

論文 衝撃弾性波法による RC 部材の鉄筋付着切れ検出手法の基礎検討

森 拓未*1・大野 健太郎*2・宇治 公隆*3・宮里 心一*4

要旨: 本研究は、塩害による RC 部材の鉄筋腐食において、コンクリート表面にてひび割れが確認される前の潜伏期から進展期における鉄筋の付着切れ検出手法を提案することを目的として、衝撃弾性波法と開口合成法の組合せによる可視化手法を検討した。実験では、鉄筋の付着切れを模擬した供試体の鉄筋直上および無筋部にて、加速度計を複数貼付し衝撃弾性波法を適用した。鉄筋直上および無筋部での測定波形の差分を開口合成法の入力値とし、供試体断面内を可視化した。その結果、鉄筋位置や付着切れ模擬位置にて累積差分値が大きくなり、本手法による鉄筋の付着切れ位置検出の可能性が示唆された。

キーワード: 塩害, 鉄筋腐食, 鉄筋付着切れ, 衝撃弾性波法, 開口合成法, 累積差分値

1. はじめに

沿岸部や寒冷地などの RC 構造物においては、飛来塩分や凍結防止剤などによって、コンクリート外部から塩化物イオンが供給されやすい環境にあり、塩害による鉄筋腐食が主な劣化要因となる。鉄筋腐食膨張圧に伴うコンクリートのひび割れ発生モードは、鉄筋軸ひび割れ、剝離ひび割れ、水平剝離ひび割れに大別され¹⁾、外観目視によりこれらのひび割れが確認できない状態において、コンクリート内部では鉄筋腐食の進行や付着力低下が生じている可能性が示唆される。予防保全による維持管理の観点から、コンクリート中の鋼材が発錆しない状態(潜伏期)、もしくはコンクリート表面に変状が現れない状態(進展期)において、鉄筋腐食の可能性や鉄筋とコンクリートの付着を非破壊試験にて把握することが望ましい。現状の維持管理では、鉄筋腐食の可能性を把握するために自然電位計測が主に行われる。一方で、鉄筋とコンクリート間の付着および付着切れを非破壊にて検出することは難しく、研究段階にていくつかの検討が進められている。たとえば、超音波速度の経時変化や継続的な AE モニタリングによる発生頻度の傾向から鉄筋腐食あるいは付着状態を推定する方法²⁾やコンクリートから露出させた鉄筋に超音波を入力し、コンクリート表面で信号取得する方法³⁾などである。これらは、測定期間が長期に及ぶことやコンクリートの部分破壊を伴うなどの制約があり、完全非破壊による短期測定から鉄筋の付着状態を把握する技術が望まれる。

ここで、衝撃弾性波法は、鋼球などの打撃により弾性波をコンクリート中に入力し、加速度計などのセンサで伝搬してきた弾性波を受信する方法⁴⁾であり、入力周波数が超音波法と比較して低く、骨材の影響を受けにくいため、コンクリートを一様な弾性体とみなし測定ができ

る。さらに、測定方法が簡便であり、短期測定が可能である。一方、弾性波の伝搬経路内に鉄筋および鉄筋腐食により生じる空隙・不連続面・付着不良(鉄筋の付着切れと称する)が存在する場合、コンクリートとの音響インピーダンス(密度と弾性波速度の積)の差により測定結果にはそれらの影響が少なからず含まれる。しかし、鋼球打撃により入力点から直接センサに到達する直達波と比較し、鉄筋および鉄筋の付着切れからの反射波は非常に小さく、測定された波形から鉄筋の付着切れによる反射波成分を同定することは困難である。そのため、鉄筋を含む範囲を伝搬した受信波形からコンクリート部分だけを伝搬した受信波形を差し引くこと(差分波形と称する)で、鉄筋あるいは付着切れによる反射波成分を含んだ情報を取得できると考えられる。

本研究では、鉄筋腐食が要因で生じるコンクリートと鉄筋の付着切れ検出の基礎検討として、コンクリート表面にて腐食ひび割れが確認される前段階の潜伏期あるいは進展期を想定し、コンクリートは健全な状態とした。

