

地下構造物に適用する新たな免震構造 (SaS 免震) の提案と検証

宍倉 佳浩¹・鈴木 猛康²

¹ 学生会員 山梨大学大学院医工農学総合教育部工学専攻 (〒400-0014 山梨県甲府市武田 4-3-11)

E-mail:G17TC009@yamanashi.ac.jp

² フェロー会員 山梨大学地域防災・マネジメント研究センター (〒400-0014 山梨県甲府市武田 4-3-11)

E-mail: takeyasu@yamanashi.ac.jp

線状地下構造物の地震対策の一つであるトンネル免震構造では、トンネルひずみの平滑化が行われるため、免震区間長が長くなるという課題がある。これに対して、免震区間長を短縮させる試みとして、本論文では新たなトンネル免震構造の提案を行っている。新たな免震構造は、滑り型免震構造の両端に比較的小規模な可撓継手を配置した構造で、SaS 免震と命名している。この SaS 免震構造を適用したシールドトンネルを対象として、基盤不整形表層地盤における地震時トンネル軸ひずみを解析し、従来の滑り型免震構造のケースと比較することにより、本論文では SaS 免震が従来の免震構造よりも優れた顕著なトンネル軸ひずみ低減効果を有することを示すと同時に、免震区間長の低減を図ることができることを示している。

Key Words: seismic isolated tunnel, slip and separation (SaS), seismic analyses,

1. はじめに

都市の地下には上下水道、共同溝、地下鉄などライフラインを担う線状の地下構造物が多く構築されている。これらの線状地下構造物は、地震時に周辺の地盤の変位に追従し、自己励起振動を起こすことがないため、一般的に地震の影響を受けにくいとされている。しかし、硬質地盤と軟質地盤の境界付近や基盤不整形部等、地盤変位が急変する表層地盤では、大きな地盤ひずみがトンネルに伝達され、トンネルに大きな断面力が発生する。

そこで、トンネルの地震対策として、トンネル構造の一部に柔な構造を導入し、トンネルのひずみを吸収させることを目的とした柔構造が提案された。しかし、地盤とトンネルの間には地盤の摩擦抵抗が存在するため、柔構造を導入した箇所にトンネルひずみを全て集中させられるわけではない。これに対して、トンネル外周に免震層を形成して、トンネルを地盤から絶縁する免震構造が提案された。免震材料や施工法とともに、トンネルの免震設計法も開発され、施工が行われている。

トンネルの免震構造には二種類に大別される。まず、一つ目に、柔らかい免震層を構造物の外周面に形成する手法である。免震層は液状の免震材料を注入するか、板状の免震層をトンネル躯体に接着することによって形成する。例えば、シールドトンネルにおいて裏込め材をシ

リコーン系免震材に置換えて注入し、免震層を形成すると、止水性も高まるため、地盤条件急変部だけでなく立坑接合部への適用にも有効である。しかし、地盤条件急変部に免震層を適用させる場合には、免震効果を高めるために長い免震区間長が必要とされる場合があり、免震材の高性能化とともに低コスト化が課題であった¹⁾。

免震材注入に対して、セグメント外周面に滑動塗料を塗布した滑り型免震構造は、セグメント外周面を保護する以外には特に通常と異なる施工を必要としない。したがって、滑り型免震構造は安価であるが、滑り型免震構造もまたトンネルひずみの平滑化を行うため、長い免震区間長が必要とされる場合がある。

このように、免震層ならびに滑り型免震による免震構造はともに、免震区間長が長くなるという課題があった。そこで、本研究では、免震区間長を短縮できる新たなトンネル免震構造の提案を行うことを目的として、検討を行ったので報告する。

2. 滑り型免震構造適用によるケーススタディー

前述のトンネル免震構造のメカニズムを説明するため、不整形表層地盤中のシールドトンネルに対する滑り型免震構造適用の有無の2ケースについて、地震応答解析を実

施し、結果の比較を行う。

図-1 に示す表層不整形地盤中に構築する外径 5.1m の共同溝シールドトンネルを解析対象とした。不整形表層地盤はせん断波速度 $V_s=400\text{m/s}$ の硬質地盤と $V_s=100\text{m/s}$ の軟質地盤で構成されており、地下水位は地表面下 1m の位置とした。免震構造は滑り型免震構造とし、地盤境界を跨ぐように 30m にわたって適用することとした。滑り型セグメントの動摩擦係数は、トンネル位置の深さにおける有効拘束圧より 0.231 とした¹⁾。不整形表層地盤とシールドトンネルを、軸対称 FEM モデル（解析コード：EASIT）²⁾によってモデル化した。道路橋標準示方書の標準波の中からレベル 2 地震動、II 種地盤 JR 鷹取駅 EW 成分を基盤入力波とし、重複反射理論に基づいた表層地盤の一次元地震応答解析で得られたせん断ひずみ最大時刻における水平加速度を求め、水平慣性力（質量×加速度）を解析モデルの各節点に静的に与える地盤応答震度法に基づいて、外力を与えることによる地盤ならびにトンネルの応答を解析した。

