研究論文

健全性診断機能を付与した機械的継手部の革新設計

肖 毅^{*1}, 角田 義秋^{*1}, 石川 隆司^{*2}

(2006年1月17日受付)

Innovative Design of Mechanically Fastened Joints with
Damage Diagnostic FunctionYi XIAO,^{*1} Yoshiaki KAKUTA^{*1} and Takashi ISHIKAWA^{*2}

(Received January 17, 2006)

The primary objective of this study is to address a key research challenge for improving traditional joint design, which develop functions and structures that can monitor their own structural integrity. A self-sensing technique using the bolt itself to monitor the bearing damage in bolted composite or metallic joints is proposed. The basic concept is based on making Bolt Gauge (BG) measurements. That is, have only to bond a strain gauge onto the surface of bolt head to reflect changes in the bolt strain, which would identify the state of bearing damage. Novel system can maintain not only the peculiar structures and functions of the mechanical fastener, but more importantly, also can provide the self-diagnostic function for component damage. And, it can be contributed directly to technology development for structural health monitoring (SHM) to address these issues, and to meet demanding goals in increasing aerospace vehicle safety and reliability while reducing operating costs. Extensive tests using double lap bolted joint specimen are performed to verify this technique in the various joint cases. The investigations include the effects of the bolt clamp-up, material response, joint geometry and loading history on the detection sensitivities for the bearing damage. The onset and progress of the bearing damage monitored by BG measurements are also compared with acoustic emission (AE) measurements that used in traditional NDE method. A further consideration of the detection mechanisms by BG including an axial loading test and a three-dimensional finite element analysis is performed. The behavior of bolt deformation and stiffness degradation due to the bearing damage initiation and progression are estimated using damage mechanics approach.

1. 序 言

ボルトやリベットのようなファスナーは最も代表的な機械的締結具であり、一般構造物に広く利用されている。特に航空機構造においては、部材締結やパネルアセンブリーなどに対して欠かせない重要な役割を演じるの

みならず、機体構造の機能性、安全性をも強く左右するキー技術である。なお、現在急速に拡大している航空機の複合材料構造にそれらを適用する場合は、技術上の多様化と高効率化がさらに求められている¹⁾。

しかしながら、ファスナーによる接合は、部材の円孔周辺に応力集中が顕在化するため、円孔部が部材損傷の最も一般的な発生源となる。代表的な損傷形態はファスナー孔まわりの面圧損傷であることが知られている²⁾。さらにこれらの微小き裂の発生・進展が、最終的には部材の疲労破壊につながると考えられる。この問題について Boller³⁾ は有力な論証を提示した。Fig. 1 は、Tornado 戦闘機で行った MAFT (major airframe fatigue test) 試験後の構造における損傷分布に関する統計結果である。これらから、構造損傷分布の中で疲労き裂が最も支配的であり、70%を占める。その中、ファスナー孔に起

^{*1} 宇宙航空研究開発機構複合材技術開発センター
(181-0015 三鷹市大沢 6-13-1)

Advanced Composites Technology Center, Japan
Aerospace Exploration Agency (JAXA), 6-13-1,
Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

^{*2} 宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループ
(182-8522 調布市深大寺東町 7-44-1)

Aviation Program Group, Japan Aerospace
Exploration Agency (JAXA), 7-44-1, Jindaiji
Higashi-machi, Chofu, Tokyo 182-8522, Japan

Fig. 1 Statistical results for damage distribution in an aircraft after MAFT: (a) distribution of structural damages, (b) distribution of fatigue cracks.

因するのが最も多く、44%を占めることが明らかになった。

現在、ファスナー継手部の探傷方法として、簡便なコイン・タッピング (coin tapping) や目視による巨視的検査と、損傷の特定評価を目的とする超音波、X線、渦流などによる非破壊検査 (NDI: non-destructive inspection) 方法が一般的に知られている⁴⁾。いずれの場合においても、ファスナーを取り除く作業が必要となるため、点検作業に多くの時間と労力を費やすのが現状である。したがって、構造の健全性・信頼性を確保することが重要な課題となる。

近年、航空宇宙システムの長期的安全性・信頼性を維持するために、構造ヘルスマonitoring技術の開発への広範な取り組みが注目されている。ヘルスマonitoring技術は、構造、機能及び情報の融合により、材料劣化や破壊の進行状況を診断して、寿命予告を実現しようという視点から導入されてきた新規技術である。一般的に

