

# 上下クラフト・ライナーに引離し力が働く際の両面段ボールの応力解析 (接合材の接合幅および弾性特性と諸応力との関係)

松島 理\* 松島成夫\*\*

## Stress Analysis for Corrugated Fiberboard under Separating Forces on Kraft-Liner Surfaces (Relationships Between Binder Breadth, Elastic Characters and Stresses Components)

Satoru MATSUSHIMA and Shigeo MATSUSHIMA

An elastic stress analysis for the single wall corrugated fiberboard (SWCF) under separating force on kraft-liner (KL) surfaces was performed by the finite element method (FEM). The thickness of KL and semichemical corrugating medium (SCM) was 0.32 mm, and the wave-length and the wave height of SCM were 9.2 mm and 4.6 mm.

Then relationships between the binder breadth  $\Delta B$  and stress components for the structure materials of SWCF were done obviously, and the dependence of elastic characters of the binder for stresses was discussed. Also, behaviors of maximums  $\sigma_{x\max}$ ,  $\sigma_{y\max}$  and  $\tau_{xy\max}$  of absolute normal stresses to the machine and the cross directions and the shear stress for KL, SCM and the binder in the range of  $\Delta B > 1.05$  were different from stresses in  $\Delta B < 1.05$  mm.  $\sigma_{x\max}$ ,  $\sigma_{y\max}$  and  $\tau_{xy\max}$  for KL, SCM and the binder increase remarkably with the increase of the longitudinal elastic modulus.  $\sigma_{x\max}$ ,  $\sigma_{y\max}$  and  $\tau_{xy\max}$  for KL, SCM and the binder increase rarely with the increase of the Poisson's ratio. The largest stress component for SWCF is  $\sigma_{x\max}$  and the next component is  $\sigma_{y\max}$ . Also, stress components decrease with the increase of  $\Delta B$  respectively.

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

上下クラフト・ライナー (KL) に引離し力が働く両面段ボール (KL および中芯の厚さは 0.32 mm、中芯の波長および波高は 9.2 mm および 4.6 mm) の素材の応力解析を弾性有限要素解析法によっておこなった。

接合部接合材の幅  $\Delta B$  と応力状況を明らかにし、接合材の材料特性に伴う応力変化を議論した。また、KL、中芯、接合材の流れ方向および横方向の垂直応力およびせん断応力の絶対値の最大値  $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$  および  $\tau_{xy\max}$  の挙動は  $\Delta B \approx 1.05$  mm 以上と以下とでは異なる。接合材の縦弾性係数の増加によって、KL、中芯、接合材の  $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$  および  $\tau_{xy\max}$  は大きく増加する。接合材のポアソン比の増加によって、KL、中芯、接合材の  $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$  は僅か増加する。全域に渡って、最も大きい応力成分は  $\sigma_{x\max}$  で、次に、 $\sigma_{y\max}$  である。なお、諸応力成分は、各  $\Delta B$  の増加に伴って僅か減少する。

**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

\* 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(〒790-5677 愛媛県松山市文京町3番) : Ehime University, 3 Bunkyou-cho, Matsuyama-shi, Ehime, 790-5677

## 1. 緒言

段ボールは、クラフト・ライナー (KL) と波状をなす中芯との組み合わせおよび接合によって造られ、特有の構造をしているものである。その形態は、生産性、経済性に富み、力学的視野からみても優れ、妥当なものであると考えられる。そして、段ボールの構成のための主要なもの、すなわち、その強度形成を支えているものが、KL・中芯の接合および接合部であると考えられる。

したがって、両面および複両面段ボールの加工時における重要な工程の一つが、KLと中芯との接合加工であるとみなせる。しかし、段ボールの加工形態上、接合加工時に大きなニップ圧 (接合圧)<sup>1)</sup> をとることは困難であると思われる。故に、定められた低いニップ圧で良好な接合をおこなうには、接合材の接合特性および接合後の接合強度の議論が必要であると考えられる。

