

# 非接触式レーザー変位計を用いた 非破壊試験における 欠陥探査装置の製作および実験

森山 夏輝<sup>1</sup>・岸田 真幸<sup>2</sup>・倉橋 貴彦<sup>3</sup>・村上 祐貴<sup>4</sup>・池田 富士雄<sup>5</sup>・井山 徹郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 長岡技術科学大学 機械創造工学課程

(Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology)

<sup>2</sup> 長岡技術科学大学大学院 技学イノベーション専攻

(Department of Science of Technology Innovation, Graduate School of Nagaoka University of Technology)

<sup>3</sup> 長岡技術科学大学大学院 機械創造工学専攻

(Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Nagaoka University of Technology)

<sup>4</sup> 環境都市工学科

(Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Nagaoka College)

<sup>5</sup> 機械工学科

(Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Nagaoka College)

Development and experiment of a defect detection machine  
for non-destructive inspection using a non-contact laser displacement meter

Natsuki MORIYAMA<sup>1</sup>, Masayuki KISHIDA<sup>2</sup>, Takahiko KURAHASHI<sup>3</sup>,  
Yuki MURAKAMI<sup>4</sup>, Fujio IKEDA<sup>5</sup> and Tetsuro IYAMA<sup>5</sup>

## Abstract

In recent years, the deterioration of social infrastructure has become problems in Japan. There are concerns about an increase in serious accidents. The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism has announced the whole inspection of infrastructures, which is necessary to be inspected at high speed. Thus, this study aims to develop the impact testing machine using a non-contact laser displacement meter. Internal defects are estimated by mechanically impacting the surface and measuring the displacement of the surface with the non-contact laser displacement meter. The machine was used to conduct impact tests on spring test pieces and simple beams. The results showed the validity of the machine.

**Key Words** : *Non-destructive inspection, Hammering test, non-contact laser displacement meter.*

## 1. 序論

近年、日本では高度経済成長期に建設された道路橋やトンネルなどの社会インフラの老朽化が進行している。老朽化が進むことによって、2012年12月に発生した笹子トンネル崩落事故<sup>1)</sup>に代表されるような重大事故増加の懸念がある。国土交通省から橋梁等の総点検が打ち出されており、高速かつ高精度な検査が求められている。非破壊検査手法として打音検査がある。これは、点検者が構造物を検査用ハンマで叩き、打撃音の清濁で構造物の状態を評価する手法である。この検査手法は操作が簡便であるためコンクリート構造物の点検に幅広く用いられている。しかしこの検査は点検者が打音の清濁を聞き分ける官能試験である。そのため、点検者の熟練度に依存するという問題がある。さらに、点検者が侵入できない場所が存在する問題もある。

このような問題を解決するために、小型の打撃試験装置により機械で打撃試験を行う研究が進められてきた。今までは加速度センサ<sup>2)</sup>や音響センサ<sup>3)</sup>によって打撃応答を取得していたが、非接触レーザ変位計を用いることでさらに高速で検査することができると考えた。本研究では、非接触レーザ変位計を用いて機械で打撃試験を行うことを目的とする。

## 2. 非接触式レーザ変位計を用いた打撃試験装置

### 2. 1 打撃試験装置の構成と動作

本研究で開発する打撃試験装置の動作の流れを図-1に示す。青枠で囲われたものが打検部である。マイコンによりソレノイドを制御し、ソレノイドで検査対象を打撃する。その表面変位をレーザ変位計で読み取り、センサ出力をオシロスコープ上に表示させ内部欠陥の有無を推定する。打撃をソレノイドで行うことで、電圧によって打撃力の制御ができ、常に一定の打撃力で試験することができる。また、今回は簡便に製作するために検査対象をABS樹脂とした。

### 2. 2 製作した装置と設計仕様

実際に製作した装置を図-2に、装置の二次元図面を図-3にそれぞれ示す。またこの装置の設計仕様を表-1に示す。本体を動かさずに打検部を可動できるようにリニアガイドを用いた。また、後述する単純はりの長手方向の大きさを200mmにするため今回の装置は図-3

