

20. リングシールド工法のセグメント組立実験

住友建設(株)：金子 正士
 東急建設(株)：毎田 敏郎
 (株)銭高組：鶴岡 胤英

1. はじめに

大断面化、大深度化、異形化など、近年多様化してきた都市部の地下構造物に対するニーズに対応できる新しいシールド工法として、リングシールド工法の研究開発を進めている。本工法は、任意形状のトンネルの覆工部のみをシールド掘削し、覆工体を構築した後に内部の土砂掘削を行ってトンネルを完成させる新しいトンネル工法である。

研究は五洋建設、住友建設、銭高組、東急建設、日本国土開発、不動建設の6社の共同で、三菱重工業、住友金属工業の協力の下に行っている。

本文では、リングシールド工法の概要とセグメント組立実験について報告する。

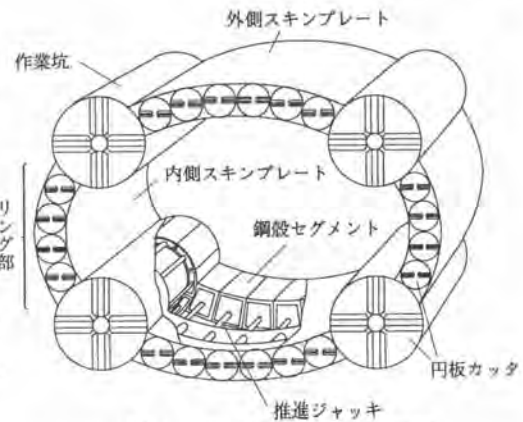


図-1 リングシールド概要図

2. 概要

2.1 工法概要

リングシールド工法では、覆工体部分を先行掘削するため、内外二重のスキンプレートを持つ筒状のシールド機を使用する。したがってその断面形状はリング状となり、リングは覆工厚に相当する厚さを有する。リングの一部は、セグメントの搬送・組立や掘削土砂搬出などのため、円筒状に拡幅されている。シールド機は、この拡幅された作業坑部（2ヶ所以上必要）と、その他の部分であるリング部より構成されている。作業坑の配置とリング部の線形は、シールドトンネルの断面形状に応じて自由に選定できる。シールド機は多軸ビット等の掘削装置の後方に推進ジャッキを備え、組み立てられたセグメントに反力を取り、リング部と作業坑部が一体となって同時に掘進する。

セグメントは、作業坑からリング円周方向に押し出し、組み立てる。セグメントはトンネル円周方向に中空部を有する合成セグメントとする。

内部地山は、リング状覆工体の完成後に掘削す

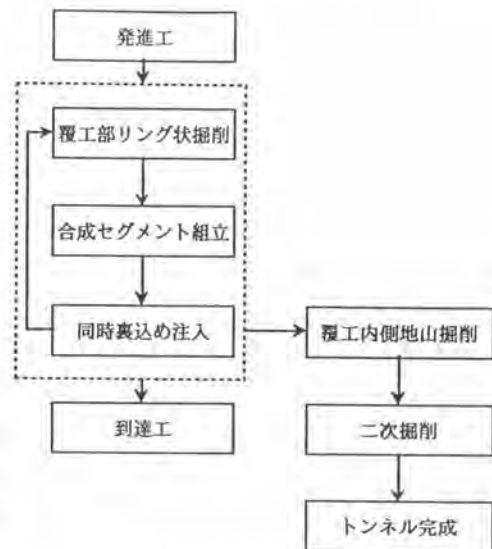


図-2 施工フロー

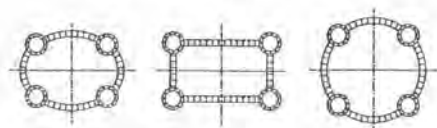


図-3 トンネル断面形状例

る。このため、掘削土は産業廃棄物とならず、処理は容易になる。

図1、図2に、リングシールドの概要図と施工の全体フローを示す。このようにリングシールド工法は、任意形状の大断面トンネルを効率的に、かつ安全に構築できる新しいトンネル工法である

