

論文 弾性波トモグラフィ法によるコンクリートの内部探査の推定精度

関 俊力*1・小野 晃*2・山田 和夫*3

要旨：本研究では、コンクリート内部の可視化が可能なトモグラフィ法の推定精度について検討を行った。その結果、伝搬経路を直線と仮定し、最小二乗法によって伝搬速度分布を算定した場合には、介在物埋設位置の推定誤差は若干大きいですが、全体的な傾向の再現は可能であること、誤差のないデータに対して、1要素12節点波線追跡法と同時反復法およびマルカート法を適用した伝搬速度分布の算定結果は、細部に亘って実際の伝搬速度分布を再現できること、誤差を含む実測データに対して、準ニュートン法は試験体内部の局所的な伝搬速度の変動が平滑化され、伝搬速度分布と介在物の対応も良好であること、などが明らかとなった。

キーワード：コンクリート、非破壊試験、内部探査、弾性波トモグラフィ法、波線追跡、非線形最適化

1. はじめに

近年、環境問題に関連して持続型社会を構築し地球環境を維持していくための技術の開発が急務となっている。とりわけ、建築分野では環境負荷低減型建築技術として建築物の循環化・長寿命化技術および膨大なストック量のある既存コンクリート造建築物の合理的なストックマネジメント技術の開発・実用化が求められている。既存コンクリート造建築物の合理的な長寿命化を図るには、建築物の現状把握、劣化状況に応じた適切な補修・補強対策の策定などの一連の検査・診断技術を確立する必要があるが、これまでに規格・基準化されている試験方法は、試験手順を規定するに留まっているものが多く、結果の評価方法を含む試験方法の規格・基準化が急務となっている。非破壊試験は、基本的には測定結果からその原因を推定する逆問題であるため、結果と原因を関連付ける法則と特性値を確定できれば、測定結果からその原因である変状の定量化が可能となる。この点を踏まえて、本研究では、筆者らが従来から検討を行っている弾性波法を取り上げ、コンクリート内部の可視化が可能なトモグラフィ法¹⁾の推定精度について検討を行った。

2. モデル実験の概要

2.1 試験体

本実験では、表-1および図-1に示すように、200×250×50mmの平板試験体(W/C=40%のモルタル)を使用し、実験要因として、介在物の種類(無し, モルタル/コンクリート二層モデル(長手方向で二分割), 空洞(発泡スチロール), 木材(油性ワニスで表面をコーティングした樫の木), 軟質ゴムおよび鋼材の6種類), 介在物の形状(無し, 円形および正方形の3種類), 介在物の寸法(無し, 2.5, 5.0および7.5cmの4種類)を取り上げ、弾性波トモグラフィ法の適用性および推定精度について調査を行った。

表-1 実験の概要

試験体記号	試験体寸法(mm)	母材	介在物		
			種類	形状	寸法(mm)
NN	200×250×50	モルタル	—	—	—
MC	200×250×50	モルタル	コンクリート	長方形	200×125×50
SC	200×250×50	モルタル	鉄鋼	円形	φ25×50
GC			軟質ゴム		φ50×50
WC			樫の木		φ75×50
SS	200×250×50	モルタル	鉄鋼	正方形	25×25×50
GS			軟質ゴム		50×50×50
WS			樫の木		75×75×50
AS			発泡スチロール		

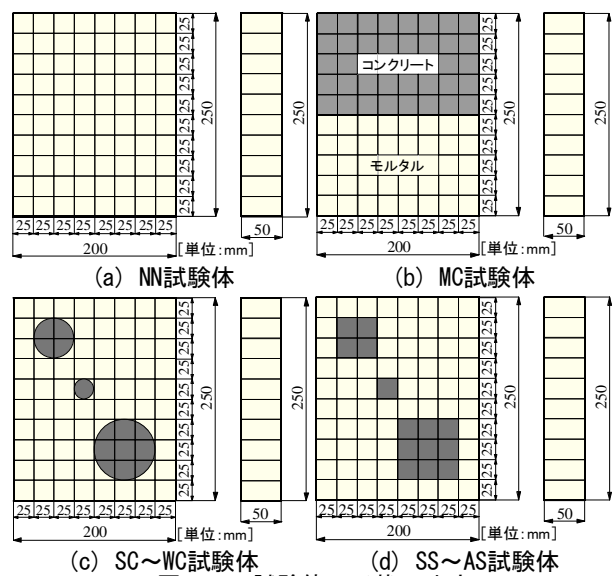


図-1 試験体の形状・寸法

2.2 計測方法

ファンクション・ジェネレータ (FG-350) によって発生させた弾性波(パルス幅10μsの矩形パルス)は、高速バイポーラ電源 (HSA4011) によって約125Voltに増幅した後、圧電式の発振用AEセンサ (AE-905S, 共振周波数: 約1MHz) を介して試験体の所定位置(図-2に示すS01~S36の36箇所)から入力し、図-3に示す4

