

本体利用した仮土留めが開削トンネルの地震時挙動に及ぼす影響に関する基礎的検討

桐生 郷史¹・井澤 淳²・小島 謙一³

¹正会員 ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社 技術本部（〒171-0021 東京都豊島区西池袋1-11-1）
E-mail:kiryu@jrc.jregoup.ne.jp

²正会員 （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail:izawa@rtri.or.jp

³正会員 （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: kojima.kenichi.03@rtri.or.jp

本報は、仮土留めを本体利用した場合に、仮土留めが開削トンネル躯体の地震時挙動、安全性に与える影響について、基礎的な検討を行うことを目的とし、動的解析を実施した。その結果、仮土留めを本体利用した開削トンネルの地震時の応答値は、上下床版隅角部において増加することを確認した。また、仮土留めの上部突出部が開削トンネルの地震時挙動に与える影響は、開削トンネル側壁と仮土留めを一体化することによる影響に比べて小さいことを確認した。

Key Words : cut and cover tunnel, seismic response, retaining walls

1. はじめに

都市部の鉄道構造物では、用地が狭隘であることなどから、仮土留め（地下連続壁等）を本体利用した開削トンネルが用いられることがある。これまでに、一般的な矩形の開削トンネルについては、地震時の動的応答特性の検討が実施されている。しかし、仮土留めを本体利用した場合の詳細な構造を反映した上で、開削トンネルの地震時の動的応答特性を検討した事例は少ない。

本研究では、仮土留めを本体利用した場合の開削トンネルについて、動的解析を実施し、仮土留めを有することによる開削トンネルの地震時の動的応答特性を把握することを目的としている。

2. 検討概要

検討対象構造物は、3層2径間の開削トンネル（高さ23.4m、幅16.8m）とした（図-1）。開削トンネルの周辺地盤は、水平成層地盤であり、深度-33.55mに工学的基盤面を有する。開削トンネルの部材諸元は、表-1に示す。床版および側壁はRC造、中柱はS造である。

解析モデルは、図-2に示す。解析は2次元動的FEM解

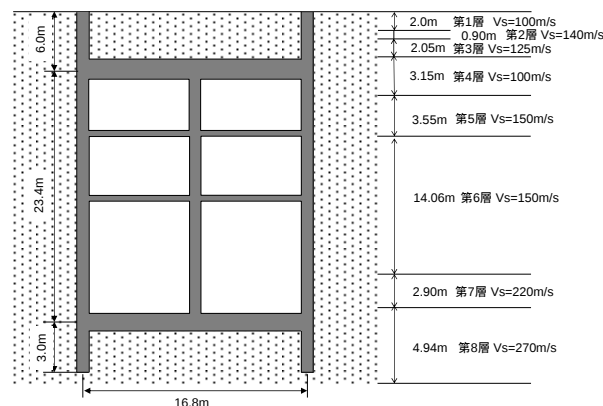


図-1 検討対象構造物

表-1 開削トンネルの部材諸元

		弾性係数 E (kN/m ²)	断面二次モーメント I _x (m ⁴)	断面積 A (m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)
上床版	一般部	2.65E+07	0.090	1.042	24.5
	ハンチ側壁部	2.65E+07	0.302	1.560	24.5
	ハンチ中柱部	2.65E+07	0.153	1.246	24.5
中床版 (2段目)	一般部	2.65E+07	0.048	0.854	24.5
	ハンチ側壁部	2.65E+07	0.195	1.358	24.5
	ハンチ中柱部	2.65E+07	0.089	1.048	24.5
中床版 (3段目)	一般部	2.65E+07	0.045	0.821	24.5
	ハンチ側壁部	2.65E+07	0.189	1.328	24.5
	ハンチ中柱部	2.65E+07	0.086	1.024	24.5
下床版	一般部	2.65E+07	0.281	1.518	24.5
	ハンチ側壁部	2.65E+07	2.525	3.177	24.5
	ハンチ中柱部	2.65E+07	0.411	1.738	24.5
側壁	一般部1段目	2.65E+07	0.123	1.157	24.5
	一般部2段目	2.65E+07	0.198	1.347	24.5
	一般部3段目	2.65E+07	0.210	1.383	24.5
	ハンチ上床版部	2.65E+07	0.365	1.660	24.5
	ハンチ中床版2段目	2.65E+07	0.120	1.142	24.5
	ハンチ中床版3段目	2.65E+07	0.203	1.362	24.5
	ハンチ下床版部	2.65E+07	0.853	2.234	24.5
中柱		2.65E+07	0.002	0.027	77.0

