

打音試験の測定法に関する一提案と打音の解析

Analysis of Hammering Sound and One Suggestion Regarding Measurement Method of Hammering Test

(株)砂子組 ○正 員 梶村 瑛奈 (Ena Horomura)
(株)砂子組 正 員 佐藤 欣治 (Kinji Sato)
(株)砂子組 正 員 長谷川雅樹 (Masaki Hasegawa)
(株)砂子組 正 員 古川 大輔 (Daisuke Furukawa)
(株)砂子組 正 員 田尻 太郎 (Taro Tajiri)

1. はじめに

打音試験法は非破壊検査方法の中でも広く利用されている検査方法であり、他の試験方法と比較して試験方法が単純であり、高価で大掛かりな試験装置や設備を必要としないことから、近接目視とともに橋梁等の実構造物の事前点検では主要な検査方法となっている。しかしながら、通常行われている点検用ハンマーを用いた試験方法は、健全部と欠陥部の打撃音の違いを検査者の聴覚によって判断するため、検査者の経験や熟練度によって検査結果が異なるなどの欠点を有している。そこで筆者らは、ハンマー打撃音の周波数解析結果に基づいた損傷評価を試みてきた¹⁾²⁾。

打撃音（以下打音）が、ハンマーと検査対象との衝突加速度に起因するものであるのは明らかである。今回、入力としての衝突加速度と出力としての打音の周波数特性を直接関連付けるため、高サンプリング周波数（加速度：20 kHz、打音：44.1 kHz）で測定を行い、周波数特性の相関を検討した。

2. 試験概要

打音試験は、コンクリート橋脚壁面において行った（図-1）。容量 200 G の加速度計を打撃点から 10 cm と、亀裂を挟んで 30 cm の位置に配置し（図-2）、点検用ハンマーには金属部に容量 1000 G の加速度計を添付し（図-3）、サンプリング周波数 20 kHz で測定した。

打音は iPhone にて音を含めて動画撮影し、事後に音声だけを Wav ファイルに変換し、解析を行っている。Bits/Block と Sampling Rate は 16 bits と 44.1 kHz である。

3. 検査用ハンマーの入力加速度

以後測定データは、打音振幅（音圧）と比較する目的で、全て最大値を 1 として表示する。

図-4 小～大にハンマーによる入力打撃加速度を赤ラインで示す。打撃は強度を変えて小、中、大を各 15 回行い、図-4 は各 15 回の平均となる。いずれのケースでも、ハンマー加速度はほぼ同じ波形となり、打撃の強弱によって特性はあまり変化しない事がわかる。表-1 に各ケースで平均したハンマーの最大加速度を示す。

加速度計の正方向は壁面から直角に離れる方向であるので、図-4 に示した三角形形状のハッチ部が、ハンマーとコンクリート壁面との衝突過程と考えられる。ハッチ部のみを取り出した振幅スペクトルが、図-5 となる。



図-1 橋脚における打音試験状況

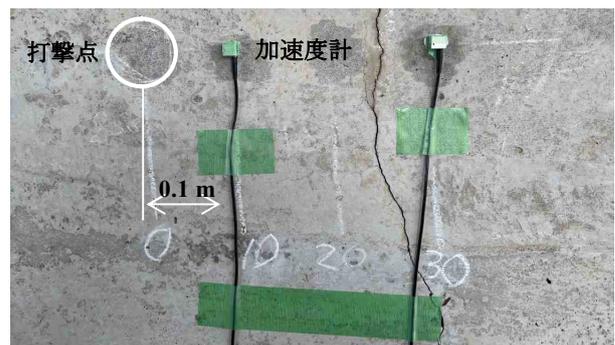


図-2 加速度計



図-3 点検用ハンマーの加速度計

表-1 最大加速度

	小	中	大
ハンマー(m/s ²)	11630	19665	26498
コンクリート(m/s ²)	55	108	208
伝達率	0.0047	0.0055	0.0079