*1 愛知工業大学大学院 工学研究科生産・建設工学専攻 修士(工学) (正会員)
 *2 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)
 *3 愛知工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

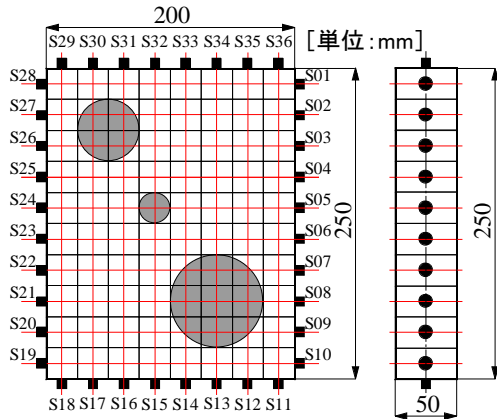


図-2 弾性波入力位置 (SC~WC試験体の場合)

面(上面: U01~U07, 左面: L01~L07, 下面: B01~B07, 右面: R01~R07)に設置した各7個の超小型圧電式加速度ピックアップ (PV-91: CH.1~CH.4およびPV-90B: CH.5~CH.7, 測定上限周波数: 25kHz) で検出した。なお、発振用センサおよび検出用ピックアップは、いずれも両面テープで試験体に直接接着した。チャージアンプ (UV-06: CH.1~CH.4およびUV-16: CH.5~CH.7) で増幅した検出弾性波は、一旦高速データロガー (GL-1100, サンプルング間隔: 0.1 μ s, サンプルング個数: 16,000個/1データ, 分解能: 12bit) に記憶させた後に、処理用ノートPCに転送して各種の波形処理を行った。

2.3 処理方法

弾性波トモグラフィ法は、医療技術分野で実用化されているCT (コンピュータ・トモグラフィ) 技法や地球物理学の分野で使用されている地震波トモグラフィ法の原理を導入したもので、処理手順は、以下の通りである。

まず、図-1に示すように、測定対象領域を n 個の要素に分割 (本研究では、200 \times 250 mmの測定対象領域を寸法が25 \times 25mmの80要素に分割) した後に、測定対象領域を網羅するように弾性波入力用センサ (S) と検出用ピックアップ (例えばR) を移動させながら伝搬時間の測定を繰返し m 回行う。これら一連の測定によって得られた波線 $S_i \rightarrow R_k$ 間の弾性波伝搬時間 (t_{ik}) とその測定時に弾性波が j 要素を通過する長さ (ikl_j) および j 要素の弾性波伝搬速度 (V_j) との間には、式(1)が成立する。

$$t_{ik} = \sum_{j=1}^n ikl_j / V_j \quad \text{ここに、} ik=1,2,\dots,m \quad (1)$$

式(1)より、各要素の弾性波伝搬速度を求め、作成した伝搬速度分布から内部の変状が視覚的に表現できる。

(1) 弾性波入力→検出間の波線を直線と仮定した場合

試験体内部の局所的な音響インピーダンスの変化に関わらず弾性波の入力→検出間の波線を直線と仮定する場合には、式(1)は線形連立一次方程式となる。本研究では、式(1)の解法として、線形最小二乗法 (修正グラム-

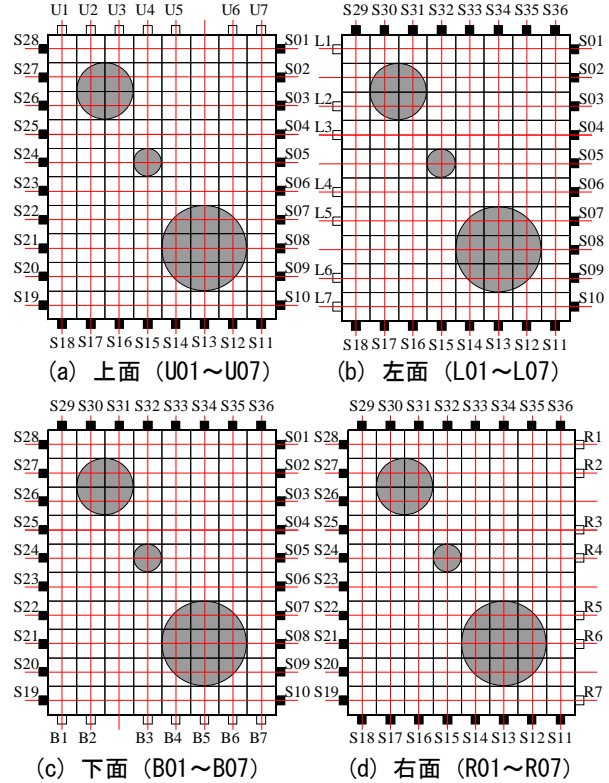


図-3 ピックアップ設置位置 (SC~WC試験体の場合)

