

論文の内容の要旨

論文題目 せん断荷重を受ける複合材補強パネルの座屈後解析と
外板 - ストリング間における初期剥離進展予測

氏名 梅澤 啓佑

航空機の胴体側面部分では、一般に与圧荷重による面内引張力が生じるのに加え、飛行荷重や地上荷重によるせん断力を受ける。このせん断力は主に外板が受け持ち、外板のせん断座屈を引き起こす可能性がある。航空機の通常運航時にこのせん断座屈を許容するか否かは設計方針によるが、弾性限度内でこの座屈を許容するいわゆる座屈許容設計は、航空機構造の健全性を保ったまま軽量化に寄与することができ、胴体構造の効率化につながると期待される。金属構造の機体では座屈許容設計の適用例もあるが、複合材料製胴体でこれを実現しようとする場合、座屈後の外板の面外変形がこれに接着された補強材の外板からの剥離につながる可能性があり、座屈を許容しない保守的な設計にならざるを得ない場合が多い。

この論文では胴体外板のせん断荷重負荷下での座屈後挙動について、リッツ法を用いて簡易に解析する手法を開発すると同時に、外板の座屈によって引き起こされる可能性のある補強材の剥離挙動を破壊力学的に予測することを試みた。

第1章は序論であり、複合材料の航空機への適用と座屈許容設計の複合材料構造への適用の現状をまとめた。その上で複合材料製補強パネルの座屈後解析に関する既存の研究と課題を述べ、座屈後挙動の簡易解析手法の必要性を示して本論文の目的を設定した。

近年、軽量化を目的に複合材料の航空機への適用範囲が拡大しており、二次構造のみならず主翼や胴体等の一次構造にも適用されている。しかし、実際に座屈許容設計を適用した例は少なく、また適用するとしても実験や有限要素解析などに頼っているのが現状である。しかし、設計の初期段階などでは多くのモデルを検証する必要があり、より簡易な方法が必要とされている。

複合材補強パネルの座屈後挙動の簡易解析に関しては多くの研究がなされているが、外板 - ストリング間の剥離の評価を行った研究は少なく、また、積層構成等によって座屈後に生じるしわの方向や周期の変化を考慮して剥離の評価を行った研究はない。

したがって、本論文では積層構成等の剥離進展への影響をより精度高く評価することができる、複合材補強パネルの座屈後挙動に関する簡易な解析手法を提案することを目的とした。

第2章は「座屈後解析」と題し、せん断荷重下における補強パネルの座屈後挙動の解析手法について述べ、解析結果を示した。

本論文では外板のストリング間の部分(全長 a 、幅 b の矩形の平板)について解析を行った。パネル中央に原点をとり、 x 軸方向を幅方向に、 y 軸方向を長手方向(ストリングに平行)とした。ストリングは曲げ変形とねじり変形は生じない事、すべての軸周りの回転をゼロとする事を仮定し、パネルのストリング端($x = \pm b/2$)での境界条件を設定した。また、本論文では胴体側面を想定しているため、全ての辺にせん断荷重 q_0 を負荷した。

有限要素解析の結果をもとに変位の近似関数として

$$w(x, y) = \left\{ \frac{\gamma_1}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi}{b} x \right) + \frac{\gamma_2}{2} \left(1 - \cos \frac{4\pi}{b} x \right) + \frac{\gamma_3}{2} \left(1 + \cos \frac{6\pi}{b} x \right) \right\} \sin \frac{\pi}{l} (-m_1 x + y)$$

$$u_0(x, y) = \left\{ \alpha_1 \cos \frac{\pi}{b} x + \alpha_2 \cos \frac{3\pi}{b} x + \alpha_3 \cos \frac{5\pi}{b} x + \alpha_4 \cos \frac{7\pi}{b} x \right\} \sin \frac{2\pi}{l} (-m_2 x + y) \\ + \alpha_5 \sin \frac{\pi}{b} x + \alpha_6 \sin \frac{3\pi}{b} x$$

$$v_0(x, y) = \left\{ \beta_1 + \beta_2 \cos \frac{\pi}{b} x + \beta_3 \cos \frac{3\pi}{b} x \right\} \sin \frac{2\pi}{l} (-m_3 x + y) + \beta_4 x + \beta_5 \sin \frac{2\pi}{b} x + \beta_6 y$$

を用いた。ここで、 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, m_i, l$ は未知パラメータであり、特に m_1, l はそれぞれしわの方向、半波長を表す。この近似関数を用いてポテンシャルエネルギーを求め、ポテンシャルエネルギー停留の原理より導かれる連立方程式をNewton法により数値的に解き、未知パラメータ $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, m_i, l$ を決定し、座屈後の変位分布を求めた。

このリッツ法を用いた解析結果と有限要素解析の結果との比較を等方性材料($a = 2000\text{mm}$ 、 $b = 100\text{mm}$)、複合材料積層板($a = 2400\text{mm}$ 、 $b = 100\text{mm}$)の2ケースについて行い、リッツ法を用いた提案手法によって補強パネルの座屈後挙動を十分な精度で解析できることを示した。