は、ハードウェアとソフトウェアの2つに区分されている。ハードウェアは、センサの開発、データ通信を含むセンシングシステムを構築する技術である。一方、ソフトウェアは検出データに基づく診断などの情報処理技術が含まれる。また、対象とする設備・機器は多岐にわたるので、関連する研究や技術開発についても極めて多様な側面を持つことが知られている⁵⁾。

ここで、著者らが行った事前調査に基づいて、本研究の対象となるボルト継手部の健全性モニタリングに関わる先行研究例を紹介する。高橋ら⁶⁾は、耐熱複合材料のボルト継手部の面圧破壊をモニタリングの対象とし、円孔近傍に貼り付けた光ファイバーによって損傷モニタリングの可能性を調べた。当技術は、検知感度の光ファイバー配置に強く依存し、破断ひずみの大きな接合材に対して適用が困難であることが指摘されている。Shimamuraら⁷⁾は、電気抵抗変化法を利用してCFRP複合材ボルト継手部の面圧損傷をモニタリングすることを試みた。炭素繊維は良好な導電性を有することから、それ自体をセンサとして利用することが可能である。この方法はCFRP材のひずみや損傷の検知によく利用されているが、様々な繊維配向に起因する導電性の異方性を有するため、損傷同定の判別解析の際に大きな障碍となっている。また、航空機などに適用する場合は、CFRP材に電流を負荷することから、安全管理法上の視点において不安な要素となる。Ihnら⁸⁾は、圧電 (PZT) 系内蔵型診断技術を用いて航空機の胴体継手部におけるき裂進展をモニタリングする方法を報告している。診断回路は、ネット分布を有する圧電性薄膜材をセンサ/アクチュエータとして、各々継手列の両側に取り付けることによって構成される。また、モニタリング結果と既存のNDT結果との比較検討も行っている。Peairsら⁹⁾は、ボルト緩み止め問題に対して能動的自己修復型ボルト継手を提案した。このシステムは、PZTパッチを用いたインピーダンス基の自己検知技術と、形状記憶合金 (SMA) 製のワッシャーをアクチュエータとして利用した自己修復技術との融合によって構成される。SMAワッシャーは、相変態による形状記憶効果を利用してボルト張力制御に役立っている。実験結果は一定の評価を得られたが、加熱の効率化に課題が残っている。以上の研究より、損傷の検知は外部からセンサを追加することによる診断システムの構築が主流である。そのため、システム支援には特別な設備と周辺機器を必要とするため、非常に高コストとなる問題点を抱えている。このような現状を踏まえて、締結要素自体の力学的性質 (負荷中の

Fig. 2 BG concepts applied to bolted joints design.

ひずみ変化)を損傷診断に適用できれば、センサの簡素化によって診断システムの低コスト化につながり、また特別なエネルギー転換を必要としないため、高感度の診断システムが期待できる。

そこで、本研究では既設のボルト継手の形態と機能を維持しながら、損傷診断機能も備えたボルト継手設計のスマート化を実現することを目的としている¹⁰⁾。このような技術構想を実現するためには、ボルト継手自体を面圧損傷の検知用センサとするボルトゲージ (BG: bolt gauge) 法を提案する。すなわち、面圧損傷の発生及び進展状況とボルトひずみの変化との相関性に着目し、ボルト頭部にひずみゲージを貼付した接合部の健全性診断システムを構築する。BG法による診断システムの概観を Fig. 2 に示す。技術検証のために、ダブルラップジョイント方式の面圧強度試験を実施し、供試材料、ボルトの締め力、破壊モード及び負荷履歴が面圧損傷の検出感度に及ぼす影響を調べた。また健全性診断結果と AE 測定結果との比較を行い、BG 法の妥当性、適用性について検討した。さらに面圧損傷を受けた場合を考慮したボルト継手変形挙動の 3 次元有限要素法 (FEM) 解析を行い、BG 法による測定結果を検証するとともに検知メカニズムを考察した。

