

新素材セグメントを使用したトンネル分岐事例

米崎育和¹・木村勉²

¹ 東大阪市 上下水道局 下水道部 建設室 (〒577-8521 大阪府東大阪市荒本北50-4)

² 正会員 株式会社大林組 シールド技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

本工事は、シールドトンネルにおける坑内分岐事例である。都市部では地上部の交通や生活、社会環境に影響を与えず、低コストで全く違う方向にトンネルを分岐させる方法のニーズが高まっている。すなわち、分岐箇所立坑を設けず、地中で直接トンネルを分岐させる方法である。本工事では地上を全く使用しないで、すべてセグメント内の作業で分岐工事を施工した。セグメント内からの分岐トンネルの構築には、狭隘な作業空間の特殊性や本線トンネルに開口設置するという構造に起因した設計・施工上の課題がある。特に、深度の大きな位置で、狭い坑内からの発進には、高い安全性と施工性を兼ね備えた工法の選定が必要であった。

本報文では分岐シールドの設計・施工上の課題と、分岐部に採用した新技術(FFUセグメント)の有効性を報告する。

キーワード:分岐シールド、FFUセグメント、開口補強セグメント、坑内発進

1. まえがき

本工事は、東大阪市南西部に貯留型の増補幹線を築造する工事である。この地区は、都市化の進展に伴って、集中豪雨時の既設管渠や終端ポンプ場の能力不足が問題となってきた。そこで、既設設備の処理量を超えた分を増補幹線に回すことで、ピークカットを図ることになった。そのため、市内の複数箇所既設管渠から増補幹線へ分水することが求められ、増補幹線の分岐が必要とされた。

分岐箇所は交通量の多い主要幹線道路である。加えて、民家や店舗の密集した地域であり、地上の工事用地の確保が困難であった。そのため、分岐工事用立坑の築造や地上部での地盤改良等、大規模な工事は不可能であった。発注者、警察、地域の要望で、地上を全く使用しない坑内での分岐トンネルが必要とされた。

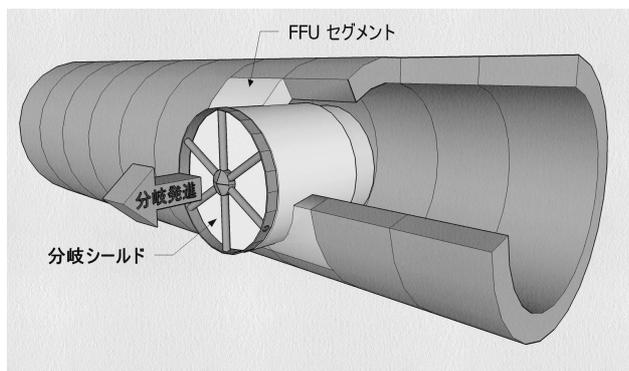


図-1 FFU セグメントを使用した坑内分岐のイメージ

2. 工事概要

工事名称:平成16年度公共下水道第5工区管きょ築造工事

発注者:東大阪市上下水道局下水道部

工事内容:シールド工(泥水シールド)

表-1 トンネル概要

	路線延長 (m)	シールド 外径 (mm)	セグメント 外径 (mm)	セグメント 内径 (mm)	二次覆工 内径 (mm)
親(本線) トンネル	1104	4700	4550	4173	3750
子(枝線) トンネル	337	2680	2550	2244	1800

3. 地質・土質条件

施工箇所平面図を図-2に、地質縦断図を図-3に示す。

シールド掘進対象地層は大阪層群の上部に位置する洪積粘土層(海成粘土層)である。N値が平均7程度の比較的硬い地層である。この粘土層の下部は天満砂層と呼ばれ、粒径がそろった均等係数の小さな砂層である。含水も多く、過去の工事でもトラブルの要因となっている。今回、工事に先立ってボーリング調査を実施し、分岐箇所での地層の状況を調べた。トンネル分岐は、均一な粘土層中で分岐できることを確認した。



