

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	打撃音を用いた接着接合部の接着剤厚さおよびヤング率の推定
Title(English)	Estimation of thickness and Young's modulus of adhesive layer in adhesively bonded joint by impact sound
著者(和文)	小野寺琉, 木村達郎, 関口悠, 佐藤千明
Authors(English)	Ryu Onodera, Tatsuro Kimura, Yu Sekiguchi, Chiaki Sato
出典(和文)	日本接着学会誌
Citation(English)	Journal of The Adhesion Society of Japan
発行日 / Pub. date	2023, 4
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

打撃音を用いた接着接合部の接着剤厚さおよびヤング率の推定

小野寺琉*, 木村達郎*, 関口悠**, 佐藤千明**

*東京工業大学大学院

**東京工業大学科学技術創成研究院

***神奈川県横浜市緑区長津田 4259 〒226-8503

Estimation of Thickness and Young' s modulus of Adhesive Layer in
Adhesively Bonded Joint by Impact Sound

Ryu Onodera*, Tatsuro Kimura*, Yu Sekiguchi** and Chiaki Sato**

* Graduate School, Tokyo Institute of Technology

** Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology

***4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8503, Japan.

要旨

接着サンドイッチビームの接着剤層の厚さとヤング率を打撃音より推定する手法について検討した。接着サンドイッチビームの振動に対して Mead らの方法を適用してその固有振動数を求め、接着剤の厚さとヤング率の複数の組み合わせに対してデータセットを作成した。また、このデータセットを教師データとし、勾配ブースティング決定木により周波数分布から接着剤の厚さとヤング率を逆推定するモデルを構築した。この逆推定モデルに実験結果を入力したところ、試験片の接着剤厚さを正確に予測できたが、ヤング率は推定誤差が大きかった。

ABSTRACT

A method for estimating the thickness and Young's modulus of the adhesive layer in an adhesively bonded sandwich beam from the sound caused by an impact was investigated. A method obtained by Mead et al. was applied to the vibration of an adhesive sandwich beam to obtain its eigenfrequencies, and the thickness and modulus of elasticity of the adhesive layer were probabilistically selected to generate many teaching data. A system for inverse estimation of the thickness and Young's modulus of the adhesive layer from the eigenfrequencies was constructed by machine learning from the teaching data. By inputting the experimental results into this inverse estimation system, the adhesive thickness of the specimens was precisely predicted, but the estimation of Young's modulus was not precise.

Key words: Impact sound, Sandwich beam, Adhesive joint, Adhesive thickness, Young's modulus, Reverse estimation

1. 緒言

接着接合部の強度評価には、被着体を接着した試験片が用いられる。例えばせん断強度の測定には引張りせん断試験片が、また破壊力学的な評価には DCB 試験片などが用いられる。これらの強度は、接着界面の強度のみならず、接着剤層の厚さや弾性率に大きく影響を受ける。また、これらの管理が容易でないため、強度試験結果にもばらつきが大きい。したがって、試験の前に接着剤層の厚さや弾性率を評価できることが好ましい。接着剤層の厚さは、継手の厚さをマイクロメーターで測り、被着体の厚さを差し引くことにより概ね予測できるが、接着剤層の厚さが均一でない場合は対応が難しい。また、接着剤層の弾性率を試験前に評価する方法は、ナノインデンテーションなどを除いて、ほぼ存在しない。いずれにしても、簡易な方法は存在しない。

一方、接着試験片の打撃音は比較的簡単に計測できる対象である。また、その周波数分布が接着剤層の厚さや弾性率に大きく影響を受けることが知られている¹⁾。したがってこの打撃音から、接着剤層の厚さや弾性率を推定できる可能性がある。例えば、似たような例として、接着剤層のせん断弾性率を求める試験規格(ASTM E756-05)が存在している²⁾。この規格では、2枚の被着体を貼り合わせた試験片を用い、それを加振した際の変位の周波数依存性から接着剤層のせん断弾性率を求める。しかし特殊な形状の試験片が必要で、しかも接着剤のせん断弾性率を求めることが主な目的であり、一般的な被着体材料や試験片形状に適用できず、実際の接着試験片の簡易な評価には結びつかない。

