

セグメントの切削による分岐合流工法の開発における実験的研究

The experimental study of developing a divergent junction construction method by cutting through existing tunnel segments using shield machine

宮澤昌弘¹・松井芳彦²・林田道弥³・藤野豊⁴

Masahiro Miyazawa, Yoshihiko Matsui, Michiya Hayashida and Yutaka Fujino

¹正会員 前田建設工業株式会社 土木本部土木技術部 (〒102-8151 東京都千代田区富士見二丁目16-10)

E-mail:miyazawa.m@city.maeda.co.jp

²工修 前田建設工業株式会社 土木本部土木技術部 (〒102-8151 東京都千代田区富士見二丁目16-10)

³正会員 工修 新日鉄マテリアルズ株式会社 企画管理部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)

⁴正会員 ジオスター株式会社 セグメント事業部 (〒113-0022 東京都文京区西片一丁目17-8)

Recently, road tunnel construction using the shield tunneling method has been utilized on infrastructure projects in urban areas. Due to the strict site constraints in urban area, the divergent junctions are to be located underground. Normally, for the construction of an underground diversion junction, large-scale cut and cover methods or the NATM method with ground improvement works shall be adopted. However, these methods involve significant issues relating to safety, cost and the construction period.

We then considered that we could construct a divergent junction with minimum section by cutting through the existing tunnel shield using another shield machine. For the development of a new construction method, various experiments have been carried out using specially designed segments for ease of cutting. This paper discusses the possibility of actually adopting this method based on the experiments undertaken.

Key Words : the segment for ease of cutting , NOMST , lightweight aggregate concrete

1. はじめに

(1) 研究の背景と概要

近年、都市部インフラ整備の一つとして、シールド工法による道路トンネルの計画がなされている。用地条件の厳しい都市部の道路トンネルでは、分岐合流部を地下に構築せざるを得ない場合が多く、現状の技術では地上から行う大規模開削工法、地盤改良を併用したNATMによる切り上げ工法などが考えられるが、安全、コスト、工期の面で多くの課題がある。

こうした課題に対して、図-1のように、先行するシールドトンネルを後行シールドで直接切削ができれば、最小幅で最小限な切り上げで分岐合流部を構築する工法が考えられる。

本論文は、この工法の開発において、シールドで切削掘進が容易なセグメント（以下、切削セグメントと称する）を各種の実験により研究し、工法の実現性について検証したものである。

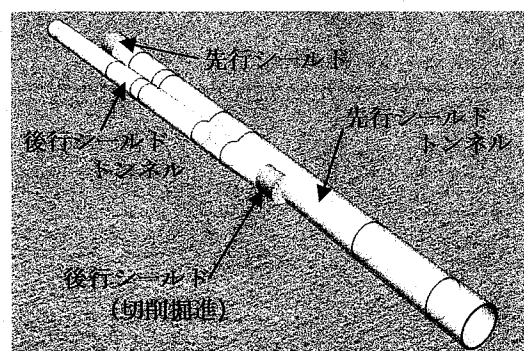


図-1 先行トンネルを後行シールドで切削する分岐合流部の構築工法のイメージ

(2) 技術的課題

切削セグメントを設置した先行トンネルを後行シールドでトンネル延長方向に切削掘進する場合には、発進および到達での仮壁の切削とは異なり、施工上、次のような技術的課題が考えられる。

- ・適切な掘進速度と切削状況
- ・先行トンネルの挙動および影響
- ・後行シールドの姿勢制御
- ・後行シールドの切削負荷

これらの技術的課題に対する知見を得るために、要素試験により切削セグメントの材料、構造を研究し、切削セグメントで組み立てた先行トンネルを後行シールドで切削掘進する実証実験を行い、工法の実現性を検証した。なお、本研究では、切削負荷や騒音、振動など切削状況の良否を表現する言葉として、切削性と称することとした。

2. 基礎切削試験

(1) 切削セグメントの材料と基礎切削試験

切削セグメントには削り易いこと、すなわち切削性が良い材料にする必要がある。そのため、切削セグメント本体の材料は、仮壁切削による発進および到達工法として実績の多いNOMSTの材料である連続繊維補強材および切削可能なコンクリートを基本とした。

この中で連続繊維補強材としては、切削実績において閉塞等の不具合が少なく、さらにセグメントの製作性を考え、炭素繊維格子筋を選定した。

切削可能なコンクリートについては、粗骨材が切削性に影響を及ぼすと考えられるため、粗骨材の種類を変えて、基礎切削試験により切削性を検証することとした。

なお、基礎切削試験では、切削掘進に伴うカッタービットの摩耗による切削性の変化についても検証することとした。

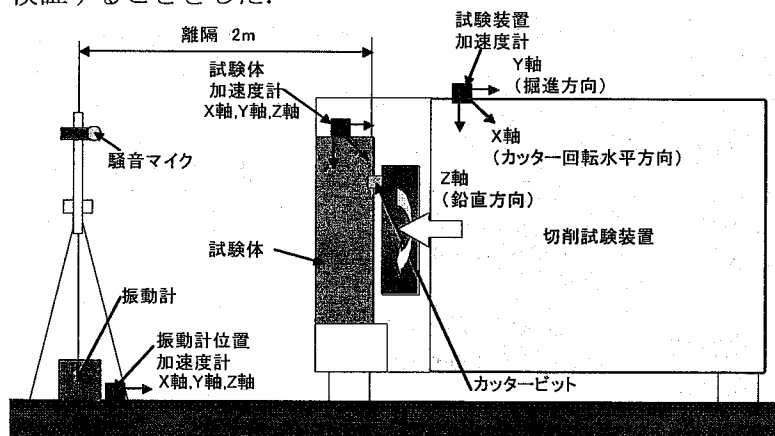


図-2 基礎切削試験装置の概要

(2) 基礎切削試験の方法

a) 試験装置および試験手順

基礎切削試験は、図-2に示す試験装置で、取り付け半径190mmの1パスのカッタービットを回転させて、幅500mm×高さ500mm×厚さ200mmの矩形の無筋試験体を切削した（写真-1）。

カッタービットは、E5種超硬チップを配置した先端幅20mmの平形の片刃ビットで、写真-2のように、先端形状をR1.5mmとした初期状態のビット、R5.0mmで摩耗を再現したビットの2種類のビットにより試験を行った。

切削の条件として、掘進速度、カッター回転数を制御し、式(1)で得られるカッタービットの切込み量(1~10mm)をパラメータとした。

$$t = \frac{V}{V_c \cdot N} \quad (1)$$

t : 切込み量(mm)

