

特殊条件下のシールドトンネル設計に関する研究

—併設・近接—

Study on Special Conditional Shield Tunnel Segment Design Methods

—Very Close Twin Tunnel ・ Very Close Excavation—

小山 幸則¹⁾・小西 真治²⁾・佐藤 豊³⁾

Yukinori KOYAMA, Shinji KONISHI, Yutaka SATO

Because of crowding in underground work and economy of space, very close twin railway shield tunnels or excavation work close to shield tunnel will have to be planned in urban areas. In that case, acting earth pressure will be complicated. To evaluate this influence of the adjacent tunnel or open cut excavation, three trial design methods for the tunnels are discussed in this paper. Consequently, method of the two-ring beam-spring model calculation with the load obtained from two-dimensional plain strain finite element method produced the most reliable calculation outputs.

キーワード：シールドトンネル，併設トンネル，近接施工，設計法，土圧

1 はじめに

都市域において鉄道シールドトンネルを計画する場合，輻輳した埋設物の問題や用地確保の困難さからトンネルを併設したり，トンネルに近接して掘削が行われるという特殊条件下でのシールドトンネルの設計が多くなっている．平成9年7月発刊の「鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル」において適切な設計方法を提示する必要がある，解析手法の違いによる結果の差を検討した．

特殊条件下のトンネルに現れる力学的な影響として，以下のものが考えられる．

- ①土荷重等に及ぼす長期的な相互干渉の影響
- ②後行トンネル通過や近接施工時に先行して建設されていたトンネルに生じる一時的な影響

ここで，①の影響とは，近接して建設される構造物とトンネル相互の干渉によって，トンネルのみの場合とは異なる土圧や地盤反力が長期的に作用し，トンネルに生じる長期的な断面力が異なったものとなる場合である．また，②の影響とは，例えば併設トンネルでは，後行トンネルの切羽での地山の呼び込みや泥水圧や泥土圧等による地山の押し込み，シールドスキンプレートと地盤の摩擦力，蛇行や曲線施工に伴うシールド側面からの地山の押し込み，テールボイドでの地山の呼び込み，裏込め注入圧による地山の押し込み，あるいは

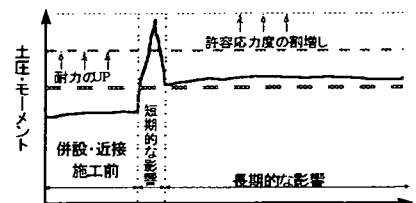


図1 既設トンネルに生ずる影響

- 1) 正会員 財団法人 鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部
- 2) 正会員 財団法人 鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 トンネル担当
- 3) 正会員 財団法人 鉄道総合技術研究所 企画部国際課

は泥水圧や裏込め注入圧が直接作用することなどに起因するものである。

図1にトンネルに生ずる併設・近接施工の影響を概念的に表現した図を示す。このようなトンネル単一時と比べた大きな断面力の作用が短期的なものであれば、許容応力度の割り増し等により、また、長期的なものであれば、セグメントの耐力自体を大きくするなどして、十分な安全性を有するセグメントの設計を行わなければならない。しかし、このような影響評価について、統一された断面力の算定手法が未だ確立されていず、様々な手法が用いられているのが現状である。そこで、まず目的に合ったFEM掘削解放率の求め方を検討し、次に3種類の断面力算定手法を比較してもっとも現実的な手法および適用にあたっての注意点について検討した。

2 解析方法

2.1 検討手法

併設・近接施工の影響を検討する方法として、2次元平面ひずみ要素で地盤をモデル化した弾性FEM解析をもとに次に示す3手法を用いた。

①手法1

トンネルと地盤を含む領域を2次元平面ひずみ要素、セグメントをビーム要素でモデル化し、弾性FEMによる掘削解析を行い、その結果得られたビーム要素での断面力を設計用断面力とする方法。

②手法2

上記手法1と同様、トンネルと地盤を含む領域を対象にしたFEMによる掘削解析を行い、単一トンネルの場合に算定された断面力と併設・近接施工した場合の断面力を比較して、断面力の増加率を算出し、2リング全周ばねモデルで計算した単一トンネルの断面力を割り増しする方法。

