

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に関する研究

AN ISOLATION MECHANISM OF UNDERGROUND STRUCTURES DURING EARTHQUAKE
BY 3-DIMENSION DYNAMIC FEM ANALYSIS村井和彦¹・星隈順一²・運上茂樹³

Kazuhiko Murai, Jun-ichi Hoshikuma and Shigeki Unjoh

¹正会員 工修 建設省土木研究所耐震研究室交流研究員(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)²正会員 工修 建設省土木研究所耐震研究室研究員(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)³正会員 工博 建設省土木研究所耐震研究室室長(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

To improve the seismic safety, a new seismically isolated underground structures has been studied. An isolation material is injected into the small gap between soil and structure to isolate underground structures from the effect of earthquake ground motion. This paper presents an isolation mechanism of the seismically isolated underground structure by analytical approach. A 3-dimensional dynamic FEM analysis is carried out for the isolated shield tunnel through a boundary of different soil condition, and the seismic behavior of the isolation layer, the tunnel and the surrounding soil was studied based on the analytical results. Furthermore, the seismic behavior of an unisolated tunnel was compared with the isolated one, and the mechanism of the isolation effect was described.

Key Words : Seismically Isolated Underground Structures, 3-Dimension Dynamic FEM Analysis, Isolation Mechanism

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隨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、大地震時に於いて過大な残留変形が生じるなど、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、構造物に過大な残留変形も生じない。このような免震工法は、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⁾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、また、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。さらに、地中構造物を免震化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)に関しても、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^{2),3)}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³⁾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、トンネル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、トンネルに伝達する法線方向直応力の分布を平滑化し、トンネル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³⁾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、トンネル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於いてトンネル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トンネル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。

なお、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。その一方で、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。

2. 3次元解析モデル構築の検討

2.1 解析条件

モデル構築の検討を目的とした予備解析は、周波数領域における複素応答法による2次元動的有限要素法解析にて行った。予備解析でのモデル化においては、構造物には梁要素、地盤及び免震層には平面ひずみ要素を用いた。表層地盤厚やトンネル径、トンネル位置、地盤、免震層及びトンネルの物性値、入力地震動については、後述する3次元解析と同じとした。

2.2 メッシュ分割数に関する検討

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、トンネル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、トンネル要素円周方向の分割数の3項目である。図-1に今回実施したメッシュ分割数に関する検討項目を示す。

免震層法線方向のメッシュ分割数に関しては、免震層（層厚10cm）を1層でモデル化した場合と、法線方向に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とした解析を実施した。図-2は、解析結果の一例として軟質地盤を対象とした場合のトンネル上部に着目した伝達関数を比較して示したものである。同図より、免震層の法線方向のメッシュ分割数に起因する相違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ないことがわかる。なお、ここでは示さないが、トンネル側部、下部に着目した伝達関数、構造物に発生する最大地震時増分断面力、免震層の最大せん断応力についても、地盤条件を問わずメッシュ分割数に起因する計算結果の大きな相違は生じていないこと

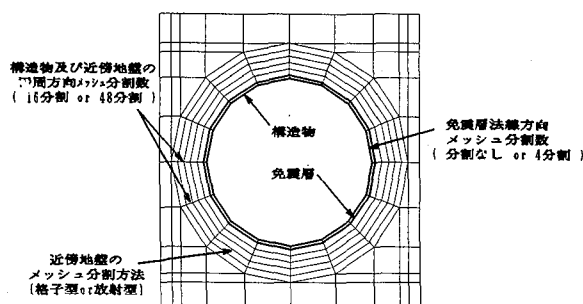


図-1 メッシュ分割数に関する検討項目

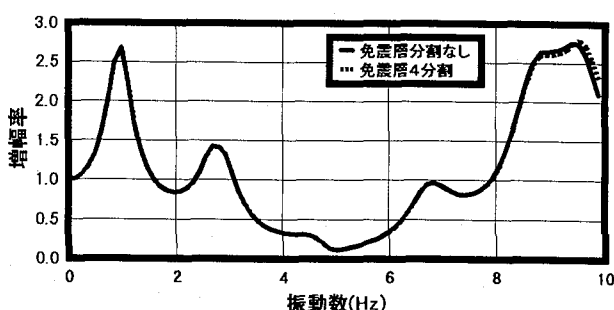


図-2 免震層法線方向メッシュ分割数の影響
(トンネル上部伝達関数：軟質地盤)

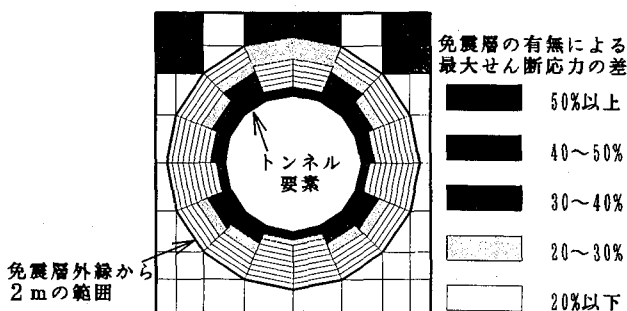


図-3 免震層の有無による地盤の最大せん断応力の差
(軟質地盤)

