

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、鉄道、道路等の地上のライフラインのみならず、地下鉄、通信、上下水道、ガス等の地下ライフラインにも大きな被害が発生した¹⁾。この地震を契機として、耐震設計基準類の見直し、レベル2地震動の設定が行われ、これら基準類に基づいてレベル2地震動に対する耐震設計が、地下構造物でも実務で行われるようになった。現行の耐震設計法でレベル2地震動を適用すれば、何らかの地震対策を講じなければ地下構造物は損傷を受ける結果となるケースがほとんどである。しかし、現行の耐震設計法の基本である応答変位法には、波長の推定精度やレベル2地震動への適用性に限界があり、また設計計算に基づいてすべての地下構造物に特殊な地震対策を施すことに、世論の同意が得られるとは思えない。地下構造物は、地震時に地盤に追随して変形する特徴を有するため、地震被害を受ける箇所は地盤条件ならびに構造条件より特定できると言っても過言ではなく、要対策箇所の特定技術がもっとも重要と思われる。

一方、地下構造物でも、重要度の高い幹線道路、地下鉄、上下水道幹線、共同溝等は、大地震によって損傷を受けても供用に耐えうる程度に留まるか、地震発生後に速やかに復旧できることが要求される。重要構造物の建設に当たっては、もっとも効果的な箇所に、技術性かつ経済性に優れた地震対策を適用することが肝要である。

そこで、本稿では、地下ライフラインを構成する重要な要素である都市トンネルの地震防災という観点から、まず都市トンネル縦断方向の耐震設計において考慮すべき地盤条件について考察する。次に、都市トンネル縦断方向の耐震設計に適用する地盤ならびにトンネルの耐震解析モデルを示す。また、地震対策技術の現状をまとめるとともに、これらのモデルの実務への適用例を示す。

2. 波動伝播によって発生する水平成層地盤の直ひずみと都市トンネル縦断方向の耐震性

まず成層構造が平面的に連続するような水平成層地盤に、地震時に発生する直ひずみ(以下、地盤ひずみと呼ぶ)について考察する。応答変位法では地盤の変位振幅 U_h と波長 L を算定し、(1)式で地盤ひずみ ϵ_a を算定する。

$$\epsilon_a = \frac{\pi U_h}{L} \quad (1)$$

ここで、地盤の変位振幅は、表層地盤の基本せん断振動に基づき、応答速度 S_V を用いて(2)式で与えられる。地盤の応答速度 S_V は、例えば水道指針²⁾ではレベル2地震動に対して表層地盤の周期が0.7秒以上では90%非超過確率で100cm/sとされている。ここではこの値を、水平成層地盤で起こりうる最大規模の変位振幅と考える。

図-1に示す基盤上に $V_{S1}=50\text{m/s}$ の軟質地盤が30m堆積した水平2層地盤で、GL.-10mの地下構造物を想定する。表層地盤の周期は $T = 4 \times 30 / 50 = 2.4$ 秒であり、GL.-10mの地盤の変位振幅は以下のように42cmとなる。

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} S_V \cdot T = \frac{2}{\pi^2} 100 \cdot 2.4 \cdot \cos \frac{\pi \cdot 10}{2 \times 30} = 42\text{cm} \quad (2)$$

