

# 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

鈴木 猛康\* 粕田 金一\* 田中 港\* 小林 正宏\*\*

トンネル覆工体と周辺地盤との間に免震層を形成する都市トンネルの免震構造では、トンネル軸方向のトンネル断面力を大きく軽減させることが確認されている。免震層材料の物性としては、ヤング率が小さく、なおかつポアソン比が0.5に近いことが必要である。本論文ではこのような物性を有する免震層材料として、シリコン系材料を開発し、物性試験ならびに大型実験土槽を用いた注入確認実験を実施し、物性、施工性とも免震層材料として適切な材料であることを確認した。

キーワード：シールドトンネル、免震、シリコン、中空ねじりせん断試験、ポアソン比、注入試験

## 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軽減できる点で耐震性に優れていることが知られている。一様な成層地盤中のシールドトンネルに、波長の長い波動が伝播する場合、リング間継手の変位吸収を期待すれば、トンネル断面力にとって危険となるケースは稀である。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状況においては、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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>、局部的に大きなひずみが発生した結果、リング間継手の破壊に至ることもある。

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、免震効果を検討してきた<sup>3),4),5)</sup>。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を発揮することを示した<sup>4),5)</sup>。このような免震効果を発揮させ、なおかつトンネル周辺地盤に対して地表面沈下を誘発させないような免震層材料の物性としては、(1)ヤング率が小さいこと、(2)ポアソン比が0.5に近いこと、(3)大きなせん断ひずみ領域まで破壊することがなく、(4)長期に亘って安定したせん断特性を有することが必要であり、かつ現場施工を考えると、(5)テールボ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ことが

必要である。さらに裏込め材と同様に(6)高い止水性を有している必要がある。周辺地盤と比較すると極めて軟らかい層が形成されることになるが、(2)の必要条件であるポアソン比が0.5に近いことが満たされており、なおかつ材料が注入後早期に硬化すれば、周辺地盤の安定性を崩すことによる長期に亘る沈下や覆工体の断面力の増加を生じないことがわかっている<sup>6)</sup>。

上記のように免震層として必要とされる物性値や特性が明らかになったので、実施工で注入によって形成でき、上記の物性を有する材料を具体的に示す必要がある。そこで本論文では、免震層材料としてシリコン系材料を提案し、上記の免震層材料として必要とされる物性を有することを確認し、さらに現場施工を念頭に置いて大型実験土槽を用いた注入確認実験を実施し、現場施工の可能性を検討する。

## 2. トンネル免震構造の概要<sup>4)</sup>

ここで検討するのは、Fig.1に示すようにトンネル覆工体と周辺地盤の間に軟らかな免震層を形成させる免震構造である。

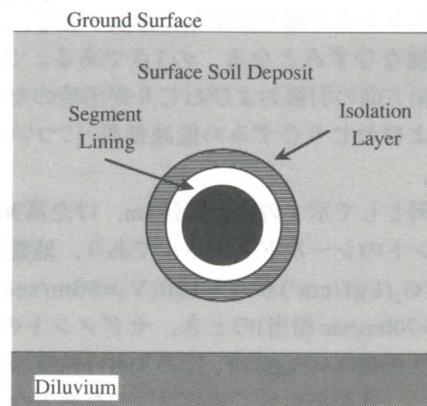


Fig.1 都市トンネルの免震構造概念図

\* 技術研究所 土木系研究開発部土木グループ  
\*\* 技術本部 土木技術部一般土木グループ

免震層はシールド掘進に伴って生ずるテールボイドに坑内からの注入によって充填，形成させるもので，裏込め注入材と同様，注入後早期に硬化して所定の物性を有する必要がある。

Fig.2(a)に示すような地盤条件急変部やFig.2(b)に示す立坑のような剛な構造物との接合部付近のように，もっとも大きな地盤ひずみやトンネルひずみが集中する箇所部分的に免震層を形成させて免震構造とするのが，もっとも効果的な免震構造の配置である。

