

側面地中接合工法の開発 —側面ドッキングシールド工法—

植田 勝紀* 濱田 和人**
稻田 徹**

要 旨

シールド工法とは、まず発進と到達の立坑を構築しこの立坑間を接続するトンネル工事のことを云う。しかし近年、地上用地の確保が困難であったり、トンネルの大深度化に伴う建設費用の増加などの問題により、この立坑数を極力減らすことができる施工法の試みがなされている。側面ドッキングシールド工法とは、シールド到達部が既設のトンネルであった場合に、新トンネルを既存のトンネル側面部に直接結合させることで、到達立坑を削減しようとするものである。

本研究開発では、シールド機に装備できるセグメント（鉄筋コンクリート製）切削ビットの開発と切削実験を進めてきた。この結果、セグメント切削に適した特殊ビットの選定および切削ノウハウを把握することができ、側面ドッキングシールド工法の実用化に目処をつけた。また、シールド機にて既設トンネルを切削する際の応力度照査による安定性検討も行った。

1. まえがき

今日では、大都市の地下空間の有効利用のために、様々な用途に応じた特殊シールドの必要性が高まっていいる。これまでのシールド機地中接合工法としては2台のシールド機が互いに正面接合するケースで幾つかの事例がある。しかし、図-1のように既設トンネルのセグメントをシールド機で直接機械切削し新トンネルを接合する技術の確立は未だなされていない。今までは、このように既設トンネルの側面部に新トンネルを結合させる場合、既設トンネル直前までシールド機を掘進し、結合部周辺の地山を薬液注入等により固めて地山が自立するようにした後、人力で既設セグメントを除去していた。この施工法では、地下の土水圧と戦いながら人力と破碎機械を駆使して強固な既設セグメント撤去作業をする必要があり、安全性と効率性に問題があった。（このようなニーズとしては、既設大口径の幹線下水道側面部に小口径の下水道を接続していくものがある。）

今般の研究開発テーマである側面地中接合工法は、シールド到達に際して、シールド機で直接既設トンネルを切削し接合しようとするものである。切削対象となる既設トンネルは鉄筋コンクリート製と想定した。この場合、以下のような課題が考えられる。

- ①強固なセグメントを機械切削する際に、周辺地山に過大な乱れを発生させない工法であること。
- ②セグメント構造材料である鉄筋およびコンクリートを同時に切削できるビットの選定。

- ③このビットをシールド機にどのように装備するか。
- ④数kmのシールド掘進を完了後、セグメント切削性能を發揮できること。
- ⑤既設トンネルの安定性を損なわずに切削できること。

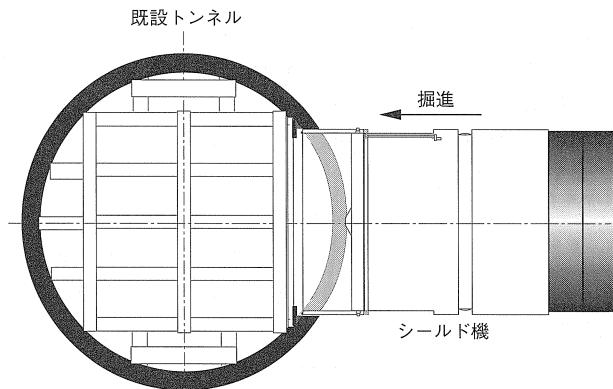


図-1 側面地中接合概念図

本研究開発では、こうした課題の解決を目指して、接合方法のアイデア出し・詳細技術実用化の可能性の検討・実験方法の検討・実験・評価等を行った。その内容は、切削方式の異なる種々のビットを用いて鉄筋コンクリート切削実験を行い、切削特性および磨耗特性などの検討から鉄筋コンクリートを切削できる技術を確立した。結果として、側面地中接合工法の実用化に目処をつけた。本報告では、これら一連の研究・開発成果について述べる。

