

SLDVと空中放射音波を用いたコンクリート非破壊検査

—トーンバースト波を用いたS/N比改善—

Study on the Non-destructive Inspection Method for Concrete Structures
by using Air-coupled Sound Wave,
-Study about the Improvement of the Signal to Noise Ratio using Tone Burst Wave -

赤松 亮・杉本 恒美

桐蔭横浜大学大学院工学研究科

(2014年3月20日 受理)

1. はじめに

日本では高度経済成長期以降、数多くのコンクリート構造物が建設されてきた。それらの中には30年以上経過したものも少なくなく、維持管理する上で点検業務は不可欠である。一般的に、コンクリートインフラ設備の維持管理は一次点検と二次点検から成る。一次検査は広い領域における損傷箇所を見つけるために行われる。一方、二次検査では、狭い領域における損傷箇所の詳細な箇所や欠陥の進行度合いを調査するために行われる。二次検査においては、様々な非破壊検査法が開発されてきたが、一次検査では、その作業効率性から目視点検および打音検査が未だに主流である。しかしながらこれら検査法の検出精度は検査者の技量に依存し、実際に欠陥の見落としも起きている。また、打音検査の場合、大型構造物を対象としたときに高所での作業は避け難く、安全性からも問題がある。このような問題に対し、本研究では音響加振とスキャニング振動計 (SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer) による入出力共に非接触で行うシステム (以下音響探査法) を

提案し、その実用可能性について検討している¹⁻³⁾。コンクリート供試体を用いた実験より、加振に十分な音圧が出力されれば10m遠方から空洞欠陥の検出が可能であること⁴⁻⁶⁾、非常に層の薄い(0.5mm程度)のひび割れによるはく離欠陥も同様に検出可能であること^{6,7)}を確認した。一方で、加振音波により検出用のレーザヘッド自体が振動し、これが検出感度に影響を及ぼす問題も明らかになってきた⁸⁾。本研究ではこの問題を回避するため、トーンバースト波を用いた加振法を提案する。

2. 原理

本章ではパルス波による励振と時間-周波数ゲート処理を組み合わせた方法を提案する。また、この提案手法における従来の非接触音響探査法の基本構成について述べる。

2.1 従来法の基本構成

Fig.1に音響探査法の概要図を示す。音源から発した音波によりコンクリート表面を励振させる。その表面の振動速度をSLDV(Polytec Corp, PSV400-H4)により二次

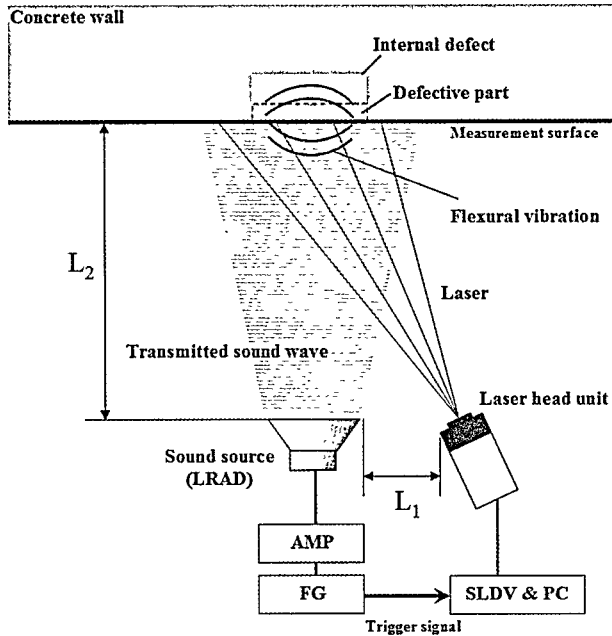


Fig. 1 Basic concept of non-contact acoustic inspection method.

元的に計測する。もし、壁面内部に水平方向のひび割れなど空隙欠陥が存在していたとする。その欠陥部は曲げ剛性が低下し、振動板のように働く。例えば欠陥部分の形状を矩形と想定した場合、単純支持した矩形平板と近似できる。そのときの一次固有振動数は下式で表される⁹⁾。

$$f = \frac{\pi h}{4} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{E}{3(1-\nu^2)\rho}} \quad (1)$$

ここで h は板の厚さ a と b は板の辺長、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 ρ は密度である。(1) 式より、欠陥部の一次固有振動数は深さに比例し、辺長の二乗に反比例することがわかる。この固有振動数と送信波形の周波数が近くなると、欠陥部上でたわみ共振現象生じる。しかしながらこの共振周波数は不明であるため、広い周波数帯域を持った Chirp 波か、ホワイトノイズ波を用いて加振を行う。このたわみ振動を励振することで振動分布から欠陥位置を特定することができる。本研究では強力音源として Long Range Acoustic Device (LRAD Corp, LRAD-300X) を使用

している。LRAD は 500-5000 Hz の周波数範囲で -10 dB のフラットな特性を持ち、20m 遠方においても 100-110 dB の音圧を維持することの出来るスピーカである。

