

併設シールドの影響予測解析と実際の挙動

EVALUATION OF THE ANALYSIS METHOD FOR CLOSELY LOCATED SHIELD TUNNELS BEHAVIOR
BASED ON THE IN-SITU MEASUREMENTS

山口 巖* 山崎糸治* 福島健一* 小林 隆** 杉嶋敏夫***

Iwao YAMAGUCHI, Itoji YAMAZAKI, Kenichi HUKUSHIMA, Takashi KOBAYASHI and Toshio SUGISHIMA

In case of closely adjacent tunnels being constructed one after another, the preceding tunnel is ill-affected by the following one. This paper describes the pre-analysis of tunnel behavior and the in-situ measurements carried out during the construction of four subway shield tunnels very closely located. Based on the result of measurements, the acting pressure and the sectional force of tunnel lining caused by the following shield were evaluated. Authors discuss the applicability of analysis method studying the difference between presupposition and actuality.

Keywords : shield tunnel, pre-analysis of tunnel behavior, in-situ measurement

1. はじめに

京都市交通局では現在、高速鉄道東西線の建設を行っているが、このうち御陵駅東側の京阪京津線との乗り入れ区間は4線併設シールドとなっている。当該工事は併設シールドにおいて発生し得る諸問題に関し、事前の影響評価と実施工での計測を実施しているが、シールドの掘進、作用荷重、およびトンネル挙動の三つについて詳細な計測を実施する比較的希少な工事である。本文はこの工事における予測解析の手法の問題と実際の挙動について考察するものである。

大都市部においては地下の高度利用を迫られ、地下構造物の過密化が進み、シールド工事においても既設トンネルに近接して新たなトンネルが、あるいは複数のトンネルが近接して同時期に施工されるという事例が増加しつつある。一方、この種の近接施工における設計・施工上の問題を解明するために必要な情報は十分には得られておらず、設計手法ならびに施工法は確立されたものがないのが現状である。このような状況に対し、筆者らは今後の併設シールドの影響評価に資することを目的として、一般化できる事項の抽出を念頭に、当該工事の設計・施工の実績について分析を行ってきた。

既報¹⁾ではこの4線併設シールドのセグメントの設計に関し、その設計手法と設計成果について述べた。ここでは、その後実際にシールド工事に着手し4線のうち1号、2号シールドの施工が完了したので、予測解析における仮定条件と関連させながら得られた計測データについて考察し、解析手法の評価を試みる。

* 正会員 京都市交通局高速鉄道本部

** 正会員 東西線建設工事(御陵東工区)佐藤・西松・鴻池・東洋・吉村・金沢土建共同企業体

*** 正会員 佐藤工業(株)技術本部土木設計部

2. 工事の概要

工事は単線4線シールド（泥土圧式シールド、マシーン外径：5,840mm）で計画され、図-1に示すように、上下2段の四角形状の配置から順次発進し、4線トンネル全体が移行し、途中菱形の位置関係を経て90度回転して上下2段で到達する。トンネル相互の離隔は全般におおむね1.0m～3.0mであり、移行部の最近接部において0.7mの離隔となる。

土質は、工事区間全般において地表面から数メートルは沖積の粘性土および砂質土、以深は洪積の砂礫質土、粘性土であり一部に砂層を挟む。シールド施工部周辺はおおむね洪積砂礫質土であり、N値30以上で細粒分を多く含み自立性が高い。ただし最も深い1号シールドは工区前半において粘土層、後半において砂礫質土層を掘進することになる。この洪積粘土層はN値10～40とばらつきはあるが平均20以上と硬い。

