

# 扁平型断面シールド工法の開発（その2）

## －ビームカッターシールド機による掘削実験－

### Development of Compressed Section Shield Tunneling Method (Part 2)

#### - Excavation Experiment of Beam Cutter Shield Machine -

浅野 剛\* 田中雅彦\*\* 福居雅也\*\*\*  
熊澤伸康\*\*\*\* 成本和俊\*

#### 要旨

大都市圏近郊における平野部の軟弱な沖積層から丘陵地の比較的硬質な洪積層へと遷移するような、シールド工法と山岳工法の境界領域の地盤を対象とした扁平型断面シールド工法の開発に平成17年度より着手している。本工法ではビームカッターシールド機および扁平型セグメントが開発技術の2本柱となっているが、本報告はビームカッターシールド機の実験機を用いて実施した掘削実験の概要と、実験により得られたデータの分析結果について述べたものである。本実験の主な目的は、「ビームカッターの制御性能確認」、「地盤強度とトルク、掘進速度、推力等の掘削データとの関連性把握」であるが、実験によりこれらに関する有益な知見が得られ、実機的设计に向けた技術的な裏付けを得ることができた。

キーワード：扁平断面、シールド工法、境界領域、掘削実験、ビームカッター

#### 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コンセプトとしている。開発の方針としては「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実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  $q_v$  が  $0.1 \sim 10.0 \text{ N/mm}^2$  と比較的硬質であることをふまえて、セグメントの設計において応力の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。

本文は、本工法の主要な開発技術であり、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、当社の相模原工作所におい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ものである。

#### 2. ビームカッターシールド機の概要

本工法では、基本的に施工対象として第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<sup>1)</sup>。開発したビームカッターシールド機を図-1、2に示す。

ビームカッターシールド機のカッターヘッドは、円形カッターと扁平張り出し部の掘削を行う2本のビームカッターから構成されている。各ビームカッターは円形

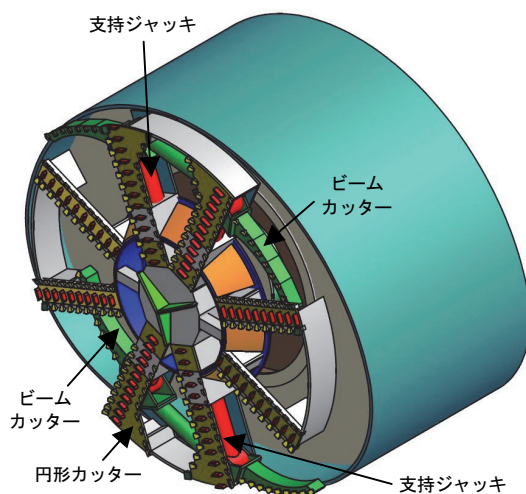


図-1 ビームカッターシールド機鳥瞰図

\*技術研究所 \*\*技術本部土木部 \*\*\*技術本部東京土木技術部 \*\*\*\*東京支社機械部

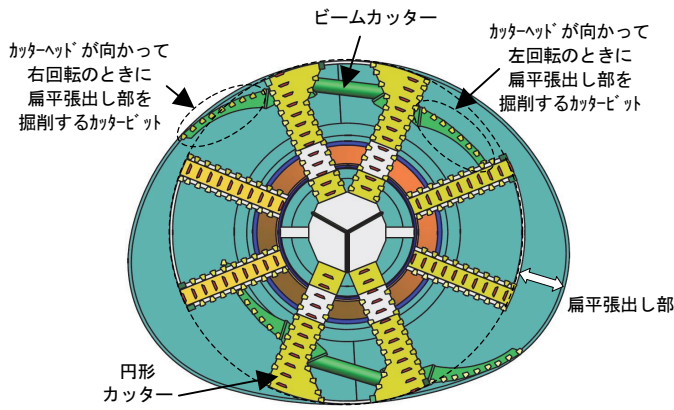


図-2 ビームカッターシールド機正面図

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。ビームカッターの張り出し量は最大で1.3m程度となること、さらに本工法では最大で $q_u = 10.0\text{N/mm}^2$ 相当の硬質地盤を適用範囲としていることから、実用化にあたっては、特に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る。このような状況から、これらの課題に関する検討資料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

