

シールドトンネルの免震構造に対する シリコン系免震材の適用

鈴木 猛康¹・小林 正宏²・福田 健³・池野 正行⁴・宮路 敦⁵

¹正会員 工博 (株)熊谷組技術研究所 土木系研究開発部 (〒300-22茨城県 つくば市鬼ヶ窪1043)

²正会員 工修 (株)熊谷組土木本部 土木技術部 (〒162東京都新宿区津久戸町2-1)

³工修 信越化学工業(株)シリコン事業本部第一営業部 (〒100東京都千代田区大手町2-6-1)

⁴理博 信越化学工業(株)シリコン電子材料技術研究所 (〒379-02群馬県碓氷郡松井田町人見1-10)

⁵信越アステック(株)シリコン事業部 (〒101東京都千代田区内神田1-5-13)

トンネル覆工体と周辺地盤との間に比較的薄い免震層を形成するシールドトンネルの免震構造は、トンネル軸方向のトンネル断面力を大きく低減させ、大きな免震効果を発揮することが確認されている。免震材料としては、ヤング率が小さく、なおかつポアソン比が0.5に近い物性を有することが必要であるとともに、シールドトンネルの掘進とともに坑内からの注入によって、充填・形成させるための施工面からの流動性や硬化特性も要求される。本論文ではまず、このような要求を満たす免震材料として、筆者らがこれまで開発してきたシリコン系免震材料を紹介している。次に、免震構造の実用化を図ることを目的として実施した、材料配合の改良、現場注入実験について述べ、シールドトンネルの免震施工にシリコン系免震材料が適用可能であることを示している。

Key Words : *shield-driven tunnel, seismic isolation, silicone, material properties
in-situ grouting experiment*

1. はじめに

シールドトンネルは柔構造であり、リング間継手による変位吸収によって覆工体の断面力を低減できる点で、耐震性に優れていることが知られている。しかし、地盤条件が極端に急変する場合や、立坑のような剛な構造物との接合部のように、極めて短い区間に大きなひずみが集中する箇所においては、リング間継手による変位吸収が期待するほど得られないことから、覆工体本体に大きな断面力が発生することが予想される¹⁾。またミチョアカン地震の際メキシコ市のシールドトンネルにおいて、立坑との接合部付近でねじり変形によるリング間ボルトのせん断破壊が生じた被害に見られるように²⁾、大きなひずみが局部的に発生した結果、リング間継手の破壊に至る可能性もある。

そこで筆者らは、シールドトンネルの覆工体と周辺地盤の間に免震層を形成することによる免震構造を提案し、その免震効果について検討してきた³⁾、⁴⁾、⁵⁾。その結果、免震層の存在により、トンネル軸方向の伸縮ならびにねじり変形に対して、非常に大

きな免震効果が発揮されることを示した⁴⁾、⁵⁾。

免震構造による免震効果は、シールドトンネルの場合、主に(1)免震層で周辺地盤のひずみが吸収されることによってトンネルに伝達されるひずみが低減される、(2)トンネル外周のせん断抵抗が極めて小さくなることによって継手による十分な変位吸収が期待できる、(3)免震構造としたトンネル部でひずみの分散が生じ、この範囲ではほぼ一様なひずみとなる、の3点である。

筆者らは、これらの研究成果に基づいて、シールドトンネルの免震層を形成する材料として、液状シリコンゴム組成物を提案し、その動的物性や施工面に配慮した配合、注入・充填性について実験的検討を行ってきた⁶⁾。

本論文ではまず、上記の研究成果に基づいてシリコン系免震材料の特徴と有効性を簡単にまとめる。次に実地山への注入・充填性の検証を目的として実施した現場注入実験をまとめる。さらに、この現場注入実験の結果に基づき、シールドトンネルの免震施工に採用するシリコン系免震材料と施工システムについて提案する。

2. シリコン系免震材料

(1) 免震材料としてのシリコン系材料

免震効果と地表面沈下を抑制するためには、免震層としては、(1)ヤング率が小さいこと、(2)ポアソン比が0.5に近く体積変化が極めて少ないこと、(3)大きな変形性能を有すること、(4)耐久性に優れ長期に亘って安定したせん断特性を有すること等の材料特性が要求され、かつ現場施工を考えると、(5)テールポイドへの裏込め注入と同様にトンネル坑内からの注入による形成が容易である材料であることが要求される。また(6)高い止水性を有していることも必要である。