③手法3

上記手法1と同様、トンネルと地盤を含む領域を対象にしたFEMによる掘削解析を行う。ただし、この時、セグメントの剛性を無限大に近づけ、併設・近接施工による直接的な荷重変動をトンネル周辺の平面ひずみ要素より抽出し、この値を2リング全周ばねモデルに外力として入力し、断面力を求める方法。

2.2 掘削解放率の決定方法

FEM掘削解析の場合、掘削解放率の大きさによって、セグメントに生じる断面力の値が大きく変化するため、この値の設定が非常に重要となってくる。これまで、掘削解放率の設定については多くの研究^{1),2)}がなされてきたが、その多くは地盤の変位挙動の解析を目的としていた。ここでは、トンネルに生ずる断面力の算定を目的とするため、単一トンネルのFEM掘削解析で算定された最大曲げモーメントの値が、同様な条件での単一トンネルの全周ばねモデルの結果に近くなるまで掘削解放率を変化させて、掘削解放率を決定した。この繰り返し計算により、N値=10の砂質の解析モデル地盤の場合、掘削時50%、覆工施工時50%の応力解放によって、全周ばねモデルで得られたモーメントの最大値に比較的近い値が算出できた。また、N値=27の砂質の解析モデル地盤の場合では、掘削時に40%、覆工施工時に60%の解放率となった。併設の

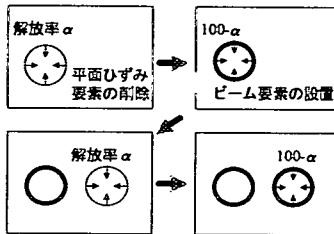


図2 掘削とセグメントの設置

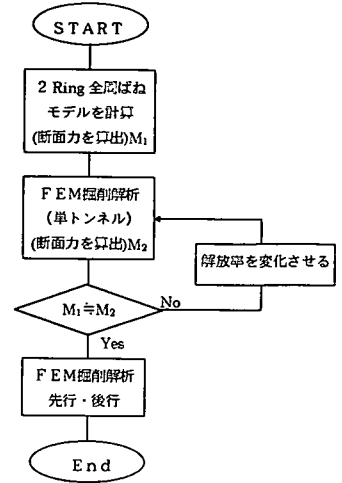


図3 影響解析の流れ

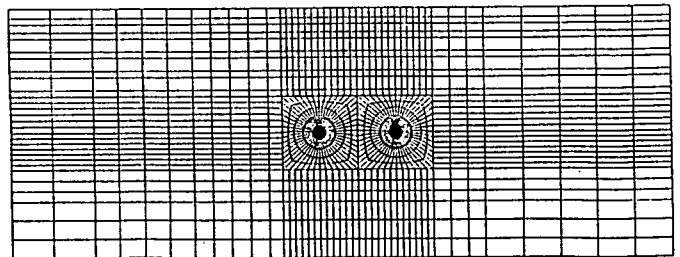


図4 併設トンネル（隔離 0.25D）のFEMモデル図

場合の掘削とセグメントの設置の流れを図2に、掘削解放率決定のための解析の流れを図3に、併設トンネル（離隔0.25 D）のFEMモデル図を図4に示す。なお、ここでは解析手法を一般化しやすいよう、地盤、覆工の応力～ひずみ関係はともに線形弾性とした。

2.3 セグメントの諸元と地盤の土質定数

解析モデルとして、2種類の砂質地盤中のRC平板型セグメントのトンネルを想定して計算を行った。解析に用いたセグメントの諸元と解析モデル地盤の土質定数を表1、表2に示す。併設トンネルの離隔は0.25Dと0.5Dの2種類の解析ケースを設定し、近接度の影響を評価した（図5）。近接施工は、トンネルから2D離れに幅および深さ2Dの開削工事が行われた場合を計算した（図6）。開削土留の入力値を表3に示す。解析は、掘削に合わせて6ステップで行った。

