

道路トンネル分岐合流部の 合理的な構築工法の開発

Development of rational construction method for road tunnel junctions

藤本明生¹・竹之内康昭²・小倉靖之³・小林暁⁴・配野均⁵

Akio Fujimoto, Yasuaki Takenouchi, Yasuyuki Ogura, Satoru Kobayashi, Hitoshi Haino

¹正会員 ハザマ 土木事業本部 技術第一部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

E-mail: fujimoto@hazama.co.jp

²フェロー会員 ハザマ 土木事業本部 技術第一部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

³正会員 ハザマ 土木事業本部 技術第一部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

⁴正会員 JFEエンジニアリング(株) 重工センター 重工部 (〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

⁵青山機工(株) 土木部 (〒230-8611 東京都江東区亀戸1-38-4)

This report introduces the construction method for road tunnel junctions to enlarge spaces between two shield tunnels safely and rationally in the deep underground. This method builds arch pre-lining by arch excavating equipment at the same time with the main track shield tunneling.

The proof experiment was executed to confirm the excavating and the concrete placing performance of the arch excavating equipment. As a result, it was confirmed that the arch cutter was able to excavate hard ground of 3N/mm^2 , and place concrete under the high water pressure of 0.5MPa . From these proof experiments, prospects for the practical use of this construction method could get it.

Key Words : shield, road tunnel, junction, ramp, enlargement, arch pre-lining

1. はじめに

都市再生プロジェクトとして大都市圏における環状道路の整備が急がれている中で、都市環境への影響が少ないシールド工法による道路トンネルの計画が増えている。それに伴い、本線とランプトンネルの分岐合流部を非開削で構築できる新技術の開発が望まれている。分岐合流部は非常に大きなトンネル断面であり、切り拡げに必要な防護工・止水工も大規模で、施工の安全性の確保や工期の短縮、建設コストの縮減などが課題である。

これらの課題を解決できる分岐合流部の合理的な構築工法として、ウィングプラス工法の開発に取り組んできた。本稿では工法の概要を紹介し、開発経過として、工法の実用化に向けて実施した実証実験の結果について報告する。

2. 工法の概要

(1) 施工概要

工法の概要を図-1に示す。本工法は大深度での適用を想定し、分岐合流部の切り拡げ防護工として高剛性の先受けアーチシェル（以下、先受けアーチと称す

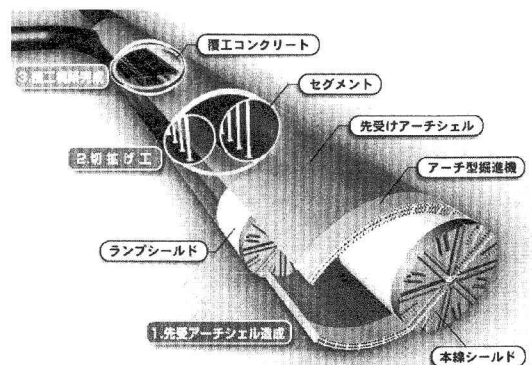


図-1 工法概要

る)を造成する工法である。

シールド機の側方にアーチ型掘進機を張り出した状態で掘進することにより、トンネルの構築と同時に先受けアーチを造成する。

(2) 施工手順

本線シールドから先受けアーチを施工する場合の施工手順を以下に示す(図-2)。

- ① シールド機内でアーチ型掘進機を組み立てて、胴体部から側方に張り出す。
- ② その状態で本線シールドを掘進し、トンネル構築と同時に先受けアーチを造成。
- ③ 先受けアーチと閉合するようにランプシールドを施工。
- ④ アーチ脚部固定、補足止水注入、仮設柱設置。
- ⑤ 拡幅部を掘削して切り抜け、覆工を構築。

なお、ランプシールドからも先受けアーチの造成が可能であり、その場合の施工手順は、本線シールド施工、ランプシールド施工(同時に先受けアーチ造成)、切り抜け掘削、覆工構築の順となる。

(3) 適用事例

本工法の適用例を図-3に示す。トンネル覆工構造として、ノーズ部とテーパ部ではセグメントの一部を本体利用する。減速車線部では両外側のセグメントを残して切り抜けて、内部に楕円形のトンネル覆工を構築する。

これにより切り抜け範囲を小さくし、合理的な覆工構造とすることができる。さらに、トンネル占用幅を縮小する効果もある。なお、減速車線部の前後で走行車線を中央よりにシフトすることで、建築限界を確保している。

