

論文 超音波法による ASR 既存膨張率の算定

中川 裕之*1・横田 優*2・長尾 和明*3・松島 学*4

要旨: 超音波法を用いてアルカリ骨材反応によって生じた既存膨張率を算定する手法を検討した。算定手法は、供試体による促進膨張実験結果から求めた伝播速度、受振波振幅、周波数特性などと既存膨張率の関係を事前にニューラルネットワーク解析により回帰分析した結果を用いる方法である。本研究では、新たに供試体による促進膨張実験を行い、実測した既存膨張率と超音波法により算定した膨張率を比較検討した。その結果、超音波伝播速度、受振第一波の振幅、周波数スペクトルの平均値の3因子により、既存膨張率0.2%程度までは精度良く算定できる可能性が高いことがわかった。

キーワード: 超音波法, アルカリ骨材反応, 膨張率, ニューラルネットワーク

1. はじめに

コンクリート構造物にアルカリ骨材反応 (以下, ASR) 発生の可能性を有する骨材が使用されている場合, 構造物のひび割れ発生前に ASR を察知することは難しい。今後も, 使用される砕石, 砕砂等に ASR が潜在する可能性が考えられ, コンクリート構造物の適切な維持管理のために, ひび割れ発生前に ASR 潜在性を把握するための早期診断方法の技術開発は重要と思われる。

筆者らは, 超音波法を用いて ASR による膨張変化を捉え, さらにには既に生じている膨張量 (以下, 既存膨張率) を求めるための手法を検討している。これまでの検討^{1),2)}では, 促進膨張実験から得られた既存膨張率と超音波測定から得られる伝播速度, 受振波振幅, 周波数特性など (以下, 超音波伝播特性) の関係を基にして, 実構造物から採取したφ100mm コアを対象に, 超音波測定により既存膨張率を算定できる可能性があることがわかった。

本研究では, これまでに構築した超音波法による既存膨張率算定手法の再現性及び精度を確認するために, ASR 反応性骨材を使用したコンクリート供試体を製作, 促進膨張実験を行い, コンタクトゲージ測定による実測膨張率と超音波法により算定した既存膨張率 (以下, 超音波膨張率) を比較検討した。次に, 既存膨張率の算定精度向上のために, 膨張率算定の際に指標とする超音波伝播特性の各因子を再検討した。

2. 既往の研究に基づく既存膨張率算定手法

2.1 超音波伝播特性

超音波膨張率を算定する際に指標とする超音波伝播特性を図-1, 図-2に示す。コンクリート強度や剛性を表すための指標として従来から研究³⁾されている伝播速度に加え, 伝播エネルギーを表す指標として, 受振波から

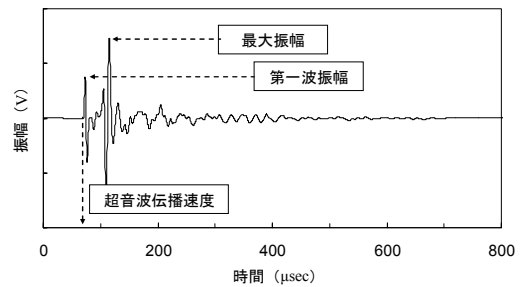


図-1 受振波から求める伝播特性

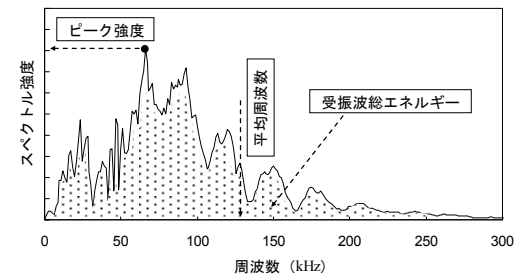


図-2 周波数スペクトルから求める伝播特性

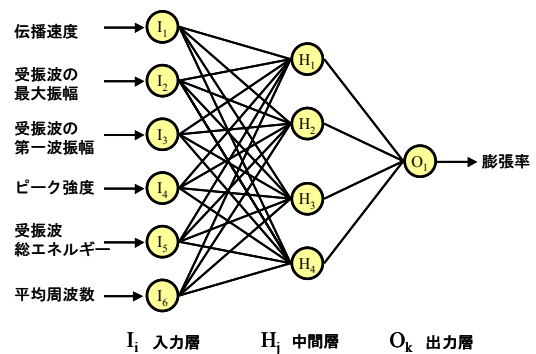


図-3 階層構造と超音波伝播特性

は最大振幅および第一波振幅の電圧値, 周波数スペクトルからはスペクトル強度の最大値 (以下, ピーク強度), 周波数毎のスペクトル強度を積算した面積 (以下, 受振

