

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：55401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420446

研究課題名(和文) 端面掘削方式による掘削効率を飛躍的に向上できる無人化施工技術の開発

研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF UNMANNED CONSTRUCTION TECHNIQUE FOR IMPROVED EXCAVATING EFFICIENCY BY USE OF AN EDGE EXCAVATION METHOD

研究代表者

重松 尚久 (Shigematsu, Takahisa)

呉工業高等専門学校・環境都市工学分野・准教授

研究者番号：10321481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実機を想定した段階的に端面掘削を行える形状のモデル掘削機を製作し、モデル実験により最適な推進力の算定を行い、端面掘削方式による剥離破碎技術の力学的なメカニズムを明らかにした。また、硬質岩盤や鉄筋コンクリートにおける剥離掘削機を設計・開発するために、掘削効率を向上させるため、芯残りの起こらない刃の最小半径の最適化を行った。その結果、端面掘削の掘削段階が進むと掘削効率が上昇していたため、実際の多段型掘削機で掘削を行う際にも掘削段数を増やすと、掘削効率が上昇すると推測された。

研究成果の概要(英文)：A use of edge excavation method was considered to be more effective than use of the plane excavation method. Earlier studies has been proposed that the edge excavation method is efficient compared to the plane excavation method. The purpose of this study was to develop a rock excavator attached of the backhoe by use of a multistage edge excavation method. We carried out experiments with the model excavator to find out efficiency and force acting on the rock excavator. The experiments using a "model excavator" showed that the accumulated sediment caused the decrease of the excavation efficiency. By changing position of the model excavator from vertical to horizontal settings, removal of the excess sediment was remarkably improved. This improvement provides the following benefits: 1) increase of the excavation speed, 2) decrease of the torque, 3) increase of the overall excavation efficiency.

研究分野：建設施工

キーワード：剥離掘削 端面掘削 センターカッタビット

1. 研究開始当初の背景

岩盤を掘削する手段として最も効率的で安価な方法である発破工法は騒音や振動によって採用できない事例が多くなっている。機械化工法のなかで油圧を用いた機械では岩盤に設けたボーリング孔に差し矢を油圧で貫入する割岩機があるが、自由面がない岩盤では効率が著しく低下する。打撃により圧壊する機械として油圧ハンマやブレーカ等が挙げられるが、能力が低いという騒音が大きいなどの課題がある。また、推進工事の需要が山間部などの未整備部分に移行するにつれ、岩盤対応のセミシールドマシンの開発依頼も増加してきている。現在多くの機械に採用されている岩盤を破碎する方式としては、カッタを押しつけて強引に破碎する掘削方式が用いられている。下図の上側に示す平面掘削方式がその原理であり、強引に亀裂を発生させそれを成長させることにより岩盤を圧壊していく。そのため、装置全体および破碎ビットの部分において頑強な構造とせざるを得ない。また、強引な方式であるため構造自体の損傷も大きなものとなり、大きなコスト負担となっている。特に石英分を多く含む花崗岩では摩耗が激しく削孔距離にも制限を受ける。現方式では、新たなコストダウンや効率化は望む事ができない状況にある。

そこで、岩盤を効率よく削孔する新技術を検討したところ端面掘削方式による剥離破碎の技術に行き着いた。この端面掘削方式の技術は、岩石は破壊形態によってその強度が著しく異なるという物理的特性を積極的に利用したもので、これまでにない発想の岩盤破碎方法である。図-1に示すように、端面掘削方式は、2自由面を設けることにより、

エネルギー効率が良好なため、従来の機械掘削工法に勝る岩盤の水平・垂直方向の削孔工法となる可能性が高い。また、応用分野が多く汎用性の高い低騒音・低振動の環境型の機械・工法となりうる。

一般に、岩石の引張り強度は、圧縮強度の十数分の一程度である。多くの亀裂を発生させて岩盤の連続性を遮断し、多数の自由面を形成することで、より小さな力で剥離破壊が発生する。供試体に安山岩を用いた端面掘削の実験では、平面掘削に対し掘削効率が約10倍になる¹⁾(単位掘削土量当たりの回転仕事量である比エネルギーは、約1/10に減少する)という結果が得られている。これによると従来の圧壊方式に変え、2自由面を作った後、引っ張り破壊により削孔する全く新たな掘削方式となり、掘削効率の向上やディスクカッタビットの摩耗減少も図れる。

