様式第11 別紙2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1)課題名:非接触音響探査法による外壁調査の効率性向上に関する検討
- (2)研究期間:平成29~30年度
- (3) 交付申請者名: 杉本 恒美(桐蔭横浜大学・教授)
- (4)研究代表者名:杉本 恒美(桐蔭横浜大学・教授)
- (5) 共 同 研 究 者 名 : 歌川 紀之(佐藤工業(株)技術研究所・上席研究員)
- (6) 補助金交付総額: 20,000,000円
- (7) 技術研究開発の目的

竣工から10年を経過した建築物は全面打診等による調査が求められているが、全面打 診は仮設足場等の構築が必要となるため、所有者にとっての費用負担が大きく現実的では ない。また、赤外線法は温度変化や分布を計測する手法であり、補助的に使われることは あっても原理的に打音検査と同等の精度は得られないという問題点がある。一方で、従来 の非接触音響探査法は遠距離から打音点検と同程度の欠陥検出が可能な優れた手法であ るが、音波照射加振を使用しているため、音源から計測対象面を見たときの角度が大きく なると打音と同じたわみ共振を起こすことが困難になるという欠点があった。しかしなが ら、近年普及しつつある無人航空機(UAV: Unmanned aerial vehicle)に音源自体を搭載 した場合には、音源位置を計測対象面に正対させることが可能となり、角度依存性の問題 は解消してしまうことが予想される。そこで、本研究開発では、音源搭載型 UAV を開発 することにより、従来の非接触音響探査法を改良して、外壁調査の効率性を格段に向上さ せることができる計測システムの開発を目的とする。

- (8) 技術研究開発の内容と成果
- I.音源搭載型 UAV と外壁供試体について

本研究開発のために試作した音源搭載型 UAV の外観写真を図1に示す。ベース機体で ある UAV 本体(DJI Corp., Matrice 600 Pro)の下面に平面音源(FPS Corp., 1030M3F1R)、 照準用レーザーポインター、レーザ距離計および FM 受信機等が装備されている。UAV 自体の重さは約10kgで、音源とアンプ等を搭載した状態で約20分間の飛行が可能であ る。また、音波照射加振用の波形は FM 送信機より送信することができ、LDV 側の測定 と同期させることが可能である。タイル張りの外壁供試体の外観写真および供試体に埋め 込まれた模擬亀裂欠陥の配置図を図2に示す。全体の大きさは2×1.6×0.2 m³ であるが、 底部は柱部(2×0.6×0.6 m³)を模しているために約0.4 m ほど厚くなっている。また、重 量が約2.6トンであるため、移動を容易にするために大型車輪が供試体の底部に取り付け られている。模擬亀裂欠陥としては、厚さ 0.5 mm のスチレンシートおよび発泡シートを 使用した。ただし、固定のため、スチレンシートは周囲4辺を、発泡シートは全面を厚さ 0.5 mm テープで躯体コンクリートに貼り付けられており、その上に接着用モルタルとタ イルが取り付けられている。欠陥形状は正方形で、欠陥サイズは 50mm 角、100 mm 角、 150 mm 角、200 mm 角の4 種類である。コンクリート基材からタイルの上面までの厚さ が 10 mm であると仮定すると、シートの埋没深さはタイル表面から約 9 mm である。な お、一つのタイルの大きさは約45×95×7 mm³である。上下2段に同じ模擬欠陥を配置し

たが、違いは背面のコンクリートの壁の厚さである。



図1 音源搭載型 UAV (a) 着陸時、(b) 飛行時



図2 タイル張り外壁供試験体 (a) 外観写真、(b) 模擬欠陥配置図

II.音源搭載型 UAV を用いた外壁点検効率化の実証実験

音源搭載型 UAV からの音波照射加振によるタイル張り外壁供試体に対する非接触音響 探査法の有効性を確認するために、以下の実験が行われた。

- 実験① : 模擬欠陥に音源を正対させて音波照射した場合
- 実験② : 外壁供試体の中央部に対して音波照射した場合
- 実験③ :外壁供試体に対して 2m 程度の高さで UAV を飛行させた場合
- 実験④ :外壁供試体に対して 4m 程度の高さで UAV を飛行させた場合
- 実験⑤:実構造物に対して 8m 程度の高さで UAV を飛行させた場合

