

研究報告 令和2年度 土木分野 No.8  
CFRP-コンクリート複合構造に対する  
人工知能非破壊検査手法の開発

Development of artificial intelligence nondestructive inspection method for CFRP-concrete composite materials

群馬大学大学院理工学府 環境創生部門 准教授 斎藤隆泰

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. はじめに

近年、社会基盤構造物や材料に対する維持管理を目的に、非破壊検査の重要性が高まっている。特に、超音波非破壊検査法は、最も広く利用されている非破壊検査法の一つである。一方、先進材料である炭素繊維強化プラスチック(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics)を、鋼材やコンクリートの補強等に利用する事例が近年増加している。その際、CFRPを適切に接着できているか、また、構造物の供用期間中に接着部分の剥離が生じないかが問題となる。CFRPの未接着箇所があれば、当然、期待通りの補強効果が得られない可能性がある。よって、この未接着部分を適切に検出できる非破壊検査法の確立が必要となる。一般的に、土木構造物の検査範囲は広範囲に渡る。そのため、効率的に、かつ検査員が判断しやすい非破壊検査法の開発が必要であろう。そこで、本研究では、一部非接触検査が可能なレーザ超音波可視化試験(LUVT: Laser Ultrasonic Visualization Testing)を用い、CFRP-コンクリート複合試験体の未接着部分の検出を試みる。以下では、まず、本研究で用いたLUVTとその原理について簡単に説明する。次に、本研究で用いたCFRP-コンクリート複合試験体について説明し、最後にLUVT結果を示すことで、本手法の有効性等について検討する。

2. LUVTとその原理

本節では、本研究で用いたLUVTとその原理について簡単に説明しておく。図1はLUVT装置の全容を示している。図1に示すように検査対象となる試験体に超音波探触子を設置しておく。次に、試験体表面にパルスレーザを照射する。レーザは、適当なピッチで操作させるが、その際、各レーザ照射点における熱膨張の発生により、照射点を波源とした超音波が伝搬することとなる。この超音波を、予め設置しておいた超音波探触子で受信する。次に、その超音波探触子の設置点を受信点とし、その受信点とレーザスキャンによる各波源を、相反定理を用いて入れ替える。この操作により、受信側探触子から各波源へ超音波が伝搬した場合の信号を作成し、それらを重ね合わせることで、レーザ照射面での超音波伝搬の様子を映像化(画像化)することができる。そのため、後に示すような図3、4では、相反定理により、受信側探触子から超音波が送信される映像が得られていることに注意されたい。なお、本研究で扱うLUVTは、超音波伝搬挙動の可視化結果を連番画像(動画)として出力することができる。本研究