免震材料として採用したシリコン系材料は、縮合型硬化機構を利用した2液常温硬化型液状シリコンゴム組成物であり、硬化後のヤング率 E_t が 10kgf/cm^2 程度となるよう調整されたものである。主材(A液)はシリコンポリマーに充填材等を配合したものからなる。これに硬化材(B液)を加えることにより常温で硬化する。図-1に主材と硬化材の配合比と硬化特性(粘度変化)の関係を示すが、硬化速度は主材と硬化材の配合比によって容易に制御することができる。本研究で免震材料として採用するのは、主材と硬化材の重量混合比が10:1で、約1時間で流動停止する材料である。シリコンゴムは、天然ゴムや合成ゴム等炭素を主成分とする高分子材料と異なり、石英や長石の化学構造であるシロキサン結合(-Si-O-Si-O-)を骨格として有し、周囲に有機基を配置した合成高分子構造であり、柔軟性、耐久性、耐候性、止水性など、一般のゴムよりはるかに優れている。またその組成から、硬化前後に有害となる物質を発生することはない。

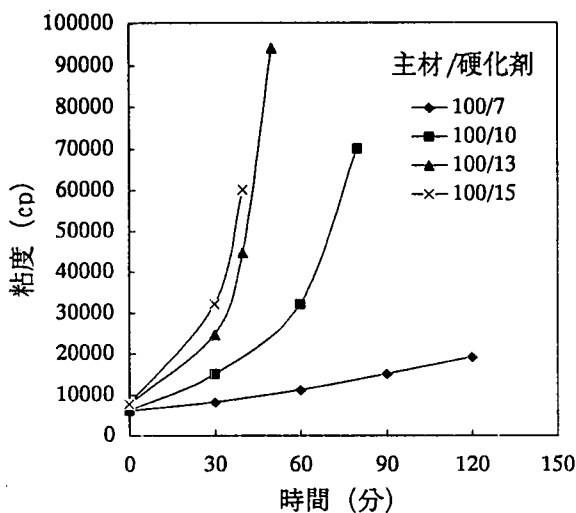


図-1 免震材料の配合と硬化特性の関係

(2) シリコン系免震材料の動的物性

単純せん断状態におけるシリコン系免震層材料の動的物性を得るため、中空ねじりせん断試験を実施した結果について説明する。拘束は等方応力状態で行い、材料の拘束圧依存性を検討するため、有効拘束圧 $\sigma_z' = \sigma_h' = 0.5\text{kgf/cm}^2$ および 1.0kgf/cm^2 の2ケースについて繰返しせん断試験を実施した。繰返しねじりせん断は、せん断ひずみ $\gamma = 10^{-5}$ レベルから20%のレベルまでを10段階に分け、各ひずみ段階で11サイクルのせん断荷重を行い、10サイクル目の履歴を用いて供試体のせん断弾性係数 G と減衰定数 h を求めた。なお、荷重振動数は 0.2Hz とした。

図-1に有効拘束圧 1.0kgf/cm^2 、せん断ひずみ20%の荷重ケースにおける履歴を示すが、シリコン系免震材料は荷重サイクルとともに物性が変わることなく、安定した履歴を示していることがわかる。

