

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

萩原良二¹・飯塚隆²・鈴木猛康³・岡田一郎⁴・勝川藤太⁵

¹正会員 国土交通省 千葉国道工事事務所 (〒263-0016 千葉県稲毛区天台5-27-1)

²国土交通省 千葉国道工事事務所 (〒263-0016 千葉県稲毛区天台5-27-1)

³正会員 工博 (財) 土木研究センター (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

⁴正会員 工修 日本シビックコンサルタント (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

⁵正会員 工修 中央復建コンサルタンツ (〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町2-11)

外径5450mmの共同溝シールドトンネルを対象として、免震構造の適用について検討を実施した。総延長約5.4kmの共同溝であり、その間に発進、到達、中間合わせて7立坑が構築される。本共同溝ではレベル2地震動を対象とした耐震検討が行われ、7立坑のうち5立坑の接合部で地震対策を実施することとなった。これらのシールドトンネル立坑接合部において、筆者らは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、免震設計法に基づいて検討した。その結果、新免震構造が従来型の免震構造と同等以上の耐震性能を有することが示された。

Key Words : Seismic isolation, shield-driven tunnel, isolation layer, slip, seismic design, axisymmetric finite elements, junction with a vertical shaft

1. はじめに

地下構造物の免震設計は、建設省名古屋国道工事事務所・中川共同溝の発進ならびに到達立坑接合部のシールドトンネルに対して、平成10年に初めて適用された¹⁾。この免震設計では、免震構造は従来技術である可撓セグメントと比較して、費用は同等ながら耐震性能がL1からL2地震動レベルへと1ランクアップすることが評価された。本共同溝に試験フィールド制度が適用され、試験施工が平成11年(発進立坑部)と平成12年(到達立坑部)に実施され、免震構造の施工性が検証された。また、発進立坑接合部では現場載荷実験が行われ、免震効果の確認も行われた。しかしながら、試験施工を通して、①免震材が高価なこと、②到達立坑部での絶縁層の施工に想定以上の労力を要すること、ならびに③坑口構造の簡略化が可能であることの3点が、免震構造の今後の課題として挙げられた。本稿では、これらの課題を克服すべく改良した立坑接合部の免震構造を示すとともに、本免震構造の実構造物への適用を目的として実施した検討の概要を紹介する。

