損傷力学手法に基づく複合材料機械的継手部の 面圧破壊挙動シミュレーション^{*1}

Failure Behavior Simulation for Bolted Composite Joints Based on Damage Mechanics Approach

肖 毅^{*2}・石川 隆 司^{*2}

Yi XIAO and Takashi ISHIKAWA

Key Words: CFRP Laminated Composites, Bearing Failure, Progressive Damage, Continuum Damage Mechanics (CDM)

Abstract: This paper presents the development of an accumulative damage model based on continuum damage mechanics (CDM) to simulate the bearing failure and response in the bolted composite joints. The simulation is implemented into a general-purpose FEM code ABAQUS. The main damage mechanisms observed from experimental study are described as accumulated compressive damage that appeared by matrix compression failure and fiber compression-shear failure. The fundamental approach consists of contact problem at the pin/hole interface, progressive damage, large deformation problem and material nonlinear problem. A complex approach based on a nonlinear shear elasticity theory combined with a continuum damage mechanics approach can be also utilized to represent the material nonlinear behavior during loading. The damage accumulation criteria using the hybrid method based on Hashin and Yamada-Sun's failure criteria are adopted, and the stress redistribution analysis using a degradation model for the damaged ply is performed. The accurate prediction results include progressive damage and strength response of the joints that agrees well with the existing experimental data.

1. 序 言

CFRP（炭素繊維強化プラスチック）複合材料は航空宇宙輸送機の構造材料として実用化が進められている。これを用いて構造体を構築する場合、部材間の結合は不可避である。このため、ボルトのような機械的継手による接合技術が多く利用されてきた。接合部設計の巧拙は、構造体の耐久性・信頼性に関わる非常に重要な課題である¹⁾。適切な設計が行われなければ、接合部は構造体の最も一般的な破壊源となる可能性が高く、最終的には構造要素の破壊をもたらす。接合部設計にあたり、その信頼性を確保するためには、実験による損傷形態の把握と、解析による力学挙動の解明が必要となる。既に文献¹⁾に指摘されているように、米国、欧州などの先進国では、ここ数年、この分野の研究活動に先行着手しており、特に接合部設計を行うため、多数の強度解析コードが開発されている。このような状況のもとで、日本においても、国内の研究・開発計画に並行して、実用的解析ツールの開発に積極的に取り組んでいくことは極めて有意であると考えられる。

近年、損傷力学的手法に基づいた破損過程のシミュレ-

ーションが、複合材の接合部設計ならびに力学的挙動解析に有効な手段として注目されている。一方、損傷材料の力学的ならびに物理的特性の評価を連続体力学的観点から研究する連続体損傷力学（continuum damage mechanics）に関しては、80年代から村上²⁾及びChaboche³⁾らによって体系的に紹介されてきた。その後、損傷力学の概念と有限要素法を組み合わせ、複合材料に関する工学問題についても数多くの研究成果が報告されている⁴⁻⁷⁾。

最近、このような損傷力学的手法が積層型複合材料の接合部破壊解析にも適用され⁸⁻¹¹⁾、損傷の逐次進展を非線形解析問題として取り扱っている。ここでは、損傷による材料劣化の記述が応力再配分解析の重要なルールとなると考えられている。しかし、これらの研究においては、材料定数の低下に関して単純なモデルを用いている。すなわち、損傷状態の弾性係数を0とか、または数%の残存剛性として求めている。このため、最終構造破壊に至るまでの累積損傷過程を忠実に再現することができない。また、実際の面圧破壊において、ワッシャーによる側面拘束は、損傷進展の抑制に大きな役割を果たし、その結果、面内剛性低下を妨げていると考えられる¹²⁾。Hungら⁹⁾は、このような効果を取り入れた解析を試みているが、臨界損傷域の基準が必ずしも明確化されていないため、剛性低下則をより現実に近いものに修正する必要がある。