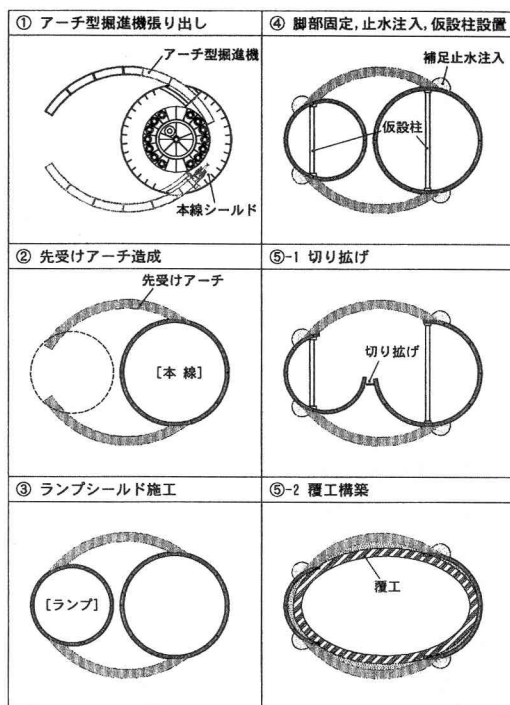


図-2 施工手順

(4) 工法の特長

本工法には以下の特長があり、高水圧が作用する大深度地下での切り抜け施工を効率的に行うことが可能となる。

- ① 高剛性の先受けアーチにより安全な切り抜け作業が可能で、切り抜けに伴う周辺地盤の緩みを防止して地表面沈下の抑制効果も大きい。
- ② トンネルに沿って連続的に先受けアーチを造るので、高い止水性を得られる。
- ③ シールド掘進しながら同時に先受けアーチを施工するので、防護工の工程を短縮できる。

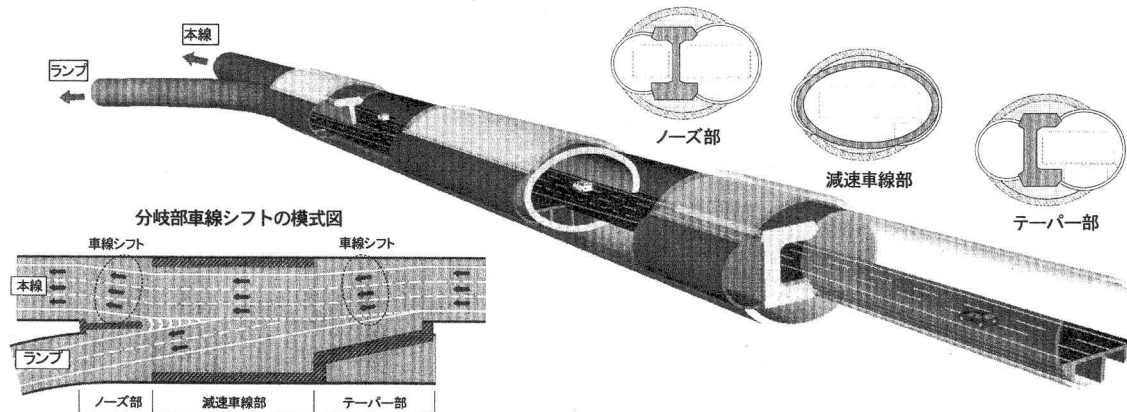


図-3 分岐合流部(OFFランプ)への適用例

- ④ 先受けアーチにより大規模な地盤改良が不要となり建設コストを低減できる。
- ⑤ トンネル間に大きな切り抜け空間を確保できるため、覆工構造の自由度が広がる。

3. 分岐合流部の覆工構造

(1) 検討条件

a) 地盤条件

地盤条件を図-4のように仮定し、先受けアーチ、分岐合流部のトンネル覆工構造について試設計を行った。図-5に分岐合流部の完成時のトンネル覆工構造を示す。

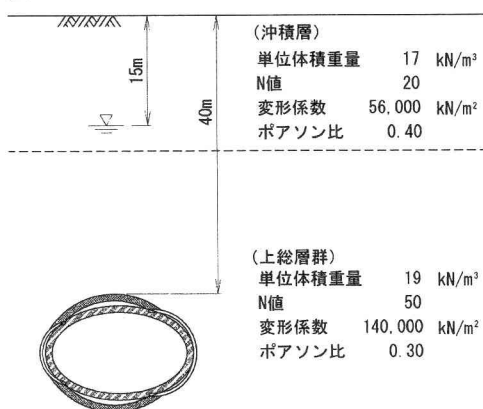


図-4 地盤条件

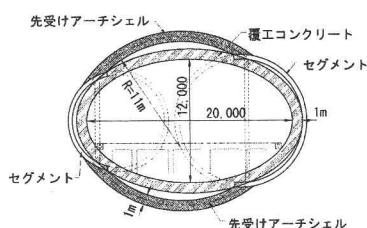


図-5 トンネル覆工構造

b) 荷重条件

想定地盤は、N値50以上の硬質地盤で粘着力も期待できるため Terzaghiの緩み土圧は発生しないが、土被り10m相当の土圧を考慮し、水圧を土水分離として扱い試設計を行う。図-6にトンネル覆工の荷重条件を示す。

