解説シリーズ

複合材料のマイクロメカニクス・損傷解析の最新動向—VII.

——面外低速衝撃による積層複合材料の損傷進展

シミュレーションの最新動向——

胡

寧*

1. はじめに

繊維強化プラスチック (FRP) を中心とした積層複合材料は優れた比剛性・比強度を有し、重量軽減が重要な航空宇宙構造等に適用されている。しかし、積層複合材料は面内強度と比べて層間強度が非常に弱く、特に、面外低速衝撃荷重が作用する場合には、図1に示すようにマトリックスき裂・層間はく離・繊維破断などの損傷が発生し、材料の残留強度に悪影響を与える^{1,2)}。特に、層間はく離とマトリックスき裂は衝撃後残留圧縮強度 (CAI) の大幅な低下を招くため、現在の航空機複合材料構造設計の重要な設計基準の一つとなっている。また、このような材料の内部損傷は目視によって発見することが非常に困難であるため、疲労荷重などによる損傷の進展はさらに危険な事故につながる恐れがある。

したがって、積層複合材料の優れた性質を活かしつつ、航空機運行時の強度を保証する設計を行うためには、低速衝撃荷重下における損傷の発生・進展メカニズムを解明し、損傷進展評価法を確立することが不可欠となる。低速衝撃による積層複合材料の損傷発生・進展に関して、これ迄実験的手法による研究結果は数多く報告されているが、実験によって複雑な破壊現象を全て把握するにはコスト的にも困難を伴う。そこで、数値解析手法に基づいて損傷進展および破壊挙動を解明しようとする試みも多くなされており、Abrate^{1,2)}、Richardson ら³⁾の解説論文にも示されているように、最近20年間、複合材料研究分野において多くの研究者の注目を集めている。

積層複合材料の損傷に関する研究は極めて多数にのぼるが、本解説では、積層複合材料中の低速衝撃損傷の発生・進展予測のための数値シミュレーションに焦点をあ

て、本問題に関連するいくつかの重要な研究課題と数値解析手法について解説する。最初に、衝撃物体と積層構造間の接触則を紹介し、積層構造の衝撃応答解析法を説明する。続いて、応力情報に基づく破壊基準の紹介、低速衝撃の複合材料衝撃損傷に関する最近の研究とその解析例などについて評述する。

2. 衝撃物体と積層構造との接触則

積層複合材料構造の衝撃応答を正確に解析するために、衝撃物体と積層構造間の相互作用、即ち両物体間の接触現象を正しく捉えることが重要となる。従来、等方性材料においては、準静的接触力と食い込み量の関係を記述する Hertz 則がよく用いられている⁴⁾。複合材料においては、spring-mass モデル、energy balance モデル、assumed force モデルなどの簡略化された方法が、定性的な衝撃特性をモデル化するために用いられてきた¹⁻³⁾。さらに、より詳細な解析のため、Yang ら⁵⁾と Tan ら⁶⁾は、球体衝撃による準静的な実験結果から負荷と再負荷のカーブが1.5の指数法則、除荷のカーブが2.5の指数法則に従うことを示し、修正された Hertz 則を提案した。この修正 Hertz 則は下記で定義される：

$$\text{負荷：} \quad F = \kappa \alpha^{1.5} \quad 0 < \alpha \leq \alpha_m \quad (1a)$$

$$\text{除荷：} \quad F = F_m \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_m - \alpha_0} \right)^{2.5} \quad (1b)$$

$$\text{再負荷：} \quad F = F_m \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_m - \alpha_0} \right)^{1.5} \quad (1c)$$

ここで、 α は図2に示すように食い込み量であり、接触剛性 κ は積層構造と球体の材料特性や球体の寸法に依存する定数であり、実験^{5,6)}あるいは弾性理論⁷⁾で評価する。 F_m は除荷が始まる前の最大衝撃荷重、 α_m は負荷段階の最大食い込み量、 α_0 は衝撃過程における永久食い込み量であり、下記のように評価する。

$$\alpha_0 = \begin{cases} \eta(\alpha_m - \alpha_p) & \text{if } \alpha_m > \alpha_p \\ 0 & \text{if } \alpha_m < \alpha_p \end{cases} \quad (2)$$

* Ning Hu：東北大学工学研究科航空宇宙工学専攻
(980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

