

地下構造物に適用する新たな免震構造 (SaS免震) の適用性に関する考察

山梨大学大学院 学生会員 ○穴倉 佳浩

山梨大学大学院 フェロー 鈴木 猛康

1. はじめに

都市の地下には鉄道、道路、共同溝といった線状地下構造物が構築されている。線状地下構造物は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振動するため、地震の影響を受けにくいことが知られている。しかし、硬軟地盤境界部、基盤不整形表層地盤といった地震時地盤変位急変部では大きな地盤ひずみが発生し、2009年新潟県中越地震ではシールドトンネルのリング継手の破断が報告されている¹⁾。

トンネル縦断方向の地震対策としては、トンネル構造に柔な構造を導入する柔構造化技術、トンネル外周面に絶縁層を形成し地盤ひずみを絶縁する免震構造がある²⁾。柔構造化技術において、柔な構造にトンネルひずみを集中させることは、トンネルが周辺地盤によって拘束されているため困難であることは明らかである。一方で免震構造は、トンネルひずみを分散させ、ひずみの平滑化を図るものである。シールドトンネルに適用させる免震構造は、トンネル外周面にゴム弾性を有する免震層を形成する手法、セグメント表面に滑り塗料を塗布して絶縁層を形成する滑り型免震構造の2つに大別される。これらの免震構造はトンネルひずみの低減に有効であるが、地盤ひずみの増大する区間が長くなるほど必要とされる免震区間長が長くなる。

トンネル免震構造の課題である免震区間長の短縮化を図るために穴倉ら³⁾により新たな免震構造である SaS 免震が提案され、硬軟地盤境界に適用させた場合、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等のセグメント軸ひずみ低減効果が得られることが確認されている。本研究では、基盤不整形表層地盤中を通過するされたシールドトンネルに SaS 免震の適用し、免震効果を検証する。

2. SaS免震について

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 SaS 免震(seismic isolation with both functions of Slip and Separation)が提案された。SaS免震に用いられる簡易な可撓継手とは、既存の大変位を吸収する大規模な可撓継手ではなく変位吸収量を20～30mm程度と小さくして、止水の簡略化を図るものである。

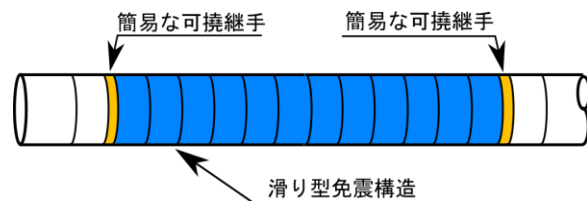
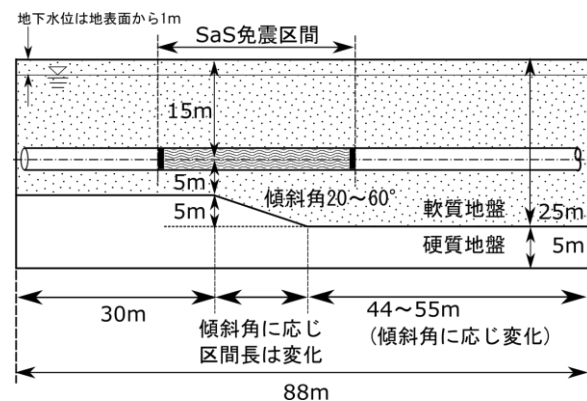
図-1 SaS 免震の概要³⁾

図-2 基盤不整形表層地盤中のトンネルの SaS 免震

3. 基盤不整形表層地盤への適用

図-2に示す基盤不整形表層地盤中に構築された直径5.1mの共同溝用シールドトンネルへのSaS免震の適用性について、セグメント軸ひずみの比較を通常構造と滑り型免震を適用させたケースについて行うとともに、基盤の傾斜角度をパラメータとしたパラメトリックスタディを実施し、SaS免震の軸ひずみ低減効果と傾斜角度の関係について検討した。

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剛性から $E = 1773.96 \text{ N/mm}^2$ とした。SaS免震は、動摩擦係数0.231の滑り型免震構造の両端に変位吸収量30mm、ばね定数 $6.32 \times 10^4 \text{ kN/m}$ の可撓継手を配置した構造とした。基盤である硬質地盤は密度 $\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$ 、せん断波速度 $V_s = 400 \text{ m/s}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.40$ の洪積層、表層地盤である軟質地盤は $\rho = 1.8 \text{ g/cm}^3$ 、 $V_s = 50 \text{ m/s}$ 、 $\nu = 0.45$ の沖積層とし、地下水位は地表面から1mとした。基盤の傾斜角度は 20° から 60° までを 10° ずつ変化させた計5ケースとした。

軸対称FEMモデル(解析コード：EASIT)を用いた地盤応答震度法を用いて解析を行った。地震慣性力は駐車場指針等⁴⁾に規定されている深さ方向の最大地盤変位分布

キーワード：シールドトンネル、免震地下構造物、基盤不整形表層地盤、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