Ⅱ-①. 模擬欠陥に音源を正対させて音波照射した場合

最初に、音源を模擬欠陥部に正対させた場合の検証実験を行った。そのため、UAV は 飛行させずに運搬用車両の後部に搭載した状態とした。音波照射実験は、外壁供試体の上 部にある 8 個の模擬欠陥(欠陥サイズ 50~200 mm 角)について行われた。実験1の実 験セットアップを図 3(a)に示す。音源と外壁供試体間の距離は約1.6~1.7 m であった。ス キャニング振動計(SLDV, Polytec Corp., PSV-500 Xtra)を用いて欠陥位置周辺の振動速度 分布を測定した。運搬用車両の後部が供試体の近くにあったので、SLDV は欠陥位置を測 定しやすい位置に配置した。したがって、SLDV と供試体間の距離は約2.4~3.4 m であり、 供試体への垂直入射を0°としたときのレーザ入射角は約38°~55°であった。音波照射加 振用に使用された波形はシングルトーンバースト(STNB)波であり、対象となる欠陥の たわみ共振周波数を一致させるために2種類の波形が作成された。一つ目の波形は、周波 数範囲 0.5~4 kHz のもので欠陥サイズが 100~200 mm 角のときに用いられた。二つ目の 波形は、周波数範囲が 9~13 kHz のもので欠陥サイズが 50 mm 角のときに用いられた。 両波形とも 5ms のパルス幅(周波数インターバルは 100 Hz)で、各パルスの時間間隔(イ ンターバル時間)は 15ms とした。なお、加振時の音圧は測定対象面近傍で約 95 dB(Z 特性の最大値)とした。使用した周波数帯域での振動エネルギー比による欠陥の映像化例 を図 3(b)に示す。 測定点数は 121 (11×11)点であり、加算平均が 5 回のときの測定時間 は約 9 分 11 秒であった。 この図から、50~200 mm 角の全ての欠陥サイズが検出される ことが分かる。 そのうち、欠陥サイズ 50 mm 角のたわみ共振周波数は 10 kHz 以上であ ったため、通常の叩き点検では見つけることが困難な欠陥である。



図3 実験① (a) 実験セットアップ、(b) 振動エネルギー比分布

II-②. 模擬欠陥に音源を正対させて音波照射した場合

UAV を実際に飛行させた時には、風などの影響で UAV 自体が揺動することが予想され る。しかしながら音波照射加振の場合、音源と欠陥位置が正対していなくても、欠陥位置 が音源の指向性の範囲内にあれば、欠陥検出自体は可能であると考えられる。UAV に搭 載されている平面音源の指向角(音源中心音圧に対して音圧が 6 dB 低下する角度)は4 kHz で約 30 度である。したがって、音源から 3 m 程度の距離があれば、今回のタイル外 壁供試体のほぼ全面に 4 kHz 以下の周波数の音波を照射することが可能である。そこで、 次に外壁供試体の中央部に音波照射した場合の検証実験を行った。図 4(a)は実験時の配置 を示す写真である。室内実験のため、UAV は高さ調整台の上に配置し、音源と供試体間 の距離を約 3 m とした。 SLDV (Polytec Corp., PSV-500 Xtra) は音源のやや斜め後ろに配 置した。この時の SLDV と供試体間の距離は約 4.3 m であった。照射音波としては、周波 数範囲 0.3~4 kHz のマルチトーンバースト波(MTNB)波を用いた。この波形には、パ ルス幅 5 ms(周波数インターバル 100 Hz)の 38 周波数が含まれており、波形全体の時間 長さは約 197ms であった。高速で走査するために、1 回の送波で全ての周波数を送出す るとともに、加算平均処理は行わなかった。なお、測定対象面近傍の音圧は約 95 dB(Z 特 性の最大値) とした。

図 4(b)に 0.3~4 kHz の範囲で積分された振動エネルギー比分布を示す。計測領域の大きさ(スキャンエリアサイズ)は約 1.30×1.53 m²で、測定点の総数は 1015(29×35)点とした(計測点の間隔は約 45 mm)。白枠は、欠陥部の位置と大きさを示している。高い共振周波数を有する欠陥サイズ 50 mm 角については、送信した周波数範囲の関係で検出されていないが、その他の欠陥についてはほぼ検出されていることが分かる。ノイズがやや

