

論文 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

志田 爲御*1・大野 健太郎*2・内田 慎哉*3・春畑 仁一*4

要旨：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を目的とし、火害を模擬した供試体に対し、衝撃弾性波法を適用した。付着切れの推定に際し、鉄筋直上・鉄筋直交方向の加熱面にて弾性波計測を行い、実験で得られた弾性波速度と屈折法に基づくモデルによる計算結果を比較することで鉄筋の付着切れの推定を試みた。その結果、加熱前供試体にてモデルによる計算結果は実測値と概ね一致し、本研究で設定したモデルの妥当性が確認された。さらに、加熱後供試体では、鉄筋直上で得られた弾性波速度とモデルによる計算結果を比較することで、火害による付着切れを推定できる可能性が示唆された。

キーワード：コンクリート、火害、鉄筋-コンクリート界面の付着、衝撃弾性波法、弾性波速度

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) の劣化現象の一つに、火災による劣化(火害)がある。RC 部材が高温で加熱されると、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数および鉄筋-コンクリート間の付着強度などの物理的性質の低下や水酸化カルシウムの熱分解に伴う中性化の進行などのようなコンクリートの劣化が生じる¹⁾。ここで、例えば受熱温度が 500℃の場合、圧縮強度は健全時の 5 割、静弾性係数は健全時の 2 割程度まで低下するといわれている¹⁾。

過去に火害を受けた RC 構造物の例として、トンネルや高速道路などの道路構造物や RC 造大型倉庫に加え、高層ビルのような SRC 造建築物が挙げられる。これらの RC 構造物は、被災程度にもよるが、火災後も再使用が望まれる場合があり、その際には早期の復旧が必要とされる。そのため、再使用の可否の判断や補修・補強方法の選定の基準となる調査・診断を早急に行うことが重要である。日本建築学会「建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説」²⁾によれば、火害調査は、予備調査(新聞や消防などからの情報収集)、一次調査(目視試験)、二次調査(材料分析など)の順に進め、火害診断においては調査結果に基づいて火害等級および被災度の判定を行うとされている。現状では、目視試験に加え必要に応じて材料分析や力学試験を行い、受熱温度の推定や被害範囲の決定が行われている。しかしながら、文献¹⁾に示されているように、同じ受熱温度でも残存強度には変動があり、推定された受熱温度を基にした診断には注意を要する。また、目視試験は定量的とはいえず、材料分析や力学試験は信頼性が高い結果が得られる反面、躯体コンクリートの一部破壊を伴い、局所的な情報に限られ、

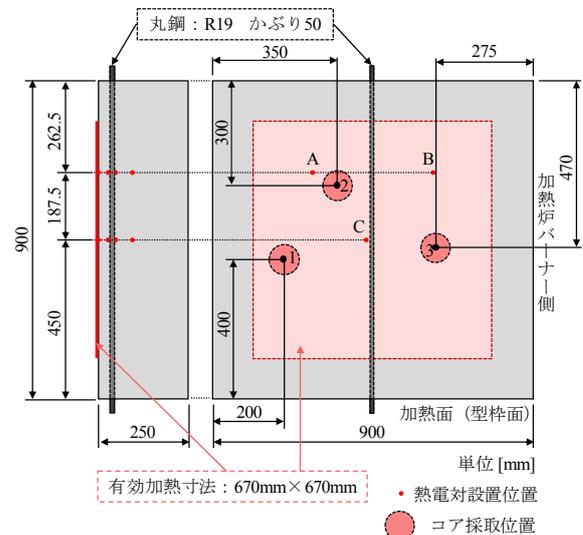


図-1 供試体概要

部材あるいは構造体全体の評価が難しいなどの課題があり、非破壊による定量的かつ迅速な火害劣化評価を行える手法の確立が望まれる。このような背景から、非破壊試験による劣化評価手法について検討が実施されている²⁾⁴⁾。それらによれば、火害を受けたコンクリートにおける面的および深さ方向の劣化領域推定手法については多くの検討が進められている。一方、非破壊試験による鉄筋-コンクリート界面の付着状態の推定手法においては、今後の更なる検討が期待されている。

本研究では、コンクリートの表面温度を 500℃とし、4.5 時間加熱したコンクリート供試体の鉄筋直上および鉄筋直交方向の測線において、コンクリート表面にて衝撃弾性波試験を行い、火害を受けた RC 部材の鉄筋-コンクリート界面の付着切れ推定方法について検討した。