一方、波長 L は、波動の伝播速度 c と振動周期 T の積であるが、この伝播速度の推定法が確立されていないのが実情である。基準類では、表層地盤の基本せん断振動

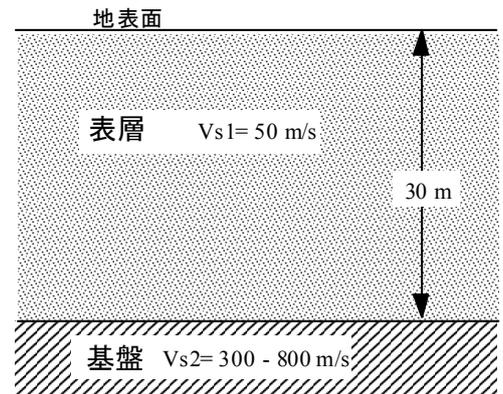


図-1 検討対象とする表層地盤

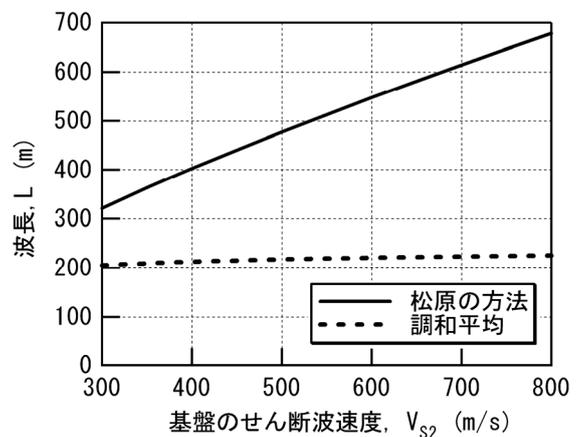


図-2 波長の試算例

の周期 T に、それぞれ表層のせん断波速度 V_{S1} 、基盤のせん断波速度 V_{S2} を乗じて求めた各波長の調和平均をみかけの波長 L として採用しているものが多い。表層地盤に到達した実体波は表層地盤で表面波に変換されて、分散性を有する表面波の伝播速度で伝播することが知られている。松原は、Love 波の群速度極小時の位相速度から波長 L を算定することを提案している³⁾。ここで、図-1 に示す地盤条件で、基盤のせん断波速度を $V_{S2}=300\sim 800\text{m/s}$ まで 50m/s 刻みで変化させ、調和平均ならびに松原の方法により求めた波長を比較して図-2 に示した。図のように、軟質な表層地盤が比較的厚く堆積した表層地盤を想定し、 V_{S2} を一般的に基盤と判断される 300m/s 以上と設定すると、両者の乖離は明確であり、 V_{S2} が大きくなるほど両者の差は拡大していることがわかる。(1)式の地盤のひずみ ϵ_a は、調和平均の波長の場合で 6000μ 程度、表面波から波長を求めれば $2000\sim 4000\mu$ 程度となる。調和平均の波長から算定した地盤ひずみを想定するならば地下構造物には地震対策が不可欠となるが、強震時の地盤の減衰が高いことを考慮すれば、実際に発生する地盤ひずみはもっと小さいはずである。一方、Love 波や Rayleigh 波の表面波の波長を設計で用いるなら、特殊条件下の地下構造物に多少の損傷が出ることは否定できないが、決して地震対策を要する地盤ひずみのレベルには至らない。とくに水平成層地盤中では、波動の伝播によって地盤ひずみが発生するわけであるから、どこか1箇所に損傷が集中して構造物に大規模な破壊が生じるわけではない。したがって、すべての地下ライフラインで、縦断方向の耐震設計を適用する必要性は認められない。

3. 不整形地盤中の都市トンネル縦断方向の耐震設計

3. 1 概要

水平成層地盤構造における波動伝播で発生する地盤ひずみと比較して、不整形表層地盤では 10000μ オーダーの極めて大きな地盤ひずみの発生する可能性がある。我が国では都市は沖積平野に形成されているが、その基盤構造は過去の海進、海退や旧河川の蛇行の歴史を反映させて複雑な起伏構造を呈している。過去の地震においても、地上の構造物のみならず、地下ライフラインに大きな被害をもたらしたのは、地盤条件が急変する箇所、旧河川跡、埋め立て地あるいは切土～盛土の境界等である。このように、2次元あるいは3次元の地盤不整形性に起因して発生する地盤ひずみは、不整形地盤をモデル化した2次元あるいは3次元の地震応答解析によらなければ算定できない。

