

VI-11

レーザを用いた岩盤制御破壊に関する実験的研究

北海道開発局開発土木研究所	○ 正 会 員	西村 克弘
北海道開発局開発土木研究所	正 会 員	池田 憲二
北海道開発局開発土木研究所	正 会 員	佐 藤 京
住友重機械工業株式会社		吉川 光昭
住友重機械工業株式会社		黒 沢 隆
地 層 科 学 研 究 所	正 会 員	里 優

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により行われてきている。これらの施工法として、最も効率の高い掘削技術として定着しているのが、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と思われる。

現在では、レーザ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切断などの精密加工を可能とした。また、大出力のレーザの開発が急速に進められ、現在では数 10kw のレーザ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点検や防災工事を進めている。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困難と思われるものもある。さらには、一般的な斜面であっても、切り取り作業の際、ドリル等の振動によって、予期せぬ崩壊が発生することもある。そこで、著者らは岩盤の破碎にレーザの応用を考案している。

岩盤等構造物の破壊においてレーザは、現在使用している施工機械に比べ二つの長所を有している。一つは、レーザが騒音や振動を発生しないことであり、もう一つは、レーザビームの照射に際して反力を必要としないことである。二つ目の特徴は、レーザ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が有る。

このような観点から、レーザによる穿孔を用いた新しい施工法の研究開発を行っている。そこで、本論文ではこれまで行った岩石とレーザの相互作用を調べるために行った基礎的実験の結果について取りまとめている。

1, 基礎実験

ここでは、これまで行われてきて基礎的実験について取りまとめている。

1-1, 試料

実験に用いた岩石は、国道 229 号積丹半島付近で採取した凝灰岩および石材として使用されている花崗岩である。図-1 に代表的試料を示す。

凝灰岩は、乾燥密度=2.1~2.4kgf/cm³、有効間隙率=10~25%、一軸圧縮強度=100~400kgf/cm²である。



図-1 実験後試料(凝灰岩)

Study on 英文タイトル

by Katsuhiko NISHIMURA, Kenji IKEDA, Takashi SATOH, Mitsuaki YOSHIKAWA and Masaru SATO

1-2、 試験装置

レーザの種類には、レーザ媒質として固体、気体、色素、化学等の種類が存在しかつ励起源として、放電、電流、フラッシュランプ等といったものがあり様々な種類がある。本研究においては、照射対象が岩体であることから、比較的高出力のものが必要であると考えた。この場合、固体レーザでは YAG（イットリウム・アルミニウム・ガーネット）、気体レーザでは炭酸ガスそして化学レーザとしてヨウ素が上げられる。しかし、現場施工方法に適用するための重要な条件として、対象物が屋外に有るため搬送性に優れかつ照射対象である斜面に比較的エネルギー損失が少なく、照射時の安全性がより高いものが不可欠であると考えられる。このことから本実験では、光ファイバでレーザ光が伝送可能な YAG レーザを選定した。

本実験で使用した YAG レーザの仕様を以下に示す。

- ・最大平均出力；4,500W（加工点では、3,500W）
- ・出力波形；連続波、5～500Hz のゲーティング
- ・ビームクオリティー；25mm.mrad
- ・ファイバー径；0.6mm
- ・加工レンズ；f200 焦点距離 200mm
- ・アシストガス；酸素および空気（溶融物除去手法の基礎実験に使用）

1-3、 基礎実験

基礎実験は大きく分けて、2 種に分類できる。1 つは、岩石とレーザの相互作用を確認することであり、もう一つは溶融物の除去に着目している。岩石とレーザの相互作用を確認するために 3 つに区分し、下記に示す項目について着目した。¹⁾

実験 1；レーザのエネルギー密度と切断性能について

実験 2；レーザ照射時間と切断性能について

実験 3；レーザエネルギーと含水比について

次に示す実験 4 は、レーザを用いた岩盤制御破壊を想定しかつ実験 1～実験 3 で挙げられる課題点の解決方法を探るものである。また、上記実験 ¹⁾において切断による施工は、穿孔形の施工と比べ岩盤除去には適正でないと判断し、レーザを用いた穿孔について実験ケースを選定した。

