

論文 超音波法による ASR 膨張測定に関する研究

中川 裕之^{*1}・横田 優^{*2}・長尾 和明^{*3}・松島 学^{*4}

要旨：アルカリ骨材反応によって生じるコンクリートの膨張変化への超音波法による測定を検討した。アルカリ骨材反応を生じる供試体を製作し、表面法により測定した。測定結果から伝播速度、受振波総エネルギー、平均周波数の3指標の経時変化を求めた。供試体内に埋設したひずみ計による膨張変化の実測値と各伝播特性を比較した結果、測定データにばらつきはあるが、受振波総エネルギーや平均周波数は伝播速度よりも感度良く膨張変化を捉えている可能性が高いことがわかった。

キーワード：超音波法、表面法、アルカリ骨材反応

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理のためには、対象構造物への詳細なモニタリングは重要であるが、頻繁なコア採取による構造物の損傷が問題となる。

アルカリ骨材反応（以下、ASR）が潜在あるいは顕在化した構造物に対して、従来行われているコア採取による残存膨張量試験に加えて、コンクリート膨張などの変状を非破壊試験によって把握することにより、より正確なライフサイクルの管理が可能になるものと思われる。

筆者ら^{1),2)}は、これまで超音波透過法による検討を行ってきたが、大規模な実構造物では透過距離が相当長くなる場合があり、さらにコンクリート擁壁などの透過法で測定できない構造物も多い。本研究は、超音波法の測定方法の一つである、発・受振センサをコンクリート同一面に設置する方法（以下、表面法³⁾）によって ASR コンクリート膨張変化の測定を検討した。実験は、ASR を生じる骨材を使用して供試体を製作し、膨張変化するコンクリートを表面法で測定した。超音波伝播特性として伝播速度、受振波総エネルギー、平均周波数の3指標と供試体内に埋設したひずみ計による実測値を比較し、ASR 膨張変化を捉えることができるか否かを検討した。

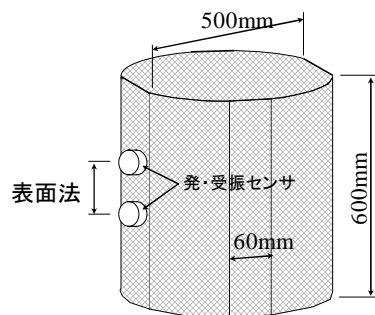


図-1 測定方法および供試体の形状

2. 供試体による膨張実験および超音波測定

2.1 供試体製作

供試体は、無筋コンクリートで直径 500mm、高さ 600mm の円柱とした。供試体の形状を図-1 に示す。粗骨材は、ASR 膨張を促進するために既往研究のペシマム確認試験結果¹⁾を参考に、既往研究と同じ粗骨材を使用し、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と「無害」と判定された砂岩を重量比 6:4 で使用した。細骨材は、全て ASR 反応性を有していない砂岩である。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。コンクリート配合を表-1 に示す。

同じコンクリート配合で同時に製作した 100 × 200mm の円柱供試体による圧縮強度は、30.8N/mm²（材齢 28 日）であった。

供試体製作 8 日後に脱型し、供試体側面の 4 箇所を約 60mm 幅で鉛直方向に研磨により平滑化し、超音波測定



図-2 供試体の外観

表-1 コンクリート配合

Gmax (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 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		
20	12±2	5.0±1	60	44.0	180	300	829	611	419	0.18	10

*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)

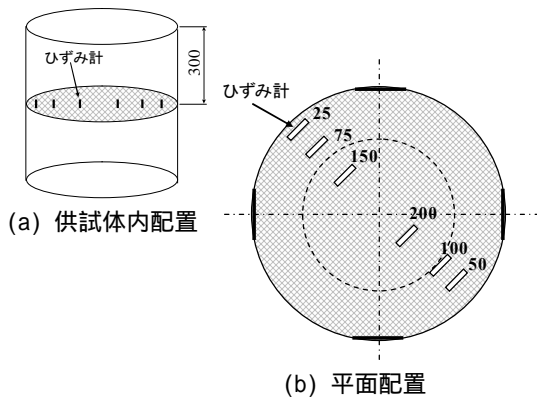


図-3 埋込型ひずみ計設置位置 (mm)



