

レーザー超音波リモートセンシングを用いたコンクリート内部欠陥探傷

○[土]御崎 哲一、坂本 保彦 (西日本旅客鉄道 (株))
島田義則、オレグ コチャエフ ((財) レーザー技術総合研究所)
内田成明 (東京工業大学)
羽矢 洋 ((財) 鉄道総合技術研究所)

Inner defect inspection in concrete using laser-based remote sensing system.

N. Misaki, Y. Sakamoto (West Japan Railway Company)

Y. Shimada, O. Koktyaev (Institute for Laser Technology)

S. Uchida (Tokyo Institute of Technology)

H. Haya (Railway Technology Research Institute)

Laser-based remote sensing system (LRSS) for detect inner defects in concrete has been investigated. The refraction efficiency of the photorefractive crystal in LRSS has been increased up to 8.7 times with applied electric field and phase shift of reference beam. We have been carried out field experiments with large size concrete samples. The LRSS located at 5 m far from large concrete samples and could be detected inner defects due to refraction efficiency increase of the photorefractive crystal. It is concluded that the LRSS has high capability to detect the inner defects in concrete structure at 5 m away from concrete.

キーワード：非破壊検査、パルス法、振動解析、コンクリート構造

Keywords: Nondestructive testing, Pulse method, Vibration analysis, Concrete structure

1. はじめに

トンネル覆工コンクリートからの剥落を防止することは鉄道の安全確保において重要であり、適切な検査・管理手法が求められている。トンネル覆工コンクリートの検査手法として実施しているハンマーを用いた打音検査は、検査者の経験により精度が左右される、高所作業を伴うため作業の安全性が劣る、人的および時間的な面で莫大なコストがかかる等の問題がある。この問題を解決するため、安全、低コスト、高速高精度な検査方法を開発することが求められており、レーザー超音波技術を用い遠隔・非接触でトンネル覆工コンクリート剥離検知手法の開発を実施している。今回は、レーザ

ー超音波技術を用い大型コンクリート供試体での欠陥検出試験を実施したので、以下報告する。

2. レーザー超音波リモートセンシングを用いた コンクリート内部欠陥探傷

レーザー超音波リモートセンシング法は、超音波の励起と検出を、レーザー光を用いて行うものである。遠隔かつ非接触で対象物の検査が行えるので、圧電素子などを用いた機械的接触方式に比べて、高速で検査が行える。また、振動の検出を光の干渉現象で行うため、同一のシステムで非常に広い周波数領域（数キロヘルツから数メガヘルツ以上）の振動

検出の可能性も持つ。

レーザー超音波法では一般に振動の励起に高出力のパルスレーザーを、振動の検出には狭帯域の連続発振レーザーを用いる。振動励起の原理は試料表面に瞬間的に局所的な温度変化を与えて試料のアブレーションにより、内部に衝撃波、振動を励起する方法である。振動の検出には試料表面に現れる振動を光の周波数変調に変換し干渉計により検出する。干渉信号の検出方法はマイケルソン型干渉計を用い、コンクリート表面からの波面の乱れた信号光に対して干渉信号が得られるようホログラフィックに波面乱れを補正する機能を付加した干渉計を用いた¹⁻³⁾。しかし、ダイナミックホログラム内の参照光の回折効率は小さく、近距離での計測しか適さなかった。トンネルなどのコンクリートを探傷する場合には最低でも 5 m 遠方のコンクリート内部欠陥を探傷することが求められる。このためには、ダイナミックホログラムの回折効率ひいては検出効率の向上が不可欠である。ここでは、ダイナミックホログラムに電圧、参照光に位相シフトを印加し回折効率を向上させた。また、検出用レーザーの出力を向上させることにより約 50 倍の検出効率向上が図られた。これを用いて大型コンクリート供試体内の内部欠陥探傷実験を行い検出が可能であることを確認したことについて報告する。