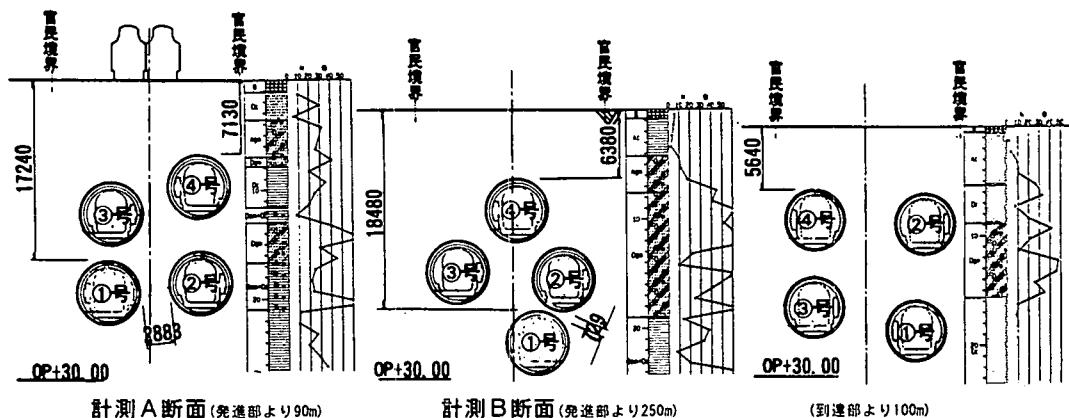


図-1 トンネル断面図

3. 計測計画

実施した計測は、沈下計、傾斜計等を用いた地盤挙動に関するものと、土圧計、ひずみ計等を用いたトンネル挙動に関するものに大別される。4線シールドの位置関係、設計の成果などを考慮し、図-1に示すA、Bの2断面において詳細な計測を行った。図-2に詳細なトンネル挙動の計測を実施する2断面の機器配置を示す。なお、セグメントひずみ計は隣接する2リングに設置した。B断面は1号と2号シールドが縦並列でほぼ最近接となる断面に相当し、併設の影響が最も顕著に現れると想定された。

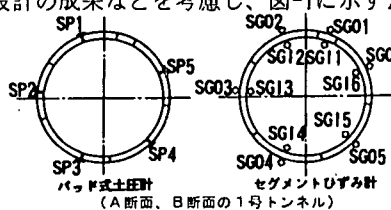


図-2 トンネル挙動計測断面

4. 予測解析

詳細な計測を実施するA断面およびB断面の2断面について計測機器の配置に対応した予測値を得ることを目的として、4線シールドの離隔等位置関係を忠実にモデル化し、地盤の変形挙動およびトンネル挙動について予測解析を実施した。また、トンネル挙動は横断面、縦断方向断面について検討した。ここではこれらのうちトンネル横断面の挙動解析について述べる。

4.1 解析の手法

予測解析は、図-3のフローに示すように、FEMを用いて4線シールドの施工順序、施工過程を考慮したステップ解析を行い、各施工段階、すなわち各シールドが順次施工される過程で生じる先行トンネルに対する後続シールドの推進または裏込め注入圧による加圧的な荷重ならびに掘削に伴う応力解放による引き込み

側の荷重を抽出し、その荷重を「はりーばねモデル」に載荷してトンネル挙動を解析する。なお、FEMを用いて求めた荷重は Mindlin等より算定される荷重とも比較しながら妥当性を評価する。

FEM解析ではセグメントの剛性を梁要素などで評価して組み込み、地盤とトンネルの一連の挙動を同時に解析することも可能である。これに対しここで用いた方法は、FEMをトンネル挙動の原因となる荷重の抽出のみに適用し、トンネル挙動は、シールドトンネルにとって支配的と考えられるセグメント継手の存在や地盤反力の有効作用位置を考慮できるセグメント検討上より合理的な「はりーばねモデル」で解析することを試みるものである。

なお、ダクタイルコルゲートセグメント ($h=25\text{cm}$) の「はりーばねモデル」に用いるセグメント継手回転ばね定数は、施工に先立ち実施した要素実験から導入軸力0の場合の実験値を用いた(表-1)。

4.2 影響の原因となる荷重の評価

(1) シールド推進の影響

シールドの推進が地盤を介して外部にもたらす加圧側の影響は、切羽前面圧力に着目すれば、土圧・水圧とのつりあい以上の圧力が載荷されることに起因すると考えられる。通常、施工計画においては所要の切羽圧力は土圧・水圧に、切羽を地山に貫入させ安定を図るための予備の圧力(以下、予備圧と呼ぶこととする)を加えて設定され、その値としては $0.1 \sim 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ 程度が標準的と考えられる。予測解析では、通常の施工において後続シールドの推進に伴う荷重のうち先行トンネルに影響を及ぼす荷重として有効な部分はこの予備圧相当であると考え。解析上用いる荷重は、上記の値に施工上の変動量、不確定量を考慮し、おおそ最大値に近い値に対して検討しておく必要があるという観点から 1.0 kgf/cm^2 を採用する。

