

土 木 研 究 所 資 料

3次元動的有限要素法解析に基づく

地中構造物の免震メカニズム

平成10年 2 月

建 設 省 土 木 研 究 所
耐震技術研究センター耐震研究室

Copyright ©(1998) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, 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。

3次元動的有限要素法解析に基づく 地中構造物の免震メカニズム

耐震技術研究センター 耐震研究室 室長 運上 茂樹
研究員 星隈 順一
交流研究員 村井 和彦*

要 旨

本文では、耐震性の向上を目的とした地中構造物の免震化に関する研究の一部として、地盤条件が急変する箇所に構築される免震地中構造物を対象とした3次元動的有限要素法解析を行うとともに、免震層や周辺地盤および構造物に発生するひずみや応力などの解析結果を考察し、免震効果のメカニズムを検討した。免震層を設置すると、地震時には免震層が大きくせん断変形し、地盤と構造物が遮断されるため、地盤条件急変部付近に発生する地盤ひずみの集中が構造物に伝達されないこととなり、構造物への影響を低減する免震効果となって顕在化することが明らかとなった。

キーワード： 免震地中構造物、3次元動的有限要素法解析、メッシュ分割法、
地盤条件急変部、軸方向加振、軸直角方向加振、免震メカニズム

* 交流研究員在職期間（平成8年4月～10年3月まで）

目 次



1. まえがき	1
2. 3次元解析モデル構築のための予備解析	3
2.1 検討項目および解析条件	3
2.2 メッシュ分割数および分割方法に関する検討	6
2.3 解析領域幅と境界条件および地盤条件変化面のモデル化に関する検討	15
3. 3次元解析における解析条件	24
4. 解析結果および考察	28
4.1 X方向加振解析結果	28
4.2 Y方向加振解析結果	45
5. 免震メカニズムまとめ	67
参考文献	68

1. まえがき

地中構造物は、一般に、地震時に生じる地盤変形に追従して変形を受ける特徴があるため、耐震設計において構造物の剛性を高めると、地震時の増分断面力も相応して大きくなることとなり合理的でない場合もある。通常地中構造物の耐震対策工法としては、可とう性継手や弾性ワッシャーの採用など柔構造化を図る方法の採用が一般的である。しかしこのような方法では、大地震時には変形が生じるなど、地中構造物の要求性能によっては問題も生じる。これに対して、地盤と地中構造物本体との間にせん断弾性係数の小さい免震層を介在させれば、地盤の変形がここで吸収され、免震層がない場合と比較して地震時増分断面力の低減が期待できるとともに、過度な変形も生じない。このような免震構造は、地中構造物の耐震性向上に対する有効な方法の1つであると考えられ、地震時に地盤ひずみが集中し、これが構造物に伝達されることにより局所的に地震時増分断面力が生じる地盤条件変化部などに適用することが効果的である。

地中構造物の免震工法に関するこれまでの研究成果^{1) 2) 3)}から、周辺地盤と免震層のせん断弾性係数の比が地中構造物の地震時増分断面力低減効果（以下免震効果と称する）に大きな影響を与え、このせん断弾性係数比が一般に1/100以下ならば有意な免震効果が得られることが主に静的な解析により明らかにされている。

地中構造物に免震構造を適用した場合に免震効果が得られる機構（以下免震メカニズムと称する）に関しては、2次元動的有限要素法解析による円形、矩形断面の横断方向を対称としたパラメトリックな解析^{4) 5) 6)}により知見が得られている。

円形断面を有する地中構造物の横断方向の免震メカニズムの解明を目的とした解析^{4) 5)}によると、地中構造物周辺にせん断弾性係数の小さい免震層を設置した場合、地震時には免震層が大きくせん断変形し、ここでせん断ひずみが吸収されるとともに、地盤と構造物との拘束が遮断され、構造物に作用する周面せん断力が低減されることが明らかとなっている。また、ポアソン比の影響については、免震層のポアソン比が小さい場合は、免震層はせん断方向のみならず法線方向にも変形し、構造物に伝達する法線方向直応力の分布を平滑化し、構造物の変形を緩和する効果があることが明らかにされている。

また、矩形断面を有する地中構造物の横断方向の免震メカニズムの解明を目的とした解析⁶⁾によると、円形断面の場合と同様に、地震時に免震層は大きくせん断変形し、構造物周面に作用するせん断方向の土圧が低減されることが明らかにされている。

これらの知見から、地中構造物の免震メカニズムとしては、免震層の設置により地震時において構造物周面に作用するせん断力が低減することと、ポアソン比が小さい場合には免震層は法線方向にも変形し構造物の変形を緩和することにより免震効果が顕在化するものと整理できる。

本文は、地盤条件急変部を有する地盤を通過する免震シールドトンネルを対象とし、実構造物の3次元性を評価できる3次元動的有限要素法解析（以下3次元解析と称する）を実施し、その結果を用いて、このような免震メカニズムに関する基本的な知見を検証する

とともに、縦横断方向の免震メカニズムをまとめたものである。

3次元解析においては、解析モデルの構築方法が解析結果に大きな影響を及ぼすものと考えられ、免震メカニズムを正しく検証するためには、解析モデルを適切に設定する必要がある。また、3次元解析では計算機の容量等の制約から合理的な解析モデルを適用しなければならないが、このような検討が行われた例は少ない。そこで本研究では、まず、2次元モデルによりメッシュ分割数や解析領域の大きさ、境界条件等を予備解析し、十分な解析精度が得られる範囲で解析モデルの合理化を図ることとした。

なお、本研究は建設省土木研究所と（財）土木研究センターならびに民間17社との共同研究である「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究」のメカニズムワーキングにおける成果の一部である。

2. 3次元解析モデル構築のための予備解析

2. 1 検討項目および解析条件

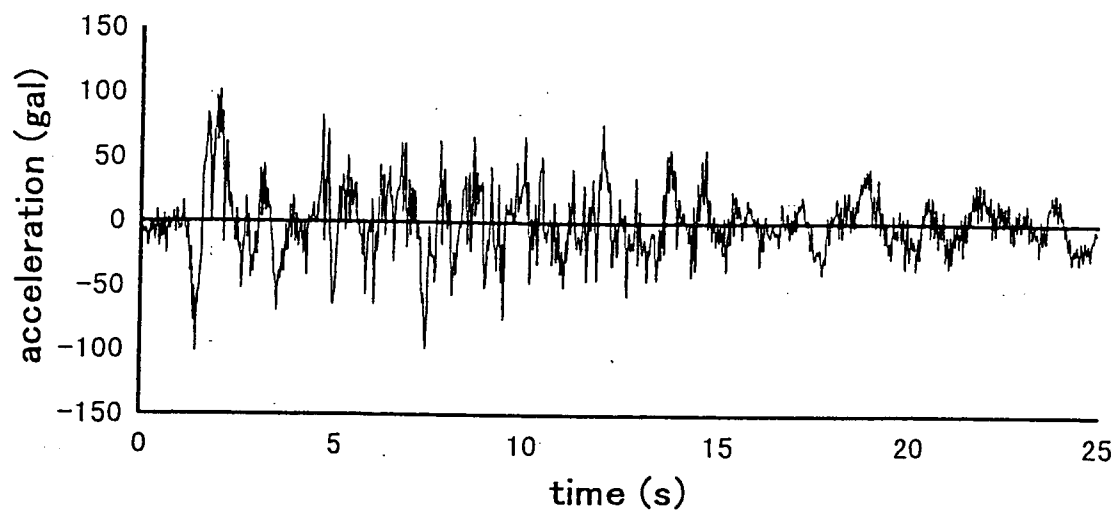
3次元解析を実施するに先立ち、合理的なモデルの構築を検討することを目的とした予備解析を実施した。予備解析は2次元での解析とし、周波数領域における複素応答法による動的有限要素解析により実施した。検討した項目は、メッシュ分割数や分割方法の検討、モデル化領域と境界条件の検討である。予備解析における検討項目と評価方法を表-1にまとめる。表に示すように、予備解析では、3次元モデル構築の検討が目的であるため、モデルの応答特性を評価できる伝達関数を用いて考察することを基本とした。

予備解析に用いた入力地震動としては、平成2年道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁷⁾に示されている震度法に用いるI種地盤用標準波形を用い、これを解放基盤面における波形と考え、その1/2をモデル下面に入力した。予備解析に用いた入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトルを図-1に示す。

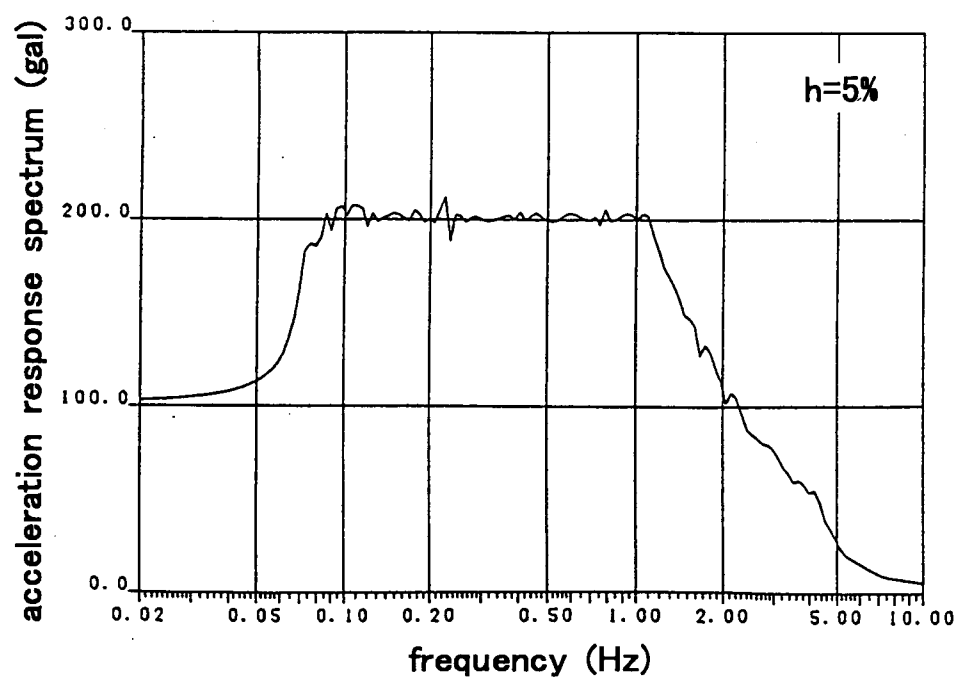
表-2は予備解析において用いた地盤と免震層の物性値を示したものである。このうち、表層地盤は、層厚30mの様な軟質地盤と硬質地盤の2種類を対象とし、その物性値としては、軟質地盤としてN値が3の沖積粘土層を、硬質地盤としてN値が20の洪積砂質土を、それぞれ想定したものをを用いた。ここで、地盤のせん断弾性係数は、入力地震動が震度法レベルであることを考慮し、共同溝設計指針⁸⁾を参考に、地盤ひずみの大きさに基づく補正係数を0.8としたうえで一定値を用いた。また、免震層は層厚10cmとし、その物性値としては、軟質硬質両地盤それぞれについて、地盤ひずみの大きさに基づく補正係数0.8を考慮した地盤のせん断弾性係数に対してせん断弾性係数比が1/100になるよう設定するとともに、ポアソン比は0.3とした。また、減衰定数は免震材料として別途検討されているシリコン系材料を想定し、3%とした⁹⁾。

表-3は同じく予備解析に用いた構造物の物性値を示す。構造物は、径が5.1mの円形断面のものが土被りが5.0mの位置に設置されたものとし、その物性値としては、厚さ22.5cmのコンクリートセグメントを想定したものをを用いた。

モデル化においては、構造物には梁要素を、地盤および免震層には平面ひずみ要素をそれぞれ用いた。



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図-1 入力地震動

表-1 予備解析における検討項目および評価方法

分類	検討項目	評価方法
メッシュ分割数 および メッシュ分割方法	免震層法線方向メッシュ分割数 (1分割or4分割)	伝達関数 地震時増分断面力
	構造物近傍地盤メッシュ分割方法 (格子型or放射型およびその範囲)	地盤の最大せん断応力
	構造物近傍地盤円周方向メッシュ分割数 (16分割or48分割)	伝達関数 地震時増分断面力
横断方向のモデル化	モデル幅と境界条件 境界条件：エネルギー伝達境界 粘性境界、水平ローラー モデル幅：10m,15m,20m	伝達関数 免震層の最大せん断応力
縦断方向のモデル化	地層境界面のモデル化 (傾斜型or階段型)	伝達関数
	モデル長と境界条件 境界条件：エネルギー伝達境界 粘性境界、水平ローラー 自由境界 モデル長：87.75m,193m	伝達関数

表-2 地盤および免震層の物性値

項 目	軟質地盤対象		硬質地盤対象		基盤層
	地盤	免震層	地盤	免震層	
せん断弾性係数 tf/m^2	2,160	21.6	5,560	55.6	18,370
単位体積重量 tf/m^3	1.6	1.0	1.8	1.0	2.0
せん断弾性波速度 m/s	115	14	174	23	300
ポアソン比	0.49	0.3	0.45	0.3	0.49
減衰定数	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

表-3 構造物の物性値

弾性係数	単位体積重量	ポアソン比	減衰定数
2,600,000 t/m^2	2.5 t/m^3	0.167	0.03

2. 2 メッシュ分割数および分割方法に関する検討

一般に有限要素法解析におけるメッシュ分割は、細かくするほど解析精度が向上するが、計算時間や容量が大きくなる。そこでここでは、メッシュ分割数が解析精度に与える影響を構造物横断方向の解析により検討し、3次元解析において十分な精度の解析結果が得られる最適なメッシュ分割数を決定することとした。検討項目は、免震層法線方向のメッシュ分割数、近傍地盤のメッシュ分割方法、構造物および近傍地盤の円周方向分割数の3項目である。図-2に今回実施したメッシュ分割数およびメッシュ分割方法の検討に用いた解析モデルおよび検討項目を示す。

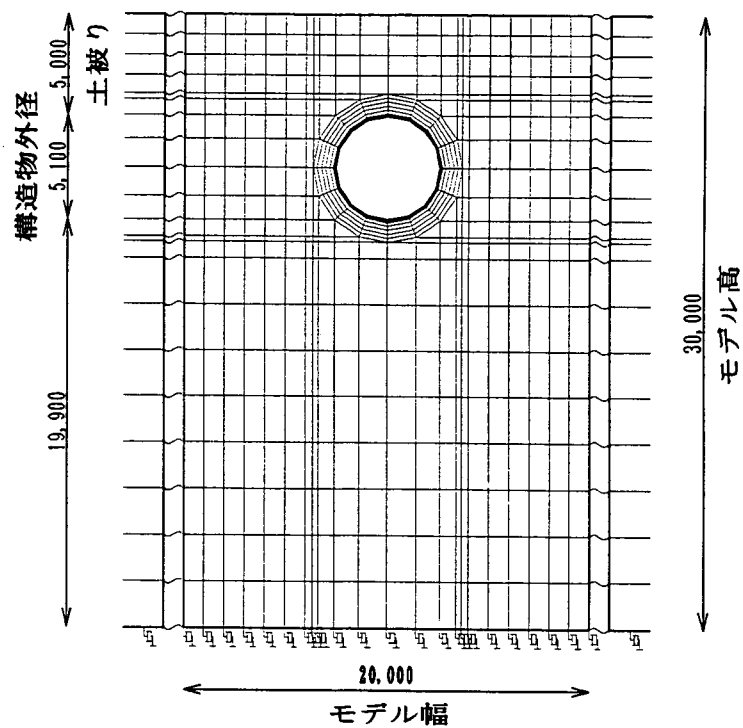
免震層法線方向のメッシュ分割数に関しては、構造物と地盤との間にせん断弾性係数の小さい免震層を設置するため、境界で物性値の変化が著しく粗いメッシュ分割では解析結果に影響を及ぼすことも懸念されたため、免震層（層厚10cm）を法線方向に分割しない場合と、4分割した場合の2ケースについて、硬質地盤、軟質地盤それぞれを対象した解析を実施した。

図-3および図-4は、軟質地盤、硬質地盤それぞれを対象にした場合の構造物天端に着目した伝達関数を比較して示したものである。これらより、免震層の法線方向のメッシュ分割数に起因する応答特性の相違は、軟質地盤を対象とした場合においては高周波数領域で若干生じているものの耐震設計上重要となる低周波数領域ではほとんど認められず、また、硬質地盤を対象とした場合においては低周波数領域および高周波数領域ともにほとんど認められないことがわかる。

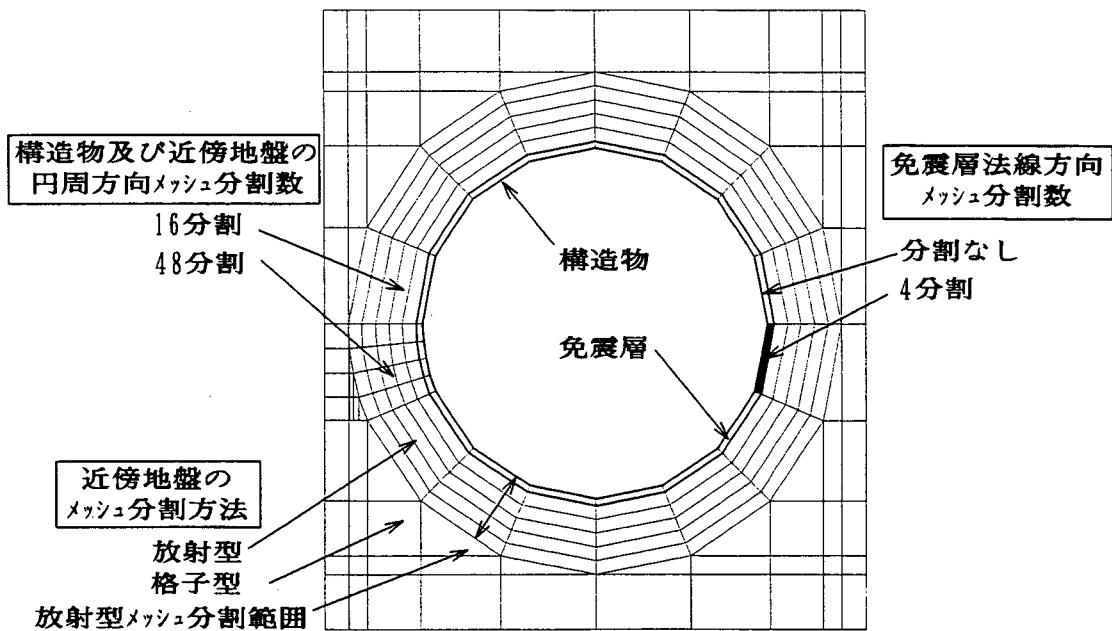
図-5は、軟質地盤を対象にした場合の構造物に発生する地震時増分断面力の最大値発生時刻における計算結果を示したものである。ここでは、横軸に構造物天端を始点に時計回りの角度をとり、構造物の位置を表した。また、対象性を考慮して、右半分のみを示した。これより、計算される地震時増分断面力に及ぼす免震層の法線方向メッシュ分割数の影響は認められないことがわかる。

構造物近傍地盤のメッシュ分割に関しては、図-6に示すように格子型分割と、放射型分割が考えられる。分割の作業性は格子型の方が簡便であるが、解析で得られたデータの評価は放射型の方が有利である。そこで、硬質地盤、軟質地盤それぞれを対象とし、構造物近傍地盤を2mの範囲まで放射型にメッシュ分割した解析を実施し、免震層の有無による地盤の最大せん断応力を比較した。図-7および図-8は、軟質地盤、硬質地盤それぞれを対象とした場合の免震層の有無による最大せん断応力の差の分布を示す。これらより、免震層の有無により周辺地盤の最大せん断応力に大きな差が生じるのは主に構造物外径より2mの範囲内であり、免震層の有無が近傍地盤に影響を及ぼすのはこの範囲内であることがわかる。

構造物および近傍地盤の円周方向分割数に関しては、構造物、免震層および近傍地盤のうち放射型メッシュ分割範囲を円周方向に16分割した場合と、48分割した場合の2ケースについて、硬質地盤、軟質地盤それぞれを対象した解析を実施した。図-9および図-10は、軟質地盤、硬質地盤それぞれを対象にした場合の構造物天端に着目した伝達関数を比較し



(a)解析メッシュ



(b)検討項目

図-2 メッシュ分割数の解析モデルおよび検討項目

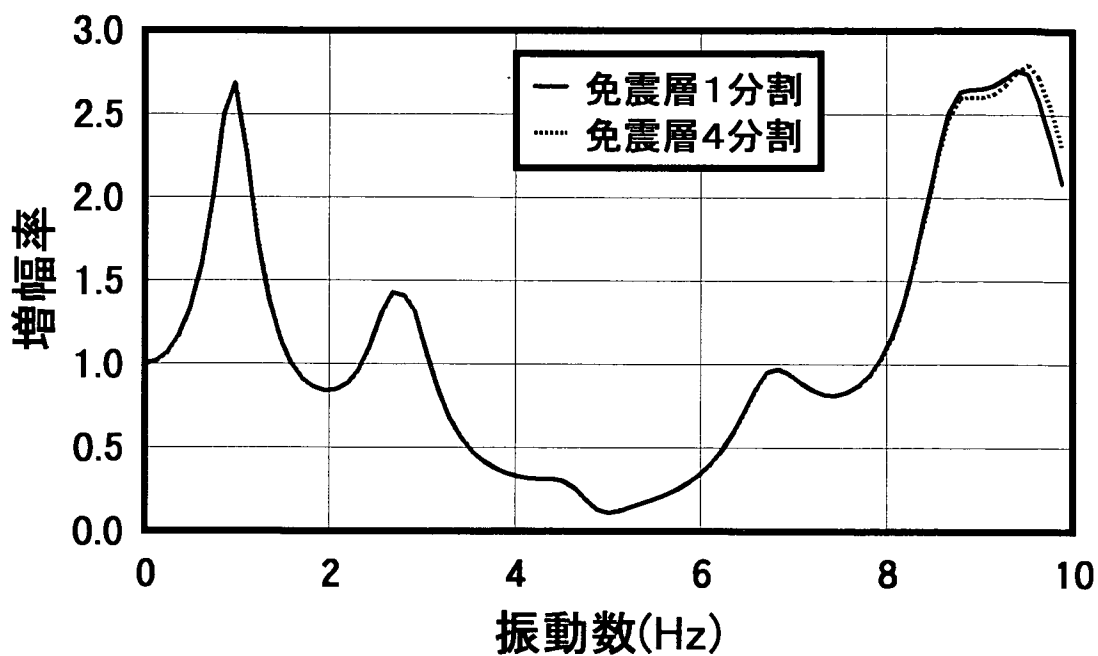


図-3 免震層法線方向メッシュ分割数が伝達関数に及ぼす影響
(構造物天端伝達関数：軟質地盤)

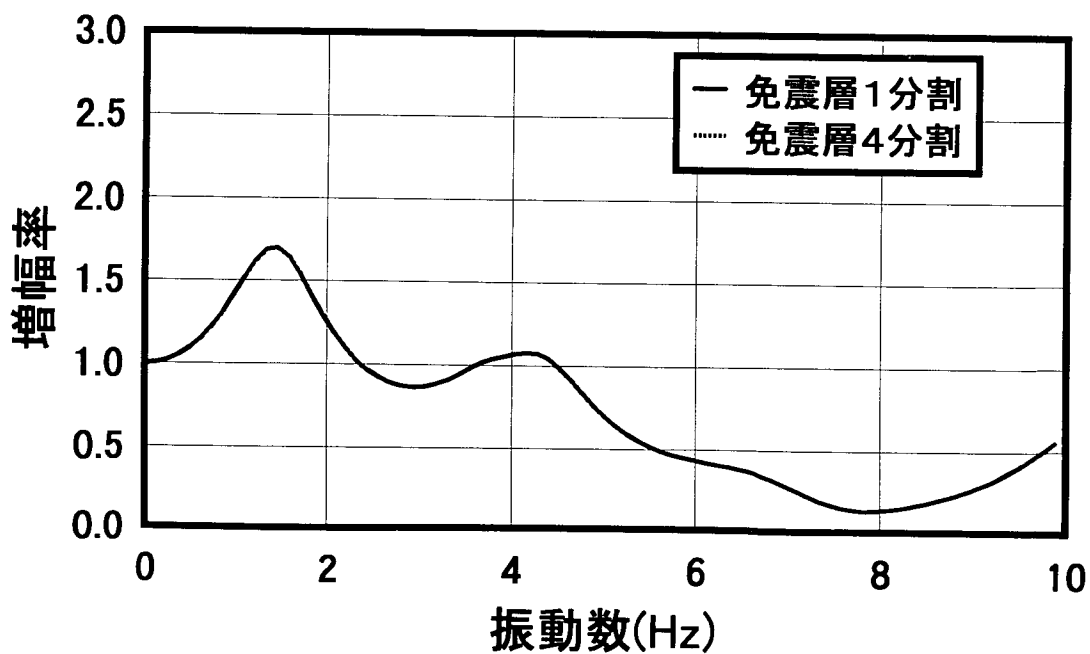
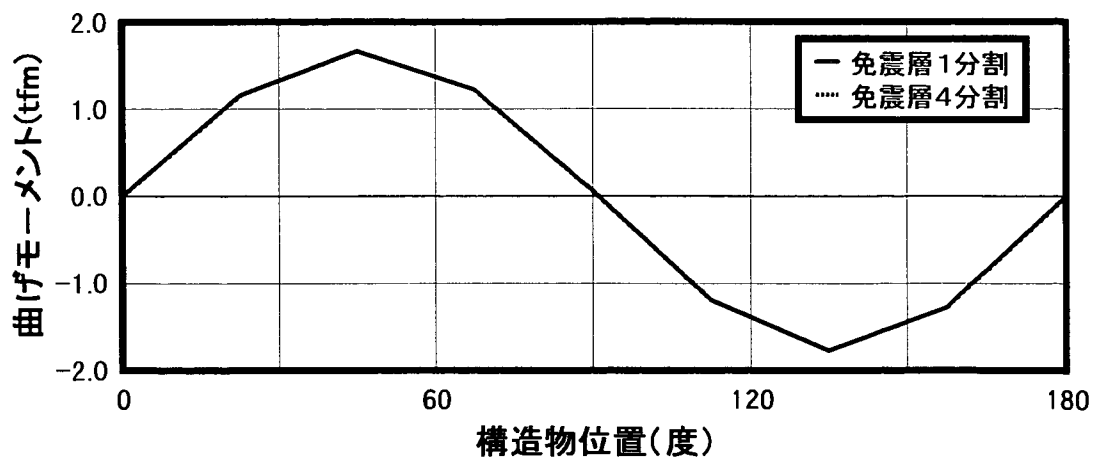
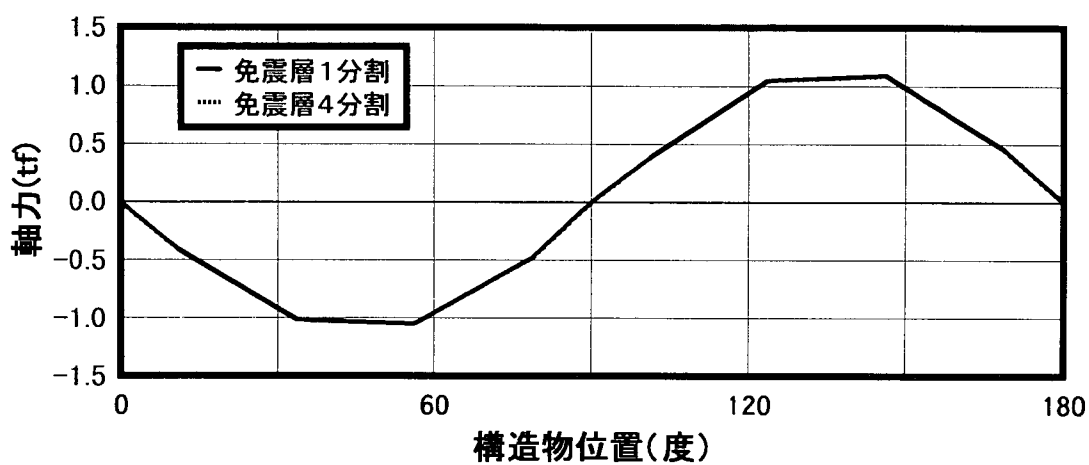


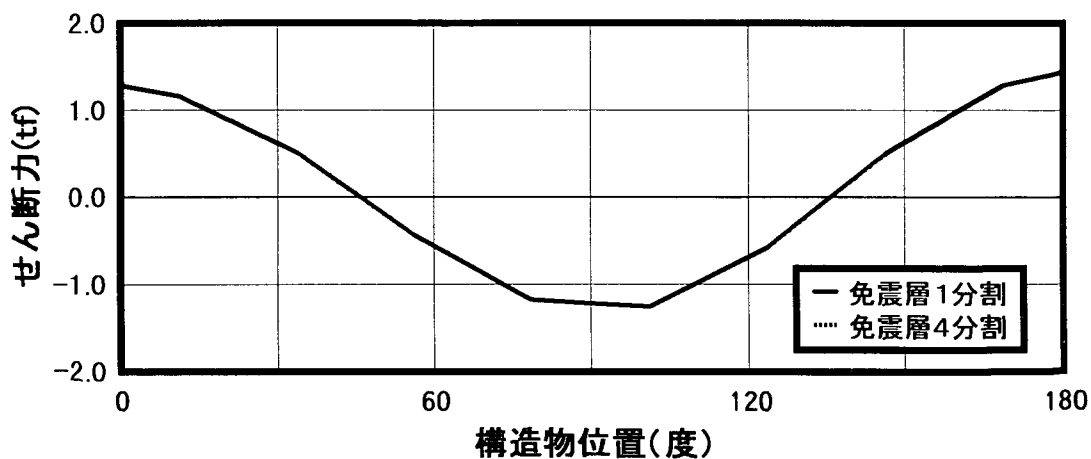
図-4 免震層法線方向メッシュ分割数が伝達関数に及ぼす影響
(構造物天端伝達関数：硬質地盤)



(a) 曲げモーメント

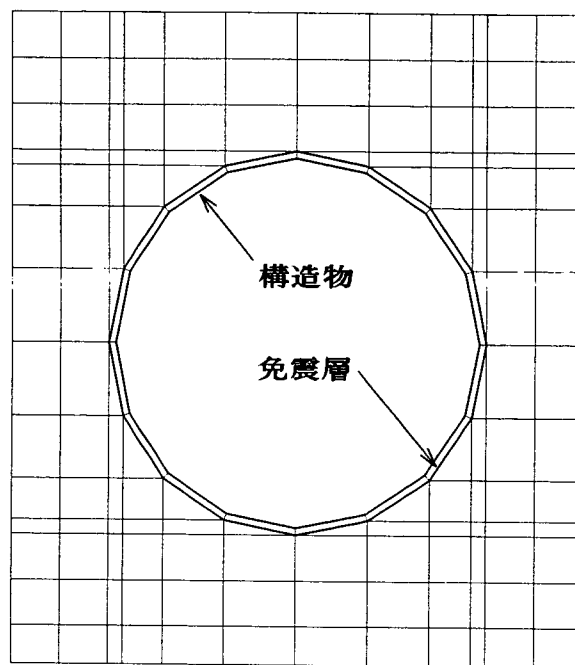


(b) 軸力

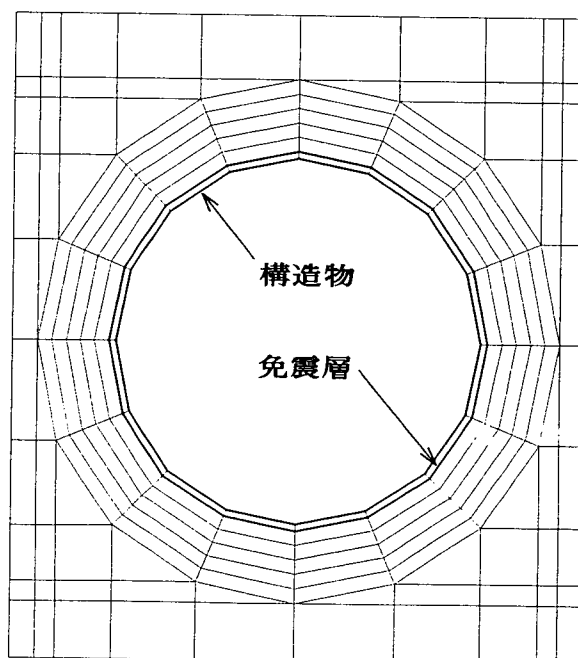


(c) セン断力

図-5 免震層法線方向メッシュ分割数が地震時増分断面力に及ぼす影響（軟質地盤）



(a) 格子型分割



(b) 放射型分割

図-6 メッシュ分割方法

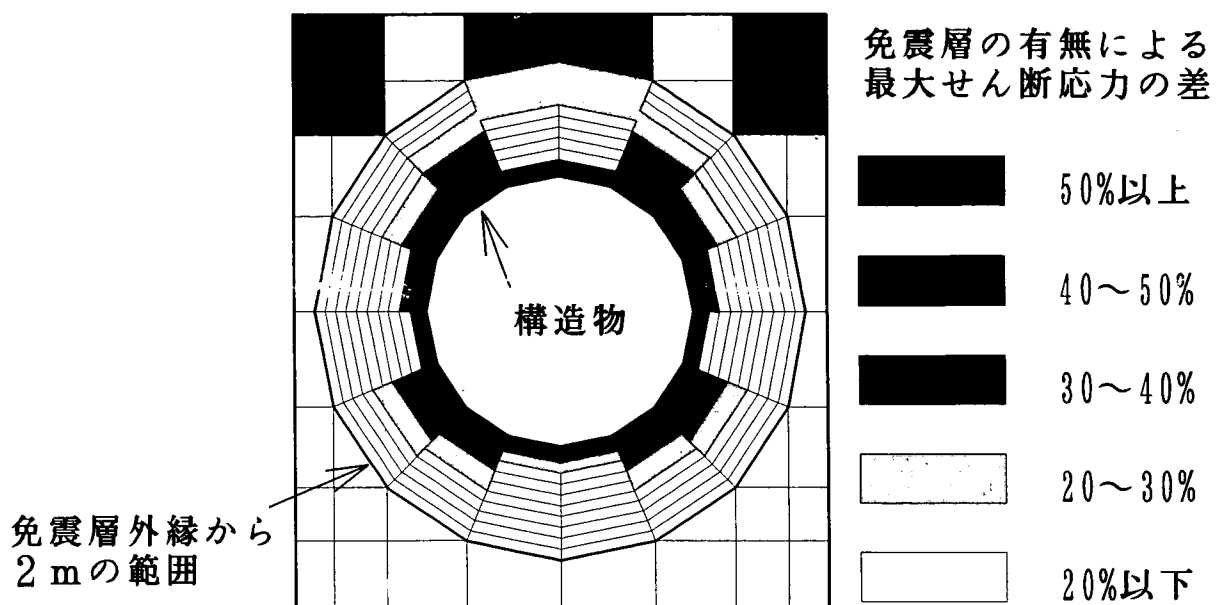


図-7 免震層の有無による地盤の最大せん断応力の差（軟質地盤）

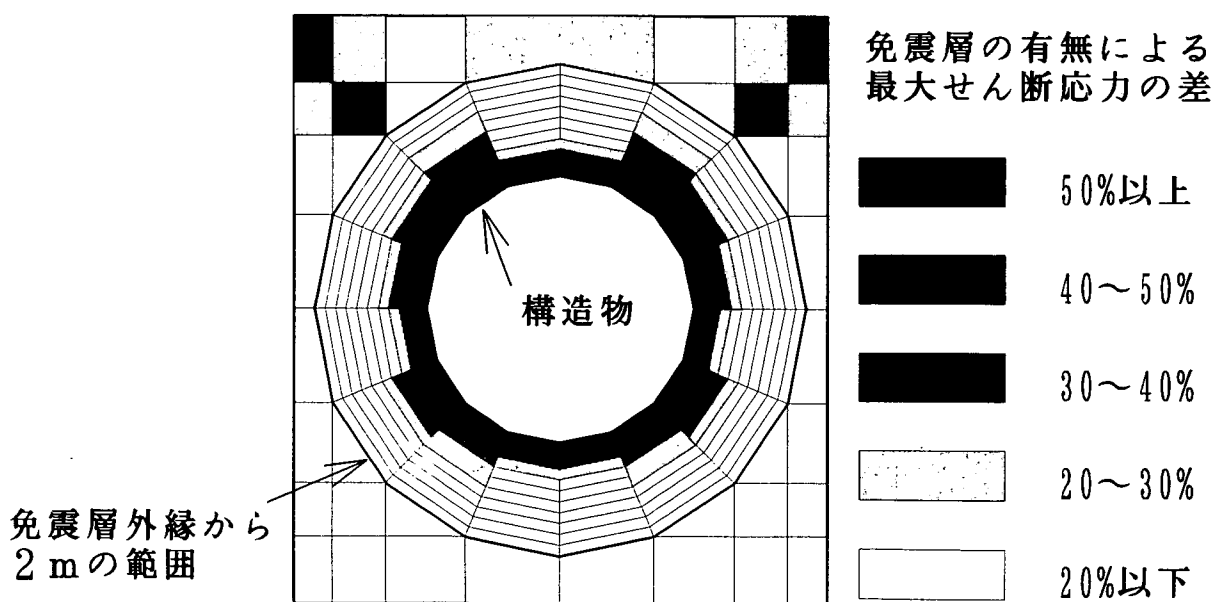


図-8 免震層の有無による地盤の最大せん断応力の差（硬質地盤）

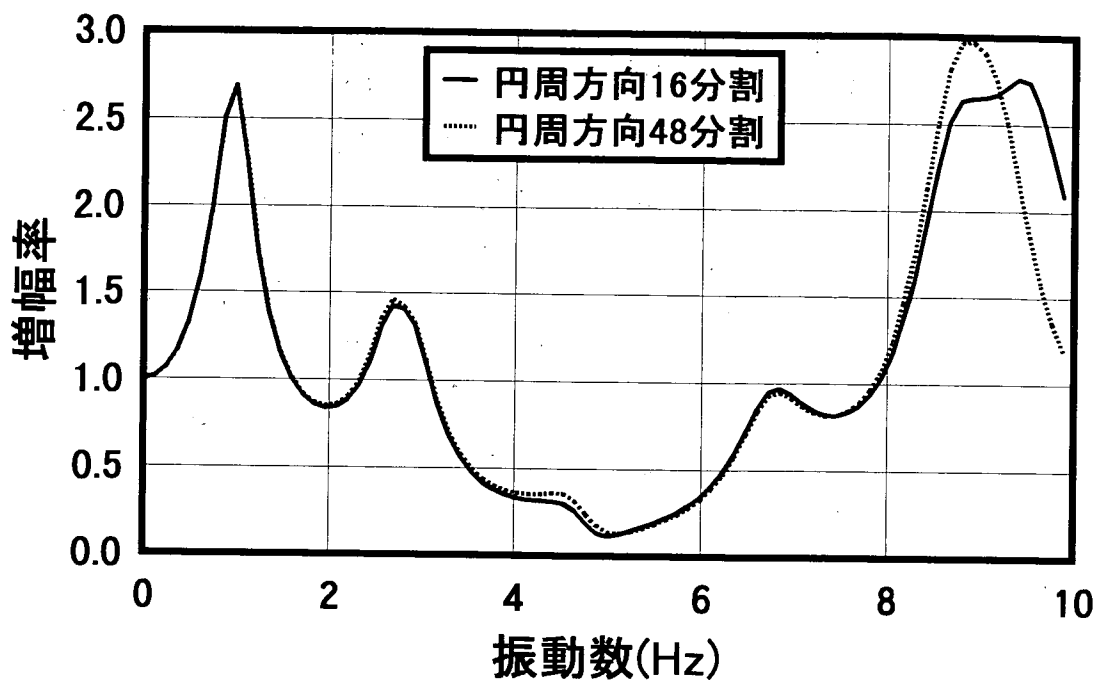


図-9 構造物および近傍地盤の円周方向分割数が伝達関数に及ぼす影響
(構造物天端伝達関数：軟質地盤)

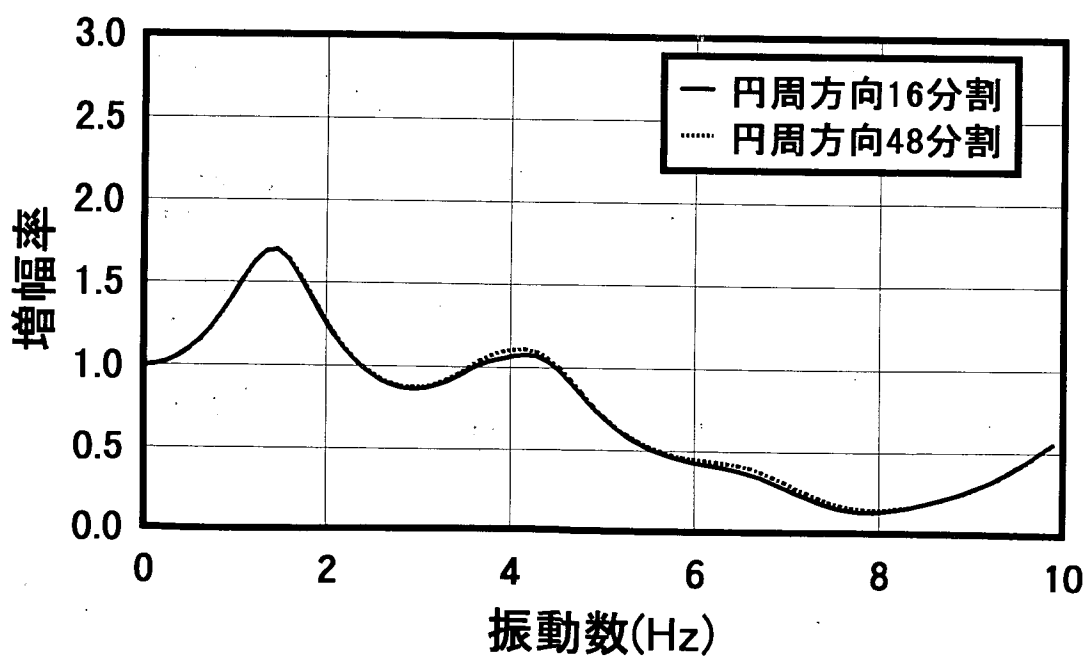


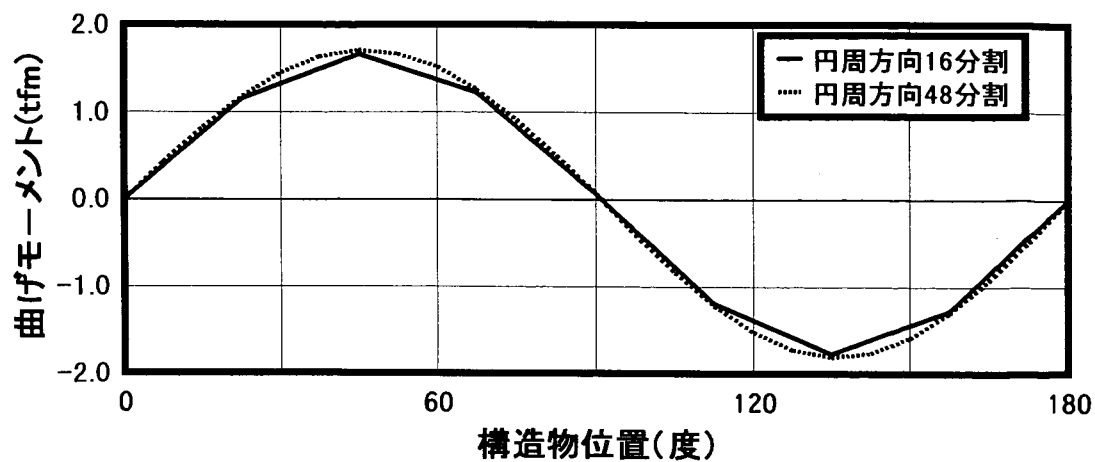
図-10 構造物および近傍地盤の円周方向分割数が伝達関数に及ぼす影響
(構造物天端伝達関数：硬質地盤)

て示したものである。これらより、構造物および近傍地盤の円周方向分割数に起因する応答特性の相違は、軟質地盤を対象とした場合においては高周波数領域で若干生じているものの低周波数領域ではほとんど認められず、また、硬質地盤を対象とした場合においては低周波数領域および高周波数領域ともにほとんど認められないことがわかる。

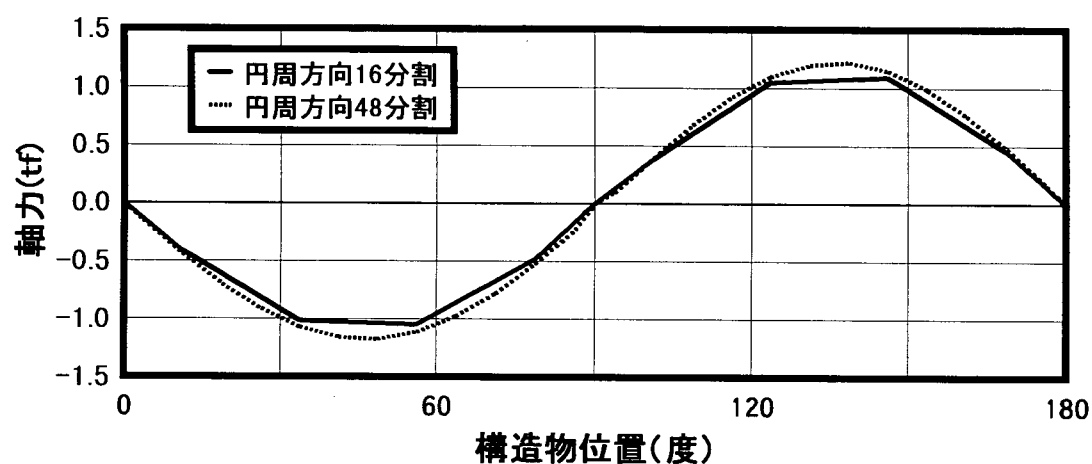
図-11は、図-5と同様の方法で、軟質地盤を対象にした場合の構造物に発生する地震時増分断面力の最大値発生時刻における計算結果を示したものである。これより、計算される地震時増分断面力に及ぼす構造物および近傍地盤の円周方向分割数の影響は認められないことがわかる。

以上の検討より、3次元解析におけるメッシュ分割数と分割方法は、以下の通りとすることとした。

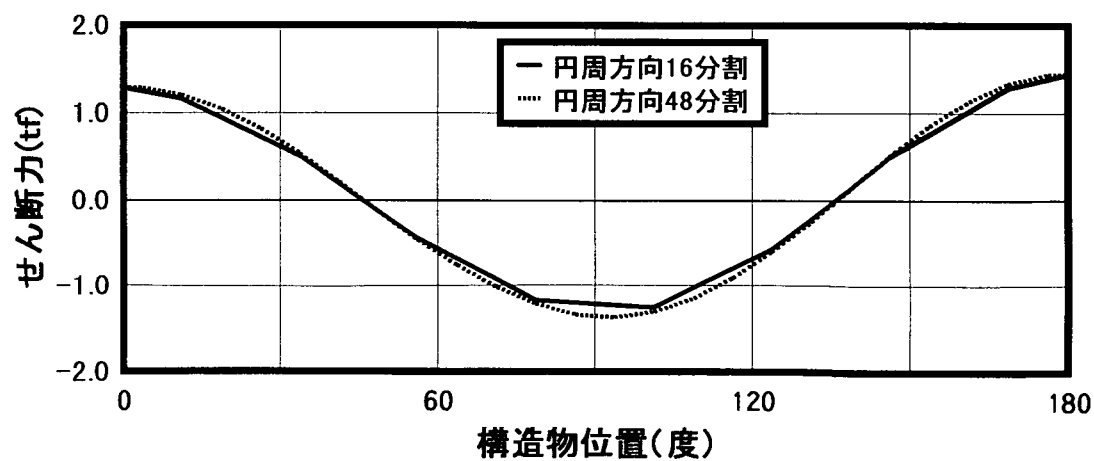
- 1) 免震層は法線方向にはメッシュを分割する必要なく、法線方向に10cmの層厚全体を1つの要素で表現する。
- 2) 近傍地盤は構造物外径から2mの範囲までを放射型にメッシュ分割する。
- 3) 構造物、免震層および近傍地盤における放射型メッシュ分割範囲の円周方向分割数は16とする。



(a) 曲げモーメント



(b) 軸力



(c) セン断力

図-11 構造物および近傍地盤の円周方向分割数が地震時増分断面力に及ぼす影響
(軟質地盤)

2. 3 解析領域幅と境界条件および地盤条件変化面のモデル化に関する検討

周波数領域における動的有限要素法解析に用いる境界条件としては、水平ローラー、粘性境界、エネルギー伝達境界等があり、より厳密な境界条件を用いれば境界の影響を小さくするために必要となるモデル化領域は小さくできるものの、境界における計算時間は増大することとなる。上述した3つの境界条件では、エネルギー伝達境界が最も厳密な境界条件であるが、他の境界条件と比較して非常に長い計算時間を要するため、節点数や自由度の大きい3次元解析において境界条件としてこれを用いることは得策ではない。そこでここでは、水平ローラーや粘性境界を用いた場合においてエネルギー伝達境界を用いた場合と同等の結果を得るために必要なモデル幅とモデル長を、横断方向、縦断方向それぞれを対象として2次元解析にて検討することとした。また、今回の3次元解析においては、地盤条件が硬質地盤から軟質地盤へと変化する箇所を対象とするため、その境界面のモデル化方法についても併せて検討することとした。図-12および図-13にここで実施した横断方向および縦断方向の検討項目を図示する。

横断方向の検討においては、まず、硬質地盤、軟質地盤それぞれを対象にし、側方境界条件としてエネルギー伝達境界、粘性境界、水平ローラーを用い、それぞれについてモデル幅を10m,15m,20mと変化させた解析を実施した。

図-14および図-15は、解析結果の一例として軟質地盤、硬質地盤それぞれを対象とし、モデル幅を20mとした場合について、上記3種類の境界条件の違いが構造物天端に着目した伝達関数に及ぼす影響を比較して示したものである。これらより、応答特性に関しては、モデル幅を20mとすれば粘性境界を用いた場合はエネルギー伝達境界を用いた場合と応答特性に相違はほとんど認められないが、水平ローラーを用いた場合は3~4Hz以上の周波数領域において差が認められることがわかる。

図-16および図-17は、軟質地盤、硬質地盤それぞれを対象とし、モデル幅を20mとした場合について、上記3種類の境界条件の違いが免震層に発生する最大せん断応力の計算結果に及ぼす影響を比較して示したものである。これらより、免震層に発生する最大せん断応力についても、応答特性と同様に、粘性境界を用いた場合はエネルギー伝達関数を用いた場合と大きな相違はないものの、水平ローラーを用いた場合では相違が生じてくることがわかる。

縦断方向の検討においては、構造物や免震層をモデル化せず、水平方向と45°の角度を有する地層境界面を持ち、境界面の左側を硬質地盤、右側を軟質地盤とした地盤要素のみを対象とした2次元解析を実施した。検討の対象とした項目は、前述したように、モデル長と側方境界条件との関係とともに地層境界面のモデル化方法である。図-18に境界面のモデル化方法と検討項目を示す。図に示すように、ここでは、地層境界面のモデル化方法として、階段型と傾斜型の2ケースを考えた。このうち、傾斜型分割はより厳密な解析メッシュとなるが、メッシュ分割の作業性は階段型分割の方が簡便かつ有利となる。ここでは、モデル化領域と側方境界条件の検討とともに、境界面についても両分割方法での解析結果を比較し、3次元解析における縦断方向解析メッシュ分割方法を検討した。

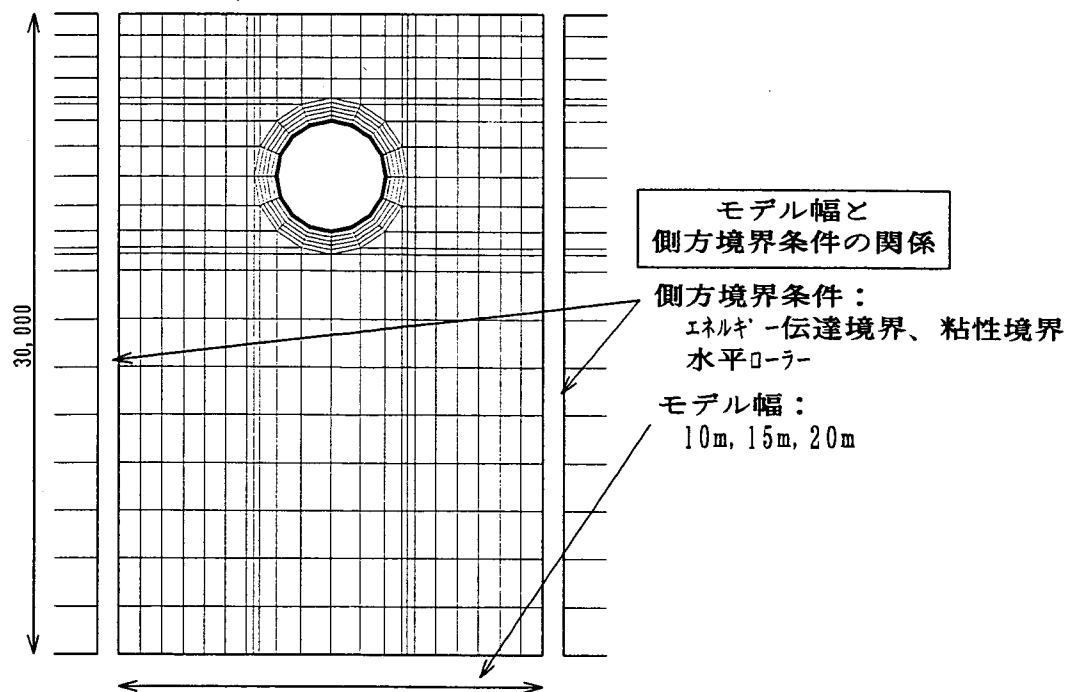


図-12 境界条件とモデル幅の検討（横断方向）

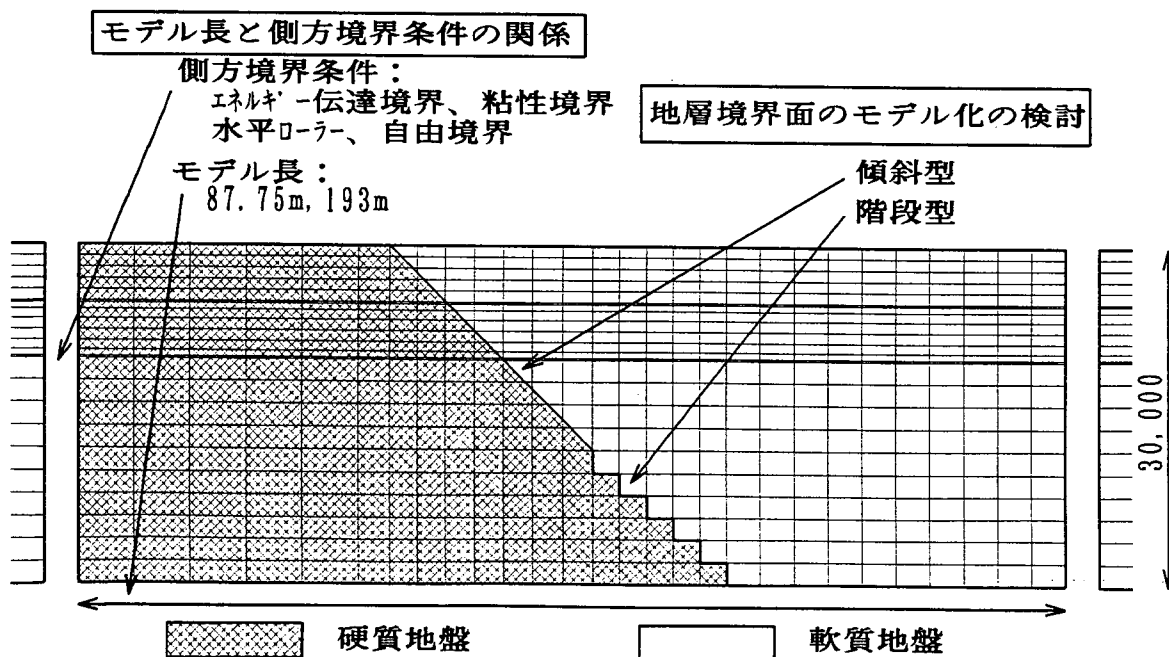


図-13 境界条件とモデル長および地層境界面のモデル化方法の検討（縦断方向）

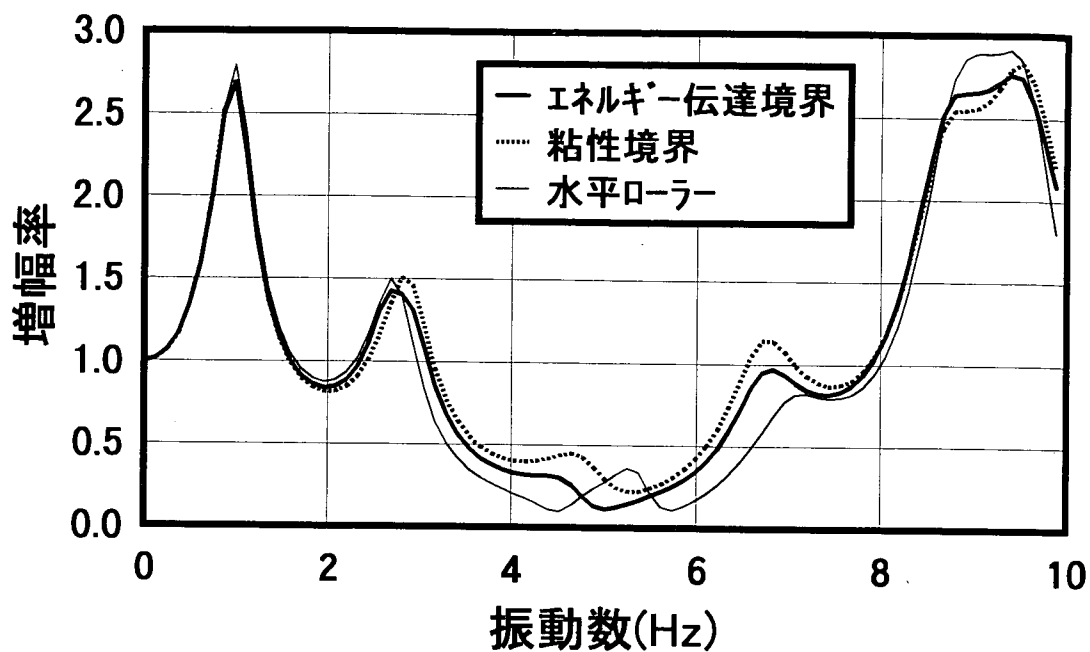


図-14 モデル幅を20mとした場合の側方境界条件が伝達関数に及ぼす影響
(構造物天端伝達関数：軟質地盤)

