

論文 回転式打音の音圧特性に関する実験的考察

中山 歩^{*1}・園田 佳巨^{*2}・三好 茜^{*3}・吉田 直紹^{*4}

要旨：「回転式打音検査法」は、最も簡易な非破壊検査法の一つである打音検査の精度と効率を向上させることを目的として開発されたものであり、検査器先端の多面体をコンクリート面上で移動・回転させ、発生する連続打音の変化をもとにコンクリート内部の異常箇所を調べる方法である。本論文は、「回転式打音検査法」で得られる打音の特性とコンクリート内部の欠陥状態との相関性に関して、実験により検討したものである。その結果、実験により得られた打音に欠陥の形状による打音特性の変化が確認されたことから、「回転式打音検査」の有用性が認められた。

キーワード：回転式打音検査法、周波数特性、供試体実験

1. 緒言

近年、老朽化した構造物に対して適切に維持管理を行い、ライフサイクルコストの低減を図ることの重要性が非常に高くなっており、構造物の非破壊診断法の研究・提案^{1),2)}が数多くなされている。しかし、従来の非破壊診断法（超音波探傷、熱赤外線等）のほとんどは、高額な計測機器を利用するものであったり、計測環境に対する適用条件が厳しく、実験室などの理想的な条件下でなければ効力を発揮しにくい等の問題³⁾を有している場合が多い。そのため、実際の橋梁等の構造物の点検業務は、「目視」による調査を主体とする場合が多く、大規模な野外構造物などの検査対象に対して適用可能な非破壊検査法は限定されていると言わざるを得ない。

一方、従来から簡易な非破壊診断法として利用されてきた方法の一つに打音検査があるが、検査領域が広範囲に及ぶ場合、点検員の労力が非常に大きいことが指摘されてきた。また、従来の打音検査では、熟練者の経験的な感覚で打音の音質の相違から異常の有無を判断することが多く、理論的な判断が現場における診断作業にあまり反映されていないのが現状である。

回転式打音検査法は、最も簡易な非破壊診断の一つである打音検査の精度と効率を飛躍的に向上させることを期待して開発されたもので、図-1に示すようなロッド先端に金属製の回転部を取り付けた検査器をコンクリート表面に押し当てながら回転させ、発生する打音の変化をもとにコンクリート内部の異常箇所を調べる方法である。

本手法の特徴として、①従来の打音検査に比べて構造物に与える打撃力（入力）のばらつきを大幅に低減可能であること、②検査器先端を転がしながら連続的に加振点を移動させることで、検査効率を飛躍的に向上できる

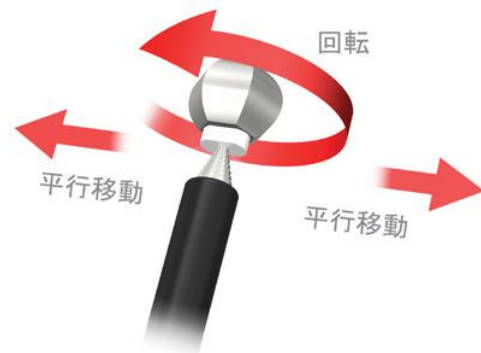


図-1 回転式打音検査器

ことなどが挙げられ、検査対象が大規模な野外構造物に対しても簡易で作業効率が高い方法として、既に実務レベルで診断業務に数多く利用された実績を有している。

本研究は、「回転式打音検査法」で得られる打音の特性とコンクリート表層部の欠陥状態（欠陥位置や欠陥部の大きさ）との相関性に関して、矩形モルタル供試体を用いた実験により検討したものである。ここでは、打音の特性値として、特に音圧波形の周波数特性（ピーク周波数、周波数分布性状）に着目することとし、さらに打音波形の最大音圧についても併せて検討することとした。また、「回転式打音検査法」で得られる打音の特性を検討するにあたり、「回転式打音検査法」の特徴をより明確化するため、ハンマーによる従来の打音検査法を用いた実験を同様に実施し、従来の打音検査法から得られる打音と比較することとした。