3. 2 擬似3次元地盤モデル

2次元不整形地盤の地震応答解析は、多質点系モデルあるいは2次元有限要素法によって行うのが既に一般的となっている。パーソナルコンピュータの高速化、大容量化により、有限要素法を用いた2次元地震応答解析は、パーソナルコンピュータによる逐次非線形解析に至ってもさほど苦にならないレベルにまで達しつつある。地下構造物横断面方向の都市トンネルの耐震解析は、2次元有限要素法による動的解析、あるいは地盤応答震度を静的に水平に載荷する地盤応答震度法による静的解析によって可能となる。しかし、縦断方向の耐震検討では、地盤の不整形性を2次元でモデル化することの是非が、まず問われることとなる。表層地盤の不整形性が、トンネルの線形に対して3次的に分布する場合には、地盤は当然ながら3次元でモデル化しなければならない。しかし、3次元有限要素法では、モデル化の煩雑さ、コンピュータ容量、解析時間のみならず、境界条件の設定に高度な専門知識を要するため、実務設計で使用できるレベルには達していない。

そこで、図-3 に示す擬似3次元地盤モデル (Q3D)⁴⁾ のように、3次元地盤構造の簡易解析モデルが考案された。本モデルでは、3次元表層地盤を土柱にブロック化し、各土柱を基本せん断振動の1質点系でモデル化する

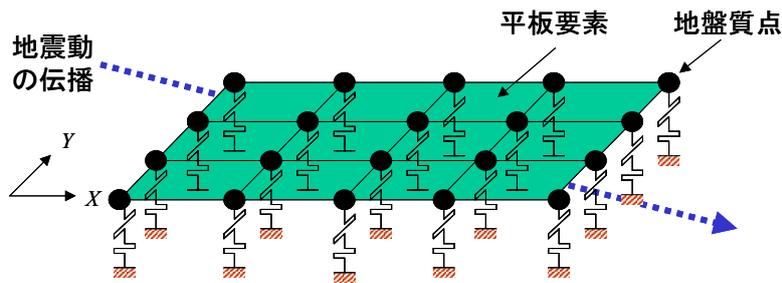


図-3 擬似3次元地盤モデルの概念図

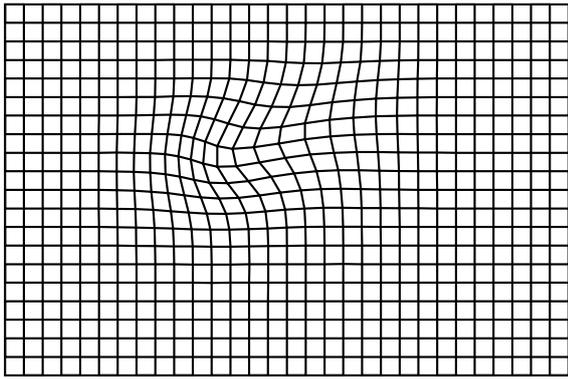


図-4 溺れ谷地盤の1次振動モード

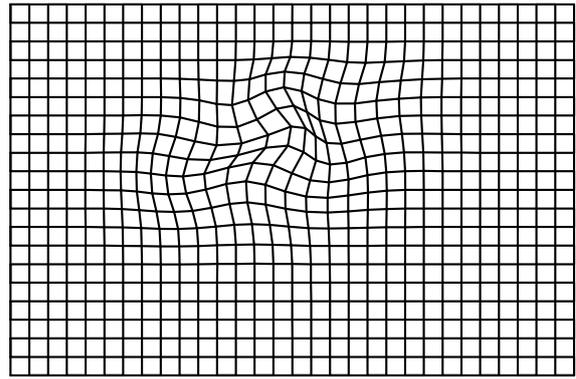


図-5 溺れ谷地盤の7次振動モード

とともに、隣り合う質点間を平板要素で置換えている。本モデルは基本的に2次元モデルであるが、上下振動を取り入れることによって、簡単に3次元振動も解析することができる。また、土柱の基本せん断振動のみに限定されず2次、3次のせん断振動についても考慮でき⁵⁾、また非線形解析も可能とする拡張擬似3次元モデル (EXQ3D) までモデルの拡張を行った。

図-4ならびに図-5は、図-6に示す表層厚分布を有する溺れ谷地形の表層地盤の主要な2つの振動モードを、擬似3次元地盤モデルによって解析した結果である。図のように、振動モードによって最大振幅の発生する場所や振動主軸の方向が異なり、表層地盤固有の振動を呈することがわかる。

