

併設して施工されるシールドトンネルの影響解析

PREDICTIVE ANALYSIS TO EVALUATE BEHAVIOR OF CLOSELY CONSTRUCTED PARALLEL SHIELD TUNNELS.

木村 定雄*, 矢田 敬**, 小泉 淳***
Sadao KIMURA, Kei YADA, Atsushi KOIZUMI

Presented is an analytical method to predict the behavior of the lining of the existing tunnel when a new tunnel is constructed parallel and close to it. In the analysis, driving forces in the longitudinal and the lateral direction and the change of the earth pressure due to the construction of the new tunnel are evaluated separately. The behavior of the lining of the existing tunnel is computed and compared with the result of the measurement. The analysis shows good agreement with the measurement, hence the proposed method is effective for the design of the construction of closed parallel shield tunnels.

Keywords: parallel shield tunnels, closed construction, pseudo-three dimensional analysis of segment rings

1. はじめに

近年、都市部は、地上はもとより地下においても、鉄道、上下水道、電力、通信等の構造物が錯綜し、相当な過密状態となってきた。このため、新たに構築されるトンネル構造物は、その立地条件、施工条件等の制約を受け、既設の構造物に近接して施工されたり、トンネル断面を縮小したりする例が増えている。また、同様の制約から、複数のトンネルを併設する場合も、各々の離隔距離を従来より狭くして施工しなければならないことも生じている。

一方、最近の都市トンネル工法に関する技術開発の動向を見ても、大深度地下利用に関連した研究開発では、複数のトンネルの分岐や接合時の超近接施工等、トンネルを近接して施工する際の技術開発およびその設計法の確立が重要課題となってきた。

現在、このようなトンネルを施工するにあたっては、周辺地盤や他の構造物への影響が比較的少ないシールド工法を基本とするトンネル工法が最も適していると考えられるが、構造物の形状が複雑であったり、地盤条件が良くない場合には地盤改良等の補助工法を併用せざるを得ないのが実情である。

近接施工となる併設シールドトンネルにおいて、後続して施工するシールド（後続シールド）が、先行して施工したトンネル（先行トンネル）に与える影響には、①ジャッキ推力、泥水圧または泥土圧、裏込め注入圧等の施工時荷重、②テールボイド、切羽崩壊または土砂の過大な取り込み等による周辺地盤の緩

* 正会員 工修 佐藤工業㈱ 中央技術研究所

** 正会員 佐藤工業㈱ 技術本部 エンジニアリング第二部

*** 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科

みが考えられる。また、シールドトンネルの一次覆工は、継手を数多く有するフレキシブルなセグメント構造であるため、先行トンネルに二次覆工を施す前に、後続シールドを近接して施工する場合は、後続シールドの施工時荷重が先行トンネルの継手に主に集中するものと想定される。

従来、併設シールドトンネルの設計では、これらの影響を評価するために②の影響に主眼を置き、鉛直土圧の割り増し、あるいは土圧係数や地盤係数の低減を検討するとともに、後続シールド推進時の偏圧についても別途考慮するものとしてきた。

しかしながら、最近の併設シールドトンネルの施工事例によると、先に述べた①による影響が、②による影響よりも顕著となっている¹⁾。これは、シールドの施工法が従来の開放型シールドから、密閉型シールドに代わってきたためと考えられる。

本報告は前述した近接施工のうち、新設されるシールドトンネルの施工が、既設のシールドトンネルへどのような影響を与えるのか、主に①の影響に重点を置いた予測解析手法の確立を目的としてその基本的な考え方を提案するものである。また、この予測解析手法を検証するために、併設して施工されたシールドトンネル（京葉都心線隅田川トンネル）の、後続シールドが先行トンネルに与える影響を計測により把握し、予測解析結果と計測結果との比較検討を行っている。

2. 予測解析

2. 1 予測解析の分類

後続シールドが先行トンネルに与える影響を評価し、先行トンネルの挙動を事前に予測する解析手法を確立するためには、大別して次に示す2項目について検討することが必須となる。