フーリエ解析をするにあたって加速度の波形抽出時間は、0.5 s とした。スペクトル分布の分解能は、2 Hz である。

3. コンクリートの応答加速度

橋脚壁面のコンクリートの応答加速度（10 cm 位置）を、ハンマー入力とピーク位置を合わせて図-4 に黒ラインで示す（各ケース 15 回の平均）。表-1 に最大平均加速度を示すが、伝達率はハンマーの入力加速度が大きいほど高い。これは衝撃伝搬過程における減衰の影響と考えられる。図-6-小～大の黒ラインは応答波形の振幅スペクトルである。入力加速度が大きいほど低周波の振幅が増加する傾向にある。

応答に線形挙動を仮定すると、周波数 ω の入力によって生じる強制振動の振幅は、次式に従うと考えられる。

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (式.1)$$

$$\alpha = \frac{\left(1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right)a + \frac{2\zeta\omega_0}{\omega}b}{\left(1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega_0}{\omega}\right)^2} \quad (式.2)$$

$$\beta = \frac{-\frac{2\zeta\omega_0}{\omega}a + \left(1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right)b}{\left(1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega_0}{\omega}\right)^2} \quad (式.3)$$

ここに、

- ω_d, ω_0 : 減衰および無減衰系の固有振動数
- ω : 入力波の振動数
- ζ : 臨界減衰比、コンクリートで 0.03~0.05
- $a(\omega), b(\omega)$: 入力波の cos, sin 成分の振幅
- $\alpha(\omega), \beta(\omega)$: 出力波の cos, sin 成分の振幅

図-6 のピーク周波数から ω_d は、表-2 と判断できる。 ω_d と ζ として表-2 の値を、 $a(\omega), b(\omega)$ として図-5 の結果を用いて(式.1~3)で $\alpha(\omega), \beta(\omega)$ を計算し最小二乗法で図-6 の応答振幅にフィッティングすると、同図の赤ラインが得られる。

一般に線形系では境界条件を満たすため、強制振動と同時に自由振動が生じるが、応答波形のフーリエ振幅から強制振動のそれを引けば、その振幅スペクトルが得られる。結果を図-6 の緑ラインとして示す。入力加速度が大きいほど、自由振動が大きく励起され、低周波領域とピーク周波数の振幅が増大する結果となった。

4. 打音の周波数特性

打音記録は交通騒音や風音等のノイズの混入が避けられないため、波形抽出時間を 0.02 s とし、図-8-NG と OK に示すように、波形の立ち上りが明確である記録のみの平均を用いた。スペクトル分解能は 50 Hz である。

打音の振幅スペクトルを、ピークを 1 とし、図-7-小～大の青ラインで示すが、700~1500 Hz にコンクリートの応答波形には見られないピークがある(同図ハッ

