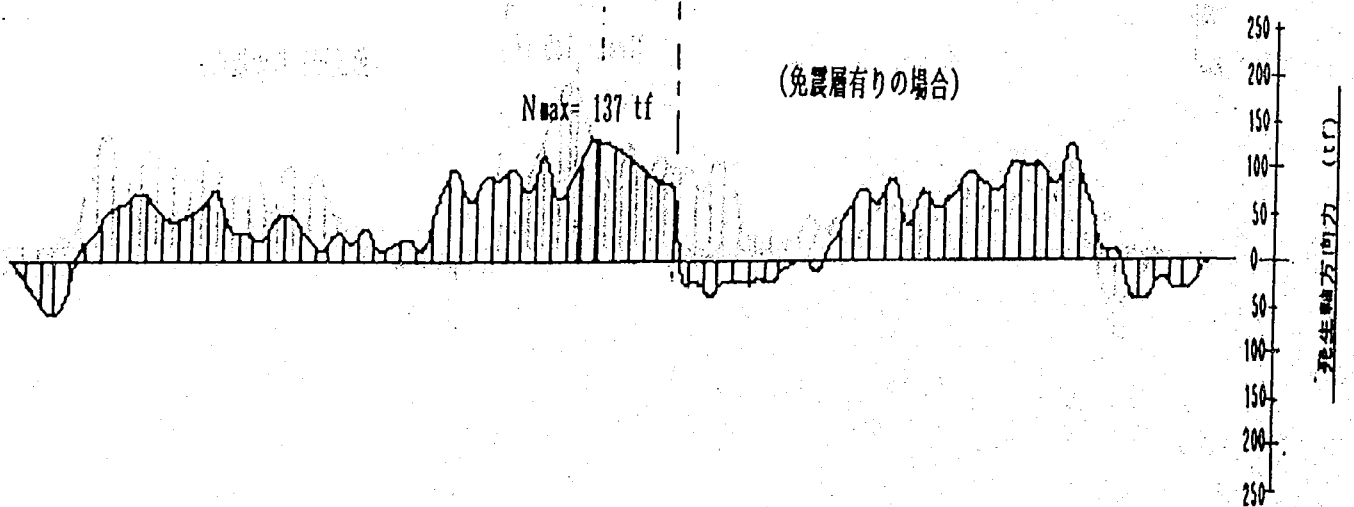
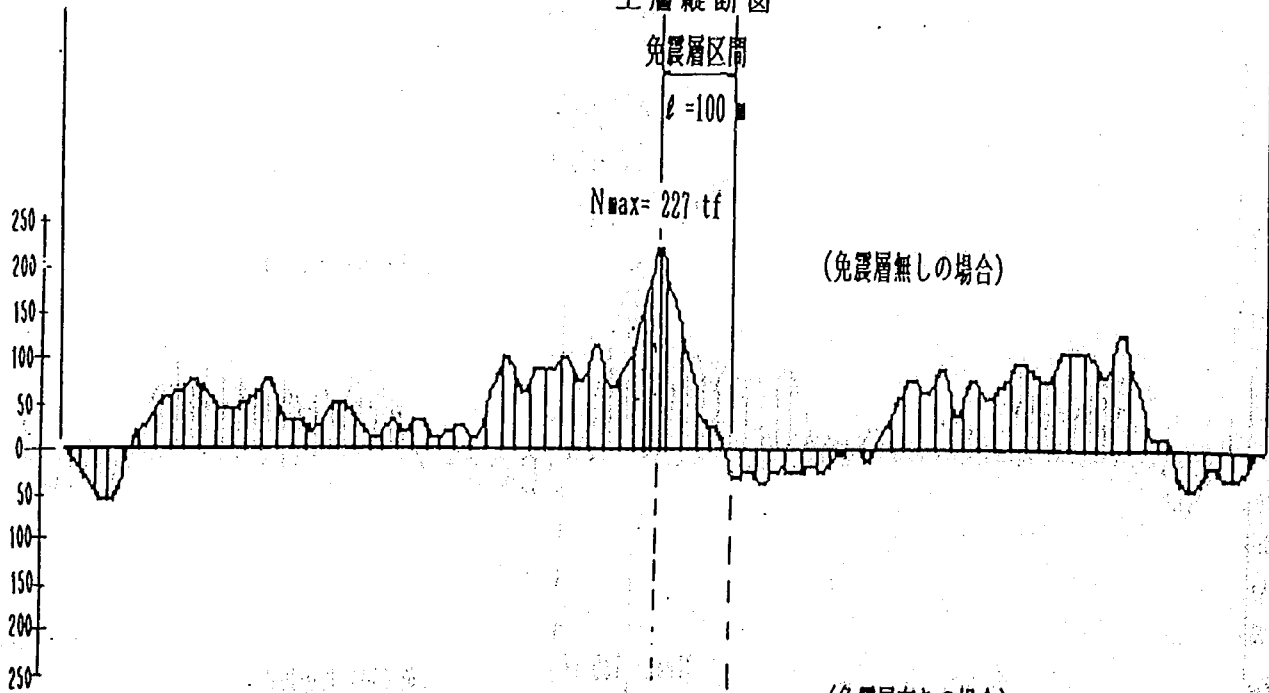
