

1045

トンネルの免震施工に用いるシリコン系免震材の動的物性

株式会社熊谷組 正会員 ○鈴木 猛康, 粕田 金一, 小林 正宏  
信越化学工業株式会社 池野 正行, 福田 健, 田中 耕一

1. はじめに

地下構造物の外周に軟らかな免震層を形成させることにより、地盤と構造物の絶縁ならびにトンネルひずみの分散化を図って、地震時に構造物に発生する断面力の大幅な低減を図るのが、地下構造物の免震工法<sup>1)</sup>である。筆者らは、地下構造物の免震施工に適用できる免震材としてシリコン系免震材を提案してきた<sup>2)</sup>が、コスト低減とシールドトンネルでの施工性を重視して材料の配合に改良を加えた<sup>3)</sup>。ここでは、改良された免震材の動的物性を、中空ねじり繰返しせん断試験によって求め、従来の免震材と同様な動的物性が確保されていることを確認したので報告する。

2. 材料の概要

開発したシリコン系免震材は、シリコンポリマーと増量材(粘土, *フィッシュ*等)を主材とし、これに硬化材を混合攪拌させることにより、ゴム弾性体を形成する材料である。耐久性、変形性能等は従来のシリコン系免震材と同程度であるが、増量材添加によるポンプ圧送性の向上とコスト低減を図っており、また塑性調整剤添加による早期の $\text{チャトピ}$ 性の発現により、裏込め注入と同様な施工性と材料性状が達成された。注入装置の試作/検証、現場注入実験を終え、材料開発ならびに施工法開発を終え、既に実用化の段階にある。

3. 中空ねじり繰返しせん断試験

地下構造物の免震構造の概念図を図-1に示す。免震層は、地下数mから数十mの地盤中で、かつ構造物と周辺地盤との間に形成される。地震時には、地下の拘束圧を静的に受けた状態で、免震層はトンネル軸方向ならびにトンネル横断面方向に強制的にせん断変形を受けることになる。したがって、免震材の動的物性値は、地盤中の拘束条件下で、繰返しせん断荷重を与えて測定する必要がある。また、その際の荷重振動数は、材料物性の振動数依存性が存在する場合を考慮し、表層地盤の卓越振動数と同程度とすることが望ましい。そこで、免震材の動的物性の測定方法として、地盤材料の動的せん断特性を測定する目的で行われる、繰返し中空ねじりせん断試験を採用することにした(写真-1)。

せん断試験の中空供試体の寸法は、外径10cm、内径6cm、高さ8cmであり、予め専用モールドで硬化・作成後、端面にカッターナイフで溝を作って上下のキャップとの噛み合わせを良くし、試験機に固定、セットした。荷重振動数は表層地盤の卓越振動数に相当する1Hzとし、微小なひずみ領域よりスタートし、次第にせん断ひずみ振幅を増やして、最大20%までのせん断ひずみ振幅を与えることにした。このような大きなせん断ひずみ振幅で、かつ1Hzでの繰返しせん断時の測定を行うため、レーザー変位計による回転変位測定方法を採用した。なお、材料物性の拘束圧依存性を検証するため、拘束圧は0.5, 1.5, 3.5kgf/cm<sup>2</sup>の3種類で同様な繰返し荷重を実施した。各せん断ひずみで正弦波11波の繰返し荷重を行い、10回目の荷重ループより、材料のせん断弾性係数ならびに減衰定数を算定することにした<sup>2)</sup>。

