



## トンネル免震技術に適用する滑動塗料の開発

研 究

鈴木 猛 康\* 勝 川 藤 太\*\*

### 1. は じ め に

1995年に発生した兵庫県南部地震では、わ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、わ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地震動に対して保有すべき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ろうが、とくに人命に係わる地下鉄・道路など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あるが生じ、この要求に応えるべく免震構造が考案された<sup>1)</sup>。

シールドトンネルの免震構造は、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<sup>2)</sup>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免震構造は、立坑接合部において既に実構造物に適用されている<sup>3)</sup>。

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など、有望な地震対策と言える<sup>3)</sup>。

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。

本稿では、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セグメントの開発について報告するものである。

### 2. 滑り型セグメント

本稿で定義する滑り型セグメントとは、外周面に予め滑動塗料を塗布したシールドセグメントである。これにより、地震時に裏込め材とセグメント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ことができる。セグメント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で低摩擦で滑動可動となっていなければならない。今回、周囲に裏込め材があるという条件で境界面で滑らせるために、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枚の平滑面で滑材をサンドイッチすることとした。

今回使用した滑動塗料は、水分透過タイプかつ微粒子充填材を多く含有する水性エマルジョン型シリコン系塗料(以下、シリコン系滑動塗料という)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、高軸圧でも塑性変形を抑制すべく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。

セグメント外周面に本塗料を予め塗布しておく、シールド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、塗料は裏込め材から徐々に水分を吸収し、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。

図-1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剝離し、裏込め材側で裏込め材と固着した状態で、コンクリート表面と滑動膜の間で滑りが発生する。

\* 中央復建コンサルタンツ(株)東京本社総合設計室部長

\*\* " " " " 課長代理

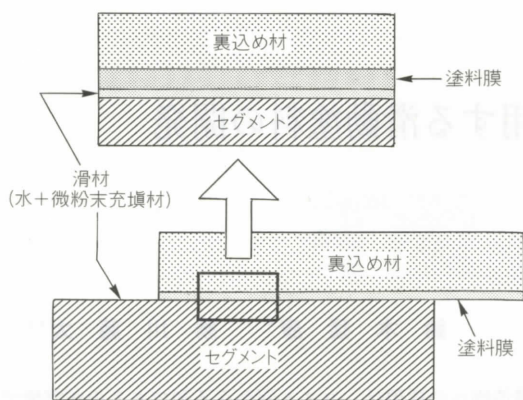


図-1 滑り型セグメントの滑動メカニズム

### 3. 滑り型免震構造の適用箇所

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などの局所的に地盤ひずみが集中する箇所である。トンネル縦断方向の圧縮・引張変形に対しては、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、また、一方では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、それぞれトンネルに発生する軸力、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きわ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(1)、(2)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。図-2(1)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。これに対して図-2(2)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。

図-2(3)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。立坑接合部では、立坑躯体とトンネル覆工との間に免震層を形成し、止水性を図るとともに曲げ変形の局所的集中を防止するため、立坑より3~5mのみは免震層を形成し、それより地盤側

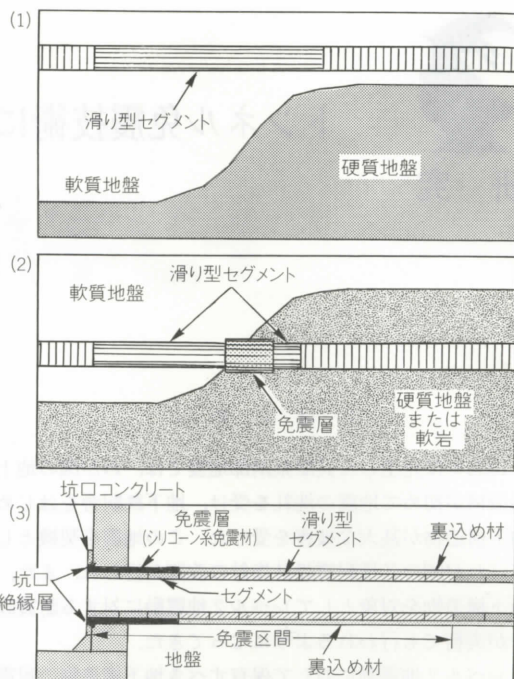


図-2 滑り型免震構造の適用箇所

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。

### 4. 滑り型セグメントの物性試験

#### 4-1 くり返し中空ねじりせん断試験

##### 4-1-1 実験方法および実験ケース

開発した滑動塗料の動的物性を測定するため、くり返し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。供試体の高さ7cmまではモルタルであり、その上面に滑動塗料が塗布されている。さらにその上方の3cmが裏込め材で形成されている（写真-1）。

