

4 本併設シールドの地盤-トンネル挙動分析と併設シールドの設計・施工への応用に関する研究

山口 巖¹・山崎 糸治²・小林 隆³・松下 惇次⁴・宮田 弘之介⁵・杉嶋 敏夫⁶

¹正会員 京都市都市建設局 局長 (〒604 京都市中京区河原町御池)

²正会員 京都市交通局高速鉄道本部建設部 建設第二課長 (〒604 京都市中京区壬生坊城町48)

³正会員 佐藤・西松・鴻池・東洋・吉村・金澤土建共同企業体 所長 (〒607 京都市山科区御陵原西町5-6)

⁴正会員 中央復建コンサルタンツ(株) 第二設計部技術課長 (〒532 大阪市淀川区東三国3-5-26)

⁵フェロー 佐藤工業(株) 代表取締役副社長 (〒103 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

⁶正会員 佐藤工業(株) 土木本部設計部 設計課長代理 (〒103 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

京都市地下鉄における世界的にも例を見ない4本超近接シールド工事に関し、筆者らはその計画・設計段階から併設シールドの諸問題について研究し、重点的な情報化施工による確認作業を重ねて工事を遂行してきた。本研究は、将来の併設シールドの影響評価に資することを目的に、工事で得られた地盤とトンネル挙動を詳細に分析し、その中から一般化できる事項を抽出し評価を試みるものである。

本文では、設計・施工上の影響予測について言及し、その中の後続シールドの推進力が先行トンネルに与える影響荷重、併設シールドにおける長期的影響の荷重変動からみた特性、および併設シールドにおける地盤挙動メカニズムの解析的表現手法について、その評価と応用に関する考察を述べる。

Key Words : tunnel, construction, design, earth pressure, deformation

1. はじめに

大都市部では地下の高度利用が進み、地下構造物の過密化に伴い、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同時に施工されるといったシールド近接施工の事例が増加しつつある。シールドは大断面、多様な断面の実用化が図られる等著しい進歩を遂げる一方で、この種の近接施工に関する問題は十分に評価されていないのが現状であるといえ、シールドトンネルがその計画上の自由度を増し、安全かつ経済的に建設されるためには、近接施工の設計手法ならびに施工法の確立が望まれる。

併設シールドの設計上の課題として以下のようなことが挙げられる。

- ・後続シールドの推進に伴う施工時荷重の規模が、シールド型式、推力、切羽圧力、近接度、地盤条件等の施工条件と対応して定量的に見積もられること。
- ・その施工時荷重が作用した場合の影響度について、作用期間が明確にされ、トンネルの限界状態との対応から、部材の許容応力度が適切に設定されること。
- ・後続シールドの掘削に伴う先行トンネルへの長期的影響について、その特性と程度が、併設

位置、離隔距離等の近接条件ならびに土被り、土質等の地盤条件と対応して定量的に見積もられること。

また、これらはシールドの掘進管理の方法と精度に依存することから、同時に施工上の課題でもある。

京都市高速鉄道東西線建設工事の御陵東工区は、地下鉄2線と京阪電鉄京津線2線が相互に乗り入れる区間で単線4本併設シールドの施工を行った。本工法の採用によって、前述の併設シールドにおける設計・施工上の課題に対する解答が要求された。

筆者らは本工事の計画段階から併設トンネルの諸問題を過去の施工実績とその成果等を参考に工事の実現可能性について検討を行い^{1)・2)・3)}、工事の遂行に当たっては、施工管理のための情報化施工を重点的に行った。また、将来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、本工事の設計・施工の実績について分析を行ってきた^{4)・5)}。

本論では、無事に完了した4本併設シールドの施工実績とその後の研究により得られた成果の一部を報告するものである。

まず、地盤とトンネル挙動の計測結果から、それぞれの特徴を抽出し、各種併設モードによる特性を分析した。次に、併設シールド特有の後続シ

ールドが先行トンネルへ与える影響を定量的に把握するため、施工段階毎の先行トンネルに作用する荷重やトンネル断面力の変動の実際を詳細に分析した。これらの実績データの分析をもとに、後続シールドの影響荷重の予測や地盤変位量などの予測解析手法の確立を試みた。そして、これらの成果をもとに、予測解析を地盤・トンネル挙動計測とあわせた新しい施工管理技術の体系化について論ずる。

2. 地盤とトンネル挙動の特徴

(1) 工事概要

工事は単線4本シールド（泥土圧式シールド、シールド外径：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。図-1に示すA断面とB断面は、本論で分析結果を示す主計測断面である。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2～3m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号シールドは下層の洪積粘土層を掘進する区間があり、この粘土層はN値20以上と硬い。

(2) 地盤挙動の特徴

図-2に、各施工段階毎の地盤挙動を示す。

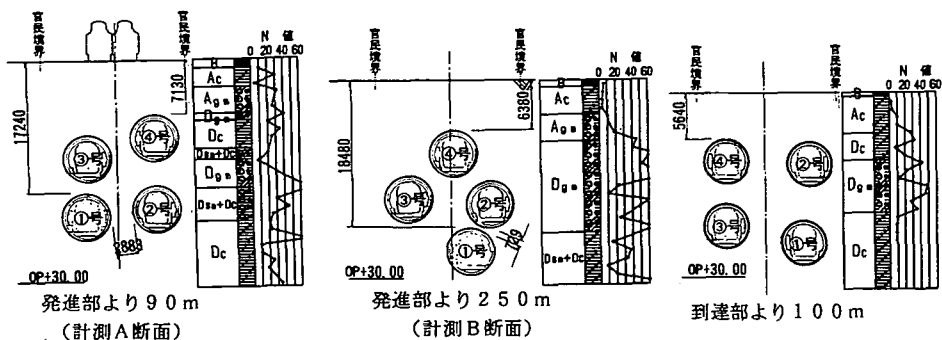


図-1 トンネル断面図

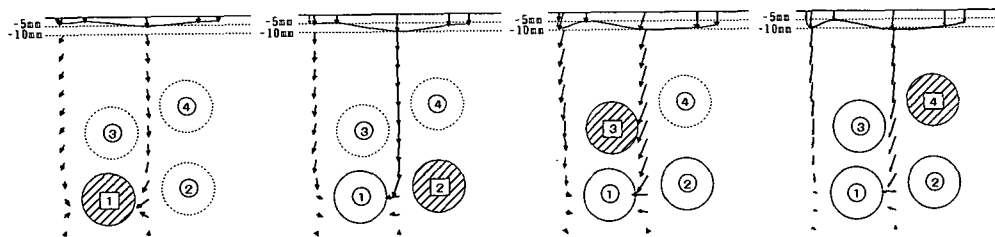


図-2-(a) 地表・地中変位図（計測A断面）

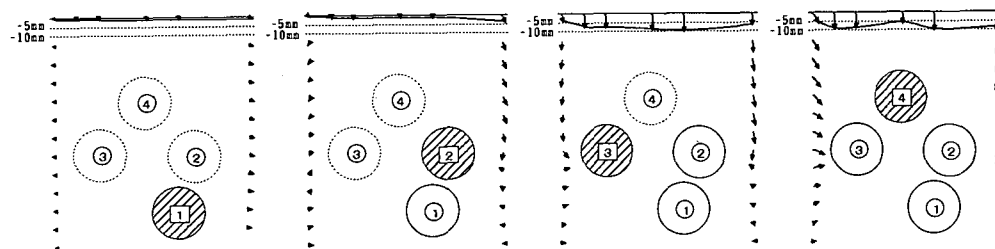


図-2-(b) 地表・地中変位図（計測B断面）

今回の工事で見られた地盤挙動の特徴は、地表面沈下の値に着目すれば、各トンネルの施工段階でその値が相当に異なることであり、これは併設条件に起因していると想定される点である。すなわち、周辺の地盤条件が同等であってもそのトンネルが先行トンネルの上方に近接する場合には地表面沈下量が小さい、または一部相対隆起を伴う。相対隆起現象は、計測A断面の3号シールド施工時および計測B断面の4号シールド施工時に見られる。その原因を特定するには施工要因についても慎重な分析を行う必要があるが、切羽土圧、裏込め注入圧は適正に制御されている。地中変位について、図-2の地盤変位ベクトルは累積値を示すが、側部の地盤が、沈下方向に比べて地表面の相対隆起をもたらしたトンネル方向への顕著な水平方向相対変位をみせることから掘削除荷に伴うリバウンドによる部分が大いとい判断される。この現象は、トンネル断面相当の地盤が掘削除去されることに対応した地盤挙動として、シールドトンネルが上下に併設される、あるいは多数のトンネルが併設されることに起因して生じた可能性が高い。

