

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属			役職
	杉本恒美 (すぎもとつねよし)	桐蔭横浜大学・大学院・ 工学研究科			教授
②研究 テーマ	名称	非破壊検査のための非接触音響探査法についての研究開発			
	政策 領域	[主領域] 道路資産の保全	公募 タイプ	タイプII	
		[副領域] 道路資産の保全			
③研究経費 (単位:万円)	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	総合計
※端数切り捨て。	750万円	1,090万円	1,999万円	2,093万円	5,932万円
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)				
氏名	所属・役職 (※平成26年3月31日現在)				
歌川 紀之	佐藤工業(株)技術研究所・上席研究員				
片倉 景義	技術コンサルタント 明篤技研・代表				
⑤研究の目的・目標	(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)				
<p>本研究は、強い音響振動を発生する長距離音響発生装置 (LRAD) と高感度のスキヤニング振動計 (SLDV) を組み合わせた非接触音響探査法により、橋梁やトンネル覆工、その他構造物のコンクリート劣化部の非接触・非破壊検査システムを開発するものである。平成25年度は次の開発目標の達成を目指すものとする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・欠陥検知アルゴリズムの改善検討 ・LDVを用いた計測高速化・高精度化に関する検討 ・大音圧音源を用いた長距離音場制御に関する検討 ・実コンクリート構造物での探査実証実験 <p>なお、上記検討の実証実験に用いるため、欠陥の大きさ及び深さ等を変化させたコンクリート供試体の製作を行う。</p>					

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況(H25年度分)

1. 欠陥検知アルゴリズムの改善検討(振動エネルギー比の導入)

LDVにより検出される振動速度のピーク振幅の強度は欠陥の平面規模が小さく、あるいは深くなるほど弱くなる。コンクリート供試体で用いた欠陥と異なり、実際の構造物中は形状が複雑であることを考慮すると、様々な振動モードが発生する可能性がある。そのため実構造物中の欠陥の振動速度スペクトルの形状も複雑なものになることが予測される。すなわち、単一のスペクトルピークだけを検出するやり方では、実際の欠陥部に適用が難しいことが予測される。一方で、健全部は空中放射音波程度ではほとんど揺れず、欠陥部があるときのみ、振動速度スペクトルに分布(すなわち振動エネルギー)が生じている。そこで、ここでは振動エネルギー比に着目した評価を検討した。振動エネルギー比(Vibration energy ratio : VER)は下式より計算される。

$$VER = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (PSD_{defect}) d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (PSD_{health}) d\omega} \quad (1)$$

ここで、 PSD_{defect} および PSD_{health} は欠陥部上および健全部上のパワースペクトル密度、 ω_1 および ω_2 は下限および上限の角速度である。

Fig.1に円形供試験体の場合の振動エネルギー比の計算結果を示す。図より、振動エネルギー比と欠陥の深さとの相関が見てとれる。ここで、健全部同士の振動エネルギー比の最大差を±3.6 dBとし、これを検出

限界の閾値とするとφ300 mmでは深さ100 mm、φ200 mmでは深さ80 mm程度まで検出可能であることがわかり、昨年度の実験結果と合致する。

2. LDVを用いた計測高速化・高精度化に関する検討(トーンバースト波の導入)

レーザーヘッドに悪影響を及ぼす主成分は測定対象面からの反射波である。しかしながら、音波とレーザー光の伝搬速度の違いを考慮すると、レーザー光の速度の方が圧倒的に早いため、測定対象面から反射波が戻ってくる間に、振動速度の計測を行ってしまうと、ヘッドが多少振動しても特に問題ないことがわかる。そのため、Fig.2に示すように異なる中心周波数帯をもつ短いパルス波を逐次送信することで、チャープ波と同等の広帯域の周波数成分を得ることができる広帯域トーンバースト波を送信波として採用することにした。

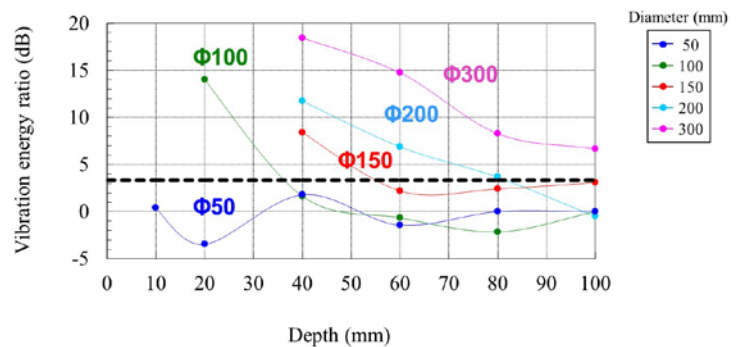


Fig.1. Vibration energy ratio between the defective and healthy part.

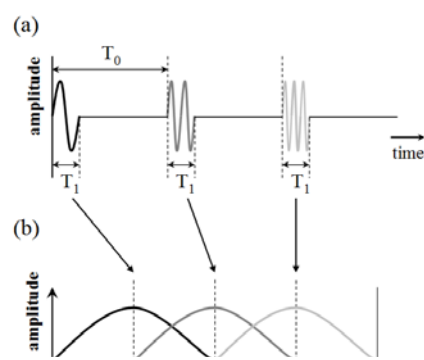


Fig.2. Multi frequency transmission tone burst waveform.

