

## 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（FS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 領域	[主領域] 道路資産の保全	公募	タイプII (FS実施)
		[副領域] 防災・災害復旧対策	タイプ	
③研究経費 (単位:万円) ※受託金額を記入。	平成22年度 750万円			
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			
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>近年、地表面やコンクリート表面等屋外で2次元振動計測が可能な高感度のスキャニング振動計(SLDV:Scanning Laser Doppler Vibrometer)や通常のラウドスピーカに比べると遠距離でも高音圧を維持することができる長距離音響発生装置(LRAD; Long Range Acoustic Device)が開発された。そのため、被測定物から10メートル以上離れた位置において、非接触で非破壊計測が行える可能性が予測される状況になってきた。したがって、本研究の目的は、高感度のスキャニング振動計と長距離音響発生装置を組み合わせた制御により、非接触・広域の音響探査システムを構築し、主としてコンクリート構造物を対象とした非破壊検査用非接触音響探査システムの実用化を図ることである。</p> <p>なお、本年度のFS研究の開発目標は、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>適切な機器のサイズを維持しつつ、コンクリート構造物に対し10mの離隔から、50mmの深さに存在する面状の欠陥が検出できること</li> </ul> <p>である。</p>				

## ⑥ F S 研究の結果

### 1. 使用したコンクリート供試体について

橋梁の床版や柱やボックスカルバートなどの鉄筋コンクリートの浮きや空洞欠陥（以下欠陥）を想定した5体のコンクリート供試体を作成した。供試体は、自体の振動が測定へ影響しないように、幅2m、高さ1.5m、幅0.3mの大きさとし、その内部に発泡スチロールの正方形板を用い、かぶりと平面規模の異なる32種類の欠陥をモデル化した。Photo.1(a)に製作中の供試体(No.1-No.5)、Photo.1(b)に完成した供試体(No.1-No.5)を示す。次頁のTable 1に、欠陥の大きさ（発泡スチロール板の大きさ）、平均かぶり（コンクリート表面と発泡スチロール板の距離）、発泡スチロール板の厚さ等を示す。

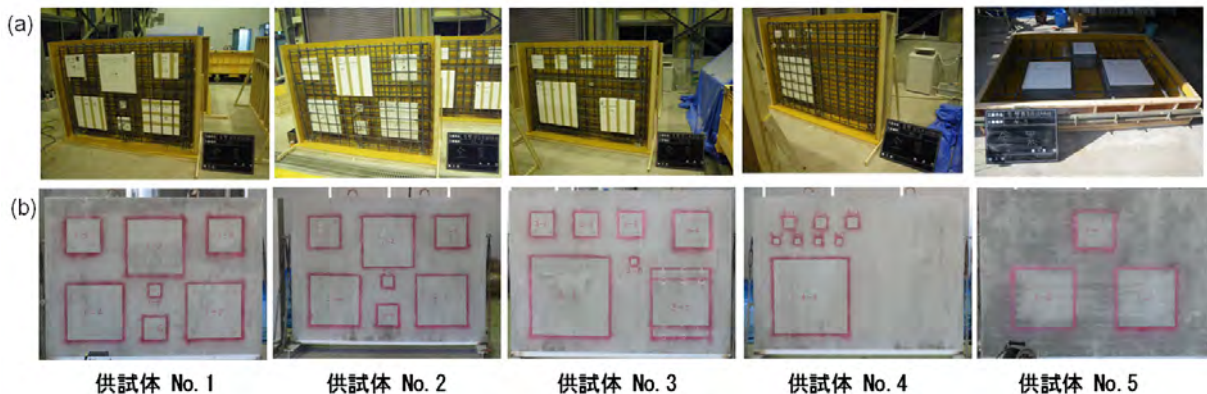


Photo.1 使用したコンクリート供試体 (a)製作中、(b)完成後

### 2. 実験セットアップ

Fig.1 に実際の実験セットアップ図を示す。基本的にはコンクリート供試体に対して約10m離れた位置からLRAD(LRAD-300X, LRAD Corp.)による大音圧にて表面振動を励起させ、その振動速度をSLDV(PSV400-H4, ポリテックジャパン(株))により2次元的に計測するというものである。