地層構成、土質条件および4本シールドの配置条件などを勘案すると、2計測断面においてみられた各シールド施工段階の地盤挙動は大略以下のように説明される。

計測A断面では、1、2号シールド通過時に比較的大きな地表面沈下を生じ、3、4号シールド通過時には非常に小さく、一部相対隆起を示す。このことから、1～4号シールド周辺の地盤は基本的に比較的大きな変位を生じる地盤であり、3、4号シールドは各々1、2号シールドの上部に併設されることによるリバウンドの影響により沈下が小さくなったと想定される。

計測B断面では、1、2号シールド通過時に地表面沈下は非常に小さい。2号シールドと同等深さの3号シールド通過時に比較的大きな沈下を生じ、4号シールド通過時には直上で相対隆起を生じ、周辺の沈下も微小である。1号シールド通過時に地表面沈下が小さいのは周辺地盤が相対的に硬いことによると考えられる。それより浅い2～4号シールドの周辺地盤は比較的大きな変位を生じる地盤であるが、2号シールドは1号シールドの直上に併設されることによるリバウンドの影響で、沈下が小さい。3号シールドはおおよそ単独で設置されるため大きな変位を生じた。4号シールドはほぼ1、2号シールドと縦一列の併設となるためリバウンドの影響で隆起を生じたと想定される。

(3) トンネル挙動の特徴

併設シールドにおける後続シールドが先行トンネルに及ぼす影響の特徴を作用荷重の変動に着目して分析する。

a) セグメント土圧計の計測値による作用荷重の評価法

作用荷重の変動に着目するうえでセグメント土圧計の計測値は直接的であるが、土水圧や後続シールドの施工時荷重などの外荷重のほかにはトンネルの変形挙動や地盤のリバウンドによる地盤反力相当の荷重が含まれる。また、土圧計はセグメント接線方向に作用する荷重は検知しない。したがって土圧計で検知された作用荷重の意義を明確にするには、まず発生断面力等からトンネルの変形モードを想定する必要がある。

なお、ある位置に対するシールドの推進に伴う影響荷重を評価する場合に、シールドの進行方向および方向変化量を考慮することは重要と考えられる。

ここで扱う計測A断面の1号トンネルと2号トンネルの平面線形における角度は離れる方向に0.41度、同様に計測B断面では縦断面において離れる方向に0.02度と小さい。また、方向変化量は、掘削外径とシールド外径から地盤とシールドがせる値の70%を施工管理上の許容値0.14度(8.4分)と定めたが、これに対しほぼ全域で0.1度(6.0分)を下まわっている⁶⁾。赤木ら⁷⁾は、シールドの姿勢変化が地盤挙動に及ぼす影響が大いことを指摘し、方向変化量の大小と対応して影響の有無があるという実測値を示している。

以上のことから、以下の施工要因と影響荷重の関連に関する考察では上記の影響は無視できると判断する。

b) 施工段階毎のトンネル挙動

図-3は、先行1号トンネルに対する後続シールドの影響としてのトンネル断面力ならびにセグメント土圧計計測値の変動を併設条件3ケースについて示す。図-4は作用荷重の経距離変化図として、計測A断面1号トンネルに対して2号シールドが接近するときの値を示し、図-3におけるSTAGEと対応する変動値の意味を明示するものである。

CASE 1・STAGE 1では曲げモーメントは、トンネルが上方から押された変形モードを示し、後続シールドに面する側の荷重を外荷重と見なした場合の挙動と符合する。したがってこの作用荷重は後続シールドの推進に伴う影響荷重と想定される。

同STAGE 2では曲げモーメントは、トンネルが上下に伸びる変形モードを示す。荷重は側部が減少し

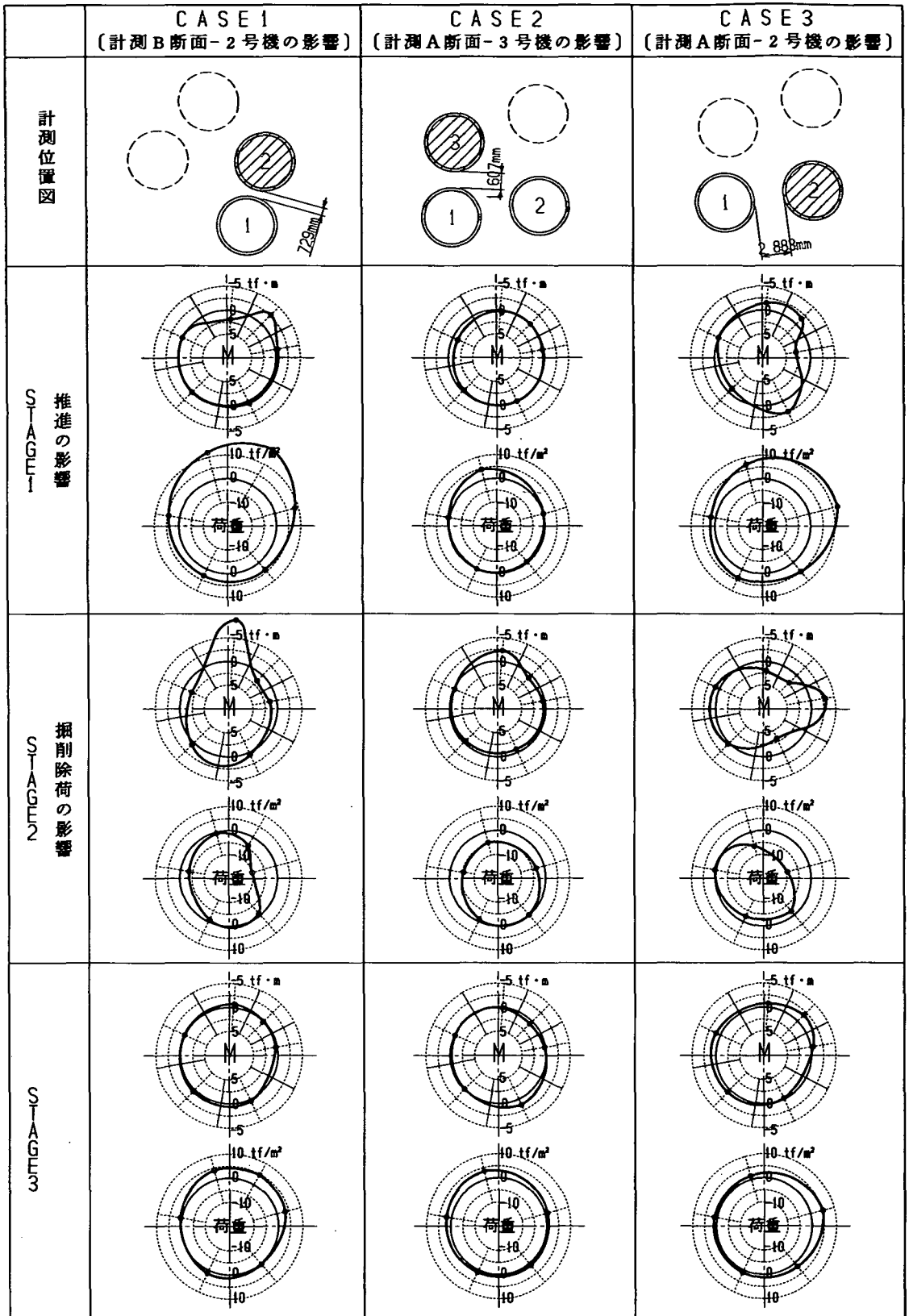


図-3 曲げモーメント・荷重の変動値

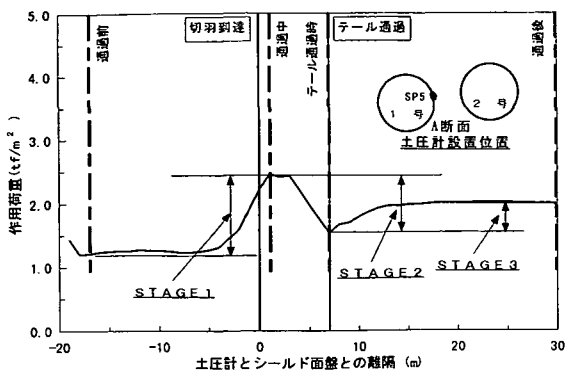


図-4 作用荷重の経距離変動特性 (1)

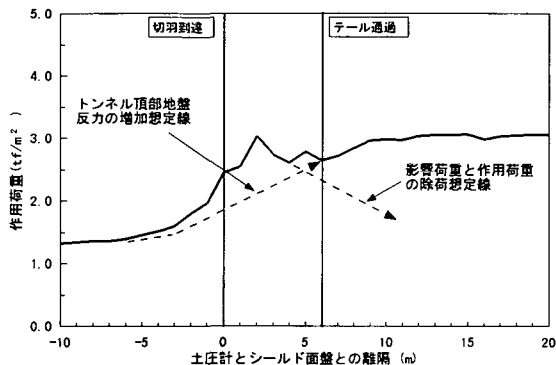


図-5 作用荷重の経距離変動特性 (2)