3. レーザー超音波を用いたコンクリート内部欠陥検出

装置の概要

レーザー超音波を用いたコンクリート内部欠陥検出装置 (図 1) は、コンクリート表面を加振させる信号印加レーザーとコンクリート表面に発生した振動を検出する検出用レーザーの 2 本を使用 (図 2) している。信号印加用レーザー光をコンクリート表面に集光してアブレーションによる衝撃波をコンクリートに印加し、振動を発生させる。コンクリート表面が振動すると、検出器に入射する信号光と参照光との位相差が変化し光の強弱となってあらわれることを用いてコンクリート表面の振動を検出し、欠陥の有無を判断する。実験では、信号印加用レーザーとしてエネルギー 0.4 J・パルス幅 10 ns の Nd:YAG レーザーを使用した。

4. レーザー超音波による加振と鋼球による加振との欠陥検出比較

図 3 に供試体 (コンクリート大きさ 300×300×100mm、欠陥大きさ 150×150mm、欠陥深さ 10mm) にレーザー超音波による加振と鋼球による加振を実施した場合の、検出された時間振動波形とスペクトル波形を示す。ここで、鋼球による加振は、打音検査を模擬するものとする。

両者とも 1 次の固有振動数が 2.1 kHz を示し、レーザー超音波による加振は、現在実施している打音検査と同じ振動特性を示すことが確認できた。

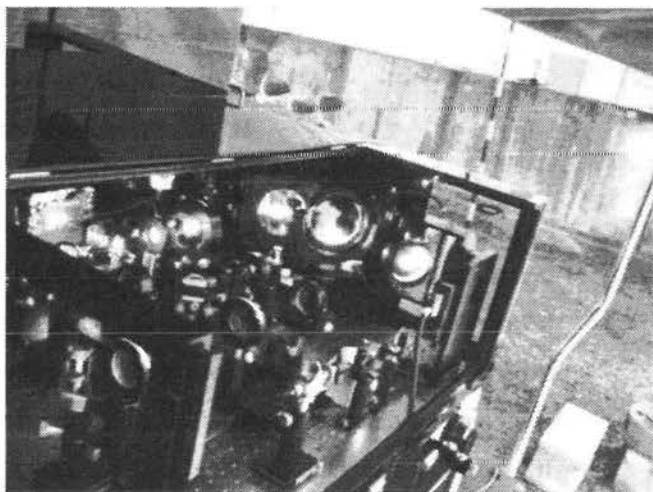


図 1 コンクリート内部欠陥検出装置の全景

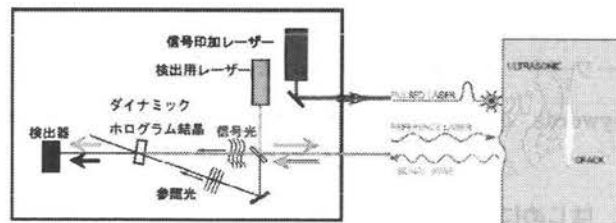


図 2 コンクリート内部欠陥検出装置の概要

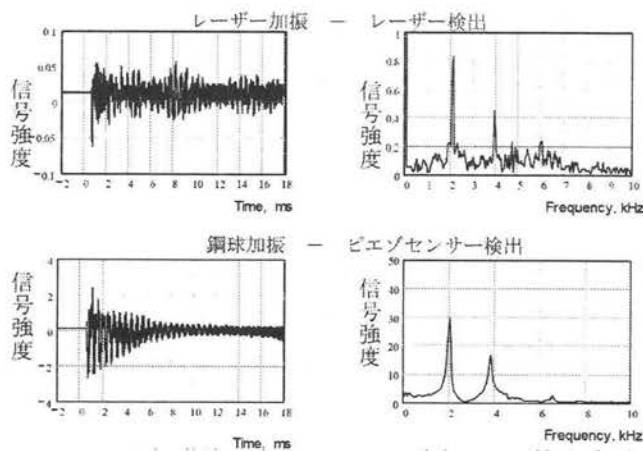


図 3 板振動法・ハンマーリング法による検出波形

5. 検出効率の向上