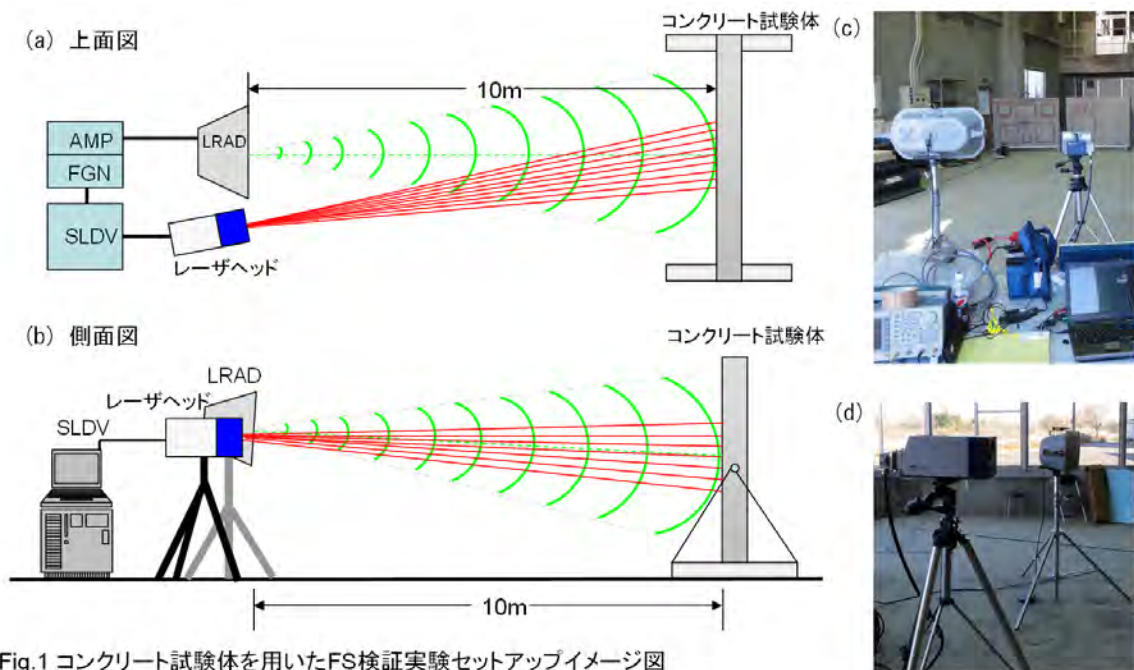


Fig.1 コンクリート試験体を用いたFS検証実験セットアップイメージ図  
(a)上面図、(b)側面図、(c)セットアップ写真1、(d)セットアップ写真2

### 3. 欠陥部の検出実験結果

本実験では観測された欠陥中心の振動速度スペクトルから反応周波数帯を設定し、その反応周波数帯周辺で周波数をずらしながら、スペクトル振幅の平面分布を見て欠陥領域で大きな増幅分布となる映像および周波数を探す方法により欠陥の位置を検出するものである。欠陥の探査結果を Table 1 に示す。表には各欠陥に対する反応周波数帯、検出時の欠陥位置での音圧、SLDV 映像結果等が示されている。映像結果の◎、○、△はそれぞれ欠陥部のほぼ全域で反応、欠陥部の半分以上の領域で反応および欠陥部の一部分のみ反応という状態に対応している。

Table 1. 非接触音響探査法による埋設物探査実験結果のまとめ表(平均かぶりの括弧内の数値は実測平均値)

欠陥 No	大きさ(mm角)	厚さ(mm)	平均かぶり(mm)	反応周波数帯(Hz)	SLDV 映像結果	検出時音圧
1-1	300x300	25	25(15)	1300-1600	○	113 dB
1-2	500x500	25	25(0)	1300-1600	○	115 dB
1-3	300x300	25	50(28)	2250-2500	○	118 dB
1-4	500x500	25	50(16)	—	未測定	—
1-5	100x100	25	100	—	未測定	—
1-6	200x200	25	100	—	×	120 dB
1-7	500x500	25	75(51)	2460	△	115 dB
2-1	300x300	25	75(71)	2960-3150	○	115 dB
2-2	500x500	12.5	50(31)	—	未測定	—
2-3	300x300	25	100(95)	2470-2490	○	120 dB
2-4	500x500	25	100(92)	—	未測定	—
2-5	100x100	25	150	—	未測定	—
2-6	200x200	25	150	—	未測定	—
2-7	500x500	25	150(45)	—	未測定	—
3-1	200x200	25	25(21)	1450-1650	◎	115 dB
3-2	200x200	25	50(44)	2760-2880	◎	115 dB
3-3	200x200	25	75	2042 3821	○	125 dB
3-4	300x300	25	150	—	×	120 dB
3-5	700x700	25	50(10)	2121	△	120 dB
3-6	50x50	25	150	—	未測定	—
3-7	500x500	50	50(48)	750	◎	115 dB
4-1	100x100	25	25	2800-4000	◎	117 dB
4-2	100x100	25	50	2959	○	116 dB
4-3	100x100	25	75	3300	○	120 dB
4-4	50x50	25	25	3000	○	120 dB
4-5	50x50	25	50	3000	○	120 dB
4-6	50x50	25	75	3500	○	120 dB
4-7	50x50	25	100	3500	○	120 dB
4-8	700x700	25	100	2121	△	122 dB
5-1	300x300	25	50	1960-2025	◎	120 dB
5-2	500x500	25	75	1158-1205	◎	119 dB
5-3	500x500	25	50	1042	○	120 dB

