

論文 弾性波速度構造に基づく鉄筋-コンクリート界面における付着切れ検出方法に関する検討

志田 爲御*1・大野 健太郎*2・宇治 公隆*3・上野 敦*4

要旨：鉄筋コンクリートにおける鉄筋-コンクリート界面の付着切れ位置推定を目的とし、付着切れを模擬した供試体にて衝撃弾性波計測を行った。付着切れの推定に際して、鉄筋直上にて弾性波計測を行い、実験で得られた弾性波速度の実測値と屈折法に基づく計算値を比較することで鉄筋の付着切れ位置の推定を試みた。その結果、長さ 50mm および 100mm の付着切れでは、弾性波速度を指標としたコンター図において、速度の低下領域と供試体の付着切れ領域が概ね一致した。また、付着切れ領域が長いほど、鉄筋直上で測定される弾性波速度の最小値は小さくなることを確認した。

キーワード：コンクリート, 付着, 衝撃弾性波法, 弾性波速度, 屈折法

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) において、鉄筋とコンクリートの付着は構造体としての成立条件の一つであり、耐荷・耐久性能の点において重要である。しかしながら、RC 構造物においては、種々の要因により両者の付着が失われる (以下、付着切れ) 場合がある。代表例として鉄筋腐食に起因する付着切れが挙げられる。

付着切れの調査・診断方法には目視調査やたき調査が主として行われるが、これらの方法で異常を検知できるのは劣化損傷程度が比較的大きい場合である。そのため、上記の調査で劣化損傷が認められた領域周辺に生じる可能性のある軽微かつ潜在的な付着切れについては検知できない場合があると考えられる。

このような潜在的な付着切れに対しては、微小な損傷を捉えるという点に加え調査コストの抑制という観点から非破壊試験の適用が望ましいと考えられる。一方、付着切れに関する既往の研究では、前らりによる電磁パルス法や金本ら²⁾による赤外線サーモグラフィを用いた検討が報告されているが検討事例は多いとは言えず、未だ確固たる手法は確立されているとは言い難い。

このような現状において、著者らの先行研究³⁾では、火害を模擬した RC 供試体において、鉄筋直上に設けた弾性波の入出力点から弾性波速度を測定し、付着切れ検出を試みた。測定で得られた弾性波速度の実測値と弾性波の伝搬経路をモデル化し屈折法に基づいて計算した弾性波速度の計算値とを比較することで、鉄筋とコンクリートの付着切れを検出できる可能性を示した。この検討においては、鉄筋直上に一定間隔で 8 個のセンサを配置し、付着切れの有無を評価していたため、測定が煩雑で

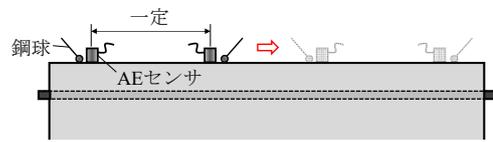


図-1 センサ走査のイメージ

あることと検出可能な最小付着切れ長さが不明であることが課題として残されていた。ここで、センサ数を減らし、弾性波の入出力点を鉄筋直上で走査しながら弾性波速度を測定することで、走査領域における付着切れ位置を推定できると考えられる。

本研究では、鉄筋とコンクリートの付着切れを設けた供試体において、図-1 に示すように鉄筋直上で弾性波の入出力点の距離を一定として走査し、先述の先行研究³⁾と同様に弾性波速度の実測値と計算値の比較を行うことで付着切れ位置の推定を試みた。なお、本検討では、先行研究³⁾のように火害を受けたコンクリートではなく、一般的な環境における RC での付着切れを対象とし、付着切れ長さを 3 水準設けた供試体にて付着切れ領域検出手法について基礎的に検討を行った。

