

ポリマー材を用いた開削トンネルの免震工法

室野剛隆¹・桐生郷史¹・館山勝¹・小林正介²

¹(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:imamura@rtri.or.jp, kiryu@rtri.or.jp, tate@rtri.or.jp

²横浜市交通局 (〒231-0017 横浜市中区港町1-1)

E-mail: sh11-kobayashi@city.yokohama.jp

既設の開削トンネルの耐震性能を照査した場合、中柱や側壁の耐力不足が見られる場合がある。中柱については鉄板巻き補強など具体的な対策法があるが、側壁については現実的な有効な手法がない。そこで、本研究では、ポリビニルアルコール系ポリマー剤（以下、ポリマー）を開削トンネルの両側に配置することにより、構造物に作用する地盤変位荷重を遮断する免震工法を開発した。本論文は、ポリマーの物理特性を簡単に示し、ポリマー壁の堅さ、厚さ、配置をパラメータとした感度分析を行い、設計上のポイントをまとめた。また、動的相互作用（Kinematic相互作用とInertial相互作用）の観点から、ポリマー免震壁がどのような影響があるかを解析的に示した。最後に、本工法を実際の既設トンネルに適用した事例を紹介する。

Key Words : cut and cover tunnel, polymer material, isolation system, Kinematic interaction, Inertial interaction

1. はじめに

柱などの地上構造物において、せん断耐力が不足する場合には、鋼板巻補強などが有用な手法として定着しているが、既設開削トンネルなど地中構造物では、部材は地盤中に埋設されているので、有効なせん断補強工法が存在しないのが現状である。最近では、片面のみを鋼板等で補強する工法も提案されているが、地中構造物での実施工を考えた場合には、狭隘な作業環境であることや、夜間に線路を閉鎖した後でないと施工ができず、時間的・コスト的にも大変な作業となる。さらに、アンカーボルトのためにコンクリートを削孔することが必要で、長期的な使用を考えた場合、地下水位下では漏水などに対する不安も否定できない。

そこで、近年では、従来からの耐力補強に加えて、地中構造物に作用する地震力そのものを低減させる工法が開発されつつある^{1,2)}。地中構造物の地震時挙動を考えた場合、地上構造物と異なり、地震時慣性力の影響は小さく、地盤変形による影響が支配的となるため、橋梁等に用いられるような長周期化や高減衰化などの措置は、効果的でない。これに対して、変位吸収層を設けて、地震時の地盤変形が構造物に伝達するのを遮断したり^{例えは3)}、トンネル外周に滑動シートを設けて、構造物と地盤間に

作用する相互作用力を減少させる方法^{例えは4)}が考えられている。また、構造物の特定箇所に特殊部材やピン等を導入して、耐震上有利な構造形式を構築する損傷モード制御型工法なども提案されている^{例えは5)}。

さて、変位吸収層に用いる材料としては、その剛性が周辺地盤の剛性に比べて 1/10 ~ 1/1000 程度が目安とされている。これらを満足する材料としては、シリコン系材料、ウレタン系材料、アスファルト系材料などが挙げられている。しかし、材料費が高かったり、または剛性が高すぎて、大きな低減効果が期待できないなどの問題もあるようである。

このような状況に鑑み、本研究では、トンネルの側面部に、変位吸収層の材料（以下、免震材と呼ぶ）として、ポリビニルアルコール系ポリマー剤を用いることにより、実用性を高めた工法を開発した。本論文は、ポリマーの物理特性を簡単に示し、ポリマー壁の堅さ、厚さ、配置をパラメータとした感度分析を行い、設計上のポイントをまとめた。また、動的相互作用（Kinematic相互作用とInertial相互作用）の観点から、ポリマー免震壁がどのような影響があるかを解析的に示した。最後に、本工法を実際の既設トンネルに適用した事例を紹介する。

2. 免震層の材料および施工法

(1) ポリビニルアルコール系ポリマー剤

本開発工法で用いるポリビニルアルコール系ポリマー剤（以下、ポリマーと呼ぶ）は、ポリビニルアルコール（PVA）を主剤とし、架橋剤と合成した白色粉末状の水溶性合成樹脂（ホモゲル）である。このポリマー水溶液と地盤とを攪拌混合することにより、ポリマー地盤改良体を構築する方法が既に提案されている⁸⁾。このポリマー混合体は、地下水汚染箇所における拡散防止や廃棄物処理場などにおける封鎖処理方法として有効な手法とされており、遮水性や変形性能が高いことが分かっている。ポリマー地盤改良体は、セメントなどの無機系固化材と地盤を混合攪拌して固結体を築造する従来の地盤改良工法と異なり、柔軟性が高く地震時などによる変形追従性が高い材料とされている。