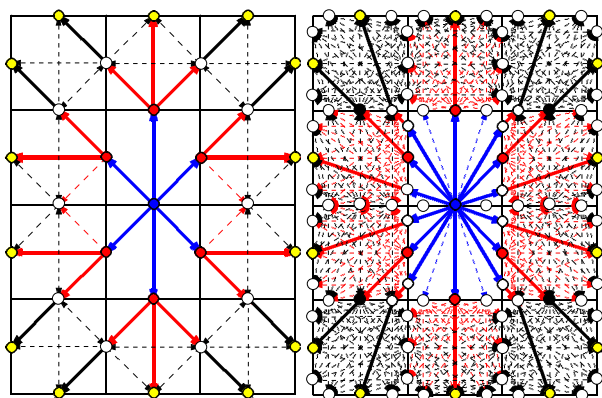
シュミット法) と各要素の弾性波伝搬速度を式(2)の重付き平均値で評価する逆投影法 (重付き平均法) ²⁾ を用いて伝搬速度分布を推定し、相互に比較検討した。

$$V_j = \frac{\sum_{ik} (ikl_j \cdot V_{ik})}{\sum_{ik} ikl_j} \quad (2)$$

ここに、 V_{ik} : $S_i \rightarrow R_k$ 間の波線での平均弾性波伝搬速度。

(2) 弾性波入力→検出間の波線の屈折・回折現象を波線追跡法により評価した場合

試験体内部で音響インピーダンスが局所的に変化した領域が存在すると、弾性波は音響インピーダンスの変化に応じて反射、屈折あるいは回折を繰返しながらかつて伝搬するため、弾性波入力点→検出点間の経路は直線とはならず、伝搬経路は試験体内部の伝搬速度分布によって変化することになる。従って、式(1)は、試験体内部の伝搬速度分布に依存した伝搬経路を有する非線形連立一次方程式となるため、式(1)を解くためには非線形最適化手法を用いた繰返し計算が必要となる。本研究では、式(1)の解法として、同時反復法^{1),3)}、非線形性の強い問題に有効なマルカート法⁴⁾および準ニュートン法⁵⁾を用いて試験体内部の伝搬速度分布を算定し、得られた算定結果を相互に比較検討した。なお、試験体内部の伝搬速度分布に依存した弾性波の伝搬経路の評価方法としては、本研究では、1要素4節点および12節点の2種類のモデルによる波線追跡を行い、波線追跡モデルが算定結果に及ぼす影響について検討を行った。図-4 (a)および(b)に、



(a) 1要素4節点モデル (b) 1要素12節点モデル
図-4 弾性波放射後3ステップの波線パターン例

それぞれ本研究で採用した1要素4節点および12節点の波線追跡モデルに関する波線パターンの例を弾性波放射開始から3ステップまでについて示す。波線の追跡に際しては、全ての弾性波入力点→検出点間について、まず波線追跡により全ての入力→検出の経路を求め、次にその時点における伝搬速度分布を式(1)に代入して得られる伝搬時間のうち、伝搬時間が最短となる経路をその入力点→検出点間の伝搬経路として採用した。

3. 数値実験の概要

本研究では、実測結果への適用性について検討する前に、まず測定誤差を含まない伝搬経路と伝搬時間データを用いた数値実験を行い、上記の各種伝搬速度分布算定方法の特徴を相互に比較検討した。数値実験に用いたモデルは、母材コンクリートの伝搬速度を一律に4,000m/sとした図-1(c)に示す試験体で、モルタル、介在物として取り上げた空隙、軟質ゴムおよび鉄鋼の伝搬速度は、それぞれ3,000, 500, 1,500および5,000m/sとした。なお、