壁型コンクリート供試体(1.5×2.0×0.3 m³)内の深さ75mmに埋設された欠陥（発泡スチロール板(300×300×25 mm)を用いて、トーンバースト波の検証実験を行った。計測に使用した広帯域トーンバースト波は各パルス幅3 ms (Bandwidth: 330 Hz)で、パルス間インターバルは100 msである。各パルスの中心周波数は500-5100 Hzの範囲で200 Hzずつ変調し、全体で170-5430 Hz程度の周波数成分を有している。音源から対象面およびレーザヘッドから対象面までの距離は5 mおよび5.4 mである。計測点は欠陥部の中心部の1点のみである。計測された欠陥部上の時間ゲート適応後の振動速度スペクトル例をFig. 6に示す。従来の従来法では光学系の振動ノイズが取り除くことができなかつたため、S/N比4 dBであるのに対し、今回の提案手法では19 dBと、従来法に比べ15dBの改善が行われたことがわかる。

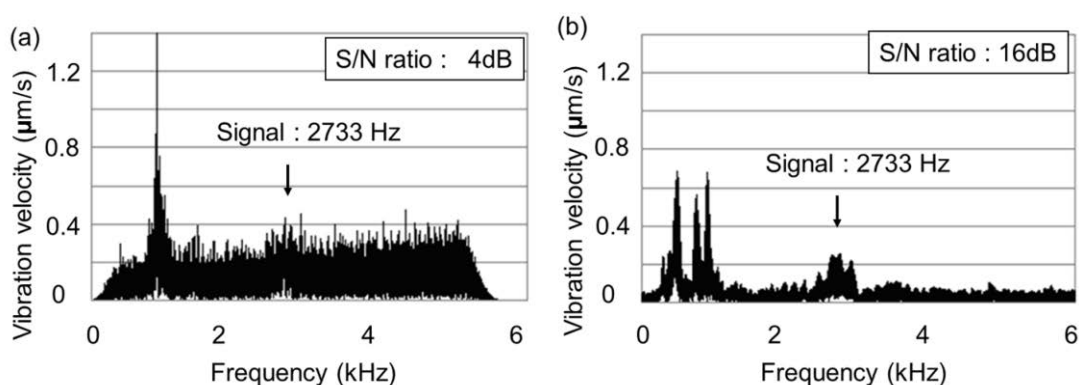


Fig.3. Vibration velocity spectra on the damaged part. (a) chirp wave (Duration : 2s, Bandwidth : 500-5000 Hz), (b) Tone burst wave (Bandwidth : 170-5430 Hz) with time gate.

3. 大音圧音源を用いた長距離音場制御に関する検討(強力超音波音源)

直径 600mm、焦点距離 5m の強力超音波音源の試作をおこなった(超音波素子総数約 3200 個)。試作した強力超音波音源を用いて、実際に 5m の遠隔から探査が行えるかどうか実験を行った。実験セットアップ図を Fig.4(a)に示す。円形欠陥部 (φ300mm、深さ 80 mm) と健全部に対して 500Hz から 7000Hz のトーンバースト波を使用して探査実験を行った。欠陥部上で健全部上の振動速度スペクトルを Fig.4(b)および Fig.4(c)に示す。図より、LRAD 同様に明確な共振ピークが観測できることがわかる。

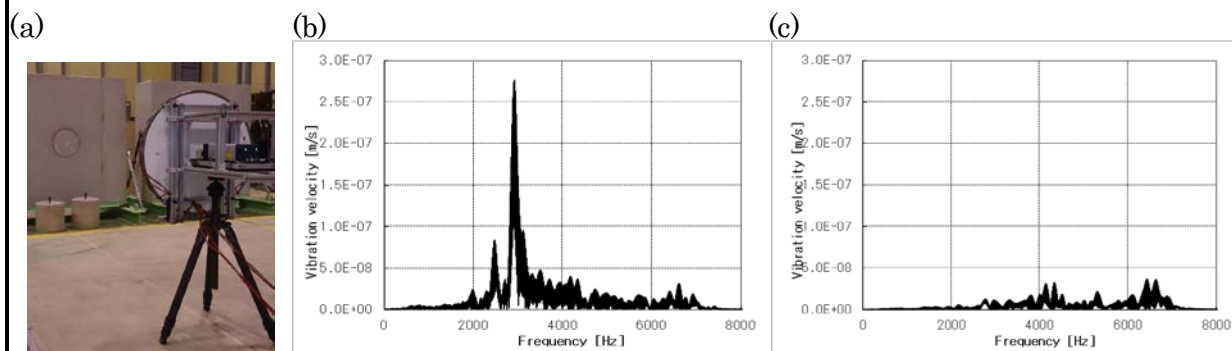


Fig.4. High power ultrasonic sound source. (a) Experimental setup, (b)Vibration velocity spectral at defective part, (c) Vibration velocity spectral at healthy part.

4. 実コンクリート構造物での探査結果例

4.1 ボックスカルバート

探査対象とした北陸自動車道のボックスカルバートをFig.5に示す。叩き点検結果および非接触音響探査法による振動エネルギー比の映像結果をFig. 6に示す。図中に示された地表面から高さ1.7 mの赤枠のエリアを対象とした。1回の測定規模は1.0×1.0 cm程度とし、4エリアに分け測定した。1エリアのスキャンポイント数は5×5ポイントである。音源から対象面までの距離は4 m程度である。床および天井面反射による干渉を抑えるため、床



Fig.5. Experiment scenery in a box culvert at Hokuriku highway.

面から音源の高さは2 mと設定した。SLDVのレーザーヘッド位置も同様な距離、高さに設定し、良好な受光感度を得るため、各測定エリアに対し正対させている。送信波形は広帯域トーンバースト波である（持続時間3ms、変調インターバル200Hz、パルス間インターバル50ms、開始—終了周波数 1500-6500Hz、コンクリート表面での音圧は100 dB程度）。加算平均回数は1点につき10回とした