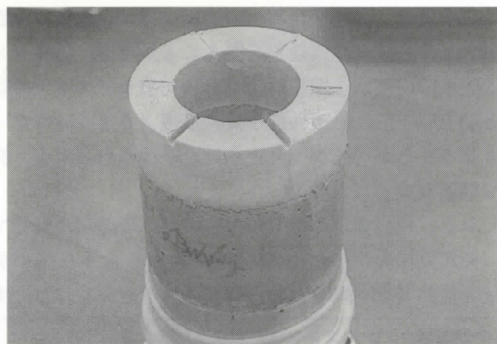


写真-1 中空ねじり供試体

高軸圧下でも塗料自体の塑性変形を抑制できるように配合調整した No.1 ～ 3 の 3 種類のシリコン系滑動塗料を用いた。塗料 No.1 を塗布した供試体は 1 体、塗料 No.2 と No.3 を塗布した供試体はそれぞれ 2 体で、合計 5 体の供試体を作成した。供試体が荷重装置のセル内にセットされた状態を写真-2 に示す。

荷重試験は非排水条件下で行い、一定振幅の正弦波 3 波を荷重振動数 1Hz で変位抑制にて荷重した。荷重振幅は 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荷重装置の荷重能力を勘案して、15mm 程度（ねじり回転角で 30° 程度）とした。

初期に実施した No.1 供試体の荷重試験では、実際荷重装置にどの程度のトルクが発生するかが想定できなかったため、安全上 0.147N/mm<sup>2</sup> までの有効拘束圧下で荷重試験を実施した。その後、材料の摩擦係数が明確になるに伴い、荷重装置のトルク容量をチェックしながら、No.3 供試体の荷重については有効拘束圧を次第に上昇させ、最終的に最大有効拘束圧 0.441N/mm<sup>2</sup> で荷重を実現させた。

写真-3 は、2 つの境界面を上にして並べた試験後の供試体である。右が裏込め材側であり、何度もくり返し荷重したため摩耗した結果、端部で一部損傷を受けているものの、塗装膜が表面を覆っていることがわかる。一方、左はモルタル側であり、表面が白く見えるのは水分で光が反射しているためである。両境界面とも指で触ると微粉末の溶けた白い液体（滑材）を確認できた

#### 4-1-2 セン断応力履歴に対する有効拘束圧の影響

図-3 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、0.392N/mm<sup>2</sup> の実験ケースのせん断応力～せん断変位の関係をまとめたものである。これらはすべてせん断振幅を大振幅としたケースであり、横軸の目盛り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。

これに対して各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/mm<sup>2</sup> 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/mm<sup>2</sup> のケースでは、0.098N/mm<sup>2</sup> 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、0.0294

