

地下構造物の免震技術

鈴木 猛康*

1. はじめに

地下構造物は、建築物や橋梁のように本体構造物内で振動が増幅したり、固有の振動が励起されることなく、また、地下にあるので表層地盤における地震動の地盤内増幅の影響を受けにくいことから、耐震性に優れた構造物として知られている。しかし、地上構造物と比較すればはるかに耐震性に富むものの、兵庫県南部地震で体験したように、大地震による極めて大きな地震荷重条件下や、特殊な地盤・構造条件下では、必ずしも地震に対して無防備で良いわけではない。例えば、地盤条件急変部を通過するトンネル箇所や立坑等の異種構造物との接合部のような地盤・構造条件下では、耐震対策が不可欠であることが従来より指摘されており、既にいくつかの対策技術が実用化されている。

本稿では、このような地盤・構造条件下における地下構造物の地震対策として近年開発が行われ、実用化された免震技術について紹介する。まず、従来技術である柔構造化技術と免震技術の相違を述べ、次に地下構造物の免震技術（以下、地下免震技術と称する）の開発の変遷と種類について紹介する。ついで、地下免震技術の具体的な設計法、材料、施工技術を、実験、設計の実施例を含めて概説する。

2. 免震技術と柔構造化技術

地盤の地震時変位に追従して変形するのが、地下構造物の地震時挙動の特徴である。構造物が剛であれば、大きな断面力を伴って地盤の強制変形を受けることになるが、地盤の変形にフレキシブルに追従できる機構を構造物に付与すれば、大きな断面力が発生することなく、地盤変位に追従することが可能となる。したがって、縦断方向の地盤変形に追従できるように変形容易な柔な部位を設け、この変形で構造物全体の変形を集中して吸収する柔構造化技術が開発された。この柔構造化技術は、地盤沈下対策としても従来から利用されており、シールドトンネルの可撓セグメント、弾性ワッシャー、開削トンネルの可撓性継手、沈埋トンネルの可撓継手構造等はすべてこの柔構造化技術に分類される地震対策である。

図-1に免震技術と柔構造化技術の相違を、地盤に一樣な引張ひずみが発生する場合について模式的に示す。地盤条件急変部における硬軟地盤変化境界は、面としてではなく、3次元的な地盤空間として存在する。また、地震時の

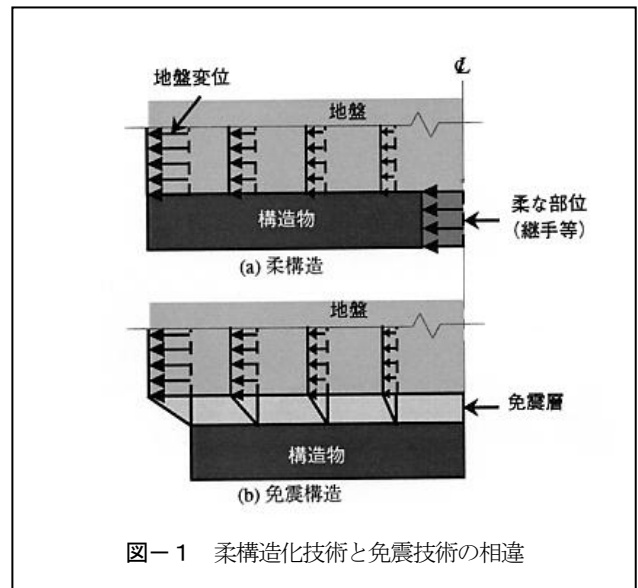


図-1 柔構造化技術と免震技術の相違

地盤ひずみの集中は、狭くとも数十メートル単位に分布する形で存在する。したがって、柔構造化技術の場合、部分的に導入した柔な部位に、構造物全体の変形を集中させることは、外周を地盤で拘束されている地下構造物では理屈上困難であることが明白である。さらに、柔構造化技術では、許容値以上の変形が柔な部位に作用した場合には、この部位が破壊弱面となってしまう。これに対して免震構造では、地盤ひずみの集中する範囲の構造物外周に地盤ひずみを吸収可能な免震層を形成するので、確実に構造物を地震の影響から絶縁することができる。