V : 掘進速度(mm/min)

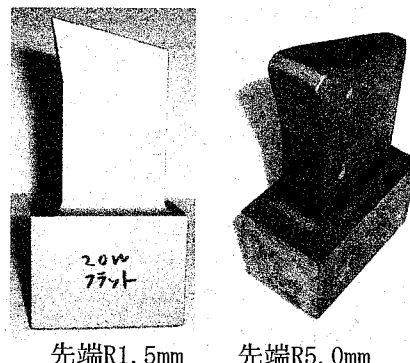
V_c : カッター回転数(rpm)

N : カッタービットのパス数

試験データとしては、掘進方向の押付力、カッターの切削トルク、また同時に試験装置から2mの離隔における騒音・振動および各測定位置における加速度をサンプリング時間0.1secで計測した。



写真-1 基礎切削試験の状況



先端R1.5mm 先端R5.0mm

写真-2 カッタービット

b) 試験ケース

代表的な試験ケースを表-1に示す。表は試験体強度 σ_{28} が同程度なものをまとめている。

コンクリートの骨材については、NOMST材料である石灰岩碎石を粗骨材とした普通コンクリート（以下、石灰碎石コンクリートと称する）を基本ケースとし、骨材を人工軽量骨材とした軽量骨材コンクリートと、粗骨材がない普通モルタルを比較することとした。

カッタービットは、既に述べたように先端Rを変えたビットを用いて摩耗を再現し、普通モルタルを除く上記2種類のケースと比較した。

(3) 基礎切削試験の結果

基礎切削試験の代表的な結果について示す。

a) 切削トルク

切込み量が5mm ($V=5\text{mm/min}$, $V_c=1.0\text{rpm}$) の場合の切削トルクの時刻歴データを図-3に示す。

骨材による比較（ケースN-1, H-1, G-1）では、石灰碎石コンクリートに比べて、軽量骨材コンクリートと普通モルタルの方が切削トルクは小さく、その変動幅も小さい。

カッタービットの摩耗による比較（ケースN-1とN-3, ケースH-1とH-2）では、ビットの摩耗を再現した場合の方が切削トルクは大きく、その変動幅も大きい。

表-1 切削基礎試験 代表的な試験ケース

試験ケース	ケースの目的 (条件変更項目)	試験体				カッタービット 形状
		材料	粗骨材	細骨材	試験体強度 σ_{28} (N/mm^2)	
N-1	基本ケース	石灰碎石コンクリート	石灰碎石	砂	65.6	平形R1.5mm
N-3	ビット摩耗を再現	石灰碎石コンクリート	石灰碎石	砂	65.6	平形R5.0mm
H-1	軽量骨材	軽量骨材コンクリート	軽量骨材	軽量骨材	60.6	平形R1.5mm
H-2	軽量骨材・ビット摩耗を再現	軽量骨材コンクリート	軽量骨材	軽量骨材	60.6	平形R5.0mm
G-1	粗骨材なし	普通モルタル	—	砂	64.2	平形R1.5mm

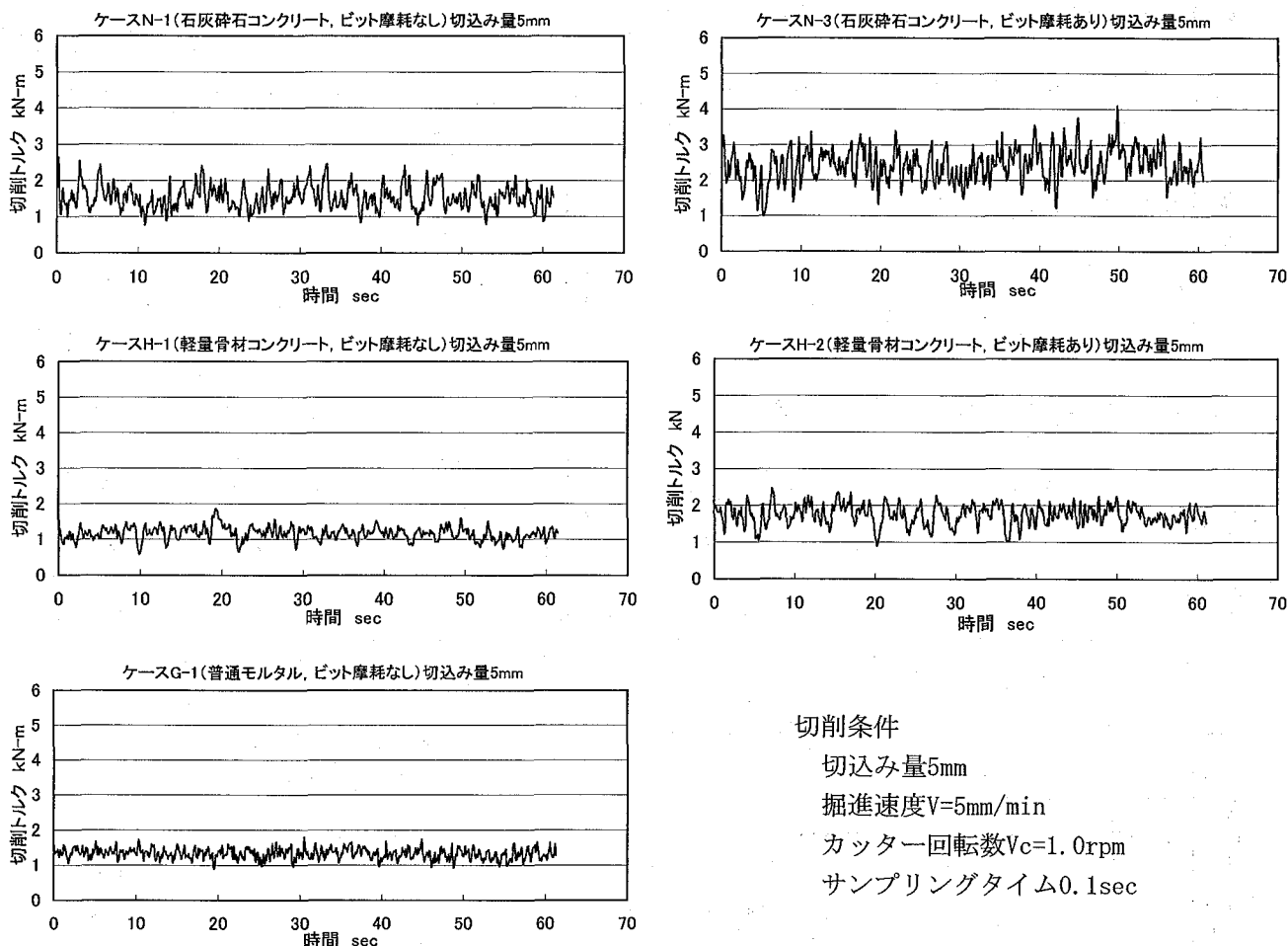


図-3 同じ切削条件（切込み量5mm）における試験ケース別の切削トルク

b) 切込み量と切削トルクの関係

切込み量と切削トルク（平均値）の関係について、図-4に骨材に関する比較を、図-5にカッタービット摩耗に関する比較を示す。

切削トルクは、全てのケースにおいて切込み量に対してほぼ線形関係にある。骨材の比較では、どの切込み量においても、石灰砕石コンクリートと比較して、軽量骨材コンクリートと普通モルタルの方が切削トルクは小さい。また、ビット摩耗を再現した場合の方が切削トルクは大きい。

