

トンネルにおける免震対策工法の数値解析

波多野 陽香¹・土門 剛²・西村 和夫²

¹学会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: hatano-haruka@ed.tmu.ac.jp

²正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

開削トンネルに対する免震対策工法としては、免震壁について多く研究されている。しかし、免震材をトンネルの側面に沿って深く、幅の狭いスリット状に、しかも連続的に配置する必要があることから、免震壁には施工性に課題があることがわかっている。そこで施工性を優先した免震対策工法の選択肢を増やす目的として免震杭が提案され、施工事例もあるが計測もされておらず、十分な検証がなされていない。

本研究では、免震杭の免震効果が、どのような状態なら発揮されるかを把握することを目的としている。今回は、地盤条件の急変部を通過する矩形トンネル側方に免震杭を設置し、数値解析による免震効果の検討を行った。

Key Words : cut and cover tunnel, seismically isolation structure, strong earthquake, earthquake response analysis ,

1. はじめに

地下構造物は、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。これは、慣性力よりも地盤変位によって強制的に構造物を変形させようとする力の影響が卓越しているからである。この場合、従来の耐震設計思想で構造物の断面剛性を高めると、地震時の増分断面力が大きくなってしまうなど、耐震安全性上有効な手段とは言えない場合もある。そこで、地震時に地盤変形を地下構造物に伝えにくくする免震が有効であると考えられる。これは、地下構造物の周辺にやわらかい材料で免震層を配置するものである。地下構造物と地盤の間の免震層が大地震時に生じる地盤変位を吸収し、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。

免震対策工法としては、矩形トンネルの側面免震壁については多く研究されている¹⁾²⁾。しかし免震材をトンネルの側面に沿って連続して深く、幅の狭いスリット状に配置する必要があることから、免震壁には施工性に課題があることがわかっている。そもそも免震は減震効果を期待するものであり、完全な免震効果を期待するものではない。個々の既設構造物によっては、免震効果がやや減少しても施工性を優先する場合もあり得る。そこで施工性を優先した免震対策工法の選択肢を増やす目的として免震杭を対象として選んだ。

本研究では、免震対策工法の適用が効果的と考えられる代表的な箇所として、地盤条件が急変する場所をとりあげた。地盤条件の急変部では急変部を境としてその両側の表層地盤の卓越振動が異なるため、急変部付近で地盤ひずみが集中する。トンネル縦断方向に対する免震対策工法の適用は、このような地盤条件の急変部に集中する地盤ひずみがトンネルへ伝達しないよう遮断し、トンネルひずみの分散を図ることを目的として採用されるものである。

本研究の最終目的としては、免震対策工法の効果を模型実験により明らかにすることである。本論文ではその第一段階として模型実験計画のため、数値解析による模型の妥当性の検証を兼ねて、免震対策工法の数値解析による効果を事前に確認することを目的とする。解析では地盤条件の急変部を通過する矩形トンネル側方に免震杭を設置し、免震効果の検討を行った。

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軸方向に入力し、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。

(1) 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。硬質地盤から軟弱地盤の急変部に開削トンネルを新設するケースを考える。図-2に示すように、矩形トンネルの地盤の急変部付近に免震材を入れる。この免震材は杭構造を想定し、矩形トンネル手前側に11本、その外側に10本の2列を両側に配置する。

これを表-1に示した相似則に基づき模型寸法および諸物性を決定した。今回の解析モデルでは模型実験の予測解析を目的とし、実験の値を用いる。なお、免震杭はせん断剛性を地盤の1/100とし、寸法は半径4mm、長さ198mm、間隔12mmとする。また免震材の配置(拡大図)を図-3に示す。

模型実験ではトンネルを高密度ポリエチレン、地盤・免震材は2種類のシリコンゴムを用いることから、相似側によりそれぞれ実物、解析の物性値を表-2および表-3のようにした。

