

シールド機で切削可能なセグメントの開発 Development of the concrete segments to enable cutting by shield machine

村上 賢治*	磯 陽夫**
Kenji Murakami	Akio Iso
大江 郁夫*	三戸 憲二*
Ikuo Oe	Kenji Mito

要 約

近年、道路トンネルをシールド工法で計画されることが多くなってきており、用地条件の厳しい大都市では種々の制約から、道路トンネル分岐合流部を地下に非開削で施工する必要がある。そこで、このニーズに応えるため、当社では非開削の分岐合流部施工技術として、先行トンネルに後行トンネルを併設した後にトンネル間を切開く技術（カップルバード工法）を開発した。しかし、今後、都市計画範囲の制約などの理由から、断面をより縮小することが求められる場合もあるため、カップルバード工法を縮小断面に適用することを目的に後行シールド機のカッタービットで直接切削可能なセグメント（以下、切削セグメント）の開発を行い、切削セグメントの構造実験および切削実験を行った。本論文は切削セグメントに関する一連の実験結果を報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 基礎構造確認試験
- § 3. 構造確認試験
- § 4. 切削性確認試験
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

当社では非開削の分岐合流部施工技術として、先行トンネルに後行トンネルを併設した後にトンネル間を切開く技術（カップルバード工法）を開発した¹⁾。しかし、今後は都市計画範囲の制約などの理由から、断面をより縮小することが求められる場合もある。また、図-1のように先行トンネルを後行トンネルで直接切削することができれば、合理的な断面の分岐合流部を構築できるため（図-2参照）、条件によってはコストダウンも可能となることが期待される。そこで、後行シールド機のカッタービットで直接切削可能なセグメント（以下、切削セグメント）の開発を行った。

本論文は、切削セグメントの構造および切削性を確認するために行った基礎構造確認試験（曲げタフネス試験）、構造確認試験（単体曲げ試験）、切削性確認試験の結果を報告するものである。

