

地下連続壁を本体利用する開削トンネルの 擬似一体解析手法

中島 卓哉* 小林 克哉**
戸田 和秀*** 小島 謙一#

Simple Analysis Method of Considering Construction Process
at the Time of the Design of Cut and Cover Tunnels with Diaphragm Walls

Takuya NAKASHIMA Katsuya KOBAYASHI
Kazuhide TODA Kenichi KOJIMA

Analysis methods used when cut and cover tunnels with diaphragm walls are designed have been so far either those in consideration of construction process or those leaving construction process out of consideration (hereinafter referred to as analysis method separating construction process). Practically, analysis methods separating construction process have been used unless particular conditions are required at the time of design, because they often leads to the result of the safe side and they are easy to apply. On the other hand, analysis methods in consideration of construction process at the time of design has been said to be desirable in a case where the influence at the time of construction is large. But it is rarely used because the analysis method is very complicated. For that reason, simple analysis methods of considering the residual stress at the time of construction when the main body is designed have been studied. But they have not as far been applied generally. So in this paper, we proposed a simple analysis method of considering the stress state at the time of the temporary installation of diaphragm walls to be later used as the side walls of a cut and cover tunnel in order to make cut and cover tunnels with diaphragm walls more rational and economical structures, and we also showed the characteristics.

キーワード：開削トンネル，地下連続壁，本体利用，擬似一体解析，分離計算法，一体計算法

1. はじめに

地下連続壁（以下、「連壁」という。）を本体利用する際の開削トンネルの構造解析手法としては、一体計算法もしくは分離計算法がある¹⁾。詳細については後述するが、実務においては、計算が容易であることや設計時点では施工工程が明確となっていないことから、一般的な条件下では分離計算法が用いられてきた。一方、地盤掘削時（以下、「施工時」という。）の影響が大きい場合などにおいては、一体計算法により設計することが望ましいとされてきたが、手法の煩雑さなどの理由からほとんど用いられてこなかった。そのため、簡易的に施工時の残留応力を本体設計時に考慮する一体計算法も示されたが、適用範囲などがあまり明確になっていない。

そこで、連壁を本体利用する構造物の設計を適切かつ

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

** 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
(現 鹿島建設株式会社)

*** 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
(現 日本製鉄株式会社)

鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

合理的なものとするを目的として、現実的な応力状態を表現することが可能な一体計算の簡便法（以下、「擬似一体解析」という。）を検討し、その特性を明確にした。本論文では、擬似一体解析の適用性や特徴を評価するため、詳細法として位置付けた弾塑性 FEM 解析および現状の設計で多く用いられている分離計算法に対し同一断面を用いて解析を実施し、比較、検証を行った。

2. 連壁本体利用時の構造解析手法と特徴

1章で述べた3つの構造解析手法の概要とその特徴を表1に、分離計算法および擬似一体解析の概念をそれぞれ表2、表3に示す。

分離計算法における施工時の検討では、主働側圧を作用させた通常の弾塑性法による解析を行う。本体構造物完成時（以下、「完成時」という。）の検討では、連壁、本体構造、地盤ばねをモデル化した断面に、埋戻し荷重、く体自重、揚圧力などの鉛直力、静止側圧を作用させた骨組解析を行う。なお、分離計算法を用いる場合には、施工時の残留応力に配慮し、許容応力度の割増を制限し

特集：開削トンネルの設計技術

て設計（通常の仮設時割増率 1.5 に対して、1.3 程度に制限）されていることが多い。

擬似一体解析は、施工時の弾塑性法による解析と完成時の骨組解析を組み合わせた解析手法である。施工時の検討では、分離計算法と同様に通常の弾塑性法による解析を行う。一方、完成時の検討では、連壁、本体構造、地盤ばねをモデル化した断面に、埋戻し荷重、く体自重、揚圧力などの鉛直力、静止側圧から主動側圧を差し引いた“差分側圧”を作用させた骨組解析で得られる応力度と、施工時の弾塑性法による解析で得られる応力度を足し合せ、断面照査を行う。なお、このように施工時の残留応力を本体構造物の設計に考慮する方法については、文献 2) 等において一体計算法と同等の断面力を簡便に評価できることが示されている。