ているが、これを側方土圧の減少ととらえた場合には相対的に鉛直土圧が卓越することとなり、トンネルは水平方向に伸びる挙動を示すと考える。しかし実際のトンネル挙動は上下に伸びる挙動を示していることから、計測値はトンネル挙動に伴う側方の地盤反力の減少を検知したものと考えられる。

CASE 2はCASE 1と同様に後続シールドが上方に併設される場合である。STAGE 1の作用荷重はあたかも後続シールドの推進による影響荷重を想定させるが、曲げモーメントはトンネルが上下に伸びる変形モードを示している。したがって作用荷重はトンネル挙動に伴う地盤反力と想定される。このSTAGEではCASE 1と同様に後続シールドの推進の影響が作用していると考えられるが、ここでは上方での掘削除荷の影響が卓越したためにこのようなトンネル挙動を示したと考えられる。なお、地盤挙動は後続シールドの切羽通過直前から地表面に微小ながら相対隆起が現れている。これは後続シールド後方での掘削除荷の影響が3次元的に前方まで及んだ結果と想定される。

ここで、CASE 1・STAGE 2の作用荷重ではトンネル頂部において見掛け上荷重の変動はないようであ

るが、STAGE 1からSTAGE 2に至る荷重変動過程に着目すれば、図-5に示すように後続シールドの推進による影響と上方での掘削除荷に伴うトンネル挙動による地盤反力が前後して同時に発生しているようである。すなわち、後続シールドの掘削に伴う先行トンネルの変動の点では両CASEにおいて共通のことが生じている。

両CASEにおけるSTAGE 3では曲げモーメントは微小ながらトンネルが上下に伸びる変形モードであり、これはSTAGE 2での挙動が継続的に進んでいることを示す。したがって計測値はトンネル挙動に伴う地盤反力を検知していると考えられる。

横方向の併設となるCASE 3・STAGE 1では曲げモーメントから想定されるトンネルの変形モードから計測値は後続シールドの推進に伴う影響荷重と考えられる。

同STAGE 2では、曲げモーメントはトンネルが横方向に伸びる変形モードを示すが、これは断面力、荷重ともにSTAGE 1の挙動を打ち消す方向のものであり、後続シールドの影響が生じる以前の状態に対してはほとんど変化がない。したがって作用荷重は後続シールドの推進による影響荷重の除荷を検知したものと考えられる。同STAGE 3では曲げモーメントはトンネルが上下に伸びる変形モードを示すことから作用荷重は土圧の増加と考えられる。

以上、作用荷重の意義を分析しながら併設シールドにおける先行トンネルの挙動について述べたが、ここで併設条件の相違に着目すると、後続シールドの掘削による影響に、上下併設の場合と横方向併設の場合とで相違がある。すなわち、後続シールドの掘削の影響は上下併設において顕著な除荷として現れ、横方向併設の場合には、計測結果を見る限り除荷としては現れていない。

3. 実際挙動の工学的意義に関する考察

(1) 先行トンネルに対する後続シールドの推進による影響荷重の評価

近接したシールド工事において、後続シールドの施工時荷重による増加応力が地中内を伝播して、先行トンネルに対する影響荷重となる。後続シールドの施工時荷重については、次のものが考えられる。

- ・カッター前面が地山を押す荷重
- ・チャンパー内土圧
- ・スキンプレートと地山の摩擦力
- ・裏込注入圧

チャンパー内土圧と裏込注入圧は、重要な掘進管理項目であり、直接計測されている。カッター前勢力とスキムプレート摩擦力は、総推力やチャンパー内土圧の計測値から類推する。

先行トンネルに与えられる影響荷重は、前章における分析結果から、土圧計の計測値をシールド推力による影響荷重と特定できるA断面2号機、B断面2号機の影響および同様の分析により⁶⁾、A断面4号機、B断面4号機の影響による計測値を採用する。

a) 施工時荷重と影響荷重の離隔による相関

施工時荷重が地中内を伝播して影響荷重として先行トンネルに作用するとき、その強度と離隔距離との相関が得られれば、定量的な予測が可能である。

表-1は、実際の推進実績で得られた後続シールドの施工時荷重である総推力、チャンパー内土圧、裏込注入圧と、土圧計で計測した作用荷重およびそれらの離隔の関係を表している。各データは、シールド前面と土圧計が接近したときに、作用荷重が最大となるときに値を採取したもので(図-6)、計測A断面2号機通過時の値を1とした比率で示す。

表-1より、総推力またはチャンパー内土圧を影響要因とみなした場合、作用荷重は、

$$(\text{影響要因}) / (\text{距離})^2$$

におおよそ比例していることがわかる(①と②、または①と③)

表-1 施工時荷重と作用荷重との関係

| 断面 | 後続シールド | 作用荷重 | 1/距離 ² | 総推力 | チャンパー内土圧 | 裏込注入圧 | × 1/距離 ² | | |
|-----|--------|------|-------------------|------|----------|-------|---------------------|----------|-------|
| | | | | | | | 総推力 | チャンパー内土圧 | 裏込注入圧 |
| A断面 | 2号 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 4号 | 0.13 | 0.31 | 0.52 | 0.60 | 1 | 0.16 | 0.19 | 0.31 |
| B断面 | 2号 | 1.42 | 2.62 | 0.55 | 0.60 | 1 | 1.44 | 1.57 | 2.62 |
| | 4号 | 0.25 | 0.34 | 0.45 | 0.52 | 1 | 0.15 | 0.18 | 0.34 |

(注) ① A断面の2号シールドの値を1とした場合の比率を示す。
② 距離とは先行トンネル外周と後続シールド中心の仮設距離とする。

裏込注入圧は、圧管理であるため上限圧はすべて同じで、その上限圧が作用するのは一瞬であり、実績では作用荷重との相関が得られていない。

この検討結果から、施工時荷重とした切羽前勢力と影響荷重と考えられる作用荷重は、その離隔を考慮することにより強い相関があると認められる。よって、距離の2乗に反比例する弾性体内応力伝播理論の適用は妥当であると判断し、そのモデル化、計算方法の検討を進めた。

b) 作用荷重の変動

作用荷重の経時変化から、先行トンネル周辺の地盤応力状態が、後続シールドの掘進により変化するメカニズムについて類推した。

後続シールド前面が土圧計に近づくとき、掘進開始とともに作用荷重は上昇する。掘進が終了すれば、作用荷重は減少するが、掘進前の状態までは戻らずにいくらか残留する(図-7)。後続シールド前面が土圧計の脇を通過した後は、逆に掘進中では作用荷重は下がり、掘進が終了すれば増加するが、この場合も掘進開始前の状態までは戻らない。このよう

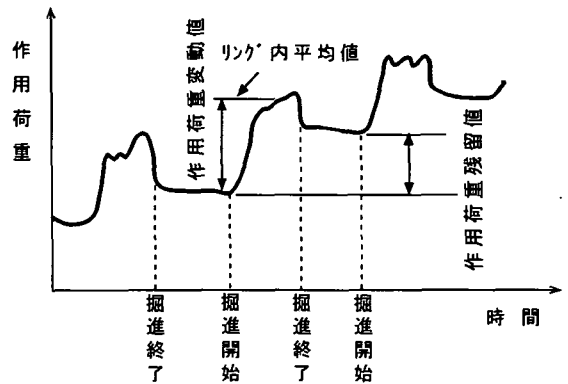


図-7 作用荷重の変動値と残留値

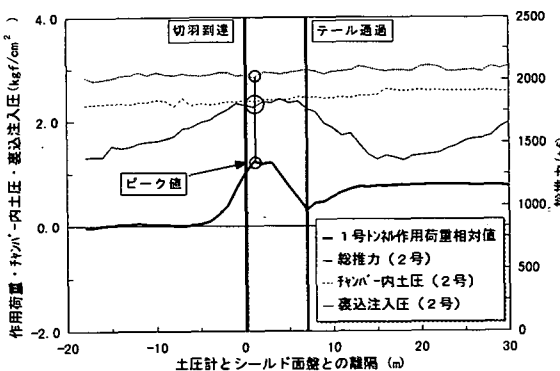


図-6 先行トンネル作用荷重と後続シールドの掘進データ

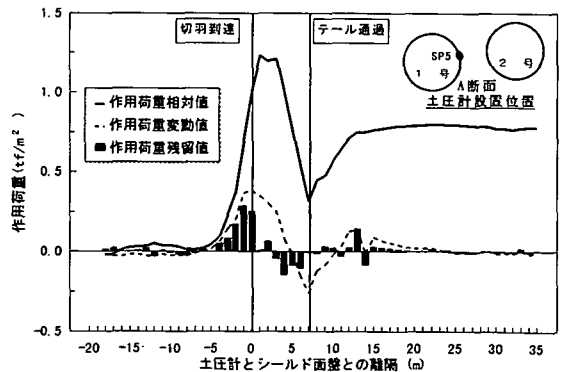


図-8 先行トンネルへの作用荷重の分析

に、施工時荷重による影響荷重が先行トンネル周辺の地盤に作用したときに、地盤内の応力の増分が残留する。この原因は、シールドの掘進により周辺地盤が不可逆的に挙動していることと推測される。

