

論文 バースト弾性波を用いた非破壊試験

森 和也^{*1}・鳥越 一平^{*1}・木原 隆嗣^{*2}・馬場 トドル^{*2}

要旨：バースト弾性波をコンクリート構造物の非破壊試験に適用する方法を提案した。バースト波は間欠的波形で、無波形時に計測を行うことによって、加振の影響を低減することができる。コンクリート試験片内の人工欠陥検出とシース管のグラウト充填問題へ適用した。その結果、大きさ 20cm 程度の欠陥であれば、10cm 以上の深さに位置してもイメージングが可能であった。また、深さ 20cm～25cm に位置するシース管のグラウトの有無の判定が可能であった。さらに、バースト弾性波を用いる際の留意点について検討した。

キーワード：非破壊試験, 弾性波, バースト波, 欠陥, グラウト充填評価, コンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物の健全性評価は、その重要性がますます大きくなっている。戦後の高度経済成長時に大量に建造されたコンクリート構造物の耐用限界が近づいているからである。それらの構造物の完全な再構築はコスト的に不可能であり、健全性評価によって判定される危険箇所への補修を行うより他に道はない。

コンクリート構造物内の欠陥の検出には、X線法、レーダー法、弾性波法などがある。さらに弾性波法は、超音波法、衝撃弾性波法¹⁾、打音法などに分類される。検査表面下のはく離や空げきの検出に対しては、有効な方法が確立されつつある。しかしながら、PC コンクリートのシース管内部のグラウトの有無の判定に関しては、簡便で信頼性の高い試験手法は未だに確立されていない²⁾。

本質的には、グラウト充填評価は欠陥検出と同じ問題であり、検査箇所が鋼製シース管内部であることと、シース管がコンクリート構造物の比較的深い部分に存在していることが検査を難しくしているに過ぎない。したがって、従来の欠陥検出法を改良・高精度化すればグラウト充填評価は可能になるのではないかと考えられる。

そこで、本論文では弾性波法の高精度化を試みる。超音波法と衝撃弾性波法の特長を有するバースト弾性波法 (Burst Elastic Wave Method) を提案する。バースト弾性波法の特徴を説明し、実際に、コンクリート試験片に埋め込んだ人工欠陥の検出ならびにシース管内のグラウト充填評価に適用する。さらに、バースト弾性波法を用いる場合に考慮すべき点についても言及する。

2. バースト弾性波法の原理

2.1 超音波法・衝撃弾性波法の特徴と問題点

超音波法、衝撃弾性波法、バースト弾性波法の特徴を表-1 に示している。超音波法は、探触子で超音波を発生・検出する。欠陥などの対象物からの超音波の反射時間・反射強度によって、対象物の情報を得るものである。使用する周波数は、通常、数十キロヘルツから数百キロヘルツで、その周波数の高さから、比較的小さな欠陥の検出が可能である。反面、コンクリートなどの複合材料では、拡散が激しく、深部の情報を得ることは難しい。また、振動エネルギーが小さいことも深部情報の収集には欠点となる。

衝撃弾性波法は、鋼球あるいはハンマーの打撃で弾性波を発生し、加速度センサで振動を計測する方法である。検査面と欠陥などとの間に発生する定在波の振動周波数、あるいは、検査対象のたわみ振動の周波数から、対象物の情報を得る。打撃によって発生する振動の振動数に限界があることから、数十キロヘルツ以下の周波数を対象としている。コンクリートの検査では、低周波であることが有利となる。また、比較的大きなエネルギーの弾性波を発生することが可能である。しかしながら、毎回の打撃に対して、加振エネルギーの周波数分布が安定しない欠点がある。これは、欠陥が深部にある場合など、欠陥によって発生する振動の信号がノイズと同程度である場合には、有効な信号とノイズとの判別を難しくする。

表-1 超音波法、衝撃弾性波法、バースト弾性波法の比較

方法名	加振方法	計測方法	計測周波数 (Hz)	計測対象
超音波法	探触子	探触子	数十キロ～数百キロ	反射時間, 反射強度
衝撃弾性波法	鋼球, ハンマー	加速度センサ	～数十キロ	定在波の周波数・強度
バースト弾性波法	圧電素子, 磁歪素子	加速度センサ	～百キロ	定在波の周波数・強度

