

現場計測データに基づくシールドトンネルの 設計法に関する研究

STUDY ON THE DESIGN METHOD OF SHIELD DRIVEN TUNNEL LINING BASED ON FIELD MESEUREMENTS

松本嘉司* 小山幸則** 松本吉雄** 菊入 崇*** 小林宏基***

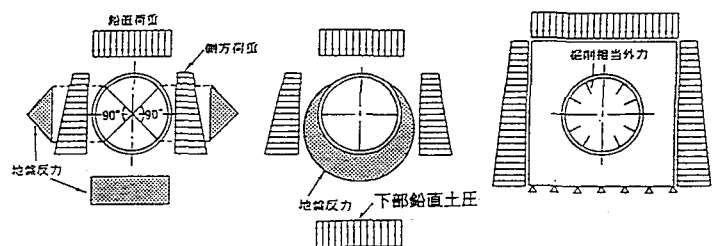
Yoshiji MATSUMOTO, Yukinori KOYAMA, Yoshio MATSUMOTO, Takashi KIKUIRI, Hiroki KOBAYASHI

Recently there are a lot of subterranean construction works such as sluly or earth pressure balanced shield tunnelling in the urban area. Design methods of the shield tunnel linings have been studied in domestic and foreign countries. This paper describes the estimations of compatibility of the prior design models and methods which consist of flame models, flame models with ground-spring reacting with proportional to lining displacement and finite element models based on comparison with field measurements.

KEYWORD: Shield tunnel design method, Field Mesurement, FEM analysis, Flame analysis

1. はじめに

都市内および都市近郊において上下水道、地下鉄に代表されるシールド工事は年々増加する傾向にある。近年は密閉型シールド工法が主で、大断面、大深度、長距離掘進、異形断面掘削等新しい技術開発が盛んである。一方トンネルの設計法は、側方の地盤反力を覆工変位に従属するものとして取り扱う土木学会示方書、国鉄指針等の方法は、概ね妥当であるとの評価もあるが、この後に述べる模型実験からの考察および解析等からは、改善すべき点が見受けられる。諸外国において採用されている設計法ならびに国内の設計モデルについては、文献^{1) 2) 3)}に紹介もしくは論評されているが、それぞれ構造系ならびに荷重系に特徴があり、大きく分けると3種類の方法が広く採用されている。ここでは、設計手法を慣用モデル、全周ばねモデル、連続体支持モデルに分類し、これら設計モデルの



(a) 慣用モデル (b) 全周ばねモデル (c) 連続体支持モデル

図1 設計モデルの概要

*正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部 土木工学科

**正会員 (財) 鉄道総合技術研究所

*** 東京理科大学 理工学研究科

特徴、設計への適用性を既設トンネルを対象にした解析から検討した。

2. 模型実験結果からの考察

鉄道総研では平成4年度に密度の異なる2種類の模型砂地盤中にシールドトンネルを模した鋼製のリング(直径1m×長さ3m×管厚10mm)を設置し、上方から載荷試験を行っている^{4) 5)}。この実験の結果から、トンネルに作用する土圧、地盤反力、設計モデルに考慮すべき要素等について、以下の様な興味深い示唆が述べられている。

① セグメントに作用する半径方向土圧は、緩地盤においてはアーチ部で大きく、逆に密地盤ではインバート部が大きくなる。

② 接線方向土圧の分布形状は緩地盤では上半部で大きく、密地盤では下半部が大きくなる。また、半径方向と接線方向土圧の大きさの比率は、地盤により明らかな差があり、緩地盤で0.4、密地盤では0.7程度となっている。

③ 実験より得られた土圧を、鉛直および水平方向に分離すると、両地盤とも鉛直は中央がくびれた形状になり、水平はS.L.より少し上で三角形に近い形状となった。

④ シミュレーション解析ではFEMによる連続体解析は概ね実験結果を良く表現でき、一方全周にばねを配したモデルでは、上方からの荷重だけを考慮したモデルではかなり相違したものとなり、下方からの荷重を考慮することにより近づく傾向を示し、更に地盤ばねを圧縮ならびに引っ張り方向にも作用するとした方が良い結果となる。

