

免震構造を設けた矩形断面トンネルの地震応答に及ぼす剛性の影響

Effects of Tunnel Rigidity for earthquake Responses of Seismically Isolated Rectangular Shaped Tunnels

粕田金一¹⁾、 鈴木猛康²⁾

Kin-ichi KASUDA¹⁾ and Takeyasu SUZUKI²⁾

1) 熊谷組技術研究所 地下技術グループ、副長 工修

Deputy Manager, Technical Research & Development Institute, Kumagai gumi Co.,Ltd., M.Eng.

2) 熊谷組技術研究所 土木耐震研究グループ、課長 工博

Manager, Technical Research & Development Institute, Kumagai gumi Co.,Ltd., Dr.Eng.

要約

矩形断面トンネル横断面方向の免震効果の検証を目的として、等価線形解析による動的FEM解析を実施した。トンネルの見かけ剛性が周辺地盤の剛性よりも大きな場合、小さい場合の2種類のトンネルを想定し、それぞれ免震層を設置した場合と免震層を設置しない場合の2つのケースの各種応答値を比較することにより検討を実施した。その結果、トンネルと周辺地盤の相対的な剛性比によらず、免震層は地震時の曲げモーメント、せん断力およびに関して大きな低減効果があること、免震層による断面力低減効果は主にトンネルに作用するせん断土圧の低減によりもたらされることが明らかとなった。

SUMMARY

To verify the seismic isolation effect in the transversal direction of rectangular shaped tunnels, dynamic FEM analyses were conducted using an equivalent linear method. Two tunnels were modeled for the analyses, one's rigidity is larger than that of the surrounding soil and the other is smaller. Two cases were adopted for each tunnel model, the one in which the tunnel was seismically isolated by a soft isolation layer and the other was non-isolated. As a result of comparing section forces and earth pressures acting on the tunnels, it was shown that the isolation layer reduced bending moment and shear force remarkably, and such reduction effect was mainly brought about by the reduction of tangential earth pressure.

1. はじめに

筆者らは、これまで地中構造物の地震時断面力の低減を図る一つの手法として、地中構造物の外周に柔らかな免震層を形成することによる地中構造物の免震化手法を提案してきた^{1),2)}。数値解析の結果により、この免震化手法は免震層による地震時周面せん断力の低減と断面力の平滑化によって、構造物長手方向のみならず横断面方向についても大きな断面力低減効果を示すことが明らかとなった。また、模型振動実験を行い、数値解析によって示された矩形断面トンネル横断面方向の免震効果の検証を行い、免震層による断面力およびせん断土圧低減効果を実験的に確認した³⁾。

本研究は、矩形断面の開削トンネル横断面方向の免震メカニズムを説明することを目的として、トンネルの見かけ剛性が周辺地盤の剛性よりも大きな場合および小さな場合の2種類のトンネルを想定し、それぞれ免震層を設置した場合と免震層を設置しない場合の2つのモデルに対して動的FEM解析を実施した。解析で得られたトンネルの変形、トンネル周辺の応力・ひずみ分布、トンネルの断面力など各種応答値を比較することによって、免震と非免震のケースの比較による免震効果を定量的に評価するとともに、剛性の異なる2つのトンネルを比較することにより、トンネルの見かけ剛性と周辺地盤の剛性との関係が免震効果に及ぼす影響についても考察した。

2. 解析条件と解析手法

本検討における解析条件と解析手法を以下に示す。

a) 対象構造物

検討対象とした構造物は、共同溝に代表される幅10m×高さ5m(側壁厚75cm、隔壁厚37.5cm)の2連の矩形断面のRC製開削トンネルを想定した。本検討では、構造物の材料非線形性は考慮せず、トンネルは初期剛性を用いた線形材料として解析を行った。トンネルと免震層の断面図を図-1に示す。

地中構造物の地震時の応答性状は、構造物の見かけの剛性と周辺地盤の剛性との比に大きく影響を受けることが指摘されている(4,5)。本研究では、トンネルの見かけ剛性と周辺地盤の剛性比が免震効果に及ぼす影響を調べるために、トンネルの見かけ剛性が周辺地盤の剛性よりも大きなケースと小さなケースの2つについて検討を実施した。以下では、トンネルの見かけ剛性が周辺地盤の剛性よりも大きなモデルを“高剛性トンネル”と呼び、周辺地盤の剛性よりも小さなモデルを“低剛性トンネル”と呼ぶことにする。本研究では、設定した周辺地盤の初期剛性(735kgf/cm²)に対して、トンネルの見かけ剛性を高剛性トンネルでは1075kgf/cm²とし、低剛性トンネルではトンネルの壁厚は変化させずに仮想的にトンネルの見かけ剛性を高剛性トンネルの1/10の107.5kgf/cm²と設定した。

b) 解析用地盤条件

表層地盤は密度1.528t/m³、S波速度217m/sec、せん断弾性係数735.5kgf/cm²の均一な砂質地盤とした。上記物性値から算定される表層地盤の1次固有振動数は3.6Hzである。等価線形解析に用いる地盤の動的変形特性は豊浦標準砂の実験結果(6)に基づいて設定した。

