

シールド掘進中の負荷土圧に伴う近接構造物への影響検討解析手法 NUMERICAL ANALYSIS OF EARTH PRESSURE ACTING TO ADJACENT UNDERGROUND STRUCTURES

黒川信子¹, 草深守人², 田中 弘³, 吉田 保⁴
Nobuko KUROKAWA, Morito KUSABUKA,
Hiroshi TANAKA and Tamotsu YOSHIDA

Several finite element procedures for frictionless- or friction-contact problems have been proposed for the case in which node-to-node contact no longer holds. One of the typical computational algorithms have been generalized by using a perturbed Lagrangian and localized mixed concepts. The numerical parametric analyses carried out by using the algorithm to study the contact influence between a shield machine and the surrounding ground. In this paper, we describe the results of the analyses and a mechanism of the excessive loading pressure occurring during shield tunnel construction.

Key Words : shield tunnelling, contact problem, excavation analysis, elasto-plasticity, earth pressure, adjacent underground structure

1. まえがき

過密化した都市部におけるシールドトンネルの施工環境は、ますます厳しい規制が要求される状況にある。特に、大都市圏では、新設トンネルと既設構造物との離間距離あるいはトンネル直上の土被りを十分確保できないケースが増加している。このようなシールドトンネルの施工では、既設の近接地下構造物や地上構造物の機能と安全性を保証できる施工技術の開発が重要課題となっている。

過去のシールド施工実績調査によると施工時に現れる既設構造物や周辺地盤の変状は、切羽土圧や掘削による排土量の過不足によって切羽前方に発生する現象と、テールボイド部の応力解放や裏込めの施工性に大きく左右されるシールド機後方に生じる現象の他に、シールド機スキンプレートと地盤との接触摩擦が主因と考えられるシールド機通過時の現象に大きく分類できるものと考えられている[1]。一方、施工過程で発生するこれらの力学現象を事前に予測する手法として、主に数値計算力学の立場から様々な研究がなされ、実際問題に適用されてきた。しかしながら、これらの解析手法では、テールボイドや切羽面での応力解放率を過去の計測データに照らして強制的に設定したり、シールド機スキンプレートやセグメントと地盤面との接触条件を無視せざるをえなかった。このため、いずれの手法も便宜的手法であり、実際の施工過程をさらに忠実に反映した数値解析手法の飛躍的な進歩に限界を生じているものとする。著者らはこのような解析上の諸問題の多くが、セグメントと地盤面との接触を含むテールボイドの閉塞、推進移動するシールド機の外周面およびカッター面盤面と地盤との接触条件を便宜的方法によらず純粋に力学的に扱うことによって解決できるものと考え、これまでに2・3の解析事例を示した[2],[3]。本報告は、これらの接触条件に加えて掘削進行過程と地盤の材料非線形問題を同時に扱った数値解析結果について考察したものである。

¹学生会員 法政大学大学院建設工学研究科(修士)

²正会員 工博 法政大学工学部土木工学科教授

³正会員 修士 日本工営(株)都市土木部第一課長

⁴正会員 工博 日本工営(株)中央研究所開発研究部部長

2. 解析手法

接触問題に対する有限要素解析では、ギャップ要素、インターフェイス要素およびジョイント要素と呼ばれるような、接触条件を前もって想定した接点間や要素間に導入する方法が広く用いられてきた。しかしながらこれらの要素は、互いに接触する要素や接点間の接触境界に沿った相対変位が大きい場合や、あるいは前もって接触面を規定することが難しい問題に対して応用することが出来なかった。このような問題に対する解析アルゴリズムとして、接触面の接点間および要素間において接触条件を強制しない接触セグメントの概念が摩擦のない場合に対してSimo[4]等により提案されており、摩擦を考慮した問題に対してもShyu[5]等により示された。これらの方法では接触条件を任意の位置に課することができるが、互いに接触する二つの接触境界面を含む有限要素分割をほぼ同寸法にする必要があった。武田[6]は、Simo等の方法を摂動型ラグランジュ法と混合法の概念に基づいて拡張・一般化することにより、接触解析のための汎用的方法を提案した。この方法は、変形する物体間あるいは変形する物体と剛体との接触問題を摩擦を含めて扱うことができ、さらに接触境界周辺の有限要素を任意に分割しても安定した解が得られる。