3. 地下免震技術の開発経緯

「地下免震技術」とは、地震時に地盤の変位に追従して変形する地下構造物に対して、地盤と構造物の変位の伝達を遮断するような構造あるいはシステムを導入し、地震時の地下構造物に発生する断面力を積極的に低減させる技術である。地盤と構造物の変位の伝達を遮断する構造としては、軟らかで耐久性の高いゴム弾性体を免震層として形成させる免震構造が代表的であり、また地下構造物の外周で地盤と構造物とを低摩擦で滑動させる滑り型免震構造がある。

免震層を適用することによる地下構造物の免震構造は、1980年代後半に基礎研究が開始された。鈴木¹⁾はほとんど体積変化の小さい軟らかなゴム弾性体で構成される免震層

をトンネル外周に適用することによって、地盤沈下を誘発することなく地震時縦断方向変形時の構造物の断面力を低減できることを示し、模型振動実験と数値解析によってその妥当性を示した。竹内ら²⁾はアスファルト系材料を免震層として用いた静的載荷試験を実施し、円形トンネルの横断面変形に対する免震効果を示した。また、川島ら³⁾は縦断方向ならびに横断方向の数値解析において、免震層適用によるトンネルの地震時断面力低減効果を示した。これら3者による免震構造の研究では、免震層の物性は統一されておらず、また免震材の種類も具体的には言及されていなかった。例えば鈴木らは⁴⁾、体積変化の小さな弾性体を提案したが、竹内ら⁵⁾は体積変化のある粘弾塑性材料によるクッション効果を提唱していた。

1995年兵庫県南部地震を契機として、建設省官民共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発」が、土木研究所、(財)土木研究センターならびに民間17社によって開始された。本共同研究では、基礎研究を実施した上記3者が参加するとともに、建設会社6社、シールドメーカー2社、材料メーカー5社、設計コンサルタント4社と多業種に跨った民間の構成となり、新設トンネル(円形断面と矩形断面)の地盤条件急変部や立坑との接合部を対象に免震層を用いた免震構造の適用性を研究するとともに、免震層を構成する材料の開発、開発材料を用いたシールドトンネルと開削トンネルの設計・施工技術の開発に関する研究を実施しており、その研究成果は「地下構造物の免震設計法マニュアル(案)」⁹⁾に取りまとめられている。図-2に免震層を用いた免震構造のイメージ図を示す。

上記官民共同研究が1998年3月に終了した後、1998年6月に地下構造物の免震技術普及委員会が(財)土木研究セ

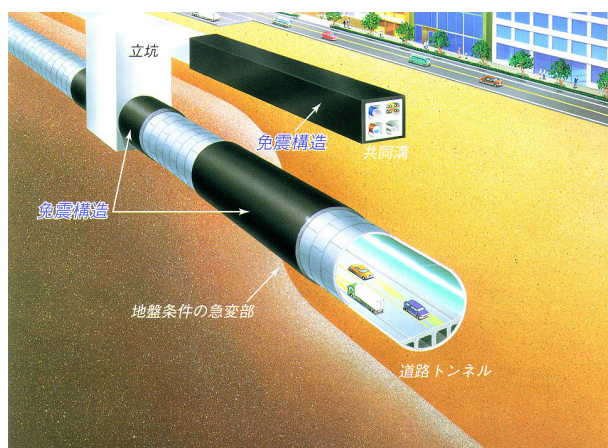


図-2 免震層を用いた免震構造概念図

ンターを事務局、筆者を委員長として発足され、地下免震技術に関して、免震設計の実構造物への適用に関する検討、設計プログラムの整備、実施工を通じた施工法の改善・充実、積算資料の作成、ならびにこれら開発した技術の普及・展開が図られた。

さらに、地下免震技術の開発や適用性検討は、上記共同研究や委員会の枠を超えて広く行われるようになった。とくに、地下構造物の外周あるいは地盤中に滑動面を設ける滑り型免震構造に関しては、構造物外面に特殊な塗料を塗布することによって塗料膜と構造物外面との間に薄い滑材層を形成させ、これによってせん断力の伝達を抑制する方法が開発されている⁷⁾。また、摩擦係数が小さい材料で製作したシートを用いて構造物外面とシートとの間、シートと地盤との間、あるいは構造物外面と周辺地盤の間に複数枚のシートを挟み、このシート間でせん断力の伝達を抑制する方法も開発されている^{8,9)}。図-3に地下構造物の外周あるいは地盤中に滑動面を設ける免震構造のイメージ図を示す⁶⁾。

