

既設トンネルにおける免震対策工法の数値解析

澤田 洋介¹・土門 剛²・西村 和夫²

¹学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:yosuke-sawada@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 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

既設の開削トンネルに対する免震対策工法には、免震壁がある。この免震壁について、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、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ている。免震杭による免震工法は施工事例はあるが計測がされておらず、その結果の十分な検証がなされていない。

本研究では、免震壁や免震杭といった配置形状の違いが免震効果にどのような差異をもたらすのか、また免震杭でも免震壁と同等の免震効果を発揮できる配置条件とは何かを見出す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材を設置し、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

トンネルを含めた地下構造物は、地震時に生じる地盤変位に追随して挙動する特徴がある。これは、地盤変位によって強制的に構造物を変形させる力、すなわち、強制変位の影響がトンネルに作用する慣性力よりも卓越しているからである。この場合、従来の耐震設計思想にあるように構造物の断面剛性などを高めると、地震時の増分断面力が大きくなる可能性もあり、一概に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、現在では地震時に地盤変形をトンネルに伝えにくくする免震が有効であると考えられている。これは、トンネルの周辺に軟質材料で免震材を配置するものである。トンネルと地盤の間の免震材が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。

トンネルに対する免震対策工法は、トンネルの側面に免震壁を配置するという免震工法があり、これについては多くの研究がなされている¹⁾²⁾³⁾。しかしながら、免震壁は免震材をトンネルの側面に沿って連続して地中深く、かつ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、免震工法は地震による発生断面力の低減を期待するものであり、完全な耐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と考えられる。そこで施工性を優先した免震対策工法として免震杭が提案されているが免震杭の研究は限られており、その適用性については明確ではない。また、免震壁、免震杭ともにトンネル縦断方向での地盤条件の変化等を考慮した三次元解析については研究事例が少ない。

本研究では、免震対策工法の効果が顕著に現れると考えられる地盤条件として、地盤の硬軟が急変する場所をとりあげ、三次元動的解析を実施した。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数が異なるため、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は、このような地盤急変部に集中する地盤のせん断ひずみがトンネルへ伝達しないようにすることを目的として採用される。

本研究の最終目的は、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。そのため、今までの研究では小型振動台模型実験用のモデルの妥当性を検証するため、数値解析で縮小模型の解析を行ってきたが、実験の振動台の大きさに合わせたモデル規模だったため、境界の影響が大きく作用してしまった。本論文ではその第二段階として、数値解析による模型実験の妥当性の検証を兼ねて、実規模の大きさの解析モデルを用いて免震対策工法の効果を数値解析によって事前に確認すること

を目的とする。解析では地盤急変部を通過する矩形トンネル側方に免震壁と免震杭を配置した場合での発生断面力を比較、検討する。

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、時刻歴応答解析手法による動的FEM解析を行う。

なお、本報告では実験で用いるモデル材料が線形材料となることも考慮し、線形解析を行う。

(1) 解析モデル

対象とするトンネルは既設の開削トンネルであり、硬質地盤から軟弱地盤の急変部に矩形トンネルが存在するケースを考える。解析では硬質、軟質地盤急変部を縦断する既設矩形トンネル周辺に免震材を挿入する場合を想定した。免震材は壁構造(図-1)と杭構造(図-2)の2つを想定する。壁構造、杭構造ともに地盤急変部の前後40mに配置している。免震杭については千鳥配置で挿入する。なお、免震材はメッシュの数の制約とメッシュの切り方に依存して不規則な長さとなっているが、着目すべき地盤急変部では杭のような正四角柱となっている。

