

## 論文

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(Ⅱ)——

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 (II)小菅 信章<sup>1</sup>・上地 樹<sup>2</sup>・杉本 和子<sup>2</sup>・杉本 恒美\*

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2018年3月17日 受理)

## I. はじめに

コンクリート構造物表層部に発生する亀裂、剥離を検査する手法としてハンマーを用いた打音検査がいまだに主流である。この検査は高価な測定機材を必要としておらず、コンクリート表面を打撃するだけとシンプルであり簡便な検査ではあるが検査の精度としては点検者の経験や年齢によって左右され橋梁などの高層施設では検査が困難といった欠点がある。そこで我々は、定量的かつ遠距離から検査可能な検査手法として、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以上の遠距離からの検査と欠陥の検出精度としては打音検査と同程度の検出が可能であることを先行研究から明らかにしている<sup>1-3)</sup>。

本手法は遠距離から計測できる一方で、計測時間短縮のための信号波形<sup>4,5)</sup>(マルチト

ーンバースト〔MTNB: Multi ToNe Burst〕波)を用いた場合に従来用いてきた信号波形である(シングルトーンバースト〔STNB: Single ToNe Burst〕波)と比べSignal/Noise(S/N)比が劣ってしまう為、高速測定時のS/N比の向上が課題として残されてきた。

そこで、この課題に対してMTNB波のS/N比は信号内の各種パラメータを変化させることにより変化することが考えられるため、今回は信号波形内の周波数配置を変化させ場合のS/N比の関係についての検討を行った。

## II. S/N比に関する検証実験

## 1. 実験概要

比較実験では、MTNB波の周波数配置をなるべく高次高調波に近い周波数を選んで配置したもの(Harmonic-type)、離散的に配置したもの(Discrete-type)、順番に配置したもの(Continuous-type)に加え、STNB

\* SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

<sup>1</sup> KOSUGE Nobuaki: Department of Medical Engineering, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

<sup>2</sup> UECHI Itsuki and SUGIMOTO Kazuko: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

波の4つを用いた。

各 MTNB 波の周波数配置の例として、Harmonic-type は、第1波群 1000、2000、3000Hz、第2波群 1200、2400、4800Hz、第3波群 1400、2800、4200Hz のように高次高調波を多く含むように配置を工夫したものである（配置できる周波数の数や波群数によっては必ずしもすべての波群の中に配置した周波数が高調波とはならない）。Discrete-type は、第1波群 1000、1600、2200Hz、第2波群 1200、1800、2400Hz、第3波群 1400、2000、2600Hz のように一定の周波数間隔で加振信号を配置したものである。Continuous-type は、第1波群 1000、1200、1400Hz、第2波群 1600、1800、2000Hz、第3波群 2200、2400、2600Hz のように配置したものである。信号波形の条件としては、MTNB 波の周波数範囲を 2000-6800Hz、STNB 波の周波数範囲を 2000-6000Hz とし、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 は共通とし、S/N 比の比較実験を行った。

## 2. 本手法で用いる信号波形

### (1) マルチトーンバースト波

マルチトーンバースト (MTNB : Multi ToNe Burst) 波は、計測の高速化のために考案された波形である。1 回の音波送信に複数の中心周波数が含まれた送信波形であり、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。概略図を Fig.2.1 に示す。本手法では、S/N 比の向上