KL・中芯の接合部の形状を考えると、現実の接合状態は、線状の接合ではなく、KL・中芯接合部を含めた接合幅<sup>2)</sup> をもつ面状のものであり、その幅間に接合材が満たされているものと考えられる。したがって、接合材の強度およびその配置状態が段ボールの強度に及ぼす寄与を明らかにすることは、段ボール設計上、重要なことである。

段ボールの接合強度値を判定するための基本的な試験として、引き離し試験<sup>3)</sup> がある。また、段ボールの接合強度の基礎的研究として、引き離し変形<sup>4)5)</sup> 時およびずれ変形<sup>6-8)</sup> 時の応力解析を議論したものがあ

る。段ボールのKL・中芯接合部の素材特性と強度との関係を議論した基礎的研究として、所定の形状をした接合部の各素材特性が、生じる応力に及ぼす影響を議論したもの<sup>9)</sup> がある。しかし、接合材の形状および材料特性の段ボールへの寄与を同時に議論した基礎的研究は見当たらない。そして、現実としての接合部の部材の形状は、加工の影響のために、相当複雑に変化し、簡単な数学的表示によって表されるものではなく、数理的な解析をおこなうのに適したものではない。

一般に、使用されている段ボールの部材の変形は、小さく、主として弾性変形であると考えられる。このような変形を示す材料の変形特性係数は弾性係数で表されるものと考えられ、また弾性変形は独立した2係数で議論できるもの<sup>10) 11)</sup> と考えられ、その係数は、強度設計においては、一般に、縦弾性係数とポアソン比が用いられている<sup>12)</sup>。係数の定義<sup>13)</sup> によると、縦弾性係数は材料の変形強度特性を、ポアソン比は材料の変形特性を示すものであり、前報<sup>9)</sup> のように、段ボールは、段ボール部材個々の形状およびその接合材の弾性特性の変化に伴い、特異な段ボールの強度特性を示すものと考えられる。

以上のことより、弾性有限要素解析法によって、上下KLに引離し力が働く際の段ボールの接合部接合材の形状および材料特性を変えた際の応力状況を明らかにすることを試みた。そして、これによって、段ボール素材の応力強度と材料特性との関係を明らかにすることを試みた。ただし、段ボール中芯の形状は、Seydelの処法<sup>14)</sup>、段ボールの面圧<sup>15)</sup>、曲げ<sup>16) 17)</sup>の処法にならない、正弦波形であるとした。

## 2. 解析方法

両面段ボールの幾何学的対称性および周期性を考慮し、前報<sup>9)</sup>と同様に、座標の軸は、段ボールの流れ方向を  $x$  方向に、厚さ方向を  $y$  方向にとり、その原点  $O$  は段ボールおよび中芯の厚さの中央にとる (図1参照)。そして、KL および中芯の厚さを  $T$  で、中芯の波長および波高を  $L$  および  $h$  で表す。さらに、段ボールの対称性および周期性を考慮し、基本的形状を、図2に示すような域 (KL は  $x = -L/4 \sim L/4$ 、中芯は  $x = 0 \sim L/4$  の域) にする。

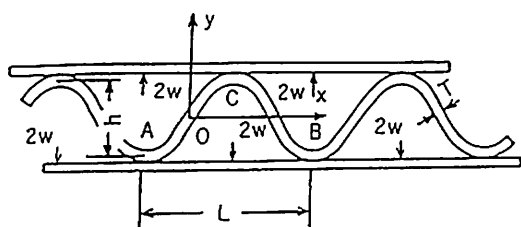


Fig.1 Applied force and coordinates for SWFC.  
(Thickness  $T=0.32\text{mm}$  of KL and SCM, wave-length  $L=9.2\text{mm}$  and wave height  $h=4.6\text{mm}$ )

