

音波照射加振を用いた土木構造物のための 高速非接触音響探査法に関する研究

——マルチトーンバースト波のS/N比に関する検討——

High speed acoustic inspection method for civil engineering structure
using acoustic irradiation-induced vibration;
Study about the S/N ratio of the multi-tone burst wave

小菅 信章・杉本 恒美

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2017年3月18日 受理)

I. はじめに

コンクリート構造物内部に発生する亀裂や欠陥を検査する手法として、様々な検査法が開発されてきたがこれら多くの検査法は対象物に対して、近距離で使用しなければいけないため高所での作業や大型の構造物の検査が困難といった問題が挙げられている。遠距離から検査可能な手法としては、赤外線法とパルスレーザを用いたレーザ超音波法¹⁾が既に検討されているが、前者は日照等の環境条件に左右されること、後者は高出力レーザを必要とすることから安全性の面に不安があることや大電力を必要とする点などが問題となっており実用的には用いられていない。

一方、著者らは長距離音響発生装置(LRAD: Long Range Acoustic Device)とレーザドップラ振動計(LDV: Laser Doppler Vibrometer)を用いた非接触音響探査法の検討を行っており、5m以上の遠距離から打音法と同程度の欠陥検出が実現可能であるこ

とを先行研究で既に明らかにしている²⁻⁵⁾。本手法では2次元的な計測時の計測時間の長さが問題点として残されていたがこの原因は探査原理の解明を優先して1回の音波送信につき1つの周波数しか使用していない波形(シングルトーンバースト(STNB: Single ToNe Burst)波)を用いていたためである。そのため、S/N比を向上させるための時間・周波数ゲートを有効に使用しながら1回の音波送信で複数の周波数を使用できる波形(マルチトーンバースト[MTNB: Multi ToNe Burst]波)が考案された。MTNB波を用いた場合、各種パラメータを変化させることで測定時間とS/N比が変化することが考えられる。そこで今回は、主として平均回数を変化させた場合の計測速度とS/N比の関係についての検討を行った。

II. 本手法で用いる信号波形

非接触音響探査法で従来用いられてきたシ

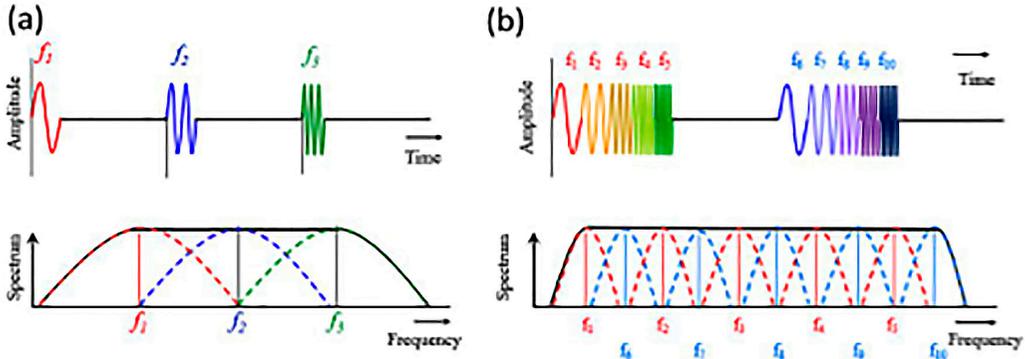


図 1. トーンバースト概略図 (a) STNB (b) MTNB

シングルトーンバースト (STNB) 波と計測時間短縮のために考案されたマルチトーンバースト (MTNB) 波の 2 つの信号波形について述べる。

1. シングルトーンバースト (STNB) 波

シングルトーンバースト波形 (STNB) 波は、音波送信毎に中心周波数を変化させ必要となる周波数帯域をカバーする信号波形であり中心周波数に対する不足成分を互いに補うような周波数特性を各パルス列に持たせることで広帯域な周波数成分を得ている。概略図を図 1. (a) に示す。