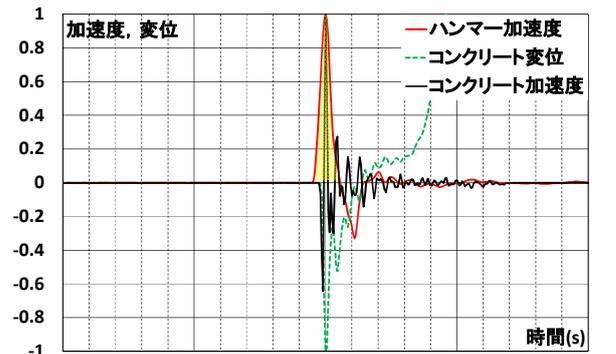


図-4-小 ハンマー加速度とコンクリート加速度

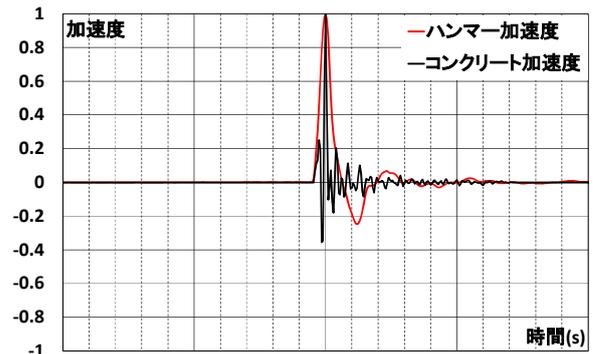


図-4-中 ハンマー加速度とコンクリート加速度

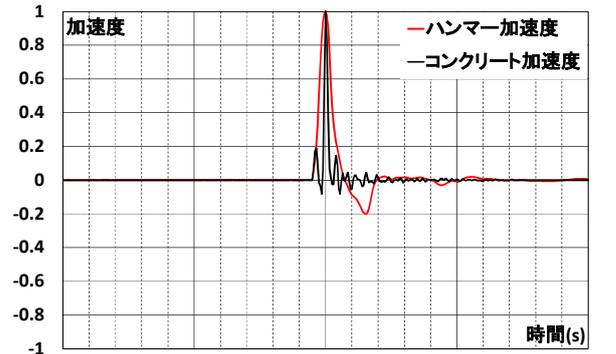


図-4-大 ハンマー加速度とコンクリート加速度

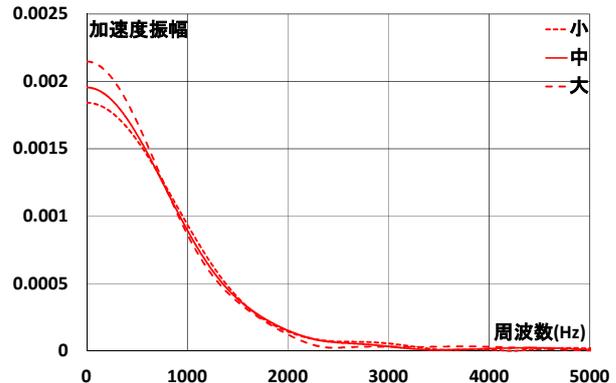


図-5 ハンマー加速度の振幅スペクトル

表-2 ω_d と ζ

	小	中	大
ピーク周波数(ω_d , Hz)	2442	2444	2512
臨界減衰比(ζ)	0.050	0.040	0.050

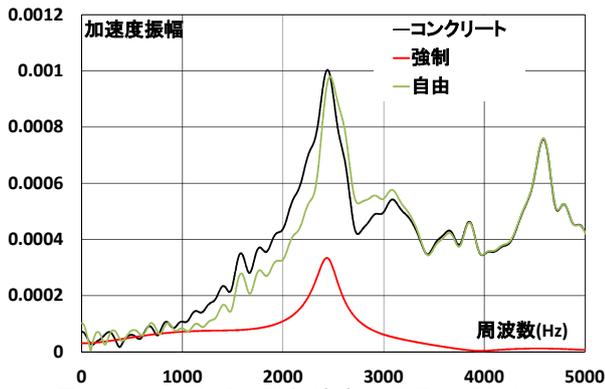


図-6-小 コンクリート加速度の振幅スペクトル

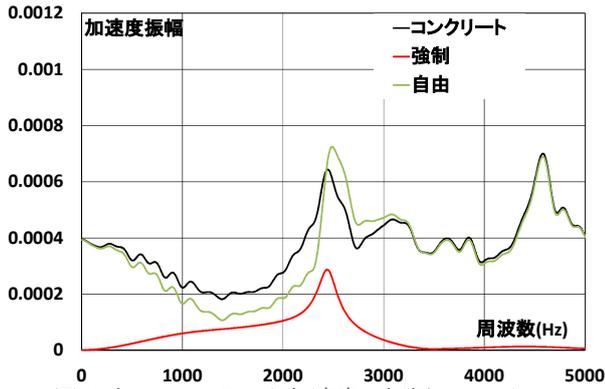


図-6-中 コンクリート加速度の振幅スペクトル

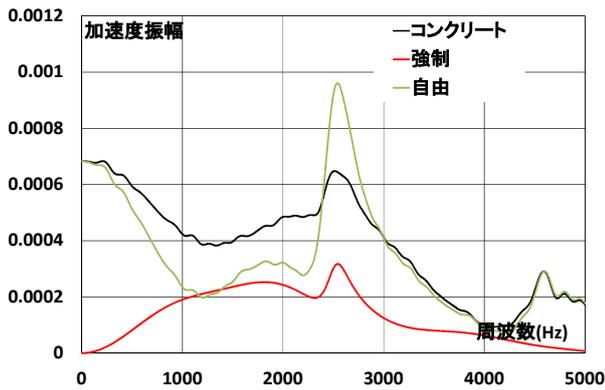


図-6-大 コンクリート加速度の振幅スペクトル

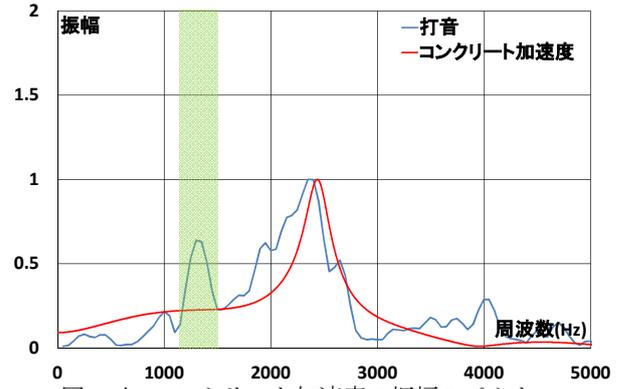


図-7-小 コンクリート加速度の振幅スペクトル

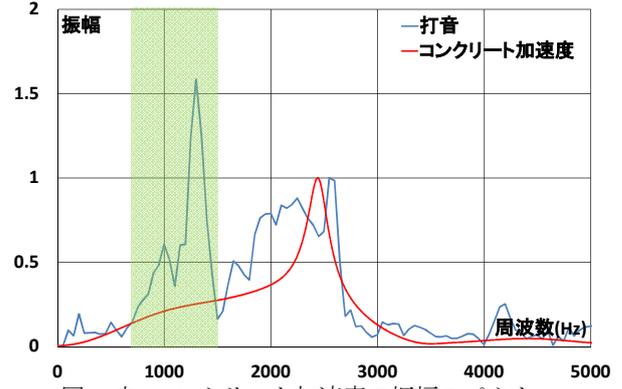


