

沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状と その予測解析について

BEHAVIOR OF GROUND DISPLACEMENT DUE TO SHIELD THRUSTING IN ALLUVIAL SUBSOILS AND ITS PREDICTION ANALYSIS

山田孝治*・吉田 保**・間片博之***・橋本定雄****
By Koji YAMADA, Tamotsu YOSHIDA, Hiroyuki MAGATA
and Sadao HASHIMOTO

Characteristics and mechanism of ground displacement during shield thrusting in soft ground were discussed. It is pointed out that the shield machine, auxiliary construction methods, backfill grout and the quality of operation control are the main influencing factors and should duly be taken into account for the prediction of ground displacement. The numerical calculation by two dimensional elastic finite element method with some modeling techniques was confirmed to provide an excellent method to predict the 3-dimensional ground displacement behavior under shield thrusting.

1. ま え が き

近年、都市におけるシールドトンネルは、各種の重要構造物に近接して施工されることが多く、シールド掘進に際しては、近接構造物に変状を与えないことが厳しく要求されている。そのために、シールド掘進に伴う地盤変状自体を小さくすること、または地盤変状の影響を遮断することを目的として、地盤を強化するための薬液注入工法、地中連続壁工法などが、防護工として頻繁に採用されてきた^{1)~7)}。そして、このような対策を行った箇所では必ず詳細な動態計測を実施している。

これらの箇所では当然、シールド機種を選定、掘進管理、裏込め注入管理などに細心の注意が払われており、その結果ほとんどの工事で、地盤変状の計測値が管理値を大きく下回っている。このことから、動態計測管理を行いながら施工を慎重に行えば、防護工が不要か、または必要な場合でも、その規模を縮少できたのではないか

との疑念が拭い去れない。すなわち、これまでの行き方では、動態計測を行って慎重に施工したものの、積極的にシールド工事を経済的に行ったとはいいがたい。この感想はおそらく、近接シールド施工を行った技術者のすべてに共通したものであろう。

著者らは、ある上下隣接シールド工事において、動態計測による入念な施工管理を行い、特に防護工を施すことなく、無事シールド掘進を完了させた経験をもっている⁸⁾。これは、著者ら⁹⁾が以前行った篠崎幹線シールド工事における地盤変状の実態調査の結果を踏まえて、地盤変状の予測解析を行い、当該地の変状は許容値以下であると判断できたこと、および施工中の動態計測によって、その予測が確認されたことによるものである。

このように、動態計測結果を積極的に施工を生かすためには、

- ① シールド掘進に伴う地盤変状のメカニズムの把握
- ② 必要とする精度で、問題となる地盤変状の予測解析が行えること

の2点が必要である。

これまで、①と②に関する研究はそれぞれ数多く行われてきた。

①について主なものを述べると、森¹⁰⁾は、シールド掘進に伴う地盤変状は、シールド掘進による応力解放のための地盤変形のほかに、地山がせん断変形を受け土の構

* 正会員 工修 日本工営株式会社第三土木技術部次長
(〒102/千代田区麴町 5-4)

** 正会員 日本工営株式会社第三土木技術部
(同上)

*** 正会員 工博 明星大学教授 理工学部
(〒191/日野市程久保 337)

**** 正会員 工博 東京都下水道局局長
(〒100/千代田区大手町 2-6-2)

造が乱されることによる圧密沈下が大きいウェイトを占めることを指摘した。藤原ら^{11)~13)}は、土圧式シールドで粘性土地盤、砂質土地盤を掘進した場合に詳細な現場計測を行い、地盤変状のメカニズムを検討している。彼らはまた、シールド機周辺の地盤の動きと、地山の乱れなども詳細に報告している。古山ら^{14)~15)}は粘性土地盤中に、ブラインド式、土圧式、および泥土加圧式シールドで掘進した場合の地盤の変状を詳細に計測し、各方式がそれぞれ特徴ある地盤変状を示したことを報告している。森¹⁶⁾、小林¹⁷⁾は模型実験により、切羽の安定を検討し、切羽の取り込み量と地山の動きに密接な関係があることを指摘している。著者らも過去7~8年間に、東京の沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状を20数例計測し、その一部を報告してきた^{7), 8), 18), 19)}。

以上のほかにも、現場計測は数多く行われてきており、それぞれ、シールド掘進に伴う地盤変状の実態、変状の原因などの分析が行われている。しかし、これらの資料を網羅するようなかたちで、地盤変状とその原因を考察したもの、さらに次に述べる地盤変状の予測解析と関連づけようとした論文は、著者らの知る限り見当たらない。

次に前記の②について、これまでの動向を述べると、最近の近接施工において要求される予測解析では、トンネル径、土被り厚さなどの幾何学的な寸法形状のほか、複雑な土質条件、シールド機種、掘進管理の内容、裏込め注入の分量、防護工の効果等を組み込んで評価できるものでなければならない。

このような観点から地盤変状の算定式を概観すると、Peckの式²⁰⁾、Jefferyの式²¹⁾等の慣用式は概略の目安を与えるのみで、多くの要因の影響を表わし得ない。

伊藤、久武^{22)~24)}は境界要素法を用いて、地盤を粘弾性体として取り扱い、テールボイド量、圧気圧、シールド切羽位置とその進行速度など、かなり施工条件を考慮できる計算方法を提案している。しかし、この方法においては、シールド切羽推力の大小、薬液注入による局所的な地盤改良の効果、トンネルセグメントの剛性をどのように評価するかなどの諸点が、なお不明のまま残されている。

著者ら^{25), 33)}は有限要素法を用いて、テールボイドの大きさ、裏込め注入の分量、および、セグメントの剛性を評価して、地盤変状予測を行った。これは本論文の一部をなすものである。その後、古山ら¹⁴⁾は同様のことを解放率 α を導入して解析することを試みている。また、寺田ら²⁶⁾は強制変位法と名付けた手法によって、テールボイドの大きさを評価している。しかし、この手法ではセグメントの剛性を沈下量算定の中に入れることをしていない。以上のほかにも、有限要素法による沈下解析例は多

