

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03861

研究課題名（和文）擬似表面波によるFRP成形板の板厚方向硬化度分布評価

研究課題名（英文）Evaluation of cure distribution of FRP plates in the thickness direction using quasi-surface waves

研究代表者

和田 明浩（Wada, Akihiro）

大阪産業大学・工学部・教授

研究者番号：60321460

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、板厚方向に樹脂硬化度分布を有するFRP板を伝播する「擬似表面波」を研究することで、片面未硬化板の非破壊検査手法について研究した。自作した特殊成形装置を用いて成形した片面未硬化FRP板において、試料表面から入射された超音波が硬化層付近に局在化して伝播する「擬似表面波」を形成することを確認するとともに、硬化層厚さが超音波伝播特性に与える影響を調査した。また、時間領域差分法であるFDTD法を高減衰材料に適用できるように拡張し、超音波伝播シミュレーションにより実測結果の再現が可能であることを示した。硬化層厚さの評価には、「擬似表面波」の周波数特性や減衰率の評価が有効であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波測定法は、材料物性の非破壊評価法として多用されている。金属材料では比較的高周波数の超音波を用いて、表面波による試料厚さ方向の物性分布評価が可能である。一方、FRPのような高減衰材料では低周波数の波しか使用できないため、板厚が小さい場合は純粋な表面波の励起は難しい。本研究では、片面未硬化FRP板の硬化側表面の近傍に局在化して伝播する「擬似表面波」に着目し、その伝播特性を実測およびシミュレーションにより調査した。このような「擬似表面波」に関する研究例は他に見当たらず、本研究成果の学術的意義は大きい。また、本研究成果は、近年社会問題化しているインフラ構造物の老朽化対策に寄与するところが大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, non-destructive evaluation method for FRP plates with cure distribution in the thickness direction was investigated by studying the propagation characteristic of "quasi-surface waves". At first, FRP plates with cure distribution in the thickness direction were molded using the special designed molding equipment. Then, the existence of "quasi-surface wave", which localize and propagate near the cured surface is confirmed experimentally, and the effect of cure distribution on the propagation characteristics of "quasi-surface waves" are investigated. Furthermore, in order to reproduce the experimental results, the FDTD method, which is a time-domain finite difference analysis, is extended to apply to highly attenuated materials such as uncured FRP plates. It is found that the evaluation of the frequency characteristics and the attenuation of "quasi-surface waves" is effective in evaluating the cured layer thickness.

研究分野：材料力学および機械材料関連

キーワード：FRP 硬化度分布 超音波 擬似表面波 非破壊検査 FDTD

1. 研究開始当初の背景

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社会問題となっている。表1は、国内におけるインフラ構造物の老朽化状況のデータであり、今後急速に老朽化が進んでいくことが予想されている。このような老朽化構造物の延命のため、機械的特性に優れ、耐食性も良好なFRP (Fiber Reinforced Plastics) を用いた補修が行われている。FRPによる補修は構造物の全面改築に比べて低コストで効率的である半面、施工不良による樹脂未硬化部の発生が重大事故につながる危険性がある。現場施工では加熱や紫外線照射によりFRPを硬化させるが、補修対象に圧着した状態での作業となるため、片面から加熱や紫外線照射を行った結果、FRPの板厚方向に樹脂硬化度分布が発生し、十分な補強効果が発揮されない可能性がある。これまでに、FRPの板厚方向に超音波を伝播させ、その伝播特性から板厚方向の物性分布を評価する試みが行われてきたが、一度に検査できる領域が狭いため広域検査に適さず、板厚方向の物性分布計測も難しいという問題があった。そこで、FRP板の面内を伝播する超音波を用いた検査手法の研究が行われてきたが、板厚方向に樹脂硬化度分布を有するFRP板の超音波伝播形態に関する研究は進んでいなかった。