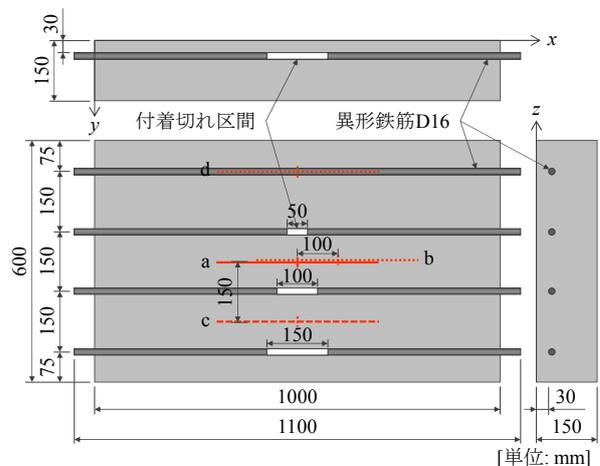


図-1 供試体概要 (C30-T)

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 博士課程前期 (学生会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 助教 博士(工) (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 教授 博士(工) (正会員)

*4 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻 教授 博士(工) (正会員)

表-1 コンクリートの計画配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤 <i>Ad</i>
20	8	60	4.5	47.1	172	287	782	879	1.148

表-2 供試体名一覧

供試体名	鉄筋かぶり	付着切れ模倣方法
C30T	30mm	ビニルテープ
C30W		ラップ
C50T	50mm	ビニルテープ
C50W		ラップ

また、コンクリートと鉄筋の付着低下状態をビニルテープおよびラップにより模倣し、供試体を作製した。実験では衝撃弾性波法により前述の差分波形を得た。また、差分波形は入力による直達波の影響を大きく低減できる反面、鉄筋の付着切れからの反射波成分以外の情報も含むことが想定された。そのため、開口合成法を用いた振幅値加算手法により鉄筋あるいは付着切れに伴う反射波成分を増幅し、計測対象断面内を可視化した。この画像からコンクリートと鉄筋の付着切れ検出方法を考察した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体は、図-1に示すように 1000×600×150mm のコンクリートに 1100mm の D16 鉄筋を 4 本埋設したものであり、4 体作製した。供試体パラメータは、鉄筋かぶり (30mm および 50mm)、付着切れ模倣方法 (ビニルテープおよびラップ) であり、その鉄筋中央に長さの異なる付着切れ区間 (付着切れなし, 50mm, 100mm, 150mm) を設けた。コンクリートの計画配合を表-1に示す。材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度は 30.0N/mm²、静弾性係数は 24.4kN/mm²であった。供試体作製方法は、あらかじめ付着切れ区間を設けた鉄筋と、未加工の鉄筋を弾性波の測定面が型枠底面となるように型枠の所定の位置に配置し、コンクリートを打設した。付着切れ区間には写真-1に示すようにビニルテープおよびラップを巻き、その上に油を塗布してコンクリートと鉄筋の付着を切った。コンクリートの打込みから材齢 14 日まで供試体を湿布養生し、脱型後から材齢 28 日以降の測定日まで屋外保管した。表-2に供試体名一覧を示す。

2.2 衝撃弾性波法の測定概要

弾性波の測定では、圧電型加速度計 (感度 20mV/(m/s²))、周波数範囲 (±3dB) 0.1~10,000Hz) を 8 個使用し、直径 4.0mm の鋼球打撃により生じた弾性波をサンプリング時間間隔 0.1μs、サンプリング数 5004 個として記録した。写真-2にセンサ配置および弾性波入力位置を示す。センサは鉄筋直上および鉄筋間の無筋部分のコンクリート表面にホットメルト接着剤を用いて接着した。

3. 開口合成法に適用する入力波形

3.1 開口合成法の概説

開口合成法は、受信信号中の微弱な成分を増幅し可視化する手法であり、超音波法などの分野で用いられてい



写真-1 付着切れ区間 (150mm)