図-2 全体平面図

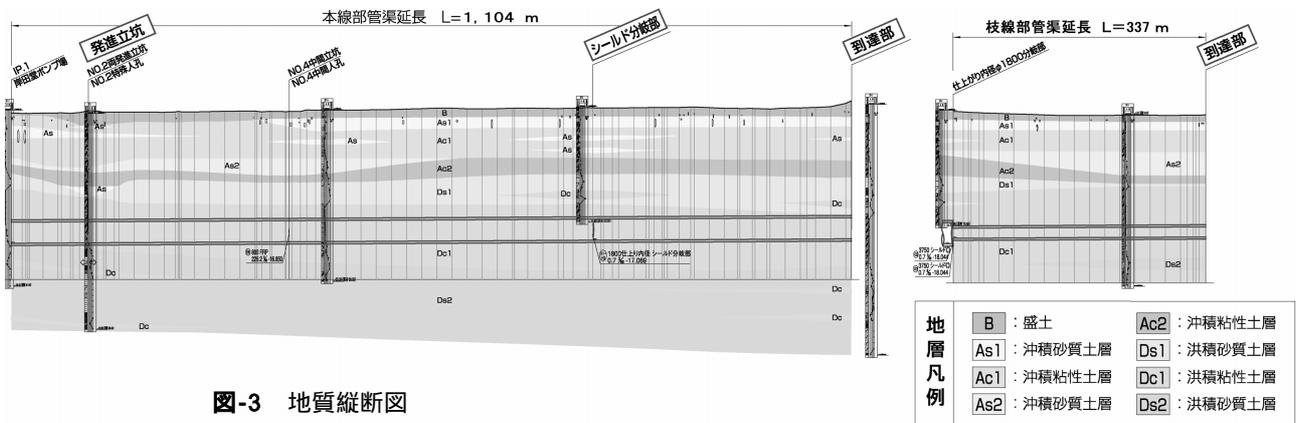


図-3 地質縦断面図

4. 分岐方法の検討

(1) 分岐シールドの技術的課題

分岐シールドの技術的な課題を以下に示す。

a) 本線セグメント内の狭隘な作業

本線セグメント(内径 4173mm)から枝線シールド(外径 2680mm)を分岐発進することが可能なマシンの製作と現地組立、掘進方法が必要とされた。加えて、作業空間がほとんど取れず、また、緊急時の退避が困難な人力での鏡切を行わない発進方法が必要とされた。直接切削可能なセグメントを使用した場合には、切削時のセグメントの大割れにより、排泥ラインでの閉塞が問題となる。

シールド発進には切羽圧を保持する最低限の泥水圧が必要となる。子機の組立時に泥水圧を保持しようとした場合、狭隘な作業空間でシールドを親側のトンネルに仮固定(バックリング防止)しなければならない。

b) 開口補強対策

一般に、本線トンネルに対する枝線トンネルの直径(開口)が20%以上となる場合、本線トンネルの補強が必要とされる。本工事の開口は59%であり、明らかに対策が必要であっ

た。

c) 地盤改良に頼るシールド発進の不確実性

鏡切やシールドジャッキ推力に対抗できるような強度の高い地盤改良が必要である。高強度改良が期待できる水平高圧噴射攪拌工法(MJS工法等)は施工設備が大きく、また、水平角以上の改良体造成が現在の技術では極めて困難である。従って、水平高圧噴射攪拌工法は制約が多く採用できない。高強度の地盤改良を前提とした人力による鏡切を行わず、シールドジャッキ推力を地盤と共にセグメントが負担できるような構造が必要であった。

d) マシンや機械設備の大幅な変更を必要としない工法の採用

シールド分岐工法でよく用いられるのが、親機に内蔵(または設置)可能な子機を使用して、親機マシンから子機を分離発進する方法である。この方法では以下のような短所がある。

- ・ シールド機長が長くなることで発進立坑の規模が増大
- ・ シールド機長が長くなることによる曲線施工への適用性が低下
- ・ 親機マシンの構造が複雑化することによるマシン製作

コストの増加

本工事では、大幅な工事変更やコストアップを伴わない、セグメントからの子機シールド発進が必要とされた。

(2)工法の選定

前述の課題を克服すべく、以下の工法選定を行った。

a) F F Uセグメントの採用

狭隘な作業空間での子機分岐発進を実現するために、人力鏡切が不要でシールドカットによる直接切削が可能な F F Uセグメントを鏡部 4R (4m区間) に採用した。

F F U (Fiber Reinforced Foamed Urethane)セグメントはガラス長繊維強化プラスチック発泡体をセグメントのリング形状に合わせて曲げ加工したものである。

F F U は少量の発泡剤、製泡剤、触媒を添加したポリオールと、ポリイソシアネートを混合攪拌し、これをガラス長繊維に含浸した後、金型内で発泡硬化させ、板状に成型したものである。(図-4)