表1 建設後50年を経過する社会資本の割合

	2013年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 [約40万橋(橋長2m以上の橋約70万のうち)]	約18%	約43%	約67%
トンネル [約1万本]	約20%	約34%	約50%
河川管理施設(水門等) [約1万施設]	約25%	約43%	約64%
下水道管きよ [総延長:約45万km]	約2%	約9%	約24%
港湾岸壁 [約5千施設(水浸-4.5m以深)]	約8%	約32%	約58%

参照：<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/html/n1131000.html>

2. 研究の目的

本研究では、板厚方向に樹脂硬化度分布を有するFRP板の硬化側表面から入射された超音波が、硬化側表面付近で形成する「擬似表面波」の伝播特性を研究することで、板厚方向の硬化度分布状態を非破壊評価することを目的とする。弾性体内部を伝播する超音波には縦波、横波成分が存在することが知られているが、波長に比べて板厚が大きい場合には、自由境界面(板表面)近傍にエネルギーが局在化して伝播する「表面波」が存在することが知られている。表面波のうち、表面垂直方向に振動成分を持つレイリー波は、その浸透深さが波長程度であることが知られており、周波数選択により波長を変化させ波の浸透深さをコントロールできる。このため、表面波による板厚方向の物性評価は原理的に可能であるが、FRPでは高周波数帯の波の減衰が大きく、板厚と同程度かそれ以上の波長しか利用できないため、表面波を利用した板厚方向の物性評価は難しい。しかし、板厚方向に傾斜的に樹脂硬化度分布を有するFRP板の場合、図1のように、硬化側表面から入射された超音波は、未硬化部で著しく減衰して硬化側裏面に達することができず、結果的に硬化側表面付近に局在化して伝播する「擬似表面波」を形成することが予想される。本研究では、この「擬似表面波」の伝播特性を分析することで、板厚方向の樹脂硬化度分布を非破壊評価する手法について研究することを目的とした。

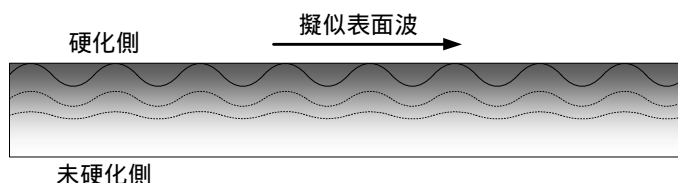


図1 擬似表面波の伝播形態

3. 研究の方法

本研究では、ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)、および炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を評価対象とし、片面加熱成形により板厚方向に樹脂硬化度分布を形成したFRP板の超音波伝播特性を実験的に明らかにするとともに、シミュレーションによる再現を試みた。以下に具体的な研究方法を示す。

(1)FRP 板の低圧成形法の検討

超音波測定の対象となる板厚方向に樹脂硬化度分布を有する FRP 板の成形手法について検討した。研究代表者はこれまでに、バギング成形と電気炉の組合せによる FRP 板の低圧成形法を確立しており、成形温度が樹脂硬化度に与える影響を明らかにしている。本研究では、FRP の現場施工により近い成形条件とするため、バギング成形とホットプレートの組み合わせによる新たな FRP 成形法について検討した。電気炉による均一加熱成形では、板厚方向に硬化度分布を有する FRP 板の作製は困難であるが、ホットプレートによる片面加熱成形では試料上下面で温度差を形成することが可能であり、上面に冷却装置を設置することで、板厚方向に所望の温度勾配を与えることができる。本研究では、図 2 のような片面加熱成形に必要な特殊金型の設計製作を行うとともに、上面に設置する冷却装置を設計製作してその性能評価を行った。