いが、2, 3の例外を除けば、テールボイド量、セグメント剛性の取り扱いが不明、または、素掘り掘削断面のものがほとんどである。

以上は、横断面方向の地盤変状解析であるが、縦断面方向の解析を行った報告は案外少なく、木村²⁷⁾、Ghaboussi²⁸⁾、大田²⁹⁾らが主なものである。また、現場実験値との照合の事例が少ない。

このように、予測解析手法についてはかなり研究が進んでいるものの、地盤条件、施工条件等が複雑なために、すべてを適切に考慮に入れた計算法は確立されていないのが現状である。

2. シールド掘進に伴う地盤変状の実態

地盤変状の特徴は、変位の分布形状、ある一点の変位の経時変化、地盤の乱れなどに現われる。以下にこれらの事項について、今までの研究で判明したことを述べる。¹⁾

(1) 地盤変状の分布

まず、シールド掘進に伴って、地盤はどのように挙動するかを、篠崎幹線の測定例に基づいて述べる。

図-1~4は、 $w_L=45\sim50\%$ 、 $w_P=30\sim35\%$ 、 $w=40\sim70\%$ 、 $q_u=5\sim7\text{ tf/m}^2$ 程度の超鋭敏粘土からなる沖積粘性土地盤を、図-5~8は N 値 $=5\sim10$ の沖積砂地盤をいずれも、土圧式シールドで掘進した場合の典型的な事例¹⁸⁾である。いずれの場合も地表面で沈下のみが生じたケースである。

地盤変状の特徴はこれらの図が示すように、シールド機本体を中心に三次元的に広がり、しかもその分布がシールド機の進行とともに移動することである。

まず粘性土地盤について述べる。図-1はシールド機が破線の位置にあるときの地表面の沈下コンターの一例である。シールド機の進行とともに、このコンターも移動する。図-2は地中における鉛直、水平変位の横断方向の分布を示す。鉛直変位のコンターはシールド切羽においてその分布幅は狭いが、シールド機通過後、約6か月経った時点(最終状態とよぶ)ではその幅が広がり変

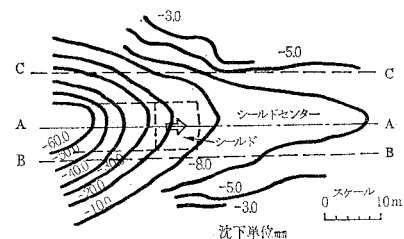


図-1 地表面沈下コンター
(篠崎幹線 4-2 地点 粘性土地盤)

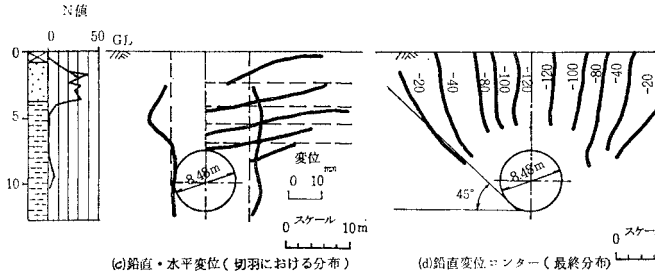
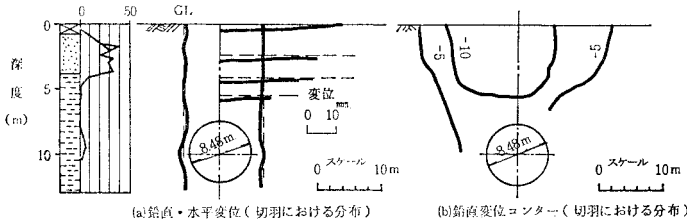


図-2 地中鉛直・水平変位の横断分布図 (篠崎幹線 4-2 地点 粘性土地盤)

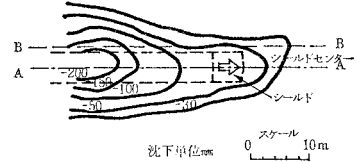


図-5 地表面沈下コンター (篠崎幹線 6-4 地点 砂地盤)

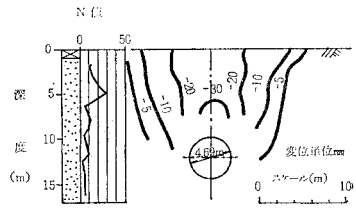


図-6 地中鉛直変位コンター (篠崎幹線 6-4 地点 砂地盤)

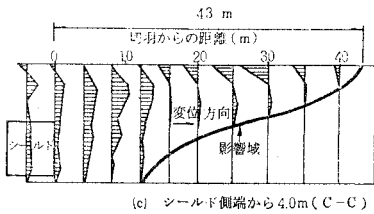
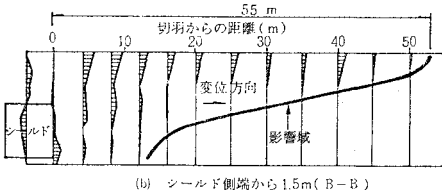
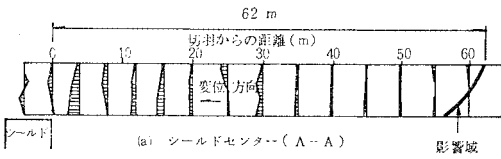


図-3 地中水平変位の縦断分布 (篠崎幹線 4-2 地点 粘性土地盤)

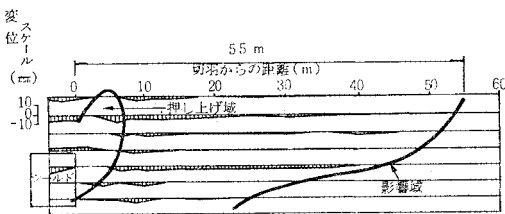


図-4 地中鉛直変位の縦断分布 (B-B) (篠崎幹線 4-2 地点 粘性土地盤)

位範囲はほぼ 45° の広がりをもっている。最終状態の、沈下コンターは鉛直に近く、地表と地中の変位にはほとんど差はない。水平変位はシールド機通過によって、シ

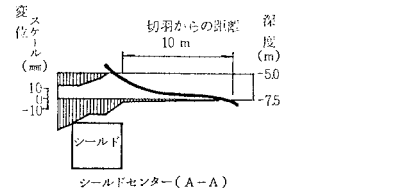


図-7 地中鉛直変位の縦断分布 (篠崎幹線 6-4 地点 砂地盤)

