

1002

滑りを考慮した地下構造物縦断方向の免震設計

中央復建コンサルタント 正会員 鈴木 猛康
熊谷組技術研究所 正会員 勝川 藤太

1. はじめに

ゴム弾性体による免震層を構造物外周に形成させる免震構造は、L2地震動に対する地下構造物の地震対策として有効であることが確認されている¹⁾。しかし、免震層を構成する免震材が高価なため、免震区間が長くなる場合にはコスト面が課題とされていた。これに対して、地下構造物の外周に特殊滑動塗料を塗布し、地震時に構造物と地盤あるいは裏込め材との間で低摩擦の滑りを発生させる滑り型免震構造が開発され、免震構造の低コスト化を可能とした²⁾。本稿では、地下構造物縦断方向の免震設計への適用を目的として開発された解析コード"EASIT"を、滑りを考慮できるよう拡張し、EASITによる試算を通して滑りを考慮した地下構造物縦断方向の免震設計のフローを示すものである。

2. 滑り型免震構造とモデル化

滑り型免震構造は、水性エマルジョンタイプの特種シリコン系滑動塗料をスプレーで塗布するだけで、この塗料膜が裏込め材あるいは埋め戻し土の水分を吸収して滑動面を形成し、地震時に構造物と裏込め材あるいは地盤との間で滑りを発生させる新たな地下構造物の免震構造である。写真-1はセグメント外周面に塗料をスプレーで塗布している状況である。繰返し中空ねじりせん断試験によれば図-1に示すように、滑動層の動摩擦係数 μ は有効拘束圧とともに低下し、有効拘束圧 0.3N/mm^2 では 0.15 程度まで低減する。

解析コード"EASIT"は、3次元構造を軸対称有限要素で近似的にモデル化し、さらに地盤応答震度法等を取り入れて動的現象を静的解析に置き換えることによって、複雑な地震時の免震トンネルの挙動を簡便に解析するものであり、地下構造物の免震設計に実用化されている。"EASIT"では、セグメント外周にテールボイドに相当する厚みの薄層要素を配置し、この薄層の物性として免震層のゴム弾性を与えることによって、免震層をモデル化していた。解析コード"EASIT"における滑動は、この薄層の有限要素に以下に示すバイリニア型の復元力特性を持たせることにより、滑りをモデル化することとした。すなわち、薄層は低ひずみのせん断変形時にはトンネル外周地盤のせん断弾性係数 G_s に応じた線形挙動を示し、要素に発生するせん断応力 τ_f が(1)式による摩擦応力 τ_f を超えると滑動して要素のせん断応力は一定値 τ_f となることとする。

$$\tau_f = \mu\sigma \quad (1)$$

ここで、 μ は滑動層の動摩擦係数、 σ は有効拘束圧である。このようなバイリニア型の復元力特性を得るため、iterationのnステップでの薄層要素iのせん断弾性係数 G_i を、(n-1)ステップにおける要素のせん断ひずみ γ と τ_f を用いて、(2)式で与えることとした。

$$G_i = \tau_f / |\gamma| \quad (2)$$

通常、このような iteration では、初期のステップでは滑り要素が iteration 毎に拡大する。最終的に(2)式による G_i と τ_f の差が許容範囲内に収まるのを確認することによって、解析が収束したとみなした。繰返し計算のステップで、滑り要素の拡がりにともない滑りの方向が逆転する場合等には、一旦薄層要素が



写真-1 滑動塗料の塗布状況

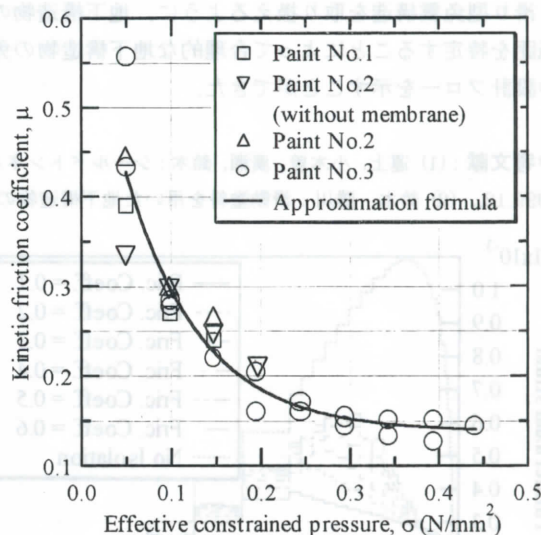


図-1 滑動塗料の動摩擦係数

Seismic Isolation Method in the Tunnel Axial Direction for Underground Structures in Consideration of Sliding-type Isolator:
Tekeyasu SUZUKI (Chuo Fukken Consultants Co. Ltd.) and Touta KATSUKAWA (Kumagai Gumi Co., Ltd.)