(2) 先受けアーチ

先受けアーチの材質は、曲げ強度、引張強度、せん断強度、タフネスなどの特性の向上を期待できる鋼繊維コンクリートとする。

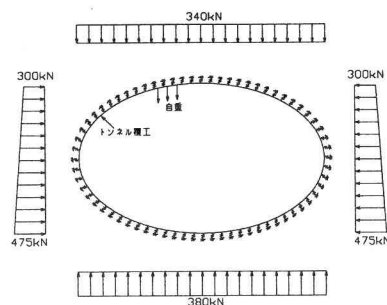


図-6 荷重条件 (トンネル覆工)

先受けアーチは、最終的なトンネル覆工の構造を踏まえ、アーチ半径を11m、弧長17mに設定している。アーチ形状については、アーチ半径が小さいほど曲げモーメントが低減され構造上有利となる傾向にあるが、その一方で弧長が長くなり施工性や機械的な面では厳しい条件となる。

切り抜け掘削完了時の骨組み構造解析の結果を図-7に示す。これより、先受けアーチの部材厚を1.0m、コンクリート設計基準強度を30N/mm²として構造が成立する。仮定した条件では軸力が卓越した状態であり、アーチ内縁側においても引張応力は発生しない。

- ・外縁側応力度 $\sigma_o = 6.6 \text{ N/mm}^2$
- ・内縁側応力度 $\sigma_i = 0.8 \text{ N/mm}^2$
- ・許容応力度 $\sigma_a = 7.5 \text{ N/mm}^2$

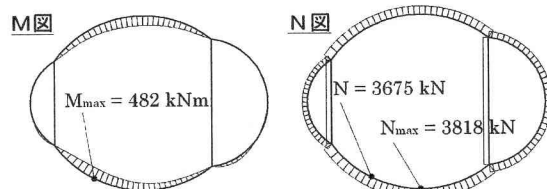


図-7 先受けアーチの断面力図

(3) トンネル覆工

覆工完成時の骨組み構造解析の結果を図-8に示す。覆工コンクリートの部材厚1.0m、コンクリートの設計基準強度40N/mm²、配筋D29@150mmの複鉄筋で構造が成立する。

- ・コンクリート圧縮応力度 $\sigma_c = 13.6 \text{ N/mm}^2$
- ・鉄筋引張応力度 $\sigma_s = 129.6 \text{ N/mm}^2$
- ・鉄筋圧縮応力度 $\sigma_s' = 166.6 \text{ N/mm}^2$

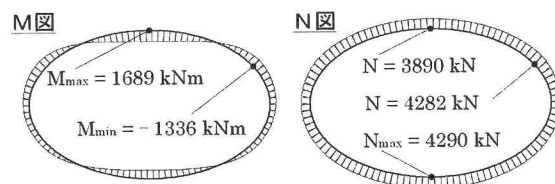


図-8 トンネル覆工の断面力図

4. アーチ型掘進機

(1) アーチ型掘進機の構造

アーチ型掘進機は、シールド側部に張り出され、シールド掘進に同調しながら先受けアーチを造成する掘進機である。図-9 に示すように円弧状の細長い形状であり、前面に円弧状に掘削できるアーチカッタを配置している（図-9 カッタ部参照）。シールドとの接続部は、シールドのローリングなどの際に負荷がかからないように、シールドとアーチ型掘進機の挙動の違いを吸収できるフレキシブルな構造としている。

また、シールド機内での組み立てを容易にするために機体をブロック化しており、テール部は機体の剛性を確保するために隔壁で仕切られた構造となっている（図-9 テール部参照）。

先受けアーチのコンクリートは、この隔壁で仕切られたテール内部で打設される。このため、隔壁により発生するテールボイドにコンクリートを確実に充填し、先受けアーチとしての連続性を確保することが重要である。

