

# 論文 鋼繊維補強モルタルの繊維分散性の非破壊評価への弾性波速度トモグラフィの適用

中野 陽子\*1・内田 慎哉\*2・鎌田 敏郎\*3・塩谷 智基\*4

**要旨:** 本研究では、鋼繊維補強モルタルを対象に、弾性波速度トモグラフィにより鋼繊維の混入状況を非破壊により評価する手法についての検討を行った。本手法の有効性を把握するため、測定位置において供試体を切断し、鋼繊維の混入状況を目視により把握した。さらに、弾性波シミュレーション解析により弾性波トモグラフィにより得られる結果の再現を試みた。その結果、弾性波速度トモグラフィにより鋼繊維の混入状況を適確に可視化できることがわかった。また、測定で求めた弾性波速度トモグラムを弾性波シミュレーション解析により再現する上で必要となる解析モデルや弾性波の入力方法の条件を見出した。

**キーワード:** 鋼繊維補強モルタル, 鋼繊維の分散性, 弾性波速度トモグラフィ, レイトレーシング

## 1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリートなどの繊維を混入したセメント系材料を用いた部材あるいは構造物を建設する場合、設計で仮定した安全性や使用性などの力学的性能を確保するためには、少なくとも、部材内で繊維が均一に分散していることが前提条件となる。しかしながら、繊維分散性を非破壊で評価する手法が確立されていない。そのため、現状では、打設時に作製した供試体での圧縮強度や引張強度を把握することにより、力学的性能を間接的に評価しているに過ぎない<sup>1)</sup>。繊維補強材料の性能を確保するためには、非破壊試験によりコンクリート中の繊維分散性を適確に評価した上で、力学的性能との関係を明確にすることが極めて重要である。

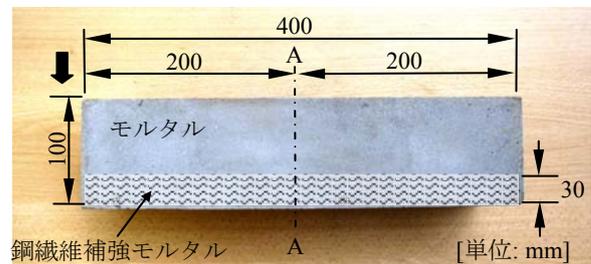
そこで本研究では、上記課題を解決するための基礎研究として、まず、鋼繊維補強モルタルを対象に、弾性波速度トモグラフィにより鋼繊維の混入状況を非破壊により評価する手法についての検討を行った。実験では、鋼繊維を混入していないモルタル供試体での計測も比較のために実施した。続いて、本手法の有効性を把握するため、測定位置において供試体を切断し、切断面で鋼繊維の混入状況を目視により確認した。最後に、弾性波シミュレーション解析により弾性波トモグラフィにより得られる結果を再現することを試みた。

## 2. 弾性波速度トモグラフィによる鋼繊維の混入状況の評価手法

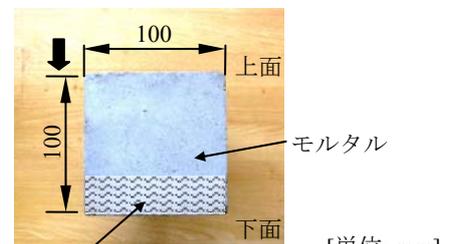
### 2.1 供試体

供試体寸法は、幅 100mm、高さ 100mm、長さ 400mm とした。鋼繊維の有無が弾性波伝搬速度に与える影響を

把握するため、鋼繊維を混入していないモルタル供試体（供試体 A）と、供試体の底面部分にのみ鋼繊維を混入した供試体（供試体 B：写真-1 参照）をそれぞれ作製した。供試体 B は、まず、鋼繊維の混入部が供試体下面からの高さ約 30mm となるように鋼繊維補強モルタルを打設し、その後、鋼繊維を混入していないプレーンモルタル（高さ約 70mm）をウエットな状態で打重ねた。表-1 にモルタルの配合を示す。なお、使用した鋼繊維は、幅 1.3mm、厚さ 0.50mm、長さ 30mm である。鋼繊維の混入率は、供試体の体積に対して 0.75%（外割り）とした。