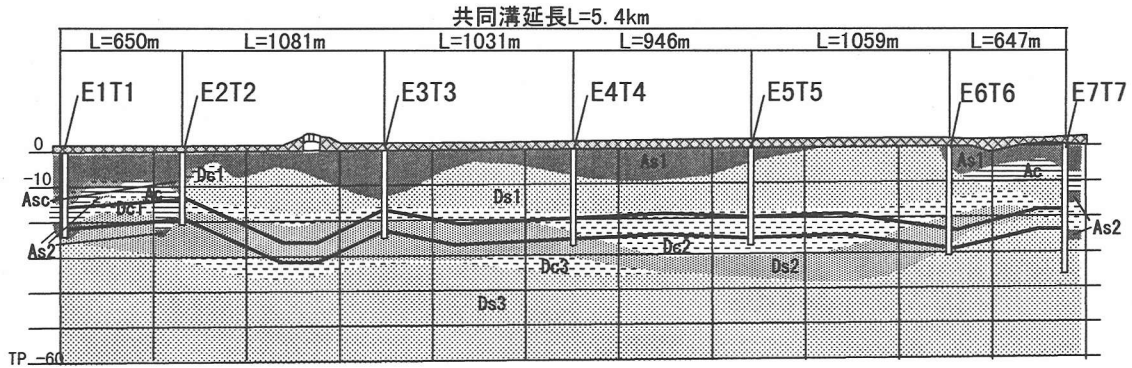
2. 共同溝と免震構造の概要

図-1は本稿で検討の対象とした共同溝の土質縦断図ならびにトンネルの縦断線形を示したものである。総延長5.4kmに亘る共同溝であり、トンネルは

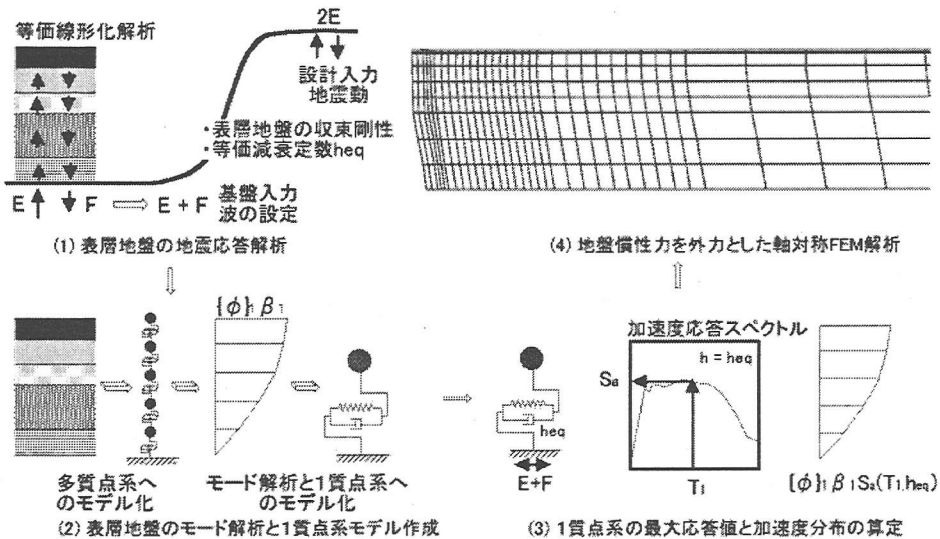
発進立坑2、到達立坑1、中間立坑4の合計7立坑と12箇所接合される。シールドトンネルはRCセグメント製であり、外径5450mm、セグメント厚は275mmである。

立坑接合部は、地震時にトンネルひずみがかかるとも集中する場所の一つであり、L2地震動を設計地震動として耐震検討を行うと、地盤条件がよほど良好でない限り、ほとんどのケースで何らかの地震対策が必要となると言っても過言ではない。本共同溝ではL2地震動を対象とした耐震性の検討が既に実施されていた。その結果、上記立坑接合部のほとんどの箇所では地震対策が必要との結論が得られた。そこで、地下構造物の免震設計法マニュアル(案)²⁾に従った免震設計法に基づき、既に前述の共同溝にて設計、施工の実績がある免震層を用いた免震構造の本共同溝への適用性について検討を行うとともに、耐震性能に加えて経済性ならびに施工性を加味した新たな免震構造の適用性についても、検討を加えることとした。

ここで検討する新免震構造は、①免震層は立坑より2~3mまでとし、それより10~20m程度に滑り型セグメントを適用する免震層と滑り型免震構造³⁾の併用とする、②到達部で残置するシールド機鋼殻の内部に形成する絶縁層を、液状免震材の注入によって構築する、③坑口構造を簡略化する、の3点を特徴としたものである。



図－１ 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



図－２ 免震設計における解析ステップの模式図

3. 免震設計

本免震設計は基本的には上記マニュアル（案）に従っているが、以下に示すようなトンネル外周における滑りの取扱いを付加することによる改良を行っている。立坑接合部の免震設計は、免震設計用解析コード EASIT⁴⁾を用いて、地盤とトンネルを軸対称 FEM でモデル化し、地盤慣性力を外力とした静的応力解析を実施した。トンネル外周の薄層要素に対して、バイリニア型の変形特性を与え、シールドセグメントの外周を構成する薄層要素のせん断応力が動摩擦応力に達すると、一定の動摩擦応力の下で滑ることとした。EASIT は、指定したセグメント外周薄層要素（要素厚はテールボイド厚と一致させている）に対してせん断応力のチェックを行って滑るか否かを判定し、滑る場合には薄層要素のせん断弾性係数を繰返し計算によって収束させるように機能が追加された⁵⁾。

図－２に示す免震設計のフローに従って、免震設計法を概説する。まず、(1)道路橋の耐震設計用標準波のL2地震動を路頭基盤波2Eと設定し、この振幅を1/2としたEを基盤入射波として等価線形化手法に基づいた表層地盤の地震応答解析を実施する。こ

