

# SLDV と空中放射音波を用いたコンクリート非破壊検査

—N2U-BRIDGE とアスファルト供試体における探査結果例—

Study on the Non-destructive Inspection Method for Concrete Structures  
by using Air-coupled Sound Wave,  
-The Experimental Result in N2U-BRIDGE and an Asphalt Test Object-

上地 樹 ・ 赤松 亮 ・ 杉本 恒美

桐蔭横浜大学大学院工学研究科

(2014年3月20日 受理)

## 1. 背景

高度経済成長期に建造された、コンクリート構造物の耐用年数越えの増加に伴い、欠陥検査技術の重要性が高まっている。その中でコンクリート構造物内部の欠陥を把握する検査方法として、打音検査法が現在多く用いられている。しかしこの方法は直接打音が不可能な場所では検査を行うことが困難である。そこで我々は、長距離音響発生装置(LRAD: Long Range Acoustic Device) とスキャニング振動計(SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer)を用いた、非接触による非破壊探査法の検討を行っている[1-3]。

## 2. 非接触音響探査法

### 2.1. 原理

Figure 1 に非接触音響探査法の概要図を示す。LRAD から欠陥部の共振周波数の音波を放射することにより、欠陥が存在するコンクリート表面にたわみ共振が生じる。そしてその状態のコンクリート表面の振動速度をSLDVで計測する。欠陥が存在する欠陥部と、存在しない健全部とでは振動速度に差異が発

生ずるため、欠陥部の位置を特定することが可能になる[4-8]。

### 2.2. 利点

本手法の利点として、以下の点が挙げられる。LRAD による音響加振と SLDV によるレーザスキャンを用いることにより、非接触による検査が可能である。また欠陥部と健全部のコンクリート表面の振動速度の差を計測するという手法により定量的な検査が可能である。これらの利点により、既存の手法より汎用性の高い検査が可能であると考えられる。

## 3. N2U-BRIDGE における探査結果

### 3.1. 目的

今回の実験の目的として、実際のコンクリート構造物である橋梁を対象とした場合、SLDV と LRAD を用いた非接触音響探査法で、コンクリート内部に存在する欠陥が検出可能か否か調査を行うため、実際の橋梁の例として名古屋大学東山キャンパス内に設置してある N2U-BRIDGE (ニューブリッジ) で実験を行った。Figure 2 に N2U-BRIDGE の図を示す。

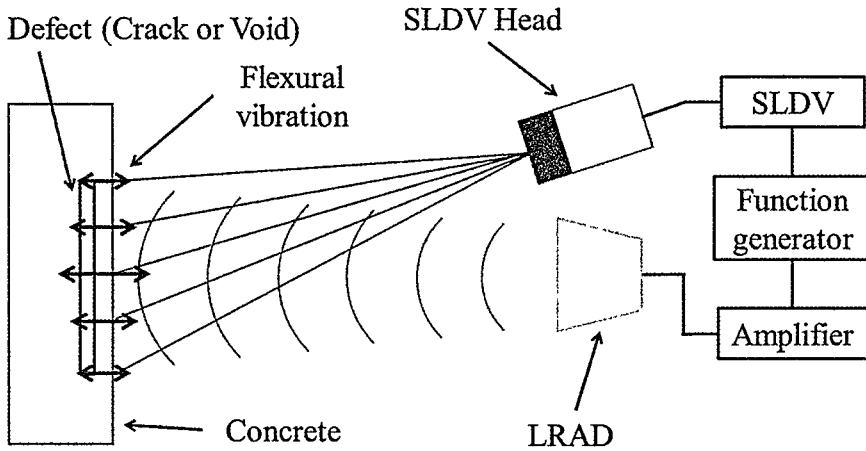


Fig.1 非接触音響探査法の概要図

### 3.2. 鋼板桁橋

#### 3.2.1. 実験方法

3.2.1.1. Figure 2 に実験セットアップ図を示す。実験の測定対象は、N2U-BRIDGE 内にある鋼板桁橋（旧洪江川橋）の床版裏である。この実験では、SLDV のレーザーヘッドと LRAD を橋梁の下約 5 m の位置に設置した状態で、非接触音響探査法を行った。この時の音圧は、対象としているコンクリート面付近で約 100dB になる様に設定した。

