

矩形トンネル免震対策としての免震壁と免震杭に関する3次元基礎的研究

馬 其万¹・土門 剛²・西村和夫³

¹学生会員 首都大学東京大学院 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: maikiman1980@yahoo.co.jp

²正会員 首都大学東京大学院 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: dom@tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京大学院 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: knishi@tmu.ac.jp

開削トンネル、特に矩形トンネルはその形状から地震時には大きな影響を受け易い。その地震時の影響を和らげる方法の一つとしてトンネルと地盤との境界に低剛性の裏込めを注入する工法がある。矩形トンネルの免震対策工に関して、免震材の配置はトンネルの全周面に免震材を巻く、側面に免震壁として免震材を注入する方法でトンネルへの作用力を低減する研究が多くあるが、矩形トンネルの側面に沿って深く狭い免震壁を配する施工性に課題があると考えている。

本論文では、免震壁と新しく提案する施工性に優れている免震杭工法について矩形トンネル縦方向の上・下床版の挙動に着目して免震効果の比較検討を行った。

Key Words: rectangular tunnel, seismically isolation structure, earthquake response analysis, strong earthquake

1. はじめに

地下構造物は、一般には地震時に生じる地盤変位に追従して挙動する特徴がある。この場合、必ずしも、構造物の断面剛性を高めることが耐震安全性上有効な手段とは限らない場合がある。地下構造物の免震技術としては、地震時に地盤変形を地下構造物に伝えにくくする方法がある。この方法が地下構造物の周辺に柔らかい材料で免震層を配置するものである。大地震時に生じる地盤変位を免震層に吸収させて過大な変位を地下構造物に生じさせることなく、地震時の断面力を低減させる方法である。特に、構造物の周辺地盤は均一ではなく、すなわち、弱層或いは断層があるところで地震時の地盤変形は増大するため構造物に大きな応力が生じる。矩形トンネルについて、その増分応力を低減するため、側面免震対策工法として矩形トンネルの側面に免震壁を設置する工法がある。

矩形トンネルの側面免震壁の手法については二次元、三次元の多くの研究があるが、トンネルの側面に沿って深く、幅の狭いスリット状に免震材を配する必要があることから、施工性に大きな課題があると考えている。もともと免震壁の施工によって完全な免震効果を期待するものではなく、ある意味減震効果を期待するものであることから、個々の構造物によっては免

震効果がやや減少しても施工性が優先する場合もあり得る。本研究では、施工性を優先した免震対策の選択肢を増やすことを目的に免震杭の基礎的研究を行った。解析では弱層を通過する矩形トンネル側方に免震杭を設置し、矩形トンネル軸方向の上・下床版の免震効果を三次元的に検討した。

2. 解析手法

解析プログラムにはTDAPⅢを使用し、水平地震動のみをX軸から入力し、地盤の非線形を等価線形化法で考慮する時刻歴応答解析手法による動的FEM解析を行う。地盤の非線形の考慮について、応力震度法により、地震時における地盤の収束剛性の算出は、一次元地盤応答解析(解析コード: SHAKE)により行い、得られた収束せん断弾性係数を線形材料として扱う。

3. 地盤と免震材及びトンネルのモデル化

本解析では、120*150*19mの地盤の中央に弱層120*8*13mを設置した。地盤の物性値は表-1に示した。境界条件は側方をローラー境界及び底面を固定境界とし

た。また、地盤のひずみ依存特性は建設省土木研究所の沖積砂質土・洪積砂質土の依存曲線のデータを参考に設定する。

免震材は、低剛性材料を弾性範囲で使用するもの、非線形性を示す低耐力を上限とする材料、滑り挙動を利用したものなど、各種材料が開発され実現性があると考えられる¹⁾。本解析では、弱層を通過する矩形トンネル側方に弾性体で免震壁もしくは免震杭を設置した。免震壁の寸法は幅20m、深さ13m、厚さ10cmとする。免震杭は長さ13m、径0.5mと0.7mとした。免震材の物性値は表-2に示す。