↓：打設方向  
(a) 側面



↓：打設方向  
(b) A-A 断面

写真-1 供試体 B の概要

\*1 大阪大学 工学部地球総合工学科 (正会員)

\*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻特任助教 博士(工学) (正会員)

\*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻准教授 博士(学術)

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水 W	セメント C	細骨材 S	混和剤 A
53	250	473	1430	1.657

## 2.2 弾性波伝搬速度の計測

計測の対象断面は、いずれの供試体においても、供試体の長さ方向の中央とした(写真-1 A-A断面)。センサの配置状況を図-1に示す。供試体の上下面および両側面に、各面あたり6個、計24個のセンサをそれぞれ設置した。センサの設置間隔は約16.7mmである。弾性波伝搬時間の計測では、図-2に示す波線全ての時間を計測するため、まず、U1のセンサを発信子として弾性波を入力し、供試体中を伝搬した弾性波をR1~R6、D1~D6およびL1~L6の計18個のセンサでそれぞれ受信した。続いて、発信子をU2として同様の計測を実施した。その後、発信子をU3からU6へ順次移動し、D6が発信子となるまで計測を行った。

弾性波伝搬時間の計測概要を写真-2に示す。マルチファンクションシンセサイザにより最大電圧6.5Vのパルス波を出力し、パイポラ電源で電圧を増幅し、発信側のセンサに240Vの印加電圧を与えることにより供試体中へ弾性波を発信した。供試体を伝搬した弾性波は、受信側のセンサにより受信し、プリアンプで40dB、メインアンプで40dBの増幅処理を行った後、サンプリング周波数2MHzでデジタル化し、AE計測装置に記録した。また、パイポラ電源で増幅処理した電圧波形に対しても、サンプリング周波数2MHzでデジタル化して、AE計測装置に併せて記録した。記録したそれぞれの波形に対して、50dBのしきい値を最初に超えた時刻をそれぞれ読み取り、両者の差から伝搬時間を求めた。

入力する弾性波の周波数の違いが伝搬速度に与える影響を把握するため、応答感度の異なる2種類のセンサ(30kHz共振型および140kHz共振型のAEセンサ)をそれぞれ使用した。30kHz共振型AEセンサの応答感度は、

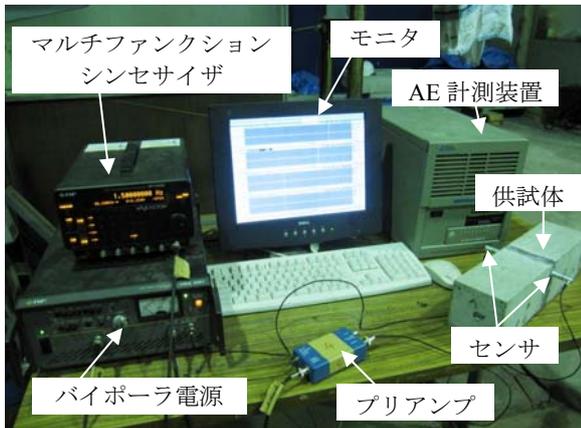
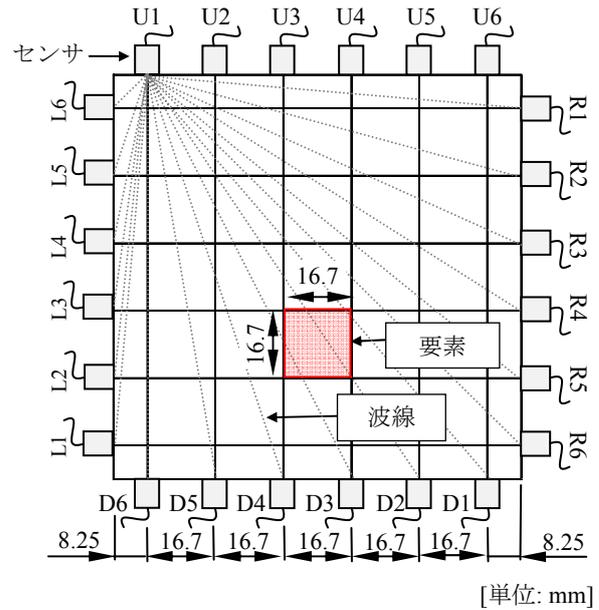


