

論文

コンクリート非破壊検査のための
非接触音響探査法に関する研究

——長距離計測の検討（Ⅲ）——

Study on non-contact acoustic inspection method for concrete
non-destructive inspection: Study about long distance measurement (III)上地 樹*・杉本 恒美¹・歌川 紀之²・川上 明彦³* 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科、¹ 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科教授、
² 佐藤工業(株)技術研究所、³ 本州四国連絡高速道路(株)しまなみ尾道管理センター

(2019年3月16日 受理)

I. はじめに

日本列島は、ユーラシアプレート、北アメリカプレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートの四つから形成された弧状列島である。そのため山岳地帯が多く、トンネルや橋梁などのコンクリート構造物が多数存在している。また、これらと同様に高度経済成長期において爆発的に都市化が進んだため、高層ビルなど多くのコンクリート製の建造物が立ち並ぶことになった。しかし、現在この時期に建造されたコンクリート構造物が耐用年数を迎えつつあり、そのことが大きな社会問題となっている。これは、コンクリート構造物の経年劣化に伴い剥離や剥落が発生する可能性があり、重大な事故に結びつく危険性が存在しているためである。したがって、現在コンクリート構造物に対する維持管理を目的とした欠陥検査技術の重要性が叫ばれており、一般にも広く認識されるようになっている。

現在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、打音検査が多く用いられている。これはハンマ等を用いて検査対象面を直接打撃し、その時に発生した音から検査者が、欠陥か健全かを判断する手法である。この手法で必要なものは、検査者と打撃を行う道具のみであり、簡便な検査が可能なことから、現在までに広く普及している。しかしながら、近年では高架橋等、巨大な建造物が溢れているため、直接打撃が困難な場所が多く、高所作業車や仮設足場が必要である等、簡便な検査が困難である。また、この手法では検査者の耳で判断を行うため、検査の判定結果が検査者の技量に依存する等の問題点が存在している。

そこで我々は、空中放射音波による音響加振とレーザドップラ振動計(LDV: Laser Doppler Vibrometer)によるレーザ振動計測を用いた、非接触による非破壊探査法である非接触音響探査法を提案している¹⁻¹¹⁾。

これまでに本手法を用いて、試験体から始

* UECHI Itsuki: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² UTAGAWA Noriyuki: Sato Kogyo Co., Ltd.

³ KAWAKAMI Akihiko: Honshu-Shikoku Bridge Expressway Co., Ltd.

まり供用中の小規模橋梁およびトンネル等を対象に、多くの計測実験が行われてきた。これらの実験の多くは、計測距離が10 m以内の状況下での実施が主であった。しかし前述した様に、大規模な構造物が多く存在している現代のインフラ構造物等においては、検査対象場所に近づくこと自体が困難であることも多く、10 m以上の距離からの計測が必要とされることがある。従来は、低出力のHe-Neレーザー(633 nm、出力1 mW)を用いたLDV(PSV-400-H4等)を用いていたこともあり、計測距離は10m以内での活用が中心であった。しかしながら、通信用半導体レーザーの普及にとともに、高出力の半導体レーザー(1550 nm、出力10 mW)を用いたLDV(PSV-500 Xtra等)が登場してきている。なお出力は既存の10倍であるが、レーザー光の安全基準はクラス2 (eye safe)である。この様な計測機器を用いて、最近では試験体および実橋梁を対象とした、離隔距離30m程度の計測実験を行っている。これらの実験の結果、非接触音響探査法を用いて長距離でも十分に計測可能である事が確認された。

今回は、2016年に計測を行った実際に供用されている大規模橋梁の床版下面を対象に、再現性の確認と欠陥の進行状況の検出・把握を目的として再度非接触音響探査法による計測を実施した。前回の実験から約1年が経過しているため、計測対象部に何らかの変化が起きていると予想された。これらの計測は橋梁の下から行われたため、床版下面までの距離が30 m以上ある状況下での長距離計測となった。今回の計測は日中に行われたため、自動車等が橋梁を通行している中での実験であった。

II. 非接触音響探査法

非接触音響探査法の概念図を図1に示す。非接触音響探査法とは、音響加振とレーザー計

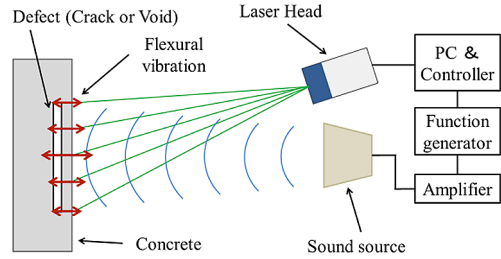


図1 非接触音響探査法の概念図

測を用いることで対象に近接することなく検査が可能な方法である。計測の流れとしては、まずスピーカから放射された音波により能動的に対象面を励振させる。そして次に、励振されている場所の振動速度を、レーザードップラ振動計により計測を行うという手順である。