土木学会地震工学委員会では、「土木構造物の減震・免震・制震構造設計法マニュアル(案)」¹⁰⁾を2002年1月に刊行した。本マニュアル(案)は2部構成となっており、前半のⅠ部は橋梁編、後半のⅡ部は地下構造物・地盤編となっている。地下構造物・地盤編には柔構造化技術も含まれるが、中心はここでまとめている免震技術である。このように、地下免震技術はまだ新しい技術であるが、実構造物を対象とした設計ならび施工が実施されるようになっており、学会における研究や設計実務の中でやっと「地下免震」の言葉が定着してきた

4. 免震層を用いた地下免震技術

4.1 免震材

前記共同研究では、免震層を形成する免震材としてシールドトンネル用3種類、開削トンネル用2種類の材料の開発が行われ、そのうち液状材料としてシリコン系免震材が、固形材料として免震パネル(ウレタン)が既に実用化されている。ここではシリコン系免震材を紹介する。

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能力を持たせることができる。フライアッシュの配合比により

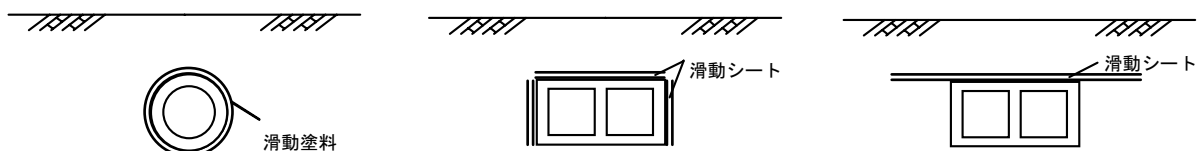


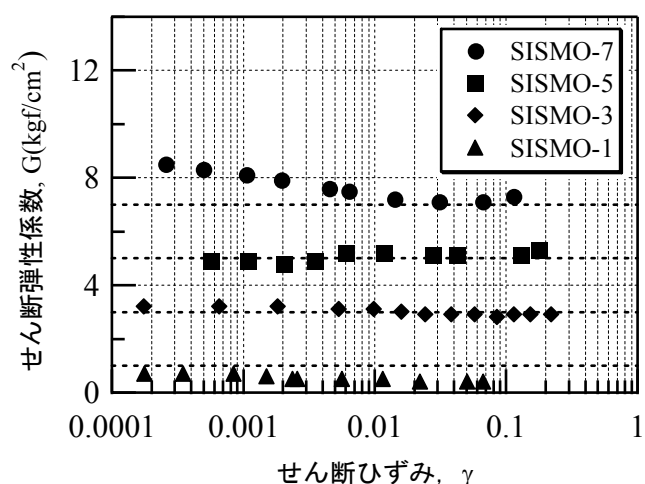
図-3 構造物外周に滑動面を適用した滑り型免震構造¹⁰⁾

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 $0.1\sim0.7$ の４タイプの免震材が既に開発済みである。表－１に示す４タイプの免震材に対して、中空ねじりせん断試験を実施し、求められたせん断弾性係数に関するひずみ依存性特性である。試験における載荷振動数は表層地盤を意識して 1Hz とし、 20% を超えるせん断ひずみ領域までの載荷が実施されており、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、減衰項は無視できる弾性材料である。

シリコン系免震材の耐久性については、温水浸漬による劣化試験が行われている。これによれば、材料のヤング率が 10% 変化するのに要する時間は、 150 年にも及ぶことが確認されており、免震層は半永久的な耐久性を有している。

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－４ 免震材のせん断弾性係数のひずみ依存性

4.2 免震設計

前述した建設省官民共同研究の最終成果として、地下構造物の免震設計法マニュアル（案）⁹が刊行された。地下構造物の免震設計とは、免震材のせん断弾性係数、免震層厚および免震区間を適切に設定することにより、地下構造物に発生する地震時増分断面力を効果的に低減させる設計のことである。以下、このマニュアル(案)に従って、免震設計法を概説する。