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科博士前期課程

2.2 バースト弾性波

そこで筆者らは、図-1 に示すようなバースト波形を弾性波の発生に用いる方法を提案する。弾性波の発生は積層圧電アクチュエータなどの圧電素子で行い、振動の計測は衝撃弾性波法と同じく加速度センサを用いる（図-2 参照）。

バースト弾性波の特徴は、正確な周波数と安定した強度の弾性波を発生させることが出来ることである。圧電素子として積層圧電アクチュエータを用いれば、百キロヘルツ程度までの加振が可能である。この程度の高周波では、高周波用加速度センサを用いても感度は低下するが、補正を施せば計測は可能な範囲である。

発生エネルギーは、バースト数を増やせば理論的には制限はない。また、信号の同期が容易で、検出信号の時間領域での加算平均や相関の計算が可能である。

2.3 バースト弾性波の周波数変調

バースト弾性波で問題となるのは、周波数の変調方法である。単一周波数では、その周波数近傍の固有振動数を有する振動系のみしか振動させることが出来ないからである。周波数変調方法としては、図-3 に示すような方法が考えられる。

図-3(a)は、一つのバースト信号内で周波数スイープを行うものである。この方法は信号が毎回同じなので簡便である。しかしながら、相対的に、スイープ開始から計測開始までの時間が長く、スイープ終了から計測開始までの時間が短くなるので、スイープ開始時の周波数よりスイープ終了時の周波数の方が計測強度は優位となる。加振時間から計測開始までの時間が短い方が、振動の振幅が大きくなるからである。したがって、加振・計

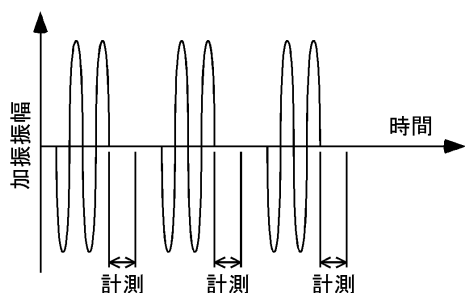


図-1 バースト弾性波

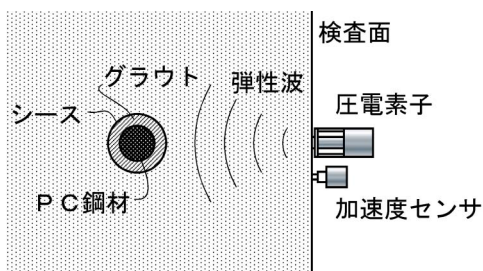


図-2 試験方法（グラウト充填評価の例）

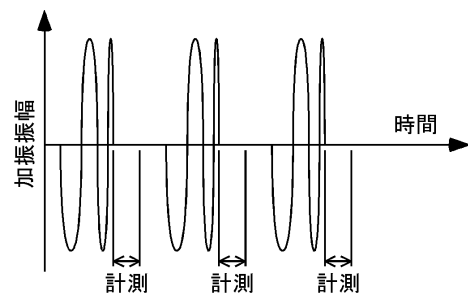
測法に依存する周波数に対するゲインの変動が発生する。

図-3(b)は、ホワイトノイズを用いる方法である。バースト数が十分多い場合は有効である。しかしながら、一つのバースト内には加振に有効に働くエネルギーが小さいので、振動が微小になり検出が困難になる可能性がある。これは、図-3(a)の手法にも共通の問題である。

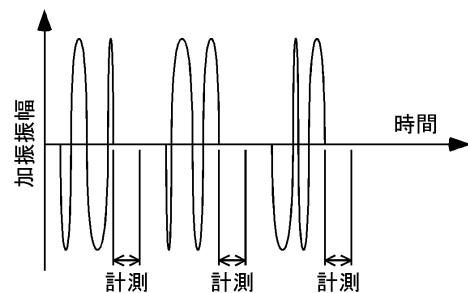
図-3(c)は、一つのバースト内では一定周波数とし、バーストごとに周波数を変調する方法である。この方法は、変調する周波数幅に注意すれば正確な周波数範囲の安定した加振が可能である。また、それぞれの周波数の直後に計測を行うので、ある一定の周波数が優位となることもない。そこで、本論文では、この一つのバースト内では周波数を一定とし、バースト間で周波数を変調する方法を採用する。