加圧的な圧力として裏込め注入圧を考慮する必要があるが、これも注入ポンプにおける注入圧力を考慮するのは過大であり、外部に対して有効な圧力として上記と同様の 1.0 kgf/cm^2 程度を見込めば十分であると判断される。なお、これら荷重は施工途上に一時的に作用するもので、残留しないとして扱う。

(2) 掘削の影響

後続シールドの掘削による除荷の影響は、FEM解析上掘削相当外力で規定し、応力解放率を仮定する方法により求める。応力解放率の値は地表面沈下を推定する場合に計算結果がおおよそ実際の沈下量と合致するとされる³⁾10%を用いる。すなわち、地表付近の変位に着目した手法を、トンネル近傍での応力変動算定に適用するものである。元来この手法は、掘進、裏込め注入等の施工要因に支配される部分が大きい地表面およびその近傍の変形を、変形係数等地盤定数の決定方法と応力解放率の組合せの適性化を図ることで設計上または施工管理上実用的に予測するものである。したがって、必ずしもシールド施工に伴う地山応力の再分配、変形等地盤挙動の全体を再現するものではなく、当該検討のようなトンネル近傍の挙動検討への方法論は確立されていない。そこで、シールド断面相当の土塊重量がなくなることは応力的には解析上応力解放100%とすることに相当するとした代替の試算も行ったが、結果として先行トンネルの発生断面力は低減され、部材にとって有利な方向に移行することがわかった。また、地盤挙動の点で後続シールド掘削面の内空

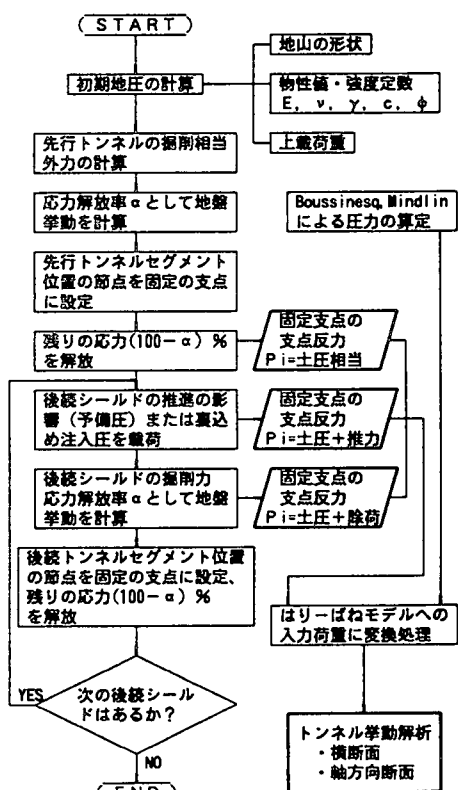


図-3 予測解析のフロー

変位は実際に起こりうる変位量に比して過大であり実情にそぐわないと想定された。このように確立されていない手法を用いることから、結果として安全側の値を与える応力解放率10%の計算結果を暫定的な目安として採用し、手法の妥当性の確認は将来の実測値に基づいた検討に委ねることとした。なお、掘削による影響は残留するとして扱う。

4.3 解析結果

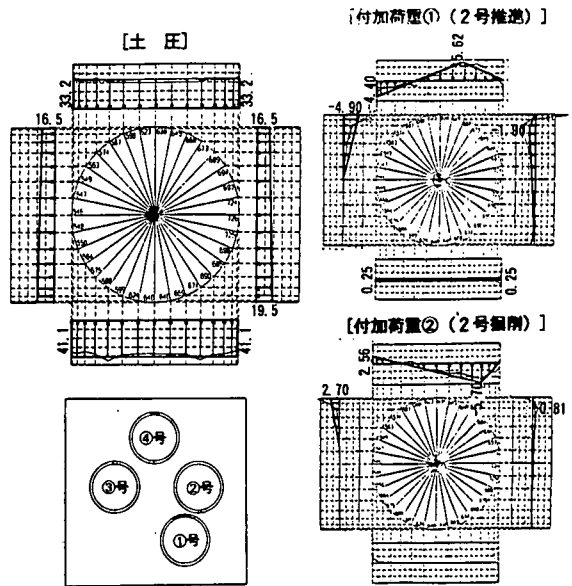
断面検討は、A断面、B断面の両断面について多少なりとも後続シールドの影響を受ける1号～3号トンネルに対して実施した。ここでは主荷重たる土圧に対して最も厳しく、後続シールドの影響が最も顕著に現れたB断面の1号トンネル（ダクトイルセグメント）の解析結果を示す。なお、この断面は洪積粘性土層に位置し、地盤反力係数は、 $K = 1.0 \times 70\%$ （地盤の乱れを考慮した低減率） $= 0.7 \text{ kgf/cm}^2$ に設定している。

