

論文 衝撃弾性波法（表面波法）を用いたコンクリートの表面ひび割れの評価

山口 喜堂*¹・渡辺 健*²・橋本 親典*³・石丸 啓輔*⁴

要旨：弾性波を用いた非破壊試験の一つである衝撃弾性波法に着目し、表面から内部に進展したひび割れの評価を試みた。本研究では、周波数範囲の異なる加速度センサおよびアコースティック・エミッションセンサを用い、センサの周波数特性による差異やその適用性を検討した。その結果、加速度センサで計測した波形の振幅およびアコースティック・エミッションセンサ（以下、AE センサとする）で計測した波形パラメータのエネルギーが、鋼球の波長とひび割れの本数を考慮した指標と相関性が高いことを示した。

キーワード：衝撃弾性波，減衰，レイリー波（R 波），AE センサ，加速度センサ，ひび割れ

1. はじめに

大規模のコンクリート構造物が 100 年以上基準の性能を保つためには、維持管理が必要不可欠であり、限られた予算と人員で、手間をかけずに適切に維持管理するためには損傷部の早期発見が重要である。しかしながら、従来から行われているコンクリート構造物の検査は、反発度法など若干の非破壊検査が利用されているものの目視検査が主流であり、目視検査は周囲環境や個人差による影響で統一した検査結果を得ることが難しい。また、構造物内部の様子まで調査できない。

異常箇所に関する他の非破壊試験で代表的な打音法や超音波法にはそれぞれ、センサが非接触のためノイズの影響を受けやすい点や減衰が大きい点等、構造物の損傷度評価に対して大きな課題を持っており、コンクリート構造物を広範囲に渡り評価する非破壊試験は未だ確立されていないのが現状である。

ここで筆者らは近年研究が行われているレイリー波（以下、R 波とする）に着目した。衝撃弾性波法や超音波法では縦波（以下、P 波とする）の伝播時間差を用いたひび割れの評価が最も行われているが、波動エネルギーも全体の 7%と小さく、エネルギー減衰速度も大きい。実体波のエネルギー減衰は $1/r^2$ で表される（ r ：弾性波入力位置から計測位置までの距離）。これに対し、R 波は波動エネルギーが全体の 67%を占め、減衰速度が P 波に比べて遅い。R 波のエネルギー減衰は $\sqrt{1/r}$ で表される¹⁾。

既往の研究より、R 波を用いたひび割れ深さの評価方法について検討は行われている²⁾が、ひび割れの本数やその位置関係による R 波の挙動については検討が行われていない。

本研究では、機械的な外力で弾性波を生じさせる衝撃弾性波法に着目し、R 波の伝播速度および、P 波、S 波および R 波を含む弾性波全体から算出したパラメータによる表面ひび割れの評価を試みた。試験体として、健全なコンクリート供試体とスリットにより模擬的にひび割れを再現した供試体を用いて、ひび割れ本数とひび割れ間隔の異なる供試体を作製し、加速度センサと AE センサの 2 種類から、各パラメータによって減衰量の変化を測定した。これにより、ひび割れ本数とひび割れ間隔の評価を試みた。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は表 1 の配合で、角柱供試体 100×200×900mm を湿布養生で作製した。ひび割れは、コンクリートを打設する前に、型枠内に厚さ 1mm、長さ 100mm（水平方向）の鋼板を、深さ 40mm（鉛直方向）で設置し、脱型後に鋼板を引き抜いてスリット状に形成したものである。作製した供試体の概要を図 1 に示す。供試体は、ひび割れの無い健全な供試体（以下、健全とする）と、ひび割れを供試体端部から 450mm の位置に 1 本入れた供試体（以下、ひび割れ 1 本とする）と、ひび割れを供試体端部から 300mm の位置にひび割れ間隔 300mm で 2 本入れた供試体（以下、ひび割れ 2 本とする）と、ひび割れを供試体端部から 425mm の位置にひび割れ間隔 50mm で 2 本入れた供試体（以下、近接したひび割れ 2 本とする）と、ひび割れを供試体端部から 225mm の位置にひび割れ間隔 225mm で 3 本入れた供試体（以下、ひび割れ 3 本とする）の 5 種類用意した。また、弾性波発生位置や計測位置は、コンクリート表面の凹凸による弾性

