

# 論文 ASRを生じたコンクリートの材料劣化評価に対する超音波法の適用

村坂 宗信\*1・鈴木 基行\*2

**要旨:** ASRが生じたコンクリート中の超音波伝搬挙動を解明するため、円柱供試体を用いてASR促進膨張過程における供試体中の骨材及びモルタル部分の特性変化、膨張過程で発生するマイクロクラックの存在が、超音波伝搬速度や周波数特性に及ぼす影響について検討した。その結果①超音波伝搬速度は骨材寸法の変化に余り影響しないものの骨材量に対して大きく影響を受けること②周波数特性に関しては骨材寸法が大きくなるに連れて高周波数域の減衰が顕著であること③コンクリート中のマイクロクラックは超音波伝搬速度には余り影響しないものの周波数特性を大きく変化させることが確認できた。特に高周波数域の減衰が顕著であることが確認できた。

**キーワード:** 超音波, アルカリシリカ反応, 周波数特性, マイクロクラック

## 1. はじめに

コンクリートはセメントペースト中に骨材が分散して存在する複合材料である。この複合材料中における超音波伝搬挙動を複雑にしているものは、材料の不均一性であり、特に①骨材の存在(大きさ・量)②セメントペースト部分の特性変化③マイクロクラックの存在が、コンクリート中を伝搬する超音波の速度及び周波数特性に及ぼす影響は大きいと考えられる。アルカリシリカ反応(以下、「ASR」という)は、コンクリートに含まれる強アルカリ性の水溶液が骨材中の反応性珪物と反応し、異常膨張やそれに伴うひび割れ等を引き起こす現象であり、超音波法を実施する上で、上述した3項目の評価を明確にすることがポイントと考えられた。

近年、ASRによるコンクリート膨張劣化に関して、透過法による超音波測定から得られる超音波伝搬速度や周波数特性等の超音波伝搬特性が、コンクリート物性を評価する有効な手法であることが報告<sup>1)2)</sup>されている。



写真-1 広帯域超音波測定システム

しかしながら材料の不均一性に着目した報告は非常に少なく、膨張率と超音波伝搬特性に関する報告が主である。そこで本論文では、まずASR骨材を用いた供試体に対して超音波透過試験を実施し、骨材の大きさや量及びセメントペースト部分の密実性の違いが超音波の伝搬速度及び周波数特性に与える影響を検討した。続いて促進養生による膨張過程において、セメントペーストの特性変化及びマイクロクラックの存在が超音波伝搬挙動に与える影響について検討した。

## 2. 使用する広帯域超音波透過試験の概要

透過法による超音波伝搬速度、受振波のエネルギー及び周波数特性の測定には、写真-1に示す広帯域超音波測定器を使用した。超音波の発・受振にはセラミック振動子(共振振動数0.5MHz)を組み込んだφ40(mm)の広帯域垂直探触子を2個使用し、印加電圧30V、増幅度70dB、サンプリング周波数2MHzの測定条件にて実施した。

評価項目としては、供試体中の超音波伝搬時間から得られる超音波伝搬速度と、受振波形に対してFFT処理を実施することで得られる周波数分布を取り上げることとした。発振及び受振探触子の供試体表面への設置に際しては、表面粗度が試験結果に及ぼす影響を除去するため、表面のグラインダー処理を実施し、適切な接触媒体(SONOTECH社製ハイゼット使用)を媒介した。また供試体の含水状態が試験結果に及ぼす影響を考慮して、試験実施直前まで水溶液中に浸漬させた。

このような試験方法の基で、評価対象とする周波数範囲は、超音波の減衰をほとんど無視できるアルミニウム板:50x100x200(mm)に対して超音波透過試験を行い確認した。その際に得られた受振波形及びその周波数分析結

\*1 調査設計会社 水空舎 (正会員)