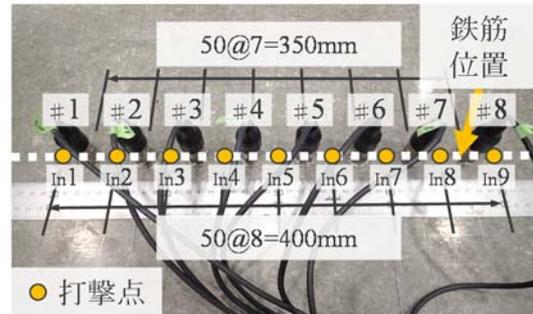


写真-2 センサ配置および弾性波入力位置

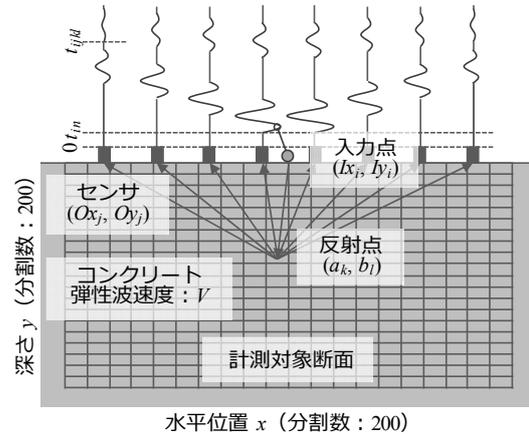


図-2 弾性波の反射と検出波形の模式図

る⁵⁾。図-2に弾性波の反射と検出波形の模式図を示す。本研究での計算方法は、観測されたすべての波形は測定領域内の各反射点から生じた波形として扱い、入力点-反射点-受信点を結ぶ距離と弾性波速度を用いて各反射点から受信点に到達する時刻を算出し、その該当する時間の振幅値を各反射点に入力、積算するものとした。ここで、コンクリート表面で鋼球打撃により入力された弾性波は、各センサ位置で入力位置から直接到達した波 (直達波) が最初に検出され、その後対象物内で反射した反射波が各センサで受信される。このとき、コンクリートの弾性波速度を V とし、弾性波の入力点を (x_i, y_i)、検出点の座標を (O_{xj}, O_{yj})、反射点の座標を (a_k, b_i) とすると、各センサ位置での反射波到達時刻 t_{ijkl} は以下の式で表される⁶⁾。

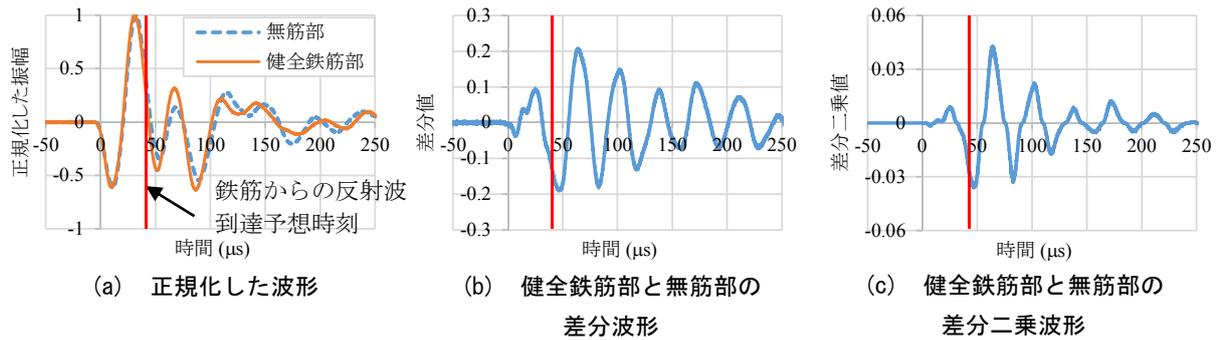


図-3 測定波形の一例

$$t_{ijkl} = \frac{\sqrt{(Ix_i - a_k)^2 + (Iy_i - b_l)^2} + \sqrt{(Ox_j - a_k)^2 + (Oy_j - b_l)^2}}{V} - \frac{\sqrt{(Ix_i - OIx_j)^2 + (Iy_i - OIy_j)^2}}{V} + t_{in} \quad (1)$$

ここに、 OIx_j ：弾性波の入力点にもっとも近いセンサの x 座標 (m)、 OIy_j ：弾性波の入力点にもっとも近いセンサの y 座標 (m)、 t_{in} ：弾性波の入力点にもっとも近いセンサにおける第 1 波の到達時刻 (sec)、 $i=1\sim N$ 、 N ：入力点個数、 $j=1\sim M$ 、 M ：センサ数、 k ：計測対象領域の x 方向の分割数、 l ：計測対象領域の y 方向の分割数であり、本研究では分解能をそれぞれ 2mm および 1mm とした。