構造物に対して加振が行われた際に、その計測対象面内部に空隙および剥離等の欠陥が存在していた場合、その表面部分が板状の構造になり、その部分においてたわみ振動が励起される。これにより欠陥が有る場所では振動速度が上昇し、健全な場所と振動速度に差異が生じるため、欠陥部の位置を特定することが可能になる。ただし、この手法は音波による加振を行っているため、打音法におけるハンマによる直接加振に比べて、非常に小さなエネルギーしか対象に与えることが出来ない。そのため、ただ音波を当てるだけではコンクリート製の構造物等を励振させることは困難である。そこで重要になるのは、対象の共振現象を利用するという方法である。

構造物内部に発生した欠陥を円形であると仮定した場合の、たわみ振動の定義式を(1)に示す。たわみ振動の共振周波数 fr は単純支持された円盤のたわみ振動で近似する事が可能である。式(1)において、 h はコンクリート表面から欠陥までの深さ、 a は半径、 E はヤング率、 ρ は密度、 ν はポアソン比を表している。

$$fr = \frac{4.98h}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \dots\dots (1)$$

式(1)より、共振周波数は欠陥の深さに

比例し、半径に反比例する事が確認出来る。非接触音響探査法では、このたわみ振動を利用しているのだが、コンクリート実構造物内部に欠陥が存在する場合のたわみ振動の共振周波数（固有振動数）は、100 Hz～10 kHzの広い範囲に存在する事が推測される。この事から、音響加振時にはこれらの共振周波数範囲内で波形を作成し、音源から放射させることで、計測対象面でたわみ共振を励起させ欠陥部を検出しているのである。

また、音響加振を行う際に重要なことがもう一つ存在している。それはスピーカから放射されている音の音圧である。前述した様に非接触音響探査法で使用している音波のエネルギーは微弱であるため、ある程度音圧を与える必要がある。これは、今までの研究結果から検査対象面で100 dB前後必要であることが確認されている。この音圧の値は、対象の欠陥規模や材質にもある程度左右されており、90 dB程度でも検出可能な物も存在している。

我々が提案している非接触音響探査法は、この様に音波を用いて計測対象面にたわみ共振を励起させ、それにより発生した振動分布の差異をレーザドップラ振動計により計測し、欠陥部を検出する手法である。

本手法の利点としては、まず音響加振とレーザドップラ振動計を用いて計測を行うため、長距離からの検査が可能である。加えて機器を用いて能動的に計測を行うため、定量的な検査も可能である点が挙げられる。またトーンバースト波と時間-周波数ゲートを用いることで高いS/N比を実現しており、交通振動の影響はほとんど受けないことなどが挙げられる。

Ⅲ. 実験方法

1. 実験セットアップ図

今回は、供用中の大規模橋梁の床版下面を対象に非接触音響探査法を実施するため、加

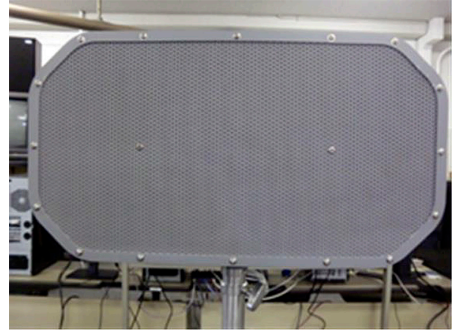


図2 LRAD-300X



図3 PSV-500 Xtra

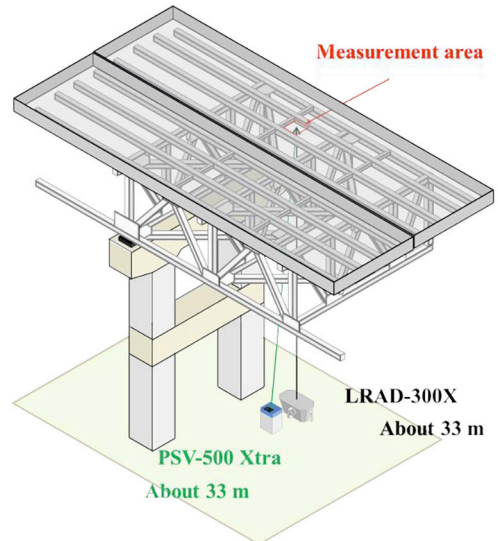


図4 実験セットアップ図

振音源には高出力の音源である長距離音響発生装置（LRAD: Long Range Acoustic Device, LRAD-300X, LRAD Corp.）、対象面の振動を計測するレーザドップラ振動計には長距離計測での走査が可能な超高感度スキャニング振動計（PSV-500-Xtra, Polytec Corp.）を用いて計測を行った。図2にLRAD-300X、

