

非接触音響法による鉄筋腐食ひび割れの検出

河野 豊^{*1} 杉本 恒美^{*2}
Kawano Yutaka Sugimoto Tsuneyoshi

老朽インフラに対してのアセットマネジメントが提唱されているが、実際には市町村が管理している小規模なインフラなどは不具合が顕著化してから対処することがほとんどで、事前保全には手が回らないのが現状である。事前保全のためには、簡便かつわかりやすい非破壊検査技術が必要である。

特に従来は、メンテナンスフリーと考えられていた鉄筋コンクリート構造物（以下 RC 構造）の劣化が顕著となってきている。RC 構造の劣化としては内部鉄筋の腐食劣化が主なものであるが、その劣化メカニズムは塩分の浸透によるものが多い。コンクリート表面への塩分（塩化物イオン）は海洋からの飛来や融雪剤散布により付着するもので、コンクリートそのものにはそれほど悪影響を与えないが、内部に配置されている鉄筋などの鋼材まで浸透すると、腐食を生じさせ腐食膨張圧によりひび割れ、錆汁発生、鉄筋断面減少、さらには部材破壊に至ることもある。

内部の鉄筋が腐食しているか否かを早期に発見することができる非破壊検査手法の開発は、事後保全から事前保全への転換に大きな意味をなす。

著者らは、非接触音響法によるコンクリート内部の鉄筋腐食ひび割れ検出試験を行い、本計測手法の適用性を確認した。

キーワード：非接触、音響、コンクリート、鉄筋腐食、遠隔検査

1. はじめに

非接触音響法とは桐蔭横浜大学で提唱されている非破壊検査手法⁽¹⁾で、主にトンネル内面の打音検査の代替手法として研究されているものである。本研究では鉄筋の腐食に伴う腐食ひび割れの有無に関して本手法を適用し、腐食ひび割れの発見が可能か評価を行う。

非接触音響法の概要を図 1 に示す。強い音響振動を発生する長距離音響発生装置（LRAD）で対象構造物に振動を与え、振動を与えた部分を高感

度のスキヤニング振動計（SLDV）により振動計測する。従来打音検査で行われていた、点検者がハンマーでコンクリート表面をたたき、その音色で欠陥部を検知する検査を遠隔で行えるようになる手法である。

非接触音響法により橋梁やトンネル、その他構造物において、コンクリートの空洞や剥離などの劣化部を非接触・非破壊で検査できることは知られている。本研究は、この手法を鉄筋腐食によるひび割れ検査に適用する初の試みである。

