

すみRのある長方形孔を持つCFRP積層板の強度

中 村 俊一郎¹

¹第一工業大学客員教授 航空宇宙工学科 (〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)
E-mail:s-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

Strength of a CFRP Laminate with a Round-cornered Square Hole

Shunichiro Nakamura¹

¹Guest Professor, Dept. of Aeronautics Eng., Daiichi Univ. Institute of Technology
(Kokubu-Chuo 1-10-2, Kirishima-shi, Kagoshima-ken 899-4395, Japan)
E-mail: s-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

The airplane fuselage structures made by the carbon fiber reinforced plastic (CFRP) are damaged in accidents or incidents. On the repair of the damaged fuselage panel, the damaged area is cut out by squared hole. So, strength of the panel with the square hole is considered. A test panel with a round-cornered square hole is prepared and the longitudinal tension test is conducted. The panel is failed at the cross section including R-end of the round-corner. The ply failure features of the panel are observed. A FEM analysis of the panel shows the stress concentration around the square hole. The stress concentration factor of the panel is calculated. Simplified method to estimate the tensile strength of the panel is attempted to apply. The strength is estimated as un-notched laminate strength divided by stress concentration factor. This method is applicable to the panel with small stress concentration factor, like the tested panel with a round-cornered square hole, while it is too conservative to apply the panel with large one, like a panel with round hole.

Key Words: notched composite laminates, ply failure features, stress concentration factor, simple estimation, tensile strength

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック複合材料 (CFRP) が航空機構造に一般的に使われるようになり、設計の分野でもその強度が議論されてきた。民間旅客機の胴体構造の設計を例にとると、主要な荷重として与圧があげられる。特に胴体前部はこの与圧により設計される部分が多く、胴体外板は円周方向と長手方向に2:1の割合で引張荷重を受ける。胴体構造は部品を取り付けのため多くの孔があげられ、孔部の安全な設計は重要である。引張荷重が

作用する複合材積層板の有孔問題には数多くの研究があるが、強度に影響するパラメータも多く課題がある。複合材積層板で作られた胴体外板が運用中に損傷を受けることを想定し、損傷を受けた部分は切取られるものとする。積層板は損傷部を切取られることにより「すみRのある長方形切欠き孔を持つCFRP擬似等方性積層板」となる。本報告ではこの切欠きのある積層板の引張強度について述べる。また、このような場合の簡便な強度推算法の適用を試みる。なお、切欠き孔はパッチを当てて修理される。

2. 試験供試体

図 1 に示す「すみRのある長方形切欠き孔を持つ CFRP 積層板」を試験供試体^{3), 4)}とする。積層構成は擬似等方性 $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]_s$ 、厚さは 0.89mm ¹⁾、幅は 108mm 、長さは 280mm である。切欠き孔の大きさは幅 68mm 、長さ 42mm 、すみ $R5\text{mm}$ である。

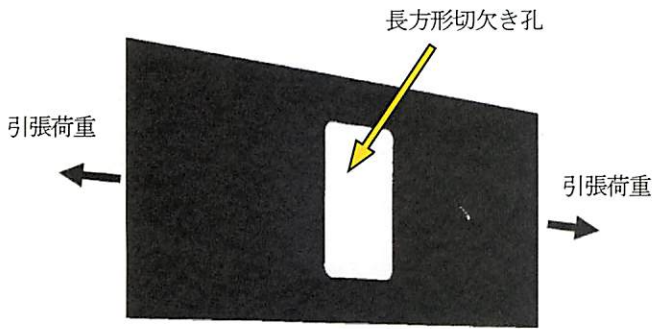


図 1 試験供試体

3. 引張試験

試験供試体の両端をガラス繊維強化プラスチック (GFRP) で補強し、MIS 電気油圧サーボ万能試験機にセットして、変位制御により供試体が破断するまで引張荷重を加えた(図 1)。その結果、図 2 に示すように破断は応力集中のある長方形切欠き孔すみR止まりを含む断面で生じた。破断荷重は $P_{\text{test}}=15.5\text{kN}$ である。破断面には図 3 に示すように① 0° 層の繊維破断、② 45° 層の繊維方向に沿う破断および繊維破断、③ 90° 層の繊維方向に沿う破断が見られ、これらが混在している。しかし短冊状試験片の引張試験で見られた端面剥離³⁾は、応力の高い自由縁部分が限られていることもあり目視では観察できなかった