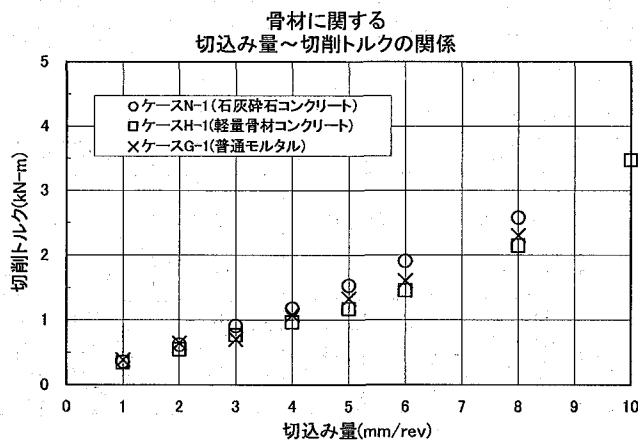


図-4 骨材に関する切込み量と切削トルクの関係

c) 振動および騒音

切込み量が5mm ($V=5\text{mm/min}$, $V_c=1.0\text{rpm}$) の場合の振動レベルと騒音レベルの時刻歴データを図-6に示す。

骨材による比較（ケースN-1, H-1, G-1）では、石灰砕石コンクリートに比べて、軽量骨材コンクリート、普通モルタルの方が、騒音と振動が小さく、その変動幅は小さい。

カッタービットの摩耗による比較（ケースN-1とN-3, ケースH-1とH-2）では、ビット摩耗を再現した場合の方が振動と騒音は大きい。

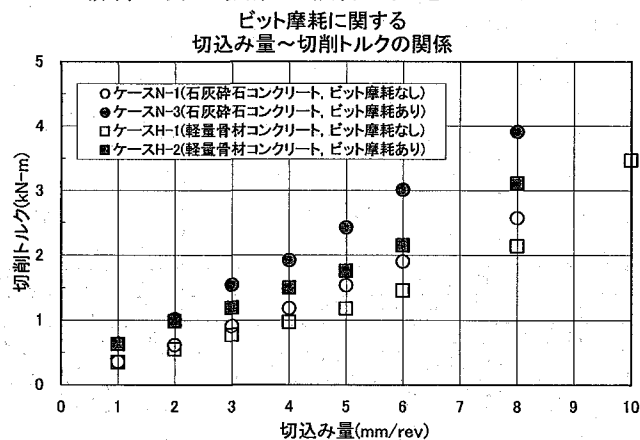
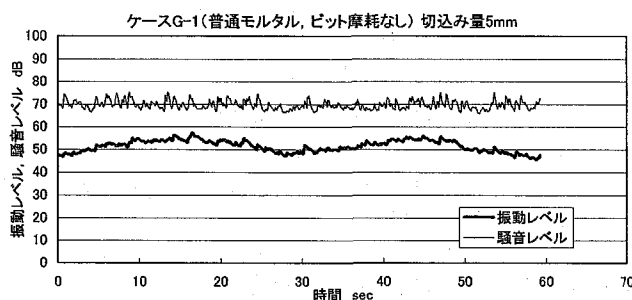
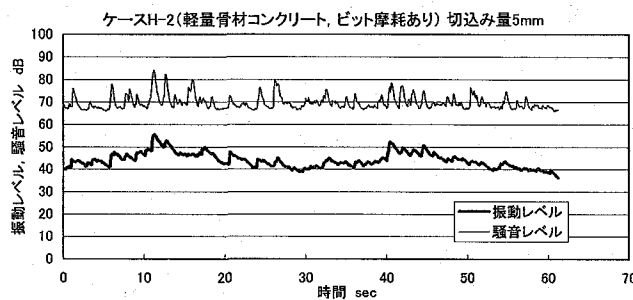
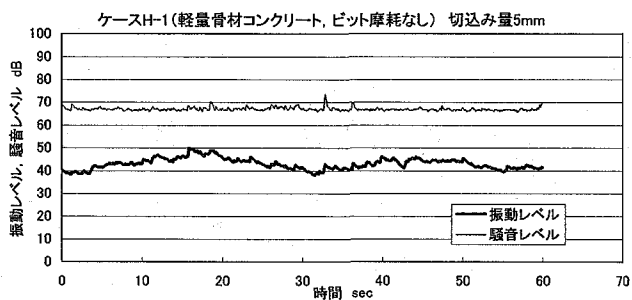
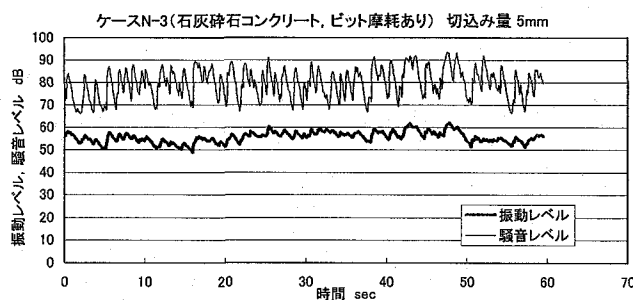
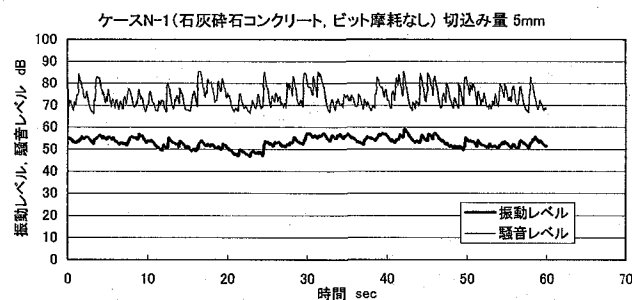


