

免震トンネルの耐震評価手法としての軸対称モデル
The Axisymmetric Finite Element Model developed as a Measure to Evaluate
Earthquake Response of Seismically Isolated Tunnels

鈴木 猛康¹⁾、丸山 雅淑²⁾
Takeyasu SUZUKI¹⁾ and Masayoshi MARUYAMA²⁾

- 1) (株)熊谷組 技術研究所土木耐震研究グループ 課長 工博
Manager, Earthq. Eng. Res. Group, Tech. Res. & Develop. Inst., Kumagai Gumi Co., Ltd., Dr. Eng.
2) 日本シビックコンサルタント (株) 首都圏事業部技術第一部 次長
Assistant Director, Technical Division, Nippon Civic Engineering Consultant Co., Ltd

要約

トンネルの免震とは、トンネル外周に形成させた極く薄い免震層により、地盤ひずみの伝達を遮断するとともにトンネルひずみの平滑化を図り、地震時にトンネルに発生する断面力の大幅な低減を図る方法であり、このようなトンネル～免震層～地盤の間に生じる相互作用の評価にはある程度精度の高い数値解析モデルが不可欠である。筆者らは、煩雑な3次元解析を行うことなく、上記の相互作用を考慮したトンネルの地震時応答を簡便に解析することを目的として、軸対称FEMを用いた解析手法を提案している。本論文では、軸対称モデルにおける地震荷重の設定法の概要をまとめた上で、地盤条件急変部ならびに立坑接合部へ免震構造を適用したケースを対象として実施した3次元静的解析を、本提案モデルで解析し、本提案モデルの妥当性を検証した結果について報告するものである。

SUMMARY

The seismic isolation of tunnels is the system in which a tunnel is covered by a thin seismic isolation layer. The sectional force generated on the tunnel body due to earthquake excitations can be largely reduced by isolating tunnel body from peripheral soil and smoothing tunnel strain within the isolated section. Precise numerical models are indispensable in order to evaluate the interaction between a tunnel body, a seismic isolation layer and peripheral soil. Authors has proposed a numerical method using an axisymmetric finite element procedure, in order to analyze earthquake responses of a tunnel in consideration of such interaction without using three-dimensional approach. This paper introduces the outline of the proposed model first. Then, the model is applied to the simulations of the three-dimensional finite element analyses on cases in which the seismic isolation is applied to the section where geological condition abruptly changes and to the junction with a vertical shaft. Then, the validity of the formation of the proposed model is verified through the comparison of the both results.

1. はじめに

地盤条件急変部あるいはトンネル立坑接合部のトンネルに対して、免震構造^{1),2)}を適用したことによるトンネルの地震時断面力低減を適切に評価するためには、トンネルを含んだ表層地盤や立坑を三次元的にモデル化して解析することが理想である。しかし、地盤条件急変部のように不整形な表層地盤の3次元的なモデル化のみならず、トンネル構造を考慮したメッシュ分割が必要となる

ため、モデル化が極めて煩雑な作業となるばかりでなく、コンピュータにも大きな計算容量と高い計算能力が要求される。したがって、実務設計において3次元解析を採用するのは、現実的には困難と言える。

そこで筆者らは、3次元解析のモデル化の煩雑さを解消しつつ、トンネル～免震層～周辺地盤の相互作用を考慮できる簡便な解析手法として、軸対称有限要素モデルを基本として外力項を補正する静的解析手法を提案し、

その妥当性を示した3),4)。本稿ではまず、軸対称モデルにおける地震荷重の設定法の概要と軸対称モデルによる立坑接合部のモデル化について述べる。次に、地盤条件急変部ならびに立坑接合部に対して免震構造を適用したケースを対象として、3次元有限要素法と本提案モデルによる耐震解析を実施し、両者の解析結果の比較より本提案モデルの妥当性を検証した結果について報告する。

2. 軸対称モデルを用いたトンネルの耐震解析

(1) モデルの概念

軸対称モデルの概念を図-1に示す。左側が軟質、右側が硬質地盤であり、中央で両地盤の境界が鋭角で形成されている表層地盤の地盤条件急変部を跨がって、シールドトンネルが建設されている。図-1上図の地盤条件ならびにトンネルの配置条件を、軸対称モデルによってモデル化すると、図-1下図のようになる。トンネル中心線が対称軸であり、半径がトンネル中心軸から基盤までとなる。トンネルとその周辺地盤は軸対称有限要素によってモデル化されるので、地盤とトンネルとの相互の力のやりとりはバネではなく、形状と構成則によって決められた連続体として厳密に取扱われる。したがって、図-1上図と下図のトンネル位置での地盤の地震時応答変位が一致するような地震荷重条件が軸対称モデルで設定できれば、地盤とトンネルの相互作用を厳密に考慮してトンネルの地震時応答を評価することが可能となる。