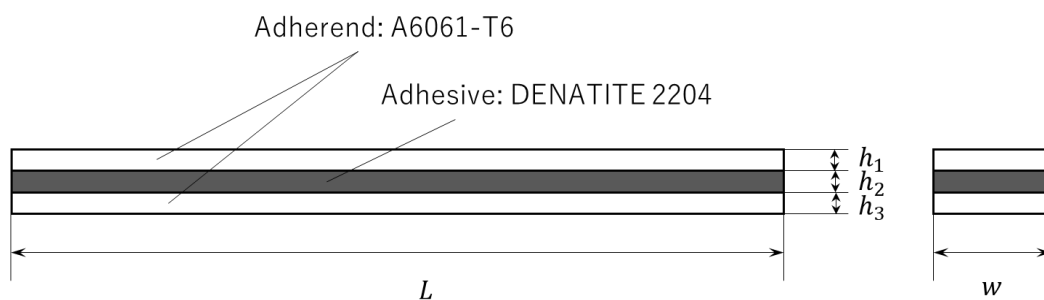
そこで本研究では、DCB 試験片に形状が比較的よく似ている接着サンドイッチビームを対象に、その接着剤層の厚さおよびヤング率を、打撃音から簡易に推定する手法を提案する。具体的には、接着サンドイッチビームの振動特性を、力学モデルを用いて計算し、固有振動数を高次まで求める。次に接着剤層の厚さやヤング率をランダムに変えてその固有振動数を求め、多数の教師データを生成する。さらに、この教師データを用いて機械学習による逆推定モデルを構築し、この妥当性を確認する。最後に、実際の接着サンドイッチビームを用いて実験的に求めた固有振動数から、その接着剤厚さならびにヤング率を推定し、実際の値との比較を行う。

2. 理論及び解析法

2.1 接着サンドイッチビームの振動解析

解析対象とする接着サンドイッチビームの概形を Fig.1 に示す。また、その材料定数を Table 1 に示す。本接着サンドイッチビームは 2 枚の同じ寸法のアルミ板材(材質:6061-T6)を 2 液エポキシ接着剤(Denatite 2204, ナガセケムテックス)で貼り合わせた三層構造を有して

いる。このような構造の振動特性を予測する手法は多数存在する³⁻⁵⁾。なかでも、Meadらの方法は、接着剤層を粘弾性体として扱える利点がある⁵⁾。また、比較的古い理論であるにも関わらず、良好な予測精度を有しているため、現在でも広く用いられている。しかし、固有振動数の解析解を直接求めることはできず、一部に数値解析が必要となる。今回は接着剤層の粘弾性特性は扱わないが、将来的に扱えるポテンシャルがあることを考慮し、かつ数値計算に大きな困難が存在しないため、本手法を用いた。



L (mm)	200
h_1 (mm)	1.00
h_2 (mm)	0.127, 0.984
h_3 (mm)	1.00
w (mm)	25.0

Fig.1 Configuration and dimensions of sandwich beam specimen bonded adhesively

Table1 Material constants for the specimen

Adherend	Young's modules E (GPa)	69.0
	Density ρ (kg/m^3)	2.71×10^3
Adhesive	Young's modules E (GPa)	6.08
	Poisson's ratio ν (-)	0.390
	Density ρ (kg/m^3)	1.55×10^3

Meadらの理論より、本振動系の支配方程式は次式で表される⁵⁾。

$$\frac{d^6 W_n}{dx^6} - g(1+Y)\frac{d^4 W_n}{dx^4} - \omega_n^2(1+i\eta_n)\left(\frac{m}{D_t}\right)\left(\frac{d^2 W_n}{dx^2} - gW_n\right) = 0 \quad (1)$$

