

土被りを有する開削トンネルにおけるポリマー 免震工法の適用性とメカニズム

桐生 郷史1·室野 剛隆2·盛川 仁3

1ジェイアール東日本コンサルタンツ (〒171-0021 東京都豊島区西池袋1-11-1)
E-mail: kiryu@jrc.jregroup.ne.jp
2鉄道総合技術研究所 (〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: murono@rtri.or.jp
3東京工業大学大学院 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-G3-7)
E-mail: morika@enveng.titech.ac.jp

既設の開削トンネルの耐震補強は、中柱については、鋼板巻き補強などの耐力補強工法が有効な方法として定着しているが、側壁については有効な補強法がないのが現状である.また、既に供用されている地 中構造物を対象とした場合は、施工上の制約などがあるため、既存の耐力補強工法が適用できないことも ある.そこで、著者らの一部は、既設開削トンネル外側の側面に免震層(変位吸収層)を配置して地震外 力の低減を図る工法が開発してきた.免震層の材料としては、ポリビニルアルコール系ポリマー材(以下、 ポリマー)という柔軟な材料を用いることで、実用性を高めた工法としている.本論文は、このポリマー 材を用いた免震工法の、より詳細な免震効果のメカニズムを把握するため、免震工法を適用した時に、上 載土が開削トンネルに与える影響や、免震効果に影響を与える要因について解析的に検討した.その結果、 土被りによる上床版周面せん断力が免震効果に及ぼす影響は小さいのに対して、地盤と構造物の剛性比が 免震効果に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった.

Key Words Cut and cover tunnel, Isolation wall, Polymer, Kinematic interaction, Inertial interaction

1. はじめに

既設の開削トンネルを耐震照査した場合,中柱や側壁 に耐力不足が見られることがある.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,鋼板巻き補 強などが有用な手法として定着している.しかし,既設 開削トンネルなどの地中構造物では,中柱以外の部材に ついては,地盤中に埋設されているため,有効な補強方 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,夜間に供用されているトンネルを封鎖して施工する 必要があること,さらに,アンカーボルトなどを挿入す るための削孔が必要であることから,時間的・経済的に も大変な作業となる.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 低減させる工法が提案されつつある¹⁰².

そこで,著者らの一部は,地中構造物に作用する地震 力を低減する方法として,トンネルの側面部に実用性の あるポリビニルアルコール系ポリマー材で構築した変位 吸収層を設ける免震工法(以下,ポリマー免震工法)に ついて検討を行ってきた³⁴⁴.これらの成果をもとに,当 該工法は,駅部の開削トンネルにおいて実用化されてい る⁵.しかしながら,これまでの検討では,駅部を想定 した土被りのない地中構造物を対象としていたことから, 土被りを有するような一般的な開削トンネルの免震効果 に関する詳細なメカニズムは未解明である.そこで,よ り詳細な免震効果のメカニズムを把握するため,免震工 法を適用した時に,上載土が開削トンネルに与える影響 の程度や,免震効果そのものに影響を与える要因につい て解析的に検討した.

2. ポリマー免震工法を有する開削トンネルの地 震時挙動

著者らは、これまでに土被りを有しない条件下でポリ マー免震工法を用いた場合の有効性⁴を検討したが、こ こでは、より一般的な条件下で、その有効性を検討する. 一般的な開削トンネルでは、数 m の土被りがある場合 が多く、上載土が周面せん断力として、開削トンネル上 面に作用することが考えられることから、上載土と免震 工法の関係について把握する.また、地盤と構造物の剛 性比が地震時の応答値に影響することが知られているの で、地盤と構造物の剛性の差が免震効果にどのような影 響を与えるかについても検討する.

(1) 解析条件

対象構造物および地盤の構成を図-1 に示す.対象構 造物は,幅 16.0m,高さ 6.0mの1層 2径間の開削トンネ ルである.上床版直上の上載土は N値 10 相当の埋戻し 土として評価した.解析は、2 次元 FEM 動的解析を用 いた.解析モデルを図-2 に示す.本解析では、地盤お よび免震層は平面ひずみ要素、開削トンネルは梁要素と してモデル化した.地盤の非線形性は、修正 R-Oモデ ル⁶⁰⁷で表現した.ポリマー免震層に関しては、正確に その挙動を評価できる構成則は現在はないものの、強度 の頭打ちは表現できるモデルとして双曲線モデルを用い た.また、開削トンネルの非線形特性は、トリリニア型 モデルを用いた.免震層の基本特性については、これま での検討結果⁴を踏まえ、免震層の幅は 450mm、深さは 地表面から構造物下端とし、物性値は、現地盤の約



図-1 解析対象地盤と構造物

表-1 解析ケース

	土被り	構造物 剛性	模式図			
ケース			無対策	免震対策	摩擦カット	摩擦カット +免震対策
A	無	岡山				
в						
с	有	柔				

1/100 相当となるせん断剛性とした.また,ポリマー材の室内試験結果³より,免震層の単位体積重量は 10kN/m³,ポアソン比は 0.49 とした.また,解析に用いた入力地震動は,鉄道構造物の耐震設計⁸で用いられている基盤入力用地震波であり,その波形を図-3 に示す.

