固-気体複合材料の静的荷重分散機能* (内部静水圧分布の効果)

三木正俊^{*1}, 片山傳生^{*2}, 山本英毅^{*2}

Static Load Dispersion Function of Solid-Air Composites (Effect by the distribution of Internal Hydrostatic Pressures)

Masatoshi MIKI, Tsutao KATAYAMA^{*3} and Hidetake YAMAMOTO

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University,
1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

In order to make a new movement of the composite material design, the purpose of the present study is applying the solid-air composites derived from the load dispersion structure of living bones to investigate the static load dispersion function shown by the mechanical behavior of those constitutive elements. Internal hydrostatic pressures were controlled by making a hole in cell walls of the honeycomb core. Static indentation tests were carried out to examine the load dispersion effect. In-plane cell's deformations and stress distributions at the bottom surface of the specimens were measured optically. Experimental results illustrated that the distribution of the internal hydrostatic pressures greatly influenced on the deformation condition of the solid part. Consequently, it is considered that controlling the internal hydrostatic pressures is an effective design parameter of the load dispersion function.

Key Words: Composite Material, Material Design, Material Testing, Solid-Air Composites, Static Load Dispersion, Internal Hydrostatic Pressures, In-Plane Indentation, Photoelastic Stress Measurement

1. 緒 言

近年の工学技術の進歩、とくにナノ計測と加工技術は、材料および微小構造物の力学的機能の評価と設計における新たな可能性を引き出している。それは複合材料の設計・開発にも、新たな局面を提起している。材料の各構成要素の力学特性が大いに追究され、要求される界面の合理的な機能設計が成就することが期待される。そこで本研究では極大の負荷が作用するような機械構造の荷重関節を想定して、荷重分散材料としての力学的機能の評価と設計に基づく複合材料の設計・開発の新展開をはかるために、界面の荷重分散特性に着目した。しかしながら、固体要素のみを持つ複合材料では、固体-固体界面で力の法線成分と接線成分がともに伝達されるので荷重分散効果には限界がある。力学的考察によれば、内部に流体要素を持つ複合構造では、固体-流体界面で力の法線成分のみの授受がなされるのでまったく新しい荷重分散効果が期待で

きることが推察される。

そのような力学的組成を持つ複合材料は一般的に工業利用されていないが、例えば生態系における骨構造として実存し、多くの優れた力学的機能をもつことが証明されている⁽¹⁾⁽²⁾。生体骨固有の荷重分散構造は長管骨骨端等の内部構造である海綿骨であり、多孔質の骨りょう構造の空げきに、流体である骨髄が充てんされて形成されている。過去の研究において、生体骨固有の複合構造の力学的機能性に学ぶ材料設計(バイオミメティックデザイン)⁽³⁾として、海綿骨の非均質力学的組成を考慮した固-流体複合材料モデルが提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。海綿骨の非対称な複合材料を解析的に単純化して取扱うために、ハニカムコア材の各セル内部に液体または気体が独立封入された。静的局部圧縮試験の荷重-変位線図とセルの面内変形状態により、内部流体の静水圧による荷重支持効果が多孔質固体の圧縮変形抵抗を増大させることが示された。

よって本研究においては、材料の軽量化設計の観点から、内部流体を気体に限定した固-気体複合材料について力学的設計因子の荷重分散効果を追究する。すなわちハニカム材のセル壁に機械的穿孔を施すことにより材料内部の静水圧分布を調節し、局部圧縮負荷の側面変形状態、さらには光弾性測定法による下面応力