2.4 全周ばねモデルの入力値

影響を検討する際の基準となる、全周ばねモデルの計算条件を表4に、解析に用いた2リング全周ばねモデルのモデル化の概念図を図7示す。

セグメントに作用させる上方からの土圧はTerzaghiの緩み土圧式により算定し、等分布荷重としてセグメントリング上部に作用させた。

下方からの土圧は地盤反力として生じるもの以外にトンネルの変位、変形とは無関係にトンネルに作用する土圧として考慮するものと考えたが、この値は既往の土圧理論や現地計測から決定することは困難であるので、上方からの土圧と同一の土圧分担（セグメント設置後に解放される地中応力）があるものと仮定して、上方からの土圧と同一の大きさの等分布荷重が作用するものとした。

側方から作用する土圧は、上方からの土圧に各モデル地盤ごとに設定した側方土圧係数を乗じて、値を定めた。

さらに、セグメントリング軸線長にセグメントの自重に相当する荷重強度を作用させるとともに、地下水

表1 セグメントの諸元

セグメント外径	$D_0 = 7.8 \text{ m}$
桁高	$h = 0.3 \text{ m}$
幅	$W = 1.0 \text{ m}$
断面2次モーメント	$I = 2.25 \times 10^{-3} \text{ m}^4$
セグメントの断面積	$A = 0.3 \text{ m}^2$
図心半径	$R_c = 3.75 \text{ m}$
セグメントの自重	$\gamma = 7.35 \text{ tf/m}$
コンクリート設計基準強度	$\sigma_{ck} = 4,500 \text{ tf/m}^2$
ヤング係数	$E = 3.5 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$
回転ばね定数	$K_{\theta} = 7,850 \text{ tfm/rad}$
法線方向リング間ばね定数	$K_{sn} = 1.62 \times 10^5 \text{ tf/m}$
接線方向リング間ばね定数	$K_{st} = 4.91 \times 10^5 \text{ tf/m}$

表2 地盤の土質定数

項目	N値=10	N値=27
地盤の種類	砂質土	砂質土
地下水位 H_w	GL-7.8 (m)	GL-7.8 (m)
土の単位体積重量 γ	1.7 (tf/m ³)	1.8 (tf/m ³)
地盤反力係数 k	480 (tf/m ³)	1,270 (tf/m ³)
側方土圧係数 λ	0.55	0.46
地盤の変形係数 $E=25N$	2,500 (tf/m ²)	6,750 (tf/m ²)
地盤の内部摩擦角 $\phi=0.9(0.3N+27)$	27 (°)	31.5 (°)
地盤の粘着力 c	0	0
静止土圧係数 $K_0=1-\sin \phi$	0.546	0.478
地盤のポアソン比 $\nu=K_0/(1+K_0)$	0.353	0.323
土被り H	15.6 (m)	15.6 (m)

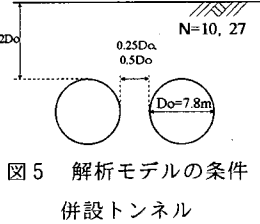


図5 解析モデルの条件
併設トンネル

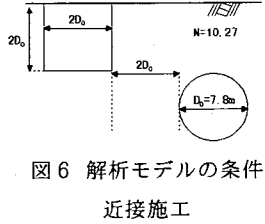


図6 解析モデルの条件
近接施工

表3 側部掘削の土留の入力値

部材, 寸法	断面2次 モーメント (m ⁴)	断面積 (m ²)	弾性係数 (tf/m ²)	長さ (m)
山留壁 $\phi 800 \times 12$	4.74×10^{-3}	0.3658	2.1×10^7	19.575
切梁(1段目) H350×350×12×19	4.03×10^{-4}	0.01739	2.1×10^7	15.6
切梁(2段目) 2H350×350×12×19	8.06×10^{-4}	0.03478	2.1×10^7	15.6
切梁(3段目) 2H350×350×12×19	8.06×10^{-4}	0.03478	2.1×10^7	15.6
切梁(4段目) H400×400×13×21	6.66×10^{-4}	0.02187	2.1×10^7	15.6
切梁(5段目) H400×400×13×21	6.66×10^{-4}	0.02187	2.1×10^7	15.6

