

## レーザーによる岩盤斜面の切り取り技術の開発

### DEVELOPMENT OF LASER ASSOCIATED CUTTING METHOD FOR DANGEROUS ROCK SLOPE

池田 憲二\*、西村 克弘\*、佐藤 京\*、○里 優\*\*

Kenji IKEDA, Katsuchiro HISHIMURA, Takashi SATOH, Masaru SATO

A new construction method by laser excavation is studied. First, the fundamental experiments were conducted for investigating the interaction between rocks and lasers. Next, some parts of lasers were improved. Two beams generated by the YAG laser system are coupled to gain the 6kw beam. This is applied through a long focus lens on the rock excavated from the similar place in which the large-scale rock failure occurred. 10-minute irradiation produced a small hole of 230mm depth and 20mm in diameter. The same experiment is achieved out of doors to demonstrate laser boring has a practical use.

#### 1. はじめに

岩盤を素早く掘削し地下資源を効率よく採取したり、得られた大規模な地下空洞を軍事基地や生活空間に用いようとする試みは、産業革命以来多くの人々の心を捉えてきた。当時より現在にいたるまで、最も効率の高い掘削方法として定着しているのは、ダイナマイトに代表されるような爆薬を用いる方法である。科学技術の進歩にしたがい、種々のエネルギーを掘削に活用することが考案され具体化されてきたが、爆薬を超える効率を有する方法は未だ見出されていない。

近年になり、レーザーの発明によって性質の良いエネルギービームを手に入れることができるようになった。レーザーは、これまで加工が困難であった材料や部品を、その極めて集中されたエネルギーにより見事に切断し、一方では、SDI 構想などの軍事利用でも主役の座に躍り出た。大出力のレーザーの開発が急速に進められ、現在では数 10kw のレーザー装置が実用化されている。

他方、1996 年には北海道の豊浜トンネルで大規模な岩盤崩落が発生し、20 人の貴重な命が失われた。このような事故を防ぐために、北海道開発局では全道規模で危険な斜面の検査や補修を進めている。しかしながら、岩盤斜面の中には急峻であったりオーバーハングしているものなど、一般の施工法では危険な岩塊の除去が不可能なものもある。さらには、一般的な斜面であっても、切り取り作業の際のドリルの振動によって、予期せぬ崩壊が発生することもあった。そこで浮上してきたのが、岩盤の切り取りにレーザーを応用することである。

レーザーは、他の施工機械に比べ二つの長所を有している。一つは、レーザーが騒音や振動を発生しないことであり、もう一つは、レーザービームの照射に際して反力が必要ないことである。二つ目の特徴は、レーザーが高所での穿孔作業や施工機械の軽量化に適していることを意味している。

このような観点から、レーザーによる穿孔を用いた新しい施工法の研究開発を行った。最初に、岩石とレーザーの相互作用を調べるために、基礎的な実験を行った。次に、実際の施工への応用を目指し、レーザーにいくつかの改良を施した。最後に 2 本のビームを合成して得た 6kw の YAG レーザーにより、大規模岩盤崩落を引き起こしたものと同様の岩石に照射した。10 分の照射で、直径 20mm、深さ 230mm の穴を開けることができた。同様の実験を屋外でも行い、レーザー穿孔が実用的であることを確認した。

\* 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室

\*\* 正会員 工博 (株) 地層科学研究所

## 2. 既往の研究成果

レーザーを岩盤に照射する研究は、1960年代から1970年代にかけて米国などで盛んに行なわれた。

Carstens と Brown<sup>1)</sup> (1971)は最大出力 5kW のレーザー装置を用い、岩石を移動させながら花崗岩など3種類の岩石にレーザー光を照射する実験を行なっている。岩石の移動速度が小さくなるにつれ、掘削深さは大きくなるが、単位掘削深さ当たりに必要なエネルギー量を表わす Specific Kerfing Energy は大きくなり、掘削効率は低下している。

Jurewicz ら<sup>1)</sup> (1974)は、レーザー光の出力が 16.5kW まで、レーザー光の移動速度が 125cm/s までの範囲で実験を行なった。すべての実験において、レーザー光の出力を大きくすると Specific Kerfing Energy は大きくなり、掘削効率は低下する。熔融したドロスをさらに熱したり気化させたりすることにエネルギーが消費されるからである。移動速度を速くするとほとんどの場合 Specific Kerfing Energy は小さくなり、掘削効率が上昇する。また、Jurewicz ら<sup>1)</sup> は CO<sub>2</sub> ガスジェットを使って熔融した岩石を取り除きながら掘削するときに、どの程度のガスジェットの圧力が適当かについて実験を行なった。それによると、0.7MPa のときが最も効率がよい。ガスジェットの圧力がそれ以下であると熔融した岩石が取り除かれず、それ以上であるとガスジェットによる冷却効果が掘削効果を低下させるためである。