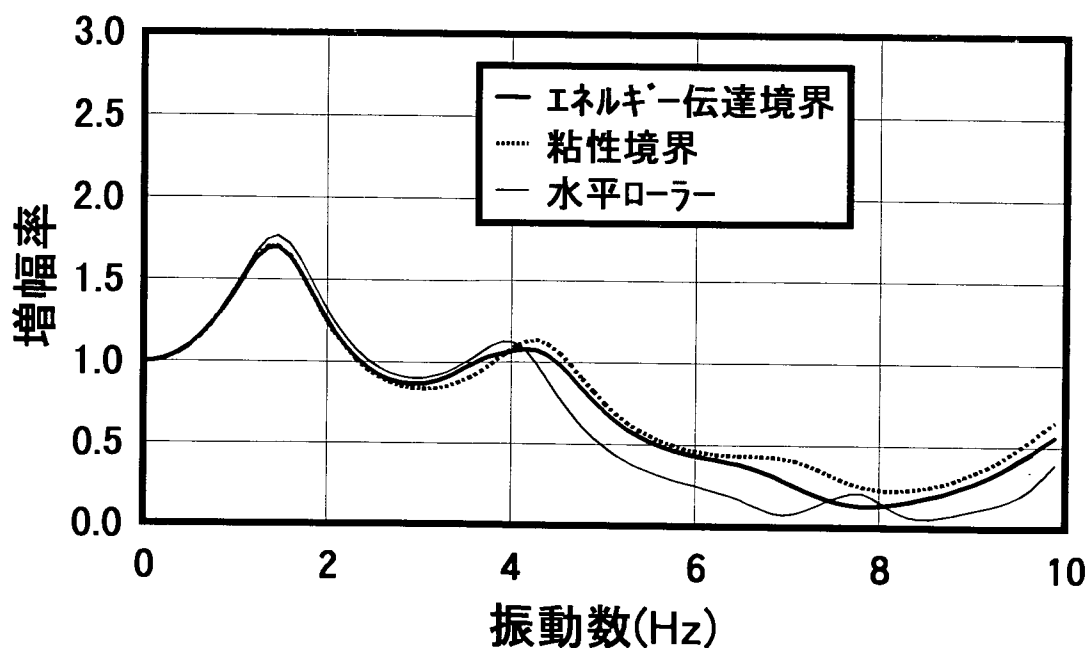


図-15 モデル幅を20mとした場合の側方境界条件が伝達関数に及ぼす影響
(構造物天端伝達関数：硬質地盤)

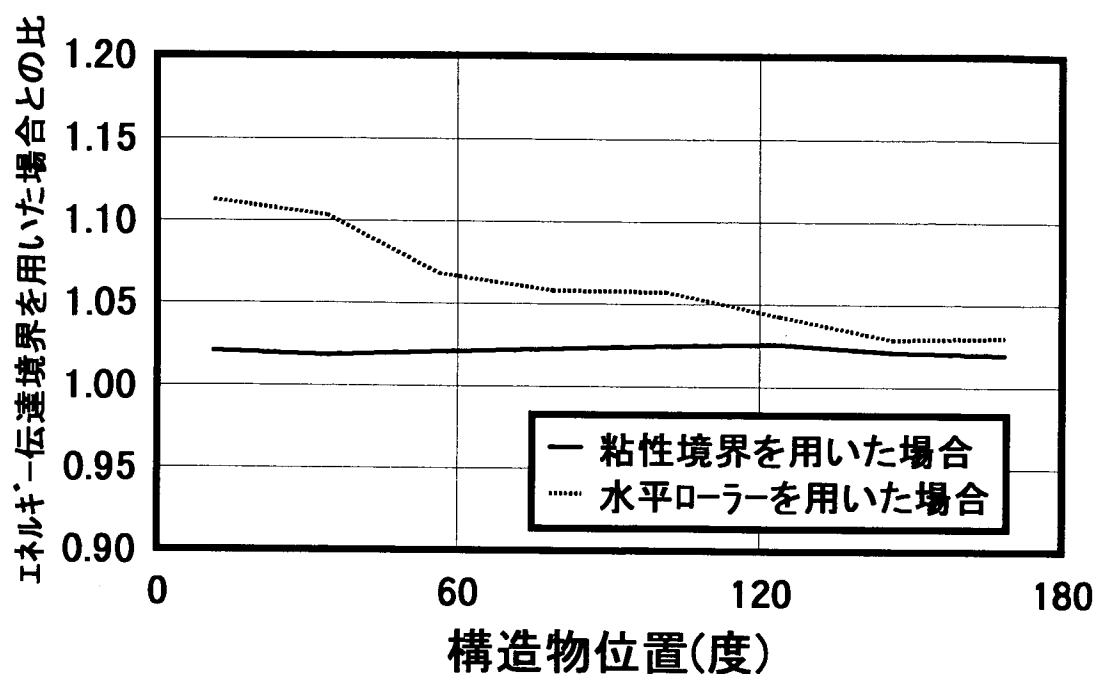


図-16 モデル幅を20mとした場合の側方境界条件が免震層最大せん断応力に及ぼす影響
(構造物側部位置：軟質地盤)

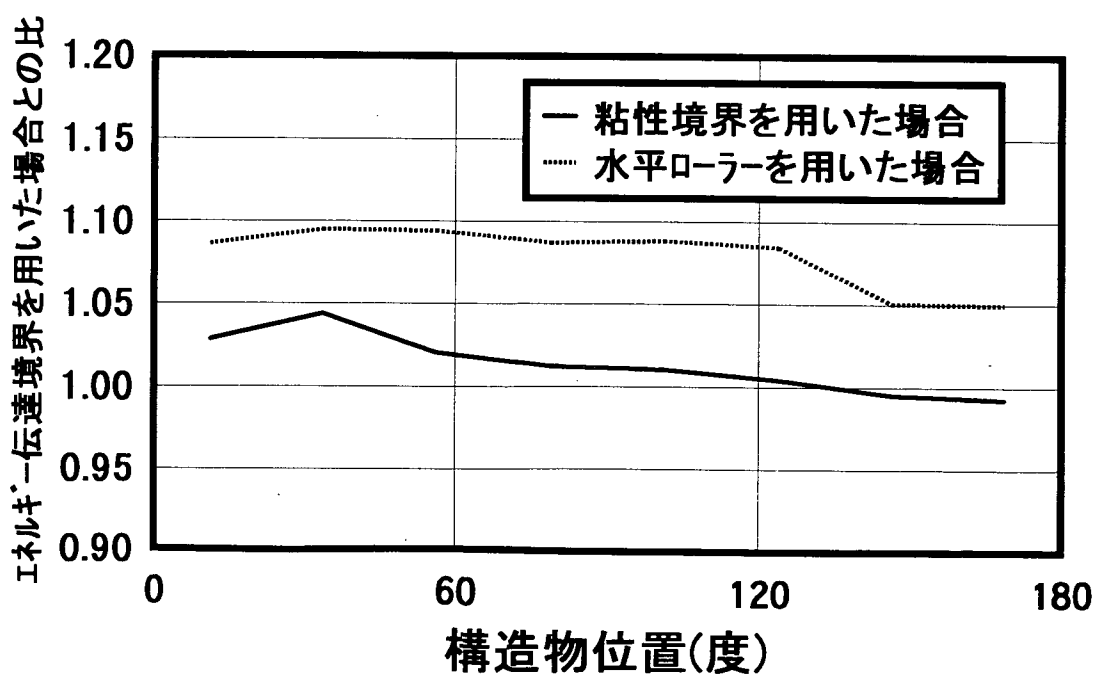
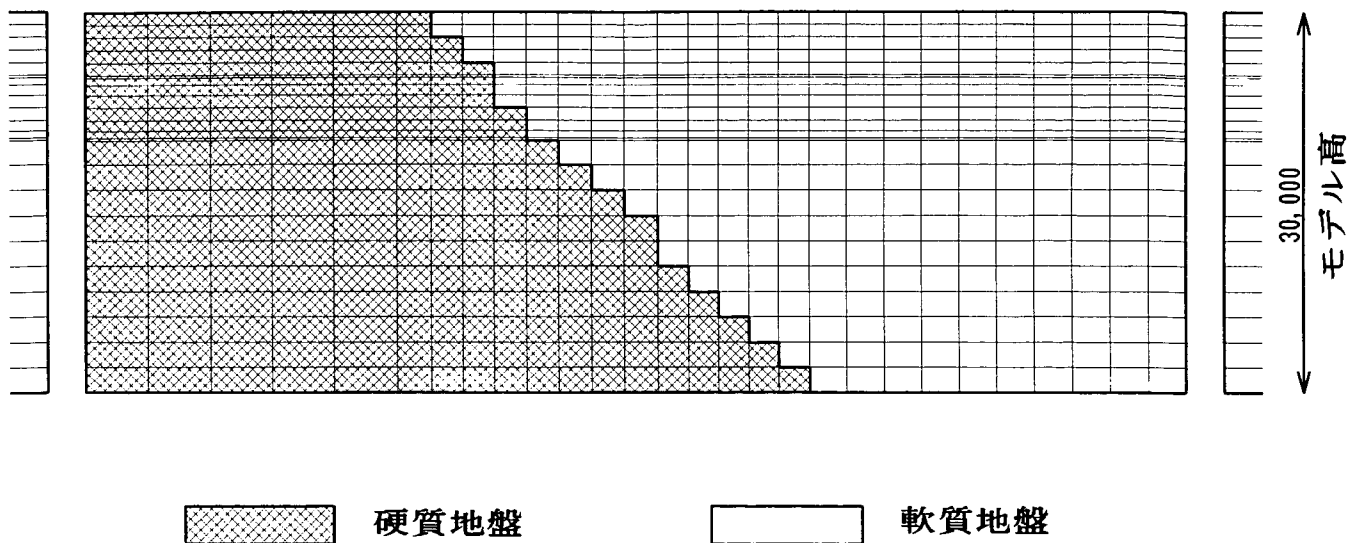
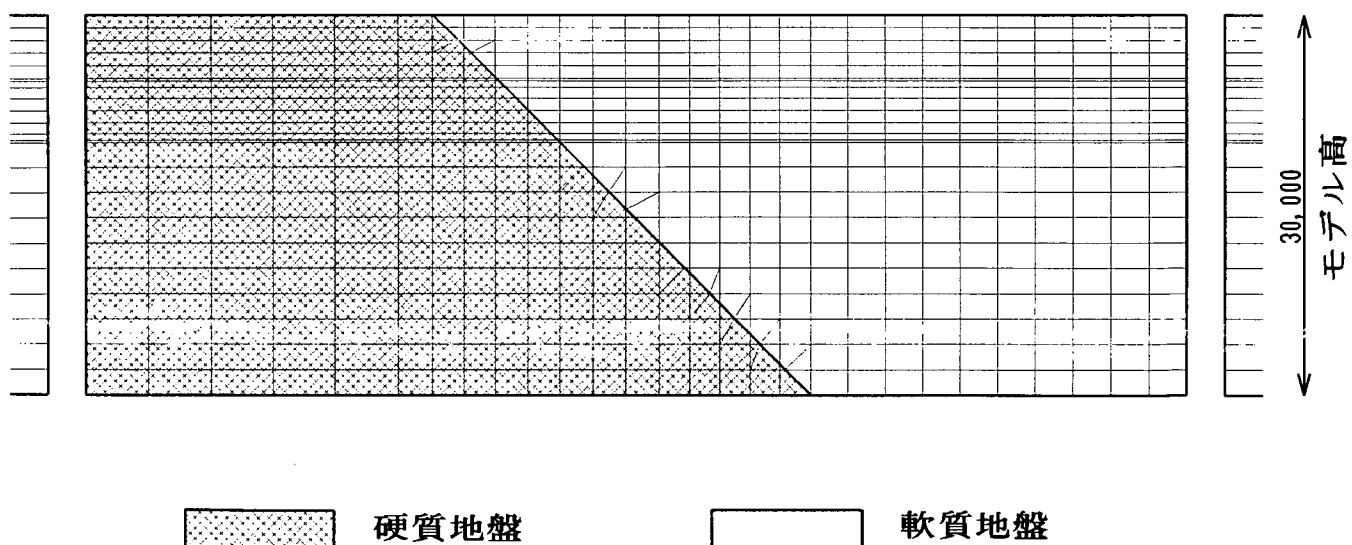


図-17 モデル幅を20mとした場合の側方境界条件が免震層最大せん断応力に及ぼす影響
(構造物側部位置：硬質地盤)



(a) 階段型分割



(b) 傾斜型分割

図-18 地層境界面メッシュ分割方法

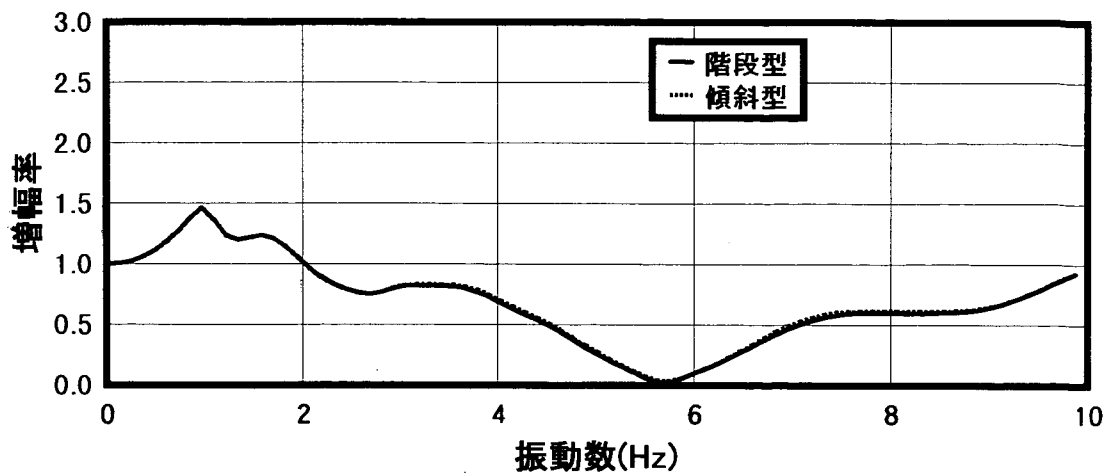
まず始めに、モデル長を87.75mとし、側方境界条件としてエネルギー伝達境界、粘性境界、水平ローラー、自由境界を用いた場合それぞれについて、地層境界面を傾斜型および階段型にてモデル化した場合の解析を実施した。図-19は、エネルギー伝達境界を用いた場合の構造物中心高さの硬質地盤中央部、地層境界点、軟質地盤中央部における階段型モデルと傾斜型モデルの伝達関数を比較して示したものである。これらから、階段型分割と傾斜型分割との間の応答特性の差異は認められないことがわかる。

図-20は、地層境界面を階段型でモデル化した場合について、側方境界条件の違いが構造物中心高さの硬質地盤中央部、地層境界点、軟質地盤中央部における伝達関数に及ぼす影響を比較して示したものである。これらより、粘性境界を用いた場合はエネルギー伝達境界を用いた場合に最も応答特性に近いが、水平ローラーや自由境界を用いた場合は卓越周波数が変化しており、顕著な境界の影響がみられることがわかる。

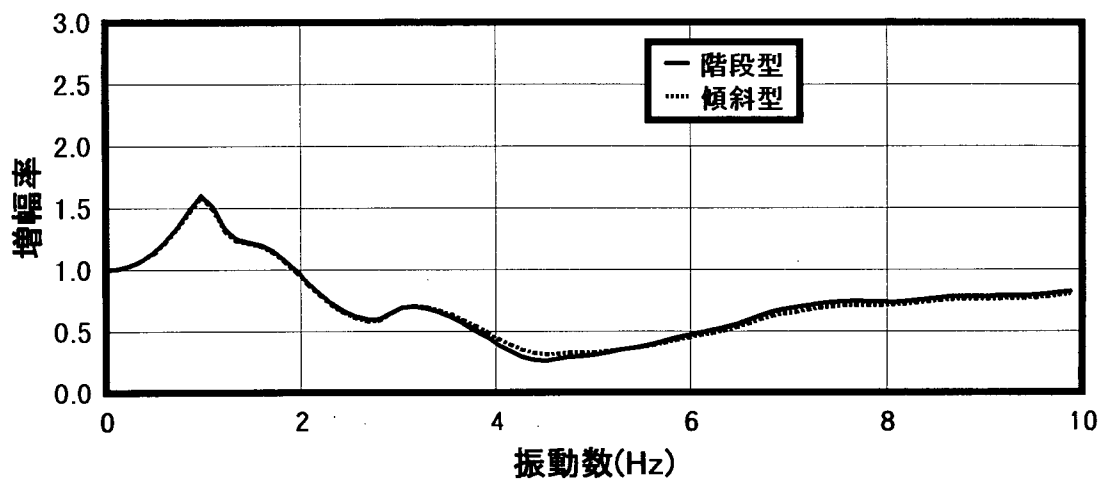
次に地層境界面を階段型でモデル化するとともに、側方境界条件としてエネルギー伝達境界と水平ローラー、自由境界を用い、モデル長を193mとした場合の解析を実施した。図-21は、構造物中心高さの硬質地盤中央部、地層境界点、軟質地盤中央部における伝達関数に及ぼす影響を比較して示したものである。これらより、側方境界条件として水平ローラーや自由境界を用いた場合は、モデル長を当初の倍以上としても卓越周波数が変化し、側方境界の影響は回避できないことが明らかとなった。

以上の検討より、3次元解析におけるモデル化は以下の通りとすることとした。

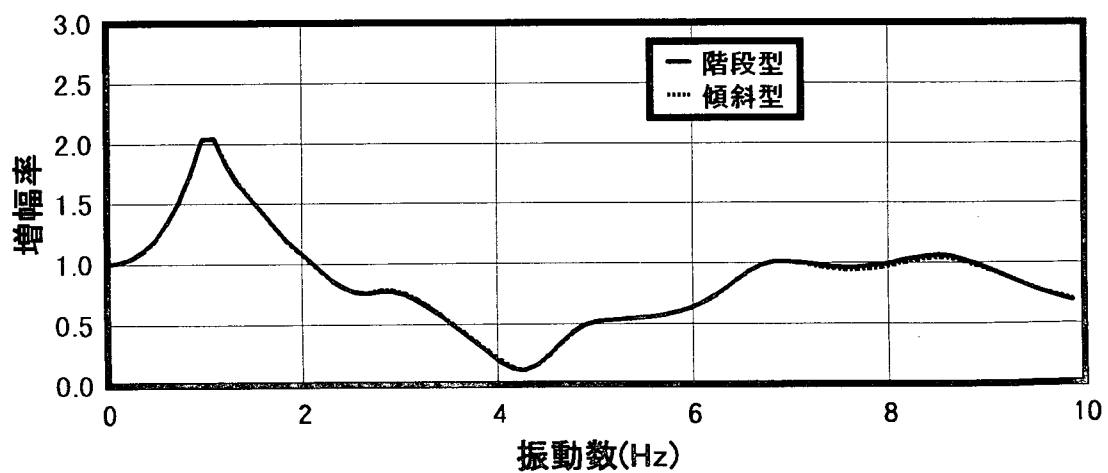
- 1)横断方向のモデル幅は20m以上とし、側方境界条件として粘性境界を用いれば、エネルギー伝達関数と顕著な相違はない。ただし、解析モデル構築の際には、対称性を考慮し、適切な拘束条件を設定したうえで構造物中心から16.5m幅（総幅33mに相当）のハーフモデルとする。
- 2)地層境界面のモデル化は簡易な階段型にて行う。
- 3)縦断方向のモデル長は87.75mとし、境界条件としては粘性境界を用いる。



(a)硬質地盤中央部

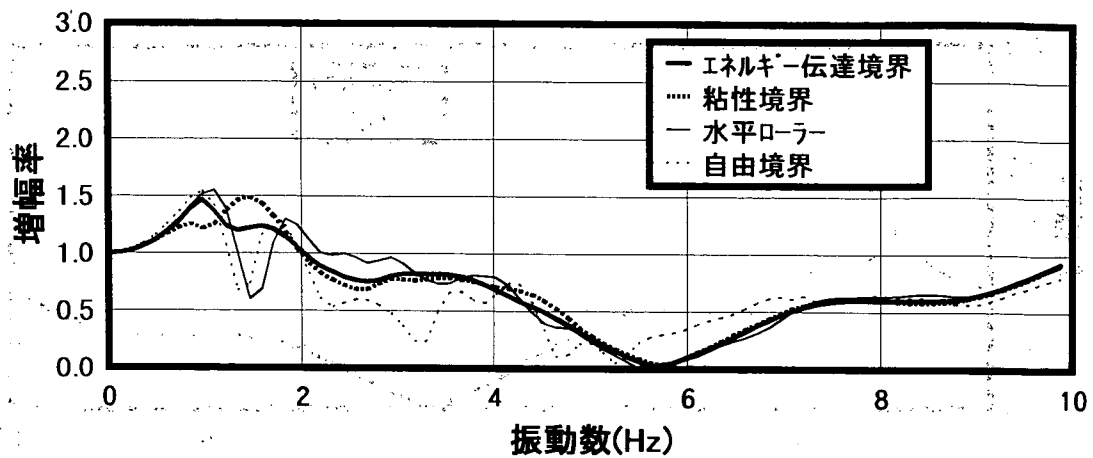


(b)地層境界点

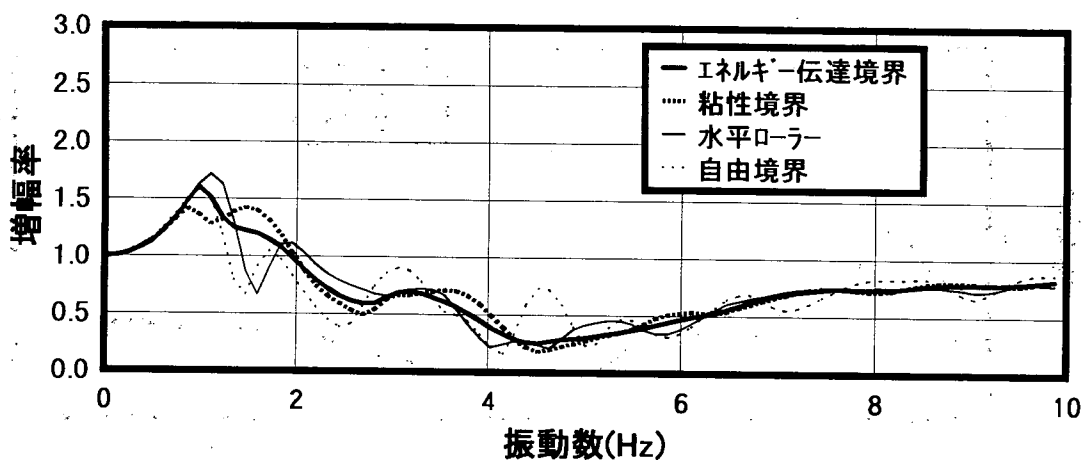


(c)軟質地盤中央部

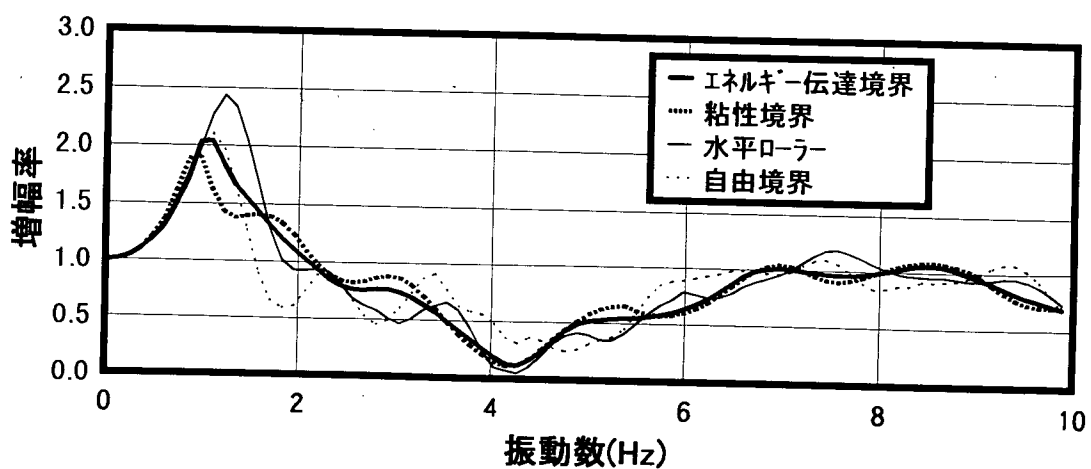
図-19 1次元-伝達境界を用いた場合の地層境界面のモデル化方法が伝達関数に及ぼす影響
(構造物中心高さ)



(a)硬質地盤中央部

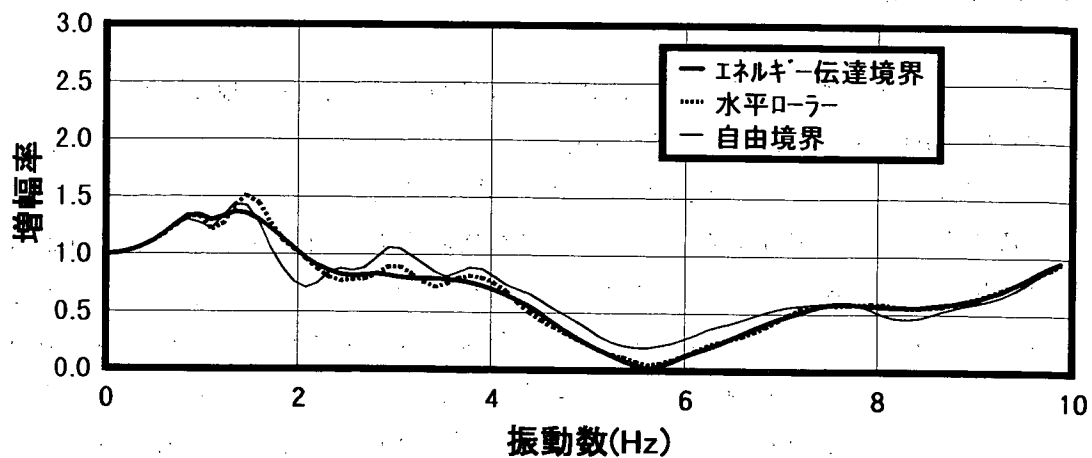


(b)地層境界点

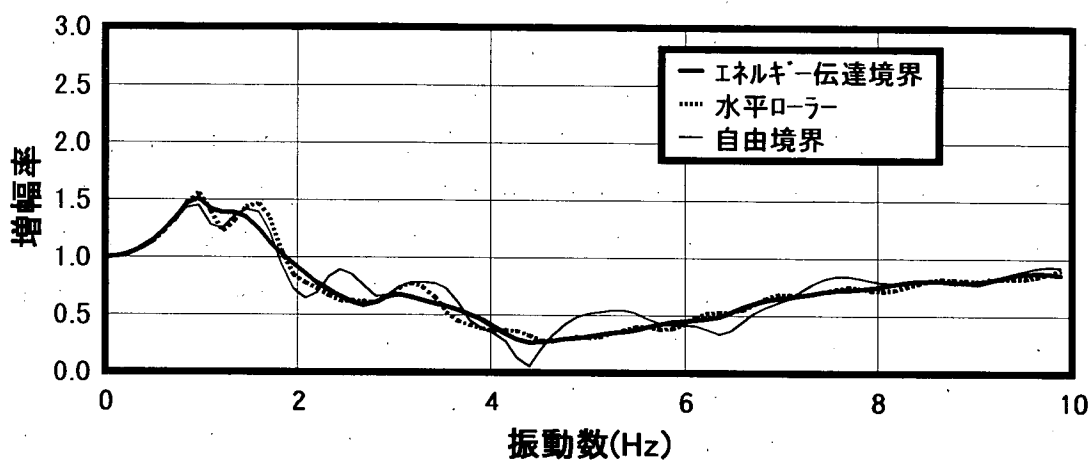


(c)軟質地盤中央部

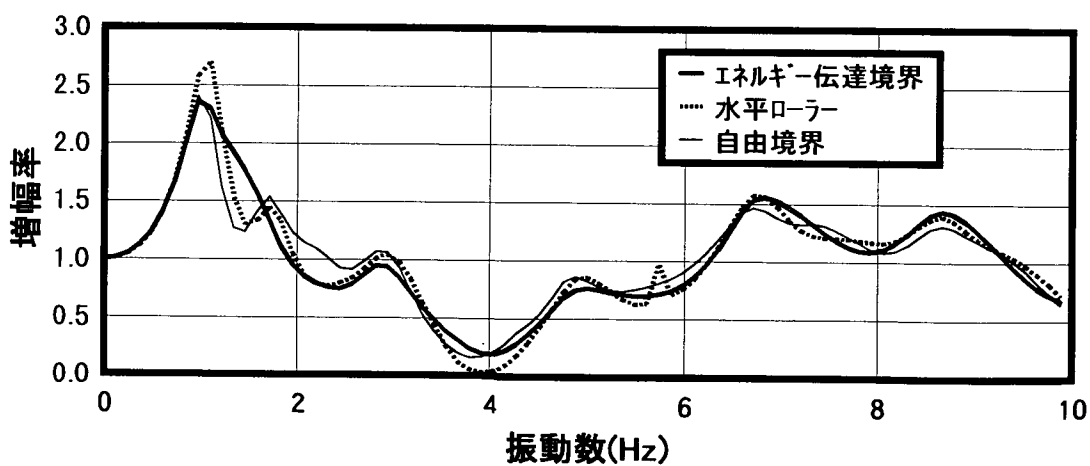
図-20 モデル長を87.75mとした場合の側方境界条件が伝達関数に及ぼす影響
(境界面：階段型、構造物中心高さ)



(a)硬質地盤中央部



(b)地層境界点



(c)軟質地盤中央部

図-21 モデル長を193mとした場合の側方境界条件が伝達関数に及ぼす影響
(境界面：階段型、構造物中心高さ)

3. 3次元解析における解析条件

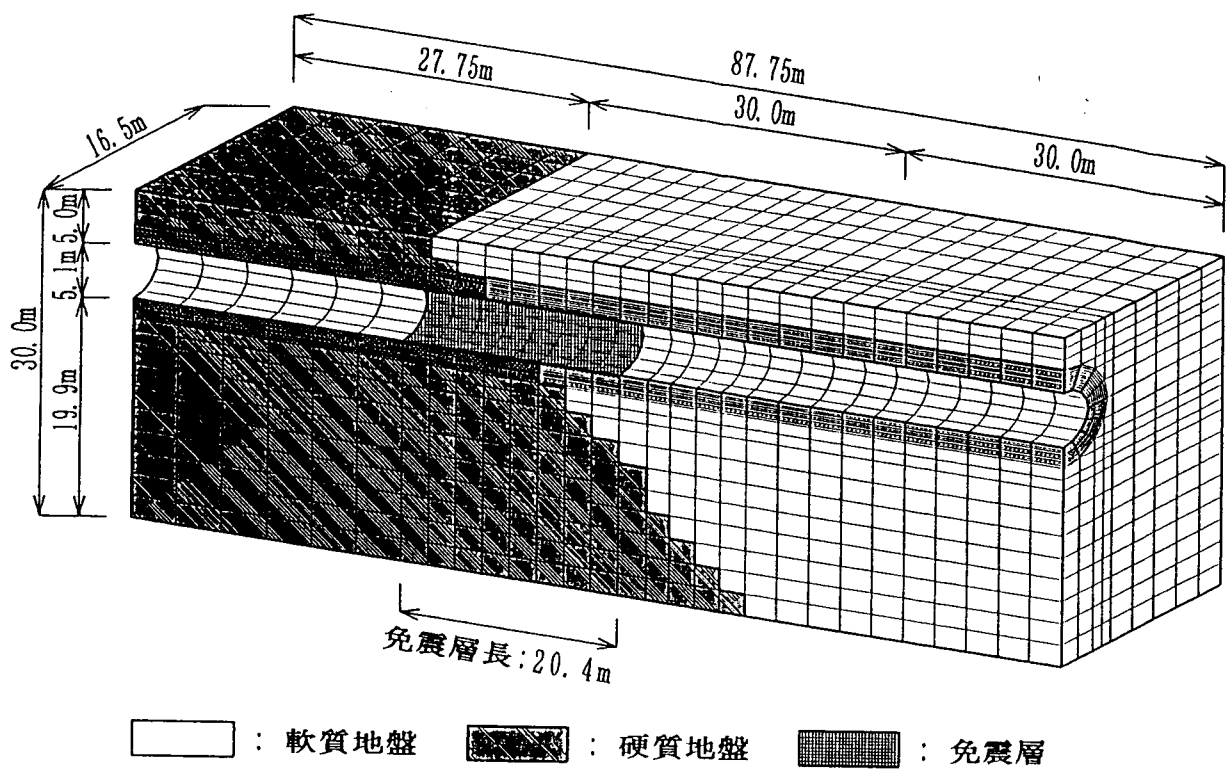
3次元解析における解析モデルは、前述の予備解析結果を踏まえ構築した。すなわち、地盤厚30mの表層地盤を対象とし、モデル幅は16.5mでハーフモデルとした。また、モデル長さは、87.75mとした。地層境界面は水平面と45°の角度を有する面を基本とし、階段型で表現することとした。境界条件は底面、構造物横断方向側面、構造物縦断方向側面とも、粘性境界を用いた。対象とした構造物は、予備解析と同様に円形断面を有するものとし、構造物の径は5.1m、土被りは5m(=1D)とした。免震層は、構造物の中心点が地層境界面と交わる点を中心に、軟質地盤側、硬質地盤側それぞれ構造物径の2倍の長さで設置することを基本とし、設置長は20.4mとした。また、免震層厚は10cmとした。解析においては、構造物はシェル要素で、地盤及び免震層は3次元ソリッド要素でモデル化した。総節点数は7350、要素数は3次元ソリッド要素6235、シェル要素232となった。解析モデル全体と地盤、構造物、免震層ごとのモデルを図-22に示す。

解析ケースとしては、表-4に示すように、加振方向を軸方向（以下X方向と称する）加振及び軸直角水平方向（以下Y方向と称する）加振の2ケースとし、それぞれ免震層あり、なしの計4ケースとした。各ケースにおける拘束条件としては、X方向加振においては、対称面におけるすべての節点でY方向の自由度を拘束するとともに、シェル要素の回転に関しては、X方向と軸直角鉛直方向（以下Z方向と称する）周りの回転自由度を拘束した。また、Y方向加振においては、対称面におけるすべての節点でX方向とZ方向の自由度を拘束するとともに、シェル要素の回転に関しては、Y方向周りの回転自由度を拘束した。これらの拘束条件より、モデルの対称性を表現することとした。

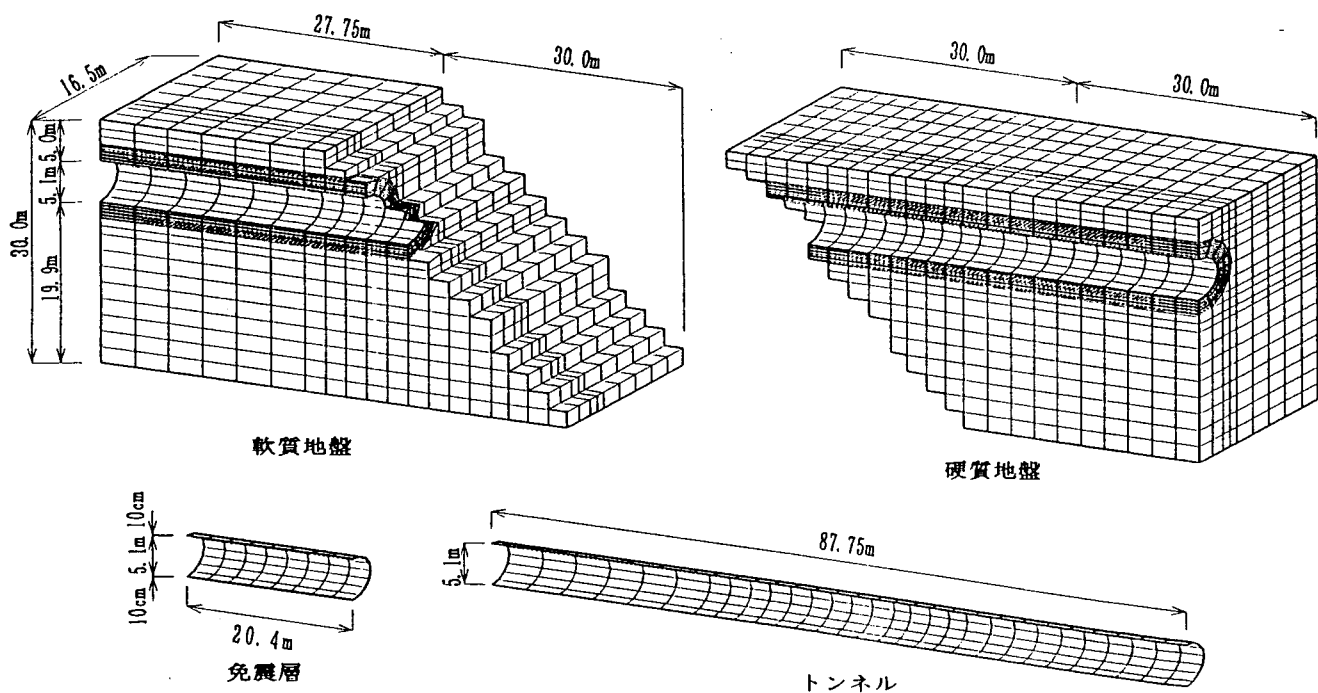
入力地震動としては、予備解析と同様に図-1に示した平成2年道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁷⁾に示されている震度法に用いるI種地盤用標準波形を用い、これを解放基盤面における波形と考え、その1/2をモデル下面に入力した。また、本解析は免震メカニズムの解明を目的としており、結果の解釈を容易にするため、入力にX方向加振、Y方向加振それぞれについて同位相で入力し、基盤面における地震動の箇所別の変化については考慮していない。

解析に用いた地盤は、予備解析の場合と同じ物性値を有する軟質地盤と硬質地盤を対象とし、地盤のせん断弾性係数は、入力地震動が震度法レベルであることを考慮し、共同溝設計指針⁸⁾を参考に地盤ひずみの大きさに基づく補正係数を0.8としたうえで一定値を用いた。また、免震層の物性値も予備解析と同様に、地盤ひずみの大きさに基づく補正係数0.8を考慮した地盤のせん断弾性係数に対してせん断弾性係数比が1/100になるよう設定したが、ここでは、硬質地盤のせん断弾性係数を基準として免震層の物性値を設定した。さらに、ポアソン比と減衰定数に関しても、予備解析と同様にそれぞれ0.3、3%とした。解析に用いた地盤および免震層の物性値を表-5に示す。

構造物については、厚さ22.5cmのコンクリートセグメントを用いた一次覆工のみのシェルドトンネルを想定し、X方向加振については、セグメントと継手との等価引張剛性を、



(a) 全体図



(b) 地盤、免震層、構造物

図-22 解析モデル

表-4 解析ケース

ケース	加振方向	免震層
①	X方向加振	なし
②	X方向加振	あり
③	Y方向加振	なし
④	Y方向加振	あり

表-5 地盤および免震層の物性値

項 目	軟質地盤	硬質地盤	免震層	基盤層
せん断弾性係数 tf/m^2	2,160	5,560	55.6	18,370
単位体積重量 tf/m^3	1.6	1.8	1.0	2.0
せん断弾性波速度 m/s	115	174	23	300
ポアソン比	0.49	0.45	0.3	0.49
減衰定数	0.03	0.03	0.03	0.03

表-6 構造物の物性値

加振方向	X方向加振	Y方向加振
弾性係数 t/m^2	195,000	3,000,000
せん断弾性係数 t/m^2	84,000	1,285,700
単位体積重量 t/m^3	2.5	
ポアソン比	0.167	
減衰定数	0.03	

Y方向加振については、セグメント自体の剛性にセグメント継手の存在に起因する曲げ剛性の有効率0.8を考慮し、諸元を設定した。解析に用いた構造物の物性値を表-6に示す。

解析は、周波数領域における複素応答法による3次元動的有限要素法により実施した。

4. 解析結果および考察

4. 1 X方向加振解析結果

(1)構造物の応答値

解析結果のうち、ここではまず、構造物軸方向の加速度、速度、および変位の応答値を対象とし、それぞれについて最大絶対値分布を示し考察する。ここで、変位の応答値に関しては、トンネルのひずみに換算し、その最大値分布を示して考察することとする。

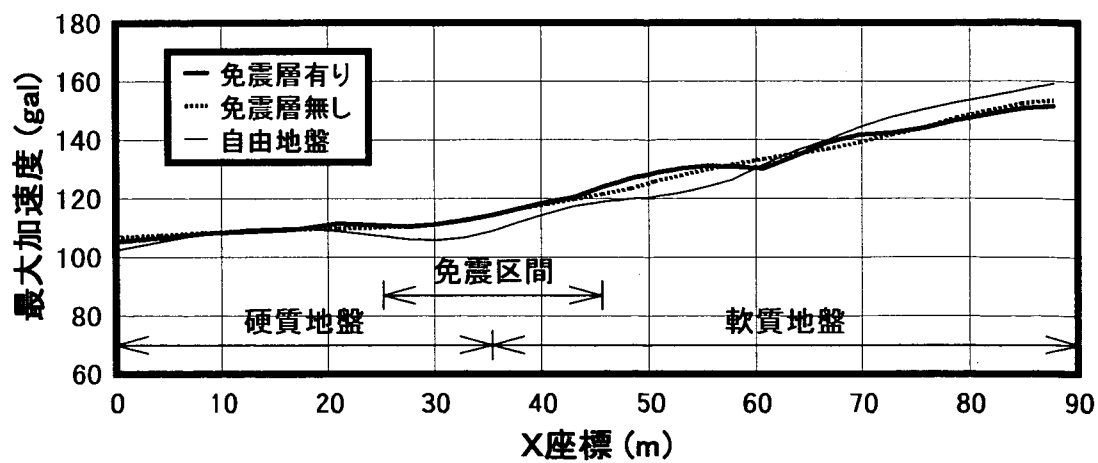
図-23および図-24は、構造物上部、側部、下部に着目し、それぞれの節点における軸方向の加速度と速度の応答値における免震層の有無による差異を、同深度における自由地盤の結果とともに比較して示したものである。これらより、免震層の有無による構造物の最大応答加速度、最大応答速度の差異は認められないことがわかる。すなわち、今回の解析条件での免震地下構造物の地震時挙動は、通常の非免震構造物の場合と同様に地盤に追従することとなり、応答加速度や応答速度に有意な影響を及ぼす自励振動等は生じないものと考えられる。

図-25は、構造物の最大軸方向ひずみ、すなわち、構造物の各節点における軸方向最大相対変位を区間長で除したものにおける免震層の有無による差異を、同深度における自由地盤の結果とともに比較して示したものである。これらより、本解析のような地盤条件変化部を有する場合、自由地盤の軸方向ひずみは地層境界より少し軟質地盤側でピークを有するような最大値分布を示し、非免震の構造物においても自由地盤に追従した形のひずみ分布となるが、これに対して免震層を設置した場合は、その設置区間において、軟質地盤側では構造物のひずみが非免震の場合と比較して低下しているが、硬質地盤側では逆に増加していることがわかる。すなわち、免震層を設置すると、このような地層変化部において構造物に生じるひずみの集中を緩和し、平滑化する効果があることが示された。このような構造物の軸方向ひずみの分布形状は、後述する構造物の軸方向軸力と対応づけられる。

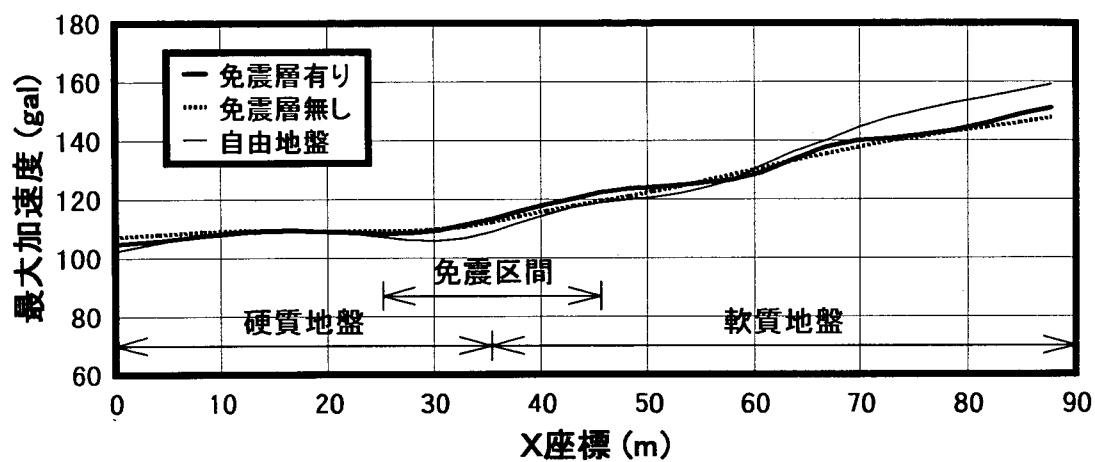
(2)構造物軸方向に関する免震層のせん断挙動と構造物軸力の低減

次に、構造物軸方向に着目し、免震層や近傍地盤のせん断ひずみやせん断応力、構造物の軸力について、それぞれ最大値分布を示し考察する。図-26に今回検討の対象としたデータの着目点と軸力、せん断応力、ひずみの方向を示す。

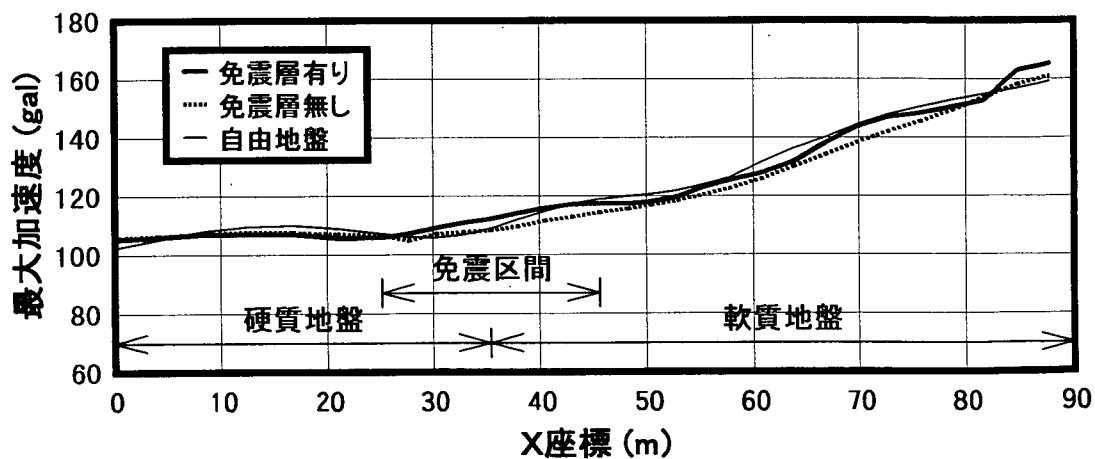
図-27および図-28は、免震層位置の要素、すなわち、非免震の場合では構造物と隣接する地盤要素、免震の場合では免震層要素における構造物軸方向せん断ひずみおよびせん断応力の最大値分布をそれぞれ比較して示したものである。これらより、免震層は非免震の同位置における地盤要素より最大で10~20倍大きいせん断変形を示しているが、免震層のせん断弾性係数は地盤の1/100であることにより、せん断応力で比較すると非免震の場合より小さいことがわかる。また、免震の場合は免震区間の両縁端部において局所的に大きなせん断応力が生じているが、これは、定性的には、免震区間の構造物外周のせん断抵抗が極めて小さいため、構造物と地盤との相互作用力が両端の境界部に集中したことによると



(a) 構造物上部

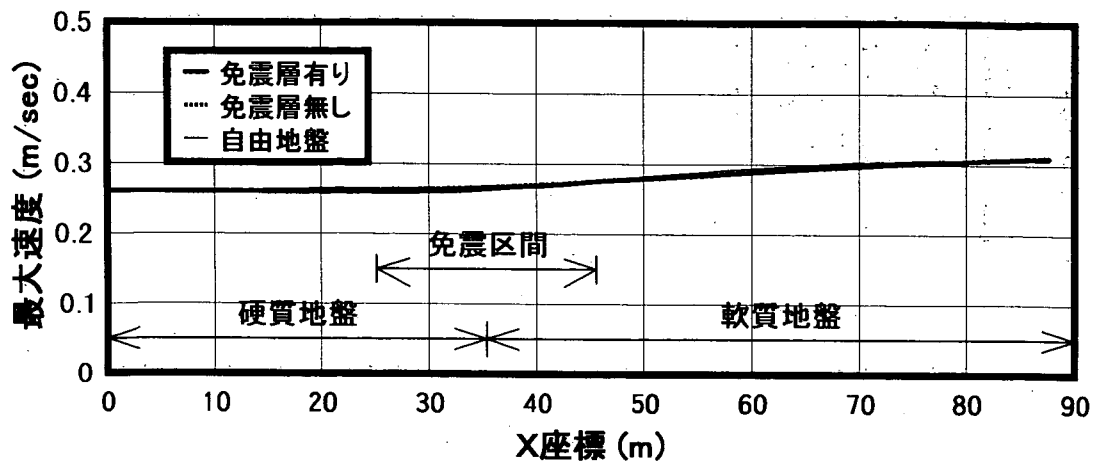


(b) 構造物側部

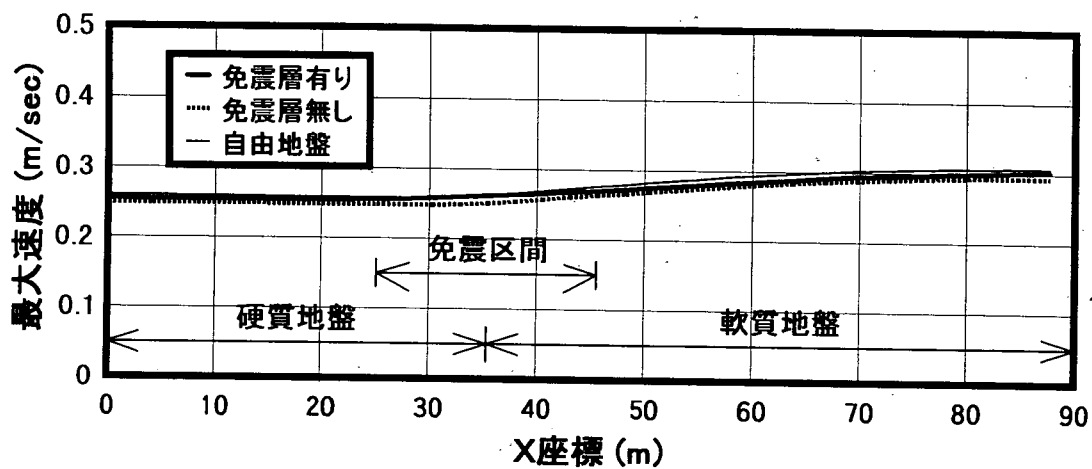


(c) 構造物下部

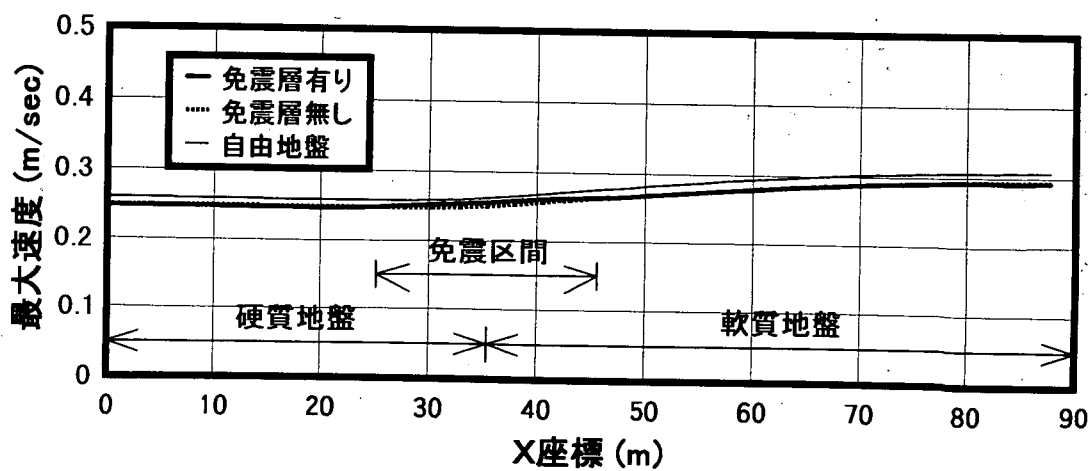
図-23 構造物軸方向最大加速度(X方向加振)



