

打音法における欠陥と健全の評価方法について

－物理的評価－

Evaluation method of defects and soundness using the impact acoustic method
-Physical evaluation-

キーワード

非破壊検査、打音法、評価方法、
浮き・剥離

歌川 紀之*, 黒田 千歳*, 濑谷 正巳*

研究概要

筆者らが開発したマルチ打音法は、物理的評価手法およびAI的評価手法により、欠陥の有無や欠陥の規模を評価してきた。それぞれの方法にメリットデメリットはあるが、片方の手法だけでは、精度高い評価は難しい。ここでは物理的評価手法に着目して検討を加える。物理的評価手法では、ハンマによる打撃振動（音圧）の大きさ（振幅値比）とコンクリート厚さの関係式を作り、測定されたハンマの打撃力とマイクロフォンの音圧からコンクリート厚さを推定し、欠陥の有無を調べてきた。この方法では厚さが大きくなると、推定精度が低下する。そこで、振幅値比とコンクリート厚さの関係式を見直し、新たに打撃により生じる曲げたわみと圧縮変形の和に着目し、関係式を作成した。その結果、本関係式は、実験結果と良好に一致した。

1 はじめに

これまで、マルチ打音法における評価手法では、物理的手法とAI的手法を併用し、より精度が高い、探査を目的に開発を進めてきた。ここ数年、AI的手法では、手法の開発や実構造物への適用を実施してきた^{1)~5)}。ただし、実構造物への適用を考えると、AI的な手法では特に学習していない形状の欠陥部、健全部に対応することを考えると、実用のレベルまで達しておらず、物理的手法を併用しながら、性能の向上を進めている。ここでは物理的手法における課題について、検討を行った。

2 マルチ打音法における評価

マルチ打音法では図-1に示す打音測定システムでデータを取得し、欠陥の有無の判別や空洞、剥離欠陥の広さやかぶりを評価する。その結果から、欠陥がある場合は欠陥の深さや補修面積を推定する。システムはコンクリート面を打撃した際に打撃荷重を測定できるインパクトハンマ(A), 打撃によりコンクリート面の振動を音圧として測定できるフード付マイクロフォン(B), ADコンバータ(C), データ収録と評価を行うPC(D)からなる。フード付マイクロフォンによりハンマから発生する音、環境音を遮断し、コンクリートの振動音のみを収録することが可能となる。



図-1 マルチ打音法における打音測定システム

評価方法は物理的評価とAI的評価をそれぞれ使うことも併用することも可能である。評価方法の特徴を表-1に示す。表に示すようにAI的評価では、事前に学習したデータについては、精度高く推定することが可能であり、叩き検査でも物理的評価でも見つけにくい小さい欠陥を見つけられる可能性はある。ただし、事前に学習していないデータについては学習データと類似した規模の欠陥についても探査性能が落ちる可能性がある。健全部についても同様である。AI的評価では、内挿・外挿が難しい。ここで「内挿」とは、例えば、広さ φ300でかぶり40mmの円形空

* 技術センター 土木研究部

洞試験体と広さ $\phi 100$ でかぶり 40mm の円形空洞試験体の打音の学習データから $\phi 200$ でかぶり 40mm の円形空洞の打音データを探査することであり、「外挿」とは、 $\phi 400$ でかぶり 40mm の円形空洞データを探査することである。学習データを増やすことにより、各種の構造物、欠陥への適用も可能であるが、現実的には、すべての欠陥試験体を作り、学習データを備えることができない。そこで、物理的評価も併用して、健全と欠陥の判別や欠陥の規模評価を実施している。物理的評価ではかぶりのみであるが、試験体の厚さと異なる厚さ(2つの試験体の中間的な厚さ)についても推定が可能となる。特に、欠陥と健全の判別では物理的評価は便利である。本報告では物理的評価について検討を行った。

