

消費電力を低減する二重カッター方式を採用したシールド機の模擬実験

(株)大林組 正会員 ○真鍋 晃一 フェロー 守屋 洋一
正会員 上田 潤 正会員 山下 健司
福田 智之 正会員 日野 義嗣

1. 目的

近年、大都市圏で見られる高速道路や鉄道の地下化による交通網の整備では、地上の影響や周辺環境負荷が小さい大断面シールドが計画されている。シールド機の稼働には、膨大な電力量が必要であり、例えばφ16mのシールド機では、一般家庭が1日に使う電力量の5千世帯分に相当する約4万5千kwhの電力量を1日で消費する。その膨大な電力量のうち、土砂を掘削するカッターが70%も消費している。そこで、カッター駆動による消費電力低減を目的に、カッター駆動方式を従来の単一駆動方式に替え、カッターヘッドの外周部と内周部が独立して駆動する二重カッター方式を採用した省エネシールドを開発した¹⁾。本稿では、その二重カッター方式の効率的なカッター回転速度の組み合わせや省エネ効果を検証するため実施した、模擬実験機による切削実験について報告する。

2. 二重カッター方式の概要

「二重カッター方式」は、シールド機の前面に位置するカッターヘッドを内周部と外周部に分割し、それぞれを独立して駆動させることで、内周部カッターと外周部カッターの回転速度の最適化を図るものである。これにより、カッター駆動に要する消費電力の低減、地山掘削時の内周部カッタービットの負荷低減による掘進速度の向上、およびカッター中心部への土砂固着によるトラブルの防止が可能となる(図-1)。また、内周部カッターは前方にスライド可能な機構を有しており、芯抜き効果により、外周部カッターにかかるカッタートルクを低減できる。

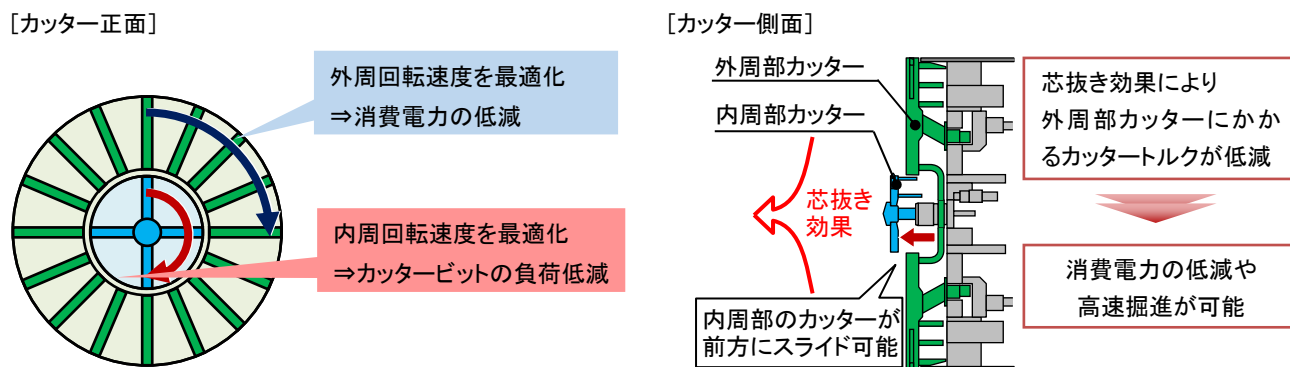


図-1 二重カッター方式の特徴

3. 模擬実験概要

(1) 目的

本実験では、内周部カッターと外周部カッターの回転速度の組み合わせを変えて、硬質の粘性土および砂質土を想定した模擬地盤を切削し、切削による電力消費量を確認することで、最も効率的なカッター回転速度の組み合わせを把握する。また、地盤の違いによるカッタートルク、推力および消費電力量への影響について確認するとともに、従来の単一駆動方式と比較し、省エネの効果についても検証する。

