

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

安光 立也*¹・宮澤 昌弘*²・野本 康介*³・森 芳樹*⁴・篠原 慶二*⁵・小泉 淳*⁶

Development of High Speed Construction For Large Diameter Tunnel by Double Cutter Shield Machine

Tatsuya YASUMITSU, Masahiro MIYAZAWA, Kousuke NOMOTO, Yoshiki MORI, Keiji SHINOHARA, Atsushi KOIZUMI



写真-1 二重カッター実験機

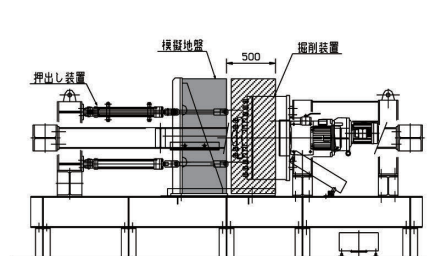


図-1 実験機の概要図

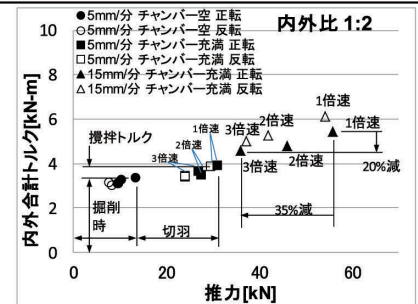


図-2 二重カッターによるトルクと推力の低減

研究の目的

近年、シールドトンネルは大断面、長距離化の傾向にあり、それに伴い高速施工による工期短縮が重要視されている。とくに大断面シールドでは、カッター外周側の周速度に比べて内周側の周速度が小さくなり、内周側の掘削効率や攪拌効率が低下するため掘進速度に影響している。内周側カッターの掘削効率や攪拌効率を向上させることがシールド機の掘進速度向上につながる。本研究はそれぞれ独立した制御機構を持つ内外のカッターからなる二重回転カッター構造を有するシールド機の模型を作製し、大深度の地盤を想定した模擬地盤による掘進実験を行い、その特性を検討したものである。

技術の説明

写真-1 および図-1 は本実験に用いた二重回転カッター構造の実験機（土圧式）を示したものである。実験機は外径φ800mmであり、模擬地盤は一軸圧縮強度が1.0N/mm²程度の固結した粘性土地盤を想定し、掘進実験を行った。実験は、回転方法を以下のように変えたケースで実施した。

- ・ 内カッターの回転方向（外カッターに対して正転（同方向）、反転（逆方向））
- ・ 内カッターの回転速度（外カッターに対して1倍速、2倍速、3倍速）
- ・ 内カッターの前方への突出量（外カッターに対して0mm、50mm、100mm）
- ・ カッターの直径比（内外比=1:2, 1:3）

主な結論

図-2 に示す通り、

(1) カッタートルクは、内カッターを速く回すほど小さくなった。

3倍速にすると1倍速よりトルクが20%低減

(2) 推力は、内カッターを速く回すほど小さくなった。

3倍速にすると1倍速より推力が35%低減

その他、

(3) 内カッター前方突出による芯抜き効果は顕著ではなかった。

(4) カッター直径比による内カッタートルクは1:2より1:3のほうが小さかった。

*1 本店 土木部

*2 関西支店 清水共同溝作業所

*3 東京土木支店 外環東名北シールド作業所

*4 本店 土木設計部

*5 本店 土木部 機械グループ

*6 早稲田大学 創造理工学部

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

安 光 立 也^{*1} 宮 澤 昌 弘^{*2}
 野 本 康 介^{*3} 森 芳 樹^{*4}
 篠 原 慶 二^{*5} 小 泉 淳^{*6}

要 旨

大断面シールドトンネルの工期短縮のために高速施工する方法としては、セグメント組立時間の短縮と掘進速度の向上がある。セグメント組立時間の短縮は既に限界に達しているため、掘進速度を向上するための二重回転カッター構造に関する実験を行った。外カッターが外径φ800mm、内外のカッター比が1:2, 1:3の実験機を製造し、大深度を想定した模擬地盤を掘削した。内カッターを外カッターに対して正転、反転、また回転速度を1倍速、2倍速、3倍速に変化させた。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攪拌効果が生じ、掘進時の負荷であるトルクおよび推力値の低減が確認できた。掘進速度が大きいほどこの効果は顕著で、本実験では最大で、推力が35%低減、トルクが20%低減した。なお、内カッターを前出したことによる顕著な芯抜き効果は、今回の模擬地盤では見られなかった。