一方、シールドトンネルの掘削問題は典型的な接触問題であり、掘削面での接触変形を満足した解析を行わない限り、トンネル周辺の地盤の応力状態や変形を正しく表現できないものと考えられる。そこで、以下の解析では、掘削の進行によって連続的に変化するシールド機等の接触条件として武田の方法を採用することにより、施工行程を出来る限り再現した図-1に示すような掘削解析を実施した。この解析サイクルは二重の増分ループからなり、外部ループはセグメント1リング分の掘進サイクルを表し、内部ループは1リング分に対する土要素の掘削、セグメント挿入およびシールド機の推進を表現する。なお、切羽面には、セグメント1リング分の土要素を掘削すると同時にシールド機推力と泥水圧に相当する圧力を作用させ、同様にテールボイド部の掘削地盤面には裏込め注入圧を作用させることができる。さらに地盤材料は弾塑性材料として扱うこととし、その構成方程式には、解の精度と収束性を高めるために適応型接線作用素を導入している[7]。これにより、従来の無限小増分を仮定した構成方程式に比較して格段に大きな増分に対しても精度を保証することができ、長距離にわたって推進移動するシールドトンネルの掘削問題を効率的に解析できる。

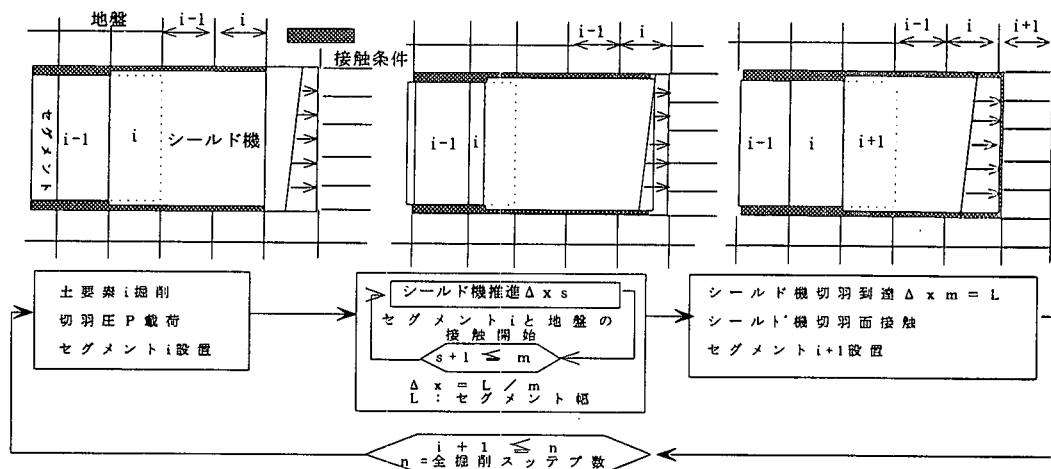


図-1 シールドトンネルの施工過程を表現した掘削解析の概念図

3. 解析ケースと解析条件

文献[3]では、現場計測データが準備されている「東京都下水道局の竹の塚幹線」のシールドトンネルを例に解析を行い、計測値をほぼ再現できることを示した。しかしながら、施工条件や地盤条件の違いが、トンネル周辺地盤の変形や既設構造物に与える影響とどのような関係にあるかまでは検討していない。本解析では、この点に力点をおき、主に施工の良否とシールド機外周面と地盤との摩擦の大小が、地盤の隆起や沈下に及ぼす影響、あるいは近接する既設構造物に作用する負荷土圧の発生等について数値解析結果から検討を加えることとする。

表-1 解析ケースと解析条件

施工状態タイプ	摩擦係数	その他の条件
A	0 0.15 0.3 0.45	地盤条件 (均質一様) 弾性係数 = 100 kgf/cm ² ポアソン比 = 0.3 粘着力 = 1.0 kgf/cm ² 内部摩擦角 = 20°
B	同上	裏込め注入率 テールボイド量の100%、70%
C	同上	予掘り率 テールボイド量の0%、10%
D Bタイプ+既設構造物 既設構造物の剛性	同上	セグメント/地盤の摩擦無し シールド機/切羽の摩擦無し シールド機外周/地盤の摩擦有り 切羽面載荷圧力P ジャッキ推力 = 3.0 tf/m ² 泥水圧 = 泥水圧比 1.2 裏込め注入率は無視