2. マルチトーンバースト (MTNB) 波

MTNB 波は 1 回の音波送信に複数の中心周波数が含まれた信号波形である。概略図を図 1. (b) に示す。時間ゲートを用いるため計測物との距離や 1 つの中心周波数のパルス幅により波群に格納できる中心周波数の数は変化するが、STNB 波と比較すると全体の休止時間が短くなるため計測時間が短縮される。

III. 平均回数を変化させた場合の計測速度と S/N 比に関する検証実験

検証実験では、送信波である STNB 波および MTNB 波の条件を揃えるために基本パ

ラメータである周波数範囲 1k-4.8kHz, 周波数変調インターバル 200Hz, パルス幅 3ms, およびパルス間インターバル 50ms を共通とした。その上で、STNB 波は 50ms 毎に 1 つの周波数のパルスを 20 回送信するために全体の波形送信にかかる時間は 1 秒 (1000ms) となる。一方で、MTNB 波の場合は 50ms 毎に 5 つの周波数群を 4 回に分けて送信する。そのため、全体の波形送信にかかる時間は 0.2 秒 (200ms) となる。なお、LDV の 1 回のデータ記録にかかる遅延時間は約 200ms である。

1. 実験セットアップ

測定ターゲットとして円形欠陥 (直径 300mm, 厚さ 25mm の発泡スチロール) が深さ 40mm の位置に埋設されたコンクリート供試体を用いて実験を行った。実験セットアップを図 2. に示す。音源としては LRAD-300X (LRAD Corp.) を LDV としては RSV-150 (Polytec Corp., 半導体レーザ, 赤外光 10mW) を使い、振動速度データの記録装置としては PSV400-H4 (Polytec Corp.) を用いた。離隔は約 5m で計測時にはコンクリー

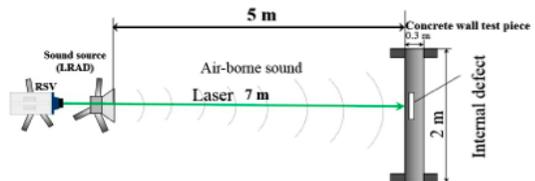


図 2. 実験セットアップ

ト表面付近での最大音圧が 100 dB 程度になるように調整して欠陥部の振動速度を測定した。平均回数は MTNB 波の場合は 1, 3, 4 および 5 回, STNB 波の場合は, 3 および 5 回とした。なお, 本節では平均を取っていないデータでも比較のため, 平均回数 1 回として表示している。

S/N 比についてはレーザヘッドの共振を考慮し, (1) 式を用いて算出した。

$$S/N[dB] = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{VSA_{peak \pm 5Hz}}{VSA_{2500-4500Hz}} \right) \dots (1)$$

ここで信号成分としての $VSA_{peak \pm 5Hz}$ は欠陥部中心のたわみ共振周波数の振動速度スペクトルピーク $\pm 5Hz$ の振幅平均値を, ノイズ成分としての $VSA_{2500-4500Hz}$ は振動速度スペクトル 2500Hz-4500Hz の振幅平均値を表している。

2. 実験結果

(1) 加算平均回数と S/N 比

測定時の平均回数による S/N 比の変化を示した図を図 3. に示す。□印が MTNB 波, △印が STNB 波の結果を示している。図より平均回数が増えると S/N が向上すること, および MTNB 波と STNB 波の S/N 比の差は少ないことが確認できる。