キーワード シールド機／大断面／高速施工／カッタートルク／推力

目 次

- | | |
|---------------|---------|
| 1. 序論 | 4. 実験結果 |
| 2. 実験装置 | 5. 結論 |
| 3. 実験ケースと実験状況 | |

DEVELOPMENT OF HIGH SPEED CONSTRUCTION FOR LARGE DIAMETER TUNNEL BY DOUBLE CUTTER SHIELD MACHINE

Tatsuya YASUMITSU Masahiro MIYAZAWA
Kousuke NOMOTO Yoshiki MORI
Keiji SHINOHARA Atsushi KOIZUMI

Synopsis:

This report describes an experiment of using shield machine with double cutters to increase excavation speed and shorten construction period, especially when the machine is applied for excavation of large diameter shield tunnels. The experiment of excavation has been carried out by using a model of shield tunneling machine with diameter 800mm of outer cutter. The diameter of inner cutter is adjusted as 1/2 and 1/3 of the diameter of outer cutter. In the operation, inner cutter was rotated in normal direction and invert direction. Rotation speed is set up as a normal speed, twice and triple of such normal speed respectively. As the result, when inner cutter was rotated faster than outer cutter, it was observed that the load on torque and thrust force during excavation has been reduced due to stirring effect. As the excavation speed became faster the effect of load reduction was more significant. In this experiment, it was confirmed that 35% of thrust force and 20% of torque are able to be reduced.

* 1 本店 土木部
 * 2 関西支店 清水共同溝作業所
 * 3 東京土木支店 外環東名北シールド作業所

* 4 本店 土木設計部
 * 5 本店 土木部 機械グループ
 * 6 早稲田大学 創造理工学部

1. 序論

近年は、道路などの大断面シールドの工事が増加しており、用地の制約等から長距離化や大深度化の傾向がある。これに伴い、工期短縮や施工効率の向上などの高速施工技術が求められている。高速施工を可能にする技術としては、セグメント組立速度向上とシールド坑内設備や立坑及び坑外設備に関する技術が含まれるが、今回はシールド機の掘進速度を向上する技術に着目した。

とくに大断面シールドでは、カッター外周側の周速度に対してカッター内周側の周速度は小さくなり、カッター内周側の掘削効率、攪拌効率の低下が掘進速度に影響するので、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方法が有効となるが、国内では机上の検討はなされているものの、その掘削効率や攪拌効率に関して実験による検討はなされていない。

筆者らは、2012年から二重回転カッター構造を持つシールド機の模型を作製し、大深度の地盤を想定した掘進実験を行ってきた。ここに、その結果を報告する。

2. 実験装置

2.1 実験機

本実験に用いた二重回転カッターの実験機（土圧式）を写真-1および図-1に示す。実験機は二重カッターの「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 $\phi 800\text{mm}$ で、外カッターは中間支持方式、内カッターはセンターシャフト方式としている。外カッターと内カッターそれぞれに電動モーターを持ち個別に回転を制御できる構造となっている。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で相対的に掘進と同じ状態を作り出す。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なっている。

計測する項目は、掘進時の負荷の代表値であるジャッキ推力とカッタートルクとした（以下、推力とトルクとする）。推力は押し出し装置のジャッキ油圧から算定される。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。約0.5秒ごとにデータロガーに記録した。

シールド機の推力には、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。また、トルクには切り込みに要する負荷と、チャンバー内の掘削土砂を攪拌するための負荷が含まれている。実験機のチャンバーの下部には蓋がついており、これを開い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、切り込みに要する推力およびトルクを計測できる。一方、蓋を閉じてチャンバー内を掘削土砂で充満すれば、実際の土圧式シールド機に近い負荷の状況を確認することができる。