目立つ理由は、加算平均処理をしていないという条件に加えて、閉鎖環境下でレーザヘッド部と音源の位置が近接しており、供試体からの反射音および周囲からの多重反射音の影響を受けているためである。なお、測定時間は約7分(1点あたり約0.4秒)であった。



図4 実験② (a) 実験セットアップ、(b) 振動エネルギー比分布(0.3~4 kHz)

II-③.外壁供試体に対して 2m程度の高さで UAV を飛行させた場合

音源搭載型 UAV を実際に屋外で飛行させ、外壁供試体を探査する実験を実施した。実 験セットアップを図 5(a)に示す。図に示すように LDV は斜め後方約 3.8 m の位置に配置 した。飛行させた高さは供試体の台車を含めた高さに合わせて 2 m 程度とし、音源と供 試体間は約 2~3 m 程度となるようにした。この距離が曖昧な理由は、大型 UAV の場合、 2 m 程度の低空では UAV 自身のプロペラが巻き起こす風が地面に当たって戻ってくる影 響で UAV 自体が揺動してしまうためである。また,図のように音圧の強い音軸上から離 れて LDV を設置した場合には、反射波によるレーザヘッドの共振現象は原理的に発生し ない。さらに、屋外実験のために周囲からの多重反射音等の影響も無い状況であるために S/N 比も向上していることが期待できる。そのため、実験②よりもさらに高速の計測が可 能かどうかを確認するために、パルス幅を 3 ms と短くしたマルチトーンバースト波を用 いた。周波数範囲も高速化のために若干短くして 0.5~4 kHz とした。この波形には帯域幅 を考慮して 200 Hz 毎に変化させた 19 周波数が含まれており、波形全体の時間長さは約 59 ms であった。また、音圧は計測対象面で約 90~95 dB (Z 特性最大値) 程度とした。



図5 実験③ (a) 実験セットアップ、(b) 振動エネルギー比分布(0.5~4 kHz)

測定対象は供試体左上に配置された 200 mm 角のスチレンシートである。計測ポイント数 は 81(縦 9×横 9)点としたため、計測時間は 21 秒であった。これは 1 ポイント当たり約 0.26 秒で計測が実施できたことを意味している。スキャンピッチは縦横約 38 mm である。振 動エネルギー比(積分範囲 0.5~4 kHz)による欠陥の映像結果例を図 5(b)に示す。図中の 白線交点は計測点を白太枠は欠陥部の大きさと位置を示す。図より,実験中に UAV 自体 は多少揺動したものの,音波照射が短時間であっても音源の指向性の範囲に入っていれば, 欠陥検出は可能であることが確認できた。他の欠陥部も同様に検出可能であると思われる が、2 m という低い高度では UAV 自体が巻き起こす風の影響により、機体が不安定な挙 動を示したため、安全を考慮して、他の模擬欠陥のデータ取得は行わなかった。

