

# 二重回転カッター方式による 大口徑シールドの高速掘進技術の開発

安 光 立 也

大口徑シールド機の掘進速度を向上するために、二重回転カッター構造に関する実験を行った。実験機は外カッター外径 $\phi$  800 mm, 内カッター外径が外カッター外径に対して1:2および1:3とし、大深度を想定した模擬地盤を供試体として掘削実験を行った。その結果、内カッターを外カッターより速く回転させることにより、カッタートルクおよびジャッキ推力の低減が確認できた。本報では、その実験の概要について紹介する。

キーワード：シールド機, 大口徑, 大深度, カッタートルク, ジャッキ推力, 高速掘進

## 1. はじめに

近年は、地下河川や道路において大口徑シールドの工事が進められており、今後は鉄道においても大口徑かつ大深度のシールド工事が予定されている。これらの工事では、用地の制約等から長距離施工や大深度施工が必要となるため、硬質地盤での掘進効率の向上を含む高速施工技術が求められる。高速施工を可能にする技術としては、セグメント組立時間の短縮技術とシールド坑内設備から立坑及び坑外設備の高速化技術が含まれるが、今回はシールド機の掘進効率を向上する技術の開発を行った。

従来のシールド機のカッター面板は単一型であり、一般的にシールド機のカッター円周方向の移動速度（以下、周速度）は、カッター外周側がおよそ30 m/min程度になるようにカッター回転数（rpm）を設定する。大口徑シールドにおいてカッター外周側の周速度を30 m/min程度とするとカッター回転数が少なく、従来の単一型カッター面板ではカッター内周側の周速度が極端に小さくなる。周速度が極端に小さくなると掘削効率と攪拌効率が低下し、カッタートルクとジャッキ推力が上昇するため掘進速度が低下する。よって大口徑シールドでは、カッター内周側の掘削効率と攪拌効率を上げることが、シールド機の掘進速度を向上させることになる。そのためには、カッターを外周と内周の二重構造として内カッターを高速で回転させる二重回転カッター方式が有効である。二重回転カッター方式は、すでに海外では実績があるが、国内では実験による検討もなされていなかった。

筆者らは2012年から二重回転カッター方式のシールド機の実験機を作製し、大深度の硬質地盤を想定した掘進実験を行ってきたので、ここにその実験結果を報告する。

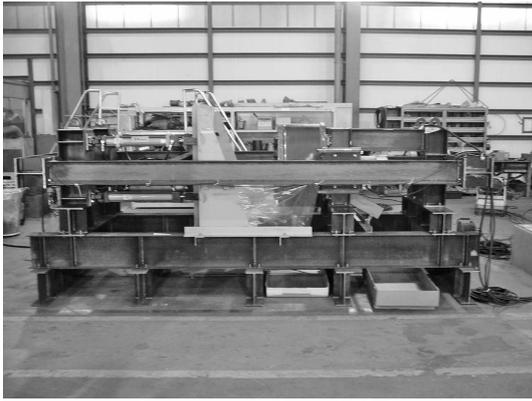
## 2. 実験概要

### (1) 実験装置

本実験に用いた二重回転カッターの実験装置（土圧式）は、二重カッターの「掘削装置」と地盤を模擬した供試体（模擬地盤）の「押し出し装置」で構成されている。掘削装置は外径が $\phi$  800 mm, 外カッターは中間支持方式で、内カッターはセンターシャフト方式である。外カッターと内カッターそれぞれに電動モーターを装備して、個別に回転を制御できる構造としている。掘削装置には推進機構は付いていないが、模擬地盤を押し出し装置で押し出すことにより相対的に掘進と同じ状態を作り出している。押し出し装置は圧力を同調した4本のジャッキで供試体の四隅を押す構造としている（写真—1, 2, 図—1, 2）。

計測項目は、掘進時の負荷の代表的な値であるカッタートルクとジャッキ推力（以下、トルクと推力とする）とした。トルクは内カッターと外カッターのモーター負荷を各々計測した。推力は押し出し装置のジャッキ油圧から算定される。計測値は約0.5秒ごとにデータロガーに記録した。