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学 博士前期課程（学生会員）

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 博（工）（正会員）

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 工博（正会員）

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター技術専門職員（正会員）

表－1 コンクリート配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン プ (cm)	水セメ ント比 (%)	空気量 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメン ト C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	SP 剤
20	10	55	5	42	181	329	722	981	3A	0.48

波入力のばらつきの低減や、センサの接触を良好にするためにグラインダで研磨を行った。

2.2 計測方法

弾性波の計測には、図－2 に示すようなセンサ配置により実施した。打撃点に近いセンサを発信波形収録用のセンサ（以下、CH1 とする）とし、ひび割れを挟んで反対側のセンサを受信波形収録用のセンサ（以下、CH2 とする）とした。CH1 は供試体端部から 200mm の位置に設置し、CH2 は供試体端部から 150mm の位置に設置した。弾性波は鋼球ハンマによって、供試体端部から 100mm 離れた位置のコンクリート表面を打撃して励起させた。

弾性波の検出には加速度センサ（シエア型加速度ピックアップ、周波数範囲 5Hz～12kHz）と AE センサ（共振型 AE センサ、周波数範囲 50kHz～200kHz）の両者を用いた。加速度センサで検出された信号は、高速デジタルを介してパソコンに記録し、記録した原波形より最大振幅および伝播速度を 2 つのパラメータで検討した。AE センサにより検出された信号は、アンプにより増幅し、市販の AE 計測装置に取り込み、記録される波形パラメータのうちエネルギー、最大振幅、伝播速度、平均周波数、継続時間の 5 つのパラメータで検討した。今回は、紙面の都合により、エネルギー、伝播速度について記載している。

弾性波の入力には試験実施者が鋼球ハンマにより手動でコンクリート表面を打撃した。そして、励起させた波形の波長や周波数を変えるため鋼球ハンマの直径を 5.5mm、7.0mm、14.8mm、18.6mm の 4 種類用意した。（写真－1 参照）本資料では代表して鋼球ハンマ直径 5.5mm、18.6mm のデータを記載している。

表－2 に本研究で得られた波長と上限周波数を示した。波長に関しては、大まかな R 波の波長を計算するため、図－3 に示すように原波形の R 波初動から 1 周期を求めて R 波の平均速度を乗じて計算した。表－2 の値は 5 つの波の平均値を示している。これらの鋼球ハンマの直径と R 波の波長の関係は既往の研究で求められた R 波の波長²⁾ におおよそ一致している。