#### 3.2.1.2. 計測範囲

Figure 3 に計測範囲を示す。計測範囲は、

縦 0.88 m 横 0.84 m の範囲に設定した。計測ポイント数は計 63 ポイント (9 × 7) に設定した。白い部分は、ハンマ等を用いて確認した欠陥の位置である。

#### 3.2.1.3. 放射音波データ

実験時に使用したトーンバースト波のデータを示す。パルス持続時間は 3 ms、周波数変調インターバルは 200 Hz、開始 - 終了周波数は 500-7100 Hz、パルス間インターバルは 100ms、音圧レベルは計測対象面付近で 100db に設定した。

#### 3.2.2. 結果と考察

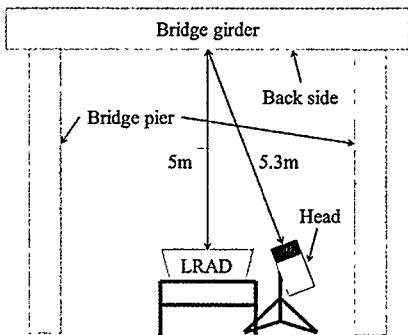


Fig.2 実験セットアップ 側面図

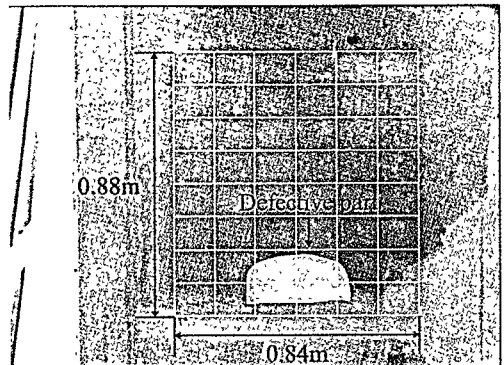


Fig.3 計測範囲

### 3.2.2.1. 振動速度の比較

SLDV 振動速度を計測した結果。1655 Hz 付近において、欠陥部で健全部には無い大きな応答が確認できる。これは欠陥上部のコンクリート面がたわみ振動を生じてさせているために、振動速度が健全部の波形よりも増加しているためと考えられる。

### 3.2.2.2. 振動速度分布

Figure 4 は 1655 Hz において振動速度分布の輝度映像化を行った図である。計測範囲は 0.88 m × 0.84 m であり、計測ポイントは 63 (9 × 7) に設定した。黒色に近いほど振動速度が高いことを示している。この図から、ハンマを用いた探査結果と同様の場所で、振動速度の上昇が確認できる。この結果から、SLDV と LRAD を用いた非接触音響探査法の場合であっても、欠陥部位置を特定することが可能であると言える。

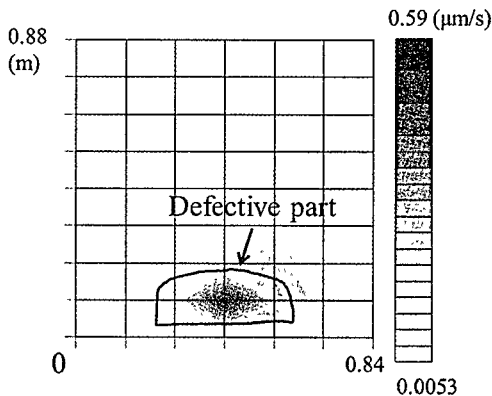


Fig.4 振動速度分布の輝度映像 (1655 Hz)

## 4. アスファルト供試体における探査結果

### 4.1. 背景

我々は、長距離音響発生装置 (LRAD : Long Range Acoustic Device) とスキャニング振動計 (SLDV : Scanning Laser Doppler Vibrometer) を用いて、様々なコンクリート構造物に対して、非接触による非破壊探査法の検討を行っていた。その過程で、道路や橋梁では耐久力を増すために、コンクリートの表面にアスファルトによる舗装がされることが多いという事に気づいた。しかし、アス