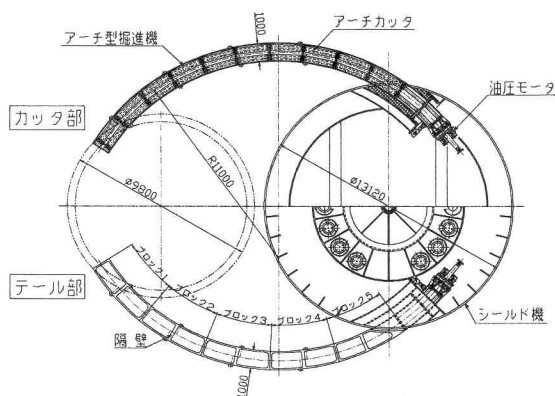


図-9 アーチ型掘進機の全体図

(2) 掘削機構（アーチカッタ）

アーチカッタは、図-10 に示すようにドラム状のカッタ軸を自在継手（ユニバーサルジョイント）で連結した構造であり、カッタ軸端部（シールド機内側）の駆動モータにより回転し、円弧状の掘削を行う。アーチ型掘進機内には駆動部が無いので、機械のメンテナンスが容易な構造となっている。

掘削方式は泥水式であり、切羽安定を図りながら掘進し、流体輸送により排土を行う。

(3) 推進・打設機構

アーチ型掘進機の推進・打設機構を図-11 に示す。本図ではアーチ型掘進機を断面で表している。

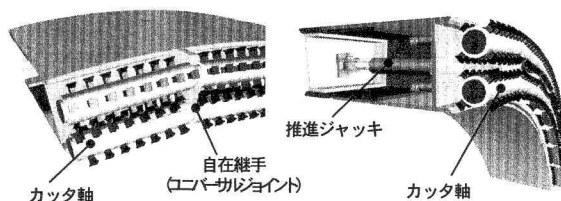


図-10 アーチ型掘進機（アーチカッタ）の構造

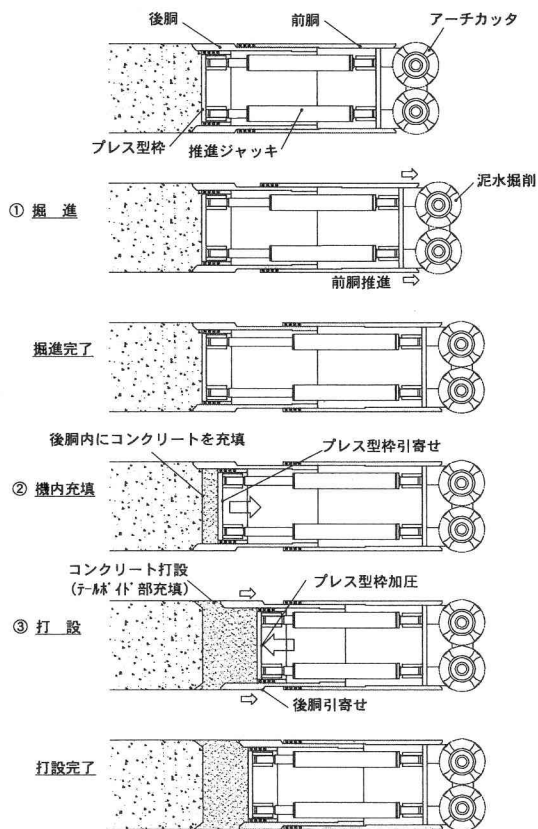


図-11 推進・打設機構

前胴と後胴の複胴式構造となっており、前胴のアーチカッタで掘削し、後胴で先受けアーチの打設を行う。この機構による施工サイクルを以下に示す。

- ① 打設されたコンクリートを反力として、推進ジャッキにより前胴を推進することで掘進する。このとき、推進ジャッキによりシールドと同調して姿勢制御を行う。
- ② 掘進完了後、プレス型枠を引き寄せながら機内（後胴）に1サイクルのコンクリートを“充填”する。
- ③ 後胴の引き寄せと同時にプレス型枠を加圧して、コンクリートを地山に押し出してテールボイド部への充填を行いながら“打設”する。

以上を繰り返すことで、地山を緩めずに先受けアー

チを造成していく。地下水の影響を受けない機内でコンクリートを充填するため、大深度の高水圧下においても、高品質の先受けアーチを造成することが可能となる。

なお、掘進時の推進反力は、打設したフレッシュコンクリートでも得ることができるので、コンクリートの硬化を待たずに、打設完了後、直ちに次サイクルの掘進を行うことができる。

5. 実証実験

(1) アーチカッタの掘削性能

アーチカッタは、カッタ軸をユニバーサルジョイントで連結した特殊な掘削機構であり、この掘削機構による円弧状断面の掘削はこれまでに例がない。そこで、1/2スケールの実験機を製作し、模擬地盤を掘削する実験を行った。