衝撃による入力の上限周波数は Sansalone の提案している式³⁾ (1)、(2) により算出した。

$$T_c = 0.0043D \quad (1)$$

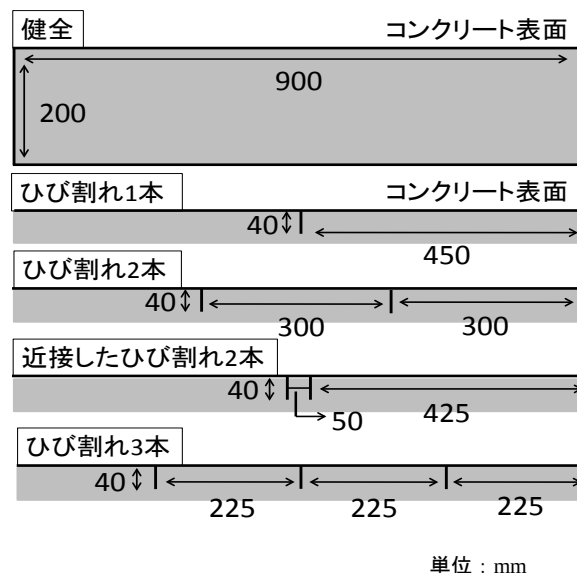
$$f_c = 1.25/T_c \quad (2)$$

ただし、 D (m)は鋼球の直径、 T_c (秒)は接触時間、 f_c (Hz)は上限周波数とする。

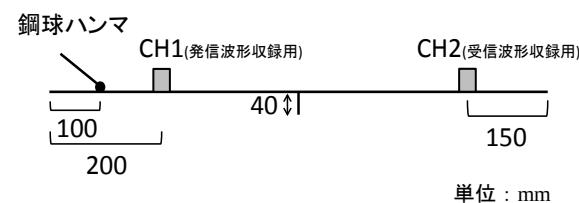
表－2 より、入力周波数に対して AE センサは、周波数範囲が比較的高いことが分かる。

2.3 各種パラメータ算出方法

加速度センサに関して、鋼球ハンマの打撃により励起された弾性波は、CH1 および CH2 で、サンプリング時間を 10μsec とし、9.9 秒間計測した。収録した波形から CH1 波形到達時間と CH2 波形到達時間の差を求め、伝播時間差を算出し、CH1 と CH2 の距離を伝播時間差で除することで、伝播速度を算出した。ここで、R 波初



図－1 各供試体のひび割れ導入位置



図－2 打撃・センサ位置

表－2 鋼球ハンマの波長と平均周波数

	直径5.5mm	直径18.6mm
波長(mm)	109	293
衝撃による入力の上限周波数(kHz)	52.85	15.63



写真-1 鋼球ハンマ（左より直径 18.6, 14.8, 7.0, 5.5mm）

動到達の決定は、図-3 の R 波初動にしたがって試験実施者が目視により確認し読み取りを行った。

また、収録した波形の最大振幅を CH1 と CH2 それぞれとり、CH2 を CH1 で除することで最大振幅の比を算出した。本研究では得られた波形の誤差を軽減するために、5 つの波形を無作為に選び平均して最大振幅の比を算出した。これらのパラメータは P 波、S 波、R 波の混在した波の値となる。

AE センサに関して、しきい値を 40dB に設定し、約 50 秒間、1 秒間隔で打撃を繰り返した。得られた波形の中からしきい値を超えた波形のエネルギー特性、最大振幅、伝播速度、平均周波数、継続時間を CH1、CH2 ごとに出して、CH2/CH1 でそれぞれ値を算出した。本研究では波形のばらつきを軽減するために、得られた全波形である 22 個の波形を平均してエネルギーの比を算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 加速度センサより得られた最大振幅比

図-4 と図-5 に鋼球ハンマ直径 5.5mm および 18.6mm の最大振幅の比を示した。CH1 で計測した最大振幅で、CH2 で計測した最大振幅を除した値でグラフを出している。これはすなわち、最大振幅比が減少すれば、弾性波の最大振幅が減衰していることを意味する。

図-4 に着目すると、健全なコンクリートに比べ、ひび割れ 1 本では 0.17 ほど減少しており、ひび割れ 2 本、ひび割れ 3 本をそれぞれ健全なものと比較すると、0.25, 0.57 と減少している。すなわち、ひび割れの数の増加により最大振幅が減少することが分かる。ここで近接したひび割れ 2 本は健全なコンクリートに比べて減少しているものの、0.08 しか減少しておらず、これにより、同じひび割れ数でひび割れ間隔の広いひび割れ 2 本に比べて波の減衰量が小さいことが分かる。

