

地下免震技術の現状と展望

鈴木 猛康¹・河西 寛²・諸橋 澄³・田中 努⁴

¹正会員 工博 熊谷組技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

²正会員 鴻池組土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

³正会員 飛鳥建設土木事業本部技術部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町2)

⁴フェロー会員 オリエンタルコンサルタンツ品質管理室 (〒150-0002 東京都渋谷区渋谷1-16-14)

地下免震技術は、極めて大きな地盤ひずみの集中する箇所のトンネルに対する縦断方向の地震対策技術として実用の域に入り、今後ますます期待される地震対策技術である。1980年代後半から基礎研究が開始され、メカニズムの検証実験や材料開発、施工法開発が進められてきた本技術は、1995年の兵庫県南部地震を契機として建設省官民共同研究のテーマとして取り上げられ、免震材と設計法が開発された。その後、1998年より地下構造物の免震技術普及委員会によって実用に供する技術へと改良、向上が図られ、実用化のレベルに達することとなった。また、新たなメカニズムを有する免震技術が開発され、地下免震という新たに体系化された技術としての地位を築きつつある。

本稿では、このようにして充実しつつある地下免震技術の現状を、構造、設計法、材料、施工法の各面からまとめるとともに、それぞれにおける課題を列挙し、さらには今後の地下免震技術の展望を示すものである。

Key Words : Seismic isolation, underground structures, state of the art, prospects

1. はじめに

「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な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。また、免震構造の効果検証のための数値解析は行われたが、免震設計法という概念は示されていないかった。

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、シールド機メーカー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、免震材、免震設計法、施工法が開発された。本共同研究の最終成果は、「地下構造物の免震設計マニュアル(案)」⁶⁾として刊行されている。

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)土木研究センターを事務局として発足され、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。また、委員会参加各社による応用技術の開発が積極的に行われ、これら応用技術を地下免震技術の中にいかに取り込むか等の議論が行われた。

Table.1 柔構造と免震構造の位置付け

技術 対策	柔構造	免震構造
沈下対策	◎	△
レベル1地震動	◎	○
レベル2地震動	○	◎

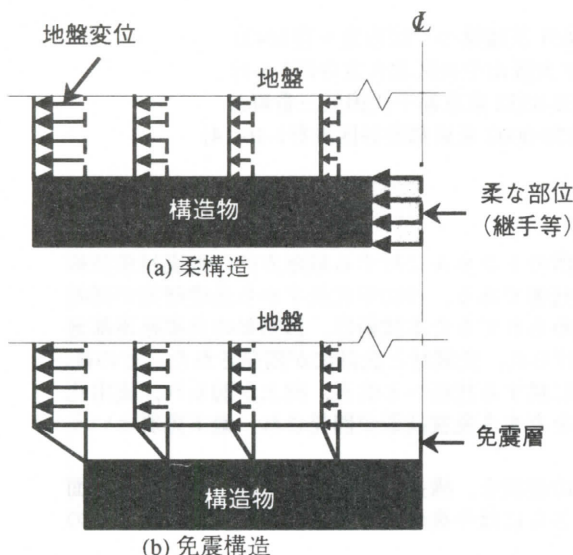


Fig.1 柔構造と免震構造

本稿では、まず、免震構造と地下構造物の地震対策における従来技術である柔構造との違いを示し、免震技術の位置付けを明確にする。次に、上記のようにして充実された地下免震技術の現状を、構造、設計法、材料、施工法に分類して簡単にまとめるとともに、技術的課題を挙げ、将来の地下免震技術の展望をまとめる。また、免震構造の適用事例を紹介し、最後に地下免震技術の歩むべき方向性を示唆する。

2. 柔構造と免震構造

地震時の地盤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、地盤の変形に追従できるフレキシブルな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、この部位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。

Fig.1に柔構造化技術と免震技術の相違を、地盤

に様な引張りずみが発生する場合について模式的に示す。柔構造化技術の場合、部分的に導入した柔な部位に、構造物の変形をすべて集中させることは、外周を地盤で拘束された地下構造物では実際上困難であることが明白である。トンネルが地盤条件急変部を通過する際、地盤急変部の境界は面としてではなく、3次元的な空間として存在する。また、地盤のひずみの集中は、少なくとも数十メートル単位の範囲に分布する形で存在する。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ふ。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。