図-4 測定状況

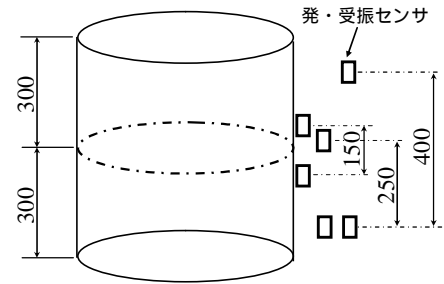


図-5 供試体に対するセンサ鉛直方向位置 (mm)

時の発・受振センサ設置面とした。供試体外観を図-2に示す。

2.2 供試体養生

供試体は、風雨に曝されない室内に設置した。室内の温度、湿度は制御しなかった。室内温度および相対湿度は、超音波測定時に乾湿球湿度計で測定した。

4 箇所超音波測定面の施工直後から、供試体全体を吸水性シートで覆い、超音波測定時以外は湿润状態を保ち養生した。

2.3 供試体膨張の測定

供試体製作時、図-3(a),(b)に示すように、供試体上端面から 300mm、側表面から 25, 50, 75, 100, 150, 200mm の各位置にひずみ測定方向が円周の接線方向となるようにひずみ計を埋設した⁴⁾。側表面から 25, 100, 200mm の各位置には、コンクリート温度を測定するための熱電対を埋設した。設置したひずみ計は、埋込型ひずみ計 (標点距離 50mm, 容量 $5000 \times 10^{-6} \mu$) である。測定は、1 回 / 時間で自動測定、記録した。

2.4 超音波測定

表面法による超音波測定は、発・受振センサを供試体側面に施した平滑面へ鉛直方向に配置した。測定状況を図-4に示す。図-4に示したように、センサ背面部と木版をマジックテープで固定し、測定時のセンサのずれ防止と、測定毎におけるセンサとコンクリート表面の密着状態や設置圧など設置状態の均一化を図った。測定時のセンサ間隔は、センサの中心間距離を 150, 250, 400mm とし、供試体側面 4 箇所を測定した。各センサ間隔における発・受振センサの測定位置を図-5に示す。

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 $0.2 \mu \text{sec}$, サンプリング数 4096 である。

3. 実験結果と考察

3.1 ひずみ実測値と測定時の温度

供試体内のひずみ計で測定したひずみ実測値の経時

変化と供試体内設置深さの関係を図-6、供試体内コンクリート温度の経時変化と供試体内設置深さの関係を図-7、超音波測定時の室内温度変化を図-8に示す。供試体製作後の経過日数は材齢 100 日以降を示した。ひずみ実測値には温度変化による影響を含み、膨張による引張りひずみ増加を下向きとした。図-6、図-7に示したひずみ実測値および供試体内コンクリート温度は、超音波測定日の 13 時における値とした。

