

超音波を用いた FRP 成形板の硬化不良検出

大久保政欣* 和田明浩**

Ultrasonic Detection of Uncured Region in FRP Laminates

Masayoshi OKUBO* Akihiro WADA**

ABSTRACT

Polymer based laminated composites play an increasing important role in industry today. In the field of civil engineering laminated plates consisting of thermoplastic and SMC are used to rehabilitate aged sewerage pipes. Pipe rehabilitation method, which is one of several trenchless rehabilitation methods to repair aged sewerage pipes, creates a close-fit 'pipe-within-a-pipe'. To guarantee the integrity of rehabilitated pipes, inspection of uncured region in a constructed pipe is required. In this study, ultrasonic testing is applied to the detection of uncured region in a laminated composite plate. In addition to wave attenuation, Acousto-Ultrasonic (AU) parameters and AIC(Akaike's Information Criterion) are introduced to evaluate the degree of cure. It is found that application of AU parameters and AIC are expected to improve the precision of inspection.

Keywords : ultrasonic, Lamb wave, laminated composite, spectrum analysis

1. はじめに

現在、高度経済成長期に敷設された多くの下水管が老朽化している。例えば、神戸市の下水道は昭和 26 年の整備開始以来約 60 年が経過し、汚水管きよの布設延長は 4036km とほぼ全域で整備が概成した。しかし管年齢 30 年を超過した老朽化管きよが全体の約 50%を占めており、管きよの老朽化に起因した道路陥没、漏水等の事故の増加が懸念される⁽¹⁾。このため、適切な管理による下水道の定期的な検査、補修が重要となる。補修法として古くなった下水管の中に未硬化の FRP 積層シートを引き込み、管内で膨らませ蒸気などで管内面に圧着、硬化させ FRP パイプを形成する管更生工法がある。この工法では施工時に地下水の侵入などにより未硬化領域が生じる可能性があり、施工後に非破壊検査による未硬化領域の検査が必要となる。これまでに板厚方向の超音波検査が検討されているが、一度に検査できる領域が狭く、対象物全体を検査するには平面走査が必要となる。本研究では検査時間の短縮を目的としてタイヤ探触子を用いた未硬化領域の検査法について検討した。また、超音波の減衰率にかわる新たな材料評価パラメータとして広帯域信号の分析に用いられる Acousto-Ultrasonic パラメータ(AU パラメータ)や赤池情報量基準(AIC)に基づく超音波伝播速度を適用し、硬化不良部検出に対する各パラメータの有効性を調べた。

2. 超音波による材料評価法

2.1 超音波測定法

板面内方向に超音波を効率よく送受信する方法として屈折の法則を利用した斜角入射法がある。斜角入射法とは Fig. 1 に示すように送受信探触子を対称に設置し、一方の探触子から超音波を斜角入射して材料中に伝播させ、受信側の探触子で漏洩波を受信する。この際、検査領域は送受信探触子に挟まれた領域となる。しかし、この方法では探触子と試料の間には超音波の伝達効率を高めるために水を配置する必要があり、検査対象物を水没させなければならないため実際の下水管の検査には適さない。そこで、Fig. 2 のようなタイヤ探触子を用いた測定方法が提案されている。タイヤ探触子のタイヤ内部には探触子が斜角で配置されており、探触子から発生した超音波は充填液およびゴムタイヤを介して表面から試料内部に入射される。タイヤが試料表面上を転がることによって連続的な測定が可能となる。

超音波の減衰率は試料の材料特性に依存しているため、受信波強度の変化が未硬化領域検出の指標となる。しかし、受信波強度は超音波の入射効率に影響されるため、受信波強度に基づく評価では検査結果に揺らぎが生じる可能性がある。そこで本研究では、受信波の減衰率に基づく評価に加えて周波数領域での変化を評価するために AU パラメータを用いた。また新たに超音波伝播速度に注

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科 教授

目した。超音波伝播速度の算出はゼロクロスポイントの計測に基づく場合が多いが、受信波強度がゆらぐと計測点に誤差が生じる恐れがある。そこで、地震波の到達時刻予測などにも利用されている赤池情報量基準(AIC)を導入して伝播速度測定精度を高めた。

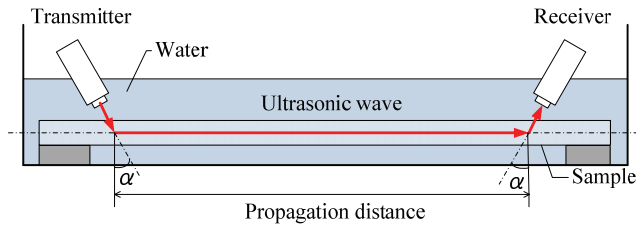


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic oblique incidence.

