トンネル覆工コンクリート検査に向けたレーザー打音検査用 小型高出力高繰り返しレーザー装置の開発

岡田 大, 長谷川 登, 三上 勝大, 近藤 修司, 錦野 将元, 河内 哲哉

(国)量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門 関西光科学研究所(〒619-0215 京都府木津川市梅美台8-1-7)

Development of High-Power and High Repetition Rate Compact Pulse Laser System for Using the Laser Hammering Test of the Inspection of Tunnel Concrete

Hajime OKADA, Noboru HASEGAWA, Katsuhiro MIKAMI, Shuji KONDO,
Masaharu NISHIKINO, and Tetsuya KAWACHI

National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), 8-1-7 Umemidai, Kizugawa, Kyoto 619-0215

(Received April 1, 2012)

We developed a flash lamp-pumped Nd:YAG laser with 2 J, 50 Hz for a laser-hammering method that inspects tunnel-lining concrete. A simple and compact laser system with a thermal lens effect was compensated by an adjustment of the image tube with high impact resistance and stability. As a result of a 1.5-month outdoor practical test, this laser system was shown to be available for maintenance-free operation.

Key Words: High-power pulse laser, Outdoor-use, Laser hammering test, Concrete maintenance

1. はじめに

急峻な地形を有する我が国にはトンネルや橋梁を始めとするコンクリートを使用した社会インフラが数多くあるが、その多くに高経年化に起因する劣化が懸念されている。現在のコンクリート内部の検査方法の主流である打音法では、検査員がハンマーでコンクリートを叩いた際に発生する音の違いを耳で聞き分けることにより健全性を診断している。信頼性が高く多くの実績があるが、接触式であるため検査には時間がかかる事に加え、検査員に危険も伴う。日本のトンネルの総延長は鉄道・道路を合わせて約8,000 kmにも及び^{1,2)}、それらを全て定期的に点検するには膨大な時間とコストが掛かるため、高速、非接触、遠隔操作が可能な新しい定量検査技術の開発が盛んに行われている。我々はレーザー照射による打撃とレーザー振動計測による振動の検出を同時に行うことにより従来の人の手による打音法と同様の検査を遠隔で行うことが可能と期待される「レーザー欠陥検出法」³⁻⁶⁾の高速化にレーザー技術総合研究所と協力して取り組んでいる⁷⁻⁹⁾。

2. レーザーを利用したトンネル内部の遠隔検査

「レーザー欠陥検出法」では、打音法における「打撃」と「音の検知」を2つのレーザーを用いることで遠隔・非接触で行う (Fig. 1)。「振動励起レーザー (Hammering la-

ser)」は打音検査におけるハンマーに相当し、遠隔でコンクリートに強い衝撃を与えることのできる高強度のパルスレーザーである。コンクリート表面を僅かにアブレーションさせることで効率良くコンクリートを振動させることが可能である。コンクリートの内部に欠陥がある場合には、打音検査と同様に、その振動に変化が生じる。「振動計測システム (Laser vibrometer)」は打音検査における耳に相当し、コンクリート表面の微細な振動をレーザー干渉計により、遠隔・非接触で検出する。振動しているコンクリート表面から反射してくる信号光の周波数変調 (ドップラー効果) を参照光と干渉させることで計測し、表面の振動を計測する³⁻⁵⁾。本手法は、西日本旅客鉄道株式会社・公益財団法人鉄道総合技術研究所・公益財団法人レーザー技術総合研究所による先行研究により、実際のトンネルの覆工コンクリート内部の欠陥検出が打音検査と同様に可能であることが示されている⁶⁾。「レーザー打音法 (Laser Hammering Test: LHT)」とも呼ばれる本手法は、レーザー干渉計により計測する振動周波数領域が人間の可聴域と重複しているため、従来の打音法と高い互換性が期待でき、その高速化が望まれている。レーザー打音検査の検査速度は、Fig. 1 中の太線枠で示した「振動励起レーザー」、「走査装置 (Scan system)」、「振動計測システム」の動作速度によって決定される。本稿では特に量子科学技術研究開発機構が開発を担当している高繰り返し動作が可能な振動励起レーザーについて述べる。

Fig. 1 Schematic of laser hammering test.