表4 全周ばねモデルで用いた計算条件

解析モデル地盤	N値=10	N値=27
地盤反力係数	$k = 480 \text{ (tf/m}^3\text{)}$	$k = 1270 \text{ (tf/m}^3\text{)}$
側方土圧係数	$\lambda = 0.50$	$\lambda = 0.41$
内部摩擦角	$\phi = 27.0 \text{ (}^\circ\text{)}$	$\phi = 31.5 \text{ (}^\circ\text{)}$
粘着力	$c = 0 \text{ (tf/m}^2\text{)}$	$c = 0 \text{ (tf/m}^2\text{)}$
荷重算定方法	土水分離	土水分離

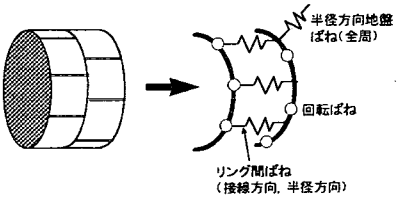
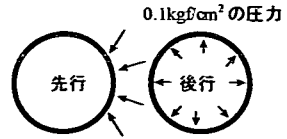


図7 2リング全周ばねモデル

圧として静水圧を考慮し、深さ方向に増加するセグメントリング図心方向に向けた荷重を設定した。



2.5 短期的な影響の検討方法

図8 裏込め注入圧(短期的な影響の検討)

前述した解析手法は長期的、および短期的な影響を検討する最に用いた手法であるが、併設の場合、短期的な影響の検討の際に、これらに加えて図8に示すような放射状の荷重を裏込め注入圧をとして後行トンネルに作用させた。ここで用いた $0.1\text{MPa}\{1\text{kgf}/\text{cm}^2\}$ の値は、実際の注入圧が、トンネルに作用する土水圧より $0.1\text{MPa}\{1\text{kgf}/\text{cm}^2\}$ 程度大きく設定されることが多い実状を考慮したものである。

3 併設トンネル検討結果

3.1 長期的な影響

長期的な影響の解析結果として、3手法による断面力の増加率の結果を表5に示す。

手法1による計算では、すべての解析ケースで正曲げの最大値部の軸力がトンネルの離隔によらず30%～40%程度に減少した(表5網掛け部参照)。このような軸力の減少傾向はこれまで実際のトンネルの計測データとして報告されておらず^{3), 8), 9), 10), 11)}、実現象をうまく表現できていないと思われる。

また、手法2の場合には正曲げの増加率と負曲げの増加率がモーメント、軸力とも大きく異なるものであった(表5網掛け部参照)。このような正負の断面力の大きな違いもこれまで実際のトンネルの計測データとして報告されておらず、併設トンネルの断面力の割り増しのために割増率を決定する際の判断材料としてあまり望ましいものとならないと言える。

手法3によるN値=10の地盤の場合、増加率は0.5Dで14%、0.25Dで29%程度の最大曲げモーメントの増加を示す結果となり、離隔が小さいほど併設の影響を受けやすいといった結果があらわれている。また、正負の断面力間でも大きな違いが現れなかった。このような傾向は実際の計測データからこれまで得られていたものと類似している。そして、このような傾向は地盤の強度が小さい場合に、これまで実際の計測データで示されてきた、後行の通過時に先行の断面力が一時的に増加し、長期的には若干の影響が残留する、といった傾向^{8), 10)}に近いものであり、本手法を用いて、単一トンネルの断面力を割り増すことによって、併設トンネルの設計断面力とすることが設計実務においては現実的なものとなると思われる。

3.2 短期的な影響

短期的な影響の解析結果として、3手法による断面力の増加率の結果一覧を表6に示す。後行トンネル側からの短期的な圧力によって先行トンネルが縦長に変形する作用を受けたため、一様に断面力が減少している。しかし、N値=27、離隔0.25Dの手法3(表6網掛け部参照)の場合にはモーメント、軸力とも大きくなり、現場で計測されたデータ³⁾に傾向として合致している。なお、実際の設計にこの程度の断面力の増加を適用した場合は、短期荷重として許容応力度を50%程度割増しすれば、特に設計断面を変更しなくとも許容応力度に収まるものと考えられる。

表6 断面力の増加率(短期的な影響)

