

矩形断面トンネルに対する周辺地盤補強と免震構造による地震時断面力の比較

(株)熊谷組技術研究所 正会員 鈴木 猛康

1. はじめに

矩形断面トンネルの地震時横断面変形では、地震荷重に占める周面せん断力の割合が大きいため、地盤とトンネルをせん断方向で絶縁する免震構造の適用が有効であることが知られている^{1),2)}。免震構造は、新設のトンネルを対象として施工法が開発されているが³⁾、既設トンネルに対する適用は困難である。既設トンネルの耐震補強はトンネル内の部材の補強によって行われてきたが、建築限界等によりトンネル内での補強が困難な場合には、有効な耐震補強方法がないのが現状である。そこで本稿では、地震荷重のうち地盤の変形(相対変位)に着目し、構造物に作用する変位を低減させるトンネル外周地盤の補強による地震時断面力の低減を算定し、免震構造との比較を行ったので報告する。

2. 解析モデルおよび解析条件

解析の対象とするのは、図-1に示す中柱を有する開削トンネルである。表層地盤は層厚15m、ヤング率 $E=1000\text{kgf/cm}^2$ 、単位体積重量 1.7tf/m^3 、ポアソン比0.48の均一地盤とした。また、トンネルは表層地盤のせん断変形の影響が比較的大きくなるように基盤に近い位置に埋設するものとした。解析は、周辺地盤を平面ひずみ要素、トンネル部材を梁要素でモデル化した2次元有限要素モデルを用いて実施する。

図-1に示すように地表面で300galとなる正弦波状の水平加速度分布を仮定し、これをモデル全体に亘って作用させたときの地盤慣性力を、地震荷重として解析モデルの各節点に静的に作用させることにより、地盤およびトンネルの変形を線形で解析した。

図-2に示すように、トンネル側壁より2mの地盤を改良した改良パターン(Type-1)とトンネル全外周を2mの幅に亘って地盤改良した改良パターン(Type-2)を想定し、それぞれの解析モデルにおいて改良範囲をもとの表層地盤の10倍から1000倍までヤング率を増大させた7ケースについて解析を実施した。これらに、地盤改良を行わない基本ケースと、トンネル外周に10cmの幅に亘って $E=9\text{kgf/cm}^2$ の免震層を形成させた免震構造のケースを加えた16の解析ケースについて検討を行った。

3. 解析結果と考察

トンネル中心位置における上床版~下床版間の水平相対変位、トンネル部材の断面力に関し、地盤改良および免震構造を適用しない基本ケースに対する各解析ケースの最大値の比を求め、解析結果を整理することとした。図-3は、横軸に基本ケースに対する地盤改良部のヤング率の比 E_R を取り、地盤改良による上記の相対変位 RD_R の変化を示したものである。図のように側壁の外側のみを地盤改良するType-1の改良パターンでは、 E_R を1000倍とした場合でもトンネルの相対変位をせいぜい60%までしか低減できていない。これに対して全周に亘って地盤改良を行うType-2のパターンでは、 E_R が100倍で相対変位が40%まで低減し、さらに E_R が1000倍では10%近くまで相対変位が低減できており、地盤改良が地震荷重の1つである地盤変位の低減に有効であることがわかる。以下、トンネルの相対変位が明らかに低減するType-2の地盤改良パターンに着目して、解析結果を考察する。