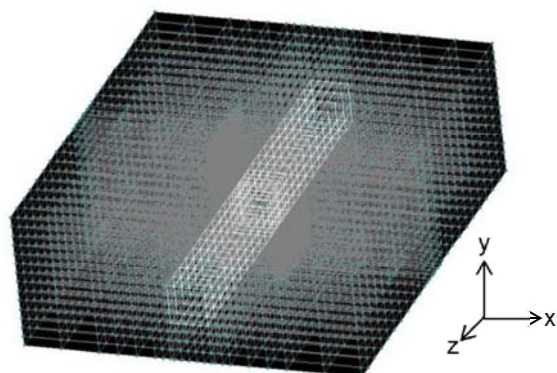


図-1 解析モデル

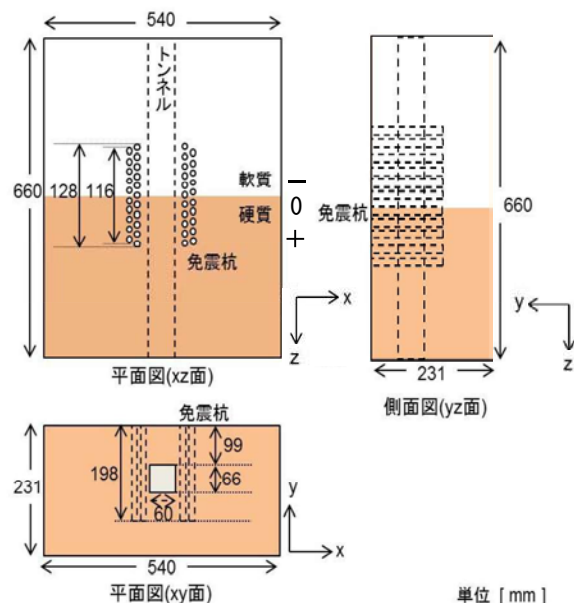


図-2 解析モデル寸法図

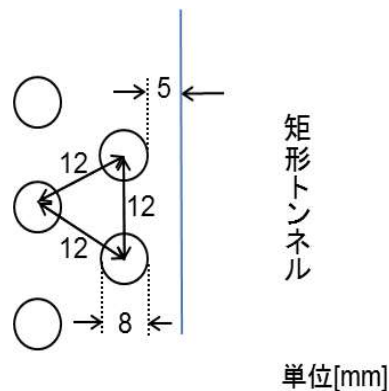


図-3 免震杭(平面図)

表-1 相似側と相似比

物理量 物性値	基礎相似比			誘導相似比		
	長さ	時間	密度	ひずみ	弾性係数	加速度
相似則	$\lambda = \frac{l_m}{l_p}$	$\tau = \frac{t_m}{t_p}$	$\eta = \frac{\rho_m}{\rho_p}$	$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p}$	$\frac{E_m}{E_p} = \frac{\eta \lambda^2}{\tau^2}$	$\frac{\alpha_m}{\alpha_p} = \frac{\lambda}{\tau^2}$
相似比	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{1.54}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{106}$	$\frac{1}{1}$

表-2 トンネルの物性値

		覆工厚 [mm]	ヤング率 [MN/m ²]	ポアソン比	重量密度 [kN/m ³]	減衰比
トンネル	実物モデル	600	3000	0.30	25.0	0.05
	解析モデル	4	700	0.34	9.50	0.05

表-3 地盤・免震材の物性値

		層厚 [m]	せん断剛性 [kN/m ²]	ポアソン比	重量密度 [kN/m ³]	減衰比
地盤 (硬質)	実物モデル	23.1	63000	0.40	16.0	0.1
	解析モデル	0.231	620	0.39	15.0	0.05
地盤 (軟質)	実物モデル	23.1	6300	0.40	16.0	0.1
	解析モデル	0.231	62	0.39	15.0	0.05
免震材	実物モデル	-	23	0.34	13.2	0.05
	解析モデル	-	0.62	0.08	13.2	0.08

表-4 境界条件

	δx	δy	δz	Rx	Ry	Rz
XY 前後面	○	○	×	×	×	×
ZY 側面	○	○	○	×	×	×
底面	×	×	×	×	×	×
その他	○	○	○	×	×	×
トンネル	○	○	○	×	×	○