対象矩形トンネルは鉄道トンネル一般部程度の大きさ9.5×120×5mの1層2径間の矩形トンネルとする。トンネルの物性値は表-3に示す。

地盤と免震材とトンネルはソリッド要素の六面体を用いた。

表-1 地盤の物性値

地盤	層厚 [m]	重量密度 [kN/m ³]	せん断剛性 [kN/m ²]	ポアソン比	減衰定数
層1	19	18	59510	0.495	0.1
弱層	13	16	36730	0.495	0.1
基盤	—	20	326530	0.300	—

表-2 免震材の物性値

配置	側面免震壁or免震杭
材料特性	等方均質弾性体
重量密度	10 (kN/m ³)
ポアソン比	0.3
せん断弾性係数	595 kN/m ²
厚さ	10 cm
減衰定数	0.03

表-3 トンネルの物性値

矩形トンネル				
壁厚 [m]	重量密度 [kN/m ³]	ヤング率 [kN/m ²]	ポアソン比	減衰定数
0.5	25	2.5×10 ⁷	0.2	0.05

4. 解析概要及び解析ケース

弱層を通過する矩形トンネルは地震時の地盤変形が場所より異なるため構造物に生じる大きい応力を低減するように、弱層がある場所のトンネルの両側に免震壁も

しくは免震杭を埋め込むモデルとする。解析モデル及びXZ平面図とXY断面図をそれぞれ図-1, 2, 3に示す。

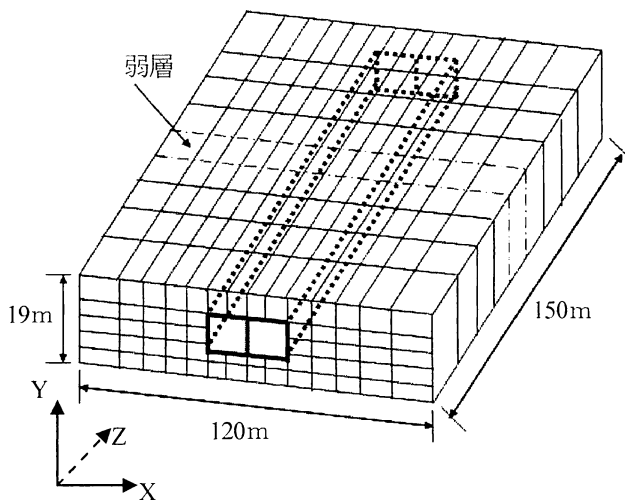


図-1 地盤モデル

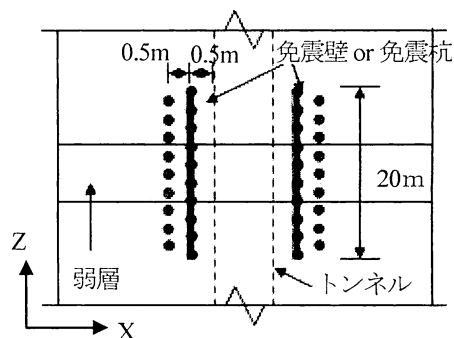


図-2 地盤 XZ 平面図

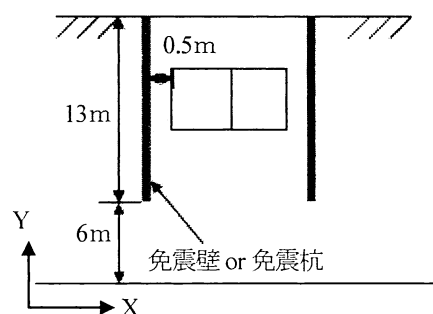


図-3 地盤 XY 断面図

入力地震動はレベル2地震動を想定し、鉄道の設計基準に記載されている内陸型地震の工学的基盤面波形を用いる。レベル2地震動は図-4に示す。

解析ケースは、

Case1: 地盤のみ。

Case2: 免震層なし。

Case3: 免震杭径 0.5m, 間隔 2m。

Case4: 免震杭径 0.5m, 間隔 1m。

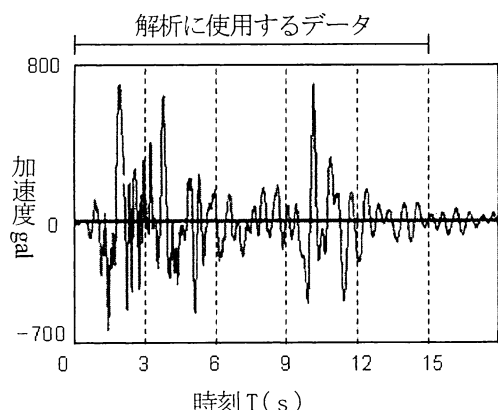


図-4 地震データ

Case5:免震杭径 0.5m, 間隔 1m, 2列千鳥配置.