図1 低速衝撃による積層複合材料の損傷

ここで、 η と α_p は実験で定まる定数である。

現在、上記の修正 Hertz 則が衝撃解析によく使われているが、この接触則にはいくつかの問題点がある。ここでは、その問題点に対する最近の研究成果を紹介する。

まず、修正 Hertz 則は積層構成、積層板の幅と厚み、および、衝撃物体の形状と摩擦などの情報が含まれていない。Suemasu ら⁸⁾は局所的な押し込み問題を調べ、板の厚さ効果を導入して、球状衝撃物体の半無限体への押し込みの解と Boussinesq 問題の解に重ね合わせの原理を使って、横荷重と食い込みの陽な関係を導いた。この関係から、板が薄くまたは接触力が高いときには板厚の影響を無視できないことが分かっている。Wu ら⁹⁾は Pagano の厳密解を使って、クロスプライ積層板と剛体球間の静的な食い込み関係を表す Green 関数を導き出した。この関係では、材料特性、積層構成、板の幅と厚さ、また剛体球の寸法などの影響を考慮している。Kim ら¹⁰⁾は有限要素法を用いて、上記の材料特性などが接触則におよぼす影響について検討した。これらの計算結果により^{9,10)}、修正 Hertz 則は正確な接触力を計算できず、通常は同じ食い込み量に対して、接触力を低めに見積もっていること、および、積層構成は接触則に大きな影響を与えることが示されている。

また、修正 Hertz 則は、衝撃による損傷が接触則に与える影響を考慮していない。Mahajian¹¹⁾は有限要素法を用いて、クロスプライ積層はりに対して、繊維配向方向、はりの厚さ、衝撃物体の大きさ、マトリックスき裂とはく離の存在など、様々な要素が接触挙動に与える影響を調べている。この計算結果から、接触域から離れたはり下部にマトリックスき裂とはく離が存在する場合は、損傷が接触力に与える影響は無視できること、一方、接触域近くにマトリックスき裂とはく離が存在する場合には、接触力の最大値と分布面積は減少することが示されている。また、積層構成については、全て 90° の構成である場合を除き、接触挙動に与える影響は非常に

図2 インパクトと積層複合材板の接触

小さいこと、さらに、積層の厚さのパラメータを接触則に考慮することが重要であることが示されている。

もう一つの重要な問題点は、衝撃物体との接触によって生じる積層板表面の局所的な塑性変形が接触則におよぼす影響である。一般に、Hertz の接触則は球体と弾性半無限体の静的弾性解析によるものであり、衝撃初期段階において板表面が弾性変形である場合に適用可能である。一方、食い込み量の増加に伴って局所的な塑性変形が生じる場合は、その影響を考慮しなければならない。Yang ら⁵⁾は永久変形パラメータ α_0 を導入することによって、式 (1b) と (1c) に示すように除荷と再負荷の過程ごとに接触力を評価した。しかし、この式では、負荷の段階で弾性変形の特性だけを考慮しているため、もし負荷の段階で衝撃物体による積層板表面の局所的な塑性変形がある場合は、修正 Hertz 式はこの特徴を反映できない。この現象は非常に複雑であるため、局所的な挙動（板表面の局所的な変形）とグローバルな挙動（板全体がたわむ変形）を分離することが必要となる。Swanson ら¹²⁾は剛体板の上に積層板を置き、積層板と剛体の衝撃物体の接触則を実験で調べた。この実験では板表面の局所的な接触挙動を調べることが可能であり、高い荷重下では、顕著な塑性変形が生じることが観測され、その塑性変形は接触則に大きな影響を与えることが明らかとなっている。また、Yigit ら¹³⁾は塑性変形が生じた領域に完全塑性挙動、それ以外の領域に弾性挙動を仮定することによって、新たな接触則を提案したが、この接触則はまだ実験で十分な検証が行われていない。

3. 積層構造の衝撃応答解析

衝撃損傷進展解析の基礎として、無損傷の積層複合材料構造の衝撃応答解析を考える。このとき、積層構造と衝撃物体の変形と運動を考慮しなければならないが、計算コストを減らすため、多くの研究において衝撃物体が剛体としてモデル化されている。

Sun ら^{14,15)}は修正 Hertz 則と Mindlin 板有限要素を使い、初期面内力を受ける積層板の衝撃応答を調べた。Lee ら¹⁶⁾は積層板に板要素を使って、修正 Hertz 則を導入して板の低速衝撃応答を解析し、積層板の材料定数

が板の衝撃応答に与える影響を調べ、衝撃側の板表面の材質が衝撃力に大きな影響を与えることを明らかにした。Vaziri ら¹⁷⁾は修正 Hertz 則とスーパー有限要素を使って、粗いメッシュで積層板とシェルの衝撃応答を解析し、その解法の高精度さを示した。Christoforou ら¹⁸⁾は、Yigit ら¹³⁾の接触則を応用して、フーリエ級数を用いて積層板の衝撃応答を解析し、衝撃物体の接触下における板の動的理論解を得ることに成功している。