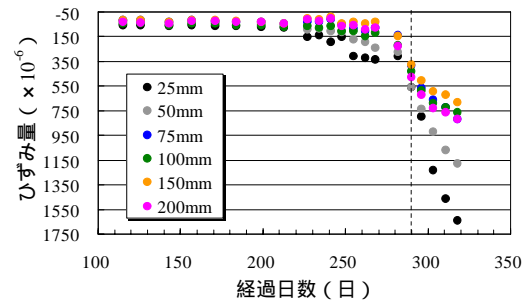


図-6 ひずみ実測値の経時変化

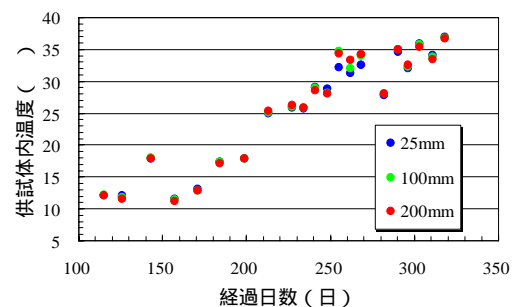


図-7 供試体コンクリート温度の経時変化

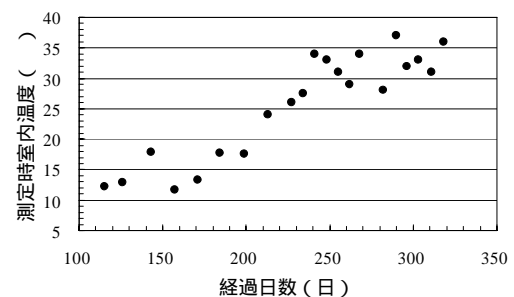


図-8 超音波測定時室内温度の経時変化

材齢 200 日程度からコンクリート温度の上昇に伴って徐々に膨張し、材齢 270 日以降から膨張が加速し、材齢 290 日での超音波測定時の供試体観察でひび割れ発生が確認された。図-6 中にひび割れ確認時点を波線で示した。測定期間の温度差は 25 程度であり、コンクリート熱膨張係数を 1.0×10^{-5} とした場合、温度上昇によるひずみは 250×10^{-6} 程度となる。図-6 に示したひずみ実測値は熱膨張量より大きく、ASR による膨張と考えられる。

図-6 に示したように、ひずみ実測値が供試体の外側ほど大きくなる傾向にあった。供試体が円周方向に膨張し、ひずみゲージを設置した各深さ位置での膨張する円周長の違いによるものと思われる。本研究では、ひずみ実測値の経時変化を各ひずみ計毎に最大値との比として整理した結果を図-9 に示す。各深さにおいてほぼ同様なひずみ比の経時変化であった。

3.2 超音波伝播特性

各センサ間隔での受振波の例を図-10(a), (b), (c) に示す。供試体の材齢は 213 日である。受振波形から、サンプリング後半は供試体内での反射波の繰返しによるものと思われる。図-10 中に示した矢印位置の波形は、到達時間が $250 \mu\text{sec}$ 程度である。供試体の直径方向 500mm 間を透過法で測定した結果、超音波伝播速度は 4270m/sec であった。よって図示した波形の伝播距離は片道が約 530mm 程度であり、ほぼ供試体の直径と同じであることから、相対する側裏面からの反射波であると考えられる。本研究では、受振波形の検討対象範囲を図示した波形を含む $290 \mu\text{sec}$ までとした。

超音波伝播特性は、伝播速度、受振波総エネルギー、平均周波数の 3 指標とした。伝播速度は、第一波立上がり部の到達時間とセンサ間中心距離から求めた。受振波総エネルギーは、コンクリート内を伝播した到達波のエネルギー量と考え、時間と受振波振幅絶対値の積算面積とした。平均周波数は、到達波を構成する周波数特性と考え、測定した 2500kHz までの全周波数毎のスペクトル強度を積算した面積の 50% にあたる周波数とした。図-11, 図-12 に各伝播特性の概要を示す。

3.3 超音波測定結果

超音波測定結果から求めた伝播速度、受振波総エネルギー、平均周波数の経時変化を図-13 ~ 図-15 に示す。各測定結果は、供試体側面 4 個所の測定結果の平均とした。供試体製作後の経過日数は材齢 100 日以降を示した。各図中にひび割れ確認時点を波線で示した。各伝播特性は、ひび割れ発生前における各伝播特性の最大値に対する比とした。