写真-2 計測概要



[単位: mm]

図-1 センサの配置および要素分割

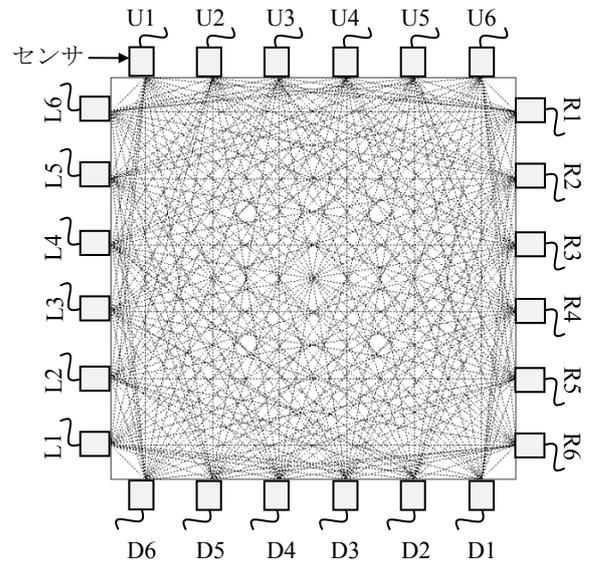


図-2 測定した全波線の概要

0~約100kHzまでの間にあり、かつ26kHzに共振点を有している。一方、140kHz共振型AEセンサは、応答感度の範囲が0~約500kHz、共振点は140kHzである。

## 2.3 弾性波速度トモグラフィの概要と計算手順

弾性波速度トモグラフィは、対象断面を複数の要素に分割(図-1参照)し、要素内の伝搬速度は一定であると仮定し、断面内を伝搬した複数の波線(発・受信センサを直線で結んだ最短経路)の伝搬時間を用いて各要素の伝搬速度を算出し、断面内の速度分布(トモグラム)を推定する方法である。この方法は弾性波を利用するため、波線上に音響インピーダンスの異なる媒質(鋼繊維)が存在すると、弾性波は反射や屈折あるいは回折する。そのため、弾性波が実際に伝搬する経路は、発信と受信センサを結ぶ最短経路にはならない。したがって、弾性波が反射、屈折および回折する現象を再現するためには、

波が伝搬した経路を解析により推定する、すなわち波線追跡法（レイトレーシング）<sup>2)</sup>を行なう必要がある。測定した弾性波の伝搬時間をレイトレーシングにより補正することができれば、繊維の混入状況が適確に評価できると考えられる。図-3に弾性波速度トモグラフィの計算手順を示す。まず、2.2の方法で、各波線の伝搬時間を測定する（図-2参照）。続いて、各波線の平均伝搬速度： $V_i$ および平均スローネス： $S_i$ を式(1)および(2)によりそれぞれ求める。

$$V_i = \frac{l_i}{t_i} \quad (1)$$

$$S_i = \frac{1}{V_i} \quad (2)$$

ここで、 $l_i$ ：波線*i*の長さ（伝搬距離）、 $t_i$ ：波線*i*の伝搬時間である。その後、調査対象断面を1辺あたり約16.7mmの要素： $j(j=1,2,\dots,49)$ に分割（図-1参照）し、要素内の伝搬速度は一定であると仮定して、平均スローネスから各要素のスローネス： $S_j$ を求める。各要素のスローネスを算出するにあたり、次に示すように、各波線が要素を横切る長さで重みをつける。

