

二重回転カッター方式によるシールド高速施工技術の開発

前田建設工業(株) 正会員 ○安光 立也
前田建設工業(株) 正会員 野本 康介
早稲田大学 正会員 小泉 淳

1. はじめに

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、シールド機のほかにシールド坑内や立坑から坑外の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や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

(1) 実験装置

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および図-2に示す。実験機は二重回転カッターの掘削装置と地盤を模擬した供試体の押出し装置で構成されている。掘削装置は外径がφ800mmで、外周カッターは中間支持方式、内周カッターはセンターシャフト方式としている。外周と内周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。掘削装置には推進機構は付いていないが、模擬地盤を押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している。

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。推力は押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。

キーワード 大断面シールド, 長距離, 大深度, 二重回転カッター, カッタートルク, ジャッキ推力
連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-2 前田建設工業株式会社 TEL 03-5276-5164



図-1. 二重回転カッター構造の掘削装置(内外比=1:2)

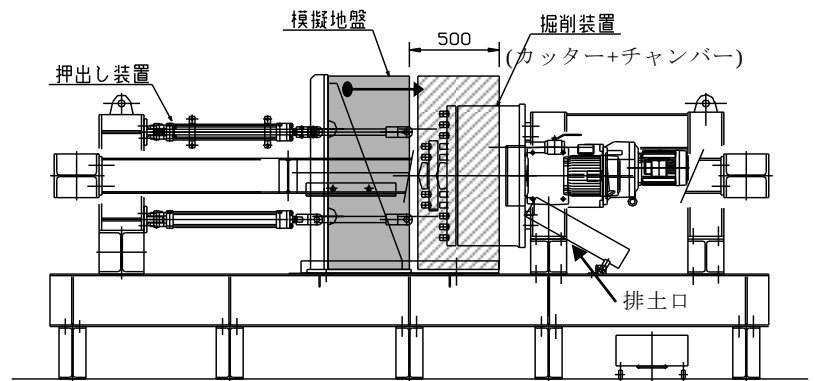


図-2. 二重回転カッター実験装置 全体

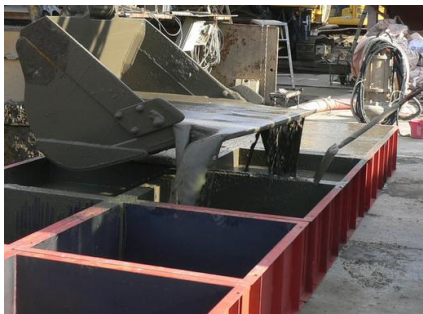


図-3. 模擬地盤 (左) 作製状況、(右) 完成



図-4. 針貫入試験による強度確認

(2) 模擬地盤

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。図-3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、図-4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、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 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。

3. 実験ケースと実験状況

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）、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て、図-5に示す形状寸法で作製した。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ることはしなかった。形状は先行ビットとティースビットを模した。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 の場合に変化が顕著だったことから、そちらのケースを多用した。実験状況を図-6および図-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．CaseNo.C-1～6はD-1～6との比較のためチャンバーは空として実験を行った．

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		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	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)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	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

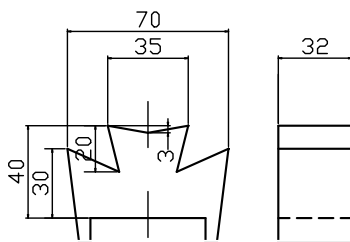


図-5. ビット形状寸法



図-6. 模擬地盤の設置



図-7. 掘進初期状況

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に単円での回転方法となる．ここでは，そのパターン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）

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チャンバーを空にしたケースでは，内カッターのトルクは，速く回すほど小さく，反転の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

a) 内カッターのトルク

カッター切り込み量 (mm/回)は，掘進速度(mm/分)÷回転速度(回/分)となるので，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．図-8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．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．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．

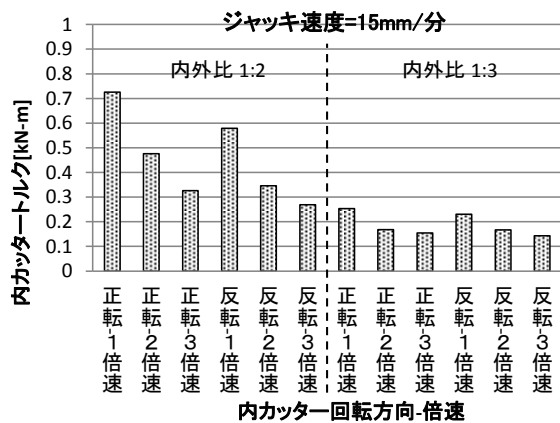


図-8. 内カッタートルクの比較

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%

b) 推力

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-9、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。