本研究では、この柔軟性に着目して、このポリマーホモゲルもしくはポリマー混合体を開削トンネルの側面に築造することにより、地盤の変形が構造物に伝達するのを遮断することを特長する。

(2) 力学的特性

ポリマー改良土の力学特性について、三軸圧縮試験および繰返し載荷試験の結果について示す。図1は三軸圧縮試験での軸差応力 q と軸ひずみ ε_a の関係を示したものである。拘束圧 σ_r は49kPaと98kPaについて試験を行った（図中の凡例参照）。また試験に用いた供試体は、豊浦標準砂、ホモゲル、ポリマー混合土（ポリマー水溶液と砂の配合比を変えた2種類、配合1はポリマー水溶液/砂=26%、配合2は30%）である。これより、ホモゲルは豊浦砂に比べて極めて剛性が低く、概ね1/500以下となっている。また、拘束圧依存性も小さいことがわかる。ポリマー混合土は、ポリマー水溶液の充填量の多寡に応じて土とホモゲルの中間的な特性を有することが分かる。また、軸ひずみが25%に達するまで圧縮を進めた場合も、供試体には明確なすべり面は生成されなかった（図2）。

図3は、ポリマー改良土（配合1）及び豊浦砂に関する三軸繰返し試験での $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ の関係である。せん断ひずみ γ の増加につれポリマー改良土の G/G_0 は低下し、その低下率は豊浦砂よりやや大きい。また、拘束圧 σ_r が小さいほど低下率は大きい。一方、ポリマー改良土の減衰比は、特に小ひずみレベルでの減衰が大きく、せん断ひずみの増加につれさらに増加する。しかし、ひずみレベルが大きくなると減衰比は逆に減少する。また、ポリマー改良土の大ひずみレベルでの減衰比は、拘束圧に依存しない。

