

地下構造物の免震構造と免震設計

SEISMIC ISOLATION SYSTEM AND SEISMIC ISOLATION DESIGN APPLIED TO UNDERGROUND STRUCTURES

運上 茂樹¹⁾・星隈 順一¹⁾・鈴木 猛康²⁾・田中 努³⁾

Shigeki UNJOH¹⁾, Jun-ichi HOSHIKUMA¹⁾, Takeyasu SUZUKI²⁾ and Tsutomu TANAKA³⁾

Techniques for improving seismic safety of urban tunnels have hitherto been limited to those for increasing the flexibility of tunnel structures by applying flexible joints and segments. However, since such techniques are insufficient for ensuring seismic safety of underground lifelines in urban areas when strong earthquakes occur, there has been a demand for developing a new, highly reliable technique, especially for protecting tunnel sections where seismic strain is concentrated locally. Given this situation, an innovative joint research project between the Public Works Research Institute and private companies was commenced to develop a seismic isolation system to be applied to underground structures. This paper will describe results of the joint project, focusing on the seismic isolation system developed and the design procedure for seismically isolated underground structures.

Key Words: seismic isolation, underground structures, seismic design, numerical analyses

1. はじめに

地下構造物の地震対策としては、(1)可とう性継手や可撓セグメントを採用して、トンネルに発生する変位を一箇所で集中的に吸収する構造、(2)シールドトンネルのリング継手の引張剛性を低減させてトンネルの地震時発生変位を複数のリング継手に分散させて吸収する構造等、地下構造物の見掛けの剛性を低減させ、構造物に発生する地震時断面力を低減させる柔構造が採用されてきた。これに対して免震構造は、地下構造物の外周に周辺地盤よりも軟らかな比較的薄い免震層を形成させ、周辺地盤からのひずみの伝達を低減・遮断するとともに、免震区間で構造物のひずみの分散を図り、構造物の地震時断面力を大幅に低減させる構造である。

地下構造物の免震機構に関する実験的研究^{1),2)}や解析的研究³⁾⁻¹³⁾は、個別の研究者や機関によって1980年後半より開始されており、免震層を形成する材料(免震材)やその注入施工^{14),15)}の領域まで開発が進められた。しかし、免震機構の解釈や免震材としての要求物性に関する見解が必ずしも統一されておらず、地下構造物の免震技術の体系化と設計法の確立が急務とされていた。そこで、建設省土木研究所、(財)土研センターならびに民間17社は、平成7年7月より平成10年3月までの約3年間に亘って共同研究を実施し、地下構造物の免震構造に適用できる免震材、施工法ならびに設計法について包括的な研究・開発を実施した¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。本稿では、地下構造物の免震構造とその免震機構について概説した後、地下構造物の免震設計法の要点を、上記共同研究の最終成果としてまとめた免震設計法マニュアル(案)¹⁸⁾に基づいて概説する。

1) 正会員 工学博士 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 耐震研究室

2) 正会員 工学博士 熊谷組技術研究所 土木耐震研究グループ

3) フェロー オリエンタルコンサルタンツ 技術統括部

2. 免震構造と免震機構

地下構造物の免震構造とは、シールドトンネルではシールド掘進に伴って発生するテールボイドへ液状の免震材を注入・充填して硬化させることにより、開削トンネルでは躯体の外周に配置した型枠へ液状の免震材を打設、硬化させ、あるいは躯体外周面へプレキャストの固形ゴムパネルを接着することにより、構造物と周辺地盤との間に免震層を形成した構造である。免震構造はトンネル縦断、横断両方向の地震時変形に伴う発生断面力の低減を目的として採用されるものであるが、縦断方向と横断方向では免震機構が多少異なる。また、立坑等の構造物との接合部に適用する際には、併せて構造物躯体とトンネルとのひずみの絶縁構造も必要となる。

図－１は硬軟地盤境界におけるシールドトンネルを例にとって、トンネル縦断方向の免震機構を模式的に示したものである。図のように地震時には、地盤急変部において軟質地盤側にピークを有する地盤の軸ひずみの集中が発生し、これがトンネルへと伝達されることにより、トンネルに大きな軸力が発生することになる。これに対して地盤ひずみのピークをカバーすべくトンネル外周に免震層を形成すると、免震層のせん断変形により地盤ひずみのトンネルへの伝達が遮断されるとともに、免震区間ではトンネル外周のせん断抵抗が小さくなるために、トンネルひずみは分散されて分布形状がフラットとなる。図－１はこのような機構が理想的に機能した場合を模式的に示したものである。実際には、免震層もあるせん断弾性係数を有しており、したがって地盤ひずみがある程度はトンネルへと伝達されるので、厳密にはトンネルひずみ分布はフラットとはならない。なお、上記共同研究で開発された免震材は、シリコンあるいはウレタンを主成分とするゴム系の線形材料であり、せん断弾性係数は0.1～0.5 MPa (1kgf/cm²～5kgf/cm²)、ポアソン比は0.4～0.5の範囲にある。