II-④.外壁供試体に対して4m程度の高さでUAVを飛行させた場合

UAV 自体が巻き起こす風の影響を避けるために、大型クレーン車を用いて外壁供試体 自体を他のコンクリート供試体(高さ3m)の上に吊り上げて配置することにより、UAV 飛行時の高さを4m程度とした場合の実験を行った。図6(a)にUAV飛行時の実験セット アップを示す。SLDV(Polytec Corp.、PSV- 500Xtra)から見ると、供試体は約 11.2 m の距 離で斜め上方約 26.7°の位置に配置されていた。 実験時には、 音源搭載型 UAV が供試体の 中央部付近に位置するように手動操作した。タイル面までの距離は 3~5m程度となるよ うに操縦したが、自然風の影響により UAV の位置自体が 3 次元的に変化してしまうため に、計測時の距離は一定ではなく、上下左右にも揺動する状況下で手動補正しながら実験 を行った。音波照射加振に用いた波形は周波数範囲 0.5~4 kHz の MTNB 波であり、高速 計測を行うためにパルス幅3ms(周波数インターバル200Hz)とし、波形全体の時間長 さは 60 ms であった。なお、音圧は 5 m の距離で約 90 dB(Z 特性の最大値)として加算 平均処理は行わなかった。周波数範囲 0.9~4 kHz の振動エネルギー比分布例を図 6 (b)に 示す(積分する周波数範囲を変更した理由は、0.9 kHz以下には UAV 自体の揺動が原因と 思われるノイズが含まれていたためと、今回の測定対象欠陥のたわみ共振周波数が 0.9 kHz 以上であったためである)。周波数範囲測定領域の大きさは約1.4×1.7 m²であり、測 定点の総数は 525 点(21×25)とした(測定間隔は約 70 mm)。図より、スチレンシートの 200 mm 角、発泡シートの 150 mm 角、200 mm 角については明確に検出されていることが わかる。その他のものについては明確には検出されていないが(50 mm 角についてはた わみ共振周波数が高いので除外)、その理由としては、実験②に比べて、測定点数が約半 分程度であり100mm角の大きさに対して1点程度しか計測点が配置されていなかったこ とや、高速計測を狙ってパルス幅 3ms の波形を用いたために音波照射時の加振力が不足 していたことなどが挙げられる。なお、測定時間は約137秒であった。これは1ポイント あたり 0.26 秒という極めて高速な計測が実施されたことを意味している。



図6 実験④ (a) 実験セットアップ、(b) 振動エネルギー比分布(0.9~4 kHz)

次に、計測時に加算平均処理(5回)をかけた上で、周波数軸上で共振ピークが存在す るものだけを加算する信号処理(共振判定処理)を行った場合の振動エネルギー分布例を 図7に示す。図より100~200 mm角の欠陥すべてが検出可能であることが判明している。 さらに、屋外実験で、反射音波や多重反射音波による影響も発生しないために、ノイズに 関してもほぼすべて低減可能である。



図 7 実験④-2 共振判定処理後の振動エネルギー分布(0.5~4 kHz)

II-⑤. 実構造物に対して 8m程度の高さで UAV を飛行させた場合

熊本県阿蘇郡南阿蘇村にある旧久木野庁舎における外壁タイルを対象に、音源搭載型 UAV を用いた非接触音響探査法による探査実験を行った。図 8(a)に実験セットアップ図 を示す。計測は建物の2階と3階の間にあるタイル面を対象に実施されたため、UAV の 飛行高度は約8m程度であった。UAV は計測対象面から約5m程度の位置で対象面に正 対するように手動操縦したが、実際には時折吹く風の影響を受けて3次元的に±1m程度 は揺動することがあった。また図に示すようにSLDV(Polytec Corp., PSV-500 Xtra)は測 定面から約17mの距離でレーザ計測を行った。図8(b)に実験風景写真を示す。音響加振 に使用した波形は、周波数範囲0.5~4 kHz、パルス幅3ms、変調周波数200 HzのMTNB 波(波形全体の時間長さは約60ms)である。また、アベレージ無しの計測のため、計測 時間は約20秒程度である(1ポイントあたり約0.26秒)なお、実験時の音圧は5mの距 離で約87dB程度(Z特性の最大値)であった。非接触音響探査法により検出された結果 の振動エネルギー比分布(0.5~4 kHz)を図9(a)に示す。計測点数は縦7点、横11点の計 77点である(測定間隔約270mm)。図より、窓枠下のあたりの計測領域上部に、比較的 大きな欠陥が存在する可能性が高い事がわかる。



図 8 実験(5)(a)実験セットアップ、(b)実験時の写真



図 9 実験⑤の結果例 1 (a) UAV からの音波照射時の振動エネルギー比分布例(0.5~4 kHz)、 (b) 打音点検(健コン診断ポータブル)による推定部材厚さ評価値の分布例



図 10 実験⑤の結果例 2 (a) UAV からの音波照射時の振動エネルギー比分布例(0.3~4 kHz)、 (b) 打音点検(健コン診断ポータブル)による推定部材厚さ評価値の分布例