ここで、

$$g = \frac{G}{h_2}\left(\frac{1}{E_1 h_1} + \frac{1}{E_3 h_3}\right) \quad (2)$$

$$Y = \frac{d^2}{D_t}\left(\frac{E_1 h_1 E_3 h_3}{E_1 h_1 + E_3 h_3}\right) \quad (3)$$

$$d = h_2 + \frac{1}{2}(h_1 + h_3) \quad (4)$$

であり、 W_n はn次の固有振動の変位、 ω_n はその角周波数、 η_n は損失係数である。また、 m は単位長さ当たりの質量、 G は接着剤のせん断弾性率、 h_1 は上側被着体厚さ、 h_2 は接着層の厚さ、 h_3 は下側被着体厚さ、 E_1 は上側被着体のヤング率、並びに E_3 は下側被着体のヤング率を示している。さらに、かつ $D_t = D_1 + D_3$ であり、ここで D_1 は上側被着体の単位幅当たりの曲げ剛性、 D_2 は下側被着体の曲げ剛性を表している。式1の固有値解析により、n次の固有振動の角周波数 ω_n を求めることができる。また、ここでは接着剤層のヤング率とせん断弾性率の変換には次式を用いている。なお、損失係数 η_n に関しては、今回は接着剤を弾性体と見做すため、これを零としている。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

また、この固有値解析には、Integrating-based spectral collocation method⁶⁾を用いた。

2.2 機械学習による逆推定手法

本研究では固有振動数から接着剤の厚さとそのヤング率を逆推定する。その手法として、勾配ブースティング決定木(Gradient Boosting Decision Tree, 以下GBDTと記す)を用いた。GBDTは計算コストや精度などの観点より、近年広く利用されている機械学習アルゴリズムである⁷⁾。本手法はマルチクラス分類⁸⁾、クリック予測⁹⁾および将棋の局面予測¹⁰⁾など、

多くの機械学習タスクにおいて利用されている。また近年では機械工学分野においても橋梁の損傷原因推定¹¹⁾や機器の音響振動予測¹²⁾といった場面で利用されている。本研究ではGBDTのひとつであるLightGBM¹³⁾を用いた。GBDTは決定木アルゴリズムと勾配ブースティングという2つのアルゴリズムから構成されている。

(1) 決定木アルゴリズム

決定木(Decision Tree)は入力されるデータに対して独立変数を基に質問を行い、場合分けし従属変数を入力するアルゴリズムである。本研究では、決定木のひとつであり回帰問題に対しても用いることが可能なCART(Classification And Regression Trees)を採用した¹⁴⁾。

(2) 勾配ブースティング

勾配ブースティングとは推定精度の低い弱学習機を集めて一つのモデルとして捉えるアンサンブル学習のひとつである。まず初めに予測モデル f_1 を構築する。この際、必ず推定精度の悪いデータが存在する。このため、このデータをより高い精度で予測可能な予測モデル f_2 を作り、以降任意の回数 $t = T$ まで繰り返し、最終的なモデル f を $f = \sum_{t=1}^T f_t$ として構成する手法である¹⁵⁾。

3. 実験および結果

3.1 接着サンドイッチビームの打撃試験

Fig.2に示す試験装置により、Fig.1に示した接着サンドイッチビームの打撃試験を実施した。ここでは接着剤厚さの異なる2つの接着サンドイッチビームを用い、それぞれをゴム製の支持台に乗せ、プラスチック製のマレットにより叩くことにより打撃を加えた。また、その音をマイクロフォンで録音し、データロガーにより記録した。ここではサンプリング周波数を100 kHzとした。

実験に先立って、多くの異なるゴム製支持台を作成し予備的な打撃試験を実施したが減衰が大きく、十分な継続時間の打撃音を得られなかった。そこで、玩具の鉄琴を購入し、その支持台を使用すると共に、添付されていたマレットを打撃体として用いたところ、良好な継続時間の打撃音を得られた。このため、本実験にはこの支持台とマレットを使用した。支持台が末広がりの形状を有しており間隔が一定ではないため、本研究ではこの間隔が約80mmの箇所に接着サンドイッチビームを載せ、マレットによりその中央部を打撃した。振り下ろし距離および速度は厳密には管理していないが、常にほぼ一定の出力がマイクロフォンより得られるように留意した。なお、マレット先端の球体の直径は約22mm、ロッド部の長さは約280mm、マレット全体の質量は約14.5gである。