Case6:免震杭径 0.7m, 間隔 1m, 2列千鳥配置.
Case7:免震壁, 厚 0.1m.
Case8:免震壁, 厚 0.35m.
合計: 8 ケース.

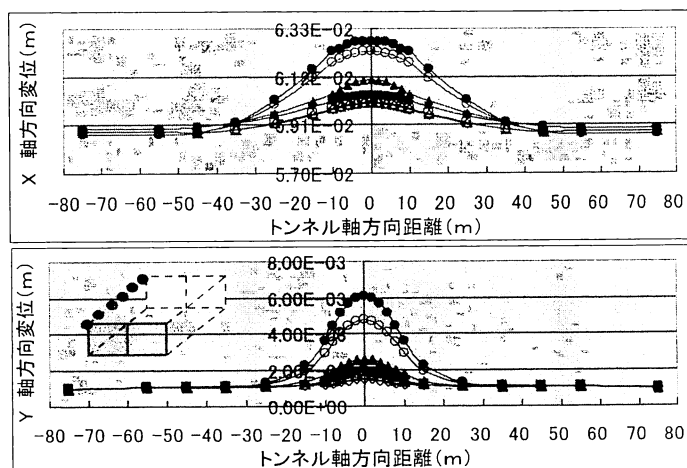
5. 解析結果および考察

トンネル上床版トンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向変位を図-5 に示す. トンネル上床版トンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向応力とひずみについてそれぞれ図-6, 7 に示す. トンネル下床版トンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向応力とひずみについてそれぞれ図-8, 9 に示す.

- ① トンネル上床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向変位 X (図-5 上段) と変位 Y (図-5 下段) は, 弱層の中央に最大値が生ずる. 1 列の免震杭 (case3, 4) では杭の影響が見えないが, 2 列の免震杭 (case5, 6) では杭の影響が生じた. 径 0.7m 2 列の免震杭 (case5) は免震杭工法としての最大変位であるが, 免震壁工法の影響の方がもっと大きいことがわかる.
- ② トンネル上床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向応力 σ_x (図-6 上段) は, 弱層の中央に最大値が生ずる. 1 列の免震杭のケースでは免震効果が小さいが, 径 0.7m 2 列の免震杭 (case6) の最大免震効果は約 20% である. なお, 免震壁工法の最大免震効果は約 30% である.
- ③ トンネル上床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向応力 σ_y (図-6 中段) は, 免震杭の場合, 免震杭設置区間では免震なしよ

り応力が上昇しており, case5 の場合最大約 17% が増加したが杭設置区間外は免震壁の場合より減少し, 結果として免震壁の場合より応力分布が平滑化した.

