

II-25 EWS を用いた任意断面シールドトンネル覆工部解析システムの開発

○(株) 富士総合研究所解析技術第1部 眞鍋 尚
 (株) 富士総合研究所解析技術第1部 宮崎 浩徳
 (株) 富士総合研究所解析技術第1部 大谷 泰昭
 早稲田大学理工学部土木工学科 小泉 淳

1. はじめに

シールド工法は他の工法と比べて地盤沈下が少なく、交通阻害を引き起こさないこと、また近接構造物に対する騒音、振動問題が起こらないなどの特徴を有し、都市部トンネル工法として多くの実績を持つ。シールドトンネルの設計に際しては、セグメントピースをつなぐセグメント継手、リングを連結するリング継手の剛性の評価方法、さらにその継手による剛性低下を構造モデルにどのように考慮するのが重要なポイントとなる。加えて、シールドトンネル特有の構造系である千鳥組による添接効果をどのように評価するかが重要である。

これまでセグメントリング断面力算定に関してはセグメントリングを曲げ一様なリングと考える方法(慣用計算法)が多用されている。しかしその設計結果は地山が良好な場合には経済性に疑問があり、また地山が悪い場合には変形が大きくなる等の問題があると指摘されており、地山の良否に応じたシールドトンネルの合理的かつ経済的な設計法の確立が望まれている。村上、小泉[1]により提案された手法(以下MK法)は合理的モデルのひとつであり、個々の継手部をばねで評価し、シールドトンネル覆工を擬似三次元円弧骨組構造としてモデル化し、抵抗土圧をWinklerの仮定に基づく地盤ばねとして構造モデルに取り入れる。このモデルにおいては千鳥組の添接効果をよく表現していることが検証されている。著者らは既にMK法に基づいてシールドトンネル設計支援となる横断方向解析システム‘MOLEMAN’を開発した[2]。‘MOLEMAN’はパソコン上で動作するが、真円のみしか解析できないなどの難点があり、任意形状を解析可能なシステムの開発が望まれていた。そこで今回、大容量で高速演算が可能なEWS(Engineering Work Station)上で動作し、任意形状に対しても解析可能な任意シールドトンネル断面力計算システム‘MOLEMAN2’の開発を行った[3]。この開発にあたっては、MK法に忠実に従うことを念頭におき、ユーザーが様々な条件下においても容易に解析可能なシステムの構築を目指した。本文は‘MOLEMAN2’の有する機能を紹介することを目的とし、その適用性および解析例を示したものである。

2. 解析手法

シールドトンネル横断方向の挙動に関する構造モデルではセグメント継手部の曲げ剛性の評価が重要なポイントである。本システムではこれをセグメント継手回転ばね定数で評価し、MK法に従い、継部分をボルトの締付け力に関与する継手板の有効幅を用いて水平方向および垂直方向のラーメン材でモデル化する。ここで、水平方向のフレーム材は‘てこ反力’を考慮する場合と‘てこ反力’を考慮しない場合によって取り扱いが異なる。‘てこ反力’を考慮しない場合には、継手板をはり部材としてモデル化し、継手板、ボルトの剛性によりそれぞれ正曲げ、負曲げに対応した回転ばねの評価を行なう。

一方、‘てこ反力’を考慮した場合は‘てこ反力’が発生する部分に支点ばねを配して、支点反力の総和を‘てこ反力’とみなし、この支点位置が確定するまで収束計算を行なう。また同時に継手板の初期圧縮変形を評価するばねをその変形に応じて取り除き、その段階毎に曲げモーメント M 、回転角 θ を算出する。得られた M, θ の関係を最小2乗法を用いて線形化し、回転ばね定数を決定する。

