

卵殻の構造・組織の力学的評価

著者	Oda Juhachi, Sakai Shinobu, Kemmochi Satoru
雑誌名	日本機械学会論文集A編
ページ	431-436
発行年	1997-02-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/2262

卵殻の構造・組織の力学的評価*

尾田 十八*¹, 酒井 忍*¹, 剣持 悟*²

Mechanical Evaluations of Structural and Material Composition of Eggshell

Juhachi ODA, Shinobu SAKAI and Satoru KEMMOCHI

An eggshell is cracked easily by an inside load, but has strong resistance to an outside load. In this study, the structural and material composition of a hen's eggshell is analyzed by microscopic observation, static and dynamic penetration tests and FEM. The results obtained are as follows. (1) From microscopic observation, the eggshell is found to have a laminated structure of many material compositions. (2) The outer eggshell membrane acts as a strong adhesive between the inner eggshell membrane and the eggshell. (3) A cone-type punch and striker makes an initial crack easily, but large penetration energies are required. (4) The penetration energy required from outside of an eggshell is bigger than from inside and consists of the energies required to break the membrane and peel it off the eggshell.

Key Words: Biomechanics, Biomaterials, Eggshell, Composite Material, Laminated Construction, Material Testing, Finite Element Method

1. 緒 言

卵の殻は生命維持のための多くの機能を有している。機械的な強さの観点から言えばヒナがふ化するまでの間、外部からの負荷重に耐えるだけの強さが必要であり、一方ヒナが成長したときは容易に殻が破られねばならない。つまり、内側から壊れやすく、外側からの負荷重には強い特性を持っている。

実は、このような機能が要求される工業製品として自動車のフロントガラスが挙げられる。これは高速で飛来する物体に対しては耐貫通性が必要であり、一方衝突事故時に運転者の頭部がガラスに衝突しても致命的な損傷を与えないことが要求されるものである。しかしながら現在フロントガラスに用いられている合わせガラスは樹脂製の中間膜を等厚の板ガラスで挟み込んだ三層構造であり、内、外強度に異方性はない。この例からも卵殻の構造・組織を力学的に評価、分析することの重要性が指摘できる。特にきわめて脆性傾向の強い卵殻と逆に超延性傾向を持っている卵殻膜の二層構造が有する強度的な機能を明らかにすることは脆

性破壊に悩む多くの工業製品の強度設計に役立つものと考えられる。

そこで本研究では、比較的安価で入手の容易な鶏卵を取りあげ、これの卵殻構造に対し、顕微鏡観察と各種材料試験によりその構造組織と各部の材料特性を明らかにする。また、我々が最も興味を持つ卵殻内、外の強度の異方性を静的、動的貫通破壊試験およびFEM解析を通して明らかにしたい。

2. 卵殻-卵殻膜構造とその材料特性

2.1 卵殻の構造 図1および表1に本研究で対象とする鶏卵殻およびその卵殻膜の組織構造とおおよその形状、寸法を示す。図1(a)に示すように、卵の殻は主にクチクラ、卵殻、卵殻膜の3つの組織で構成されている⁽¹⁾。

クチクラは卵殻の外側を0.01~0.05mmの厚さで薄い膜状に覆って、卵殻に存在する無数の微細な気孔をふさぎ、微生物の侵入を防いでいる。

卵殻は大きく乳頭層と海綿層の2つに分けることができ⁽²⁾、海綿層の大半は炭酸カルシウムの結晶だが、有機体の基質繊維によってお互にくっつき合い強化されている。外側は比較的凹凸が少ないが内側は乳頭層の突起でこぼこしているため、内側からのき

* 原稿受付 平成8年3月 日。

*¹ 正員, 金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野2-40-20)。

*² 学生員, 金沢大学大学院。

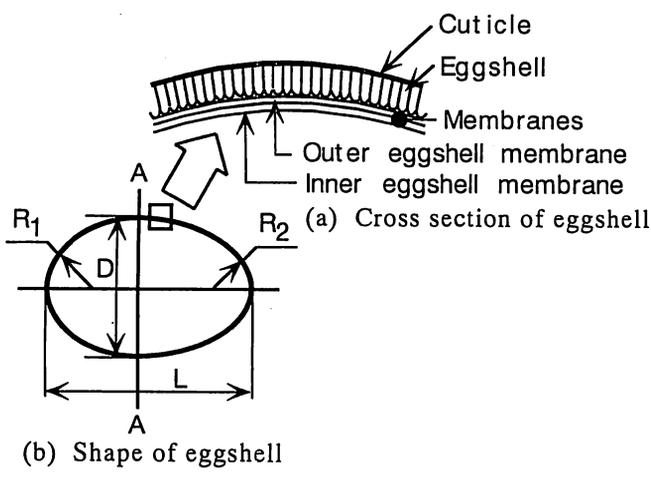


Figure 1 Cross section of eggshell

Table 1 Shapes of eggshell and membrane

L(mm)	58.80 ~ 61.95
D(mm)	45.05 ~ 47.25
R ₁ (mm)	12 ~ 15
R ₂ (mm)	15 ~ 17
Eggshell / Membrane	
Thickness(mm)	0.355 / 0.077