2. 実験的検証

2.1 供試材及び継手供試体

供試材としては、CFRP 複合材料と現行機材の 2024-T4 アルミ合金及びクロムモリブデン鋼の金属材料の 3 種類を用意した。以下では、それぞれを CFRP 材、Al 材と鋼材と称する。CFRP 材は、前報など^{11,12)}に使用

した熱硬化型高靱性エポキシ樹脂からなる IM600/QC133 (東邦テナックス製) 複合材料であり、一方向プリプレグ 16 層を積層した $[45/0/-45/90]_{2s}$ 擬似等方性積層板である。

実験に用いた継手供試体は、前報¹¹⁾に述べたように試験片と鋼製の二枚負荷治具をボルトで締結したダブルラップジョイント方式である。試験片の基本寸法は長さ 110 mm、厚さ 2.2 mm とした。試験片の形状を決めるためには、板幅 (W) と孔径 (d) の比、及び円孔中心に対する端末距離 (e) と孔径の比を破壊モードに対応して次の 3 タイプ形状の試験片が設計されている。面圧破壊型の BF (bearing failure) タイプは $W/d=8$, $e/d=3$ であり、引張り破壊型の TF (tension failure) タイプは $W/d=4$, $e/d=6$ であり、及びせん断破壊型の SF (shear-out failure) タイプは $W/d=8$, $e/d=1.5$ とした。ボルトの初期締め付けトルクは、次の三段階で設定しており、finger-tight (手で締める程度)、12~15 kgf-cm 及び 30~35 kgf-cm とし、最後にトルクレンチで仕上げ調整を行った。

2.2 実験方法

単調引張り負荷試験及び繰返し負荷除荷試験には、INSTRON 社製 8501 型油圧駆動試験機を用いて、クロスヘッド速度が 0.5 mm/min の変位制御モードで荷重を与えた。面圧強度評価の基本となる孔の変形量計測には、前報など^{11,12)}に述べたように、特殊な治具を必要としない非接触式電子光学変位計 (独 ZIMMER 社製) を用い、JIS 規格に基づいて、ピンの食い込み量に相当する変形量を測定した。また、荷重負荷中の損傷状態に対して BG 測定を比較するために、AE (acoustic emission) 法によるモニタリングも併用した。AE 計測にはフィジカル・アコースティックス (PAC) 社製の MIS-TRAS2001 システムを使用し、センサには 150 kHz 共振周波数型 (PAC 社製, R15I) のものを用い、しきい値を 55 dB として計測を行った。BG 測定には東京測器研究所製の UFLA-03-11 ひずみゲージを用い、継手供試体を装着した後、ボルト頭部の表面に貼付している。ただし、ひずみ出力はゼロバランスを取った後に行うため、初期締め付けにより生じたボルト残留応力の変化が記録できず、すべての出力はゼロをはじめの状態とした。また、ひずみゲージの長手方向は荷重方向と一致するように調整した。試験は室温で行い、試験片本数は各測定項目において 3 本ずつとした。面圧損傷評価試験の構成を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 Double lap bolted joint test set-up.

Fig. 4 Monitoring the bearing damage in CFRP joint specimen tested at monotonic tensile loading: (a) BG output versus applied load, (b) damaged state.

3. 損傷モニタリング結果

3.1 材料の効果

試験片 CFRP 材, Al 材及び鋼材について, 単調引張り負荷によって取得した BG 出力及び AE 発生率特性を荷重-変位曲線 (P - δ 線図) 上にプロットし, それぞれ

Fig. 5 Monitoring the bearing damage in 2024-T4 aluminum joint specimen tested at monotonic tensile loading: (a) BG output versus applied load, (b) damaged state.

Fig. 4, Fig. 5 及び Fig. 6 に示す. なお各試験片における損傷形態を把握するために, 円孔部近傍の損傷事例を写真で示す. これらの計測例より, 試験開始後, 面圧損傷が発生するまでは, P - δ 線図とともに BG 出力は比較的安定した状態を維持しているが, 面圧損傷もしくは局部降伏による塑性変形が発生すると, P - δ 線図上の屈曲変化とともに, BG 出力と AE 特性の明瞭な変化が計測される. その後, 荷重増加に伴って, 損傷進展が拡大されるため, BG 出力は AE 特性と同様に単調に増大していくことがわかる. ただし, Fig. 6 (a) に示したように, 鋼材試験片の場合では, 荷重が 15 kN (円孔変形が 0.2 mm) 付近までに増加すると, 荷重-変位応答と同様に, BG 出力が一旦急に变化したが, その後, その

(a)

(b)

Fig. 6 Monitoring the bearing damage in molybdenum steel joint specimen tested at monotonic tensile loading: (a) BG output versus applied load, (b) damaged state.