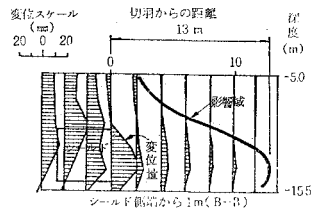


図-8 地中水平変位の縦断分布 (篠崎幹線 6-4 地点 砂地盤)

ールド機の外方に動く傾向がみられる。図-3 はシールドセンターライン (A-A) と側方の地盤中 (B-B, C-C) の3つの縦断面における、シールド切羽前方の地盤中の水平変位である。図-4 は (B-B) における鉛直変位分布を示す。シールド側方の土は進行方向に、また、切羽正面の土はシールド側に動いている。これはそれぞれシールド外壁の摩擦のためと、切羽正面で土塊を取り込んでいるためである。

以上の事例を含め、著者らの経験を総合すると、図-9 に示すように地盤が動いているものと結論できる。その特徴を要約すると次のようである。

- ① シールド切羽正面に土の取り込み域が発生し、この部分の土はシールド方向に動いている (シールド掘進の操作によってはこの動きが生じないこともあり得る)。

- ② 取り込み域の外の地盤はシールド本体外周の摩擦によって、シールド進行方向に押される。
- ③ 切羽前面の地盤は上の例では沈下している（シールド掘進の操作によっては隆起する場合がある）。
- ④ テールより背後の地盤はテールボイド発生のため沈下する（裏込め注入の操作によってはこれが生じないこともあり得る）。
- ⑤ トンネル周辺のアーチ作用はほとんどみられない。

古山^{14),15)}、藤原^{11),12)}のデータでも同様の傾向が認められる（もっとも図-9のような総合的な判断は示されていない）。したがって、図-9は沖積粘土地盤における典型的な地盤変状とみなすことができる。

一方、砂地盤について述べると、地盤の動き自体は粘性土地盤の場合と変わらないが、図-6,7に示すように、地中ではトンネルすぐ上の部分が大きい沈下を示し、それよりも上方の沈下は小さくなっている。すなわち土のアーチ作用が発揮され、アーチの内側にゆるみ域が発生することになる。藤原¹²⁾のデータもこれと同様の結果を示している。図-8はシールド進行方向の水平変位分布である。シールド切羽部で地盤は前方に押しつけられているが、影響域は地表まで達していない。以上から、この場合の地盤変位は図-10に示す模式図のようになると考えられる。

(2) シールド掘進による地盤の乱れ

著者ら^{9),30)}は篠崎幹線、柴又幹線における実態調査において、シールド掘進前後における土性の変化を調査し、含水比、密度、せん断強度、弾性係数（これのみボーリング孔内载荷試験による）などのチェックを行ったが、シールド掘進前後では弾性係数の変化のみが著しく、他はあまり変化がなかった。これと同様のことは桑原³⁰⁾、藤原^{12),13)}にも報告している。

図-11に篠崎幹線における地山の弾性係数の変化の事例を示す。弾性係数はトンネルの1m側方で孔内水平载荷試験を実施して求めたものである。変化率 $=\{(E_2 - E_1)/E_1\} \times 100\%$ で、 E_1 はシールド施工前、 E_2 は施工後の弾性係数である。4本の線は各工区における平均値を示すものである。

データはばらつきはあるが、施工後の弾性係数はほとんど減少し、数点では増加した。全体を平均すると施工前の弾性係数の1/2程度となる。なお、施工が良好な場合、弾性係数の低下は1/2以下となるので、これを1/2とするとおおむね安全側の結果を与える。

(3) シールド掘進に伴う沈下の分類とメカニズム

図-12は篠崎幹線で計測された沈下（隆起も含む）の

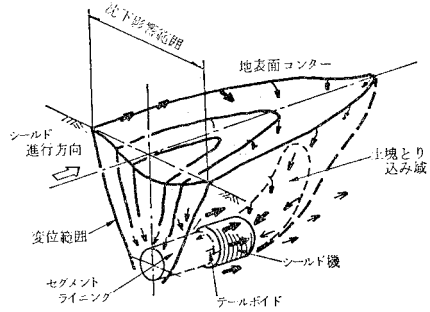


図-9 地盤変位模式図（粘土地盤）

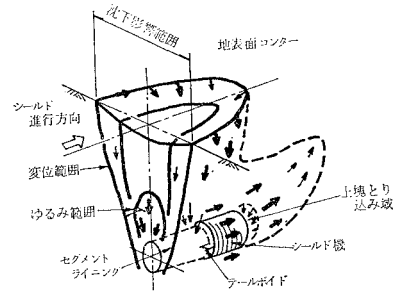


図-10 地盤変位模式図（砂地盤）

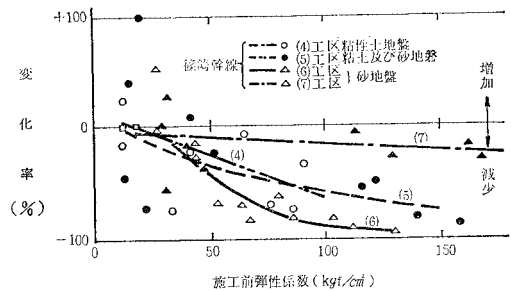


図-11 地盤の弾性係数の変化

経時変化の事例である。いずれも地表面の一点のデータである。4-2, 4-3地点は粘土地盤、6-1, 6-4地点は砂質地盤である。シールド機種は土圧バランス式である。

4-2地点ではシールド切羽到達以前に沈下が始まっており、シールド機のテールが通過し、テールボイドが発生すると急に沈下が増している（裏込め注入は2~3リング遅れでなされた）。その後10数日間シールドが停止していた間も沈下が進み、再び動き出すと一時沈下速度が増し、結局ほぼ100日経過後沈下は10cmに達している。

4-3地点ではシールド切羽到達前に沈下はほとんどみられず、逆に切羽到達からテール通過の間に隆起が生じている。4-2と4-3地点の地盤性状はよく似ており、このような挙動の差はシールド切羽を押しつける推力の大小に起因するものである。

