

## コンクリート中のひび割れが超音波伝搬挙動に与える影響評価

調査設計会社 水空舎 正会員 ○村坂 宗信  
 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 正会員 工博 鈴木 基行

Abstract : This study investigated the influence which the crack on concrete inside gave to the ultrasonic wave propagation behavior. As a result, the following content turned out. The ultrasonic wave spread speed was greatly influenced by the mortar crack but it was able to be confirmed that there was little influence in bond crack. However, it was able to be confirmed to evaluate as paid attention to the frequency distribution. Moreover, even if the crack existed in concrete, the increase tendency to the frequency distribution was able to be confirmed in the state that some compression power has acted because the crack was blocked.

Key words : Ultrasonics , Frequency characteristic , Microcrack

### 1. はじめに

コンクリートはモルタル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モルタル部分の特性変化③ひび割れの存在が、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た。著者等は、コンクリート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モルタル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<sup>1)</sup>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の減衰が顕著であること③モルタル部分の水セメント比を増加させるとモルタルの密実性が低下し、高周波数の減衰が顕著であること等が確認できた。プレストレストコンクリートでは、一般にひび割れは許容されていないが、既設構造物はコンクリート内部に経年劣化や置かれている自然環境影響により、凍害や過度の荷重載荷影響によりひび割れが内在する状況が考えられる。今後、実構造物に超音波透過試験を適用する上で、このようなコンクリート内部ひび割れが超音波の伝搬にどのように影響を与えるか明らかにすることは重要であると考えられた。そこで本論文では、特にモルタル部分のひび割れ及び粗骨材-モルタル間の境界層部分のひび割れに着目し、それらに対する評価法の検討を行った。まず粗骨材-モルタル間の境界層（界面性状）が超音波伝搬挙動に与える影響を明確にするため、人為的に境界層を変化させた供試体を用いて検討を行った。次に凍結融解試験及び一軸圧縮試験により劣化させたコンクリート供試体を作製し、その圧縮試験、弾性係数試験及び断面観察といった直接的な手法により材料劣化の定量化を行った。これらの検討結果を踏まえて非破壊試験法によるコンクリートの材料劣化評価を行った。この際、評価指標には超音波伝搬速度、受振波の最大振幅及び周波数分析を用いた。

### 2. 使用する広帯域超音波透過試験の概要

近年、コンクリートの材料劣化を評価する手法と



写真-1 広帯域超音波測定システム

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>2),3)</sup>されている。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下で、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。

### 3. 骨材界面性状に関する検討

コンクリート中の骨材界面には、遷移帯が存在し周辺のモルタル部分より脆弱でポーラス部分であるため、力学的弱点となる。ここではコンクリート中の粗骨材-モルタル間の遷移帯（界面性状）が超音波伝搬挙動に及ぼす影響を解明することを目的として、人為的に骨材界面性状を変化させた供試体を用いて検討を行った。用いた供試体はφ100x200(mm)のコンクリート円柱供試体であり、コンクリート中の粗骨材-モルタル間の界面性状を変化させるため、①粗骨材として碎石を用いた普通コンクリート②セメントペーストでプレコーティングした碎石を粗骨材として用いたコンクリート③鉱油を塗布した碎石を粗骨材として用いたコンクリートの3種類を検討した。骨材の最大寸法、形状：20mm及び体積濃度：68%とし、モルタル部分の特性を同一とするため、W/Cは50%とした。