(2) 実験機

図-2 に実験装置概要を、図-3 に実験装置（カッター部）を示す。実験機は、掘削外径 16m の大断面シールド

キーワード 省エネシールド、二重カッター方式、大断面シールド、芯抜き効果

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株)大林組 TEL: 03-5769-1318

ルド機を想定し、その 1/8 スケール（外周部カッター径：φ2,000 mm，内周部カッター径：φ500 mm）とした。また、内周部カッターには脱着可能なスペーサー（38mm）を取付け、内周部カッターと外周部カッターを段差配置することで、スライド機構を模擬した。外周部カッター径と内周部カッター径の比率（4：1）は、想定した φ16m の大断面シールド機において、センターシャフト支持方式にて設置する内周部カッターの最大径が 4m であることから、その比率と同等とした。

想定掘進速度を 48mm/分とした場合の切込み量（シールド機が掘進し、カッターヘッドが 1 回転する間に、1 個のビットが地山に切り込む深さ）と同等の切込み量となるように実験機のカッター回転速度の仕様を決定した。掘進速度 48mm/分の場合、外周部カッターの最外周の切込み量は、4.4～8.8mm，内周部カッターの最外周の切込み量は、4.6～7.1mm となる（表-1）。実験機では、掘進速度を 12mm/分とし、この切込み量を再現するように実験機の回転速度およびパスを決定した（表-2）。

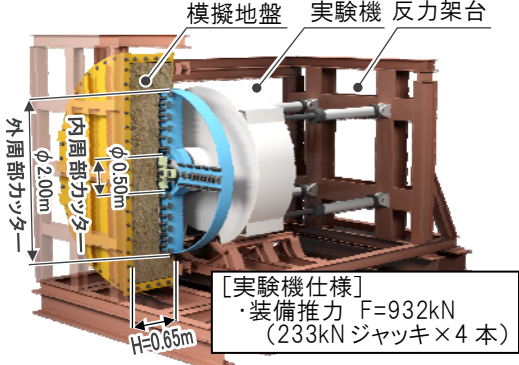


図-2 実験装置概要

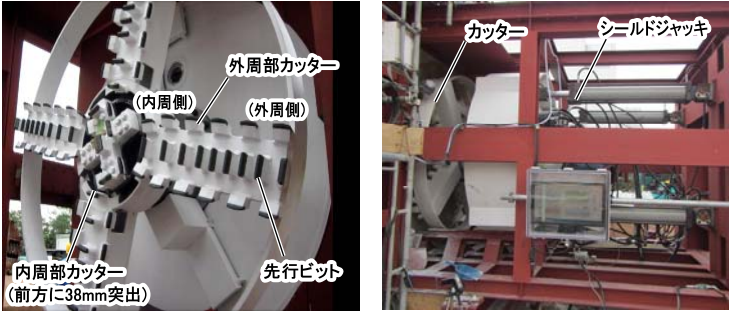


図-3 実験装置

表-1 想定シールド機仕様

	切削外径 (m)	周長 (m)	回転速度 (rpm)	ビットのパス数	切込み量 (mm)
外周部カッター	16.0 (外周側)	50.27	0.68～1.36	8	4.4～8.8
	4.5 (内周側)	14.14		4	8.8～17.6
内周部カッター	4.0 (外周側)	12.57	1.70～2.60	4	4.6～7.1
	1.4 (内周側)	4.40		2	9.2～14.1

表-2 実験機仕様

	切削外径 (m)	周長 (m)	回転速度 (rpm)	ビットのパス数	切込み量 (mm)
外周部カッター	2.00 (外周側)	6.28	0.25～1.50	4	4.4～8.8
	0.57 (内周側)	1.79		2	8.8～17.6
内周部カッター	0.50 (外周側)	1.57	1.00～1.60	2	4.6～7.1
	0.17 (内周側)	0.53		1	9.2～14.1

(3) 模擬地盤

模擬地盤は、硬質な粘性土および砂質土の 2 種類を想定し、設定強度を 2.0N/mm² とした。粘性土には空洞充填材を使用し、砂質土には体積比 55%の山砂を添加した流動化処理土を使用した。模擬地盤の配合を表-3 に示す。それぞれ、鋼枠（φ2.66m，L=0.65m）に打設後、強度が発現したのち実験装置に投入した（図-4）。強度確認は、原位置で直接計測できる針貫入試験にて行うこととした。

