

3.1.2 地下構造物の免震設計法マニュアル（案）

鈴木猛康

熊谷組技術研究所（〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043）
tsuzuki@ku.kumagaigumi.co.jp

1. はじめに

地下構造物の免震設計法マニュアル（案）¹⁾は、平成7年7月～平成10年3月の約3カ年に亘る建設省土木研究所、（財）土木研究センターならびに民間17社による建設省官民共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発」の最終成果を、設計法マニュアルの形式でまとめたものである。本共同研究では、免震メカニズムの検討、免震材料の開発やその免震材を用いた免震構造の施工法の開発、免震設計法の開発、ならびに免震効果の検証実験と、地下構造物の免震構造に関する包括的な研究が行われた。マニュアル（案）は指針のスタイルで、設計法を中心として書かれているが、設計法開発に当って実施されたパラメトリックスタディーや検証実験、免震材料や施工法等についても参考資料としてまとめられており、設計から材料、施工に至まで一連の共同研究の成果が網羅されている。

本稿では、このマニュアル（案）の免震設計法を中心として、共同研究で開発された地下構造物の免震構造について紹介する。

2. 地下構造物の免震構造

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^{2),3),4)}。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可能とするが、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、トンネルと周辺地盤との絶縁に加えて構造物躯体とトンネルとの絶縁も必要である。

図-1は硬軟地盤境界の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、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となる。地盤ひずみのピークを包含する領域のトンネル外周に免震層を形成すると、免震層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、トンネルひずみはフラットな分布形状となる。

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が抑制されるため、隅角部に断面力が集中する。また構造物に作用する地震荷重の中で周面せん断力が断面力発生要因に占める割合が相対的に大きく、要因全体の6割～9割に達することがある。免震層の設

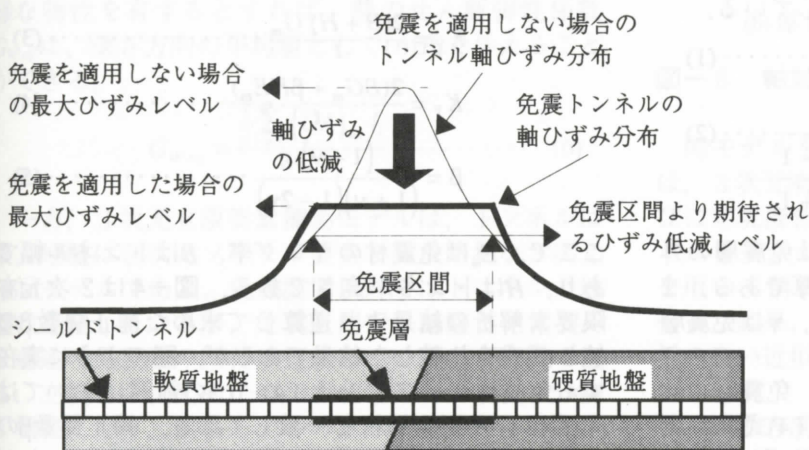


図-1 縦断方向の免震機構模式図

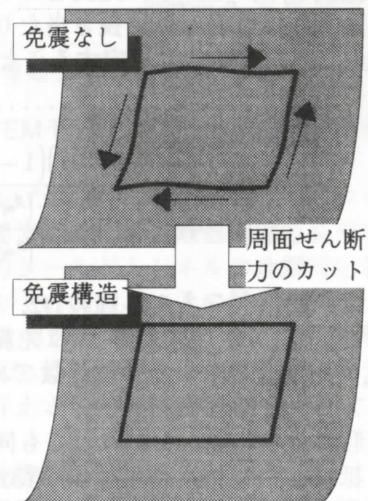


図-2 横断方向の免震機構模式図

置は、この周面せん断力を大きく低減させるため、大幅な断面力低減が可能となる。一方、免震層は体積変形の小さな免震材で構成されるため、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、全周に亘って軸力が低減する他、図-2に示すように、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が大きく低減される。これに対して、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、構造物の回転が可能であり、周面せん断力の影響は小さいため、免震構造の有効性は比較的低いと言える。

なお、マニュアル(案)で設計の対象とする免震材は、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0.1~50kN/cm²(1kgf/cm²~5kgf/cm²)、ポアソン比は0.4~0.5の範囲にある。

