

面圧が働く際の両面段ボールの 塑性変形進行および応力解析

松島 理*・松島成夫**

Plastic Deformation Progress and Stress Analysis for Single Wall Corrugated Fiberboard under Uniform Surface Compression

Satoru MATSUSHIMA and Shigeo MATSUSHIMA

一様面圧荷重を受ける両面段ボールの降伏域増加に伴う塑性変形進行を議論し、変形進行の特性を明らかにした。そして、計算されたクラフト・ライナー (KL) および中芯の応力特性を議論した。

中芯の塑性変形の進行は塑性域の幾何学的制限にしたがった単純曲げと純圧縮との組み合わせによって表され、塑性変形域が大きく増加すると、単純圧縮変形状態に近くなる。中芯の応力 (σ_b^*) 分布は、近似的に、変形進行によらずほぼ同様なものになる。KLの応力 (σ_{k1}^*) は流れ方向 (MD) の単純引張りのものとなり、変形進行に伴って、その値は、初めは増加し、次に大きく減少する。

キーワード：計算力学、構造解析、弾性曲げ、段ボールの強度、弾性応力解析、構造強度、数値解析、応力集中

Plastic deformation progress by the increase of the stress yield range and stress analysis were discussed for single wall corrugated fiberboard (SWFC) under uniform surface compression, and characteristic for the deformation progress was clarified. And stress behaviours for kraft-liner (KL) and semichemical medium (SCM) in SWCF were considered.

Progress of the plastic deformation is produced by the connection of simple bending and the pure compression in the plastic range for SCM, and the increase of the plastic range is denoted by the bending progress induced by the geometrical constrain of the deformation position. The deformation becomes nearly the simplecompression in the extreme progress increase. Patterns of the stress (σ_b^*) distribution for SCM are nearly independent to the progress and are always similar. Elastic stress (σ_{k1}^*) for KL is shown as tension in the machine direction, and firstly increases with the progress and next decreases obviously.

Keywords : Computational mechanics, Structural analysis, Elastic bending, Strength of corrugated fiberboard, Elastic stress analysis, Structure strength, Numerical analysis, Stress Concentration.

* 帝人製機(株) 松山工場 (〒791-8513 愛媛県松山市北吉田町77) : Matsuyama Factory, Teijin Seiki, Ltd.
77 Kitayoshida-cho, Matsuyama-shi, Ehime, 791-8513

** 愛媛大学名誉教授 (〒790-5677 愛媛県松山市文京町3番) : Honorary Professor of Ehime University,
3 Bunkyou-cho, Matsuyama-shi, Ehime, 790-5677

1. 緒言

軽くて、優れた力学的強度特性をもつ段ボールは、現在盛んに、包装材として用いられている。段ボール箱の利用状況を見ると、両面段ボール板に面圧が働く状態は、常時、生じるものと考えられる。故に、面圧を受ける段ボールの力学的状態を明らかにすることは、段ボール工学上意義あることと考えられる。したがって、段ボールの面圧縮変形の解析をおこない、圧縮強度を明らかにすることは、その利用、改善のために、また強度設計上、重要なことである。

面圧縮を受ける正弦波形中芯の段ボールおよび正弦波板の弾性応力解析に関する研究がおこなわれ^{1)~3)}、面圧縮を受ける円形中芯⁴⁾および楕円形中芯⁵⁾、部分楕円形中芯⁶⁾の段ボールの弾性応力解析もおこなわれている。そして、大きな面圧縮を受ける正弦波形中芯の段ボールの塑性変形開始についてのもの⁷⁾がある。しかし、塑性変形が順次大きく進行する際についてものは見受けられていない。

そこで、本研究では、上下KL(クラフト・ライナー)・中芯接合部から生じる降伏域の中芯外表面が、近似的に、上下KLの内表面KLに接し、大きな面圧を受けると、中芯に塑性変形が生じ、その変形が進行するものと考え、大きな面圧を受ける両面段ボールの塑性変形の進行を議論することを試み、その際の段ボールの応力状況を明らかにすることを試みた。

2. 解析方法

面圧を受ける両面段ボール中芯の塑性変形

開始は、前報⁷⁾のように、その位置の全断面が降伏状態に達したときに生じるものと考え。そして、その変形進行は、中芯の外表面がKL内表面に接し、平面状をなして生じるものと考え、また、変形に伴い弾塑性境界付近の塑性域で、所定の位置に応じた曲げ変形が生じるものと考え、以下のように、変形状況を議論する。

両面段ボールの上下KLは平板であるが、中芯は流れ方向に沿って周期的に変化する。そこで、いま、両面段ボールの流れ方向(MD)、厚さ方向および横方向(CD)をx、yおよびz方向に、中芯の厚さ T_s および波高hの中心を原点にする座標を考える(Fig. 1(a)参照)。