表層地盤の厚さは15mであり、土被り厚5mで表層地盤の中央の深度にトンネルが設置される条件とした。トンネルの設置位置および解析モデルを図-2に示す。

c) 免震材料

免震材料は、密度1.2t/m³、せん断弾性係数G=3.35kgf/cm²、ヤング率E=9.98kgf/cm²の物性をもつ弾性材料を想定した(7)。地盤の初期物性値に対するせん断弾性係数の比は、1/220である。免震層の厚さは25cmであり、図-1に示すようにトンネル全周にわたり配置した。

d) 解析手法

解析手法は、複素応答法による2次元動的FEM解析であり、図-2に示すように地盤および免震層を2次元平面ひずみ要素で、トンネルを梁要素でモデル化した。解析は等価線形化手法により行ったが、上述のように地盤の非線形性のみを考慮した。FEMモデルの境界条件は、側面はエネルギー伝達境界、底面は固定境界とした。

e) 入力地震動

入力地震動は表層地盤の1次固有振動数に相当する3～4Hzの短周期成分が卓越する釧路沖地震(1993.1.15, M7.8)の際に釧路地方気象台において観測された水平EW成分(最大加速度922gal)を最大振幅200galに調整して用いた。入力地震動の時刻歴波形を図-3に、フーリエスペクトルを図-4に示す。

f) 解析ケース

解析ケースは、高剛性トンネルおよび低剛性トンネル

の免震・非免震の計4ケースを実施した。免震および非免震のトンネルの結果を比較することにより、免震層の効果に関して考察し、剛性の異なる2種類のトンネルの結果を比較することにより、トンネル剛性の影響を考察した。なお、以下で取り扱う応答値はすべて地震時増分の値を取り扱うものとする。

トンネル：

$$\rho = 2.5 \text{ tf/m}^3$$

$$E = 2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\nu = 0.2, h = 5\%$$

免震層：

$$\rho = 1.2 \text{ tf/m}^3$$

$$E = 10 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\nu = 0.49, h = 2\%$$

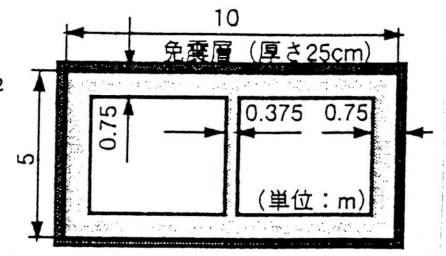


図-1 トンネル横断面図

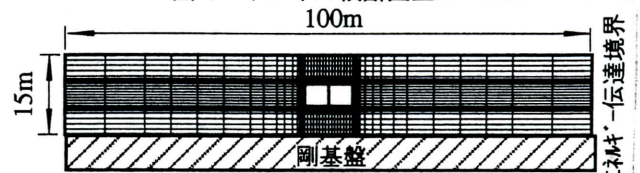


図-2 解析モデル図

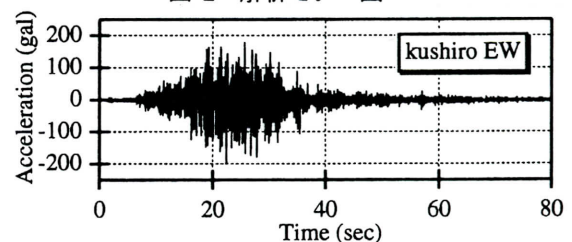


図-3 入力地震動の時刻歴波形

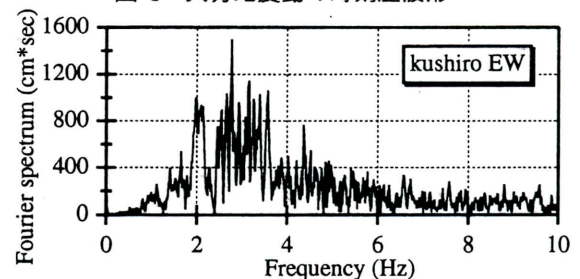


図-4 入力地震動のフーリエスペクトル

3. 解析結果

本検討では、主にトンネル頂版～底版間に最大相対変位が発生する時刻における加速度、相対変位、断面力、応力およびひずみの応答値に基づいて考察を行う。解析結果より、高剛性トンネルでは非免震のケースが $t=25.92$ 秒、免震のケースが $t=25.72$ 秒に、低剛性トンネルでは非免震・免震のケースともに $t=25.94$ 秒にトンネル頂版～底版間に最大相対変位が発生する。また、以下においては最大相対変位発生時刻における作図の際に両ケースの比較を容易にするために、地盤およびトンネルが左側にせん断変形している状態に各応答値の符号を統一した。