シールド機のトルクには、カッターが地山に切り込む際に要する負荷と、チャンバー内の掘削土砂を攪拌するために要する負荷が含まれている。また、推力に



写真一 二重回転カッター実験装置全景



写真三 チャンバー下の開口部



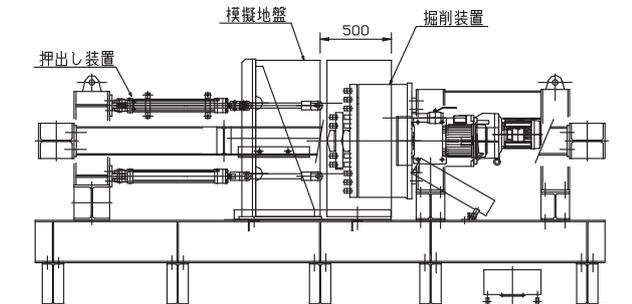
写真二 二重回転カッター面板

た状態で実験を行えば、チャンバー内に掘削土砂が溜まらず、切り込む際に要するトルクおよび推力を計測できるようにした（写真三）。実際の土圧式シールド機に近い状態を再現する場合は、開口を閉じてチャンバー内を掘削土砂で充満した。ただし、スクリーコンベア装置は設けることができなかったため、チャンバー内を掘削土砂で充満した場合の排土は、掘進装置の後方の排土口からチャンバー内の圧力により自然に押し出す方法とした。

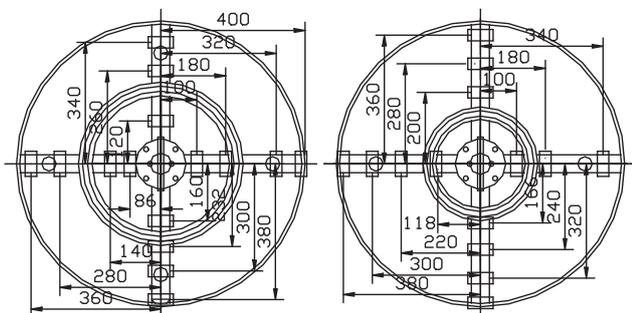
(2) 模擬地盤

供試体に用いる模擬地盤は大深度の固結した粘性土地盤を想定し、一軸圧縮強度は  $1.0 \text{ N/mm}^2$  程度と設定した。これは、北多摩層等のデータ等を参考としている。この値は土とモルタルの中間であることから、材料には流動化処理土を選んだ。供試体は縦  $1 \text{ m} \times$  横  $1 \text{ m} \times$  厚さ  $0.4 \text{ m}$  の鋼製型枠に流動化処理土を打設した（写真四）。

流動化処理土の強度は、打設時に作製したテストピースの一軸圧縮強度試験により確認し、28日ではほぼ  $1.0 \text{ N/mm}^2$  であった。模擬地盤がテストピースと大きな違いがないことを確かめるため、岩盤等で使用される針貫入試験を模擬地盤に対して行った（写真



図一 二重回転カッター実験装置側面図



図二 二重回転カッター面板 (内外比 (左) 1:2, (右) 1:3)

はカッターが地山に切り込む際の負荷と、チャンバー内に充満した掘削土砂による切羽圧の負荷が含まれている。切り込む際に要する負荷を測定するために、実験機のチャンバーの下部には開口を設け、これを開い



写真四 供試体 (模擬地盤)



写真一五 針貫入試験機

一5)。この方法は、針貫入量 (mm) に対する貫入力 (kgf) を針貫入勾配 (kgf/mm) として、試験機に付与されたグラフから一軸圧縮強度を読み取るものであり、何度か繰り返し行った結果、ほぼ  $2 \text{ N/mm}^2$  となった。よってテストピースによる一軸圧縮試験で得られた結果と大きく乖離していないことが確認できた。

