

## 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（1年目の研究対象）】

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	
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		
		[副領域] 防災・災害復旧対策	タイプ			
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		
H23は受託金額、H24以降は計画額を記入。端数切り捨て。	1090万円	2,093万円	2,093万円	5,276万円		
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					
川崎 拓	(株)IHI検査計測・検査技術部					
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"> <li>・測定対象物への照射角度及び測定点密度が欠陥検出能力へ与える影響の把握</li> <li>・応答周波数帯の識別手法に関する計測アルゴリズムの改善の方向性の把握</li> <li>・スキャニング振動計の計測用ヘッドの簡易防振対策による計測精度向上程度の把握</li> </ul>						

## これまでの研究経過

### 1. 欠陥を模擬したコンクリート供試体の製作および評価について

#### (1-1) 欠陥を模擬したコンクリート供試体の製作

実際のコンクリート構造物に想定される欠陥についての意見交換会を平成 23 年 6 月 9 日に国総研にて開催した。その結果、剥離につながる浮きやひび割れ等の欠陥を模擬するために円柱テストピース(100×200)を割裂させ、ひび割れを保持しコンクリート平板内に埋設させるという手法をとることとした。製作した供試体は、自体の振動が測定へ影響しないように、幅 2m、高さ 1.5m、厚さ 0.3m の大きさとし、その内部に割裂試験用の円柱テストピースのひび割れ幅を 0-2mm に調整したものを埋設させた。ひび割れの位置はコンクリート表面から 25mm と 50 mm の 2 種類を用意した。実際に製作された供試体の写真およびその配置図を Fig.1(a),(d)に示す。また、深さ 25 mm の供試体は円柱自体を長軸方向にカットすることにより実現している(Fig.1(c)参照)。

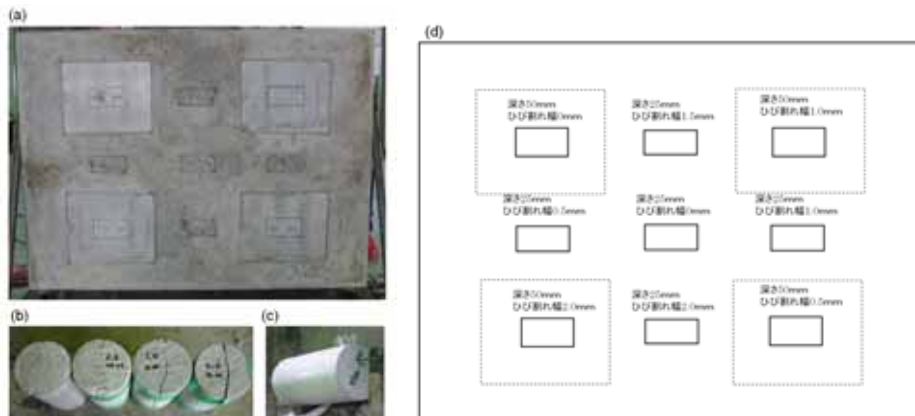


Fig.1. (a)製作したコンクリート供試体、(b)埋設前の割裂円柱モデル、  
(c)深さ 25mm 用カットモデル、(d)コンクリート供試体の配置図

深さ 50mm のひび割れ欠陥用円柱テストピースを埋設した供試体は、当初は可搬性を考慮して小型の幅 0.5m、高さ 0.4m、厚さ 0.1m のものとして製作されたが、検証実験の結果、供試体自体の振動が無視できないことが判明したため、大型の供試体に埋設し直して再使用している。なお、ひび割れ幅 0mm とは割裂していない円柱テストピースを比較対照用に埋設したものである。

#### (1-2) 欠陥を模擬したコンクリート供試体の評価 (LRAD との離隔 2m、測定音圧 110dB)

欠陥を模擬したコンクリート供試体を用いた評価実験は綾瀬市にある L 社の恒温室内にて実施した。実験結果から、深さ 25mm の欠陥の場合はすべて良好に検出可能であり、ひび割れ幅 0mm の場合には明瞭な応答周波数帯が見当たらなかった。しかしながら、深さ 50mm のひび割れ欠陥の場合はひび割れ幅が 1.0mm のもの以外は検出が困難であった。打音法による検査でも同様な傾向が見られたので、最初に小型の供試体として製作したものをそのまま再利用して大型の供試体に埋め込むという手法をとったことが影響していることが考えられる。なお、本実験結果から、ひび割れ幅が異なると、コンクリート間の接触の仕方、減衰挙動が異なるため、FFT 結果が違ってくるが、振動のレベルは健全部に比較して、ひび割れ幅によらず同程度に大きくなるので、欠陥の有無は判断できるものと考えられる。今回と同じモデルで、発泡スチロールのものは作って比較していないが、浮き・空洞については、発泡スチロールのもので代用できると判断した。