2.2 従来法の問題点

レーザ計測の光学ノイズの要因として、レーザヘッド自体が振動してしまう事が挙げられる。音響加振を用いる場合、加振に用いる高音圧の音波によりレーザヘッドが振動させられる。この振動は光学ノイズとなり、レーザの検出感度を低下させる。音源からの直達波、対象面からの反射波成分および遠方の構造物からの残響信号に起因する。本手法では欠陥部のたわみ振動を励振し、その信号を検出する。したがって、たわみ振動の信号は欠陥の平面規模が小さいほど、あるいは深くなるほど小さくなる。信号を強くするには音圧を上げるか、あるいは加振時間を長くする必要がある。しかしながら、直達波や残響による影響は加振音波の強度に比例する。そのため、これらの方法は S/N を改善する上であまり効果的とは言えない。

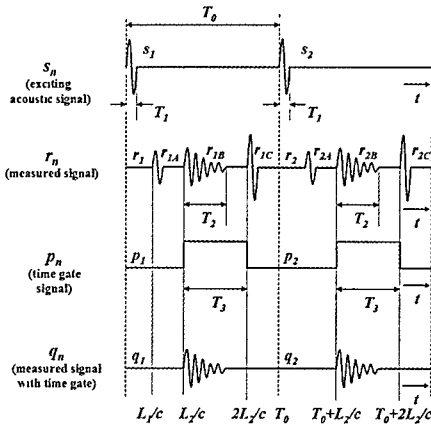


Fig. 2 Procedure of pulse wave excitation method with time gate processing.

2.3 パルス波励振を用いた時間分離

Figure 2 に直達波および反射波の悪影響を取り除く構成例を示す。ここで、信号 s_n はパルス列である。このパルスは欠陥部の共振周波数成分を含み、時間間隔 T_0 で繰り返されるものとする。対象面の振動は SLDV により計測信号 r_n として検出される。この計測信号 r_n は主に直達波によるノイズ信号 r_{nA} 、欠陥部の目的信号 r_{nB} および反射波によるノイズ信号 r_{nC} により構成される。空気中の音速を c とすると、各信号 r_{1A} 、 r_{1B} および r_{1C} はそれぞれ L_1/c 、 L_2/c および $2L_2/c$ となる。目的信号 r_{1B} の出現時間は反射波の振動ノイズ r_{1C} の半分の時間であり、これらの信号は時間的に分離可能である。目的信号 r_{nB} および振動ノイズ r_{nA} は (2) 式で示される時間的条件を満足する事で分離可能である。

$$\frac{L_1}{c} + T_1 < \frac{L_2}{c} \quad (2)$$

ここで、目的信号の持続時間 T_2 は目的信号の帯域幅の逆数により与えられる。我々の過去の研究において、通常、コンクリートのはく離欠陥の場合この持続時間 T_2 は 10 ms 程度以下であることがわかっている。したがって、 r_{nB} と r_{nC} を時間的に分離するため、(3) 式

の時間的条件もまた必要になる。

$$\frac{L_2}{c} + T_2 < \frac{2L_2}{c} \quad (3)$$

加えて、各送波の独立性を保つため、(4) 式を満足させるインターバル時間 T_0 も必要となる。

$$\frac{2L_2}{c} < T_0 \quad (4)$$

この時間分離法において、上記3つの時間的条件を満足させる必要がある。そして目的信号は制御信号 p_n により分離抽出される。制御信号 p_n は時間幅 T_3 のゲート信号により構成される。 T_3 の開始時間および終了時間はそれぞれ L_2/c および $2L_2/c$ である。距離 L_1 および L_2 はレーザ距計等により事前に把握可能である。この制御信号を用いることで、不必要なノイズ信号が除去される。

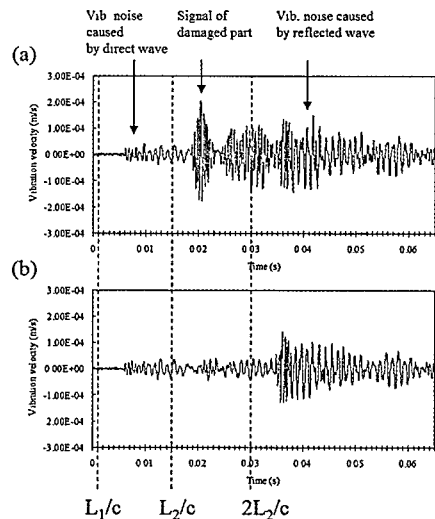


Fig. 3 Actually measured waveform, (a) defective part, (b) healthy part.

