

# 地震から地下構造物を守る

—地下構造物に対する免震構造の開発—

Shigeki UNJOH  
**運上茂樹**

正会員 工博 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 耐震研究室室長

Takeyasu SUZUKI  
**鈴木猛康**

正会員 工博 (株)熊谷組技術研究所 土木耐震研究グループ課長

Earthquake Protective Technology for Underground Structures

— Development of Seismic Isolation Technology —

## 地下構造物の地震被害と対策

1995年1月の兵庫県南部地震における地下構造物の被害は、建築物や橋などの地上構造物に比較すると全体としては軽微であったが、神戸高速鉄道大開駅の被害のように、中柱のせん断破壊に伴って上床板が崩落するという、これまでなかったような甚大な被害が生じたものもみられた。また、下水道施設などの地下埋設構造物では、多くの目地ずれや管体のひび割れ、立坑とトンネルの接合部の損傷、継手間の過度な変位による漏水などの被害が報告されている<sup>1), 2)</sup>。

地下構造物には、地震時に地盤との相互作用によって変形や断面力が生じることから、地盤条件や構造条件の変化部など、地盤や構造物間の振動特性の違いにより地下構造物に変形や断面力が集中するようなか所において一般に被害が生じやすい。これは、1983年日本海中部地震や1985年メキシコ地震などの、兵庫

県南部地震より前に起きた地震による被害からも知られている<sup>3)</sup>。

このような箇所を有する地下構造物の耐震性を向上させるには、どのようにすればよいか。通常の地上構造物のように、地震力に抵抗できるように鉄筋量を増やしたり断面を大きくしたりすると、逆に変形に対する追随性が小さくなり、耐震性を向上させるうえでは必ずしも有利とはならない。地盤の変形によってその耐震性を支配される地下構造物の場合には、伝達される地盤変形の影響を低減させることがキーポイントとなる。

建設省土木研究所と(財)土木研究センター、ならびに民間17社は、地下構造物の耐震性を向上させるための技術として、地盤と地下構造物との間に周辺地盤よりもせん断弾性係数の小さい免震層を設置し、これによって地盤変形から地下構造物を絶縁する免震構

造技術の開発を行った<sup>4)</sup>。

## 免震構造とは

地下構造物に作用する地盤変形の影響を低減させる1つの方法としては、地下構造物自体の剛性を小さくして地震時の地盤の変形に追随しやすくする方法がある。可撓セグメントや可撓性継手、ならびに弾性ワッシャーを用いたリング継手を採用した地下構造物は、その代表例である。

地下構造物に対する免震構造は、構造物の剛性は変化させずに構造物に伝わる地盤変形自体を直接的に低減させようという発想である。図-1に示すように地下構造物の外周に周辺地盤よりもせん断弾性係数の小さい免震層を設置することにより、ここで地盤のせん断変形を吸収し、地震時に地盤の変形が地下構造物に直接伝わらないようにしようというものである。免震層のせん断弾性係数としては、周辺地盤の1/100程度以下にすると地下構造物に生じる変形や断面力を有効に低減させることができる。このように免震構造では、継手等の変形によって地盤変形に追随する構造と違って、地下構造物本体に過度な変位を生じさせないようにすることが可能となる。また、一般に線状地下構造物で耐震設計上重要となる軸方向のみならず、横断方向に対しても有効に機能する。さらに、構造上防水・止水性が問題となる地下構造物の場合には、防水・止水性を有する免震材を設置することにより、耐震性