(2) 測定時間と S/N 比

次に測定点 1 点 (欠陥部中心) における測定時の平均回数毎の測定時間と S/N 比の関係を表した図を図 4. に示す。

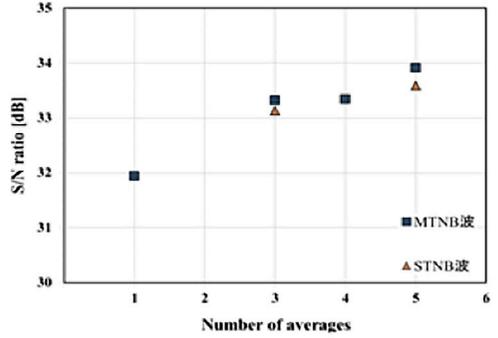


図 3. 加算平均回数と S/N 比

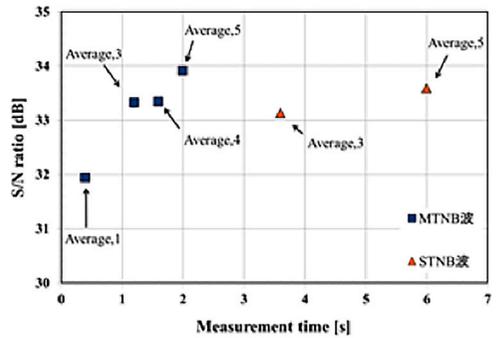


図 4. 測定時間と S/N 比

□印が MTNB 波, △印が STNB 波の結果である。図より MTNB 波は, STNB 波と同程度の S/N 比を保ちながら, 1 点あたりの測定時間を約 2 秒 (平均回数 3 回時) から約 4 秒程度短縮 (平均回数 5 回時) できていることが分かる。また, 図からは市販の LDV としては高出力の RSV150 の場合には, 特に平均処理を行わなくとも 30dB 以上の極めて

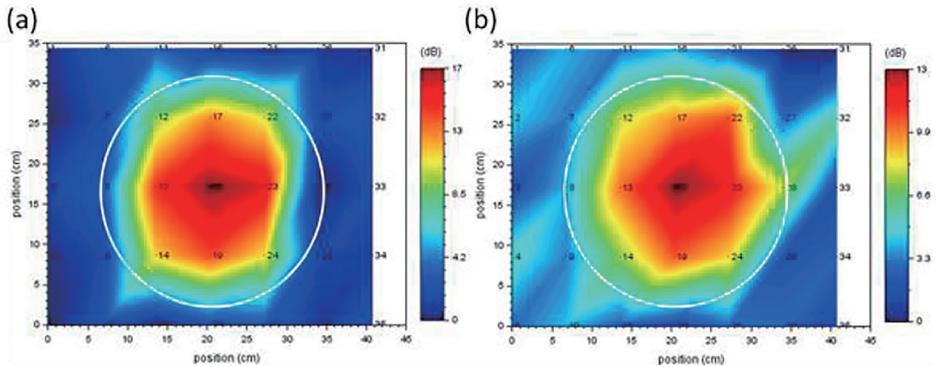


図 5. トーンバースト概略図 (a) STNB (b) MTNB

高いS/N比が実現できていることも見て取れる。そのため、測定表面の状態（凹凸や反射率）にも依存すると思われるが、欠陥部のたわみ共振周波数がレーザーヘッドの共振周波数に重ならない限り、極めて高速な計測が実現できる可能性が高いといえる。逆に言えば、LDVとしてRSV150を用いた場合には、レーザーヘッドの共振をどのようにして低減するかが実用上の課題となることが予測される。

(3) 映像結果の比較例

振動エネルギー比による欠陥部映像結果例を図5.に示す。白円は欠陥部の大きさと位置を示している。図より、白円内に振動エネルギー比が高い領域が集中していること、および最大値が中央に存在していることなどが共通していることから、ほぼ同等の欠陥検出が出来ていることがわかる。また35点の計測時間が、STNB波の場合は210秒、MTNB波の場合は70秒となり3倍の高速化が実現できていることがわかる（どちらも平均回数5回の場合）。

131(4), p.3462, (2012)

4) R. Akamatsu *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.52, 07HC12, (2013)

5) K. Katakura *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.53, 07KC15, (2014)

IV. まとめ

非接触音響探査用の送信音波としてSTNB波とMTNB波の比較実験を行った。平均回数を変化させた場合の実験結果から、MTNB波を用いれば欠陥映像化に必要なS/N比を保ったまま、従来のSTNB波に比べて高速計測が実現可能であることを確認した。今後、MTNB波としてさらに効率的な送信方法があるかどうかについて検討を加える予定である。

【参考文献】

- 1) 島田他, 非破壊検査 61(10), pp.519-524, (2012)
- 2) T. Sugimoto *et al.*, *IEEE Int. Ultrasonics Symp.*, pp.744-777, (2011)
- 3) T. Sugimoto *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*,