2. 回転式打音検査法の特徴

回転式打音検査器の先端をコンクリート表面上に押し

*1 西部ガス株式会社 (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 博士（工学）(正会員)

*3 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士課程 (正会員)

*4 (株) 第一復建 道路構造部 (非会員)



図-2 回転式打音検査の場合の正常箇所と異常箇所の打音波形イメージ

当てながら回転・移動させると、先端の角部が検査体に衝突することで打音が発生する。打音は角部がコンクリート面に衝突する度に発生するが、コンクリート内部が正常な箇所と異常な箇所では、コンクリートの振動によって発生した音波の伝播特性が異なることから、打音波形に相違が見られる。従来の打音法と比較した場合、打撃力の作用時間が短いため、回転式打音検査で得られる打音特性は、高周波域の打音が得られやすいなどの異なる特徴を有することが確認されている^{4),5)}。

図-2は、実際の診断業務で収録された正常箇所と異常箇所の典型的な打音波形のイメージを示したものである。これまでの検査実績^{5),6)}によると、回転式打音検査器による打音特性には、概ね以下のような特徴があることが報告されている。

- 1) 正常箇所と異常箇所では回転式打音検査による音圧を比較すると、異常箇所では10～20dB程度大きな値が得られることが多い。
- 2) 従来の打音検査では、浮き・剥離等の異常箇所では低周波音が得られるように言われているが、回転式打音検査では逆に異常箇所では高周波の音圧が大きくなる傾向にある。
- 3) 図-2の打音波形にも見られるように、正常箇所と異常箇所では打音の減衰特性に大きな相違があり、異常箇所では大きな反響音が長時間継続する傾向がある。

3. 実験概要

本実験では、欠陥を模擬した矩形モルタル供試体を作製し、実験を行った。ここでは、実験に用いた供試体の作製方法、および実験の内容を示す。コンクリート構造物を主に対象とするが、ここでは欠陥が打音に与える影響に関する基礎的な考察を行うため、コンクリート供試体は用いずモルタル供試体を作製し、実験を行った。

3.1 供試体および欠陥部

本実験では、図-3に示すような10×10×40cmの矩形モルタル供試体を用いた。表-1にモルタルの配合を示す。ここでは、人工欠陥のある供試体と、人工欠陥のない供試体を作製し、人工欠陥を含む供試体には、矩形の欠陥を想定し、発泡スチロール（厚さ2cm）を埋設した。人工欠陥の寸法および深さ（埋設位置）は表-2に示すとお

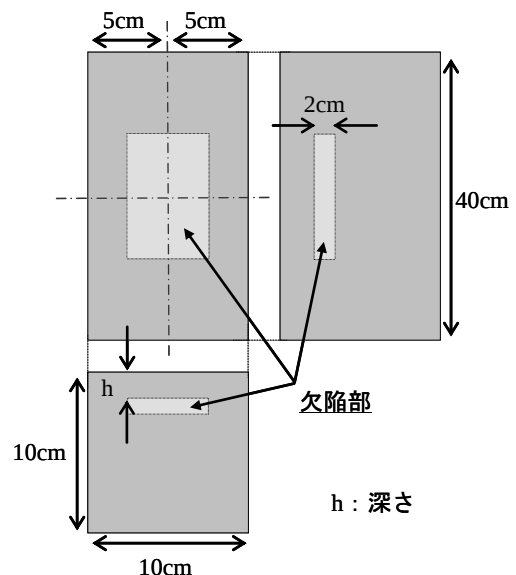


図-3 供試体寸法

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m ³)		
		W	C	S
50	2.25	295	590	1327

表-2 欠陥寸法および深さ

欠陥寸法 (cm)	欠陥深さ (cm)
3×5	2
5×10	2, 4, 6
5×15	2
7×20	2

りである。供試体の作製は、写真-1に示すように型枠中で発泡スチロールを固定させた後にモルタルを打設して行った。モルタル供試体の動弾性係数は32GPa、密度は2.15g/cm³である。ここで、動弾性係数の算出に関しては共鳴振動による動弾性係数試験⁸⁾ (JIS A 1127-2001) を用いて算出したものである。発振器により供試体が振動するよう駆動力を加え、一次共鳴振動数を測定し、その一次共鳴振動数を式(1)に代入することで動弾性係数を算出した。

$$E_D = 4.00 \times 10^{-3} \frac{L}{A} m f_2^2 \quad (1)$$

ここに、 E_D ：動弾性係数 (N/mm²)、 L ：供試体の長さ (mm)、 A ：供試体の断面積 (mm²)、 m ：供試体の質量 (kg)、 f_2 ：縦振動の一次共鳴振動数 (Hz)。