図-2 は EASIT によって得られた解析結果より、滑り型免震構造適用の有無によるシールドトンネルのセグメント軸ひずみの解析結果を比較して示したものである。滑り型免震構造の適用によって、セグメント軸ひずみはひずみの最大値発生位置で 1/4 に低減しており、大きな軸ひずみ低減が達成できている。なお、滑り型免震構造を適用した 30m の区間のうち図の水平座標 15~31m と 42~43m の範囲で地盤とセグメント間に滑りが発生し、それ以外の場所では滑りが発生しない結果となった。

滑り型免震構造を適用しても、セグメントに残存する軸ひずみは、摩擦力としてトンネル周辺地盤から伝達されるひずみと、滑動の発生しない両端のセグメント間の相対変位によって発生するひずみの和として生成されている。地盤とセグメント間に滑りが発生した 15~31m の平均トンネル軸ひずみが 1.520×10^{-3} であったのに対して、水平座標 15m と 31m のトンネル相対変位から得られたトンネル軸ひずみは 1.518×10^{-3} であり、両者はほぼ一致した。したがって、滑りが発生した区間のトンネル軸ひずみの発生には、その区間の両端のトンネル変位が支配的であると言える。

3. 新たな免震構造の提案

前章でも述べたように、滑り免震を適用してもセグメントに残存するひずみの発生要因としては、滑りセグメント適用区間の両端におけるトンネルの相対変位が支配的である。これに対して、滑り免震を適用した区間をその両端の通常構造の区間と分離する（separate）ことができれば、滑り型セグメントは周辺地盤からも隣接するセグ

メントからも絶縁され、軸ひずみはほとんど発生しなくなるはずである。そこで、図-4 に示すように、滑り免震区間の両端に可撓継手を適用し、滑り免震構造と柔構造を組合わせた新たな免震構造を提案する。この免震構造は、地盤ひずみを滑りにより絶縁し、免震区間を通常構造の区間から分離させる機能を有することから、SaS 免震（Seismic Isolation with both Functions of Slip and Separation）と命名することとする。

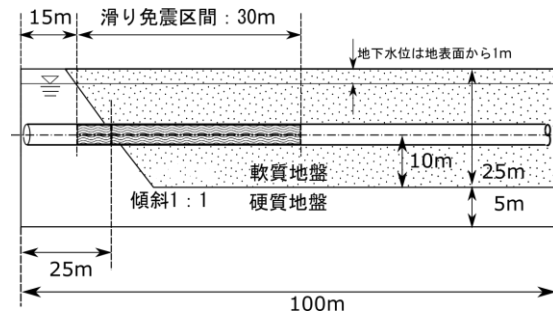


図-1 解析対象とした不整形表層地盤と中のトンネル

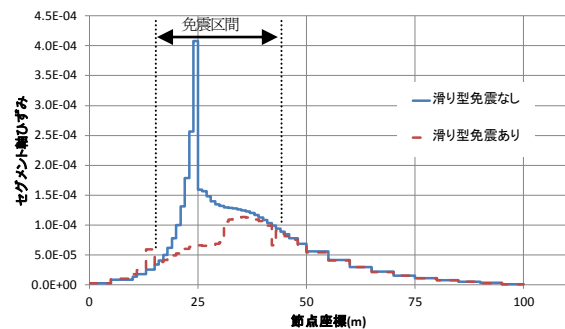


図-2 滑り型免震構造の有無とセグメント軸ひずみ

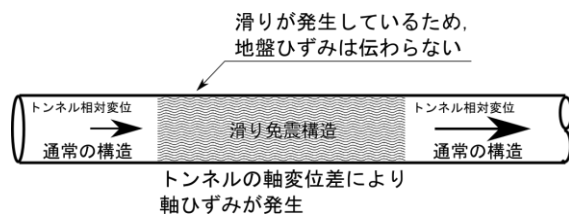


図-3 滑り免震区間のひずみ発生メカニズム

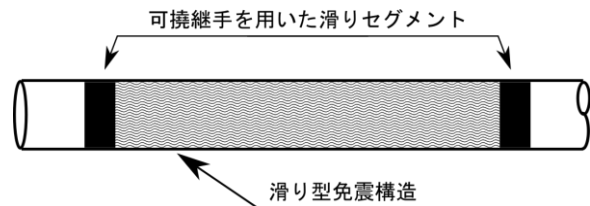


図-4 SaS 免震の概要図

4. SaS 免震の適用効果

新たに提案する SaS 免震の免震効果を評価するため、2章で解析に用いた表層地盤、シールドトンネル、外力の条件にて、免震適用なし、滑り型免震構造に加え、SsS 免震適用のケースについて解析し、各ケースで発生するセグメント軸ひずみを比較した。