表-3 模擬地盤の配合（1m³ 当たり）

粘性土		砂質土	
材料	単位量 (kg/m ³)	材料	単位量 (kg/m ³)
水	825	水	265
セメント系結合材	330	土	368
特殊増粘剤	175	山砂	1355
不分離性混和剤	0.5	固化材	220

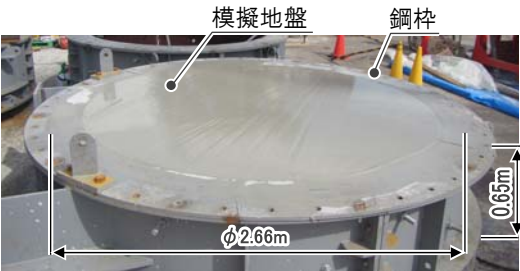


図-4 模擬地盤（硬質粘性土）

(4) 実験ケース

実験ケースを表-4に示す。実験は、粘性土地盤および砂質土地盤ともに、掘進速度 12mm/分にて算出した切込み量の中から外周部カッター、内周部カッターそれぞれ3種類(最大値, 中間値, 最小値)を選定し、それらを組み合わせたケースについて行った。さらに、単一駆動方式での切削実験として、内周部カッターと外周部カッターの段差ない実験機に改造後、内周部・外周部が同一の回転速度のケースを砂質土地盤にて実施した。これらの実験ケースに対し、カッタートルク、推力の機械負荷を計測し、それにもとづく電力量にて、最適なカッター回転速度の組み合わせおよび省エネ効果について検証することとした。

表-4 実験ケース

実験ケース番号	粘性土地盤	砂質土地盤	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	—	—
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
スライド機構			段差あり									段差なし	
カッター駆動形式			二重									単一	
切込み量(mm)	外周部カッター	外周側	8.6			6.5			4.3			6.5	2.9
		内周側	17.1			13.0			8.6			13.0	5.9
	内周部カッター	外周側	7.0	5.9	4.7	7.0	5.9	4.7	7.0	5.9	4.7	13.0	5.9
		内周側	14.0	11.8	9.4	14.0	11.8	9.4	14.0	11.8	9.4	26.1	11.8
回転速度(rpm)	外周部		0.35			0.46			0.70			0.46	1.02
	内周部		0.86	1.02	1.28	0.86	1.02	1.28	0.86	1.02	1.28	0.46	1.02

4. 実験結果

外周部カッター切削開始後から切削完了までの区間長450mmの掘進データについて考察する。切削完了後の模擬地盤を図-5に示す。

(1) 粘性土地盤での実験結果

a) カッタートルク

実掘進速度および実カッター回転速度から算出した実切込み量を表-5に示す。また、外周部カッターおよび内周部カッターについて、カッタートルクと実切込み量の関係を図-6に示す。外周部カッターの回転速度が速く、切込み量が小さいほどカッタートルクも小さくなり、外周部

表-5 実切込み量

		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
実カッター回 転速度(rpm)	外周部	0.35	0.32	0.36	0.47	0.44	0.44	0.69	0.71	0.71	
	内周部	0.85	1.02	1.28	0.85	1.02	1.28	0.85	1.02	1.28	
実掘進速度(mm/分)		11.6	11.6	11.7	12.3	12.9	12.4	12.2	12.1	12.2	
実切込み量 (mm)	外周部	外周側	8.4	9.1	8.2	6.5	7.4	7.0	4.4	4.2	4.3
		内周側	16.8	18.1	16.4	13.1	14.8	14.1	8.8	8.5	8.5
	内周部	外周側	6.8	5.7	4.6	7.2	6.3	4.8	7.1	6.0	4.7
		内周側	13.6	11.4	9.1	14.4	12.7	9.7	14.3	11.9	9.5



