# UAV 遠隔打音検査を意識した模擬損傷 RC 床版の音響特性と打撃力に関する考察

徳山工業高等専門学校	学生会員	〇中村	智哉
徳山工業高等専門学校	非会員	宮﨑	亮一
徳山工業高等専門学校	非会員	藤井	貴一

### 1. はじめに

近年,UAV (Unmanned Aerial Vehicle)を活用した打 音による橋梁点検技術が積極的に開発されている.それ らの機体には,垂直または水平方向に打撃するためのハ ンマー機構(ピストン式または射出式)と打撃音収録用 のマイクが搭載されており,UAVが点検箇所を打撃し た音を地上で技術者がヘッドホンで直接聞いて判断する 仕組みが採用されることが多い.これらの機体はすでに 実装試験が実施され,実用化されている技術もあるが, ハンマー機構や水平駆動機構といった様々な装置を搭載 し,かつ打撃時の反力に耐えるためにUAV自体が重く 大型化する傾向にあることから,飛行時間や給電ケーブ ル,狭隘部への侵入困難などの課題が残されている.

このことから、有木ら<sup>1</sup>はRC床版下面への適用を意識 した回転振動式のハンマー機構を考案し、ハンマー機構 とUAV自身の軽量化と数Hzの連続打撃による遠隔打音 検査の可能性を見出したが、収録した音源データに雑音 が多く含まれることに加え、損傷検知に必要な回転振動 ハンマーの打撃力についても未検討であることから、そ の実用化には多くの課題が残されている.

以上のことから、本研究では、収録した単発打撃音の 音響特性を分析することで、損傷検知に必要な打撃力の 大きさを推定するとともに、打撃力の大きさがその音響 特性に与える影響について考察する.

### 2. 試作UAVによる連続打撃音の収録試験

### (1) 打撃音収録試験の概要と UAV 機体について

本研究に先立ち,連続打撃によるUAV遠隔打音点検 の現状を把握し,解決すべき技術的課題を洗い出すため, 有木ら<sup>1)</sup>のUAV機体と模擬損傷を有するRC床版供試体 を用いて連続打撃音の収録試験を実施した.

写真-1に収録試験の様子を示す. 模擬損傷を有する

徳山工業高等専門学校	正会員	海田	辰将
徳山工業高等専門学校	非会員	池田	将晃
広島大学名誉教授 フェ	ェロー会員	藤井	堅



写真-1 UAVによる打撃音収録試験



RC床版<sup>1)</sup>を吊り下げ,写真のように棒で支えたUAV機体を下から押し当てて打撃し,模擬損傷の大きさ,かぶり厚,プロペラノイズの有無などを変化させ,計42パターンの収録環境について打撃音を収録した.

図-1に,使用したRC床版供試体の概要を示す.外寸 は1500 mm×1500 mm×200 mmである.図中に赤線で示す ように,50~200 mm四方の段ボールが主鉄筋とかぶり の間に挿入されており,鉄筋の腐食によって生じた「浮 き」を模擬している.かぶり厚は挿入された段ボールの 列ごとに,それぞれ30 mmと70 mmである.

**写真-2**に,実験で使用した試作UAVを示す.機体中 央に**写真-3**に示すような回転振動式打撃ハンマーと, その直下に打撃音収録用のマイクが装着されている.こ



写真-2 試験に使用した UAV



写真-3 回転振動式ハンマー

のハンマーは、ヘッド内で回転する振り子の作用によっ てヘッドを上下に振動させるため連続打撃が可能であり、 ピストン式ハンマーに比べて小型軽量である.

#### (2) UAV による打音検査の課題

### a) ハンマーに必要な打撃力と打撃の安定性

回転振動式打撃ハンマーは小型軽量であり,連続打撃 が可能などのメリットは大きいものの,人間による通常 の打音点検よりも打撃力がかなり小さいため,深い位置 にある損傷を発見しづらいと考えられる.

また,打撃中にハンマーヘッドが不規則に跳ねる現象 が確認され,安定した打撃力が得られていないことも明 らかとなった.これらのことから,UAV 打音検査によ る検出率を向上させるためには,損傷の検出に最低限必 要なハンマーの打撃力について検討し,かつ安定した打 撃力が得られるようハンマーの改良に活かす必要がある.