を別途確認している。したがって、3次元解析においては免震層は法線方向に1層でモデル化すればよいものと判断した。

トンネル近傍地盤のメッシュ分割に関しては、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、トンネル近傍地盤を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-3は、解析結果の一例として軟質地盤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。同図より、今回のケースでは、免震層の有無により最大せん断応力に大きな差が生じるのはトンネル外径より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範囲はこの範囲内であることが明らかとなった。したがって、3次元解析においては近傍地盤はトンネル外径から2mの範囲までを放射型にメッシュ分割することとした。

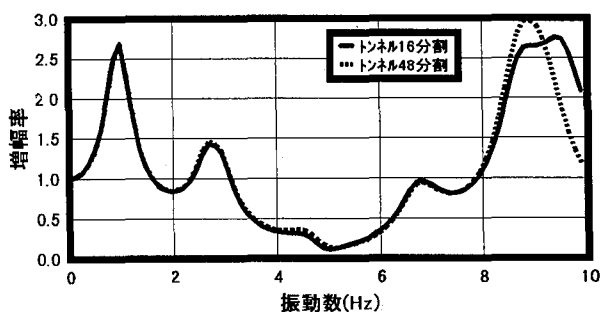


図-4 トンネル分割数の影響
(トンネル上部伝達関数:軟質地盤)

トンネル要素の円周方向分割に関しては、トンネルを円周方向に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とした解析を実施した。図-4は、解析結果の一例として軟質地盤を対象にした場合のトンネル上部に着目した伝達関数を比較して示したものである。同図より、トンネルの分割数に起因する相違は高周波数領域で生じているものの、低周波数領域ではほとんどないことがわかる。また、トンネル側部、下部に着目した伝達関数、構造物に発生する最大地震時増分断面力、免震層の最大せん断応力についても、地盤条件を問わずトンネルの分割数に起因する計算結果の大きな相違は生じていないことを別途確認している。したがって、3次元解析においてはトンネルの円周方向分割数は16とすることとした。

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なるものの、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種類の境界条件では、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、節点数や自由度の多い3次元解析において境界条件としてこれを採用す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た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-5および図-6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、硬質地盤、軟質地盤それぞれを対象にし、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と変化した解析を実施した。図-7

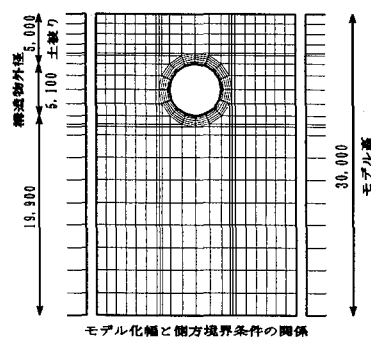


図-5 境界条件とモデル幅の検討
(横断方向)

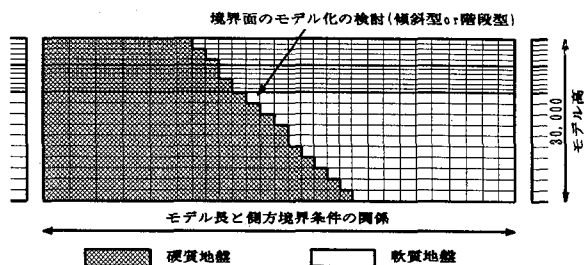


図-6 境界条件とモデル長および地層境界面のモデル化方法の検討(縦断方向)

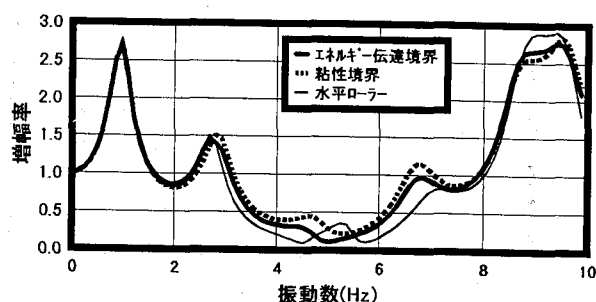


図-7 モデル幅を20mとした場合の境界条件の影響
(トンネル上部の伝達関数:軟質地盤)

は、解析結果の一例として、軟質地盤を対象にモデル幅を20mとし、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た場合の境界条件の違いの影響に関して、トンネル上部に着目した伝達関数を示したものである。同図より、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用いた場合との解析結果の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相違が認められることがわかる。また、モデル幅が20mの場合は、トンネル側部、下部に着目した伝達関数、構造物に発生する最大地震時増分断面力、免震層の最大せん断応力についても同様に、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解析結果に大きな相違はないものの、水平ローラーを用いた場合は相違が生じてくることを別途確認している。したがって、今回の3次元解析においては、モデル化する横断方向幅を20m以上とし、境界条件として粘性境界を用いれば、エネルギー