\*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

果を図-1及び図-2に示す。この結果から、本論文に用いる超音波は0~500(kHz)という比較的広い周波数帯にわたって成分を有していることが確認できる。

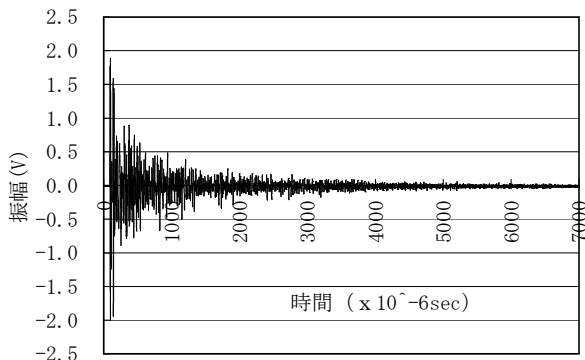


図-1 アルミニウム供試体を用いた時の受振波形

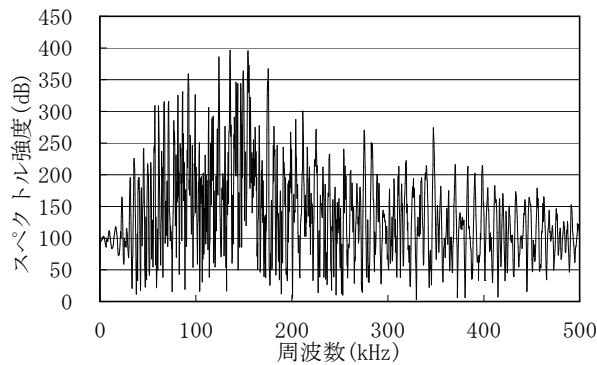


図-2 入射超音波の周波数特性

### 3. 超音波伝搬挙動に関する基礎的検討

#### 3.1 供試体概要

使用する供試体寸法はφ100x200(mm)の円柱供試体とし、始めにコンクリート中の骨材影響を評価するため、大きさの異なる骨材をセメントペースト中に混入させて作製した。骨材の直径及び混入量が超音波伝搬挙動に与える影響を検討するため、骨材の直径を10・20・30(mm)、骨材体積濃度を10・25・35(%)と変化させた供試体を作製した。この時、供試体作製時に骨材が沈降しないようにセメントペーストの水セメント比を30(%)とした。次にコンクリート中のセメントペースト部分の密実性が弾性波伝搬挙動に与える影響を評価するため、骨材量を一定(直径20(mm)・体積濃度25(%) )として、水セメント比を30(%)・50(%)の2種類を作製した。表-1に各材料の諸特性を示す。なおポアソン比は角柱供試体(材令:28日, 寸法:40mmx40mmx160mm)用いて、超音波透過試験より縦波及び横波伝搬速度を測定して算定<sup>3)</sup>した。

#### 3.2 骨材の大きさ及び混入量が超音波伝搬挙動に与える影響

岩波等<sup>4)</sup>はガラス球や鋼球を骨材に模擬した実験を行い、模擬骨材の大きさや混入率が超音波伝搬挙動に及ぼ

表-1 使用材料の諸特性

(a)使用材料の諸特性

材料	種類	特性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	砕砂	密度: 2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.93%, 粗粒率: 2.79
粗骨材	碎石 安山岩系	密度: 2.51g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 3.22%, 粗粒率: 6.68

(b)セメントペースト・骨材の伝搬速度・ポアソン比

材料種類	縦波伝搬速度 (m/s)	横波伝搬速度 (m/s)	ポアソン比
S・P (W/C=30%)	4330	2510	0.247
S・P (W/C=50%)	3725	2112	0.263
骨材	5638	3453	0.200

※S・P:セメントペースト

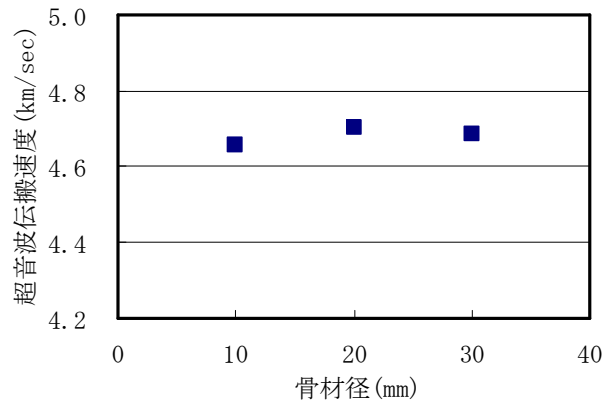


図-3 骨材径と超音波伝搬速度との関係 (骨材体積濃度: 35%の場合)