図-5 切削完了後の模擬地盤

カッターの切込み量が最も小さいケース⑦～⑨が最もカッタートルクが小さい。内周部カッターについては、外周部カッターほどカッタートルクに顕著な差は出ていないものの、回転速度が速く、切込み量が小さいほど、カッタートルクも小さくなる傾向が確認できる。なお、内周部カッターの回転速度の違いによる外周部カッタートルクへの影響は明確には確認できなかった。

b) 推力

推力と実切込み量のグラフを図-7に示す。外周部カッターの回転速度が速く、切込み量が小さいほど、推

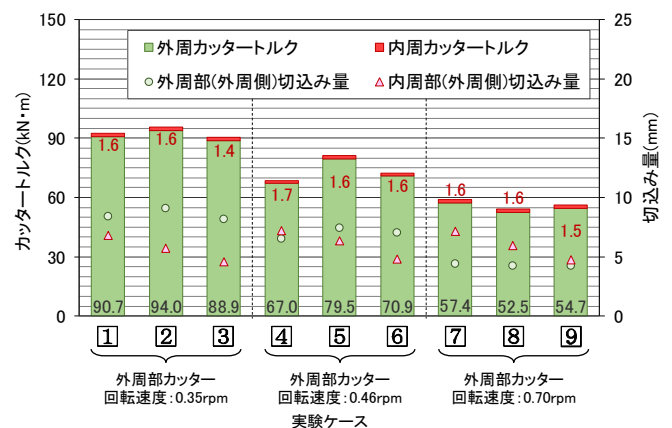


図-6 カッタートルクと実切込み量

力も小さくなり、外周部カッターの切込み量が最も小さいケース⑦～⑨のグループの推力が最も小さい。なお、内周部カッターの回転速度の違いによる推力への影響は、明確に確認できなかった。

c)消費電力量

外周部カッター、内周部カッター、およびシールドジャッキに関して、各種パワーユニットのポンプ圧力をもとに算出した消費電力量と実切込み量のグラフを図-8に示す。消費電力のうち、外周部カッターによるものが90%以上であり、大部分を占めていた。

内周部カッターの回転速度の違いによるカッタートルクや推力への影響が小さかったことから、外周部カッターの回転速度が同じグループごとに消費電力を平均し比較する。ケース⑦～⑨は、外周部カッターの回転速度が最も速く、切込み量が最も小さいグループであり、カッタートルク、推力ともに最も小さいグループであったが、消費電力量は最も大きい結果となった。これは、切削抵抗や推進時の負荷の減少により、地盤の切削やシールド機の推進に必要な電力量は低減されるものの、カッター回転速度の増加により、油圧ポンプの稼働が増大し、電力量が増加したことが要因と考える。今回の実験では、ケース④～⑥が最も消費電力が小さく、ケース⑦～⑨と比較すると、約2割の差が生じた(表-6)。

以上より、回転速度が遅い場合、切込み量が大きくなり、カッタートルクや推力の機械負荷が増加する。一方、回転速度が速い場合は、切込み量が小さくなるが、油圧ポンプの稼働増大により消費電力が増加する。これらのことから、適切な切込み量で掘削することが機械負荷や消費電力を低減するために重要であると考え。外周部カッターおよび内周部カッターの回転速度について、表-6よりそれぞれ切込み量が概ね10mm程度となる回転速度の組み合わせが効率的であると考え。

(2)砂質土地盤での実験結果

カッタートルクおよび推力は、粘性土地盤と同様に、外周部のカッター回転速度が速く、切込み量が小さいほど小さくなる傾向であった。また、内周部カッターの回転速度の違いによる外周部カッターへの影響は明確に確認できなかった。外周部カッターの回転速度が同じケース毎に平均した消費電力量を図-9に示す。消費電力量も粘性土地盤同様、カッタートルクおよび推力が最も小さいケース⑦～⑨のグループが大きかった。また、最も消費電力量が小さいグループは、ケース④～⑥のグループであった。

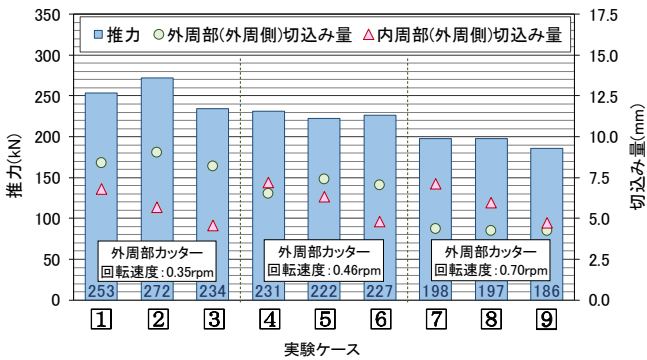


図-7 推力と実切込み量(粘性土地盤)