2. 供試体

図-2 に供試体概要を示す。供試体は、長さ 950mm、幅 900mm、厚さ 100mm の版状供試体であり、図-2 に示すように供試体半分のかぶり部分 40mm を低品質なモルタル (W/C:90%) とした。なお、モルタル領域については、他の検討で使用したものであり今回の検討からは除外する。供試体中には異形棒鋼 D19 を埋設し、検討対象とするコンクリート領域のかぶりは 30mm とした。また、各鉄筋には図に示すように 50, 100, 150mm の付着

*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域助教 博士 (工学) (正会員)

*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域教授 博士 (工学) (正会員)

*4 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授 博士 (工学) (正会員)

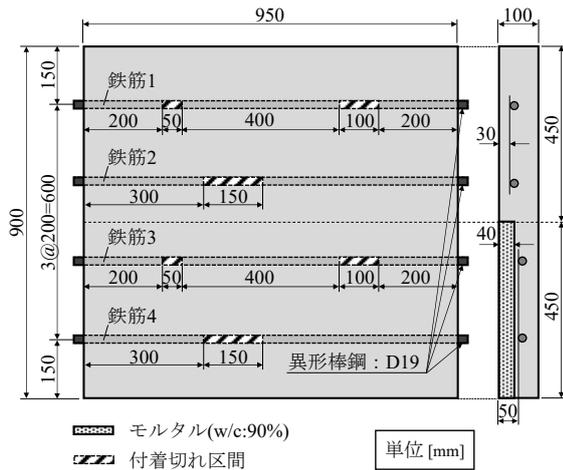


図-2 供試体概要



写真-1 付着切れ模擬方法（付着切れ長さ 150mm）

切れ領域を設けた。なお、付着切れ領域の模擬は写真-1に示すようにビニルラップを10回巻くことで行った。コンクリートの使用材料は表-1、計画配合は表-2に示すとおりである。供試体は材齢5日まで封緘養生した後脱型し、その後は気中保管とした。材齢31日におけるコンクリートの圧縮強度は 39.1N/mm^2 、静弾性係数は 25.2kN/mm^2 であった。

3. 走査法による鉄筋-コンクリート界面における付着切れ推定

3.1 評価手法の概要

本研究においては、以下に示す手順により鉄筋とコンクリートの付着切れの評価を試みた。

まず、一般に弾性波は健全なコンクリート中では 4000m/s 、鉄筋中では $5000\sim 5500\text{m/s}$ 程度で伝搬する。衝撃弾性波法による検討を実施した岩野ら⁴⁾によれば、波形の初動到達時間を基にした弾性波速度測定では、弾性波速度が鉄筋の影響を受ける場合があるとされている。これは、鉄筋とコンクリートにおける速度差のため、図-3(a)に示すように、鉄筋を経由した弾性波がコンクリートのみを伝搬した弾性波より先に検出点に到達することによるものである。この現象については超音波法を用いた尼崎ら⁵⁾によって実験的にも証明されている。また、これは著者らの先行研究³⁾においても確認され、鉄筋直上で測定した弾性波速度の実測値は、後述の屈折法による弾性波速度の計算値と概ね一致することが確認されている。屈折法による計算は鉄筋とコンクリートの完全付

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm^3)
細骨材	S	相模原市産砕砂 (表乾密度: 2.56g/cm^3)
粗骨材	G	相模原市産砕石 (表乾密度: 2.61g/cm^3)
混和剤	Ad	AE減水剤 (変形リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体を主成分とする)
	-	AE剤 (アルキルアリルスルホン酸化合物系および陰イオン界面活性剤を主成分とする)

表-2 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 s/a [%]	単体量 [kg/m^3]				
					W	C	S	G	Ad
20	8	55	4.5	46.4	172	313	812	960	0.939