れにより、土層のせん断弾性係数と減衰定数の収束値を得るとともに、以下の解析に用いる地動E+Fを求める。(2)表層地盤の収束物性を用い、表層地盤を多質点系でモデル化して、せん断振動モードを算定する。本モード解析で得られた基本せん断振動の1質点系（固有周期 T_1 ）を構成し、モードベクトルと収束減衰定数よりこの基本せん断振動モードの等価減衰定数 h_{eq} を算定する。(3)上記E+F波を地動として1質点系（ T_1 , h_{eq} ）の最大応答加速度 S_a を求め、さらに基本せん断振動のモーダルベクトルと刺激係数の積に S_a を乗じ、地盤慣性力算定のための表層地盤の加速度分布を算定する。(4)加速度分布と地盤質量の積である地盤慣性力を外力とし、地盤ならびにトンネルの応答をEASITにより解析する。

4. EASIT による免震解析と解析結果

検討の結果、E3T3 ならびに E6T6 の2立坑の接合部については、剛結合の条件でも L2 地震動に対する各照査項目は許容値以下であるため、地震対策は不要とし、残る5立坑接合部について免震設計を行うこととした。この中で、地盤条件よりもっとも

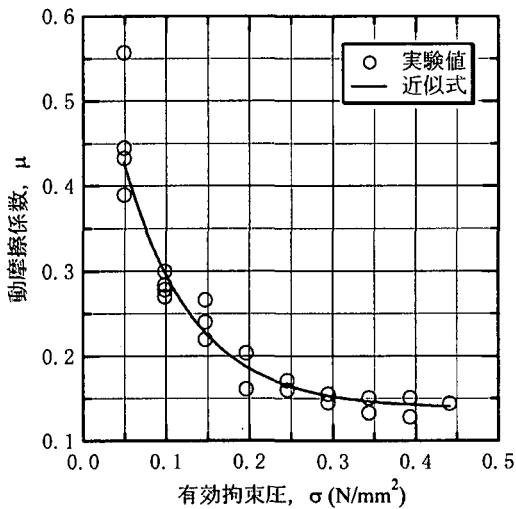


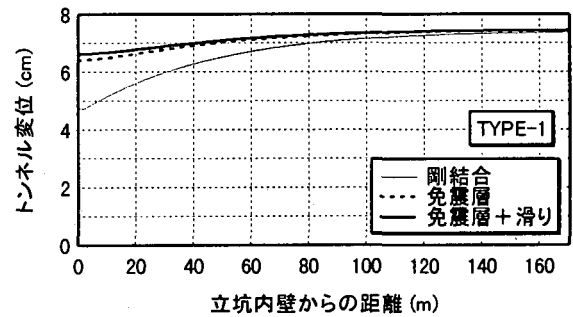
図-3 滑動塗料の摩擦係数

地震の影響が大きいと判断される E5T5 立坑接合部について、実施した免震解析について以下に概説する。

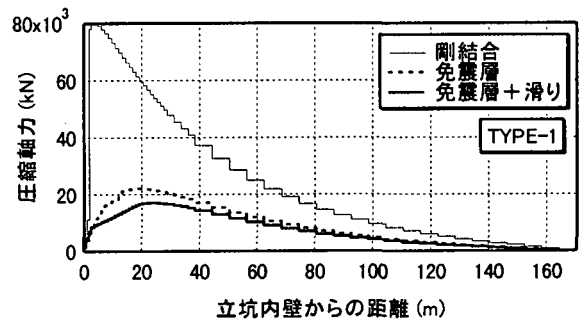
解析ケースは、トンネル構造のケースとして、立坑接合部を剛結としたケース、立坑外壁より約 10m の区間にせん断弾性係数 $G=0.5\text{N/mm}^2$ のシリコン系免震材を用いた免震層を層厚 7.5cm で形成するケース（従来免震構造）、さらに立坑内壁より 2 リング（2.4m）はセグメント外周に免震層を、これより 20 リング（24m）に亘って外面に滑動塗料を塗布した滑り型セグメントを適用してトンネルを構築するケースの 3 ケース、入力地震動のケースとして L2 地震動のタイプ I、タイプ II の 2 ケース、セグメント剛性のケースとして圧縮剛性、引張剛性の 2 ケースで、合計 $3 \times 2 \times 2 = 12$ ケースとした。なお、滑りを解析する場合の摩擦応力の設定であるが、トンネル中心深度における有効土圧は 0.184N/mm^2 であり、図-3⁵⁾よりこの拘束圧に相当する滑動塗料の動摩擦係数として $\mu=0.18$ と設定すると摩擦応力は $\tau=0.033\text{N/mm}^2$ となる。そこで解析では安全率を考慮して $\tau_f=0.035\text{N/mm}^2$ を採用した。