* 土木設計部

** 技術研究所

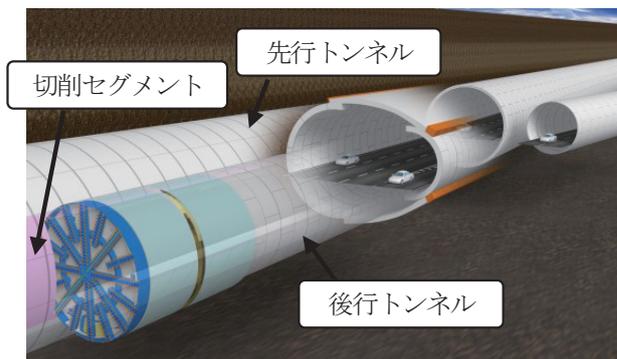


図-1 先行トンネルを後行トンネルで切削して分岐合流部を構築するイメージ

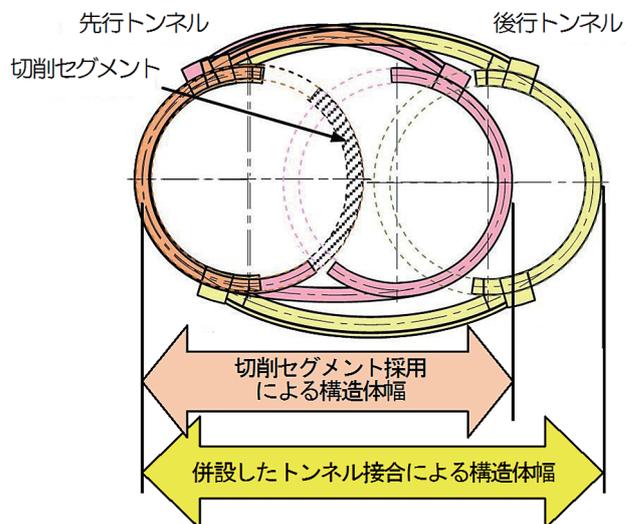


図-2 切削セグメント採用による構造体幅の低減

§ 2. 基礎構造確認試験

2-1 試験概要

切削セグメントには、以下の性能が必要となる。

- ① 切削時のシールド機の負荷が小さい
- ② RCセグメントと同等の強度および止水性を有する

上記要求性能を満足するため、切削セグメントの補強筋を鉄筋に代わりガラス繊維製異形ロッド（写真-1）とし、さらにアラミド繊維（写真-1）をコンクリートに加えることで、ひび割れ抑制効果に基づく止水性の向上を考えた。ここでは、切削セグメントの基礎構造確認試験としてアラミド繊維およびガラス繊維製異形ロッドを配置した梁の曲げタフネス試験（JSCE-G552-2010）を行い、ひび割れ発生後の耐荷性能を確認することとした。試験は表-1に示す5ケース行った。供試体を図-3に示す。



写真-1 ガラス繊維製異形ロッド、アラミド繊維

表-1 試験ケース一覧表

ケース	供試体数	設計基準強度 (N/mm ²)	ガラス繊維異形ロッド	アラミド繊維量 (vol%)
No.1	3	42	—	0.50
No.2	3			0.25
No.3	2		2-S8 (0.54%)	0.00
No.4	1			0.25
No.5	2			0.50

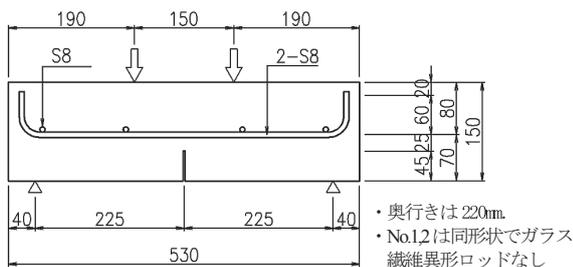


図-3 供試体 (No.3 ~ No.5)

2-2 曲げタフネス試験結果

試験No.1~No.5の荷重~ひび割れ肩口開口変位 (CMOD) 関係図を図-4に示す。

- ① アラミド繊維のみを加えたNo.1, No.2では、ともに設計ひび割れ発生荷重以上でひび割れが発生し、荷重は一時的に低下するが、その後荷重増加を示した。アラミド繊維量の多いNo.1はNo.2よりも荷重低下量は小さく、その後の荷重増加量は大きい。

- ② ガラス繊維製異形ロッドを配置したNo.3では、No.1, No.2と同様にひび割れ発生後に荷重低下を示すが、その後の荷重増加はNo.1, No.2よりも大きい。
- ③ ガラス繊維製異形ロッドの配置およびアラミド繊維を加えたNo.4, No.5では、No.3よりもひび割れ発生後の荷重低下は小さく、その後の荷重増加は大きい。特にNo.5ではひび割れ発生後の荷重低下はほとんどなく、荷重増加を示す。

以上の結果から、アラミド繊維0.5 vol%を加え、ガラス繊維製異形ロッドを配置した切削セグメント (No.5) は、施工時荷重により万が一、ひび割れが生じた場合でも、ひび割れ幅が広がらず、止水性に優れることを確認した。

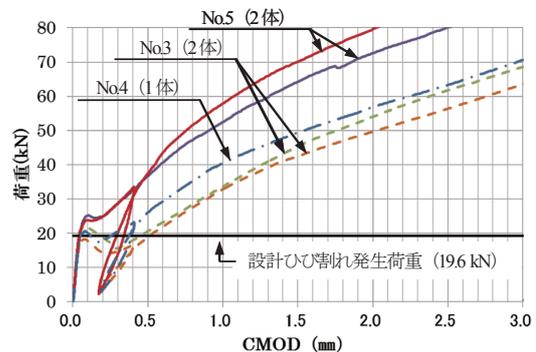
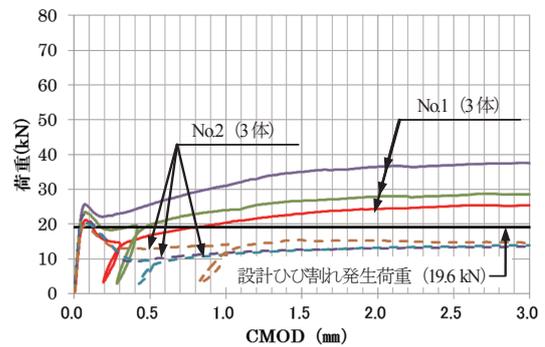