3. レーザー打音検査用小型高出力高繰り返し レーザー装置の開発

3.1 レーザー打音検査の高速化に必要な振動励起 レーザーの性能

振動励起レーザーの能力は、レーザー打音検査において、コンクリートを加振する能力、検査速度、検査精度等に影響を与える。Table 1にレーザー打音検査の高速化に必要な振動励起レーザーの性能及び今回開発したレーザーの性能を示す。更に屋外での使用を前提とするため、装置の小型化や屋外における動作安定性なども必要となる。振動励起レーザーによって、深さ数 cm に位置する欠陥を検出するには、1 J 以上のパルス出力エネルギー、100 ns 以下のパルス幅、5 m 以上離れた位置において直径 5-10 mm 程度にビームを絞る集光性能が求められる^{6,8)}。集光強度が高すぎるとコンクリート面を破壊してしまうため照射強度を sub-GW/cm² 程度に抑えつつ、大きなエネルギーを投入する必要がある。検査速度を決定するレーザーの繰り返し数については、最大で 100 Hz 程度が適切となる。これは、レーザー打音検査では、可聴域の振動(具体的には 100 Hz-20 kHz)を計測対象としているためである。

Fig. 2 に、レーザーメーカーからカタログ品として販売されているフラッシュランプ励起レーザーのパルス繰り返し数とパルス出力エネルギーを示す。Fig. 2 中の点線は平均出力 100 W を示しており、これを越える製品はほとんど存在しないことが分かる。レーザー打音計測を高速化するには、前述のようにパルスエネルギーと繰り返し数のバランスが重要であり、Fig. 2 中の明るい領域の性能が必要である。高出力レーザーを高い繰り返しで動

Table 1 Requirement and performance of the developed hammering laser.

	Laser parameter	Requirement	Developed performance
Performance of the vibration of the concrete	Repetition rate	> 1 J/shot	2 J/shot
	Duration	< 100 ns	10 ns
	Focusibility	< 10 mmφ	7 mm × 10 mm
Inspection speed	Repetition rate	50-100 Hz	50 Hz
Outdoor use	Footprint size	< 2 m × 1 m	1.8 m × 0.7 m

Fig. 2 Commercial catalog specs of the flash lamp pumped high average power laser. Bright area shows suitable lasers for a hammering laser. the star indicates the performance of the developed hammering laser.

作させる場合、レーザー媒質の励起に伴う熱により生じる波面の歪み(熱レンズ効果等)の影響を低減する必要がある。この影響を低減する手法としては、波面を補正する誘導ブリルアン散乱による位相共役鏡(SBS-PCM)¹⁰⁾、冷却効率を高めてレーザー媒質内の熱勾配を低減するクライオスタットによる結晶の極低温冷却システム¹¹⁾等が挙げられる。平均出力 100 W を越えるレーザーでは、これらの手法が良く用いられるが、屋外での運用を前提とする振動励起レーザーでは、SBS-PCM への入射スペクトル線幅の安定性や結晶を極低温に維持する装置群が付加される事により、動作安定性の低下や装置の大型化が懸念される。本研究では、光学素子数を低減した単純な光学レイアウト設計による小型化と平均出力 100 W を両立するレーザーの開発を目指した。