接着剤層の厚さは、まず試験片の厚さを測定し、これから被着体の厚さを差し引いて求めた。この測定にはマイクロメータを用い、試験片は全体を満遍なく計21点、被着体は四隅と中心近傍の5点の厚さを測定した。そもそも被着体の厚さは極めて均一であった。また接着剤層については、ガラスビーズを接少量混入し、その厚さをコントロールした。したがって、接着剤層の厚さも比較的均一であった。さらに、求めた4つの被着体厚さおよび接着剤厚さを平均してその代表値とした。

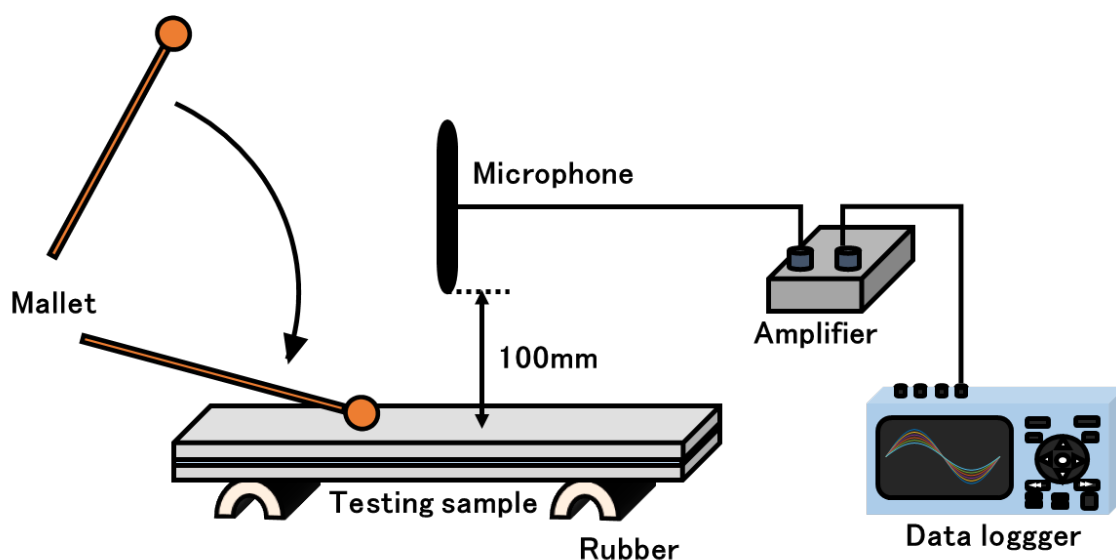


Fig.2 Experimental set-up for testing sandwich beams bonded adhesively

3. 2 実験結果

Fig.3に接着剤厚さを変えた試験片の打撃音の周波数分布を示す。ここでは5次の固有振動モードまで記載している。また、図中の縦線は2.1節で示したMeadらの方法により求めたn次の固有振動周波数である。両者は良い一致を示しており、本研究で用いたMeadらの方法により接着サンドイッチビームの振動特性を高い精度で求めることが可能であることが分かる。

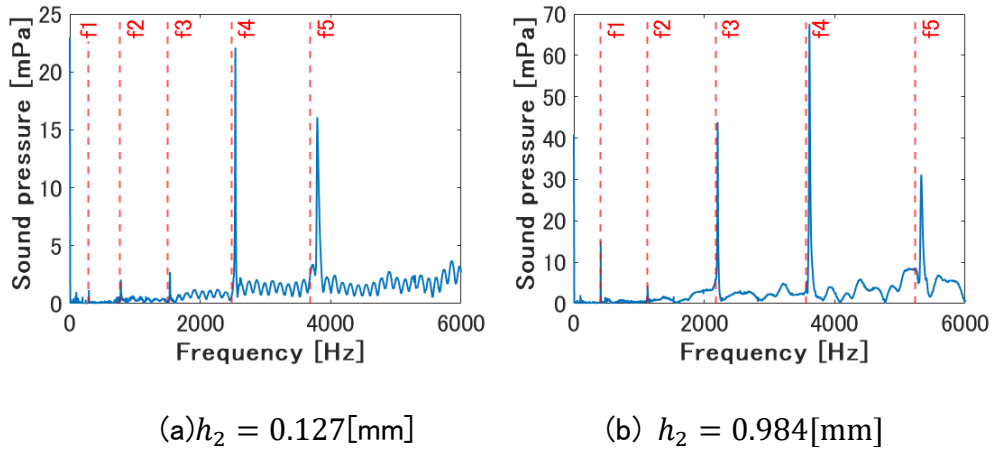


Fig.3 Frequency distribution of sandwich beams bonded adhesively having different thicknesses of adhesive layer