(1) 先行トンネルの軸方向に分布する荷重の評価および先行トンネルの軸方向挙動を把握するための先行トンネルのモデル化（先行トンネル軸方向挙動の検討）

(2) 先行トンネルの横断方向に作用する偏圧の評価および先行トンネルの横断方向挙動を把握するための先行トンネルのモデル化（先行トンネル横断方向挙動の検討）

以降、これら項目別にその基本的な考え方および検討例を示す。

2. 2 先行トンネル軸方向挙動の検討

後続シールドの施工時荷重は、地盤を媒体として先行トンネルに作用する(図1参照)。この場合、地盤の剛性と先行トンネルの剛性との違いを十分に考慮して、先行トンネルに作用する荷重を同定することが重要となる。すなわち、地盤とトンネルとの剛性の違いにより、先行トンネルに作用する荷重は異なる。例えば、地盤が良好でその剛性がトンネルの剛性と同じか大きい場合には、施工時荷重を地盤が支持する程度が大きくなり、逆に、軟弱な地盤の場合には、トンネルに過大な荷重が作用することになる²⁾。

一方、超近接施工(掘削距離0.3D以下を総、D:トンネル径)となる場合には、先行トンネルと後続シールドとの間の地盤を強固にすると施工時荷重の伝播が良くなり、結果として先行トンネルに過大な影響を与えることもある¹⁾。そこで、本解析においては、後述する隅田川トンネルにおける計測結果と予測解析結果とを比較検討するために、隅田川トンネルとほぼ同条件(トンネル径、地盤条件)で構築されたAトンネルの計測結果を逆解析することにより、これらの検討を行った。

Aトンネルの概要を図2に示す。このトンネルは、後続シールドの施工により1cm程度、先行トンネル

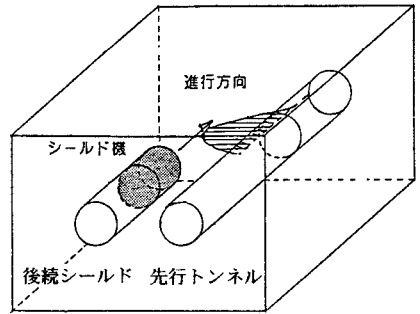


図1 併設シールドトンネルの概要

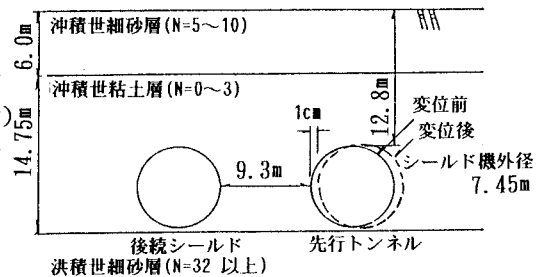


図2 Aトンネルの概要

が後続シールドと反対側に押し出されたものである。そこで、この計測結果を用いて、図3に示す手順で逆解析を行うことにより、先行トンネルに作用する荷重を同定した。

Step1：地盤を一樣地盤にモデル化し、軸対称弾性FEMにより、トンネル軸方向の荷重分布 $f(z)$ を求める。

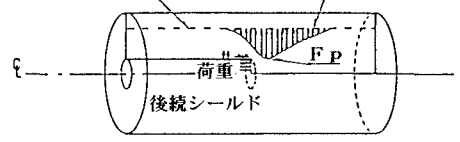
Step2：Aトンネルの変形量と同じになるような荷重分布 $f(z)$ の補正係数 α を求める。

なお、Step1において後続シールドの施工時荷重は、図4に示すようにモデル化した。Step2において荷重分布 $f(z)$ の補正係数 α を決定する際の先行トンネルは、図5に示すようなはりばねモデル³⁾とした。なお、はりばねモデルのリング間ばね定数およびセグメントリングの剛性は、参考文献³⁾により求めた。

以上の逆解析結果より、荷重分布 $f(z)$ の補正係数 α は2.64となった。

次に、この結果を踏まえて、隅田川トンネルの予測解析を行う。図6a)および図6b)は隅田川トンネルの平面図および施工条件を示したものである。先行トンネルに作用するトンネル軸方向荷重分布は先に述べたAトンネルの逆解析Step1と同様な方法により求めた。なお荷重分布 $f(z)$ の補正係数 α は逆解析結果と同じ2.64を用いた。また、後続シールドの施工時荷重は施工計画時に想定した値とし、地盤の物性値は土質調査から得られた表1に示す値とした。これらの条件からStep2のはりばね計算法により先行トンネル軸方向の変位量および断面力を計算した。結果は表2に示すとおりである。なお、表2中の応力度は以下に示す方法で求めた。