2. 開発経緯

図-2に開発経緯をフローで示す。

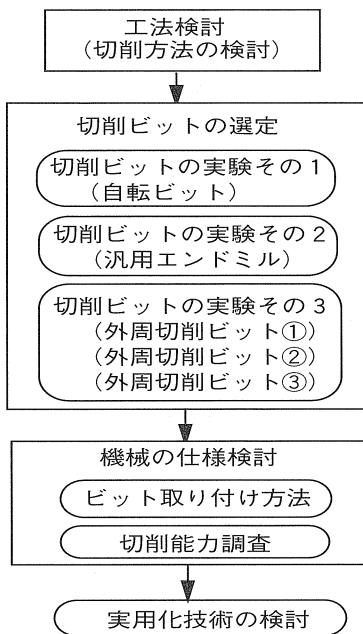


図-2 開発フロー

本工法を使用する場所はシールド到達地点である。発進から到達までの通常掘進作業に悪影響を及ぼさず、しかも掘進の最終地点で切削破碎能力を十分発揮できるものでなければならない。切削方式検討段階では、当初、既設トンネルを全断面破碎の方向で工法検討を行った。実験その1およびその2では、この全断面破碎方式の実用化を目的として、自転ビットとエンドミルによる切削実験を行った。その成果として、鉄筋コンクリートの破碎が可能なビットを開発することができた。しかし、このビットで既設トンネル全断面を破碎するためには、シールド機に通常機の数倍の動力設備を装備する必要があり、本工法の実用化には適さないものと判断した。写真-1に開発した自転ビットの実験状況を、写真-2に汎用エンドミルの実験状況を示す。

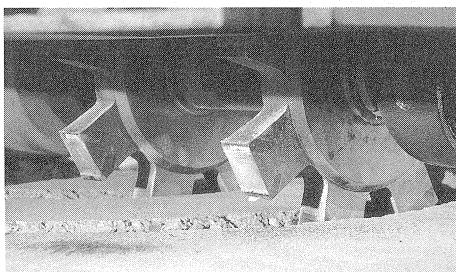


写真-1 自転ビットによる切削

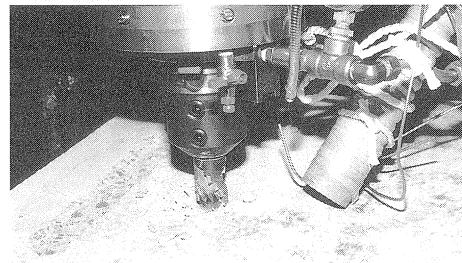


写真-2 エンドミルによる切削

実験その1その2の結果により全断面破碎方式の検討を中断し、実験その3では外周切削（コア抜き）型の実験へと開発工程を進めた。外周切削型検討では3種類の異なるビットを選定し実験を行った。その結果、セグメントの構造材料であるコンクリートと鉄筋を同時に切削でき、実用化が可能な特殊ビットを見い出し、実用化の目処も付けることができた。

実験の詳細データを用いて、ビットのシールド機への装備方法、切削方法、切削に必要な動力の把握と補助的装備品の開発、さらに施工手順や総合的技術の検討など開発工程を進めた。

3. 鉄筋コンクリート外周切削実験¹⁾

3. 1 実験装置

写真-3に実験装置を示す。実験装置は大口径岩盤掘削機ピックマン（BM-150A、鉱研工業（株）製）と架台により構成される。本装置は通常岩盤のボーリング等に使用される機械で、今回行った実験の範囲では十分な推力、切削トルク、回転数、制御能力他を有している。本実験装置の主な仕様を表-1に示す。

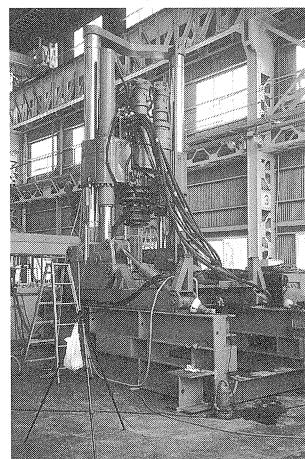


写真-3 実験装置

表一 1 実験装置の仕様

項目	C G S 単位系	S I 単位系
リング回転数	0~50rpm	0~10.8 (1/S)
リング回転トルク	11.4tonf・m	111795.81(N・m)
推力	76tonf	745305.4 (N)
切削速度	0~800mm/min	0~800 (mm/min)
重量	約15tonf	約147(k N)

実験装置の駆動軸に実験用コア抜きリング ($\phi 800\text{mm}$) を取り付け、その先端部に実験用ビットを装着した。実験装置では切削リングが上方より徐々に鉛直下方の被削材(鉄筋コンクリート板)を切削するようにした。写真-4にコア抜きリングを示す。