その他の解析条件として、時間積分は Newmark の β 法(β =1/4)、計算時間間隔は 1/1000 秒、継続時間は 16 秒間とする.また、地盤および構造物の減衰定数は、振 動数 2Hz~5Hz の帯域で 5%程度となる Reyleigh 減衰を用 いた.

解析ケースの一覧を表-1 に示す. 土被りの有無(土 被り厚 5.0m) と構造物の剛性を変えた 3 ケースに対し て,無対策の状態およびポリマー免震を施した状態を比 較し,免震効果について検討した. 地盤と構造物の剛性 比が地震時の応答値に影響することが知られているので, その影響についても検討し得るよう,構造物の剛性を変 化させている. 土被りのあるケースについては,上載土 の影響を除去できると考えられる滑動シートが利用され ていることを想定して,上載土の摩擦をカットしたケー ス (ケース B) についても検討をおこなった. なお,摩 擦カットは,ジョイント要素を用いてモデル化した.









(2) 常時(自重)状態に関する検討

開削トンネルのような地中構造物は、上載荷重や地盤 反力、側壁に作用する土圧との釣合いによって安定して いる構造物である.ポリマー免震工法のように、柔軟な 材料を配置した場合、常時状態における側方の応力状態 が変化することが考えられるため、常時状態の構造物の 安全性を確認することが必要である.そこで、免震工法 を適用した際の常時における断面力分布について検討す る.

図-4 に土被りのないケース A, 図-5 に土被りのある ケース B の常時における断面力分布図(曲げモーメン ト・せん断力)を示す. 図中の破線は無対策時,実線は 免震対策時の断面力分布である. なお,ケース C につ いては,ケース B と同様の傾向であるため,ここでは 割愛した. いずれのケースにおいても,免震対策を施す ことにより,無対策時の応力常態と異なっている.

ケース A については、免震対策により、側壁の断面 力は、構造物下端位置で小さくなっている.また、上下 床版の中柱付近では、無対策時に比べて断面力が大きく なっている.

ケース B については,免震対策により,側壁の断面 力は,等分布に近い形状となり,小さくなっている.そ の一方で,上下床版の中柱付近においては,無対策時に 比べて断面力が大きくなっている.

ポリマー免震工法を用いると開削トンネル側面に非常



図-5 常時状態の断面力の比較(ケースB)

に柔らかいポリマー免震層が配置されることで、ポリマ ー免震層と接している側壁の曲げモーメントが滑らかに なり、その結果として、側壁の断面力は大幅に減少した と考えられる.一方、上下床版の中柱付近では、側壁の 断面力が減少することに伴い、応力が再配分され、部材 の応力の分担率が変化することで断面力が増加している と考えられる.

常時状態においては、免震対策によって、断面力が減 少する部材がある反面、応力が再配分され、部材の応力 の分担率が変化することで、断面力が大きくなる部材も ある.特に、上下床版については、免震対策によって常 時状態の断面力が大きくなる.従って、既設構造物へ当 該免震工法を適用する際は、部材の応力の分担率が変わ ることを考慮し、常時における中柱付近の上下床版の耐 力が十分であるかどうかを確認することが重要である.

(3) 地震時増分断面力に関する検討

図-6 に地震時最大せん断力分布を無対策と免震対策 で比較した結果を示す.いずれのケースについても側壁 のせん断力分布が,免震対策時には滑らかになり,無対 策と比べて地震時の断面力が小さくなっていることが分 かる.この分布形状の傾向は,常時における無対策と免 震対策の傾向と同様であることから,地震時最大断面力 に常時の影響も含まれていることが分かる.

そこで、純粋に地震による増分荷重に対する効果を抽 出するために、ここでは、式(1)に示す指標αを導入し



た. α は, 無対策時の地震時増分断面力に対する免震 対策時の地震時増分断面力の比率である. つまり, α が 1.0 未満であれば, 免震効果が発揮されていると判断 できる. なお, 抽出した断面力は, 側壁, 上下床版, 中 柱の各部材中の最大断面力である.

式(1)を用いて各部材毎に地震時増分断面力の比率を 整理した結果を図-7に示す.

ケース A, およびケース B は, 全ての部材で免震対 策によって地震時増分断面力の比率が 1.0 より小さく, 免震効果が発揮されていると判断できる. それに対して, ケース C では, 側壁, 中柱において増加断面力率が 1.0 より大きく, 免震効果が発揮されていないことが分かる.