*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 (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(工学) (正会員)

*3 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*4 (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター (正会員)

表-3 コンクリートコアの各試験結果

採取位置	圧縮強度 [N/mm ²]	平均 [N/mm ²]	静弾性係数 [kN/mm ²]	平均 [kN/mm ²]
1	23.4	22.7	17.7	17.1
2	22.9		16.9	
3	21.9		16.8	



図-4 各種試験履歴

試験翌日と 36 日後で目視ではひび割れ性状に大きな変化は認められなかった。

表-3 にコンクリートコアの圧縮強度および静弾性係数の試験結果を示す。材齢 28 日時点と比較した場合の加熱後の測定値の低下度合いは、圧縮強度に比べて静弾性係数の方が大きく、本結果は既往の研究結果¹⁾と整合した。以上の各種試験履歴は図-4 に示すとおりである。

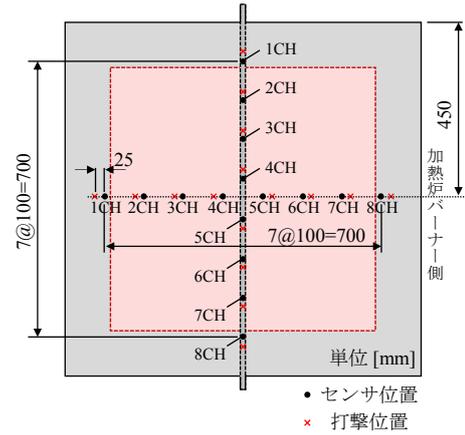
4. 衝撃弾性波法による鉄筋-コンクリート界面の付着切れ推定方法

4.1 弾性波の計測方法

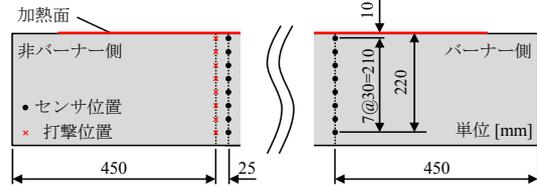
弾性波の計測は、加熱前（材齢 722 日）および加熱後 36 日に行った。弾性波の検出には AE センサ（60kHz 共振型）を用い、図-5(a)に示すように鉄筋直上と鉄筋直交方向のコンクリート表面にて、供試体端部から 100mm の位置を起点として、1 測線につき 100mm 間隔で 8 個の AE センサを配置した。弾性波の励起は、各センサ位置に対し供試体中心から外側方向 25mm の位置にて、直径 4.7mm の鋼球をコンクリートに打撃することで行った。弾性波の記録は、プリアンプによる増幅率を 60dB、サンプリング時間間隔を加熱前は 1μs、加熱後 36 日は測定精度の向上を目的として 0.1μs として行った。さらに、供試体深さ方向の弾性波伝搬速度を測定するため、バーナー側および非バーナー側の供試体側面に AE センサを設置し、透過法による弾性波の計測を行った。図-5(b)に示すように、AE センサは加熱面から 10mm の位置を起点として、30mm 間隔で 220mm の位置まで、1 側面につき計 8 個設置し、非バーナー側にてセンサから水平方向に 25mm 離れた位置にて鋼球で打撃した。なお、使用したセンサおよび鋼球は加熱面計測と同様であり、サンプリング時間間隔は 1μs とした。

4.2 屈折法に基づく弾性波伝搬時間のモデル化

本検討においては、弾性波探査屈折法の原理⁷⁾に基づき RC 部材中を伝搬する弾性波の伝搬経路をモデル化し、実測値およびモデルによる速度の比較から火害によって劣化した鉄筋-コンクリート界面の付着切れ推定を行う。ここで弾性波探査屈折法（以下、屈折法と称する）とは、地下深部ほど弾性波伝搬速度が高くなるという仮定に立



(a) 加熱面（表面法）



(b) 供試体側面（透過法）

図-5 弾性波計測におけるセンサ配置

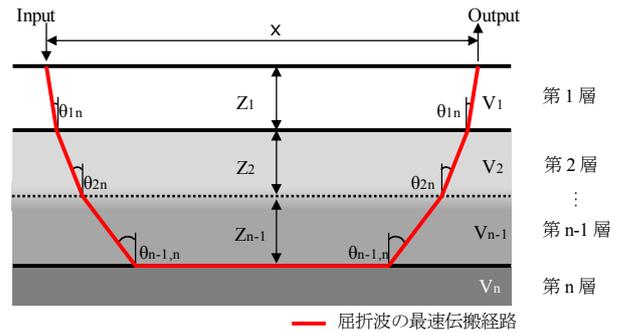


図-6 水平多層構造と屈折波

脚して地下探査を行う手法である。本検討では、図-6 に示すように各層が水平に存在し、深部の層がより弾性波速度が高くなるような構造（以下、水平多層構造と称する）の弾性波探査の原理に基づきモデル化を行った。

