

地下構造物の滑り型免震構造の提案と検証試験

鈴木 猛康¹・勝川 藤太²

¹正会員 工博 中央復建コンサルタンツ(株) 東京本社 (前熊谷組技術研究所)
(〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町2-11 イワサキ第2ビル)

²正会員 工修 中央復建コンサルタンツ(株) 東京本社 (前熊谷組技術研究所)
(〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町2-11 イワサキ第2ビル)

本稿では、厚みを有する免震層ではなく、地下構造物の外周面に特殊な塗料を塗布することによって、地震時に構造物と地盤との間に滑りを発生させる滑り型免震構造についてまとめている。滑り型免震構造をシールドトンネルの立坑接合部に適用した場合について、数値解析により免震効果を明らかにし、滑り型免震構造で必要とされる滑動塗料の摩擦係数について考察している。次に、滑り型免震構造に適用できる滑動塗料を選定、開発し、この塗料を用いた供試体の静的せん断試験、繰返し中空ねじりせん断試験により、滑動塗料の滑り性能、動摩擦係数を求めている。また、セグメントのテールシール通過試験を実シールドトンネルの発進立坑で実施し、損傷することなく塗料がセグメントに残存することを確認している。

Key Words : seismic isolation, sliding, coating, underground structures, verification tests

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、我が国の地下構造物が初めて地震の洗礼を受け、地下鉄駅舎をはじめ地下構造物が甚大な被害を受けた。この地震を契機として、我が国の各種耐震設計指針の改訂が行われ、また、地下構造物を対象としてレベル2地震動に対する耐震設計が実務でも行われるようになってきた。

レベル2地震動に対する地下構造物の耐震性能については、構造物の用途によってさまざまであるが、とくに人命にかかわる地下鉄、道路等の用途で建設されるトンネルでは、地震後に構造部材がほぼ健全な状態を保持することが必要不可欠となる。しかし、地下構造物外周の地盤変位が大きいと、構造部材を弾性領域で維持することは困難であり、したがって、何らかの地震対策技術を導入する必要が生じる。

地中線状構造物の縦断方向の地震対策技術としては、シールドトンネルの可撓セグメント、弾性ワッシャーや沈埋トンネルのゴムガスケット、あるいは開削トンネルの可撓性継手等のように、局所的に柔構造を設け、ここで構造物変位を吸収することによって構造物全体の断面力を低減させる柔構造化技術が従来より採用されてきた。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¹⁾、地盤わずみの集中が柔構造を設置した

点あるいは面で生じるのではなく、数十メートル規模の範囲に分布することから、外周を拘束されない地上の構造物のケースで想定されるほど、柔構造が有効に機能しないはずである。また、レベル2地震動を対象とする場合には、柔構造化技術では許容値以上の変形が柔な部位に作用するケースも想定しておくべきと思われるが、その際この部位が破壊弱面となりうる。このような観点から、これに代わる地震対策として、免震構造が考案された²⁾。

地下構造物の免震構造とは、シールドトンネルではシールド掘進に伴って発生するテールボイドへ液状の免震材を注入・充填して硬化させることにより、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)する構造である。免震設計法³⁾が整備されるとともに、材料開発、施工法開発が実施され、とくにシリコン系免震材を用いたシールドトンネルの免震構造については、立坑接合部において、既に実構造物に適用されている⁴⁾。

免震構造は、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、耐震性能は従来技術より1ランクアップさせることが可能で、さらに高止水性能が得られる等が試験施工⁴⁾で実証されており、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 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。

本稿は、免震構造の利点を生かしながら上記のコスト面での欠点を補うべく開発した「滑り型免震構造」をまとめたものである。まず、滑り型免震構造の必要性や適用箇所を概説した後、本構造をシールドトンネルの立坑接合部に適用した場合について、数値解析により免震効果を明らかにする。また、滑動塗料を開発し、この塗料を用いた滑り型免震構造の静的せん断試験、繰返し中空ねじりせん断試験を実施して、滑動塗料を塗布した滑り型免震構造の低摩擦での滑り性能を検証した結果を示す。また、セグメント組立て時の目違いが、滑り型免震構造の摩擦係数に及ぼす影響について、段差を設けた供試体のせん断試験で検討した結果を示す。最後に、滑動塗料を塗布したセグメントがシールド機のテールシールを通過する際の滑動塗料の損傷状況を確認するために実施した現場試験について示す。

2. 滑り型免震構造

(1) 滑り型免震構造の定義

滑り型免震構造とは、シールドセグメントや開削トンネルの外周面に予め滑動塗料を塗布したり、低摩擦材料を貼付けたり、あるいは構造物外周面を極めて円滑に仕上げたり等により、地震時に裏込め材あるいは埋戻し土と躯体との間で低摩擦の滑りを発生させ、地震時の地盤変位から構造物を絶縁する (isolate) ことによって、地下構造物の地震時安全性を高める新しい免震構造である。地下構造物とその外周地盤との間で滑りを発生させるためには、構造物と地盤との間が低摩擦で滑動可能となっていなければならない。この滑動面の形成にはいくつか手法があるが、外周に粒状体である土があることから、単に構造物躯体表面を平滑に仕上げたとしても、境界面で滑りを発生させるほど摩擦係数を低減させるのは容易ではない。したがって、周囲に土があるという条件でも境界面で滑らせるためには、平滑な表面を有する躯体の外周に滑材と平滑面を形成させ、2枚の平滑面の間を滑材でサンドイッチすることが理想である。

図-1に免震層による免震構造と滑り型免震構造の免震機構の相違を示す。図のように、前者が免震層のせん断変形によって地盤と構造物の変位の伝達を遮断するのに対して、後者は地盤と構造物の間に設けた薄い滑動層で滑りを発生させるとともに両者間のせん断応力を低減させ、その結果として変位の伝達を遮断している。

(2) 滑り型免震構造の適用箇所

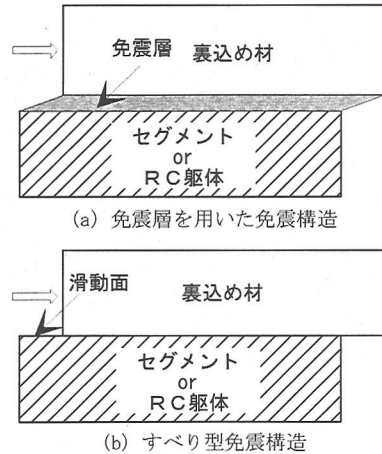


図-1 免震層と滑り型免震構造の免震機構の相違

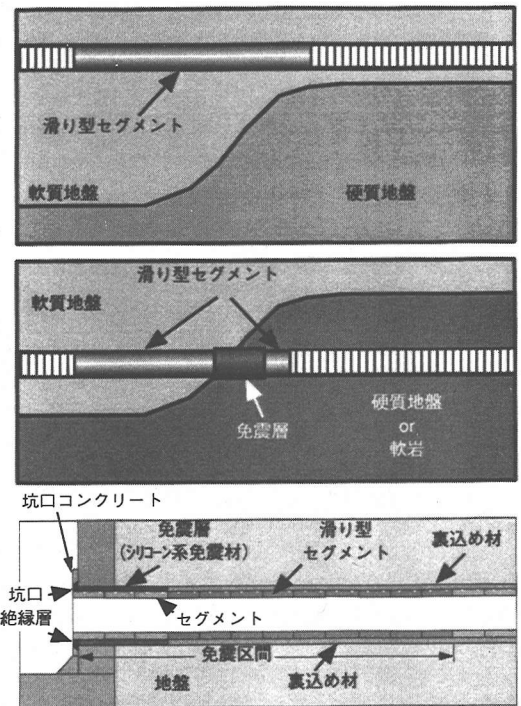


図-2 滑り型免震構造の適用例

トンネル縦断方向に対する滑り型免震構造の適用が効果的な箇所は、基本的に免震層による免震構造と同じで、立坑接合部や地盤条件急変部等、局部的に地盤ひずみが集中する箇所である。外径 5 m 程度の円形断面のトンネルでは、トンネル縦断方向の圧縮、引張変形に対しては、横断面内でほぼ一様な伸縮変形を呈すると見なせることが、地震観測⁵⁾ならびに数値解析⁶⁾によってわかっている。したがって、大断面トンネルでは別途検討を要するが、滑り型免震構造では一般的に、トンネ

ル外周全体が一様に軸方向に地盤との間で滑ることにより、トンネルに発生する軸力を低減することができる。一方トンネルの曲げ変形に対しては、トンネル左右のスプリングライン位置において左右でそれぞれ前後反対方向に地盤との間で滑ることにより、トンネルに発生する曲げモーメントを低減することができる。しかし、立坑躯体との接合面や硬軟地盤境界面における極めて局所的な拘束に起因するトンネルの曲げ変形に伴う応力集中の解消には、層厚をもって変形を吸収できる免震層をトンネル外周に形成させることが必要不可欠である。