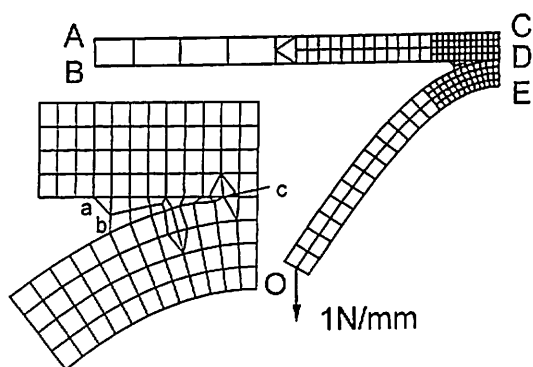


Fig.2 FEM elements and deformation restriction.  
Range AB is clamped, and displacements in  $x$  direction for range CDE and position O are zero. Section abc is binder material and range of binder breadth  $\Delta B$  is  $0.734 \sim 1.460\text{mm}$ .

弾性有限要素解析における要素の設定は、図2の形状域に約200個の4角形要素を、同図のように割り当て、おこなう。

変形条件については、段ボールの引き離し変形の状況に合わせ、図2の  $x = -L/4$  および  $x = L/4$  の断面 AB、CDE の  $x$  方向の変位を零、AB の  $y$  方向の変位を零にした。接合部に働く単位幅当たりの引き離し力  $2w$  ( $w = 1\mu\text{N/mm}$ ) の寄与は位置  $O$  に  $w$  を加えるようにした。解析に用いた段ボールの形状は、前報<sup>19)</sup> にならい、実用段ボールに合わせ、 $T = 0.32\text{mm}$  および  $L = 9.2\text{mm}$ 、 $h = 4.6\text{mm}$  にし、計算処理の可能性を考慮し、KL・中芯接合域の幅を  $b = 0.457\text{mm}$  にした。また、弾性係数は、既知の KL および中芯の縦弾性係数  $E_k$ <sup>18)</sup>、 $E_s$ <sup>19)</sup> およびポアソン比  $\nu_k$ 、 $\nu_s$ <sup>19)</sup> を考慮し、 $E_k = 5.80 \times 10^3\text{N/mm}^2$ 、 $E_s = 2.80 \times 10^3\text{N/mm}^2$  および  $\nu_k = 0.1$ 、 $\nu_s = 0.1$  であるとした。接合材の基本的な縦弾性係数およびポアソン比は、高分子接着材<sup>20)21)</sup> を考慮し、 $E_b = 1.0 \times 10^3\text{N/mm}^2$  および  $\nu_b = 0.4$  にした。なお、議論すべき接合材 (図2の abc の域) の幅 (両端の幅)  $\Delta B$  は、計算処理の可能性および接合材の幅の議論が可能となるよう7種 ( $\Delta B = 0.734 \sim 1.460\text{mm}$ ) を定めた (図3参照)。そして、上記の材料特性値を基準とし、接合材の特性縦弾性係数  $E_b$  およびポアソン比  $\nu_b$  を各2種変え、材料特性の段ボール強度への寄与の議論が可能となるようにした。

## 3. 解析結果およびその考察

段ボール構成素材の力学的破壊は、一般の部材と同様に、最大応力値より生じるものと

考えられる。したがって、引き離し変形を受ける段ボールの各素材の段ボール強度への役割を明らかにするために、各部材の最大応力と  $\Delta B$  および  $E_b$ 、 $\nu_b$  との関係を議論する。

そこで、 $x, y$  方向の垂直応力の最大値  $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$  およびせん断応力の最大値  $\tau_{xy\max}$  の状況を順次述べる。

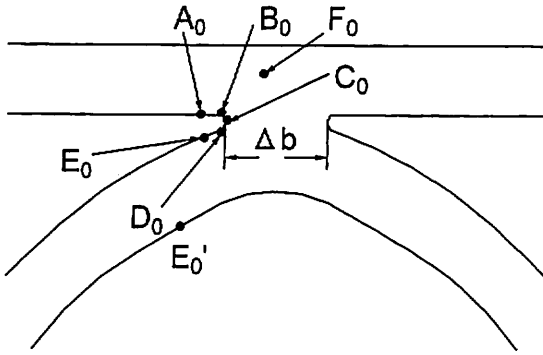


Fig.3 Maximum positions of absolute stress components. ( $E_x=5800\text{N/mm}^2$ ,  $E_s=2800\text{N/mm}^2$ ,  $\nu_x=0.1$ ,  $\nu_s=0.1$ )