(2) 地震荷重の設定法

図-2右のように、厚さHの表層地盤の基盤から h_c の位置に中心を有する半径 r_0 のシールドトンネルを対象とする。軸対称モデルでは対称軸が実トンネルの天端と一致し、対称軸から $r=r_0$ の位置を実トンネルの中心軸と一致させた円筒状の構造とし、対称軸から基盤までの $r=R$ の領域を軸対称有限要素でモデル化する。なお、基盤（外周）は固定条件とする。実構造物の場合にはトンネル下方には基盤が、左右には半無限に地盤が、また上方には地表面があるので、トンネル外周の極く近傍を除けば構造条件が実際とは異なる。従って、軸対称モデルでも実地盤と同様な地盤のせん断変形が生じるように、荷重条件を設定する必要がある。

地震時に地表面で a_0 の正弦波状の分布をした加速度による地震慣性力が、密度 ρ の均質地盤に地震荷重として作用する場合を考える。軸対称モデルではトンネル中心より上方の地盤がモデル化されないため、(1)式ならびに(2)式で与えられるトンネル外周位置に作用するせん断力 S^* と、それより下方の地盤に作用する地震慣性力 $p(z)$ の2つに分離し、図-3のように地震荷重を作用させる必要がある。

$$S^* = \rho a_0 \int_{h_c}^H \sin\left(\frac{\pi z}{2H}\right) dz = \frac{2\rho a_0 H}{\pi} \cos\left(\frac{\pi h_c}{2H}\right) \quad (1)$$

$$p(z) = a_0 \rho \sin\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (2)$$

