

1. はじめに

地震時にトンネル縦断方向に大きな断面力が発生する箇所として、地盤条件急変部と構造条件急変部がある。筆者らは、地盤条件急変部においてシールドトンネルに免震構造を適用した場合のトンネル縦断方向の免震効果や、矩形断面のトンネルに免震構造を適用した場合の横断面方向の免震効果を、数値解析<sup>1),2)</sup>ならびに振動実験<sup>3)</sup>によって検証してきた。一方、構造条件急変部では、単にトンネル外周に軟らかな免震層を形成し、トンネルと地盤との絶縁を図るだけでなく、トンネルと構造物の間を絶縁させる免震構造とする必要がある。本稿では数値解析によって、シールドトンネルの建設に不可欠な構造物である立坑とトンネルの接合部に免震構造を適用した際の免震効果を、非免震ならびに接合部に可撓セグメントを設置したケースと比較して示すことにする。

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に示す立坑接合部のシールドトンネルである。表層地盤は層厚20m、 $E=500\text{kgf/cm}^2$ 、単位体積重量 $=1.7\text{tf/m}^3$ 、ポアソン比0.45の均一地盤とした。また、シールドトンネルは外径5050mm、セグメント厚25cmで、土被り11.45mの深さに建設されると想定した。一方立坑は、躯体が基盤まで根入れされているとし、立坑土留め壁が奥行き方向に連続していると仮定し、基盤に固定されたコンクリート壁として取り扱う。

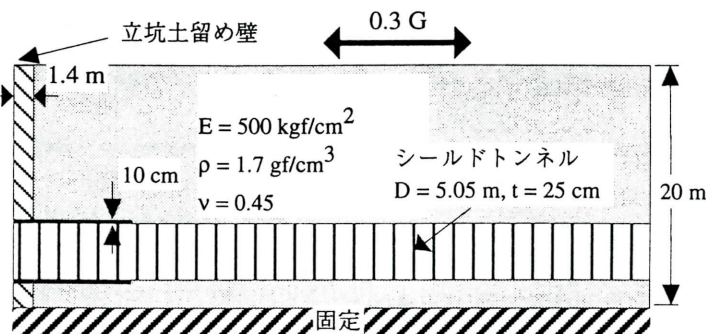


図-1 シールドトンネルと立坑との接合部の解析モデル

解析にはトンネルの耐震解析のためにコーディングされた軸対称FEMを基本とした解析コードEASIT<sup>4)</sup>であり、一様な水平震度0.3を、モデル全体に亘って右側あるいは左側へ作用させたときの地盤慣性力を、モデルの各節点外力として与え、それぞれトンネルの引張および圧縮変形を静的に解析した。

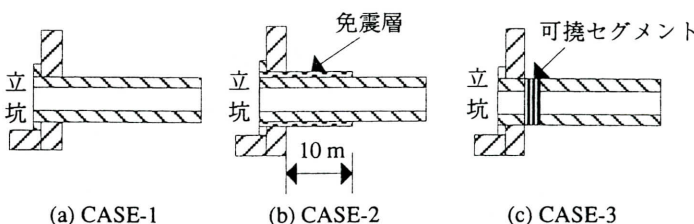


図-2 解析ケース

解析ケースは図-2に示す3ケースである。

CASE-1は従来型の接合部で坑口でセグメントと立坑が剛結されているケース、CASE-2は立坑より10mの区間が免震構造となっており、坑口で立坑とセグメントが絶縁されているケース、そしてCASE-3は立坑と隣り合う1リング(1m)に可撓セグメントを採用したケースである。

CASE-2の免震層は層厚10cmで、シリコン系免震材<sup>5)</sup>の採用を想定して、せん断弾性係数 $G=3\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.48の物性を与えた。またCASE-3の可撓セグメントとしては、 $E=0.1\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.3の極めて小さなヤング率を有するセグメントとしてモデル化した。なお、セグメントの物性は、上記の3解析ケースとも、引張変形時にはセグメントリングの等価軸剛性に相当するヤング率として $E=18600\text{kgf/cm}^2$ を、圧縮変形時にはコンクリートのヤング率である $E=330000\text{kgf/cm}^2$ を採用した。なお、セグメントのポアソン比は0.167である。