図-5 に着目すると、健全なコンクリートに比べ、ひび割れ 1 本が 0.01 減少していて、ひび割れ 2 本、ひび割

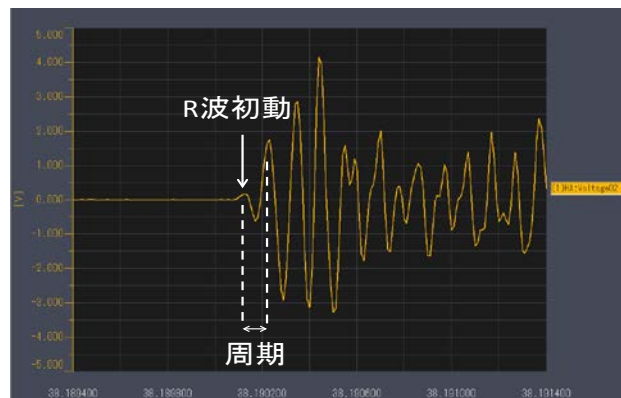


図-3 鋼球ハンマにより励起した波形

れ 3 本をそれぞれ健全なものと比較すると、0.17, 0.59 減少している。よって波長や周波数の異なる直径 18.6 mm 鋼球ハンマを用いてもひび割れの数によって最大振幅が減少することが分かる。近接したひび割れ 2 本は健全なコンクリートに比べ、0.07 減少しており、こちらもひび割れ 2 本に比べて波の減衰量が小さいことが分かる。

この 2 つのハンマによるひび割れと最大振幅比の減衰量により、ひび割れが 2 本発生している、入力した波の波長に比べて、ひび割れ間隔が十分に近接した場合は、2 つのひび割れは 1 つのひび割れと検出されることが考えられる。

また直径 5.5mm 鋼球ハンマは直径 18.6mm の鋼球ハンマに比べて最大振幅比の減衰が大きい。これは表-2 より直径 5.5mm の鋼球ハンマの弾性波の波長が直径 18.6mm の波長に比べて小さく、ひび割れの影響を受けやすかったためであると考えられる。

3.2 加速度センサより得られた伝播速度

図-6 と図-7 に鋼球ハンマ直径 5.5mm および 18.6mm の R 波の伝播速度を示した。

図-6 に着目すると、健全なコンクリートに比べひび割れ 1 本が 162 (m/s) 減少し、ひび割れ 2 本は 181 (m/s) の増加、ひび割れ 3 本は 680 (m/s) 減少している。ひび割れ 2 本で健全なコンクリートより伝播速度が増加していることが分かる。近接したひび割れ 2 本は健全なコンクリートに比べて 165 (m/s) 減少している。

図-7 から、健全なコンクリートに比べてひび割れ 3 本が 71 (m/s) 増加していることが分かり、図-6 と比較しても、鋼球ハンマ直径 5.5mm に関して、R 波の速度の変化は入力波長とひび割れ深さの影響を受けると考えられる。鋼球ハンマ直径 18.6mm に関しては、値がばらついている原因として、目視による波の読み取りによる誤差が影響したと考えられる。

3.3 AE センサにより得られたエネルギー

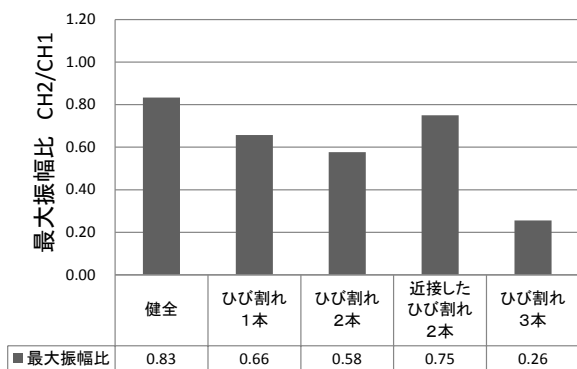


図-4 直径 5.5mm 鋼球ハンマ 最大振幅比
(加速センサ)