3 物理的評価

物理的評価とは、ハンマ打撃による音圧データの中から時系列データやFFTデータに着目し、打撃振動(周波数、振幅、減衰など)と構造物の欠陥の状態との関係を作ることである。なお、AI的評価では時系列データやFFTデータ、特徴量と1対1の学習ラベル(健全 or 欠陥、欠陥の規模など)を作ることにより、評価をすることになる。ここで用いている物理的評価は、ハンマ打撃により発生したコンクリートの曲げ振動の振幅とコンクリートの厚さに関係があると考え、音圧振幅から、厚さを推定する方法である。浮きや空洞の欠陥部を打撃するケースでは、コンクリートの薄い板を打撃することと等価であり、大きな曲げ振動(たわみ)が発生する。一方、トンネル覆工の厚さ 300mm の部を打撃するケースでは、コンクリートの厚い板を打撃することと等価であり、曲げ振動(たわみ)は生じない。この原理を用いることにより、コンクリート表層の浮きや剥離(振幅が大きくなる箇所)を見つけることが可能となる。本手法で得られた各測点の厚さを等高線で表すことにより、欠陥の面的な分布(欠陥の広がり)を表すことも可能となる。また、厚さの結果から、水平ひび割れの位置(鉄筋かぶり、増し打ち部との境界)を推定することも可能となる。現状は厚さが異なる $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方形試験体で打音データを取得し、発生振幅と厚さの関係式を作り、その関係式により厚さを推定している。

厚さ推定では現状、以下の課題があり、発生振幅と厚さの関係式を再度検討するとともに、それを用いた検討を行った。ここで、厚さから振幅値比を求める式を「評価式」と呼び、振幅値比から厚さを推定する式を「推定式」と呼ぶことにする。

- ① 厚さが 200mm 以上の大きいケースの場合の厚さ推定
- ② 正方形試験体を用いた試験と異なる条件での厚さ推定
- ③ 空洞や剥離欠陥の欠陥判別の限界検討

4 正方形試験体を用いた検討

現状の関係式の再検討を行い、新たな関係式を提案し、

表-1 AI的評価方法と物理的評価方法

	AI的手法	物理的手法
概要	欠陥部や健全部の打音データを収録し(ラベル付)、観測された打音データがどのラベルに近いかを調べることにより判別。	打撃振動や音圧で評価される物理量(周波数など)から欠陥の有無や規模を調べる方法。
メリット	学習されている(ラベル付)データであれば精度高く、評価される。	打撃振動や音圧に着目すると健全と欠陥の判別や規模推定が可能。
デメリット	ラベル付けされたデータと異なる欠陥に対し、精度は低下する。実構造物ではあると学習データを集めることは難しい。	耳で聞く打音法に比較すると判別・推定性能は向上するものの、欠陥の規模に限定される。

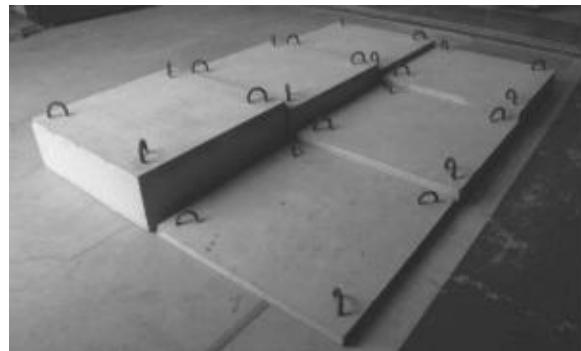


写真-1 1m × 1m の試験体

いくつかの検討を行った。

現状の評価式は無限に広がった平板の機械インピーダンス Z は部材厚さ h の二乗に比例するという原理⁶⁾に着目している。

$$Z = \frac{F}{v} = 2.3 \cdot C_L \cdot h^2 \quad (1)$$

ここで、 F は打撃荷重、 v はコンクリート板に発生する面外方向の速度であり、 C_L はコンクリートの弾性波速度、 ρ は比重である。また、速度 v は発生音圧 P に比例する。インピーダンス Z の逆数 A を以下のように定義する。

$$\frac{1}{Z} = \frac{v}{F} \cong \frac{p}{F} = A \quad (2)$$

ここでは音圧振幅の大きさに着目するため、打撃荷重当たりの発生音圧ということで振幅値比 A を定義した⁷⁾。また、発生速度と音圧の関係も不明なので、ここでは6種類の厚さ h が異なる正方形試験体（写真-1）の振幅値比 A を測定し、累乗近似を仮定し、最小二乗法で a 、 b を求めた。

$$\frac{1}{Z} = A = \frac{A_m}{A_i} = ah^{-b} \quad (3)$$

ここで、図-2に示すように A_i はハンマ打撃時の最大打撃力で、 A_m は打撃時に発生する1波目の最大音圧である。6種類の厚さの異なる試験体で測定された、最大打撃力 A_i と最大音圧 A_m の関係を図-3に示す。図に示すように、同じ厚さで最大打撃力 A_i と最大音圧 A_m は比例し、傾きである振幅値比 A は一定となることが分かる。この結果は、打撃力が変化しても一定の振幅値比となることがわかる。また、厚さが大きくなると傾き（振幅値比）が小さくなることがわかる。ここでは振幅値比 A を指標としてすることで、打撃力 F という変数は不要となり、コンクリート厚さ h と振幅値比 A は1対1の関係となった。