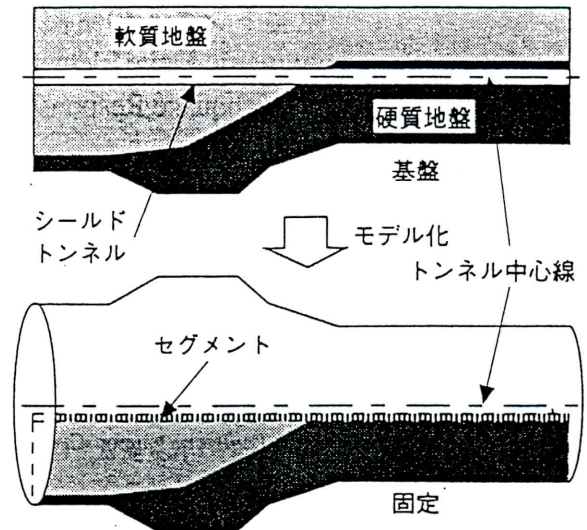


図-1 軸対称モデルの概念図

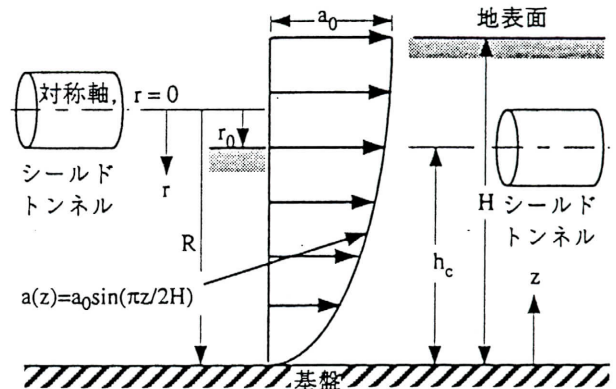


図-2 軸対称モデル（左）と実構造（右）との座標関係

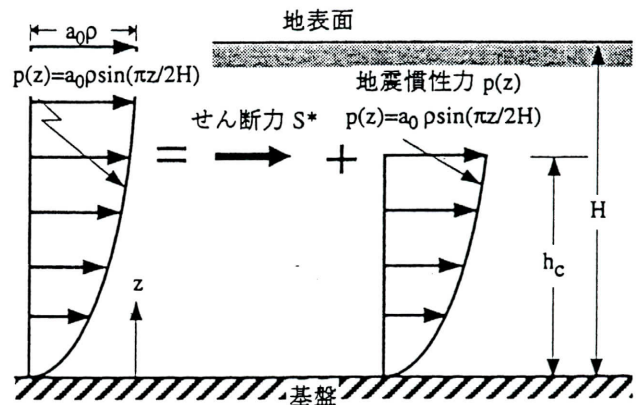


図-3 集中せん断力と分布地震慣性力の分離

ここで、Hは表層地盤厚であり、zは基盤から上方へとした座標、また h_c は基盤からトンネル中心までの高さを意味し、 $h_c = R - r_0$ の関係にある（図-3参照）。

実地盤で基盤から $z = R - r$ の深さに地震荷重 P^* が作用するとき、この位置で発生する地盤変位が、軸対称モデルの半径 r の位置でも生じるように、軸対称モデルでは(3)式で与える荷重 P に変換する必要がある。地下構造物の応答

にとってもっとも影響度の高い地盤の基本せん断振動モードに着目するならば、地表面加速度を a_0 とした正弦波状の加速度分布を仮定すると、数値解析上の取り扱いが簡単であり、2次元FEMあるいはバネ-質点系の地盤モデルによる地震応答解析で得られた地表面あるいは質点の加速度より、簡単に深さ方向の地震荷重を(2)式で与えることができる。

一方、(1)式で与えたトンネル上方地盤の集中せん断力 S^* は、上述の(3)式と同様に、この集中せん断力による実地盤の変位が軸対称モデルでも生じるように、新たなせん断力 S として(5)式のように変換する必要がある。

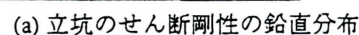
(3)式は(5)式と同じ形であるが、(3)式中の r が(5)式ではトンネル覆工の外径 r_0 となっているところが異なっている。

さらに、**実地盤**と同様な**変位分布**を与えるためには、トンネル外周にせん断力 S を集中するのではなく、(6)式のように深さ方向に荷重を分散させた分布荷重 s として作用させる必要がある。

このような集中荷重 S^* を軸対称モデルへ変換した分散荷重 s についても、 $p(z)$ と同様に質量マトリックスに加速度を乗ずることによって与えるとすれば、その加速度 a_s は(7)式で与えられ、

最終的に(4)式と(7)式の加速度の総和を各節点に加速度として与え、これと各節点の質量との積である慣性力を地震荷重として作用させることにより、軸対称モデルでも実地盤に発生する変位を再現できる。

こまでは、奥行方向に一様な表層地盤中の円形断面のトンネルの軸対称モデルによる地震荷重のモデル化について述べてきたが、立坑のような立体構造物のモデル化に際しては工夫が必要となる。ここでは地中から坑口までのトンネルの耐震性評価を行うことを考え、立坑駆



体内壁までを解析対象とする。

立坑は、実構造物と同じ壁厚 t と幅 W を有し、立坑と等価なせん断剛性 GA を有する壁としてモデル化する。等価なせん断剛性壁が図-4に示すように一様な物性を有するとすれば、壁のせん断弾性係数は、深さ方向の平均値として(8)式で与えることができる。

ここで、立坑に作用する地震荷重は立坑前面と背面の地盤慣性力であるが、本モデルではその片方のみを考慮しているので、上式の分子に1/2を乗じている。このような軸対称モデルでは、立坑を奥行方向に連続した構造物と仮定しており、実構造物より立坑の剛性を高く評価しているため、立坑接合部における地盤ひずみの集中を多少過大に評価する。したがって、軸対称モデルによる解析結果は、安全側の評価を与えると考えられる。

(1) モデル化と解析条件

硬軟地盤境界における免震シールドトンネルの地震応答を、三次元有限要素法と本モデルによって解析し、トンネルスプリングライン位置におけるセグメントの変位、ひずみに関して、両解析結果を比較することにより、本モデルの妥当性を検証する。