本研究では、超音波測定の際にセンサをコンクリート面に密着させるために水溶性グリセリンを主材料とした接触媒質を使用した。既往研究⁵⁾から、測定時の温度

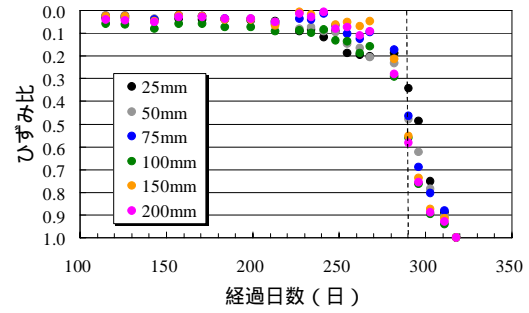
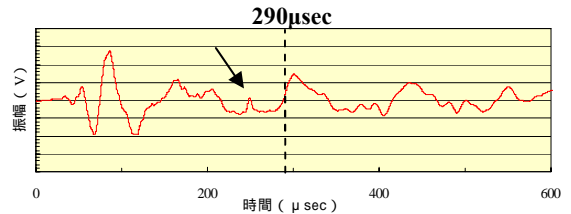
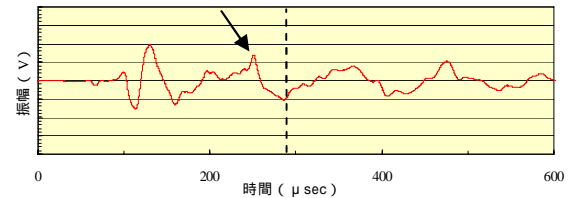


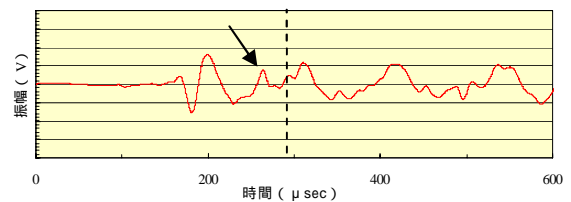
図-9 ひずみ実測値 (比換算) の経時変化



(a) センサ間隔 150mm



(b) センサ間隔 250mm



(c) センサ間隔 400mm

図-10 受振波の例

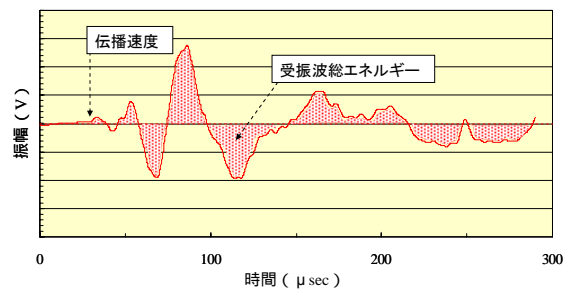


図-11 受振波の指標

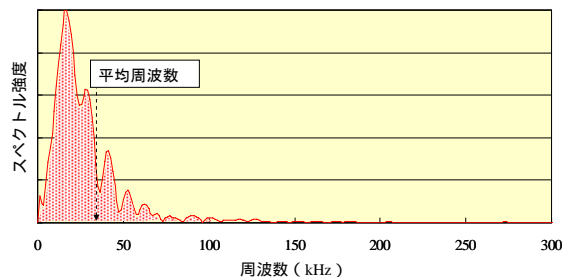
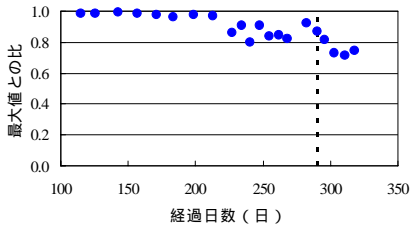
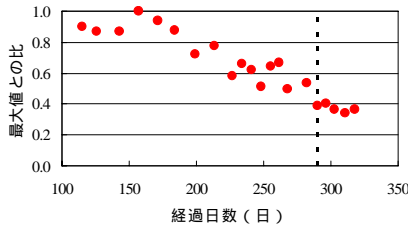


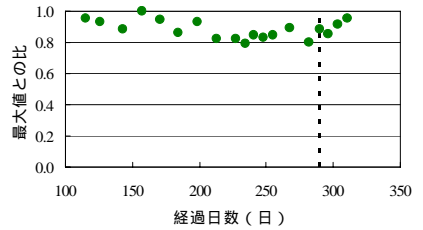
図-12 周波数特性の指標 (300kHz 以上は省略)