Step1：軸対称FEMによる荷重分布 $f(z)$ の計算
先行トンネル位置



Step2：はりばね計算による補正係数 α の決定

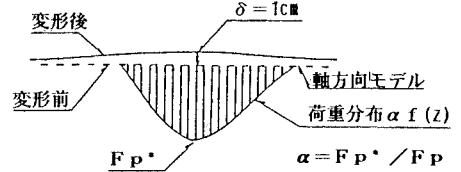


図3 軸方向解析の手順

③裏込め注入圧

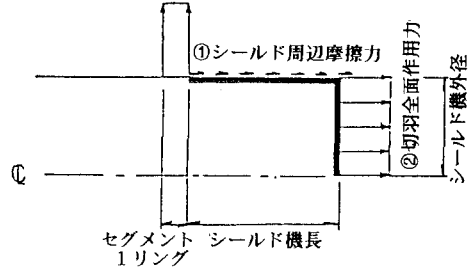


図4 後続シールドの荷重条件

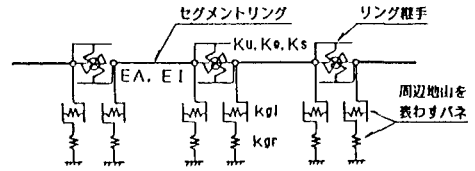
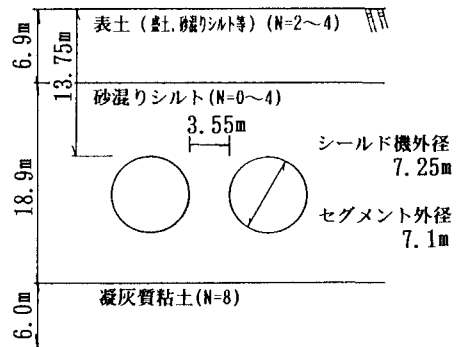


図5 先行トンネルの軸方向モデル



細砂、シルト混り砂礫 (N=50 以上)

図6b) 施工条件

表2 軸方向挙動の計算結果

項 目	計算結果
最大変位	1.42 cm
最大曲げモーメント (Mmax)	232.0 tfm
最大せん断力 (Smax)	26.7 tf
コンクリートの圧縮応力度 (σ_c)	10.59 kgf/cm ²
リング間ボルトの引張応力度 (σ_t)	822 kgf/cm ²
リング間ボルトのせん断応力度 (τ)	233 kgf/cm ²
掘削面の曲げ応力度 (σ_b)	1040 kgf/cm ²

表1 土質条件およびその物性値

地 層	弾 性 係 数 (kgf/cm ²)	地盤反力係数 (kgf/cm ³)	ポアソン比
表土 (盛土、砂混りシルト等)	40	—	0.35
砂混りシルト	12	0.01	0.45
凝灰質粘土	90	—	0.35
細砂、シルト混り砂礫	500	—	0.35

①圧縮応力度 σ_c および引張応力度 σ_t : リング継手断面を図7に示すように、セグメント本体からなる圧縮断面とボルト断面からなる引張断面とに分け、中立軸を求める。断面内ではひずみ分布が直線であると仮定し、 M_{max} より σ_c および σ_t を計算する。