4.1 これまでの評価式とその課題

50回の実験で得られた厚さの異なる6個の試験体の平均振幅値比のうち4個を用い（R二乗値が最大となる）、累乗近似で得られた評価式の結果と実験結果を比較し図-4に示す。図から、厚さが大きくなると単調減少の評価式から実験値がはずれてくることが分かる。また、 b は2に近く、無限平板のインピーダンス評価式(2)と類似した結果となっていることが分かる。

評価式から厚さの推定式を求め、50回の測定結果を推定式に代入し、厚さを求めた結果を図-5に示す。図から200mmを超えると精度が悪くなることがわかる。累乗近似式は厚さが大きくなると振動が小さくなる、単調減少の式であるが、実験結果からは、ある程度の厚さを超えると振動が大きくなることが分かる。また、本評価式では、振幅が大きくなる欠陥部と振幅が小さくなる健全部と同じ式を用いているために、精度が低下するものと考えられる。

4.2 新しい評価式（新評価式）

打撃振動を静的の荷重によるたわみと考えて、振動が最大たわみからスタートすると考える。また、変形は曲げたわみ δ_1 ((4)式) と圧縮変形 δ_2 ((5)式) の和と考えると、厚さが小さいときは、曲げたわみが卓越し、厚さが大きいときは圧縮変形が卓越するものと考えられる。表-2に用いた物性と加力値を示す。図-6に厚さと各変形の関係を示す。