3. 縦断方向の免震設計法

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採用されてきた梁ばねモデルの適用を原則としている。図-3にモデルの概念図を示す。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応答を算出し、これを相互作用ばねを介して等価剛性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手法である。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ことから、地盤の地震時応答変位の算定には地震応答解析が不可欠と判断された。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厚み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たとき免震層に働く反力抵抗より、それぞれ免震層のトンネル軸方向、軸直角方向に対する単位長さ当たりの相互作用ばね定数 K_x 、 K_y を理論的に決定することとしている。

$$K_x = \frac{2\pi \cdot G_m}{\ln(R_m/R_t)} \dots \dots \dots (1)$$

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

ここで、 R_t はトンネル外径の1/2、 R_m は免震層の外径の1/2で $R_m = R_t + t$ 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も同様、免震層のせん断抵抗として相互作用ばねを(3)式と(4)式で与えている。ここで、軸直角方向の相互作用ばね定数については、側壁に接する免震層が水平方向と奥行方

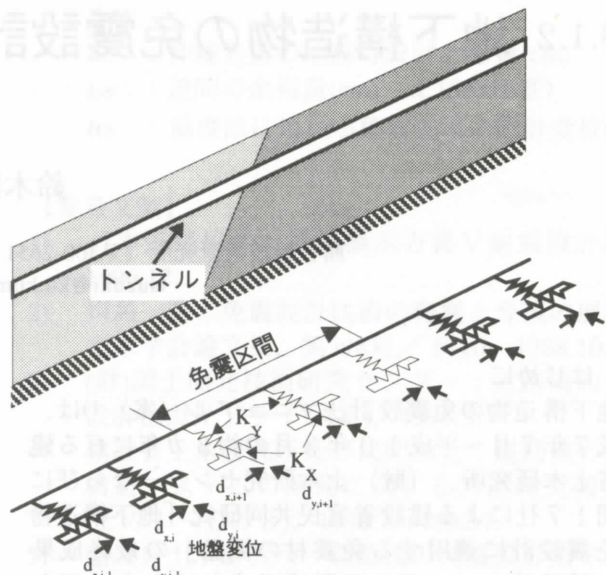


図-3 梁ばねモデルによる縦断方向の解析モデル

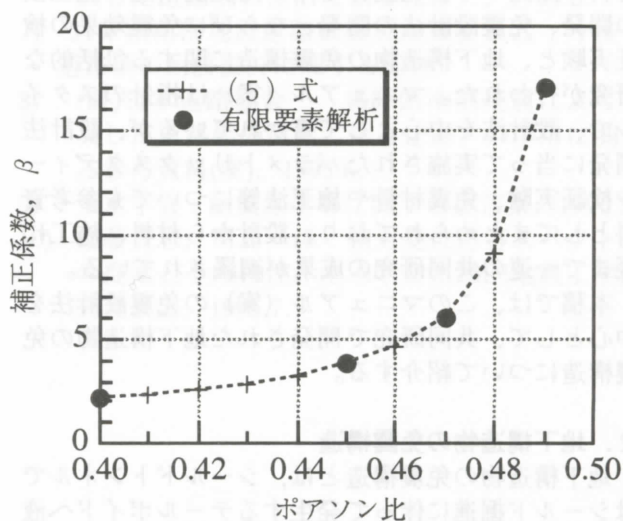


図-4 補正係数 β の近似式と2次元FEMとの比較

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に依存する(5)式の補正係数 β を考慮した(4)式としている。

$$K_x = \frac{2(B+H)G_m}{t} \dots \dots \dots (3)$$

$$K_y = \frac{2(BG_m + \beta HE_m)}{t} \dots \dots \dots (4)$$

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

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)式を比較した結果であるが、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検証されている。

4. 立坑接合部の免震設計法

立坑接合部の免震構造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地震時挙動は、立坑の地震時挙動に大きく依存することが確認されている。また、立坑接合部では、立坑躯体とトンネルとの絶縁構造も適確にモデル化が必要があることが示されている。このような局所的かつ3次元的现象を梁ばねモデルで再現するのは困難であることから、立坑接合部の免震設計では、立坑とその周辺地盤という局所的な領域に、軸対称FEMモデルや3次元FEM簡易モデルといったFEMによる詳細モデルを適用した部分系の解析を採用している。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⁵⁾。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とされた。