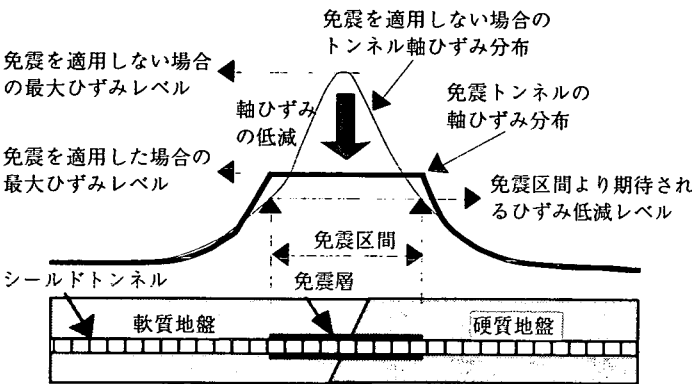
縦断方向に免震構造の適用が効果的と考えられる地盤条件急変部は、図－３に示すような何種類かのパターンに分類することができる。各地盤条件急変部の特徴を、図にしたがって簡単に解説すると以下ようになる。

1) 硬質、軟質地盤の境界部付近（堆積環境）

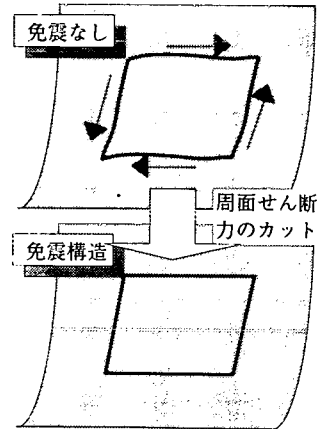
硬質、軟質地盤の波動インピーダンスのコントラストと地層境界面の傾斜等により、境界部への地盤ひずみの集中度やピーク値が異なる。両者のインピーダンスのコントラストの著しいほど、また境界面の傾斜が急なほど、地層境界部における地盤ひずみの集中が顕著となる。ただし硬質・軟質のインピーダンス比が5を超えるような極めてインピーダンスのコントラストの著しい地盤は、横浜市の土丹層と沖積粘土層の境界等の特定の地域に限定され、自然環境下では決して多く存在するわけではない。

2) 断層により形成された不連続な地層境界

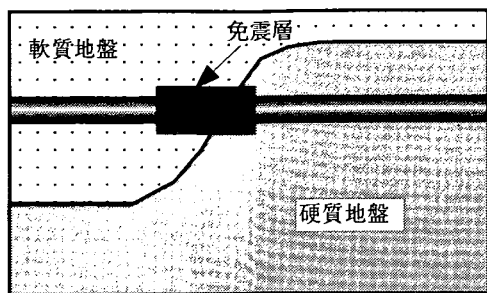
1) が堆積過程で形成されたのに対して、断層運動により急傾斜かつインピーダンスのコントラストが著しい地層境界が形成されている箇所が存在する。このような箇所では地層境界が、堆積環境下では希な90度を超え