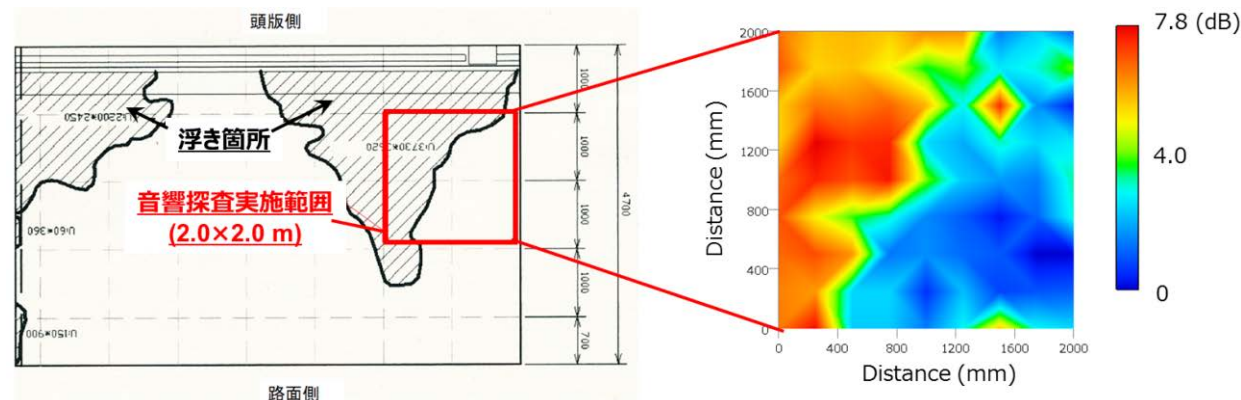


Fig.6. Experimental results. (a) Hammer method (slash part :float), (b) Non contact acoustic inspection method using vibration energy ratio.

振動エネルギー比の基準となる健全部のデータは、今回測定された全スキャンデータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を用いた。図から、海側に比べ、陸側の側壁の方が高いエネルギー比を示している。健全部とのエネルギー比4 dBを欠陥判定の閾値とすると、図中の左半分はほぼ欠陥部と判定される。叩き点検において浮きと判定された部位と音響探査法によりエネルギー比率が高く判定された部位は非常に近く、音響探査法の探査精度は叩き点検と近い性能を有している事が確認出来る。

4.2 RC床版

探査対象としたRC床版のある橋梁の外観をFig.7に示す。実験日は特に車両規制等はなく、トラック等が走行している状態で行った。

床版は Fig.7 (b)に示すよう下面側から計測した。Fig. 8 に探査結果を示す。音響探査法の結果は振動エネルギー比による評価を行った。基準となる健全部のデータは、今回測定された全スキャンデータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を用いた。Fig.8 (a) は音響探査法によるエネルギー比分布、Fig.8(b)は打音法による厚さ分布である。Fig. 8 (a) 中のエネルギー比の高い位置と Fig.8 (b)の薄く判定された位置を比較すると、概ね位置関係が合致している事がわかる。

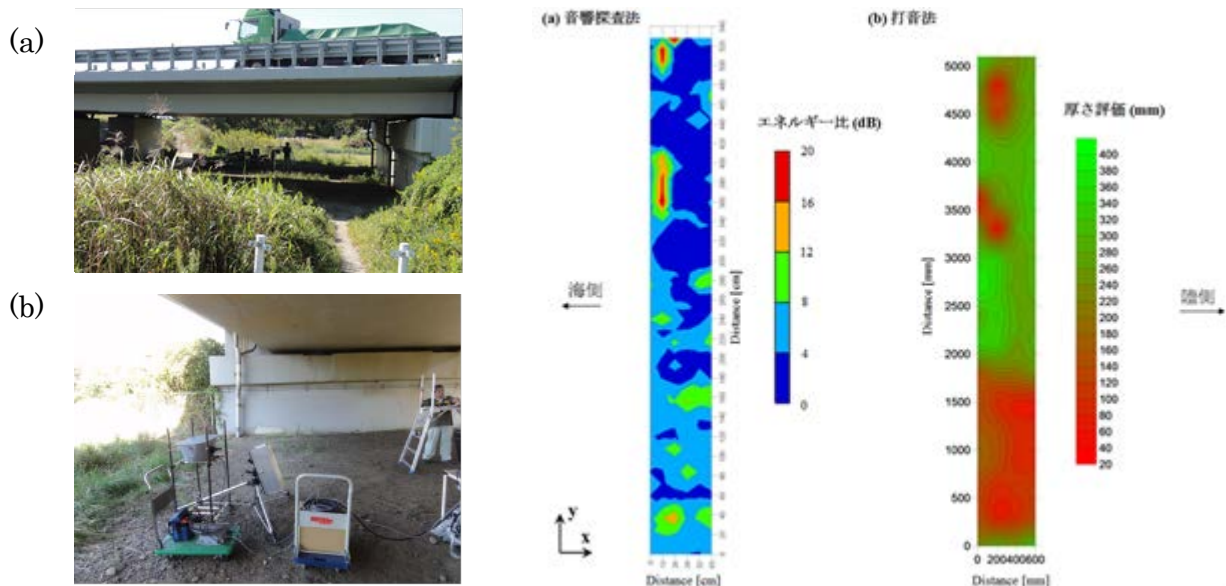


Fig.7. Experiment scenery in a RC bridge at Hokuriku highway.

Fig.8. Experimental results. (a) Non contact acoustic inspection, (b) Hammer method with microphone.

⑦ 中間評価で指摘を受けた事項への対応状況

中間評価における指摘事項は以下の3項目である。

(1) コンクリート構造物内部の欠陥を検出することは緊急を要する課題である。遠距離用強力音源の製作を含め、実用化に向けて一層の研究推進を期待する。

・・・強い指向性をもつ強力音源の製作、送波方式の改善によるSN比改善および計測速度向上など、実用化につながる極めて重要な研究を実施した。

(2) 実用化に向けて、実際の欠陥に対して適用性を検討することを期待する。特に、実地調査実験が重要であり、臨場感を持って研究を進めていただきたい。

・・・昨年度は実コンクリート構造物における調査実験を複数行い、音響加振による力が有効に伝えられるような状況ではたたき点検と同程度の精度が得られることを明らかにした。

(3) 最終取りまとめでは、トンネルなどの実構造物での点検実施を念頭に、たたき点検など既存手法との比較から、手引などの実務者が使いやすい形で適用範囲や限界・課題の整理をお願いしたい。