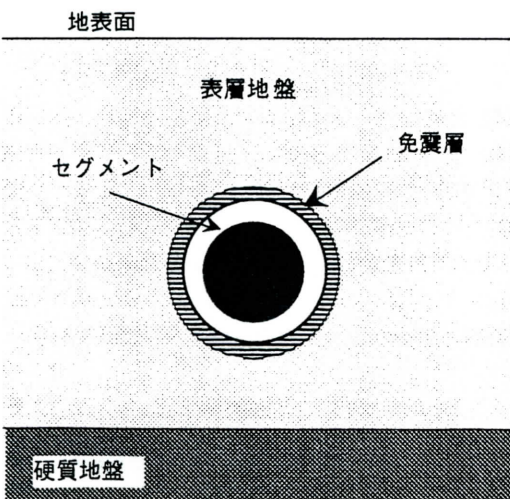


図-1 免震構造の概念図

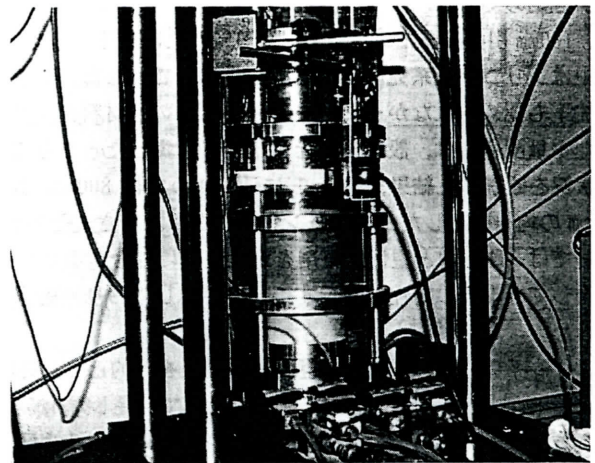


写真-1 繰返し中空ねじりせん断試験

Dynamic Properties of the Silicone-based Seismic Isolation Material adopted for Seismic Isolation of Shield-driven Tunnels; Takeyasu SUZUKI, Kin'ichi KASUDA and Masahiro Kobayashi (Kumagai Gumi Co., Ltd.), Masayuki IKENO, Takeshi FUKUDA and Kouichi TANAKA (Shin-Etsu Chemical Co. Ltd.)

#### 4. 試験結果と考察

図-2に拘束圧1.5kgf/cm<sup>2</sup>、せん断ひずみ振幅約6%の載荷ケースにおける履歴を示す。11回の履歴ループはほとんど重なっており、載荷サイクルとともに物性が変わることもなく、安定した弾性体としての履歴を示していることがわかる。地震時に免震層に働く最大せん断ひずみはせいぜい20%程度であり<sup>4),5)</sup>、せん断の繰り返し回数も最大振幅で10回程度考慮しておけば十分多いと考えられる。このようにシリコン系材料は、大きなせん断ひずみの繰返しに対して弾性体として挙動し、また大地震の繰返しせん断に対しても耐えられることが実証された。

図-3および図-4に、実験によって得られたせん断弾性係数Gおよび減衰定数hのひずみ依存性をそれぞれを示す。両図からわかるように、0.5~3.5kgf/cm<sup>2</sup>と広い範囲の拘束圧条件下で実験を行ったが、Gについてもhについても拘束圧依存性は認められず、トンネルの埋設深度によらず、一定の動的物性が与える材料であることを示唆している。

せん断弾性係数Gは図-3のように、せん断ひずみ振幅の増加とともにわずかではあるが低下する傾向が認められる。しかし、微小せん断ひずみ時に3.2kgf/cm<sup>2</sup>であったGが、せん断ひずみ20%でもせいぜい2.8kgf/cm<sup>2</sup>まで低下する程度であり、土の場合と比較すればひずみ依存性はないに等しい。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。なお、JIS-C2123によって測定した免震材のせん断弾性係数は3kgf/cm<sup>2</sup>であるので、本免震材は、一般的なゴムのせん断弾性係数の測定結果をそのまま動的なせん断弾性係数として用いることが可能である。

一方、減衰定数hについてはひずみ依存性は認められず、図-4に示すように2%前後の数値を示した。図-4では1プロットのみ他より大きな点があるが、この点でもhはせいぜい4%である。地下構造物の免震では、免震層の履歴エネルギー減衰は期待しないが、大きなせん断ひずみ振幅に対しても、安定した材料であることが示された。