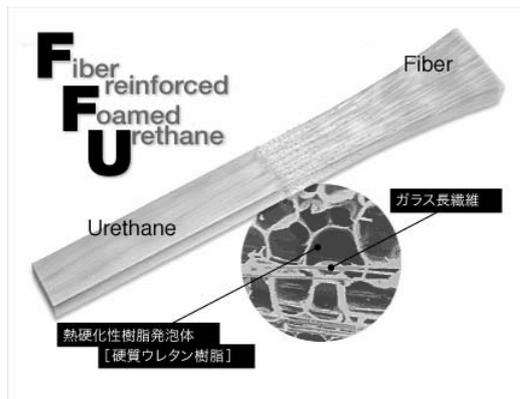


図-4 F F U 材料

F F U を立坑土留壁に応用したものが S E W 工法であり、セグメントに先行して実績が増加している。

F F Uセグメントの長所は、カッターでの切削性に優れた点である。F F Uのようなプラスチック素材は、NOMST工法のようなコンクリート素材に比べてやわらかく、削りやすい。シールドマシンに大きなトルクが不要で、切削が容易である。従って、カッタートルク不足やローリング対策、低吐出ユニットの準備等の対策が軽微で済む。結果としてスムーズな発進が可能となる。本工事のように、狭いセグメント内から子機を順次組立てて発進する場合、このような対策に配慮する必要がないことは大きなメリットである。

また、切削抵抗が小さいため、掘進速度の大きな低下がない。そのため、坑内発進の不安定な初期掘進時期を早期に終わらせることができる。安全で確実なシールド発進方法といえる。

本工事では分岐部の土質が均質で、透水性の低い洪積粘性土であった。そこで、F F Uセグメントとゴムチュー

ブ拡張型のエントランスパッキンの組合わせにより、発進防護の地盤改良を行わないシールド発進が可能となった。

表-2 F F U 材料の基本物性値

項目	物性方向	試験値	設計用値
密度(g/cm ³)		0.74	
曲げ応力度(N/mm ²)	繊維方向	72.0 ²	36.0
圧縮応力度(N/mm ²)	繊維方向	56.9	29.0
	繊維直角方向	13.2	6.6
せん断応力度(N/mm ²)	繊維方向	9.1	4.6
	繊維直角方向	6.2 ²	3.1
接着せん断応力度(N/mm ²) ¹	繊維方向	9.1	4.6
引張応力度(N/mm ²)	繊維方向	127.0	64.0
ヤング係数(N/mm ²)	繊維方向	1.0×10 ⁴ ²	1.0×10 ⁴ ²

1 接着剤はエポキシ系接着剤を使用

2 F F U部材の実物大載荷試験の結果

b) 開口補強セグメント (10R) の採用

本工事では狭隘なセグメント内部からのシールド発進となるため、開口補強部材をセグメント組立完了後に追加する方法は空間的に不利である。したがって、鋼製セグメント単体で開口補強がなされたセグメントを採用した。(図-5, 6)

補強は開口上下の梁部(受桁)と柱部に分けられる。受桁は曲げ部材として大きなモーメントを受けるが、リング間の伝達不足しないよう2列配置のボルト継手板(M30(10.9)N=22本)を使用した。柱部は影響範囲のスチールセグメントを3本主桁から4,5本主桁に増強した。加えて、中主桁にフランジリブを追加した。

また、シールドジャッキ反力についても検討を加えた。地山・セグメント・反力壁(H-350×2本+コンクリート)の3つで負担できるよう設計し、セグメントの補強を行った。

c) 分割発進に合わせたシールドマシンの採用

セグメント内の狭隘な作業空間でシールドマシンを運搬、組立、発進できるよう、以下の対応を行った。

- ・マシン分割は運搬組立可能な4分割(カッター部・前胴・後胴前部・後胴後部)
- ・組立途中での掘進が可能な構造(空間が狭いため、組立完了してから発進することができない)
- ・組立途中のマシンのバックリングを防止するため、補強セグメントに固定できる構造
- ・F F Uの大割れした破砕物によりチャンパーが閉塞しないよう、スクリーコンベア型のガラ搬出装置を装備
- ・F F Uセグメントを均等に切削できるよう、カットを球面に合わせたスポーク配置とする