・・・たたき点検との比較をコンクリート供試験体および実コンクリート構造物を用いて実施しており、現状での適用範囲や限界および課題の整理を行った。

③研究成果(本研究全体)

1. 非接触音響探査法の概要

1.1 基本セットアップ

非接触音響探査法の基本概要図をFig. 1に示す。音源から発した空中放射音波により対象壁面を励振する。励振時の壁面上の振動をLDV(Laser Doppler Vibrometer)により光学的に検出し、欠陥部と健全部の振動特性の違いから欠陥を検出するという手法である。

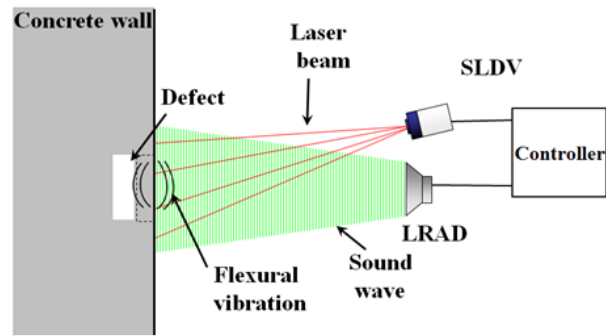


Fig.1. Fundamental concept of non-contact acoustic inspection method

1.2 非接触音響探査法の計測原理

コンクリート構造物の表面近傍に空洞欠陥もしくは亀裂がコンクリート面に対して水平かつ平面的に存在していた場合、その欠陥上で板状の構造が構成される。この場合、ハンマーによる叩き点検を実施するとこの板状の部分は構造物からはく離れた板は振動板のように働くことになる。この時、2種類の振動が発生する。

一つはコンクリート表面と空隙までの厚み方向で生じた定在波による縦振動である。一般的に、コンクリートの音速は 3000-4000 m/s であり、欠陥までの深さを 10-100 mm とすると縦振動の固有振動数 f_L は 15-200 kHz となり、ほぼ可聴域外である事がわかる。

もう一つはたわみ振動である。たわみ振動は欠陥部が太鼓のように振動する振動パターンである。簡単のため、はく離部を単純支持された円板と近似すると、その一次の固有振動数 f_{fr} は以下の(1)式で表される。

$$f_{fr} = \frac{4.98}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

ここで、 h はコンクリートから欠陥までの深さ、 a は半径、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 ρ は密度である。(1)式より、固有振動数は欠陥の深さに比例し、半径の二乗に反比例することがわかる。

2. 遠距離からの探査能力の実証

本手法が実際に5m以上の離隔で探査が行えることを確認するために実証実験を行った。音源とコンクリート供試体間は10 mに設定した。音源であるLRADは供試体に正対して設置し、SLDVはそのやや斜め後方の位置から計測を行った。実験に用いたコンクリート供試体の大きさは150×200×30 cm³である。供試体には深さ5 cmの位置に30×30×2.5 cm³の発泡スチロール板が埋設されている。音源としては米LRAD社のLRAD 300Xを、SLDVとしては独Polytec社のPSV400-H4を使用した。また、探査用の送振波形としては広い周波数帯域を持ったチャープ波を用いた。実験時の出力音圧はコンクリート表面付近で約110 dBである。

Fig.2 に欠陥部の応答周波数帯の輝度映像結果（周波数スペクトルの最大値で規格化したスペクトル表示）を示す。探査用のリニアアップチャープ(500-4200 Hz,1800-2400 Hz)を送振した結果, 2 kHz 周辺で明瞭なスペクトルピークを存在することがわかる。帯域を絞ったチャープ(1800-2400 Hz)を送振した場合の SLDV の振動速度分布の映像化例を図-8（映像化周波数は 1998Hz）に示す。図中の大きな白四角が埋設物の位置と大きさを示しており,その他の細白線の交点はスキャンポイント位置を示している。スキャン領域は 60×70cm²の大きさで,計測ポイント数は 195（13×15）ポイントである。この映像から埋設物中心での振動が見てとれる。この結果から, 10 m の離隔であっても欠陥検出が可能であることを確認した。

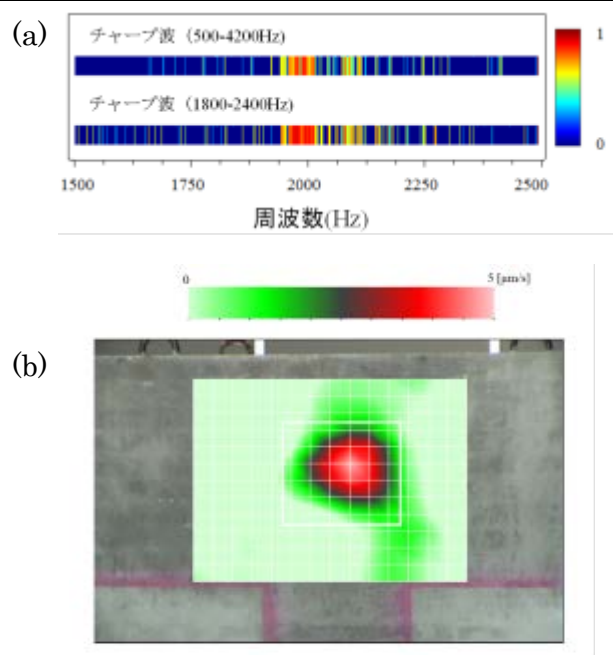


Fig.2. Experimental results. (a)Brightness image, (b)Vibration velocity image (1998Hz).