供試体は水中養生とし、打設後28日以降で実験を行った。

3.2 実験方法

打音の特性の比較を行うため、従来の打音検査用ハンマーと回転式打音検査器を用いて、モルタル供試体の表面を叩き、得られる打音をそれぞれICレコーダーにより録音した。計測におけるサンプリング周波数は44.1kHzである。その後、録音した打音波形に対してDFT処理を行い周波数分布を求めた。

なお、打撃位置は図-4に示すように、従来の打音検査の場合では供試体中央 (×印) への一点入力とし、回転式打音検査の場合では供試体中央部で中央線上に検査器先端を転がした。供試体は床に置いた状態とし、打音の測定位置は打撃位置より水平方向に15cm、鉛直上方向に10cmの位置に配置した。測定は各供試体につき3回ずつ行った。回転式打音検査器を用いた場合の測定の様子を写真-2に示す。

また、供試体の寸法や境界が周波数特性に影響を与えることも考えられるが、本研究では欠陥なしの供試体と比較した場合のパラメータの変化から欠陥部が打音に与える影響を考察するため、これら寸法や境界の影響は無視できるものと考えられる。

4. 実験結果および考察

ここでは、まず回転式打音検査で得られる連続打音の特徴に関して考察を行った。次に、欠陥部の位置 (表面からの深さ) や大きさが打音波形の周波数特性に与える影響を、従来の打音検査の場合と比較し、それぞれ検討した。

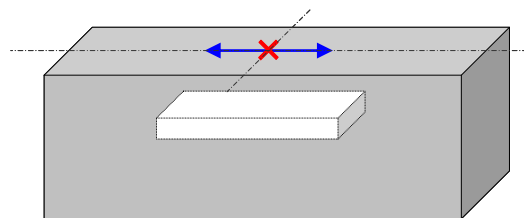
4.1 回転式打音検査法の連続打音の特徴

回転式打音検査で連続的に加えられる入力により得られる連続打音の性質に関して考察を行った。図-5に欠陥のない供試体、図-6に欠陥のある供試体で回転式打音検査により得られた打音の時刻歴波形をそれぞれ示す。図-5, 6より、作業者の動作による個人差はあるが、回転式打音検査により連続的に生じる打音の時間間隔は約0.015~0.02secであり、毎回ほぼ一定の時間間隔となることがわかる。また、欠陥のある供試体、欠陥のない供試体どちらにおいても、一回の打撃音が発生してから、次の打撃音が生じるまでに音圧レベルはおおよそ10%以下まで減衰していることが確認された。