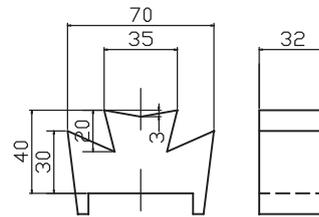
### 3. 実験ケースと実験状況

#### (1) 実験ケース

実験ケースは、掘削のみの負荷となるチャンバーが空の状態と、チャンバー内の掘削土による負荷も含むチャンバーが充満した状態に着目し、外カッターの回転数は全ケースとも共通で、0.8回/分とした。内カッターは、回転方向を正転（外カッターと同方向）および反転（外カッターと逆方向）させた場合、回転速度

を外カッターに対して1倍速、2倍速、3倍速にした場合の実験を行った。内カッターおよび外カッターは直径比で、内：外 = 1：2 および 1：3 となる組合せを用意した。外カッター直径  $\phi 800 \text{ mm}$  に対して、内：外 = 1：2 の場合は内カッター直径  $\phi 400 \text{ mm}$ 、内：外 = 1：3 の場合は内カッター直径  $\phi 267 \text{ mm}$  である（表一1）。

カッタービットは、実験機の外径に合わせてスケールダウンすると加工時に精度が確保できないので、加工精度が確保できる寸法とした。そのため、実験機の小さなカッタースポークに先行ビットとティースビットを分けて配置できないので、ビット形状は地山側が先行ビットで面板側がティースビットとなる一体型のビットとした（図一3）。このビットに対して適度な切り込み量になるように掘進速度を設定し、掘進速度は  $5 \text{ mm/分}$  とし切り込み量は  $5 \text{ mm/分} \div 0.8 \text{ 回/分} = 6.25 \text{ mm/回}$  を基本とした。しかし、初期のデータから掘進速度  $15 \text{ mm/分}$  の場合にトルクと推力の変化が顕著だったことから、そちらのケースを多用した。さらに、掘削時の負荷低減のための芯抜き効果を明らかにするため、内カッターを前方に突出できる構造とし実験を行った。



図一三 カッタービット形状寸法

表一1 代表的な実験ケース

着目点	Case No.	内外比	内カッターの回転方法		チャンバー内の状態	掘進速度	内カッター前出し
			正転, 反転	回転速度			
(1) 掘削のみの負荷	A-1	1：2	正転	1倍速	空	15 mm/分	0 mm
	A-2			2倍速			
	A-3			3倍速			
	A-4		反転	1倍速			
	A-5			2倍速			
	A-6			3倍速			
	B-1 ~ 6	1：3	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	0 mm
(2) 掘削による負荷とチャンバー内の掘削土砂による負荷	C-1 ~ 6	1：2	Aと同様の6ケース		空	5 mm/分	0 mm
	D-1 ~ 6	1：2	Aと同様の6ケース		充満	5 mm/分	0 mm
	E-1 ~ 6	1：2	Aと同様の6ケース		充満	15 mm/分	0 mm
(3) 芯抜き効果	F-1 ~ 6*	1：2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	0 mm
	G-1 ~ 6	1：2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	50 mm
	H-1 ~ 6	1：2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	100 mm

\* : A1 ~ 6 と同じ

(2) 実験状況

供試体を、押出し装置と掘削装置の間に設置して、掘削装置の二重回転カッターを作動させながらジャッキにて供試体を押出す。実験ケースの Case No ごとに供試体を入れ替えて同様のことを繰り返した(写真-6, 7)。掘進初期は模擬地盤の表面が薄板状に剥落する様子が観察されたことから、掘削開始初期からではなく100 mm 程度掘進したところからデータを採取した。



写真-6 供試体の設置状況



写真-7 供試体の掘進状況

4. 実験結果

実験結果は、計測された推力とトルクのデータの平均値をとり、各々のケースでの代表値とした。内カッターが外カッターに対して正転1倍速の場合は、従来のシールド機と同様の単一面板での回転方法となるので、正転1倍速を基準として各ケースとの比較を行った。