3.1 地盤・トンネルの加速度、相対変位

FEM解析の結果得られた加速度・相対変位について以下に考察する。側壁上端位置における水平動の伝達関数をそれぞれ図-5、図-6に示し、側壁下端位置における鉛

直動の伝達関数をそれぞれ図-7、図-8に示す。

初めに、自由地盤については、200galの入力に対して地表で305galの最大加速度応答値が得られ、収束物性値は剛性低下率0.27~0.91、減衰定数2.4%~27%の値に収束した。これに対してFEM解析では、トンネル直上の地表面において高剛性トンネルの非免震が302gal、免震が340gal、低剛性トンネルの非免震が330gal、免震が350galの最大加速度応答値が得られ、免震化により10%程度最大応答値が増加する傾向がみられた。高剛性・低剛性のケースともにトンネルの隅角部における地盤の剛性低下率が大きく、免震のケースでは0.3程度、非免震のケースでは0.2程度にまで低下がみられた。

次に、トンネル側壁位置での伝達特性について考察する。図-5、図-6に示す伝達関数よりこの表層地盤の卓越振動数が約2Hzであり、図-4に示した入力地震動の卓越振動数とはほぼ一致していることがわかる。高剛性・低剛性のケースともに非免震のケースの伝達関数は、自由地盤の伝達関数と顕著な差はなく、非免震トンネルの応答は、基本的には周辺地盤の応答に支配されている。

免震トンネルの伝達特性は、高剛性・低剛性のケースともに自由地盤に見られる2Hz付近の地盤のせん断振動の卓越振動数は変わらないが、免震層設置により高剛性のケースでは6.6Hz付近に、低剛性のケースでは9Hz付近に伝達関数の2次のピークが現れる。このピークは図-7、図-8の鉛直方向の伝達関数におけるピークと一致しており、ロッキング的な振動のモードと考えられる。免震化により生じる2次のピークは増幅倍率が小さく、1以下であるため、高振動数域での応答が問題となる場合を除けば、トンネルの振動に及ぼす影響は一般に小さいと考えられる。

次に、地盤の加速度、相対変位分布について考察を行う。トンネル側壁に沿った鉛直線上および自由地盤においてトンネル頂版~底版間に最大相対変位が発生する時刻の加速度分布、相対変位分布をそれぞれ図-9~図-12に示す。まず、高剛性トンネルについて考察すると、図-9、図-10より非免震のケースでは、トンネルの見かけ剛性が周辺地盤の初期剛性よりも大きいため、自由地盤の応答と比べてトンネル頂版~底版間の応答値の増加率が低下し、トンネル頂版、底版位置で加速度分布、相対変位分布に折れ曲がりが見られる。一方、免震層を設置したケースでは免震層が大きくせん断変形する影響により、上に述べたトンネルの頂版、底版の深度での加速度分布、相対変位分布の折れ曲がりが見られ、大きな水平変位が発生するが、トンネルの底版より下部および頂版より上部の地盤では、非免震のケースとは逆に応答値の増加率が自由地盤の応答よりも低下し、トンネル頂版~底版間の増加率も自由地盤、非免震のケースより低下することがわかる。

これに対して低剛性トンネルでは、図-11、図-12より、免震、非免震ともにトンネル頂版、底版位置で加速度分布、相対変位分布に折れ曲がりが見られる点は共通であるが、トンネルの見かけ剛性が周辺地盤の初期剛性よりも小さいため、自由地盤の応答と比べてトンネル頂版~底版間において応答値は増加し、逆にトンネルの下部お

よび上部では応答値の増加率が自由地盤よりも低減する傾向がみられた。なお、側壁の剛性が小さいため、トンネル頂版~底版間での側壁自体の変形が高剛性のケースに比べて顕著である。

図-13、図-14は、免震・非免震トンネルの地震応答の位相について考察するために、トンネル側壁上端位置における頂版~底版間の水平相対変位時刻歴の主要部分を示したものである。これより高剛性・低剛性のケースともに、免震および非免震トンネルの時刻歴波形は互いに同位相であり、トンネルは同じ変形モードで振動しており、振幅のみが免震化により減少することがわかる。