表 1 連壁本体利用の解析手法とその特徴

解析手法および概要	特徴
「分離計算法」 施工時の設計と本体構造物の設計を各々個別に行う方法	<ul style="list-style-type: none"> 施工時残留応力は考慮不可（但し、施工時発生応力を制限することが多い。） 計算が容易
「擬似一体解析」 施工時の発生応力（残留応力）を本体構造物の設計に加算する方法	<ul style="list-style-type: none"> 施工時残留応力を考慮可 計算が比較的容易 計算結果は一体計算法と概ね一致²⁾
「一体計算法」 施工時から完成まで、順を追って逐次解析を行う方法	<ul style="list-style-type: none"> 施工時残留応力を考慮可 計算が煩雑 全ての施工過程を考慮できるが、設計時に設定した施工手順に制約される

表 2 分離計算法の概念

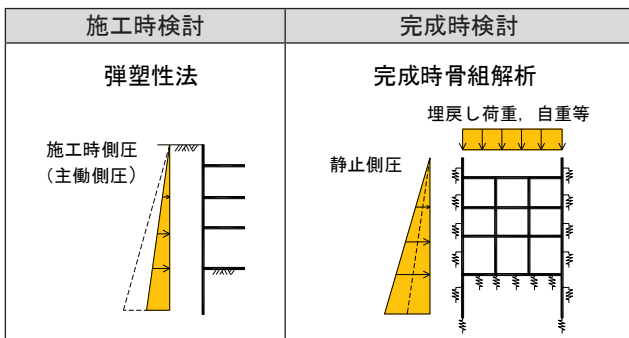
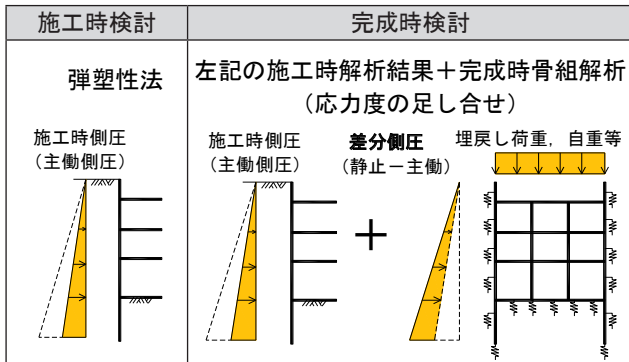


表 3 擬似一体解析の概念



3. 擬似一体解析の基本特性

3.1 検討概要

実工事事例をもとに、擬似一体解析により算出した断面力と掘削開始から埋戻し完了までの施工過程を精度よく考慮できる手法である弾塑性 FEM 解析により算出した断面力を比較、検証することにより、擬似一体解析の基本特性を明らかにした。また、従来から用いられている分離計算法により算出した断面力との比較、検証を行い、その特徴を整理した。

検討に用いた断面形状および土質柱状図は図 1 の通りである^{3) 4)}。

- ・本体利用形式：一体壁形式（内壁 $t=200 \sim 400\text{mm}$ ）
- ・土留め形式：RC 連壁 $t=800\text{mm}$ 、鋼製支保工（5 段）
- ・施工方法：逆巻き工法
- ・土層構成：B 層 (GL $\pm 0 \sim -7\text{m}$)、Ys 層 ($-7 \sim -15\text{m}$)、Yc 層 ($-15 \sim -25\text{m}$)、Nac 層 ($-25 \sim -35\text{m}$)、Tog 層 ($-35\text{m} \sim$)

※ Yc、Nac 層の掘削側は石灰杭 ($\phi 0.4\text{m} \times \text{L}20 \sim 25\text{m}$, @ 1.2 ~ 1.4m) による地盤改良を実施⁵⁾