これにより、回転式打音検査法で得られる連続打音は、



写真-1 供試体型枠



↔：回転式打音検査，×：従来の打音検査
図-4 打撃入力位置

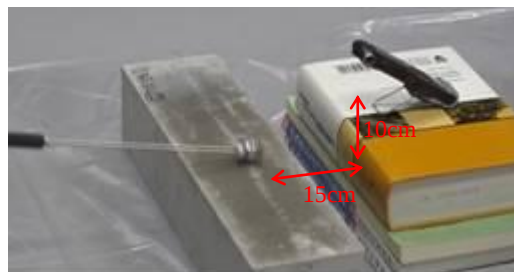


写真-2 実験の様子

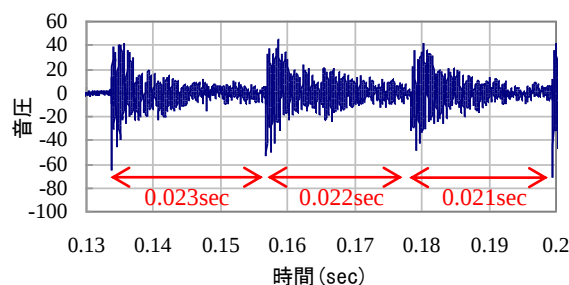


図-5 欠陥のない供試体での打音の時刻歴波形

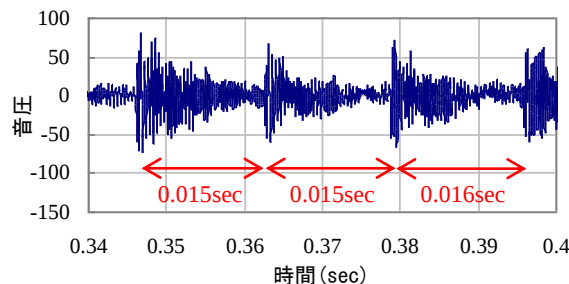


図-6 欠陥のある供試体での打音の時刻歴波形

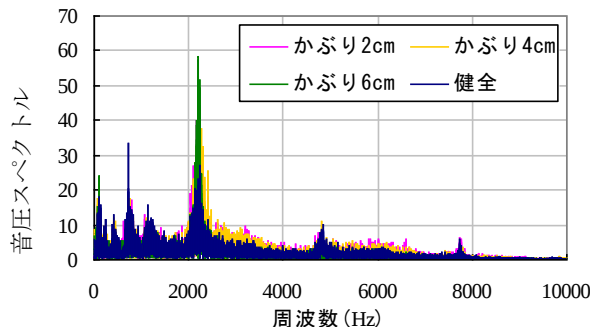


図-7 回転式打音の周波数特性 (位置の変化)

その一つ一つが互いに干渉する影響は比較的小さく、個々の打音はそれぞれ独立しているとみなしても構わないと考えられる。

4.2 欠陥位置が打音特性に与える影響

(1) 周波数特性に与える影響

欠陥部の位置が打音の周波数特性に与える影響を考察するために、人工欠陥の埋設位置を2cm, 4cm, 6cmと変化させ、打音を測定し、DFT処理を行った。欠陥部の大きさは 5×10 cmである。図-7, 8に回転式打音検査の場合の音圧 - 周波数関係を、図-9, 10に従来の打音検査の場合の音圧 - 周波数関係をそれぞれ示す。ここで、人間の最大可聴周波数は約22kHzであるが、モルタル供試体を打撃することで得られる打音には10kHz以上の周波数成分はほとんどみられないため、図中の周波数表示範囲は10kHzまでとしている。

図-7, 8より、欠陥がある場合では欠陥がない場合と比較して2000Hz以上の周波数成分が多少大きくなるという傾向がみられ、欠陥位置が浅い方がその傾向が大きいことが認められた。しかし、埋設位置を6cmとした場合では、欠陥のない場合と比較してほとんど周波数特性に違いはみられなかった。また、図-9, 10より、従来の打音検査の場合、欠陥がある供試体では欠陥がない供試体と比較して2000Hz付近の周波数帯で音圧レベルが多少大きくなるという傾向がみられるが、欠陥位置による違いは顕著に現れず、現時点では周波数特性からだけでは欠陥位置の特定までは困難であると考えられる。

(2) 最大音圧に与える影響

次に、欠陥部の位置が打音波形の最大音圧に与える影響を考察した。ここでは、欠陥なし（健全）の場合において計測された打音波形の最大音圧に対する比率を最大音圧比として定義し、この最大音圧比と欠陥部の位置の関係に関して考察を行った。図-11に回転式打音検査の場合の最大音圧比と欠陥位置の関係を、図-12に従来の打音検査の場合の最大音圧比と欠陥位置の関係をそれぞれ示す。図-11より、欠陥部が浅い位置にあるほど最大音圧比が大きくなるという傾向がみられたが、欠陥位置を6cmとした場合では最大音圧比にほとんど違いは認められなかった。また、図-12より、従来の打音検査の場合、欠陥がある供試体では欠陥がない供試体と比較して多少最大音圧比が大きくなっているが、欠陥位置による明確な違いを認めることが困難であった。以上のように、従来の打音検査の場合と比べると、回転式打音検査の方が、欠陥位置の変化にともなう最大音圧比に明確な相違が見られることから、回転式打音検査の方が欠陥位置を推定し易いものと考えられる。