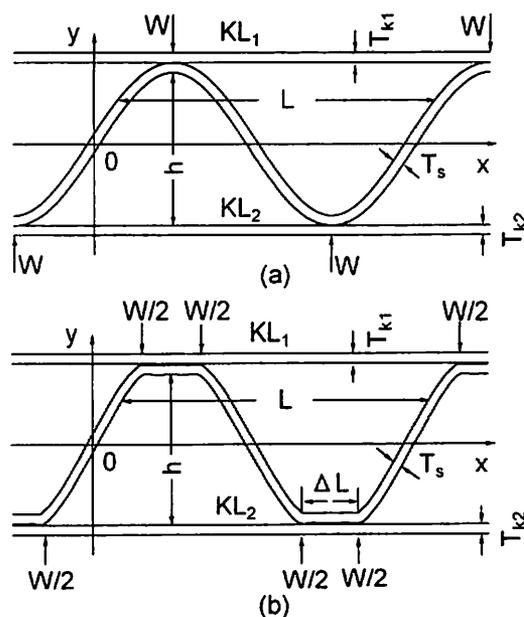


Fig. 1 Coordinates and load for SWCF.

中芯の形状を近似的に正弦波形^{1)~3),7)}であるとすると、その厚さ中央の位置 y_0 は

$$y_0 = \frac{h}{2} \sin \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \quad (1)$$

で表される。その L は中芯の波長である。そ

の厚さ中央から厚さ方向に距離 t にある位置 y は

$$y = y_0 + t \cos \theta \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{dy_0}{dx} \right)$$

で表される。

面圧を受ける段ボールの変形は平面ひずみであるものとする⁷⁾。また、平面ひずみにおける応力、ひずみ関係は平面応力のものと同様な関係であること⁸⁾が知られているので、中芯の変形は、近似的に、周知の曲がりはりの変形理論⁹⁾によって議論できる⁷⁾。

2.1 降伏域の進行と中芯の形状変化

面圧 p の増加に伴って、降伏域は進行する。その進行は、KL・中芯接合部の降伏域の幅が増加するように、降伏した幅の域の中芯の外表面 $t = T_s/2$ は平板 KL に接触し、近似的に、水平な形状をなすものと考えられる (Fig. 1 (b), Fig. 2 参照)。いま、塑性変形開始時の位置 $x = L/4$ 、 $y_0 = h/2$ が移動し、位置 x_{10} 、 y_{10} (断面全域塑性開始位置の中芯厚さ中央: Fig. 3 参照) まで進行した際、中芯接触部の長さ ΔL は、近似的に、

$$\Delta L = 2 \int_{x=x_{10}}^{x=L/4} ds \quad (3)$$

$$ds = \left[1 + \left(\frac{dy_0}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

で表わされる。その際、塑性開始位置付近の塑性変形は、全断面降伏によって進行するため、力学的条件、幾何学的条件に順応した塑性曲げによる傾きが生じ、塑性変形が生じた中芯の外表面は KL 内表面に接するものと考えられる。すなわち、塑性変形域の進行に伴

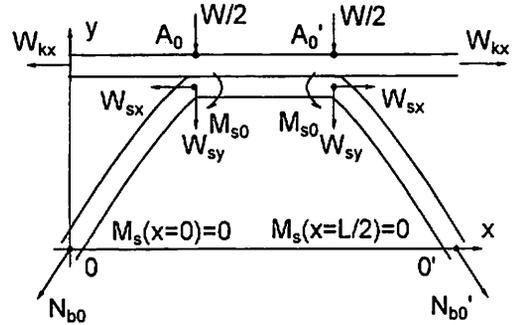


Fig. 2 Fixed loads and moment at KL-SCM joint.

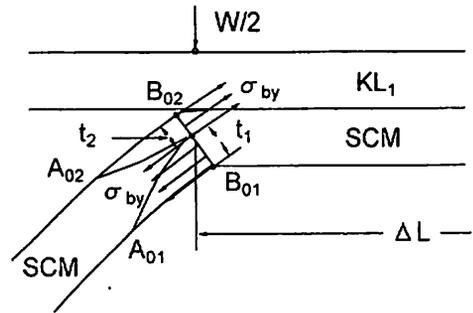


Fig. 3 Yield stress pattern at KL-SCM joint.