## 3. 基礎研究

### 3. 1 岩石の種類とレーザーの効果

最初に行った実験は、岩石の種類によるレーザーの照射効果の違いと、これに及ぼす水分の影響を調べることを主眼としたものである<sup>2)</sup>。用いたレーザーは、東芝製の 1.2kw のものである。予備実験によりレーザー出力と照射速度ならびにフォーカスを定め、全ての岩石について統一した。実験の結果、レーザーの照射効果に関しては岩石が大きく3つに分類できることがわかった(図-1~3)。

#### (1) 水の影響が大きいもの

固結した粘土は、含水させることにより爆発的に削溝される傾向にある。予備実験で用いたシルトモルタルにおいても同様な傾向が見られた。これらに共通する点は、粘土鉱物が多く含まれ、また空隙率が比較的大きいことであり、このような岩石では空隙や鉱物に含まれる水が急激に気化し、爆発的な破壊を生ずると考えられる。

#### (2) 熔融するもの

大谷石など比較的軟らかい岩石は、含水状況に拘らずレーザー照射により表面が熔融し、爆発的な破壊はほとんどしなかった。これらの岩石に共通する点は、シリカに富み、また空隙率が比較的大きいことで、このような岩石ではシリカ質の熔融に多くのエネルギーが使われていると考えられる。

#### (3) 割れるもの

花崗岩などの極めて固い岩石は他に比べて熔融せず、レーザー照射により試料全体が破碎された。これらの岩石は空隙率が低く剛性も高いのが特徴であり、このような岩石は、急激な熱膨張によって発生した大きな引張応力により破碎されるものと考えられる。

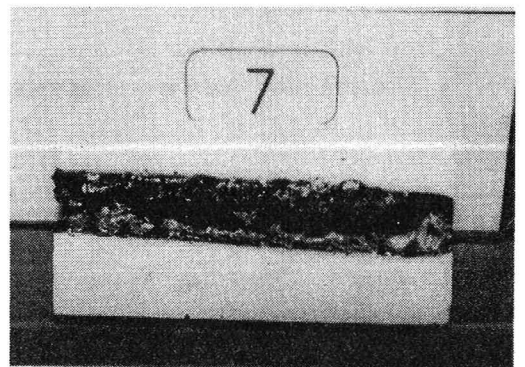


図-1 レーザー照射後の泥岩

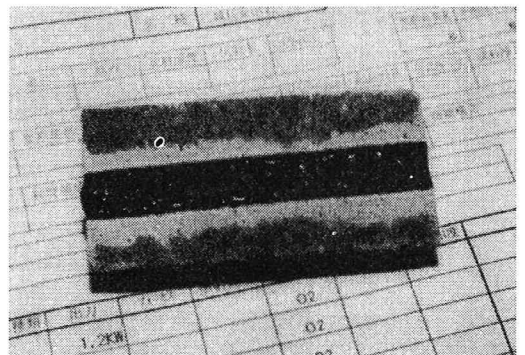


図-2 レーザー照射後の凝灰岩



図-3 レーザー照射後の石灰岩

### 3. 2 高出力レーザーの効果

同様の種類の岩石を用い、三菱重工製の20kwレーザーによって照射実験が行われた。結果は、想像を超えた破壊力がレーザーにはあることが示された。最も効果があった岩石では、アシストガスなどの補助手段を全く用いず、φ1cmのフォーカス、100cm/minの移動速度で15cmの掘削深さを達成した。このことは、高出力のレーザーが掘削工事などの現場で平易に用いることができれば、正に無反力掘削が可能となることを示している。

### 3. 3 掘削効率の定量的評価

予備実験の結果から、本実験では(2)の溶融するタイプの岩石と(3)の割れるタイプの岩石を用いることとした。一般的な認知度を考慮した結果、(2)の岩石からは来待砂岩、(3)の岩石からは稲田花崗岩を選定した。岩石ブロックはすべて25cm(縦)×25cm(横)×15cm(高さ)の直方体とし、自然乾燥状態にして実験を行なった。両岩石の物性値を表-1に示す。