実験 4；実験 1～実験 3 により発生したガラスドロスの除去の検討を行っている。

照射方向は横向きで同一箇所への連続照射である。表-1 にそのケースを示す。なお、対象岩石は凝灰岩である。

表-1 実験 4 のケース一覧

	照射角度 (°)	対象面でのビーム径(mm)	照射時間(min)	アシストガス (kg/cm ² G)	照射方向に対する移動
ケース 1	0	10	5	なし	なし
ケース 2	0	20	5	なし	なし
ケース 3	0	20	5	8	なし
ケース 4	0	20	5	8	20(mm/min)
ケース 5	5 上向き	20	5	なし	20(mm/min)

1-4、 実験結果

図-2～3 は、実験 1～2 の結果を取りまとめたものである。

これらの結果より、切断実験はエネルギー密度が高いものが良く切断されている。また、切断方向の移動速度が速くなるに従い、溶融深さが減少する。切断実験よりレーザーを用いた切断形岩盤除去工法は、現段階において、施工早さが非常に遅いことから実用的ではないと思われる。

次に図-4には実験3の結果を取りまとめたている。この実験での含水比の違いによる穿孔性能については、有意な差はみられなかった。切断実験においてもみられることであるが、穿孔実験においては、特に溶融したガラスドロスが照射対象面上に滞留しレーザーエネルギーを吸収し、穿孔性能を低下させていたと思われる。

これらの実験について福井らは、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、レーザー出力と照射速度ならびにフォーカスを定めて実験を行っている²⁾。この実験の結果、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。

(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。また、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) 溶融するもの

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溶融し、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溶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溶融せず、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。

以上の結果は、本実験や予備実験等とほぼ一致する。本実験で用いた試料は、凝灰岩および花崗岩である。凝灰岩は、爆発現象はほとんど発生せず溶融による切断および穿孔が行えた。花崗岩は、溶融は伴うものの爆発現象を起こし、その爆発と共にドロスが飛散するため凝灰岩に比べ付着量が少ない。