3. 解析結果と考察

図-3に圧縮変形時のトンネル変位、軸ひずみならびにトンネル軸力の解析結果を、図-4に引張変形時のトンネル変位、軸ひずみならびにトンネル軸力の発生分布図を示す。とくに引張変形時には、CASE-1の非免震の場合では立坑に近づくにつれてトンネル変位が急激に減少し、トンネルと立坑の接合面付近で明瞭なピークを有するトンネル軸ひずみの分布となるが、免震構造を適用したCASE-2では、適用区間はわずか10mであるが、トンネル軸ひずみが非免震のケースの1/3まで低減し、大きな免震効果が得られていることがわかる。一方可撓セグメントを採用したCASE-3では、可撓セグメントで著しくトンネル変位が吸収されているものの、この影響はあまり遠くまでは及ばず、トンネル軸力の低減は免震構造の場合ほど顕著とならず、非免震の場合の3/5程度にとどまった。一方圧縮変形時には、トンネル軸ひずみの集中度は引張変形時ほどは高くなり、可撓セグメントが引張変形の場合よりも比較的有効にトンネル変位を吸

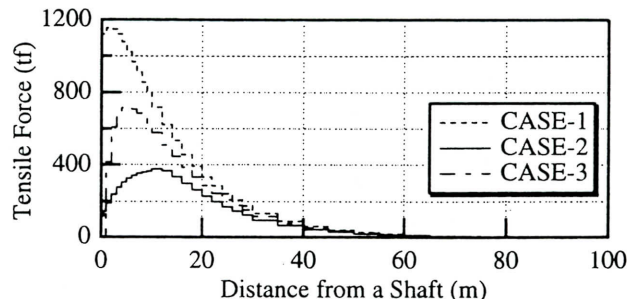
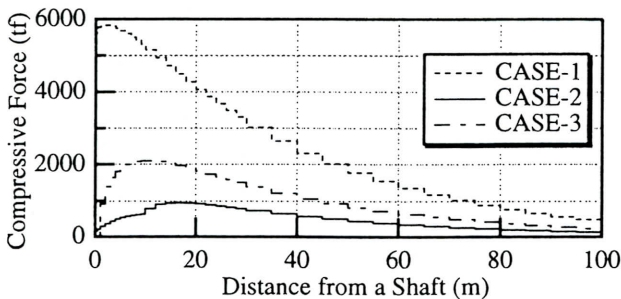
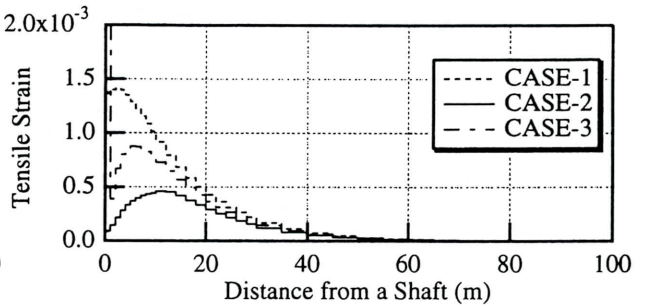
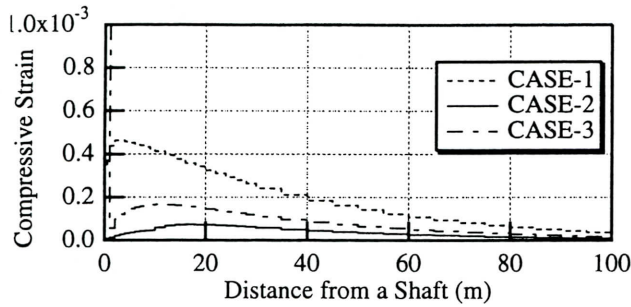
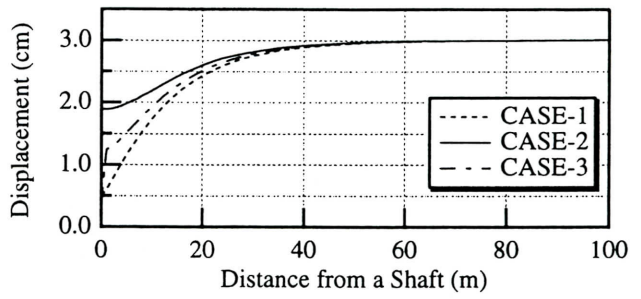
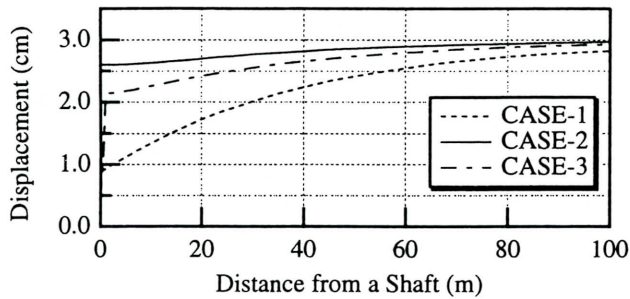