解析対象とする地盤ならびにトンネルの配置を図-5に示す。地盤は、鉛直な地層境界を有する表層厚30mの硬軟地盤境界であり160mが硬質地盤 ($E = 4794 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.49$, $\gamma_t = 1.8 \text{ tf/m}^3$)、右側260mが軟質地盤 ($E = 486 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.45$, $\gamma_t = 1.6 \text{ tf/m}^3$)である。なお、軸対称モデルではトンネル軸直角方向に無限に広がりを持つ地盤として扱うが、3次元有限要素解析(以下、3次元解析と称する)では地盤は100mの有限幅とし、境界は自由境界である。トンネルは外径5.1m、セグメント厚25cmであり、図の示すように土被り5.1m(1D)の深さに埋設されているものとした。

トンネル要素の物性としては、シールドトンネルの等価引張剛性に相当するヤング率として $E = 19600 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.167とした。免震層は、せん断弾性係数 $G = 5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.4とし、免震層厚 $t = 10 \text{ cm}$ で地層境界より硬質地盤側へ50m、軟質地盤側へ100mの合計150mに亘って設置することとした。

軸対称モデルによるメッシュ分割を図-6に示す。トンネル軸方向の要素分割は、軸対称ならびに3次元解析で一致させた。また鉛直方向あるいはセグメントから基盤までの分割は、軸対称モデルに基づく解析コードEASIT⁵⁾では自動的に9分割される。なお、セグメントならびに免震層は、1層でモデル化した。

地震荷重は解析モデル全体にわたって、モデルの右側へ静的に一様震度0.3Gを作用させた。

(2) 解析結果

図-7に軸対称モデルで解析されたセグメント外面の変位を、3次元解析のトンネルスプリングライン位置のセグメント変位と比較して示す。図のように両者の解析結果はほとんど重なっており、本提案モデルの地震荷重設定法(トンネルスプリングライン位置より地表面までのせん断力ならびにトンネルより基盤までの地盤慣性力)が妥当であることが検証できた。

図-8は、セグメントの軸ひずみに関する軸対称モデルと3次元解析の解析結果を比較して示している。図のように軸対称モデルによる解析結果は、セグメントひずみの分布が多少シャープになっている点で3次元解析の結果と異なるものの、最大ひずみの発生位置ならびに最大ひずみ値はほとんど一致しており、軸対称モデルは3次元解析の極めて高い近似を与えていることがわかる。前述のように、3次元解析の場合にはモデル周囲の自由境界の影響が少なからず解析結果に影響を及ぼすが、軸対称モデルではトンネル軸方向の両端の境界のみであるため、両者の解析結果は必ずしも一致するわけではない。しかし、図-7、図-8に示すように両解析結果の差はわずかであり、軸対称モデルが3次元解析の簡易解析法として実用面では十分な近似を与えることを示している。