に示すサイズで設計した

(580 mm × 131 mm × 152 mm)。打撃による装置の浮きを抑制するため両脚部に打撃力より十分に重量のあるおもりを装着した。

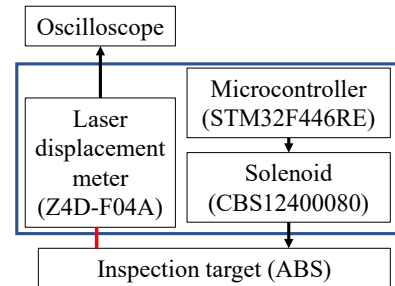


図-1 打撃試験装置の動作

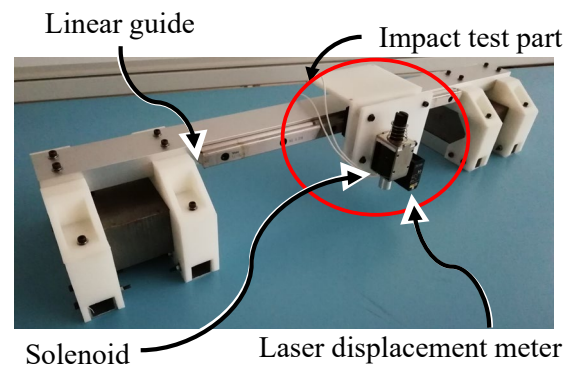


図-2 開発した打撃試験装置

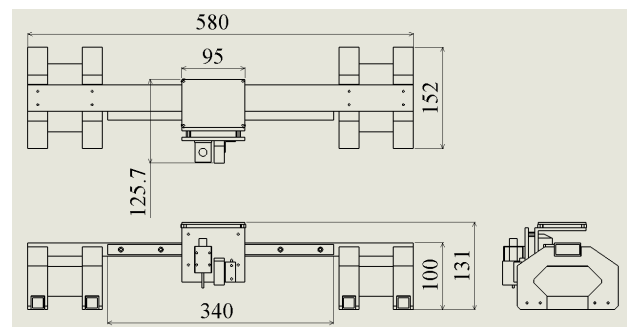


図-3 開発した打撃試験装置の二次元図面

表-1 設計仕様

打検部の移動範囲	[mm]	245
打撃力	[N]	15
設置部寸法	[mm]	142×111
レーザセンサ		Z4D-F04A
ソレノイド		CBS12400080
マイクロコントローラ		STM32F446RE

### 2. 3 回路

本装置の実験用回路の概略図を図-4 に示す。この回路は、マイコン (Nucleo STM32F446RE)、レーザ変位計 (Z4D-F04A)、昇圧モジュール (NJW4131)、制御用基板から構成されている。レーザ変位計からの出力電圧をオシロスコープ (DS1104Z plus) で読み取ることにより打撃時の変位を測定する。

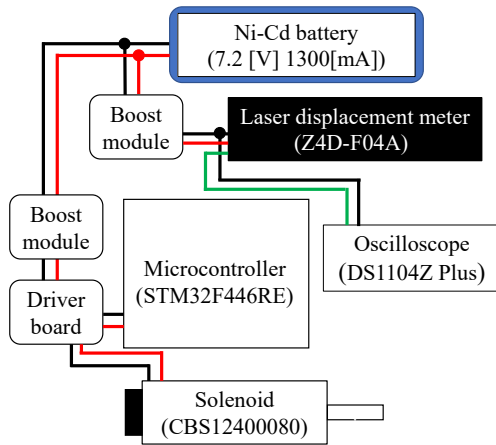


図-4 実験用回路

### 2. 4 実際の現場への適用例

この装置の打撃試験対象としては、橋梁遊間部を想定している。想定している適用方法の手順を以下に示す。

- ・実際の現場で試験を行う前に、用意した欠陥の無い健全対象物体で打撃試験を行い、最大たわみ量からヤング率を求め、たわみ曲線を作成する。
- ・実際の現場に移動し、装置の脚部を橋梁遊間部に固定する。
- ・打検部に装着されたアクチュエータで自走して打撃試験を行い、たわみ曲線を作成する。
- ・事前に用意したたわみ曲線と比較し、欠陥有無と位置を推定する。