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。実際の土圧式シールド機のような、スクリーコンベアーによる強制的な排土は行わなかった。



写真-1 二重回転カッター実験機 (内外比=1:2)

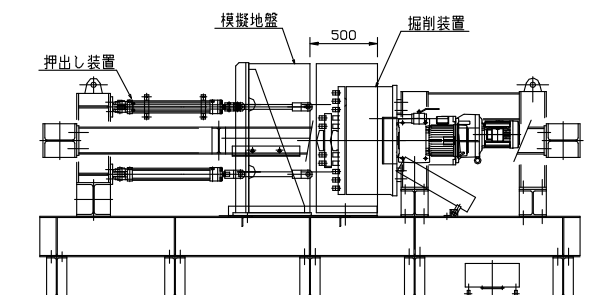


図-1 二重回転カッター実験機側面

2.2 供試体（模擬地盤）

供試体（模擬地盤）は大深度の固結した粘性土地盤を想定し、北多摩層等のデータ等を参考にして、一軸圧縮強度は 1.0N/mm^2 程度と設定した。この値は土とモルタルの間であることから、材料には流動化処理土を選んだ。

写真-2 に作製状況と完成した模擬地盤を示す。大きさは、縦 1m ×横 1m ×厚さ 0.4m とした。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 1.0N/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、写真-3 に示すように、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。この方法は細かい値まではわからないが、何度か繰り返して行った結果、ほぼ 2N/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。



写真-2 供試体(模擬地盤)の作製(左)～完成(右)



写真-3 針貫入試験による強度確認

3. 実験ケースと実験状況

3.1 実験ケース

代表的な実験ケースを表-1 に示す。掘削のみの負荷となるチャンパーが空の状態と、チャンパー内の掘削土による負荷も含むチャンパ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）、反転（逆方向）させた場合、および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。内カッター及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。内:外=1:2 の場合は、外カッター直径 $\phi 800\text{mm}$ に対して内カッター直径 $\phi 400\text{mm}$ 、内:外=1:3 の場合は内カッター直径 $\phi 267\text{mm}$ である。

ビットは加工時に精度を確保できることを重視し、実験機の外径に合わせてスケールダウンしたビットは用いなかった。カッタースポークが小さいので先行ビットとティースビットを分けて配置できないため、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化した形とした。図-2 にビットの形状・寸法を示す。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 mm/分、切り込み量は 5 mm/分 $\div$ 0.8 回/分=6.25 mm/回を基本とした。しかし、初期のデータから掘進速度 15 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。

3.2 実験状況

実験状況を写真-4 および写真-5 に示す。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、表層ではなく、100mm 程度掘進したところからデータを採取した。

表-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 正転、反転	回転速度	チャンパー 内の状態	掘進速度	内カッター 前出し
(1)掘削のみの負荷	A-1	1:2	正転	1倍速	空	15 mm/分	0mm
	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			
(2)掘削による負荷とチャンパー 内の掘削土砂による負荷	B-1-6	1:3	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	0mm
	C-1-6	1:2	Aと同様の6ケース		空	5 mm/分	0mm
	D-1-6	1:2	Aと同様の6ケース		充満	5 mm/分	0mm
	E-1-6	1:2	Aと同様の6ケース		充満	15 mm/分	0mm
(3)芯抜き効果	F-1-6*	1:2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	0mm
	G-1-6	1:2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	50mm
	H-1-6	1:2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	100mm

*: A1-6と同じ

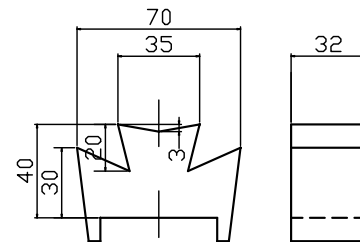


図-2 ビット形状寸法



写真-4 供試体(模擬地盤)の設置



写真-5 切削初期段階

4. 実験結果

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円での回転方法となる。ここでは、その正転1倍速を基準として各ケースとの比較を行った。

4.1 掘削のみの負荷 (Case No. A, B)

チャンパー下部の蓋を開け、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推力やトルクを測定した。その結果、以下のことがわかった。