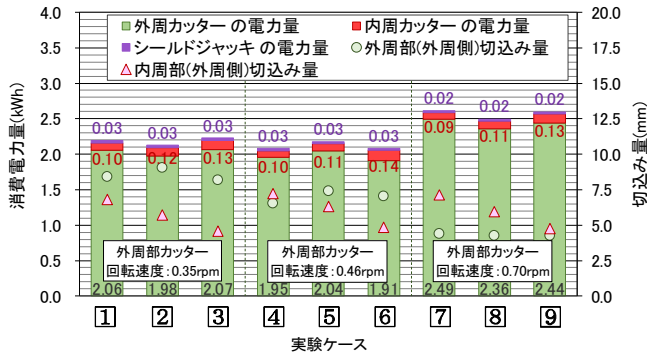


図-8 消費電力量と実切込み量(粘性土地盤)

表-6 消費電力量と平均切込み量(粘性土地盤)

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
外周部カッターの平均切込み量(mm)	12.9	13.9	12.6	10.0	11.4	10.8	6.7	6.5	6.5
内周部カッターの平均切込み量(mm)	11.9	10.0	8.0	12.6	11.1	8.4	12.5	10.4	8.3
消費電力量の合計(kWh)	2.19	2.13	2.23	2.08	2.18	2.08	2.61	2.50	2.59
平均消費電力量(kWh)	2.18			2.11			2.57		
比率※1	0.85			0.82			1.00		

※1 消費電力が最も多いケース⑦～⑨を1とした場合の比率

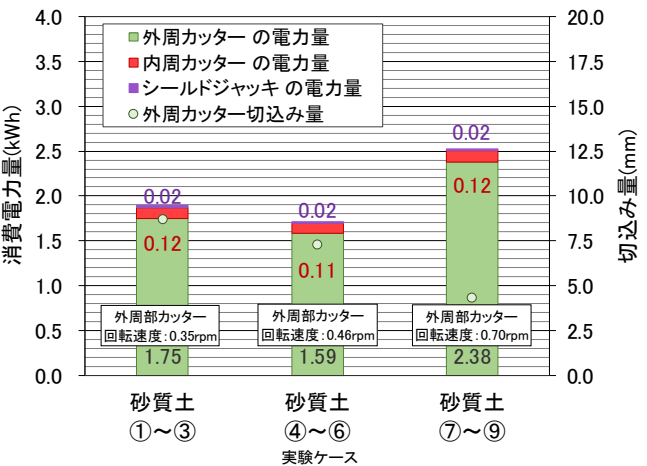


図-9 消費電力量(砂質土地盤)

(3) 粘性土地盤と砂質土地盤の比較

地盤の違いによるカッタートルク、推力および消費電力への影響を確認するため、粘性土地盤と砂質土地盤の結果を比較する。内周部カッターの回転速度の違いによる影響が少なかったことから、外周部カッターの回転速度が同じケースごとに外周部・内周部カッタートルクおよび推力を平均し、粘性土地盤と砂質土地盤の違いについて比較する。カッタートルク、推力および消費電力量をそれぞれ図-10～12に示す。カッタートルクは、どのケースも、粘性土地盤の方が高い。村山・畠の実験式²⁾にて算出した切削抵抗によるトルクも粘性土地盤の方が高い結果であり、同様の傾向が確認できた。また、推力および消費電力量についても、カッタートルク同様、粘性土地盤の方が大きかった。