写真-4 コア抜きリング

3. 2 被削材

写真-5、図-3に実験に用いた被削材を示す。本被削材は実際のセグメントを想定して製作した。材質は以下である。

- ・コンクリート : $q_{ck} = 500 \text{ (kgf/cm}^2)$
49033 (kPa)
- ・鉄筋 : SD345 <主筋 $\phi 22\text{mm}$ >
<配筋 $\phi 16\text{mm}$ >
- ・ボルトボックス : M490A < $t=19\text{mm}$ >

実験で使用した被削材は2ピースをボルトボックス部でボルト結合し、この部分にコア抜き切削ラインが通過するように配置して使用した。

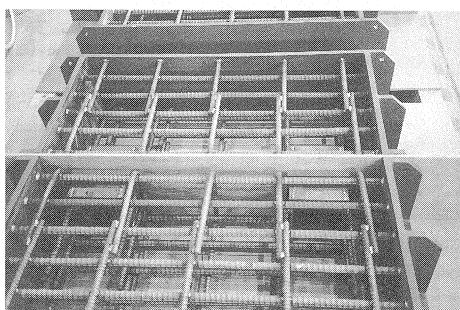


写真-5 製作中の被削材

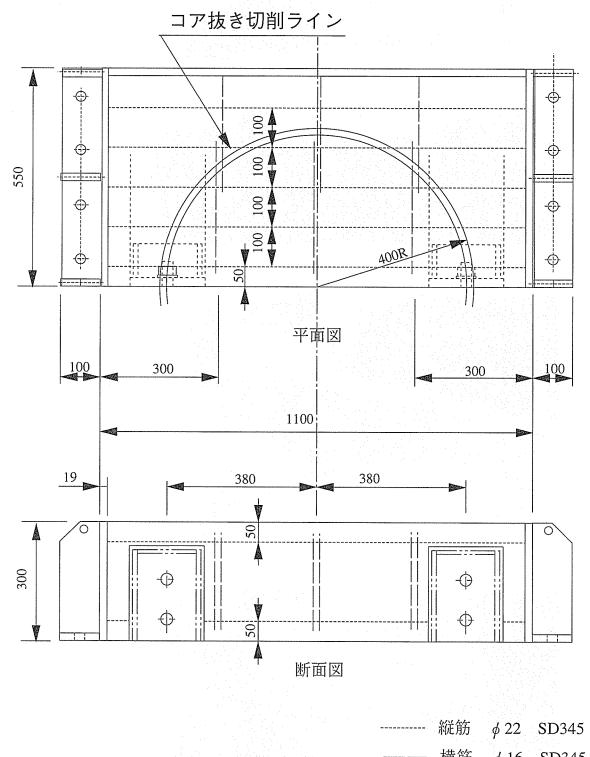


図-3 被削材

3. 3 ビット

外周切削方式について次の3種類のビットで実験を行った。以下にこのビットの概要を示す。

(1) 特殊ビット (写真-6)

特殊ビットは、全断面破碎方式の実験その1、実験その2の結果をふまえて考案したビットで、母材に柱状の超硬チップを鉛直かつ多段に埋め込んだものである。この埋め込まれた超硬チップは、硬度が高く切削性は良いが靭性が小さく欠損は生じやすい。切削中に超硬ビットが欠けたり磨耗した場合には、超硬チップの回りの母材を磨耗させ新たな超硬チップが現れ切削性を回復するように工夫してある。

(2) ダイヤモンドビット (写真-7)

ダイヤモンドビットは銅合金にダイヤモンド粉を溶かし込んだものである。切削はダイヤモンド粉による研削によって行われる。切削時間が長いとビットは磨耗しやすい。

(3) ローラビット (写真-8)

ローラビットは岩盤や礫地盤での掘進タイプのシールド機に多く使用されているビットである。押しつけ力を与えながら被削材上を転動させることにより、ローラビットの頂部を被削材に貫入させながら破碎する。