ダイナミックホログラムを用いた振動計測は、連続発振のレーザーを2分割し、一方をコンクリートに照射して、その反射光を信号光としてダイナミックホログラム結晶に入射させる。他方は参照光として、そのまま結晶に入射させ、2ビームを干渉させることにより光学的な回折格子を生成させる。回折格子による干渉縞の明部では電子が誘起され、暗部に向かって拡散する。これによって結晶内部に屈折率差が生じ、入射された参照光が回折を起こして信号光と同じ光軸に進み、検出器に入る。この際、参照光のパワーすなわち回折効率が大きくなるほど検出効率が上がる。参照光の回折効率を向上させるためには光の回折格子の明部で生成された電子数を増やす必要がある。ダイナミックホログラムに外部電圧を印加すると結晶内の電子は電界で加速される。

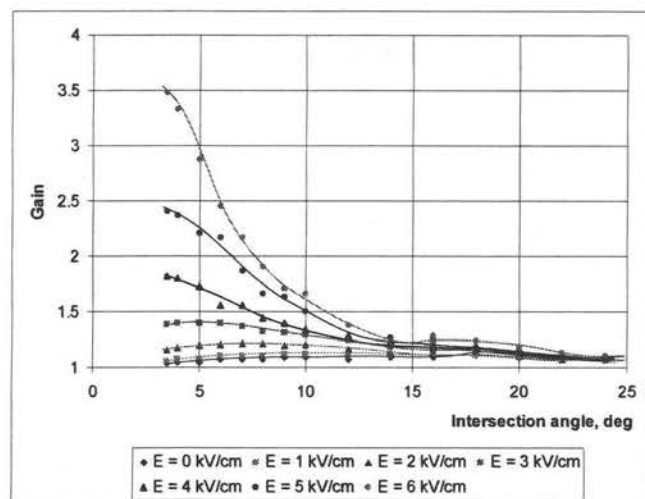


図4 信号光と参照光の入射角度と印加電圧を変化させた場合の信号出力の増加

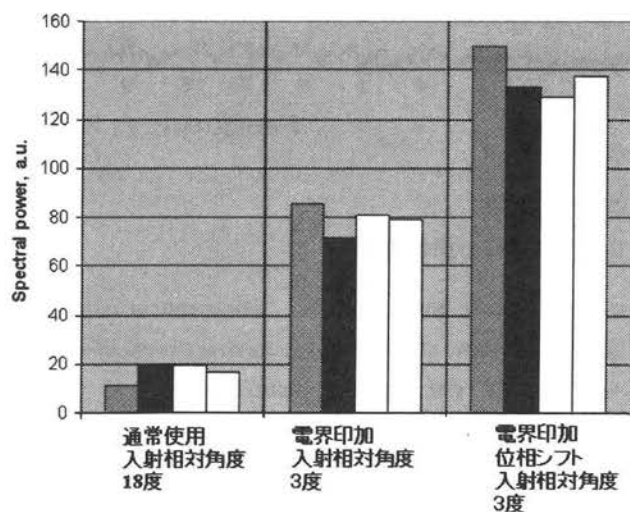


図5 参照光の位相シフトを加えた場合の信号出力の増加

その際、回折格子間隔を広げることにより1つの明部に存在する電子数を増加させることが出来る。実験結果を図4に示す。信号光と参照光の入射角度を小さくする。すなわち干渉縞の明部を広くし、且つ、外部電界を印加すると明部の総電子数が増加し回折効率が向上したことがわかる。双方が作る入射角度を 3° とするとゲインは3.5まで上昇した。次に参照光に電圧印加と位相シフトを加えることにより回折効率を向上させた。実験結果を図5に示す。印加電圧を6 kV/mとし、位相シフト周波数を増加させると通常使用時と比べて信号出力の増加は約8.7倍となった。

さらに効率を向上させるため、レーザーを0.25 Wから2 Wのレーザーに置き換えることによりコンクリートからの反射パワーが約6倍増加した。電圧印加とレーザーパワーの増強により約50倍の検出効率の向上が図れた。