図-5にマニュアル(案)で採用された軸対称FEMモデル⁶⁾を模式的に示した。本モデルでは図のように、トンネル内周から表層地盤の基盤までが軸対称有限要素でモデル化されている。本モデルでは、地盤慣性力の鉛直方向分布の取り扱いは無論のこと、地震荷重とトンネルの軸方向変位の関係が地表面~基盤で構成される実地盤と一致するように、節点荷重を補正することによって、2次元解析で3次元のトンネルと地盤との相互作用の取り扱いを近似的に可能としたものである。

立坑接合部では、立坑の取り扱いを可能とするために、トンネルと接合される立坑躯体壁を、無限に連続するせん断剛性が等価な壁としてモデル化している。図-6に壁のせん断弾性係数のモデル化を示した。立坑は、実構造物と同じ壁厚 t と幅 W を有し、立坑と等価なせん断剛性 GA を有する壁としてモデル化する。等価なせん断剛性壁が図のように一様な物性を有するとすれば、壁のせん断弾性係数 $G_{w,eq}$ は、深さ方向の平均値として(6)式で与えることができる。

$$G_{w,eq} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (GA)_{v,i} \cdot l_i \dots \dots \dots (6)$$

一方、3次元有限要素簡易モデルは、トンネルは梁、地盤は3次元ソリッド要素とした簡易な3次元FEMモデルである。免震区間以外ではトンネルと地盤は連続しているが、免震区間では地盤とトンネルを前述の免震層のばねで連結しているのが特徴である。立坑を3次元的にモデル化するとメッシュ分割が煩雑となり、簡易モデルの意味がなくなることから、立坑をせん断剛性が等価な中実体(3次元ソリッド要素)にモデル化している。

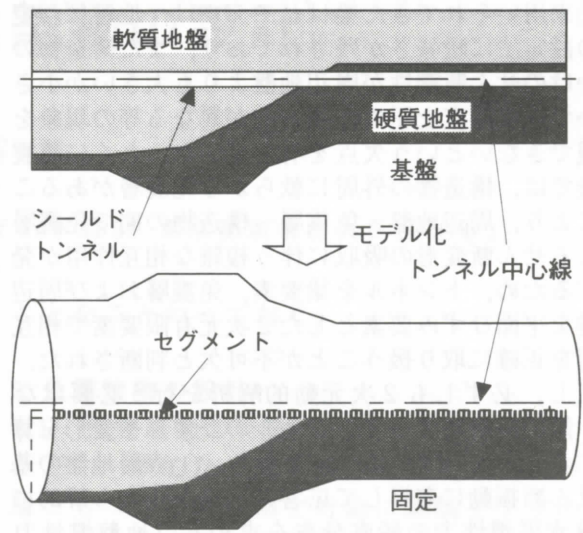
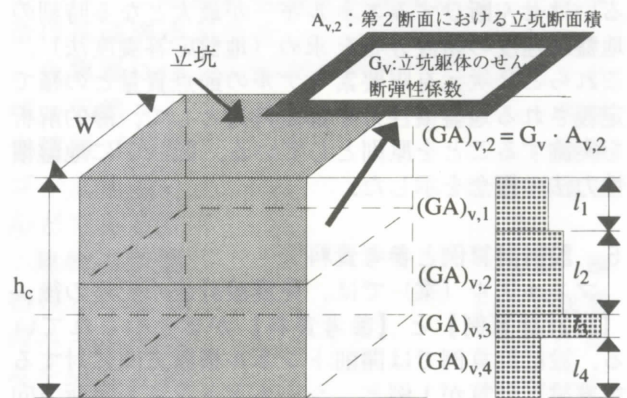
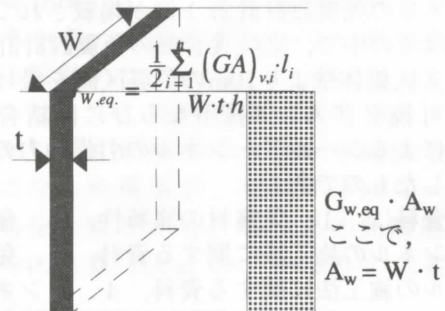


図-5 軸対称FEMモデルの概念図



(a) 立坑のせん断剛性の鉛直分布



(b) 厚さ t の等価なせん断剛性壁への変換

図-6 軸対称FEMモデルによる立坑のモデル化

両モデルを用いた詳細解析法の妥当性については、3次元有限要素解析による地盤条件急変部ならびに立坑接合部のシールドトンネルの地震時応答シミュレーションを予め実施し、この解析を両モデルを用いて解析し、3次元有限要素解析との比較を行った結果、これら詳細モデルは3次元有限要素解析の良い近似を与えることが検証されている。