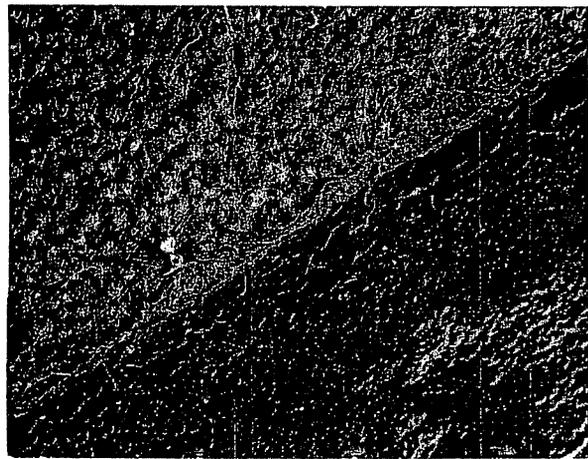
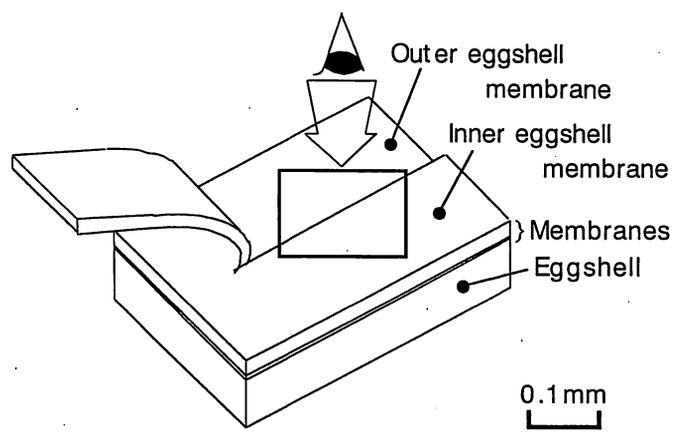


Figure 2 Surfaces of inner and outer eggshell membranes

裂が生じやすい。

卵殻膜は内卵殻膜と外卵殻膜の二層から成る⁽¹⁾。それらは主としてケラチンの芯と糖タンパク質の覆いでできた繊維より成っており、我々の顕微鏡観察

結果の図2からもわかるとおり、外卵殻膜は内卵殻膜に比べて薄く、繊維の目も粗くできていることから、内側表面がでこぼこしている卵殻となめらかな表面を持つ内卵殻膜との接着面積を拡げ、接着力を増すための接着層として機能していると考えられる。

2.2 材料特性の測定 卵殻構造の各部における材料特性を表2に、また卵殻、卵殻膜の応力-ひずみ線図を図3に示す。これらはすべて10本程度の供試片データの平均値である。これらを求めた材料試験には、被測定物が微小で、かつ生体であることから、種々の工夫が必要であった。例えば、試験片として用いた膜は生卵を8%の酢酸溶液に20時間程度つけておき、殻を溶かして卵殻膜だけを取り出したものであり、卵殻のヤング率は約1mm 程度の大きさに砕いた殻をエポキシに混ぜて鑄込んだ試験片の引張試験により、体積比を考慮した複合則から推定した。このようなことで先の図3における卵殻の応力-ひずみ関係は表2のヤング率と引張強さのデータをもとにして作成した。また、座屈圧力値の測定には生卵に穴を開けて中身を取り出した後に穴を塞ぎ、気孔等から水が入り込まないようにオイルでコーティングし、薄いビニル膜で密閉した試験片を用いた。これを圧力容器に入れ、図4に示す装置により静水圧下で破壊させて座屈圧力値を求めた。表2、図3から卵殻と卵殻膜はその応力・ひずみ挙動が大きく異なるが引張強さはほぼ等しいことがわかる。また座屈圧力値は35気圧にあたり、とても大きい値をとることは驚くべき特性と言える。