また、2自由面の端面にディスクカッタビットを押し付けつつ削孔する方法は、水平方向に削孔するセミシールドマシンのみでなく、垂直方向の縦坑削孔に水平方向と同様の構造で用いることができ応用範囲も多い。特に垂直削孔の場合では、従来の機械掘削の課

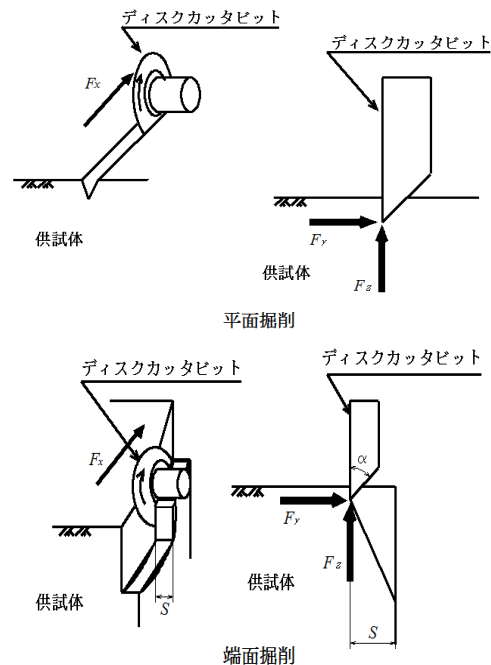


図-1 平面掘削と端面掘削の概略図

題であった騒音や振動が少なく掘削効率が高いことから新たな削孔工法となりうる^{2),3),4)}。また、道路建設などに剥離破碎を応用した端面掘削を用いた硬質岩盤剥離技術を用いることにより、掘削効率の向上とディスクカッタビットの摩耗量の低減が期待できる。また、多数の回転する円盤形剥離破碎刃を円錐体型岩盤掘削機に設置し、剥離破碎刃が岩盤を端面掘削することによって作業能力を一段と向上させ、推進力の軽減によって破碎刃の摩耗劣化を防止することができる。さらに、本工法を採用したアタッチメントをバックハウなどに用いることにより、コンクリート構造物などの解体を行うことが期待できる。特に今後増加する原子力発電所などの解体などの無人化施工への適応が可能である。これまでの研究により、軟質岩(一軸圧縮強度 20N/mm²程度)において、直径 2m 深さ 10m の深礎を建設する場合、従来の工法に比べて、総工費が 50%ほど軽減されること⁵⁾が分かっている。また、変位制御方式を用いた硬質岩盤への適応性と有効性の確認することができた。今回の研究では、本工法を採用した硬質岩や鉄筋コンクリートを掘削する実機実現に向けての必要不可欠な研究となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、端面掘削方式による掘削効率を飛躍的に向上できる低騒音・低振動の新しい硬質岩盤剥離掘削技術を開発することである。端面掘削方式は、エネルギー効率が良好なため、従来の機械掘削工法に勝る削孔工法となる可能性が高く、本技術を利用してバックハウなどのアタッチメントを製作

することにより、今後増加すると予想される原子力発電所の解体などの無人化施工への適応が期待できる。今回は、掘削中の排土処理構造を設けた実験装置を開発し、センタービットの改良を行いながら、実機を想定したモデル実験により最適な推進力の算定を行い、端面掘削方式による剥離破碎技術の力学的なメカニズムを明らかにし、硬質岩盤や鉄筋コンクリートにおける剥離掘削機を設計・開発するための課題を抽出することを目的とする。

3. 研究の方法

硬質岩（花崗岩や砂岩など）やコンクリート供試体における岩盤剥離掘削機を設計・開発するための課題を抽出する。実機を想定した油圧による荷重制御で、岩盤剥離掘削機の掘削工程の推進力、作用トルク、単位掘削土量あたりの掘削動力である比エネルギーの性能を実験により明らかにする。また、個々の剥離破碎刃について掘削の状態を明確にし、剥離破碎方式の力学的なメカニズムを明らかにする。それぞれの岩盤において、掘削効率の向上とディスクカッタービットの摩耗量低減のための最適な荷重状態とカッターの配置を求めていき、実用機として用いるための岩盤剥離掘削機を設計・開発するための基礎的な設計指針を提供する。また、剥離掘削刃の最適な荷重制御システムの構築を行う。