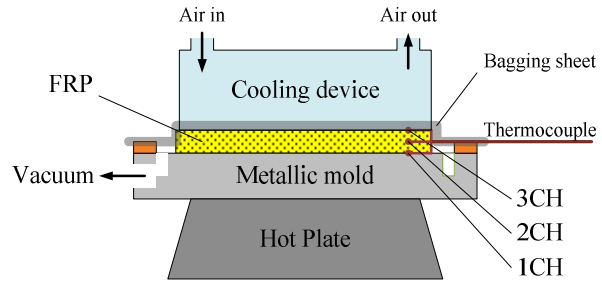


図 2 片面未硬化 FRP 板の成形装置

(2)擬似表面波の計測

製作した特殊成形装置により、GFRP および CFRP それぞれについて、標準成形板および板厚方向に樹脂硬化度分布を有する片面未硬化板を成形して評価対象とした。マイクロビッカース硬度計で試料断面の硬度測定を行い、板厚方向の樹脂硬化度分布を数値化した後に、同試料に対して板厚方向および面内方向の超音波計測を行った。面内超音波計測では、図 3 のように、送受信面を同じ側とした場合と、反対側とした場合で計測を行い、超音波伝播特性を比較することで「擬似表面波」の発生有無を調査した。また、ウェーブレット変換による時間周波数解析を用いて「擬似表面波」の伝播特性を分析した。

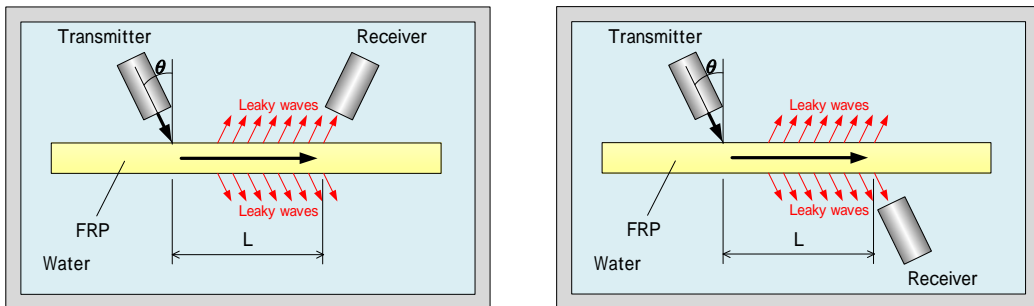


図 3 擬似表面波の計測システム

(3)FDTD 法による超音波伝播シミュレーション

板厚方向に樹脂硬化度分布を有する FRP 板の超音波伝播形態を明らかにするため、超音波伝播シミュレーションについて検討した。本研究では、時間領域差分法である FDTD 法を用い、実験で観測された擬似表面波の伝播形態の再現を試みた。ここでは、樹脂未硬化部における超音波の著しい減衰を表現するため、FDTD シミュレーションの支配方程式に減衰効果を取り入れる手法について検討した。

$$\text{運動方程式} \quad \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \zeta v_i = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\text{構成方程式} \quad T_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \xi_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}$$

ここで、

- v : 粒子速度ベクトル
- T : 応力テンソル
- c : 剛性テンソル
- ε : ひずみテンソル
- $\dot{\varepsilon}$: ひずみ速度テンソル
- ζ : 離散化後のセル間に働く減衰係数
- ξ : 離散化後のセル内に働く減衰係数

