

論文 空中超音波法を適用したコンクリートの内部探査の精度向上に関する基礎的研究

金森 藏司*1・関 俊力*2・瀬古 繁喜*3・山田 和夫*4

要旨：本研究では、空中超音波法を適用したコンクリートの内部探査精度向上を目的として一連の実験的検討を行った。その結果、内部探査の評価指標として相対振幅自乗平均値を用いた場合は、平均伝搬速度を用いた場合と比較して、埋設物（初期欠陥および介在物）の寸法の違いの検出性能は優れているが、厚さの違いの検出性能は、逆に平均伝搬速度を用いた場合の方が優れていること、評価指標として無次元化した相対振幅自乗平均値と平均伝搬速度の自乗積を用いた場合は、これらを単独で用いた場合の平均的な内部探査結果となるため、これらの評価指標の欠点を相互に相殺できる利点を有すること、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、空中超音波法、自動計測、平均伝搬速度、振幅値

1. はじめに

近年、建築分野では環境負低減型技術として、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が、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、残存寿命の判定、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・診断技術が不可欠である。

筆者らも、この点を踏まえて、従来から弾性波法を適用した各種の非破壊試験方法の検討を行っている¹⁾。ただし、これらの試験方法では、弾性波の入力・検出用変換子をコンクリート表面にグリセリン等を介して密着させる必要があり、現場での使用制限を受ける場合があるため、前報^{2)~4)}では、測定を非接触で行える空中超音波法に着目して、コンクリートの内部探査精度に及ぼす試験体厚さ（15~95mm）、骨材寸法（0.6~25mm）、初期欠陥・介在物（空隙と鉄鋼）、仕上げ材（石膏ボード）の影響について検討を行い、その有用性を確認した。本研究では、新たに試作した2次元自動走査型測定装置を用いて、コンクリートの内部探査結果に及ぼす埋設物の種類、大きさ、厚さおよび埋設深さの影響について検討した。

2. 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3シリーズの空中

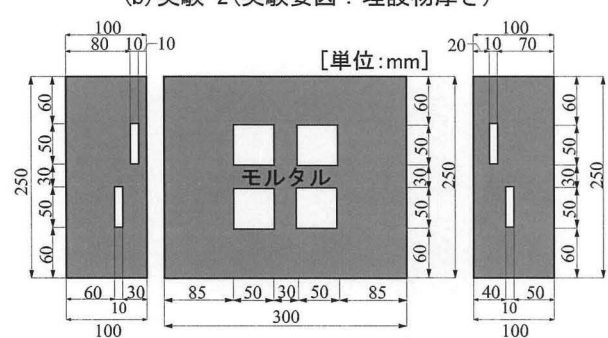
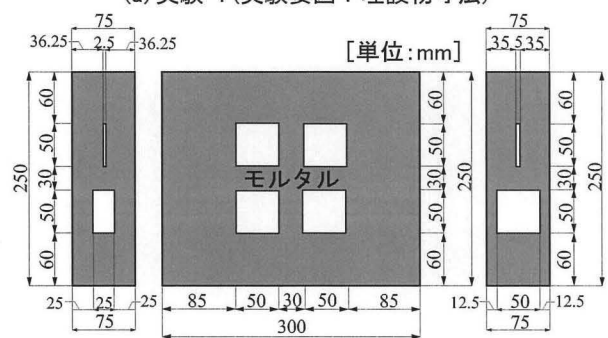
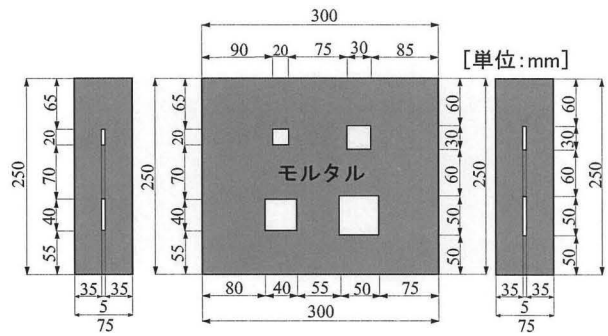


図-1 試験体の形状・寸法

表-1 実験の概要

試験体 記号	母材コンクリート		試験体 寸法 (mm)	埋設物の詳細
	W/C (%)	骨材寸法 (mm)		
AIR -SIZE-75	60	5	300×250 ×75 <モルタル>	発泡 スチロール
AIR -THICK-75				
STL -SIZE-75	60	5	300×250 ×75 <モルタル>	平鋼
STL -THICK-75				
AIR-100	60	5	300×250 ×100 <モルタル>	発泡 スチロール
STL-100				平鋼