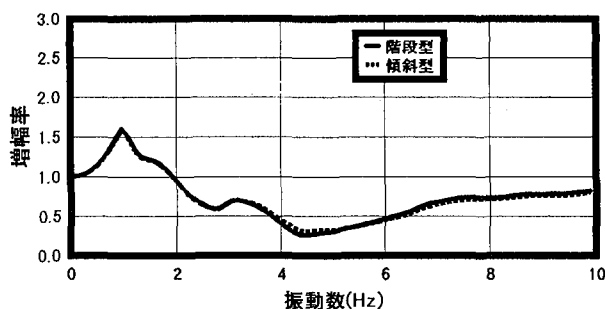


図-8 地層境界面モデル化の影響
(地層条件変化部における伝達関数)

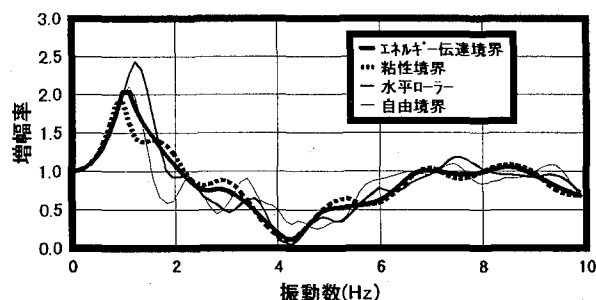


図-9 縦断方向モデル化長さで境界条件の関係
(モデル長を87.75mとした場合の軟質地盤部伝達関数)

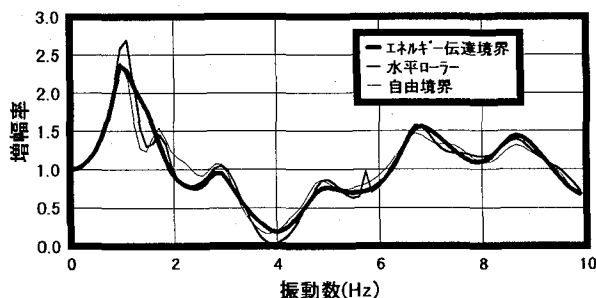


図-10 縦断方向モデル化長さで境界条件の関係
(モデル長さを193mとした場合の軟質地盤部伝達関数)

伝達境界を用いた場合と顕著な相違はないものと考えた。ただし、解析モデル構築の際には、対称性を考慮して適切な拘束条件を設定したうえで、トンネル中心から16.5m幅（総幅33mに相当）のハーフモデルとすることとした。

縦断方向の検討においては、トンネルや免震層をモデル化せず、地層境界部を含めた地盤のみを対象とした2次元解析を実施した。まず始めに、モデル長を87.75mとし、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、地層境界面を階段型と傾斜型にモデル化した場合の解析を実施した。図-8は、解析結果の一例として、エネルギー伝達境界を用いた場合のトンネル中心高さの地層境界点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。同図からは、階段型モデルと傾斜型モデルとの間の差異は認められず、境界面のモデル化は簡易な階段型にて行うことの妥当性が示されたも

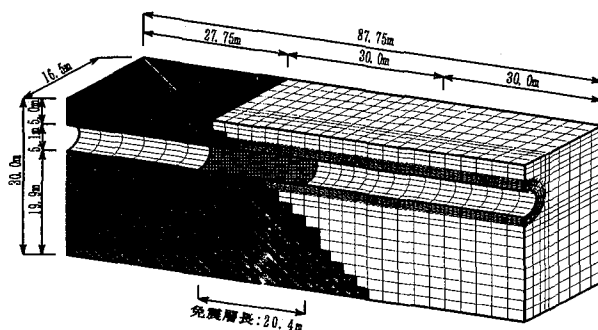


図-11 解析モデル

のと考えられる。また、図-9は、トンネル中心高さの軟質地盤側中央部における境界条件の違いによる伝達関数を比較して示したものである。同図より、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と大きな相違は認められないが、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-10は、トンネル中心高さの軟質地盤側中央部における境界条件の違いによる伝達関数を比較して示したものである。これより、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、境界の影響は回避できないことが明らかとなった。以上の結果より、3次元解析においては、地層境界面は階段型でモデル化するとともに、縦断方向境界条件としては粘性境界を用い、モデル長は87.75mとすることとした。

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、モデル化の幅は16.5mとし、ハーフモデルとした。また、モデル化の長さは、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、トンネル横断方向側面、トンネル軸方向側面とも、粘性境界を用いた。解析においては、トンネルはシェル要素で、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。解析モデルの全体図を図-11に示す。