図-4はFEMにより求めた節点荷重を、その実態を把握するために等価な等変分布荷重として整理したものである。1号トンネルに対する2号シールドの推進の影響（付加荷重①）は荷重強度の最大値が鉛直成分で 5.62tf/m^2 であり、これは既報¹⁾に示した Boussinesq や Mindlin による試算結果と同等かやや大きい値となっている。

また、2号シールドの掘削の影響（付加荷重②）は除荷の鉛直成分が最大 5.70tf/m^2 となっている。このような荷重に対してセグメントの発生応力度を求め計測点毎に整理して予測値とした。表-1には最大値のみを示す。付加荷重が、部材に対して危険側に最も大きな変動を及ぼす施工段階は2号シールドの推力が作用した場合で、増加応力は主荷重による応力度に比して比較的小さく、付加荷重が作用した場合も長期の許容応力度（曲げ引張: 1600 kgf/cm^2 曲げ圧縮: 1900 kgf/cm^2 ）に収まるという結果を得た。

5. 計測データと予測解析の評価

ここでは、計測により確認された併設シールドにおける現象の特質をまとめ、予測と実測の間に生じた差異に着目し、予測解析手法の評価を試みる。なお、詳細な計測と予測解析の対象とした2断面の1号トンネルはいずれも洪積粘土層中に位置し、都市トンネルとしては比較的良好な地盤条件下のトンネルである。ま



・ FEMで求めた1号に対する2号の影響荷重を示す。・ 3、4号は省略する。

図-4 荷重の予測値（B断面1号トンネル）

表-1 セグメント応力予測解析結果（B断面1号トンネル）

施 工 段 階	土圧のみ	2号推進	2号掘削	3号推進	3号掘削	4号推進	4号掘削
地 盤 反 力 係 数	$k_s = 1,000 \times 0.7 = 700 \text{ tf/m}^2$						
セグメントの剛性	$k_f = 1,800$ $k_f = 13,600$ (離間前) 2,500 (離間後) tfm/rad						
正曲最大	M tfm	21.87	27.28	20.58	21.13	20.38	20.42
	N tf	-53.56	-50.10	-53.70	-53.63	-53.48	-53.51
負曲最大	M tfm	-22.42	-25.70	-20.29	-20.16	-20.38	-20.37
	N tf	-95.95	-91.14	-93.00	-93.14	-92.94	-92.98

正曲最大 kgf/cm ²	σ_{out}	-1,299	-1,599	-1,235	-1,263	-1,224	-1,226
	$\Delta \sigma_{out}$	—	-260	324	-28	39	-2
	σ_{in}	994	1,302	923	954	913	915
	$\Delta \sigma_{in}$	—	308	-379	31	-41	2
負曲最大 kgf/cm ²	σ_{out}	773	935	677	670	681	683
	$\Delta \sigma_{out}$	—	162	-258	-7	11	2
	σ_{in}	-1,578	-1,717	-1,451	-1,445	-1,455	-1,457
	$\Delta \sigma_{in}$	—	-139	266	6	-10	-4

た、セグメントはともにダクタイルである。

5.1 計測データのまとめ

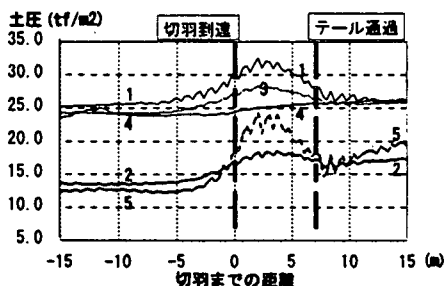
(1) 荷重の予測と実測

A断面、B断面の1号トンネル外周に設置されたパッド式土圧計（受圧面：450mm×750mm）により計測された荷重について、その経時変化と分布状況（予測値を併記する）を図-5、図-6に示す。なお、実測の荷重には外荷重としての土水圧とトンネル変形に応じて発生する地盤反力を含んだものであるのに対し、解析値は外荷重のみを抽出したものである。以下に確認された事実を予測値と比較しながら挙げる。