6. 大型コンクリート供試体内部欠陥探傷実験

当社が保有する、コンクリート変状を模擬した大型コンクリート供試体に対して、5 m離れた位置から変状を検出する実験を行った(図6)。欠陥は2 cmの深さに発泡スチロールが埋め込まれたもので、大きさは 250×300 mmである。欠陥の中心部分と欠陥のない部分の2カ所をレーザー照射して振動スペクトルの違いを計測した。結果を図7に示す。

図a)は内部欠陥中心付近を、図b)は欠陥を外れた箇所をレーザー照射した場合の振動スペクトルを示す。図a)の内部欠陥中央付近の探傷結果では0.8, 1.9, 2.7 kHzに特徴的な振動モード(高いピーク)が検出できた。0.8 kHzがコンクリート板振動の1次モード、1.9 kHzが2次モード、2.7 kHzが3次モードである。この結果は加速度センサーをコンクリート表面に取り付け周波数スペクトルを計測した場合と一致した。一方で、図b)の欠陥を外れた箇所の探傷結果ではレーザー照射しても高いピークは現れない。以上より、5 m離れたレーザー装置で検出可能であることを確認した。

7. おわりに

トンネル覆工コンクリート表層近傍の内部欠陥について、レーザー超音波技術を活用することで5 m遠方からの加振及び欠陥検出が可能であることが確認できた。今後は、欠陥検知に対する効果的な検知システムの構築を目指し取り組んでいきたい。