図-4 荷重~ひび割れ開口変位 (CMOD) 関係図

§ 3. 構造確認試験

3-1 試験概要

(1) 試験目的

切削セグメントがRCセグメントと同等の性能を有することを確認する目的で、表-2に示す3ケースの単体曲げ試験を行った。

表-2 試験ケース一覧表

ケース	骨材	補強材		アラミド繊維 (vol%)
		主筋	フープ筋	
No.1	普通	鉄筋: 6-D13 + 2-D16 (0.70%)	16-D10	—
No.2	普通	鉄筋: 6-D13 + 2-D16 (0.70%)	4-D10	0.50
No.3	軽量	ガラス繊維製異形ロッド: 8-S12 (0.55%)	10-S10	0.50

(2) 試験装置

単体曲げ試験は、図-5に示す鉛直2点荷重両端可動方式とした。セグメント仕様を表-3に、配筋図を図-6に示す。

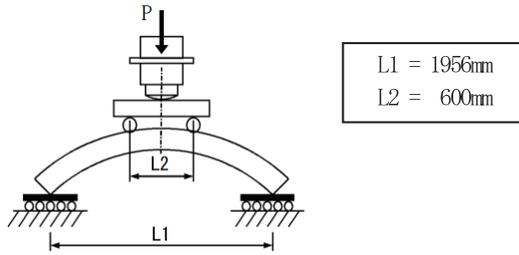


図-5 単体曲げ試験モデル図

表-3 セグメント仕様

外径×幅×桁高 (mm)	3350×1000×200
設計基準強度 (N/mm ²)	42
骨材	表-2 参照
補強材	表-2 参照
アラミド繊維 (vol%)	表-2 参照

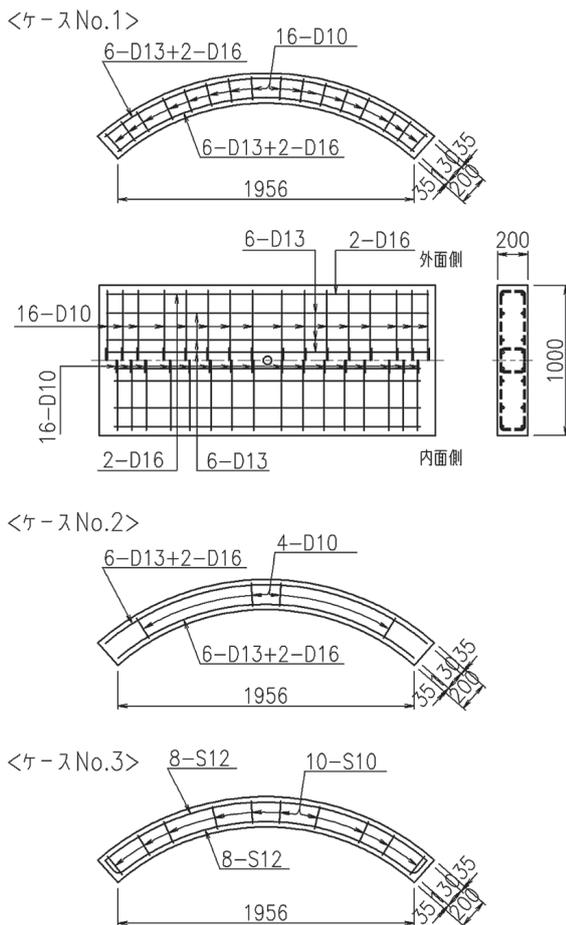


図-6 セグメント配筋図 (No.1~3)

