

軸対称モデルによるトンネル縦断方向の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

鈴木 猛康¹

¹正会員 工博 (株)熊谷組技術研究所 (〒300-22 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

トンネルと地盤の相互作用は本来、単純にばねで表現できるものではなく、3次元でモデル化して評価するのが望ましい。しかし、複雑な実地盤の地層構成とモデル化の煩雑さから、3次元解析が実用に供しないのは明らかである。免震トンネルは、短い区間でトンネル外周の極く薄い免震層と地盤の間で生じる相互作用により、地震時発生トンネル断面力の低減を図るものであり、その効果の評価にはある程度精度の高い構造のモデル化が不可欠である。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、軸対称モデルを用いた場合の地震荷重の設定法を示し、提案手法を用いてシールドトンネルを対象とした数値解析例を示している。

Key Words : shield-driven tunnel, seismic isolation, earthquake load, formulation
soil-tunnel interaction, axisymmetric finite element, numerical model

1. はじめに

地盤条件急変部を横断するトンネルに対して、免震構造^{1),2)}を適用したことによる構造物の地震時断面力低減を正確に算定するためには、トンネルを含んだ表層地盤を三次元的にモデル化して解析することが理想であるが、地盤条件急変部を含む極めて不整形な表層地盤を3次元でモデル化することは、煩雑であるばかりでなく、高いコンピュータの性能が要求され、実用には供しないのは明らかである。さらに表層地盤中のトンネルのモデル化が加わることになるため、3次元解析を行う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、トンネル～免震層～周辺地盤の相互作用を考慮できる解析手法として、軸対称有限要素解析を拡張した手法を提案し、数値解析例を示した^{3),4)}。本論文では、軸対称モデルを用いたトンネルの縦断方向の耐震解析において、これまで課題として残されていた、トンネルより上方の地盤に作用する地震荷重の設定法を提案し、その妥当性を検証する。また免震シールドトンネルの縦断方向に本モデルを適用した2種類のパラメトリックスタディーを通じて、いくつかの知見と本手法の優位性を示す。

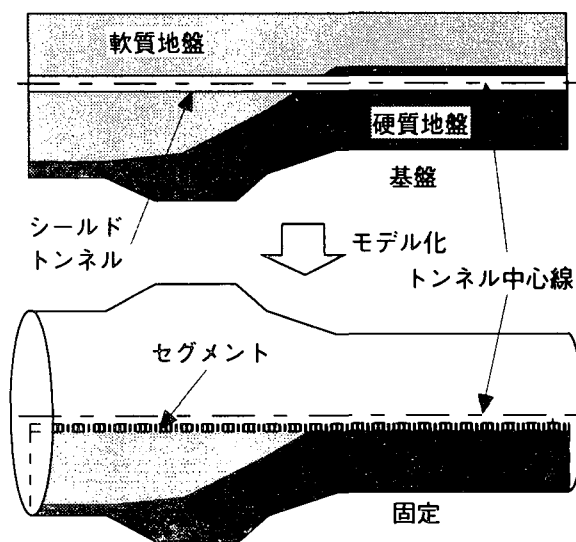


図-1 軸対称モデルの概念図

2. 軸対称FEMによる解析モデル

(1) モデルの概念

軸対称モデルの概念図を図-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

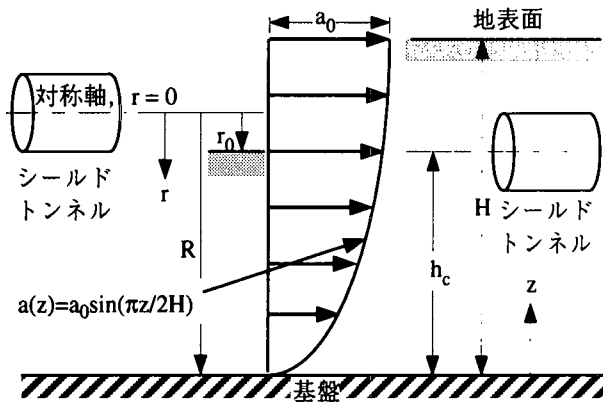


図-2 軸対称モデルと実地盤の位置関係と想定地震荷重

-1上図の地盤条件ならびにトンネルの配置の軸対称モデルによるモデル化を、概念的に示したのが図-1下図である。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の距離となる。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、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解析することが可能となる。軸対称モデルでは、トンネル断面中心を対称軸としなければならない、実地盤のような地表面や側方の半無限境界を考慮することができない。ここで提案する軸対称モデルでは外側の境界を基盤位置に設定し、ここに固定の条件を設定した。