そこで本研究では、航空機用複合材の機械的接合法に関

^{*1} © 2003 日本航空宇宙学会

平成 13 年 8 月 1 日、第 43 回構造強度に関する講演会にて講演。
平成 14 年 2 月 13 日原稿受理

^{*2} 独立行政法人航空宇宙技術研究所先進複合材評価技術開発センター

第 1 図 継手供試体の外形寸法及び取り付け状況の模式図

する系統的研究の一環として、前報¹²⁾に引き続きボルト接合部面圧破壊試験を取り上げ、積層板の面圧破壊の発生・進展をシミュレートすることを目的とし、さらに、接合部設計を行うための支援ツールの開発を試みる。具体的には、汎用 FEM コード ABAQUS を利用して複合材継手部の強度応答及び損傷過程のシミュレーションを実施した。3 次元解析の準備とするため、面圧損傷進展を 2 次元問題にモデル化し、荷重伝達時の接触、大変形及び材料の非線形性を考慮した。材料の非線形挙動としては、損傷に起因しない一方向材のせん断変形非線形特性と損傷に起因する損傷力学的表現を融合して取り扱うものとした。損傷発生の判定には、Hashin と Yamada-Sun の混合破壊則を採用し、損傷を受けた要素が材料定数劣化を生じるものとして、応力再配分を評価した。最後に、解析結果の検証として、実験結果との対比を行い、2 次元問題でも、ある程度、現象を証明できることを示すと共にその問題点を考察した。

2. 面圧強度と損傷進展に関する考察

著者らはこれまでに、複合材料機械的継手部の面圧強度と損傷進展挙動の関係を明らかにするために、面圧強度試験を実施し、内部損傷の進展挙動について詳細な観察を行ってきた¹²⁾。

2.1 実験の概要 供試材は熱可塑性ポリイミド系樹脂である PIXA (三井化学 (株) 製) を用いた CF(IM-7)/PIXA 複合材料と、高靱性熱硬化型エポキシ樹脂である CF(IM600)/Epoxy(Q133) (東邦テナックス (株) 製) 複合材料の 2 種類である。両者とも一方向プリプレグ 16 層を積層した擬似等方性積層板 $[45/0/-45/90]_{2S}$ である。

継手供試体の外形寸法及び試験機に取り付けた状況の模式図を第 1 図に示す。面圧破壊試験では、CFRP 試験片を 2 枚のクロムモリブデン鋼製の負荷用板で挟み、これらをボルトで結合するダブルラップ接合方式によって、継手部への負荷を導入している。試験片の板幅 (W) と円孔 (d) の比、及び端末距離 (e) と円孔の比は、それぞれ $W/d = 8$, $e/d = 3$ とした。また、複合材料の面圧強度評価の基本と

なる孔の変形量計測には、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 MODEL-100B) を用いて、簡易でしかも再現性の高い計測システムを構築した¹³⁾。それを用いてピンの食い込み量に相当する変形量を JIS 規格に基づいて測定した。

2.2 面圧破壊のメカニズム 面圧破壊プロセスを理解するために、第 2 図に両供試材における引張り荷重-変位曲線と、各荷重段階で撮影した面圧損傷部の軟 X 線探傷写真及び SEM による断面観察写真を示す。このような観察によって、荷重-変位曲線上での荷重応答の変化から、面圧破壊過程を次の 4 つの段階、すなわち初期損傷、損傷進展、局部破壊及び構造破壊に分けて巨視的に要約する。

初期損傷と損傷進展では、ボルトと円孔の接触表面に生じた圧潰損傷と、ワッシャー拘束領域内に生じた 0° 層繊維のキンクバンド発生と、これを起点とした隣接する 45° 層の板厚方向のせん断破壊と、それに伴う層間はく離などの損傷累積が特徴的に発生する。ワッシャーによる表面拘束は試験片の面外変形を抑制し、その結果、損傷累積は主に面内方向に進展する。したがって、ワッシャー拘束によって、結果的に継手部の面圧強度向上がもたらされると考えられる。

局部破壊と構造破壊では、ワッシャー拘束領域内での損傷が徐々に飽和状態に達した後、ワッシャー拘束の直下に、板厚全体にわたる大きなせん断破壊領域の形成や、大規模な層間はく離などの破壊が発生し、継手部の耐荷能力は急激に低下している。

このような考察から、面圧破壊挙動の表現は、主に圧縮損傷の累積過程である。損傷形態は非常に複雑であり、荷重-変位曲線上では、荷重応答の変化としてのみ観測される。換言すれば、荷重-変位曲線上の非線形挙動は、 0° 方向繊維層内のキンクバンド発生及びせん断破壊進展、さらに層間はく離など様々な損傷モードと関連して発生している。このような損傷モードは、相互に影響しあって同時に進展していくことが実験観察より明らかとなった。