3-2 単体曲げ試験結果

(1) ひび割れ発生荷重および最大荷重

試験結果を表-4および図-7に示す。各ケースとも設計ひび割れ発生荷重および設計終局荷重を上回り、

No.2, No.3はNo.1の最大荷重を上回った。

No.2, No.3の設計ひび割れ発生荷重および設計終局荷重はアラミド繊維の効果を無視して従来のRC理論で算定した。なお、設計終局荷重は、 $\sigma_{ck} = 42 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{sy} = 345 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{gy} = 1000 \text{ N/mm}^2$, 材料係数等を1.0として算定した。

表-4 試験結果一覧表

	No.1	No.2	No.3
設計ひび割れ発生荷重 (kN)	84.5		54.7
設計終局荷重 (kN)		191	
ひび割れ発生荷重 (kN)	95.7	96.5	94.5
最大荷重 (kN)	279	292	295

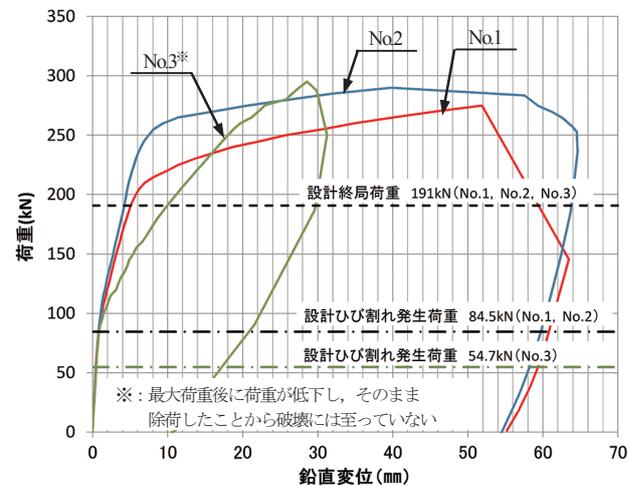


図-7 荷重-鉛直変位関係図

(2) 破壊形態

試験終了後の供試体状況を図-8に示す。

鉄筋を補強筋としたNo.1では、通常のRCセグメントと同様にフープ筋位置にひび割れが発生し、引張側鉄筋の降伏後、圧縮側のコンクリートが圧壊した。

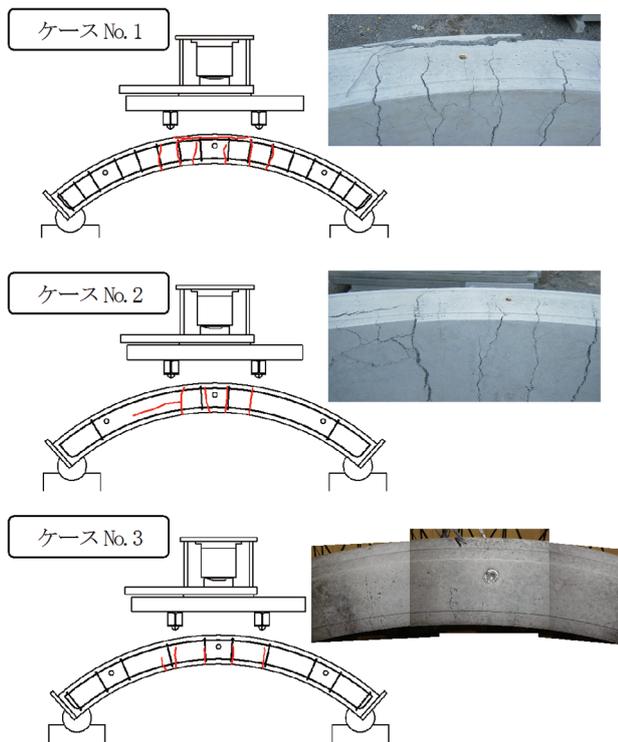
RCセグメントにアラミド繊維を0.5 vol%加え、フープ筋を16本から4本に減らしたNo.2では、ひび割れが分散し、No.1より目視できるひび割れ本数は少なかった。破壊形態は、曲率を有する補強筋が荷重を受けて内面側にはらみ出し、フープ筋の無い箇所でコンクリートの剥離現象が発生し破壊に至った。

