

# 超音波を用いた FRP 積層板の成形モニタリング

朴将海\* 和田明浩\*\*

## Ultrasonic Cure Monitoring of FRP Laminates

Changhae PAK\* Akihiro WADA\*\*

### ABSTRACT

In the field of civil engineering, laminated plates consisting of thermoplastic and SMC (Sheet molding compound) are used to rehabilitate aged sewerage pipes. In order to reduce the construction cost by minimizing the cycle time, cure monitoring is required. In this study, an ultrasonic testing is applied to investigate the curing process in SMC. Instead of conventional method in which through-thickness ultrasonic wave is used, wheel type probes are adopted to transmit and receive Lamb waves. AIC (Akaike Information Criterion) is introduced to evaluate the arrival time of transmitted waves in curing process. Two types of waveform, pulse and burst waves are examined to confirm the effect of waveform on the accuracy of measurement. It was found that the arrival time of Lamb wave can be used as cure index because it decreases with degree of cure and tends to be almost constant during post cure process.

*Key words* : GFRP, Rehabilitated pipe, Ultrasonic, Cure monitoring, Akaike Information Criterion

## 1. 緒言

現在、高度成長期に敷設された多くの下水管が老朽化している。神戸市では平成 22 年度末で下水管の敷設延長が 4036km に及ぶ。しかし管年齢 30 年を超過した老朽管が全体の約 50%を占めており、下水管の改築更新が求められている<sup>①</sup>。最も信頼性の高い工法は下水管の工事による敷設替であるが現場の条件などにより敷設替が困難である場合、改築方法の一つとして管更生工法が利用される。この工法では古くなった下水管の中にガラス繊維と熱硬化性樹脂からなる未硬化の FRP 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、加熱硬化させることで老朽管内に FRP パイプを形成する。この際、地下水の侵入により硬化が遅れる場合があるため、現場における作業工程としては加熱時間を長くするなどに対応しており、余分な加熱時間を含んでいる可能性がある。そこで、成形時にリアルタイムで FRP の硬化状態を測定する成形モニタリングが求められている。成形モニタリングにより硬化度を判断できれば硬化不良を未然に防ぐことができ、また作業終了のタイミングを客観的に判断することができるため、作業時間の短縮につながる。

樹脂の硬化モニタリングには光の屈折率を測定する方法<sup>②</sup>、光透過性を利用する方法<sup>③</sup>、イオン粘度を測定する方法<sup>④</sup>、硬化時の反応熱を測定する方法などがある。しかしこれらはセンサを固定しなければならない、常時測定が必要などの制限があるため下水道更生管のように広範囲にわたって検査が

必要な試料に対しては適さない。そこで本研究では測定位置の走査が容易な超音波測定法を採用し、超音波による成形モニタリングの可能性について検討した。また、広域を効率よく検査するためにタイヤ探触子を用いた。

## 2. 超音波による成形モニタリング

2.1 供試材 Fig. 1 に検査に用いた試料の材料構成を示す。試料は実際の下水道更生管に使用されているものと同じで、有機織物、SMC、熱可塑性樹脂をコーティングした有機織物の積層材とした。熱可塑性樹脂層が更生管の内側に相当し成形後の板厚は約 8mm である。本研究では SMC 層の硬化度を超音波により常時モニタリングすることを試みた。

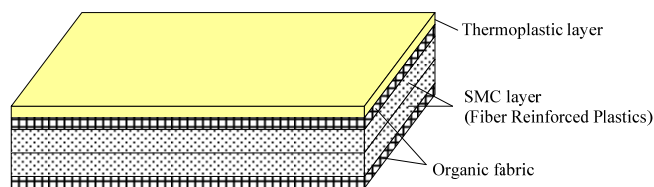


Fig. 1 Laminate configuration of the specimen.