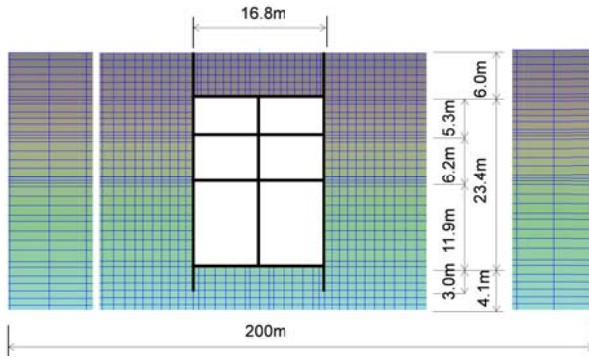


図-2 解析モデル図

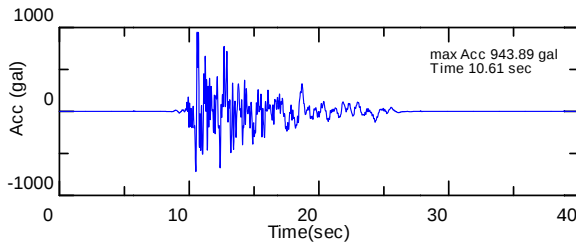


図-3 入力地震波形

析を用いる。構造物は梁要素，地盤は平面ひずみ要素でモデル化する。解析モデルの境界条件は，側方は等変位境界，下方は，粘性境界とした。開削トンネルは，M点（最大耐力点）剛性を用いた等価線形でモデル化する。本体利用する仮土留めは，地表面（土被り6.0m）から根入れ3.0mの範囲に設定し，開削トンネル側壁と仮土留めは完全に一体化される条件を基本とした。なお，開削トンネル側壁と地下連続壁の一体箇所は，1本の線材としてモデル化する。一体壁の断面剛性（単位幅当たり）は，鉄筋の影響を無視し，コンクリートの有効断面に対して求めることとし，式（1）に基づき一体壁の断面剛性を設定している¹⁾。

$$EI = \frac{1}{12} E_1 h_1^3 + \frac{1}{12} E_2 h_2^3 + \frac{E_1 E_2 h_1 h_2 \left(\frac{1}{2} h_1 + \frac{1}{2} h_2 \right)^2}{E_1 h_1 + E_2 h_2} \quad (1)$$

ここに， E ：一体壁の弾性係数（ kN/m^2 ）， I ：一体壁の断面二次モーメント（ $=1/12 \cdot b \cdot (h_1 + h_2)^3$ ）（ m^4 ）， E_1 ：開削トンネルの弾性係数（M点剛性として設定した弾性係数）（ kN/m^2 ）， h_1 ：開削トンネルの部材高（m）， E_2 ：仮土留壁の弾性係数（ kN/m^2 ）， h_2 ：仮土留壁の部材高（m）としている。

地盤は，非線形性を考慮するものとし，地盤の構成則はGHE-Sモデル²⁾とした。土の動的変形特性は，標準パラメータを用いている。入力地震動は，耐震標準³⁾のスペクトルⅡ（G1地盤用）を工学的基盤相当に入力した（図-3）。