*1：研究開発センター 研究開発グループ 次長 コンクリート診断士

*2：桐蔭横浜大学 教授 博士（工学）、超音波工学フェロー、研究推進部副部長

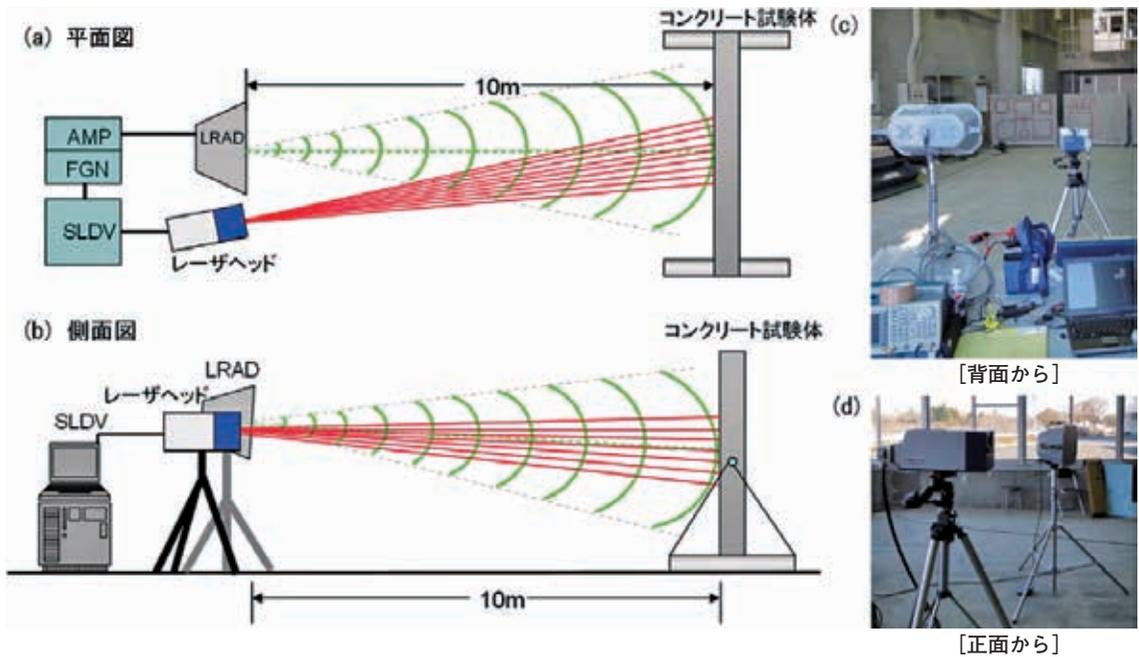


図1 非接触音響手法の概要

2. 非接触音響法の計測原理

図2に示すように、コンクリート構造物の表面近傍に空洞欠陥もしくはき裂がコンクリート面に対して水平かつ平面的に存在する場合、その欠陥上で板状の構造が構成される。

この場合、ハンマーによるたたき点検を実施す

ると、この板状の部分は振動板のように働くことになる。この時、2種類の振動が発生する。

一つはコンクリート表面と空隙までの厚み方向で生じた定在波による縦振動である。縦振動の固有振動数 f_L は式(1)で表される。

$$f_L = \frac{c}{2h} \quad (1)$$

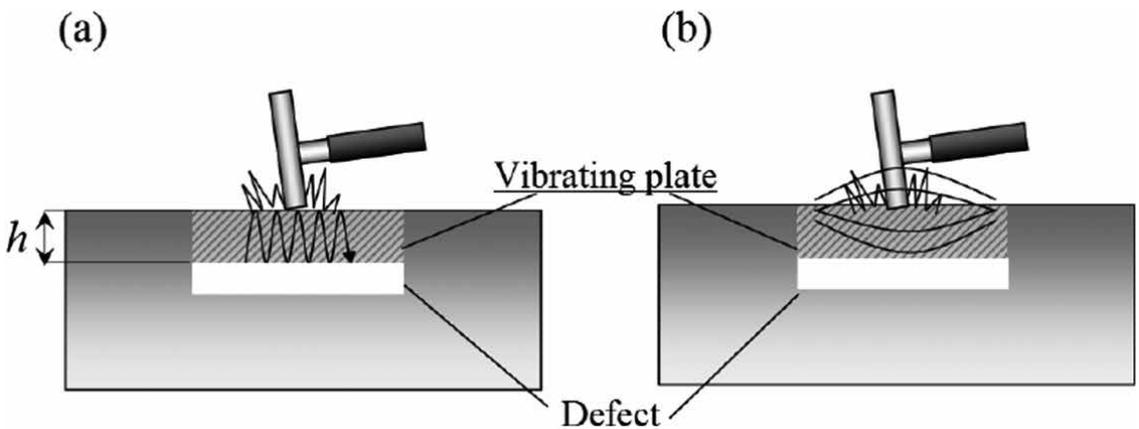


図2 欠陥部における2種類の振動パターン

ここで h はコンクリート表面から欠陥までの深さ、 c はコンクリート中の音速である。一般的に、コンクリート内の音速は 3000 ~ 4000m/s であり、欠陥までの深さを 10 ~ 100mm とすると縦振動の固有振動数 f_L は 15 ~ 200kHz となり、ほぼ可聴域外であることがわかる。