2.2 工法の用途・特長

本工法は大断面トンネルにその特長を活かすことができる。そこで、道路、鉄道、共同溝、調整池、地下河川、地下駐車場などに有効に利用できる。また、本工法は以下の特長を有する。

- ①作業坑間を直線または円弧で構成することにより、大断面トンネルの形状を目的に応じて任意に選定できる（図3参照）。
- ②覆工部のみをシールド掘削するため、設備の軽減化と産廃土の減少が可能である。内部地山の掘削土は普通土として取り扱うことができる。
- ③シールド掘削断面積が小さくなることから切羽が安定しやすく、掘削に伴う沈下等の地盤変形が小さくなる。また、補助工法も軽減できる。
- ④シールド機の現地組立の軽減化や、一次覆工と二次覆工の並行作業が可能であることから、工期の短縮が図れる。
- ⑤従来のシールド工法と比較すると、シールド機が小規模になることから、コスト低減が期待できる。

2.3 作業坑

本工法ではトンネルの覆工部のみを先行掘削する。従って、掘削土の搬出、セグメント搬送、リング部の覆工作業を行うために、作業坑が必要となる。

リング部覆工をセグメントにより構築する場合、作業坑から特殊エレクタにてスライドさせながら組み立てていくことから、リング部は同一曲率とする必要がある。そこで、作業坑は曲率変化点に設置する。作業坑の大きさは、桁高1mのセグメントを利用する場合で、セグメント外径にして3.6m程度は必要である。なお、シールド掘削完了後の作業坑は、そのまま残して共同溝・避難坑等として活用することができる。不要な場合は、作業坑内に本体と一体の構造物を構築した後に撤去する。

2.4 覆工

本工法を3車線道路トンネルに適用すると仮定すると、RCセグメントでは覆工厚が1mを越える場合もあり、施工時重量が非常に大きくなる。このため、図4に示すように、トンネル円周方向に中空部を有する合成セグメントを考案した。主な特徴は以下の通りである。

- ①同一厚さのRC構造にくらべて、限界曲げモーメントが大きくなるため、RC構造より桁高を小さくできる。
- ②セグメントは、複数の作業坑に1台ずつ装備する特殊エレクタを使用し、作業坑内でピース間を結合しながら、リングの円周方向に順次スライドさせながら押し込む。よって、リング間継手は、リング間の接合と、セグメントを作業坑からスムーズに送り込むためのガイド機能を有する必要がある。これらの条件を満たすため、

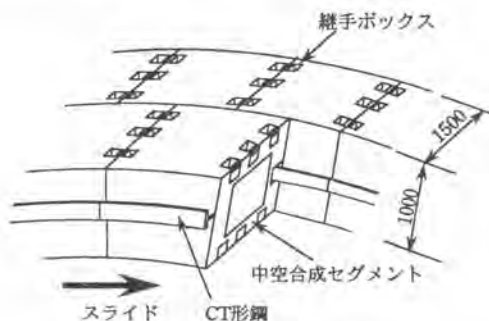


図4 合成セグメント概要図

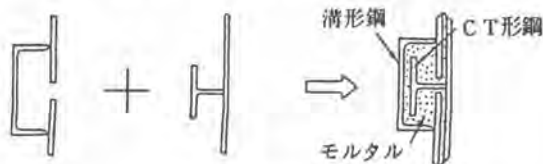


図5 リング継手構造

図5に示すようにチャンネル形鋼とCT形鋼を組合せた構造（CT継手）とした。組立セグメントは、既設セグメントのCT形鋼とシールド機に設置したガイドの間をスライドし、覆工を形成する。また、組立後は継手部にモルタル等を注入し、せん断力伝達性と止水性を向上させる。

③ピース間継手については、作業坑内で組み立てることができるため、継手ボルト接合をセグメントの内側だけでなく外側でも行うことができる。このため、通常弱点となる継手部の剛性を増すことができる。曲げモーメントが卓越する円形以外の断面形状でも、高強度の継手が提供できる。

