

# 分割フード式シールド接合工法の開発

— 既設管に地中で斜め接合可能な『分割フード式シールド接合工法』 —

福居雅也\* 稲場啓能\*\*

## 1. まえがき

下水道シールドトンネルにおいて流入管などの地中接合を行う場合、浅深度では接合箇所近傍に立坑を築造し地盤改良後に接合する施工法が一般的である。また、立坑設置が困難な場合や大深度では、トンネル坑内から凍結工法や大規模な地盤改良を実施して施工している<sup>1)</sup>。

最近ではシールド機で直接接合する工法も開発され実用化されつつある。しかしながら、これらの工法は直角接合が基本であり、斜め接合では大規模な地盤改良などの補助工法を併用せざるを得ないことなどから新たな技術開発が期待されている。

このような背景のなか、従来は困難であった地中内で斜めに接合を可能とする“分割フード式シールド機”の基本設計を行い、本シールド機を用いた“分割フード式シールド接合工法”の基本構想を確立したので報告する<sup>2)</sup>。

## 2. 分割フード式シールド接合工法の概要

本工法で用いる“分割フード式シールド機”の全体構造図を図-1に、分割フード式シールド接合工法の

主な特徴を以下に示す。

- i. シールド機前胴部に多分割フードを装備
- ii. 多分割フード部に掘削機構を装備
- iii. 各分割フードは単独作動が可能
- iv. 隣接する分割フードは噛合せ構造（フード部全体を一体化構造とする）

これらにより、大規模な補助工法を併用しなくても斜め側面での地中接合を可能とする施工法である。

図-2に施工手順図を、図-3に接合完了時のイメージを示す。

施工手順は以下のとおりである。

STEP①：シールド機を所定の位置まで掘進する。

STEP②：カッターヘッド伸縮用スポークを収納してシールドジャッキ等の機器類を解体・搬出し、分割フードにロータリーシリンダおよびフード押しジャッキをセットする。

STEP③：本線トンネルとの離隔の小さい箇所の分割フードからウォータージェット併用で本線トンネルセグメントまで圧入し、分割フード先端部より薬液注入を行い、本線トンネルとの接続部の止水を行う。その後、隣接する分割フードの圧入を順次行う。

・1ストローク(500mm)押し後、延長推進

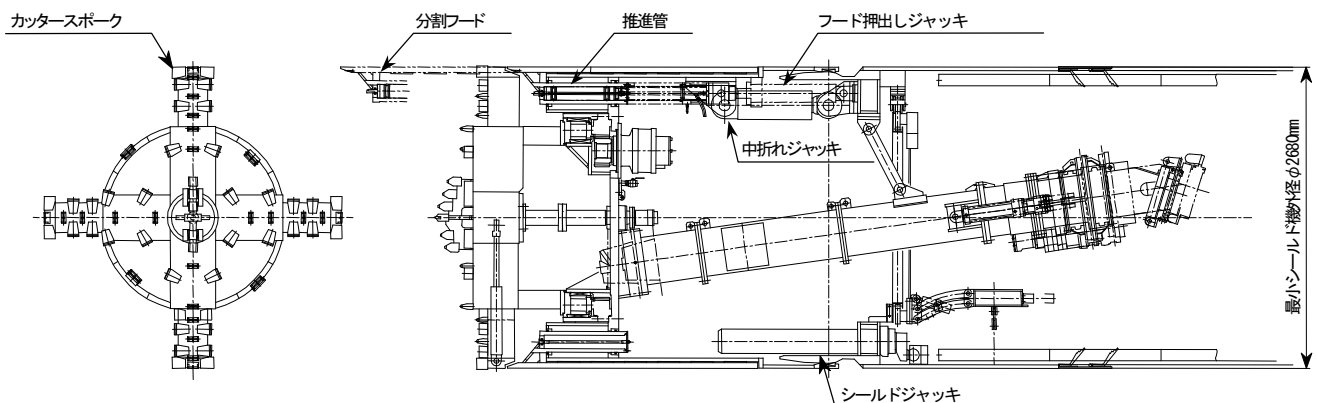


図-1 分割フード式シールド機の全体構造図

\*技術本部土木部 \*\*奥村機械製作(株)