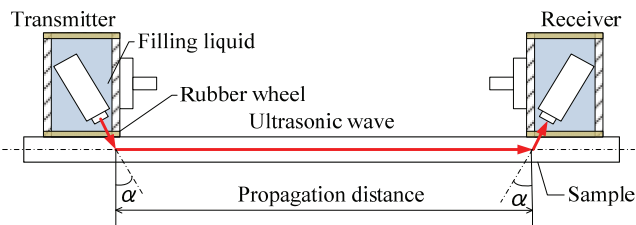


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic testing with wheel type probes.

2.2 AU パラメータについて

AU パラメータは被検査材を伝播する広帯域超音波のスペクトル線図から算出されるパラメータであり、受信波が持つ周波数特性の定量的な評価に利用される⁽²⁾。AU パラメータは次式であらわされるスペクトルモーメントにより算出される⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$M_n = \int_0^{f_m} W(f) f^n df \quad (1)$$

ここで $W(f)$ はスペクトル密度関数、 f は周波数、 f_m はナイキスト周波数であり、 n はスペクトルモーメントの次数を表す。これまでに複数の AU パラメータが提案されているが本研究では以下の 2 つのパラメータを利用する。

$$A1 = M_0 \quad A2 = \frac{M_1}{M_0} \quad (2)$$

A1 パラメータはスペクトル線図の 0 次モーメントと等しく、波の総エネルギーに相当する。A2 パラメータはスペクトル線図の図心に相当し、波の中心周波数を表している。

2.3 AIC パラメータについて

今回の測定で得られた波形データの先頭部には入力波の影響やノイズが含まれている。そのため、波形データから波の到達時刻を正確に読み取るためには波形データをノ

イズ部と波形部に分ける分割点を求める必要がある。この区間分割の判断基準として地震波自動処理システムにおける到達時刻の読み取りと評価にも用いられる赤池情報量基準(AIC)を用いた。AIC を用いることで数学的客観性を保ちつつ精度のよい読み取りが可能となる。AIC は

$$AIC = -2\{(\text{モデルの最大対数尤度}) - \text{モデルの自由パラメータの数}\} \quad (3)$$

で定義される⁽⁶⁾。この値を最小にするモデルを最適なモデルとみなす。区間分割は次の手順で行う。

- (1) Fig. 3 のように n 個の点を 2 つに分け、区間 1 (1~ k) に MODEL1, 区間 2 ($k+1$ ~ n) に MODEL2 を最尤法によりあてはめ、AIC を計算する ($AIC(k)$ と記す)。
- (2) $AIC(k)$ を最小にする点 k_{min} を探し分割点とする。

今回は測定より得られた波形データのモデルとして正規分布モデルを用いる。正規分布モデルを用いた $AIC(k)$ は次のような式で表される。

$$AIC(k) = n \log 2\pi + k \log \sigma_1^2 + (n - k) \log \sigma_2^2 + n + 8 \quad (4)$$

ここで σ_1^2 , σ_2^2 はそれぞれ区間 1, 区間 2 に正規分布モデルをあてはめたときの分散である。この区間分割法を入力波の波形到達時刻の読み取りに使用する。

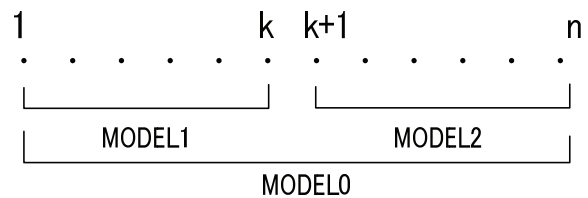


Fig. 3 Illustration of the method to divide a section.