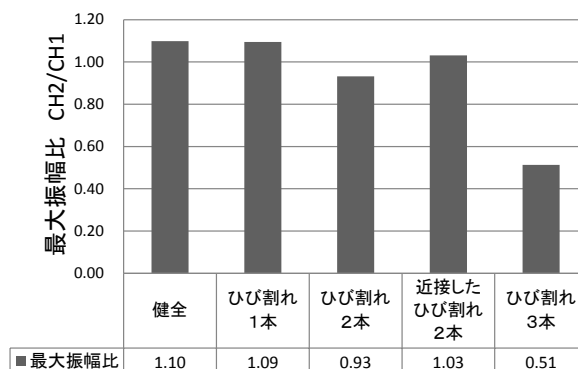


図-5 直径 18.6mm 鋼球ハンマ 最大振幅比
(加速度センサ)

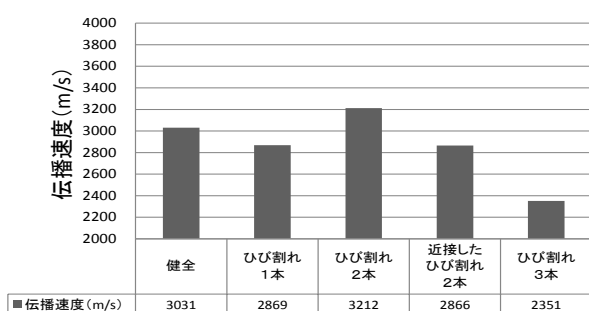


図-6 直径 5.5mm 鋼球ハンマ 伝播速度
(加速度センサ)

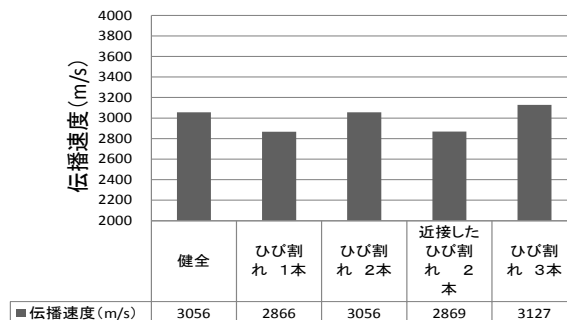


図-7 直径 18.6mm 鋼球ハンマ 伝播速度
(加速度センサ)

図-8と図-9に鋼球ハンマ直径5.5mmおよび18.6mmのエネルギーを示した。CH1で計測したエネルギーで、CH2で計測したエネルギーを除した値でグラフを出している。これはすなわち、エネルギー比が減少すれば、弾性波のエネルギーが減衰していることを意味する。図-8に着目すると、健全なコンクリートに比べ、ひび割れ1本が0.13減少していて、ひび割れ2本、ひび割れ3本をそれぞれ健全なものと比較すると、両者とも0.40減少している。これよりひび割れの本数の増加でエネルギーは減衰することが分かる。そして、近接したひび割れ2本は健全なコンクリートに比べて減少しているものの、0.23しか減少しておらず、これにより、同じひび割れの本数のひび割れ2本に比べて波の減衰量が小さいことが分かる。

図-9に着目すると、健全なコンクリートに比べ、ひび割れ1本は同じ値であり、ひび割れ2本、ひび割れ3本をそれぞれ健全なものと比較すると、0.23、0.20減少している。よって直径18.6mm鋼球ハンマを用いてもひび割れによりエネルギーが減少することが分かる。直径18.6mm鋼球ハンマは直径5.5mm鋼球ハンマに比べて、ひび割れの数によるエネルギーの減衰が分かりにくい結果であった。そして、近接したひび割れ2本は健全なコンクリートに比べ、0.12減少しており、こちらもひび割

れ2本に比べて波の減衰量が小さいことが分かる。

この2つのハンマによるひび割れとエネルギーの減衰量により、ひび割れが2本発生していても、入力した波の波長に比べて、ひび割れ間隔が十分に近接している場合は、2つのひび割れは1つのひび割れと検出することが考えられる。また直径5.5mm鋼球ハンマは直径18.6mm鋼球ハンマに比べてエネルギーの減衰量とひび割れの数との関係性が顕著に出ている。これは表-2より直径5.5mm鋼球ハンマが入力した弾性波の波長が109mmであり、ひび割れ深さ40mmとひび割れ間隔50mmの影響を波長が29mmである直径18.6mm鋼球ハンマに比べて受けやすかったためであると考えられる。