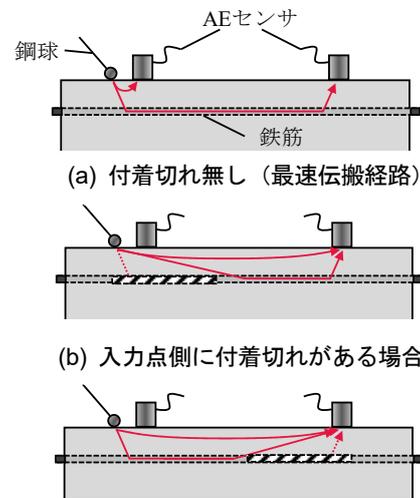


図-3 鉄筋を経由する場合の弾性波の伝搬経路

着が前提であるため、適切にモデル化を行うことで、実測値が計算値よりも低い値を示した場合に付着切れを検出できると考えられる。

次に、測定方法について述べる。ここで、次節で述べる屈折法では、臨界角以上の入射は全反射が起こるとして考慮されないが、異形棒鋼においては、節によって鉄筋とコンクリートは単純な水平多層構造とならず、界面での弾性波の入射が臨界角に限らず起こるものとして、以降は臨界角以上の弾性波の入射も考慮する。

図-3(b), (c)に示すように付着切れ区間上に入力点あるいは検出点がある場合は、最速伝搬経路を迂回して伝搬することになるため付着切れがない場合と比べると弾性波速度が低下する。そのため、弾性波速度を指標とすることで伝搬経路内に存在する付着切れを検出できると考えられる。しかしながら、付着切れが入力点側、非入力点側のいずれの位置にあっても速度は低下するため、2つのセンサのみで得られる弾性波速度を指標とするだけでは付着切れ位置の推定は困難であるといえる。そこ

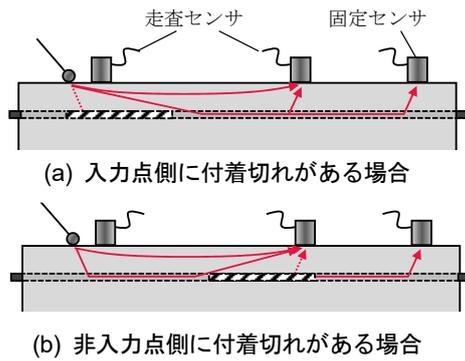


図-4 固定センサを配置した場合の弾性波の伝搬経路

表-4 固定センサを用いた付着切れ位置判定方法

	モデル計算値との比較結果と判定		
	1	2	3
非入力側センサ	○	×	×
固定センサ	○	○	×
判定	付着切れ無し	非入力点側付着切れ	入力点側/全線付着切れ

(○：計算値と同程度，×：計算値を下回る)

で本研究では、図-4に示すように、2つのセンサ以外に、設置位置周辺の付着の健全が既知である点にセンサ（以下、固定センサ）を配置することで付着切れ位置の推定を試みた。健全が既知である点に固定センサを配置する理由は、付着切れ区間上に配置した場合、次に述べる付着切れ位置の判定が行えなくなるためである。

固定センサにおける弾性波速度に基づく付着切れ位置の判定は、以下のように考えた。まず、非入力点側のセンサと固定センサがいずれも付着が確保される場合の計算値より速度が低くなった場合には入力点側に付着切れがあると考えられる（図-4(a)参照）。これに対し、非入力点側のセンサのみ計算値より速度が低くなった場合には非入力点側に付着切れがあると考えられる（図-4(b)参照）。また、いずれのセンサでも計算値と同程度となる場合は付着切れが無いものと判断できる。以上をまとめたものを表-4に示す。ここで、固定センサを付着切れ領域上に設置した場合を考える。固定センサが付着切れ領域上にある、すなわち固定センサでの測定値が常に計算値を下回る状態にある場合、表-4における2番の判定が不可能となる。そのため、付着切れ位置を確定することができなくなる。

次に、固定センサの設置位置の決定フローを図-5に示す。この測定の方針は、完全付着とした場合の屈折法に基づく弾性波速度の計算値（次節参照）が測定値として得られる点を探すことである。

まず、計算値を算出するためにコンクリートおよび鉄筋の速度を決定する。コンクリートの速度は、測定結果が鉄筋の影響を受けないように鉄筋軸に対して45°傾けた測線で測定する。このとき、入出点間距離Lは300mm以上とすることが望ましい。これは、時間分解能