解析ケースとしては、表-1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

表-1 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-2 地盤及び免震層物性値

項目	軟質地盤	硬質地盤	免震層
せん断弾性係数 tf/m^2	2,160	5,560	55.6
単位体積重量 tf/m^3	1.6	1.8	1.0
せん断弾性波速度 m/s	115	174	23
ポアソン比	0.49	0.45	0.30
減衰定数	0.03	0.03	0.03

表-3 構造物物性値

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

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、平成2年道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁴⁾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、X方向加振、Y方向加振とも同位相入力とした。

解析に用いた地盤の物性値としては、軟質地盤と硬質地盤を検討の対象とし、軟質地盤としてはN値が3の沖積粘土層を想定した物性値を、硬質地盤としてはN値が20の砂質地盤を想定した物性値をそれぞれ用いた。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⁵⁾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。免震層の物性値としては、既往の文献²⁾を参考に、せん断弾性係数に関しては、硬質地盤のせん断弾性係数を基準にせん断弾性係数比が1/100となるように

設定し、ポアソン比は0.3とした。また、免震層の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⁶⁾。解析に用いた地盤及び免震層の物性値を表-2に示す。

構造物については、トンネル外径5.1m、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ー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、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-3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)トンネル軸方向に関する結果と考察

解析結果のうち、ここではまず、トンネルの加速度応答値、速度応答値、軸方向ひずみについて、それぞれ最大絶対値分布を示し考察する。なお、以降の検討では、トンネルの側部に着目した最大絶対値分布にて計算結果を示し、考察することとする。

図-12、13は、それぞれ、トンネルの軸方向加速度と軸方向速度に関す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。同図より、免震層の有無による最大応答加速度、最大応答速度の顕著な差異は認められないことがわかる。

また、図-14は、トンネルの軸方向ひずみに関す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。同図より、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、非免震のトンネルにおいても自由地盤に追随した形のひずみ分布となっていることがわかる。一方、これに対して免震層を設置した場合は、その区間において軟質地盤側のひずみが低下し、逆に硬質地盤側のひずみが増加し、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。

以上より、今回の解析に用いた物性値を有する免震層を設置した場合のトンネルの地震時挙動は、通常の非免震トンネルの場合と同様に地盤に追随することとなり、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が、トンネルに生じるひずみの局所的な集中を緩和し、平滑化する効果があることが示された。

次に、トンネル軸方向について、免震層や近傍地盤のせん断ひずみやせん断応力、トンネルの軸力に着目する。図-15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-16、17は、免震層位置要素、すなわち、非免震の

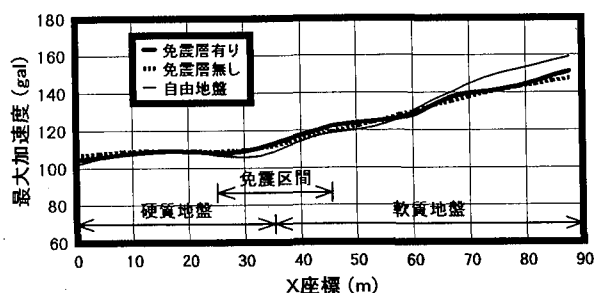


図-12 トンネル軸方向最大加速度(X方向加振,トンネル側部)

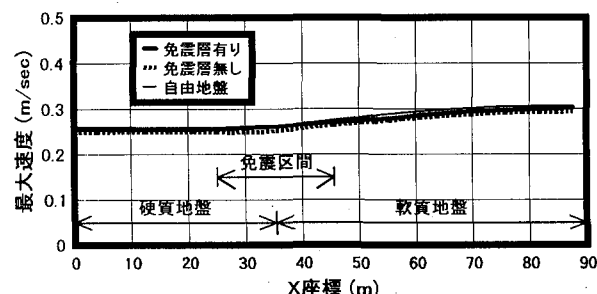


図-13 トンネル軸方向最大速度(X方向加振,トンネル側部)

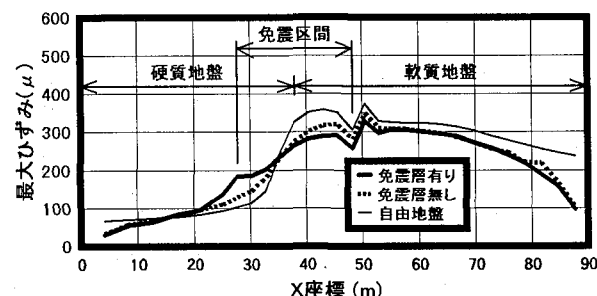


図-14 トンネル軸方向最大ひずみ(X方向加振,トンネル側部)

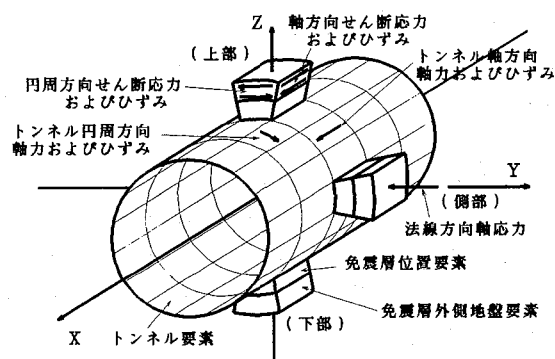


図-15 着目した要素及び所量

場合ではトンネル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トンネル軸方向せん断ひずみ及びせん断応力分布をそれぞれ比較して示したものである。同図より、免震層は非免震の同位置における地盤要素の10～20倍のせん断変形を示しているが、せん断弾性係数は周辺地盤の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