(1) 掘削のみの負荷 (Case No.A, B)<sup>1)</sup>

チャンパー下部の開口を開け、掘削土砂がチャンパー内に溜まらないようにして、掘削のみのトルクや推力を測定した。その結果、以下のことがわかった。

(a) 内カッターのトルク

内カッターの回転方向(正転, 反転)および回転速度(1倍速, 2倍速, 3倍速)による内カッターのトルクの比較を示す(図-4)。カッター切り込み量(mm/回)は、掘進速度(mm/分)÷回転速度(回/分)で表されるので、回転速度が大きくなると、カッター切り込み量が小さくなる。掘進速度は一定のため、回転速度を速くすることにより、切り込み量が小さくなり掘削に要するトルクも小さくなったと考えられる。内外比1:2よりも内外比1:3が全体的に小さいのは、カッターの面板が小さいことおよび取り付けられているビットの本数が少ないことなどの理由によるものと考えられる。回転方向と回転速度による内カッタートルクの変化を、正転および反転の各1倍速の値に対する比率で示す(表-2)。内カッタートルクは、内外比1:2では2倍速で66%, 3倍速で45%に低減した。内外比1:3では2倍速で66%, 3倍速で61%に低減した。いずれの場合も、切り込み量が2倍速で1/2(50%), 3倍速で1/3(33%)と単純な反比例とはならなかったが、回転速度が大きいほどトルクが小さくなる傾向は明らかとなった。

(b) ジャッキ推力

内カッターの回転方向(正転, 反転)および回転速度(1倍速, 2倍速, 3倍速)によるジャッキ推力の比較を示す(図-5)。ジャッキ推力の変化を、正転

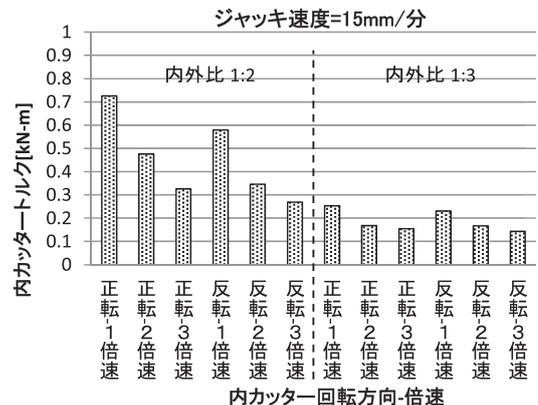


図-4 内カッタートルクの比較

表-2 内カッタートルクの比率

比の取り方	内外比	
	1:2	1:3
正転1倍速/正転1倍速	100%	100%
正転2倍速/〃	66%	66%
正転3倍速/〃	45%	61%
反転1倍速/反転1倍速	100%	100%
反転2倍速/〃	60%	72%
反転3倍速/〃	46%	62%

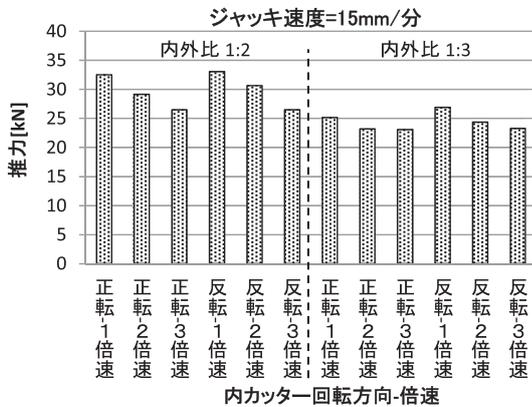
および反転の各1倍の値に対する比率で示すと、内外比1:2では2倍速で87~96%, 3倍速で82~86%に低減した。内外比1:3では2倍速で91~92%, 3倍速で86~92%に低減した(表一3)。回転速度が速いほど、カッターの切り込み量は小さくなることから、掘進に要する推力も小さくなったと考えられる。

(c) 掘進速度の向上

内カッターの回転速度を上げることにより推力が低減したことから、同じ推力であればどれだけ掘進速度が向上できるかについて、直線近似式を用いて試算し定量的に評価した。掘進速度を横軸に、推力を縦軸にとったグラフを示す(図一6)。このときの実験は掘進速度を5, 6, 7, 8, 9, 10, 15 mm/分と細かく変