以上のようにポリマー改良土は、改良前の砂に比べて

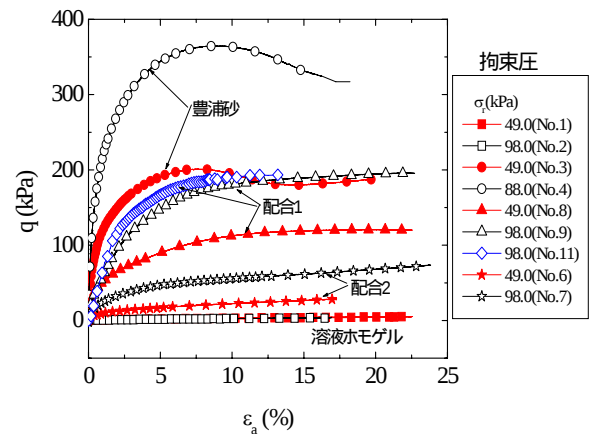


図1 三軸圧縮試験結果（軸差応力～軸ひずみ）



図2 圧縮試験後の供試体の様子

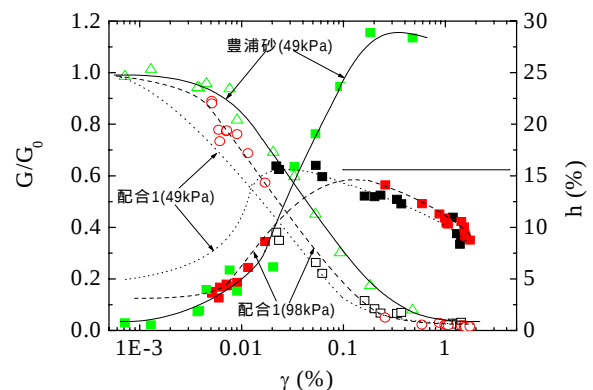


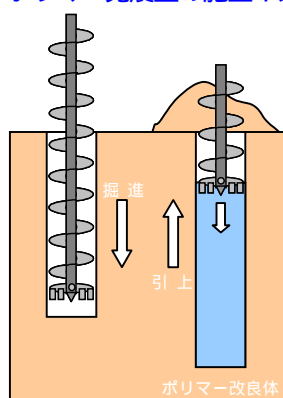
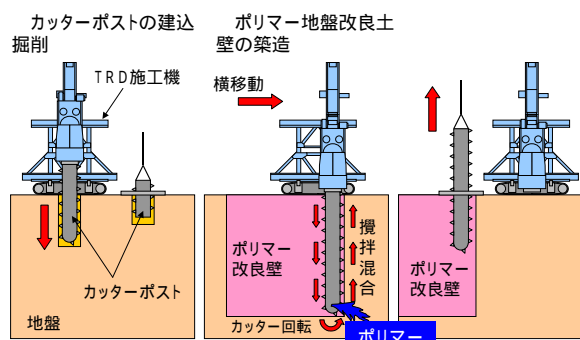
図3 ポリマー材の動的変形特性

微小ひずみレベルでの減衰が非常に大きく、初期剛性も小さい結果が得られた。

(3) 施工方法

上記のような特性を有するポリマーホモゲルもしくはポリマー混合体を免震層として、開削トンネルの両脇に配置するわけだが、ポリマー免震層の構築方法としては、大きく分けて2通りが考えられる。1つはTRD工法と同様にポリマーを壁状に構築する方法、もう1つはポリマーを柱状に構築する方法である。

既設トンネルにおいて、ポリマー免震壁を構築する方法として、例えば、地盤に挿入したチェーンソー型カッター（カッターポスト）を有するベースマシンによって、カッターチェーンを回転、横方向に移動させることにより地盤の切削及び固化液による切削土との攪拌混合、もしくは置き換えを同時に行い、地中に等厚で連続した免震壁を築造することが考えられる。イメージ図を図4に



と図 5 に示す。

本工法と一面せん断補強工法などの従来工法を比較した場合の特徴は、以下の通りである。

地震時地盤変形が構造物に伝達するのを遮断するため、構造物全体の相対変形を抑制するので、鉄板補強のようにある一部の部材の補強になるのではなく、部材全体の発生断面力が軽減され、全体としての耐震性能の向上が図れる。

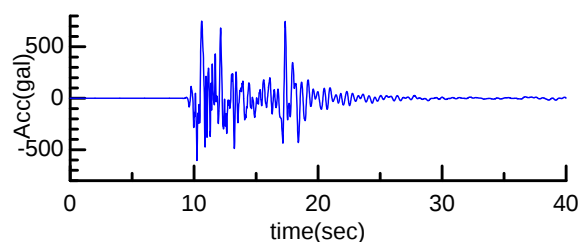
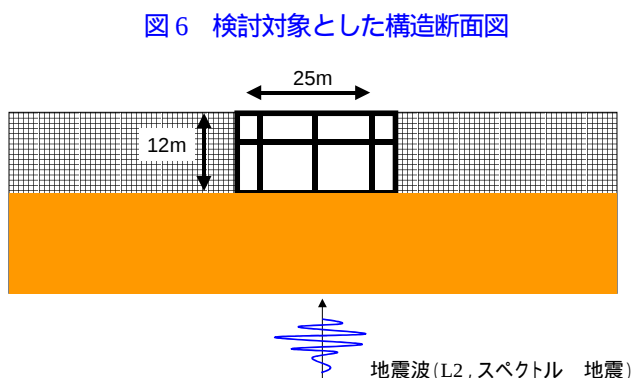
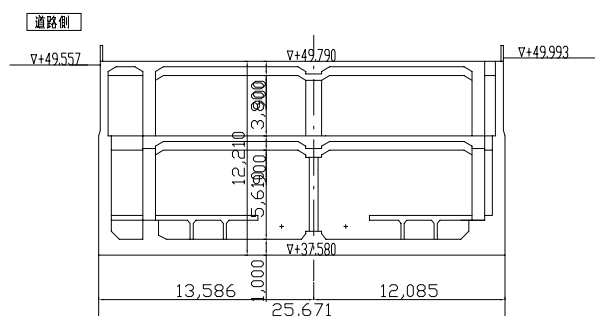
開削トンネルの外部での施工となるので、夜間線閉をすることなく施工が可能であり、工期を短縮することができる。