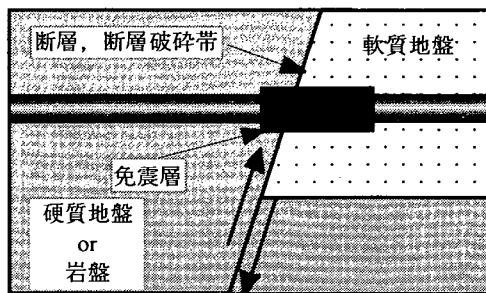
図－１ 縦断方向の免震機構模式図



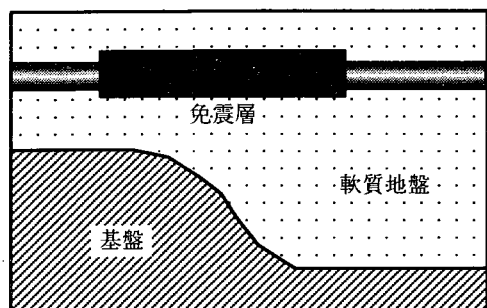
図－２ 横断方向の免震機構模式図



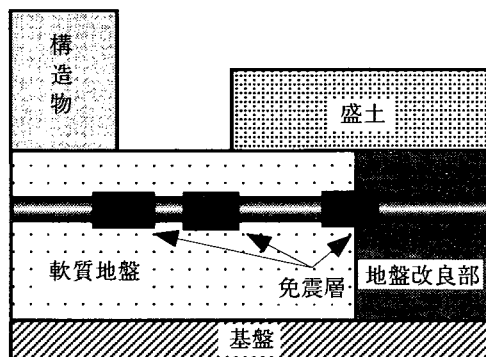
(a) 堆積過程で生じた硬質／軟質地盤の境界部



(b) 断層運動によって生じた不整形地盤



(c) 基盤が不整形なため、表層地盤の卓越振動数が急変する箇所



(d) 盛土、切土や地盤改良部との境界部ならびに構造物境界等、人工的に表層地盤の卓越振動数が急変する箇所

図－3 地盤条件急変部と免震構造の適用箇所

るような傾斜（衝上断層等）であったり、インピーダンス比が10以上（岩盤と軟質土等）となることがあり、著しい地震時地盤ひずみの集中が発生する可能性がある。

3) 基盤が不整形な表層地盤

トンネル建設区間を通してトンネル外周を構成する地層はほとんど変わらないが、基盤深さが急激に変化するため、基盤傾斜部を境としてその両側で表層地盤の卓越振動数が急激に変化するような不整形表層地盤構造であり、地震時に基盤傾斜部ならびにその周辺で地盤ひずみが集中する。

4) 盛土、切土、地盤改良部

盛土、切土、地盤改良工事や構造物建設等により、人工的に作り出された地盤条件急変部である。このような箇所では表層地盤の卓越振動数が急激に変化するため、地震時地盤ひずみの局所的集中が著しい場合がある。とくに盛土や切土の将来計画がわかっている場合には、この影響も考慮して免震設計を行うことが望ましい。

一方トンネル横断方向では、トンネルの断面形状や周辺地盤のせん断剛性に対するトンネルの見かけのせん断剛性の比によって、免震機構や免震効果の程度が異なる。すなわち、開削トンネルのような矩形断面のトンネルでは、コーナーで構造物の回転変形が抑制されるため、とくに隅角部に断面力が集中することがわかっている。また構造物の断面力発生に及ぼす周面せん断力の影響が大きく、トンネル構造や周辺地盤に対する構造物の見かけのせん断剛性にもよるが、周面せん断力は地震力全体の6割～9割を占める。免震層の設置は、この周面せん断力を大きく低減させるため、大幅な断面力低減につながる。一方体積変化の少ない材料を用いるため、トンネル上下層間のせん断変形の低減は比較的少ない。この場合、免震機構としては、図－2に示すように、全周に亘って軸力が低減する他、側壁や上下床版のs字型の曲げ変形が緩和され、コーナー部に集中したせん断力と曲げ

モーメントも大きく低減される。一方、シールドトンネルのような円形断面を有するトンネルでは、地震時発生断面力の集中が比較的小さく、地震時発生断面力がトンネル横断面の設計上支配的となる場合は稀である。さらに、断面力発生に及ぼす周面せん断力の影響も小さいため、免震構造の適用はさほど有効とは言えない。

以上のような地下構造物の縦断、ならびに横断方向の免震機構に関する知見に基づき、以下に様に、免震地下構造物の地震時設計、すなわち地下構造物の免震設計法の開発を行った。地下構造物の免震設計とは、免震材のせん断弾性係数、免震層厚および免震区間を適切に設定することにより、地下構造物に発生する地震時増分断面力を効果的に低減させる設計のことである。なお、免震構造の採用に当たっては、施工時ならびに常時の安定性についても十分検討する必要があるため、施工性、止水性、耐久性、材料物性等の広い観点から適切な評価を行った上で、免震材を選定することが重要である。