図 9(b)に高所作業車を用いて、フード付きマイクとインパルスハンマーを用いた打音点 検(佐藤工業㈱、健コン診断ポータブル)を行った場合の欠陥検出結果例を示す。表示は コンクリート部材の場合の推定部材厚さ評価値であるために、タイル外壁部の欠陥評価に は適していない可能性があるが、おおよその欠陥位置は示していると思われる。計測点数 は縦 10 点、横 13 点の計 129 点(排気口部分が計測不可であるために 1 点減)で、計測間 隔は約 200 mm である。UAV からの音波照射加振による非接触音響探査法と打音点検の 結果を見比べると、どちらも窓枠下の計測領域上部に欠陥が存在するという傾向は一致す るものの、打音点検結果では欠陥範囲が広く表示されており、欠陥検出位置が完全には一 致していない。この理由は、ハンマー打撃の方が加振力が大きいためにコンクリート躯体 部も含めた評価になってしまっていることも考えられるが、今回は衝突防止のために UAV と壁面の距離を 4~5 m 程度となるように操縦していたこと、および実験時の音圧が 5 m の距離で約 87 dB とやや低めであったことが大きく影響していたと思われる。そのた め、LDV による計測位置に十分な音圧が加わっておらず、欠陥部の加振が安定していな かったことが原因として考えられた。

そこで、UAV 側のアンプのゲインの調整を行い、5 m での音圧を約 90 dB として、欠陥 が存在すると思われる窓枠下の領域のみを再計測した。計測点数は縦 9 点、横 37 点の計 333 点である(計測間隔は約 75~77 mm)。低い周波数が検出されることが予測されたた めに、周波数範囲 0.1~2.9 kHz、パルス幅 5 ms、変調周波数 100 Hz の MTNB 波(波形全 体の時間長さは約 160 ms)の波形を音響加振に使用した。加算平均処理を行わなかった ために計測時間は約 120 秒である(1 ポイントあたり約 0.36 秒)。周波数軸上で共振ピー クが存在するものだけを加算する信号処理(共振判定処理)を行った場合の振動エネルギ ー比分布例(0.3~4 kHz)を図 10(a)に示す。また、同じ領域の打音点検による欠陥深さ推 定値分布図を図 10(b)に示す。図より、計測間隔が異なるために一見した印象は異なって いるが、よく見てみると窓枠下の中央部付近から、右側にかけて欠陥が連続して存在して おり、どちらも同様な傾向を示していることがわかる。

III. まとめと今後の課題

小型の平面音源を搭載した UAV と亀裂欠陥を模した薄いシートを埋設したタイル張 りの外壁供試体を製作し、UAV からの音波照射加振を用いた非接触音響探査法により外 壁タイルを検査できるかどうかを調べるための基礎実験を行った。 UAV を飛行させずに 実施した基礎実験結果から、UAV に搭載可能な小型音源であっても、たわみ共振を利用 した非接触音響探査法により外壁タイル下に存在する亀裂欠陥を検出することが可能で あり、かつ音源の指向性範囲内であれば、音源が欠陥部に正対していなくても欠陥検出 が可能であることが確認された。タイル張りの外壁供試体を大型クレーンで他のコンク リート供試体の上に配置して、UAV を実際に飛行させた場合には、自然風の影響により UAV 自体が3次元的な位置変化をする状況下での計測となったが、そのような状況下に おいても大きな欠陥(発泡シートの 150 mm 角、200 mm 角、スチレンシート 200 mm 角) については特に問題なく検出できることが明らかになった。その他のものについても、 基礎実験では検出できていたため、実験条件(加算平均処理や共振判定等信号処理)等 の調整により、100 mm 角以上の欠陥も検出できることが判明した。次に実構造物にお ける探査結果では、窓枠下の大きな欠陥は打音点検と同様に検出しており、UAV からの 音波照射加振により実際のタイル外壁点検が可能であることが明らかになった。一方で 打音点検結果と異なる点については、LDV による計測位置に十分な音圧が加わっておら ず欠陥部の加振が安定していなかったことが原因として考えられた。そのため、音圧調 整を行って、欠陥が存在すると思われる領域のみを再計測した。その結果、打音点検と ほぼ同様な傾向を示す結果を得ることができた。また、本手法では音源と高感度 LDV の位置を離すことができるために、レーザヘッド部の共振による影響が少なくなり、極 めて高速な測定が可能であることも明らかになった(1ポイントあたり 0.26秒)。これは 計測条件(測定間隔、音波照射加振用波形の時間長さ、加算平均回数)にも依存するが、 一般的な打音計測の 50 m²/h を超える 62.5 m²/h (測定間隔約 70 mm、波形の時間長さ 60ms、 加算平均無しの場合)の計測速度が達成できることを意味している。しかしながら、実 際の外壁検査にこの方法を実用的に使用するためには、UAV 自体の位置精度の向上(GPS に依存しない自律飛行)や LDV と協働した自動測定など、まだまだ克服すべき多くの 問題があると思われる。そのため、今後も本方法の実用化を目指した様々な検討が行わ れる予定である。