* 原稿受付 2002年8月8日。

^{*1} 正員, 新キャピラー三菱(株)油圧ショベル開発本部
(☎674-8686 明石市魚住町清水 1106-4)。

^{*2} 正員, 同志社大学工学部(☎610-0321 京田辺市多々羅郡谷 1-3)。

E-mail: tkatayam@mail.doshisha.ac.jp

状態を用いて固-気体複合材料の静的荷重分散機能の評価を行った。

2. 実験方法

2.1 試験片の製作 固-気体複合材料の単位構造を図1に示す。静的圧縮負荷に対する材料変形の観点から、内部に気体要素を備えた多孔質の軽量化固体であれば、静水圧による固体要素の変形の均一化が図られることが考えられる。固体-流体界面の応力伝達では法線応力成分のみが対象となるために、複合材料界面の新しい機能的設計の可能性が期待される。固体要素の選択肢として、慣用機械構造用材料においてはフォーム⁽⁶⁾⁽⁷⁾とハニカムが考えられる。フォームは三次元的に複雑な構造を持つので負荷時の内部構造の変化を精確に測定することは困難である。ハニカムは二次元的構造であるので材料の厚さ方向のひずみ分布を無視でき、かつセル形状の均一化が考慮されているので本研究には有利である。さらに、六角形セルハニカムは、面内圧縮負荷によりセル内部に静水圧が付与された場合、三角形や四角形セルハニカムよりもセル変形の均一化に適した構造であると考えられる。

そこで本研究では、六角形セルハニカムに気体を封入することにより固-気体複合材料を製作する。固体

Fig. 1 Structural unit of solid-air composites

Fig. 2 Dimensions of specimen

要素には軽量で十分な剛性を持ち、かつ試験片製作が容易なアルミ合金(A 3004 H)ハニカムを用いた。それは接着積層されたアルミはく展張製造品⁽⁸⁾であり、各セルは1層と2層のセル壁を持つ。図2に試験片の寸法を示す。セルの仕様はアルミはく1層の厚さ0.051 mm、はく幅23 mm、セルサイズ9.53 mmを選択した。気体要素は空気とした。試験片の製作手順としては、寸法裁断したハニカムの所定セル壁に図3、4のように機械的穿孔し、弾性エポキシ系接着剤(MOS 7)を16.0 g塗布した膜厚0.018 mm、ヤング率約500 MPaのラッピング用塩化ビニルフィルム(以後、フィルムと呼ぶ)をハニカム側面に接着し、1気圧、25°Cの条件下でセル内に空気を封入した。セル変形測定でセル壁と接着剤フィレットを識別するために、ハ

Fig. 3 Honeycomb cell wall with artificial holes

Fig. 4 Controlling hydrostatic pressures

Fig. 5 Controlled patterns of pressures displayed by the continuous line

ニカム側面を黒塗りし、接着剤に白色顔料を混ぜフィルムに塗布し接着した。

Type A～G の 7 種類の試験片を用いた。Type A は固体要素(ハニカム)である。Type B はフィルム接着の影響をみるために、セル壁すべてに穿孔したハニカムにフィルムを接着した固体要素である。Type C は各セル壁に孔を開けずに気体封入した固-気体複合材料である。Type D～G はそれぞれ、図 5 の各タイプ中に示す実線方向に孔を開けて気体封入した固-気体複合材料である。

2.2 荷重分散の評価 本研究では静的圧縮負荷に対する固-気体複合材料の固体要素の内部変形状態と材料底部での伝達応力分布を測定するために、図 6 に示す試験片側面を評価面とする面内局部圧縮試験を行った。インストロン万能試験機(1122 型)のロードセル下部に鋼製圧子を取付けクロスヘッドスピード 5 mm/min の条件で用いて、試験片に静的局部圧縮負荷を与えた。固体要素に用いたハニカムは面内異方性

を示し、かつ積層はく展張製造品のためにはく厚が 1 層と 2 層のセル壁を持つので、セル変形は多様化している。しかし X1 方向の圧縮であれば、セル変形を最も単純化でき評価をも簡単化できるので、X1 方向に圧縮した。圧子が試験片中央部の単一セルに接触するように試験片を配置し、負荷による屈崩壊を避けるために圧子直下のセルに不飽和ポリエステル樹脂を注入した⁽⁹⁾。