3.4 AEセンサにより得られた伝播速度

図-10と図-11に鋼球ハンマ直径5.5mmおよび18.6mmの伝播速度を示した。

図-10に着目すると、健全なコンクリートに比べひび割れ1本が200(m/s)減少し、ひび割れ2本は331(m/s)の減少、ひび割れ3本は284(m/s)減少している。よってひび割れ箇所があると、健全なコンクリートに比べて伝播速度が減少することは分かる。中でも近接したひび割れ2本は健全なコンクリートに比べて551(m/s)減少している。

図-11に着目すると、健全なコンクリートに比べひび

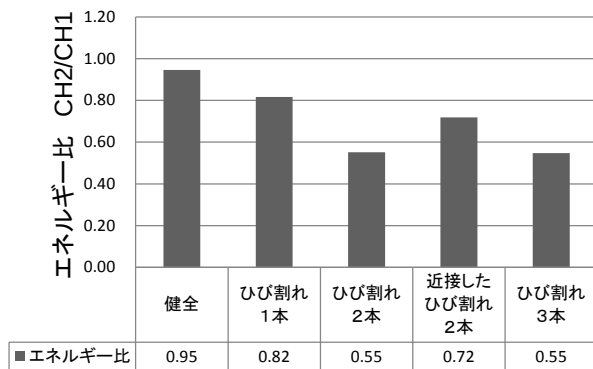


図-8 直径 5.5mm 鋼球ハンマ エネルギー (AE センサ)

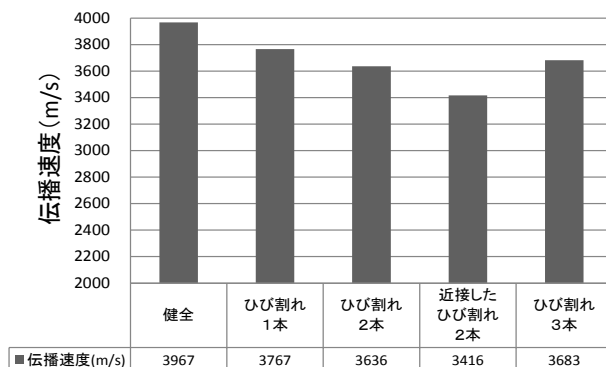


図-10 直径 5.5mm 鋼球ハンマ 伝播速度 (AE センサ)

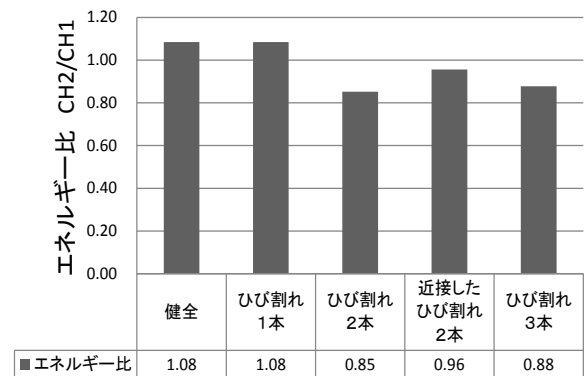


図-9 直径 18.6mm 鋼球ハンマ エネルギー (AE センサ)

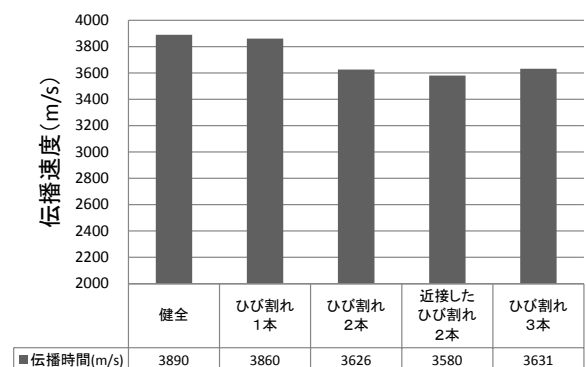


図-11 直径 18.6mm 鋼球ハンマ 伝播速度 (AE センサ)

