研究論文

超音波を用いた下水管更生用 GFRP 成形板の硬化不良検出

和田 明浩^{*1}, 山崎 友裕^{*2}, 北川 英二^{*3}, 伊藤 博^{*3}

(2015 年 4 月 29 日受付)

Ultrasonic Detection of Uncured Region in GFRP Laminates for Rehabilitation of Sewerage Pipes

Akihiro WADA,^{*1} Tomohiro YAMASAKI,^{*2} Eiji KITAGAWA^{*3} and Hiroshi ITO^{*3}

(Received April 29, 2015)

Abstract: A new technique using Lamb wave is proposed to detect uncured region in GFRP laminates nondestructively. Polymer based composites play an increasingly important role in the field of civil engineering in recent years. For example, laminated sheets consisting of thermoplastic layer, organic fabric sheets and SMC (sheet molding compound) are used to rehabilitate aged sewerage pipes. The cylindrical laminate is inserted in the pipe, and is inflated and cured by steam blowing to create close-fit pipe. This CIPP (cured in place pipe) is one of several trenchless rehabilitation methods to repair aged pipes. In this study, ultrasonic Lamb wave is applied to the detection of uncured region in a laminated composite plate. Oblique incidence method in which ultrasonic waves are launched by the transducer inclined at a selected angle is applied to excite specific mode of Lamb waves in the laminate. Wheel type probes are used to improve inspection efficiency. Beside wave attenuation, AU parameters which are derived from power spectrum of a broadband signal are introduced. It is found that application of AU parameters leads to the improvement of the detectability of uncured region.

Key words: Composite material, Laminated construction, Nondestructive inspection, Ultrasonic inspection, Lamb wave, Spectrum analysis

1. 緒 言

我が国では近年、社会インフラとして整備された土木構造物の老朽化が問題視されており、高い比強度と比剛性を有し現場施工性にも優れた繊維強化プラスチック (FRP) による補修工事が行われている。我々の生活を支える重要なインフラの 1 つである下水道においても管路の老朽化が顕在化しており、下水管の破損に伴う道路陥没事故も多発している。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、汚水管きょの敷設延長は平成 22 年度末で 4036 km とほぼ全域で整備が概成した¹⁾。しかし、管年齢 30 年を超過した管きょが全体の約 50% を占めており、管きょの老朽化に起因した漏水、道路陥没などの事故の増加が懸念される。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。補修方法の 1 つとして、古くなった下水管の中に未硬化の筒状 FRP シートを挿入し、蒸気により管内で膨らませて内面に圧着するとともに加熱硬化させて下水管

^{*1} 神戸市立工業高等専門学校機械工学科 教授 (651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3)

Professor, Department of Mechanical Engineering, Kobe City College of Technology, 8-3, Gakuenhigashimachi, Nishi-ku, Kobe 651-2194, Japan

^{*2} 大阪市立大学大学院工学研究科 教授 (558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138)

Professor, Department of Mechanical Engineering, Osaka City University, 3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan

^{*3} 芦森工業株式会社機能製品事業本部 (566-0001 大阪府摂津市千里丘 7-11-61)

High Performance Product Business Division, Ashimori Industry Co., LTD., 7-11-61, Senrioka, Settsu, Osaka 566-0001, Japan

内面に FRP パイプを形成する管更生工法 (CIPP) がある。この工法では施工後に TV カメラ調査が実施されているが、FRP パイプの硬化状態を把握できないため、地下水などの影響による部分的な温度上昇不足のために生じる硬化不良部を見逃す可能性がある。硬化不良部の存在は強度不足や漏れの原因となるため、下水管内に形成した FRP パイプの硬化状態を非破壊検査する手法が望まれている。