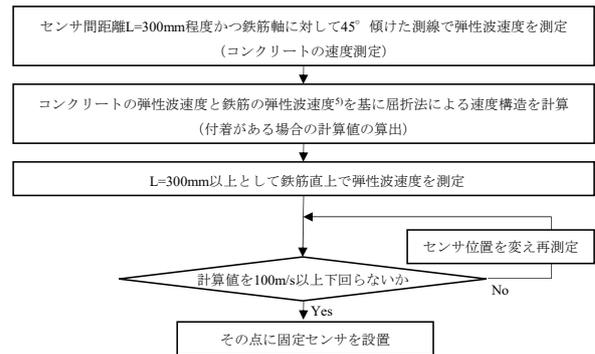


図-5 固定センサの設置位置決定法

にもよるが、距離Lが短い場合には、著者らの先行研究³⁾でも指摘しているように測定値の変動が大きくなるためである。著者らの先行研究³⁾の結果より、波形記録装置が少なくとも1μsの時間分解能を有することが望ましい。次に、鉄筋の速度は、尼崎ら⁵⁾の検討を参考に鉄筋径によって5000~5500m/s程度で設定する。以上の方法でコンクリートと鉄筋の速度を決定した後、屈折法に基づく弾性波速度の計算値を算出する。その後、距離Lが300mm以上となるようにし、鉄筋直上で弾性波速度を測定する。距離Lの設定については、かぶりや対象とするコンクリートの測定値の変動を基に、計算上付着がある場合とない場合で有意な差が得られる距離とすることが望ましい。鉄筋直上で弾性波速度を測定した後、設定した距離Lにおける弾性波速度の計算値と実測値を比較する。このとき、実測値と計算値の差が測定値の変動の範囲内であればその点にセンサを設置し、下回る場合にはセンサ位置を変え条件を満たすまで測定を繰り返す。以上の工程より、付着の健全位置に固定センサを設置する。

以上の考えに基づき、以降の測定および評価を行った。

3.2 屈折法に基づく弾性波速度の計算方法

本検討においては、弾性波を利用した物理探手法の一つである屈折法の原理⁶⁾に基づいて弾性波の伝搬経路をモデル化し、モデルにおける弾性波速度の計算値と測定から得られる実測値を比較することで付着切れの評価を行う。ここで屈折法とは、弾性波が弾性波速度の異なる層間を伝搬する場合に、層の境界部で屈折して伝搬することを考慮した探手法である。また、屈折法は、深部の層ほど弾性波速度が高くなるという仮定の下行われる。本検討では、図-6に示すようにコンクリートと鉄筋が水平に存在し、弾性波が両者の境界面にて屈折して伝搬すると仮定して検討を行った。このとき、コンクリート表面で入力された弾性波がコンクリートと鉄筋の界面を伝搬し、表面で検出されるまでの伝搬時間Tは、式(1)で表される。

$$T = \frac{2Z \sec \theta_{CR}}{V_C} + \frac{(x - 2Z \tan \theta_{CR})}{V_R} \quad (1)$$

ここで、Z：かぶり、 θ_{CR} ：コンクリートから鉄筋へ入射

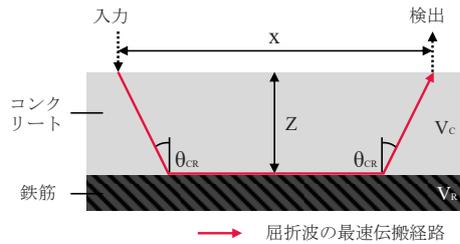


図-6 屈折法に基づくモデル伝搬経路

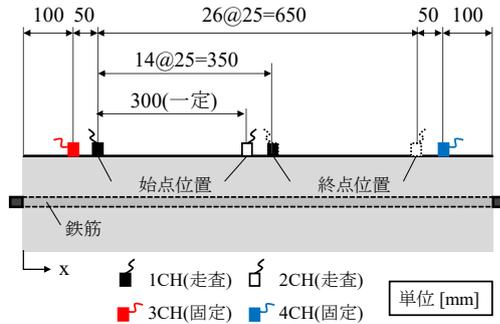


図-7 センサ配置

する際の臨界角, V_C : コンクリートにおける弾性波速度, V_R : 鉄筋における弾性波速度, x : 入力点と検出点の距離である。また, スネルの法則より θ_{CR} は式(2)で表される。