以上の研究は、無損傷の積層板の衝撃応答に関する研究であり、初期はく離が衝撃応答に与える影響を調べていない。一方、著者ら^{19~21)}は Mindlin 板要素と修正 Hertz 則を用いて、はく離を有するクロスプライ積層板の衝撃応答を計算した。はく離した層間の接触状態を調べ、はく離領域においてはピーナッツ形状の開口状態の領域が存在することを示し、ピーナッツ形状の長軸ははく離した層間の下層の繊維配向方向と一致することを示した。一般に、モード II がはく離の発生と大きさを左右することがよく知られているが、このようなピーナッツ形状の開口状態の領域は、モード I がはく離形状の生成過程に重要な役割を果たすことを意味する。

4. 応力情報に基づく破壊基準

低速衝撃は積層板に様々な破壊を引き起こすことがよく知られている。多くの研究者は様々な理論モデルを提案し、積層材料の損傷を評価してきた。その中でも、応力情報に基づく破壊基準は数多く研究されている^{22,23)}。このような破壊基準では、単層内の面内破壊と界面はく離などの発生を予測する。

最近、いくつかの破壊基準が提案された。例えば、単層の面内破壊を予測するために、Chang ら²⁴⁾は引張りとせん断破壊基準を提案しており、この破壊基準は他によく知られる破壊基準、例えば Hashin 基準²³⁾の理論とよく似ている。また、上記の面内破壊基準を拡張して、Brewer ら²⁵⁾、Choi ら²⁶⁾、Chai ら²⁷⁾は、はく離の破壊基準を提案している。Brewer ら²⁵⁾のはく離基準では、界面の垂直応力 σ_3 を考慮している。一方、Choi ら²⁶⁾と Chai ら²⁷⁾は σ_3 の代わりに、上下層の繊維と直角方向の応力成分 σ_{22} の比を用いて、マトリックスき裂から誘起されるはく離発生を検討した。Hou ら²⁸⁾は Chang-Chang 基準²⁴⁾を修正し、層間はく離の判定に Brewer らの基準²⁵⁾を導入した。

これまでの様々な研究成果により、応力情報に基づく破壊基準は損傷の発生、特にマトリックスき裂と繊維破壊などの面内損傷の発生に有効に適用できることが示さ

れている。一方、損傷が大きい場合、損傷の進展と損傷サイズの予測の精度はあまり高くない。特に、層間にはく離に関しては、Davies ら²⁹⁾が指摘したように、応力情報に基づく破壊基準では寸法効果を反映していないため、はく離進展の予測精度が余り良くない。そのため、はく離進展を正しく評価するには、エネルギー解放率に基づく破壊力学モデルを用いるべきである²⁹⁾。

5. 低速衝撃による積層複合材料の衝撃損傷

低速衝撃による積層複合材料の衝撃損傷予測と損傷進展解析について、前節に紹介したように、いくつかの困難な課題がある。例えば、衝撃物体と積層構造間の接触則、大変形下の層間応力の高精度解析、破壊発生の判定基準などが挙げられる。それ以外にも、面内損傷発生後の剛性低下、例えば、積層構成関係式の更新、および、破壊進展の判別と進展過程の模擬、層間にはく離による層間の接触問題など、損傷進展解析は困難を極める。このようなモデル化の複雑さや計算規模の増大、非線形特性、解の収束性低下などの理由により、現在までの主な研究は、単純なクロスプライ積層を対象として層間にはく離数が少ない場合を扱う例が多い。実際によく使われる多層の擬似等方性積層板を対象とした衝撃損傷解析は、次節で紹介する著者らの研究を除いてまだ行われていないと思われる。

積層複合材料のモデリングには有限要素法 (FEM) がよく使われている。FEM における数値解析方法には、二次元要素モデル、板あるいはシェル要素モデル、三次元要素モデルなどがあるが、本解説はこの順で説明していく。