図-7-中 コンクリート加速度の振幅スペクトル

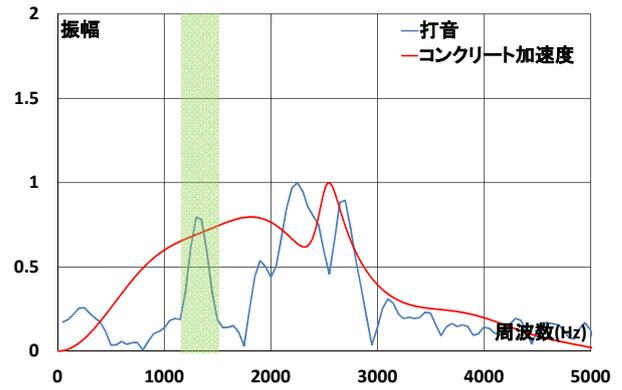


図-7-大 コンクリート加速度の振幅スペクトル

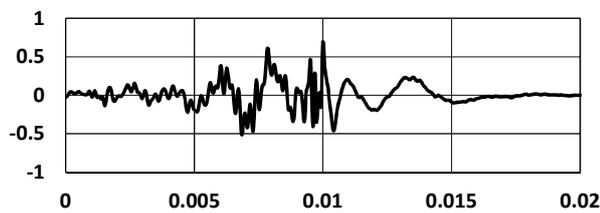


図-8-NG 立ち上がりが不明瞭な打音波形

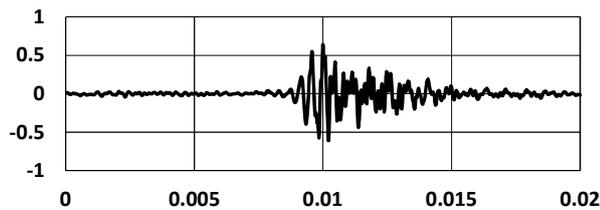


図-8-OK 立ち上がりが明確な打音波形

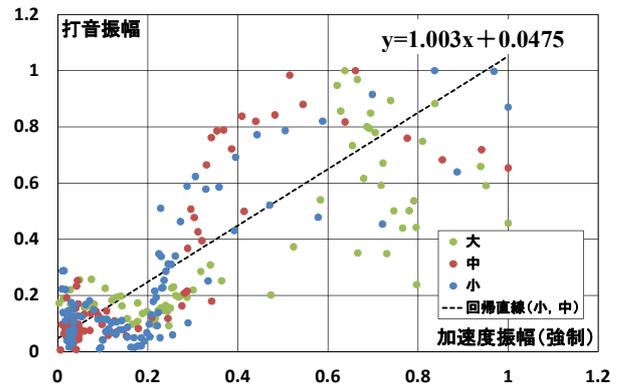


図-9 強制振動と打音の振幅相関

ち部)。これはハンマー自体が発する音やノイズの影響、録音機材の特性などが考えられる。

同図赤ラインに、コンクリートの強制振動のスペクトル分布を併せて示す。さきに述べたピーク領域を除けば打音の周波数特性は、コンクリート応答の強制振動が音

として現れたものと解釈する事は可能である。

図-9 に、ハッチ部を除外して比較した、強制振動と打音の振幅相関を示す。ケース（大）についてはばらつきが大きいものの、少なくとも（小，中）のケースでは、回帰直線の傾きはほぼ1であり、 R^2 値も0.699とかなり高い。図-7のもととなった打音波形は、図-9に示す。

5. シュミットハンマー打音の周波数特性