これより、反射点の反射レベルは各センサで得られた時間 t_{ijkl} における振幅の和となる。この処理を各打撃点で行い重ね合わせることで、計測対象領域の反射強度が得られる。

$$R(k, l) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{A(j, t_{ijkl})}{A_{max}(i)} \right| \quad (2)$$

ここに、 $R(k, l)$ ：計測対象領域の点 (a_k, b_l) における反射強度の絶対値、 $A(j, t_{ijkl})$ ：弾性波を点 (Ix_i, Iy_i) で入力したときのセンサ位置 (Ox_j, Oy_j) で信号受信したときの時間 t_{ijkl} における振幅値、 $A_{max}(i)$ ：弾性波の入力点 (Ix_i, Iy_i) に最も近いセンサにおける最大振幅値である。

3.2 開口合成法の入力波形に適用する差分波形

(1) 音響インピーダンスが弾性波の反射に及ぼす影響

異なる物質 (物質 1 と物質 2 と称する) 中を伝搬する弾性波の反射は、物質 1 と物質 2 の音響インピーダンスの比によって決定される。コンクリートを伝わる弾性波が内部の空隙や端部で反射する場合、音響インピーダンスの差が大きいためその反射率は 90%以上となり、鉄筋とコンクリート間では、鉄筋の音響インピーダンスはコンクリートの音響インピーダンスの 5~6 倍となり、反射率は約 70%となる⁷⁾。以上のことから、測定波形には鉄筋からの反射波が含まれると考えられる。

(2) 健全鉄筋直上部と無筋部での測定波形の差分波形

開口合成法の入力値に測定波形を直接使用すると表面波などの直達波成分が卓越し、鉄筋および付着切れ界面からの反射像が得られないと考えられる。そのため、

測定波形から鉄筋からの反射波を抽出する方法を検討した。実験で得られた測定波形を用いて以下に概説する。図-3(a)に C50T 供試体の健全鉄筋直上および無筋部で、写真-2 で示したセンサ配置において、In5 で弾性波を入力し #5 で受信した波形に対し、それぞれの最大振幅で正規化した波形を示す。波形では入力位置からの直達波が最初に到達し、その振幅が卓越していることがわかる。ここで、到達時間差から弾性波速度を算出し、弾性波が鉄筋表面で反射しセンサに到達するまでの時間を算出すると、55.7 μ s であった。また、直達波の到達時間は 12.4 μ s と計算され、反射波と直達波の到達時刻の差は 43.3 μ s であった。すなわち、図中に示す健全鉄筋部での波形の 43.3 μ s 以降に鉄筋からの反射波成分が含まれると考えられる。鉄筋から反射波が到達する場合には反射面が固定端となり位相が逆転することが想定されるが、反射波成分が直達波成分と比較して非常に小さいことから、測定波形から反射波の到達を判断することは困難であることがわかる。

次に、直達波の影響を小さくし反射波成分を抽出する目的で、健全鉄筋部の波形から無筋部の波形を差し引いた差分波形を図-3(b)に示す。差分波形は、各検出点にて二つの測定波形の初動到達時刻を揃え、同時刻での振幅値の差を波形にしたものである。差分波形では直達波の影響が低減され、鉄筋からの反射波到達予想時刻付近で差分値が大きくなっていることがわかる。この操作により直達波の影響を排除し、鉄筋からの反射波成分をより明確にできた可能性が示唆される。一方、この差分波形には鉄筋からの反射以外の情報も含まれると考えられたため、鉄筋からの反射波成分と考えられる差分値を強調するため、この差分値を二乗した値 (差分二乗値と称する) を算出した。ただし、振幅の極性を反映するため、差分二乗値は、差分値 \times |差分値| の計算により算出した。差分二乗値の波形 (差分二乗波形と称する) を図-3(c)に示す。以上の操作により、図-3(a)や図-3(b)において赤線で示す鉄筋からの反射波到達時刻より前の成分は図-3(c)では小さくなり、鉄筋からの反射波成分が強調されたと判断できる。以下の検討では、差分二乗値