②ボルトのせん断応力度 τ : S_{max} を1リング当たりのボルト断面積で除して計算する。

③継手板の曲げ応力度 σ_b : 継手板を両端固定はりとし、その支間中央にボルトの引張力を载荷したモデルから計算する。

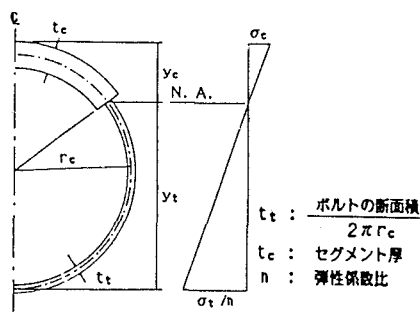


図7 応力度の計算方法

2.3 先行トンネル横断方向挙動の検討

本解析例のように軟弱地盤中の先行トンネルの横断方向挙動について検討する場合、後続シールドと先行トンネルとの離隔距離および各々のトンネルの基盤からの距離の程度によって、先行トンネルに作用する荷重(偏圧)は異なる。すなわち、トンネル離隔距離が小さい程、またトンネルと基盤までの距離が小さい程、後続シールドの施工時荷重が先行トンネルに与える影響は大きくなる⁴⁾。そこで、先行トンネルに作用する荷重を二次元BEMにより求め、この影響を考慮した。以下に隅田川トンネルを例に先行トンネル横断方向挙動の解析手順を示す。

Step1 : まず、前述した先行トンネルの軸方向挙動の検討の際得られた単位幅当たりの最大荷重を F_{p^*} とする。次に図8に示す二次元断面において、後続シールドの施工時荷重を仮想内圧 P_i とした時、先行トンネルに作用する水平方向荷重の合力(ΣF_x)が $F_{p^*} = \Sigma F_x$ となるように P_i を決め、偏圧値を同定する。なお、二次元BEMのモデルは図9に示すとおりであり、地盤の物性値は表1の値を用いた。また、今回の解析例において計算された偏圧を図10に示す。

Step2 : 先行トンネルを2リング千鳥組のはり一ばねモデル⁵⁾として、Step1 から得られた偏圧を荷重とした時のトンネル横断方向の断面力を計算する。

Step3 : Step2 と同様に図11の主荷重(土圧、水圧、自重)作用時の断面力を計算する。

Step4 : Step2, 3 より得られた断面力をセグメント要素の各節点

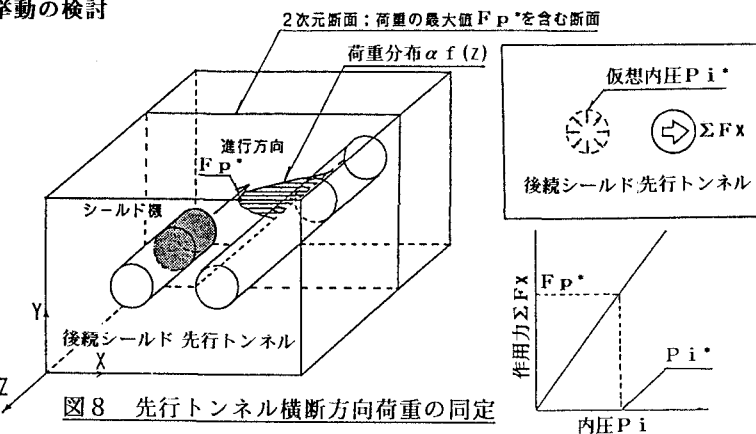


図8 先行トンネル横断方向荷重の同定

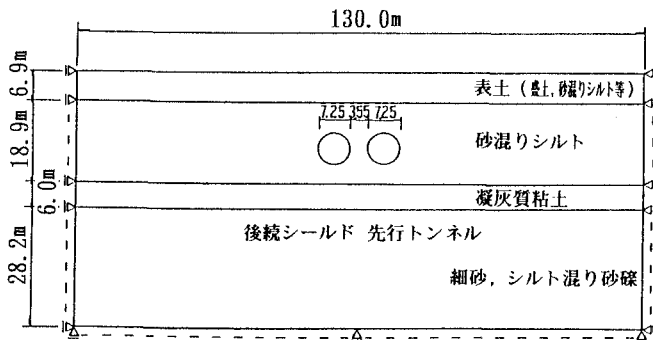
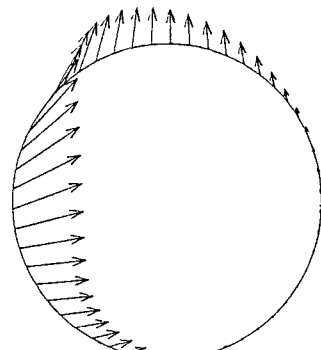


図9 横断方向のモデル化



(後続シールドの内圧 $P_i^* = 3.29 \text{ tf/m}^2$)