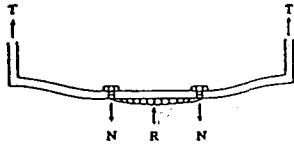


図1 てこ反力

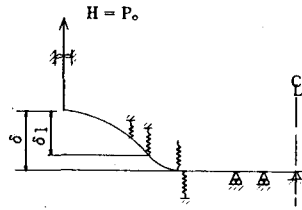


図2 支点ばね

断面力を計算する際にはシールドトンネル覆工を図3のようにはりとはばねから成るモデルに置換する。ここで一次覆工、二次覆工および、他の任意部材は線形円弧はり、直線はりを用いてモデル化を行なう。セグメント継手は回転、法線方向、接線方向ばねに、リング継手ばねは法線、接線方向ばねとして評価する。抵抗土圧はいわゆる‘Winkler ばね (地盤ばね)’と考え収束計算を行なってその作用位置を定める。なおそれぞれのばねは非線形性も考慮できるようにしている。図4 はばね要素の非線形性の例を示したものである。モデル化された構造系に対して Matrix 構造解析法を用いて変位および断面力を求める。その際、計算時間短縮のため Skyline 法により連立一次方程式を解いている。

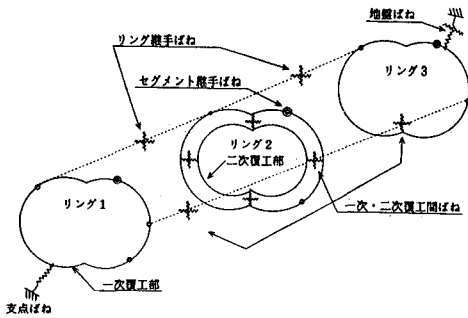


図3 はり - ばねモデル

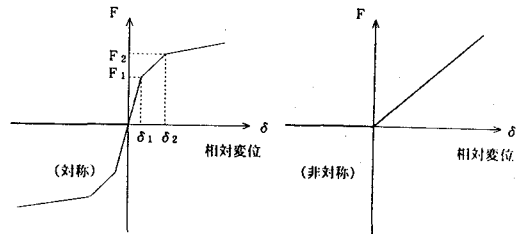


図4 ばねの特性

3. システムの概要

本システムは環境設定モジュール、セグメント回転ばね算定モジュールおよび断面力計算モジュールから構成されている。本システムはEWSのWindowシステム上において動作するものであり、これはどの機種においても共通に標準的機能として搭載されているため、特に機種の限定はしていない。したがって、UNIXをOSとする機種に対して動作可能である。操作方法はマウスオペレーションを基本とし、データ入力に関しては画面を見ながら入力可能な対話形式を採用している。このためEWSおよびOSの知識の少ないユーザーでも容易に使用できる利点を持つ。

3.1 解析機能

セグメント継手回転ばね定数算定モジュールではコンクリート平板形、コンクリート中子形、スチールおよびダクタイルセグメントを対象としている。特にコンクリート平板形セグメントは通しボルトタイプも解析でき、また継手部のボルト数は4本まで解析可能である。

断面力計算モジュールでは最大8000節点、13000要素の構造に対して解析可能である。覆工は円弧はり、直線はりを用いてモデル化を行い、これらを組み合わせることによって真円のみならず任意形状の覆工構造に対しても適用可能である。その際、自動メッシュ分割機能を有しているため、複雑な任意形状でも容易にモデル化できる。また、セグメント継手、リング継手はユーザーが任意の位置に設定することができる。このためセグメント継手の位置を変化させるだけでも継ぎ、千鳥組を容易に設定できる。継手部を評価するばねに関しては完全弾塑性を採用している。また、地盤ばねに関しては荷重条件(外荷重、自重)に応じて異なる地盤ばねの設定が可能である。ここで用いる地盤ばねはMatrix構造解析法における全体系、要素系の定義が可能である。要素系で定義される地盤ばねは接線方向に対しては完全弾

塑性であり、法線方向に関しては圧縮、引張りばねとして評価する。収束計算過程においてばね反力の値よりユーザーが設定した圧縮および引張り、弾性、一次、二次塑性の地盤ばねを選択することになる。荷重の取り扱いにおいては自重の他に外荷重として全体系、要素系でそれぞれ分布荷重、節点荷重を設定できる。自重と外荷重との組み合わせ、または複数の荷重ケースの組み合わせが選択できる。自重と外荷重とを加え合わせて断面力を計算する他に自重、外荷重に対してそれぞれ独立に計算を行ない断面力の段階で重ね合わせて出力することもできる。計算結果の出力はリスト出力とグラフ出力の2つの機能がある。グラフ出力は1,2,3リングでそれぞれ構造系、荷重条件、地盤ばね作用位置、変位、および曲げモーメント、軸力、せん断力、リング継手部せん断力の断面力が画面に表示される。

