

高性能レーザ変位計を用いた鋼部材の損傷検出に関する研究

Study on Damage Evaluation of Steel Member by High-performance laser displacement meter

北見工業大学 学生員 ○池田貴大(Takahiro ikeda)
北見工業大学 フェロー 大島俊之(Toshiyuki Oshima)

北見工業大学 正員 三上修一(Shuichi Mikami)
北見工業大学 正員 宮森保紀(Yasunori Miyamori)
北見工業大学 正員 山崎智之(Tomoyuki Yamazaki)

1. まえがき

わが国において、戦後の復興とその後の高度経済成長期に非常に多くの社会基盤施設を作ってきた。これらの多くの社会基盤施設は建設後数十年を経過しており、現在では何らかの損傷が生じているものが多くなりつつある。また、損傷に起因した性能限界を越える構造物が増加していると思われる。今後これらの社会基盤施設の維持管理や建設には多額の費用がかかると予想される。現実的にはわが国の経済成長率や財政状況から考えると供用年を越えている全ての橋梁を架け替えることは困難であり、構造物の維持・補修により長寿命化を目指すことが非常に重要な課題である。このような背景から構造物の維持・補修を行う時期を検討することが重要であり、損傷度の把握および健全度の判定方法を確立することが必要だと考えられる。

本研究は鋼構造部材の損傷について構造部材を局部加振させることにより、高性能レーザ変位計を用いることで局部加振をすることにより部材自体の振動特性の変化を捉えることで損傷位置決定を行うものである。

2. 局部加振実験概要

2.1 実験器具および供試体

(1)実験供試体

本実験で使用した供試体を図-1に示す。供試体はフランジ 360×19×2090mm, ウェブ 390×12×2090mm を溶接で固定した T 型鋼材の供試体を使用した。また、供試体の左右両側に設置された支柱には溶接で固定された L 字型支持板が配置され、この L 字型支持板と T 型鋼端部をボルト 8 本(片側 4 本)で接合し、供試体を支持している。T 型鋼は支持板により支えられており、両側に配置されている支柱とは接触していない。本研究における仮想損傷状態をフランジとウェブの接合の一部に長さ 200mm の溶接不良を図-2の通り設けた。

(2)実験装置

高性能レーザ変位計の特徴は供試体に接触することなく、表面振動を計測できる点である。加速度計を接着固定できない塗装劣化が激しい鋼材等でも振動計測が可能である。以降、高性能レーザ変位計を変位計と呼ぶ。本実験で使用した変位計の性能を表-1に示す。本実験での変位計の性能を確認するため、圧電型加速度計を併用

して計測を行った。アクチュエータ動作部はアクチュエータが振動する時の加振波形を作成するファンクションジェネレータ、ファンクションジェネレータから出力される電圧を増幅させるピエゾドライバーおよび加振機となる積層圧電アクチュエータから構成される。¹⁾

表-1 高性能レーザ変位計の性能

測定範囲	±5mm
光源	赤色半導体レーザー
波長	650nm(可視光)クラス3R (JIS C6802)
出力	最大4.8mW
スポット径(基準距離にて)	約30×850 μm
直線性	±0.05% of F.S.(F.S.=±5mm)
繰り返し精度(分解能)	0.05 μm(0.01 μm)
サンプリング周波数	20/50/100/200/500/1000 μs

2.2 実験方法

本実験は積層圧電アクチュエータで鋼材供試体を加振させた。アクチュエータおよび変位計のレーザ照射位置を図-2に示す。アクチュエータの位置は加振力が効率よく反映されるようフランジ中央を避け端部とした。本実験では 800Hz 程度までの周波数領域を対象とするためサンプリング周波数を 1600Hz としている。ファンクションジェネレータはスタート周波数とストップ周波数を設定して周波数を直線的に連続変化させる sin 波出力が可能であり、本研究ではこの出力による加振方法をスイープ加振と呼ぶことにする。本実験ではスタート周波数 0.1Hz, ストップ周波数 400Hz, 加振時間 15 秒, 収録時間を 20 秒とし振動測定を行った。変位計は固定台の関係よりフランジ下面にレーザを照射し計測を行った。変位計は数量が限られており、11ヶ所の測点を一度に計測することができないため、一回の実験で、レーザ変位計の測点位置を順次移動させることにより全測点を計測するものとした。また、測点1の変位計を固定し、変位計を移動することにより生じる各測点の時刻のずれを同期することができるよう考慮している。変位計により測定されたスイープ加振による変位時刻歴波形および同測点の加速度時刻歴波形を図-3, 図-4に示す。