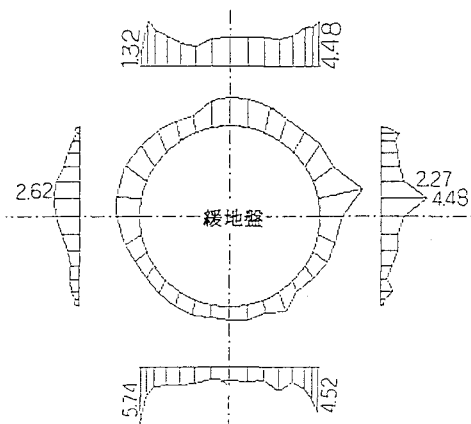


図2 模型実験より得られた土圧分布の例

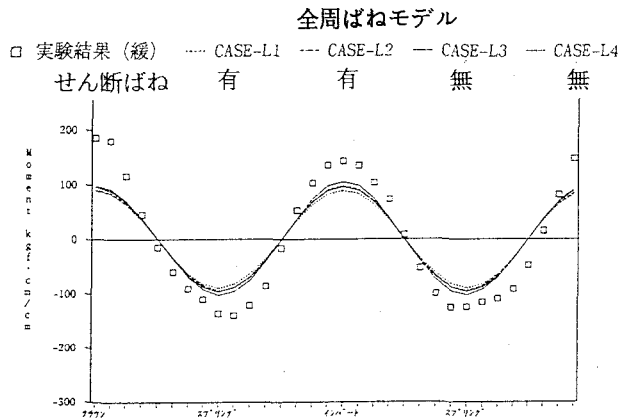


図3 下方鉛直土圧を考慮し、せん断ばねの有・無しによる影響を考察した解析ケース

以上の知見は、上方から鉛直載荷した模型実験による考察であるが、以下ではこれらの傾向が実際に施工されたトンネルではどの様になるかを検討した。

3. 既施工トンネルの解析

3.1 解析対象トンネルの概要

解析対象はデータが良く整理されている沖積層における粘性土と、砂質土中の2トンネルとした。Aトンネル⁶⁾は有楽町層の軟弱粘土中にあり、天端での作用土圧は全土被り圧の約8割となっている。また、間隙水圧はおおむね静水圧状態と考えられる。土圧の経時変化は裏込め注入時に最大となり、その後漸減し10日

程度で安定している。Bトンネル⁷⁾は計測点付近では、おおよそN値が20～50（平均35）程度、層厚が20m 前後の安定した堆積層中にある。また、間隙水圧はほぼ地下水位に相当する圧力が測定されている。解析時点は土圧が安定した時期とした。各トンネルの施工条件ならびに主な計測データを表1に示す。

3.2 検討手順

まず最も一般的な条件下においてそれぞれのモデルの設計定数を決定もしくは推定し、解析結果と実測値との比較からその手法の設計法としての適応性を評価した。また、いくつかの定数、要素についてパラメトリックな考察を行い、解析値の改善度ならびその定数の適切な範囲等を検討した。

3.3 入力物性値と解析条件の検討

解析に用いた入力物性値を表2に示す。また、設定に至った過程は以下の通りである。特に⑦、⑧については、前記模型実験を踏まえて検討する項目である。

① 側方土圧係数 (λ)

粘土地盤（以下A地盤と称す）では、土圧計の測定値を元にパラメーター解析を行い検討した。砂地盤（以下B地盤と称す）では、測定された有効土圧が小さいために示方書等を参考に土質ならびにN値から推定した。

② 地山の変形係数

A地盤では孔内載荷試験の値を元に、側方土圧係数同様パラメーター解析を行った。B地盤ではN値から推定した ($E=7N$)。

③ 地盤ばね値

半径方向については E/R (トン/半径) を用い、接線方向を考慮する場合は上述の実験結果等を参考にして、その値を半径方向の1/3とした。

④ FEM 解析に適用した覆工の掘削外力負担率 (μ) (この場合はライニングが負担する掘削相当外力の総解放力に対する比率)