#### 3.1 実験概要

ビームカッターシールド実用機（以後、実機）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。

- i. 模擬地盤強度とトルク、掘進速度、推力の関連性
- ii. 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
- iii. ビームカッターの制御性能

実験は水槽に高強度流動化処理土を打設して作成した模擬地盤を、実験機を用いて掘削することにより行った。

実験ヤードの状況を写真-1、2に示す。模擬地盤を打設した水槽は隔壁により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打設されている。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。

#### 3.2 実験機の構造

現在想定している実機のカッターヘッドは図-2に示したとおりであり、扁平張り出し部の掘削を行うビーム



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<br>440V    | 外径2140、機長3050<br>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<br>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 <sup>3</sup>     | w10800×h3000×t2000                 | 1  |
| 排土用バルコン     | 200V                 | w400×h280×L3000<br>w400×h280×L4000 | 1  |
| 土砂運搬ベッセル    | 0.7m <sup>3</sup>    | w1900×h620×t1500                   | 1  |
| 発電機         | 195kVA, 440V         |                                    | 1  |
| オイルクーラー用水槽  | 20m <sup>3</sup>     | w5000×h2000×t2000                  | 1  |

カッターは2組装備されている。しかし、前節で述べた3項目の確認を目的とした場合には1組のビームカッターが装備されていれば十分であると判断し、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

表-2 計測項目

| 計測項目                                    | 想定レンジ        | 備考                     |
|---|--------------|------------------------|
| ① カッター回転角度                              | 0~359°       | 分解能0.5°                |
| ② カッターPU元圧力                             | 0~35MPa      |                        |
| ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦<br>ビームカッター<br>制御ジャッキ<br>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                |
| ⑧ ⑨ ⑩ ⑪<br>ビームカッター<br>制御ジャッキ<br>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                |
| ⑫ 推進ジャッキストローク                           | 0~1150mm     |                        |
| ⑬ 推進速度                                  | 0~100 mm/min |                        |
| ⑭ 推進圧力                                  | 0~50MPa      |                        |
| ⑮ カッタートルク                               | 0~150%       | 0~264.8kN-m            |

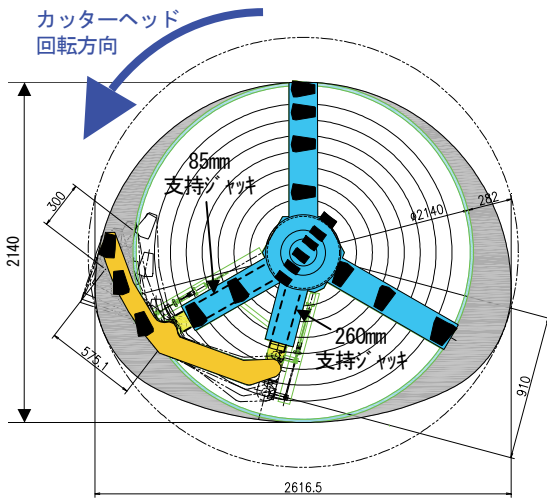


図-3 実験機のカッターヘッド

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、所定の扁平断面を掘削する

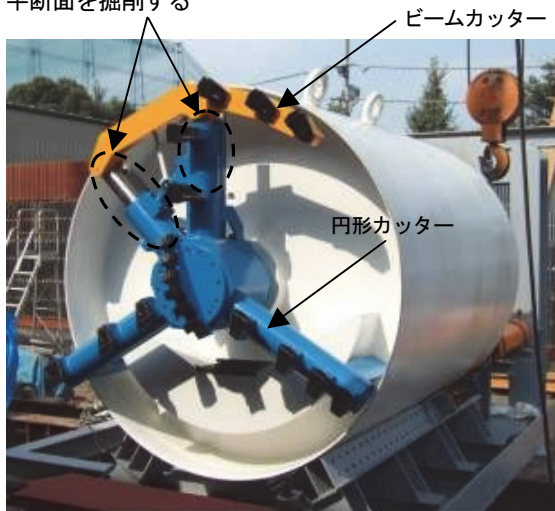


写真-3 実験機のカッターヘッド

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。

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、330° から 0°、180° から 210° 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。