樹脂成形品の硬化度評価の取り組みとしては誘電率測定²⁾、光ファイバによるひずみ測定³⁾などが研究されているが、これらはセンサの材料表面への貼り付けや材料内部への埋め込みが必要なため測定位置の走査が困難であり、検査コストが高いという問題もある。超音波検査では音速測定⁴⁾や金型界面反射波の測定⁵⁾などが研究されており原理的に測定位置の走査が可能であるが、板厚方向の超音波計測に基づく手法では一度に検査できる領域が狭く検査効率が悪い。板厚方向検査以外の手法として板面内を伝播するラム波 (板波) を利用した検査方法があり、Guo ら⁶⁾、Tan ら⁷⁾をはじめ多くの研究者により FRP 積層板の損傷検査に適用した例は報告されているが、硬化不良部検出への適用事例は見当たらない。そこで本研究では、CIPP 法で用いられるものと同じ材質の GFRP 積層平板を対象にラム波を用いた硬化不良部検出の有効性について検討した。特に、下水道更生管のような大型構造物の連続検査に適したタイヤ探触子を用いてラム波の送受信を試みた。材料評価パラメータとして振幅減衰率に加えて広帯域信号の分析に用いられる AU パラメータ (acousto-ultrasonic parameter) を導入し、検査精度の改善を試みた。

2. タイヤ探触子を用いた超音波測定

2.1 ラム波測定法

超音波検査では欠陥などの内部反射源からの反射波を検出する手法が一般的であるが、硬化不良部検出においては硬化部と硬化不良部の境界が明確でなく、領域境界からの反射波の検出は望めない。このため検査領域を透過した超音波の変化を評価する必要がある。また、超音波を板厚方向に入射した場合は一度に検査できる範囲が探触子直下部に限定されるため広域の検査には時間を要する。そこで本研究では、試料面内を伝播するラム波を計測対象とした。FRP 積層板は微視的には非均質材料であるが、検査に用いるラム波の波長が材料の微視構造に比べて十分に大きければ均質材の波動伝播理論が適用できる。ラム波は複数の伝播モードを有することが知られ

Fig. 1 Schematic illustration of dispersion curves of Lamb waves.

Fig. 2 Deformation of S_0 and A_0 Lamb modes.

ており、Fig. 1 に模式的に示すように各モードには特有の速度分散性がある。モードは対称モード (S モード) と反対称モード (A モード) に分類され、それぞれ 0 次モードから高次モードが存在するが、周波数と板厚の積が小さい領域では Fig. 2 に示す 2 つの 0 次モードのみが存在できる⁸⁾。 S_0 モードは板中心面に対して対称な変形様式を示し、 A_0 モードは反対称な変形様式となる。 S_0 モードは低周波数域において分散性が弱いため、伝播に伴う波形の崩れが少なく検査に適していると考えられる。本研究では、0 次モードが主として励起される低い周波数帯の波を用い、 S_0 モードが A_0 モードに比べて伝播速度が速いことを利用して、 S_0 モードが支配的な受信波の先頭領域を解析対象とした。

ラム波を効率よく送受信する方法として屈折を利用した斜角入射法がある。斜角入射法では Fig. 3 に示すように試料表面に対して送受信探触子を対称に設置し、送信探触子から斜角入射された縦波が屈折して板面内をラム波として伝播する際に水中に漏洩する縦波を受信探触子で検出する。このとき、検査領域は送受信探触子に挟ま

Fig. 3 Schematic illustration of ultrasonic oblique incidence.

Fig. 4 Schematic illustration of ultrasonic testing with wheel type probes.

れた領域となる。しかし、この方法では超音波の伝達効率を高めるために探触子と試料の間を水で満たす必要があり、検査対象物を水没させなければならないため下水管などの実構造物の検査には適さない。そこで、Fig. 4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⁹⁾。タイヤ探触子のタイヤ内部には縦波用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試料表面から内部に入射される。タイヤが試料表面上を転がることにより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、受信波振幅の変化が未硬化領域検出の指標となり得るが、受信波振幅は超音波の入射効率に依存するため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、受信波の振幅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。

2.2 AUパラメータ

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ている¹⁰⁻¹²⁾。著者らはこれまで、複合材料の内部損傷検出に対するAUパラメータの有効性について検討しており、AUパラメータが超音波の送受信効率の影響を受けにくいことを明らかにしている¹³⁾。本研究では、AUパラメー

