

地下構造物に適用する免震技術

Seismic Isolation Technology applied to Underground Structures

鈴木 猛 康 (すずき たけやす)

中央復建コンサルタンツ(株) 東京本社総合設計室 部長

1. はじめに

本稿のタイトルとした地下構造物や基礎構造物に適用する免震技術は、構造物の外周あるいは外面の一部、あるいは構造物に近接した地盤中に、何らかの遮断層や遮断面を形成し、地震時に地盤から構造物に伝達されるひずみ、変位あるいは相互作用力の遮断、絶縁 (isolation) を図り、構造物に発生する断面力を低減する技術である。地上構造物における地震時外力は、特殊な条件を除けば地震慣性力のみであるのに対して、地盤と接する構造物にとって地震外力とは、地盤変位、周面せん断力、地震慣性力の3種類であり、そのうち構造物自体の地震慣性力の寄与は数%で、無視できる程度である。

地下構造物では、免震装置 (isolator) のせん断変形や滑動による地盤変位あるいは地盤ひずみの伝達の遮断、構造物外周に作用する周面せん断力の低減といった機能が不可欠である反面、長周期化や高減衰付加機能は不要である。しかし、地上構造物の免震において上部構造と下部構造の間に免震支承という免震装置を導入するように、地下構造物の免震でも構造物と地盤の間、あるいは構造物と近接した地盤内に免震層や滑動層といった免震装置を形成するので、地上構造物の「免震」とは定義が異なるものの、地下構造物に対しても「免震」という用語を採用し、地下免震技術 (Underground Seismic Isolation) と呼ぶことにしている。

図-1 は地下免震構造の模式図である。本稿では、最近開発され、実用化されつつある地下免震技術の現状を紹介し、本技術の課題と将来の方向性について述べる。

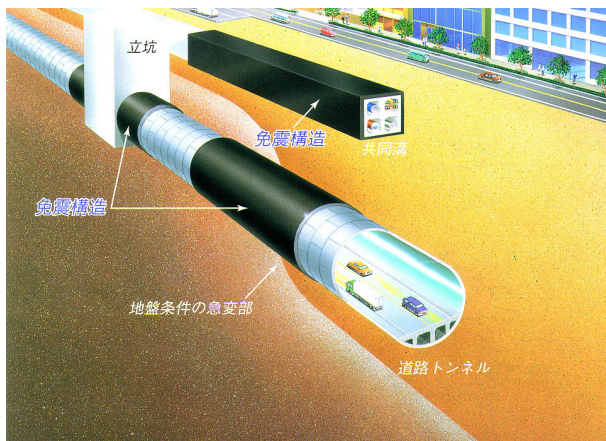


図-1 地下免震技術概念図

2. 免震技術の分類

地下免震技術には、ゴム弾性体を主体とする層状の免震体を構造物外周あるいは構造物と近接する地盤中における免震層の形成と、構造物外周あるいは構造物と近接する位置に、滑動しやすい面やシートを形成する滑り型免震の2種類に大分される。図-2に地下免震技術の分類を系統図として示した。

図の3列目で枠を薄く塗りつぶした免震層、免震パネル、滑動塗料、滑動シートについては、既に製品開発が行われており、実施工あるいは試験施工を終えているものである。免震層と免震パネルは、構造物の外周面にゴム系免震材による免震層を形成するもので、シリコン系免震材はシールドトンネルの裏込め注入材の代わりに、テールボイドへ液状の免震材を注入するものである。一方、免震パネルは、タイヤ粉碎ゴムチップをウレタンで固めた固形ゴムパネルであり、開削トンネルの躯体構築後、躯体外周面に貼り付けるものである。一方、滑り型免震構造では、滑動塗料を躯体外周面に塗布するものと、低摩擦シートを躯体外面に沿って設置するものがある。