そこで本研究では、実験によって推定した面内圧縮破壊挙動の数値的解明を主眼におき、マトリックス圧縮破壊と繊維圧縮-せん断破壊が面圧破壊の破壊モードとして支配的であると仮定し、損傷力学的解析を基礎としたモデル化を試みた。なお、本解析では、2 次元問題として扱うことで、解析対象となる積層板をモデル化するには、データ作成時の手間や、計算時間に要するコストを大幅に削減できる利点がある。よって、シミュレーションはより効果的になると考える。しかし、本解析での平面応力状態を仮定した 2 次元解析では、面外変形挙動を伴う板厚方向のせん断破壊や、層間はく離現象は考慮していない。

3. 損傷力学によるモデル化

本研究では、積層板の非線形応答を適切にシミュレートするために、積層板全体の力学挙動について、損傷に起因しない非線形性と、損傷に起因する材料劣化の非線形性を共に考慮できるような解析モデルが必要である。そこで、主

第2図 CF/PIXA 材と CF/Epoxy 材に関する荷重-変位線図と、各段階における供試材の軟X線探傷写真及び SEM による断面観察写真

に損傷前を対象とした一方向材のせん断変形の非線形特性と損傷力学的特性を解析モデルに導入した。

3.1 せん断変形の非線形性 非損傷時の一方向複合材において、最初に認識された非線形性は、繊維に沿うせん断変形に対する非線形性である¹⁴⁾。Hahn and Tsai は高次弾性理論を用いて¹⁵⁾、次式のように簡単な形で定式化した。

$$\varepsilon_{12} = G_{12}^{-1} \sigma_{12} + \alpha \sigma_{12}^3 \quad (1)$$

ここで、 G_{12} 、 σ_{12} と ε_{12} は、それぞれ初期せん断弾性係数、せん断応力とせん断ひずみである。 α は非線形弾性を表す材料定数である。

次に、以降の有限要素解析に用いるため、式 (1) を増分形に書き直す。

$$\sigma_{12}^{(i+1)} = \frac{1 + 2\alpha \left(\sigma_{12}^{(i)} \right)^3 \left(\varepsilon_{12}^{(i)} \right)^{-1}}{1 + 3\alpha G_{12} \left(\sigma_{12}^{(i)} \right)^2} G_{12} \varepsilon_{12}^{(i+1)} \quad (2)$$

式 (2) から明らかなように、微小荷重増分の範囲内においては、非線形性を有するラミナとして扱えることがわかる。損傷が生じた後は、この非線形性にも変化があることが考えられるが、実際の数値計算を行うと、損傷後は次節に述べる効果が大きいので、ここでは連成はないものと仮定した。

3.2 損傷力学的表现 本研究で実施した損傷進展解析には、通常の損傷力学の手法とほぼ同様のものを用いている。すなわち、有限要素法を用いて応力解析を行い、破壊

則を用いて各要素の損傷判定を行う。次に、損傷発生と判定された要素中の弾性係数を低下させ、応力再配分による他要素の損傷進展をシミュレートするものである⁴⁻⁷⁾。この方法では、材料の損傷状態を何らかの適切な損傷変数で記述することができれば、連続体力学の枠内で、損傷の進展と、損傷材料の力学的挙動の系統的取り扱いが可能となる²⁾。

そこで本研究では、前述したように、面圧破壊モードにおいて、積層板中における損傷は、主に層内のマトリックス圧縮破壊と繊維圧縮-樹脂せん断破壊の発生に支配されると仮定した。第1表に各破壊モードに対応する損傷判定則と損傷変数との関係を示す。表中の損傷変数 FV_i を、場の変数 (Field Variable) として定義する。 FV_1 と FV_2 は、それぞれマトリックス圧縮破壊、繊維圧縮-せん断破壊に対応する。 D_i は後述する式 (3) に示す損傷による材料の剛性の劣化係数である。各要素における損傷発生の有無は、修正した Hashin¹⁶⁾ と Yamada-Sun¹⁷⁾ の破壊則を用いて判定する。すなわち、破壊指数 $e \geq 1$ となった時、要素に損傷が発生したと判断する。なお、表中の破壊則に使った X_c 、 Y_c 、 S_c は、それぞれ一方向強化材の繊維方向、繊維と垂直方向の圧縮強度及び面内せん断強度である。これらについて、本論文で使用した値を第2表に示す。ただし、応力状態 $\sigma_i \geq 0$ の場合、すなわち引張り応力による損傷の全体の損傷状態への影響が少ないため、ここでは、解析の簡易化のため、圧縮損傷と同一の損傷変数 FV_i を用いている。