う中芯移動に基づく中芯弾性域に傾きが生じ、 x_{10} 、 y_{10} の位置は x_{10}^* 、 y_{10}^* に変位するものと考えられる。このような場合の x_{10}^* 、 y_{10}^* は、弾塑性境界域が、また、弾性域の変形が小さい際、近似的に、

$$x_{10}^* = L/4 - \Delta L \quad (4a)$$

$$y_{10}^* = [R^{*2} - x_{10}^{*2}]^{1/2} \quad (4b)$$

で表される。ただし、 R^* は $x = 0 \sim x_{10}^*$ 間の中芯弧の長さ

$$R^* = [x_{10}^{*2} + y_{10}^{*2}]^{1/2} \quad (5)$$

であり、 y_{10} は

$$y_{10} = \frac{h}{2} \sin \left(\frac{2\pi x_{10}}{L} \right) \quad (6)$$

である。

2.2 降伏域の進行と応力状況

段ボール表面に働く圧縮分布荷重 p の増加によって、中芯の塑性域は順次進行し (Fig. 1(b) 参照)、中芯の着目位置 x, y_0 も x^*, y_0^* に変化するものと考えられる。そのとき、弾性域の中芯は全変形に応じた回転をする。すなわち、原点を中心とした回転が生じ、回転時の位置 x^*, y_0^* は、近似的に、

$$x^* = x(x_{10}^*/x_{10}) \quad (7a)$$

$$y_0^* = y_0(y_{10}^*/y_{10}) \quad (7b)$$

で表されるものと考えられる。

この変形状況に応じた p および $KL \cdot$ 中芯接触部に働く荷重 W の算定は、多少煩雑ではあるが、降伏応力分布の条件および弾性応力分布状況を考慮した数値解析によって求めることができる。所定の ΔL に応じた p, W の値は所定の降伏位置に応じたものであり、中芯が降伏応力 σ_{by} の完全弾塑性材¹⁰⁾であると考え、その位置の $t = -T_s/2 \sim -T_s/2 + t_1$ および $t = T_s/2 - t_2 \sim T_s/2$ の域の曲げ応力 σ_b^* は、全断面降伏状態であるために、

$$\sigma_b^*(x_{10}^*, y_{10}^*, t = -T_s/2 \sim -T_s/2 + t_1) = \sigma_{by} \quad (8a)$$

$$\sigma_b^*(x_{10}^*, y_{10}^*, t = T_s/2 - t_2 \sim T_s/2) = \sigma_{by} \quad (8b)$$

で表される (Fig. 3 参照)。

p の増加に伴い、弾塑性境界 (Fig. 3 の $A_{01}B_{01}, A_{02}B_{02}$) の位置 (x_{10}^*, y_{10}^*) まで変形が進行した際の弾性域、中芯の曲げ応力 σ_b^* は、

$$\sigma_b^*(x^*, y_0^*) = N_b(x^*, y_0^*) + \frac{1}{\rho(x^*, y_0)}$$

$$\left[1 + \frac{1}{k(x^*, y_0)} \frac{t}{\rho(x^*, y_0) + t} \right] M_s(x^*, y_0^*) \quad (9)$$

で表される⁷⁾。 N_b および M_s は中芯着目位置の軸力およびモーメント

$$N_b = W_{sx} \cos \theta^* + W_{sy} \sin \theta^* \quad (10)$$

$$M_s = W_{sx}(y_{10}^* - y_0^*) - W_{sy}(x_{10}^* + x_0^*) + M_{s0} \quad (11)$$

であり、 ρ および k は曲率半径および断面係数

$$\rho = - \frac{\left[1 + \left(\frac{dy_0}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{d^2 y_0}{dx^2}} \quad (12a)$$

$$\kappa = \frac{1}{3} \left(\frac{T_s}{2\rho} \right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{T_s}{2\rho} \right)^4 + \frac{1}{7} \left(\frac{T_s}{2\rho} \right)^6 + \dots \quad (12b)$$

である。そして、 θ^* は

$$\theta^* = \theta [x_{10}y_0^*/(x^*y_{10})] \quad (12c)$$

である。

原点に対する変形の反対称性により、 M_s 、中芯の固定モーメント M_{s0} は

$$M_s = -W_{sx}y_0^* + W_{sy}x^* \quad (13a)$$

$$M_{s0} = -W_{sx}y_{10}^* + W_{sy}x_{10}^* \quad (13b)$$

で表される。 W_{sx}, W_{sy} は塑性進行時の位置 x_{10}^*, y_{10}^* に働く x, y 方向の中芯の固定荷重である (Fig. 2 参照)。位置 x_{10}^*, y_{10}^* の x 方向の変位を零と考えると、 W_{sx} は

$$W_{sx} = (A^*/B^*) W/2 \quad (14a)$$

$$A^* = \int_{x=0}^{x=x_{10}^*} \left[\sin \phi - \frac{1}{\rho} \left(1 + \frac{1}{k} \right) y_0 \right] (y_{10} - y_0) d\phi$$

$$B^* = \int_{x=0}^{x=x_{10}} \left[\cos \phi - \frac{1}{\rho} \left(1 + \frac{1}{k} \right) x \right] (y_{10} - y_0) d\phi$$