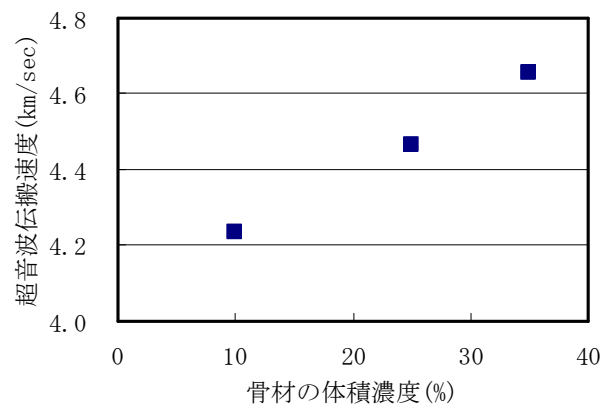


図-4 骨材量と超音波伝搬速度との関係 (骨材径: 10mmの場合)

す影響が大きいことを報告している。ここではASRを有する反応性粗骨材を使用して実験を行った。図-3及

び図-4に骨材の直径及び混入量を変化させた時の超音波伝搬速度の結果を示す。この結果から、骨材径よりも骨材量の変化の方が超音波伝搬速度に与える影響は顕著であることが確認できた。これは表-1(b)に示すようにセメントペーストよりも骨材の方が超音波伝搬速度は大きく、その混入量が多いほど全体としての超音波伝搬速度が大きくなるためと推測される。

次に骨材の存在が供試体中を伝搬する超音波の周波数特性に与える影響について検討を行った。図-5及び図-6にセメントペースト中の骨材の直径及び混入量を変化させた時の超音波透過試験の周波数分析結果を示す。

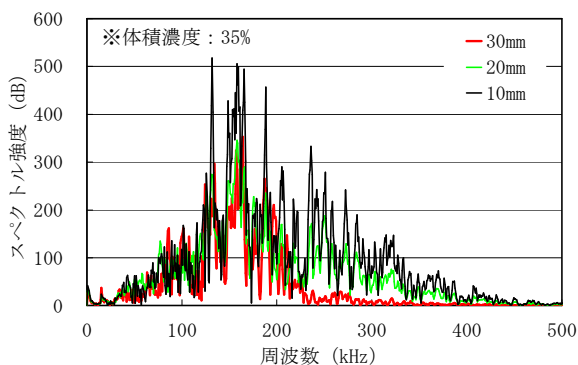


図-5 骨材径と超音波周波数特性の関係

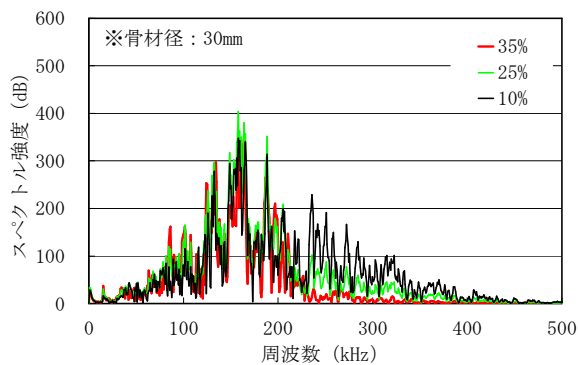


図-6 骨材量と超音波周波数特性の関係

この結果から、骨材の直径が大きくなるほど、混入量が大きくなるほど周波数分布のうちで高周波数成分が減衰していることが確認できた。この減衰の影響を受けている周波数範囲は200~400(kHz)であり、骨材の直径と

同程度の波長に相当する周波数範囲と一致することが確認できた。これは岩波等<sup>4)</sup>が実施したガラス球や鋼球を骨材に模擬した実験結果と同様の傾向である。この減衰は骨材の存在に起因する超音波の散乱によるものと推測される。また実験結果から、骨材量よりも骨材径の方が周波数特性に与える影響は大きいことが確認できた。

### 3.3 セメントペースト部分の密実性が弾性波伝搬挙動に与える影響

次に、セメントペースト部分の密実性が超音波伝搬挙動に与える影響を調べるため、コンクリートの水セメント比を変化させることで密実性の異なる供試体を作製し、同様の超音波透過試験を実施した。図-7に水セメント比:30%・水セメント比:50%の供試体中を透過した超音波の周波数分析結果を示す。水セメント比が増加すると高周波数帯における減衰傾向が確認できた。これは水セメント比の増加によりセメントペーストの密実性が低下し、セメントペーストと骨材境界面における超音波の散乱・反射が顕著になったものと推測される。