縦断方向の免震設計では、地中線状構造物の縦断方向の耐震解析で採用されてきた梁ばねモデルの適用を原則としている。従来の梁ばねモデルとの相違は、免震区間における相互作用ばね（免震層のばね）の取り扱いにあり、免震層のトンネル軸方向、軸直角方向に対する単位長さ当たりの相互作用ばね定数を、理論式を導いて与えている。

立坑接合部の免震構造における効果的な免震区間長は立

坑よりせいぜい $10\sim20\text{m}$ 程度であり、この局所的な地盤の地震時挙動は、立坑とその周辺地盤の地震時挙動に支配される。また、立坑接合部の免震構造では、地盤とトンネルとの絶縁のみならず、立坑躯体とトンネルとの絶縁構造も重要である。このような局所的かつ３次元的な現象を梁ばねモデルで再現するのは困難であることから、免震設計では立坑とその周辺地盤という局所的な領域に、軸対称FEMモデルや３次元FEM簡易モデルといった有限要素法を用いた部分系の詳細解析手法を採用している。立坑接合部の免震構造では、立坑躯体とトンネル間にも免震層（あるいは絶縁層）が形成されるため、曲げ変形に対する両者の接合条件はピン結合と見なせる状態となる。そのため、立坑とトンネルの接合面に集中するトンネル軸直角方向の地盤変形に起因する水平方向の曲げ変形、ならびに立坑のロッキング振動に起因する鉛直方向の曲げ変形に伴って発生するトンネルの軸ひずみはともに、接合面では 0 に近似できることが確認されている。そこで、立坑接合部の免震設計では、トンネル軸方向に対して安全性を照査すればよいこととされた。ただし、有限要素法による詳細解析モデルを採用するが、地震時地盤慣性力を要素節点に静的に載荷する静的解析が基本で、必ずしも動的解析を行う必要はない。

横断方向の免震設計では、２次元有限要素解析が採用されている。応答変位法に基づく解析手法として従来用いられてきた梁ばねモデルは、地盤ばね定数の設定法に決して解決できない曖昧さがあり、また構造物の見かけのせん断剛性が周辺地盤よりも大きい小さいかで地震時直土圧の作用方向が異なる等の実現象を再現できないという欠点を有していた。とくに免震構造では、構造物の外周に軟らかな免震層があることにより、周辺地盤～免震層～構造物の間で免震層のせん断変形に伴う複雑な相互作用が発生するため、トンネルを梁要素、免震層および周辺地盤を平面ひずみ要素とした２次元有限要素で相互作用を正確に取り扱うことが不可欠と判断された。ただし、必ずしも２次元動的解析を行う必要はなく、特殊なケースを除いては静的解析によってトンネルのひずみや変形を算出することができるとしている。

4.3 免震層を用いた免震構造の施工

上記共同研究では、設計法の開発とともに、材料開発、施工法開発が行われた。ここでは、免震構造の施工法について、共同研究の実施である建設省中部地建名古屋国道工事事務所の中川共同溝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¹¹⁾を用いて解説する。本共同溝は、共同研究成果であるマニュアル（案）に従って共同研究で開発された軸対称FEMモデルに基づく免震設計プログラムEASIT¹²⁾を用いて設計が行われたものであり、立坑より約 10m に亘る免震区間に免震層を形成することにより、従来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が１ランクアップした。

図－５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



写真-1 免震材の注入状況



写真-2 スプレーによる滑動塗料の塗布状況

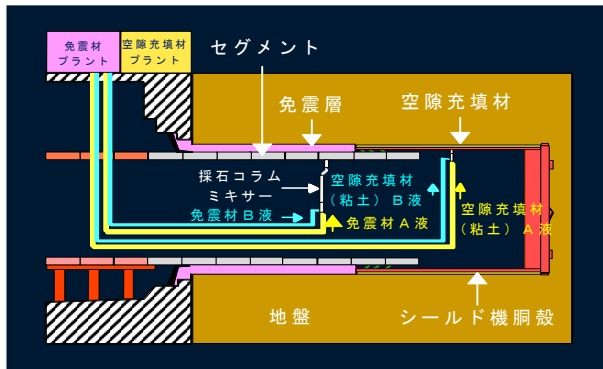


図-5 発進立坑部の免震構造の施工

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(クレーショック)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出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⁵⁾、本共同溝でも注入率は120%に抑えられた。