本解析により、段ボールの KL、中芯、接合材の  $\sigma_x$  の絶対値の最大値  $\sigma_{x\max}$  は、 $\Delta B < \Delta B_0$  ( $\cong 1.05 \text{ mm}$ ) の際図 3 に示す  $A_0$ 、 $D_0$ 、 $B_0$  の位置に、 $\Delta B > \Delta B_0$  の際  $A_0$ 、 $E_0$  ( $E_b = 8000 \text{ N/mm}^2$  および  $\nu_b = 0.1$  のものは  $E_0'$ )、 $B_0$  に生じることが窺えた。得られた  $\sigma_{x\max}$  と  $\Delta B$  との関係を図 4～6 に示す。図 4 より、 $\Delta B = \Delta B_0$  以上と以下とでは、KL の  $\sigma_{x\max}$  の挙動は若干異なることが窺える。そして、 $E_b$  が大きくなると  $\sigma_{x\max}$  は大きく増加し、 $\nu_b$  が大きくなると  $\sigma_{x\max}$  は極僅か増加することがわかる。

図 5 より、中芯の  $\sigma_{x\max}$  の値は、図 6 の際と同様に、 $\Delta B = \Delta B_0$  以上と以下では異なることが窺える。そして、 $E_b$  が大きくなると  $\sigma_{x\max}$  は大きく増加し、 $\nu_b$  が大きくなると  $\sigma_{x\max}$  は極僅か増加することがわかる。しか

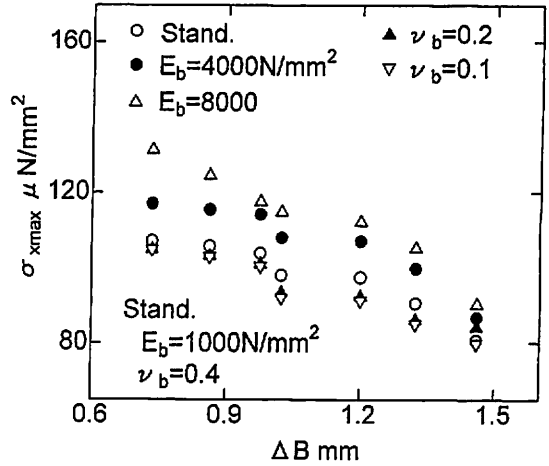


Fig.4  $\sigma_{x\max}$  and  $\Delta B$  for KL. Elastic parameters of Stand. are  $E_x=5800\text{N/mm}^2$ ,  $E_s=2800\text{N/mm}^2$ ,  $E_b=1000\text{N/mm}^2$ ,  $\nu_x=0.1$ ,  $\nu_s=0.1$  and  $\nu_b=0.4$ .

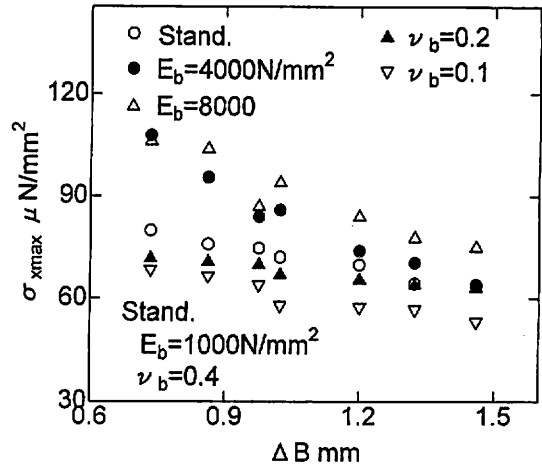


Fig.5  $\sigma_{x\max}$  and  $\Delta B$  for SCM. Elastic parameters of Stand. are  $E_x=5800\text{N/mm}^2$ ,  $E_s=2800\text{N/mm}^2$ ,  $E_b=1000\text{N/mm}^2$ ,  $\nu_x=0.1$ ,  $\nu_s=0.1$  and  $\nu_b=0.4$ .