図-2の最上ならびに中央は、地盤条件急変部への滑り型免震構造の適用例を示している。最上図は基盤が不整形な表層地盤であるが、トンネルは地層境界を通過することがないので、トンネル位置における表層地盤のひずみ分布に応じて、滑り型免震構造の配置を決定できるケースである。これに対して中央は、硬軟地盤のインピーダンス比のコントラストが明瞭であり、上記境界におけるトンネルの局所的な曲げの集中が無視できないケースである。したがって、地層境界のみトンネル外周に免震層を形成するが、その前後は滑り型免震構造とする。このように、免震層と滑り型免震構造を併用することで、免震材の使用量を大幅に低減させ、コストダウンを実現している。免震層がなければトンネルは外周を硬質地盤で覆われていると、法線方向の変形が拘束される。したがって、縦断方向の曲げ変形時に硬軟地盤境界面に応力集中が発生することとなる。しかしトンネル外周に免震層が存在すれば、厚みはわずか数cmではあるが免震層がトンネル法線方向の変形を吸収し、このような曲げモーメントの集中を防止することができる。また、免震層は防水材料であるシリコーンゴム組成物であるため、シールドトンネルで想定以上の地震荷重が作用し、継手の目開き量が設計許容値を超えたとしても、トンネル外周の地盤や地下水の流入を防止することができる。

最下図は同様に、立坑接合部における滑り型免震構造の適用例を示したものである。前述のように滑り型免震構造では、立坑躯体との接合部ではトンネル外周における法線方向の拘束条件は剛結合のケースと同じであり、トンネル縦断方向の曲げ変形には何ら免震機能は発揮できない。したがって立坑躯体とトンネル覆工の間には免震層を形成し、坑口における防水機能を与えると共に、縦断方向のトンネル曲げ変形に伴う立坑躯体とセグメントとの接合部の応力集中を緩和する。したがって、立坑躯体やその外側の地盤改良区間を包含する3~5mの区間は免震層を形成し、それより地盤側については、トンネル外周の地盤ひずみ分布のピークを包含するように30~50mの区間にわたって滑り型免震構造を適用することが望ましい。

3. 数値解析

(1) 軸対称FEMモデル (EASIT)⁷⁾の概要

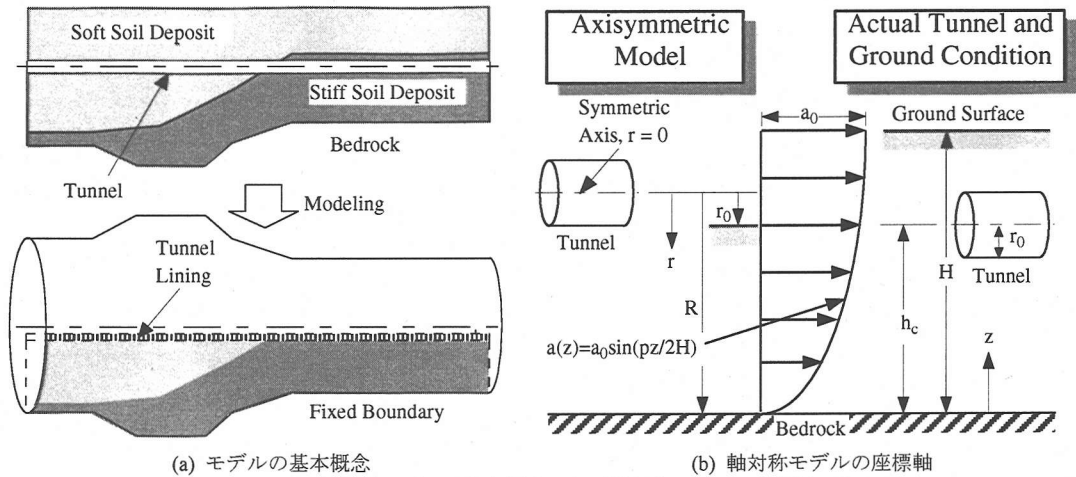
滑り型免震構造において要求される摩擦係数を検討する目的で、シールドトンネルの立坑接合部を対象として数値解析によるパラメトリックスタディーを実施した。解析には免震トンネルの地震時挙動を評価することを目的として開発された“EASIT”⁷⁾を使用した。本解析コードは、3次元構造を軸対称有限要素を用いて近似し、さらに地盤応答震度法等を取り入れて動的現象を静的解析に置き換えることによって、複雑な地震時の免震トンネルの挙動を簡便に解析するものであり、地下構造物の免震設計に実用化されている⁴⁾。以下に、“EASIT”の中で実施されている軸対称FEMモデルによる解析アルゴリズムの概要を簡単にまとめることにする。

図-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(地盤慣性力)の変換によって、近似的にモデル化を可能としている。図-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、座標軸を設定している。

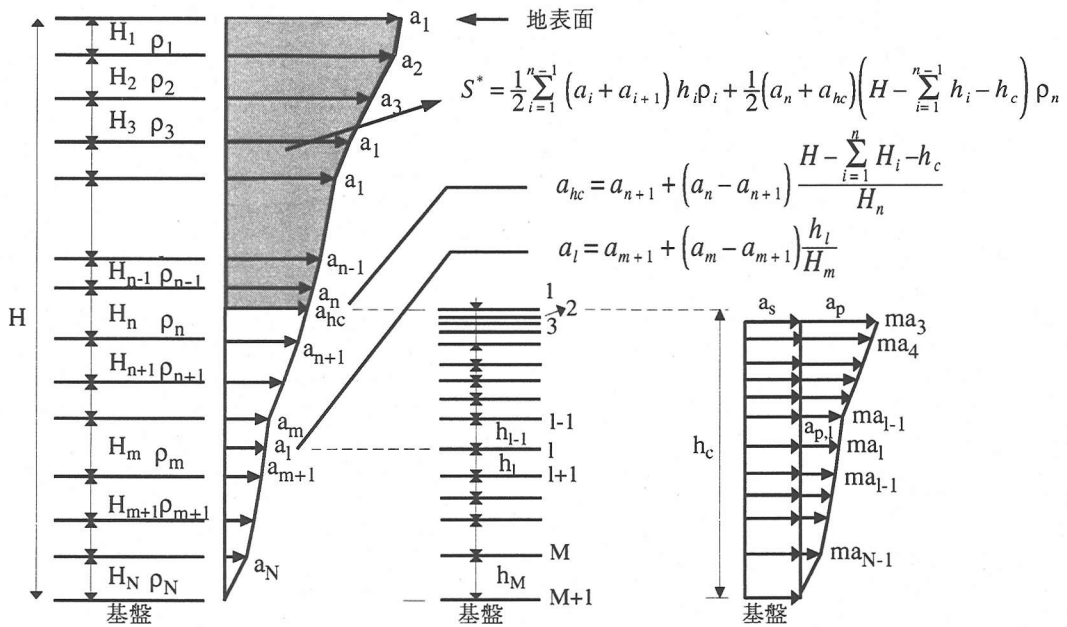
図-4(a)に示すN層の成層構造に分割された表層厚Hの表層地盤を対象として、地盤慣性力の算定法を説明する。図-4(a)の地盤モデルを用いて表層地盤の1次元地震応答解析を行った場合、表層地盤のせん断ひずみエネルギーの累積値あるいはある深度におけるせん断ひずみの最大値等の発生する時刻の地盤加速度分布を求め、これら加速度値 $a_1 \sim a_n$ を入力データとして保存しておく。地表面よりi番目の土層の層厚を h_i 、密度を ρ_i とし、トンネルの中心 h_c が地表面からn番目に位置するとすれば、軸対称モデルでモデル化されないトンネル上方の地盤に働く地震慣性力は式(1)に示す S^* で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

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

ここで式中の a_{hc} 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)のメッシュ分割を図-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) モデルの基本概念 (b) 軸対称モデルの座標軸
 図-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



(a) 成層地盤の応答加速度鉛直分布 (b) EASITによるモデルの層分割 (c) 補正加速度係数
 図-4 軸対称FEMモデルで作用させる加速度の変換過程

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

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、式(1)と式(2)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_i と定義すると、 ma_i は以下の式(3)で与えることができる。

$$ma_i = \frac{2\pi(R-r)}{\ln(R/r)} \cdot a_i + \frac{2\pi(R-r_0)}{R-r_0-r_0 \ln(R/r)} \frac{S^*}{\rho_m} \quad (3)$$

ここで式(3)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図-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