伝搬時間データを算定する際に必要な伝搬経路は、上述した母材および介在物の伝搬速度を各要素に割り当てた後、1要素12節点の波線追跡法を適用して求めた。

4. 結果とその考察

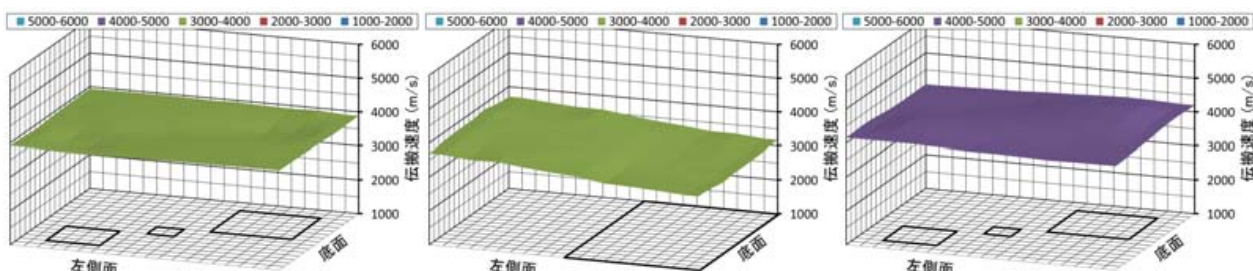
4.1 数値実験に関する考察

(1) 弾性波入力→検出間の波線を直線と仮定した場合

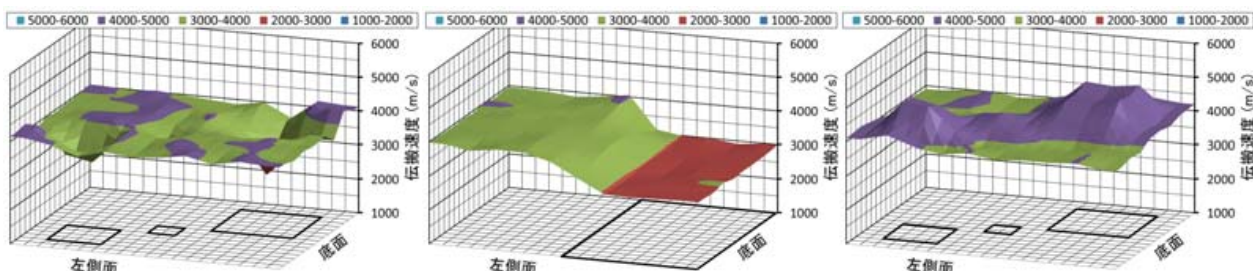
図-5および図-6は、各要素の伝搬速度の算定方法として、それぞれ逆投影法および最小二乗法を用いた場合の伝搬速度分布図の例を示したものである。これらの図によれば、逆投影法による場合は、実際の伝搬速度分布と比較して、伝搬速度の変化が著しく小さくなっているのがわかる。これは、各要素の伝搬速度を式(2)に示す重み付き平均値として求めているためである。これに対して、最小二乗法を用いた場合には、弾性波の伝搬経路を直線と仮定して各要素の伝搬速度を算定しているため、弾性波が屈折・回折する介在物埋設位置近傍の伝搬速度の推定誤差が若干大きくなってはいるものの、おおよその伝搬速度分布は再現できているといえる。なお、紙数の関係で図には示していないが、軟質ゴムを埋設した場合は、空隙を埋設した場合と殆ど同じ伝搬速度分布の算定結果が得られた。この原因としては、本数値解析では、空隙および軟質ゴムの伝搬速度を、それぞれ500および1,500m/sに設定してあり、母材コンクリートの伝搬速度(4,000m/s)として比較してかなり小さいため、介在物中を透過伝搬した弾性波よりも迂回した弾性波の方が早く検出位置に到達することが挙げられる。

(2) 弾性波入力→検出間の波線の屈折・回折現象を波線追跡法により評価した場合

図-7および図-8は、それぞれ波線追跡法として1



(a) 空隙埋設モデル (b) コンクリート・モルタル二層モデル (c) 鉄鋼埋設モデル
図-5 逆投影法による算定結果(伝搬経路を直線と仮定した場合) <口部は介在物埋設位置>



(a) 空隙埋設モデル (b) コンクリート・モルタル二層モデル (c) 鉄鋼埋設モデル
図-6 最小二乗法による算定結果(伝搬経路を直線と仮定した場合) <口部は介在物埋設位置>