えて行った。その結果、推力は掘進速度に対してほぼ直線的に上昇する関係が見られた。

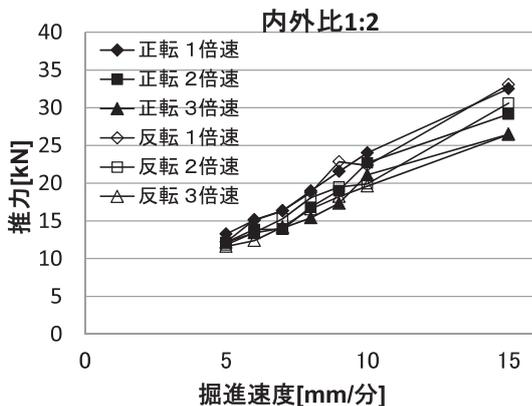
推力が最も大きかったのは回転方法が正転1倍速(従来の単円での回転)、最も小さかったのは反転3倍速であったことから、両者を比較の対象とし、正転1倍速と反転3倍速の近似直線を求めた(図一7)。同図中に10 mm/分のときの求め方を例示した。正転1倍速で掘進速度が5 mm/分、10 mm/分、15 mm/分の場合に、同じ負荷で反転3倍速ではどのくらい掘進速度が向上できるかを、この直線の式にもとづき試算した(表一4)。その結果は、多少ばらつきはあるものの、全体的に20%以上掘進速度が向上できるものと考えられる。



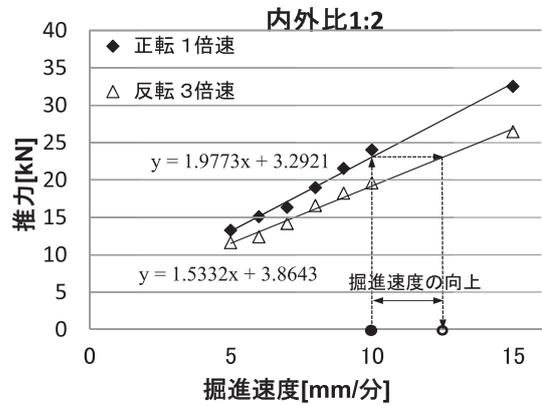
図一5 ジャッキ推力の比較

表一3 ジャッキ推力の比率

比の取り方	内外比	
	1:2	1:3
正転1倍速 / 正転1倍速	100%	100%
正転2倍速 / 〃	87%	92%
正転3倍速 / 〃	82%	92%
反転1倍速 / 反転1倍速	100%	100%
反転2倍速 / 〃	96%	91%
反転3倍速 / 〃	86%	86%



図一6 掘進速度と推力の関係



図一7 掘進速度と推力の相関直線

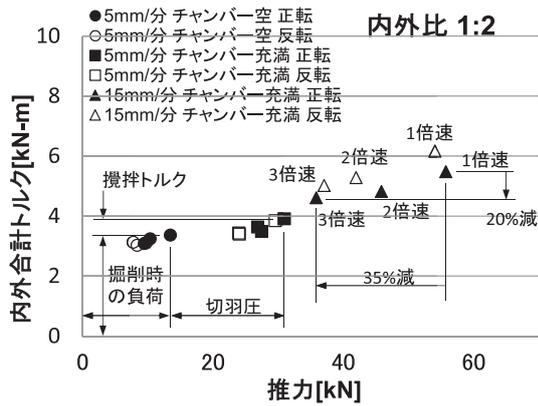
表一4 回転方法による掘進速度の向上

正転1倍速	掘進速度	反転3倍速	掘進速度	上昇率
5 mm/分	13.2 kN	6.1 mm/分	10 mm/分	+ 22%
10 mm/分	23.1 kN	12.5 mm/分	10 mm/分	+ 25%
15 mm/分	33.0 kN	19.0 mm/分	10 mm/分	+ 26%

(2) 掘削による負荷とチャンバー内の掘削土砂による負荷 (Case NO.C, D, E) <sup>1)</sup>

チャンバー下部の開口を閉め、掘削土砂をチャンバー内に充填して実験を行った。トルクと推力の測定は、チャンバー内が充填し、排土口から一定量で安定して排土する状態になったことを確認してから行った。