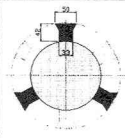
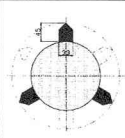
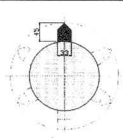
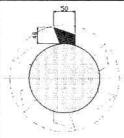
a) 実験機

カッタは長さ60cmのものを5ブロック接続したものを上下2列に配置したものとし、各カッタの継手角度は実機と同じ10度とする（写真-1、図-12）。カッタ回転駆動は油圧モータとし、推進機構は後方より油圧ジャッキにて推進して模擬する（図-13）。なお、排土は泥水流体輸送方式とする。

b) カッタビット

カッタビットの形状や配置によるカッタトルクなどの掘削性能の違いを確認するために、表-1 に示す4種類のビットを用いて掘削性能を比較する。

表-1 カッタビット形状

Type-1	Type-2	Type-3	Type-4
			
幅50mm	幅50mm	幅50mm	幅25mm

c) 模擬地盤

強度を調整した流動化処理土で模擬地盤を製作する。模擬地盤の寸法は幅3.1m×高さ1.4m×奥行1.0m、強度は泥岩層を模擬して4週一軸圧縮強度1～3N/mm²とする。

d) 無負荷試験結果

模擬地盤の掘削前に、無負荷でのカッタ回転試験を行った。その結果、カッタを回転させるために使用している油圧モータの作動圧力は略0MPaで、ユニバーサルジョイントの機械損失は非常に小さいことが確認された。

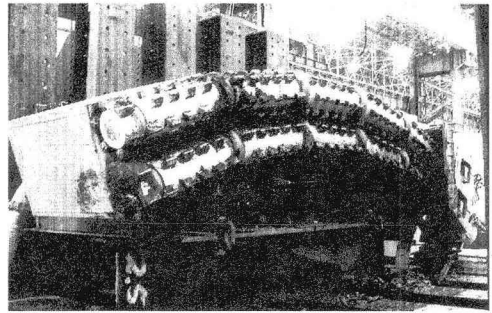


写真-1 アーチカッタ実験機

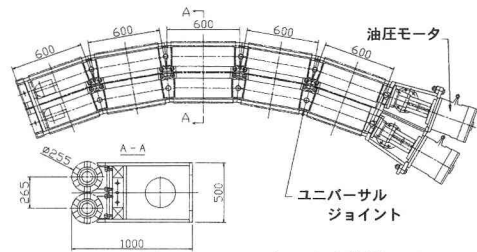


図-12 アーチカッタ実験機

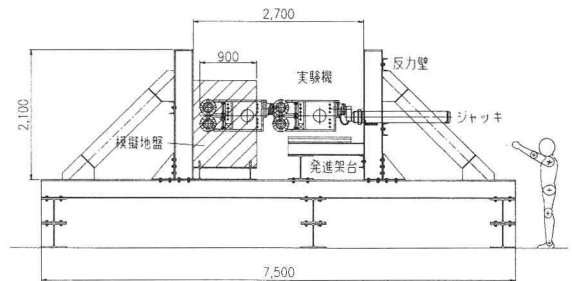


図-13 実験装置の側面図

e) 掘削実験結果

カッタの回転速度を9～20rpm、推進速度を10～30mm/分 で変化させた掘削実験の結果、アーチカッタにより泥岩相当の強度において支障なく掘削できることが実証された（写真-2）。

また、カッタビットの形状や配置がカッタトルクに影響を及ぼすことが確認された。図-14 に強度3N/mm²の模擬地盤切削時の各ビットのカッタトルクを示す。なお、設計カッタトルクは式（a）により算定される。

$$T = q \times \Delta / p \times (b \times N / 2) \times r \quad (a)$$

ここに、T：カッタトルク（N・m）

q：地盤強度（一軸圧縮強度）（N/mm²）

Δ：1回転あたりの切り込み量（mm）

p：パス数

b：カッタビット幅（mm）

N：カッタビット数（個）

r：回転ビット半径（mm）

以下に、ビット形状がアーチカッタの掘削性能に及ぼす影響について、タイプごとに考察する。

① Type-1

ビット背面に掘削土が付着し、摩擦抵抗が増大する。そのため、切り込み量が小さい場合でも大きなカットトルクを必要とし、粘性土地盤には適さないと考えられる。

② Type-2, Type-3

すくい角のないビット形状であるが、Type-1に比べて摩擦抵抗が少なく、カットトルクが低減している。Type-2（3パス）はビット配置数が多く、地盤を同時に切り込むビット数が多いため、Type-3（1パス）に比べてカットトルクの瞬間的な上下変動が大きい。