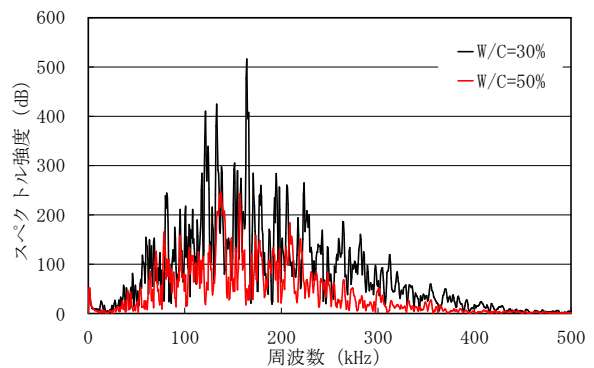


図-7 水セメント比が異なるときの周波数分布

## 4. 促進養生によるASR膨張過程の超音波伝搬挙動の確認

ASRを評価する上で重要なポイントは、膨張過程における骨材の劣化程度を評価できるかである。3.において、超音波透過試験で骨材の動きを捕らえられることが検証できた。ここでは促進養生による膨張過程において超音波伝搬挙動がどのように変化するか検証することを目的とする。

表-2 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		水 (W)	セメント (C)	細骨材 非反応性	粗骨材※1		減水剤 ※2	アルカリ 総量※3
					反応性	非反応性		
46.1	46.8	181	393	855	486	487	C*1.50%	6.0

※1; 粗骨材径の粒度範囲; 10~20mm    ※2; 遅延型ナフタレン系高性能減水剤  
 ※3; NaOHを使用し、アルカリ総量=6.0kg/m<sup>3</sup>となるように添加

#### 4.1 供試体概要

使用したコンクリート配合を表-2に示す。化学法で「無害でない」と判定された反応性骨材は安山岩系の骨材であり、非反応性骨材と1:1の割合で用いた。使用する反応性骨材に関わらずコンクリート中のアルカリ総量が $4.0\text{kg/m}^3$ 以上で顕著な膨張が見られること<sup>5)</sup>が報告されており、本論文ではアルカリ総量を $6.0\text{kg/m}^3$ と設定した。 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体は、コンクリート打設から5週間、 $20^\circ\text{C}$ で封緘養生したのち、デンマーク法を参考に、飽和塩化ナトリウム水溶液中に浸漬し $40^\circ$ の恒温槽内で促進養生した。供試体の膨張率は、JIS A 1129<sub>1993</sub>に規定するコンタクトゲージ法による長さ測定から算定した。所定の膨張率に達した供試体については超音波透過試験を実施した後、静弾性係数試験（JIS A 1149<sub>2001</sub>）を含む圧縮強度試験（JIS A 1108<sub>1999</sub>）を実施した。断面観察は、ダイヤモンドカッターを用いてコア供試体を軸方向に切断し、その切断面に赤色インクを浸透させ、ひび割れ全長を画像解析装置により測定し、そのひび割れ全長を観察面積で除した値をひび割れ密度と定義した。この評価に際しては骨材内のひび割れ（骨材クラック）、モルタル部分のひび割れ（モルタルクラック）及び骨材-モルタル境界の付着切れ（ボンドクラック）に分けて行った。

#### 4.2 A S R膨張過程における材料劣化の定量化

図-8に促進養生によるA S R供試体の残存膨張試験結果を示す。データは1週間単位で測定したものである。特徴として測定開始から28日目位までは膨張率の増加傾向は緩やか（この期間を本論文では潜伏期とする）であり、28~91日目位までに急激に膨張率の増加（この期間を本論文では加速期とする）が確認できた。91日目以降の膨張率の増加は緩やか（この期間を本論文では劣化期とする）となり、増加傾向の収束化が確認できた。