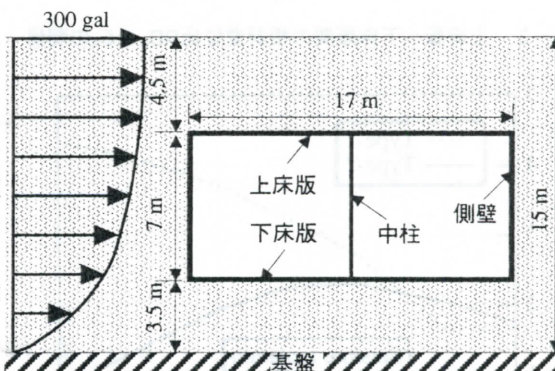


図-1 解析対象地盤およびトンネル

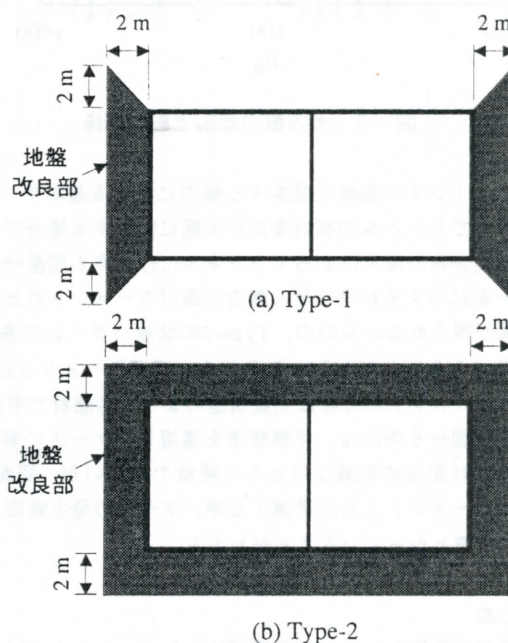


図-2 地盤改良パターンのタイプ

Effect Evaluation by Applying Soil Improvement in Comparison with the Seismic Isolation Method regarding Tunnels with Rectangular Cross-section; Takeyasu SUZUKI (Technical Research & Development Institute, Kumagai Gumi Co., Ltd.)