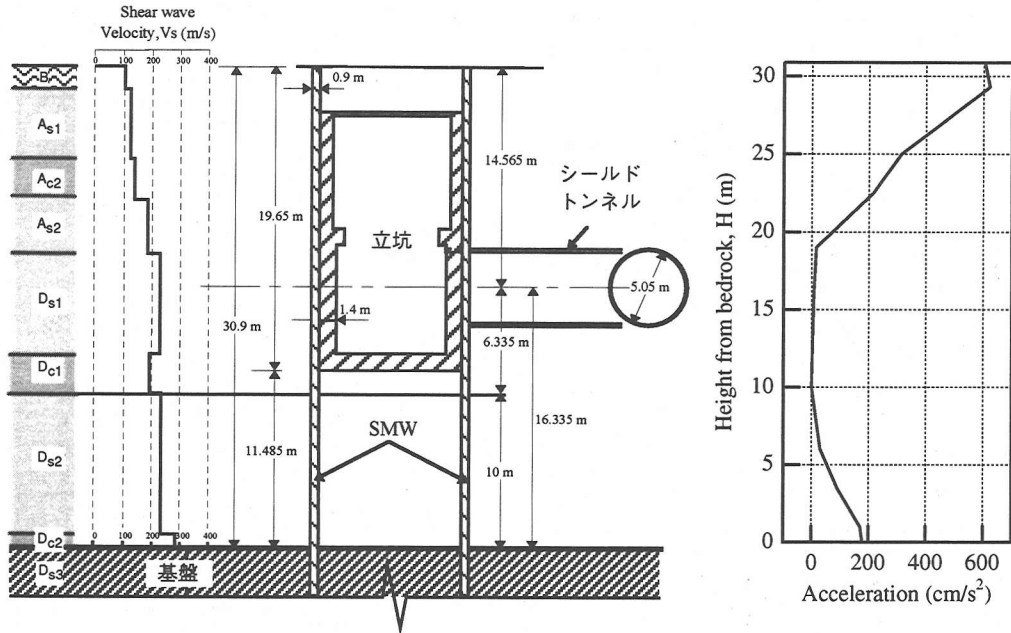


図-5 解析対象とする立坑接合部の地盤、構造条件と地盤慣性力算定に用いる地盤加速度分布

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 $S_a(T)$ とするとき、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、前述の式(1)~(3)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。

(2) 解析条件

図-5に解析の対象とした地盤およびトンネル断面を示す。トンネルは、共同溝の標準的な断面を有するシールドトンネルである。

地震荷重は図-5の右に示す加速度分布にて、地震慣性力を静的に作用させた。この加速度分布は、道路橋示方書におけるL2地震動のI種地盤用標準波形を基盤に入射した表層地盤の地震応答解析

の結果、前述の方法で求めたものであり、最大加速度は地表面で600 galと大きい。

解析ケースとしては、トンネルと立坑躯体壁が直接接している剛結合のケース (No isolation)、トンネルと立坑躯体壁との間にせん断弾性係数 0.5N/mm^2 、ポアソン比 0.48 の免震層があり、この免震層が厚さ 7cm で立坑内壁より 15m の免震区間長で形成されたケース (Isolation layer)、立坑内壁から 3m の区間は前記の免震層でそれより 12m の区間に滑り型免震構造を採用したケース (Slid. Isolation(1))、さらに、立坑接合部における表層地盤のひずみのピークを包含するように、滑り型免震構造を 35m に亘って採用したケース (Slid. Isolation(2)) の4ケースとした。なお、滑り型免震構造では、摩擦係数を 0.1 とし、 $\tau_f = 0.12\text{N/mm}^2$ と設定した。

(3) 滑り型免震構造のモデル化

解析コード“EASIT”では、セグメントの外周にテールボイドに相当する薄層の要素を配置し、この要素の物性として免震層の物性を与えることによって免震層をモデル化している。解析コード“EASIT”における滑動は、この薄層の有限要素に以下に示すバイリニア型の復元力特性を持たせることにより滑りをモデル化することとした。すなわち、薄層は低ひずみのせん断変形時にはトンネル外周地盤のせん断弾性係数 G_s に応じた線形挙動を示し、要素に発生するせん断応力 τ_s が式(5)による摩擦応力を超えると滑動して要素のせん断応力は

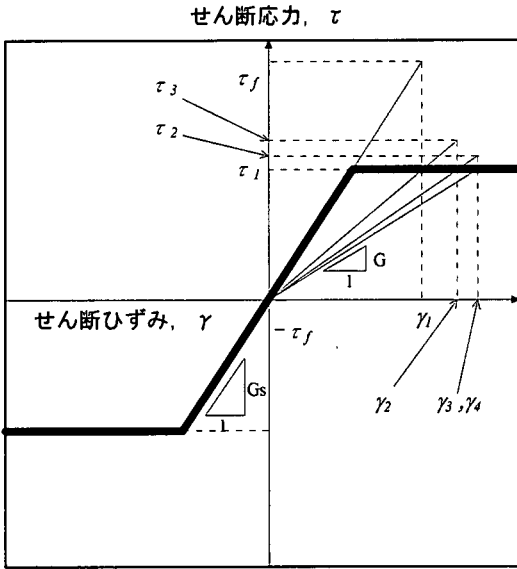


図-6 EASITによるバイリニア型の滑りのモデル化

一定値 τ_f となることとする。

$$\tau_f = \mu\sigma \quad (5)$$

ここで、 μ は摩擦係数、 σ は有効拘束圧である。このようなバイリニア型の復元力特性を得るため、iterationの n ステップにおける薄層要素のせん断弾性係数 G を、 $(n-1)$ ステップにおける要素のせん断ひずみ γ_{n-1} と τ_f を用いて、式(6)で与えることとした。

$$G = \tau_f / |\gamma_{n-1}| \quad (6)$$

通常このような解析を行うと、iterationの初期の段階で滑り要素がステップ毎に拡大してゆくが、薄層要素のせん断応力と τ_f の差が許容範囲内に収まるのを確認することによって、最終的に解析が収束したとみなした。図-6は滑り要素のせん断弾性係数の設定過程を示している。図中では4回目のステップで収束している。すなわち、iterationの3回のステップにおける薄層要素のせん断ひずみ γ_1 、 γ_2 、 γ_3 をそれぞれ用いて、次のステップの新たなせん断弾性係数を(6)式を用いて設定しており、4回目に設定したせん断弾性係数を用いた場合に、結果として得られたせん断応力が τ_f にほぼ一致して収束したとみなした。

iterationのステップでは、滑り要素の拡がりにともしない滑りの方向が逆転する場合等には、一旦薄層要素が滑り状態に入ってから、次のステップで再度せん断応力が摩擦応力を大きく下回る段階がある。したがって、あるステップで一旦滑り要素となっても、せん断応力が滑り応力の80%を下回ると、未滑動の要素として初期の線形特性を与えることとした。

(4) 解析結果

a) 圧縮変形時

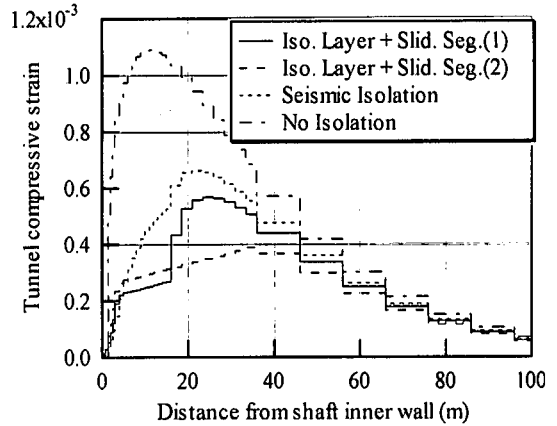


図-7 圧縮変形時のトンネルひずみ分布の比較

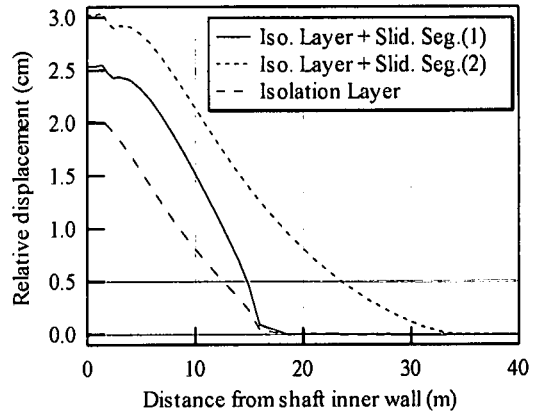


図-8 圧縮変形時のトンネル～地盤の相対変位 (滑り量)

図-7は圧縮変形時にシールドトンネルに発生する圧縮ひずみと立坑内壁からの距離の関係を示している。図に示すように、剛結合のケース (No isolation) のトンネルひずみのピークは、地盤ひずみのピークと一致して立坑内壁より約10mの位置にあり、これより立坑から遠ざかるにつれて、徐々にトンネルひずみが低減する分布となっている。免震層を用いた免震構造を適用した場合 (Isolation) には、立坑躯体とトンネルとが剛結状態から比較的軟らかな弾性ばね結合に変わって、トンネルと立坑との相対的な移動が可能となること、ならびに地盤ひずみのピーク位置で地盤とトンネルが免震層によって絶縁させることにより、トンネルひずみは剛結合のケースに対して半減している。これに対して、滑り型免震構造を免震層と同じ区間に採用した場合 (Slid. Iso. Layer + Slid. Seg.(1)) は、滑り型免震構造適用区間で直線的なトンネルひずみ分布となり、さらにトンネル軸ひずみを低減させている。さらに、滑り型免震構造を地盤ひずみのピークを包含するように適用 (Slid. Iso. Layer + Slid. Seg.(2)) すると、トンネル軸ひず