し、中芯の  $\sigma_{x\max}$  の値は KL のものに比べ小さい。

図 6 より、接合材の  $\sigma_{x\max}$  の値は、 $\nu_b = 0.1$  のものについては、KL および中芯の際と同様になるが、それ以外のものについては、 $\sigma_{x\max}$  の挙動は大きく異なり、 $\Delta B = \Delta B_0$  以上では大きな値を、以下では小さな値を示すことがわかる。そして、 $E_b$  および  $\nu_b$  の増加

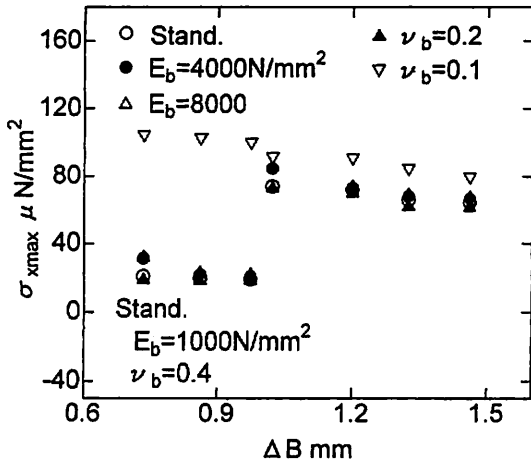


Fig.6  $\sigma_{xmax}$  and  $\Delta B$  for binder.  
Elastic parameters of Stand. are  $E_s=5800N/mm^2$ ,  $E_c=2800N/mm^2$ ,  $E_b=1000N/mm^2$ ,  $\nu_s=0.1$ ,  $\nu_c=0.1$  and  $\nu_b=0.4$ .

に伴う増減はKLおよび中芯の際と同様になることがわかる。しかし、接合材の $\sigma_{xmax}$ の値はKLのものに比べ小さい。

なお、各素材の両 $\Delta B$ 域の $\sigma_{xmax}$ は $\Delta B$ の増加に伴って各僅か減少することが窺え、素材の中で、最も大きい $\sigma_{xmax}$ はKLで、次に $\Delta B < \Delta B_0$ では中芯、 $\Delta B > \Delta B_0$ では接合材であることが窺える。

本解析により、段ボールのKL、中芯、接合材の $\sigma_y$ の絶対値の最大値 $\sigma_{ymax}$ は、 $\Delta B < \Delta B_0$ の際図3に示す $B_0$ 、 $D_0$ 、 $C_0$ の位置に、 $\Delta B > \Delta B_0$ の際 $B_0$ 、 $D_0$ 、 $D_0$ に生じることが窺えた。そして、得られた $\sigma_y$ の絶対値の最大値 $\sigma_{ymax}$ と $\Delta B$ との関係を図7~9に示す。図7より、 $\sigma_{xmax}$ の際と同様に、 $\Delta B = \Delta B_0$ 以上と以下とでは、その相異は僅かであることがわかる。なお、 $\sigma_{ymax}$ は、 $E_b$ の増加に伴って増加し、 $\nu_b$ の増加に伴って僅か増加することがわかる。

図8より、中芯の $\sigma_{ymax}$ の値は、 $\Delta B = \Delta B_0$ 以上と以下とでは大きく異なり、 $\Delta B = \Delta B_0$ 以上では大きな値を、以下では小さい