#### b) 打撃音収録方法と雑音抑制に関する考察

打撃音とともに収録される環境音(雑音)には,プロ ペラ音,モーター音以外にも現場状況に応じて風切音や 人の声,車両の走行音など様々な音が含まれる.このこ とから,音の指向性を考慮した効果的な音源データの取 得方法や音源データをリアルタイムに解析し,雑音抑制 できる音響信号処理技術の開発が望まれる.



図-2 RC 供試体の概略図

**表−1** RC 供試体寸法

供試体名	20-40	30-50	
外寸法 [mm]	400×400×200		
鉄筋	主鉄筋:D19 (SD345) 配力鉄筋:D16 (SD345) ピッチ:100		
スチレンボード寸法 [mm]	200×200×5		
呼び強度(目標値) [N/mm <sup>2</sup> ]	28		
かぶり厚さ(C <sub>i</sub> ) [mm]	20	30	
かぶり厚さ(C2)[mm]	40	50	

表-2 コンクリートの配合設計

(呼び強度) 配合強度	W/C	スランプ 又はフロー	s/a	水	セメント
$(N/mm^2)$	(%)	(cm)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )
(24) 28.2	57	8	49.6	164	288
細骨材     粗骨材		混和剤	混和剤		
砕砂A(3A)	石灰石砕砂	砕石1505A	砕石2010A	766714 A1	APPLIE H1
(kg	g/m <sup>3</sup> ) (kg/m <sup>3</sup> )		(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	

### 3. 模擬損傷を有する小型 RC 床版供試体

本研究では、コンクリート表面における打撃音の音響 特性を明らかにするため、環境雑音および打撃時の反響 音ができるだけ少ない状況で打撃試験を行う必要がある. このことから、小型の供試体を新たに作製し、簡易無響 室において単発打撃試験を実施した.

**図-2, 表-1** に本研究で作製した小型供試体の概要を 示す.供試体寸法は 400 mm×400 mm×200 mmの RC床 版の一部とし,図に示すように主鉄筋(D19:SD345) と配力鉄筋(D16:SD345)が格子状に配置され,その 中央に 200 mm×200 mm×5 mm のスチレンボードを挿入 してコンクリートの「浮き」を表現した<sup>2)</sup>.本供試体は 両表面で異なるかぶり厚(C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>)を有したものを 2 体 作製しており,かぶり厚は,一般的な RC 構造物の設計 を参考に 20 mm と 40 mm, 30 mm と 50 mm にそれぞれ 設定した.本供試体に用いたコンクリートの配合設計を **表-2** に示す.円柱供試体の圧縮試験により圧縮強度を 測定した結果,供試体 20-40 では圧縮強度 $\sigma_b$ =34.6 N/mm2, 供試体 30-50 では $\sigma_b$ =34.6 N/mm2 であった.

### 4. 室内打撃試験

### (1) 実験方法

図-3 および写真-4 に室内打撃試験の概要を示す.図 に示すように、ピン支持された RC 点検用のテストハン マー(長さ 600 mm)を所定の高さhまで糸で吊り上げ た後,自由落下によって振り下ろして供試体を打撃した. 打撃点から 0.5 m 離れた点に設置した指向性マイクで打 撃音を収録した.実験では,各供試体の損傷部(スチレ ンボード)の中央を打撃し,これと比較するために供試 体の端部から 50 mm の箇所を健全部として打撃した.

## (2) 打撃パターン

本実験では、4種類のかぶり厚(20,30,40,50 mm)に 対してハンマーヘッドの高さhを10 cm~60 cm まで10 cmごとに変化させており、損傷部と健全部を各24パタ ーンずつ、計48パターンの打撃を行った.また、打撃 点のズレによる収録音のばらつきを抑えるため、1パタ ーンにつき3回の打撃試験を行った.その後、収録した 音源から非破壊サウンド編集ソフトAudacity(ver2.3.3)を 用いて図-4に示すような時刻歴波形から目的の打撃音 に関する波形のみを抽出、周波数分析し、スペクトログ ラム等によって可視化した.

### (3) 実験結果および考察

### a) 打撃エネルギーの大きさと音響特性

図-5に、かぶり厚20 mmの供試体の健全部と損傷部を それぞれh=10 cm、60 cmから打撃して得られた各周波数 の音量分布を示す. 図の横軸は周波数[kHz],縦軸は音 源データごとに異なる音量レベルの差を正規化した音量 [dB]である.