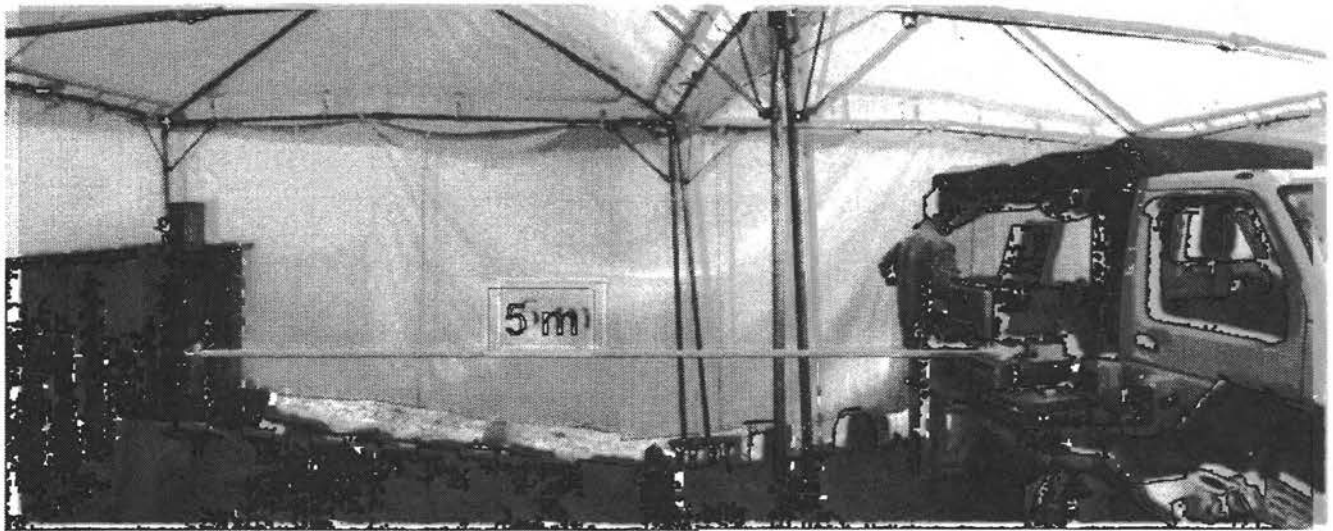
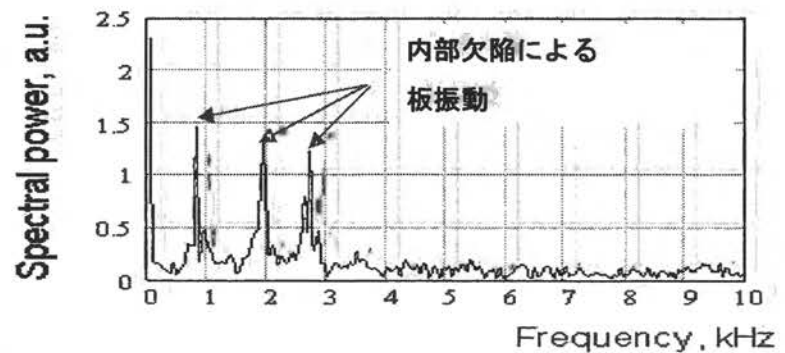
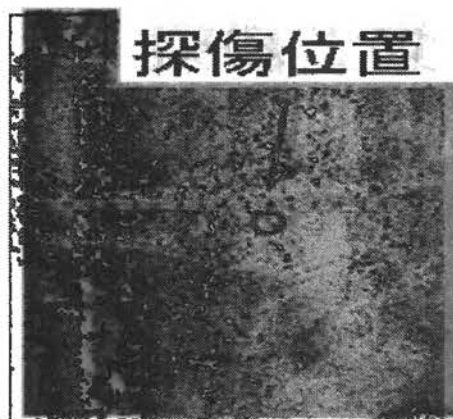
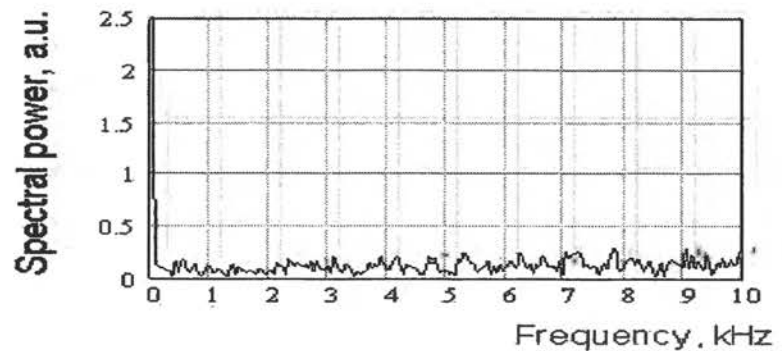
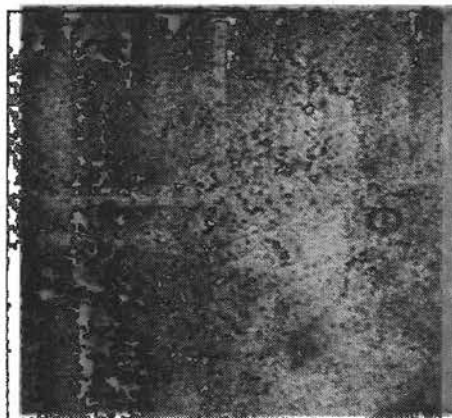


図 6 5 m 遠方からのコンクリート内部欠陥探傷実験



a) 欠陥中心部を探傷



b) 欠陥を外れた箇所を探傷

図 7 5 m 離れた大型コンクリート供試体の探傷結果

文 献

(1) 内田成明、Oleg Kotiaev、橋本和久、山中千代衛、“二光波混合を用いたレーザー超音波非破壊検査システムの開発”、ILT2000 年報、(財)レーザー技術総合研究所、(2000)。

(2) Oleg Kotiaev, Shigeaki Uchida, “Laser Based Non-destructive Inspection of Concrete Structures with the Use of Photorefractive Two-wave Mixing”, Proc. of the 6th Far-East Conference on Nondestructive Testing, pp421-426, (2002)。

(3) Oleg Kotiaev, Shigeaki Uchida, “Nondestructive inspection of concrete structures with the use of photorefractive two-wave mixing”, Proc. SPIE vol. 4702, pp241-249, (2002)。