2.3 合わせガラスの材料特性との比較 表1および表2からわかるように卵殻と卵殻膜の厚さの比は4.61であり、ヤング率の比は1770である。これに対し現在利用されている自動車のフロントガラス用合わせ

Table 2 Material properties of eggshell and membrane

	Eggshell	Membrane
Young's modulus(MPa)	7760	4.38
Tensile strength(MPa)	1.99	2.23
Peel strength(N/25mm)	0.327(3)	
Buckling pressure(MPa)	3.53	

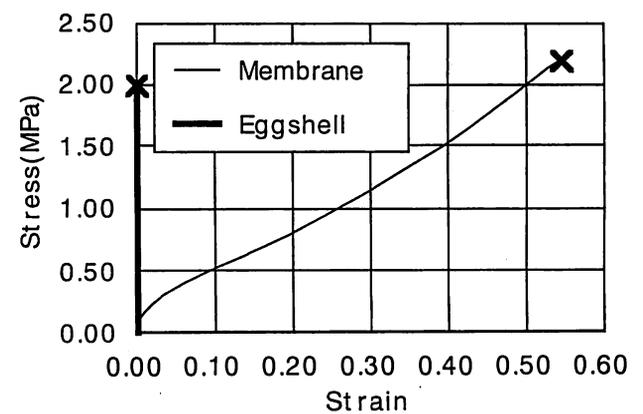


Figure 3 Stress-strain diagram of eggshell and membrane

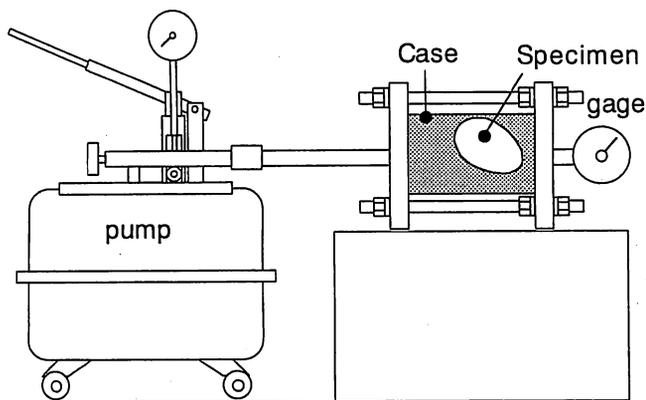


Figure 4 Measurement set-up of buckling test under hydraulic pressure

ガラスのガラス部と中間膜のそれらの比は6.58と6245である⁽⁴⁾。このことから卵の殻と合わせガラスの寸法構成とその材料特性の比率が割合似ていると見ることができる。ただ卵の殻は合わせガラスに比べ、膜が寸法的にも、材料特性的にもより大きな役割を果たしていると言える。

3. 卵殻の静的貫通破壊試験とその評価

3.1 実験方法 卵の殻の基本的な強さの1つとして局部的な負荷に対する破壊抵抗値が考えられる。ここではこれを測定する尺度として、ある種の圧子(後述)によるその貫通破壊抵抗(破壊荷重やエネルギー)値を考える。そしてまずその静的な耐貫通性の評価を実験的に試みる。耐貫通性に影響を及ぼす因子は膜の有無や貫通方向、圧子の先端形状などが考えられる。そこで試験片はゆで卵を図1(b)に示したようなA-A断面で切断し中身をくり抜いた後に、酵素によって膜を除去した膜無し試験片とそのままの膜有り試験片の二種類作製した。このような試験片は卵の形状からもわかるとおりほぼ軸対称形であり、その形状を曲率のみで評価できるという簡便さがある。

貫通方向は図5にその試験法を示すとおり外側から貫通破壊させる場合と内側から貫通破壊させる場合の二種類を行った。圧子は卵殻に押し当てて貫通さ

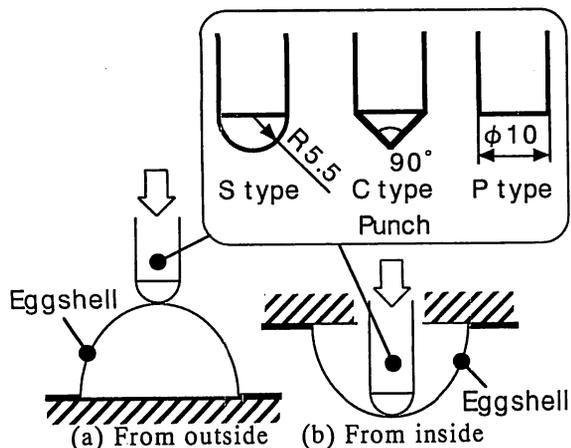


Figure 5 Static penetration test and three types of punch

せるための器具であり、先端の形状の違いによって三種類作製した。1つは嘴を想定した円錐型圧子で先端角が90°になっている。あとの2つは比較的多く自然界に存在する形状として先端を平面と球形にした。それぞれC型、P型、S型圧子と呼ぶことにする。いずれも直径10mmのステンレス鋼製で、ロードセルに取り付けて使用した。