③ Type-4

4タイプのビットの中で最もカットトルクが小さく、固結粘性土地盤の掘削に適した形状であると考えられる。トルクの減少は、ビットのすくい角を8.5度、逃げ角を20度として刃先の切削抵抗が減少したことによると推定される。

しかし設計カッタートルクに対しては約1.9倍と大きい結果となっている。Type-4は、幅25mmのビットを50mm間隔に配置し、ビット間に25mmの未掘削部分を残している。このためビット側面と未掘削部の地山との摩擦抵抗が生じ、カッタートルクの上昇につながっていると考えられる。

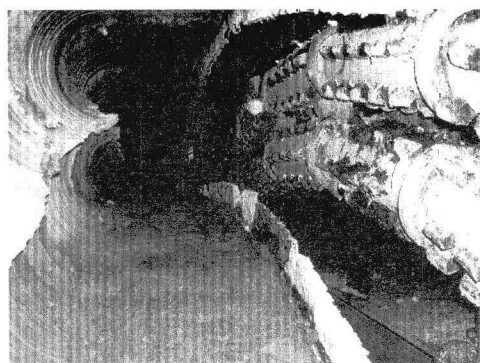


写真-2 掘削状況

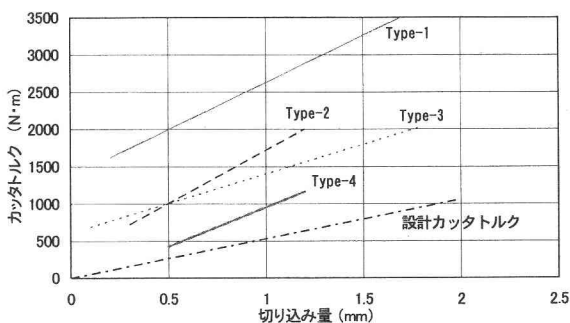


図-14 切り込み量とカッタトルクの関係

(2) 先受けアーチの打設性能

大深度の高水圧下で地盤を緩めずに高品質の先受けアーチを打設することが要求される。また、前述のように隔壁で仕切られたテール部で打設されるコンクリートが、アーチとしての連続性を確保できるかどうかは、本工法の実証において重要である。そこで、圧力土槽を用いて0.5MPaの被圧下で打設実験を実施した。

a) 実験装置（打設ブロック）

図-15 に示すように、実験装置はアーチ型掘進機の後胴部分を模擬し、機内へのコンクリート充填と地山への打設のサイクルを再現できる構造とする。

打設するコンクリートの厚さは500mmとし、実機の1/2スケールとする。また、ブロック構造であるアーチ

型掘進機を模擬して打設部を□-500×500の2連形のブロックとし、ブロック間の隔壁厚さを実機と同じ160mmとする。

b) 実験土槽

圧力土槽に打設ブロックをセットした後に、砂を投入して水締めを行い模擬地盤（相対密度65%）を作成する。土槽と連通した水タンク（レシーバタンク）をエアコンプレッサで加圧し、0.5MPaが作用する緩い砂地盤を模擬する。

c) 使用材料

先受けアーチの材料としては、充填性、不分離性、安定性（可使時間の確保）などが要求されるため、スランプフロー65～75cm、可使時間120分の高流動鋼繊維コンクリートを選定する。ただし、コンクリートの