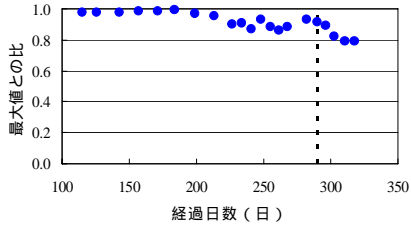
(a) センサ間隔 150mm



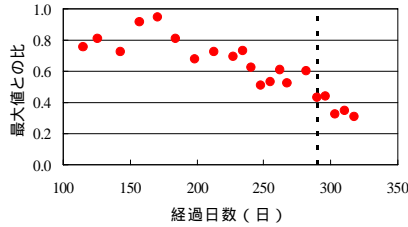
(a) センサ間隔 150mm



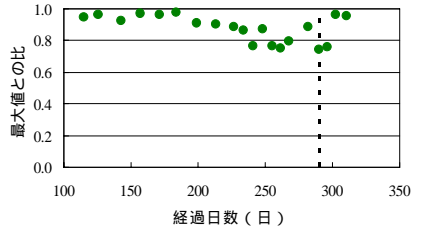
(a) センサ間隔 150mm



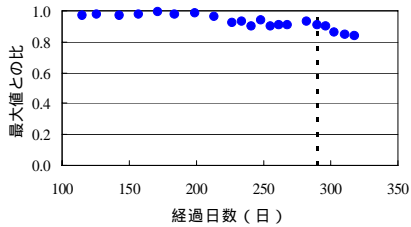
(b) センサ間隔 250mm



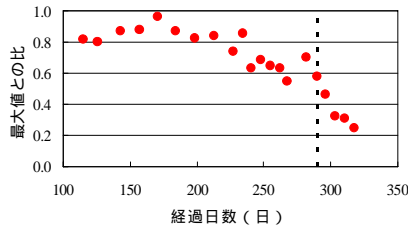
(b) センサ間隔 250mm



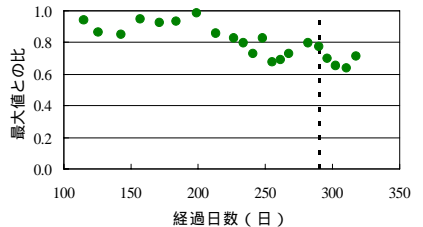
(b) センサ間隔 250mm



(c) センサ間隔 400mm



(c) センサ間隔 400mm



(c) センサ間隔 400mm

図-13 伝播速度

図-14 受振波総エネルギー

図-15 平均周波数

の違いが接触媒質を介して測定結果の各伝播特性へ影響する。伝播速度は、ほとんど測定時温度の影響を受けない。受振波総エネルギーは、測定時温度が高くなるにしたがい指標値が小さくなる。接触媒質の粘性低下に伴い、センサからコンクリートへの超音波伝播エネルギーが減少するものと考えられる。平均周波数は、測定時温度が高くなると指標値が若干高くなる。測定時温度が違ってても伝播する周波数帯は変わらないが、図-12 に示したピーク周波数位置のスペクトル強度がピーク前後の周波数帯よりも相対的に低下し周波数分布形状が変化した結果、平均周波数位置が少し高周波数側へずれることによるものと考えられる。100×200mm 円柱供試体を透過法で測定した既往研究結果では、図-16、図-17 に示すような関係が得られた。

測定時温度の影響は、発・受振センサとコンクリート間の接触媒質が原因であり、測定方法やコンクリート形状に関係しないものと考え、本研究では、受振波総エネルギーおよび平均周波数への測定時温度による影響を考慮して全て 20 相当に換算した。図-13～図-15 は換算後の結果である。