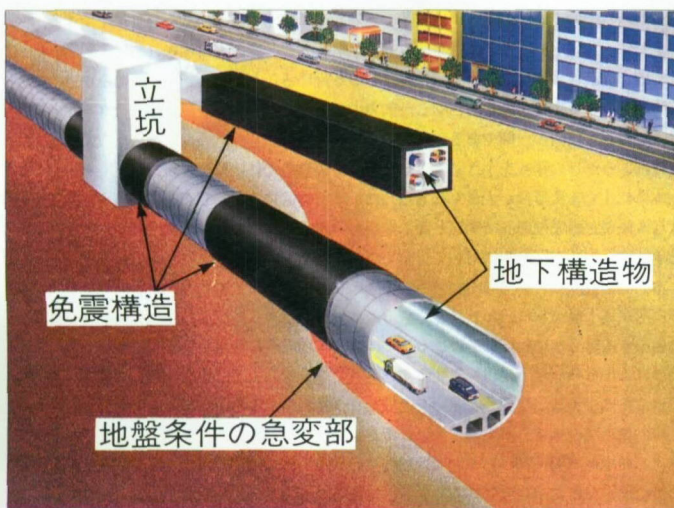


図-1 免震地下構造

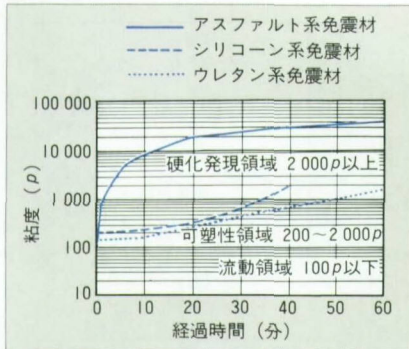


図-2 シールドトンネルに適用する免震材の混合後の粘度の変化

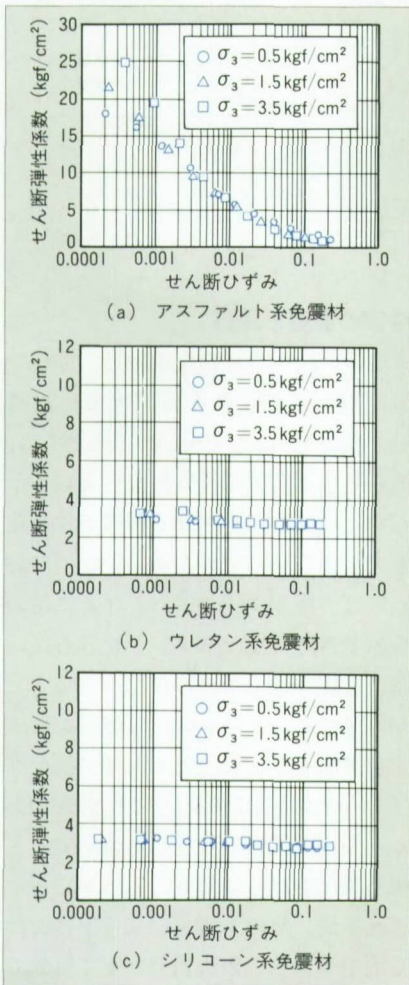


図-3 シールドトンネルに適用する免震材のせん断弾性係数

の向上とともに、防水効果も同時に得ることができる利点を有している。

### 開発された免震材の特性と施工法

地下構造物に適用可能な免震材としては、免震効果を発揮できる性能を有するとともに、裏込め材としての機能も有する必要がある。免震材の開発は、シールド工法と開削工法の施工法に応じて、以下のような要求性能を設

表-1 開発された免震材

トンネルの施工方法	免震材	特徴
シールドトンネルに適用可能な免震材	アスファルト系免震材	アスファルト乳剤に硬化材としてセメントを混合したものを主材とし、ゲル化材として高吸水性ポリマーを加えた免震材
	ウレタン系免震材	主材および硬化材からなる2液混合型のウレタン系材料に、塑性調整材としてポリオール系化合物を加えた免震材
	シリコン系免震材	主材および硬化材からなる2液混合型のシリコン系材料に、塑性調整材としてポリエーテル系化合物を加えた免震材
開削工法に適用可能な免震材	液状ゴム系免震材	ポリブタジエンを主成分とした液状ゴムとアスファルトからなる主材に、硬化材としてイソシアネートを加えた免震材
	固形ゴム系免震材	軟質ゴムチップと粉碎塵タイヤを、空隙を有するようにバインダーで固めたゴムチップパネル

定して行った。

- ①小さいせん断弾性係数を有する軟らかい硬化物で、高いせん断変形性能を有すること
- ②耐久性に優れ、長期安定材料であること。また、体積変化が小さい材料であること
- ③施工性に優れること（例えば、シールドトンネルの場合は、液状で圧送可能で材料分離を起こさず、高い充填性を有すること等）
- ④高い止水性を有すること
- ⑤地下水に希釈されないこと
- ⑥有害物質を発生しないこと