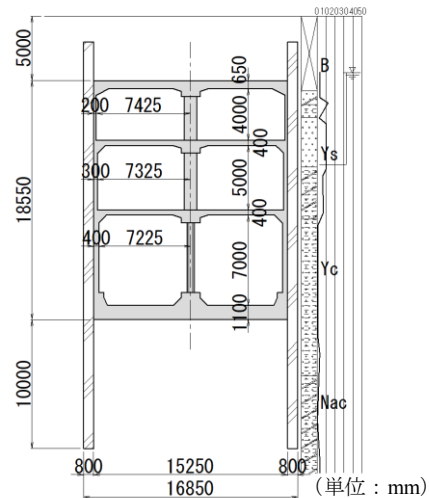


図 1 断面形状および土質柱状図

3.2 弾塑性 FEM 解析による断面力の算定

本事例における構造物の断面力を、掘削開始から埋戻し完了までの施工過程を考慮した弾塑性 FEM 解析により求めた。地盤物性値は、当時の設計図書を基本に、掘削時の連壁変位計測値を用いたフィッティング解析により決定した。解析手法、構造のモデル化、境界条件、地盤のモデル化、解析ステップの概要を以下に示す。

(1) 解析手法

軟弱な粘性土層が含まれている地盤であることから、解析手法には掘削時における連壁の変位や応力状態、間隙水圧の上昇を適切に評価するために、土-水連成有限要素解析を用いた。粘性土の力学特性を表現する構成モ

デルは、軟弱地盤解析で多くの実績を有する関口・太田モデルを拡張した EC モデル⁶⁾を採用した。

(2) 構造のモデル化および境界条件

構造体は半断面モデルとし、解析に影響が出ない領域までモデル化することを考え、幅 100m、深さ 70m の 2次元領域とした。総節点数は 4010、要素数は 3947 である。幾何学的境界条件は、モデル下端が水平・鉛直ともに変位固定、側面が水平の変位固定で鉛直ローラとした。水理境界条件は、モデル上下端が排水条件、側面が非排水条件とし、掘削面は、その進行に応じて排水境界を移動させた。連壁と地盤間はジョイント要素を用いて境界部の挙動を表現した。

(3) 地盤のモデル化および物性値

砂質土層は線形弾性モデル、粘性土層は弾塑性モデル (EC モデル)、石灰杭による改良領域は掘削影響による局部的なせん断破壊や引張破壊を考慮できるように非線形弾性モデル (Drucker-Prager) でモデル化した。構造部材については、連壁をビーム要素、切梁・スラブをトラス要素でモデル化した。採用した地盤物性値を表 4～表 6 に示す。

表 4 砂質土層の物性値 (線形弾性体)

層	γ_t	E	ν	k
B	16	1.4×10^3	0.33	1.0×10^3
Ys	18	2.8×10^3	0.33	1.0×10^3
Tog	17	1.12×10^6	0.33	1.0×10^3

単位) γ_t : kN/m³, E : kPa, k : cm/sec

表 5 粘性土層の物性値 (EC モデル; $n_E=1.5$)

層	γ_t	M	A	ν	K_0	D	k
Yc	16	1.24	0.709	0.331	0.486	0.056	5.0×10^{-7}
Nac	17	1.51	0.863	0.284	0.397	0.039	2.2×10^{-7}

単位) γ_t : kN/m³, k : cm/sec

表 6 石灰杭改良地盤の物性値 (Drucker-Prager)

層	γ_t	E	ν	ϕ'	c	k
Yc'	16	6.3×10^3	0.331	0	100	5.0×10^{-7}
Nac'	17	3.5×10^4	0.284	0	100	2.2×10^{-7}

単位) γ_t : kN/m³, E : kPa, ϕ' : 度, c : kPa, k : cm/sec

(4) 解析ステップ

掘削過程、く体構築過程の解析ステップは施工工程を基に設定し、以下 1)～5) の順序 (3), 4) は掘削過程に応じて繰返し) で解析を行った。

- 1) 初期自重解析 (全要素を線形弾性体と仮定)
- 2) 初期自重解析での発生変位クリア、各物性の設定
- 3) 掘削解析 (掘削底面に排水境界を設定、掘削底面・側面に掘削解放応力を載荷)
- 4) く体構築解析 (自重と切梁撤去時の解放力を載荷)
- 5) 埋戻し過程解析 (埋戻し荷重を載荷、過剰間隙水圧が十分消散するまで放置)