5.1 二次元有限要素モデル

積層構造の破壊進展解析として、積層はりを対象に、二次元の平面応力 FEM モデルを用いた研究がある。例えば、Geubelle ら³⁰⁾は二次元のコヒーシブ要素を用いて、薄い積層はりの低速衝撃損傷、特にはく離の解析を行っている。この研究では動的非線形 FEM にコヒーシブ要素を層間と層内部に導入し、マトリックスき裂と層間にはく離の発生と進展を同時にモデル化し、時間増分法としては陽的解法を使って解析を行っている。この手法は二次元問題の複雑な破壊現象をシミュレート可能であることを示したが、三次元問題に対しては、特に層数が多い場合は計算の規模が非常に大きく、解析が困難となる。Tay ら³¹⁾は計算規模を削減するため、粗いメッシュを用いて要素破壊アルゴリズムを提案し、二次元の平面応力 FEM モデルで複合材料のはり問題を解析し、

T^* 積分方法を用いてクラックの発生、進展方向を判別した。この手法の問題点としては、一つの要素の中で、複雑なき裂先端の応力場とひずみ場を正しく反映できない可能性が高いことが挙げられる。

5.2 板とシェル有限要素モデル

板あるいはシェル要素を使って、積層複合材料の衝撃損傷の解析研究が行われている。Zhao ら³²⁾ は8節点の非適合シェル要素を用い、積層シェル構造の衝撃損傷を解析した。ここでは既に紹介した修正 Hertz 則を用いており、Tsai-Wu²²⁾ 破壊則を使って層内の面内破壊の評価を、Hou ら²⁸⁾ の応力情報に基づくはく離評価基準を使ってはく離のサイズを評価した。彼らははく離に及ぼす曲率の影響が大きいことを示している。Mahanta ら³³⁾ は、高次板理論を用いて低速衝撃による積層板の損傷解析を行った。彼らは修正 Hertz 則を用い、Chang-Chang²⁴⁾ と Choi ら²⁶⁾ の応力基準に基づいて、面内破壊則とはく離損傷評価則によって損傷を評価し、適当な有限要素メッシュサイズの必要性を示している。応力破壊基準では、衝撃損傷解析結果がメッシュサイズに強く依存することが知られており、破壊力学に基づく手法が望ましい。Her ら³⁴⁾ は ANSYS/LS-DYNA のシェル要素を用いて、低速衝撃による複合シェル構造の損傷解析を行っている。修正 Hertz 則を用い、Choi ら²⁶⁾ の基準を用いて、シェルの曲率、境界条件、衝撃速度などのパラメータの影響を調べ、衝撃力は衝撃速度と正比例することを示すとともに、衝撃速度は衝撃損傷に大きな影響を与えることを明らかにした。Icardi ら³⁵⁾ は C^0 タイプ8 節点板要素解析に基づき、高精度の板厚方向三次式ジグザグ変位場モデルを適用して、ブレードおよびハット形状の補強板の衝撃損傷を調べた。面内破壊には Hahsin²³⁾ のモデルを、はく離に Choi ら²⁶⁾ と Chai ら²⁷⁾ の基準を適用して損傷の評価を行い、はく離基準において σ_{33} の影響は小さいことを指摘した。

5.3 三次元有限要素モデル

三次元の FEM を用いて、積層構造の衝撃損傷を解析した研究も多い。例えば、Duan ら³⁶⁾ は三次元 FEM を用い、衝撃物体と積層構造間の接触問題に、修正 Hertz 則ではなく速度場を用いた接触アルゴリズムを提案した。この方法は接触の非貫通条件を高精度に満たすこと、数値不安定性を減らすことなどの利点を持っている。なお、層間はく離に関して、Choi ら²⁶⁾ の半経験的なはく離評価モデルを用いている。Collombert ら³⁷⁾ は、衝撃物体を離散化した接触アルゴリズムを用いて接触面と接触力を算出している。また、面内破壊については応

力破壊基準、はく離は界面力に基づく破壊基準によって評価した。これらの解析モデル^{36,37)} では修正 Hertz 則を使わずに、衝撃物体と積層構造の接触面を探すため、計算の規模が大きくなることが弱点となる。

Guan ら³⁸⁾ は衝撃破壊によって引き起こされる剛性低下が修正 Hertz 接触則に与える影響を調べた。また、彼らは Yang ら⁵⁾ と Tan ら⁶⁾ が提案した接触則の徐荷の部分で修正するとともに、Tsai-Wu²²⁾ 破壊則を用いてマトリックス裂の発生および剛性低下を考慮した解析を行っている。はく離は Choi ら²⁶⁾ のモデルを用いており、人工減衰により計算の安定化を図っている。Davies ら²⁹⁾ は Choi ら²⁶⁾ のモデルを用いてはく離のサイズを予測したが、予測したはく離のサイズは実験結果より小さいことが示され、はく離の評価については破壊力学モデルに基づいて評価すべきであることを結論付けた。

