

ビームカッターシールド機による掘削実験

Excavation experiment of beam cutter shield machine

浅野 剛¹・田中雅彦²・福居雅也³・中根 隆⁴・吉田 譲⁴

Takeshi Asano, Masahiko Tanaka, Masaya Fukui, Takashi Nakane and Yuzuru Yoshida

¹正会員 (株)奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

E-mail:takeshi.asano@okumuragumi.jp

²正会員 (株)奥村組 技術本部 土木部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

³正会員 (株)奥村組 技術本部 東京土木技術部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

⁴正会員 (株)IHI 社会基盤事業部 油機・シールド部 (〒478-8650 愛知県知多市北浜町11-1)

Development of a beam cutter shield machine and segments of compressed profile are the two wheels in the development of the compressed profile shield tunneling method. This paper describes an overview of an excavation test conducted using a beam cutter shield machine and the results of an experimental analysis. The main objectives of the experiment were to examine the control performance of the beam cutter and understand the relationship between the ground characteristics and excavation data. Instructive knowledge on the topics was obtained by the experiment and will be a technological foundation for designing an actual machine.

Key Words : shield method, compressed profile, beam cutter, excavation experiment

1. まえがき

扁平型断面シールド工法は、シールド工法と山岳工法の利点を併せ持つということを基本構想としている。開発の方針としては、各々の工法の短所を改善するという観点から「シールド工法においてコストを下げる」あるいは「山岳工法において施工速度を上げるとともに環境への負荷を低減する」という2つの方向性が考えられるが、山岳工法の場合は地質条件が補助工法等に大きく影響するためコストの不確定性が避けられないことを考慮し、本開発ではシールド工法を基本工法として開発を進めた。また、本工法が対象とする地盤の一軸圧縮強さ q_u が $0.1 \sim 10.0 \text{ N/mm}^2$ とシールド工法を適用する地盤としては比較的硬質であることをふまえ、セグメントの設計において応力的負荷の少ない条件設定が可能であることから、コストダウンのためのポイントを「経済的な掘削断面の実現」とし、断面内のデッドスペースが小さく経済的である山岳工法の標準的な断面に近い扁平形状を採用した。

本報文では、本工法の主要技術であり、所定の扁平断面が掘削可能なビームカッターシールド機の制

御性能、掘削性能の検証を目的として実施した実験機による掘削実験結果について報告する。

2. ビームカッターシールド機の概要

本工法では施工対象として第1種3級の2車線道路トンネルを想定しており、その建築限界が確保可能な断面として高さ10m、幅12mの扁平断面を設定した。ビームカッターシールド機はこの断面を余掘りおよび未切削部を残すことなく施工可能なカッターヘッドを装備している(図-1, 2)¹⁾。

扁平断面が掘削可能なシールド機としては、遊星カッターを採用した自由断面シールド機²⁾、偏心多軸式あるいは揺動式のカッター機構などが提案されており、実現場への適用例が報告されている^{3), 4)}。しかしながら、本工法では最大で $q_u = 10.0 \text{ N/mm}^2$ 相当の硬質地盤を適用範囲としていること、さらに想定している実用機(以後、実機)では扁平張り出し量は最大で1.3mに達することを考慮して、より単純なカッター機構として回転する円形カッターにビームカッターを併用する機構を考案した。

扁平張り出し部の掘削を行う2本のビームカッタ

ーは円形カッターのスポーク内に収納された各々2本のジャッキ（以後、支持ジャッキ）により支持されており、この支持ジャッキの伸縮量を制御することでビームカッターの張り出し量を調節し、扁平張り出し部の掘削が可能となっている。このような構造とすることで、小さい支持ジャッキストロークで大きな張り出し量を発生させることができる。

実機ではビームカッターの張り出し量が大きく硬質地盤を適用範囲に含むことから、実用化にあたっては硬質地盤掘削時のビームカッターの掘削性能、所定の扁平断面を掘削するためのビームカッターの制御性能を確認する必要があった。このような状況から、これらの課題に関する基礎データを得ることを目的として実験機による掘削実験を実施した。