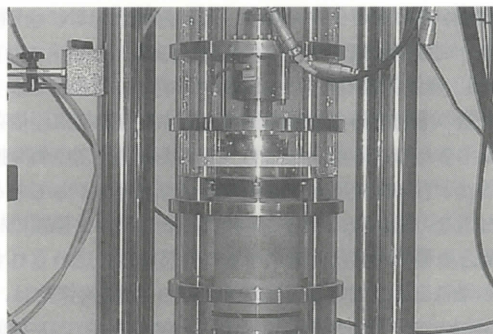


写真-2 くり返し中空ねじりせん断試験

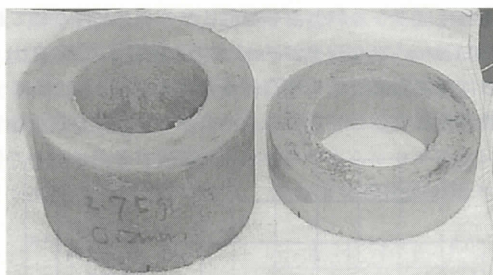


写真-3 試験後の供試体境界面の状況

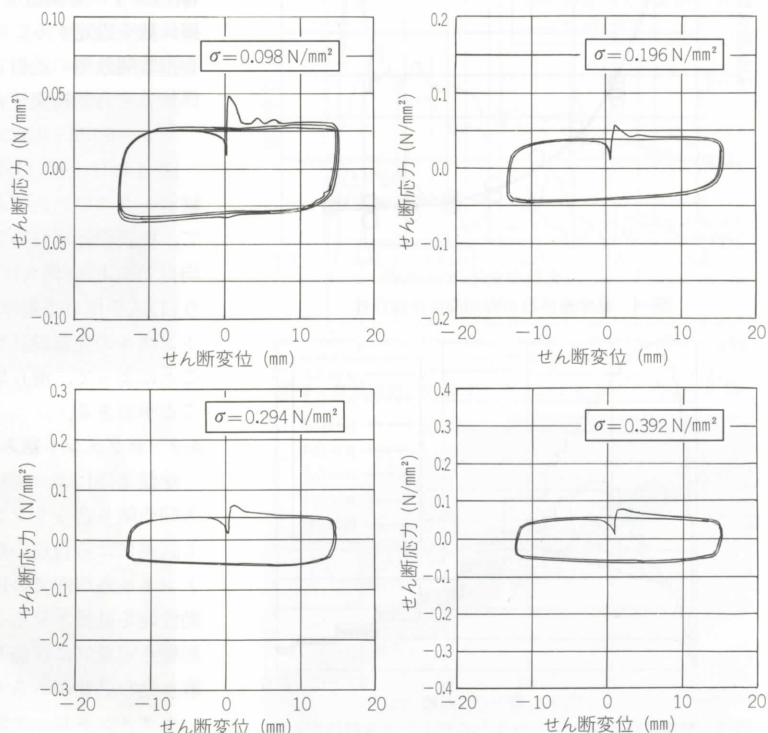


図-3 セン断応力履歴に及ぼす有効拘束圧の影響

$\text{N/mm}^2$ ではさらに狭くなっている。しかし、 $0.0392\text{N/mm}^2$ のケースは、 $0.0294\text{N/mm}^2$ 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、有効拘束圧  $0.3\text{N/mm}^2$  程度で一定値に収束することが推測される。

#### 4-1-3 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  $\mu$  と有効拘束圧  $\sigma$  の関係を図-4にプロットしてまとめた。この図から、今回の実験で用いた塗料3種類の材料配合の範囲内では、滑動挙動に有為な差は認められず、同じ傾向を示していることがわかる。動摩擦係数は、 $0.05\text{N/mm}^2$  の有効拘束圧下ではばらつきが大きく、数値としても  $0.3\sim 0.6$  と大きいが、有効拘束圧が  $0.1\text{N/mm}^2$  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、 $0.1\text{N/mm}^2$  で  $0.3$ 、 $0.2\text{N/mm}^2$  で  $0.2$  程度まで低減し、さらに有効拘束圧が  $0.3\text{N/mm}^2$  を超えれば  $0.15$  でほぼ一定値と見なすことができる。

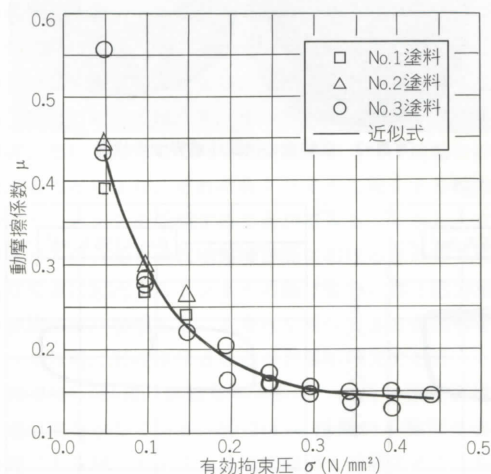


図-4 動摩擦係数の有効拘束圧依存性

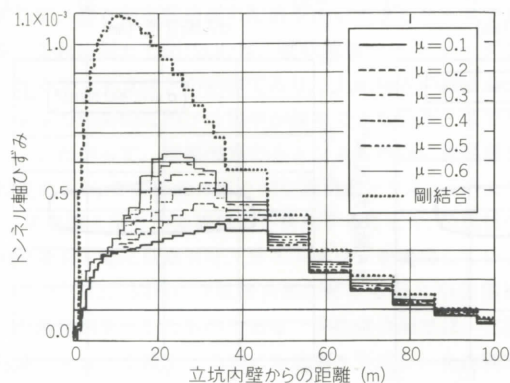


図-5 摩擦係数  $\mu$  をパラメータとしたトンネル軸ひずみの解析結果

図-5は5.1mのRCセグメント製シールドトンネルの立坑接合部を対象とした免震構造の数値解析結果の一例である<sup>4)</sup>。ここでは、立坑内壁より3m間は免震層を形成し、それより約30mの区間に滑り型セグメントを適用したことを想定している。レベル2地震動を対象とし、滑り型セグメントの摩擦係数を  $0.1\sim 0.6$  までパラメトリックに変動させ、トンネルに発生するひずみと立坑内壁からの距離の関係をまとめているが、摩擦係数  $0.3$  でもトンネル発生ひずみは接合部を剛結合とした場合に対して半減していることがわかる。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ことが、別途実施した数値解析によって示されており<sup>4)</sup>、したがって、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  $0.45\text{N/mm}^2$  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実証された。