(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シールドトンネルを対象とする。軸対称モデルではトンネル覆工体の内周を内円、基盤面を外円とする円筒状の構造でモデル化し、トンネル中心軸を対称軸としてセグメントから基盤までを軸対称有限要素で構成する。実際にはトンネル下方には基盤が、左右は半無限に地盤が、上方には地表面があるので、トンネル外周のある範囲以外は構造条件が実際とは大きく異なる。したがって、実構造物に発生するような変形が軸対称モデルで生じるよう、荷重条件を設定する必要がある。なお、以下では、図-2の記号を用いて説明する。

地震時に地表面で a_0 で図-3に示すように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。

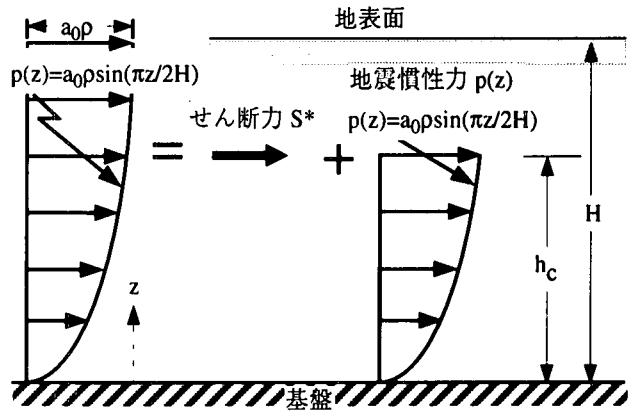
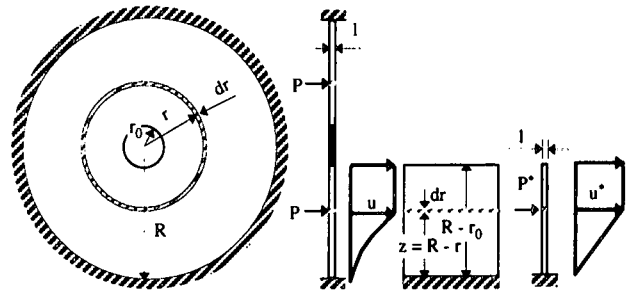


図-3 集中せん断力と分布地震慣性力の分離



(a) 単位厚みの中空ディスク (b) 単位幅、単位奥行き土柱

図-4 地震慣性力 $p(z)$ の与え方

軸対称モデルではトンネル上方の地表面までの地盤が考慮されないため、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つに分離して、それぞれを地震荷重として与える必要がある。

まず $z < h_c$ の領域の地盤に作用する地震慣性力 $p(z)$ は、図-4に示すように、中空ディスクの荷重～変形関係と単位厚みの土柱の荷重～変形関係の比較より、基盤から z の高さの土柱に作用する慣性力を P^* とすると、軸対称モデルでは(1)式で表す P を地震荷重として与えればよいことを既に示した³⁾。

$$P = \frac{2\pi(R-r)}{\log(R/r)} P^* \quad (1)$$

一方、集中せん断力 S^* は、図-3のように正弦波状の地震慣性力分布を仮定すれば(2)式で与えられるが、図-5中央のように(2)式を軸対称モデルに置換えると、与えるせん断力 S は(3)式となり、図-5右端のように2次元地盤と同様な変位分布とするためには、トンネル外周にせん断力を集中するのではなく、(4)式のように深さ方向に荷重を分散させて s として作用させる必要がある。