以上のように、柔構造と免震構造を比較した結果、免震構造は主としてレベル2地震動に対する対策として、柔構造は主としてレベル1地震動に対する地震対策として位置付けることが可能と思われる。Table.1に両者の位置付けを表にまとめた。柔構造は、従来よりトンネルの沈下対策としても採用されており、また柔構造のうちのいくつかは、レベル2地震動を対象とした構造である。一方、免震構造は、免震層を用いればある程度は沈下対策としても機能するが、コストパフォーマンスでは明らかに柔構造に劣る。またレベル1地震動に対する対策として免震層は有効であるが、滑り型の免震構造ではまだ滑りの発生しない応力レベルの場合には機能しない。

3. 免震技術の現状と展望

(1) 免震構造

免震層を用いる地下構造物の免震構造は、構造物外周にゴム弾性体の免震層を形成する単純な構造である。シールドトンネルではシールド掘進に伴ってセグメント外周に発生するテールボイドに免震材を注入・充填することによって、開削トンネルでは躯体の外周に配置した型枠へ液状の免震材を打設・硬化させ、あるいは躯体外周面へプレキャストの固形ゴムパネルを接着する等により、構造物と周辺地盤とを免震層で絶縁 (isolate) する。Fig.2に到達立坑接合部における免震構造の例を示す。図はシールド機を残置して、シールド機鋼殻の内面にゴムあるいは発泡スチロールのような固形絶縁層を貼付け、あるいは簡易型枠を設置して液状体を注入・硬化させることによって、鋼殻の内側に絶縁層を形成し、さらにその内側に場所打ちの覆工を構築している。また、テールシールド部にも免震材を注入・充填することによって、立坑より場所打ち覆工外周の絶縁層、テールシールド部に注入した免震層、セグメント～地盤間のテールボイドに形成した免震層を連続させて、トンネル本体 (セグメント+場所打ち覆工) を地盤および

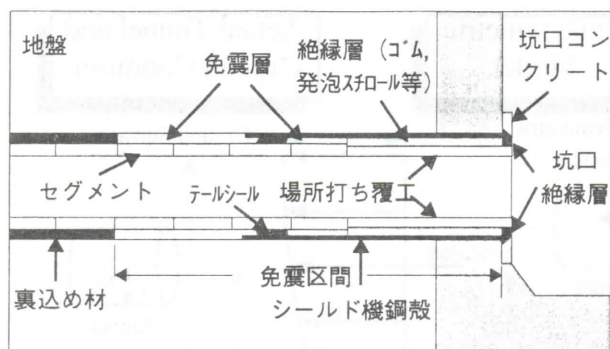


Fig. 2 到達立坑部の免震構造

立坑躯体と絶縁する構造となっている。さらに坑口には、場所打ち覆工の外周に、3面に水膨張ゴムを貼付した楔型断面を有するゴムガasket (坑口絶縁層)を配置し、止水と絶縁の両方の機能を坑口にも付与している。

免震層は、立坑接合部への適用では10m程度の免震区間で十分大きな免震効果を得ることができ、施工コストは従来の代表的な地震対策である可撓セグメントの採用と同等以下で、耐震性能を従来技術より1ランクアップさせることが可能、かつ高止水性能が得られる等、有望な地震対策と言える。しかし、免震構造の地盤条件急変部への適用に際しては、免震効果を得るためには100mに達するような長い免震区間長が要求されるため、材料コストが高くなり、実構造物への採用はコスト面から不利であるのが実情であった。

このような免震層を用いる免震構造の欠点を補うために、免震層のせん断変形によるのではなく、地下構造物外周面と地盤との間で滑りを発生させる滑り型免震構造が開発されている。Photo.1は滑り型免震構造の一つである水性エマルジョン型シリコン系滑動塗料⁷⁾を用いた実験例である。この滑動塗料を地下構造物外周面に塗布した場合、わずかながら塗料膜を地下水が浸透し、構造物の外周面と塗料膜との間に水と微粉末充填材による滑材を形成する。すなわち、平滑に仕上げた構造物外周面とその上に塗布して形成された平滑な塗料膜の間に滑材がサンドイッチされることにより、低摩擦の滑りを可能とするものである。この滑り型免震構造は単独で使用することも可能であるが、地盤条件急変部、立坑接合部において免震層と併用して免震層の外側に適用すると、免震層の使用量を低減でき、コスト面でのメリットが大きい。

一方、矩形断面のカルバートの地震時横断面変形時の断面力低減を図る免震構造として、構造物上面に低摩擦のシートを敷設する方法がある⁸⁾。シートは厚み1mmの2枚の塩化ビニールシートの上に0.1mmの厚みのテフロンシートをサンドイッチしたものであり、塩化ビニールシートとテフロンシートの間で低摩擦の滑りを発生させることによって、構造物と地盤を変位から絶縁するもので