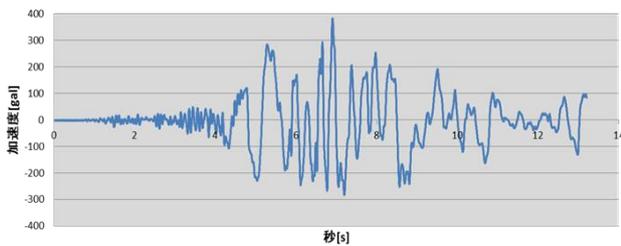


図-3 入力地震動

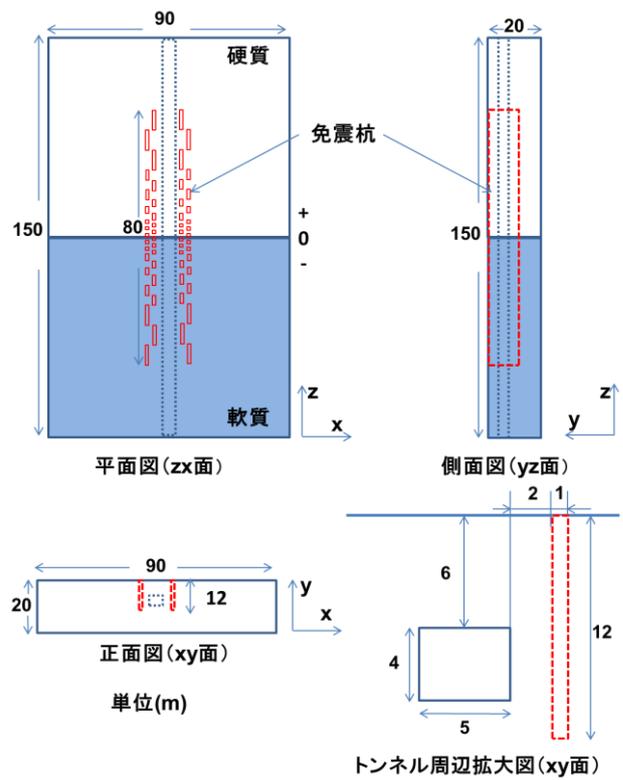


図-1 解析モデル(免震壁モデル)

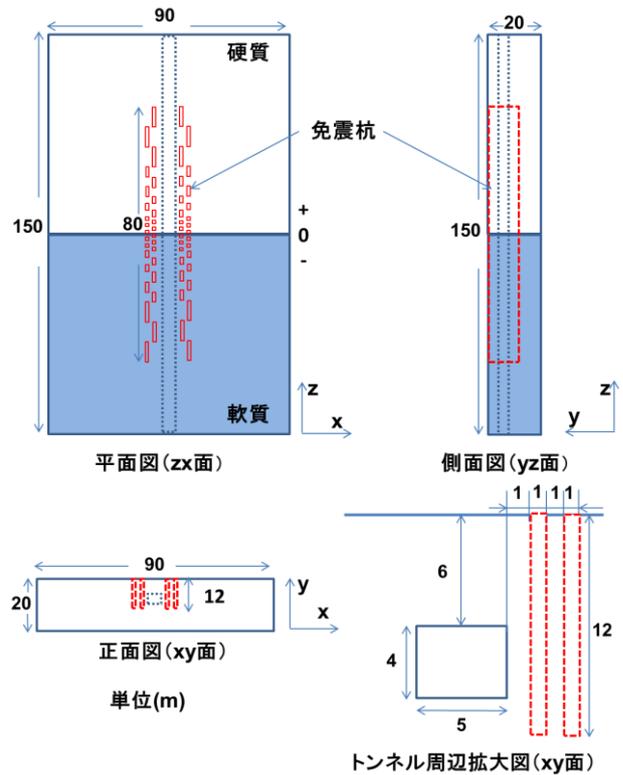


図-2 解析モデル(免震杭モデル)

表-1 トンネル覆工の物性値

	覆工厚 (m)	弾性係数 (GN/m ²)	質量密度 (kN/m ³)	ポアソン比	減衰比
トンネル覆工	0.6	25.5	24.5	0.20	0.05

表-2 諸物性値

	層厚 (m)	弾性係数 (MN/m ²)	質量密度 (kN/m ³)	ポアソン比	減衰比
硬質地盤	20	158	17.7	0.45	0.07
軟質地盤	20	63.2	15.7	0.49	0.09
免震材		0.58	9.81	0.49	0.20