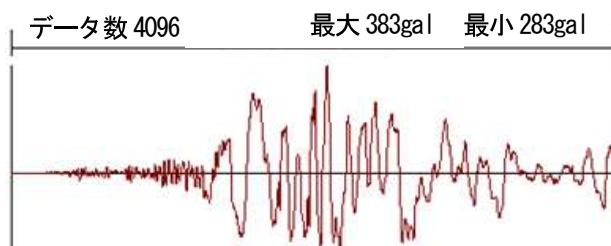


図-4 入力地震動

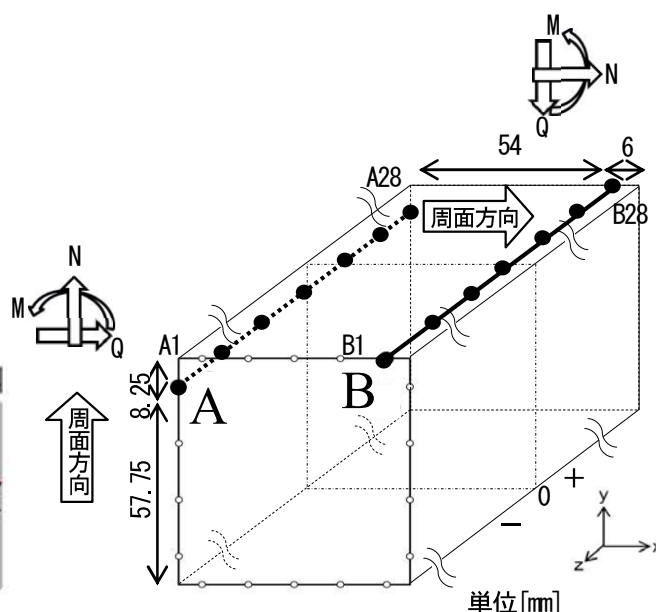


図-5 矩形トンネルにおける評価軸

(2) 境界条件

今後予定している振動台における模型実験を模擬しているため、側方はローラー境界、底面を固定境界とした。境界条件を表-4に示す。拘束有りとしをそれぞれ○と×で示した。 δ は変位拘束、Rは回転拘束を示す。

(3) 入力地震動

入力地震動は新神戸変電所の地表で得られた兵庫県南部地震の観測記録を工学的基盤に引き戻した推定波形(図-4)を用いる。入力波は基盤からx軸方向に相似側に即して入力した。

3. 解析結果および考察

矩形トンネルのz軸(トンネル縦断方向)に沿ったA1からA28までの28点からなるA軸、B1からB28までの28点からなるB軸を図-5に示す。この軸上の加震時のトンネ

ル周面方向断面力により免震杭の免震効果を確認する。

この2軸は最も免震効果が表れた軸である。断面力は軸力(N)、曲げモーメント(M)、せん断力(Q)とし、いずれも動的解析で生じた最大時の値とする。なお、図-2の平面図において、z軸については地盤急変部をゼロとし、z方向負の向き、すなわち軟質地盤側をマイナスとし、逆にz方向正の向き、すなわち硬質地盤側をプラスとする。

免震杭のない場合とある場合(以下、免震無、免震有とする)について、トンネルの加震時最大断面力の分布を図-6～図-11に示す。

なお、模型実験の数値解析ではモデルの外周境界の影響が大きく生じているが、モデルの外寸法は用いる予定の振動台の大きさで制限されている。したがって、ここでは外周境界の影響があることを前提として、硬軟境界部付近での免震杭の有無の相対値で評価する。

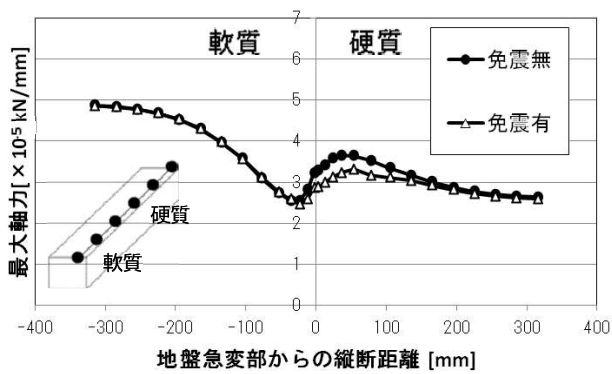


図-6 最大軸力(A軸)

