

令和元年5月16日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06928

研究課題名(和文)環境低負荷型コンパクトブラस्टィングシステムの開発

研究課題名(英文)Development of Environment-Friendly Compact Blasting System

研究代表者

笹岡 孝司 (Sasaoka, Takashi)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20444862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：発破工法を安全かつ効率的に幅広く利用するためには、様々な施工状況に応じて発破に伴う周辺環境への影響を最小限に抑制し、安全かつ経済的なコストで発破作業を可能とする新しい観点での発破システムが必要である。そこで本研究では、室内小規模発破試験および数値解析を用いて岩盤状態や発破規格が岩石の破壊機構に及ぼす影響について把握するとともに、露天掘り鉱山における現場試験により、岩盤状態および発破規格が起砕岩石の飛翔挙動および起砕物粒度に及ぼす影響について検討し、飛石の発生抑制手法および起砕物粒度の制御方法についてまとめ、環境負荷低減型コンパクトブラस्टィングシステムの設計指針を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した「環境低負荷型コンパクトブラस्टィングシステム」を活用することで、これまで発破作業の適用が困難とされていた地山や住宅近隣地域においても、発破工法の適用が可能となり、作業効率の向上だけでなく重機の稼働に伴うCO2排出の削減も可能となる。さらに、構造物の解体や人命救出のためのアクセス通路の構築等、救助作業にも適用が可能で、人命救助・災害・復旧への適用も期待できる。以上のことから、本システムは、鉱山および土木における発破工法の安全・効率化から、災害時の人命救助および災害復旧に至るまで、発破工法の適用領域の拡大を可能とするシステムとして、日本が世界に貢献できる技術の一つになると考える。

研究成果の概要(英文)：Rock blasting is the rock excavation and fragmentation technique widely adopted in the various fields of the mining and civil engineering because of its economic efficiency. On the other hand, the blasting operation may have an impact on the surrounding environment, such as ground vibration, flyrock, noise, etc. in case the blasting standard is not appropriate. The new guidelines have to be developed in terms of safe and economical in order to apply blasting technology more effective and widely. From these points of view, at first, the mechanism of rock fragmentation by blasting were discussed and made clear by means of small scale blasting tests and numerical simulation. Then, the effects of blasting standard and rock mass conditions on the rock fragmentation and flight characteristics of fragmented rocks based on a series of field blasting tests. Finally, the new guide lines for blasting design were proposed.

研究分野：資源開発

キーワード：起砕メカニズム 数値シミュレーション 起砕効果 飛石抑制 起砕物最大初速度予測式 起爆秒時差
起爆方向 岩盤評価

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

爆薬のエネルギーを利用して岩盤および構造物を破壊させる発破作業は、鉱山・土木分野では重要で普遍的な作業の一つである。また、石灰石・砕石等の露天採掘では、経済的な採掘方法として一般に用いられている。さらに、地下空洞掘削や坑内採掘では、トンネルボーリングマシン（TBM）やロードヘッダー等の掘削機械による機械掘削作業が発達している今日においても、発破工法の適用による掘削経費の軽減、工期の短縮等の利点も多い。その上、近年ではコンクリート構造物の老朽化に伴う解体作業も問題となっているが、通常のブレイカ工法では、大きな打撃音、振動粉塵等により周辺環境に多大な影響を与えることから、これら老朽化した都市部のビル等構造物の解体作業においても、爆薬を用いた爆破解体が注目されている。