2.2 超音波測定法 従来の超音波測定法では板厚方向に伝播する垂直入射法が多く利用されてきたが、本研究では広域を効率よく検査するために斜角入射法を採用した。Fig. 2 に斜角入射法の概略図を示す。送受信探触子を試料表面に対し斜角で設置し、発信機から縦波が発信され板波(ラム波)として材料中を伝播した波を受信機によ

\* 神戸市立工業高等専門学校 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 神戸市立工業高等専門学校 機械工学科 教授

って検出する。この方法では送受信探触子に挟まれた領域が検査領域となるため、1回の操作で垂直入射法に比べて広い領域を検査することができる。しかし、超音波の入射効率を高めるために探触子と試料の間に水を配置し検査対象物を水没させる必要があるため、実際の下水管などの大型構造物の検査には適さない。この問題を解決するために、本研究では Fig. 3 に示すようなタイヤ探触子を利用した。タイヤ探触子は充填液で満たされたゴムタイヤ内部に送受信探触子が斜角で配置された構造になっている。超音波は充填液とゴムタイヤを介して試料に入射される。そのため Fig. 2 で示した水浸法とほぼ同じ条件で超音波測定を行うことができる。加えて、タイヤを回転させて場所を変えながら測定を行うことで広域を効率よく検査することができるため、下水道更生管のような大型構造物にも適用できる。探触子の傾斜角は超音波測定に影響を及ぼすため角度の最適化が必要になるが、タイヤ探触子の構造的な制約から本実験においては傾斜角度  $10^\circ$  のものを用いた。

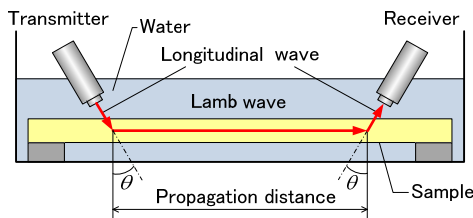


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic oblique incidence.

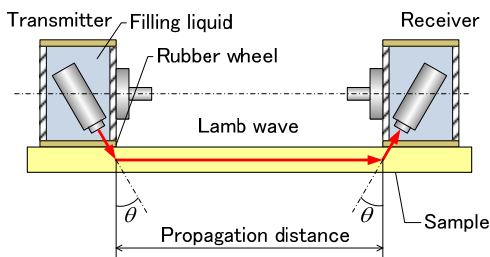


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic testing with wheel type probes.

**2.3 実験システム** Fig. 4に本実験で用いた実験システムの概略を示す。前節で示した成形材料を金型にセットし、バギングフィルムをかぶせた後、真空引きしてフィルムを試料に圧着させた。実際には蒸気によって加熱を行うが本実験では金型をオープンに設置し、設定温度 $90^\circ\text{C}$ で加熱成形した。Fig. 5は実際のオープン内部の様子である。成形中は常時試料表面中央にタイヤ探触子を2つ中心間距離 $100\text{mm}$ でセットし、一方の探触子から送信した超音波を他方の探触子で受信することで信号を測定した。また、試料表面及び内部に熱電対をセットし、成形中の温度変化も測定することで温度と超音波を同時にモニタリングした。入力波は振幅 $100\text{V}$ 、周波数 $160\text{kHz}$ のバースト波とし、インターバル $10\text{ms}$ とした。

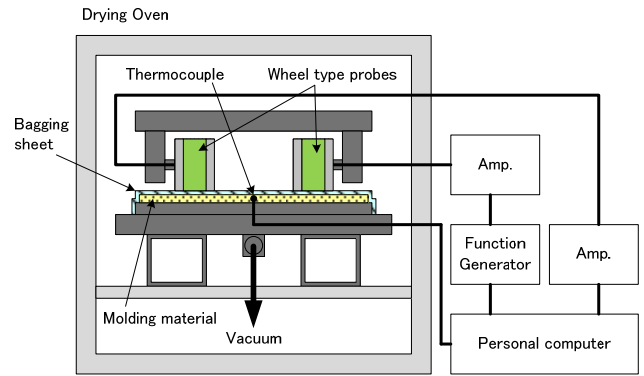


Fig. 4 Experimental setup for ultrasonic cure monitoring.

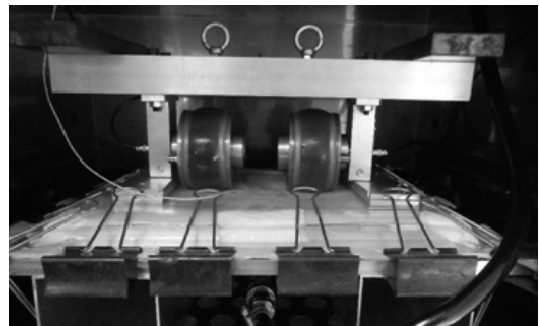


Fig. 5 Appearance of inside of the oven.