(1) 伝播速度

ひずみ実測値が材齢 230 日あたりから少しずつ増加し始めていた(図-9)のに対して伝播速度も遅くなっていたが、ひび割れ発生までのひずみ実測値の増加に対して、

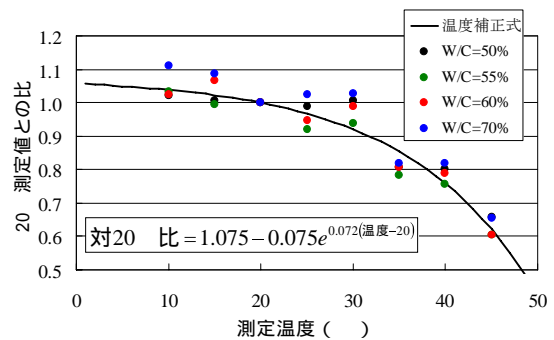


図-16 受振波総エネルギーと測定温度

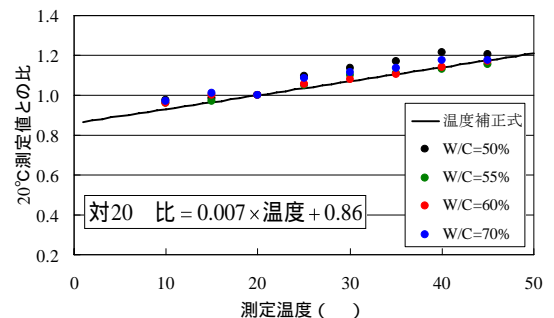


図-17 平均周波数と測定温度

伝播速度はセンサ間隔に関係なくほぼ一定であった。ひび割れ発生後は、少しずつ低下していた。センサ間隔が大きいほど、伝播速度の低下率は小さくなるが、測定結果のばらつきは小さくなっていた。センサ間隔が小さいほど、設置したセンサの僅かなずれに起因する伝播速度

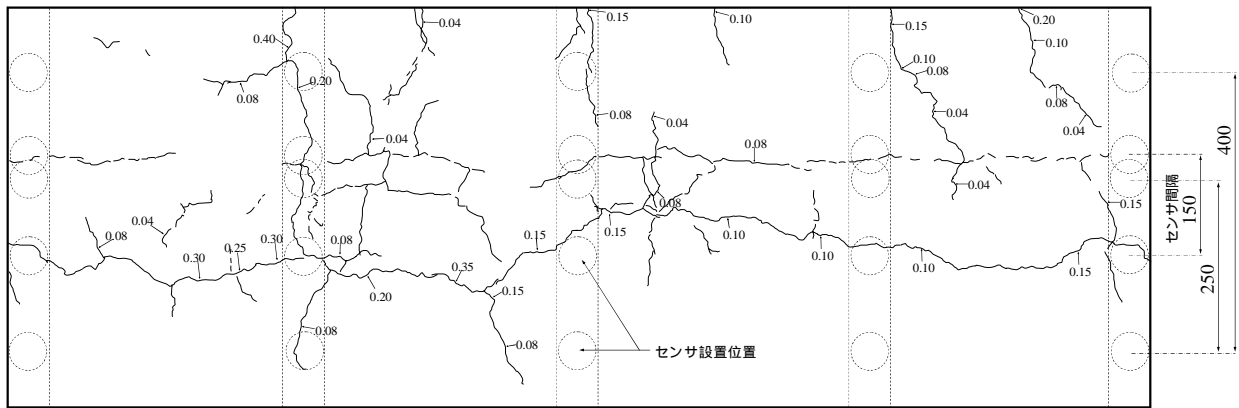


図-18 供試体のひび割れ発生状況展開図 (mm)

算出の誤差が大きくなったものと思われる。

本実験結果から伝播速度は、ASR ひび割れ発生後の大きな膨張変化は測定できるが、ひび割れ発生前の膨張変化を捉えることは難しいことがわかった。

(2) 受振波総エネルギー

測定データ間にばらつきはあるが、ひずみ実測値の膨張に対して受振波総エネルギーは低下していた。特にセンサ間隔 400mm での受振波総エネルギーの経時変化は、材齢 230 日程度までほぼ一定で、その後低下していた。図-9 に示したひずみ実測値の経時変化と相似していることから、受振波総エネルギーは膨張変化、特に伝播速度と比較してひび割れ発生前の膨張変化を捉えることができる可能性が高い。