5. 滑り型免震構造

5.1 材料(滑動塗料)

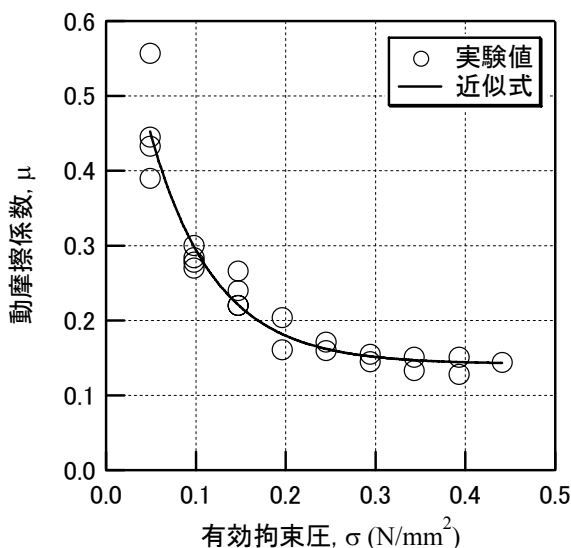
滑り型免震構造として有効な低摩擦滑動面を生成する塗



図-6 滑り型免震構造の滑動メカニズム

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^{13,14)}。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-6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を塗布している状況である。

滑動塗料は、構造物が供用される長期間にわたって、滑動性能を保持していなければならない。また、滑動塗料は地下水位以下の地中環境で使用されるため、地下水環境に対する配慮も不可欠である。とくに、本滑動塗料を塗布したセグメントを用いてシールドトンネルを構築する場合には、塗料が強アルカリ環境下に置かれる。したがって、強アルカリ条件下で温水浸漬劣化試験を実施し、引張試験による塗料膜の伸びが100%(初期は600%)に低減するときの時間をアレニウスプロットによって求めた結果、約150年との結果が得られている。地下構造物の外周に滑材層が存在することが低摩擦での滑動条件であり、塗料膜の強度は滑動条件ではないが、少なくとも塗料膜が大幅に劣化して構造物外面から滑材の流出を容易にする条件にはならないことを意味しており、したがって滑動効果はさらに長期



図ー７ 動摩擦係数の拘束圧依存性

にわたって継続するため、少なくとも一般的な構造物の供用期間を通して滑動効果は持続する。

橋梁や建物の制震で使用される摩擦型支承に用いられるテフロンシートは、拘束圧（軸圧）の増加とともに摩擦係数が小さくなる拘束圧依存性を有している。本滑動塗料のような滑り型免震機構を地中で発現されるためには、構造物外周面に発生するせん断応力 τ が、式ー１に示す摩擦応力 τ_f の限界値に達することが必要である。

$$\tau_f = \mu \cdot \sigma_e \quad (\text{式ー１})$$

ここで σ_e ：有効拘束圧、 μ は動摩擦係数である。本免震構造は地中で使用されるため、地下水位以下では構造物外周に作用する拘束圧は有効拘束圧である。 σ_e は土被りが大きいほど大きくなるが、 μ は有効拘束圧の増大に伴って低減するため、材料試験のデータに基づいて、式ー１により τ_f を設定した上で、免震設計を実施しなければならない。図ー７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⁹⁾。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評価して用いることとした。なお、図ー７に示されている動摩擦係数の実験値の近似を、式ー２で与えることができる¹⁰⁾。

$$\mu = 0.142 + 0.615 \exp(13.941\sigma_e) \quad (\text{式ー２})$$

5.2 免震設計

滑り型免震構造の設計とは、滑り型免震構造が使用される環境や施工条件を考慮して使用する滑動塗料の種類を選定するとともに、構造物に発生する断面力や変形と滑動の発生する領域を数値解析によって確認した上で、最終的に滑り型免震構造の適用範囲を決定することである。