## 2. 簡易防振対策および LRAD 音場分布

### (2-1) 計測用ヘッドの簡易防振対策による計測精度向上

昨年度の FS 研究の結果から、スキャンニング振動計 (SLDV) のレーザヘッド自体の振動が計測自体に影響を及ぼしている可能性が考えられたため、簡易防振対策の有無により計測精度の向上がはかれるかどうかの検討を行なった。製作した簡易防振対策用ケースを Fig.2 に示す。ケースは計測ヘッドに接触しないように独立した 4 本足で自立しており、内部に吸音材が貼られているほか、レーザ光通過部には取り外し可能なガラス板が取り付けられているものである。なお、使用したコンクリート供試体(150×200×30 cm<sup>3</sup>)は深さ 5 cm に発泡スチロール(30×30×2.5 cm<sup>3</sup>)が埋設されているものであり、振源である長距離音響放射装置 (LRAD) をコンクリート供試体から 5 m の離隔で実験を行なった。実験結果 (Table.1 参照) から、昨年度の結果より 10 dB 以上低い音圧でも計測が可能であることが確認された (出力音圧はコンクリート表面付近での計測値)。



Fig.2 簡易防振対策用ケース

Table.1 測定可能な音圧と防振対策の有無

音圧値(dB)	防振対策無	防振対策有 ガラス 5mm 厚
80	×	×
85	×	△
90	△	○
95	△	○
100	○	○

また、簡易防振対策の有無による振動速度スペクトルの違いを Fig.3 に示す。

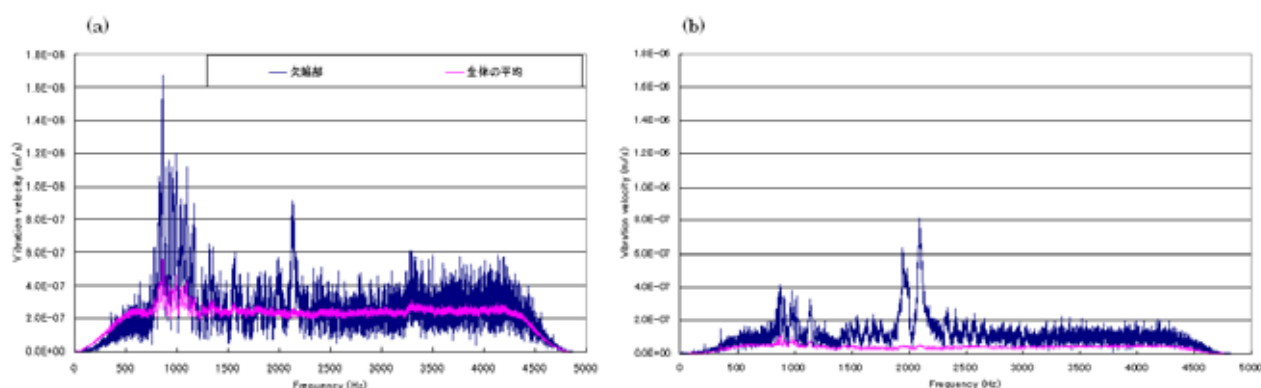


Fig.3 振動速度スペクトル (a) 防振対策無、(b) 防振対策有 (青線：欠陥部、紫線：平均)

出力した音圧は 100 dB である。Fig.3(a)の防振対策無の結果からは 800Hz 周辺のレーザヘッド自体の共振が強くなってしまっている上に全体の平均ノイズレベルも高く、埋設物の反応が埋もれていることがわかる。一方、Fig.3(b)の防振対策有の結果を見ると全体の平均ノイズレベルが低いために、埋設物 (欠陥) の振動速度スペクトルが非常に明確に検出できていることがわかる。以上の結果から防振対策を行うことにより、測定感度が大幅に改善されると同時に加振用の音波の音圧値も従来より 10dB 以上低くても音響探査が可能であることが明らかになった。