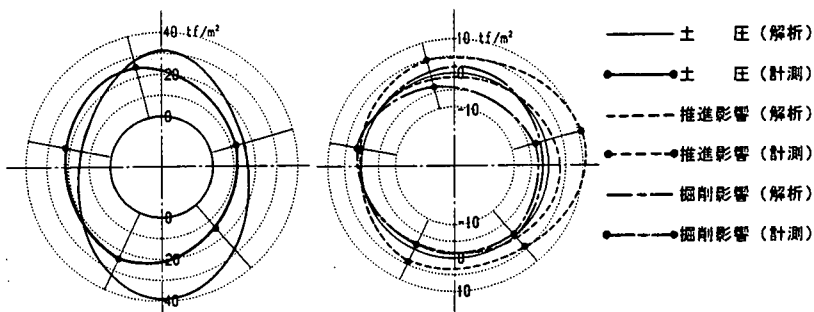
①後続2号シールド（以下、後続と呼ぶ）通過前の土圧は全土被の荷重が有効に作用した場合の圧力よりも小さい。10%の応力解放を行った残り90%の地圧をトンネルが負担する、すなわち全土被圧の90%とした予測値に対し、A断面が80%（図-5）、B断面が50%（図-6）となっている。

②後続の推進の影響は事前の想定より大きく、付加荷重の最大値は主荷重たる実測土圧と同オーダーとなっている。付加荷重の最大値は後続に面する位置に現れ、A断面は10 tf/m²で、予測値の5倍にも相当する。B断面では15 tf/m²で、これは予測値の3倍程度の値となる（図-6）。

③後続の推進の影響は、後続切羽の位置が計測点の10m程度手前から現れはじめ、切羽



経距離変化図



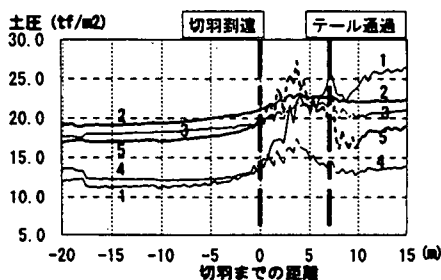
土圧 (通過前)

影響荷重 (変動値) 「掘削影響」は「推進影響」時

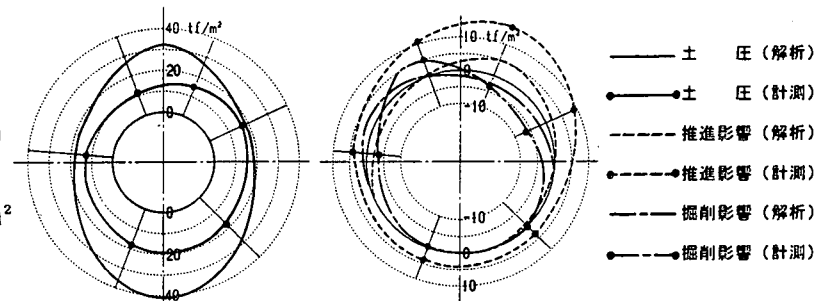
分布図

からの変動値を示す。

図-5 荷重図 (A断面1号トンネル)



経距離変化図



土圧 (通過前)

影響荷重 (変動値) 「掘削影響」は「推進影響」時

分布図

からの変動値を示す。

図-6 荷重図 (B断面1号トンネル)

到達後、テール通過前にピークを示す（図-5、図-6経時変化図）。

④後続の通過に伴う除荷が生じた後も作用荷重は通過前の土圧まで減少しないことから後続の推進の影響は、残留すると判断される。

⑤後続の掘削による影響は両断面において除荷として明確に現れている。顕著に現れたB断面では、最大値 6.5 tf/m^2 を示し、これには地圧の応力解放に相当するもの以外に先に作用し残留している推進影響成分も含むものと考えられるが、予測値との単純な比較では約2倍となる（図-6）。

⑥B断面において、後続通過後に頂部の加圧側荷重が相当増加しており、斜上の後続の掘削により後続側部地盤の鉛直応力が増加したと考えられる。この現象は解析結果とも一致する（図-6）。

