

(31) 衝撃荷重を受ける複合材料積層板の衝撃力緩和機構に関する実験的研究

早稲田大学理工学部 ○依田 照彦
早稲田大学理工学部 桑原 善浩
(株) ハザマ 一瀬 修志

1. まえがき

高い剛性と高い強度を持った積層板は、衝撃荷重を受けるとその高い剛性のため大きな荷重を小さな変形のもとに伝えることになる。したがって、衝撃力を緩和するという点においては、理想的であるとは言えない。そこで、積層板の衝撃緩衝効果を高める方法の一つとして、多層からなる積層板の間にスリットをいれることが考えられる。これにより座屈モードが制御できれば、座屈後の剛性低下を有効に利用できることになる⁽¹⁾⁻⁽²⁾⁾。

本研究は、三層からなるスリット入りの積層板の衝撃緩衝効果を実験的に研究するものであり、具体的には、スリットを3ヶ所入れた積層板をまず複合材料積層板で作成し、それに軸圧縮力を加える実験を行い、衝撃緩衝効果を定性的に調べる。次に、実験用供試体の作成が容易なアルミ板を用いて、スリットの位置や長さを変化させ衝撃力の緩和機構を調べる。この成果をもとに座屈モードの制御に関する考察や、スリットの位置や長さの変化にともなう積層板の衝撃緩衝効果に関する考察を行う。

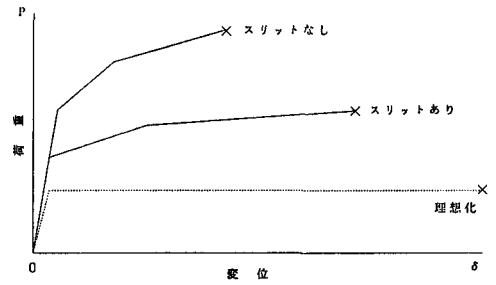


図-1 積層板の衝撃緩衝効果

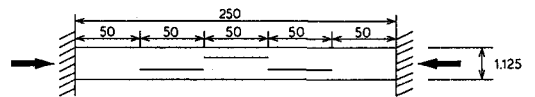
2. 実験用供試体および実験の概要

2.1 実験用供試体

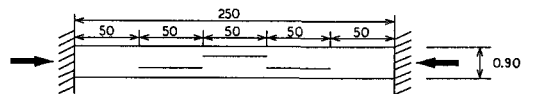
実験用供試体には、複合材料としてポリエステル・エーテル・エーテル・ケトン (PEEK) を使用し、座屈モードの制御の可否を調べるための供試体の材料としてアルミニウムを用いた。今回の実験に用いた積層板は、図-2に示す3種類のスリットを持つもので、全体の形状はいつれの供試体でも縦27cm、横7cmの平板である。厚さについては、PEEK材の場合には配向角0°の薄板を9層重ね合わせて1.125mmとした。またアルミ板の場合には、厚さ0.3mmのアルミ板3枚を接着剤(アラルダイト)で張り合わせ0.9mmの積層板を作成している。

スリットは、9層より成る複合材料積層板については、板厚を3等分する面内に長さ5cmのものを全幅に図-2(実験A)のように配置した。一方、アルミ板

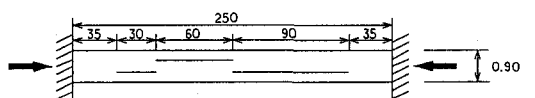
単位 : mm



(A) 実験Aの供試体 (PEEK材)

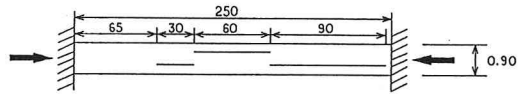


(B) 実験Bの供試体 (アルミ材)



(C) 実験Cの供試体 (アルミ材)

については、スリットの位置や長さの変化が座屈モード、座屈後の剛性に及ぼす影響を調べるため、図-2（実験B・C・D）に示す3種類のスリットのアルミ材を用いた。弾性係数の代表であるヤング率については、PEEK材については実測値 $E_P = 1.56 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ を、アルミ材については $E_A = 7.17 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ を用いた。