手法	N	離隔	Mmax (正曲げ) 増加率(%)	Mmax部 軸力 増加率(%)	Mmin (負曲げ) 増加率(%)	Mmin部 軸力 増加率(%)
1	10	0.5D	-33	-36	-30	-32
		0.25D	-35	-44	-30	-31
	27	0.5D	-31	-24	-24	-13
		0.25D	-33	-22	-26	-13
2	10	0.5D	-35	12	-30	-4
		0.25D	-37	-2	-30	-3
	27	0.5D	-30	14	-25	-4
		0.25D	-32	18	-28	-4
3	10	0.5D	-48	-1	-40	-4
		0.25D	-40	21	-23	9
	27	0.5D	-34	8	-20	4
		0.25D	42	18	31	13

3.3 側方土圧係数の影響

一般に側方土圧を決定する際には、ある決められた範囲から、設計技術者が側方土圧係数の値を選択して算定することが多い⁴⁾。このため、併設の検討に側方土圧係数の違いがどの程度断面力の変化に影響を与えるかを調べるため、解析モデルの側方土圧係数を1割程度変化させて断面力の変化を計算した。それらの結果を図9および図10に示す。図中に破線で示したものが手法1によるものであり、1割程度の側方土圧係数の変化が解析値に大きな影響を与えることがわかる。

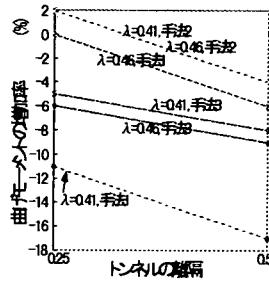


図9 側方土圧係数の違いとモーメントの増加
(地盤のN値=10の場合)

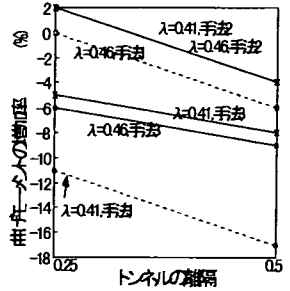


図10 側方土圧係数の違いとモーメントの増加
(地盤のN値=27の場合)

4 近接施工検討結果

側部掘削による近接施工の影響解析結果として、3手法による断面力の増加率を表7に示す。手法3の曲げモーメントがかなり大きく出ていること、手法1の軸力が全周ばねモデルに比べて小さいのが特徴である。

手法1による計算では、曲げモーメントはN値=27の地盤で増加することではなく、N値=10の地盤で正曲げが15%、負曲げが13%増加する結果となっている。この手法によれば、固い地盤では側部掘削によって曲げモーメントの増加が生じないことになる。ただし、軸力が50%近く減少しているため、応力度の照査では、注意が必要である。

手法2による計算でも、同様に曲げモーメントはN値=27の地盤で増加することではなく、N値=10の地盤で正曲げが11%、負曲げが13%増加する結果となっている。

手法3による計算では、いずれの地盤でも、曲げモーメントの増加が算定され、この値は他の2つ手法に比較していずれも大きな値となっている

表7 近接施工時の断面力の増加率

手法	N	Mmax (正曲げ) 増加率 (%)	Mmax部 軸力 増加率 (%)	Mmin (負曲げ) 増加率 (%)	Mmin部 軸力 増加率 (%)
1	10	15	-46	13	-29
	27	-12	-47	-7	-24
2	10	11	-7	13	0
	27	-10	22	-9	-17
3	10	21	-3	18	1
	27	14	-2	13	0

5 まとめ

併設トンネルの先行トンネルに生じる影響を調べるために、3つの検討手法による影響評価を行った。現在トンネルの断面力算定には、周辺地盤を平面ひずみ要素などでモデル化して計算する例は少なく、海外でも実用レベルで用いられることは少ないようである^{5), 6), 7)}。しかし、併設トンネルのように幾何学的に複雑な問題を解析する場合は、FEM解析を上手く利用すれば、併設の影響をなんらかの形で評価することが可能であると思われる。