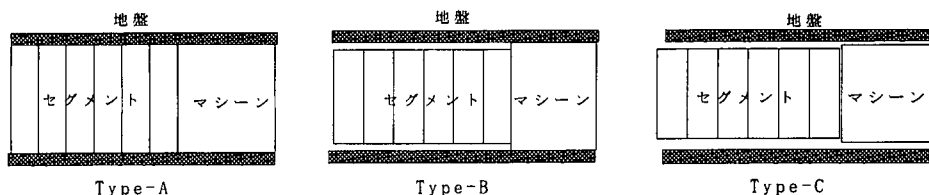


図-2 想定した施工条件 (Aタイプ: 理想的施工, Bタイプ: 裏込め注入不良, Cタイプ: 裏込め注入不良+予掘)

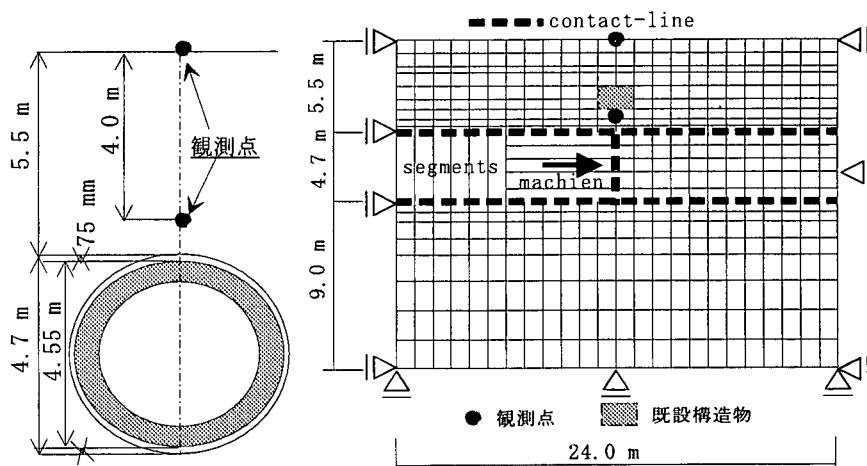


図-3 有限要素分割図 (既設構造物無しでは既設構造要素を土要素に置換える)

施工条件の良否については、切羽での掘削径、テールボイド部の裏込め注入量および切羽の作用圧力に絞って図-2に示す仮想の3タイプについて解析した。Aタイプは切羽での予掘りが全くなく、かつテールボイドが完全に同時裏込めされた最も理想的な場合であり、これに対してBタイプはテールボイドの70%が同時裏込めされた場合、CタイプはBタイプに加えて切羽での予掘りが発生した場合を示す。地盤条件については、地盤とシールドスキンプレートとの摩擦の大小が周辺地盤や既設構造物に与える影響に絞ってを考察するものとした。したがって地盤そのものの材料条件は均質一様材料として上記3タイプで共通とした。さらに、トンネルに近接する既設構造物に作用する負荷土圧の発生状況を調べる目的で、トンネル直上0.3D (D:トンネル径)の位置に横断方向の線形構造物が存在するDタイプについても解析することとした。ただし、この場合の施工条件は上記のBタイプを採用する。さらに、既設構造物の紙面直交方向の剛性を考慮するため、水平方向と鉛直方向にバネ要素を挿入している。以上の全ての解析ケースとその条件を表-1にまとめた。また、図-3に解析に使用した有限要素モデルを示す。