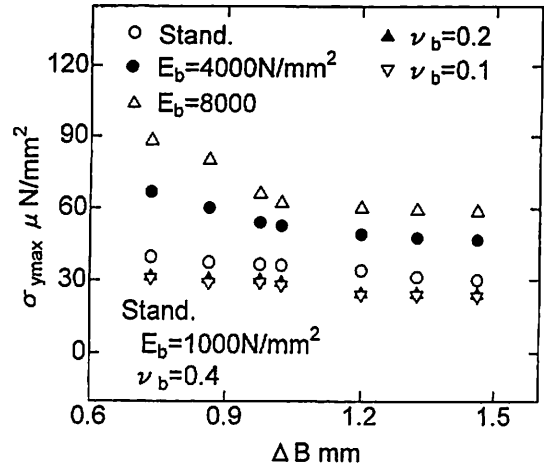


Fig.7  $\sigma_{ymax}$  and  $\Delta B$  for KL.  
Elastic parameters of Stand. are  $E_s=5800N/mm^2$ ,  $E_c=2800N/mm^2$ ,  $E_b=1000N/mm^2$ ,  $\nu_s=0.1$ ,  $\nu_c=0.1$  and  $\nu_b=0.4$ .

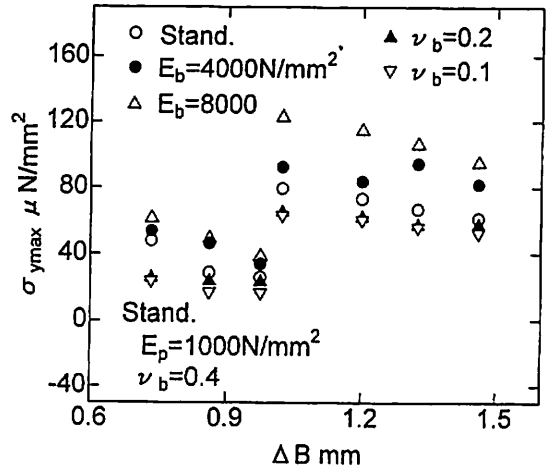


Fig.8  $\sigma_{ymax}$  and  $\Delta B$  for SCM.  
Elastic parameters of Stand. are  $E_s=5800N/mm^2$ ,  $E_c=2800N/mm^2$ ,  $E_b=1000N/mm^2$ ,  $\nu_s=0.1$ ,  $\nu_c=0.1$  and  $\nu_b=0.4$ .

値を示すことが、そして $E_b$ の増加によって大きく増加し、 $\nu_b$ の増加によって僅か増加することがわかる。

図9より、接合材の $\sigma_{ymax}$ の値は、図8の際と同様に変化し、その値は、 $\Delta B = \Delta B_0$ 以上のものが以下のものより大きいことがわかる。なお、 $E_b$ および $\nu_b$ の増加に伴う増加は、 $\sigma_{xmax}$ の際と同様になることがわかる。しか

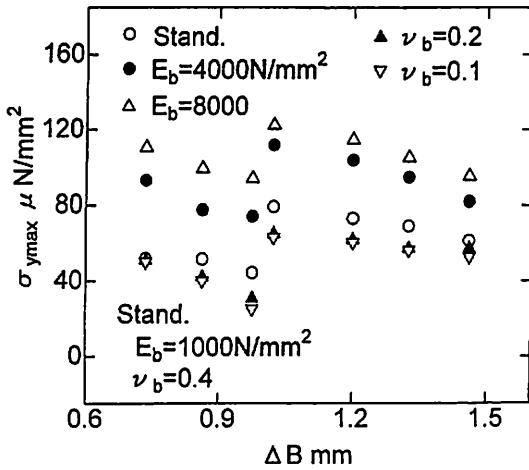


Fig. 9  $\sigma_{y\max}$  and  $\Delta B$  for binder.  
Elastic parameters of Stand. are  $E_b=5800\text{N/mm}^2$ ,  $E_s=2800\text{N/mm}^2$ ,  $E_b=1000\text{N/mm}^2$ ,  $\nu_s=0.1$ ,  $\nu_s=0.1$  and  $\nu_b=0.4$ .