3. 試験方法

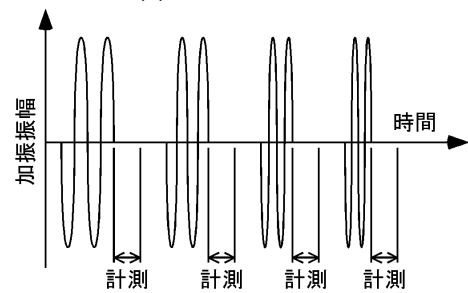
図-4 に試験装置を示す。バースト信号はパソコンで生成し、アンプで増幅して圧電素子（積層圧電アクチュエータ、NEC/TOKIN, AE1010D44H40F）をドライブし



(a) 単バースト周波数スイープ



(b) ホワイトノイズ



(c) 単バースト単一周波数

図-3 バースト弾性波

た。壁面の振動は加速度センサで電気信号に変換し、シグナルコンディショナーで増幅して、パソコンに取り込んだ。計測点と加振点との間隔は4 cmとした。

バースト信号は、一つのバースト信号で10サイクルとし、バースト間の時間を200 msとした。一回の計測では11バーストとした。バースト信号毎の周波数変調は、発生周波数の1%程度とした(6章参照)。信号計測は、バースト弾性波の停止直後から、100 msの間とした。

4. 人工欠陥を有する試験片への適用

4.1 試験片

試験片形状を図-5に、配合表を表-2に示している。一辺が、約500 mmの立方体である。人工欠陥の大きさは、直径200 mm、厚さ10 mmの円盤状とした。これは、ポリスチレンの円盤を埋め込んだものである。欠陥の深さは、表面から $d=25$ mm, 50 mm, 100 mmの三種類とした。同時に製作した角柱試験片から次の物理特性を得た。密度 $\rho=2580$ kg/m³, ヤング率 $E=25$ GPa, ポアソン比 $\nu=0.19$ 。

4.2 実験結果

バースト弾性波発生後に計測された振動を高速フーリエ変換(FFT)で周波数スペクトルに変換し、その結果を加算した一例($d=100$ mm)を図-6に示す。計測点は人工欠陥中心軸上の試験片表面である。図-6からわかるように、3 kHzにおいて鋭いピークが見られる。

前述の材料定数から求められる音速は $C_p = 3300$ m/sで¹⁾、深さ $d=100$ mmに存在する欠陥に対する縦波振動の固有振動数 f_l は次のように求められる³⁾。

$$f_l = \frac{0.96C_p}{2d} = \frac{0.96 \cdot 3300}{2 \cdot 0.1} \approx 16 \text{ kHz} \quad (1)$$

たわみ振動の固有振動数 f_f は、周辺固定円板のたわみ振動の固有周波数を用いて近似すると次のように求めることができる⁴⁾。

$$f_f = \frac{K_n d}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3(1-\nu^2)\rho}} \quad (2)$$

ここで、 a は円板の半径、 d は円板の厚さ、 K_n は振動のモードによって決まる係数で、一次の場合 $K_n=4.99$ である。

試験片の材料定数を式(2)に代入すると、 $d=100$ mmの欠陥に対するたわみ振動の固有振動数 f_f は次のように推定される。

$$f_f = 7.3 \text{ kHz} \quad (3)$$

実際のたわみ振動の振動数は、円板が人工欠陥であるポリスチレンに接触していることによって低下すると予測される。したがって、実験で得られた振動数3 kHzは、縦波振動で発生する固有振動数と大きく異なることから、振動のモードはたわみ振動であると推測される。

図-7は、深さ $d=100$ mmの欠陥に対して、表面を4 cm間隔の格子状に計測を行った結果をマップで示したものである。格子の交点が計測点である。図-7から、深さ100 mmに位置する200 mm程度の欠陥に対しては、