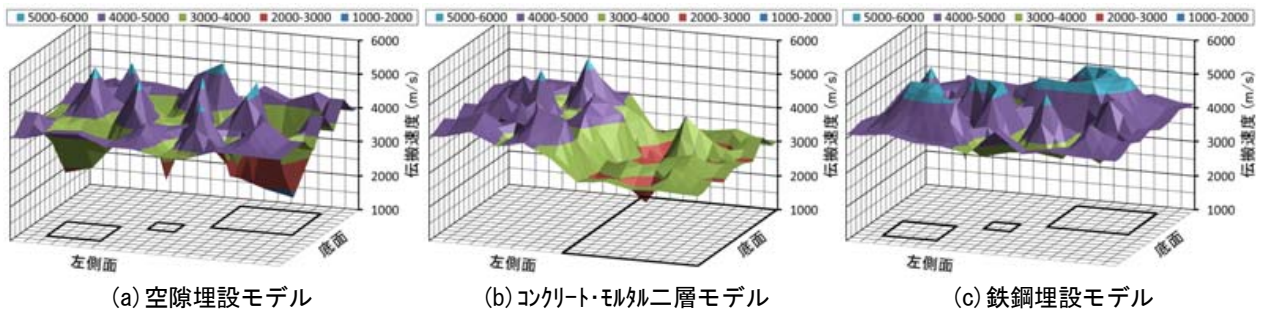


図-7 マルカート法による算定結果 (1要素4節点波線追跡法を適用した場合) <口部は介在物理設位置>

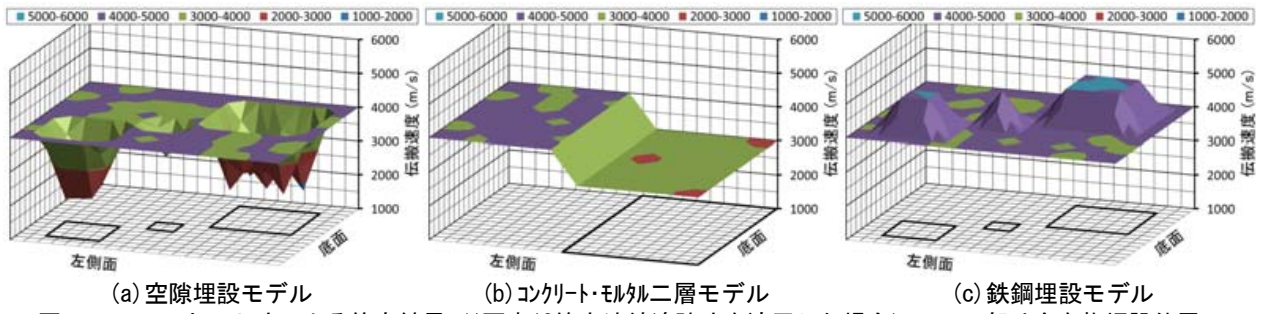


図-8 マルカート法による算定結果 (1要素12節点波線追跡法を適用した場合) <口部は介在物理設位置>

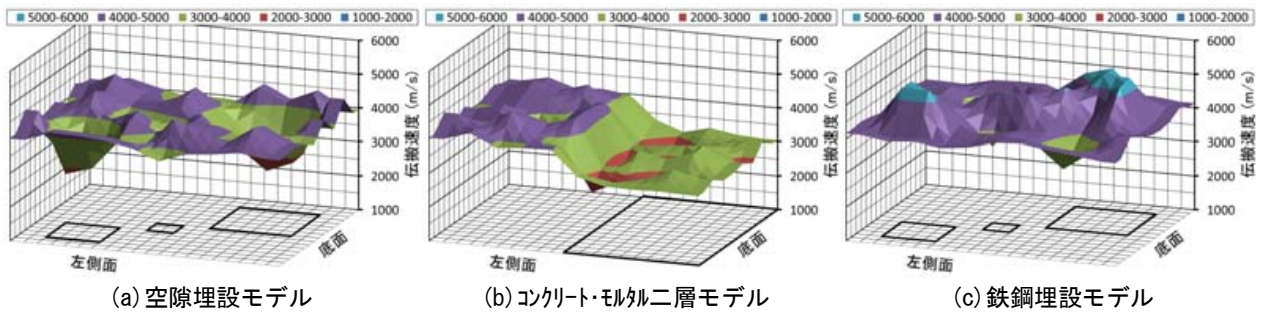


図-9 準ニュートン法による算定結果 (1要素4節点波線追跡法を適用した場合) <口部は介在物理設位置>

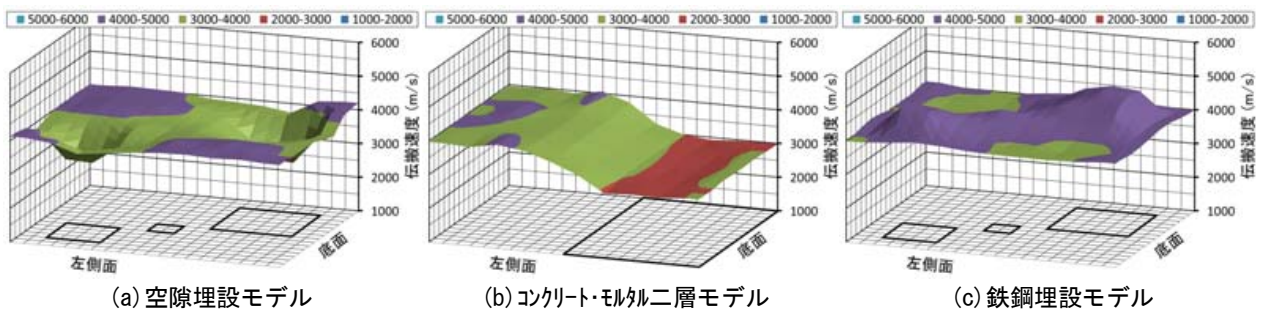


図-10 準ニュートン法による算定結果 (1要素12節点波線追跡法を適用した場合) <口部は介在物理設位置>

要素4節点および12節点モデルを用いた場合のマルカート法による伝搬速度分布の算定結果の例を示したものである。これらの図によれば、波線追跡に1要素4節点モデルを用いた場合には、概略の伝搬速度分布は再現できているといえるが、図-4 (a)に示すように、波線角度として0(180)、45(135)および90°しか選択の余地がないために波線経路が折線状となり、本来は伝搬速度が一定の領域であっても、伝搬速度が局所的に著しく変化している箇所が観察される。これに対して、波線追跡に1要素12節点モデルを用いた場合には、図-4 (b)に示すように、波線角度の選択の自由度が飛躍的に増加しているため、決定された波線も実際に近い伝搬経路となってお