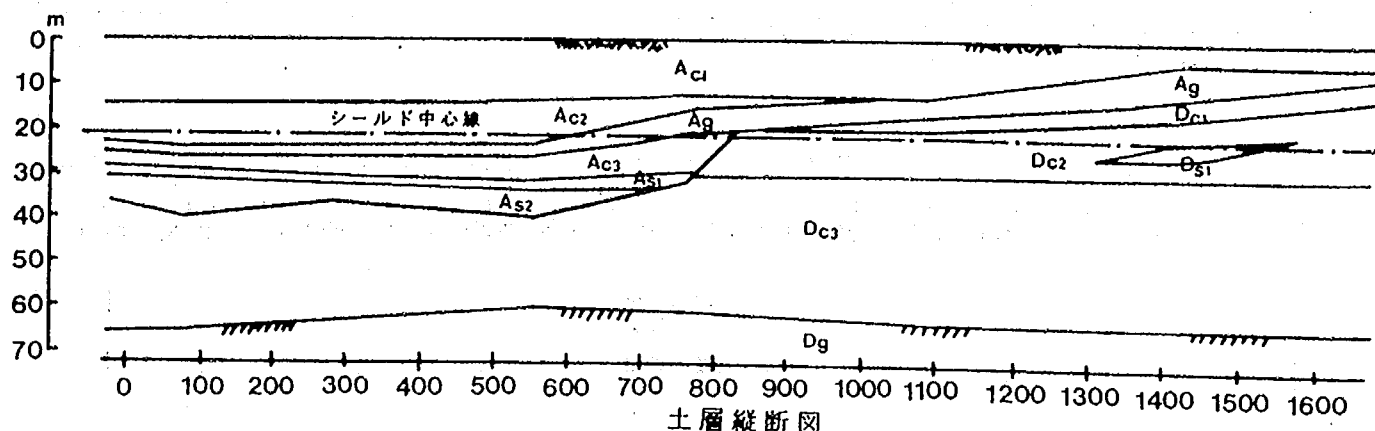