しかしながら、発破作業では爆薬の爆轟に伴って発生する振動、騒音、飛石など、他の工法よりも周辺環境に悪影響を及ぼす可能性が高く、都市部やその近郊部では発破作業が制限されている。一方、その発破規格については、各現場において未だオペレーターの経験的判断により地山の状態を把握しながら穿孔作業が行われ、事前に決定された最小抵抗線や孔間隔あるいはそれらを基本として試行錯誤的に発破規格が決定されているのが現状である。そのため、発破規格が地山条件に適していない場合あるいは周辺地山が軟弱な場合には、発破振動および飛石により周辺構造物および住民に直接的な被害を与えるだけでなく、発破による周辺地山の損傷から斜面崩壊（図1参照）の誘発や、地下空間周辺地山の支持力の低下に伴う内空変形の増大や支保力の増大により地下空間の安定性が著しく低下する等、2次的な影響としても周辺環境に甚大な影響を与える可能性が高い。特に近年、わが国ではこれまでにない集中豪雨に見舞われ、山岳斜面あるいは宅地造成地での大規模な斜面崩壊が発生している現状を考えると、発破による2次的影響も今後深刻化することが予想され、各種地山条件下で発破による周辺地山の損傷を的確に評価・予測した上で、周辺地山への影響を抑制しつつ効果的な制御発破を行う必要がある。

このように、発破工法を安全かつ効率的に幅広く利用するためには、様々な施工状況に応じて発破に伴う周辺環境への影響を最小限に抑制し、安全かつ経済的なコストで発破作業が可能な新しい観点でのブラスティングシステムが必要である。

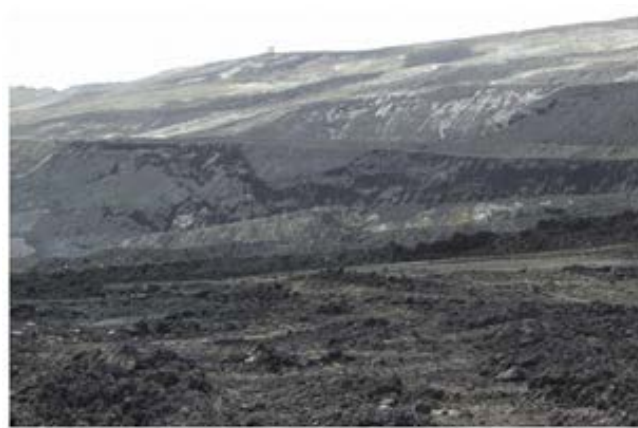


図1 石炭鉱山における発破振動による斜面崩壊（インドネシア・露天掘り石炭鉱山）

2. 本研究の目的

発破工法を安全かつ効率的に幅広く利用するためには、様々な施工状況に応じて発破に伴う周辺環境への影響を最小限に抑制し、安全かつ経済的なコストで発破作業を可能とする新しい観点でのブラスティングシステムが必要である。そこで本研究では、発破孔周辺および発破孔間で発生する亀裂の方向および数を効果的に制御することで、発破の規模および薬量（1孔あるいは1段当り）を低減し周辺環境への影響を軽減しつつ、コスト低減の観点から種々の環境条件に応じて高い発破精度および期待される発破効果を得ることのできる環境負荷低減型コンパクトブラスティングシステムの開発およびその設計指針の構築を目的とした。

3. 研究の方法

本研究において目標とする小規模・環境低負荷・高精度・高効率を実現する「環境低負荷型コンパクトブラスティングシステム」を開発するためには、まず各種諸条件下における発破による亀裂進展のメカニズムの解明およびその制御方法について検討する必要がある。次に、発破効果および周辺地山および環境への影響抑制効果を検討するため、起砕効果・発破振動・騒音に及ぼす各種地山条件および発破規格の影響について定量的な評価を行うとともに、その予測手法を確立する必要がある。そこで、本研究では以下に示す一連の室内実験、数値シミュレーションおよび現場試験を実施し、得られた結果を基に環境負荷低減型コンパクトブラスティングシステムを開発するとともにその設計指針について検討した。

