

株式会社熊谷組 技術研究所 正会員 ○勝川 藤太, 鈴木 猛康, 粕田 金一

1. はじめに

トンネルの外周に軟らかな免震層を形成することにより、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、地震時にトンネルに発生する断面力の大幅な低減を図るのが、地下構造物の免震構造<sup>1)</sup>である。筆者らはこれまでに数値解析および振動実験で免震効果を検証するとともに免震材や施工法の開発を行ってきた<sup>2)~5)</sup>。地震時に縦断方向に発生するトンネル断面力低減を目的として免震構造を適用する場合、地盤条件急変部や構造条件急変部等の地盤ひずみが局所的に集中する箇所への適用が効果的であるが、本稿では地盤条件急変部を通過するシールドトンネルを検討対象として、数値解析により本免震構造の免震効果を検証した結果を報告する。

2. 解析対象地盤およびトンネル

本解析対象とするのは、図-1に示す海上と陸上の立坑間を結ぶ総延長310mの海底シールドトンネルである。対象とするトンネルは外径9.5m、セグメント厚35cmのダクタイル製セグメントである。地盤条件は、陸側では表層厚が85mで、上部26mが埋土、その下に10mの沖積砂層、それ以深は洪積の砂、砂礫、粘性土の互層の水平成層構造、一方海側では、表層厚が59mで、陸側の埋土部が海になっている以外は陸側と同様の地層構造である。トンネルが通過する区間における表層厚は、ケーソンの設置された護岸部を境として変化するため、振動特性が変化するとともに、護岸ケーソン自体も地震時のトンネルの応答性状に影響を与えることが予想される。従って、護岸ケーソン直下を通過する延長85mの区間に免震層を配置することとする。免震層厚は10cm、免震材にはシリコーン系免震材<sup>4)</sup>の使用を想定して、せん断弾性係数 $G=3.0\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.48$ の物性を与えた。なお、入力地震波はL2地震動を対象とし、道路橋の耐震設計用標準波のI種地盤の地震波の中から、タイプI地震動として開北橋橋軸直行成分、タイプII地震動として神戸海洋気象台NS成分の2波を選定した。

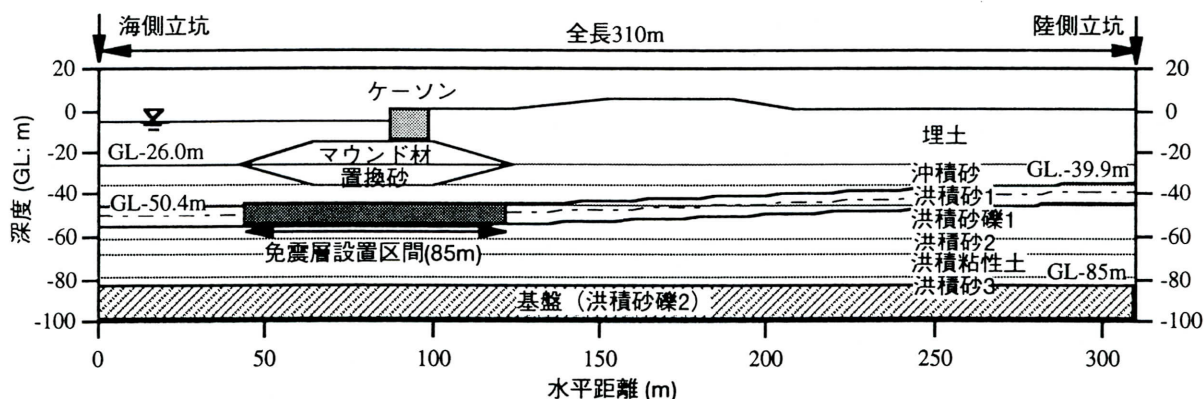


図-1 解析の対象とした地盤とトンネルの模式図

3. 解析方法

まず最初に、水平成層地盤の地震応答解析により地盤の収束物性値の算定した。次に、表層地盤を免震区間で3m、その他の区間で約4mごとに土柱列として離散化し、多質点系モデルによる地震応答解析を行って、縦断方向トンネルスプリングライン位置の地盤の軸・軸直角方向の変位応答を求めた。多質点系によるモデル化では、土柱の基本せん断振動モードから3次振動モードまでをそれぞれ取扱った全体系を構成し、3つの系でおのおの実施した時刻歴応答解析の結果を重ね合わせた<sup>6)</sup>。なお、地盤のせん断弾性係数は、水平成層地盤の地震応答解析により得られた収束物性値を使用し、減衰定数は一律20%とした。最後に、トンネルをはり要素、地盤をばね要素でモデル化し、地盤変位の時刻歴応答を入力として梁ばねモデルによるトンネルの耐震解析を行った。トンネルは、引張時はセグメントの等価引張剛性、圧縮時はセグメント軸剛性とした非線形梁要素としてモデル化した。解析に用いたトンネルの引張剛性は $(EA)^T=1.26 \times 10^5 \text{tf}$ 、圧縮剛性は $(EA)^C=2.02 \times 10^7 \text{tf}$ 、曲げ剛性は $EI=3.91 \times 10^6 \text{tf} \cdot \text{m}^2$ である。また、解析領域の両端には立坑を想定しており、立坑とトンネルの接合部には可撓セグメントの採用を想定した。

4. 解析結果

タイプI地震動入力時の解析の結果得られた縦断方向の免震および非免震トンネルの最大応答を、図-2にまとめて示した。また、タイプI、タイプII地震動入力時の最大断面力に関する非免震に対する免震の比率(断面力低下率)を、表-1に