図 2 破断部全体

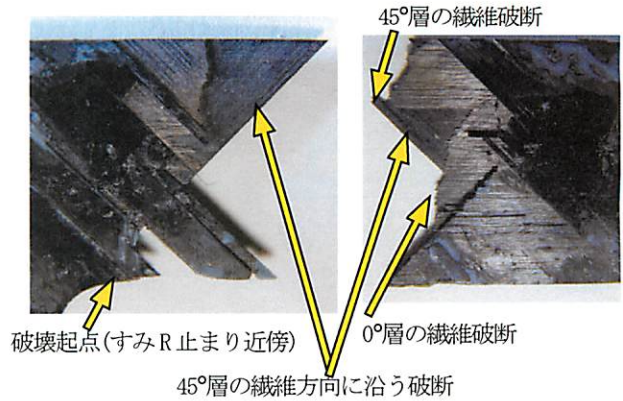


図 3-1 破断部A左詳細 図 3-2 破断部A右詳細

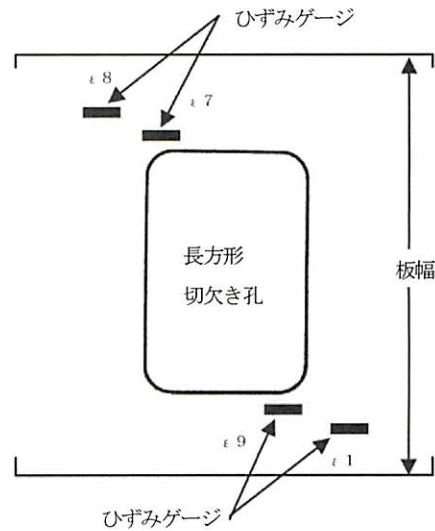


図 4 ひずみゲージ貼付位置

長方形切欠き孔のすみR止まり近傍に貼付したひずみゲージ(図 4 の $\epsilon 7$ および $\epsilon 9$)の読みは、図 5 に示すように引張荷重の増加に応じて破断までほぼ直線である。しかし上部R止まり近傍のひずみ $\epsilon 7$ は破断の少し手前でわずかにステップ状のひずみ増加が計測されている。

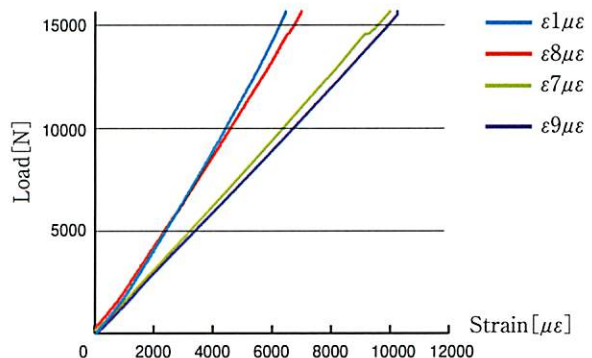


図 5 長方形切欠き孔近傍のひずみ

4. 応力集中部のFEM解析

すみRのある長方形切欠き孔を持つ積層板の応力分布の把握を目的として、有限要素法による応力解析(FEM解析)を行った。モデル化は積層毎では行わず、厚さは $t=0.89\text{mm}$ 、材料定数は $E=59.1\text{GPa}$ 、 $\nu=0.32$ の擬似等方性板として行った。図6-1に示すように、試験供試体の板幅方向の対称性を考慮して板半幅について要素分割した。要素は2次元板要素を用いた。対称面と左端面の拘束条件(変位 δ および角変位 θ)および右端面の引張荷重(破断荷重の半分： $P_{\text{total}}=7.8\text{ kN}$)を図6-1に示す。破断面の平均応力は $\sigma_{\text{max}}=436\text{ MPa}$ である。計算はAltair社提供のソフト(プリ処理：HyperMesh、FEAソルバー：RADIOSS、ポスト処理：HyperView)を使用した。解析の結果から図6-2に示すように長方形切欠き孔のR止まり近傍に応力集中があることが判る。R止まり近傍の破断面の応力分布を図6-3に示す。参考文献6)によりR止まり近傍の応力集中度率 $\alpha_A=2.05$ と計算される。