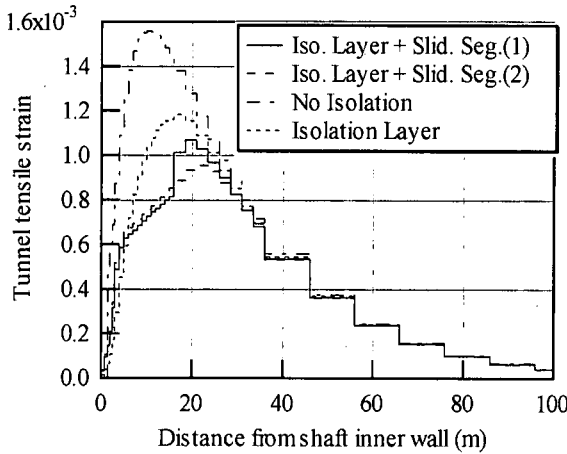


図-9 引張変形時のトンネルひずみ分布の比較

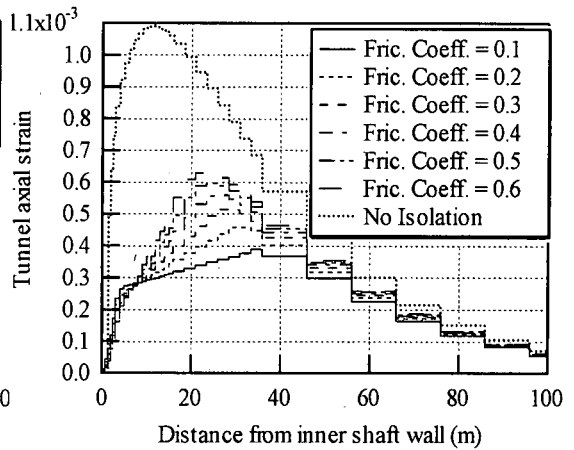


図-11 トンネルひずみ分布に対する摩擦係数の影響

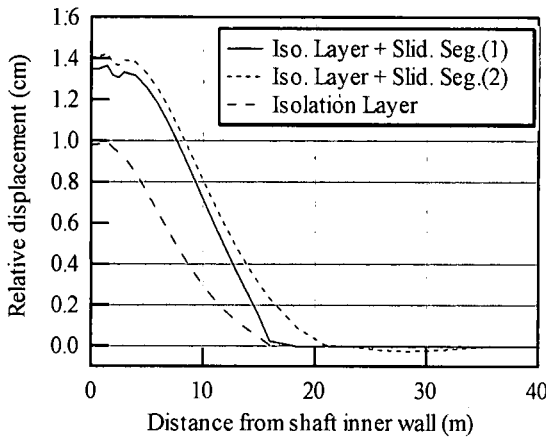


図-10 引張変形時のトンネル～地盤の相対変位（滑り量）

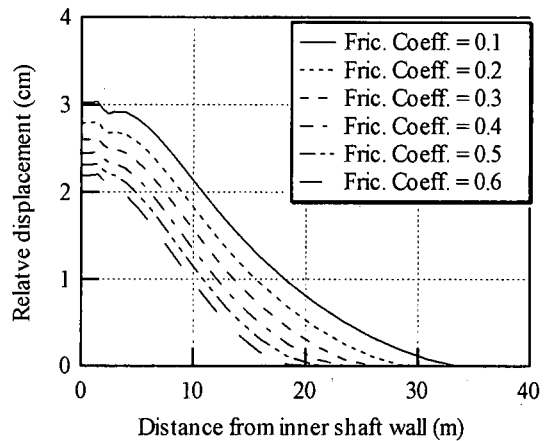


図-12 滑り量分布に対する摩擦係数の影響

みは剛結のケースに対して1/3まで低減する。以上のように、摩擦係数を0.1程度に調整できれば、滑り型免震構造はせん断弾性係数0.5 N/mm²程度のゴム弾性体の免震層を適用するよりも高い免震効果を実現できることがわかる。

図-8は、解析結果より前記薄層要素のトンネル軸方向のせん断変位である地盤とトンネルの相対変位を、立坑からの距離に対してプロットしたものである。立坑内壁における立坑とトンネルの相対変位は、免震層による免震構造で2.0cm、同じ免震区間長の滑り型免震構造で2.5cm、免震区間長35mの滑り型免震構造で3.0cmである。滑り型免震構造の免震区間長について言及すると、免震区間長15mでは、滑り量（相対変位）が立坑からの距離と共に急激に低下している。これに対して免震区間長を35mとした場合には、免震層を用いた場合とほぼ平行な緩勾配の滑らかな曲線分布となっている。このように、滑り型免震構造で最大の免震効果を確実に得るためには、地盤ひずみのピークを包含するように、30～40mに亘って免震区間長を設定することが望ましい。

b) 引張変形時

引張変形時については、セグメント剛性としてリング継手における面板の降伏を考慮した等価引張剛性を採用するため、セグメント要素の等価ヤング率が圧縮時と比較して1オーダー小さくなっているが、それ以外は圧縮変形時の場合と解析条件に相違はない。

図-9にトンネルひずみ発生分布に関する解析結果を示す。図のように剛結合のケースに対する免震層適用あるいは免震層と滑り型免震構造を併用したケースのトンネルひずみ低減効果は、圧縮変形時ほど際立っていないものの、滑り型免震構造は免震層による免震構造と同等以上の免震機能を有していることがわかる。

図-10は図-8と同様にトンネルと地盤の相対変位分布を示したものである。3解析ケースの引張変形時における相対変位分布の形状は、圧縮変形時とほぼ同じであるが、相対変位の絶対値が圧縮変形時の約半分となっている。ただし、免震区間長を35mとしたケース（Iso. Layer + Slid. Seg.(2)）では、立坑からの距離30mの付近で滑り量がマイ



図-13 水性エマルジョン型シリコン系塗料を用いた滑り型免震構造の滑動機構

ナスを示しており、滑りが立坑と逆方向に発生していることがわかる。

c) 摩擦係数に関するパラメトリックスタディー

地下構造物の滑り型免震構造において有効な摩擦係数を検討する目的で、上記立坑内壁35mの免震区間長とした圧縮変形時の条件で、摩擦係数を0.1から0.6まで0.1刻みで変化させたパラメトリックスタディーを実施した。なお、解析における荷重条件は前述の通りである。

図-11は滑り型免震構造の摩擦係数をパラメータとして、トンネルひずみの発生分布に関する解析結果を比較したものである。図のように、摩擦係数が大きいほどトンネルひずみ低減効果は小さくなるものの、あまり現実的ではないかもしれないが、摩擦係数0.6でも剛結のケースより40%程度のトンネルひずみ低減効果を有している。図-12はトンネルと地盤との相対変位（滑り型免震構造では滑り量）の分布を、摩擦係数をパラメータとして整理したものである。図のように、摩擦係数が小さいほど広い区間で滑りが発生しており、この滑り区間の長さが、トンネルひずみ低減効果の相違となっていることがわかる。

本解析ケースでは、トンネルひずみ（あるいは地盤ひずみ）のピークを包含するように滑り型免震構造を配置している。したがって、滑り型免震構造が有効に機能したか否か（滑り型セグメントを配置したほとんどの区間で滑ったか否か）で判断するならば、滑り型免震構造では0.1ないし0.2程度の摩擦係数が要求されることとなる。しかし、図-7の免震層のケースと同等な免震効果を導くのが目的であれば、さらに摩擦係数が0.3を超えて0.6に達したとしても、あまり現実的とは思えないが解析上は、免震構造として十分に機能していることになる。

4. 滑動材料の選定

(1) 滑動材料の概要と滑動メカニズム

開発した滑動塗料は、水分透過タイプかつ微細粒子充填剤を多く含有する水性エマルジョン型シリコン系塗料である。元来、耐久性塗料として主にプラントの塗装に使用されていた塗料に対して、配合上の改良を行い、高拘束圧下でも低摩擦で滑りを実現する材料とした。セグメント外周面