- 1) 室内実験による諸条件下における亀裂の発生・進展メカニズムの解明および亀裂の発生制御方法に関する検討

- 2) 現場試験による各地山条件および発破条件下における発破効果および発破振動に関する検討
- 3) 亀裂の発生および進展特性を考慮した数値シミュレーションモデルの開発・検討および発破効果ならびに周辺環境に及ぼす影響に関する予測手法に関する検討
- 4) 現場試験による発破に伴う周辺地山の損傷領域に関する評価方法の確立
- 5) 上記項目 1)～4)の結果を基に、周辺環境への影響を抑制しつつ必要とされる発破効率および経済的効果を得ることが可能な「環境低負荷型コンパクトブラस्टィングシステム」の開発およびその設計指針の確立

4. 研究成果

まず、発破による岩石の破壊機構を解明するため、コンクリートブロックを用いた室内小規模発破試験を実施した(図2参照)。この試験では、高速度カメラで撮影した画像に画像相関法による2次元動的ひずみ計測手法を適用することで、既存のひずみゲージでは計測が困難であったき裂の発生および進展箇所における動的ひずみを可視化し、定量的に評価した(図3参照)。その結果、発破に伴う岩石内のき裂は、動的ひずみが岩石の有する限界ひずみを超えると発生・進展すること、限界ひずみは岩石強度の増大とともに大きくなることが明らかとなった。また、最小抵抗線を小さくすれば、岩石内により多くのき裂が発生して発破による起砕効果が改善されるが、き裂発生時の動的ひずみ速度も大きくなり飛石発生リスクが増大することも明らかとなった。