もう一つはたわみ振動である。たわみ振動は、欠陥部が太鼓のように振動するパターンである。簡単のため、剥離部を単純支持された円板と近似すると、その一次の固有振動数 f_{fr} は式 (2) で表される。

$$f_{fr} = \frac{4.98}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\gamma^2)}} \quad (2)$$

ここで、 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、 γ はポアソン比、 ρ は密度である。式 (2) より、固有振動数は欠陥の深さに比例し、半径の二乗に反比例することがわかる。

単純支持円板の一次固有振動数の計算法を **図 3** に示す。コンクリートの物性値は **表 1** に示したものをを用いた。**図 3** から、ここで示す平面規模および深さを持つ欠陥の固有振動数は概ね可聴域内であることがわかる。一般に、たわみ振動数は

縦振動数より低く振幅が大きいため、たわみ振動が励振可能な水平方向の空洞、あるいはひび割れの欠陥検出においてはたわみ振動を利用する方が有利となる。逆に垂直方向のひび割れの場合には、検出は困難となる。非接触音響法の場合も、たたき点検やマイクを併用する打音点検と同様に、たわみ振動を利用した検査になる。

鉄筋腐食に起因する腐食ひび割れ探査においても、コンクリート面に平行なひび割れが検出のターゲットとなる。

3. 実証試験

3.1 試験体

今回使用した試験体は **図 4** のとおり、寸法 1000×450×200mm で D16 鉄筋を表面から 50mm の深さに配置したものである。

鉄筋の腐食度は (0) < (1) < (2) < (3) の順に大きくなっている。鉄筋はコンクリート部 (かぶり 50mm) に埋め込まれている。試験体は、食塩水に浸した状態で鉄筋に電圧をかけ、(0) < (1) < (2) < (3) と通電時間を変えて鉄筋の腐食度合いを変化させて製作した。

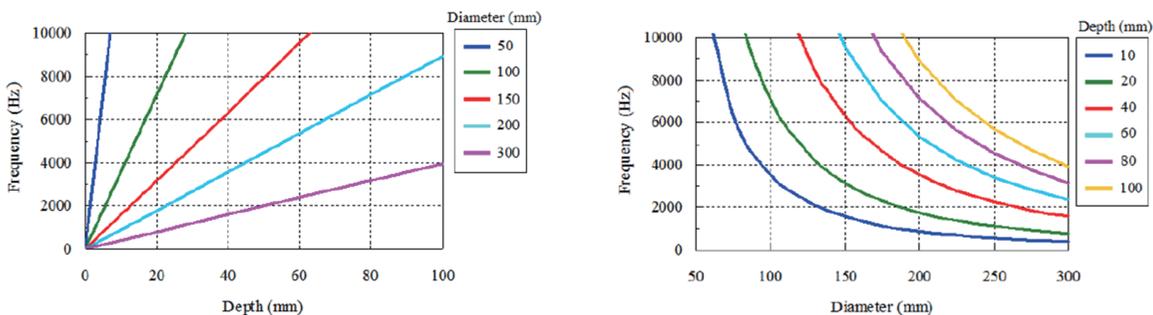


図 3 単純支持円板の一次固有振動数の計算法

表 1 コンクリートの物性値

Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
35	2400	0.2

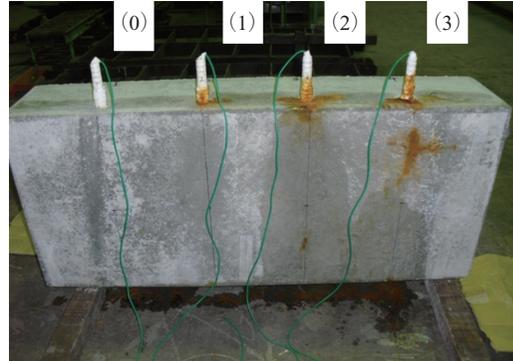
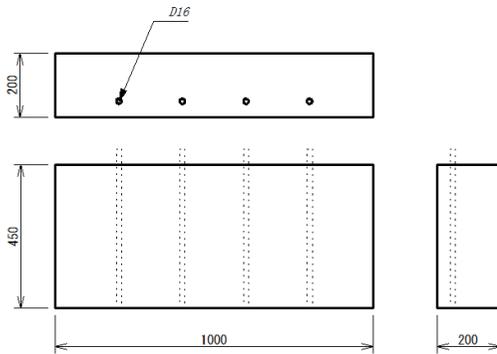