後続シールドの前面が、土圧計に近づくまでと、スキムプレートが土圧計の脇を通過しているとき、テールが土圧計の脇を抜けたときでは、シールド掘進による周辺地盤の挙動に違いが認められる。特に、テールが通過した後は、応力解放による地山の挙動が施工時荷重による影響と比較して非常に大きくなるので、作用荷重の変動量を分析するときはこの影響を考慮しなければならない。

図-7に示すように、後続シールド掘進開始前の作用荷重と掘進中の作用荷重の平均値との差を「作用荷重変動値」、掘進開始前と掘進終了後の作用荷重の差を「作用荷重残留値」と称する。

図-8に「作用荷重変動値」、「作用荷重残留値」、「作用荷重相対値」の経距離変化図を示す。「作用荷重相対値」は後続シールドが接近通過する過程の作用荷重そのものである。これら作用荷重の変動値や残留値の工学的意義を分析し、作用荷重の発生メカニズムについて考察する。

c) 施工時荷重による影響荷重の理論的算出

施工時荷重源から、影響荷重測定位置までに介在する地盤を弾性体と仮定した応力伝播の計算モデルと、当工事の実測で得られた結果との比較検証を行った。

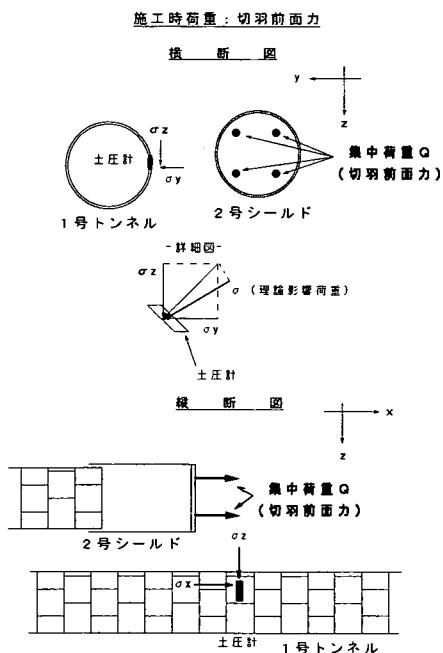


図-9 施工時荷重モデル

計算モデルには、三次元的に広がる弾性地盤内に作用する水平荷重という観点と地表面を自由面とする境界条件から、「Mindlinの第2解」⁸⁾が適当であると考えた。本モデルは、地盤を弾性体として、三次元座標軸で解析し、施工時荷重から伝播された影響荷重強度を求める。なお、ポアソン比は1号トンネルの周辺および施工時荷重の伝播経路の地盤が粘性土および粘性土をマトリクスとする砂礫層であることから0.4とした。

施工時荷重としては、総推力が切羽前面位置から発せられるとした。総推力は施工実績から計測A断面で1700tf、計測B断面で1000tfとした。施工時荷重モデルは、切羽前面を4分割し、それぞれの図心からの集中荷重とした。(図-9)

d) 影響荷重の変動値の理論と実際の比較

後続シールドの掘進中の影響荷重の変動値を理論値と実測値について比較した。

理論値は、「Mindlinの第2解」による算出値をそのまま適用した。実測値は、「作用荷重変動値」とした。

「理論影響荷重」と「作用荷重変動値」を図-10に示す。なお、図-10には参考として Boussinesq の解⁹⁾(3次元)を併記する。Mindlinによる「理論影響荷重」と「作用荷重変動値」の比較では次のような特徴がみられる。

1. 切羽前面位置が土圧計に接近し、その後土圧計の脇を通過するまでの区間では、「理論影響荷重」と「作用荷重変動値」の増加・減少過程が同じ傾向を示す。
2. ピークの発生位置が異なるなど位相差があるが、「理論影響荷重」が総推力を切羽に集中させているのに対し、実際にはスキムプレート部分も分担しており荷重の重心がもう少し後方に

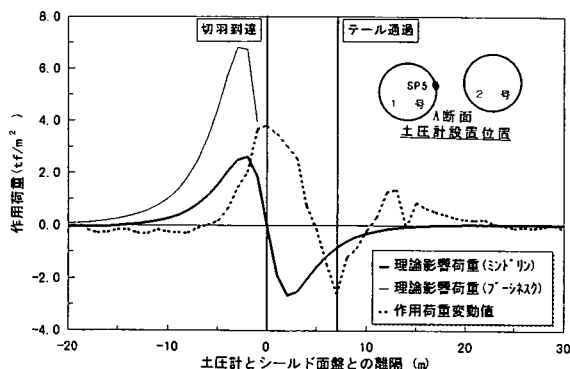


図-10 理論影響荷重と作用荷重変動値の比較 (計測A断面, 土圧計SP5)

あることを考慮すれば理論値は右にシフトすることになり、ほぼ一致しているといえる。

3. 土圧計の脇をテールが通過した後は、「理論影響荷重」が0に収束するのにに対し、「作用荷重変動」値は再度掘進中に増加する傾向を示す。

切羽前面が土圧計に近づくまでは、定性的な傾向の一致が見られたことから、地盤を弾性体と考えた本計算モデルは、基本的には適用できるといえよう。ただし、影響荷重強度の定量的な整合性を求めるならば、この計算モデルでは不十分である。また、テールが土圧計の脇を過ぎた後に定性的に傾向が一致しなくなるのは、実際の地盤ではトンネル掘削による応力解放の影響が現れること、荷重の作用環境が計算モデルと乖離することによると想定され、ここで用いた計算方法では表現できない。

これらの相違は基本的に実際の土が弾性連続体ではないことに起因しているといえよう。

量的な相違は伝播および変形特性に関して地盤の材料特性を考察する手掛かりとなる。図-10の「作用荷重変動値」が「理論影響荷重」より大きいことに着目すると、伝播という観点からは地盤の異方性が指摘できよう。また、受圧部はトンネル壁面にあるため地盤と比較して相対的に剛性が高いと仮定すれば作用荷重が増大する可能性がある。さらに、土の粒状体としての物理的特性に着目すれば、密な地盤における正のダイレイタンスによる体積膨張の影響も考えられる。

e) 作用荷重の発生メカニズムに関する考察

2章(3)トンネル挙動の特徴における考察から、ここで扱う土圧計により計測された後続シールド推進時の計測値は推進の影響荷重として信頼できる。また、次項に述べる解析モデルによる荷重と断面力のフィッティング結果からも影響荷重としての整合性が確認されている。この作用荷重は図-11,12に「作用荷重相対値」として示すように、弾性体を仮定する地盤から想定される作用荷重（「理論影響荷重」）に対してきわめて大きな値となっている。ここではこのような荷重が作用するメカニズムについて考察する。

既述のとおり、1リングを掘進する間の「作用荷重変動値」については施工時荷重がある位置まで伝播するメカニズムは定性的に地盤を弾性連続体とみなし、ひずみ-応力の関係に実際的な土の力学的特性を考慮することで説明できるようである。しかしながら、「作用荷重相対値」は図-11,12から明らかなように、「理論影響荷重」に対して4~5倍程度の規模となっており、上述の要因のみでは説明しきれないと判断される。そこで、実際の作用荷重の

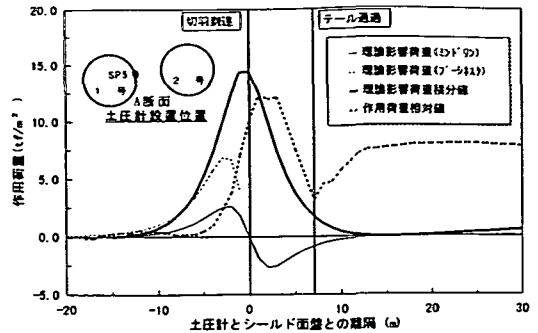


図-11 理論影響荷重積分値と作用荷重相対値の比較 (計測A断面, 土圧計SP5)

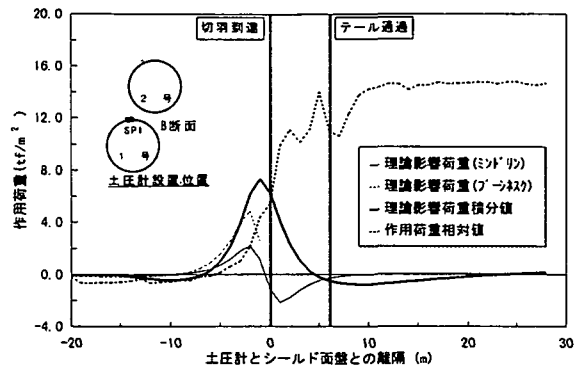


図-12 理論影響荷重積分値と作用荷重相対値の比較 (計測B断面, 土圧計SP1)