図-5 ビット摩耗に関する切込み量と切削トルクの関係



切削条件

切込み量5mm

掘進速度 $V=5\text{mm/min}$

カッター回転数 $V_c=1.0\text{rpm}$

サンプリングタイム $\Delta t=0.1\text{sec}$

図-6 同じ切削条件（切込み量5mm）における振動レベル、騒音レベル

(4) 基礎切削試験の考察

基礎切削試験の考察を以下に示す。

a) 骨材による切削性の違い

石灰砕石コンクリートと比較して、軽量骨材コンクリートおよび普通モルタルの方が、切削負荷と騒音、振動などから切削性は良いと言える。

この理由としては、粗骨材が切削時の主たる抵抗になるためであり、これは骨材のない普通モルタルの切削性の良さからも明らかである。また、軽量骨材コンクリートの場合には、人工軽量骨材が多孔性であるため、堅固な石灰砕石と比較して破砕しやすいためであると考えられる。

b) ビット摩耗に関する切削性の違い

カッタービットが摩耗していない場合に比べて、カッタービットが摩耗している場合の方が切削性は悪くなる。

これは、切削の本質的な機構は切削する刃の前進に伴う被切削体のせん断破壊であり、刃先の摩耗の進行に伴いせん断破壊に必要な切削抵抗は増加すると、一般的に考えられることを検証した結果と言える。

ただし、軽量骨材コンクリートは、カッタービットが摩耗した場合でも、摩耗していないビットを用いて石灰砕石コンクリートを切削した場合と同等の切削性を保持できる。

c) 切込み量における切削性の違い

どのケースにおいても、切込み量と切削トルクにはほぼ線形の関係が認められることから、切込み量と切削性には強い相関関係にある。

仮壁切削工法による発進到達では低速掘進であるため、切込み量が2mm以下の施工事例が多いが、本試験ではさらに大きな切込み量での切削データを得ることができた。セグメントを切削する本工法の場合には、工程上、本掘進に準じる掘進速度が必要となる。本試験では仮壁切削よりも大きな切込み量で切削できることが確認され、本工法の実現にあたって必要となる掘進速度、カッター回転数、装備トルク、カッタービットの形状やパス等の配置に関する基礎的なデータが得られた。

(5) 基礎切削試験の結論

軽量骨材コンクリートは、切削性が良く、シールドの切削負荷が小さい。またカッタービットが摩耗しても、NOMST材料として用いられている石灰砕石コンクリートを摩耗がないビットで切削する場合と同等の切削性を保持できることから、切削セグメントの材料として適していると考えられる。

3. 単体曲げ試験

(1) 単体曲げ試験の目的

a) 切削セグメントの構造に関する技術的課題

切削セグメント本体がセグメントとしての基本性能を有するためには、補強筋材の配置方法、スターラップの必要性、切削セグメントの設計手法などを検証する必要がある。

また、セグメント継手、リング継手、吊手等、通常のRCセグメントと同様な機能を有し、同時に切削が可能な材料について研究する必要がある。

b) 単体曲げ試験の目的

上記の技術的課題の中で切削セグメント本体に関する課題について、単体曲げ試験によりセグメント構造と耐力について検証することとした。

(2) 単体曲げ試験の方法

a) 試験ケース

補強筋の配置、スターラップの配置などを比較するために、表-2に示す試験ケースとした。

表-2 単体曲げ試験の試験ケース

	補 強 筋	スターラップ
ケース1	鉄筋 単配筋	スターラップあり
ケース2	炭素繊維格子筋 単配筋	スターラップなし
ケース3	炭素繊維格子筋 単配筋	スターラップあり
ケース4	炭素繊維格子筋 多段配筋	スターラップあり

b) 試験体

試験体のコンクリートは、前章で述べた結果を受け、軽量骨材コンクリートとした。

本試験では、主筋を炭素繊維筋、配力筋をガラス繊維筋とした格子筋を補強筋とした。補強筋の配置についてはセグメントの製作性を考慮して、図-7のように曲率を有する補強筋を円周方向に平置きし、必要量に応じて積み重ねて配置することとした。

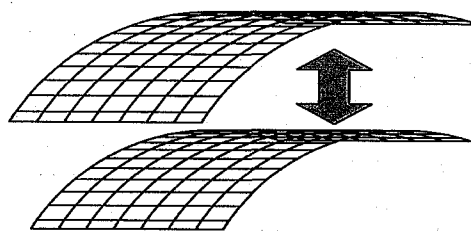


図-7 補強筋の配置イメージ

試験体の寸法は、外径 1800mm、桁高 125mm、幅 500mm、弦長 996mm である。代表としてケース 4 の試験体構造図を図-8 に示す。

c) 試験方法

試験は、一般的な単体曲げ試験方法である水平 2 点载荷両端可動方式とした。試験モデル図を図-9 に、载荷スパン等の条件を表-3 に示す。

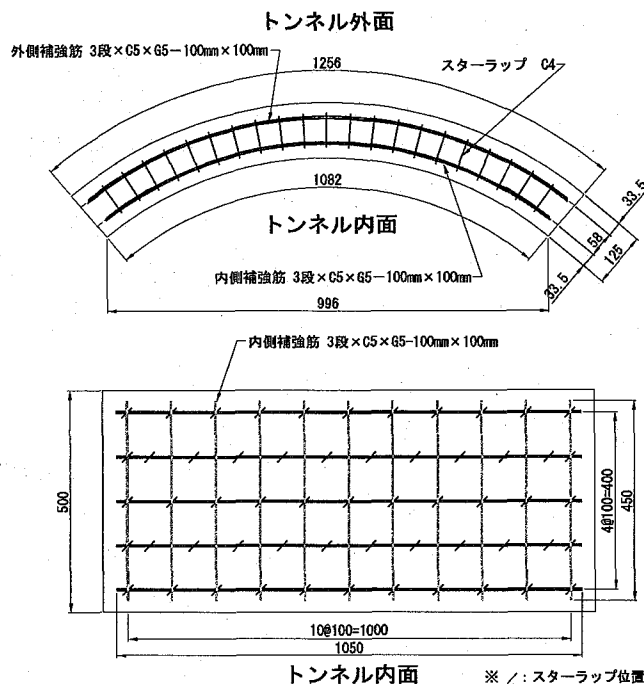


図-8 試験体構造図 (ケース 4)