$$S_j = \frac{\sum_i (l_{ij} S_i)}{\sum_i l_{ij}} \quad (3)$$

ここで、 $l_{ij}$ ：波線*i*が要素*j*を横切る長さである。このようにして各要素のスローネスを順次求め、これをスローネス分布の初期モデルとする。

次に、レイトレーシングにより初期波線を求めるとともに、初期波線の理論走時を求める。レイトレーシングの方法は、Sassaらが提案した弾性波の伝搬経路の二次元波線追跡法<sup>3)</sup>で行った。具体的な計算手順としては、まず、図-4に示すように、弾性波を発信位置（節点）から16方向の各節点に向かって放射する。発信位置（節点）から各節点までの距離と各要素のスローネスの値から、各節点における理論伝搬時間をそれぞれ計算する。その理論伝搬時間と波の入射方向を各節点にそれぞれ記録させる。その後、波が到達した節点からさらに16方向の各節点に向かって波を放射して、各節点での理論伝搬時間を同様に求める。その節点において、既に他方から波が到達していれば、両者を比較して、理論伝搬時間が小さい値のものをその節点での理論伝搬時間として採用する。以上の計算をモデル内の全ての節点に波が到達するまで順次計算する。計算終了後、発信点から各節点に記録されている波の入射方向を順次たどることで、初期波線とその波線における理論伝搬時間を決定することができる。

続いて、レイトレーシングにより算出した理論伝搬時間と測定した伝搬時間の両者から各要素のスローネス

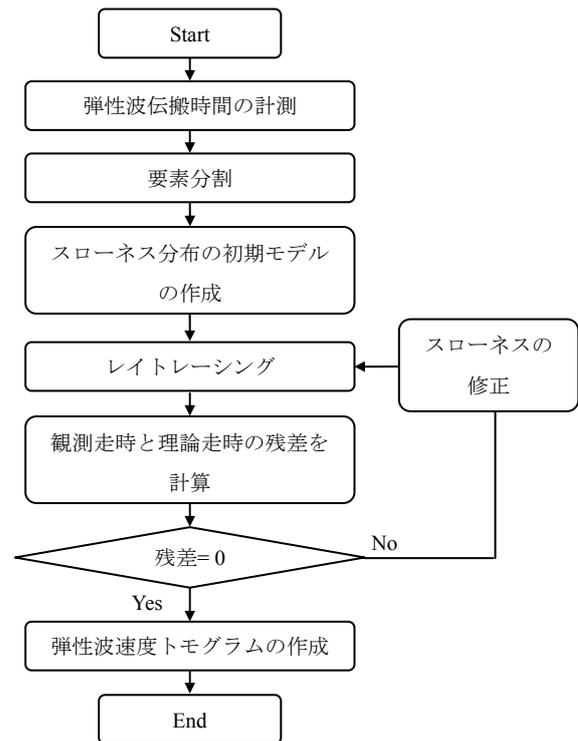


図-3 弾性波速度トモグラフィの計算手順

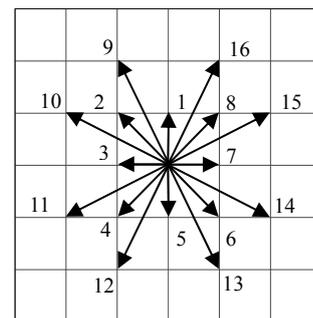


図-4 二次元波線追跡法における波の放射方向

の補正を行なう。補正計算には、同時反復法<sup>4)</sup>を用いた。ここでは、まず、全ての初期波線について走時残差： $\Delta T_i$ を以下の式により算出した。

$$\Delta T_i = T_{oi} - T_{ci} \quad (4)$$

ここで、 $T_{oi}$ ：波線*i*の計測伝搬時間、 $T_{ci}$ ：初期波線*i*の理論伝搬時間である。次に、走時残差を初期波線が通過する要素に振り分ける。その際、次に示すとおり、各初期波線が要素を横切る長さで重みをつける。

$$\Delta t_{ij} = \frac{\Delta T_i l'_{ij}}{l'_i} \quad (5)$$

ここに、 $\Delta t_{ij}$ ：初期波線*i*において要素*j*に振り分ける走時残差、 $l'_{ij}$ ：初期波線*i*が要素*j*を横切る長さ、 $l'_i$ ：初期波線*i*の長さである。なお、要素*j*のスローネス補正量： $\Delta S_j$ は、次式から算出できる。