図-5(a), (b)に示した健全部および図(c), (d)に示した損 傷部どうしの比較から,ハンマーの高さ(打撃力)を 10cmから60cmに変えても,その音量分布には損傷の検 知のために有意な差が見られないことが確認できる.こ のことから,打撃力と音量の分布形には損傷検知に関す る直接的な関係性は薄いと考えられる.





写真-4 室内打撃試験セットアップ状況





一方,損傷の有無が音響特性に与える影響に着目すると,図-5(a),(c)の比較から,h=10 cmの場合には,損傷



(c) 損傷部,かぶり厚20mm (d) 損傷部,かぶり厚50mm
図-6 かぶり厚によるスペクトログラムの比較 (h=10cm)

部の打撃において 15 kHz 以上の高い周波数帯の音量が 健全部よりも増加していることが確認できる.しかし, h=60 cm から打撃した図-5(b), (d)には,そのような特徴 は見受けられない.以上の結果から,点検者の聴覚によ って損傷を判断する場合には,より大きな打撃音の方が 判別しやすいと予想されるが,その影響が必ずしも音響 特性として現れるとは限らないことがわかった.

### b) 損傷部と健全部の音響特性の比較

打撃力に関する前項での考察を踏まえ、本項では h=10 cmの打撃音に着目し、スペクトログラムを用いて 健全部と損傷部の周波数特性の違いについて考察した.

図-6に健全部と損傷部を打撃した時のスペクトログ ラムの一例を示す.1パターンにつき3回の打撃から得た 音源データを時間的に繋ぎ合わせてスペクトログラムと して可視化している.図-6(a),(b)に示したスペクトログ ラムより,健全部では,かぶり厚にかかわらず,ほぼ一 定の周波数 (=3kHz) で明確なピークが発現しているこ とが特徴的である.また,このピーク値ほどではないが, 健全部は損傷部に比べて高いスペクトル強度を示す周波 数が比較的広く分布しているようにもみえる.

一方, 図-6(c), (d)に示す損傷部では,スペクトルピー クが3 kHzではない周波数でばらつきが大きくなってお り,健全部と異なる周波数でピークとなっていることに 気づく.このことから,コンクリートに内部損傷を有す る場合にはスペクトログラムのピーク値が発現する周波 数に明確な違いが出ることがわかった.また,かぶり厚 が20~50 mmの場合には,損傷がいずれの深さにあった としても,本実験のような10 cm程度の高さからの自由 落下による打撃力によって損傷の有無が判断できる可能 性があることが分かった.

### 5. おわりに

本研究では、模擬損傷を有する RC 床版供試体を対象 とした室内打撃試験を実施し、収録音源の周波数を分析 することで、打撃力の大きさが音響特性に及ぼす影響お よび損傷部と健全部の音響特性の違いを明らかにした. 本研究から得られた主な成果を以下に示す.

- 打撃エネルギーを増加させても、その打撃音の周 波数特性において損傷が検知できるほどの有意な 差が表れるとは考え難い.
- かぶり厚に着目した打撃試験から、健全部では、 いずれのかぶり厚さにおいても、ほぼ一定の周波数(=3 kHz)で明確なピークが発現していること が確認された.一方、損傷部では周波数 2~4 kHzの 間でピークとなり大きなばらつきを有しているこ とが確認された.
- 3) 2)に示した結果は、今回の実験で設定した最小の打 撃力よりもさらに小さい打撃力によって損傷が検 知できる可能性を示唆しており、回転振動式ハン マーヘッドを搭載したUAVと音響信号処理を併用 することで遠隔打音検査における様々なメリット が期待できることを示した。

謝辞:本研究にあたりルーチェサーチ株式会社,株式 会社シーエム・エンジニアリングより多大なご支援・ご 協力を賜りました.ここに記して謝意を表します.

#### 参考文献

- 有木崚将:UAV を活用した遠隔打音検査技術の開発,平 成29年度 広島大学大学院工学研究科 社会基盤環境工学 専攻 修士論文,2017.2.
- 新保弘, 溝渕利明, 野嶋潤一郎: 打音探査への機械学習 の適用に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文 集, Vol.41, No.1, pp.1829-1834, 2019.