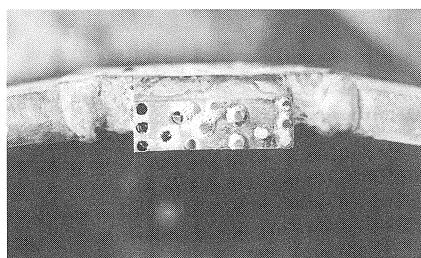


写真-6 特殊ビット

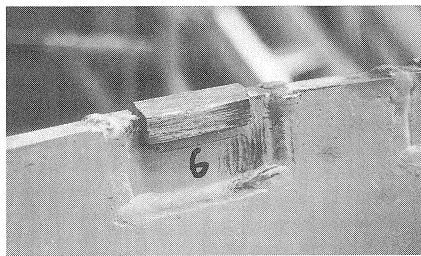


写真-7 ダイヤモンドビット

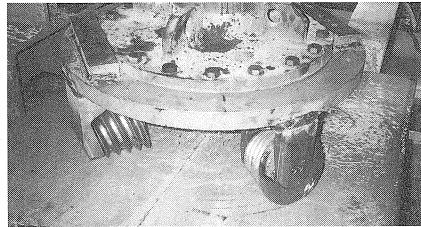


写真-8 ローラビット

3.4 実験項目

実験時の計測項目を表-2に示す。またビットの磨耗量、欠損状況は被削材を約10mm切削するたびに計測した。実験状況を写真-9に示す。実験当初コア抜きリングに芯ぶれが発生したため、これを防止するワッフルガイドを取り付けた。

表-2 計測項目

計測項目	センサ	測定範囲(CGSS)	測定範囲(SI)
切削トルク	圧力変換器	0~15 (tonf·m)	0~147 (kN·m)
リング回転数	ロータリエンコーダ	0~70 (rpm)	0~1.17 (1/s)
推力	圧力変換器	0~250 (tonf)	0~2451.5 (kN)
切削位置	ポテンショメータ	0~500 (mm)	0~500 (mm)

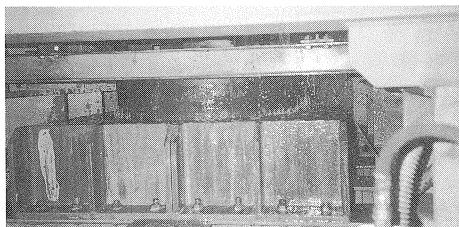


写真-9 実験状況

4. 実験結果

3種類の外周切削ビットの実験結果は、特殊ビットだけが厚さ300mmの鉄筋コンクリートをくり抜くことができた。ダイヤモンドビットとローラビットは実験過程で様々な問題が発生し、実用に適さないことが判明した。以下に各ビットの実験結果を示す。

4.1 特殊ビット

800mmのコア抜きリングに18個のビットを取り付け切削実験を行った。表-3に切削データを示す。実験の前半では切削送り速度を0.3~0.5mm/min程度とし、1ビットの切り込み深さを1μm以下に制御して切削開始した。状況を見ながら速度2mm/minまで増速した。切削は良好に行われ300mm厚の鉄筋コンクリートを貫通できた。写真-10、写真-11にコア抜き完了後の被削材の状況を示す。被削材の切削面は非常に滑らかであり、亀裂、裂傷、あるいは鉄筋切削時の段差、衝撃跡などはみられなかった。写真-12に切削完了後のビット状況を示す。コア抜きリングの刃先をみると、特殊ビットの回転方向面での欠損や外周部での磨耗が進んでいるがビットそのものは十分残っており、切削性能の低下はなかった。