最後に、剛性の異なるトンネルの変形状況の違いを調べるために、トンネル頂版~底版間の最大水平相対変位発生時刻におけるトンネル変形図(左半分を表示)をそれぞれ図-15、図-16に示す。図-15に示す高剛性トンネルでは、部材の剛性が高い為変形は直線的で、水平相対変位量は免震の場合が $t=25.72$ 秒において0.128cm、非免震の場合が $t=25.92$ 秒において0.225cmであり、このとき側壁下端部の鉛直相対変位量は免震の場合が0.056cm、非免震の場合が0.079cmである。相対変位量を免震/非免震の最大値の比で比較すると、水平相対変位で0.57倍、鉛直相対変位で0.69倍となり、免震層の設置によってトンネルの相対変位量は水平方向、鉛直方向ともに半分近くに低減されることがわかる。

高剛性トンネルの変形状況と異なり、図-16に示す低剛性トンネルでは部材の剛性が小さく、隅角部の変形拘束効果が相対的に大きいことにより隅角部とスパン中間部間でトンネル壁面が大きく変形し、単純なせん断変形ではないことを示している。水平相対変位量は免震の場合が0.719cm、非免震の場合が0.888cmであり、このとき側壁下端部の鉛直相対変位量は免震の場合が0.025cm、非免震の場合が0.086cmである。相対変位量を免震/非免震の最大値の比で比較すると、水平相対変位で0.81倍、鉛直相対変位で0.29倍となり、免震層の設置によってトンネルの相対変位量は水平方向、鉛直方向ともに低減されるが、ロッキング的な振動が小さく、水平方向の変位が支配的であるため、低剛性トンネルでは免震層による相対変位低減効果は高剛性トンネルよりも小さい。

3.2 トンネルに作用する土圧分布

頂版、側壁、底版に隣接する要素を対象としてトンネル壁面に作用するせん断応力 τ_{xy} および直応力 σ_x, σ_y について議論する(添字 x, y はそれぞれ水平、鉛直方向を示す)。ここでいうせん断応力はトンネルに作用するせん断土圧の地震時増分に相当し、直応力の内でトンネル壁面に垂直な成分は直土圧の地震時増分に相当するものである。図-17~図-20に最大相対変位発生時刻のせん断応力 τ_{xy} および直応力 σ_x, σ_y の分布図を示す。図示はいずれもトンネルの左半分を示し、直応力については各壁面の外側のプロットを圧縮、内側を引張として図示した。

図-17、図-19から高剛性・低剛性のケースともに、免震層のせん断応力はトンネル全周にわたり非免震の場合の20%前後の値にまで低減し、特に側壁での低減効果が大きく、底版でやや小さい。これより免震層はトンネルのせん断土圧低減に大きな効果があることがわかる。

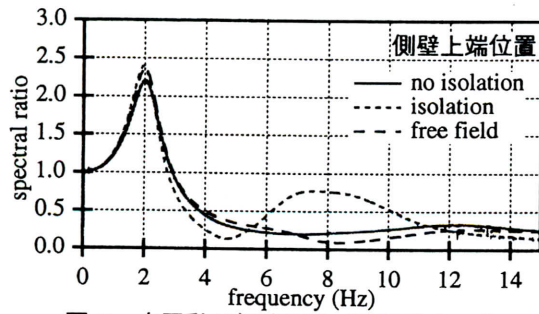


図-5 水平動の伝達関数 (高剛性トンネル)

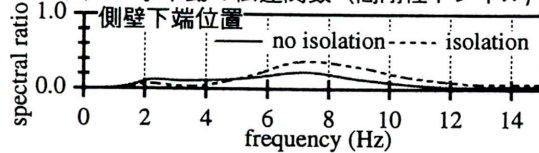


図-6 鉛直動の伝達関数 (高剛性トンネル)

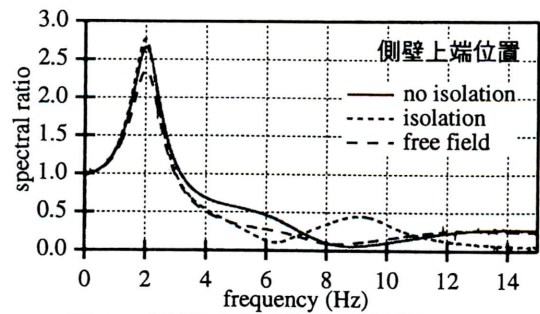


図-7 水平動の伝達関数 (低剛性トンネル)

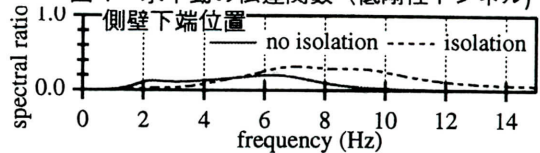


図-8 鉛直動の伝達関数 (低剛性トンネル)

トンネル頂版～底版間最大水平相対変位発生時刻
 — no isolation (FEM, $t=25.92\text{sec}$)
 isolation (FEM, $t=25.72\text{sec}$)
 - - - free field ($t=25.94\text{sec}$)