$$\theta_{CR} = \sin^{-1} \left(\frac{V_C}{V_R} \right) \quad (2)$$

モデルにおける弾性波速度の計算は, 式(1)より算出した伝搬時間とセンサ間距離からセンサ設置面で測定される見かけの弾性波速度を計算した。

4. 弾性波速度構造に基づく付着切れ位置推定

4.1 弾性波の計測方法

弾性波の検出には AE センサ (60kHz 共振型), 励起には鋼球 (直径 4.7mm) を用いた。図-7 にセンサ配置を示す。まず, 図-7 における左端部を走査の始点側とし, 走査するセンサのうち始点側のセンサを 1CH, 終点側を 2CH とした。また, 始点側の固定センサを 3CH, 終点側を 4CH とした。ここで, 以降のセンサの座標は, 図-7 に示す図の左端部からの距離で示す。例えば, 図-7 における 3CH の座標は 100mm である。

固定センサは, 3CH を 100mm, 4CH を 850mm の位置に設置した。走査センサとなる 1CH と 2CH は, 両者のセンサ間距離を 300mm で一定とした。走査に際しては, 1CH が 150mm, 2CH が 450mm の位置となる点を起点として, 25mm 間隔で 1CH 座標 500mm まで走査した。

弾性波の励起は, 各走査センサ位置に対しセンサ間の外側方向 30mm の位置にて, 鋼球をコンクリートに打撃することで行った。また, 打撃は各測点において 1CH 側および 2CH 側の両方で行った。なお, 打撃回数は 7 回とした。弾性波の記録は, プリアンプによる増幅率を 60dB, サンプル時間間隔を 0.1 μ s として行った。

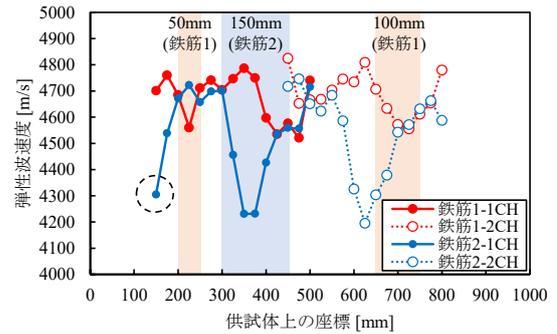


図-8 弾性波の入力位置と弾性波速度

また, 走査法による測定に加え, モデル計算に用いるコンクリート部の弾性波速度を決定するため, センサ間距離を 300mm とし, 鉄筋と直交する 5 測線で測定を行った。なお, 弾性波速度の実測値は, 入力点直近の検出点とその他の検出点の検出波形に対し, AIC (赤池情報量規準) を適用し, 最小値を示す時刻を初動到達時間として, それらの時間差とセンサ間距離より算出した。