表-1 トンネル断面力低下率

	タイプI	タイプII
	免震/非免震 (%)	免震/非免震 (%)
軸圧縮力	17	29
軸引張り力	35	25
曲げモーメント	8	9
せん断力	6	7

まとめて示す。

図-2(a),(b)のトンネル縦断方向の最大変位分布図をみると、免震層を設置したケーソン護岸下以外、免震と非免震のケースで変位分布が重なっている。護岸ケーソンの下部で非免震のケースの変位が急激に変化しているのに対して、免震のケースでは変位がなだらかで、トンネルひずみが分散されている。

図-2(c)の最大引張り力は、免震のケースでは非免震のケースの約35%に低減されている。引張り力の低減は免震層設置区間の左半分ではほとんど図られていないが、最大引張り力の発生する右半分では著しい。これは、引張り力の集中が左半分へと分散された結果と理解できる。一方、図-2(d)の最大圧縮力は大幅に低減され、非免震のケースの約17%まで低減されている。また、図に示すように最大圧縮力の分布形状は免震層設置区間ではほぼ平らとなり、軸力の分散効果が顕著である。図-2(e),(f)の最大曲げモーメント、最大せん断力についても同様の傾向で、断面力低下率は10%以下に達して、極めて大きな免震効果が発揮された。

タイプII地震動入力の場合でもトンネル縦断方向の最大応答値の傾向は同様であった。従って、入力地震波のタイプによる免震効果の相違は特に認められなかった。また、表-1からタイプI、タイプII地震動入力時ともに、免震効果としては軸力よりも曲げモーメントおよびせん断力の低減効果の方が大きいことが分かる。

図-3は、最大断面力発生地点である護岸ケーソン前面の直下部(海側立坑から83m)におけるトンネル軸ひずみの時刻歴応答波形を示したものである。非免震のケースでは引張側で $2000 \times 10^{-6}$ を超えるようなひずみが数回にわたって発生しているが、免震構造適用によって $1000 \times 10^{-6}$ 以下に大幅に低減されていることが分かる。

5. まとめ

地盤条件急変部に対して免震構造を適用することで、局所的に集中するトンネルひずみをピークカット、分散させ、地震時トンネル発生断面力を大幅に低減できることが、地震応答解析により示された。

解析の結果得られたトンネル断面力低下率は、軸圧縮力で30%以下、軸引張り力で35%以下であり、曲げモーメントおよびせん断力では10%以下となって、大幅な免震効果が得られた。

なお、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。

参考文献

- 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.
- 柏田他: 矩形断面トンネルの免震構造に関する模型振動実験, 第1回免震制震コロキウム論文集, pp.109-116, 1996.
- 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.
- 鈴木, 柏田, 小林, 池野, 福田, 田中: トンネル免震施工に用いるシリコン系免震材の動的物性, 第32回地盤工学研究発表会, pp.2095-2096, 1997.
- 小林, 柏田, 鈴木, 岡本, 池野, 福田: シリコン系免震材によるシールドトンネルの免震施工について, 第32回地盤工学研究発表会, pp.2093-2095, 1997.
- Suzuki, Unami: The Extended Quasi-Three-Dimensional Ground Model for Irregularly Bounded Surface Ground, Proc. JSCE, No.446 / I-19.

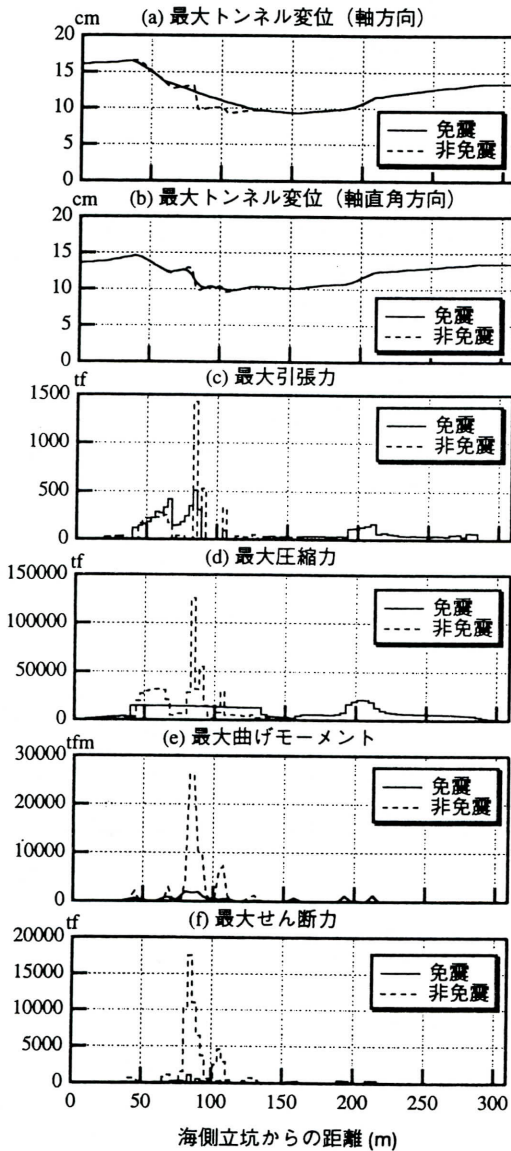


図-2 最大応答値 (タイプI)

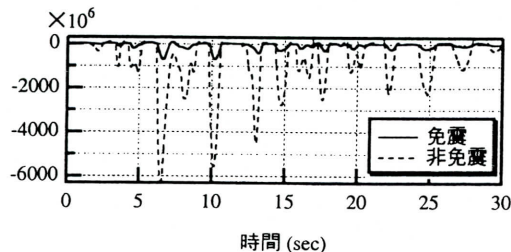


図-3 ケーソン下部における軸ひずみの時刻歴応答