既存のコンクリートに削孔する必要が無く，既存構造物を痛めることがない。

攪拌混合方式を採用することにより廃土が少なく、工費や環境対策にも優れている。

3. ポリマー免震層の効果

ポリマー免震層を構築することにより、どの程度、開削トンネルの地震時断面力が低減するか、解析的に検討する。



(1) 解析モデル

本研究では、横浜市交通局の開削トンネル 2 層 2 径間（ドライエリア付き）の駅部を検討対象の例とした。構造諸元は、概ね高さ 12m、幅 25m の構造であり、一般図を図 6 に示す。なお、表層地盤は関東ロームが 10m 程度堆積しており、N 値は 1~5 程度の軟弱な粘性土で、その下に N 値 50 以上の堅い基盤が現れている。開削トンネルの底部はこの基盤に付けられている。また土被りはゼロである。

解析モデルは、2次元 FEM 解析である。開削トンネルく体は梁要素、地盤は平面ひずみソリッド要素とした。基本検討という位置づけで、部材は線形、地盤とポリマーは非線形材料とし、それぞれ修正 RO モデルと双曲線モデルでその特性をモデル化した。なお、地盤とポリマー、構造物は密着とした。地盤の下端は粘性境界、左右端は水平ローラーとした。図 7 に解析モデルのイメージ図を示す。減衰定数は、1 次モードで 5% になるように設定した剛性比例型減衰とする。

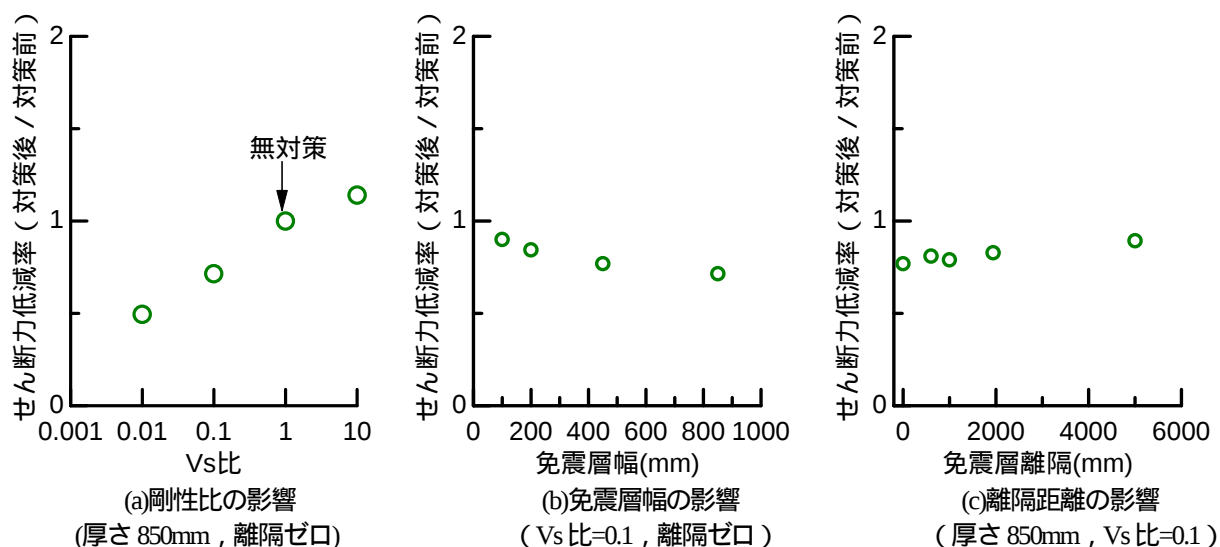


図10 ポリマー免震層の特性による地震時断面力の低減効果

(2) 入力地震動

解析に用いた入力地震動は、鉄道構造物の耐震設計⁹⁾に用いられている基盤入力用標準地震波である。図8に波形の時刻歴を示す。

(3) 免震材の剛性の影響

まず、免震材の剛性の影響について検討する。検討条件は図9(a)であり、免震層の厚さは850mm、構造物からの離隔距離はゼロ（密着）である。図中の○印の位置のせん断力に着目して結果を整理した。図10(a)が検討結果である。縦軸は対策前のせん断力に対する対策後のせん断力の比率である。着目部は側壁下端である。横軸は現地盤のせん断波速度に対する、ポリマー材のせん断波速度の比率である。Vs比が1というのは、現状（無対策）を表している。Vs比が1/100の範囲までは、ポリマーが柔らかいほど免震効果が有効に働いて、せん断力が低減していることが分かる。なお、Vs比が1/100というのは2章で見たように、材料的には現実的な値ではないが、パラメータの感度を見るために、この領域まで検討対象とした。log(Vs)に対して線形的にせん断力の低減が期待できることが分かる。ポリマー材としては、Vsが1m/s程度まで作成可能であることは要素試験で確認しており、実用性が高いことが分かる。