4.2 鉄筋直上における弾性波速度分布

図-8 に, 弾性波の入力位置 (入力側のセンサ座標) と弾性波速度の関係を示す。図中の凡例は, 鉄筋-弾性波の入力位置の組み合わせを示し, 例えば鉄筋 1-1CH は, 図-2 の鉄筋 1 において, 1CH 側で弾性波を入力した場合の結果を示す。ここでは, 例として 1CH 側を入力点とした場合の結果に着目する。まず, 1CH 座標において, 1CH と 2CH のいずれかのセンサ位置が付着切れ領域上に重なるのは, 鉄筋 1-1CH シリーズではセンサ位置 200~250mm, 鉄筋 2-1CH シリーズではセンサ位置 300~450mm である。1CH がこれらの座標にある場合の弾性波速度に着目すると, 速度の低下がみられ, 付着切れ長さが長いほど速度が低下していることがわかる。ここで, 鉄筋 2-1CH シリーズにおけるセンサ位置 150mm における速度の低下 (図-8 の破線の円で囲まれた領域) は, 2CH がセンサ位置 450mm で付着切れ区間上に重なっているためと考えられる。このように, 鉄筋直上で測定した弾性波速度を指標とすることで, 付着切れを検出することは可能と考えられる。一方, 2CH の結果に着目し, 1CH の結果と比較すると, 1CH の座標と対となる座標 (例えば 1CH : 350mm - 2CH : 650mm) で 1CH と同様に速度が低下していることがわかる。この場合, 3.1 節で述べたように, 検出された速度の低下が 1CH と 2CH のどちら側に付着切れが生じた結果であるかの判断が困難である。すなわち, 鉄筋直上で測定した弾性波速度を測定点の座標で整理したのみでは付着切れ位置の特定は困難である。そこで本研究では, 次節に示す手法で付着切れ位置の推定を試みた。なお, 鉄筋 1 では, 長さ 50mm および 100mm の 2 つの付着切れ領域が存在しているが, 本検討のセンサ間距離 300mm では両者が同時に伝搬経

路内に存在することはないため、付着切れ領域間の干渉の影響などは考慮しないものとする。

4.3 弾性波速度構造に基づく付着切れ位置推定

本検討では、3.1節で述べた固定センサを用い、以下の手順により速度の低下域を1CH, 2CH座標のいずれかと結び付け、弾性波速度を指標としてコンター表示することで付着切れ領域の推定を試みた。

まず、コンター指標の最大・最小値の設定方法について述べる。速度の最大値は、コンクリートと鉄筋の2層からなる構造を仮定しモデル化を行い、3.2節で述べた方法より得られる最速伝搬経路での弾性波速度とした。なお、コンクリートの速度は直交方向での測定結果から4150m/s、鉄筋は尼崎⁵⁾の検討における異形棒鋼D19の測定値を基に5500m/sとした。計算の結果、最大値は4680m/sとした。次に、下限値の設定は、以下のように行った。まず、弾性波が臨界角以上でも鉄筋に入射すると仮定し、図-9(a)に示すような付着切れ領域上での伝搬経路を考える。ここでは入力点側に付着切れ領域がある場合について示すが、対称性の点から非入力側についても同様のことがいえる。付着切れ領域付近の鉄筋への弾性波の入射は、入力点から付着切れ領域に向かって前方を伝搬する場合（以下、前方迂回）と、後方を伝搬する場合（後方迂回）の2つが考えられる。計算に際しては、付着切れ長さ l を決定する必要があるが、最小長さの50mm付着切れまでを検出することを目的とし、 $l=50\text{mm}$ として計算を行った。次に仮定した経路において、入力点から付着切れ端部までの距離 x を変数として弾性波速度を求める。距離 x における前方迂回および後方迂回での弾性波速度を図-9(b)に示す。図中には参考として最速伝搬経路での速度も併せて示している。初動到達時間を基に弾性波速度を決定する場合、測定される速度は全ての経路のうち最も速度の高いものになる。そのため、図-9に示す場合において、最速伝搬経路と最も差が生じる場合は前方迂回と後方迂回のグラフの交点となり、交点 $x=14\text{mm}$ での速度は4635m/sとなる。一方、各測点における測定値の変動は40m/s程度であり、これを考慮すると、最大値との差(4680-4635=45m/s)が有意でないと考えられる。そこで本検討では、基礎検討とし