$$\delta_1 = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (4)$$

$$\delta_2 = \frac{\sigma \cdot h}{E} \quad (5)$$

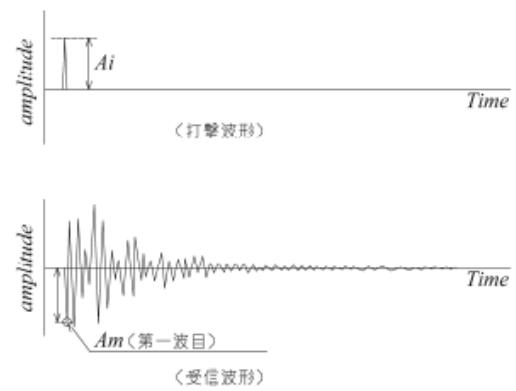


図-2 振幅値比の定義式

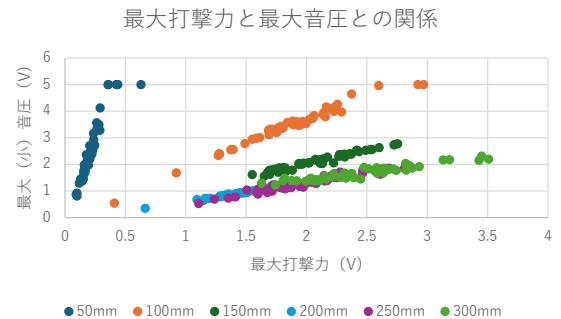


図-3 最大打撃力 A_i と最大音圧 A_m の関係

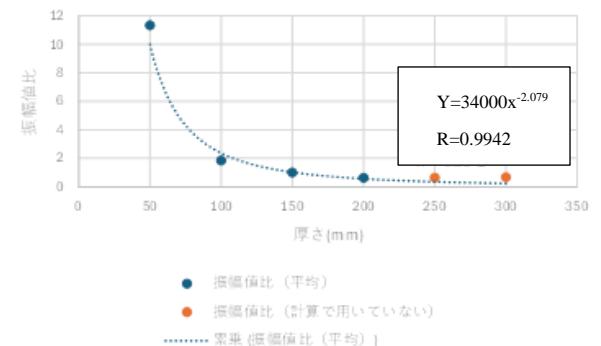


図-4 評価式と実験結果の比較

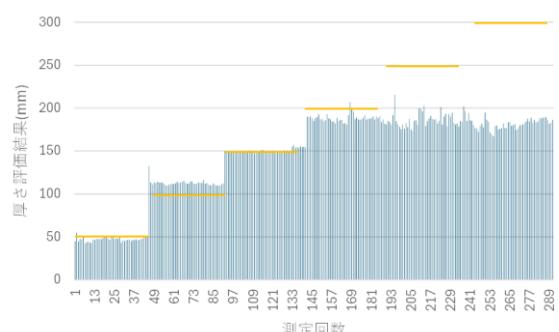


図-5 厚さの推定結果

表-2 用いた物性と加力値

動弾性係数	28175Mpa(円形欠陥試験体), 36959MPa(正方形試験体)	表面弾性波速度から推定
単位体積重量	2.3×10^{-6} kg/mm ³	一般的なコンクリート
衝撃荷重	2000N, 8471N	小ハンマ, 大ハンマ2V相当
衝撃応力	0.5N/mm ² , 2.35N/mm ²	36cm ² 当たりに換算(ハンマを中心としてマイクまでの範囲)
曲げ板の大きさ	1m×1m, 2m×2m	試験体の大きさ

変形の和と測定された振幅値比が比例すると考え、例えば実験で得られた厚さ50mmの振幅値比から、各厚さの振幅値比(厚さ50mm以外)を評価した。その結果を図-7に示す。本評価式の結果と実験で得られた振幅値比が一致しており、本評価方法が妥当であることがわかる。

4.3 新評価式を用いた検討

今回の評価式を用いて、部材厚さと振幅値比の関係を求めた。これまで、1m×1mの正方形の試験体を用い、それを正とし、厚さ評価を行ってきたが、実際の構造物でそのまま使ってよいのかという疑問があり、いくつかの検討を行った。

(1) 広さが変化した場合

1m×1mの正方形板に比較し、実構造物は大きいので、そのまま使うことが可能かどうかを検討する。図-8に1m×1mの正方形板と2m×2mの正方形板の評価結果を比較する。この結果からわかったことは、厚さが10cm以下の場合は差異が生じる。ただし、厚さが200mmを超えると差異はないことが分かる。なお、広さが大きい欠陥については、厚さ評価の精度が落ちることがわかる。現実的にこのような欠陥については、叩き点検で検知可能である。

(2) 弹性係数が変化した場合

弾性係数については、高強度コンクリートのように大きい場合は、対象とするコンクリートで、試験を行い、振幅値比と厚さの関係を調べることが必要である。

(3) 加力値が変化した場合

実際に打音をしていると、打撃力を大きくすると、欠陥の有無が分かりやすくなるという指摘があり、加力値を4倍にした大ハンマを用いた場合と小さいハンマを用いた振幅値比を比較し、図-9に示す。小ハンマに比較し、振幅値比が大きいために、健全部との差異が大きくなってくるので、欠陥の有無を調べられる範囲は広い。ただし、薄い欠陥の場合、音圧が飽和するという課題がある。

(4) 各種の健全構造物の振幅値比

図-10に各種の構造物の健全部の振幅値比を比較した。

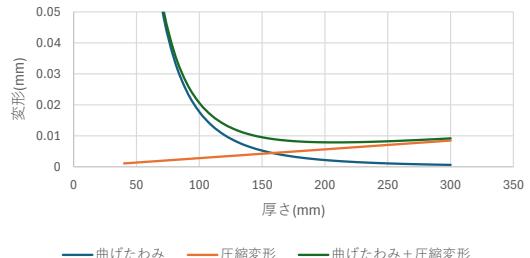


図-6 厚さと変形の関係

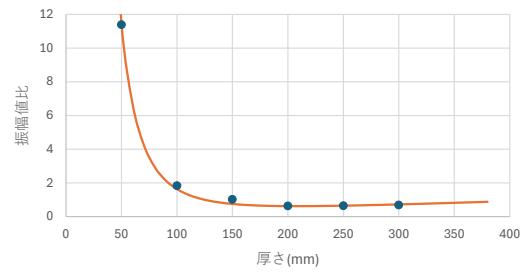


図-7 新評価式と実験結果の関係
耐力壁 (20m × 20m × 5m)