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

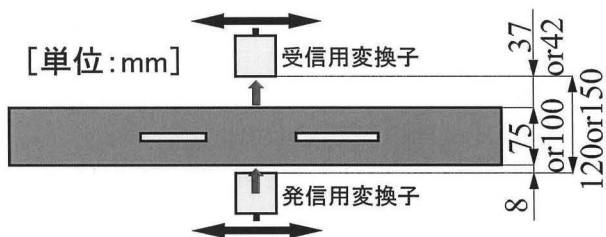


図-2 入力・検出用変換子の設置間隔

超音波法によるコンクリートの内部探査実験を行った。

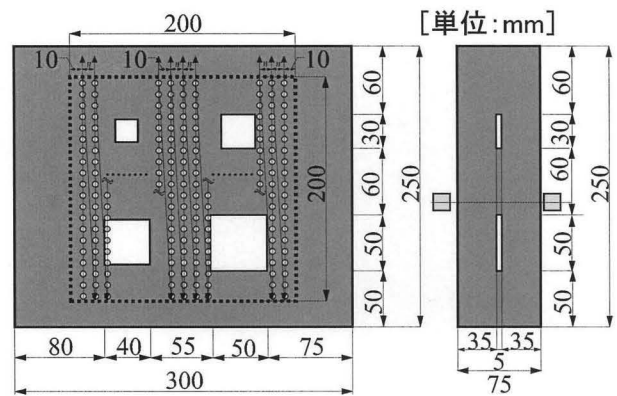
- ①実験-1：長さ×幅×厚さが300×250×75mmの試験体内部に、長さ×幅×厚さが20×20×5mm，30×30×5mm，40×40×5mmおよび50×50×5mmの初期欠陥（発泡スチロール）と介在物（平鋼）が埋設してある試験体を使用して、介在物の大きさの影響を調査した（図-1（a）参照）。
- ②実験-2：長さ×幅×厚さが300×250×75mmの試験体内部に、長さ×幅×厚さが50×50×2.5mm，50×50×5mm，50×50×25mmおよび50×50×50mmの初期欠陥（発泡スチロール）と介在物（平鋼）が埋設してある試験体を使用して、埋設物の厚さの影響を調査した（図-1（b）参照）。
- ③実験-3：長さ×幅×厚さが300×250×100mmの試験体内部に、長さ×幅×厚さが50×50×10mmの初期欠陥（発泡スチロール）と介在物（平鋼）を試験体表面から10，20，30および40mmの深さに埋設した試験体を用いて、埋設物の埋設深さの影響を調査した（図-1（c）参照）。

2.2 計測方法

計測に際しては、空中超音波測定装置（超音波パルサー・レシーバ（JPR-10C-RL型）、増幅度60dBの外部プリアンプ（PR-60A型）、共振周波数が約200kHzのエアプローブ（ARH-0.2K25×25N型）および制御用PCで構成される計測・処理装置）と試作の2次元自動走査型測定装置とから成る計測システムを使用した。また、超音波の入力・検出に際しては、変換子（エアプローブ）の設置位置を、図-2に示すように、試験体の厚さに関わらず入力用変換子が試験体表面から8mmの位置、検出用変換子が入力用変換子から120mm（試験体厚さ75mm）または150mm（試験体厚さ100mm）の位置とし、図-3に示す試験体上下面の破線の枠内（200×200mmの範囲）をx・y方向ともに10mm間隔で2次的に自動走査・自動計測した。なお、発振用矩形パルスの電圧および周波数は、それぞれ200Voltおよび200kHz、超音波のサンプリングの間隔および個数は、それぞれ0.5 μ sおよび1,024個に設定した。

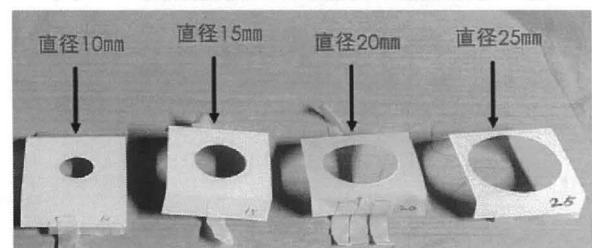
2.3 処理方法

本研究では、内部探査の評価指標として、前報^{2)~4)}と同様に検出弾性波の振幅値と伝搬時間を使用した。また、前報⁴⁾で示したように、内部探査に適した評価指標が埋設物の種類および位置（内部または表面）によって相違するため、相対振幅自乗平均値と平均伝搬速度の積