4. 接着剤層の厚さおよびヤング率の逆推定

4. 1 教師データの作成

2. 1節で示した Mead らの方法により, 接着剤層の厚さとヤング率の組み合わせを複数用意し, それぞれの固有振動数を5次まで求めて, 教師データセットを構築した。生成したデータセットは独立変数であるサンドイッチはりの接着剤層の厚さとヤング率が, 従属変数である5次までの固有振動数と紐づけされている。データ点の総数は 18200 とした。Table2に教師データの独立変数の種類, 変数の値域および刻み幅を示す。従属変数は1次から5次までの固有振動数(計 5 つ)である。このうち, 学習用データとしてその 60%を, 20%を検証用, 20%をテスト用とした。検証用のデータは, 構築したモデルを一時的に評価し, 過学習していないか, 並びに用いたモデルが適切かなどを判断するために使用するデータである。一方, テスト用データは, モデルを決定した後に, 構築した逆推定システムのロバスト性を評価するためのデータである。

Table 2 Detail of datasets for teaching, testing and verification

Parameters	Range	Step
Adhesive thickness (mm)	0.01–2.00	0.01
Young' s modulus (GPa)	1.00–10.0	0.100

データセットの要素を固有振動数と接着剤厚さに対してプロットしたものを Fig.4に、固有振動数と接着剤のヤング率に対してプロットしたものを Fig.5にそれぞれ示す。Fig.4を見ると、接着剤層が厚くなる、および固有振動数の次数が高くなるにつれ、周波数のレンジが広がっている。これは接着剤が薄い場合にはヤング率の値に関わらず固有振動数が決定しやすいが、これが厚くなる、もしくは固有振動数の次数が高くなるにつれて難しくなることを示している。また、Fig.5でも同様に、ヤング率ならびに固有振動数の次数が高くなるにつれて、ヤング率の推定に接着層厚さの影響が増していくことを示している。