(2) セグメント発生応力の予測と実測

計測2断面のうち、絶対応力が大きく、より顕著な応力変動を示したB断面1号トンネルのセグメント応力について、図-7に絶対応力の、図-8に後続の影響による通過前応力に対する変動値の経時変化を示す。計測値はピーク値を測定しているとは限らないが、予測値との比較では、表-2に示

表-2 セグメント応力の予測と実測

施 工 段 階	土圧のみ	2号推進	2号掘削
予測値	σ_{out} -1.299	-1.559	-1.235
	$\Delta\sigma_{out}$ -	-260	324
kgf/cm ²	σ_{in} 994	1,302	923
	$\Delta\sigma_{in}$ -	308	-379
予測値	σ_{out} -520	-830	-550
	$\Delta\sigma_{out}$ -	-310	280
kgf/cm ²	σ_{in} 400	310	-210
	$\Delta\sigma_{in}$ -	-90	-520

(B断面1号トンネル)

図-9に同断面の曲げモーメントと軸力を解析結果と併せて示す。発生曲げモーメント、軸力ともに小さな値となっているが、軸力が作用土圧に相応する値を示し、荷重の増加にも追従しているのに対し、曲げモーメントは解析値と比較して非常に小さく発生傾向も異なる。また、付加荷重に対する増加量も微小である。

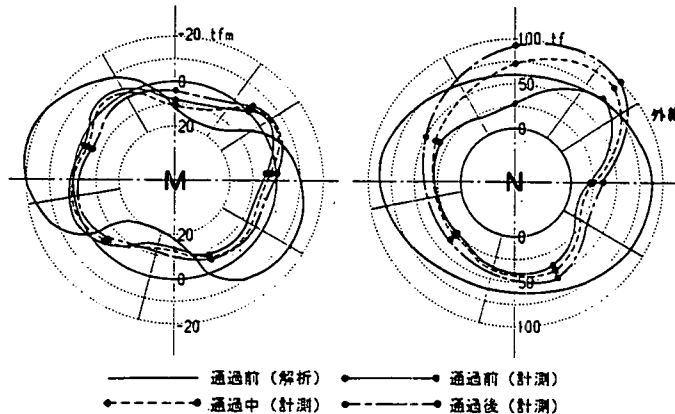


図-9 断面力図 (B断面1号トンネル)

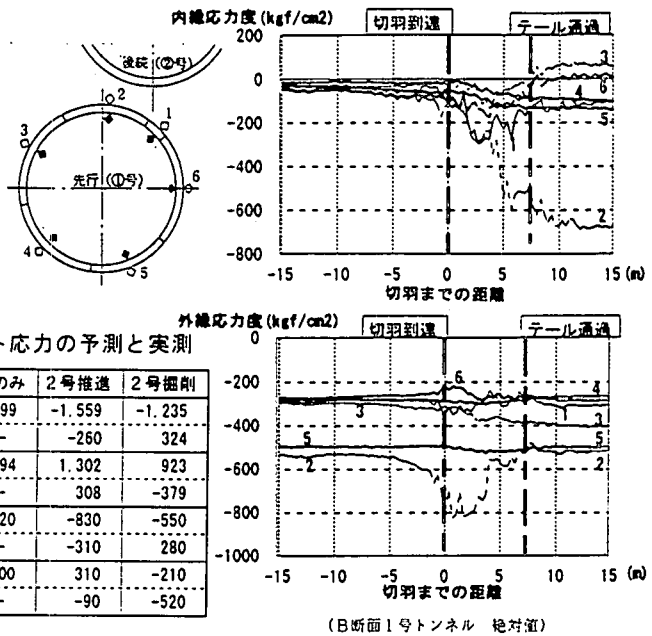


図-7 セグメント応力経距離変化図

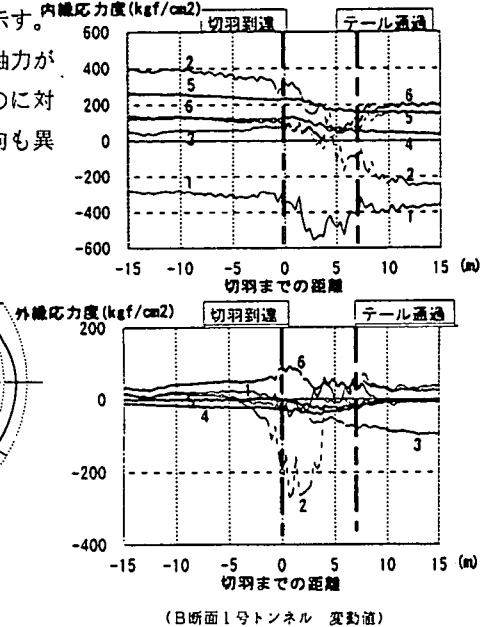


図-8 セグメント応力経距離変化図

5.2 予測解析の評価

(1) トンネル解析モデル

計測された付加荷重とセグメント発生応力の関係は、事前に予測された挙動と定性的には一致するものの、量的な関連において比較的大きな差異がある。この原因のひとつとしてトンネル解析モデルに着目する。