図4 非接触音響用鉄筋腐食試験体

3.2 非接触音響試験方法

図5のとおりセットアップで測定を行った。
測定条件は、以下のとおりである。

計測周波数範囲 500 ~ 7100Hz

音源 LRAD (Long Range Acoustic Device)

LRAD から測定面までの距離 2.549m

SLDV から測定面までの距離 3.165m

音波 トーンバースト波

(変調周波数 200Hz、interval=50ms)

測定点での加算平均回数 5回

測定面での音圧 100dB 程度

計測ピッチ x=5cm、y=5cm (x:水平 y:垂直)

図6のSLDVのCCDカメラ画像に示すように、試験体側面を5cmのピッチで野書き、LRADで試験体に音波を付加してSLDVで各目目の点を順番に計測した。赤い+は測定点の位置、右下に測定番号を示す。

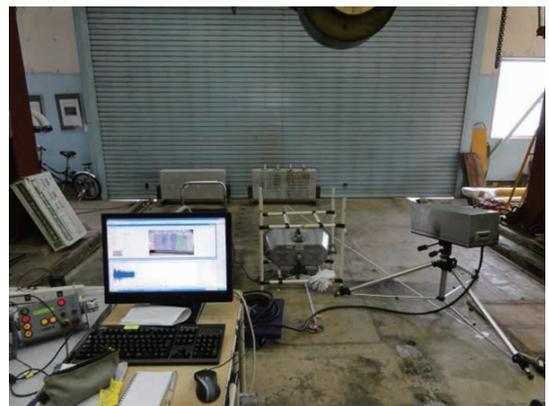


図5 試験中の概観

3.3 試験結果

計測結果としてSLDVから計測された振動エネルギー比の分布を図7に示す。

格子点は測定点を示し、黄色点線は鉄筋の位置を示す。凡例メモリ最大値を、全体の振動エネルギー比の最大値より低い値に設定して表示した。

鉄筋(3)は、上部に腐食ひび割れが大きく広がっている。鉄筋(2)は、鉄筋(3)に比べて振動エ



図6 SLDVのCCDカメラ画像

ネルギー比が低く、鉄筋方向に分布が散見される。鉄筋(2)の腐食の度合いは、鉄筋(3)より小さいが腐食による劣化が存在することがわかる。腐食のない鉄筋(0)では、青い健全部分が鉄筋方向

に広がっている。このことから、鉄筋 (2) の振動エネルギー比の分布は、腐食による劣化の状況を反映していると考えられる。

図 7 では、左側に赤い部分があいづつか見られるが、レーザー戻り光不足による計測不良点である可能性が高い。

次に鉄筋 (3) の位置の上部を詳細に計測した。鉄筋 (3) 上部の SLDV の CCD カメラ画像、およびびび割れ図を図 8 に示す。また計測結果として、振動エネルギー比の分布を図 9 に示す。

計測ポイント数は水平方向 7 点、垂直方向 5 点の合計 35 点で、計測点は手動により格子状に選択指定した。試験体の鉄筋 (3) の表面には、図 8 のようなびび割れが見られる。これは、鉄筋の腐食膨張によりき裂が生じたものである。図 9 では、表面方向のき裂部のたわみ振動分布が振動エネルギー比の分布で表示されている。健全部の青い部分に比較して、欠陥部が顕著に赤→黄色→黄緑(振動エネルギー比は大→小)と変化して見られる。鉄筋の腐食によるびび割れ状態が顕著に可視化され計測できた。