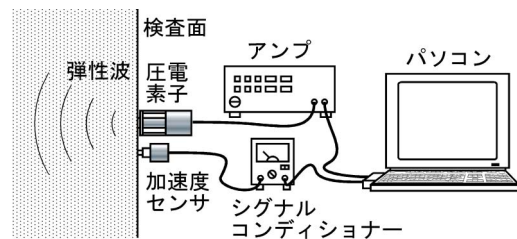


図-4 試験装置

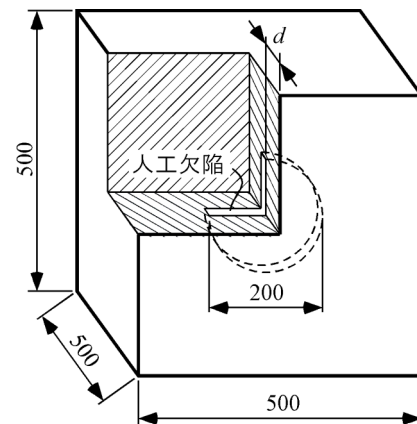


図-5 人工欠陥入り試験片

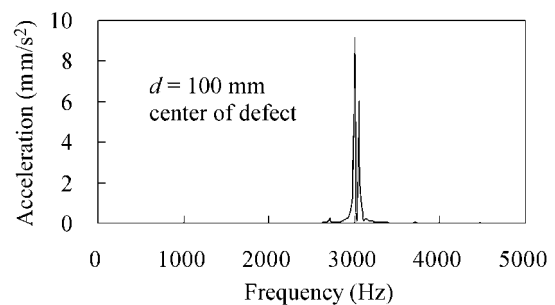


図-6 人工欠陥入り試験片($d=100$ mm)の振動のFFT結果

表-2 配合表

呼び強度 (N/mm ²)	スランブ (cm)	組骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
18	15	20	66	50	183	277	890	992	4.16

検査点間隔を欠陥寸法の5分の1程度にすればイメージングが可能であることがわかる。

図-7において、欠陥の中心ほど振動の振幅が大きくなっていることも、この振動モードがたわみ振動であることの裏付けとなる。

深さ25 mm、50 mmの欠陥に対しても同様の試験を行ったが、深さ100 mmの欠陥と同じように欠陥の輪郭が明確に現れた。

5. グラウト充填評価への適用

5.1 試験片

従来の弾性波法では明確な判定が困難であるシース管のグラウト充填評価の試験を試みた。シース管の径は45 mmで、PC鋼棒の径は36 mmである。試験片形状を図-8に示す。シース管内にグラウトを完全に充填した試験片と全く充てんしていない二つの試験片を用いた。コンクリートの配合は図-5の試験片と同じで、表-2に示した通りである。

音速を測定するために、シース管がない位置において、厚さ400 mm方向の縦波振動周波数を衝撃弾性波法で測定したところ、二つの試験片において約4.3 kHzであった。したがって、二つの試験片の音速 C_P は次式のように推定される³⁾。

$$C_P = \frac{2d \cdot f_l}{0.96} = \frac{2 \times 0.40 \times 4300}{0.96} \approx 3600 \text{ m/s} \quad (4)$$

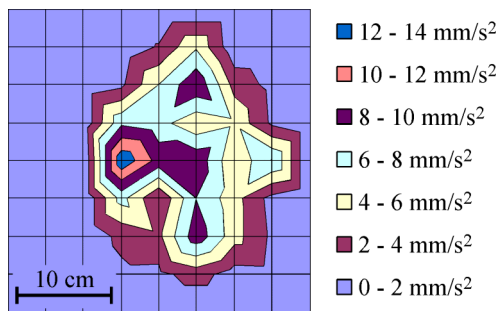


図-7 人工欠陥入り試験片($d=100\text{mm}$)の表面振動のマップ

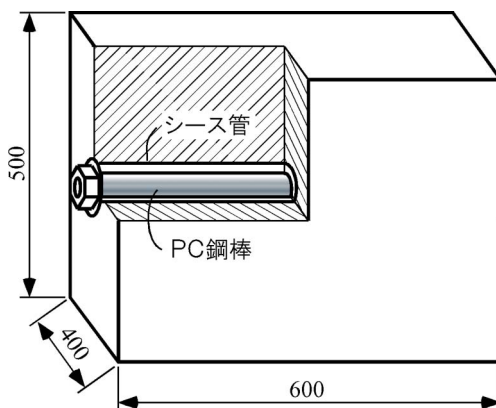


図-8 グラウト充填評価試験片

5.2 実験結果

図-8に示す試験片の正面と上面から計測を行った。正面のからの計測では検査面からシース管中心までの距離が200 mmとなり、上面からの計測では250 mmとなる。シース管表面までの距離は、それぞれ約180 mm、230 mmとなる。

