

Ⅲ - B90

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に関する研究

法政大学大学院 学生会員 黒川信子

法政大学大学院 正会員 草深守人

日本工営 正会員 田中 弘

日本工営 正会員 吉田 保

1.はじめに：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。しかしながら、施工過程で発生する力学現象を事前に予測する解析手法では、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。そこで本論文は、まず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手法について述べた後、この手法を用いた数値解析結果に基づき、シールドトンネルの施工条件が既設構造物や周辺地盤の変状に及ぼす影響について考察している。

2.解析手法：本研究で示した解析手法は図1に示すように二重の増分ループからなる。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る。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。この二重ループからなる全ての処理過程で、シールド機と地山掘削面、セグメントと地山掘削面のそれぞれの境界において、摩擦を含めて接触条件を満足させる。また、この接触境界は、シールド機の推進と掘削要素の削除によって変化・更新されることになる。

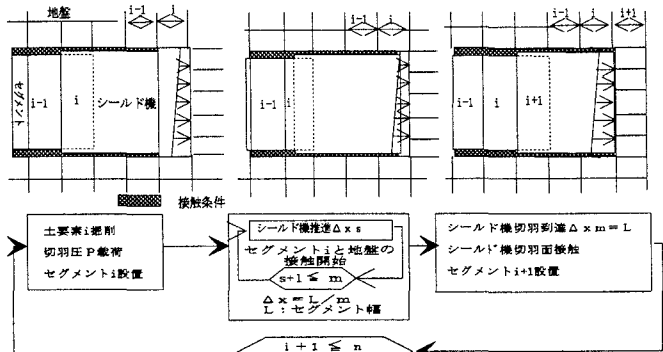


図1 シールドトンネルの施工過程を表現した掘削解析の概念図

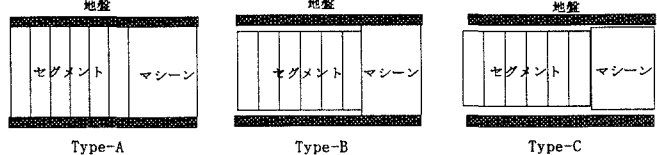


図2 想定した施工条件(Aタイプ：理想施工、Bタイプ：裏込め注入不良、Cタイプ：裏込め注入不良+予掘)

2.計算例及び考察：解析タイプは施工条件の良否によって図2に示す3タイプ(A.B.C)に加えて、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場合(D)の4タイプである。解析結果は、いずれのケースも、実際のシールド掘進時に観測される典型的な3タイプの変形モード、すなわち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を表現できた。図3はこれらの現象をさらに明確に表すためにタイプ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。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が、シールド機通過時の隆起はほとんど生じなくなる。図4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

*184 小金井市梶野町3-7-2 法政大学工学部

*102 千代田区麹町5-4 日本工営(株)

*近接施工構造物、負荷土圧、接触解析、有限要素法

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。

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の技術として主に、ジャッキ推力等の切羽圧の適切な管理とテールボイドの確実な同時裏込め注入技術の開発が今日までの中心的課題として取上げられてきた。そこで、これらの技術的対策の効果の確認を含めて表1に示した解析条件で数値解析を行ったところ、E→F→G→H→Iと改善を加えていくことによって、隆起・沈下などの地盤変位を十分に抑制できることを示した。さらに、従来から開発され続けてきた前期の技術に加えて、シールド機外周面の摩擦抵抗の低減対策が重要であることを指摘した。

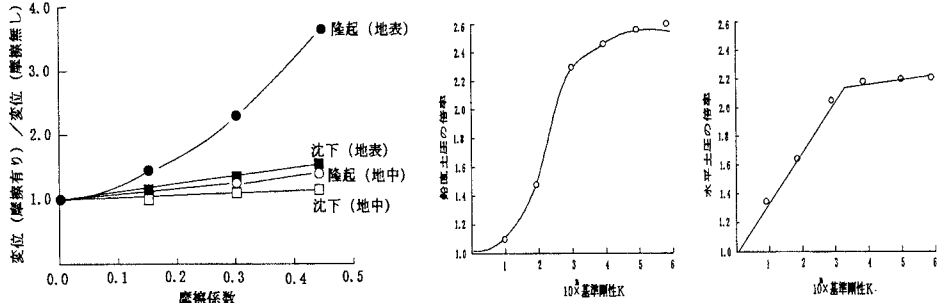


図3 シールド機外周面摩擦が地盤の沈下・隆起に及ぼす影響 図4 既設構造物に作用する最大土圧と摩擦係数

3. 実際問題への適用：現場計測データが準備されている「東京都下水道局竹の塚幹線」のシールドトンネルを例に解析結果と計測値の比較を行うことによって実際問題への適用性について考察した。図5は、シールド機の推進に伴って測定されたトンネル直上部地盤内の沈下量と負荷土圧（シールド機の推進によって発生する水平方向土圧の増分量）を本解析手法による計算値と比較したものである。沈下量及び負荷土圧の計算値は、実測値と定量的にも定性的にも一致している。ただし、沈下及び負荷土圧の量的、モード的一致は、シールド機と掘削地盤面の摩擦係数、掘削切羽面に負荷する泥水圧およびテールボイド量の見積りに大きく左右され、それらの適切な選定が重要である。特に、シールド機周面の摩擦抵抗量と切羽面の泥水圧の相対的比率の評価が実測値を解析で表現する上で重要な要素となっている。

4. 結論：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。

また、本研究で示した解析手法に従って、シールドトンネルの掘削解析を実施し、さまざまな側面から解析結果を考察し、例えばシールド機と地盤の摩擦によって既設の近接構造物に及ぼす負荷土圧のおよその範囲を示唆し、この負荷土圧の低減や周辺地盤の変形を抑制するための技術開発課題を提示することができた。

さらに、実際の現場計測値と解析値の比較から、本解析手法により、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ことを示した。

表1 解析条件

施工条件タイプ	摩擦	予掘	テールボイド裏込め率	泥水圧
E	C	あり	70%	0.5
F	B	あり	70%	0.5
G	A	あり	100%	0.5
H	A	なし	100%	0.5
I	A	なし	100%	0.7

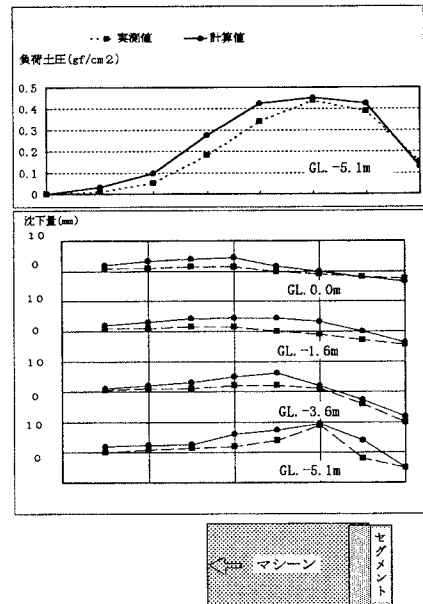


図5 解析結果と実測値の比較

【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) 黒川, 草深, 田中, 吉田：シールド掘進中の負荷土圧荷に伴う近接構造物への影響検討解析手法, 第6回トンネル工学研究発表会論文集, 1996.