### 2. 5 たわみ量とヤング率の関係

2. 4 で述べた対象物体のたわみ量とヤング率の関

係を導出する。本研究では対象物体を両端固定単純はりとする。図-5 に中央荷重がかかる両端固定単純はりのモデルを示す。以下にはりのたわみの微分方程式を示す。ここでたわみを  $v$ 、ヤング率を  $E$ 、任意の位置  $x$  の曲げモーメントを  $M_x$ 、打撃力を  $F$ 、断面二次モーメントを  $I$ 、はりの長さを  $L$  とする。

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M_x}{EI} \quad (1)$$

荷重と支点反力を考えた任意の位置  $x$  の曲げモーメント  $M_x$  は以下のように表すことができる。

$$M_x = \frac{F}{8}(4x - L) \quad (2)$$

式 (2) を式 (1) に代入し積分する。任意の位置  $x$  のたわみ  $v_x$  とヤング率  $E$  の関係は以下のとおりである。

$$v_x = \frac{FLx^2}{24EI} \left( \frac{3}{2} - \frac{2x}{L} \right) \quad (3)$$

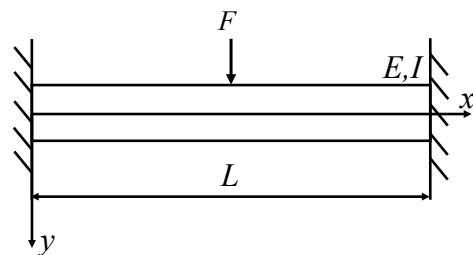


図-5 中央荷重がかかる両端固定単純はり

### 2. 6 たわみ曲線を表す式の導出

2. 4 で述べたたわみ曲線を表す式を導出する。図-6 に任意の位置に集中荷重がかかる両端固定単純はりのモデルを示す。荷重と支点反力を考えた AC 間の曲げモーメント  $M_{AC}$  は以下のように表すことができる。ここで端面 A から打撃位置 C までの距離を  $a$ 、打撃位置 C から端面 B までの距離を  $b$ 、AC 間のたわみ量を  $v_{AC}$  とする。