次頁の Fig.2 および Fig.3 に欠陥検出例を振動速度分布画像として示す。図中、赤い色の箇所は周囲に比べて大きな振動速度が得られている部分を示し、その周波数で固有振動している状況が推定することができる。また白四角は欠陥部のおよその位置と大きさを示している。なお測定ポイント数は約 200 ポイントである。

#### 4. 評価可能な対象探傷物の大きさ及び深さ等の検討

(4-1) 探査可能深さの検証・・・Fig.3(a)に示すように深さ 75mm に設置した欠陥 No.5-2 (平面規模 500mm 角)が明瞭な反応を示していることから、120dB 前後の音圧で探査可能な深さは対象物表面から約 75mm 程度と推定される。

(4-2)対象物の大きさの影響・・・Fig.2 に示すように、平面規模 100mm 角から 300mm 角の欠陥探査が可能であることを確認した。ただし、それぞれの大きさで、どの程度のかぶりの欠陥を探査できるかは今後の課題である。大きさ 500mm 角および 700mm 角の欠陥については、かぶりが一定の欠陥 No.5-2 の場合には Fig.3(a) に示すように良好な結果が得られた。しかしながら、欠陥 No.1-2 のようにかぶりが増える欠陥については、全体としてきれいな一次の固有振動モードが得られないために平面規模を決定する探査は難しいことが分かった。また、大きさ 50mm の欠陥については、Fig.3(b)に示すように欠陥上に数点の計測ポイントを配置できれば検出自体は可能であり、応答周波数帯が近い場合には複数欠陥部位の同時測定が可能であると思われる。

(4-3)対象物の形状の影響・・・今回、コンクリート供試体内に埋設した発泡スチロールは正方形形状のもののみであるため、その他の形状 (丸等) に関しては、後日検証実験を行う予定である。

#### 5. 測定可能距離の検討

(5-1)LRAD の音響特性測定・・・屋外および無響室にて LRAD-300X の軸上音圧を測定した(測定周波数 2kHz)。屋外での音圧測定結果例を Fig.4 に示す(縦軸は最大音圧値を基準とした場合の dB 表示)。図より床や舗装面等の反射面がある場合には途中に反射波との干渉の影響で音圧極大値が見られるものの、基本的には距離に応じて徐々に減衰していく特性であることを確認した。また、20m 程度の遠隔からでも計測に十分な音圧(110dB 以上)を発生できることも確認した。

(5-2)測定可能距離の検証・・・SLDV および LRAD とコンクリート供試体間の距離を 15m、20mにした場合について検証実験を行った。その結果、距離 15mの場合には計測に特に問題はなかったが、距離を 20mの場合には SLDV の受光感度に低下が見られた。原因はレーザー光の伝搬減衰によるものと推測される。したがって現状の測定可能距離は音響(LRAD)側によるものでなく主にレーザー (SLDV) 側の制約により 20m以内と推定される。

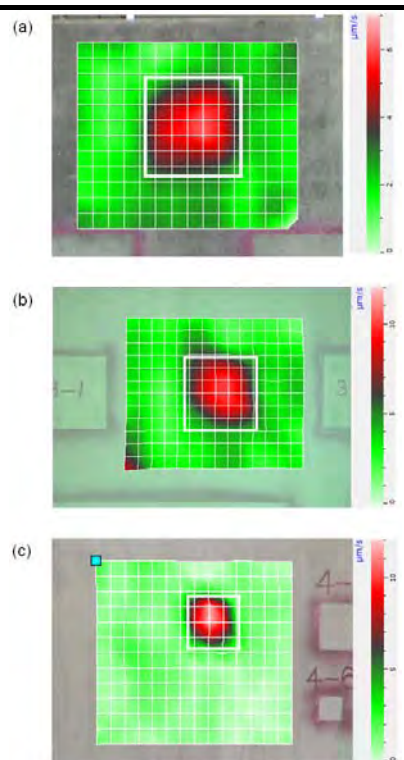


Fig.2 欠陥部位検出結果例  
(a)欠陥5-1, 300mm角,かぶり50mm, 2094Hz,  
(b)欠陥3-2, 200mm角,かぶり45mm, 2864Hz,  
(c)欠陥4-1, 100mm角,かぶり25mm, 4000Hz,  
白枠は埋設物の位置と大きさを示す。

