

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では神戸高速鉄道・大開駅が崩落し、地下鉄神話が崩壊したとさえ言われ、開削トンネルの耐震性が問われる結果となった。地上の交通手段が損傷を受けた際の代替交通手段として地下鉄の果たす役割は大きく、地震に対して万全の安全策を講じておく必要がある。筆者らはトンネル外周に軟らかな免震層を形成することによる都市トンネルの免震構造を提案し、シールドトンネルを対象として円形断面のトンネルの免震構造の効果を検討してきたが¹⁾、本稿では共同溝や地下鉄等で矩形断面の都市トンネルに対し、免震構造を適用した場合の免震効果について考察を行ったので報告する。

2. 免震構造の概要

本稿で提案する免震構造とはFig.1に示すように、トンネル躯体と周辺地盤の間に厚み5～10cm程度の軟らかな免震層を形成するものである。円形断面のトンネルでは、地震時横断面変形の際ロッキング振動が発生するため、トンネル外周の周面せん断力によるトンネル変形は比較的少なく、免震構造は軸方向のトンネル断面力の低減が主目的となる¹⁾。しかし矩形断面のトンネルでは、免震層が円形断面のトンネルと同様に軸方向の断面力の低減に有効であるのは勿論のこと、地震時横断面変形による断面力発生に及ぼす周面せん断力の貢献度が高くなるため、地震時横断面変形による躯体の断面力低減にも有効と言える。すなわち、Fig.2のように地盤が左から右へとせん断変形する際、トンネルはこの水平変位と周面せん断力を外力として受けてせん断変形することになるが、免震層が介在することによって、構造物に伝達される変位が軽減され、なおかつ周辺せん断力を大幅に低減させることが可能となるはずである。本稿ではこのような免震効果を、数値解析的に示すことを以下で試みた。

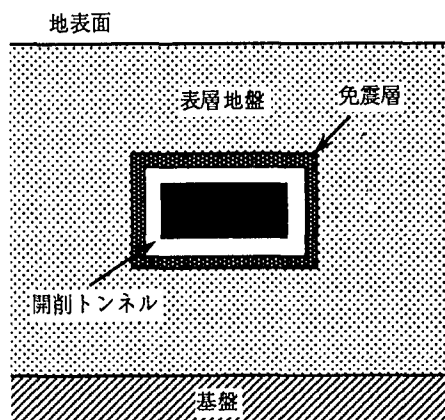


Fig.1 トンネル免震構造の概念図

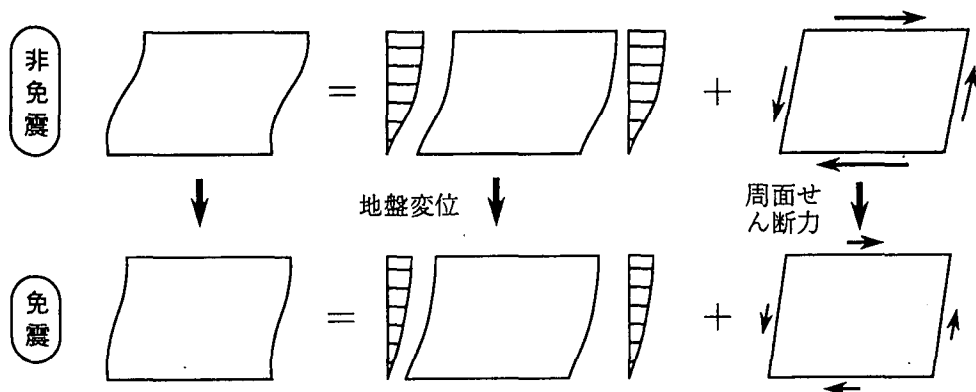


Fig.2 地震荷重の低減による地震時トンネル横断面変形に対する免震構造の効果

3. 地震被害と解析条件

兵庫県南部地震における地下鉄の被害を整理してみると、(1)中柱のせん断破壊、(2)側壁上、下部におけるトンネル軸に沿って見られる曲げ破壊、(3)トンネル全周に亘る引張クラックに大別される。(1)は大開駅の崩落の直接的な要因であると考えられ、また大開駅～高速長田駅間のトンネル部でもとくに柱脚部で多く確認された。(2)は同トンネル部のほぼ全区間に亘って確認され、とくに側壁下部で顕著であった。Photo.1に代表的な側壁の被害例を示す。(1)、(2)は地盤のせん断変形に伴う地震時横断面変形を主因とする破壊性状であり、(3)はトンネル軸変形に起因する被害と考えられる。なお、トンネルに発生した縦クラックの分布と幅を、大開駅ならびに高速長田駅より50mの区間で測定し、クラック幅の累積値を測定長さ50mで除してこれを軸ひずみに換算した結果、大開駅側で 340μ 、高速長田駅側で 220μ という数値が得られている。