(4) 単一駆動方式との比較

a) 外周部のカッター回転速度を合わせたケース

二重カッター方式によるビット負荷の低減効果や掘進速度の向上性について、単一駆動方式と比較し検証する。カッター回転速度をパラメータとした実験では、外周部カッターの回転速度が 0.46rpm のとき、消費電力が小さく効率的であったことから、カッター回転速度が 0.46rpm の条件にて比較する。単一駆動方式の実験機は、内周部カッターモーターを撤去し、内周部カッターと外周部カッターを鋼材にて接続する改造を行い、カッター回転の動力は、全て外周部カッターモーターに負担させる構造とした。また、内周部カッターのスペーサーを取り外し、内周部カッターと外周部カッターの段差をなくした。

カッタートルクおよび推力を図-13に示す。単一駆動方式がケース⑩であり、二重カッター方式は、内周カッターの回転速度が 1.02rpm のケース⑤である。カッタートルクは、単一駆動方式が 80.7kN・m であるのに対し、二重カッター方式では、58.5(=57.0+1.5)kN・m であり、約 28%低減されている。また、推力は、単一駆動方式が 219.8kN であるのに対し、二重カッター方式では、147.9kN であり、約 33%低減されている。このときの平均切込み量について、外周部カッターはどちらも約 10mm で同等であるのに対し、内周部カッターはそれぞれ 23.1mm と 10.5mm と約 2.2 倍の差がある。この内周部カッターの切込み量の差が、カッタートルクおよび推力に影響したと考える。

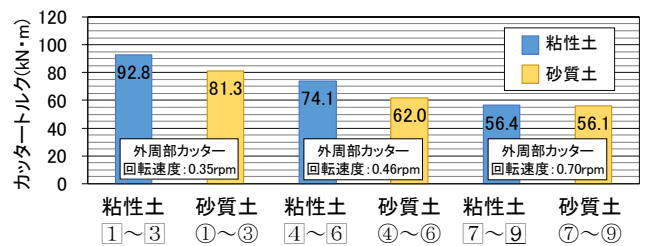


図-10 カッタートルク

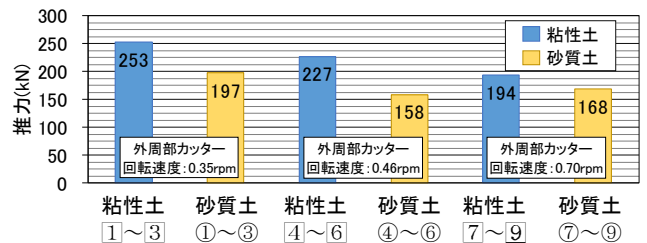


図-11 推力

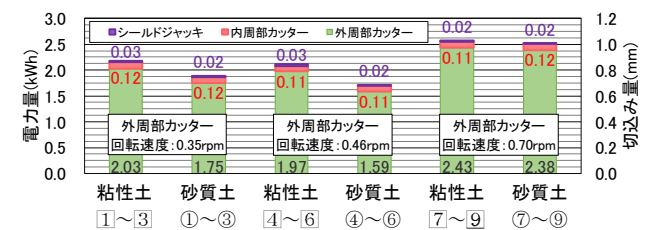


図-12 消費電力量

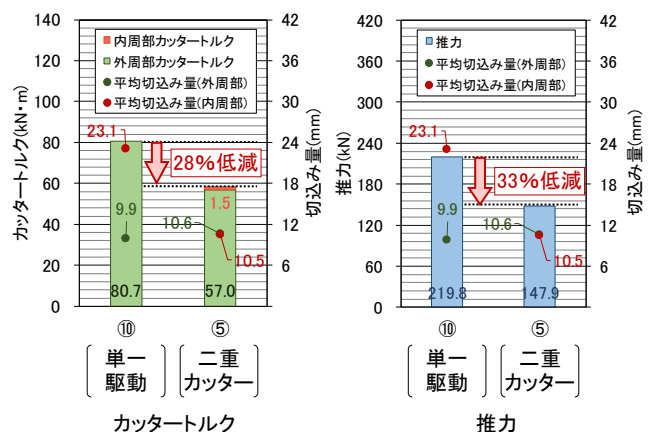


図-13 カッタートルク、推力
(外周部のカッター回転速度を合わせたケース)

表-7 消費電力量
(外周部のカッター回転速度を合わせたケース)

