

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

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・工学部		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	[主領域] 道路資産の保全		公募	タイプII	
	領域	[副領域] 防災・災害復旧対策		タイプ		
③研究経費（単位：万円）	平成23年度	平成24年度	平成25年度	総合計		
	1090万円	1,999万円	2,093万円	5,182万円		
※H23は精算金額、H24は受託金額、H25は計画額を記入。端数切り捨て。						
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。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					
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。）					
<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）と高感度のスキャニング振動計（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。本年度は実際のコンクリート構造物に想定される欠陥を模擬したコンクリート供試体を製作した上で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"> ・複数音源を用いた長距離音場制御による騒音低減効果及び検出性能向上程度の把握 ・計測時のサンプリング周波数の検討等による計測速度および感度向上程度の把握 ・検出可能な欠陥の大きさ及び深さ並びにその検出精度の把握 						

⑥これまでの研究経過

1. 複数音源を用いた長距離音場制御による騒音低減効果及び欠陥検出性能の検討

(1-1) 複数音源を用いた長距離音場制御による騒音低減効果

2個の長距離音響放射装置（LRAD-300X, LRAD Corp.）を用いた場合の騒音低減効果について検討を行った。実験セットアップ図をFig.1に示す。図に示すようにコンクリート供試体（ $2.0 \times 1.5 \times 0.3 \text{ m}^3$ ）から5m離れた位置にLRADを配置し、スキャニング振動計（SLDV）は音源のやや後方になるように配置した。なお、使用したコンクリート供試体内の深さ50mmの位置に埋設された300mm角、25mm厚の空洞を模した発泡スチロールを測定対象とした。

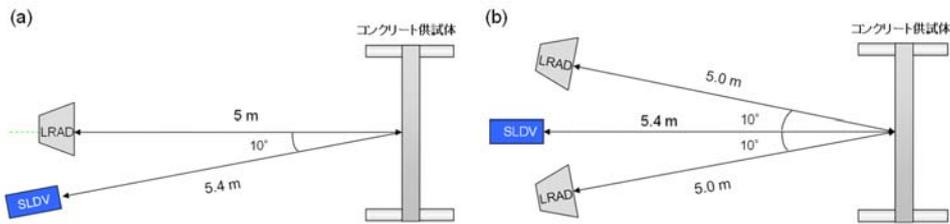


Fig.1 複数音源を用いた長距離音場制御による騒音低減効果, (a)音源1個、(b)音源2個

実験結果より、2個の音源を用いて供試体表面に100dBの音圧を発生させるにはそれぞれ音源が供試体前面に発生する音圧は97dB(-3dB)程度で良いことが判った。また、供試体の表面に100dBの音圧が発生している瞬間の音圧分布計測結果例をFig.2に示す。図より、中心軸上では5dB以上音圧を下げられることが判る。なお、以降の実験では簡単のためにFig.1(a)の配置で実験を行った。

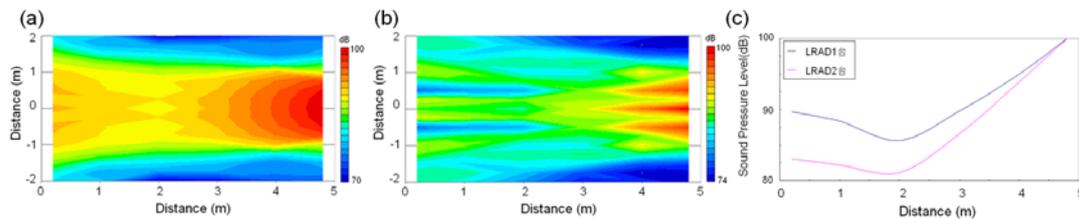


Fig.2 複数音源を用いた音圧分布計測結果, (a)音源1個、(b)音源2個、(c)中心軸上の音圧比較

(1-2) 複数要素音源を用いた長距離音場制御による欠陥検出性能の検討

次に複数要素音源を用いた強力超音波音源（直径30cm、超音波素子800個使用）を試作し、動作確認実験を行った。実験結果より、1mの離隔での加振領域は半径3cm程度の同心円内に限局されること、LRADと異なり500Hz以下の低周波数領域でも音波を自由に発生できること、などが判明した。また、コンクリート供試体を用いた探査結果から、加振力は多少低いもののLRADと同様な欠陥探査が可能であり、また、SLDVヘッド共振による1kHz近傍における不要応答の解消、さらに、周囲環境への騒音放射を低下させることが判明した。

