

# UAV を用いた遠隔打音検査技術の開発

ルーチェサーチ(株)

正会員

○有木 峻将

広島大学

フェロー会員

藤井 堅

## 1. はじめに

現在日本には約 70 万橋以上の橋梁が供用されており、それらの多くは 50 年以上もの間使用され続けている。そのため橋梁の老朽化が社会的な問題になっており、点検や健全度評価といった維持管理や補修補強が近年意識されている。

維持管理の点検部門では国土交通省が道路橋の点検方法を定めている。5 年毎に近接目視を軸に行う定期点検や、定期点検を行う年とその中間年に行うこととされている橋梁を構成するコンクリート部材の剥落の防止を目的とした第三者被害予防措置などである。

こういった点検は点検箇所に基づく必要があり、橋梁の設置場所によっては実施が非常に困難になる場合がある。例えば、長大橋の渡河部や山間部の高架橋などの点検はアクセスが困難であり、足場を仮設する、橋梁点検車を利用する、ロープアクセスを行うといった方法をとらなくてはならない。しかし、これらは経済面、安全面、速度面で問題がある。

これらの問題を解消しつつより簡易的に点検を行う方法として、ロボット技術の利用が近年進められている。その中でも機動性に優れた UAV を用いた点検方法が注目されており研究が行われている。

日本電気（株）<sup>1)</sup> は足場を必要とする高所の点検箇所の打音点検支援をするシステムとして打音点検用飛行ロボットシステムの開発を行っている。この研究では 6m 以上の高さの点検を高所作業車などの足場を利用せずに飛行ロボットを利用して打音点検を行うといったものである。この手法の打撃方法は、筒状の打撃機の中に鉄球を入れ、それを電磁力で打ち出す方法を採用している。しかし、この方法では点検面を点的に点検することになるため、面的な点検ができないといった問題があり、小エリアの損傷を見逃す可能性がある。また、壁面に対して鉄球を打ち出して点検を行う場合では、飛行ロボットは鉄球が点検面に衝突した反力を受けるため、壁面を吸引するなどして接着しなければならないため、移動や点検自体に多くの時間を要してしまう。

阿部ら<sup>2)</sup>は、マルチコプタによる打音点検を目指し、マルチコプタへ搭載可能な軽量かつ高精度な打音装置の設計・試作を行っている。打音点検装置の機構をマルチコプタに搭載するために、軽量かつコンパクトになるよう設計している。ハンマリング機構は歯車とバネを用いた機構の設計を行っている。阿部らの打音点検装置を応用し、新日本非破壊検査（株）<sup>3)</sup> はコンクリート床板へのロボット接触状態における点検の現場検証として移動機構を備えた点検ロボットを開発している。この点検ロボットは、4 連ピストン式打撃による一定間隔で打撃を与える機構を備えており、小エリアの損傷を比較的発見しやすくなっている。また、UAV と点検面との接触面にはタイヤ駆動による移動方法を採用しているため接触したままの移動が可能である。

以上のように UAV を利用した点検手法の研究は進められている。UAV による打音検査方法は、従来の打音検査を完全に代替するのではなく、従来の点検の一部を支援するものである。

本研究は、UAV を利用した連続打撃による打音検査方法の開発を行う。本誌では、UAV で行う遠方の打音検査を遠隔打音検査と呼ぶ。本研究の目的は、連続打撃での遠隔打音検査がどの程度の損傷まで検知できるかと、それが通常の打音検査と比較して実用に足るかを検討することとする。

## 2. 打撃装置の開発・性能確認

UAV に搭載する遠隔打音検査用打撃機の開発をした。打撃機は UAV の上部に取り付け橋梁の床版下面に張り付き打音検査をする方法を想定している。本研究では、連続打撃が可能な打撃装置による打音検査を行うため、ハンマーやピストンといった打撃装置は利用せず、他の方法で打撃を行うこととした。

打撃装置の性能確認はマイクによる集音を行い、数 m 離れた場所で無線送信された応答音を確認する方法で行った。ここでは損傷の有無による打撃応答音の差と、マイクでの集音が問題なく行えるかを確認する。

## 2.1 振動式打音検査機

開発した打撃装置は、図-2.1 に示すモーターの回転をそのまま打撃の力とした振動式打音検査装置である。ヘッド部のモーターは回転数 5800r/min の小型直流モーターを使用し、10g の半月型分銅を取り付けて回転させることで打撃力とした。点検面と接触する部分には、スチール製のアタッチメントを取り付け、打撃によって接触部が消耗してもアタッチメントを付け替えるのみで打撃性能を維持できるようにした。打音点検装置の省力を図るため、モーターの電源を入れヘッド部を下に押し込む、つまり点検面に接触して初めて装置が作動するようにした。