		⑩ (単一駆動)	⑤ (二重カッター)
カッター回転速度(rpm)	外周部	0.46	0.46
	内周部	0.46	1.02
平均切込み量(mm)	外周部	9.9	10.6
	内周部	23.1	10.5
消費電力量(kWh)	外周部カッター	2.328	1.540
	内周部カッター	-	0.104
	シールドジャッキ	0.028	0.019
	合計	2.356	1.662
比率		100.0%	70.5%

消費電力量を表-7に示す。二重カッター方式により、消費電力は約30%低減されている。これは、内周部カッターを独立して駆動させることによる消費電力の増加量より、カッタートルクや推力の機械負荷の減少による低減量の方が大きかったためと考える。

b) 内周部のカッター回転速度を合わせたケース

二重カッター方式による省エネ効果について、単一駆動方式と比較し検証する。内周部カッターの回転速度を同条件とし、カッタートルク、推力および消費電力を比較する。

カッタートルクおよび推力を図-14に示す。内周部のカッター回転速度は、両者とも1.02rpmであり、二重カッター方式における外周部のカッター回転速度は0.46rpmである。推力およびカッタートルクは、ケース⑤の二重カッター方式の方が高い。この時の外周部の平均切込み量は約10mmであった。一方、単一駆動方式の外周部の平均切込み量は4.2mmと非常に小さい値であった。

消費電力量を表-8に示す。消費電力は、二重カッター方式が小さく、単一駆動方式の73.3%であった。

以上のことより、内周部が最適となる回転速度をもとに単一駆動方式の回転速度を設定すると、外周部の回転が必要以上に速くなり、過大な仕様となることが分かる。また、二重カッター方式により、外周部および内周部の回転速度を適切に設定することで、消費電力を低減できることが確認できた。

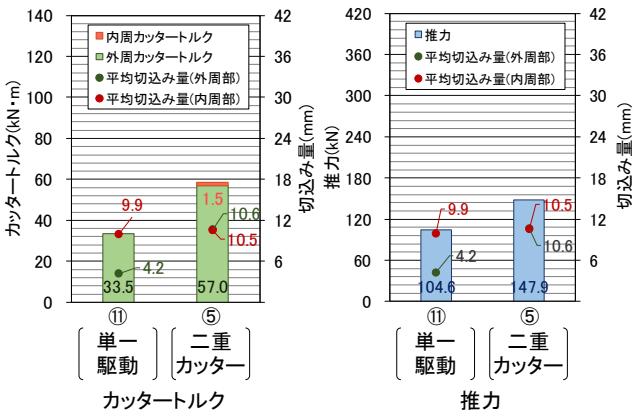


図-14 カッタートルク、推力
(内周部のカッター回転速度を合わせたケース)

表-8 消費電力量
(内周部のカッター回転速度を合わせたケース)

		⑪ (単一駆動)	⑤ (二重カッター)
カッター回転速度(rpm)	外周部	1.02	0.46
	内周部	1.02	1.02
平均切込み量(mm)	外周部	4.2	10.6
	内周部	9.9	10.5
消費電力量(kWh)	外周部カッター	2.225	1.540
	内周部カッター	-	0.104
	シールドジャッキ	0.013	0.019
	合計	2.268	1.662
比率		100.0%	73.3% (26.7%低減)

5. おわりに

硬質な粘性土および砂質土の2種類を想定した模擬地盤での切削実験を行い、両者とも適切な切込み量で掘削することにより、消費電力を小さくできることが分かった。今回は、単一駆動方式と二重カッター方式において、カッターの切削抵抗に着目して実験を行った。二重カッター方式を採用している省エネシールドでは、内周部の回転速度を最適に設定することで、内周部の攪拌能力が向上し、掘削土砂の流動性が高まる。今後、実工事において、地盤の切削抵抗とチャンバー内の土砂攪拌抵抗が作用する状況下での省エネシールドの有用性についても検証する予定である。

参考文献

1) 足立・阪本・山本・杉山，電力低減と高速施工を両立した省エネシールドの開発，土木学会 第69回年次学術講演会，VI-623，pp. 1245-1246，2014年9月
2) 村山・畠，土の切削抵抗について，土木学会誌 40巻 第3号，pp. 10-16，1955年3月