図-4.7(b) 地震時増分軸力の分布図 (免震層厚510mm)



土層縦断面図

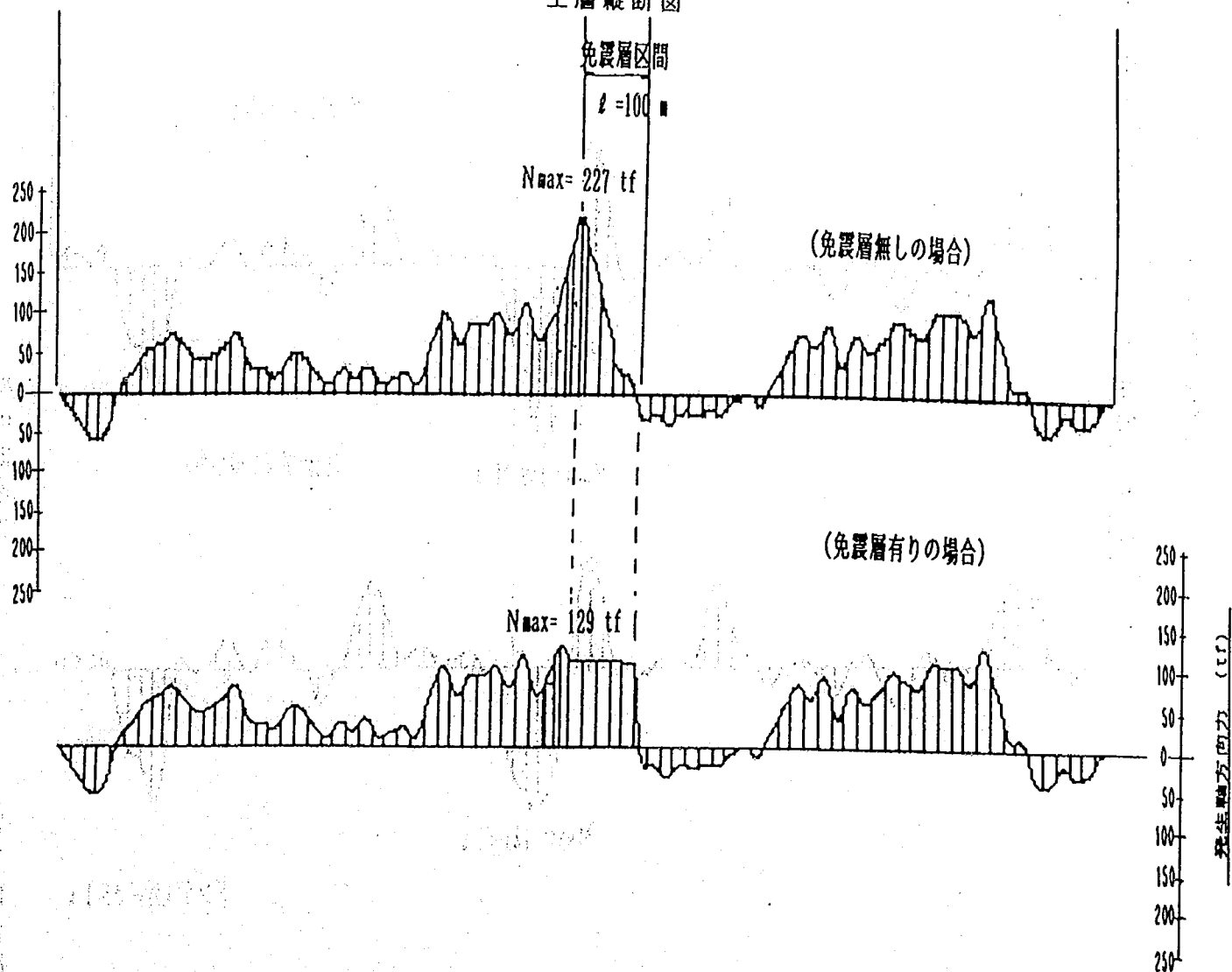


図-4.7(c) 地震時増分軸力の分布図(免震層厚5100mm)