(1) 荷重制御下における掘削刃に作用する力の測定

実機を製作するにあたって最も重要なことは、どのぐらいの反力を確保する必要があるかである。モデル実験や要素実験を行うことによって、押しつけ力に対するそれぞれの反力を把握できるため、実機製作のための重要なデータとなる。これまでは現有の実験装置で写真-1 に示す本工法を採用したモデル掘削機を用いて実験を行ってきたが、掘削土の処理が難しいため、図-2 に示すように、本装置を横向きに倒すことができるように改良し、掘削孔内の掘削残土の排土を効率的に行うことにより、掘削残土が影響しないデータを取得し、掘削時の力の関係を把握する。また、実機的设计に欠かすことのできない掘削土量をリアルタイムで測定するために、掘削土を一カ所で回収し、掘削土の質量をリアルタイム測定出来るように実験装置の改良を行い、剥離破碎方式の力学的なメカニズムを明らかにする。

(2) センタービットの掘削性能の検討

硬質岩盤用掘削機であるTBMの中心にはディスクカッタービットをセンタービットとして配置している。このように摩耗しにくい高強度のディスクカッタービットをセンタービットに使用することで、硬質岩盤に対して効率よく掘削を行うことができる。この技術を



写真-1 モデル掘削機

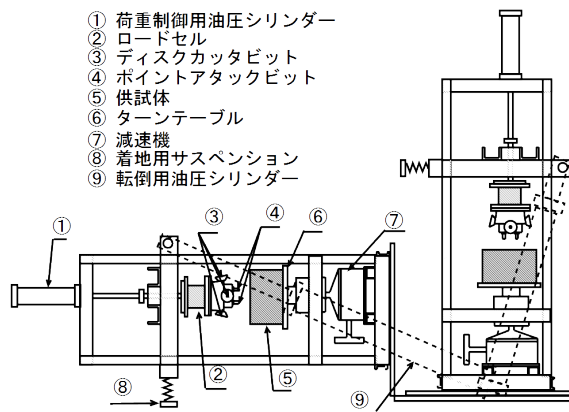


図-2 実験機概略図



写真-2 モデル掘削機を用いた実験の様子

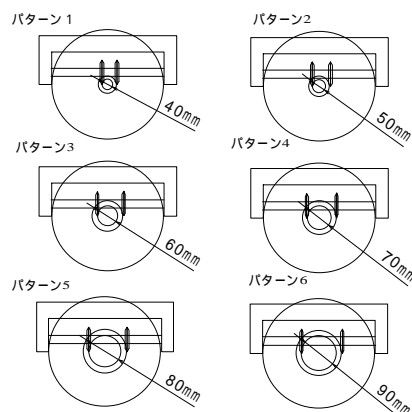


図-3 パターン別カッターの軌跡

応用して、硬質岩盤でも掘削が可能な先行ビットを開発する。中心からのディスクまでの距離やディスクカッタービット間の距離を変化させることにより、芯残り（削りのこり）といわれる現象がない最適なディスクカッター

タビットの配置を実験により決定する。写真-2にモデル掘削機での実験の様子を示す。図-3に示すように2枚のカッタ間隔を変化させ、それぞれのカッタの軌跡をパターン別に分けた実験を行い、芯残りの発生しない最長の間隔を求める。

(3) 剥離掘削刃の最適な荷重制御システムの開発

掘削刃に作用する荷重の変化を検知することにより、掘削刃の摩耗度を検知する摩耗度検知システムを開発する。また、それぞれの掘削刃にかかる荷重を制御することにより、最適な掘削速度と掘削刃の摩耗が軽減できる荷重制御システムを開発する。

4. 研究成果

(1) 荷重制御下における掘削刃に作用する力の測定

トルク T

図-4に各掘削段階におけるトルク T の比較を示す。参考のため、掘削土の排出改善を行っていない実験結果も同時に示す。各掘削段階でそれぞれ垂直力 F_z とトルク T が比例していることがわかる。また、全ての掘削段階を通して垂直力 F_z とトルク T が比例する傾向があることがわかる。垂直力 F_z とトルク T に相関が見られるため、実際の掘削機でも垂直力 F_z を制御することにより掘削機に作用するトルク T を把握できると考えられる。次に、掘削土排出の改良前と比較すると、掘削土の堆積しにくい1段目は大きな差は見られなかったが、2段目と3段目では掘削時に作用するトルク T が低減されていることがわかる。掘削土の今回の改良により、トルク T が減少していることから、掘削土の排出の効率が掘削機に作用するトルク T に影響を与えていると考えられる。