3.3 実務への適用例

図-7は擬似3次元地盤モデルを沈埋トンネルの耐震性評価に適用した例である⁶⁾。沈埋トンネルは海底を浚渫、平坦な基礎を形成した後、陸上あるいは海上で構築した沈埋函を計画地点まで曳航して沈設、連結して建設される海底トンネルである。沈埋トンネルの基礎は平らであっても、河川あるいは港湾の海底地盤は複雑な基盤構造ならびに海底表層地盤の堆積構造を呈することが多く、いわゆる基盤不整形な地盤構造である。

図-7において、黒く塗りつぶした部分が旧河道を意味しており、厚い地点では50mの深さまで海底に軟質層が堆積している。点線は護岸線を示している。沈埋トンネルはちょうどメッシュの中央を左右に配置されるように計画されており、沈埋トンネルの耐震性評価のために、海底地盤の地震時変位応答を算定する目的で擬似3次元地盤モデルが採用された。メッシュは擬似3次元地盤モデルの平板要素のメッシュである。

沈埋トンネルの耐震設計は、一般にトンネル縦断面に関する2次元解析によって行われるが、明らかに表層地盤の3次元構造がトンネルの地震時応答にとって支配的となる場合には、モデル化や解析があたかも2次元FEMと同等に簡易にできる擬似3次元モデルを適用すれば、実務設計にも十分に対応可能である。