ファルト舗装は耐久性が低く、5～10年で交換が必要である。また内部の劣化・損傷を起因とした、アスファルト表面のひび割れにより、重大な事故が発生する可能性があることなど、多数の問題が存在する。このようなアスファルト舗装の劣化・損傷に対して、目視やレーザを用いた表面のひび割れ点検、打音検査による内部の欠陥に対する点検等が広く使用されている。しかし、目視やレーザを用いた手法では内部の劣化・損傷は確認することが出来ない、そして打音検査は検査者の技量に依存している等の問題点が有る。

### 4.2. 目的

前述の問題点を、改善できる可能性のある非接触音響探査法を用いて、アスファルト舗装が施された状態のコンクリート供試体 (以下：アスファルト供試体) で、表面からでは認識できない、コンクリート内部の水平剥離を検出することを目的として、欠陥部探査の適用性の検証を行った。今回実験に用いたアスファルト供試体は、金沢工業大学の設置してあるものを使用した。

### 4.3. アスファルト供試体

#### 4.3.1. アスファルト供試体とは

Figure 5 にアスファルト供試体の側面図、Figure 6 にアスファルト供試体の上面図を示す。アスファルト供試体 (900 mm × 900 mm × 275 mm) とは、厚さ 200 mm のコンクリートの上に、厚さ 75 mm のアスファルト舗装が施された状態の供試体のことである。供試体の中心には疑似的な劣化と損傷を模した欠陥が存在している [9]。

#### 4.3.2. 劣化と損傷

##### 4.3.2.1. 劣化と損傷の種類

道路や橋梁に生じる可能性のある劣化と損傷の種類として、今回実験の対象としたものは、分離化、水平剥離、脆弱化の三つである。分離化は、雨水の侵入や活荷重により、床版と舗装の剥離が発生することにより生じたものである。水平剥離は、海岸付近における潮風や散布された凍結防止剤などによりもたらされた塩分が、雨水によって内部に浸透する

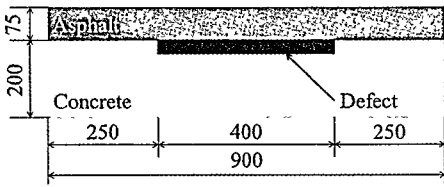


Fig.5 アスファルト供試体 側面図

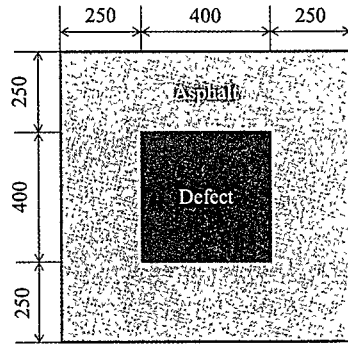


Fig.6 アスファルト供試体 上面図

Table 1 アスファルト供試体における欠陥の概要

欠陥種類	欠陥深さ(mm)	欠陥材料
分離化	75	ろ紙
水平剥離	105	ろ紙+ビニール
	155	ろ紙+ビニール
脆弱化	75-105	細骨材+粗骨材

ことにより、コンクリート中の鉄筋が腐食し、その結果ひび割れや剥離が発生したものである。脆弱化は、活荷重、雨水の浸透により床版上部のかぶり部が脆弱化したものである。

#### 4.3.2.2. 供試体における疑似的な欠陥

以上三つの劣化と損傷を疑似的に作成し、アスファルト供試体内に埋設した。分離化と水平剥離は、ろ紙 (400mm × 400mm × 1mm) を埋設することにより、疑似的に欠陥とした。脆弱化は、細骨材と粗骨材という、大小様々な石を埋設し、欠陥とした。疑似的な欠陥の埋設位置を、下記に示す。欠陥深さは、アスファルト表面からの欠陥の位置を表している。

#### 4.3.3. 分離化 欠陥深さ 75 mm

Figure 7は、雨水の侵入などにより床版と舗装の剥離が発生した状態を模した分離化のアスファルト供試体である。アスファルト表面から75 mmの位置にろ紙が埋設されている。