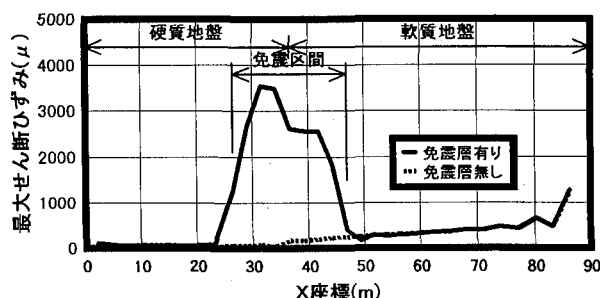


図-16 免震層位置要素のトンネル軸方向せん断ひずみ(X方向加振,トンネル側部)

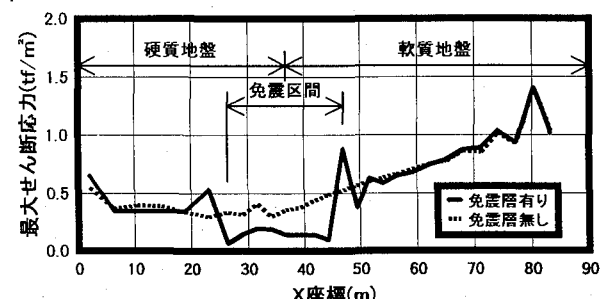


図-17 免震層位置要素のトンネル軸方向せん断応力(X方向加振,トンネル側部)

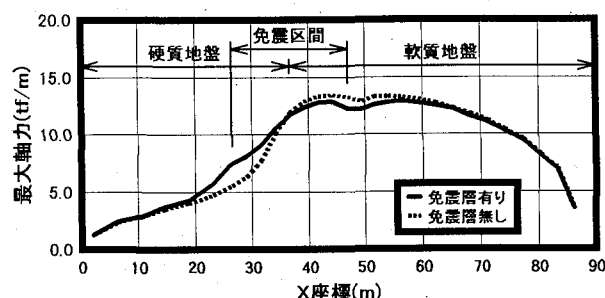


図-18 トンネル軸方向軸力(X方向加振,トンネル側部)

せん断応力が生じているが、これは、定性的には、免震区間のトンネル外周のせん断抵抗が極めて小さいためトンネル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考えられる。

図-18は、トンネル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。同図より、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トンネルのひずみの平滑化に対応したトンネル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トンネルと地盤との拘束が遮断されるとともに、トンネルに伝達する軸力が低減したことが考えられる。特に、今回のような地盤条件変化部においては、このメカニズムは、免震層がせん断変形することによりトンネルに及ぼす地盤ひずみの局所的な集中の影響が緩和されていることとなる。ただし、本解析は、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トンネル軸力の低減効果に関しては定量

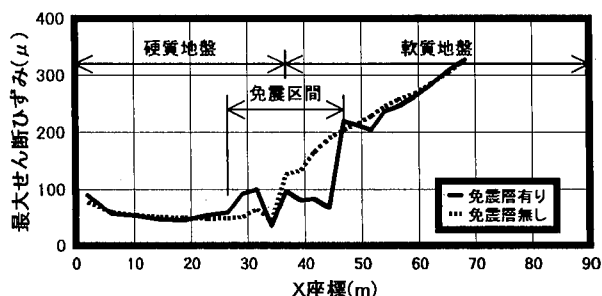


図-19 免震層外側地盤のトンネル軸方向せん断ひずみ
(X方向加振,トンネル側部)

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。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、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-19は、免震層位置のすぐ外側の地盤要素におけるトンネル軸方向せん断ひずみ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。同図より、免震層を設置すると、その設置区間においては外側近傍地盤のせん断ひずみは小さくなる傾向を示し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、近傍地盤の挙動がトンネルが存在せず空洞となった場合の地盤（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。

(2)トンネル円周方向に関する結果と考察

一般に、X方向加振時においてトンネル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トンネル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、トンネルの軸力に着目し検討する。なお、X方向加振においては、トンネル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、トンネル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、トンネル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-20、21は、免震層位置要素におけるトンネル円周方向せん断ひずみ及びせん断応力分布をそれぞれ比較して示したものである。同図より、トンネル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10～20倍大きなせん断変形を呈しているが、せん断応力は非免震の場合より小さいことが分かる。

図-22は、トンネルの円周方向軸力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。同図より、非免震の場合では、地盤条件の境界付近で局所的に大き