(a) 構造物上部

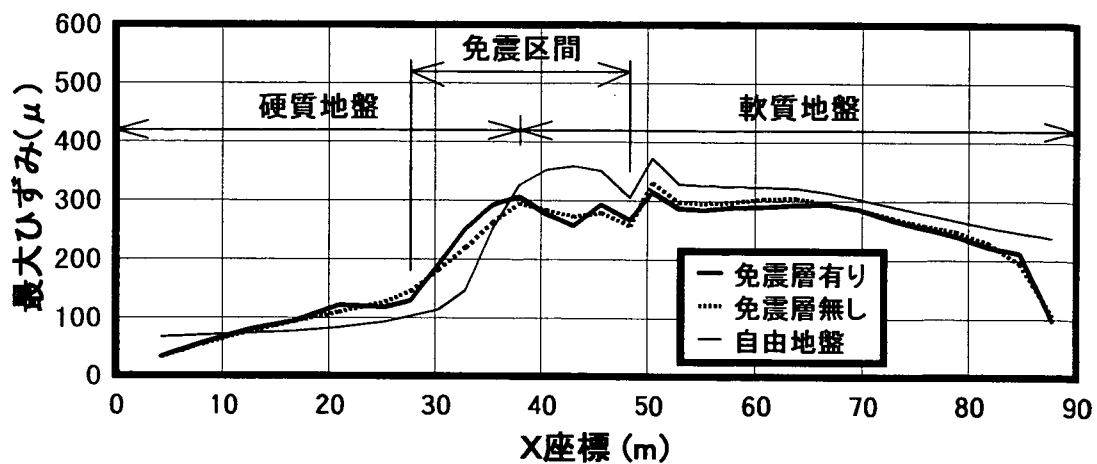


(b) 構造物側部

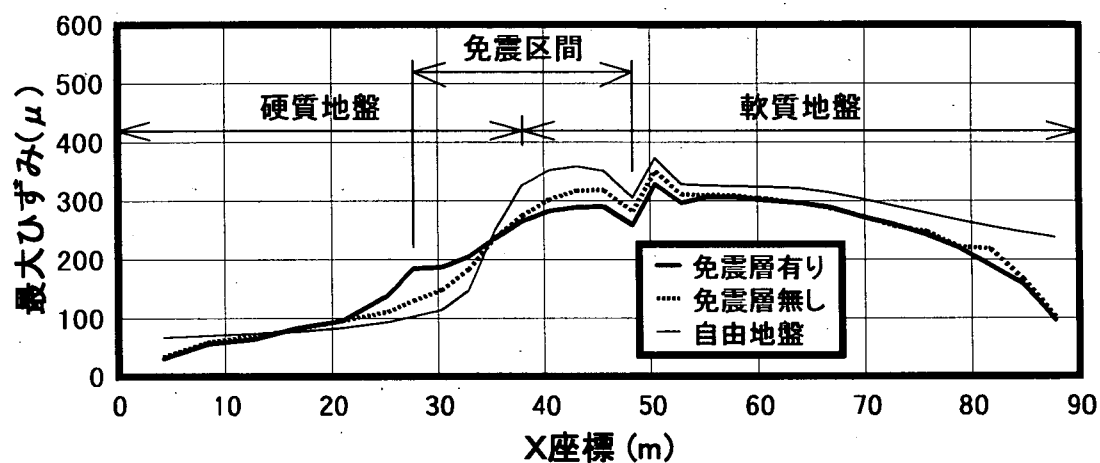


(c) 構造物下部

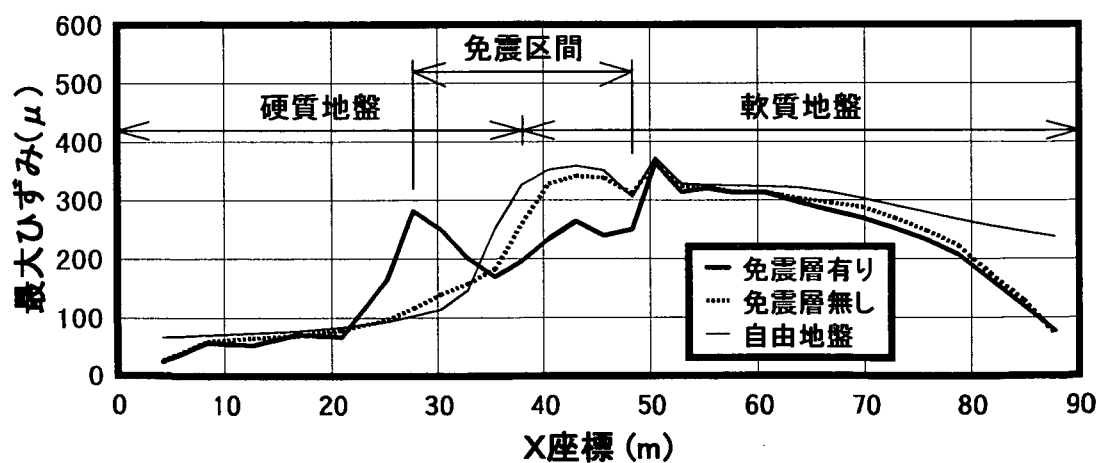
図-24 構造物軸方向最大速度(X方向加振)



(a) 構造物上部



(b) 構造物側部



(c) 構造物下部

図-25 構造物軸方向最大ひずみ(X方向加振)

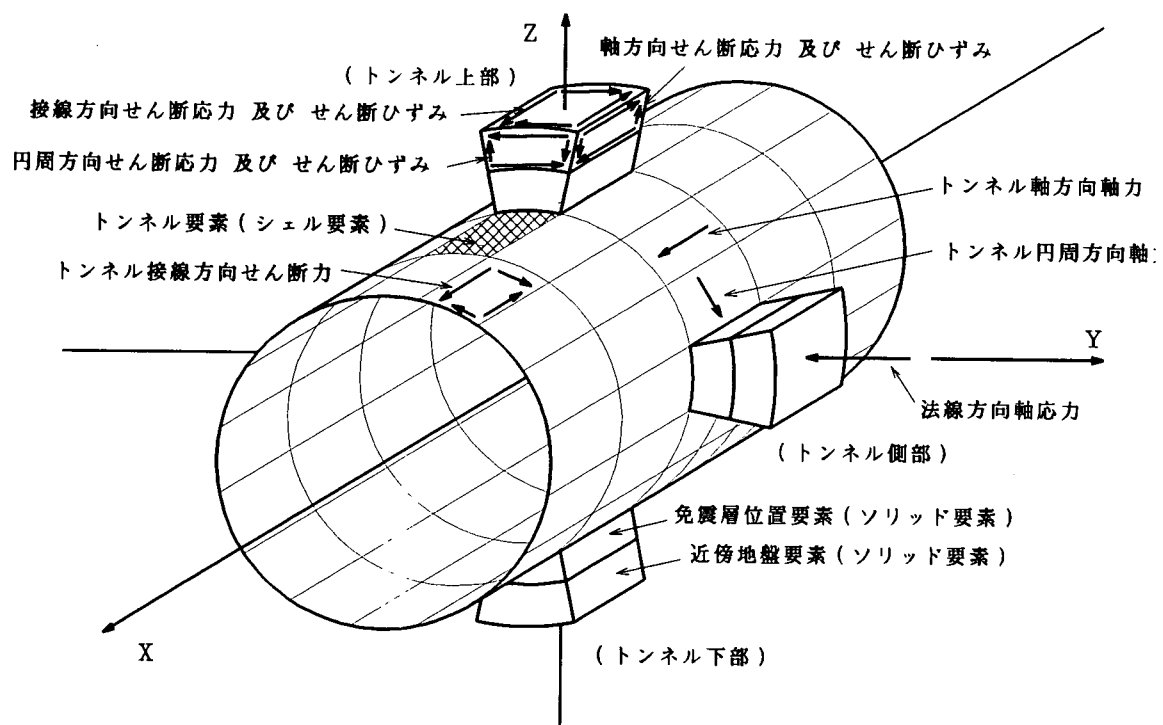
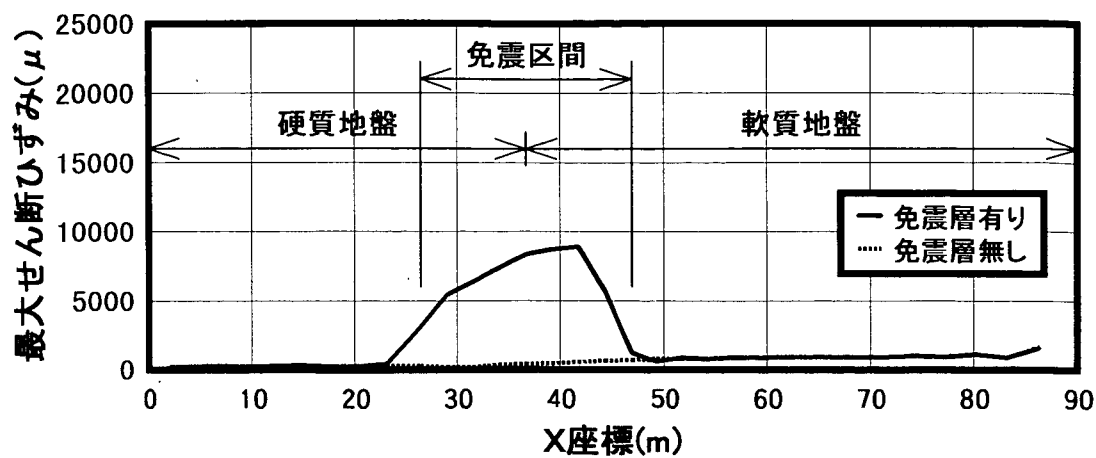
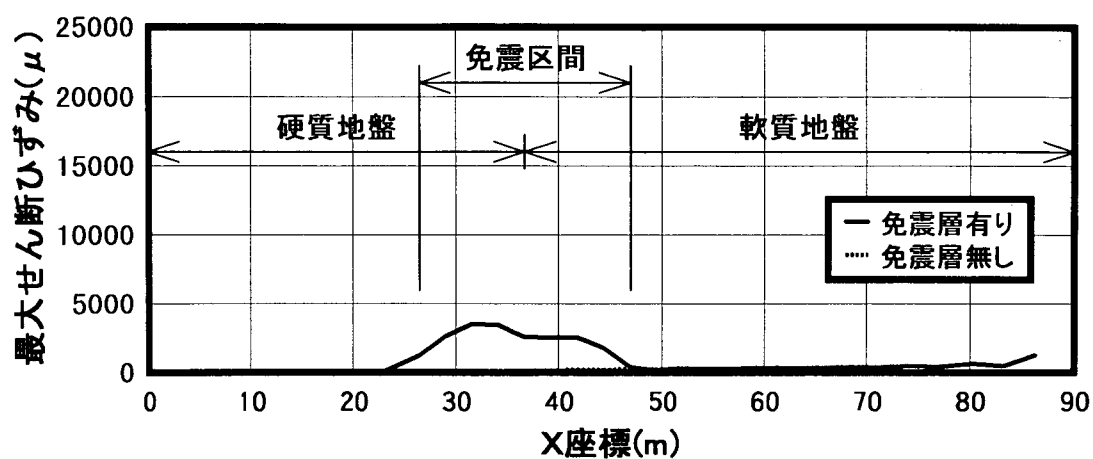


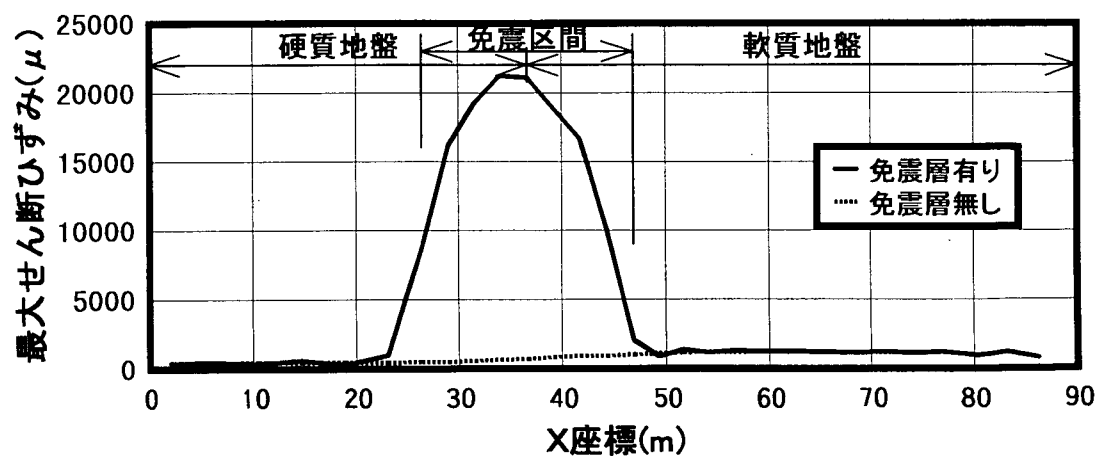
図-26 着目した要素及び所量



(a) 構造物上部

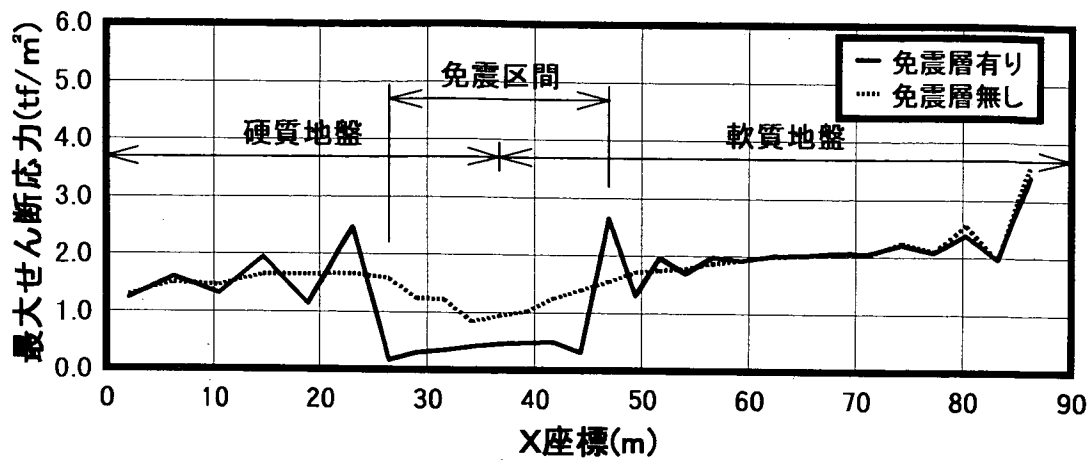


(b) 構造物側部

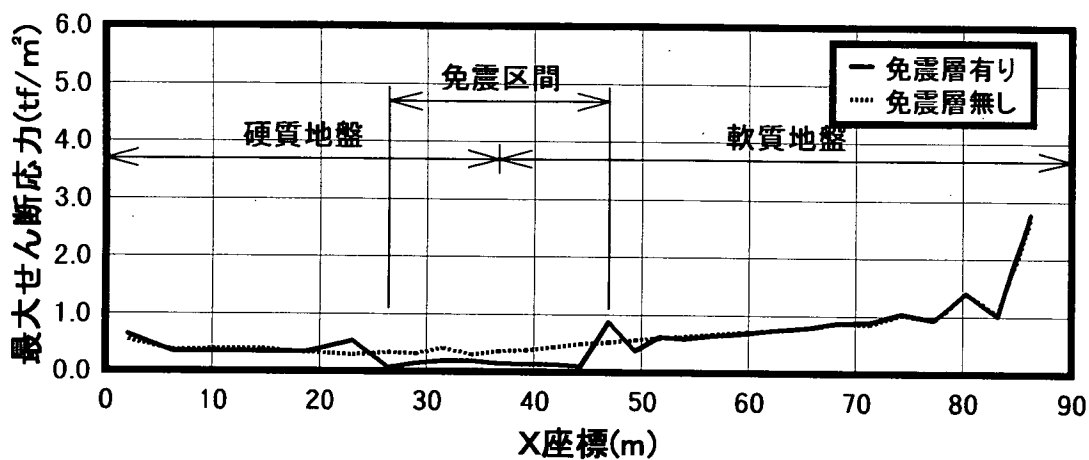


(c) 構造物下部

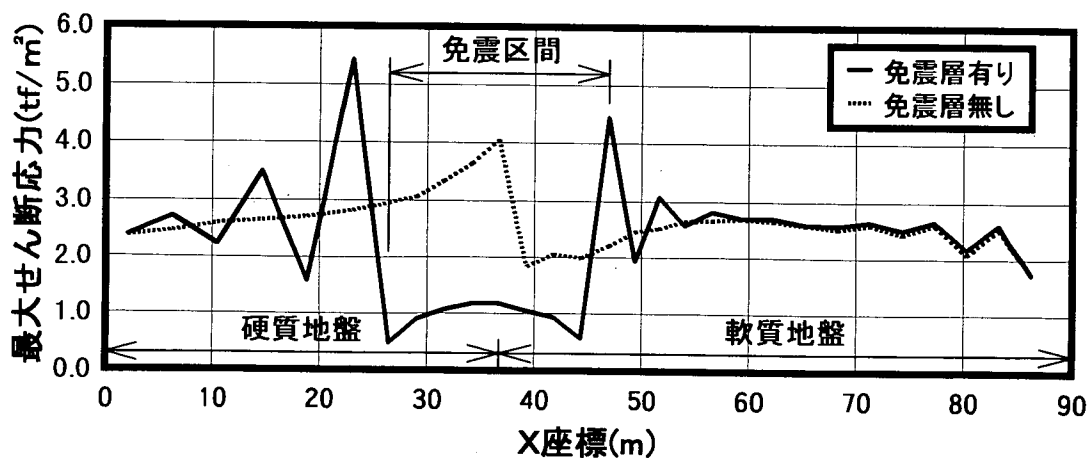
図-27 免震層位置要素の構造物軸方向せん断ひずみ(X方向加振)



(a) 構造物上部



(b) 構造物側部



(c) 構造物下部

図-28 免震層位置要素の構造物軸方向せん断応力(X方向加振)

考えられる。

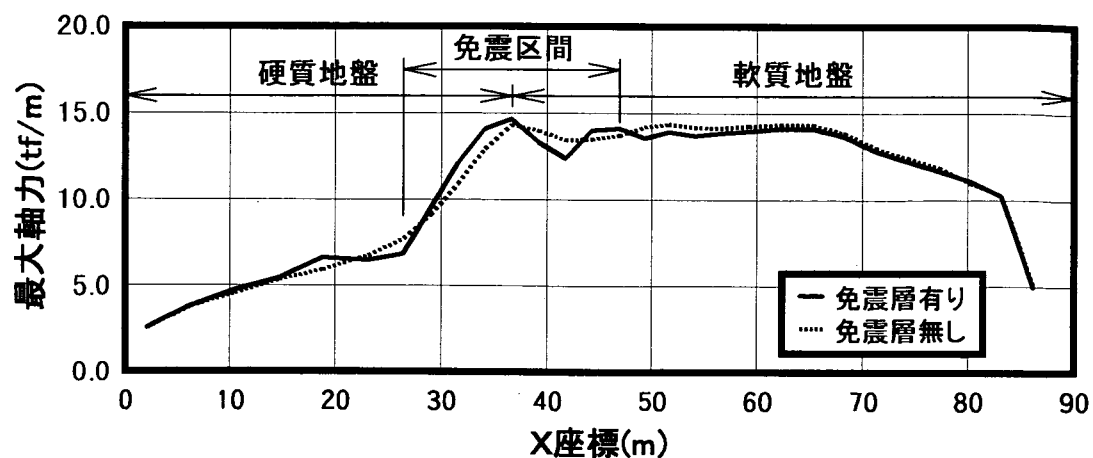
図-29は、構造物軸方向に着目した構造物軸力の最大値に関する免震層の有無による差異を比較して示したものである。これらより、免震の場合では、免震区間において免震層のせん断応力の低減や構造物のひずみの平滑化に対応した構造物軸方向軸力の低減が認められる。この低減メカニズムとしては、既往の知見と同様に、免震層が大きくせん断変形することにより構造物と地盤との拘束が遮断されるとともに、構造物に伝達する軸力が低減したことが考えられる。特に、今回対象としたような地盤条件変化部においては、免震層がせん断変形することにより、地盤に生じるひずみの局所的な集中が構造物に及ぼす影響を緩和することとなる。ただし、本解析では、あくまでも免震メカニズムの解明に主眼を置いており、免震層の設置による構造物軸力の低減効果に関しては定量的には顕著とはなっていない。この理由としては、今回の地盤条件では軟質地盤と硬質地盤の動的物性の差が小さく、また地盤のひずみ分布から勘案すると免震層の設置長も十分ではなかったことが考えられる。また、X方向加振では構造物の剛性として等価引張剛性を用いたこともその要因として考えられる。したがって、地盤の動的物性差、ひずみ分布に応じた免震層の設置長、構造物剛性等の条件を充分勘案したうえで免震層の諸条件を決定すれば、定量的にもさらに大きな免震効果が得られるものと考えられる。

図-30および図-31は、免震層位置のすぐ外側の地盤要素に着目し、構造物軸方向せん断ひずみとせん断応力の最大値分布における免震層の有無による差異を比較して示したものである。これらより、免震層設置区間においては、外側近傍地盤のせん断ひずみおよびせん断応力は、非免震の場合と比較して免震の方が小さくなっていることがわかる。これは、地盤よりもせん断弾性係数の小さい免震層が存在し、地盤と免震層の境界面が解放面の条件に近くなることにより、近傍地盤の挙動が構造物が存在せず空洞となった地盤（以下空洞地盤と称する）の挙動に近づいたことによるものと考えられる。

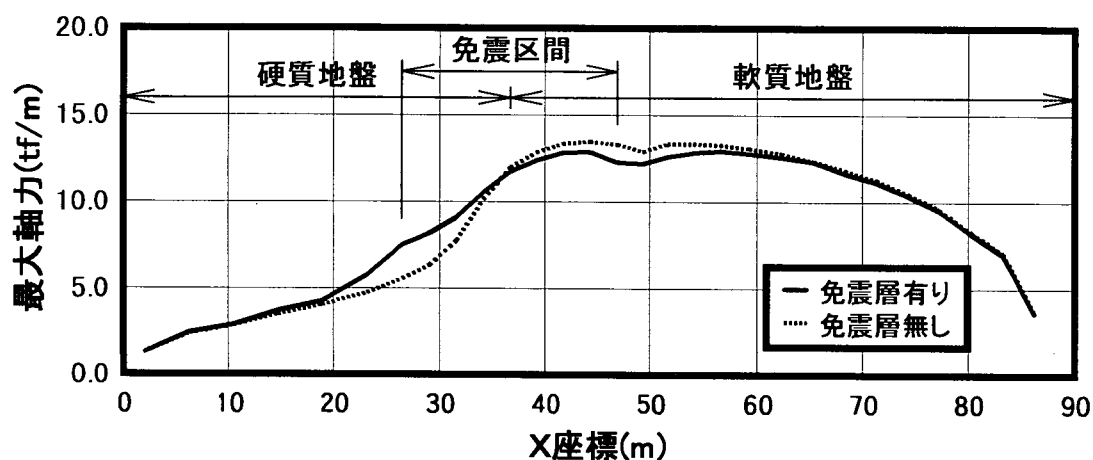
(3) 構造物円周方向に関する免震層のせん断挙動と構造物軸力の低減

一般に、X方向加振時において構造物円周方向に生じる地震時増分断面力は定量的には小さいと考えられるが、ここでは、免震層を設置した場合の同方向の地震時挙動についても構造物軸方向と同様に免震層や近傍地盤のひずみやせん断応力、構造物の軸力の最大値に着目し検討する。なお、X方向加振においては、構造物の剛性としてセグメントと継手を考慮した等価引張剛性を用いているため、構造物円周方向に関しては剛性が実際のシールドトンネルよりも小さいものとなっており、構造物軸方向との定量的な比較はできないことに留意する必要がある。

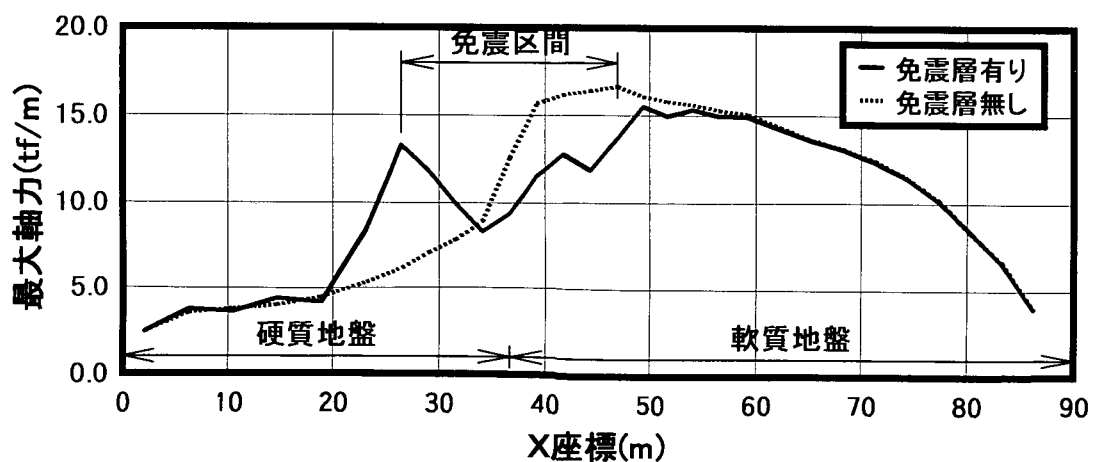
図-32および図-33は、免震層位置要素における構造物円周方向せん断ひずみおよびせん断応力の最大値分布に関する免震層の有無による差異を比較して示したものである。これらより、構造物軸方向の場合と同様に、免震層は非免震の場合の同位置地盤よりも最大で10～20倍大きなせん断ひずみを示しているが、せん断応力は非免震の場合より低減されていることが分かる。



(a) 構造物上部

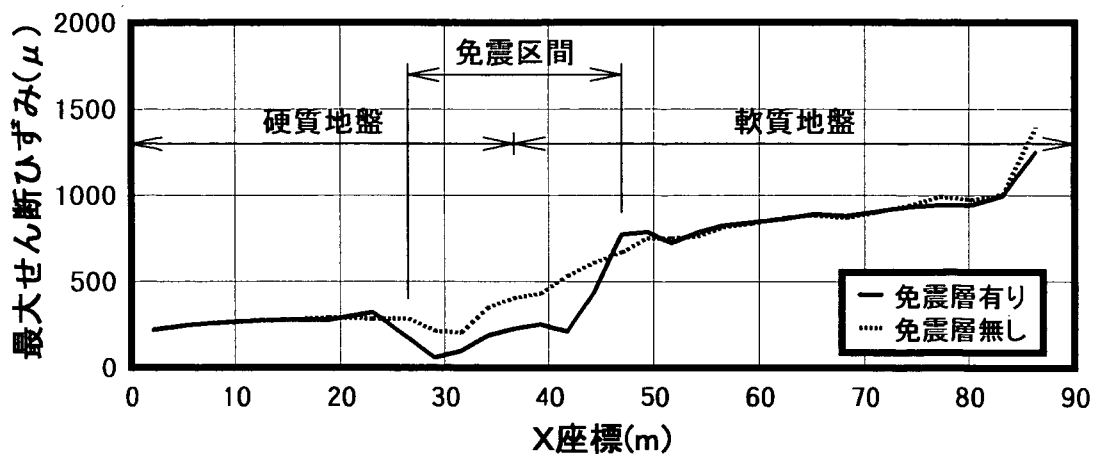


(b) 構造物側部

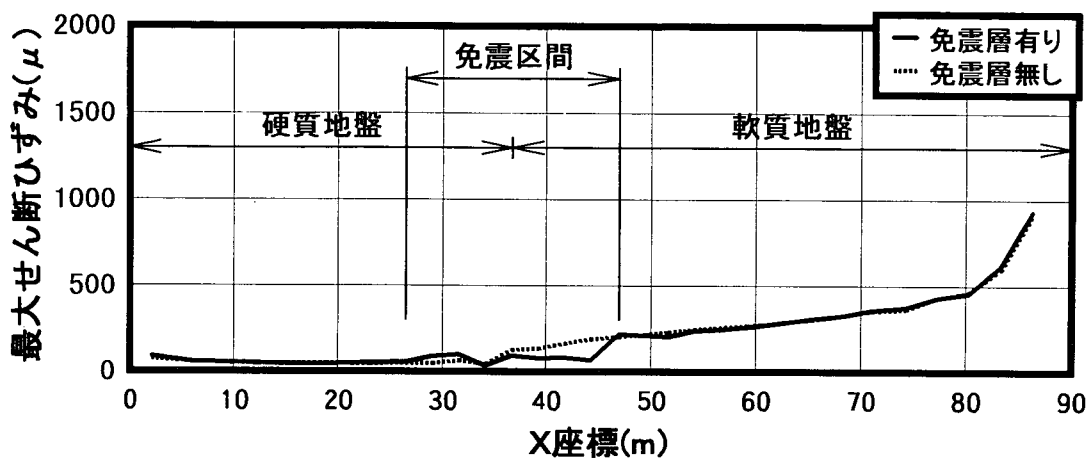


(c) 構造物下部

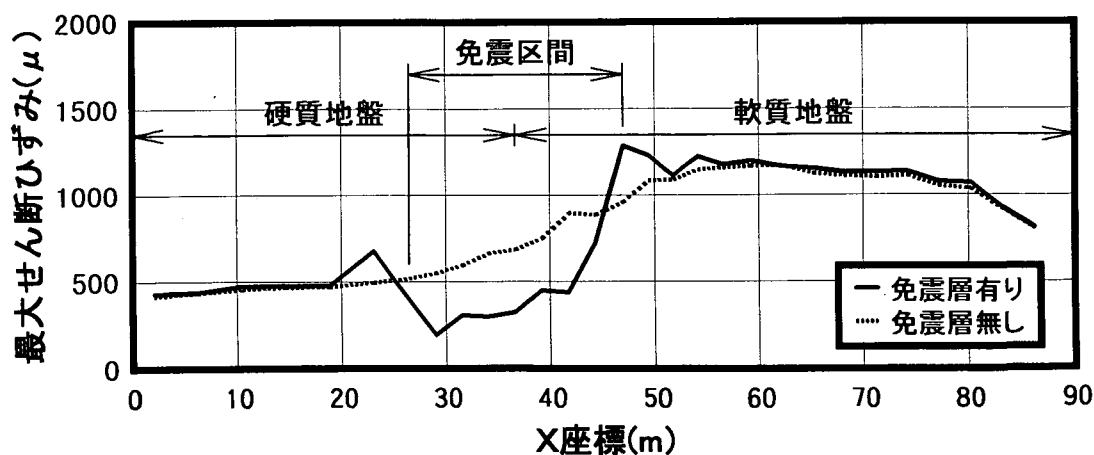
図-29 構造物軸方向軸力(X方向加振)



(a) 構造物上部

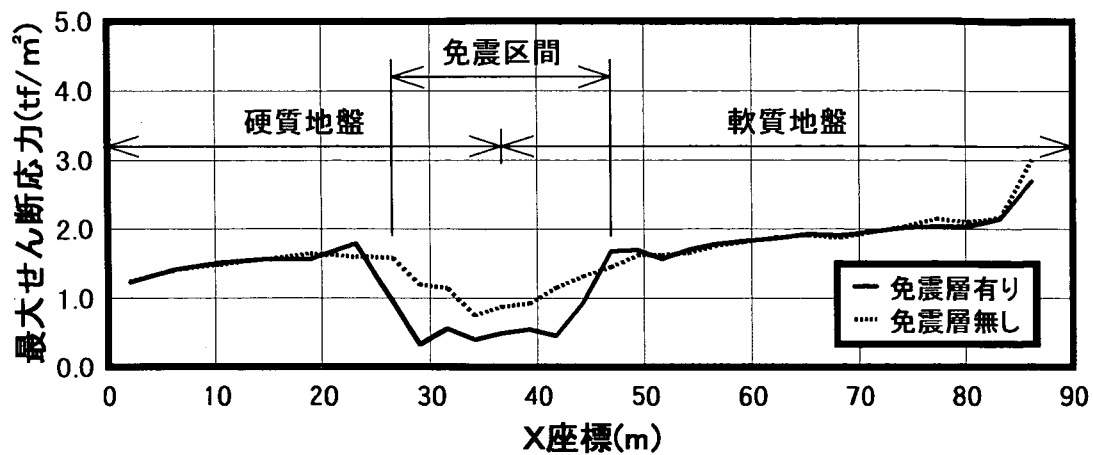


(b) 構造物側部

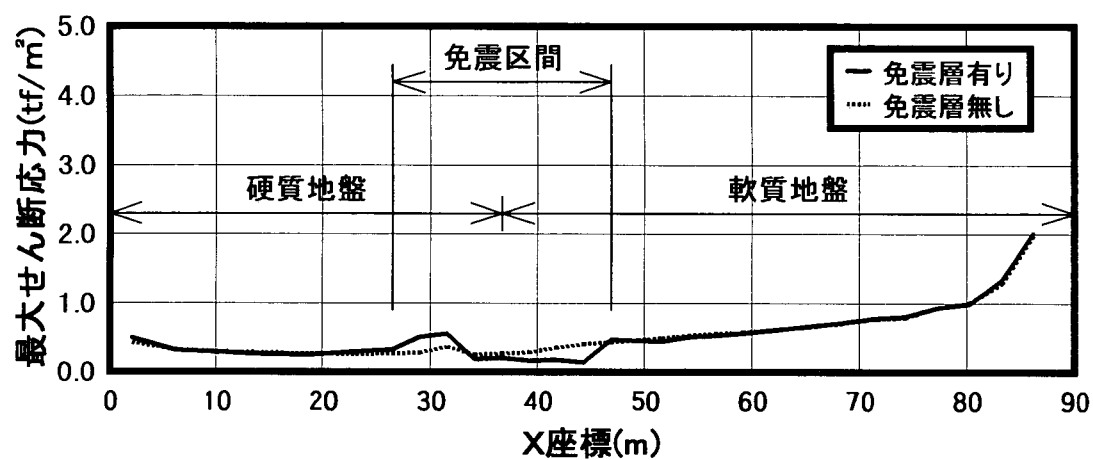


(c) 構造物下部

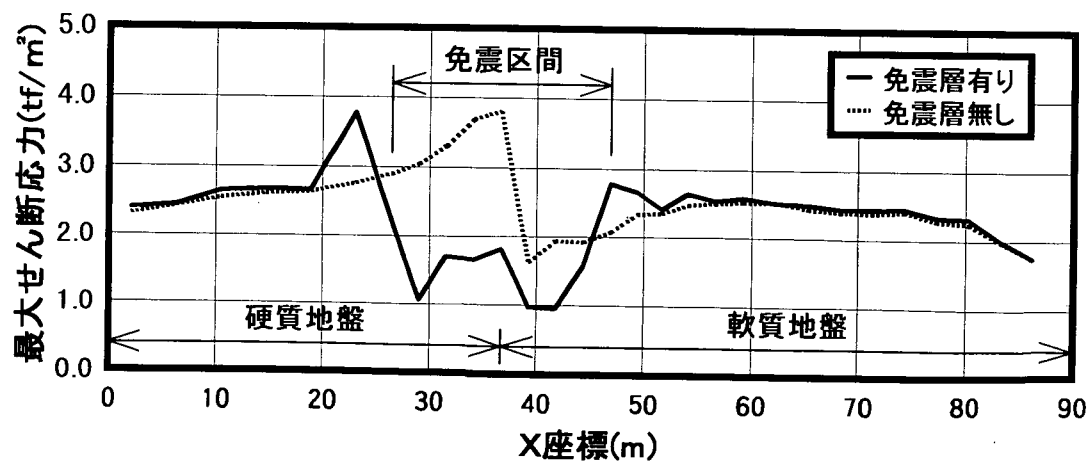
図-30 免震層外側地盤の構造物軸方向せん断ひずみ(X方向加振)



(a) 構造物上部

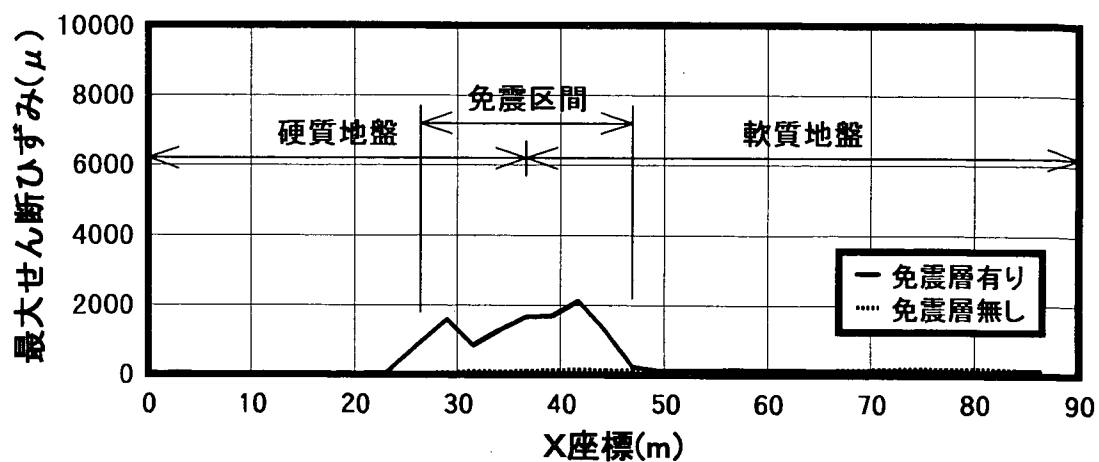


(b) 構造物側部

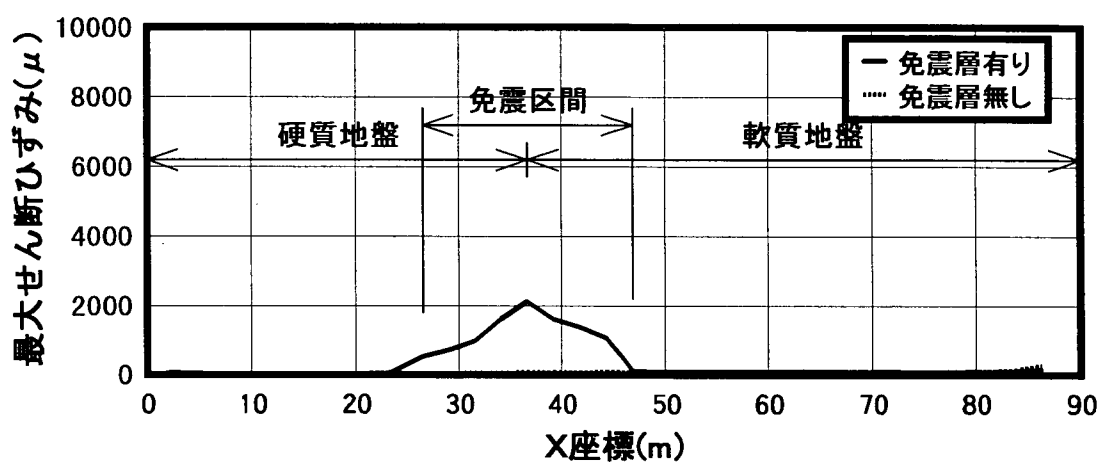


(c) 構造物下部

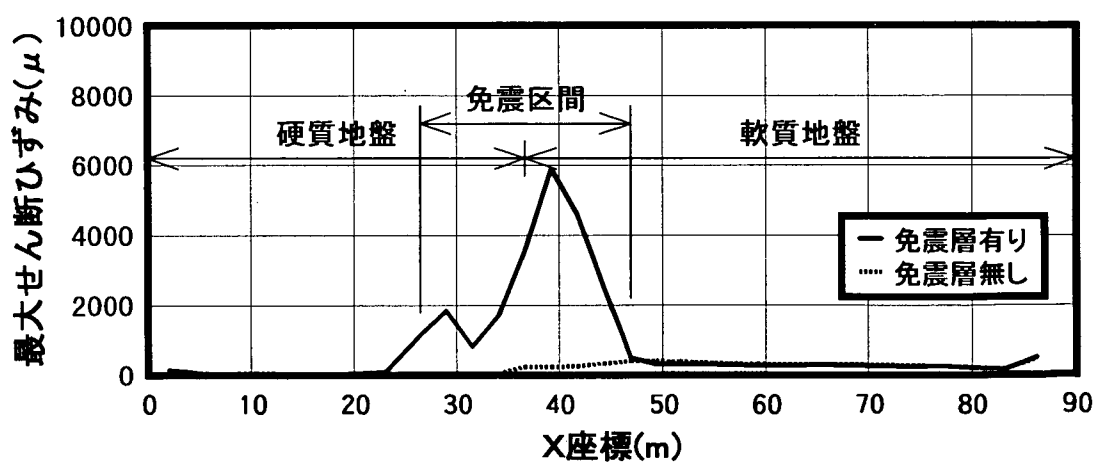
図-31 免震層外側地盤の構造物軸方向せん断応力(X方向加振)



(a) 構造物上部

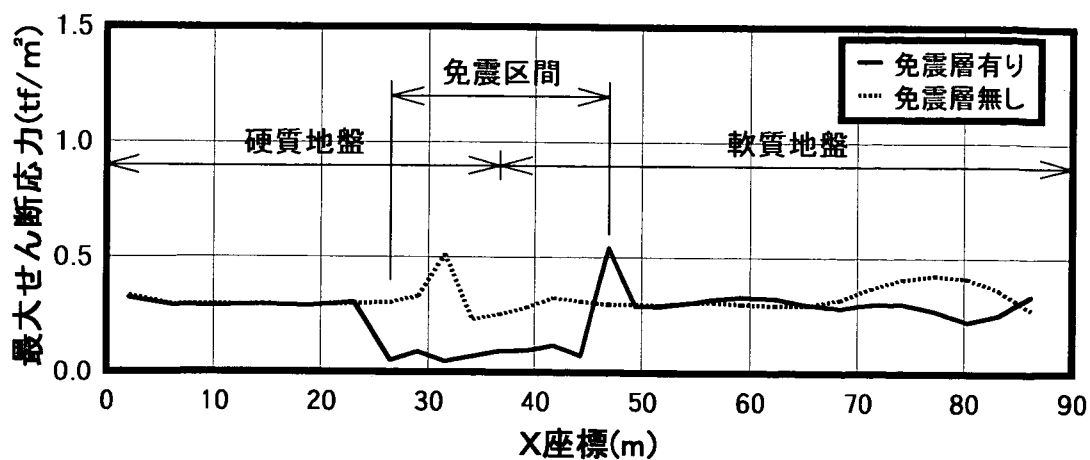


(b) 構造物側部

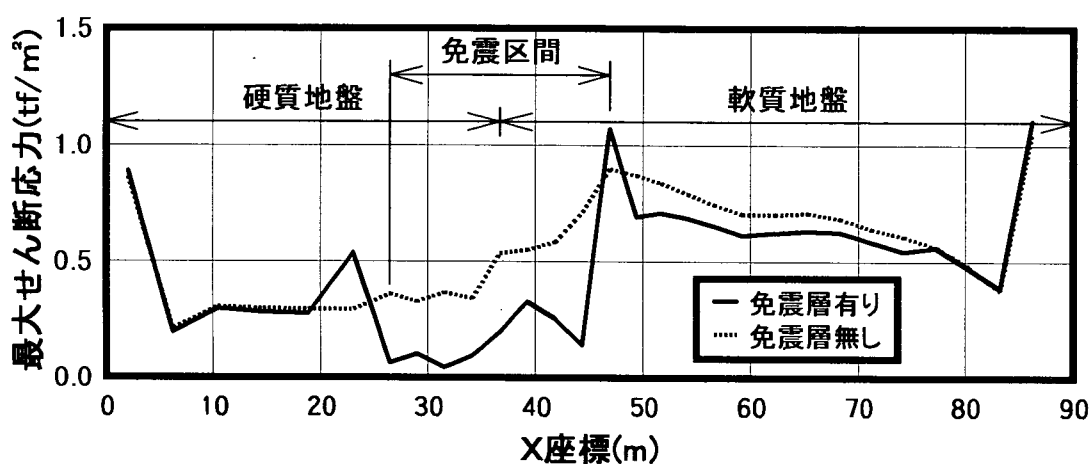


(c) 構造物下部

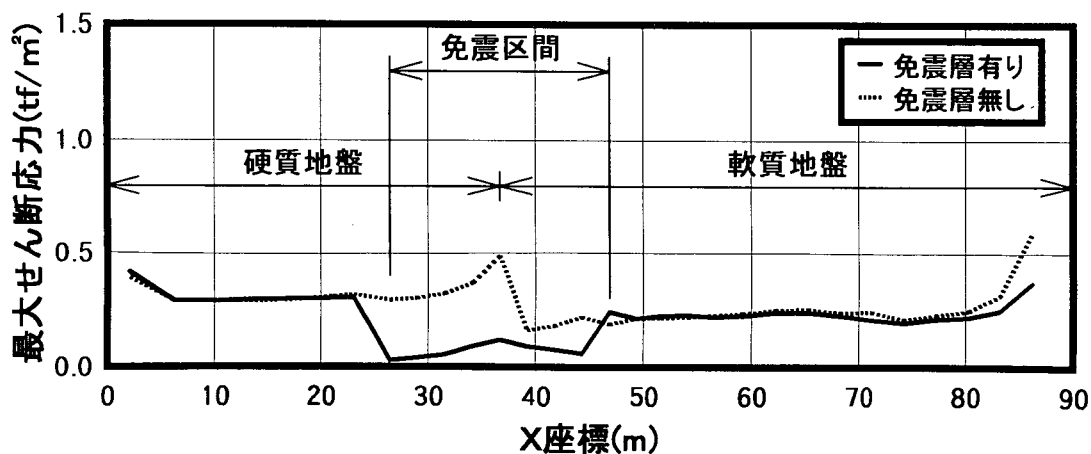
図-32 免震層位置要素の構造物円周方向せん断ひずみ(X方向加振)



(a) 構造物上部



(b) 構造物側部



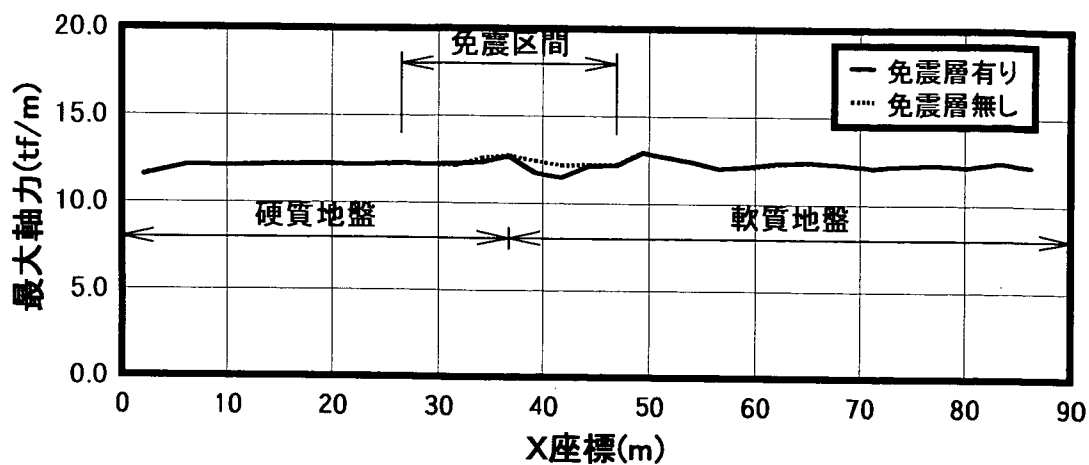
(c) 構造物下部

図-33 免震層位置要素の構造物円周方向せん断応力(X方向加振)

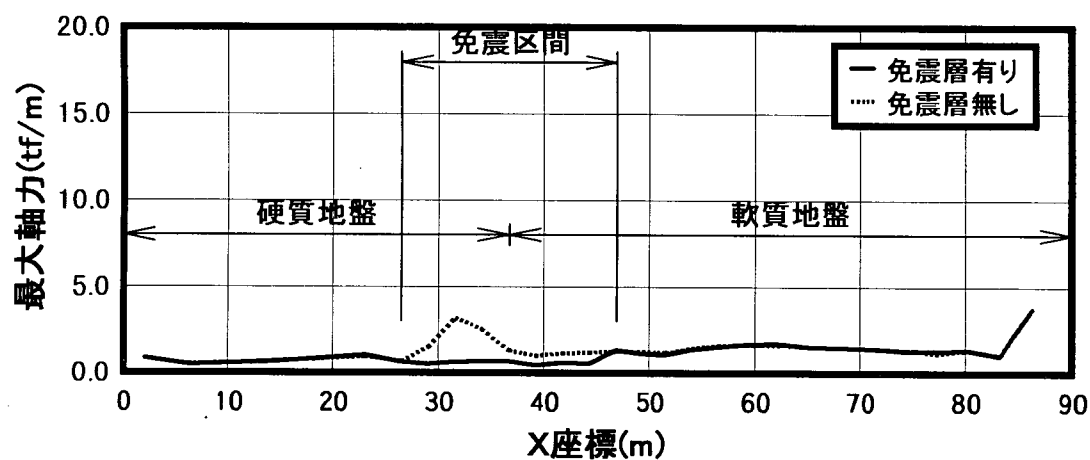
図-34は、構造物の円周方向軸力における免震層の有無による差異を比較して示したものである。これらより、構造物側部においては、非免震の場合、地盤条件の境界付近で局所的に大きな円周方向軸力が生じていることがわかる。これは主として構造物円周方向に作用する周面せん断力に起因するものと考えられる。しかし免震の場合には、このような局所的な軸力の集中が緩和されており、軸方向の場合と同様に免震層が地盤ひずみの集中に応じてせん断変形し、構造物に及ぼす周面せん断力の集中を緩和しているためと考えられる。構造物上部、下部においては、この傾向は顕著ではない。

図-35および図-36は、免震層位置のすぐ外側の地盤要素に着目し、構造物軸方向せん断ひずみとせん断応力の最大値分布における免震層の有無による差異を比較して示したものである。これらより、構造物側部においては、免震層を設置した場合の外側近傍地盤のせん断ひずみは非免震の場合と比べて小さくなっていることがわかる。これは、構造物軸方向の場合と同様に、地盤よりもせん断弾性係数の小さい免震層が存在し、地盤と免震層の境界面が解放面の条件に近くなることにより、近傍地盤が空洞地盤の挙動に近づいたことによるものと考えられる。構造物上部、下部においては、ひずみや応力の最大値も小さく、この傾向は顕著ではない。

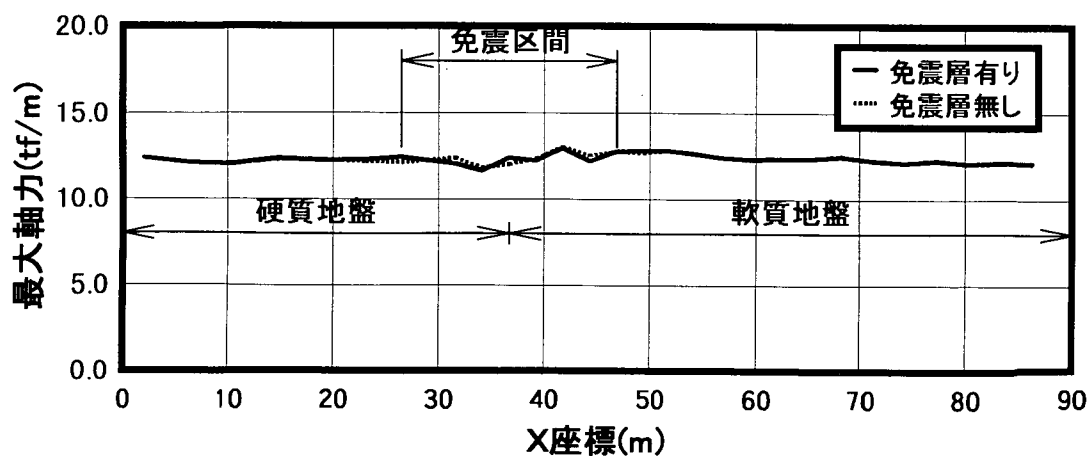
総じて、X方向加振における構造物円周方向に着目した免震層の有無による挙動の差異は、定量的には小さいものの、構造物軸方向の場合と同じ傾向を示すことが確認された。



(a) 構造物上部

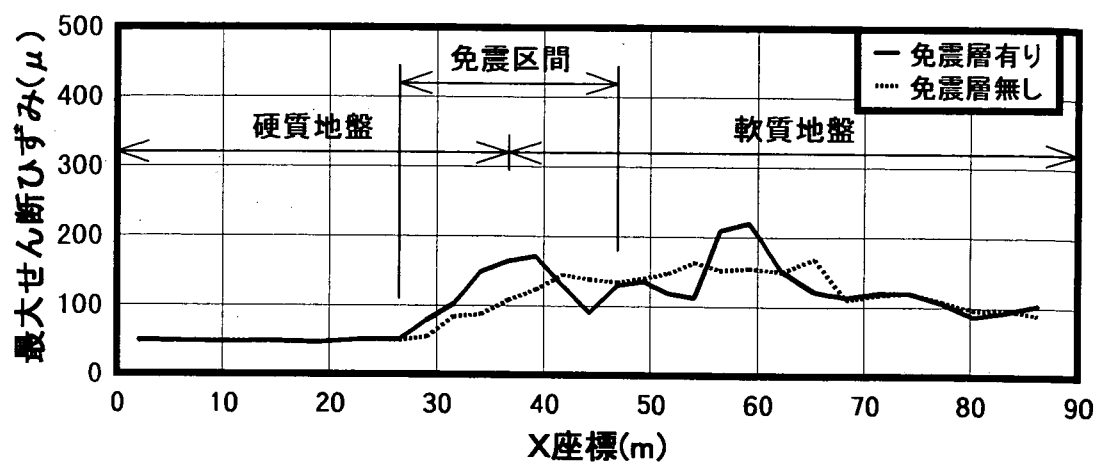


(b) 構造物側部

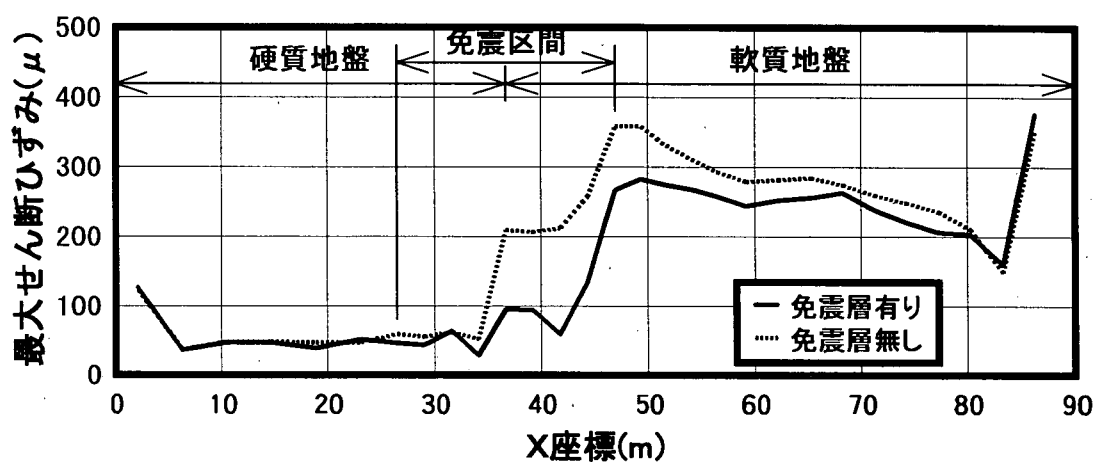


(c) 構造物下部

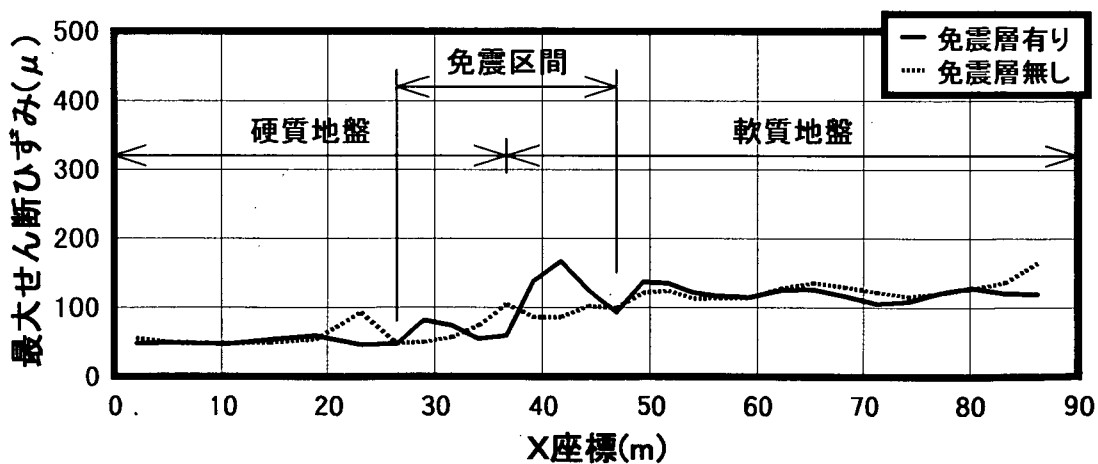
図-34 構造物円周方向軸力(X方向加振)