(5) 解析結果

解析から得られた曲げモーメント分布を図 2 に示す。結果は側壁の上床版部 (着目点①)、B2F 中床版部 (着目点②)、下床版部 (着目点③) に着目し、断面力 (曲げモーメント M 、軸力 N) の値を表記した。断面力は、施工時の連壁における断面力と一体化後の断面 (連壁+内壁) の断面力を足し合せた断面力分布である。下床版付近の側壁では、掘削側に大きな曲げモーメントが発生していることがわかる。

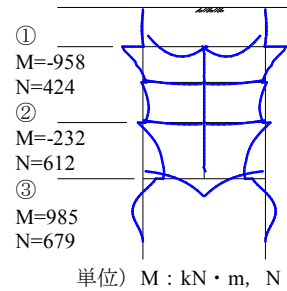


図 2 弾塑性 FEM 解析結果 (曲げモーメント図)

3.3 擬似一体解析と分離計算法による断面力の算定

擬似一体解析と分離計算法を用いて、構造物の断面力を求めた。なお、断面力の算出には市販プログラムを用いた (施工時の弾塑性法による解析: 「RAINPAL-JR」、完成時骨組み解析: 「RAINFRAME-JR」)。

得られた断面力分布を図 3 に示す。図 2 と同様に側壁の上床版部 (着目点①)、B2F 中床版部 (着目点②)、下床版部 (着目点③) に着目し断面力 (曲げモーメント M 、軸力 N) の値を示した。分離計算法の結果は、完成時 (連壁+内壁) の断面力分布である。また、擬似一体解析の結果は、施工時 (連壁) の断面力、差分側圧による断面力 (連壁+内壁)、およびそれらを合成した断面力分布

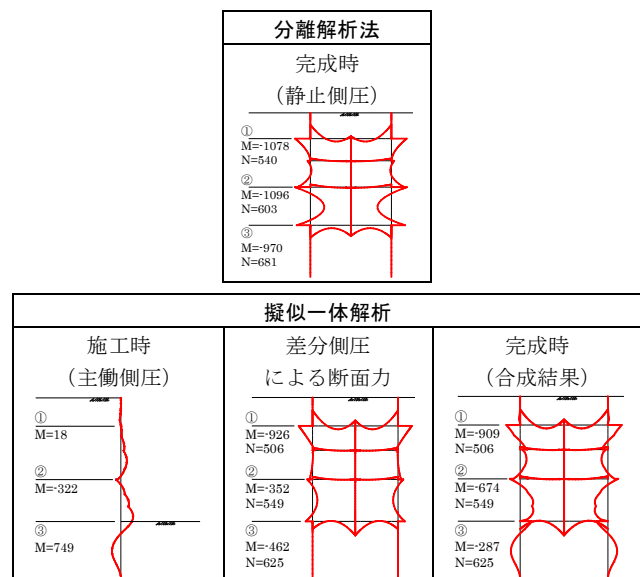


図 3 断面力の算定結果 (曲げモーメント図)

特集：開削トンネルの設計技術

である。

着目点①では、両手法ともほぼ同等の結果となった。これは、当該箇所では埋戻し荷重による隅角部モーメントが卓越するため、最終的な本体構造物の断面力に両手法の断面力の差異が及ぼす影響が小さかったことが考えられる。着目点②では、分離計算法の場合、静止側圧による負の曲げモーメントが大きくなり、擬似一体解析との差が見られた。着目点③では、両手法の結果が大きく異なった。これは、施工時の残留応力の影響が大きく、この残留応力を考慮している擬似一体解析の断面力が小さな値となったものと考えられる。

3.4 発生断面力の比較（弾塑性 FEM 解析・擬似一体解析・分離計算法）

3.2 節と 3.3 節の解析結果から得られた各解析手法の断面力の比較を図 4 に示す。実設計における断面力の照査位置（着目点①：側壁上端，着目点②：施工時背面側引張最大点，着目点③：側壁下端）を着目点とし、断面力（曲げモーメント M）の値を表記した。