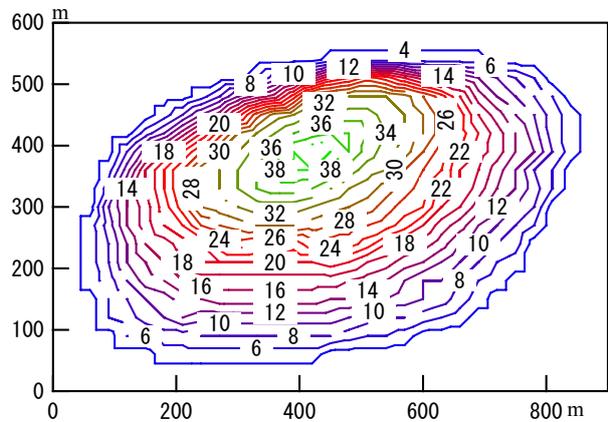


図-6 溺れ谷盆地の表層厚分布

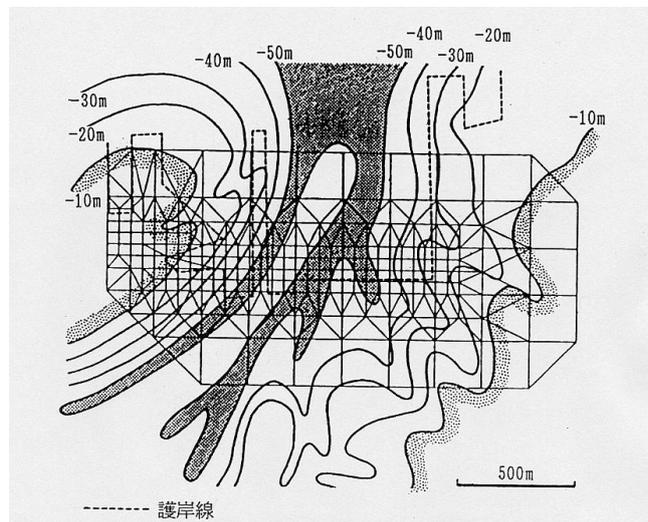


図-7 沈埋トンネルの耐震設計への適用例

4. 地下ライフラインの地震防災対策と耐震設計

4.1 柔構造と免震構造

上述した不整形地盤の硬軟地層境界や異種構造物との接合部といった局所的に発生する大ひずみを構造的に吸収する、あるいは地盤ひずみの伝達を遮断する地震防災技術がある。

都市トンネル縦断方向の地震対策技術としては、シールドトンネルの場合には可撓セグメントや弾性ワッシャー、開削トンネルの場合には可とう性継手といった、いわゆる柔らかなばねを構造物間に挿入し、構造物の変形を集中的に吸収する柔構造化技術が一般的である。柔構造化技術は、構造物外周に変形拘束がなければ、ばねが小さい分だけ大きな変位を吸収できる。しかし構造物外周を地盤が拘束する条件では、構造物と柔継手の直列ばねから期待するだけの変位吸収は期待できない⁷⁾。したがって、柔構造は相対変位の発生が確実な箇所での採用が効果的である(図-8上図参照)。これに対して、硬軟地層境界や異種構造物と都市トンネルの接合部において、地盤や異種構造物から構造物へのひずみの伝達を遮断するのが免震技術である(図-8下図参照)。免震技術には、図-9に示すように、構造物外周に柔らかいゴム弾性体で構成される免震層を配置し、免震層のせん断変形で地盤ひずみを吸収するものと、構造物外周で地盤との滑動を発生させ、構造物に伝達させるのは動摩擦力のみとする滑り型免震構造がある⁸⁾。また、免震層と滑り型免震構造を併用することができる。柔構造化技術は主にレベル1地震動を対象とした対策技術であるのに対して、免震技術はレベル2地震動用の対策技術と言える。

4.2 軸対称FEM解析モデル(EASIT)

上記のようなトンネル～免震層～地盤の相互作用やトンネル外周で発生する滑りを、トンネルを棒あるいは梁で、地盤をばねでモデル化するような離散化手法で再現することは困難である。したがって、トンネルとその外周を有限要素法によりモデル化することが必要となるが、通常は3次元解析となるので実務設計には適さない。そこで、図-10に示すように、トンネル中心を対称軸とし、基盤面を外周面とする軸対称モデルが開発されている。都市トンネルの耐震解析で用いられてきた梁ばねモデルでは、梁にある間隔で地盤ばねが接続されており、ばねの先端にトンネル位置における地盤変位が強制変位として与えられていた。これに対して、軸対称FEMモデルでは、トンネルは3次元シェル要素であり、その周囲の地盤要素に対して、トンネルが存在しなければトンネル周辺地盤に所定の変形が生じるような水平外力を载荷している。梁は大きさを持たずに剛性だけを有する部材で