Fig. 3 に移動を伴う運用を考慮したレーザー打音検査装置の概略を示す。装置本体は上部の振動励起レーザー、下部のレーザー振動計測部、先端のスキャナー部分から構成される(太線内)。Fig. 3 中の矢印はレーザーの出射方向を示し、トンネルの円弧に沿って計測位置を移動することを想定している。レーザー打音検査では、微小なコンクリート振動を計測対象とするため、振動励起レーザー及び外部からの振動が振動計測部に伝わらないように各部に防音・防振対策を施しており、現状では装置が静止した状態で振動計測を行う。スキャナーによりトンネル内壁の円周部に沿った検査が可能であるが、トンネル内での移動を伴う運用のために、レーザーの電源、冷却装置等も含めた装置全体がトンネル内に導入可能な車両に搭載可能であることが求められる(STOP & GO による計測)。例えば、一般的な車両の荷台(4 t トラック: 6.2 m × 2.1 m)に搭載し計測を行うためには、装置本体の寸法はその 1/4 程度の長さ 3 m、幅 1 m 以下であることが望ましい。筐体内での防振・耐衝撃性能、ス

Fig. 3 Laser hammering test system on a vehicle.

キャナー部分の大きさを考慮すると振動励起レーザーは、長さ2 m以下、幅0.7 m以下の光学定盤上に収める必要がある。

3.2 光学素子の固定手法に関する耐衝撃性の検討

レーザー打音装置は、検査対象であるトンネルまでの長距離輸送や、STOP & GOによる計測の際に低速ではあるが移動することが想定される。レーザーシステムを構成する光学素子は、周辺環境からの振動等の小さい力に加えて、衝突による衝撃等の大きな力に晒される可能性があり、耐衝撃性も重要課題となる。Fig. 4(a), (b)に、レーザー内蔵のポジションセンサ(駿河精機製C400-C016S/K55)を使用した耐衝撃試験の配置とその試験方法を示す。ポジションセンサや光学素子は寸法0.6 m × 0.3 mのブレッドボードに設置し、ボードの長手方向を床から0.1 m持ち上げてそのまま自由落下させ、衝撃前後のレーザーポインティングの角度ずれを測定した。これは時速5 kmでの移動速度における衝突に相当する。Fig. 4(c)に、ミラーホルダーをポストスタンド方式とペダスタル方式で定盤に固定した場合の結果をそれぞれ示す。衝撃後の角度ずれは、両方式とも測定下限の0.001°程度であり、低速移動時の衝撃に対しては十分な固定強度が得られている事が分かった。本結果を受けて、光学部品の上方向の調整が必要な部品(レンズ等)に関してはポストスタンド、その他ではペダスタルによる固定方式を採用した。しかしながら、現状の評価方法では、光

Fig. 4 (a), (b) Setup of the impact resistance test for mirror mount fixing method on a breadboard. (c) Test results for two kinds of fixing methods.

学部品のホルダーへの固定方法や各固定ネジのトルクに対する定量評価には至っていない。今後は、定量評価手法の確立と、更に大きな衝撃力に対する固定手法の開発なども検討する予定である。

3.3 振動励起レーザーの光学配置

今回開発した高速動作が可能な振動励起レーザーの光学配置をFig. 5に示す。本レーザーには、コンクリートを振動させるための高いエネルギー、高速検査のための50-100 Hz程度の繰り返し数に加え、温度・湿度等の環境変化に対する耐性や、システムの社会実装を踏まえ小型化及び低コスト化も望まれる。そこで低コストかつ環境変化に起因する励起エネルギーや励起波長の変動が少ないフラッシュランプ励起方式のNd:YAGレーザー(波長1064 nm)を採用した。レーザー発振器として市販のレーザーヘッドが小型かつ高出力のNd:YAGレーザー(Litron lasers製:TRL-HR 250-100, 250 mJ, 10 ns)を使用することで、増幅器のパス数を減らすと共に、2つのレーザー増幅媒質を同じ仕様(14 mmφ, 1.3 at%)とすることで、各増幅過程における熱的な影響が等しくなるようにした。