$$\Delta S_j = \frac{\sum_i \Delta t_{ij}}{\sum_i l'_{ij}} \quad (6)$$

したがって、修正後の要素  $j$  のスローネス  $S_j^1$  (反復回数 1 回目) は以下の式により求めることができる。

$$S_j^1 = S_j + \Delta S_j \quad (7)$$

さらに、得られた  $S_j^1$  を用いて、レイトレーシングにより初期波線の更新 (更新 1 回目の波線) と、その波線の理論走時を求める。その後、同時反復法により要素  $j$  のスローネス  $S_j^2$  (反復回数 2 回目) を前述の計算手順で算出する。したがって、 $N$  回目の反復計算により算出される要素  $j$  のスローネス  $S_j^N$  は以下の式となる。

$$S_j^N = S_j^{N-1} + \Delta S_j \quad (8)$$

ここに、 $S_j^{N-1}$  は、 $N-1$  回目の繰り返し計算で算出されるスローネスである。

以上の繰り返し計算を行ない、走時残差が 0 となった時点で値が収束したと判断して計算を終了する。このときのスローネスの逆数である伝搬速度を求め、その結果から弾性波速度トモグラムを作成する。

## 2.4 実験結果および考察

図-5 および図-6 に各センサを使用して算出した弾性波速度トモグラムをそれぞれ示す。図-5 に示すトモグラムは、供試体 A および B のいずれにおいても、中央

部の速度が側面よりも大きくなっていることが確認できる。したがって 30kHz センサを使用した場合には、鋼繊維の有無や混入状況を把握することは極めて難しいと思われる。これは、入力した弾性波の波長が、鋼繊維の長さに対して大きかったことが一つの要因と考えられる。ここで、モルタルの伝搬速度を供試体 A の各波線での伝搬速度の平均値：3483m/s と仮定した場合、センサの応答感度の範囲の上限値として 100kHz を仮定すると、入力される弾性波の波長は約 34.8mm よりも大きくなる。したがって、鋼繊維の長さ：30mm よりも波長が大きいため、繊維の有無に関わらずほぼ同じ可視画像になったと考察できる。

これに対して、図-6 に示すトモグラムは、図-5 のそれと比較すると明らかに異なる可視画像になった。供試体 A でのトモグラムは、端部に速度の小さい領域があるものの、断面内の速度分布は概ね一定であった。一方、供試体 B のトモグラムは、供試体の下面部分以外の速度が小さくなり、下面から高さ方向に約 25mm の部分に速度の大きい領域が出現している。この領域と鋼繊維補強モルタルを打設した部分 (底面から高さ方向に 30mm)

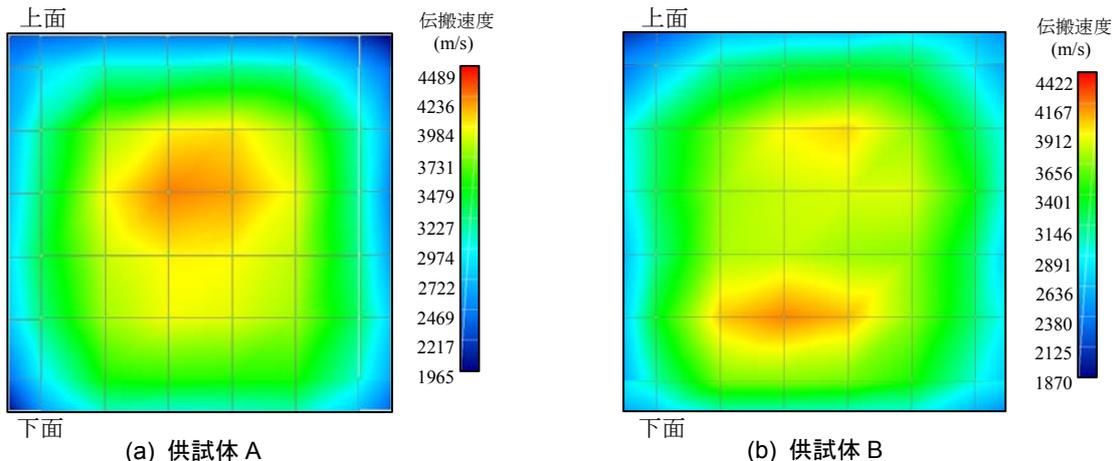


図-5 30kHz 共振型センサを使用した場合に得られた弾性波速度トモグラム (実験結果)