地盤改良としては、トンネル周辺を堅くすることも考えられるが、この場合、中柱のせん断力は低減するが、側壁のせん断力は無対策よりも大きくなる。中柱は鋼板巻補強などやRC巻などの補強が可能であるが、側壁のせん断補強は難しく、その意味からは、免震材を利用した方が有利といえる。

(4) 免震層の厚さの影響

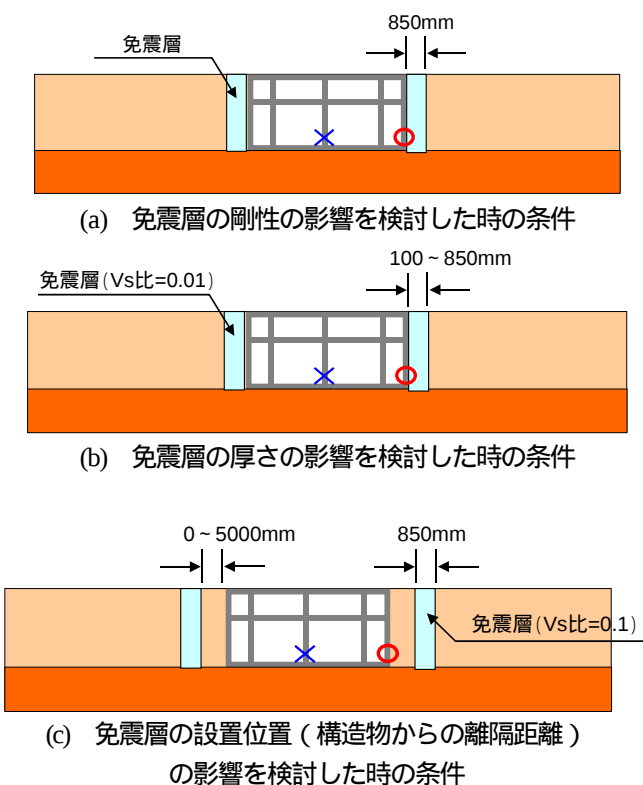


図9 検討条件

免震層の厚さの影響について検討する。検討条件は図9(b)であり、免震層のVs比は0.1、構造物からの離隔距離はゼロ（密着）である。免震層の厚さは、100mm、200mm、450mm、850mmと変化させた。

検討結果を図10(b)に示す。厚さが450mm以上であれば、厚さの影響は小さいといえるが、厚さが200mm以下になると急激に、免震層によるせん断力の低減効果が小さくなっている。実際の施工時には、材料費・工事費

の観点から，400～450mm が最適条件になると思われる．

(5) 免震層の設置位置の影響（構造物からの離隔距離の影響）

免震層を設置する位置の影響，つまり開削トンネルからの離隔距離の影響について検討する．検討条件は図 9(c)であり，免震層の剛性比（ V_s 比）は 0.1，免震層の厚さは 850mm である．

検討結果を図 10(c)に示す．免震層の設置位置の影響は少ないことがわかる．実際の設計時には，現地の周辺状況（道路状況や私有地）や施工時の残置された矢板などを勘案して，設置位置を決めれば良いことになる．

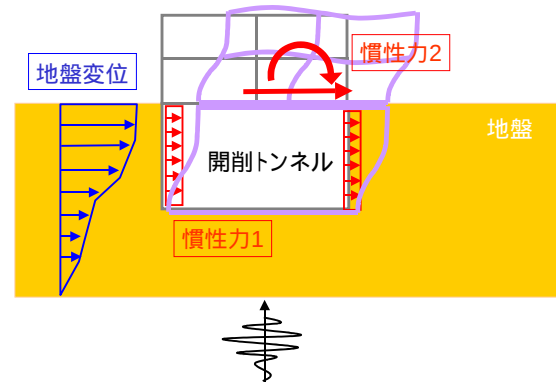


図 11 動的相互作用のイメージ図

4. 地下構造物の上部に建屋が存在する場合

(1) 基礎概念

近年，土地の高度有効利用の観点から，地下構造物の上部に建築建屋が構築される場合がある．その場合には，3 章で述べたのとは違う相互作用効果が見られる．つまり，一般的な開削トンネルでは，地盤変位の作用が卓越するのに対して，建屋が構築された場合は，その建屋が振動することにより発生する慣性力により，開削トンネル自体が振動させられる．前者は広義な意味で Kinematic 相互作用，後者は Inertial 相互作用に相当する．その概念図を図 11 に示す．