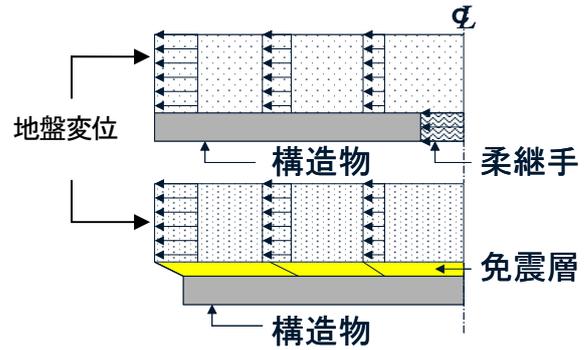


図-8 柔構造化技術と免震技術の相違

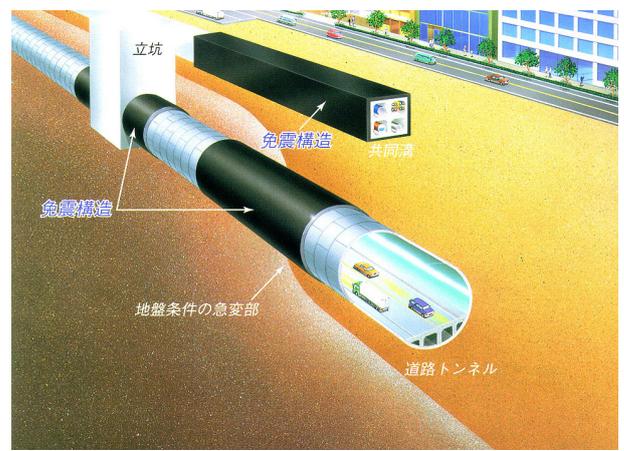


図-9 地下構造物の免震構造

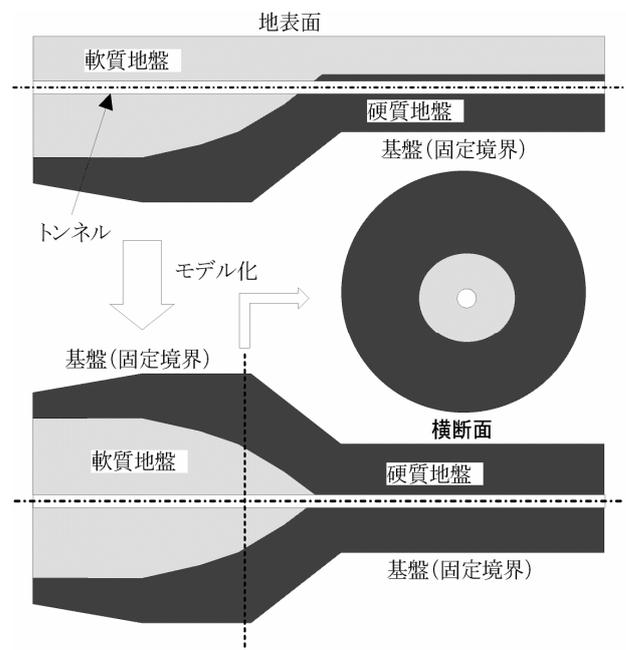


図-10 軸対称FEMモデル(EASIT)の模式図

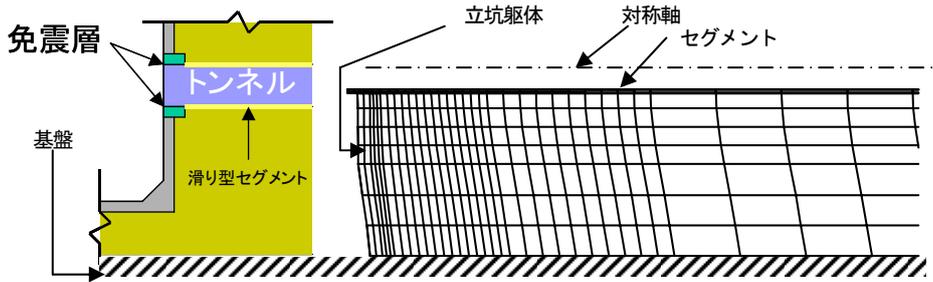


図-11 軸対称 FEM モデル (EASIT) による立坑接合部免震構造の解析例

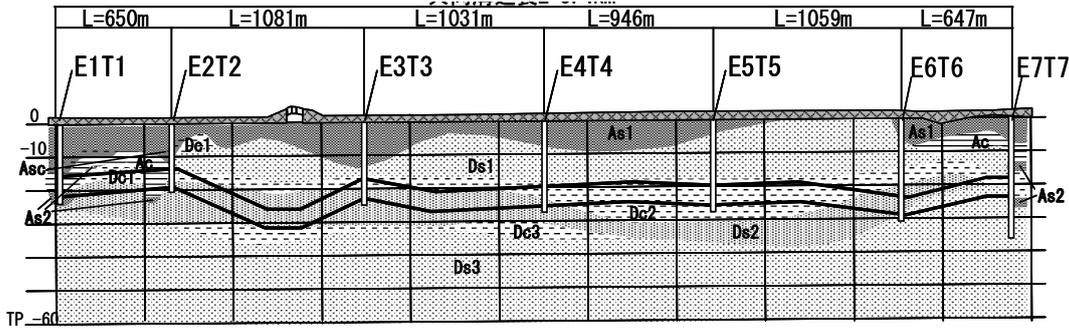


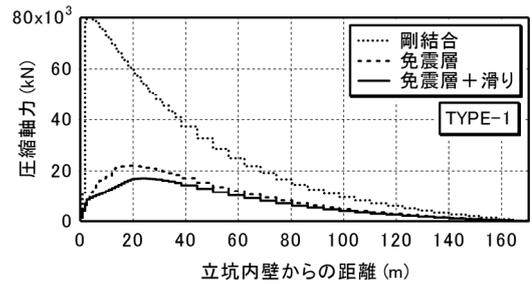
図-12 検討の対象とする地盤縦断面およびトンネル縦断線形の模式図

あり、地盤ばねの定数は本来変形の波長に依存するものであるのに対して、軸対称 FEM モデルのトンネルと地盤は 3次元有限要素でモデル化されているため、都市トンネルと地盤との相互作用は厳密に取り扱われる。このモデルは免震設計用として開発、検証が行われ、既に EASIT の名称で免震解析用プログラム^{8),11)}として実務設計に使用されている。図-11 は EASIT を用いたシールドトンネル立坑接合部の耐震検討を示している。立坑躯体までが軸対称要素でモデル化できるよう簡略化が行われており、入力データ作成の煩雑さはない。