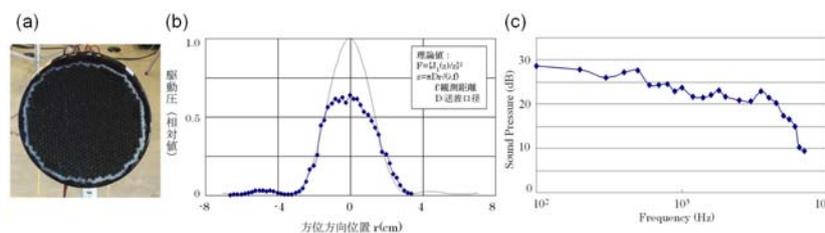


Fig.3 強力超音波音源を用いた計測結果, (a)外観写真、(b)指向特性、(c)周波数特性

2. 計測時のサンプリング周波数の検討等による計測速度および感度向上程度の把握

(2-1) 簡易防振対策用ケースの効果について

昨年度、試作した SLDV ヘッド用の防振ケースは上下の角度をつけるのには不向きな 4 本足構造であったため、今年度は三脚にそのまま取り付けるタイプの新防振ケースを試作した。防振対策無しの場合と新旧の防振ケースの効果を実験体中の欠陥部中心の振動速度スペクトルを見ることで比較した。使用した欠陥は深さ 25mm の位置に埋設された 100×200mm² 角、25mm 厚の空洞を模した発泡スチロールである。送信波形は 500-5000Hz の周波数帯域を持つ Chirp 波（持続時間 1s）を用いた。実験結果例を Fig.4 に示す。

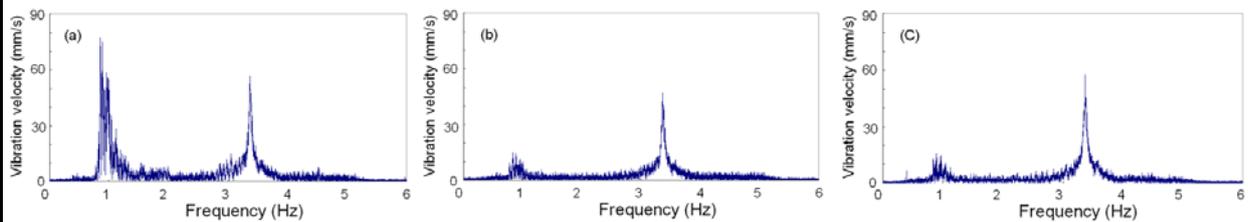


Fig.4 簡易防振対策用ケースの効果, (a)防振ケース無、(b)旧防振ケース、(c)新防振ケース

図より、防振ケース無しの場合では 3.5kHz 付近にある欠陥部の応答と同程度の卓越周波数が 1kHz 付近に観測されているが、これは SLDV ヘッドの共振周波数であることが確認されている。一方、新旧の防振ケースを用いた場合はどちらもケース無しの場合に比べると、欠陥部の応答はほとんど変化しないものの、1kHz 付近のヘッドの共振周波数は約-30dB (1/1000 倍) 程度の軽減が観測されており、新旧の両ケースともに同程度の防振効果を持つことが確認できた。したがって、以降の実験では、主に設置の自由度の高さから新防振ケースを用いた。

(2-2) 送信波形の工夫による測定感度についての検討

Chirp 波を送信波として用いた場合、送信時間（通常 2 秒程度）の関係で、測定対象物からの反射波の影響による SLDV ヘッドの振動を避けることは困難であった。今年度は、このような SLDV ヘッドの振動を抑制し、測定感度を向上させる目的で、空中放射音波とレーザ光の伝搬速度の差を利用し、対象物からの反射波が戻ってくるまでに計測を終了させる方法に着目した。そこで、従来の Chirp 波と反射波の影響を低減させた Tone burst 波を用いた計測法の感度 (S/N) について比較した。測定対象は深さ 75mm の位置に埋設された 300mm 角、25mm 厚の空洞を模した発泡スチロールである。用いた Chirp 波は帯域幅 500-5000 Hz、持続時間 1.8s で、Tone burst 波としてはパルス長 3ms とし周波数帯域は Chirp 波とほぼ同じ 500-5100 Hz 間を 200Hz 毎に送信した。送信間隔は残響を避けるため、100ms とした（平均回数は 5 回）。