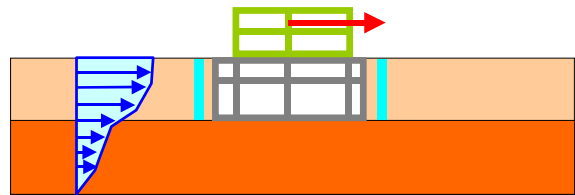
(2) 解析的検討

建屋を構築したことにより，免震層の効果にどの程度の影響が有るかを考察する．解析モデルは図 12 に示すように，全体系モデル，地盤変位系モデル，慣性力系モデルの 3 つを検討する．全体系モデルとは，全てを含んだ一般的なモデルである．次に地盤変位系モデルとは，慣性力による効果をなくすために，建屋重量と開削トンネルのく体重量をゼロとしたモデルである．慣性力系モデルとは，地盤変位による影響を除去して，慣性力による影響だけを考慮したものであり，全体系から地盤変位系を差し引くことにより算定される．非線形解析の場合には，重ね合わせの法則が成り立たないので，上記のモデルは厳密性には欠けるが，定性的な議論をするだけの精度は有していると思われる．解析は全て，2 次元 FEM 解析による．なお，建屋については，RC 2 階建て構造とした．

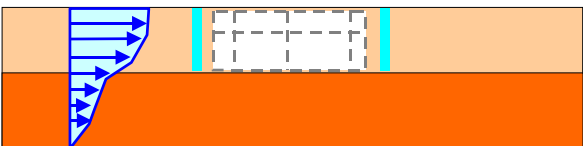
図 13 に免震材の剛性比の影響を示す．左が地盤変位系モデルの結果（図 10(a)の再掲）で，右が慣性力系モデルの結果である．地盤変位が主体として作用する場合には，免震層を導入することにより，大幅にせん断力の低減が期待できた．しかも，柔かいほど，その低減効果は大きかった．

全体系モデル：

全ての影響を取り入れたモデル



地盤変位系モデル：建屋は無し．トンネルの質量はゼロで剛性のみ評価される．基本的には地盤変位だけによる影響が検討される．



慣性力系モデル：地盤変位による影響を除外し，慣性力による影響のみ考慮する．

この場合には，全体系の解析結果から地盤変位系の解析結果を差し引くことにより算定される

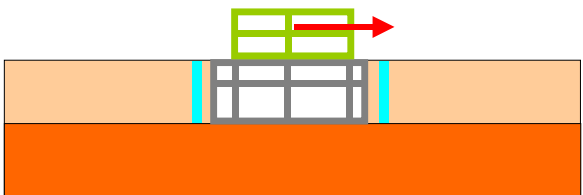
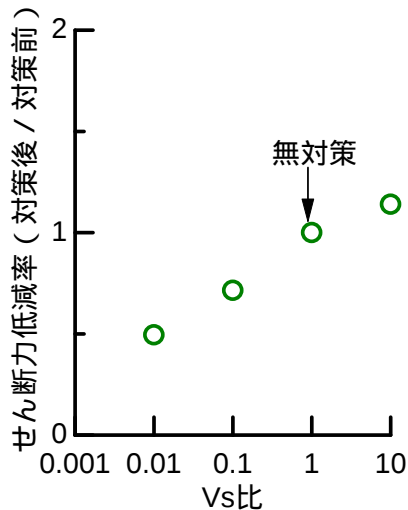
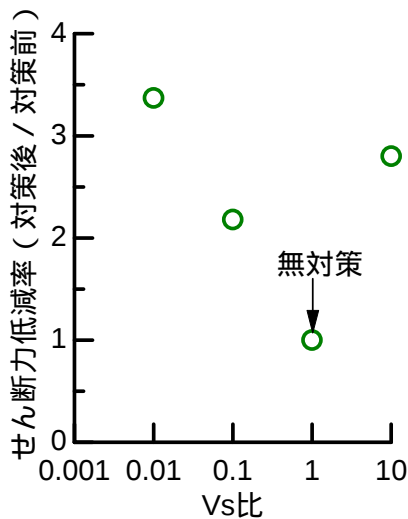