実際に計測された波形の例を Fig. 3 に示す。この例では L_1 および L_2 は 0.3 および 5m である。Figure 3 (a) は欠陥部、(b) は健全部

の振動速度波形である。この欠陥は 1.7 kHz に固有振動数を有しており、それに合わせ中心周波数 1.7 kHz、持続時間 3 ms の正弦波パルスを送信した例である。空気中の音速 c を 331 m/s とすると、図中の 3 本の破線は音波の各到達時間を示している。最初の破線は直達波がレーザヘッドに到達する時間であり、微弱なノイズが若干のタイムラグ後に見られる。二本目の破線は直達波がコンクリート壁面に到達する時間であり、欠陥部の信号が見られる。三本目の破線はコンクリート壁面からの反射波がレーザヘッドに到達する時間であり、両図で強い振動ノイズが見られる。このように、時間的に短いパルスを用いることで欠陥部の信号を効果的に分離抽出することが可能である。

2.4 トーンバースト波による励振法

実際の検査において、欠陥部の固有振動数は不明であり、送信音波の持つ周波数成分が欠陥部の固有振動数の帯域外であった場合加振することは出来ない。したがって欠陥部の固有振動数を含んだ波形を送波する必要がある。広い周波数帯域を含んだ時間的に短いパルスは、その周波数成分が著しく低下し、十分な加振力を得るのは困難である。このような理由から、Fig. 4 (a) に示すように各々異なった中心周波数を有するトーンバースト波を逐次的に送信する方法を提案する。Fig. 4 (b) は説明のため、各トーンバースト波のメインローブのみを表示した模式図である。このように、送信パルスは特定周波数成分が強勢であり、それぞれ不足した周波数成分は送信パルス間の周波数成分を重畳させる事で満足させる。このトーンバースト波の具体的構成を以下に示す。トーンバースト波が N 回送波されるとすると、 N は開始、終了中心周波数 f_s , f_e と周波数変調間隔 Δf により決定する。

$$N = \frac{(f_e - f_s)}{\Delta f} + 1 \quad (5)$$

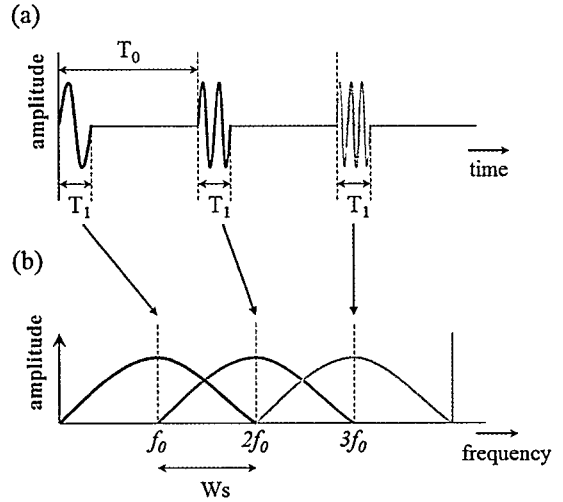


Fig. 4 Schematic pattern of multi frequency tone burst wave excitation method.

インターバル T_0 を有したトーンバースト波列 $s(t)$ は (6) 式で構成される。

$$s(t) = \sum_{n=1}^N u_n(t) \alpha_n(t) \quad (6)$$

ここで、 $u_n(t)$ ($n=1,2,3 \dots, N$) は下式に示される周波数 f_n の正弦波である。

$$u_n(t) = \sin(2\pi f_n t) \quad (7)$$

$$f_n = f_s + \Delta f(n-1)$$

n 番目の正弦波の振幅は以下の矩形窓関数 $\alpha_n(t)$ により変調される。

$$\alpha_n(t) = \begin{cases} 1, & \{T_0(n-1) \leq t \leq T_0(n-1) + T_1\} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

よく知られたように、矩形トーンバースト波要素 $w_n(t)$ の周波数スペクトル周波数 f_n を中心として持続時間 T_1 の逆数で与えられる。トーンバースト波列 $s(t)$ の全体の周波数成分

は個々のトーンバースト波のフーリエ変換結果の総和と等しく、(9) 式のようになる。

$$S(f) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{\sin \frac{2\pi(f+f_i)T_i}{2}}{2\pi(f+f_i)} + \frac{\sin \frac{2\pi(f-f_i)T_i}{2}}{2\pi(f-f_i)} \right\} \quad (9)$$

十分な周波数成分を得るには周波数変調間隔 Δf は Fig. 4 (b) に示されるように $1/T_i$ とすれば良い。このトーンバースト波励振法と時間分離処理を組み合わせる事により、高精度かつ見落としのない欠陥検出が可能となる。

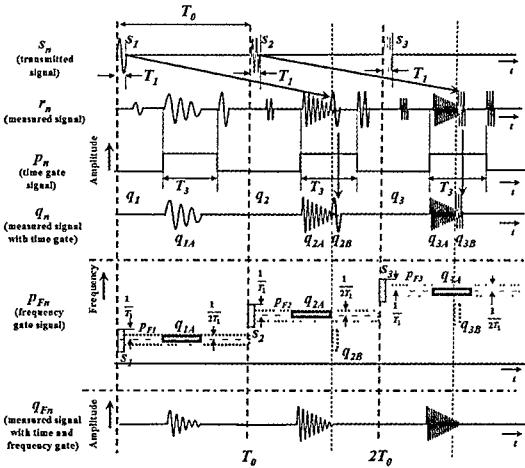


Fig. 5 Procedure of tone burst wave excitation method with time-frequency gate processing.