(a) 構造物上部

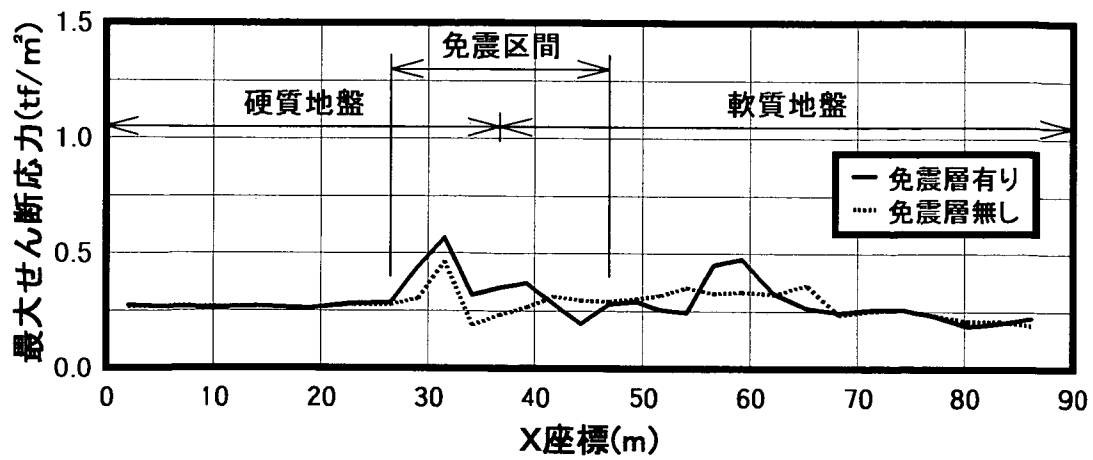


(b) 構造物側部

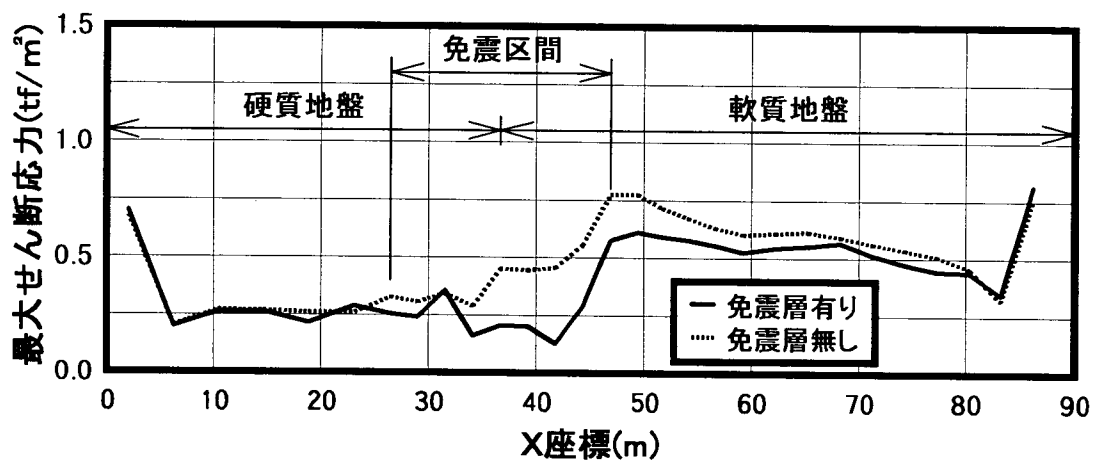


(c) 構造物下部

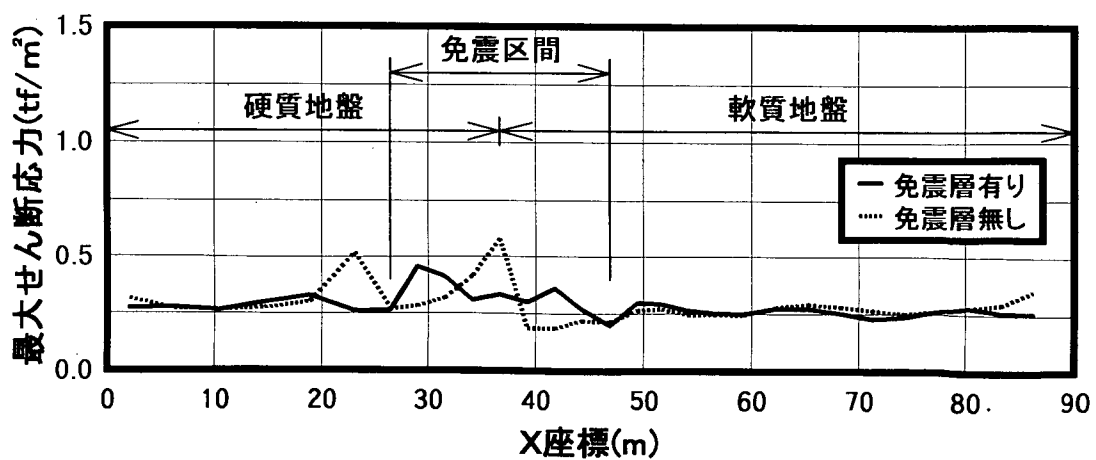
図-35 免震層外側地盤の構造物円周方向せん断ひずみ(X方向加振)



(a) 構造物上部



(b) 構造物側部



(c) 構造物下部

図-36 免震層外側地盤の構造物円周方向せん断応力(X方向加振)

4. 2 Y方向加振解析結果

(1)構造物の応答値

Y方向加振の解析結果についても、X方向加振解析結果と同様に、まず、構造物の加速度、速度、変位の応答値を対象とし、それぞれについて最大絶対値分布を示し考察する。なお、変位の応答値に関しては、X方向加振と同様にトンネルのひずみに換算し、その最大値分布を示すこととする。

図-37および図-38は、構造物上部、側部、下部に着目し、それぞれの節点における軸直角水平方向の加速度と速度の応答値における免震層の有無による差異を、同深度における自由地盤の結果とともに比較して示したものである。これらより、X方向加振と同様に、免震層の有無による構造物の最大応答加速度、最大応答速度の差異は認められないことがわかる。

図-39は、構造物の直角水平方向最大ひずみ、すなわち、構造物の各節点の水平方向最大相対変位を区間長で除したものにおける免震層の有無による差異を、同深度における自由地盤の結果とともに示したものである。これらより、X方向加振の場合と同様に、自由地盤の軸直角水平方向ひずみは地層境界より少し軟質地盤側でピークを有するような最大値分布を示し、非免震の構造物においても自由地盤に追従した形のひずみ分布となることがわかる。これに対して免震層を設置した場合は、その設置区間において、このような地層変化部のひずみの集中を緩和するひずみ分布傾向となっていることがわかる。Y方向加振において用いた構造物剛性としては、セグメントの剛性を用いており等価曲げ剛性でないため定量的には評価できないが、免震層を設置した場合の構造物の応答特性は、定性的にはX方向加振の場合と同様と考えられる。

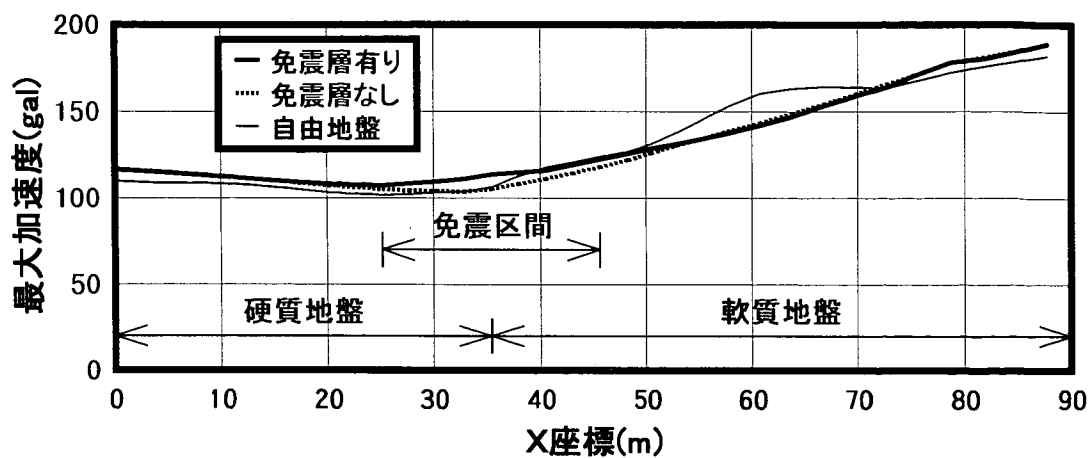
(2)構造物円周方向に関する免震層のせん断挙動と構造物軸力の低減

Y方向加振時における免震メカニズムを検討するために、構造物円周方向に着目し、X方向加振の場合と同様に、免震層や近傍地盤のせん断ひずみやせん断応力、構造物の軸力の最大値分布に着目し考察する。検討の対象としたデータの着目点と軸力、せん断応力、ひずみの方向は図-26で示したものと同様である。

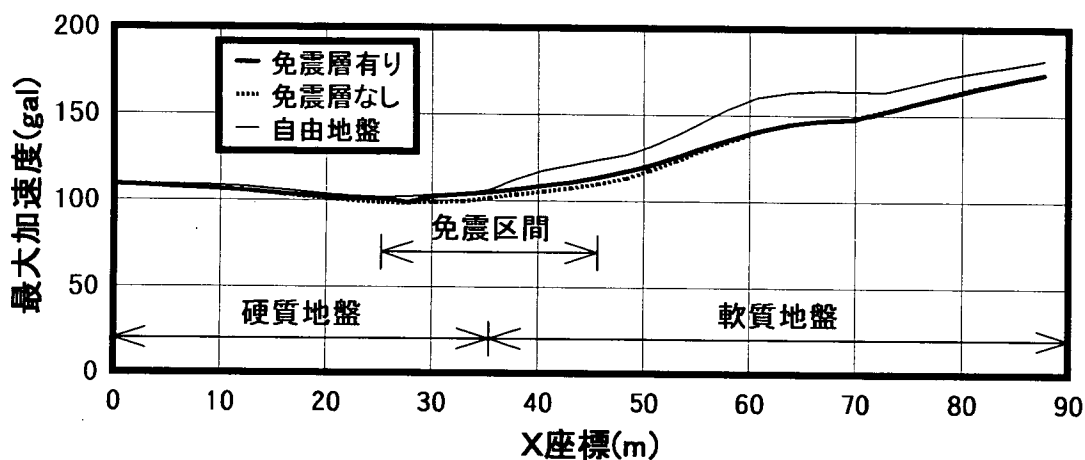
図-40および図-41は、免震層位置要素における構造物円周方向せん断ひずみおよびせん断応力の最大値分布をそれぞれ比較して示したものである。これらより、免震層の設置により構造物円周方向にも免震層は大きくせん断変形し、構造物周面に伝達する力せん断が低減されていることがわかる。これは、X方向加振の場合と同様な傾向となっている。

図-42は構造物の円周方向軸力の最大値分布に関して免震層の有無による差異を比較して示したものである。これらより、やはりX方向加振の場合と同様に、免震層設置区間においては、特に側部において局所的に集中する構造物円周方向軸力が効果的に低減されていることがわかり、免震層による周面せん断力の低減と対応づけられる。

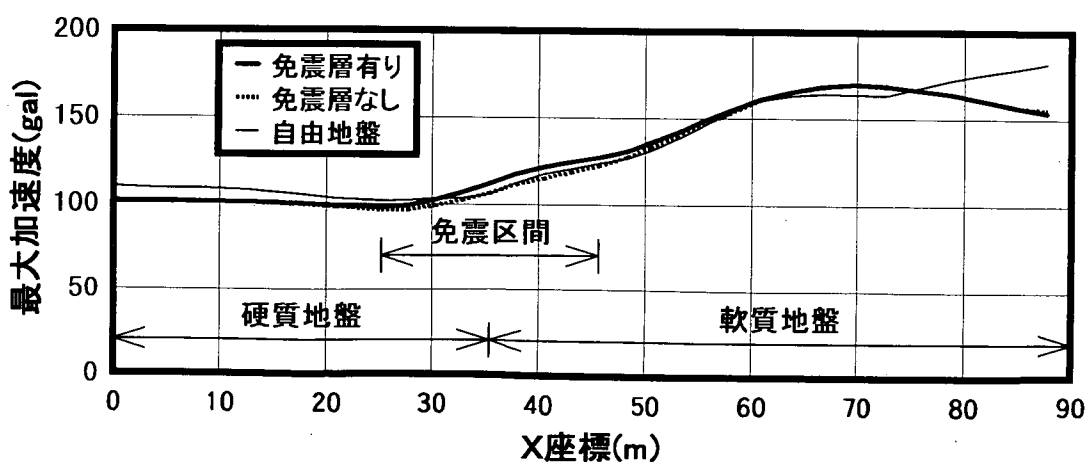
図-43および図-44は、免震層位置のすぐ外側の地盤要素における構造物円周方向せん断ひずみとせん断応力の最大値分布分布に関して免震層の有無による差異を比較して示した



(a) 構造物上部

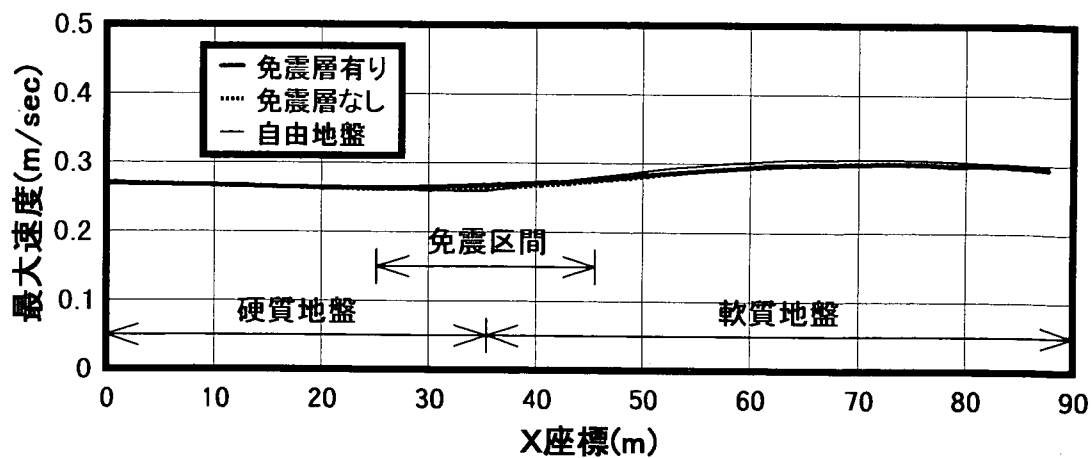


(b) 構造物側部

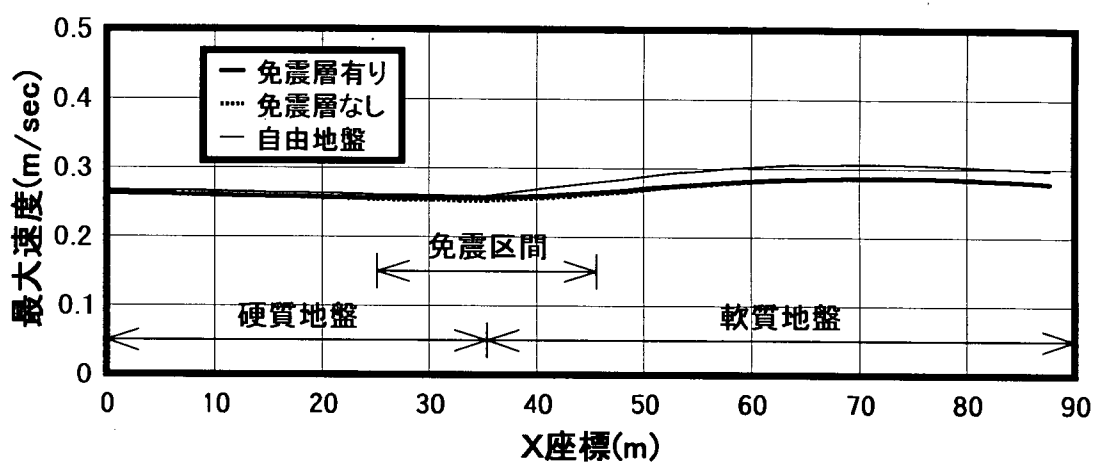


(c) 構造物下部

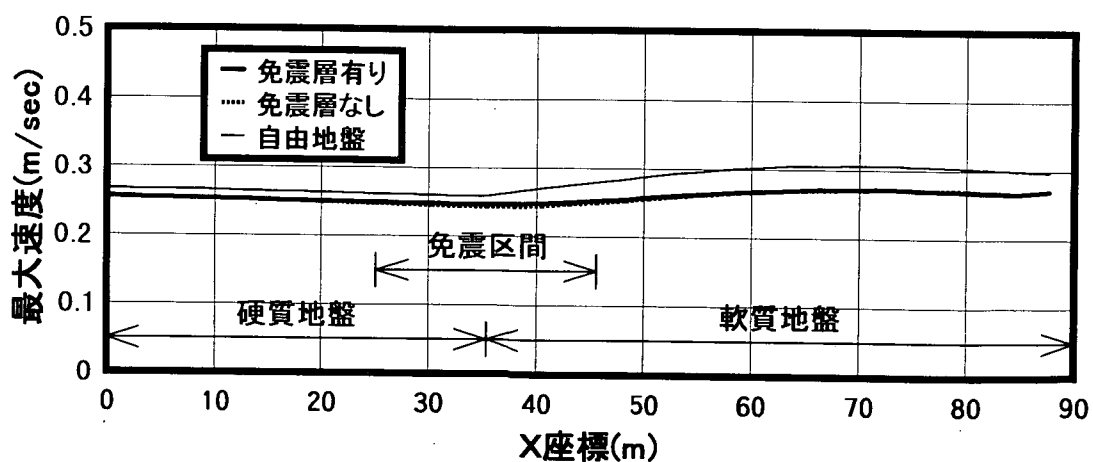
図-37 軸直角水平方向最大加速度(Y方向加振)



(a)構造物上部

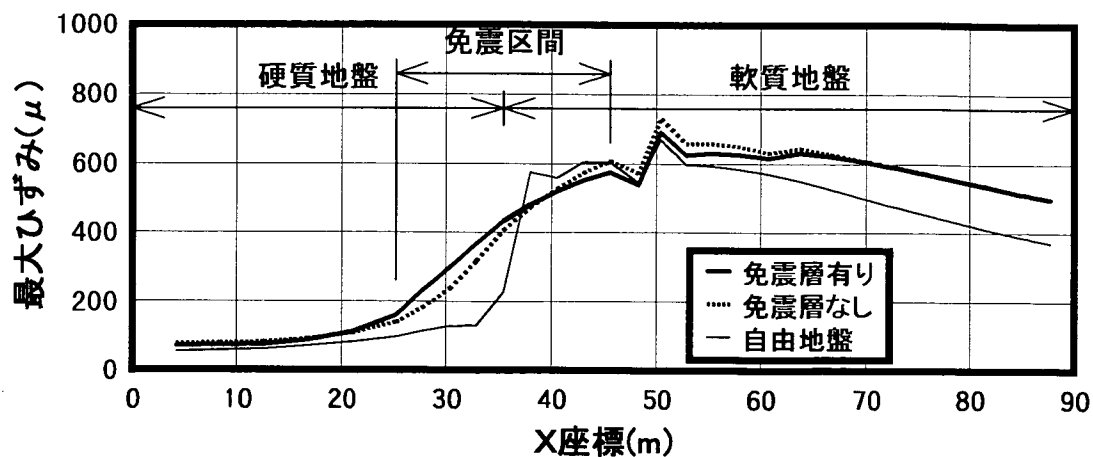


(b)構造物側部

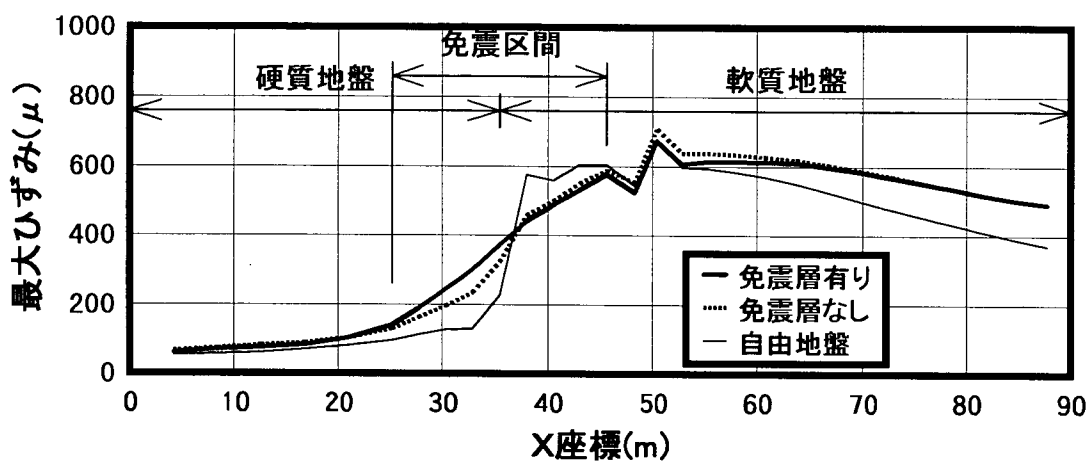


(c)構造物下部

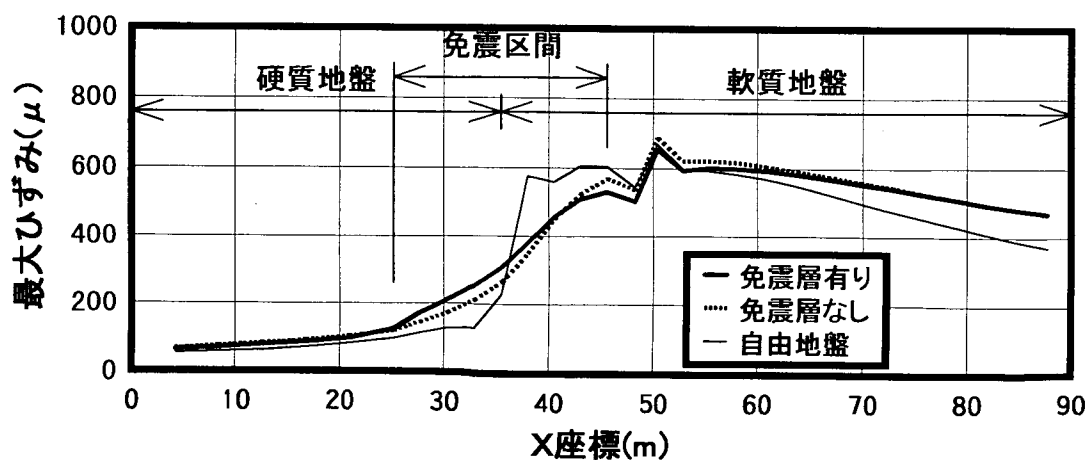
図-38 軸直角水平方向最大速度(Y方向加振)



(a) 構造物上部

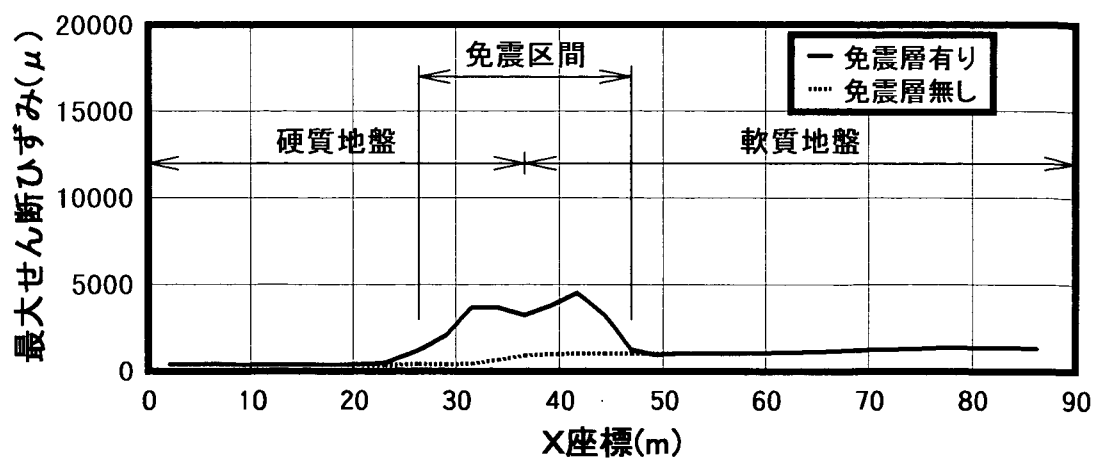


(b) 構造物側部

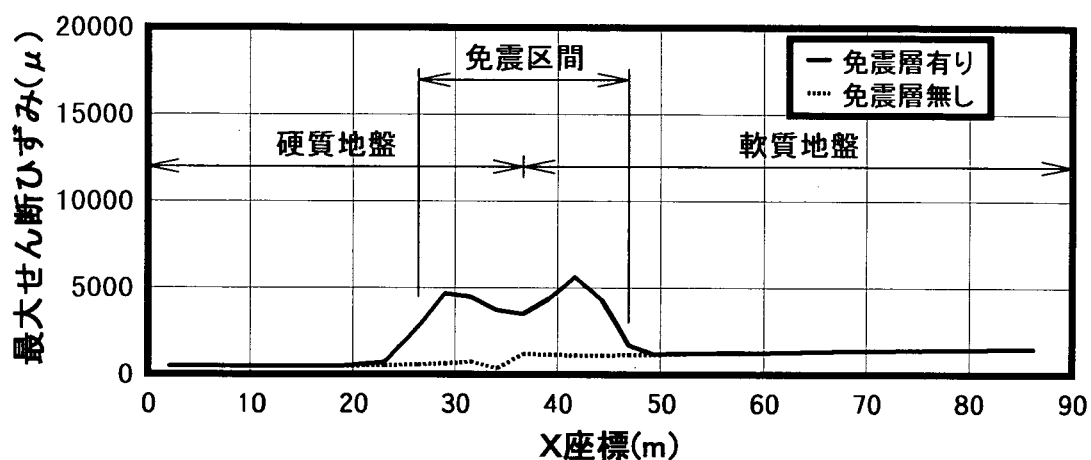


(c) 構造物下部

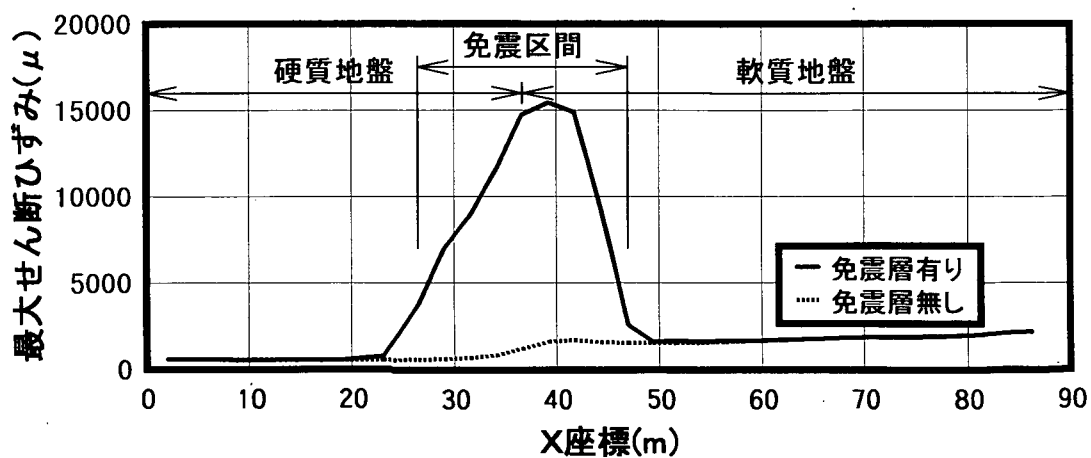
図-39 軸直角水平方向最大ひずみ(Y方向加振)



(a) 構造物上部

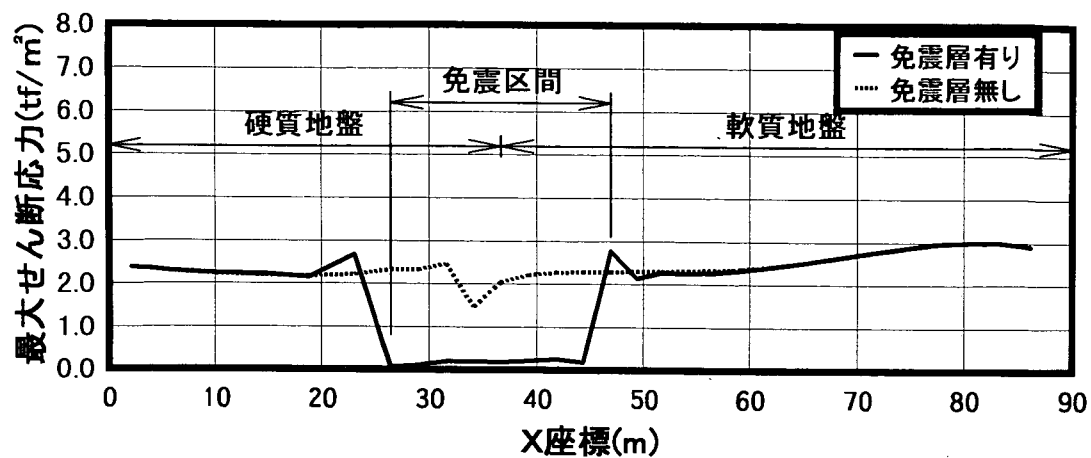


(b) 構造物側部

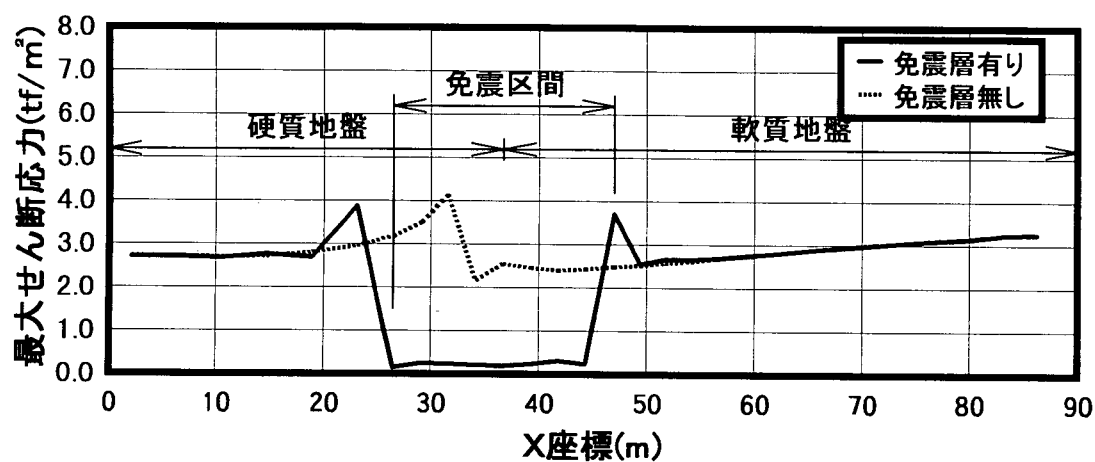


(c) 構造物下部

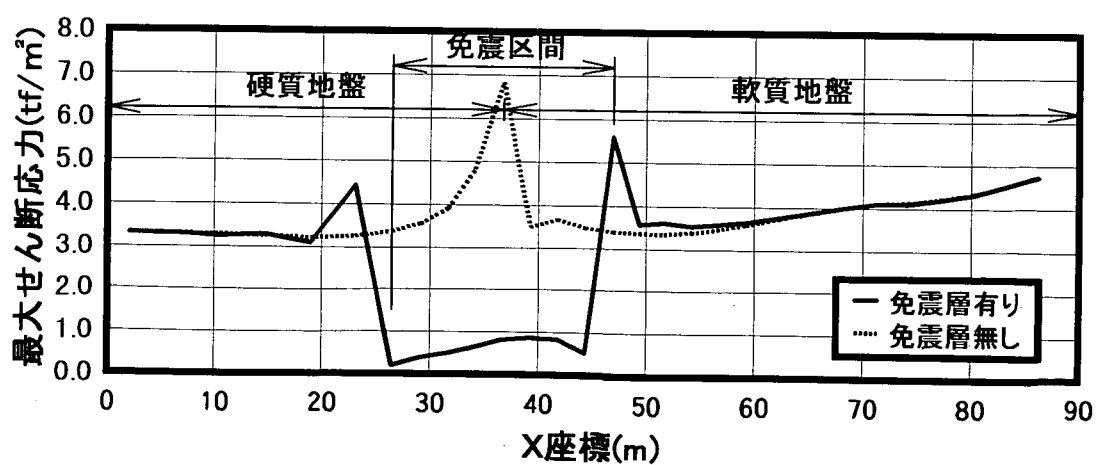
図-40 免震層位置要素の構造物円周方向せん断ひずみ(Y方向加振)



(a) 構造物上部

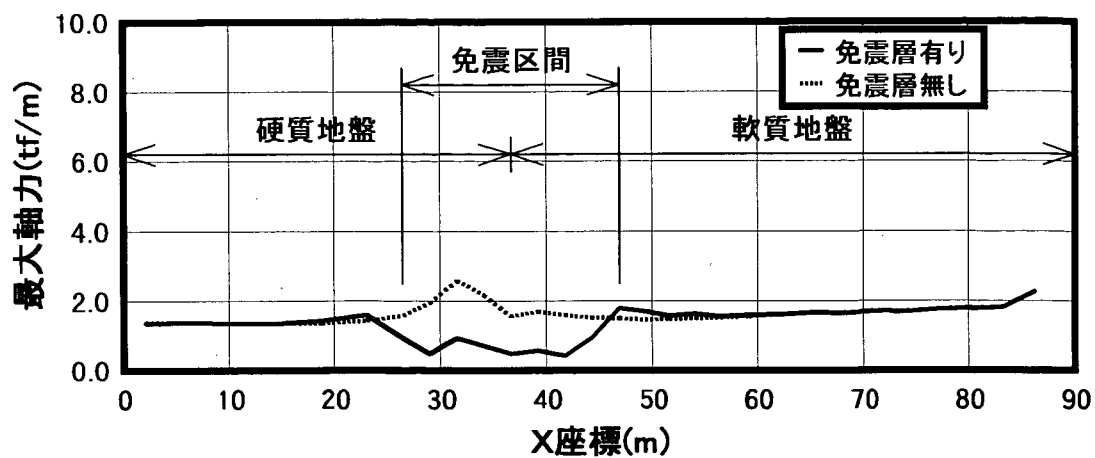


(b) 構造物側部

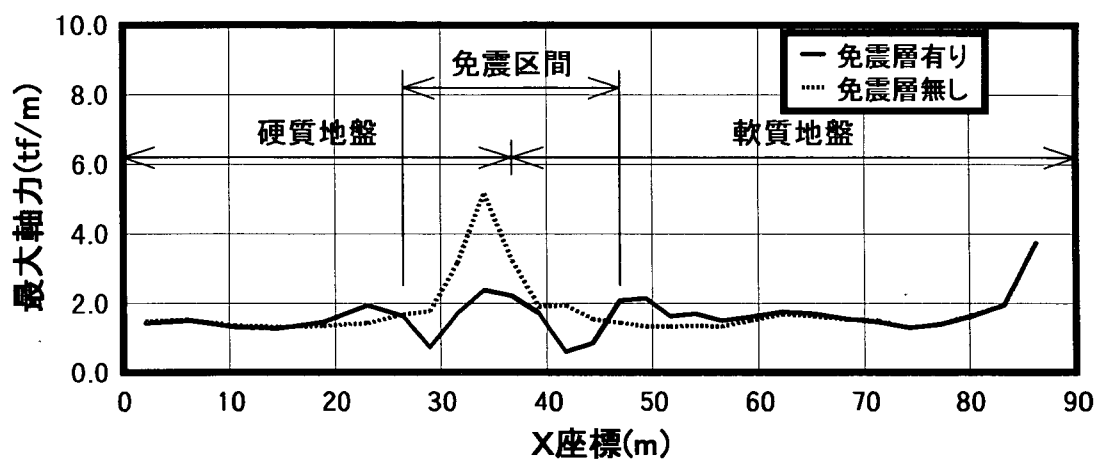


(c) 構造物下部

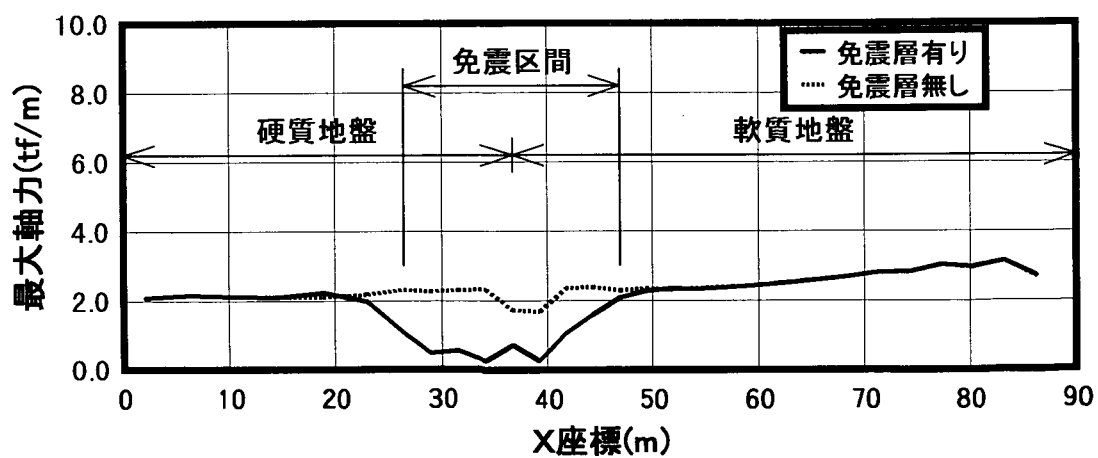
図-41 免震層位置要素の構造物円周方向せん断応力(Y方向加振)



(a)構造物上部

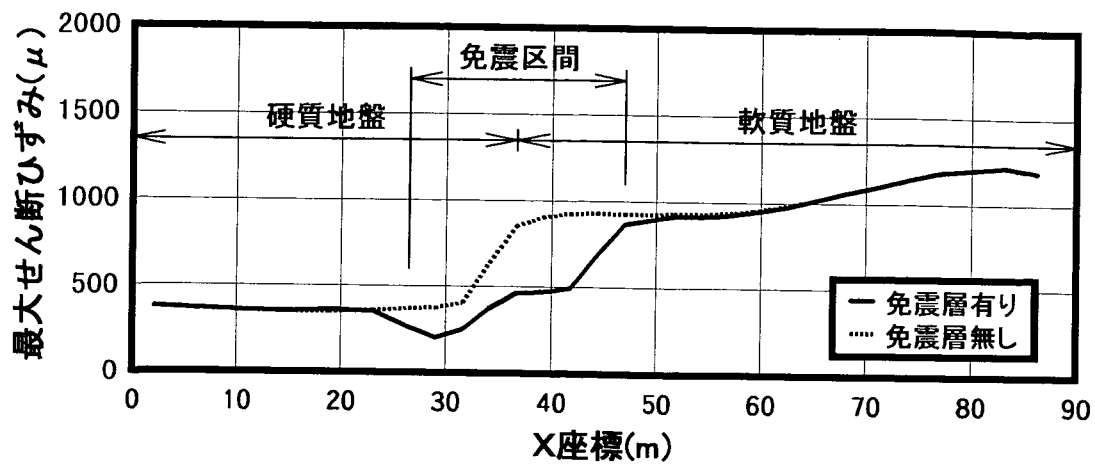


(b)構造物側部

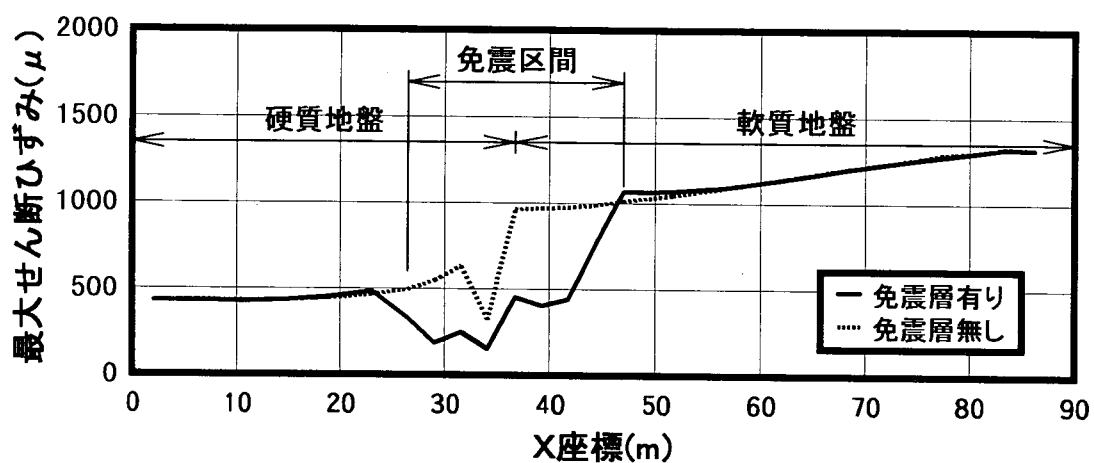


(c)構造物下部

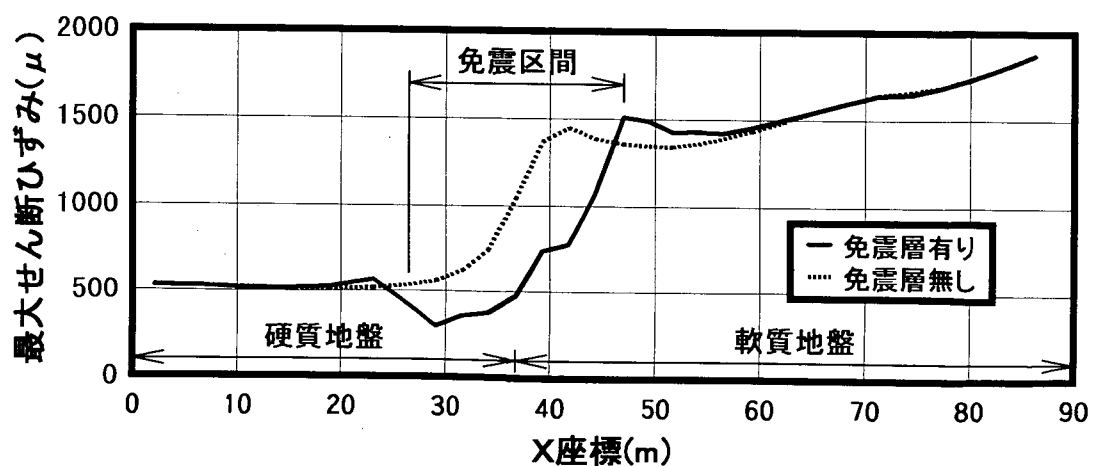
図-42 構造物円周方向軸力(Y方向加振)



(a) 構造物上部

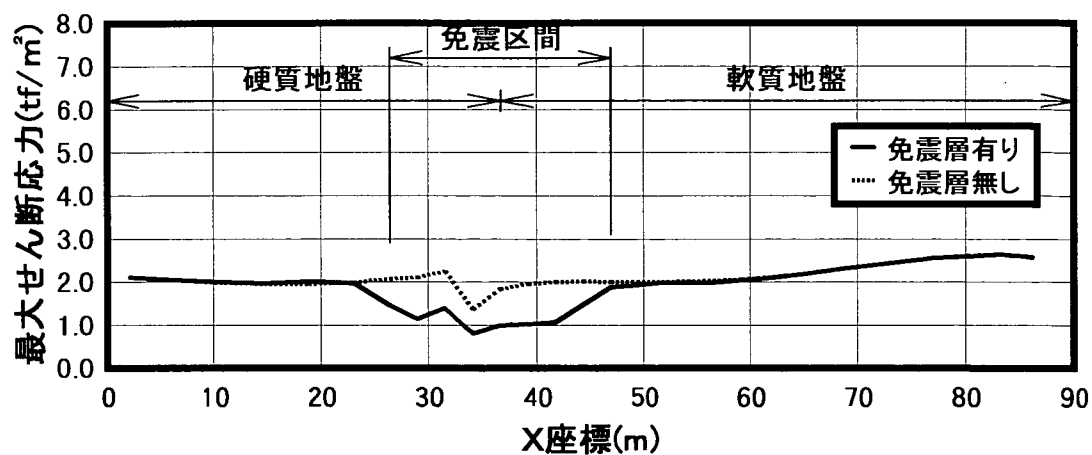


(b) 構造物側部

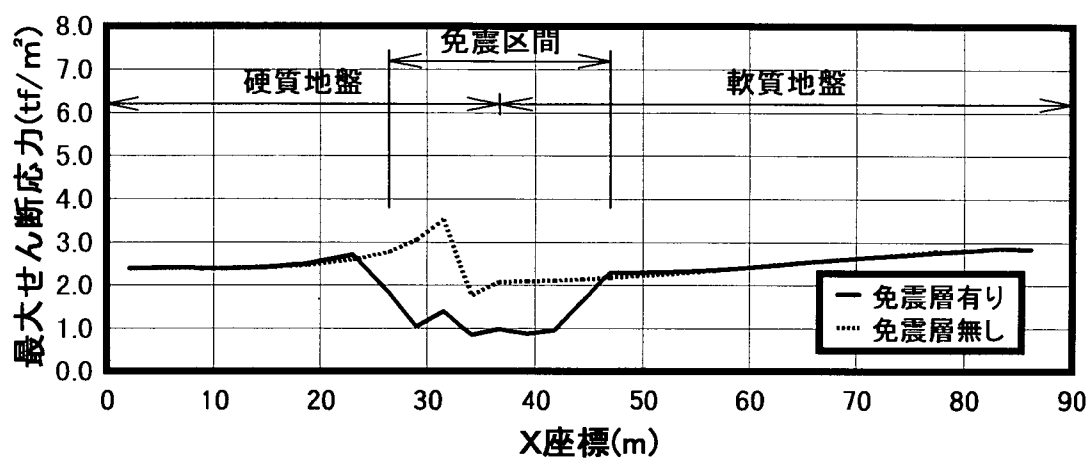


(c) 構造物下部

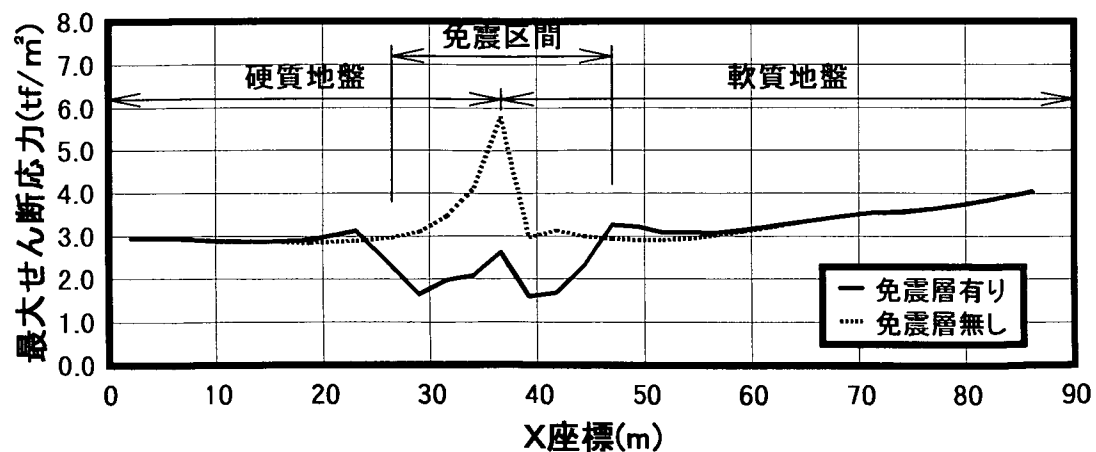
図-43 免震層外側地盤の構造物円周方向せん断ひずみ(Y方向加振)



(a) 構造物上部



(b) 構造物側部



(c) 構造物下部

図-44 免震層外側地盤の構造物円周方向せん断応力(Y方向加振)

ものである。X方向加振における挙動と同様に、免震区間では地盤が構造物と絶縁され、構造物の存在しない空洞地盤の挙動に近づいたため非免震の場合と比較してせん断ひずみが小さくなっていることがわかる。

(3) 構造物軸方向に関する免震層のせん断挙動と構造物軸力の低減

本解析のような地盤条件変化部を有する条件下におけるY方向加振においては、変化部近傍における構造物の曲げ変形について検討するため、構造物軸方向の挙動も確認する必要がある。そこで、構造物軸方向の免震層や近傍地盤のせん断ひずみやせん断応力、構造物の軸力の最大値に着目する。なお、Y方向加振における構造物軸方向の検討は、X方向加振における構造物円周方向の挙動の場合と同じく、構造物が実際のシールドトンネルとは剛性が異なり、ここでは逆に大きな剛性を有するものとなっているため、構造物円周方向との定量的な比較はできないことに留意する必要がある。

図-45および図-46は、免震層位置要素における構造物軸方向せん断ひずみおよびせん断応力の最大値分布をそれぞれ比較して示したものである。これまでの加振方向及び着目方向の結果と同様に、免震層は非免震の場合における同位置での地盤よりも大きくせん断変形し、構造物に伝達される周面せん断力が低減されていることがわかる。

図-47は、構造物軸方向の軸力に関する免震層の有無による差異を比較して示したものである。これらより、免震層により構造物軸方向軸力が低減していることがわかるが、X方向加振の場合と比較すると構造物側部では軸力のピークは局所的であることが特徴的である。これに対して、構造物上下部では側部と比較して非免震の場合でも最大軸力が相対的に小さい結果となっている。したがって、地盤条件変化部を有する条件下でのY方向加振における構造物軸方向軸力は地震時の曲げ変形に起因するものと考えられ、免震層はこの曲げ変形を緩和する効果があるものと考えられる。

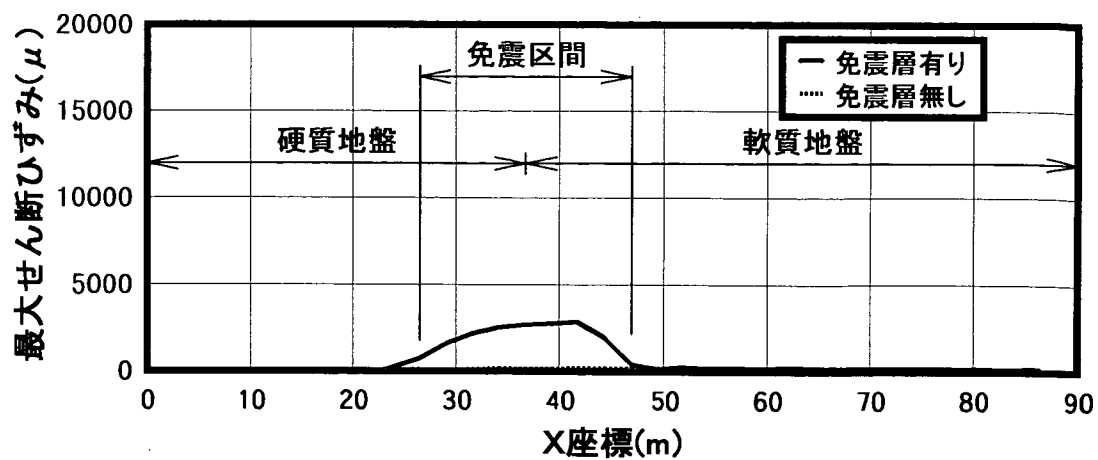
図-48および図-49は、免震層位置のすぐ外側の地盤要素における構造物軸方向せん断ひずみとせん断応力の最大値分布に関する免震層の有無による差異を比較して示したものである。これまでに示した結果と同様に、免震区間では構造物と地盤とが絶縁されたことに起因するせん断ひずみや応力の低減が認められる。

(4) 構造物面内方向に関する免震層のせん断挙動と構造物のせん断力の低減

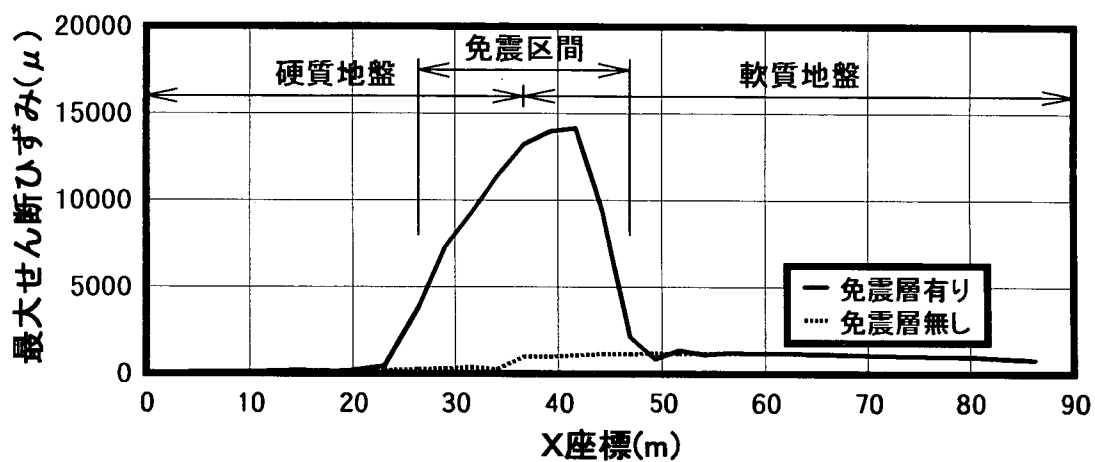
Y方向加振においては、前述したように構造物が地盤条件変化点近傍で曲げ変形が生じるため、構造物円周方向や軸方向に加え、構造物面内方向の地盤や免震層のせん断応力やせん断ひずみおよび構造物のせん断力についても、その挙動を確認した。

図-50および図-51は、免震層位置要素における構造物面内方向せん断ひずみおよびせん断応力の最大値分布をそれぞれ比較して示したものである。これらからも、これまでの加振方向及び着目方向の結果と同様に、免震層は非免震の場合における同位置での地盤よりも大きくせん断変形し、構造物に伝達される周面力が低減されていることがわかる。

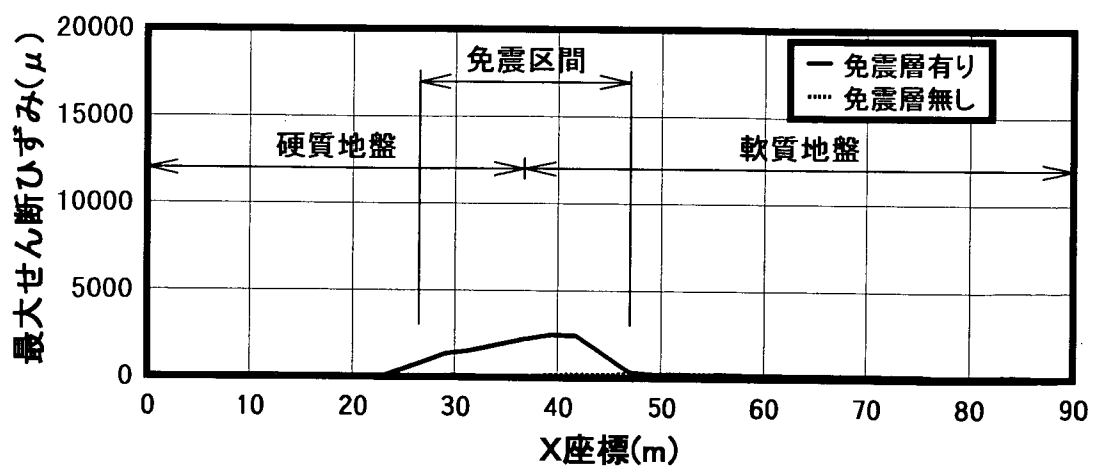
図-52は、構造物要素の最大せん断力分布に関する免震層の有無による差異を比較して示