図-4 (a) はタイプ I 地震動を入力とし、圧縮剛性を用いた場合について、トンネル構造条件によるトンネル水平変位の縦断方向分布の相違をまとめたものである。図のように、剛結合では立坑付近でトンネル変位分布に急激な変化が見られるのに対して、免震層を用いた免震構造では立坑内壁においても変位が大きく、緩やかな変位分布となっていることがわかる。免震層と滑り型免震構造を併用した場合にはさらに、トンネル変位分布の勾配が緩やかである。

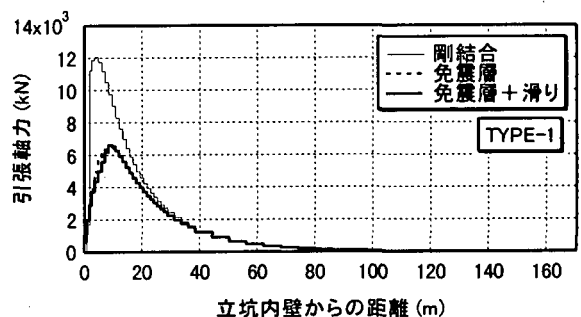
図-4 (b) は上記の解析ケースで、発生したトンネル圧縮軸力の縦断方向分布を示したものである。免震層の適用によって軸力は剛結合のケースの約 1/3 に低減しており、免震層と滑り型免震構造の併用は明らかに免震層のみのケースよりも軸力の低減が顕著で、剛結合のケースの約 1/4 に低減していることがわかる。一方、図-4 (c) はタイプ I 地震動



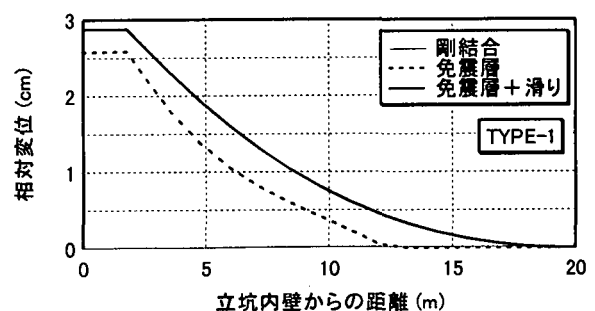
(a) トンネル水平変位の縦断方向分布



(b) トンネル圧縮軸力の縦断方向分布



(c) トンネル引張軸力の縦断方向分布



(d) トンネルと地盤の相対変位の縦断方向分布

図-4 EASITによる解析結果 (TYPE-1)

を入力とし、引張剛性を用いた場合について、トンネル引張軸力の縦断方向分布を示したものである。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-4 (d) は圧縮剛性を用いた上記解析ケースで、セグメントと地盤との軸方向相対変位をまとめたものである。相対変位とは、免震層のみのケースでは免震層のせん断変位を、併用の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