(1) 内カッターのトルク

図-3 に内カッターの回転方向（正転，反転），倍速（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。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、取り付けし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。表-2 に正転と反転の各 1 倍速の値に対する比率を示す。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。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。

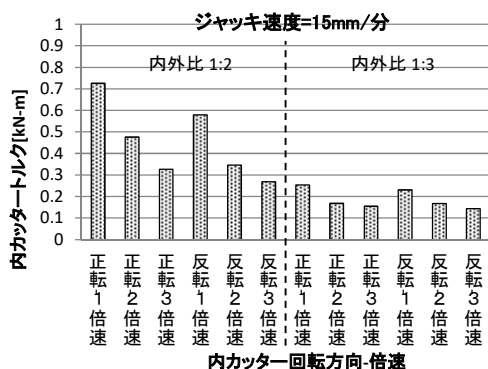


図-3 内カッタートルクの比較

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%

(2) ジャッキ推力

図-4、表-3に推力の比較を示す。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。

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。

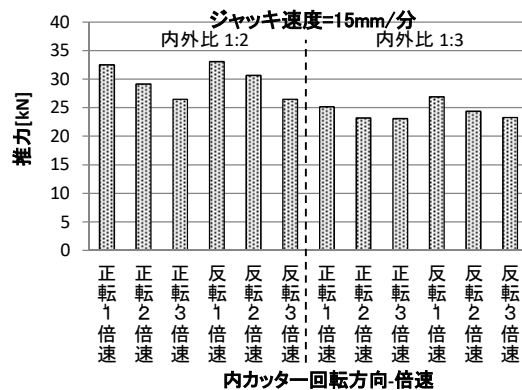


図-4 ジャッキ推力の比較

表-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%

(3) 掘進速度の向上

内カッターの回転速度を上げることで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を試算し、定量的に評価した。図-5 に、掘進速度を横軸に、推力を縦軸にとったグラフを示す。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。

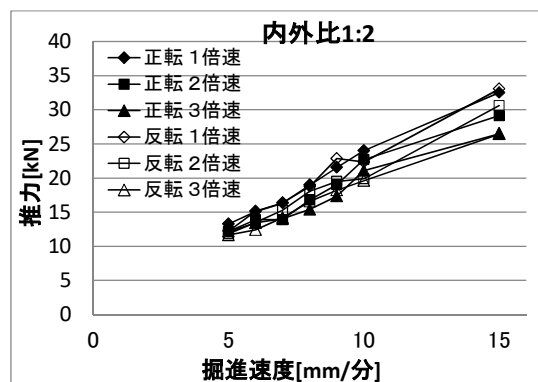


図-5 掘進速度と推力の関係

推力が最も大きかった回転方法が正転 1 倍速（従来の単円での回転），最も小さかったのが反転 3 倍速であったことから、両者を比較の対象とした。正転 1 倍速と反転 3 倍速の近似直線を図-6 に表す。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。同図中に 10 mm/分のときの求め方を例示した。結果を表-4 に示す。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。

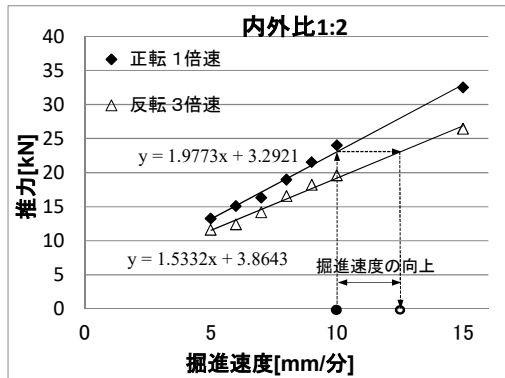


図-6 掘進速度と推力の関係(直線近似)

表-4 回転方法による掘進速度の向上

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

4.2 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. D, E)

チャンバー下部の蓋を閉め、掘削土砂をチャンバー内に溜めて実験を行った。チャンバー内が充満し、排土口から一定量で排土が行われる安定した状態になったことを確認してから推力やトルクを測定した。

図-7に内外比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●○) と比べて充満している場合 (図中の■□) には、推力は切羽圧の分上昇し、トルクは攪拌に要する負荷により上昇したため、グラフは右上にシフトした打点の位置になった。