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  $15\sim 50\text{m}$  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-4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-4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  $\mu$  と有効拘束圧  $\sigma$  ( $\text{N/mm}^2$ ) の関係は(1)式となった。

$$\mu = 0.138 + 0.523 \exp(-12.042\sigma) \quad (1)$$

図-4には上記(1)式が実線で示してあるが、(1)式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  $\sigma$ )より(1)式を用いて動摩擦係数  $\mu$  を求め、これをシールドトンネルの免震設計用プログラム“EASIT”<sup>5)</sup>に与えることによって、滑り型セグメントの免震効果を評価することができる。

#### 4-2 セグメント組み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り合うリング間のセグメントピース間で組み立て誤差による目違いが生じることがある。この目違いは、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、動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(写真-4)、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-5 に示すように、ジャッキを用いて  $0.15\text{N/mm}^2$  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  $0.10\text{N/mm}^2$  まで低減し、その後漸増してせん断変位 30mm で  $0.12\text{N/mm}^2$  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

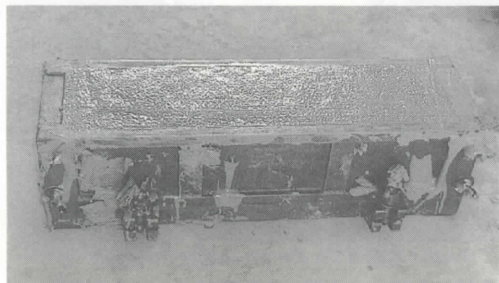


写真-4 裏込め材の打設

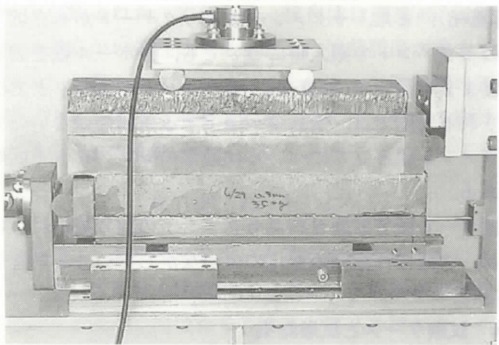


写真-5 段差供試体のせん断試験

10mm で鉛直圧  $0.10\text{N/mm}^2$  まで低減し、その後は  $0.10\text{N/mm}^2$  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-6 に整理した。図のように、上方向へのせん断のケースの結果は、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とは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-6 に上方向へのせん断の実験ケースについて試験後の供試体境界面の状況を示す。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てい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

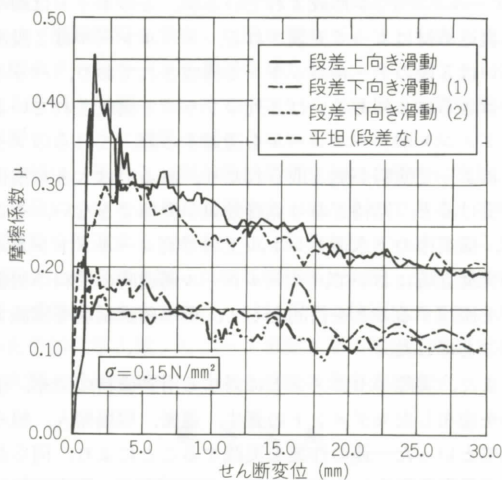


図-6 摩擦係数に及ぼすセグメント組み立て誤差の影響

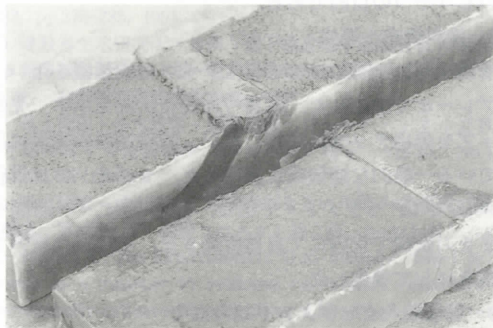


写真-6 段差上方向へ滑動後の供試体

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(静止摩擦)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動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、(1)式によって与えた動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%程度摩擦係数を割増しておけば、セグメントの組み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。