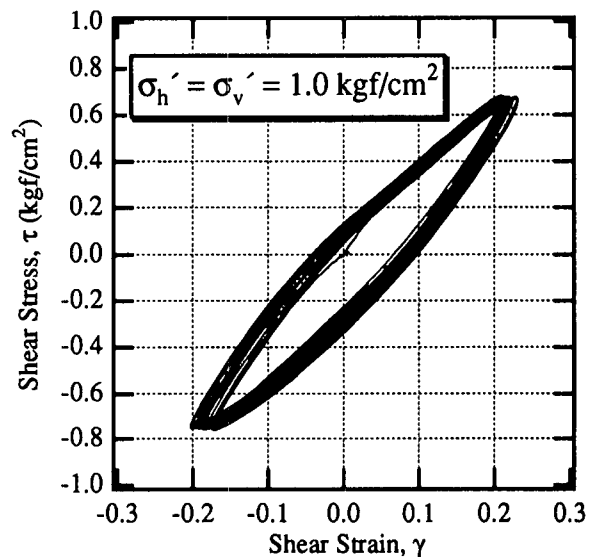


図-2 免震層材料のせん断変形に関する動的履歴特性

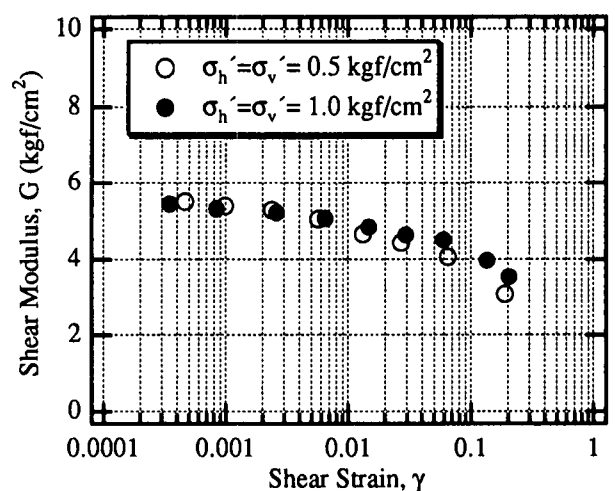


図-3 免震層材料のせん断弾性係数 G のひずみ依存性

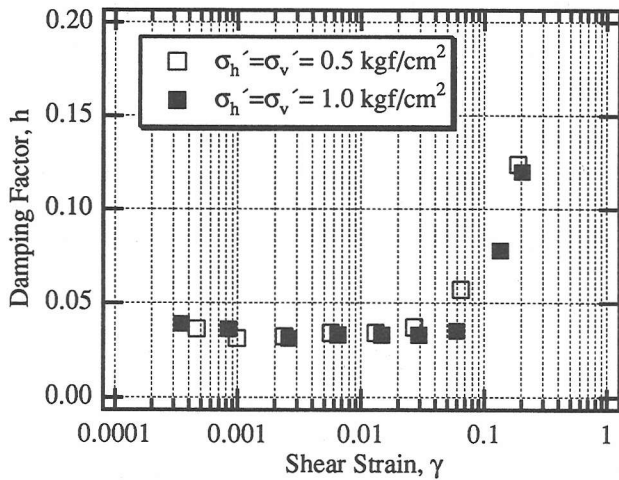


図-4 免震層材料の減衰定数 h のひずみ依存性

図-3および図-4に、実験によって得られた G および h のひずみ依存性それぞれを示す。両図からわかるように、拘束圧依存性は、 G についても h についても認められず、トンネルの埋設深度によらず、設計通りの物性が与えられる材料であることを示唆している。

せん断弾性係数 G は、せん断ひずみ振幅 γ の増加とともに徐々に低下し、 γ が 10^{-2} レベルまでは 5kgf/cm^2 程度であるが、 10^{-2} レベルより低下の度合いが次第に大きくなり、 γ が20%のとき 3kgf/cm^2 程度となっている。一方減衰定数 h については、せん断ひずみ γ が10%以下ではほぼ0.03で一定であり、 γ が10%を超えると急激に増大し、 γ が20%では0.1以上となる。解析によれば⁷⁾、地震時に免震層に発生するせん断ひずみは、せいぜい10%程度である。したがって、本免震材料のせん断弾性係数ならびに減衰定数のひずみ依存性は、実用上無視できると判断される。このようにシリコン系免震層材料は、10%程度の大きなせん断ひずみ領域まで有意なひずみ依存性を示さない。本材料は、100%のせん断ひずみを与えても破壊しないことを確認している。

なお、三軸試験機のセル圧 σ_h を徐々に増加させるとき、鉛直変位を一定に保つための鉛直圧 σ_v を測定することにより、材料のポアソン比を求めた結果、ポアソン比は0.48であり、ほとんど体積変形することなく地表面沈下を誘発しない材料であることを確かめている。

(3) 注入・充填性確認のための室内実験

大型実験土槽を用いて実施した注入確認実験について説明する。写真-1に注入状況を示す。大型実験土槽は幅4m、長さ3m、高さ3mであり、土被り1m

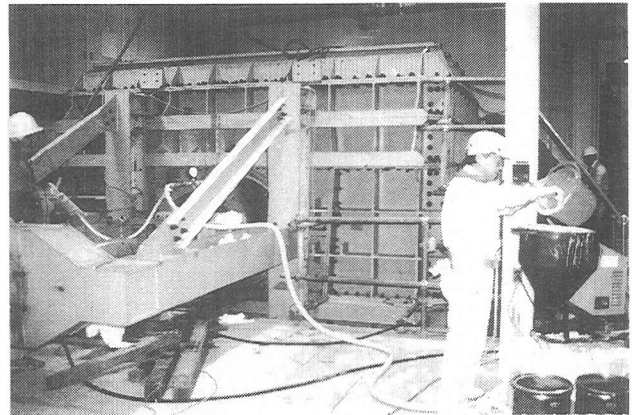


写真-1 大型実験土槽を用いた注入確認実験

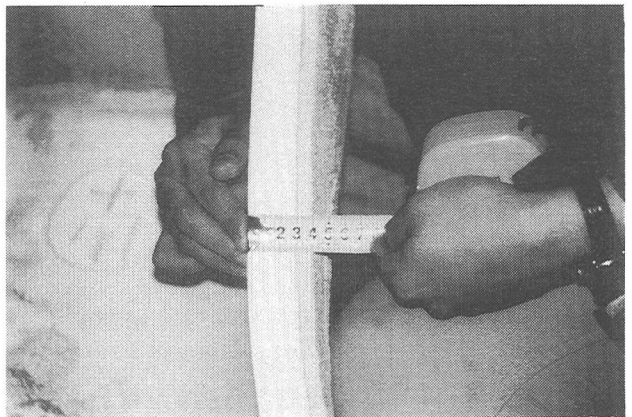


写真-2 切出した免震層とその外層の砂との混合層

の位置にトンネル模型が設置できるように設計されている。また上面に圧力蓋を取付け、蓋と土表面の間に水袋を設置し、水圧により均等に 6kgf/cm^2 までの土被り圧を発生させることができる。