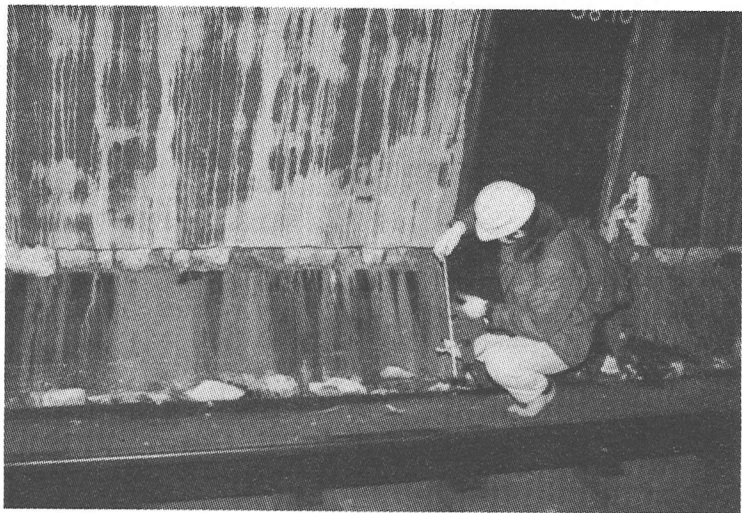


Photo.1 側壁下部の曲げによる水平クラック

本稿では、上記3つの被害形態のうち、(1)、(2)の横断面変形に着目し、数値解析を実施した結果を用いて、免震構造の効果について示す。解析モデルは駅部の標準的な断面であり表層地盤はFig.3に示すように20mの表層厚を有する地盤で、駅部躯体は土被り4.8mで埋設されている。地盤を平面ひずみ要素、躯体をbeam要素とし、中柱の間隔3.5m分についてモデル化を行い、2次元の線形問題として取扱った。解析では片山ら²⁾の提案している擬似動的な解析法である応答震度法と、水平、上下の地震動入力による地震応答解析の2種類を実施した。応答震度法による解析の入力地震波は気象庁・神戸海洋気象台の観測波のうち水平NS成分を、地震応答解析の入力地震波はこの水平動に加えて同気象台の上下UD成分を上下動として入力した。

免震構造を適用した場合の解析ケースでは、Fig.3の地下鉄駅部解析モデルの躯体の外周に、ヤング率 $G=5\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.48、単位体積重量 1.3gf/cm^3 の免震層を厚み10cmで形成させてモデル化した。このように免震構造とした場合の躯体の断面力を解析し、免震層なしの場合と比較することによって、地震時横断面変形における免震構造の効果を示すことにした。なお、このような物性を有する免震材としてはシリコンゴム組成物を開発中であり、物

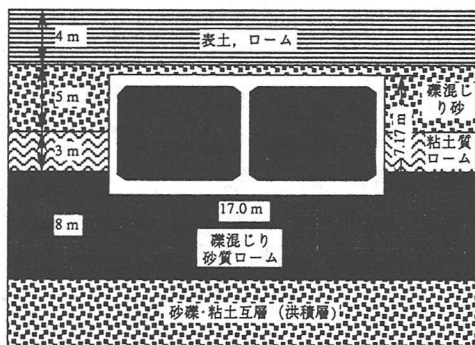


Fig.3 解析モデル

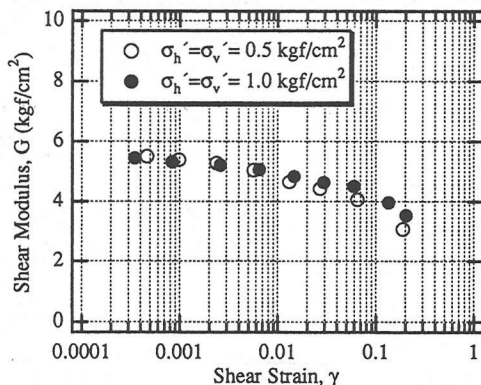


Fig.4 免震材料のせん断弾性係数

アソン比0.48、単位体積重量 1.3gf/cm^3 の免震層を厚み10cmで形成させてモデル化した。このように免震構造とした場合の躯体の断面力を解析し、免震層なしの場合と比較することによって、地震時横断面変形における免震構造の効果を示すことにした。なお、このような物性を有する免震材としてはシリコンゴム組成物を開発中であり、物