6-1地点は切羽前面の地盤の崩壊が沈下を生じさせた事例である。6-4地点は切羽の崩壊がなく、テールボイ

ト発生による沈下のみを示した事例である。いずれも、シールド機通過後、粘性土地盤と比べると、かなり早い時期に沈下は落ち着いている。

以上の例からも明らかなように、経時沈下曲線は地盤の種類、シールド掘進の良否に大きく影響され、この沈下曲線を分析することによって、沈下に影響する要因を抽出することができると考えられる。

著者ら^{9),18),19)}は地盤の沈下を図-13のように5段階に分けて考えた。すなわち、次の①~⑤である。

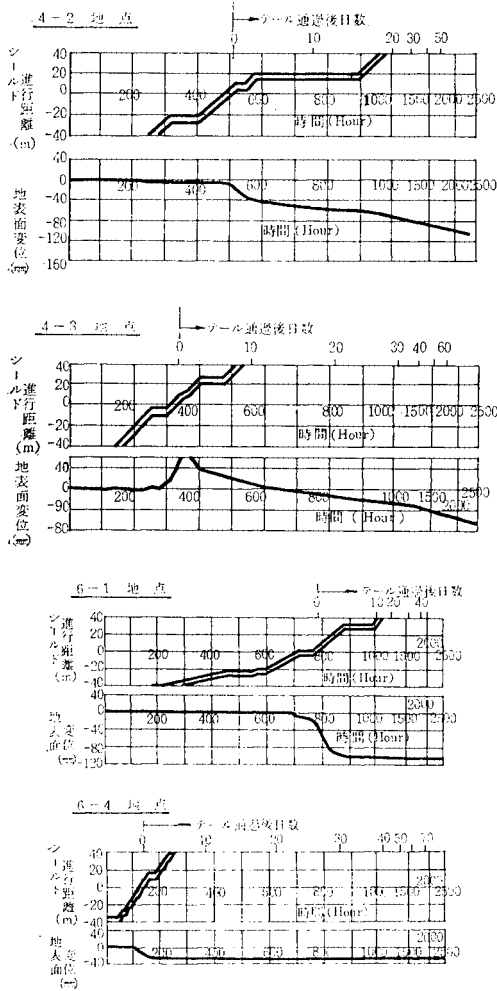


図-12 地表面変位経時変化例(篠崎幹線)

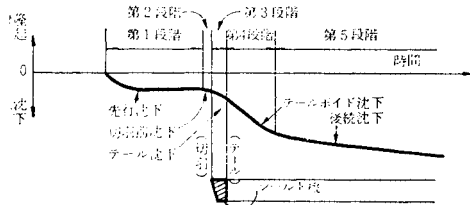


図-13 沈下経時変化曲線模式図

- ① 先行沈下：トンネル切羽が地表の測定点のかなり手前（数 10 m 程度）にある時期から、切羽が測定点の直前に至る間に生じるもので、シールド掘進に伴う地下水位低下によって生じる。したがって、これは地盤の有効土被り圧が増加したために生じる圧縮・圧密沈下である。
- ② 切羽前沈下および隆起：切羽が地表の測定点のごく手前（数 m 程度）に達した時期から、切羽が測定点直下に達する間に生じる沈下、または隆起現象。切羽の崩壊、シールドの過推力など、切羽における土圧のアンバランスによって生じるもので、地山の応力解放、負荷土圧の作用による地盤の弾塑性変形である。
- ③ テール沈下：測定点の直下に切羽が到達してから、シールド機のテールが通過するまでの間に生じる沈下現象。主として土の乱れに起因する。
- ④ テールボイド沈下：シールド機のテールが測定点の直下を通過した後が生じる沈下現象。テールボイドに起因する地山の応力解放による弾塑性変形である。
- ⑤ 後続沈下：主として、地盤の乱れに起因する圧密およびクリープ的残留沈下現象。

表-1 地盤変状のメカニズム

沈下の種類	原因	地盤状況の変化	変状メカニズム
①先行沈下	地下水位低下 ⁹⁾	有効土被り圧の増加	圧縮・圧密沈下
②切羽前沈下 隆起	切羽崩壊、過大な取り込み 切羽押し込み ^{7),9),18)}	地山の応力解放、乱れ 負荷土圧	弾・塑性変形
③テール沈下	シールド機通過時の擾乱 ⁹⁾	乱れ	圧縮
④テールボイド沈下	テールボイドの発生	地山の応力解放	弾・塑性変形
⑤後続沈下	以上全要因(残留分)		圧縮およびクリープ沈下

表-2 地盤変状原因と影響要因

原因	補助工法	シールド機	裏込めの注入	施工管理
地下水位低下	・地下水位低下工法 ⁹⁾ ・圧気工法 ⁹⁾ ・不完全な薬液注入工法	・切羽における水圧バランス性能の不良 ¹²⁾	・裏込め不良の場合のセグメントからの漏水	・セグメント組立不良による漏水 ⁹⁾
切羽の崩壊 切羽の押し込み	・不完全な薬液注入工法	・切羽における土圧、水圧バランス性能の不良 ^{9),19)}	---	・ジャッキ能力および掘り進路の管理不良 ^{9),18),19)}
テールボイドの発生	---	・スキッププレート補強リブの厚さ	・注入量の不足 ⁹⁾ (注入時期の遅れによる)	・余振、蛇行不良 ⁹⁾
地盤の乱れ	・過大な薬液注入 ⁹⁾ ・突進時割孔による乱れ ⁹⁾	・切羽掘削時の擾乱および地山の崩壊 ^{9),18)}	---	・過推力、過少推力による地山の過度の変状 ⁹⁾

これらの沈下は常にそのすべてが生じるものではなく、地盤状況、施工条件によって卓越する沈下の種類が異なる。

著者らのこれまでの経験から、地盤変状は表-1に示す原因とメカニズムで生じ、沈下の原因は表-2に示すような補助工法、シールド機、裏込め注入、施工管理の要因と関連することがわかってきた。

以上のことから、地盤変状予測においては表-1、2に示す事項を解析計算中に定量的に組み込むことができないなければならない。

3. 地盤変状解析

(1) 変状解析の取り組み方

前節で述べたように、シールド掘進に伴う地盤の沈下は①～⑤の5段階に分けられる。それぞれが異なった原因が重なって生じるものであるから、1つの手法で変状の予測解析を行うことは不可能であるといえる。そこで、著者らは地盤変状を次の3つに分解して算定するべきであると考えている。