次に鉄筋 (2) の位置の上部を詳細に計測した。鉄筋 (2) 上部の SLDV の CCD カメラ画像を図 10 に示す。また計測結果として振動エネルギー比の分布を図 11 に示す。計測ポイント数は同じく合計 35 点で、計測点は手動により格子状に選択指定した。

図 11 の橙色点線は、鉄筋 (2) の位置を示している。鉄筋 (2) が埋め込まれている線上では、一見、青く健全部に見える。見える振動エネルギー比の範囲を下げるため、凡例メモリ最大値を約 1/4 に調整すると、図 12 に示す鉄筋 (2) の線上辺りに、周辺より高い振動エネルギー比の分布が見られる。これは、鉄筋によるものか、鉄筋の腐食による内部欠陥の影響によるものか、まだ明らかでない。

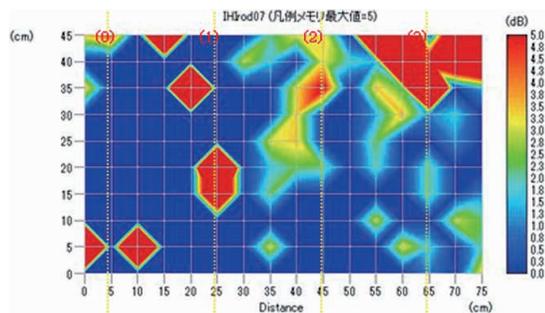


図 7 計測結果 (振動エネルギー比の分布)

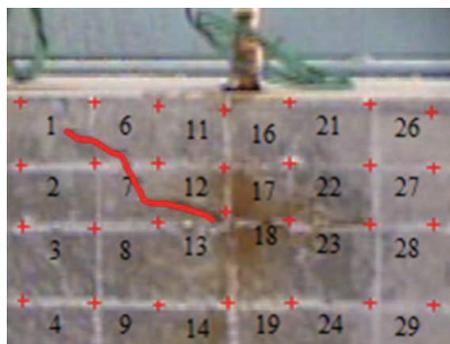


図 8 鉄筋 (3) 上部の CCD カメラ画像

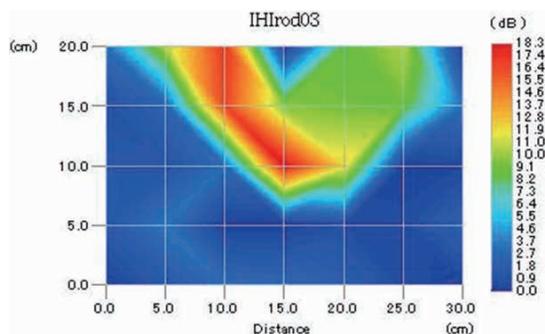


図 9 鉄筋 (3) 計測結果 (振動エネルギー比の分布)

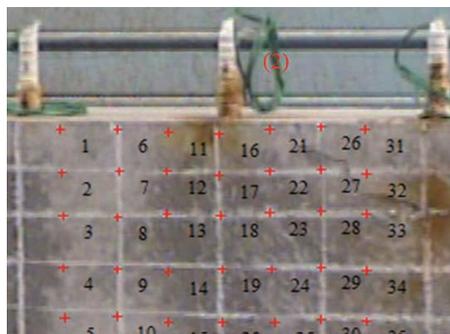


図 10 鉄筋 (2) SLDV の CCD カメラ画像

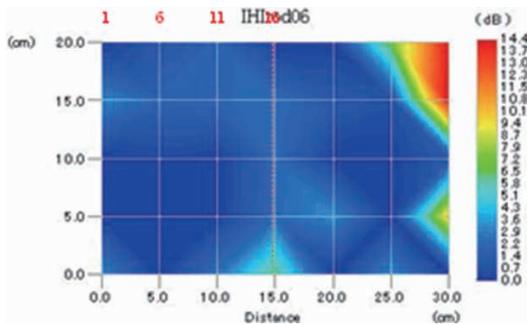


図 11 鉄筋 (2) 計測結果
(振動エネルギー比の分布)