表-1 来待砂岩と稲田花崗岩の物性値

	来待砂岩	稲田花崗岩
一軸圧縮強度 (MPa)	38	180
圧裂引張強度 (MPa)	3.0	5.8
ヤング率 (GPa)	8.0	6.5×10
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.98	2.63
空隙率 (%)	22.6	0.75
比熱 (cal/g/cdeg)	0.003 ~ 0.008	0.004 ~ 0.009
熱伝導率 (cal/cm/s/cdeg)	0.2	0.13~0.2

掘削深さは、岩石ブロックを切断しノギスにより測定した。稲田花崗岩の場合は、組成鉱物によるレーザー光吸収率の違いや破碎した粒隕の大きさの違いなどから、場所により掘削深さに最大3倍程度の差異が生じたため、掘削深さを数ヶ所において測定し、その平均値を求めた。レーザー光の出力Pと掘削深さDの関係を図-5に示す。いずれの岩石、あるいは移動速度においても、レーザー光の出力が大きくなると掘削深さはそれに比例して大きくはならず、効率が低下している。例えば来待砂岩では、岩石の移動速度が1.7単位深さを掘削するのに必要なエネルギーは、レーザー光の出力が大きくなるほど増加する。

### 3. 4 岩盤の切り取りを目指した技術開発

#### 3. 4. 1 技術開発課題

これらの基礎的な検討に基づき、屋外で岩盤に対しレーザーを照射するシステムの開発を行った。巨大な岩盤を切り取る際には、レーザーにより複数の孔を空け、ここに破碎材などを挿入し、ブロック状に割ることが最も効率がよい。そこで、レーザーで効率よく穿孔する技術の開発を目標とした。また、基礎研究により、溶融ドロスがレーザーの照射効率を低下させることが明らかとなっていることから、岩盤に対しては水平より5°上向きに照射することで、ドロスを排出しながら穿孔することとした。また、ファイバー伝送が可能であることから、YAGレーザーを用いることとした。ただし、実際の岩盤に穿孔するためには、次のような課題を解決していく必要がある。

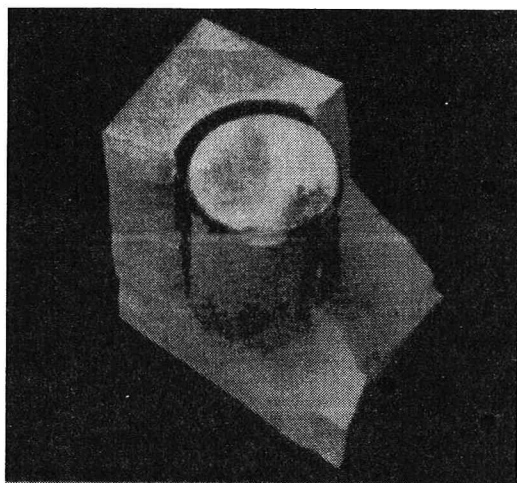


図-4 20kw照射後のシルトモルタル

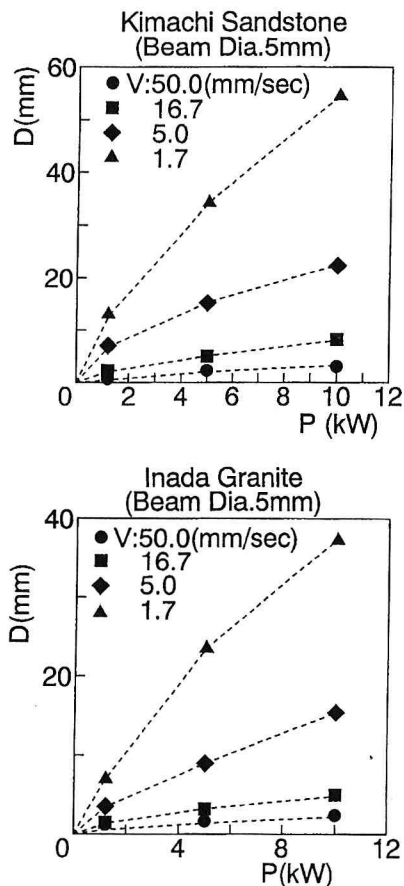


図-5 レーザ出力と掘削深さの関係

- (1) レーザーをほぼ平行光として照射し、遠方からの穿孔を可能とする。
- (2) レーザーを合成して、出力を向上させる。
- (3) レーザー装置を屋外で作動させる。