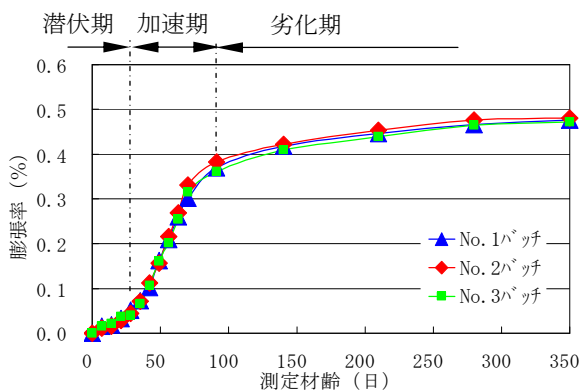


図-8 A S R供試体の残存膨張試験結果

図-9及び図-10は膨張率と圧縮強度及び静弾性係数試験結果を示したものである。膨張率の増加に伴い、圧縮強度及び静弾性係数とも減少傾向が確認できる。特

に静弾性係数の減少率が大きいことが確認できた。また静弾性係数は、膨張率が0.04%付近（潜伏期）で増加傾向が見られ、反応に伴う体積膨張に由来する膨張圧が骨材内部に蓄積されたためと考えられる。

次に供試体の断面観察を行った時のひび割れ密度の変化を図-11に示す。断面観察は、①促進養生前：0日目の供試体②潜伏期：21日目の供試体③加速期：56日目の供試体④劣化期：280日目の供試体の合計4供試体で実施した。潜伏期（21日目）の段階では各ひび割れはほとんど見られず、加速期（56日目）以降に爆発的な増加傾向が確認できた。特に潜伏期から加速期に移行する段階での骨材内部のひび割れ密度増加は顕著（写真-2）である。先の静弾性係数の減少傾向も、この時期と一致することから、A S Rの耐荷・耐久性を評価する上で極めて重要な変化点と考えられる。

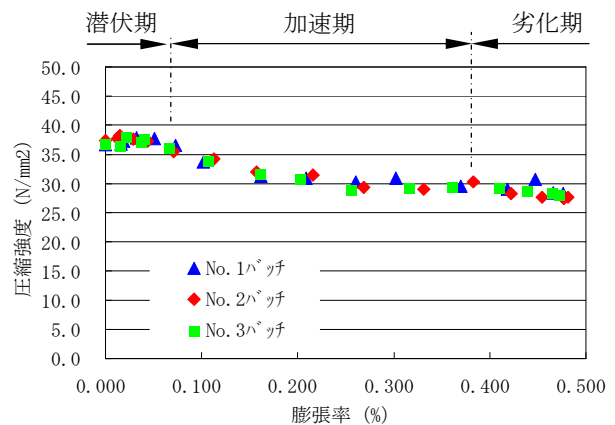


図-9 膨張率と圧縮強度の関係

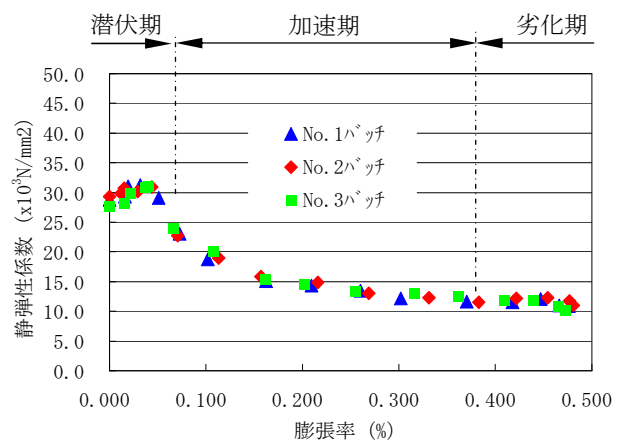


図-10 膨張率と静弾性係数の関係

#### 4.3 超音波伝搬挙動によるA S R材料劣化評価

ここでは促進養生によるA S R供試体の膨張過程における供試体中を伝搬した超音波の伝搬挙動に及ぼす影響について検討を行った。測定は、断面観察時と同様に①促進養生前：0日目の供試体②潜伏期：21日目の供