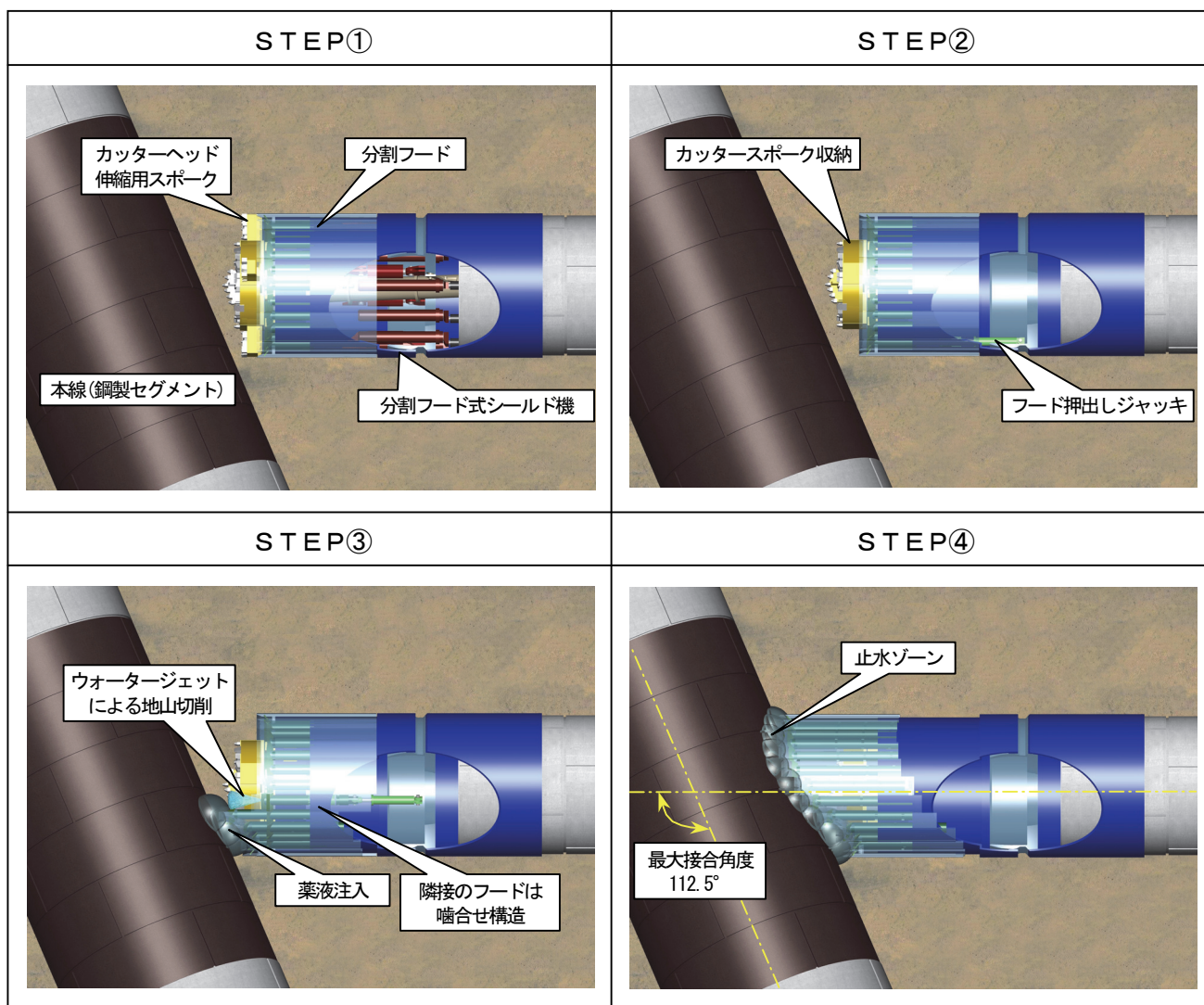


図-2 “分割フード式シールド接合法”による地中斜め接合の施工手順

管を継ぎ足し圧入する。

- ・分割フード部を残置し、ロータリーシリンダ、フード押し出しジャッキを回収する。

STEP④：全分割フードについて圧入を繰り返す。

- ・ロータリーシリンダおよびフード押し出しジャッキは転用する。

分割フード全数の施工後、原則として分割フード式シールド機側からカッター部解体、地山掘削、本線セグメント開口および接続部覆工を行う。

なお、分割フードの掘削機構は先端部より高圧水を回転噴射する機構を採用している。図-4に分割フード部を詳細に示す。