内外比1:2で掘進速度5 mm/分と15 mm/分の推力とトルク(内外合計)の関係を示す(図一8)。図には掘進速度5 mm/分でチャンバーが空の場合(Case No.C)も併記した。チャンバーが空の場合(図中の●○)と比べて、チャンバーが充填している場合(図中の■□)には、トルクは攪拌に要する負荷の分上昇し、推力は切羽圧の分上昇するので、グラフは右上にシフトした打点の位置になった。



図一 8 内カッター回転方法と掘進速度による負荷

チャンバーが空の場合(図中の●○)は、内カッターの回転方法の違いではトルクが大きくは変わらなかったことから、打点が横長の群になった。チャンバーが充填の場合(図中の■□)は、内カッターを速く回すとトルクと推力が若干低下する傾向が見られた。これは、内カッターを速く回すとチャンバー内の掘削土砂が攪拌され塑性流動性が向上することから、切り込み量低下による負荷の低減に加え、攪拌効果による塑性流動性の向上に伴う低減が表れたと考えられる。

掘進速度 15 mm/分の場合(図中の▲△)は、1倍速よりも2倍速、2倍速よりも3倍速のほうが負荷は低減した。掘進速度が大きいことからチャンバー内に取り込まれる掘削土砂の量が多いので、攪拌に与える回転速度の効果が大きいため、負荷の低減が大きかったものと考えられる。一方、掘進速度 5 mm/分の場合(図中の■□)は、内カッターを速く回すほど負荷が低減したが、2倍速と3倍速の違いは顕著ではなかった。掘進速度が遅い場合は、取り込まれる掘削土砂が少なく、2倍速ですでにチャンバー内が十分に攪拌されていたので、負荷の変化が小さかったと考えられる。

また掘進速度 15 mm/分の場合(図中の▲△)は、回転方向による負荷の差は小さいが、正転に対して反転の方がトルクは大きくなっている。その原因としては、反転の場合は内外のカッターの相対速度が大きいため、チャンバー内の掘削土砂のせん断抵抗力が大きくなり、トルクの増加につながったものと推測される。掘進速度 5 mm/分では、正転と反転は同程度の負荷となっている。これは、上述のように取り込まれる掘削土砂が少なく、チャンバー内の掘削土砂が十分に塑性流動化された状態になっていたと考えられることから、せん断抵抗力の影響が小さくトルク差も小さかったためと推測される。以上のことから、負荷の低減は掘進速度が大きいほど顕著であることがわかった。

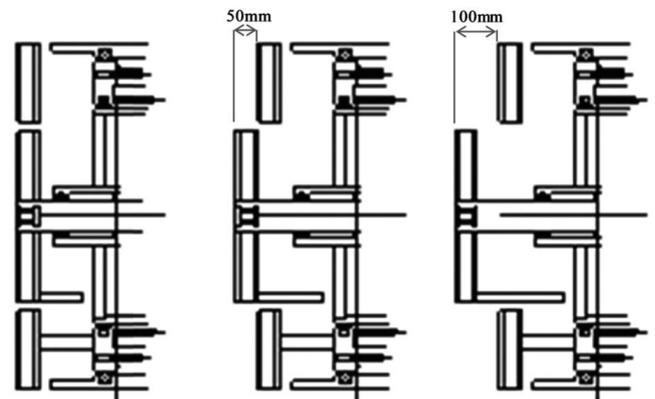
低減効果を算定すると、掘進速度 15 mm/分では、正転 3倍速の場合にトルクが最大 20%、推力が最大 35%低減した。またこれらの低減が生じた場合に、実験機の消費電力を試算すると、全体で 32%の低減効果があることがわかった。