を開口合成法の入力値として用い、鉄筋および付着切れの可視化手法について検討した。

3.3 差分二乗値を用いた開口合成法の概説

本検討では、開口合成法の入力値に上記の差分二乗波形を適用し、断面内の可視化を試みた。すなわち、各測定波形を最大振幅で正規化し、可視化対象とする鉄筋直上（対象部と称する）での正規化波形 $A_1(j, t_{ijkl})/A_{1max}(j)$ から予めコンクリート内部状態が既知である参照部での正規化波形 $A_2(j, t_{ijkl})/A_{2max}(j)$ を差し引き、得られる差分二乗波形 $A(j, t_{ijkl})$ を生成する。各センサで得られた差分二乗波形の振幅値を要素分割した対象断面内の各要素にて、時間 t_{ijkl} における差分二乗値の和である累積差分値を算出し、この処理を各弾性波入力点で行い重ね合わせることで、計測対象断面のコンター図を出力し、可視化した。

$$D(k, l) = |\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M A(j, t_{ijkl})| \quad (3)$$

ここに、 $D(k, l)$: 計測対象領域の点 (a_k, b_l) における累積差分値の絶対値、 M : センサ数、 N : 弾性波の入力点数である。

開口合成法で用いる弾性波速度は、参照部における測定で算出し、各センサ間を伝搬する弾性波の初動到達時刻差と各センサ間の距離を用いて算出した。図-4 に差分波形を用いた開口合成法による鉄筋付着切れの可視化手法のフローチャートを示す。

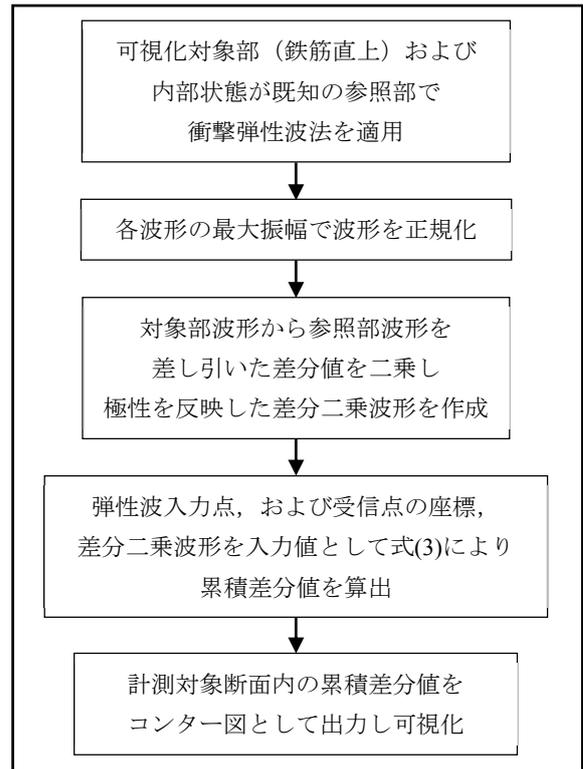


図-4 差分波形を用いた開口合成法による鉄筋付着切れの可視化手法のフローチャート

全」のように表す。画像は図-1 に示した対象部における x - y 平面を表示しており、 y 軸は供試体の深さ、 x 軸は水平位置に対応している。 x 軸および y 軸方向にそれぞれ 200 分割した各要素における、入力点数 (9 点) × センサ数 (8 個) の差分二乗波形 (72 波形) の差分二乗値の和をコンター図として示している。画像内の白色点線は鉄筋位置を、白色実線は付着切れ区間を、白色破線は供試体底面を示している。各画像の右下に累積差分値の最大値を示す。また、表示される差分値の下限値と上限値は、カラーバーの左右にそれぞれ示す値である。

4. 実験結果

4.1 計測結果の表示方法

図-5 に C50T 供試体での実験結果を示す。各画像の名称は、対象部および参照部の名称をハイフン「-」で表示した。例えば、対象部をビニルテープ 150mm 部、参照部を無筋部とした場合は「T150-無筋」、対象部をラップ 50mm 部、参照部を健全鉄筋部とした場合、「W50-健