噴射ロッドの回転機構はロータリーシリンダ方式を採用した(図-5参照)。通常のシリンダでは油圧によるピストン部の前後運動にともない、ロット部は前

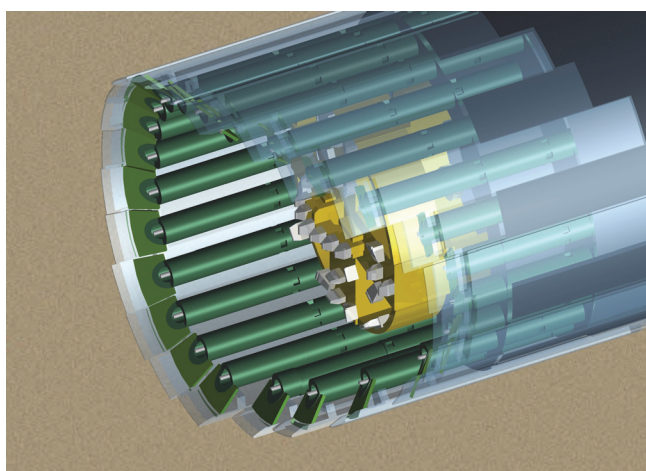


図-3 接合完了時のイメージ

後運動のみとなる。そのため、ロット部の回転運動のためには別途、回転駆動装置(旋回モータ等)を装備する必要がある。

一方、ロータリーシリンダは油圧によるピストン部

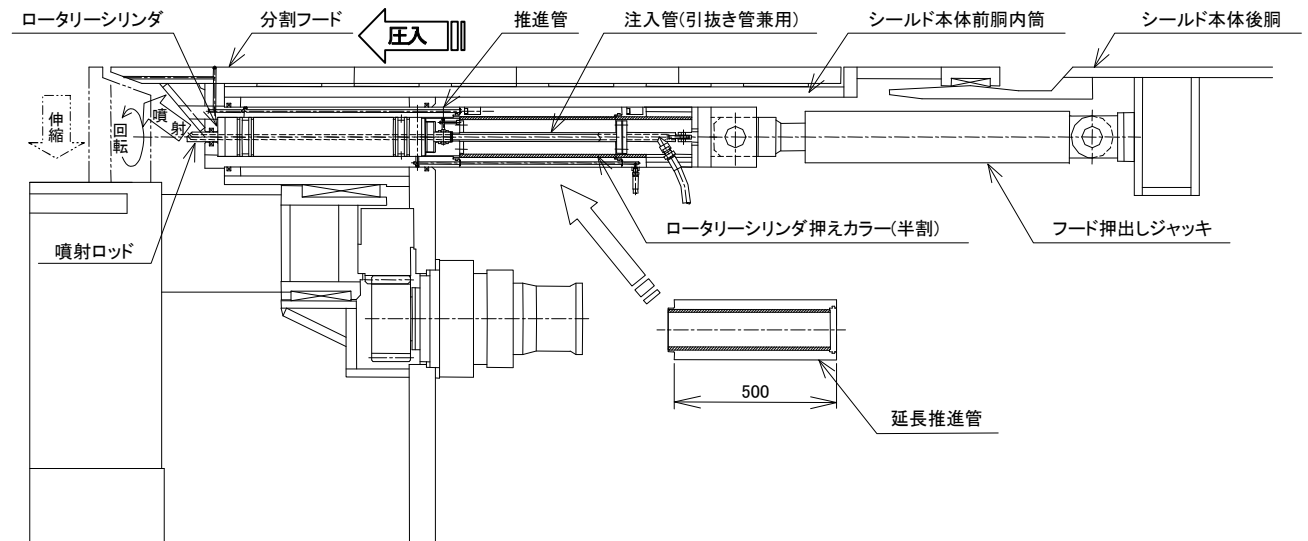


図-4 分割フード部の詳細