4. 立坑接合部に対するモデルの適用

(1) モデル化と解析条件

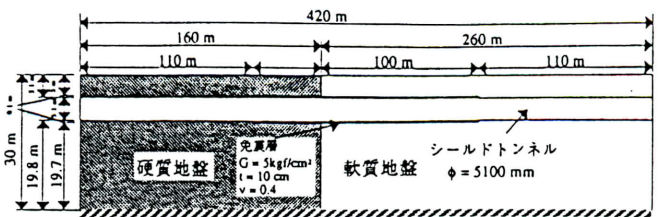


図-5 解析対象地盤およびシールドトンネルの配置

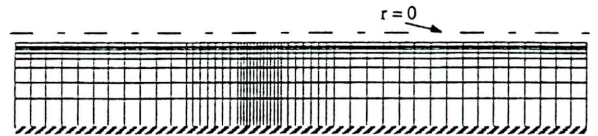


図-6 軸対称FEMモデルによるメッシュ分割

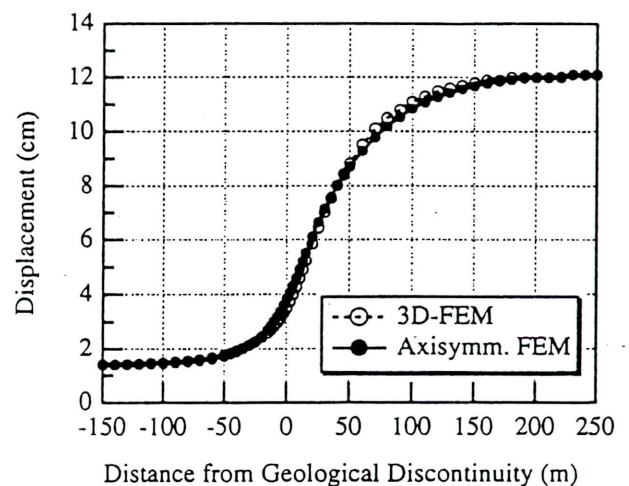


図-7 トンネル応答変位分布に関する解析結果の比較

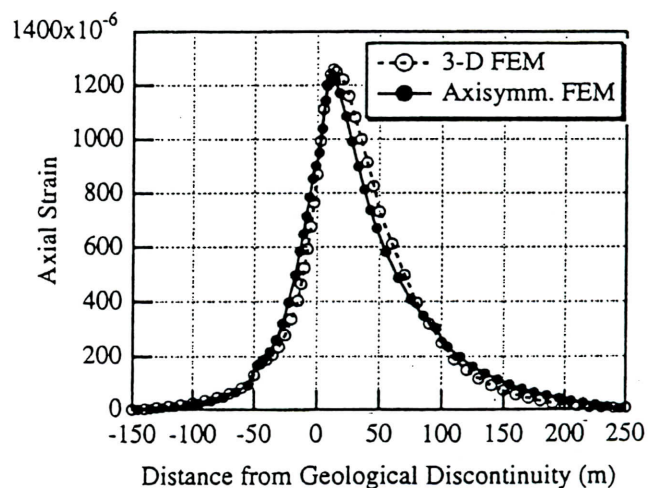


図-8 トンネル軸ひずみに関する解析結果の比較

立坑接合部における免震シールドトンネルの地震応答を、三次元有限要素解析⁶⁾と本モデルによって解析し、トンネルスプリングライン位置におけるセグメントの変位、ひずみに関して、両解析結果を比較することによ

り、本モデルの妥当性を検証する。

解析対象とするのは、四方を連続地中壁で囲まれた立坑である。解析対象地盤および立坑、トンネルの配置を図-9に示す。ここでは、連続地中壁と立坑が、どちらも基盤まで根入れされているとして壁厚を2.4mに固定した上で、(8)式を用いてせん断剛性が立坑と等価な壁にモデル化した結果、壁のヤング率は $E = 328000 \text{ kgf/cm}^2$ となった。なお、ポアソン比は0.167である。地盤は表層厚30.4mであり、上層26.4mが軟質地盤、下層4mが硬質地盤である。なお、表層地盤のトンネル縦断方向の延長は、3次元解析、軸対称モデルとも150mとし、モデルの境界においては水平ローラー支持の条件として鉛直方向の変位は拘束した。トンネルは外径5.1m、セグメント厚25cmのRCセグメント製のシールドトンネルを想定しており、土被り厚は約12mである。トンネルの物性値は、等価引張剛性に相当するヤング率として $E = 19600 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.167とした。免震層は立坑の坑口から約20mにわたって形成し、免震層厚は $t = 10 \text{ cm}$ で、物性はせん断弾性係数 $G = 3 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.487とした。解析ケースは2ケースであり、免震構造を適用しない場合ならびに立坑躯体より20mの区間に免震層を適用したケースである。

トンネル縦断方向のメッシュを図-10に示す。メッシュ分割では、立坑ならびに連続地中壁をそれぞれ2分割としている他、免震層が適用される立坑より20mの区間は1m間隔で分割しており、3次元解析の要素分割と比較すると軸対称モデルによる分割の方が少し細かい。

地震荷重としては、解析モデル全体にわたって右方向へ一様な水平震度0.6Gを与えた際、モデルに発生する地盤慣性力を、節点外力として作用させた。

(2) 解析結果と3次元静的解析との比較

図-11および図-12に、本解析によって得られたセグメント外面の変位を、3次元解析の結果と比較して示す。3次元解析の変位とは、スプリングライン位置におけるセグメント外面の変位である。図-11の免震構造を適用しないケースでも、図-12の免震構造を適用したケースでも、立坑のせん断剛性が3次元解析よりも多少大きく評価されているため、本解析モデルによる立坑部のトンネル変位の絶対値が3次元解析に比べて若干小さいが、両解析モデルによるトンネル変位の分布は良い一致を示している。

図-13は、セグメントの軸ひずみに関する軸対称モデルと3次元解析の解析結果の比較を示したものである。図のように軸対称モデルによる解析結果は、免震構造を適用しないケースでは3次元解析の結果よりも軸ひずみの分布形状がシャープとなっており、免震構造を適用したケースでは全体的に3次元解析より大きなひずみの発生となっているが、両者の最大ひずみの発生位置はほとんど一致しており、かつ軸ひずみのピーク値は両ケースとも軸対称モデルによる方が大きく、設計上で安全側の