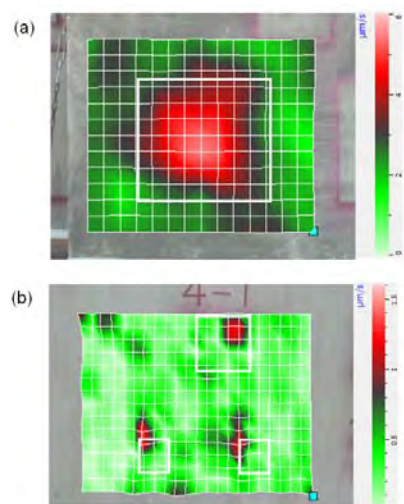


Fig.3 欠陥部位検出結果例  
(a)欠陥5-2, 500mm角,かぶり75mm,1187.5Hz,  
(b)同時検出例,欠陥4-1, 4-3(50mm角,かぶり25mm), 4-4(50mm角,かぶり50mm) 4313.5Hz  
白枠は埋設物の位置と大きさを示す。

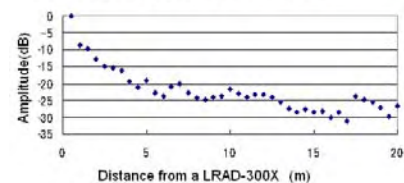


Fig.4 LRAD-300Xの軸上音圧分布計測結果例

## ⑦本格研究の見通し

1. **本格研究における研究成果の見通し**・・・FS 研究の結果より、10m 離れた遠隔であっても提案手法により非接触での欠陥部位の検出が基本的に可能であることが明らかになった。したがって、従来の近接して実施されてきた叩き検査や打音検査の代わりに、「遠距離からコンクリート構造物の表層欠陥（浮きや空洞）を検出するための一次スクリーニング用非破壊音響探査システムの開発」を最終目標とする。しかしながら、同時に実用的なシステムとして完成させるためには、新たに改善すべきいくつかの課題が存在することも明らかになった。そのため、当初計画の測定可能距離の延伸、SLDV の計測高速化および小型軽量化等に加えて欠陥検出アルゴリズムの改善、長距離音場の制御（周囲の騒音対策、感度改善）およびヘッドの振動対策等の実施が必要であると思われる（ただし、SLDV の小型軽量化についてはすでに進行中とのことであるので省略する）。改善すべき課題が増えたことにより、申請時は本格研究 2 年としていたが、上限の 3 年に変更して研究目標を達成したい。

2. **研究目標の達成見込み**・・・各研究目標の達成見込みは以下のとおりである。

(1) **欠陥検知アルゴリズムの改善検討**・・・本手法により欠陥検知は、応答周波数帯を見つける過程など操作者のノウハウに依存している状況なので、測定対象に対する適用限界を明らかにした上で欠陥検知アルゴリズム自体の改善を行い必要がある。また、アルゴリズムの改善は探査時間を短縮するためにも必要となる。従来の打音法で用いられている欠陥検知アルゴリズムの応用検討および本手法による測定条件の検討を行うことで検知アルゴリズムの改善は達成可能と思われる。

(2) **SLDV を用いた計測高速化・高精度化に関する検討**・・・複数レーザを用いた計測高速化に関しては、3 次元 SLDV の構成を応用して、複数レーザの協調制御の検討を行うことおよび現在最適化されていない計測手法自体の改善検討を加え、さらに前記の欠陥検知アルゴリズムの改善等を組み合わせることで、現状の数倍程度の高速化および高精度化は原理的に達成可能であると思われる。

(3) **LRAD を用いた長距離音場制御に関する検討**・・・長距離音場を制御することにより、騒音問題、測定距離延伸およびレーザヘッドの振動問題(感度改善)等も解決する可能性がある。音響理論的には可能であるため、精密な音場計測を行った上で音場制御を行うことにより実現できる可能性は高い。

3. **成果の活用方法およびその手段**・・・基本仕様自体は公開して遠隔非破壊検査に使用できるように配慮する。また、得られた成果は関連学会（音響、土木等）で発表する予定である。

## ⑧特記事項

1. **国内外等へのインパクト**・・・実際に 10 メートル以上の遠隔距離からコンクリート供試体内の浮きや空洞欠陥に見立てた発泡スチロールの検出（映像化）が確認できたことは、LRAD の軸上音圧値から予想できたこととは言え、我が国において従来にはない革新的な非接触浅層音響探査手法が生み出されたことを意味しており、今後国内外に与える影響は非常に大きいと思われる。現状ではまだ荒削りで欠陥検出アルゴリズムの改善やレーザ計測の高速化および LRAD による長距離音場の制御など乗り越えなければいけない課題も多いが、いずれも基本的には現状の技術を結集すれば解決可能な問題であり、今後の発展が大いに期待できる研究テーマであるといえるだろう。

2. **本 FS 研究から得られた知見および研究成果の見通しについての自己評価**

レーザ側の制約により現状では計測距離に限界があることが明らかになったが、その他については解決可能な課題であると思われるため、研究成果の見通しは妥当であると判断する。