#### 4.3.4. 水平剥離

##### 4.3.4.1. 欠陥深さ 105 mm

Figure 8に側面図を示す。水平剥離のアスファルト供試体は、塩害によりコンクリート中の鉄筋が腐食し、ひび割れや剥離が生じた状態の物である。この供試体はアスファルト表面から105 mmの位置にろ紙が埋設されている。

##### 4.3.4.2. 欠陥深さ 155 mm

Figure 9の供試体では、さらに深い位置に埋設されており、アスファルト表面から155 mmの位置にろ紙が埋設されている。

#### 4.3.5. 脆弱化 欠陥深さ 75-105 mm

Figure 10に脆弱化の供試体側面図を示す。

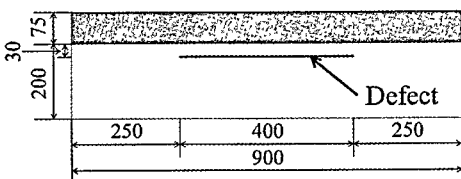


Fig.7 分離化 欠陥深さ 75mm 側面図

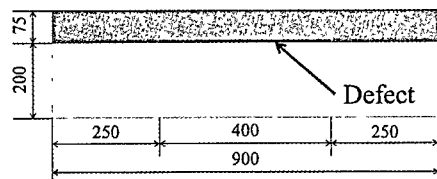


Fig.8 水平剥離 1 欠陥深さ 105 mm 側面図

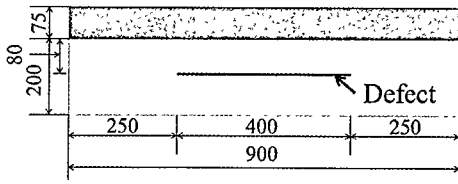


Fig.9 水平剥離 2 欠陥深さ 155 mm 側面図

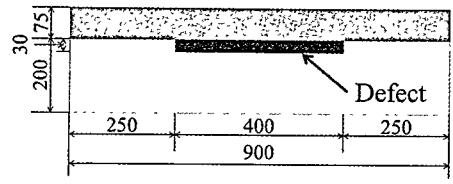


Fig.10 脆弱化 欠陥深さ 75-105 mm 側面図

脆弱化は、活荷重などにより床版上部のかぶり部が脆弱化したのである。この供試体には、アスファルト表面から 75-105 mm の範囲に、細骨材と粗骨材が埋設されている。

#### 4.4. 実験の流れ

初めに、ハンマ加振により供試体を振動させ、SLDV により振動速度計測を行った。次に検出した振動波形から欠陥部の共振周波数を特定した。その後、各供試体の共振周波数の単一の周波数のバースト波を LRAD から放射して、非接触音響探査法を行った。最後に、検出した振動速度にデータ処理を行い、二次元的な輝度映像化を行った。

#### 4.5. 非接触音響探査法による実験

##### 4.5.1. 実験方法

##### 4.5.1.1. 実験セットアップ

Figure 11 に実験セットアップ図を示す。LRAD をアスファルト供試体の垂直 1 m 上に設置した。SLDV はアスファルト供試体中心から 1.2 m の位置に設置した。この状態で、共振周波数の放射音波を用いた非接触音響探査法の実験を行った。

##### 4.5.1.2. 計測範囲

Figure 12 に計測範囲を示す。計測範囲は、欠陥部 (400 mm × 400 mm) に対して 500 mm × 500 mm に設定した。計測ポイントは輝度映像化を行うことを考慮し、121 (11 × 11) ポイントに設定した。