No.3ではNo.1, No.2の最大荷重以上を作用させた段階で一度荷重が低下し、そのまま除荷したため破壊には至らず、ひび割れ幅も他ケースと比べ非常に小さい状態であった。

(3) まとめ

- ① No.1とNo.2の比較から、アラミド繊維にフープ筋と同様に主筋を拘束する効果があり、アラミド繊維を0.5 vol%加えた場合には、フープ筋をRCセグメント比25%としてもRCセグメント以上の耐力を有すことを確認した。

- ② 軽量骨材を使用したコンクリートの引張強度は、普通骨材を使用したコンクリートの70%²⁾になるとされている。しかし、No.1~No.3の結果から、軽量骨材を使用したセグメントにアラミド繊維を0.5 vol%加えた場合は、普通骨材を使用したセグメントと同等のひび割れ発生荷重となることを確認した。切削セグメントに軽量骨材を使用した場合も、アラミド繊維を0.5 vol%加えることでひび割れ発生荷重まではRCセグメントと同じ挙動を示し、かつ、RCセグメント以上の耐力を有すことを確認した。
- ③ ガラス繊維製異形ロッドを配置したセグメントも、RC理論で終局荷重を算定できることを確認した。



図一八 単体曲げ試験終了後の状況

§ 4. 切削性確認試験

4-1 試験概要

(1) 試験目的

道路トンネルの分岐合流部を非開削で施工する場合は、数 km 掘進してきた後行トンネルが先行トンネルに対して小さい角度で交差し、その後先行トンネルに並行して掘進する必要があると想定される。そこで、以下の項目を切削性確認試験により検証する。

- ① 先行トンネル切削時のシールド機の負荷
- ② 先行トンネル切削時の掘進速度
- ③ 摩耗したカッタービットにおいて小さな交差角でセグメントを切込みおよび切削することが可能か

(2) 試験ケース

切削方向、ビットの摩耗、骨材の影響を検証するため、

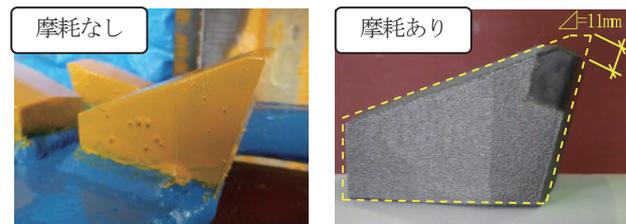
試験ケースを表一五および表一六に示す4ケースとした。なお、No.2ではセグメント継手を含む箇所を切削する試験とした。カッタービットは写真一二に示す摩耗ありと摩耗なしをそれぞれ使用した。ビット摩耗量はシルト層 0.5 km, 砂礫層 1.0 km の掘進後を想定して 11 mm とした。

表一五 試験ケース一覧表

ケース	切削方向	ビット摩耗	骨材
No.1	直進	なし	軽量骨材
No.2	斜め (10°)	なし	軽量骨材
No.3	斜め (10°)	あり	軽量骨材
No.4	斜め (10°)	あり	高炉スラグ骨材

表一六 切削方向一覧表

	No.1	No.2	No.3,4
平面図			



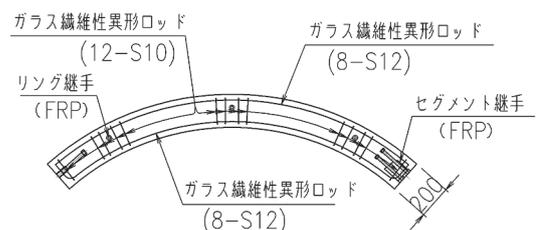
写真一二 カッタービット形状

(3) 切削セグメントの仕様

切削セグメントは、先の単体曲げ試験により RC セグメントと同等の曲げ性能を有することを確認した仕様とした (表一七)。また、リング継手およびセグメント継手には FRP 製ボルトを使用した。切削セグメントの構造を図一九に示す。