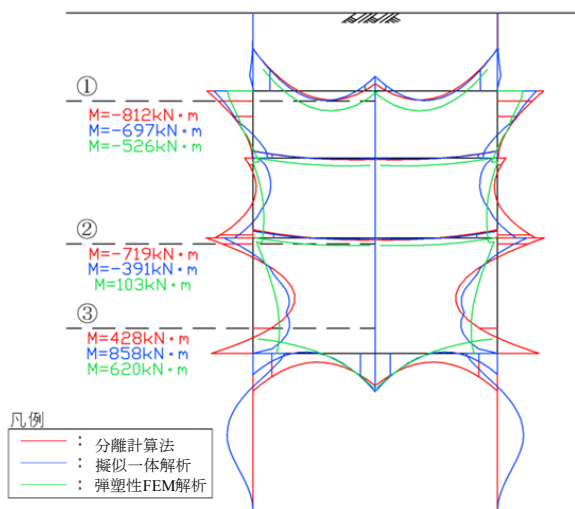


図 4 曲げモーメント比較図

着目点①では弾塑性 FEM 解析よりも擬似一体解析、さらに分離計算法の順で断面力が大きくなっている。また、着目点②においても、弾塑性 FEM 解析による断面力は分離計算法や擬似一体解析よりも小さな値となった。これは、分離計算法や擬似一体解析では、埋戻し後は長期的に側圧が静止側圧まで戻ることを想定して解析を行うのに対し、弾塑性 FEM 解析では側圧が静止側圧まで戻らなかったことが影響していると考えられる。着目点③では、擬似一体解析と弾塑性 FEM 解析は概ね等しい断面力分布となった。分離計算法では下床版を支点として大きな背面側引張となる断面力が発生しているが、擬似一体解析および弾塑性 FEM 解析では、施工時

において掘削側に引張応力が残留する傾向を示しており、最終的な断面力分布に影響を及ぼしている。

地下連壁を本体利用する際の解析手法としては、着目点によって若干のばらつきはあるものの、施工時に特徴的な断面力が発生する箇所は、分離計算法と比べ擬似一体解析の方がより現実的な断面力を表現でき、実態に近い結果となっていることが確認できた。

4. 擬似一体解析の適用性

4.1 検討概要

3章では3層2径間の開削トンネル（逆巻き工法）を例に擬似一体解析の基本的な特性を示した。本章では、断面形状および施工方法（順巻き工法，逆巻き工法）の違いが擬似一体解析の適用性に与える影響を明らかにすることを目的として、分離計算法により設計された複数の開削トンネルの実事例を用いて、擬似一体解析および分離計算法を用いた解析を実施し、断面力について比較、検証した。

検討に用いた事例の一覧を表 7 に示す。仮土留め壁には RC 連壁を用いており、施工方法は事例 a～c が順巻き工法，事例 d，e は逆巻き工法によるものである。例として、事例 c（4層3径間，順巻き），事例 e（4層2径間，逆巻き）の各断面形状を図 5 に示す⁷⁾。残留応力を考慮しない分離計算法で設計されているが、施工時に大きな応力を発生させない配慮から、2章で述べたように施工時の許容応力度の割増率を通常の 1.5 倍から 1.3 倍程度に低減して設計されている⁸⁾。なお、いずれも供用開始から 30 年以上経過しているが、本評価に用いたすべてのトンネルで土水圧等の外力により発生したと考えられるクラック，構造体の変形などの変状は確認されていない。

表 7 検討事例一覧

事例	連壁	施工方法	掘削深度 × 幅	断面概要	本体利用形式	地盤構成
a	RC 連壁	順巻き	約 26m × 15m	3層 3径間	一体壁	互層 ・砂質土 (N 値 10～25) ・粘性土 (N 値 8)
b			約 29m × 10m	4層 1径間	一体壁	互層 ・砂質土 (N 値 5～60) ・粘性土 (N 値 1～10)
c			約 26m × 15m	4層 3径間	一体壁	・砂質土主体 (N 値 10～50)
d	RC 連壁	逆巻き	約 23m × 15m	3層 2径間	単独 / 一体壁	互層 ・砂質土 (N 値 2～10) ・粘性土 (N 値 3)
e			約 37m × 19m	4層 2径間	一体壁	互層 ・砂質土 (N 値 40～50) ・粘性土 (N 値 10)

