ホログラフィ干渉計測および 3 次元計測による薄肉構造部材の 非破壊検査法に関する研究

Non-destructive test of thin-walled structures by using holographic interferometry and
3D-optic system

松田 浩^{*1}・大石 裕介^{*2}・神原 天鳴^{*3}・仲村 政彦^{*4}・崎山 毅^{*5}

Hiroshi Matsuda, Yusuke Oishi, Takanari Kanbara, Masahiko Nakamura, Takeshi Sakiyama

^{*1}正会員 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*2}学生会員 長崎大学大学院生 生産科学研究科 環境システム工学専攻 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*3}非会員 長崎大学大学院生 生産科学研究科 環境システム工学専攻 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*4}正会員 日本構研情報(株) 福岡テクノセンタ (〒 812-0011 福岡市博多区博多駅前 1-7-22)

^{*5}正会員 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

A non-contact and portable 3D measurement system has been developed for measuring the three dimensional profiles of membrane and shell structures. By the present system, the surface profiles of twisted thin shells are measured, and free vibrations of finite element analysis are carried out by using measured 3D data. Their resonance vibration modes are obtained by forming a hologram on photographic plate, using the time-average method of holographic interferometry. In this study, it was examined about applicable possibility to the non-destructive test of thin-walled structures of 3D-optic measurement and holographic interferometry.

Key Words : 3D-optic measurement, holographic interferometry, non-destructive test, thin-walled structures

1. はじめに

船舶が定期的にドックに入り検査・修理が行なわれているように、橋梁などの建設構造物の維持管理においても定期点検を行い、欠陥を検知し、補修・補強が行なわれている。その際、欠陥の検知には種々の非破壊検査法が用いられている。例えば、表層部の欠陥検出には、目視試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験、電磁誘導試験、内部欠陥検出には、放射線透過試験、超音波探傷試験、AE 試験などが用いられている¹⁾²⁾。また、その他の非破壊検査法に分類されているひずみ測定においては、標点間または点の電氣的、機械的なひずみ計測、あるいは、光弾性実験法、光弾性被膜法、モアレ法などの全視野ひずみ計測技術が用いられている¹⁾。

ホログラフィ干渉計測は、全視野ひずみ計測技術の一つで、光の波長程度の小さな変形や変位、振動状態などを精度よく測定することができる³⁾⁴⁾⁵⁾。ホログラフィに関する研究は 1960 年代から活発になされていたが、比較的規模の大きな装置を必要とすること、またホログラムの記録媒体として写真フィルムを使用するため、記録と再生の間に時間を必要としリアルタイム計測ができないなどの理由により、非破壊検査としてはあまり用いられていなかった。しかし、ホログラフィ像や高解像度の CCD カメラによる画像の数値処理技術の進歩により、自動車や航空機産業において採用されるよう

になってきた。ホログラフィを利用した非破壊計測技術は、① 大面積(数 m²) 物体の欠陥(接着切れ、き裂、不均一)の直接的・全体的な可視化が可能、② 被検査面に特別の処理を必要とせず、また被検査物体への作用がない、③ 空間的高解像力、高感度、パルスレーザによる現場計測、自動化が可能、などの利点があるため、放射線透過法、サーモグラフィ、超音波などの非破壊検査法以上になるともいわれている⁴⁾。最近のコンピュータや周辺機器の高性能化と低価格化および画像処理技術の進歩により、その可能性はますます大きくなるものと考えられる。

筆者らは膜・シェル構造の形状計測のためにレーザ光と CCD カメラを用いた可搬型・非接触 3 次元計測装置を試作開発してきた⁶⁾⁷⁾⁸⁾。また、それにより得られる膨大な 3 次元座標情報を用いた形状計測⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾と大規模ソリッド要素による FEM 解析を実施している¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。さらに、このようにして得られる FEM 解析結果の信頼性と精度を検討するために、平板および曲面の振動実験を行ない、共振周波数およびホログラフィ干渉計測装置を用いた振動モードとを比較検討してきた。

本研究ではこれまでの研究成果を踏まえ、人工的な欠陥を有する試験片を製作して、ホログラフィ干渉計測による振動数と振動モードの変化及び 3 次元計測データを用いた FEM 解析による薄肉構造部材の非破壊検査への適用可能性について検討したものである。