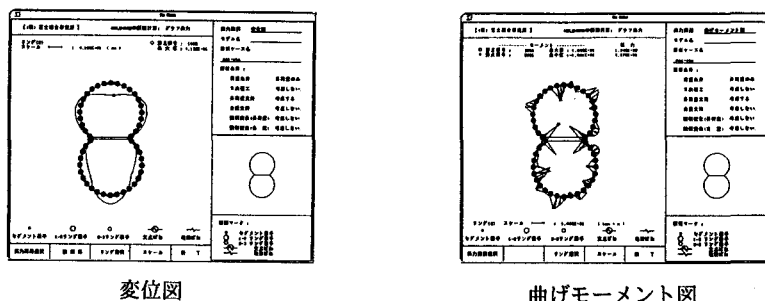


図5 グラフ出力

3.2 適用性

本システムはシールドトンネルの一般的な形状である円形トンネルのみならず最近のシールドトンネルにみられるようなMF(Multi Face)トンネルや駅部のように三連で中壁を有するようなトンネルや、多心円や欠円さらに矩形トンネルなどの任意の形状に対してモデル化可能であり、これらのトンネルが二次覆工を有する場合にも適用できる。最大節点数8000、要素数13000を考慮すると複雑な形状においても十分細かいメッシュ分割が可能であり、十分精度の良い解析結果が得られると考えている。

表1 解析機能一覧

項目	機能
セグメント継手 回転/ばね定数を 計算する対象セ グメント	・コンクリート平板形セグメント (1本ボルト)(帯型、ボックス型) ・コンクリート平板形セグメント (2本ボルト)(帯型、ボックス型) ・コンクリート平板形セグメント (3本ボルト) ・コンクリート中子形セグメント ・通しボルトタイプセグメント ・スチールセグメント ・グラタイルセグメント
構造系のモデル 化	・真鍮板および円筒型を用いた任意の断面 形状のモデル化が可能 ・マルチフェイスシールド ・DOT ・楕円形シールド ・欠円シールド ・二次覆工、セグメント継手、リング 継手、地盤ばね、一次・二次覆工間 ばねの構造のモデル化が可能
荷重	・荷重ケースを最大5ケースまで組み合 わせ可能 ・節点荷重(全体系、要素系) ・分布荷重(全体系、要素系) ・自重
リングの組み方	・セグメント継手位置の任意指定が可能 ・イモ継ぎ ・2リング1サイクル千鳥組 ・3リング1サイクル千鳥組
データ入力方法 数値解法	・対話形式によるデータ作成 ・有限要素法 ・スライディング法による連立方程 式の高速処理
出力図	・構造モデル・荷重図 ・変位図 ・断面力図(軸力図、せん断力図、 曲げモーメント図) ・リング継手せん断力図

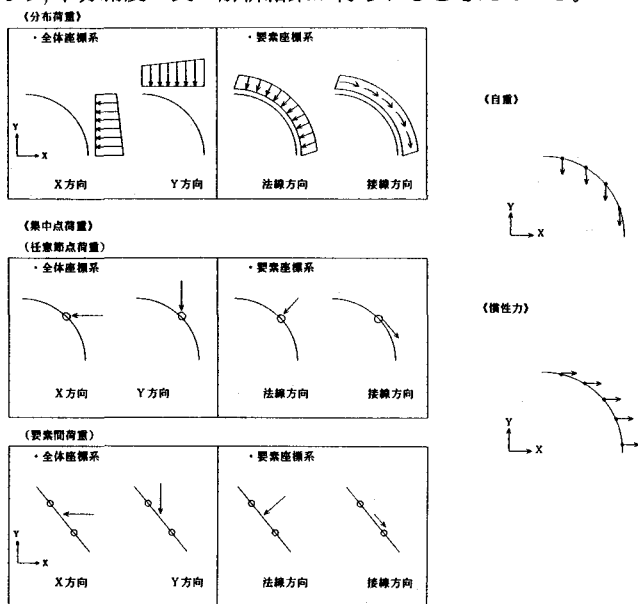


図6 荷重概要

また、適用用途としては土、水圧を考慮する一般的な地中構造物や内水圧を考慮する水路トンネルの解析に用いることができる。耐震性の検討に関しては地盤変位を地盤ばねのばね先変位として扱い、地盤の