表-3 切削データ

切削時間 時:分	累積時間 時:分	回転数 rpm	トルク t-m	荷重 ton	切削速度 mm/min	切削深さ mm	切削物
0:48	0:48	40	0.6	4.5	0.3~0.5	12.6	コンクリート
0:38	1:26	40	0.7	4.7	0.3~0.5	22.9	コンクリート
0:35	2:01	40	0.8	4.9	0.3~0.5	31.1	コン+鉄筋16
0:27	2:28	40	0.6	4.7	0.3~0.5	38.4	コン+鉄筋16
0:44	3:12	40	0.6	4.7	0.3~0.5	47.8	コン+鉄筋22
0:36	3:48	40	0.7	4.6	0.3~0.5	57.5	コン+鉄筋22
0:36	4:24	40	0.9	4.7	0.3~0.5	72.0	コン+SMA22t
0:11	4:35	40	0.6	4.7	0.3~0.5	75.5	コン+横板9t
0:22	4:57	40	0.8	4.7	0.3~0.5	82.2	コン+SMA22t
0:25	5:22	40	0.8	4.7	0.3~0.5	92.3	コン+SMA22t
0:26	5:48	30	0.6	4.7	0.3~0.5	101.3	コン+SMA22t
1:03	6:51	40	0.7	4.7	0.3~0.5	118.7	コン+SMA22t
1:24	8:15	40	0.9	4.7	0.3~0.5	140.6	鉄筋19+SMA22t
0:37	8:52	40	0.8	4.7	0.3~0.5	150.3	コン+SMA22t
0:30	9:22	40	1.0	4.7	0.3~0.5	169.3	コン+SMA22t
0:11	9:33	40	0.8	4.7	0.7	176.0	コン+SMA22t
0:14	9:47	40	0.9	4.9	1.0	190.3	コン+SMA22t
0:12	9:59	40	0.9	4.7	1.1	204.0	コン+SMA22t
0:04	10:03	30	1.0	4.7	1.1	206.4	コン+SMA22t
0:13	10:16	30	0.9	4.8	1.1	220.4	コン+SMA22t
0:09	10:25	30	1.0	4.7	1.3	234.0	コン+SMA22t
0:06	10:31	30	1.1	4.6	2.1	248.0	鉄筋22+SMA22t
0:06	10:37	40	1.1	4.8	2.1	257.3	鉄筋22+SMA22t
0:02	10:39	40	1.4	4.9	2.0	265.0	鉄筋16t+SMA22t
0:10	10:49	25	1.7	4.6	2.0	273.0	鉄筋16t+SMA22t
0:07	10:56	20	1.6	4.7	2.0	281.0	鉄筋16t+SMA22t
0:10	11:06	40	0.8	4.9	0.5	300.0	コン+SMA22t

$$1 \text{ (rpm) } = 1/60 \text{ (1/s) } \quad 1 \text{ (ton) } = 9.8 \text{ (kN) }$$

$$1 \text{ (t - m) } = 9.8 \text{ (kN · m) }$$



写真-10 被削材の切削面



写真-11 コア抜きした被削材の表面



写真-12 切削完了後の特殊ビット

ここで、1つのビットが切削する切り込み深さ d は、次式（1）の理論式で与えられる。

$$d = \frac{v}{n b} \quad \dots \quad (1)$$

v : 切削速度 (mm/min)

n : リング回転数 (rpm)

b : リングのビット数 (18)

今回の実験においては、最大負荷・速度においても1ビット切り込み深さは $3 \mu\text{m}$ 程度であった。図-4は切り込み深さと切削トルクの関係を示したものである。実験結果は約11時間程度の切削で 300mm を貫通することができたが、外径数メートルのシールド機が地盤中で稼働することを想定すると微速で連続的な掘削の制御方法が課題となる。

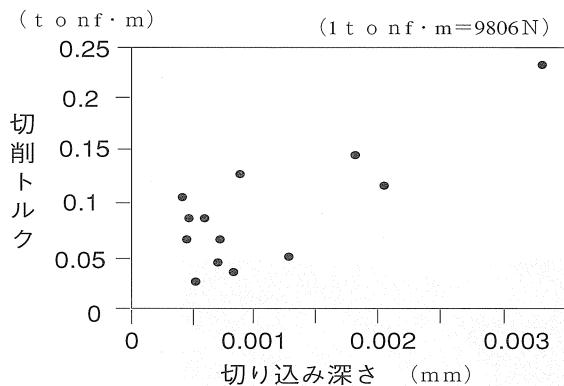


図-4 切り込み深さと切削トルク

4. 2 ダイヤモンドビット

特殊ビットの実験と同様に、コア抜きリングに18個のダイヤモンドビットを取り付けて切削実験を行った。コンクリートと鉄筋は切削できたが、約 50mm 程切り込んだ後に現れるボルトボックス部では急激にビットの磨耗が進行し、切削深さ 75mm 付近で実験継続不能となった。このボルトボックス部分の切削時のトルクは鉄筋コンクリート切削時の10倍以上に増加していた。このことから、連続的な金属部の切削には不向きなビットであることが判った。写真-13に切削後のビットを示す。



写真-13 切削実験後のダイヤモンドビット

4. 3 ローラビット

一般に礫地盤対応型のシールド機に装備されるローラビットを用いて同様の実験を行った。実験結果は、コンクリートと鉄筋は切削可能であったがボルトボックスは切断できずローラビットの歯が破損した。この破損状況を写真-14に示す。また、切断可能と判断できた鉄筋についてもローラビットの回転方向と直角に交叉するものは切断されやすかったが、回転方向と同方向にあるものは切断されにくかった。