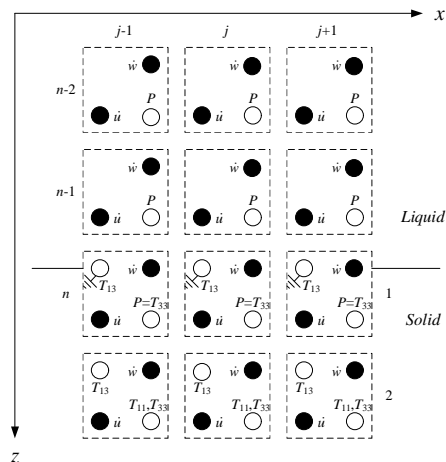


図 4 固液界面での staggered grid システム

4. 研究成果

(1)FRP 板の低圧成形法の確立

成形試料は GFRP と CFRP の 2 種類とし、材料ごとに適した成形条件の探索を行った。成形試料の樹脂硬化度を評価するためにパーコール硬度計による試料表面硬度の測定、およびマイクロビッカース硬度計による試料断面の硬度分布測定を行った。板厚 6mm ~ 18mm の試料を成形した結果、ホットプレートの加熱温度と冷却装置の冷却能力を調整することで、加熱面は完全硬化し、冷却面にかけて板厚方向に樹脂硬化度分布を有する片面未硬化板が成形できることを確認した。図 5 に未硬化層厚さの異なる GFRP 成形板の断面写真の一例を示す。

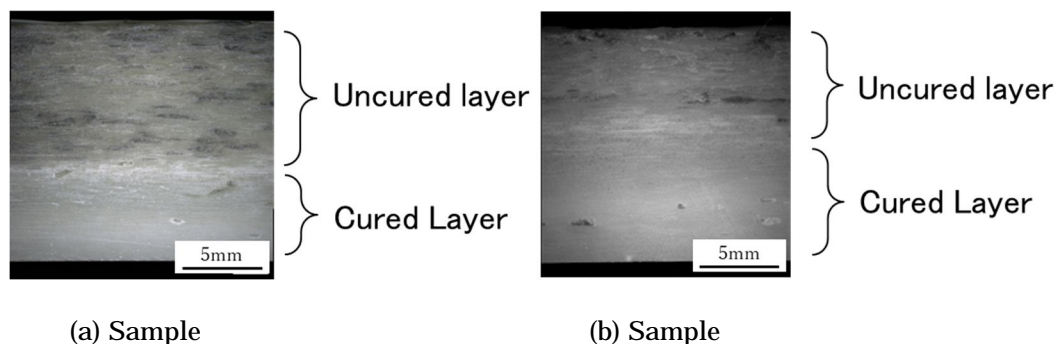


図 5 板厚方向に樹脂硬化度分布を有する GFRP 成形板の断面写真

(2)擬似表面波の計測結果

超音波測定の結果、板厚方向測定、面内方向測定いずれにおいても片面未硬化板で超音波伝播速度の低下が確認できた。また、板厚方向測定では超音波入射面による違いは見られなかったのに対し、面内方向測定では入射面による違いがみられ、未硬化側入射の場合には伝播速度が遅くなり、周波数低下の傾向もみられた。このことから、試料表面から入射された超音波は、入射面付近の特性をより強く反映することがわかった。また、完全硬化板では、図 6 に示すように試料片面から入射された超音波が試料両面で同程度検出できたが、未硬化層が比較的大きな片面未硬化板では、図 7 に示すように硬化側表面から入射された超音波が裏面の未硬化面側ではほとんど検出できなかった。これは、本研究課題の主題である「擬似表面波」の存在を裏付ける結果であり、硬化層の厚さにより受信波の周波数特性や受信波強度が変化することを確認した。