- ④ トンネル上床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大せん断応力 τ_{max} (図-6 下段) では, 免震杭 (case6) の場合には 15% の免震効果が生じた. なお, 免震壁 (case7) の場合に 40% の免震効果である.
- ⑤ 免震杭工法のトンネル上床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向応力について見ると杭 1 列の case3, case4 より杭 2 列の case5, case6 は応力の免震効果が大きいことが分かる. case5 と case6 比較すると杭の径 (case6) が大きい方の免震効果が大きい.
- ⑥ トンネル上床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向ひずみ γ_x , γ_y また最大せん断ひずみ γ_{max} の和らげる傾向は応力と同じく, 今回の解析条件でトンネル上床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向応力及びひずみについて case6 (杭径 0.7m, 間隔 1m, 2 列) の平滑化は最大の効果であると思われる.



- ◇ Case2: 免震なし
- Case3: 杭径 0.5m, 間隔 2m, 1 列
- △ Case4: 杭径 0.5m, 間隔 1m, 1 列
- Case5: 杭径 0.5m, 間隔 1m, 2 列
- ▲ Case6: 杭径 0.7m, 間隔 1m, 2 列
- Case7: 免震壁厚 0.1m
- Case8: 免震壁厚 0.35m

図-5 トンネル上床版左隅角軸方向の最大変位

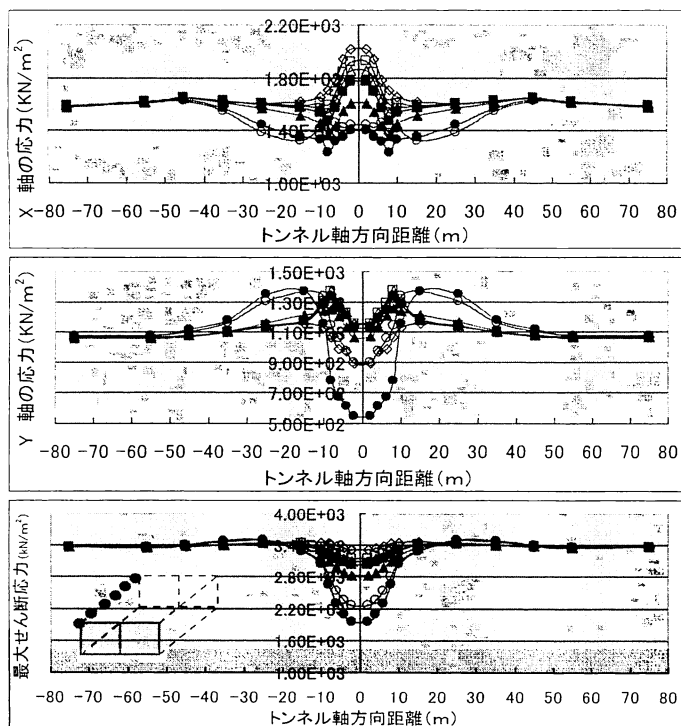


図-6 トンネル上床版左隅角軸方向の最大応力

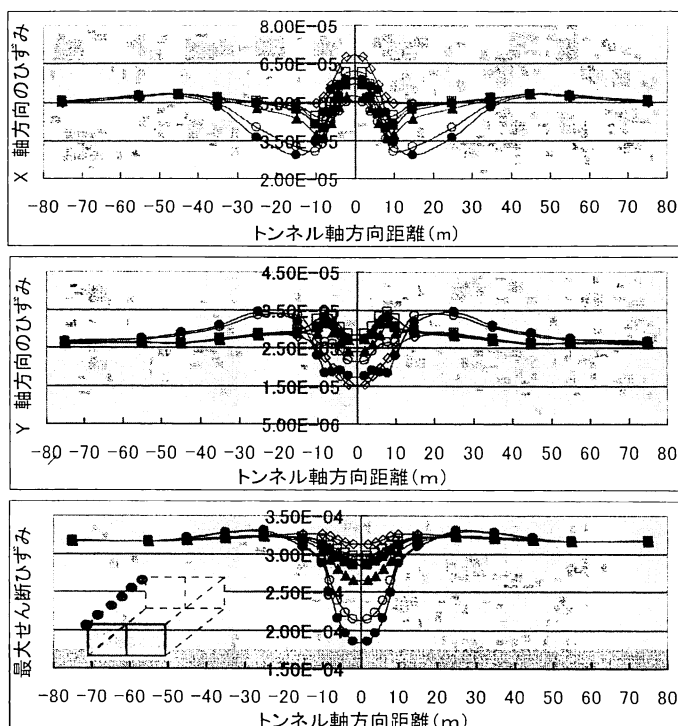


図-7 トンネル上床版左隅角軸方向の最大ひずみ

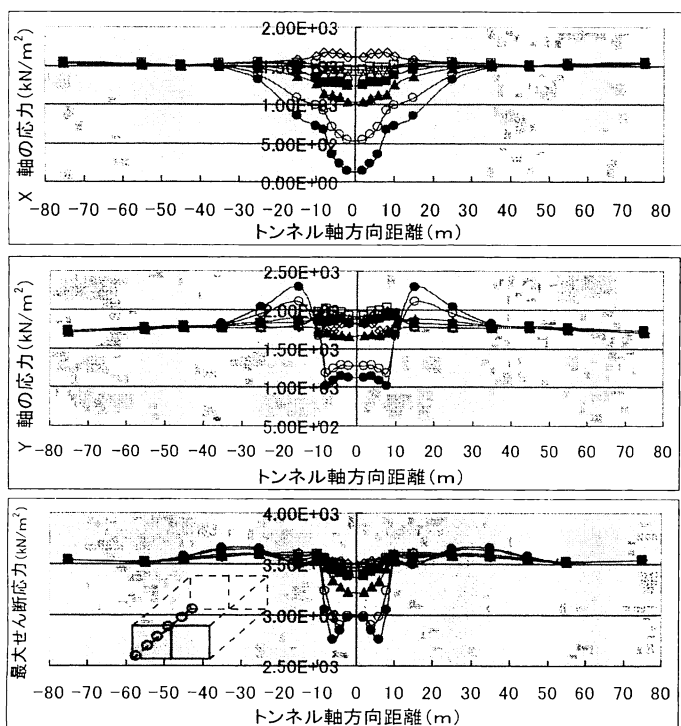


図-8 トンネル下床版左隅角軸方向の最大応力

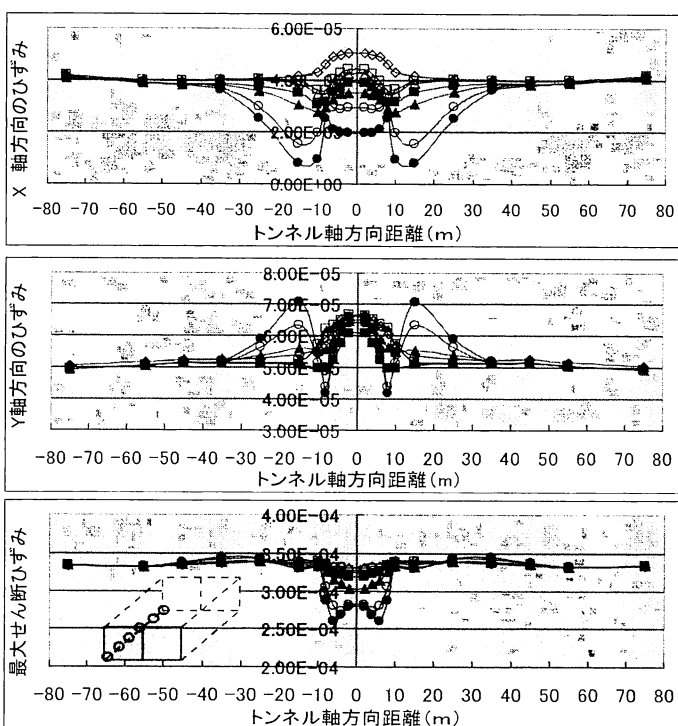


図-9 トンネル下床版左隅角軸方向の最大ひずみ

- ⑦ 本解析でトンネル下床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向応力は弱層場所に地震時増分の応力が上床版より小さい。なお、トンネル上床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向応力とひずみの変化傾向と似てゐるが、各ケースを比べて下床版隅角のトンネル軸方向に沿う測線の最大軸方向応力及びひずみについて case5 (杭径 0.5m, 間隔 1m, 2 列) の平滑化は最大の効果であると考えられる。