上記の多くの研究では、応力破壊基準を満たす領域では理想的な脆性破壊が生じるものとして、支配的な剛性と応力成分を直ちにゼロとしている。実際には、破壊した部分の剛性と応力は一気に減少するのではなく、徐々に減少していく。その性質を反映するため、連続体の損傷力学モデル (CDM) が提案されており、複合材料中の破壊の評価に適用されている³⁹⁻⁴¹⁾。このモデルでは、人工的な損傷変数を導入し、複合材料の構成関係式を損傷の程度に応じて修正する。これらの研究から、CDM モデルは複合材構造の損傷進展解析に有効な手段であることが示されている。しかし、一般に、CDM モデル中のパラメータは明らかな物理的意味を持たないため、その特性を把握することは困難である。また、このモデルは面内の破壊、例えば、繊維破断やマトリックスクラックなどに対して有効であるが、層間はく離に対して適用は困難である。

6. 低速衝撃による積層複合材料の 衝撃損傷解析例

前節で紹介したように、計算コストを削減するために、従来の多くの研究では面内破壊と層間はく離に対して、応力破壊基準を用いて破壊発生の領域を評価している。この基準は損傷、特に面内破壊の発生評価に対しては有効であるが、損傷の進展と損傷サイズ評価には有効性に疑問が残る。特に層間はく離に関しては、Davies ら²⁹⁾ が指摘したように、破壊力学モデルに基づく方法が望ましい。しかし、破壊力学モデルによって全ての破壊パターンをモデリングすることは、計算規模が膨大と

図 3 Mindlin 板を用いた解析モデル

図 4 はく離先端におけるひずみエネルギー解放率の計算

なるため困難となる。準静的荷重を受けるはく離進展には、様々な破壊力学モデルに基づく計算手法が数多く研究されている。一方、複雑な衝撃荷重を受ける場合には、積層はりのようなシンプルな構造についてのみ、面内破壊とはく離を考慮した破壊力学モデルに基づく解析が行われている³⁰⁾。特に、多層の擬似等方性積層板の衝撃損傷評価に関する研究はまだ少ない。著者ら^{42~44)}は、低速衝撃による破壊モードを、繊維破断やマトリックスき裂などの面内破壊と層間のはく離の二つに分類し、計算コストを削減するため面内破壊には応力破壊基準、層間のはく離には破壊力学に基づく手法を用いて、積層板の損傷進展解析を行った。本節に、著者らの研究結果を紹介する。

6.1 クロスプライ積層板の衝撃損傷解析例

文献 42), 43) では、3 層クロスプライ積層板の低速衝撃下の損傷進展解析が行われている。この計算では修

図 5 数値計算と実験のはく離の比較

正 Hertz 則を用いて、衝撃物体と積層板の運動方程式の解法として、それぞれ無条件安定の 4 次 A(α) 陰解法と修正した Newmark 時間積分陰解法⁴⁵⁾を用いている。面内破壊については、Hou ら²⁸⁾の破壊基準を適用し、はく離は破壊力学モデルを用いている。図 3 に示す $90^\circ/0^\circ$ の界面を二重の板要素とし、はく離していない場合、二重板の間は強いバネによって結合されている。図 4 に示すように、はく離先端両側の応力とひずみ情報から、混合モードのエネルギー解放率を評価して、はく離進展をシミュレートする。

この計算結果と、Collombet ら⁴⁶⁾の GFRP クロスプライ円形積層板の衝撃実験結果との比較を図 5, 図 6 に示す。図 5 に示すように、はく離面積に関して計算結果と実験結果はよく一致している。また、図 6 から分かるように、マトリックスき裂ははく離領域を含む広い領域に発生している。

CFRP クロスプライ積層板について、様々な境界条件、板のサイズおよびインパクト質量に対する最大衝撃荷重とはく離面積の関係を図 7⁴³⁾ に示す。最大衝撃荷重とはく離面積の間には、ほぼ線形な関係が存在する。この結論は Davies ら²⁹⁾の研究結果と一致する。

6.2 コヒーシブモデルによる擬似等方性 CFRP 板の衝撃損傷解析例

積層複合材料の層間のはく離のシミュレーションを考えると、大きく 2 つの段階を考慮する必要がある。一つは層間のはく離が開始する段階、もう一方は層間のはく離が進展する段階である。表 1 に、応力基準に基づく手法、エネルギー解放率に基づく手法、コヒーシブモデルを用いた手法の特徴を示す。層間に仮想のコヒーシブ要素⁴⁷⁾を配置する方法では、はく離の前段階である軟化の開始