り、得られた伝搬速度分布は、母材コンクリートよりも伝搬速度の遅い介在物理設領域を除けば、細部に亘って実際の伝搬速度分布を再現できている。なお、同時反復法を用いた場合でも、上述のマルカート法と類似した結果が得られたが、同時反復法はマルカート法と比較して収束が遅いため、波線追跡に時間を要する問題の解法としてはマルカート法の方が有利といえる。

一方、図-9および図-10は、準ニュートン法による伝搬速度分布の算定結果の例を示したものであるが、得られた結果は、上述のマルカート法の場合と比較して母材と介在物との境界部における伝搬速度の変化が緩やかになっているのがわかる。なお、この局所的な伝搬速度

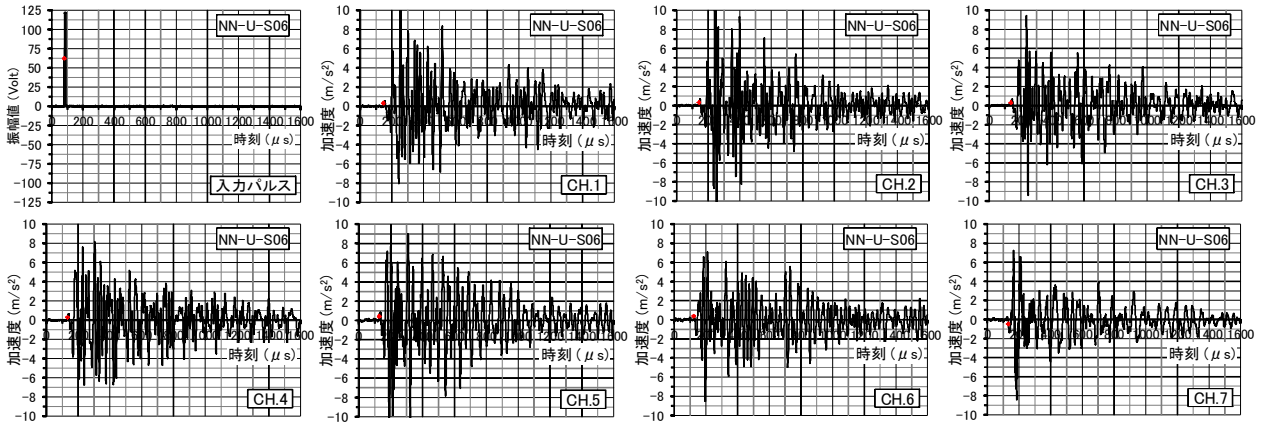


図-11 直交する2面で弾性波の入力・検出を行った場合の検出波形の例（測定条件：NN-U-S06）

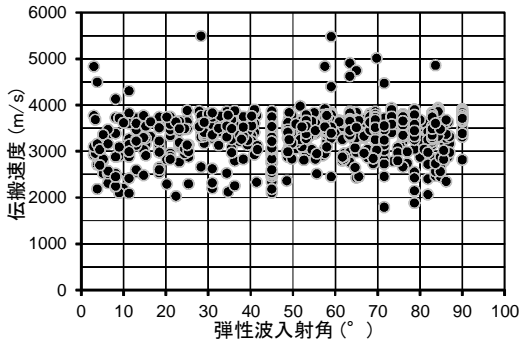


図-12伝搬速度と入射角との関係（NN試験体）

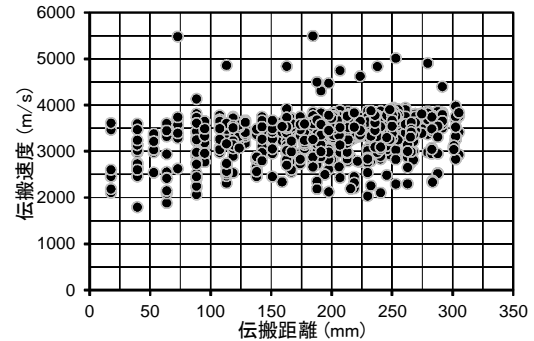


図-13伝搬速度と伝搬距離との関係（NN試験体）

変化が平滑化されることによって、波線追跡に自由度の乏しい1要素4節点モデルを用いた場合でも、マルカート法に比べて実際に近い伝搬速度分布が得られている。

4.2 モデル実験に関する考察

(1) 平均伝搬速度の測定結果

NN試験体（プレーンモルタル）のS06位置から弾性波（矩形パルス波）を入力した時の上面（U面）で検出された波形の例を図-11に示す。図-12および図-13は、それぞれNN試験体によって得られた平均弾性波伝搬速度（以下、平均弾性波速度と略記）と弾性波の入射角お