表-3 境界条件

	δ_x	δ_y	δ_z	R _x	R _y	R _z
XY 前後面	自由	自由	固定	固定	固定	固定
ZY 側面	自由	固定	自由	固定	固定	固定
底面	固定	固定	固定	固定	固定	固定
その他	自由	自由	自由	固定	固定	固定
トンネル	自由	自由	自由	固定	固定	自由

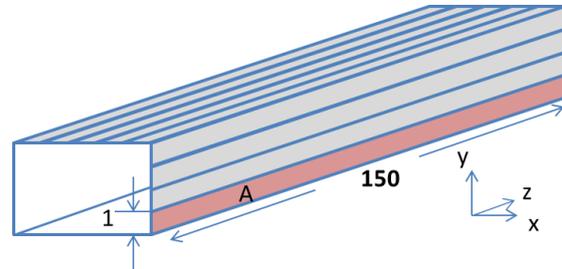


図-4 矩形トンネルの断面力評価箇所

(2) 物性値

物性値については、類似研究⁴⁾を参考に決定した。その際、既報の研究での弾性係数、質量密度がt-f換算の物性値をN-m換算に換算して設定している。表-1にトンネル覆工の物性値、表-2に諸物性値を示す。

(3) 境界条件

地盤の境界条件は、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-3に示す。拘束しているものを固定、拘束していないものを自由と表記した。 δ は変位拘束、Rは回転拘束を示す。

(4) 入力地震動

入力地震動を図-3に示す。これ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である。これをモデルの底面からx方向に入力する。

3. 解析結果および考察

免震壁、免震杭、免震材無の場合について、既設矩形トンネルの側壁上の最大断面力により評価する。図-4に示すように、矩形トンネルの軟質地盤側からみて右下の側壁部Aにおける縦断方向(z軸方向)に沿うトンネル横断面内の断面力を評価する。評価にあたり、側壁部Aにおいてトンネル縦断方向に断面を34分割し断面力のプロットを行う。

断面力はトンネル横断面内断面力とし、軸力、せん断力および曲げモーメントにより対策工の効果を確認することとする。断面力は軸力(N_x)、せん断力(Q_x)および曲

げモーメント(M_x)とし、いずれの断面力も動的解析で生じた最大時の値とする。なお、各横断面内断面力はx軸方向加震時の値なので、サフィックスにxを付している。また、図-1, 2の平面図において、z軸については地盤急変部を原点とし、z軸下向き、すなわち軟質地盤側をマイナスとし、逆にz軸上向き、すなわち硬質地盤側をプラスとする。

免震材を配置しない場合のモデル(以下、免震無)と、免震材を壁配置にしたモデル(以下、免震壁)、免震材を杭配置にしたモデル(以下、免震杭)でそれぞれ2ケースで比較を行う。この2ケースの比較について、トンネルの加震時最大断面力の分布を図-5～図-10に示す。

なお、模型実験を想定した前回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、これはモデル外寸法が振動台の大きさに制限されているためである。今回は大きく緩和されているがまだ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材の有無に対する効果の差を相対値で評価する。