(3) 芯抜き効果<sup>1)</sup>

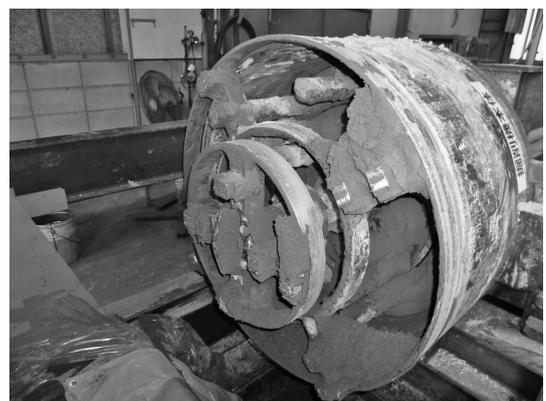
山岳トンネルでは、導坑を先行掘削することで掘削の負荷を低減する、いわゆる芯抜き効果が知られている。芯抜き効果の原理は、地山に自由面を設けることで、掘削する際に亀裂を生じやすくさせることである。二重回転カッター構造では、内カッターを前に出すことで芯抜き効果を得られる可能性が考えられた。そこで、内カッターを前に突出させた実験を行い、結果を前出し 0 mm の平面のケースと比較した。具体的には内カッターのセンターシャフトを延伸し、外カッターに対して 50 mm、100 mm 前出した(図一 9、写真一 8)。

芯抜き効果は掘削における負荷低減であることから、4. (1) と同様の実験方法を採用し、掘削のみの負荷を計測した。

内カッターのトルクは、50 mm および 100 mm 前出したケースの方が、前出ししていない場合(前出



図一 9 内カッター前出し状態断面図 (0/50/100 mm)



写真一 8 内カッター前出し 100 mm

し0 mm)よりも全体的にトルクが増加した。これは、前出し0 mmでは面板だけの掘削であったのに対して、前出しすると内カッターの外周リングの抵抗も付加されることが原因と考えられる。ただし、50 mmと100 mmの大小関係はまちまちであり、内カッターのトルクが0 mm < 50 mm < 100 mmの順番に大きくなるような一様傾向は見られなかった(図-10)。

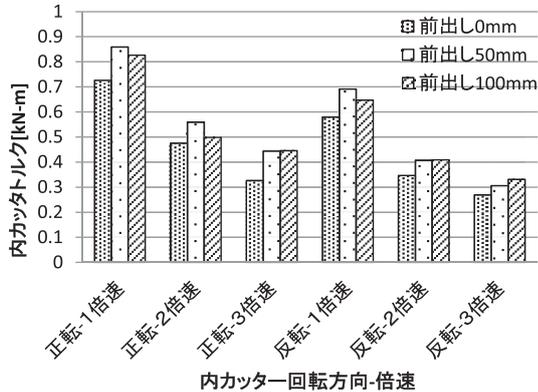


図-10 内カッタートルク (前出し0/50/100 mm)

外カッターのトルクは、前出し0 mmのときよりも50 mm, 100 mm前出ししたほうがトルクは若干減少する傾向があった。これは、内カッターで芯抜きした自由面へ切削土が流れることにより、外カッターの負担が低減したものと考えられる。ただし、前出し50 mmと100 mmの差は顕著ではなかった(図-11)。

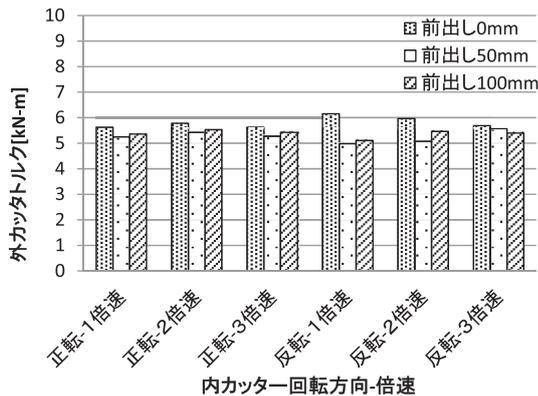


図-11 外カッタートルク (前出し0/50/100 mm)

ジャッキ推力は、正転反転の各ケースで内カッター回転速度の1倍速>2倍速>3倍速の順番に減少する傾向が見られた。しかし、前出し0 mmに対して50 mm, 100 mm前出ししても、推力が大きい場合と小さい場合があり、傾向として明確に把握できるものではなくその差も顕著ではなかった(図-12)。