写真-1 防振台上のホログラフィ装置

写真-2 加振装置

図-1 レーザホログラフィ装置の光学系

図-2 ホログラムの記録

図-3 ホログラムの再生

2. 振動実験, 3次元計測および FEM 解析

2.1 ホログラフィ干渉計測

振動実験は、写真-1に示すように、ホログラフィ干渉計測装置による振動モード測定のために、振動絶縁された防振台上の定盤上で行なった。固定治具に試験片を固定し、試験片の裏面からスピーカーで加振した(写真-2)。また、振動モード測定法には時間平均法を用いた。レーザホログラフィ干渉装置の光学系を図-1に、またホログラムの原理を図-2および図-3に示す。レーザから出た光をビームスプリッターによって二分割

し、物体光と参照光とする(図-2参照)。物体光、参照光ともにミラーにより方向を変え、エキスパンダに通し、その一方を振動している試験片に照射し、その反射光を物体光として写真乾板に照射する。もう一方は、参照光として直接写真乾板に照射し、両者を乾板上で干渉させる。これにより、試験片の振幅分布が干渉縞の等高線として現れるので、その様子を写真乾板にホログラムとして記録する。

ホログラムとして記録された物体の像を再生させるには(図-3参照)、参照光と同じ光をホログラムに照射すればよい。この光は再生参照光と呼ばれる。ホログラム

は細い干渉縞を記録した一種の回折格子であり、これに光を照射すれば、直進する光のほかに、別の方向に回折して進む光が生じる。回折光は再生光と呼ばれ、記録した物体光と全く同じ形をしている。

以上のような原理で、再生光が互いに干渉して加振された試験片の振動モード図が干渉縞として観察される。ホログラフィでは明るい部分が振動の節であり、振幅が大きくなるに従って縞本数が増加して表わされる。

2.2 三次元計測装置の概要

膜などの柔構造の形状計測を目的として非接触・可搬型の3次元計測装置を開発した。本計測装置はCCDカメラ1台とスポットレーザ投光器から構成され、図-4に示すように光切断法とも呼ばれるスリットレーザ投影法による計測も可能である。光切断法は、照射されたスリットレーザラインをCCDカメラにより撮影し、スリットレーザラインが対象物に投影している部分の画像座標値を取得し、取得した画像座標値を透視変換行列を

用いて三次元座標を算出する方法である。本計測装置はキャリブレーションなどの手間を省くため、写真-3に示すようにCCDカメラ1台とスポットレーザ投光器を同一盤上に一体化させてある。写真-4に計測風景を示す。三面からなる木枠はキャリブレーション用ボードである。

2.3 試験片概要

本実験では、平板6種類と曲面板2種類、合計8種類の試験片を使用した。図5に示すように、平板2～6および曲面板2には欠陥を想定して切欠き(幅1mm, 長さ20mm, 45mm), 開孔(直径10mm), 変形(ヘコミ)を付与している。平板1および曲面板1は欠陥のない健全な試験片である。平板試験片は長さ175mm, 幅90mm, 厚さ1mm, 曲面板試験片は長さ150mm, 幅90mm, 厚さ0.1mmであり、どちらもアルミ合金からなる。アルミ合金の材料定数はヤング率 $E = 71 \text{ GPa}$, ポアソン比 $\nu = 0.33$, 密度 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ である。

図-4 スリット計測

写真-3 計測装置

写真-4 計測風景

図-5 試験片

2.4 三次元計測データから FEM メッシュの作成手順

触針式 3D 計測器より得られた三次元座標データはデータ間隔が均一で、メッシュ分割は比較的簡単に得られる。レーザ光式 3D 計測装置により得られた三次元座標データはデータ数が多く、ノイズもあり、またデータ間隔が不均一なため、計測データをそのまま用いてメッシュ分割することは困難である。そのため、ここでは、以下に示すようにメッシュ分割プログラムを作成した。