3. 縦断方向の免震設計

縦断方向の免震設計では、地中線状構造物の縦断方向の耐震解析で従来採用されてきた梁ばねモデルの適用を原則とした。すなわち、表層地盤の地震応答解析に基づいてトンネル縦断方向の地盤変位の時刻歴を算出し、これを相互作用ばねを介して等価剛性を有する梁に入力することにより、静的にトンネルに発生する断面力や変形を求める。トンネル縦断方向に免震構造を適用する箇所は地盤条件急変部や構造条件急変部であり、地盤ひずみの集中が極めて局所的となるので、地盤の地震時応答変位の算定には地震応答解析の実施が不可欠と判断した。ここで従来の梁ばねモデルとの相違は、免震区間における相互作用ばね（免震層のばね）の取り扱いにある。円形トンネルの場合、トンネル外周に形成された単位高さを有する免震層のリングを想定し、免震層の外周面固定の条件のもとで、トンネル外周面を強制的にリングの軸方向ならびに軸直角方向に強制変形を与えたとき免震層に働く反力抵抗より、トンネル単位長さ当たりの免震層の相互作用ばね定数を理論的に決定することとした。

$$K_x = \frac{2\pi G_m}{\ln(R_m/R_i)} \dots\dots\dots (1) \qquad K_y = \frac{8\pi G_m(3-4\nu)(1-\nu)}{(3-4\nu)^2 \ln(R_m/R_i) - \frac{(R_m/R_i)^2 - 1}{(R_m/R_i)^2 + 1}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 K_x 、 K_y はそれぞれ単位長さ当たりのトンネル軸方向および軸直角方向の相互作用ばね定数、 R_i はトンネル外径の1/2、 R_m は免震層の外径の1/2で $R_m = R_i + t$ であり、 t は免震層厚である。また G_m は免震層のせん断弾性係数であり、 ν は免震層のポアソン比である。

矩形断面のトンネルに対しては、免震層の外周を固定としてトンネル外周面に強制変位を与えると、トンネル軸方向については円形トンネルと同様、免震層のせん断抵抗として相互作用ばねが(3)式で与えられる。一方軸直角方向に関しては、トンネル側壁に接する免震層の反力は、免震層のヤング率 E_m とともにポアソン比 ν にも大きく依存する。すなわち、側壁に接する免震層は純粋に水平方向と奥行方向の直ひずみを拘束された3次元弾性体に近似できるので、体積変化に関するポアソン比のみ

$$K_x = \frac{2(B+H) G_m}{t} \dots\dots (3), \quad K_y = \frac{2(BG_m + \beta HE_m)}{t} \dots\dots (4)$$

$$\beta = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \dots\dots (5)$$

ここで、 E_m は免震材のヤング率、 B はトンネル幅であり、 H はトンネル高さである。図-4は2次元有限要素解析の結果より逆算して求めた補正係数 β の値と(5)式を比較したの検討結果であるが、

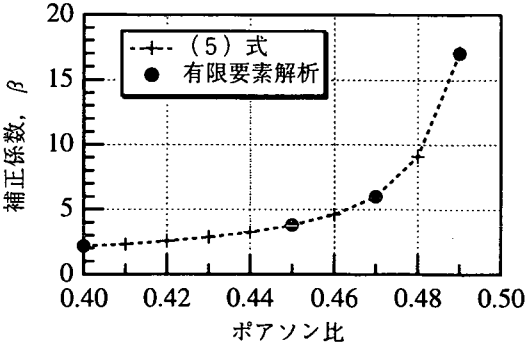


図-4 補正係数 β に関する(5)式の適用性

図のように実在する免震材のポアソン比0.4～0.5の範囲においては(4)式は有限要素解析と一致しており、補正係数 β の近似式は十分な精度をもって適用可能であることがわかる。

本マニュアル(案)のトンネル縦断方向の免震設計を、図-5に示す河川を横断する外径5,050mmのシールドトンネルに適用した例について説明する。なお、ここではトンネル軸方向ならびに軸直角方向の検討結果の中から、軸方向の検討結果についてのみ紹介することにする。

表層地盤を多質点系モデルを用いてモデル化し、1種地盤用タイプⅠ地震動を入力したときの表層地盤の地震時応答解析を実施した。図-5の縦断面図の下には、解析の結果得られたトンネル縦断線形に沿った地震時地盤ひずみの最大値分布を示すが、トンネル縦断線形に沿った地盤ひずみは、河川の左岸直下、右岸直下ならびに右岸部の急勾配部の3箇所で $2,000 \times 10^{-6}$ を超えており、とくに右岸直下では $4,000 \times 10^{-6}$ に達している。そこで、図-5の縦断面図に示す免震区間に、シリコン系の免震材を想定して、せん断弾性係数 $G_m = 0.3 \text{ MPa}$ 、ポアソン比0.48の免震層を10cmの厚みで形成した免震構造を梁ばねモデルでモデル化し、前述の地震応答解析で得られた表層地盤の応答変位を入力としたトンネルの時刻歴応答を解析した。なお、シールドトンネルは、引張変形時にはリング継手の剛性を考慮した等価引張剛性、圧縮変形時にはセグメントの軸剛性とした非線形剛性梁としてモデル化した。また、地盤ひずみの発生分布図では、地盤ひずみ集中部での地盤の分割を20mおよび3m間隔とした2ケースを示しているが、モデルの分割間隔を変化させ、間隔が適切であることを確認することも重要である。