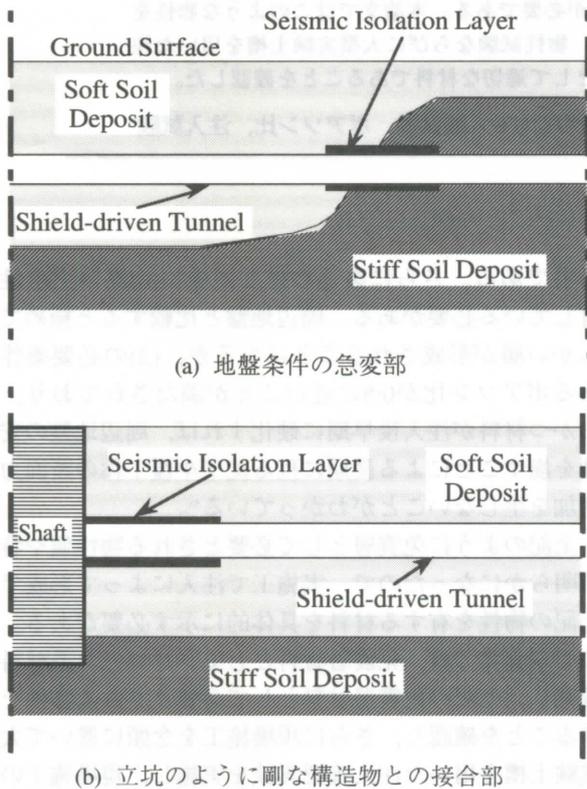


Fig.2 シールドトンネルに対する免震構造の適用箇所

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，この範囲でほぼ一様なひずみとなる，の3点である。この中で，トンネル軸方向の引張およびねじり変形時のセグメントの引張およびねじりひずみの低減効果<sup>9)</sup>について簡単に紹介する。

ここで例として示すのは，外径5m，けた高30cmのRC製セグメントのシールドトンネルであり，地盤のせん断弾性係数 $G_g$ (kgf/cm<sup>2</sup>)が $G_g=100$ ( $V_s=80$ m/sec相当)～ $10000$ ( $V_s=700$ m/sec相当)のとき，セグメントの外周に，せん断弾性係数 $G_l=5$ kgf/cm<sup>2</sup>，厚み5cmの免震層が形成された場合と，外周がすべて地盤物性の材料となっている場合，すなわち免震層の有無によるセグメントの引張ひ

ずみとねじりひずみの比をひずみ低下率と呼び，これをもって免震効果を評価することにする。

$$\mu_a = \frac{\epsilon_{a, iso}}{\epsilon_{a, non}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\mu_t = \frac{\gamma_{z\theta, iso}}{\gamma_{z\theta, non}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで， $\mu_a$ ， $\mu_t$ はそれぞれセグメントの軸ひずみおよびねじりひずみの低下率であり， $\epsilon_a$ ， $\gamma_{z\theta}$ はそれぞれセグメントの軸およびねじりひずみである。式中の下添字"iso"は免震層ありのケースを，"non"は免震層なしのケースを意味している。Fig.3はセグメントの引張ひずみ低下率を，またFig.4はねじりひずみの低下率を，周辺地盤のせん断弾性係数 $G_g$ をパラメータとしてプロットしたものである。免震層のせん断弾性係数 $G_l$ と地盤のせん断弾性係数 $G_g$ の組み合わせによって，セグメント

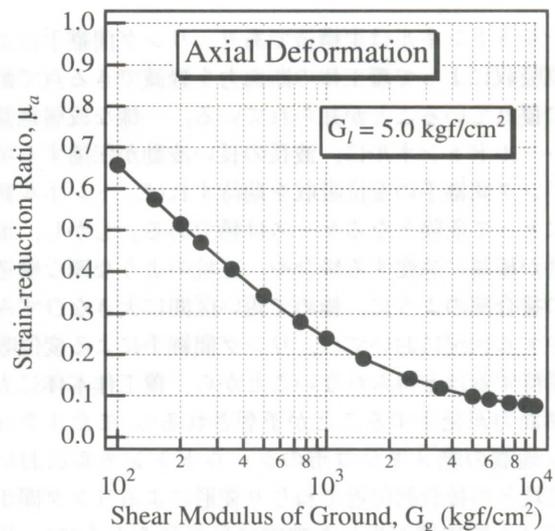


Fig.3 セグメントの軸ひずみ低下率

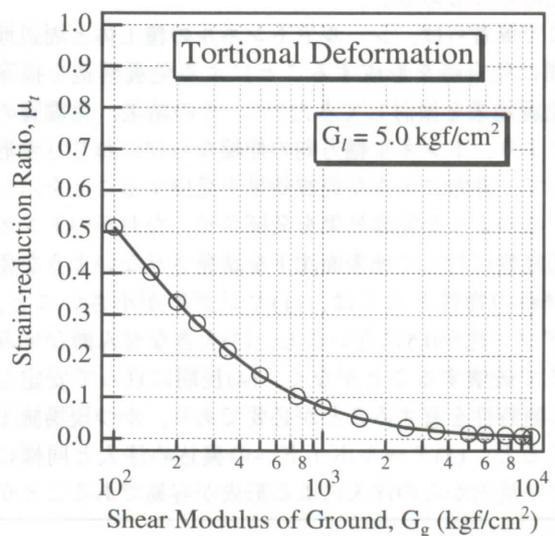


Fig.4 セグメントのねじりひずみ低下率

ひずみの低減効果は異なるが、 $G_g=5\text{kgf/cm}^2$ 程度の軟らかさを有する免震層の場合にはセグメントの軸ひずみが1/4に、ねじりひずみが1/10に低減されており、免震効果は非常に高いことがわかる。また軟弱な地盤におけるFig.2(b)のような立坑との接合部でも、1/2程度のひずみの低減が期待できることがわかる。