### 3. 受信波強度による評価

Fig. 6に成形モニタリング中に検出された波形の例を示す。成形開始から20分で信号は検出されず、40分頃から波形が現れ始めた。その後50分、60分と時間とともに波形は変形した。材料が未硬化であると、超音波はその領域の粘弾性特性により吸収され未硬化領域がない場合に比べて大きく減衰する。これより樹脂の硬化前と硬化後の受信波強度には大きな差が生じる。以下では得られた波形と温度変化の対応関係を明らかにすることで、受信波強度による硬化度評価を試みた。

Fig. 7に受信波強度と温度変化の関係を示す。上下のグラフは同じ実験条件による測定結果である。オープンの設定温度 $90^\circ\text{C}$ に対して測定温度が $100^\circ\text{C}$ 辺りまで上昇した。これはSMCが硬化する時に生じる反応熱の影響だと考えられる。この反応熱が収まってきた時間帯から受信波強度が増加する傾向が見られた。上図において受信波強度は成形開始から40分頃にピークに達し、その後減少し70分頃から再び増加傾向を見せた。一方下図では上図に比べて受信波強度は緩やかに増加し50分頃ピークに達した後、緩やかに減少した。このことから、受信波強度を用いて樹脂硬化のおおよそのタイミングを知ることができた。しかし、増加した受信波強度は再び減少したため、温度と受信波強度との間に1対1の対応関係が得られなかった。また、硬化過程の受信波強度の振る舞いは実験ごとに異なり安定しなかったため、硬化度判断の指標として利用することは困難であることがわかった。

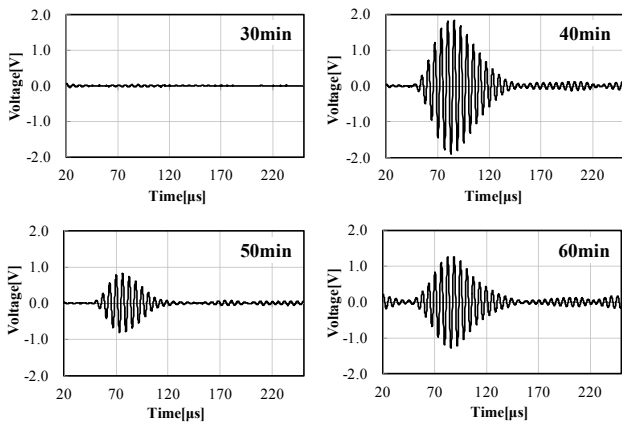


Fig. 6 Example of received waves with 160kHz.

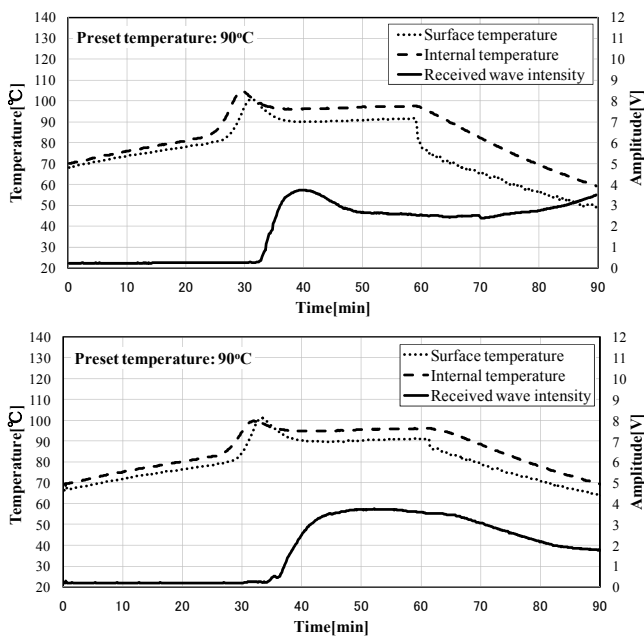


Fig. 7 Variation in received wave intensity and temperature in curing process.

