

トンネル免震材としてのシリコン系材料の物性の検討

(株) 熊谷組技術研究所 正会員 田中 港
 (株) 熊谷組技術研究所 正会員 鈴木 猛康
 (株) 熊谷組技術研究所 正会員 粕田 金一
 (株) 熊谷組土木技術部 正会員 小林 正宏

1.はじめに

シールドトンネルは東京湾横断道路に代表される大断面の道路トンネルだけでなく、地下鉄、高電圧送電線、上下水道幹線、通信幹線等都市のライフラインとして大きな役割を担っている。今後はその耐震性を正確に評価するだけでなく、トンネルの重要度と地盤条件によっては免震構造を採用することが望まれる。このような観点から、筆者らは図-1に示すようなシールドトンネルの覆工体と周辺地山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。¹⁾²⁾ その結果、(1)ヤング率が小さいこと、(2)大きなせん断ひずみ領域まで破壊することがなく、(3)長期にわたって安定したせん断特性を有すること、(4)ポアソン比が0.5に近いこと、がトンネル軸方向の伸縮、並びにねじり変形に対して大きな免震効果を発揮する条件であることを示した。³⁾ 本論文では免震層材料としてシリコン系材料を提案し、上記の物性条件を満足することを確認する。

2.免震層材料としてのシリコン

本論文で用いたシリコン系材料は、2液性の常温液状シリコンゴム組成物であり、硬化スピードは触媒によって調節することができる。なお、硬化後のヤング率Eは15 kgf/cm²程度となるように調節されている。重量密度は1.3 gf/cm³で硬化前後でほとんど変化せず、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、硬化前は液体であるが水と混合されることはなく、硬化後は止水性・対候性に富んだ長期安定の材料となる。さらに、事前に実施した引張試験より、引張ひずみが200%を超えなければ破断は生じないことを確認している。

3.繰り返し中空ねじりせん断試験

先に行なった繰り返し三軸試験の結果より、ヤング率および減衰率のひずみ依存性はほとんどないことが得られているが、軸ひずみのレベルが10⁻¹程度が限界であること、また実地盤のような単純せん断状態を実現していないことから、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。供試体はあらかじ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にカッターナイフで溝を付けたものを用いた。寸法は外径7cm、内径3cm、高さ7cmである。拘束は等方応力状態で行い、有効拘束圧は $\sigma_z = \sigma_h = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 、1.0 kgf/cm²の2ケースについて繰り返しねじりせん断試験を実施した。せん断ひずみが、 $\gamma = 10^{-5}$ レベルから0.2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 Hzとした。図-2は有効拘束圧1.0 kgf/cm²、せん断ひずみ20%の載荷ケースでの履歴だが、載荷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。図-3、図-4はそれぞれ実験より得られたせん断弾性係数G、減衰定数hとひずみとの関係を示す。せん断弾性係数Gについて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5 kgf/cm²程度であるが、次第に低下の度合いが大きくなり、 $\gamma = 0.2$ では3 kgf/cm²程度となっている。このようにシ