- A) 圧縮・圧密沈下：地下水位の変化を予測し、通常の圧密沈下計算手法により①の計算を行う。
- B) 応力変化による地盤の変形：弾性解析（あるいは弾塑性解析）により②、③、④の計算を行う。
- C) クリープ沈下：粘弾性解析または実測値による統計処理の結果を参考にして⑤の計算を行う。

A)、C)については本論文では省略し、B)について行ったいくつかの検討結果を報告する。

これについての解析手法は沈下だけでなく、隆起をも対象としなければならない。また、地盤の土層構成、シールド機の機能、裏込め注入状況、施工管理状況などの要因を解析に組み込むことができなければならない。このような条件をことごとく考慮できる解析法は現在のところ、有限要素法以外に見当たらない。

有限要素法には二次元と三次元のものがある。実際の地盤変状は前述のとおり三次元的に生じるので、解析も三次元有限要素法を用いるのが理想であるが、入力データが膨大な量となり、簡単なケースを除けば実用上困難である。そこで、以下に述べるような検討を行って二次元解析を適用してみたが、観測結果をかなり説明することができた。

(2) 横断方向解析

横断方向解析は地盤沈下と地盤隆起の場合で解析モデルの設定の仕方が異なる。

まず地盤沈下解析の場合について述べる。この場合の

解析を行うにあたってまず留意しなければならないことは、テールボイド量とセグメントライニングの剛性が考慮されなければならないことである。このようなことを考慮しない素掘り型のモデルでは、ともすると、シールド周辺地盤がセグメントの位置をはるかに越えた変位を与えるという実状に合わない結果を与える。著者ら²⁴⁾は地山掘削面とセグメントライニングの間に、有限のテールボイド量を入力できるようなプログラムを作成した。その結果、テールボイドの大きさ、セグメントの剛性を組み入れるだけでなく、実際の施工手順に伴う地盤状況の変化を解析に考慮できるようになった。解析プログラムのフローチャート、テールボイドとセグメント剛性を組み込むための手順は図-14のとおりである。

まず、素掘り状態の地山の変位を算定し②、この値がテールボイド量より大きい場合は地山の変位量をテールボイド量に限定した場合のセグメントライニングによる反力を求め③、これを節点力としてセグメントライニングに作用させてセグメントライニングの変位量を求め④、最終の変位位置を算出するものである。この解析モデルによって、裏込め注入の良否はテールボイド量の大小として、また切羽崩壊の影響もセグメント周囲の余掘量として解析に組み込むことが可能となる。シールド掘進に伴う地盤の乱れの影響は、あるゆるみ範囲の地盤の弾性係数を変化させることによって反映させることが

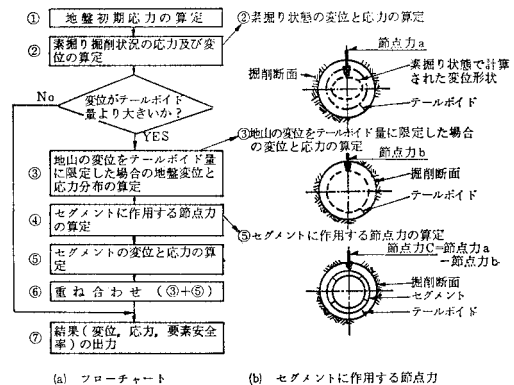


図-14 解析フローチャートおよびセグメントに作用する節点力

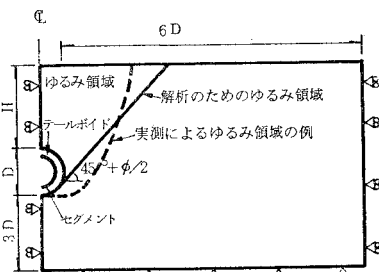


図-15 横断解析断面モデル

できる。標準的な解析断面を 図-15 に示す。最終状態の沈下計算を行う場合には、ゆるみ範囲を $45^\circ + \phi/2$ (ϕ : 内部摩擦角) の傾きの直線とすると、図中の実測ゆるみ範囲に基づく計算と大差ない結果を得た³³⁾。また、モデルの寸法は幅をシールド径 (D) の 6 倍、深さを 3 倍程度にとれば十分である。

次に土質定数の決め方について述べる。図-9, 10 に示すように、シールド掘進に伴う地盤沈下はシールド機を中心とする舟底形に地中分布しており、それがシールド機の進行とともに前進し広がってゆく。そしてその際、図-11 に示すように地山の弾性係数が著しく低下することが確認されている。この変化は模式的に図-16 のように表わせる。

A地点が解析断面である。この位置からみると地表面沈下は、シールド機が十分離れた位置 1 から、2, 3 と接近し通過する間に (a) 図に示すようにゼロ、 S_2 , S_3 と増え、ゆるみ範囲は (c) 図のようにゼロ、 α_2 , α_3 と広がる。そして地盤の弾性係数は自然状態の値 E_1 から、乱されて E_2 , E_3 へと低下する。したがって、有限要素法によってシールド掘進後の最終沈下量を算定する場合、ゆるみ範囲 α_3 とその部分の弾性係数 E_3 を入力すればよい。 $\alpha_3 = 45^\circ + \phi/2$, E_3 を 図-11 に示す実績を参考にして E_1 の 1/2 とすれば、これまでの経験では十分な精度の結果を得ている。

図-17 は上記の手法で解析した一事例で、沈下、水平変位ともに計算値と実測値がよく一致している。入力した土質定数は図中に示してある。地盤の弾性係数 E_1 は現位置において孔内水平載荷試験を行って求めたものである。