検査面とシース管表面間に発生する縦波振動の周波数は次のように推定される。

$d=200\text{ mm}$ の場合：

$$f_l = \frac{0.96C_P}{2d} = \frac{0.96 \cdot 3600}{2 \cdot 0.18} \approx 9.6 \text{ kHz} \quad (5)$$

$d=250\text{ mm}$ の場合：

$$f_l = \frac{0.96C_P}{2d} = \frac{0.96 \cdot 3600}{2 \cdot 0.23} \approx 7.5 \text{ kHz} \quad (6)$$

深さ $d=200\text{ mm}$ のシース管と深さ $d=250\text{ mm}$ のシース管に対するグラウト充填と未充填の壁面振動の周波数スペクトルを、それぞれ図-9と図-10に示している。図-9と図-10の結果は、10回の計測結果の平均値である。

図-9と図-10において、ピーク周波数はそれぞれ縦振動の場合に推定される周波数9.6 kHzと7.5 kHzに近いことから、計測されている振動は検査面とシース管表面に発生した縦振動であると推定される。

図-9と図-10において共通に見られるグラウト充填と未充填の相違点は、グラウト充填の場合、二つのピークが存在しピーク値が低いことであり、未充填の場合、卓越した一つのピークが存在し、ピーク値がグラウト充填の場合に比べて大きいことである。この理由は次のように考えられる。

図-11に示すように、グラウトが充填されたシース管に弾性波が当たると、一部は反射し、一部は通過する。シース管を通過した弾性波は、さらにPC鋼材で反射する。したがって、グラウトが充填されたシース管では、異なる長さの経路に対して異なる周波数の定在波が発生する。

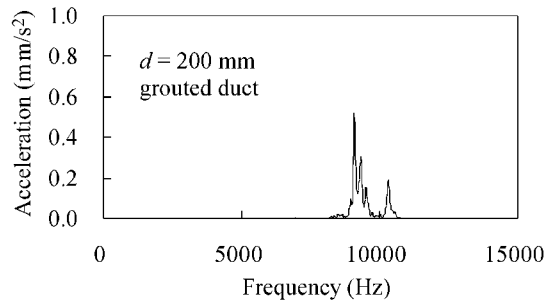
一方、グラウトが充填されていないシース管では、弾性波はシース管を通過することではなく、シース管のみで反射が起きる。その結果、単一の周波数の定在波が発生する。