ローラビットは原理的に切削の際被削材に歯を先行して貫入させなければならないために、他のビットの

数倍の推力が必要であり振動も極めて大きい。このことは、既設セグメントに与えるダメージが大きいと予想でき、実施工への採用には課題が多いビットである。写真-15に実験後の被削材を示す。約70mm切削した時点でローラビットが破損し実験を中断した。

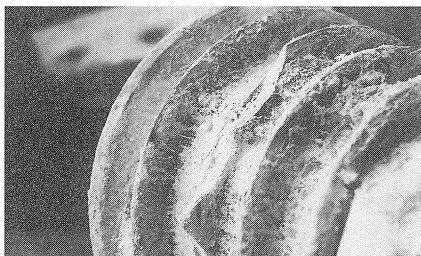


写真-14 切削実験中断時のローラビット

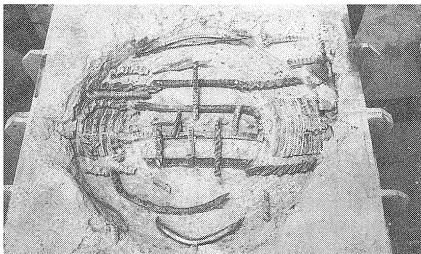


写真-15 実験後の被削材

4. 4 ビット切削実験のまとめ

実験は全断面破碎方式から外周コア抜き方式へと変更した。全断面破碎方式の実験ではシールド機に装備する能力に限界があり、実験を中断した。しかし、自転ビットは鉄筋コンクリート切削用として別の用途で採用できるものである。切削に適したビットの選定は難航したが最終的に本工法に有効と思われる切削ビット（特殊ビット）を見いだすことができた。また、この特殊ビットはシールド機の通常の掘進機能を損なわずに装備することが可能である。

外周切削方式の実験結果を表-4に示す。実験用に選定した3種類のビットは十分に事前検討した上で選んだものであったが、結果として総合評価が「良」となったものは特殊ビットだけであった。この理由は、セグメントは延性材である鉄筋と脆性材であるコンクリートで構成されており、加えてボルトボックスとボルトという、強固な連結部材が切削ライン上に不連続に現れ、これらを同時に切削できるビットを見いだすことは容易ではなかった。総合評価が「良」となった特殊ビットを対象にして、実シールド機への装備方法、施工手順、既設トンネルの保護方法等の課題につき検討した。

表-4 実験結果

	特殊ビット	ダイヤモンドビット	ローラビット
切削形態	超硬による切削	ダイヤ粉による研磨	圧碎
切削結果			
○ 切削良	コンクリート ○	コンクリート ○	コンクリート △
△ 切削可	鉄筋 ○	鉄筋 ○	鉄筋 △
× 切削不可	ボルトボックス○	ボルトボックス×	ボルトボックス×
切削深さ	300mm (貫通)	76mm	約60~70mm
切削負荷 (1ビット 当たり)	推力 250kgf 切削力 13.8kgf 回転数 30~40 rpm 切削速度 0.3~1.0mm/分	推力 250kgf 切削力 13.8kgf 回転数 30~40 rpm 切削速度 0.3~0.5mm/分	推力 500kgf 切削力 1250kgf 回転数 20 rpm 切削速度 (推力制御)
切削面	良好	良好	不良、周辺部破損
ビット磨耗 ビット破損	小 小(超硬の欠けあり)	大 大	小 大
振動	小	小	大
総合評価	○	×	×

(1kgf=9.8N, 1rpm=1×1/S)

5. 側面地中接合工法

選定した特殊ビットをシールド機に装備し実用化するため以下検討を行った。

①シールド機へのビット装備方法。

②接合工程と施工手順。

③既設セグメントを切削する場合の応力度照査と防護対策。

5. 1 シールド機

図-5に特殊ビットを装備したシールド機の概念図を示す。地中接合用の特殊ビットはスライド式の切削リングの先端部に取り付けられる。シールド機が通常掘進をしているときは、切削リングをカッタースポークの背面に引込めておく。シールド機内には、地中接合時に切削リング全体を段階的に押し出すことができるリング押し出し用シリンダー装置を装備する。また、トンネル切削中に切削ビット部分を冷却するための注水ラインと水噴出口が設けられる。切削リングの所定箇所にはコピーカッタのカッタ伸長により係合できる係合穴があいており、この係合がなされるとシールド機カッタの回転駆動力が切削リングに伝わり既設トンネルの切削が可能となる。