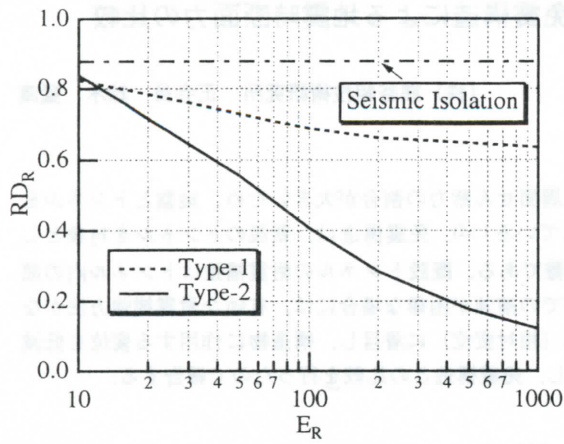


図-3 上床版～下床版間の相対変位比 RD_R と E_R の関係

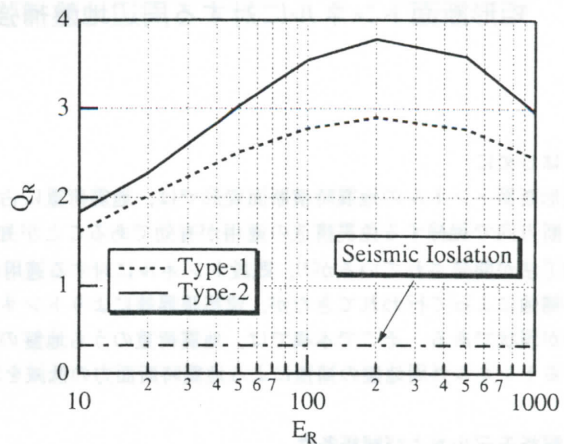


図-4 軸力比 Q_R と E_R の関係

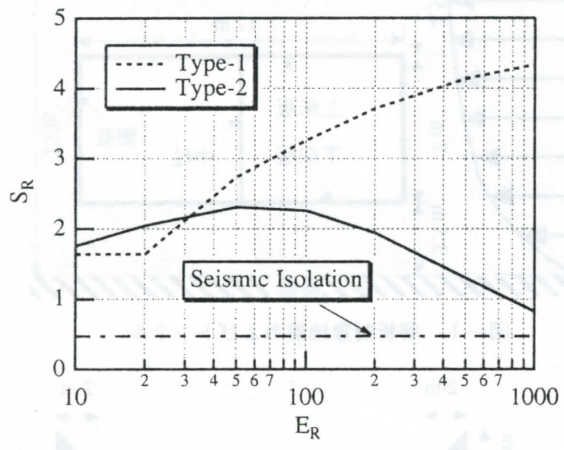


図-5 せん断力比 S_R と E_R の関係

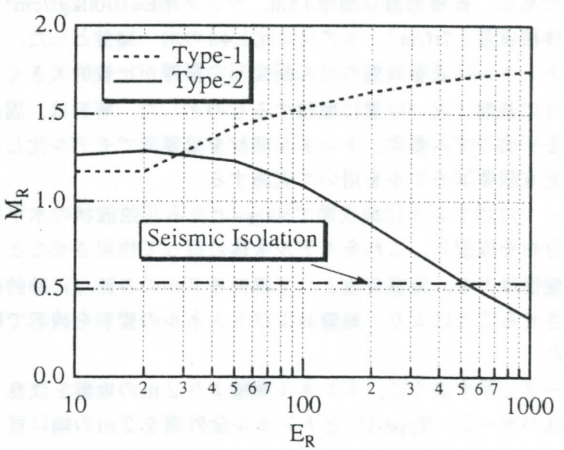


図-6 曲げモーメント比 M_R と E_R の関係

図-4 にトンネル部材に発生する軸力に関する基本ケースとの比 Q_R と E_R の関係を示す。図のように、Type-2の地盤改良のケースでトンネルの相対変位が大幅に低減する場合でも、軸力は基本ケースを下回ることはなく、地盤改良によるせん断弾性係数の増大によってトンネルに作用する周面せん断力は増大していることがわかる。これに対して図-5および図-6に示すそれぞれせん断力と曲げモーメントの比 S_R 、 M_R に関しては、側壁付近のみを改良するType-1ではほとんど効果が得られないものの、Type-2の改良パターンで基本ケースに対して E_R を大きくとれば1以下となり、断面力低減に有効であることがわかった。とくに曲げモーメントに関しては、 $E_R=500$ 程度で半減させることが可能である。なお、曲げモーメントの分布は免震構造のように各部材で平滑化されるわけではなく、コーナー部に集中する。

図-3～図-6中には、免震構造を適用したケースの解析結果 (Seismic Isolation) も示しているが、免震構造ではトンネルの相対変位の低減はほとんど期待できないが、周面せん断力の低減によって軸力が大幅に低減し、またせん断力、曲げモーメントともに半減する等、すべての発生断面力の低減が達成されており、矩形断面トンネルに対して効果的な地震対策となっていることがわかる。

4. まとめ

矩形断面の既設トンネルの耐震補強として、トンネル外周の2 m程度の領域をトンネル全周に亘って地盤改良し、地震荷重としての地盤変位低減によるトンネルの地震時断面力低減効果について、数値解析によって検討した。その結果、トンネル部材の曲げモーメントの低減に関して比較的有効であることが認められた。一方、地震荷重のうち周面せん断力の低減を目的とした免震構造は、軸力、せん断力、ならびに曲げモーメントのすべてを低減させることができ、コーナー部における断面力集中を緩和する等、地盤改良とは断面力低減の様態が大きく異なることが示された。

参考文献

1) Suzuki, T.: Damages of Urban Tunnels due to the Southern Hyogo Earthquake of January 17, 1995 and the Evaluation of Seismic Isolation Effect, Proc. 11WCEE, Acapulco, Mexico, 1996. 2) 粕田他：矩形断面トンネルの免震構造に関する模型振動実験，土木学会第1回免震制震コリキウム論文集，pp.109-116, 1996. 3) 建設省土木研究所他：地下構造物の免震設計法マニュアル（案），共同研究報告書 整理番号211号，平成10年9月