### 3. 4. 2 疑似平行光の作成

岩盤のように起伏に富んだ形状に対しては、短い焦点距離では安定した照射が難しい。そこで、焦点距離 4000mm の集光レンズを用い疑似平行光を作り出した (図-6)。ビーム径を実測した結果、4m 離れた点で 20mm であり、レーザー光は片側約  $0.06^\circ$  の角度で照射され、平行光に近いビームとなっていることが確認された。

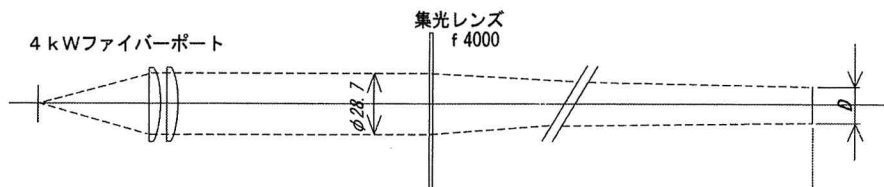


図-6 長焦点レンズを用いた疑似平行光の作成

### 3. 4. 3 レーザーの合成

岩盤に穿孔する際には、施工速度などの面から、レーザーの出力は大きければ大きい程良い。しかし、単体の YAG レーザーの出力は数 kw が現状であり、大きな出力を得るためにはレーザー光の合成が必要となる。

本研究では、4kW の疑似平行光を包み込む形で、別の 2kW のレーザー光を合成させる方法を採用した。2km のレーザー光はコリメートレンズを介して平行光とした後に、円錐状のプリズムを組み合わせた光学系によってリング状にした。二つのレーザー光を同軸状に合成するために、穴のあいたミラーを製作した。疑似平行光はその穴を通し、もう一方のリング状のレーザー光をミラーで折り返して合成した。

光学系部品については全て YAG 用の AR コート (反射防止用コーティング) を施してレーザー光の透過率を上げているが、散乱光や戻り光によって光学系の温度が上昇する可能性があり、保護のために水冷用の冷却ブロックを設けた。また、ハウジング内にもクリーンエアーを流して粉塵の進入を防ぐ機構を設けた。

合成器の外観を、図-7 に示す。なお、用いたレーザー装置は、住友重機械工業株式会社製の MW2000 (2kw) と MW4000 (4kw) である。

合成して得られた 6kW のレーザー光を用い、穿孔試験をおこなった。用いた岩石は、崩落が生じた箇所での岩石と同じ種類の凝灰岩とした。実験の結果、ビーム径 20mm、5 分間の照射で 180mm、10 分間の照射で 230mm の穿孔が可能であることがわかった。照射時間と穿孔深さの関係を図-8 に、断面形状を図-9 に示す。

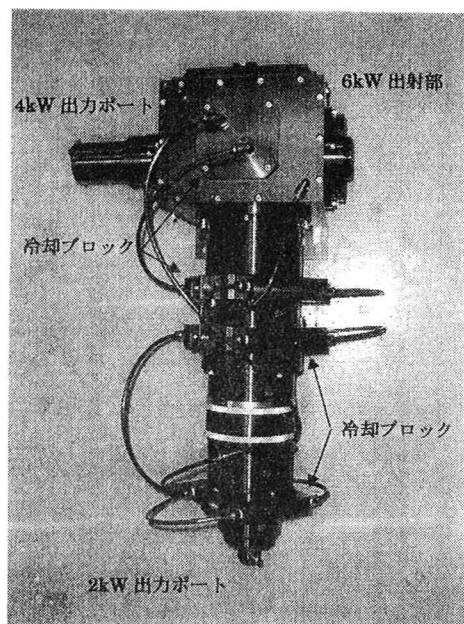


図-7 レーザーの合成器

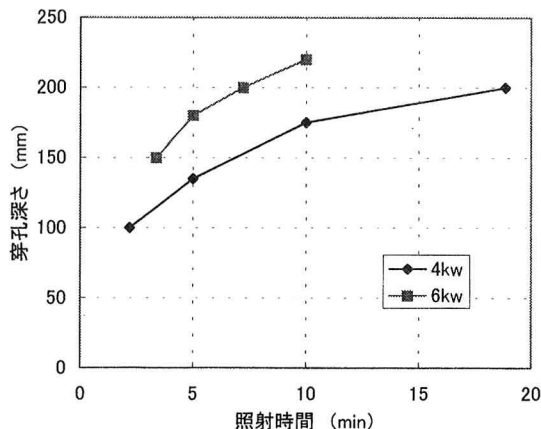


図-8 レーザ照射時間と穿孔深さの関係

### 3. 4. 4 屋外実験

次に、屋外で、かつ自然岩石に対し、レーザー照射による穿孔をおこなった。実施場所は、北海道開発局開発土木研究所の角山実験場（北海道江別市）である。実験場には、重量 4tf の自然岩石が搬入され、架台に固定された。