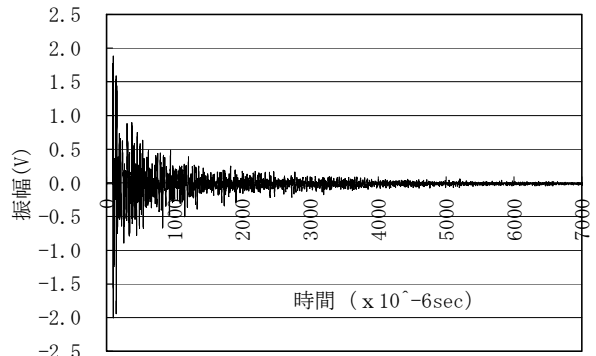


図-1 アルミニウム供試体の受振波形

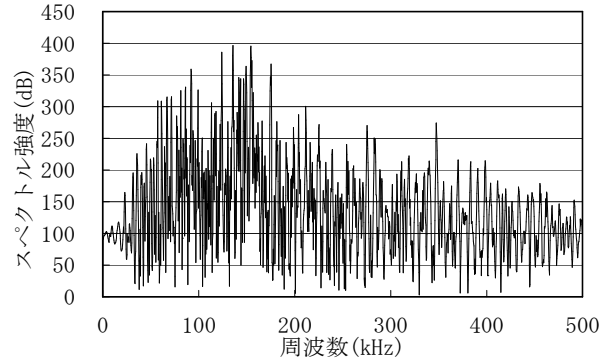


図-2 入射超音波の周波数特性

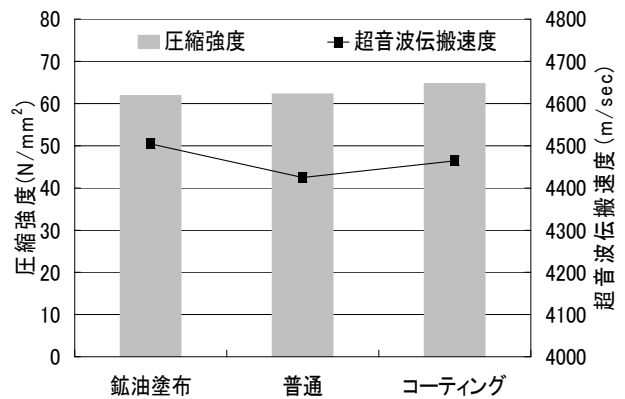


図-3 圧縮強度と超音波伝搬速度

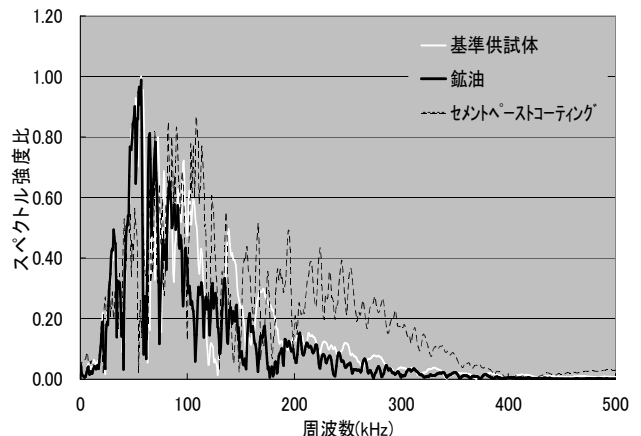


図-4 骨材界面性状別の周波数分布

図-3は各ケースの超音波伝搬速度と圧縮強度の結果を示したものであるが、超音波伝搬速度及び圧縮強度ともあまり変化が見られない。次に受振波の周波数分析結果を図-4に示す。鉱油を塗布した砕石を用いた供試体においては、200kHz以上の周波数成分がほとんど減衰していることが確認でき、またセメントペーストでプレコーティングした砕石を用いた供試体においては、基準ケースより 200kHz 以上の周波数帯成分の増加傾向が確認できた。これらのケースにおいて周波数成分の差違が確認できる範囲は 200~400kHz であり、粗骨材の大きさ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。

4. コンクリート中のひび割れが超音波伝搬挙動に及ぼす影響

4.1 実験概要

本論文での実験には、φ100x200mm のコンクリート円柱供試体を用いた。これらの供試体は、表-1に示す材料及び配合にて作製した。空気量を 1.0%と小さく設定したのは凍結融解抵抗性に劣るコンクリートを作製するためである。これらの供試体を用いて凍結融解試験及び先行載荷試験により人為的に供試体中にひび割れを発生させた。凍結融解試験は、供試体内中心温度-18.0℃~5.0℃、凍結 4 時間、融解 2 時間の水中凍結水中融解の繰り返しサイクル 0, 10, 15, 20, 25, 30 回として行った。先行載荷試験は、予め実施した供試体の破壊荷重(420kN)に対して 0, 20, 40, 60, 80%を先行載荷荷重として行った。

4.2 コンクリート供試体中のひび割れ量の評価

供試体中のひび割れ量を評価するため、試験後の供試体を軸方向にダイヤモンドカッターで切断し、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、粗骨材内のひび割れ(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)及び粗骨材-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。

図-5に凍結融解シリーズ、図-6に先行載荷シリーズの各供試体の圧縮試験結果を示す。凍結融解シリーズは、サイクル数の増加に伴い圧縮強度及び弾性係数はともに低下するが、先行載荷シリーズでは 20%以降において載荷荷重が増加しても圧縮強度及び弾性係数はほとんど変化が見られなかった。次に両シリーズの各供試体の断面観察を行った場合のひび割れ密度の変化を図-7に示す。凍結融解シ