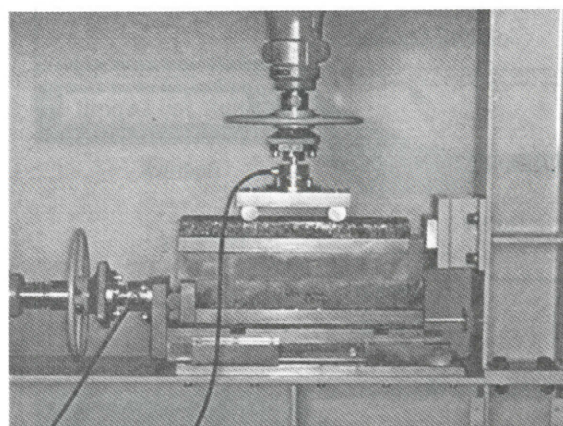


Photo. 1 滑り型免震構造のせん断試験

ある。本来、免震層による免震構造を地下構造物横断面方向で適用する場合には、構造物外周の周面せん断力をカットし、構造物のコーナー部に断面力を集中させないことを主眼としていた。本免震構造の場合には、構造物上方の地盤の地震慣性力を低減させることのみを狙っており、上記シートを構造物幅より広く敷設することで、地下構造物に発生する断面力を低減させることに成功している。

免震構造は、免震層や滑動塗料を用いることで構造物と地盤との変位の絶縁を図る構造であるが、免震層と滑動塗料の併用の他、柔構造化技術との併用も大きなメリットを生むことがわかっている⁹⁾。Table.2は、柔構造、免震構造に加えて損傷箇所を限定させて破壊パターンを制御する方法、ならびに従来の耐震技術である高剛性の4つの技術のそれぞれを組合せた場合、レベル2地震動を対象とした地震対策としての効果を、マトリクスに整理したものである。筆者らの独断と偏見に基づいて、大いに有効(◎)、有効(○)、ある程度有効(△)、有効でない(×)の4種類に分類したが、免震構造と柔構造の併用は、柔構造の変位吸収性能を免震構造が十分に引き出すことで、両者の相乗効果が生じる点で極めて有利といえる。また、地下構造物に要求される性能として沈下対策や防水対策があり、これらの機能と免震機能を兼ね備えた構造としても、両者の併用は今後注目されるものと思われる。