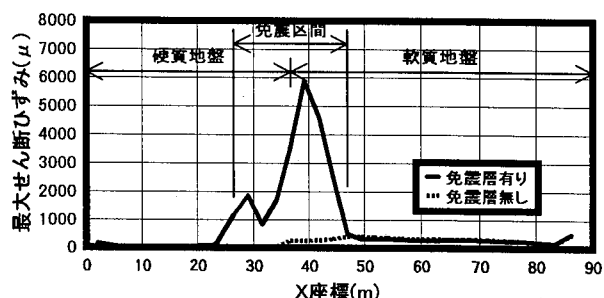


図-20 免震層位置要素のトンネル円周方向せん断ひずみ
(X方向加振,トンネル側部)

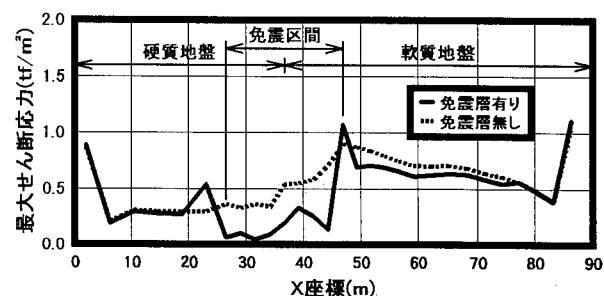


図-21 免震層位置要素のトンネル円周方向せん断応力
(X方向加振,トンネル側部)

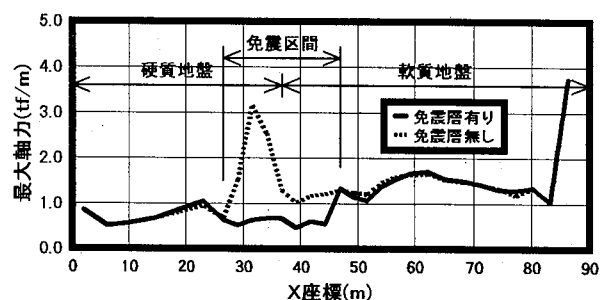


図-22 トンネル円周方向軸力(X方向加振,トンネル側部)

な円周方向軸力が生じていることがわかる。これは主としてトンネル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、トンネル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。

総じて、X方向加振におけるトンネル円周方向の免震層の有無による挙動の差異は、トンネル軸方向の場合と同様であることが確認された。

4.2 Y方向加振解析結果

(1)トンネルの軸直角方向に関する結果と考察

X方向加振解析結果と同様に、まず、トンネルの加速度応答値、速度応答値、軸直角水平方向ひずみについて結果を示し考察する。図-23、24は、それぞれ、トンネルの軸直角水平方向加速度と同方向速度に関す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。同図より、X方向加

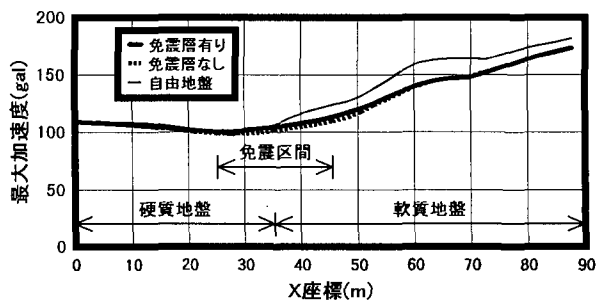


図-23 軸直角水平方向最大加速度(Y方向加振,トンネル側部)

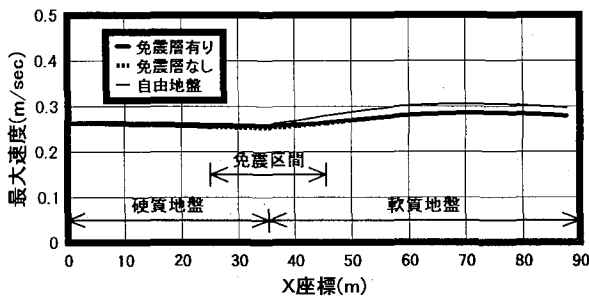


図-24 軸直角水平方向最大速度(Y方向加振,トンネル側部)

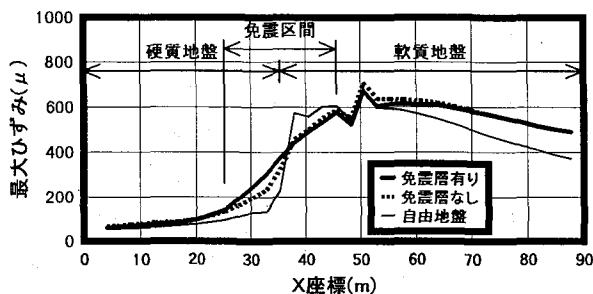


図-25 軸直角水平方向最大ひずみ(Y方向加振,トンネル側部)