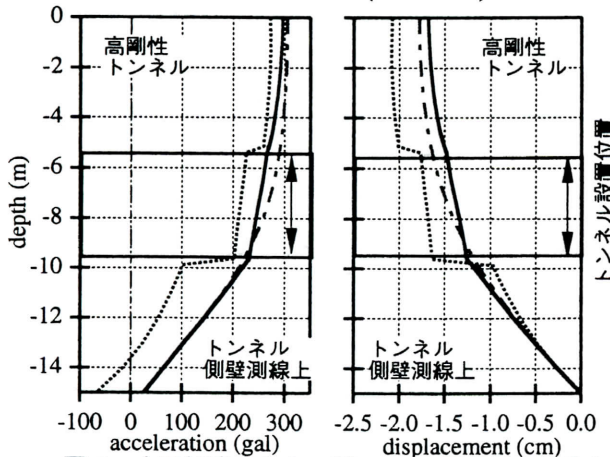


図-9 水平加速度分布 (高剛性トンネル)

トンネル頂版～底版間最大水平相対変位発生時刻
 — no isolation (FEM, $t=25.94\text{sec}$)
 isolation (FEM, $t=25.94\text{sec}$)
 - - - free field ($t=25.94\text{sec}$)

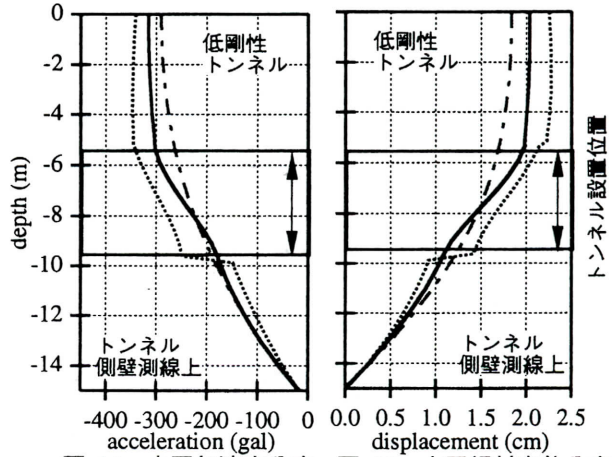


図-11 水平加速度分布 (低剛性トンネル)

次に、高剛性トンネルの直応力は、図-18から免震のケースでは底版側の下側隅角部を除いて非免震の場合の約2倍の直応力が発生しており、側壁の下側隅角部、頂版の上側隅角部での倍率がやや大きい。本検討例では、このように免震、非免震の各ケースにおける発生応力の大小関係はせん断応力と直応力とでそれぞれ逆の傾向を示し、直土圧の絶対値は免震層の設置により底版部を除いて増加する現象がみられた。同様な傾向は、本解析で用いた高剛性トンネルをモデル化した模型振動実験の結果³⁾においてもみられた。直応力の符号は免震・非免震のケースともに、トンネルが左向きにせん断変形する場合には上側隅角部で引張、下側隅角部では圧縮の符号をとり、直土圧がトンネルのせん断変形を増加させる向きに作用していることを示している。このようなトンネルの側壁の上部と下部とで作用方向が逆転する地震時増分土圧の分布は、既往の研究結果⁵⁾においても報告されており、トンネルの見かけの剛性が周辺地盤の剛性よりも大きいことに起因するものである。

一方、低剛性トンネルの直応力は、図-20から非免震の場合には高剛性のケースとは作用方向が逆転し、既往の研究結果⁵⁾と同様な結果が得られた。一方、免震の場合では、直応力の作用方向は高剛性のケースと同方向

であり、その絶対値は、位置による差異はあるが総体的には免震の方が非免震よりも小さな値を示している。ただし、作用方向は免震と非免震とで互いに逆であり、非免震のケースでは直土圧はトンネルのせん断変形を低減させる向きに作用しているのに対し、免震のケースではトンネルのせん断変形を増加させる向きに作用している。したがって、低剛性トンネルでは免震層設置により直土圧の絶対値は低下傾向を示すが、その作用方向まで考慮した場合、高剛性トンネルと同様に直土圧はトンネルの断面力低減に寄与していないことがわかる。

以上の結果より、トンネルと周辺地盤の相対的な剛性差によらず免震化によって、せん断土圧は大きく低減するが、直土圧はむしろトンネルの変形を増加させる傾向を示す。断面力はトンネルと周辺地盤の総体的な剛性差によらず免震化により低減するので、免震層を設置したことによるトンネルの断面力低減には、せん断土圧の低減が主要な役割を果たしていることがわかる。