タが硬化不良部検出に対してどの程度の感度を有するかを実験的に検証する。

AUパラメータは次式で表わされるスペクトルモーメントより算出される。

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

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わす整数である。例えば $n=0$ の場合は次式となる。

$$M_0 = \int_0^{f_m} W(f) df \quad (2)$$

式(2)はスペクトル線図の面積を表わしており、波の持つエネルギーに相当する。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KiernanらによりFRP積層板への適用実績がある以下の4つのパラメータ^{10,11)}を利用する。

$$\begin{aligned} A1 &= M_0, \quad A2 = \frac{M_1}{M_0} \\ A3 &= \left(\frac{M_2}{M_0} \right)^{0.5}, \quad A4 = \left(\frac{M_4}{M_2} \right)^{0.5} \end{aligned} \quad (3)$$

A1パラメータはスペクトルの0次モーメントと等しく、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わしている。A2パラメータが大きいときは、波のエネルギーの多くがより高い周波数領域で輸送されていることを意味する。A3およびA4パラメータは波形の統計処理に基づいて算出されるパラメータであり、A3は時間波形が0レベルを通過する頻度（周波数）に対応し、A4は時間波形に含まれる最高周波数を表わしている¹⁴⁾。A4/A3は比較的低い周波数を持つ主要波の中に高周波数成分の波がどの程度含まれているか、すなわちスペクトル線図の“ねじれ”を表す指標となる。

3. ラム波を用いた硬化不良部の検出

3.1 供試材

本研究では、下水道管の更生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。実際の管更生では既設管の内側に圧着するように更生管を成形するが、既設管と更生管は接着しておらず、両者の間にはある程度の空気層が存在するため、既設管への波の漏洩は少ないと考えられる。また、更生管は曲率を有しているが、直径と板厚の比が50程度と大きいため、平板のラム波分散曲線を近似的に適用できる¹⁵⁾。

試料はFig. 5に示すように更生管の内側になる層か

Fig. 5 Configuration of laminated composite plate.

ら順に、オレフィン系熱可塑性樹脂/PET 繊維製織物/SMC/PET 繊維製織物の 4 層構造である。SMC 層の主成分は不飽和ポリエステル樹脂とガラス短繊維であり、成形時に昇温することで樹脂を硬化させ GFRP 層を形成する。試料サイズは 300 mm×600 mm であり、成形の際に右半領域の金型温度を十分に上昇させないことにより意図的に硬化不良部を作製した。成形後の試料は板厚が約 5 mm で硬化度が一方向に傾斜的に変化したものとなった。この試料は板厚方向に非対称な積層材であり、均質材を対象としたラム波伝播理論は厳密には適用できない。また、全板厚に占める表面材の割合は 30% 程度であり無視できないが、本研究では均質材に対するラム波計測手法を用いて硬化不良の検出がどの程度可能か検討した。

3.2 ラム波送受信条件の検討

2.1 節で述べた測定法においては、探触子の試料表面に対する傾斜角がラム波入射効率に大きな影響を持つ。そこで、前節で示した積層板に対してラム波送受信に適した探触子傾斜角を実測より求めた。ここではタイヤ探触子のかわりに中心周波数 1 MHz の水浸探触子を用い、タイヤ探触子の送受信感度が比較的高かった搬送波周波数 160 kHz、320 kHz の 2 種類のバースト波（振幅 100 Vp-p、5 周期分）で測定を行った。測定は局所水浸法で行い、Fig. 5 の熱可塑性樹脂層側から超音波を入射しラム波伝播距離は 100 mm で固定した。Fig. 6 に示した探触子傾斜角と受信波振幅の関係をみると、いずれの入力周波数においても受信波振幅のピークが確認でき、160 kHz では 22°、320 kHz では 24~26°が最適角となった。屈折の法則（スネルの法則）より、材料中の超音波伝播速度が小さいほど最適入射角は大きくなる。よって、160 kHz に比べて 320 kHz は超音波伝播速度が小さいと考えられ、Fig. 1 において S_0 モードが周波数の増加に伴い

Fig. 6 Variation in wave intensity with inclined angle of the transducer.