センサ間隔 400mm での測定結果が 150, 250mm の場合に比べて精度が良かった理由を考察するために、材齢 370 日における供試体側面のひび割れ発生状況とひび割れ幅、および超音波測定位置を図-18 に示す。図-18 は側面の展開図であり、図中に示した ~ は超音波測定のための平滑面の位置である。供試体上部には、円周方向に膨張したと思われる鉛直方向のひび割れが発生していたが、供試体下端付近には、比較的ひび割れが少なかった。本実験では、供試体下面の型枠を脱型しなかったため、供試体の膨張に対して下端が拘束され、比較的上部がひび割れたものと思われる。図-18 に示した測定位置から、センサ間隔 400mm の場合がひび割れ発生範囲を最も広く測定できたものと考えられる。

センサ間隔が大きいほど、供試体内浅部と深部の伝搬波を均等な強さで受振できることも、供試体内部全体で生じている ASR 膨張を精度良く捉えることができた理由の一つと思われる。

(3) 平均周波数

受振波総エネルギーと同様に測定データ間にばらつきはあるが、センサ間隔 400mm でのひび割れ発生前までの平均周波数の経時変化は、図-9 に示したひずみ実測値の経時変化と相似しており、膨張変化を捉えていた可

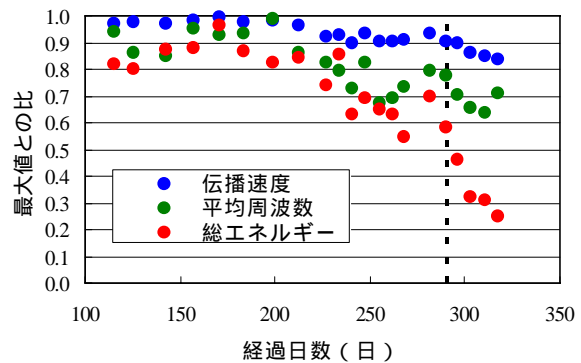


図-19 各伝播特性の経時変化 (センサ間隔 400mm)

能性がある。ひび割れ発生後における平均周波数の経時変化は、全てのセンサ間隔においてのばらつきは大きかった。

(4) 各伝播特性の相対比較

図-13~図-15 に示したセンサ間隔 400mm での各伝播特性の経時変化を重ねて図-19 に示す。

各伝播特性に関して、経時変化の低下量の相対差を供試体の膨張変化に対する各伝播特性の感度差と考えた場合、本実験結果が膨張変化を捉えていたとすると、膨張変化に対する測定感度は、伝播速度、平均周波数、受振波総エネルギーの順で大きくなっていった。

ひび割れ発生前の膨張変化に対する伝播速度の感度はほとんど無かった。伝播速度は、受振波振幅が経時的に減少していく過程で、図-11 に示した受振波を同一受振増幅度で測定する際、第一波立上がり部を到達時間が遅くなる方向へ読み取ってしまう誤差も若干含まれていると思われる。

本実験結果からは、ASR 膨張によるひび割れ発生前において、伝播速度だけでは察知できないコンクリート膨張変化を平均周波数や受振波総エネルギー等によって捉えることができる可能性がある。平均周波数と受振波総エネルギーの経時変化は、ひび割れ発生前後で不連続となっていた。よって、ひび割れ発生前後の連続した測定は困難であるが、図-19 中の波線で示したように、ひ

び割れ発生前とは分けて検討することによって、ひび割れ発生後のコンクリート膨張変化を捉えることができる可能性もあると思われる。

(5) 測定時の温度影響

図-19 に示したように、本実験結果における平均周波数や受振波総エネルギーは、伝播速度よりも膨張変化に対する感度は高いと思われるが測定データのばらつきも大きかった。また図-14 に示した受振波総エネルギーの経時変化の内、センサ間隔 150, 250mm は、ひずみ実測値の経時変化と比較して若干早いと思われる材齢 150 日あたりから低下傾向にあった。

本研究では、測定時の温度による接触媒質自体の粘性の影響を考慮したが、センサ間隔 400mm での温度影響を考慮した結果の比較を図-20, 図-21 に示すが、経時変化の傾向が変わるほどではなかった。