3. 測定条件の選定

3.1 供試材について

実際に下水道更生管に使用されているものと同じ材料構成で成形した平板状試料を評価対象とした。試料は平板で Fig. 4 に示すように内面側(探触子設置側)から、熱可塑性樹脂、有機繊維製織物、SMC、有機繊維製織物の積層構造である。厚さは9mm,12mmの2種類である。

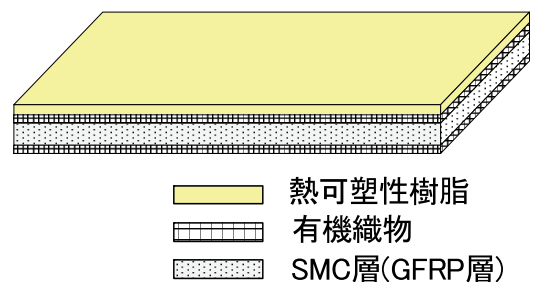


Fig. 4 Configuration of a laminated composite plate.

板厚のちがいはSMC層の積層数に起因している。このFRP積層板に人工的に硬化不良部を形成し、硬化領域から未硬化領域にかけてタイヤ探触子を用いて連続測定し受信波の分析を行った。

3.2 入力周波数の選定

材料中を伝播する超音波の減衰特性は入力周波数によって異なる。そこで本研究ではFRP積層板の硬化領域において入力周波数の最適値を探索した。測定には共振周波数が180kHzのタイヤ探触子を用いた。入射波は振幅100Vのバースト波(カウント5)とし、伝播距離は100mmに設定した。入力周波数を100kHzから10kHz刻みで400kHzまで変化させ、各周波数での受信波形の最大振幅を測定した。測定結果をFig. 5に示す。いずれの板厚においてもタイヤ探触子の共振周波数である180kHz付近でピークが生じている。

これらの結果より、板厚9mmにおいてはピーク周波数である160kHzを入力周波数とした。また、板厚12mmにおいては110~180kHzで受信波強度に大差がないため、波長が短く直進性の良い180kHzを入力周波数とした。またタイヤ探触子の2次共振周波数付近の波である320kHzの入力波についても調査した。

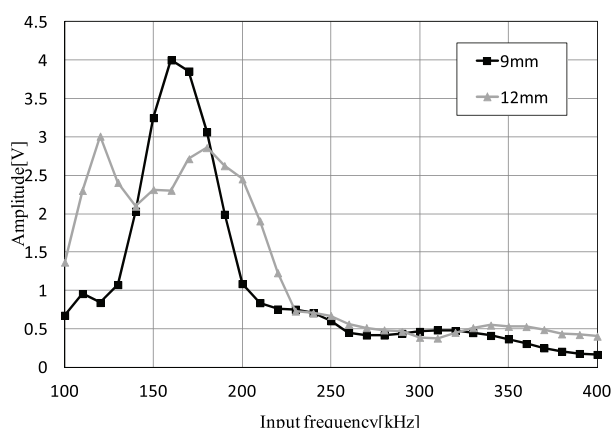


Fig. 5 Variation in the intensity of received waves with the input frequency.

4. 受信波強度を用いた未硬化領域の検出

硬化度が傾斜的に変化したFRP積層板を人工的に成形し、タイヤ探触子を用いて超音波検査を行った。走査距離は硬化領域から未硬化領域にかけての300mmとし、10mm間隔で波形を取り込んだ。またタイヤ探触子間の超音波伝播距離を100mm, 120mm, 140mmの3パターンに変化させて伝播距離の変化が測定結果に与える影響を調査した。Fig. 6に入力周波数が160kHz(9mm)と180kHz(12mm)の場合の各測定位置における受信波強度を示す。縦軸は受信波の最大振幅、横軸は波形取り込み位置に対応している。いずれの測定結果も未硬化領域は硬化領域に比べ超音波の伝播効率が悪くなるため、波