性試験や施工性確認実験を行い、免震材として使用可能であることを確認済みである³⁾。Fig.4にシリコン系免震層材料の代表的な物性を示す。

4. 解析結果と免震効果の評価

まず応答震度法を用いた解析結果について説明する。Fig.5に応答震度法で慣性力の設定に用いた地盤加速度の鉛直プロファイルを示す。解析で得られた躯体の断面力の分布を、免震層なしのケースは点線で、免震構造のケースは実線で表し、比較したものがFig.6である。ただしFig.6中の中柱の断面力分布については10倍に拡大している。この図より明らかなように免震構造を適用することにより、上床版、下床版ならびに側壁の断面力は、とくに断面力の大きなコーナー部で大幅に低減しており、免震効果が高いことがわかる。これに対して中柱では、免震構造としても断面力の低減は少なく、前述の地震荷重の中の応答変位の低減はあまり生じてあらず、一方周面せん断力の低減が大きく断面量の低減に貢献していることが推察できる。免震層がない場合はある場合と比較して、コーナー部で躯体が地盤から受ける拘束力がとくに大きいのが、免震層の形成によりこの拘束力が低減され、断面力の分散が生じたものと思われる。なお、免震層のポアソン比を0.3としたケースについても解析を実施したが、結果はほとんど変わらないことを確かめている。

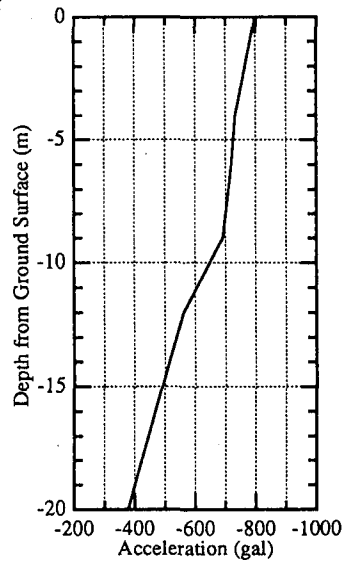


Fig.5 地盤加速度のプロファイル

地震応答解析では、解析モデルの左右境界までの距離を十分にとり、なおかつ左右境界には粘性境界とした。下部境界は固定としたが、予め一次元重複反射理論にしたがって観測波の1/2を洪積基盤に入射させたときの基盤の応答を求めておき、これを地動として基盤入力することにより、地盤～構造物系の地震応答を逐次積分法によって求めた。Fig.7に設定した入力地震動を示す。