3. PSD による損傷検出の概略²⁾

3.1 PSD について

PSD(パワースペクトル密度)はスイープ加振により得られた測点の変位時刻歴データから MATLAB, MATLAB

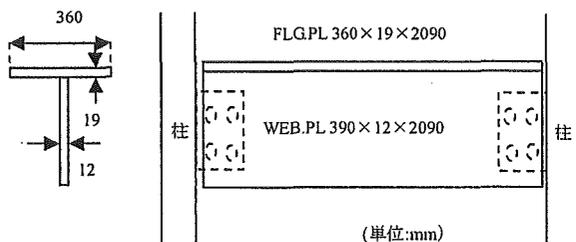


図-1 実験供試体概略図

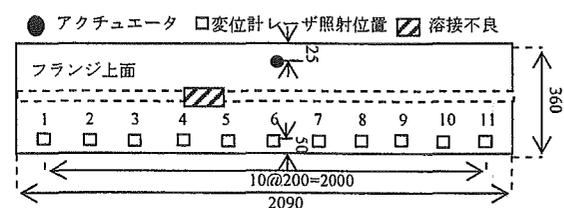


図-2 実験装置設置位置

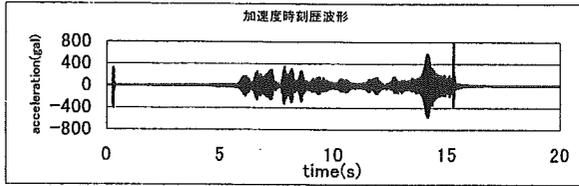


図-3 加速度時刻歴波形

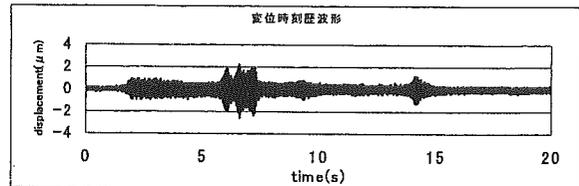


図-4 変位時刻歴波形

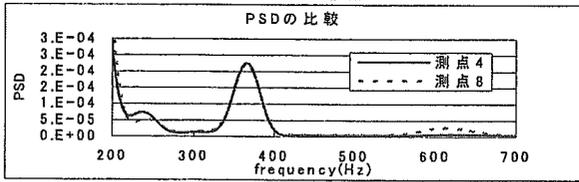


図-5 PSDの測点4と測点8の比較

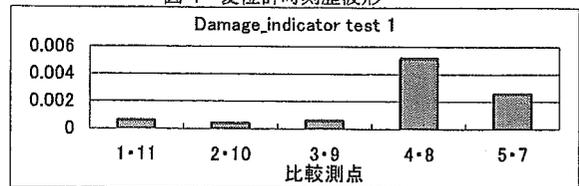


図-6 Damage_indicator test 2

Signal Toolbox PSD(x(t),NFFT,Fs,Window) より算出した。PSD は x(t)で指定された SPECTRUM オブジェクトを使って離散信号ベクトルのパワースペクトル密度推定を含むプロパティをもつ PSD オブジェクトを出力できる。Fs はサンプリング周波数である。NFFT はパワースペクトル密度を計算するために使われる FFT 点数である。Window は窓関数を指定するものであり、本研究ではハニングウィンドウを用いた。この解析では、NFFT=256, Fs=1600 としている。