位相速度が低下する傾向にあることと対応している。しかし、周波数による最適角の相違はわずかであり、位相速度換算では 10% 程度の差となるため、Fig. 1 に示した分散曲線において S_0 モードと A_0 モードの位相速度が接近する領域まで至っていないと考えられる。この領域では、 A_0 モードの群速度も相対的に遅いことから、波の先頭付近を解析することで S_0 モードのみの解析が可能となる。

斜角入射法では試料を水没あるいは局所水浸状態にする必要があるが、下水道更生管のような大型構造物に対して水没試験は適用できず、一般的な局所水深法も測定位置の走査が困難なため適さない。一方、タイヤ探触子では Fig. 4 のようにタイヤを試料表面で転がしながら検査することで局所水浸状態を維持しながら広範囲を短時間で検査可能である。しかし、探触子をタイヤ内部に収める必要があるためその傾斜角には制約がある。そこで以下では、市販のタイヤ探触子（探触子傾斜角 10°）を使用してラム波の送受信が可能か検討した。入力信号は事前検討で比較的高感度の高かった搬送波周波数 320 kHz で振幅 100 Vp-p、5 周期分のバースト波を用い、Fig. 5 で示した試料の完全硬化部に対し伝播距離 100~140 mm の範囲で測定した。なお、タイヤ探触子と試料の接触面には接触媒質としてソニコート塗布して信号の送受信効率を高めた。

Fig. 7 に受信波形、Fig. 8 にそのウェーブレット変換結果を示す。マザーウェーブレットとしては Gabor 関数を用いた。受信波形を観察すると 2 種類の波が干渉しているように見え、伝播距離が大きくなるにつれて各波の時間軸方向の相対位置関係が変化している様子がうかがえる。ウェーブレット変換結果をみると、320 kHz 付近と 160 kHz 付近にそれぞれピークがみられる。320 kHz

Fig. 7 Example of detected waveforms. Mixed mode waves are observed.

付近の波はパースト波による強制振動成分であり、160 kHz 付近の波はタイヤ探触子が持つ低次の共振周波数成分である。ここで各成分波の到達時刻を比較すると、320 kHz 付近の成分よりも 160 kHz 付近の成分の到達時刻が早く、伝播距離が大きくなるにつれてその差が大きくなる傾向がみられる。320 kHz 以下の周波数帯であれば、 A_0 モードの群速度が相対的に遅いため波の先頭には現れないこと、および S_0 モードは周波数が低いとき群速度が速くなる傾向にあり、 A_0 モードは逆の傾向を示すことを考慮すると、上記の2つのピークは異なる周波数帯の S_0 モードが干渉した結果と解釈できる。また、160 kHz 付近の波は伝播距離が大きくなるに伴い2つに分離する傾向がみられ、時間軸上の後方に位置する波は伝播距離の増加に伴い波束の幅が広がる分散性を示しており、 A_0 モードの特徴と一致している。以上の結果より、ラム波送受信の最適角からずれたタイヤ探触子を用いても S_0 モードラム波の送受信が可能であり、第1ピーク波付近を抜き出せば S_0 モード主体の解析が可能と考えられる。

3.3 受信波振幅による評価

3.1 節で示した硬化度が傾斜的に変化する GFRP 積層

Fig. 8 Example of wavelet transformation of detected waves. Two peaks appeared, which correspond to S_0 mode waves in different frequency regions.

板を対象として、タイヤ探触子を用いて Fig. 5 に示すように硬化部から硬化不良部にかけてラム波による検査を行った。前節と同じく熱可塑性樹脂層側から超音波を送受信し、入力信号は搬送波周波数 320 kHz で振幅 100 Vp-p、5 周期分のパースト波を用いた。走査距離は完全硬化部と未硬化部を含む 200 mm とし、10 mm 間隔で波形を取り込んだ。また、タイヤ探触子間のラム波伝播距離を 100 mm, 120 mm, 140 mm 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. 9(a), (b) にラム波伝播距離 100 mm の場合の硬化部 (0 mm) と硬化不良部 (160 mm) それぞれの受信波形を示す。硬化不良部ではラム波の減衰が大きくなるため伝播効率が低下し、硬化部に比べ振幅が大きく低下している。測定位置による受信波振幅の変化を示した Fig. 10 をみると、いずれの伝播距離においても波形取り込み位置が 150 mm を越えたあたりから振幅が大きく低下しているのがわかる。また、ラム波伝播距離が長くなるにつれて受信波振幅が低下する傾向も確認できた。しかし、硬化部においても振幅が大きくばらつく傾向がみられ

(a) Cured region (with couplant)

(b) Uncured region (with couplant)

(c) Cured region (without couplant)

Fig. 9 Example of detected waveforms. (propagation distance: 100 mm)

Fig. 10 Variation in amplitude with position for different propagation distances.