(1) 目視によるノイズの削除

被計測物の形状が複雑になるにつれ、それに伴うノイズの削除も非常に難しい問題となる。現段階ではノイズ削除の自動化方法は構築しておらず、今回は目視によりノイズと判断したデータを削除した。スリット計測により数十万点の計測データが取得され、それには試験片以外のデータも含まれる。そのデータから試験片のデータだけを取り込む(図-6)。図-6は試験片部分の計測データ(約2万点)を示したものである。端部にノイズが見られ、これを除去して FEM メッシュを作成した。

図-6 本三次元計測器による計測データ

(2) データ間隔の均一化

本計測装置により得られた三次元座標データを xy 平面に投影し、 $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$ 間隔で z 座標を平均化することにより新三次元座標データを作成して、データの均一化を図る(図-7)。

図-7 均一化されたデータ

(3) FEM メッシュ分割

均一化された三次元座標データを図-8に示す方法で、実点に対応する位置に最大5点の補間点を設け、実点と補間点からなる三角形要素を作り、より実物に近い形状となるように FEM メッシュを作成する(図-9)。

図-8 三角形要素の作成

図-9 FEM メッシュ

(4) 本研究での FEM メッシュ分割例

本研究で取り扱った試験片の平板 3(図7参照)の計測点群、均一化点群およびメッシュ分割の拡大図を図-10に示す。また、このようにして実施するメッシュ作成の有効性の確認のために、平板においては座標値を直接入力し、曲面板では触針式計測器を利用した計測データを用いて解析を行ない解析2とした。なお、厚さはノギスで実測した値を用いた。

(a) 計測点群

(b) 均一化点群

(c) FEM メッシュ

図-10 FEM メッシュの作成例

3. 実験・解析結果および考察

3.1 ホログラフィ計測と三次元計測による結果

平面板試験片について、ホログラフィ干渉計測、三次元計測に基づくFEM解析による振動モード(1次～6次)を図-11に示す。ホログラフィでは明るい部分が振動の節であり、振幅が大きくなるに従って縞本数が増加して示される。FEM解析では逆に暗い部分が振動の節であり、明るい部分が腹を示す。

図 11 振動モード

同図よりホログラフィ干渉と三次元計測に基づくFEM解析による振動モードはほぼ一致している。同図右欄の三次元計測の結果は周辺にギザギザがある。これは計測データからFEMメッシュを作成する過程で生じたものである。簡単な形状であれば修正可能であるが、複雑な形状になると修正できないので、本実験でもあえて修正せずにそのまま利用することにした。

振動実験による共振周波数と三次元計測データを用いたFEM解析による固有振動数を図12(a)に示す。また、三次元計測データに基づくFEM解析による固有振動数と平面板の実測座標値データを基にFEMメッシュを作成して解析した固有振動数を図12(b)に示す。

図12(a)より、振動実験による共振周波数と三次元計測データを用いたFEM解析による固有振動数は、数値は一致しているとはいえないが、1次～6次までの振動数の変化は同じ傾向で増加している。また、図12(b)より、三次元計測データを用いたFEM解析による固有振動数と平面板を実測して得られる座標値を直接用いたFEM解析による固有振動数は、図12(a)の場合よりもよく一致している。これより、本三次元計測装置を用いた方法は、座標値取得に十分信頼性があるものと考えられる。したがって、振動実験による共振周波数とFEM解析による固有振動数にはあまりよい一致はみられないので、その原因を多方面から検討する予定である。

図 12 振動数の比較

平板
No.1

実験結果 (590Hz)

解析 1(657Hz)

解析 2(651Hz)

平板
No.2

実験結果 (466Hz)

解析 1(515Hz)

解析 2(496Hz)

平板
No.3

実験結果 (508Hz)

解析 1(597Hz)

解析 2(538Hz)

平板
No.4

実験結果 (523Hz)

解析 1(702Hz)

解析 2(604Hz)

平板
No.5

実験結果 (408Hz)

解析 1(521Hz)

解析 2(433Hz)

平板
No.6

実験結果 (583Hz)

解析 1(658Hz)

解析 2(643Hz)