図-5の下部にはそれぞれトンネルの最大引張軸力と最大圧縮軸力の発生分布について、免震を適用しないケース(免震なし)についても比較のために重ね描きにして解析結果を示した。図のように、圧縮と引張では免震による断面力低減の程度に相違が見られ、トンネル剛性が高い圧縮側では最大値分布がほぼフラットとなり免震効果が顕著であるが、引張側ではトンネルと周辺地盤の剛性の差が小さいため、右岸直下での断面力低減は大きいものの、残りの2箇所では顕著な免震効果が発揮されていない。このように、縦断方向の免震設計では、地盤ひずみ分布より断面力低減の目標と免震区間を想定し、地震応答解析によって断面力低減を確認する。

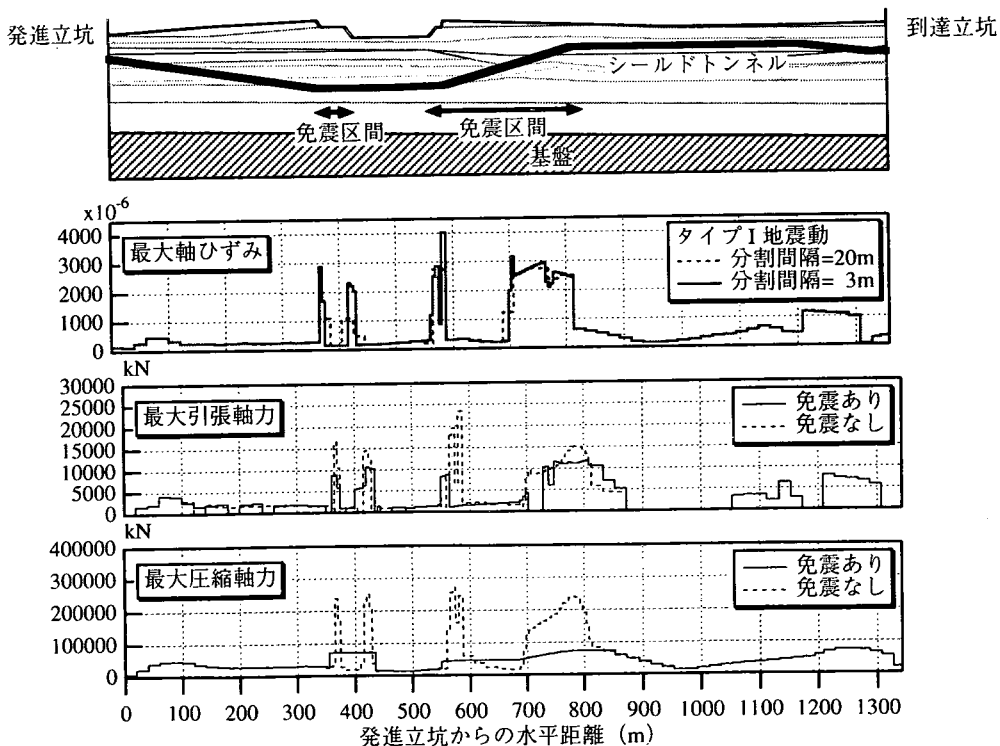


図-5 河川を横断するシールドトンネルの縦断方向に対して免震構造を適用した例

4. 立坑接合部の免震設計

地下構造物の縦断方向の耐震解析では、立坑単体の地震応答を予め解析しておき、この応答を梁の端部に強制変位として与えるのが一般的であり、剛結合あるいは軟らかなばね結合等によってトンネルと立坑との接合条件をモデル化してきた。立坑接合部で必要とされる免震区間長は立坑よりせいぜい10～20m程度であり、この局所的な地盤の挙動は立坑の地震時挙動に大きく依存すること、また、立坑躯体とトンネルの絶縁構造もモデル化する必要があることから、立坑とその周辺の地盤の局所的な領域の解析には、立坑周辺の部分系に対して、軸対称FEMモデルや3次元FEM簡易モデルによる詳細解析法を適用することとした。なお、立坑接合部の免震構造では、立坑躯体とトンネル間にも免震層（あるいは絶縁層）が形成されるため、曲げ変形に対する両者の接合条件はピン結合と見なせる状態となり、立坑とトンネルの接合面に集中する軸直角方向の地盤変形に起因する水平方向の曲げ変形、ならびに立坑のロッキング振動に起因する鉛直方向の曲げ変形に伴って発生するトンネルの軸ひずみはともに、接合面では0に近似できることが確認されている。そこで、立坑接合部の免震構造は、トンネル軸方向に対して安全性を照査すればよいこととした。