る。これは試料の表面状態によりタイヤ探触子と試料の接触状態が変化しラム波の送受信効率がばらついたことが原因と考えられる。

Fig. 9(c)はタイヤ探触子と試料の界面に接触媒質を

(a) Uncured region (with coupling medium)

(b) Cured region (without coupling medium)

Fig. 11 Comparison of power spectrums obtained in cured and uncured regions. (propagation distance: 100 mm)

塗布しなかった場合の受信波形である。同図は Fig. 9 (a), (b)とは別試料の同等品硬化部に対するデータであるが、接触媒質がない場合はラム波の送受信効率が下がるため受信波振幅が大きく低下しており、硬化部においても Fig. 9(b)で示した硬化不良部での信号強度と同等の信号しか検出できなかった。下水道更生管のような大型構造物の検査ではタイヤ探触子を試料表面上で走査しながらの検査となるため、接触媒質が適切に塗布できない状態での検査も想定される。このような場合、受信波振幅の低下が硬化不良によるものかタイヤ探触子の接触不良によるものを判別することは困難である。以上のことから、受信波振幅にかわるより高精度の評価指標が必要と思われる。

3.4 AU パラメータによる評価

前節で示したように、受信波に変化をもたらす要因として試料の硬化不良だけではなくタイヤ探触子と試料の接触状態が挙げられる。受信波振幅のみを評価指標とした場合、Fig. 9で示したように両者を区別することは困難であるため、本研究では受信波の周波数領域での評価を試みた。周波数解析に際しては、波形の第1ピーク後方に現れる A_0 モードの影響を排除するため、第1ピークを中心として区間幅 $80 \mu\text{s}$ でハニングウィンドウを適用した後FFT解析を行った。Fig. 11はFig. 9(b), (c)の波

Fig. 12 Comparison of power spectra at regions of various cure degree. (propagation distance: 100 mm)

形を図中に示す区間で周波数解析して得たパワースペクトルである。図より明らかなように、硬化部では入力周波数である 320 kHz 付近の波が相対的に強く検出されているのに対し、硬化不良部では 130 kHz 付近の比較的低い周波数成分しか検出されていない。130 kHz 付近の成分は探触子の低次の共振周波数付近であり波長が長いいため比較的減衰しにくい。すなわち Fig. 11 は硬化不良部においてラム波の高周波数成分が選択的に減衰したことを示しており、このようなスペクトル線図の変化は硬化・未硬化の判定指標として使用できる可能性がある。

Fig. 12 は波形取り込み位置が 0 mm (硬化部), 150 mm (中間領域), 180 mm (硬化不良部) の受信波スペクトルを比較したものであり、いずれも接触媒質を使用した測定結果である。グラフより、硬化部である 0 mm のスペクトル線図においてパースト波で励起した 320 kHz 付近の波が強く検出されていることがわかる。一方で、

Fig. 13 Variation in AU parameters with position for different propagation distances.

硬化不良部である 180 mm のスペクトル線図では入力周波数である 320 kHz 付近の成分は微弱で、100 kHz 付近の成分が相対的に強く検出された。また、硬化部と硬化不良部の中間領域である 150 mm では 100 kHz 付近、320 kHz 付近の両成分とも比較的強く検出されている。これらの結果は試料の硬化度が低下するに伴い、高周波数成分がより激しく減衰したことを意味している。このようなスペクトル線図の変化を定量的に評価するためには 2.2 節で述べた AU パラメータが有効であると考えられる。

Fig. 13 は各測定位置における各種 AU パラメータの変化を示しており、波形取り込み位置 0 mm での値を基準として縦軸を正規化したものである。本研究では、波