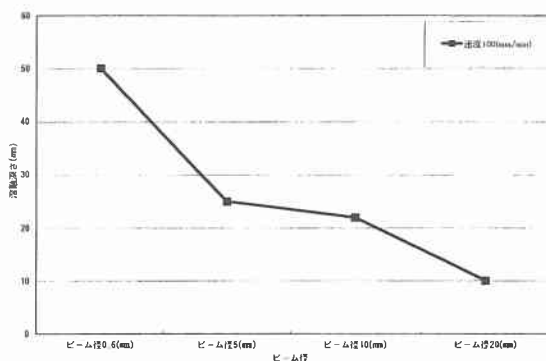


図-2 ビーム径と溶融深さ（切断実験）

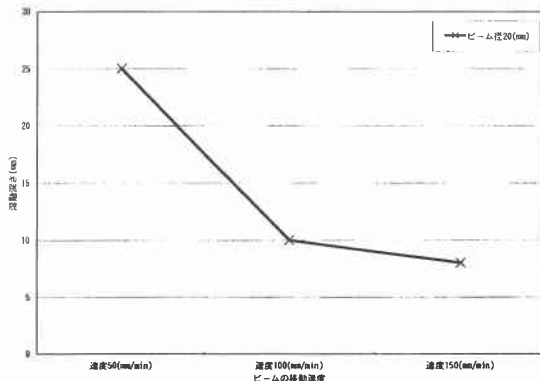


図-3 切断速度と溶融深さ（切断実験）

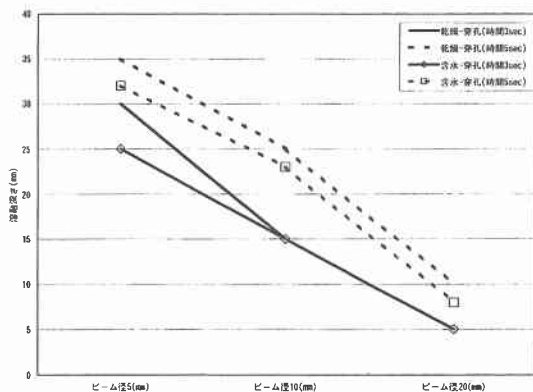


図-4 ビーム径と溶融深さ（穿孔実験）

表-2 には実験4のガラスドロスの除去に着目した実験結果を示している。この実験で明らかとなったのが、ガラスドロスが穿孔部より流れ出て照射面に対して良好なレーザエネルギーを与えることがわかった。このうちケース5の上向きに 5° レーザを傾けた場合のガラスドロスの流出が他のケースと比較して良好となることがわかった。しかし、全ケースにおいて開口部より流れ出たガラスドロスは直ちに冷却され粘性が上昇し堆積が著しくなる。これにより穿孔内のガラスドロスの流出を妨げ、穿孔能力の低下を招く結果が得られた。これは、これまでの照射方法が、ある点に対してレーザ光を集中させる方法であったため、開口部付近にレーザが照射されない部分が発生する(図-5参照)。これにより、ガラスドロスが開口部付近で冷却され粘性が上昇する。つまり、内部で発生したガラスドロスが開口部付近でせき止められ、穿孔の進展を妨げると考えられる。

また、強制的にガラスドロスを除去する目的で高圧ガスを吹き付けたが、局所的な除去であり逆に穿孔の進行を妨げる結果となった。

2. 新技術の開発

2-1. 技術開発の課題

これまでの基礎的な検討に基づき、岩盤を切り取るなどの除去工法に適用させる際には、レーザにより複数の孔を空け、ここに破碎材などの補助工法と組み合わせてブロック状に割ることが現在の技術において最も効率が良いと判断される。そこで、レーザで効率よく穿孔する技術が必要と考えられる。しかし、基礎研究により、ガラスドロスがレーザの照射効率を低下させることが明らかとなっている。これは、実験4により岩盤に対しては水平より 5° 上向きに照射することで、ガラスドロスの排出をある程度良好に行えることが確認されていたが、作業性の向上を検討する場合、出力の向上がもっとも重要な課題と考えられる。

そこで、実際の岩盤に穿孔するための課題を抽出しまとめると次の項目が挙げられる。

- (1) レーザをほぼ平行光として照射し、穿孔内でのレーザ照射部のエネルギー均一化を計る。
- (2) 出力を向上させる。
- (3) 低温下での作業を考慮。

2-2. 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。また、穿孔内部でガラスドロスが冷却され、ガラスドロスの流出を妨げている。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、レーザ光は片側約 0.06° の角度で照射され、比較的平行光に近いビームとなっていることが確認された。

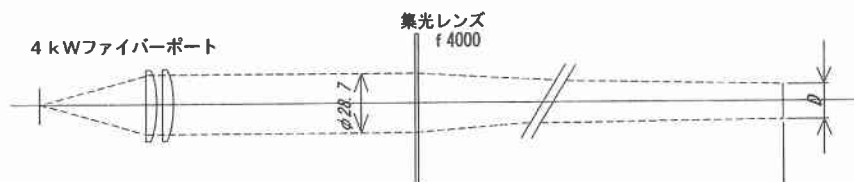


図-6 長焦点レンズを用いた疑似平行光の作成

表-2 実験4で得られた溶融深さ

実験ケース	溶融深さ(mm)
ケース1	100
ケース2	80
ケース3	80
ケース4	90
ケース5	140

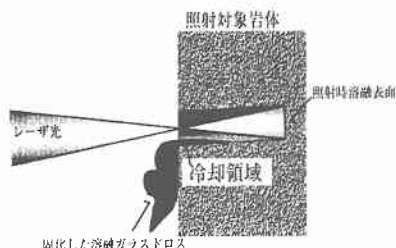


図-5 ガラスドロスの冷却域

2-3, レーザの合成

岩盤に穿孔する際には、施工速度などの面から、レーザの出力はより大きい程良い。しかし、単体の YAG レーザの出力は数 kW が現状であり、現在の技術レベルでの出力向上は、レーザ光の合成を行うことが現実的であると考えられる。

本研究では、4kW の疑似平行光を包み込む形で、別の 2kW のレーザ光を合成させる方法を採用した。2kW のレーザ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、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。

2-4 合成器を用いた穿孔実験

合成して得られた 6kW のレーザ光と 4kW 単体のレーザを用い、穿孔試験をおこなった。用いた岩石は、凝灰岩である。また、照射径を 20mm、照射角度を 5° 上向きに設定し照射時間をパラメータとしている。