変化率が荷重の増大に伴って緩やかに低下している様子が見られる。このような挙動は、Fig. 4 と Fig. 5 に示す CFRP 材及び Al 材の場合では見られていない。これは、締結部材と締結具の異なる材料物性によって、その関与する割合で理解され得るものと考えられる。実験後における供試体の観察結果 (Fig. 6 (b)) は、円孔部での面圧損傷及びボルトの軸部に曲げ損傷を生じている様子が認められる。したがって、BG 法によるモニタは、ボルト継手のせん断や曲げ破壊が起こる場合でも損傷状況の情報を十分捉えていることが理解される。

また、異なる材質による面圧破壊過程での BG 出力特性を比較検討するために、CFRP 材と Al 材について測定した結果を Fig. 7 に示す。同図により、CFRP 材の場合は、微視的き裂や割れなど（いわゆる脆性破壊）に起因する突発型 BG 出力が見られるのに対して、Al 材の場合は、塑性変形に起因する連続型 BG 出力となっている。両者の相違がより明瞭に現れることがわかる。

Fig. 7 GB responses plotted as a function of applied load for various material systems.

Fig. 8 GB responses plotted as a function of applied load for various clamping forces.

3.2 初期締め付け力の効果

Fig. 8 は、CFRP 材を用いて 3 種類のボルト初期締め付けトルクに対して、負荷荷重と BG 出力との関係を示す。BG 出力の急激に変化した点は、いずれも面圧損傷の発生時期に対応しており、且つボルトの初期締め付け力に比例することがわかる。このことから、初期締め付け力を高めることは、面圧強度の向上につながり、さらに損傷の発生時期を遅らすことに役立つことを示唆している。

3.3 継手部の幾何学パラメータの効果

試験片の幾何学パラメータが円孔部の応力集中に関わるファクタである。このため、円孔の位置と寸法の相互関係によって、継手試験片の最終破壊には、面圧破壊

Fig. 9 GB responses plotted as a function of applied load for various joint geometries.

(BF), 引張り破壊 (TF), 及びせん断破壊 (SF) の3つの破壊様式を示すことが一般に知られている。ここでは、それぞれの破壊モードに対応した試験片を製作して、幾何学パラメータの影響を調べた。Fig. 9に各試験片に対して得られたBG出力の結果を示す。初期損傷の発生時期は、TFタイプが最も早く、次にSF、BFタイプの順となる。一方、耐荷能力について、最も弱いのはSFタイプで、次にTF、BFタイプの順となる。いずれの場合においても、初期損傷の形態が面圧破壊から生じるため、BG出力は試験片の幾何学パラメータに関係なく、損傷の発生過程だけに対応していることがわかる。

3.4 負荷除荷の効果

負荷除荷試験では、前述した単調負荷試験の追加考察として、主に除荷過程中的BG出力に対する材料の影響と損傷判断に着目して検討した。試験には所定の荷重値まで負荷した後、完全除荷する過程を繰り返しながら、BG出力のヒステリシス曲線における変化挙動を測定した。

CFRP材及びAl材について負荷除荷サイクル中のBG出力を荷重応答とともにFig. 10とFig. 11に示す。両図中に示す数字 n は負荷除荷繰り返しを行った回数であり、それらは各除荷開始の位置に対応している。両図の(b), (c)には、図(a)に示した損傷発生の前後領域に関するBG出力の詳細を拡大して表示した。Fig. 10及びFig. 11の(a)から、両材料とも各サイクルにおける負荷曲線(包絡部分)をたどると、単調引張り試験中のBG出力(Fig. 7)とほぼ同様な傾向が認められる。すなわちBG出力は一旦ピークになって、その後、損傷

Fig. 10 GB responses plotted as a function of applied load tested at cyclic loading/unloading (CFRP joint specimen): (a) hysteresis loop, (b) undamaged and (c) damaged.