### 3.3 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 6 N/mm<sup>2</sup> 程度までであり、今回想定している 10 N/mm<sup>2</sup> 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。

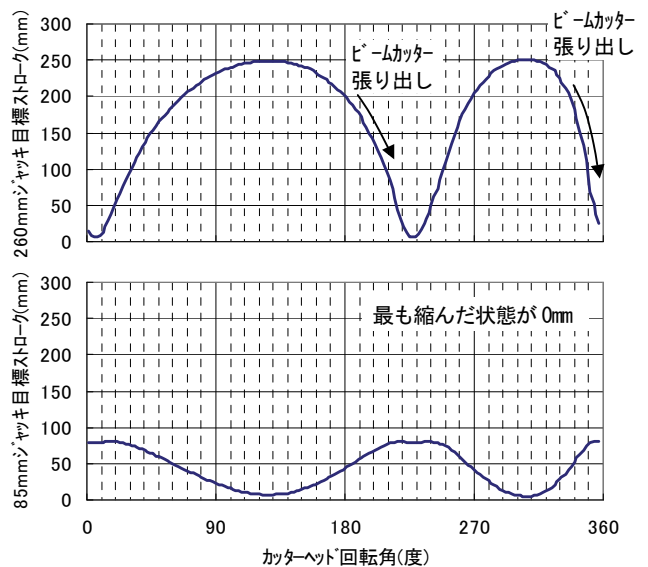


図-4 支持ジャッキのストローク目標値

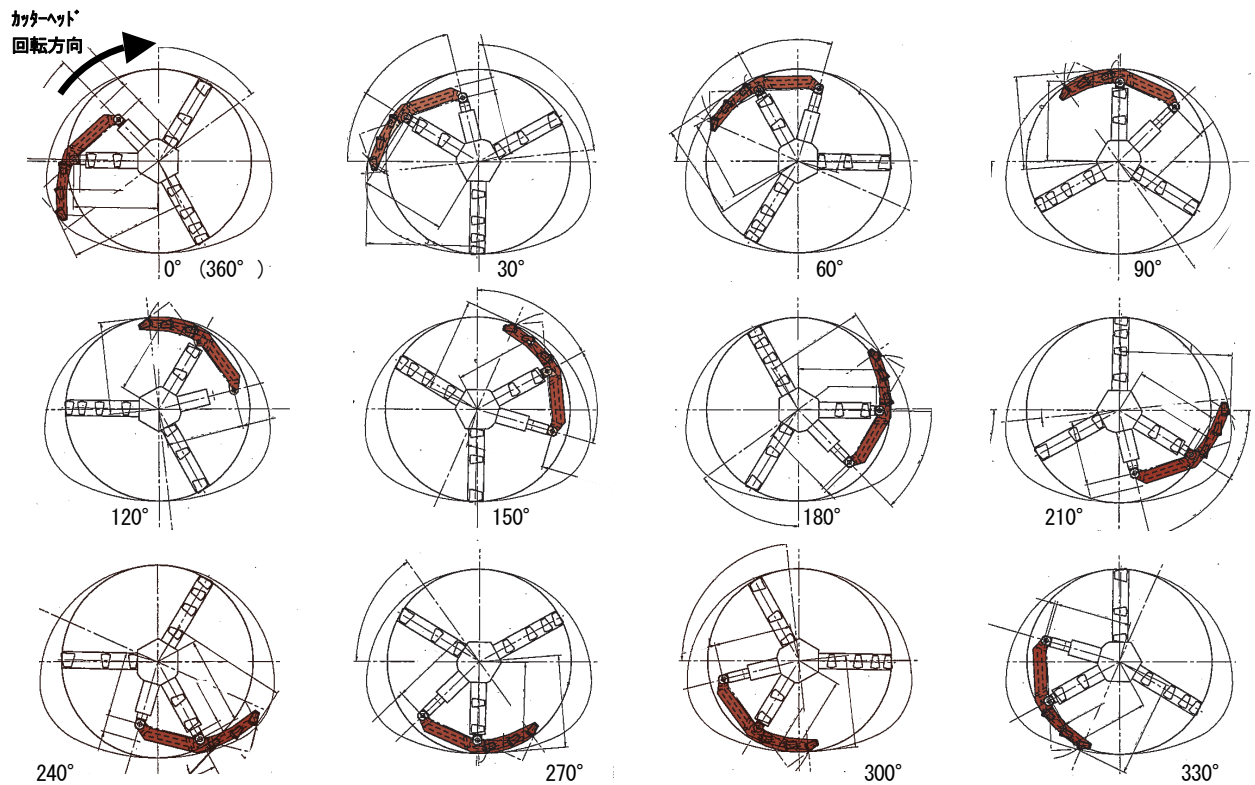


図-5 カッターヘッド回転角とビームカッターの位置関係 (シールド機後方から見た場合)

実験時の  $q_u$  は、基本的に実際に模擬地盤から採取したコアを用いた強度試験により決定した。ただし、その結果が得られていないケースでは、針貫入試験結果とコアを用いた一軸圧縮試験結果との間に整合性が見られることから、掘削終了時に切羽で実施した針貫入試験結果を採用した。

#### 4. 実験データの分析

##### 4.1 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0～10° および 210～220° 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

表-3 模擬地盤配合と実験時の強度