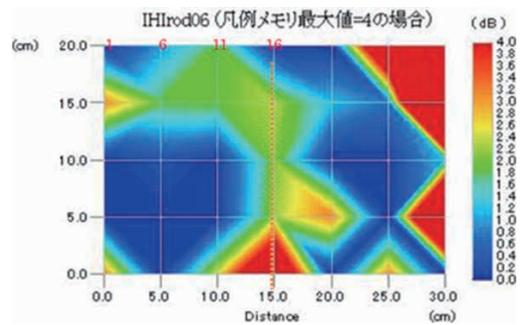


図 12 鉄筋 (2) 計測結果
(振動エネルギー比の分布：凡例変更)

以上の結果で、鉄筋 (3) の上部の計測では明確なひび割れ部を発見することができたが、鉄筋 (2) に関しては鉄筋のひび割れ部を検出することはできなかった。

そこで最終確認として、本試験体を切断し、内部ひび割れの状態を確認した。まず鉄筋 (3) 上部の切断写真を図 13 に示す。

赤いラインで記載したのが鉄筋表面からのひび割れである。ひび割れは鉄筋から表面に向かっており、そのひび割れ幅は約 0.3mm である。しかし非接触音響法で検出できたのは、本ひび割れではなくその上部の剥離部 (青いライン) である。剥離部を上面から見た写真を図 14 に示す。鉄筋 (3) 上端部の局所的な腐食膨張により、かぶりコンクリートが端部で剥離した状態になっている。この部分をハンマーで打音検査したところ、明確な音の差を聞き分けることができた。

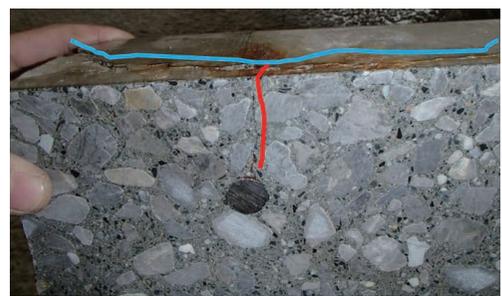


図 13 鉄筋 (3) 試験体上部剥離写真



図 14 鉄筋 (3) 試験体上部切断写真

次に鉄筋 (2) 上部の切断写真を図 15 に示す。

赤いラインで記載したのが鉄筋からコンクリート表面にかけて発生しているひび割れで、その幅は鉄筋から約 0.05 ~ 0.1mm となっており表面では 0.05mm 程度である。

本試験体を打音検査しても、明確な音の差を聞き分けることができなかった。

鉄筋 (2) に関しては微細な (ひび割れ幅 0.05 ~ 0.1mm) 腐食ひび割れが発生していたが、非接



図 15 鉄筋 (2) 試験体上部切断写真

触音響法では検出できなかった。

鉄筋 (3) に関しても上部の剥離部分は打音検査と同等に非接触音響法で検出できたが、鉄筋表面からコンクリート表面に向かうひび割れは検出することができなかった。

4. 結言

(1) 非接触音響法により鉄筋の腐食膨張に伴う、剥離状のひび割れ (検出面に平行) は検出が可能であることが明確になった。

(2) 非接触音響法では、鉄筋からコンクリート表面に向かう腐食膨張ひび割れ (検出面に垂直) の検出には適用が困難であることが判明した。今後の信号処理手法の開発に期待したい。

(3) 非接触音響法は遠隔で鉄筋腐食による剥離ひび割れを検出できることから、老朽インフラに対しての点検省力化が期待できる。

参考文献

- (1) 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、2012、pp.59-60



研究開発センター
研究開発グループ 次長
コンクリート診断士

河野 豊

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547

桐蔭横浜大学 教授 博士(工学)、
超音波工学フェロー、
研究推進部副部長

杉本 恒美

TEL/FAX. 045-974-5264(居室)
TEL/FAX. 045-974-5059(実験室)