当初は荷重-変位線図によっても試験片の荷重分散の評価の可能性を検討したが、むしろ圧縮剛性の変化は荷重支持の評価に適用されるべきであると考えた。そこで本研究では負荷に伴う固体要素の変形状態を光学的手法により非接触に測定して、定量的に議論した。

まず試験片側面の面内変形を評価するためにセルの変形を考慮した。本実験条件の圧縮によるセルの面内変形には、図 7 に示す Mode I～III の 3 種類のモードが考えられる。Mode I は試験片中央部に広く分布し、Mode II は試験片上部にのみ分布し、そして Mode III は Mode I と II の境界に沿って出現すると考えられる。Mode III は 1 層と 2 層のセル壁を直接圧縮するので不安定な変形をなすことが推察される。それらセル変形モードの存在はセルの角度変位 $\Delta\alpha$ と $\Delta\beta$ を用いて測定され得る。しかしながら、本研究で製作した固-気体複合材料の各試験片とも $\Delta\beta$ の有意な値は得られなかったもので、 $\Delta\alpha$ の正值の測定結果によりとくに Mode I のセル変形分布について評価した。試験片側面のセル数は高さ方向 16 セル、幅方向 27 セルであるが、試験片下端部と両側端付近のセルがときどき不規則変形するために、図 8 のとおりセル変形の評価対象を負荷点を基準に高さ方向 13 セル、幅方向 25 セルに限定した。所定の静的圧縮負荷時の試験片側面の変形状態をデジタルカメラ(オリンパス：C-820 L)で撮影し、その画像をパーソナルコンピュー

Fig. 6 Experimental conditions of in-plane indentation

Fig. 7 Quantification of in-plane deformations

Fig. 8 Measurement area of in-plane deformations

タ内で二値化処理してセルの面内変形分布図とした。

試験片底面での応力伝達を評価するために、光弾性測定により下面応力分布を定量化した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。試験片底部の支持状態と光弾性材料に生じる干渉じまの発生例を図9に示す。光弾性材料と直接接触する試験片底部の各セル壁に、辺長5 mm、高さ20 mmの亚克力製正三角柱を、支点として接着剤で測定した。光弾性材料には、光弾性感度に優れたポリウレタンゴムを用いた。適用寸法は厚さ20 mm、高さ50 mm、幅300 mmである。静的局部圧縮に伴い生じる各支点直下の干渉じまの次数をデジタル画像から観測すれば、各点に対応する主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ は、次式で与えられる。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n / (\alpha t) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 n はしま次数、 α は光弾性感度、 t は材料厚さである。本実験の荷重条件は試験片上部の中央にある単一セルに対する圧縮であるので、試験片下面の応力伝達性能は主応力差の等分布化として評価され得る。

3. 結果と考察

測定結果の評価に先立って、各試験片の典型的荷重-変位線図を図10に示す。前述のとおり、Type A、

Fig. 9 The conditions of photoelastic stress measurement

Fig. 10 Load-indentation depth curves

Bは固-気体複合材料の固体要素とフィルム接着された固体要素である。線図から両試験片の圧縮剛性の定量的特性には大差がある。フィルム接着は固体要素の圧縮荷重支持に大いに影響を及ぼすことが考えられる。しかし圧縮剛性の定量的変化に注目すると、両者とも暫時的低下を繰返して徐々に安定化する。変位約5 mmに見られる Knee 点まで剛性は一定のため各セルの弾性変形が推察される⁽¹²⁾。以後、剛性は低下と再増加を繰返す。アルミハニカムでは、Knee 点以後セル壁の曲げ塑性降伏⁽¹³⁾による剛性低下と大変形による幾何学的剛性低下のために試験片の急激な剛性低下が起こり、セルの崩壊に伴うセル同士の接触によるち密化のために、その後の剛性増加が生じると考えられる。本研究のフィルム接着は、固体要素の圧縮剛性の定量的変化に有意な影響を及ぼさないことが推察された。