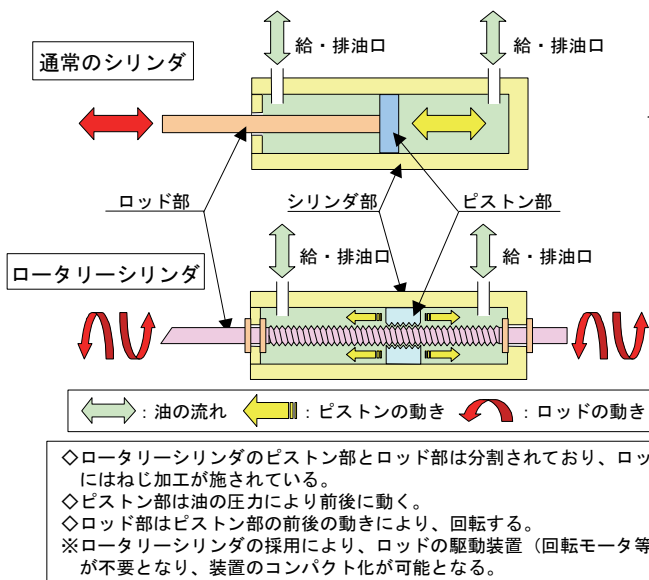


図-5 ロータリーシリンダの原理と特徴

の前後運動により、ねじ加工されたロッド部が回転運動を行う機構となっている。これにより、回転駆動装置を省くことができ、適用シールド径の小口径化を可能とした。

### 3. 本線開口部の覆工補強

近年のシールド工事においては二次覆工の省略が一般的になりつつある<sup>3)</sup>。二次覆工を施工する場合、接合部の覆工の補強は二次覆工の巻き厚の中で処理されている。しかしながら、二次覆工省略の場合是一次覆工の桁厚内で接合部の覆工の補強を行う必要がある。