一般に、 n 層からなる水平多層構造において、第 n 層を通過して表面へ戻ってくる屈折波の伝搬時間 T_n は、式(1)で表される。

$$T_n = 2 \sum_{m=1}^{n-1} \left(\frac{Z_m \cos \theta_{mn}}{V_m} \right) + \frac{x}{V_n} \quad (1)$$

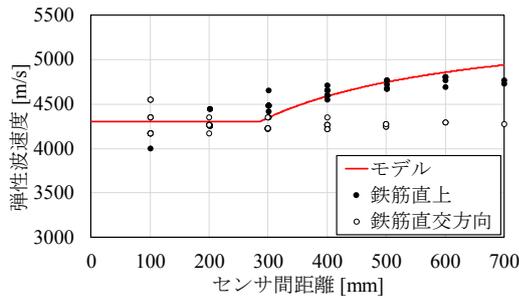
ここで、 Z_m : 第 m 層の厚さ、 θ_{mn} : 第 m 層から第 $m+1$ 層へ入射する際の臨界角、 V_m : 第 m 層における弾性波速度、 x : 入力点と検出点の距離、 V_n : 第 n 層における弾性波速度である ($1 \leq m \leq n-1$)。

また、スネルの法則より式(2)が成り立つ。

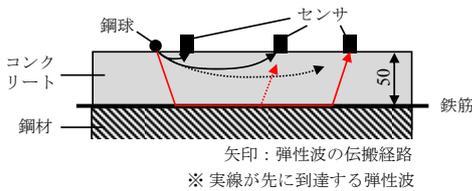
$$\frac{\sin \theta_{1n}}{V_1} = \frac{\sin \theta_{2n}}{V_2} = \frac{\sin \theta_{n-1,n}}{V_{n-1}} = \frac{1}{V_n} \quad (2)$$

また、式(2)より θ_{mn} は式(3)で表される。

$$\theta_{mn} = \sin^{-1} \left(\frac{V_m}{V_n} \right) \quad (3)$$



(a) 弾性波速度



(b) 伝搬経路の概略図

図-7 各センサ間距離における弾性波速度 (加熱前)

モデルによる弾性波速度の計算では、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。なお、式(1)による伝搬時間の計算は後述する各層について行い、それぞれの層を経由する場合の伝搬時間のうち、最小となる伝搬時間とセンサ間距離から弾性波速度を算出した。ここで層の設定に際し、加熱前はコンクリートと鉄筋の合計2層とした。また、加熱後は、鉄筋直上では劣化コンクリート5層と鉄筋の合計6層、鉄筋直交方向では劣化コンクリート5層と健全コンクリート1層の合計6層とした。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における初動到達時間差とセンサ間距離より算出した。

4.3 センサ間距離と弾性波速度の関係

(1) 健全時の弾性波速度

図-7に、加熱前計測において加熱予定面にて得られた弾性波速度とセンサ間距離の関係を示す。鉄筋直上および鉄筋直交方向における弾性波速度の実測値は、1~8CHの各入力点にて打撃した際に、入力点のセンサを除く各センサで測定された値である。ここで、弾性波速度の測定に用いる検出点は、入力点が1~4CHの場合は入力点のCH番号より数が大きいCH(例えば、1CH入力の場合は2~8CHが検出点)、入力点が5~8CHの場合は入力点のCH番号より数が小さいCHのセンサとした。なお、打撃回数は1回とした。また、図中に示すモデルによる弾性波速度の計算は、表面から深さ50mmの位置までがコンクリート、深さ50mm以深は鉄筋(鋼材)である2層構造として行った(図-7(b)参照)。コンクリートの弾性波速度は、鉄筋直交方向において測定値の変動が小さくなるセンサ間距離300mm以上の結果から4300m/s、鉄筋の弾性波速度は尼崎ら⁸⁾の検討における異形棒鋼D19の測定値をもとに5500m/sとした。