3. 掘削実験

(1) 実験概要

実験機の開発を念頭に置き、以下の項目の把握を実験の目的とした。

①地盤強度とトルク、掘進速度、推力の関連性

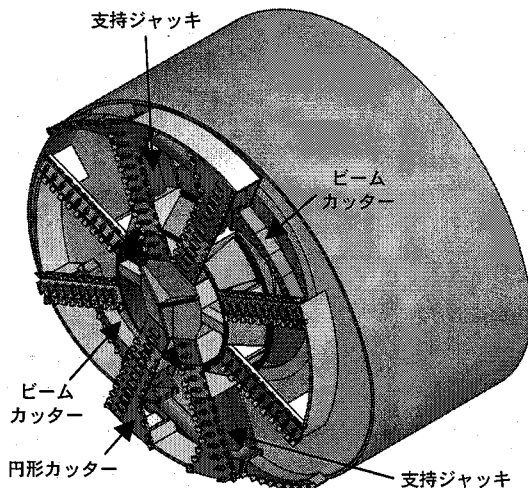


図-1 ビームカッターシールド機鳥瞰図

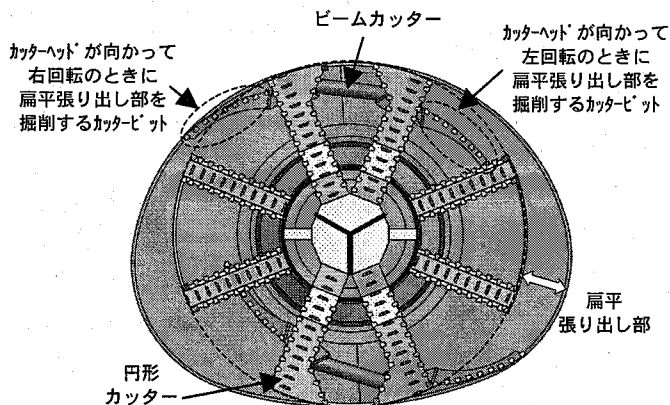


図-2 ビームカッターシールド機正面図

②ビームカッターの位置によるトルク、掘進速度、推力の変動状況

③ビームカッターの制御性能

水槽に高強度流動化処理土を打設して模擬地盤を作成し、実験機を用いて掘削した。実験ヤードの状況を写真-1, 2に示す。水槽は隔壁により3区画に分割されており、各区画には異なった強度の模擬地盤が形成されている。写真-1は2つの区画における模擬地盤の掘削を終了した後、3区画目の掘削位置に実験機を設置し終えた状況である。各区画における