|      | 調整泥水 1m <sup>3</sup> あたり (kg) |      | 固化材 (kg) | 分散剤 (kg) | 掘削実験時強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |
|------|-------------------------------|------|----------|----------|------------------------------|
|      | 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

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210～220° 近傍のトルクのピークの発生位置が若干ずれており、トルクの値も0～10° 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0° の時のトルクの比率は1.7で

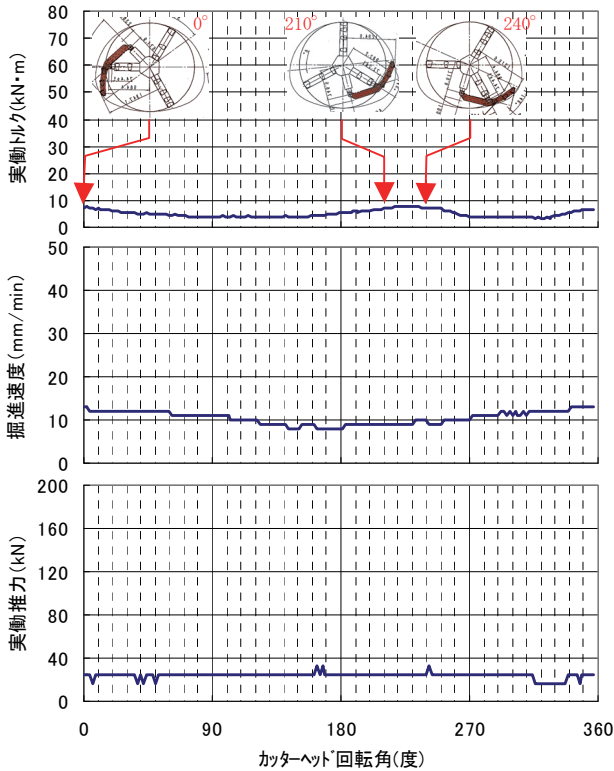


図-6 カッター回転角と掘削データの関係 ( $q_u=2.1\text{N/mm}^2$ )