このほかにも、同じ解析手法を適用した例は多いが、沖積地盤で土被り厚さがシールド径の 2.5 倍以下であれば、ほとんどよい一致をみた。

次に地盤隆起解析について述べる。地盤隆起はシール

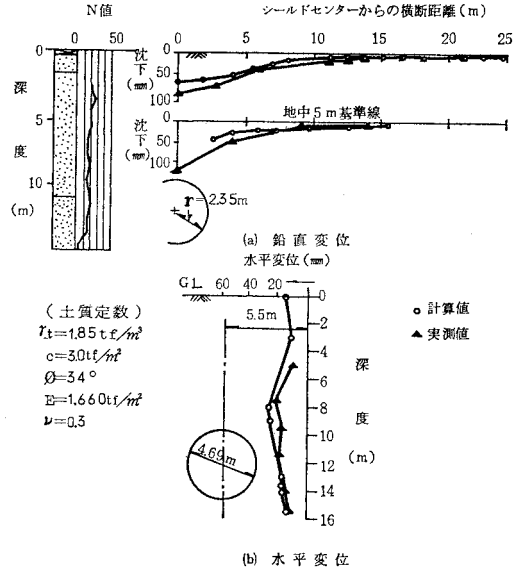


図-17 計算値と実測値の比較 (篠崎幹線 6-1)

ド推進時の過推力がシールド切羽における負荷土圧、シールド機の周辺摩擦力となって、周辺地山を受働土圧的に押しつけることによって生じるものである。したがって、力の作用する方向が異なるために、二次元横断解析では、そのまま切羽の負荷土圧、シールド機の周辺摩擦力を入力することができない。解析モデルとしては図-18 に示すように、過推力によって生じる地山の負荷土圧の横断方向成分を仮想応力として地山掘削面に作用させることが考えられる。この場合でも、ゆるみ範囲の土の弾性係数は前述の沈下解析の場合と同様に低減させる。

この解析では、作用させる仮想応力は当然施工の方法によって異なり、経験的に推定するほかない。そこで、施工実績から仮想応力を逆算することを試みた。

梅田幹線³¹⁾ (シールド外径 7.0 m, 土被り 7.5 m), 青井幹線³¹⁾ (シールド外径 5.18 m, 土被り 8.3 m) シールドトンネルは沖積粘土地盤に対し、ブラインドシールドによって施工された。この現場では 図-19 (a), (b) に示すような地表面隆起が測定された。この場合の負荷土圧を逆算する手順は、それぞれの場合について仮想応力を 3 通り変化させて、地表面隆起分布ならびに地表面最大隆起量を仮想外力との関係を求めておき、この計算結果と現場実測値を比較するのである。

この解析では地盤が粘土であるために ϕ はゼロであるので、ゆるみ範囲を 45° の傾斜とし、その中の地盤の弾性係数はシールド掘進前の 1/2 とした。なお、梅田幹線の場合は、下部に並行して通っている既設管もシールド工法で施工しているので、上記の操作を 2 度繰り返した。

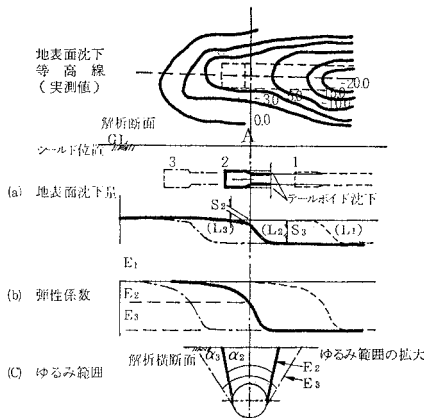


図-16 弾性係数とゆるみ範囲の推移

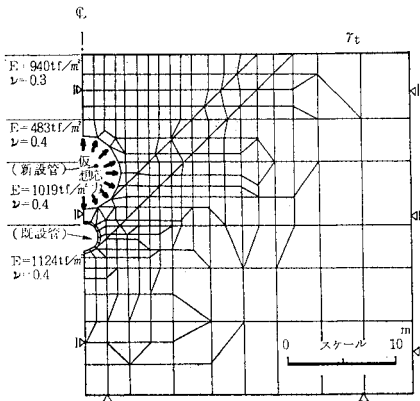


図-18 地盤隆起解析モデル例 (梅田幹線)

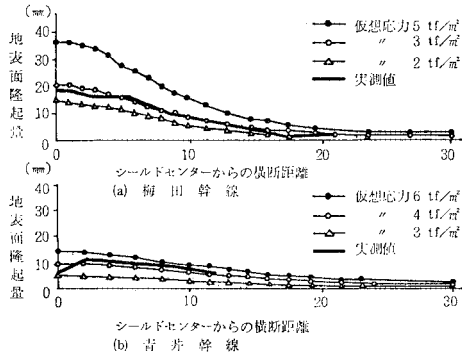


図-19 地表面隆起解析結果

仮想応力 (tf/m ²)	2	3	5	仮想応力 (tf/m ²)	2	4	6
地表面最大隆起量 (mm)	14.7	20.8	36.9	地表面最大隆起量 (mm)	4.8	9.6	14.3

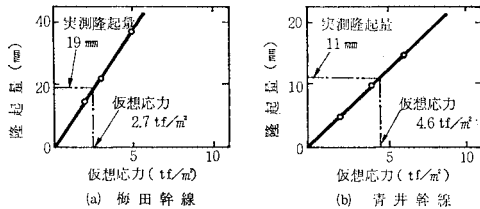


図-20 地表面隆起解析検討結果

解析の結果から得られた地表面隆起の横断分布を実測値とともに 図-19 に示す。両ケースとも計算値と実測値の分布形状はよく似ており、地盤が押し上げ力によりほぼ弾性的に挙動していることを示している。なお、青井幹線の実測値がトンネル中央でやや隆起が小さくなっている (b) 図) のは、図-19 (a) に示す梅田幹線の場合と逆に新設シールドの上方 1 m に直径 3.25 m の既設管があり、それらが互いに浅い角度で交差するような平面配置となっていたために、その縦断方向の剛性で地盤隆起が抑制されたものである。計算は二次元なのでこの点は考慮に入れていない。

次に、シールド中心線上における隆起量と仮想外力の

表-3 仮想応力とジャッキ推力

	地表面隆起量 (mm)	隆起に要する仮想応力 A (tf/m ²)	ジャッキ計測値 B (tf/m ²)	A/B (%)	その他
梅田幹線	19	2.7	43	6.3	粘土地盤 下部シールド先行
青井幹線	11	4.6	56	8.2	粘土地盤 上部シールド先行