$$M_{AC} = \frac{Fb^2}{L^3} \{ (3a + b)x - aL \} \quad (4)$$

式 (4) を式 (1) に代入し積分する。AC 間の任意位置のたわみ量  $v_{AC}$  は以下のとおりである。

$$v_{AC} = \frac{Fb^2x^2}{6EIL^3} \{3aL - (3a+b)x\} \quad (5)$$

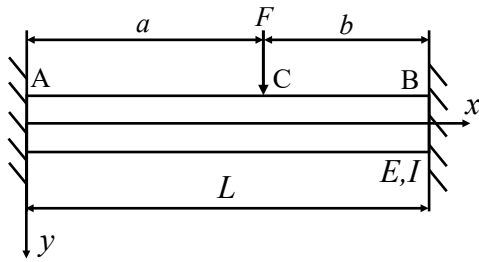


図-6 任意の位置に荷重がかかる両端固定はり

### 3. センサとソレノイドの性能評価

#### 3. 1 レーザセンサの性能評価

レーザセンサの出力電圧を変位に換算する関係式を立てるために、実際のセンサを用いて次のような実験を行った。実験のために製作した器具を図-7に示す。

図-7に示した器具についての板とセンサの距離をノギスで測定し、その時の電圧をオシロスコープで測定することで距離と電圧の関係を調べた。

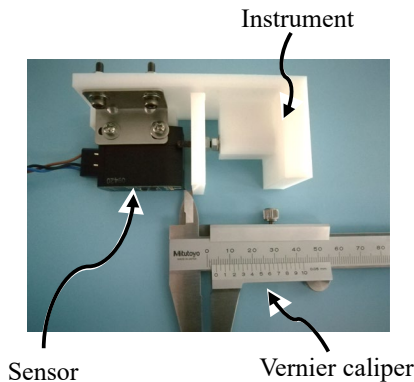


図-7 製作した器具

実験結果を図-9に示す。この結果からセンサの出力電圧を変位に換算する式は以下ようになった。ここで距離を  $d$ 、電圧を  $V$  とする。

$$d = \frac{V + 4.24}{1.83} \quad (6)$$

#### 3. 2 ソレノイドの性能評価

ソレノイドでの打撃力を確認するために電子バネ秤

を用いて打撃力の参考値を取得した。実験の概略図を図-8に示す。図-8(a)ではソレノイドに連続通電し電子バネ秤に押し付けた。図-8(b)ではソレノイドに連続通電し電子バネ秤を引っ張った。そして、ソレノイドが引っ込んだ時の質量を打撃力の参考値とした。

実験結果として、二つの方法で同じく打撃力  $F = 15 \text{ N}$  という結果を得た。この結果は参考値であるが、同じ実験方法で同じ結果が得られているためこの値を今回の装置の打撃力とする。また、ソレノイド (CBS12400080) のデータシートから値に問題がないことを確認している。

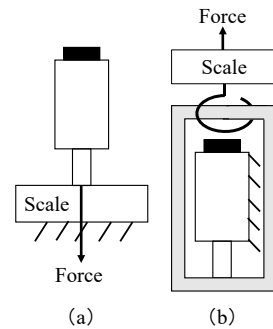


図-8 ソレノイドの性能評価実験の概略

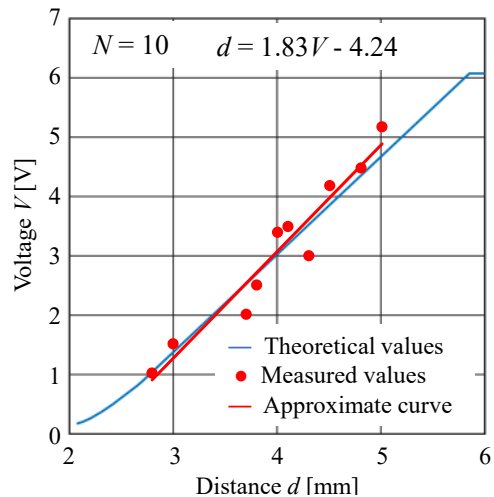


図-9 センサの電圧特性

### 4. 開発した装置での打撃試験

開発した打撃試験装置を用い、バネを使った試験片での打撃試験と、実際の問題を想定し単純はりでの打撃試験を行う。この結果から開発した装置の性能評価

を行う。

#### 4. 1 バネを使った試験片での打撃試験

図-10 にバネを使った試験片を示す。今回の実験では 2 種類のバネを用意して試験を行った。図-11 に試験の概略図を示す。

試験の手順は以下の通りである。

- ・打撃試験装置、オシロスコープの電源を入れる。
- ・ソレノイドの直下にバネ付き試験片を設置しクランプで固定する。
- ・打撃前の距離によるセンサの出力電圧を記録する。
- ・ソレノイドで試験片を打撃し、打撃時の出力電圧を記録する。
- ・式 (6) より打撃前と打撃時の電圧差を変位に換算する。
- ・以下に示すフックの法則から性能評価を行う。ここで打撃を  $F$ 、バネ定数を  $k$ 、変位を  $u$  とする。

$$F = ku \quad (7)$$

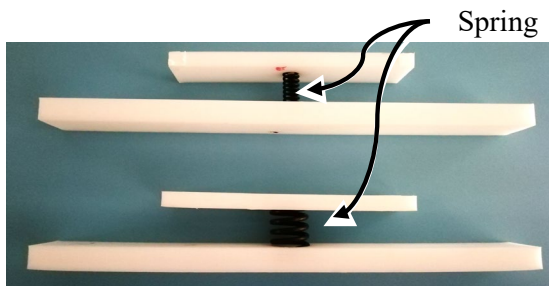


図-10 バネを使った試験片

図-12 にバネ付き試験片での試験の様子を、表-2 にソレノイドの打撃力から求めた理論値とバネ付き試験片での試験結果をそれぞれ示す。この結果から、理論値と打撃時の変位量がほとんど変わらないため、この試験装置が妥当であると言える。