(3) 単体曲げ試験の結果

a) 試験結果の概要

表-4 に試験条件の詳細と理論値および試験結果一覧を示す。なお、理論値の算定は、一般的なセグメント部材の応力度算定方法³⁾および NOMST 部材の設計⁴⁾に準じて、炭素繊維筋 ($E_s=1.0E5$ N/mm²) とコンクリート ($E_c=1.4E4$ N/mm²) のヤング係数比を $n=7.1$ とした RC 理論により行った。

各ケースともに、ひび割れ発生荷重は理論値を上回った。破壊荷重については、ケース 2 だけが曲げによる理論破壊荷重を下回った。

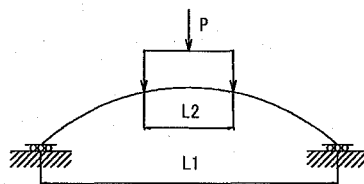


図-9 試験モデル図

表-3 载荷スパン等

	弦長:L1 (mm)	载荷幅:L2 (mm)
ケース1	996	300
ケース2	996	180
ケース3	996	180
ケース4	996	180

表-4 単体曲げ試験の試験結果一覧

ケース番号				ケース1	ケース2	ケース3	ケース4		
条件	ヤング係数比			n	15.0	7.1	7.1	7.1	
	補強筋	種類			鉄筋	炭素繊維	炭素繊維	炭素繊維	
		ヤング係数	Es	N/mm ²	2.10E+05	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05	
		許容引張応力度	σ fa	N/mm ²	180	360	360	360	
		降伏応力度※	σ sy	N/mm ²	295	1200	1200	1200	
		引張強度	σ su	N/mm ²	440	1200	1200	1200	
		引張側補強筋	配筋		D10×5	C10×5	C5×9	3×C5×5	
		圧縮側補強筋	配筋		D10×5	C10×5	C5×9	3×C5×5	
		引張鉄筋比	P	%	0.751	0.373	0.244	0.396	
	コンクリート	種類			軽量骨材 コンクリート	軽量骨材 コンクリート	軽量骨材 コンクリート	軽量骨材 コンクリート	
		圧縮強度	σ 28	N/mm ²	57	62	38.3	34.9	
		ヤング係数	Ec	N/mm ²	2.14E+04	2.21E+04	1.69E+04	1.74E+04	
		許容曲げ圧縮応力度	σ ca	N/mm ²	21.0	22.6	13.0	12.5	
	スターラップ	種類			----	----	炭素繊維	炭素繊維	
		ヤング係数	Ew	N/mm ²	----	----	1.00E+05	1.00E+05	
		スターラップ	Ss	mm	----	----	100	100	
			配筋		----	----	C4×4	C4×5	
理論値	ひび割れ発生荷重			Pc	kN	20.32	17.10	11.79	11.15
	抵抗モーメントが生じる荷重			Pr	kN	30.28	33.77	14.41	19.96
	曲げモーメントによる破壊荷重			Pu	kN	68.78	115.09	48.08	74.08
	せん断による破壊荷重			Pv	kN	107.36	76.73	69.85	84.52
	試験結果	荷重	ひび割れ発生荷重	Pc	kN	25.0	22.0	25.0	25.0
破壊荷重			Pu	kN	94.4	59.0	71.3	86.0	
破壊形態				引張鉄筋降伏に伴う圧縮側コンクリート破壊	せん断破壊+補強筋材の内面へのはらみに伴うコンクリート剥離	曲げ主導型のせん断複合破壊	曲げ主導型のせん断複合破壊		

b) 破壊形態

破壊形態の比較として、ケース2の破壊状況を写真-3に、ケース4の破壊状況を写真-4に示す。

鉄筋を補強筋としたケース1では、通常のRCセグメントと同様に、引張側鉄筋の降伏に伴い圧縮側コンクリートが圧縮破壊した。スターラップがないケース2では、曲げモーメントによる理論破壊荷重の前にせん断破壊するとともに、曲率を有する補強筋が荷重を受けて内面側にはらみ出し、それに伴いコンクリートの剥離現象が発生した。スターラップを有するケース3、ケース4では、曲げモーメントによる理論破壊荷重より大きな荷重で曲げ主導型のせん断破壊を起こした。なお、ケース2のような内面側コンクリートの剥離現象は生じなかった。

c) 変位およびひずみの挙動

多段配筋のケース4の、荷重～鉛直変位図を図-10に、荷重～外面側コンクリートひずみ図を図-11に示す。ひび割れ発生後については、抵抗モーメントが理論上生じる荷重の2.5倍までは、ヤング係数比 $n=7.1$ としてRC理論で算定した理論値とほぼ同じとなることが確認できた。

(4) 単体曲げ試験の考察と結論

単体曲げ試験の考察とその結論を以下に示す。

a) 補強筋の配置方法

補強筋を多段に配筋したケース4は、単配筋したケース3と比べて挙動に違いはなく、補強筋を多段に平置きした配筋をしても問題ないと考えられる。

b) スターラップの必要性

炭素繊維筋は、鉄筋に比べてヤング係数が小さく、曲率を有するため、外面側から荷重を受けた場合に内面側に変形しやすく、内面側コンクリートが剥離する可能性がある。スターラップは、補強筋を拘束し、位置保持を行うことで、内面側コンクリートの剥離防止をするために必要である。その必要量については、せん断耐力が曲げ耐力を上回る値とすれば問題ないと考えられる。

c) 切削セグメントの設計手法

変位、ひずみ等の計測データから、抵抗曲げモーメントが理論上生じる荷重の2.5倍までは、ヤング係数比 $n=7.1$ としたRC理論で切削セグメントを設計して問題ないと考えられる。



写真-3 ケース2の破壊形態



写真-4 ケース4の破壊形態

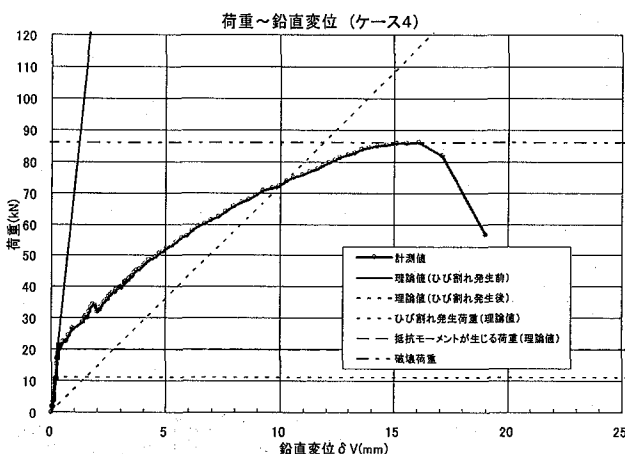


図-10 荷重～鉛直変位図 (ケース4)