*1 (株) 四国総合研究所 土木技術部副主席研究員 博 (工) (正会員)

*2 (株) 四国総合研究所 土木技術部・部長 工博 (正会員)

*3 四国電力 (株) 土木建築部建築技術グループリーダー 工修 (正会員)

*4 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリート配合

種別	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 C× (%)	NaCl Na ₂ Oeq(kg/m ³)
						水	セメント	細骨材	ASR粗骨材	砂岩粗骨材		
基礎実験	20	12±2	4.5±1	50	44.4	165	330	784	981	—	0.50	1.9
本実験	20	12±2	5.0±1	60	44.0	180	300	829	618	412	0.18	10

混和剤：基礎実験（高性能AE減水剤）、本実験（AE減水剤）

波総エネルギー）、周波数特性を表す指標として受振波総エネルギーの50%にあたる周波数（以下、平均周波数）、以上6因子である。

2.2 算定手法構築のための実験

筆者らは、これまでにASR既存膨張率と超音波伝播特性の関係を求めるために促進膨張実験（以下、基礎実験）を行った^{1),2)}。基礎実験で使用した供試体のコンクリート配合および物性値を表-1、表-2に示す。

粗骨材に化学法（JIS A1145）で「無害でない」と判定された安山岩と流紋岩の混合を用いて製作した直方体の大型供試体（900×600×500mm）からコア抜きしてφ100×250mmに整形した供試体を、50℃飽和塩化ナトリウム水溶液に浸漬し促進膨張させた。コンタクトゲージによる長さ変化測定により既存膨張率を求め、同時に超音波測定により各超音波伝播特性を求めた。各測定は、全て20℃,60%RHの条件下で行った。

2.3 既存膨張率の算定手法

基礎実験結果から得られた各超音波伝播特性と既存膨張率の関係を学習データとして、ニューラルネットワーク解析（以下、NN解析）により回帰分析した。階層構造および入力因子を図-3に示す。

超音波法による既存膨張率の算定手法は、上記に示したNN解析結果を用いて、測定から得られた超音波伝播特性を図-3に示した階層構造に入力することによって各伝播特性を総合的に判断し、測定した対象コンクリートの既存膨張率を算出する方法である。

3. 促進膨張実験

3.1 供試体製作

本研究のために製作した供試体のコンクリート配合および物性値を表-1、表-2に示す。コンクリートには、ASR膨張を促進するために塩化ナトリウムをNa₂O換算で10kg/m³相当添加した。

本促進膨張実験用の粗骨材は、基礎実験で使用したASR反応性骨材である安山岩・流紋岩とASRに関して「無害」と判定された砂岩を重量比6:4で使用した。ASR反応性骨材と砂岩を混合した目的は、ペシマム配合によるASR膨張の促進化と基礎実験と異なる骨材混合による超音波膨張率への影響を検討するためである。

ペシマムの重量比は、事前にいくつかの重量比にて実験を行って決めた。その結果を図-4に示す。ペシマム確

表-2 コンクリート物性

種別	表乾単位質量 (g/cm ³)	圧縮強度 28日(N/mm ²)	静弾性係数 28日(×10 ⁴ N/mm ²)
基礎実験	2.24	31.0	2.50
本実験	2.33	29.6	2.42

表-3 骨材物性

骨材種別	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	
ASR粗骨材	安山岩 流紋岩	2.51	3.19	6.68
粗骨材	砂岩	2.58	1.83	6.75
細骨材	砂岩	2.60	1.70	2.65