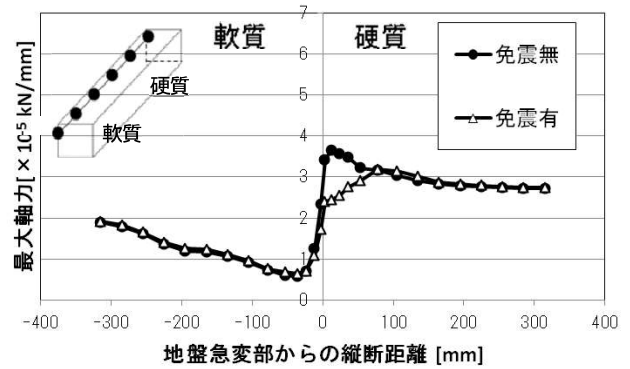


図-7 最大軸力(B軸)

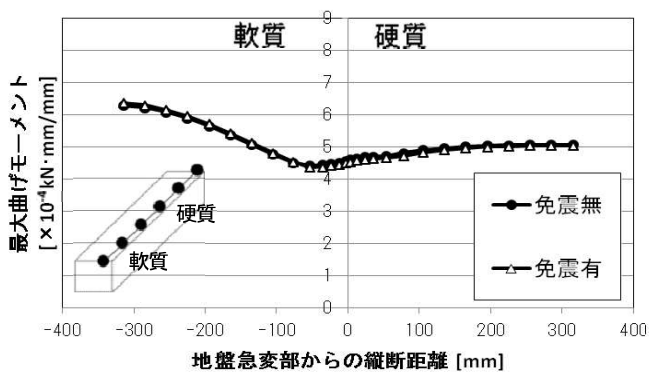


図-8 最大曲げモーメント(A軸)

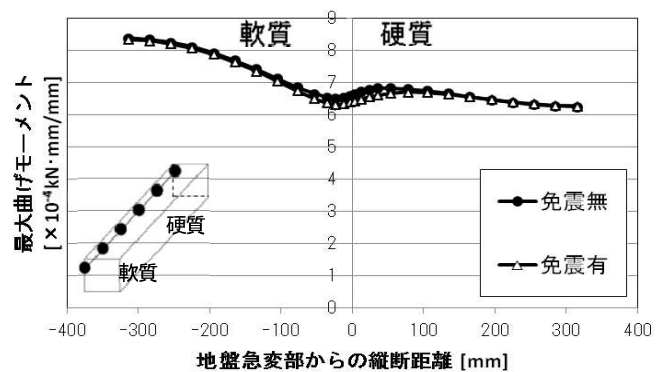


図-9 最大曲げモーメント(B軸)

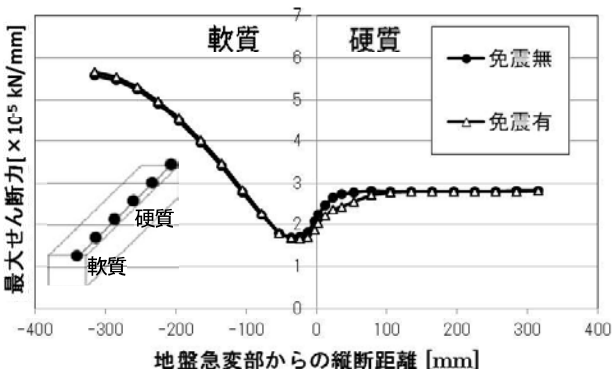


図-10 最大せん断力(A軸)

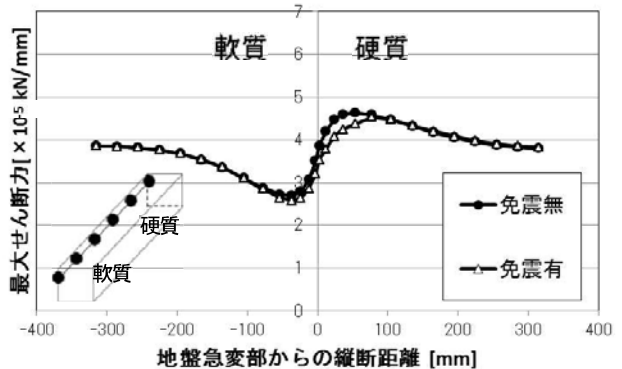


図-11 最大せん断力(B軸)