関係から、実際の押し上げ力を推定する手順は 図-20 (a), (b) に示すとおりである。推定される押し上げ力は梅田幹線で 2.7 tf/m²、青井幹線で 4.6 tf/m² で、これらは表-3 に示すようにジャッキ推力の 6~8% 程度である。

以上の推論は地盤の実際の挙動を一応合理的に説明できる点で、大きな誤りはないと考えている。なお、このような隆起の予測は、次節に説明する縦断方向解析が先ずべきことは当然である。

(3) 縦断方向解析

シールド工事において縦断方向解析が必要となるのは、掘削土の取り込み量、泥水圧、泥土圧、ジャッキ推力などの管理が不適切で、シールド切羽における土圧のバランスが崩れ、近接構造物に負荷土圧や強制変位が起こるおそれのある場合である。

シールド掘進時の縦断方向の地盤変位は明らかに三次元的な挙動であるために、縦断方向解析は横断方向解析のように簡単に二次元平面ひずみ問題として取り扱うことはできない。そこで 図-21 に示す単純な矩形要素モデルによって、二次元、三次元有限要素法弾性解析の比

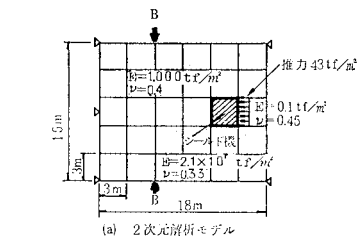


図-21 比較計算のための解析モデル

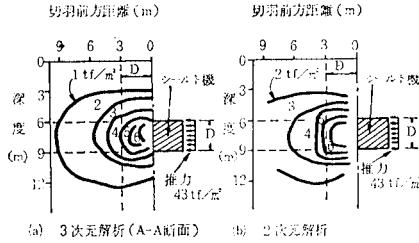


図-22 シールド位置と水平土圧分布

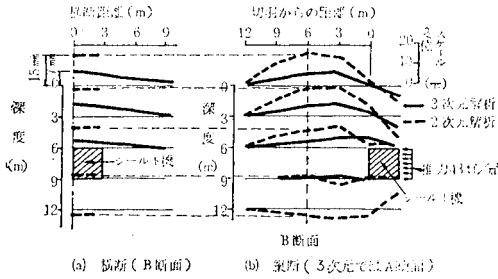


図-23 鉛直変位分布図

較を行った。このモデルは梅田幹線の事例を模式化したものである。

図-22, 23 は計算結果の水平土圧分布、鉛直土圧分布である。水平土圧はシールド切羽から前方に遠ざかるほど分散、減少するが、その割合は当然三次元解析の方が大きく、切羽前方 $1D$ の範囲では二次元の場合に比し約 70% の土圧強度となっている。地盤の鉛直変位はピーク値に注目すると、二次元解析の場合が三次元解析よりも約 2 倍大きな値を示している。

以上の結果から、縦断方向解析は複雑な三次元解析によらなくても、上の例のような両者の差に留意しさえすれば、簡単な二次元解析によってある程度有用な情報が得られると考えられる。

次に示す事例は、3.(2) でも述べた梅田幹線を既設シールドトンネル(外径 3.26 m, 手掘式)の 1 m 直上をブラインドシールドで掘進施工したときの縦断方向解析である。ごく近接して存在する既設管に与える、シールド掘進時の負荷土圧の影響を検討したものであるが、今回は地表面の変状についてのみの報告する。

解析断面モデルを図-24 に示す。モデルの境界条件、解析定数は(a)図、荷重載荷条件は(b), (c)図に示すとおりである。なお、入力定数のうちシールド機テール以後のシールド上方地盤の弾性係数と既設シールドトンネルの弾性係数を次のように定めた。前者はシールド掘進に伴う地盤のゆるみ域であるから、篠崎幹線実態調査結果より、自然状態の地盤の弾性係数の $1/2$ に設定した。後者はたわみ性管路を二次元平面要素で扱えるよう、実際の既設トンネルのたわみ性とトンネル平面要素断面のたわみ性が等価となるような弾性係数を設定し

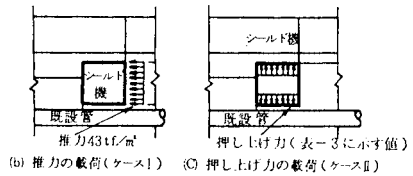
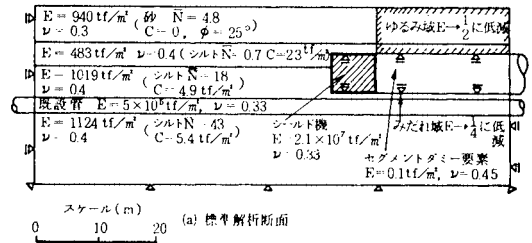


図-24 梅田幹線縦断解析モデル

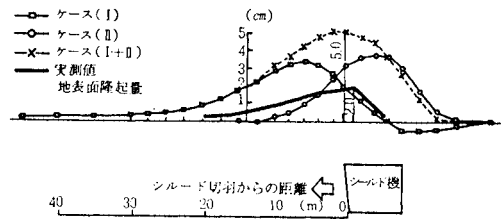


図-25 地表面変位解析結果

た。

解析結果を図-25 に示す。この二次元解析で得られた地表面変位は図-24 の(b), (c)等のモデル単独では変位量、分布形状とも実測値をうまくシミュレーションすることができず、図-25 に示すように(b)と(c)を重ね合わせることによって、地表面の分布形状を実測値と合わせることができた。計算値の最大隆起量は実測値の 2.5 倍であり、これは前記の比較計算から推定して、三次元問題を二次元モデルで扱ったための差と解釈される。

切羽前面の水平負荷土圧、および既設管に作用する鉛直方向負荷土圧分布などの結果は省くが、(b)の荷重条件がおおむね実測値に近い計算値を与えた。

4. あとがき

著者らは過去 7~8 年の間に 20 数例の現場計測を行い、その間に試行錯誤を繰り返しながら、今回報告した解析法に到達することができた。最近は入念な動態計測管理が普及し、ほとんど地盤変状を生じさせなかった施工例²²⁾すら報告されていることはまことに喜ばしい。

しかし、地質、シールド機、近接構造物からの要求の組合せはさまざまであり、地盤変状の予測の必要性は今後とも否定されることはないだろう。本論文で著者らが提案した手法が、このような問題解決の一助ともなれば