第 1 表 各破壊モードと損傷判定則及び損傷変数

Failure mode	Failure index	Damage variable
Matrix compression failure	$\sigma_2 \leq 0, e_m^2 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2$ (Hashin failure criteria)	FV_1 (D_2, D_6)
Fiber compression-shear failure	$\sigma_1 \leq 0, e_{fs}^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2$ (Yamada-Sun failure criteria)	FV_2 (D_1, D_2, D_6)

第 2 表 炭素繊維一方向強化 PIXA 複合材料の力学特性

Elastic properties of CF/PIXA	
Longitudinal modulus, E_1 (GPa)	152.4
Transverse modulus, E_2 (GPa)	8.06
Shear modulus, G_{12} (GPa)	4.69
Poisson's ratio, ν_{12}	0.34
Strength properties of CF/PIXA	
Longitudinal tensile strength, X_t (MPa)	2293
Longitudinal compression strength, X_c (MPa)	948.2
Transverse tensile strength, Y_t (MPa)	66.2
Transverse compression strength, Y_c (MPa)	210
In-plane shear strength, S_c (MPa)	155.3

引張り応力による損傷発生の判定の詳細説明を Appendix A に示す。

3.3 損傷累積と材料劣化 材料中の損傷は、材料の剛性低下としてモデル化することができるので、損傷を受けた要素の弾性係数低下を、以下の手法を用いて定めることとする。はじめに、非損傷時に対称な積層板を考えると、平面応力状態における各ラミナの応力-ひずみ関係を次式のよう表せる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}^0 & Q_{12}^0 & 0 \\ Q_{12}^0 & Q_{22}^0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}^0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 ε_{12} は式 (1) に示す非線形せん断ひずみで、 Q_{ij}^0 は剛性マトリックス成分である。次に、損傷発生後の各ラミナにおける有効剛性マトリックス Q_{ij}^* は、

$$[Q_{ij}^*] = \begin{bmatrix} Q_{11}^0 D_1 & Q_{12}^0 & 0 \\ Q_{12}^0 & Q_{22}^0 D_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}^0 D_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

で与えられる。 D_1, D_2 と D_6 はそれぞれ損傷変数 FV_i に依存する材料定数の劣化係数である。本解析では、各要素の損傷発生後の弾性係数は、各損傷モード FV_i に応じて低下させることとする。損傷材料の劣化係数 D_i と損傷変数 FV_i の関係を第 3 表に示す。なお、これらの劣化係数の決定方法について後の 5.1 節に記述する。また、工学的定数と弾性定数の換算関係についての詳細説明を Appendix B に示す。

4. 有限要素法による解析

4.1 解析モデル 解析では、第 1 図に示したダブルラッ

第 3 図 FEM 解析における要素分割と境界条件の概略
(a) 全体的要素分割
(b) 3 種類の局部的要素分割

プ接合形式の中間ラップのみを取り出したものを解析モデルとした。解析対象物の対称性を考慮して、積層板の全体の半分について要素分割を行い、応力が急激に変化していると予想される円孔の近傍において要素を細かく分割し、また破壊挙動解析に及ぼす要素分割の影響を調べるため、3 種の要素分割で損傷シミュレーションを実施した。要素分割と境界条件の概略を第 3 図に示す。なお、擬似等方性積層板 $[45/0/-45/90]_{2S}$ の部分に対しては、4 節点の平面応力要素 (CPS4R) を使用し、板厚方向に 4 層を設け、各層の要素が同一節点で構成され、層ごとに要素番号を取り換えることによって作成した^{18, 19)}。層レベルまで分解すると、厳密には対称性が失われるが、ここではそれを無視している。

これまで著者ら²⁰⁾ は、ピン継手による荷重伝達の場合、ピン/円孔間の摩擦効果が荷重伝達に重要な役割を果たすことを明らかにした。また、積層板端面における摩擦係数の求め方を提案し、摩擦係数が孔周りの接触応力分布に与える影響を示した。しかしながら今回、解析問題を単純化するため、ピンの部分を剛的な円弧表面として定義し、ピン/円孔間の摩擦係数の影響は無視した。解析に用いた炭素繊維一方向強化 PIXA 複合材料の力学特性は、第 2 表に示す