荷重ベクトル $\rightarrow$ 1 tonf

図10 先行トンネルに作用する偏圧

において重ね合わせ、セグメントおよびセグメント継手の応力度を求める⁵⁾。

以上の計算より得られた結果を表3に示す。

3. 計測の概要

予測解析手法の妥当性を検証する目的で、京葉都心線隅田川トンネルにおいて、後続シールド施工時の先行トンネルの挙動を計測した。この併設シールドトンネルは各々のシールドが反対向きに発進・到達するものであり、計測は図6に示したA点およびB点において反対側の路線がそれぞれ後続シールドとなる状態で実施している。表4は各計測点における計測項目を示したものである。各々の計測を実施した目的は、①先行トンネルの軸方向変位挙動の把握（リング継手の目開き量測定、中心測量、水準測量）、②先行トンネルの横断方向変位挙動の把握（セグメント継手の目開き量測定、内空変位測定）、③2リング千鳥組されたリング同士の変形性能の相違によって生じるせん断方向の変位差の把握（リング継手の段差量測定）、④後続シールドから先行トンネルに作用する荷重の一つである裏込め注入圧（ $\sigma_{\text{裏込め}}$ ）の把握（裏込め注入圧）である。後続シールド施工時の先行トンネル挙動の概略を以下に示す。

(1) 先行トンネルの軸方向挙動

後続シールドの切羽が、先行トンネルの計測点に接近し通過すると、先行トンネルは後続シールドと反対側に10～20mm押されるとともに、上方に0～5mm押し上げられた。また、後続シールドのテールが通過した後、先行トンネルは後続シールド側に5～20mm引き戻され、2～10mm沈降した(図12参照)。

(2) 先行トンネルの横断方向挙動

後続シールドの切羽が先行トンネルの計測点に接近すると、先行トンネルは水平側線が拡がり横長な変形(D+2～5mm)を起し、その後、切羽が通過する直前から通過にかけて水平側線が縮まり、縦長な変形状態(D-0～4mm)となった。また、テールが通過した後、横長な変形状態(D+1～7mm)となった(図13参照)。

4. 予測解析結果と計測結果との比較検討

隅田川トンネルにおける予測解析結果と計測結

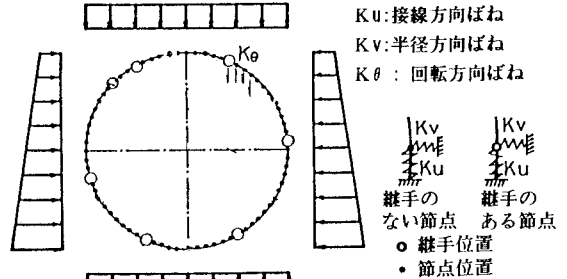


図11 横断方向解析モデル

表3 横断方向挙動の計算結果

項 目	計 算 結 果
最大曲げモーメント	20.8 tfm
最大軸力	140.1 tf
最大せん断力	28.2 tf
コンクリートの圧縮応力度	144.8 kgf/cm ²
鉄筋の引張応力度	947.7 kgf/cm ²
セグメント継ぎボルトのせん断応力度	1011.1 kgf/cm ²

表4 計測項目

計 測 項 目	計測点数
リング 継手目開き量	8点×2断面
リング 継手段差量	8点×2断面
セグメント 継手目開き量	7点×2断面
中心測量	14(8)点
水準測量	14(8)点
内空変位	3点×4断面
裏込め注入圧	4点×3断面