一般的に高出力高繰り返しレーザーでは、フラッシュランプの高速動作に伴う熱によりレーザーロッドの半径方向に熱分布(屈折率分布)が生じ、ロッドを通過した光が屈折し集光もしくは発散してしまう熱レンズ効果や、熱複屈折効果による入射光の偏光の解消が問題となる。特に熱レンズ効果が顕著になると、レーザーの集光性能が低下しコンクリートの加振が困難となるだけでなく、レーザー各部への光学損傷の原因となる。Nd:YAGロッドで生じる熱レンズ効果は、凸レンズによる集光に近い挙動を示すため、本レーザーでは各部にレーザー光の直径と広がり角を補正するレンズ対(Fig. 5中のImage tube)を導入した。このレンズ対は、発振器からの良好なパターンをレーザー内部の各位置(Fig. 5中の星印)に転送する像転送光学系としても機能するため、熱レンズ効果の低減に加えて、波面の保持及び光軸ずれに対するビーム位置安定性の向上にも寄与する。

ロッド内で生じる熱複屈折効果については、増幅器1で増幅後に偏光を90°回転させ、増幅器1と同じ熱負荷に設計した増幅器2で再び増幅することにより補償することが可能である。増幅されたレーザー光は、Image tube 6によ

Fig. 5 Optical layout of flash lamp pump Nd:YAG laser for using the hammering laser of the LHT.

り集光用レンズまで像転送され、数 m先のコンクリート上に集光される。像転送光学系の設計を最適化することにより、前述の車両の荷台に搭載可能な $1.8\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ の定盤上に全ての光学部品を配置することを可能とした。

3.4 振動励起レーザー (50 Hz) の性能評価

レーザーロッド増幅器は、ロッド1本当り2本のフラッシュランプで励起しており、ランプリフレクターは2つの楕円を焦点位置で結合した形状に加工している。楕円の結合位置(2つの楕円の共通の焦点)にレーザーロッドを、反対の焦点位置にフラッシュランプを配置することで2つのフラッシュランプの光を1本のレーザーロッドに集約している。フラッシュランプへの最大電気入力エネルギーは50 J/本であり、ランプの時間パルス幅はNd:YAGの蛍光寿命が200 μs 程度であることを考慮して180 μs とした。Fig. 6に発振器の出力を調整して取得したレーザーロッド増幅器の入出力特性を示す。1段目のレーザーロッド増幅器(Fig. 6中の白抜きプロット)では、230 mJの入力エネルギーに対し、970 mJの出力エネルギーが得られ、2段目のレーザーロッド増幅器(Fig. 6中の黒塗りプロット)では、220 mJの入力エネルギーに対し、2210 mJの出力エネルギーが得られた。Fig. 6中の破線及び実線はFrantz-Nodvik式¹²⁾から算出した入出力特性であり、得られた測定結果とはほぼ一致している。なお、50 Hz動作時における振動励起レーザーの増幅器内で発生する熱レンズ効果は焦点距離約+2.2 mと計測されており、各レーザーロッド直前のImage tubeを調整することで増幅後のビームが平行光線となるようにしている。

Fig. 7(a)に増幅器1への入射ビームパターン、(b)に増幅器2直後の増幅後ビームパターンを示す。Image tubeによる像転送と熱レンズ効果の補正により、50 Hz動作においても良好なビームパターンが得られている。増幅後

Fig. 6 Characteristics of the amplification of the Nd:YAG rod amplifiers.

の出力は2.1 J(RMS 1%)であり、深さ数 cmの欠陥を検出するのに十分な出力が得られた。増幅されたレーザー光は、焦点距離の調整が可能な組み合わせレンズを用いてコンクリート上に集光される。実際のトンネル内壁の形状は真円ではなく楕円であるため、レーザー打音装置からトンネル内壁までの距離に合わせて集光距離を調整する必要がある。Fig. 7(c)に焦点距離 -100 mm, +229 mmの組み合わせレンズを用いて7 m遠方(典型的なトンネルの頂上付近までの距離に相当)に集光したビームパターンを示す。7 mm $\times$ 10 mmの領域にレーザー出力の90%以上が集約されており、良好な結果が得られた。

