

24. 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

大断面シールド機における高速施工と省エネの技術開発

前田建設工業株式会社
早稲田大学
前田建設工業株式会社

○ 安光 立也
小泉 淳
篠原 慶二

1. はじめに

近年は、道路や鉄道などのトンネルにおいて大断面シールドの工事が増加しており、用地の制約等から大深度化や超長距離化の傾向がある。これに伴い、施工効率の向上や工期短縮などの高速施工技術と共に省エネが求められている。高速施工と省エネを可能にする技術としては、セグメント組立とそれに係るシールド坑内から立坑および坑外における搬送設備の効率化が含まれるが、セグメント組立時間等の効率化はすでに限界に達しており、今回はシールド機の掘進効率を向上する技術に着目した。

大深度では硬質地盤となりカッター切削抵抗やジャッキ推力の増大が想定される。とくに大断面シールドでは、カッター外周側の周速度に対してカッター内周側の周速度は小さくなるので、カッター内周側の切削効率の低下と取込土砂の攪拌効率の低下が掘進効率に影響する。したがって、カッター内周側の切削効率と攪拌効率を上げることが、シールド機の掘進効率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、その切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模擬地盤を用い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

以下に、実験機と供試体について説明する。

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）を図-1および写真-1～2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φ800mmで、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。

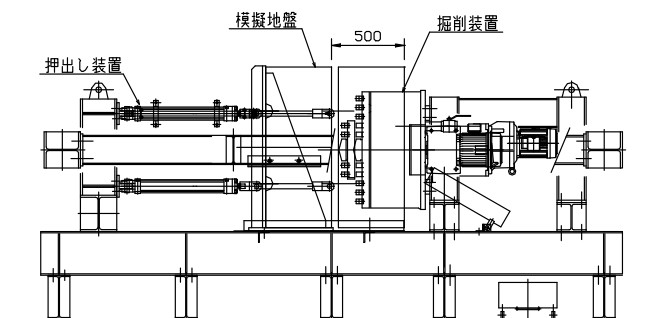


図-1 二重カッター実験機側面図



写真-1 二重カッター実験機全景



写真-2 二重カッターフェース(左)内外比=1:2, (右)内外比=1:3

実験機は外径が小さいので外カッターの駆動モーターをシールド機よりも外側に配置したが、外カッターは中間支持方式、内カッターをセンターシャフト方式とすることによりカッター駆動部の複雑化を解消した。

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。

2.2 供試体

供試体は大深度における固結した粘性土地盤を想定した模擬土として、北多摩層等のデータ等を参考に、一軸圧縮強度を 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、模擬土材料には流動化処理土を選んだ。写真-3 に示すような鋼製型枠に流動化処理土を打設して硬化養生した。大きさは、縦 $1\text{m} \times$ 横 $1\text{m} \times$ 厚さ 0.4m とした。この鋼製型枠を実験ケース数に合わせて 16 基用意して供試体を作成した。

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。供試体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-4 に示すように、岩盤等で使用される針貫入試験を供試体に対して行った。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-3 供試体作製(左:流動化処理土打設、右:硬化養生後)



写真-4 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¹⁾。切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を着目点とし、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(外カッターと逆方向)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。

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		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)切削のみの負荷	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			
	B-1~6	1:3	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	0mm
(2)切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	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
	F-1~6*	1:2	Aと同様の6ケース		空	15 mm/分	0mm
(3)芯抜き効果	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

写真-5 にビット取付状況、図-2 にビットの形状・寸法を示す。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スポーク側がティースビットになる一体型の形状とした。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 $5 \text{ mm/分} \div 0.8 \text{ 回/分} = 6.25 \text{ mm/回}$ を基本とした。しかし、初期のデータから掘進速度 15 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。



写真-5 ビット取付状況

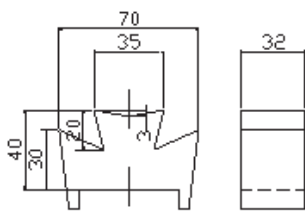


図-2 ビット形状・寸法

3.2 実験状況

実験状況を写真-6および写真-7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。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。



写真-6 供試体設置状況



写真-7 実験状況全景

4. 実験結果

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 切削のみの負荷 (Case NO. A, B)

写真-8に示すようにチャンバー下部の蓋を開け、掘削土砂がチャンバー内に溜まらないようにして切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。



写真-8 チャンバー下部開放状況

(1) 内カッターのトルク¹⁾

図-3に内カッターの回転方向（正転，反転），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。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。切り込み量は2倍速で1/2（50%），3倍速で1/3（33%）に対して単純な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。