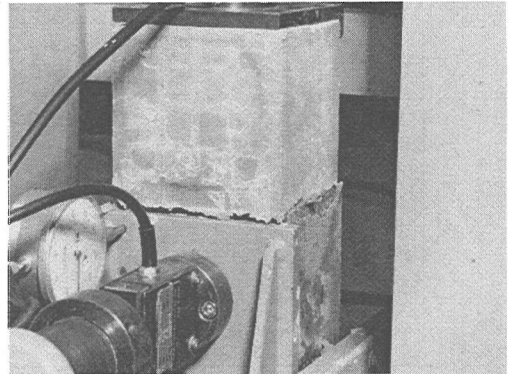


写真-1 せん断試験

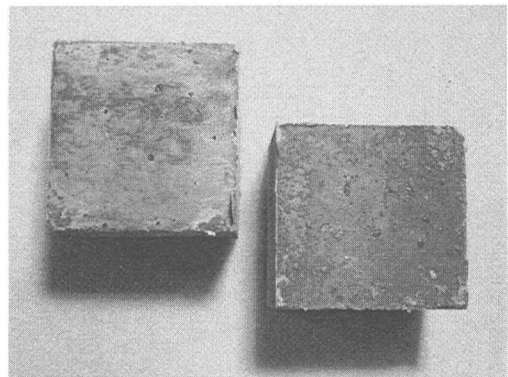


写真-2 試験後の供試体境界面（左；モルタルブロック、右；裏込め材ブロック）

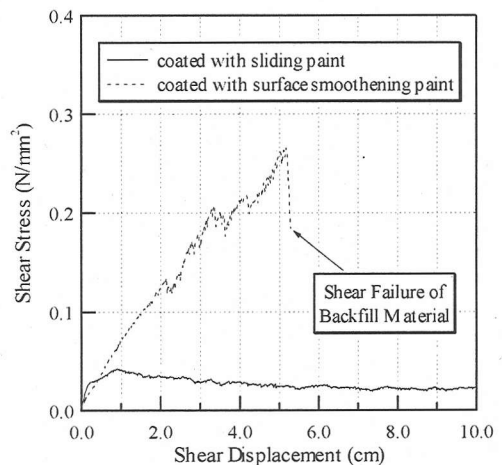


図-14 滑動塗料を塗布した供試体のせん断試験結果

に本塗料を予め塗布しておく、シールテールを通過したセグメントの外周に裏込め材が充填された際、塗料が裏込め材から水分を吸収し、セグメントの平滑面と塗料の平滑面との間に水と微粒子からなる滑材を形成することになる。滑動塗料の耐久性については、温水浸漬劣化加速試験が実施されており、地下構造物の供用年数である100年

程度の範囲では、ほとんど物性に变化がないことが確認されている。ただし、本材料は周囲に地下水がなければ滑材が形成されないため滑動効果は得られず、また水膨潤と乾燥を繰り返すような環境下では、著しく劣化することがある。

図-13 に滑動メカニズムを模式的に示す。図のように、塗料膜はコンクリートから剥離し、裏込め材側で裏込め材と固着した状態となり、コンクリート表面と滑動膜の間で滑りが発生する。

(2) ブロックせん断試験⁸⁾

写真-1 は、10cm 角のコンクリートブロックの表面に開発したシリコーン系滑動塗料を塗布した後、その外側に裏込め材を打設、養生したシールドトンネルのセグメントと裏込め材を模擬した供試体(ブロック)に対し、 0.2 N/mm^2 の軸応力を载荷しながらせん断変形を与えて実施したせん断試験である。図-14 はこのせん断試験の結果であり、コンクリート表面に各種表面平滑剤を塗布した供試体を用いて行った同様なせん断試験結果の代表例も併記した。滑動塗料を塗布した供試体では $0.02 \sim 0.03 \text{ N/mm}^2$ の一定のせん断弾力力でコンクリートと裏込め材の境界面に滑りが発生しているのに対して、表面平滑剤を塗布した供試体では裏込め材が大きくせん断変形した後裏込め材がせん断破壊に至っており、コンクリートと裏込め材との境界面に滑動が発生することはなかった。表面平滑材としては、シリコーンワニス、有機溶剤タイプのシリコーンゴム系塗料、ならびにフッ素樹脂系塗料の合計5種類を試したが、樹脂の硬度や塗装厚に関らず、すべての供試体で裏込め材のせん断破壊が発生し、境界面の滑りは発生しなかった。

写真-2 は試験後にコンクリートブロックと裏込め材ブロックを分離した境界面を示しているが、写真左のコンクリート表面が水膜で反射して光っているのがわかる。一方、裏込め材側には塗料膜がブロック表面に形成されている。

滑動塗料は $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$ 厚であるから塗料の使用量はわずかであり、地盤条件急変部のように免震区間が長い場合でも、滑り型免震構造の採用はそれほど大きなコストにはつながらない。

5. 滑動材料の物性試験

(1) 繰返し中空ねじりせん断試験

a) 供試体

開発した滑動塗料の動的物性を測定するため、中空ねじりせん断試験を実施した。中空ねじり供試体は、外径10cm、内径6cm、高さ10cmと通常の中空ねじり供試体の寸法を有しているが、高さ7cmまでがモルタル、その上の3cmの厚みが裏込め材で構成されている(写真-3)。

静的ブロックせん断試験の結果に基づいて、高軸圧でも塗料自体の塑性変形を抑制することに主

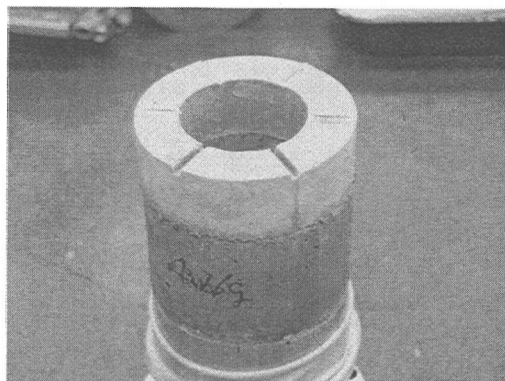


写真-3 中空ねじり試験供試体

眼を置いて材料配合を調整した塗料No.1~No.3の3種類の水性エマルジョン型シリコーン系塗料を用いた。塗料No.1の供試体は1体、塗料No.2とNo.3の供試体はそれぞれ2体で、合計5体の供試体を作成した。

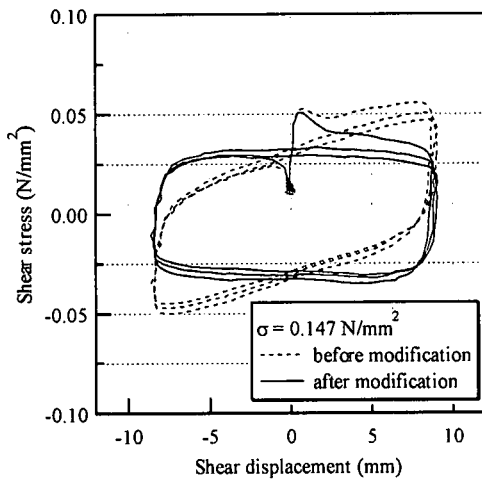
供試体の作成は、まず、モルタルを中空の特殊モールドに打設、脱型の後、1ヶ月間水中養生した。その後、モルタル供試体を乾燥させ、供試体上面に滑動塗料を塗布して乾燥させた。なお、乾燥後の滑動塗料の膜厚は約 0.3 mm である。この供試体を再度モールドに入れ、その上部に裏込め材を打設、脱型の後、1ヶ月間水中養生した。このようにして作成した供試体の上、下面に溝を形成し、載荷装置の上、下面の金属との固定を図り、載荷装置のセルにセットした。

b) 実験方法および実験ケース

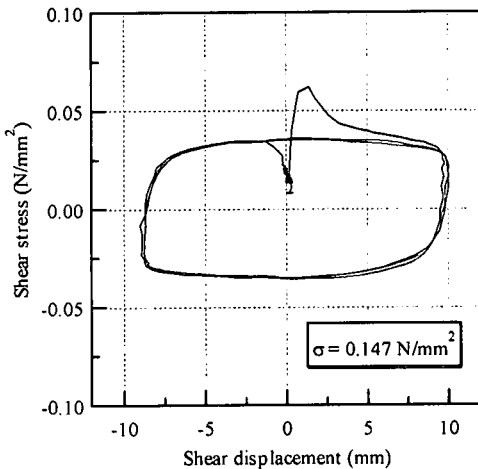
載荷試験は非排水条件で行い、一定振幅の正弦波3波を載荷振動数1Hzで変位制御にて載荷した。載荷振幅は10mm以内の中振幅と10mmを超える大振幅の2段階とし、それぞれの振幅レベルで上記の正弦波3波の加振を行った。ここで与える最大振幅は、実際に発生が想定される滑り量と載荷装置の載荷能力を勘案して、15mm程度(ねじり回転角で 30° 程度)とした。

有効拘束圧は 0.049 N/mm^2 から 0.049 N/mm^2 刻みで最大 0.441 N/mm^2 まで変化させた実験ケースを設定した。ただし、初期に実施したNo.1供試体の載荷試験では、実際載荷装置にどの程度のトルクが発生するかが想定できなかつたため、安全上 0.147 N/mm^2 までの有効拘束圧下で載荷試験を実施した。その後、材料の摩擦係数が明確になるに伴い、載荷装置のトルク容量をチェックしながら、最後に実施したNo.3供試体の載荷については、1供試体で有効拘束圧を次第に上昇させ、最終的に最大 0.441 N/mm^2 での載荷までを実現させた。