#### 4. 周波数解析による評価

樹脂が硬化すると高周波数成分の超音波が伝播しやすくなることが予想される。そこで周波数解析に基づいて樹脂の硬化度を評価することを試みた。高周波成分の波が伝播したかどうかを検証するために入力信号を160kHzから320kHzに変更して前章と同様の実験を行った。Fig. 8に入力波を320kHzとしたときの受信波形の一例を示す。160kHz のときと同様、成形開始から40分で波形が現れ硬化とともに波形が変化していった。これらの波形を周波数解析した結果をFig.9に示す。成形開始から40分後、タイヤ探触子の共振周波数である160kHz周辺の周波数成分が検出された。そして時間が経過するにつれて160kHzの周波数成分の検出強度が増加した。しかし、成形開始から60分後の樹脂硬化がかなり進んだ時間帯においても320kHzの周波数成分はほとんど検出されなかった。成形開始から80分後、

冷却過程に入った段階で320kHzの周波数成分はようやく検出された。加熱しながら超音波測定を行う実際の管更生作業における成形モニタリングでは冷却過程以前に硬化完了を判断することが求められるが、周波数分析では硬化初期段階の硬化度の相違を評価できないためリアルタイムでの硬化モニタリングには適さないことがわかった。

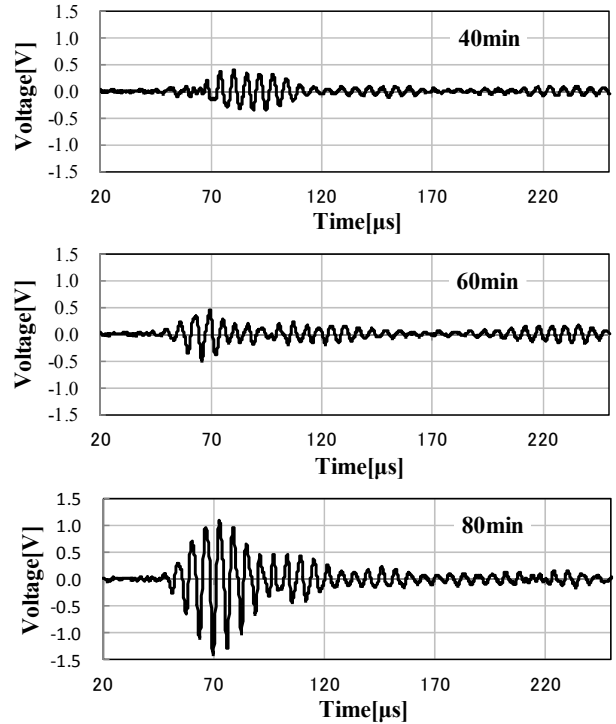


Fig. 8 Example of received waves with 320kHz.

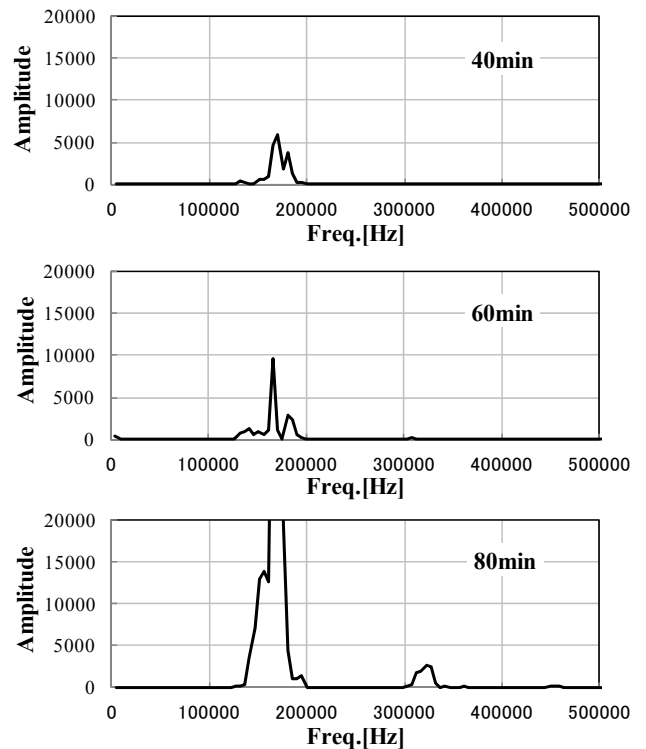


Fig. 9 Variation in spectrum diagram with time.