振動式打音検査機は、モーターがむき出しのため回転音など打撃音以外の音を大きく集音してはいるものの、損傷の有無を応答音の差で容易に聞き分けることができた。遠隔打音検査において十分な性能を有していると考えられる。

## 3. 打音検査用 UAV の開発

本研究で使用した UAV はルーチェサーチ（株）が開発したものをを使用した。10000mAh の動力バッテリーによって駆動する上向き 4 枚羽の UAV である。図-3.1 に示す。

今回の遠隔打音検査に使用する振動式打音検査機を打撃部が機体の中心に位置するように搭載した。プロペラが付属している部材から UAV 上部に点検面との距離を一定に保つための支柱が伸びており、この角度を調節し点検面に打撃機がちょうど接触した時に装置が作動するようにした。集音マイクは打撃機の直下に設置した。今回は打撃装置を UAV に搭載した状態で打音検査を行い、無線によって送信された音声のみで損傷を判断できるかの検証を行うことが目的である。そのため、空中を飛行することや、自動航行などは考慮せず、地上から約 1m 浮かせた状態で打音検査を行う。

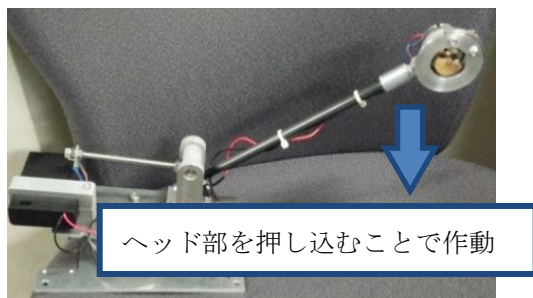


図-2.3 振動式打音検査機



図-3.1 遠隔打音検査用UAV



図-3.2 付属品を取り付けたUAV

この状態では飛行制御が困難なため、精密な前後左右移動はUAVに取り付けた棒によって人力で行う。これらすべてを付属させて状態の機体を図-3.2に示す。

## 4. 検証実験の概要

### 4.1 供試体概要

遠隔打音検査用の供試体として、表-4.1 に示すように圧縮強度と鉄筋のかぶり深さと模擬損傷の大きさをパラメータとした図-4.2 のようなコンクリートブロックを4つ作製した。1500mm×1500mm×200mm のコンクリート床版の一部を模した供試体の鉄筋かぶりに厚さ約 5mm の模擬損傷を施した。模擬損傷は図-4.3 のようにポリプロピレンシートで挟み込むことで水濡れ防止を図った段ボール板で再現している。鉄筋のかぶり部に模擬損傷が位置するようにかぶり鉄筋に直接段ボールを結び付けた。ブロック上部には曲げに抵抗するように格子状に鉄筋を配置した。

鉄筋のかぶり深さは一般的に多く用いられている 30mm をはじめとし、50mm、70mm と設定した。また、損傷が進行した状況を再現するため、かぶり深さ 20mm も用意した。1つの供試体に2種類のかぶり深さが発生するように鉄筋を配置した。

損傷の大きさを1つのかぶり深さに対し 200mm 四方、150mm 四方、100mm 四方、50mm 四方の4種類を配置

した。損傷同士の間隔を 150mm とり、模擬損傷の打撃応答音が干渉しないようにした。

4.2 実験概要

これらの供試体を用いて遠隔打音検査の検証実験を行った。今回の実験は、通常の点検業務で使用するハンマー等で行う通常打音点検と UAV を用いた遠隔打音検査の UAV 点検の性能の比較を主に検証する。この検証実験は過去に橋梁点検に携わった経験のある企業の方の協力をいただき実施した。

遠隔打音検査供試体は図-4.4 のように 100mm 四方の格子状エリアに分割する。同一かぶり深さの損傷の中心は bc 間, gh 間に位置しており、供試体  $\alpha 1$ ,  $\beta 1$  の bc 間がかぶり深さ 20mm, gh 間がかぶり深さ 50mm, 供試体  $\alpha 2$ ,  $\beta 2$  の bc 間がかぶり深さ 70mm, gh 間がかぶり深さ 30mm である。

まず、通常打音点検を行う。格子状エリアのみが書かれている点検シートに損傷があると判断した箇所を書き込むことで判定を行う。

次に、UAV 点検を行う。点検箇所は、同一かぶり深さの損傷中心である bc 間, gh 間の 1~12 までを連続的に打撃していくことで行う。供試体  $\alpha 1$  の bc 間を―A―, gh 間を―B―, 供試体  $\alpha 2$  の bc 間を―C―, gh 間を―D―のように設定し点検を行う。判定は損傷ありの場合は○, 損傷が確認できなければ×, 判断できないまたは不明の場合は△の 3 段階の評価方法で行った。今回は同一点検箇所を 2 回繰り返して打撃する。1 回目は 1 からスタートし、2 回目は 12 からスタートする。2 回目終了すると最終判定を行う。