2.5 シールド機

リングシールド機はトンネル外殻部のみをリング状に先行掘削するため内外二重のスキンプレートを持つ掘削機であり、リング部と作業坑部から構成される。リング部と作業坑部は一体であり、同時に掘進する。

掘削工法については、大断面シールドで実績の多い泥水工法を基本とした。泥水工法によれば、最も坑内設備が簡素化でき、作業坑断面を可能な限り縮小してトンネル断面の効率的利用を図ることができる。切削方法は、作業坑部は、回転面板方式とする。また、リング部は、多軸ビットタイプ、スクリーカッタタイプ、ドラムカッタタイプの中から選定する。ただし、地盤条件に対する適応範囲は多軸ビットタイプが広いと考えられる。

2.6 セグメント組立機構

リング部セグメントは、複数の作業坑に1台ずつ装備する特殊エレクトラを使用し、作業坑から1リング前のセグメントの組み立てガイドキー（CT形鋼）およびシールドテールに設けたガイドに沿って送り込み、スライドさせ、順次組み立てる。このエレクトラは6つの自由度を有しておりピース間の面合わせにおいて微調整が可能である。また、リング部セグメントと、作業坑部セグメントの両方を組立てることができる。ボルト締めは、作業坑内にて、セグメントの内側と外側の両方の継手で行う。リング部1スパンのスライドが完了すると、シールド機テールプレートに装備した位置合わせジャッキにより、微調整を行ってから、シールドジャッキで固定する。

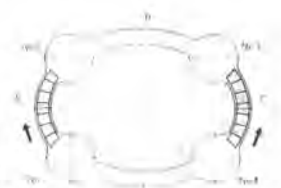
図11にリング部セグメントと作業坑部セグメントの組立手順を示す。

3. セグメント組立実験

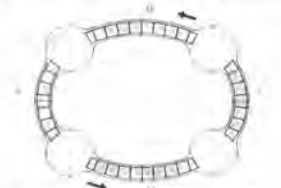
3.1 実験の目的

リング部セグメントの組立方法は前述のように、従来工法と大きく異なっている。また、作業坑から搬入できるように細かく分割されており、その組立サイクルが掘進速度に大きく影響する。このため、リング部セグメントの良好な施工性を得ることが当工法の完成に不可欠と考えられる。そこで、リング部セグメントを対象に3車線道路トンネルを想定した実大規模の地上組立実験を行うこととした。実験の主な目的としては、

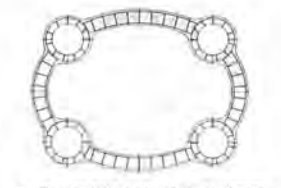
- ・リング部セグメントの組立施工性の確認
- ・組立精度の把握
- ・ガイド兼用継手、マシン側ガイドの最適な形状、強度の確認



1 作業坑No1とNo4から、リング部AとCのセグメントを組立てる。



2 作業坑No1とNo3から、リング部BとDのセグメントを組立てる。



3 作業坑部のセグメントを組立て、掘工が完了する。

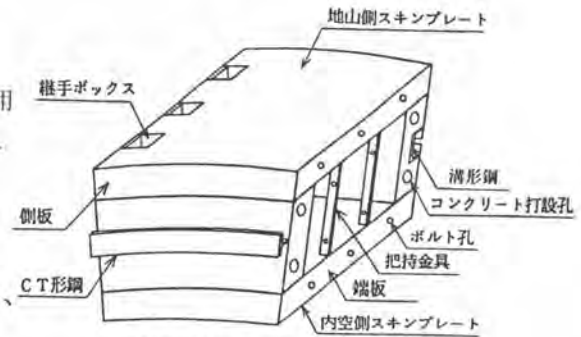
図-6 セグメント組立手順

- ・位置合わせジャッキの配置、必要能力の調査
- ・エレクターのセグメント組立に必要な機能の調査
- ・サイクルタイムの把握

3.2 実験装置

1) セグメント

高強度でかつ軽量化が可能な、トンネル円周方向に中空部を有する、合成セグメント（厚さ1.0m、幅1.5m、長さ1.0m、重量約2.4tf）を採用した。ピース間継手は、施工性が良いナット埋め込みタイプの直ボルト継手とし、油圧レンチを用いて所定のトルクを導入した。