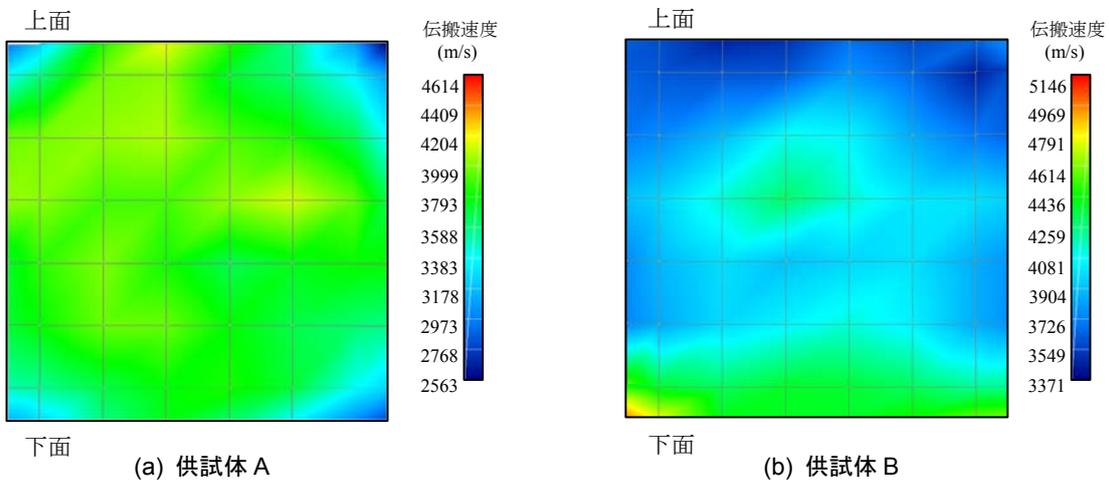


図-6 140kHz 共振型センサを使用した場合に得られた弾性波速度トモグラム (実験結果)

は概ね一致している。ここで、140kHz のセンサで入力される弾性波の波長について考察をする。供試体 A での全測定値の平均値：3859m/s を用いた場合は、センサの応答感度の範囲の上限値を 500kHz と仮定して波長を算出すると 7.72mm となる。したがって、入力する弾性波の波長を鋼繊維長よりも短くして、弾性波速度トモグラフィを行った場合は、鋼繊維が混入されているおおよその領域を把握できる可能性があると考えられる。

なお、レイトレーシングにより算出した伝搬速度を供試体ごとに比較すると、30kHz センサの方が 140kHz の場合よりも全体的に速度が小さくなっていることがわかる。このような速度差が生じた明確な理由については不明であるが、おそらく、両センサで使用している圧電素子の特性や圧電素子をカバーしている受信板の音響インピーダンスが異なっていることなどが主な原因と考えられる。

モルタル中の鋼繊維の混入状況を把握するため、供試体 B を対象に、写真-1 に示す A-A 断面において、コンクリートカッターにより供試体の切断を行った。供試体切断後、切断面を観察し鋼繊維があると判断した箇所をマーカーにより印を付けた。写真-3 に切断面を撮影した画像を示す。その結果、下面から高さ方向に約 32mm の層にのみ鋼繊維が混入されていた。この鋼繊維の混入状況の実態と、トモグラム(図-6 参照)との比較から、弾性波速度トモグラフィは、繊維が実際に混入されている箇所を適確に可視化できることが明らかとなった。

### 3. 弾性波シミュレーション解析による検討

#### 3.1 解析概要

弾性波シミュレーション解析により鋼繊維を混入した供試体 B の弾性波速度トモグラムを再現するための解析モデルや弾性波の入力方法についての検討を行った。解析モデル寸法は幅 100mm、高さ 100mm であり、要素寸法は幅 0.1mm、高さ 0.1mm とした。写真-3 に示す供試体切断面図により実際の繊維の位置を把握し、この結果をもとに繊維位置に鋼繊維断面積分の要素を配置することにより対象とした供試体の情報を解析モデルに反映させた。解析モデルを図-7 に示す。要素の種類は四角形シェル要素とし、図に示す 4 箇所の各接点(図中の A~D)の x および y 方向の変位を固定した。表-2 にモルタルおよび鋼繊維の物性値をそれぞれ示す。