トンネル模型は、外筒管と内筒管とからなり、外筒管はシールドマシンを模擬したもので外径106cm、内筒管はセグメントリングを模擬したもので外径100cmであり、両管とも厚さ10mmのスチール製である。外筒管の中に内筒管を挿入した状態で地盤中にトンネル模型を設置しておき、油圧ジャッキにより外筒管を引き抜きながら、地盤と内筒管の間にできる厚さ3cmのテールボイドに免震材料を注入する方法を採用した。

実験に用いた免震材料は、注入時の粘性抵抗を小さく調整したものである。事前にJIS-C2123に従って測定したヤング率 E_t は 7.5kgf/cm^2 であり、注入時の粘性は約5000cps、流動停止時間は1時間である。

材料の注入にはロータリー式ポンプを用いた。注入速度は約 5l/min でほぼ一定であり、吐出量一定として外筒管の引き抜き速度を調整することにより、充填率を調整した。

写真-2は免震層の一部を切り出した断面を示したも

のである。写真下部の厚み3cmの白色の層が純粋な免震層で、その外側に見える厚み約1cmの灰色の部分が、免震層材料と砂の混合層である。この切り出した免震層より供試体を作成しJIS-C2123に従ってヤング率を求めた結果、 $E_f=8.4\text{kgf/cm}^2$ が得られた。これは純粋な材料の物性試験の結果 $E_f=7.5\text{kgf/cm}^2$ より大きな値であるが、周辺地盤の砂を若干取り込んで層が形成されたためであり、これ以外は実験で形成された免震層は純粋な免震層材料と同様な性質を有していた。

以上のように、シリコン系免震材料は、物性と注入・充填性の両面から、シールドトンネルの免震材料として適用可能であることが示されているが、実施工への適用に当たっては、さらに材料改良、実地山中への注入・充填性の確認ならびに施工システムの確立が必要と判断された。

3. 現場注入実験

(1) 試験概要

免震材の実地山への注入・充填性を確認するため、掘削外径3,260mm、セグメント外径3,130mmの泥土加圧式シールド工事現場の発進立坑付近地盤改良部で、現場注入実験実施した。

図-5に現場注入実験の実施概要図を示す。注入区間は、立坑内の発進部から4および5リング目の2m区間である。当現場の理論テールボイド厚は65mmであり、施工時に裏込め注入を行わず、注入区間の

前後のリングを、予めミニパッカーを施工して保護しておいた。注入区間の各セグメンベースにグラウトホール（直径2インチ）を設置した（1リング7ピースで、天端のキーセグメントにのみグラウトホール2個配置）。グラウトホールは、免震材の注入口、注入時の免震材の流出確認孔、ならびに注入後のサンプリング孔として使用し、天端の1箇所には空気抜き用のストレーナーパイプを、それ以外にはボールバルブを取り付けた。

(2) 材料および注入装置

試験に用いたシリコン系免震材料は、2章の大型実験土槽による注入試験で用いたものと同一材料であり、ヤング率 E_f は 7.5kgf/cm^2 、主材と硬化材の重量混合比は10:1、流動停止時間は約1時間である。

注入装置には高粘性材料を確実に圧送できるモノポンプを採用した。ポンプの吐出量は、低速度で注入することによりテールボイドの充填性を高めることを目的とし、回転数900rpm、吐出量 5.5l/min とした。この際の吐出圧力は、注入パイプの先端部に取り付けた圧力計で管理し、周辺地盤に影響を与えない 2kgf/cm^2 以下と設定した。

(3) 注入方法

主材と硬化剤の混合は比は10:1で、電動ミキサーによる手動混合とした。免震材のミキシングは写真-3に示すように、まず主材18l入りのジャンビー管に硬化剤1.8lを投入して十分間混合した後、そのジャンビー缶を直ちに注入装置側に移動し、注