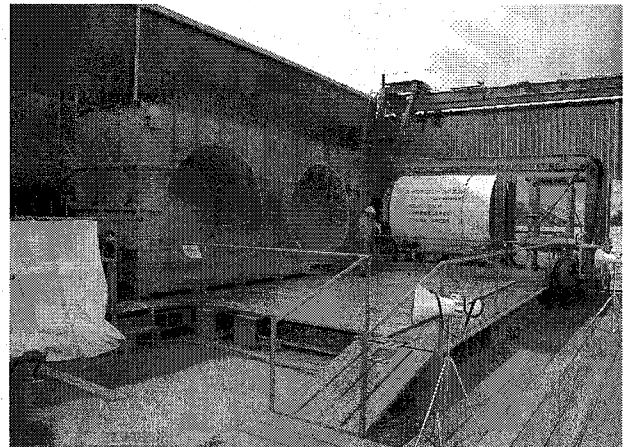


写真-1 実験ヤード全景

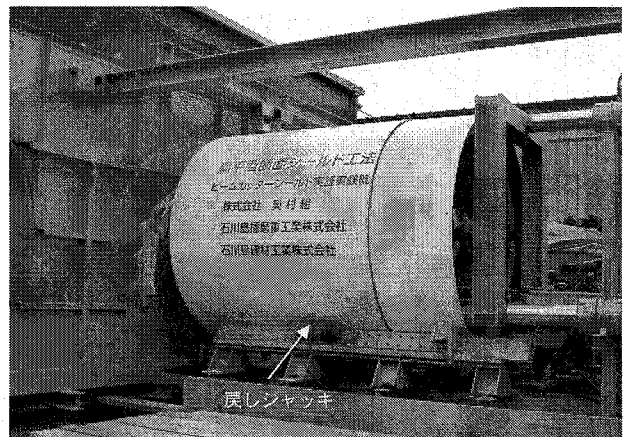


写真-2 実験機全景

表-1 実験設備仕様

名称	仕様	形状、機能他	台数
実験機	電動機15kW×2 440V	外径2140、機長3050 重量250kN	1
推進系の制御盤		w1400×h850×t500	1
起動・制御盤		w2100×h1800×t500	1
ビームカッターユニット	55kW、18.5kW 440V	w2200×h1800×t1400	1
推進ジャッキユニット	11kW、220V	w2200×h1700×t900	1
推進ジャッキ	1000kN、1050st		3
横送りジャッキ	1000kN、1050st	実験機を横方向にスライドさせて掘削位置に設置	2
戻しジャッキ	500kN、200st	掘削後に実験機を引出す（写真-2）	2
模擬地盤打設水槽	60m ³	w10800×h3000×t2000	1
排土用ベルトコン	200V	w400×h280×L3000 w400×h280×L4000	1 1
土砂運搬ベッセル	0.7m ³	w1900×h620×t1500	1
発電機	195kVA、440V		1
オイルクーラー用水槽	20m ³	w5000×h2000×t2000	1

掘進距離は約1.6mであり、その間に推力、トルク
の状況に応じて掘進速度を0~50mm/minの範囲で変化
させて掘削データを計測した。主な実験設備の仕様
を表-1に、計測項目を表-2に示す。

表-2 計測項目

計測項目	想定レンジ	備考
カッター回転角度	0~359°	分解能0.5°
カッター回転速度	1.63rpm	カッター回転速度は一定
カッターPU元圧力	0~35MPa	
ビームカッター 制御ジャッキ 260mm	目標ストローク	0~260mm 回転角度0.5°ピッチで設定
	ストローク	0~260mm
	ストローク偏差	0~260mm ④-③
	ヘッド圧力	0~35MPa
	ロッド圧力	0~35MPa
	ジャッキ推力	⑤、⑥より算定
ビームカッター 制御ジャッキ 85mm	目標ストローク	0~85mm 回転角度0.5°ピッチで設定
	ストローク	0~85mm
	ストローク偏差	0~85mm ⑧-⑦
	ヘッド圧力	0~35MPa
	ロッド圧力	0~35MPa
	ジャッキ推力	⑨、⑩より算定
推進ジャッキストローク	0~1150mm	
推進速度	0~100 mm/min	
推進圧力	0~50MPa	
カッタートルク	0~150%	0~264.8kN・m