##### 4.5.2. 結果と考察

##### 4.5.2.1. 分離化 欠陥深さ 75mm

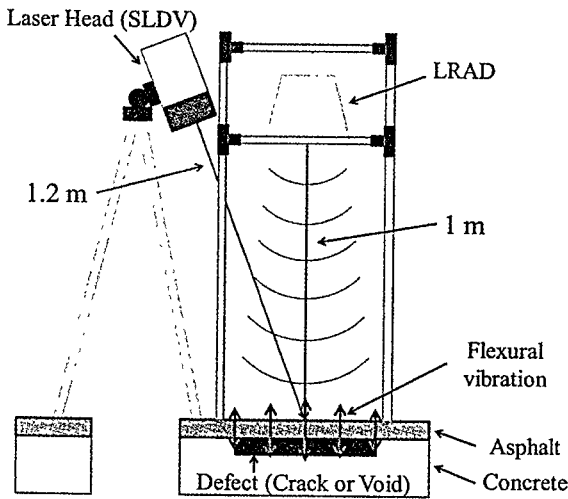


Fig.11 実験セットアップ図 (非接触音響探査法)

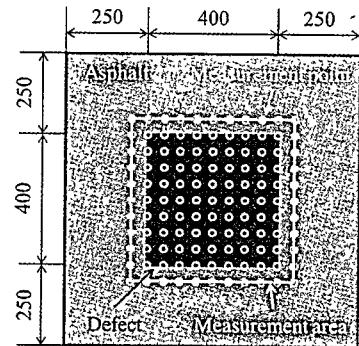


Fig.12 非接触音響探査における計測範囲図

使用した音波は、バースト波、周波数 1500 Hz、サイクル数 4 cycle、インターバル 150ms に設定した。Figure 13 は、1536 Hz における振動速度の分布を輝度映像化したものである。内側の黒枠が欠陥部の範囲であり、外枠が計測範囲である。色が黒色に近いほど振動速度が大きいことを示している。この図では中心に行くほど振動速度が増加していることが分かる。これは LRAD から放射された共振周波数の音波により、欠陥上部のコンクリートにおける、たわみ共振が生じていると考えられる。

#### 4.5.2.2. 水平剥離

##### 4.5.2.2.1. 欠陥深さ 105mm

使用した音波は、バースト波、周波数 1500 Hz、サイクル数 4 cycle、インターバル 150ms に設定した。Figure 14 はアスファ

ト表面から 105 mm の位置にろ紙が埋設してある、水平剥離を模したアスファルト供試体における、振動速度を 1466 Hz で輝度映像化したものである。この結果から水平剥離を模したアスファルト供試体においても、欠陥部のたわみ振動と思われる現象を確認できる。

##### 4.5.2.2.2. 欠陥深さ 155mm

Figure 15 に振動速度による輝度映像を示す。使用した音波は、バースト波、周波数 2300 Hz、サイクル数 6 cycle、インターバル 150ms に設定した。さらに深い、アスファルト表面から 155 mm の位置に欠陥が存在している供試体の結果である。2296 Hz で輝度映像化を行った。先ほどの結果よりも最大振動速度は減少しているが、欠陥部中心ほど振動速度が増加している。これより約 15 cm の位置に存在している欠陥でも、検出が可能であ

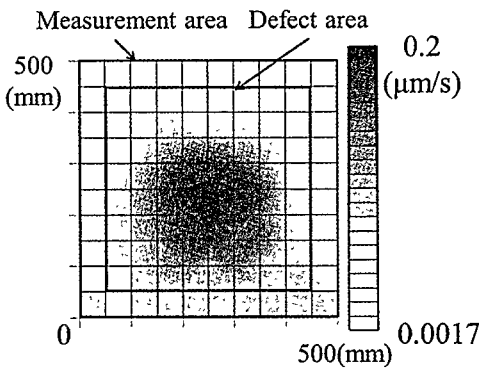


Fig.13 振動速度による輝度映像 (1536 Hz)

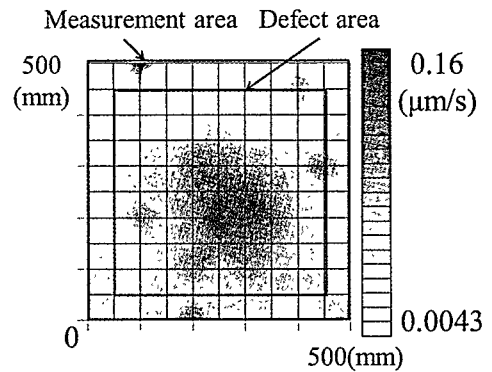


Fig.14 振動速度による輝度映像 (1466 Hz)