Table. 2 技術の組合せによるレベル2地震動対策の効果

	柔構造	免震構造	破壊制御	高剛性
柔構造		◎	△	×
免震構造	◎		△	△
破壊制御	△	△		○
高剛性	×	△	○	

(2) 免震設計法

地下構造物の免震設計法マニュアル(案)では、横断面方向の設計では2次元有限要素法による静的解析を基本とした。一方、縦断方向の全体系の

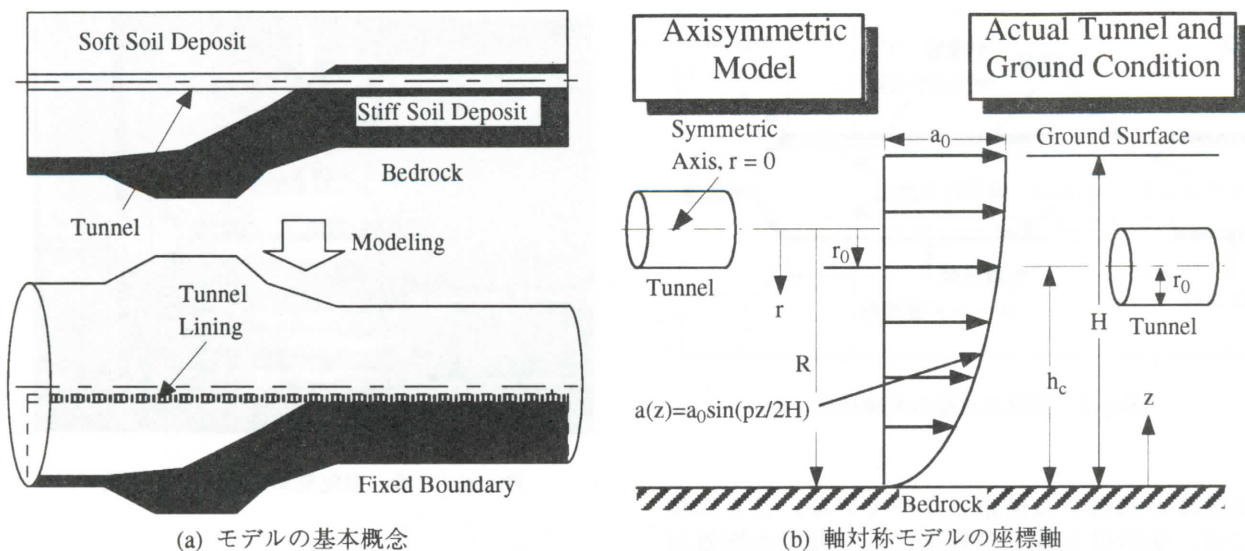


Fig.3 軸対称モデルの基本概念および軸対称モデルの座標軸の設定

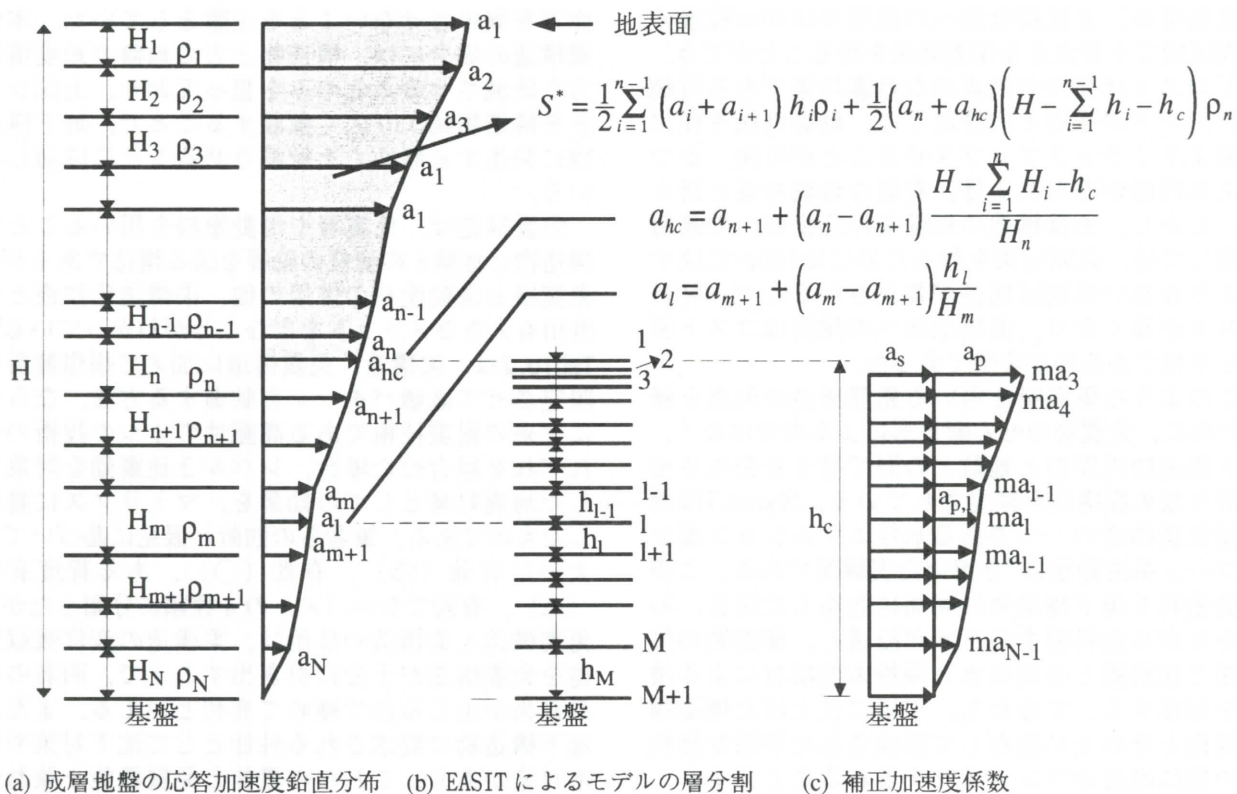


Fig.4 軸対称FEMモデルで作用させる加速度の変換過程

設計に対しては、地盤の地震応答解析と梁ばねモデルによる時刻歴応答解析を用いた従来の耐震解析法において、免震区間の梁ばねモデルに免震層の理論ばねを与える方法¹⁰⁾を適用している。また、立坑接合部や地盤条件急変部のような部分系の設計に対しては、有限要素法に基づく詳細設計法を提案した。

免震層を用いた地下免震構造が、耐震性能ならびにコスト面でもっとも有力なのは、立坑接合部に対する縦断方向の地震対策としての適用と考えられるが、3次元的な構造条件を簡便に取り扱う