4. 地盤の沈下・隆起に関する考察

図-4は、シールド機の推進に伴って生じるトンネル直上部（図-3に示した測点）での地表面沈下と地盤内沈下をシールド機外周面の摩擦係数の大小によって比較したものである。これらの解析結果では切羽圧を全てのケースで同一条件としていることから、沈下および隆起の相違はシールド機外周面摩擦とテールボイドおよび予掘りによる効果として現れている。いずれのケースも、切羽到達以前は切羽圧の不足による先行沈下、シールド機通過中の摩擦による隆起、通過後のテールボイドによる後続沈下の3つのタイプの変形を生じており、実際のシールド掘進時に観測される典型的な3タイプの沈下・隆起現象を表現している。また、地表面の先行沈下が隆起に転じるシールド機の位置と観測点断面までの距離は土被り深さにほぼ等しく（シールド機先端上部と観測点を結ぶ方向が粘性土の土圧論に基づく破壊面の方向にほぼ一致）、この点を境に観測点は主働土圧状態から受働土圧状態に移行するものと考えられる。一方、トンネル天端に接近した観測点では、シールド切羽上部の影響が現れにくいため、主働状態から積極的に受働領域に移行するまでの区間が長いようである。

シールド機外周面の摩擦が周辺地盤の変形に及ぼす影響は、シールド機に接近した地中よりもむしろ地表面付近に顕著に現れ、テールボイドや予掘りのない理想的な施工条件でもシールド機周辺地盤の塑性ひずみの発生により後続沈下を生じている。さらに、隆起量に対するテールボイドの影響は相対的に小さく、かつ予掘りによる摩擦の低減の影響が大きいことから、隆起は主に摩擦により支配されるようである。