特集：開削トンネルの設計技術

モーメント分布と各着目点（①側壁上端，②施工時背面側引張最大点，③側壁下端）の応力度算出結果を示す。

解析結果から、擬似一体解析の応力（合成時）が、分離計算法の応力を上回る箇所が見られた。しかし、最大の鉄筋引張応力度は、耐久性ひび割れ照査省略の目安値（ $\sigma_s=140\text{N/mm}^2$ ）程度で収まっている。これは、施工時の設計において応力を制限したため、残留応力の影響がある箇所でも有害な応力レベルには至らなかったものと考えられる。また、今回の事例では顕著ではなかったが、施工時に背面側に引張応力が発生し、完成後の静止側圧に戻る過程において背面側の引張応力が残存している箇所、つまり逆巻きスラブ位置（事例 e の着目点①）や、切梁位置とスラブ位置が近い場合（事例 c の着目点①）などでは、非常に大きな引張応力が残留する可能性がある。このような挙動は分離計算法では評価しきれない場合がある。

2章で示したように、弾塑性 FEM 解析と擬似一体解析の断面力は概ね整合することから、逆巻き工法を採用する場合や、背面側に大きな引張応力が発生する支保工配置となる場合は、擬似一体解析の適用がより有効であると考えられる。なお、残り 3 断面においても上記と同様の結果が得られている。また、擬似一体解析と分離計算法を用いた応力度の検討の詳細については、文献 9) を参照されたい。

5. まとめ

実工事事例をもとに、擬似一体解析により算出した断面力と詳細法として位置付けた弾塑性 FEM 解析により算出した断面力を比較すると共に、断面形状および施工方法（順巻き工法，逆巻き工法）が異なる複数の断面に対して断面力の算出を行い、擬似一体解析の適用性を検証した。得られた結果について以下に纏める。

- 1) 擬似一体解析は施工時の残留応力を考慮できるため、分離計算法と比べると実際の断面力分布に近い結果となる。ただし、着目箇所によって両手法での発生応力度の大小関係が異なるため、擬似一体解析を行うことで一概に設計を合理化できるわけではない。
- 2) 着目箇所によっては、分離計算法が擬似一体解析より危険側の設計となることがある。ただし、分離計算法においても施工時に連壁に大きな応力を発生させない配慮（施工時における許容応力度の割増し率を制限するなど）を行えば、完成後も長期耐久性を満足する応力レベルで収まることが多いと考え

られる。

- 3) 逆巻き施工時や、施工時と完成時ともに背面側に大きな引張応力が発生する支保工配置を行う場合などは、分離計算法では背面側の残留応力を評価することができないことから危険側の設計となることがあるため、擬似一体解析の適用が有効である。

なお、現在実施工現場において連壁を本体利用する構造物の計測を行っている。今後は、計測データ等を収集し、各解析手法の特性についてさらに精緻な検証を行っていく予定である。

謝辞

工事事例のご提供を頂きました各鉄道事業者様に謝意を申し上げます。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，2001
- 2) 西山誠治，本田道織，小島謙一，棚村史郎：連壁本体利用構造物の擬似一体解析法，土木学会第 57 回年次学術講演会，2002
- 3) 石川幸彦，小坂彰洋，村松泰，村田基代彦：地下連続壁を本体に利用する場合の設計法について—計測データを基にした地盤バネ定数法に関する考察—，トンネル工学研究論文・報告集第 6 巻，1996
- 4) 小林克哉，小島謙一，藤井公博，松丸貴樹，大野進太郎：連壁本体利用構造物における簡易一体解析手法の適用性，第 50 回地盤工学研究発表会，2015
- 5) 増田義孝，入江平門，渡辺吉教：軟弱地盤における掘削土留工の現場計測と設計方法について（8号湾岸線辰巳停車場），土木学会第 41 回年次学術講演会，1986
- 6) 大野進太郎，飯塚敦，太田秀樹：非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル，土木学会応用力学論文集 vol.6，2006
- 7) 小林克哉，小島謙一，佐藤僚生：実事例を用いた連壁本体利用構造物の設計法の比較，土木学会第 71 回年次学術講演会，2016
- 8) (社) 日本鉄道技術協会：深い掘削土留工設計法 - 深い掘削土留工設計指針研究会編 -，1993
- 9) 關泰史，佐藤僚生，松丸貴樹，小島謙一：連壁本体利用構造物における擬似一体解析法と分離計算法の比較検討，第 50 回地盤工学研究発表会，2015