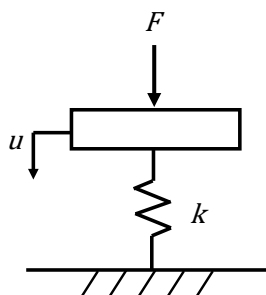


図-11 バネ付き試験片を用いた打撃試験の概略

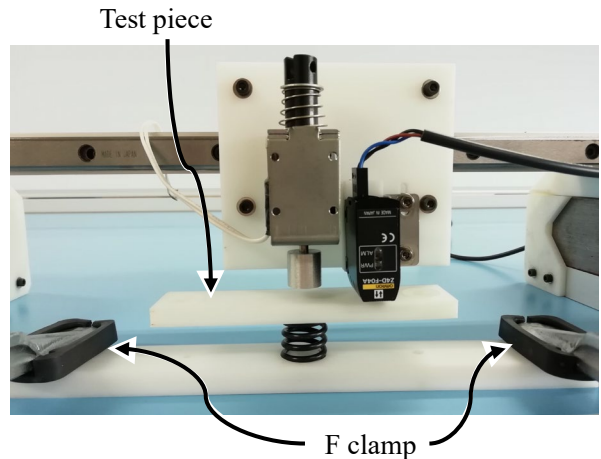


図-12 バネ付き試験片での打撃試験

表-2 バネ付き試験片を用いた打撃試験結果

バネ定数 [N/mm]	打撃力 [N]	変位[mm]	
		理論値	測定値
6.8	15	2.06	1.95
17.7		0.79	0.87

#### 4. 2 単純はりでの打撃試験

2. 4 で述べた現場への適用方法の検証をするために一連の試験を行った。今回は簡便に行うために、検査対象を 3D プリンタ (Zortrax M200) で製作した。図-13 に使用した 3D プリンタを示す。素材は ABS 樹脂に物性値が似ているフィラメント (Z-ABS) を使用した。表-3 に 3D プリンタと材料の仕様を示す。なお、ヤング率  $E$  の値は ABS 樹脂の物性値<sup>4)</sup>である  $E = 1.54 \sim 2.32$  GPa を参考にする。



図-13 Zortrax M200

表-3 3Dプリンタと材料の仕様

3Dプリンタ		熱溶解積層型
積層ピッチ	[mm]	0.09
充填率	[%]	100
材料		Z-ABS
ヤング率	[GPa]	1.54~2.32

図-14 に製作したはりの概略図を、表-4 に製作したはりの設計定数をそれぞれ示す。ここで欠陥位置を  $x_d$ 、ヤング率を  $E$ 、はりの長さを  $L$ 、はりの断面寸法を  $a$ 、欠陥の長さを  $l$ 、欠陥の断面寸法を  $b$  とする。

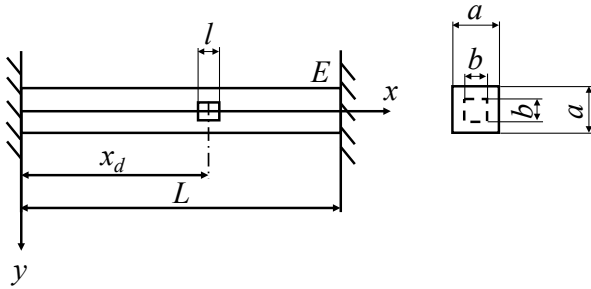


図-14 はりの概略図

表-4 はりの設計定数

欠陥位置	$x_d$ [mm]	50, 100, 120
ヤング率	$E$ [GPa]	1.8
はりの長さ	$L$ [mm]	200
はりの断面寸法	$a$ [mm]	10
欠陥の長さ	$l$ [mm]	13
欠陥の断面寸法	$b$ [mm]	8.49