「慣用計算法」、「はりーばねモデル」は地盤－構造物系のモデル化において基本的に同一の体系をもつ設計手法であるといえる。この設計の枠組の中で今回の現象をシミュレートするために、支配的な要素のひとつである地盤反力係数の値をパラメータとし、概略のフィッティングを試みた。断面計算には「はりーばねモデル」を用いた。荷重は、計測の初期値の取扱い上、より確からしい付加荷重である後続の推進の影響相当とし、これから外荷重相当を分離して用いた。地盤反力係数値として、予測解析で設計時の設定条件を踏襲して用いた $K=0.7 \text{ kgf/cm}^3$ と

これより大きな複数の値を用いて断面力を求めたところ、 $K=3.0, 5.0 \text{ kgf/cm}^3$ のときに計測値との整合がよいことが分かった。

図-10 に計測された増加曲げモーメントが比較的大きいA断面の算定結果を示す。この地盤反力係数値は、基準類に地盤条件と対応して示される値のおおよそ上限に相当し、これより当該工事の設計が地盤条件に関して安全側の設定をしたことが理解される。また、フィッティングの過程でこの種の付加荷重を扱う問題における当該モデルの有効性も確認された。

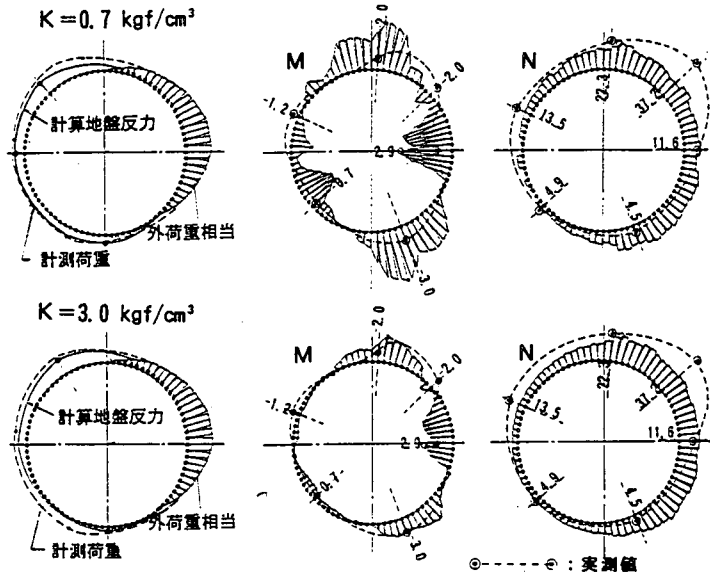


図-10 計測荷重－断面力のフィッティング（A断面1号トンネル）

(2) 影響荷重の評価手法

影響の原因となるものを仮に荷重源と呼ぶこととすると、この荷重源の大きさを特定した後にトンネル横断面の荷重分布を求めるのにFEM等の数値解析が有効であることは知られている⁴⁾。FEMの固定節点を用いて影響荷重を抽出した本解析でも荷重の分布形は推進の影響、掘削除荷の影響とも実測荷重とよく一致している。しかしながら一方で、荷重強度については既述のとおり大きな差異を生じた。

推進に起因する付加荷重は、予測解析では荷重源として「予備圧」相当荷重 1.0 kgf/cm^2 とし、弾性的伝播を仮定して求めた。「予備圧」 1.0 kgf/cm^2 は掘進計画時の値として小さくないと考えられ、予測値と実測値に差異が生じた理由は、一つは実際的な切羽保持あるいはシールド掘進のメカニズムが仮定と異なるために、解析上の荷重源の設定に相違が生じた可能性があること、もう一つは、計測結果に見られるように、付加荷重が残留することに起因するものと考えられる。