(a) 構造物上部

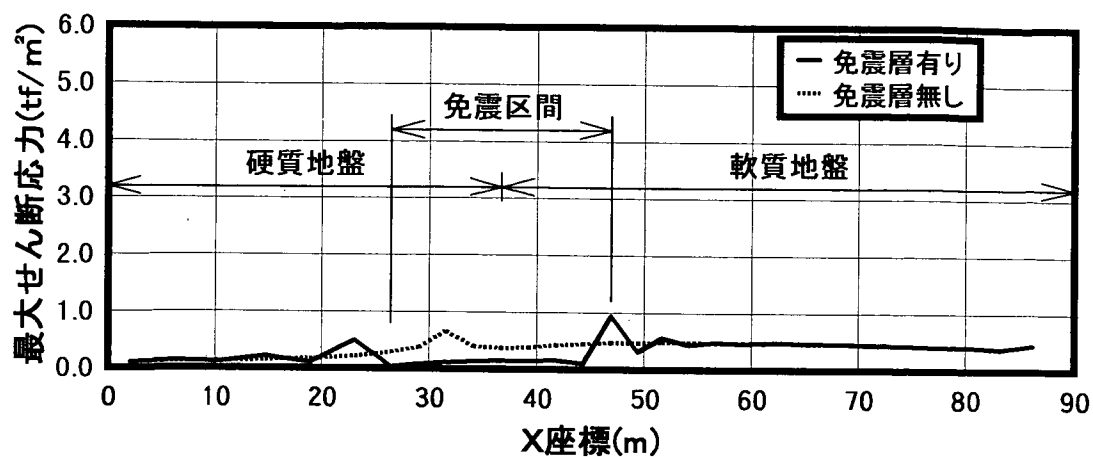


(b) 構造物側部

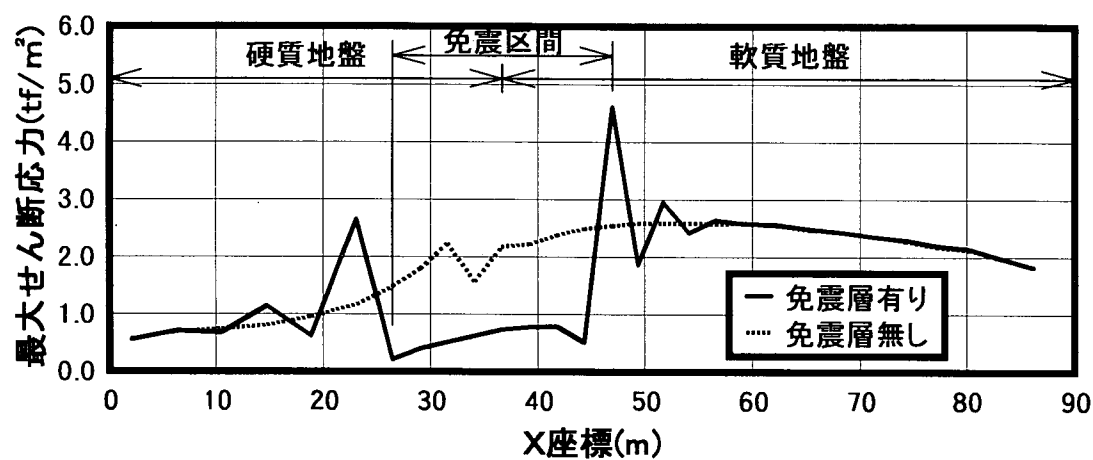


(c) 構造物下部

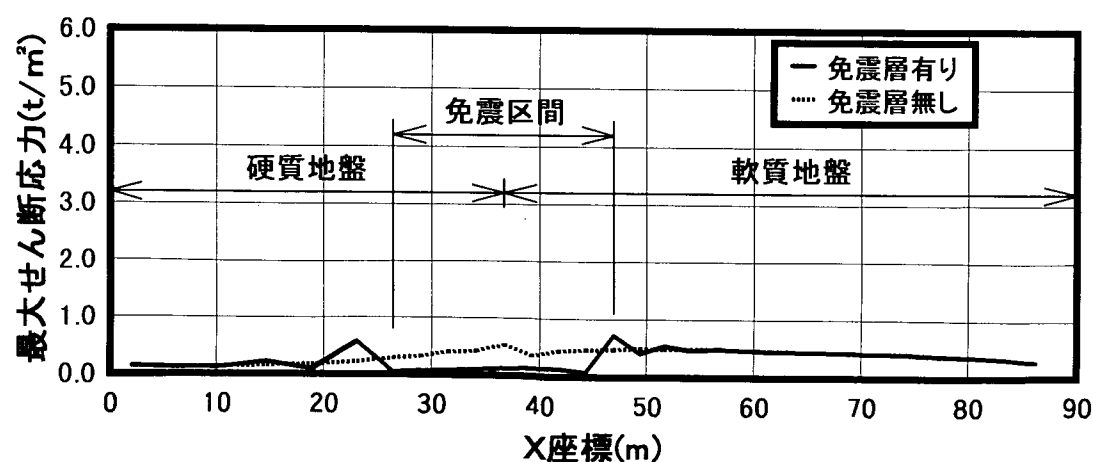
図-45 免震層位置要素の構造物軸方向せん断ひずみ(Y方向加振)



(a) 構造物上部

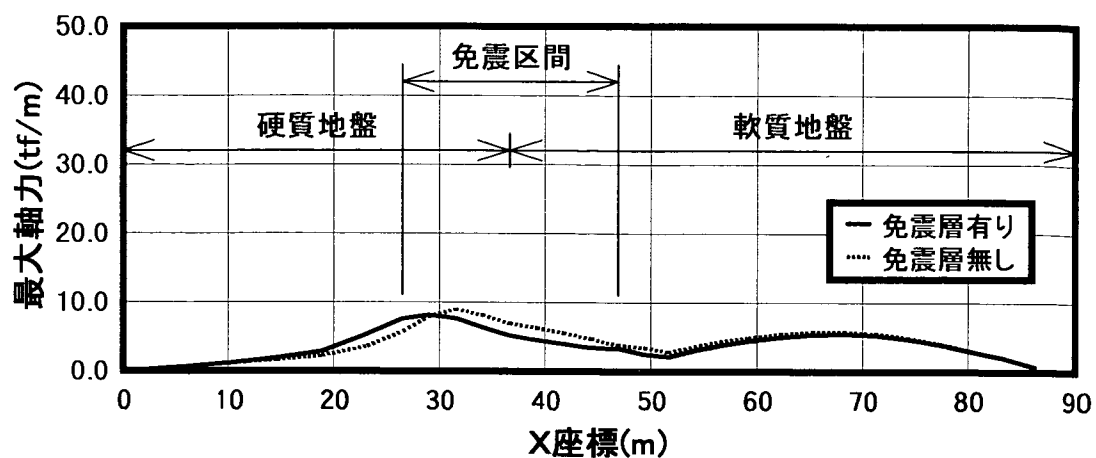


(b) 構造物側部

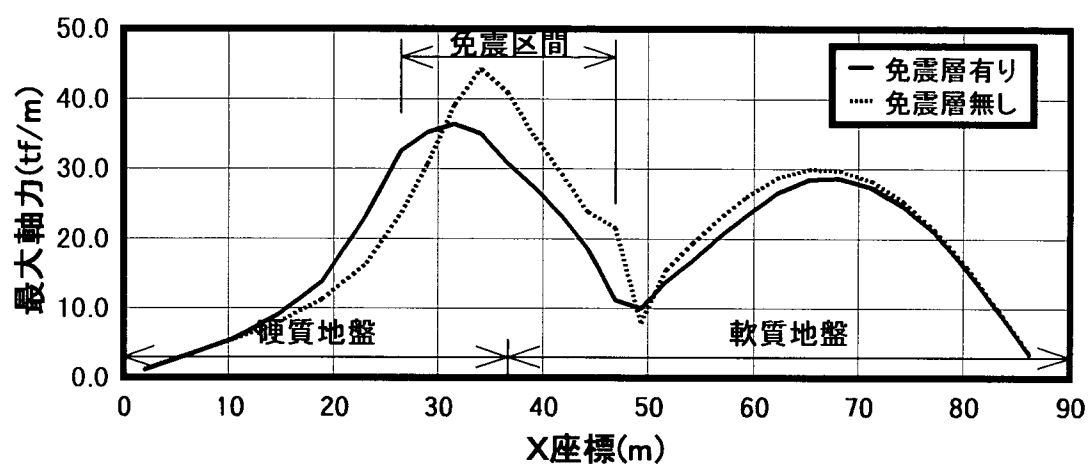


(c) 構造物下部

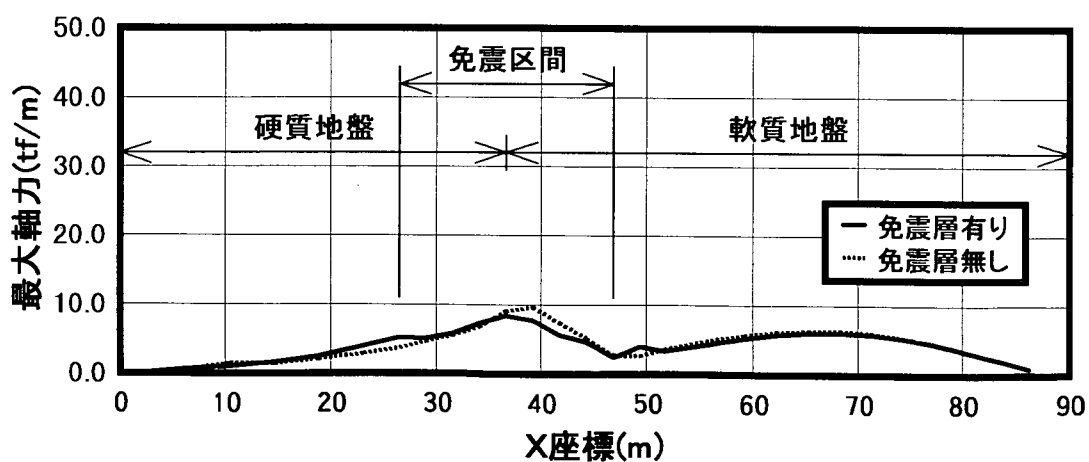
図-46 免震層位置要素の構造物軸方向せん断応力(Y方向加振)



(a) 構造物上部

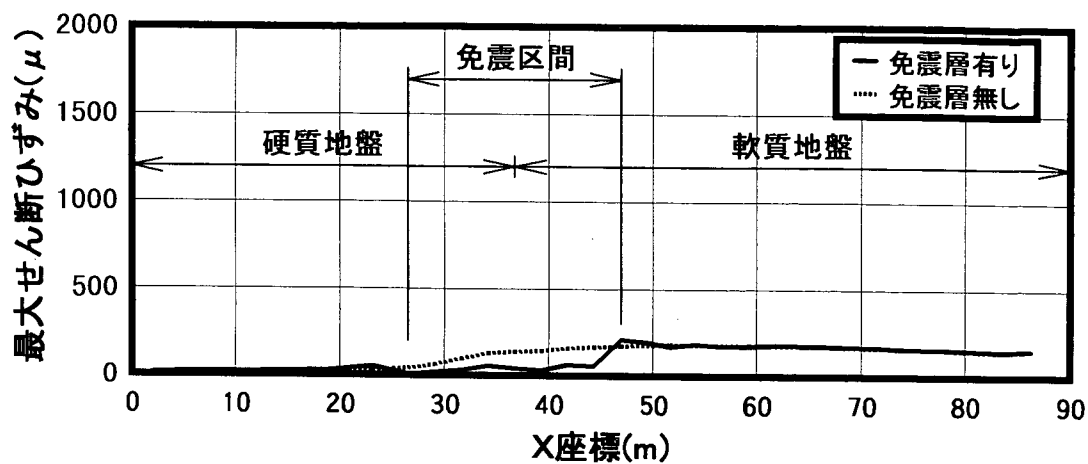


(b) 構造物側部

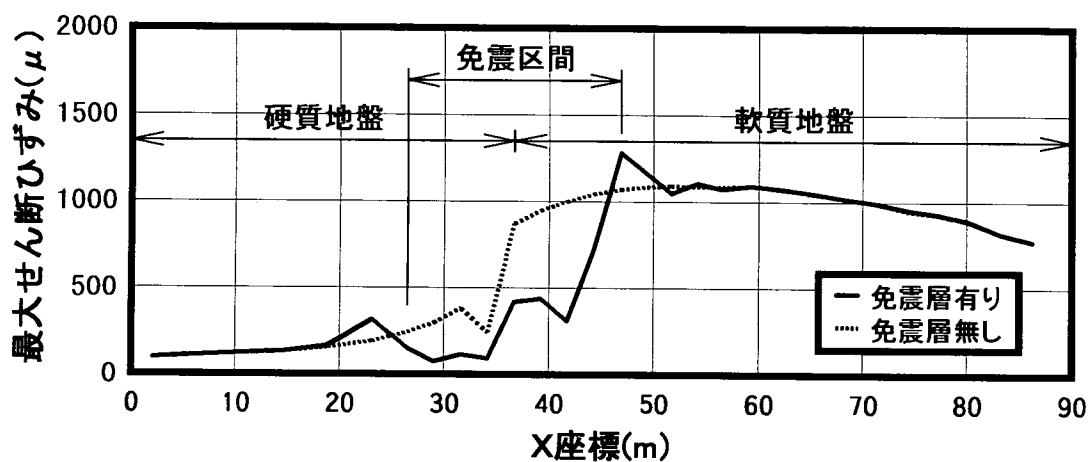


(c) 構造物下部

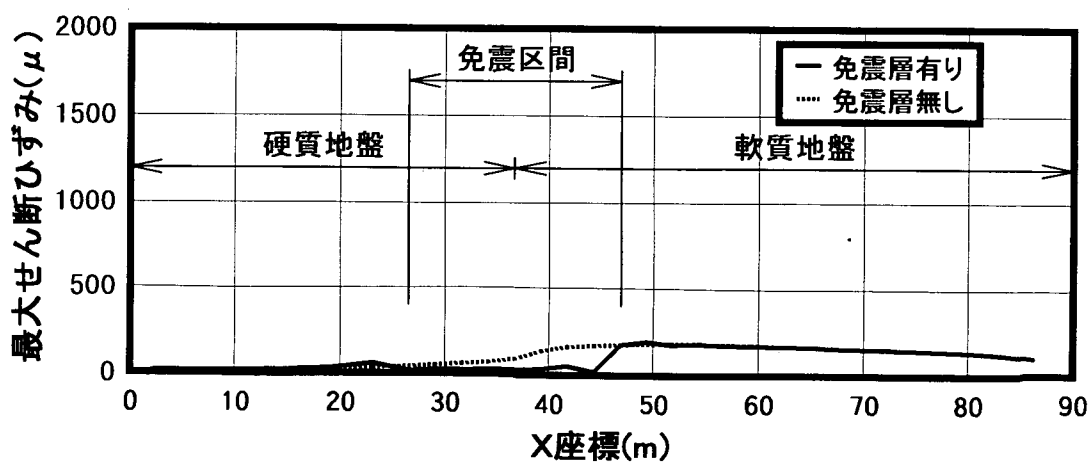
図-47 構造物軸方向軸力(Y方向加振)



(a) 構造物上部

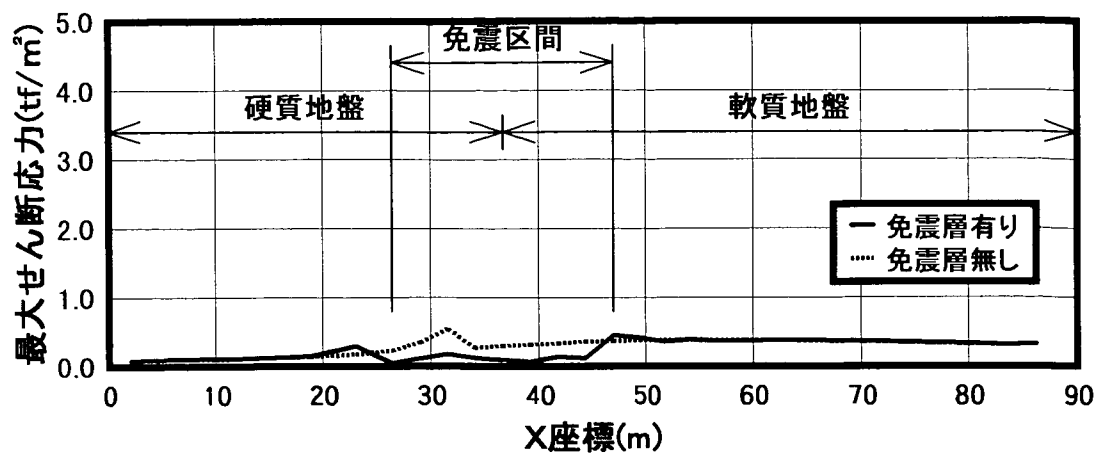


(b) 構造物側部

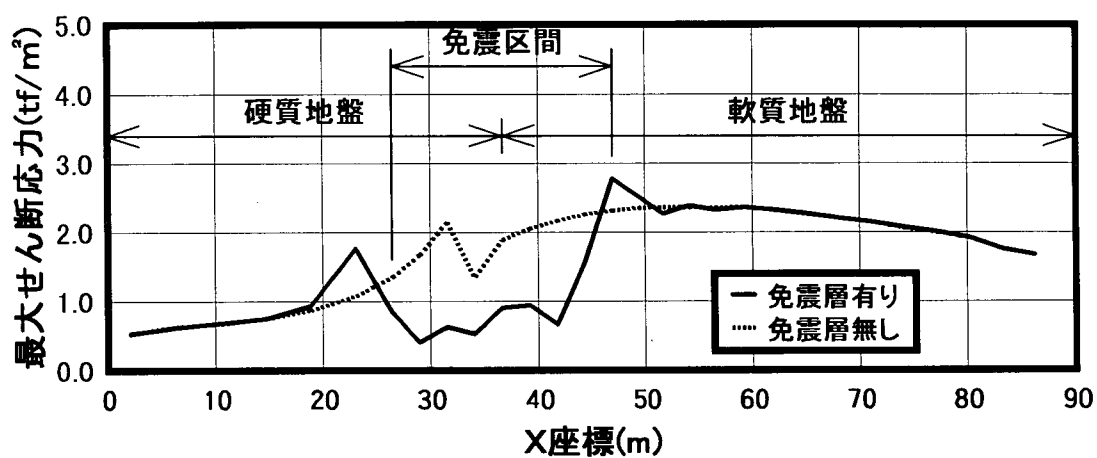


(c) 構造物下部

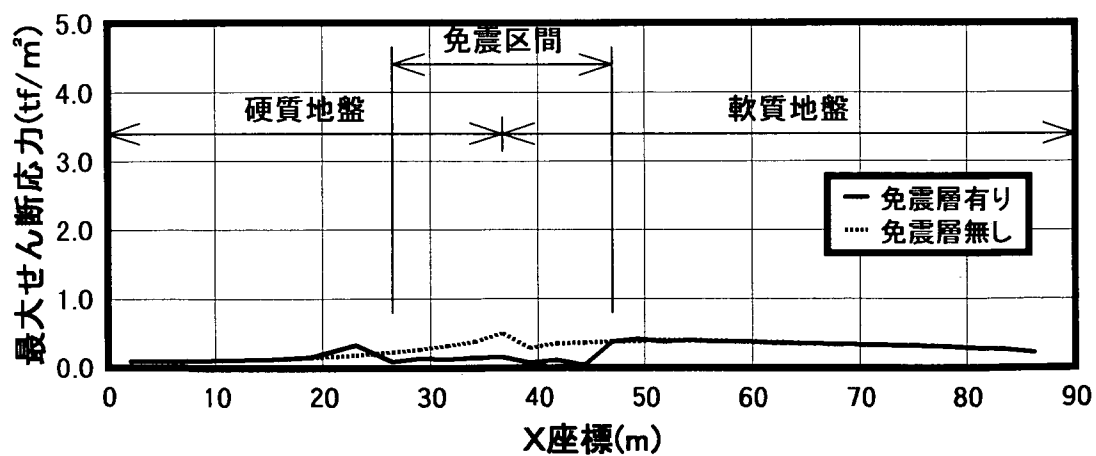
図-48 免震層外側地盤の構造物軸方向せん断ひずみ(Y方向加振)



(a) 構造物上部

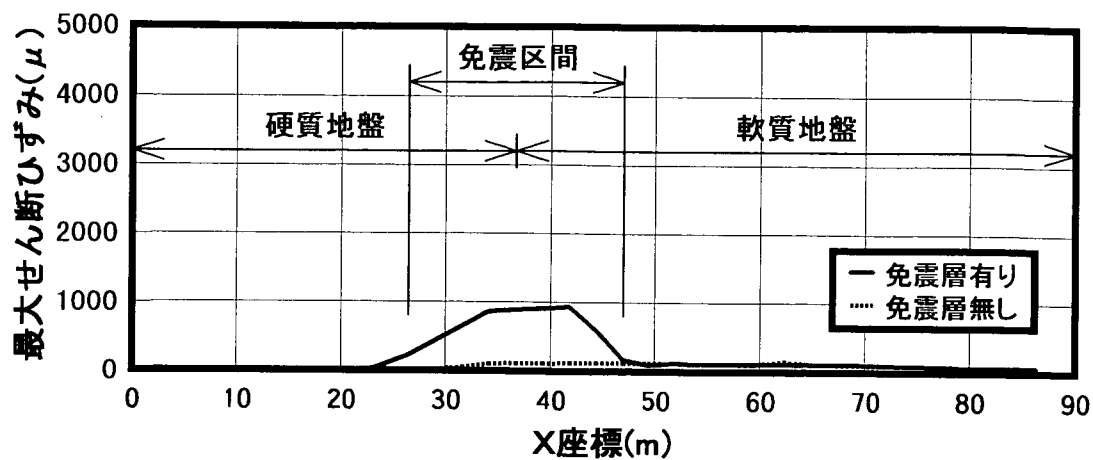


(b) 構造物側部

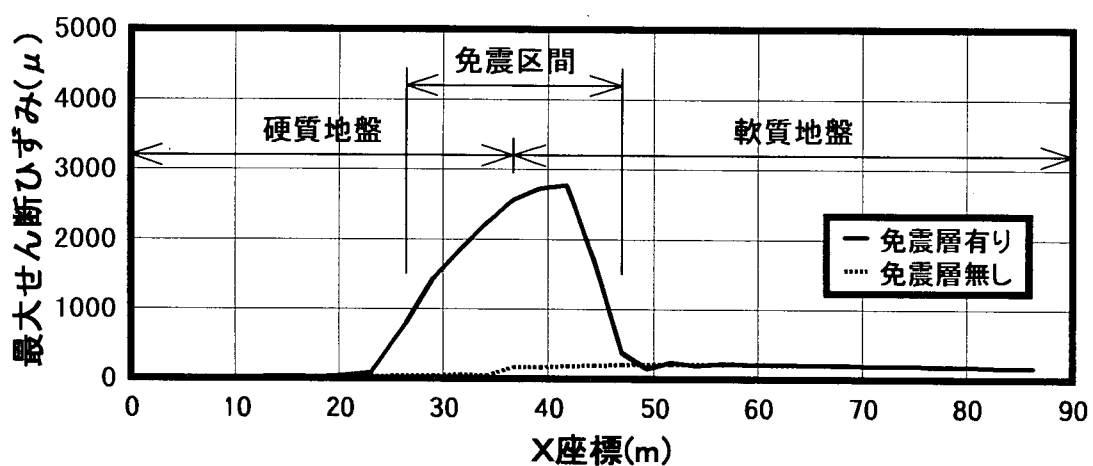


(c) 構造物下部

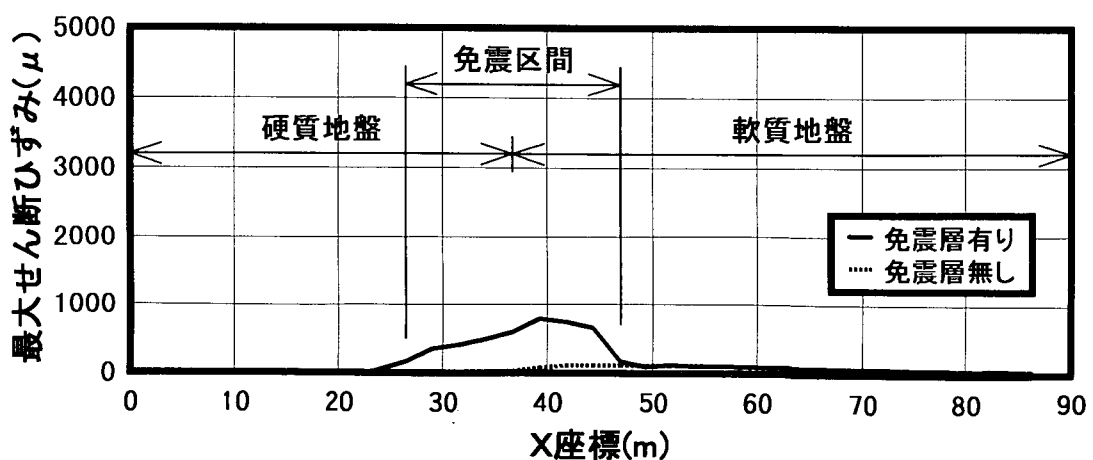
図-49 免震層外側地盤の構造物軸方向せん断応力(Y方向加振)



(a) 構造物上部

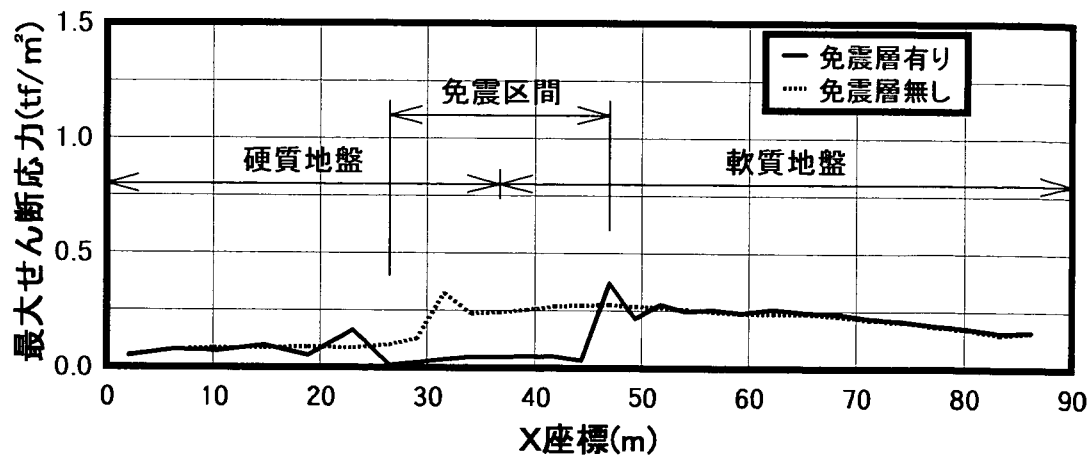


(b) 構造物側部

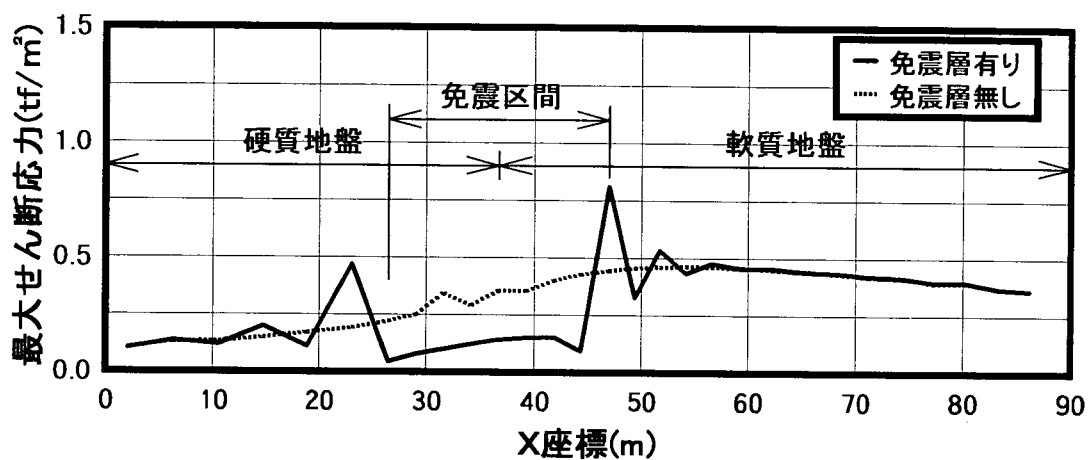


(c) 構造物下部

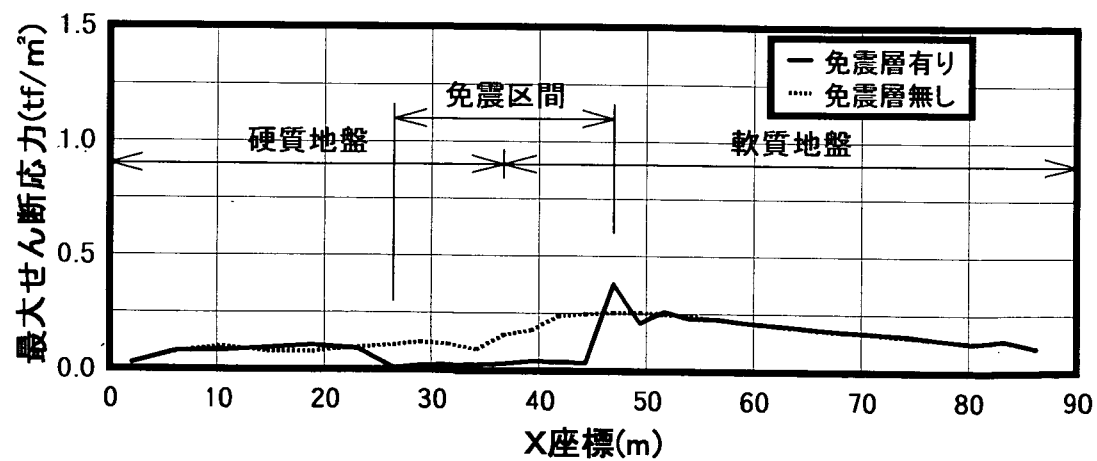
図-50 免震層位置要素の構造物面内方向せん断ひずみ(Y方向加振)



(a) 構造物上部

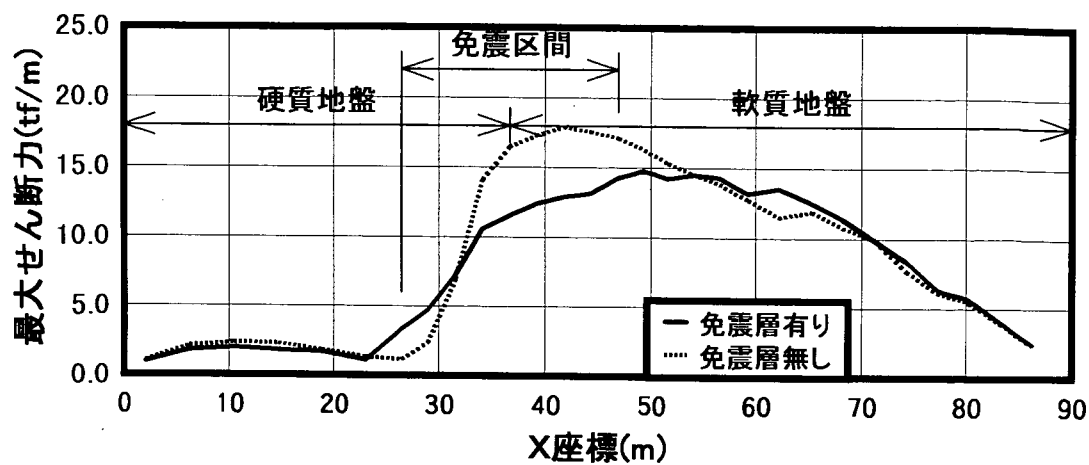


(b) 構造物側部

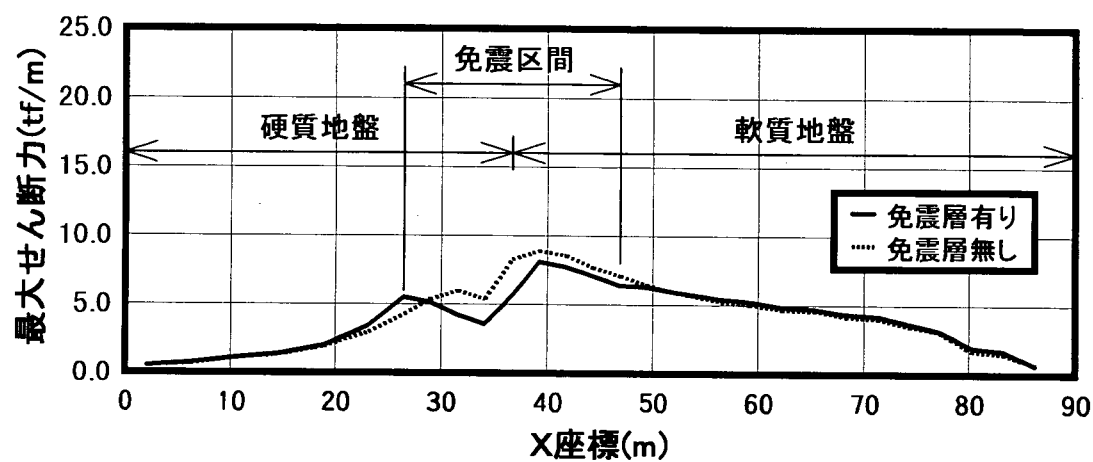


(c) 構造物下部

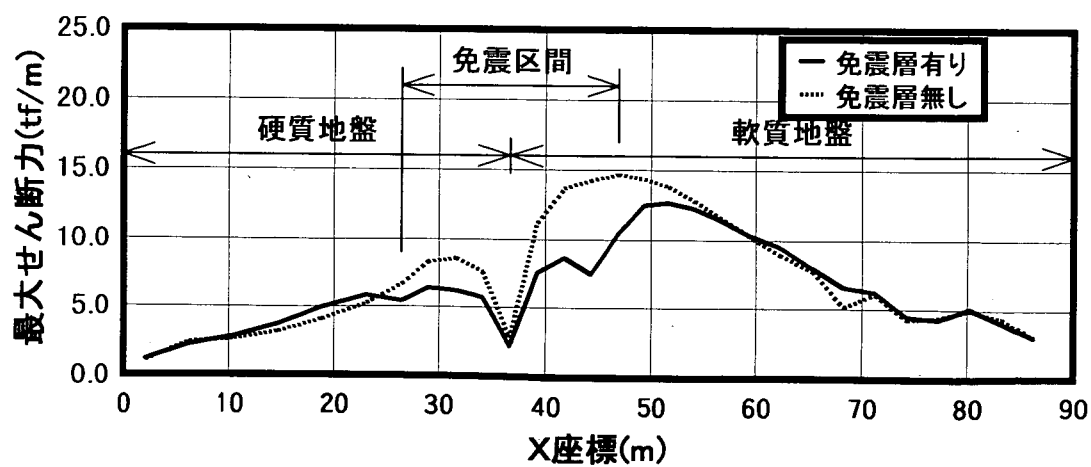
図-51 免震層位置要素の構造物面内方向せん断応力(Y方向加振)



(a)構造物上部



(b)構造物側部



(c)構造物下部

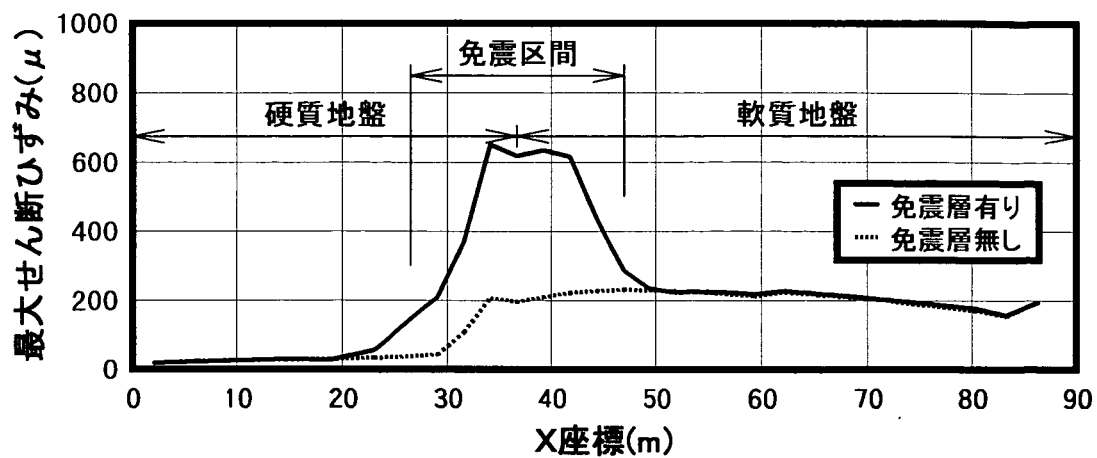
図-52 構造物のせん断力(Y方向加振)

したものである。これらより、免震層により構造物のせん断力が低減していることがわかる。

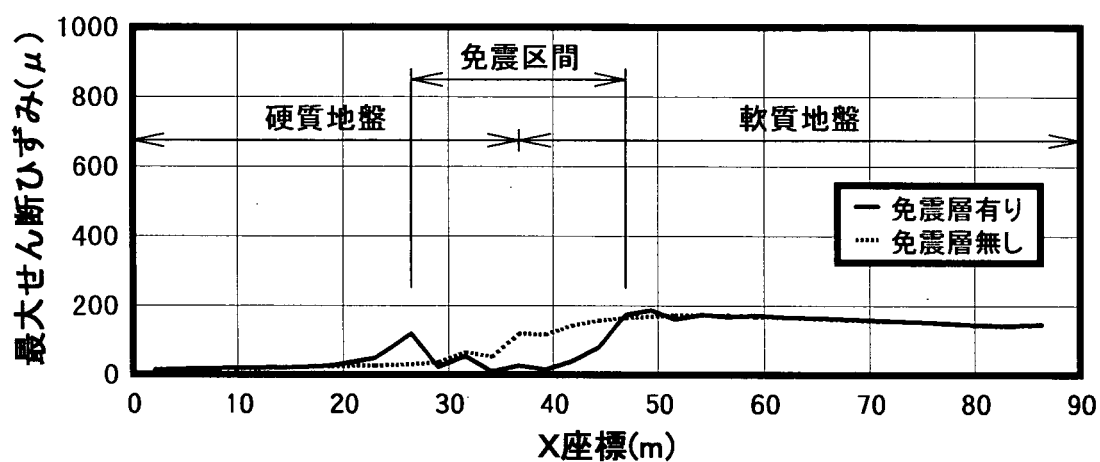
図-53および図-54は、免震層位置のすぐ外側の地盤要素における構造物面内方向せん断ひずみとせん断応力の最大値分布に関する免震層の有無による差異を比較して示したものである。これまでに示した結果と同様に、免震区間では構造物と地盤とが絶縁されたことに起因するせん断ひずみや応力の低減が認められる。

(5) 構造物法線方向直応力に関する免震層の挙動

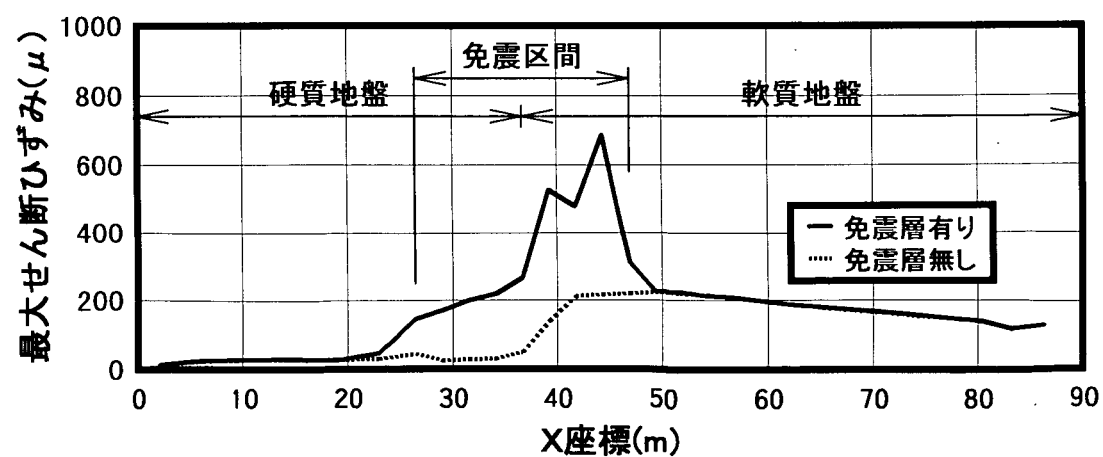
図-55は、構造物法線方向の免震層位置要素の直応力の最大値分布を示したものである。ここで、一様地盤中にある円形断面の構造物の場合は、地震時はせん断変形が支配的であるため45°や135°の位置に着目する必要があるが、本解析は地盤条件変化部を対象としたものであり、前述したように曲げ変形が支配的であると考えられるので、これまでと同様に構造物上部、側部、下部に着目する。これらより、構造物側部においては、非免震の場合は地盤急変部付近で局所的に大きな法線方向直応力が発生しているが、免震層を設置した場合には、このような直応力の局所的集中が分散、緩和されていることが認められる。この理由としては、今回の解析に用いた免震層のポアソン比は0.3と小さく、構造物横断方向に対する動的解析結果⁹⁾でも示されているように、免震層がせん断方向のみならず軸方向（ここでは法線方向）にも変形することに起因するものと考えられる。この構造物法線方向の軸応力の局所的集中の緩和は、構造物に伝達されるせん断力の低減と相まって、構造物変形の緩和および地震時増分断面力の低減につながっているものと考えられる。また、上部、下部においても、免震層設置区間は直応力が大きく低減されている。



(a) 構造物上部

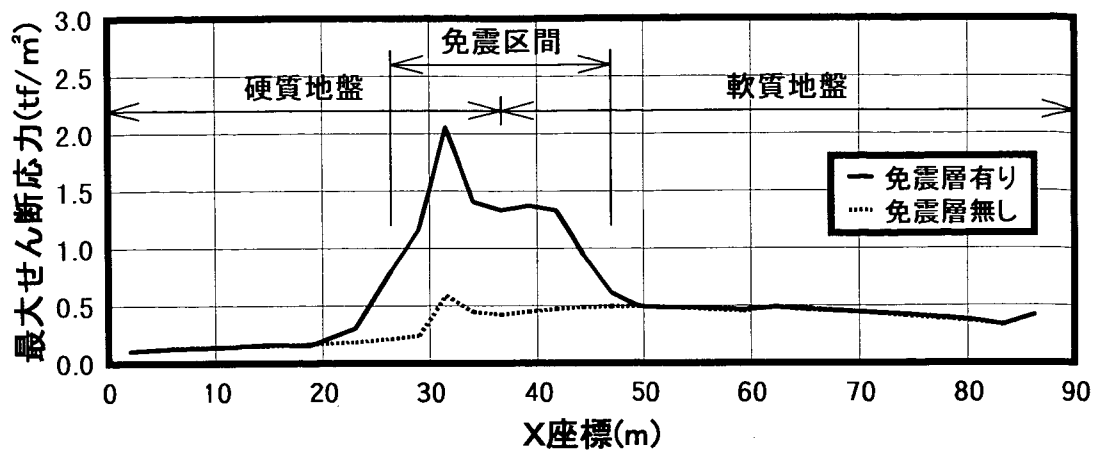


(b) 構造物側部

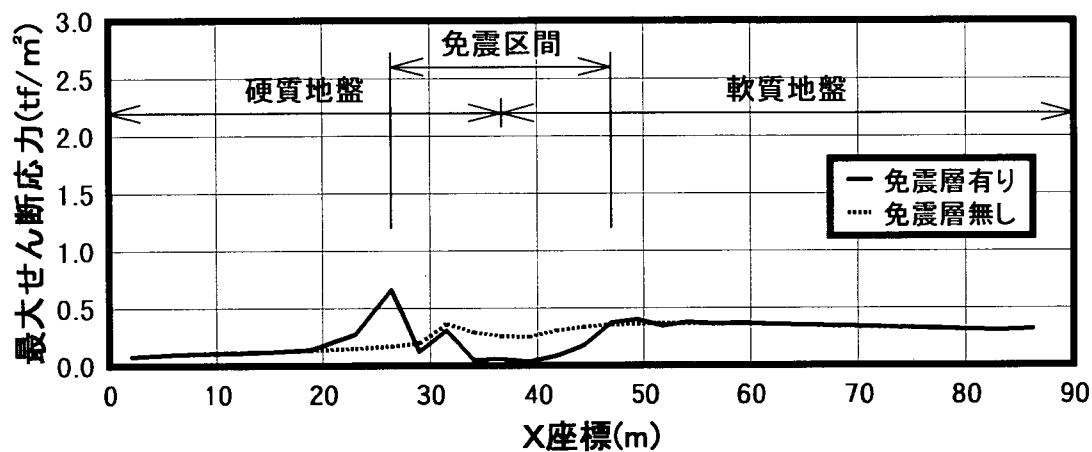


(c) 構造物下部

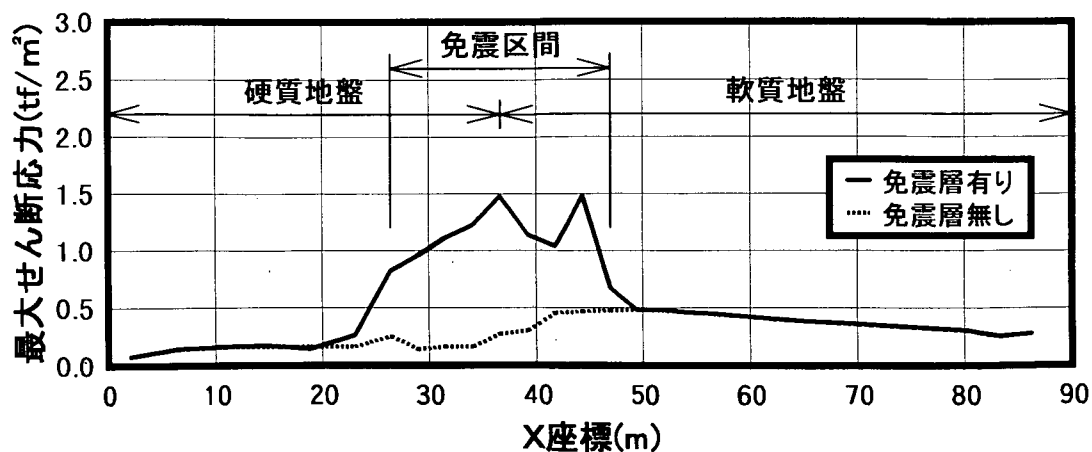
図-53 免震層外側地盤の構造物面内方向せん断ひずみ(Y方向加振)



(a) 構造物上部

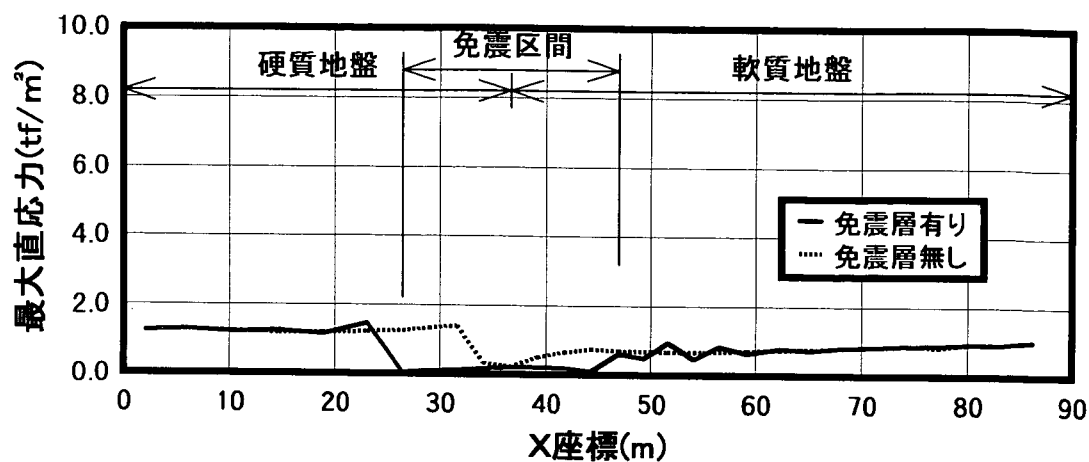


(b) 構造物側部

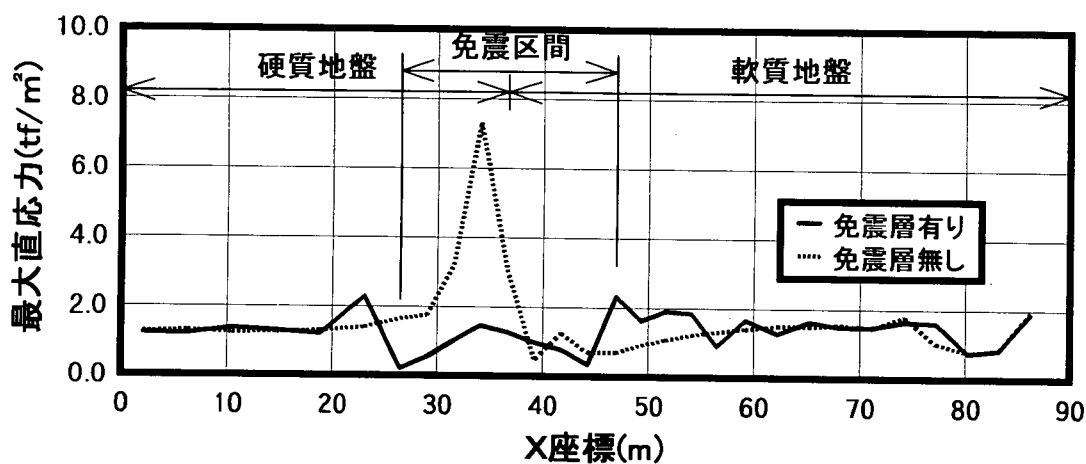


(c) 構造物下部

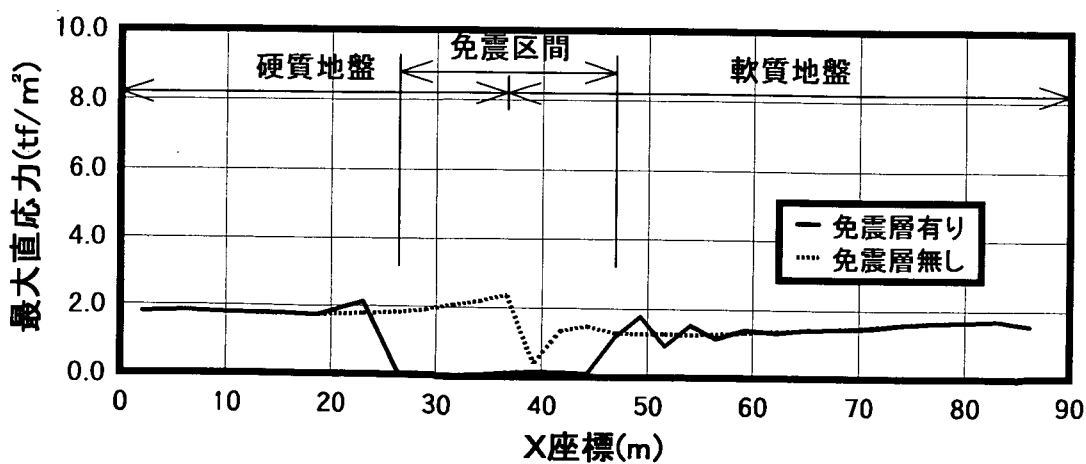
図-54 免震層外側地盤の構造物面内方向せん断応力(Y方向加振)



(a) 構造物上部



(b) 構造物側部



(c) 構造物下部

図-55 免震層位置要素の構造物法線方向直応力(Y方向加振)

5. 免震メカニズムまとめ

本文では、地中構造物を免震化した場合の免震メカニズムの検討を目的とし、地盤条件変化部を通過する免震シールドトンネルを対象とした3次元動的有限要素解析を行った。解析に際しては、まず、十分な解析精度を得ることのできる合理的な解析を実施するため、2次元モデルにて予備解析を実施し、その検討結果を踏まえて解析モデルを構築した。そして、構築された解析モデルを用いて3次元動的有限要素解析を実施し、構造物の応答値や地盤－免震層－構造物に生じる地震時最大応答値に着目して解析結果を整理するとともに、免震メカニズムの検討を行った。

本解析結果より得られた免震メカニズムに関する知見は以下のようにまとめられる。

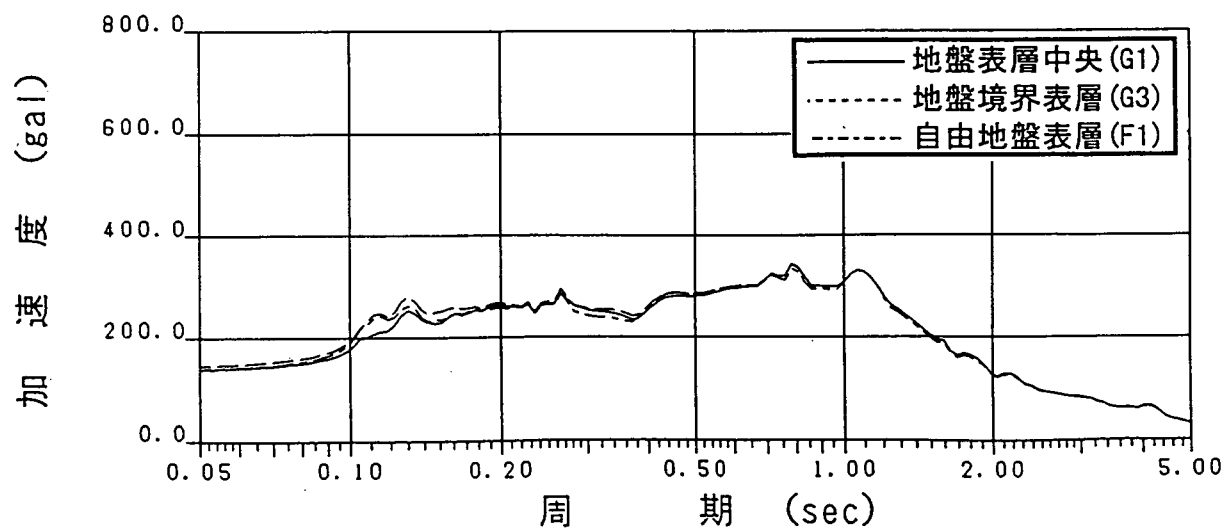
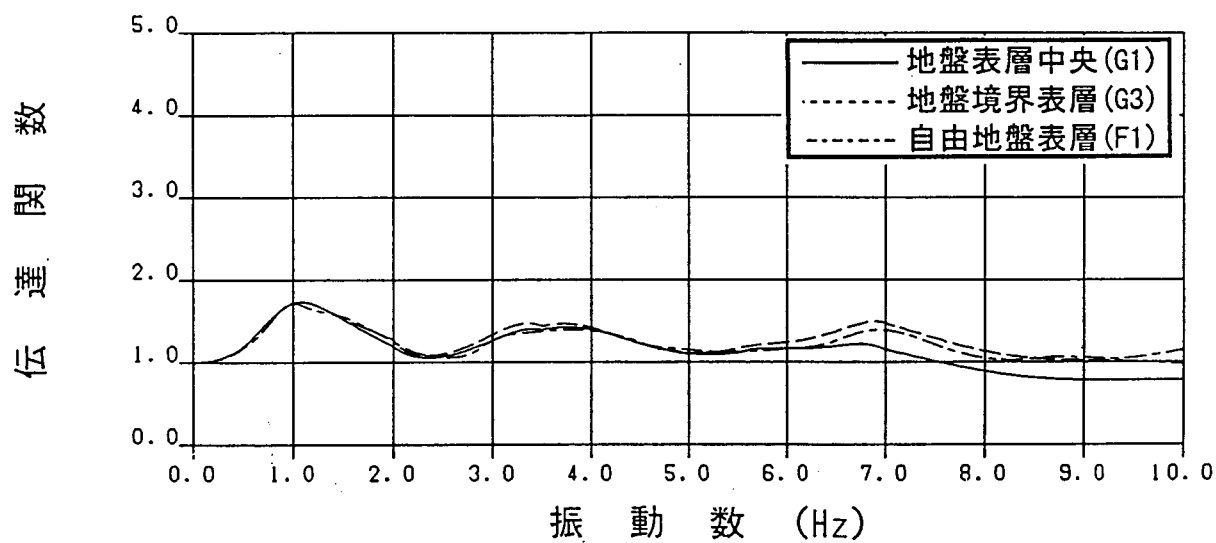
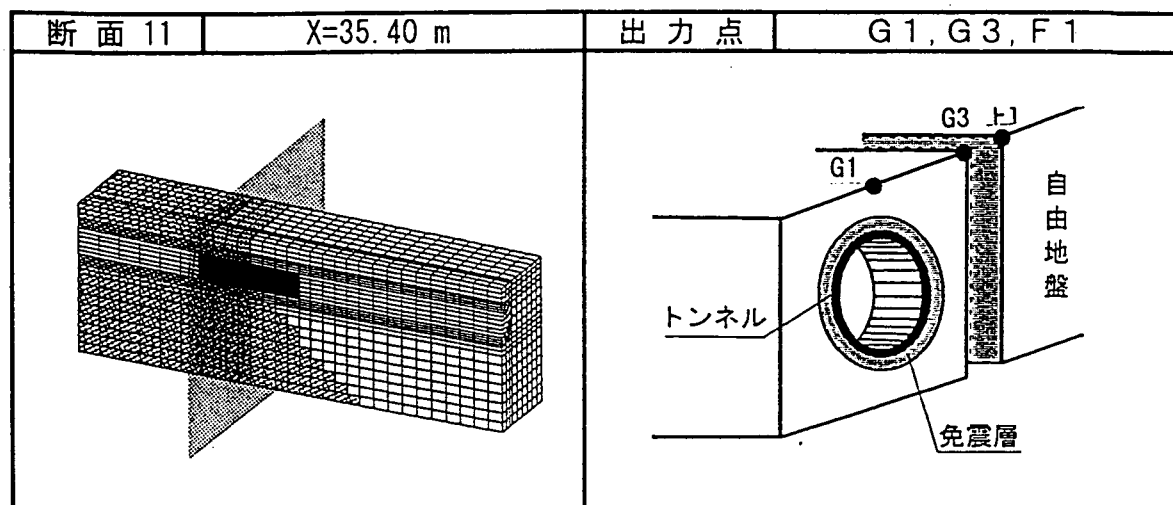
- (1) 加振方向や着目する方向に関わらず、免震層は非免震の場合の同位置における地盤と比較して大きなせん断変形を示してしており、地盤ひずみがここで吸収されている。これは、構造物と地盤が絶縁され、両者の相互作用が低減していることを意味している。免震層に生じるせん断応力は、免震層のせん断弾性係数が小さいため、非免震層の場合の同位置における地盤のせん断応力と比較して小さくなっているが、これは、構造物周面に伝達する軸力または周面せん断力の低減と対応づけられる。また、近傍地盤においては、構造物との絶縁に起因して、空洞地盤の挙動に近づくこととなる。これらは地中構造物を免震化した場合の基本的な免震メカニズムであると考えられる。
- (2) 今回解析に用いた物性値を有する免震層を設置して地中構造物を免震化した場合、構造物の地震時挙動は非免震の場合と同様に地盤に追随し、応答加速度や応答速度に有意な影響を及ぼす自励振動等は生じない。しかし、今回のような地盤条件変化点を通過する構造物においては、免震層を設置することにより構造物に生じるひずみの局所的な集中が緩和され、平滑化される。例えば、X方向加振においては、非免震構造物では、地盤の動的物性差に起因する軸方向ひずみの集中が地盤及び構造物に生じ、これが地震時の挙動として卓越的であるが、免震層を介在させると、免震層がせん断変形することにより、構造物に伝達するこのような地盤ひずみの局所的な集中が緩和、分散され、構造物の変形が平滑化されることとなる。また、Y方向加振においては、非免震構造物では、構造物に地盤急変部近傍で局所的な曲げ変形が生じ、特に構造物側部位置で大きな軸方向軸力が発生するが、免震層を介在させると、免震層がせん断変形するとともに、軸方向にも変形し、両方の効果が相まって構造物に伝達するひずみの集中が分散され、変形が緩和されることとなる。