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	砕石 安山岩系	密度：2.51g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：0.87%, 粗粒率：6.68

(b) コンクリートの配合

W/C	s/a	Slump	Air	W	C	S	G
%	%	cm	%	kg/m <sup>3</sup>			
50.0	44.5	8.0	1.0	190	380	791	983



写真-2 ひび割れ発生状況

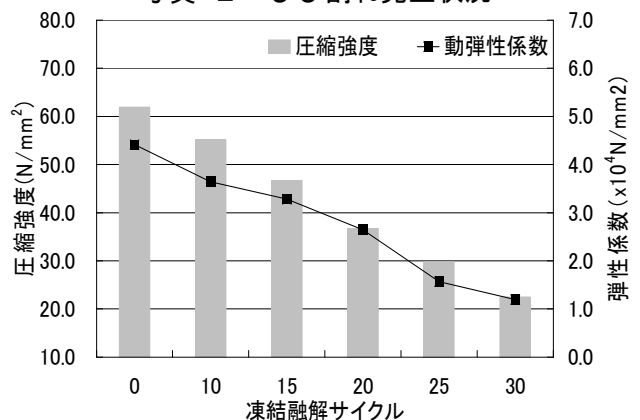


図-5 凍結融解シリーズ圧縮試験結果

リーズではサイクル数が少ない段階でボンドクラックの発生が飽和状態に達し、その以降はモルタルクラックの発生量が増加する傾向が確認できた。このようにモルタル部分が劣化することは、図-5及び図-6に示したように圧縮強度及び弾性係数を低下させる、すなわちコンクリートの力学特性に大きな影響を与えることが確認できた。

先行载荷シリーズでは、载荷荷重が増加してもモルタルクラックの発生量にあまり変化が見られないことから、このシリーズの供試体モルタル部分はあまり劣化を受けていないものと考えられる。しかしながらボンドクラックの発生量は、载荷荷重の増加に伴い徐々に増加していることが確認できる。このようなボンドクラックの存在は、先のモルタルクラックのようにコンクリートの力学特性には、あまり影響しないものの耐久性を評価する上で極めて重要な要因となる。

4. 3 超音波伝搬速度による評価

図-8に凍結融解シリーズ及び先行载荷シリーズの各供試体の超音波伝搬速度の変化を圧縮強度と合わせて示す。凍結融解シリーズでは、圧縮強度の低下に伴い超音波伝搬速度も低下し、更に圧縮強度の低下が著しい区間では超音波伝搬速度も著しく変化していることが確認できた。先行载荷シリーズでは、20%以降において圧縮強度と同様に、超音波伝搬速度にも大きな変化は確認できない。従って超音波伝搬速度を用いた場合、凍結融解シリーズのように境界層部分及びモルタル部分のいずれにも劣化が生じている場合には十分評価可能と判断できるが、先行载荷シリーズのように境界

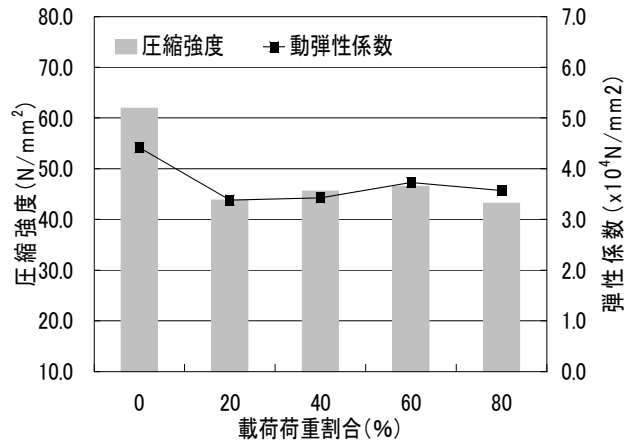
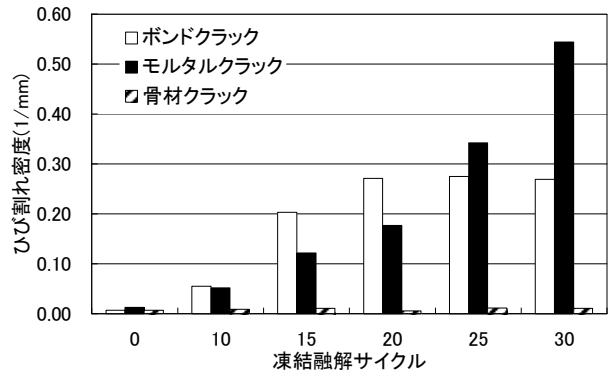
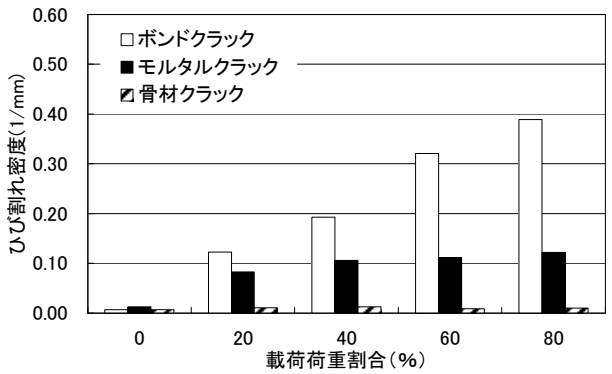