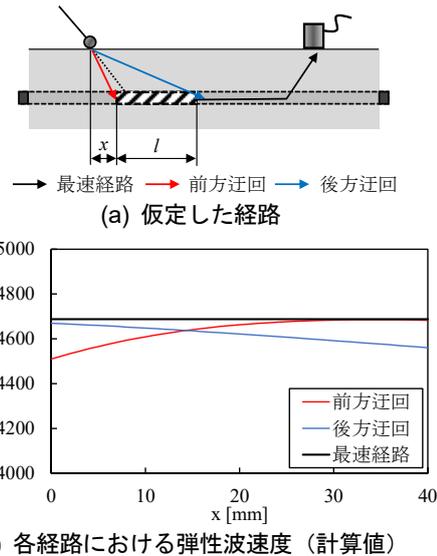


図-9 コンター図の最低速度算出時に仮定した経路

て、50mm付着切れ領域上で最小となる速度(4561m/s)をコンター図における最小値とした。

次に、コンター図の作成フローを図-10に示す。まず、各測点において1CHおよび2CH側打撃時に測定された弾性波速度(手順1)のうち、値の小さい方をその測点での弾性波速度 V とする(手順2)。これは、付着切れ端部に測点がある場合に、ある一方のセンサ側で弾性波を入力した際には速度の低下がみられるが、もう一方のセンサで弾性波を入力した場合には速度の低下がみられない場合があるためである(図-10手順2参照)。すなわち、付着切れ領域端部の検出を行うためである。特に、付着切れ領域側のセンサ近傍で弾性波の入力を行った場合には速度の低下がみられるが、もう一方のセンサ近傍で入力を行った場合には速度の低下がみられない。

次に、各測点での弾性波速度 V をコンター図の最小値(ここでは4561m/s)と比較する(手順3)。速度 V が最小値を超える場合は付着切れがないものとし、その測点での1CHおよび2CHの座標での弾性波速度とする(手順4-1)。一方、速度 V が最小値以下であった場合は、1CHおよび2CH打撃時の固定センサでの弾性波速度の実測値と最速伝搬経路での計算値とを比較し(手順4-2)、計算値よりも速度が低い方のセンサの座標の弾性波速度とする。もう一方のセンサの座標については、コンター図

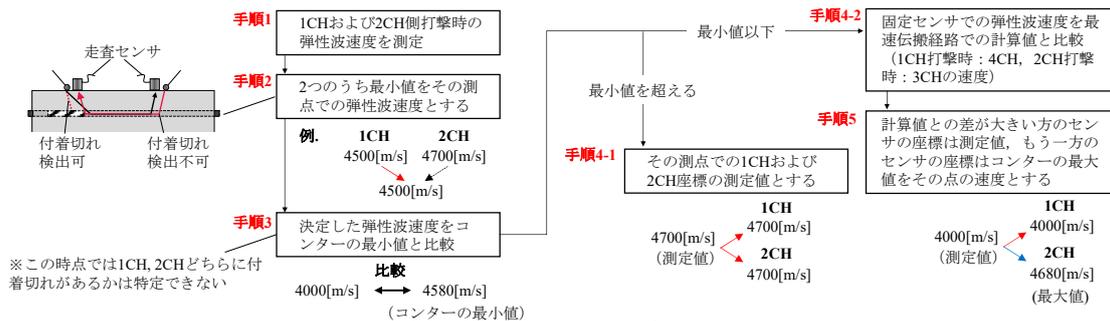


図-10 コンター図の作成フロー

における最大値をその座標の弾性波速度とした(手順5)。

以上の手順により得られたコンター図を図-11に示す。コンター指標は、図中に示す最大値から最小値までの色彩に加え、最小値を下回る点を黒色で表示した。まず、鉄筋1に着目すると、長さ50mmおよび100mmのいずれの付着切れ領域においても速度の低下域と付着切れ領域が概ね一致した。一方、付着切れ領域外(座標400mm周辺)にも速度の低下域が確認された。この理由を以下に述べる。まず、この座標400mmを測点とした場合、1CH座標は400mm、2CH座標は700mmであり、2CHが長さ100mmの付着切れ領域上に重なる。ここで、この低下域での最低速度は4572m/sであり、最小値と概ね等しい。したがって、測定値には2CH側に存在する付着切れの影響が含まれていると考えられる。しかしながら、図-10の手順4-1に従うと、最小値を下回らないためこの速度は付着健全部の1CHの座標(400mm)にも割り振られる。そのため、1CH座標である座標400mm周辺にも低下域が現れたと考えられる。この問題については、測定経路長を長くし、1測点の評価に用いるデータ数を増やすことで改善できる可能性が考えられる。例えば、座標400mmでは、本検討では1CHが400mm、2CHが700mmの位置にある場合の測定値のみで評価を行った。そのため、付着健全部の1CH座標にも付着切れの影響を含む測定値を割り振る結果となった。ここで、1CHが100mm、2CHが400mmの配置のように付着健全部で測定を行った場合を考える。この場合には、1CH、2CHのいずれも健全時の速度が得られることから、座標400mmは健全という結果が得られるといえる。このように、他のセンサ配置から健全という結果を得ることで、前述の問題を改善できると考えられる。