せん断力および慣性力を考慮する解析が可能である。さらに、自重の取り扱いにおいては自重荷のみ
の解析をはじめ、土圧、水圧を発生断面力レベルで加算する方法や地盤改良剤の同時注入や即時注入を想
定した同一構造系による解析も可能である。詳細の設計検討については算出された断面力によりセグメ
ント本体および継手部、ヒンジ構造取り付け部、二次覆工の健全性の評価にも用いることが可能である。

4. 解析例

本システムを用いて行なった解析の中から例としてその一つを以下に示す。この例は3連型駅シール
ドトンネルの例であり、助川[4]らに示された他のプログラムによる計算結果との比較を目的に解析した
例である。構造は2リング千鳥組とし、リング間のせん断ばねは無限大としている。また地盤ばねは法
線および接線方向で同じものを与え計算を行なった。解析条件および諸元は文献[4]に従っている。図
7~9に解析結果として得られた変位図および断面力(曲げモーメント、軸力)図を示す。

○ 節点番号 : 1001
最大値 : 8.203E-01

○ 節点番号 : 1002 最大値 : 2.605E+01
○ 節点番号 : 1018 最小値 : -1.722E+01

○ 節点番号 : 4039 最大値 : 2.276E+02
○ 節点番号 : 3002 最小値 : 1.223E+02

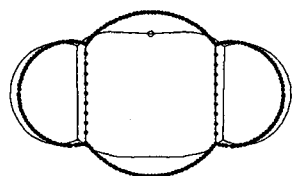


図 7 変位

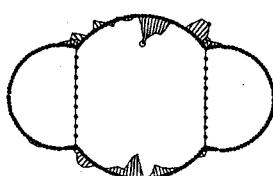


図 8 曲げモーメント

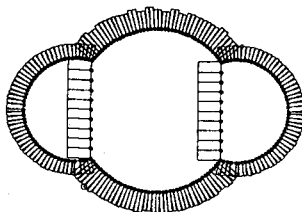


図 9 軸力

解析結果は変位、断面力とも文献[4]とほぼ一致している。したがって、本システムを用いればこのよ
うな複雑な構造物の解析をEWS上において容易に行なえることがわかる。

5. おわりに

本文ではMK法に基づく任意断面シールドトンネル解析システム‘MOLEMAN2’を紹介し、そのシス
テム概要、解析例を通じて本システムが任意断面に対して容易に解析可能なことを示した。今後はさら
に本システムの使用性の向上、解析機能の改良に努める予定である。なお、縦断方向解析では既にシール
ドトンネル縦断方向解析システム‘KING MOLE’を開発している[5]。本システムの開発に際し、西松建
設(株) 根本隆栄氏、(株) 大林組横溝文行氏、鍋本 誠氏、佐藤工業(株) 岡村直利氏、木村定雄氏、清水建設
(株) 川口博行氏、青山哲也氏、守屋記和氏、およびパシフィックコンサルタンツ(株) 佐藤辰己氏、岩松親
博氏より設計に関わる貴重な意見を得た。ここに謝意を表する次第である

参考文献

- [1] 小泉 淳, シールドトンネルの設計法, MOLEMAN シリーズユーザー会講演会テキスト, (1994)
- [2] MOLEMAN 使用説明書, (株) 富士総合研究所, (1989)
- [3] 任意断面シールドトンネル解析システム MOLEMAN2, (株) 富士総合研究所, (1992)
- [4] 助川 禎, 中島 信, 藤木 育雄, 荻野 竹敏, 小泉 淳, 3 心円形駅シールドトンネルの設計法に関する研究, ト
ンネル工学研究発表会 論文・報告集, 3, 111, (1993)
- [5] シールドトンネル縦断方向解析プログラム KING MOLE, (株) 富士総合研究所, (1991)