弾性波の入力は、140kHz のセンサで入力される弾性波の波長を考慮して、周期  $2\mu\text{s}$  (周波数：500kHz) のパルス上の半サイン波とした。解析上における弾性波の入力位置は、弾性波伝搬速度の計測と同じ位置(2.2 参照)である。一方、弾性波の出力位置も、2.2 と同じにした。波の出力方向は、x および y 方向それぞれの変位波形の

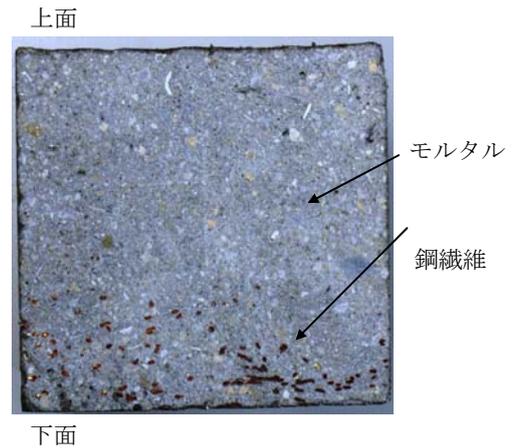


写真-3 鋼繊維の混入状況

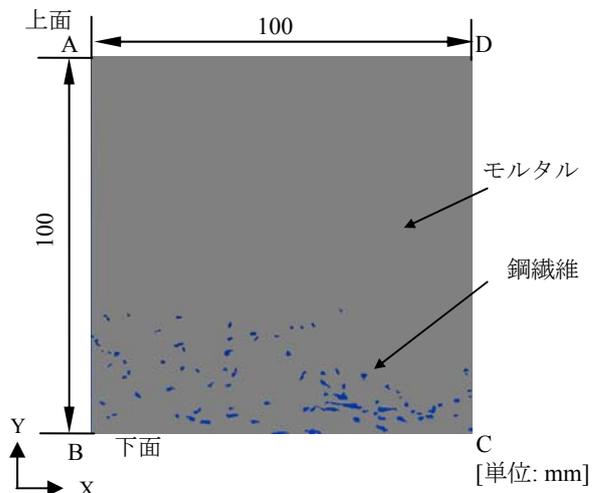


図-7 解析モデルの概要

表-2 解析モデルの物性値

	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
モルタル	27.5	0.20	2.1
鋼繊維	206	0.30	7.8

合成波とした。入力および出力位置の走査方法や手順も 2.2 と同じである。

解析により得られた伝搬速度から、2.3 に示す手順に従ってレイトレーシングを行ない、弾性波速度トモグラムを算出した。

#### 3.2 解析結果および考察

供試体 B の切断面を模擬した解析モデルでの波の伝搬状況を、各接点での変位分布として図-8 に示す。図中には、弾性波の入力位置を矢印で示している。図-8 (a) によれば、入力した弾性波がモルタル中を球面波として伝搬していることがわかる。しかも側面において波が反射していることも併せて確認できる。経過時間が  $27\mu\text{s}$  (図-8 (b) 参照) になると、鋼繊維により波が散乱するとともに、鋼繊維を主に伝搬した波がモルタル部分のそれよりも早く伝搬していることが、モデル下面側の一部分で確認することができる。

図-9 に弾性波シミュレーション解析により得られた弾性波速度トモグラムを示す。図より、速度が大きい領域は、下面側から高さ方向に約 25mm までであった。また、この解析結果と測定結果（図-6 (b) 参照）とを比較すると、トモグラム上での各要素の伝搬速度の値そのものは両者で異なるものの、速度が大きい領域はいずれの場合も下面から 25mm 程度であった。さらに、解析により得られたトモグラムにおいて速度が