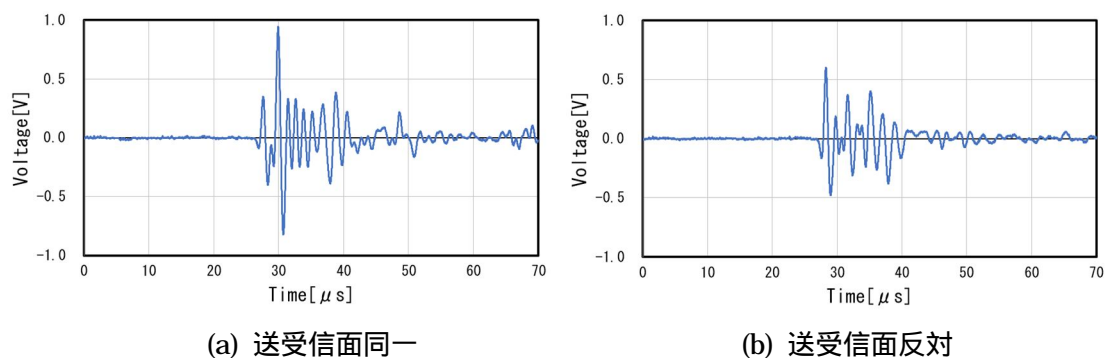


図 6 完全硬化 GFRP 板の超音波波形

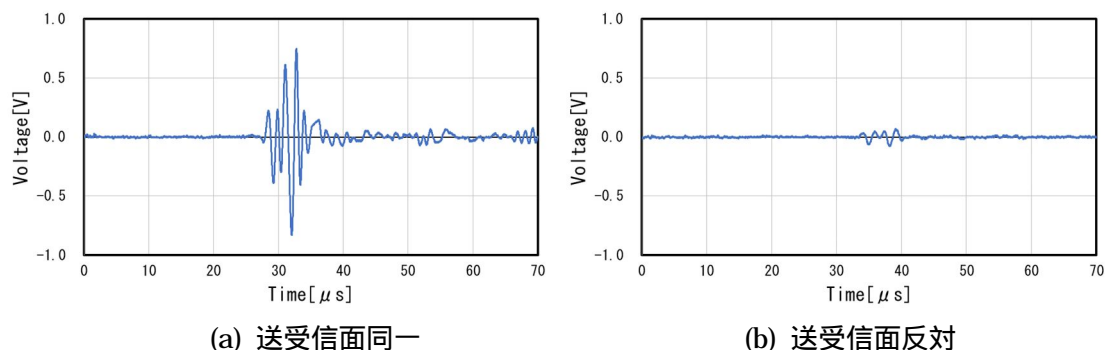


図 7 片面未硬化 GFRP 板の超音波波形 (Sample 1, 硬化側入射)

(3)FDTD 法による超音波伝播シミュレーション

時間領域差分法である FDTD 法による超音波伝播シミュレーションにおいて、運動方程式と構成方程式にそれぞれ減衰項を導入して支配方程式を修正し、各減衰項が超音波伝播特性に与える影響を調査した。その結果、構成方程式に導入した減衰項は主に周波数低下をもたらし、運動方程式に導入した減衰項は主に信号強度低下に寄与することがわかった。図 8 は、運動方程式のみに減衰項を考慮した場合のシミュレーション結果であるが、Sample 1、いずれにおいても、試料表面から入射された超音波が硬化層付近に局在化して伝播している様子が確認でき、実験結果を裏付ける結果が得られた。また、未硬化層が比較的大きい Sample 2 では、超音波がより表面付近に局在化して伝播している傾向もみられた。さらに、未硬化層側から超音波入射した場合、検出される超音波の周波数が低下するという実験観測結果も再現することができた。しかし、硬化層の厚さによる超音波伝播速度の変化は比較的小さく、伝播速度に基づく硬化層厚さの評価は困難であることがわかった。