式を疑似水平加速度分布式に変換した式(1)から得られた水平加速度を図-2の左側から入力した。速度応答スペクトルは $S_v=0.8\text{m/s}$ とした。

$$a(z) = \frac{4}{\pi} S_v \omega_s \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (1)$$

ここに、 a ：水平加速度(m/s^2)

z ：地表面からの深さ(m)

S_v ：基盤面の速度応答スペクトル(m/s)

ω_s ：表層地盤の角速度(rad/s)

H ：表層地盤の厚さ(m)

図-3は傾斜角度 60° のケースでの免震構造なし、滑り型免震構造、SaS免震を適用したケースのセグメント軸ひずみを比較したものである。図中のピーク1は硬質地盤傾斜部左側で発生した鋭いピークを示し、ピーク2は傾斜部右側の水平部で発生した緩やかなピークを示す。滑り型免震構造の軸ひずみは免震構造なしのケースの4/5程度で、より高い免震効果を得るためには免震区間長を長くする必要がある。対するSaS免震は免震構造なしの軸ひずみを1/2程度まで減少させている。他の傾斜角度のケースでも同様にSaS免震の高い軸ひずみ低減効果が確認されている。

図-4は傾斜角度と可撓継手の変形量の関係を示しており、可撓継手1は図-2の免震区間の左端の可撓継手で可撓継手2は右側の可撓継手である。可撓継手2の変位吸収量は基盤傾斜角度が変化してもほぼ一定値であった。これに対して、可撓継手1は傾斜角度が大きくなるほど変位吸収量が大きくなった。図-5はピーク1とピーク2のセグメント軸ひずみ低減率と傾斜角度の関係を示したものである。ピーク1のセグメント軸ひずみ低減率は40%前後ではほぼ一定であるのに対して、ピーク2では傾斜角度が急になるほど滑りが発生しているセグメントが増え、軸ひずみ低減率が下がる傾向が見られた。以上の結果から、基盤傾斜角度の増加に伴って増加するトンネル軸ひずみを、ピーク1では可撓継手の変位吸収でカバーしたのに対して、ピーク2では滑り型セグメントの外周における滑り要素数が増えることによってカバーした。このように、SaS免震は柔構造と滑り免震の相互補完効果によって高い軸ひずみ低減効果を発揮していることが考えられる。

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) 基盤不整形表層地盤中を通過するシールドトンネルにSaS免震を適用させた場合、セグメント軸ひずみを免震構造がないケースに比べて半減させる程度の免震効果が得られることが確認された。

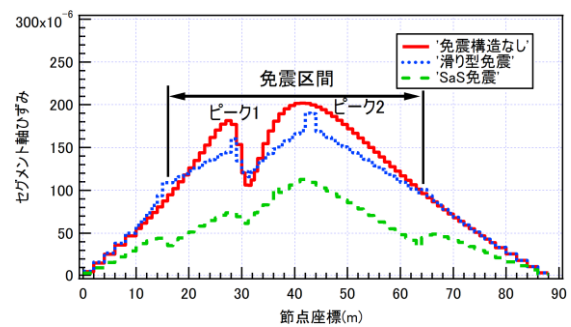


図-3 傾斜角度 60° のセグメントひずみの比較

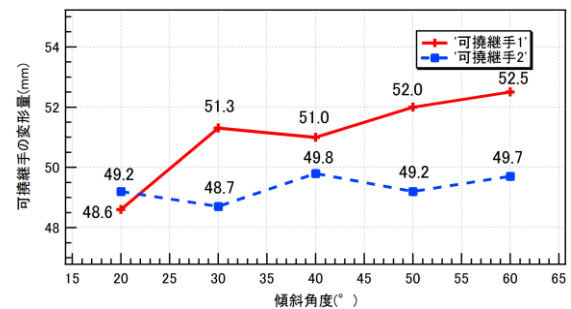


図-4 傾斜角度と可撓継手の変形量

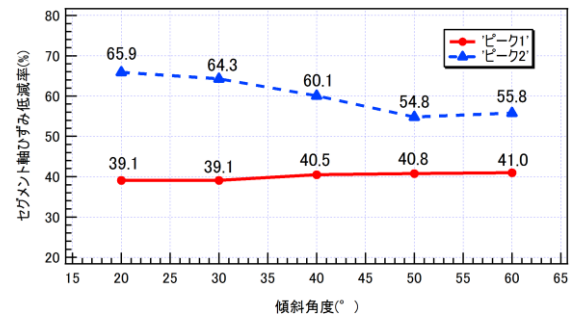


図-5 セグメント軸ひずみのピーク低減率

- (2) SaS免震構造は、地盤ひずみが鋭いピークを有する場合はもちろん、比較的緩やかなピークを有する場合であっても、柔構造である可撓継手と滑り免震の相互補完効果によって、免震効果を発揮することが確認された。

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)の提案と検証, 土木学会第37回地震工学研究発表会概要集, 2017.1
4. 大塚久哲[監修]: 最新 地中・基礎構造の耐震設計[改訂増補版], pp.31-33, 九州大学出版会, 2006.6.