実際の施工現場での計測データによれば、0.5D程度の離隔があれば、短期的には後行トンネルの裏込め注入等トンネルの変形を縦長に戻して発生する応力を一時的に軽減し、長期的には、単一トンネルの計測データにほぼ等しくなり、先行トンネル側にほとんど影響を与えないという例が報告^{8), 9), 10)}されている。さらに、離隔がそれより小さな場合にも、後行トンネルの裏込め注入等による一時的な荷重の増加があっても、長期的にはあまり大きな影響が生じていないとの報告^{3), 11)}されている現状を考えると、設計計算上での割り増しは、手法3程度の値が算定されるのが現実的なものと思われる。

また、近接施工の影響評価を同じように3つの手法で行うと、従来の1の手法と他の手法でかなり違う結果が出た。今後、現場データとの照合を行うとともに、従来の方法にも検討が必要であると考えられる。

6 おわりに

現状の単一トンネルの断面力の算定手法が全周ばねモデル等によっているため、併設・近接施工によるトンネルの断面力算定もこれを基本として、幾何学的な複雑さから生ずる影響を周辺地盤を平面ひずみ要素でモデル化したFEM解析により、うまく表現して基本となるモデルに取り込んでいかなければならない。結果的に、この2つの解析モデル間での影響の受け渡しが良好に行えたモデルが「手法3」であったと言える。

なお、掘削時の解放率の大きさの決定方法は本解析手法独特のものである。トンネル覆工の断面力の算定を主たる目的とする本試計算では、地表面変位の算定の際に一般に用いられる応力解放率にとらわれることなく、妥当な断面力が算定できる解放率を独自に設定して用いた。その結果、N値10程度の地盤では掘削時の解放率50%、N値27程度の地盤では40%程度であり、これを用いることによって、基準となる単一トンネルの全周ばねモデル解析の断面力に近い値が算定できることがわかった。そして、この結果をもとに併設トンネルの断面力算定を行って前述の各手法により評価を行ったものである。

さらに、本解析に用いたFEM解析は周辺地盤、覆工体ともに線形弾性のモデルであること、掘削解放率以外の入力値の同定も土の強度定数よりごく一般的に求めた値を用いたため、一般化が比較的容易で、実際に併設トンネルの設計や近接施工の影響評価を行う際にも適用可能であると思われる。

シールドトンネルに発生する断面力について設計値と解析値の比較を行う場合、単一トンネルでさえこれらの間に大きな開きがある場合も少なからずあるため、現状では併設トンネルにおけるデータ比較は定性的なものにならざるを得ないが、今後、実現場で得られる計測データなどを注意深く収集・検討して、ここで示した解析手法との対比を行っていきたい。

なお、本研究は運輸省から委託を受けた「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一環として実施したものであり、関係各位に感謝する次第である。

文献

- 1) 宮川房夫，久保泰文，町田茂一 他：シールド掘進による地盤変位の実用予測手法の提案，土木学会論文集，No.528/VI-29,115-129,1995.12
- 2) 中山 隆，中村信義，中島 信：泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について，土木学会論文集，No.397/VI-9,1998.9
- 3) 川口 廣，久保泰文，町田茂一，水谷 進：超近接単線並列シールドトンネルの設計・施工，土と基礎，p13-p18,1993.5
- 4) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，1996.7
- 5) Duddeck：Empfehlung zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein (1980), DIE BAUTECHNIK, 1980, pp351-353
- 6) Le groupe de travail no7：Texte provisoire des reflexions sur les methodes usuelles de calcul du revetement des souterrains, TUNNELS, 14, 1976, pp56-57
- 7) Bergian Member Society of ISSMFE：BELGIAN GEOTECHNICAL VOLUME published for the 1985 golden jubilee of the international society for soil mechanics and foundation engineering, 1985
- 8) 森 麟，竹内雄三 他：軟弱粘土層での坑内二次注入を実施した近接並列シールド掘進時の地盤計測(その2)，第23回土質工学研究発表会732，1987.6
- 9) 川村 努：地下鉄11号線九段上シールドにおける近接施工の予測と計測，基礎工，p106-p114,1989.12
- 10) 水谷敏則，真下英人，猪熊 明 他：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号，1989.12
- 11) 日本鉄道建設公団東京支社・日本トンネル技術協会：京葉都心線トンネルの設計・施工技術に関する研究報告書，1990.9