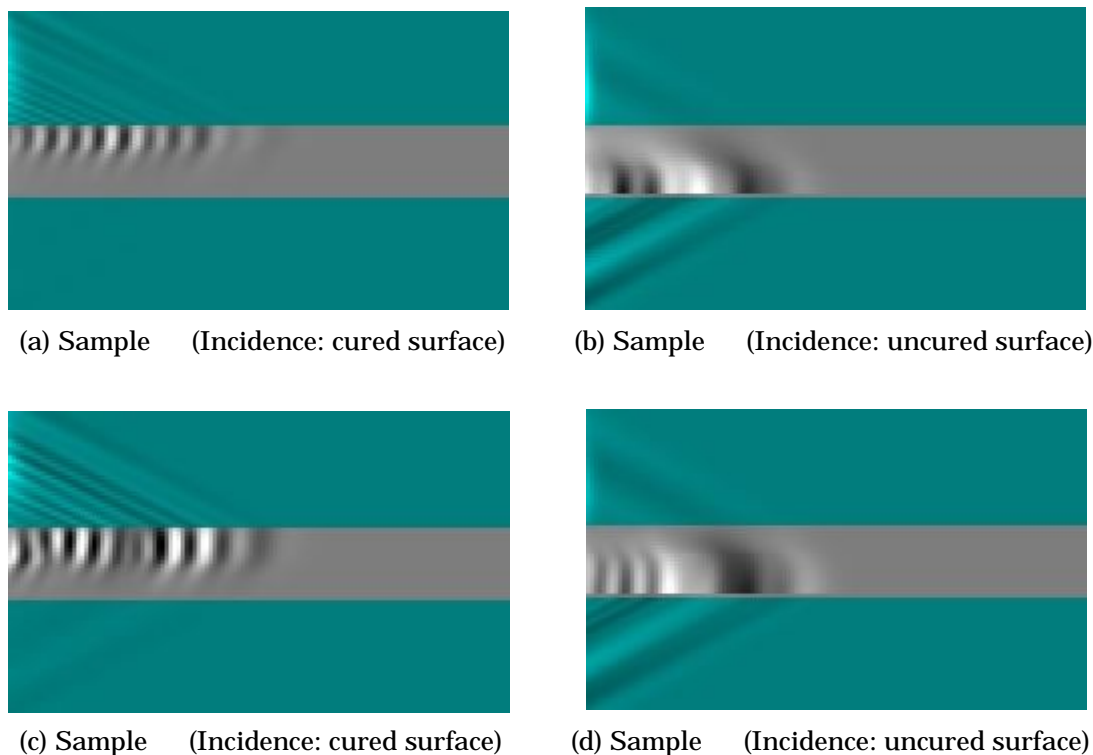


図 8 板厚方向に樹脂硬化度分布を有する GFRP 成形板の FDTD シミュレーション結果

以上で示したように、本研究では、超音波計測結果および超音波伝播シミュレーション結果から、片面未硬化 FRP 板の超音波伝播形態を明らかにした。片面未硬化板では試料表面から入射された超音波が硬化層付近に局在化して伝播する「擬似表面波」を形成し、その伝播形態は硬化層厚さに依存して変化する。しかし、硬化層厚さが超音波伝播速度に与える影響は小さく、伝播速度に基づく硬化層厚さ評価は難しい。一方、硬化層厚さは超音波の周波数特性や減衰率に影響を与えるため、これらに基づいて硬化層厚さを評価できる可能性がある。しかし、本研究では、硬化層厚さと超音波の周波数変化、減衰特性の関係を特定するには至らなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Masaya MATSUKI, Akihiro WADA, Eiji KITAGAWA
2. 発表標題 Ultrasonic Testing of CFRP Laminates with Distribution of Cure Degree in the Thickness Direction
3. 学会等名 16th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松木将哉, 和田明浩, 北川英二
2. 発表標題 厚さ方向に硬化度分布を有するCFRP積層板の超音波測定
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松木将哉, 和田明浩, 北川英二
2. 発表標題 超音波によるFRP成形板の厚さ方向硬化度分布評価
3. 学会等名 日本機械学会 第27回機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田明浩, 松木将哉, 北川英二
2. 発表標題 厚さ方向に傾斜硬化したCFRP積層板の超音波測定
3. 学会等名 第44回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松木将哉, 早稲田一嘉, 和田明浩, 北川英二
2. 発表標題 板厚方向に樹脂硬化度分布を有するFRP成形板の超音波伝播特性
3. 学会等名 日本機械学会 第28回機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田明浩, 北川英二
2. 発表標題 板厚方向に物性分布を有するFRP板のFDTD法による超音波伝播シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 第28回機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田明浩, 松木将哉, 早稲田一嘉, 北川英二
2. 発表標題 板厚方向に樹脂硬化度分布を有するGFRP板の未硬化層厚さが超音波伝播特性に与える影響
3. 学会等名 第12回日本複合材料合同会議
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------