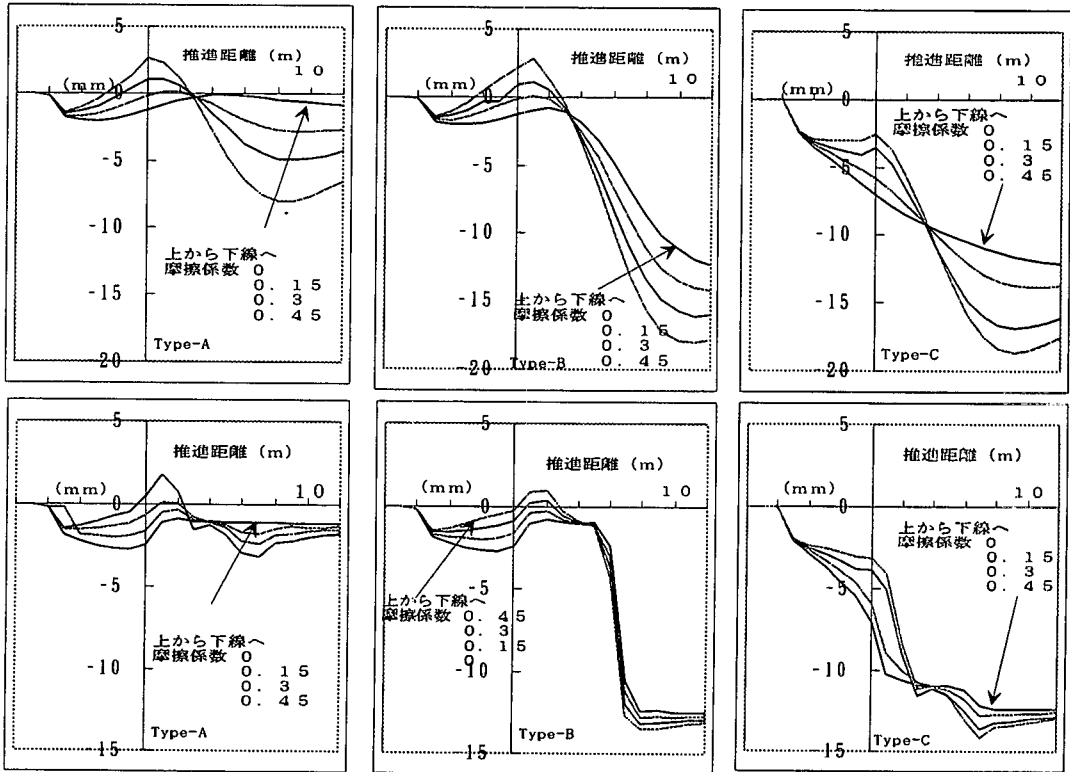


図-4 シールドトンネルの掘削進行に伴う地盤の沈下・隆起状況（上段：地表，下段：地中）

図-5はこれらの現象をさらに明確に表すために図-3のタイプBに関する地表面での最大隆起と最大後続沈下を摩擦のない場合を基準としてその比率を示したものである。ただし、隆起については最大先行沈下と最大隆起の相対的な差を表しているのに対して沈下は絶対沈下量を意味する。テールボイドは、明らかに先行沈下や隆起にさほど重要な影響を及ぼすものでなく、後続沈下を支配し、シールド機テール部が通過すると同時に急激な沈下を発生させる。他方、切羽での予掘りは先行沈下に重大な影響を与え、切羽到達後も継続的に沈下を生じることとなる。また、予掘りによりシールド機通過時の隆起はほとんど生じなくなる。なお、解析での予掘りは、シ

ールド機の蛇行によりシールド機外周面が地盤に及ぼす側圧の効果を考慮していないことを注意しておく必要がある（ただし、本解析に使用したプログラムでは蛇行を伴う推進過程も扱うことができる）。

以上の解析結果の考察から、シールドトンネルの掘削による地盤の変形を抑制するために、先行沈下を押さえるために切羽圧を大きめに設定するとシールド機通過時の隆起が過大となり、隆起を押さえるために切羽圧を低めに設定すると先行沈下を防止できなくなるといった解決困難な問題を抱えているように思われる。このような問題に対する対策（後述する負荷土圧の低減対策についても共通する）は、従来から指摘されていた、シールド機外周面の摩擦抵抗とジャッキ推力等の切羽圧の適切な管理、テールボイドの確実な同時裏込め注入技術の開発に加えてさらに以下のような技術の可能性を探ることも有効かもしれない。

- 1) シールド機による摩擦抵抗を極力低減するためのシールド機外周面の耐久的な表面処理。
- 2) あるいは、切羽での掘削径をシールド機外径より若干大きめに掘削するカッターとこの予掘り部分の空隙を即時に注入充填する機構を備えたフリクションカット型シールド機の開発。
- 3) さらに、以下の性能を出来る限り確保した上記の充填材の開発。
 - ・シールド機外周面との付着または摩擦抵抗を無視できること。
 - ・シールド機離脱直前に硬化強度発現することによりテール部離脱直後の掘削地山面を支持すると同時にテールボイドを一時的に確保し、確実な裏込め注入が可能であること。
 - ・また、できれば硬化後の注入材と裏込め材により確実な止水が可能であること。