A、B地盤とも地盤の荷重負担容量が小さいと考えられること、ならびに文献³⁾等を参考に地山初期応力の解放率は100%とし、掘削面に対して法線方向のみ解放とした（せん断力については無視）。

⑤ セグメントの曲げ剛性有効率 (η)

剛性一様リングとして取り扱い、曲げ剛性有効率は1.0 とした。

⑥ 土圧・水圧

A地盤では土圧・水圧込みとし、B地盤では分離とした。

⑦ 下方鉛直土圧係数 (λ')

従来のばね支持モデルでは、下方からの荷重は水圧による浮力のみ（土圧・水圧分離の場合）であった。しかし、上述の模型実験のシミュレーション解析によれば、下方から荷重を作用させることによりセグメントに生じる断面力が良く説明できること、これまでの計算ではトンネル中心が大幅に変位すること等から、上方鉛直土圧に対する下方鉛直土圧の比である係数 λ' を考え、適切な値を求めることとした。

表1 解析対象トンネルの諸元ならびに計測結果

諸元, 計測結果	トンネルA	トンネルB
トンネル径 D	7.1 m	5.1 m
土被り高さ H	13.0 m	16.0 m
地下水位	-0.9 m	—
地盤種別	沖積粘性土 (N値=2～4)	沖積砂質土 (N 値=10 ～20)
掘削方式	泥水式	泥水式
注入時土圧 (7-チ, インバト)	1.8, 2.4	2.2, 2.5
安定時土水圧 (")	1.8, 1.8 (10day)	1.6, 2.1 (10day)
間隙水圧 (")	1.1, 1.4	1.6, 2.1

表2 計算に用いた入力物性値

入力項目	トンネルA	トンネルB
単位体積重量	1.8 t/m ³	1.9 t/m ³
鉛直荷重 (土圧)	23.4 t/m ²	7.2 t/m ²
(水圧)	(土水込み)	14.6 t/m ²
地盤変形係数	22.7 kgf/cm ²	200 kgf/cm ²
地盤反力係数	0.1 kgf/cm ³	1.0 kgf/cm ³
側方土圧係数	0.7	0.55
セグメント 断面2 次モーメント	0.00225 m ⁴	0.0006 m ⁴

③ テンション解析

上述の実験結果を参考にトンネルに作用する主動的荷重は、覆工の変位に依存して増減するものと考え、地盤ばねは引張り状態においても有効とするケースを想定した。また、地盤ばね値は引張、圧縮ともに線形とし同じ値とした。

3.4 解析結果の考察

(1) 各設計モデル (手法) の比較

(a) 粘土地盤トンネル (Aトンネル)

断面力の測定データは2リングの平均値とした。実測による変形は鉛直荷重が卓越し、横潰れの形となる。各手法による曲げモーメントの比較を図4に示す。慣用モデルはアーチ部で実測値と概ね一致し、S.L.部で大きく、インバート部では小さくなり、その偏差は実測値の100%程度である。連続体支持モデルはアーチ部、インバート部において概ね実測値と一致するが、S.L.部では大きくなる。全周ばねモデル ($\lambda'=0$) は縦潰れの変形モードとなり、実測値と傾向が合わない。軸力は全周ばねモデル以外は全周長にわたって実測値より大きくなり、分布の傾向も実測値とは異なる (図5)。また、その偏差は連続体支持モデルが最も大きく、全周ばねモデルでは分布形状ならびに値の相違が大きく、この場合も適応していないことを示している。これらは入力物性値の取り方により、結果が異なることも推察されるが、既往の方法ではばね支持モデルの相違が著しいといえる。

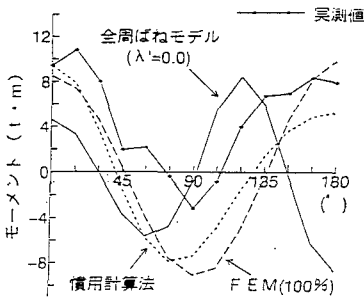


図-4 解析手法とモーメントの関係 ($\eta=1.0$)
(Aトンネル)