10 トンウィング車には、YAG レーザ電源及び発振器、4 トンウィング車上には、発振器冷却用チラー、レーザーを稼働させるためのディーゼル発電機が、それぞれ搭載された。主要機器を、表-2に一覧する。

レーザービームが不用意に照射されないように管理区域を設け、装置的にも各種安全機構を付加した。また、12月であることから、チラーから循環される冷却水には不凍液を投入（濃度 20%）し、凍結防止を図った。

実験では、1分及び4分間の連続照射を行い、屋外でのレーザービーム出力の安定性と穿孔能力を調べた。各照射条件での穿孔深さは、照射時間1分間で70mm、4分間で110mmであった。この結果は、室内で得られた値と比較しても大きな差異がなく、システムとして室内の条件が再現されたことが確認された（図-10）。

表-2 レーザによる岩石への穿孔実験主要機器

名称	機種及び性能	使用台数
YAG レーザ発振器	MW4000 最大出力:4kW	1台
発振器冷却用チラー	T型 301 空冷式	2台
光ファイバ	ファイバ径:0.6φ、長さ:15m&30m	各1本
穿孔合成ハウジング	4+2kW 合成焦点距離 4m (20mm φ)	1台
コンプレッサ	100 l/min(エアナイフ、合成ハウジング冷却)	1台
ディーゼル発電機	SDG300S 60Hz・出力 240kVA	3台

### 4. おわりに

これまでの実験を通じて、レーザーが岩盤斜面の切り取りなどに適用可能であり、かつ有望なものであることが理解できた。ただし、実用化に向けては数多くの問題を解決していかなければならない。

第一の課題は、他の掘削方法との複合効果によって、レーザー掘削の効率を向上していく方法の模索である。レーザー照射により得られるエネルギーは、入力したエネルギーの数%程度であり、レーザー単体で掘削を行う際にはこの低効率が障害となる。これを排除する方法の一つは、レーザーと他の掘削方法とを組み合わせ、その相互作用によって掘削性能を向上することである。例えば、レーザーで岩盤に穿孔し、これに破砕材などを挿入して制御破壊するものである。このような方法では、装置の軽量化や省電力などにより総合的な掘削効率は向上する可能性がある。

第二の課題は、レーザー装置自身の問題である。レーザーの高出力化に向けた研究は進みつつあるものの、レーザーが用いられるのが主として室内であるために、レーザー装置の可搬性などにはあまり配慮されていない。実際の岩盤への照射は、言うまでもなく斜面や地下の空洞などの工事現場で行われることから、掘削装置は小型で運搬が容易であり、手足のように使いやすいものである必要がある。今後、このような観点での研究開発を積極的に進めることで、レーザーの用途も大きく広がるとと思われる。

#### 参考文献

- 1) WILLIAM C. MAURER, ADVANCED DRILLING TECHNIQUES (1980)
- 2) 高谷 他：CO2 レーザを用いた岩盤掘削に関する研究，資源素材学会秋季大会，pp. 40-41，1995.

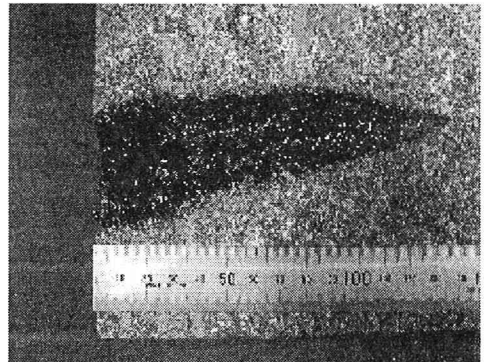


図-9 レーザによる穿孔断面

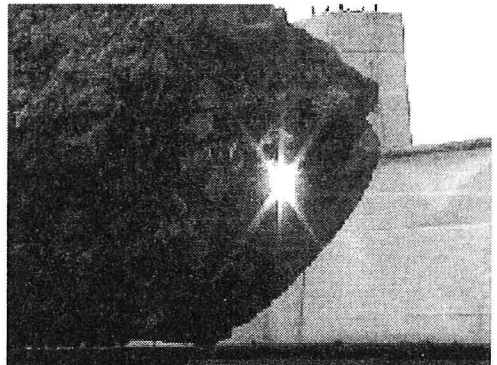


図-10 屋外でのレーザー照射実験