3.2 PSD を用いた損傷検出

PSD を用いるにあたり、供試体中央より対称な測点 2 点(例えば、測点 1 と測点 11)の PSD の大きさの違いを検討することにする。

$G_i(f)$ は測点 i の $G_i^*(f)$ は測点 i と対称となる測点の PSD の大きさを表し、その差の絶対値を $D_i(f)$ とする。各測点の振動数 f_1 から f_m までの PSD の変化をマトリックス[D]に示す。また、各測点の PSD の変化の合計値を Total_Change とする。n は比較する測点の数である。

$$D = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_1(f_2) & \dots & D_1(f_m) \\ D_2(f_1) & D_2(f_2) & \dots & D_2(f_m) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \dots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \quad \text{Total_Change} = \begin{bmatrix} \sum_f D_1(f) \\ \sum_f D_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f D_n(f) \end{bmatrix}$$

マトリックス[D]において各列の最大値を抜き出したものをマトリックス[M]とする。マトリックス[M]において、最大値 $M_n f_m$ を 1 に置き換えたものをマトリックス[C]とする。

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2(f_2) & 0 & \dots & 0 \\ M_3(f_1) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & M_4(f_2) & \dots & M_5(f_m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

測点 i におけるマトリックス[M][C]の各周波数の合計値をそれぞれ SM, SC とする。ノイズの影響や測定誤差を軽減するために、SM,SC の標準偏差 σ, λ を算出し、SM, SC から引いたものをそれぞれ SMD1,SCD1 とする。

$$SMD1 = \begin{bmatrix} \sum_f M_1(f) - \sigma \\ \sum_f M_2(f) - \sigma \\ \vdots \\ \sum_f M_n(f) - \sigma \end{bmatrix} \quad SCD1 = \begin{bmatrix} \sum_f C_1(f) - \lambda \\ \sum_f C_2(f) - \lambda \\ \vdots \\ \sum_f C_n(f) - \lambda \end{bmatrix}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SM(i) - \overline{SM})^2}{n-1}}, \overline{SM} = \frac{\sum_{i=1}^n SM(i)}{n}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SC(i) - \overline{SC})^2}{n-1}}, \overline{SC} = \frac{\sum_{i=1}^n SC(i)}{n}$$

SMD1 と SCD1 の積により、Damage_indicator が算出される。

$$\text{Damage_Indicator} = \begin{Bmatrix} SMD1(1) \times SCD1(1) \\ SMD1(2) \times SCD1(2) \\ \vdots \\ SMD1(n) \times SCD1(n) \end{Bmatrix}$$

Damage_indicator により損傷位置の決定を行う。

4. Damage_indicator による損傷位置決定

本研究では測点 1,2,3,4,5 を損傷状態、7,8,9,10,11 を健全とし、変位データを用いて解析を行った。図 5 は例として測点 4 と測点 8 の PSD の比較を示した。測点低周波数帯および高周波数帯のノイズの影響を考慮し周波数 375Hz から 700Hz に限定して算出した Damage_indicator を図-6 に示す。測点 4 と測点 8 を比較した 4・8 が他の測点の比較よりも大きな値を示しめしており、損傷付近の測点に影響が現れていることがわかる。健全状態の振動データが不明である部材においても損傷位置決定を行える可能性を示す結果を得られた。

5. 今後の課題

高性能レーザ変位計による損傷判定を行うにあたり、使用する環境に注意しなければならない。地盤振動が大きく影響すること、また、加速度計と異なり、固定器具を用意しなければならない、その固定器具によっては変位データを計測する際に容易にドリフト、トレンドが混入する。なるべく以上のものを取り除くことが望ましく固定器具をはじめとする計測環境の改善をする必要がある。また、レーザ変位計の特徴を活かせる損傷判定を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 山崎智之 大島俊之 大西功基 三上修一 : 局部加振による鋼材接合部の損傷評価に関する研究 応用力学論文集 vol.5, pp837-846, 2002
- 2) Sherif Beskhyroun, Toshiyuki Oshima, Shuichi Mikami and Tomoyuki Yamazaki: Structural damage identification algorithm based on changes in power spectral density Journal of Applied Mechanics Vol.8, pp73-84 August 2005