図 6 数値計算のマトリックスき裂の領域

図 7 CFRP クロスプライ板における最大衝撃荷重とはく離面積の関係図

表 1 各手法の特徴

応力破壊基準	・ はく離開始のみ	・ 進展解析は困難
エネルギー解放率	・ 初期はく離必要	・ 進展解析可
コヒーシブモデル	・ 初期はく離不要	・ 進展解析可

図 8 各プロセスゾーンにおける層間強度と初期剛性の関係 ($\alpha < 1$)

はコヒーシブ要素に発生する応力が層間強度に到達したかどうかで判定し、軟化が開始してはく離が進展するときは破壊力学に基づいて、コヒーシブ要素のなす仕事が限界のエネルギー解放率に到達したかどうかで判定する。これによってはく離の開始と進展過程を同時に考慮することができる。

粗いコヒーシブ要素を使うとき、しばしば数値的な不安定現象とピーク荷重の誤差が生じることが報告され^{48,49)}。これらの点を考慮して、著者ら⁴⁴⁾は粗いメッシュサイズにおいても適用可能であるコヒーシブの材料特性を修正するモデル（アダプティブコヒーシブモデルと呼ぶ）を提案し、低速衝撃問題に適用した。本解法においては、層間に初期厚さゼロの双線形材料特性を持つ8節点コヒーシブ要素⁴⁷⁾を用いている。コヒーシブ要素の剛性の決定には、各積分点における時間履歴上の最大の有効変位 $\delta_m^{\max}$ を用いることとし、軟化が始まる有効変位 δ_m^0 としたとき、 $\delta_m^{\max}$ が δ_m^0 より大きい状態であ

図 9 アダプティブコヒーシブ要素の材料特性 (Mode-I)

ばこの点は軟化領域 (softening area) に入り、剛性は線形に低下する。アダプティブコヒーシブモデルでは、図8に示すように、通常の軟化領域の前に、予備的な軟化領域 (Pre-softening area) を設定する。モード I の

図 10 試験片支持治具

a) 上面図

b) 側断面図

図 11 数値計算モデル

場合について、図 9 に示すように、有効変位の増加によってコヒーシブ要素の層間強度 N と初期剛性パラメータ K を徐々に低下させる。このとき破壊靱性 G_{Ic} は初期値のまま低減しないので、はく離進展に伴う解放エネルギーは維持される。この予備的な軟化領域を設定することにより、安定な計算が可能で、かつ計算結果に対するメッシュサイズの依存性を軽減できる。

次に落錘衝撃実験の実験結果とシミュレーション結果を述べる。図 10 に示すように、落錘衝撃試験では、JAXA 所有の Instron 製 Dynatup 9250 HD、治具は SACMA に準拠するものとし、上部から質量 4.6 kg のインパクトを自然落下により板に衝突させる。低速衝撃問題解析においては、著者ら⁵⁰⁾の提案したハイブリッド三次元要素を使い、陽な中央差分方法を用いて積層板の動的応答を解析する。図 11 に、 $[(45^\circ/0^\circ/-45^\circ/$

a) 衝撃エネルギー 6.0 J

b) 衝撃エネルギー 7.2 J

図 12 衝撃荷重履歴

図 13 各時間における X-X 断面のはく離分布 (衝撃エネルギー 6.0 J)

90°), ϵ_s 32 層積層板の解析モデルを示す。中央 35 mm × 35 mm の範囲に 30 層コヒーシブ要素を配置し、その外側 (点線範囲) はコヒーシブ要素を配置しない。点線より外側の領域については厚さ方向 1 層 (厚さ方向で一要素分割) とした。なお、図 11b) に示すように厚さ方向 1 層の要素と 32 層の要素の接続はペナルティー乗数を用いて接続する。これによって本解析モデルの計算自由度を大幅に軽減することができる。面内破壊については Hou ら²⁸⁾ の破壊基準を用いる。また、修正 Hertz 則を用いて、インパクトは剛体質点として CFRP 板上側表面の中央 9 節点に接触するものとする。

図 12a) と b) に、それぞれ衝撃エネルギー 6.0 J と 7.2 J の衝撃荷重履歴を示す。この図から、数値計算の結果は実験結果とよく一致していることが分かる。ま