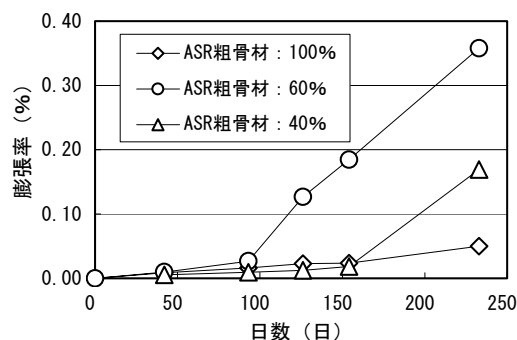


図-4 ペシマム確認実験結果

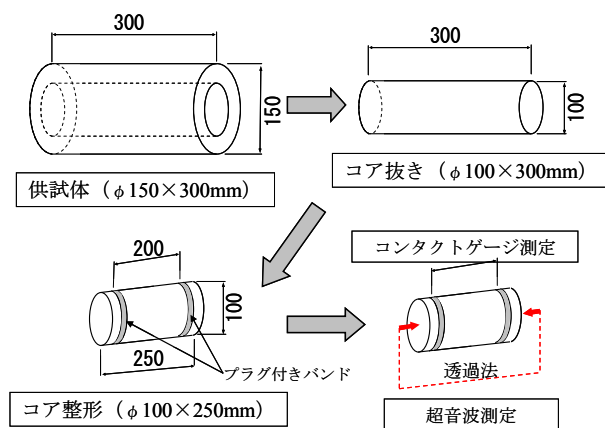


図-5 コア供試体の製作および測定概要図

認のための実験条件は、上記と同種類の粗骨材を所定の重量比で混合して製作したφ100×200mmの円筒供試体をJCI-DD2法⁴⁾を参考に、ステンレス養生箱に入れ密閉し40℃,100%RHで促進膨張させた結果である。

細骨材は、全てASR反応性を有していない砂岩である。各骨材の物性値を表-3に示す。

本促進膨張実験用の供試体は、最初に円筒形φ150×300mmを製作、28日間水中養生した後、コア抜きしてφ100×250mm（以下、コア供試体）に切断整形した。

製作方法の概要を図-5に示す。コア供試体は3本製作し、供試体名称は各々「コア供試体 1」、「コア供試体 2」、「コア供試体 3」とした。基礎実験と同様、コア抜きしたものを供試体とした理由は、現在の実務で行われているASR診断作業では、残存膨張試験のためにコア採取される場合が多く、将来的には、その採取コアの残存膨張試験をする前に超音波測定が可能と考えたからである。本研究では、供試体形状や供試体表面でコア抜き時に切断された骨材状態などを採取したコアに近い状態とした。

3.2 促進養生による膨張率の測定

コア供試体は、プラグゲージ付きステンレス製バンドを20cm間隔で取り付けした後、コンタクトゲージで初期値を測定した。促進膨張は、ステンレス養生箱に入れ密閉し40℃,100%RHで行った。促進養生しながら定期的に長さ変化を測定し、初期値との比を実測膨張率とした。測定は、全て20℃,60%RHの条件下で行った。

本研究では、測定した実測膨張率がコア供試体のASRによる既存膨張率を示しているものとした。

3.3 超音波測定

超音波測定は、基礎実験と同様に20℃,60%RHの条件下で図-5に示したようにコア供試体の端面をセンサで挟む透過法で行った。発・受振センサは、共振周波数0.5MHzのセラミック振動子(直径40mm)を使用した。印加電圧30V、サンプリング間隔0.2μsec、サンプリング数4096である。上記条件で受振した第一波到達の伝播速度、約810μsec分の受振波形を記録した。