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

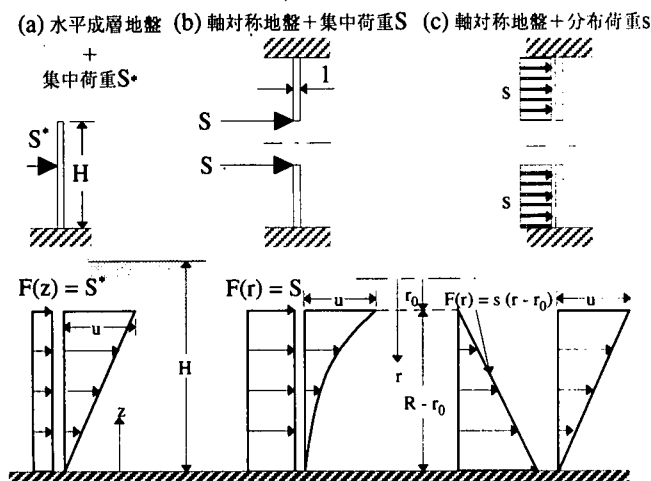


図-5 集中せん断力Sの軸対称モデルでの取り扱い概念図

$$S = \frac{2\pi(R-r_0)}{\log(R/r_0)} S^* \quad (3)$$

$$s = \frac{\log(R/r_0)}{R-r_0-r_0 \log(R/r_0)} S \quad (4)$$

地震荷重分布が正弦波ではなく、たとえば地動をモデル全体に均等に作用する場合は、その加速度を a_0 とすると(2)式を(5)式のように修正すればよい。

$$S^* = a_0 \rho (H - R + r_0) \quad (5)$$

(3) 妥当性の検証

荷重条件の設定法の妥当性を検証するため、2次元FEMと軸対称FEMによる解析を行い、両者の結果を比較した。基本とするのは表層厚30m、単位体積重量 1.6 tf/m^3 、 $V_s = 100 \text{ m/sec}$ 、ポアソン比0.48の均質地盤であり、地震荷重設定法の妥当性の検証の目的から、軸対称モデルでは地盤要素のみの素掘りの状態とした。また地震荷重は正弦波分布とし、地表面加速度 $a_0 = 300 \text{ gal}$ とした。図-6は軸対称モデルの内径を $r_0 = 5 \text{ m}$ で一定とし、トンネル中心を基盤からそれぞれ10m、15m、20mおよび30mとした4ケースについて、軸対称モデルの内周位置での地盤の水平変位を求め、2次元FEM解析で得られた水平変位の鉛直分布と比較したものである。図のように、両者の解析結果はよく一致しており、上記の地震荷重設定法の妥当性が検証された。

4. 数値解析例

図-7に示すような硬質、軟質地盤の鉛直な境界を有する地盤条件急変部に、外径5.1mのシールドトンネルが横断するケースを想定する。ここで、免震施

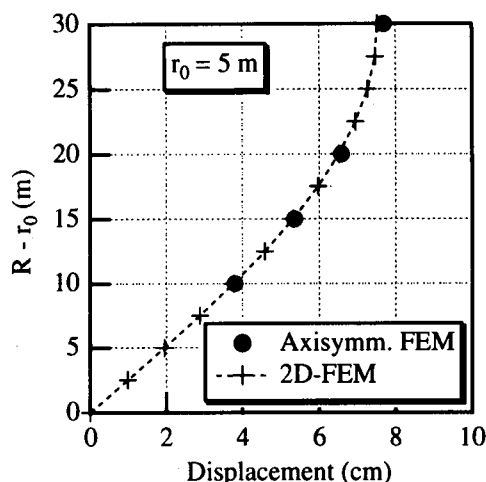


図-6 地震荷重設定法の妥当性検証例

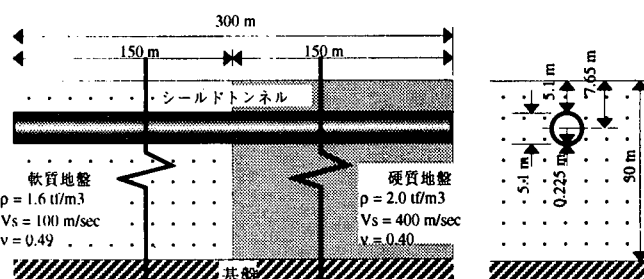


図-7 地盤条件とトンネルの配置

工区間は軟質地盤側40m、硬質地盤側10mに固定した場合につき、以下の2種類の数値解析例を示す。なお、地震荷重は $0.3G$ を(5)式での形でモデル全体に均等に作用させた。

図-8はせん断ばねによる免震層のモデル化の妥当性検討を目的としたパラメトリックスタディーの結果をまとめたものである。図は、免震層のせん断弾性係数 G_i (kgf/cm^2)と免震層厚 t (cm)を、 $G_i/t = 1$ で一定となるように、 $G_i = 5 \sim 100 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で免震層を8種類変えたモデルに対して上記の地震荷重を与えた際のセグメントの軸ひずみ分布を、水平位置とともにまとめたものである。図のように $G_i \leq 30 \text{ kgf/cm}^2$ の6ケースの結果はほぼ一致しているが、 $G_i \geq 50 \text{ kgf/cm}^2$ の2ケースについては、軟質地盤側では他ケースとほぼ一致するものの、硬質地盤側では他ケースより大きなひずみが発生する結果となっている。上記の解析結果より、 $G_i \leq 30 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲においてはせん断ばねによる免震層のモデル化の妥当性が確認されており、免震層はテールボイドへの裏込め注入によって形成することから免震層厚 t は最大でも15cm程度と考えれば、現実の免震層厚の範囲では、免震層はせん断ばねとしてモデル化でき