以上のような要求性能のもとで、表-1に示す5種類の免震材が開発された。せん断弾性係数などの力学的特性はもちろんのこと、耐久性、止水性、クリープ特性、さらに施工性に対して重要となる硬化特性などの材料試験を行った。

シールドトンネルの場合を例にとると、免震材は現場において注入の直前に必要な材料を混合攪拌してテールポイドに注入することになるが、注入後にすみやかにゲル状となって地山を保持するとともに、その後の注入によって加圧されると可塑状となって流動し、確実に空隙を充填できるような通常の裏込め材に要求される性能も有していることが必要とされる。図-2は、開発した5種類の免震材のうちシールドトンネルに用いるアスファルト系、ウレタン系、シリコン系免震材の硬化特性を示したものであり、いずれも混合後に必要な粘度を発揮できること

がわかる。また、いずれの材料も水中で分離することなく硬化することが可能であり、水中でも所要の免震層の形成が可能となる。

図-3は、上記の3種類の免震材を対象に中空ねじりせん断試験により求めた動変形特性を示したものである。試験においては、土被り圧に相当する拘束圧を変化させたり、大地震時に免震材に生じるひずみの範囲を変化させている。繰返し載荷速度としては、表層地盤の卓越振動数を考慮して1Hzを基本としている。これによれば、ウレタン系およびシリコン系の弾性免震材は、想定するせん断ひずみの範囲内でほぼ一定のせん断弾性係数を有し、拘束圧にも依存せず一定の弾性特性を有している。粘弾塑性材料であるアスファルト系免震材ではひずみ依存性を有するが、ほかの2種類の免震材と同様に拘束圧依存性は小さい。このような免震材の力学的特性をもとに免震層の厚さや長さの設計、さらに、免震地下構造物の耐震設計を行うことになる。

図-4は、開発された免震材の施工法を示したものである。シールド工法においては、通常のテールポイドへの裏込め材と同様の施工方法であり、テールポイドに坑内から免震材を注入充填することにより、トンネルと周辺地盤の間に免震層を形成させるものである。免震材のシールドマシン切羽側への流入を防止し、確実にテールポイドに充填するためには、シールドマシンのテールから切羽への免震材の逆流防止に配慮すれば、免震構造としての特別な

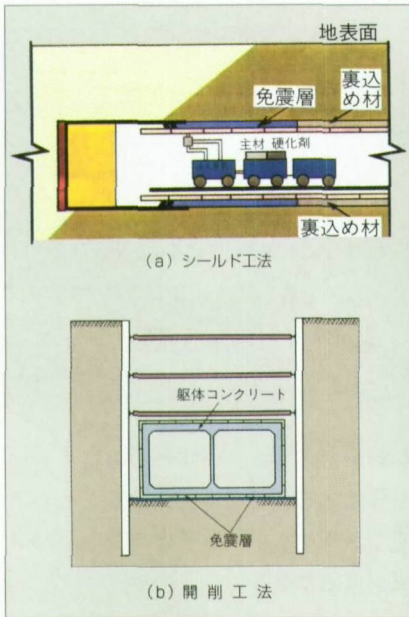


図-4 免震トンネルの施工法の概要

装置は必要とされない。また、開削工法の場合には、必要な施工空間を確保したうえで免震層を形成しながらトンネルを構築していく施工法となる。

免震構造の場合には、特別な材料である免震材や免震材の注入システムが新たに必要となるが、これまでの検討では免震層の長さを適切に設計すれば可撓セグメントよりも経済的になる可能性がある。

#### 模型振動台実験による免震効果の検討

大型振動台を用いた模型実験により、免震効果を検討した例を以下に示す。実験では、写真-1に示すように建設省土木研究所所有の3次元大型振動台の上に実物の約1/70に縮小したシリコン製の地盤模型を設置し、この地盤模型の中に免震構造を採用した場合と採用しなかった場合の両方のトンネル模型を埋設している。この実験は、トンネルにひずみの集中しやすい地盤条件急変部を対象にしたものであり、地盤模型に硬質地盤と軟質地盤の境界部を設けている。この地盤条件の急変部をトンネルが通過する場合を想定し、地震時にトンネルに生じるひずみを計測して、免震構造の採用によりどの程度ひずみが小さくなるか、また、免震