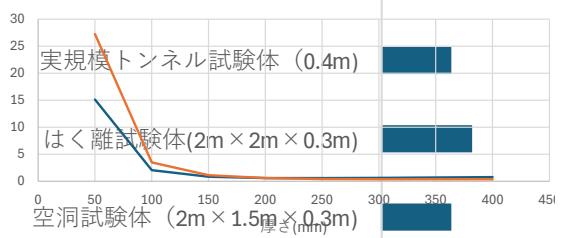


図-8 広さが変化した場合の評価式

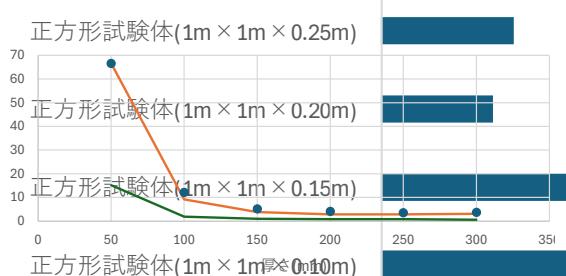


図-8 広さが変化した場合の評価式

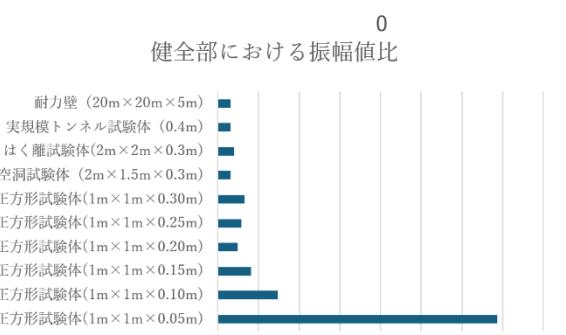


図-9 加力値を変えた場合の評価式

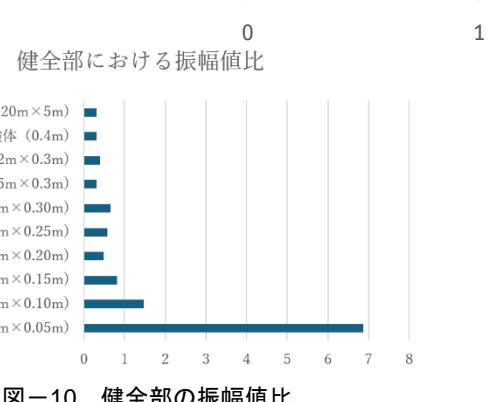


図-10 健全部の振幅値比

$1m \times 1m \times 0.3m$ の正方形試験体に比較し、同じ厚さ（300mm）の試験体（空洞、剥離試験体）で、小さい振幅値比となっているもの、厚さが大きい400mm（覆工試験体）、5000mm（耐力壁）でも振幅値比が小さくなっている。これらの原因は、①弾性係数が大きく振幅が小さくなっているケース（空洞、剥離試験体、覆工試験体）、また②厚さに対し加力時間が足りなくために変形が小さくなるケース（耐力壁）が考えられる。

このような健全部では振幅値比は小さいが、微妙に異なることがわかる。これらは欠陥と健全の判別の際に用いられる。実構造物で厚さが分からぬ場合は、健全と思われる箇所で、振幅値比を測定し、波形もデータとして残すことが必要と考えられる。

5 空洞、剥離を模擬した周辺が拘束された欠陥試験体

周辺で拘束されている空洞や、剥離の試験体へ振幅値比による評価を用いた事例を示す。

5.1 空洞、剥離を模擬した試験体

着目した試験体は $1.5m \times 2m \times 0.3m$ の直方体に、大きさの異なる円形欠陥を模擬した図-11に示す試験体である。着目した欠陥は、図-12に示すような空洞欠陥と剥離欠陥で、広さは $\phi 50$, $\phi 100$, $\phi 150$, $\phi 200$, $\phi 300$ でかぶり厚さは 20~100mm の 20 種類の欠陥である。空洞欠陥は $t=25mm$ の発泡スチロール、剥離欠陥は $t=0.5mm$ のスチロール板で模擬した。

5.2 振幅値比の推定

空洞、剥離欠陥の中心で振幅値比を測定した、図-13、14 に示す振幅値比は 50 回の測定における最大、最小値、平均値である。この結果から、以下のことが分かる。

- 剥離と空洞を比較すると、振幅値比は空洞の方が大きいことが分かる。背面の拘束の影響と考えられる。
- 剥離、空洞ともに同じ平面規模（直径）であると、欠陥のかぶりが大きくなると振幅値比は小さくなり、この傾向は正方形板と同様である。
- この結果から、健全部の振幅値比と欠陥部の振幅値比を比較することにより、試験体の範囲で、測定の限界が分かる。
- $\phi 200$, 150 の空洞では一部、かぶりと振幅値比の関係が同様（かぶりが大きくなると振幅値比が小さくなる）ではなくており、境界の拘束の違いが出ている可能性がある。