次に、鉄筋2に着目すると、鉄筋1と同様に速度の低下域が付着切れ領域上で確認できるが、付着切れ領域外においても確認される。この原因については、鉄筋2で測定された速度が鉄筋1と比べて低かったことが挙げられる。鉄筋1と鉄筋2における付着健全領域の速度の平均値を比較すると、鉄筋2が120m/s程度小さい。これにより、平均的に最小値に近い値となっているために、コンター図において速度の低下領域が多数みられると考えられる。なお、この差が生じた理由については現在検討中である。また、最小値を下回る黒色の領域に着目し、付着切れ領域上および領域外を比較すると、付着切れ領域上(座標300~400mm)では4200~4300m/sであるのに対し、例えば右端の黒色の領域(座標700~750mm)では4500m/s程度であり、設定した最小値は下回るが、鉄筋2の付着健全領域に近い値であった。鉄筋2については、対象測線に応じた閾値の設定により改善されると考えられるが、これは今後の課題である。

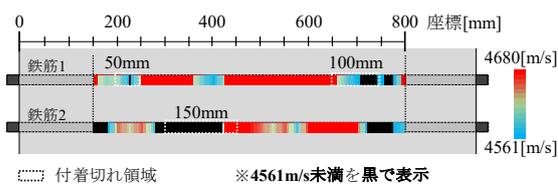


図-11 付着切れ位置推定結果

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉄筋直上で伝搬時間を基にした弾性波速度を測定した。その結果、付着切れ長さが長いほど付着切れ領域上において弾性波速度の低下が大きくなった。
- (2) 鉄筋直上の測線においてセンサ間距離を300mmで一定とした2つの走査センサ、および付着の健全が既知である点に設置した2つの固定センサを用いて弾性波速度を測定し、鉄筋の付着切れ位置の推定を試みた。その結果、長さ50mm、100mmおよび150mmのいずれの付着切れ領域でも速度の低下がみられ、本手法により検出できる可能性が示唆された。
- (3) 一方、いずれの場合も付着切れ領域外において速度の低下域が確認された。今後、測定対象鉄筋ごとにコンター指標を設けるなど精度向上が必要である。

参考文献

- 1) 前裕史ら：弾性波に基づく鉄筋腐食に起因するコンクリート表層部の変状の非破壊評価手法に関する基礎研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.8，pp.9-16，2008.10
- 2) 金本恒之介ら：剥離・空洞を誘発した鉄筋腐食の定量的評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1729-1734，2015.6
- 3) 志田爲御ら：弾性波伝搬速度に基づく火害を受けたコンクリートの鉄筋-コンクリート界面の付着切れ推定方法に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1630-1635，2020.6
- 4) 岩野聡史ら：衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.547-552，2001.6
- 5) 尼崎省二ら：コンクリートの弾性波速度に及ぼす鉄筋の影響および表面法による弾性波速度の測定，コンクリート工学論文集，Vol.18，No.2，pp.95-102，2007.5
- 6) 佐々宏一ら：建設・防災技術者のための物理探査，森北出版，pp.18-25，2007.6
- 7) 前田直樹：地震波自動処理システムにおける読み取りおよび評価，地震，第2輯，第38巻，pp.365-379，1985.7