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。チャンバーが充満の場合 (図中の■□) 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トルクと推力が低下するので打点が左下がりの群になった。推力は 4.1(2)で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>2倍速>3倍速の順番で負荷が低減した。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、推力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、回転方向による推力の差は小さいが、正転に対して反転の方がトルクが大きかった。その原因として、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、正転も反転も同程度の負荷となった。上述のように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、せん断力の影響が小さくトルク差も小さかったと推測される。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倍速の場合に最大で推力が35%低減、トルクが20%低減した。またこれらの低減が生じた場合に、実験機が要する電力を試算すると、全体で32%の消費電力の低減効果があることがわかった。

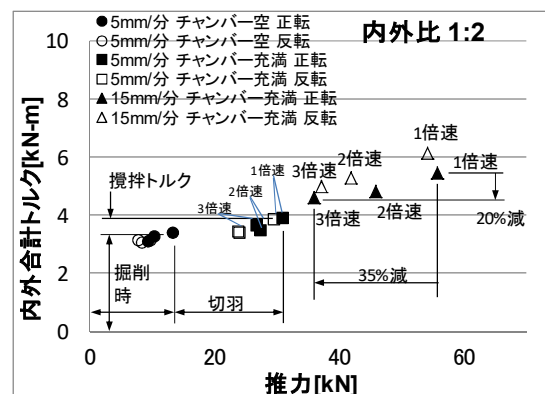


図-7 掘進負荷(チャンバー空と充満)

4.3 芯抜き効果

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。芯抜きの原理は、地山の自由面を多くすることで、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。これを明らかにするために、内カッターを前に突出させた構造とし、実験を行った。結果を前出し0mmの平面のケースと比較した。具体的には図-8、写真-6に示すように、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50mm、100mm前出した。

芯抜き効果は掘削における負荷低減として知られてい

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。

図-9は内カッターのトルクの比較である。前出しを50mm、100mmしたケースの方が前出ししていない場合（前出し0mm）よりも全体的にトルクが増加した。前出し0mmでは面板だけの掘削であったのに対して、前出しするとカッター外周リングの抵抗も付加されることが原因と考える。ただし、50mmと100mmの大小関係はまちまちであり、 $0\text{mm} < 50\text{mm} < 100\text{mm}$ の順番になる一様な傾向は見られなかった。

図-10は外カッターのトルクの比較である。0mmのときよりもトルクが若干減る傾向があった。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。50mmと100mmの差は顕著ではなかった。

図-11は内外の合計トルクの比較である。内カッターのトルクは外カッターのトルクに対してワンオーダー小さかったため、合算した際に埋没した。

図-12は推力の比較である。各ケースで1倍速>2倍速>3倍速の順番になる傾向は見られた。0mmに対して前出しした場合は、大きい結果と小さい結果が入り混じっており、傾向として明確に把握できるものはなかった。また、その差は顕著ではなかった。

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。写真-7は掘削後の供試体の状態である。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。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。

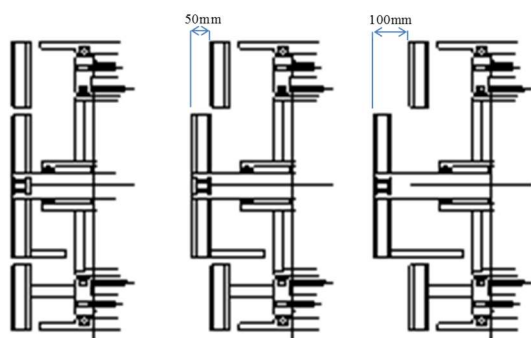


図-8 内カッター前出し(0/50/100mm)



写真-6 内カッター前出し(100mm)