本稿では、筆者が直接開発、実用化に係わったシリコン系免震材による免震層形成と滑動塗料を用いた滑り型セグメントについて、以下に紹介する。

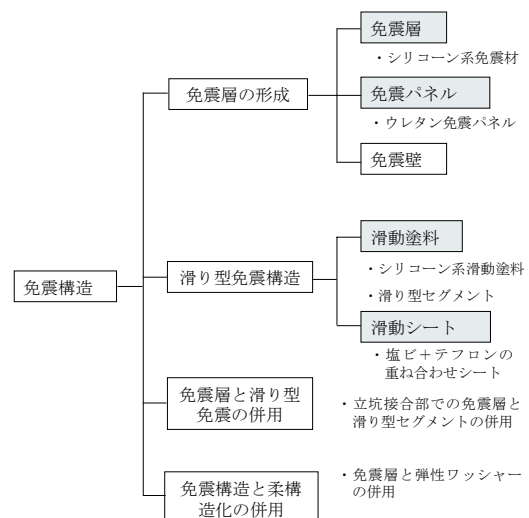


図-2 免震構造の分類

3. 免震層形成によるシールドトンネルの免震

3.1 免震材

シリコン系免震材は、シリコンポリマーを主成分とする主材と増量材であるフライアッシュを混合したA液と、硬化材に塑性調整剤を添加したB液とを、注入の直前で混合攪拌することによって、常温で硬化してゴム弾性体を形成する材料である。また、硬化時間は硬化材の配合で調整できる他、B液に塑性調整剤を添加することで混合直後に粘性を上昇させ、シールドトンネルにおける地山保持機能を与えることができる。フライアッシュの配合比により材料のせん断弾性係数 G を調整することができ、表-1のようにせん断弾性係数 $0.1 \sim 0.7 \text{ N/mm}^2$ の4タイプの免震材が既に開発済みである。図-3はこれら4タイプの免震材のせん断弾性係数に関するひずみ依存特性を、中空ねじりせん断試験によって求めたものである。試験における載荷振動数は大地震時の表層地盤の平均的な卓越振動数である 1Hz とし、20%を超える大きなせん断ひずみ領域まで試験が実施されており、材料のひずみ依存性はないことがわかっている。なお、また減衰定数は2%程度で、設計においては減衰項が無視できる弾性材料である。

表-1 シリコン系免震材の種類と物性値

種類 物性値	SISMO -001	SISMO -003	SISMO -005	SISMO -007
$G(\text{N/mm}^2)$	0.1	0.3	0.5	0.7
ν	0.48	0.48	0.48	0.48

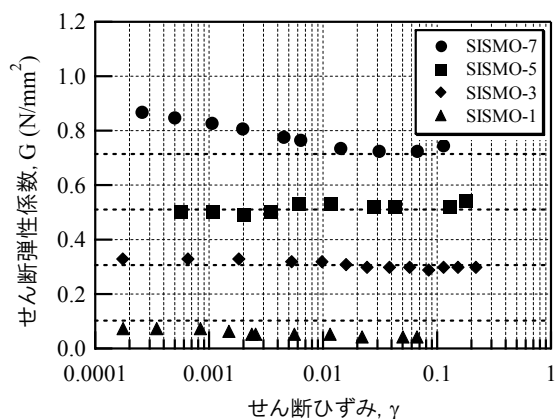


図-3 免震材のせん断弾性係数のひずみ依存性

3.2 施工

ここでは、免震構造の施工法（免震層の形成）について、国土交通省（旧建設省）名古屋国道工事事務所の中川共同溝工事で実施されたシールドトンネル発進立坑部における施工¹⁾を紹介して解説する。本共同溝の免震構造は、地下構造物の免震設計法マニュアル（案）²⁾に従って、軸対称 FEM モデルに基づく免震設計プログラム EASIT³⁾を用いて設計が行われた。立坑より約 10m の区間のトンネル外周に免震層を形成することにより、従来

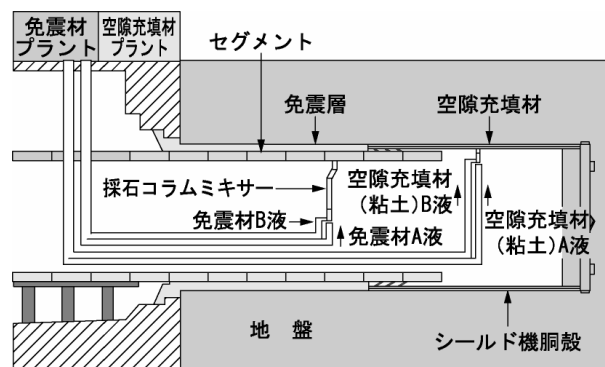


図-4 発進立坑部の免震構造の施工

構造である可撓セグメントで設計した場合に対して、費用は同等ながら耐震性能レベルをレベル1地震動からレベル2地震動対応へと1ランク向上させたものである。

図-4に発進立坑部における免震構造の施工の模式図を示す。図のように免震材は、シールド掘進に伴って発生するテールボイドへ、裏込め注入における即時注入と同様にセグメントの注入口より注入された(写真-1)。免震材注入工において懸念されるのは、免震材のゴム状硬化物が切羽へと移動してチャンバー内に取り込まれることによって発生する掘進トラブルである。これに対応するため、シールド機の中折れ部付近に配置した注入口より、シールド機鋼殻と地山との空隙に空隙充填粘土をシールド掘進時に注入し、テールボイドと切羽との間の空隙を塞いでいる。空隙充填粘土は掘削された地山の小さな空隙に圧入されることになるため、免震材の地山への逸脱防止にも効果がある。また、ボイドをできるだけ早期に充填することでテールボイドの地山崩壊や地下水および泥水の流入を防ぐというシールド工法の基本に忠実な免震材注入を可能とするため、予めセグメントピースの異なるトンネル軸方向位置に3カ所の注入口を設けておき、ボイドにもっとも近い注入口から注入を開始することによって、トラブルによる掘進停止からの掘進再開にも対応できるよう配慮された。

免震層を形成する免震材としては、シリコン系免震材 SISMO-005 を採用した。本材料は裏込め材と比較して地山中への逸脱が少なく、本共同溝でも注入率は120%に抑えられた¹⁾。