子機シールドマシンを写真-1、図-7に示す。

5. 施工状況と有効性の確認

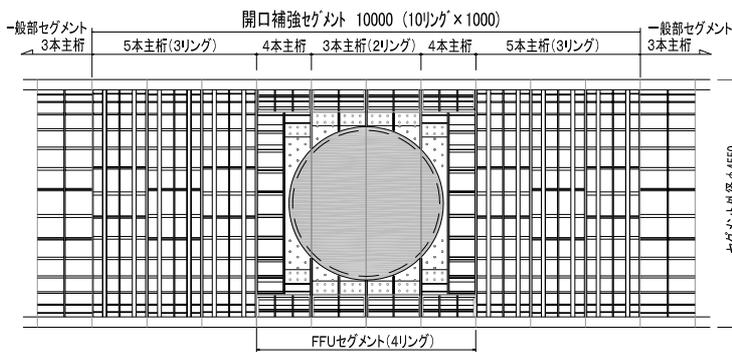


図-5 FFUセグメントと開口補強セグメント



写真-1 子機シールドマシン

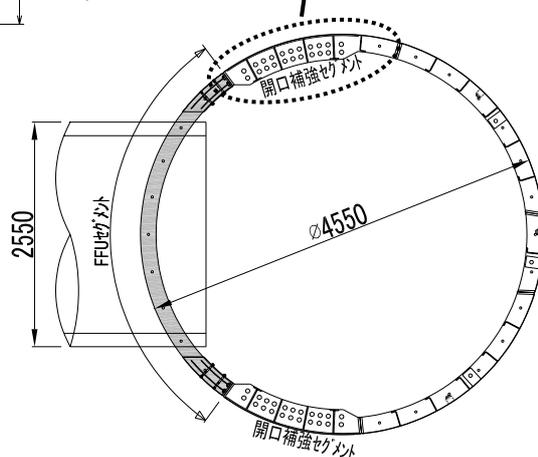
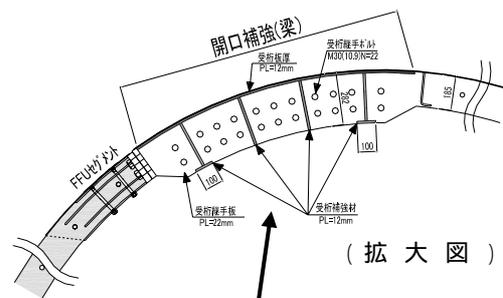


図-6 FFU及び補強セグメント断面図

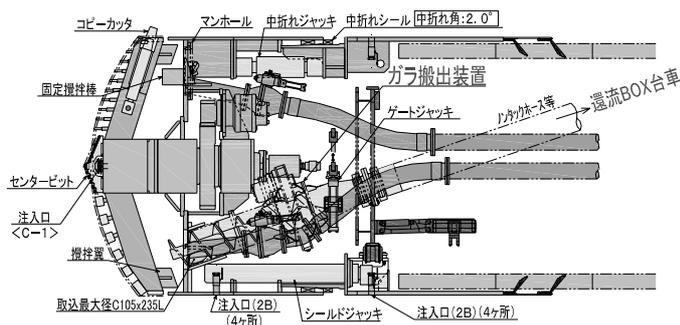


図-7 子機シールドマシン図



写真-2 FFUセグメント組立状況

(1) FFUセグメント及び開口補強セグメント組立

FFUセグメントの組立状況を写真-2に示す。FFUは引張に比べ、圧縮強度(特に繊維と直角方向)が低い。このため、FFUセグメント組立直後の親機のジャッキ推力による変形を防止することが課題になった。今回使用したFFUセグメントは、製作時にFFUよりも圧縮強度の大きなFRP(9mm)を4層挟み込むことでジャッキ圧に対応(装備推力の50%)した。実施工でも親機シールドマシンの推力を抑制したため、一時的に掘進スピードが低下した。

FFUはガラス繊維補強で強度を発現しているため、素材中に方向性があり、繊維同士を直接繋げる事ができない。また、カッターで直接切削するため、継手に金物を使用することはできない。本工事は、開口率が59%もあり、FFUセグメント1弧長が4.28m(108度)と、通常ピース(67.5度)よりもか