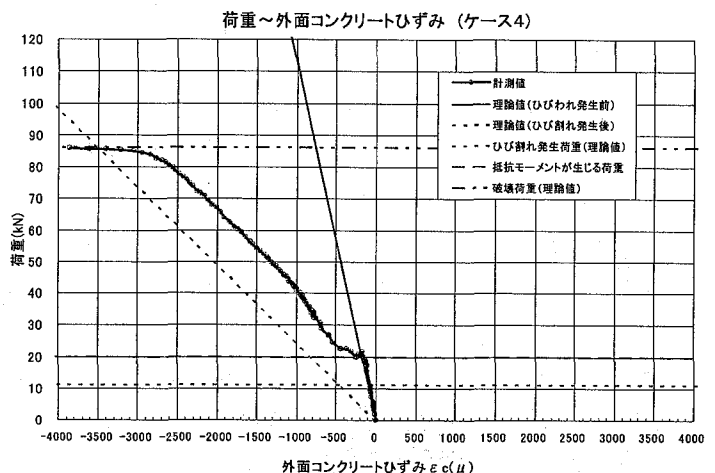


図-11 荷重～外面コンクリートひずみ図 (ケース4)

4. 先行トンネル切削実証実験

(1) 先行トンネル切削実証実験の目的

道路トンネルの分岐合流部で本工法を適用することを考えると、先行トンネルと3～5°の小さな交差角度で後行シールドは切削掘進できることが必要である。小さい交差角度での切削掘進の実現性については、既に継手のない無筋コンクリート製ヒューム管の切削実験で検証している。

しかし、本工法の実現のためには、セグメント形式による先行トンネルを切削掘進する場合、適正な掘進速度、先行トンネルの挙動および影響、後行シールドの姿勢制御と切削負荷などについて検証する必要がある。先行トンネル切削実証実験を行うこととした。

(2) 先行トンネル切削実証実験の方法

a) 実験装置と実験方法

実験装置の概要を図-12、写真-5に示す。

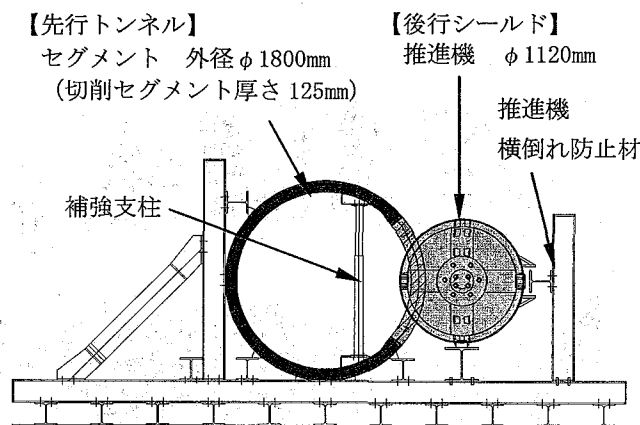


図-12 実験装置の概要

先行トンネルは、外径φ1800mm、幅500mm、厚さ125mmの切削セグメントと鋼製セグメントをボルトで結合した全部で8リングのモデルとした。

切削セグメント（図-13、写真-6）は、先行トンネルの中央の6リングの切削箇所に軽量骨材コンクリートと炭素繊維格子筋で構成された本体と、リング継手およびセグメント継手に切削可能なガラス繊維樹脂製の継手により配置した。

先行トンネルの拘束は、周辺地盤よりも弱い拘束をイメージし、鋼製架台にトンネル断面で2箇所をボルト結合させたほかは無支持とした。また、切削により欠円構造となるため、先行トンネル内部に補強の支柱を設けた。

後行シールドには、表-5の仕様の外径φ1120mmの推進機を用い、カッタービットとして、先端にE5種超硬チップを配置した写真-7に示す形状のものを、最外周2パス、内周側1パス装備した。

推進機は、後方の推進装置により鋼製架台上を先行トンネルと5.0°の交差角度を持って推進される。なお、側方には安全上の部材として横倒れ防止材を設けたが、これは側方反力を受ける部材ではなく、推進機とは接触していない。

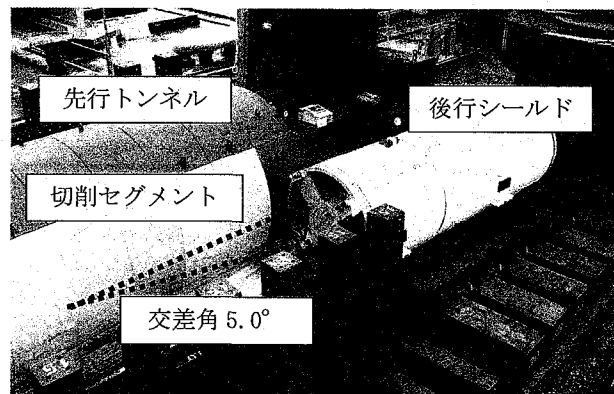


写真-5 実験装置の全景

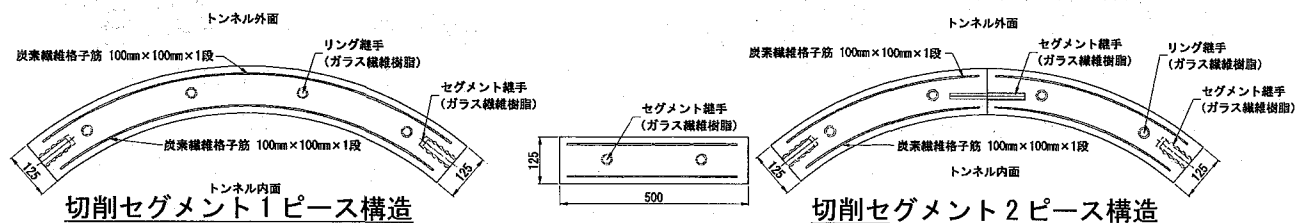


図-13 切削セグメントの構造概要

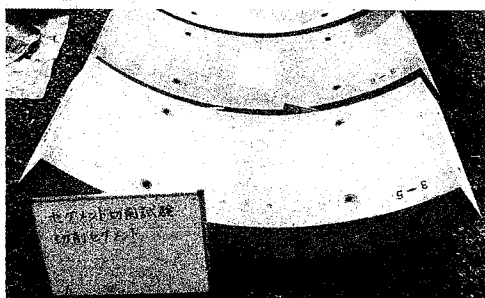


写真-6 切削セグメント

表-5 推進機の仕様

項目	仕様
総推力	1000 kN
装備トルク	32.3 kN-m
回転数	10.2 rpm

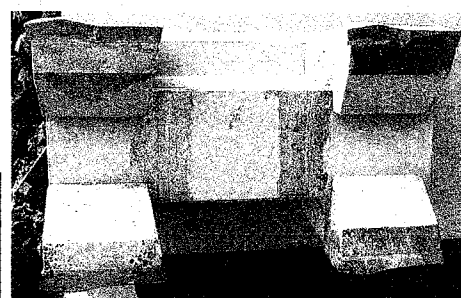


写真-7 カッタービット

b) 実験ケース

セグメントのリング継手およびセグメント継手の状況に着目した代表的な実験ケースを図-14に示す。ケース1はリング継手のみでセグメント継手がない継ぎのケースであり、ケース2ではセグメント継手を有した千鳥組するケースである。