#### 5. まとめ

以上の結果は、従来提案した免震材とほぼ同様であり、増量材を添加したが、この影響は動的物性値にはさほど影響せず、免震材としての大きな変形性能と小さなせん断弾性係数を保証する材料であることが確認できた。

本研究は、建設省土木研究所、土木研究センターと民間17社による官民共同研究「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。なお、試験の実施に関して、東京ソノメサの竹原氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 鈴木, 田村: 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) 鈴木他: 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.
- 3) 鈴木他: シールドトンネルの免震構造に対するシリコン系材料の適用, 第1回免震制震コロキウム論文集, pp.141-149, 1996.
- 4) 鈴木: シールドトンネルの地震応答評価のための解析法の提案, 第1回免震制震コロキウム論文集, pp.125-132, 1996.
- 5) Suzuki, T.: Damages of Urban Tunnels due to the Southern Hyogo Earthquakes of January 17, 1995 and the Evaluation of Seismic Isolation Effect, Proc. 11WCEE, Acapulco, Mexico, 1996.

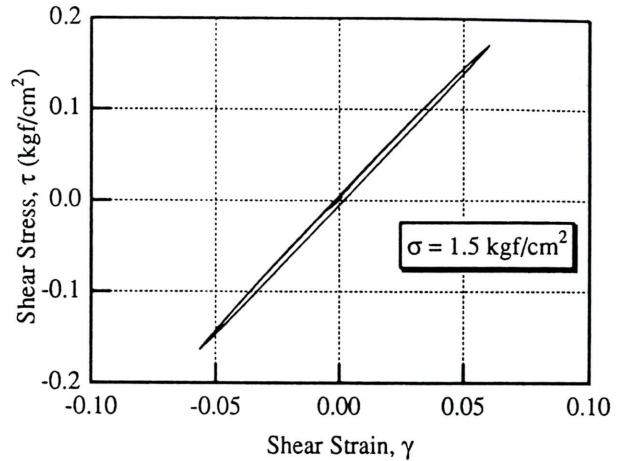


図-2 シリコン系免震材の代表的な履歴曲線

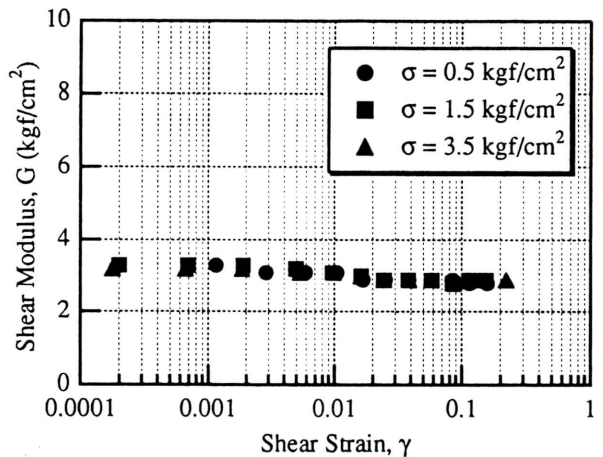


図-3 せん断弾性係数Gのひずみ依存性

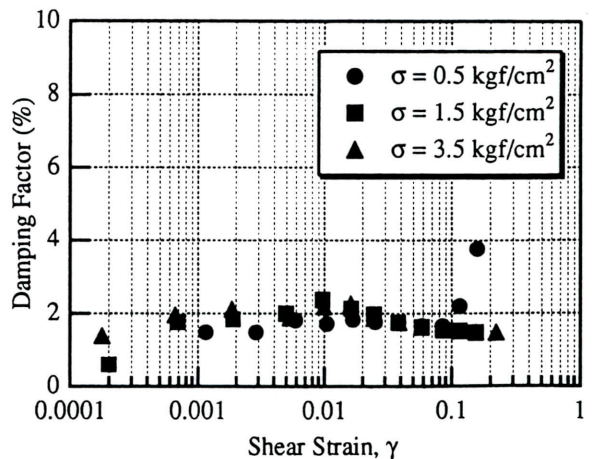


図-4 減衰定数hのひずみ依存性