立坑接合部を図-6に示すように軸対称FEMモデル¹⁹⁾によってモデル化し、右方向に0.3Gの水平震度を与えたとき、トンネルに発生する引張軸力を解析した。免震層としては、シリコン系免震材の適用を想定し、せん断弾性係数 $G_m = 0.3 \text{ MPa}$ 、ポアソン比0.48とし、層厚10cmで立坑躯体との接合部ならびに立坑躯体壁より10mの区間に亘って免震層を形成することとした。なお、トンネルはリング継手の伸びを考慮した等価引張剛性に一致するように換算したヤング率を有するソリッドとしてモデル化し、立坑は奥行方向に連続した壁として取扱っている。免震構造適用による断面力低減効果を示すため、免震構造を適用しないケースならびに可撓セグメント適用を想定して立坑躯体より1リング目（1m）のトンネルのヤング率を0.1 MPaとしたケースについても解析を実施し、これらを免震構造適用のケースと比較することとした。図-7は上記3解析ケースの引張軸力に関する解析結果を比較したものである。図のように、免震構造を適用しないケースで立坑接合部に集中した引張軸力は、免震区間長10m程度でもピーク値で1/3に低減しており、顕著な免震効果が発揮されていることがわかる。一方、可撓セグメント適用のケースでは、可撓セグメント部では大幅な引張軸力低減となっているものの、トンネルひずみの吸収は可撓セグメントの極く近傍に限られるため、トンネルひずみの分散が図れる免震構造と比較すると、断面力低減効果は小さいことがわかる。