束条件(変位 δ および角変位 θ)および右端面の引張荷重(破断荷重の半分： $P_{\text{total}}=7.8\text{ kN}$)を図6-1に示す。破断面の平均応力は $\sigma_{\text{max}}=436\text{ MPa}$ である。計算はAltair社提供のソフト(プリ処理：HyperMesh、FEAソルバー：RADIOSS、ポスト処理：HyperView)を使用した。解析の結果から図6-2に示すように長方形切欠き孔のR止まり近傍に応力集中があることが判る。R止まり近傍の破断面の応力分布を図6-3に示す。参考文献6)によりR止まり近傍の応力集中度率 $\alpha_A=2.05$ と計算される。

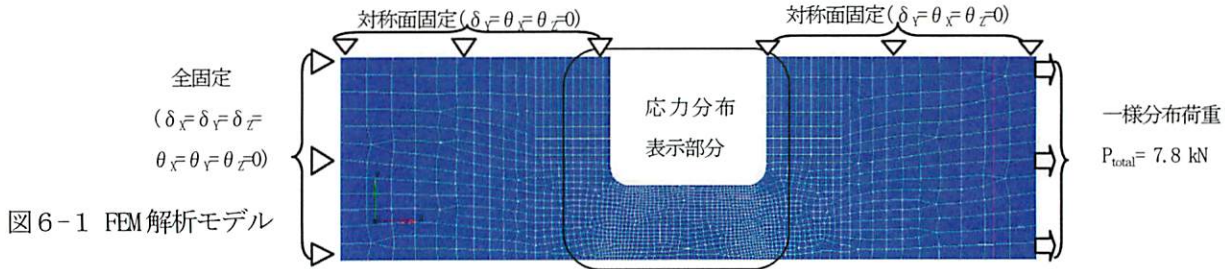


図6-1 FEM解析モデル

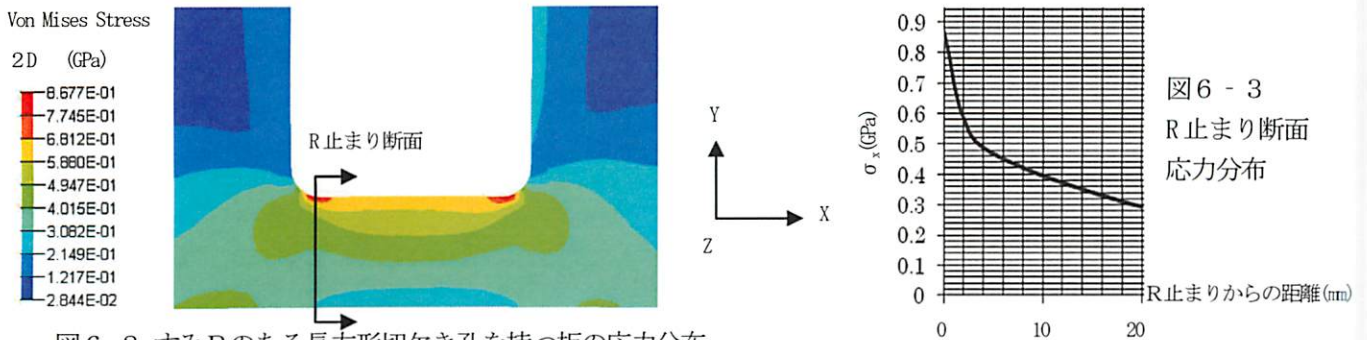


図6-2 すみRのある長方形切欠き孔を持つ板の応力分布

図6-3 R止まり断面 応力分布

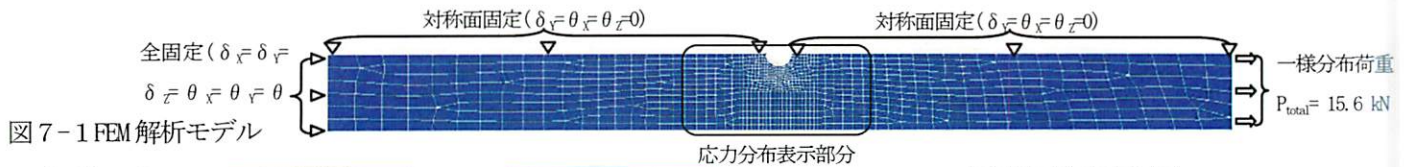


図7-1 FEM解析モデル

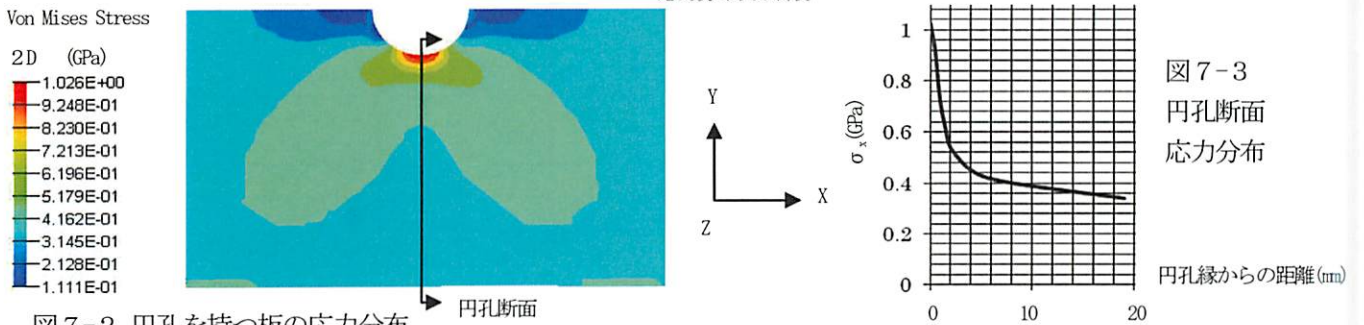


図7-2 円孔を持つ板の応力分布

図7-3 円孔断面 応力分布

5. 考察

すみRのある長方形切欠き孔を持つ有限幅 CFRP 積層板の引張試験を行った。破断は切欠き孔R止まり部の断面で生じている。破断部には0°層の繊維破断、45°層の繊維方向に沿う破断と繊維破断、および90°層の繊維方向に沿う破断が混在している。参考文献1)の円孔切欠