耐貫通性の評価パラメータとしては貫通破壊エネルギー U_s 、最大荷重 F_{max} 、初期亀裂発生荷重 F_{cr} を考え、圧縮試験機に記録された荷重-変位曲線から算出する。貫通破壊エネルギー U_s は(荷重量)×(変位)の積分値として記録される。実験終了条件としては、圧子先端が殻に接触してから10mm程度変位し、ほぼ先端が貫通した時か荷重がほとんどゼロになった時点とした。

3.2 実験結果とその考察 図6に各モデル5個に対する貫通破壊試験によって得られた圧子の受ける荷重とその変位曲線の代表的なものを示す。C型圧子では

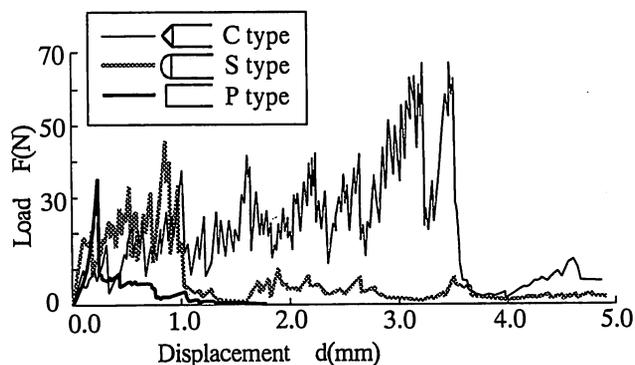


Figure 6 Static displacement-load diagram

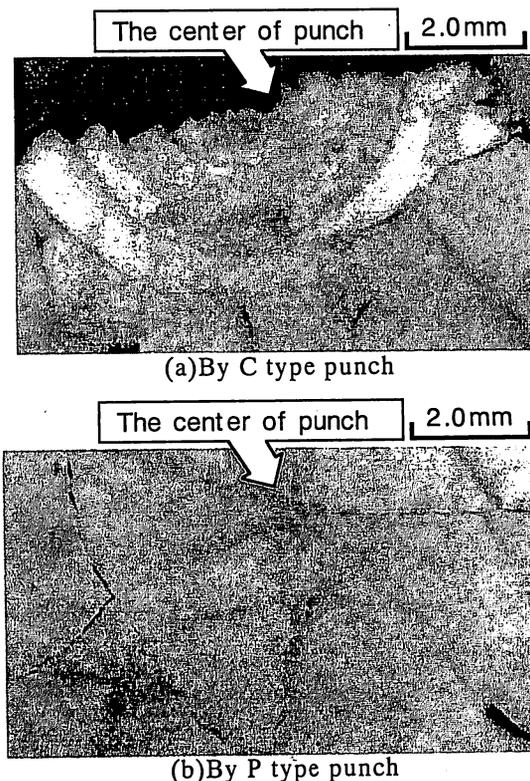


Figure 7 Shape of fracture after static penetration

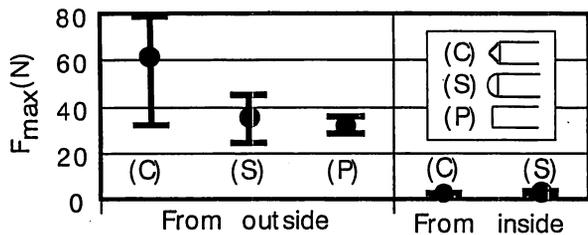


Figure 8 Maximum static load to penetrate

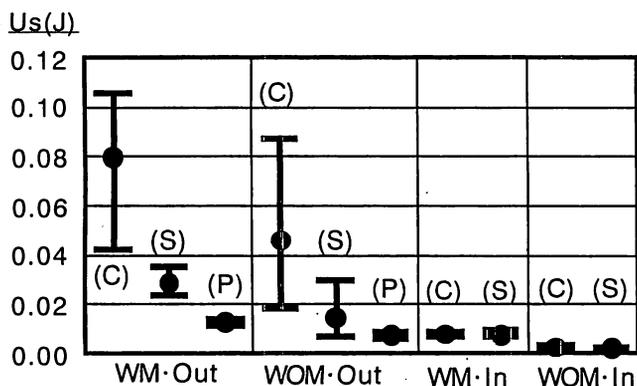


Figure 9 Static penetration energy U_s (J)

