

免震トンネルの縦断方向の地震時挙動評価に用いる詳細分割モデルの提案

山梨大学大学院 学生会員 ○穴倉 佳浩
山梨大学大学院 フェロー 鈴木 猛康

1. はじめに

都市の地下には上下水道、地下鉄や道路、共同溝等の線状地下構造物が構築されており、ライフラインの機能を担っている。これらの線状地下構造物は地震時に地盤の変位に追従して変形するため、耐震構造では地盤ひずみ集中部で断面力が大きくなる。そこで、地盤の変形に追従できる柔構造が開発されたが、構造物の周面が地盤と接している限り、どんな条件でも柔な継手で変位を吸収することを期待できるわけではない。これらに対して、構造物外周もしくは地盤中に免震層を導入し、構造物を地震の影響から絶縁する免震構造が開発されている。

トンネル縦断方向の免震構造の設計には、周辺地盤と免震層、トンネルと地盤との間の相互作用を考慮できる三次元 FEM 解析を用いることが望ましい。これに対して、三次元解析の煩雑さを解消するため、鈴木は軸対称 FEM モデルを用いた解析手法を提案した。設計実務では、簡易な梁ばねモデルが使われている。免震構造の適用が必要な地盤条件では局所的に大きな地盤ひずみが発生するため、梁要素を地盤ひずみの分布に対応した適切な分割をしなければならない。しかし、適切な梁の分割手法は示されていない。

そこで本研究では、局所的に地盤ひずみが集中するような地盤条件であっても、免震トンネルの地震時応答を評価することのできる梁ばねモデルを提案する。また、不整形表層地盤中の免震トンネルの地震時挙動を対象として提案モデルと軸対称 FEM モデル、従来の梁ばねモデルによる解析結果の比較を行い、妥当性の検証を行う。

2. 梁要素の離散化についての解析実験

図-1に示すように、せん断波速度400m/sの硬質地盤中の直径5.1mの共同溝用シールドトンネルに対して、局所的に発生する大きな地盤変位を想定し、20cmの相対変位を与えた。そして、地盤変位の正負の境界を跨ぐ梁要素の長さを変え、トンネルの変形を比較、適切な梁の離散化手法について検討した。その際、梁要素の長さがセグメントリング幅1m以上の場合は等価剛性梁、1m以下の場合はセグメント剛性梁とした。

図-2に解析結果を示す。モデル化における梁要素長を短くすればするほどトンネルの変形は滑らかなS字となり、変位分布の傾きが急になる傾向が見られた。しかし、梁要素の長さが0.4mのケースで梁の傾斜が緩くなった。

したがって、梁要素の長さがセグメントリング幅1m以下の0.8mでトンネルの変形が収束したと考えた。この結果より、梁要素をセグメント剛性梁として1セグメントリングごとに離散化し、梁要素同士を継手ばねで繋ぐ梁ばねモデルの分割手法が妥当だと考えた。

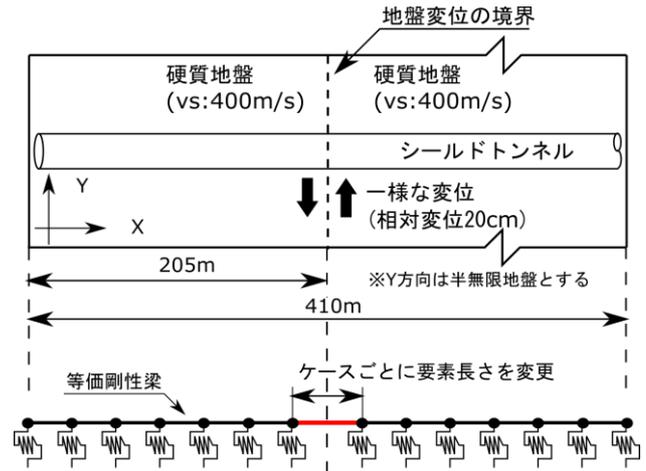


図-1 梁要素長さの検討に用いた地盤条件

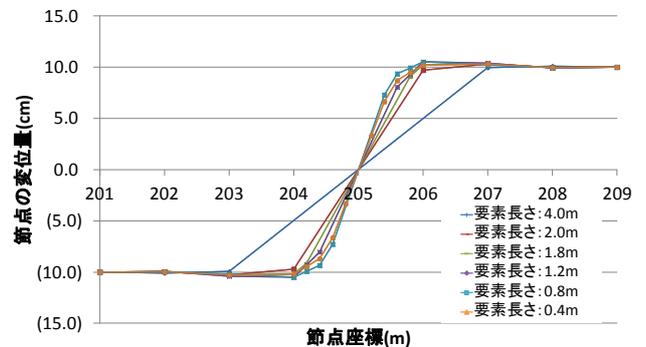


図-2 梁要素長さとトンネルの変形の関係

3. 詳細分割モデルの提案

現在、免震トンネルの解析に用いられる従来の梁ばねモデルは、地下構造物の免震設計法マニュアル(案)²⁾の中で示されている。この従来の梁ばねモデルに対して、梁要素を1セグメントリングごとに分割し、鈴木によって提案された土のせん断抵抗ばね⁴⁾を免震層のせん断抵抗ばねとして導入する改良を行った。これにより、不整形表層地盤中の免震トンネルに適用可能な梁ばねモデルとして「詳細分割モデル」を提案した。提案した詳細分割モデルの模式図を上記マニュアルに示された従来の梁ばねモデルと比較して図-3に示す。