3.3 トンネルの断面力

最大相対変位発生時刻においてトンネルに発生する断面力の比較結果をトンネルの左半分を対象として、それぞれ図-21(a)～(c)、図-22(a)～(c)に示す。

図-21(a)～(c)より、高剛性トンネルでは、既往の研究結

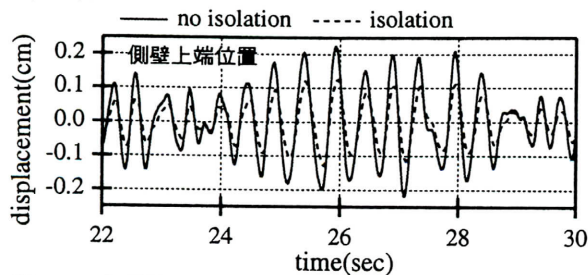


図-13 高剛性トンネル頂版～底版間水平相対変位時刻歴

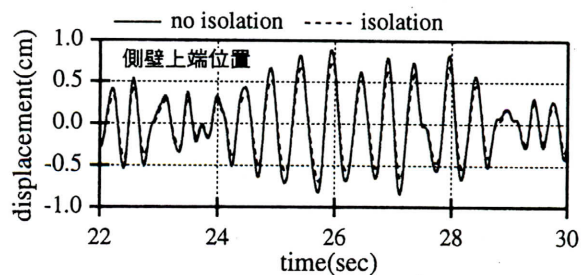


図-14 低剛性トンネル頂版～底版間水平相対変位時刻歴

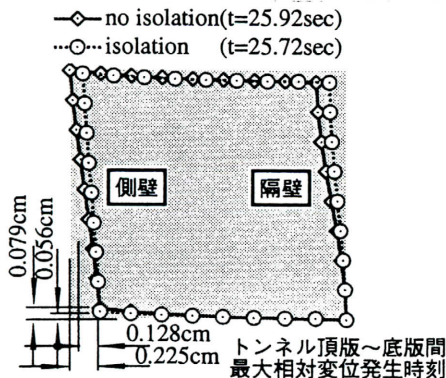


図-15 高剛性トンネル変位図

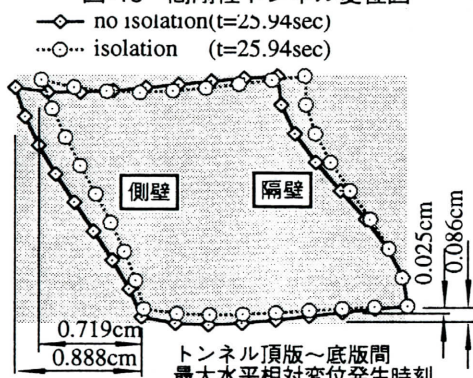


図-16 低剛性トンネル変位図

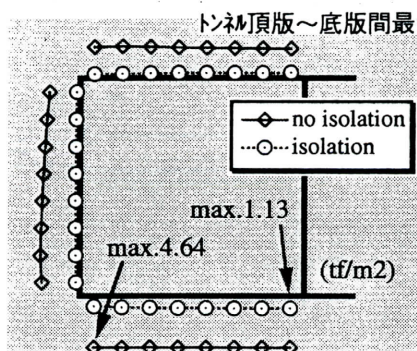


図-17 高剛性トンネルのせん断土圧分布

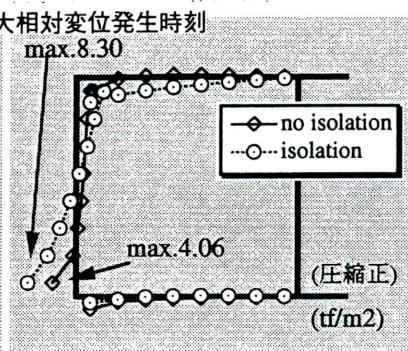


図-18 高剛性トンネルの直土圧分布

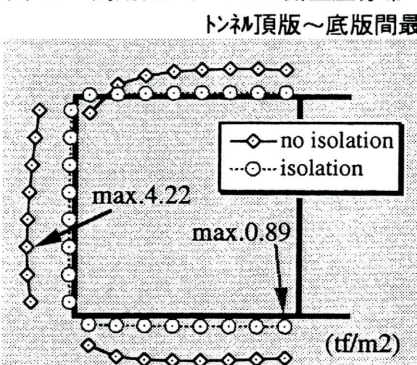


図-19 低剛性トンネルのせん断土圧分布

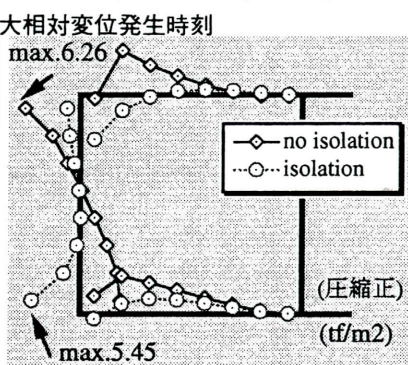


図-20 低剛性トンネルの直土圧分布

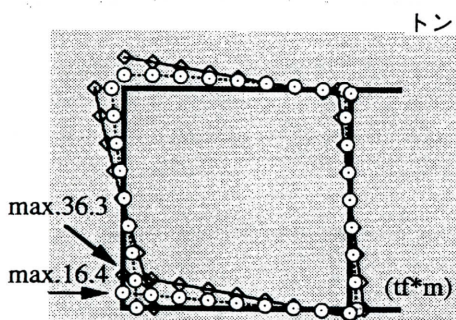


図-21(a) 高剛性トンネルの曲げモーメント分布

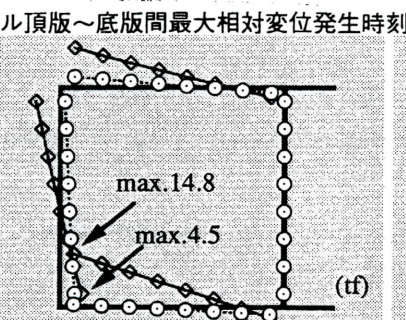


図-21(b) 高剛性トンネルの軸力分布

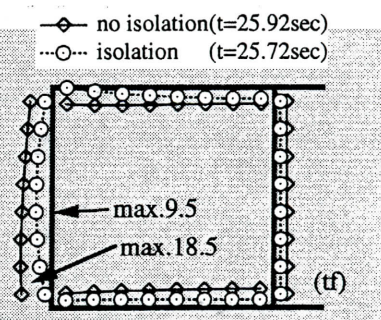


図-21(c) 高剛性トンネルのせん断力分布

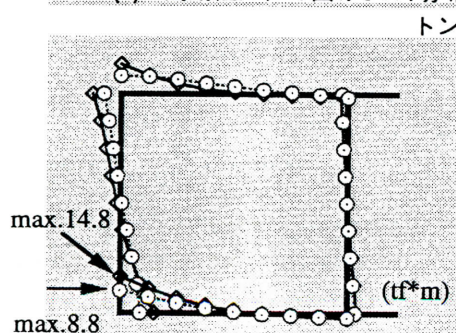


