コンクリート構造物のための非接触音響探査法に関する研究

――鉄筋腐食によるコンクリートひび割れの検出――

Study on Non-contact Acoustic Inspection Method for Concrete Structures: Detection of cracks due to reinforced corrosion

杉本 和子・杉本 恒美

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

（2017 年 3 月 18 日　受理）

Ⅰ．はじめに

安全・安心な社会の構築のために、インフラの維持管理は重要であるが、点検者がハンマーでコンクリート表面を叩き、その音色で欠陥部を検知する叩き点検が主流である。我々の研究室では、主にトンネル内面の打音検査の代替法として非接触音響探査法[1, 2]を研究してきた。強力な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レーザドップラ振動計（SLDV）により計測する手法である。非接触・非破壊で、橋梁・トンネル・ダム、その他構造物のコンクリートの空洞や剥離などの内部欠陥を、遠隔から定量的に検査できると期待される。今までコンクリート供試体の内部欠陥として発砲スチロールを埋設した空洞欠陥供試体を用いてきた。今回、従来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の劣化に着目し、その腐食度を定量的に評価する非破壊検査手法がまだ提案されていないので、鉄筋腐食によるひび割れを遠隔から検出する非接触音響探査法を検討した。

Ⅱ．実験方法

1．鉄筋腐食コンクリート試験体

図 1 のように、鉄筋腐食試験体（1000 × 450 × 200mm^3）は、表面から 50mm の深さ

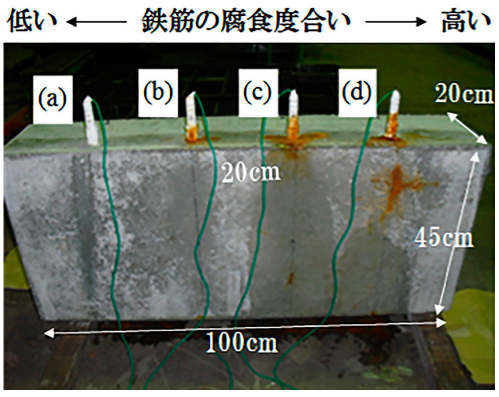


図 1　鉄筋腐食コンクリート試験体

Sugimoto Kazuko and Sugimoto Tsuneyoshi : Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama.
1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, 225-8503, Japan

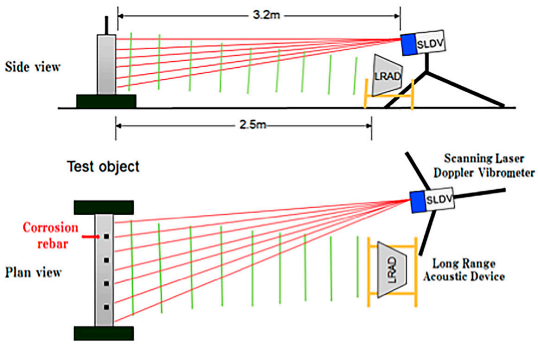


図２　実験セットアップ

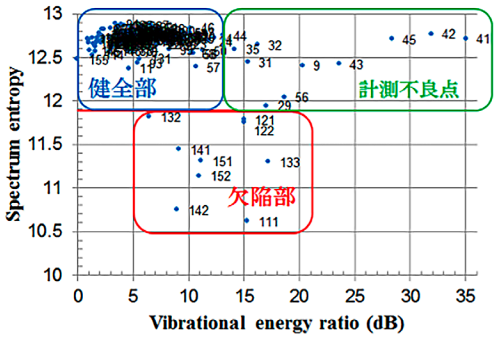


図３　振動エネルギー比 vs スペクトルエントロピー

に鉄筋 D-16 を埋め込んで作製された。

試験体を食塩水に浸した状態で鉄筋に電圧をかけて通電させ、(a) < (b) < (c) < (d) と通電時間を長くして鉄筋の腐食度合いを変化させて製作した。鉄筋の腐食度は (a) < (b) < (c) < (d) の順に大きくなっている。

２．実験セットアップ

実験セットアップを**図２**に示す。音源としては LRAD（LRAD Corp., LRAD-300X）を使用し、コンクリート表面での最大音圧が 100dB 程度になるように音圧を調整した。送信音波としては 500-7100Hz のトーンバースト波（変調周波数 200Hz、interval time 50ms）を用いた[2]。コンクリート表面の振動速度は SLDV（Polytec Corp., PSV400-H4）により、水平および垂直方向約 5cm ピッチで 160 点（16 × 10）計測した。LRAD から測定面までの距離は約 2.5m、SLDV から測定面までの距離は約 3.2m であった。

３．数値解析

計測された振動速度の時間波形に対して、時間－周波数ゲート処理を行い、周囲からの反射や残響の影響を軽減した。SLDV ヘッドの共振周波数を除くために 1200Hz ～ 8192Hz の範囲で積分を行って、各測定点における振動エネルギーを算出した。全計測点のうち、健全部の最小振動エネルギーを基準値とみなして、振動エネルギー比を計算した。さらに、各測定点におけるスペクトルエントロピーを算出し、計測不良点の検出を行った[3]。その結果を**図３**に示す。測定データから計算された各測定点での振動エネルギー比とスペクトルエントロピーを散布図で示している。２つの音響学的特徴量を用いることによって、健全部・欠陥部・計測不良点がうまく分離されている。健全部は図の左上に、欠陥部は下側に、計測不良点は右上に点在している。