$$(\phi = \pi/2 - \theta)$$

$$W_{sy} = W/2 \quad (14b)$$

で表される⁷⁾。KL・中芯接触部の中芯に働く圧縮荷重 W は

$$W = pL \quad (14c)$$

である。

p に応じた塑性進行状態が明らかになれば、式 (7a,b) によって x^* 、 y_0^* が求められ、式 (14a,b) および式 (10)、(13a) によって W_{sx} 、 W_{sy} および N_b 、 M_s が求められる。すると、式 (8a,b)、(9) によって、塑性変形進行時の中芯内外表面における弾塑性境界域の幅 B_1 ($A_{01}B_{01}$)、 B_2 ($A_{02}B_{02}$) を求めることができる (Fig. 3 参照)。

KL₁、KL₂ に働く応力は、幾何学的条件により、近似的に、流れ方向の垂直応力 σ_{k1}^* 、 σ_{k2}^* で表され、各

$$\sigma_{k1}^* = W_{sx}/T_{k1} \quad \sigma_{k2}^* = W_{sx}/T_{k2} \quad (15b)$$

によって表される。

式 (10)、(13) より、降伏境界位置 x_{10} 、 y_{10} における M_s/N_b の比 A_s^* は、

$$A_s^* = M_s/N_b \quad (16a)$$

$$A_s^* = \frac{B^* y_{10} + A^* x_{10}}{-B^* \cos \theta_{10}^* + A^* \sin \theta_{10}^*} \quad (16b)$$

$$\theta_{10}^* = \theta^* (x = x_{10})$$

で表され、 $\sigma_b^* - t$ 関係の線形性を用いると、近似的に、関係

$$\sigma_b^* (t = -T_s/2) / \sigma_b^* (t = T_s/2) \doteq t_1/t_2 \quad (17)$$

が成り立つ⁷⁾。 $\sigma_b^* (t = -T_s/2)$ 、 $\sigma_b^* (t = T_s/2)$ は位置 x_{10} 、 y_{10} における内外表面の応力、 t_1 、 t_2 は中芯の中立面から内外表面までの距離である。そして、 x_{10} 、 y_{10} における N_b は力の釣合い則より

$$N_b (x_{10}, y_{10}) = \sigma_{by} [2t_1 - T_s] \quad (18a)$$

で表せ⁷⁾、その際の曲げモーメント M_s はモーメントの釣合い則より

$$M_s (x_{10}, y_{10}) = [\sigma_{by} t_2^2] \quad (18b)$$

で表せる。式 (10)、(13)、(14a) により、位置 x_{10} 、 y_{10} における t_1 、 t_2 の関係は

$$t_1 = T_s - t_2 \quad (19a)$$

$$t_1 = -A_s^* - \sqrt{A_s^{*2} + A_s^* T_s} \quad (19b)$$

で表せる。そして、式 (16b)、(19a,b) より t_1 、 t_2 が求まり、式 (18a,b) より N_b 、 M_s が明らかになり、式 (10)、(13) より W_{sx} 、 W_{sy} が明らかになる。式 (14b,c) より、それに応じた p、W が明らかになる。

3. 解析結果および考察

一般に、使われている両面段ボールの形状¹¹⁾ に合わせ、議論する KL および中芯の厚さを $T_k = 0.30$ mm および $T_s = 0.24$ mm に、中芯の波長および波高を $L = 9.2$ mm および $h = 4.6$ mm にする。

3.1 ΔLの進行について

N_b 、 M_s 、 σ_b^* が特異な分布状況⁴⁾⁻⁷⁾ を示すので、KL と中芯の接触幅 ΔL の増加に伴う形状、作用力との関係を議論することは意義あるものと考えられる。

そこで、まず形状の変形進行を示すパラメータ θ_0^* 、 x_{10} 、 t_1 と ΔL との関係性を求めた。それを、Fig. 4 に、 θ_0^* 、 x_{10} 、 $t_1 - \Delta L$ 関係で示す。 θ_0^* は正值であり、 ΔL の増加に伴って、 θ_0^* は増加し、その増加の傾向も増加することがわかる。 ΔL の増加に伴って、当然のことであるが、 x_{10} は減少し、その減少の傾向も減少する。 t_1 は、 ΔL の増加に伴って、極僅かではあるが、始めは増加し、やがて極僅かな減少の傾向を示す。

面圧 p 、応力 σ_{k1}^* ($=\sigma_{k2}^*$) と ΔL との関係性を求めた。それを Fig. 5 に p 、 $\sigma_{k1}^* - \Delta L$ 関係で示す。Fig. 5 より、 ΔL の増加に伴って、 $|p|$ は増加し、その増加の傾向も増加することが、 σ_{k1}^* は、始めは増加を示すが、その後顕著な減少を示すことがわかる。