第3表 FEM 解析における材料の損傷変数 FV_i と剛性劣化係数 D_i との関係

Failure state	Damage variable		Material properties			
	FV_1	FV_2	E_1	E_2	ν_{12}	G_{12}
No failure	0	0	E_1	E_2	ν_{12}	G_{12}
Matrix compression failure	1	0	E_1	$D_2 E_2$	$D_2^{-1} \nu_{12}$	$D_6 G_{12}$
Fiber compression-shear failure	0	1	$D_1^{1st} E_1$	$D_2 E_2$	$D_2^{-1} \nu_{12}$	$D_6 G_{12}$
Matrix compression failure & Fiber compression-shear failure	1	1	$D_1^{2nd} E_1$	$D_2 E_2$	$D_2^{-1} \nu_{12}$	$D_6 G_{12}$

値を使用した。

4.2 汎用 FEM コードによる解析の実施 本解析では、汎用 FEM コード ABAQUS を使用した。逐次破壊を考慮した損傷シミュレーションでは、第3図中のピン中央部に強制変位を与え、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。なお、前述した損傷変数、要素の破壊条件をユーザサブルーチン USDFLD に取り込むことによって処理した。すなわち、この機能を利用することによって、損傷発生後の材料特性を、場の変数（損傷変数 FV_i ）の関数として定義することができ、さらに材料計算点の情報を解依存の状態変数（Solution Dependent State Variables: SDV）として保存した。シミュレーション過程の概要を以下に示す。

- (1) 対象となる解析モデルの形状データと境界条件を入力する。
- (2) ピン中央部に与えた強制変位を増加させ、接触力ならびに収束状態を求める。
- (3) 式 (3) に基づき、積層板における各要素の応力解析を行う。
- (4) 第1表に示す破壊則を用いて各要素の破壊判定を行う。
- (5) 要素破壊が生じた場合は、その要素の弾性係数を第3表に示すように変更する。さらに同一の強制変位の条件下で応力状態の再計算を行う。
- (6) 新たな破壊要素の発生が判定されなくなるまで (3) ~ (5) の処理を繰り返す。破壊要素が存在しなくなったら (2) に戻って、強制変位の増分を更新し、最終ステップまで (2) ~ (5) を繰り返す。

以上のアルゴリズムを組み込んだ2次元損傷シミュレーションのフローチャートを第4図に示す。

5. 解析結果とその検証

5.1 材料劣化係数の決定 本解析では、3.3 節に述べた損傷材料の劣化係数 D_i を、ラミナの損傷に依存する定数として扱っている。問題の核心はこれらの劣化係数 D_i 値の決定にある。これまで多くの研究^{2, 3)} は、 D_i を歪みの関数として実験によって求めることが一般的である。ただし、複雑な面圧問題について、実際に損傷状態下の歪み測定が困難であるため、 D_i 値の決定に関する理論的、あるいは実験的な評価方法がほとんど確立されていないのが現状である。この理由で、本研究では、 D_i 値の決定をより簡便、現実的な方法で行うことを考えて、以下の方針を採用した。

- (1) 決定すべき劣化係数 D_i の種類、数を最大限に減らす。
- (2) 要素分割が解析結果に与える影響を明確にする。

第4図 損傷進展シミュレーションのフローチャート

(1) について、一般に積層板の層内方向に初期圧縮損傷が発生しても、き裂表面で考えると、圧縮応力となるので耐荷能力はまだ残存している。また、 D_i の中では、荷重方向の繊維剛性劣化係数 D_1 の変化が最も支配的である。このため、マトリックス損傷による材料劣化係数 D_2 と D_6 は一定値と仮定し、主に繊維方向の劣化係数 D_1 の変化を考慮する。まず D_2 と D_6 の決定について言及すると、Tanら⁵⁾ は、積層板の有孔圧縮損傷問題として、 D_2 と D_6 ともに 0.01 ~ 0.3 の間で変化させ、要素分割や荷重増分の大きさなどの影響を含め検討した。その結果は、異なる要素分割や荷重増分に対する変動の最も少ないケースで、材料劣化係数 D_2 と D_6 共に 0.3 を採用している。本研究ではこれにならって、 $D_2 = D_6 = 0.3$ と定める。

一方、2.2 節に述べた損傷に関する考察から、面圧破壊での損傷累積の特徴として、ワッシャーによる側面拘束は、損傷進展の抑制に大きな役割を果たし、その結果、面内剛性低下の緩和につながると考えられる。その反映として、本研究では、圧縮破壊挙動で支配的となる、繊維方向の材料の劣化係数 D_1 の2段階低下手法を提案する。すなわち、 D_1 を損傷程度に応じて2つの値に分け、 D_1^{1st} 及び D_1^{2nd} で表すこととした。さらに詳細に言うと、各要素の応力状態から FV_i が計算され、 $FV_1 = FV_2 = 1$ となった時に D_1^{2nd} を用いる。 D_1^{1st} と D_1^{2nd} の決定方法を以下に示す。