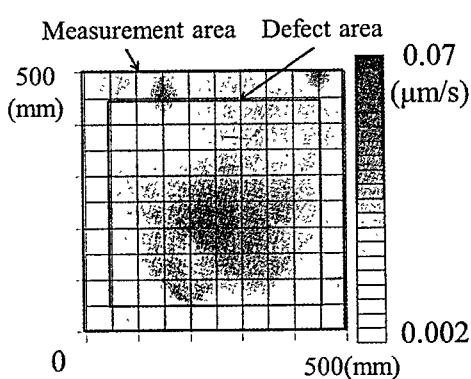


Fig.15 振動速度による輝度映像 (2296 Hz)

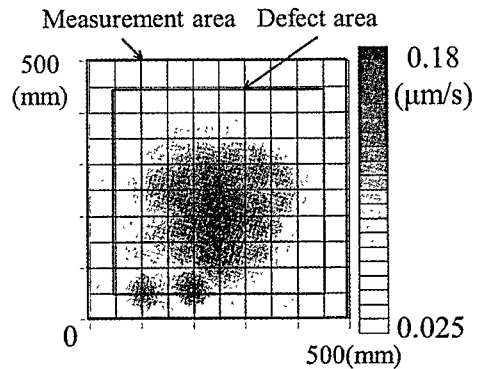


Fig.16 振動速度による輝度映像 (1080 Hz)

ると言える。

#### 4.5.2.3. 脆弱化 欠陥深さ 75-105mm

Figure 16 に振動速度による輝度映像を示す。使用した音波は、バースト波、周波数 1000 Hz、サイクル数 3 cycle、インターバル 150ms に設定した。75-105 mm の範囲に細骨材と粗骨材が埋設してある脆弱化を模したアスファルト供試体の結果である。1080 Hz において、振動速度の輝度映像化を行った。欠陥部の位置において、振動速度の上昇が見られ、欠陥部の位置が特定できていることが確認できる。

## 5. まとめ

今回は実際の橋梁とアスファルト面下のコンクリート欠陥に対する非接触音響探査法の適用性の検討を行った。実験結果から、どちらも本手法により欠陥検出が可能であることが明らかになった。特にアスファルト舗装がされた供試体でも、表面から 155mm の深さに存在する欠陥が検出可能であることが確認できた。今後も、さらに非接触音響探査法の実用化に向けて検討を加えていく予定である。

## 謝辞

N2U - Bridge を快くお貸しいただいた名古屋大学の中村光教授および NEXCO 中日本の和田孝幸氏アスファルト供試体を実験対象として提供して頂いた、金沢工業大学の木村定雄教授、および資料を提供して頂いた杉山弘晃さんに感謝いたします。なお、本研究は平成 25 年度の国土交通省道路政策の質の向上に資する技術研究開発の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino: Abstract Book, IEEE International Ultrasonics Symp., p. 744, (2011).
- [2] R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: Abstract Book, IEEE International Ultrasonics Symp., p.94 (2012).
- [3] R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.52, 07HC12, (2013).
- [4] 赤松亮、杉本恒美、「SLDV と LRAD を用いた非破壊探査のための非接触音響映像法に関する研究 -」、日本音響学会春季研究発表会講演論文集、3-8-7, p.134, pp.1569-1570 (2011.3)
- [5] 赤松亮、杉本恒美 (桐蔭横浜大)、歌川紀之、辻野修一 (佐藤工業株)、SLDV と LRAD を用いた非破壊探査のための非接触音響映像法に関する研究 - 遠距離コンクリート探傷検査としての実用可能性に関する検討一、日本音響学会春季研究発表会講演論文集、1-5-3, p.13, pp.1415-1416 (2012.3)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 杉山弘晃他「打音法による橋梁床版の損傷検知の信頼性に関する検討」北陸橋梁保全会議 VOL 1 (2013)