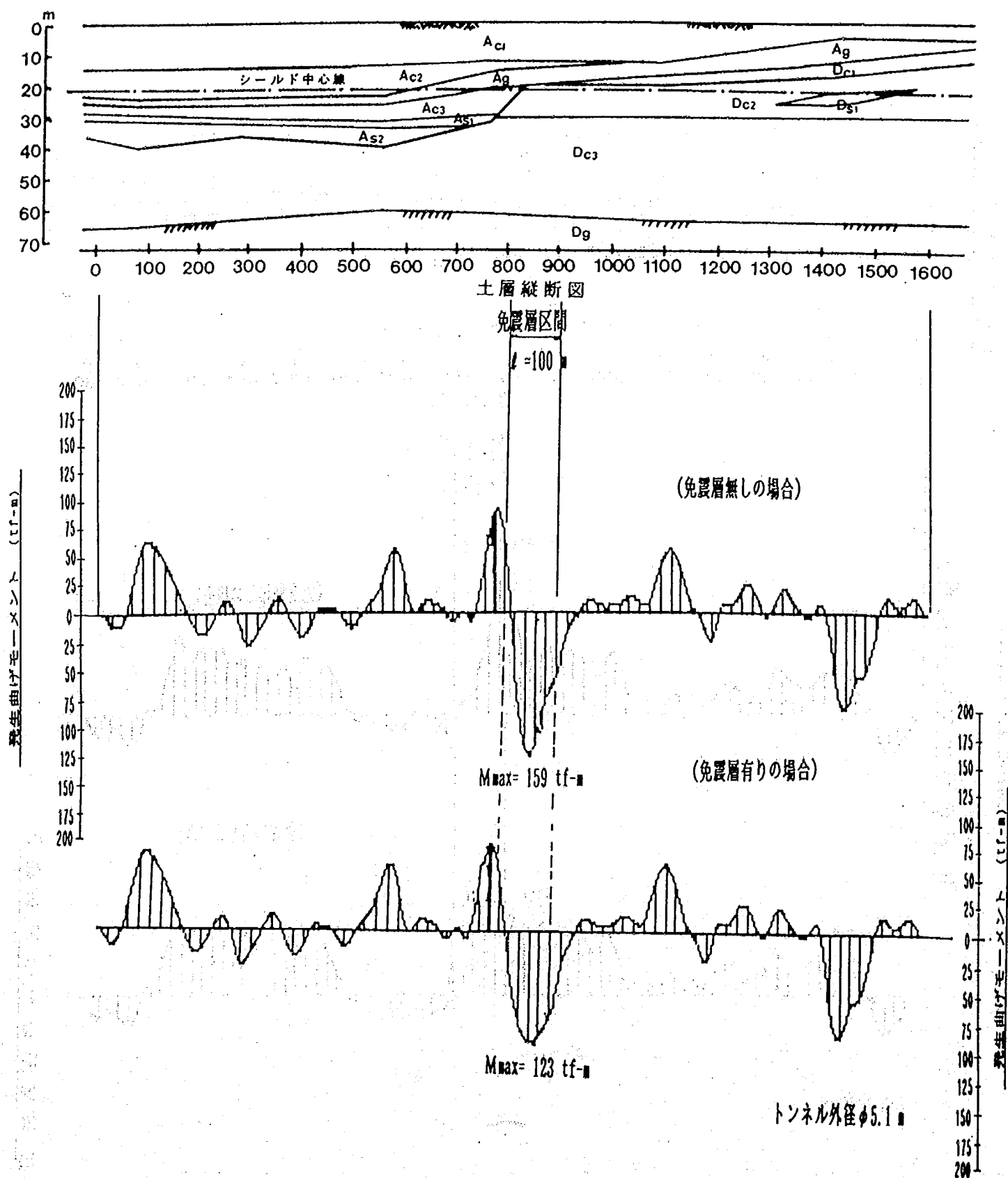


図-4.8(a) 地震時増分曲げモーメントの分布図 (免震層厚51mm)

