

地下構造物に適用する免震構造であるSaS免震の設計法の提案

大成建設株式会社 正会員 ○穴倉 佳浩
山梨大学大学院 フェロー 鈴木 猛康

1. はじめに

都市の地下には地下鉄のトンネル、共同溝といった多くの線状地下構造物が構築されている。これらの線状地下構造物は、地震時に自己励起振動を起こすことがなく、周辺地盤の変位に追従して変形する特性を持つ。したがって、地盤条件急変部のような地盤変位が急激に変化する箇所では、トンネルに引張ひずみが集中し地震被害が発生する。事実、2007年新潟県中越沖地震では地盤条件急変部付近のシールドトンネルのリング継手が破断する被害が発生している。¹⁾

シールドトンネルの地震対策はトンネルひずみ集中部に柔な構造を導入する柔構造化技術と構造物の外周面に絶縁層を設け、地盤ひずみを絶縁する免震構造の2つがある。柔構造化技術の場合、トンネルが周辺地盤によって拘束されているため、柔な構造にトンネルひずみをすべて集中させることは難しい。対する免震構造はトンネルを地盤ひずみから絶縁し、トンネル構造を地震の影響から確実に絶縁することができる。しかし、地震時地盤ひずみが長く広範囲に分布している場合、免震区間長が長大になるという課題がある。²⁾

そこで、穴倉らにより従来の免震構造に比べて免震区間長の短縮化が可能な免震構造である SaS 免震が提案された。SaS 免震は図-1 に示すように地盤ひずみを滑りにより絶縁する滑り免震区間の両端に、免震区間を通常構造の区間から分離させる簡易な可撓継手を配置したものである。SaS 免震構造を硬軟地盤境界を通過するシールドトンネルに適用させた場合、従来の滑り型免震構造に対して免震区間長を 1/5 程度まで短縮できることが示された。³⁾

本研究では、地震時に曲げ変形が発生するシールドトンネルに対する SaS 免震構造の適用性の検討と SaS 免震の区間長の設計法の提案を行っていく。

2. 曲げ変形が発生するシールドトンネルへの適用

図-2に示す地震時に曲げ変形が発生する硬軟地盤境界を通過する直径5.1mの共同溝用シールドトンネルに対するSaS免震構造の適用性について、区間長10mの滑り型免震構造とSaS免震構造の地震時セグメント軸ひずみを比較して検証する。また、硬軟地盤境界の傾斜角度を15°、30°、45°と変化させたパラメトリックスタディを実施する。

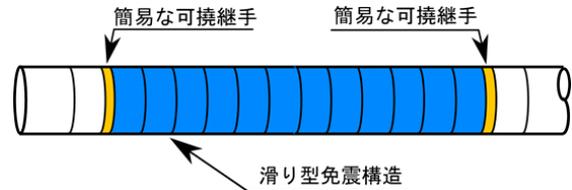


図-1 SaS 免震の概要

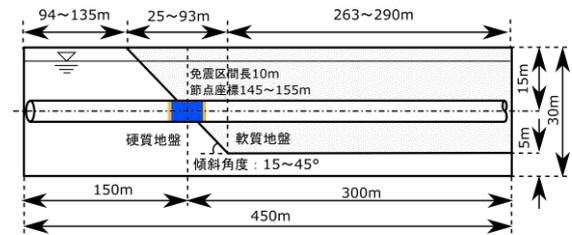


図-2 解析対象とするシールドトンネルと地盤構造

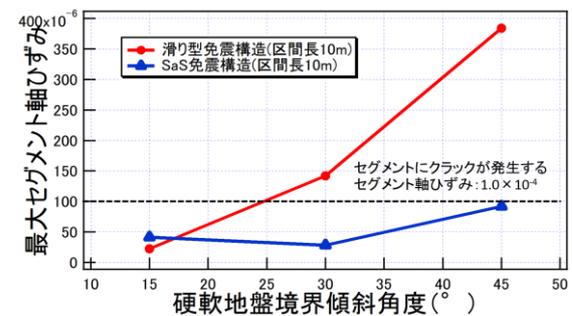


図-3 地盤境界傾斜角度と最大セグメント軸ひずみ

シールドトンネルのヤング率はセグメントリングとリング継手の等価曲げ剛性から $E=2882.50\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比0.167とした。硬質地盤は密度 $\rho=2.0\text{g/cm}^3$ 、せん断波速度 $V_s=400\text{m/s}$ 、ポアソン比 $\nu=0.40$ の洪積層、軟質地盤は $\rho=1.8\text{g/cm}^3$ 、 $V_s=100\text{m/s}$ 、 $\nu=0.45$ の沖積層とし、地下水位は地表面から1mとした。解析には軸対称FEMモデル“EASIT_tv”を用いた。EASIT_tvでモデル化した地盤とシールドトンネルに対して道路橋標準示方書レベル2地震動JR鷹取駅EW成分から得られた地盤水平加速度分布を応答震度法に基づきトンネル軸直角方向に地震慣性力として作用させた。

図-3は区間長10mの滑り型免震構造と同一区間長のSaS免震構造の最大セグメント軸ひずみを硬軟地盤境界の傾斜角度ごとに示した図である。硬軟地盤境界の傾斜角度30°と45°のケースでは滑り型免震構造のセグメント軸ひずみがセグメントリングにクラックが発生する 1.0×10^4 ひずみを上回った。それに対し、SaS免震構造はすべての傾斜角度のケースにおいて 1.0×10^4 を下回って

キーワード：シールドトンネル、免震地下構造物、硬軟地盤境界、slip and separation(SaS)