き付き帯板の試験結果でも同様に3つの破断モードの混在が示されている。また、平滑または切欠きのある積層板の損傷について、90°層に早い段階で亀裂が発生し、45°層の亀裂発生が0°層の亀裂発生の前に生じ、そして0°層の破断が積層板の破断につながると述べている。参考文献7)では平滑な積層板の自由縁の損傷について、負荷荷重が増大するに従って、90°層に亀裂が発生し、

続いて 45°層の繊維に沿う亀裂および 90°/90°層間剥離を生じ、さらに 90°/45°層間剥離が生じると述べている。また、90°/90°層間と 90°/45°層間の大規模な剥離が応力ひずみ関係の非線形に表れていると述べている。したがって、図 5 のひずみ ϵ_7 で計測された破断する手前でのステップ状の変化は 90°/90°層間と 90°/45°層間の大規模な剥離によるものと推定される。

すみ R のある長方形切欠き孔を持つ有限幅板の強度(断面平均破断応力 σ_{mean}) が、切欠きのない平滑な積層板の破断応力 $\sigma_t = 887 \text{MPa}$ を応力集中度 $\alpha_A = 2.05$ で除した値として簡便に推算できないか試みた。表 1 に示すように推算値 $\sigma_{\text{estimate}} = 433 \text{GPa}$ となり試験値 $\sigma_{\text{mean}} = 436 \text{MPa}$ とほぼ同じ値になる。また、図 6-2 に示す FEM 解析の結果は応力集中のある R 止まり部の応力が 867.7GPa になり、平滑な積層板の破断応力 $\sigma_t = 887 \text{MPa}$ とほぼ一致した。したがって、応力集中度が 2 程度の切欠きのある積層板の強度は、平滑な積層板の破断応力(たとえば JAXA-ACDB[®])と応力集中度[®] から簡便に求められると言える。