た、図 13 に、衝撃エネルギー 6.0 J における各段階 A, B, C (図 12a) 参照) における X-X 断面 (図 11a) 参照) のはく離分布を示す。また、図 14 には、6.0 J の場合について、実験後の超音波探傷によるはく離状況と、数値計算によるはく離形状の透過図 (表層から 1/3) を示す。これらの結果から、荷重点側よりも荷重反対側のはく離面積が大きく、数値計算の結果と実験結果はほぼ一致することが分かる。なお、7.2 J のはく離面積は 6.0 J のはく離面積より少し大きい。最大荷重はほとんど変わらないため、はく離面積にそれほどの大きな差は見られない。これは Davies ら²⁹⁾ と著者ら^{42,43)} が指摘しているように、はく離の大きさは主に最大荷重によって決定されることによる。

図 14 はく離形状の透過図 (衝撃エネルギー 6.0 J)

7. おわりに

積層複合材料の低速衝撃損傷解析に関して、本稿では主要な研究課題と最近の研究状況について紹介した。複合材料への適用に際してはまだ完成されていない部分も含んでおり、以下に本稿のまとめと今後の課題と思われる点をまとめる。

(1) 衝撃物体と積層構造間の接触について、修正 Hertz 則は計算モデルの簡略化と計算コストの低減などに役に立つ。一方、衝撃損傷が起きた場合、負荷段階での最大食い込み量は積層板の塑性変形限界値より高いため、修正 Hertz 則の負荷段階に塑性変形の影響を考慮することが望ましい。また、衝撃荷重のモデリングにおいて、集中荷重で扱う場合には損傷が早めに生じ、最大荷重が低く見積もられる。衝撃過程の食い込み量の変化

に伴い、接触面積と分布荷重の変化を詳細に反映できる解析手法が望ましい。

(2) 面内破壊基準として、応力基準を用いるとき、面内損傷が起きた場合のより正確な面内剛性更新則を開発することが重要となる。また、面内損傷進展解析においては、応力基準ではなく、高精度かつ低コストの破壊力学や損傷力学理論に基づく手法の開発が重要である。