(3) 先行トンネル切削実証実験の結果

実験の各段階における切削実証実験の結果を以下に示す。

a) 切削開始時の挙動

切削開始時の挙動として、ケース1の状況を写真-8に示す。ケース1, 2ともに、無筋コンクリート製ヒューム管の切削実験と同様に、試験体表面が平滑であってもスムーズに切削を開始できた。特に切削開始時には、小さい交差角度で後行シールドが先行トンネルに対して逃げるような挙動が懸念されたが、そのような挙動は認められなかった。



ケース1 リング継手のみ ケース2 セグメント継手あり

図-14 試験ケース概要



写真-8 切削開始時の状況 (ケース1)

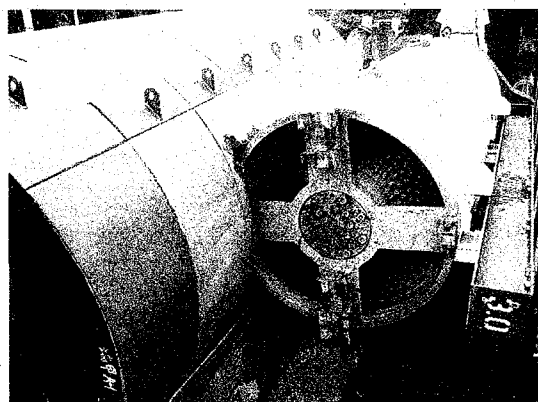


写真-9 切削状況 (ケース1)

b) 切削掘進時の挙動

ケース1の切削掘進距離における掘進速度と切削トルクを図-15に示す。また、ケース1の切削状況を写真-9に、ケース2の切削状況を写真-10に示す。

ケース1では掘進速度を除々に大きくし、30～40mm/minの速度を維持しながら掘進できた。この場合においても、先行トンネルと後行シールドは問題があるような横振れ挙動を示すことなく、スムーズに本体とリング継手を切削できた。

カッター回転は正回転、反回転のどちらも行ったが、その違いは認められなかった。また、カッター回転を反転させる際に、掘進速度を下げたところ、切削トルクも下がる傾向が認められた。

ケース2では、特に継手部の挙動に着目したが、切削セグメントおよび鋼製セグメントのリング継手、セグメント継手には、大きな目開き、目違いは認められず、ケース1と同様の傾向が認められた。

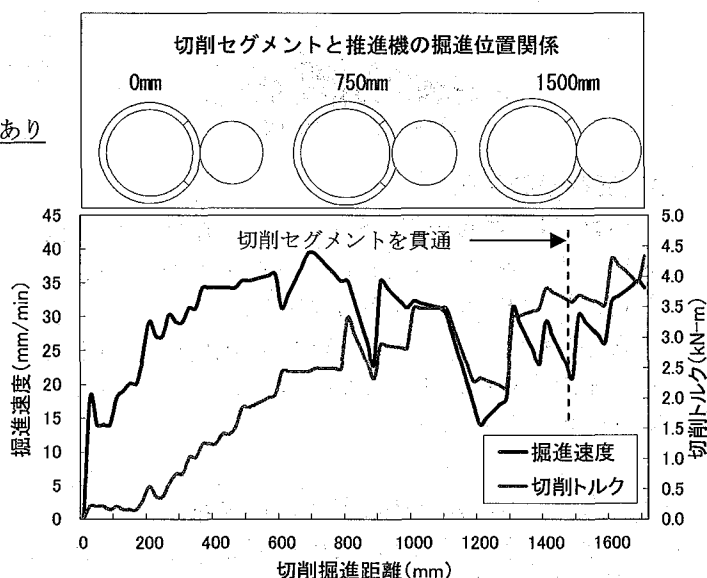


図-15 掘進速度と切削トルク (ケース1)

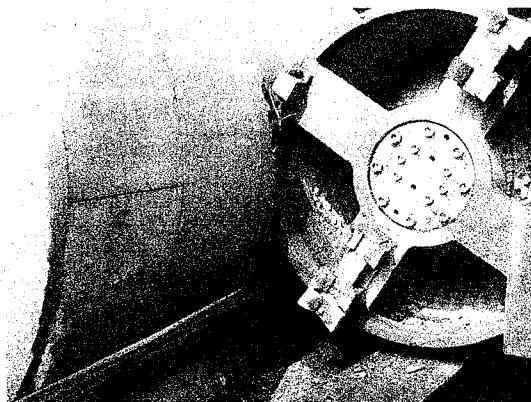


写真-10 切削状況 (ケース2)

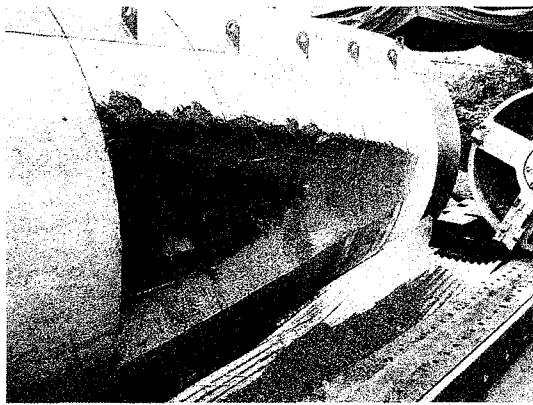


写真-11 切削完了後の状況（ケース1）



写真-12 切削完了後の状況（ケース2）



写真-13 切削屑

c) 切削後の状況

写真-11、写真-12に各ケースの切削完了後の状況を示す。各ケースともに、切削面が滑らかかつ計画通りの形状の切削跡が認められた。

また、写真-13に示すように、切削屑は細くなり、泥水式シールドにおいて閉塞の要因となる大割れは生じなかった。

(4) 先行トンネル切削実証実験の考察

先行トンネル切削実証実験の考察を以下に示す。

a) 掘進速度と切削トルク

本実験では、30～40mm/minという実際のシールド工事と同程度の掘進速度を安定して維持でき、切削トルクと掘進速度の相関性が確認できた。

この相関関係について、掘進速度を切込み量に換えて検証することとしたが、本実験では切削掘進に伴い有効となるビット幅が変化していくため、同じ掘進速度であっても切削トルクが異なる。そこで、切削トルクをビットの有効幅で除して単位幅あたりの切削トルクを求め、最外周のカッタービット1パスあたりの切込み量との関係を見ることとした。