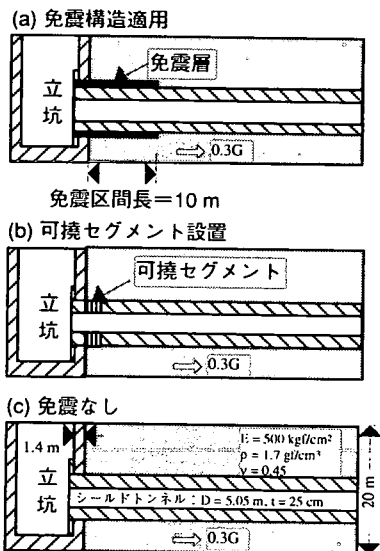


図-6 立坑接合部と解析ケース

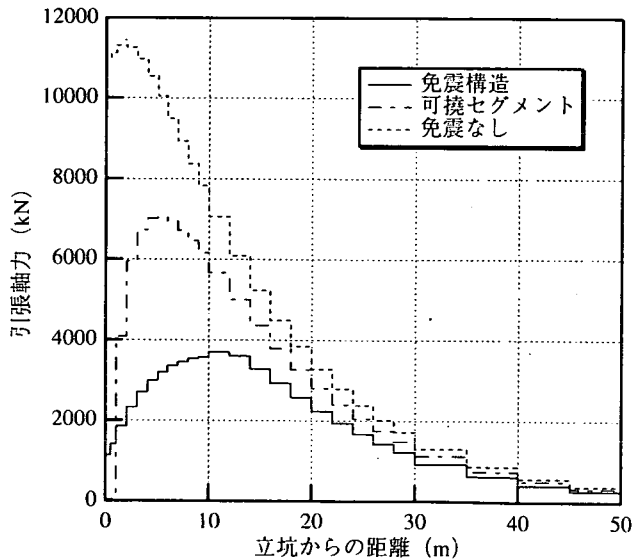


図-7 立坑接合部の引張軸力に関する解析結果

5. 横断面方向の免震設計

横断面方向の免震設計では、2次元有限要素解析を採用することとした。応答変位法に基づく解析手法として従来用いられてきた梁ばねモデルは、相互作用ばね定数の設定法に曖昧さが残されており、また構造物の見かけのせん断剛性が周辺地盤よりも大きい小さいかで地震時直土圧の作用方向が異なる等の現象を、再現することができないという欠点を有していた。とくに免震構造では、構造物の外周に軟らかな免震層があることにより、周辺地盤～免震層～構造物の間で免震層によるせん断変形の吸収に伴う複雑な相互作用が発生するため、トンネルを梁要素、免震層および周辺地盤を平面ひずみ要素とした2次元有限要素でこれらの関係を正確にモデル化することが不可欠と判断した。ただし、必ずしも2次元動的解析を行う必要はなく、静的解析によってトンネルのひずみや変形を算出することとした。すなわち、(1)表層地盤の基本せん断振動に着目して応答スペクトルから静的に地盤水平慣性力の鉛直分布を求めるか(地盤慣性力法)²⁰⁾、あるいは(2)表層地盤の1次元地震応答解析に基づいて、トンネル位置で地盤の最大せん断変位あるいはせん断ひずみエネルギーが最大となる時刻の地盤加速度の鉛直分布を求めておき、これと2次元有限要素モデルの節点質量との積で定義される地盤慣性力を節点外力として、静的応力解析を実施することを原則とした。

図-8は中柱を有する開削トンネルに対して、その外周にせん断弾性係数 $G_m = 0.5 \text{ MPa}$ 、ポアソン比0.48の免震層を厚さ10cmで設置したケースについて、2次元有限要素モデルを用いた上記の静的応力解析を実施し、軸力、せん断力、曲げモーメントの発生分布を示したものである¹³⁾。図中には免震を適用しないケースの解析結果も比較のため示しているが、トンネルのコーナー部に集中する断面力が大幅に低減されていることがわかる。また図-9は、静的応力解析と同一のトンネル、地盤モデルを用いて地震応答解析を実施し、側壁底部で解析された軸力、せん断力、および曲げモーメントの時刻歴波形を示したものである¹³⁾。これらの図中にも免震を適用しないケースが比較のため併記されているが、断面力の大きな時刻でより大きな断面力低減が生じていることが明らかである。