参考文献

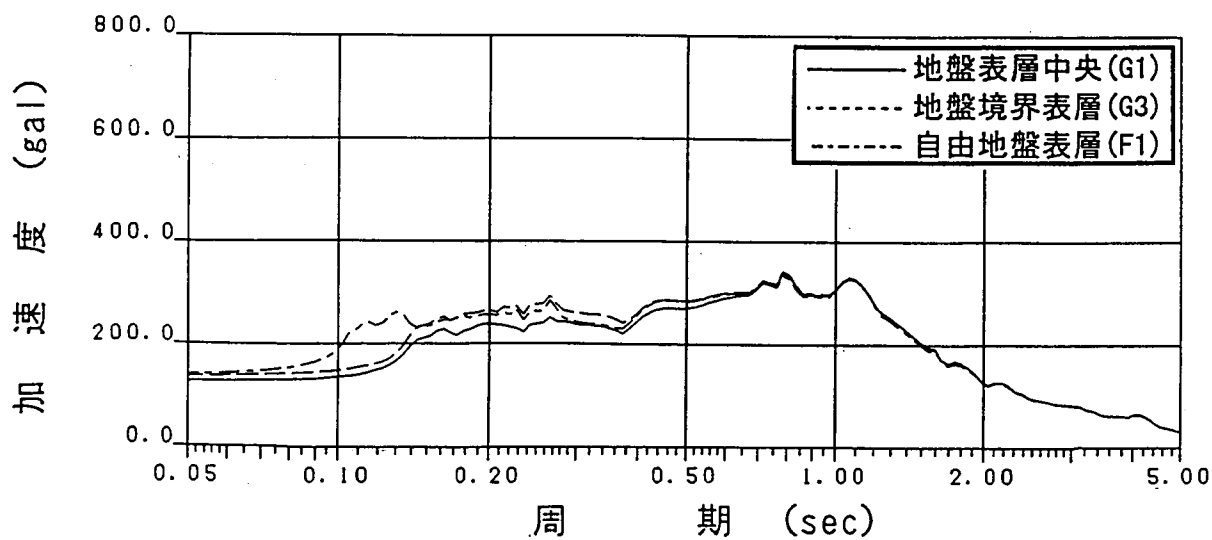
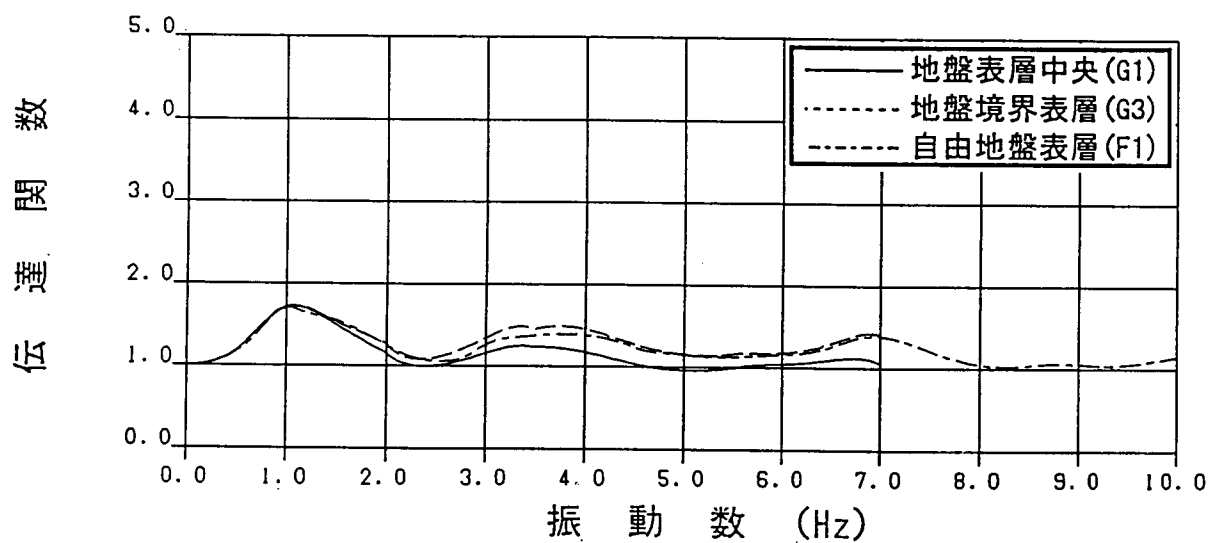
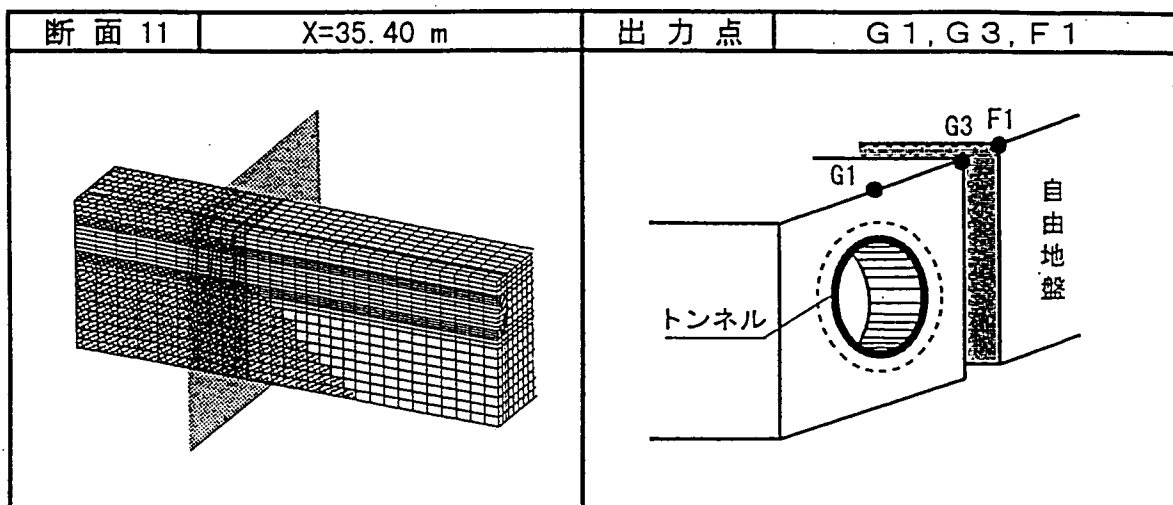
- 1) 建設省土木研究所他：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書（その1）,平成8年11月
- 2) 大塚久哲、星隈順一、村井和彦：地中構造物に適用する免震材料の開発,土木技術資料 Vol.39-3,pp.50-55,平成9年3月
- 3) 大塚久哲：地中構造物の免震化に関する研究,第1回免震・制震コロキウム講演論文集,pp5-17,平成8年11月
- 4) 村井、星隈、運上：円形断面を有する免震地下構造物の免震効果とメカニズムに関する解析的検討,第24回地震工学研究発表会講演論文集pp.757-760,1997.7
- 5) 運上、星隈、村井：円形断面を有する免震地下構造物の免震効果とメカニズム,土木研究所資料第3537号,1998.1
- 6) 柏田、鈴木：矩形断面トンネルの免震メカニズムに関する解析的検討,第24回地震工学研究発表会講演論文集,pp.409-412,1997.7
- 7) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編,平成2年2月
- 8) 社団法人 日本道路協会：共同溝設計指針,昭和61年3月
- 9) 鈴木、柏田、小林、池野、福田、田中：トンネルの免震施工に用いるシリコン系免震材の動的物性,第32回地盤工学研究発表会講演論文集pp.2095-2096,1997.7

付 録 資 料

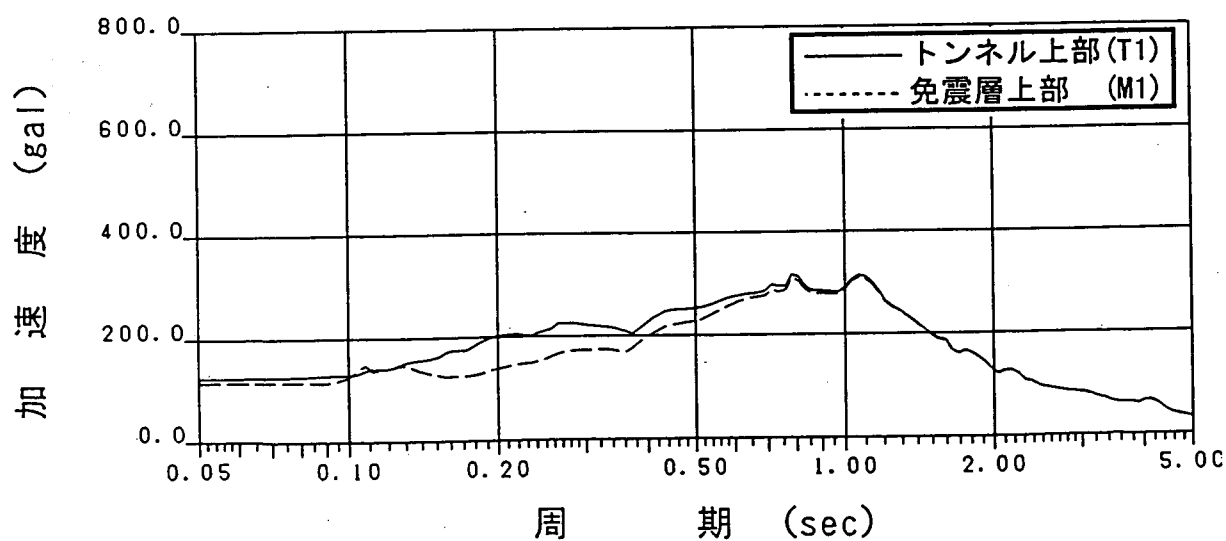
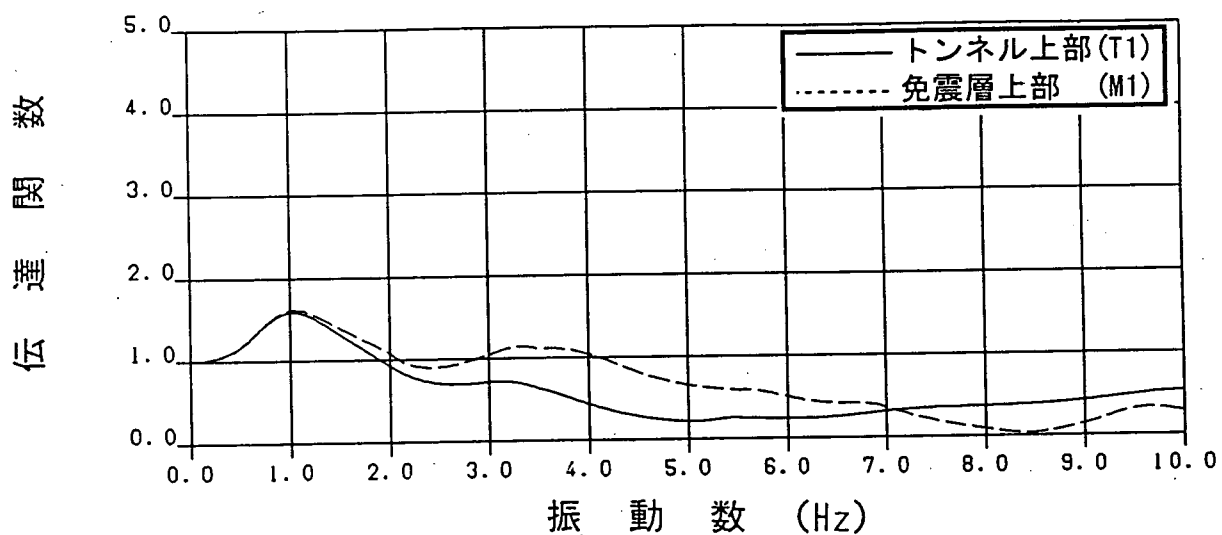
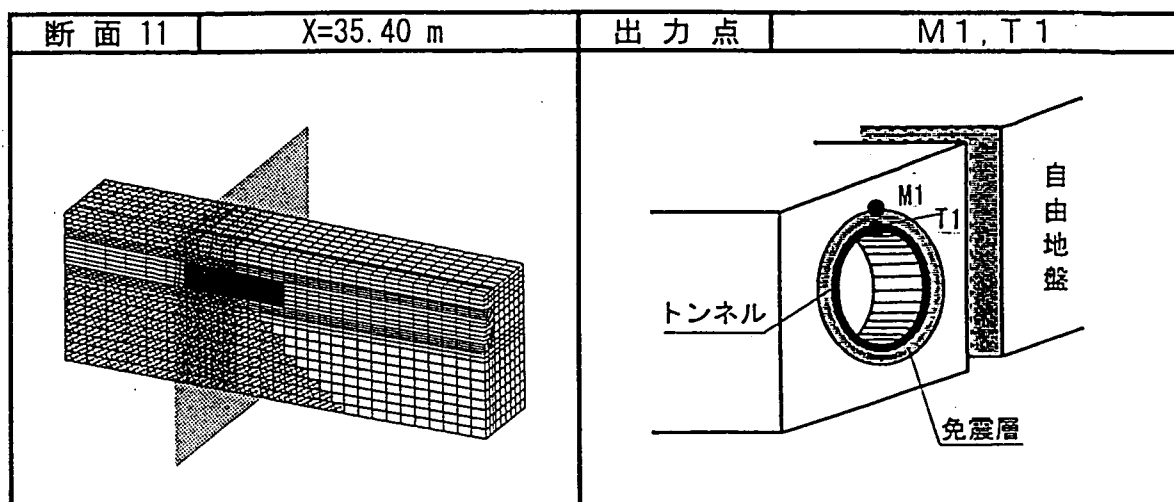
1. 伝達関数および加速度応答スペクトル
2. X方向加振解析結果
3. Y方向加振解析結果



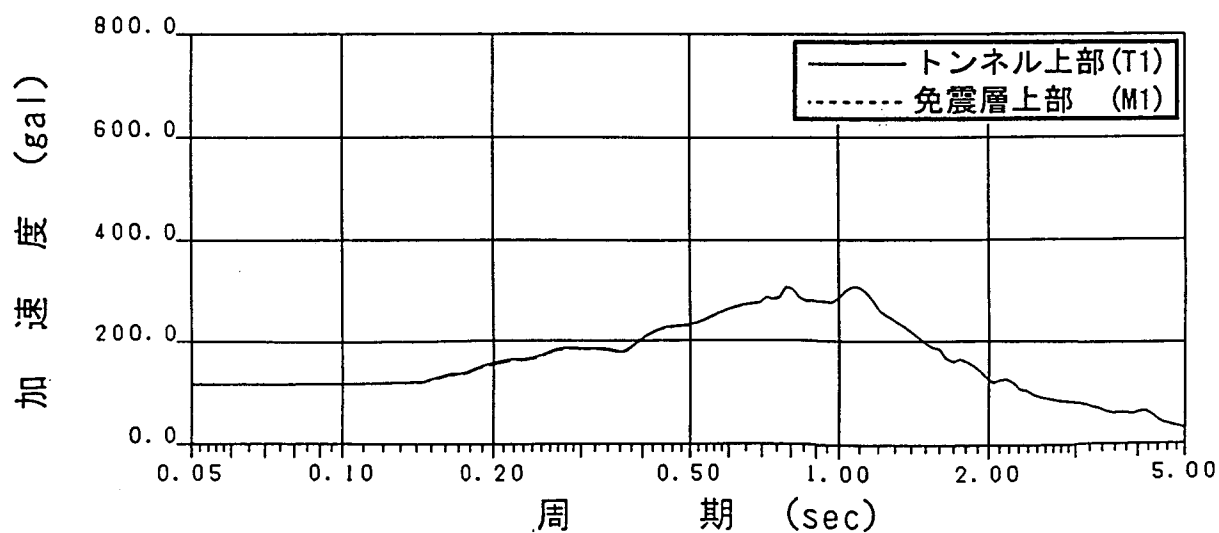
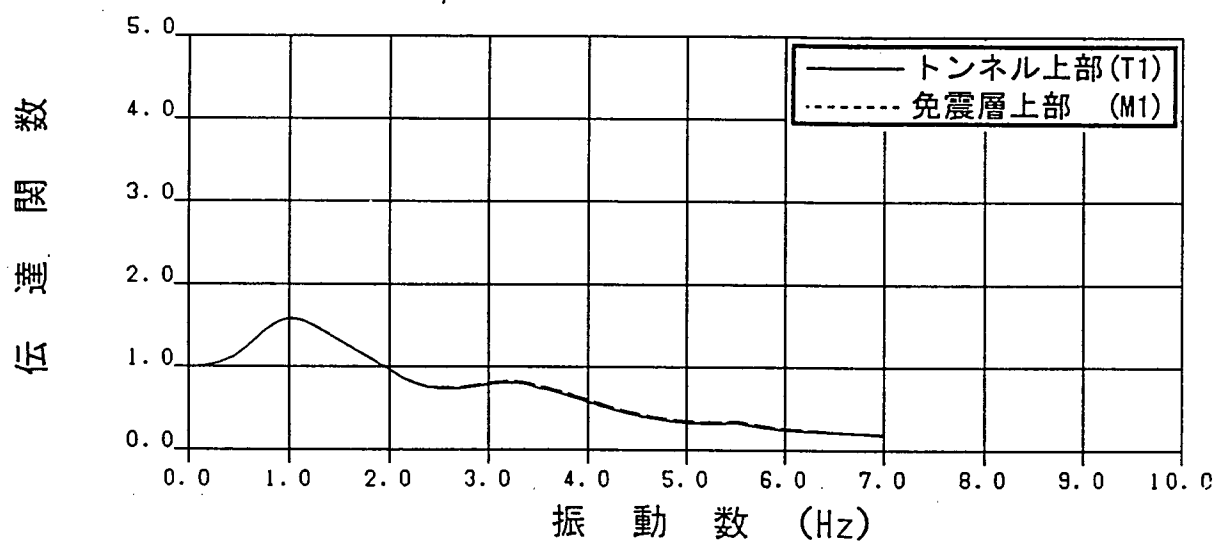
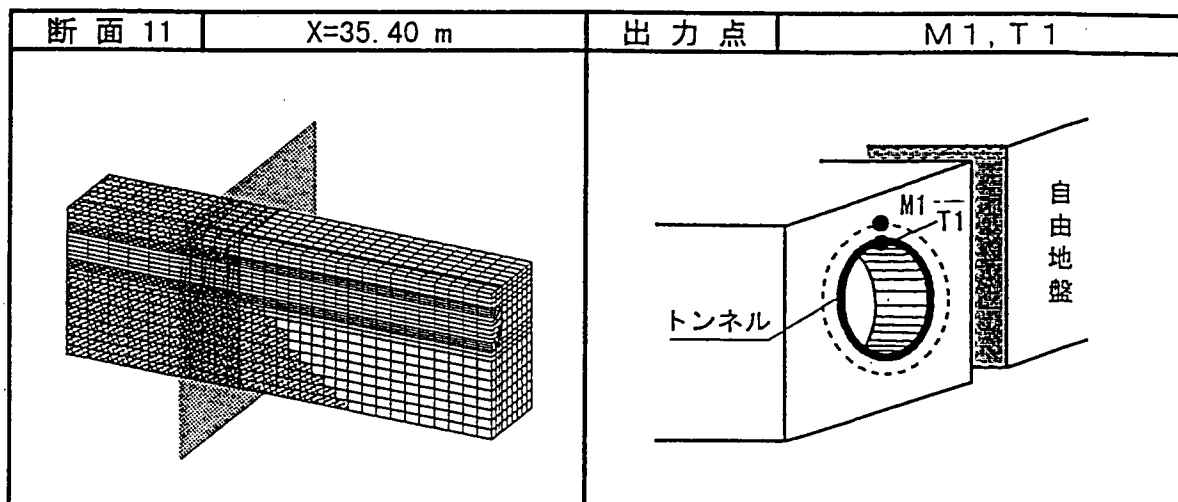
地盤条件変化点の地表面位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(X方向加振、免震層有り)



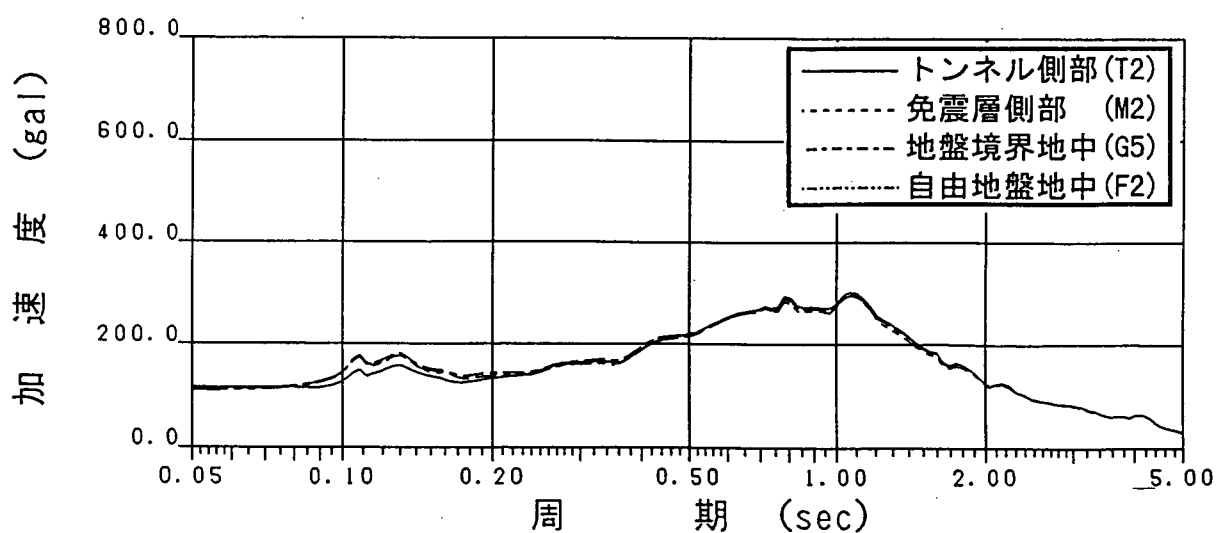
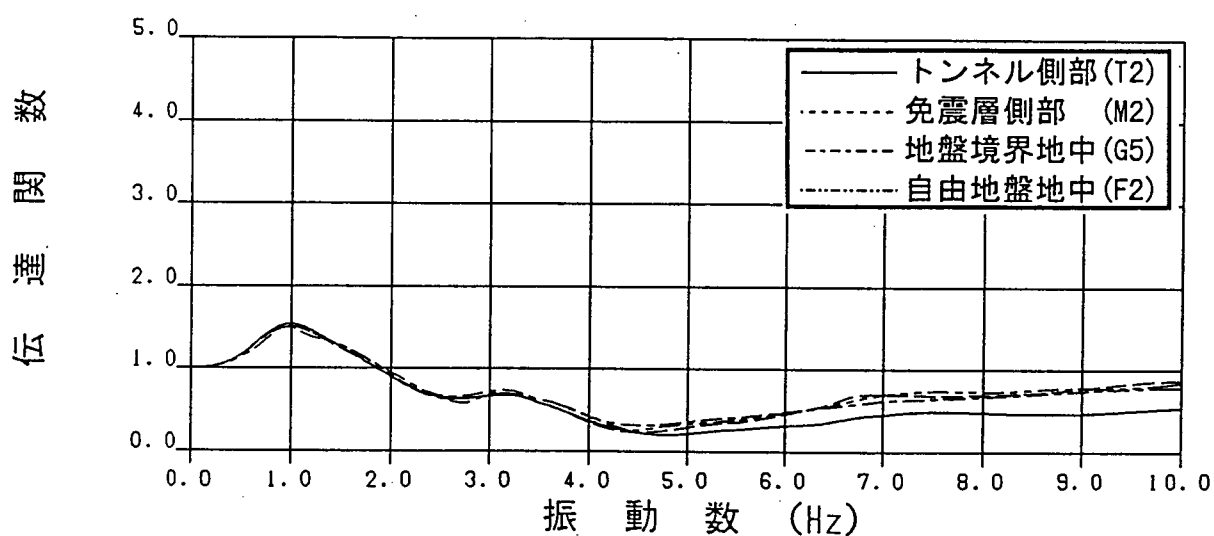
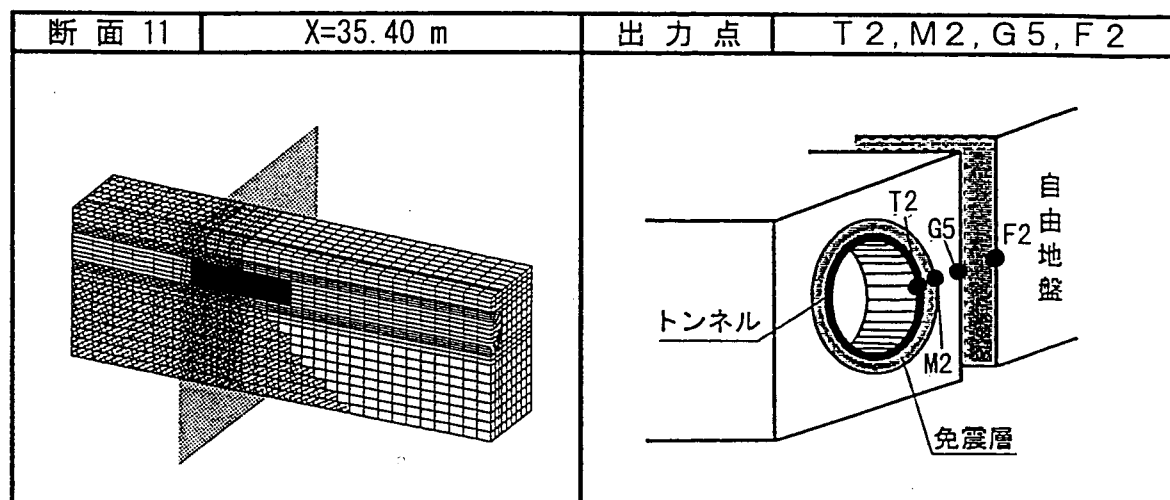
地盤条件変化点の地表面位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(X方向加振、免震層無し)



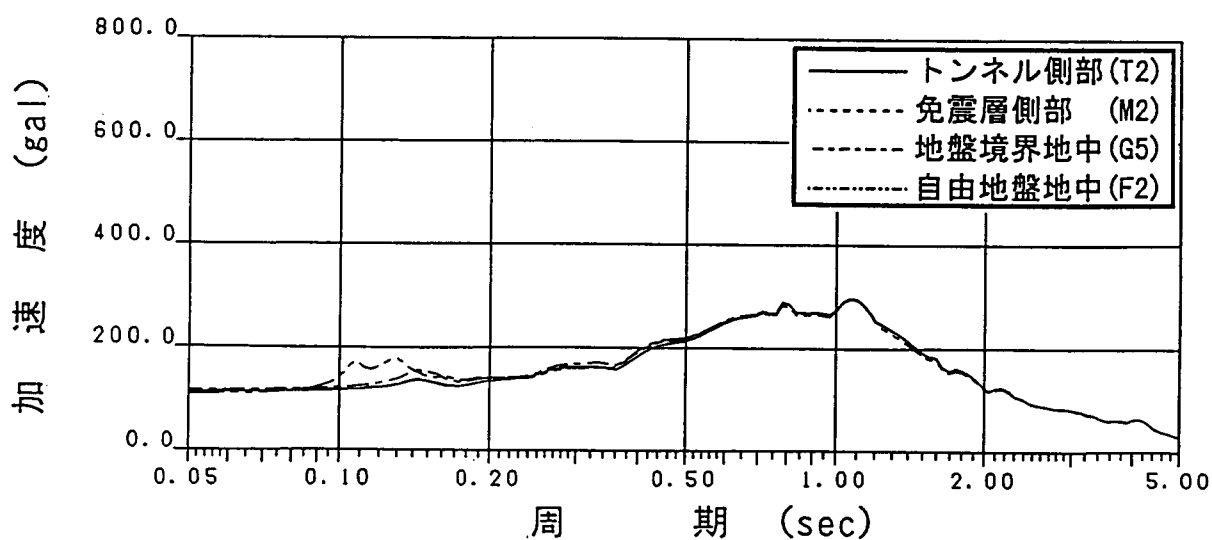
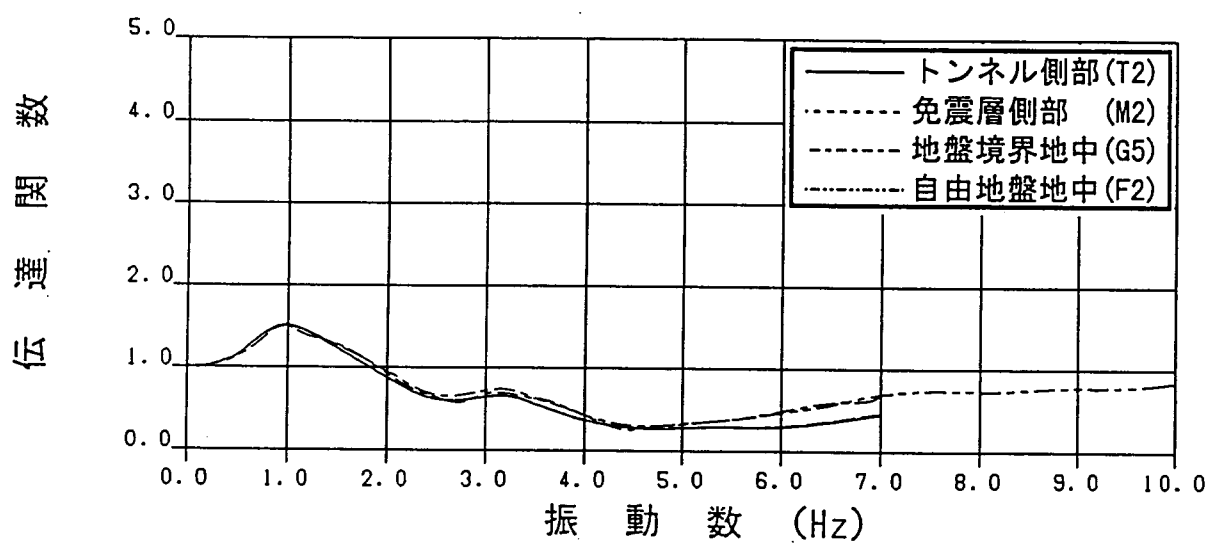
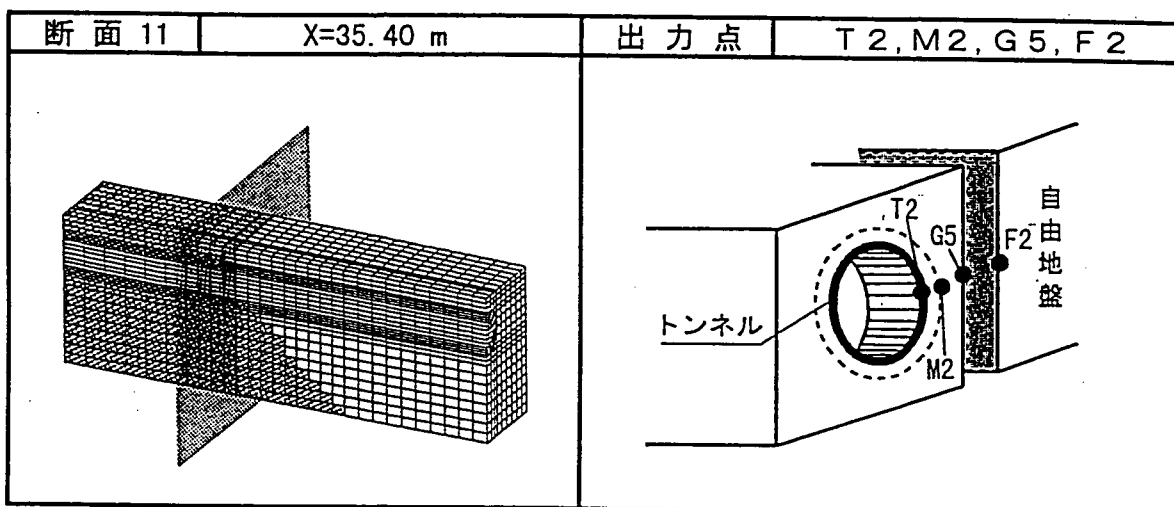
地盤条件変化点のトンネル上部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(X方向加振、免震層有り)



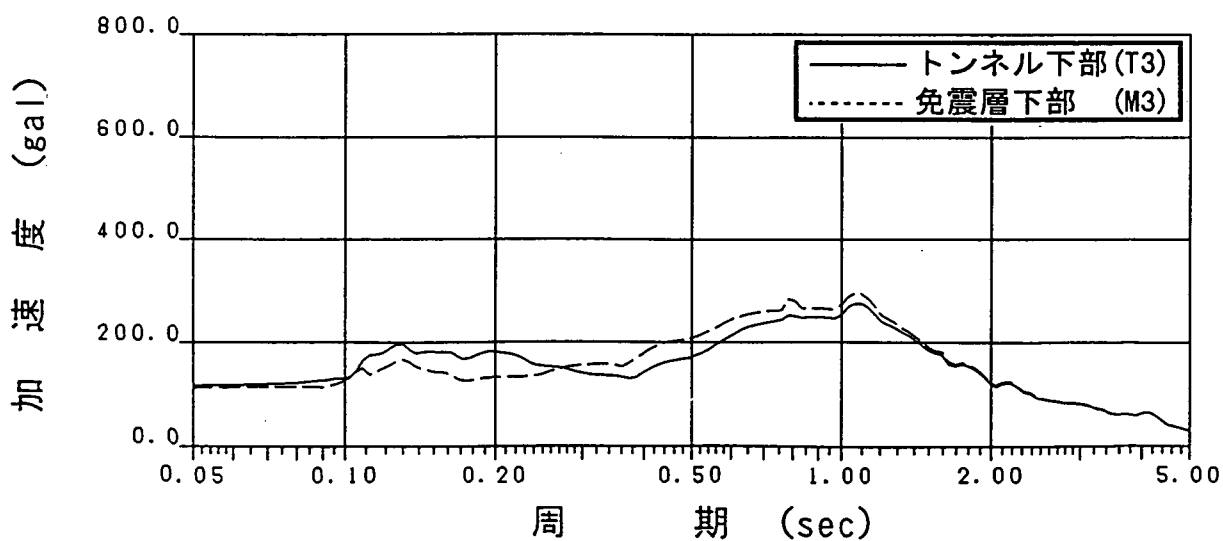
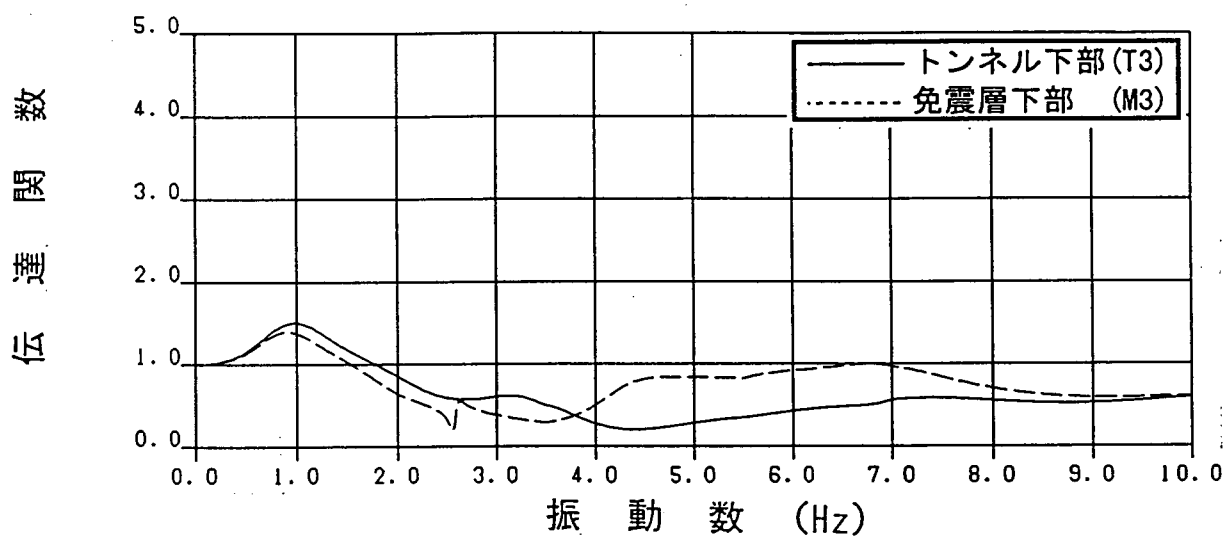
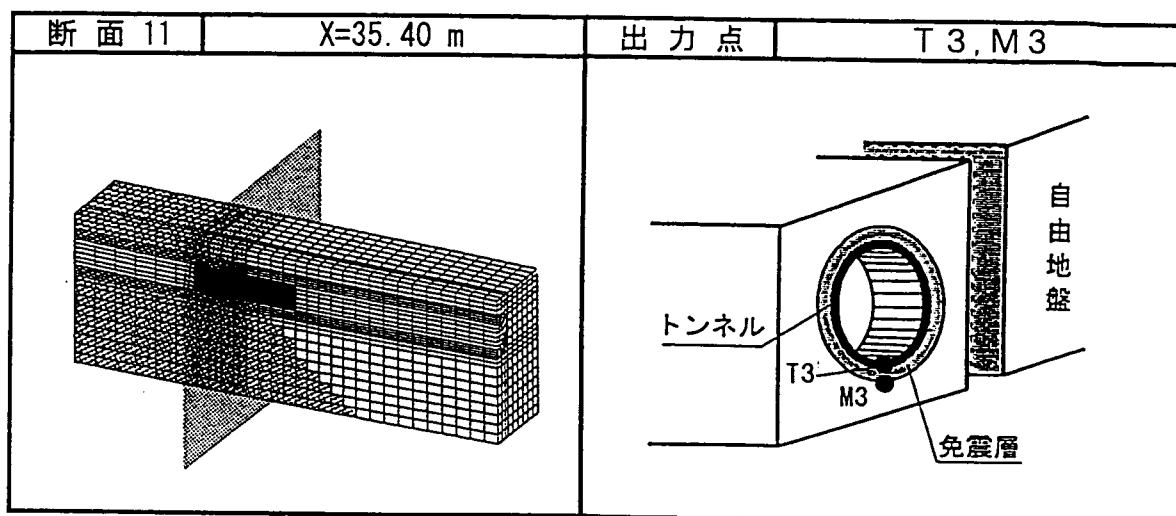
地盤条件変化点のトンネル上部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(X方向加振、免震層無し)



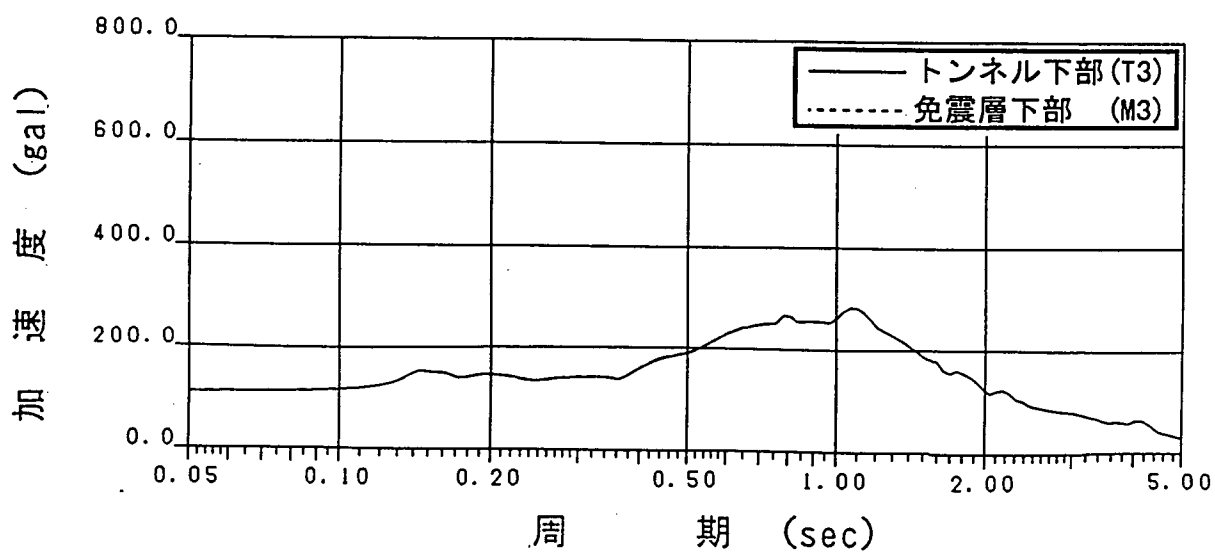
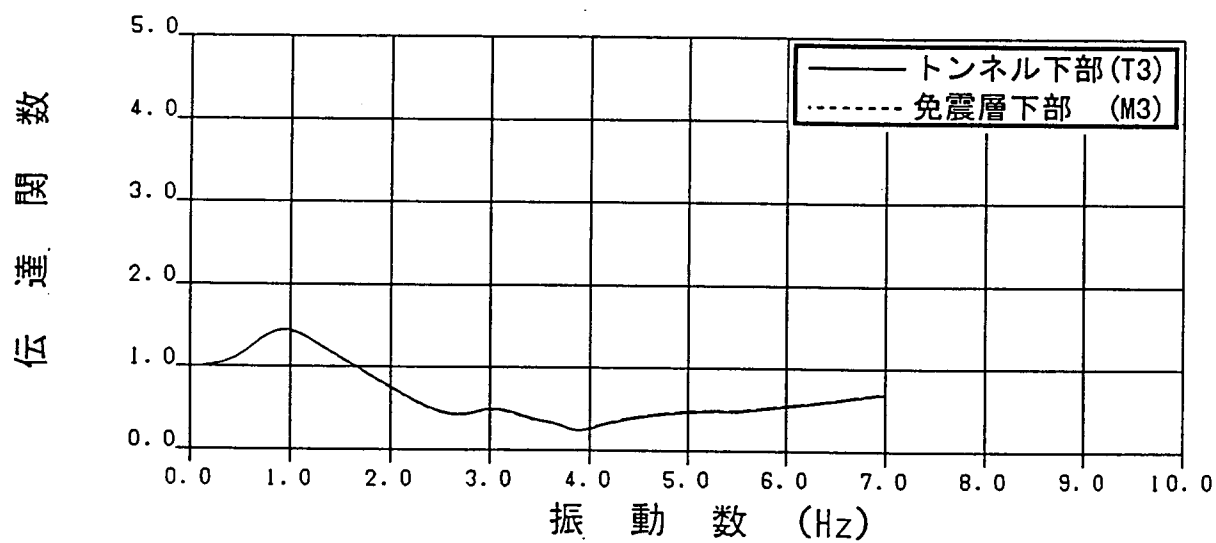
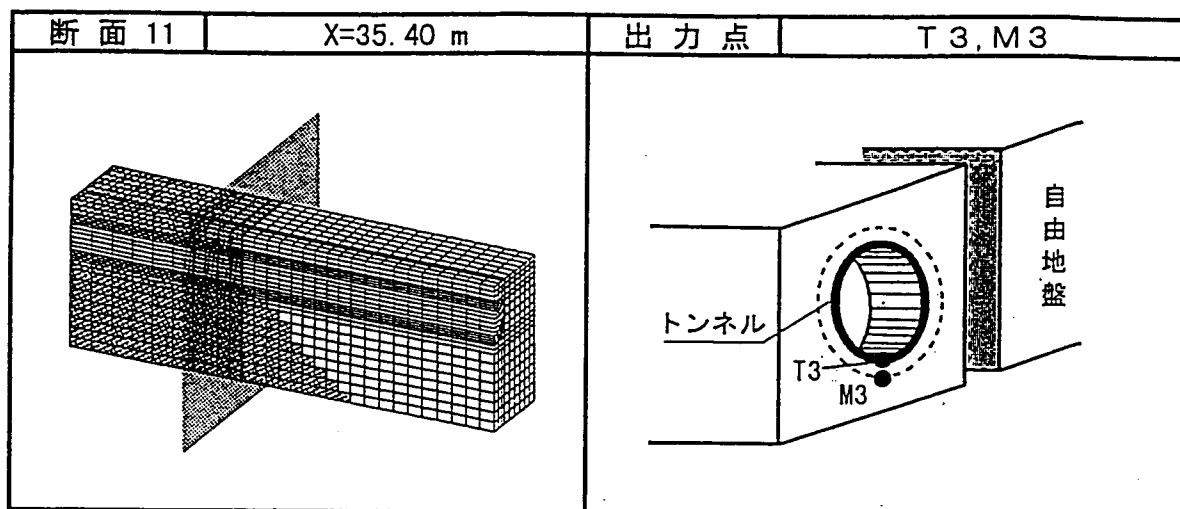
地盤条件変化点のトンネル側部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(X方向加振、免震層有り)



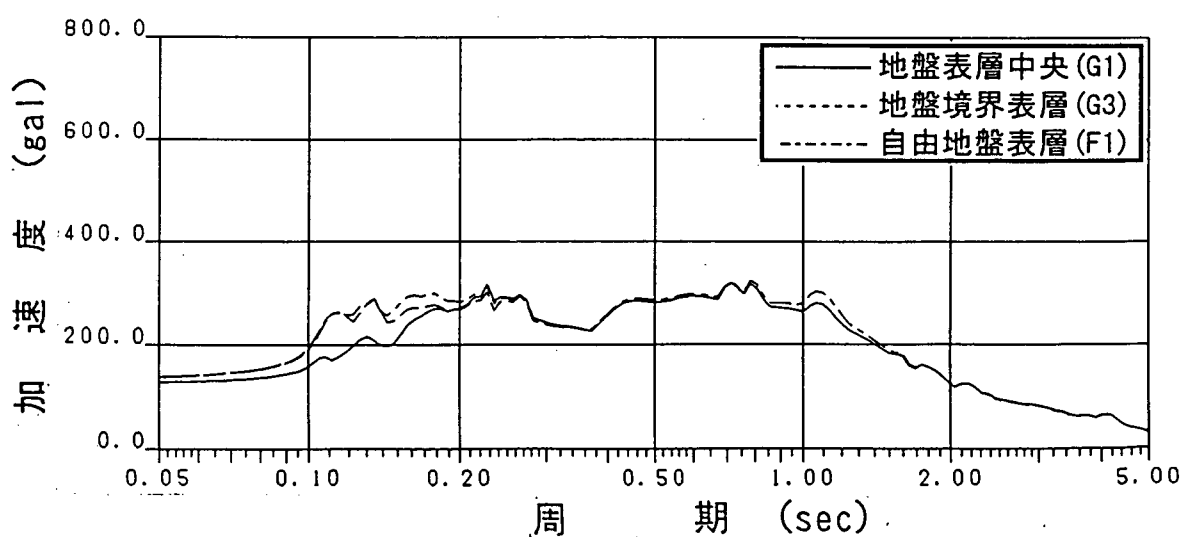
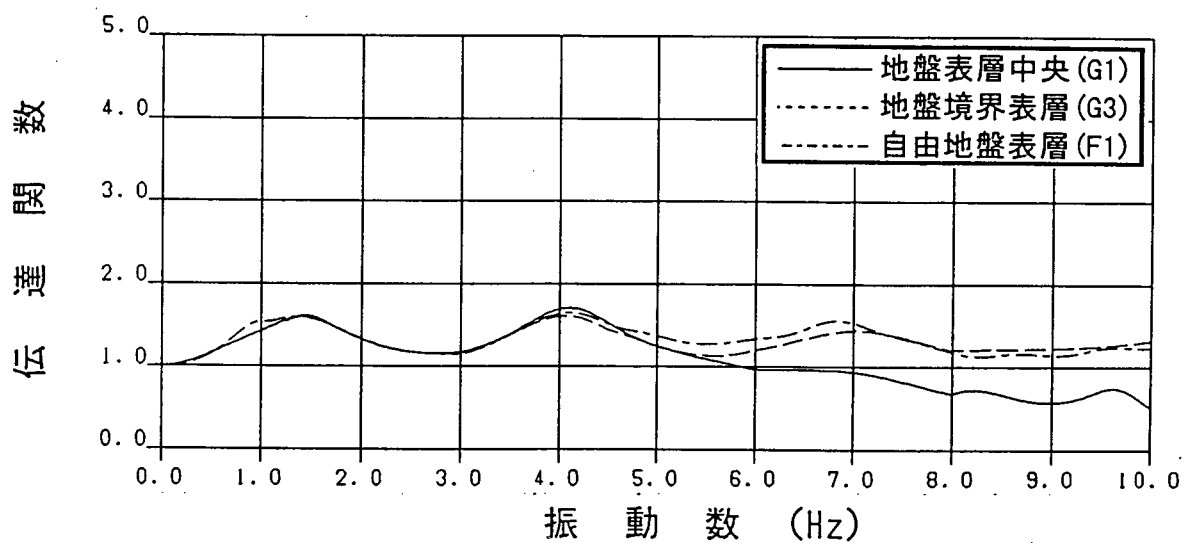
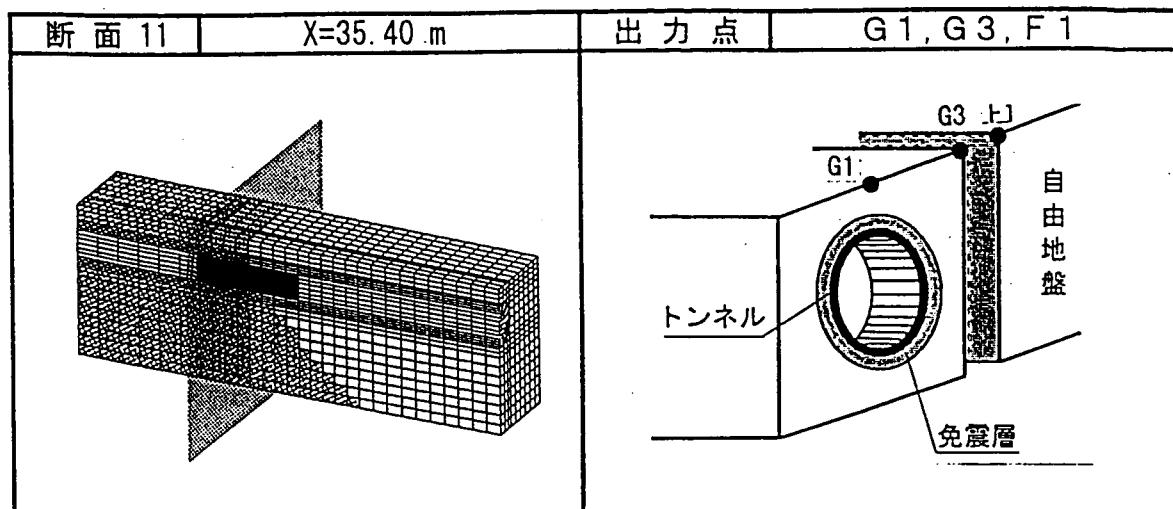
地盤条件変化点のトンネル側部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(X方向加振、免震層無し)