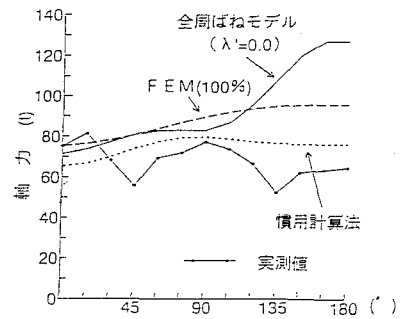


図-5 解析手法と軸力の関係 ($\eta=1.0$)
(Aトンネル)

(b) 砂地盤トンネル (Bトンネル)

実測データでは、Aトンネルと同様に変形は横潰れの形となる。図6、7に示すように慣用モデル、全周ばねモデルともに変形モードが実測と相違し、連続体支持モデルのみが傾向を捉えている。

以上から、慣用モデルを現行の指針等によって適用した場合には、良質地盤において実現象を説明出来ないことが考えられる。また、全周ばねモデルは更に検討を要すること、連続体支持モデルが概ね良好な結果を表していると言える。

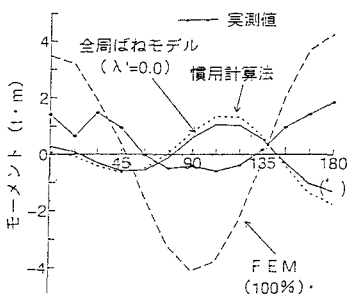


図-6 解析手法とモーメントの関係 ($\eta=1.0$)
(Bトンネル)

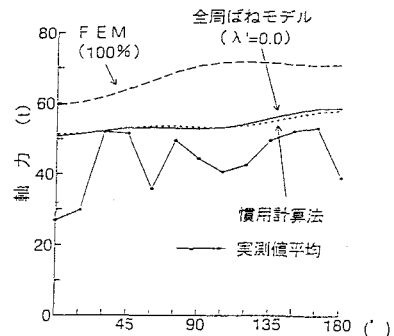


図-7 解析手法と軸力の関係 ($\eta=1.0$)
(Bトンネル)

(2) 改善効果の検証

以下では、断面力に影響を与えると見られるいくつかの要素を検証する。上記の結果から、ばね支持モデルについては $\lambda' = 0$ とした場合は実測値と乖離するため、まず λ' をパラメータとした。

① 下方鉛直土圧係数 (λ') とテンション解析 (地盤引張りばね)

λ' は荷重パラメータであり、テンション解析と関連する。従って、ここでは λ' を検討し、その後、引張ばね効果と併用してその影響を考察する。

(a) Aトンネル (図8, 9)

λ' が 0.5 ~ 1.0 の間で変形モードが変わり、1.0 より少し小さい値がこの場合の適切な値と考えられる。また、テンションばねの影響は少ない。従って、 λ' を考慮することにより、実トンネルの挙動が表現可能であること、ならびに地盤が軟弱な場合は、アーチ部に作用する鉛直荷重分布は、覆工の変位の影響が少ないと推定されることと合致する (模型実験においても、測定された上方の土圧分布はフラットになっている)。

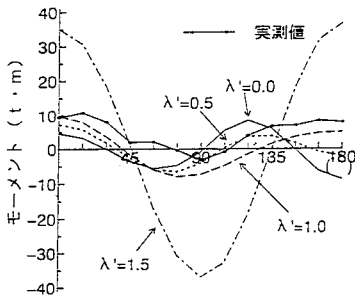


図-8 λ' とモーメントの関係 ($\eta=1.0$)
(Aトンネル)

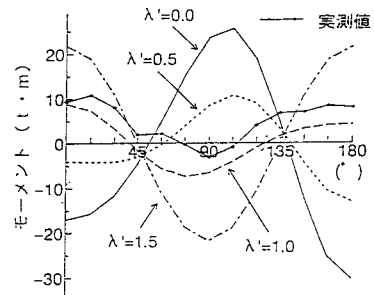


図-9 λ' とモーメントの関係 ($\eta=1.0$)
(Aトンネル)

(b) Bトンネル (図10, 11)