6. まとめ

今回の条件で得られた免震杭と免震壁の設置による矩形トンネルの応力についてまとめると以下の通りである。

(1) 免震杭の場合には杭の間隔は小さいほど、杭の径は大きいほど免震効果が大きくなる。また、1 列数より 2 列千鳥配置の方は免震効果が大きくなる。トンネル軸方向に沿う測線の X 軸応力と最大せん断力の免震効果が現れている。y 軸応力は免震なしより応力が増加するところがあるが、元々応力値の低いところであり、全体としては免震なし、免震壁の場合より応力分布が平滑化した。

(2) 免震壁上法の場合に免震材の厚さが大きくほど免震効果が大きくなる。トンネル軸方向に沿う測線の X 軸応力と最大せん断応力も免震効果が大きい。Y 軸応力については上記に述べたように免震層設置位置の両端に応力増加区間が生じ、結果として大きなコントラストを生む。

7. 今後の課題

今回の解析で弱層を通過する矩形トンネルを対象とする、施工性に優れている免震杭工法について、地

震時増分応力を和らげる効果があることが分かった。本解析に採用された弱層と免震杭の径や間隔はまだ解析の例に過ぎない。

今後の課題として

- (1) 免震杭工法の、断層を通過する矩形トンネルへ、また立体交差建設される矩形トンネルへの適用性。
- (2) 免震杭の杭間隔について、実施工における施工性の観点から、杭径に応じた適切な杭間隔の検討を継続して行う予定である。

参考文献

- 1) 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，土木研究所資料第 3535 号，pp. 9-121，平成 10 年 1 月。
- 2) 建設省土木研究所：大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン (案)，土木研究所資料第 3119 号，平成 4 年 3 月。
- 3) 建設省土木研究所：3 次元 FEM モデルを用いた開削トンネル縦断方向に対する免震材配置の検討，土木研究所資料第 3535 号，pp. 353-370，平成 10 年 1 月。
- 4) 河西寛，佐野祐一，春海正和：既設地下構造物の横断面内の免震対策，第二回免震・制震コロキウム講演論文集，2000 年 11 月。
- 5) 土木学会地震工学委員会：「地下構造物の合理的な地震対策研究」小委員会報告/シンポジウム発表論文集，pp. 333-348，2006 年 6 月。
- 6) 小林雅彦，大竹省吾，井上陽介：開削トンネルの縦断方向の地震時挙動に関する一考察，トンネル工学報告集，第 19 巻，pp. 263-268，2009 年 11 月。

A three-dimensional basic study on the seismic isolation wall and piles as seismic isolation technique of rectangular tunnel

Qiwang Ma, Tsuyoshi Domon, Nishimura Kazuo

As the seismic isolation technique of rectangular tunnel using seismic isolation materials, there are a lot of methods. For example, One of them is that of surrounding the tunnel with seismic isolation materials at all peripheral surface of the tunnel or injecting seismic isolation materials in the side of tunnel. Such a technique was studied in the laboratory or analytic studies. But the problem with this method is to build up the seismic isolation deep walls along the two side of rectangular tunnel at the time of construction.

The new method on group of piles of isolation materials is introduced in this study that is an easy method in the time of construction. This method is made many seismic isolation piles in the side of tunnel. A comparative study on seismic isolation effect of tunnel between seismic isolation wall method and the group of piles method was carried out.