5.3 空洞・剥離試験体における測定限界

前章と同様に実験で得られた振幅値比を用い、実験条件と広さ、かぶりが異なる欠陥の振幅値比を推定した。円形板の中央に集中荷重を作用させた場合のたわみと圧縮変形の和から求めた変位と実験で測定された振幅値比から、

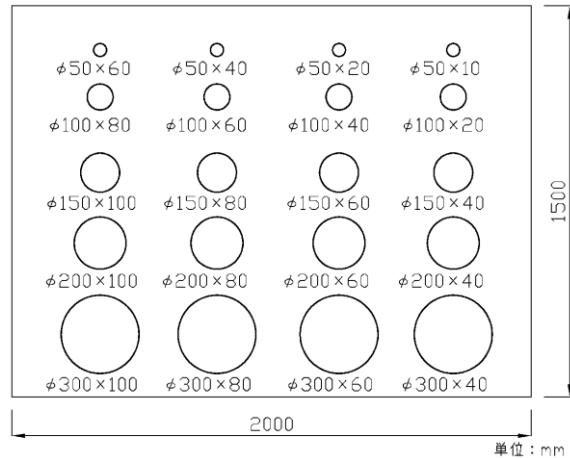


図-11 空洞を模擬した試験体



図-12 円形空洞、円形剥離欠陥

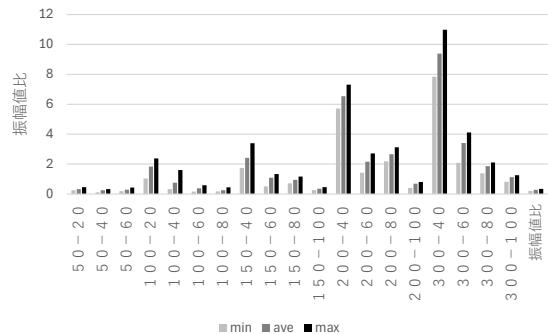


図-13 円形空洞欠陥で測定された振幅値比

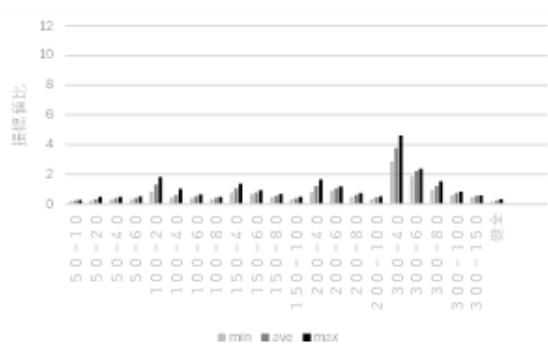


図-14 円形剥離欠陥で測定された振幅値比

振幅値比を評価した。物性値、荷重は、表-2と同様の値を用いた。ここでは、 $\phi 300$ の剥離欠陥、空洞欠陥、 $\phi 150$ の空

洞欠陥、剥離欠陥における欠陥のかぶりと振幅値比の評価式と実験結果を図-15に示す。この結果から、

- ・ 端部を拘束した場合でも、一部を除いて、本評価式により実験結果を良好に表現している。
- ・ 試験体の健全部の振幅値比とかぶりの異なる欠陥部の振幅値比の評価結果を比較することにより、測定可能なかぶりの大きさが分かる。図-15に各欠陥に対し、測定限界のかぶりを示した。

6まとめ

本報告では、マルチ打音法における健全、欠陥の評価システムの中で厚さ評価に着目し、振幅値比から厚さを推定する方法の検討を行った。その結果、以下の成果が得られた。

- ・打撃による曲げ変形と圧縮変形を足し合わせた変形の大きさと振幅値比が比例すると考え、厚さと振幅値比の関係式を導出し、実験結果と比較したところ良好な結果が得られた。
- ・本関係式を用いることにより、打撃条件や物性、構造物規模が $1m \times 1m$ の正方形試験体と異なる、広さや打撃力のケースの振幅値比（振幅）を評価することが可能となる。
- ・本関係式を厚さ推定に用いる場合の課題は、健全部で同じ振幅値比に対し、異なる厚さの結果が得られる事である。現状は累乗の近似式を用い、厚さ30mmに対応する振幅値比を超える場合は、健全と評価する方法がよいと考えられる。
- ・同じ平面規模の剥離・空洞の試験体で、かぶりを変化させた場合の振幅値比を評価することができる。健全部の振幅値比と比較することにより、剥離・空洞の検知範囲を検討することができる。