5. 実験結果と考察および課題

5.1 検証実験結果の考察

点検方法別に検証実験の結果を比較し考察する。  
それぞれの実験結果を図-5.1 図-5.2 に示す。通常打音点検ではかぶり深さが深くなる、もしくは、損傷の大きさが小さくなるにつれ検出率が低下している。この現象の原因として考えられるのが経験年数による差である。しかし、この現象が最も顕著に表れているかぶり深さ 150mm 四方の損傷をかぶり深さと経験年数をパラメータとしたグラフ (図-5.3) を見てもわかるように、経験年数が検出率の増減に関与しているとは言いづらい。

表-4.1 遠隔打音検査供試体パラメータ

| 供試体名   | $\alpha 1$                         | $\alpha 2$ | $\beta 1$ | $\beta 2$ |
|--------|------------------------------------|------------|-----------|-----------|
| 供試体サイズ | 1500mm × 1500mm × 200mm            |            |           |           |
| 鉄筋径    | D16                                |            |           |           |
| 損傷間隔   | 150mm                              |            |           |           |
| 損傷の厚み  | 5mm                                |            |           |           |
| 損傷の大きさ | 50mm 四方・100mm 四方・150mm 四方・200mm 四方 |            |           |           |
| 圧縮強度   | 43.6N/mm                           |            | 58.6N/mm  |           |
| かぶり深さ  | 20mm・50mm                          | 30mm・70mm  | 20mm・50mm | 30mm・70mm |

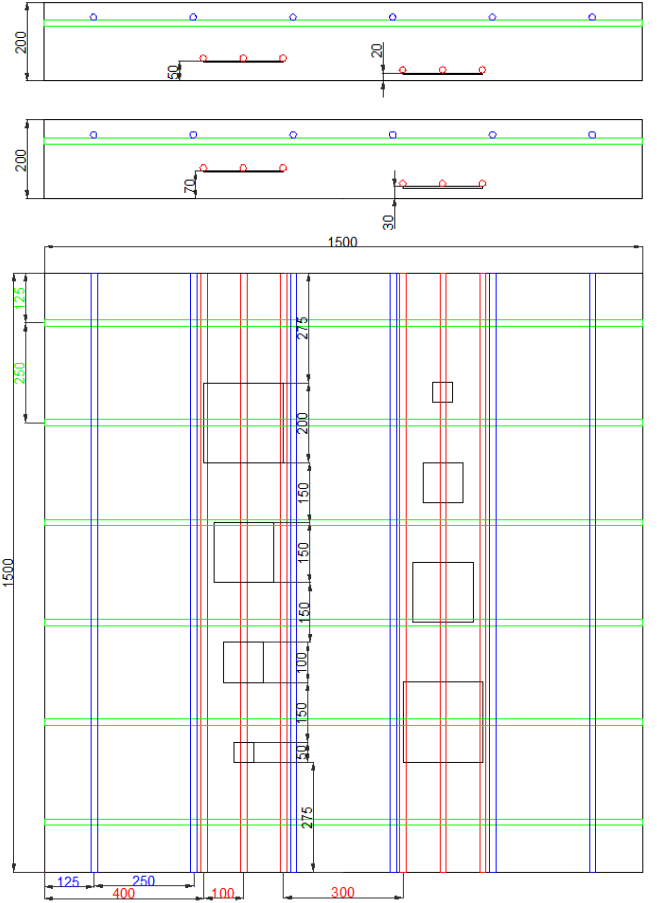


図-4.2 遠隔打音検査供試体図面

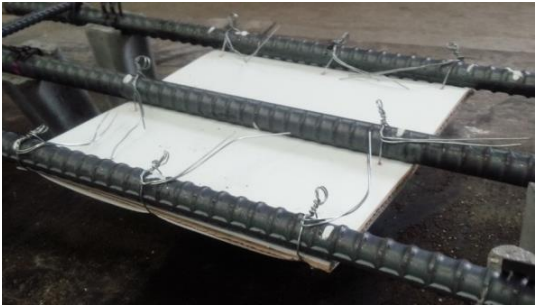


図-4.3 供試体内部に埋め込んだ模擬損傷

一方、UAV 点検ではかぶり深さが 50mm 以上になる、または、損傷の大きさが 100mm 四方以下になると途端に検出率が低下する。しかし、損傷検出ができていた範囲、特にかぶり深さ 30mm の大きさ 150mm 四方の損傷部では 98.2% の検出がされている。通常打音点検の同箇所の検出率と比較しても 26.5% の差がある。つまり、通常打音点検では損傷レベルに応じて検出率が低下していくが、UAV 点検ではある一定以上の損傷レベルでは個人差なく検出が可能であると考えられる。