割れ 1本が 30 (m/s) 減少し、ひび割れ 2本は 264 (m/s) の減少、ひび割れ 3本は 259 (m/s) 減少している。よって直径 5.5mm 鋼球ハンマと似た傾向であり、ひび割れがあると、健全なコンクリートに比べて伝播速度が減少することが分かる。中でも近接したひび割れ 2本は健全なコンクリートに比べて 310 (m/s) 減少している。図-10 と図-11 より、鋼球ハンマ直径 5.5mm, 16.8mm 共に伝播速度がひび割れ数の増加に伴い減衰するパラメータであることが分かる。

加速度センサで計測した伝播速度と AE センサで計測した伝播速度を総じて比較すると、AE センサの伝播速度が大きく出ている。これは AE センサでは、P 波の初動を検出しているためである。

AE センサは周波数範囲が 50kHz~200kHz であり、入力周波数よりも高い周波数に対応したセンサであったが、今回の試験の範囲においては、3.3 で述べたエネルギーや伝播速度とともに減衰が確認できるデータが計測できたといえる。

4. 直径による波長の変化とひび割れ本数を考慮した各種パラメータの評価

前述した各種パラメータの変化には鋼球の波長による変化が各種パラメータの減衰量に影響を及ぼしていたと考えられる。そこで、鋼球の波長とひび割れの本数を考

慮した指標を既往の研究¹⁾を参考に検討した。入力波形の波長の変化とひび割れ本数を考慮した指標を横軸にとり、加速度センサの最大振幅、伝播速度と AE センサのエネルギー特性、伝播速度について図-12~15 に示した。横軸は nd/λ とした。ここで、 n はひび割れ本数、 d はひび割れ深さ(mm)、 λ は R 波の波長(mm)である。前述のように、近接したひび割れ 2本はひび割れ 1本と同じ減衰傾向を示し、他のものとは違う傾向を示していたため、ここでは評価対象から除外した。

図-12~15 より、伝播速度を除くいずれの結果も、ひび割れによる減衰量と nd/λ の良い相関が認められた。伝播速度に比べ振幅やエネルギーが減衰と良い相関が得られた理由に、加速度センサの伝播速度については試験実施者が目視で原波形から値を読み取ることや、伝播速度は欠陥に対して鈍感である⁴⁾ことが考えられる。

これらの結果は、エネルギーや振幅は減衰が大きいことも表すので、構造物を広く範囲で調べる場合にどれだけの距離、評価できるパラメータなのか検討していくことが必要である。本研究ではひび割れ深さが 40mm ですべて統一していたため、ひび割れ本数とひび割れ深さを乗じたが、実際のひび割れはひび割れ深さ、ひび割れ間隔、ひび割れ幅が一樣でないため、実構造物に使用するにはそれらを考慮した指標を今後検討する必要がある。