掘削速度 V

図-5に垂直力 F_z と掘削速度 V のグラフを示す。参考のため、掘削土の排出改善を行っていない実験結果も同時に示す。全ての掘削段階で、垂直力 F_z に比例して掘削速度 V が増加する傾向が見られた。また、段数が増加するに従い、掘削速度 V の傾きが緩やかになる傾向が見られた。以上のことから、実際の掘削機械で端面掘削を行った際にも垂直力 F_z による掘削速度 V の推測が可能であると考えられる。次に、掘削土排出の改良前と比較すると、掘削土の堆積しにくい1段目は大きな差は見られなかったが、2段目と3段目では掘削速度 V が増加していることがわかる。今回の改良により、掘削速度 V が上昇することから、掘削土の排出効率が掘削速度 V に影響を与えていると考えられる。

各掘削段階における比エネルギー E_s

図-6に各掘削段階における比エネルギー E_s のグラフを示す。参考のため、掘削土の排出改善を行っていない実験結果も同時に示す。比エネルギー E_s は掘削に必要なエネルギー

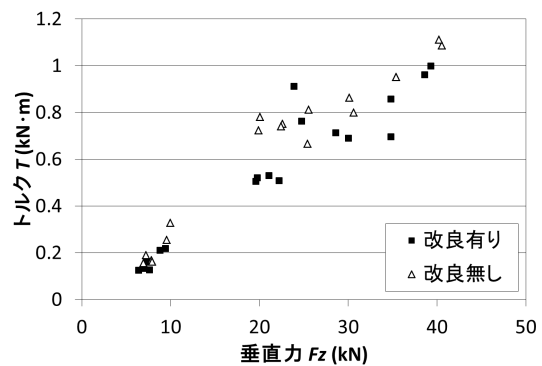


図-4 各掘削段階におけるトルク T の比較

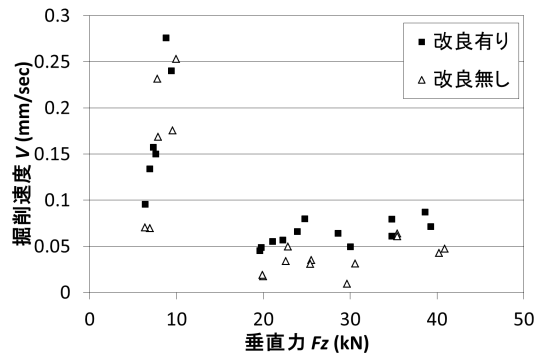


図-5 各掘削段階における掘削速度 V の比較

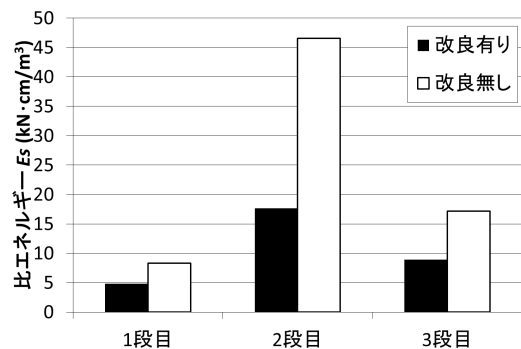


図-6 各掘削段階における比エネルギー E_s の比較

ギーを掘削土量で除したもので、小さいほど効率が良いことを意味する5)。1段目は比エネルギー E_s が小さく、掘削効率がよいことが分かる。これは供試体上面部の強度が低いことと、掘削機中心部に近い位置にポイントアタックビットがあることで、トルク T が小さくなったことが原因だと考えられる。2段目は1段目と比較すると比エネルギーが増加している。2段目から3段目については比エネルギー E_s が大きく減少している。ディスクカッタビットが2枚から4枚に増え、掘削土量も増えたため、掘削効率が上昇したのと考えられる。段数を増加させることにより、掘削効率を上昇させることができると推測される。次に、掘削土排出の改良前と比較すると、改良した実験の方が、比エネルギー E_s が減少しており、効率的に掘削土の処理を行うことにより掘削効率が飛躍的に向上していることがわかる。

(2) センターピットの掘削性能の検討

水平力 F_x

図-7に水平力 F_x と掘削時間 t の関係を示す。水平力 F_x は正の値は回転の中心から外向き、負の値は内向きの力を表す。時間とともに水平力は増加している。その後、極大値をとり、減少して一定の値を示す。この点を映像にて確認したところ、極大値で芯取れが発生したことが分かった。芯が取れ、掘削面の抵抗がなくなることで、一時的に外側へかかる力が減少するような挙動を示す。設定垂直力 $F_{zset}=40$ kN での水平力の値は-10 ~ 10 kN 以内である。いずれのパターンもこれに当てはまる。このことから内側の刃にかかる水平力は設定垂直力 F_{zset} の1/4程度になることが推測できる。図-8に水平力 F_{xmax} と掘削中心からの距離 r の関係を示す。 $r=92.5$ mm で掘削を行った場合、供試体の外側から破壊が起きたため、水平力 F_{xmax} は大きくなった設定垂直力 F_{zset} が増加すると最大水平力 F_{xmax} が増加することがわかる。掘削中心からの距離 r を大きくしたことによる水平力 F_x の変化はあまり見られなかった。