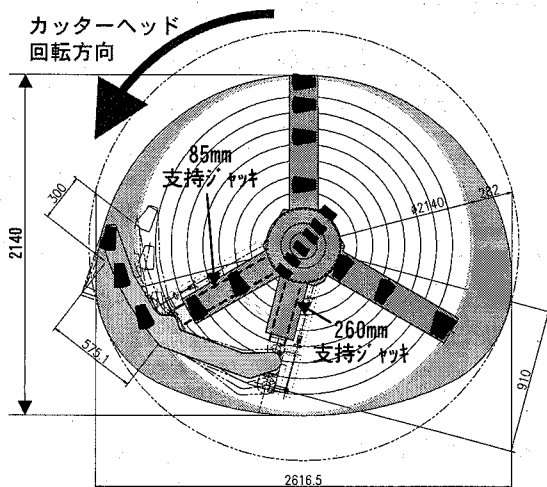


図-3 実験機のカッターヘッド

ビームカッター支持ジャッキに取付けたストローク計に
よりビームカッターの位置を管理し、所定の扁
平面面を掘削する

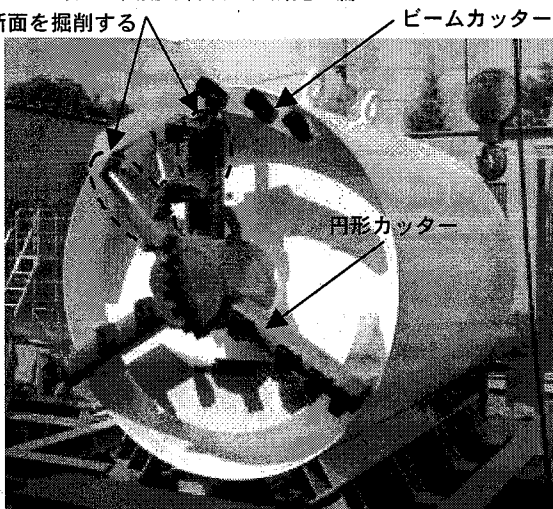


写真-3 実験機のカッターヘッド

(2) 実験機の構造

実機ではビームカッターが2組装備されるが（図-2）、その掘削性能および制御性能の確認には1組で可能と判断し、実験機用として図-3に示すカッターヘッドを製作した。実験機は既存の円形推進機本体（外径2140mm）に製作したカッターヘッドを取付けたものである。実験機を写真-3に示す。ビームカッターに装備されている3個のビットの先端位置は円形カッターに取付けられているビット先端よりも70mm後方に位置しており、ビームカッターは円形部分の掘削には寄与しない機構となっている。また、カッター回転数は1.63rpmである。

ビームカッターを支持する2本の支持ジャッキのストロークは各々260mm、85mmであり、カッターヘッドの回転に連動して各支持ジャッキのストロークを制御することにより所定の扁平断面を掘削することができる。カッターヘッド回転角と支持ジャッキのストロークの目標値との関係を図-4に、カッターヘッド回転角30°ごとのビームカッター制御状況を図-5に示す。これらの図から、130°から220°、310°から0°の間に85mmジャッキのストロークが伸びるとともに260mmジャッキのストロークが急激に縮まることによりビームカッターが張り出されていることがわかる。特に円形掘削状態から最大張り出し地点までの回転角度が小さい330°から0°においてストロークの変化速度が最も速くなっているが、この状況は実機のビームカッターの制御においても同様である。なお、実験機は本工法で想定している実機の1/4.5スケールである。