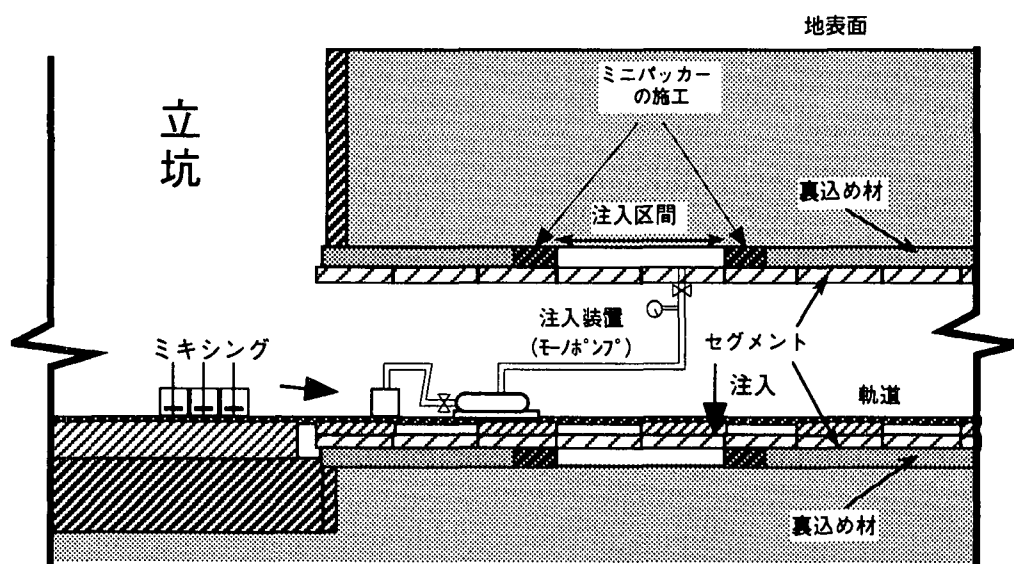


図-5 注入手順ならびに装置の配置概念図

入材料タンクとして使用した。なお、硬化剤を予め黒色に着色し、主材（白色）および注入材料（グレー）を明確に区別できるようにした。

図-6に注入ステップの概略を示す。免震材の注入は、はじめにインバート部のグラウトホールより開始し（注入ステップ1）、ついでインバート部にて免震材の流動停止を確認した後、上方のグラウトホールに移動し、左、右の順に注入（注入ステップ2～5）した後、最後に天端の4つのグラウトホールの順で注入した。注入時には、次に流出が予想されるグラウトホールのボールバルブを開け、グレーに着色された免震材の流出を確認し、サンプルを採取した後、ボールバルブを閉じた。なお、免震材の流動停止時間（約1時間）を考慮し、1注入口当たり30分以内で注入作業を完了することを基本とした。

(4) 注入結果

注入状況を写真-4に示す。総注入量は 0.49m^3 であり、これは理論テールボイド量（ 1.64m^3 ）と比較するとかなり少なかったが、注入前にグラウトホー

ルの近くまで裏込め材の存在が確認されており、とくに天端部ではテールボイドが無い状態となっていたことから、実験区間前後の裏込め材施工時に、ミニパッカーの間からかなりの裏込め材が侵入したためと推測する。なお、注入前の地下水の抜取り量は約 0.5m^3 であり、総注入量とほぼ一致している。

注入圧力は、注入開始時が配管抵抗に等しい 0.2kgf/cm^2 であり、約1m上方のグラウトホールより流出した時点で水頭差分の増加に等しい 0.3kgf/cm^2 に達するケースが一般的であった。また、側部の注入の際には、注入グラウトホールのすぐ上方のグラウトホールより免震材の流出が確認されるとともに、一部のグラウトホールでは、水や裏込め材の塊が流出した後に免震材が流出した。これらのことより、テールボイドはリング間およびグラウトホール間で連結しており、そこに免震材がボイド内の水や裏込め材を置き換えて充填されたと判断した。