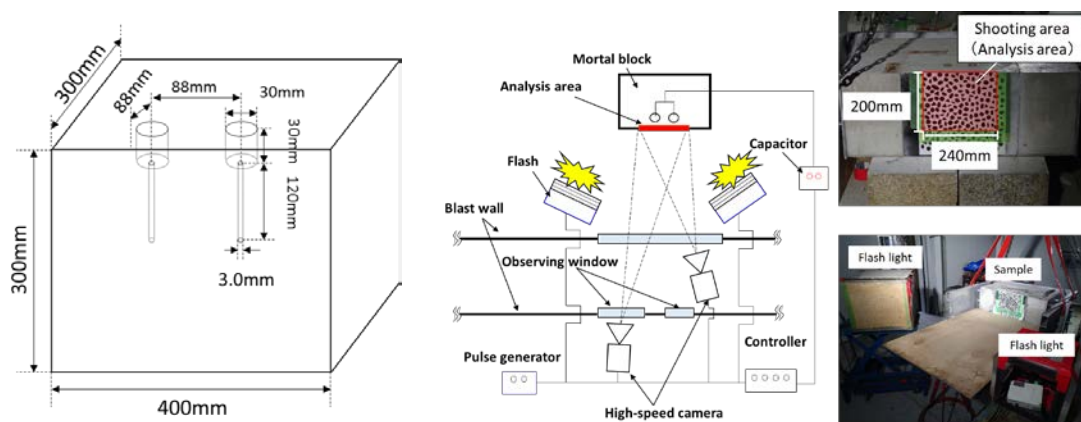


図2 コンクリートブロックを用いた室内発破実験の概要

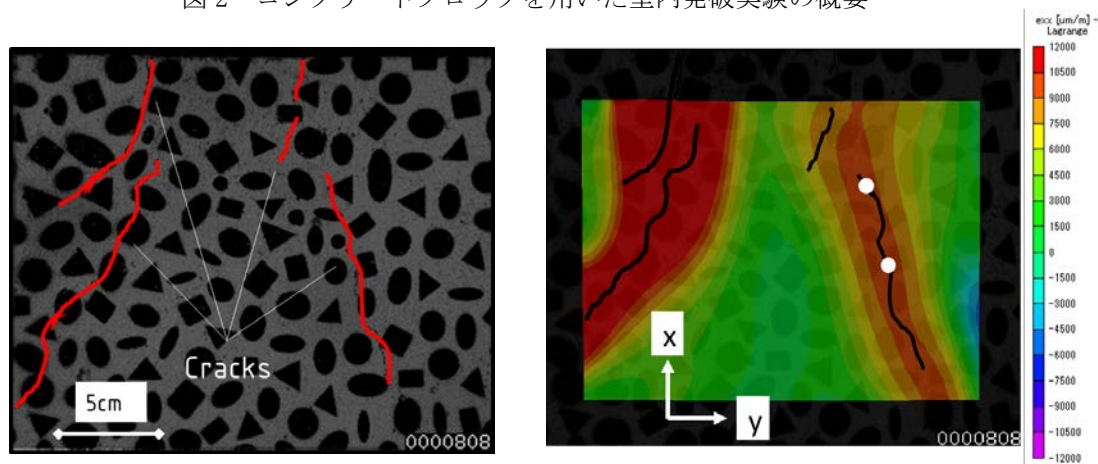


図3 試験結果の一例(左:撮影画像、右:ひずみ解析結果)

次に、発破孔から発生した応力波の伝播挙動および応力波による岩盤の破壊機構に及ぼす発破規格(遅延時間、最小抵抗線、孔間隔)の影響について3次元有限要素解析ソフトウェアAUTODYNを用いて種々の検討を行った(図4参照)。まず、斉発発破と遅延発破の解析結果の比較により、起爆後、発破孔から同心円状に伝播する圧縮応力波により発破孔周辺にき裂が発生した後、圧縮応力波が切羽の自由面に到達して引張応力波として反射し、次の起爆により生じた圧縮応力波との重ね合わせにより、さらにき裂が発生・進展するという岩石の破壊機構が明らかとなった。次に、最小抵抗線を小さくすることで、隣接発破孔から発生する応力波との重ね合わせにより隣接発破孔間および発破孔と自由面間の岩石が効果的に起砕されることが明らかとなった。さらに、孔間隔を縮小することで、応力波の重ね合わせによる起砕効果が增大するとともに、適切な起爆秒時差を設定することで、最小抵抗線および孔間隔を変更することなく起砕効果が改善されることも明らかとなった。