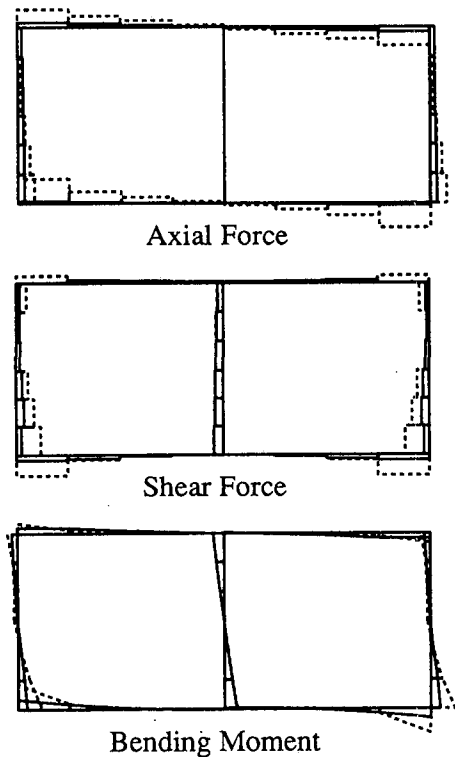


Fig.6 免震層の有無による発生断面力の比較

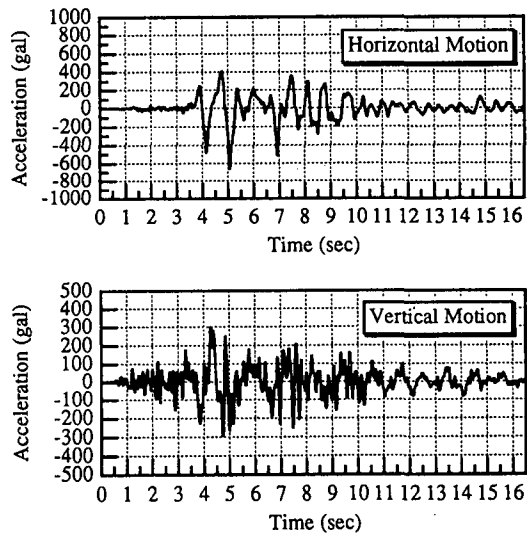


Fig.7 入力地震動

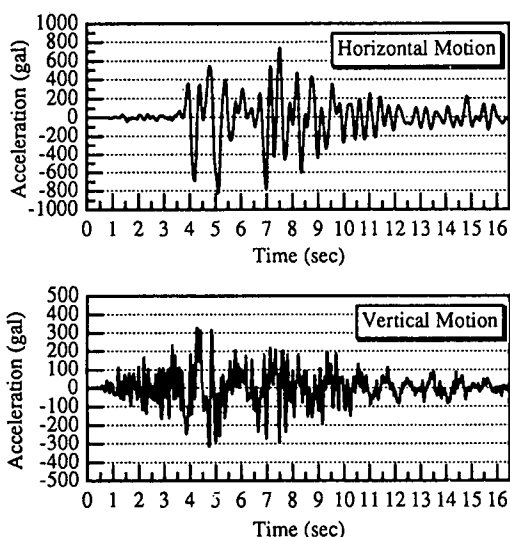


Fig.8 地表面の加速度時刻歴応答波形

地震応答解析によって得られた地表面における加速度応答波形をFig.8に示す。図のように、加速度の水平成分は増幅し800galを超えているが、上下動はほとんど増幅していないことがわかる。

Fig.9に、もっとも大きな断面力が発生する側壁下部(右側壁ハンチ部上部)における軸力、せん断力、曲げモーメントの時刻歴応答波形を、免震層の有無で比較して示した。ただし、これら断面力は単位奥行き(1cm)当りの数値であり、破線が免震層なし、実線が免震構造を表している。これら断面力の時刻歴応答特性を見ると、Fig.8の地表面加速度波形の水平成分と同位相あるいは逆位相となっており、地盤の水平せん断振動を主因として断面力が発生していることが明らかで、上下動の影響は軸力の時刻歴応答波形の4秒以前に現れているのみである。免震構造とした場合、Fig.9の4～10秒のもっとも大きな断面力の発生が見られる時間帯で、3種類の断面力とも1/3～1/2に低減しており、免震構造が有効であることがわかる。

5. まとめ

本稿では、開削トンネルに対し免震構造を適用した場合の免震効果を、数値解析によって検討した。その結果、矩形断面のトンネルに免震構造を適用した場合、トンネルの地震時横断面変形に伴う周面せん断力が低減され、トンネル断面力の集中するコーナー部で大幅な断面力の低減を図ることが可能であることが示された。

参考文献

1)鈴木他：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(投稿中)，2)片山他：地中掘設構造物の実用的な準動的解析法「応答震度法」の提案，第40回土木学会年次学術講演会，第一部，pp.737-738，1985，鈴木他：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(投稿中)

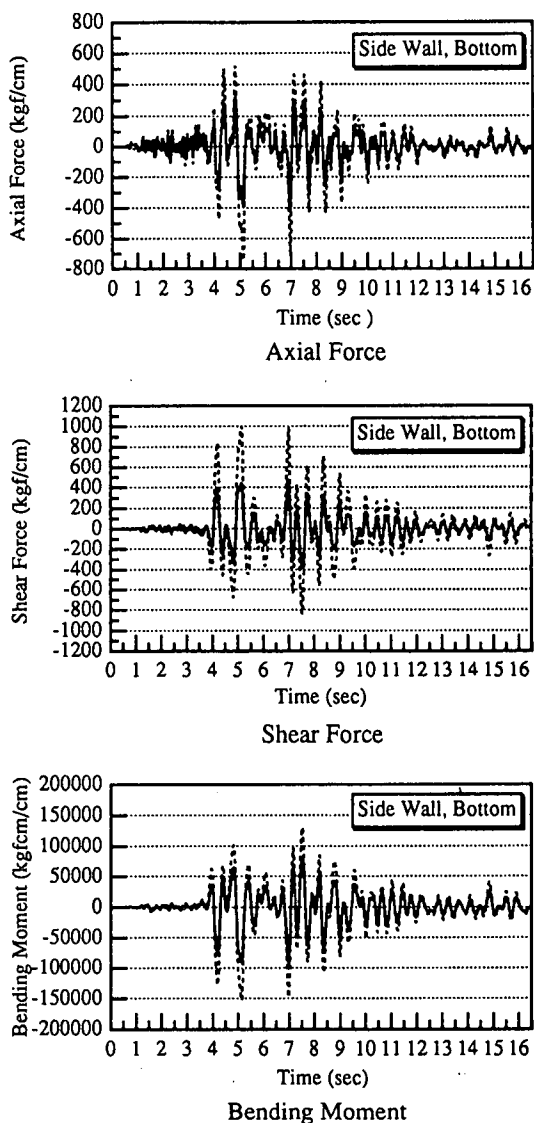


Fig.9 側壁下部の断面力に見られる免震効果

免震効果
3種類の断面力とも1/3～1/2に低減しており、免震構造が有効であることがわかる。