よび伝搬距離との関係を示したものである。これらの図によれば、得られた平均弾性波速度は、弾性波の入射角によっては明確な影響を受けないが、伝搬距離が長くなるに従って若干増大する傾向を示しているのがわかる。

(2) 伝搬速度分布の推定結果

図-14は、波線追跡に1要素12節点モデルを用いたマルカート法による伝搬速度分布図の例、また図-15は、GS試験体に関する各波線の伝搬時間の残差（測定値と推定値との差）と伝搬距離との関係を示したものである。これらの図によれば、得られた伝搬速度分布と介在物と

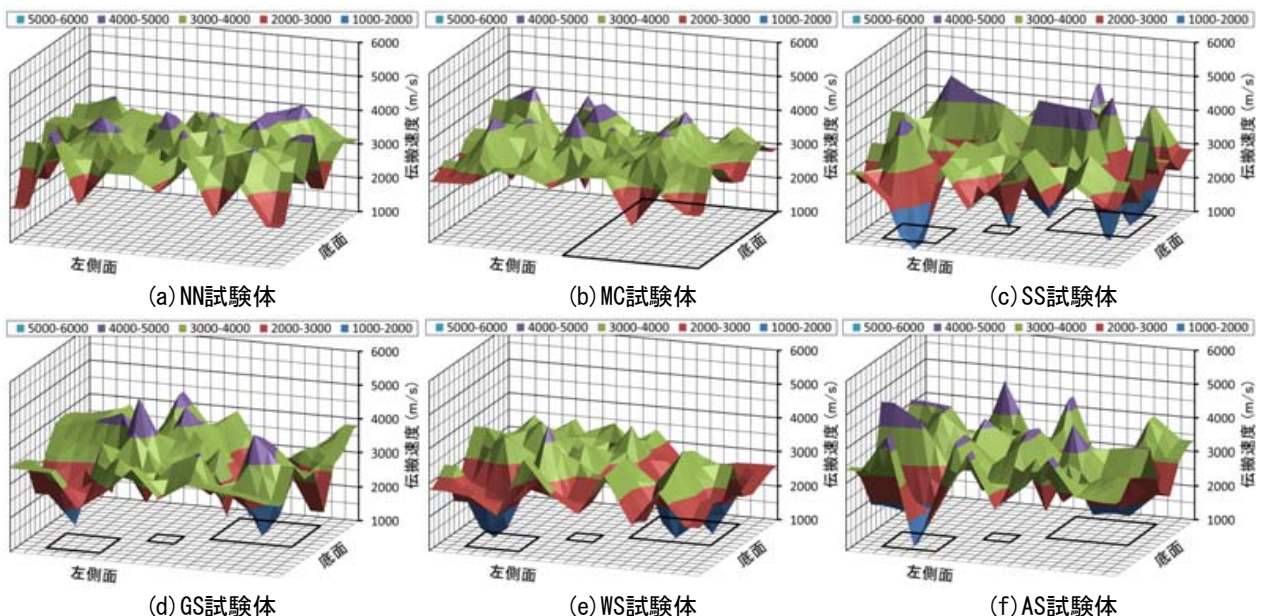


図-14 マルカート法による算定結果（1要素12節点波線追跡法を適用した場合） <口部は介在物理設置位置>

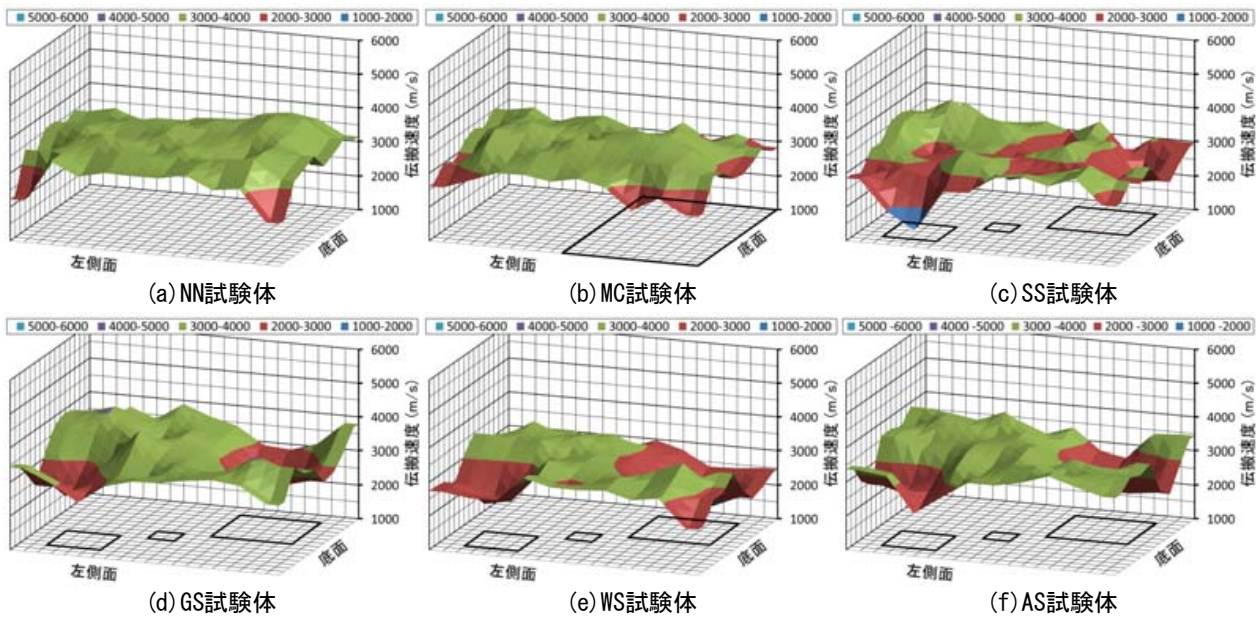


図-16 準ニュートン法による算定結果 (1要素12節点波線追跡法を適用した場合) <口部は介在物理設位置>

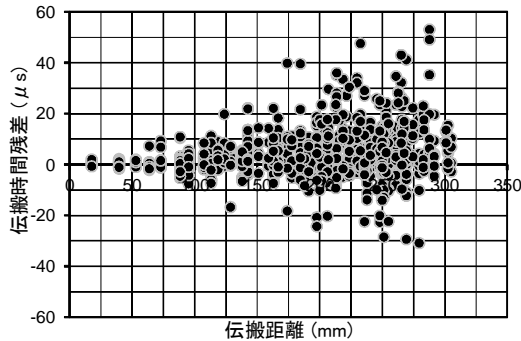


図-15 伝搬時間残差と伝搬距離との関係 (GS試験体)

の関係は、母材と介在物の界面近傍での局所の変動が激しく、かつ弾性波伝搬時間の残差は、伝搬距離が長いほど増大する傾向を示しており、介在物の認識が困難である。この原因としては、これらの伝搬速度分布の算定では、伝搬経路を1要素12節点モデルによって追跡しているが、実際の弾性波は、更に試験体内部の局所的な非均質性（音響インピーダンスの変化）に起因した屈折・回折も繰返しながら伝搬しているため、試験体内部の局所的な速度変化を敏感に捉えるマルカート法などの場合には、伝搬距離が長くなるほど算定結果に及ぼす局所的な伝搬経路の違いの影響が顕著となることが挙げられる。これに対して、準ニュートン法を適用した場合の伝搬速度分布図の例を示した図-16によれば、前述した音響インピーダンスの変化界面近傍領域での速度変化の平滑化によって、得られた伝搬速度分布は、マルカート法による推定結果に比べて内部の局所の変動が小さくなっており、試験体内部に母材モルタルと比べて弾性波伝搬速度の遅い軟質ゴム、木材および空隙を埋設した試験体（それぞれ図(d)～図(f)参照）では、伝搬速度分布と介在物位置との対応関係も良くなっているのがわかる。ただし、母材モルタルと比べて弾性波伝搬速度の速い鉄鋼を埋設