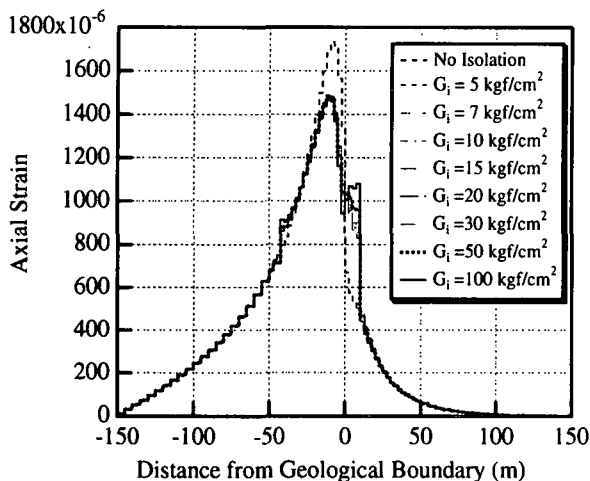


図-8 免震層のせん断ばねによるモデル化の妥当性検討

ることを示唆している。

図-9はリング継手のモデル化の有無が解析結果に与える影響の検討を目的としたパラメトリックスタディーの結果をまとめたものである。図中の Isolation, Equivalent Stiffness と Isolation, Segments and Ring Joints はそれぞれ、免震で、覆工に等価引張剛性に相当するヤング率を与えたケース（等価引張剛性のケース）とセグメント、リング継手を分離してモデル化したケースの覆工に発生する引張応力の解析結果である。一方、No Isolation, Equivalent Stiffness と No Isolation, Segments and Ring Joints はそれぞれ、非免震で、等価引張剛性としたケースとセグメント、継手を分離してモデル化したケースの解析結果である。非免震の場合、セグメントと継手を分離してモデル化したケースで覆工に発生する引張応力は、セグメント部では等価引張剛性のケースより数倍大きく、継手部ではその逆で何割か小さく、周辺地盤のせん断抵抗によるリング継手の変位吸収効率の低下⁵⁾を示唆している。一方免震の場合では、前述の2ケースによる発生引張応力はほぼ一致しており、またセグメントと継手を分離してモデル化したケースでも応力は連続的に分布していることがわかる。したがって、免震施工区間ではリング継手が有効に変位吸収するため、等価引張剛性によりシールドトンネルをモデル化が妥当であることが示された。

5. まとめ

本論文では、(1)免震シールドトンネルの地震時応答評価を目的とした軸対称モデルにおける地震荷重

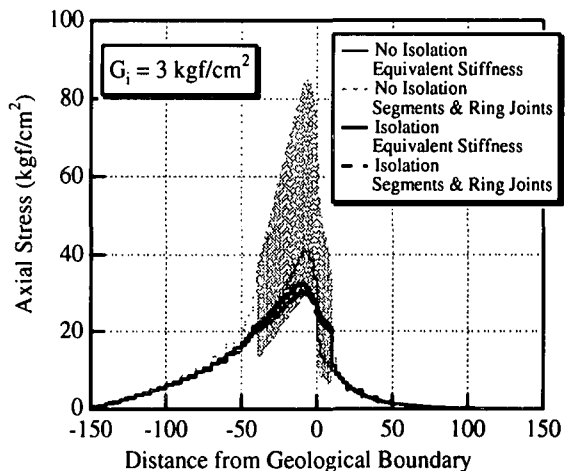


図-9 等価引張剛性と継手のモデル化による結果の比較

の設定法を提案し、その妥当性を検証した。また、2種類のパラメトリックスタディーより、(2)免震トンネルでは免震層はせん断ばねによるモデル化が妥当であること、(3)免震シールドトンネルの縦断方向の耐震性評価で等価引張剛性の適用が妥当であること、を示すとともに、(4)数値解析例を通じて本解析手法の優位性を示すことができた。

本解析手法は、トンネル（～免震層）～周辺地盤の相互作用を、簡便かつ厳密に再現することができ、ある程度複雑な地盤にも対応させることができるため、免震トンネルの照査用の解析として有用であると思われる。今後、プログラムを整備し、また軸直角方向の解析にも対応すべく、モデルを拡張させる予定である。

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社による建設省官民共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発」の一環として実施されたものである。

参考文献

- 1) 鈴木猛康：シールドトンネルの耐震性評価と免震化手法に関する研究，東京大学工学部学位論文，1990.
- 2) 鈴木猛康，田村重四郎：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.275-85，1995.
- 3) 鈴木猛康，金聲漢，植村靖美：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) 鈴木猛康：免震層と弾性ワッシャー併用によるシールドトンネルの地震時断面力低減効果，土木学会第51回年次学術講演会，第1部，pp.874-875，1996.
- 5) 鈴木猛康：シールドトンネル軸方向の耐震性評価に関する考察，土木学会論文集，No.441/I-18，pp.137-146，1992.1