図-3 圧縮変形時のトンネル変位、軸ひずみ、軸力

図-4 引張変形時のトンネル変位、軸ひずみ、軸力

収し、CASE-3のトンネル軸力は非免震のCASE-1の1/3まで低減されているが、免震構造を採用したCASE-2では1/6まで達している。

立坑部付近のトンネル軸ひずみは、立坑の近くでピークを持つ分布形状となる。可撓セグメントのように1箇所でもトンネル変位を吸収し、トンネルひずみの低減を図る柔構造の場合には、隣り合うセグメントが周辺の地盤から絶縁されていることが必要条件であるが、実際にはセグメントの外周には地盤が存在し、地盤のせん断抵抗を受けるために、単純に柔構造のばね定数から期待する変位吸収は発揮されない<sup>6)</sup>。これに対して免震構造では、1箇所ではなく10m～20mの区間でセグメントと地盤とを絶縁しており、また坑口でトンネルの変位を吸収することが可能となるため、効率的にトンネル発生ひずみを大幅に低減できる。また、この影響が免震適用区間外の比較的遠方まで及び、さらに免震効果を高めていると思われる。以上のように免震構造は可撓セグメントよりもトンネルひずみ(断面力)低減効果が高く、かつ可撓セグメントのように機械的な不確実性がなく、また立坑部から比較的短い区間の適用でも大きな免震効果を発揮できるため、コスト面でも有利となると思われる。

#### 4. まとめ

立坑接合部に免震構造を適用した場合の免震効果について数値解析を実施し、(1)立坑より比較的短い区間への免震構造の適用でも、最大トンネル断面力を1/3から1/6に大幅に低減でき、著しい免震効果が発揮されること、

(2)可撓セグメント等の柔構造よりも効率良くトンネルひずみを吸収する機構を有するため、より大きな地震時断面力低減効果を発揮されること、が確認できた。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」の一環として実施されたものである。

#### 参考文献

- 1) Tanaka T., and Suzuki, T.: Research and Development of the Seismic Isolation System applied to Urban Tunnels (Part-2: Effects of Seismic Isolation and Seismic Design), Proc. US-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, Seattle, 1997.
- 2) 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.
- 3) 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，土木学会第1回免震制震コリキウム論文集，pp.109-116, 1996.
- 4) 鈴木：軸対称モデルによるトンネル縦断方向耐震解析法の提案とその免震シールドトンネルへの適用例，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.349-352, 1997.
- 5) 鈴木他：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.
- 6) 鈴木：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, 1992.1