注入時に上方のグラウトホールより採取した免震材のサンプルは、写真-5に示すように、全て約1時間後に流動停止し、翌日には硬化していた。また、

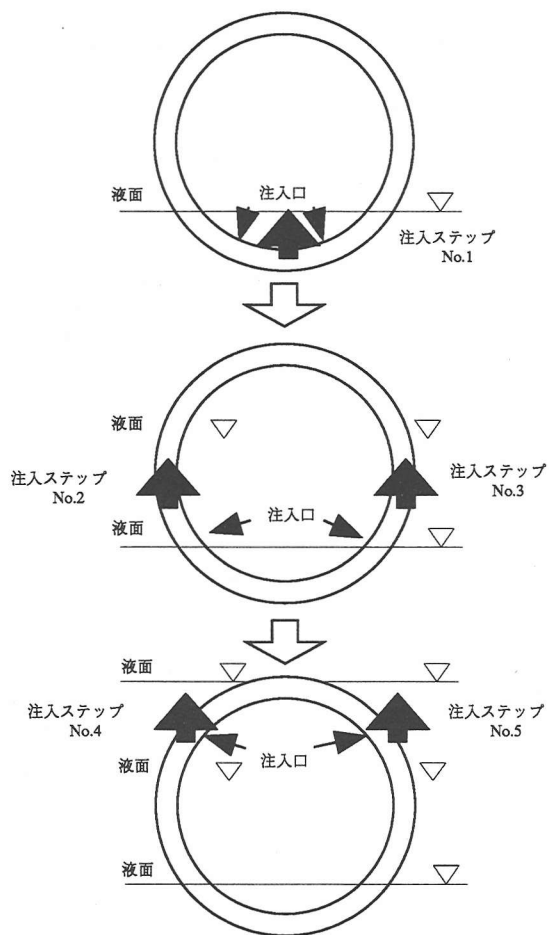


図-6 注入ステップ概略図



写真-3 電動ミキサーによる免震材のミキシング状況

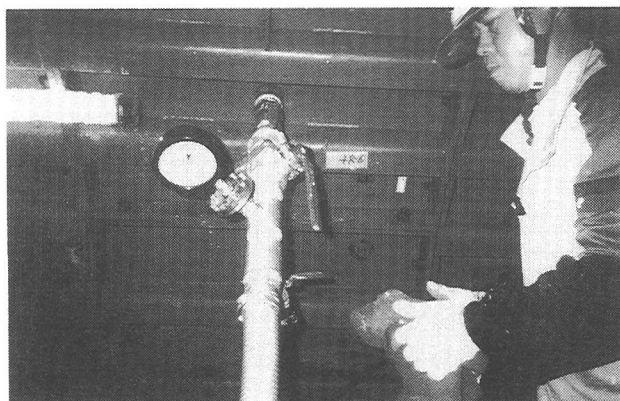


写真-4 免震材の注入状況

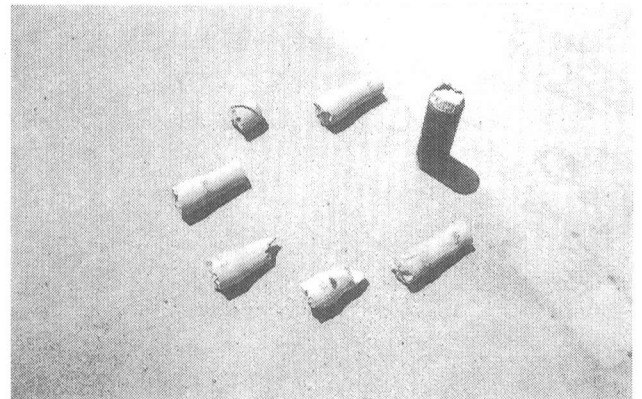
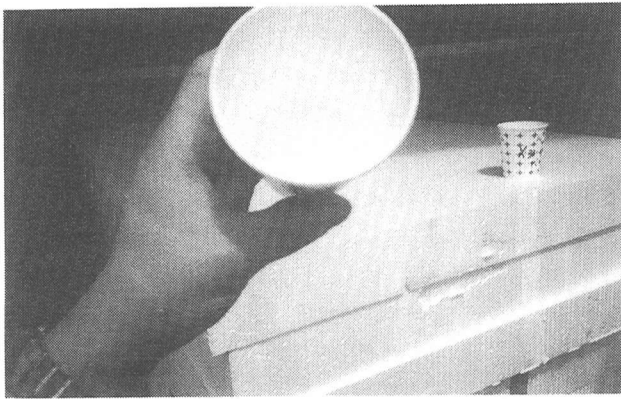


写真-7 コア抜き結果 (4リング目)



写真-6 注入翌日のグラウトホール内部の状況

注入翌日のグラウトホールの状態を写真-6に示すが、全てのグラウトホール内で免震材のゴム硬化体が形成されていることを確認した。

免震材の充填を確認するため、注入10日後に油圧ポンプ式のサンプリング装置を用いて、4リング目の全てのグラウトホールから免震材のコアを抜取った。写真-7に抜取ったコアの状況を示す。コアはグラウトホールの配置に従って並べてある。左上の短いコアが天端のグラウトホールから抜取ったものであり、右のコアはまだサンプルがサンプラーに入った状態である。いずれのコアも地山に達するまでのほぼ完璧に採取できた。写真より、各コアの長さの違いが見られるが、これは各グラウトホールにおけるテールボイド厚の相違による。また、免震材が体積変化をほとんど生じない材料であり、ロッドの押し込み初期に引張応力が発生するため、抜き取ったサンプルはすべて先端部が細くなっているが、どのサンプルも均等にゴム硬化体を形成しており、地下水等の現場条件にかかわらず、当初設定した免震層を形成できることが確認できた。