幸いである。

最後に、本論文で扱った篠崎幹線、梅田幹線、青井幹線のシールド工事に、東京都下水道局および多数の建設会社の関係各位には長年にわたり現場計測のご支援をしていただいた。また、日本工営(株)の杉山仁実、田中 弘の両君には数値計算にご協力いただいた。なお大阪市立大学の三笠正人教授には本論文とりまとめに際し、多くのご助言・ご指導をたまわった。あわせて、ここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 今中利信・中村重政：大断面シールドにおける重要構造物防護について，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp. 480~481，昭和55年。
- 2) 中村重政ほか：シールド工事施工における重要構造物防護計画と施工結果，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp. 368~369，昭和56年。
- 3) 志村益世ほか：腐植土層におけるシールド掘進に伴う地表面沈下について，第15回土質工学研究発表会概要集，pp. 1545~1548，昭和55年。
- 4) 小菅英嗣ほか：盛土に近接したシールド工事における地盤挙動，第17回土質工学研究発表会概要集，pp. 1225~1228，昭和57年。
- 5) 松崎茂樹：重要構造物の直近をシールドで貫く，トンネルと地下，第16巻6号，pp. 45~51，1985。
- 6) 峯尾正臣：軟弱地盤における地盤沈下の試験工事，トンネルと地下，第14巻4号，pp. 31~40，1983。
- 7) 橋本定雄：上下隣設シールドの施工と追跡調査(2)，トンネルと地下，第13巻7号，pp. 43~54，1982。
- 8) 橋本定雄：上下隣設シールドの施工と追跡調査(1)，トンネルと地下，第13巻5号，pp. 7~14，1982。
- 9) 東京都下水道局：篠崎幹線シールド工事実態調査に伴う解析，昭和54年。
- 10) 森 麟・赤木寛一：軟弱粘土地盤でのシールド工事に伴う地盤沈下状況の特徴とその要因，土木学会第35回年次学術講演会，第6部，pp. 476~477，昭和55年。
- 11) 藤原正明ほか：土圧シールド工事における現場計測結果，第16回土質工学研究発表会概要集，pp. 1529~1532，昭和56年。
- 12) 藤原正明・尾儀一郎：シールド周辺地山の実応力，ひずみの検討，土木学会第36回年次学術講演会概要集，第3部，pp. 370~371，昭和56年。
- 13) 藤原正明ほか：土圧シールド工事における現場計測結果，第17回土質工学研究発表会概要集，pp. 1237~1241，昭和57年。
- 14) 古山政勝ほか：シールド工事における地盤変状測定，第15回土質工学研究発表会概要集，pp. 1549~1552，昭和55年。
- 15) 古山政勝ほか：シールド工事における地盤変状測定(その2)，第16回土質工学研究発表会概要集，pp. 1537~1540，昭和56年。
- 16) 森 麟ほか：シールド推進時における切羽地盤の動きと取り込み土量との関係，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，pp. 335~337，昭和60年。
- 17) 小林健郎・西松裕一：シールド掘進に伴う地盤変位に関する研究，土木学会論文報告集，第328号，pp. 77~88，1982。
- 18) 山田孝治ほか：シールド掘削に伴う地盤沈下測定結果，第15回土質工学研究発表会概要集，pp. 1541~1544，昭和55年。
- 19) 間片博之：下水道シールド工事における地盤沈下対策(1~4)，下水道協会誌，Vol. 17，No. 191~195，1980。
- 20) Peck, R.B.: Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, State-of-the art reports, 7th ICOSMFE (Mexico), pp. 225~290, 1969.
- 21) たとえば，K. チェッキー：「トンネル工学」(島田隆夫訳)，鹿島出版会。
- 22) 伊藤富雄ほか：シールド掘削による地表面沈下の三次元解析，第16回土質工学研究発表会概要集，pp. 1569~1572，昭和56年。
- 23) 久武勝保・伊藤富雄：トンネル掘削によって生じる地表面沈下の境界要素法による三次元解析，土木学会論文報告集，第327号，pp. 155~162，1982。
- 24) 久武勝保・竹山 喬・伊藤富雄：既設シールドトンネルによる地表面沈下の算定手法とその現場への適用，土木学会論文報告集，第332号，pp. 75~83，1983。
- 25) 山田孝治ほか：有限要素法によるシールド掘進に伴う地盤沈下解析，第14回土質工学研究発表会概要集，pp. 817~820，昭和54年。
- 26) 寺田正治・苗村康造：シールド掘進に伴う沈下の要因について，第16回土質工学研究発表会概要集，pp. 1533~1536，昭和56年。
- 27) 木村洋行ほか：切羽の進行を考慮した掘削の解析について，第16回土質工学研究発表会概要集，pp. 1565~1568，昭和56年。
- 28) Ghaboussi, J. et al.: Finite Element Simulation of Tunneling over Subway, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. log. No. 3, ASCE, 1983.
- 29) 大田秀樹ほか：シールド掘進を考慮したFEM解析，第20回土質工学研究発表会概要集，pp. 1525~1528，昭和60年。
- 30) 東京都下水道局：柴又，東南幹線シールド工事実態調査報告書，昭和56年。
- 31) 東京都下水道局：上下複線シールド工事実態調査に伴う解析，昭和58年。
- 32) 平田武弘：土圧式シールド掘削に伴う軟弱粘性土地盤の挙動と施工管理，土木学会論文集，No. 355，pp. 114~123，1985。
- 33) 山田孝治ほか：有限要素法によるシールド掘進に伴う地盤沈下解析(その2)，第15回土質工学研究発表会，pp. 1553~1556，昭和55年。
- 34) 桑原 力・小林健郎・青山菊男：シールド現場で行った計測例，トンネルと地下，第13巻1号，pp. 27~34，1982。

(1986.4.23・受付)

● ご案内 ●

土木学会論文集編集委員会第VI小委員会

『土木学会論文集・第VI部門』は年2回(3月，9月)の発行です。別掲の投稿要項等をご覧のうえ，多数の論文をお寄せ下さい。

なお，不詳点等は事務局編集課(電話 03-355-3441 番，内線 153) までお願いします。