変動状況を観察し、図-13に示すように応力の残留を仮定して以下のような作用荷重の発生メカニズムを想定する。

1. 掘進開始によりシールド推力は地盤中を伝播して先行トンネル周辺地盤に載荷される。(伝播モードは、地盤を弾性連続体と仮定して説明できる)
2. 伝播荷重の載荷により土の材料特性に応じたひずみ-応力関係が生じ、応力の再配分により地盤はあるつり合い状態を形成する。
3. 掘進終了と同時に除荷が進行するが、その速度は緩やかであり、次の掘進開始までに除荷は完了せず応力は残留する。(残留の要因として除荷時の非線形性やクリープ挙動を考慮)
4. 次の掘進開始により新たな応力の再配分を生じ応力は累積する。(新たな境界が形成されつり合い状態が保持される)

以上のように、土の材料特性として載荷側と除荷側の変形特性の相違や、シールド施工のサイクルタイムに基づく載荷と除荷が繰り返行われるという

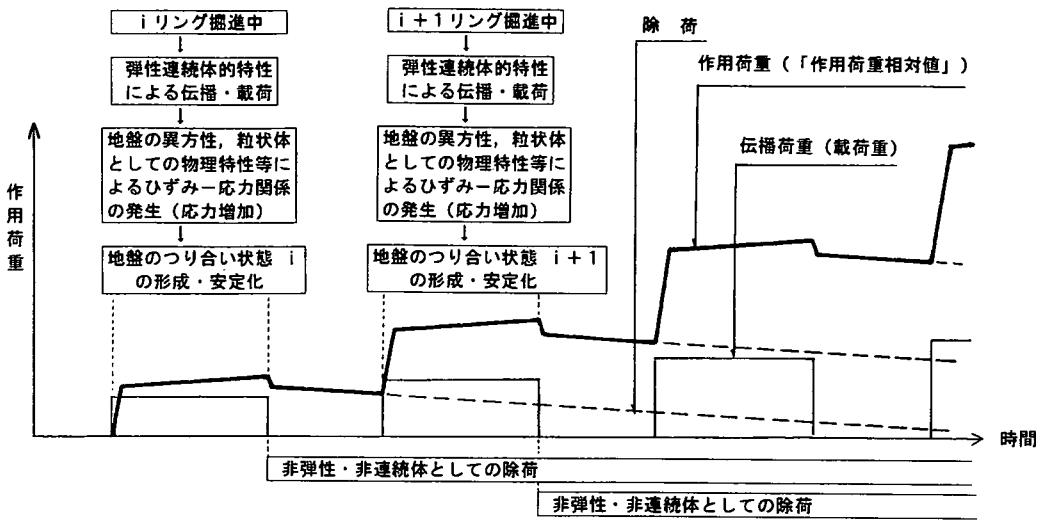


図-1-3 作用荷重の発生メカニズム

施工条件が、シールド工事において特徴的な影響荷重の発生メカニズムに寄与していると考えたと現象をうまく説明できそうである。

伝播メカニズムにおける異方性、ひずみ-応力関係の変化メカニズムにおけるダイレイタンスーなどによる応力増加の定量的な議論は残るが、残留という観点から、図-11,12に示す「理論影響荷重積分値」が実際の「作用荷重相対値」と比較的近似していることは興味深い。

なお、実測値の切羽通過後の変動過程には、横方向併設の場合(図-11)と上下併設の場合(図-12)で顕著な相違がある。上下併設では、既述のとおり、図-5に示すように先行トンネル頂部の地盤反力に移行していることがこのような実測値の相違となっていると考えられる。

掘進実績と計測した先行トンネルの作用荷重の変動から、近接併設シールドトンネルの施工時の影響について、理論値と実測値の比較照査を試みたが、これまでの検討結果から、今後の同種工事における後続シールドの近接先行トンネルあるいはその他の既設構造物への影響を評価する場合に考慮すべき要件が把握された。施工時荷重は上下併設、横方向併設などの併設モードに関わらず、定性的には弾性体の応力伝播理論に従った伝播状況であるが、地盤の物理的特性により、応力の増加や残留を考慮しなくてはならない。また、上下併設においては、施工時荷重の影響以外の掘削による地盤内応力変化の影響を大きく受けるため、近接影響を予測するうえでは、どの影響がもっとも主体的であるかを認識して、設

計に反映しなければならないといえる。

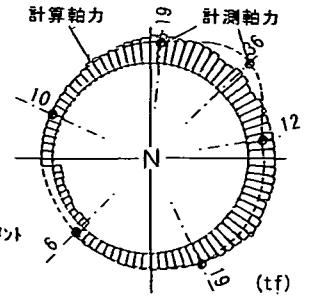
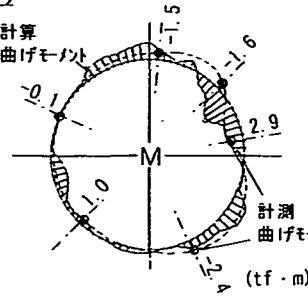
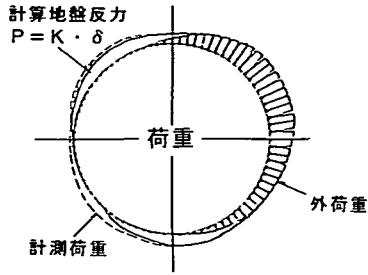
f) トンネル部材に及ぼす影響度

実測された後続シールドの推進による影響荷重と部材断面力の関係は図-14に示すように、はり-地盤バネモデルによりシミュレートされ、設計計算上も影響荷重の現実性が確認される。

土圧計(パッド式土圧計、受圧面大きさ:750mm×450mm)は一計測断面に5箇所設置され、およそセグメント全周の荷重を把握できる。計算は、この計測値の変動成分を施工時荷重としての外荷重とその作用によるトンネルの変位に伴い発生する地盤反力に分析し、外荷重をはり-地盤バネモデルに載荷したものである。計算で得られたセグメント断面力および変位に地盤反力係数を乗じて得られる地盤反力は計測値とほぼ一致した。なお、地盤反力係数の値は設計数値としておよそ妥当な値と考えられる¹⁰⁾(計測A断面1号トンネル:洪積砂質土層+洪積粘性土層、N値>20、計測B断面1号トンネル:洪積粘性土層、N値>30)。

部材応力度の変動値は計測値から計測A断面、計測B断面各々において、 $\sigma_x = -170\text{kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_y = -270\text{kgf/cm}^2$ である(ダクタイルセグメント)。影響荷重の規模は、前述の考察を踏まえれば地盤条件により異なるものになると想定されるが、同様の併設条件で同等規模の影響荷重が発生するとすれば、影響荷重による発生応力が主荷重による発生応力の最大値と合成される場合などを想定すれば部材に相応の余裕を付与することが必要と理解される。

計測A断面 (地盤反力係数 $K=3.0\text{kgf/cm}^3$)



計測B断面 (地盤反力係数 $K=5.0\text{kgf/cm}^3$)

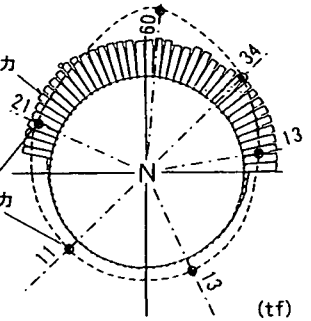
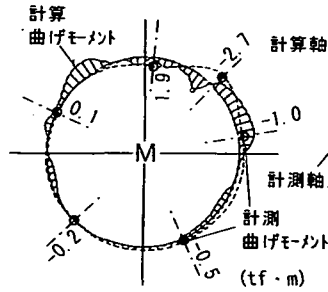
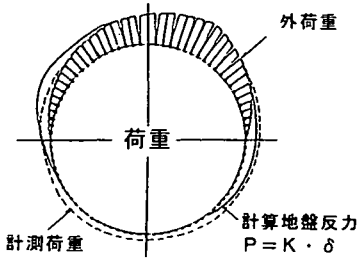


図-14 実測荷重 - 断面力のはり-地盤バネモデルによる再現

(2) 後続シールドの掘削に伴う先行トンネルの土圧変動特性の評価

後続シールドの掘削に伴う先行トンネルへの影響は、トンネル断面相当の地盤が取り除かれることによる除荷に起因して生じる。またこの影響は併設トンネルにおける長期的影響を意味する。

前章(3)ではトンネル断面力とセグメント土圧の計測結果から、後続シールドが接近通過する過程における作用荷重とトンネル挙動の変動特性を分析し、長期的影響に関しては上下併設の場合に鉛直土圧の減少が顕著に現れることを述べた。ただし、側方土圧の変動については計測結果を見る限りでは明確ではない。また、横方向併設の場合には土圧の除荷に対応した挙動は見られず、CASE 3・STAGE 3(図-3)のように側方土圧の増加の傾向が見られる。