(D) 実験Dの供試体（アルミ材）

図-2 実験供試体のスリットの位置と寸法

2.2 実験の概要

実験は、上下両端固定（上下両端1cmづつを固定している）で、側面両側は2本のシリンダー支柱ではさむ（左右の縁より1cmのところ）に円形断面の支柱を設けている。）ことにより単純支持の条件を満足させるようにした（図-3）。供試体表面には、座屈モードを調べる目的から、ひずみゲージを8枚張り付けた。その位置は、上端から3.5cm、8.5cm、13.5cm、18.5cmの位置であり、積層板の表裏に上から順にNo.1、No.2、・・・No.8と番号を付けている。荷重の載荷はアムスラー試験機を用いて、圧縮荷重 P (kgf)を加え、荷重の増加に合わせて、各荷重レベルでひずみ（No.1-No.8）と同時に、ダイヤルゲージを用いて荷重方向の縮み量 d (mm)を測定した（写真-1）。荷重ゼロの状態から最高荷重に達するまで実験を続けたが、実験供試体の初期不整については測定を行っていない。

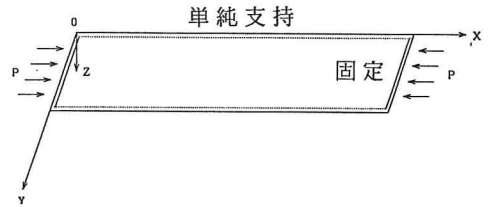


図-3 実験供試体の境界条件

3. 実験の結果と考察

3.1 複合材料積層板の荷重-変位曲線

衝撃力の緩和機構を定性的に調べるために、複合材料の静的載荷試験を行った。図-4には、スリットのある場合とない場合の圧縮荷重と軸方向変位との関係が示されている。図-4から分かるように、最初のうち荷重に比例して増加した変位も、ある荷重レベルを境に曲線の傾きが緩やかになる。この点を座屈点と考えてもよいであろう。参考のために同図には、積層板の1/4モデルについてADINAを用いてFEM解析した結果を図示した。その結果と比較すると、座屈荷重は、スリットのない場合には実験値が解析値にくらべてやや高めになり、スリットのある場合には、やや低めになっている。実験値、解析値ともスリットのある場合の方がいない場合に比べて座屈荷重が低いこと

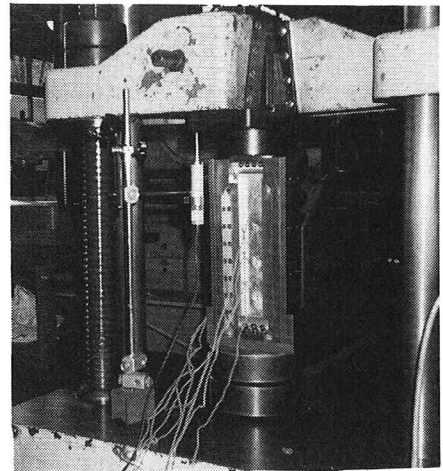


写真-1 静的載荷試験装置

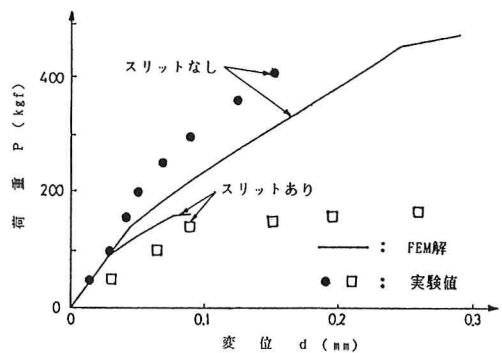


図-4 複合材料積層板の荷重-変位曲線（実験A）

が分かる。そこで、スリットの大きさと位置を変えて、それらの影響を観察することにする。

3. 2 スリットの大きさと位置の影響

まず、実験Bとして複合材料積層板の実験Aと同じスリットを持つ供試体(図-2(B))を用いて、静的載荷試験を行った。図-5に、圧縮荷重と軸方向変位の関係を示す。実験値は、複合材料積層板のように顕著な後座屈挙動を示していないが、衝撃力の緩和機構が期待できる点は同じである。アルミ材の剛性がPEEK材の半分以下であることが荷重-変位曲線に差異をもたらした原因と考えられる。図-6の変形モードは、通常の座屈モードと類似しており、このことは図-7、図-8の荷重とひずみの関係からも観察される。ひずみのデータから、150 kgf 付近が座屈荷重であることも確認できる。