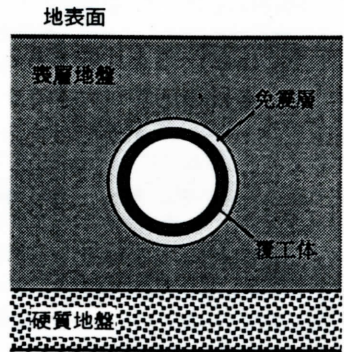


図-1 トンネル免震構造の模式図

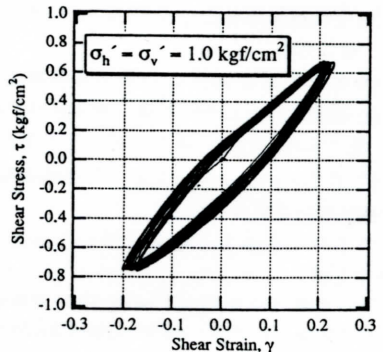


図-2 応力-ひずみ曲線

シリコン系免震層材料にもひずみ依存性は認められるもの土と比較すればそれ程大きくなく、微小ひずみ時のGを用いて免震効果を考慮した設計ならばひずみが大きい場合には安全側となることがわかる。一方減衰定数hについては、 $\gamma = 0.1$ 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、10%を超えると急激に増大し20%を超えたあたりで約0.2となる。このことから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じる場合には、履歴減衰もある程度期待できる可能性が示された。なお、G、h共に拘束圧依存性は認められなかった。

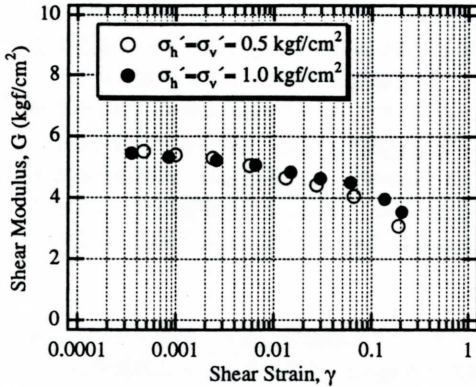


図-3 G - γ の関係

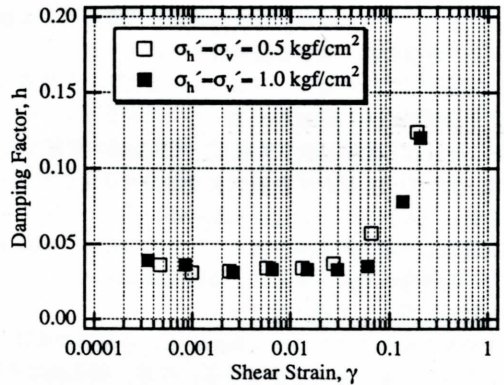


図-4 h - γ の関係

4. 平面ひずみ三軸試験

免震層材料のポアソン比 ν が小さいと免震層の体積収縮により地表面沈下を生じる。また体積収縮によりトンネル外周の地盤にせん断変形を与えるため、長期にわたる沈下を誘発する恐れもある。そこで、シリコン系免震層材料のポアソン比 ν を得るため鉛直変位を固定した平面ひずみ三軸試験を行なった。

図-5は0.2 kgf/cm²の等方圧状態から平面ひずみ状態を保ちながらセル圧(水平応力 σ_h)を単調に増加させたときの σ_h と ν の関係を示している。载荷の初期段階では電気的な変動が大きく安定した制御ができていないが、 $\sigma_h = 1.0 \sim 2.5$ kgf/cm²の区間では比較的安定した結果が得られていることから、この区間の平均値0.48をシリコン系免震層材料のポアソン比 ν とすると、ポアソン比はほぼ0.5であり免震層材料に適していることが確認された。

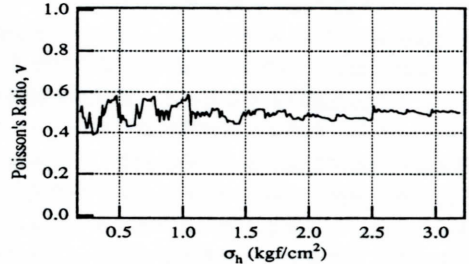


図-5 $\nu - \sigma_h$ の関係

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材料の物性試験を実施した結果、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Gを5 kgf/cm²以下とすることができる。これは免震層として機能するのに十分小さな値である。
- (2) せん断弾性係数Gのひずみ依存性については、土質材料と比較すれば十分に小さいといえる。
- (3) 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、ひずみ依存性は認められないが、10%を超えると急激に増大し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恐れはないと考えられる。

以上のことから本論文で用いたシリコン系材料は免震層材料に適していることが確認された。

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) 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
- 3) 鈴木猛康, 田村重四郎: 都市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, (投稿中)