なお、試験はモルタルと裏込め材の境界面での一面せん断となるため、供試体を覆っているメンブレンのねじり抵抗を事前に確認するとともに、No.2供試体ではメンブレンなしの状態、セルに



(a) メンブレンあり (等方応力状態)



(b) メンブレンなし (1軸応力状態)

図-15 メンブレンありなしの供試体によるせん断応力履歴の比較とメンブレンの影響の補正

は圧力を与えることなく水を満たしただけの状態とし、軸圧のみ0.049~0.196N/mm²で4種類変化させて載荷し、繰返し中空ねじりせん断を実施した。

(2) 中空ねじりせん断試験結果とその評価

a) メンブレンの影響

図-15(a)は塗料 No. 2を用いた供試体を用いてメンブレンを装着した通常の載荷試験において、有効拘束圧 0.147N/mm²のケースのせん断応力とせん断変位の関係を示したものである。図中の破線は補正を行わない生データをグラフにしたものである。一方、実線は破線の履歴における傾きをメンブレンのねじり抵抗と考え、この傾きを0にすべく数値上の補正を行ったものである。これに対して図-15(b)は、塗料 No.2を用いた同じタイプの供試体について、前述のメンブレンなしで、0.147N/mm²の軸圧のみを載荷した状態で実施した載荷試験のせん断応力とせん断変位の関係を示したものである。図-15(a)は等方応力状態であるのに対して図-15(b)は1軸応力状態ではあるが、面圧としては同じであるため、両者の履歴はほぼ一致しており、図-15(a)のメンブレンの影響の補正が妥当であることがわかる。メンブレンなしの供試体では、有効拘束圧 0.147N/mm²以外にも 0.049, 0.0098, 0.196N/mm²の軸圧を載荷した条件で中空ねじり試験を実施しており、同様な比較を実施しているが、後述するメンブレンを装着した通常の供試体との同じ有効拘束圧下での載荷試験結果の比較では、得られた動摩擦係数はほぼ一致している。

メンブレンの影響に関しては、2つ割の鋼製中空供試体の間に摩擦係数 0.1 のテフロンシート 2枚を挟んだ供試体にメンブレンを装着し、中空ねじりせん断試験を実施して検討を行っている。そ

の結果、得られたせん断履歴の傾きは、低拘束圧下ではばらつくものの、有効拘束圧が 0.1N/mm²を超えるとほぼ一定値となり、その数値はほぼ本実験とほぼ一致している。ただし、作成した供試体毎に、またせん断振幅の大きさによって多少のばらつきが認められたため、傾きをすべての供試体で一定として前述の補正を行うのではなく、得られた傾きを用いて個々の実験ケースで補正を行うこととした。

b) せん断応力履歴に対する有効拘束圧の影響

図-16は、塗料No.3を用いた供試体に関するそれぞれ有効拘束圧 0.098, 0.196, 0.294, 0.392 N/mm²の実験ケースのせん断応力とせん断変位の関係をまとめたものである。これらすべてせん断振幅を大振幅としたケースであり、横軸の目盛も実際に発生している振幅も一致していることがわかる。これに対してそれぞれの図の縦軸の上限値は、有効拘束圧に一致させてある。図より一目瞭然であるが、有効拘束圧 0.098N/mm²ではせん断応力履歴の幅が広く、摩擦係数が他のケースより高い。有効拘束圧 0.196N/mm²のケースでは、0.098N/mm²のケースに比べてせん断応力履歴の幅が狭くなっており、さらに0.294N/mm²ではさらに狭くなっている。しかし、0.392N/mm²のケースは、0.294N/mm²のケースとほぼ同じと見なすことができる。したがって、塗料の動摩擦係数は、有効拘束圧が高いほど小さくなり、0.3N/mm²程度で一定値に収束することが推測される。

c) 摩擦係数の有効拘束圧依存性

上記の滑動塗料の動摩擦係数に関する有効拘束圧依存性を示すために、得られたすべての実験ケースの動摩擦係数 μ と有効拘束圧 σ の関係を、図-17にプロットしてまとめた。図のように、今回の実験で用いた塗料 3種類の種類内の範囲内では、滑動挙動に有意な差は認められず、同じ傾向

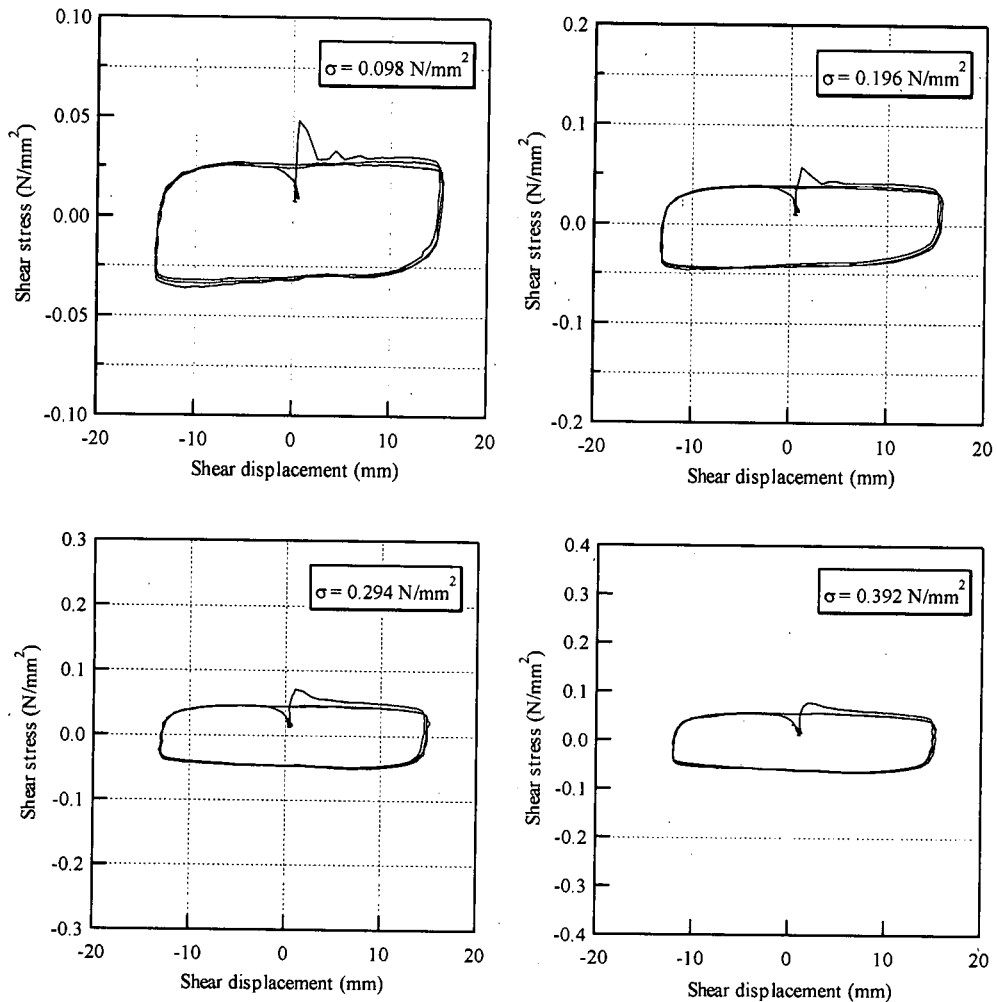


図-16 せん断応力履歴に及ぼす有効拘束圧の影響

を示していることがわかる。動摩擦係数は、 0.05N/mm^2 の有効拘束圧下ではばらつきが大きく、数値としても $0.3\sim 0.6$ と大きい。有効拘束圧が 0.1N/mm^2 を超えればばらつきが小さく安定したデータが得られており、 0.1N/mm^2 で 0.3 、 0.2N/mm^2 で 0.2 程度まで低減し、さらに有効拘束圧が 0.3N/mm^2 を超えれば 0.15 でほぼ一定値と見なすことができる。

2章の数値解析で示したように、摩擦係数 0.3 以下であれば滑り型免震構造は免震層と同等かそれ以上の免震効果が期待できるため、開発した塗料は免震構造として十分な滑り性能を有していると言える。塗料の開発においては、実際に塗料に作用するような土圧条件下でも、塑性変形することなく滑動するように、塗料の剛性を高める配合を工夫したが、とくにNo.3塗料では 0.45N/mm^2 の有効拘束圧下でも安定した滑り性能を実証しており、 50m を超えるような大深度のトンネルへも適用可能であることが示された。