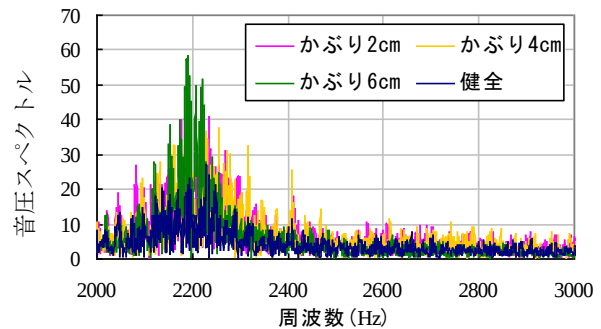


図-8 回転式打音の周波数特性（3000Hz まで表示）

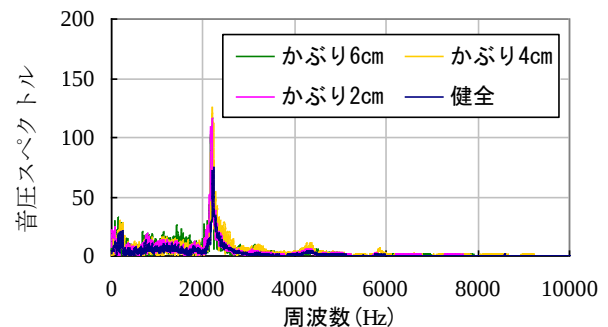


図-9 従来の打音の周波数特性（位置の変化）

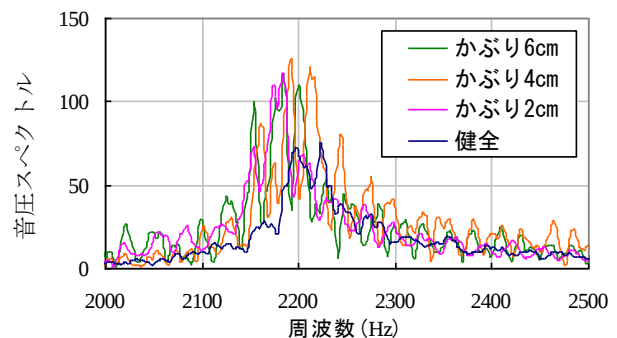


図-10 従来の打音の周波数特性（2500Hz まで表示）

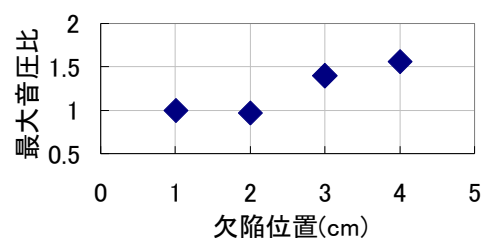
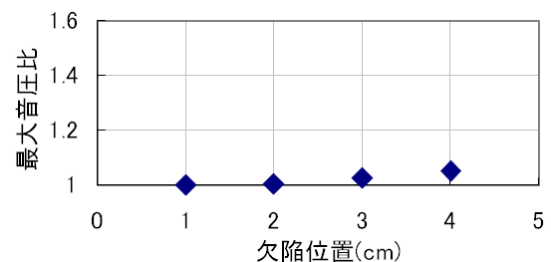


図-11 回転式打音の最大音圧比（位置の変化）



4.3 欠陥の大きさが打音特性に与える影響

(1) 周波数特性に与える影響

ここでは、欠陥部の大きさ（面的な広がり）が打音の周波数特性に与える影響に関して考察した。欠陥部には、 $7 \times 20\text{cm}$ 、 $5 \times 15\text{cm}$ 、 $5 \times 10\text{cm}$ 、 $3 \times 5\text{cm}$ の4パターン的人工欠陥を埋設し、それぞれの供試体において打音を測定し、DFT処理を行った。欠陥部はいずれも供試体表面から 2cm の深さとした。図-13に回転式打音検査の場合の音圧 - 周波数関係を、図-14, 15に従来の打音検査の場合の音圧 - 周波数関係をそれぞれ示す。