連絡先：山梨県甲府市武田 4-3-11 山梨大学工学部土木環境工学科 防災研究室 TEL：055-220-8531

おり、SaS免震構造はトンネルに地震時曲げ変形が作用するケースでも免震区間長の短縮が可能であることが示された。

3. SaS免震の設計法の提案と検証

図-4はSaS免震構造の区間長を変化させたパラメトリックスタディの結果をもとに新たに提案したSaS免震の免震区間長の設計フローである。この設計フローはSaS免震構造の免震区間長を通常構造のトンネル断面力分布をもとに決定し、SaS免震構造の地震応答解析の結果に応じて区間長を修正する特徴を持つ。

新たに提案したSaS免震構造の設計法の妥当性を図-5に示す傾斜角度15°の硬軟地盤境界を通る直径5.1mの共同溝用シールドトンネルを対象とした試設計を行い検証した。シールドトンネルの引張変形に対するヤング率は $E=1104.80\text{N/mm}^2$ 、曲げ変形に対しては $E=2880.55\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は0.167とした。硬質地盤は密度 $\rho=2.0\text{g/cm}^3$ 、せん断波速度 $V_s=400\text{m/s}$ 、ポアソン比 $\nu=0.40$ 、軟質地盤は $\rho=1.8\text{g/cm}^3$ 、 $V_s=100\text{m/s}$ 、 $\nu=0.45$ とし、地下水位は地表面から1mとした。解析には軸対称FEMモデルを用いて、先の解析で用いたレベル2地震動の地震慣性力をトンネル軸方向と軸直角方向に分けて入力し、両者のセグメント軸ひずみ分布を重ね合わせて、試設計の結果とした。

図-6に試設計を行う過程で得られたセグメント軸ひずみ分布に解析段階ごとにまとめたものである。まず、通常構造のセグメント軸ひずみ分布をもとにSaS免震構造の免震区間長を決定し地震応答解析を実施した解析1回目ではセグメント軸ひずみが 1.0×10^{-4} を上回った。この結果を受けた解析2回目ではSaS免震構造の免震設計法に基づき区間長を修正して解析を行った。解析2回目では全ての区間でセグメント軸ひずみが 1.0×10^{-4} を下回ったものの、簡易な可撓継手の伸び量が許容値の30mmを超えた。よって解析3回目では免震設計法に基づいて簡易な可撓継手に隣接するリング継手に弾性ワッシャーを導入した。解析3回目では全ての区間でセグメント軸ひずみが 1.0×10^{-4} を下回り、簡易な可撓継手の伸び量も許容値の30mm以内に収まった。よって、新たに提案したSaS免震構造の設計法を用いれば地震応答解析を3回繰り返すことで適切な免震区間長を決定できることが示された。

4. まとめ

本研究で得られた結論をまとめとして箇条書きで示す。

- (1) シールドトンネルの軸直角方向に地震慣性力が入力され、曲げ変形が発生するケースにおいて、従来の滑り型免震構造に比べてSaS免震構造は短い区間長でも高い軸ひずみ低減効果を発揮することが可能であることが示された。

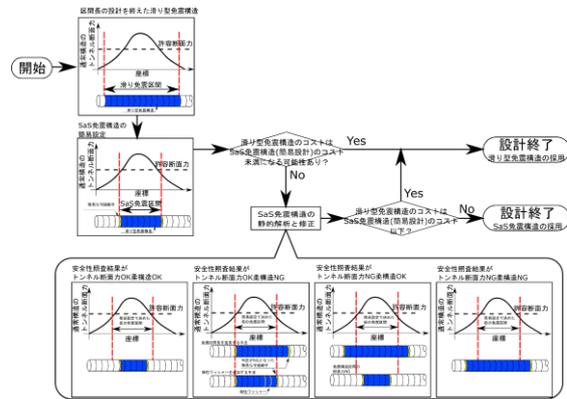


図-4 SaS免震の区間長の設計法

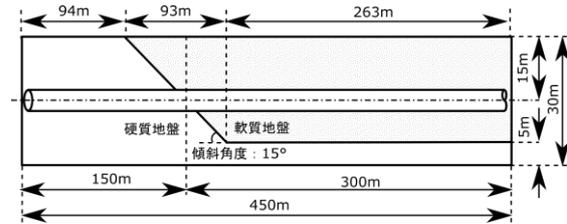


図-5 解析対象とするシールドトンネルと地盤構造

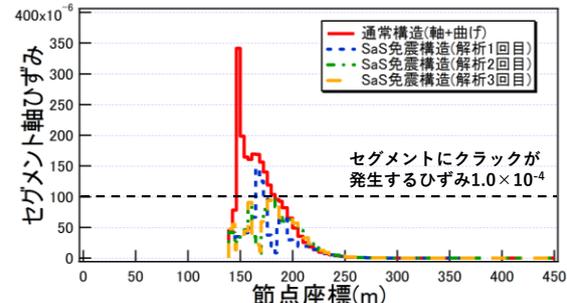


図-6 解析段階ごとのセグメント軸ひずみ分布

- (2) シールドトンネルに地震慣性力が軸方向、軸直角方向同時に作用するケースに適用させる SaS 免震構造の設計は、新たに提案した免震設計法に基づいて行った場合、地震応答解析を 3 回繰り返すことで適切な免震区間長が決定し、円滑に設計することが示された。

参考文献

- 1) 谷茂, 斉藤正幸, 荒木繁雄: 中越沖地震におけるシールドトンネルの被災例, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.56-67, 2010.
- 2) 土木学会 地震工学委員会, 減震・免震・制震小委員会: 減震・免震・制震構造設計法ガイドライン(案), 土木学会, 2002.1
- 3) 穴倉佳浩, 鈴木猛康: 地下構造物に適用する新たな免震構造 (SaS 免震) の提案と適用性に関する考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.74, No.4 (地震工学論文集第 37 巻), pp.I_558-I_567, 2018