今回の打音試験では、シュミットハンマーの打音も記録した。結果を図-10, 11 に示す。シュミットハンマーにも、750~1100 Hz の領域に、コンクリート応答にはないピークが見られる。シュミットハンマー打突部の入力加速度測定はできなかったが、前項の強制振動（中）のピーク周波数が打音のピークに一致したと仮定して、ハッチ部を無視し同様に振幅相関を計算すると、 $R^2=0.470$ が得られ、図-11 に示すように相関が認められる。

相関係数の値が前項より低いのはシュミットハンマーによるコンクリートの強制振動波形を用いていないためだと考えられる。

6. 波動伝搬速度

点検用ハンマーの入力加速度と 10 cm 離れた位置でのコンクリート応答加速度の立ち上り時間には、 $3 \sim 8 \times 10^{-5}$ s のタイムラグがあった。距離 10 cm を考慮すると平均で 2500 m/s の波動伝搬速度になる。これは $E=25000 \text{ N/mm}^2$, $\nu=1/6$ とした時の、コンクリートの S 波速度： $C_s=2158 \text{ m/s}$ 近い。

7. まとめ

- (1) 打音は、ハンマー入力により励起された点検対象の強制振動が音として現れたものとして、ほぼ説明できる。強制振動は伝搬速度から、コンクリート表面を伝播する S 波の表面波と考えられる。
- (2) 点検用ハンマーによる入力は、打撃の大きさに関わらず、ほぼ一定の三角形状波形とスペクトル分布を持つ。
- (3) ハンマー入力が大きいと、点検対象の自由振動の方が大きく励起されるが、打音への影響はほとんどなかった。
- (4) シュミットハンマーの打音も、点検用ハンマーによる打音と同種のものと考えられる。