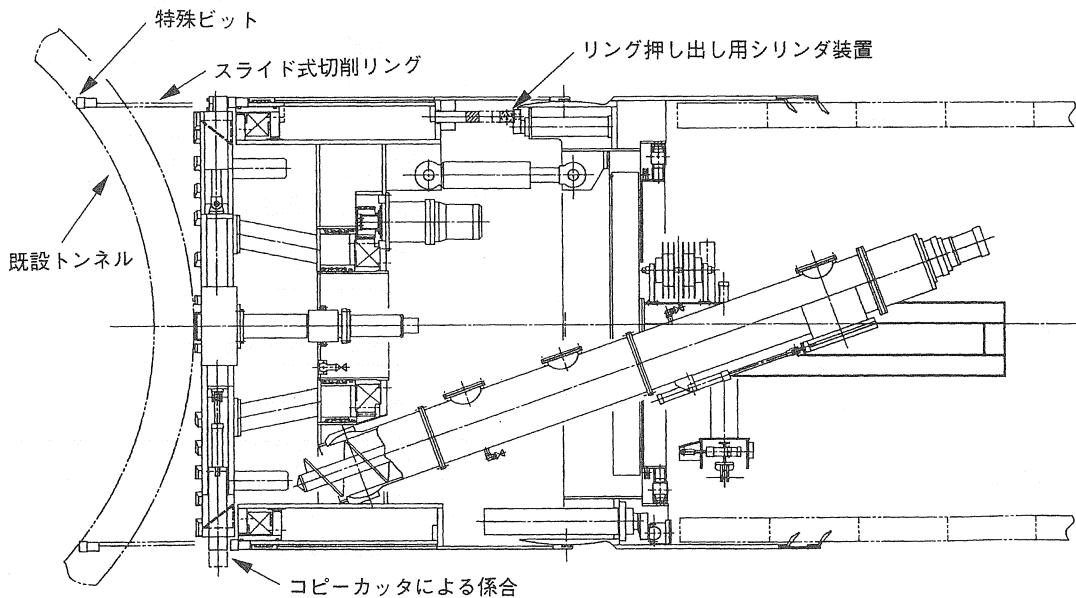


図-5 シールド機の概念図

5.2 接合手順概要

図-6 ①～④に、側面地中接合工法の接合手順概要を示す。

- ①既設トンネル直前まで通常のシールド掘進を行う。
接合部周辺地山を坑内側から地盤改良する。
既設トンネルの接合部分を支保工にて補強する。
- ②セグメント切削用リングを、リング押し出し用シリンドラ装置を用いて前方に押し出す。
コピーカッタのカッタを伸長させることにより、切削用リングの係合穴に係合する。

③ビット部分の冷却注水を行いながら、切削用リングを回転して既設トンネルを切削する。

- ④結合部を止水処理し、コア抜き後の新旧トンネルの接合工事を完成する。

本接合手順は、様々なビットの切削実験結果から、シールド機による外周切削ドッキング方法として実現可能な施工法を検討したものである。この場合、最大の課題は既設トンネルの安定性の確保であり、次項にこの検討結果を示す。