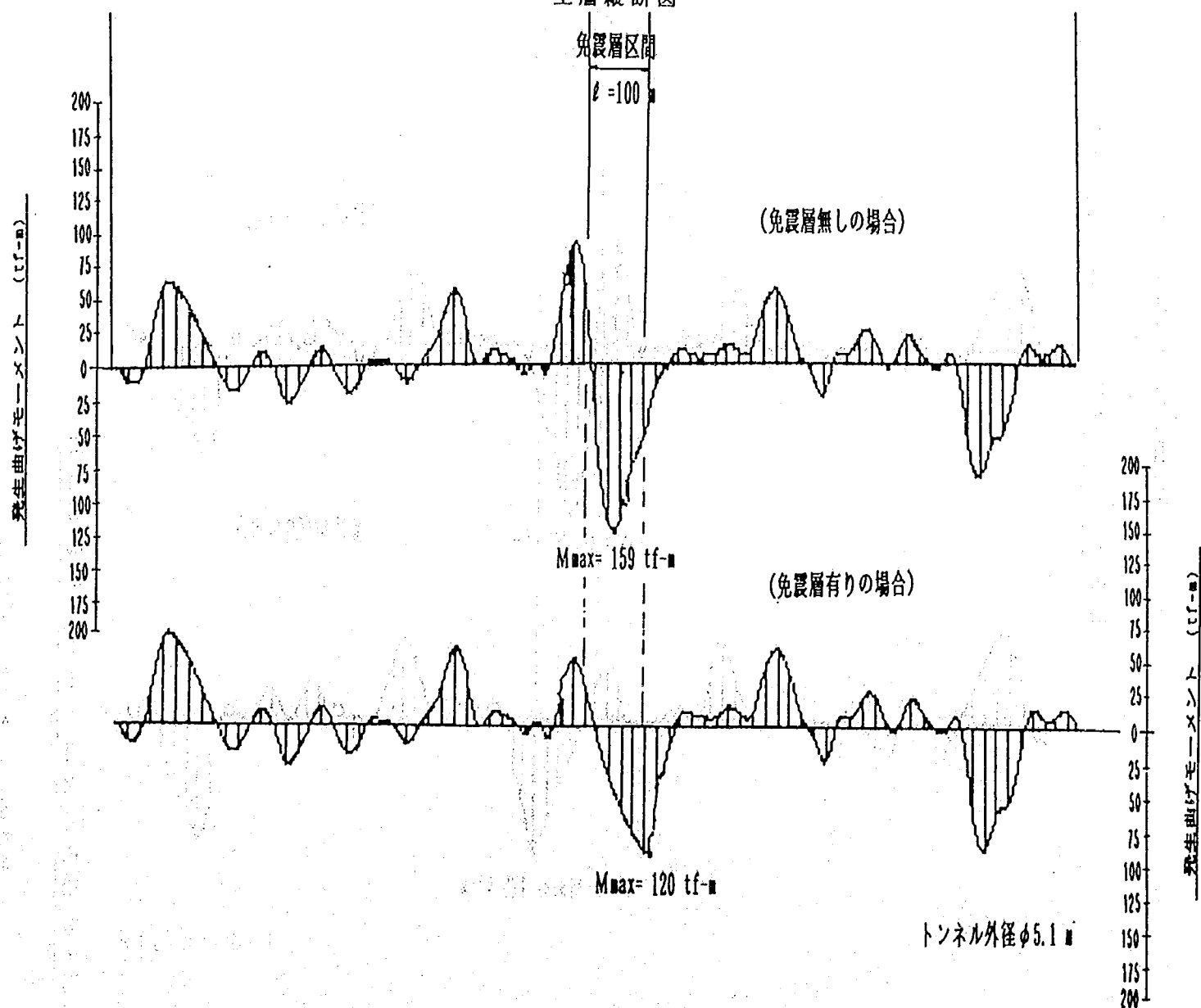