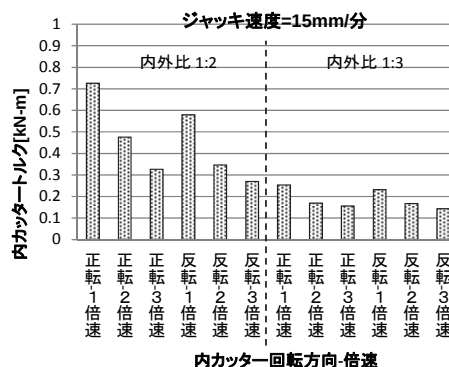


図-3 内カッタートルクの比較

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¹⁾

図-4に推力の比較、表-3に推力の比率を示す。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。

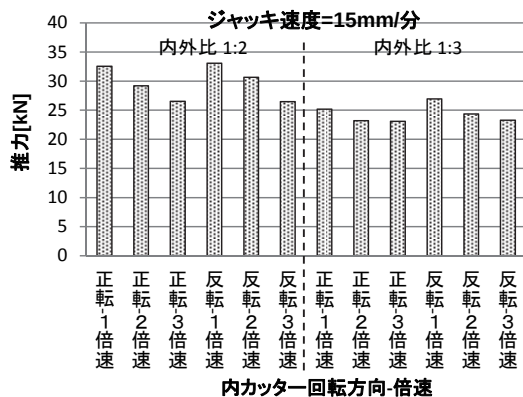


図-4 ジャッキ推力の比較

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¹⁾

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を試算し、定量的に評価した。図-5に、横軸に掘進速度、縦軸に推力を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。

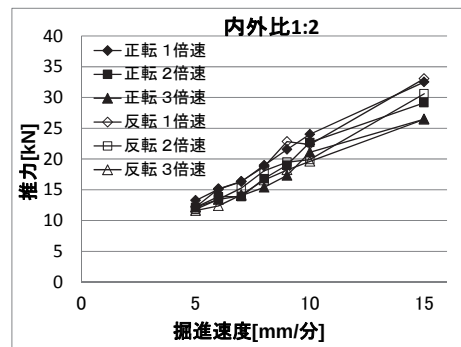


図-5 掘進速度と推力の関係

回転方法が正転 1 倍速（従来の単円での回転）の時に推力最大、反転 3 倍速の時に推力最小であったので、正転 1 倍速と反転 3 倍速を比較対象とした掘進速度と推力の近似直線を求めた。これを図-6に示す。

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、この近似直線の式にもとづき試算した。その結果を表-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中の点線は掘進速度 10 mm/分のときの求め方を例示している。

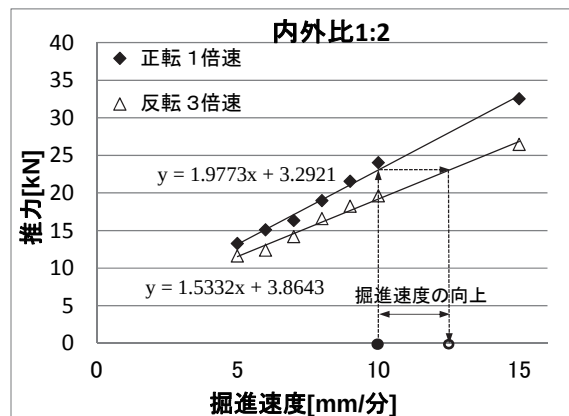


図-6 掘進速度と推力の近似直線

表-4 回転方法による掘進速度の向上率

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 切削のみの負荷とチャンバー内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●○) と比べて充填している場合 (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。チャンバーが充填の場合 (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りの群になった。推力は、4.1(2)で示した切り込み量低下による負荷低減に加え、攪拌効果による塑性流動性の向上に伴う負荷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、回転速度が攪拌に与える影響が大きく、推力の低減が大きくな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。これは取り込まれる掘削土砂の量が少なく、2倍速ですでにチャンバー内が十分に攪拌され塑性流動化していたので、負荷の変化が小さかったためと考えられる。

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。この原因は、反転の場合は内外のカッターの相対速度が大きいのでチャンバー内の掘削土砂のせん断抵抗力も大きくなり、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 (図中の■□) では、正転も反転も同程度の負荷となった。掘進速度が遅い場合は、チャンバー内が十分に攪拌され塑性流動化した状態になる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の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1倍速に対して正転3倍速の場合に最大でトルクが20%低減、推力が35%低減した。

また実験機本体の電力消費量に占めるカッターモーターとジャッキパワーユニットの電力消費量の割合はそれぞれ約60%と約10%であることから、トルクと推力の低減による電力消費量の低減率 α を試算すると以下ようになる。