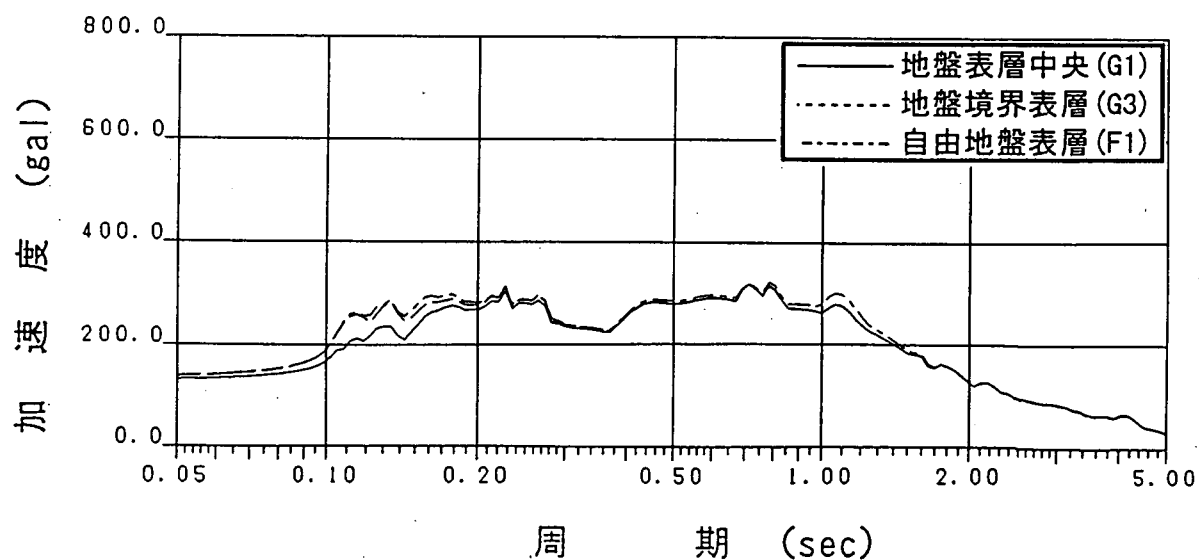
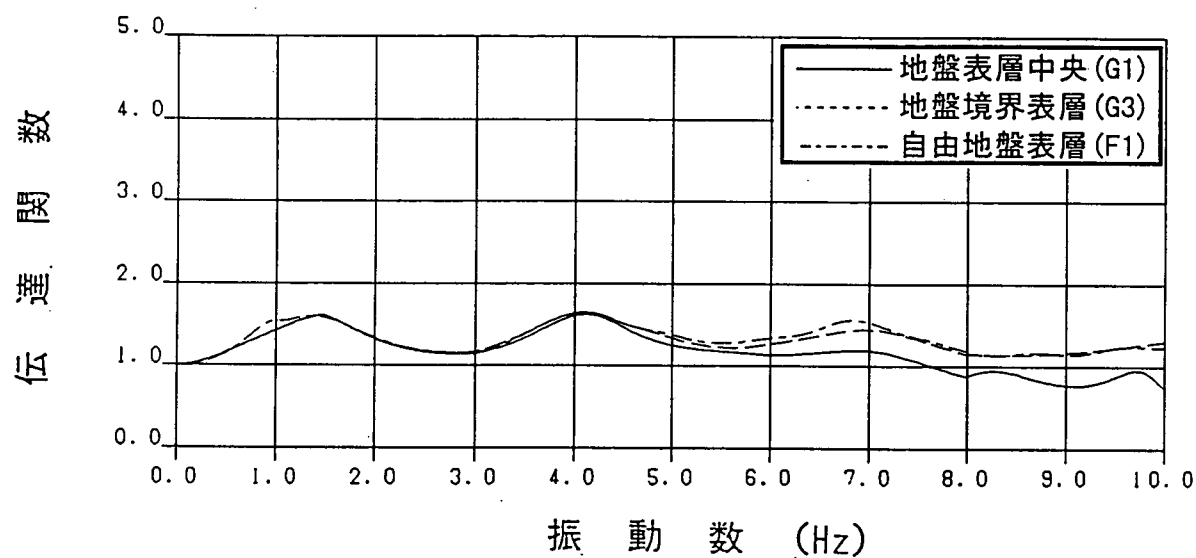
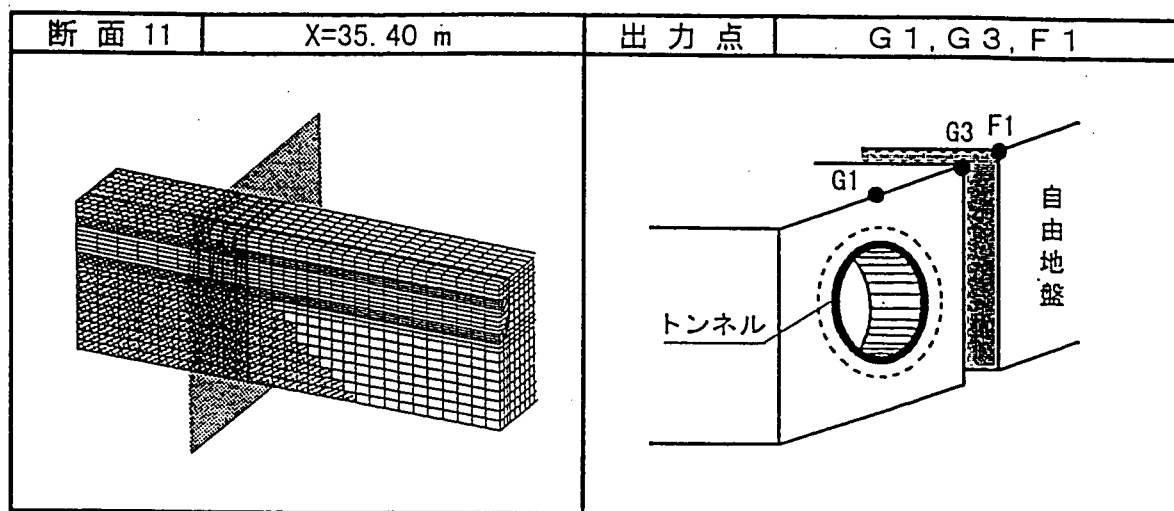
地盤条件変化点のトンネル下部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(X方向加振、免震層有り)



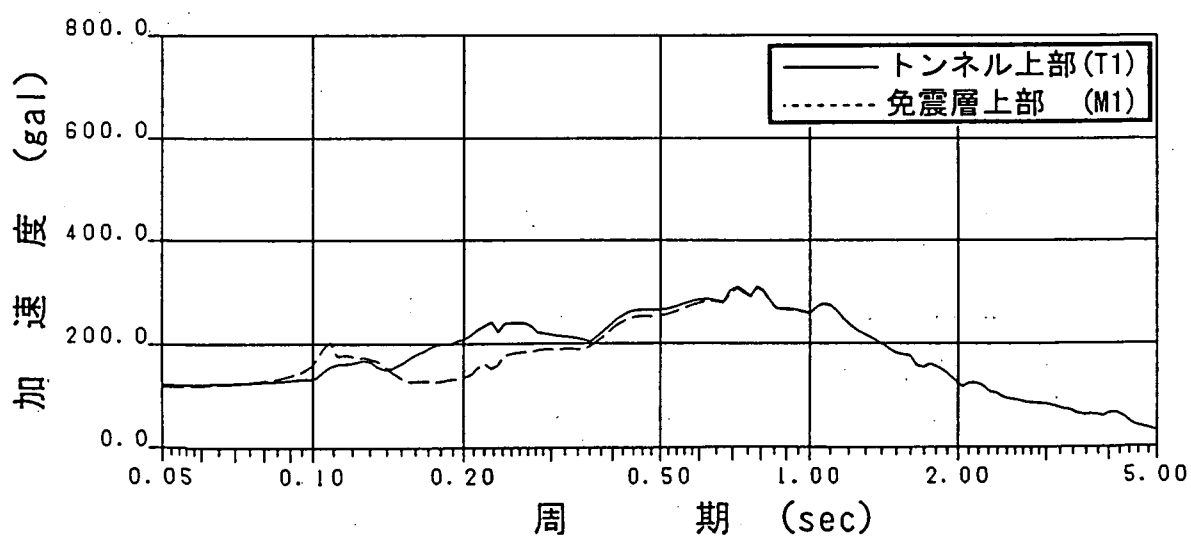
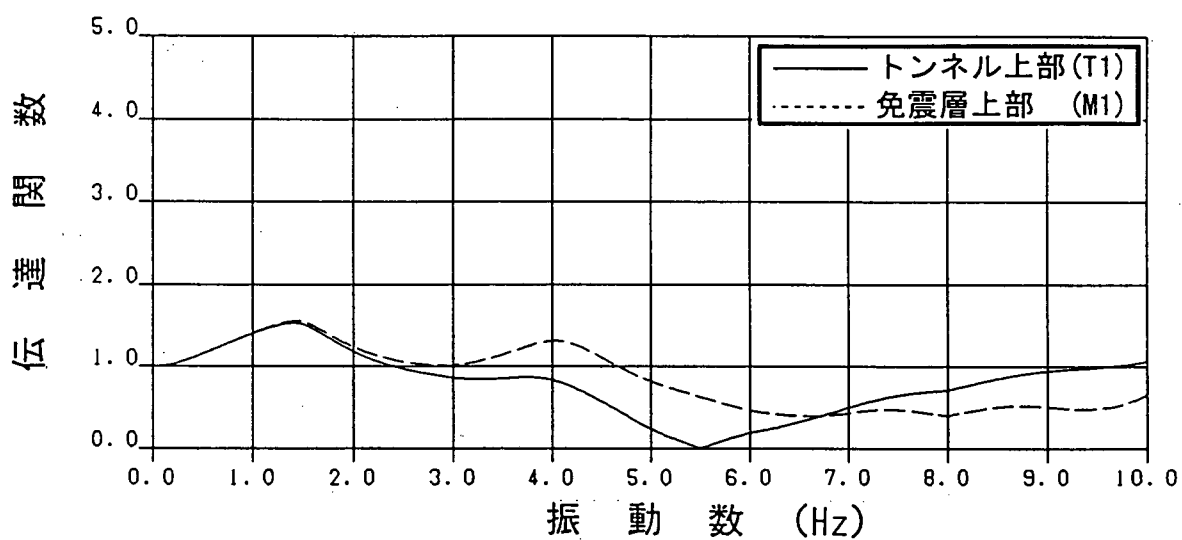
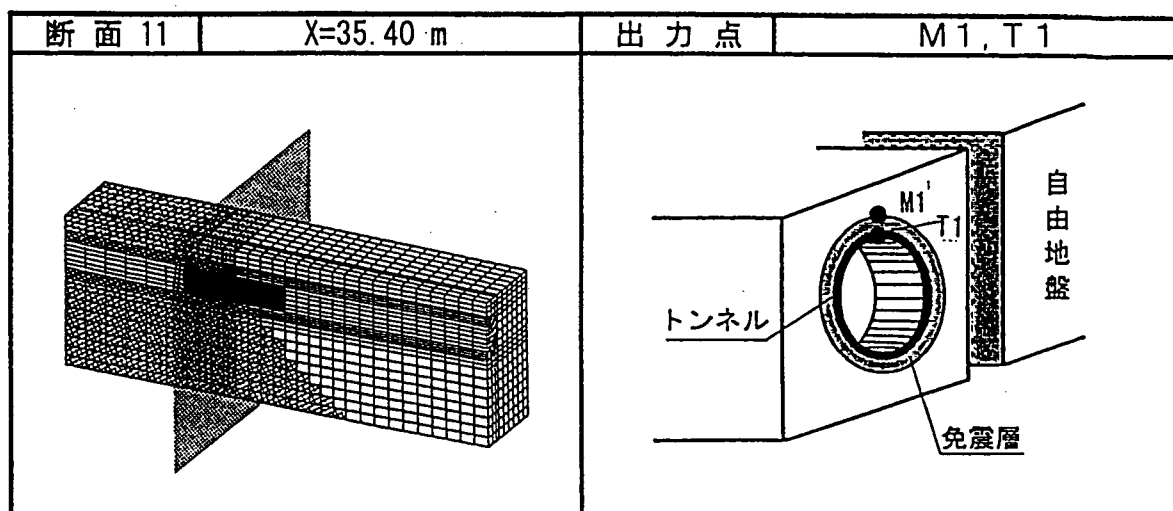
地盤条件変化点のトンネル下部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(X方向加振、免震層無し)



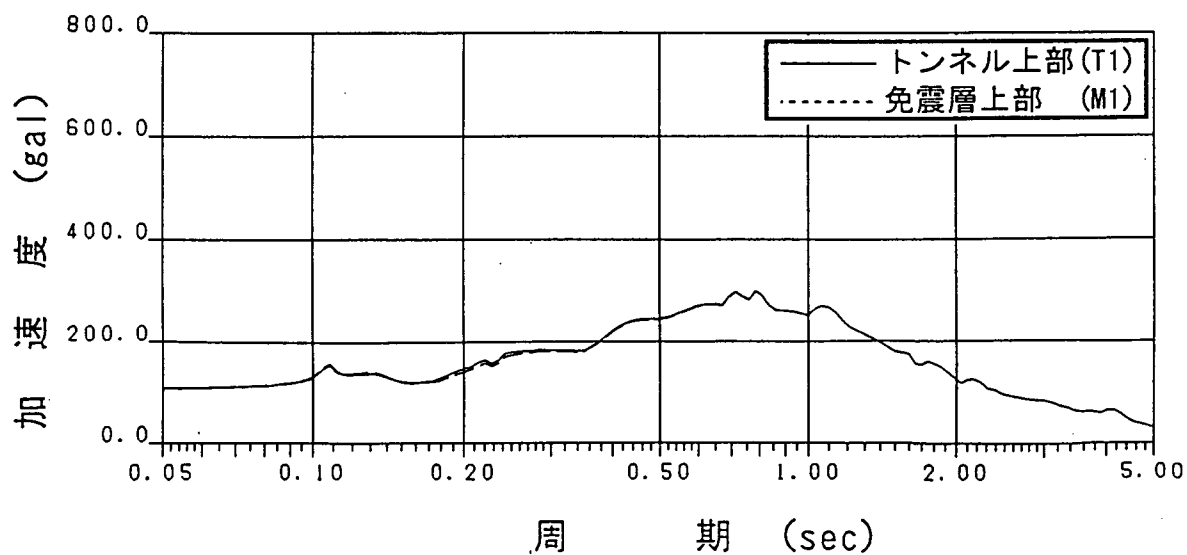
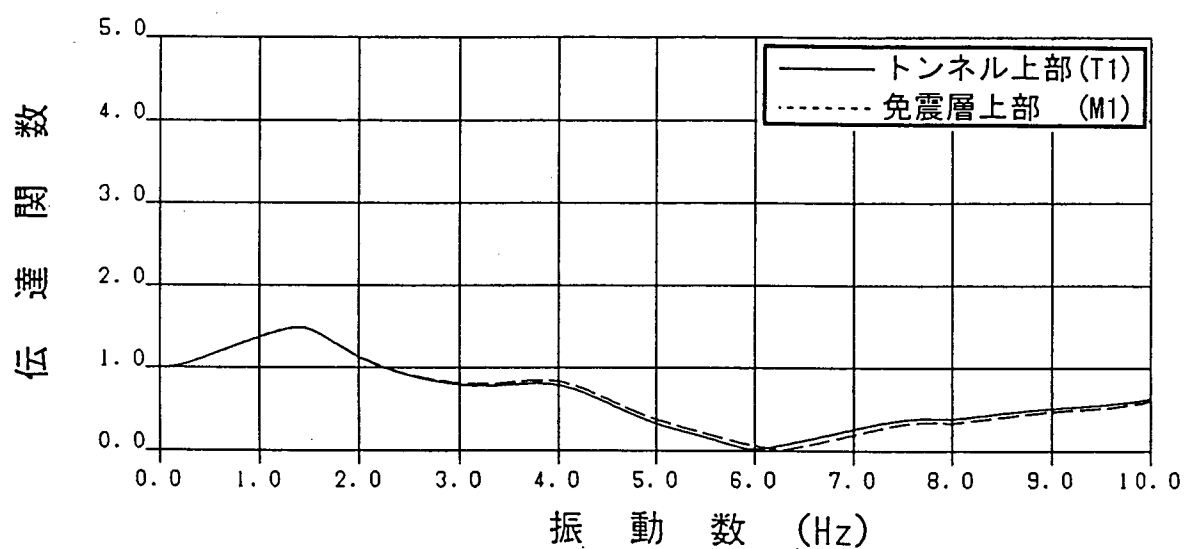
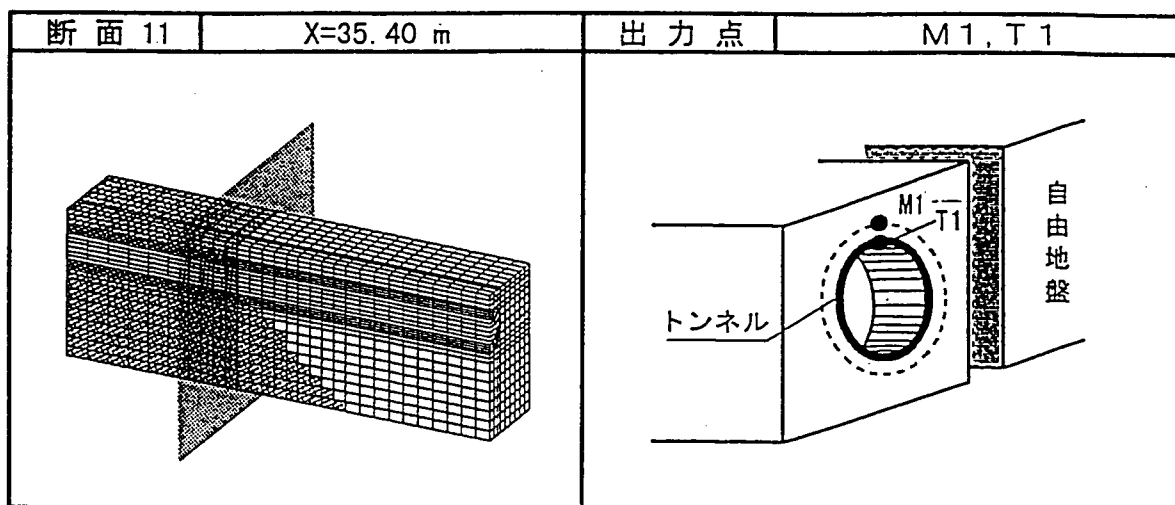
地盤条件変化点の地表面位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(Y方向加振、免震層有り)



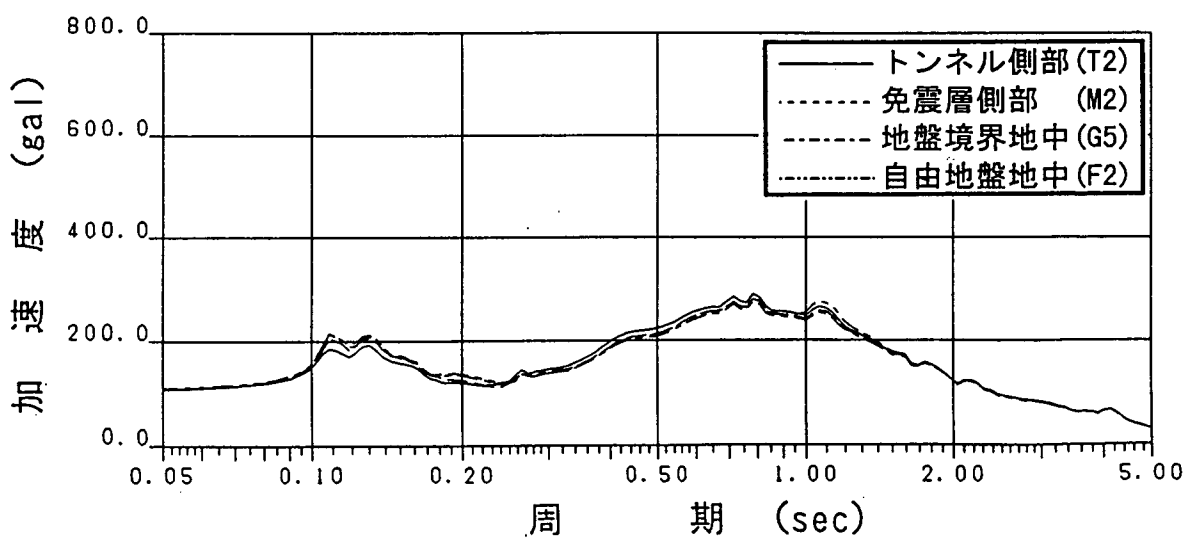
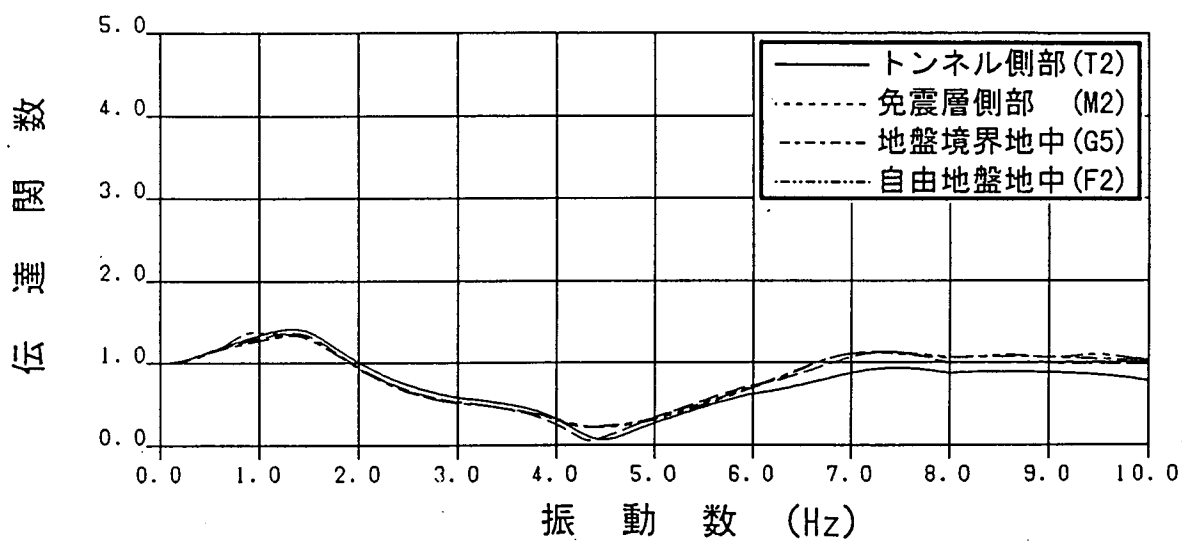
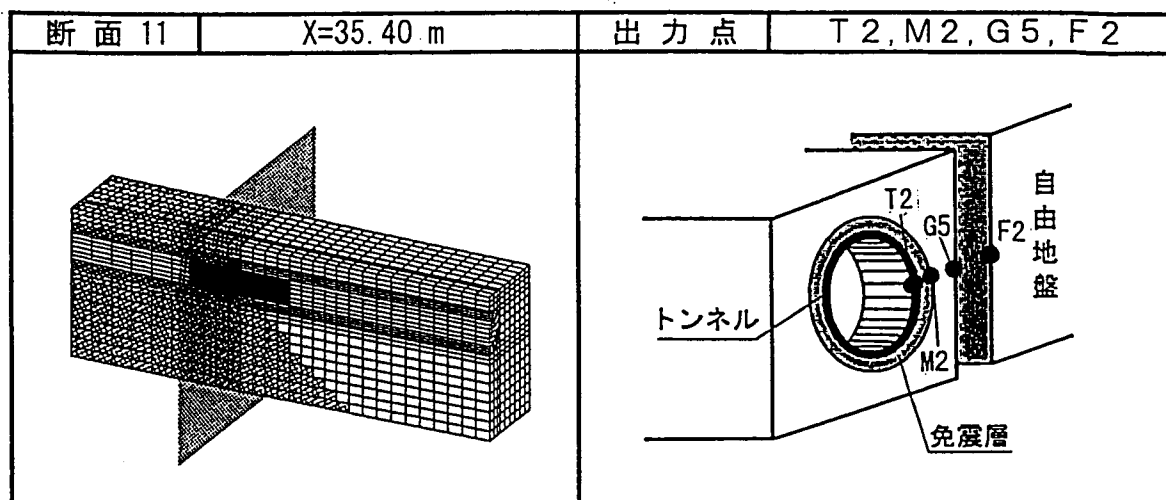
地盤条件変化点の地表面位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(Y方向加振、免震層無し)



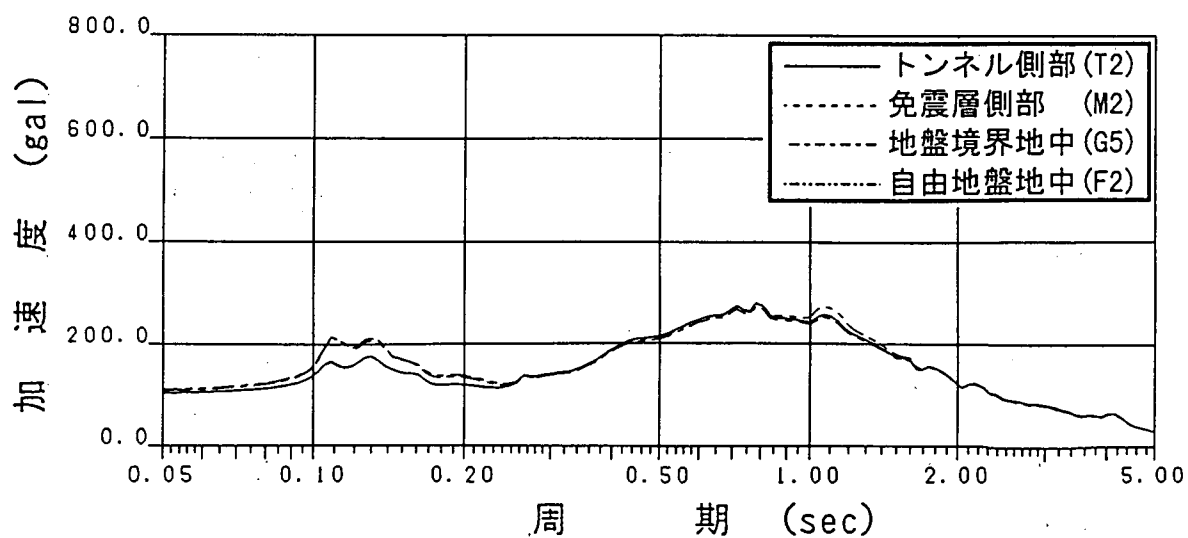
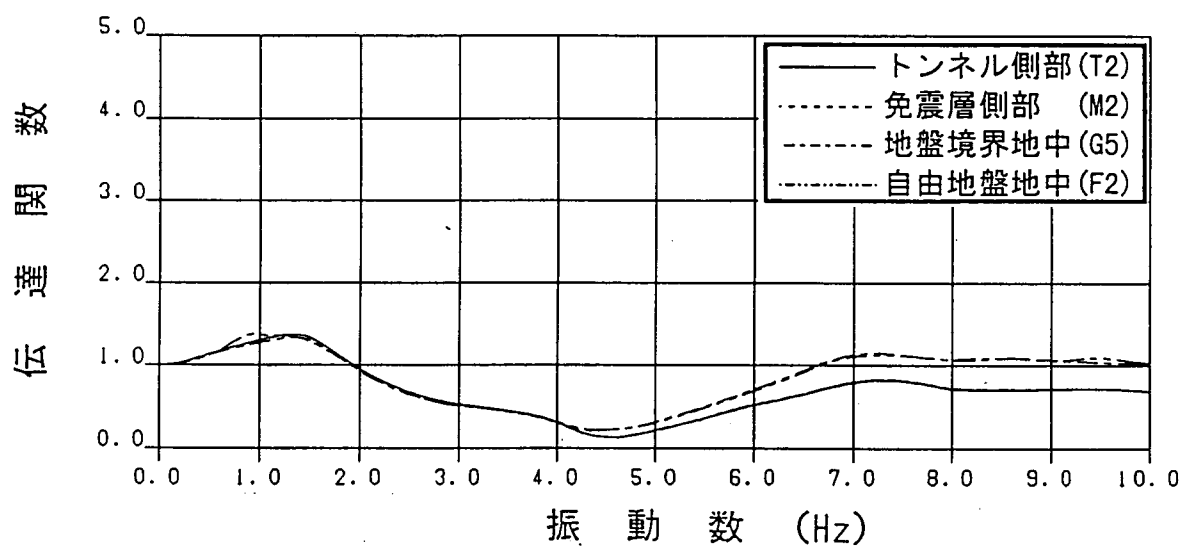
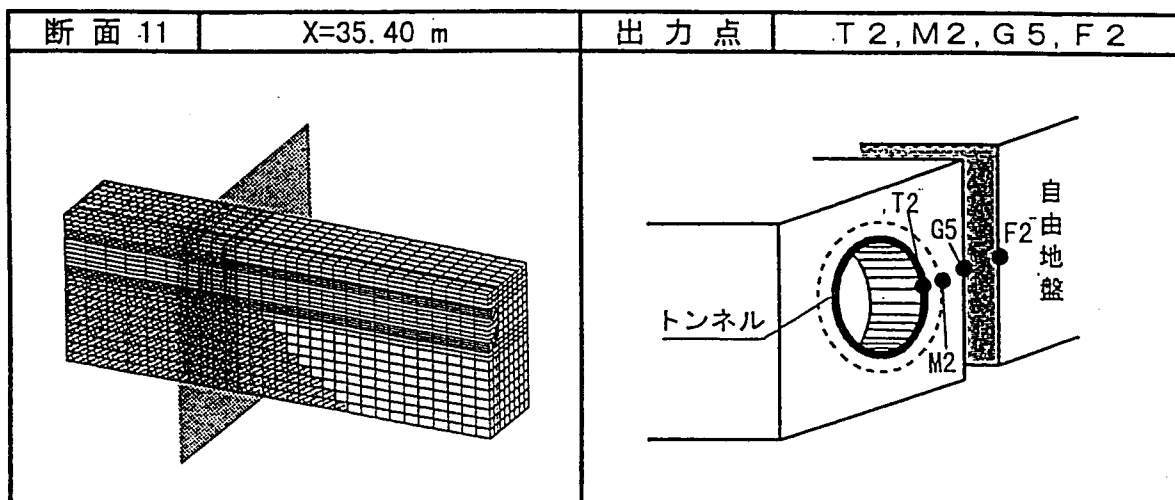
地盤条件変化点のトンネル上部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(Y方向加振、免震層有り)



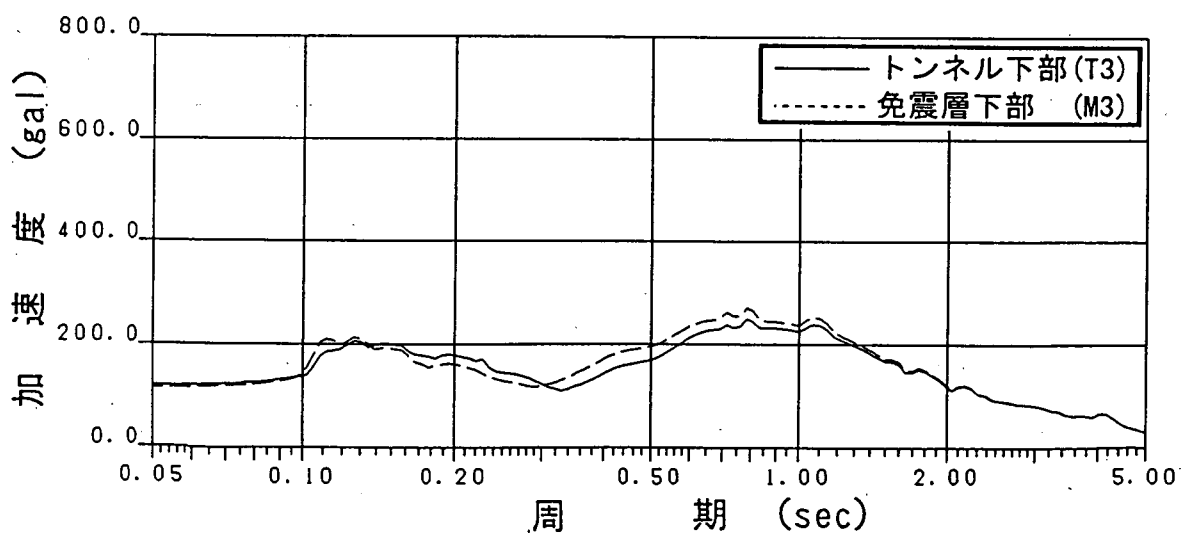
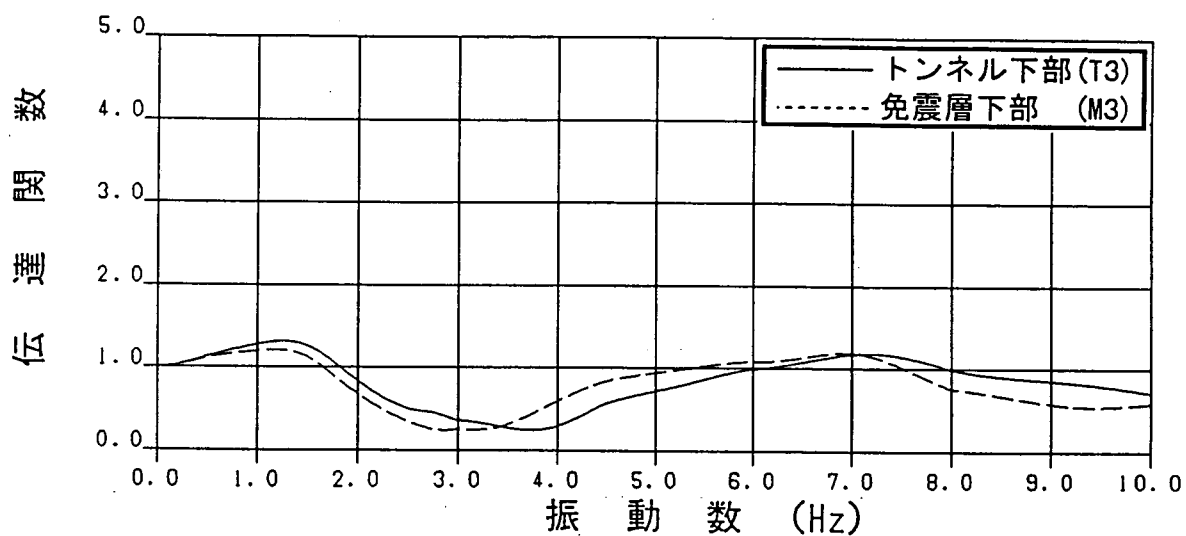
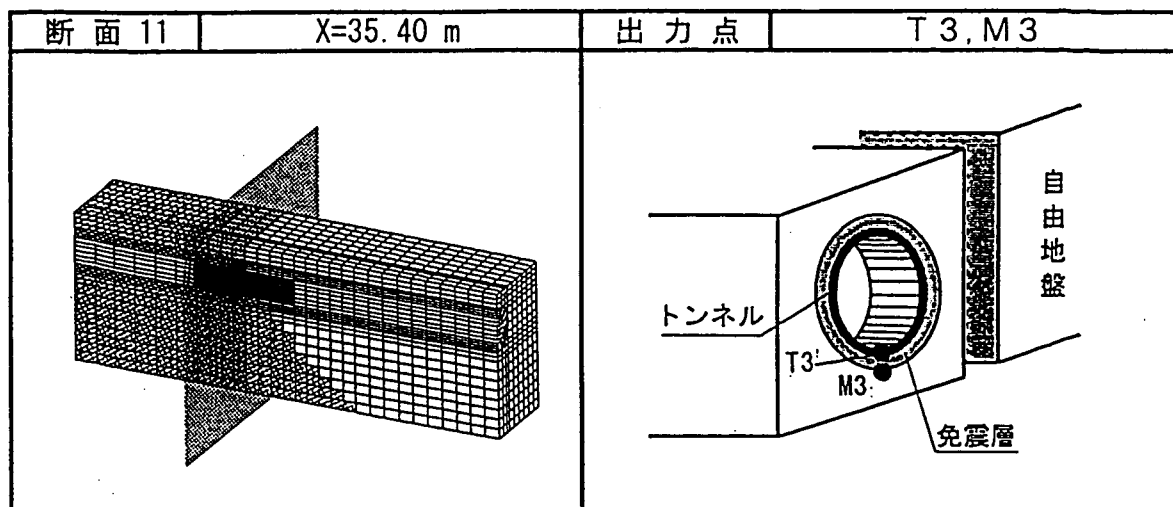
地盤条件変化点のトンネル上部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(Y方向加振、免震層無し)



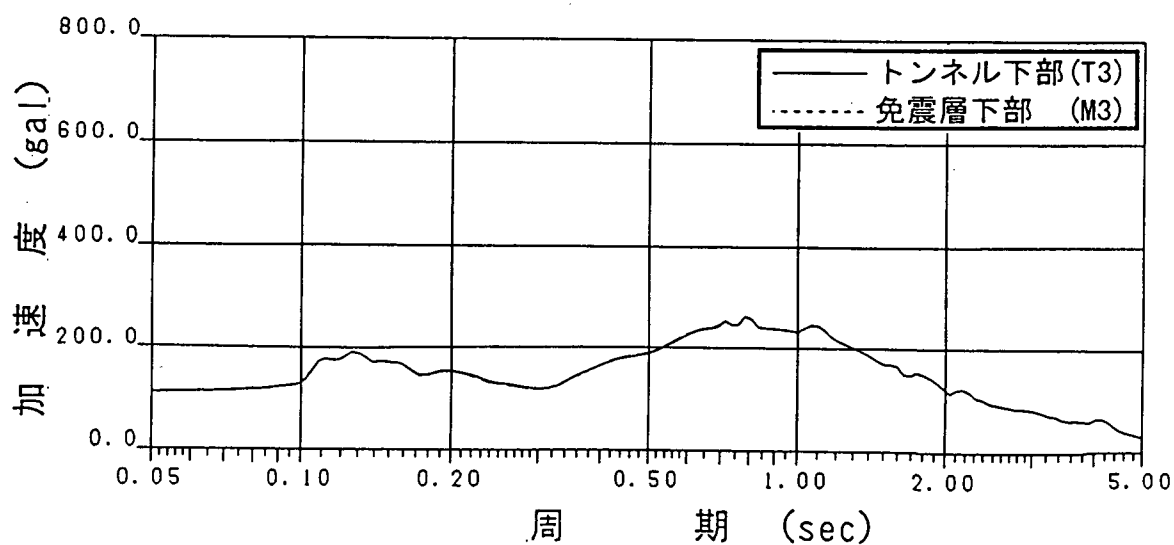
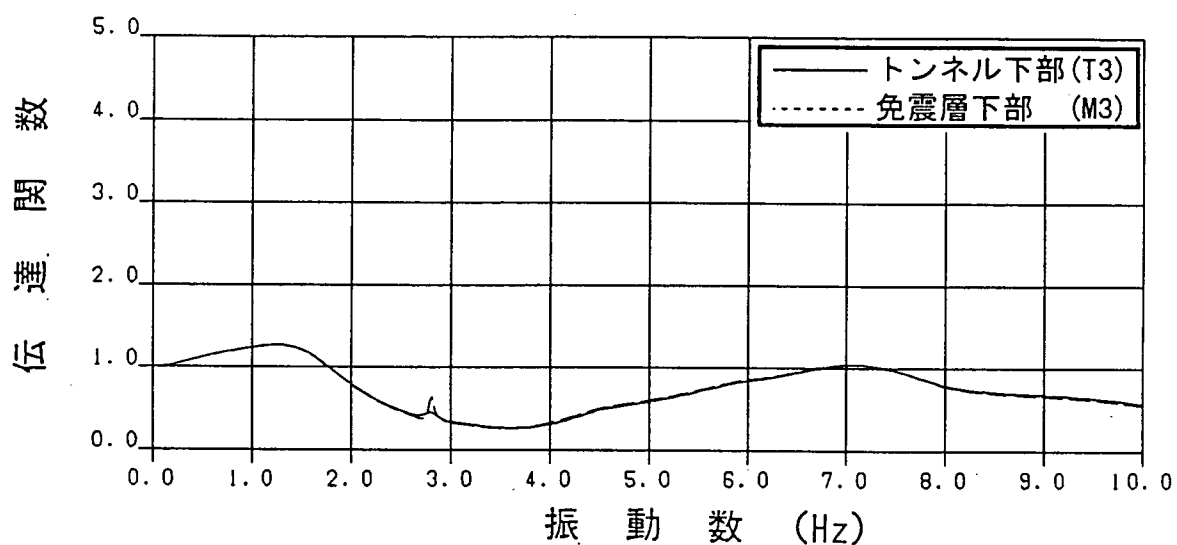
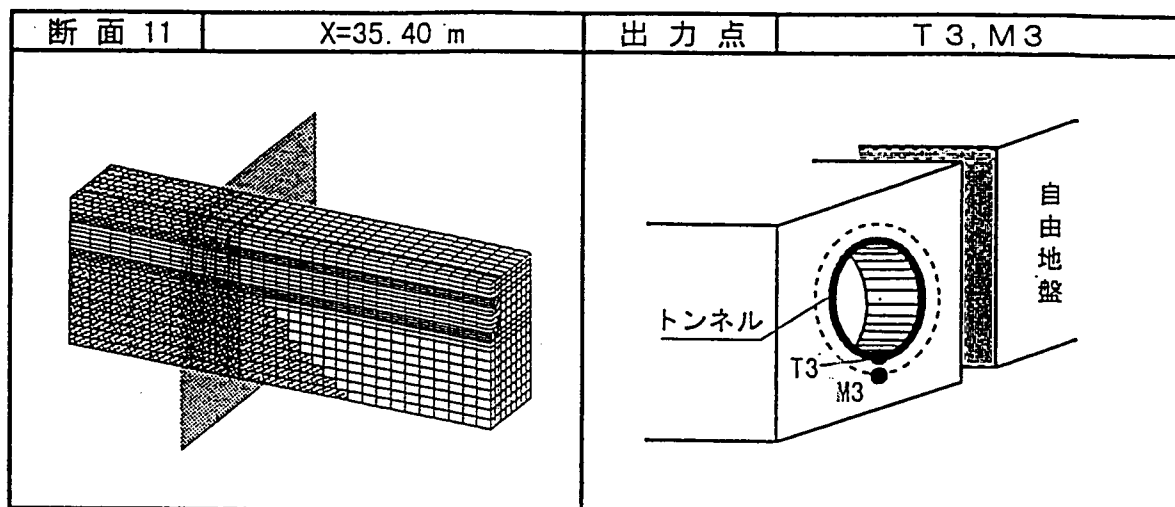
地盤条件変化点のトンネル側部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(Y方向加振、免震層有り)



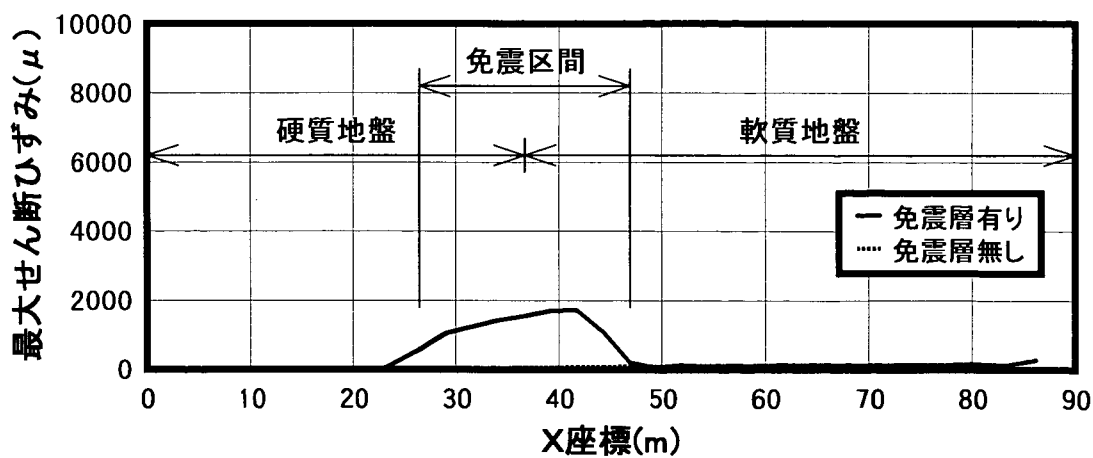
地盤条件変化点のトンネル側部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(Y方向加振、免震層無し)



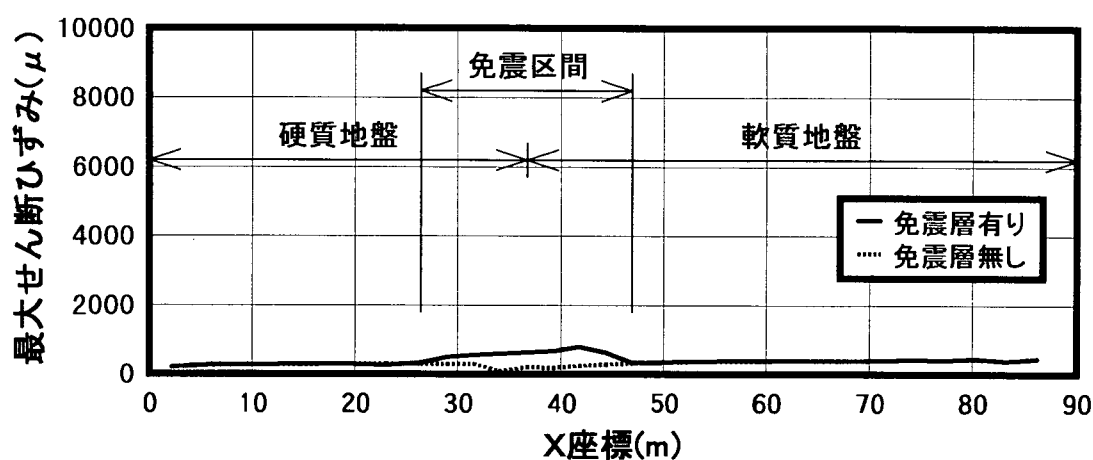
地盤条件変化点のトンネル下部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(Y方向加振、免震層有り)



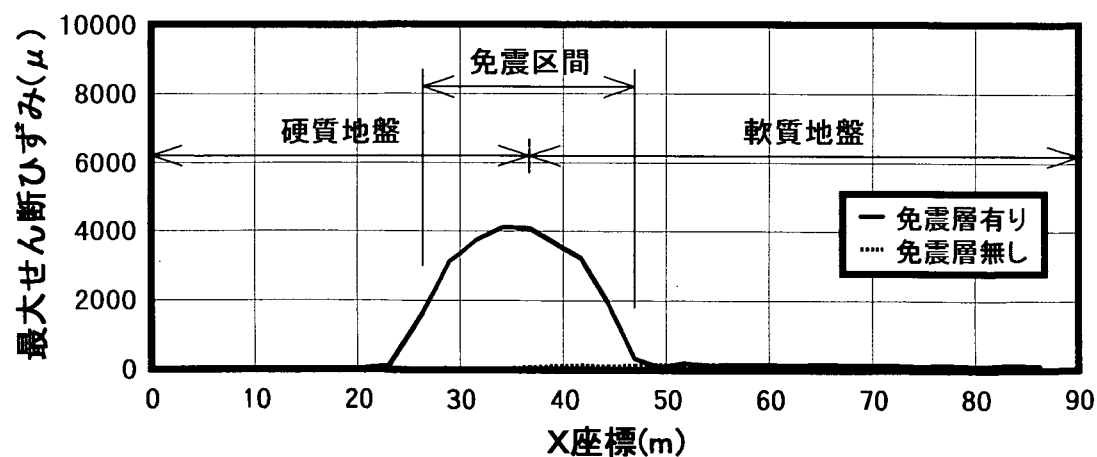
地盤条件変化点のトンネル下部位置における伝達関数および加速度応答スペクトル
(Y方向加振、免震層無し)



(a) 構造物上部

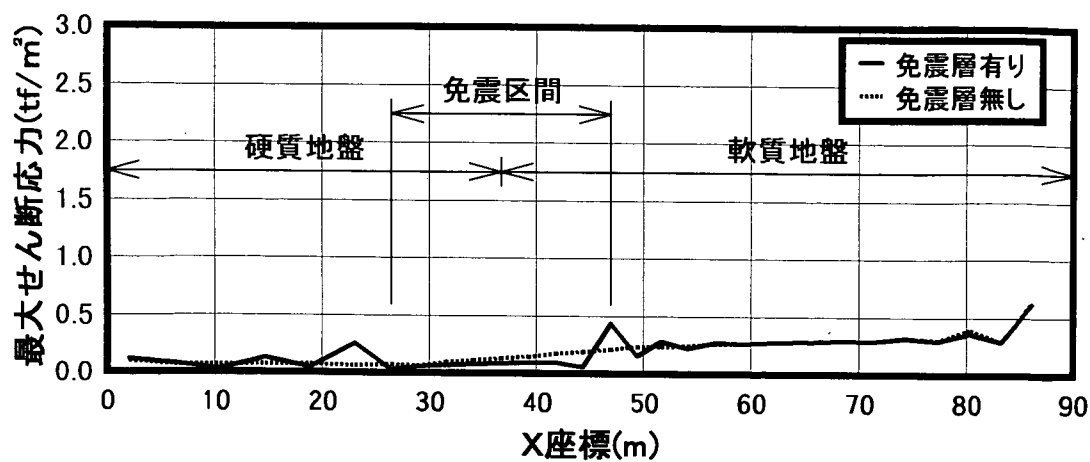


(b) 構造物側部

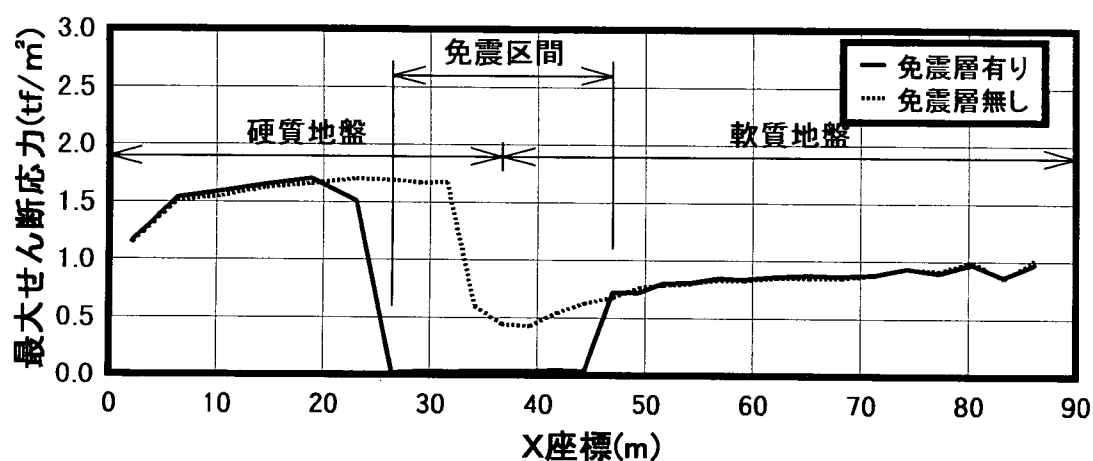


(c) 構造物下部

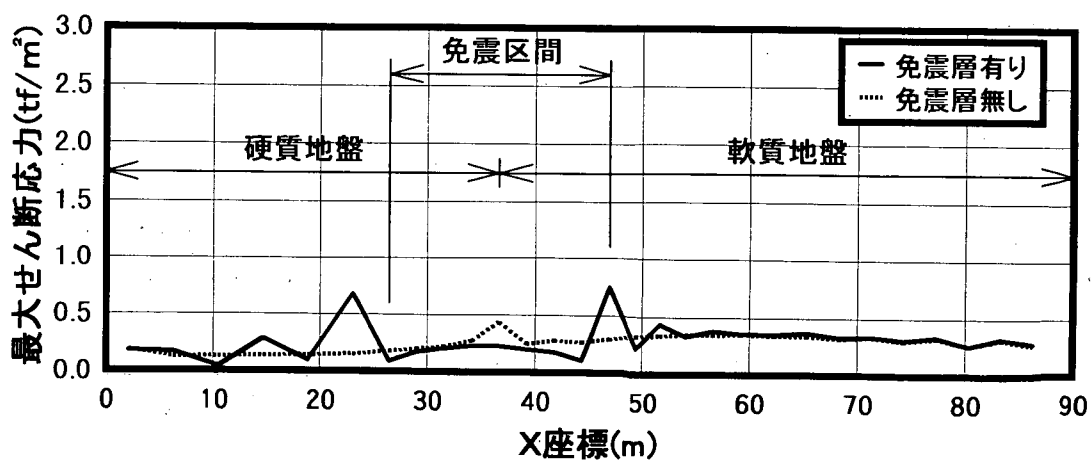
免震層位置要素の構造物面内方向せん断ひずみ(X方向加振)



(a) 構造物上部

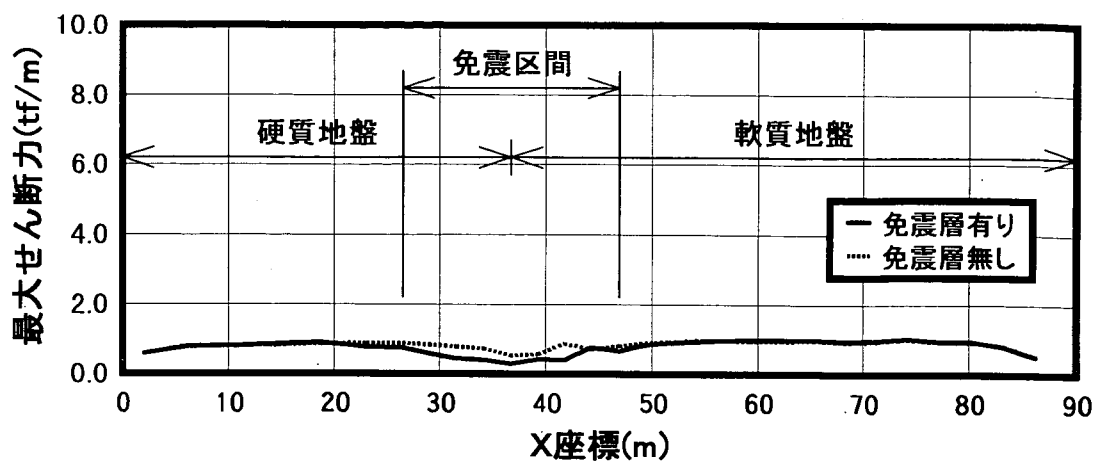


(b) 構造物側部

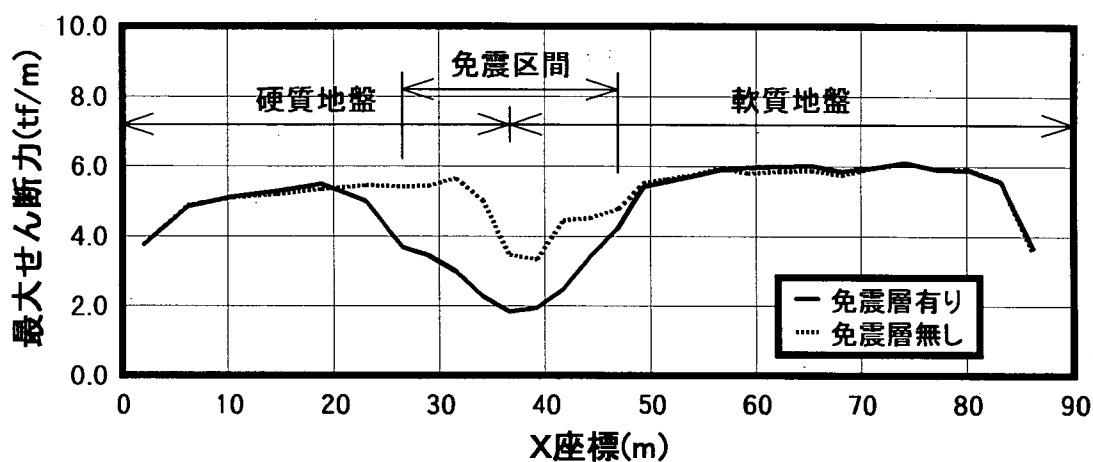


(c) 構造物下部

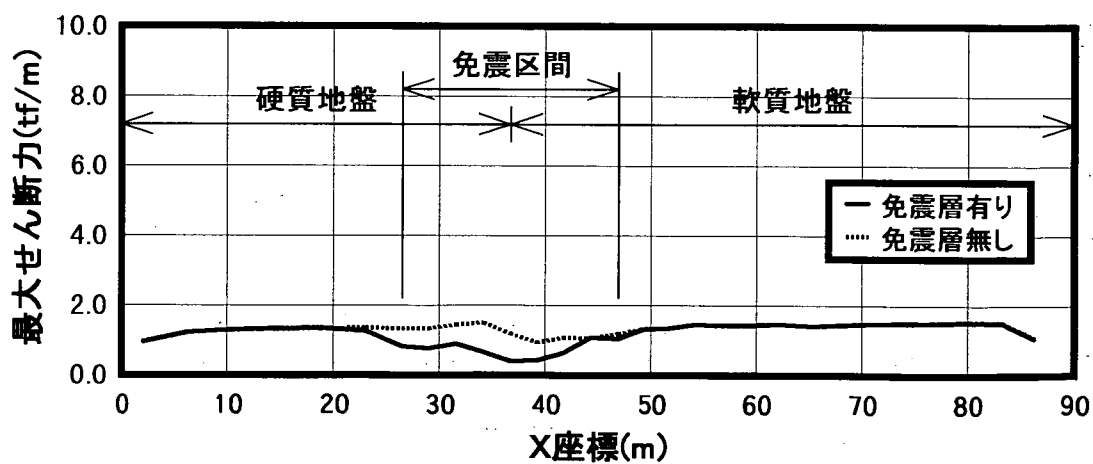
免震層位置要素の構造物面内方向せん断応力(X方向加振)