通常、本線トンネル開口部は開口箇所を含め本線トンネルのトンネル軸方向に開口径の3倍程度にわたり

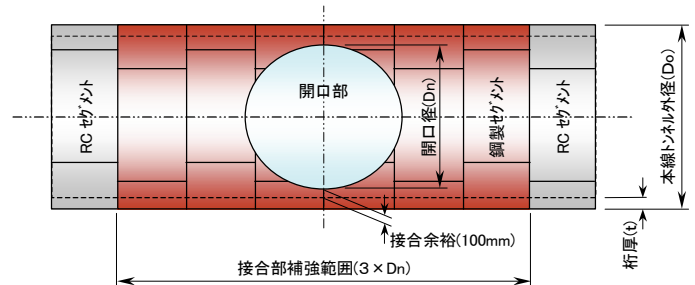


図-6 接合部覆工構造概念

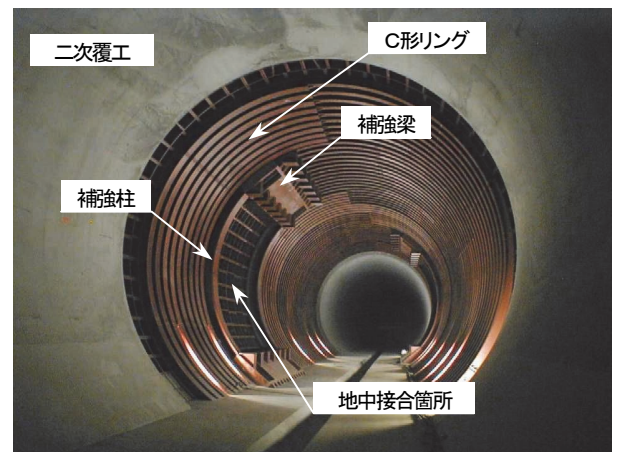

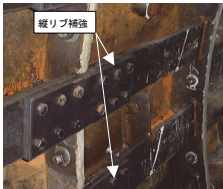
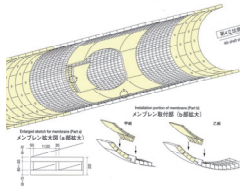
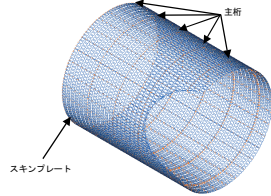


写真-1 従来の本線接合部の開口補強例(二次覆工あり)

鋼製セグメントを設置する(図-6参照)。また、開口箇所は、写真-1に示すように鋼材で井桁(補強梁、補強柱)に開口部を補強し、さらに補強箇所およびそのトンネル軸方向の前後数リングに補強リング(C形リング)を設置するのが一般的である(以下、“井桁補強+C形リング”と呼ぶ)。

ここでは、二次覆工省略を前提に開口部の補強方法の比較・選定を行い、選定された補強方法を用いた場

表-1 開口部の補強方法の比較

	井桁補強+C形リング	本設セグメント(縦リブ)補強	鋼製メンブレン+本設セグメント	本設セグメント(主桁、スキムプレート)補強
概要	土水圧をC形リングで受け、反力を井桁補強(補強梁、補強柱)によって支える。 	セグメントの縦リブ断面を大きくし、かつ、数リング分接続して荷重を受ける。 	開口部周りにメンブレン(補強鋼材)を設置し、土水圧に対抗する。メンブレンは本設セグメントにて支持する。 	セグメントの主桁厚、スキムプレート厚を増加させ、本体構造によって荷重を受ける。 
トンネル内径	二次覆工省略を考慮すると、補強鋼材が一次覆工の桁高内に収まらず、必要内空を侵す。	添接板の接続ボルト位置でセグメント全体の桁高が大きくなり、二次覆工の巻厚が薄くなる。	トンネル内径を侵すことなく施工が可能である。	トンネル内径を侵すことなく施工が可能である。
特長	トンネル内に補強材を円形に組付けるため構造的に安定している。C形リングはセグメントの主桁を利用したもので、断面定数の大きなものが設計可能となる。	施工方法が簡単であり、経済性に優れている。鋼材の増分が少ない。開口部の補強は添接板の接続が主な作業であり、セグメント組立後に余裕をもって施工ができる。	開口周りの補強は構造的に安定しているとともに、最も補強効果が大きい。	セグメント製作時に補強が可能であり、施工性に優れる。
問題点	荷重を補強材全体で受けるように、補強材とセグメントの間に隙間に確実な間詰が必要となる。鋼材設置時に危険作業となる。	最終的な内面処理工では鋼板貼付、内面処理が必要となる。	荷重を補強材全体で受けるように、メンブレン部材とセグメントの間に隙間に確実な間詰が必要となる。	継手ボルトが通常より本数、強度ともに増加する必要がある。