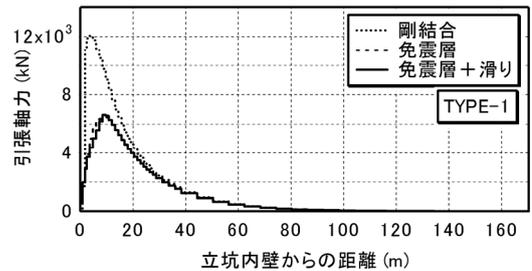
4. 3 免震設計の実施例

図-12 に示す外径 5450mm の共同溝シールドトンネルの立坑接合部を対象として、レベル 2 地震動に対する耐震検討に本モデルを適用した例を示す。総延長約 5.4km の共同溝であり、その間に E1T1, E7T7 の発進立坑、E4T4 の到達立坑と、中間立坑合わせて 7 立坑が構築される。本実施例は、これらのシールドトンネル立坑接合部において、免震層と滑動塗料を外周に塗布した滑り型セグメントを併用した新たな免震構造の適用を検討したものである⁹⁾。

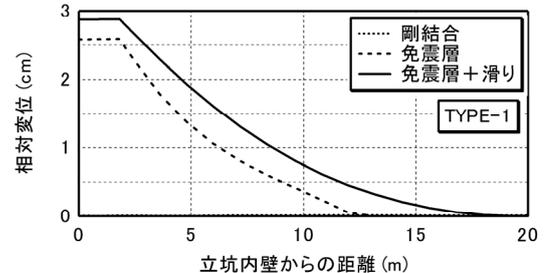
図-13(a), (b) は、E5T5 立坑接合部についてそれぞれトンネル圧縮軸力と引張軸力の縦断方向分布の解析結果を示したものである。図中の免震層とは、立坑外壁より約 10m の区間にせん断弾性係数 $G=0.5\text{N/mm}^2$ のシリコン系免震材を用いた免震層を層厚 7.5cm で形成するケースを意味しており、また免震層+滑りとは、立坑内壁より 2 リング