SaS 免震は、動摩擦係数 0.232 の滑り型免震構造の両端に変位吸収量 20mm、ばね定数 6.31×10^4 kN/m の可撓継手を配置した構造とした。EASIT による可撓継手のモデル化に当たっては、セグメントと同断面の幅 1m の要素を配置し、その要素のヤング率を可撓継手のばね定数と一致させた。

図-2 の免震構造なし、滑り型免震構造によるセグメント軸ひずみの解析結果に、SaS 免震適用のケースの軸ひずみ解析結果を重ねて図-5 に示した。SaS 免震を適用した場合、滑り型免震構造のみ適用のケースでは滑りが発生しなかったセグメント箇所でも滑りが発生し、可撓継手が滑り型免震の効果を促進させる相乗効果を確認することができた。その結果、図に示すように、本稿で提案する SaS 免震構造は、従来の滑り型免震構造に対してセグメント軸ひずみの発生量を $2/3 \sim 1/5$ に低減させている。また、SaS 免震を適用すると、軟質地盤側では免震区間の外側の通常のセグメントの区間でも、滑り型免震適用のケースに比べてセグメント軸ひずみを減少させていることが示された。

以上のように、SaS 免震は滑り型免震と可撓継手の相乗効果により、効果的な免震効果が得られることがわかった。これまでも免震層と弾性ワッシャーの併用等、免震構造と柔構造の併用については検討され、効果があることがわかっているが、滑り型免震構造の両端に可撓継手を配置する SaS 免震は、とくに顕著なセグメントひずみ低減効果が期待できる。したがって、SaS 免震はトンネル免震構造の課題であった免震区間長の短縮化を実現できる可能性がある。

5. 免震区間長と軸ひずみ低減効果

SaS 免震を適用することによって免震区間長の短縮化が実現できることを確認するため、図-6 に示すように免震区間長を表-1 に示すように 6、8m としたケースについて、トンネルの地震時軸ひずみを解析した。なお、滑り型免震構造の範囲（免震区間長）は水平座標 15~45m 間の 30m の区間である。これに対して SaS 免震の適用範囲（免震区間長）は硬質地盤と軟質地盤の境界を中心とする $1/4 \sim 1/5$ の区間長となっている。