(3) 積層複合材料の衝撃損傷は複雑な破壊現象であり、衝撃物体下の複雑な応力分布を高精度かつ低コストで解析する手法の研究も必要となる。

(4) 衝撃損傷は局所的な破壊現象であるため、計算コストを削減するために、数値解析モデルの工夫も必要である。

積層複合材料の低速衝撃損傷を高精度に予測可能な効率的数値解析手法が確立されれば、複合材構造物のさら

なる軽量化が期待でき、その成果は極めて重要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) S. Abrate : *Appl. Mech. Rev.*, **44**, 4 (1991), 155-190.
- 2) S. Abrate : *Appl. Mech. Rev.*, **47**, 11 (1994), 517-544.
- 3) M.O.W. Richardson & M.J. Wisheart : *Composites Part A*, **27A** (1996), 1123-1131.
- 4) W. Goldsmith : *Impact*, Edward Arnold, London, (1960).
- 5) S.H. Yang & C.T. Sun : *Composite Materials: Testing and Design* (6th conference), ASTM STP 787, American Society for Testing and Materials (1982), pp. 425-449.
- 6) T.M. Tan & C.T. Sun : *J. Appl. Mech.*, **52** (1985), 5-12.
- 7) D.A. Hill, D. Nowell & A. Sackfield : *Mechanics of Elastic Contacts*, Butterworth Heinemann (1993), pp. 181-197.
- 8) H. Suemasu, S. Kerth & M. Maier : *J. Compos. Mater.*, **28**, 17 (1994), 1723-1739.
- 9) E. Wu & C.J. Yen : *J. Appl. Mech.*, **61** (1994), 60-66.
- 10) S.J. Kim & N.S. Goo : *Comput. Struct.*, **65**, 1 (1997), 83-90.
- 11) P. Mahajian : *Compos. Sci. Technol.*, **58** (1998), 505-513.
- 12) S.R. Swanson & H.G. Rezaee : *Compos. Sci. Technol.*, **38** (1990), 43-54.
- 13) A.S. Yigit & A.P. Chrisoforou : *Compos. Struct.*, **30** (1995), 169-177.
- 14) C.T. Sun & J.K. Chen : *J. Compos. Mater.*, **19** (1985), 490-504.
- 15) J.K. Chen & C.T. Sun : *Compos. Struct.*, **3** (1985), 97-118.
- 16) Y.S. Lee, K.H. Kang & O. Park : *Comput. Struct.*, **65**, 6 (1997), 956-974.
- 17) R. Vaziri, X. Quan & M.D. Olson : *Int. J. Impact Engrg.*, **18**, 7-8 (1996), 765-782.
- 18) A.P. Christoforou & A.S. Yigit : *Compos. Struct.*, **43** (1998), 15-24.
- 19) 関根英樹, 胡 寧, 夏目卓也, 福永久雄 : 日本機械学会論文集 (A編), **63** (1997), 787-793.
- 20) H. Sekine, N. Hu, H. Fukunaga & T. Natsume : *Mech. Compos. Mater. Struct.*, **5** (1998), 257-278.
- 21) N. Hu, H. Sekine, H. Fukunaga & Z.H. Yao : *Int. J. Impact Engrg.*, **22** (1999), 633-648.
- 22) S.W. Tsai & E.M. Wu : *J. Compos. Mater.*, **5** (1971), 58-65.
- 23) Z. Hashin : *J. Appl. Mech.*, **47** (1980), 329-334.
- 24) F.K. Chang & K.A. Chang : *J. Compos. Mater.*, **21** (1987), 834-855.
- 25) J.C. Brewer & P.A. Lagace : *J. Compos. Mater.*, **22** (1988), 1141-1155.
- 26) H.Y. Choi & F.K. Chang : *J. Compos. Mater.*, **26** (1992), 2134-2169.
- 27) Y. Chai & M. Gädke : DLR report IB 131-99/20 (1999).
- 28) J.P. Hou, N. Petrinic, C. Ruiz & S.R. Hallet : *Compos. Sci. Technol.*, **60** (2000), 273-281.
- 29) G.A.O. Davies & X. Zhang : *Int. J. Impact Engrg.*, **16** (1995), 149-170.
- 30) P.H. Geubelle & J.S. Baylor : *Composites Part B*, **29B** (1998), 589-602.
- 31) T.E. Tay, V.B.C. Tan & M. Deng : *Int. J. Solids and Struct.*, **40** (2003), 555-571.
- 32) G.P. Zhao & C.D. Cho : *J. Compos. Mater.*, **38**, 14 (2004), 1231-1254.
- 33) B.B. Mahanta, D. Chakraborty & A. Dutta : *Compos. Sci. Technol.*, **64** (2004), 2341-2351.
- 34) S.C. Her & Y.C. Liang : *Compos. Struct.*, **66** (2004), 277-285.
- 35) U. Icardi & G. Zardo : *Int. J. Impact Engrg.*, **31** (2005), 579-606.
- 36) S.H. Duan & T.Q. Ye : *Adv. Engrg. Software*, **33** (2002), 9-15.
- 37) F. Collombert, X. Lalbin, J. Bonono & J.L. Lataillade : *Mathl. Comput. Modelling*, **28**, 4-8 (1998), 171-184.
- 38) Z.D. Guan & C.D. Yang : *J. Compos. Mater.*, **36**, 7 (2002), 851-871.
- 39) R. Talreja : *Proc. Royal Soc. Lond. A*, **399**, 1817 (1985), 195-216.
- 40) A. Matzenmiller, J. Lubliner & R.L. Taylor : *Mech. Mater.*, **20**, 2 (1995), 125-152.
- 41) K. V. Williams & R. Vaziri : *Comput. Struct.*, **79** (2001), 997-1011.
- 42) C.F. Li, N. Hu, Y.J. Yin, H. Sekine & H. Fukunaga : *Composites Part A*, **33** (2002), 1055-1062.
- 43) C.F. Li, N. Hu, J.G. Cheng, H. Fukunaga & H. Sekine : *Composites Part A*, **33** (2002), 1063-1072.
- 44) N. Hu, Y. Zemba & H. Fukunaga : 九州大学応用力学研究所力学専門部会 共同研究集会「複合材料の損傷と強度に関する力学的モデル」, 福岡, 2006年1月, pp. 40-43.
- 45) N. Hu : *Comput. Struct.*, **63** (1997), 1053-1063.
- 46) F. Collombert, X. Lalbin & J.L. Lataillade : *Compos. Sci. Technol.*, **58** (1998), 463-478.
- 47) P.P. Camanho & C.G. Davila : NASA/TM-2002-211737 (2002).
- 48) J. Chen, M.A. Crisfield, A.J. Kinloch, E.P. Busso, F.L. Matthews & Y. Qiu : *Mech. Compos. Mater. Struct.*, **6** (1999), 301-307.
- 49) A. Turon, C.G. Davila, P.P. Camanho & J. Costa : NASA/TM-2005-213547 (2005).
- 50) Y.P. Cao, N. Hu, J. Lu, H. Fukunaga & Z.H. Yao : *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, **53** (2002), 2529-2548.