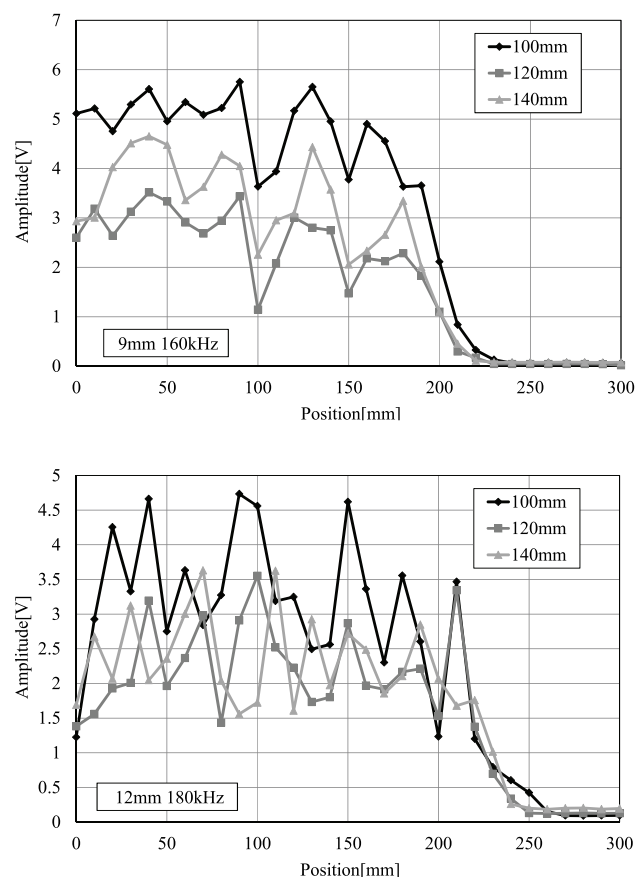


Fig. 6 Variation in amplitude with propagation distance.

形取り込み位置が200mmを越えたあたりから振幅が大きく減衰しているのが分かる。また、伝播距離が短い100mmの場合は、他の伝播距離に比べて波の減衰が少なく受信波強度が高い傾向が確認できた。しかし、硬化領域においても振幅が大きくばらつく傾向がみられる。これはタイヤ探触子と試料の接触状態のばらつきなどに起因すると考えられる。入力周波数が320kHzの場合も同様の傾向が見られた。以上のことから、受信波強度に基づく評価は未硬化領域の検出は可能であるが、さらなる検査精度の向上が望まれる。

5. AUパラメータを用いた未硬化領域の検出

波の総エネルギーを表すA1パラメータはFig. 6に示す受信波強度の変化と同様の傾向を示したため以下ではスペクトル線図の図心を表すA2パラメータに注目する。また、入力周波数が160,180kHzの場合はA2パラメータに大きな変化が見られなかったため以下では入力周波数が320kHzの場合に着目する。Fig. 7に各板厚における硬化領域と未硬化領域での受信波形のスペクトル線図を示す。板厚9mmにおける硬化領域のスペクトル線図においてバースト波で励起した320kHz付近の波と180kHz付近の波が強く検出されていることが分かる。一方で、板厚12mmにおける硬化領域のスペクトル線図では入力周

波数である 320kHz 付近の波が強く検出された。またどちらの板厚においても未硬化領域のスペクトル線図ではスペクトルの強度が大きく低下し、入力周波数である 320kHz 付近の波よりも 100~180kHz 付近の波が相対的に強く検出された。これは未硬化領域においてバースト波の高周波数成分が著しく減衰したためと考えられる。この傾向は波形取り込み位置が 230mm 以降で顕著に確認できた。

入力周波数が 320kHz の場合の A2 パラメータの変化を Fig. 8 に示す。どちらの板厚においても未硬化領域において A2 パラメータが低下する傾向が見られた。これは Fig. 7 に示したように高周波数成分の減衰によってスペクトル線図の図心が低周波数側に移動したことを反映している。また超音波の伝播距離が長くなるにつれて、波に含まれる高周波数成分の減衰が著しくなるため未硬化領域において A2 パラメータの低下位置が早まる傾向が見られた。

ここで硬化領域に注目すると、どちらの板厚においても A2 パラメータは比較的安定している。さらに、板厚が 12mm の場合は 9mm の場合と比較してスペクトル線図の図心が高周波数側である。よって高周波数成分の波が安定して励起されるかどうかは試料の板厚や表面材の状態に依存するといえる。また超音波の伝播距離が増加するにつれて受信波の高周波数成分が低周波数成分よりも先に減衰するためスペクトル線図の図心が低周波数側に移動する。その結果、硬化領域においても超音波の伝播距離が長くなるにつれて A2 パラメータが低下する傾向が見られた。

以上の結果より、高周波数成分が励起可能であるならば、A2 パラメータを用いた未硬化領域の検出が可能である。しかし第 4 章の受信波強度を用いた評価と比較すると A2 パラメータは未硬化領域に対する感度が低い。