以上のように、シリコン系免震材料は、実地山のテールボイドに対しても注入・充填できることを示したが、実用化のためには、材料の低コスト化、実施工に適合した材料の開発、および施工法の確立がさらに必要と判断した。

4. 材料の開発と施工法の確立

(1) 材料の低コスト化

これまでの各種試験に用いたシリコン系免震材料は、主材の中にシリコンポリマーを主成分とする主材と充填材が重量比2:1の割合で含まれており、他のシリコン系ゴム材料よりも若干安価であるが、実工事では大量に使用することから、さらにコストダウンをはかる必要がある。

ここでは、充填材の替りにより安価な市販の膨潤性粘土を増量材として用いたシリコン系免震材料に対して、基本配合試験を実施した結果について説明する。

膨潤性粘土は裏込め材の助剤として使用されており、セリサイト、モンモリロナイトを主成分とする無機系無公害の材料である。配合ケースは、増量材を裏込め材の助剤と同様、現位置で混合する場合を想定し、主材と硬化剤の重量混合比を既存材料と同じ100:15.5で一定にしておき、膨潤性粘土の重量配合比を既存材料と同じ55 (Case1)、およびそれより多い75 (Case2)、100 (Case3) の3ケースとした。これら3つの配合ケースによる混合実験ではすべて、24時間後には完全な硬化が確認できた。

各配合ケースの24時間後のサンプルは、従来材料とほとんど同じゴム硬度を示した。また伸びは100%前後で従来材料の半分程度に低下したが、免震材

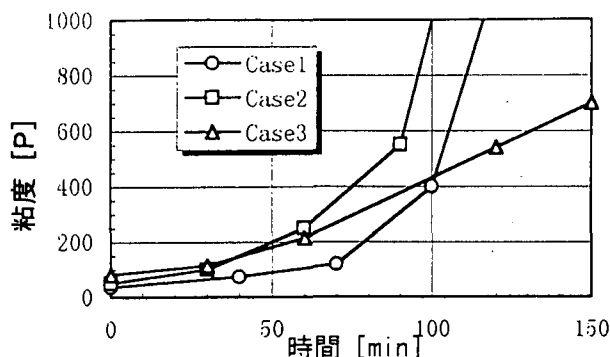


図-7 膨張性粘土を増量材として用いたシリコーン系免震材料の粘度の経時変化

料としての物性を失うものではないことから、各配合ケースはいずれも、免震材料としての基本物性を満たしていると判断した。

図-7に、各ケースにおける混合後の粘性の経時変化を示す。図より、混合直後の粘度はCase3が最も高く、8000cpsであったが、ミキシングおよび注入に悪影響を及ぼすものではない。また、流動停止時間は、Case1が100分、Case2が120分、Case3が180分であった。

以上のように、各配合ケースは、いずれも実施工に適用可能な材料であることを示したが、低コスト化を考慮した場合の最適配合は、膨張性粘土の添加量が最も多く、従来材料より15%程度のコストダウンが期待できるCase3（主材：硬化剤：膨張性粘土＝100：15.5：100）と判断された。

(2) ゲル化剤の開発

低コスト化を目的として改良した、膨張性粘土を増量材とするシリコーン系免震材料は、流動停止時間が150分であり、テールボイド内に充填された後も長時間にわたり流動性を保持しているため、この間に地山中に逸散することによって土圧が保持できない可能性が懸念される。このような問題に対し、裏込め材の注入では、塑性調整材（ゲル化材）を注入直前に混入させ、数秒間で圧入時の流動性（チキソトロピー性）を保持した流動性ゲルにする方法を採用していることから、シリコーン系免震材料用のゲル化剤の開発を行った。

開発したゲル化剤は、特殊ポリオキシアルキレン化合物であり、ゲル化剤の酸素原子と主材に予め混入させた微粉シリカの水酸基との水素結合により、増粘性・チキソトロピー性を発現する材料である。

ゲル化剤の増粘効果を確認するため、ゲル化剤を混入したシリコーン系免震材料10gを、平面上に注いだ時の拡がりを測定した。その結果、ゲル化剤混

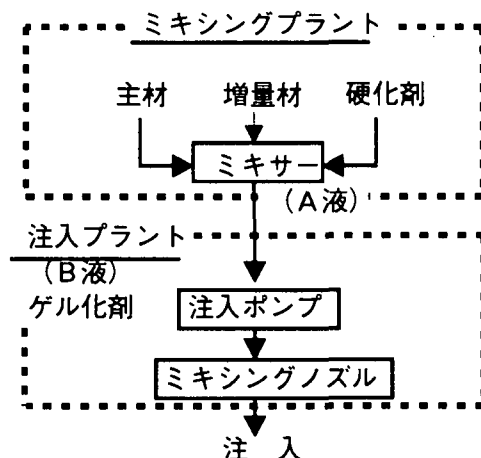


図-8 シリコーン系免震材料の注入システム

合直後は、平面上で直径80mmの拡がりを形成したのに対し、混合30秒後には約半分の直径35mm程度に低下した。このことから、ゲル化剤は数十秒後には増粘性を発揮することがわかった。