固-気体複合材料については、Type Cと Type D～Gで全く異なる性質の線図を示した。Type Cの線図は Knee 点以後にも再び線形性を示すが、圧縮剛性の変化について、Type D～Gの線図は固体要素のものよりも複雑な履歴を示した。しかしながら、固-気体複合材料の圧縮剛性は固体要素のそれよりも常に大きな値を示した。それはセルの圧縮変形に伴い内部気体要素の静水圧が局所的に上昇するためであり、フィルムの接着によるものとは全く異なる影響を試験片の荷重支持特性に及ぼすことが推察された。その荷重分散の効果は以下の結果により評価される。

3.1 面内変形の評価 図10より各試験片は圧縮荷重20 Nですでに非線形変形を生じるが、より大き

Fig. 11 Distribution of in-plane deformations (Type A)

Fig. 12 Distribution of in-plane deformations (Type B)

な負荷条件も表示すればハニカムの変形が理解しやすくなるので、圧縮負荷 20 N、40 N における各試験片側面のセル面内変形分布を図 11~17 に示す。ただし Type A の固体要素にはフィルム接着による荷重支持が存在しないので圧縮負荷 10 N、20 N における結果を示す。各図は試験片側面の右半分の形状を表すので、図の左上角部が圧縮負荷の作用点になる。

そこでまず、固体要素の面内変形とフィルム接着の影響をみる。Type A では固体要素本来の塑性変形のために負荷点近傍に著しく大きなセル変形が集中しその影響は鉛直下方へ分布するが、フィルム接着された

Fig. 13 Distribution of in-plane deformations (Type C)

Fig. 14 Distribution of in-plane deformations (Type D)

Fig. 15 Distribution of in-plane deformations (Type E)

Fig. 16 Distribution of in-plane deformations (Type F)

Type B では負荷点近傍と斜め下方に大きなセル変形が分布する。フィルム接着はハニカム変形を拘束するので固体要素の荷重支持性に影響して面内変形分布にも影響を及ぼした。本固-気体複合材料において、接着フィルムも設計要素として意味を持つことを示唆する。

一方、固-気体複合材料において、セル壁に孔を持たない Type C では負荷点近傍にのみ大きなセル変形が

Fig. 17 Distribution of in-plane deformations (Type G)

Fig. 18 Stress distributions at bottom surface

集中し、試験片底部で変形分布は拡大しない。圧子直下のセル内部で静水圧が著しく上昇するため、セルの崩壊および密化が生じないので圧縮剛性は著しく上昇した。しかし静水圧は隣接セル間で異なるため、その効果は試験片全域に及ばない。つまり各セルに気体を独立封入すると十分な荷重分散効果は期待できないと推察された。鉛直方向に孔を配置した Type D では負荷が大きいほど負荷点近傍の限られた鉛直方向セルユニットで静水圧上昇を伴い荷重支持するために大きなセル変形は底辺上でも負荷点直下に分布する。水平方向に孔を配置した Type E では水平方向セルユニットで十分な静水圧上昇が生じず鉛直下方のセル変形が生じてしまい静水圧の荷重支持が十分に機能しないために、Type B によく似た変形分布が生じた。山型方向に孔を配置した Type F では制御された静水圧分布が荷重支持の機能を果たすので負荷点から水平方向の大きなセル変形が分布した。すなわちこれは固体要素の場合とは全く異なる変形分布であり、本固-気体複合材料に固有の変形分布が表示された。谷型方向に孔を配置した Type G ではさらに広範囲な水平方向のセル変形分布を表示した。

以上の結果、静水圧分布を図5に示した Type F, G の方向に制御することにより、固-気体複合材料の変形分散に通じるセル変形分布を与えることができた。

3.2 応力伝達の評価 圧縮負荷が 20 N, 40 N による Type B~G 各試験片の下面応力分布を図18に示す。図中横軸の数値は、図9に示す試験片底面の支点位置を表すハニカムセルの番号に対応しており、負荷点を通る中心軸側を番号1とする。なお、固体要素の比較結果としてはフィルム接着の条件が必要であるので、Type A の結果は評価対象から除外した。