表-2 構造物と自由地盤の相対変位

検討	ァース	構造物る _s (mm)	自由地盤る _g (mm)	
F 7	無対策	6.3	6.8	
7-XA	免震対策	3.5		
4-7P	無対策	20.6	24.2	
-7-XB	免震対策	18.7		
4 -70	無対策	45.1	24.2	
-)	免震対策	53.9		

特に側壁において免震効果が発揮されていない.これは、 常時の断面力分布(図-5)の影響を受けて、地震時の側 壁の最大断面力が小さくなり、免震効果を発揮した結果 (図-6)とは異なっている.また、ケースAとケースB を比較すると、土被りが大きくなることによって、免震 効果は小さくなっていることがわかる.さらに、ケース BとケースCを比較すると、同じ土被りの開削トンネル であっても免震効果に差が生じることが分かる.

以上のことより,免震効果には,上載土の地震時の挙 動や,構造物と地盤の剛性比が寄与していると推察される.

ここで、構造物および地盤の層間変位の最大値と免震 効果の関係について検討する.層間変位とは、図-8 に 示すように、構造物上床版高さ位置の変位から下床版高 さ位置の変位を差し引いたもので、 δ_s は構造物中柱位 置、 δ_s は自由地盤位置の変位である.各ケースにおけ る層間変位を表-2 に示す.免震効果の比較(図-7)で、 免震効果を発揮したケース A、ケース B については、 免震対策時の δ_s が無対策時より小さくなっている.免 震効果を発揮しなかったケース C は、免震対策時の δ_s は無対策時よりも大きくなっており、構造物の層間変位 δ_s と免震効果に関連があることが分かる.さらに、無 対策時の相対変位に着目すると、免震効果が発揮された



図-9 上載土の影響検討

ケース A, Bは、無対策時における地盤の層間変位 δ_s が 構造物の相対変位 δ_s より大きいのに対して、免震効果 が発揮されなかったケース C については、地盤の層間 変位 δ_s が構造物の層間変位 δ_s よりも小さくなっている. つまり、無対策時に $\delta_s - \delta_s > 0$ の場合は、無対策時に おいて地盤が作用として働いているモード、逆に $\delta_s - \delta_s < 0$ の時は、地盤が抵抗として働いているモー ドであると考えられ、その違いが免震効果に影響してい るものと推察される.

3. ポリマー免震工法の有効性に関する考察

土被りの有無によって,免震効果に差異が確認された. その要因としては、上載土により発生する上床版の周面 せん断力による影響や、土被りがあることによる地盤の 変位分布の違いなどが考えられる.そこで、これらにつ いて以下に考察する.

(1) 上床版の周面せん断力に関する影響

上載土が上床版の周面せん断力に与える影響を把握す るため、上床版にせん断力をカットする滑動シートを配 置して、その影響について検討した. 図-9 にケース B について滑動シートの有無による地震時増分断面力の比 率の違いを示す. 比較は、地震時増分断面力の比率でお こなうこととし、無対策時、免震対策時、それぞれにつ いて、以下の式(2)、式(3)に準じておこなった.

$$\alpha 2 = \frac{(地震時最大せん断力)_{\theta_{+,h_{y}}} - (常時せん断力)_{\theta_{+,h_{y}}}}{(地震時最大せん断力)_{\theta_{0}} - (常時せん断力)_{\theta_{0}}} (3)$$

ここで、下付き文字の「カット」は、滑動シートがあ



図-11 上床版のせん断力刻歴波形

り、上床版に作用する摩擦力をカットすることを示し、 「免+カット」は、滑動シートに加え、免震対策をおこ なった場合であることを示す.

免震工法の有無に関わらず、いずれの部材も滑動シートを配置しても地震時増分断面力の比率は、ほとんど変わらないことが分かる.

図-10 にケース B の無対策および滑動シートがある場合の上床版直上の地盤のせん断応力の時刻歴波形を, 図-11 に上床版のせん断力の時刻歴波形を示す. なお, 抽出した要素番号は図-12 に示すとおりである. 図-10 より,無対策の場合は,上載土の粘着力 C を上限値と した挙動を示しているのに対して,滑動シートを配置し た場合は,地盤のせん断応力がほとんど生じていないの が分かる.しかしながら,地盤のせん断応力に差がある



にも関わらず、図-11 に示す上床版のせん断力では、いずれの部材も最大断面力が発生する 20s 程度までは、ほぼ同じ断面力となっており、本検討ケースにおいては、上載土の影響は小さいことがわかる.

以上のことより,図-7 で示した増加断面力率の比較 で確認した免震効果の差異は、上床版の周面せん断力の 影響よりも、構造物の剛性と側方地盤からの地盤変位に 強く支配されているものと考えられる.