振と同様に、免震層の有無による最大応答加速度、最大応答速度の顕著な差異は認められないことがわかる。

また、図-25は、トンネルの軸直角水平方向ひずみに関す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。同図より、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呈し、非免震のトンネルにおいても自由地盤に追従した形のひずみ分布となっていることがわかる。また、これに対して免震層を設置した場合は、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トンネル剛性は等価曲げ剛性でないため定量的には評価できないが、免震層の場合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)トンネル円周方向に関する結果と考察

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、ここではまずトンネル円周方向について、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、トンネルの軸力に着目し考察する。

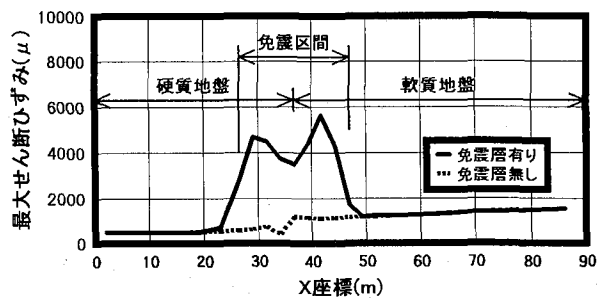


図-26 免震層位置要素のトンネル円周方向せん断ひずみ(Y方向加振,トンネル側部)

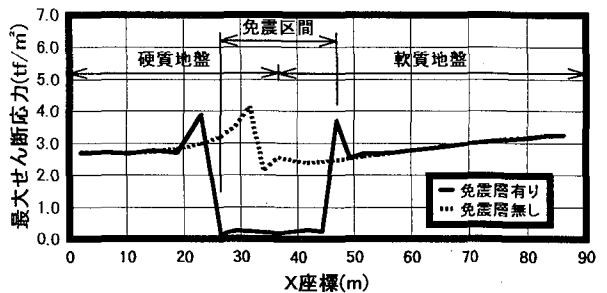


図-27 免震層位置要素のトンネル円周方向せん断応力(Y方向加振,トンネル側部)

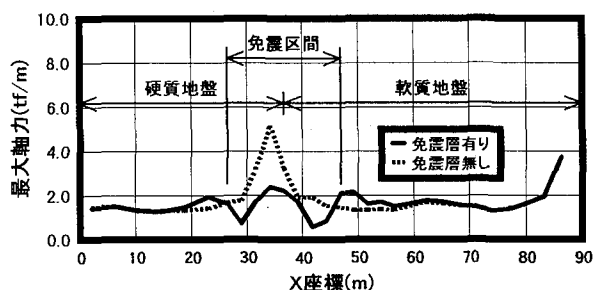


図-28 トンネル円周方向軸力(Y方向加振,トンネル側部)

図-26、27は、免震層位置要素におけるトンネル円周方向せん断ひずみ及びせん断応力分布をそれぞれ比較して示したものである。同図より、X方向加振の場合と同様な傾向が認められ、免震層の設置によりトンネル円周方向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。

図-28はトンネルの円周方向軸力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。同図より、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、局所的に集中するトンネル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-29は、免震層位置のすぐ外側の地盤要素におけるトンネル円周方向せん断ひずみ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。X方向加振における挙動と同様に、免震区間では地盤がトンネルと絶縁され、トンネルの存在しない空洞地盤の挙動に近づくため非免震の場合と比較してせん断ひずみが小さく

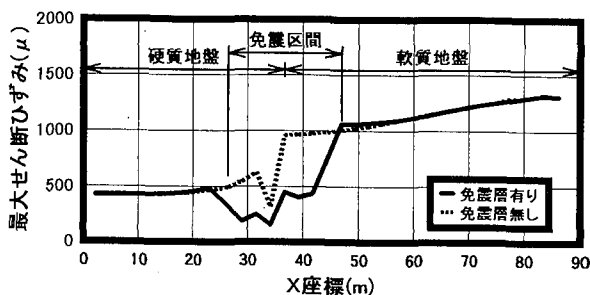


図-29 免震層外側地盤のトンネル円周方向せん断ひずみ
(Y方向加振,トンネル側部)

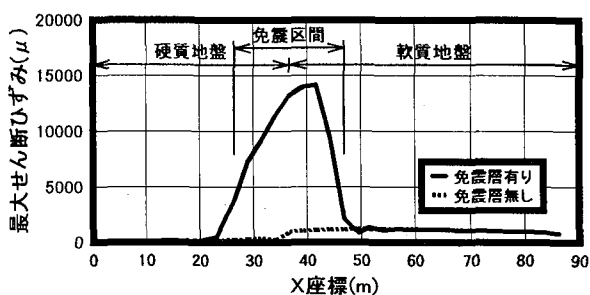


図-30 免震層位置要素のトンネル軸方向せん断ひずみ
(Y方向加振,トンネル側部)