次に、図-2(C)に見られるようにスリットの位置と大きさを変えた実験Cを実施した。この実験Cの結果である図-9、図-11、図-12より座屈荷重は、200 kgf 前後であることが分かる。特徴として挙げられる点は、荷重載荷点に近いひずみゲージ(No.1-No.4)では座屈荷重前後でひずみの変化が見られるのに対し、図-12から分かるように中央から少し下端側のひずみゲージ(No.5, No.6)では座屈荷重を超えた250 kgf の荷重で座屈が生じており、座屈モードの制御が行われていることが明確に現れている。座屈波形が伝播していく様子は図-10の変形モード図からも観察できる。このように、スリットの大きさと位置を変えることによって、座屈荷重と座屈後の荷重-変位曲線がある程度制御できることが分かった。

実験Dは、実験Cと同じようにスリットの長さを上から順に30mm、60mm、90mmと1:2:3の比にした場合であるが、その位置は30mmづつ下側にずらしている。図-13に示す荷重-変位曲線も実験Cの曲線と同様の傾向を示しており、座屈荷重は200 kgf 付近と推定できる。全体的傾向は、実験Cと似ているものの、図-14の変形モード図を見ると、座屈波形の伝播の様子があまりはっきりしない。このことは、図-15、図-16の荷重とひずみの関係図からも観察でき、No.6とNo.7のひずみゲージから $P \approx 200$ kgf の荷重で座屈していることは容易に分かるが、それ以前の荷重レベルで、ひずみ分布に乱れが生じているこ

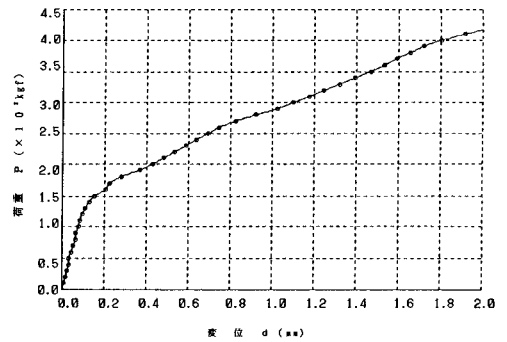


図-5 荷重と軸方向変位の関係(実験B)

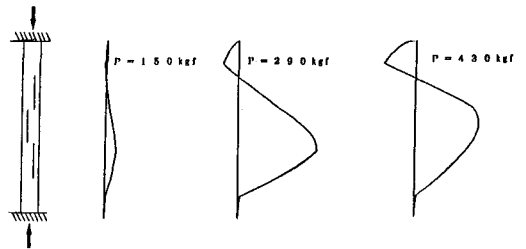


図-6 変形モード図(実験B)

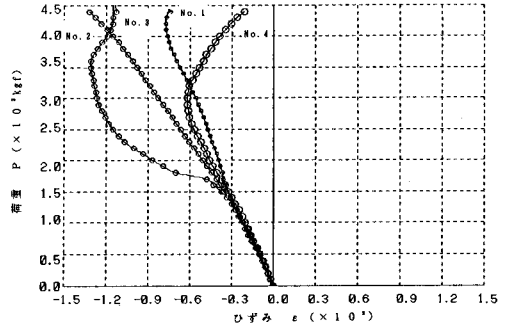


図-7 荷重とひずみの関係(実験B No.1-No.4)

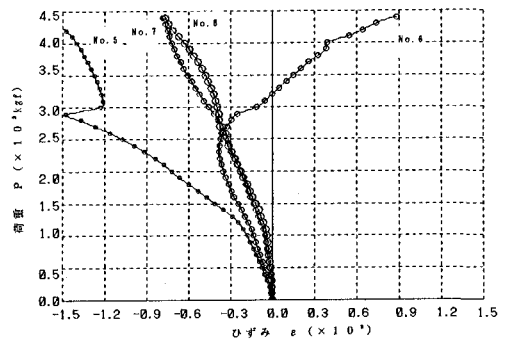


図-8 荷重とひずみの関係(実験B No.5-No.8)

とも事実である。今回のアルミ積層板の実験では初期不整を測定していないため、供試体そのものの製作精度の問題、供試体の固定方法の信頼性などに今後の課題を残しているものと思われる。