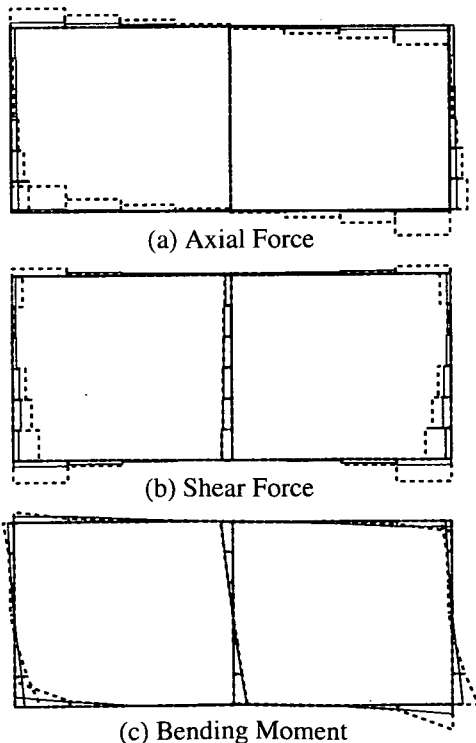


図-8 トンネルの断面力分布の比較

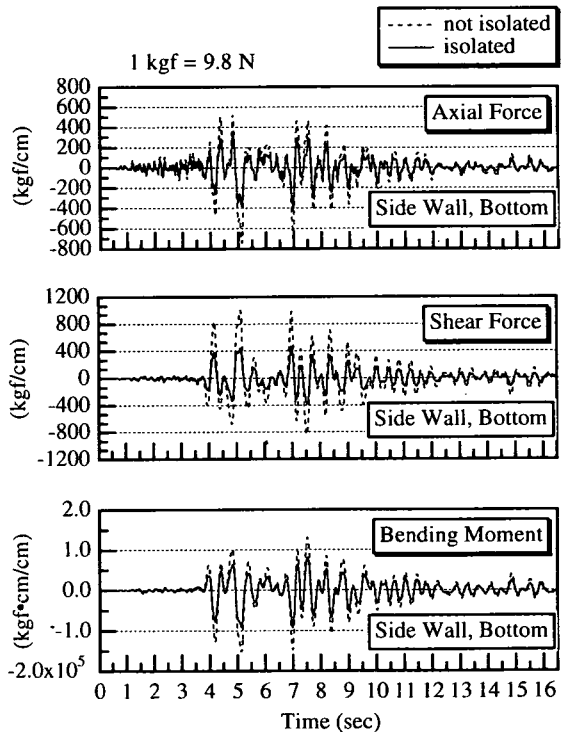


図-9 側壁下部の断面力の時刻歴波形に関する比較

6. まとめ

本稿では、トンネルの縦断方向、立坑接合部ならびに横断方向の免震機構と免震設計法、ならびに解析例を示し、設計法を中心として地下構造物の免震設計マニュアル(案)の概要を紹介した。本マニュアル(案)では設計法として、縦断方向では表層地盤の地震応答解析の実施と梁ばねモデルにおける免震区間の相互作用ばねの設定法の提案を、立坑接合部では詳細解析法を用いた静的応力解析を、横断方向では2次元有限要素モデルを用いた静的応力解析を特徴としており、従来の地下構造物の耐震設計法と比較すれば、より厳密な解析に基づいた設計法となった。免震材、施工法の開発を終え、さらに設計法がまとまったことにより、地下構造物の免震技術の実用化への道が開けたと考えている。

謝辞

本稿は、建設省土木研究所、(財)土木研究センターならびに(株)奥村組、(株)熊谷組、(株)鴻池組、佐藤工業(株)、飛鳥建設(株)、前田建設工業(株)、オリエンタルコンサルタンツ(株)、日本技術開発(株)、日本工営(株)、日本シビックコンサルタント(株)、旭電化工業(株)、信越化学工業(株)、住友ゴム工業(株)、東亜道路工業(株)、東海ゴム工業(株)、川崎重工業(株)、(株)小松製作所によって実施された建設省共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発」の最終報告書としてまとめられた地下構造物の免震設計マニュアル(案)の内容を、研究代表機関である建設省土木研究所と共同研究の幹事長ならびに設計WG幹事で代表してまとめたものである。本マニュアル(案)は、共同研究参加各位の研究・開発ならびに活発な議論によりまとめることができた。ここに記して深謝する次第である。

参考文献

- 1) 鈴木：シールドトンネルの免震構造に関する模型振動実験，第20回地震工学研究発表会，pp.565-568, 1989.
- 2) 竹内他：シールドトンネルの断面内地震時応力低減効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.483/I-26, pp.107-116, 1994.
- 3) 宇波，鈴木：シールドトンネルの免震構造に関する研究（その1）-FEM解析による効果の確認-，土木学会第45回年次学術講演会，第1部，pp.1204-1205, 1990.
- 4) 鈴木，宇波：シールドトンネルの免震構造に関する研究（その2）-地震応答解析への適用-，土木学会第45回年次学術講演会，第1部，pp.1206-1207, 1990.
- 5) 鈴木：シールドトンネルの耐震性評価と免震化手法に関する研究，東京大学工学部博士論文，1990.
- 6) 川島他：地下構造物の耐震設計技術の開発に関する研究，共同研究報告書第29号，pp.208-235, 1989.
- 7) 川島他：地下構造物の耐震設計技術の開発に関する研究，平成元年度共同研究報告書，pp.282-324, 1990.
- 8) 川島他：地下構造物の耐震設計技術の開発に関する研究，平成2年度共同研究報告書第63号，pp.290-330, 1991.
- 9) 川島他：地下構造物の耐震設計技術の開発に関する研究，平成3年度共同研究報告書，pp.255-283, 1992.
- 10) 鈴木：トンネル免震構造の開削トンネルへの適用，第23回地震工学研究発表会，pp.413-416, 1995.
- 11) Otuska, H., Hoshikuma, J. and Nagaya, K.: A Fundamental Study on Innovative Menshin System for Underground Structures, Proc. 6th U.S.-Japan Workshop on Earthq. Dis. Prevent. for Lifeline Systems, Osaka, pp.427-436, 1995.
- 12) 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.
- 13) Suzuki, T.: Damages of Urban Tunnels due to the Southern Hyogo Earthquake of January 17, 1995 and the Evaluation of Seismic Isolation Effect, CD-ROM of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996.
- 14) 森吉他：常温水中硬化型瀝青系新複合材料の開発と特性，土木学会論文集，No.433 /V-15, pp.157-166, 1991.
- 15) 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，No.534/VI-30, pp.69-76, 1996.
- 16) 建設省土木研究所他：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発（その1），共同研究報告書154号，1996年11月.
- 17) 建設省土木研究所他：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発（その2），共同研究報告書192号，1997年12月.
- 18) 建設省土木研究所他：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発（その3）-地下構造物の免震設計法マニュアル(案)-，共同研究報告書，1998年9月.
- 19) 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.
- 20) 大塚他：地盤慣性力に基づく応答変位法を用いた地下構造物横断方向の耐震解析法，土木学会第52回年次学術講演会，1-B, pp.906-907, 1997.