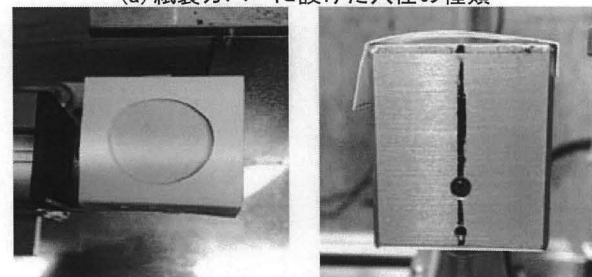


[注] ○：測定位置、□：変換子設置位置

図-3 測定範囲および変換子の設置位置の例



(a) 紙製カバーに設けた穴径の種類



(b) 紙製カバーの設置状況

写真-1 入力用変換子の紙製カバー

を汎用性のある評価指標として使用することの適用性についても検討を行った。なお、相対振幅自乗平均値と平均伝搬速度の積を算出する際の前処理として、それらの値を最大値で除して無次元化を行った後に積値を求め、更に積値を自乗して数値幅を拡大させる工夫を行った。

2.4 変換子

本計測システムでは、断面寸法30×30mmの入力・検出用変換子を使用しており、本研究で内部探査の対象としている最小埋設物（寸法：20×20×5mm）が変換子寸法よりも小さいため、埋設物の検出が困難となる可能性がある。この点を考慮して、本研究では、入力超音波の指向性を向上させるために、写真-1に示すように、円形の穴を設けた紙製カバーを入力用変換子の表面に密着させないように隙間を設けて取り付けて計測を行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 入力用変換子カバーの選定結果

本研究では、予備的調査として、入力用変換子の指向性を向上させるために取り付けた紙製カバー（円形穴の

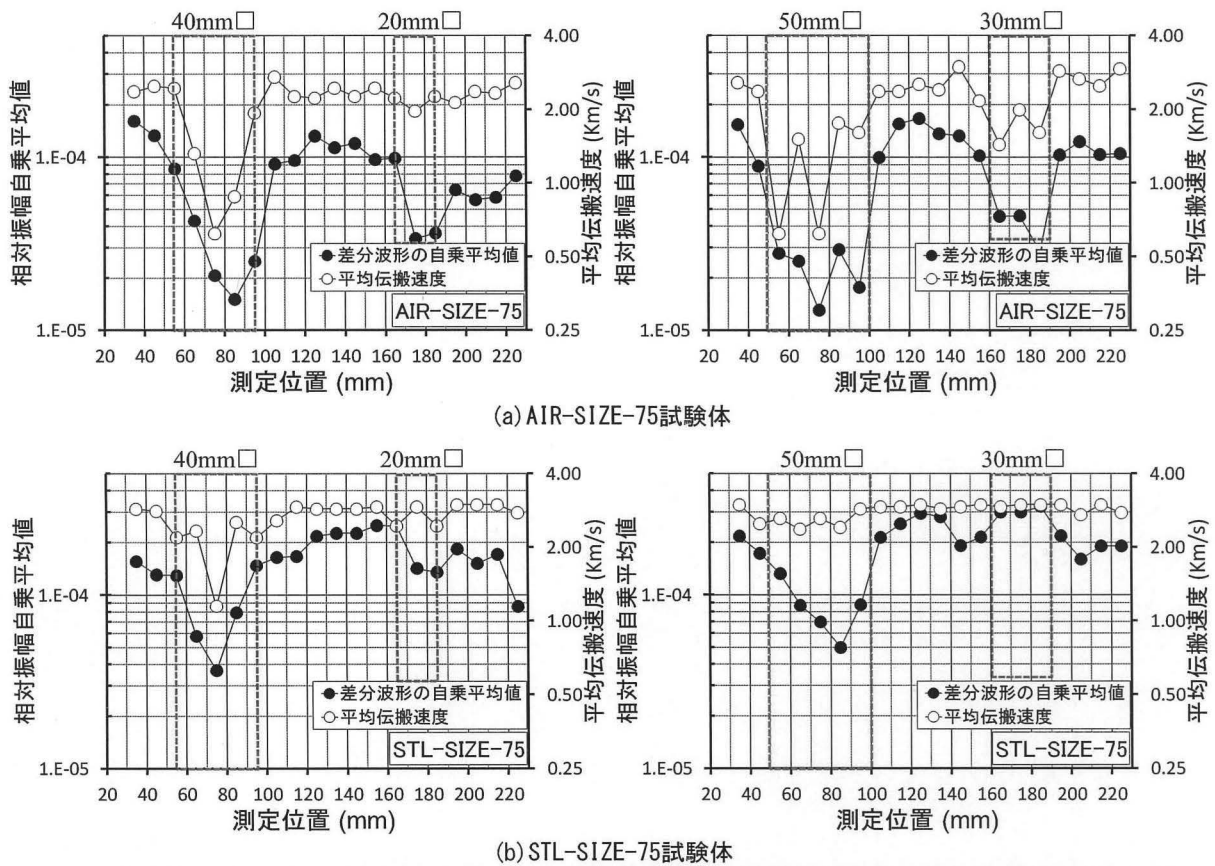


図-4 検出超音波の相対振幅自乗平均値および平均伝搬速度と測定位置との関係の例(埋設物寸法の影響)