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
物理探査学会第138回学術講演会論文集 (pp.99-100, 音源搭載型 UAV を用いた非 接触音響探査法による外壁検査に関す る検討)	H30.05.27	物理探查学会	杉本 恒美
土木学会第72回年次学術講演会論文集 (pp.948-850, 非接触音響探査法を用いた 欠陥探査技術の開発,-音源搭載型 UAV による外壁検査に関する検討-)	H30.08.01	土木学会	杉本 恒美

(9) 成果の刊行に関する一覧表

日本音響学会秋季講論集(3-7-2, p.135, pp.741-742, コンクリート非破壊計測の ための非接触音響探査法に関する研究, - ー音源搭載型 UAV を用いた外壁検査の 効率化に関する検討-)	H30.08.29	日本音響学会	杉本 恒美
Proceedings of symposium on ultrasonic electronics (USE2018, Vol.39, 2E1-3, High speed noncontact acoustic inspection method using sound source mounted type UAV for the outer wall inspection, 2pages, Distribution by USB memory)	H30.09.28	USE2018	T.Sugimoto
IEEE International Ultrasonic Symposium 2018 Program Book (IUS2018, 5K-5, Outer wall inspection using acoustic irradiation induced vibration vibration from UAV for noncontact acoustic inspection method, 4pages, Distribution by USB memory)	H30.10.01	IEEE IUS2018	T.Sugimoto
日本非破壊検査協会 平成 30 年度秋季講 演大会講演概要集(pp.73-76, 空中放射音 波を用いた非接触欠陥検出法に関する 検討, -音源搭載型ドローンを用いた外 壁点検(1)-)	H30.11.15	日本非破壊検査 協会	杉本 恒美
安全・安心な社会を築く先進材料・非破 壊計測技術シンポジウム論文集(3-2, pp.39-44. UAV からの音波照射加振によ る外壁の非接触音響検査)	H31.03.07	日本非破壊検査 協会	杉本 恒美
物理探査学会第140回学術講演会論文集 (音源搭載型 UAV を用いた非接触音響 探査法による外壁検査に関する検討(II), 発表予定)	R01.06.03 (予定)	物理探查学会	杉本 恒美
コンクリート工学年次論文集(Vol.41,外 壁検査のための音源搭載型 UAV を用い た高速非接触音響探査法,査読付論文、 掲載予定)	R01.07.11 (予定)	日本コンリート 工学会	杉本 恒美
コンクリート工学(Vol.57, No.9, ドローンからの音波照射加振を用いた外壁の 非接触音響探査, 特集、掲載予定)	R01.09.01 (予定)	日本コンリート 工学会	杉本 恒美
Proceedings of 2019 International Congress on Ultrasonics (ICU2019, Noncontact acoustic inspection of outer wall by acoustic irradiation induced vibration from UAV equipped with sound source, to be published)	R01.09.03 (予定)	ICU2019	T.Sugimoto
Proceedings of 23rd International Congress on Acoustics (ICA2019, Outer wall inspection by noncontact acoustic inspection method using sound source mounted type UAV, Peer reviewed paper to be published)	R01.09.09 (予定)	ICA2019	T.Sugimoto
2019 IEEE IUS Program Book, (IUS2019, Efficiency Improvement of Outer Wall	R01.10.06 (予定)	IEEE IUS2019	T.Sugimoto

Inspection by Noncontact Acoustic	
Inspection Method using Sound Source	
Mounted Type UAV, to be published)	