この簡便な方法を参考文献 1) に示す、板中央に円孔サイズの異なる 4 種類の円孔切欠きを持つ有限幅 CFRP 積層板に適用してみた。CFRP 積層板は、板幅 38.1mm 板厚 $t = 2.08 \text{mm}$ であり、プリプレグは AS4/3501-6、積層構成は $[+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{28}$ である。平滑な積層板の破断応力は $\sigma_t = 822 \text{MPa}$ である。表 1 に示すように、4 種類の円孔切欠きのある試験片について引張試験を実施して得た強度と、簡便な方法で推算した強度とを比較する。また、円孔を持つ有限幅積層板について $d/W = 0.167$ を例に FEM 解析(計算は Altair 社提供のソフトを使用)を行い、図 7 に示すように円孔縁に応力集中があることを把握した。表 1 より円孔切欠きを持つ有限幅積層板は強度(推算)と強度(試験)とには差異があり、かつ、応力集中度が大きくなるほどその差異は大きくなる。したがって応力集中度が 2.4 から 2.9 の円孔切欠きを持つ有限幅積層板の強度推算には簡便な方法は適用できない。

なお、切欠きのある部材の精度のある強度の推算方法は参考文献 1) に示されている。この方法は Whitney と Nuismer により提案されており point-stress criterion の characteristic distance (d_0) を、切欠きを有する積層板についてあらかじめ試験および FEM 解析で求めておき、類似の切欠きを持つ積層板の強度を推算するものである。これを円孔切欠きのある CFRP 擬似等方性積層板について、FEM 解析と試験により検証している。また、参考文献 2) では円孔切欠きのある CFRP 擬似等方性積層帯板について試験を行い、おなじ応力集中度でも、円径/板幅が異なること、および板厚が変わることにより強度が変化することを述べている。この孔径および板厚の強度への影響は、構成する積層材 1 層厚さと積層板厚さ

および孔径の比が変わることにあると説明しており、強度に及ぼすパラメータについて課題のあることを示している。

表 1 切欠き材の強度推算

切欠き材	強度(試験)	応力集中度	積層板強度	強度(推算)
	σ_{mean}	α_A	σ_t	σ_{estimate}
	MPa	参考文献 6)	MPa	MPa
すみ R 付き長方形孔	436	2.05	887	433
円孔 d/W	0.520	2.85	822	288
	1.000	2.73	822	301
	0.167	2.58	822	318
	0.250	2.42	822	345

d: 円孔径、w: 板幅

6. まとめ

航空機に一般的に使われる複合材料構造が何らかの原因で損傷を受け場合のパッチ修理を想定して、損傷の除去を模擬したすみ R のある長方形切欠き孔を持つ有限幅 CFRP 積層板を製作し引張試験を行った。その結果、破断部の各層の破断のモードは参考文献 1) の示す円孔切欠きのある帯板と同じであった。また、応力集中のある切欠き材引張強度の簡便な推算を、応力集中度と切欠きのない積層板破断応力を用いて試みた。その結果、簡便な方法は、応力集中度が 2 程度の航空機胴体外板の損傷除去を想定したすみ R のある長方形切欠き孔を持つ有限幅 CFRP 積層板には適用できるが、応力集中度が大きい円孔切欠き材では適用できなかった。

今回の研究を行うにあたりご指導頂いた九州大学応用力学研究所基礎力学部門複合連続体力学分野の高雄善裕教授、汪 文学准教授および松原監壯係長に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) J. Wang, P.J. Callus, M.K. Barnister, Experimental and numerical investigation of the tension and compression strength of un-notched and notched quasi-isotropic laminates, Composite Structure 64 (2004) 297-306
- 2) B.G. Green, M.R. Wisnom, S.R. Hallett; An experimental investigation into the tensile strength scaling of notched composites, Composite : Part A 38(2007) 867-878
- 3) 中村俊一郎: CFRP 積層板の製作, 第 21 号(2009)pp.11-16
- 4) 中村俊一郎: CFRP 修理供試体の製作, 第 22 号(2010)pp.49-54
- 5) 中村俊一郎: CFRP 試験片の引張強度, 第 21 号(2009)pp.17-21
- 6) 西田正孝: 応力集中; 森北出版 258-263, 415-422
- 7) 金 炯秀: 複合材料積層板の損傷挙動と破壊靱性に及ぼす温度の影響, 九州大学大学院博士論文, 2000

(2011. 4. 15 受付)