し、接合材の  $\sigma_{y\max}$  の値は  $\sigma_{x\max}$  の際のものに比べ小さい。

また、各素材の両  $\Delta B$  域の  $\sigma_{y\max}$  は、 $\sigma_{x\max}$  の際と同様に、 $\Delta B$  の増加に伴って各僅か減少することが窺え、素材の中で、最も大きい  $\sigma_{y\max}$  は、 $\Delta B < \Delta B_0$  では接合材、 $\Delta B > \Delta B_0$  では中芯または接合材にあることが窺える。

段ボールの KL、中芯、接合材の  $\tau_{xy}$  の絶対値の最大値  $\tau_{xy\max}$  は、 $\Delta B < \Delta B_0$  の際図 3 に示す  $F_0$ 、 $E_0$ 、 $D_0$  の位置に、 $\Delta B > \Delta B_0$  の際  $F_0$ 、 $E_0$ 、 $B_0$  に生じることが窺えた。得られた  $\tau_{xy\max}$  と  $\Delta B$  との関係を図 10~12 に示す。図 10 より、 $\tau_{xy\max}$  は、 $E_b = 8000 \text{ N/mm}^2$  のものについては、 $\Delta B = \Delta B_0$  以上と以下との相異は僅かであるが、それ以外のものでは、 $\Delta B = \Delta B_0$  で大きく変化し、以上と以下とは大きな相異を示すことがわかる。そして、 $\tau_{xy\max}$  も、 $E_b$  の増加に伴って大きく増加し、 $\nu_b$  の増加に伴って僅か増加する。

図 11 より、図 10 の  $E_b = 8000 \text{ N/mm}^2$  以外の際と同様に、中芯の  $\tau_{xy\max}$  の値も、 $\Delta B = \Delta B_0$  以上では大きな値を、以下では小さな

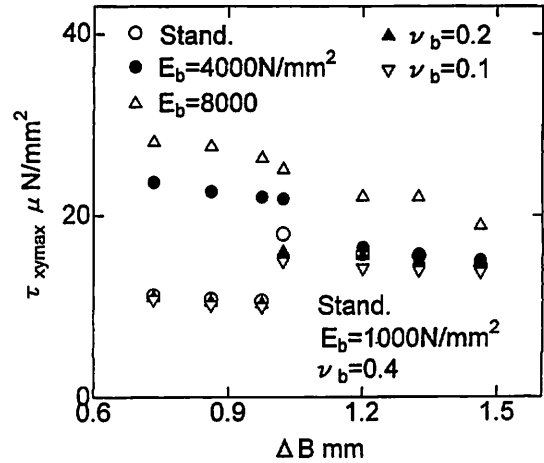


Fig. 10  $\tau_{xy\max}$  and  $\Delta B$  for KL.  
Elastic parameters of Stand. are  $E_s=5800\text{N/mm}^2$ ,  $E_s=2800\text{N/mm}^2$ ,  $E_b=1000\text{N/mm}^2$ ,  $\nu_s=0.1$ ,  $\nu_s=0.1$  and  $\nu_b=0.4$ .

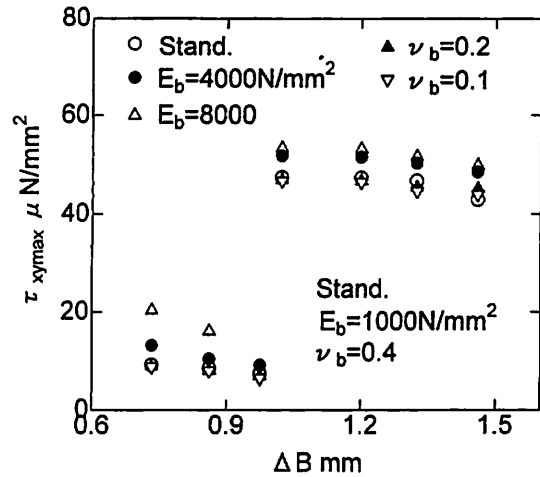


Fig. 11  $\tau_{xy\max}$  and  $\Delta B$  for SCH.  
Elastic parameters of Stand. are  $E_s=5800\text{N/mm}^2$ ,  $E_s=2800\text{N/mm}^2$ ,  $E_b=1000\text{N/mm}^2$ ,  $\nu_s=0.1$ ,  $\nu_s=0.1$  and  $\nu_b=0.4$ .