Ⅲ．実験結果

図４は、測定時にレーザドップラ振動計の CCD カメラで撮影された鉄筋腐食コンクリート試験体の画像である。図の右上のコンクリート表面に亀裂（赤線部）が所々見られる。

図５に鉄筋コンクリートの腐食状態を映像化した例を示す。計測不良点を取り除いた後[3]、振動エネルギー比の分布状態を表示したものである。縦方向の黄色点線は、埋め込まれた鉄筋の各位置を示す。

鉄筋 (d) では、上部に振動エネルギー比の高い部分が存在しており、鉄筋腐食ひび割れの目視による亀裂位置（**図４**）とほぼ同じ位置にあった。また、鉄筋 (c) では、鉄筋 (c) の位置を示す黄色縦線から少し左にずれた縦方向に、鉄筋 (d) より振動エネルギーがかなり

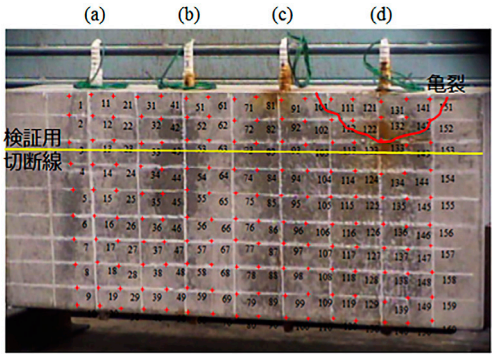


図４　鉄筋腐食コンクリート試験体の
CCD カメラ画像

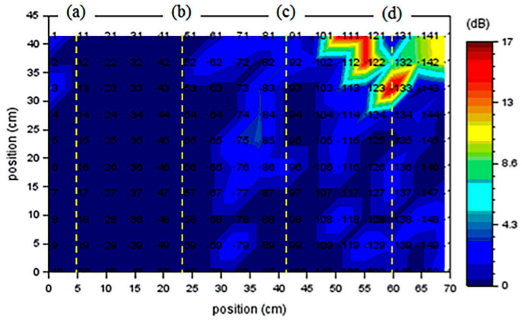


図５　鉄筋腐食コンクリート試験体のかぶり部
分の剥離状態の映像化

低いが、周囲より若干高くなっている縦方向に伸びる領域を見つけることができる。

これらの結果を検証するために、実際に鉄筋腐食コンクリート試験体を切断して、鉄筋腐食ひび割れの状況を確認した。切断位置は、**図４**に黄色の検証用切断線で示した。**図６**に試験体を切断した鉄筋 (c)、(d) の結果を示す。紙面が切断面で、赤色の線に沿って鉄筋腐食ひび割れが見られ、紙面に垂直な面が試験体の表面で、青色の線がコンクリート表面の亀裂を示している。鉄筋 (c)、(d) ともに鉄筋からコンクリート表面に向け、それぞれひび割れが確認された。ひび割れ幅は、それぞれ 0.1mm、0.2mm 程度で、鉄筋 (d) のひび割れ幅が大きく、鉄筋腐食が大きいことがわかる。また鉄筋 (d) の上部には表面剥離を生じていた。

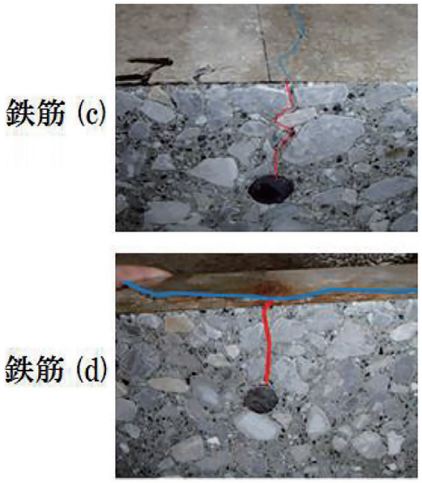


図６　鉄筋腐食コンクリート試験体の断面写真

Ⅳ．結論

非接触音響探査法を用いた、鉄筋腐食コンクリートの内部欠陥の検出実験を行い、鉄筋腐食に伴う、かぶりコンクリートの剥離部分を検知することができた。コンクリート表面に沿う方向のひび割れ（0.2mm 程度）を検知し、内部欠陥の状態を振動エネルギー比によって映像化することができた。鉄筋 (c) のコンクリート表面に垂直な方向のひび割れ（0.1mm 程度）については、鉄筋 (d) の欠陥部に比べて、振動エネルギー比が小さいが、健全部に比べて若干の差が見られた。また、欠陥部のひび割れの劣化状態を経時変化で確認することができた。

謝辞

コンクリート供試体の製作および提供していただいた IHI 検査計測の河野豊氏に感謝いたします。

【参考文献】

1）R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa and K.Katakura : *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 (2013)

07HC12.
2) K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto and N.Utagawa : *Jpn. J. Appl. Phys*. 53 (2014) 07KC15.
3) K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N. Utagawa, C.Kuroda and K.Katakura : *Jpn. J. Appl. Phys*. 54, 07HC15 (2015).