一方で、検出ができていない範囲の中でも最も検出されている損傷、かぶり深さ 50mm の大きさ 200mm 四方の損傷でも検出率は 19.1%であり、通常打音点検の同箇所の検出率は 85.2%となっており、66.1%の差がある。

以上より、通常打音点検ではかぶり深さが深くなる、または、損傷の大きさが小さくなるにつれ検出率が低下する。この現象は経験年数によるものではなく個人差により発生しているものと考えられる。

一方、UAV 点検では、検出ができていないかぶり深さ 30mm 以下かつ大きさ 150mm 四方以上の条件下の損傷では検出率はほぼ 100%であった。

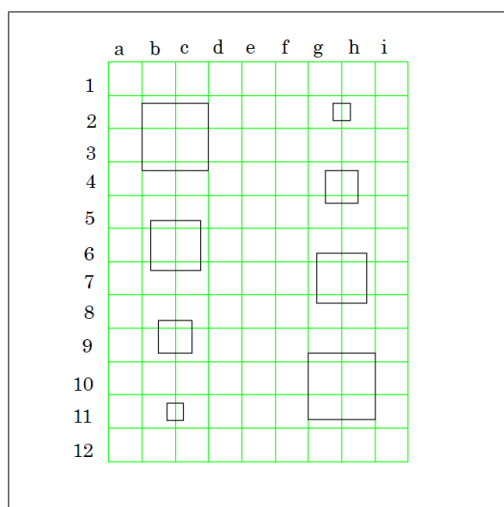


図-4.4 供試体の分割エリアと損傷位置

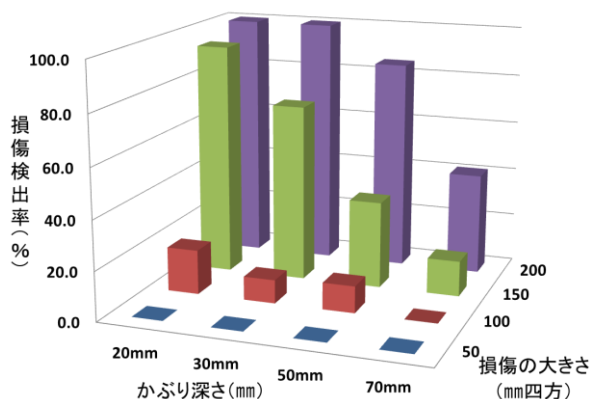


図-5.1 通常打音点検の実験結果

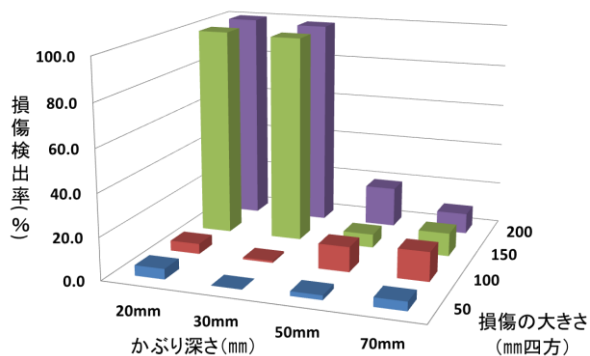


図-5.2 UAV 点検の実験結果

## 5.2 UAV 点検の課題と対策

UAV 点検にはいくつかの課題が存在する。

まず、通常打音点検と比較して損傷検出ができる範囲が狭いことである。

次に、モーター音などの打撃音以外の音が大きく損傷検知が妨げられることである。

また、カメラでの外観目視、集音波形の観察による周波数や振動数の変化など音声以外の定量的な判断材料を加えることが必要であると考えられる。

さらに、打撃装置に関しても課題がある。今回採用した振動式では接触部に押し当てる強さにより応答音が変化する可能性がある。

このように、いくつか課題が浮き彫りになった。現段階では、十分な精度を持って点検の支援をすることは難しいが、これらの問題を解決することで、実務でも十分に活用できるのではないかと考えられる。

## 6. 参考文献

- 1) 日本電気 (株) : 橋梁・トンネル用打音点検飛行ロボットシステムの研究開発
- 2) 阿部雄樹, 市川明彦, 池田貴公, 大原賢一, 福田敏男 : インフラ構造物点検のためのマルチコプタ搭載用打音機構の研究, 日本ロボット学会誌, No.16-2, 1A2-17b5, 2016
- 3) 新日本非破壊検査 (株) : 近接目視・打音点検等を用いた飛行ロボットによる点検システムの研究開発