図3にPSV-500 Xtraを示す。

実験セットアップ図を図4に示す。これらの実験機器は、計測対象が床版下面であるため、橋梁を構成する鉄骨等に計測用のレーザーおよび加振音波が阻害されないように、橋梁の下に設置した。特に、今回対象にした場所は作業用通路のほぼ真上であるため、それを避ける様に設置した。計測距離は、2016年、2017年ともに計測対象面から33 m程度の距離に設定した。

2. 計測範囲

非接触音響探査法における計測範囲図を図5に示す。図中における黒枠が2016年、白枠が2017年の計測範囲となっている。計測範囲内には目視可能な亀裂が存在しており、2016年よりも2017年の方がより亀裂が進展していた。ここでは、2017年時の亀裂を図中に示す。2016年の計測ポイント数は7×11の計77ポイント、計測間隔は縦約95 mm 横約72 mmに設定し、2017年の計測ポイント数は9×15の計135ポイント、計測間隔は縦約65 mm 横約90 mmに設定した。計測範囲の大きさは、0.5 m～1.3 m程度である。

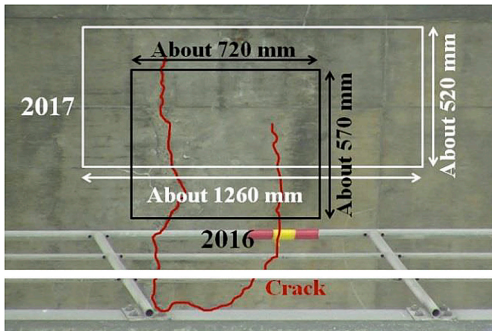


図5 計測範囲図

3. 使用波形

今回使用した加振音波は、マルチトーンバースト波¹²⁾である。図6に実験時使用したマルチトーンバースト (MTNB: Multi ToNe Burst) 波の波形を示す。このMTNB波は、計測対象面から反射波がLDVに到達するま