図-17において▽印のプロットがメンブレンなしの供試体の試験結果であるが、同じ有効拘束圧

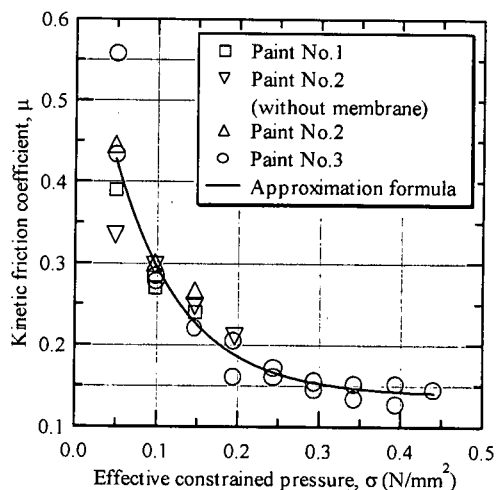


図-17 動摩擦係数の有効拘束圧依存性

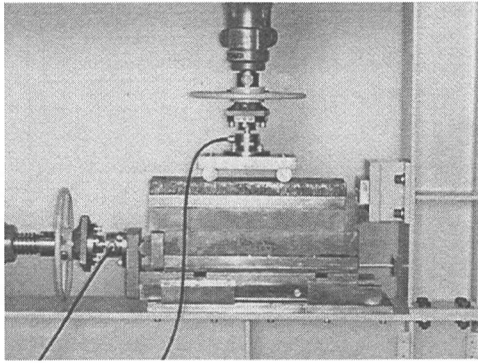


写真-4 境界面に段差を設けた供試体のせん断試験

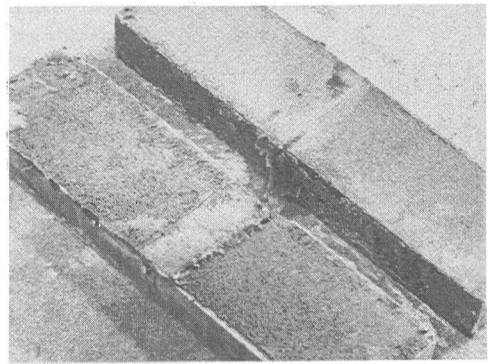


写真-5 試験後の供試体

下ではメンブレンありの△印のプロットとほぼ一致していることがわかる。また▽印のプロットが有効拘束圧 0.05N/mm^2 ではもっとも低い動摩擦係数を示しており、有効拘束圧が 0.05N/mm^2 と低い条件では、せん断挙動におけるメンブレンのねじり抵抗の影響度が相対的に大きく、メンブレンのねじられ方によって塗料の滑り挙動が大いに影響を受けていることが推測される。

滑り型免震構造を実シールドトンネルに適用する場合、想定される有効拘束圧は、トンネル設置深度を $15\text{m}\sim 50\text{m}$ 程度と考えれば $0.1\sim 0.4\text{N/mm}^2$ となり、ほとんどのケースは図-15の実験結果を用いて免震設計に適用する動摩擦係数を設定することが可能と言える。図-16のプロットを指数関数型の近似式でフィッティングすると、動摩擦係数 μ と有効拘束圧 σ (N/mm^2)の関係は式(7)となった。

$$\mu = 0.138 + 0.523 \exp(-12.042\sigma) \quad (7)$$

図-17には上記式(3)が実線で示してあるが、式(7)は実験データの良い近似となっていることがわかる。したがって、免震設計においては、設計検討を行うトンネルの平均有効拘束圧（例えばトンネル中心深度における σ ）より式(7)を用いて動摩擦係数 μ を求め、前述のEASITで与える τ を算定することができる。

(3) セグメント組立て誤差による影響

地盤条件によっては、リング内におけるセグメントピース間や隣合うリング間のセグメントピース間で組立て誤差による目違いが生じることがある。セグメント間の目違いは、トンネル外周面での段差となって、滑り型免震構造の滑動性能を低減させることが予想され、したがって、この影響を定量的に評価し、摩擦係数の補正の形で設計に取り込む必要があると考えた。

セグメントピース間に段差がある場合、段差の上方向へ滑る場合と下方向へ滑る場合とでは、当然ながら抵抗が異なることになる。したがって、幅 10cm 、長さ 40cm 、高さ 5cm のモールドを用い、 1mm の厚みのスペーサーを利用して半分の 20cm は

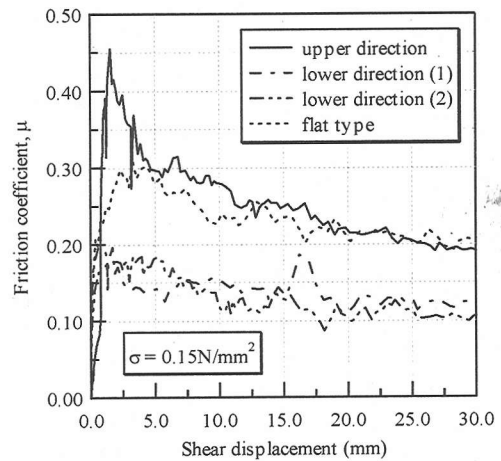


図-18 表面の段差が摩擦係数に与える影響

高さ 4.9cm 、残りの半分を高さ 5.0cm とし、中央で 1mm の段差を設けたモルタル供試体を作成した。水中養生の後に十分乾燥させたモルタル供試体の表面に、シリコン系滑動塗料をエアレスタイプの塗装機で所定量塗布し、乾燥後 0.3mm の膜厚を形成させた。次にこの供試体を高さ 10cm のモールドに入れ、その上部に 5cm の厚みで裏込め材を打設して幅 10cm 、長さ 40cm 、高さ 10cm の供試体を作成して28日間水中養生した。

これに対して同様な方法により、境界面が平坦な供試体も作成した。境界面に段差を設けた供試体を3体、境界面が平坦な供試体を1体作成した。このうち段差を設けた3つの供試体では、段差の上方向へせん断する実験を2ケース、下方向へせん断する実験を1ケース行うこととした。

せん断試験装置は写真-4に示すように、ジャッキを用いて 0.15N/mm^2 の鉛直圧を与えた後、上部の裏込め材の右端を固定し、手動のジャッキにてモルタルの左端に対して水平荷重を載荷した。鉛直荷重と水平荷重はロードセルで計測を行い、水平変位を変位計で測定した。鉛直ジャッキは固定としたため、鉛直荷重はせん断の過程で多少変動した。

上方向へのせん断のケースでは、せん断変位約5mmで鉛直圧が 0.10N/mm^2 まで低減し、その後漸増してせん断変位30mmで 0.12N/mm^2 まで回復した。一方、下方向へのせん断の実験ケースでは、せん断変位約10mmで鉛直圧 0.10N/mm^2 まで低減し、その後は 0.10N/mm^2 のほぼ一定値で推移した。

上記のように、実験の精度上、得られた実験結果は数値としての精度が低いが、実験ケースで相対的な比較は可能と判断し、4実験ケースの結果を摩擦係数とせん断変位の関係として図-18に整理した。図のように、上方向へのせん断のケース

(upper direction)の結果は、初期のせん断時に見かけ上摩擦係数が高くなるが、この後は境界面が平坦なケース (flat type) とほぼ同じ挙動を示している。一方、下方向へのせん断の実験ケース (lower direction) では、2ケースともほぼ同様な結果であるとともに、境界面が平坦ならびに上方向へのせん断のケースと比較すると摩擦の低減が著しいことがわかる。写真-5に上方向へのせん断の実験ケースでの試験後の供試体の境界面の写真を示す。写真のように裏込め材側で、段差部より滑った方向の滑動塗料が一部剥ぎ取られた状況となっている。このように滑動塗料の一部が剥ぎ取られる場合と裏込め材自体に多少の損傷が生じて滑動塗料は残存する場合があるが、この程度の損傷では滑り性能に大きな影響は生じない。さらにセグメントのリング長が1~1.2mであり、滑り型免震構造の滑り量はせいぜい数cmであることを勘案すれば、段差の影響は摩擦係数にはほとんど影響しないと言える。

地下構造物の場合には、地震時の地盤変位に追従して構造物が応答する性質がある。したがって、衝撃型の地震動であったとしても、初期の比較的小さな地盤の変位応答時に段差部分で境界面の破壊が生じ、これが一時的に摩擦抵抗を増加させるが、その後の主要動ではほぼ境界面が平坦な場合と同程度の摩擦抵抗で滑ることを本実験結果が示していると思われる。したがって、式(3)によって与えた摩擦係数をそのまま使用するか、あるいは安全率を考慮して10~20%程度摩擦係数を割増しておけば、セグメントの組立て誤差の摩擦係数に与える影響を十分考慮できるものと判断される。

6. 現場確認試験

(1) 試験目的と滑り型セグメントの製作

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、地盤内へと出るようになる。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