λ' が 0 ~ 0.5 の間で変形モードが変わり、0.5 あたりが適切な値と考えられる。またテンションばねの影響は著しく、考慮することにより曲げモーメントは1/3 程度 ($\lambda' = 1.0$ の場合) に減少し、軸力も分布形状は変わらないが10% 程度減少する。従って、テンションばねを考慮する場合は、 λ' の適当な値はAトンネルと同様に0.5 ~ 1.0 の間にあると考えられる。

以上の結果は、模型実験における考察とおおむね合致するものといえる。下方鉛直土圧の概念はFEM の掘削解析において地盤中の初期応力を解放する時、下方からの解放力もあることから同様な考え方によるものである。

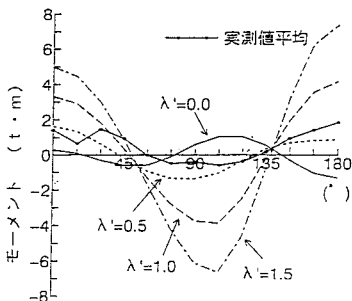


図-10 λ' とモーメントの関係 ($\eta=1.0$)
(Bトンネル)

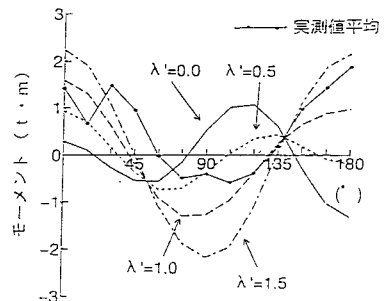


図-11 λ' とモーメントの関係 ($\eta=1.0$)
(Bトンネル)

② FEM 解析に適用した覆工の掘削外力負担率 (μ)

Aトンネルでは μ を70%とすると、100%に較べ軸力、曲げモーメントともに小さくなる。実測値との比較では部位によりどちらが良く一致しているとはいいがたい。設計という観点に立てば100%をとるのが安全といえる。Bトンネルでは、明らかに100%は実測値よりかなり大きくなり、70%程度が妥当と見られる。

③ 地盤ばね(接線方向)

両トンネルとも、影響は殆ど見られない。従って実験に見られるライニング周辺に生じるせん断力は、試験方法による結果とも考えられる。即ち施工過程を考慮するとセグメントに荷重が作用する段階では、地盤のせん断変形はほぼ終了しているとも考えられる。

④ 有効剛性率 (η)

A地盤では影響が無い。B地盤では断面力に及ぼす影響は大きく、硬質地盤では覆工剛性を適切に設定することが必要である。

5. まとめ

現在、慣用モデルは簡便であることと、多くの実績で安全側の計算になることなどから、シールドトンネルの覆工設計に広く用いられている。しかしながら、解析結果から明らかなように実トンネルの挙動を正確に表しえないので、覆工設計の経済性の向上を図ったり、特殊形状トンネルの設計に用いる場合には、必ずしも適切なモデルではないと考えられる。今回、全周ばねモデル、連続体支持モデルの設計への適用性の検討の第一段階として、各種パラメータを変化させた計算値と実トンネルの計測データとの比較を行った。その結果2つの方法とも、実トンネルの挙動を慣用モデルよりも正確に表しうることが分かった。今後、さらに多くの実トンネルの計測データによる検証を行い、適用性を検討したいと考えている。最後に、計測データを提供いただいた建設省土木研究所、ならびに水資源開発公団の各位に深甚の謝意を表する。

〔参考文献〕

- 1) 山口良雄、河田博之、山崎幹男：セグメントの各種設計法の比較，国鉄構造物設計資料No55，
- 2) 国際トンネル協会編：トンネル新技術に関する海外文献集- 各国トンネル構造設計の比較，1981.
日本トンネル技術協会（翻訳）
- 3) A.DUDDECK: Analysis of lining for shield driven tunnels, AFTES国際シンポジウム論文集, 1985.
- 4) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道技術基準整備のための調査研究 報告書（平成3年度），1992.4
- 5) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道技術基準整備のための調査研究 報告書（平成4年度），1993.4
- 6) 建設省土木研究所：軟弱地盤中のシールドトンネルの現場計測（土木研究所資料第2839），1988.12
- 7) 水資源開発公団：霞ヶ浦利根川連絡水路新設工事 第1次観測工事報告書，1989.