図-13より、欠陥がある場合では欠陥がない場合と比較して 4000Hz 以上の高周波成分が卓越するという傾向がみられ、欠陥部の大きさが大きくなるほど、高周波成分が大きくなることがわかる。また、欠陥部寸法が $7 \times 20\text{cm}$ や $5 \times 15\text{cm}$ の場合においては、高周波域のピーク周波数にも相違が認められ、欠陥がない場合と比較して顕著に違いがみられた。一方、従来の打音検査の場合には、図-14, 15より、欠陥がある供試体の方が最大音圧比が大きくなっているが、欠陥の大きさによる音圧比の変化を認めることは困難であった。

(2) 最大音圧に与える影響

次に、欠陥部の大きさ（面的な広がり）が打音波形の最大音圧に与える影響を考察した。ここでも、欠陥なし（健全）の場合の最大音圧に対する比率を最大音圧比とし、この最大音圧比と欠陥部の大きさの関係に関して考察を行った。図-16に回転式打音検査の場合の最大音圧比と欠陥位置の関係を、図-17に従来の打音検査の場合の最大音圧比と欠陥の大きさの関係をそれぞれ示す。

図-16より、欠陥部が大きくなるに従い、最大音圧比が大きくなる傾向が明瞭にみられた。回転式打音検査では、欠陥部の寸法を $3 \times 5\text{cm}$ と小さくした場合でも最大音圧比に顕著に違いが認められた。図-17より、従来の打音検査の場合、欠陥がある供試体では欠陥がない供試体と比較して最大音圧比が大きくなっているが、欠陥の大きさによる明確な違いは認められなかった。これより、回転式打音検査の場合では、従来の打音検査の場合と比較して、欠陥の大きさの変化に対し、周波数特性、最大音圧比ともに明確な相違を示していることから、回転式打音検査ではより明確に欠陥部の大きさを特定することが可能であると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 回転式打音検査で連続的に加えられる入力により得られる連続打音の性質に関して検討を行った結果、以下の二つのことが確認された。