## 5. 現場確認試験

### 5-1 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み立てられ、掘進に伴ってテールシールを通過した後、シールド機外に出ることになる。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たり、あるいは大きな損傷を受けると、期待どおり免震効果が発揮できない。そこで、横浜市下水道トンネル工事で実シールドトンネルの発進立坑において、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、組み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。

### 5-2 塗料塗布と養生

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-7に塗布状況を示す。先端チップを専用チップに交換したが、防錆塗料の塗装に用いている一般的な塗装機を流用した。セグメントは外径2,400mmのCPセグメントである。塗布後は、一週間そのままの状態です室内にて自然乾燥させ、その後は室内で横置きにして養生した。

### 5-3 現場搬入とセグメント組み立て

滑り型セグメントの出荷に際しては、塗装膜を傷つ



写真-7 スプレーによる滑動塗料の塗布

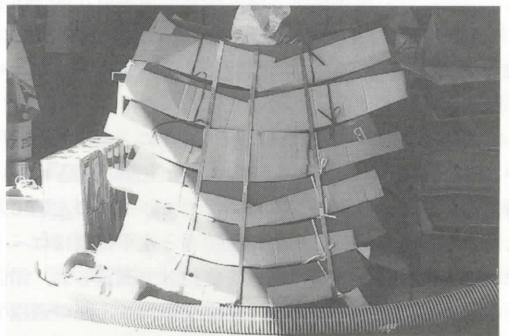


写真-8 滑り型セグメントの現場搬入



写真-9 セグメントの立坑への搬入

ないように、段ボール紙で塗装面を保護して運搬した(写真-8)。また、セグメントストックヤードから立坑下へのセグメントの搬入時についても、段ボール紙を装着したままで行った(写真-9)。セグメントがエレクタで把持される段階では、塗装膜が損傷する可能性はないので、セグメント組み立てについては通常のセグメントと同様である。

段ボール紙で保護されたセグメントの取り扱いについては、大幅な作業性の悪化にはつながらないことが確認できた。

### 5-4 試験ケースと試験結果

シールド機内で組まれ、テールシール通過後に立坑内

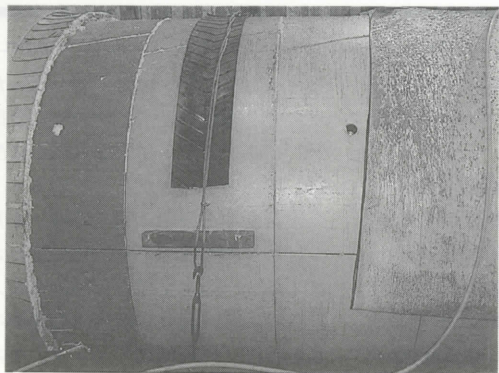


写真-10 テールシール通過後のセグメント

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仮組みのセグメントリングはわずか4リングで、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ごとでそれぞれ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でもシールパッキンと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。

テールシール通過後のセグメント3リングの状況を写真-10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か所のグラウトホールの位置で小規模の塗料の剝離が認められ、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た。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剝離が、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°程度の比較的柔らかい弾性体であるため、塗装膜厚が薄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と推察された。したがって、今後は塗装膜厚0.3mmを標準とすることとした。

## 6. おわりに

本稿では、滑動塗料を用いた滑り型セグメントのくり返し中空ねじりせん断試験、セグメントの組み立て誤差を想定して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。以下に得られた結論をまとめる。

(1) 水性エマルジョン型シリコン系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てくり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呈して境界面で滑動することを確認した。

(2) 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  $0.1 \text{ N/mm}^2$  で0.3,  $0.2 \text{ N/mm}^2$  では0.2,  $0.3 \text{ N/mm}^2$  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定関数型近似式で与えた。

(3) セグメントの組み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るものの、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%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。

(4) 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きわ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。

本稿は、筆者らが熊谷組技術研究所に在職中に実施した開発について、その成果をまとめたものである。本技術開発を推進するにあたって、的確なアドバイスならびに励ましの言葉を賜った熊谷組技術研究所・北原部長に深く感謝致します。また、材料面での技術協力をいただいた信越化学工業シリコン事業本部の福田主席研究員と大橋主任研究員に、心より感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 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。
- 2) 建設省土木研究所・ほか：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。
- 3) 連上茂樹・小木曾繁・廣瀬昌俊：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。
- 4) 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。
- 5) 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。