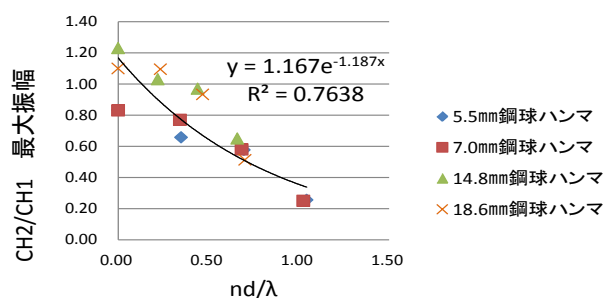


図 - 12 加速度センサ 最大振幅

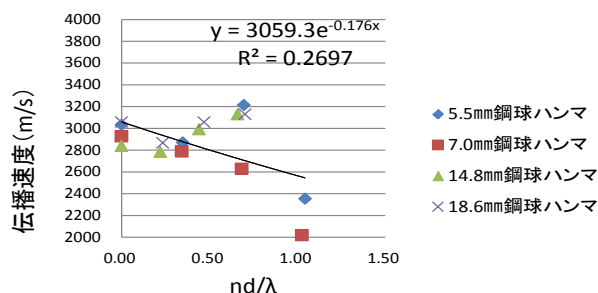


図 - 14 加速度センサ 伝播速度

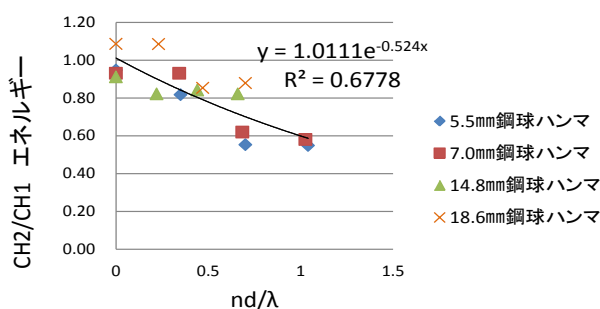


図 - 13 AE センサ エネルギー比

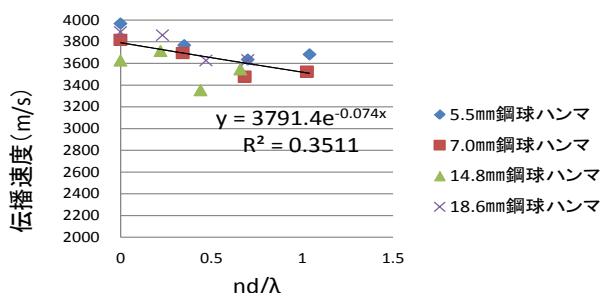


図 - 15 AE センサ 伝播速度

5. まとめ

本研究では、ひび割れ間隔やひび割れの数の異なる供試体を作製し、加速度センサで記録した原波形から目視で読み取った波形パラメータと AE センサで記録した波形から機械的に抽出した波形パラメータを用い、各供試体において弾性波の減衰特性とひび割れとの関係性を調べた。得られた成果を以下に述べる。

- 1) 本実験で検討した基本的なパラメータの内、加速度センサで得られた最大振幅と AE センサで得られたエネルギー特性において最も良い相関が得られた。
- 2) ひび割れが 2 本発生していても、入力した弾性波の波長に比べてひび割れ間隔が小さい場合、1 つのひび割れとして検出する可能性がある。
- 3) 本実験で求めた鋼球ハンマの打撃により入力された弾性波の上限周波数は 15.63kHz～52.85kHz であった。それに対し、AE 計測器による計測では、周波数範囲が 50kHz～200kHz の共振型のセンサを使用した。今回の試験の範囲では、ひび割れによる弾性波の減衰の傾向を捉えることができた。

- 4) 本実験で、鋼球の波長とひび割れの本数を考慮した指標を用いて、弾性波の波形パラメータの減衰を調べることでひび割れによるコンクリートの損傷度が評価できる可能性があることを示せた。

参考文献

- 1) 江川顕一郎, 堤知明, 呉佳暉: 表面波を用いたひび割れ深さの新しい測定技術, コンクリート構造物の非破壊検査への期待, pp.65～74, 2003
- 2) 桃木昌平, 蔡華堅, 塩谷智基: Rayleigh 波減衰特性によるコンクリートひび割れの定量評価に関する基礎研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 第 9 巻 pp.25～30 2009.10
- 3) Sansalone, M.J. and Streett, W.B :Impact-Echo, BullbrierPress, Ithaca, N.Y., 1997.
- 4) T.Shiotani・D.G.Aggelis : Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage, Materials and Structures, pp.377～384, 2009