塑性変形開始時の面圧力 p_e は $1.536 \times 10^{-2} \text{ N/mm}^2$ であり⁷⁾、Fig. 5 に示すように、その圧力状態の $\Delta L/2$ は 2.2 mm ($x_{10} = 1.5$ mm) 程度である。このことより、 p が、塑性変形開始後も外圧の状況が p_e 状態を保つような際、 $p = p_e$ の状態までの座屈状態が、

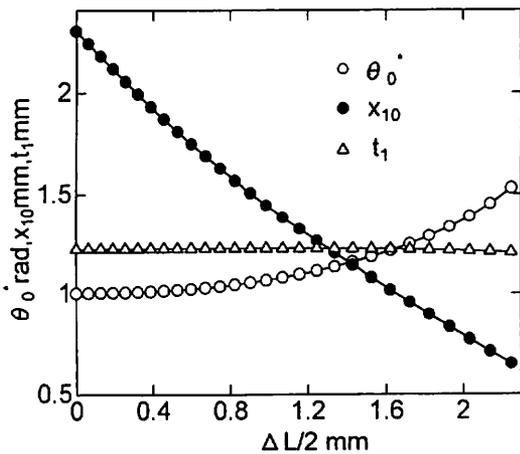


Fig. 4 Relationships between inclination θ_0^* , position x_{10} , distance (from neutral plane) t_1 and plastic deformation breadth ΔL for SCM.

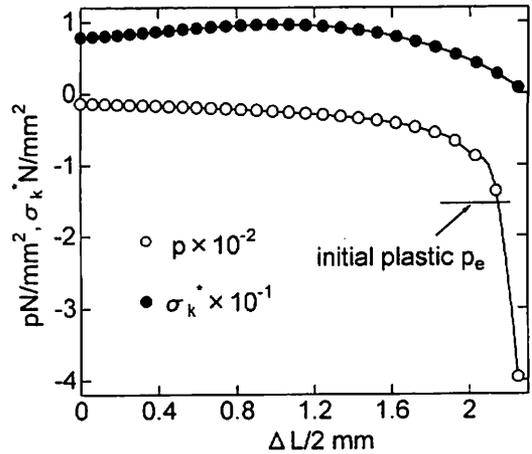


Fig. 5 Relationships between pressure p , inclination, KL stress σ_k^* ($\sigma_{k1}^* = \sigma_{k2}^*$) and plastic deformation breadth ΔL for SCM.

$\Delta L/2 \approx 2.2$ mm まで、急激に、生じるものと考えられる。

塑性域の概況をみるために、内外表面の弾塑性境界域の幅 B_1 、 B_2 と ΔL との関係性を求め、それを Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、 ΔL の増加によって、内表面の B_1 は減少し、その減少の傾向は、始め順次増加するが、やがて緩やかに減少することがわかる。 ΔL の増加に

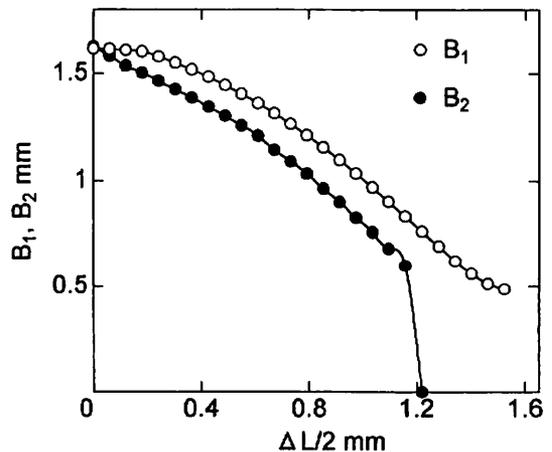


Fig. 6 Relationships between outer and inner breadth B_1 , B_2 of elastic-plastic boundary and plastic deformation breadth ΔL for SCM.

に伴い、その表面の B_2 は大きく減少し、その傾向も増加する。そして、 B_1 の値は B_2 のものより大きい。

式 (14a) より W_{sx} 、式 (13b) より M_{s0} が明らかになれば、それによって中芯の応力を明らかにすることができる。そこで、 W_{sx} 、 W_{sy} 、 M_{s0} と変形状況との関係を議論するために、 W_{sx} 、 W_{sy} 、 M_{s0} と ΔL との関係求めた。これを Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、 W_{sx} 、 W_{sy} は負値であり、 ΔL の増加に伴って、 $|W_{sx}|$ は、最初は、緩やかに増加し、やがて大きく減少し、ほぼ零となるまで減少することが、 ΔL の増加に伴って、 $|W_{sy}|$ は増加し、その増加の傾向も順次増加することがわかる。