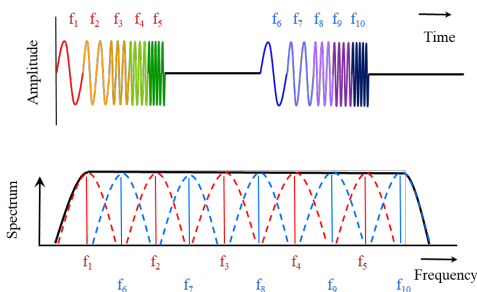


Fig.2.1 MTNB 波概略図

のためデータ処理時に時間ゲートを用いる。時間ゲートは、測定対象物から反射して戻ってきた音波がレーザーヘッドを揺らし大きなノイズになるため、時間的に計測対象物を振動させているところのみを抽出するものである。そのため、MTNB 波は計測対象との距離や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が変化する。音源 - 計測対象物間の音波伝搬時間を  $t_1$  [s]、計測対象物 - レーザーヘッド間の音波伝搬時間を  $t_2$  [s] とするとき、時間ゲートを有効に使うためには MTNB 波の1つの波群の持続時間は  $(t_1+t_2)/2$  [s] までとなり、休止時間を  $(t_1+t_2)/2$  [s] 以上にする必要がある。このことから MTNB 波は1度にすべての中心周波数を送出するのではなく距離によって中心周波数をいくつかの波群に分割して送している。計測対象との距離が離れるほどほど1つの波群の持続時間は長くなり波群に格納できる中心周波数の個数が増えるため、長距離の計測になるほど計測時間としては有利になる。次にパルス幅と波群に格納することのできる中心周波数の個数の関係だが、パルス幅（周期）と周波数は逆数であり信号波形全体の周波数帯域をカバーするためには、パルス幅を長くすると変調周波数はより間隔を狭めなければならない。例えば、パルス幅 3ms の場合1つのパルスの持つ周波数帯域幅は 333Hz であり波形全体の周波数帯域をカバーするためには、最小で 166.5Hz の間隔で変調させる必要がある。パルス幅を 5ms に延長したときには、変調周波数は 100Hz、パルス幅 10ms では、変調周波数 50Hz となる。MTNB 波では波群の持続時間に制約があるため、パルス持続時間が長くなると1つの波群に格納できる中心周波数の数は減ってしまう。また、この場合変調周波数の間隔が短くなるため中心周波数の数も増加する。このため、パルス持続時間を長くした場合加振力は増大するため S/N 比としては有利になるが、全体の中心周波数が増える一方で1つの波群に格納することのできる中心周波数の個数は減ってし

まうため、計測時間としては不利になる。

## (2) 実験で使用した MTNB 波の周波数配置

MTNB 波は時間ゲート処理を有効に用いるために計測対象との距離によりパルス持続時間に制限がある。そのため、1 度にすべての周波数を送出することができず、信号波形内でいくつかの波群に分割され送出される。周波数配置とは、波群内の周波数の順番のことを表している。概略図を Fig.2.2 に示す。

実験で使用した Harmonic-type (高次高調

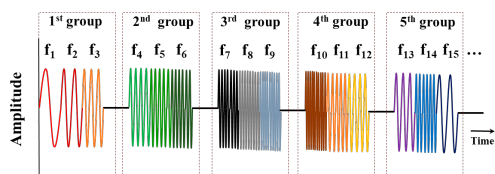


Fig.2.2 波群概略図

波に近い周波数を選んで配置したもの)、Discrete-type (離散的に配置したもの)、Continuous-type (順番に配置したもの)の周波数配置を Table.2.1.1 ~ 3 に示す。

## 3. 実験セットアップ

測定ターゲットとして直径 300mm と直径 200mm のプラスチックフィルムが深さ 60mm の位置に埋設され円形剥離欠陥が模擬されたコンクリート供試体を用いて実験を行った。実験セットアップ図を Fig.2.3 に示す。音源としては LRAD-300X (LRAD Corp.) を、LDV としては PSV-500 Xtra (Polytec Corp., 半導体レーザ、赤外光 10mW) を用い、振動速度データの記録装置としては PSV400-H4 (Polytec Corp.) を用いた。音源 - コンクリート間は約 5m、LDV - コンクリ

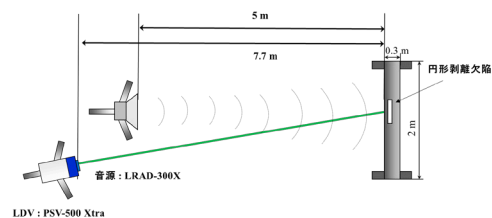


Fig.2.3 実験セットアップ図

Table.2.1.1 Harmonic-type

	1 <sup>st</sup> group	2 <sup>nd</sup> group	3 <sup>rd</sup> group	4 <sup>th</sup> group	5 <sup>th</sup> group
f <sub>1</sub>	2.0	f <sub>6</sub> 2.2	f <sub>11</sub> 2.8	f <sub>16</sub> 3.4	f <sub>21</sub> 2.4
f <sub>2</sub>	4.0	f <sub>7</sub> 4.2	f <sub>12</sub> 5.4	f <sub>17</sub> 3.6	f <sub>22</sub> 4.8
f <sub>3</sub>	3.0	f <sub>8</sub> 4.4	f <sub>13</sub> 5.6	f <sub>18</sub> 3.8	f <sub>23</sub> 2.6
f <sub>4</sub>	5.8	f <sub>9</sub> 4.6	f <sub>14</sub> 3.2	f <sub>19</sub> 6.2	f <sub>24</sub> 5.0
f <sub>5</sub>	6.0	f <sub>10</sub> 6.6	f <sub>15</sub> 6.4	f <sub>20</sub> 6.8	f <sub>25</sub> 5.2