試験開始直後の右上がりの直線がすぐに落ち込んでいることから初期き裂を生じやすいことがわかる。しかし図7(a)の破壊写真からもわかるとおり、き裂が進展しても小破壊にとどまる。この微小破壊が順次進行して全体的な破壊になるまで大きな荷重が維持されるため貫通破壊エネルギーは大きくなる。それに対し、P型圧子では図6からわかるとおり、初期き裂は生じにくいが発生後はたかだか数回の進展で貫通孔が開き、検出される荷重がゼロになってしまう。つまり貫通破壊に至るまでのき裂量は少なく、破片は他よりも大きい(図7(b)参照)。

図8に最大荷重 F_{max} のグラフを示す。この図で各記号は5個の供試片における測定値の範囲とその平均値(黒丸印)を示している。内側から貫通破壊させた場合、荷重はほとんどゼロに等しいのに対し、外側からの破壊には高荷重が必要となることがわかる。特にC型圧子で外側から貫通させたときの値が他よりも大きい。これはC型はある程度の大きさの円孔が形成されると、その後荷重が殻を圧縮する方向に働くためであると考えられる。S型にもこれと同じことがいえるが、P型だけが殻に沿った荷重を与えることができず、曲げ応力が主体となり、その値が他の2つに比べて小さくなるものと考えられる。一方 F_{max} に対しては膜有りと膜無しの違いは明確ではなかった。

次に図9に貫通破壊エネルギー U_s のグラフを示す。いずれの圧子でも大きい方から膜有り/外側、膜無し/外側、膜有り/内側、膜無し/内側の順となっている。ここでも先の F_{max} の場合と同様C型圧子の外側からの値が大きく、膜の影響も顕著に現れている。C型圧子は嘴形であることからこれらは卵が他の動物の攻撃に対して強いものとなっていることをうかがわせて興

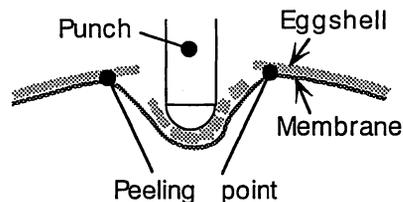


Figure 10 Peeling mechanism of membrane

味深い。

さて以上より、 F_{max} には圧子形状や荷重方向が、また U_s にはさらに膜の有無も強く影響することがわかった。そこでこれらが何に基づいているのかを考えてみたい。まず1つの大きな理由は殻全体がアーチ状になっていることである。このため内側からの荷重に対しては殻は外に拡がり、引張応力が生ずる。さらに殻はゼリー性材料であるためこれに弱く、かつ殻の内側は図1(a)のようにでこぼこしており、その結晶方向も殻厚さ方向であることから、容易にき裂が進展しやすい。このようなことが内側からの荷重に対し F_{max} を小さくし逆に外側荷重に対してそれを大きくしていると言える。つまり卵殻の内/外の強さの違いは卵殻と卵殻膜構成という材料組織の相違よりも、卵殻がアーチ状でしかもその結晶配置方向が内外の荷重によって生ずる応力と巧みに適応しているためと考えられる。

次に貫通破壊エネルギーに対する膜の効果を考える。膜有りと無しの違いは、内側から貫通破壊させた場合に比べ、外側からの場合の方が大きい。これは膜の破断に要するエネルギーの他に外側からの場合は、図10に模式的にそれを示すように、殻と膜のはく離が進行しそのためエネルギーが大きくなると考えられる。

3.3 FEMを用いた弾性解析とその評価 前節での貫通破壊実験結果の一部を理論的に説明するため、FEMによる静的解析を行った。用いた要素はアイソパラメトリック軸対称要素で、膜の無い半卵殻球を414節点、111要素で分割した。図11に座標軸の取り方とその要素分割状況を示す。本研究で行ったFEM解析は結晶の異方性を考慮していないが、他の材料定数や支持条件は試験片および実験条件に合わせている。

荷重条件としては頂点付近のZ軸方向に単位荷重1Nを集中荷重に近いものと分布荷重で与え、またそれを内側から荷重した場合(Z軸上で正の方向)と外側からの場合の計4通り考えた。これは、すべての実験での対応を考え、集中荷重に対応するC型圧子の場合でも完全集中荷重とは考えられないこと、またS、P型でもその接触域は圧子直径よりは小さいことより決めている。図11(a)、(b)にこれらの荷重条件を示す。さらに特別な解析条件としてC型圧子によって直径5mmの円孔が形成されたモデルを作成し、45°の角度を持った円縁に等分布荷重を1N与えるものを考