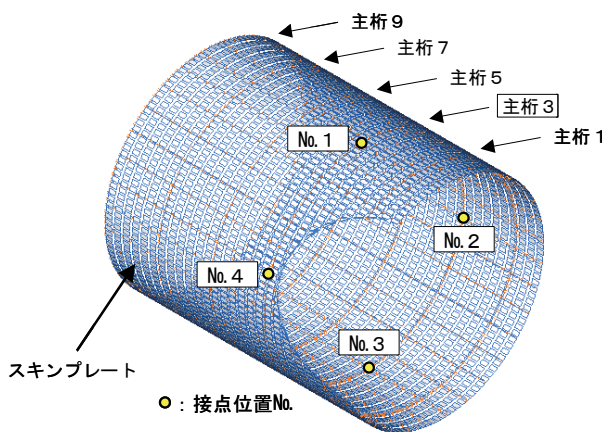


図-7 解析モデル

合の“分割フード式シールド接合法”の適用条件の検証を行った。

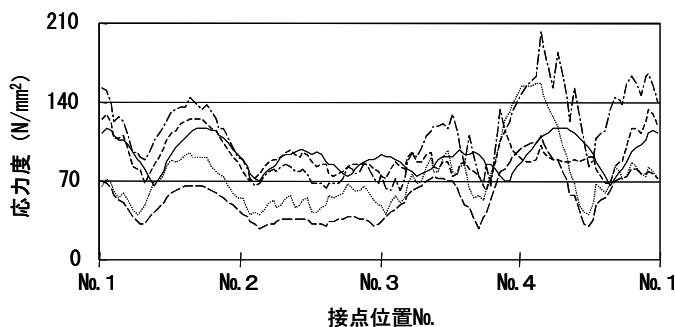
### 3.1 接合部の補強方法の選定

開口部の補強方法の比較を表-1に示す。

各方法について三次元FEM解析を用い補強効果を確認した。解析モデルを図-7に示す。解析は外径φ3800mmの本線トンネルのセグメントにφ3080mmの開口を行った場合をモデル化した。なお、このモデルにおける接合用シールド機外径と本線トンネル外径との比(以下、開口率と呼ぶ)は81%となる。

解析結果例を図-8に示す。同図は、開口無し(CASE0)を基準に、各補強方法における開口部に最も近い主桁3に発生する応力度を示している。

解析の結果、本線トンネルの鋼製セグメントの“主桁、スキムプレート補強”が最も補強効果が大きいことが判明した。一般的な施工方法である“井桁補強+



ケース	凡例	補強方法	補強効果
CASE0	—	開口なし	—
CASE1	----	井桁補強+C形リング	○
CASE2	- - - -	縦リブ補強	×
CASE3	.....	メンブレン補強	△
CASE4	----	主桁、スキムプレート補強	◎

図-8 解析結果(主桁3の発生応力度)  
(本線φ3800mm、開口径φ3080mm、開口率81%)

C形リング”も補強効果は認められる。しかしながら、二次覆工省略を前提とすれば補強鋼材が一次覆工の桁厚内に収まらずトンネル必要内空を侵すことから、下水道トンネルでは流下性能に問題が生じるため適用不可と判断される。本線トンネルの鋼製セグメントの“縦リブ補強”および“メンブレン補強”は開口部近傍(接点位置No.4)付近で大きな応力が発生する結果となった。

以上より、本検討においては施工性および補強効果の観点から二次覆工省略を前提とした開口部の補強方法として本線トンネルの鋼製セグメントの“主桁、スキムプレート補強”を選定することとした。