(3) 模擬地盤の配合と強度

模擬地盤材料としては流動化処理土を用いた。流動化処理土は、産業廃棄物である汚泥を一次処理し

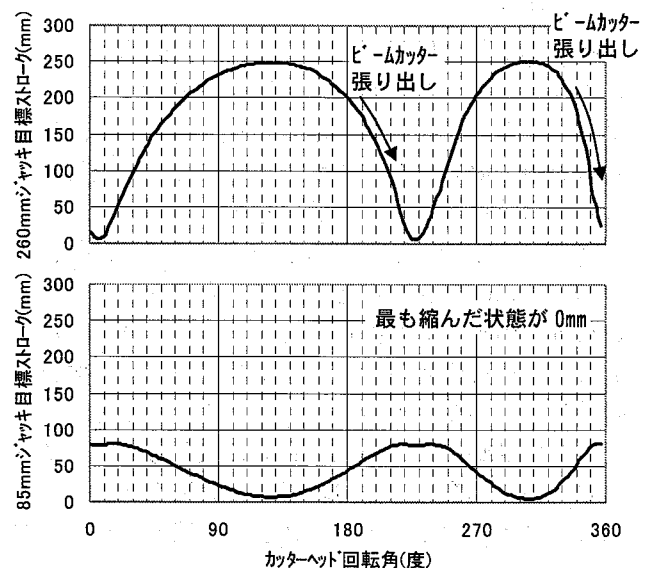


図-4 支持ジャッキのストローク目標値

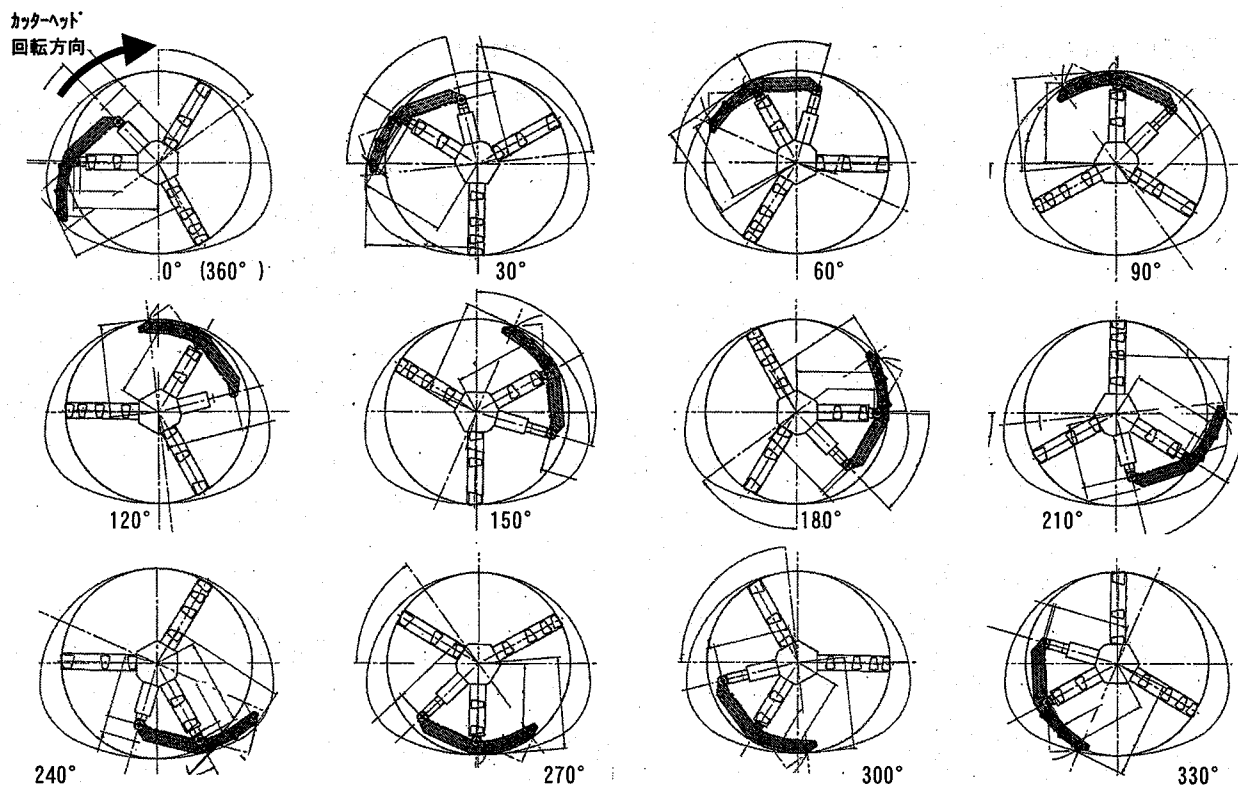


図-5 カッターヘッド回転角とビームカッターの位置関係（シールド機後方から見た場合）

た細粒分泥水に砂を加えて比重を調整した調整泥水と固化材を混ぜたもので、開削トンネルの埋め戻しやシールドトンネルインバート部への埋め戻しなどへの適用実績が見られる。ただし、既往の実績では q_u が 6N/mm^2 程度までであり、今回想定している 10N/mm^2 という強度は適用例が見られない。したがって本実験への採用にあたっては試験練りを実施し、その結果に基づき配合を決定した。模擬地盤打設に用いた配合、掘削実験実施時の強度を表-3に示す。

4. 実験データの分析

(1) 掘削データ

各模擬地盤強度におけるトルク、掘進速度、推力とカッターヘッド回転角の関係を図-6～8に示す。実働トルクおよび実働推力はトルク、推力の実測値から無負荷の場合のトルクおよび実験機と設置架台間の摩擦抵抗を差し引いた値である。

図-5に示したようにカッターヘッドの回転角が $0\sim 10^\circ$ 、 $210\sim 220^\circ$ 付近でビームカッターに装備された3個のビットが回転中心から最も張り出した状態で地盤を切削する状況となることから、いずれのケースにおいてもカッターヘッドの回転にともなうトルクの変動に特徴が見られる結果となっている。

図-6, 7の場合にはこれに対応する地点でトルクが大きくなっており、両ケースとも2箇所のピーク値

表-3 模擬地盤配合と実験時の強度

	調整泥水 1 m^3 あたり (kg)		固化材 (kg)	分散剤 (kg)	掘削実験時強度 (N/mm^2)
	細粒分泥水	砂			
C200	562	1038	200	6	2.1
C280	562	1038	280	7	4.5
C420	562	1038	420	8	9.0