シリコン系滑動塗料により形成される滑材層はバイリ

ニア型の非線形特性を有している。軸対称FEMモデルを用いた免震設計プログラムEASIT¹²⁾では、テールボイドに相当するトンネル外周の平面ひずみ要素のせん断弾性係数を、バイリニア型の履歴に一致するような収束計算で決定する方法を採用している^{12),13)}。また、簡易3次元FEMモデルではトンネル外周に相互作用ばねを配置しているので、このばねにバイリニア型の非線形特性を与えることとなる。このように設計で採用する解析モデルに応じて、滑材層の非線形特性のモデル化手法を適切に選択すればよい。

5.3 滑り型免震構造の施工

滑り型免震構造の施工は、地下構造物の外周に滑動塗料を塗布すること、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だけである。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。

セグメントはシールド機内で組立てられ、掘進に伴ってテールシールを通過した後、地盤内へと出ることになる。テールシールを通過した直後のセグメント外周には、掘削外径とセグメント外径との差であるボイド（テールボイド）が形成されているが、このボイドは即時に裏込め材によって充填される。テールシールは２段あるいは３段のテールパッキンで構成されており、パッキンはさらに２列あるいは３列のブラシで構成されている。セグメントがテールシールを通過する際、これらのブラシによって塗料が剥ぎ取られ、あるいは大きな損傷を受けると、期待通り免震効果が発揮できないことがある。

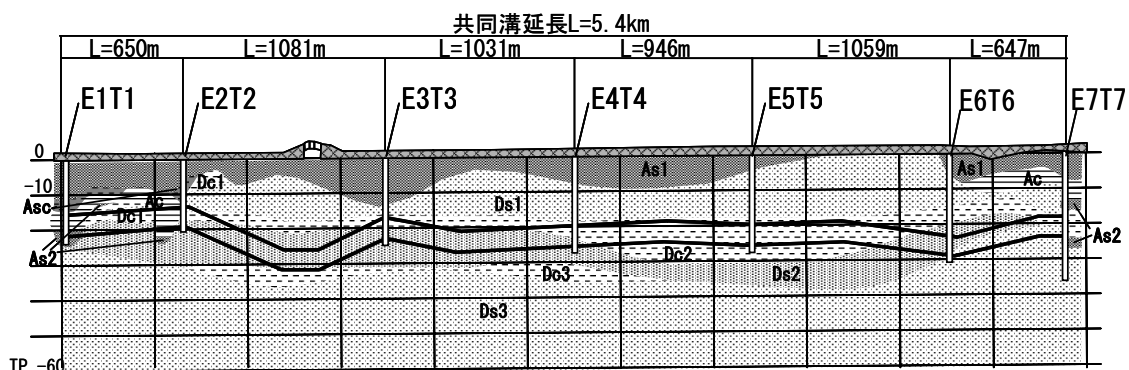
そこで、横浜市の下水道トンネル工事のシールドトンネル発進立坑において、仮組みセグメントとして外周に滑動塗料を塗布した滑り型セグメントを適用し、テールシール通過時の塗料の損傷度を確認することを目的として、現場確認試験が実施されている¹³⁾。

5.3 免震設計の実施例

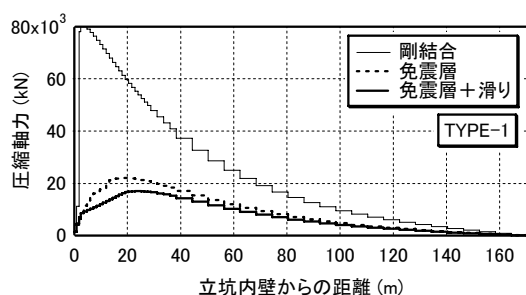
図ー８に示す外径5450mmの共同溝シールドトンネルの立坑接合部を対象として、ベレル２地震動に対する耐震検討にEASITを適用した例を示す。総延長約5.4kmの共同溝であり、その間にE1T1, E7T7の発進立坑, E4T4の到達立坑と、中間立坑合わせて7立坑が構築される。本実施例は、これらのシールドトンネル立坑接合部において、免震層と滑動塗料を外周に塗布した滑り型セグメントを併用した新たな免震構造の適用を検討したものである¹⁵⁾。