本論文では、免震層材料としてシリコン系の材料を用いているが、上記の免震効果を発揮させることを目標に、材料のせん断弾性係数は $G_g < 5\text{kgf/cm}^2$ となるように配合を調整したシリコン系免震層材料を開発し、以下の検討を行った。

### 3. シリコン系免震層材料の室内試験

#### (1)免震層材料としてのシリコン系材料

今回提案するシリコン系材料は、2液性の常温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 $15\text{kgf/cm}^2$ となるよう調整されたものである。主材(A液)はオルガノポリシロキサンに充填材等を配合したものからなる。これに触媒(B液)を加えることにより常温で硬化し、硬化スピードは触媒量によって調整することができる。ここではシリコン系免震層材料の化学組成については詳述しないが、混合時の粘性は約10000cpsで、ゲルタイム約1時間ではほぼ所定のヤング率の硬化物となるよう配合調整を行ったものを開発し、物性実験に用いた。なお、材料の重量密度は $1.3\text{gf/cm}^3$ で硬化前後でほとんど変わることはなく、硬化時に有害となるような物質を発生させることもない。また硬化前は液状であるが水と混合されることもなく、硬化後は止水性、耐候性に富んだ長期安定の材料となる。

事前に材料の引張試験を実施しており、引張ひずみ220%まで破断しないことが確認されている。また水中に直径6cm、高さ5cmの容器を予め沈めておき、容器の中に材料を注入して水と置換、硬化させる水置換実験を実施し、地下水での注入が可能であることを確認している。

#### (2)繰返し中空ねじりせん断試験

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。供試体寸法は、外径7cm、内径3cm、高さ7cmであり、予めモールド中で硬化させて作成した後、上下端面の噛み合わせを良くするため端面にカッターナイフで溝を作り、中空ねじりせん断試験機にセットした。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 $\sigma_h' = \sigma_v' = 0.5\text{kgf/cm}^2$ および $1.0\text{kgf/cm}^2$ 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 $\gamma = 10^{\circ}$ 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、載荷振動数は $0.2\text{Hz}$ とした。

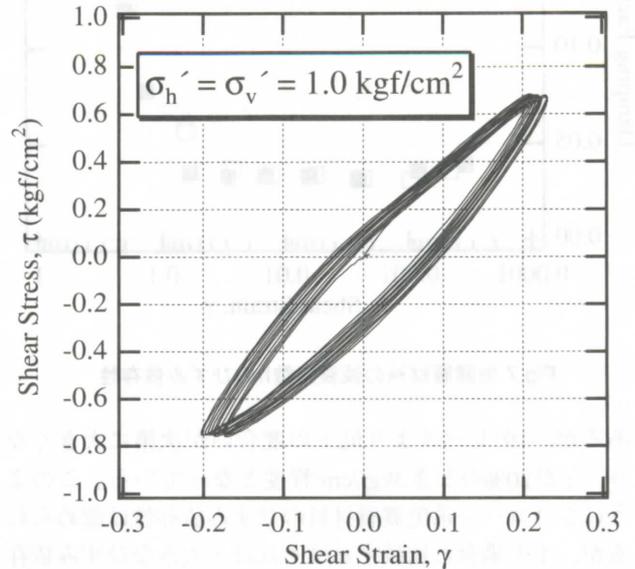


Fig.5 免震層材料のせん断変形に関する動的履歴特性

Fig.5に有効拘束圧 $1.0\text{kgf/cm}^2$ 、せん断ひずみ20%の載荷ケースにおける履歴を示すが、シリコン系免震層材料は載荷サイクルとともに物性が変わることもなく、安定した履歴を示していることがわかる。

Fig.6およびFig.7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 $\gamma$ の増加とともに徐々に低下し、 $\gamma$ が $10^{\circ}$ レベルまでは $5\text{kgf/cm}^2$ 程度で