5. 波形到達時刻による評価

5.1 音速測定法 弾性体を伝播する超音波の伝播速度は次式により与えられる。

$$c \doteq \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{1}$$

ここで、 $c$ は超音波の伝播速度、 $E$ は材料の弾性率、 $\rho$ は材料の密度である。一般に樹脂の硬化に伴って弾性率は増加するためその中を伝播する超音波の速度が速くなる。この性質を用いて硬化度を判断することを試みた。以下では波の伝播速度を評価対象とするが、本実験では伝播距離が不明確なため、伝播速度にかえて波の到達時刻で評価を行った。

波の到達時刻は、波形データの先頭位置に対応するゼロクロスポイントを読み取る方法が一般的である。Fig.10に示すようなパルス状の波形の場合、最初のゼロクロスポイントを波形データの先頭位置とみなすことは容易である。しかし、本実験で得られた波形データにはFig.11のように入力波の影響やノイズが含まれているため、ゼロクロスポイントの候補が複数存在する。そのためゼロクロスポイントを読み取る方法では読み取り誤差が生じる可能性がある。

波形データの先頭位置を正確に決め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ればよい。そこで、本研究ではこの区間分割の判断基準として赤池情報量基準(AIC)<sup>(5)</sup>を用いた。これを用いることで、数学的客観性を保ちつつ精度の高い読み取りが可能となる。AICは次式で定義される。

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

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. 12 のように  $n$  個の点を 2 つに分け、区間 1(1~ $k$ )に MODEL 1、区間 2( $k+1$ ~ $n$ )に MODEL 2 を最尤法によりあてはめ、このときの 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、 $k_{min}$ を分割点とする。

このとき、 $n$  個の点を 1 つの区間として MODEL 0 をあてはめ AIC を計算すれば、AIC( $k_{min}$ )との比較から区間分割を行うべきかどうかの判断に使うこともできる。

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た。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<sup>(6)</sup>。

$$AIC(k) = n \log 2\pi + k \log \sigma_1^2 + (n - k) \log \sigma_2^2 + n + 2 \times 4 \tag{3}$$

ここで $\sigma_1^2$ 、 $\sigma_2^2$ 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時の分散である。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した。

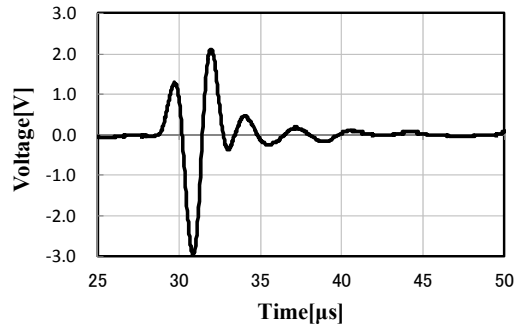


Fig. 10 Example of zero-cross detecting method.

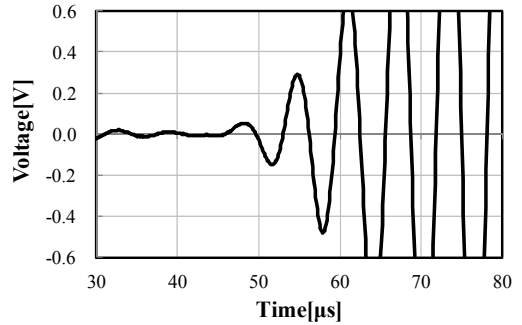


Fig. 11 Example of detected waveform in the experiment.

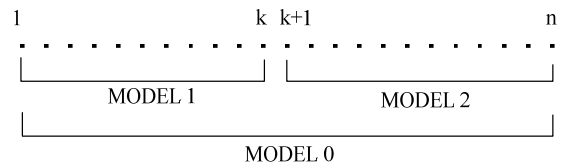


Fig. 12 Illustration of the method to divide a section.