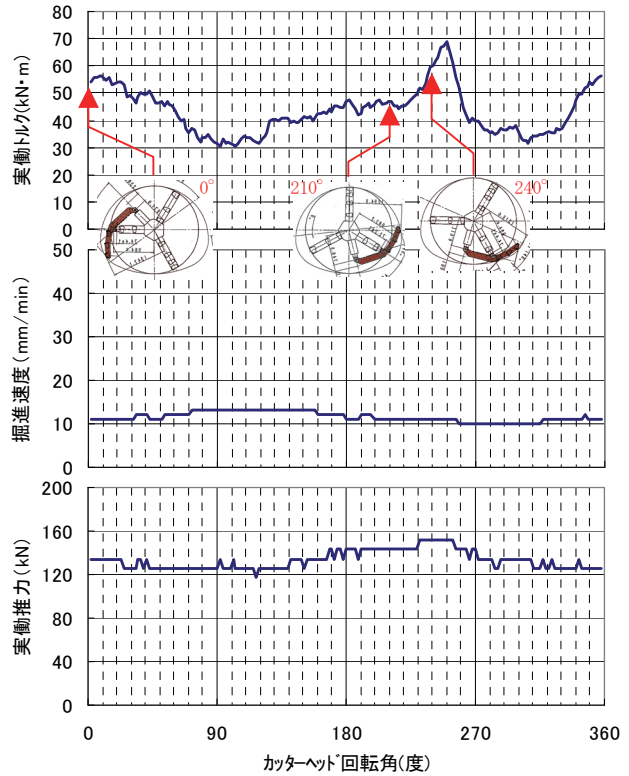


図-8 カッター回転角と掘削データの関係 ( $q_u=9.1\text{N/mm}^2$ )

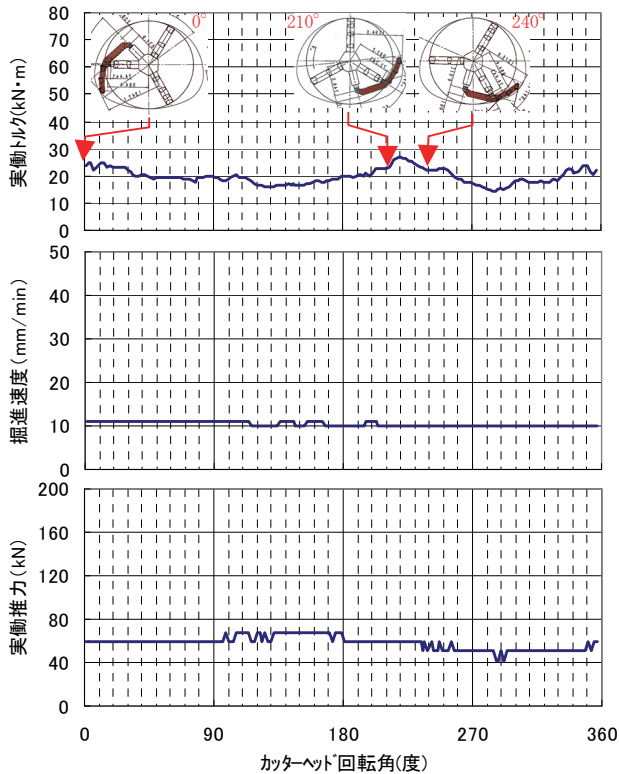


図-7 カッター回転角と掘削データの関係 ( $q_u=4.5\text{N/mm}^2$ )

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。

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 $0^\circ$ 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<sup>2)</sup>、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)

トルクに関しては既往の実験式では $v$ の指数は0.5とされる場合が多いが、式(1)では0.67と比較的近い値となっている。これらの結果を図-9、10に併記しているが、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。

#### 4.2 ビームカッターの制御性能

掘削実験における85mmジャッキと260mmジャッキの目標ストローク(図-4)に対する偏差を図-11、12に示す。図には、無負荷でカッターヘッドを回転させた時の偏差も併記している。85mmジャッキの場合には、無負荷の場合と地盤を掘削する場合の偏差が同程度となっている。また、偏差は支持ジャッキを伸ばす速度が