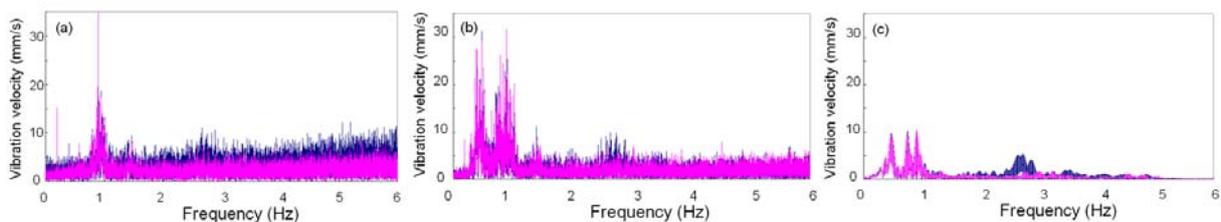


Fig.5 測定感度についての検討, (a)Chirp波, (b)Tone burst波, (c) Tone burst波（ゲート処理後）

赤線：健全部、青線：欠陥部

振動速度スペクトルの計測結果例を Fig.5 に示す。Chirp 波の場合(Fig.5(a))は、ノイズフロアが全体的に高いために、応答らしいものは見られない (2.7kHz 付近の S/N 比約 4dB 程度)。同じくトーンバースト波の場合(Fig.5(b))も、何も処理を施さないと 2.7kHz 付近に若干差が見られる程度である (S/N 比約 7dB 程度)。しかしながら、Fig.5(c)に示すように、反射波が SLDV ヘッドに到達する前、実際に音波が測定対象面を振動させている時間帯にゲートをかけて FFT 処理をすることで、ノイズフロアが下がり、明瞭な固有振動を見ることができる (S/N 比約 19dB 程度)。ゲート処理をかけた Tone burst 波 (時間ゲート Tone burst 波法) と Chirp 波の場合の S/N 比差は約 15dB(30 倍)である。

(2-3) 送信波形の工夫による計測速度の向上についての検討

S/N 比が高いということは平均回数を減らすことができることを意味する。時間ゲート Tone burst 波法と Chirp 波法による、S/N 比の差は約 15dB(30 倍)であり、この改善度は、計測速度における 30 倍の高速化に相当する。この結果より、以降の実験では時間ゲート Tone burst 波を使用している。

3. 検出可能な欠陥の大きさ及び深さ並びにその検出精度の把握

(3-1) 欠陥を模擬したコンクリート供試体の製作

検出可能な空洞欠陥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。配置図および写真を Fig.6(a)および(b)に示す。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。また、亀裂幅の違いによる検出精度を検討するために円柱型の割裂試験体を埋設したコンクリート供試体 (2×1.5×0.3m³) も製作した。その配置図を Fig.6(c)および(d)に示す。割裂部の平面規模としては 100×50mm² (深さ 25mm)、200×100 mm² (深さ 25、50mm) および 300×150 mm² (深さ 50、75mm) とした。それぞれ、割裂幅 0、0.5 および 1mm のものに比較用に 25mm 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 0mm 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。

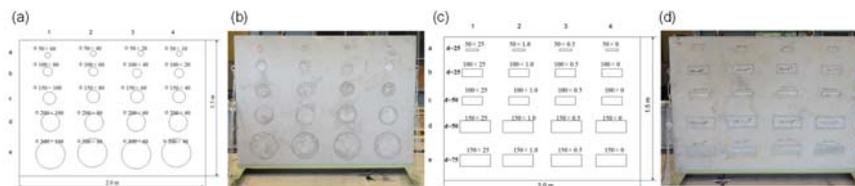


Fig.6 コンクリート供試体の配置図, 円形欠陥(a)配置,(b)写真、割裂試験体(c)配置,(d)写真

(3-2) 検出可能な欠陥の大きさ及び深さの検討

円形欠陥モデルを用いた場合の探査結果を Table.1 に示す。上段は叩き点検法による検出の可否、下段は本手法による検出の可否 (検出可の場合にはその共振周波数を表示) を示している。表より、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おり、反応を示す共振周波数は深さに比例し、直径の 2 乗に反比例していることがわかる(例: Table.1 深さ 40mm)。現状の LRAD の周波数特性が 10kHz あたりから低下することおよびデータ容量の観点から SLDV のサンプリング周波数を 16.38kHz としていることなどから、φ100 で深さ 20 mm 程度が計測限界であるというのは、想定されるたわみ共振周波数の見地からしてほぼ妥当な結果であると思われる。

Table. 1 円形欠陥モデルを用いた探査結果例（上段：叩き点検法、下段：本手法）

	深さ100	深さ80	深さ60	深さ40	深さ20	深さ10
Φ 50	—	—	△ ×	△ ×	×	×
Φ 100	—	×	×	×	△ ○5430Hz	—
Φ 150	×	×	△ △4958Hz	△ ○4449Hz	—	—
Φ 200	×	×	○ ○3733Hz	○ ○2762Hz	—	—
Φ 300	○ △3155Hz	○ △2734Hz	○ ○2106Hz	○ ○1449Hz	—	—

(○：検出可能、△：判定が分かれるもの、×：検出不可)

(3-3) 割裂試験体を用いた検出精度の検討

割裂試験体を用いた場合の実験結果例を Fig.7 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 0mm 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本手法により検出可能であること示している。