(a) 構造物上部

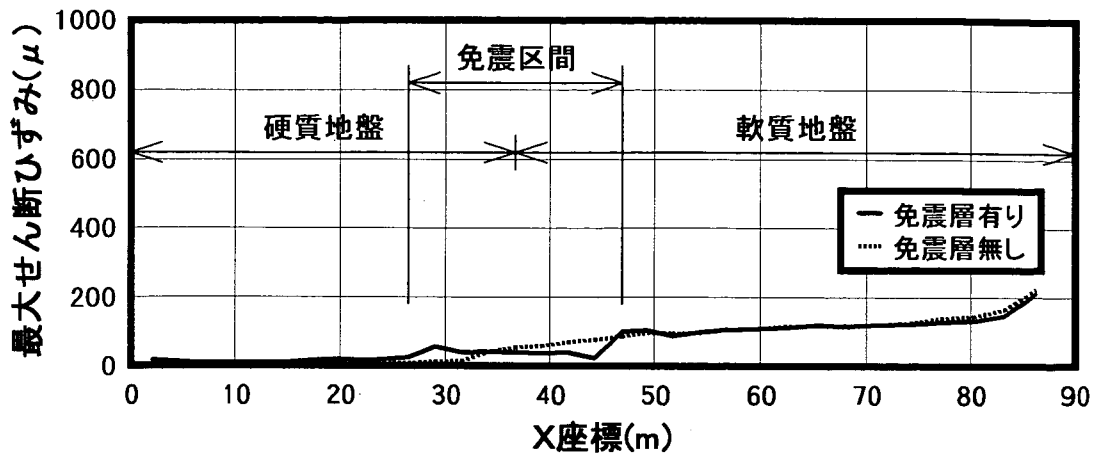


(b) 構造物側部

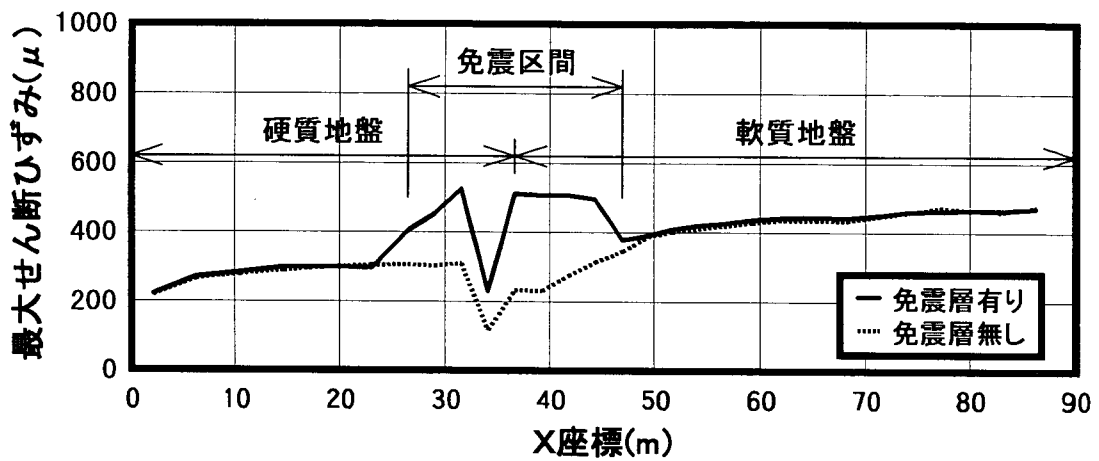


(c) 構造物下部

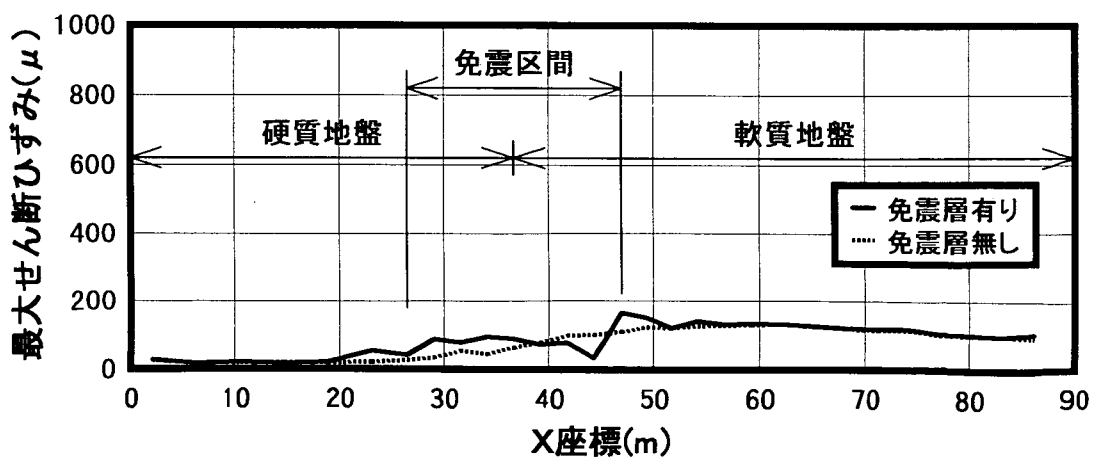
構造物のせん断力(X方向加振)



(a) 構造物上部

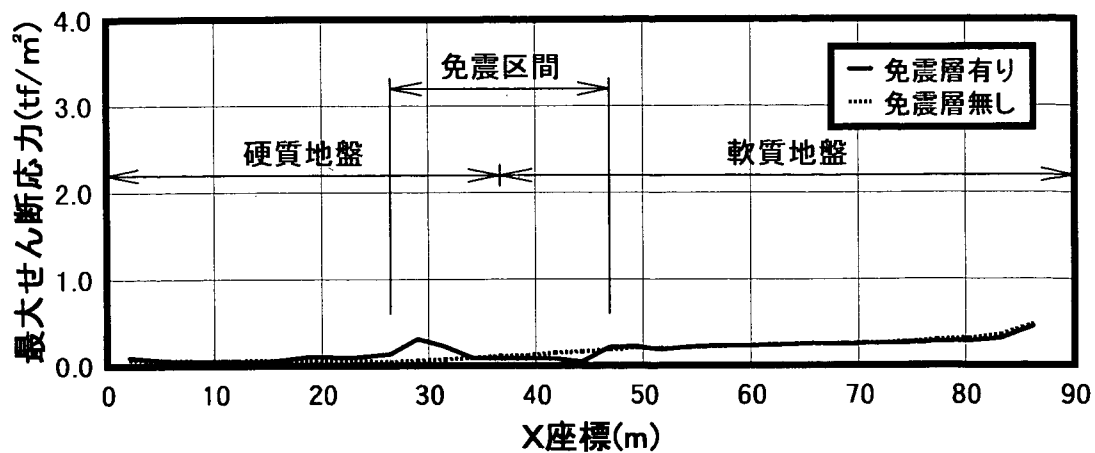


(b) 構造物側部

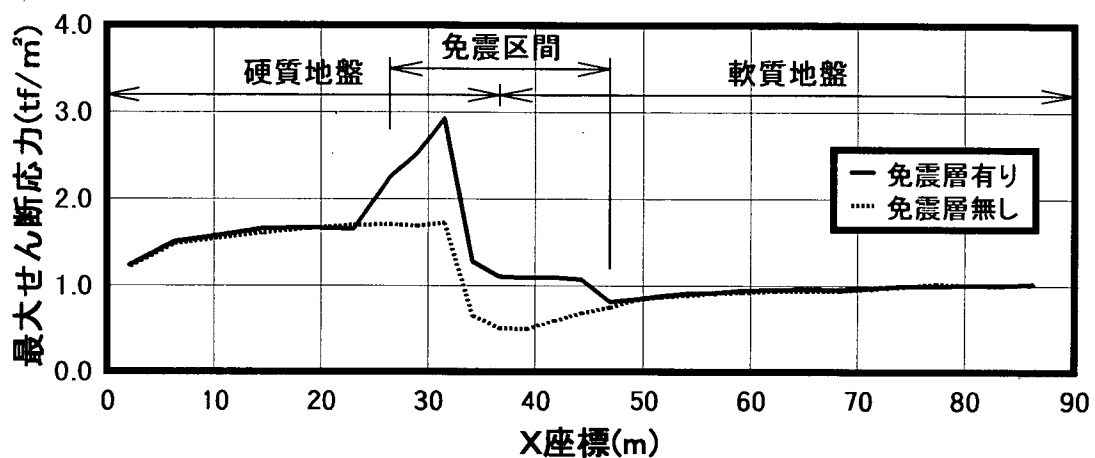


(c) 構造物下部

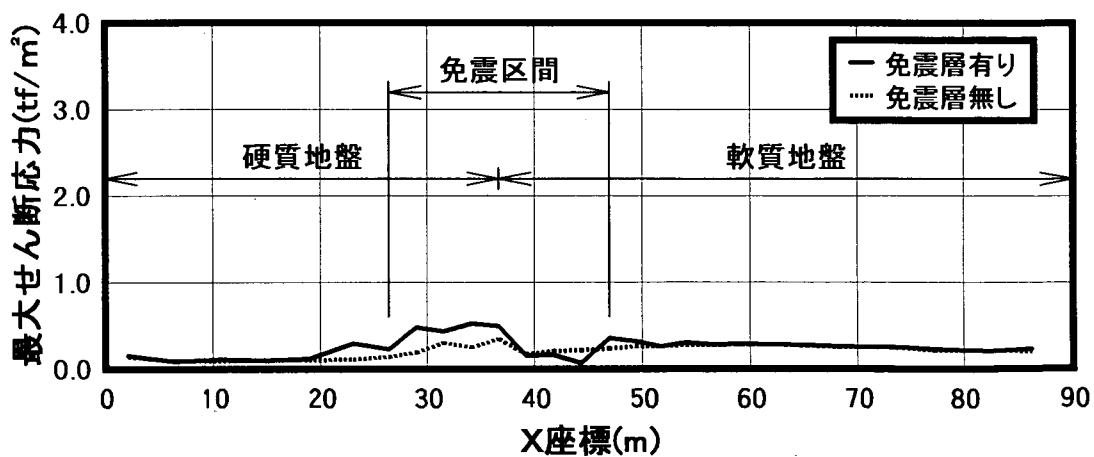
免震層外側地盤の構造物面内方向せん断ひずみ(X方向加振)



(a) 構造物上部

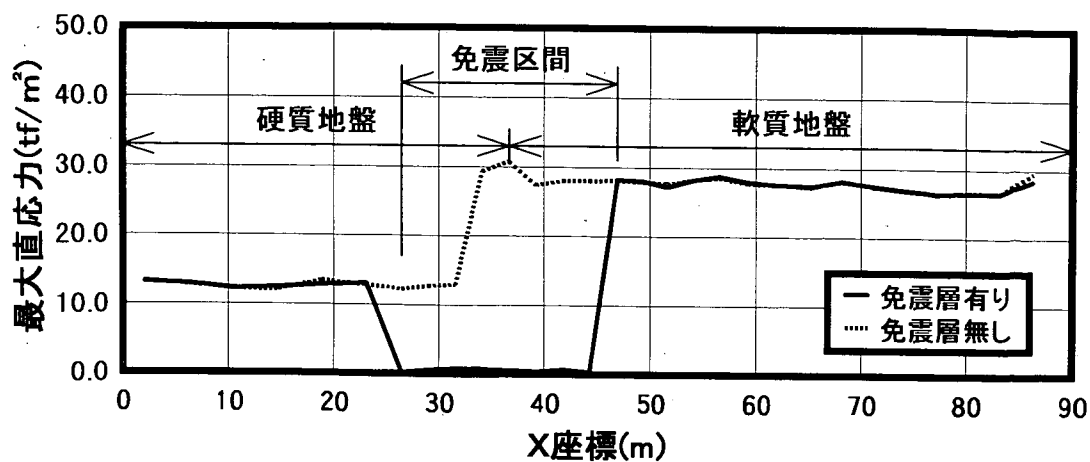


(b) 構造物側部

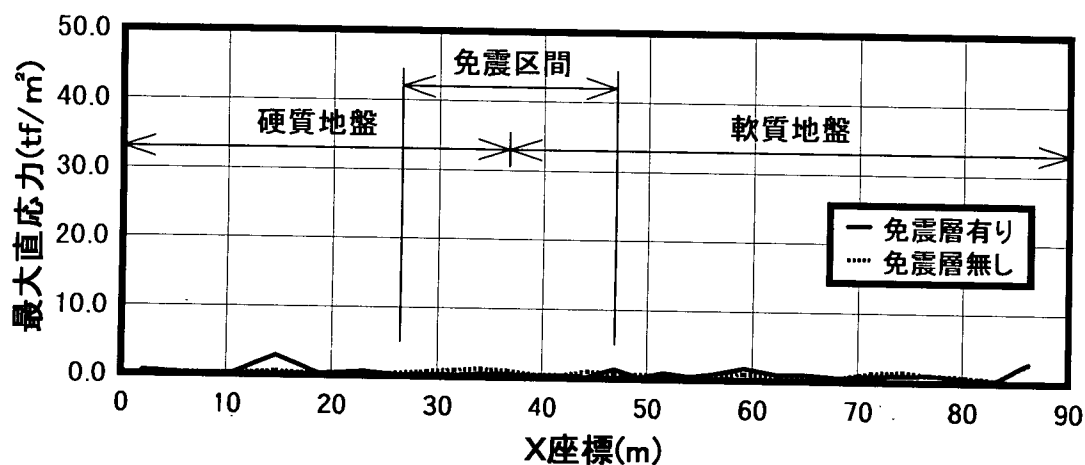


(c) 構造物下部

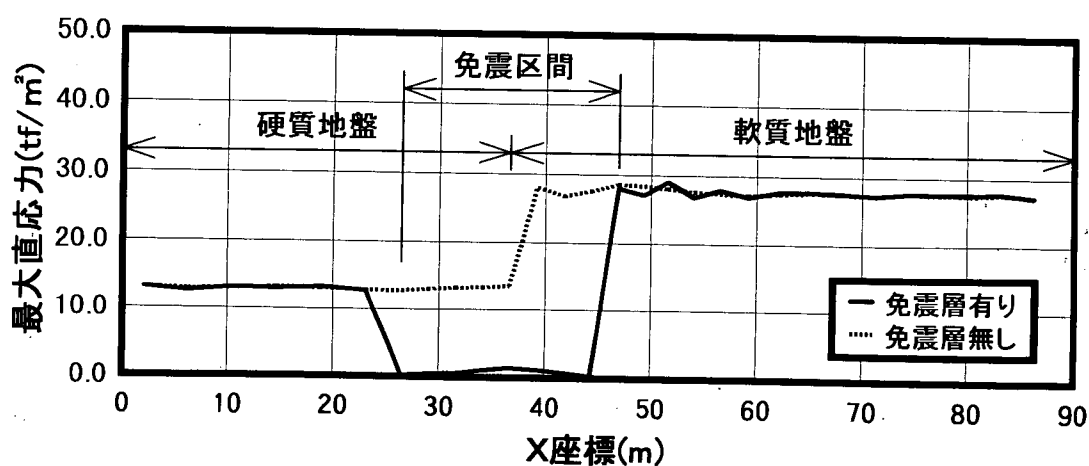
免震層外側地盤の構造物面内方向せん断応力(X方向加振)



(a) 構造物上部

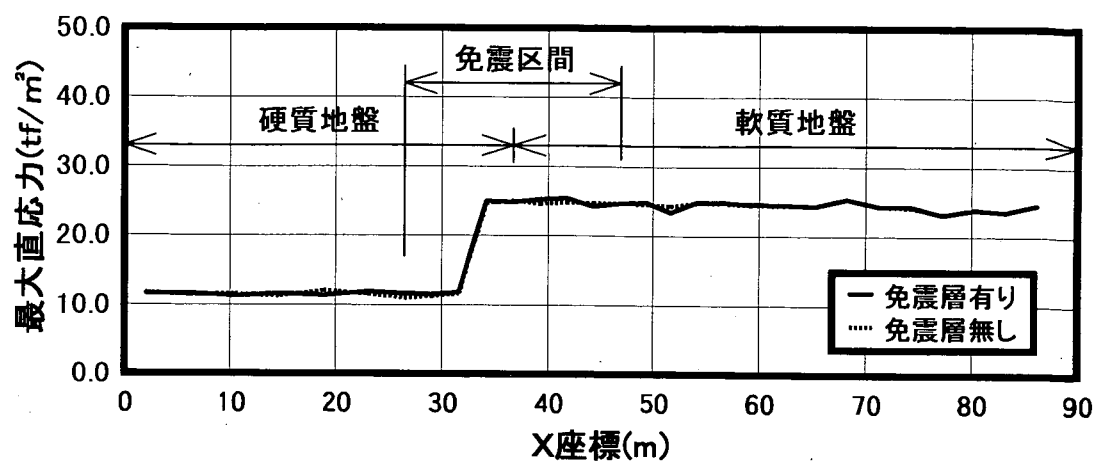


(b) 構造物側部

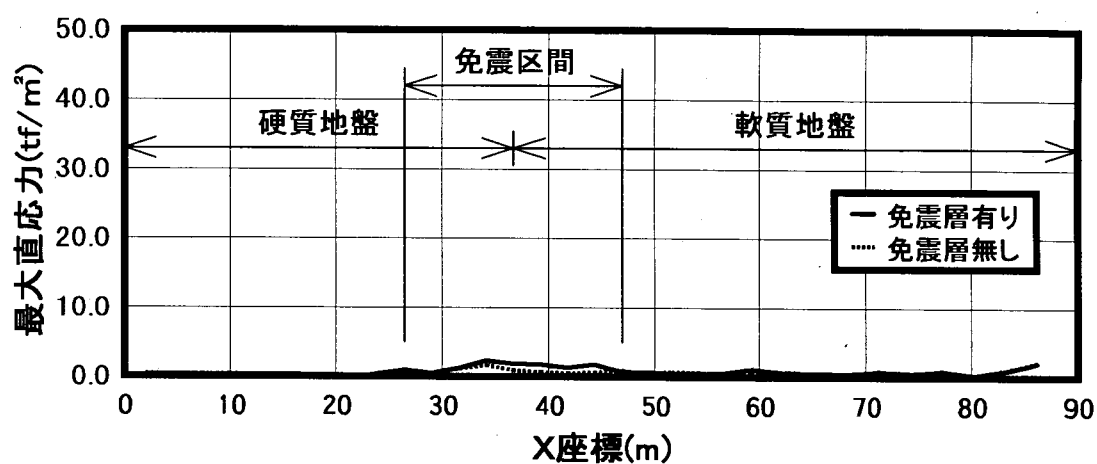


(c) 構造物下部

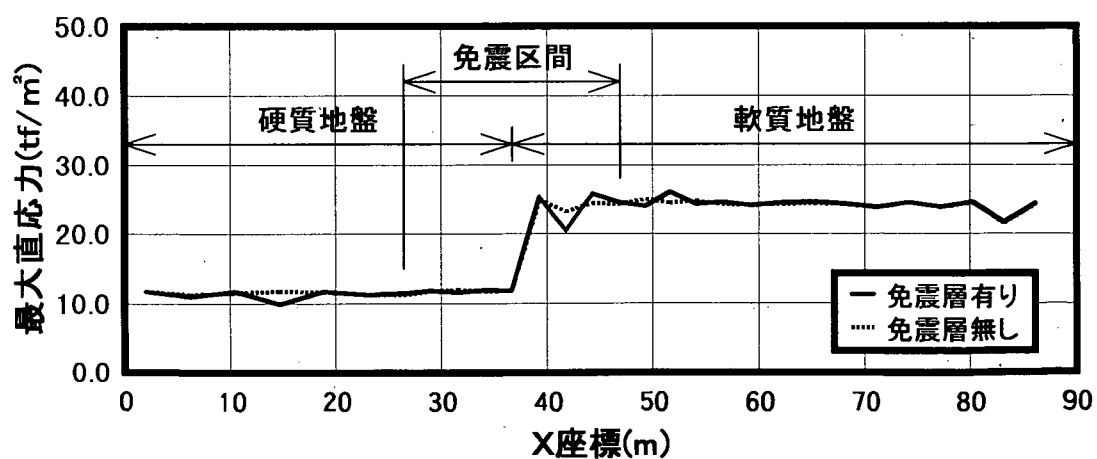
免震層位置要素の構造物法線方向直応力(X方向加振)



(a) 構造物上部

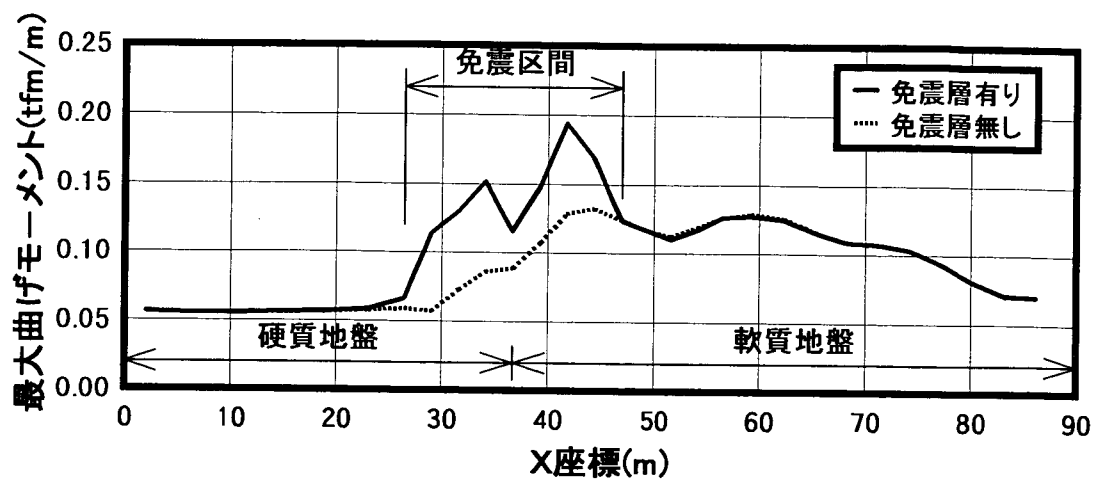


(b) 構造物側部

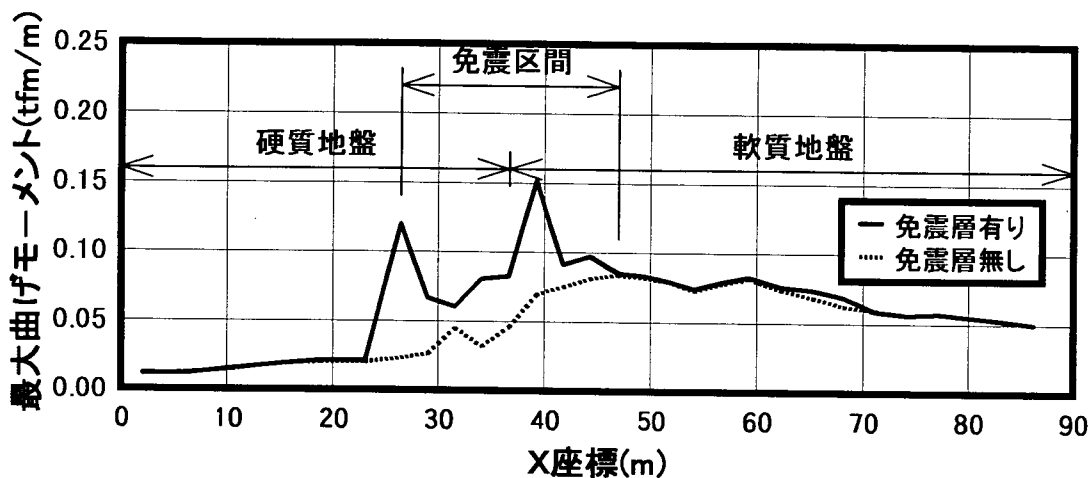


(c) 構造物下部

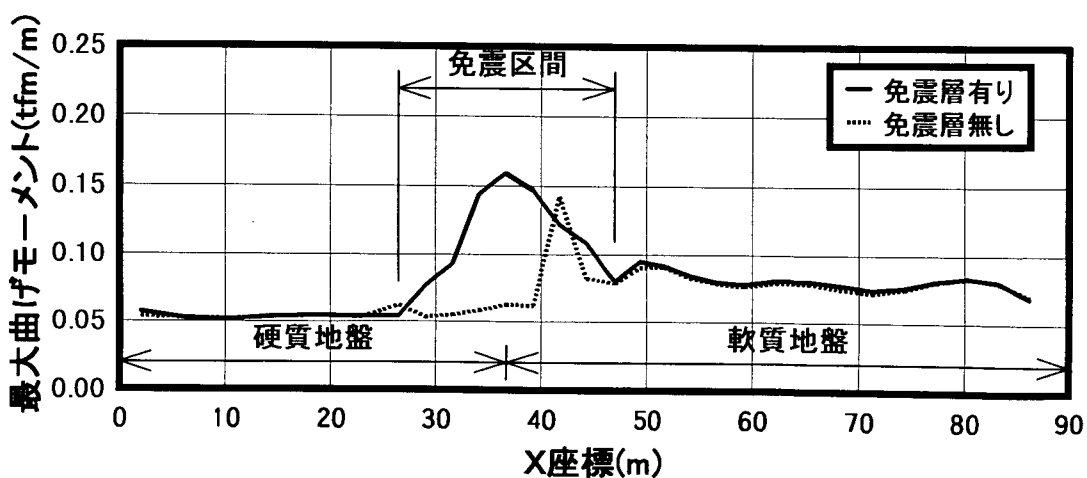
免震層外側地盤の構造物法線方向直応力(X方向加振)



(a)構造物上部

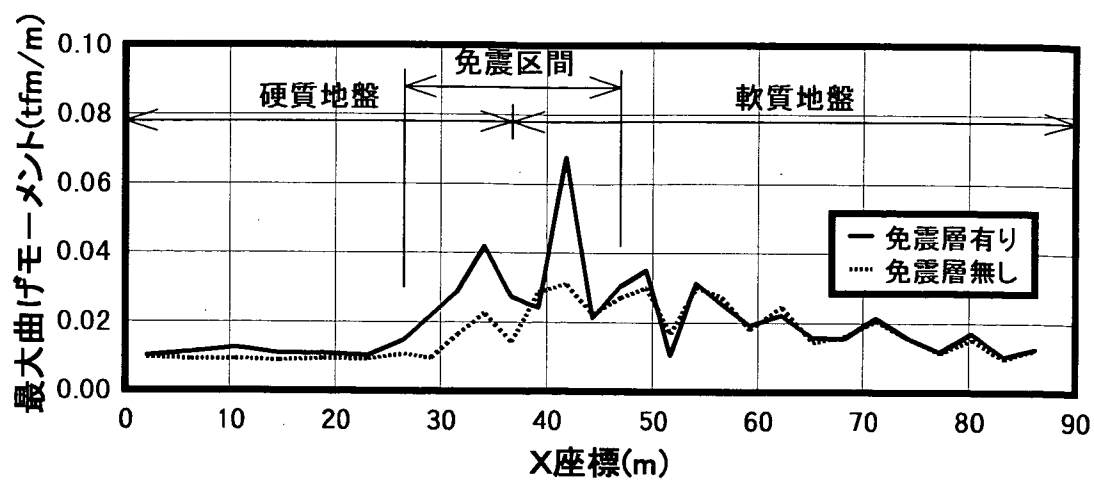


(b)構造物側部

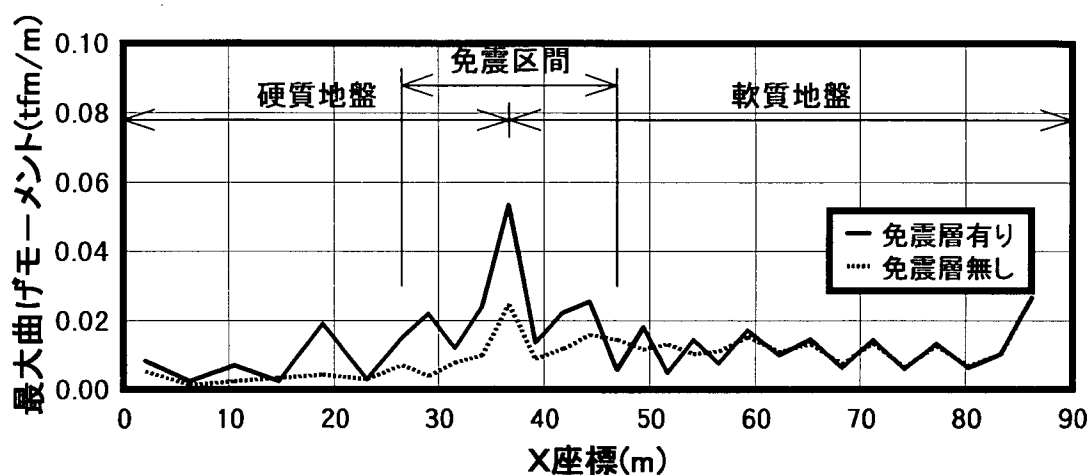


(c)構造物下部

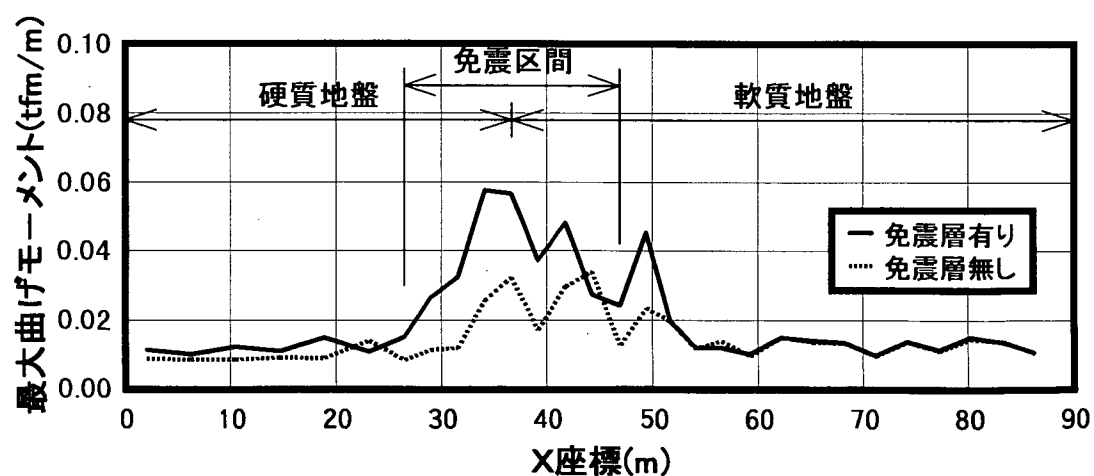
構造物軸方向曲げモーメント(X方向加振)



(a) 構造物上部

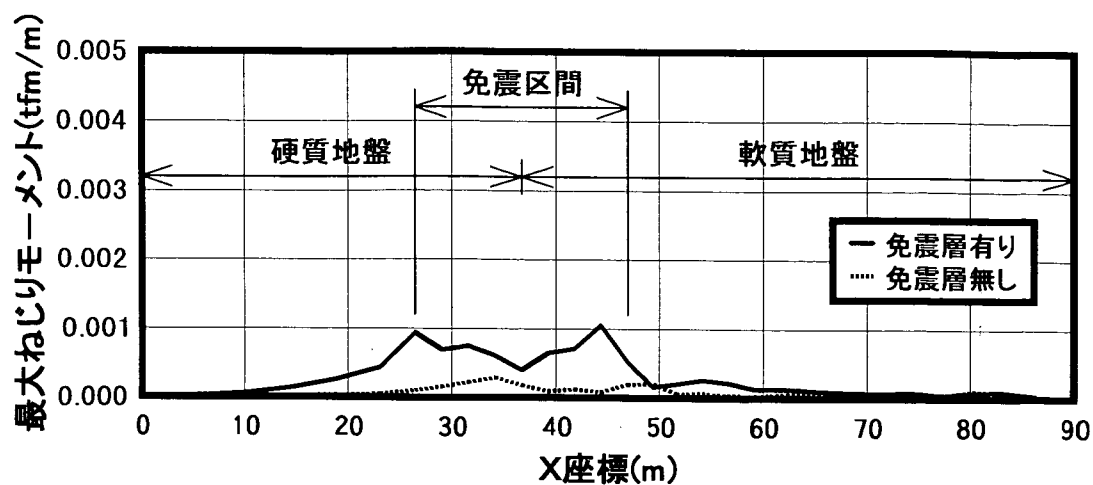


(b) 構造物側部

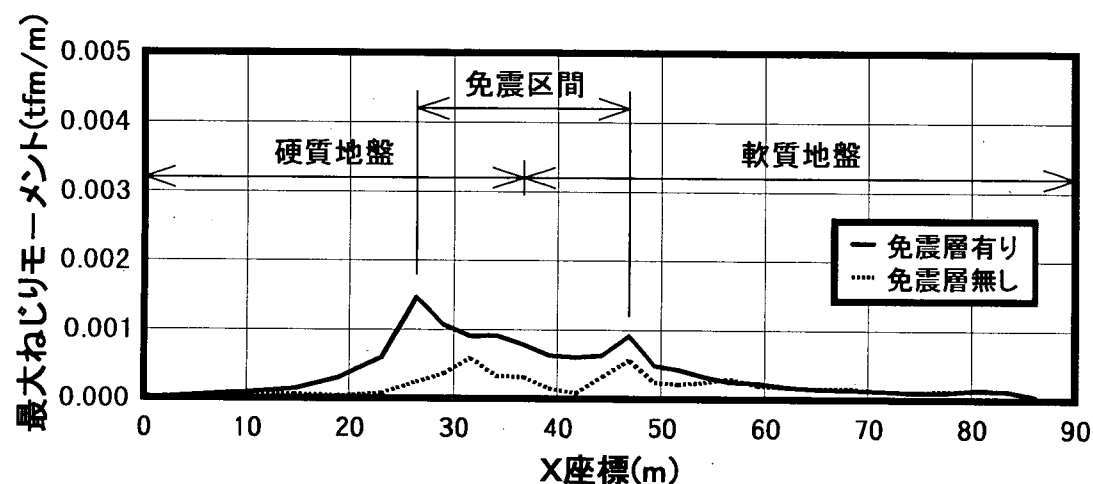


(c) 構造物下部

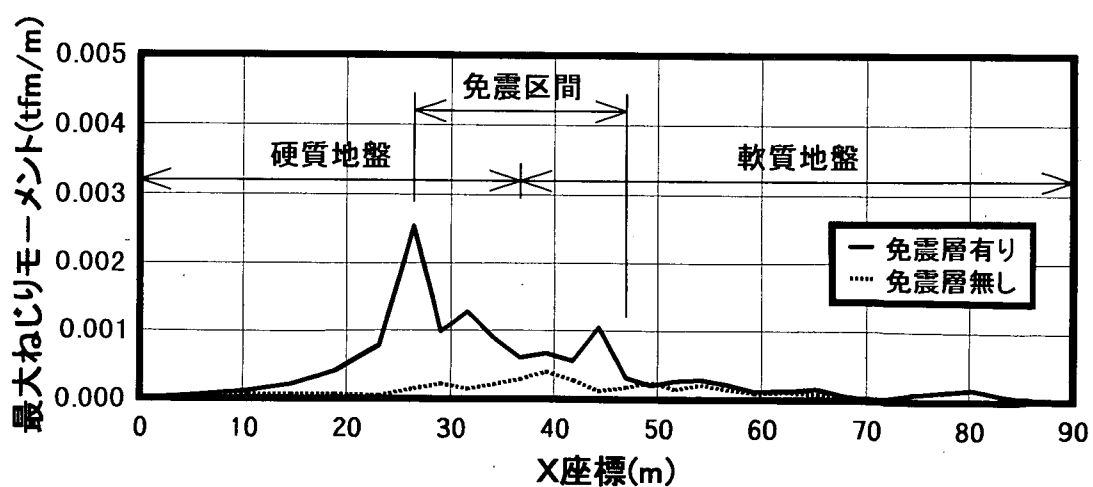
構造物円周方向曲げモーメント(X方向加振)



(a)構造物上部

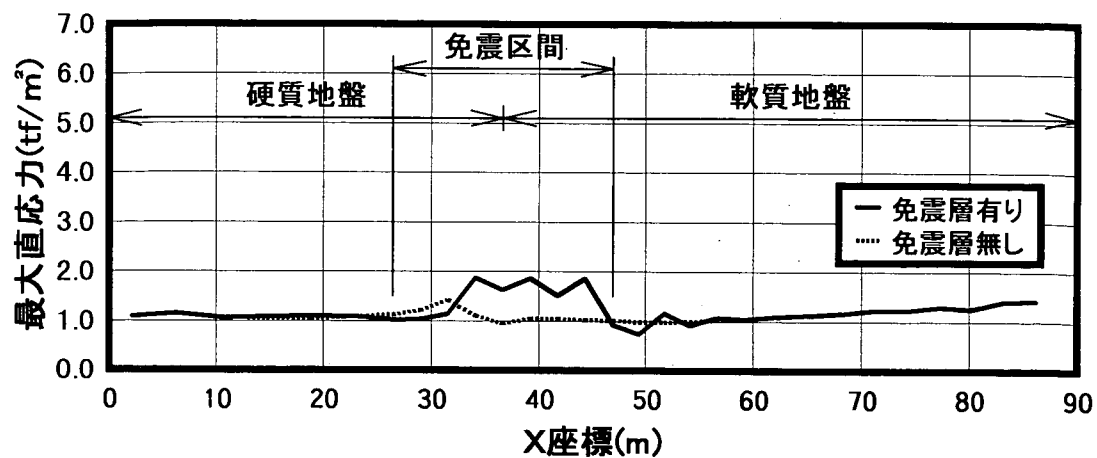


(b)構造物側部

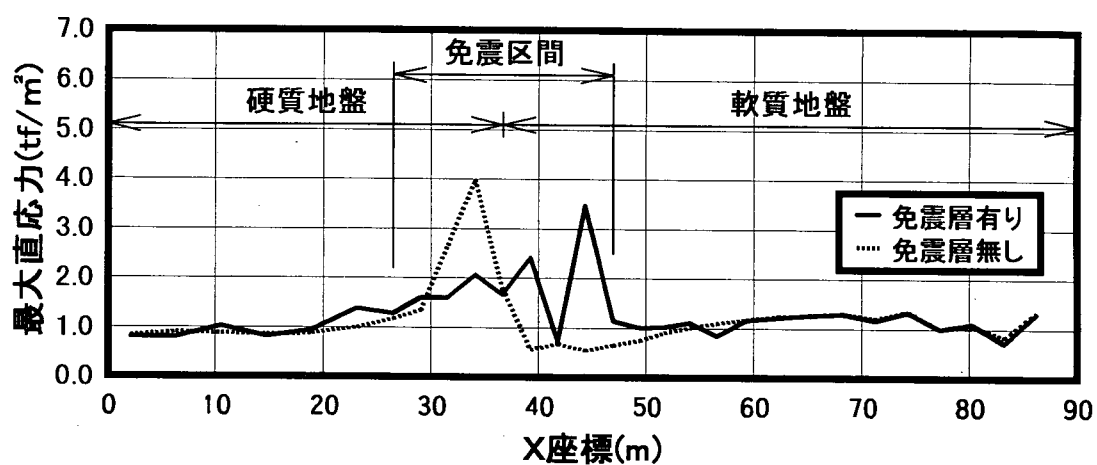


(c)構造物下部

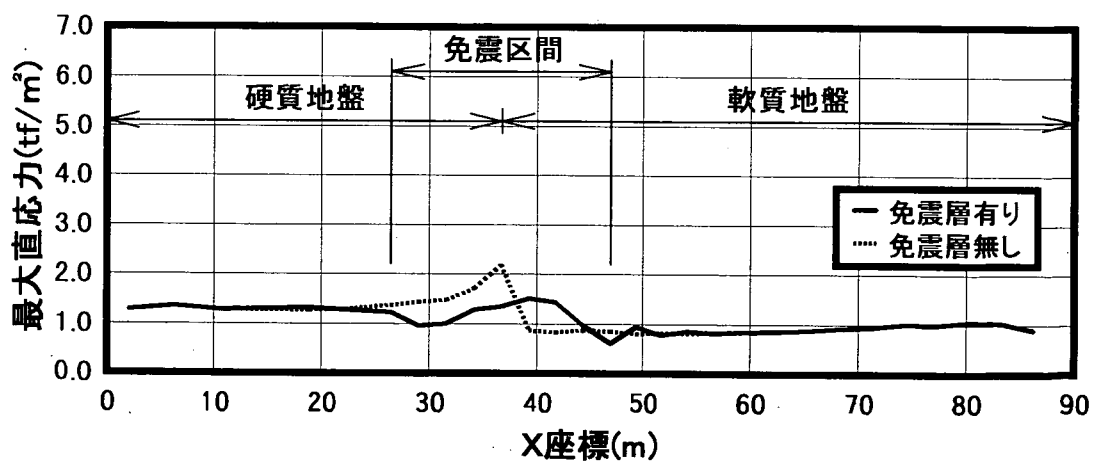
構造物ねじりモーメント(X方向加振)



(a) 構造物上部

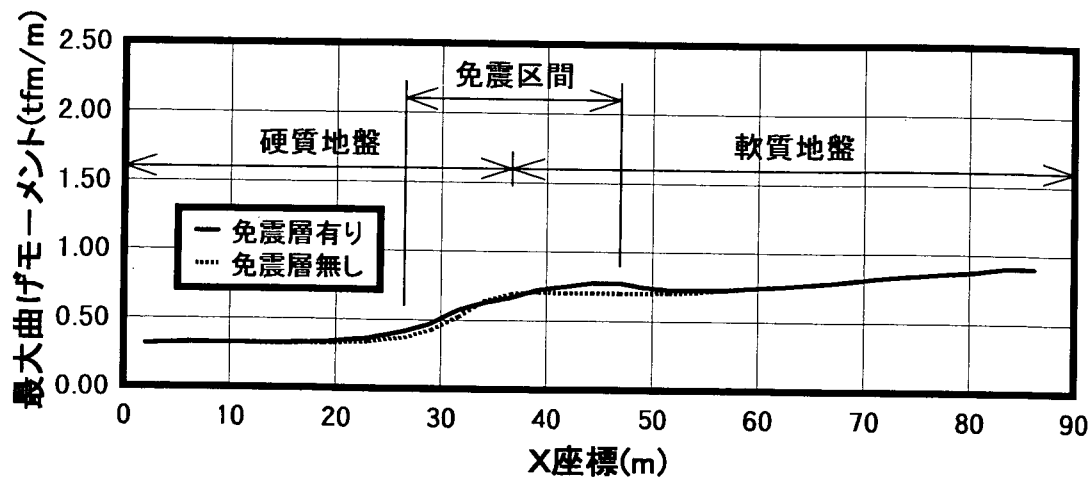


(b) 構造物側部

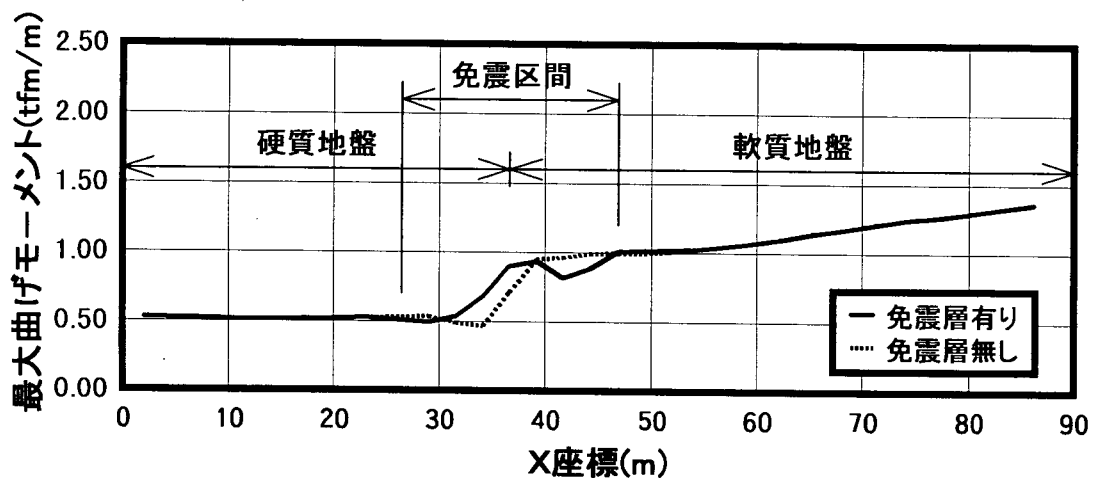


(c) 構造物下部

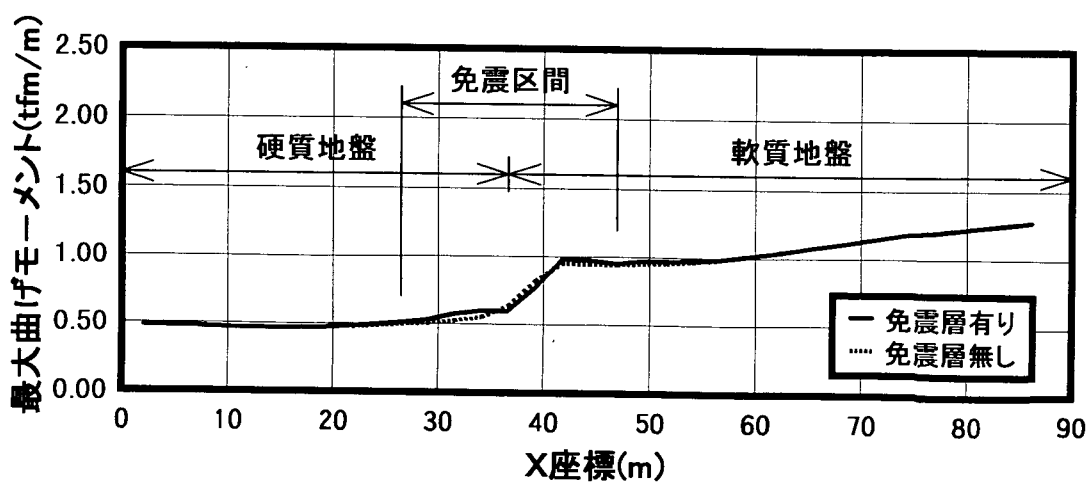
免震層外側地盤の構造物法線方向直応力(Y方向加振)



(a) 構造物上部

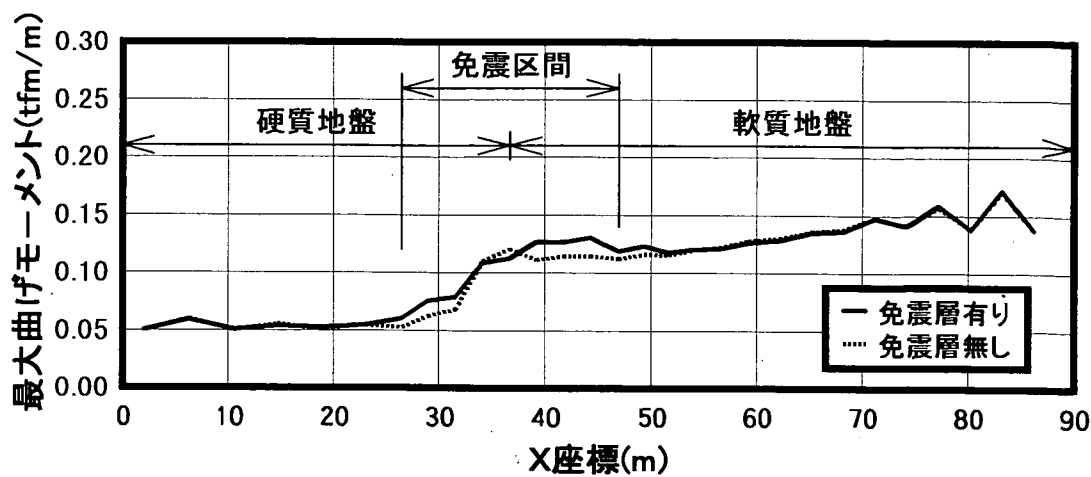


(b) 構造物側部

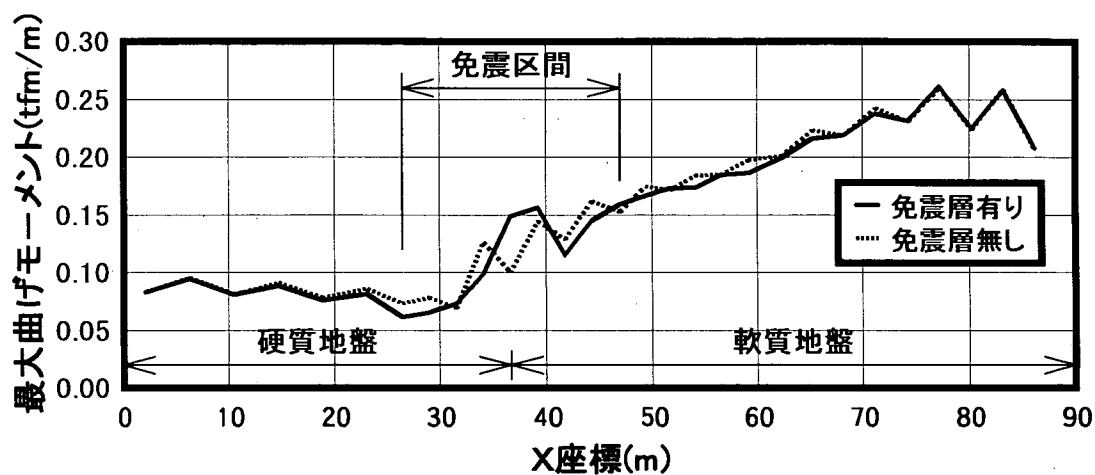


(c) 構造物下部

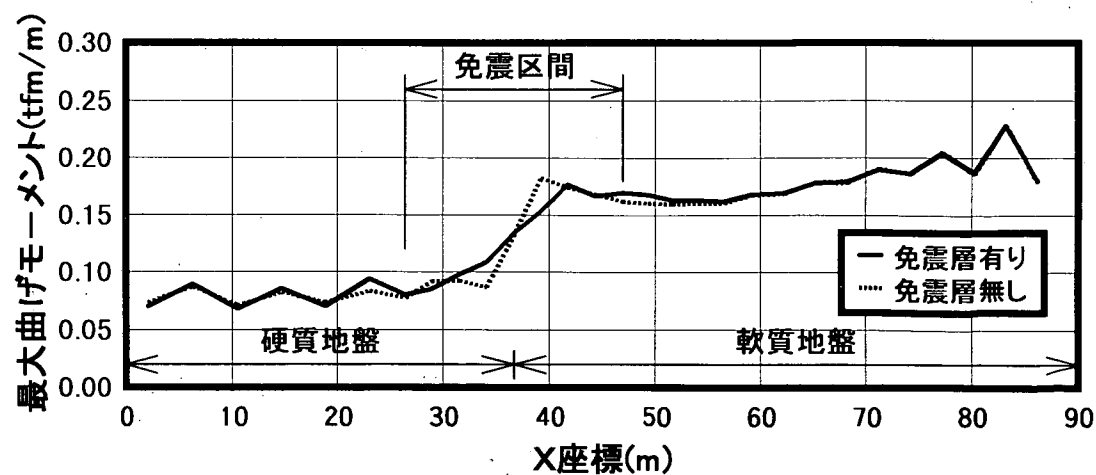
構造物軸方向曲げモーメント(Y方向加振)



(a)構造物上部

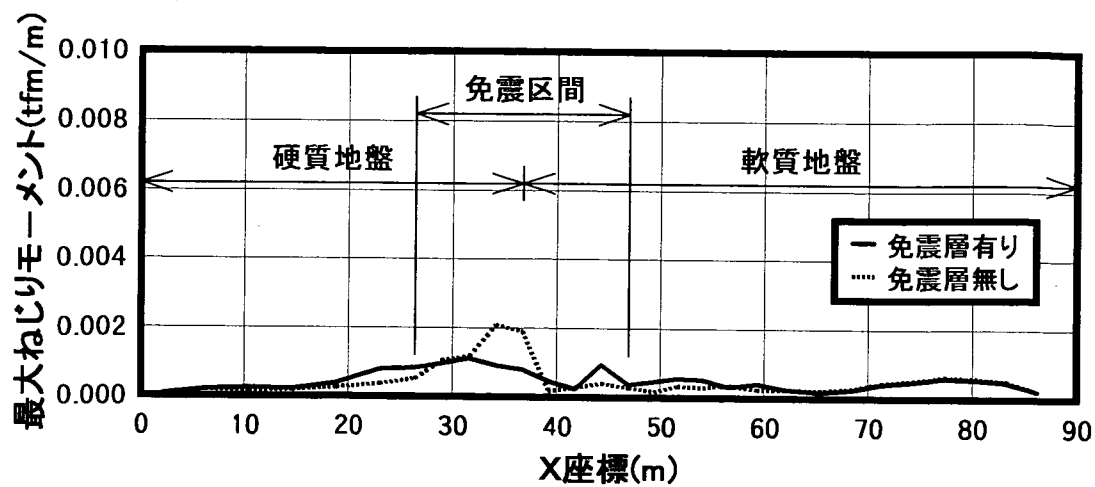


(b)構造物側部

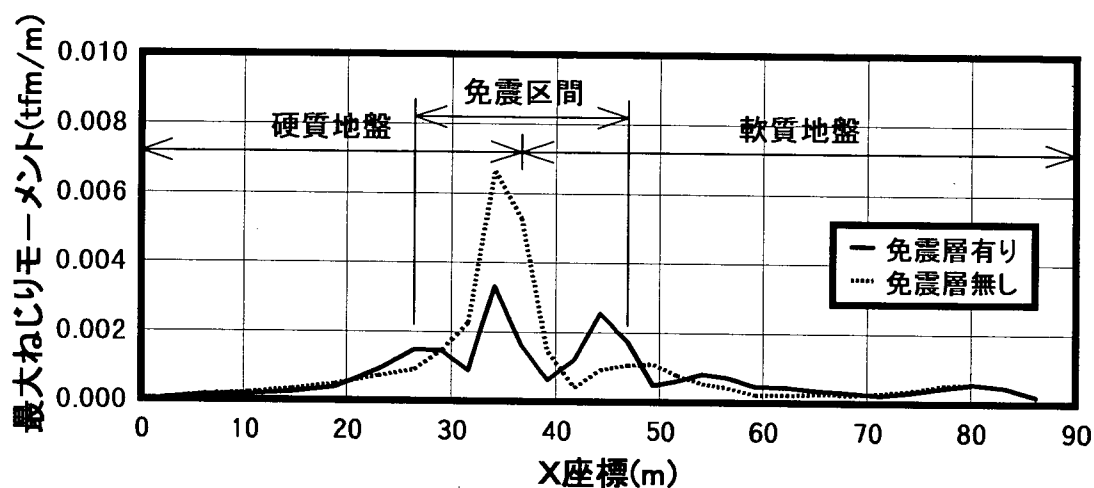


(c)構造物下部

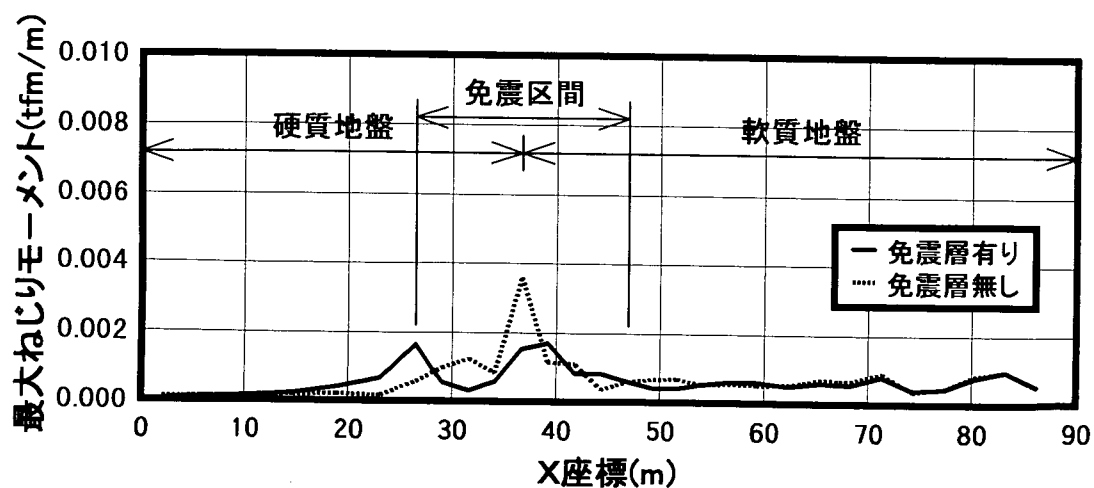
構造物円周方向曲げモーメント(Y方向加振)



(a) 構造物上部



(b) 構造物側部



(c) 構造物下部

構造物ねじりモーメント(Y方向加振)