表一七 切削セグメント仕様

外径×幅×桁高 (mm)	3350×1000×200
設計基準強度 (N/mm ²)	42
骨材	表一五参照
補強材	ガラス繊維製異形ロッド
アラミド繊維 (vol%)	0.50



*アラミド繊維0.5vol%混入

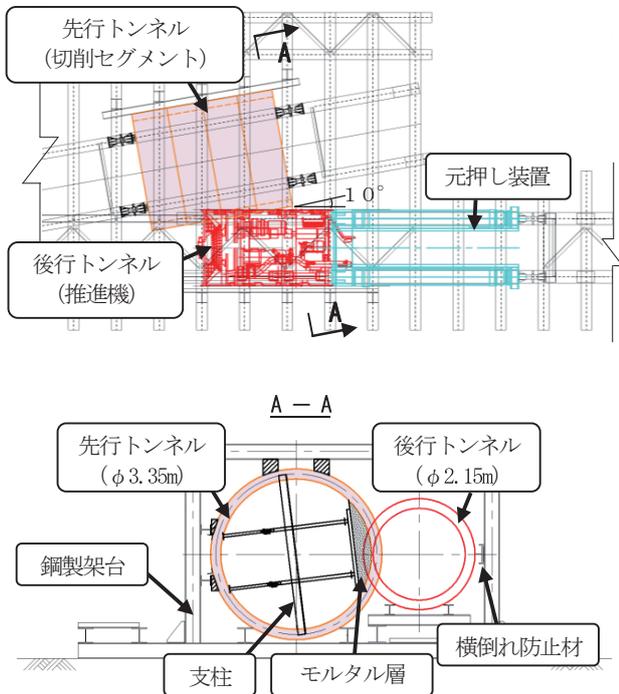
図一九 切削セグメント構造図

(4) 試験装置

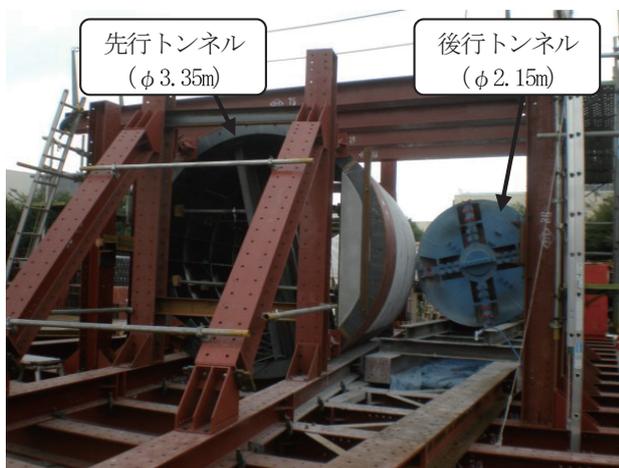
切削性確認試験装置を、**図一10**、**写真一3**に示す。

先行トンネルは切削する箇所を切削セグメント、その他を鋼製セグメントとしてボルトで結合した。また、先行トンネルは鋼製架台で拘束し、切削時のセグメントリングの変形抑制を目的に支柱を2本/リング設置した。また、切削箇所の内側に切削部を固定する目的でモルタルを充填した。

後行トンネルには**表一8**に示す外径φ 2.15 mの推進機を用い、カッタービットは2パス配置とした。また、鋼製架台上の推進機を後方の元押し装置により押し出し、先行トンネルと0° または10° の交差角で推進する配置とした。



図一10 切削性確認試験装置の概要



写真一3 切削性確認試験装置

表一8 推進機および元押し装置仕様

推進機	推進機外径 (m)	2.15
	トルク (α 値)	—
	回転数 (r.p.m)	2.2
元押し装置	総推力 (kN)	12,000
	推進速度 (mm/min)	5~154