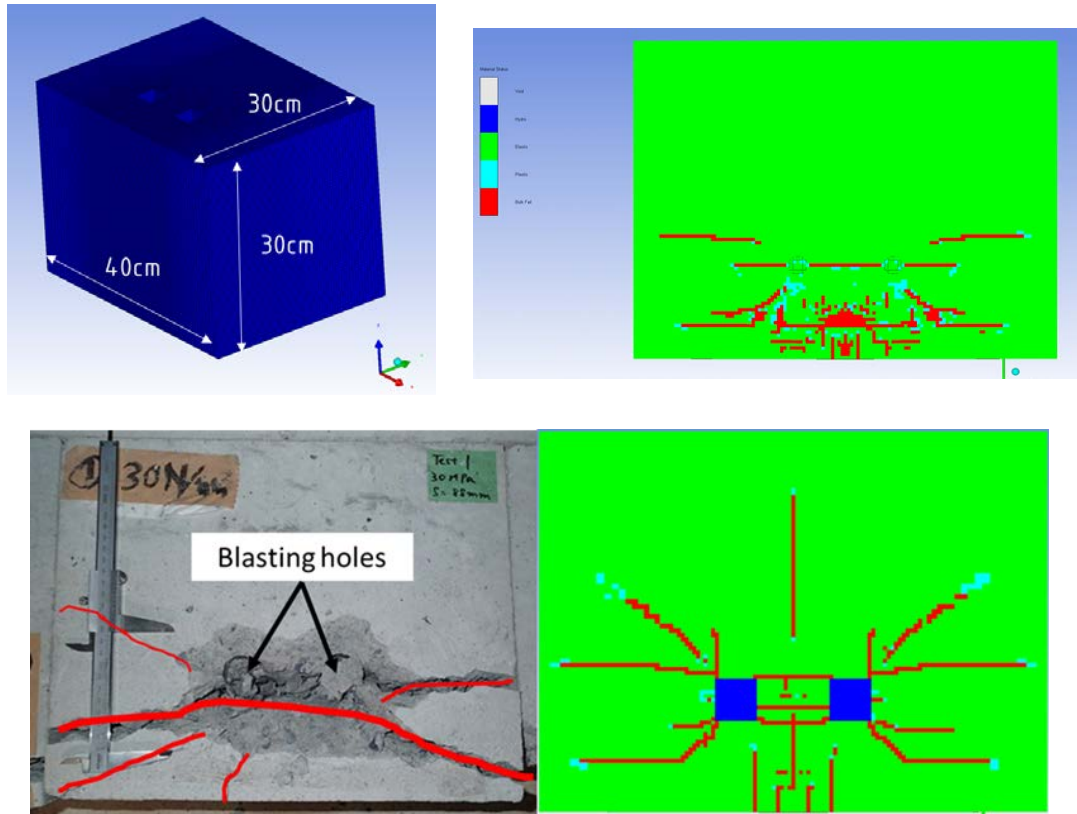


図4 室内発破実験のシミュレーションモデルおよび解析結果（上段）と実験結果との比較（下段）

次に、露天掘り鉱山において発破試験を実施し、岩盤状態および発破規格が起砕岩石の飛翔特性に及ぼす影響について検討した。まず、岩盤特性では岩石強度および岩盤内節理の状況が、発破規格では火薬原単位および最小抵抗線が起砕岩石の最大初速度に顕著な影響を及ぼしていることがわかった。次に、Rock Mass Rating 法を用いて得られた岩盤特性値、および発破規格としての火薬原単位と最小抵抗線を主要パラメータとして抽出し、起砕岩石の最大初速度の予測式を提案した。この予測式を用いることで、異なる切羽の岩盤状態および発破規格から発生する起砕岩石の最大飛翔距離の推定が可能となり、飛石災害を抑制するために発破規格を変更する際の指針として有用であることを確認した（表1参照）。さらに、岩盤内に存在する節理方向が起砕岩石の飛翔方向に及ぼす影響について検証し、岩盤内節理の走向が切羽面の走向に対し0度から30度あるいは60度から90度で存在する場合には、起砕岩石は切羽正面方向に飛翔し、岩盤内節理の走向が切羽面の走向に対し30度から60度で存在する場合には、切羽正面方向ではなく岩盤内節理の走向に対して垂直な方向に飛翔する傾向があることが明らかとなった。

起砕物最大飛翔距離予測式

$$V_0 = 75.46 \times W - 1.83 \times B - 0.01 \times T_d - 0.09 \times K_{RMR} + 11.23$$

W : Powder factor [kg/t]
 B : Burden [m]
 T_d : Delay time [ms]
 K_{RMR} : RMR [-]

表1 起砕物最大飛翔距離予測チャート

Powder factor (kg/t)	Burden(m)	Delay time (ms)	RMR		
			60	70	80
0.15 ~ 0.16	1.5	0	194	173	153
		25	188	167	148
		50	182	162	143
		250	139	121	105
	2.0	0	172	153	134
		25	167	147	129
		50	161	142	125
		250	121	105	90
	2.5	0	152	134	117
		25	147	129	112
		50	142	124	108
		250	104	90	76

次に、種々の岩盤状態において発破規格の変更による起砕岩石の粒度制御方法について現場試験結果を基に検討を行っている。岩盤特性は、岩石強度および岩盤内節理の状況が起砕岩石の粒度に顕著な影響を及ぼすため、事前の定量的な評価が重要である。発破規格については、装薬量および最小抵抗線の変更により起砕物粒度の効果的な改善が期待できることが明らかになった(図5参照)。また、本研究で提案した起砕岩石の最大初速度の予測式を適用することで、飛石の発生リスクを抑制しつつ効果的な発破規格の変更が容易になると考えられる。さらに、適切な起爆秒時差を設定することで、起砕岩石の平均粒子径の改善が可能になるとともに、発破孔列中央から両端方向に起爆することで、発破孔列端から端への一方向起爆に比べて均等係数の小さい起砕岩石が得られることもわかり、起爆秒時差および起爆方向の変更により起砕物粒度の制御が可能になることが明らかとなった(図6参照)。