試験の手順は以下の通りである。

- ・欠陥が無い健全はりを用意し両端固定する。
- ・中央を打撃し、たわみ量  $v$  からヤング率  $E$  を推定する。
- ・複数個所を打撃し、たわみ曲線を作る。
- ・欠陥不明のはりで打撃試験を行い、たわみ曲線を作成し欠陥位置を推定する。

図-15 に単純はりでの打撃試験の様子を示す。欠陥が無い健全はりを打撃して得られたセンサ位置 ( $x=80$  mm) のたわみ量  $v$  は  $0.349$  mm となった。このたわみ量と式 (3) からヤング率  $E$  は  $1.80$  GPa と推定できる。表-3 に示した ABS の物性値の範囲に入っているためこの値は概ね正しいものと考えられる。図-16 に打撃前後のセンサ出力のグラフを示す。このグラフから打撃後の振動がほとんど存在せず、センサ出力に若干のノイズがあることがわかる。

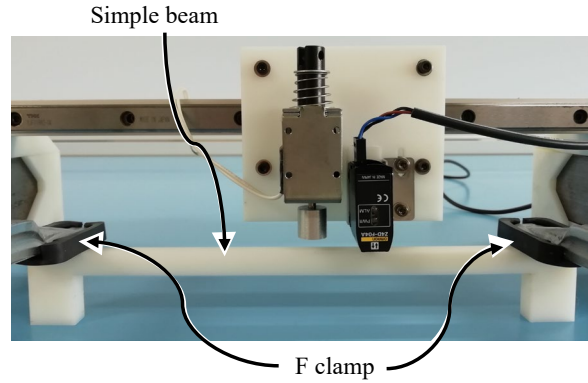


図-15 単純はりでの打撃試験

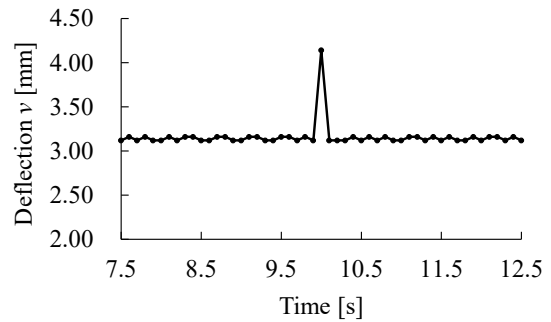


図-16 打撃前後のセンサ出力

欠陥が無い健全はりを打撃試験して得られたたわみと式 (5) で算出したたわみ曲線を図-17 に示す。この図から試験で得られたたわみと理論式から算出したたわみがほぼ合致しているため、この装置によって単純はりの打撃試験ができていることがわかる。

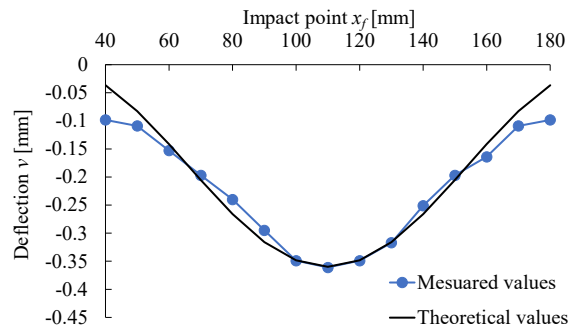


図-17 健全はりの打撃試験結果と理論値

欠陥が無い健全はりを打撃試験して得られたたわみと欠陥をそれぞれ 50, 100, 120 mm の位置につけたはりで打撃試験して得られたたわみを図-18 に示す。欠陥が無い健全はりのたわみとそれぞれの欠陥位置で得られたたわみの誤差を2乗したグラフを図-19 に示す。図-18 から欠陥が無い健全はりと欠陥があるはりのた