Fig. 11 GB responses plotted as a function of applied load tested at cyclic loading/unloading (2024-T4 aluminum joint specimen): (a) hysteresis loop, (b) undamaged, and (c) damaged.

進展によって単調に増大していくことである。初期損傷の発生時期としては、CFRP材が8番目サイクル、Al材が5番目サイクルの付近であることがわかる。また、Fig. 10及びFig. 11の(b)と(c)を比較してみると、健全と損傷状態での荷重除荷の循環経路は異なることが明らかになった。健全状態では、荷重から除荷までの循環経路が時計回りの方向と一致し、損傷状態では、その循環経路が逆方向に回る動きを示した。

一方、損傷後の除荷過程においてはFig. 10とFig. 11の(a)に示すように、両試験片ともに、各サイクルでの完全除荷（無負荷状態）後に生じた永久ひずみ変形が見られ、荷重増大とともに永久ひずみ変形も増加する。BG出力は、荷重履歴に依らず過去に受けた永久ひずみ変形を記録できることが確認された。除荷と再負荷履歴については、ほとんどもとの負荷曲線をたどりながら、過去に受けた最大荷重時のBG出力に対応して更新する。この結果を両試験片について比較すると、CFRP材では除荷再負荷の影響が若干認められるが、Al材ではその影響をほとんど受けていない。さらに最も注目すべきことは、除荷過程での両試験片の相違点である。CFRP材では、BG出力が除荷に伴って除荷直前と比べて緩やかに増大する傾向を示し、無負荷状態の近傍で再び低下を呈する。これに対して、Al材では除荷の影響が及ばず、各サイクルの完全除荷に至るまでスムーズに低下する傾向を示す。このような挙動については、材料性質の相違が起因であると考えられる。すなわち、脆性破壊に支配されるCFRP試験片は、特に圧縮負荷下での材料非圧縮性挙動がよく観察されており、この原因で荷重除荷試験中のBG出力に複合材料における力学特性上の不可逆性が存在するためと考えられる。なお、現段階ではこのメカニズムを明確に説明しかねるため、今後、荷重履歴によるBG出力の特異現象に対して、CFRP材ボルト継手構造ヘルスマonitoringをする上で留意すべきである。

4. BGの発生機構

4.1 面圧破壊によるBGの発生

ここでは、面圧破壊に伴うBGの発生機構を考察する。Fig. 12は、前述の単調荷重試験における結果に基づいて、面圧変形構造とBG出力形態の対応関係を模式的に表示した。同図(a)に示すように、円孔部に面圧荷重が作用した場合には必ず試験片の板厚方向に微小な面外変形が生じ、この変形量に最も直接に反応するのがボルトによる試験片の表面拘束抵抗である。したがっ

(a)

(b)

Fig. 12 Simplified schematic of mechanism detected by BG method for (a) bearing failure and bolted joint deformation, and (b) bolt's lateral constraint resistance.

て、ボルトによる試験片の表面拘束はBG発生の必要条件になると考えられる。このような表面拘束は主に二つの要素で構成される。(1) ボルトの初期締め付け力と、(2) 面内圧縮荷重によって拘束領域内に生じた材料自身の膨張効果、両者の重ね合わせ過程や変化はBG応答の重要な指標となる。同図(b)からわかるように、面圧荷重の初期における健全な状態では、荷重増加に伴い、材料自身の弾性圧縮膨張による表面拘束の全体抵抗力が比較的に増大したので、BG出力もそれに対応して若干

Fig. 13 Damage index plotted as a function of applied load for various clamping forces in CFRP joint specimen.

大きくなる。その後、荷重 P がある臨界損傷荷重 P^D 以上になると、面圧損傷もしくは塑性変形が発生し始めるため、BG出力はピークより徐々に低下していく傾向を示す。なおこのようにBG出力曲線上の降伏点を求めれば、構造健全性の是非が判断できる。Fig. 13は、この判断基準に基づいて、損傷指数を用いて構造健全性の定量的な評価をした一例であり、損傷の発生時期や損傷程度が一見でわかるように整理することが可能となる。