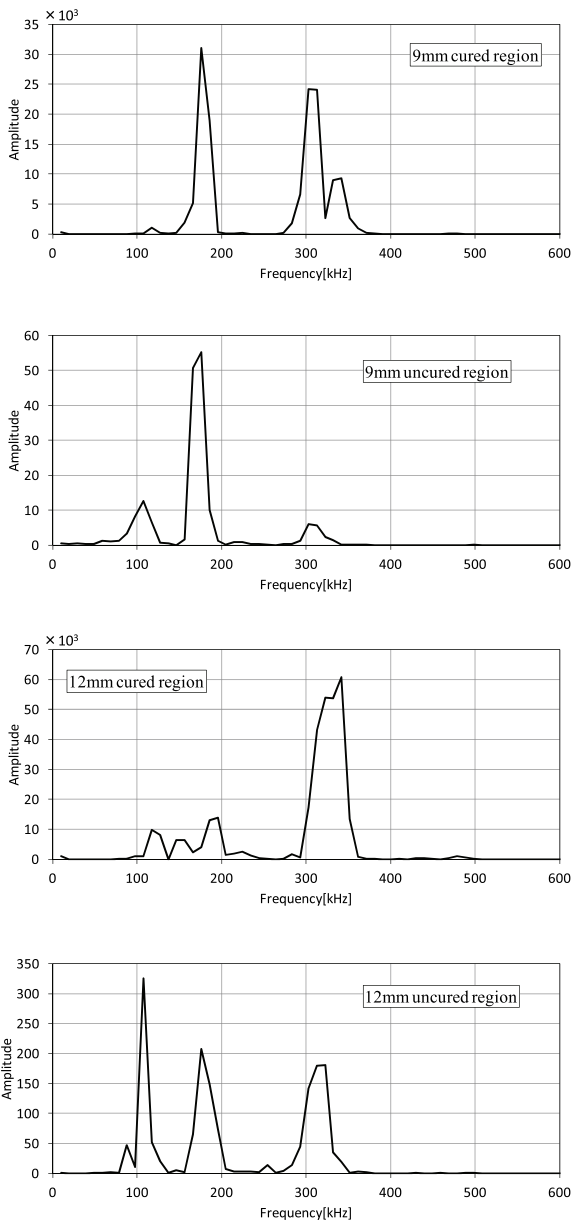


Fig. 7 Variation in spectrum diagram with cure degree.

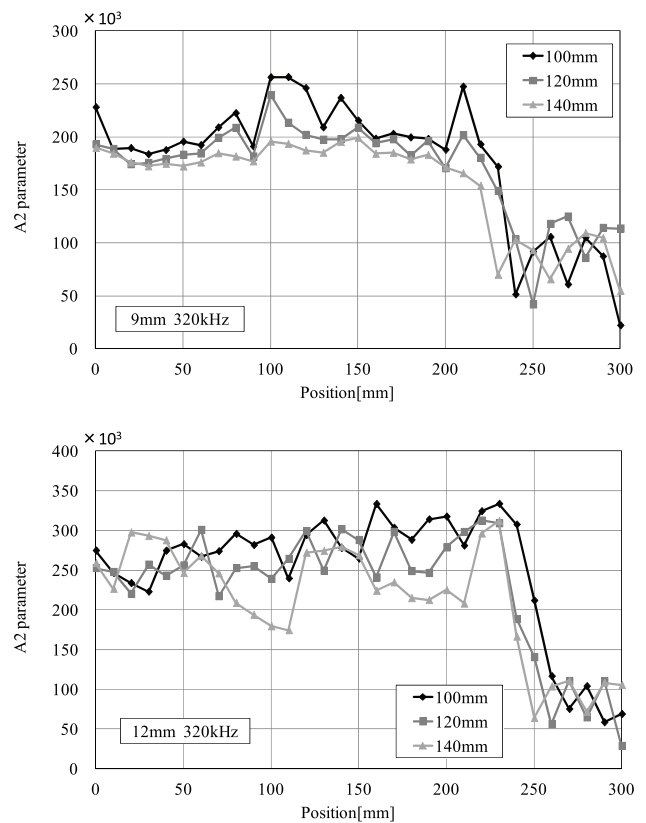


Fig. 8 Variation in A2 parameter with the position.