シュミットハンマーが本質的に、打突部の入力加速度の測定に基づき強度を推定するものである事は、明らかである。その入力に起因する打音は、点検用ハンマーによる打音と同種のものとして判断できる。

- (5) 従って打音検査は、簡略化されたシュミットハンマーテストとみなす事も、不可能ではない。

また今回録音機材として、iPhone の動画記録機能を利用したが、動画記録を変換した Wav ファイルを音源としても、十分な結果が得られたと考えられる。

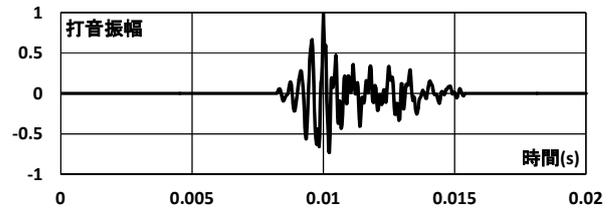


図-9-小 打音波形

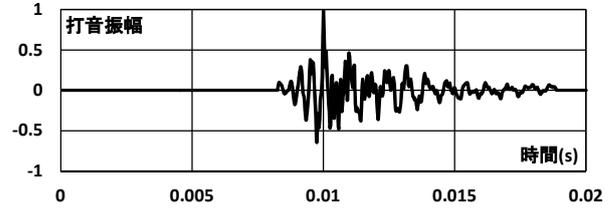


図-9-中 打音波形

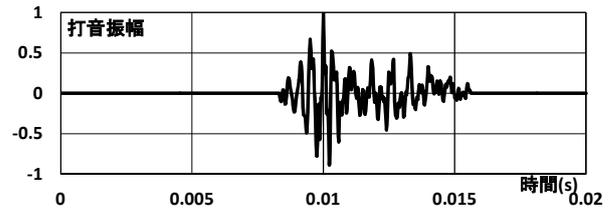


図-9-大 打音波形

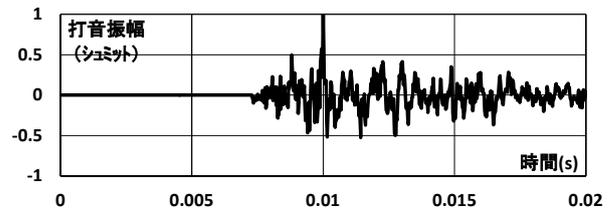


図-10 シュミットハンマーの打音波形

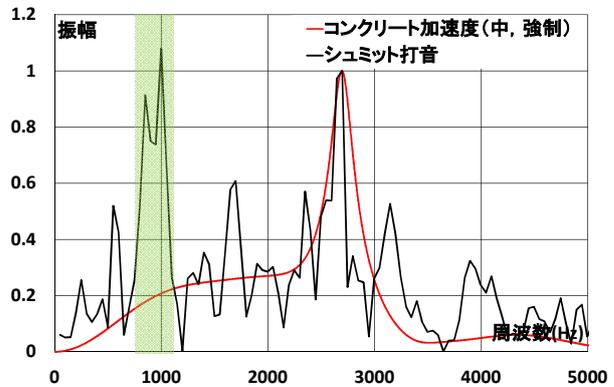


図-11 シュミットハンマー打音と強制振動のスペクトル

- (6) 打音検査の定量化にあたっては、専用の録音機材等の重装備なものでなく、比較的手軽な日用品による収録でも十分と考えられる。特に Bits/Block = 16 bits と Sampling Rate = 44.1 kHz は、Wav 記録のスペックとして標準的なものである。

[参考文献]

- 1) 床版劣化に関する打音試験方法のデータ処理と評価, 長谷川他, 北海道支部論文報告集第 72 号 E-34, 2016 年。
- 2) 床版端部の劣化推定と補修に関する一提案, 井元他, 北海道支部論文報告集第 73 号 E-05 1-4, 2017 年。