図-7 は地震時セグメント軸ひずみについて、従来の滑

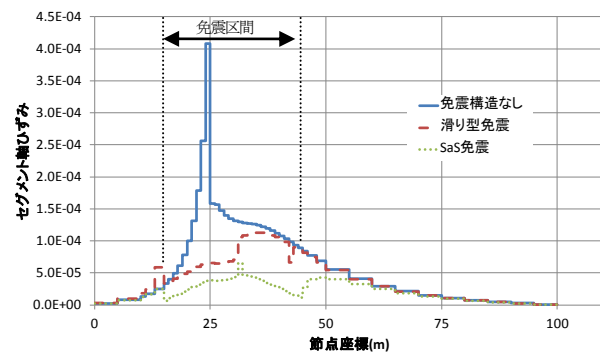


図-5 セグメント軸ひずみの比較

表-1 SaS 免震の適用箇所と区間長

ケース番号	適用区間(m)	免震区間長(m)
1	22~28	6
2	21~29	8

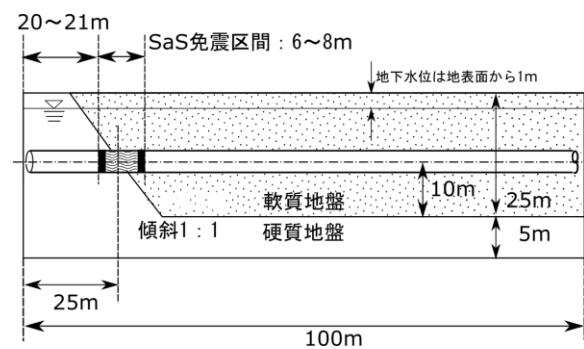


図-6 SaS 免震の適用範囲と地盤条件

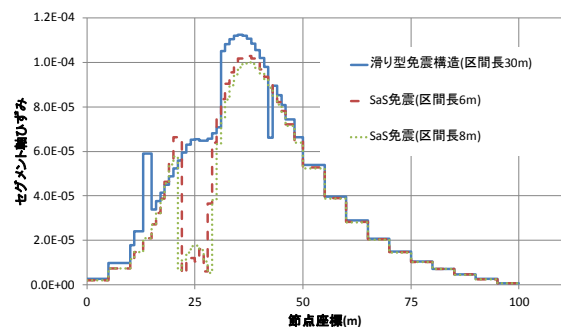


図-7 滑り型免震構造と SaS 免震の比較

り型免震構造（免震区間長 30m）と SaS 免震で免震区間長 6m、8m のケースを比較したものである。SaS 免震の免震区間長を 8m としたケースでは、6m のケースよりもわずかにセグメント軸ひずみが低減しているが、その差はわずかである。これら SaS 免震を適用した 2 ケースでは、従来の滑り型免震構造のケースよりもセグメント軸ひずみが部分的に上回っているが、最大セグメント軸ひずみは低減しており、SaS 免震が従来の滑り型免震構

造と同等以上のセグメント軸ひずみ低減効果を有していることが示された。

SaS 免震の効果的な適用範囲を検討するためには、さらに免震区間長を変化させたパラメトリックスタディーを行う必要があるものの、SaS 免震がトンネル免震構造にとって課題であった免震区間長の大幅な低減に貢献できることを確認することができた。

6. まとめ

本論文では、滑り型免震構造の両端に可撓継手を配置した SaS 免震構造を提案し、SaS 免震の効果を軸対称 FEM 解析に基づいたトンネルの地震時応答解析コード EASIT を用いて検討した。以下に本論文で得られた結論を箇条書きに示す。

- 1) 滑り型免震構造の免震区間におけるセグメント軸ひずみの発生要因としては、免震区間の両端における通常のセグメントの相対変位が支配的であることが示された。
- 2) 滑り型免震構造の両端に可撓継手を配置した SaS 免震構造は、従来の滑り型免震構造と比較して、顕著なセグメント軸ひずみ低減効果を有することが示された。
- 3) SaS 免震を用いた場合、従来の滑り型免震構造の 1/5 程度の免震区間長でも、従来の滑り型免震構造と同

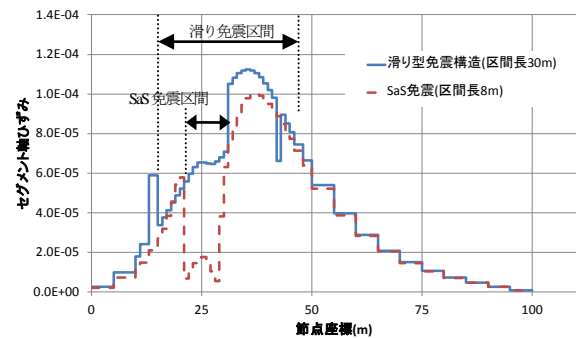


図-8 滑り型免震構造と局所的に配置した SaS 免震の比較

等なセグメント軸ひずみ低減効果が得られることがわかった。

参考文献

- 1) 鈴木猛康, 勝川籐太: 地下構造物の滑り型免震構造の提案と検証, 土木学会論文集 No.689/I-57, pp137-151, 2001.10
- 2) 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.

(2017.8.25 受付)

PROPOSAL AND VERIFICATION ON A NEW SEISMIC ISOLATION FOR SHIELD-DRIVEN TUNNELS

Yoshihiro SHISHIKURA and Takeyasu SUZUKI

In the seismically isolate tunnel, which is one of the countermeasures against the earthquake of linear underground structures, since the reduction of seismic tunnel strain is obtained by the mechanism of smoothing strain, there is a problem that the isolation interval length becomes long. On the other hand, as an attempt to shorten the seismic isolation section length, this paper proposes a new seismic isolation for shield-driven tunnels. A new seismic isolation is a structure in which a relatively small flexible joint is arranged at both ends of a slip-type type isolated segment and is named SaS isolation. By analyzing earthquake tunnel axial response of the shield-driven tunnel in surface soil deposits with SaS isolation structure and comparing it with the case of conventional slip-type seismic isolated shield-driven tunnel. Then, this paper demonstrates that SaS seismic isolation structure shows a remarkable effect of reducing the tunnel axis distortion which is superior to the conventional seismic isolated structure.