6. 超音波伝播速度を用いた未硬化領域の検出

6.1 超音波伝播速度の算出

超音波の伝播速度は材料の弾性率に依存するため材料の弾性率が低下する未硬化領域において超音波の伝播速度も低下すると考えられる。そこで超音波伝播速度を評価パラメータとして FRP 成形板の未硬化領域の検出を試みた。本研究では波形到達時刻の導出に式(4)に示した AIC を使用した。測定で得られた波形データの各時刻

における AIC を計算し、AIC が最小となる時刻を波形到達時刻とした。AIC の計算結果の一例を Fig. 9 (a) に示す。また AIC が最小となる時刻で波形データを分割したものを Fig. 9 (b) に示す。本研究ではタイヤ探触子の中心間距離を超音波伝播距離として、AIC を用いて算出した波形到達時刻で割ったものを超音波伝播速度と定義した。

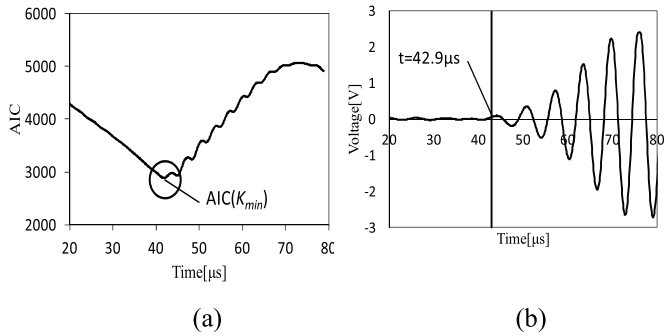


Fig. 9 Example of AIC analysis to divide a section.

6.2 評価結果

AIC 解析には高い SN 比の信号を用いる方が良いため以下では入力周波数が 160,180kHz の場合について注目する。Fig. 10 に入力周波数 160kHz (9mm) と 180kHz (12mm) の場合の波形取り込み位置に対する超音波伝播速度の変化を示す。どちらの板厚においても超音波伝播速度は硬化領域で比較的安定し未硬化領域で低下する傾向が見られた。波形取り込み位置が 230mm 以降で受

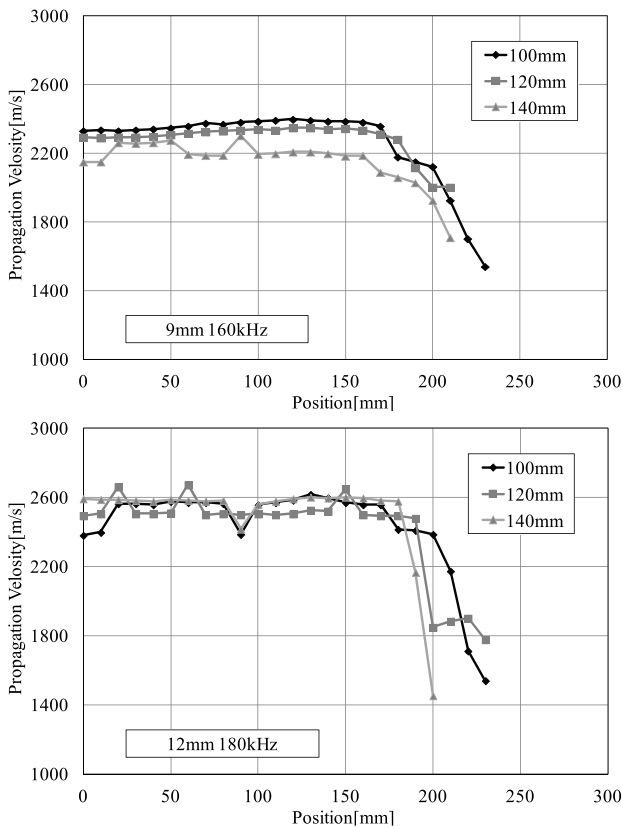


Fig. 10 Variation in propagation velocity with the position.