図 12 全体系モデル，地盤変位系モデル，慣性力系モデルの概念図

しかし，慣性力作用に対しては，全く逆の効果を有している．周辺地盤が柔かいと，建屋からの慣性力により開削トンネルそのものが振動させられ，その抵抗を周辺地盤で受けようとするが，免震層があるために，周辺地盤-免震層系で抵抗してくれる割合が減り，結果的に部材そのもので抵抗するようになるためである．



(a) Kinematic 相互作用に対する効果



(b) Inertial 相互作用に対する効果

図 13 開削トンネル - 建屋連成系に対するポリマー免震層の影響

以上のように、構築される建屋の重量・階層が大きいほど不利になることが分かる。地盤変位からの作用と慣性力からの作用については、免震層を設計する際にはトレードオフの関係になることが分かる。

5. 実構造物への適用例

横浜市交通局では、既設開削トンネルの上に建築建屋を増築する工事が計画されている。しかし、現行の耐震基準に従い既設開削トンネルの耐震照査を行った結果、側壁のせん断耐力が大幅に足りないことが分かった。中柱については鋼板巻き補強などを考えればよいものの、側壁については有効な対策がなく、ここで開発した免震工法を導入することになった。

本事例の場合は、既設開削トンネルの上部に建屋が建

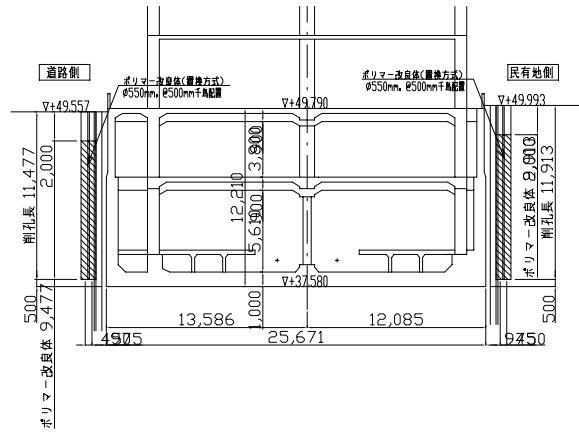


図 14 ポリマー免震材の配置図

設される計画であり、その場合には図 13 に示したように、地盤変位に対する効果と慣性力による効果に対しては、トレードオフの関係になる。なお、図 13 では建屋を線形で扱っているので、慣性力による影響が強く現われ過ぎているが、本検討では建屋の柱の降伏を考慮しており、慣性力の影響は図 13 ほど大きくないことを付記しておく。

既存開削トンネル施工時に残置されている矢板や周辺の施工環境条件を制約条件として、ポリマー材の物性値や配置をパラメトリックに変化させて、諸条件を決定した。その結果、せん断弾性波速度比が 0.1 程度の剛性を有するポリマー材を用いることとした。また、ポリマー免震層の配置については、図 10(c)のようにある程度トンネル壁体から離して設置しても問題ないことから、残置されている矢板などを勘案して、図 14 の位置に配置することとした。施工法としては、ポリマー免震材を柱状に千鳥配置にする。

上記の設計条件のもと、構造物の耐震性照査を実施する。照査は、2 次元 FEM 解析による。解析モデルは図 15 に示す通りである。地盤、ポリマーおよび部材の非線形性を考慮した。地盤は修正 RO モデル、ポリマーは双曲線モデル、部材は武田モデルでそれぞれ表現した。ポリマー材を双曲線で設定した理由は、ポリマーの有する強度の上限値をきっちりと評価するためである。ただし、双曲線モデルとした場合には、履歴減衰を過大に評価する傾向があり、これについては、今後検討する必要がある。