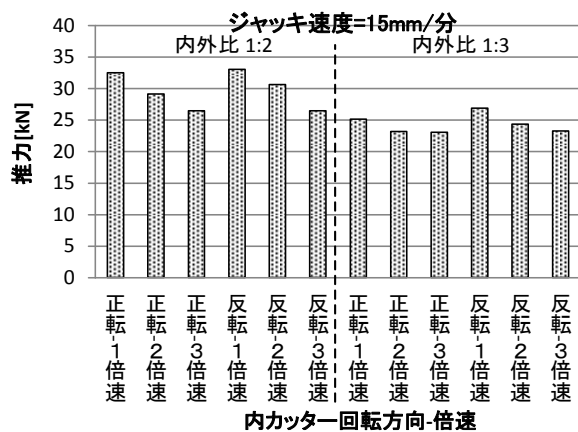


図-9. 推力の比較

表-3. 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%

c) 掘進速度の向上

内カッターの回転速度を上げることで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直線近似式を用いて試算し、定量的に評価した。図-10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。

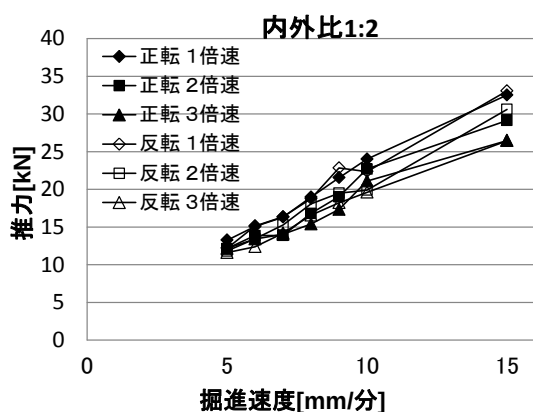


図-10. 掘進速度と推力の関係

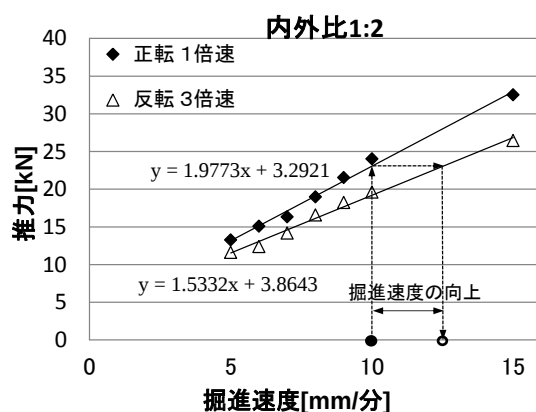


図-11. 掘進速度と推力の関係 (直線近似)

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-11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．

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%

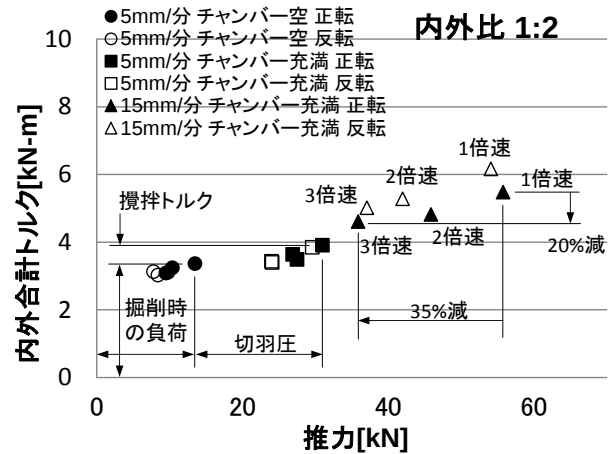


図-12. 掘進負荷（チャンバー空と充满）

(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．チャンバー内が充满し，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．その結果，以下のことがわかった．

- ⑤チャンバーを充满したケースでは，トルクも推力も，内カッターを速く回すことで低減し，この傾向はとくに掘進速度が大きいほど顕著だった

図-12に内外比1:2で掘進速度5 mm/分と15 mm/分の結果を示す．また，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●○）と比べて充满している場合（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する．よって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．チャンバーが充满の場合（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(1)のb)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．

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．一方，5 mm/分の場合（図中の■□）は，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．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15 mm/分の場合（図中の▲△）は，推力は同程度であるが，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くなり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．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かったと推測される．

低減効果としては、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。

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。