4. 膨張率の比較検討

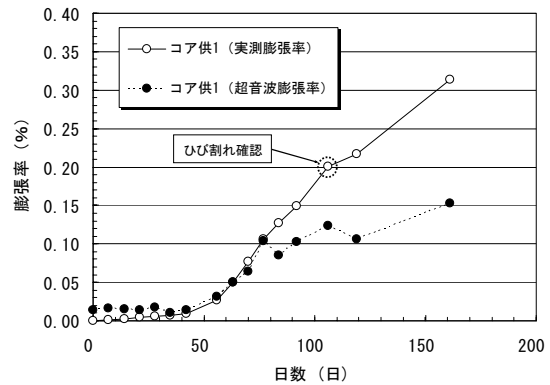
4.1 実測膨張率と超音波膨張率

前章3.で述べた促進膨張実験の結果から、図-3に示した6因子の超音波伝播特性により算定した超音波膨張率と実測膨張率を各コア供試体別に図-6に示す。

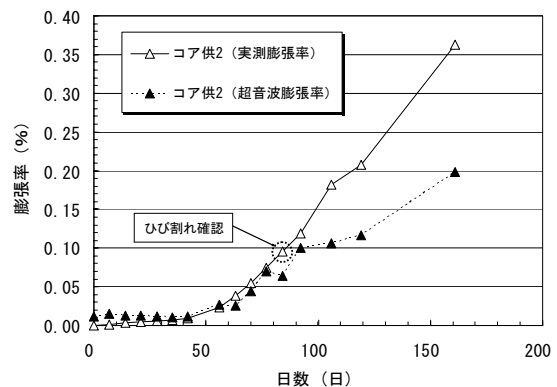
実験中、コア供試体表面にひび割れ発生が目視で確認できた時期を図-6中に示した。ひび割れは、本実験結果からは既往膨張率0.1~0.2%程度で発生していた。

超音波膨張率が最初から0.01%以上になっている理由は4.2で述べる。超音波膨張率は、0.02~0.1%程度の範囲では実測膨張率の増加をほぼ正確に捉えていたが、0.1%以上では実測膨張率に対する算定誤差が大きくなっていった。コア供試体1は、0.2%程度でコア供試体表面にひび割れが観察されたが、図-6に示したように、超音波膨張率の算定誤差が3本全てのコア供試体に関して同様な傾向であったことから、コア供試体1についても0.1%程度でコア内部にひび割れが発生していたものと考えられる。

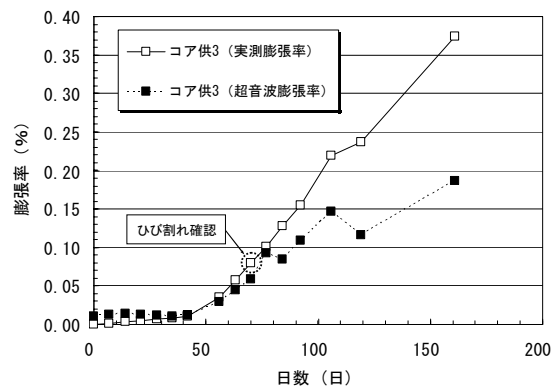
6因子の超音波伝播特性により算定した超音波膨張率と実測膨張率の比較検討結果からは、コンクリート内に



(a) コア供試体 1



(b) コア供試体 2



(c) コア供試体 3

図-6 伝播特性6因子を指標とした
超音波膨張率の比較検討

ASR膨張によるひび割れが発生するまでは、超音波膨張率の算定精度は比較的精度が良いが、ひび割れ発生に伴い算定精度が低下することがわかった。

ここで、既往膨張率0.1~0.2%範囲では、コンクリート内部のみにひび割れが発生し、発生したひび割れが外側から目視できない場合が想定される。本研究の算定手法をASRに対する早期劣化診断に適用するために、採取したコンクリートコア表面にひび割れが見つからない場合でも、可能な限り正確な既存膨張率を算定する必要があると思われる。