3. 検出可能な欠陥の大きさ及び深さについて

検出可能な空洞の大きさ及び深さについて検討するために,埋設深さと直径を変化させた円形欠陥モデル（発泡スチロール 25mm 厚）を埋設したコンクリート供試体（2×1.5×0.3m³）を製作した(Fig.3 参照)。円形発泡スチロールの直径および深さは直径 50mm のものが深さ 10, 20, 40 及び 60mm に,直径 100mm のものが深さ 20, 40, 60, 80mm に直径 150, 200 および 300mm のものが深さ 40, 60, 80, 100mm の位置に埋設されている。5m の離隔からの探査結果を Table 1 に示す。上段は岩検ハンマーを用いた叩き点検法による検出の可否(3 名でブラインドテストを行い,○は検出可能,△は判定が分かれるもの,×: 検出不可), 下段は本手法による検出の可否(○は検出可能,かつ SLDV の共振ピーク以上の共振ピークを検出した場合でその共振周波数を表示,△は SLDV の共振ピークと同程度以下のピークを検出した場合,×: 検出不可を示す)を示している。岩検ハンマーを用いた叩き点検では,打音検査のプロではない素人の方に自由

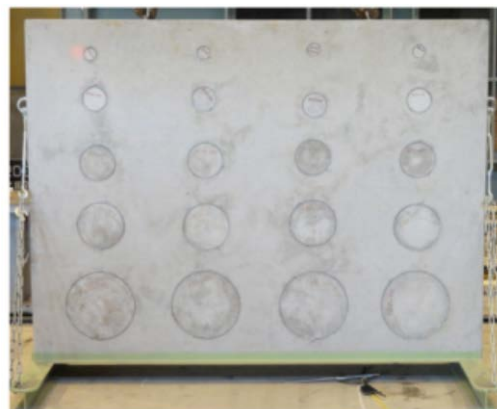


Fig.3. Concrete test object with circular defect model..

Table 1 Experimental result using circular defect models.

(mm)	深さ100	深さ80	深さ60	深さ40	深さ20	深さ10
直径 50	—	—	△	△	×	×
直径 100	—	×	×	×	△	—
直径 150	×	×	△	△	—	—
直径 200	×	×	○	○	—	—
直径 300	○	○	○	○	—	—

に叩いて判定をしてもらった場合の結果である。両手法ともに加振方法に違いがあるにも関わらず、同様な探査性能を示していることがわかる。

4. 亀裂欠陥を用いた探査結果

より現実に近い亀裂欠陥の場合の検出の可能性を調べるために、亀裂幅の違う円柱型の割裂試験体を埋設したコンクリート供試体 ($2 \times 1.5 \times 0.3 \text{ m}^3$) を製作した。割裂モデルの製作手順を以下に示す(Fig.4 参照)。

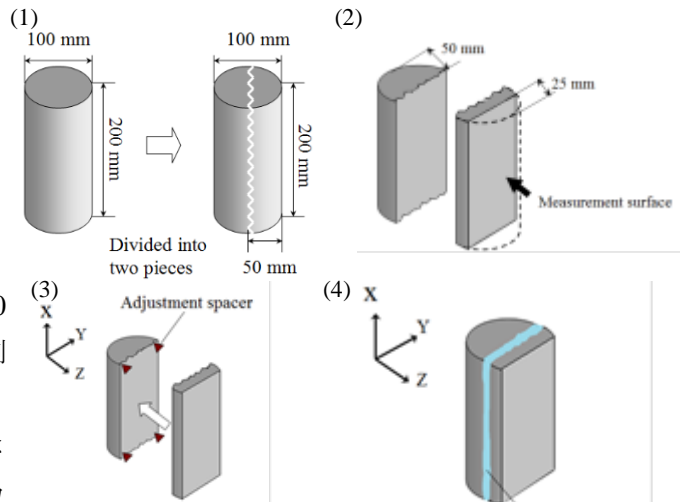


Fig.4. The production method of the crack model.

- ① 円柱状コンクリートピース ($\phi 100 \times 200 \text{ mm}$) を割裂引張強度試験により 2 つに割裂させる。
- ② 測定面側をフラットにするため、割裂させたテストピースのうち一つを半分にカットする。
- ③ 割裂させた二つの供試体間に金属スペーサを挿入することで間幅を調整。
- ④ エポキシ接着剤を亀裂部周囲に塗布。供試体の固定とともに、後に流し込むコンクリートの侵入を防ぐ。

(Fig.4参照)。割裂部の平面規模は $200 \times 100 \text{ mm}^2$ (深さ 25 mm) とした。割裂幅は $0, 0.5$ および 1 mm のものに加えて比較用として 25 mm 厚の発泡スチロールを挟んだものが埋設してある。なお、ここで割裂幅 0 mm とは、いったん円柱試験体を 2 つに割った後に再度隙間なく付け直したものである。

割裂試験体を用いた場合の実験結果例を Fig.5 に示す。図より割裂試験体の場合は接触面積が試験体により異なるため、共振周波数にばらつきが見られるものの、割裂幅 0 mm であっても検出できていることがわかる。

これらの事実は、音響加振の場合には非常に小さな亀裂であっても、それなりの平面規模に達すれば、レーザ探査と異なり検出可能であること示している。なお、 1 kHz で見られるピークはレーザヘッド自体の共振周波数である。

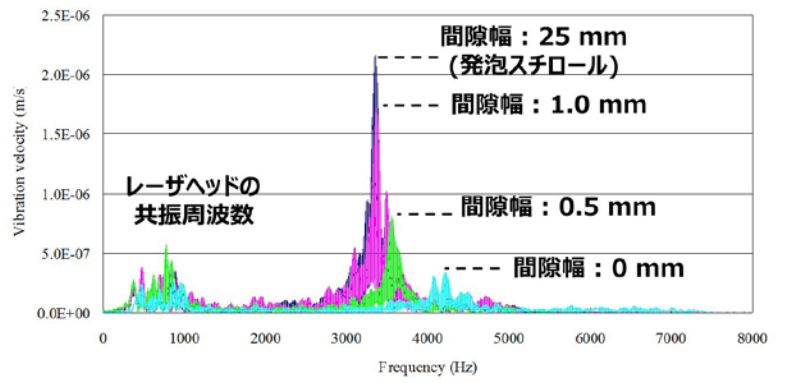


Fig.5. Vibration velocity spectrum on the each crack models (depth 25 mm , size $100 \times 200 \text{ mm}^2$).