ことを可能とするために、数値解析モデルが開発された。その1つは軸対称FEMモデル¹¹⁾であり、もう1つは3次元FEM簡易モデルである。前者は地盤と立坑の3次元構造をトンネル中心軸を対称軸とする軸対称有限要素で近似するための荷重（地盤慣性力）の変換方法を示したものであり、3次元構造の応答を2次元解析で可能としている。一方、後者は、3次元有限要素解析であるが、立坑をせん断剛性が実物と等価な均質中実体に近似させ、トンネルは梁で置き換えるものである。

とくに、軸対称FEMモデルについては免震設

計用の専用解析コード“EASIT”が開発され¹¹⁾、必要最小限の入力データ作成で、パーソナルコンピュータによる短時間の解析を可能としている。以下に、“EASIT”の中で実施されている解析アルゴリズムの概要を簡単にまとめることにする。

Fig. 3(a)に軸対称FEMモデルの概念図を示す。図のように、軸対称FEMモデルでは3次元地盤中の円形トンネルを、トンネル中心を対称軸とし、トンネル内周面をモデルの内周面、基盤を外周面とする軸対称中空円筒体にモデル化している。したがって、トンネル上方の表層地盤の影響や構造条件の相違は、すべて荷重として変換することで、近似を可能としている。Fig. 3(b)に示すように、トンネルのスプリングライン位置の現象を解析することに主眼を置くため、実トンネルのトンネル中心位置が、解析モデルのセグメント外周面と一致するように、座標を設定している。

Fig. 4(a)に示すN層の成層構造に分割された表層厚Hの表層地盤を対象として、地盤慣性力の算定法を説明する。Fig. 4(a)の地盤モデルを用いて表層地盤の1次元地震応答解析を行った場合、表層地盤のせん断ひずみエネルギーの累積値あるいはある深度におけるせん断ひずみの最大値の発生する時刻の地盤加速度分布を求め、これら加速度値 $a_1 \sim a_N$ を入力データとして保存しておく。地表面よりi番目の土層の層厚を h_i 、密度を ρ_i とし、トンネルの中心 h_c が地表面からn番目に位置するとすれば、軸対称モデルでモデル化されないトンネル上方の地盤に働く地震慣性力は式(1)に示す S^* で与えることができる。

$$S^* = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i + a_{i+1}) \cdot h_i \rho_i + \frac{1}{2} (a_n + a_{h_c}) \left(H - \sum_{i=1}^{n-1} h_i - h_c \right) \rho_n \quad (1)$$

ここで式中の a_{h_c} は高さ h_c における加速度値である。軸対称FEMモデルの鉛直方向（半径方向）のメッシュ分割をFig. 4(b)のように行うと、メッシュの対称軸よりl番目の節点に作用する地盤加速度は、表層地盤のm層目にあるので、(2)式で与えられる。

$$a_l = a_m + 1 + (a_m - a_{m+1}) \frac{h_l}{H_m} \quad (2)$$

したがって、この位置において節点質量との積によって地盤慣性力を得るために用いる加速度は、(1)式と(2)式を軸対称モデル用の加速度に変換した加速度係数に置き換えれば良い。すなわち、これを補正加速度係数 ma_l と定義すると、 ma_l は以下の(3)式で与えることができる。

$$ma_l = \frac{2\pi(R-r)}{\ell n(R/r)} \cdot a_l + \frac{2\pi(R-r_0)}{R-r_0-r_0 \ell n(R/r)} \frac{S^*}{\rho_m} \quad (3)$$

ここで(3)式の第2項が、この位置の土の密度で除されているのは、集中せん断力の算定に用いたトンネル上方の土の密度と慣性力作用位置の土の密

度の相違を補正するためである。

このようにして補正された加速度係数の分布をFig. 4(c)に模式的に示す。モデルでは内周の第一層目の要素はトンネル、第2層目の要素は免震層か地盤、あるいは裏込め材となるが、内周が自由境界となっているため、トンネルには慣性力を与えることなく、地盤の変形に伴うトンネルの静的な抵抗のみを解析する必要があるからである。したがって“EASIT”では、対称軸より1, 2番目の節点の補正加速度係数は0としている。