本解析によって、 $\Delta L/2=2$ mm 付近から中芯の変形は、強い曲げ変形の状態から圧縮変形に近い状態になることがわかり、 $\Delta L/2=2.2$ mm 付近になると純圧縮変形（断面一様な応力）に近い状態になることがわかった。

Fig. 7 より、 M_{s0} は正值であり、 ΔL の増

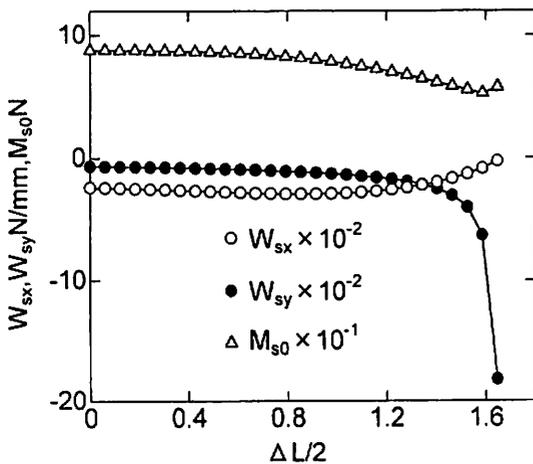


Fig. 7 Relationships between fixed axial force W_{sx} , fixed machine direction force W_{sy} , moment M_{s0} and plastic deformation breadth ΔL for SCM.

加に伴って、 $|M_{s0}|$ は、始めは、緩やかに増加し、やがて大きく減少し、その後、再び、僅かではあるが増加することが見られる。

3.2 σ_b^* の分布状況について

σ_b^* の分布状況の概略を示すために、塑性開始時および塑性変形進行時の内外表面の σ_b^* と x^* との関係および σ_b^* と t との関係を求めた。その $\sigma_b^*-x^*$ 関係を Fig. 8、9 に、 σ_b^*-t 関係を Fig. 10、11 に示す。Fig. 8 より、

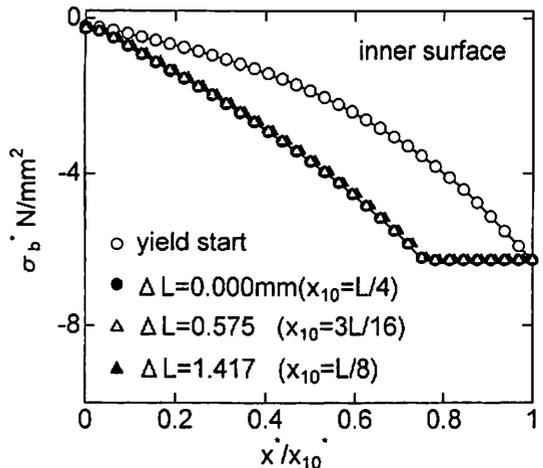


Fig. 8 Relationship between inner surface stress σ_b^* and position x^*/x_{10}^* for SCM.

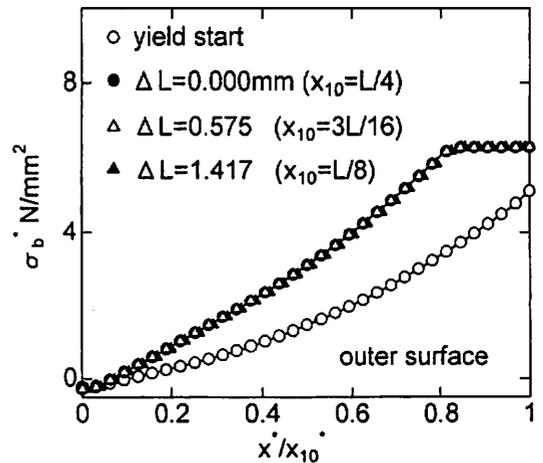


Fig. 9 Relationship between outer surface stress σ_b^* and position x^*/x_{10}^* for SCM.

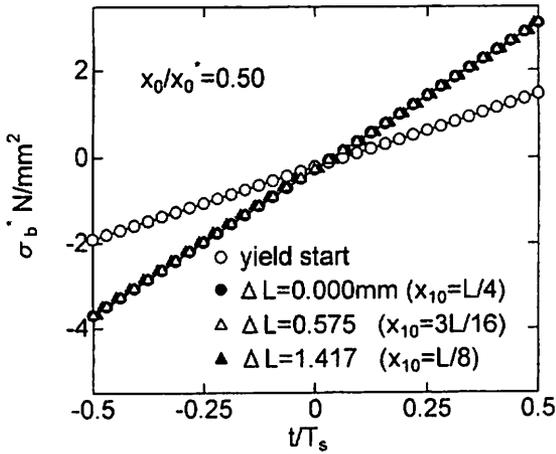


Fig. 10 Relationship between inner stress σ_b^* and position t/T_s at $x^*/x_{10}^*=0.50$ for SCM.