5. 実コンクリート構造物での探査結果例 (N²U-Bridge)

遠距離非接触音響探査法の適用性を確認するため、実構造物での探査実験を複数実施した。ここでは一例として、名古屋大学東山キャンパス内のN²Uブリッジ(名古屋大学・ネクスコ中日本橋梁モデル)での査結果例について紹介する。N²Uブリッジ内のRCT桁橋(旧厚東橋)の下面を測定対象とした場合の実験セットアップ図をFig. 6に示す。

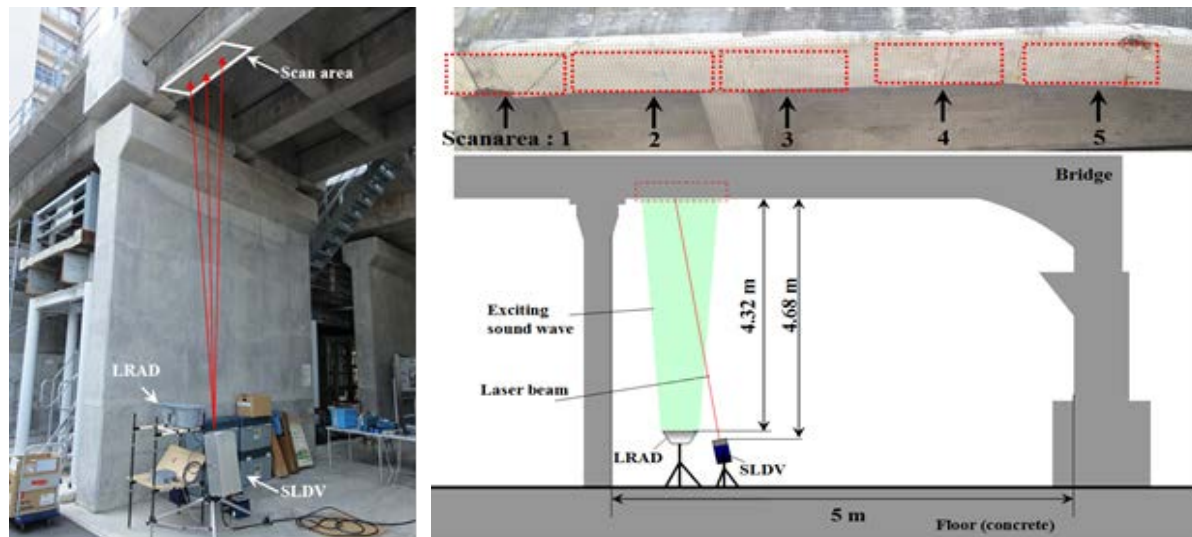


Fig.6. Experimental setup at N²U-Bridge.

探査に用いた波形はトーンバースト波である(持続時間 3ms、変調インターバル 200Hz、パルス間インターバル 50ms、開始—終了周波数 1500-6500Hz、コンクリート表面での音圧は 100 dB 程度)。加算平均回数は 1 点につき 20 回とした。計測された最小振動エネルギー値を基準とした振動エネルギー比の分布を Fig.7 に示す。過去に行われたコンクリート供試体での実験結果から振動エネルギー比 4 dB(≒3.6 dB)を欠陥判定の閾値とすると計測範囲ほぼ全体が不良部であると判定出来る。測定箇所側面部では、目視で明らかに確認出来るひび割れが数多く存在しており、対象構造物中には水平ひび割れが全体的に生じている事が予想される。

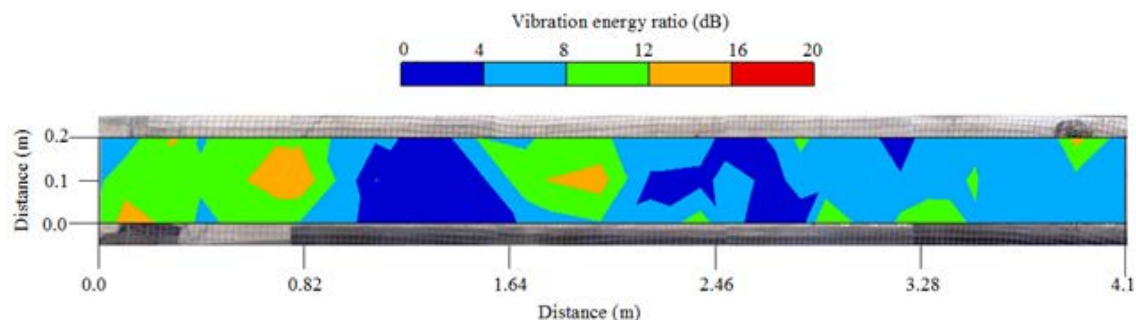


Fig.7. Experimental result using vibration energy ratio.

6. まとめ

以上より、非接触音響探査法は遠距離から従来の打音法と同程度の精度での探査を行うことが可能であることが実証された。騒音問題、測定速度など実用化に向けて改善すべき点はあるものの、いずれも解決可能な問題であり、本手法による実用システムの登場は近い将来実現すると思われる。