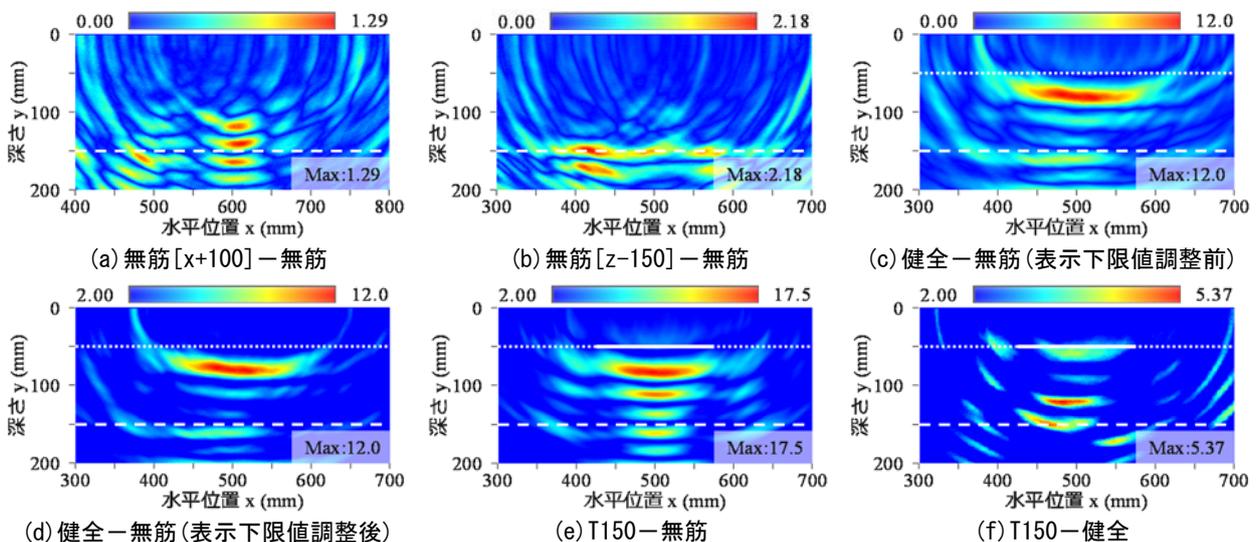


図-5 C50T 供試体での実験結果

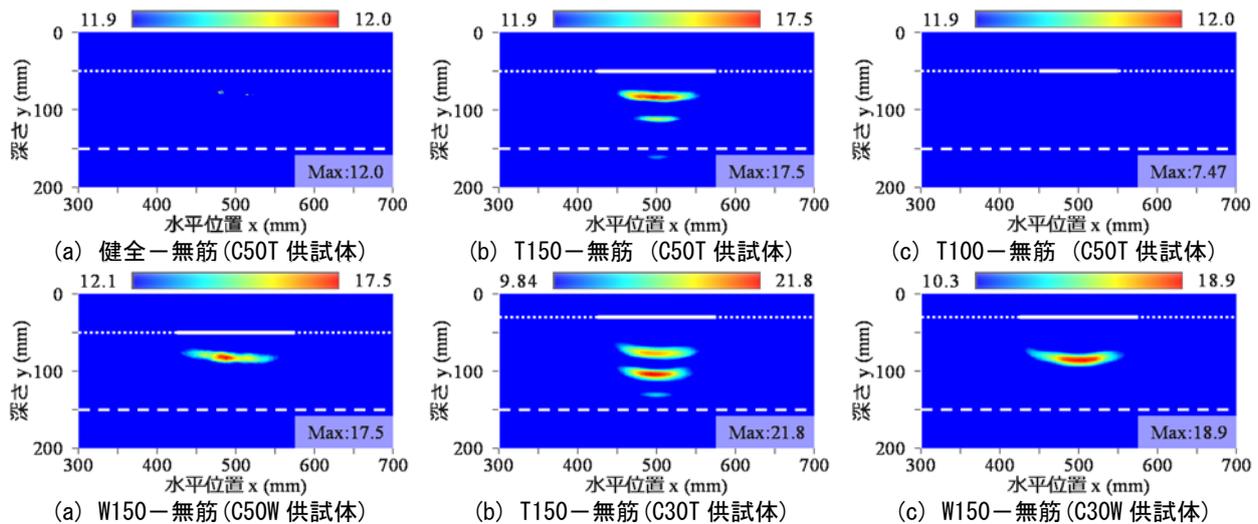


図-6 付着切れ検出手法の検討（表示下限値の変更）

4.2 測定誤差の検討

まず、測定誤差を把握するため、参照部を無筋部（図-1実線 a）とし、対象部をそこから x 軸方向に +100mm（図-1点線 b）および z 軸方向に -150mm（図-1破線 c）それぞれ移動した箇所（無筋[x+100]、無筋[z-150]と称する）とし、無筋部同士の比較で生じる差を検証した。図-5(a)に無筋[x+100]を対象部とした結果、図-5(b)に無筋[z-150]を対象部とした結果を示す。これらの累積差分値の最大値には、センサの貼付け精度や弾性波入力時の鋼球打撃の精度などの測定上の誤差が含まれるほか、測定箇所直下の空隙や骨材の影響が含まれると考えられる。本研究ではこれを測定誤差とみなし、表示する累積差分値の下限値（表示下限値と称する）を 2.00 に設定した。図-5(c)、(d)に健全鉄筋部（図-1点線 d）を対象部とした解析結果を示す。上記で設定した表示下限値により、解析結果がより鮮明となり、鉄筋位置付近で累積差分値が大きくなっていることがわかる。ここで、累積差分値の大きな箇所（図中赤の線状領域）は、鉄筋位置より深い位置を示している。これは、測定面から鉄筋位置までの距離に比べ、入力周波数が低く、深さ方向の解像度が低くなったことによる影響と考えられ、入力周波数を変えた検討が今後必要である。本検討では、鉄筋位置より 20mm 程度深い箇所に表示される像を鉄筋あるいは付着切れによるものとして考察する。

以上の結果から、鉄筋位置よりもやや深い位置に累積差分値の大きい領域が表示され、この位置を鉄筋由来とすれば、従来の衝撃弾性波法の検討では、表面が曲面状で反射源の面積が小さい鉄筋などからの反射波を捉えることは難しかったが、本手法によりこれを可視化することができたと考えられる。