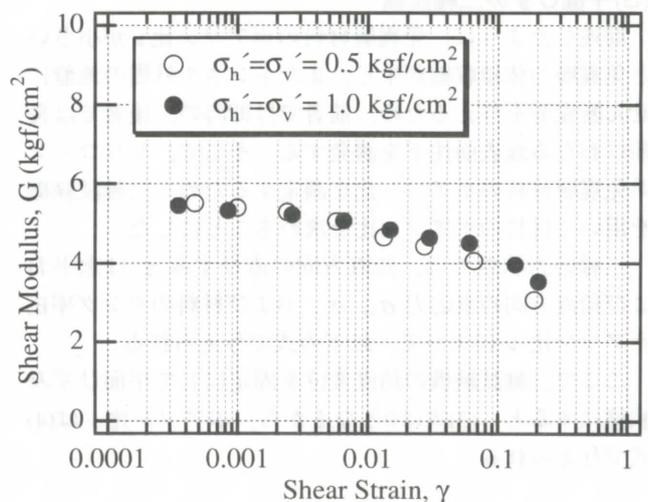


Fig.6 免震層材料のせん断弾性係数 $G$ のひずみ依存性

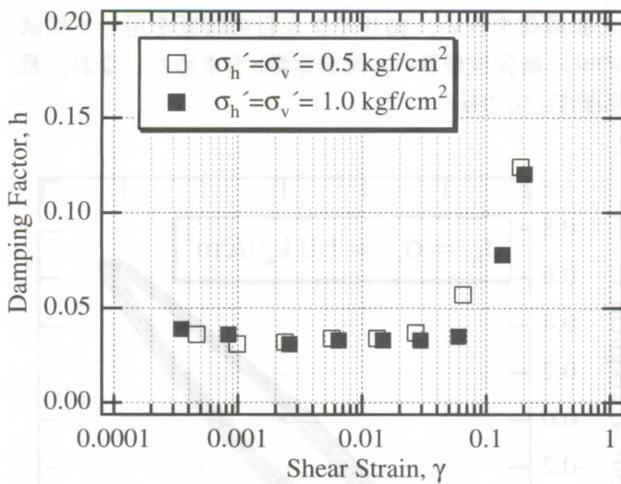


Fig.7 免震層材料の減衰定数hのひずみ依存性

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、 $\gamma$ が20%のとき $3\text{kgf/cm}^2$ 程度となっている。このようにシリコン系免震層材料のひずみ依存性は認められるが、土の場合と比較すればそれほど大きなひずみ依存性はない。したがって、微小ひずみ時のGを用いて免震効果を設計で考慮しておけば、ひずみが大きい場合に対しては安全側となる。また本シリコン系材料は、引張ひずみが200%を超えなければ破断は生じないことから、少なくとも100%のせん断ひずみまでは破壊することなく、免震効果の発揮が期待できる。

一方減衰定数hについては、せん断ひずみ $\gamma$ が10%以下ではほぼ0.03で一定であり、ひずみ依存性はあまり認められないが、 $\gamma$ が10%を超えると急激に増大し、 $\gamma$ が20%で約0.2となる。トンネル免震構造では、免震層によるエネルギー吸収は期待していないが、免震層が地盤ひずみを吸収して大変形が生ずる場合には、免震層の履歴減衰もある程度期待できる可能性が示された。

**(3)平面ひずみ三軸試験**

前述したように、免震層材料のポアソン比 $\nu$ が小さいと免震層の体積収縮が生じ、またトンネル外周の地盤にせん断変形を与えるため、前者では即時の、後者では長期にわたる地表面沈下を誘発する。そこで、シリコン系免震層材料のポアソン比を測定するため、三軸試験機を用いて材料のポアソン比を求めることにした。

三軸応力状態では、鉛直方向の直ひずみ $\epsilon_v$ は水平および鉛直方向の直応力 $\sigma_h, \sigma_v$ 、および材料のヤング率E、ポアソン比 $\nu$ によって、以下の式で与えられる。

ここで三軸試験機の鉛直変位を固定にして平面ひずみ状態にすると、(3)式は0となるから、ポアソン比 $\nu$ は(4)式で与えられる。

$$\epsilon_v = \frac{1}{E} (\sigma_v - 2\nu\sigma_h) \dots\dots\dots (3)$$

$$\nu = \frac{\sigma_v}{2\sigma_h} \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、三軸試験機のセル圧 $\sigma_h$ を徐々に増加させるとき、鉛直変位を一定に保つための $\sigma_v$ を測定することにより、(4)式の関係を用いて材料のポアソン比を求めることができる。実験は $0.2\text{kgf/cm}^2$ の等方応力状態からスタートし、水平応力 $\sigma_h$  (セル圧)を単調に増加させ、平面ひずみ状態を保つよう鉛直応力 $\sigma_v$ をコンピュータ制御することにより実施した。

Fig. 8に実験の結果得られた $\sigma_h$ と $\nu$ の関係を示すが、荷重の初期段階では電氣的な変動が大きく、安定した制

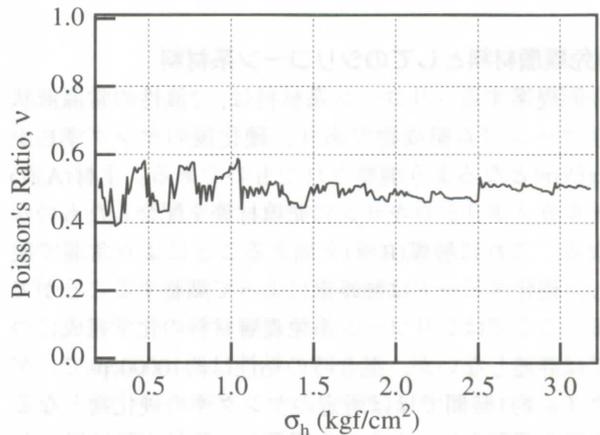


Fig.8 平面ひずみ三軸試験によるポアソン比の測定結果

御ができていないが、 $\sigma_h=1.0\sim 2.5\text{kgf/cm}^2$ の区間では比較的安定な結果が得られている。したがってこの区間で平均値を求め、材料のポアソン比は $\nu=0.48$ と決定した。このようにポアソン比はほぼ0.5であり、この材料を免震層に適用しても、地表面沈下を誘発しないことが示された。

