

I-B 437 免震層と弾性ワッシャー併用によるシールドトンネルの地震時断面力低減効果

熊谷組技術研究所 正会員 鈴木 猛康

1. はじめに

シールドトンネルは縦断方向で、しばしば地震時に過大な断面力の発生が想定され、耐震対策が必要とされている。近年継手のワッシャーに大きな変位吸収性能を持たせてフレキシブル構造（弾性ワッシャー）とし、シールドトンネルの柔構造化を図って地盤震動に対する追従性を高めると共に、継手で集中的にトンネルひずみを吸収することにより、セグメントに発生する地震時断面力を低減させる方法が採用されている。一方、トンネル外周に免震層を形成させ、地震時に局所的に集中した地盤ひずみを吸収し、トンネルへの伝達を低減させる免震構造がある<sup>1)</sup>。免震構造の適用効果の1つとして、トンネル外周のせん断抵抗をカットすることにより、トンネルひずみの継手部による集中的な吸収効率を高めることがある。そこで本稿では、柔構造化と免震化という2つの異なる技術を併用することによるシールドトンネルの地震時断面力低減効果を検討したので報告する。

2. 数値解析

解析の対象とする地盤は、図-1に示すようにモデルの中央で90度の角度で左右の剛性が急変する地層境界を有する表層地盤であり、境界より左側が $V_s=120\text{m/sec}$ 、右側が $480\text{m/sec}$ の層厚30mの堆積層が剛な基盤の上にあるものとした。水平方向の解析領域は地層境界部より左右に約40mの区間である。シールドトンネルは外径5m、けた高27.5cmのRCセグメント製とし、リング継手の剛性はセグメント部の1/30と設定した。

表層地盤とシールドトンネルの相互作用を解析で考慮するため、図-2に示すように表層地盤を含めて軸対称FEM<sup>2)</sup>でモデル化した。この場合、実際にモデル化されるのは、基盤からシールドトンネルの中心までの15mである。免震を適用する範囲は、地層境界部の軟弱層側10mと硬質層側5mの計15mの区間とし、この免震適用区間とその外側5mではセグメントリング（1m）とリング継手を個別にモデル化し、それ以外はセグメントリング～継手による直列ばねの等価剛性に相当するヤング率を算定して与えた。とくに地層境界部の5m区間については、セグメントリングを2分割している。シールドトンネルの外周は10cmの厚みで要素分割を行い、免震区間にはこの要素にせん断弾性係数 $G_1=5\text{kgf/cm}^2$ を与えた。免震区間以外ではここに裏込め材として $G=1000\text{kgf/cm}^2$ を与えた。

地震荷重はここでは簡単のため、基盤においてモデルの左方向に0.3の震度を与える地盤応答震度法とした。表層厚30mに震度0.3が作用したときの慣性力による地震荷重の総和が解析モデルのそれと等価となるよう、実際には震度0.3の $\alpha$ 倍の震度を与えている。

解析ケースは、通常のリング継手を用い上記の免震適用区間で免震層が有り無

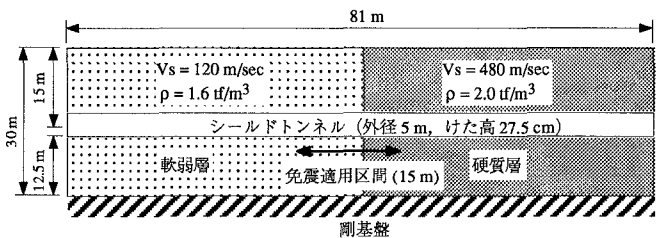


図-1 解析対象とする表層地盤モデルとシールドトンネルの配置

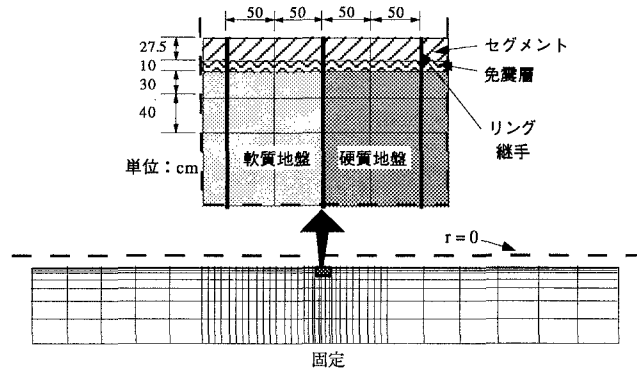


図-2 軸対称FEMによるメッシュ分割図

しの2ケースと、弾性ワッシャーの適用を想定してリング継手の軸剛性をさらに1/10（セグメント部の1/300）として免震適用区間で免震層が有り無しの2ケース、合計4ケースであり、これらの4ケースのトンネルに発生する軸力を比較することによって、免震層と弾性ワッシャー併用の地震時軸力低減効果を示すことにする。