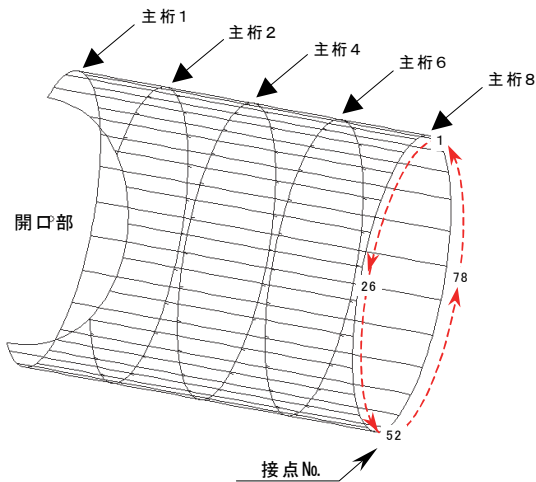


図-9 解析モデル

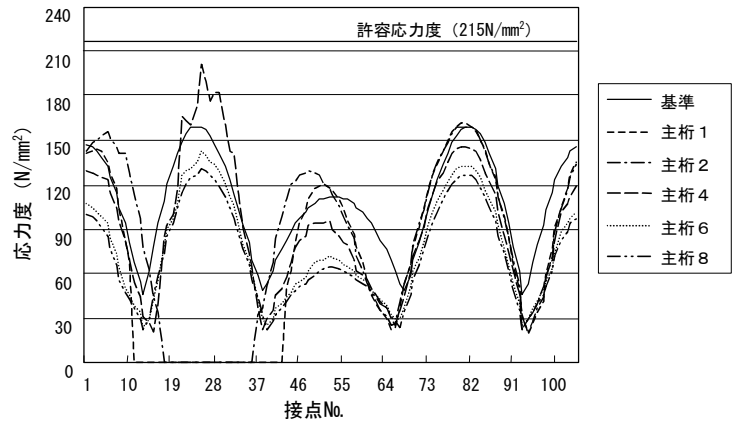


図-10 解析結果（主桁の発生応力度）  
 本線φ3350mm—接合シールド<sup>\*</sup> 外径 φ2680mm  
 接合角度 112.5°

### 3.2 接合工法の適用条件の検証

前項で選定した開口部の補強方法を用い、“分割フード式シールド接合法”において本線トンネルのセグメント外径、開口径（開口率）および接合角度をパラメータとして三次元FEM解析を実施し、接合法の適用条件の検証を行った。

土被りは20m相当を想定し、本線トンネルのセグメント外径はφ2000mm～φ4550mm、開口径はφ2130mm～φ3680mmを対象に開口率が概ね80%となる組合せで解析を実施した。

また、接合角度に関しては、本線トンネルのセグメント外径と開口径の組合せで適用可能なケースについて、最大接合角度112.5°（直交90°+22.5°）を条件として検討を行った。接合角度は、シールド機径およびフード長により幾何学的に決定される。すなわち、フード長が長くなればそれに伴い接合角度も大きくなる。しかしながら、フードはシールド機前胴部に装備されることからフード長には制約があり、最大接合角度にも限界がある。

解析モデルを図-9に、解析結果の一例を図-10に示す。解析結果の評価は、開口無し（図-10の“基準”）を基準として、各主桁において最大発生応力度が許容応力度内に収まることを確認することとした。

解析の結果、最小開口径はφ2680mm、最大開口率80%程度（本線トンネルのセグメント外径：φ3350mm）、最大接合角度112.5°の条件で補強が可能であることを確認した。

しかしながら、本検討は三次元FEM解析をベースに実施したものであり、通常実施している構造設計（二次元骨組み構造解析等）との整合性や施工ステップを考慮した仮設構造等の確認にまでは至っていない。

### 4. 経済性の評価

接合深度別に地中接合に係わる施工費（直接工事費）を表-2に示す3ケースについて試算した。検討は外径φ3800mmの本線トンネルにφ3090mmの流入管を接合する場合について実施した。

コストの試算結果を図-11に示すとともに、傾向を以下に示す。なお、同図は接合深度GL-10mにおけるケース1（立坑+地盤改良+刃口推進）の直接工事費を100%として表示している。