直径：10，15，20および25mmの4種類)が内部探査結果に及ぼす影響を、埋設物の寸法が異なるAIR-SIZE-75試験体(図-1(a)参照)で検討した。紙数の関係で図には示していないが、穴径が15mm以下の紙製カバーでは、試験体に入力される超音波のエネルギー量が小さくなり過ぎて、健全部(モルタル部)の探査結果も十分ではない結果が得られた。また、穴径が20および25mmの紙製カバーを用いた場合は、何れも最小寸法(20mm)の埋設物を検出できたが、直径20mmの穴を設けた紙製カバーの方が健全部と埋設部との差が顕著となる結果が得られた。そのため、以後の考察では、穴径が20mmの紙製カバーを用いて行った内部探査の結果について述べる。

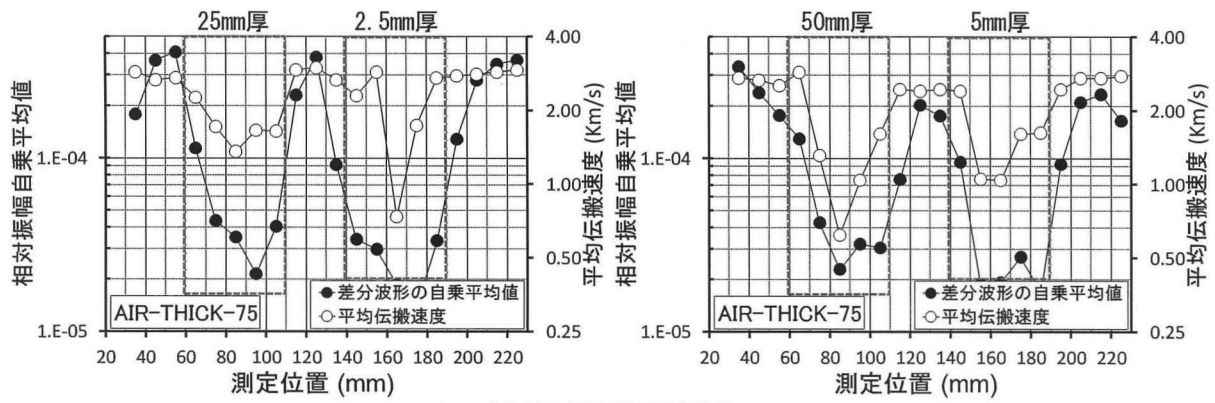
3.2 振幅値および伝搬速度に及ぼす埋設物寸法の影響

図-4(a)および(b)は、寸法の異なる埋設物として、それぞれ発泡スチロールおよび平鋼が埋設されている試験体の相対振幅自乗平均値²⁾(収録した全波形データの相対振幅値の自乗平均値)および平均伝搬速度²⁾(変換子間距離(120または150mm)/超音波伝搬時間)と測定位置との関係を示したものである。なお、図中の赤色の破線で示した枠内が埋設部を示している。これらの図によれば、発泡スチロールが埋設された試験体(図-4(a))の健全部(モルタル部)では、相対振幅自乗平均値(図中の●印)および平均伝搬速度(図中の○印)は、発泡スチロール埋設部に比べて著しく大きな値となっており、モ

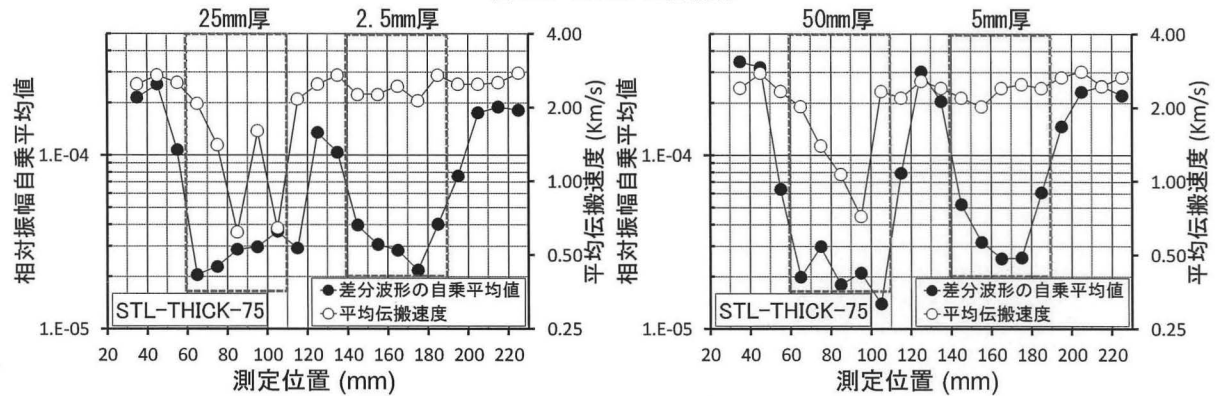
ルタル内部の変状を容易に評価することが可能であることがわかる。これに対して、平鋼が埋設された試験体(図-4(b))では、モルタル部の相対振幅自乗平均値(図中の●印)は、平鋼埋設部と比べ大きくなってはいるが、埋設物寸法が30mm以下の平鋼埋設部では、モルタル部と大差ない値を示している。これは、平鋼の寸法が小さいと、平鋼を迂回してモルタル中を伝搬した超音波が減衰することなく検出されるためと考えられる。また、平均伝搬速度(図中の○印)は、平鋼の厚さが5mmと薄いため、モルタル部と平鋼埋設部の差があまり認められない。