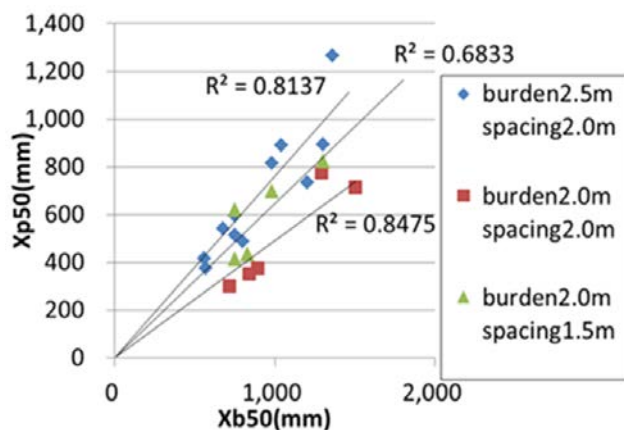


図5 発破規格(最小抵抗線&孔間隔)が岩石の起砕効果に及ぼす影響
(Xb50:起砕前の岩石(岩盤)の積算50%平均粒子径、Xp50:起砕物の積算50%平均粒子径)

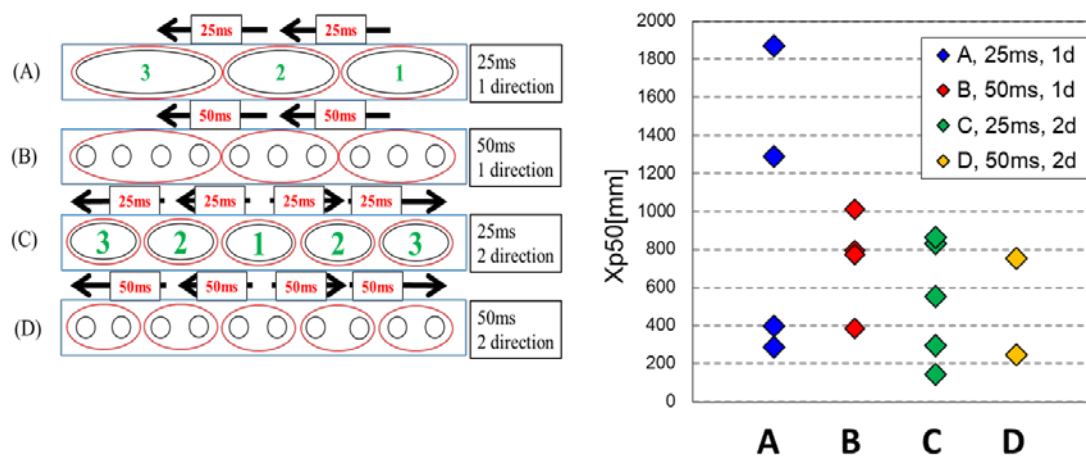


図6 起爆方向および起爆秒時差が岩石の起砕効果に及ぼす影響
(Xp50:起砕物の積算50%平均粒子径)