本報では，本体利用する仮土留め壁体の剛性に着目した検討，および仮土留めの形状に着目した検討を行うも

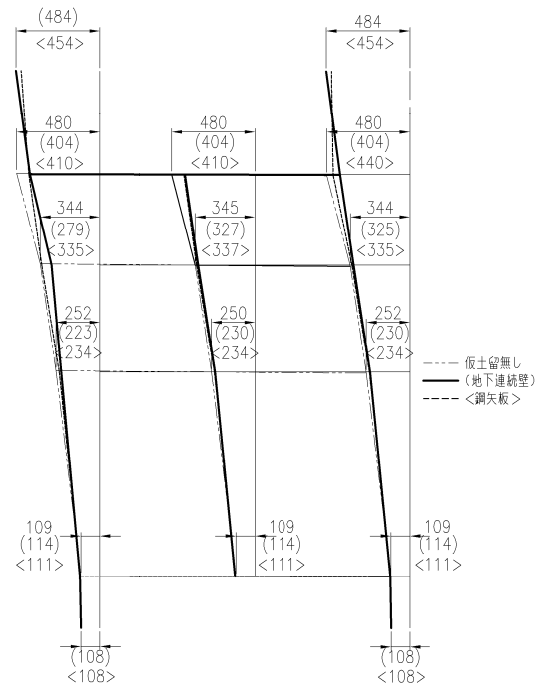


図-4 変位分布図

のとし，各々の検討条件は後述する。

3. 仮土留めの壁体剛性に関する検討

(1) 検討ケース

検討は，「仮土留めを本体利用しない基本ケース」，「開削トンネル側壁部にRC地下連続壁（ $t=800\text{mm}$ ）を本体利用したケース」，「本体利用する仮土留めの剛性を鋼矢板（Ⅲ型）相当の剛性としたケース」について行う。なお，鋼矢板相当の剛性としたケースは，仮土留めの剛性の違いによる影響を把握するために行ったケースである。本体利用する仮土留めの剛性は，RC地下連続壁の剛性を $0.6EI$ とし，鋼矢板相当の剛性を $0.45EI$ とした¹⁾。

(2) 結果および考察

図-4は，中柱の相対変位最大時における変位分布図を示す。仮土留めを本体利用しない基本ケースに対し，RC地下連続壁を有するケースは全体的に変形が抑制されていることが確認できる。一方，鋼矢板相当の剛性のケースは，地表面付近では変形が抑制されているものの，中床版以深は，仮土留め無しの変形と同等の変形となっている。地表面付近は，鋼矢板の剛性であっても変形抑制効果が得られるが，中床版以深においては鋼矢板の剛性では，全体変形を抑制するほどの期待はできないと考えられる。

図-5は，断面力（曲げモーメント）の比較結果を示している。ここで示す断面力は，常時断面力を除いた地震時増分断面力を示し，剛域を除く各部材の端部，および

スパン中央を抽出し、全時刻中の最大断面力について整理した。断面力の整理は、断面力の比率 $\alpha = (\text{本体利用有り}) / (\text{本体利用無し})$ について行っている。上下床版については、中柱付近を除いて仮土留めを本体利用することによって断面力が最大2倍程度増加していることが分かる。一方、中床版の断面力に大きな相違は見られない。上下床版は、仮土留壁を本体利用して一体化することにより、仮土留めを本体利用しない場合に負担していなかった地盤変位荷重や、仮土留自体の慣性力が付与されたことが要因であると推察される。側壁の断面力は、

地下連続壁で最大10倍、鋼矢板で最大4倍程度の増加が確認できる。側壁の断面力増加は、仮土留めを一体構造化することによる部材剛性の増加が要因と考えられる。そこで、断面力と同様に、曲率 $\phi (=M/EI)$ の比率 β による比較結果を図-6に示す。床版については、断面力と同様の傾向であるが、側壁については、仮土留めを本体利用しない場合に比べて、仮土留めを本体利用する場合の曲率は小さくなっていることが確認できる。つまり、側壁については、断面力は増加するものの、曲率は減少しており、地震時挙動は抑制されていることが分かる。