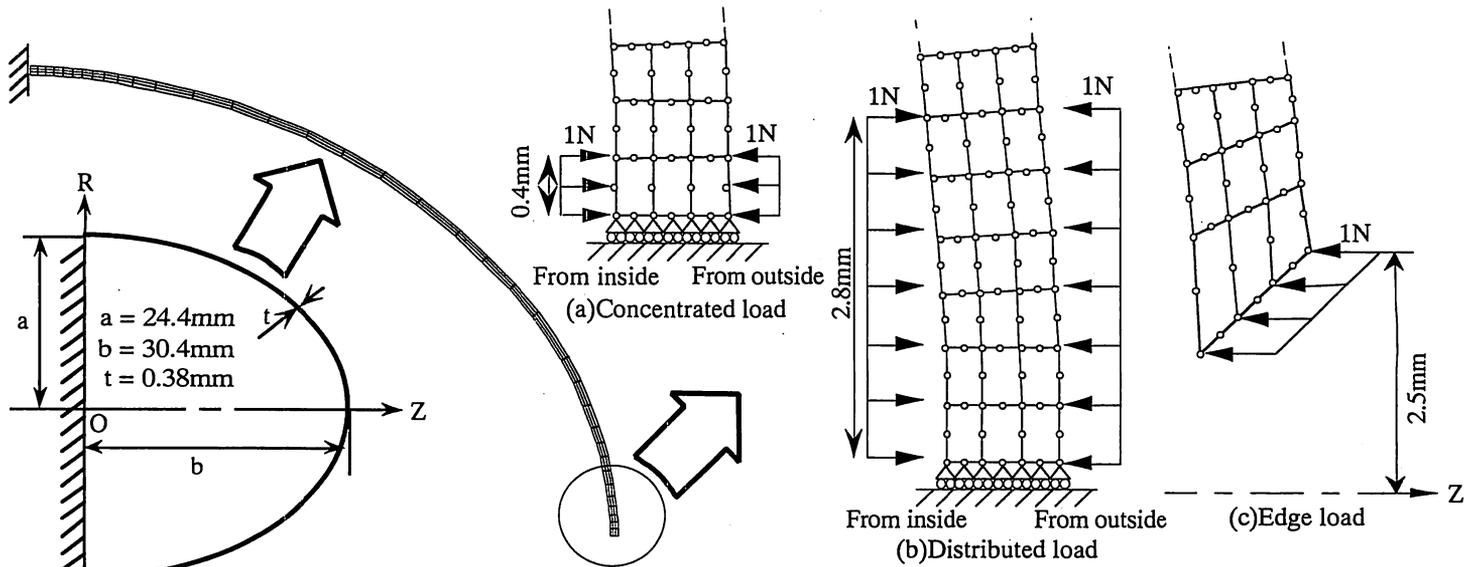


Figure 11 Loading and supporting conditions for FEM analysis

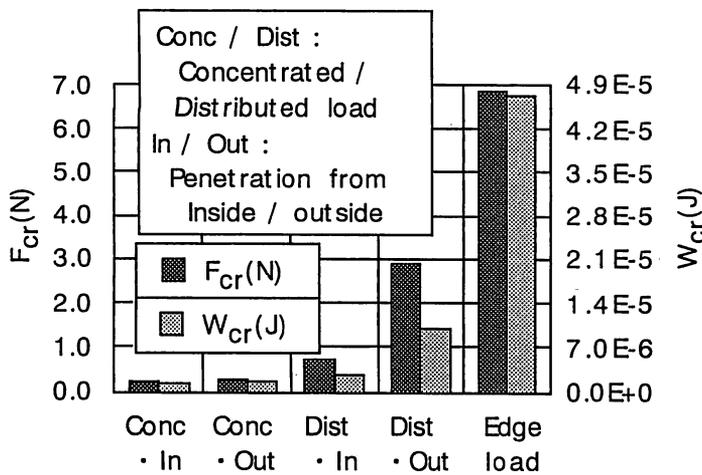


Figure 12 Results of FEM analysis

えた(図11(c))。このような方法による弾性解析で明らかとなるものは初期き裂の生じやすさのみと考えられる。よって引張応力による破壊が生じると考えられる節点にのみ注目し単位荷重を与えたときにその節点で発生する最大引張応力 σ_{max} を求め、これより卵殻の引張強さ σ_c に等しい応力を生じさせるのに必要な荷重量 F_{cr} を σ_c/σ_{max} で計算する。単位荷重がする仕事を w とすると弾性的エネルギー W_{cr} は次式より求まる。