図-6 先行载荷シリーズ圧縮試験結果

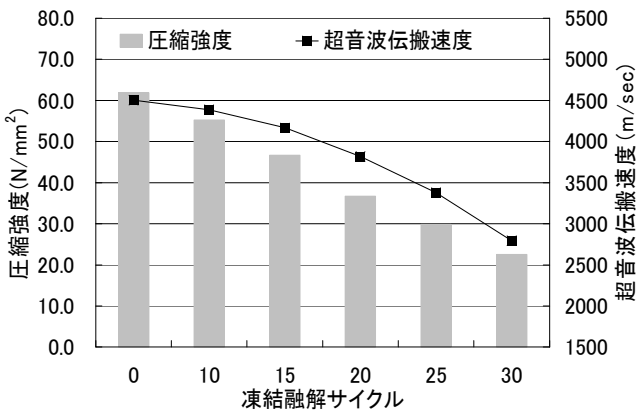


(a) 凍結融解シリーズ

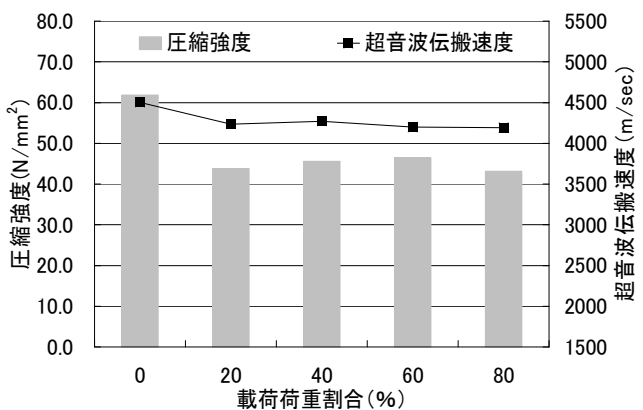


(b) 先行载荷シリーズ

図-7 供試体ひび割れ密度結果



(a) 凍結融解シリーズ



(b) 先行载荷シリーズ

図-8 各供試体の超音波伝搬速度及び圧縮強度の変化

層部分にのみ劣化が生じている場合には評価が困難であると判断できる。これは先に実施した骨材界面性状に関する検討結果と類似した傾向である。

両シリーズ間に評価結果の差が生じたのは、超音波伝搬経路に締める劣化部分の割合による違いによるものと考えられる。コンクリート中の超音波伝搬経路は、ほとんどがモルタル部分及び粗骨材部分であり、境界層部分の占める割合は極めて少ない。従って主として境界層部分のみが劣化を受けている場合には、超音波伝搬速度にあまり変化が見られないものと判断できる。

#### 4. 4 周波数分布による評価

次に広帯域超音波測定により得られた受振波の周波数分析を行った。図-9は凍結融解シリーズの結果を示したものである。超音波の伝搬は各サイクルにおける融解直後に透過法にて測定した。サイクルの増加に伴い、全体的に周波数成分の減衰が顕著に確認できる。図-10は先行载荷シリーズの結果を示したものである。超音波の伝搬は载荷荷重を除荷した後に透過法にて測定した。载荷荷重の増加に伴い 300kHz 以降の周波数成分の減衰が顕著に確認でき、先の凍結融解シリーズのような全体的な周波数成分の減衰傾向との差が確認できた。測定に用いた供試体の超音波伝搬速度を考慮すると、この 300kHz に相当する超音波の波長は約 15mm であり、これは断面観察から判明された粗骨材の平均存在間隔 (16.3mm) や供試体作製に使用した粗骨材の粒度範囲 (15~25mm) とほぼ一致している。従って、この 300kHz 以降の周波数減衰特性はボンドクラックの存在によるものと考えられる。