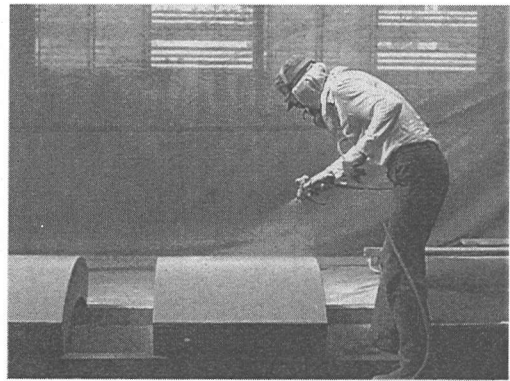


写真-6 スプレーによる滑動塗料の塗布状況

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たり、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。そこで、横浜市の下水道トンネル工事の実シールドトンネルの発進立坑において、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、現場確認試験を実施することにした。また、実際のセグメントに対する滑動塗料の塗布、塗料を塗布したセグメントの養生、運搬、現場搬入、組立てといった一連の作業を実践することにより、何らかの不具合の発生の有無を確認することも、本現場確認試験のもう一つの目的である。

滑動塗料の塗布にはエアレスタイプの塗装機を用い、スプレーにて塗布した。写真-6は塗布状況であるが、防錆塗料の塗装に用いている一般的な塗装機を流用し、先端チップを専用のチップに交換して使用した。セグメントは外径2400mmのCPセグメントであるが、仮組みを終えた後で桁内部にコンクリートを打設するため、実質的にはスチールセグメントの状態である。セグメントの外周面には通常は防錆塗料を塗布するが、滑り型セグメントでは防錆塗料の代わりに水性エマルジョン型の滑動塗料を塗布した。

(2) 試験ケースと試験結果

シールド機内で生まれ、テールシール通過後に立坑内に現れることによって外周の状況が確認できるセグメントリングであって、かつ初期の掘進においてセグメント投入口とならないセグメントリングはわずか4リングであり、そのうちの3リングを利用して、滑動塗料の塗装膜厚をリング間で0.2, 0.3, 0.5mmの3種類変化させ、膜厚による損傷度の違いの有無を確認することとした。なお、セグメントリングは6ピースのセグメントで構成されているが、シールド掘進の状況によっては推力の偏心により、天端、スプリングライン、下端のいずれの位置かのシールパッキンとセグメント

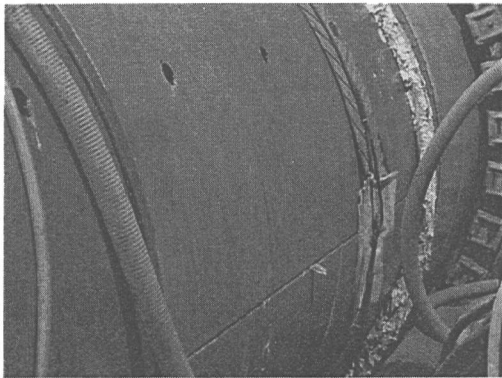


写真-7 テールシール通過後のセグメント

の接触圧が大きくなることも予想されるので、塗料は3リングのすべてのセグメントに塗布することとした。

セグメントのテールシール通過後の3リングの状況を写真-7に示す。塗装膜厚を変えた3リングとも、滑動性能に影響するほど大きな塗装膜の損傷は認められなかった。しかし、塗装膜厚0.2mmのケースでは、1箇所のみではあるがグラウトホールの位置で小規模の塗料の剥離が認められ、またセグメントの端部を中心として多少の損傷が認められ、また、塗装膜厚0.5mmのケースでは、セグメント端部において小さな剥離が認められ、またわずかながらブラシによる筋状の傷が認められた。一方、塗装膜厚0.3mmのケースは、他の2ケースと比較すると明らかに損傷の程度が低いと判断された。すなわち、膜自体は硬度45°程度の比較的軟らかい弾性体であるため、塗装膜厚が薄すぎると膜の強度が低いために損傷しやすく、厚すぎるとブラシが膜の中に食い込むことによって塗装膜の破損を招きやすくなると推察された。したがって、今後は塗装膜厚0.3mmを標準にすることとした。

7. まとめ

本論文では、まず地下構造物の新たな免震構造である滑り型免震構造の位置付けを明らかにした。次に、シールドトンネルの立坑接合部を対象として数値解析を実施した。また、滑動塗料を開発し、この塗料を用いた滑り型免震構造の静的せん断試験、動的中空ねじりせん断試験を実施した。さらにセグメントの組立て誤差を想定し、段差を設けたモルタル、裏込め材ブロックのせん断実験を実施し、最後に実シールドトンネルの発進部の仮組みセグメントに開発した塗料を塗布したセグメントを採用してテールシール通過試験を実施した。以下に、本論文で得られた結論をまとめる。

(1) 滑り型免震構造は、摩擦係数を0.1と設定した場合、せん断弾性係数 0.5N/mm^2 の免震層よりも大きな免震効果を得ることができ、地盤ひずみ分布の

ピークを包含するように配置すれば、さらに大きな効果を発揮できる。

(2) 滑り型免震構造では摩擦係数が小さいほど、より広い範囲まで、またより大きな滑りが発生して大きな免震効果が期待できるが、レベル2地震動を想定した場合には、摩擦係数0.6でも免震層と同程度の免震効果が得られることがわかった。

(3) 水性エマルジョン型のシリコーン系滑動塗料を開発した。この塗料を塗布した供試体を用いた静的せん断試験を実施し、低摩擦係数を以って滑動することを確認した。

(4) 開発した水性エマルジョン型滑動塗料を境界面に塗布したモルタルと裏込め材の中空供試体を用い、繰返し中空ねじりせん断試験を実施した結果、摩擦型のせん断応力履歴を以って境界面で滑動することを確認した。

(5) 上記の実験で得られた動摩擦係数は有効拘束圧依存性を示した。塗料の動摩擦係数は有効拘束圧 0.1N/mm^2 で0.3、 0.2N/mm^2 で0.2、 0.3N/mm^2 以上ではほぼ0.15の一定値であり、動摩擦係数と有効拘束圧の関係を指数関数型近似式で与えた。

(6) セグメントの組立て誤差によるセグメント間に生じる段差が滑り性能に与える影響は、段差の下方向へのせん断の場合は段差のない場合よりも摩擦抵抗は明らかに小さくなる。しかし、段差の上方向へのせん断では、初期に裏込め材の部分的な破壊に起因する抵抗の増加が認められものの、その後は段差のない平坦な場合とほぼ同程度の摩擦抵抗であり、せいぜい10~20%程度摩擦係数を増やしておけば、設計上特別な補正は必要としない。

(7) 滑動塗料を塗布した滑り型セグメントを実シールド機のテールシールを通過させた結果、テールブラシによる塗料の損傷は極めて小さいことから、免震効果に影響するような損傷は起こらないことがわかった。

謝辞：滑動塗料の選定、開発に当たっては、信越化学工業(株)の福田健氏、大橋博司氏の協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。また、現場確認試験実施に当たっては、横浜市下水道局建設部ならびに金田則夫所長はじめ熊谷・紅梅・芦澤建設共同事業体の保土ケ谷・平沼幹線作業所の皆様にご協力いただきました。ここに記して、深謝致します。

参考文献

- 1) 鈴木猛康：シールドトンネル軸方向の耐震性評価に関する考察，土木学会論文集，No.441/I-18，pp.137-146，1992.1.
- 2) 鈴木猛康，田村重四郎：シールドトンネルの免震構造とその免震効果の評価手法の提案，土木学会論文集，No.525/I-33，pp.275-285，1995.
- 3) 建設省土木研究所，土木研究センター，他民間17社：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発（その

- 3) 一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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 運上茂樹, 星隈順一, 村井和彦: 3次元動的有限要素解析に基づく地中構造物の免震メカニズム, 土木研究所資料, 第3559号, 1998.2.
- 7) 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.
- 8) 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.

(2000.11.6 受付)

PROPOSAL AND VERIFICATION TESTS ON THE SLIP-TYPE SEISMIC ISOLATION FOR UNDERGROUND STRUCTURES COATED WITH A LOW FRICTION PAINTS

Takeyasu SUZUKI and Touta KATSUKAWA

The paper presents a new seismic isolation of slip-type for underground structures. By coating particular paints on the outer surface of underground structures, slip easily occurs with low friction between tunnel body and its peripheral soil. In this paper, the effect of seismic isolation of this type is demonstrated by numerical simulations, on a seismic behavior at the joint portion of a shield-driven tunnel with a vertical shaft.

Particular silicone paints of water emulsion type was developed and was tested. Hollow cylindrical cyclic shear tests were conducted and they proved that the developed paints effectively enabled slip with friction coefficient as low as 0.15 even under dynamic condition. In-situ test was also conducted by applying segments coated with the developed paints to temporary segments at a departure shaft of shield tunneling. It revealed that the paint was not largely damaged by wire brushes when the tail seal passed through the segments during shield driving.