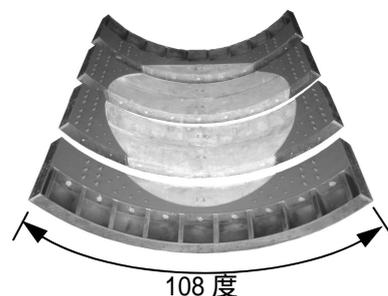


写真-3 FFUセグメント

なり大きくなった(写真-3)。坑内運搬やエレクター組立時の空間的な余裕はほとんどない状態であった。

(2) 分岐シールドの発進とFFUセグメント切削工

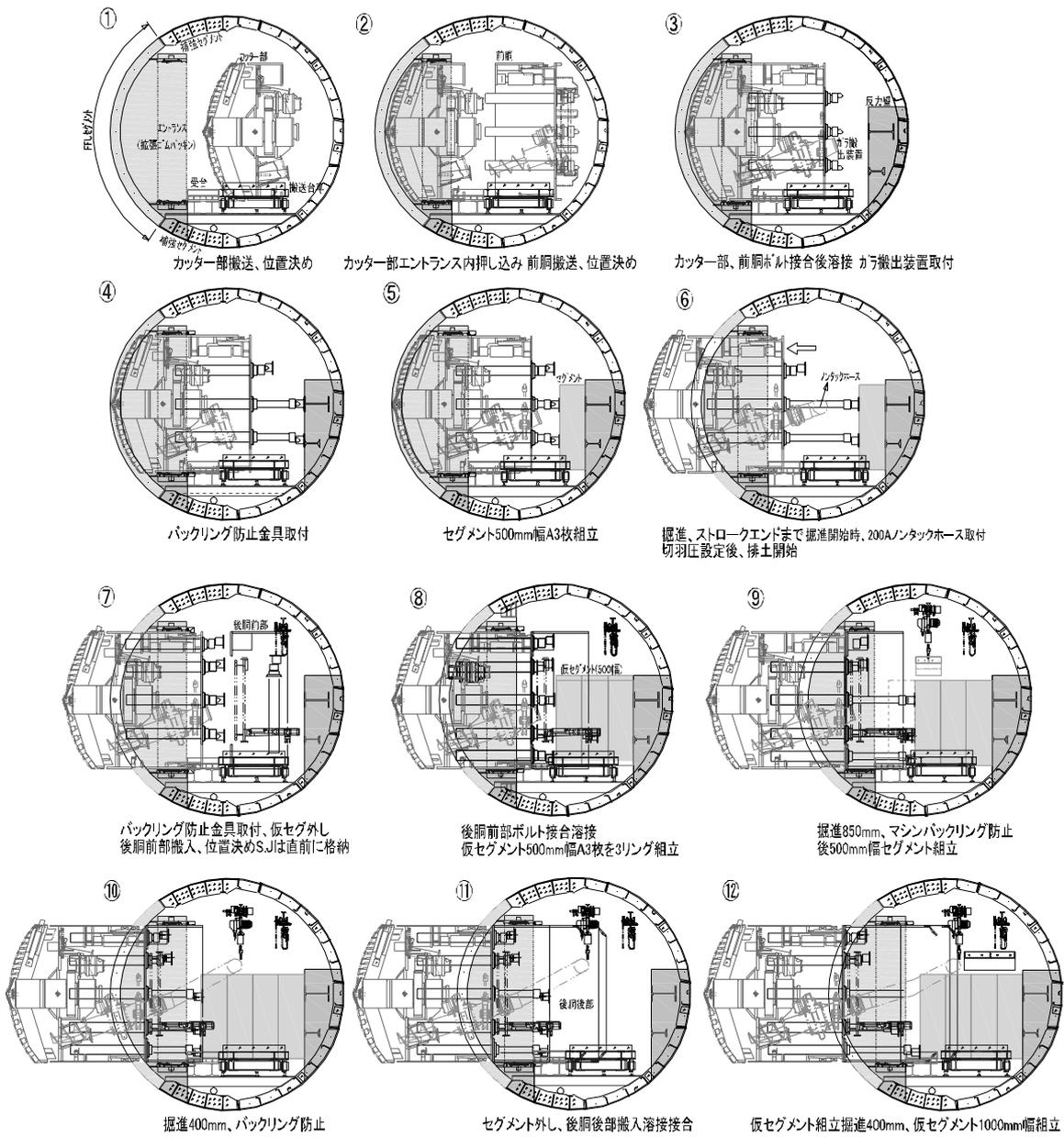


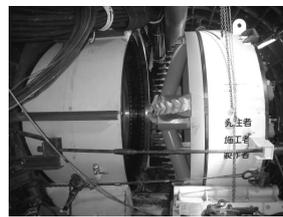
図-8 分岐シールド発進フロー図



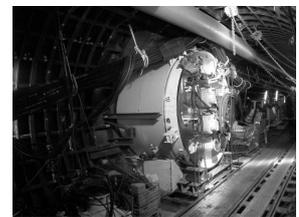
エントランス設置



カッター部坑内搬送



カッター部セット



カッター部挿入



FFU 切削掘進



後胴設置

写真-4 分岐シールド発進状況

表-3 分岐シールド工程表

日数	1	10	20	30	40
親機シールド掘進	■				
親機シールド解体撤去	■	■			
子機シールド設備工					
エントランス設置工		■			
シールド工法設備設置工		■			
子機シールド組立・掘進工					
カッタ、前胴設置組立			■		
反力壁設置				■	
試運転調整、掘進準備				■	
FFU切削、貫入掘進				■	
後胴前部組立					■
貫入掘進					■
後胴後部組立、調整					■
初期掘進工					■

親機シールド到達後、マシン解体～子機シールド発進準備に約1箇月弱を経て、子機組立とシールド掘進を開始した。図-8に分岐シールド掘進フロー図、写真-4に状況写真を、表-3に分岐シールドの工程表を示す。

狭隘な内空の制約から、子機シールドは後胴を組立てる前にFFUセグメントの切削掘進を行う必要があった。

FFUは比重が0.74と水よりも小さいので液体の充填では切削屑をチャンバーから排出しにくい。そこで、切削屑が浮かず、チャンバー内に均等に分散するよう、加泥材を添加した。加泥材はベントナイトに水溶性の高分子添加材(TG-ジェル)を加えたものを使用した(ベントナイト 70kg/m³, 高分子添加材(TG-ジェル) 15kg/m³)。これにより、切削屑の流動性と非分離性を高めて、FFU切削を行うことができた。