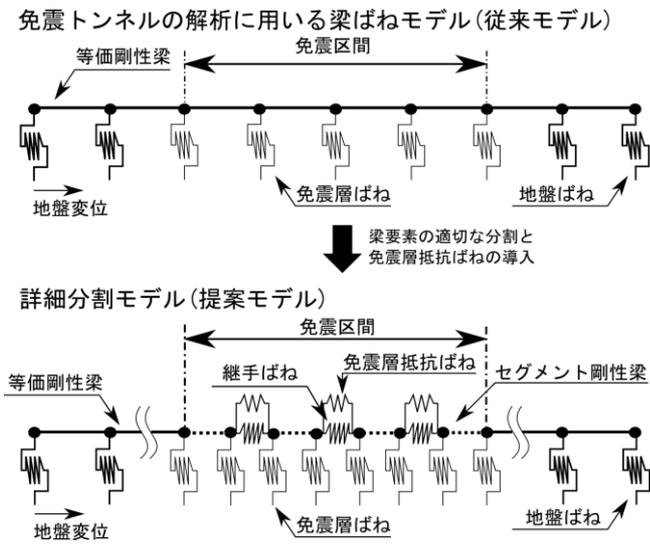


図-3 従来モデルと提案モデルの模式図の比較

4. 詳細分割モデルの検証

図-4に示すように、せん断波速度400m/sの硬質地盤と150m/sの軟質地盤で構成された基盤不整形表層地盤中の直径5.1mの共同溝用シールドトンネルを検討対象とした。免震層はせん断弾性係数0.32N/mm²とし、免震層厚10cm、免震区間長80mとした。詳細分割モデルに入力値として与える地盤変位は、道路橋樑標準示方書レベル1地震動(2種地盤)を用いた一次元地震応答解析から得られた地盤加速度をプログラムEASITに入力し算出した。詳細分割モデルに用いる免震層のせん断抵抗ばねは既往の研究を応用して得られた式(1)を用いる。

$$K_s = 0.030\pi G D L_{seg} \times 10^5 \dots \dots \dots (1)$$

- K_s : 免震層のせん断抵抗ばね定数(kN/m)
- D : シールドトンネルの直径(m)
- G : 免震層のせん断弾性係数(N/mm²)
- L_{seg} : セグメントリングの幅(m)

詳細分割モデルの妥当性は、軸対称FEMモデル(解析コード：EASIT)、従来の梁ばねモデルと比較を行い、検証を行った。

その結果、従来の梁ばねモデルの解析結果は、軸対称FEMモデルとほとんど一致したが、地盤条件急変部で1割ほど軸対称FEMモデルの結果を上回った。それに対して、詳細分割モデルは、梁ばねモデルであるにも関わらず、地盤条件急変部を含めた全ての区間で、軸対称FEMモデルの解析結果と再現することができた。よって、提案モデルである詳細分割モデルの妥当性が検証された。

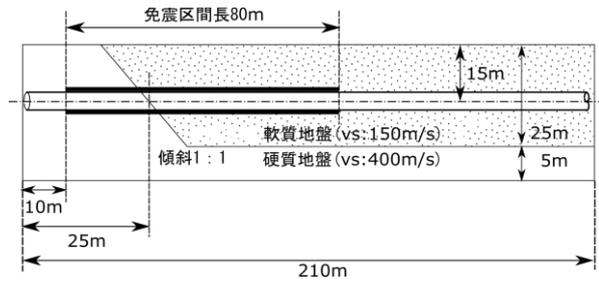


図-4 検証に用いた基盤不整形表層地盤

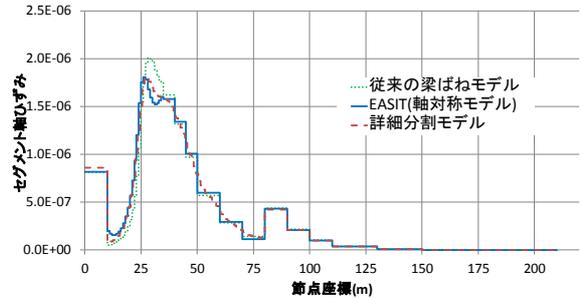


図-5 各モデルから得られたセグメント軸ひずみの比較

5. まとめ

本研究で得られた結論をまとめとして箇条書きで示す。

- (1) 免震区間のシールドトンネルを1リング毎で梁に置換え、梁同士を継手ばねと免震層のせん断抵抗ばねの並列ばねで繋ぎ、さらに梁両端の節点に免震層ばねを配置し、ばねの端部に地震地盤変位を外力として与える詳細分割モデルを、免震区間に適用する梁ばねモデルとして提案した。
- (2) 基盤不整形表層地盤中の免震シールドトンネルの地震時挙動を対象として、詳細分割モデル、軸対称FEMモデル、従来の梁ばねモデルによる解析結果を比較した結果、本提案の詳細分割モデルの解析結果は従来の梁ばねモデルよりもさらに軸対称FEMモデルの解析結果に近似しており、詳細分割モデルの妥当性を示す事ができた。

参考文献

- 1) 川島一彦：地下構造物の耐震設計，鹿島出版会，pp.94-110，1994.6
- 2) 建設省土木研究所：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3)-地下構造物の免震設計法マニュアル(案)-，1998.9
- 3) 土木学会 地震工学委員会，減震・免震・制震小委員会：減震・免震・制震構造設計法ガイドライン(案)，土木学会，2002.1
- 4) 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