わみ量を見比べると、欠陥があるはりのたわみ量の方が大きい。このことから欠陥の有無があることが推測できる。また、図-19 から欠陥が存在する位置の周辺に大きな誤差が生じている。このたわみ量の誤差から欠陥があることが推測できる。このことから、この装置により欠陥の位置推定ができることがわかる。

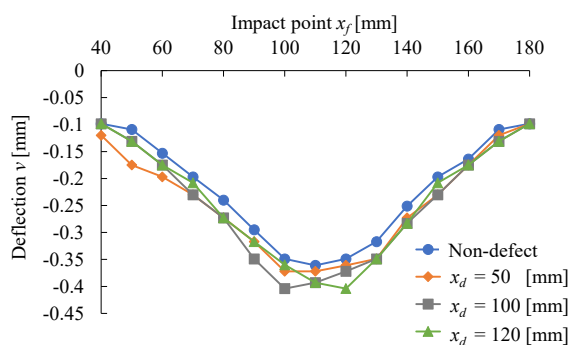


図-18 健全はりとはりがあるはりの打撃試験結果

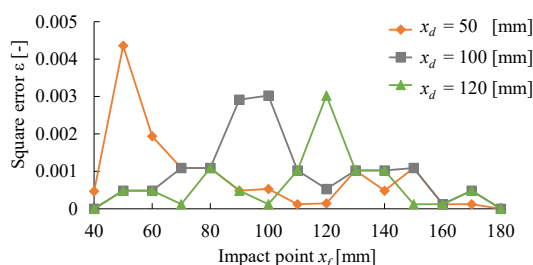


図-19 理論値と測定値の誤差の2乗値

## 5. 結論

本研究では、従来の打撃試験の問題点を解決するために、非接触レーザ変位計を用いた打撃試験装置を開発した。開発した装置に使った部品の性能評価を行ったどのような特性があるのかを調査した。また、開発した装置を用いてバネを使った試験片と欠陥の有無と位置を変更した単純はりでの打撃試験を行った。結果としてバネを使った試験片では理論値とほぼ同様な変位を読み取ることができた。また、欠陥が無い健全単純はりから理論式によりヤング率を求めることができた。そして、実験から単純はりの欠陥位置の推定ができた。

しかしながら、本研究の打撃試験に用いたはりの欠陥はサイズが非常に大きく、材料はコンクリートよりヤング率が低いものを使用している。そこで今後の課題として、実際のコンクリート構造物に適用させるた

めに打撃力の強化を行うことが挙げられる。また、より精度よく打撃試験を行うために分解能がさらに高いレーザ変位計に変更することも挙げられる。そして、遊間部などでも打撃試験を行うことができるように打撃部が自走できるようなアクチュエータを装着することが挙げられる。

**謝辞：**本論文を執筆するにあたり、国立研究開発法人科学技術振興機構A-STEPトライアウト「自己組織化マップにより形式知化された打音点検技能に基づく技能獲得プロセスのDX化」に関する経費による援助を受けた。また、本試験装置を製作するにあたり、本研究内外の先輩方のご助力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：“トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書”，2013.
- 2) 高橋和也，池田富士雄，志田爲御，林充輝，村上祐貴，外山茂浩，倉橋貴彦：“橋梁遊間部を対象とする打音点検システムの改良”，日本機械学会年次大会講演論文集，2019.
- 3) Masaya Iwata, Yuji Kasai, Ching-Tzun Chang, Takashi Okuma, Yusuke Nozoe, Sota Takatsu, Yuichi Kubota, and Masahiro Murakawa：“AI-aided Hammering Test System to Automatically Generate Anomaly Maps”，Sensors and materials Vol. 31 No. 10, pp3087-3098, 2019.
- 4) 山口章三郎：“JIS 使い方シリーズ 新版 プラスチック材料選択のポイント 第2版”，日本規格協会，pp438-439, 2003.

(2021.8.19 受付)