以上の実験B、C、Dの結果によれば、スリットの位置と大きさを変化させることによって座屈荷重を制御できる（実験Bでは座屈荷重約150 kgf, 実験Cでは約200 kgf, 実験Dでは約200 kgf である）ことが分かり、座屈点以降の荷重と変位の関係もある程度制御できることが定性的に確かめられた。今回の数少ない実験結果から判断すると、スリットの入れ方としては、実験Cの供試体の場合が望ましく、衝撃力の緩和という面ですぐれていると考えられる。つまり、積層板の層間に初期の状態からスリットを適切に配置しておくことにより、衝撃力の緩和効果を高めることができると判断される。

4. あとがき

複合材料積層板は、構造物の機能性を要求される分野、特に航空・宇宙関連分野で多く使用されている。土木工学分野においても、FRPを中心に複合材料の使用が増大しつつある。複合材料積層板の高い剛性と高い強度は、複合材料の特性に起因しており、設計の自由度を大きく向上させるものと考えられている。しかしながら、衝撃荷重を受ける場合には、その高い剛性のため大きな荷重を小さな変形のもとに伝えることになり、衝撃力の緩和という観点からは常に理想的とは考え難い。そこで、本研究では軸圧縮力を受ける複合材料積層板の衝撃力を緩和する方策の一つとして、三層よりなる積層板の層間にスリットを入れ、座屈モードを制御することにより、衝撃力の緩和が可能であるかどうかを調べた。その結果、実験的研究により、スリットの位置や大きさを変化させることによって、積層板の衝撃緩和効果が変わることが確かめられた。このことは、座屈荷重と座屈モードの制御により、座屈後の剛性低下を有効に利用でき、衝撃荷重の緩和が複合材料積層板に期待できることを示唆するものと考えられる。

参考文献

- 1) 依田・梅田・多田：衝撃荷重を受ける複合材料積層板のエネルギー吸収機構に関する実験的研究，

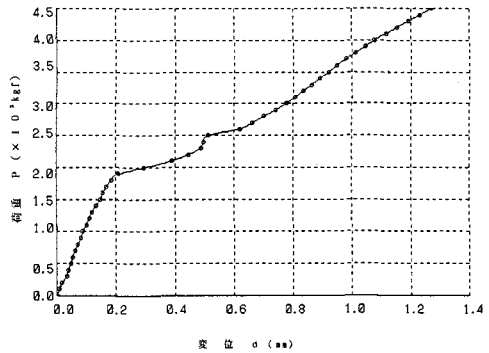


図-9 荷重と軸方向変位の関係 (実験C)

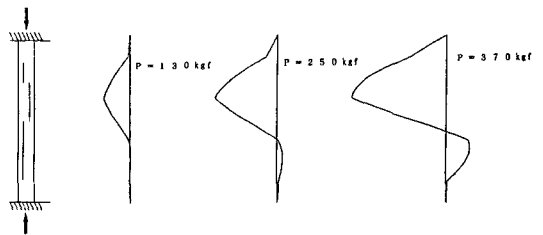


図-10 変形モード図 (実験C)

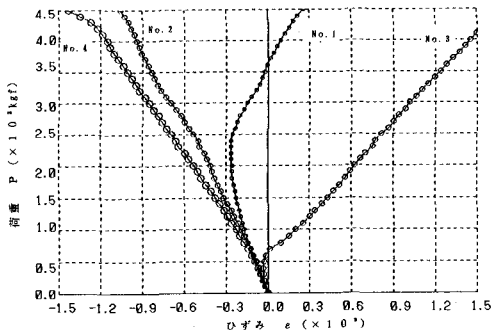


図-11 荷重とひずみの関係 (実験C No.1-No.4)

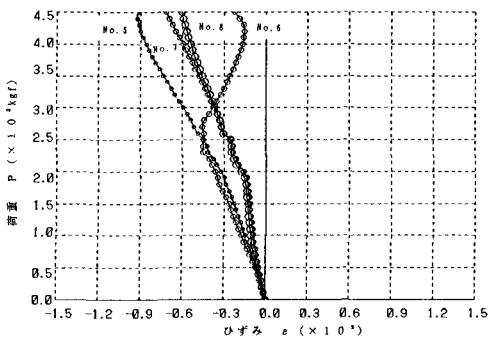


図-12 荷重とひずみの関係 (実験C No.5-No.8)

土木学会第47回年次学術講演会, 1992. 9,
pp. 1100-1101.