ここでは、上記のように不明な点がある程度想定するために、FEM解析を用いて荷重を試算する。

解析モデルは、次項(3)シールド施工に伴う地盤挙動の解析的表現で用いる2次元弾性FEMにおいて変動土圧を求める1号トンネルの掘削面を構成する節点を固定し、2号シールドの掘削条件を与え、その影響を固定節点の支点反力として抽出し、影響荷重と見なすこととした。ここで、抽出された影響荷重は、それに基づき計算されるべき変位の計算根拠となる荷重であり、実際の土圧変動は1号トンネ

ル自身の変形挙動にも支配されると考えられるが、荷重の発生モードを把握するうえでは有効であると考えられる。

図-15に示す上下併設の場合の計算結果では、トンネル頂部には鉛直土圧の除荷、側部には側方土圧の増加が見られる。図-16に示す横方向併設の場合の計算結果では、トンネルの後続シールドに面する側全般に土圧の増加が見られ、側部に比較的顕著に現れている。横方向併設の場合について、CASE 3・STAGE 3(図-3)に見られる挙動を、後続シールドの掘削に伴う影響がある程度の時間の経過を伴って生じたものすれば、解析結果はこれと符合するものと考えられる。

今回の計測結果ならびに解析結果を総合すると、併設シールドにおける後続シールドの掘削に伴う長

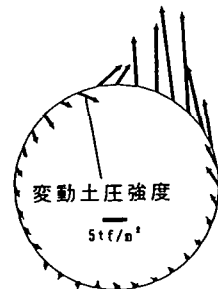


図-15 変動土圧解析結果 (上下併設の場合) 図-16 変動土圧解析結果 (横方向併設の場合)

期的影響は、土圧の変動に関して以下のように説明される。

- ・上下併設においては、トンネルの鉛直土圧は除荷され、側方土圧は増加する。

- ・横方向併設においては、全般に土圧は増加する方向にあり、とりわけ側方土圧の増加が顕著である。

なお、横方向併設シールドにおける長期的影響については、トンネル解析モデルの問題として、側方土圧の低減または側方地盤反力係数の低減として表現できるとする研究もあり¹¹⁾、トンネル間に存在する地盤の土質に応じた挙動を考慮することが必要であるといえる。

(3) シールド施工に伴う地盤挙動の解析的表現

a) 既往の解析モデルの概観

従来のシールド施工に関する地盤挙動解析は、主に地表面の沈下に着目し、その予測または逆解析による地盤物性値の再評価を経た再予測を目的としている。解析手法として最も一般的な方法は、切羽管理、裏込め管理、セグメントの耐荷挙動などの沈下要因を総括し、ある応力解放率を仮定して掘削相当外力を設定するものである¹²⁾。これに施工条件を加味した方法として、泥水シールドにおいて、地圧と泥水圧の差に係数を乗じたものを掘削相当外力とするもの¹³⁾、セグメントの耐荷挙動をはり要素などで評価することに併せて、裏込め注入をその施工時期に基づいた地山の変位しうる空隙、または材料特性、強度特性を考慮した面要素として評価する方法¹⁴⁾などがある。このほかに裏込め注入圧を考慮して掘削相当外力を土被りによらず定格値として扱う方法やゆるみ土圧を掘削相当外力とする方法なども提案されている¹⁵⁾。

応力解放率を仮定する方法は、最も適用事例が多く、実際の工事における実測値の解析条件へのフィードバックを繰り返し、現在では一般的な条件下では地表面沈下を実用的な精度で予測できるようになっているといえる。ただし、現状の応力解放率を仮定する方法では、地盤の掘削、シールド通過後のテールボイドの発生、裏込め注入、セグメントの耐荷挙動という一連の過程における挙動およびこれらに付随する施工精度をも包含した形で応力解放率というパラメータに込めていることになり、実用上の意義はあるものの、応力解放率の実際の事象との対応や、現にトンネル断面相当の地盤が掘削除去されるという力学的意義が明確ではない。

b) 応力解放率を仮定する方法による地盤挙動のシミュレーション

応力解放率を仮定する方法により当該工事におけ

る各シールド施工段階の地表面相対変位の実測値を表すような応力解放率を逆算した。なお、解析モデルは、2次元弾性FEMを用い、掘削面を素掘り状態としてモデル化し、地盤の変形係数はN値からの推定により、砂質土に対して $5N + 70 \text{ kgf/cm}^2$ 、粘性土に対して $105 q u^{1.2} = 105 N / 8^{1.6} \text{ kgf/cm}^2$ とした。応力解放率の逆算結果を表-2に示す。

応力解放率の値は、全体的に一貫性が乏しいためにその工学的意義が希薄である。また、計測A断面の3号シールドおよび計測B断面の4号シールド施工時に生じた相対隆起はこの解析モデルでは再現できない。

表-2 従来解析モデルによる応力解放率

| | | FEM解析 | |
|-----|--------|-------|---------|
| | | 応力解放率 | 沈下量(mm) |
| A断面 | 1号シールド | 13% | 2.9 |
| | 2号シールド | 12% | 2.9 |
| | 3号シールド | 設定不能 | |
| | 4号シールド | 6% | 0.5 |
| B断面 | 1号シールド | 3% | 0.7 |
| | 2号シールド | 8% | 0.7 |
| | 3号シールド | 23% | 3.7 |
| | 4号シールド | 設定不能 | |

c) 解析モデルの提案とその構成

観察された地盤挙動の特徴として、上下併設の場合に上方の後続シールドの施工時には相対沈下量が小さいこと、および相対隆起を示す場合があることが挙げられる。その原因がトンネルの掘削除荷に伴う地盤のリバウンドであると想定し、トンネル断面の地盤が現実に取り除かれることをモデル化する観点から、以下のような解析モデルを用い現象のシミュレーションを試みた。

・解析モデルの基本構成：2次元弾性FEMを用い、4本シールドの施工過程を考慮したステップ

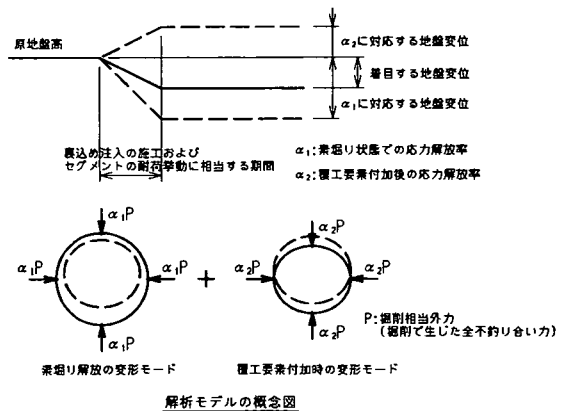


図-17 解析モデルのメカニズム

解析とする。地盤の構成則としては弾塑性、粘弾性等を考慮する必要性も認められるが、ここではそれらの議論に進む前段階として最も単純な弾性モデルとし、基本的な地盤応力の再配分の傾向を把握する。

・掘削相当外力と掘削断面のモデル化：掘削相当外力は土の自重に基づき算定し、これにある応力解放率を乗じて素掘り状態で応力解放を行い、次にトンネル覆工要素（はり要素）を付加して残りの掘削相当外力を解放することとする。これは地盤の応力解放が裏込め注入の施工、セグメントの耐荷挙動と同時に進行する状況をモデル化しようとする試みである（図-17）。

・応力解放率と地盤物性値の設定：応力解放率 α_1 ($\alpha_2 = 100 - \alpha_1$) は主に相対隆起を生じた施工段階に着目し沈下から隆起に転じる境界の値を参考に、他の施工段階との整合を考慮して設定する。地盤物性値（特に変形係数）は実測の地盤変位量をも

とに逆算的に求める。

なお、地盤挙動が沈下から隆起に転じる臨界点は、地盤変位の規模、すなわち変形係数によらず、応力解放率のパラメトリック・スタディのみにより定まり、これにより応力解放率を特定する。その後に変形係数等地盤定数は変位とのフィッティングにより求められる。

d) 解析結果と収束パラメータ

応力解放率および地盤の変形係数をパラメータとして複数の解析ケースを試行したところ、図-18に示すとおり両断面において、各シールド施工段階間の相対変位ならびに絶対変位についておおむね実測値を再現することができた。