図-22(a) 低剛性トンネルの曲げモーメント分布

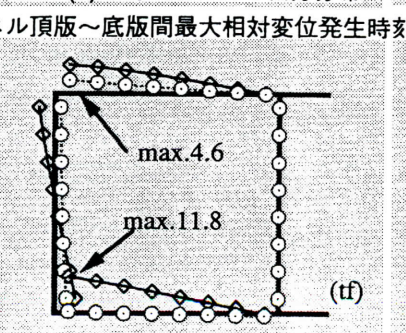


図-22(b) 低剛性トンネルの軸力分布

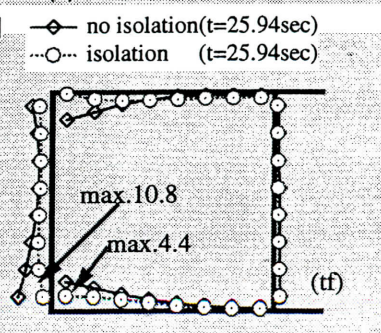


図-22(c) 低剛性トンネルのせん断力分布

果2)、3)、9)、10)と同様に頂版・底版・側壁および隔壁の隅角部において曲げモーメント、せん断力は免震層の設置により約半分に低減した。高剛性のケースではトンネルの見かけ剛性が周辺地盤の剛性よりも大きく、非免震トンネルの曲げモーメントの分布が部材間で直線的であるため、免震トンネルの曲げモーメントの低減傾向も部材間でほぼ一様に低減する傾向を示す。軸力についても曲げモーメント、せん断力と同様の低減傾向を示すが、側壁下部のように低減効果が顕著ではない箇所もある。

図-22(a)~(c)より、低剛性トンネルにおいても高剛性トンネルと同様に隅角部において曲げモーメント、せん断力は免震層の設置により約半分に低減し、軸力についても傾向は類似している。高剛性のケースと比較すると、断面力の絶対値に関しては、断面力の低減率が全般的にやや小さく、特に隔壁で小さいことが挙げられる。また、断面力の分布形状に関しては、曲げモーメントとせん断力の隅角部での増加率が大きい。免震トンネルではそれが平滑化され、直線的な分布形状に変化していることがわかる。この傾向は、トンネルの見かけ剛性が周辺地盤の剛性よりも小さな解析事例である文献9)、10)においても認められた。したがって、低剛性トンネルではトンネルの相対変位低減が断面力低減の主な要因ではなく、免震層は主に断面力分布の平滑化に効果を発揮し、隅角部の断面力を特に低減する働きを示すものと考えられる。また、免震層とは直接に接していない隔壁には免震層による断面力分布の平滑効果があり及ばず、相対変位の低減による断面力低減が主体と考えられるため、相対変位の低減効果の小さな低剛性のトンネルほど断面力低減効果が小さくなることが想定される。