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の 種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
非接触音響解析システム 及び非接触音響解析方法	特願 2018-090807	H30.05.09	(出願中)	学校法人桐 蔭学園、佐 藤工業㈱、 ㈱日本サー キット

(11) 成果の実用化*の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

音源搭載型 UAV (試作機) と外壁供試体を用いた初期の検証結果は極めて優れたもの であり、提案手法が叩き点検の代替手法として実用的に用いることができる可能性が高い ことを示している。音響計測側から見れば、送信音波の改善による計測高速化や音源等機 材の軽量化による飛行可能時間の増加等は比較的短期間で実現可能であると思われる。基 礎検証実験の結果からは現状の試作システムでも 150 mm 角以上の欠陥であれば、比較的 簡単かつ高速に検出可能である。また、100 mm 角の欠陥についても計測時にアベレージ 処理をかけた上で、時間波形上で共振ピークが存在するものだけを加算する信号処理(共 振判定処理)を行うことにより検出自体は可能である。

しかしながら、計測システムとして本当の意味で実用化するためには、高速な計測速度 を維持しつつ、比較的シンプルな信号処理で欠陥検出可能な手法とするべきであると考え る。そのためには、計測時の UAV 自体の位置精度の改善が必要である。GPS に依存した 現状の UAV 機体制御では、UAV の位置精度が±1mと非常に低いために、スキャン密度 にも依存するが 100 mm 角程度の欠陥を見落とす可能性がある。ただし、これは 360 度プ リズムを使用した測量システムによるフィードバック制御を導入すれば、UAV の位置精 度は±15 cm 程度に向上することが判明しているため、将来的には改善されることが期待 されている。

また、現状では計測時の UAV 操作者の負担が大きいため、将来的には UAV の自律飛 行機能もしくは自動制御による飛行機能が実際の点検作業に用いる場合には必要になる と思われる。この点については、UAV の機体制御技術は日進月歩で進化しており、UAV の飛行機能自体の更なる進化も期待されていることから、それほど遠くない将来に実用的 な計測システムが構築可能になることが期待される。

(12) その他(補足事項)

A. UAV の飛行可能時間について

試作した音源搭載型 UAV の飛行可能時間は 20 分程度でしかないため、点検時間がそ れ以上かかる場合にはバッテリー交換のために着陸する必要がある。点検の開始から終了 までの間は飛び続けられる方が作業効率が高まることから、現状のリチウムイオン電池よ り高性能の全固体電池の実用化が期待されるところである。

B. 照射波形について

通常、欠陥部のたわみ共振周波数は未知である。そのため、送信波形としてはその欠陥 部のたわみ共振周波数を探すために、必要と思われる周波数帯域を含んでいる必要がある。 そこで本手法では、必要な周波数帯域をカバーすることができるトーンバースト波を送信 波形として用いている(図 B 参照)。1回の送波で、1つの周波数帯域を持つバースト波 を送信する波形をシングルトーンバースト(STNB:Single ToNe Burst)波、複数の周波数 帯域を持つバースト波を送信する波形をマルチトーンバースト(MTNB:Multi ToNe Burst) 波と呼称して区別している。一般的にはたわみ共振波形の時間的な減衰部分まで計測可能 な STNB 波の方が S/N(Singnal to Noise)比では有利ではあるものの計測時間が長くなる 傾向があり、MTNB 波はやや S/N 比では不利であるものの高速な計測ができるという特 徴がある。



C. 振動エネルギー比

実際の構造物内部に発生する欠陥は複雑な形状をしていることが多く,複数の共振ピークを持つ場合がある。そのような場合には、単一の共振周波数のみを映像化していては欠陥規模を明らかにすることができない。そこで、ある周波数範囲での振動速度のパワースペクトルの和を振動エネルギーに対応する値であるとして振動エネルギー比(VER: Vibration Energy Ratio)を(1)式のように定義する。

$$[VER]_{dB} = 10\log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \quad \cdots \quad (1)$$

ここで、 PSD_{defect} , PSD_{health} は欠陥部、健全部のパワースペクトル密度(PSD:Power Spectral Density)、 f_1 および f_2 は下限および上限周波数である。実際の構造物では健全部でも若干のばらつきがあることが考えられるが、ここでは計測された健全部中で振動エネルギーが最も低い値を PSD_{health} として計算する。