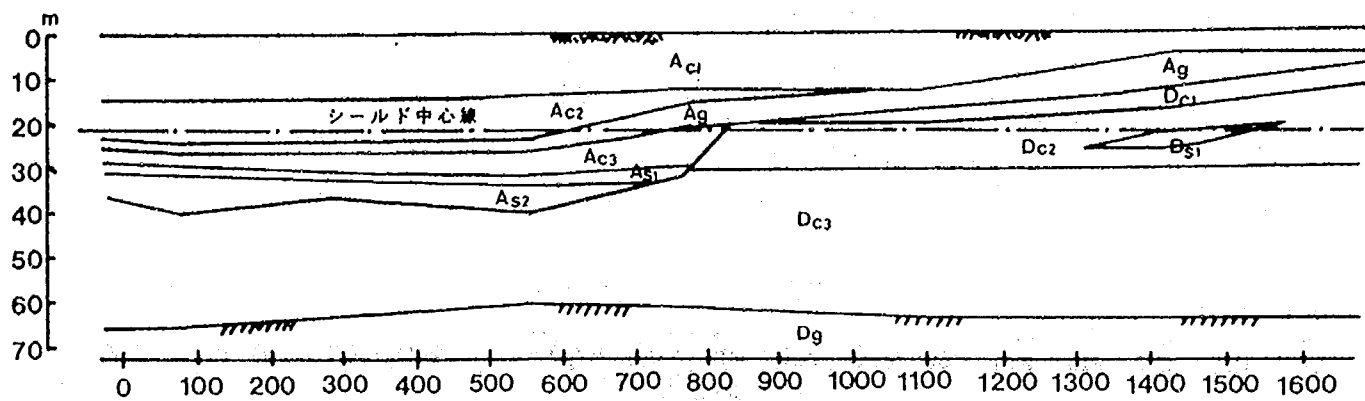