4.2 ボルト頭部のくぼみ変形評価試験

前章に記述したBG出力結果からわかるように、実験結果はいずれも面圧損傷の発生直後にBG出力が負の値になる。すなわち、ボルト頭部の表面がくぼむような変形の曲げ状態になるものと考えられる。このボルト頭部の変形挙動は、純粋な軸向力荷重試験を実施して、より詳細に検討した。試験に用いた負荷治具とそのセットアップ状況をFig. 14(a)に示す。負荷治具は上下一組のブラケットを、真ん中の箇所にもボルトとナットで結合した。また、前述のようにボルト頭部の表面にはひずみゲージを貼付け、図中の矢印方位で引張り荷重を負荷した。Fig. 14(b)は、ボルトの初期締め付け力異なることによって得られたくぼみ変形と荷重の対応関係である。いずれの場合においても、ボルトに作用する最大荷重は、負荷荷重の作用とボルト初期締め付け力の作用の差を反映した結果である。このため、負荷荷重の作用は初期締め付け力より小さい時、BG出力が正の状態(張力)に維持している。負荷荷重の作用は初期締め付け力の抵抗(減圧点)を超えると、ボルト頭部に微小な曲げモーメントが生じ、BG出力が負の状態となる。このよ

Fig. 14 Axial loading test for verifying the depression deformation occurred at bolt head: (a) test setup, (b) depression deformation vs. applied load.

うなボルトのくぼみ変形の変化は後述したジョイントの面圧破壊シミュレーション結果から理解されるように、面圧破壊の開始点に対応している。

4.3 FEM による BG 発生機構の考察

BG 発生機構は、非線形構造解析用の汎用 FEM コード ABAQUS を用いて、2024-T4 アルミ合金材に対する面圧破壊挙動の数値解析を実施し、検討した。有限要素解析には、Fig. 2 に示したダブルラップジョイント方式

Fig. 15 Finite element model and boundary conditions.

の中間ラップのみを取り出したものを 3 次元解析モデルとして作成した。解析対象の対称性を考えて、全体の 1/4 (面内 $1/2 \times$ 板厚 $1/2$) に対して要素分割を行った。Fig. 15 に要素分割と境界条件の概略を示す。負荷は、図中のボルトシャंक部のセンターラインから強制変位を与え、設定した最大負荷に至るまで、強制変位を漸増させる繰り返し増分法で行った。ボルトの初期締め付け力は、ボルト頭部の表面に分布荷重として加えた。また、解析には、ボルト/円孔間及びボルト/試験片表面間の摩擦効果を考慮した上、摩擦を含む接触問題の解析として取り扱った。一方、面圧損傷に伴う接合材料の降伏挙動を適切に表現するために、本解析では ABAQUS に既存した「場の変数」に依存する材料解析機能を活用して、損傷依存材料モデルを導入した。すなわち、材料特性応答を最大ひずみ (場の変数) の関数で定義することができる。それをユーザサブルーチン USDFID に取り込むことによって、一般的な弾塑性解析に準ずる問題をより容易に求めることが可能になった。Al 材のクーポン試験より得られた有効材料定数とひずみの関係を Fig. 16 に示す。損傷依存材料決定アルゴリズムのフローチャートを Fig. 17 に示すが、ここで詳細の組み込む

Fig. 16 Effective elastic moduli for 2024-T4 aluminum.

Fig. 18 Comparison between the measured and calculated BG responses.

Fig. 17 Flowchart illustrating the procedure of progressive damage analysis.

手順については割愛したので、参考文献を参照された
い^{13,14)}。

Fig. 18 に、BG 出力に対する数値解析の結果と実験により測定した結果の比較を示す。ここでの数値解析による BG 出力は、実際に取り付けたひずみゲージの有効位置に対応して、図中に標記した要素に対して荷重方向に沿ってひずみ分布の平均値として求めたものである。有効材料応答を考慮した場合は、BG 応答の数値結果と実験値が精度よく一致した。線形材料応答のみを考慮した場合は、BG 出力が発生しない。こうした結果から、4.1 節に述べたボルトの拘束による抵抗効果と関係する BG 出力は、面圧損傷の進行による材料劣化の挙動を捉えているものと理解される。

Fig. 19 は数値解析より各荷重段階で得られた継手部の変形状態を 3 次元的に示したものである。見掛けをわ

Fig. 19 Predicted bolt depression deformation for (a) $P=1.5$ kN, (b) $P=4$ kN, (c) $P=7$ kN and (d) $P=10.5$ kN.