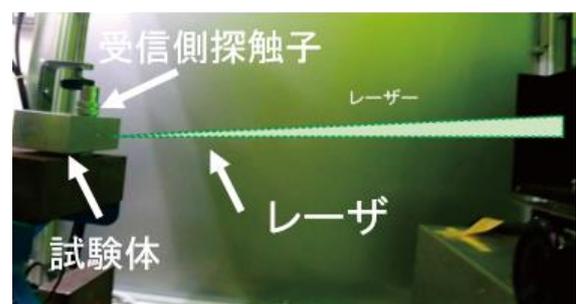


図1: 本研究で用いたLUVT試験機。

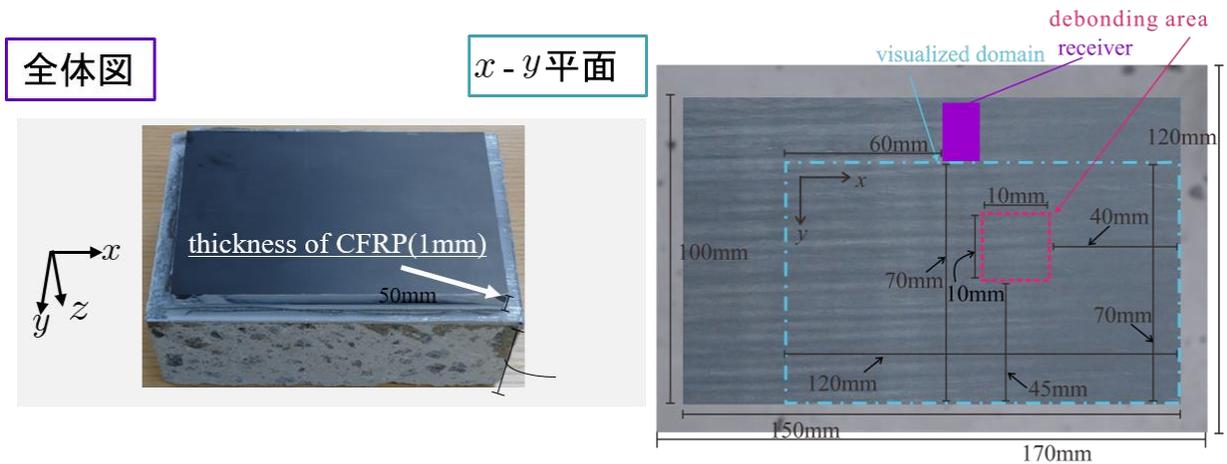


図 2:作成した試験体の一例 (左) 全体図 (右)  $x-y$ 平面図.

ではこの LUVT を用いて CFRP-コンクリート複合構造の未接着部分を検出する方法について検討を行う.

### 3. 試験体の概要

本研究で用いた試験体の概要を図 2 に示す. 縦, 横の寸法がそれぞれ 120mm, 170mm であり, 厚さ 50mm のコンクリート試験片に縦, 横それぞれ 100mm, 150mm, 厚さ  $z_c$ mm の CFRP を接着させる. CFRP はトレカ T700 のプリプレグを使用したものであり, コンクリートとの接着面は接着しやすいように片面粗し仕様のものを用いている. また, 厚さ  $z_c$  は 1mm, 2mm, 4mm, 8mm のいずれかとした. 接着のためのプライマーは炭素繊維接着剤, 貼付け接着剤はグレーで不透明なアンカー定着剤のものを用いている. ただし, 図 2(右)に示すように, 中央やや右側に, 赤点線で囲まれた一辺 10mm の未接着部分を人工的に設ける. 未接着部分は CFRP の接着面にフィルムを貼り付け, 空気層を設けることで作成した. また, 接着剤の厚さはおよそ 2mm 程度である. LUVT における受信探触子は図 2 における紫色の箇所を設置した. 用いた探触子はジャパンプローブ社製の中心周波数が 1MHz の斜角探触子(45 度, コンポジット型)である. ただし, 通常斜角探触子は CFRP のような音響異方性材料に対して設計されたものではない. そのため, 音響異方性を持つ CFRP 内部に超音波が 45 度の入射角で必ずしも入射するとは限らないが, CFRP 自体の厚さ  $z_c$  はコンクリートの厚さに比べれば十分薄いことを考慮し, 試験的にこの探触子を用いて LUVT を行ったことに注意する. また, レーザ照射領域は図 2 (右) の水色の点線で囲んだ矩形領域とした. すなわち, この  $x-y$ 面における照射領域が, LUVT における超音波伝搬の可視化領域となる. LUVT は, 未接着部分有り, 無し, および CFRP の厚さ  $z_c = 1, 2, 4, 8$ mm の合計 4 パターンに対して実施した. また, CFRP は一方向炭素繊維強化されたものであり, 図 2 中の  $x$ 方向が炭素繊維の配向方向を示していることに注意されたい.

### 4. LUVT に対する人工知能 (AI) 非破壊検査の開発に用いた手法

LUVT 可視化結果は 5 節で示すように, 通常は検査員が目で見ても未接着部分の有無を判断することになるが, 本研究ではその判断を AI に任せる. 一般的に AI の基礎は機械学習である. 機械学習の中でもニューラルネットワーク (NN) を基礎とした深層学習等は, 幸いにも画像解析との相性が良い. ただし, 単に与えた画像中の未接着部分の有無を判定することは, 得策ではない. なぜなら, 一般に LUVT では, 超音波伝搬の時刻歴画像群, すなわち動画が得られる. 5 節で示すように, 人間は欠陥からの散乱波を目で見ても確認する. AI も Grad-CAM を用いて欠陥からの散乱波の発生に着目して欠陥の有無を判定できるこ