図-7(a)より、モデル上の変曲点を超えるセンサ間距離300mm以上の実測値に着目すると、鉄筋直交方向においては弾性波速度が4300m/s程度であるのに対し、鉄筋直上においてセンサ間距離の増加に伴い弾性波速度が増加していることがわかる。尼崎ら⁸⁾は、一般に鉄筋の弾性波速度がコンクリートの弾性波速度に比べて大きいことから、コンクリートの弾性波速度を測定する場合に測定位置近傍に測定方向と平行な鉄筋が存在すると、弾性波速度が鉄筋の影響を受ける場合があることを示している。これは、図-7(b)に示すように、ある一定のセンサ間距離を超えて測定した場合に、鉄筋を経由して伝搬した弾性波が表面付近を伝搬した弾性波よりも先に検出点に到達し、見かけ上弾性波速度が増加するというもので、図-7(a)に示す結果についても同様の理由で弾性波速度が増加したと考えられる。鉄筋直上における測定値とモデルによる計算結果を比較すると、概ね一致する結果となった。また、鉄筋直上および直交方向のいずれの場合においても、センサ間距離200mm以下の場合に他と比べ測定値の変動が大きくなっているが、これは測定機器の時間分解能が十分でないためと考えられる。

ここで、本検討でのモデルは、鉄筋-コンクリート界面において弾性波が伝搬可能である、すなわち両者の付着が確保されている状態であることを前提としており、モデルを適切に設定すれば測定値とモデルによる計算結果の比較により付着状態の把握が可能と考えられる。加熱前測定の結果、鉄筋の影響を受けない測線と鉄筋直上の測線で取得した弾性波速度および計算モデルを用いることで、鉄筋の付着切れを検出できる可能性が示唆され、加熱したコンクリートに対しても同様の検討を行った。

(2) 加熱後36日の弾性波速度

図-8に、加熱後36日の加熱面の鉄筋直上および鉄筋直交方向にて得られた弾性波速度とセンサ間距離の関係を示す。入力・検出点は4.3(1)に準じ、打撃回数は3回として3回の打撃の平均値を測定値とした。凡例は入力点を示し、例えばInput2は2CH近傍を入力点とした場合の弾性波速度とセンサ間距離の関係を示す。なお、ここでは入力点が加熱領域外である1CHおよび8CHを除く入力点のうち、最遠点のセンサ間距離が最大となるInput2およびInput7を取り扱う。

本研究のモデルにおける弾性波速度の解析フローを図-9に示す。加熱後のコンクリートにおいては、図-10に示すように深さ方向で速度が異なり、モデルの設定に際してはこれを考慮する必要がある。本検討においては、基礎検討として検討対象の層の厚さ(鉄筋直交方向:推定劣化深さ、鉄筋直上:かぶり50mm)を5分割し各層ごとに弾性波速度を設定することで加熱後のモデル化を行った。各層の弾性波速度の設定は、既往の研究²⁾に基

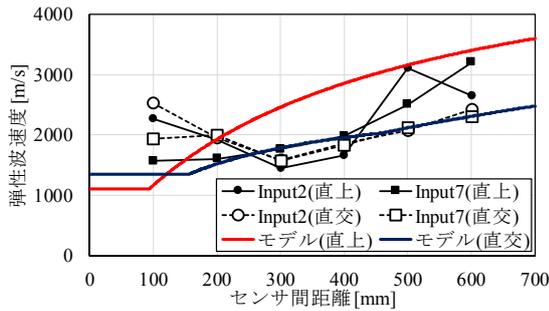


図-8 各センサ間距離における弾性波速度
(加熱後 36 日)

づき、深さ方向において弾性波速度が深さを変数として直線的に増加すると仮定し、計算により求めた深さ方向の速度分布を基に行った。このときの深さ方向の速度分布は、式(4)のように表され、加熱面での伝搬距離と伝搬時間の関係は式(5)のようになる。

$$v(z) = v_0 + az \quad (4)$$

$$T = \frac{2}{a} \sinh^{-1} \frac{ax}{2v_0} \quad (5)$$

ここで、 z : 加熱面からの深さ、 $v(z)$: 深さ z における弾性波速度、 v_0 : 加熱面における弾性波速度、 a : 定数、 T : 加熱面での弾性波の伝搬時間、 x : 加熱面での伝搬距離である。

本検討では、実測値と式(5)より得られる伝搬時間の誤差が最小となるように、定数 a および加熱面における弾性波速度 v_0 を最小二乗法より算出した。なお、計算に用いた実測値は Input2 および Input7 のセンサ間距離 300mm 以上の伝搬時間である。