**4. 注入確認実験**

**(1)実験装置および実験概要**

注入確認実験は、大型実験土槽を用いて実施した。Photo.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の位置にトンネル模型が設置できるよう設計されている。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 $6\text{kgf/cm}^2$ までの土被り圧を発生させることができる。本実験装置はこれまでに、大深度トンネルのゆるみ土圧の検討や<sup>6)</sup>、シールドトンネルの裏込め注入に関する検討<sup>7)</sup>等を目的として使用されてきた。

Fig.9に実験の概要を示す。模型地盤材料としては珪砂5号を用いた。砂を1層25cmの厚さで敷均し、散水後電動ランマーにて転圧して模型地盤を作成した。トンネル模型の設置下面近くまで地盤を作成した時点でト

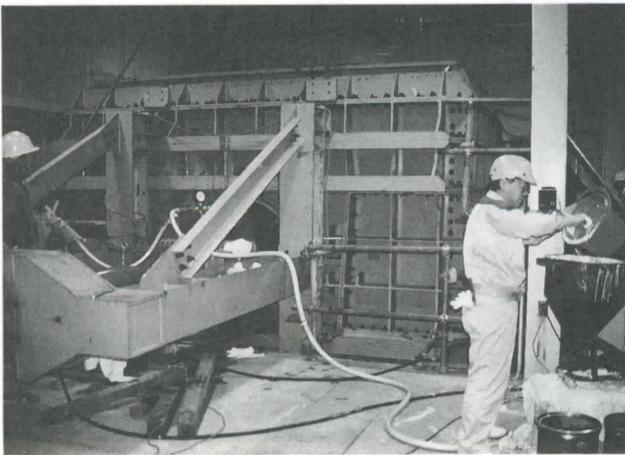


Photo.1 大型実験土槽を用いた注入確認実験

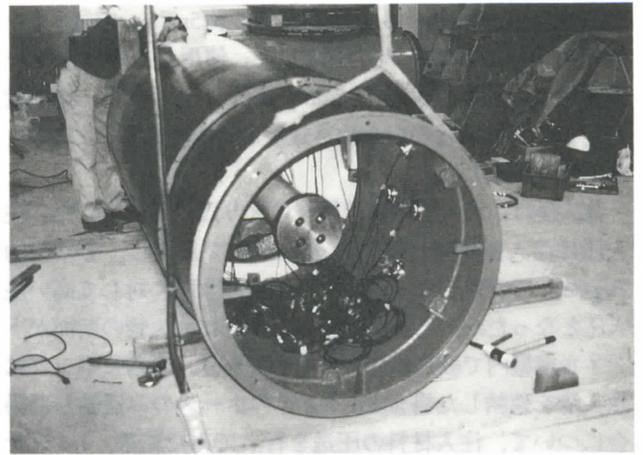


Photo.2 注入実験に用いたトンネル模型概要

ンネル模型を設置し、その後同様に25cmの厚さで敷均し、散水、転圧を繰返しながら約3mの高さまで地盤を作成した後、最後に水締めを行った。最終的に作成された地盤は、湿潤密度 $\gamma_w=1.59\text{gf/cm}^3$ 、含水比 $w=3.3\%$ 、飽和度 $S_r=12.3\%$ であり、ほぼ目標どおりの締め固めができていた。なお、土被り圧として前記水袋によって土被り圧 $1\text{kgf/cm}^2$ を与え、以下の実験を行った。

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。Photo.2にトンネル模型を示す。写真の手前にあるのが内筒管で奥にあるのが外筒管である。外筒管の内面4箇所にはガイドが設けてあり、外筒管と内筒管との間で均等なクリアランスが保持できるよう設計されている。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のテールポイドに免震層材料を注入する方法を採用した。外筒管の先端部には、外筒管と内筒管の隙間に注入材料が流入しないよう

ゴム製パッキンが取付けられており、注入管は外筒管の外側より外筒管と内筒管の隙間を通り、このパッキンを貫通させて外筒管のクラウン部の先端より地盤中に数mm出した状態でセットされている。注入管は外筒管と内筒管の隙間を通すため、厚さが内寸法で14mm程度の扁平な楕円の断面としてある。