調整泥水比重 1.6

固化材は普通ポルトランドセメント

は同レベルの値となっている。実験機では、円形カッターに装備されているビットは9個であり、各ビットの回転中心からのアーム長の総和は 6040mm 、これにビームカッターの張り出し量が最も大きくなった時のビームカッターに装備されている3個のビットのアーム長を加えると 9657mm となる。各ビットの切削力が等しいと仮定すると、トルクの最大値と最小値の比率は総アーム長の比率 ($9657/6040=1.6$) に対応することになるが、図-6, 7では各々1.9, 1.6となっており、総アーム長の比率に近い値となっている。

これに対し、図-8では $210\sim 220^\circ$ 近傍のトルクのピーク発生位置が若干ずれており、トルクの値も $0\sim 10^\circ$ 地点よりもかなり大きくなっている。これは、図-5に示したように 240° から 250° にかけて下盤に向かって押し付けられるような軌跡を描くビームカッターとトンネル下盤との間にチャンバー内の掘削

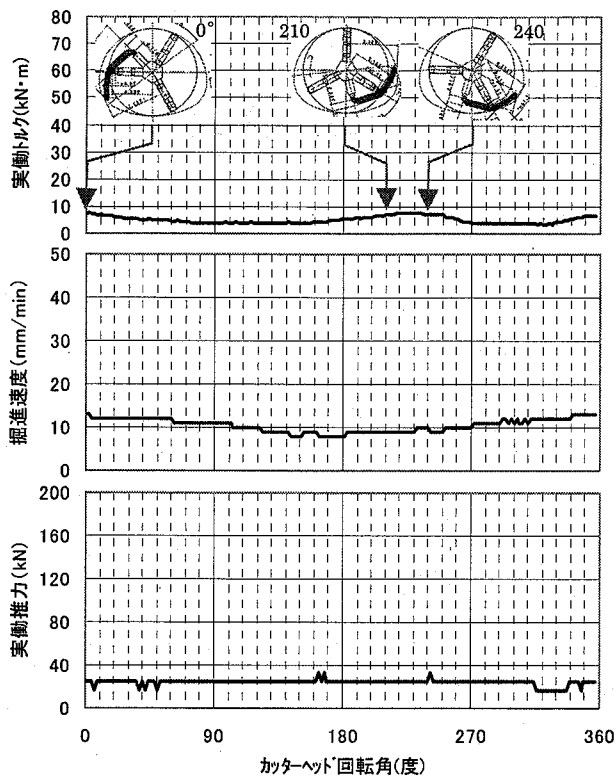


図-6 掘削データの推移 ($q_u=2.1\text{N/mm}^2$)

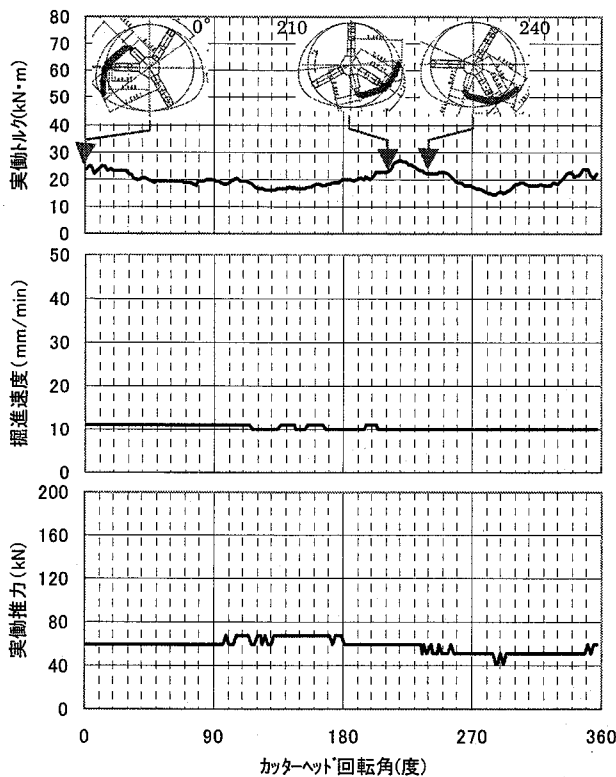


図-7 掘削データの推移 ($q_u=4.5\text{N/mm}^2$)