2.5 時間・周波数ゲート法の原理

トーンバースト波法を閉鎖空間で適応する場合、遠方に存在する周囲構造物からの反射波(残響)もまた、レーザヘッドに入射する。Figure 5 中、 q_{2B} および q_{3B} に模式的に示すように、残響信号は各送波周期に対して遅れて到達する。したがって、残響によるノイズ信号は時間ゲート処理により完璧に除去することが出来ない。しかしながら、残響信号 q_{nB}

と送波信号 s_n の周波数特性は異なる。したがって時間・周波数分離法を提案する。Fig. 5 に示すように、時間・周波数分離法は時間ゲート処理後に周波数ゲート処理を適応する。まず、時間ゲート処理において、計測信号 $r(t)$ は時間ゲート信号 $p_n(t)$ により必要な信号のみ選択され $q_n(t)$ となる。

$$q_n(t) = r(t)p_n(t) \quad (10)$$

ここで、 $p_n(t)$ は以下の時間的条件を満たす矩形時間ゲート信号である。

$$p_n(t) = \begin{cases} 1, & \{T_0(n-1) + \frac{L_2}{c} \leq t \leq T_0(n-1) + \frac{2L_2}{c}\} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

時間ゲート適応後の計測信号 $q_n(t)$ は次の周波数ゲート処理のため、フーリエ変換により周波数スペクトル $Q_n(f)$ となる。

$$Q_n(f) = F\{q_n(t)\} \quad (11')$$

(11') 式中、 $F\{\cdot\}$ はフーリエ変換を示す。次に $Q_n(f)$ より必要な周波数成分を得るため、周波数ゲート信号 p_{Fn} により周波数フィルタリングされ $Q_{Fn}(f)$ となる。

$$Q_{Fn}(f) = Q_n(f)p_{Fn}(f) \quad (12)$$

周波数ゲート信号 $p_{Fn}(f)$ の中心周波数 f_n は、(13) 式に示されるように送波信号 $s_n(t)$ の中心周波数と同期して変化する。

$$p_{Fn}(f) = \begin{cases} 1, & (f_n - \frac{1}{2T_1} \leq f \leq f_n + \frac{1}{2T_1}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

時間周波数ゲート適応後のこれらの必要周波数成分 $Q_n(f)$ は逆フーリエ変換により最終選択信号 $q_{Fn}(t)$ として得られる。

$$q_{Fn}(t) = F^{-1}\{Q_{Fn}(f)\} \quad (14)$$

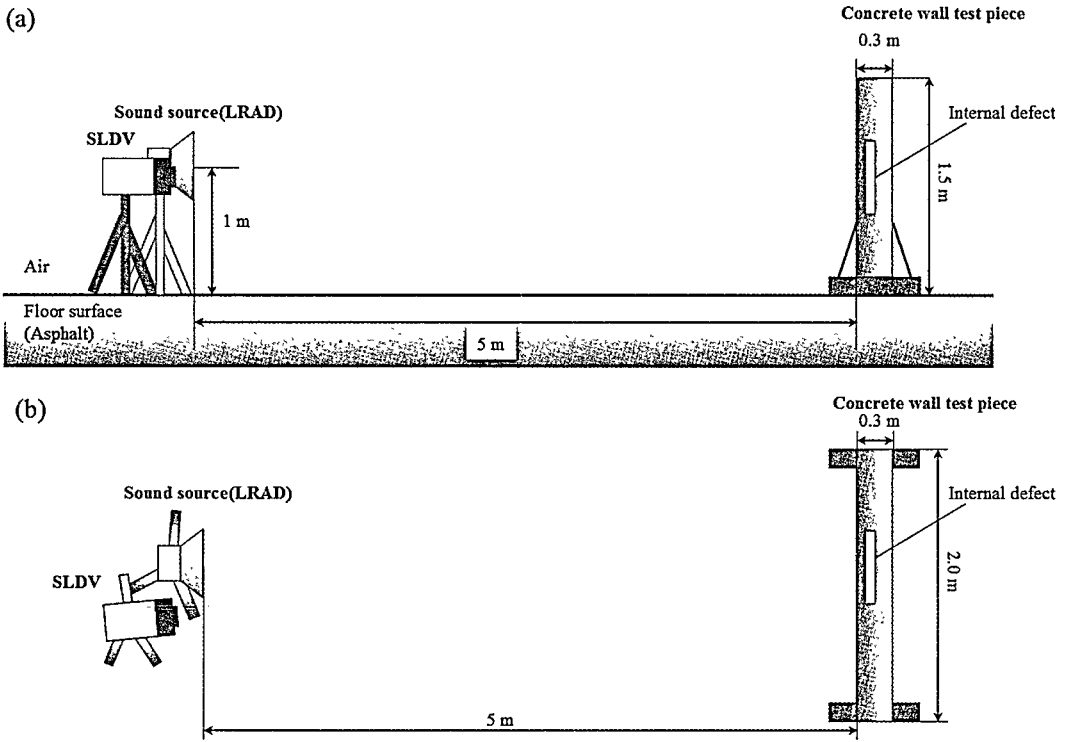


Fig. 6 Experimental setup, (a) side view, (b) upper view.