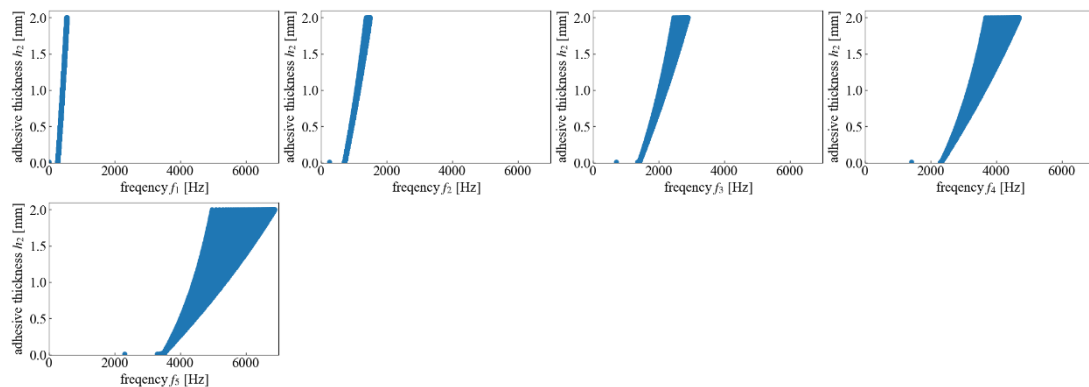


Fig.4 Data sets in a space between adhesive thicknesses and eigenfrequencies

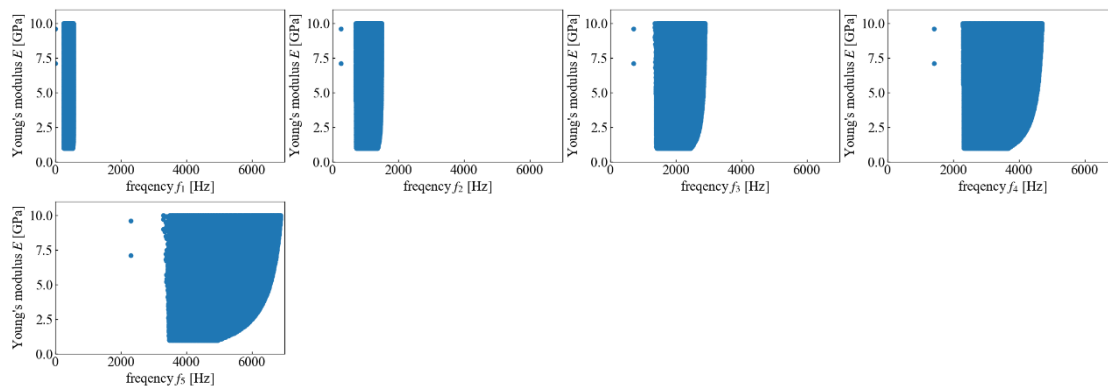


Fig.5 Data sets in a space between adhesive Young's moduli and eigenfrequencies

4. 2 勾配ブースティング決定木(GBDT)による逆解析

GBDT を用いて接着層厚さおよびヤング率の逆推定を行った。まず、接着層厚さの推定には 5 つの固有振動数およびヤング率を独立変数として予測モデルを構築した。同様にヤング率の推定には 5 つの固有振動数および接着層厚さを独立変数とした。この逆推定モデ

ルに、全データセットの20%であるテスト用データの固有振動数とヤング率、または固有振動数と接着剤厚さの組み合わせを入力し、その結果出力される接着剤厚さやヤング率の予測値を、テスト用データのそれに相当する値と比較した。なお、この逆推定予測モデルの精度評価には平均絶対誤差(MAE: Mean Absolute Error)および決定係数 R^2 を用いた。この結果を Fig.6および7に示す。さらに、この逆推定モデルに、実験的に得られた固有振動数を入力し、逆推定された接着剤厚さとヤング率を Fig.6および7に記すとともに、Table3に実測値と予測値の比較を示す。

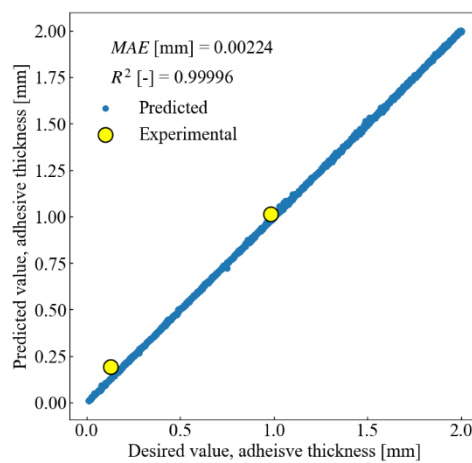


Fig.6 Relationship between desired and predicted values in adhesive thickness

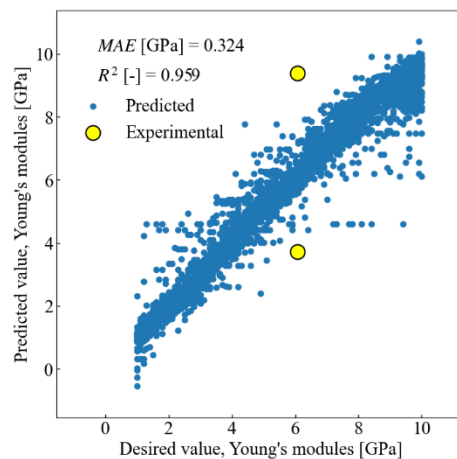


Fig.7 Relationship between desired and predicted values in Young's modulus

Table 3 Comparison between experimental data and prediction by inverse estimation

Index	Data type	Adhesive thickness (mm)	Young's modulus (GPa)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_5 (Hz)
1	Experimental	0.127	6.08	278	772	1520	2510	3740
	Predicted	0.191	3.71	-	-	-	-	-
2	Experimental	0.984	6.08	410	1130	2190	3570	5260
	Predicted	1.01	9.39	-	-	-	-	-