Table.2.1.2 Discrete-type

	1 <sup>st</sup> group	2 <sup>nd</sup> group	3 <sup>rd</sup> group	4 <sup>th</sup> group	5 <sup>th</sup> group
f <sub>1</sub>	2.0	f <sub>6</sub> 2.2	f <sub>11</sub> 2.4	f <sub>16</sub> 2.6	f <sub>21</sub> 2.8
f <sub>2</sub>	3.0	f <sub>7</sub> 3.2	f <sub>12</sub> 3.4	f <sub>17</sub> 3.6	f <sub>22</sub> 3.8
f <sub>3</sub>	4.0	f <sub>8</sub> 4.2	f <sub>13</sub> 4.4	f <sub>18</sub> 4.6	f <sub>23</sub> 4.8
f <sub>4</sub>	5.0	f <sub>9</sub> 5.2	f <sub>14</sub> 5.4	f <sub>19</sub> 5.6	f <sub>24</sub> 5.8
f <sub>5</sub>	6.0	f <sub>10</sub> 6.2	f <sub>15</sub> 6.4	f <sub>20</sub> 6.6	f <sub>25</sub> 6.8

Table.2.1.3 Continuous-type

	1 <sup>st</sup> group	2 <sup>nd</sup> group	3 <sup>rd</sup> group	4 <sup>th</sup> group	5 <sup>th</sup> group
f <sub>1</sub>	2.0	f <sub>6</sub> 3.0	f <sub>11</sub> 4.0	f <sub>16</sub> 5.0	f <sub>21</sub> 6.0
f <sub>2</sub>	2.2	f <sub>7</sub> 3.2	f <sub>12</sub> 4.2	f <sub>17</sub> 5.2	f <sub>22</sub> 6.2
f <sub>3</sub>	2.4	f <sub>8</sub> 3.4	f <sub>13</sub> 4.4	f <sub>18</sub> 5.4	f <sub>23</sub> 6.4
f <sub>4</sub>	2.6	f <sub>9</sub> 3.6	f <sub>14</sub> 4.6	f <sub>19</sub> 5.6	f <sub>24</sub> 6.6
f <sub>5</sub>	2.8	f <sub>10</sub> 3.8	f <sub>15</sub> 4.8	f <sub>20</sub> 5.8	f <sub>25</sub> 6.8

ート間の距離は約 7.7m である。また、計測時にはコンクリート表面付近での最大音圧が 100dB 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。加算平均回数は MTNB 波、STNB 波ともに 5 回としている。

## 4. 実験結果と考察

### (1) 模擬欠陥の共振周波数

計測対象であるコンクリート試験体の  $\phi$  300-60 と  $\phi$  200-60 の共振周波数を調べるために STNB 波で計測した結果から欠陥部と健全部の振動速度スペクトルの比較を行った。Fig.2.4 に比較を行った計測点を示す画像を表し、Fig.2.5、Fig.2.6 にそれぞれの振動速度スペクトルを示す。また、共振周波数のスペクトルのピークが低いため、周波数別の振動速度画像 (Fig.2.7) と合わせてたわみ

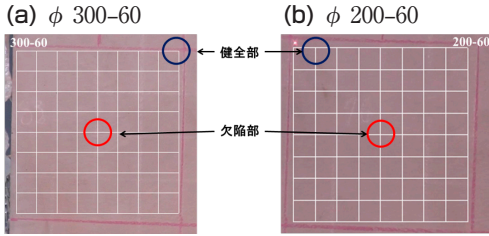


Fig.2.4 計測点画像

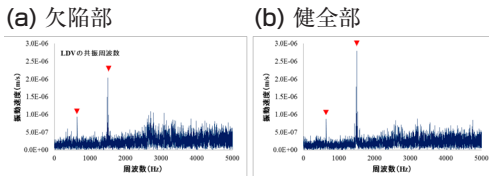


Fig.2.5 φ 300-60 の振動速度スペクトル

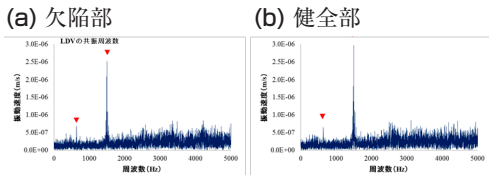


Fig.2.6 φ 200-60 の振動速度スペクトル

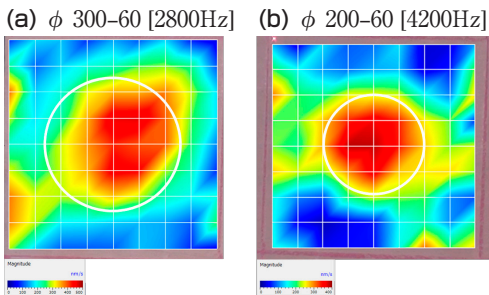


Fig.2.7 振動速度画像

振動の共振周波数を探った。この結果からφ 300-60の共振周波数2800Hzであり、φ 200-60では欠陥部の共振周波数が4200Hzであることが確認された。