## (2-2) 簡易音圧分布計測およびシミュレーションによる数値計算結果例

千葉県八街市にある S 社の敷地内にて、コンクリート供試体に対して長距離音響放射装置 LRAD300X (LRAD Corp.) を用いた時の音圧分布を計測した。また床面が存在する場合の音圧分布の数値計算 (ヘルムホルツ方程式に対する境界要素法) も比較のために実施した。地表面から 1.5m 上の水平面での実測結果例(A 特性補正による dB 値) を Fig.4(a) に、数値計算結果例を Fig.4(b) にそれぞれ示す (周波数 1kHz、LRAD とコンクリート供試体との離隔は 10m)。図より、コンクリート供試体と LRAD スピーカー間の直線上で騒音レベルが大きく、中心軸上から横に離れると急激に騒音レベル小さくなっていることおよび、コンクリート供試体から 6 m 程度離れたところで音圧が下がっていることなどが実測、数値計算ともに確認できる。

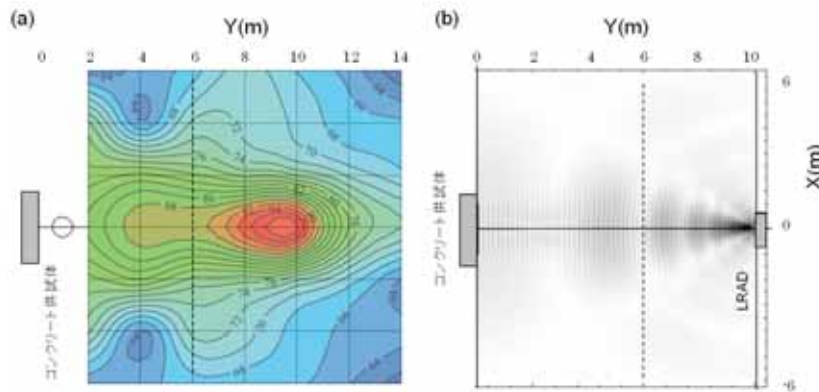


Fig.4 水平方向の音圧分布 (a) 実測結果 (2m 格子間隔で計測)、(b) 数値計算結果例

## 3. 照射角度および測定点密度

### (3-1) 照射角度変更時の測定結果について

50 mm の深さに埋設した 30 cm 角の発泡スチロールを対象として、LRAD による音響照射角度および SLDV によるレーザ照射角度のそれぞれを変更した場合について検討した。LRAD との離隔 5m、測定音圧 100dB である。実験セットアップ図を Fig.5(a),(b) に示す。レーザ光入射角に対する振幅計測結果を矩形黒点により表示し、対応する解析結果を点線により示した。両者は良く一致している。音波入射角に対する振幅計測結果を円形黒点により表示し、対応する矩形分布振動に対する解析結果を実線、ハニング分布振動に対する解析結果を一点鎖線により示す。計測結果は、これら両解析結果の範囲内に収まっていることがわかる。

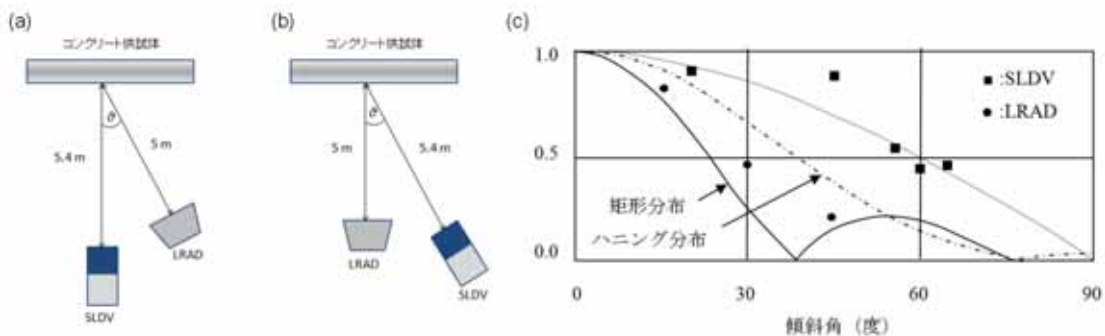


Fig.5 照射角度変更実験 (a) 音波照射角度の変更、(b) レーザ光入射角度の変更  
(c) 入射角依存性の実験結果と解析結果との比較

### (3-2) 測定点密度変更時の測定結果について

深さ 25 mm の位置に埋設された 10 cm 角の発泡スチロールを対象に計測に必要な測定点密度についての検討を行った。スキャンエリアは 20×20 cm で位置を固定し、測定点数を変更する事で欠陥部上にあるスキャンポイント数の調整を行った。供試体と LRAD 間の距離は 5m で、送振波形は 500-5000 Hz の up chirp を使用した。出力音圧は 100dB である。Fig.6 に SLDV の振動速度分布映像を示す。スキャンポイント数、ポイント間隔および測定時間はそれぞれ(a)が 25 点、5cm、1 分、(b)が 49 点、3.3cm、3 分である。実際に欠陥部上にあるスキャンポイント数はそれぞれ 4 点と 9 点である。図より欠陥部一辺の大きさに対してその 3 分の 1 程度のスキャン密度があれば、明確な検出が行えることがわかる。