図-19に、この解析結果を与えた解析モデル、応力解放率および地盤物性値を示す。

応力解放率については、素掘り状態での応力解放では、応力解放率 α_1 が40%前後である。したがっ

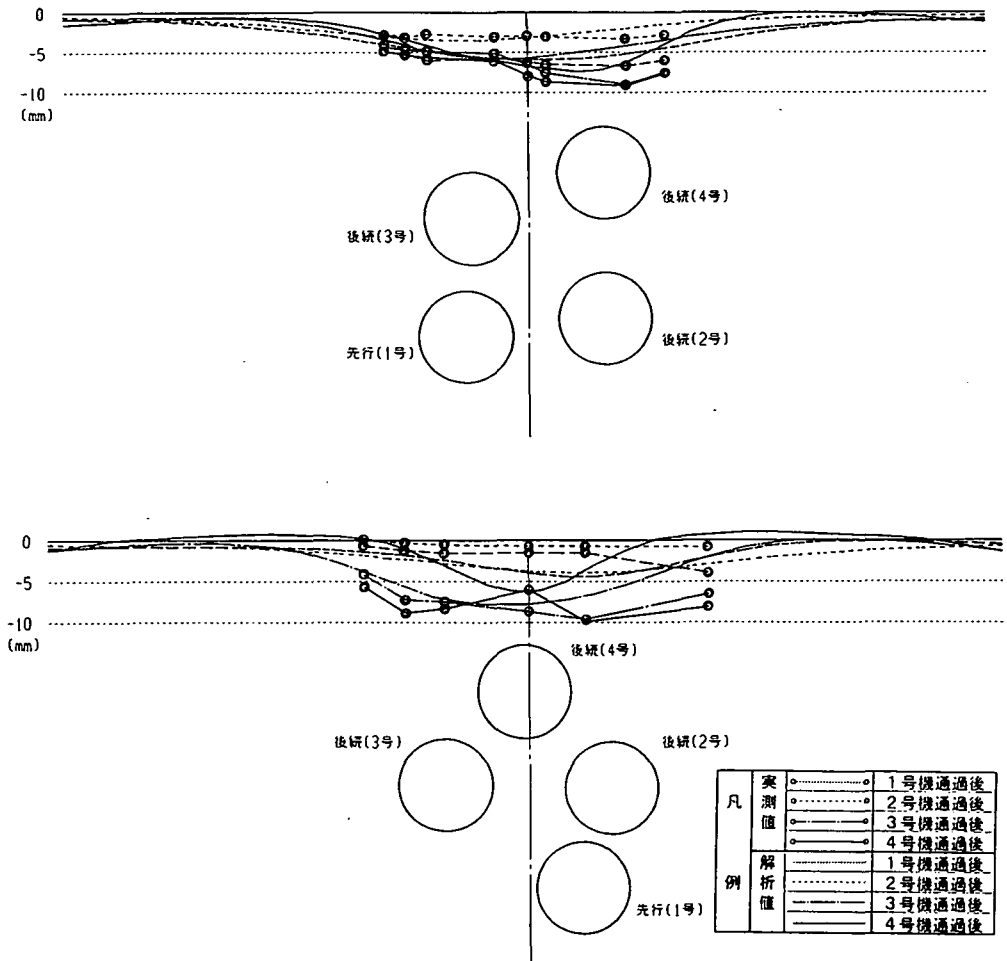


図-18 提案解析モデルによる計算結果

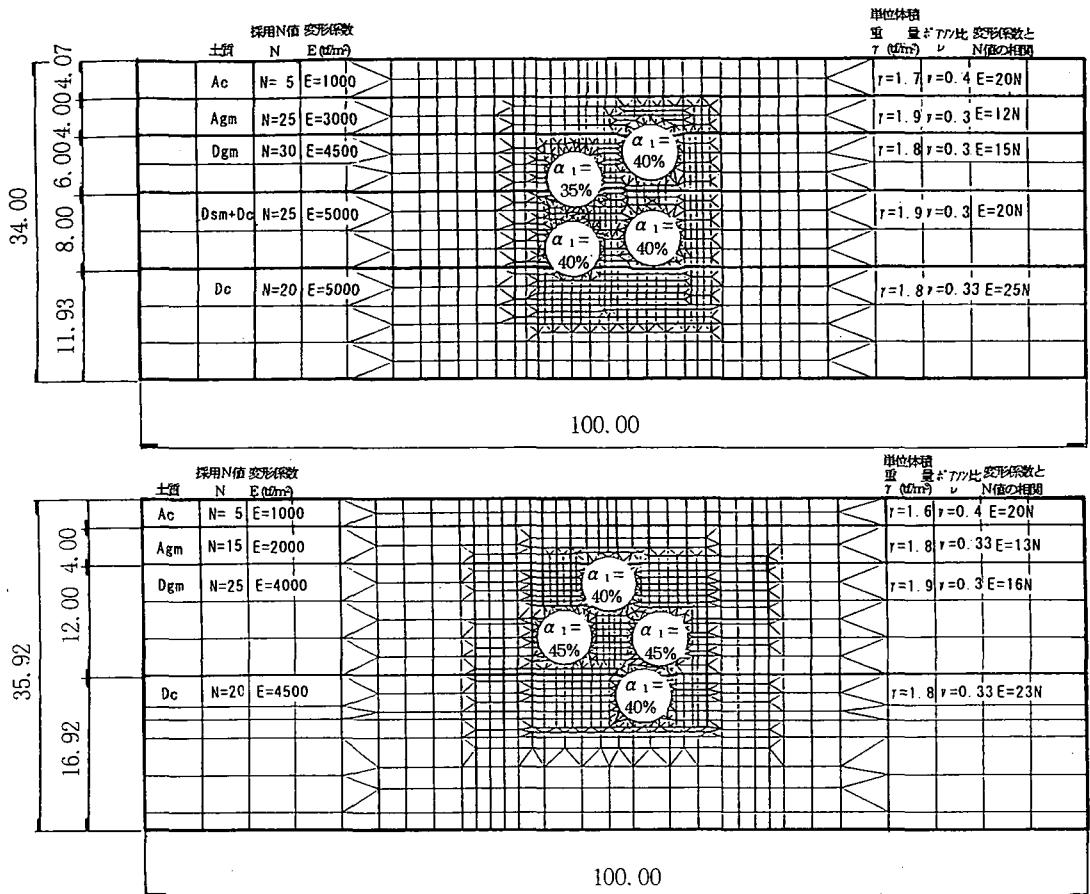


図-19 解析モデルと諸数値

て、覆工要素付加後の応力解放率 α_2 は60%前後となる。求められた変形係数のN値との相関は、一般に用いられる変形係数の範囲に収まっており、砂質土では $E=15\text{Nkgf/cm}^2$ 、粘性土では $E=20\text{Nkgf/cm}^2$ 程度である。

図-20は、1本のトンネルが掘削されたときの解析上の地盤の鉛直応力の変動を示し、図-21は、計測B断面について、各々のシールドが施工順序どおりに掘削された場合とそれ単独で掘削された場合の掘削相当外力を比較したものである。地盤挙動を解析上再現できたメカニズムとして、1本のトンネル掘削による地盤の鉛直応力の変動は、掘削されたトンネルの側部において顕著な増加を示し、これと符合して後続シールドの掘削ではリバウンドの成分となる上向きの掘削相当外力が大きくなることが理解される。