3.5 屋外での動作試験

Fig. 8に量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所内の屋外試験場(a)及びその中に設置したレーザー打音装置(b)の写真を示す。平成28年11月上旬から12月中旬の約1.5ヶ月間の試験期間における屋外試験場内の温度及び湿度はそれぞれ6-35°C, 20%-95%であった。振動励起レーザーはFig. 3にも示した様にレーザー打音装置の上部の防振定盤上に設置されており、下部先端のスキャナー部へ供給され、コンクリート上に導かれる。実験室から試験場までの移動(フォークリフト等を使用)によるレーザー出力への影響は観測されておらず、短距離移動ではあるが、本レーザーが実験室内から建屋外への移動による衝撃等に対して十分な耐性を有することが示された。なお、本試験時のレーザーへの電力供給は建屋からの商用電源で実施した。Fig. 9に1ヶ月間に渡るレーザー出力の推移を示す。試験期間内において光軸の調整を行わない条件下では、約2.1 Jから1.8 Jまで徐々に出力が低下していく様子が観測されたが、試験終了後に実験室内へ戻してから、増幅器への光軸を微調整することでレーザー出力は1.9 J(Fig. 9中の点線)まで回復した。試験の前後において発振器の出力に変動が見られなかったことから、アライメントによる出力回復分(0.1 J分)は、試験期間中の光軸ずれに起因すると考えられる。0.2 Jの低

Fig. 7 Beam patterns(a), (b) and focal pattern (c).

Fig. 8 (a) Outdoor test-field at QST. (b) LHT system in the test-field.

Fig. 9 Energy stability of the hammering laser over one month.

下分については、増幅器フラッシュランプの劣化が一因として考えられるが、試験期間中のフラッシュランプ shot 数は、典型的なランプ寿命よりも少ないため、光学素子の表面汚れ等その他の要因も今後考慮する必要がある。現在は光学素子の洗浄等のメンテナンスに加え、光学素子ホルダーの選定も含めた再構築を行っており、長期間の運用時の出力安定性の向上に向けた開発を継続している。

試験期間中における振動励起レーザーの出力低下(約0.3 J)は、約7 m先に設置したコンクリート供試体内部の欠陥検出の結果には影響しておらず、約1.5ヶ月間実質メンテナンスフリーにて運用可能であることを示せたことは、装置の社会実装に向けて大きな意義がある。

3.6 ディーゼル発動機を用いた動作試験

3.5節の屋外動作試験では、電力を建屋の商用電源から供給していたが、実際のトンネル検査では自立稼働が求められる。屋外での電力供給源としては一般的にディーゼル発動機が用いられるが、レーザー打音検査ではコンクリートの微小振動を計測するため、発動機由来の騒音と振動が計測に悪影響を与える可能性がある。そこで、振動励起レーザーのディーゼル発動機を用いた動作試験と合わせて、レーザー振動計測システム(Fig. 8 (b)の下側)の設置されている定盤の振動を計測した。発動機はデンヨー製DCA-45ESI(45 kVA)を使用し、騒音レベルはレーザー打音装置周辺で約80dB(サトテック製SD-23SDにて計測)であった。Fig. 10に発動機からの電力供給時の振動励起レーザーの出力安定性を示す。20分間の計測において出力は1%(RMS)の精度で安定している。発動機の動作由来の出力低下が900秒のところで見られたが、その後も問題無く動作している。振動励起レーザーの消費電力は約20 kVAであり、25 kVAクラスの発動機1台でもレーザー打音装置全体の稼働が可能である。Fig. 11に、発動機稼働状態におけるレーザー振動計測システムの定盤の振動計測結果を示す。点線は筐体の蓋を開けている状態、実線は閉じている状態をそれぞれ示す。定盤に対して垂直方向の振動では蓋の有無に関わらず特異な振動は観測されておらず、筐体の防振機構が十分に機能していることが分かる。水平方向に関し

Fig. 10 Energy stability of the hammering laser under the use of the diesel electric generator.