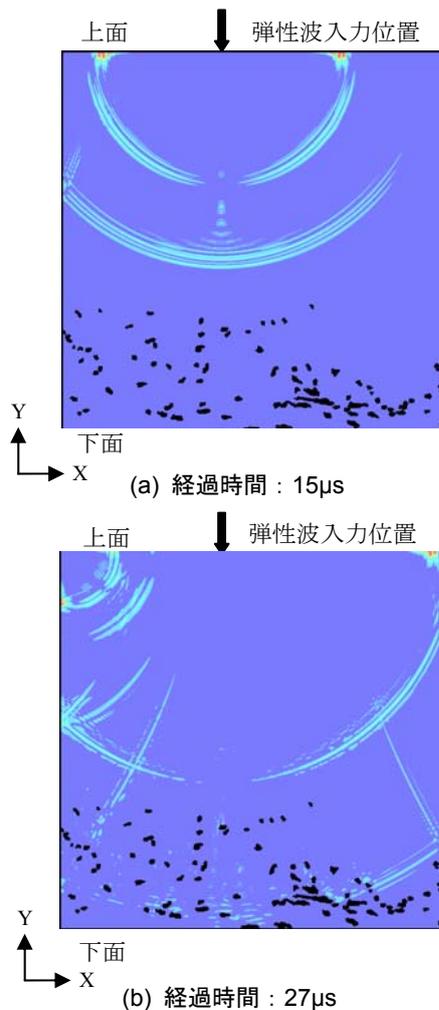


図-8 弾性波の伝搬状況

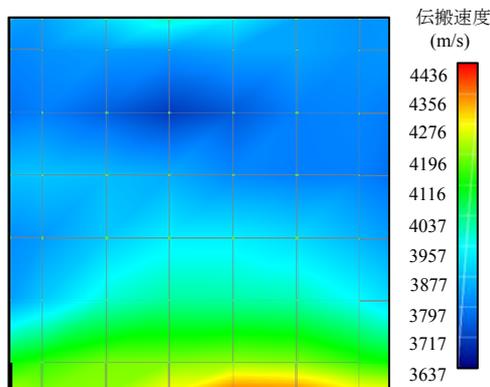


図-9 弾性波伝搬シミュレーション解析により得られた弾性波速度トモグラム

相対的に大きい領域と鋼繊維補強モルタルを打設した箇所とは、概ね一致していた。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 弾性波速度トモグラフィによりモルタル内部の鋼繊維の有無を把握できることが明らかとなった。さらに、鋼繊維の混入状況も概ね可視化できることがわかった。
- (2) 鋼繊維の有無や混入状況を弾性波速度トモグラフィにより適確に把握するためには、入力する弾性波の波長を鋼繊維よりも短くすることが重要である。
- (3) 鋼繊維補強モルタルに対して弾性波速度トモグラフィを適用した場合に得られる弾性波速度トモグラムを弾性波シミュレーション解析により再現する上で必要となる解析モデルや弾性波の入力方法についての検討を行い、これに適した条件を見出した。

今後は、弾性波シミュレーション解析により弾性波トモグラフィで評価可能な繊維混入率や繊維の種類について、詳細な検討を行う予定である。さらに、弾性波トモグラフィによる結果と力学性能との関係を明確にし、本手法を繊維補強材料における品質検査手法へと高度化する予定である。

#### 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（若手スタートアップ 21860055）の援助を受けて行ったものである。また、実験の実施にあたり大阪大学の角田 蛍君にご協力頂いた。弾性波トモグラフィでは、京都大学の河合啓介君にご助力頂いた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, pp.69-70, 2004
- 2) 魚本健人, 加藤 潔, 広野 進：コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, pp.38-39, 1996
- 3) 佐々宏一, 芦田 譲, 菅野 強：物理探査, 森北出版, pp.117-127, 1993
- 4) Sassa, K., Ashida, Y., Kozawa, T. and Yamada, M.: Improvement in the Accuracy of Seismic Tomography by Use of an Effective Ray-Tracing Algorithm, MIJ/IMM Joint Symposium Volume Papers, pp.129-136, 1989