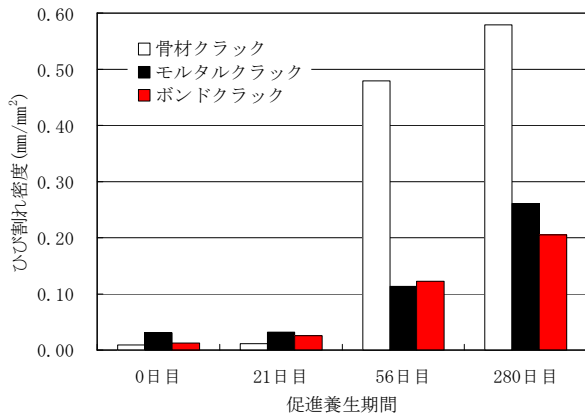


図-1-1 ひび割れ密度による断面観察結果



写真-2 骨材クラック状況

に①促進養生前：0日目の供試体②潜伏期：21日目の供試体③加速期：56日目の供試体④劣化期：280日目の供試体の合計4供試体で実施した。供試体中を伝搬した超音波波形を図-1-2に示す。特徴として、潜伏期の最大振幅が促進養生前の最大振幅より若干ではあるが大きい傾向が確認できた。また潜伏期から加速期・劣化期に移行すると最大振幅は大きく減衰傾向にあることが確認できた。

図-1-3は、得られた受振波形の周波数分析を行った結果を示したものである。促進養生前と比較すると、潜伏期は300kHz以降の成分が若干ではあるが増加傾向にあり、加速期及び劣化期においては200kHz以降の成分

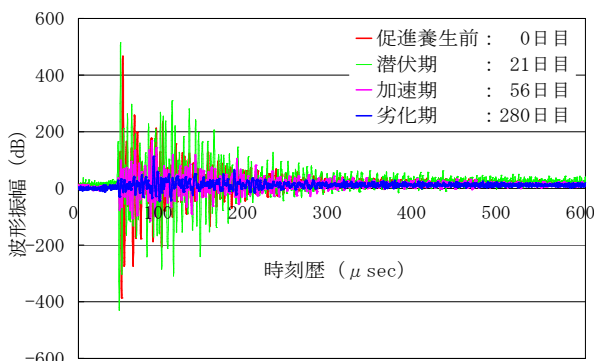


図-1-2 透過法により測定された受振波形

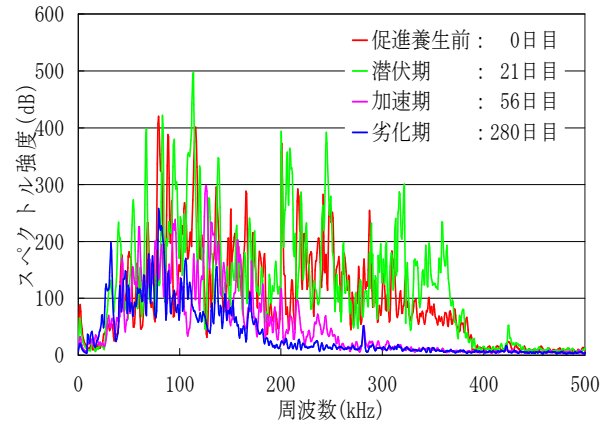


図-1-3 受振波形の超音波周波数特性

の大幅な減衰傾向が確認できた。測定に用いた供試体の超音波伝搬速度は、供試体長さ：200mmを図-1-2における受振波形の立ち上がり部分の伝搬時間で除したものであり、3.304~4.464(km/h)の範囲である。この伝搬速度を考慮すると、200kHzに相当する超音波の波長は16~22mmであり、使用した粗骨材の粒度範囲：10~20mmとほぼ一致している。従って加速期及び劣化期の減衰傾向は、図-1-1に示した骨材クラックの存在によるものと考えられる。また潜伏期において300kHz付近の成分が若干ではあるが増加傾向を示したのは、反応に伴う体積膨張が骨材クラックの発生には至らないものの、膨張圧が骨材内部に蓄積されたためと考えられる。

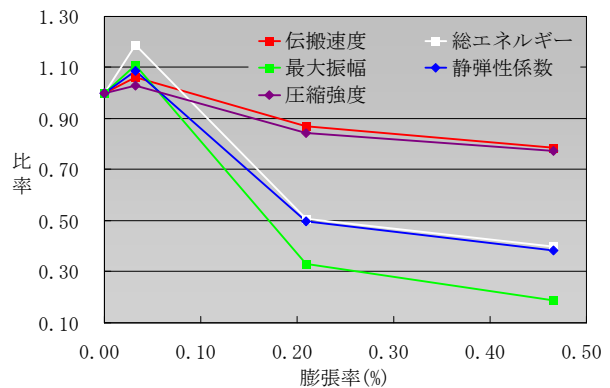


図-1-4 膨張率と各評価指標の関係

ここで、先に実施した圧縮強度及び静弾性係数試験と超音波伝搬挙動を供試体の膨張率の観点から整理したものが図-1-4である。評価指標に用いた最大振幅とは受振波形の最大値と最小値の絶対量を示し、受振波総エネルギーとは周波数範囲0~500kHzまでの周波数分布と横軸で囲まれた部分の面積を示している。なお図中の横軸は促進養生による膨張率を示し、縦軸は比較を同じレベルにするため、促進養生前の値に対する各膨張過程で得られた値の比とした。