反射強度の大きさは、完全反射が起きるグラウトが充填されていないシース管の方が大きくなり、周波数スペクトルにおいてもその結果が現れると考えられる。

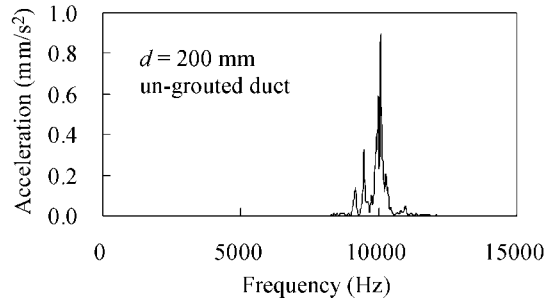
6. 考察

6.1 パースト弾性波の周波数の変調幅

パーストごとに周波数を変える場合、周波数をどの程度の範囲以内で変化させれば、連続的に周波数を変化さ

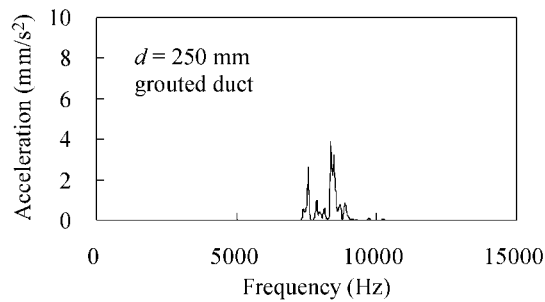


(a) グラウト充填

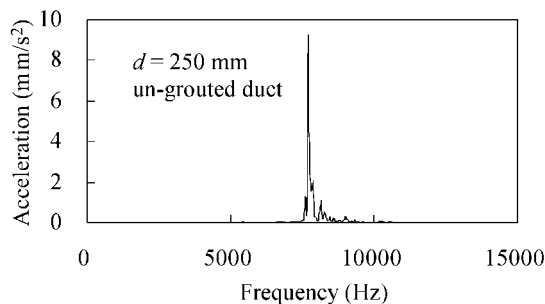


(b) グラウト未充填

図-9 深さ 200mm のシース管の結果



(a) グラウト充填



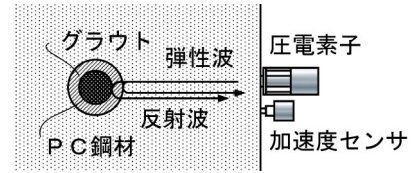
(b) グラウト未充填

図-10 深さ 250mm のシース管の結果

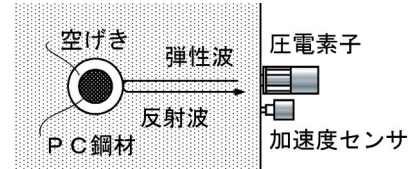
せる場合と同等であるかが疑問に残るところである。この点に関して、コンクリートの振動の減衰をもとに考察する。

図-12 は、加振を停止した後の減衰振動を示したものである。このときの振動振幅 x の包絡線は式(7)で表される。

$$x = a_0 \exp(-\omega_n \zeta t) \quad (7)$$



(a) グラウト充填



(b) グラウト未充填

図-11 グラウトの有無による弾性波の反射の違い

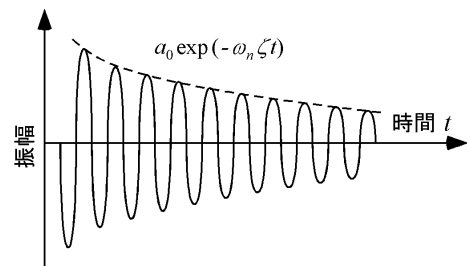


図-12 減衰振動

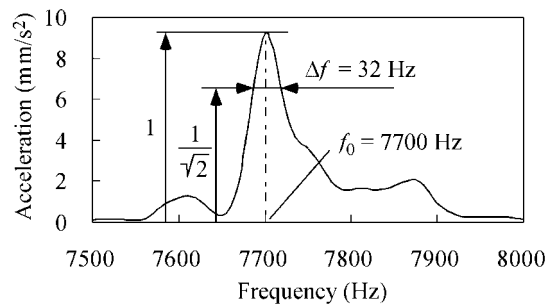


図-13 図-10(b)の拡大図

ここで、 a_0 は振幅の初期値、 ω_n は固有振動数、 ζ は減衰比である。減衰比 ζ は、パワースペクトルの半値幅 Δf から求めることが出来る⁵⁾。図-13 を例に説明する。