3.3 振幅値および伝搬速度に及ぼす埋設物厚さの影響

図-5(a)および(b)は、それぞれ厚さの異なる埋設物として発泡スチロールおよび平鋼が埋設されている試験体の相対振幅自乗平均値および平均伝搬速度と測定位置との関係を示したものである。これらの図によれば、発泡スチロールが埋設された試験体(図-5(a))のモルタル部の相対振幅自乗平均値(図中の●印)および平均伝搬速度(図中の○印)は、何れも発泡スチロール埋設部に比べて著しく大きな値となっており、モルタル内部の変状を容易に評価することが可能であるといえる。なお、相対振幅自乗平均値(図中の●印)は、発泡スチロールの厚さによる影響は殆ど認められないが、平均伝搬速度(図中の○印)は、厚さ5mmに比べて50mmの発泡スチロールの方が値は小さくなっているのがわかる。これに対して、

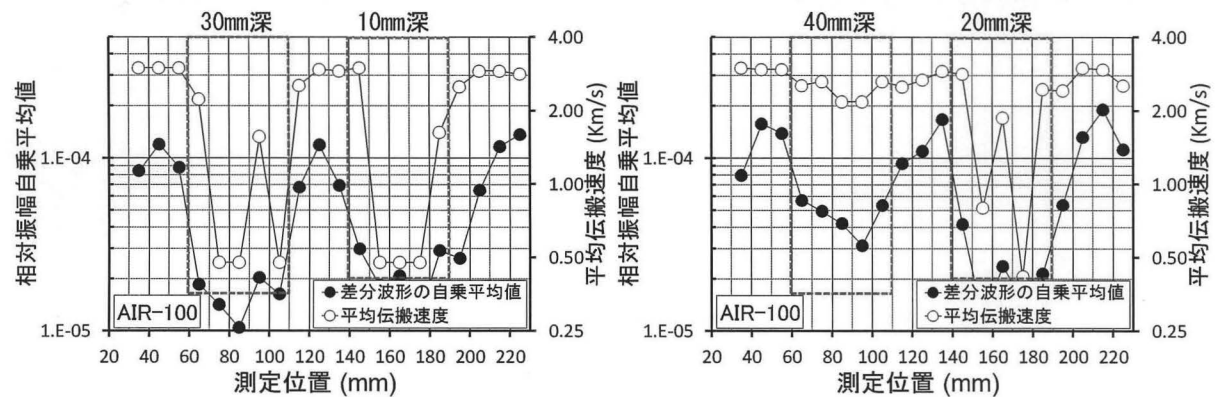


(a) AIR-THICK-75試験体

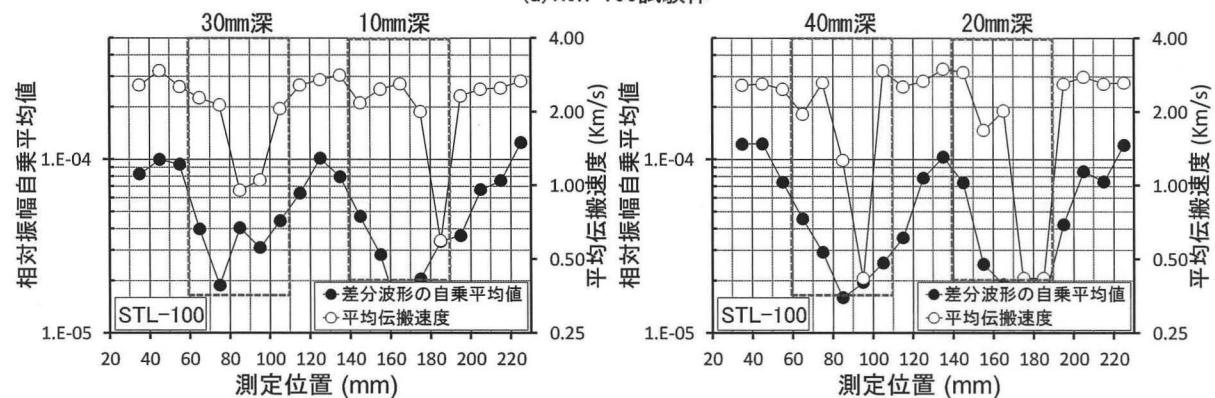


(b) STL-THICK-75試験体

図-5 検出超音波の相対振幅自乗平均値および平均伝搬速度と測定位置との関係の例(埋設物厚さの影響)