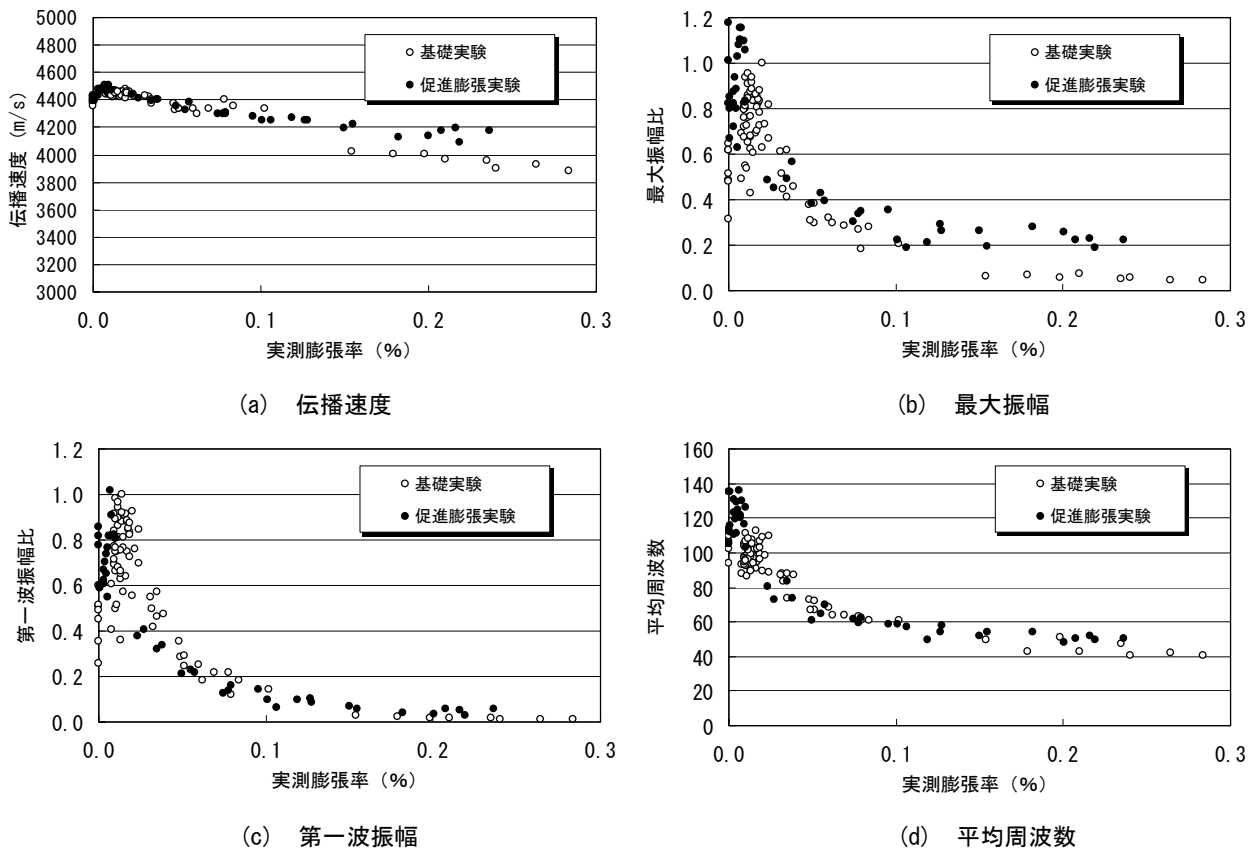


図-7 超音波伝播特性と実測膨張率

4.2 基礎実験結果と超音波膨張率

ASR 膨張に対する各超音波伝播特性の感度を検討するために、基礎実験および本促進膨張実験から得られた各超音波伝播特性と実測膨張率の関係を図-7に示す。最大振幅および第一波振幅は、各々基礎実験での最大値に対する比として示した。伝播特性6因子の内、ピーク強度、受振波総エネルギーは、最大振幅と同傾向であり省略した。

図-7に示したように、各超音波伝播特性は、実測膨張率0~0.01%間は増加し、0.01%程度以降は膨張率の増加に伴い低下している。本研究では、基礎実験結果をNN解析する際、同じ超音波伝播特性値に対して2種類の既存膨張率が該当することを避けるために、0~0.01%までのデータを削除した。よって、算定する超音波膨張率の最低値は0.01%以上となってしまった。既存膨張率が0.01%程度までの誤差は、実務上問題ないものと判断し、本研究では補正しなかった。

伝播速度以外の各超音波伝播特性は、実測膨張率0.01%以降0.1%までは、膨張率増加に対して大きく低下しているが、0.1%以降はほぼ一定に近づいている。促進膨張実験結果からは0.1~0.2%程度でひび割れが発生しており、コンクリート内のひび割れが各超音波伝播特性の膨張率に対する感度に影響したと思われる。よって図-6に示したように、既往膨張率が0.1%程度まで