時間周波数ゲート法を用いることで、遠方に存在する周囲構造物からの反射波によるノイズ信号 q_{nB} は完全に除去され、最終選択信号 $q_{Fn}(t)$ が得られる。

3. コンクリート供試体を用いた検証実験

提案手法の有効性を確かめるため、コンクリート供試体を用いた探査実験を実施した。

3.1 実験セットアップ

壁型コンクリート供試体 ($1500 \times 2000 \times 300 \text{ mm}^3$) 内に埋設された試料を対象にその周波数応答計測を行う。対象とした試料は大きさ $300 \times 300 \text{ mm}$ 、深さ 75 mm と前節のものに比べ深く埋設されたものであり、これは従来のチャープ波を用いた計測において検出が困難 (ノイズレベルとの差が非常に少ない応答) であったものである。実験セットアップ図を Fig. 6 に示す。音源である LRAD は

試料に対し正対させ、供試体までの離隔距離は 5 m とした。計測点は埋設位置の中心 (欠陥部)、埋設位置外 (健全部) の 2 ポイントである。各点の加算平均回数は 5 回とした。送信波形は 2.4 節で論じたトーンバースト波であり、構成の各パラメータを Table 1、駆動波形およびその周波数スペクトルを Fig. 7 に示す。出力した音圧レベルはコンクリート表面付近で 100 dB 程度である。

3.2 実験結果

計測された欠陥部上および健全部上の振動速度波形を Fig. 8 に示す。両者を比較すると、欠陥部では 1.2 s 周辺で健全部に見られない応答が見られる。これが欠陥部のたわみ共振であると思われる。これらの FFT 結果を Fig. 9 に示す。両 FFT 結果から、 400 、 800 Hz 周辺で大きい振幅が見られるがこれはレーザーヘッドの共振周波数であり、これ以外に着目すると欠陥部では健全部で見ら

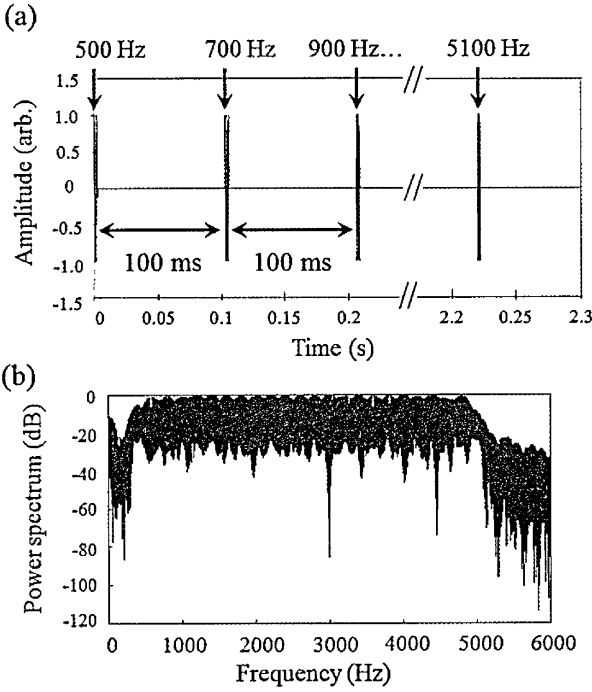


Fig. 7 Actual formed driving tone burst wave, (a) waveform, (b) frequency spectrum.

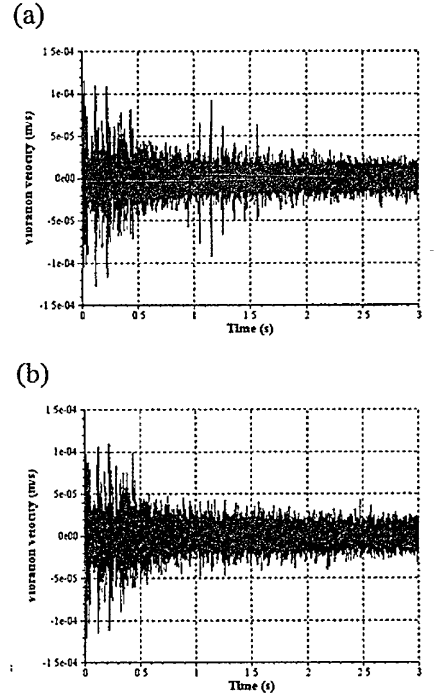


Fig. 8 Measured vibration velocities, (a) defective part, (b) healthy part.