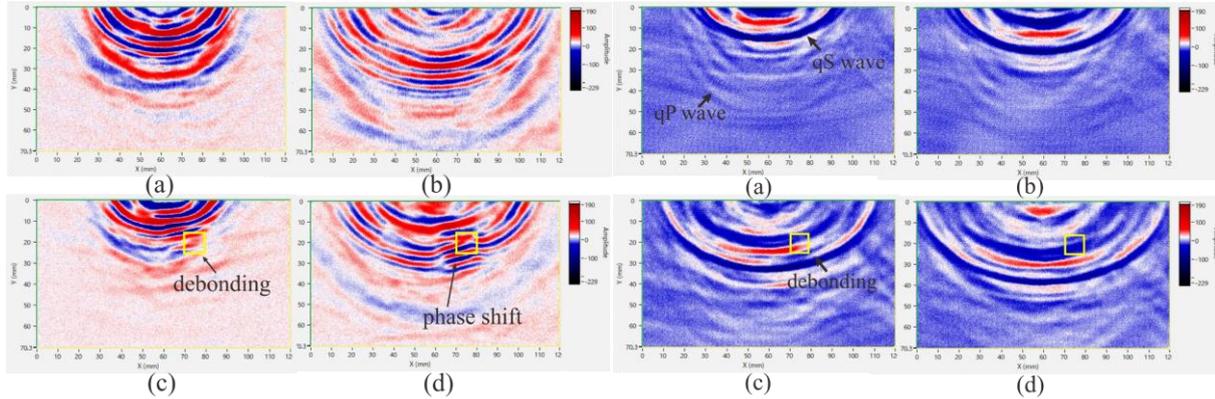


図 3:  $z_c=1\text{mm}$  の場合の LUVT 結果.

図 4:  $z_c = 8\text{mm}$  の場合の LUVT 結果.

とがこれまでの研究でわかっている（例えば、斎藤ら：時間領域境界要素法で求めた散乱波動場の深層学習と欠陥種別の判定の試み，非破壊検査，(2021)（掲載決定済））。そこで，本研究では，RNN(Recurrent Neural Network) と呼ばれる機械学習法を用いて図 3，4 のような LUVT 画像を機械に学習させて AI のプロトタイプを作成する．RNN では，画像中の猫や犬等を分類する深層学習のように，ある 1 枚の画像データを対象とするのではなく，時系列画像を対象とした分類問題を解くことができる．先に述べたように，LUVT では一回の試験で一連の超音波伝搬の LUVT 画像が得られることから，RNN が本研究目的に適した機械学習であると考えた．RNN の詳細については，適当な文献を参照されたい．

### （実験調査によって得られた新しい知見）

#### 5. LUVT による超音波伝搬可視化結果

図 3，図 4 に LUVT で得られた CFRP 表面の超音波伝搬の可視化結果の一例を示す．図 3 は  $z_c = 1\text{mm}$ ，図 4 は  $z_c = 8\text{mm}$  の結果を示しており，それぞれ上段の(a)，(b)は未接着部分無しの場合，(c)，(d)は未接着部分有りの場合の結果を示している．また，各図の(a)-(d)はそれぞれ同時刻の超音波伝搬の様子を示しており，(c)，(d)中の黄色四角は未接着部分を示していることに注意されたい．図 3 より， $z_c = 1\text{mm}$  の場合の結果に注目すると，未接着部分がない図 3(a)，(b)の場合はいずれも超音波は，問題なく伝搬していることがわかる．超音波の振幅の大小が連続して現れる理由は，接着面からの反射が繰り返されることによって生じていると考えられる．一方，未接着部分を含む図 3(c)，(d)の場合に着目すると，未接着部分近傍で位相が反転(phase shift)している様子を見て取れる．この理由は，空気層を含む未接着部分で超音波が反射・散乱されたことが原因であると考えられる．次に，図 4 の  $z_c = 8\text{mm}$  の場合の結果に着目する．CFRP が比較的厚いため，超音波の振幅の大小は図 3 に比べて広い間隔で現れている．また，図 4(c)，(d)の未接着部分有りの結果に着目すると，図 3(c)，(d)のように明確な位相の反転現象を確認することはできない．なお，詳細は省略するが，厚さ  $z_c$  が大きくなるほど，未接着部分の影響を CFRP の表面で計測することは難しくなる．その理由は，LUVT はレーザー照射面での超音波伝搬を可視化することが目的のため，厚さ  $z_c$  が大きくなると，未接着部分の影響がレーザー照射面に現れづらくなること，CFRP では炭素繊維の影響を受けて超音波伝搬が減衰することが理由である．また，図 3，図 4 より，超音波は等方に伝搬せず，水平方向に速く伝搬していることがわかる．その理由は，3 節で述べたように，炭素繊維が水平方向(x方向)に配向されており，音