の総エネルギーに相当する $A1$ パラメータ、スペクトル線図の図心に相当する $A2$ パラメータ、スペクトル線図のねじれに相当する $A4/A3$ パラメータに注目した。 $A1$ パラメータは受信波振幅と同様の变化傾向を示し硬化部でのばらつきが大きい。その他のパラメータでは硬化している左側領域において変化が少なく、未硬化の右側領域において変化がみられる。 $A2$ パラメータの場合、硬化不良部で低下する傾向がみられるが、これは Fig. 12 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、受信波の主要周波数成分 (320 kHz 付近) の減衰を反映して、時間波形の 0 レベル通過周波数を表す $A3$ パラメータは低下し、受信波の最高周波数に相当する $A4$ パラメータは比較的变化が小さいため、スペクトル線図のねじれを表わす $A4/A3$ パラメータは硬化不良部であるグラフ右側で増加している。 $A2$, $A4/A3$ パラメータのグラフにおいて測定位置 180 mm 以降でデータのばらつきが大きくなる傾向がみられるが、この領域では試料の硬化度が極端に低く $A1$ パラメータが示すように受信波が著しく減衰したため、ノイズの影響を比較強く受けたと考えられる。ここで、伝播距離による検出精度の差を比較すると、ラム波伝播距離が長い 140 mm の場合が最も変化が大きく感度が高いことがわかる。本実験で使用的是硬化不良部が一次元的に分布した試料であり、各測定位置でラム波伝播経路の硬化状態はほぼ一様とみなせる。よって、伝播距離を伸ばすことでラム波が硬化不良部の影響をより強く受けるようになり、 AU パラメータの変化が大きくなったものと解釈できる。しかし、ラム波伝播距離を伸ばすことで受信波強度が弱まり信号の SN 比が低下するため、被検査材料に則して伝播距離を適切に設定する必要がある。

次に、各種 AU パラメータの硬化不良部検出感度についてみると、 $A1$ パラメータが 110 mm あたりから急激に低下しているのに対し、 $A2$ および $A4/A3$ パラメータは 130 mm あたりから大きく変化しており、硬化不良に対しては $A1$ パラメータが最も感度が高い。しかし、前節で示したように、受信波振幅と相関のある $A1$ パラメータはタイヤ探触子と試料の接触状態の影響を強く受けるため、このデータのみから硬化不良を判定することはできない。複数の AU パラメータを複合的に評価することで検査精度を高められると考えられる。

4. ラム波測定結果と力学特性の比較

前章までに示したラム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。サンプルは Fig. 5 の超音波伝播方向に平行に幅 20 mm の短冊状で切り出し、完全硬化側 (No. 1) から未硬化側 (No. 10) の 10 本を測定した。試験条件は荷重速度 2 mm/min、サポートスパンは 60 mm とした。Fig. 14 に代表的なサンプルリング位置での荷重-たわみ線図を示す。いずれのサンプルにおいても初期の線形領域のあとに非線形領域が現れ、荷重ピーク以降も荷重負担能力を完全には失わず、ある程度の荷重負担能力を保持している。本研究で用いた供試材は Fig. 5 で示したような積層構造を有しており、表面材である熱可塑性樹脂、PET 繊維製織物は非線形特性を有している。荷重ピーク以前にみられる非線形現象は主に表面材の非線形特性に起因している。硬化不良部は中間層である SMC 層のみで発生しており、サンプル採取位置が硬化不良部側に近づくにつれて傾きが低下し、最大荷重も低下する傾向がみられる。荷重ピーク

Fig. 14 Comparison of load-deflection curves between samples with different degree of cure.

Fig. 15 Photograph of specimen cross-section after 3 points bending test.

Fig. 16 Comparison between ultrasonic testing and mechanical properties.

付近では Fig. 15 に示すような表面材のはく離が観察され、その後ははく離を起点とした SMC 層の破壊が観察された。荷重ピーク以降では、表面材である熱可塑性樹脂、有機繊維製織物が主に荷重を負担しているため、一定の荷重負担能力を保持できたと考えられる。