但し、()内はB点の値である

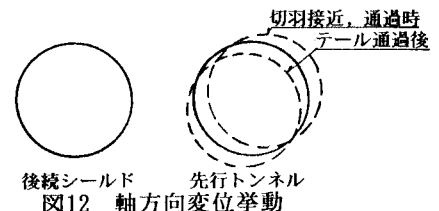


図12 軸方向変位挙動

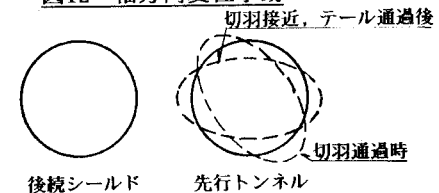


図13 横断方向変位挙動

果とを比較した一例を表5に示す。
 この結果は、先行トンネルにおける計測結果のうち、それぞれ最大値を示すものである。すなわち、後続シールドの切羽が先行トンネルの計測点に接近し、通過する際、後続シールドの施工時荷重の影響を最も受けている時に発生したものである。これらを比較すると、本予測解析結果は、概ね計測結果と一致している。また、図10と図13とを比較すると予測解析から得られた偏圧の状況が実際の先行トンネルの変形挙動を説明しているようである。なお、図13における挙動は後続シールドのジャッキ重心によっても異なると考えられ、今回の施工では若干後続シールドが先行トンネル側に向く方向でジャッキ推力を加えたため、この影響が顕著に現れたように思われる。

表5 予測解析結果と計測結果との比較

	施工時荷重		軸方向変形挙動		横断方向変形挙動		
	推 力	掘 削 注 入 圧 力	掘削方向変位	リング継手の目開き量	内空変位	リング継手の目開き量	セグメント継手の目開き量
	tonf	kgf/cm ²	mm	mm	mm	mm	mm
解析結果	1400	3.0	14.2	0.15	掘圧作用時水平 掘削が5mm収縮 主荷重作用時 27mm伸長	0.2～ 0.5	0
	1400～ 1700	1.3～3.1	10～20	0.4	切羽通過時水平 掘削が1mm収縮 通過後8mm伸長	0.5	0.2
計測結果	1000～ 1100	2.1～3.3	0	0.5	切羽通過時水平 掘削が7mm収縮 通過後元に戻る	0.3	0.4

5. まとめ

本報告では、近接施工となる併設シールドトンネルの、後続シールドが先行トンネルに与える影響を事前に予測するための解析手法について、その基本的な考え方を示した。また、京葉都心線隅田川トンネルにおいて先行トンネルの挙動を計測により把握し、予測解析結果との比較検討を行った。この結果、得られた知見を列挙すれば次のとおりである。

- (1) 軟弱地盤に近接して施工されるシールドトンネルの挙動は、概ね本解析手法により事前に把握できるものとする。
- (2) 併設シールドトンネルの影響解析を行う場合、先行トンネルの剛性と周辺地盤の剛性との相違により、先行トンネルに作用する荷重の程度は異なるため、この特性を十分に考慮する必要がある。
- (3) 併設シールドトンネルの影響解析を行う場合、各々のトンネルの離隔距離はもとより、各々のトンネルと基盤までの距離の程度を考慮する必要がある。

本予測解析においては、先行トンネルに作用する軸方向荷重分布の同定を軸対象FEMにより行っているが、今後三次元FEMによりその妥当性を検討する必要がある。また、先行トンネルの横断方向解析では主荷重（土圧、水圧、自重）による影響と後続シールドの施工時荷重である偏圧の影響とを、それぞれの断面力を計算した後に重ね合わせているが、その妥当性を検討することも必要となる。今回は、先行トンネルの変形挙動を中心に計測を行ったが、今後先行トンネルに実際に作用する荷重およびセグメント本体ならびに継手部に生じるひずみ等についても計測を行い、本予測解析手法の妥当性をさらに詳細に検証することが重要と思われる。最後に今回の隅田川トンネルの計測に際し、多大なるご協力を頂いた日本鉄道建設公団東京支社の関係各位には深く感謝する次第である。

6. 参考文献

- 1) 飯田, 伊藤: 並列泥水シールドの超近接施工, 土木学会第9回施工体験発表会, 1990. 1
- 2) 今野, 矢田, 小泉: 後続トンネル施工時における先行トンネルの挙動, 土木学会第42回年次講演会, 1987. 9
- 3) 小泉, 村上, 西野: シールドトンネルの軸方向特性のモデル化, 土木学会論文集, 第394号/Ⅱ-9, 1988. 6
- 4) 矢田, 今野, 小泉: 後続トンネルによる先行トンネルへの受働側の影響, 土木学会第42回年次講演会, 1987. 9
- 5) 村上, 小泉: シールドトンネルリングの耐荷機構について, 土木学会論文集, 第272号, 1978. 4