a) 軸力

A軸、B軸上で、それぞれの最大時の軸力(以下、最大軸力)を示す。

A軸の最大軸力を図-6に、B軸の最大軸力を図-7に示す。A軸では免震無に比べ、免震有の最大軸力が硬質地盤で低減している。また、B軸では免震無に比べ、免震有の最大軸力が地盤条件急変部で低減している。最大免震効果は約30%である。

b) 最大曲げモーメント

A軸、B軸上で、それぞれの最大時の曲げモーメント(以下、最大曲げモーメント)を示す。

A軸の最大曲げモーメントを図-8に、B軸の最大曲げモーメント図-9に示す。A軸では、免震杭の有無による差はほとんどない。B軸では免震無に比べ、免震有の最大曲げモーメントが地盤の急変部で少し低減している。最大免震効果は約5%である。

c) 最大せん断力

A軸、B軸上で、それぞれの最大時のせん断力(以下、最大せん断力)を示す。

A軸の最大せん断力を図-10に、B軸の最大せん断力を図-11に示す。A軸、B軸ともに、免震無に比べ、免震有の最大軸力が地盤条件急変部で低減している。最大免震効果は約10%である。

今回設定した条件では、免震杭による軸力、せん断力の低減が地盤条件急変部でみられた。これは、免震材が壁状の連続配置でなくとも免震杭が地盤変形を吸収した結果、トンネルに伝達される地盤変形が小さくなったためだと考えられる。また、壁状配置でみられる免震区間の両端での断面力の急増は緩和されている。

一方、曲げモーメントは免震杭の有無による差はあまりみられなかった。これは、免震杭が曲げ変形を吸収していないためだと考えられる。免震無の軸力、せん断力は、地盤条件急変部で断面力の増加が見られるのに対し、免震無の曲げモーメントは地盤条件急変部で大きな変化を生じていない。曲げモーメントは軟質地盤、硬質地盤でほぼ一様である。このことから、免震杭を設置しても一様な断面力には免震効果が十分に発揮されないと考えられる。

4. まとめ

本研究では、施工性を優先した免震対策工法の選択肢を増やす目的として提案された免震杭に関して数値解析

を行い、免震効果を検証した。

地盤条件が軟質から硬質に急変する箇所において、免震杭による軸力、せん断力の低減がみられ、免震効果が確認できた。曲げモーメントは免震杭による免震効果はみられなかった。よって、今回の解析からは、顕著な免震効果を確認することはできなかった。

5. 今後の課題

今回の解析では、地震時に断面力の増加する箇所における免震対策工法として、免震杭は有効であるとはいえない。本研究は模型実験を行うための事前解析であるが、今回の結果からは模型の妥当性が確認できなかった。

したがって、今回想定した杭径、間隔、材質などの条件を見直し、改めて解析を実施する予定である。

参考文献

- 1) 馬其万，土門剛，西村和夫：十字交差建設の新設トンネル免震対策の既設トンネルへの影響に関する三次元解析的研究，トンネル工学報告集，第22巻，pp.397-404，2012。
- 2) 馬其万，土門剛，西村和夫：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，トンネル工学報告集，第21巻，pp.441-446，2011。
- 3) 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。

(2013.9.2 受付)

NUMERICAL ANALYSIS ON EARTH QUAKE-ABSORBING MEASURE CONSTRUCTION METHOD IN TUNNEL

Haruka HATANO, Tsuyoshi DOMON and Kazuo NISHIMURA

Seismic isolation methods of cut and cover tunnel are investigated mainly on soft seismic isolation layer as a wall. There're some problems on the seismic isolation layer method in construction, because it's need to place as deep and slit-like narrow wall continuously alongside the side wall of underground structure. There's a seismic isolation piles method as an alternative. This study is aimed at understanding the isolation effect of seismic isolation piles method. This paper describes the results of dynamic analysis on the model in which one rectangular tunnel is set through a section where ground conditions vary suddenly and double rows of seismic isolation piles are placed just along the side walls of the rectangular tunnel.