4. 滑り型セグメント

4.1 滑動塗料

滑り型免震構造として有効な低摩擦滑動面を生成する塗料として開発された、水膨潤性の水性エマルジョン型シリコン系滑動塗料について紹介する⁴⁾。この材料は、酸化チタンの微細粒子を充填材として多量に含有したシリコン系塗料であり、塗料膜が地下水等より水分を吸収し、構造物外面と塗料膜との間に酸化チタン微粉末と水とで構成される薄い滑材層を形成するものである。図-5に滑り型免震構造の滑動メカニズムを模式的に示す。地下構造物の外面に塗料を塗布、乾燥後、所定の位置に



図-5 滑り型免震構造の滑動メカニズム

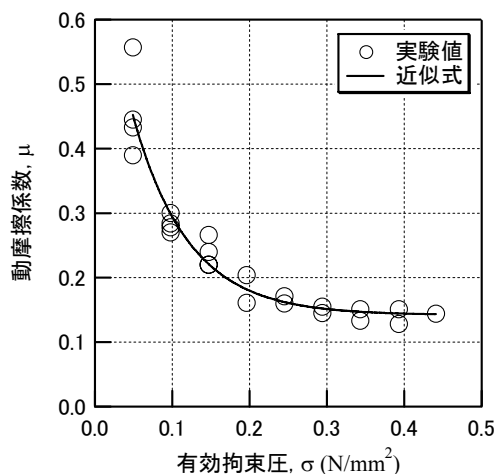


図-6 動摩擦係数の拘束圧依存性

設置し、裏込め材等で覆うことにより、地下水位以下では構造物外面と塗料膜による2枚の平滑面ならびに両者の間の滑材層が形成されることとなり、低摩擦で滑りが発生する条件が整う。なお、単に表面が平滑となる塗料や塗料膜表面が平滑となるような表面コーティング処理を行っても、免震効果が得られるほどの低摩擦係数を得ることが困難であることが確認されている。写真-2は、シールドセグメント外周面にシリコン系滑動塗料の塗布状況である。

図-6は、繰返し中空ねじりせん断試験で得られたシリコン系滑動塗料による滑材層の動摩擦係数の有効拘束圧依存性を示したものである⁴⁾。このような滑材層の動摩擦係数の有効拘束圧依存性を設計で適切に評価することが重要であることから、構造物に作用する有効拘束圧に応じて、滑材層の動摩擦係数を実験結果に基づいて設定し設計に用いることとした。なお、図-6に示されている動摩擦係数の実験値の近似値が、式(1)で与えられている⁵⁾。

$$\mu = 0.142 + 0.615 \exp(13.941 \sigma_e) \quad (1)$$

4.2 滑り型免震構造の施工

地下構造物の外周に滑動塗料を塗布する、あるいは滑動塗料を塗布した構造物を現場に搬入して組立てるのが、滑り型免震構造の施工である。したがって、特殊な施工は必要ないが、滑動塗料を塗布したセグメント（滑り型セグメント）を、セグメント工場から現場まで搬入し、また立坑より切羽まで搬送して組立てを行うまでの過程で、塗布面を適切に保護するよう配慮が必要である。

滑り型セグメントは、横浜市の下水道トンネル工事の



写真-2 スプレーによる滑動塗料の塗布状況

シールドトンネル発進立坑において、仮組みセグメントとして適用されている。同工事現場では、テールシール通過時のワイヤーブラシによる塗料膜の損傷はわずかであるとともに、通常と同様のセグメント組立てが可能であることが確認されている⁴⁾。

5. 今後の課題と将来の方向性

地下免震技術は、地下構造物と地盤との間の相互作用を制御する技術と言える。したがって、設計にはFEMに基づいた詳細解析法が適用されている。しかし、現状の地下構造物の耐震設計では、応答変位法を基本とした簡易法が適用されているので、従来技術は簡易法で免震技術は詳細解析法で評価するという矛盾が生じる。レベル2地震動に対する耐震性能照査には、地下構造物でも詳細解析法の導入が必要であり、パソコンのパフォーマンスが飛躍的に向上した現状では、その環境はすでに整っている。詳細解析法の導入によって、従来技術に対する免震技術の優位性が明らかとなり、地下免震技術良質な社会基盤の形成に寄与することを期待するものである。最後に、地下免震技術の設計法は、文献2)のみならず、文献5)でもまとめられている。参考にされたい。

参 考 文 献

- 1) 運上茂樹, 小木曾繁, 廣瀬昌俊, 鈴木猛康: シールドトンネル立坑接合部に対する免震構造, トンネルと地下, Vol.30, No.12, pp.43-53, 1999.12.
- 2) 建設省土木研究所, 他: 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, 共同研究報告書211号, 1998.
- 3) Suzuki, T.: The axisymmetric finite element model developed as a measure to evaluate earthquake responses of seismically isolated tunnels, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- 4) 鈴木猛康, 勝川藤太: 地下構造物の滑り型免震構造の提案と検証実験, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.137-151, 2001.10.
- 5) 土木学会地震工学委員会: 減震・免震・制震構造設計法ガイドライン(案), 土木学会, 2002.1.

(原稿受理 2002.10.31)