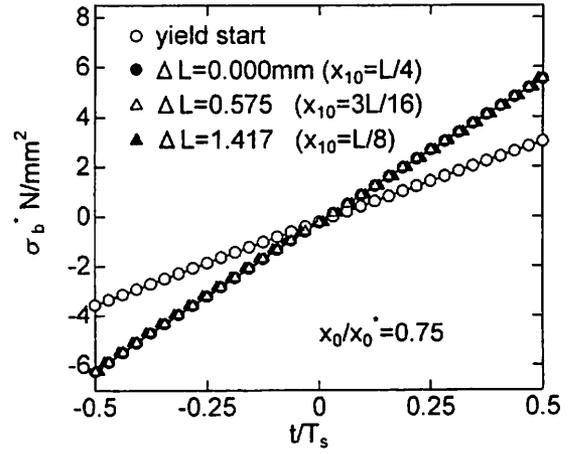


Fig. 11 Relationship between outer stress σ_b^* and position t/T_s at $x^*/x_{10}^*=0.75$ for SCM.

内表面の σ_b^* は負値であり、弾性域では、 $|\sigma_b^*(t=-T_s/2)|$ は x^* の増加に伴って増加することがわかる。

Fig. 9 より、 $\sigma_b^*(t=T_s/2)$ は、 $x=0$ 付近を除けば、正值であり、 x^* の増加に伴って、 $\sigma_b^*=\sigma_{by}$ までの弾性域では、大きく増加することがわかる。

Fig. 10、11 より、 t の増減に伴って、弾性域の σ_b^* は、ほぼ、比例して変化することが

わかる。そして、この関係は、 ΔL の値によらず、類似した関係を示す。

また、Fig. 10~11 より、塑性変形進行時の σ_b^* の分布は、弾性域では、塑性開始時の σ_b^* 値の大きさは異なるが、その変化は類似することがわかる。

N_b の分布状況の概略の明らかにするために、塑性開始時および塑性変形進行時における所定の ΔL の N_b と x^* との関係を求め、そ

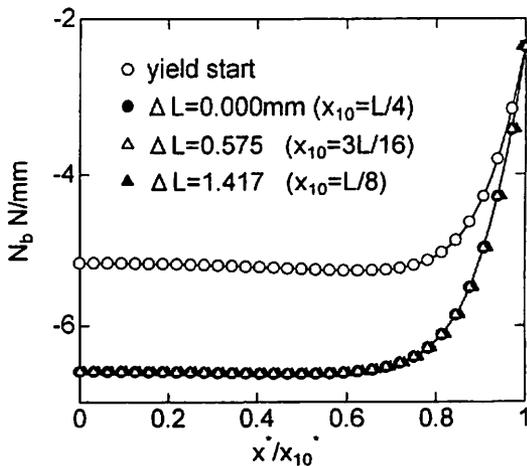


Fig. 12 Relationship between axial force N_b and position x^*/x_{10}^* for SCM.

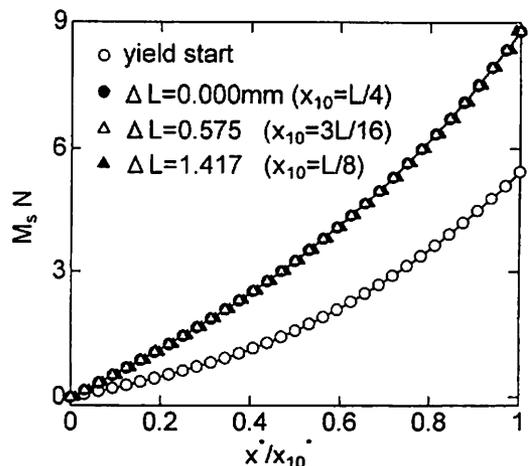


Fig. 13 Relationship between axial moment M_s and position x^*/x_{10}^* for SCM.

れを Fig. 12 に示す。Fig. 12 より、 N_b は、 x^* の増加に伴って極僅か減少し、やがて大きく増加する傾向がわかる。そして、その関係は、 ΔL の値によらず、類似した関係で表せる。

M_s の分布状況の概略を明らかにするために、塑性開始時および塑性変形進行時における所定の ΔL の M_s と x^* との関係を求め、それを Fig. 13 に示す。Fig. 13 より、 M_s は x^* の増加に伴って大きく増加し、その増加の傾向も順次増加することがわかる。そして、これらの関係は、 ΔL の値によらず、類似した関係で表せる。

これらのことより、KL の変形は、近似的に、単純な流れ方向の弱い引張り変形で表せることが、そして、中芯の変形は、 $\Delta L=2$ mm ($x_{10}=1.5$ mm) 付近までは、曲げ変形が強く生じるが、 $\Delta L=2$ mm を越えると、ほぼ、一様圧縮変形になり、強い変形進行抵抗が生じることがわかった。