施工の結果、閉塞もなく、切削屑もガラ排出装置から容易に取出せ、掘進にあわせて切羽圧も順当に作用させることができた。

写真-5は、FFUセグメントの切削状況を写したものである(ハッチの奥に見える筋がFFUをカッタが削った跡)。

写真-6は、FFUの切削屑を写したものである。FFUは繊維状に細かく、2～5cm程度の長さで切断されている。平らに数cm角で切断されているのは、FFUに積層されているFRPである。図-9はFFU切削時の掘進データを示したものである。ジャッキ推力とカッタトルクはそれぞれ装備能力の25～45%であり、マシンに与える負荷は通常の掘進程度に収まった。ジャッキスピードは2～6mm/minで、工程を遅らせることなく順調に切削し、かつFFUの大割れも防止できた。カッタ回転数を後半に上昇させているのは、カッタの切込み深さを押さえることで、トルクの上昇と大割れを防止するためであった。

以上、分岐シールド工事を順調に施工でき、FFUセグメントの採用が適正であったと実感できた。

子機の組立には発進架台兼用の搬送台車を特別製作し、組立や段取替えの施工時間を縮小させた。また、不安定な



写真-5 FFU切削状況



写真-6 FFU切削屑

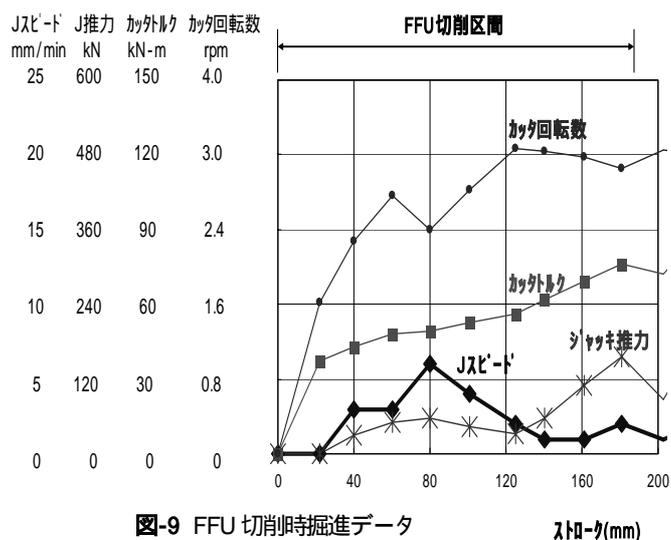


図-9 FFU切削時掘進データ

ストローク(mm)

荷姿のカッタ部について、マシン工場にてトンネル最小半径での搬送試験を実施し、坑内運搬の安全性を事前に確認した。

6. おわりに

FFUセグメントは、適用限界の課題もあるが、施工性の良さやコスト的な有利さから、トンネル内分岐には有効な方法であった。

トンネル内からの確実な分岐方法として今後の使用が予想される。本報告がその際の一助になれば幸いである。