さて、照査結果を表 1 に示す。対策前後のせん断の安全度を見てみると、側壁・中柱とも免震効果によりその断面力が有効に低減していることが確認される。

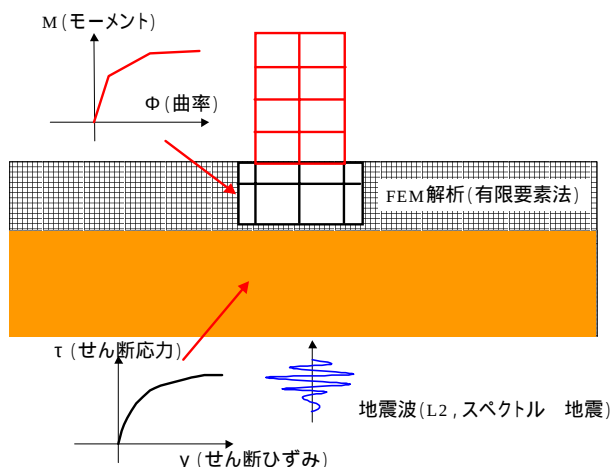


図 15 検討モデル

表 1 耐震性照査結果の例

		対策前	対策後
上床板～下床板 相対変位		99mm	64mm
せん断力	中柱(1階)	2170 kN	1950 kN
	中柱(2階)	1513 kN	1400 kN
	側壁(1階)	872 kN	882 kN
	側壁(2階)	2632 kN	1965 kN

6. まとめ

本研究の主要な結論を下記に示す。

- 1) 開削トンネルの両側にポリビニルアルコール系ポリマー材（ポリマー）によるゲル状の柱状もしくは壁状の免震層を設けることにより、地盤変位による影響を遮断する工法を提案した。本工法は、既設の開削トンネルでも新設の開削トンネルでも適用可能である。
- 2) Kinematic 相互作用が卓越する場合には、免震材の剛性としては、せん断弾性波速度比で 1/100 までであれば、柔らかいほどトンネルく体の断面力の低減効果がある。免震材の層厚は 400mm 程度あれば、十分である。免震材の設置位置については、それほど感度は高くないので、残置されている土留め等を勘案して、設置すればよい。
- 3) ただし、開削トンネルの上部に建築建屋が構築され

る場合など、Inertial 相互作用が卓越する場合には、ポリマー免震層を設置することは、逆効果を有する。よって、このような構造形式の場合には、地盤変位からの作用と慣性力からの作用については、免震層を設計する際にはトレードオフの関係になる。

- 4) 実構造物に対する適用検討を行い、実現場への適用の目処がたった。

ただし、以上の検討は土被りが無い状態での検討であり、今後、より広い条件での検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 減震・免震・制震構造設計法ガイドライン（案）：土木学会 地震工学委員会 減震・免震・制震小委員会，2002.01.
- 2) 地下構造物の免震設計法マニュアル（案）、建設省 土木研究所、平成10年9月
- 3) 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2回免震・制震コロキウム講演論文集，pp.255-260，2000.
- 4) 鈴木猛康，勝川藤太：滑動塗料を用いた地下構造物の免震構造，第2回免震・制震コロキウム講演論文集，pp.311-318，2000.
- 5) 西山誠治，川満逸雄他：スリップシートを用いた矩形地下構造物の免震に関する一考察，第2回免震・制震コロキウム講演論文集，pp.295-302，2000.
- 6) 金子誉，鈴木猛康，勝川藤太，松本達治：高軸力を受ける地下構造物中柱用の免震装置，第2回免震制震コロキウム論文集，pp.319-325，2000.
- 7) 中村敏晴，栗本雅裕，竹内幹雄，遠藤辰巳：地中構造物の中柱滑り支承の効果，第26回地震工学研究発表会論文集，pp.1089-1092，2001.08.
- 8) 館山勝，矢口直幸，平山勇治，花森一郎：ポリマー地盤改良に関する基礎的研究，鉄道総研報告Vol.16，No.3，pp.19-24，2002.03
- 9) （財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善出版，1999.

(2005年03月04日)

ISOLATION METHOD FOR CUT AND COVER TUNNEL USING POLYMER PAMATERIAL

Yoshitaka MURONO, Satoshi KIRYU, Masaru TATEYAMA, and Syousuke KOBAYASHI

An effective reinforcement method for the side wall of a cut and cover tunnel has not been established yet. The behavior of cut and cover tunnel is strongly controlled by the deformation of the soil surrounding the tunnel. It is said that, therefore, the best way to improve the seismic performance of the tunnel is to cut the action transmitted from the ground to the tunnel. A new concept for seismic countermeasure of the cut and cover tunnel is developed. Thin walls made by a polymer material, whose stiffness are extremely small, are constructed at both sides of the tunnel. This thin wall, which is called "the isolation wall", reduce the action transmitted from the ground and make the deformation of tunnel small. In this study, the efficiency of the newly developed method is demonstrated through the analytical simulation, especially from the viewpoint of SSI (Kinematic interaction and Inertial interaction).