一方、応答スペクトルによって応答加速度 S_a が与えられている場合、“EASIT”には表層地盤のせん断振動モードを解析し、基本せん断振動モードの加速度鉛直分布を算出する機能を持たせている。すなわち、表層地盤の基本せん断振動モードのモーダルベクトルを $f_1(z)$ 、刺激係数を β_1 とし、表層地盤の卓越周期Tに相当する応答加速度を $S_a(T)$ とすると、表層地盤の加速度分布 $a(z)$ は(4)となる。

$$a(z) = \beta_1 f_1(z) S_a(T) \quad (4)$$

このようにして与えられる加速度を用いて、前述の(1)～(3)式の過程で補正加速度係数を算定することができる。

立坑接合部の解析においては、3次元的な立坑構造をモデル化しなければならない。そこで“EASIT”では、実構造物と同じ壁厚と幅を有し、等価なせん断剛性を有する壁として、立坑をモデル化することにより、上記と同様な解析を可能としている。

(3) 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た。しかしながら、免震材として要求される動的せん断弾性係数、変形性能、体積変化小、施工性、長期耐久性、無公害等の諸条件を、すべての材料が満たすまでには至らなかった。最終的に、上記条件をすべて満たしたのは、シリコン系免震材のみであったことから、前記普及委員会ではまず、この材料を用いた免震シールドトンネル、免震開削トンネルの実用化を目的として検討を進めることとした。

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、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材料のせん断弾性係数Gを調整することができ、Table.1のようにせん断弾性係数0.1～0.7の4タイプの免震材が既に開発済みである。Fig. 2, Fig. 3は、Table.1に示す4タイプの免震材に対して、中

Table.1 シリコン系免震材の種類と物性値

種類	SISMO-001	SISMO-003	SISMO-005	SISMO-007
物性値				
G (N/mm ²)	0.1	0.3	0.5	0.7
ν	0.48	0.48	0.48	0.48

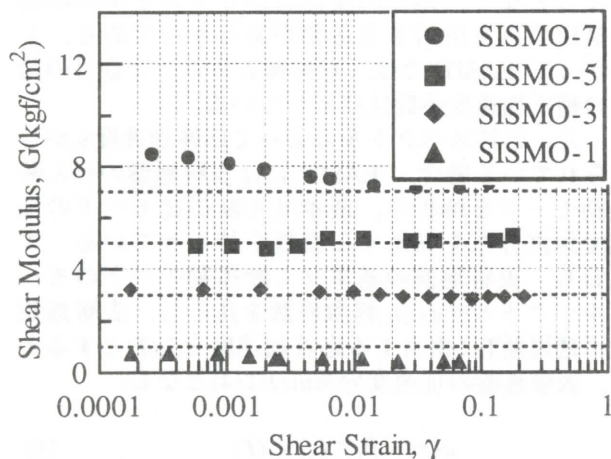


Fig.5 免震材のせん断弾性係数のひずみ依存性

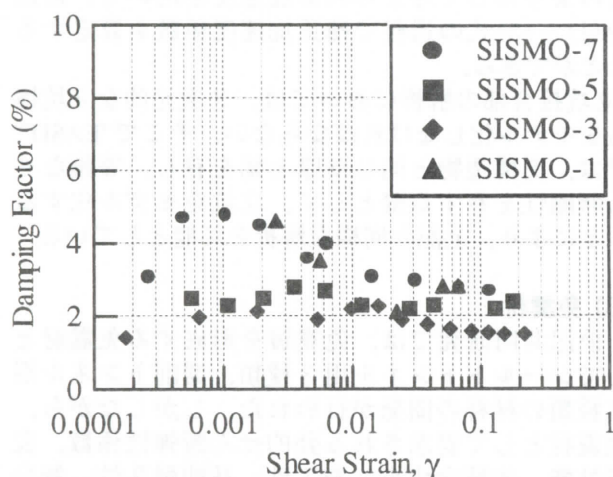


Fig.6 免震材の減衰定数のひずみ依存性

空ねじりせん断試験を実施した結果である。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を実施した。図のように、材料のひずみ依存性は認められず、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ことがわかる。

(4) 施工および積算

Fig.7にシールドトンネルの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、掘進中に注入することを原則としている (Photo.2)。シリコン系免震材を用いる場合は、裏込め注入と同様に注入の直前でA液とB液を噴射・混合するが、その後碎石を詰めた鋼管 (碎石コラムミキサー) を高圧で通過させ、