本逆推定システムは、数値計算だけの閉じた領域では、接着層の厚さおよびヤング率の逆推定が良好に実施できており、その決定係数は $R^2 = 0.900$ を超える高い精度を示した。特に接着層厚さの逆解析では非常に高い精度が得られた。この原因は、教師データの接着層厚さ h_2 と f_1 および f_2 の関係がばらつきの小さな“細い線状”の領域に止まっていることが挙げられる。すなわち、 f_1 や f_2 が決まると接着層厚さを高い精度で同定できる可能性がある。ただし、この線状の領域の幅と接着層厚さの同定精度との関係が定量的に明らかになっている訳ではない。

ヤング率の逆解析は接着層厚さより推定精度が劣る。これは、教師データのヤング率と f_1 および f_2 の関係が“太い線状”の領域に分布しているためと考えられる。実験結果と予測結果を比較すると、接着層厚さについては、高い精度の予測が可能であった。しかし、ヤング率では、傾向の一致はみられるものの、その推定精度はやはり高くなかった。しかし、このように数値計算で求めた教師データを用いた逆推定システムでも、実験的に求めた打撃音の固有振動数から、接着層の厚さおよびヤング率を概ね推定できることが分かった。

4. 結論

本研究では接着サンドイッチビームをとりあげ、その接着剤層の厚さとヤング率を打撃音より推定する手法について検討した。まず、接着サンドイッチビームの振動に対して Mead らの方法を適用してその固有振動数を求めた。この結果は実験結果と良好な一致を示しており、本理論が接着サンドイッチビームの振動を高精度に予測できることが分かった。

次に接着剤の厚さとヤング率に対して、多数の組み合わせを用意し、その固有振動数を求め、教師データを作成した。また、この教師データを用いて GBDT モデルを構築し、周波数分布から接着剤層の厚さとヤング率を逆推定するモデルを構築した。この逆推定モデルの精度を検証したところ、高い精度を有することが分かった。さらに実験的に得られた固有

振動数をこの逆推定システムに入力したところ、試験片の接着剤厚さを正確に推定できることが分かった。しかし、ヤング率の正確な推定は比較的難しかった。

本研究では、実際の接着試験片とは形状の異なる接着サンドイッチビームをとりあげている。その形状はDCB試験片と似ているが、実際には異なっているので、今後の検討により接着試験片へ適用可能な理論を構築する必要がある。具体的には、DCB試験片端部のプリクラック部に対しては弾性率を零にする、もしくはプリクラック部の被着体重量を境界条件として与えるなどの方法が考えられる。

このように、今の段階では実際の接着試験片形状への適用は難しいものの、少なくとも接着サンドイッチビームに対しては、その接着剤層の厚さを打撃音より簡易に推定することが可能である。ただし、ヤング率の推定については更なる改善の余地が残る。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP14014)の結果得られたものです。

文献

- 1) 竹内文人, 日本ゴム協会誌, **8**, 249, (2016).
- 2) American Society for Testing and Materials. Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials. ASTM International, (2017).
- 3) M. K. Edward, The Journal of the Acoustical Society of America, **952** (1959).
- 4) A. S. Sayyad, and M.G. Yuwaraj, Composite Structures **171**, 486 (2017).
- 5) D. J. Mead, S. Markus, Journal of Sound and Vibration, **10**, 163 (1969).
- 6) D. N. Mai, Communications in numerical methods in engineering **22**, 627 (2017).
- 7) J. H. Friedman, The Annals of Statistics, **29**, 1189, (2001).
- 8) P. Li. arXiv preprint arXiv:1203.3491, (2012).
- 9) R. Matthew, D. Ewa, and R. Robert, In Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web, 521, (2007).
- 10) K. Watanabe, T. Kaneko, Information Processing Society of Japan The 22nd Game Programming Workshop 2017, 158, (2017).
- 11) H. Tatsuta, et al., Intelligence Informatics and Infrastructure ,**1**, 63 (2020).
- 12) S. Shimazaki, Q. Shi and S. Ando, Transactions of the JSME (in Japanese), **88**, 1, (2022).
- 13) K. Guolin et al., 30st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), (2017).
- 14) L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, and C. J. Stone, Classification and Regression Trees, Wadsworth, (1984).
- 15) T. Chen, C. Guestrin, KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785, (2016).