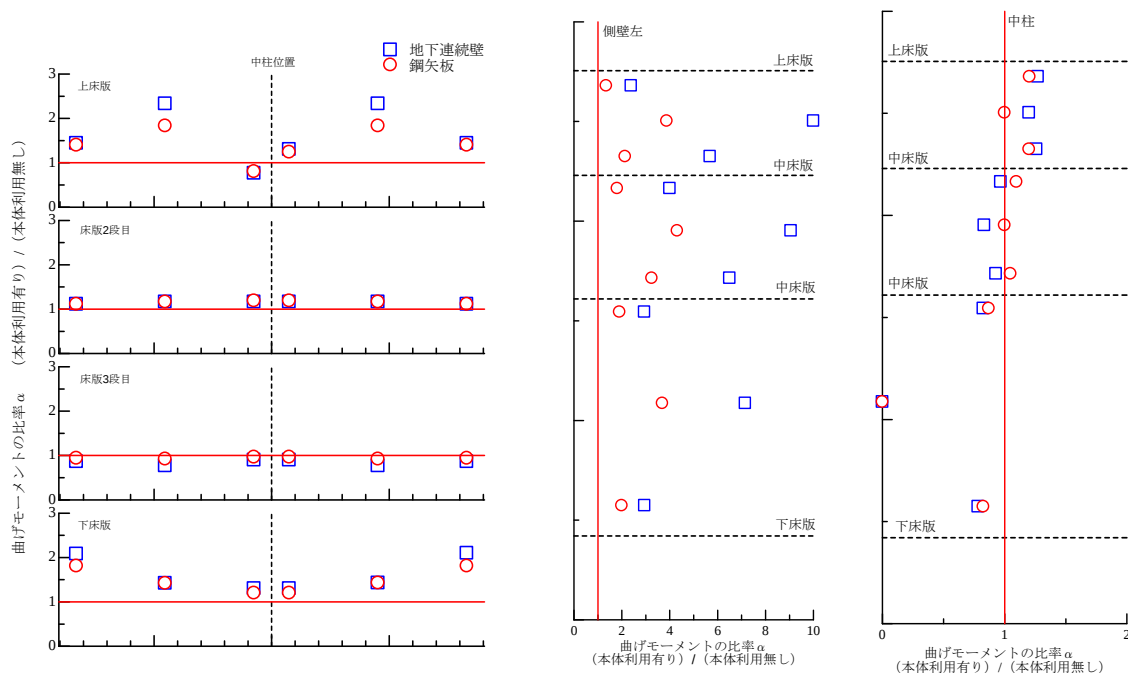


図-5 仮土留めの本体利用の有無による断面力（モーメント）の比率

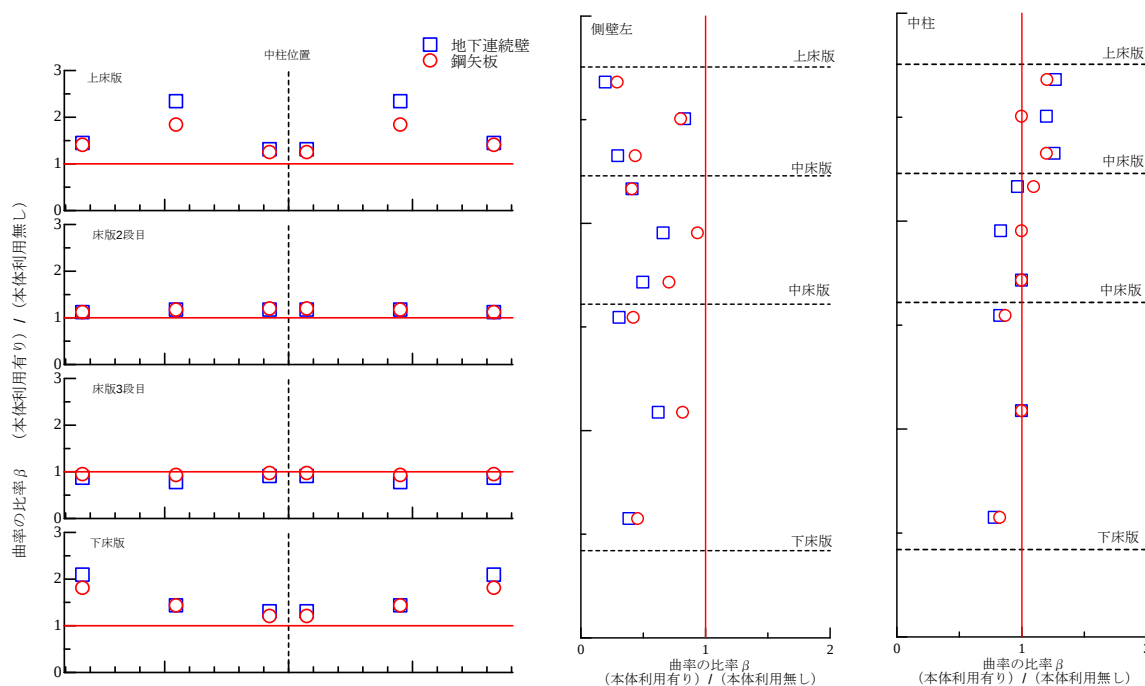


図-6 仮土留めの本体利用の有無による曲率 $\phi (=M/EI)$ の比率

4. 仮土留めの壁体形状に関する検討

(1) 検討ケース

検討ケースは、図-7に示す。Case A（基本モデル）は、仮土留めの影響を考慮せずに設計された構造を想定している。Case B～Case Dは、地下連続壁を考慮して設計された構造を想定し、Case Bは、地下連続壁全体を本体利用したケースである。Case C、Case Dは、地下連続壁の有無や、地下連続壁を一体化することによる部材剛性の変化の影響を把握するために実施したケースであり、Case Cは、躯体より上部の地下連続壁を除いたケース、Case Dは、開削トンネル側壁のみ地下連続壁を本体利用する場合と同等としたケースである。

(2) 結果および考察