## (2)材料および注入装置

実験に用いる材料は、シリコン系免震層材料であるが、注入管断面がトンネル模型中でかなり絞られていることから、3章の物性試験で用いた材料よりも、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 $7.5\text{kgf/cm}^2$ であり、注入時の粘性は約5000cps、ゲルタイムは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。実施工では、注入管の先端部にスタティックミキサー等をセットし、注入の直前にA液とB液を混合攪拌しテールポイドに充填する方法もあるが、実験では充填量が少ないため、事前にA液中にB液を加え電動ミキサーで攪拌した後、ポンプのホッパーに投入する簡便な方法を採用し

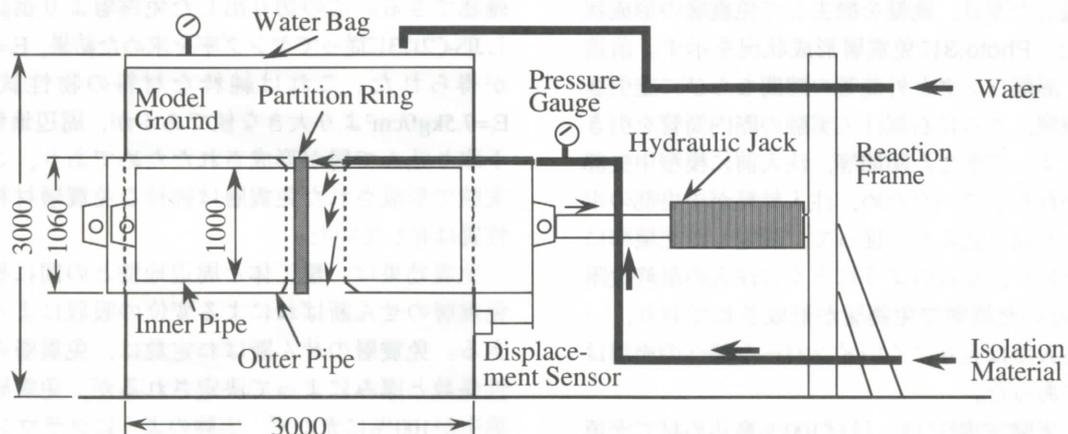


Fig.9 大型実験土槽の概要および土槽を用いた注入確認実験の模式図

た。ポンプからトンネル模型までの約5mは、内径1インチのテフロン製ホースで圧送した。使用したロータリー式ポンプの吐出量は約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。

注入圧は、注入管の外筒管への入り口にて測定した。注入圧は注入開始時には約9kgf/cm<sup>2</sup>まで上昇し、その後約7kgf/cm<sup>2</sup>で安定した。このように土被り圧に対して高い注入圧となったが、これは前述したように注入管の断面がトンネル模型内で絞られているためであり、事前にポンプに注入管を連結した場合と1インチのホースのみ連結した場合について、注入材料の圧送を行ってみた結果、1インチのホースのみでは低圧で圧送できることを確認している。

### (3)注入実験

#### (a)注入方法

2本の内筒管は、外筒管と同じ外径を有する隔壁リングによって土槽中央で接合されており、外筒管はこのリングで左右に分離されている。模型トンネル埋設時にはこのリングと左右の外筒管の間約5cmの隙間を設けておく。Fig.9に示すように、左あるいは右の外筒管を油圧ジャッキで引き抜きながら注入を行い、ジャッキスピードを調整することにより充填率を管理する。右および左半分の注入が可能であるため、1土槽で2回の注入実験ができる。最初に無注入で10cm外筒管を空引きし、その後材料の注入を開始した。注入区間は左右とも約70cmであり、片方の外筒管引抜き時には反対側で内筒管を外筒管に固定金具を用いて固定した。なお、事前に湿潤砂中に行った空隙に免震層材料を流し込み、硬化状況を確認した結果、材料の砂中への浸透がほとんど認められないことから、充填率は右部の注入では100%、左部の注入では最初の40cm区間は100%、残りの30cm区間のみ110%と設定した。

#### (b)免震層形成状況

注入を実施した翌日、地盤を撤去して免震層の形成状況を確認した。Photo.3に免震層形成状況を示す。前述したように、隔離リングと外筒管の隙間ならびに空引きの際生じた隙間、さらに右部注入実験の際内筒管を引きずったことによって生じた隙間等、注入前に模型中央部にはボイドが存在していたため、注入材料が中央部のボイドの下部へと回り込んだ。従って、設定した充填率には達していないが、写真のようによく注入の最終段階では100%に近い充填率で免震層が形成されており、一般の裏込め注入では入りにくいインパート部への充填はとくに良好であった。