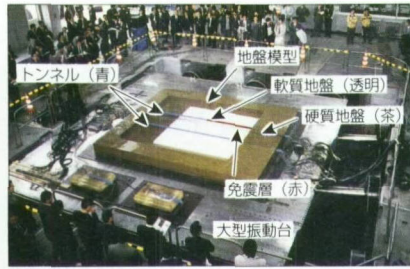


写真-1 地盤条件急変部を対象にした振動台実験による免震効果に関する検証

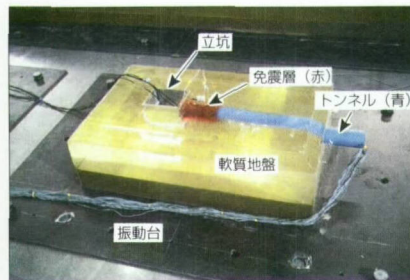


写真-2 立坑とトンネル接合部を対象にした振動台実験による免震効果に関する検証

構造を有するトンネルに対して、解析による実験結果の追跡が可能かどうかを検討した。写真-2は、構造条件の変化部として立坑とトンネルの接合部を対象とした模型を示したものである。実験では、立坑とトンネルを剛結した場合と立坑とトンネル間に免震構造を採用した場合の比較により、どの程度の免震効果が得られるかを検討した。

図-5は、実験結果の一例を示したものである。地盤条件変化部を対象とした場合には、地盤模型の卓越振動数である6.5Hzの正弦波でトンネル軸方向に加振した場合にトンネルに生じた最大軸方向ひずみ分布を示している。これによると、地盤条件急変部において集中するトンネルの軸方向ひずみが免震構造を採用することにより約30%低減することがわかる。さらに、立坑部とトンネルの接合部を対象とした場合については、トンネル軸方向に地盤模型の卓越振動数である8.5Hzの正弦波で加振した場合にトンネルに生じた最大軸方向ひずみ分布を示している。接合部を剛結した場合には接合部には大きな軸方向ひずみが生じるが、免震構造を採用した場合には免震層で絶縁されることにより、トンネルにはほとんどひずみが生じていないことがわかる。

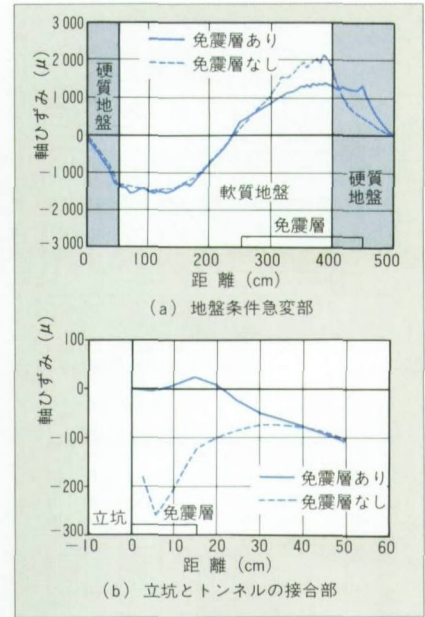


図-5 振動台実験による免震効果の検証 (正弦波加振によるトンネル軸方向ひずみ分布)

#### 今後の展望と課題

地盤と地下構造物を絶縁し、地震時の地盤変形の影響を低減する免震構造、免震材およびその施工法とともに、免震効果に関する模型振動台実験を示した。地盤条件変化部や構造条件変化部など耐震上の条件が厳しいか所においては、従来シールドトンネルに用いられてきた可撓セグメントよりも高い耐震性能を地下構造物に付与することが可能であるとともに、免震層を形成する区間を適切に設計すれば可撓セグメントよりも経済的になる可能性がある。今後、試験的な施工も含めて、実構造物における有効性の実証が必要とされるが、耐震上厳しい条件下における地下構造物の耐震構造として有効であると期待される。

#### 参考文献

- 1—建設省土木研究所：平成7年（1995年）兵庫県南部地震災害調査報告、第196号、1996.3
- 2—土木学会阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：土木構造物の被害 第2章トンネル・地下構造物、1997.5
- 3—川島一彦編：地下構造物の耐震設計、鹿島出版会、1994.6
- 4—建設省土木研究所・(財)土木研究センター・民間17社：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書（その1）・（その2）・（その3）、土木研究所共同研究報告書第154号・第192号・第211号、1996.11・1997.12・1998.9