なっていることがわかる。

(3)トンネル軸方向に関する結果と考察

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トンネルの曲げ変形について検討するため、トンネル軸方向の挙動も確認する必要がある。そこで、これまでと同様に、免震層や近傍地盤のせん断ひずみやせん断応力、トンネルの軸力に着目することとする。なお、Y方向加振におけるトンネル軸方向の検討は、X方向加振におけるトンネル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、トンネル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-30、31は、免震層位置要素におけるトンネル軸方向せん断ひずみ及びせん断応力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、トンネル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-32は、トンネル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。同図より、免震層によりトンネル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軸力のピークは局所的であることが特徴的である。なお、ここで示したものはトンネル側部に着目したものであるが、同じくY方向加振において、トンネル上下部に着目した同方向軸力はトンネル側部のものと比較して相対的に小さいことも別途確認している。したがって、地盤条件変化部を有する条件下でのY方向加振におけるトンネル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-33は、免震層位置のすぐ外側の地盤要素におけるトンネル軸方向せん断ひずみ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、免震区間ではトンネルと地盤とが絶縁されたことに起因するせん断ひずみの低減が認められる。

なお、トンネル接線面内方向に関しても、免震層や近

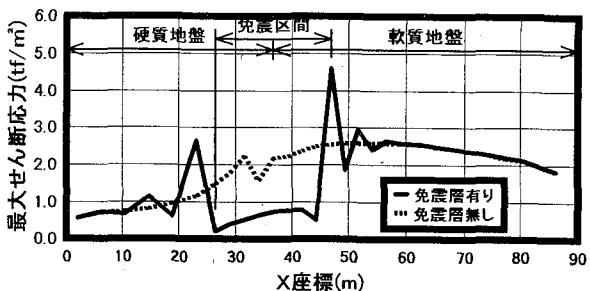


図-31 免震層位置要素のトンネル軸方向せん断応力
(Y方向加振,トンネル側部)

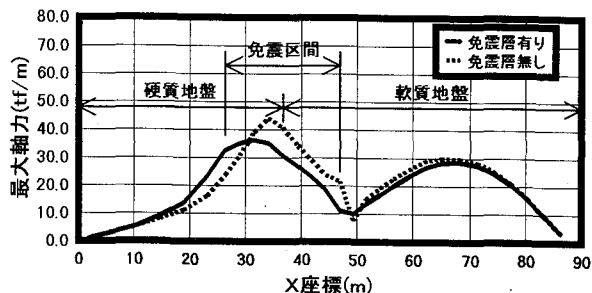


図-32 トンネル軸方向軸力(Y方向加振,トンネル側部)

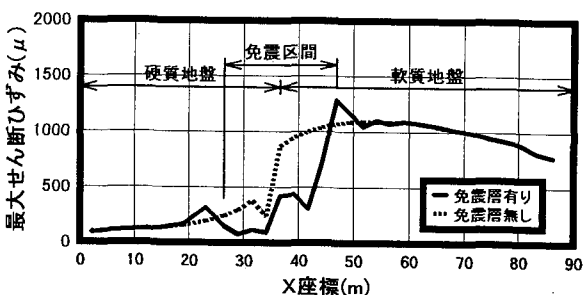


図-33 免震層外側地盤のトンネル軸方向せん断ひずみ
(Y方向加振,トンネル側部)

傍地盤のせん断ひずみやせん断応力、トンネルの面内せん断力に着目し、その定性的な傾向がこれまで示したものと同様であることも別途確認している。

(4)トンネル法線方向直応力に関する結果と考察

図-34は、トンネル法線方向の免震層位置要素の直応力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

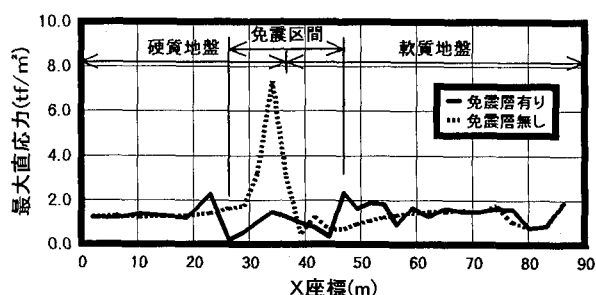


図-34 免震層位置要素のトンネル法線方向直応力
(Y方向加振、トンネル側部)

的であり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と考えられるので、これまでと同様にトンネル側部に着目することとした。同図より、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、トンネル横断方向に対する動的解析結果²⁾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。このトンネル法線方向の軸応力の局所的集中の緩和は、トンネルに伝達されるせん断力の低減と相まって、トンネル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。

5. 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次元動的有限要素法解析を行った。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次元動的有限要素法解析を実施し、トンネルの応答値や地盤-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、構造物周囲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、非免震トンネルでは、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、非免震トンネルでは、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。

謝 辞

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会社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り、貴重なご意見をいただいた関係各位に謝意を表する。

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) 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
- 3) 粕田、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
- 4) 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
- 5) 社団法人 日本道路協会：共同溝設計指針、昭和61年3月
- 6) 鈴木、粕田、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

(1997年9月26日受付)