5. 横断方向の免震設計法

横断方向の免震設計では、2次元有限要素解析が採用されている。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、地盤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次元有限要素で相互作用を正確に取り扱うことが不可欠と判断された。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ている。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(地盤慣性力法)か、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(地盤応答震度法)、これらと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、静的解析を実施することを原則としている。図-7に地盤慣性力法概念を示した。

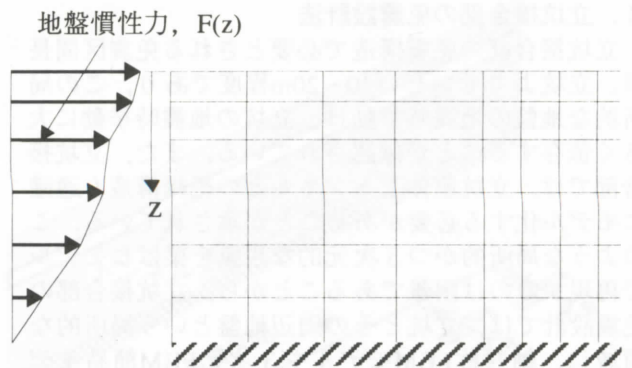


図-7 地盤慣性力法による静的解析概念図

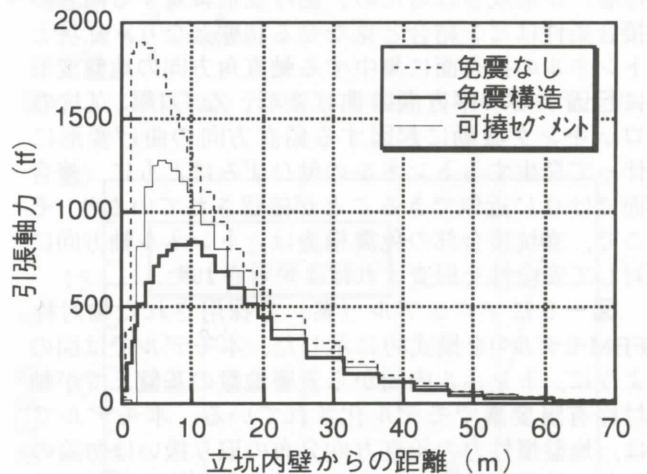


図-8 立坑接合部における引張軸力分布

6. 設計計算例と参考資料

マニュアル(案)では、免震設計法の記述の後、【設計計算例】と【参考資料】がまとめられている。設計計算例では開削トンネル横断方向に対する免震設計計算が1例と、シールドトンネル縦断方向の免震設計計算2例、ならびに立坑接合部のシールドトンネルの免震設計計算1例が掲載されている。図-8はこの中で、立坑接合部の免震設計計算において、立坑躯体壁より10mの免震区間を設けた免震構造と可撓セグメント採用ならびに剛結合の解析ケースによるシールドトンネルの引張軸力の比較結果を示したものである。

参考資料は、1. 免震材の諸特性、2. 免震シールドトンネルの施工法に関する資料、3. 免震開削トンネルの施工法に関する資料、4. トンネル縦断方向に対する免震設計の適用性、5. 開削トンネル横断方向に対する免震設計の適用性、6. シールドトンネル横断方向に対する免震設計の適用性、7. 立坑接合部に対する免震設計の適用性、8. 免震トンネル縦断方向に対する耐震設計法の適用性、9. 免震トンネル横断方向の耐震計算法の適用性、10. 免震シールドトンネル周辺地盤の沈下の検討例、11. 振動台実験によるトンネル縦断方向に対する免震効果の検証、12. 振動台実験によるトンネル横断方向に対する免震効果の検証、の12章で構成されている。なお、地盤急変部と立坑接合部におけるシールドトンネルの免震構造に関しては、土木研究所の大型振動台を用いた実証実験を実施しており、免震設計で採用した解析モデルによって実験結果が再現できることが検証されている。

7. 参考文献

- 1) 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)-, 共同研究報告書第211号, 1998年9月。
- 2) 鈴木猛康：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。
- 3) 竹内幹雄他：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。
- 4) 川島一彦他：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。
- 5) 丸山雅淑, 岡田一郎, 鈴木猛康：立坑接合部における免震シールドトンネルの地震応答解析, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 1998。
- 6) 鈴木猛康, 丸山雅淑：免震トンネルの耐震評価手法としての軸対称モデル, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2003-2008, 1998。