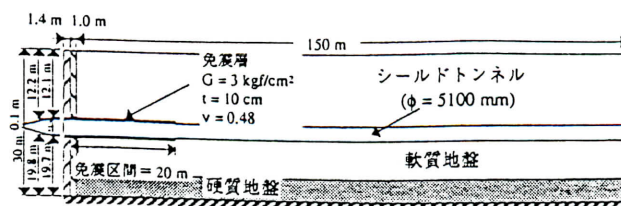


図-9 解析対象地盤およびシールドトンネルの配置

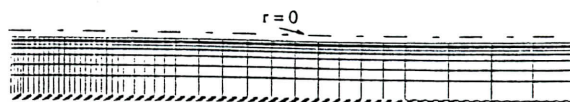


図-10 軸対称モデルによるメッシュ分割

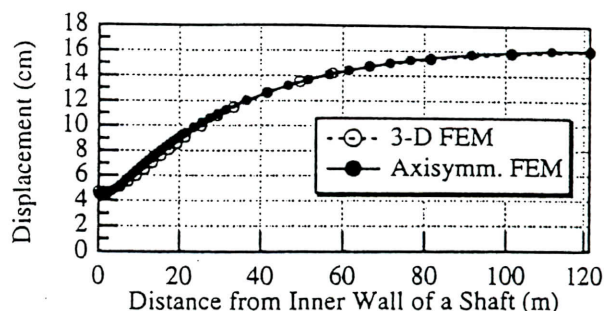


図-11 トンネル変位応答に関する比較 (免震なし)

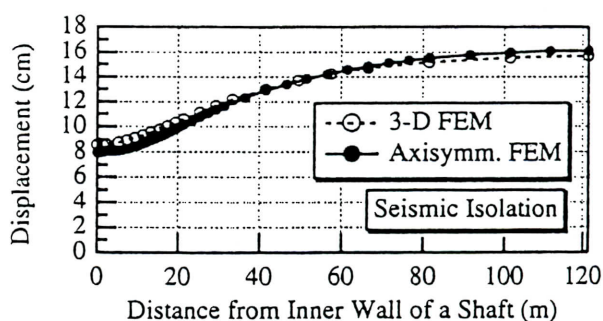


図-12 トンネル変位応答に関する比較 (免震構造)

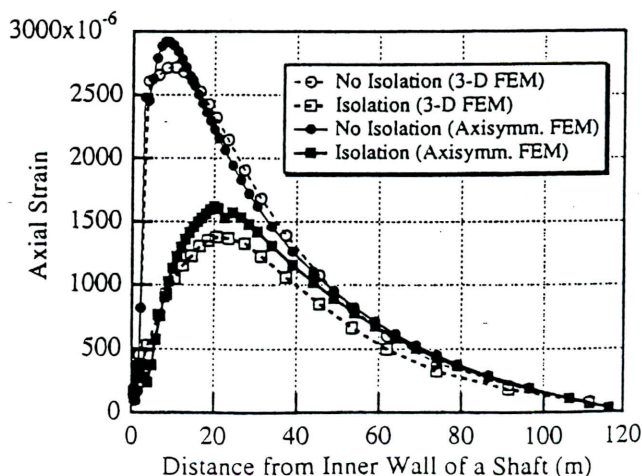


図-13 トンネル軸ひずみに関する解析結果の比較

評価を与えることがわかる。3次元解析の場合、モデル周囲の自由境界の影響が少なからず解析結果に影響を及ぼすが、軸対称モデルでは自由境界はトンネル軸方向の両端のみであるため、両者の解析結果は必ずしも一致するわけではない。しかしながら、図-11~図-13に示した両解析結果の一致は、軸対称モデルが3次元解析の近似解を与える手法として十分設計で適用可能であることを検証したものと考ええる。