響異方性の影響を受けているためである。

このように、LUVTを用いれば、検査員は図 3, 4 のような可視化画像を目で見ることで、条件が整えば未接着部分の有無や位置をはっきりと確認することができる。しかしながら、Society5.0 が提唱する現代社会の状況を鑑みれば、毎回の LUVT 試験で検査員が目視で未接着部分の有無を確認することは効率的でない。しかも、土木構造物は、機械材料等に比べて検査範囲も広い。場合によっ

ては LUVT を用いても、熟練の検査員でも未接着部分の有無を判定することが容易でない場合もあろう。そこで、本研究では図 3, 4 のような LUVT 可視化結果を判断する AI のプロトタイプを作成し、その AI に自動的に未接着部分の有無を判定させることを試みる。

## 6. RNN を用いた LUVT 画像の学習とテスト結果

次に、LUVT で得られた時系列の超音波伝搬動画(画像群)の入力に対し特徴を抽出できる RNN を用いた機械学習により、未着部分の自動検出を試みた結果を示す。用いた RNN のネットワーク構造は、入力層、双方向長短記憶層、ドロップアウト層、全結合層、ソフトマックス層、出力層から構成されている。なお、入力層には、LUVT 結果の時系列動画と学習済み GoogleNet を使用し、1 フレーム毎に画像の特徴を 1 次元データに変換したものを入力として与えた。また、全 LUVT 動画を学習用と検証用の 8:2 に分割したホールドアウト法を用いた。なお、LUVT 結果は 2 個の元動画にガウシアンノイズを施す等のデータ拡張を行い、合計 60 個の動画を作成し、それらに対して学習を行った。学習には、学習に要する時間を短縮するために GPU を用いて効率的に画像解析を行っている。ただし、ここでは  $z_c = 1\text{mm}$  とした。

図 5(a)に RNN の学習回数に対する学習損失と検証損失を、図 5(b)に RNN の学習回数に対する学習精度と検証精度の関係を示す。なお、学習回数は Epoch で表現している。図 5(a)より、4Epoch 目でおおよそ、損失はゼロとなっていることを確認できる。また、図 5(b)より、2Epoch 以降でおおよそ精度は 1 になっていることがわかる。すなわち、RNN によって、LUVT 画像における未接着部分の判定のための学習が概ね正しく行われたものと判断できる。よって、LUVT 動画を与えることで、動画中の未接着部分の有無を判定する AI のプロトタイプを作成できた。

次に学習と検証で使っていない未知の LUVT 動画をここで作成した AI に与え、それら LUVT 動画中の未接着部分の有無を識別させた。結果を表 1 に示す。表 1 は、人間が未接着部分有り、無しと判断できる LUVT 動画に対し、作成した AI がどのような判定結果を