滑り状態に入ってから、再度せん断応力が摩擦応力を大きく下回る段階がある。したがって、あるステップで一旦滑り要素となっても、せん断応力が滑り応力の80%を下回ると、未滑動の要素として初期の線形特性を与えることとした。

3. 解析例と免震設計フロー

シールドトンネルの立坑接合部を対象として数値解析によるパラメトリックスタディーを実施した。図-2に解析対象とするトンネル断面および立坑の条件を示す。トンネルは、共同溝の標準的な外径5m級の断面を有するシールドトンネルとした。地震荷重は別途解析した地盤の地震応答解析に基づいて、地表面で約600cm/s²、レベル2相当地震慣性力を静的に作用させた。

解析ケースとしては、トンネルと立坑が剛結合のケース、立坑内壁より3mの区間はせん断弾性係数0.5N/mm²

の免震層を厚さ7cmで形成し、それより40mの区間は滑り型セグメントを用いた滑り型免震構造を適用することとした。なお、滑り型免震構造では、動摩擦係数 μ を0.1から0.6まで0.1きざみで変化させたパラメトリックスタディーを実施した。

図-3は解析の結果得られたトンネル軸ひずみの縦断方向分布を、動摩擦係数 μ をパラメータとして整理したものである。また、図-4はセグメント外周面と地盤との相対変位の縦断方向分布を示したものである。ここで示されている相対変位とは、滑り型セグメントにおいては滑り量を意味している。これらの図のように、滑動塗料の動摩擦係数 μ が小さくなるほど、滑動範囲が拡大して滑り量の絶対値が大きくなり、その結果、トンネルの軸ひずみ発生量が低減している。このように解析の結果、トンネル外周で滑りの発生する領域を特定できれば、効果的な滑りセグメントの配置を決定することが可能である。

滑りを考慮した免震設計のフローとしては、(1)まず地盤ひずみ分布を把握する目的で接合部剛結条件にて滑りを考慮することなくEASITによる数値解析を行う。次に、(2)その結果得られるトンネルのひずみ分布のピークを包含するように、滑動可能区間を設定し、(3)再度滑りを考慮したEASITによる解析を行う。その結果、実際に滑りの発生する区間とそのときのセグメントや継手の挙動に応じて最終的に、(4)滑りセグメントを配置する区間長を決定する。

4. まとめ

滑り型免震構造を取り扱えるように、地下構造物の免震設計プログラム"EASIT"を拡張した。その結果、滑りの発生範囲を特定することによって合理的な地下構造物の免震設計が可能となった。また、試算によって、滑り型免震構造の設計フローを示すことができた。

参考文献：(1) 運上, 小木曾, 廣瀬, 鈴木: 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) 鈴木, 勝川: 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.

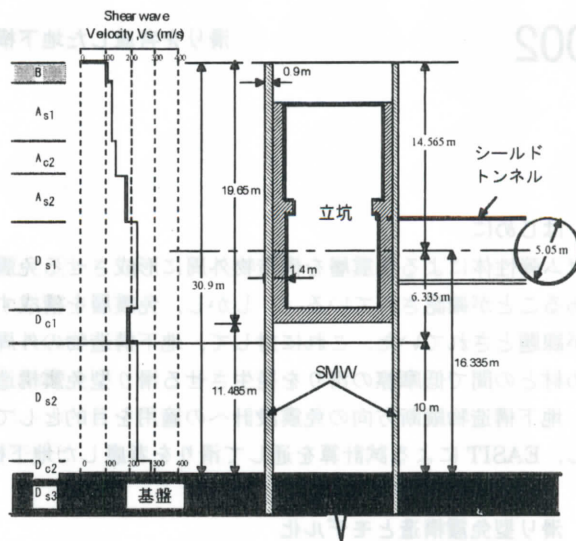


図-2 解析対象とするトンネルと立坑接合部

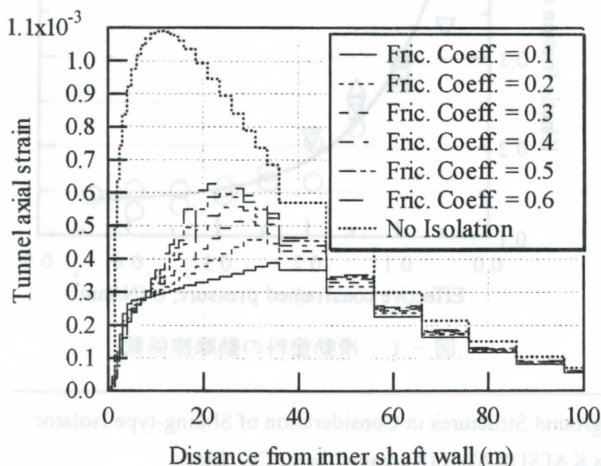


図-3 動摩擦係数とトンネル軸ひずみの関係

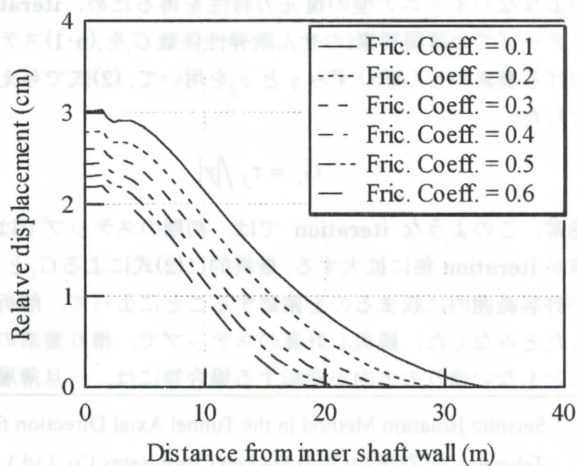


図-4 トンネル～地盤間の相対変位(滑り量)