図-13 は、図-10(b)の一部を拡大したものである。減衰比 ζ は、半値幅 Δf を用いて式(8)で求められる。

$$\zeta = \frac{\Delta f}{2f_0} = \frac{32}{2 \times 7700} = 0.0021 \quad (8)$$

ここで、 f_0 はピーク値の周波数である。半値幅 Δf は、振幅スペクトルにおいては $1/\sqrt{2}$ の振幅における周波数幅となる。

減衰比 $\zeta = 0.0021$ をもとに、最大値を1とした共振曲線を描くと図-14 のようになる⁶⁾。ここで、 ω は強制振動の振動数である。

図-14 が意味するところは、バースト弾性波の周波数 ω が対象物の固有振動数 ω_n に一致した場合の壁面振動

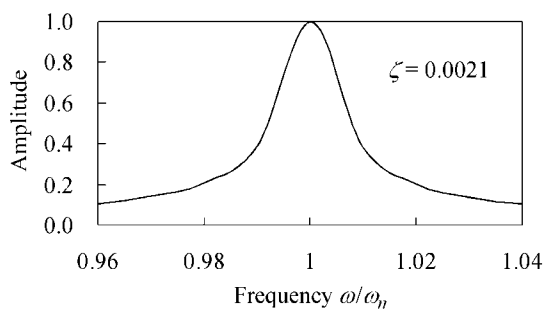


図-14 共振曲線

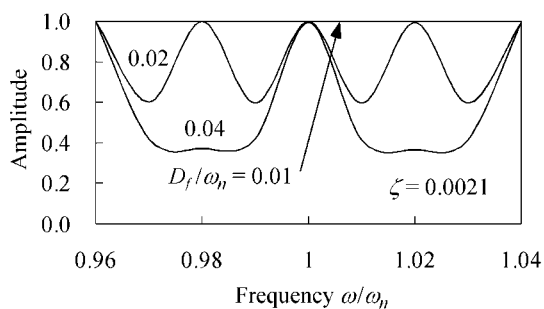


図-15 共振曲線を重ね合わせた結果

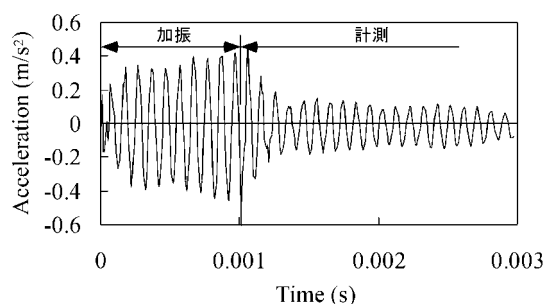


図-16 共振曲線を重ね合わせた結果

の振幅の大きさを 1 としたとき、 ω が ω_n からずれた場合の壁面振動の大きさを表したものである。

バースト弾性波の周波数を飛び飛びに設定する場合、その共振曲線は図-14 の共振曲線を、周波数の変化分だけ横軸方向にずらしたものを重ね合わせたものとなる。

図-15 は、固有振動数 ω_n に対するバースト弾性波の周波数変化 D_f を 0.01, 0.02, 0.04 と変化させた場合の共振曲線である。 $D_f/\omega_n = 0.04$ では、固有振動数 ω_n がバースト弾性波の周波数 ω のちょうど中間に位置すると、 ω が ω_n に一致した場合の振動の約 40%程度の振動になることがわかる。

$D_f/\omega_n = 0.01$ では、共振曲線はほぼ一定となる。したがって、計測しようとする周波数の 1%程度ずつバースト弾性波の周波数を変化させれば、 ω が ω_n に一致した場合と同じ効果が得られる。

以上の議論は、グラウト充填評価試験で得られた減衰比 $\zeta = 0.0021$ の仮定のもとに行われたものである。したがって、減衰の程度が著しく異なる場合には、その減衰

比に基づいてバースト弾性波の周波数を変化させる必要が生じる。

6.2 バースト弾性波のサイクル数

次に、一つのバースト弾性波において何サイクルの波形を入れるべきかを検討する。図-16 は、10kHz の弾性波を 10 サイクル入射したときの壁面振動の加速度を示したものである。弾性波入射開始から、約 3 サイクルまで壁面振動の振幅は急速に増加し、その後緩やかに増加しているのがわかる。したがって、一つのバースト弾性波のサイクル数は、5 サイクル以上必要で、10 サイクル程度で十分である。

7. まとめ

バースト弾性波をコンクリートの非破壊試験に適用する方法を提案し、試験片内に埋め込んだ円形状人工欠陥の検出とシース管内のグラウト充填評価に適用した。さらに、バースト弾性波を用いる場合の考慮点を考察し次の結論をえた。

- (1) 直径 20 cm の人工欠陥に対して、深さ 10 cm の位置の検出が可能で、欠陥寸法に対して 5 分の 1 程度の間隔で格子状に検査を行うことによってイメージングも可能である。
- (2) 深さ 25 cm 程度に位置する直径 45 mm のシース管内のグラウトの有無の判定が可能である。グラウトが充填されたシース管では壁面振動の周波数スペクトルに二つのピークが現れ、未充填のシース管では一つの卓越したピークが現れる傾向が見られる。
- (3) バースト弾性波を変調して、広い周波数範囲をカバーする場合は、変調幅を加振周波数の 1%程度にすれば、バースト弾性波の周波数と検出対象の固有振動数が一致した場合と同じ効果が得られる。
- (4) 一つのバースト弾性波のサイクル数は、5 サイクル以上必要で、10 サイクル程度で十分である。

参考文献

- 1) Sansalone, M.J. and Streett, W. B.: Impact Echo, Bullbrier Press, pp. 1-339, 1997
- 2) 内田昌勝, 加藤佳孝, 恒国光義, 魚本健人: コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1795-1800, 2005
- 3) 文献 1) の pp.51
- 4) 谷口修: 振動工学ハンドブック, pp.99-105, 養賢堂, 1976
- 5) たとえば, 近藤恭平: 振動論, 培風館, pp. 15, 1993
- 6) たとえば, 辻岡康: 機械力学入門, サイエンス社, pp. 24, 1985