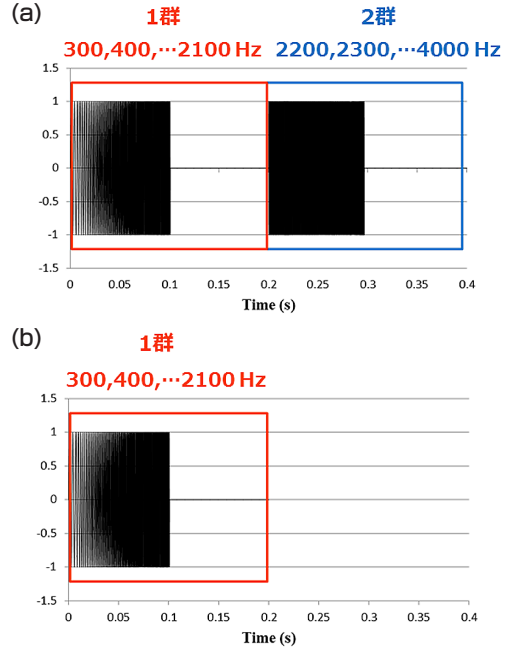


図6 使用波形 (a) 2016 (b) 2017

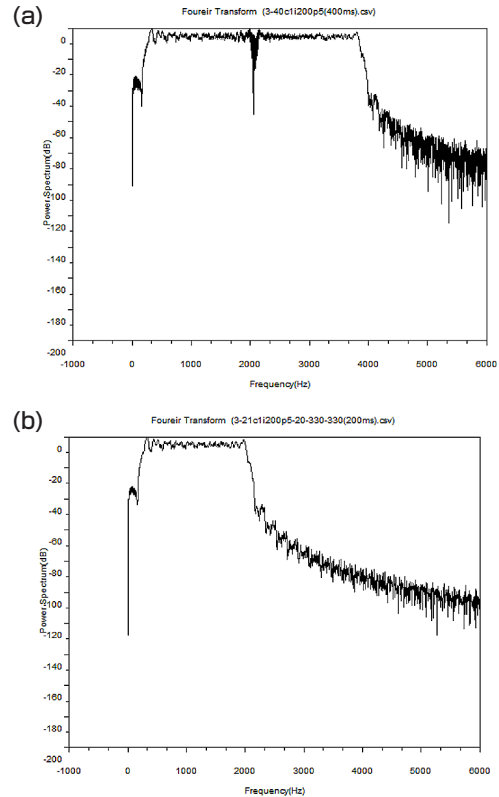


図7 周波数特性 (a) 2016 (b) 2017

表 1 使用波形データ

	2016	2017
Wave type	Multi tone burst wave	
Strat frequency	300 Hz	300 Hz
End frequency	4000 Hz	2100 Hz
Frequency transition interval	100 Hz	
Pulse duration	5 ms	
Wave length	400 ms	200 ms
Frequency layout	Continuous	

での時間内に、欠陥のたわみ共振を探すために複数の周波数のバースト波を配置した波形であり、各バースト波のカバーする帯域幅を考慮することにより、波形全体として広い周波数範囲を持たせている。図7にそれぞれの波形の周波数特性を示す。なお、類似する波形としてはチャープ波が挙げられるが、チャープ波の場合は連続的に周波数を変化させているのに対して、MTNB波の場合は共振を励起させるために同じ周波数のバースト波を一定時間駆動させており、断続的に変化させているという違いがある。

今回使用した波形の設定を、表1に示す。計測時の音圧は検査対象面で100 dB程度に設定した。2016年は300-4000 Hzの周波数範囲で、変調周波数100 Hz、パルス群間インターバル200 ms、パルス幅5 msの二群に分かれた波形を使用し、2017年は周波数範囲を300-2100 Hzに縮小した一群の波形を使用した。縮小した波形を使用した理由は、2016年の実験結果から計測対象の共振周波数が2000 Hz以下に存在する事が確認されていたためである。実際の欠陥部における共振周波数は、欠陥部の形状が供試体とは異なり複雑な形をしているため、特定することが困難である。そのため、非接触音響探査法を用いた初回の計測では、欠陥部の共振周波数を探すために加振音波の周波数範囲を広くしている。しかし、複数の周波数の音波を放射するという事は、それだけ計測時間も増加するという事を意味している。そのため今回の様に、欠陥部のたわみ振動の共振周波数が把

握出来ている状態であれば、周波数範囲を縮小することで計測時間を短縮することも可能である。

IV. 結果と考察

1. 振動速度スペクトル図

図8において○（健全部）と×（欠陥部）で示した計測点の振動速度スペクトルを図9に示す。図中における600 Hz付近の大きな反応は、振動計測に使用したレーザーヘッドの共振である。矢印で示した位置は、欠陥部のたわみ共振と推測される共振周波数の反応を示している。これらを比較すると、2017年

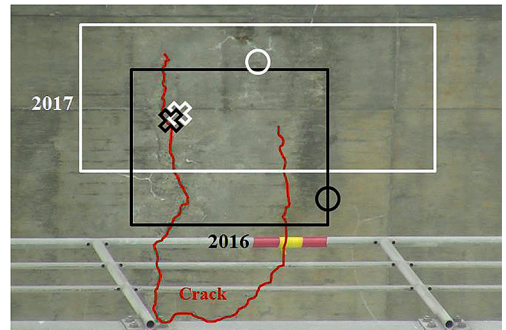


図8 比較位置 ○：健全部 ×：欠陥部

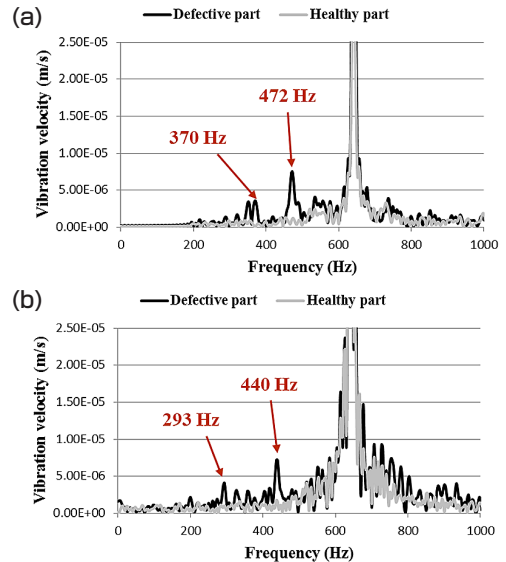


図9 振動速度スペクトル図 (a) 2016 (b) 2017

の結果では2016年よりも周波数が低くなっていることが分かる。今回使用した非接触音響探査法は、欠陥部のたわみ共振を利用しているため、欠陥部が広がると検出される共振周波数が低下する傾向がある。これは式(1)からも明らかである。この事からも、今回計測した箇所では内部欠陥が拡大している可能性がある事が推測可能である。