掘削速度 V

図-9に掘削速度 v と掘削中心からの距離 r の関係を示す。掘削中心からの距離 $r=92.5$ mm で掘削を行った場合、供試体の外側から破壊が起きたため、掘削速度 v の値が大きくなっている。結果として掘削中心からの距離 $r=32.5$ mm が最も掘削速度 V の値が大きく、掘削中心からの距離 $r=52.5$ mm と 72.5 mm にはあまり差が見られなかった。

芯残り と掘削中心からの距離の関係

表-1 に掘削中心からの距離と芯残りの関係を示す。掘削中心からの距離が大きくなるほど芯残りが発生しやすくなっているという結果が出た。また、同一の半径でも設定垂直力が小さい方が芯残りが発生しやすい。掘削において岩盤に刃が入っていき水平力によって外側に力が作用する。その力の反力により破壊線が生じ、中心部が取れる現象を芯残りと呼び、この現象が起きない場合、芯残りが発生する。そのため、半径を大きくすることにより破壊線が生じにくくなり、芯残りが発生すると考えられる。

(3) 剥離掘削刃の最適な荷重制御システムの開発

カッタヘッドの荷重を自動制御することによるメリットを示すことができれば小規模な施工現場にも自動制御化を進めることにつながり、掘削量の最適化とカッタヘッド寿命の最適化が可能になるとともに、騒音や振動など建設工事に起因する公害の低減が図れ、低コストで高品質な掘削を実現できる施工技術の飛躍的な発展が期待できる。

そこで、TBM 用掘削ディスクカッタのモデル掘削機により得られた実験データを元に MV-index の計算を行う。また、実験装置に最小分散制御を適用したと仮定した際の

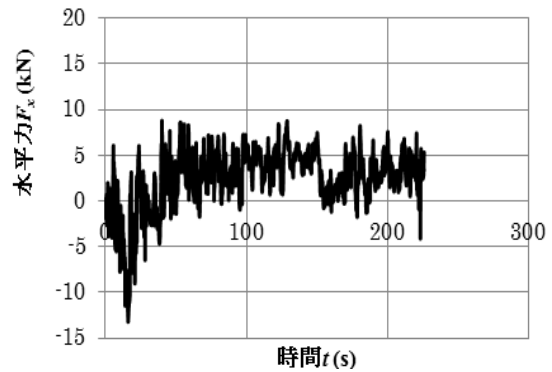


図-7 水平力 F_x と時間 t の関係

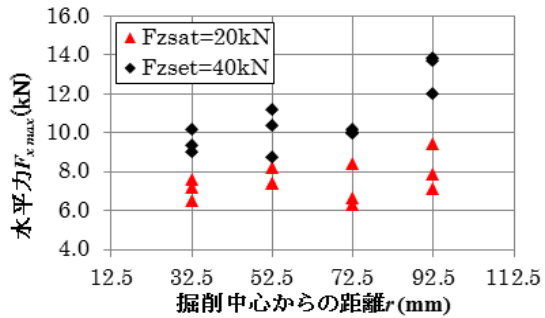


図-8 水平力 F_x と掘削中心からの距離 r の関係

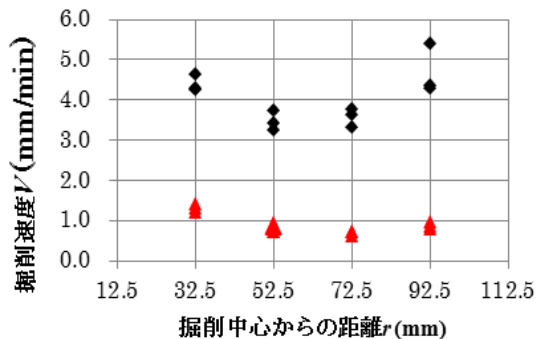


図-9 掘削速度 V と掘削中心からの距離 r の関係

表-1 芯残りの有無

中心からの距離 r	20 kN	40 kN
32.5 mm	無	無
	無	無
	無	無
52.5 mm	有	無
	無	有
	無	無
72.5 mm	有	無
	有	無
	有	有
92.5 mm	有	有
	有	有
	有	有