裏込め注入実験の際には、ほぼ100%裏込め材で充填された厚さ3cmの層の外側に、裏込め材と砂の混合層がこの層と同程度の厚みで形成されていた。またこの混合

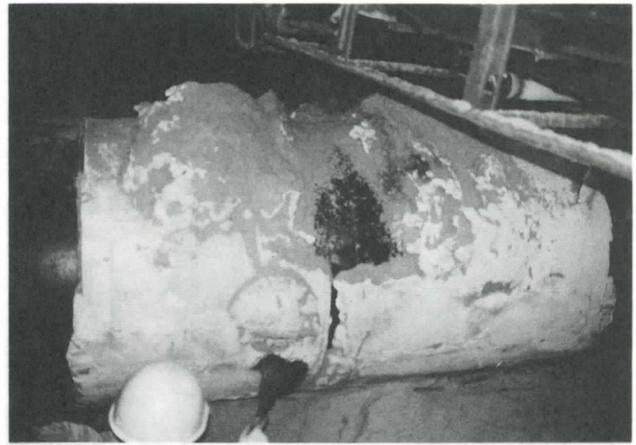


Photo.3 免震層形成の確認状況

層の厚みは不規則で、均一とはならなかった。Fig.10に左部最終段階の断面における免震層の厚みの分布を30度ピッチで計測した結果を示している。充填率が100%に達しないため、クラウン部で免震層の厚みが3cmに満たないが、クラウン部以外では免震層が約3cm、混合層が約1cmで均一な注入が達成されていることがわかる。

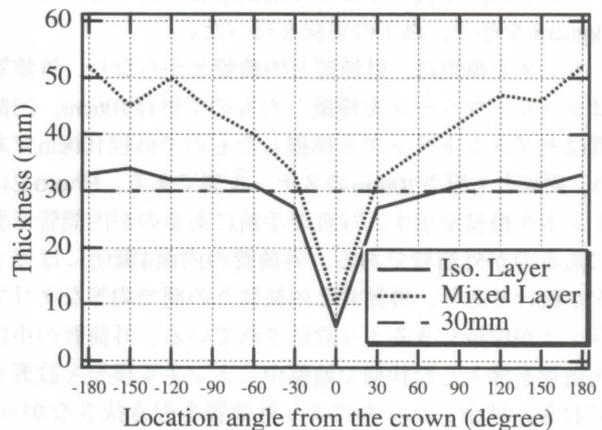


Fig.10 形成された免震層の層厚の分布状況

Photo.4は免震層の一部を切り出した断面を示したものであり、免震層3cm、混合層1cmの形成がはっきりと確認できる。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、 $E_1=8.4\text{kgf/cm}^2$ が得られた。これは純粋な材料の物性試験の結果 $E_1=7.5\text{kgf/cm}^2$ 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は有していた。

免震効果は、覆工体と周辺地盤との間に形成される免震層のせん断ばねによる変位の吸収によって説明できる。免震層のせん断ばね定数は、免震層のせん断弾性係数と厚みによって決定されるが、免震層材料の充填率が100%に充たず、実験のようにクラウン部で1/3程度の厚みしか形成されなかった場合、あるいはその逆で充填率が100%を大きく上回り、断面の一部に1.5倍程



Photo.4 切出した免震層とその外周の砂との混合層

度の厚みの免震層が形成された場合には、断面全周に亘って一様なせん断ばねが形成されずに部分的にせん断ばね定数が大きくあるいは小さくなるが、断面全体のばね定数としては一様な免震層が形成された場合と大きく異なるわけではなく、所定の免震効果が期待できる。ただ、充填率が100%未満となった場合、厚みの少ない部分では局部的に大きなせん断ひずみが発生することになる。このような状態に配慮し、本論文で提案しているシリコン系免震層材料では、大きなせん断変形性能を持たせている。

本確認実験では、不飽和砂中のテールボイドへの免震層材料の注入性については確認できた。しかし、外筒管の引抜きによってテールボイドを形成する方法では、飽和砂地盤ではテールボイドの崩壊を招くことになるため、飽和砂地盤における注入性の確認を、実験土槽を用いて実施することは困難である。実施工では水圧を伴った飽和地盤で注入を行う必要があるため、飽和地盤における注入性の確認が今後の検討課題として残された。

## 5. まとめ

本論文では、都市トンネルの免震構造のための免震層材料としてシリコン系免震層材料を開発し、まず物性試験を実施した。その結果、シリコン系免震層材料は以下の物性を有することが確認された。

- (1)せん断弾性係数を $5\text{kgf/cm}^2$ 以下とすることが可能であり、免震層として十分小さなせん断弾性係数を持たせることができる。
- (2)せん断弾性係数のひずみ依存性については、せん断ひずみ $\gamma=10^2$ のレベルまではあまり大きなせん断弾性係数の低下は認められないが、 $\gamma=10^2$ レベルより低下の程度が次第に増大し、 $\gamma=20\%$ で約60%まで低減する。しかし土質材料と比較すれば、ひずみ依存性は小さいと言える。
- (3)減衰定数 $h$ については、せん断ひずみ $\gamma$ が10%以下ではほぼ0.03で一定であり、ひずみ依存性は認められない