注) 鋼殻内部にコンクリートを充填する。

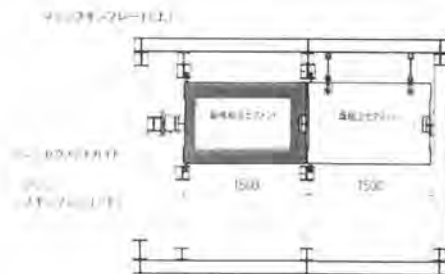
図-7 合成セグメント

2) エレクター

リング部セグメントは、桁高が1.0mと大きく、しかも内外のボルト留めが必要なため、ピース間の面合わせにおいて、微調整が必要と予想された。このため、6自由度を持った特殊エレクターを製作した。

3) 実験架台

実験架台は、横楕円形状の3車線道路トンネル（セグメント外径16.8m×12.4m）の作業坑間でのセグメント組立を想定して製作した。シールドのテール部を再現するため、既設側セグメント1スパンとマシン側ガイドを鋼材に固定し、さらにシールドのテールプレートに当たる日鋼を内外3cmのクリアランスでセットした。セグメントは、前述の特殊エレクターを用いて、その間をスライドさせて組み立てた。



(1)-(1) 断面図

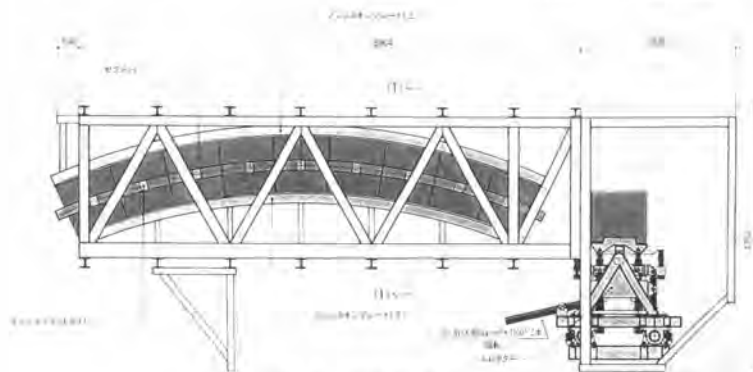
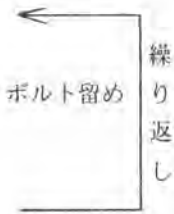


図-8 実験装置

3.3 実験手順

実験は以下の手順で行った。

- ① 既設セグメント、マシン側ガイドを所定の曲率、変位でセット
- ② セグメントをクレーンで供給し、エレクターに把持
- ③ エレクターを旋回、位置合わせジャッキで前ピースと面合わせし、ボルト留め
- ④ 押し込みジャッキ4本で押し込み
- ⑤ 落下防止処置
- ⑥ 把持ピンを外し、エレクター復帰
- ⑦ 1スパン完了後、位置合わせジャッキで最終位置合わせ
- ⑧ 組立精度確認
- ⑨ 組立セグメント解体、次ケース準備



3.4 実験ケース

実験は、表1に示すようにトンネルの上部、下部、側部のセグメント組立について、それぞれセグメントのピッチング、つぶれなどの施工誤差を想定し、実施工におけるリング部セグメント組立を模擬して行った。

表-1 実験ケース

| リング位置 | 既設セグメント | マシン側ガイド |
|--------|--|--------------|
| ①上部 | ①変形なし | ①ずれなし |
| ②下部 | ②曲率大or小 | ②ずれあり |
| ③側部 | (セグメントつぶれ想定) ③For 上の傾き (ピッチング想定) | (クリアランス偏り想定) |
| 3ケース × | 3ケース × | 2ケース |