図-4.8(b) 地震時増分曲げモーメントの分布図 (免震層厚510mm)

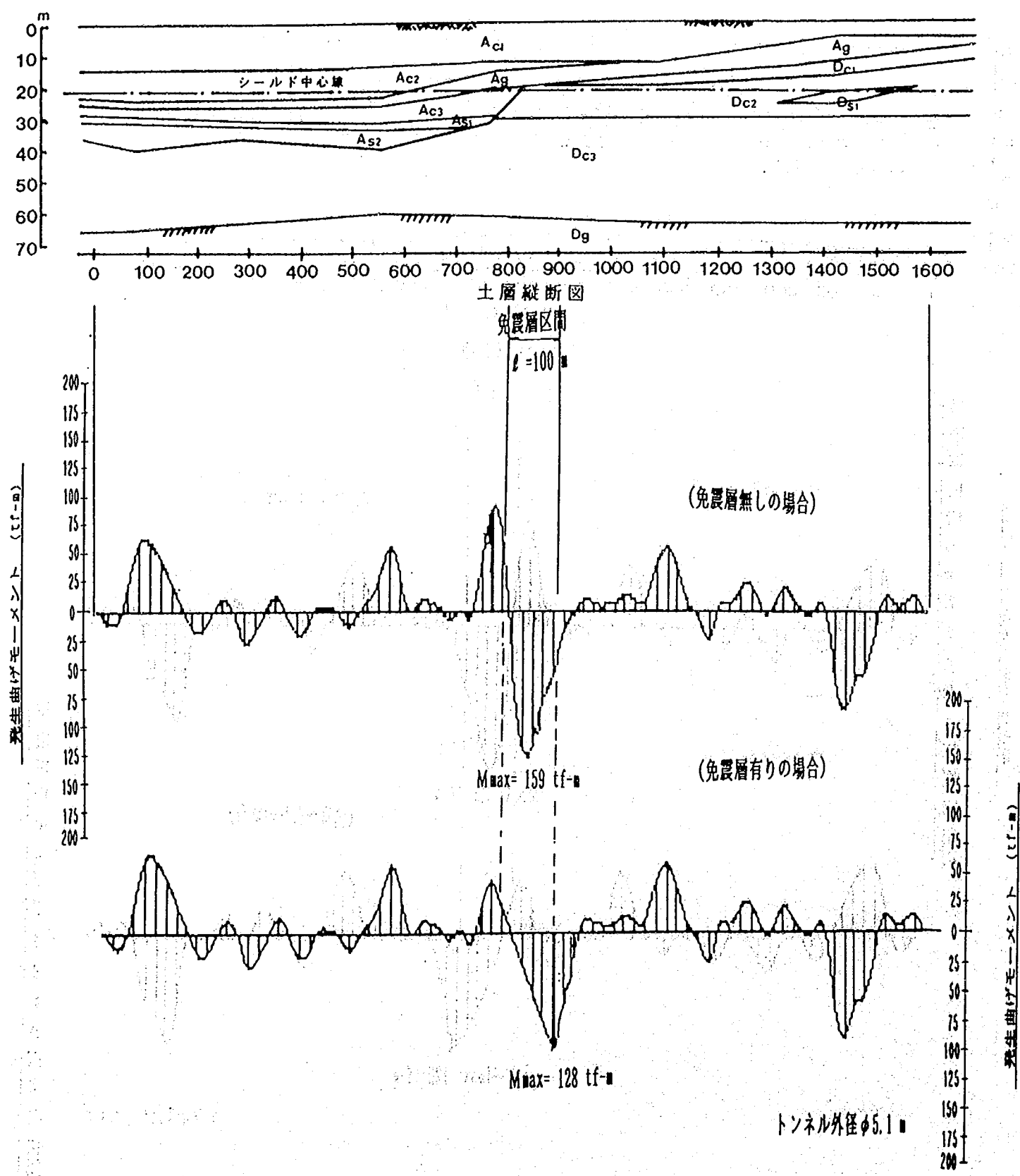


図-4.8.(c) 地震時増分曲げモーメントの分布図 (免震層厚5100mm)

表-4.6 最大断面力の解析結果

| 解析方向                  | 免震層の厚さ<br>$t$ (mm) | 地盤バネ定数<br>比率( $K/K_0$ ) | 最大発生断面力              | 低減比率           |
|-----------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|----------------|
| 軸<br>方<br>向           | 0                  | $=1.0$                  | $N_0=227\text{tf}$   | (免震層なし)        |
|                       | 51                 | $\approx 0.1$           | $N_1=189\text{tf}$   | $N_1/N_0=0.83$ |
|                       | 510                | $\approx 0.01$          | $N_2=137\text{tf}$   | $N_2/N_0=0.60$ |
|                       | 5100               | $\approx 0.001$         | $N_3=129\text{tf}$   | $N_3/N_0=0.57$ |
| 軸<br>直<br>角<br>方<br>向 | 0                  | $=1.0$                  | $M_0=159\text{tf-m}$ | (免震層なし)        |
|                       | 51                 | $\approx 0.1$           | $M_1=123\text{tf-m}$ | $M_1/M_0=0.77$ |
|                       | 510                | $\approx 0.01$          | $M_2=120\text{tf-m}$ | $M_2/M_0=0.75$ |
|                       | 5100               | $\approx 0.001$         | $M_3=128\text{tf-m}$ | $M_3/M_0=0.81$ |