図-8 に示すモデルによる鉄筋直交方向の弾性波速度の計算は次の手順で行った。まず、式(4)および式(5)から求めた速度分布より、弾性波速度が加熱前の透過法測定値と同程度 (4500m/s) となる深さ (劣化深さとす) を求める。次に劣化深さを 5 分割し、式(4)と各層の中心深さから各層の弾性波速度を決定し、これをモデルに適用することで弾性波速度を算出した。計算の結果、劣化深さは 185mm となり、各層の厚さは 37mm、弾性波速度は加熱面に近い層から 1357, 2051, 2744, 3438, 4132m/s とし、健全層 (185mm 以深) については 4479m/s とした。

鉄筋直交方向で測定された弾性波速度 (実測値) は、センサ間距離 100mm では測定値の変動が大きくなり、200mm から 300mm にかけて速度が減少し、300mm 以降は速度がセンサ間距離の増加に伴って漸増する結果となった。センサ間距離 100mm の結果については測定機器の時間分解能が十分でないことによると考えられる。また、波形の初動到達時刻より弾性波速度を算出しており、センサ間距離が短い場合には弾性波速度が低い浅い層を伝搬した弾性波の速度が測定されると考えられることから、センサ間距離 200mm では 300mm より弾性波速度は

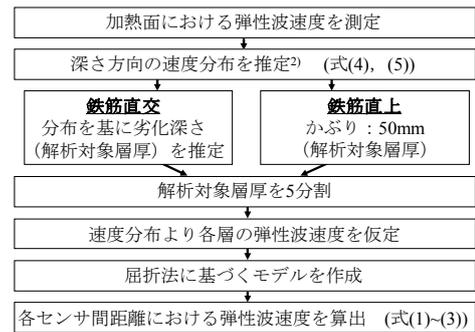


図-9 屈折法に基づく弾性波速度解析フロー

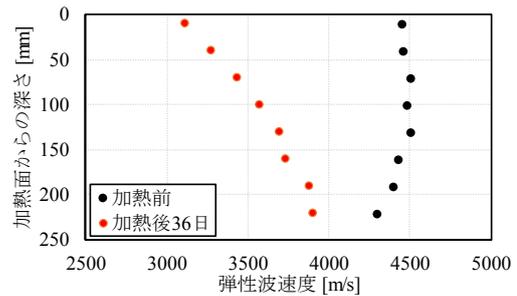


図-10 深さ方向における弾性波速度分布

小さくなると思われるが、本結果においてはセンサ間距離 200mm の弾性波速度が 300mm の場合を上回る結果となった。この原因については明らかでなく、今後の課題である。センサ間距離 300mm 以上における弾性波速度の増加は、加熱を受けた結果、コンクリート表層部と内部で弾性波速度が異なり、このような場合に弾性波は最速伝搬経路で伝搬するためと考えられ、本結果は大野ら²⁾の既往の研究結果と傾向が一致している。また、モデル (直交) と実測値を比較すると、両者は概ね一致しており、本手法は妥当なものであると考えられる。以上の結果をもとに、鉄筋直上の測定結果についても同様にモデルによる計算結果との比較および考察を行った。

図-8 に示すモデルによる鉄筋直上の弾性波速度の計算は、加熱前の検討と同様に深さ 50mm の位置までをコンクリート、深さ 50mm 以深は鋼材として行った。コンクリート層の弾性波速度は、鉄筋位置である深さ 50mm までの層を 5 分割し 10mm 間隔で設定した。このとき、深さ方向の速度分布の計算結果から、弾性波速度は加熱面側から 1104, 1291, 1479, 1666, 1854m/s とし、鉄筋の弾性波速度は 5500m/s とした。図のセンサ間距離 300mm 以上の測定値において、Input7 はセンサ間距離の増加に伴い弾性波速度が増加しているが、Input2 はセンサ間距離 500mm から 600mm にかけて弾性波速度が減少している。これらの結果についての考察を以下に述べる。

図-11 に、以下の考察で想定される弾性波の伝搬経路を示す。はじめに、鉄筋直上の実測値が直交方向のモデルと同程度である場合は、伝搬経路内に付着切れ箇所が存在していると考えられる (図-11(a)参照)。本結果では、Input2 および Input7 のいずれもセンサ間距離 300mm