なお、今回の計測は自動車等が橋梁を通行している状態で実施されていた。これらの振動が計測に影響を及ぼす可能性が懸念されていたが、実際には特に影響は無かった。この理由は、計測後に時間-周波数ゲートを取り入れた信号処理を施しているために、送信された周波数とちょうど同じ時間帯に同じ周波数による振動が起きないかぎり、ノイズとして除去されてしまうためであると思われる。

2. 振動エネルギー比

今回は、検出された結果について振動エネルギー比を用いて比較・検討を行った。振動エネルギー比の定義を式(2)に示す(VER: Vibration Energy Ratio, PSD: Power Spectral Density)。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{each}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{min}) df} \dots\dots (2)$$

非接触音響探査法により検出された振動エネルギー比の分布図を図10に示す。この時の周波数範囲は(f_1)200 Hz ~ (f_2)500 Hzに設定した。この図において(a)が2016年、(b)が2017年の検出結果である。図中において、黒色に近い程振動エネルギー比が高く、大きく振動していることを示している。

非接触音響探査法ではたわみ共振を利用しているため、振動エネルギー比の値が高い場所は内部に空隙が存在している可能性が高くなる。検出された図10を比較した場合、まず(a)は亀裂の右側付近で振動エネルギー比の上昇が確認出来る。この事から、目視可能な亀裂部分から右側に向かって、内部の剥離

が進行していると考えられる。またこの事から、この内部剥離の原因であると考えられる鉄筋が、亀裂の右側の位置に存在していると推測可能である。次に(b)の結果では、新たな亀裂が発生し、その亀裂の左側で振動エネルギー比の上昇が確認された。その結果、計測範囲に存在する二つの亀裂の間に二つの大きな反応が存在する事になり、欠陥部の範囲が拡大している可能性が高い事が確認された。これら二つの欠陥が、計測時点で一つの大きな欠陥に一体化されているかは、この計測結果から完璧に判別するのは困難である。しかし、左右の亀裂の中心部で亀裂付近より反応が弱い、振動エネルギー比の上昇が検出されており、欠陥深度が大きいと励起された振動が減退することから、その可能性は否定できない。

図10の結果において、2016年および2017年の計測範囲内には共通する箇所が存在している。そこで、それぞれに共通する範囲に限定して比較を行った。比較位置を図11に示す。図中において斜線で示した範囲が、2016年と2017年の計測における共通箇所である。共通範囲の大きさは、縦約380 mm、横約720 mmである。この範囲には、目視可能な亀裂が存在している。