前者に関して、表-3に示すとおり、計測2断面において後続と先行トンネルの離隔が相当異なるにもかかわらず同等の付加荷重が作用した原因として、量的な議論は別として、総推力に起因する荷重（たとえば表中の「差圧」）やチャンパー内土圧が付加荷重の強度と無関係でないことは容易に

表-3 2号シールド掘進データと付加荷重

計測断面	総推力 tf	チャンパー内土圧 tf	*差圧 tf	離隔 m	位置	影響荷重 tf/m ²
①A断面	1500～1800	650	550～850	2.8	横	10
②B断面	800～1000	400	100～300	0.7	斜上	15
①/②	1.9～1.8	1.6	5.5～2.7	4.0	—	0.7

*「差圧」は、推力のうち外力を上回る部分の概略値として下記により求めた。なお、周囲土圧は 300 tf とした。
 (差圧) = (総推力) - (チャンパー内土圧) - (周囲土圧)

推察できる。

後者に関しては、5.1 ④で述べたとおり推進の影響は残留することが確認されている。また、③で述べたように、後続の切羽が計測点を越えた後にピークが生じていることは、固定の荷重源の弾性的伝播を仮定した場合の伝播荷重の分布形から想定されるものと異なる。すなわち、後続の切羽が計測点の手前にある時点からの伝播荷重が逐次残留し蓄積してシールドマシン本体が計測点に差し掛かった時点にはじめて除荷が生じその時点でピークを示すことによりこのような分布形を示したものと考えられる。

予測値と実測値に差異が生じるのは、上記のふたつの原因が重なることによると考えられるが、これはいずれも密閉式シールドの掘進がいわば地盤を押し分ける動作も一部含むことによると考えられる。また、そのときにジャッキ推力の重心がどこにあるか、すなわちどの方向に押しているかといった施工要因も介在していると想定される。

以上のことから後続シールドの推進の影響を精度よく予測するためには、①荷重源の値は総推力やチャンパー内土圧に基づいて導かれるべきこと、②掘進速度、掘削土の取り込み量、ジャッキ作動位置といった施工要因を考慮すること、③応力の残留、非弾性特性など土質に応じた実際的な土の挙動特性を考慮すること、などの必要性が認められる。

6. おわりに

併設シールドにおける後続シールドの推進の影響を精度よく予測するためには、影響のもととなる荷重を特定すること、ジャッキの作動位置等の施工要因を考慮すること、圧力の残留など土の実際の挙動を考慮すること等解明すべき課題が多く、またこれらを定量的に扱うことは非常に難しい問題である。しかしながら今後、3号、4号シールドの施工によりさらに異なった条件下での計測データを得ることにより、上記の諸条件を取り込んだ詳細な分析を行うことでより具体的で信頼性のある情報が得られるものと考えられる。

本文は主に推進の影響について述べたが、後続の影響として掘削除荷の影響もまたトンネルの規模、位置関係によっては危険側の結果をもたらす可能性があり、今後、この工事で得られた情報を十分に吟味しておく必要がある。また、セグメント設計上の主荷重の問題として、計測された土水圧相当の荷重についても、ゆるみ土圧、地圧に対する応力の解放割合などその工学的意義に関する考察も重要であろうと考える。

3号、4号シールドの施工に際しては、1号、2号シールドの施工で得られた成果と上記のような問題認識をもとに施工方法と計測データの取扱いについて再度整理し、工事の完成を目指すと同時にさらに詳細な分析を行って有用な知見を得よう努めたい。

最後に、本工事の計画から施工段階に亘って貴重な指導助言をいただいた「京都市高速鉄道東西線御陵東工区シールド工法検討会」の委員各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 浅賀 博、井戸澄夫、古川 衛、近藤哲也、松下惇次：地下鉄4線超近接移行シールドの設計について、トンネル工学研究発表会論文・報告集第3巻、1993.11
- 2) 京都市交通局高速鉄道本部：高速鉄道東西線御陵東工区シールドトンネルの設計・施工計画に関する検討結果報告書、1993.3
- 3) たとえば、竹山 喬：シールド掘進による地盤沈下とその予測に関する研究、1983.12
- 4) たとえば、木村定雄、矢田 敬、小泉 淳：併設して施工されるシールドトンネルの影響解析、トンネル工学研究発表会論文・報告集第1巻、1991.12