した試験体（図(c)参照）では、鉄鋼埋設部で伝搬速度の低下傾向が認められるが、これは、本試験体の鉄鋼・母材界面に約0.1mmの隙間が存在していたため、弾性波が鉄鋼部を透過しなかったためではないかと思われる。

5. 結論

- 1) 伝搬経路を直線と仮定し、最小二乗法によって伝搬速度分布を算定した場合、介在物理設位部の推定誤差は若干大きいですが、全体的な傾向は再現できる。
- 2) 測定誤差を含まない数値実験データに対しては、1要素12節点波線追跡法と同時反復法およびマルカート法による伝搬速度分布の算定結果は、いずれも細部に亘って実際の伝搬速度分布を再現できる。
- 3) 誤差を含む実測データに対しては、準ニュートン法は試験体内部の局所的な伝搬速度の変動が平滑化され、伝搬速度分布と介在物の対応も良好である。

参考文献

- 1) 中野陽子, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 塩谷智基: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1817-1822, 2011
- 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.37-39, 1990
- 3) 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
- 4) 渡部力, 名取亮, 小国力監修: Fortran77による数値解析ソフトウェア 15.9マルカート法(MARQ), 丸善, pp.221-246, 1989
- 5) 田辺國士: 非線型最小二乗法のアルゴリズム, 応用統計学, Vol.9, No.3, pp.119-140, 1981