- i. 分割フード式シールド接合法の施工費は深度に関わらず凍結工法に比べ50～70%となる
- ii. 刃口推進との比較では、接合位置が浅深度（GL-10m）において同程度となる
- iii. 刃口推進では接合深度に比例して立坑築造費および地盤改良費が増加することにより、施工費がアップする
- iv. 凍結工法は接合深度によらずほぼ一定の施工費となり、大深度では刃口推進とほぼ同様となる

### 5. あとがき

表-2 経済性評価のケース一覧

検討ケース	ケース1	ケース2	ケース3
工法名称	立坑+地盤改良+刃口推進	分割フード式シールド接合法	凍結工法
概念図			
施工概要	接合地点の近傍に立坑を築造し、全断面地盤改良を行った後、刃口推進にて接続を行う	分割フード式シールド機を用い直接フードを本線セグメントまで圧入し、シールド機の解体、本線セグメントの開口を行う	凍結工法によりシールド機内から地盤改良し、シールド機の解体、本線セグメントの開口を行う

従来は困難であった下水道シールドトンネルを地中内で斜めに接合することができる“分割フード式シールド接合法”の基本構想を確立した。

本工法の特長を整理し、以下に示す。

- i. 斜め接合に対応 (含む、非管芯接合)
  - ・最大接合角度：112.5°
- ii. 小口径、大きな開口率に対応
  - ・接合用シールド機の適用最小外径：φ2680mm(仕上り内径：φ2000程度)
  - ・開口率：最大80%
- iii. 本線の開口部補強の簡素化
  - ・二次覆工省略を前提に従来の本線開口補強に替え、開口部鋼製セグメントの主桁およびスキンプレートを補強することにより対応可能
- iv. 従来工法に対してコストダウンを実現

今後は“分割フード式シールド接合法”のさらなるコストダウンと施工性の向上を目指したい。また、下水道を始め雨水管路や共同溝等の二次覆工のないシールドトンネルの分岐・接合部の工事に積極的に技術提案するとともに、実現現場での適用に向けて鋭意努力していきたい。

最後に、本研究開発課題の推進にあたり協力いただいた開発担当者に感謝の意を表す。

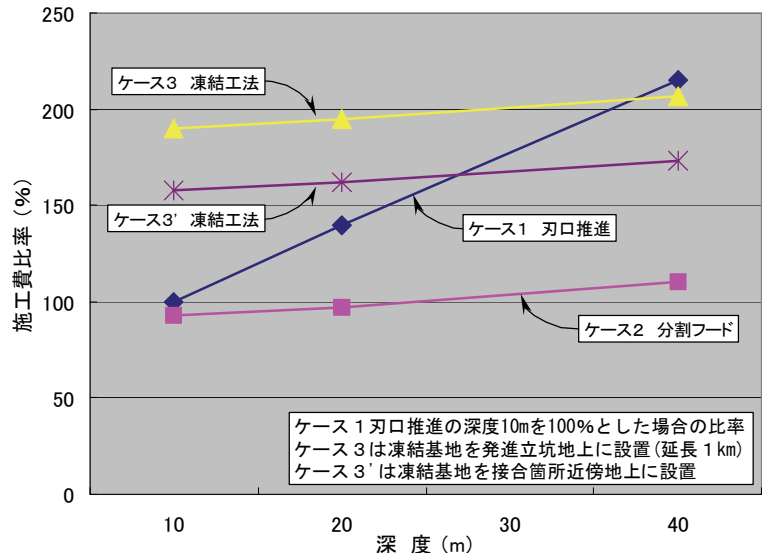


図-11 接合深度別の地中接合の直接工事費比較  
 <本線φ3800mm-接合シールド外径φ3090mm>

【参考文献】

- 1) トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説 (平成8年版)、(社)土木学会、pp189~190、1996
- 2) 福居雅也 稲場啓能、「シールドトンネル相互の斜め接合法を開発」、建設機械、pp58~61、2005.3
- 3) シールド工事用標準セグメント -下水道シールド工事用セグメント-、(社)土木学会・(社)日本下水道協会、pp357~397、2001.7