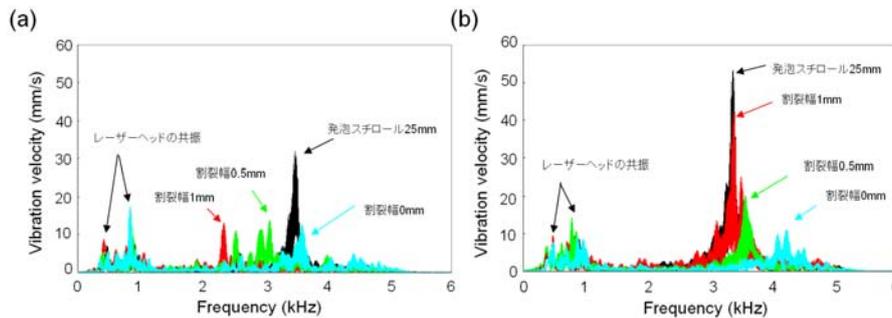


Fig.7 割裂試験体を用いた検出結果例, (a) 300×150 mm²、深さ 50mm、(b) 200×100 mm²、深さ 25mm、黒線：発泡スチロール、赤線：幅 1 mm、緑線：幅 0.5 mm、水色線：幅 0 mm

(3-4) 実構造物（切り出し試験体）を用いた欠陥検出結果例

土研のヤードに置いてあった切り出し試験体（幅約 30cm、長さ約 5m の鉄筋コンクリート製の橋桁）を用いて欠陥の検出を行った。検出結果例を Fig.8 に示す。図より、本手法により亀裂欠陥部の深さ（鉄筋腐食位置、断面修復材のはくり位置）に応じて、異なる周波数帯の映像化が行えていることがわかる。また、マイクロホンを使用した打音法による亀裂深さ評価でもほぼ同様な位置に剥離欠陥部が検出できていることがわかる。

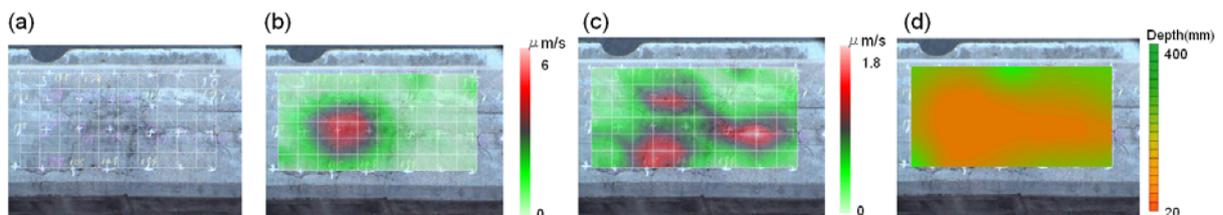


Fig.8 切り出し試験体を用いた検出結果例、(a) 測定面エリア(60x30cm²)、(b) 本手法(1339Hz)、(c)本手法(2208Hz)、(d)マイクロホンを用いた打音法による亀裂深さ評価

⑦研究成果の発表状況

- (1) 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
- (2) 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
- (3) 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)
- (4) 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)
- (5) 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)
- (6) 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)
- (7) 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 (名古屋大学)
- (8) 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-", 音響秋季講演集、2-6-12, pp1489-1490, 2012.9.20 (信州大学)
- (9) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura, "Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Concrete Defect Detection, - Study on the Defect Defection 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
- (10) 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)

⑧研究成果の活用方策

今年度の検討結果から、非接触音響探査法の具体的な探査性能が明らかになってきた。すなわち、基本的にはたわみ共振を利用した計測のため、その共振周波数は埋設物の深さに比例し、平面規模（直径）の2乗に反比例すること、亀裂幅はたとえ0mmであっても検出可能であること、計測速度と感度はトレードオフの関係にあることなどである。また、トーンバースト波に時間的なゲート処理を加えることで、Chirp波よりも感度が約15dB(約30倍)程度向上できることも判明した。さらに強力超音波音源を使用すれば加振領域±3cm程度の点加振に近い計測が実現できる可能性も確認できた。したがって、今後はSLDVとLRAD音源を用いた面加振による狭領域一括探査とシングルLDVと強力超音波音源を用いた点加振による広領域の走査探査を組み合わせることにより、実際の現場に要求される欠陥検出性能の向上を考えている。

⑨特記事項

1. **本手法の必要性**・・・高度成長期に多数構築されたコンクリート構造物の老朽化が進む中、本手法のように10mの離隔でも使用することのできる非接触探査法の開発および実用化は急務であり、是非とも進展させるべきテーマであると考えている。
2. **国内外等へのインパクト**・・・従来の打音法に替わる手法として、本研究テーマである遠距離非接触のコンクリート浅層探査が可能な音響探査法が実用できる可能性は非常に高いと思われる。世界に先駆けて実用化されればそのインパクトは国内外ともに非常に大きいものがあると予想される。