5.2 バースト波による評価結果

Fig. 13に波形到達時刻と温度変化の関係を示す。モニタリングの初期段階では、樹脂が未硬化で超音波の減衰率が大きく信号がほとんど検出されないため、AIC解析値に変動があり波形到達時刻は安定しないが、硬化による反応熱がピークを過ぎた時間帯から波形到達時刻が急速に減少し、一定値に収束する傾向が見られた。これはFRP積層板が硬化したことによって材料剛性が大きくなったことを表している。また冷却過程に至る以前では各実験において同様の傾向を示しており、波形到達時刻は近い値に収束した。したがって到達時刻による硬化モニタリングには再現性があり、硬化度判断の指標として利用できる可能性がある。しかしこの方法では、波形到達時刻の読み取りが正確に行われていない時間帯が存在する。例えばFig. 13の反応熱が収まった直後、成形開始から30~40分の時間帯で樹脂は硬化の段階にあるため波形到達時刻は減少傾向になければならないが一部増加している箇所が存在する。このような硬化段階での読み取り誤差は作業終了の判断を誤る原因となるため正確な波形到達時刻の読み取りが求められる。

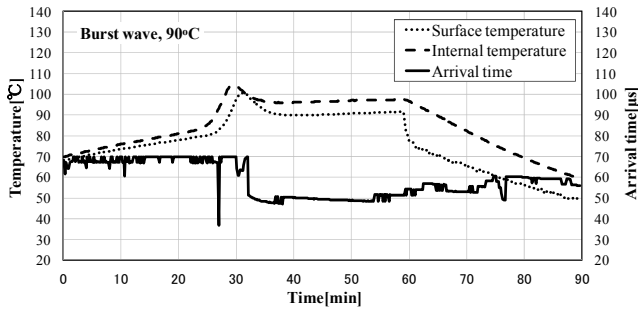


Fig. 13 Variation in arrival time and temperature with burst wave.

5.3 パルス波による評価結果 読み取り精度を改善するために入力波をバースト波からパルス波に変えて実験を行った. Fig. 14 にパルス波を用いた時の波形到達時刻と温度変化の関係を示す. バースト波の場合と同じようにパルス波の場合でも波形到達時刻は一定値に収束する傾向が見られ, 各実験において収束値は近い値を示した. また Fig. 13 に見られたような硬化段階での到達時刻の増加箇所はなくなり, モニタリング終盤にかけても到達時刻が徐々に減少する傾向が見られた. 結果的にパルス波を用いることでバースト波よりも正確な波形の到達時刻が得られ, より正確な成形モニタリングが可能であることがわかった.

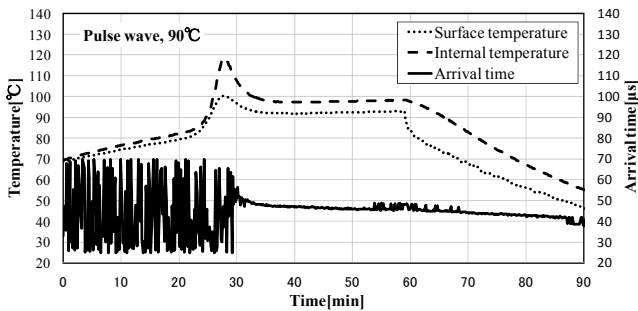


Fig. 14 Variation in arrival time and temperature with pulse wave.

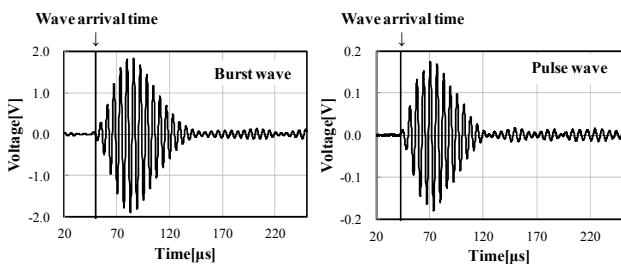


Fig. 15 Comparison between two types of waveform.

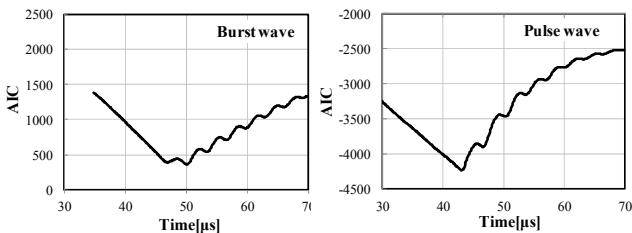


Fig. 16 Comparison between corresponding AIC values.