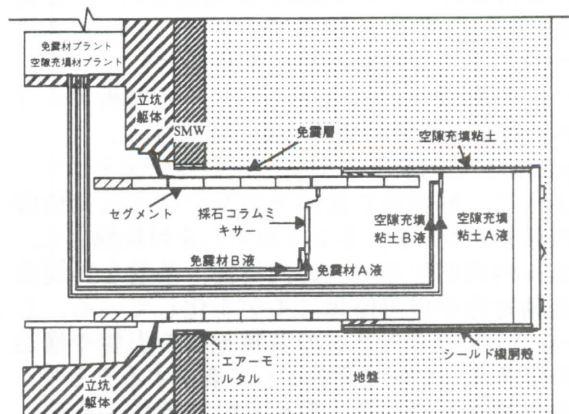


Fig.7 立坑接合部における免震構造の施工

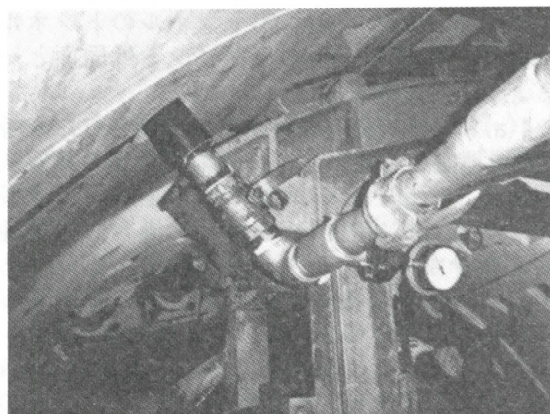


Photo.2 セグメント注入口からの免震材の注入



Photo.3 セグメント外周面への滑動塗料塗布状況

完全混合させる方法を用いている。免震材注入工において懸念されるのは、硬化後にゴム弾性体となる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ぐことが行われている。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ものと思われる。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に免震

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複数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している。

シリコン系免震材の注入は、シールドマシンの後部の同時注入管を用いた同時注入方式とすることもできるが、免震材注入は免震区間のみであるから局所的であり、とくに立坑接合部では掘進が不規則となりがちであること、同時注入管の閉塞に対して裏込め注入と同様な方法では対処できないこと等より、同時注入はまだ行われていない。

免震層を用いる免震構造の積算資料に関しては、シールドトンネルと開削トンネルの標準的な免震構造に対する積算例を取りまとめ中である。とくにシールドトンネルに関しては既に実施工を終えており、その実績を踏まえ、かつその後の技術の改良や開発を加味して修正を行っている。

一方、滑り型免震構造では、セグメントやRC躯体の表面に滑動塗料を塗布するのみであり、特殊な施工は必要としない。Photo.3は前述のシリコン系滑動塗料をセグメント外周面へ塗布している状況であるが、エアレスタイプの一般的な噴射装置で簡単に塗布することが可能である。

4. 実施例¹²⁾

上記共同研究の成果実施の位置付けで、建設省中部地建名古屋国道工事事務所の中川共同溝工事に試験フィールド制度が適用され、シールドトンネルの発進、到達両立坑接合部に、免震構造が適用された。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モデルに基づいた免震トンネルの設計用解析コード“EASIT”を用いて免震設計が行われたものであり、立坑外壁より約10mに亘る区間に、シリコン系免震材（SISMO-005）による免震層を7cmの厚みで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。発進立坑部では上記の免震層を立坑内壁より13m間に形成した後、反力受けに設置した可動式反力枠を8本の油圧ジャッキによる载荷によってシールド機ともども切羽側へ10mm移動させ、次に除荷によって戻ることを確認した。これにより、免震層が所定のせん断反力を有することと、弾性挙動を示すことが検証され、設計値を満足する免震性能を有することを検証している。

本章では中川共同溝で実施された施工の代表的なものを写真で紹介する。Photo.4は空隙充填粘土の注入状況である。シールド機の中折れ部に設けた注入口より、2液噴射タイプの混合装置で注入