$$W_{cr} = w \times F_{cr} \quad (1)$$

上式の計算結果を図12に示す。初期き裂発生までに必要なエネルギー W_{cr} および荷重量 F_{cr} は分布荷重で大きく、外側から荷重を与えたほうが大きくなる。さらに円孔縁に荷重した場合は他のどの結果よりもき裂が生じにくい。また最大引張応力が発生する箇所も荷重中心点から離れており、殻全体で荷重を分担していることがわかる。これらのことは先の実験結果と対応している。つまり、外側からの初期き裂発生荷重 F_{cr} の違いをしてみると図6に示したように大きい順にP型、S型、C型となっている。集中荷重を内側か

ら与えた場合と外側から与えた場合を比較するとC型圧子による内側と外側からの初期き裂の生じやすさはそれほど差がなく、このことはヒナでも容易に内側から殻にき裂を生じさせることができることを意味している。

以上を総合して殻の静的破壊挙動を考えると、C型圧子が殻を破壊するときは集中荷重による初期き裂は発生しやすいが、局所的な破壊に限定され、小円孔を生じる。この円孔が大きくなるにしたがって最大応力が発生する位置も殻と圧子の接触点より離れていき、全体的破壊に至ると考えられる。それに対し、P型圧子は分布荷重のため初期き裂が広範囲に渡り、すぐに全体的破壊に至ると考えられる。S型圧子はC型とP型の間期的な挙動を示すと言える。

4. 卵殻の動的貫通破壊試験とその評価

4.1 実験方法 生物界において外敵の襲撃に対しては、静的強度よりも、大きな動的負荷に耐えうるだけの耐貫通性のほうが重要な意味を持つと考えられる。そこで図13に示すような装置による動的貫通破壊試験を実施した。そして貫通破壊エネルギー U_D 、貫通孔面積 S を測定し、その耐衝撃性の評価を行なった。ここで U_D は図13のように試験片固定台の上下に設置された速度センサより測定された衝突前後の衝撃子の速度から力学的エネルギーの変化を求め算出された。また試験片は前章と同様膜有りと膜無し試験片を用い、内側と外側それぞれから貫通破壊させた場合の実験を行った。さらに衝撃子としては先の圧子と同様に同じ径、同じ先端形状のC型、S型、P型衝撃子を用いた。

4.2 実験結果とその評価 図14に貫通破壊エネルギー U_D のグラフを示す。定性的な傾向としては静的貫通破壊試験結果(図9)とほぼ同様である。つまりどの衝撃子でも貫通破壊エネルギー U_D は大きい方から順に

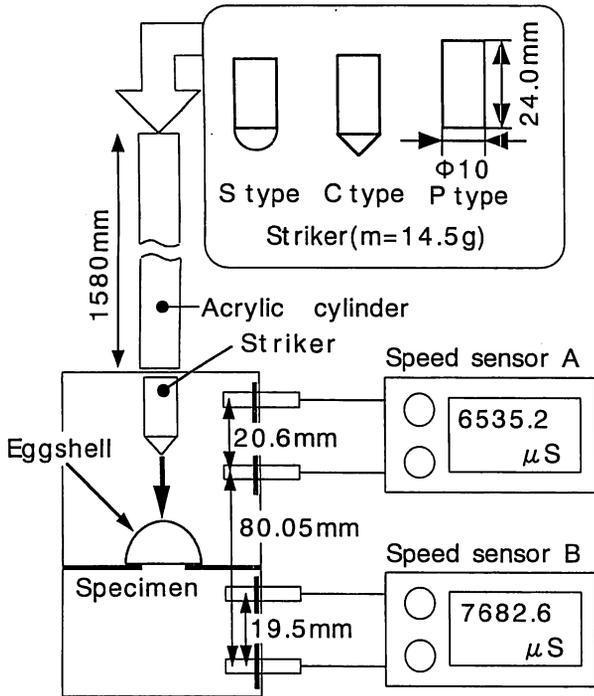


Figure 13 Measurement set-up of dynamic penetration test

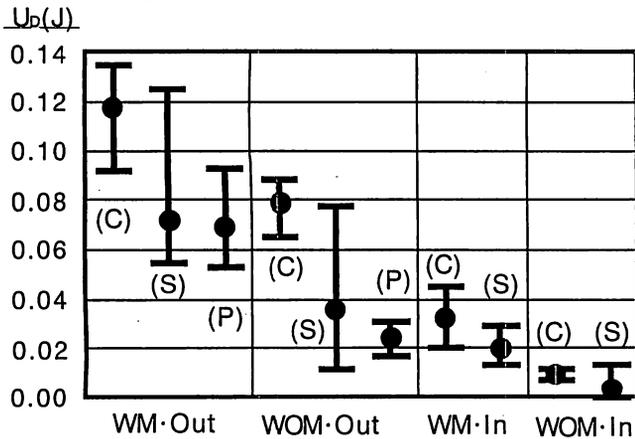


Figure 14 Dynamic penetration energy U_D (J)