一般的に、超音波伝搬速度は静弾性係数と密度の関数

で表されるため、両者の相関性は高いと考えられたが、この図から、超音波伝搬速度は圧縮強度との相関性が高く、また超音波透過試験より得られた伝搬挙動（最大振幅・総エネルギー）は静弾性係数との相関性が高い結果が確認できた。これは促進膨張により発生した供試体中のマイクロクラックの存在に対して、圧縮強度よりも静弾性係数の方が敏感であることを示している。断面観察結果から考えると、骨材内部のクラックが生じている場合は、超音波伝搬速度では評価が困難であり、伝搬挙動を検証することが極めて重要と判断できた。

## 5. 結論

今回の供試体を用いた超音波透過試験による超音波伝搬挙動結果から、以下のことが検証された。

- (1) 超音波伝搬速度は骨材寸法の変化より骨材混入量に敏感に反応することが確認できた。また超音波透過試験から得られた周波数特性に関しては、骨材寸法が大きくなるにつれて高周波数の減衰が顕著であり、これは骨材の直径と同程度の波長に相当する周波数範囲と一致することも確認できた。
- (2) セメントペースト部分の水セメント比を増加すると高周波数帯における減衰傾向が確認できた。これは水セメント比の増加によりセメントペーストの密実性が低下し、セメントペーストと骨材境界面における超音波の散乱・反射が顕著になったものと推測される。
- (3) A S R劣化を起こした供試体実験から圧縮強度と超音波伝搬速度との相関性が高いことが確認できた。また静弾性係数に関しては、受振波総エネルギー（周波数範囲 0～500kHz までの周波数分布と横軸で囲まれた部分の面積）との相関性が高いことが確認できた。
- (4) 一般的に超音波伝搬速度は、静弾性係数と密度の関数であるため両者の相関性は高いと考えられたが、低い結果となった。これは供試体内部のマイクロクラックが大きく影響しているものと考えられる。
- (5) A S R膨張過程において、断面観察結果より潜伏期

から加速期に移行する段階で、骨材クラックの増加が顕著であることが確認できた。

- (6) A S R膨張過程の潜伏期において、一時的に静弾性係数の増加傾向が確認できた。これは反応に伴う体積膨張が骨材クラックの発生には至らないものの、膨張圧が骨材内部に蓄積されたためと考えられる。この時の超音波透過試験から得られた周波数特性を評価すると、300kHz 以降の高周波数成分の増加傾向が確認できた。この周波数帯に相当する超音波の波長は使用骨材の粒度範囲：10～20mm とほぼ一致する結果が得られた。
- (7) (5)で述べた潜伏期から加速期に移行する段階で急激に増加する骨材クラックに関しては、超音波伝搬速度から評価することは困難であるが、受振波のエネルギーに関する指標（最大振幅、受振波総エネルギー）に着目することで、評価できる可能性が確認できた。

## 参考文献

- 1) 山田和夫, 小阪義夫: アルカリ骨材反応を生じたモルタル中を伝搬した超音波の減衰特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 12, No1, pp. 773-778, 1990
- 2) 中川裕之, 横田優, 松田耕作: 超音波法によるコンクリート物性予測手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No1, pp. 1889-1894, 2006
- 3) 三木幸蔵: わかりやすい岩石と岩盤の知識, 鹿島出版会, pp. 128-129, 1978
- 4) 岩波光保, 大即信明, 二羽淳一郎, 鎌田敏郎, 長瀧重義: コンクリート中における弾性波伝搬挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No627, V-44, pp. 223-238, 1998. 8
- 5) 松本茂: アルカリ骨材反应用表面保護工の長期追跡点検結果報告, コンクリート構造物の補修補強アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 2 巻, pp. 29-34, 2002