(3) 施工法の確立

シリコーン系免震材料の注入システムは、現位置での混合、注入ポンプによる注入の2系統による注入方法であり、大型実験土槽および実地山への注入実験では、実工事へ適用可能なシステムであることが実証された。このシステムは、シールドトンネルで長年培われてきた裏込め注入の基本システムであり、新たにゲル化剤を開発したことにより、裏込め材と同じシステムでの注入が可能となった。

図-6にシリコーン系免震材料の注入システムを示す。注入システムは、主材、増量材、硬化剤を所定量ミキサーに投入して混合する「ミキシングプラント」および「注入プラント」で構成される。ミキシングプラントで作製したA液は、注入ホース先端部のミキシングノズルより噴射されたB液と混合され、ゲル状でテールボイドへと圧入されるシステムであることになる。

5. まとめ

本論文では、シールドトンネルの免震層材料として開発したシリコーン系免震材料を用いた実地山への注入試験を実施した。また、シリコーン系免震材料の低コスト化を目的とした材料開発ならびに施工性の向上を目的としたゲル化剤を開発した。本論文で得られた知見をまとめると、以下のようなものである。

(1)シリコーン系免震材料は、実地山中で地下水等に

希釈されることなくテールボイドへ充填され、24時間後には均質に硬化した免震層を形成する。

(2)新たに開発したシリコン系免震材料は、従来材料に含まれている充填材に代わり、より安価な膨潤性粘土を加えた材料であり、免震材料としての物性を満足するものであることが確認できた。

(3)ゲル化剤として採用したポリエーテルは、主材に予め混入させた微粉末シリカと反応することで、増粘性およびチキソトロピー性を発現できる材料であることが確かめられた。

(4)シリコン系免震材料の注入システムは、主材、増量材、硬化剤を混合する「ミキシングプラント」および「注入プラント」で構成され、ミキシングプラントで作製したA液を、注入ホース先端部でB液と混合させることにより、ゲル状でテールボイドに圧入できる。

以上のように、実施工用として新たに開発したシリコン系免震材料は、従来材料より安価であるとともに、ゲル化剤と組み合わせることにより、裏込め注入システムと同様の注入システムを構築することができる。今後は現在開発中の注入プラントによる注入試験を実施し、実用化を図りたい。

謝辞：本論文の3章、4章は、建設省土木研究所、(財)土木研究センターならびに民間17社による建

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」の一環として実施されたものである。共同研究で活発に御議論いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木猛康：シールドトンネルの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。
- 2) 田村重四郎，伯野元彦，家村浩和，竹内幹雄：1985年メキシコ地震の震害，土木学会誌，Vol.71，No.5，pp.79-85，1986.5。
- 3) 鈴木猛康：シールドトンネルの免震構造に関する模型振動実験，土木学会第20回地震工学研究発表会講演概要集，pp.565-568，1989。
- 4) 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，東京大学工学部学位論文，1990。
- 5) 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.275-85，1995。
- 6) 鈴木，粕田，小林，福田，池野：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.69-78，1996。
- 7) Suzuki, T.: Damages of Urban Tunnels due to the Southern Hyogo Earthquake of January 17, 1995 and the Evaluation of Seismic Isolation Effect, Proc. 11WCEE, Acapulco, Mexico, 1996.

(1996.9.14 受付)

APPLICATION OF THE SILICONE-BASED MATERIAL TO THE SEISMIC ISOLATION SYSTEM FOR SHIELD-DRIVEN TUNNELS

Takeyasu SUZUKI, Masahiro KOBAYASHI, Takeshi FUKUDA,
Masayuki IKENO and Atsushi MIYAJI

The seismic isolation structure for shield-driven tunnels, in which an isolation layer is formed between a tunnel lining and surrounding soil, enables us to reduce considerably sectional forces of a tunnel lining in the tunnel axial direction. The material forming a seismic isolation layer must possess a low elastic modulus and a high Poisson's ratio of almost 0.5, as well as several characteristics needed from the view point of construction process. This paper presents the outline of the silicone-based material for a seismic isolation layer which authors have proposed first. The in-situ injection experiment conducted to verify the applicability of the material to the actual construction site of shield driving is described next. The development of the isolation material is carried out, focussing on the improvement appropriate for the construction. Based on the in-situ experiment and the development of the material, finally, the appropriate construction system of seismic isolation using the silicone-based material is proposed.