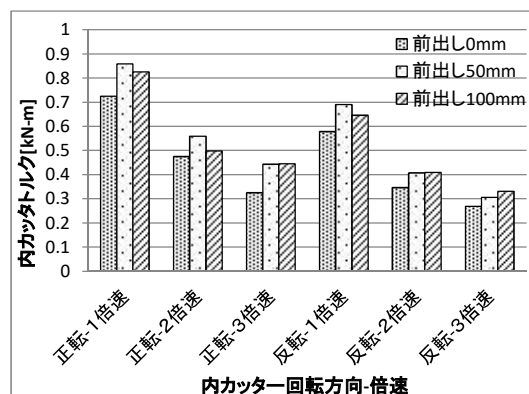


図-9 内カッタートルク

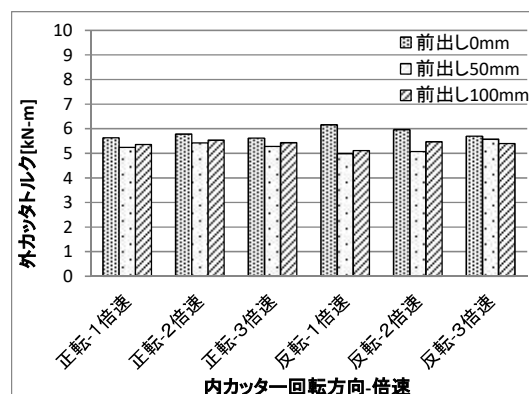


図-10 外カッタートルク

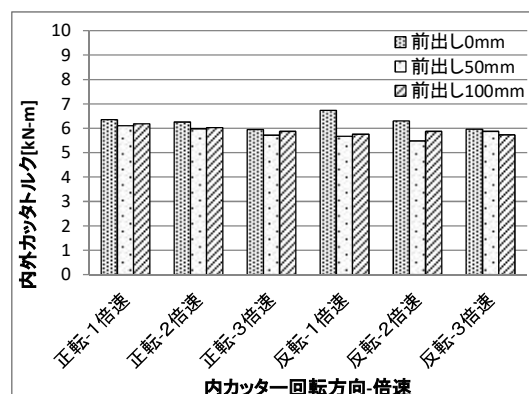


図-11 内外合計トルク

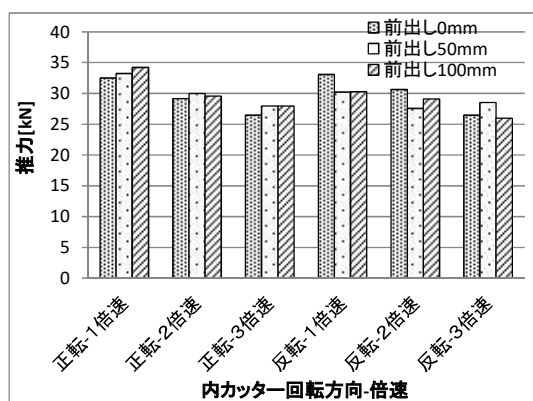


図-12 ジャッキ推力



写真-7 前出し実験後の供試体

5. 結論

二重回転カッター構造を持つシールド機の実験機を製作し、回転方法を変えた一連の実験を行った。その結果、以下のことがわかった。

(1) チャンバーが空の場合

- ①内カッターのトルクは、内カッターを速く回すほど小さく、外カッターに対して反転した方が正転の場合よりも小さくなった。

- ②外カッターのトルクは、内カッターの回転方法によらずほぼ一定だった。

- ③内外の合計トルクは、内カッターの回転方法によらずほぼ一定だった。

- ④推力は、内カッターを速く回すほど小さくなった。

- ⑤内カッターを速く回すと、同一推力で掘進速度が20%程度向上する。

(2) チャンバーが充満の場合

- ⑥トルクも推力も、内カッターを速く回すことで低減した。

以上のことから、二重回転カッター構造を持つシールド機の掘削性能および攪拌性能の向上が確認されたので、大深度の硬質地盤での大断面シールドにおける高速施工への適用が期待される。

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。

謝辞：本実験に際しては、早稲田大学の小泉教授からご指導頂き、宮下哲氏、矢沢次男氏をはじめとする株式会社前田製作所のかたがたに多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 野本ら：投稿中，第 69 回土木学会年次学術講演会，2014.
- 2) 安光ら：投稿中，土木学会土木建設技術発表会，2014.
- 3) 野本ら：投稿中，土木学会トンネル工学研究発表会，2014.