第3章は「外板 - 補強材間の剥離先端におけるエネルギー解放率解析」と題し、外板 - ストリング間の剥離に関する解析とその結果を詳述した。

本論文では剥離先端付近の外板に掛かる y 軸周りのモーメントと x 軸方向の引張り荷重、せん断荷重のみを考え、ストリングとストリングに接着している外板部分は変形しないと仮定し、等方性材料と複合材料の両ケースにおいて剥離先端におけるエネルギー解放率を解析的に導出した。ただし、本論文ではモード別(モード I, II, III)で評価せずに、エネルギー解放率の合計 G_{total} で評価した。

上述の解析的手法の妥当性を確認するために有限要素解析との比較を行った。有限要素解析ではソリッド要素を用いたモデルを解析し、仮想クラック閉口法(VCCCT)により

エネルギー解放率を求めた。解析的手法では有限要素解析で求めたひずみと曲率を用いた。ただし、シェル要素を用いたモデルの解析も行い、解析的手法で用いるひずみと曲率の妥当性を検証した。

等方性材料と複合材料積層板の2ケースで解析を行い、両ケースにおいて解析的手法と有限要素解析の結果が十分な精度で一致し、解析的手法でもエネルギー解放率の分布の傾向を掴める事を確認した。

第4章では「層間剥離特性試験」と題し、第5章で述べる補強パネルの剥離進展予測に必要な、複合材料の層間剥離進展特性を得るために行った材料特性データ取得試験について述べた。この試験では一方向炭素繊維強化エポキシ複合材料 M21/T800S を用いた。

まず、モード I の剥離進展特性を得るために DCB 試験を行った。DCB 試験では、最初に静的試験を行い、その結果をもとに疲労試験を行った。

静的試験では、荷重点の変位速度を 0.05mm/s とし、剥離が進展するまで増加させ、進展後はき裂先端位置を記録し、変位を初期位置に戻し、再び剥離進展が生じるまで増加させることを繰り返した。疲労試験では、振動数を 5Hz とし、変位制御で試験を行った。変位の最大値、最小値は R-ratio が 0.1 程度になるような値に設定した。試験中、一定周期で画像を取得し、剥離長さを測定した。このデータを繰り返し回数 N -剥離長さ a のグラフにプロットし、近似曲線を求め、 da/dN を求めた。

次にモード II の剥離進展特性を得るために ENF 試験を行った。ENF 試験も DCB 試験と同様、まず静的試験を行い、その結果をもとに疲労試験を行った。静的試験は変位制御で行い、JIS K7086 に準じ、荷重点速度を 0.5mm/min で行った。疲労試験は荷重制御で行い、振動数を 5Hz 、R-ratio を 0.1 とした。剥離長さの測定にはマイクロ CT スキャナ(TOSHIBA TOSCANER 30000 μ hd)を用いた。試験では、まず基準点とその前後 $\pm 5, 10\text{mm}$ の4か所の計5か所でコンプライアンスを測定し、コンプライアンスと剥離長さの関係性を求めた後、疲労試験を実施した。

以上の試験より、静的試験からは層間剥離靱性値 G_C を、疲労試験からは疲労剥離進展特性 (ΔG - da/dN 曲線) を求めた。

第5章は「補強パネルの疲労剥離進展予測」と題し、第2章と第3章で提示した解析手法を用いて補強パネルの剥離進展予測を行った。まず、リッツ法を用いた座屈後解析とエネルギー解放率解析を組み合わせる事で求めたエネルギー解放率の分布が妥当であるかを、有限要素解析の結果と比較することで検討し、座屈許容設計を行う際に想定するような、ストリング間のパネルの局所的な座屈に対して、本論文で提案した簡便な手法が有用であることを示した。次に、上記の手法と第4章で得た剥離進展特性を用いて剥離進展予測を試みた。まず、積層構成が剥離進展に与える影響を調べた。本論文では $[0/90/-45/45]_s$ と $[-45/45/0/90]_s$ 、さらにより実構造で用いられるような積層構成での比較として $[-45/0/45/90]_s$ と $[45/0/-45/90]_s$ 、 $[-45/90/45/0]_s$ との比較を行った。次に

[0/90/-45/45]_s で各層の厚さを 2 倍にしたものを解析し、板厚が剥離進展に与える影響を調べた。以上の解析より、座屈荷重がより大きな積層構成が、座屈後の変形状態において必ずしも剥離の進展速度を小さくするとは限らないこと、パネルの板厚が大きくなると座屈荷重が座屈後の静的な剥離進展荷重よりも大きくなる、つまりは座屈と同時にストリングが剥離する可能性があること、等の重要な知見を得た。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた結果を総括した。

有限要素解析の結果を参考に提案した変位の近似関数を用いて、リッツ法による補強パネルの座屈後解析を行い、有限要素解析と比較し十分な精度の結果が得られ事、外板 - ストリング間の剥離先端におけるエネルギー解放率の分布を解析的に求める手法を提案し、有限要素解析との比較により妥当である事を示せた事、さらに、この 2 つの解析を組み合わせた解析手法がストリング間の局所的な座屈後挙動に対しては有用である事を有限要素解析との比較により示した事を踏まえ、座屈許容設計を適用する際の、設計初期段階に用いることが出来るような簡易な解析手法を提案できたと結論付けた。最後に解析手法の精度をより上げるための改善点について言及した。