(I) D_1^{1st} を 0.07 ~ 0.2 の間で変化させ、3種の要素分割における荷重-変位曲線を求める。これにより、要素分割を決定し、初期損傷をもたらす荷重の見込み値を確認する。

(II) D_1^{2nd} は、 D_1^{1st} の指数倍数として変化させ、実験値との比較を行う。さらに、実験値との比較が良くなるまで、 D_1^{1st} 値を修正し、再検討を行う。

(a) $D_1^{1st}=0.07, D_1^{2nd}=(D_1^{1st})^2, D_2=D_6=0.3$ (b) $D_1^{1st}=0.1, D_1^{2nd}=(D_1^{1st})^2, D_2=D_6=0.3$ (c) $D_1^{1st}=0.2, D_1^{2nd}=(D_1^{1st})^2, D_2=D_6=0.3$ 第 5 図 材料劣化係数 D_1^{1st} 値に関する検討 (D_1^{1st} 値の決定と要素分割の影響)

上記の一連の検討結果を第 5, 6 図に示す。まず, 第 5 図は D_1^{1st} の変化と要素分割が $P-\delta$ 線図に与える影響を示すものである。 D_1^{1st} は 0.07~0.2 まで変化させ, その時, D_1^{2nd} は $(D_1^{1st})^2$ とした。図中に用いた 3 種の要素分割 Mesh-1, Mesh-2, Mesh-3 は第 3 図 (b) に示したものである。3 種とも円孔中心から放射状に要素分割したが, 違いは要素の大きさの変化のみとした。1 層ごとの要素数と節点数は, それぞれのメッシュ種類に応じて, 要素数 250, 475, 1300, 節点数 292, 532, 1382 である。なお, 解析全領域では同一形状の要素を用いた。

第 5 図 (a)~(c) を比較すると, 面圧強度の初期部の応答は, D_1^{1st} 値の変化に強く依存することがわかる。しかし, 要素分割法の違いが $P-\delta$ 線図に与える影響はわずかであることもわかった。以降の解析では, 計算時間の短縮を理

(a) Mesh-2, $D_1^{1st}=0.2, D_2=D_6=0.3$ (b) Mesh-2, $D_1^{1st}=0.25, D_2=D_6=0.3$ (c) Mesh-2, $D_1^{1st}=0.3, D_2=D_6=0.3$ 第 6 図 材料劣化係数 D_1^{2nd} 値に関する検討 (要素分割 Mesh-2 を用いた D_1^{2nd} 値の決定)

由として, 要素分割を Mesh-2 とし, 初期損傷時の荷重応答を予測するのに適切な D_1^{1st} 値は, $D_1^{1st} \geq 0.2$ の範囲でさらに検討した。

次に第 6 図は, 要素分割 Mesh-2 を用い, D_1^{2nd} が D_1^{1st} の指数倍数 (3 乗~6 乗) として変化させた検討結果である。第 6 図 (a) には, $D_1^{1st} = 0.2$ の場合, 初期損傷応答が実験値よりやや低くなるため, 第 6 図 (b) と (c) では, D_1^{1st} を修正した。いずれの場合も, D_1^{2nd} の損傷進展段階における強度応答曲線上の変動への影響が顕著である。また, D_1^{1st} の修正は初期損傷応答の予測に対して極めて重要であることが認められる。以上から第 6 図 (c) に示す $D_1^{1st} = 0.3$, $D_1^{2nd} = (D_1^{1st})^5$ の結果が実験値に最も良く一致し, 以降はこの値を解析に用いる。

5.2 強度応答及び損傷進展挙動の再現 本解析の有効

性を検証するため、CF/PIXA 積層板の継手部強度応答である荷重-変位曲線と損傷進展パターンの両面から、解析結果と実験結果を比較し、シミュレーションによる結果の再現性を検討する。

第7図に、前節に検討した結果（第6図(c)）を用いて、 $D_1^{1st} = 0.3$, $D_1^{2nd} = (D_1^{1st})^5$, $D_2 = D_6 = 0.3$ とし、要素分割 Mesh-2 を用いて求められた継手部における荷重-変位曲線のシミュレーション結果と実験により測定した結果との比較を示す。面圧強度であるピンの4%変位量を生じたときの荷重 $P_{4\%d}$ 付近に達するまで、荷重-変位曲線においてわずかに非線形挙動が表れるが、これは、3.1 節に述べたせん断変形の非線形効果と、初期段階の微視的な損傷発生による材料劣化の複合効果であると思われる。さらに荷重を増大すると、損傷領域の拡大に伴い、荷重応答の非線形性が顕著に現れている。このような非線形挙動は、負荷過程の初期の損傷段階のみならず、継手部の最終構造破壊に至るまでも、実験結果を良く再現していることが確認できる。