4-2 試験結果

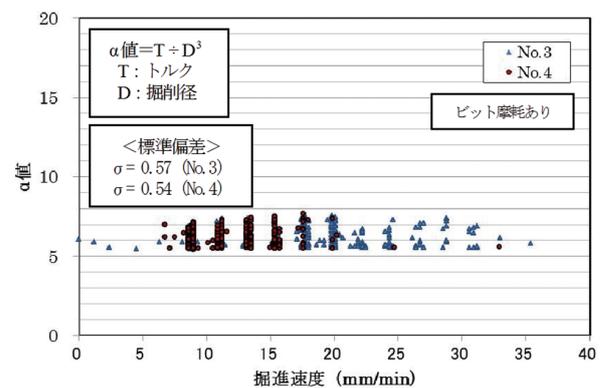
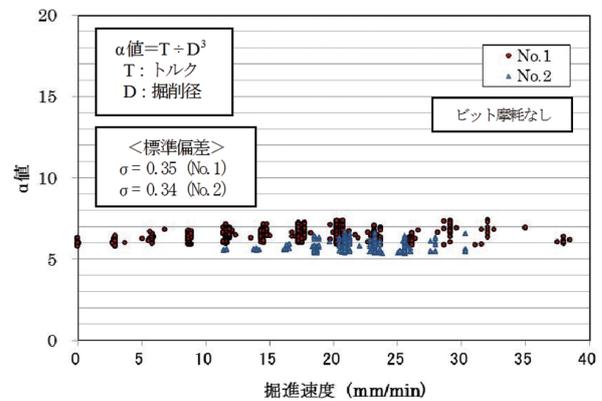
(1) 試験状況および試験結果

No.2~No.4の斜め切削のケースにおいて、カッタービットの摩耗の有無に関わらず切削セグメントの切込みが可能であることを確認した。また、いずれのケースも掘進速度を20~30 mm/minで維持することが可能で、セグメント本体、リング継手、セグメント継手も問題なく切削できることを確認した。No.3の切削状況を**写真一4**に示す。

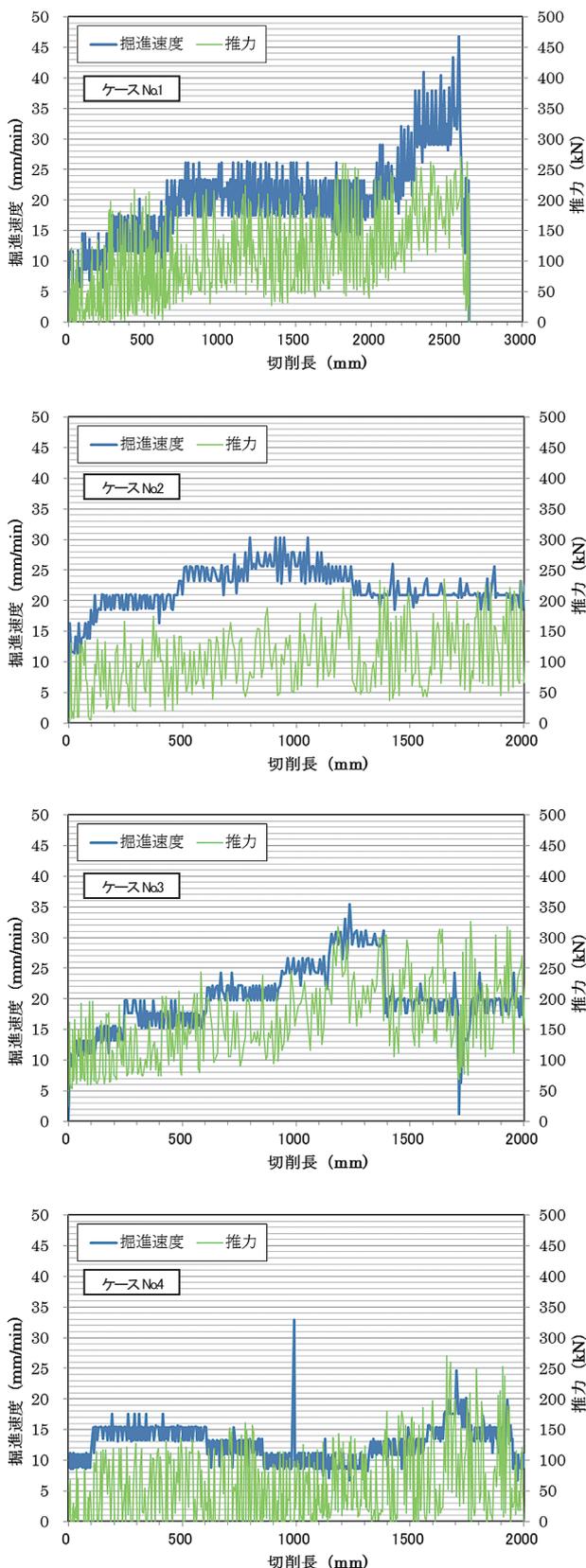
No.1~No.4の掘進速度とトルク (α 値) の関係を**図一11**に、掘進速度と元押しジャッキ推力の関係を**図一12**に示す。