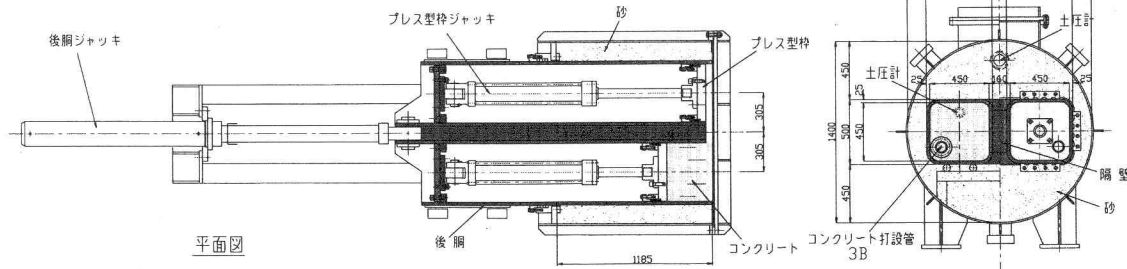


図-15 コンクリート打設実験装置

場合には配管の閉塞が懸念されるため、施工条件次第ではモルタルの適用も考える。表-2 に基本配合、表-3 に配合試験の結果を示す。

なお、今回の実験では、高流動鋼繊維モルタルで計画したが、ポンプの圧送能力が低く配管閉塞を生じたため、高流動モルタルに変更した。

d) 実験ケース

ジャッキにより後胴を土槽内から引き抜きながら、後胴の前進により発生する空間にモルタルを打設する。打設方法として、以下の2ケースを実施する。

Case-1: プレス型枠を引きながらモルタルを機内充填した後に、後胴の前進に合わせてプレス型枠を加圧制御してモルタルを押し出して打設。

Case-2: 機内充填を行わずに、後胴の前進に合わせてポンプの圧力制御により地山にモルタルを直接打設。

両ケースとも厚さ200mmの初期打設を実施後に、充填速度と打設速度を変化させて1ロット目、2ロット目の打設を行った。速度については表-4 に示すとおりで、実機のサイクルタイムを考慮して充填 80mm/分、打設 50mm/分を最低目標とする。

e) 実験結果

① 先受けアーチの出来形

Case-1、Case-2ともに、0.5MPaの作用する緩い砂地盤において砂の崩落は見られず、所定の寸法形状で先受けアーチを打設できることを確認した(写真-3)。幅および厚さは設計出来形の +0~+10mmであった。

② ブロック間(隔壁ボイド部)への充填性

ロットごとに打設モルタルに着色して識別できるようにしておき、供試体を切断してブロック間の隔壁ボイド部への充填状況を確認した(写真-4)。

打設されたモルタルは、先行打設されたモルタルを後方に押しこみ、それに伴って隔壁ボイド部へモルタルが回り込んだ形跡が見られる。この結果、隔壁ボイ

ド部へもモルタルが充填され一体化が図られており、アーチの連続性を確保できることが確認された。

表-4 実験ケース

実験ケース		Case-1	Case-2
1 ロット	充填速度	80 mm/分	—
	打設速度	50 mm/分	50 mm/分
2 ロット	充填速度	240 mm/分	—
	打設速度	150 mm/分	100 mm/分

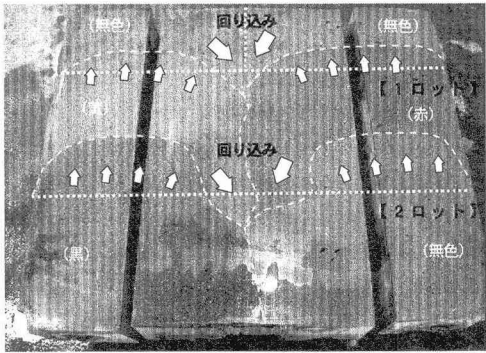
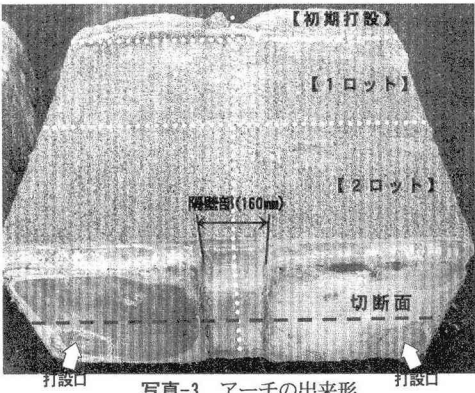


写真-4 切断面状況

表-2 高流動鋼繊維コンクリートの基本配合

	水セメント比 W/C (%)	単位粗骨材 絶対容積 (m³/m³)	鋼繊維 混入率 Vol (%)	高性能 AE 減水剤 SP/C (%)	単 位 量 (kg/m³)						
					水	セメント	細骨材	粗骨材	鋼繊維	増粘剤	高性能 AE 減水剤 SP
高流動鋼繊維 コンクリート	31.1	0.250	1.0	1.9	207	666	797	675	78.0	0.3	12.7
高流動鋼繊維 モルタル	31.1	—	1.0	1.9	250	804	1224	—	78.0	0.2	15.3

表-3 高流動鋼繊維コンクリートの配合試験結果

	圧縮強度 (N/mm²)		引張強度 (N/mm²)	曲げ強度 (N/mm²)	せん断強度 (N/mm²)
	7日	28日			
高流動鋼繊維 コンクリート	41.8	79.7	8.05	11.18	16.40
高流動鋼繊維 モルタル	44.3	84.8	8.52	11.85	17.63