図ー９はE5T5立坑接合部におけるセグメントに発生する圧縮軸力に関する解析結果である。図のように、圧縮軸力は免震層の適用によって剛結合のケースの約1/3に低減しており、さらに免震層と滑り型セグメントの併用の場合にはさらに軸力の低減が顕著であり、剛結合のケースの1/4まで低減している。

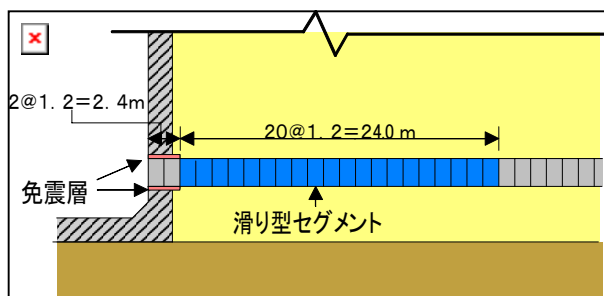
セグメントに発生する引張軸力の検討結果を図ー１０に示す。剛結合のケースでは、E3T3, E6T6立坑を除いた5立



図－8 検討の対象とする地盤縦断面およびトンネル縦断線形の模式図



図－9 セグメント圧縮軸力の解析結果比較



図－10 E5T5 立坑接合部の免震構造模式図

坑接合部で引張り軸力が引張耐力を超えることとなったが、5立坑接合部に対して免震層+滑り型セグメントを適用することによって、すべての立坑接合部において引張耐力以下に低減した。図－10は、このような検討結果に基づいて設計されたE5T5立坑接合部の免震構造を示す。

6. まとめ

本稿では、免震技術と従来の柔構造化技術の相違を明確にした上で、免震層を用いた地下免震技術と滑り型免震構造を用いた地下免震技術を紹介した。地下免震技術はまだ新しい技術であるが、レベル2地震動に対する地震対策として有望であり、ますます進展することが望まれる。

参考文献

- 1) 鈴木猛康：シールドトンネルの耐震性評価と免震化手法に関する研究，東京大学工学部博士論文，1990。
- 2) 竹内幹雄，他：シールドトンネルの断面内地震時応力低減効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.483/I-26, pp.107-116, 1994。

- 3) 川島一彦，他：地下構造物の耐震設計技術の開発に関する研究，共同研究報告書29号，pp.208-235, 1989。
- 4) 鈴木猛康，粕田金一，小林正宏，福田健，池野正行：都市トンネルの免震構造のためのシリコン系材料に関する実験的検討，土木学会論文集，No.534/VI-30, pp.69-76, 1996。
- 5) 森吉昭博，他：常温水中硬化型瀝青系新複合材料の開発と特性—地中構造物の防水用材料として—，土木学会論文集，No.433/V-15, pp. 157-166, 1991。
- 6) 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年10月
- 7) 例えば、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論文集，pp.311-318, 2000。
- 8) 例えば、佐藤博・大嶋義隆・大川尚哉・坂哲・宮澤昌弘・保立豊：せん断土圧低減材を用いた地中ボックスカルバートに関する実験的研究，第2回免震・制震コロキウム講演論文集，pp.287-294, 2000。
- 9) 例えば、西山誠治・川満逸雄・室谷耕輔・羽矢洋・棚村史郎：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。
- 10) 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。
- 11) 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., pp.43-53, 1999.12。
- 12) 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。
- 13) 鈴木猛康，勝川藤太：トンネル免震技術に適用する滑動塗料の開発，トンネルと地下，Vol. 32, No. 6, pp. 43-49, 2001. 6。
- 14) 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。
- 15) Suzuki, T., Takatori, I., Okada, I. and Hagiwara, R.: New seismic isolation design for urban tunnels in consideration of slip and its application to an actual shield-driven tunnel, Congress Proceedings CD-ROM, AITES - ITA Downunder 2002, 28th World Tunnel Congress, Sydney, Australia, 2002。