は各超音波伝播特性の膨張率に対する感度が高く、比較的精度良く既存膨張率を算定できたが、0.1%以降、発生したひび割れが徐々に増えていくにしたがって、算定精度が低下したと考えられる。

図-7(a), (b)に示したように、伝播速度と最大振幅は、基礎実験結果と比べてひび割れ発生後のばらつきが若干大きくなっていった。図-7(c), (d)に示した第一波振幅、平均周波数は、ひび割れ発生前後とも基礎実験とほぼ同様で、ばらつきも少なかった。

本促進膨張実験では、物性値の違う砂岩骨材を全粗骨材量の4割使用したが、図-7に示したように、ひび割れ発生後に若干のばらつきはあったが、各超音波伝播特性は基礎実験結果とほぼ同様な値を示しており、砂岩骨材による影響は大きくなかったものと思われる。

伝播速度や最大振幅のばらつきは、既存膨張率が同程度でも、コア供試体内に発生したひび割れの方向、分布面積、分布範囲などの違いが各超音波伝播特性のばらつきになったと思われる。最大振幅は、横波やコア供試体の側面を伝播するガイド波等も含まれている可能性があり、コンクリート内部を伝播する縦波と思われる第一波振幅に比べて、コア供試体内部の微小な変化が埋もれてしまったことが考えられる。

本実験結果から、第一波振幅や平均周波数は、ひび割れ発生初期段階におけるひび割れの影響が比較的小さ

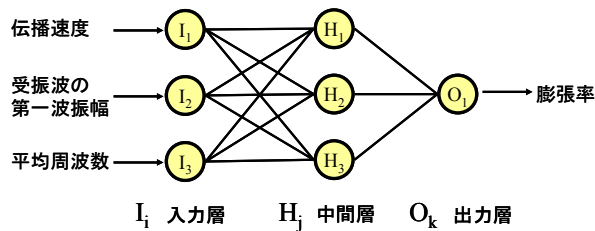


図-8 3 因子による階層構造

くなる可能性がある。ただしひび割れ発生後は、膨張率増加に対する感度が大きく低下する。伝播速度は、本実験で 0.3%以上が不明であるが、ひび割れ発生後も他因子に比べて若干ながら膨張率に対する感度を有している。伝播速度は、測定される数値の理論的根拠が受振波振幅や周波数特性に比べて明確と考えられ⁵⁾、本算定手法に必要な因子と思われる。

以上、図-7 に示した各伝播特性の比較から、伝播速度、第一波振幅、平均周波数の 3 因子を考慮することにより、ひび割れ発生後の超音波膨張率の算定精度が向上する可能性が高いことがわかった。

5. 超音波膨張率の精度向上検討

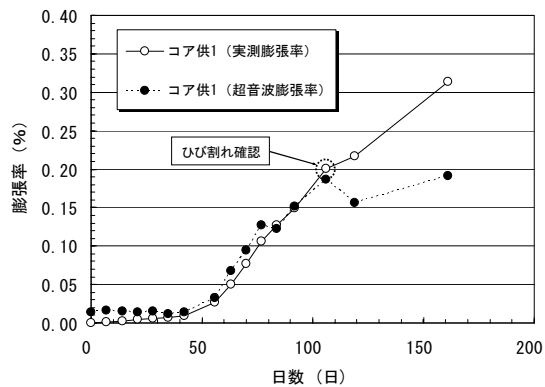
超音波膨張率の算定精度向上を目的に、算定時に考慮する超音波伝播特性の検討を行った。

前章 4.での検討結果から、超音波膨張率を伝播速度、第一波振幅、平均周波数の 3 因子から算定するために、まず基礎実験から得られた 3 因子と膨張率の関係を NN 解析により再度回帰分析した。階層構造および入力因子を図-8 に示す。