ケース1における、この関係を図-16に示す。この結果から、単位幅あたりの切削トルクと切込み

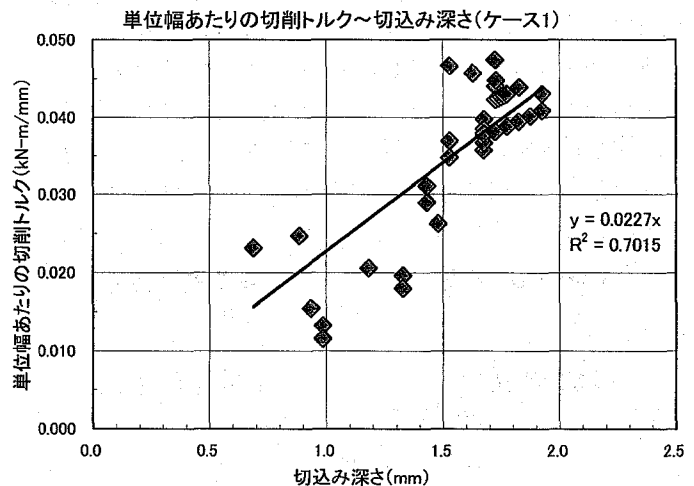


図-16 切削単位幅あたりの切削トルクと切込み深さの関係（ケース1）

量には、強い相関関係が認められた。

これは基礎切削試験で得た知見と同様であり、切込み量から切削負荷を求めることができる。これにより切削に適切と考えられる切込み量を設定すれば、カッタービットの幅とパス数、カッター回転数から、適切な掘進速度と必要な装備トルクが求めることができると考えられる。

本実験では装備トルクに比べて切削トルクは十分に小さく、実際の条件においても通常の装備トルクであれば切削に問題はないと考えられる。

b) 先行トンネルの挙動

本実験では、先行トンネルを周辺地盤よりも弱い拘束をイメージした条件で支持したが、先行トンネルは問題になるような横振れ挙動が認められないとともに、継手部に大きな目開き、目違いも認められず、スムーズに切削できた。

このことから、周辺地山で支持された実際の条件では、本実験よりも強く拘束されると考えられるため、先行トンネルには問題になるような横振れする挙動が生じにくいと判断される。

また、本実験では切削により先行トンネルが一時的に欠円構造となるため補強の支柱を設けた。しかし、実際の条件ではセグメントに荷重が作用しているため、その荷重に対して構造上安全な支柱あるいは壁構造を仮設的に設ける必要があると考えられる。

c) 後行シールドの姿勢制御

本実験では、推進機が側方反力を取ることなく、先行トンネルに対して逃げるような挙動を示すことなく切削を開始できるとともに、問題になるような横振れ挙動も見せずにスムーズに掘進できた。

このことから、周辺地山で支持される実際の条件では、後行シールドは側方に過大な反力を取らずに、通常の姿勢制御が可能と判断される。

5. おわりに

(1) 本研究のまとめ

本研究では、先行トンネルを後行シールドで切削することで分岐合流部を構築する工法の開発において、基礎切削試験、単体曲げ試験、先行トンネル実証実験により、工法の実現性について検証してきた。本研究のまとめとして、研究で得られた知見を以下に示す。

a) 切削セグメントの材料

切削セグメントの材料としては、炭素繊維格子筋と軽量骨材コンクリートが適している。

特に軽量骨材コンクリートは切削性が良く、シールドの切削負荷が小さいと考えられる。また、カッタービットが摩耗しても、切削実績の多いNOMST材料である石灰砕石コンクリート部材を摩耗がないビットで切削する場合と同程度の切削性を保持できると考えられる。

b) 切削セグメントの構造と設計手法

切削セグメントは、炭素繊維筋のヤング係数を考慮したヤング係数比 $n=7.1$ としたRC理論で設計して問題ないと考えられる。

炭素繊維格子筋は円周方向に平置きし、必要量に応じて積み重ねる多段配筋として問題ない。ただし、炭素繊維格子筋を拘束し、位置保持を行うことで、内面側コンクリートの剥離防止をするためにスターラップを必要とし、その必要量については、せん断耐力が曲げ耐力を上回る値とすれば問題ない。

c) 切込み量と切削負荷

切削トルクはカッタービットの切込み量と強い相関関係にある。

したがって、切込み量を設定すれば、掘進速度と切削負荷との関係を求めることができる。

d) 先行トンネルと後行シールドの挙動

先行トンネル実証実験では、切削開始時、切削掘進時ともにスムーズで計画通りに切削でき、先行トンネルと後行シールドに問題となるような挙動は認められなかった。また、継手部には大きな目開き、目違いは認められなかった。

以上のことから、周辺地山で支持された実際の条件では、先行トンネルと後行シールドに問題のある挙動は発生しないと考えられる。

(2) 今後に向けての課題

本研究で検証していない課題としては、次のようなものがあり、今後も研究を継続していきたいと考える。

- ・セグメント継手、リング継手の具体化と検証
- ・切削容易なセグメントの吊手の具体化と検証
- ・切削性をさらに向上させるカッタービット形状などの切削機構の改善

参考文献

- 1) 超工具ハンドブック編集委員会：超硬工具ハンドブック，超工具協会，pp. 82-98，1998.
- 2) NOMST研究会：NOMST発進・到達工の手引き，pp. 25-37，NOMST研究会，2006.
- 3) 土木学会：2006年制定 トンネル標準示方書 シールド工法・同解説，pp. 62，土木学会，2006.
- 4) 新日本製鐵株式会社：FRP格子筋「ネフマック」設計・施工マニュアル（案），pp. 5-6，新日本製鐵株式会社，2000.
- 5) 後藤真吾，松井芳彦，宮澤昌弘，野田賢治：シールドトンネル分岐合流部施工におけるセグメント切削シールド工法の開発，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，VI-063，2006.