応力解放率の値は、相対隆起を示した施工段階に着目し沈下から隆起に転じる境界の値を基準に定めたが、比較的大きな沈下を示す施工段階も同等の応

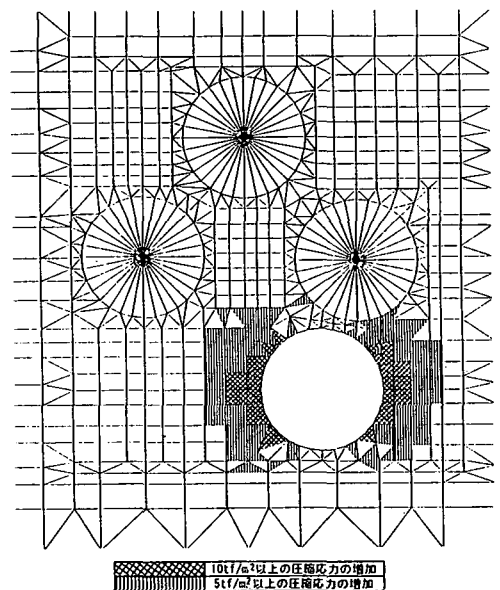


図-20 シールド掘削に伴う地盤鉛直応力の変動

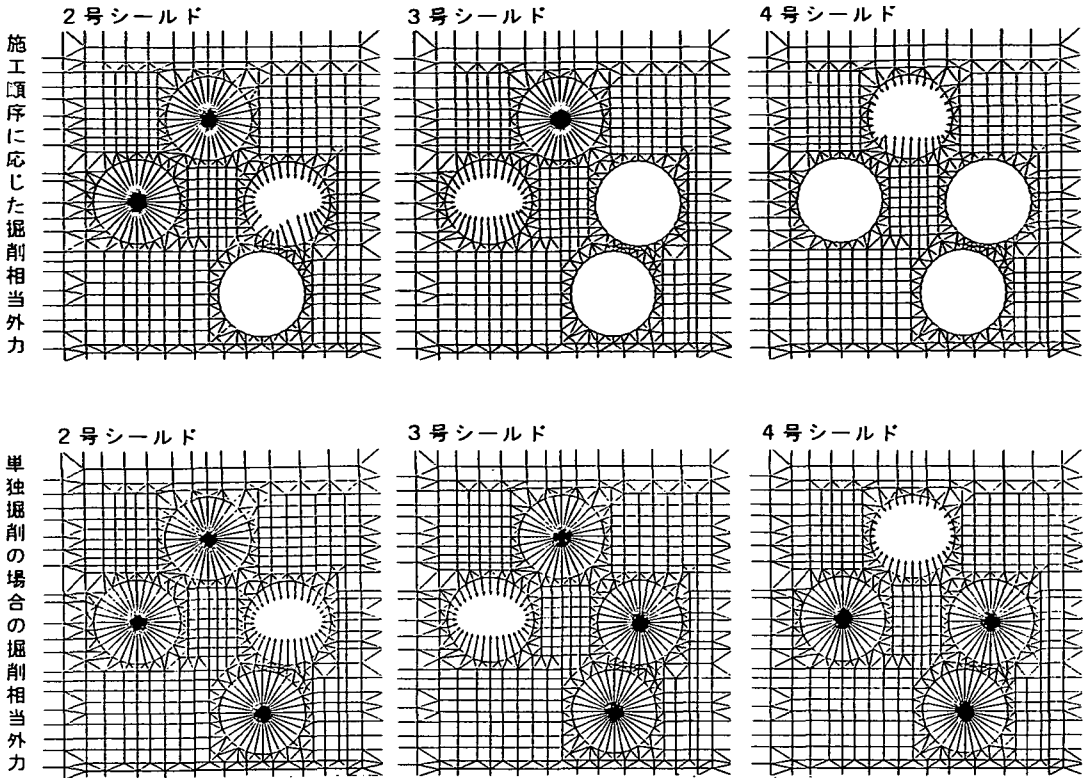


図-2.1 掘削相当外力の比較 —: 30 t f

力解放率で表されている。また、地盤の変形係数は両断面を通じて地盤毎に一貫性のある値となった。4本シールドの配置が異なり、各シールドの施工段階毎に様々な変位をみせる複数の断面において、各シールドの掘削に対する応力解放率の値がある程度一定のオーダーに整理されたことは、この解析モデルがシールド施工に伴う地盤挙動を統一的に説明できる可能性を有すると考えられる。

4. まとめ

本論文では、4本併設シールド工事における情報化施工により得られた掘進管理データならびに地盤とトンネル挙動の計測結果を用い、実際に生じた現象について分析し、その工学的意義に関する考察を行った。

これまでに得られた知見を列挙すると以下のようである。

1. 後続シールドの施工時荷重が先行トンネルに及ぼす影響について、影響荷重の規模を定量的に評価するとともに、その影響荷重がもたらされたメカニズムを施工時荷重との相関から明らかにした。

施工時荷重の伝播のメカニズムは、基本的に弾性的な挙動として説明できる。ただし、実際に作用した影響荷重のピーク値には後続シールドの接近、到達過程における伝播荷重の逐次残留の形跡がみられ、これを予測するには地盤の非弾性連続体としての特性と時間依存、およびシールド工事のサイクルタイムを考慮する必要性が把握された。

2. 併設シールドにおけるトンネルへの長期的影響について、後続シールドの掘削が先行トンネルに及ぼす影響を土圧変動に着目して評価した。

計測結果の分析と掘削解析結果から、上下併設の場合には鉛直土圧の減少と側方土圧の増加が生じ、横方向併設の場合には全般に土圧は増加し、側方土圧に特に顕著であることを把握した。

3. シールド工事における地盤挙動の予測解析手法について、トンネル掘削による除荷を忠実に解析へ反映させる方法を提案した。

4本シールドの各施工段階で観察された特異な地表面変位に着目し、それが併設トンネルの掘削によるリバウンドに起因すると想定したモデル化を行った。結果として統一性のある解析

パラメータにより各施工段階間の相対変位ならびに沈下と隆起の双方を再現することができた。

これらの成果は、今後さらに増加するであろう併設シールドの設計・施工の貴重な資料となり得ると考える。シールドトンネルがその計画上の自由度を増し、安全かつ経済的に建設されるうえで、併設シールドという選択肢が果たす役割は大きい。併設シールドが真に有効な機能を果たすためには以下のような影響予測と施工時のフィードバックのシステムが確立されることが求められる。

1. 計画・設計段階においては、後続シールドが先行トンネルに及ぼす影響や相互作用、単線シールドの場合より増幅される可能性のある地盤挙動による近接構造物への影響などを定量的に評価し、工事の実現性を的確に判断する。
2. 施工計画の段階では、設計とその背景にある仮定条件を踏まえて施工管理値を定め、それと対応する掘進計画を策定する。また、施工の実施可能性を評価し、設計にフィードバックする。
3. 施工段階においては、掘進データならびに地盤・トンネル挙動の諸値を観察し、把握された掘進データと挙動の相関から生じている現象のメカニズムを分析し次工程にフィードバックする。

本工事の計画・設計段階においては、併設シールドの諸問題について過去の工事ならびに研究実績を参考にしながら検討し、工事の遂行に当たっては設計段階での仮定について確認作業を行ってきた。上記のシステムはその過程の中で認識されてきたものであるが、今回の掘進実績を含めた工事実績に対する分析・考察を経て、このシステムを構成する個々の要因に関して具体性と信頼性を高めることができたといえる。これに施工条件に応じた責任技術者の技術的判断が加わるならば、近接施工における安全性をさらに高めることができるとともに、シールドトンネルの適用範囲がさらに広がるものと考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、「京都市高速鉄道東西線建設工事御陵東工区シールド工法検討会（座長：足立紀尚京都大学教授）」の委員の方々には、多大なるご助力、ご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)京都市交通局高速鉄道本部：シールドトンネルの設計施工計画に関する検討報告書，1993。
- 2)塚本浩一：四ツ目シールドトンネルの計画，日本トンネル技術協会，トンネルと地下，pp.23～28，1993.10
- 3)浅賀 博，山崎糸治，小林 隆：地下鉄4線超近接移行シールド工法について，日本鉄道技術協会，JREA，pp.39～41，1994.1
- 4)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，pp.87～94，1993。
- 5)山口 巖，山崎糸治，福島健一，小林 隆，杉嶋敏夫：併設シールドの影響予測解析と実際の挙動，トンネル工学研究発表会論文・報告集第5巻，pp.39～46，1995。
- 6)京都市交通局：高速鉄道東西線建設工事（御陵東工区）第7回シールド工法検討会資料，pp.19～27，1996.1
- 7)赤木寛一，小宮一仁：有限要素法によるシールド工事の施工過程を考慮した地盤挙動解析，土木学会論文集No.481/III-25，pp.59～68，1993.12
- 8)たとえば，最上武雄他：土木学会監修土質力学，技報堂出版（株），pp.246～250，1969。
- 9)たとえば，最上武雄他：土木学会監修土質力学，技報堂出版（株），pp.237～239，1969。
- 10)土木学会：トンネル・ライブラリー第6号，セグメントの設計，pp.11～13，1996。
- 11)松本嘉司，小山幸則，清水 滴，小林宏基：併設シールドが先行トンネル断面力に及ぼす長期的影響の検討，トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻，pp.211～216，1994。
- 12)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。
- 13)たとえば，中村信義，中島 信：シールド工事における予測と計測，基礎工，pp.28～34，1989.12
- 14)神戸義雄，高橋 保，吉田 保，他：有限要素法によるシールド掘削に伴う地盤沈下解析（テールボイド及びセグメントの剛性を考慮した解析），第14回土質工学研究発表会，1979。
- 15)建設省土木研究所道路部トンネル研究室：地盤変状予測・対策マニュアル（案），1992。
- 16)土質工学会：大阪地盤一特に洪積層の研究とその応用，pp.175～176，1977。

(1996.1.18 受付)

ANALYSES OF INTERACTION BETWEEN TWO PAIRS OF SHIELD TUNNELS AND SOIL , AND THEIR APPLICATION TO DESIGN AND CONSTRUCTION OF PARALLEL SHIELD TUNNELS

Iwao YAMAGUCHI, Itoji YAMAZAKI, Takashi KOBAYASHI,
Junji MATSUSHITA, Konosuke MIYATA and Toshio SUGISHIMA

Since the planning and design stage of the construction of closely running four shield tunnels proposed in Kyoto city, authors have been engaged both in the study about various problems in the parallel shields and in the construction works with close monitoring by computerized construction systems for priority works, aiming for contributing to the influence evaluation of the ground-tunnels behavior in parallel shield tunnels in future.

The paper describes the evaluation and application of the followings; 1. the influence load to the preceding shield by the driving force of following shields, 2. characteristics in load changes in the long term effect of the parallel shields and 3. analytical illustration techniques about the ground behavior mechanism.