⑨研究成果の発表状況

- (1) Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Non Destructive Inspection using SLDV and LRAD, T.Sugimoto, R.Akamatsu, N.Utagawa and S.Tsujino, 2011 IEEE International Ultrasonic Symposium Proc. pp.744-747,(2011.11)
- (2) Study on the Inspection for Shallow Area under Concrete Surface using Air-coupled Sound Wave, Ryo Akamatsu, T. Sugimoto, H.Kawasaki, N.Utagawa and S.Tsujino, Proc. of the 10th SEGJ International symposium, -Imaging and Interpretation-, pp.84-87, (2011.11)
- (3) SLDV と空中放射音波を用いたコンクリート表層部の欠陥映像化に関する研究, 赤松亮, 杉本恒美、歌川紀之、辻野修一, 信学技報 US2011-111, No.443, pp.1-5, (2012.2)
- (4) 非接触音響探査法によるコンクリート欠陥検出, 赤松亮, 杉本恒美、歌川紀之、辻野修一, 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, pp.35-38, (2012.3)
- (5) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino, “Non Contact Acoustic Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD”, Acoustics 2012 Nantes, Proceedings pp.835-839, 2012.04.24
- (6) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino, “Non Contact Long Distance Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD”, Acoustics 2012 Hong Kong, Proceedings 6pages, 2012.05.17
- (7) 赤松亮, 杉本恒美、歌川紀之、辻野修一, “SLDV と空中放射音波を用いた非接触欠陥検出法に関する研究”, 日本非破壊検査協会平成24年度春季講演大会, 講演概要集, pp.81-84, 2012.05.22 (アルカディア市ヶ谷)
- (8) 杉本恒美, 赤松亮, 歌川紀之, 片倉景義, “非破壊検査のための非接触音響探査法に関する研究、-遠距離からのコンクリート浅層内部欠陥検出に関する検討-”, 物理探査学会第126回学術講演会 講演論文集 p56-57, 2012.05.29(早稲田大学国際会議場)
- (9) 赤松亮, 杉本恒美、歌川紀之、辻野修一, “長距離音響発生装置を用いた非接触欠陥検出法の検討”, コンクリート構造物の非破壊検査, Vol.4, pp.31-36 (2012.8)
- (10) 歌川紀之, 片倉景義, 赤松亮, 杉本恒美, “音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発、-打音法との比較-”, 土木学会第67回年次講演会 講演論文集 V-029, p57-58, 2012/09/06 (名古屋大学)
- (11) 杉本恒美、赤松亮、歌川紀之、片倉景義, “音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発、-遠距離からの探査能力に関する基礎検討”, 土木学会第67回年次講演会 講演論文集、V-030, p59-60, 2012.09.06 (名古屋大)
- (12) 赤松亮, 杉本恒美、歌川紀之、片倉景義, “コンクリート非破壊検査のための非接触音響映像法に関する研究、-振動速度スペクトルを用いた欠陥検出法の基礎的検討-”, 音響秋季講義集、2-6-12, pp1489-1490, 2012.9.20 (信州大学)
- (13) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura, “Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Concrete Defect Detection, - Study on the Defect Detection using the Realistic Crack Model and the Angle Dependence-”, IEEE International Ultrasonic Symposium 2012, Abstract Book, 4C-2, pp94-95, (Laser Based Techniques, Oral session) 2012.10.08, Dresden, Germany
- (14) 杉本恒美、歌川紀之、片倉景義, “非接触音響検査装置および非接触音響検査方法”, 特願2012-258888, 出願日2012/11/27、発明者: 杉本恒美、歌川紀之、片倉景義、出願人: 桐蔭学園、片倉景義、佐藤工業(株)
- (15) SLDV と空中放射音波を用いたコンクリート表層部の欠陥映像化に関する研究、- 剥離欠陥検出の検討-, 赤松亮, 杉本恒美, 歌川紀之、片倉景義, 信学技報US2012-111, No.437, pp.1-6, (2013.2)
- (16) Ryo Akamatsu, Tsuneyoshi.Sugimoto, Noriyuki Utagawa and Kageyoshi Katakura, Proposal of Non-Contact Inspection Method for Concrete Structures, Using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.52, 07HC12, (2013.7)
- (17) Ryo Akamatsu, Tsuneyoshi.Sugimoto, Noriyuki Utagawa and Kageyoshi Katakura, Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Concrete Structures - Improvement of Signal-to-noise Ratio by using Tone Burst Wave Method-, 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium (IEEE) Prague Congress Centre (Prague, Czech Republic) Proc. IUS, pp1303-1306, (2013.7)
- (18) 音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発、-(1)検出可能な欠陥の大きさおよび深さに関する検討-, 杉本恒美、赤松亮、歌川紀之、片倉景義、土木学会平成25年度全国大会講演概要集 VI-087, pp173-174, (2013.9)
- (19) 音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発、-(2)隙間が異なるはく離欠陥の検出に関する検討-, 北川真也、赤松亮, 杉本恒美、歌川紀之、片倉景義、土木学会平成25年度全国大会講演概要集、VI-085, pp169-170, (2013.9)
- (20) 音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発、-(3)音響探査法に用いる探査アルゴリズムの検討-, 歌川紀之、片倉景義、赤松亮, 杉本恒美、土木学会平成25年度全国大会講演概要集 VI-084, pp167-168, (2013.9)
- (21) T.Sugimoto, R.Akamatsu, N.Utagawa and K.Katakura, Non Contact Acoustic Inspection Method using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer, The souvenir book of Asian Pacific Conference on Non-Destructive Testing 2013 (APCNDT2013), Paper No.103, pp150-151, (2013.11.21). Mumbai, India.
- (22) 赤松亮, 杉本恒美, 歌川紀之, 片倉景義, SLDV と空中放射音波を用いたコンクリート表層部の欠陥映像化に関する研究、-時間・時間周波数ゲート法によるS/N比の改善-, 超音波研究会, 信学技報US2013-112, No.439, pp.93-98, (2014.2)

⑩研究成果の社会への情報発信

(1) 日刊工業新聞 第21679号 1面 (2013年7月22日)

桐蔭横浜大、音波でコンクリ劣化検査－保守作業を効率化

(記事内容) 桐蔭横浜大学の杉本恒美教授は、コンクリート構造物の劣化を音波を使って検査する非接触音響探査法を開発した。強い音圧を発生する長距離音響発生装置(LRAD)と高感度のレーザ振動計を組み合わせる。構造物から約10m離れた位置からでも2mm程度の微小なひび割れを検知できる。短時間で広い面積を測定できる上、高い場所や接近しにくい場所なども安全に検査できることから、トンネルや橋などの保守作業の効率化につながる。