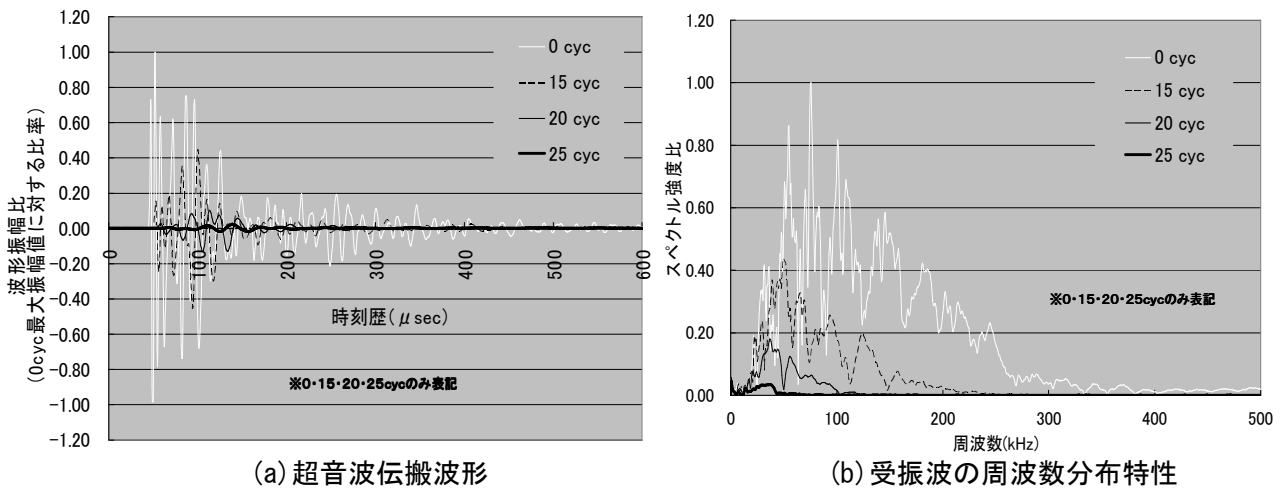


図-9 凍結融解シリーズの超音波伝搬波形及び周波数特性

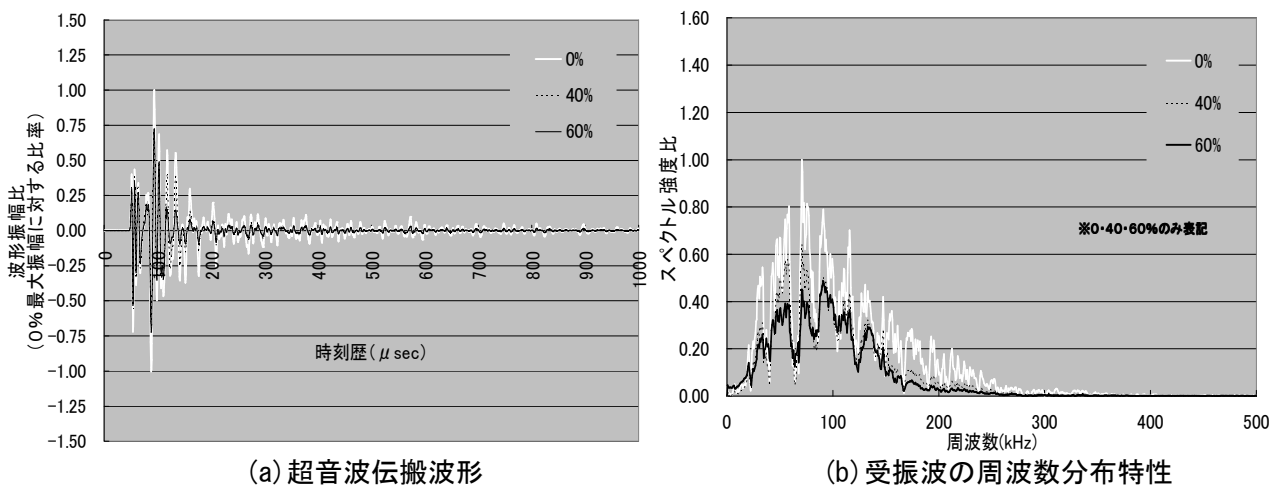


図-10 先行载荷シリーズの超音波伝搬波形及び周波数特性

#### 5. ひび割れの開閉状態に関する検討

図-10の先行载荷シリーズは、载荷荷重を除荷した後の超音波伝搬波形及び周波数特性を示した

結果である。載荷荷重作用状態と除荷状態ではひび割れの「開閉状態」が変化し、超音波の散乱・反射の程度が異なるものと考えられた。そこでコンクリート供試体の一軸圧縮試験の荷重載荷中の超音波透過試験結果を図-11に示す。周波数分布は、載荷中において破壊荷重に対して40%載荷までは全範囲においてエネルギーの増加傾向が確認できたが、それ以降は減少傾向となった。これは40%載荷までは、内部にひび割れが発生してもひび割れ部分が閉塞し、超音波の散乱を抑制していることを示していると考えられる。

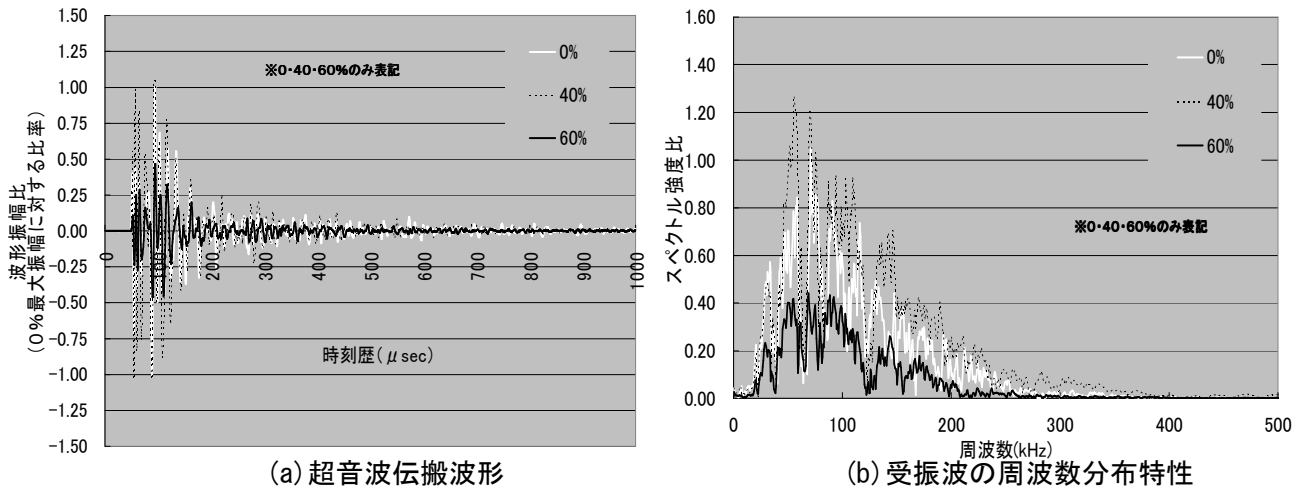


図-11 先行載荷シリーズの超音波伝搬波形及び周波数特性 (一軸圧縮試験の荷重載荷中)

## 6. 結論

本論文においては、コンクリート中のひび割れ影響を広帯域超音波を用いて検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 先行載荷を受けたコンクリートにおいては、主として粗骨材-モルタル間の境界層部分のひび割れが進行することが確認できた。また凍結融解作用を繰り返し受けたコンクリートは、これに加えてモルタル部分にもひび割れが進展することが確認できた。
- (2) 超音波伝搬速度は、モルタル部分のひび割れには大きく影響するものの粗骨材-モルタル間の境界層部分のひび割れにはあまり影響しないことが確認できた。しかしながら周波数分布に着目することで、境界層部分のひび割れ発生を評価できることが確認できた。
- (3) コンクリート中にひび割れが存在していても、圧縮力作用下では破壊荷重に対して40%載荷までは内部ひび割れ部分が閉塞し、超音波の散乱を抑制するため、周波数分布の増加傾向が確認できた。この結果は、コンクリート中にひび割れが存在していても、ある程度の圧縮応力下では周波数分布を評価することで作用応力レベルを評価できる可能性があることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 村坂宗信, 鈴木基行: A S R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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No1, pp. 1735-1740, 2013
- 2) 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
- 3) 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
- 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