(2) 周波数配置と S/N 比の比較結果

欠陥中心部で得られた振動速度スペクトルの S/N 比は以下の式を用いて計算した。

$$S/N \text{ [dB]} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{VSA_{peak \pm 5 \text{ Hz}}}{VSA_{2000-3000 \text{ Hz}}} \right)$$

注) VSA: Velocity Spectrum Average

ここで  $VSA_{peak \pm 5 \text{ Hz}}$  は振動速度スペクトルの

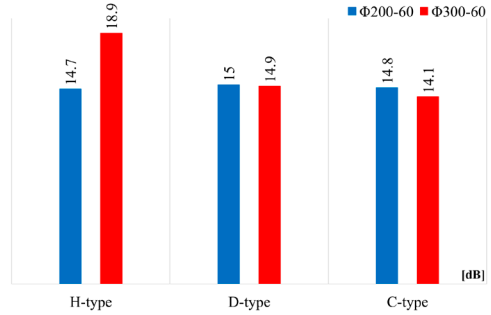


Fig.2.8 S/N 比の比較結果

Table.2.2 Harmonic-type

	1 <sup>st</sup> group	2 <sup>nd</sup> group	3 <sup>rd</sup> group	4 <sup>th</sup> group	5 <sup>th</sup> group
f <sub>1</sub>	2.0	f <sub>6</sub> 2.2	f <sub>11</sub> 2.8	f <sub>16</sub> 3.4	f <sub>21</sub> 2.4
f <sub>2</sub>	4.0	f <sub>7</sub> 4.2	f <sub>12</sub> 5.4	f <sub>17</sub> 3.6	f <sub>22</sub> 4.8
f <sub>3</sub>	3.0	f <sub>8</sub> 4.4	f <sub>13</sub> 5.6	f <sub>18</sub> 3.8	f <sub>23</sub> 2.6
f <sub>4</sub>	5.8	f <sub>9</sub> 4.6	f <sub>14</sub> 3.2	f <sub>19</sub> 6.2	f <sub>24</sub> 5.0
f <sub>5</sub>	6.0	f <sub>10</sub> 6.6	f <sub>15</sub> 6.4	f <sub>20</sub> 6.8	f <sub>25</sub> 5.2

ピーク ± 5Hz の振幅平均値を、 $VSA_{2000-3000 \text{ Hz}}$  は振動速度スペクトル 2000Hz-3000Hz の振幅平均値を表している（欠陥部の共振はφ 200-60 が約 4200Hz、φ 300-60 が約 2800Hz である）。

比較実験結果を Fig.2.8 に示す。青がφ 200-60、赤がφ 300-60 を表している。φ 200-60 では S/N 比の差がなく、φ 300-60 では H-type が D、C-type と比べ S/N 比が数 dB 改善されていることが分かる。この 2 つの模擬欠陥で S/N 比に違いが表れた理由としては、欠陥部の共振周波数に対して高次高調波が配置されていたかどうかの影響していたと考えられる。例えば Table.2.2 に示すようにφ 300-60 では、欠陥部の共振周波数が 2800Hz であり同波群内の直近に高次高調波の周波数があるのに対し、φ 200-60 では欠陥部の共振周波数が 4200Hz であり同波群内に高次高調波の周波数が含まれていないことがわかる。

5. まとめ

実験結果から欠陥部の共振周波数が高次高

調波に配置したところにある場合、他の周波数配置と比べS/N比は数dB改善された。この結果から波群内で高次高調波になるように配置したMTNB波を用いることにより高速かつ高S/N比での計測が可能であることが明らかになった。しかしながら、高いS/N比を得たい場合には、波形全体の時間は長くなるが必要とされる周波数範囲に対してはすべて高次高調波を配置した波形が必要であることも明らかになった。

**【参考文献】**

- 1) R. Akamatsu *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.52, 07HC12, (2013.7)
- 2) K.Katakura *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.53, 07KC15, (2014.7)
- 3) K.Sugimoto *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, 07HC15, (2015.7)
- 4) 杉本他, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2103-2108, (2016.7)
- 5) 小菅他, 音響秋講論集 2-1-15, pp.1257-1258, (2016.9)