(1) 最大軸力

側壁のz軸上で、免震無と免震材を挿入した場合の最大時の軸力(以下、最大軸力)を示す。

a)免震材無と免震壁

最大軸力を図-5に示す。免震壁の場合、地盤急変部では軸力の低減が見られるものの、免震壁のケースでは軟質地盤側で軸力の卓越が見られる。

b)免震材無と免震杭

最大軸力を図-6に示す。免震杭の場合、低減はほぼ見られず、両者ともに地盤急変部で卓越している。

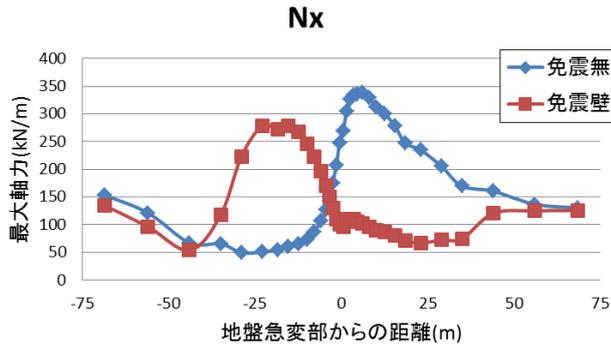


図-5 最大軸力 免震壁

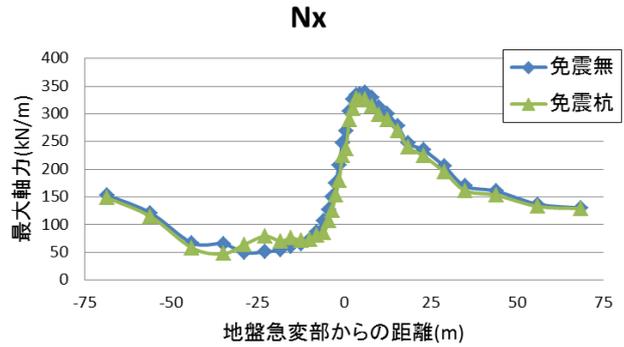


図-6 最大軸力 免震杭

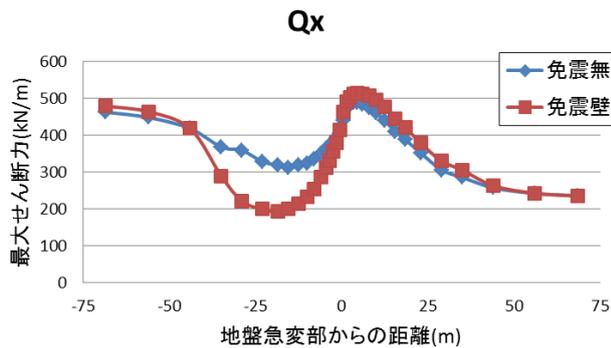


図-7 最大せん断力 免震壁

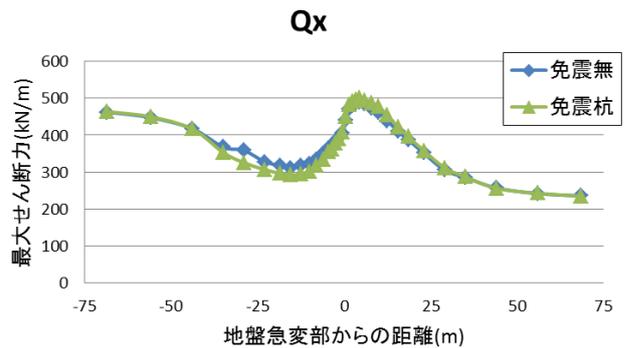


図-8 最大せん断力 免震杭

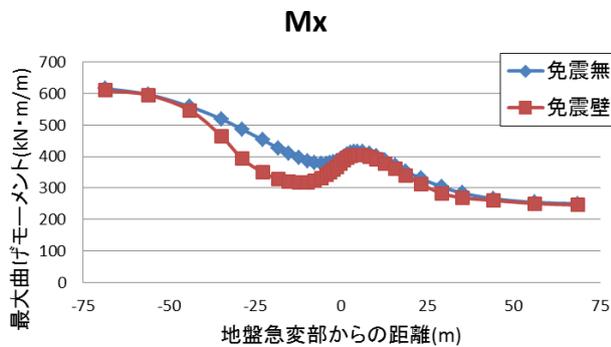


図-9 最大曲げモーメント 免震壁

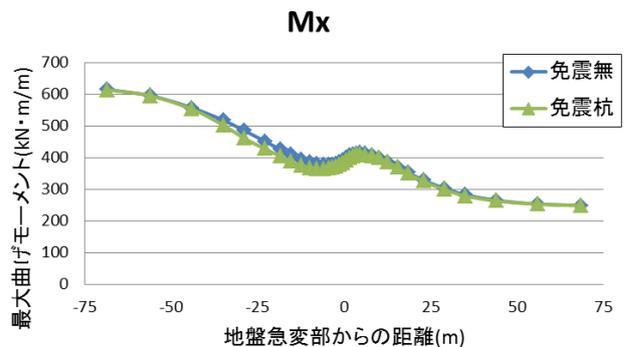


図-10 最大曲げモーメント 免震杭

(2) 最大せん断力

側壁の z 軸上で、免震無と免震材を挿入した場合の最大時のせん断力(以下、最大せん断力)を示す。

a)免震材無と免震壁

最大せん断力を図-7 に示す。免震壁の場合、地盤急変部から軟質地盤にかけてせん断力の低減が見られる。

b)免震材無と免震杭

最大せん断力を図-8に示す。免震杭の場合、曲げ

モーメントと同様、せん断力の低減はほとんど見られず、両ケースともに地盤急変部でせん断力が卓越している。

(3) 最大曲げモーメント

側壁のz軸上で、免震無と免震材を挿入した場合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)免震材無と免震壁

免震壁を挿入した場合の最大曲げモーメントを図

-9 に示す。免震壁の場合、軟質地盤側で最大曲げモーメントが低減している。

b)免震材無と免震杭

免震杭を挿入した場合の最大曲げモーメントを図-10に示す。免震杭の場合、杭による曲げモーメントの低減はほとんど見られない。

今回設定した条件では、免震壁では曲げモーメント、せん断力が地盤急変部から軟質地盤において低減が見られた。しかしながら、軸力では地盤急変部から硬質地盤にかけて軸力の低減が確認されたものの、軟質地盤において軸力の卓越が確認された。

一方、免震杭を挿入した際には、軸力、曲げモーメントおよびせん断力について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であると考えられる。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が生じていない。曲げモーメントは軟質地盤、硬質地盤ではほぼ同様である。このことから、免震杭を設置しても断面力として評価した場合の免震効果は今回設定した寸法および配置パターンでは十分に発揮されなかったと言える。