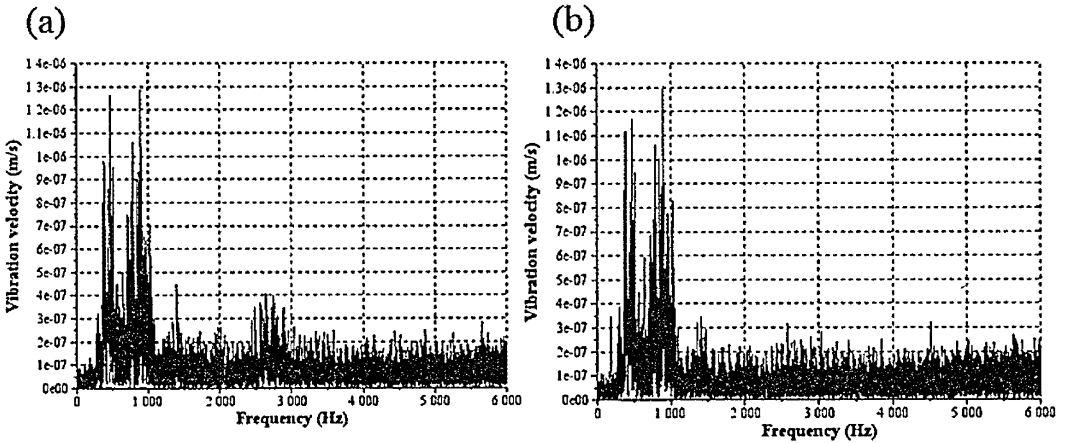


Fig. 9 Measured vibration velocity spectra (a) defective part, (b) healthy part.

れない応答が 2743 Hz 周辺で見られる。(1)式より計算される $300 \times 300 \times 75 \text{ mm}^3$ の単純支持した矩形板の一次固有振動数は 2946 Hz であり、計測値と概ね一致する。尚、計算に必要な物性値は Table II のものを用いた。計測された 2743 Hz 周辺の応答を欠陥部の信号と

しノイズフロアとの S/N 比を下式により求める。

$$S/N(dB) = 20 \log_{10} \frac{A_s}{A_n} \quad (15)$$

ここで、 A_s は信号のピーク振幅、 A_n はノイ

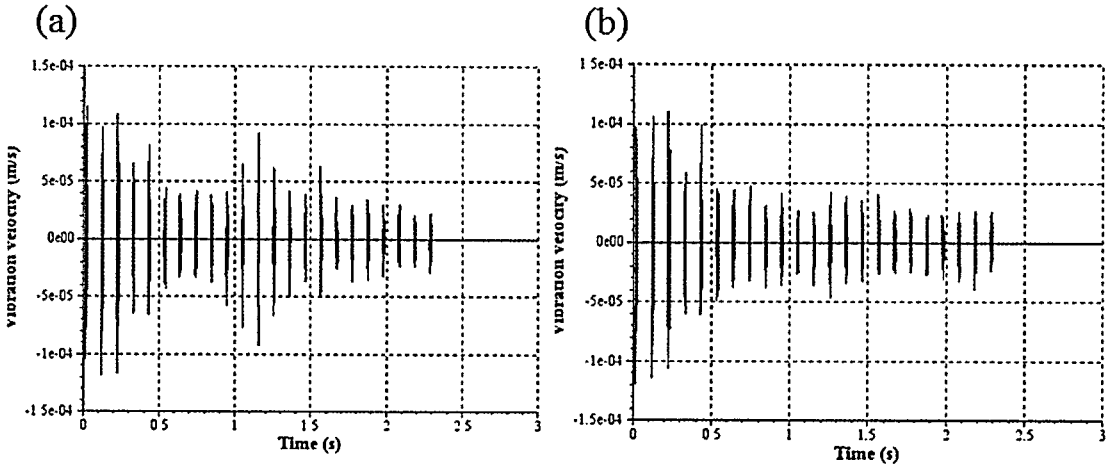


Fig. 10 Measured vibration velocities with time gate, (a) defective part, (b) healthy part.

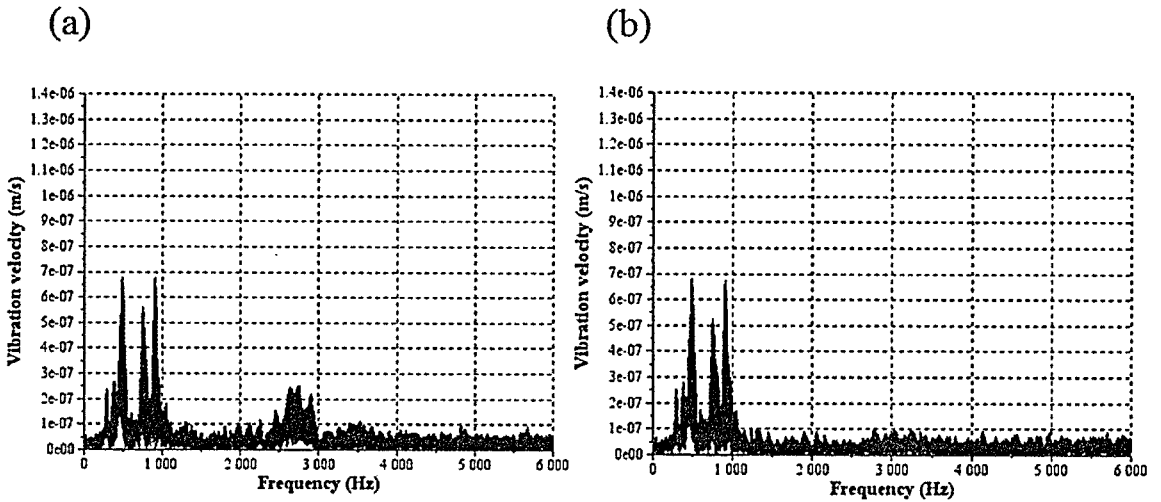


Fig. 11 Measured vibration velocity spectra with time gate, (a) defective part, (b) healthy part.