固体要素を応力伝達の評価基準とする。Type B では負荷 20 N で応力こう配がみられるが、負荷 40 N では改善されているように見える。これはハニカム内でセル壁の塑性変形が進み、セルの密化によって処女材とは全く別の構造に不可逆変化したためである。一方、固-気体複合材料では、負荷レベルによって応力分布の特長が大きく変化することはなかった。しかし Type C, E では固体要素よりも著しい応力こう配を示した。Type C の結果は、面内変形の評価と同様の理由で説明される。Type E については、静水圧分布が水平方向に制御されているが、期待に反して試験片底部の反り変形を誘発したと推察される。逆に鉛直方向に制御された Type D は応力こう配の傾向を示さなかった。

以上の評価により、負荷点近傍で上昇しやすく支持

部で上昇しにくい Type F, G の静水圧分布が圧縮負荷の分散に有効な制御であるという結論が得られた。

4. 結 言

本研究では、複合材料の静的荷重分散に対する設計を固-気体複合材料を適用して追究するために、内部静水圧分布の効果を局部圧縮負荷に伴う固体要素中の変形と試験片の下面伝達応力の測定により評価して、以下の知見を得た。

- (1) 気体要素の内部静水圧分布を調節することにより固-気体複合材料の内部変形と下面応力伝達の状態は大いに変化する。
- (2) 負荷点近傍で上昇しやすく支持面で上昇しにくい内部静水圧分布の制御が局部圧縮に対する荷重分散に有効である。
- (3) 接着フィルム(膜要素)は固体要素の変形を直接拘束するので固-気体複合材料の荷重支持に大いに影響を及ぼす。

文 献

- (1) 大塚正久, セル構造体-多孔質材料の活用のために, (1993), 431-451, 内田老鶴園.
- (2) 片山傳生・ほか3名, 海綿骨の最適構造解析による人工関節の力学的適合性評価のための定式化, 機論, 60-575, A (1994), 1706-1712.
- (3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, バイオニックデザインに関する調査 NEDO-IT-9002 (1991); NEDO-IT-9104 (1992).
- (4) 片山傳生・ほか2名, 荷重分散性能に優れた生体骨構造を模倣した固-流体複合材料の提案(第1報, ハニカムモデルの検討), 機論, 98-543, A (1998), 3078-3083.
- (5) Katayama, T., ほか2名, Two-dimensional modeling of solid-fluid composites, *Composites Struct.*, 9 (1997), 499-507.
- (6) Throne, J. L., On the static compressibility of partially liquid-fluid open-celled foams, *J. Cellular Plastics*, 25 (1991), 354-377.
- (7) Throne, J. L., Effect of foam geometry on liquid transfer rates from partially filled opened-celled foams, *J. Cellular Plastics*, 27 (1991), 354-391.
- (8) 佐藤孝, ハニカム構造材料の応用技術(上巻), (1995), 113-118, シーエムシー.
- (9) Triantafillou, T. C., ほか4名, Failure surfaces for cellular materials under multiaxial loads-II. Comparison of models with experiment, *Int. J. Mech. Sci.*, 31-9 (1989), 665-678.
- (10) Kuske, A., *Photoelastic Stress Analysis*, (1974), 86-179, A wiley interscience publication.
- (11) 鶴戸口英善, 応力測定法, (1956), 472-581, 朝倉書店.
- (12) Zhang, J. and Ashby, M. F., Buckling of honeycombs under in-plane biaxial stresses, *Int. J. Mech. Sci.*, 34-6 (1992), 491-509.
- (13) Gibson, L. J., ほか3名, Failure surfaces for cellular materials under multiaxial loads-I. Modeling, *Int. J. Mech.*, 31-9 (1989), 635-663.