理論的な最小分散出力と実験データを比較する。これらの分析によって、自動制御実装時の制御性能を予測し、どの程度制御性能を

良化できるか検討した。その結果、実験データから理論的な制御誤差の最小分散出力を計算するとフィードバック制御を実装することにより出力分散を小さくできる可能性があることが明らかとなった。トンネル掘削などに用いられる建設機械には積極的な自動制御の適用はあまり進んでいないが、フィードバック制御の導入で飛躍的に性能を向上できる可能性があることがわかった。今後は、自動制御を実現するため油圧アクチュエータをはじめとする周辺機器の開発を進めたいと考えている。また、今回はパイロットプラントとしてのモデル掘削機を使用した。実際にはより大きなもので実用化されることが想定される。一連の研究で有効性を確認できれば、実用化フェーズとして、実際の施工現場で使用されるスケールでの検証を行う必要がある。

引用文献

- 1) Snowdon, R. A. Ryley, M. D. and Temporal, J. A study of disc cutting in selected British rock. Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstrs., 19, 107-121, 1982.
- 2) 室達朗, 土屋清, 河野幸一, 若林優輔: ディスクカッタビットによるモルタル端面の通常掘削特性に関する実験的考察, 土木学会論文集, No. 687/III-56, pp. 37-47, 2001.
- 3) Muro, T., Tuchiya, K. and Khono, K. : Steady state edge excavation property of a disc cutter bit, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, Bangkok, Thailand, pp. 49-58, 2001.
- 4) Muro, T., Tuchiya, K. and Khono, K. : Experimental considerations for steady state edge excavation under a constant cutting depth for a mortar specimen using a disk cutter bit, Journal of Terramechanics, Vol. 39, No. 3, pp. 143-159, 2002.
- 5) 室達朗, 重松尚久, 河野幸一, 作原陽一: 変位制御型端面掘削方式による軟質岩盤に対応する深礎掘削機の実験的考察, 土木学会論文集 Vol. 62No. 2, 296-311, 2006.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

重松尚久, 武本崇裕, 小田登, TBM センターカッタビットの最適化に関する基礎的研究, テラメカニクス, 第 37 号, 2017, pp. 27-31

大西義浩, 重松尚久, 河村進一, 小田登, 分散評価に基づいたトンネルボーリングマシン用掘削ディスクカッタの自動制御化への検討, 電気学会論文誌 C (電子・情

報・システム部門誌) Vol. 137, 査読有, 2017, pp. 114-119
DOI:10.1541/ieejieiss.137.114

重松尚久, 松田和也, 小田登, 端面掘削方式を用いた多段型掘削機の掘削効率に関する研究, テラメカニクス, 第 36 号, 2016, pp. 85-88

重松尚久, 室達朗, 小田登, 端面掘削方式を用いた多段型掘削機の掘削効率に関する研究, 平成 26 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, 査読有, 2014, pp. 121-124.

Takahisa SHIGEMATSU, Tatsuro MURO, Noboru ODA, Shinichi KAWAMURA, Takeshi KUROKAW, THE EFFICIENCY TEST OF A ROCK EXCAVATOR BY USE OF A MULTISTAGE EDGE EXCAVATION METHOD, PROCEEDINGS OF THE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ISTVS, 査読あり, 2014, 51

[学会発表](計 2 件)

重松尚久, 松田和也, 小田登, 端面掘削方式を用いた多段型掘削機の掘削効率に関する研究, 第 36 回寺メカニクス研究会, 2016.11, 長崎

重松尚久, 武本崇裕, 小田登, TBM センターカッタビットの最適化に関する基礎的研究, 第 37 回寺メカニクス研究会, 2016.11, 新潟

6. 研究組織

(1) 研究代表者

重松 尚久 (SHIGEMATSU Takahisa)
呉工業高等専門学校・環境都市工学分野・准教授
研究者番号: 10321481

(2) 研究分担者

大西 義浩 (OHNISHI Yoshihiro)
愛媛大学・教育学部・准教授
研究者番号: 00321480

河村 進一 (KAWAMURA Shinichi)

呉工業高等専門学校・環境都市工学分野・准教授
研究者番号: 70315224

(3) 研究協力者

小田 登 (ODA Noboru)

室 達朗 (MURO Tatsuro)