および 400mm で弾性波速度が直交方向の速度と同程度である。

次に、鉄筋直上および直交方向のモデルの中間値をとる場合は、弾性波は鉄筋を伝搬しているが、部分的な付着切れの影響を受け、付着が確保されている場合の最速伝搬経路ではない経路を伝搬していると考えられる（図-11(b)参照）。すなわち、鉄筋に入射する箇所が付着切れが生じている場合や鉄筋から受信センサに向かう最速伝搬経路上で付着切れが存在することが考えられる。なお、鉄筋直上モデルと同程度である場合は付着切れがなく、弾性波が鉄筋を経由する最速伝搬経路を伝搬したものと考えられる（図-11(c)参照）。

ここで、加熱後における鉄筋の付着状態について、別の計測方法により推定を行い、上記付着切れ推定手法の信頼性について検討する。鎌田ら⁹⁾によれば、PC 鋼棒の端部にて弾性波を入出力した場合、グラウト-鉄筋間における付着が低下すると弾性波速度が増加することが示されている。本研究においても、加熱前後において鉄筋の両端に AE センサを設置し、超音波法により弾性波速度を測定した。その結果、加熱前が 4926m/s、加熱後が 5376m/s となり弾性波速度は増加した。このことから、加熱後の供試体におけるコンクリート-鉄筋間における付着は、加熱前と比較して低下していると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 健全な RC 供試体の鉄筋直上の測線において得られた弾性波速度と屈折法に基づく計算モデルから算出した弾性波速度は概ね一致し、屈折法によるモデル化の適用性が認められた。
- (2) 火害を受けたコンクリートにおいて、弾性波速度が深さ方向に単調増加すると仮定して鉄筋直交方向の測線で測定した伝搬時間より深さ方向の速度構造を推定し、推定結果を屈折法に基づく計算モデルに適用した。その結果、センサ間距離と弾性波速度の関係において、計算結果と実測値は概ね一致した。
- (3) 推定した深さ方向の速度構造に鉄筋の弾性波速度を含めたモデルから算出した計算結果と実測値を比較することで鉄筋-コンクリート界面の付着切れを検出できる可能性が示唆された。

謝辞

本研究の一部は、(一社)日本非破壊検査協会 2019 年度研究助成(研究課題:各種弾性波法の併用に基づく火害を受けたコンクリートの鉄筋界面の付着状態の非破壊評価技術の開発)を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

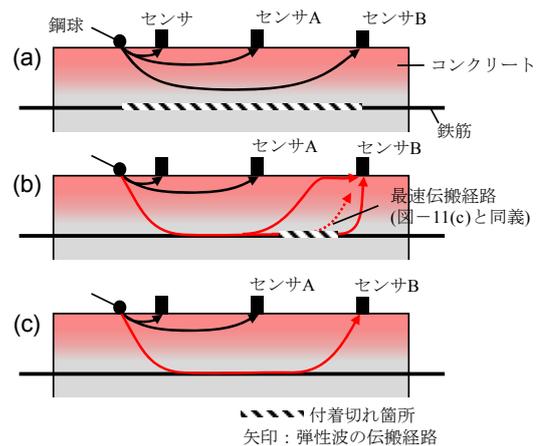


図-11 付着切れが生じた場合の弾性波伝搬経路

参考文献

- 1) 日本建築学会:建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説, 2015.3
- 2) 大野健太郎, 前田祐輔, 内田慎哉, 春畑仁一:弾性波の速度構造による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1909-1914, 2017.6
- 3) 内田慎哉, 春畑仁一, 小松由弥, 池田憲一:反発度および機械インピーダンスによる火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1903-1908, 2017.6
- 4) 岩野聡史, 内田慎哉, 春畑仁一, 渡部正:弾性波法で得られた接触時間・伝搬時間による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1915-1920, 2017.6
- 5) 春畑仁一, 阪口明弘, 山根政夫, 皿井剛典:火害を受けたコンクリートの劣化診断手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1366-1371, 2014.6
- 6) 阪口明弘, 春畑仁一, 皿井剛典:火害を受けたコンクリート構造物の劣化診断手法の検討その2 コンクリート加熱面の非破壊・微破壊試験結果, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.233-234, 2014.9
- 7) 佐々宏一, 芦田讓, 菅野強:建設・防災技術者のための物理探査, 森北出版, pp.18-25, 2007.6
- 8) 尼崎省二, 山本尚志: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
- 9) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 川嶋雅道, 内田慎哉, 六郷恵哲:弾性波による PC グラウト充填評価手法の実構造物への適用, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.3, pp.569-586, 2006.9