かりやすくするため、図中の変形スケールは実変形の 20 倍に拡大して表示した。変形過程を見ると、面圧荷重 P が 4 kN 付近 (Fig. 19 (a)) に達した後、円孔部の

面内変形とともに接触部位の真下で板厚方向へ膨らんでいる現象（図中矢印方向）が現れている。特に Fig. 19 (c), (d) ではさらに変形していく過程が明瞭に描かれている。円孔部の面外変形を生じるような微小変位は直ぐに隣り合うボルトに伝播し、ボルト頭部の表面にくぼみを形成する。このような変形挙動は荷重増大に伴って益々顕著に見られる。すなわち、BG 出力の変化はボルト頭部のくぼみ変形に反映した結果であり、なお、ボルトのくぼみ変形は面圧損傷による変形過程であると判明される。

以上のように本章の考察は、BG 発生機構を異なる側面から説明している。その結果、ボルト頭部のくぼみ変形を利用することで、面圧による損傷状況の同定メカニズムを説明できる。

5. 結 論

本研究では、ジョイント構造の健全性診断を簡易に実施するために、外付けの複雑・高価なセンサシステムの設置を必要とせず、既設ボルト継手自らが診断機能を持つようなスマート継手設計を提案した。この仕組みの基本は、面圧損傷の面外変形で生じたボルトの拘束抵抗の力学効果を利用することによって、面圧損傷を同定することである。一連の実験室レベルでの実証に基づいた結果は主として以下の通りである。

(1) 単調引張り負荷試験を通して、面圧損傷の検出は接合部材、ボルト締め力及び試験片形状などのパラメータに依らず実験初期値を記録すれば、BG 応答の変化で判断することが可能である。

(2) 負荷除荷試験を通して、BG 出力は無負荷状態でも過去に受けた永久ひずみ変形を記録することが可能である。

(3) 面圧破壊挙動の数値解析は、実測値とよく一致を示し、BG の発生機構の解明に利用される。

(4) 安価、簡便などの特徴を備える本技術は、実用的

構造ヘルスマニタリング技術として成立する可能性が示され、航空宇宙構造の安全性・信頼性の向上に役立つものと判断される。

本研究を遂行するにあたって、数々の有益な助言を頂いた九州大学応用力学研究所 高雄善裕教授及び愛媛大学工学部 黄木景二助教授に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 肖 毅, 石川隆司: 第 28 回複合材料シンポジウム講演論文集 (2003), pp. 95-96.
- 2) Y. Xiao & T. Ishikawa: *Comp. Sci. Technol.*, **65** (2005), 1022-1043.
- 3) C. Boller: *Smart Mater. Struct.*, **10** (2001), 432-440.
- 4) 遠藤 怜: 将来の航空機整備について, 航空技術 No. 574 [03-01], No. 575 [03-02].
- 5) 日本機械学会(編): 知的複合材料と知的適応構造物, 養賢堂 (1996).
- 6) 高橋 淳, 野村正人, 津田 浩, 北出真太郎, 永井英幹, 剣持 潔, 林 龍一, 福田 博: 日本複合材料学会誌, **23**, 3 (1997), 100-107.
- 7) Y. Shimamura, S. Mukai, A. Todoroki & H. Kobayashi: Proceedings of the Tenth U.S.-Japan Conference on Composite Materials (2002), pp. 215-220.
- 8) J.B. Ihn & F.K. Chang: *Smart Mater. Struct.*, **13** (2004), 621-630.
- 9) D.M. Peairs, G. Park & D.J. Inman: *Smart Mater. Struct.*, **13** (2004), 1414-1423.
- 10) 肖 毅, 角田義秋, 石川隆司: 日本複合材料学会 2003 年度研究発表講演会予稿集 (2003), pp. 63-64.
- 11) 肖 毅, 石川隆司: 日本複合材料学会誌, **26**, 6 (2000), 213-218.
- 12) 肖 毅, 石川隆司: 日本複合材料学会誌, **28**, 2 (2002), 56-65.
- 13) ABAQUS/Standard version 6.3, User's Manual, HKS Inc., Rhode Island (2002).
- 14) 肖 毅, 石川隆司: 日本航空宇宙学会論文集, **51**, 594 (2003), 331-338.