本研究で考慮した温度影響以外にもセンサ設置の際の接触媒質厚さや密着度などの僅かな違いが影響している可能性も考えられる。例えば、本実験で行った測定方法では、高温時に粘性低下した接触媒質がセンサ設置面を流下するため、測定中にセンサ密着度が低下したことも考えられる。しかし、図-8 に示したように、測定時の温度は材齢 250 日あたりから、ばらつきはあるがほぼ一定であったのに対して、図-14 に示した受振波総エネルギーは全てのセンサ間隔で材齢 250 日以降も低下しており、膨張変化を捉えていたと思われる。今後、測定精度向上のために、測定方法や測定値に対する補正方法のさらなる検討が必要と思われる。

(6) センサ間隔

本実験結果からは、表面法測定時のセンサ間隔 400mm とした場合、受振波総エネルギーと平均周波数のどちらも 150, 250mm の場合よりもひずみ実測値の経時変化と比較的良く合っていた。ASR は、骨材によるコンクリート全体の膨張変化であるため、可能な限り広い範囲のコンクリート状態を測定することによって精度向上が図られたことによるものと思われる。センサ間隔が大きくなるにしたがい到達する受振波のエネルギー量は減少する上、実構造物では鉄筋が配置されているため、今後鉄筋の影響も含めて、適切なセンサ間隔に関する検討が必要と思われる。

4. まとめ

ASR により膨張変化するコンクリート供試体を対象に表面法による超音波測定を検討した。超音波伝播特性は、伝播速度、受振波総エネルギー、平均周波数の 3 指標とし、ひずみ実測値の経時変化と比較した結果を以下に示す。

(1) ASR の膨張変化に対する伝播速度、受振波総エネルギー

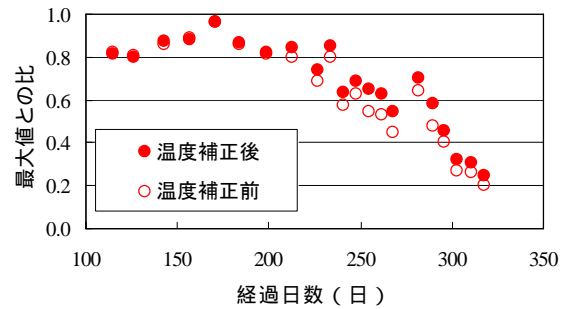


図-20 温度補正結果 (受振波総エネルギー)

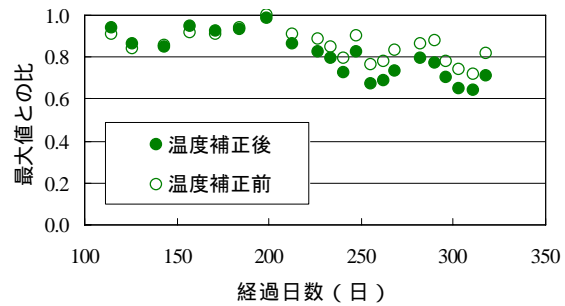


図-21 温度補正結果 (平均周波数)

ギー、平均周波数の 3 指標の感度は、伝播速度、平均周波数、受振波総エネルギーの順に大きかった。

- (2) ひび割れ発生前は、伝播速度が膨張変化を捉えていなかったのに対して受振波総エネルギーや平均周波数は、測定毎のばらつきはあるものの、ひずみ実測値の経時変化と比較的良く合っていた。
- (3) 表面法における測定時のセンサ間隔は、150, 250mm よりも 400mm の方がひずみ実測値の経時変化と比較的良く合っていた。

参考文献

- 1) 中川裕之, 横田優, 長尾和明, 松島学: 超音波法による ASR 既存膨張率の算定, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1709-1714, 2010
- 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) 土木学会: 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第 2 回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ 73, pp.11-12, 2007.2
- 4) 鍵本広之, 川村満紀: 大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみの測定による ASR 表面ひび割れ発生過程の解明, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1225-1230, 2009
- 5) 中川裕之, 横田優, 長尾和明, 松島学: 超音波伝播特性への測定温度の影響に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会第 5 部, pp.473-474, 2010.9