4.3 健全鉄筋部と付着切れ区間の比較

健全鉄筋の開口合成法の解析結果（図-5(d)）と、鉄筋の付着切れ方法をテープとし、付着切れ区間を 150mm

とした箇所での解析結果（図-5(e)）に着目すると、鉄筋位置よりやや深い位置の水平位置 400~600mm 付近に線状の像が確認できる。これは、前述のとおり鉄筋および付着切れ区間に貼ったテープによる影響が可視化されたものと考えられる。累積差分値の最大値は、鉄筋よりもテープ 150mm 部の方が大きくなった。これは、ビニルテープの基材である塩化ビニルの音響インピーダンスが、鉄筋やコンクリートより小さく、弾性波が鉄筋よりもテープで強く反射したこと起因すると考えられ、付着切れ模擬方法がラップの場合も同様であった。

4.4 鉄筋付着切れ検出手法の検討

無筋部を参照部として付着切れ区間で測定した波形の差分二乗波形には、鉄筋の反射波も含まれると考えられるため、鉄筋付着切れを検出するには付着切れ区間による影響のみを取り出す必要がある。統一的な処理により鉄筋付着切れを検出手法する手法として、以下の二つの手法を検討した。

(1) 健全鉄筋部を参照部とした場合

無筋部を参照部としたときの付着切れ区間の累積差分値には、付着切れ区間からの反射と併せて鉄筋の反射も含まれると考えられる。このため健全鉄筋部を参照部として付着切れ区間の差分二乗波形を生成すれば、鉄筋からの反射波の成分が差し引かれ、付着切れ区間の影響のみを取り出せると考えた。図-5(f)は、テープ 150mm 部を対象に、健全鉄筋部を参照部とした場合の結果である。水平位置 400mm~600mm の範囲で線状の像が検出された。これにより、健全鉄筋部と付着切れ区間の差を取り出すことができたと考えられる。付着切れ模擬方法がラップの場合やかぶりか 30mm の場合においても、付着切れ区間 150mm の場合は同様の像が確認された。一方、付着切れ区間 100mm、50mm の場合は、付着切れ区間のある位置に像が確認されなかった。よって、健全鉄筋部を参照部として付着切れが疑われる対象部で測定するこ