Fig. 15 にバースト波を用いた場合とパルス波を用いた場合の受信波形の比較を示す. 一見同じような波形であるが, パルス波による受信波形の方がバースト波に比べて先頭の立ち上がり方がより明確である. Fig. 16はFig. 16に対応するAIC値の変化であり, AICが最小となる時刻が波形到達時刻に相当する. バースト波を用いた場合, AICの第1極小値(361)と第2極小値(391)の差が小さく波形到達時刻の候補が複数存在する. 一方パルス波を用いた場合, AICの第1極小値(-4236)と第2極小値(-3893)は比較的離れており, パルス波では波形到達時刻が明確に判断できる. したがってパルス波を用いることでより正確に波形到達時刻を決定することができると考えられる.

5.4 成形温度による違い 成形温度の違いが成形モニタリングに及ぼす影響を調査するために, 成形温度を80°Cに設定して実験を行った. パルス波を用いた波形到達時刻と温度変化の関係を Fig. 17 に示す. 90°Cの場合と同様にモニタリング初期段階では信号が検出されず, 到達時刻が大きく変動している. 硬化に伴う反応熱によって設定温度 90°Cの場合よりもゆっくりと温度が上昇し, 温度のピークは 90°Cの時ほど上昇せずに収まった. これは反応速度が 90°Cの場合よりも遅いことを表している. 波形到達時刻も設定温度 90°Cの場合と比べて緩やかに減少し, 一定値に収束する傾向が見られた. このことから, 成形温度による硬化速度の違いも波形到達時刻によって検出できることがわかった.

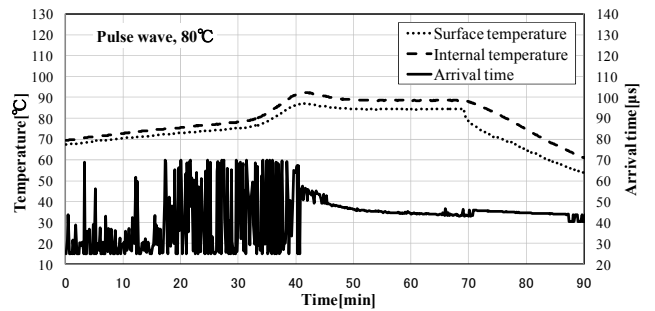


Fig. 17 Variation in arrival time and temperature in curing process with 80°C.

## 6. 力学特性と受信波の到達時刻の比較

6.1 試験条件 成形モニタリングの際に得られる受信波の到達時刻と樹脂の硬化度との関係を明らかにするために成形温度 80°C, 90°Cで作成された硬化度の異なる2種類の成形板に対して, JIS 7171 に基づいて三点曲げ試験を行った. 各試料から5本ずつ, 幅約 20mm, 長さ約 120mm(厚さ約 8mm)の試験片を取り出し, Fig. 18 に示すように三点曲げ試験による力学特性評価を行った. スパン長さは 100mmとし, 負荷速度 2mm/min で Fig. 1 の有機織物側から圧子により荷重を加えた.



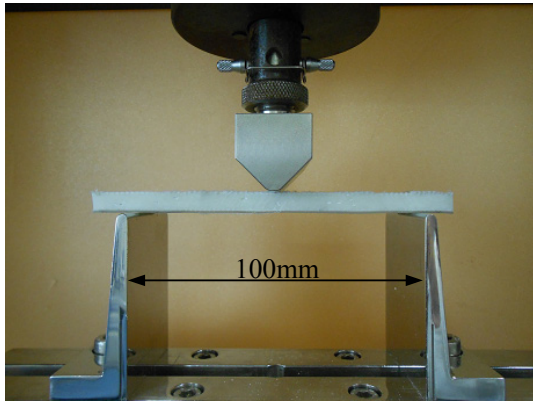


Fig. 18 Photograph of bending test.