D. 平面音源の指向特性

音源の指向特性を確認するために UAV に搭載した平面音源の音圧分布について調べた。 実験セットアップを図 D (a)に示す。音源を高さ 1.5 m の位置にリフターで保持して,外 壁供試体に対して 4 m の距離から音波を送波した。送信音波は 0.5~4 kHz の STNB 波で ある。マイクロホン(小野測器 MI4400)を音源と同じ高さで移動させて,供試体の前面 を面的に計測した(3×4 m²)。瞬時音圧(平均値)に換算した結果を図 D (b)に示す(図中 の白線交点が計測位置)。図より,水平方向では,4 m の距離でもほぼ供試体全面に 85dB 以上の音波が当たっていることが分かる。



図 D. 平面音源の指向特性 (a) 実験セットアップ図, (b) 音圧分布計測結果例

E. フード付きマイクとインパルスハンマーを用いた推定部材厚さ評価

佐藤工業㈱技術研究所で開発された健コン診断ポータブルは、コンクリート部材に対して 推定部材厚さ評価を行うことができる装置である。これはインパルスハンマーによる打撃波 形の最大振幅値 A_iとフード付きマイクによる加振点近傍の第1波形の振幅値 A_mの比(振幅 値比:Am/Ai)がコンクリート部材の厚さとほぼ線形な関係にあることを利用したものであ る。したがって、外壁タイルに対して用いた場合には、振幅値比から推定された部材厚さは 正しくない。おおよその欠陥位置の判定には使用できると思われるが、打撃力によっては外 壁タイルと筐体コンクリート間の剥離欠陥以外にも、筐体コンクリート内部の欠陥を検出し ている可能性もある。



図 E. 振幅値比による部材厚さ推定 (a) 打撃波形と受信波形例, (b) 部材厚さと振幅値比例

(参考文献: S.Kitagawa, S.Kimura, M.Moriyama, N.Utagawa, "Estimation of the deterioration for highway bridge RC slab by impact acoustics method", Life-Cycle of Structural Systems. Leiden, Holland: CRC Press/Belkema. pp.2090-2096, 2015)

様式第11 別紙2の作成要領

2. 注意事項

- (1) 用紙は日本工業規格 A 列 4 の縦位置とし、長辺とじ両面印刷で2部提出すること。
- (2) 各項目の記入にあたっては、数字、図表等を用いて詳細に説明すること。
- (3) ひらがな文字、カタカナ文字は全角とし、英数文字は半角を基本とすること。
- (4) 長音符(一) とハイフン(一) は区別すること。
- (5) 句点は「。」、読点は「、」とすること。(「.」や「,」にしないこと)
- (6)「実施期間(元号)」は、研究期間が複数年度になる場合、開始年度と終了年度を「~」 で結んで入力し、単年度で全期間が終了する場合には単に「平成00年度」と入力する こと。
- (7)「交付申請者」と「研究代表者」は、公募タイプによっては同一となる場合がある。なお、組織変更等で研究代表者を交替している場合は、交替後の氏名を記入すること。
- (8)「共同研究者」は、交付申請時の記載した全ての研究者を入力すること。また、共同研究者がいない場合でも項目は削除せず「なし」と記載すること。
- (9)「補助金交付総額(円)」は、半角数字で入力し、カンマをつけること。
- (10)「技術研究開発の内容と成果」は、補助事業によって得られた成果を、各年度の交付 申請書で記載した目的や目標、実施計画などと対比させてわかりやすく記入すること。 また、主要な研究方法、手段等の経過についても詳細に記入すること。
- (11)「成果の刊行に関する一覧表」「成果による知的財産権の出願・取得状況」については、 該当が無い場合でも項目は削除せず「なし」と記載すること。
- (12)「成果の実用化の見通し」については、具体的な計画がある場合にはその内容を記載 すること。なお、「実用化」とは、論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装 を指している。
- (13)本様式は電子データでも提出するものとし、保存形式はワードファイルとする。
- (14) CD-ROM に保存して提出する場合には「課題名」及び「交付申請者(所属機関)」を明 記したラベルを貼付すること。
- (15)本資料は、事務局にて PDF 形式に変換し、ホームページ上で公表するものとする。