4. まとめ

矩形断面トンネル横断面方向に関して等価線形解析による動的FEM解析を実施した結果、本解析事例から、以下のような知見が明らかとなった。

- ①免震層を設置したケースでは免震層に大きなせん断変形が発生するが、逆にトンネル本体およびトンネルの上下の地盤におけるせん断変形は低減する傾向を示す。
- ②側壁上端における水平動の伝達関数、側壁下端における鉛直動の伝達関数を検討した結果、高剛性・低剛性のトンネルともに、免震化によって水平動の伝達関数において鉛直動の伝達関数の1次の卓越振動数と一致する2次の卓越振動数が現れる。しかし、一般にはこの2次のピークがトンネルの地震応答に及ぼす影響は小さい。
- ③高剛性・低剛性のトンネルによらず、免震、非免震のケースともにトンネルの時刻歴応答は基本的に同位相であるが、高剛性のトンネルでは免震層の設置によってトンネルの相対変位量は水平方向、鉛直方向ともに半分近くに低減される。これに対して、低剛性トンネルの相対変位低減は、高剛性トンネルほど大きくない。
- ④高剛性・低剛性のトンネルともに、免震トンネルのせん断土圧はトンネル全周にわたり非免震の場合の20%前後の値にまで低減し、トンネルのせん断土圧低減に大きな効果があることを確認した。

免震トンネルの直土圧は、せん断土圧のように一様な

傾向はみられず、その絶対値は高剛性のトンネルでは非免震に比べて増加する傾向を示し、低剛性のトンネルでは非免震よりも小さな値をとる傾向がみられた。しかし、作用方向を考慮すると、高剛性・低剛性のトンネルともに、直土圧はトンネルのせん断変形を増加させる向きに作用しており、非免震トンネルのトンネル側壁の直土圧の作用方向が高剛性と低剛性のトンネルとで逆転した分布を示すのとは対照的な現象がみられた。

以上より、本検討で設定した条件に対しては、トンネルの剛性によらず、免震トンネルの断面力低減効果は、主にせん断土圧低減により得られるものと判断された。

⑤高剛性・低剛性のトンネルともに、トンネルの隅角部における曲げモーメント、せん断力は免震層の設置により約半分に低減した。ただし、トンネルの変形パターンに関連して、高剛性トンネルでは部材内で比較的一様な断面力低減が得られるのに対して、低剛性トンネルでは部材内での断面力の平滑化が特徴的であり、隅角部では低減が大きい。隔壁部では低減が小さい傾向が認められた。軸力は、曲げモーメントおよびせん断力と同様の低減傾向がみられるが、直土圧と同様にトンネルの部材ごとに多少異なる低減の傾向を示した。

以上より、1つの事例ではあるが、地震時の矩形断面トンネル横断面方向の応答性状、周辺地盤の応力状態、断面力などの基本特性に関して、免震構造を適用する上での有用な知見が得られた。

謝辞：本研究は、建設省土木研究所、(財)土木研究所と民間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」の一環として行われた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 粕田, 鈴木：矩形断面トンネルの免震メカニズムに関する解析的検討, 土木学会第24回地震工学研究発表会講演集, pp.409-412, 1997.
- 3) 粕田, 鈴木, 田中：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・制震コロキウム講演論文集, pp.109-116, 1996.
- 4) 当麻, 国生, 岩楯：非岩着地中構造物の耐震設計に関する研究(その1), 電力中央研究所報告, No.383023, 1984.
- 5) 渡辺, 末広：地中ダクト側壁動土圧に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.432, pp.155-163, 1991.
- 6) 龍岡, 足立：新体系土木工学18 土の力学(Ⅲ) 圧密・せん断・動的解析, 技報堂出版, pp.211-232, 1981.
- 7) 鈴木, 粕田, 小林, 池野, 福田, 田中：トンネルの免震施工に用いるシリコン系免震材の動的物性, 第32回地震工学研究発表会講演集, pp.2095-2096, 1997.
- 8) 岩楯, 飯野, 木村, 佐藤, 三浦：模型振動実験による地下鉄構造物の地震時挙動の検討, 土木学会第24回地震工学研究発表会講演集, pp.233-236, 1997.
- 9) Suzuki, T.: Damage of urban tunnels due to the Southern Hyogo Earthquake of January 17, 1995 and the evaluation of seismic isolation effect, Proc. of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, 1996.
- 10) 江崎, 服部, 伊東, 清水：大地震を想定した開削トンネルの免震効果, 第1回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.93-99, 1996.