ズフロアの振幅である。ここでは 信号 A_s は 2743 Hz における振幅値とし、ノイズフロア A_n は 1200-2400 Hz および 3000-5000 Hz の帯域間の振幅の平均値とした。これより S/N 比は 6 dB 程度であることを確認した。

3.3 時間ゲートによるノイズ低減効果

欠陥部および健全部の計測結果に時間ゲートを施す事で目的信号を抽出する。各時間

ゲート幅は 15 ms 程度（音波がコンクリート面に到達し、レーザーヘッドに戻ってくるまでの時間）であり、これを各パルスの送波毎に適應する。時間ゲート処理後の振動速度波形を Fig. 10、その FFT 結果を Fig. 11 に示す。Figure 10 の結果を見ると、時間ゲート適應前で見られた 1.2 s 周辺の欠陥部の応答が残っていることがわかる。また、Figure 11 の FFT 結果ではノイズフロアが低減され、

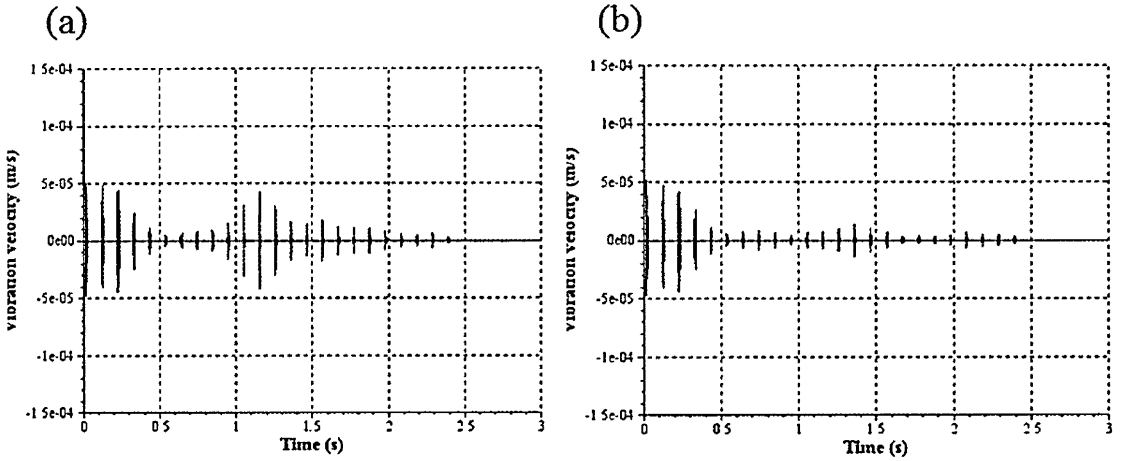


Fig. 12 Measured vibration velocities with time-frequency gates, (a) defective part, (b) healthy part.

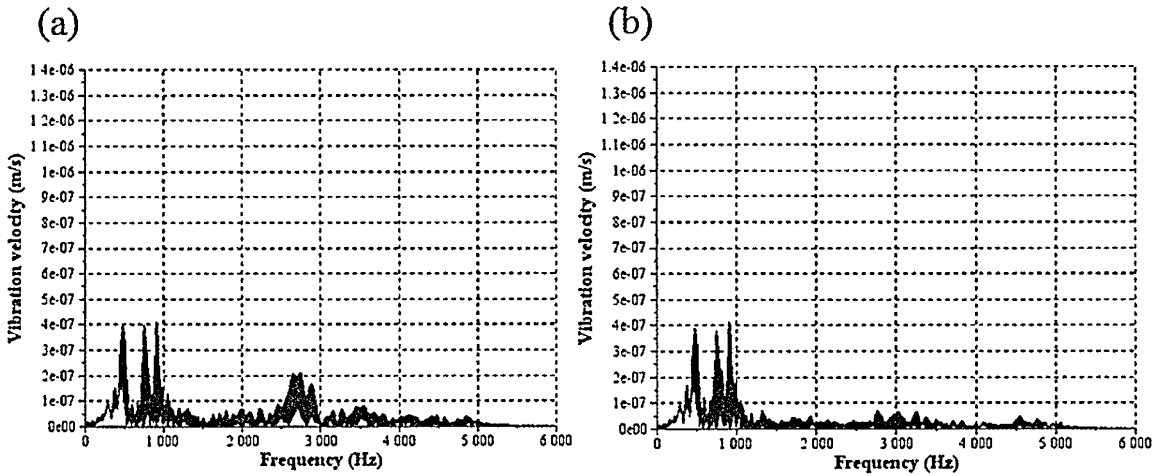


Fig.13 Measured vibration velocity spectra with time-frequency gates, (a) defective part, (b) healthy part.