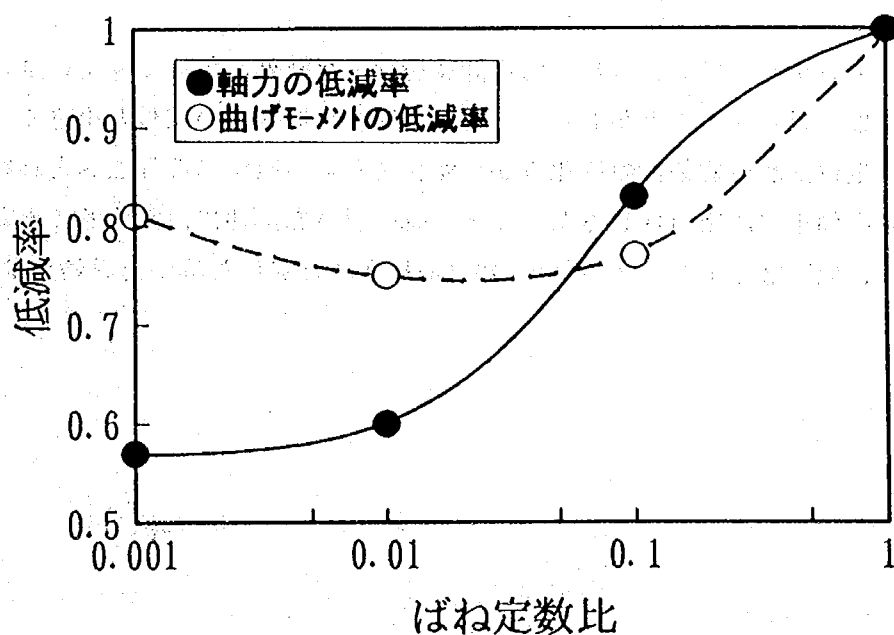


図-4.9 地震時地盤ばね定数比と断面力の低減効率の関係

## 5. 結論

本資料では、トンネルの免震工法の開発の第一歩として、免震材料及び免震施工法に関するフィージビリティスタディを行った。さらに、地盤条件の急変部を通過するシールドトンネルを例として、免震工法を採用した場合に得られる地震力の低減効果を応答変位法により試算した。本検討により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 免震工法の採用が有効なトンネルの事例としては、軟弱な地盤と硬質な地盤の境界部、あるいは地形の急変する箇所を通過する場合や、立坑とシールドトンネル本体の取付部、他の地下構造物と近接しているケース等が考えられる。
- 2) 免震材として求められる材料特性は、従来の裏込め材と基本的には同一であるが、弾性係数が小さく変形性能が豊富である点が異なる。
- 3) シールドトンネルにおける免震工法に適用可能な免震材を調査した結果、従来止水材として用いられている非ウレタン系の材料が抽出された。
- 4) シールドトンネルにおける免震工法の施工に関するアイデアとして、袋注入方式、特殊ウレタン併用方式、余堀り拡大工法、免震セグメント工法が考案された。
- 5) 地盤条件の変化点を通過するシールドトンネルの耐震解析を行った結果、免震層厚を大きくするほど対数的に地震時地盤ばね定数が低減することがわかった。また、応答変位法を用いた耐震解析により、地盤条件の変化点から地盤剛性の高い地盤の方へ免震層を設定すれば、その点で生じる地震時増分断面力はピークカットされ、耐震設計上有利な断面力分布になることが明らかになった。
- 6) 免震層厚をパラメータとしてトンネルの耐震計算を行った結果、免震層厚を過度に大きく設定すると、免震効果が悪くなることがある。これは、地震時地盤ばね定数が小さく設定されると、最大断面力の発生位置が地盤条件の変化点から免震層と硬質地盤の境界点へと移行するためであり、免震効果を効率的に発揮させるためには、免震層厚を適切に設定することが重要と言える。本解析では、免震層厚をトンネル外径の0.1倍程度に設定した時が免震効果は最も高かった。

## 参考文献

- 1)川島一彦：地下構造物の耐震設計、鹿島出版会
- 2)建設省土木研究所地震防災部耐震研究室他：地下構造物の耐震設計技術の開発に関する共同研究報告書、共同研究報告書、第29号、建設省土木研究所、1989年8月
- 3)川島一彦、杉田秀樹、中島 燈：大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン(案)、土木研究所第3119号、平成4年3月

地盤との絶縁を図ることによる  
地下構造物の免震技術に関する研究  
(その1) 免震工法の適用と免震効果に関するケーススタディ

ISSN 0386-5878  
土木研究所資料第3287号  
平成6年7月 (1994)

土木研究所

企画部

(前耐震研究室長)

地震防災部耐震研究室 研究員

地下開発研究官 川島 一彦

星隈 順一

長屋 和宏

要旨：本研究は、地下構造物の免震工法として免震材を用いて周辺地盤の変形を伝達しにくくする技術の開発を目的とする。本工法の実現には、免震材料、免震トンネルの施工法や設計法等、免震に固有な技術開発が必要となる。そこで本資料では、トンネルの免震工法開発の基礎的研究として、まず免震材料及び免震施工法に関するフィージビリティスタディを行った。さらに、地盤条件の急変部を通過するシールドトンネルを例として、免震工法を採用した場合に得られる地震力の低減効果を応答変位法により試算した。

キーワード：地下構造物、免震工法、免震材、免震効果

郵便はがき

3 0 5 - □ □

切手をは  
いて下さ

建設省土木研究所

地震防災部耐震研究室

御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 003

No. 003

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第3287号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

土木研究所資料第3287号