- a) 連続的に生じる打音の時間間隔は約 $0.015 \sim$

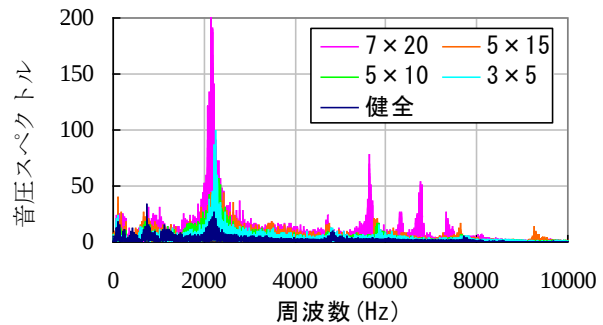


図-13 回転式打音の周波数特性（大きさの変化）

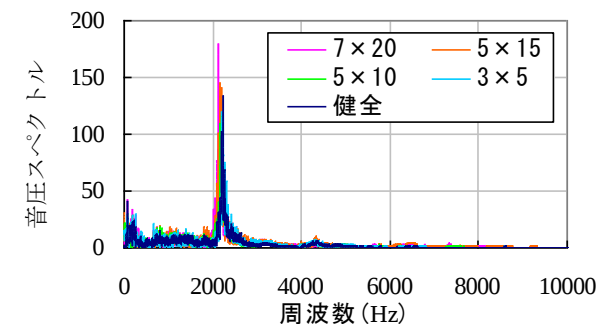


図-14 従来の打音の周波数特性（大きさの変化）

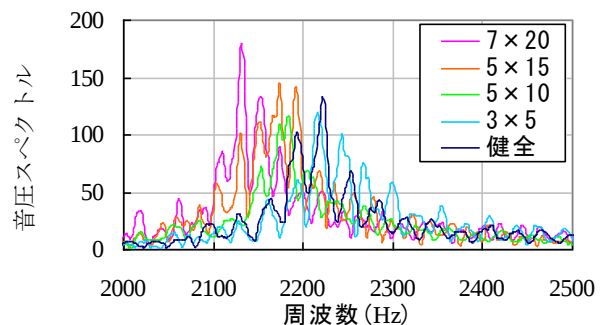


図-15 従来の打音の周波数特性（2500Hz まで表示）

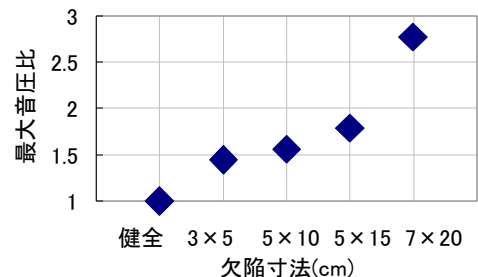


図-16 回転式打音の最大音圧比（大きさの変化）

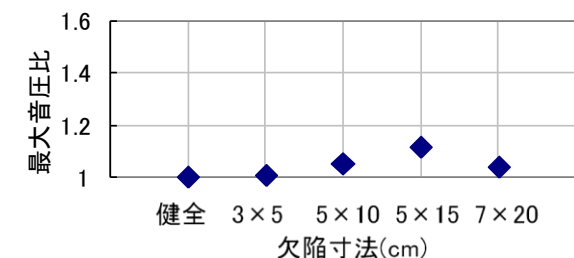


図-17 従来の打音の最大音圧比（大きさの変化）

0.02sec であり、毎回ほぼ一定の時間間隔となっている。

- b) 一回の打撃音が発生してから、次の打撃音が生じるまでに音圧レベルはおおよそ 10%以下まで減衰している。

以上より、回転式打音検査法で得られる連続打音は、互いに与える影響は比較的小さく、個々の打音はそれぞれ独立しているとみなすことができると考えられる。

- (2) 従来の打音検査においては、周波数特性や最大音圧比のみで欠陥位置を特定するのは非常に困難であると考えられる。一方、回転式打音検査を用いる場合では、欠陥部が浅い位置にあるほど最大音圧比が大きくなるという傾向が顕著にみられることから、欠陥の大きさを特定することが可能であると考えられる。
- (3) 欠陥の大きさが打音に与える影響に関しては、回転式打音検査を用いた場合では、欠陥部の大きさが大きくなるほど、高周波成分が卓越し、最大音圧比も大きくなるという傾向が顕著に認められた。この結果、欠陥の大きさの特定の可能性が確認された。

「回転式打音検査法」の供試体実験により得られる打音の周波数特性や最大音圧を比較することで、欠陥状態(欠陥の位置や大きさ)と打音との相関性を確認できた。今回の実験により得られた打音に欠陥の形状による打音特性の変化が確認されたことから、回転式打音検査の有用性が認められた。今後、より詳細に打音の特性を把握するためには、周波数特性や最大音圧だけでなく打音の減衰性など様々な打音特性にも着目し、時間 - 周波数解析

などによる音圧波形の特性を考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学，東京大学出版会，2004
- 2) 土木研究所・日本鋼構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，技報堂出版，2003
- 3) 土木学会：コンクリート構造物のヘルスマonitoring技術，コンクリート技術シリーズ 76，2007
- 4) 園田佳巨，中山歩，三好茜：音響解析を用いた回転式打音検査法の診断メカニズムに関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.54A，pp.599-606，2008
- 5) 三好茜，園田佳巨，中山歩，吉田直紹：回転式打音検査器によるコンクリート構造物の変状調査，平成 19 年度土木学会西部支部技術発表会論文集，pp.33-38，2007
- 6) 日本道路公団試験研究所道路研究部トンネル研究室：打音検査システム・器具の性能評価試験及びモデル試験検討資料，2004
- 7) 中山歩，園田佳巨，三好茜，吉田直紹：音響解析を用いた回転式打音検査法に関する基礎的考察，コンクリート技術シリーズ 76「コンクリート構造物のヘルスマonitoring技術」，土木学会，II 43-50，2007
- 8) コンクリート委員会：コンクリート標準示方書規準編，土木学会，pp.307-311，2002