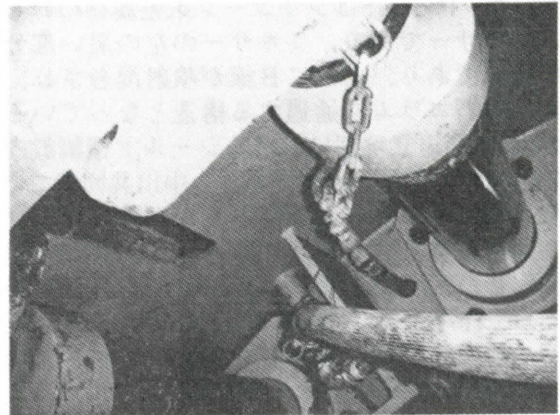


Photo.4 シールド機からの空隙充填粘土の注入

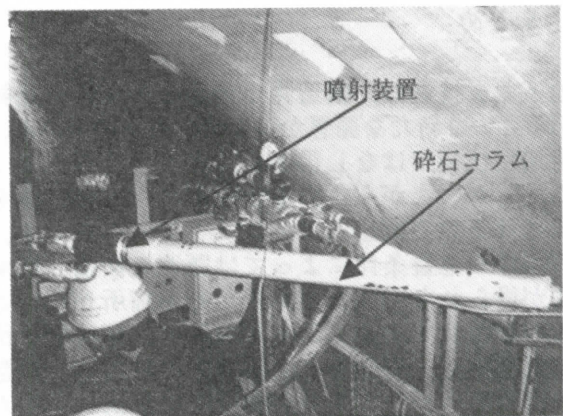


Photo.5 碎石コラムミキサー



Photo.6 絶縁層（ゴムパネル）の貼付け状況



Photo.7 坑口の仕上り状況

を行った。Photo.5はシリコン系免震材の碎石コラムミキサーである。ミキサーの左の黒い部分が噴射装置であり、A液にB液が噴射混合され、そのまま碎石コラムを通過する構造となっている。Photo.6は到達立坑部におけるシールド機鋼殻内面への絶縁層の貼付け状況である。中川共同溝では、前記共同研究において開削トンネル用の免震材として開発されたゴムチップをウレタン樹脂で固めて製作した密度0.6程度のゴムパネルを、絶縁層材料として採用した。Photo.7は坑口の仕上り状況である。前記した坑口絶縁層を配置しており、変形とともに止水性を兼ね備えた構造となっている。

5. まとめ

地下免震技術は、構造物と地盤との変位の絶縁を図るという新たな発想から生まれたものであり、柔構造化技術ではなし得ないメリットを与えてくれる。しかしながら、構造物外周にゴム弾性体を形成させる免震構造には、コスト面のみならず、構造条件や地盤条件によっては顕著な断面力低減効果が得られないことがあり、適用箇所が限定されるのが現状である。これに対して、免震層と滑り型免震構造、免震層と柔構造との併用等、複数の技術の併用や、また免震構造を効果的に得るための本体構造の工夫等、さらに新たな発想をもってすれば、コストパフォーマンスの優れた免震構造の可能性があり、L2地震動への対応技術として大いに可能性があるかと判断される。

謝辞：本稿は、地下免震技術の現状と展望について「地下構造物の免震技術普及委員会」の立場から、委員長、幹事長、施工分科会長、設計分科会長がまとめたものである。地下免震技術の普及・展開を目指した本普及委員会委員諸兄ならびに事務局である（財）土木研究センター・鷹取勲氏に、

深く感謝する次第である。

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に適用する免震材の開発（その3）—地下構造物の免震設計法マニュアル（案），共同研究報告書第29号，1998.
- 7) 鈴木猛康，勝川藤太：滑動塗料を用いた滑り型免震構造，第2回免震制震コロキウム論文集，2000.
- 8) 大嶋義隆，他：低摩擦材を用いた免震地中ボックスカルバートと実施工用摩擦材に関する実験的研究，第2回免震制震コロキウム論文集，2000.
- 9) 鈴木猛康：免震層と弾性ワッシャー併用によるシールドトンネルの地震時断面力低減効果，土木学会第51回年次学術講演会，第1部，pp.874-875, 1996.
- 10) 鈴木猛康：地下構造物の免震設計法マニュアル（案），橋梁と地下構造物の免震・制震講習会資料，土木学会，pp.77-80, 1999.
- 11) 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.
- 12) 運上茂樹，他：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.

THE PRESENT STATE AND PROSPECTS OF THE SEISMIC ISOLATION TECHNOLOGY FOR UNDERGROUND STRUCTURES

Takeyasu SUZUKI, Hiroshi KASAI, Masumi MOROHASHI and Tsutomu TANAKA

The seismic isolation for underground structures has now reached to a technology of practical use, as a measure to tunnels during a large earthquake in the longitudinal direction. The fundamental studies were started in late 1980s. Verification tests were conducted on an isolation mechanism and some isolation materials were developed. The joint research between Ministry of Construction and 17 private firms had been carried out for three years since 1995. Then, the seismic design method and some isolation materials were developed.

After the joint research, the committee promoting seismic isolation technology for underground structures has been commenced. The committee has made some improvements and modifications. Then, the seismic isolation technology for underground structures has now become a new scheme to control seismic behavior of underground structures. This paper summarizes the present state and prospects of the technology from aspects of structures, seismic isolation design, materials and construction, respectively.