打撃によりコンクリート構造物に発生する音圧の振幅については、数値計算などを用いても簡単に推定することは難しい。本研究では、実験結果と併用することにより、簡易に振幅値比を推定する方法を提案した。

参考文献

- 1) 黒田千歳, 歌川紀之, 濑谷正巳 : AI を用いた打音法におけるセンシング方法の検討, 佐藤工業技報, No.49, 2024.
- 2) 黒田千歳, 歌川紀之, 安永守利 : 複数の機械学習を用いた打音診断(3), 佐藤工業技報, No.48, 2023.
- 3) 黒田千歳, 歌川紀之, 安永守利 : 複数の機械学習を用いた打音診断(2), 佐藤工業技報, No.47, 2022.
- 4) 黒田千歳, 歌川紀之, 安永守利 : 複数の機械学習を用いた打音診断, 佐藤工業技術研究所報, No.46, 2021.
- 5) 黒田千歳, 歌川紀之, 川原佑宇紀, 安田悠, 安永守利 : マルチ打音法の実構造物への適用事例, 佐藤工業技術研究所報, No.44, 2019.

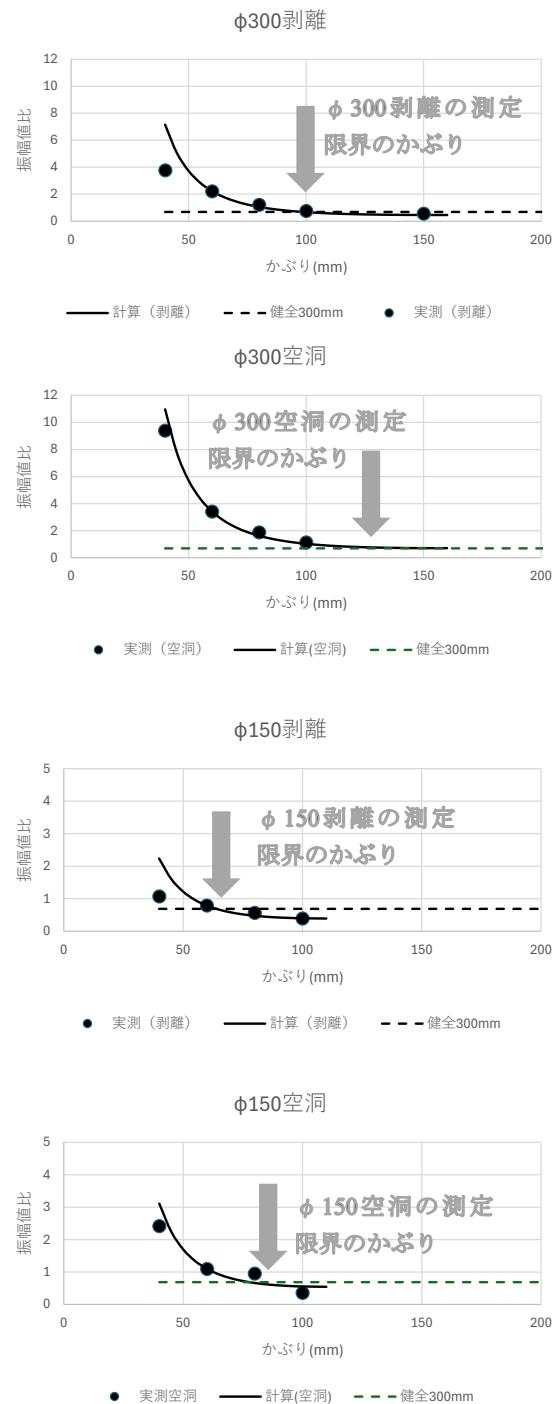


図-15 欠陥における振幅値比の評価式と実験結果

- 6) L.Cremer, M.Heckl and E.E.Ungar: Structure-borne Sound, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1973.
- 7) 北川真也, 歌川紀之, 木村定雄 : 打音法の評価パラメータのうち振幅値比のはらつきに関する検討, 第5回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, 2015.