### 3. 解析結果

図-3は通常のリング継手を採用したときのトンネルの軸力（引張）分布を、免震層の有無で比較して示したものである。免震適用区間における軸力について2つのケースの解析結果を比較すると、免震層ありのケースではスムーズな軸力分布となっているのに対し、免震層なしのケースでは軸力分布がぎざぎざな形状となっていることがわかる。これは前述のように、周辺地盤によるせん断抵抗のために継手が期待された変位吸収を十分行っていないことに起因して起こる現象であり、このためセグメントの軸力は地盤ひずみの集中部で非常に大きくなる。これに対して免震層を形成させると、継手の変位吸収効率がほぼ100%発揮されるため、軸力の分布は滑らかで連続的となり、軸力は免震層なしのケースと比較し、軟弱層側のピーク発生位置で半減する結果となった。

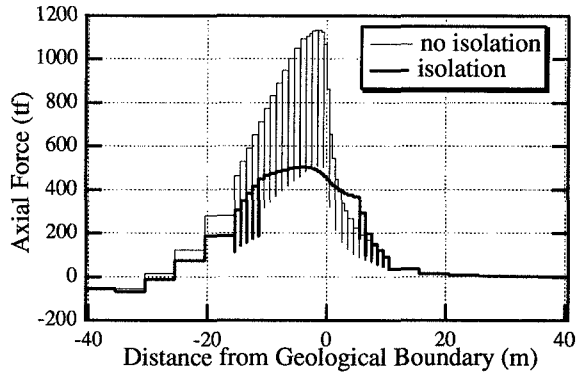


図-3 免震層による軸力低減効果

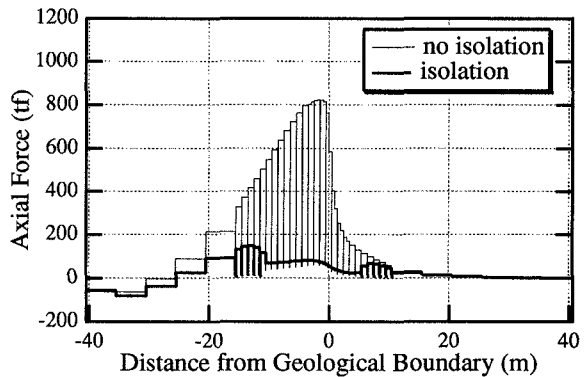


図-4 免震層と弾性ワッシャーによる軸力低減効果

図-4は弾性ワッシャーを採用したときのトンネルの軸力（引張）分布を、免震層の有無で比較して示したものである。図-4のように弾性ワッシャーを適用しても非免震の場合は、継手部では確かに大きな軸力低減が得られているが、セグメント部ではせいぜい図-3の通常の継手を適用したケースの2割程度しか低減しておらず、断面力低減効果はあまり大きくない。これに対して図-4で弾性ワッシャーと免震を併用した場合は、セグメント部と継手部で軸力の不連続性がなくなり、免震適用区間では1オーダー軸力を低減させており、さらに非免震区間でも全体的に大きな軸力の低減が達成されていることがわかる。

4. まとめ：以上のように、弾性ワッシャーと免震構造を併用することは、両者のトンネル断面力低減効果が単純に加算されるわけではなく、両者の相乗効果によってシールドトンネルの地震時断面力を飛躍的に低減させるため、地震対策として非常に有効かつ確実である。また免震層は変形性能に富んだ止水性の高い免震材<sup>3)</sup>で形成されるため、リング継手で大きなひずみを吸収した場合でも、漏水に繋がる危険性がなく、地下構造物の機能保持の点でもメリットは大きい。なお本研究は、建設省土木研究所、(財)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」の一環として行なわれたものである。

### 参考文献

- 1) 鈴木延康, 田村重四郎: 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.275-85, 1995.
- 2) 鈴木延康: シールドトンネル軸方向の耐震性評価に関する考察, 土木学会論文集, No.441/I-18, pp.137-146, 1992.
- 3) 鈴木延康, 柏田金一, 小林正宏, 福田健, 池野正行: 都市トンネルの免震構造のためのシリコン系材料に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.534/VI-30, pp.69-76, 1996.