- 2) Yoda, T., Aoki, T. and Ando, K.: Crashworthiness Design of Laminated Plate Structures with Multiple Delaminations, 1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 1992, pp. 569-575.
- 3) Hanagud, S., Craig, J. I. and Zhou, W.: Energy Absorption Behavior of Graphite Epoxy Composite Sine Webs, J. of Composite Materials, Vol. 23, 1989, pp. 498-459.
- 4) Ando, K., Aoki, T. and Yoda, T.: Energy Absorbing Laminated Structure with Multiple Delamination, French-Japanese Seminar on Composite Materials, Paris, 1990.
- 5) Mamalis, A. G. and Manolacos, D. E.: Crashworthy Behaviour of Thin-Walled Tubes of Fibreglass Composite Materials Subjected to Axial Loading, J. of Composite Materials, Vol. 24, 1990, pp. 72-91.
- 6) Farley, G. L. and Jones, R. M.: Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes, J. of Composite Materials, Vol. 26, 1992, pp. 37-50.
- 7) Kutlu, Z. and Chang, F.-K.: Modeling Compression Failure of Laminated Composites Containing Multiple Through-the-Width Delamination, J. of Composite Materials, Vol. 26, 1992, pp. 350-387.
- 8) Farley, G. L. and Jones, R. M.: Prediction of the Energy-Absorption Capability of Composite Tubes, J. of Composite Materials, Vol. 26, 1992, pp. 388-404.
- 9) Causbie, S. M. and Lagace, P. A.: Buckling and Final Failure of Graphite/PEEK Stiffener Sections, AIAA Journal, Vol. 26, 1988, pp. 1100-1106.

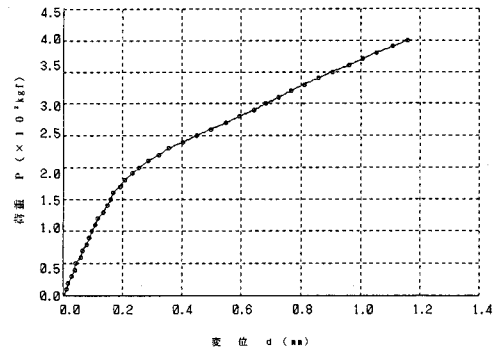


図-1 3 荷重と軸方向変位の関係 (実験D)

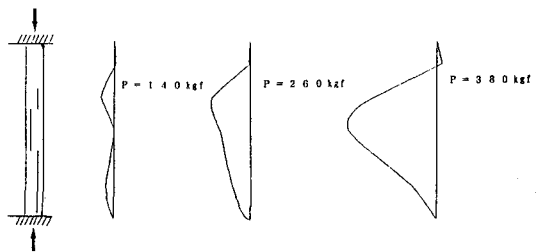


図-1 4 変形モード図 (実験D)

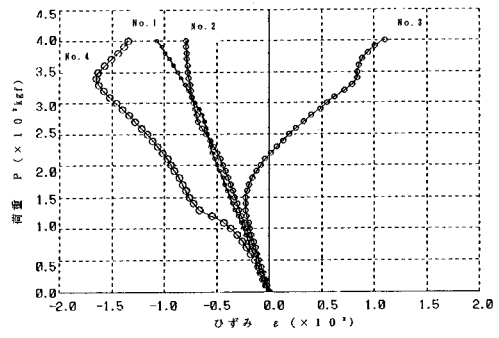


図-1 5 荷重とひずみの関係 (実験D No. 1-No. 4)

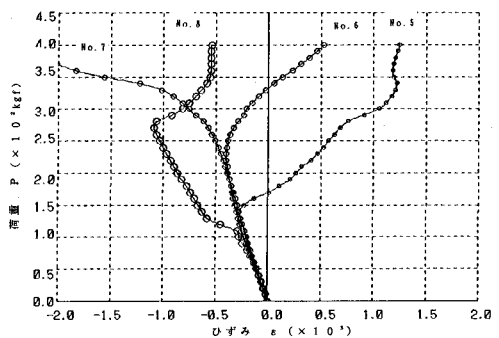


図-1 6 荷重とひずみの関係 (実験D No. 5-No. 8)