図-8は、各部材の曲率 ϕ （ $=M/EI$ ）を示している。なお、ここで示す曲率は、地震時の増分断面力（モーメント）に対して算定した曲率を示し、剛域を除く各部材の端部、およびスパン中央を抽出し、全時刻中の最大曲率について整理している。

地下連続壁を本体利用した場合（Case B）は、基本モデル（Case A）に比べて上下床版、中柱上部の応答値は最大2割程度増加する傾向にある。一方、側壁の曲率は、Case Aに比べて全体的に減少している。これは、地下連続壁を本体利用することにより、側壁の断面剛性が増加した影響である。

地下連続壁の上部を除いたCase C、側壁のみ地下連続

壁と一体化した剛性を用いたCase Dについては、各部材とも地下連続壁を本体利用したCase Bとほぼ同等の結果である。本検討条件においては、躯体より上方や根入れ部の地下連続壁が、開削トンネルの地震時挙動に与える影響は小さいと考えられる。

また、仮土留めを考慮せずに設計された構造（Case A）に比べて、仮土留めを本体利用した開削トンネル（Case B～Case D）の応答値が増加するのは、上載土や開削トンネル上床版より上方に突出した地下連続壁の慣性力等の影響ではなく、開削トンネル側壁を地下連続壁と一体化することによる剛性増加の影響が支配的であると考えられる。