2700 Hz のピークがクリアに見て取れる。ここでの S/N 比は 15 dB 程度であり、Figure 9(a) における S/N 比に比べ 6 dB 改善された。

3.4 時間 - 周波数ゲートによるノイズ低減効果
 残響や、バックグラウンドによる不要な周波数成分を除去するため、時間ゲートに加え、周波数ゲートを適用する。時間 - 周波数ゲート適応後の振動速度波形を Fig.12、その FFT

結果を Fig. 13 に示す。Fig. 12 では時間ゲートのみの Fig. 10 に比べ、ノイズ成分が落とされているため、1.2s 周辺の信号がより明瞭になっている。Fig. 13 の FFT 結果ではノイズフロアが低下したことにより 2700 Hz の信号が相対的により明瞭になっている。ここでの S/N 比は 19 dB であり、ゲート適用前に比べると 13 dB 改善された。Fig. 14 はトーンバースト波 + 時間および時間周波数ゲート適

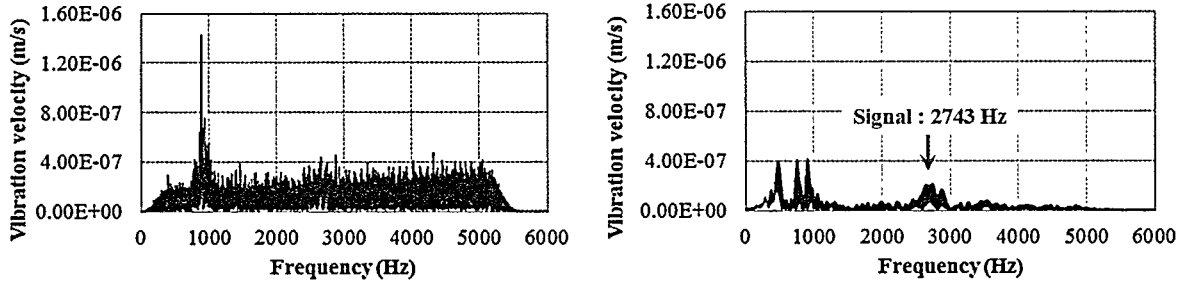


Fig. 14 FFT results of vibration velocities on the defective part.

(a) Chirp wave, sample time : 2 s, bandwidth : 500-5000 Hz, S/N ratio : 5 dB.

(b) Tone burst wave with time-frequency gate, sample time : 2.5 s, bandwidth : 200-5500 Hz, S/N ratio : 19 dB.

応後の結果と従来法（Chirp 波を用いた探査）との比較である。従来法では光学系の振動ノイズが取り除くことができなかつたため、5 dB と低 S/N 比であるのに対し、今回の提案手法では 19 dB と、従来法に比べ 14 dB 改善された。

4. まとめと今後の課題

音響加振によりレーザーヘッドが振動し検出感度を低下させる問題について、トーンバースト波を用いた加振法を提案した。トーンバースト波では従来法のように持続時間の長い Chirp 波等を用いるのではなく、時間的に

限局された音波を用いる。これにより目的信号を時間的に抽出すること可能となる。また、逐次的に中心周波数の異なるパルス波を送信することで採用することより、広帯域の周波数成分を得ることが出来る。更に送波毎の周波数特性の違いから残響などの遅れて入射してくるノイズ信号も分離可能となる。コンクリート供試体を用いた実験的検討結果より、従来法に比べ 14 dB 程度の S/N 比が改善され、検出の困難であった試料も明瞭な検出可能になった。以上の結果より提案手法の効果性を確認した。

Table I Specification of multi frequency tone burst wave

Item	Specification
Pulse duration (T_p)	3 ms (Band width : approx. 330 Hz)
Freq. transition interval (Δf)	200 Hz
Start and end freq. (f_s, f_e)	500 and 5100 Hz
Interval (T_D)	103 ms
Overall duration	2.37 s

Table II Physical property of concrete used for concrete wall test piece.

Density (kg/m^3)	Young's modules (GPa)	Poisson ratio
2400	35	0.2

謝辞

本研究は平成 24 年度の国土交通省道路政策の質の向上に資する技術研究開発の助成を受けたものである。

【参考文献】

- 1) R. Akamatsu and T. Sugimoto: Acoust. Soc. Jpn. Spring. Meet. 3-8-7 (2011) p. 1569 [in Japanese].
- 2) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Jpn. Soc. Civil. Eng. 66 (2011) p. 1569 [in Japanese].
- 3) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Proc. of the 10th Int. Symp. on New Tech. for USMCA (2011) p. 104.
- 4) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2011), p. 744.
- 5) R. Akamatsu, T. Sugimoto, H. Kawasaki, N. Utagawa and S. Tsujino: Proc. of the 10th SEGJ Int. Symp. (2011) p. 84.
- 6) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 52, (2013) 07HC12
- 7) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2012), p. 94.
- 8) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2013), p. 1303.
- 9) Jpn. Soc. Mech. Eng: JSME Mechanical Engineers' Concise Handbook 6th Edition (SANBI Printing Co., Ltd, Tokyo, 1990) 82 [in Japanese].