(2) 地盤の変形モードに関する影響

上載土が上床版のせん断力に与える影響は小さいこと が確認されたことから、無対策時の構造物周辺地盤の応 力状態と免震効果の関係を把握するため、構造物の相対 変位*δ*,が最大値をとる時刻の周辺地盤の応力状態を検 討した.地盤の応力状態抽出時の変形モードは、図-13 に示すように、紙面の右側から左側へ地盤・構造物が変 形している状態である.X方向の応力コンターを図-14 に示す. 圧縮応力を正とし引張が生じている場合はゼロ として表示している.また、地震時の挙動として推察さ れる変形モードと応力状態の関係を図-15 に模式的に示 す.

構造物の変形に大きく寄与すると考えられる側壁の上 部付近に着目すると、免震効果が発揮されたケースA およびケースBについては、紙面で構造物の左側の地 盤において、上床版付近で圧縮応力が小さい.それに比 べて、紙面で構造物の右側の地盤では圧縮応力が大きく なっている.圧縮応力が大きいということは、地盤が右 から左へ変形した時に構造物の反力として地盤の応力が 大きくなっていると判断できる.つまり地盤が作用とし て働いているモードとなっている.これに対し、免震効 果が発揮されなかったケースCについては、紙面で構 造物の左側の地盤で圧縮応力が大きく、紙面で構造物の 右側の地盤では圧縮応力が小さくなっており、地盤が抵



図-15 変形モードと応力状態の関係

抗として働いているモードとなっていることが分かる. また、ケースB、ケースCの上床版付近の地盤の応力分 布がいずれも殆ど変わらないことから、免震効果に支配 的な要因は、上載土の応力状態ではなく、側方地盤の応 力状態の違いであると考えられる.この結果は、前項の 結果と調和的である.

以上より,無対策時の地震時の地盤の応力状態を把握 することにより,免震工法の効果を定性的に予想するこ とが可能であるということを示唆するものである.

4. おわりに

開削トンネルの周辺地盤に柔軟案材料を配置する免震 工法について、土被りがあるような一般的な条件下での 免震効果について解析的な検討を行い、以下の結果を得 た.

 免震工法を施すことによって、常時において、免震 層と接する側壁の断面力分布は滑らかとなり、断面 カが低下する.一方,上下床版の断面力は無対策時 に比べて増加することがあるため,免震工法を適用 する際には,常時における構造物の安全性の検証を 行う必要がある.

- ・ 土被りを有する開削トンネルにおいて、地震時に上 載土が上床版周面せん断力に与える影響は小さい.
- 免震工法により断面力が低減する免震効果は、地盤 と構造物の剛性比によって異なる.無対策時に地盤 が構造物に「作用」として働くか、地盤が構造物に 「抵抗」として働くかの違いが、免震効果に影響を 及ぼしていることが確認され、また、免震工法の適 用による効果の有無の判断は、無対策時の構造物周 辺地盤の地震時における圧縮領域の状態から推定す ることできる可能性が示された。

参考文献

- 1) 減震・免震・制震小委員会:減震・免震・制震構造物設計法 ガイドライン,土木学会 地震工学委員会,2002.
- 2) 土木研究所:地下構造物の免震設計法マニュアル(案),建 設省,1998.

- 3) 舘山勝, 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.
- 4) 室野剛隆,桐生郷史,舘山勝,小林正介:ポリマー材を用いた開削トンネルの免震工法,第28回土木学会地震工学論文集,2005.
- 5) 日経BP社:ポリマーの壁を築き免震構造に~横浜市営地下 鉄中川駅耐震補強工事(横浜市)~, 日経コンストラクシ ョン, pp24-28, 2006.3.10.
- 6) 龍岡文夫,福島伸二:砂のランダム繰り返し入力に対する応 カ~歪関係のモデル化について(1),生産研究30巻9号, pp.356-359,1978.
- 7) 龍岡文夫,福島伸二:砂のランダム繰り返し入力に対する応 カ~歪関係のモデル化について(2),生産研究30巻10号, pp.375-378,1978.
- (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,1999.

(2007.06.29 受付)

MECHANISM OF A METHOD TO ISOLATE THE CUT AND COVER TUNNNEL WITH THE COVERED SOIL

Satoshi KIRYU, Yoshitaka MURONO and Hitoshi MORIKAWA

An effective reinforcement method for the side wall of a cut and cover tunnel has not been established yet. It is difficult to apply the reinforcement method that has already been developed because the outside of underground structure is surrounded by ground. We, therefore, develop a new seismic countermeasure of the under ground structure based on new concept. In this method a polymer material whose stiffness is quite flexible, is embedded both sides of the tunnel. In this paper, we examined the effect of the covered soil, and analyzed the causes of the effect on seismic isolation. It was found that the covered soil is hardly influenced by the effect of the isolation wall, and it was clarified that the effect of the rigidity ratio between the ground and the structure was high.