信波形の強度が著しく低下し、受信波形の波形データ部とノイズの分割が困難となるため今回用いた方法では超音波伝播速度を算出することができなかった。また、第 5 章の A2 パラメータを用いた評価結果と比較すると、どちらの板厚においても超音波伝播速度のほうが A2 パラメータよりも先に低下していることが分かる。このことから A2 パラメータよりも超音波伝播速度の方が FRP 積層板の未硬化領域に対する感度が良いと言える。

7. 超音波測定結果と力学特性との比較

前章までに示した超音波測定結果と実際の材料強度・剛性との間にどの程度の相関があるのかを調べるために、JIS K 7171 に基づき三点曲げ試験を行った。Fig. 11~13 は受信波強度・AU パラメータ・超音波伝播速度と曲げ強度・弾性率を比較したものであり、位置 0mm の値を基準として縦軸を正規化したものである。材料強度が低下している領域で各評価パラメータが低下しており、両者に相関が見られる。しかし、A2 パラメータは材料強度よりも低下位置が遅いことから未硬化領域に対する感度が低いと言える。また、受信波強度は硬化領域でバラつく傾向にあるが、超音波伝播速度は安定している。これらのことから超音波伝播速度を用いることで安定した未硬化領域の検出が可能であるといえる。

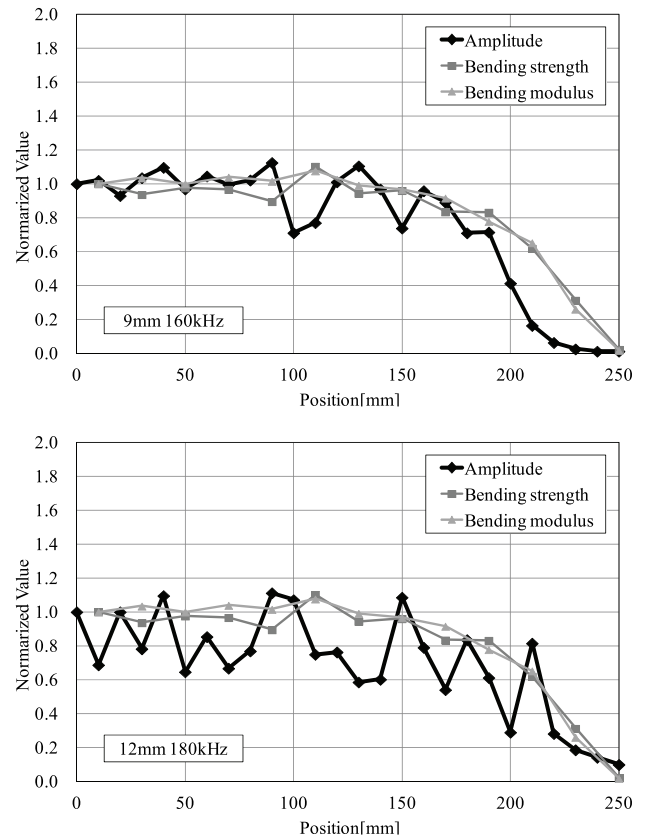


Fig. 11 Comparison between wave attenuation and mechanical properties.

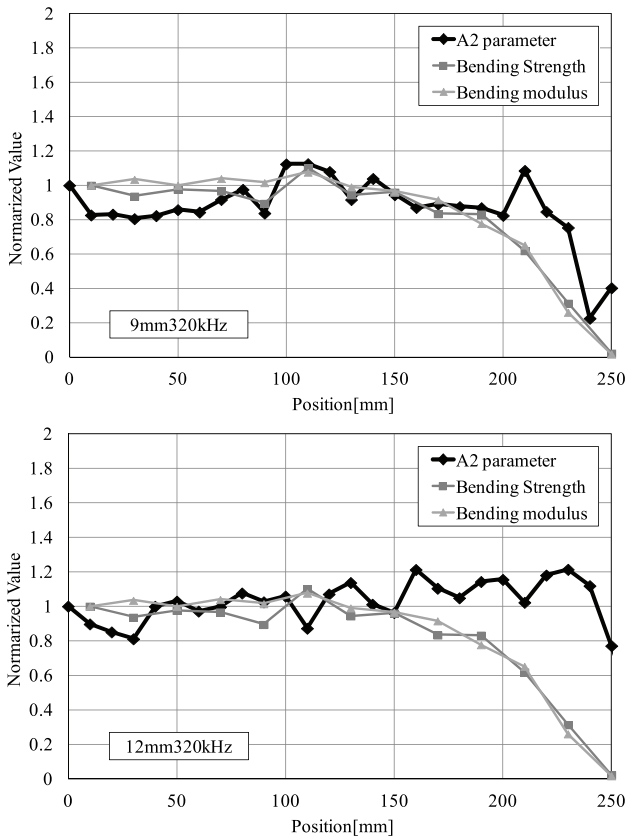


Fig.12 Comparison between A2 parameter and mechanical properties.