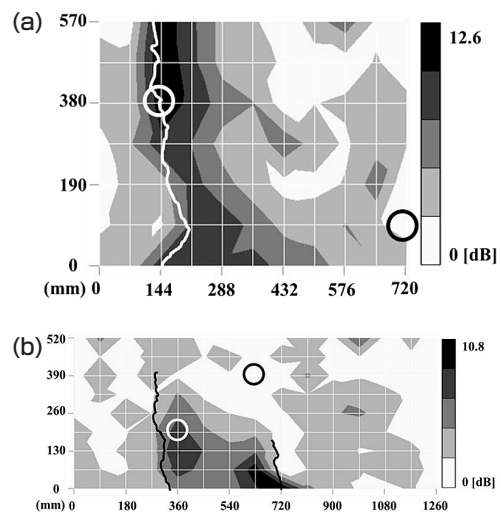


図10 振動エネルギー比分布図
(a) 2016 (b) 2017

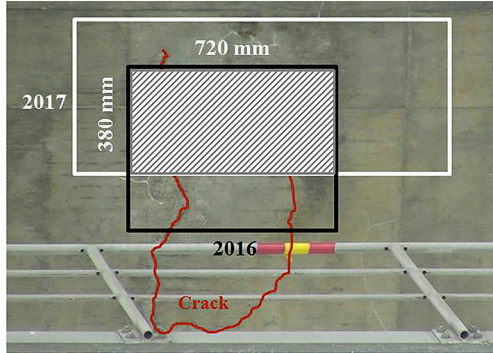


図 11 比較位置（共通箇所）

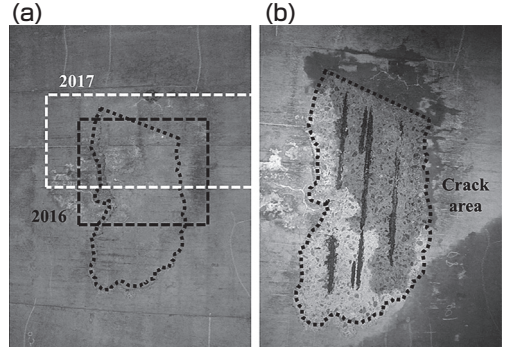


図 13 叩き落し作業前後の状態 (a)作業前 (b)作業後

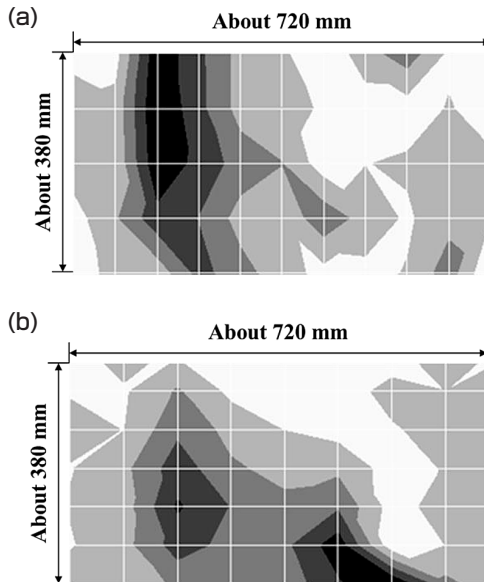


図 12 振動エネルギー比分布図
(a) 2016 (b) 2017

図 12 に、図 10 の振動エネルギー比の結果から共通範囲を切り取った図を示す。これらと比較すると、2017 年の結果では振動エネルギーが高い黒い範囲が右側に広がっており、2016 年より欠陥が拡大している事が分かる。

3. 叩き落し作業前後の状態

今回計測した箇所が存在していた欠陥が、後日行われた点検の際に、叩き落し作業がされていたことが分かった。図 13 に叩き落し作業前後の図を示す。図 5 と比較すると、目視可能な亀裂とほぼ同様の範囲で、剥離が存在していたことが分かる。これは、非接触音



図 14 内部亀裂のイメージ（断面図）

響探査法により検出された範囲とも重なっており、対象の欠陥範囲を捉えられていたことが確認出来た。内部亀裂のイメージを図 14 に示す。今回計測対象にした欠陥は、複数の鉄筋の錆が原因であるため、このような規模の剥離に繋がったと考えられる。

なお、この部分は叩き落された後に修復がなされており、再度の計測実験を実施することは不可能な状態である。

V. まとめ

今回は供用中の大規模橋梁の床版下面における、2016 年および 2017 年の検出結果を比較し、非接触音響探査法の再現性および、劣化の進行状況の確認を行った。それらの実験の結果、計測対象における内部の劣化が、1 年前よりも拡大していることが確認できた。

これにより、構造物に対する定期点検等にも、我々が提案する非接触音響探査法が活用可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) R. Akamatsu and T. Sugimoto: Acoust.

- Soc. Jpn. Spring. Meet. 3-8-7 (2011) p.1569
[in Japanese].
- 2) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Jpn. Soc. Civil. Eng. 66 (2011) p.1569 [in Japanese].
 - 3) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Proc. of the 10th Int. Symp. on New Tech. for USMCA (2011) p.104.
 - 4) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2011), p.744.
 - 5) R. Akamatsu, T. Sugimoto, H. Kawasaki, N. Utagawa and S. Tsujino: Proc. of the 10th SEGJ Int. Symp. (2011) p. 84.
 - 6) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura: Jpn. J. Appl. Phys., Vol.52, (2013) 07HC12
 - 7) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2012), p.94.
 - 8) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2013), p.1303.
 - 9) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K.Katakura: Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 07HC12.
 - 10) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto, and N. Utagawa: Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 07KC15.
 - 11) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C.Kuroda and K. Katakura: JJAP, Vol.54, 07HC15, (2015).
 - 12) T. Sugimoto, K. Sugimoto, N. Kosuge, N. Utagawa and K. Katakura: JJAP, Vol.56, 07JC10, (2017).