(a) AIR-100試験体



(b) STL-100試験体

図-6 検出超音波の相対振幅自乗平均値および平均伝搬速度と測定位置との関係の例(埋設物の埋設深さの影響)

平鋼が埋設された試験体(図-5(b))では、モルタル部の相対振幅自乗平均値(図中の●印)は、平鋼埋設部に比べて著しく大きな値となっており、モルタル内部の変状を

容易に評価することが可能であるといえる。また、平均伝搬速度(図中の○印)は、モルタル部の伝搬速度が毎秒2,300~2,500mであるのに対して平鋼の伝搬速度は毎秒

約5,300mであるため、平鋼埋設部の平均伝搬速度はモルタル部と比べ速くなるはずであるが、平鋼の厚さが5mm以下の薄い場合は、平鋼埋設部とモルタル部の平均伝搬速度に大差がなく、かつ厚さが25mm以上の場合は、平鋼埋設部の平均伝搬速度がモルタル部と比べて逆に小さくなっている。これは、モルタルと平鋼との界面弱層の影響により平鋼を透過する超音波の減衰が著しく、迂回した超音波が初動検出されるためと考えられる。

3.4 振幅値および伝搬速度に及ぼす埋設深さの影響

図-6(a)および(b)は、厚さが100mmの試験体の埋設物として、それぞれ発泡スチロールおよび平鋼が深さの異なる位置に埋設されている試験体の相対振幅自乗平均値および平均伝搬速度と測定位置との関係を示したものである。これらの図によれば、発泡スチロールおよび平鋼埋設部の相対振幅自乗平均値および平均伝搬速度は、何れの場合もモルタル部と比べて小さい値となっており、モルタル内部の変状の評価は可能であるといえるが、埋設物の埋設深さの影響による変化は認められない。

3.5 内部探査結果に及ぼす評価指標の影響

(1) 評価指標に振幅値と伝搬速度を単独で用いた場合

図-7は、検出波形の相対振幅自乗平均値および平均伝搬速度に着目した内部探査結果をコンター図で示した例である。なお、図中の破線は、欠陥・介在物の埋設位置を示す。これらの図によれば、まず寸法の異なる発泡スチロールを埋設した試験体(図-7(a))に注目すると、内部探査の評価指標として相対振幅自乗平均値を用いた場合は、埋設した発泡スチロールの寸法をかなりの精度で評価できているが、平均伝搬速度を用いた場合は、相対振幅自乗平均値を用いた場合と比べて寸法の検出精度が若干劣る傾向にあることがわかる。また、寸法の異なる平鋼を埋設した試験体(図-7(b))の場合では、内部探査に用いる評価指標に関わらず入力用変換子の寸法よりも大きな平鋼の評価は可能であるが、入力用変換子に紙製カバーを付けた場合であっても、寸法が30mm以下の平鋼の評価は困難であり、発泡スチロールが埋設されている場合と比較して平鋼の検出は難しいといえる。