が、 $\gamma=10\%$ を超えると急激に増大し、 $\gamma=20\%$ で約0.2となる。

(4)ポアソン比は0.48であり、体積収縮がほとんど生じない材料であるため、地表面沈下を誘発することはない。

また、大型実験土層とトンネル模型を用いた免震層材料の注入確認実験の結果、以下のような免震層形成状況が確認された。

(5)シリコン系免震層材料によって形成された免震層は、テールボイド分がほぼ100%材料によって充填され、その外周に厚さ約1cm程度の免震層材料と砂の混合層が形成される。この混合層の厚みは一般の裏込め注入材の場合と比較して薄くかつ均一であり、テールボイドに対し110%程度の充填率で注入を行えば、ボイドを充填するのに十分な免震層が形成できると判断された。

以上のように、本論文で提案するシリコン系材料は、免震層材料として実施工に耐えうる物性と施工性を備えていることが示されたので、本材料を用いて都市トンネルの免震構造の実用化を目指したい。本材料は土木材料としては高価であるが、適用区間が短く、注入設備が簡単となるため、安定した免震効果を考慮すればトータルコストとしては決して高くはないと思われる。

## 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-33，1995.10.
- 6) 井原俊一，大原英史，梶原健次郎，北原陽一：三円形シールドトンネルに関する模型載荷実験とその解析，熊谷組技術研究報告，No.53，pp.55-62，1994
- 7) 岡本達也，井原俊一，梶山雅生，梶原健次郎：シールドトンネルの裏込め注入状況に関する実験的研究，熊谷組技術研究報告，No.53，pp.47-54，1994

# Experimental Study on the Silicone-Based Material for Seismic Isolation System for Urban Tunnels

Takeyasu SUZUKI, Kin'ichi KASUDA, Minato TANAKA, and Masahiro KOBAYASHI

The seismic isolation structure for urban tunnels, in which an isolation layer is formed between a tunnel lining and surrounding soil, enables us to reduce considerably the sectional forces of a lining in the tunnel axial direction. Such an isolation layer must have a low elastic modulus and a high Poisson's ratio of around 0.5.

This paper presents a new silicone-based material for a seismic isolation layer. Laboratory tests were carried out to obtain material properties, and a material injection test was conducted using a large-scale soil chamber and a tunnel model. Then, the appropriateness of the new developed material as the isolation material was verified.

**Key words:** shield-driven tunnel, seismic isolation, silicone, hollow cylindrical dynamic shear test, Poisson's ratio, grouting experiment

シールドトンネルの免震構造は、トンネル管と周囲の土壌との間に免震層を形成することによって、トンネル管に作用する軸方向の断面力に著しい軽減をもたらす。このような免震層は、低い弾性率と約0.5のポアソン比を有する必要がある。本論文では、新しいシリコン系材料を免震層として提案し、その材料特性を実験的に求め、大規模土室を用いた材料注入試験とトンネルモデルを用いた試験を通じて、この新開発材料が免震材料として適していることを検証する。

### 論文要旨

シールドトンネルの免震構造は、トンネル管と周囲の土壌との間に免震層を形成することによって、トンネル管に作用する軸方向の断面力に著しい軽減をもたらす。このような免震層は、低い弾性率と約0.5のポアソン比を有する必要がある。本論文では、新しいシリコン系材料を免震層として提案し、その材料特性を実験的に求め、大規模土室を用いた材料注入試験とトンネルモデルを用いた試験を通じて、この新開発材料が免震材料として適していることを検証する。

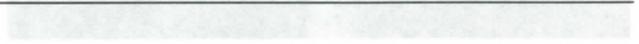


図1 シールドトンネルの免震構造のモデル図

シールドトンネルの免震構造は、トンネル管と周囲の土壌との間に免震層を形成することによって、トンネル管に作用する軸方向の断面力に著しい軽減をもたらす。このような免震層は、低い弾性率と約0.5のポアソン比を有する必要がある。本論文では、新しいシリコン系材料を免震層として提案し、その材料特性を実験的に求め、大規模土室を用いた材料注入試験とトンネルモデルを用いた試験を通じて、この新開発材料が免震材料として適していることを検証する。

シールドトンネルの免震構造は、トンネル管と周囲の土壌との間に免震層を形成することによって、トンネル管に作用する軸方向の断面力に著しい軽減をもたらす。このような免震層は、低い弾性率と約0.5のポアソン比を有する必要がある。本論文では、新しいシリコン系材料を免震層として提案し、その材料特性を実験的に求め、大規模土室を用いた材料注入試験とトンネルモデルを用いた試験を通じて、この新開発材料が免震材料として適していることを検証する。

### おわりに

本研究は、都市トンネルの免震構造のためのシリコン系材料の開発と性能評価に関するものである。実験結果から、提案したシリコン系材料は、低い弾性率と高いポアソン比を有し、免震層としての性能が優れていることが確認された。今後の研究として、より大規模な土室を用いた試験や、実際のトンネル現場での適用試験を実施する予定である。