(a) トンネル圧縮軸力の縦断方向分布



(b) トンネル引張軸力の縦断方向分布



(c) トンネルと地盤の相対変位の縦断方向分布

図-13 E5T5 立坑に関する解析結果

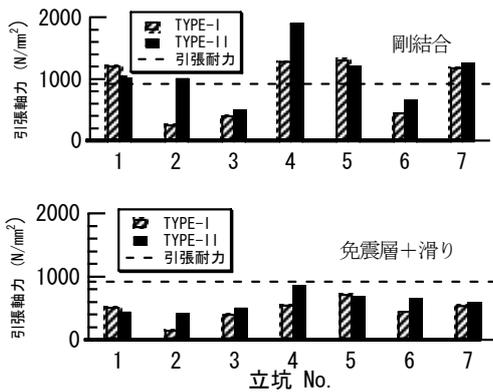


図-14 引張軸力の低減結果

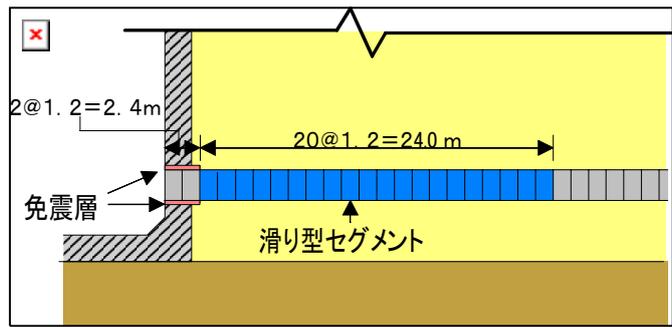


図-15 E5T5 立坑接合部の免震構造模式図

(2.4m) はセグメント外周に免震層を、これより 20 リング (24m) に亘って外面に滑動塗料を塗布した滑り型セグメントを適用してトンネルを構築するケースを意味している。圧縮軸力は、免震層の適用によって剛結合のケースの約 1/3 に低減しており、さらに免震層と滑りの併用は明らかに免震層のみのケースよりも軸力の低減が顕著で、剛結合のケースの約 1/4 に低減している。一方、トンネル引張軸力については、免震の適用による軸力の低減は圧縮の場合ほど顕著ではないが、免震の両ケースでは剛結合のケースに対して軸力が半減している。

図-13(c)では圧縮変形時の解析ケースで、セグメントと地盤との軸方向相対変位をまとめている。ここで相対変位とは、免震層のケースでは免震層のせん断変位を、免震層と滑りと併用ケースでは免震層のせん断変位とセグメント外周における滑り量を表しており、滑りは立坑より約 20m の区間に亘って発生していることがわかる。

セグメントに発生する引張軸力の検討結果を図-14 に示す。剛結合のケースでは、E3T3, E6T6 立坑を除いた 5 立坑接合部で引張り軸力が引張耐力を超えることとなったが、5 立坑接合部に対して免震層+滑り型セグメントを適用することによって、すべての立坑接合部において引張耐力以下に低減した。図-15 は、このような検討結果に基づいて設計された E5T5 立坑接合部の免震構造を示す。

5. まとめ

都市トンネル縦断方向の耐震性は高く、水平成層地盤ではとくに軟弱な地盤が特殊構造でなければ、耐震設計を適用する必要はないと考える。一方、地盤条件急変部や構造急変部では、3次元的地盤・構造条件を考慮した耐震検討が必要となり、擬似3次元地盤モデルや軸対称 FEM モデルによる合理的設計法と、免震構造等の確実な地震対策技術の適用が必須である。耐震設計の高度化を図り、効率的かつ効果的な防災対策が望まれる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997.
- 3) 松原勝巳：線状地中構造物の縦断方向耐震設計における地盤変位と地盤ばね定数の設定法に関する研究，武蔵工業大学工学部博士論文，2001.
- 4) Tamura, C. and Suzuki, T.: A Quasi-three-dimensional Ground Model for Earthquake Response Analysis of Underground Structures - Construction of Ground Model -, 生産研究，第39巻第1号，pp.37-40, 1987.1.
- 5) Suzuki, T.: The Extended Quasi-three-dimensional Ground Model for Irregularly Bounded Surface Ground, Structural Engineering/Earthquake Engineering, Vol.9, No.1, pp.21s-32s, 1992.
- 6) 清宮理，他：擬似3次元地盤モデルによる地震応答計算の沈埋トンネルへの適用，港湾技術資料，No.696, 1991.3.
- 7) 鈴木猛康：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.
- 8) 鈴木猛康，勝川藤太：地下構造物の滑り型免震構造の提案と検証実験，土木学会論文集，No.689/I-57, 2001.10.
- 9) 萩原良二，飯塚隆，鈴木猛康，岡田一郎，勝川藤太：免震層と滑り型セグメントを併用したシールドトンネル立坑接合部の免震設計，第26回地震工学研究発表会論文集，pp.797-800, 2001.8.
- 10) 鈴木猛康：地盤急変部における免震層，柔構造と滑り免震を併用した地震対策，第56回土木学会年次学術講演会，I-A376, pp.752-753, 2001.
- 11) Suzuki, T.: The axisymmetric finite element model developed as a measure to evaluate earthquake responses of seismically isolated tunnels, Proc. 12WCEE, Auckland, New Zealand, 2000.