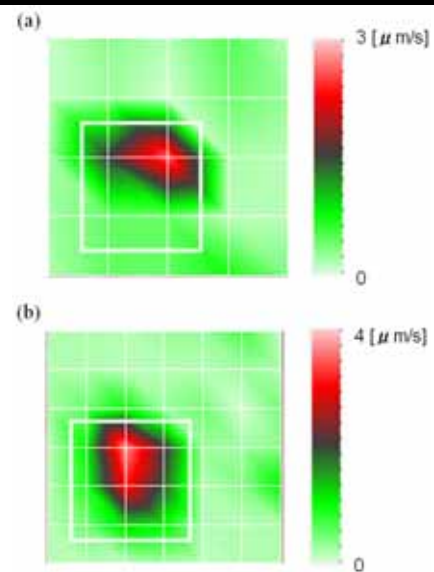


Fig.6 測定点密度変更時の映像  
(a)ポイント間隔 5cm (b)3.3cm

### 4. 計測アルゴリズムに関する検討 (打音法との比較)

円柱テストピースを割裂させ、埋設した供試体((1-1)節の欠陥部の深さ 25mm、幅 1.5mm のケース)を用いて、音響探査法と打音法により得られる周波数成分を比較した。実験時の条件は(1-1)節と同様である。測定結果例を Fig.7 に示す。黒線は打音法により得られた周波数解析結果、赤線は音響探査法により得られた周波数解析結果である。グラフより音響探査法により得られたスペクトルと打音法によるそれは、ほぼ同じ傾向を示していることがわかる。このことから計測アルゴリズムとしては既存の打音法によるものが適用可能であることが想定される。なお 800Hz 付近にみられるピークは SLDV 自体の共振特性である。

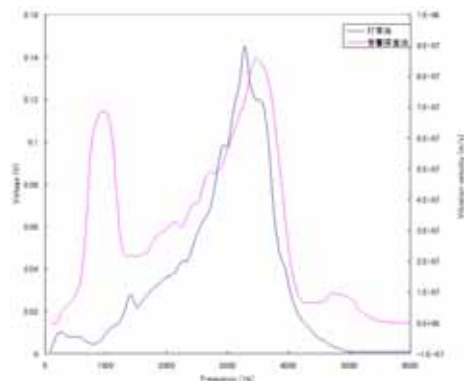


Fig.7 スペクトルの比較  
赤線：音響探査法、黒線：打音法

#### 特記事項

**1 . 本研究から得られた知見および成果について**・・・今回の研究成果から、0.5mm 程度の剥離であっても表面から 25mm 程度であれば遠距離から非接触で検出可能であること、検出可能な周波数帯は打音法による計測結果と同様な傾向があることおよびレーザーヘッドの防振対策を行うことで音響出力を 10 dB 程度以上低下させても検出に問題無いことなどが明らかになった。実用化にあたっては遠距離音場制御や計測高速化および欠陥検出アルゴリズムの改善等が必要であると思われるが、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 . 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使用できる可能性が高くなってきた。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と予想される。

### **研究遂行上の問題点等**

(株)IHI 検査計測から、来年度以降の分担研究者を出すことを差し控えたいとの要望が出されている。理由は昨年の中日本大震災に起因する原発需要の低迷から来年度は大幅な赤字が見込まれることが予想されるためである。そのため、来年度以降は分担研究者が 1 名減少することになるが、音場制御に関する研究に関しては分担研究者である片倉氏および音響計測専門の(株)INC エンジニアリング社に外注することで対応可能と考えている。

### **平成 24 年度及びそれ以降の研究計画・方法**

研究目的を達成するために以下の項目を平成24年度以降についても継続して実施予定である。

- ・ 欠陥検知アルゴリズムの改善検討
- ・ SLDVを用いた計測高精度・高速化に関する検討
- ・ LRADを用いた遠距離音場制御に関する検討
- ・ コンクリート供試体の製作および実地調査実験

当初計画との変更点は次の2点である。

- ・ SLDVを用いた計測高精度・高速化については複数レーザの協調制御から防振対策および欠陥検知アルゴリズムに対応したサンプリング周波数の最適化へと検討内容を変更。
- ・ LRADを用いた遠距離音場制御では、当初計画の逆位相音波による騒音低減から、複数音源の集束による欠陥検出能力の向上へと検討内容を変更。

また、以下の 項に示すような外注を想定している。