以上を総括すると、芯抜き効果は若干確認されたが顕著な効果は見られなかった。掘削後の供試体の状態

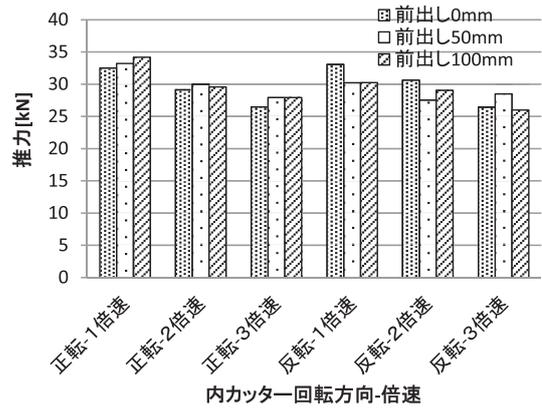


図-12 ジャッキ推力 (前出し0/50/100 mm)

を確認すると、内カッターを前出しした形状が凹型にきれいに残っており、芯抜きした周囲の自由面が崩れやすくなった様子は観察されなかった(写真-9)。今回のような比較的強度が高い固結地盤では、内カッターを先行しても芯抜き効果は起こりづらかったものと考えられる。砂層などの地盤で、先行した内カッターの周辺が緩んでくるような性状であれば違った結果になった可能性があると考えている。砂の模擬地盤による実験は一度試みているが、供試体の強度調整が難しく、安定したデータの個数が少なかったことから、結果報告できるところまでに至っていない。



写真-9 掘進後の供試体 (前出し100 mm)

### 5. おわりに

二重回転カッター方式の実験結果を整理すると以下のようなになる。

#### (1) チャンバーが空の場合<sup>2)</sup>

- ①内カッターのトルクは、内カッター回転速度により約30~50%程度低減する。
- ②推力は、内カッター回転速度により約10%程度低減する。
- ③内カッターを速く回すと、同一推力で掘進速度が約

20%程度向上する。

## (2) チャンバーが充満の場合<sup>2)</sup>

- ①内カッターを速く回すことにより、トルクは最大約20%程度、推力は最大約35%程度低減する。
- ②トルクと推力の低減により、シールド機本体の電力消費量は30%程度低減すると試算される。

以上のことから、二重回転カッター方式のシールド機（土圧式）は以下のような特長を有するので、大深度の硬質地盤における大口径シールドで安定した高速施工を実現する工法として期待できることが分かった。今後は実用化に向けた機械設計の詳細検討と、さらに負荷を低減する効率的な方法の確立を目指す予定である。また泥水式シールドは、上記実験のチャンバーが空の場合と同様の状態であることから、二重回転カッター方式は泥水式シールドにも適用性があることが分かった。

- ①カッタートルクと推力が低減できるので、効率的な切削が可能となる。
- ②チャンバー内の攪拌効率が向上するので、固着によるトルクや推力の異常を防止できる。
- ③カッター全体の回転速度を増加しなくても、内カッターの回転速度増加によりチャンバー内を均質に塑

性流動化する効果があるので、大口径での切羽安定を保持し、周辺への影響抑制が可能となる。

## 謝 辞

本実験に関して計画当初から、早稲田大学の小泉淳教授に御指導頂き、実験に際しては、株式会社前田製作所の宮下哲氏、矢沢次男氏をはじめとする方々に多大な御協力を頂きました。また、実験データの整理と考察については野本君が主導してくれました。ここに、誌面をお借りして関係者の皆様に感謝の意を表します。

JICMA

## 《参考文献》

- 1) 安光・宮澤・野本・森・篠原・小泉：二重カッター方式による大断面シールドの高速施工技術の開発，前田技術研究所報，VOL.55.2014
- 2) 安光・小泉・篠原：シールド機二重回転カッター構造に関する実験結果の報告，日本建設機械施工協会 建設施工と建設機械シンポジウム 投稿中

## 【筆者紹介】

安光 立也（やすみつ たつや）  
前田建設工業(株)  
土木事業本部 土木部  
上級技師長（シールド担当）