写真一4 切削時および切削面状況 (No.3)



図一11 掘進速度とトルク (α 値) の関係



図一12 掘進速度と元押しジャッキ推力の関係

(2) まとめ

① 先行トンネル切削時の負荷について

本試験では、いずれのケースも掘進速度を上昇させても切削トルクの α 値に増加傾向は見られず、装備トルク($\alpha=29.3$)に対し非常に小さい値($\alpha=5.3\sim 7.7$)であっ

た。さらに、標準偏差は $\sigma=0.34\sim 0.57$ と小さく、切削時のトルクは安定していることを確認した。

また、切削時の元押しジャッキ推力は切削方向および使用骨材によらず最大で250 kN~300 kNであり、一般的な装備能力の推力で容易に切削できることが分かった。さらに、掘進速度は地山掘進と同程度の20~30 mm/minとしても安定して掘進できることを確認した。

② 交差角 10° における切削性について

No.2~No.4のいずれのケースも先行トンネルに問題となるような横振れ挙動は見られず、継手部の目開き・目違いもなく、問題なく切削できた。また、摩耗したカッタービットにおいても、容易に切削できることを確認した。

③ 骨材の違いについて

No.3, No.4の α 値の比較から、骨材に軽量骨材または高炉スラグ骨材を使用した場合に、トルクに大きな差異が生じないことを確認した。

§5. まとめ

切削性確認試験および構造確認試験により、切削セグメントについて、以下のことを確認した。

- ① 切削セグメントは従来のRC理論で設計でき、セグメントとして十分な耐力を有する。
- ② 先行トンネル切削時のトルク、ジャッキ推力ともに小さく、一般的なカッター装備能力および装備推力のシールド機で容易にセグメントを切削することが可能である。
- ③ 先行トンネル切削時の掘進速度は、地山掘進と同程度の20~30 mm/minで施工可能である。
- ④ 通常装備のカッタービットが摩耗した状態でも、先行トンネルと交差角 10° で容易に切込みおよび切削が可能である。

切削セグメントの構造的確認試験、切削性確認試験により、道路トンネル分岐合流部に切削セグメントを適用することが可能であることを確認した。

また、RCセグメントにアラミド繊維を0.5 vol%加えた場合には、フープ筋を25%に減らしてもRCセグメントと同等以上の耐力を有することを確認した。

謝辞. 本研究に関して、様々なご指導を頂きました早稲田大学理工学部小泉淳教授、切削性確認試験実施に協力して頂きました平塚製作所に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 小林正典, 磯 陽夫: カップルバード工法の開発, 西松建設技報 VOL. 30, pp. 1-6, 2007.
- 2) (社) 土木学会, コンクリート標準示方書 設計編, 2012., pp. 34-36