5. 考察

軸対称モデルを動的解析に適用することを考えると、本モデルでは外周の固定壁における波動の反射があること、実地盤における地表面における波動の反射が考慮できないこと等、モデルの基本的な問題点がある。そこで、上述のように軸対称モデルは静的な荷重と変形の関係は実地盤に近似させることができ、また設計に適用するので簡便性が重視されることを考慮し、静的解析によることを基本としてモデルの構築を行った。このような静的解析手法は、地盤応答震度法として片山ら⁸⁾によってその妥当性が検証されており、また、本稿で取り扱った鉛直な境界を有する硬質軟質地盤の地震時変形に対する静的解析適用の妥当性は、2次元動的解析によって示されている³⁾。静的解析では運動方程式の減衰項が省略されるため、一般に動的解析よりも大きな変形を与えることになり、その結果、安全側の評価を与えることになる。

本稿では立坑をせん断剛性が立坑と等価な壁としてモデル化した。このモデル化では立坑の幅の範囲において、立坑のせん断剛性の平均を高さによる重みづけを考慮して算定しており、立坑もまた奥行き方向に連続した構造を想定している。したがって、このようにして算定された立坑壁のせん断剛性は3次元解析よりも相対的に大きく、その結果、3次元解析よりもトンネルの断面力を大きく算出することになる。したがって、本モデルを設計に適用する場合、解析結果が安全側の数値を与えていることに留意する必要がある。

6. まとめ

本稿では、免震トンネルの縦断方向の耐震解析を目的として開発した軸対称モデルに関して、地震荷重の設定法を概説した上で、地盤条件急変部ならびに立坑接合部のシールドトンネルに免震構造を適用したケースを対象とした耐震解析にモデルを適用し、同ケースを対象として別途実施した3次元解析と、解析結果を比較した。その結果得られた知見をまとめると、以下にまとめる。

- (1) 地盤条件急変部の免震トンネルの耐震解析では、軸対称モデルは3次元解析とほぼ等しい結果を与えることが確認できた。したがって本モデルは、免震トンネルにかかわらず、トンネルの耐震性評価の有力なツールとして広く活用できることが示された。
- (2) 3次元立体構造である立坑を、2次元的に置き換える

のは厳密には困難であるが、せん断剛性が等価な壁にモデル化することによって、軸対称モデルはトンネルひずみの発生分布に関し、3次元解析の近似解を与えることがわかった。立坑の剛性を実際よりも大きく評価するので、軸対称モデルは3次元解析よりも大きめのトンネルひずみを算定し、その結果解析結果は安全側となることがわかった。

本モデル開発の目的は、トンネルと地盤との相互作用バネを使用することなく、トンネルと地盤との相互作用を解析できるようにすることにあった。地盤条件急変部や立坑接合部のように極めて局所的な地盤ひずみの集中の著しい場所では、相互作用バネの設定が難しく、梁バネモデルでは十分な解析精度が保証されない場合がある。しかし軸対称モデルでは、相互作用が精度良くかつ簡便に解析できるため、免震トンネルだけに限らず、実務設計における地盤条件急変部や立坑接合部の耐震検討にとって有力なツールとなり得るものと考ええる。

なお本研究は、建設省土木研究所、(財)土木研究センターならびに民間17社による建設省共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発」の一環として行われたものであり、活発な議論をしていただいた共同研究参加メンバーに対して深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木, 田村: シールドトンネルの免震構造とその免震効果の評価手法の提案, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.275-285, 1995.
- 2) Suzuki, T.: Damages of Urban Tunnels due to the Southern Hyogo Earthquake of January 17, 1995 and the Evaluation of Seismic Isolation Effect, CD-ROM of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996.
- 3) 鈴木, 金, 植村: シールドトンネルの免震構造の地震応答評価のための解析法の提案, 土木学会第1回免震制震コリキウム論文集, pp.125-132, 1996.
- 4) 鈴木: 軸対称モデルによるトンネル縦断方向耐震解析法の提案とその免震シールドトンネルへの適用例, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.349-352, 1997.
- 5) 建設省土木研究所, 土木研究センター, 民間17社: 地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発(その2), 共同研究報告書, 第192号, 建設省土木研究所, 1997.12.
- 6) 丸山, 岡田, 鈴木: 立坑接合部における免震シールドトンネルの地震応答解析, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 1998.
- 7) 鈴木, 粕田, 小林, 福田, 池野: 都市トンネルの免震構造のためのシリコン系材料に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.534/VI-30, pp.69-76, 1996.
- 8) 片山他: 地中埋設構造物の実用的な準動的解析法「応答震度法」の提案, 土木学会第40回年次学術講演会, 第1部, pp.737-738, 1985.