5. まとめ

本体利用した仮土留め工を有する開削トンネルは、地震時の全体変形を抑制する効果が得られる反面、上下床版において地震時の応答が増加することを確認した。仮

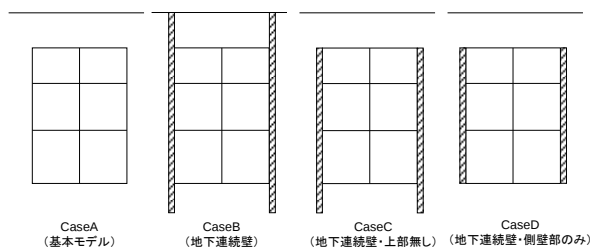


図-7 解析ケース図

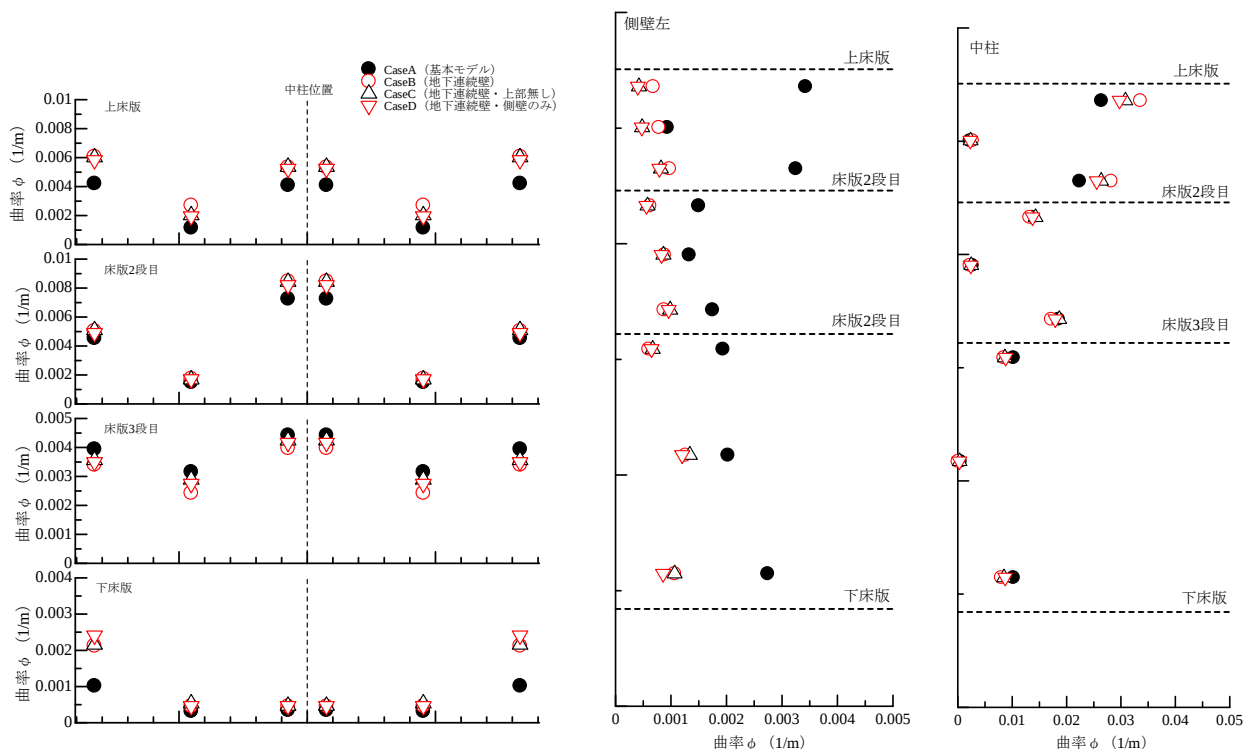


図-8 仮土留めの形状による曲率 ϕ （ $=M/EI$ ）の比較結果

土留めを本体利用する場合は、上下床版の部材性能の設定に配慮する必要があることを確認した。仮土留めを本体利用した開削トンネルにおける上下床版の応答値の増加は、仮土留めを一体化したことによる側壁の剛性増加が主要因である。また、仮土留めの上部突出部が開削トンネルの地震時挙動に与える影響は、開削トンネル側壁と仮土留めを一体化することによる剛性増加が開削トンネルの地震時挙動に与える影響に比べて小さいことが確認された。

仮土留めを本体利用した開削トンネルは、側壁部の地下連続壁を適切に評価した上で、開削トンネルの各部材の仕様を定める設計をしておけば十分であると考えられる。

なお、本報は、限られた条件に基づくものであるため、今後は、上載土の物性値や根入れ長の影響などについて検証する予定である。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル (財) 鉄道総合技術研究所, 丸善, pp.93-96, 240-244, 2001.
- 2) 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 土木学会地震工学研究発表会論文集, 30, 2009.
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計 (公財) 鉄道総合技術研究所, 丸善, pp.271-273, 2012.

(2015. 8. 7 受付)

ANALYTICAL STUDY ON SEISMIC BEHAVIOR OF A CUT AND COVER TUNNEL WITH TEMPORARY RETAINING WALLS

Satoshi KIRYU, Jun IZAWA and Kenichi KOJIMA

This paper describes analytical study on seismic behavior of a cut and cover tunnel, whose side walls contain temporary retaining walls. Analytical results showed that a cut and cover tunnel with temporary retaining walls tends to show small deformation, but show large stress resultant at upper and lower slabs as compared with that without temporary retaining walls during an earthquake. Furthermore, it was also found that such trend is primarily caused by increase of stiffness of side walls. It is concluded that cut and cover tunnels with temporary retaining walls can obtain sufficient seismic stability adequately considering that increase of stiffness of side wall due to temporary retaining walls in seismic design.