Fig. 16 は積層材試料を均質材とみなして Fig. 14 から曲げ強度・弾性率を算出し、受信波振幅および各種 AU パラメータと比較したグラフであり、位置 0 mm での値を基準として縦軸を正規化したものである。曲げ強度・曲げ弾性率は位置 110 mm 付近から低下し始めており、この付近から SMC 層の硬化度が低下していると予想される。一方、受信波強度・A1 パラメータも同じ付近から低下する傾向にあるが、A2, A4/A3 パラメータに変化がでる位置は力学特性低下位置よりも若干遅い。超音波伝播特性は材料の弾性率、粘弾性特性、内部欠陥などに依存しているため、一般的に材料の巨視的弾性率との相関はあるが、強度との直接的な相関はない。しかし、今回の試料では樹脂硬化度が主な変化要因であり、樹脂硬化度の増加に伴い曲げ強度・曲げ弾性率はともに増加傾向を示すことから、結果として超音波測定結果と曲げ強度の間にもある程度の相関がみられた。下水道更生管においては強度保証が重要となることから、本研究で示した評価手法により間接的に強度評価ができることは実用上有益と思われる。

5. 結 言

本研究では超音波による下水管更生用 GFRP 成形板の硬化不良部検出の時間短縮を目的として、タイヤ探触子により発生させたラム波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形の振幅に加え、周波数領域での変化を定量化するために AU パラメータを導入し、その有効性を検証した。以下に得られた結論を示す。

- (1) 受信波の振幅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、被検査材に対するラム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、およびスペクトル線図のねじれに相当する A4/A3 パラメータは、スペクトル線図の幾何形状に依存しており、硬化不良部での高周波数成分の選択的減衰を反映して硬化不良部で大きく変化する。また、探触子の接触状態の影響を受けにくく、硬化部でのデータの揺らぎが少ない。
- (3) ラム波測定結果と曲げ試験結果を比較した結果、強度・弾性率が低下し始める位置と受信波振幅および AU パラメータが変化し始める位置は概ね対応したが、A2, A4/A3 パラメータに変化がでるのは力学特性低下

位置よりも若干遅いことから受信波振幅、A1 パラメータに比べて硬化不良に対する感度がやや低い。

以上の結果より、160～320 kHz 程度の広帯域のラム波を試料に励起できる場合には、AU パラメータによる硬化不良検出が可能であることがわかった。5 mm を超える板厚になると S_0 モードと A_0 モードの位相速度が近づき伝播距離 100 mm 程度では時間領域におけるモード分離が困難になるため、伝播距離を長くする必要がある。しかし、伝播距離が長くなると受信波強度が弱まり信号の SN 比が低下するため設定できる伝播距離には限界がある。本手法の厚板への適用に際しては、波の干渉の影響を別途評価する必要がある。また、本研究では、表面材を有する板厚方向に非対称な積層板を均質材とみなして解析したため理論的な厳密性に欠ける部分もあるが、本手法は実用的には十分利用可能であると思われる。

参 考 文 献

- 1) 松木 靖：月刊下水道，**35**, 61 (2012), 25-28.
- 2) J.G. Kim & D.G. Lee： *Compos. Struct.*, **57**, 1-4 (2002), 91-99.
- 3) J. Leng & A. Asundi： *Sensor and Actuators A*, **103**, 3 (2003), 330-340.
- 4) D.D. Shepard & K.R. Smith： *Sensor Review*, **19**, 3 (1999), 187-191.
- 5) 山崎友裕，西野博満，片山大希：日本機械学会論文集 A 編，**76**, 62 (2010), 145-150.
- 6) N. Guo & P. Cawley： *J. Acoust. Soc. Am.*, **94** (1993), 2240-2246.
- 7) K.S. Tan, N. Guo & B.S. Wong： *Compos. Sci. Technol.*, **53** (1995), 77-84.
- 8) D. Royer & E. Dieulesaint： *Elastic Waves in Solids I: Free and Guided Propagation*, Springer (2000).
- 9) 武藤伸之：非破壊検査，**52**, 1 (2003), 20-25.
- 10) M.T. Kiernan & J.C. Duke Jr.： *Materials Evaluation*, **46** (1988), 1105-1113.
- 11) M.T. Kiernan & J.C. Duke Jr.： *Materials Evaluation*, **46** (1988), 1344-1352.
- 12) O.Y. Kwon & S.H. Le： *NDT&E International*, **32** (1999), 153-160.
- 13) 和田明浩，元木信弥，山崎友裕：日本機械学会論文集 A 編，**78**, 790 (2012), 879-889.
- 14) D.E. Newland： *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis* (1983).
- 15) 西野秀郎：日本非破壊検査協会誌，**62**, 1 (2013), 29-34.