第7図 シミュレーションで得られた荷重-変位曲線と実験値の比較

第8図に、実験により各負荷段階で取得した面圧損傷の軟 X 線写真を、損傷シミュレーションの結果と共に示す。解析により得られた内部の損傷形態は、各損傷モードや各層ごとにプロットしたもので、各負荷段階の荷重値はピンの中心節点反力として求めたものである。実験結果と解析結果を比較すると、負荷過程の各段階において設定した損傷モードは定性的にほぼ同様な傾向を示し、実験結果とある程度一致している。しかし、2.2 節に述べたように、面圧破壊過程は非常に複雑であり、複数の内部損傷モードが併発するため、撮影した面圧損傷の軟 X 線写真には、層内の圧縮損傷以外に、板厚方向のせん断破壊や層間はく離など様々な損傷が含まれている。この状況から、本研究で実施した 2 次元損傷シミュレーションが、実験における損傷現象を忠実に再現することに限界があることが認められる。この問題の改善策点として、今後さらに 3 次元非線形損傷解析による数値的評価を行う予定である。

しかし、本研究で実施した 2 次元損傷シミュレーションでも、継手部の破損様相を損傷モード別に捉えて、各層の応答を説明するという観点からは、面圧破壊メカニズムをある程度再現できると期待され、この問題を考察することで、次のステップの基礎となると考えられる。

6. 結 論

本研究では、複合材料の機械的接合部において、積層板の面圧損傷の発生・進展を数値的に評価するために、2 次元損傷力学的なアプローチを構築し、汎用 FEM コード ABAQUS を利用して損傷進展過程をシミュレートした。継手部の強度応答と損傷進展パターンを実験結果と比較し、積層板内部の損傷進展挙動をシミュレーションで再現することを試みた。得られた結果を以下に要約する。

(1) 負荷過程に発生する材料応答の 2 つの非線形性挙動について、損傷に起因しないものとするものを損傷解析

Load	X-radiograph	Matrix compression failure				Fiber compression-shear failure			
8KN									
10KN									
12KN									
16KN									
		45° ply	0° ply	-45° ply	90° ply	45° ply	0° ply	-45° ply	90° ply

第8図 シミュレーションによる各負荷段階で取得した面圧損傷と実験結果の比較

モデルに取り入れることができる。

(2) 本研究で提案した損傷材料の劣化モデルに関する D_1 値を 2 段階で低下させる手法は、複雑な現象を伴う損傷シミュレーションを簡便に行う便法と考えられる。

(3) 開発した損傷シミュレーション評価手法は、複合材の接合部挙動解析の第一歩となるものであり、この方法での試験を整理し、限界を考慮することにより、次の一歩の基礎を提供する。

(4) 板厚方向のせん断破壊や層間はく離、さらにワッシャーによる表面拘束の効果を含む 3 次元非線形損傷解析を基礎としたシミュレーションは、今後の検討課題である。