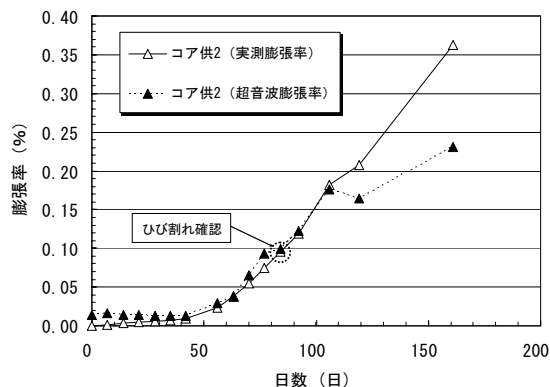
本促進膨張実験での超音波測定結果から、伝播速度、第一波振幅、平均周波数の 3 因子を考慮し、上記の再 NN 解析結果より超音波膨張率を算定した結果を図-9 に示す。図-9 には図-6 と同様に実測膨張率も示した。図-9 と比較するために、伝播速度のみから超音波膨張率を算定した結果を図-10 に示す。伝播速度のみからの算定方法は、基礎実験で得られた伝播速度と膨張率の関係を近似した関係式を求め (図-11)、本促進膨張実験で得られた伝播速度から算定した。

図-10 に示したように、伝播速度のみによる超音波膨張率の算定結果は、図-6 に示した 6 因子による算定結果とほぼ同様の算定精度であった。本実験では粗骨材種類による影響が小さかったため、伝播速度のみでも既存膨張率の算定がある程度可能であったものと思われる。伝播速度のみからの超音波膨張率算定精度は、既存膨張率 0.1%以上で低下していた。

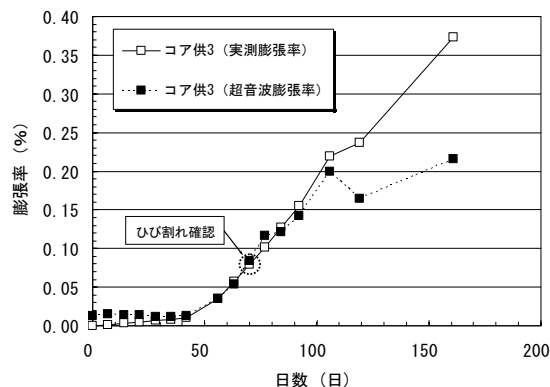
図-9 に示したように、3 因子により超音波膨張率を算定した結果、0.2%程度まで比較的精度良く既存膨張率を



(a) コア供試体 1



(b) コア供試体 2



(c) コア供試体 3

図-9 伝播特性 3 因子を指標とした
超音波膨張率の比較検討

算定できていた。0.2%以上では算定誤差が大きくなっていった。0.1~0.2%間は、コア供試体に発生したひび割れ内はまだ空隙だったのではないかとと思われる。ひび割れ発生に伴い次第に透過面積が減少し、伝播エネルギーを表す指標である第一波振幅値が減少したと思われる。平均周波数は、ひび割れの大きさよりも波長の短い高周波成分から伝播しなくなり、平均周波数値が低下したと思われる。第一波振幅や平均周波数は、コア供試体内に発生し始めた微細なひび割れをこのようにして適切に捉えることができたのではないかと考えられる。0.2%以上

になると、コア供試体に発生したひび割れ内に ASR 生成物が充填され、擬似的に緻密化されたことによって各超音波伝播特性が大きくなり、その結果、算定される超音波膨張率が既存膨張率よりも小さくなったものと考えられる。ただし本研究では、実際のひび割れ内の状態は確認できなかった。

本実験結果からは、コア供試体を超音波測定して得られた伝播速度、第一波振幅、平均周波数の 3 因子から、膨張率 0.2%程度までは、適切に既存膨張率を算定できる可能性が高いことがわかった。今後、本研究手法の適用に関しては、物性が異なる ASR 反応性骨材や川砂利の使用、W/C の違いなど様々な条件での検討が必要と思われる。