実験ケースを表-3 に示す。

なお、用いたレーザ装置は、住友重機械工業株式会社製の MW2000(2kw)と MW4000(4kw)である。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 220mm の穿孔が可能であることがわかった。4kW に比べ穿孔性能が平均で約 1.3 倍となっている。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。

3, レーザ屋外実験

これら基礎的実験より得られた結果を用いて、自然岩塊に対して照射を試みた。これらは、実際に北海道で施工する際に考慮しなければならない、冬季温度低下時の施工機械の実施テストを含んでいる。

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。照射対象岩塊は、重量 4tf の自然岩石で成型は行っていない。

準備した施工装置は、YAG レーザ電源、発振器および発振器冷却用チラーをウィング式トレ

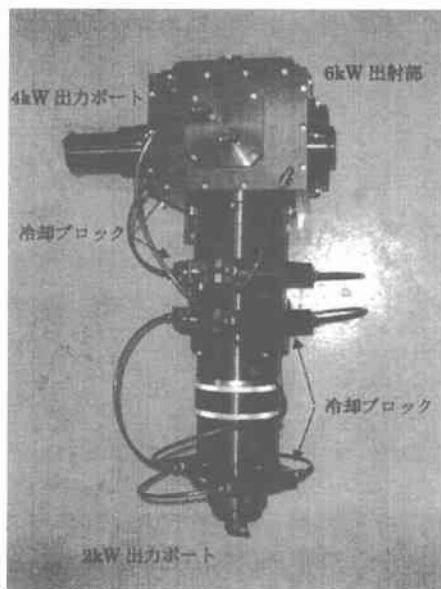


図-7 レーザの合成器

表-3 合成器を用いた穿孔実験

出力(W)	照射時間(sec)
4	132
4	300
4	600
4	1132
6	202
6	300
6	433
6	600

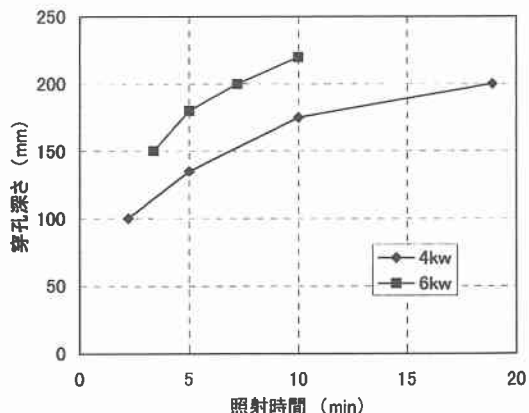


図-8 レーザ照射時間と穿孔深さの関係

ーラに積載し温度低下を防ぐよう内部に暖房設備を搭載している。また、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。主要機器を、表-4 に示す。

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(図-10)、装置に関して改良すべき点は、当初考慮していたもので十分であると考えられる。

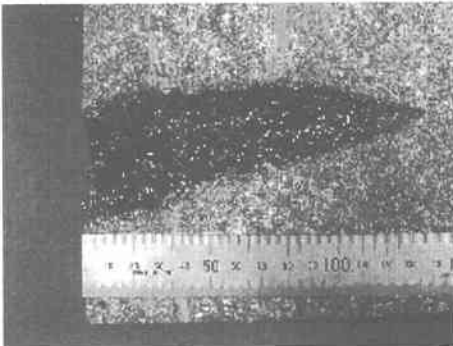


図-9 レーザによる穿孔断面

表-4 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 :0.6mm , 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、まとめ

これまでの実験より、レーザーが岩盤斜面の切り取りなどに適用可能と考えられる。ただし、実用化に向けては、施工時間の短縮など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。これを排除するには、ガラスドロスを効率的に除去することやレーザーと他の掘削方法とを組み合わせを用いて掘削性能を向上することである。

第二の課題は、レーザー装置の出力向上である。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、斜面や地下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ること、さらには遠隔操作性が高いことなどが必要である。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思われる。



図-10 屋外でのレーザー照射実験

参考文献

1)佐藤昌志,三田村浩 他:レーザー光を用いた岩盤制御破壊に関する基礎実験,第 54 回土木学会年次学術講演会,1999.9
2)福井勝則,高谷 秀 他:CO2 レーザー光を応用した岩盤の掘削に関する基礎研究",資源と素材 Vol.112No.8,PP.537-542