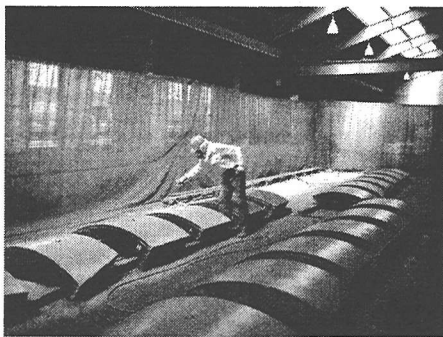


写真-1 セグメントへの滑動塗料の塗布状況

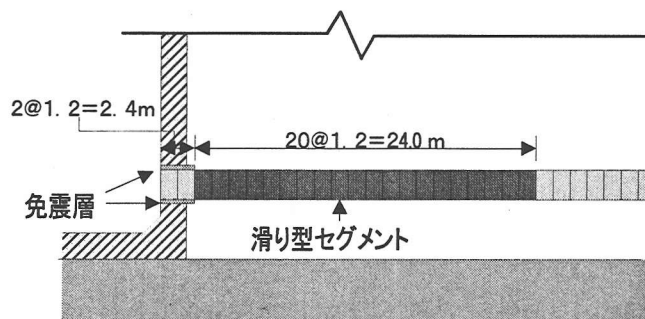


図-5 E5T5 立坑接合部の免震構造模式図

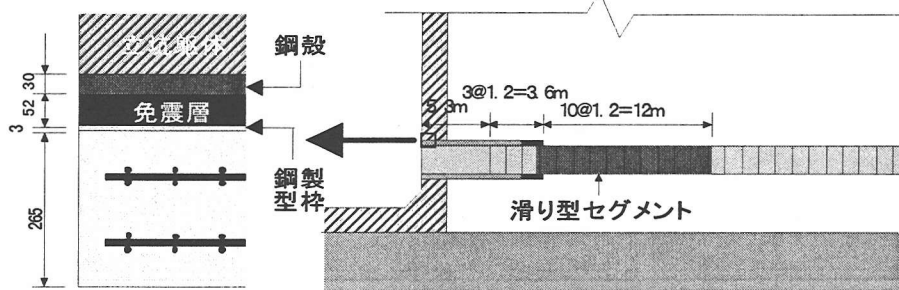
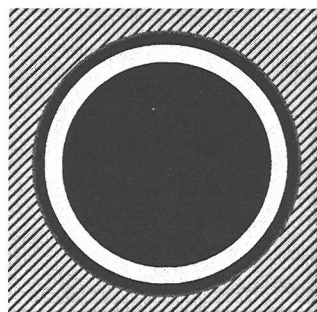


図-6 E4T4 立坑接合部の免震構造模式図

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。なお、その他の立坑接合部では、滑りが発生した区間は 10m 以内であった。

5. 免震構造

E3T3 と E6T6 を除く 5 立坑接合部については、立坑内壁より 2 セグメントリングである 2.4m のみテールボイドにシリコン系免震材 ($G=0.5\text{N/mm}^2$) を形成することとし、E1T1 と E2T2 ならびに E7T7 についてはそれより 10 リングに亘って、E5T5 についてはそれより 20 リングに亘って、滑動塗料を塗布した滑り型セグメントを採用することとした。また到達立坑である E4T4 については、シールド機鋼殻より 10 リングに亘って、滑り型セグメントを採用することとした。滑り型セグメントとは、写真-1 に示すように外周面に滑動塗料をスプレーで塗布したセグメントである。

図-5 に中間立坑 E5T5 の免震構造を、また図-6 に到達立坑 E4T4 の免震構造を模式的に示した。図-6 に示すように、到達立坑接合部では、厚み 3mm のスチール製型枠を配置し、到達立坑において残置されるシールド機の鋼殻とスチール製型枠との間に免震材を充填させることとした。この型枠は、さらにその内側に施工する現場打ち RC 覆工のコンクリート打設時の外型枠として利用することとした。

以上のような免震構造を採用することで、立坑外壁より約 10m に亘って免震層による免震構造を形成させた場合と比較して、L2 地震動に対する耐震性能はほぼ同じであることが示された。さらに滑りを導入することにより、設計地震動を上回る大きな

地震動入力を想定した場合には、従来型の免震層のみを採用した免震構造よりも、耐震性能が優れていることを確認することができた。このように、免震層と滑り型セグメントを併用した新免震構造は、重要度の高いトンネルの地震時安全性の確保に対して、有効であることが示された。

5. まとめ

共同溝のシールドトンネル立坑接合部を対象として、免震層と滑り型免震構造を併用した新たな免震構造の適用性について検討した。その結果、新免震構造は、免震層のみを用いた従来型免震構造と同等以上の免震効果を与えることが示され、都市ライフラインの地震時安全性確保に有効であることが示された。

参考文献

- 1) 運上茂樹, 小木曾繁, 廣瀬昌俊, 鈴木猛康: シールドトンネル立坑接合部に対する免震構造, トンネルと地下, Vol.30, No.12, pp.43-53, 1999.12.
- 2) 建設省土木研究所: 地下構造物の免震設計マニュアル(案), 共同研究報告書第211号, 1998.10.
- 3) 鈴木猛康, 勝川藤太: 滑動塗料を用いた地下構造物の免震構造, 第2回免震制震コロキウム論文集, pp.311-318, 2000.
- 4) Suzuki, T.: The axisymmetric finite element model developed as a measure to evaluate earthquake responses of seismically isolated tunnels, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- 5) 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, 2001. (投稿中)