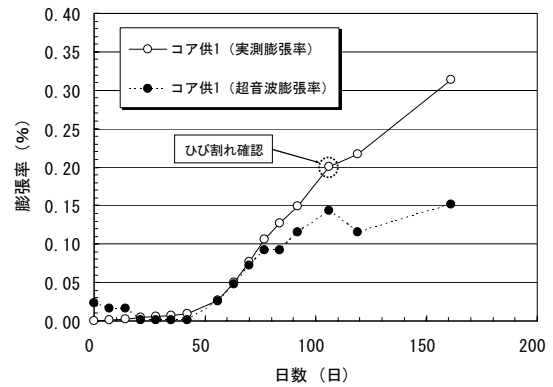
6. まとめ

超音波法による ASR 既存膨張率の算定手法を構築し、ASR 反応性骨材を用いたコア供試体の促進膨張実験を行い、算定手法の精度を検討した。既存膨張率算定の際に考慮する超音波伝播特性の種類を見直した。

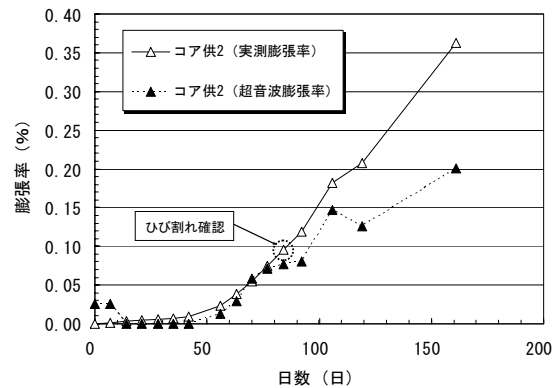
- (1) ASR 膨張によるひび割れは、本促進膨張実験からは、既存膨張率が 0.1~0.2%程度で発生した。
- (2) 本実験に関して、既往研究の 6 因子の伝播特性による既存膨張率算定手法は、コンクリート内にひび割れが発生するまでは比較的算定精度が良かったが、ひび割れ発生後は算定精度が低下した。
- (3) 既存膨張率を算定する際に考慮する超音波伝播特性に関して、伝播速度、受振第一波振幅、平均周波数の 3 因子から判断することによって、0.2%程度までは精度良く既存膨張率を算定できる可能性が高いことがわかった。

参考文献

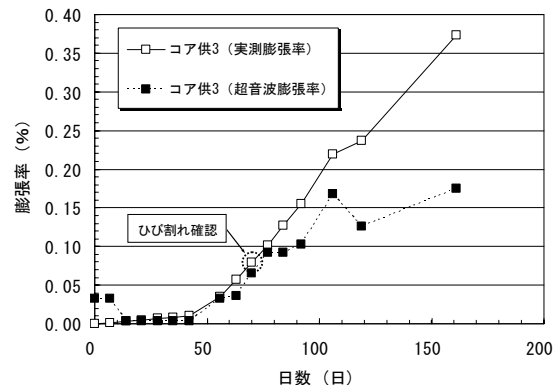
- 1) 中川裕之, 横田優, 松田耕作, 松島学: 超音波法による ASR 膨張量測定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.625-630, 2007
- 2) 中川裕之, 横田優, 長尾和明, 松島学: ASR 劣化状態に関する超音波法による評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.793-798, 2008
- 3) 尼崎省二: 超音波法によるアルカリシリカ反応の非破壊評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp.751-756, 1990
- 4) 日本コンクリート工学協会: JCI 規準集 (1977~2002 年度), pp.152-156, 2004.4
- 5) 土木学会: 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ 61, pp.20-41, 2004.8



(a) コア供試体 1



(b) コア供試体 2



(c) コア供試体 3

図-10 伝播速度のみを指標とした
超音波膨張率の比較検討

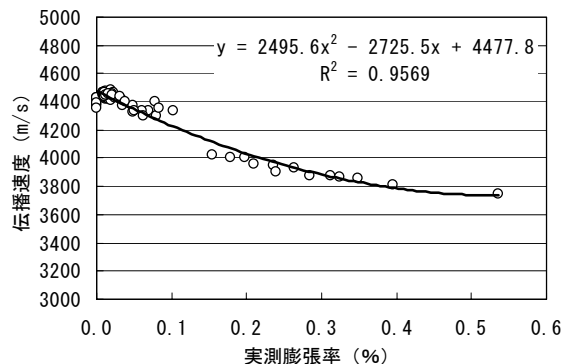


図-11 伝播速度と膨張率