とで、150mm以上の付着切れ区間が検出できる可能性が示唆された。

(2) 表示下限値を健全鉄筋部における差分値の最大値に近い値に設定した場合

ここでは、計測対象部のコンター図の表示下限値を、無筋部を参照部として健全鉄筋部で測定した累積差分値の最大値に設定することで、鉄筋からの反射波を含む成分を表示範囲外として排除し、付着切れ区間の情報を取り出す手法を検討した。図-6(a)～(c)に、C50T 供試体における無筋部を参照部とした場合の測定結果で、表示下限値を健全鉄筋部における累積差分値の最大値に近い値とした結果を示す。この処理により、健全鉄筋部での画像から鉄筋の像が消失し、テープ 150mm 部の結果では、テープの反射と考えられる像がより鮮明に表現された。累積差分値の最大値が小さいテープ 100mm 部での結果では、テープによる付着切れの影響を検出することができなかった。よって、本手法による付着切れ検出可能長さは150mm以上であると判断した。また、図-6(d)～(f)に C50T 供試体以外の鉄筋かぶりおよび付着切れ模擬方法が異なる供試体でも同様に計測した結果を示す。C50T 供試体の結果と同様に付着切れ区間が鮮明に表現され、付着切れを検出できることがわかった。これにより、無筋部を参照部として計測した結果において、健全鉄筋部での累積差分値の最大値を表示下限値に設定することで、付着切れ区間が検出できる可能性が示唆された。

5. まとめ

本研究では、ビニルテープおよびラップを鉄筋に巻き付けることで鉄筋の付着切れを模擬した版状供試体にて衝撃弾性波法と開口合成法を組合せ、付着切れ区間の検出手法について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 加速度計 8 個をコンクリート表面の鉄筋直上に 1 列に並べ、センサ間を基本とする 9 点にて弾性波を入力して得られた波形から無筋部での波形を差し引いた差分波形を、開口合成法の入力波形として供試体断面画像を出力することで鉄筋を可視化することができた。
- (2) ビニルテープによる付着切れ区間では健全鉄筋部での計測結果に比べ、累積差分値の最大値が大きくなった。これは、付着切れ区間に巻き付けたビニルテープやラップの音響インピーダンスが鉄筋やコンクリートより小さいため、ビニルテープから強い反射が得られたことに起因すると考えられる。
- (3) 付着切れ区間での累積差分値には鉄筋の反射波の影響も含まれるため、健全鉄筋部を参照部とした付着切れ検出手法を検討したところ、付着切れ区間が推

定可能となった。よって本手法では、健全鉄筋部を参照部として累積差分値を算出することで、150mm以上の付着切れ区間を検出できる可能性が示唆された。

- (4) 無筋部を参照部として付着切れ区間で計測した結果において、健全鉄筋部での累積差分値の最大値を表示下限値に設定することで、150mm以上の付着切れ区間を検出できる可能性が示唆された。

本研究では付着切れを人工的に模擬した検討を実施したが、今後は鉄筋を腐食させた場合の検討も追加し、引き抜き試験等の結果を含めて検討する必要があると考えられる。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 (B) 17H03289）の援助を受けて行った。また、本研究の遂行に際し、首都大学東京の上野敦准教授には多数の助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, Vol.1996, No.532/V-30, pp.159-166, 1996.2
- 2) 福富隼人, 渡辺健, 西山航平, 橋本親典: 超音波法および AE 法による鉄筋腐食の早期発見に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1795-1800, 2017.7
- 3) 榎園正義, 谷倉泉: 弾性波を用いた鉄筋とコンクリートの付着性状検査技術の開発, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集(Vol.5), 一般社団法人日本非破壊検査協会, pp.327~336, 2015.8
- 4) NDIS2426-2:2014: コンクリートの非破壊試験法—弾性波法—第 2 部: 衝撃弾性波法, 一般社団法人日本非破壊検査協会, 2014.9
- 5) 岩立次郎, 田中雅人, 館石和雄, 三木千壽: 回転探触子を用いた開口合成システムによる超音波探傷の分解能向上の試み, 土木学会論文集, Vol.1995, No.507/I-30, pp.121-127, 1995.1
- 6) 大野健太郎, 内田慎哉, 岩野聡史: 衝撃弾性波法による部材厚 8m の RC 供試体の反射源可視化への開口合成法の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1787-1792, 2019.7
- 7) 渡辺健, 橋本親典, 大津政康, 水口裕之: インパクトエコー法における鉄筋の影響に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1699-1704, 2005