③ 打設管理

当初、打設管理としてプレス型枠と後胴のジャッキストロークによるボリューム管理を実施した。その結果、打設圧力が土槽圧力より低下した際に、打設ブロック内に砂が流入して出来形不良を発生した。このことから、機内充填および打設時には、プレス型枠の圧力を土槽圧力以上に常に保つことが、地盤の緩み防止に対して重要であることが確認された。

④ 推進反力

打設完了後、プレス型枠をさらに加圧し、掘進時相当の推力（0.8MPa以上）をコンクリートに作用させ、フレッシュコンクリートでも十分な推進反力が得られることを確認した。

⑤ ポンプの圧送能力

実験では、少量の打設の流量調整を行うため、圧送ポンプとして脈動の小さいスクイズ式ポンプを選定した。しかし鋼繊維による閉塞を生じ、高流動鋼繊維モルタルの圧送にスクイズ式が適さないことが確認された。高流動鋼繊維コンクリートの適用を考えた場合、鋼繊維に加えて骨材も閉塞の要因となるので、実機では圧送能力の高いピストン式ポンプが適していると考えられる。

(3) まとめ

アーチカッタの掘削性能実験より以下のことを確認した。

- ・アーチカッタにより、泥岩相当（一軸圧縮強度 1 ～3 N/mm²）の地盤を円弧状に掘削できる。
- ・カッタビットは、すくい角と逃げ角を有する形状で1パスの配置が適している。

また、先受けアーチの打設性能実験より、以下のことを確認した。

- ・複胴式の打設機構により、0.5MPaの高水压下でも所定の形状の先受けアーチの打設が可能である。
- ・ブロック間（隔壁ボイド部）にも確実にモルタルが充填され一体化が図られ、アーチとしての連続性を確保できる。
- ・先受けアーチの打設管理として、プレス型枠の圧力を常に土水圧以上で管理することが重要である。

6. おわりに

アーチ型掘進機の掘削機構、および、打設機構について、実証実験によりその基本性能を確認した。今後、本工法の実用化を図る上で、アーチ型掘進機の張り出し部の止水構造と張出し方法を主要な技術課題と考えている。また、今回の実験では実施しなかった高流動鋼繊維コンクリートの圧送についても、確認しておく必要がある。

これらの技術課題については、今年度中に実証実験により確認し、実プロジェクトへの展開を目指したいと考える。

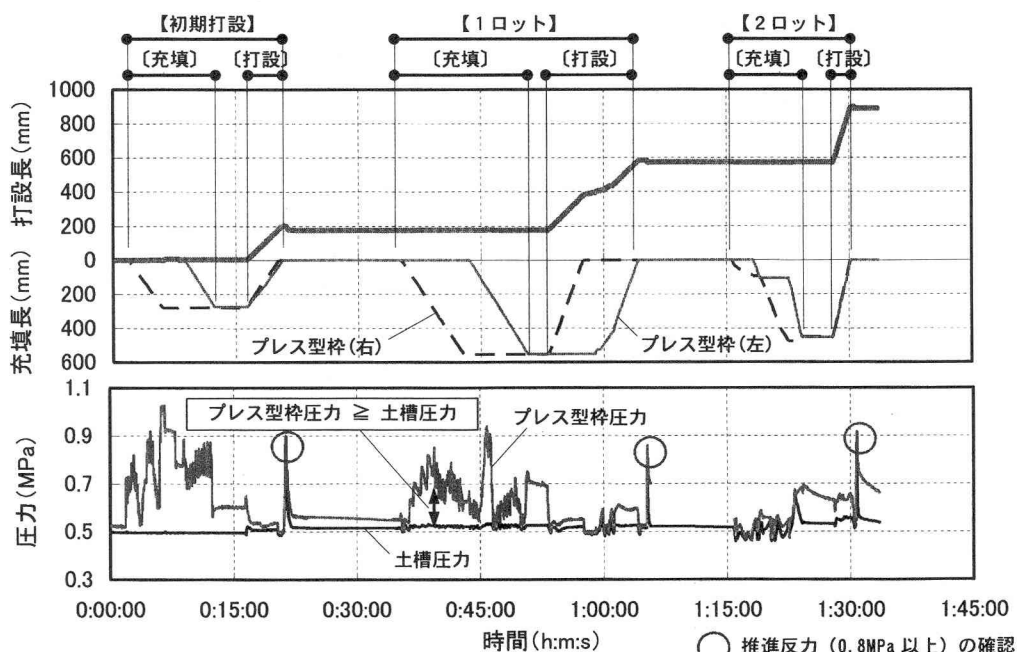


図-16 打設実験結果 (Case-1)