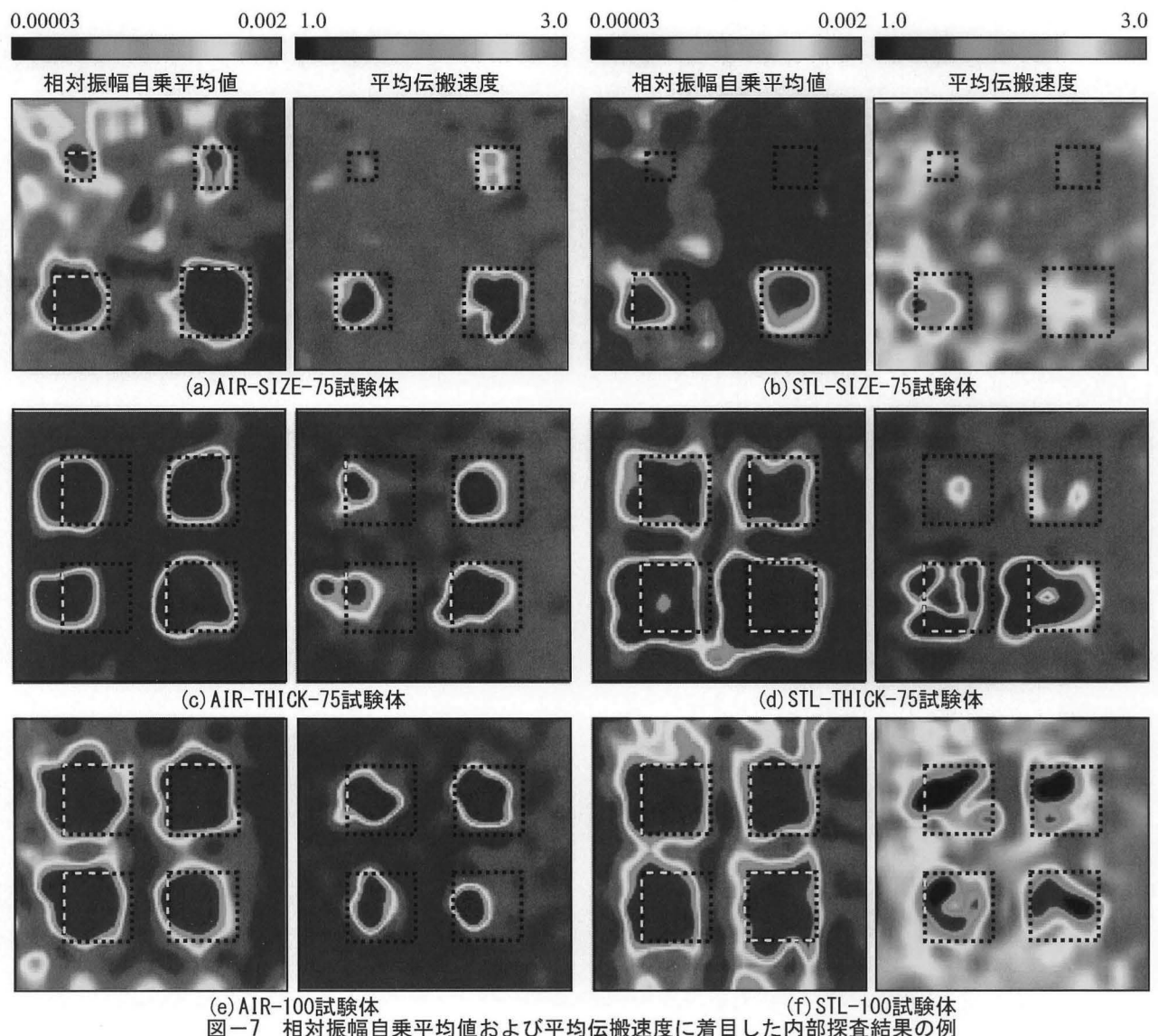


図-7 相対振幅自乗平均値および平均伝搬速度に着目した内部探査結果の例

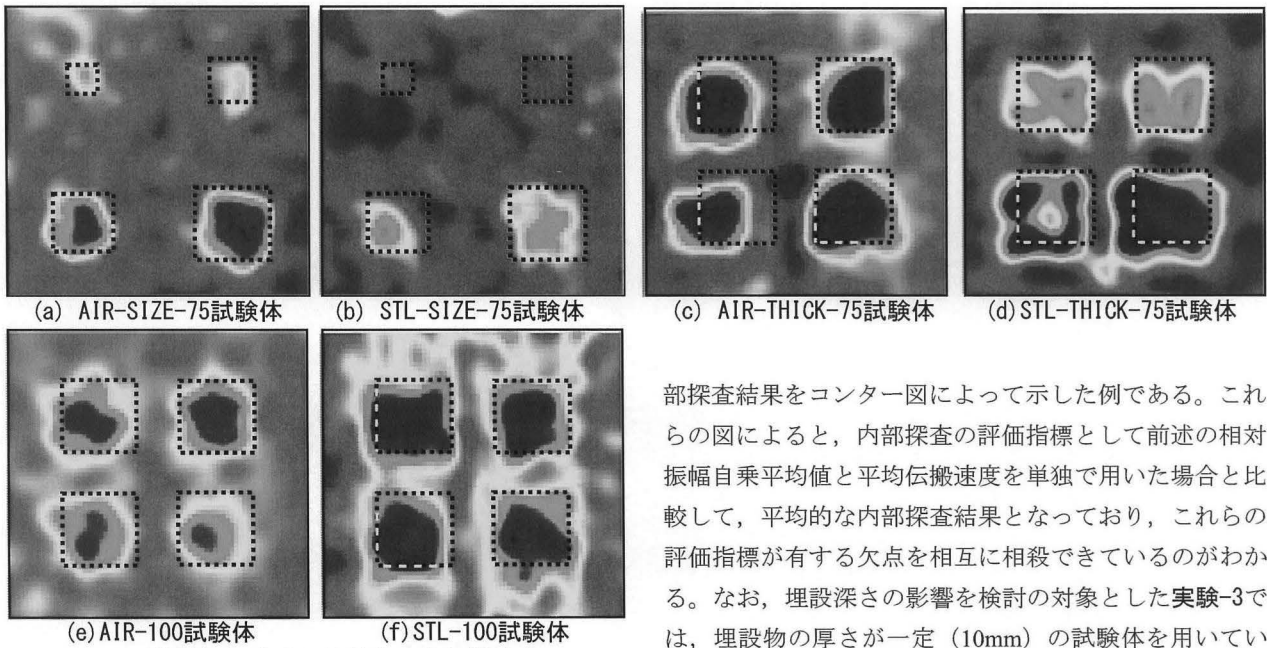


図-8 相対振幅自乗平均値と平均伝搬速度の自乗積に着目した内部探査結果の例

次に、厚さの異なる発泡スチロールおよび平鋼を埋設した試験体(図-7(c)および(d))については、内部探査の指標として相対振幅自乗平均値を用いた場合では、埋設物の種類および厚さに関わらず寸法(50mm)の評価は正確にできているが、厚さの違いを評価するのは難しいことがわかる。これに対して、評価指標として平均伝搬速度を用いた場合には、埋設物の種類に関わらず埋設物が薄くなるほどモルタル部の赤色に近づく傾向が認められるが、発泡スチロールが埋設された試験体(図-7(c))では、実際の寸法(50mm)よりもかなり小さい評価となっている。ただし、平鋼が埋設された試験体(図-7(d))では、3.3節で述べたように、厚さが2.5および5mmの薄い平鋼になると、平鋼埋設部の平均伝搬速度はモルタル部の伝搬速度とほぼ等しくなり、薄い平鋼の評価は困難となる傾向にあることがわかる。

図-7(e)および(f)は、埋設深さが異なる埋設物として、それぞれ発泡スチロールおよび平鋼が埋設された試験体に関する内部探査結果を示したものである。これらの図によれば、内部探査の評価指標として相対振幅自乗平均値を用いた場合には、埋設物の種類および埋設深さに関わらず埋設物の寸法(50mm)を良く評価できているといえるが、評価指標として平均伝搬速度を用いた場合には、特に発泡スチロールが埋設された試験体では、実際の寸法よりも小さい評価となっているのがわかる。

(2) 評価指標に振幅値と伝搬速度の積を用いた場合

図-8(a)～(f)は、無次元化した検出波形の相対振幅自乗平均値と平均伝搬速度の自乗積に着目した場合の内