Fig. 11 Vibration of the breadboard of the laser vibrometer in the LHT system under the use of the diesel electric generator.

ては蓋を開けた状態では200–400 Hz帯において共振が観測されているが、遮音材付きの蓋により共振が解消されることが観測された。レーザー打音装置に組み込んだ防振・防音機構により、発動機による振動の影響を排除できたことから、レーザー打音装置の屋外での自立稼働が可能であることが示された。

今後更に小型化・省電力化を進めるためには、半導体レーザー(LD)励起の導入が有効であると考えられる。しかしながら今回使用したNd:YAGでは蛍光寿命が比較的短く、かつ効率的な励起が可能な波長帯域が狭いため、高ピーク出力のLD及び温度(波長)安定性の高いLDが必要であり、レーザー媒質の再選定も含めた検討が重要な課題の一つである。

4. まとめ

今回我々は、レーザー打音検査の高速化に必要な振動励起レーザーの開発を行い、簡便な構造を有するフラッシュランプ励起Nd:YAGレーザーにより、小型(1.8 m × 0.7 m)かつ繰り返し50 Hz、出力2 Jを得ることに成功した。また、本レーザーは実験室内だけでなく、屋外試験場での1.5ヶ月間の運用試験においてメンテナンスフリーでの稼働に成功し、かつディーゼル発動機による自立稼働が可能であることを示した。更に平成28年11月にレーザー技術総合研究所、理化学研究所、日本原子力研究開発機構と共同で、本レーザーを用いたレーザー打音検査の屋外試験を行い、内部に模擬的な欠陥を有するコンクリート供試体を対象として50 Hzでの高速欠陥検査に成功している[†]。今後はより深い欠陥を検知するため

[†] <http://www.qst.go.jp/topics/itemid034-001306.html>

の更なる高出力化及び移動車両への搭載化を進める計画である。

謝 辞

本装置の開発に対し、様々なご助言を頂きました(公財)レーザー技術総合研究所の島田 義則様、倉橋 慎理様、北村 俊幸様に感謝いたします。本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理人: JST)によって実施されました。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報 2015.
- 2) 国土交通省：鉄道統計年報 2013.
- 3) 島田 義則：検査技術 **11** (2006) 8.
- 4) 篠田 昌弘, 大村 寛和, 御崎 哲一, 島田 義則, 内田 成明：RTRI REPORT, **23** Dec. (2009) 29.
- 5) 倉橋 慎理, オレグ コチャエフ, 島田 義則, 乗松 孝好：レーザー研究 **11** (2014) 849.
- 6) 御崎 哲一：京都大学社会基盤工学博士論文 (2015).
- 7) 長谷川 登：化学 **71** (2016) 72.
- 8) 長谷川 登, 錦野 将元, 三上 勝大, 岡田 大, 近藤 修司, 河内 哲哉, 島田 義則, 倉橋 慎理, 北村 俊幸：検査技術 **22** (2017) 57.
- 9) 島田 義則, 倉橋 慎理, オレグ コチャエフ, 倉橋 慎理, 北村 俊幸：レーザー研究 **45** (2017) 423.
- 10) T. Hatae, T. Hayashi, E. Yatsuka, S. Kajita, H. Yoshida, H. Fujita, M. Nakatsuka, K. Yahagi, K. Shinobu, T. Ono, *et al.*: J. Plasma Fusion Res. Ser. **9** (2010) 253.
- 11) A. Bayramian, J. J. Armstrong, G. Beer, R. Campbell, B. Chai, R. Cross, A. Erlandson, Y. Fei, B. Freitas, R. Kent, *et al.*: J. Opt. Soc. Am. B **25** (2008) B57.
- 12) L. M. Frantz and J. S. Nodvik: J. Appl. Phys. **34** (1963) 2346.