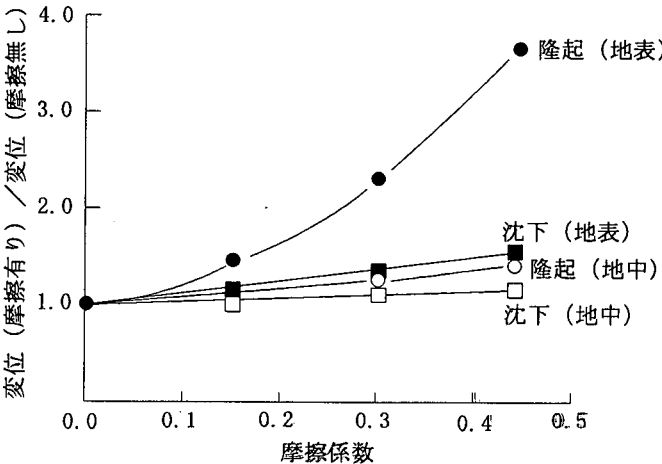


図-5 シールド機外周面摩擦が地盤の隆起・沈下に及ぼす影響

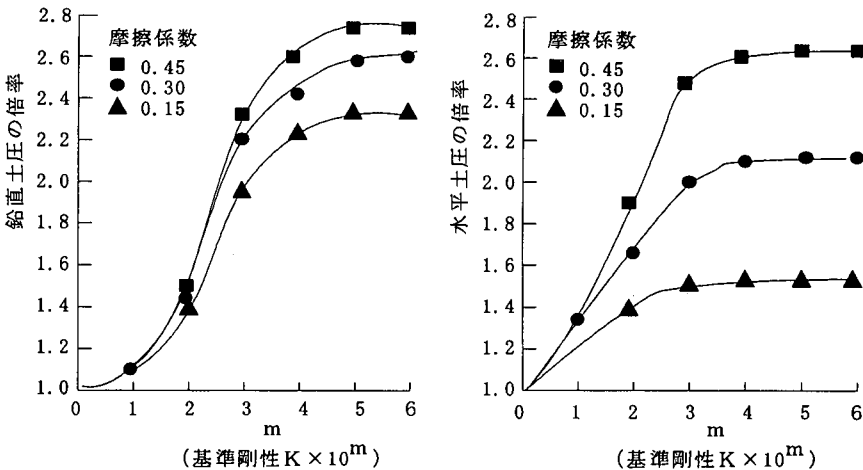


図-6. 既設構造物に作用する最大土圧と摩擦係数

5. 近接構造物に作用する負荷土圧に関する考察

図-6は、シールドトンネルと直交して近接する既設の線状構造物に作用する鉛直および水平方向の土圧の最大値を、既設構造物の剛性との関係で示したものである。図中の基準剛性 K はほぼ地盤に相当する剛性としている。また、発生する土圧の倍率は自然状態での静止土圧との比率を表している。

負荷土圧は既設構造物の剛性の増加に伴って増大し、その剛性が地盤に対して相対的にはほぼ剛体と見なされる領域で一定値に収束している。また摩擦係数が大きいほど負荷土圧は大きく、この傾向は鉛直土圧よりも水平土圧の増加に顕著である。これらの負荷土圧はあくまでも本解析条件に対するものであり、切羽圧、トンネルと既設構造物の形状とその位置関係あるいは地盤条件等によって異なることは当然である。しかしながら、地盤に対して剛体に近いような剛性を有する既設構造物が近接している場合は、最大で静止土圧の2～3倍程度の土圧を想定する必要があるかもしれない、さらに今後の検討が必要と考える。

6. あとがき

シールド機およびセグメントと掘削地盤面との相互作用を幾何学非線形問題としての接触問題としてとらえ、これに地山の材料非線形問題を連成させた掘削解析方法を示し、シールドトンネルの施工過程をほぼ完全に再現した解析が可能であることを明らかにした。ここで示した解析方法は、セグメントの接触境界に拘束されるテールボイドの閉塞過程やシールド機外周面が接触摩擦によって地盤を変形させる過程あるいはシールド機面盤面や泥水圧による切羽面の拘束効果等の従来の簡易的方法では扱いにくかった解析条件を力学的にごく自然な形で取り込むことができる。これにより、シールドトンネルの施工過程で観察される地盤のさまざまな挙動を再現できるようになった。ただし、これらの挙動の定量的な把握はさらに現実の問題を解析し、考察していく必要がある。

最後に、本解は析有限要素法汎用プログラムFENIXにより実施されたことを付記し、本プログラムを快く利用させて頂いた武田技術開発の関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 吉田, 山田: 泥土圧シールド掘進時の切羽土圧と周面摩擦力について, 土木学会論文集, No.445, 第3部門-18, 1992.
- [2] 吉田, 田中, 草深, 武田: 接触問題として扱ったシールド掘進時の地盤変状解析, 第5回トンネル工学研究発表会論文集, 1995.
- [3] 黒川, 草深, 田中, 吉田: シールド機と地盤の接触摩擦を考慮したシールド掘削解析, 土木学会第51回年次学術講演会集, 1996.
- [4] J.C.Simo and T.A.Laursen: An augmented Lagrangian treatment of contact problems involving friction, Comput. Struct., Vol.42, No.1, 1992.
- [5] S.C.Shyu, T.Y.Chang and A.F.Saleeb: Friction-contact analysis using a mixed finite element method, Comput. Struct. Vol.32, No.1, 1989.
- [6] 武田: 有限要素法による接触問題の理論と計算, 法政大学計算センター研究報告, 第4号, 1990.
- [7] 武田, 草深: 異方性を考慮した汎用的な静水圧依存型弾塑性構成方程式と数値アルゴリズム, 法政大学計算センター研究報告, 第9号, 1996.