ずりが挟まるために発生する現象であるが、実機で想定しているような密閉型の泥土圧シールドの場合には、チャンバー内の土砂は塑性流動化しているため、このような現象が発生する可能性は低いと考えている。図-8のケースでも、最小トルクに対する掘削ずりが挟まる危険性が低い0°におけるトルクの

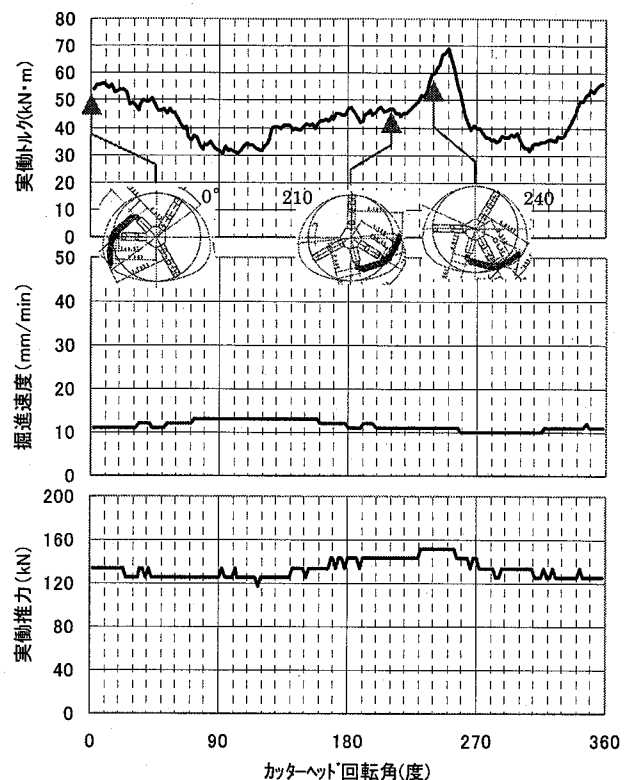


図-8 掘削データの推移 ($q_u=9.1\text{N/mm}^2$)

比率は1.7であり、他のケースと同様に総アーム長の比率に対応している。

このように実験データにおいては実働トルクの最大値と最小値が総アーム長の比率に概ね対応した値となっており、全ビットの地山切削力が同等となっている状況がうかがえる。

掘削実験におけるトルクの代表値をカッターヘッド回転角が0°の時の値(ビームカッターが回転中心から最も張り出した状態で地盤を切削する時の値)とし、推力についてはトルクのような特徴的な変動は見られないことからカッターヘッド1回転の平均値を代表値と考え、各々の値と掘進速度との関係を図-9、10に示した。いずれの q_u についても、トルクおよび推力と掘進速度の間の相関傾向が明確になっていることがわかる。切削時におけるビットの切削力は掘削する地盤の q_u および掘進速度の指数関数となると仮定して⁵⁾、トルクに関して重回帰分析を実施した。回帰式を以下に示す。

$$T=0.46 q_u^{1.42} v^{0.67} \quad (1)$$

ここで、 T :トルク (kN・m)

v :掘進速度 (mm/min)

推力についても同様に以下の回帰式が得られる。

$$F=1.07 q_u^{1.57} v^{0.64} \quad (2)$$

ここで、 F :推力 (kN)

v :掘進速度 (mm/min)