そして、Fig. 12、13 より、塑性変形進行時における N_b 、 M_s の値は塑性開始時の σ_b^* のものと大きく異なるが、その変化は類似することがわかる。

以上のことより、本報告は、面圧荷重下における完全弾塑性材としての変形進行を議論したものであるが、本表示によって、面圧を受ける両面段ボールの、一応基本的な座屈変形進行状況に関する、より有効な議論が可能になるものと考えられる。

4. 結 言

大きな面圧を受ける両面段ボールの中芯の塑性変形進行および形状変化を議論し、その段ボールの応力解析をおこなった。そして、

その力学的諸特性値を議論した。段ボールの中芯の厚さ T_s および高さ h の中央位置を原点とし、流れ方向、横方向を x 方向、 y 方向として表す。一般に使われている両面段ボールの形状に合わせ、クラフト・ライナー (KL) の厚さ T_{k1} ($=T_{k2}$) を 0.30 mm に、中芯の T_s を 0.24 mm に、中芯の波長 L を 9.2 mm に、高さ h を 4.6 mm にした。

得られた主な結果については、以下の通りである。

- (1) $x=0$ の中芯の傾き角 θ_0^* は、KL・中芯接触部の幅 ΔL の増加に伴って、 θ_0^* は緩やかに増加する。 ΔL の増加に伴い、KL・中芯接触部端の x 位置 x_{10} は減少する。 ΔL の増加に伴って、中芯内表面から中立面までの距離 t_1 は、始めは、ごく僅か増加し、その後減少する。
- (2) ΔL の増加に伴って、KL 面に働く面圧力 p の値は増加する。KL の x 方向の垂直応力 σ_{k1}^* は、まず緩やかに増加し、その後顕著に減少を示す。
- (3) 中芯内表面の弾塑性境界域の幅 B_1 は、 ΔL の増加によって減少する。外表面の弾性塑性域の幅 B_2 は、 ΔL の増加によって、大きく減少する。そして、 $B_1 > B_2$ である。
- (4) KL・中芯接触部中芯に働く段ボールの厚さ、流れ方向の固定荷重 W_{sx} 、 W_{sy} は負値であり、 ΔL の増加に伴って、 $|W_{sx}|$ は、まず緩やかに増加し、その後大きく減少する。 ΔL の増加に伴って、 $|W_{sy}|$ は増加する。 ΔL の増加に伴って、中芯の固定モーメント M_{s0} は、まず緩やかに増加し、その後大きく減少する。そして、 $\Delta L/2=2$ mm 付近で僅かに増加する。
- (5) 中芯内表面の曲げ応力 σ_b^* の絶対値は x^*

の増加に伴って増加する。 $x=0$ 付近を除く、外表面の σ_b^* は、正值であり、 x^* の増加に伴って、大きく増加する。 $|\sigma_b^*|$ は、 t の増減に伴い、ほぼ比例して変化する。この関係は、 ΔL の値によらず、成り立つ。

(6) 中芯の軸力 N_b は、 x^* の増加に伴って極僅か減少し、やがて大きく増加する。 M_s は x^* の増加に伴って大きく増加する。これらの関係は、 ΔL の値によらず、成り立つ。

以上のことより、大きな面圧を受ける両面段ボールの弾塑性解析に関する本結果は、その諸力学的特性値の変化状況により、妥当なものであると考えられ、概略ではあるが、塑性座屈の進行についての議論に役立つものであると思われる。

<参考文献>

- 1) 松島成夫、矢野忠、松島晟：紙パ技協誌、**42**(5)、480-486 (1988)
- 2) 松島成夫、矢野忠、松島晟：紙パ技協誌、**43**(6)、602-609 (1989)
- 3) 松島成夫、矢野忠、松島晟：紙パ技協誌、**44**(5)、605-613 (1990)
- 4) 松島成夫、矢野忠、上田康、松島理：紙パ技協誌、**47**(10)、1263-1271 (1993)
- 5) 松島理、矢野忠、松島成夫：紙パ技協誌、**48**(8)、1068-1077 (1994)
- 6) 松島理、松島成夫：日本包装学会誌、**5**(2)、107-118 (1996)
- 7) 松島理、松島成夫：日本包装学会誌、**9**(2)、79-89 (2000)
- 8) 例えば、清家政一郎：材料力学、共立出版、p.23-46 (1967)
- 9) 例えば、黒木剛司郎：材料力学、森北出版、p.150-156 (1975)
- 10) 例えば、益田森治、室田忠雄：工業塑性力学、養賢堂、p.37-46 (1992)
- 11) 1) の p.64-69
(原稿受付 1999 年 10 月 17 日)
(審査受理 2000 年 7 月 18 日)