以上の解析の結果により、以下のことが考察される。

免震壁を挿入した際には、軟質地盤側から地盤急変部において断面力の低減が確認された。これは免震壁を挿入したことで、軟質側と硬質側との相対変位が小さくなり地盤急変部周辺の挙動が平滑化されることによって、免震効果が得られていると考えられる。免震杭を挿入した際に断面力の低減が確認されなかった結果については、免震杭を配置した場合では、振動が免震材をすり抜けてしまうことによるものと考えられる。そのため振動が直接トンネルに伝わってしまい免震効果が得られなかったと考えられる。

一方で、免震壁の場合では、連続的に免震材が配置され振動が直接トンネルに伝達しないため、免震効果が得られるものと考えられる。また、軸力の卓越の箇所が異なる理由としては、免震壁区間に対して免震壁が挿入されていない区間が短いことによる影響、免震壁の効果が解析領域の境界により反力となって軟質地

盤側に影響を及ぼしているため、反力を含めた断面力が抽出されていることによるものだと考えられる。

4. まとめ

本研究では、施工性の優れ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をこれまでに研究されている免震壁と比較することにより、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、免震壁、免震杭により軸力、曲げモーメントおよびせん断力の低減がみられ、免震効果としては確認できた。しかしながら、免震壁では軸力の卓越の箇所が異なること、免震杭による免震壁に比べ免震効果はみられなかった。

5. 今後の課題

免震壁、免震杭ともに免震効果があることは報告されている。今回の解析では特に免震杭において顕著な効果が見られなかった。本研究は模型実験を行うための事前解析であるが、そのため、今回の結果からは免震杭の妥当性が確認できなかった。したがって、解析領域を広げるとともに、今回想定した免震材の物性や配置、免震材の形状寸法等の他、解析領域の大きさなども含めて見直し、改めて解析を実施する。

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) 波多野陽香, 土門剛, 西村和夫: トンネルにおける免震対策工法の数値解析, トンネル工学報告集, 第 23 巻, pp357-361, 2013.
- 4) 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.

(2014.9.15受付)

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

Yosuke SAWADA, Tsuyoshi DOMON and Kazuo NISHIMURA

Seismic isolation methods of established 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 walls and 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.