(2) テクニカルショウヨコハマ セミナー講演 (2014年2月6日、参加人数50名程度)

コンクリート非破壊検査のための遠距離非接触音響探査

桐蔭横浜大学大学院 教授 杉本恒美

パシフィコ横浜にて開催されたテクニカルショウヨコハマ2014に桐蔭横浜大学として出展した。「コンクリート非破壊検査のための非接触音響探査法と音波を用いた植物根域の土壌水分計測および葉の振動計測」という内容でポスター展示をおこなったほか、2月6日には「コンクリート非破壊検査のための非接触音響探査法」という題目でセミナー講演を行っている。



(3) 応用物理学会 招待講演(2014年3月17日、参加人数40名程度)

青山学院大学の相模原キャンパスで開催された応用物理学会で以下の招待講演の発表を行った。

(シンポジウム) 光を用いた構造ヘルスマニタリング技術

空中放射音波とレーザードップラ振動計を用いた遠距離非接触音響探査法

杉本恒美, 赤松亮, 歌川紀之, 片倉 景義

第61回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集17p-D8-4, p187,

2014春 青山学院大学(相模原キャンパス)、2014.03.17

空中放射音波とレーザードップラ振動計を用いた遠距離非破壊検査法について、その概要と供試体および実構造物の実験結果等について説明した。

(4) 非破壊検査協会 招待講演 (2014年3月19日、参加人数30名程度)

コンクリート非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法

杉本 恒美・赤松 亮・歌川 紀之・片倉 景義

超音波による非接触センシング・先進評価技術研究会 資料 pp.25-30 (2014.3.19)

発行(社)非破壊検査協会

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

今回の委託研究での研究成果から、非接触音響探査法の基本原理、基本特性および実コンクリート構造物への適用性などが確かめられた。同時に実用化に向けて克服すべき課題も明確になっている。現在想定される課題は以下のとおりである。

- ・ 周囲への騒音問題・・・コンクリート表面に叩き点検と同様なたわみ振動を発生させるには測定面付近で約 100dB 程度の音圧 (圧力にして 2Pa 程度) が必要である。音波の反射散乱状況によっては点検現場近くに住宅があると苦情が出てしまう可能性も予測される。そのような場合でも、強力超音波音源は非常に強い指向性を持たせることが可能であるため、反射音波の強い位置も特定しやすくなり、その箇所にだけ遮音板等を配置しておくことにより、かなりの騒音低減効果があると思われる。
- ・ 測定面の状態 (凹凸) による、計測精度の低下・・・測定対象であるコンクリートの表面は基本的に平滑であることを想定しているが、場所により表面に細かい穴が多数開いたような状態になっている場合がある。このような箇所では、異常な結果を示す可能性があるため、欠陥検知アルゴリズムと連動させる形での対応を考えている。

上記の問題に加えて、欠陥探査アルゴリズムの改善および1日の内で探査可能面積の増大も含めて、さらに検討を進め、可能なかぎり早い時期に実用試作システムの製作を実施していく予定である。

⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

非接触音響探査の基本原理・特性および実用化に向けて克服すべき課題が明確になったことから、研究開発資金の額にも依存するが、実用試作システムが開発されるのもそう遠い未来の話ではないと思われる。すでにT社より試作システム開発の打診を受けており、もし仮に競争的な研究開発資金の援助 (SIP等) が獲得できない場合でも、この2-3年で試作システムが開発される可能性は高い。もしも、本手法に基づいた実用システムが開発された場合には、従来、高所作業車を必要としていたような探査現場は、すぐにでも本手法によるものに置き換わっていく可能性がある。その上で、使い方としては、欠陥の1次スクリーニング用として非接触音響探査法を用い、発見された欠陥部の要所確認のみを従来の叩き点検で実施するという形になっていくのではないかと想像する。

また、今回は研究の対象をあくまでもトンネルや橋梁ということでターゲットを絞っているが、非接触音響探査法自体は叩き点検で判別できる場所はすべて置き換える可能性を本質的に持っている。例えば、アスファルト面下のコンクリート欠陥、建物の外壁タイルの剥離、コンクリート面に張り付けられた金属面の剥離などには応用可能である。さらに国内においては日本非破壊検査協会の規格であるNDISの中にある「コンクリート構造物の弾性波による試験方法(NDIS 2426)」への非接触音響探査法の追加を諮っていく。その上で、国際標準化機構(ISO/TC135)の非破壊試験関連の規格制定にも日本非破壊検査協会を通じて働きかけることにより、世界的に普及できる手法としての規格を確立していく予定である。

⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

今回の委託研究で得られた非接触音響探査法に関する研究成果は、今後のコンクリート構造物の点検作業を一新してしまうほどのインパクトを持っていると考えている。すなわち、音響加振によりコンクリート内部の欠陥部上で発生する振動は、たたき点検と同じたわみ共振であるため、本手法が本質的にたたき点検の代替えとなりうる手法であること、および共振周波数を利用することから、他の手法に比べてもきわめて効率的な探査が実施可能であることなどが今回の委託研究を通じて明確にされたためである。また、強力超音波音源を試作し、理論解析およびコンクリート供試体を用いた実験を行った結果、市販の長距離音響放射装置と比べた場合の優位性（角度依存性、騒音）が明らかになり、実用システムを構築する場合の指針も明確になった。以上のような研究成果より、本委託研究は研究目的を十分に達成しているばかりでなく、たたき点検の代替え手法としては最も実用化に近い手法となっており、本委託研究による研究開発成果は今後の道路政策の質の向上に寄与するところ大であると思われる。また、研究費の投資価値としては、今後本手法が実用化されていくことになると、従来のたたき点検のほとんどを代替できてしまうことが予想される。そうなると国内だけでなく、世界的に点検現場に革新が起きていくことを考慮すると、我が国の経済発展にも寄与するところが大であり、国費としての研究費の投資価値は極めて大であったと言えるであろう。