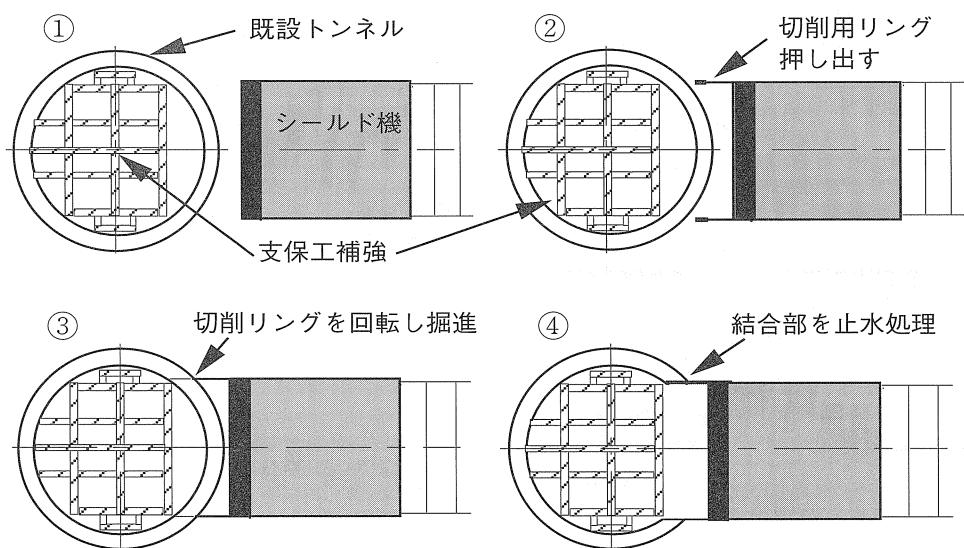


図-6 接合手順概要

5. 3 既設トンネルの安定性検討

切削時の荷重に対する既設トンネルの安定性検討は、当社技術本部第一技術部の協力を得て行った。検討は接合時の状態を2次元にモデル化し、はりーバネモデルによる構造計算プログラム「SHIL」を用いた解析を行った。本解析における主要条件は以下のとおりとした。

<既設トンネルの覆工条件>

- ・既設セグメント外径 : 8,600 (mm)
- ・既設仕上がり内径 : 7,250 (mm)
- ・セグメント厚 : 400 (mm)
- ・セグメント幅 : 1,000 (mm)
- ・分割数 : 8 (7+K)

<シールド機条件>

- ・シールド機外径 : 4.96 (m)
- ・切削時の推力 : 110 (t f)
(1078 (k N))

<荷重条件>

- ・土被り : 28.6 (m)
- ・地下水位 : G.L. -0.55 (m)
- ・側方土圧係数 : $\lambda = 0.85$ (トンネル位置)
- ・地盤反力係数 : $k = 270$ ($t f / m^3$)
(2646 ($k N / m^3$))
- ・土質条件 : シルト・砂礫層

解析の結果、既設トンネル内に支保工補強を行うことにより、一次覆工および支保工の応力度が切削開始時（ケース①）・全断面切削過程（ケース②）・切削終盤時（ケース③）全てのケースで許容値内に収まる結果となった。応力度照査結果を表-5に示す。なお、この結果はあくまで標準的モデルによる検討結果であり、対象現場毎での条件により、詳細に検討する必要があることを付記する。

検討ケースは図-7に示すとおり切削箇所の変化に伴う荷重状態を再現し、ケース①～③とした。

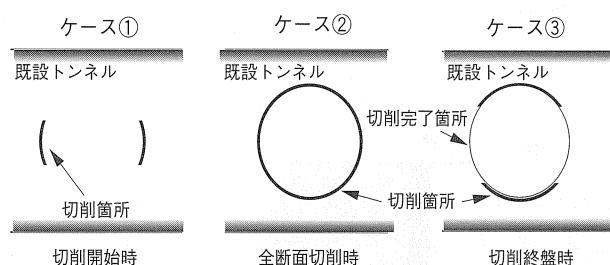


図-7 切削箇所および荷重状態変化

表-5 応力度照査結果

既設セグメントの応力度照査

項目	許容値 kgf/cm ²	計算値		
		ケース①	ケース②	ケース③
曲げ圧縮	160	88	82	86
引張	2000	50	-	26
圧縮	2000	1162	1093	1147
せん断	10.5	5.2	3.5	5.2

支保工の応力度照査

項目	許容値 kgf/cm ²	計算値		
		ケース①	ケース②	ケース③
曲げ圧縮	1600	521.5	857.9	575
引張	1600	-	-	-
せん断	900	56.5	88.7	64.8

単位: kgf/cm² (1 kgf/cm²=98 kPa)

6. まとめ

本側面地中接合工法開発の結果、実用化への目処を立てることができた内容は以下である。

- ①セグメントの鉄筋コンクリートを外周切削方式にてコア抜きできるビットを見い出した。
- ②シールド到達地点で既設セグメントを切削するシールド機の仕様と接合方法に目処をつけた。
- ③接合時の既設トンネル応力度照査を行った結果、トンネル内に支保を設けることで許容値内に収まり、十分安全であることを確認した。

7. おわりに

本側面地中接合工法の研究・開発は、日立造船(株)との共同開発で行った。研究成果は試行錯誤の繰り返しの中から得られたものであり、協力頂いた関係各位に本紙面を借りて深く感謝したい。

参考文献

- 1) 佐々木ほか：日立造船技報、Vol.58、No2、pp.37-42、1997