参 考 文 献

- (財)次世代金属・複合材料研究開発協会：平成 11 年度航空宇宙システム用先進複合材料の接合技術に関する調査報告書，日機連 11 先端-19，2000。
- 村上澄男：損傷力学とその最近の発達，機論 A，**51** (1985)，pp. 1651-1659。
- Chaboche, J. L.: Continuum Damage Mechanics (Part I—General Concepts; Part II—Damage Growth, Crack Initiation and Crack Growth), J. Appl. Mech., **55** (1988), pp. 59-72。
- Chang, F. K. and Lessard, L. B.: Damage Tolerance of Laminated Composites Containing an Open Hole and Subjected to Compressive Loadings (Part I—Analysis), J. Compos. Mater., **25** (1991), pp. 2-43。
- Tan, S. C. and Perez, J.: Progressive Failure of Laminated Composite with a Hole under Compressive Loading, J. Reinforced Plastics Composites, **12** (1993), pp. 1043-1057。
- 座古 勝，辻上哲也，津村卓也：損傷異方性を考慮した複合材料用有限要素法の開発，材料，**43** (1994)，pp. 265-270。
- 島村佳伸，轟 章，小林英男，中村春夫：FRP 損傷シミュレーションへの破壊モードの影響，機論 A，**62** (1996)，pp. 328-334。
- Lessard, L. B. and Shokrieh, M. M.: Two-Dimensional Modeling of Composite Pinned-Joint Failure, J. Compos. Mater., **29** (1995)，pp. 671-697。
- Hung, C. L. and Chang, F. K.: Bearing Failure of Bolted Composite Joints (Part II: Model and Verification), J. Compos. Mater., **30** (1996)，pp. 1359-1400。
- Kim, S. J., Hwang, J. S. and Kim, J. H.: Progressive Failure Analysis of Pin-Loaded Laminated Composites Using Penalty Finite Element Method, AIAA J., **36** (1998)，pp. 73-80。
- Camanho, P. P. and Matthews, F. L.: A progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates, J. Compos. Mater., **33** (1999)，pp. 2248-2280。
- 肖 毅，石川隆司：複合材料の機械的継手部の面圧強度と損傷進展挙動の関係，日本複合材料学会誌，**28** (2002)，pp. 56-65。
- 肖 毅，石川隆司：CFRP 複合材料の機械的接合部における面圧強度の非接触測定，日本複合材料学会誌，**26** (2000)，pp. 213-218。
- 石川隆司，松嶋正道，林 洋一：一方向強化炭素繊維複合材料の繊維方向の非線形特性，日本複合材料学会誌，**12** (1986)，pp. 8-15。
- Hahn, H. T. and Tsai, S. W.: Nonlinear Elastic Behavior of Unidirectional Composite Laminae, J. Compos. Mater., **7** (1973)，pp. 102-118。
- Hashin, Z.: Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, J. Appl. Mech., **47** (1980)，pp. 329-334。
- Yamada, S. E. and Sun, C. T.: Analysis of Laminate Strength and Its Distribution, J. Compos. Mater., **12** (1978)，pp. 275-284。
- HKS Inc.: ABAQUS/Standard version 5.8, Example Problem Manual, Rhode Island, USA, 1998, I: 3.2.25。
- HKS Inc.: ABAQUS/Standard version 5.8, User's Manual, Rhode Island, USA, 1998。
- Xiao, Y., Wang, W. X., Takao, Y. and Ishikawa, T.: The Effective Friction Coefficient of a Laminate Composite, and Analysis of Pin-Loaded Plates, J. Compos. Mater., **34** (2000)，pp. 69-87。

付録 Appendix A 引張り応力による損傷判定

引張り応力状態下でのマトリックス割れ，繊維破断—せん断破壊の発生は，次式に示す修正した Hashin の破壊則¹⁶⁾と Yamada-Sun の破壊則¹⁷⁾を用いて判定する。

マトリックス割れ：

$$\sigma_2 \geq 0, \quad e_m^2 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c} \right)^2 \quad (\text{A-1})$$

繊維破断—せん断破壊：

$$\sigma_1 \geq 0, \quad e_{fs}^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c} \right)^2 \quad (\text{A-2})$$

ここで， X_t ， Y_t は，それぞれ一方向強化材の繊維方向，繊維と垂直方向の引張り強度で，これらを第 2 表に示す。

付録 Appendix B 工学的定数と弾性定数の換算

式 (3) に，非損傷時において工学的定数と弾性定数との間に次の関係がある。

$$\begin{aligned} Q_{11}^0 &= mE_1^0 & Q_{22}^0 &= mE_2^0 \\ v_{12}^0 &= \frac{Q_{12}^0}{Q_{22}^0} & Q_{66}^0 &= G_{12}^0 \end{aligned} \quad (\text{B-1})$$

ただし，

$$m = \left[1 - \frac{Q_{12}^0 Q_{21}^0}{Q_{11}^0 Q_{22}^0} \right]^{-1}$$

よって，式 (4) 中，損傷発生後の有効工学的定数 Q_{ij}^* は，次のように表せる。

$$\begin{aligned} Q_{11}^* &= mE_1^0 D_1 & Q_{22}^* &= mE_2^0 D_2 \\ v_{12}^* &= \frac{Q_{12}^0}{Q_{22}^*} = v_{12}^0 D_2^{-1} & Q_{66}^* &= G_{12}^0 D_6 \end{aligned} \quad (\text{B-2})$$

ここで，注意したいのは，各ラミナにおける有効剛性が直交異方性を有し，ただし， m が材料損傷に依存しないと仮定する。