本研究では、以上に示す一連の室内実験、数値シミュレーションおよび現場試験の結果を基に、環境負荷低減型コンパクトブラस्टィングシステムの設計指針を提案した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Yoshiaki TAKAHASHI, Tei SABURI, Takashi SASAOKA, Sugeng WAHYUDI, Shiro KUBOTA, Hideki SHIMADA, Yuji OGATA, Fundamental Study on Rock Fracture Mechanism Induced by Blasting in Small-Scale Blasting Tests, Science Technology and Energetic Materials, peer-reviewed, Vol. 79, No. 6, 2018, pp. 175-179.
- ② Takashi SASAOKA, Yoshiaki TAKAHASHI, Sugeng WAHYUDI, Akihiro HAMANAKA, Hideki SHIMADA, Tei SABURI, Shiro KUBOTA, Study on Prediction of Ground Vibration in Consideration of Damping Effect by Fragment in the Rock Mass, Journal of Geoscience and Environment Protection, peer-reviewed, Vol. 6, No. 6, 2018, pp. 1-11.

〔学会発表〕（計 15 件）

- ① 笹岡 孝司 他、露天掘り鉱山における起爆秒時差を用いた発破振動制御手法に関する検討、資源・素材学会春季大会、2019 年
- ② Takashi SASAOKA et al、 Study on the Effect of Delay Time and Direction on Ground Vibration、International Symposium on Earth Science and Technology 2018、2018
- ③ 笹岡 孝司 他、発破規格が応力波の伝播挙動および破壊メカニズムに及ぼす影響に関する検討、資源・素材関係学協会合同秋季大会、2018 年
- ④ 笹岡 孝司 他、DIC によるひずみの可視化と室内発破試験における亀裂の進展挙動に関する研究、第 39 回西日本岩盤工学シンポジウム、2018 年
- ⑤ 笹岡 孝司 他、発破による応力波の伝播挙動と破壊の発生に関する実験的・数値解析的検討、平成 30 年度資源・素材学会九州支部春季例会、2018 年
- ⑥ 島田 英樹 他、飛石の発生メカニズムとその制御に関する基礎的研究、第 77 回石灰石鉱業大会、2018 年
- ⑦ 笹岡 孝司 他、室内小規模発破試験による強度特性が亀裂進展挙動に及ぼす影響に関する研究、資源・素材学会春季大会、2018 年
- ⑧ Yoshiaki TAKAHASHI et al、 Dynamic strain measurement by means of digital image correlations method for study on rock fracture mechanism induced by blasting、International Symposium on Earth Science and Technology 2017、2017
- ⑨ Kotaro YAMAGUCHI et al、 Experimental Study on the Effect of Blasting Patterns and Rock Mass Conditions on Flying Behavior of Fragmented Rock in Open Pit Metal Mine、The 9th International Conference on Explosives and Blasting、2017
- ⑩ Yoshiaki TAKAHASHI et al、 Study on Rock Fracture Mechanism Induced by Blasting and the Effect of Delay Time with Mortar Block、5th Asia-Pacific Symposium on Blasting Techniques and 9th international Conference on Physical Problems of Rock Destruction、2017
- ⑪ 笹岡 孝司 他、露天掘り鉱山における起砕物挙動予測に関する研究、資源・素材関係学協会合同秋季大会、2017 年
- ⑫ 山口 耕太郎 他、岩盤内き裂を考慮した発破挙動の伝播特性に関する研究、第 38 回西日本岩盤工学シンポジウム、2017 年
- ⑬ 西森 光輝 他、起爆秒時差および起爆方向が発破振動と起砕物粒度に及ぼす影響に関する研究、資源・素材学会九州支部春季例会、2017 年
- ⑭ 笹岡 孝司 他、室内小規模発破試験による岩石の破壊メカニズムに関する検討、火薬学会 2017 年度春季研究発表会、2017 年
- ⑮ 高橋 良堯 他、発破による岩石の破壊メカニズムに関する室内実験的検討、資源・素材学会春季大会、2017 年

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：島田 英樹

ローマ字氏名：(SHIMADA、hideki)

所属研究機関名：九州大学

部局名：大学院工学研究院

職名：教授

研究者番号（8 桁）：70253490

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：久保田 士郎

ローマ字氏名：(KUBOTA、shiro)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。