膜有り/外側, 膜無し/外側, 膜有り/内側, 膜無し/内側であった。また全体的な傾向としては大きい方から順にC型, S型, P型であった。ただし膜の影響は静的な値よりも大きくなった。

破壊投影面積 S については, 衝撃子の断面積約 80mm^2 に対し, 膜無し/外側の値が約 $500\sim 700\text{mm}^2$ と大きくなった。他の試験条件ではせいぜい2から3倍程度なので外側から貫通破壊させる場合, 膜が形状保持に大きく役立っていることがわかる。

図15はC型とS型で外側から貫通破壊させるのに必要なエネルギーを内側からのそれで割った値を示しており, 灰色が静的実験値, 白色が動的実験値である。いずれも3.5以上の値をとっており, これより貫通破壊エネルギーの点で殻の著しい異方性が確認できる。また図16は貫通破壊エネルギーに及ぼす膜の有, 無の影響を明らかにするため同じ条件での膜有り, 膜無し試験片の貫通破壊エネルギーの差 ($U_{wm} - U_{wom}$) を示している。これより膜は内側からよりも

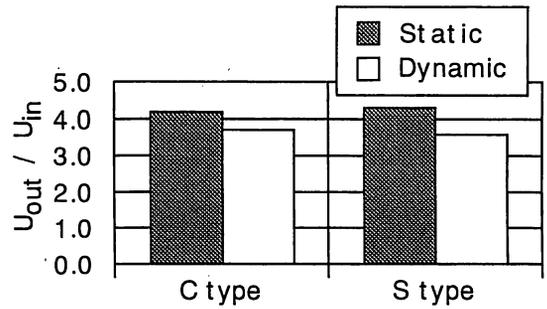


Figure 15 Ratio of penetration energies U_{out} and U_{in} (With membrane)

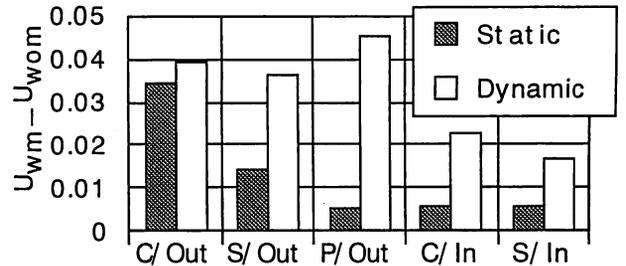


Figure 16 Difference between penetration energies U_{wm} and U_{wom}

外側からの貫通に対して効果的に働いていることがわかる。

5. 結 言

本研究では, 卵殻および卵殻膜の顕微鏡観察や静的・動的貫通破壊試験, FEM解析を行い, 次のような結論を得た。

(1) 顕微鏡観察により, 卵殻内側表面は凹凸状であり, これを滑らかな表面を持つ薄い内卵殻膜が外卵殻膜を介してその接着面積を上げ, それら間の結合度を強めていると考えられる。

(2) 外側から強く, 内側から弱いその構造の仕組みは卵殻が全体として球形(アーチ形)をしていることと結晶が厚さ方向に配向しているので表面の凹凸している内側からき裂が入りやすいためと考えられる。

(3) 円錐型圧子および衝撃子は貫通方向に関係なく初期き裂は生じやすいが, 外側からに対しては, その貫通エネルギーは大きくなる。

(4) 膜は外側からの貫通に対して効果的に働き, 膜の破断と殻と膜のはく離によって, その貫通エネルギーを大きく吸収する。

文 献

- (1) 今井 忠平, 南羽 悦悟, タマゴの知識, (1995-7), 32, 幸書房.
- (2) J.H.Becking, The IBIS, 117-2 (1975), 143.
- (3) 尾田 十八, 酒井 忍, 機講論, No.877-2, (1987-11), 143.
- (4) 尾田 十八, 他 4 名, 機論, 56-524, A (1990-4), 244-249.