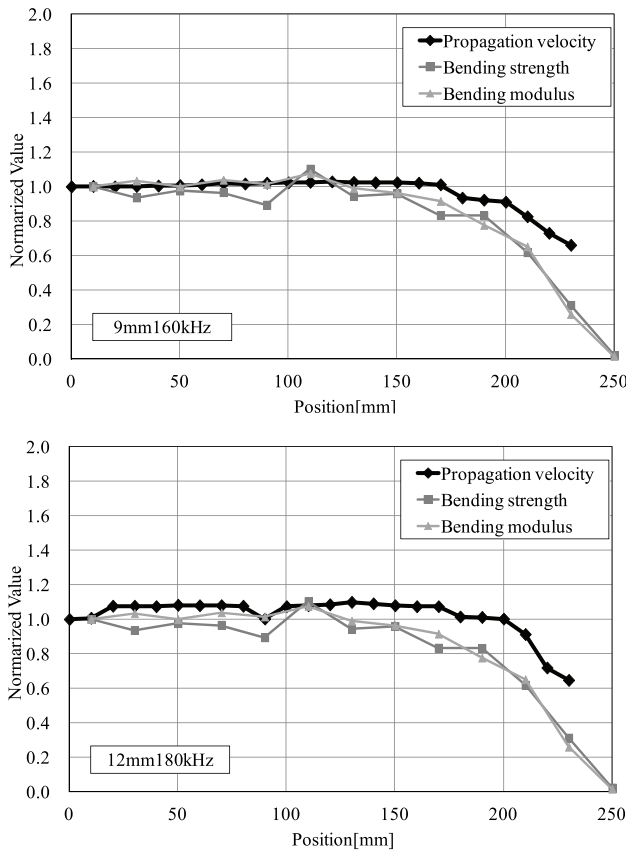


Fig.13 Comparison between propagation velocity and mechanical properties.

8. 結言

本研究では超音波による FRP 成形板の硬化不良部検出の時間短縮を目的として、タイヤ探触子を用いた検査法について検討した。評価パラメータとして受信波強度に加えて AU パラメータ・AIC に基づく超音波伝播速度の適用を試みた。以下に得られた結論を示す。

- (1) 受信波強度および受信波の総エネルギーを表す A1 パラメータを用いることで硬化不良部の検出が可能であるが、被検査材に対する超音波の入射効率の影響を受けるため硬化部においてもデータの揺らぎが生じやすい。
- (2) スペクトル線図の図心に相当する A2 パラメータを利用した評価では、入力周波数 320kHz を用いることで、未硬化領域の検出が可能である。また、硬化領域においてデータのゆらぎが少ない。
- (3) AIC に基づく超音波伝播速度の測定では、硬化領域において安定し、未効果領域で低下する傾向が見られた。また、A2 パラメータよりも未硬化領域に対する感度が良い。
- (4) 超音波測定結果と曲げ試験結果を比較し、受信波強度および超音波伝播速度と材料強度の相関が良好であることを確認した。

以上の結果より、入力周波数がタイヤ探触子の共振周波数である 180kHz 付近では、受信波強度と超音波伝播速度による評価を併用することで FRP 積層板の未硬化領域検出の精度向上が期待できることがわかった。

謝辞

本研究で使用した試料、および計測装置の一部は芦森工業株式会社より提供して頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 松木靖:「神戸市の污水管きょ改築更新基本計画と管更生材の品質管理」, 月刊下水道, Vol.35, No.61, pp.25-28, 2012.
- (2) 和田明浩, 元木信弥, 山崎友裕:「ラム波スペクトラム解析による FRP 積層板の衝撃損傷検出」, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.78, No.790, pp.879-889, 2012.
- (3) M.T.Kiernan and J.C.Duke,Jr : “Acousto-ultrasonics as a monitor of material anisotropy”, Materials Evaluation, Vol.46, pp.1105-1113, 1988.
- (4) M.T.Kiernan and J.C.Duke,Jr : “PC analysis of an acousto-ultrasonic signal”, Materials Evaluation, Vol.46, pp.1344-1352, 1988.
- (5) 前田直樹:「地震波自動処理システムにおける読み取り評価」, 地震第 2 輯, 第 38 巻, pp.365-379, 1985.