部探査結果をコンター図によって示した例である。これらの図によると、内部探査の評価指標として前述の相対振幅自乗平均値と平均伝搬速度を単独で用いた場合と比較して、平均的な内部探査結果となっており、これらの評価指標が有する欠点を相互に相殺できているのがわかる。なお、埋設深さの影響を検討の対象とした実験-3では、埋設物の厚さが一定(10mm)の試験体を用いているため、埋設物の埋設深さの評価は、困難であった。

4. 結論

- 1) 評価指標として相対振幅自乗平均値を用いた場合、平均伝搬速度を用いた場合と比較して、寸法の違いの検出性能は優れているが、厚さの違いの検出性能は、平均伝搬速度を用いた場合の方が優れている。
- 2) 評価指標として相対振幅自乗平均値と平均伝搬速度の自乗積を用いた場合は、これらを単独で用いた場合の平均的な内部探査結果となるため、これらの評価指標の欠点を相互に相殺できる利点を有する。

謝辞

本実験の実施とデータ整理に際して多大なるご助力を得た愛知工業大学学部生の松廣晋平君および山田鵬緒君、並びに2次元自動走査型測定装置の試作に際してご協力を得たジャパンプローブ(株)の菊池和幸氏および三和機器製作所の鳴澤博之氏に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 関俊力, 小野晃, 山田和夫: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.316-321, 2012.7
- 2) 関俊力, 瀬古繁喜, 山田和夫: 空中超音波法を適用したセメント系複合材料の内部探査の適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1759-1764, 2015.7
- 3) 関俊力, 瀬古繁喜, 山田和夫: コンクリートの内部探査を目的とした空中超音波法の適用性, 第70回セメント技術大会講演要旨, Vol.70, pp.30-31, 2016.5
- 4) 金森蔵司, 関俊力, 瀬古繁喜, 山田和夫: 空中超音波法を適用したコンクリートの内部探査結果に及ぼす粗骨材および仕上げ材の影響に関する基礎的研究, 第71回セメント技術大会講演要旨, Vol.71, pp.148-149, 2017.5