これらの結果を図-9、10に併記しているが、重相

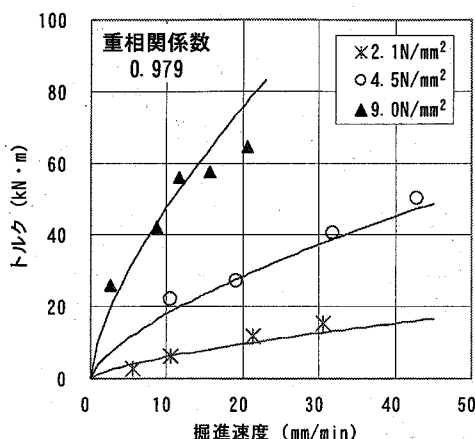


図-9 掘削実験におけるトルクと掘進速度の関係

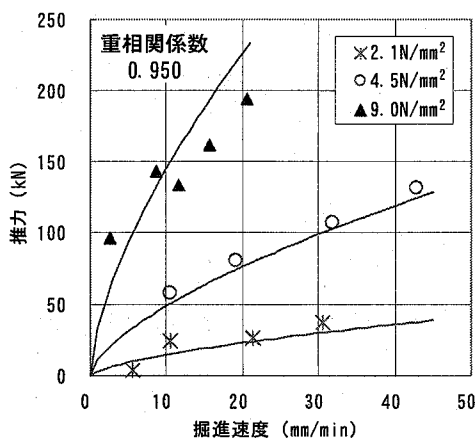


図-10 掘削実験における推力と掘進速度の関係

関係数は式(1)では0.979, 式(2)では0.950となっており, いずれの実験結果にも良い対応を示していることがわかる。

(2) ビームカッターの制御性能

坑壁の出来形偏差を図-11に示す。 q_u が 9.0N/mm^2 の場合の 350° 地点において出来形偏差が相対的に大きくなっている。偏差発生の主因は, 支持ジャッキのストロークを制御するサーボ弁の容量不足である。特にストローク 260mm の支持ジャッキのストロークを 350° 付近では縮めきれておらず, ストローク偏差が大きくなっている。ただし, 対策としてはサーボ弁の容量の大きくする他, 制御の遅れを想定した目標値の設定といった手段により十分に対処できるレベルの偏差であると判断している。

5. あとがき

掘削実験により得られた知見を以下に示す。

- ①ビームカッターの張り出しに起因するトルク, 推力の変動状況が確認され, 各々のデータと地盤強度および掘進速度との関係を把握することができた

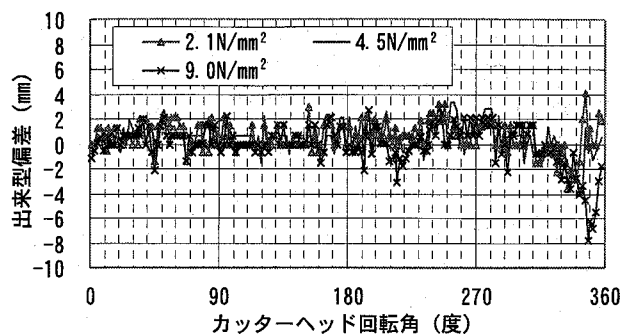


図-11 掘削実験における坑壁出来形偏差

- ②全ビットの地山切削力が同等となっている状況を考慮すると, 実験により確認されたトルク, 推力と地盤強度および掘進速度の関係は, 実験におけるビット数, ビット幅, 個々のビットのカッターヘッド回転中心からの距離を設定することにより実機の設計に拡張して用いることが可能である
- ③支持ジャッキのストロークが急激に縮まる時にストローク偏差および出来形偏差が大きくなるというビームカッターの制御特性を把握することができた
- ④実験により確認されたビームカッターの制御特性については, サーボ弁の容量をアップすることで対処することは可能であるが, 大きな偏差の発生が瞬間的なものであることから, 偏差の発生を想定した制御目標値の設定による対応も可能である

最後に, 本開発については, 首都大学東京 都市環境学部 西村和夫教授にご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉田譲, 伊藤広幸, 田中雅彦: 扁平型断面シールド工法の開発 (その3: 扁平型シールド機の開発), 土木学会第61回年次学術講演会, 6-094, 2006.9.
- 2) 石川旭, 千田昌平, 萩原英樹, 山本進: 自由断面シールド工法の開発, 建設の機械化, No.508, pp.39-45, 1992.6.
- 3) 池田勝彦, 押田理祐: ジャッキ駆動DPLEXシールドによる下水道工事の施工, 第53回施工体験発表会, pp.49-56, 2003.12.
- 4) 話題の現場 京都市地下鉄東西線・六地蔵駅-醍醐駅間の建設工事 世界で始めて「複線大断面矩形シールド工法」を採用, 月刊コンクリートテクノ, vol.12, No.12, pp.46-49, 2002.12.
- 5) 会田俊夫, 岡本隆: 採炭機械, 技術書院, 1962.