図-13 欠陥のある平板の振動数と振動モード

3.2 欠陥のある平板

図5示すような切欠きや孔のある試験片に対して振動実験を実施し、1次～6次までの共振周波数とそのときの振動モードを計測した。そのなかで、欠陥のない健全な試験片(平板1)の振動モードと顕著な違いが現われた3次の振動モード図を、ホログラフィ干渉実験結果、3次元計測データを用いたFEM解析結果(解析1)、座標値を直接用いたFEM解析結果(解析2)の順に図13に示す。また、これらの図において右端の図は、ホログラフィ干渉実験結果(実験値)、3次元計測データを用いたFEM解析結果(解析1)、座標値を直接用いたFEM解析結果(解析2)の各モードにおける振動数を示したものである。

これらの図より、ホログラフィ干渉実験とFEM解析(解析1および解析2)による固有振動数はよく一致しているとはいえないが、固有振動モードは同じような結果が示されている。

ホログラフィ干渉実験においても、またFEM解析においても、平板4解析1を除いて、切欠きがある場合には健全な平板1の振動数より小さくなっている。また、切欠きある場合の振動モード図は健全な平板1の場合の振動モード図との違いが大きいことがわかる。振動モードの変化が切欠きの欠陥の予知に有効であることが窺える。

孔を有する平板6の場合は、孔のない平板1の場合と比べて、振動数の変化および振動モードの変化も大差はみられない。

以上の結果より、切欠きのような端部からの欠陥の検査には、振動数および振動モードの変化に基づく非破壊検査は有効であるが、鋼材の内部に孔が空いたような欠陥の検知には不適であると考えられる。

3.3 曲面板

曲面板に対しても平板の場合と同様の実験および計測・解析を行った。ただし、平板の場合には、容易に得られる平板の寸法や切欠きや孔の寸法を入力してFEM解析を行い、三次元計測データによる解析結果と比較したのに対して、曲面板の場合には、本三次元計測データによる解析結果との比較は、触針式の三次元計測器で計測したデータによる解析結果を用いた。振動実験、本三次元計測データによるFEM解析結果、触針式三次元計測データによる解析結果の順に6次モードを図-14に示す。また、右端の図は、ホログラフィ干渉実験結果(実験値)、本三次元計測装置による座標データを用いたFEM解析結果(解析1)、触針式三次元計測による座標データを用いたFEM解析結果(解析2)の各モードにおける振動数を示したものである。

図-14より、曲面板においても平板同様に、固有振動数に関しては実験値と解析値の数値自体にはよい一致がみられないものの、各振動モードに対する振動数の変化および振動モード図は比較的良好に一致していることがわかる。

下図は曲面板2に対する結果であるが、図-5の図示する位置にヘコミを付与したものである。このヘコミは複雑な形状となっている。実験でも解析でも曲面板2の振動モードが、健全な曲面板1の振動モードと比較して乱れていることがわかる。本三次元計測装置による座標データを用いたFEM解析結果(解析1)、触針式三次元計測による座標データを用いたFEM解析結果(解析2)による振動数は比較的良好に一致している。また、図-14の右端の振動モードと振動数の関係図から、曲面板2の振動数は健全な曲面板1の振動数よりも小さくなっていることがわかる。

図-14 曲面板の振動数と振動モード

4. 非破壊検査への適用性の検討

本研究では、平面や曲面の面部材に人工的に欠陥を付与し、① ホログラフィ干渉計測による実験、② 三次元計測データに基づく FEM 解析による振動数および振動モードを求め、健全な試験片と比較検討した。

当研究室で試作開発した三次元形状計測装置の誤差は約 0.5% であるので、鋼構造の疲労き裂などを計測することはできないが、板面のゆがみ、へこみ、そりなどの変状は計測することができる。三次元計測データに基づく FEM 解析結果はき裂のない健全な部材の振動モードを表わしている。本研究では、切欠きがあれば振動モードが大きく変化している結果が得られた(図 13 平面板 No.2 ~ No.5)。幅が約 1mm の比較的大きな切欠きであるので、もっと小さなき裂を実際に付与して実験を行なう必要があるが、非常に小さいき裂であっても貫通き裂であれば、同じように振動モードに変化が示されるものと考えられる。したがって、三次元計測データを用いた FEM 解析による振動モードとホログラフィ干渉計測による振動モードを比較することにより、欠陥の有無の判定に利用できるものと考えられる。また欠陥の位置や大きさは逆解析を行なうことにより特定することが可能となる。なお、本研究ではスピーカーで振動を与えて共振周波数を求めたが、圧電セラミック素子や通常市販されている加振機を用いて振動を与えることができる。