**6.2 曲げ試験結果** 試験によって得られた荷重-たわみ線図を Fig. 19 に示す. 90°C で成形した試験片の最大荷重は 80°C 成形品に比べて大きく, 荷重-たわみ線図の傾きも大きい. 三点曲げ試験で得られた荷重-たわみ線図の最大荷重点より曲げ強度を, 傾きが直線的な初期区間から曲げ弾性率を算出した. その結果を Fig. 20 に示す. 曲げ強度, 弾性率共に成形温度が高い 90°C 成形品の方が高い値を示し, 成形温度の違いによって試料の硬化度が異なることを確認することができた. Fig. 14 と Fig. 17 において, 内部温度ピークから 15 分後の到達時刻の収束値はそれぞれ 41.7 $\mu$ s, 45 $\mu$ s で, 弾性率の高い 90°C 成形品の方が波形到達時刻の収束値が速い. このことから波形到達時刻の収束値は材料の力学特性と対応していることが確認できた.

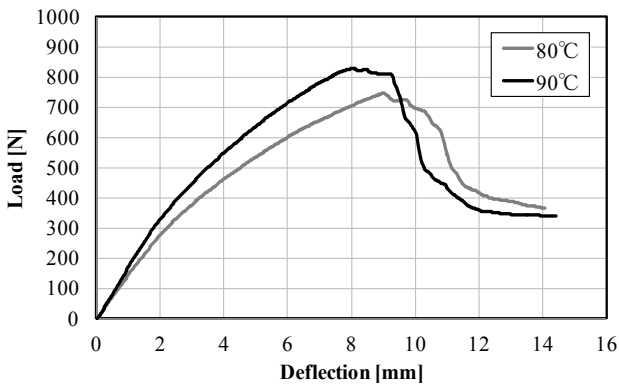


Fig. 19 Load-deflection diagram of GFRP laminates.

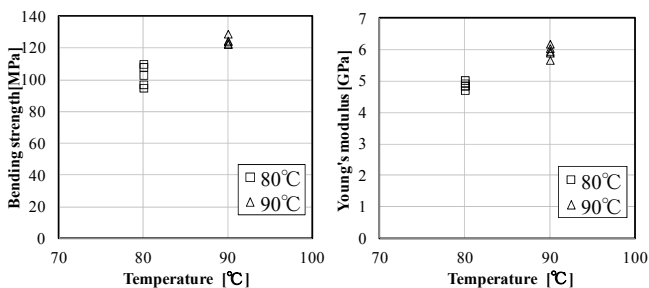


Fig. 20 Variation in bending strength and Young's modulus with temperature.

## 7. 結言

本研究では, 管更生工法における作業時間の短縮化を目的として, 超音波による GFRP 積層材の成形モニタリングについて検討した. 評価パラメータとして超音波の受信波強度, 周波数特性および受信波の到達時間の適用を試みた. 以下に得られた結論を示す.

- (1) 受信波強度を用いて樹脂硬化のおおよそのタイミングを知ることはできるが, 硬化度との間に 1 対 1 の関係がなく測定結果の再現性が低いことから, 硬化度判断の指標には適さない.
- (2) 受信波の周波数解析による評価では, 樹脂硬化直後における周波数成分の変化が小さいため硬化度判断が難しい.
- (3) AIC 解析に基づき算出した波形到達時刻は樹脂硬化とともに一定値に収束する傾向が見られ, 反応速度の相違も検出可能である.
- (4) 入力波をバースト波からスクエアパルスに変更することで, 樹脂硬化過程での受信波の到達時刻測定をより正確に行うことができる.
- (5) 波形到達時刻の収束値は材料の力学特性と対応しており, 樹脂硬化度の判断指標となり得る.

## 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.20-25, 2012.
- (2) 高坂達郎:「シングル光ファイバを用いた屈折率リアルタイム測定法による樹脂の硬化モニタリング」, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.59, No.5, pp.391-397, 2010.
- (3) 葉名紀彦:「光透過性変化による GFRP の簡易形成モニタリング」, Journal of Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.8, pp.771-776, 2007.
- (4) 神野昌明:「耐熱タフエポキシ系 CFRP の硬化モニタリング」, Journal of Society of Materials Science, Japan, Vol.52, No.4, pp.413-418, 2003.
- (5) AKAIKE, H.:「Information theory and an extension of the maximum likelihood principle」, 2nd International Symposium on Information Theory, eds. B.N.Petrov and F.Csaki, Akademiai Kiado; Budapest, pp.267-281, 1973.
- (6) 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.