3.5 実験結果

1) セグメントの押し込み

上、下、横の各リング位置とも、既設セグメントの変形、ローリング、ピッチングなど想定されるさまざまな状態において、若干の推力の増大、部分的な継手ひずみの増大はあるものの、スムーズに押し込めることが確認できた。特に当初懸念されたピース間継手の段差等に引っかかり、押し込み不能となる状態は起きなかった。

2) 最終位置合わせ

図9にセグメントの組立誤差の一例を示す。セグメントは所定の形状より±10mm程度の誤差範囲内で組み立てられた。これから、作業坑に接する両端部（リング部と作業坑部の接続部）においてセグメント位置を調整することで、リング部セグメントの組み立て精度は、作業坑セグメントの組み立てに支障しないことがわかった。

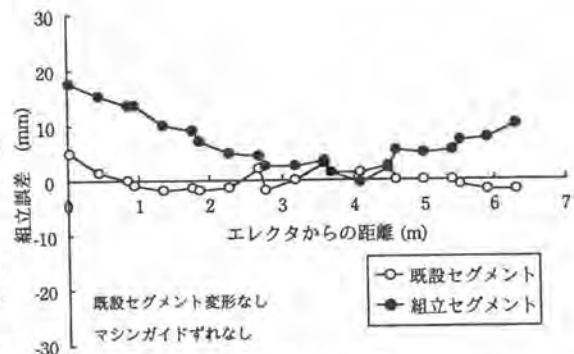


図-9 側部セグメント組立誤差

3) リング間継手

図10に示す位置で既設セグメントのCT形鋼ウェブに発生するひずみを測定した。図11に示すように、ひずみレベルは全体的に小さく、ガイドとしての強度に問題ないことがわかった。

4) エレクター機能

セグメント組み立て時には、今回装備した6自由度がすべて必要だった。また、セグメントピース間のボルト接合の際の面合わせに必要なのほかのエクスタ機能が確認できた。

5) 施工サイクル

施工サイクルを検討すると、3車線道路トンネル規模では、1日3リング(4.5m)程度の掘進が可能であることがわかった。

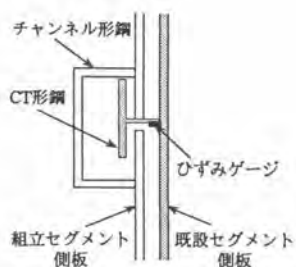


図-10 ひずみ測定位置



写-1 側部ケース組立実験状況

4. おわりに

都市部の地下空間開発は、地上の土地利用状況を勘案すると、今後ますます重要性を増していくと考えられる。このような状況下で、本研究会では、都市部において任意形状の大断面トンネルを効率よく築造できる、リングシールド工法について研究を行っている。

これからの研究計画は、シールド機については、リング形状に起因する掘削性能についてモデル地盤を用いた模型実験および数値解析を行い、マシンの推進特性、切羽安定性、地山への影響等を明らかにして本工法の実現に向けて有効なデータを蓄積する予定である。

また、覆工についても、実験を含めた詳細検討によって、セグメント本体および継手の耐荷機構を明らかにしていく予定である。

今後は、リングシールド工法の特長を生かしながら一層の研究を進め、ますます大断面化・多様化する都市トンネルへの対応力を高め、実現を目指す所存である。

なお、本研究を進めるにあたっては早稲田大学小泉教授に貴重なご意見を頂いており、ここに深く感謝する次第である。

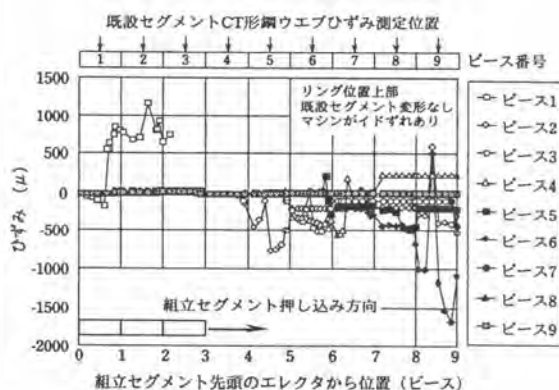


図-11 既設セグメントCT形鋼ウェブひずみ