また、本研究では、共振周波数と振動モードに注目した実験を行ったが、ホログラフィを用いた非破壊検査は振動を与えることに限定する必要はない。ホログラフィによる検査の原理は、例えば機械的負荷、空気力学的負荷、熱的負荷などの負荷を受けた物体の干渉計測を実現することである。この負荷は欠陥によって、構造体の表面が一樣でない変形を引き起こし、それが干渉縞の変状に変換される。ホログラフィを非破壊検査に適用するためには、与えられた材料と環境において、種々の欠陥を干渉縞として表わすことができるかどうかという負荷の選び方にかかっているのである。したがって、欠陥によって表面に干渉縞で検出可能な数 $10\mu\text{m}$ 以上の変形を起こすには、どのような負荷を加えればよいかを見出すことが、今後の研究課題でもある。

5. まとめ

本研究では、切欠きや孔やへこみなどの欠陥のある試験片を製作し、ホログラフィ干渉計測を用いた振動実験および三次元計測により得られる三次元座標データに基づく FEM 解析を行なうとともに、これらの手法が非破壊検査法としての適用可能性について検討した。本研究の成果は以下のようにまとめられる。

1. ホログラフィ干渉実験と FEM 解析による固有振動数はよく一致しているとはいえないが、固有振動

モードは同じような結果が示されている。

2. ホログラフィ干渉実験、また FEM 解析においても、切欠きを有する場合の振動数は健全な平面板の振動数より小さくなっている。また、切欠きが振動モードに与える影響が大きく、振動モードの変化が切欠きの欠陥の検知に有効であることが窺える。
3. 有効板の場合は、健全な平面板の場合と比べて、振動数および振動モードも大差はみられない。
4. 曲面板の中央部にへこみを付けた場合にも、健全な曲面板に比べて、振動数が小さくなっており、振動モードが乱れている。
5. 3D 計測データに基づく FEM 解析、ホログラフィ干渉計測による振動モードを比較することにより、鋼部材の切欠きの有無が評価することができる。

参考文献

- 1) 富士岳：イラストで学ぶ非破壊試験入門，(社)日本非破壊検査協会，2002
- 2) 日本非破壊検査協会編：コンクリート構造物の非破壊検査法，養賢堂，1994
- 3) 辻内順平：ホログラフィー，裳華房，1997
- 4) Paul Smigielski 著，辻内順平 訳：ホログラフィーによる計測と検査 — 工業で使われるホログラフィー —，新技術コミュニケーションズ，1999
- 5) 久保田敏弘：ホログラフィ入門，朝倉書店，1995
- 6) 杉原太郎ほか：小規模三次元計測システムの開発，日本写真測量学会秋季学術講演会論文集，pp.59-62，1998
- 7) 和田眞禎ほか：レーザ光を用いた三次元画像計測システムの開発，日本写真測量学会年次講演会発表論文集，pp.297-298，1999
- 8) 杉原太郎ほか：長さ基準における校正手法を導入した 3 次元画像計測システムの開発，日本写真測量学会年次講演会発表論文集，pp.299-302，1999
- 9) 仲村政彦ほか：可搬・非接触型三次元計測装置を用いたコンクリートの表面計測，土木構造・材料論文集，第 16 号，pp.85-92，2000
- 10) 松田浩ほか：3 次元計測装置を用いたコンクリート表面粗度の定量化と付着特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.901-906，2001
- 11) 松田浩ほか：非接触型 3D 計測装置を用いた膜形状の計測，膜構造論文集，No.14，pp.47-56，2000
- 12) 松田浩ほか：3D 計測によるコンクリート打継部及び曲面板の振動解析に関する研究，応用力学論文集，Vol.3，pp.115-124，2000
- 13) 松田浩ほか：膜・シェル構造解析のための 3D 計測 + FEM 解析システムの開発，鋼構造年次論文報告集，第 8 巻，pp.595-602，2000
- 14) H. Matsuda et-al.：Development of finite element analysis system for membrane and shell structures by using 3D-optic system，TRENDS in Computational Structural Mechanics (CSM)，pp.511-518，2001

(2002 年 4 月 19 日 受付)