電力消費量の低減率 α

$$\alpha = 60\% \times 20\% + 10\% \times 35\% = 15.5\%$$

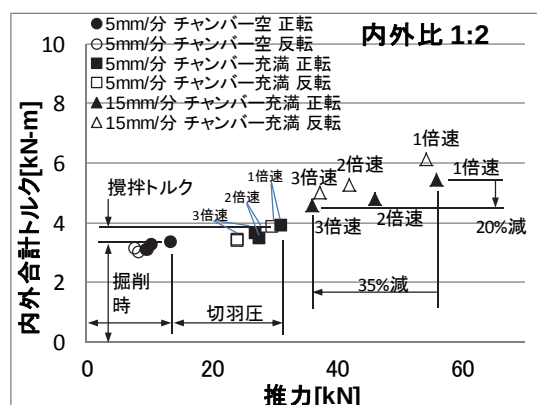


図-7 回転方法による掘進負荷

4.3 芯抜き効果

山岳トンネルでは、地山に自由面を設けて掘削負荷を低減する芯抜き効果を利用した工法が用いられている。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あると考えられる。これを明らかにするために、図-8、写真-9に示す内カッターを前に突出させたカッター面板にて切削実験を行った。具体的には内カッターのセンターシャフトの長さを変えて、外カッターに対して50mm、100mm前出しし、前出し0mmの平面のケースと比較した。

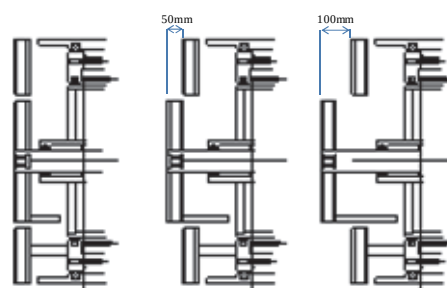


図-8 内カッター前出し (0/50/100mm)



写真-9 内カッター前出し (100mm)

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、切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。これは、前出し0mmでは一面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られる。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50mm/100mmのほうがトルクは若干減る傾向があった。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。しかし、50mmと100mmの差は顕著ではなかった。

図-11は推力の比較である。各ケースで1倍速よりも2倍速、2倍速よりも3倍速のほうが推力は小さくなる傾向は見られた。これは切り込み量の低下によるものと考えられる。0mmに対して前出しした場合の推力は、大きい場合と小さい場合が入り混じっており、前出しによる推力の変化傾向は見られなかった。これらのことから、推力の大小は切り込み量の大小が支配的であると想定される。

以上を総括すると、芯抜き効果は外カッタートルクにおいて若干確認されたが、ジャッキ推力には顕著な効果は見られなかった。写真-10は掘削後の供試体の状態である。中央部に内カッターを前出しした形状が完全に残っており、芯抜きした部分が自由面となって崩れやすくなった様子は観察されなかった。今回のような固結粘性土地盤では、内カッターを先行しても芯抜き効果はあまり期待できないと考えられる。砂質地盤などで、前出しした内カッターの周辺が緩んでくるような状態であれば芯抜き効果が期待できる可能性がある。

5. 結論

5.1 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。

5.2 チャンバーが充満の場合

- (4) トルクも推力も、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。
- (5) 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15%以上低減すると試算される。

以上のことから、二重回転カッター構造を持つシールド機の切削性能および攪拌性能の向上が確認されたので、大深度における硬質地盤での大断面シールドに関する高速施工への適用と省エネが期待される。今後は実用化に向けた詳細な機械設計と、さらなる負荷低減と効率的な掘進方法を検討する予定である。

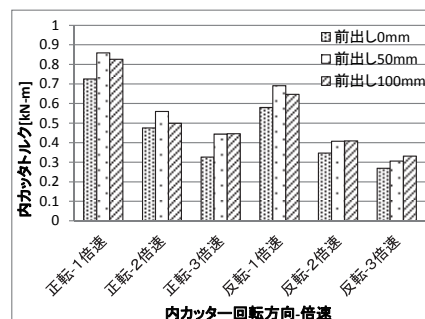


図-9 内カッタートルク (前出し 0/50/100mm)

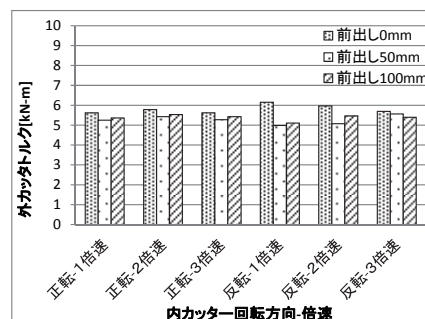


図-10 外カッタートルク (前出し 0/50/100mm)

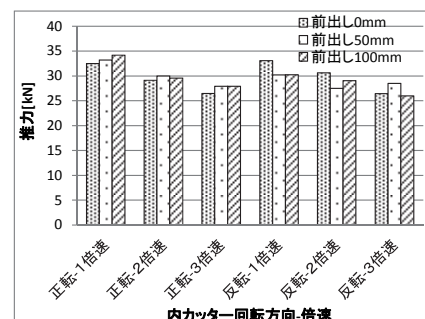


図-11 ジャッキ推力 (前出し 0/50/100mm)



写真-10 前出し実験後の供試体

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