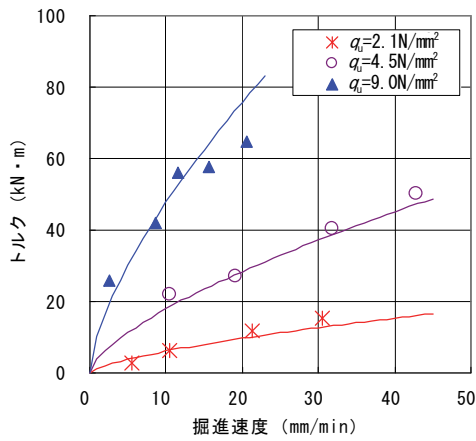


図-9 掘削実験におけるトルクと掘進速度の関係

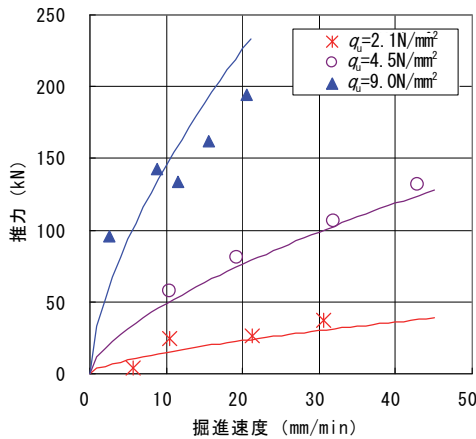


図-10 掘削実験における推力と掘進速度の関係

最も速い地点（回転角 340～350°）で最大となっているが、その値は3mm程度にとどまっている。260mmジャッキの場合にも、ビームカッターを張り出すために急激にストロークを縮める必要がある 210～220°、340～350°において偏差が大きくなっている。

無負荷のときに発生するジャッキストローク偏差を基準として、掘削により発生する偏差の増分を用いて算定した坑壁の出来形偏差を図-13に示す。 $q_u$ が9.0N/mm<sup>2</sup>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バルブの容量不足であり、対策としてはサーボバルブ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ものと考えている。

## 5. あとがき

掘削実験により得られた知見を以下に示す。

- i. 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
- ii. この関係は実機におけるビット数、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

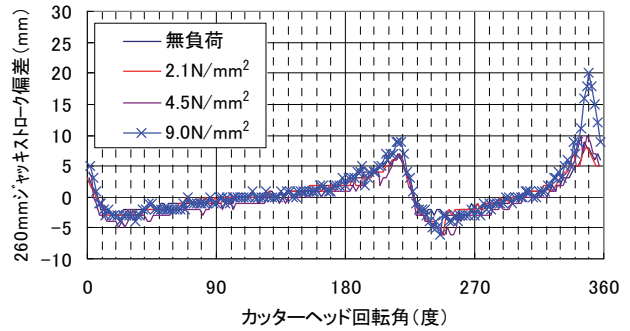


図-11 掘削実験における260mmジャッキストローク偏差

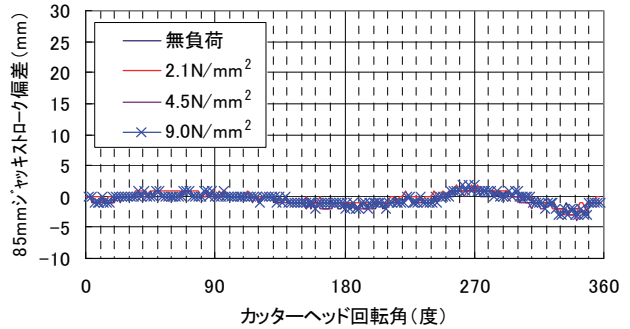


図-12 掘削実験における85mmジャッキストローク偏差

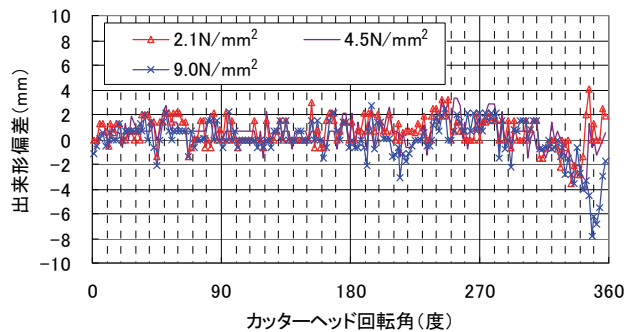


図-13 掘削実験における坑壁出来形偏差

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

- iii. 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型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
- iv. この特性については、サーボ系のパワー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がより効率的であるといえる

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った。ここに深く感謝の意を表す。

## 【参考文献】

- 1) 吉田譲他、「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、VI-094、2006。
- 2) 会田俊夫他、「採炭機械」、技術書院、1990。