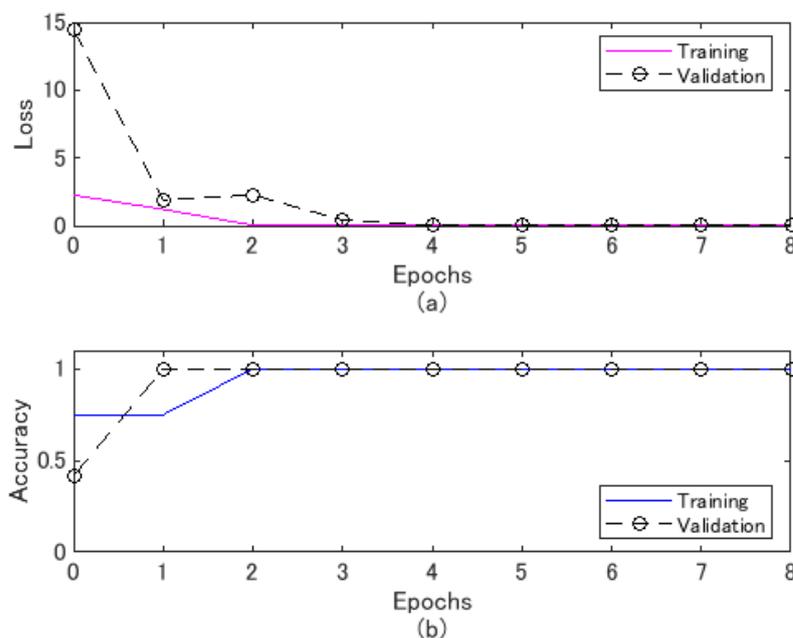


図 5 : RNN による学習回数と損失と精度の関係。

		AIが分類した結果		精度
		未接着部分なし	未接着部分あり	
人間が判断した結果	未接着部分なし	20	0	100%
	未接着部分あり	4	16	80%

表 1：RNN で作成した AI を用いた未知の動画中の未接着部分有り，無し の判定結果。

下したかをまとめたものである。表 1 より，人間が未接着部分無しと判断した LUVT 動画に対して AI は，全て同様に未接着部分無し，と判断していることがわかる。すなわち，その判定精度は 100 パーセントであった。一方，未接着部分有りの LUVT 動画に対しては，4 つを未接着部分無しと判断している。すなわち，問題とする未接着部分有りの場合は 80 パーセントの確率で正しく判断できていることがわかる。よって，作成した AI のプロトタイプは，未接着部分の有無を概ね正しく分類できたと考えられる。

## 7. まとめと今後の課題

本研究では，CFRP-コンクリート複合材料における未接着部分を，LUVT を用いて検出することを行った。単に LUVT を用いて検出するだけでなく，RNN を用いて AI のプロトタイプを作成した。本研究で得られた知見は下記の通りである。

- ・ 通常用いられる CFRP 程度の厚さであれば，未接着部分を LUVT で検出可能である。
- ・ LUVT に対する機械学習により，機械が検査員の代替となることも可能であろう。
- ・ CFRP が厚い場合は，減衰等の影響で LUVT を用いて未接着部分を検出できない。その場合，何らかの逆解析手法を適用し，未接着部分を検出する必要がある。

R2 年度は，新型コロナウイルスの影響により，研究室での研究活動を大幅に制限された。今後は，さらに LUVT 画像群（動画）を増やし，未接着部分の検出精度の向上を図ること，未接着部分の有無だけでなく，位置をも特定する等，本研究をより発展させる予定である。

## （ 発 表 論 文 ）

- [1] 蓑輪里歩・松原江里・竹田晴彦・斎藤隆泰：LUVT を用いた CFRP-コンクリート未接着部分の検出に関する基礎的検討，土木学会関東支部 第 48 回技術研究発表会，2021 年 3 月 2 日発表(CD-ROM 収録) (オンライン発表)
- [2] 竹田晴彦・松原江里・斎藤隆泰：レーザ超音波可視化試験を用いた CFRP-コンクリートの未接着部分の検討，令和 3 年度安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術見しンポジウム (オンライン発表)，2021 年 3 月 29 日発表 (発表者の第一著者が日本非破壊検査協会より新進賞を授賞)
- [3] 斎藤隆泰・松原江里・廣瀬壮一：CFRP を対象とした Wavefield data の深層学習と内部欠陥の検出，第 26 回計算工学講演会論文集，掲載決定済，(2021)
- [4] T. Saitoh, T. Kato and S. Hirose: Deep-learning for wave propagation images in CFRP and its application to laser ultrasonic non-destructive testing, Mechanistic Machine Learning and Digital Twins for Computational Science, Engineering & Technology (MMLDT-CSET 2021) (採択決定済), (2021)