値を示すことがわかり、 $E_b$  の増加によって大きく増加し、 $\nu_b$  の増加によって僅か増加することがわかる。そして、中芯の  $\tau_{xy\max}$  の値も  $\sigma_{x\max}$  のものに比べ小さいことがわかる。

図 12 より、図 11 の際と同様に、接合材の  $\tau_{xy\max}$  の値も、 $\Delta B = \Delta B_0$  以上のものが以下のものより大きくなること、そして、 $E_b$

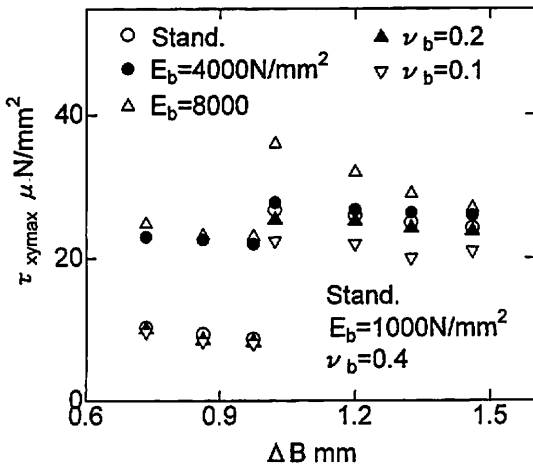


Fig. 12  $\tau_{xy\max}$  and  $\Delta B$  for binder.  
Elastic parameters of Stand. are  $E_b=5800\text{N/mm}^2$ ,  $E_s=2800\text{N/mm}^2$ ,  $E_b=1000\text{N/mm}^2$ ,  $\nu_b=0.1$ ,  $\nu_s=0.1$  and  $\nu_b=0.4$ .

および  $\nu_b$  の増加に伴う増減は  $\sigma_{x\max}$  の際と同様になることがわかる。なお、接合材の  $\tau_{xy\max}$  の値も  $\sigma_{x\max}$  の際のものに比べ小さくなるのがわかる。

なお、各素材の両  $\Delta B$  域の  $\tau_{xy\max}$  は、 $\sigma_{x\max}$  の際と同様に、 $\Delta B$  の増加に伴ってそれぞれ僅か減少することが窺える。

全域に亘って、最も大きい応力成分は  $\sigma_{x\max}$  で、次に  $\sigma_{y\max}$  である。なお、最も大きい  $\tau_{xy\max}$  は、 $\Delta B < \Delta B_0$  では KL、 $\Delta B > \Delta B_0$  では接合材にある。

計算処理の可能性のために、すなわち応力値の無限大を除くために、上述のように、接合部中央は  $b = 0.457 \text{ mm}$  程度の KL・中芯接合幅をもつように要素設定をおこなった。一般に、 $\Delta B$  の増加による接合材の接合面積増加に伴い平均化された接合部の正味の応力は減少するものとされている。しかし、 $\Delta B$  が大きい域では  $\Delta B$  の増加に伴って接合材の上下両接合境界面の開き（すなわち、接合材の厚さ）はほぼ  $\Delta B$  の二乗に比例して大きくなるが、 $\Delta B$  の小さい域でのその厚さ増加は、

極僅かであり、零に近い状態であると考えられる。このことにより、 $\Delta B > \Delta B_0$  では  $\Delta B$  の増加に伴い接合材両境界面の開きが大きくなり、その開きの増加に伴いその域の変形が大きく生じ、その域に大きな応力が生じるものと考えられる。

また、一定状態の変形の際、縦弾性係数が増大すると、その位置に生じる応力はその係数に比例して増加するものと考えられる。

これらのことより、 $E_b$  の増加に伴う接合部の応力の大きな増加は、 $E_b$  の増加に基づく接合材の大きな応力増加によって生じたものと考えられる。

板曲げの際、ポアソン比の増加によって生じる応力への寄与は、変形状態、すなわちひずみ状態が一定の際、周知の板曲げの理論<sup>22)</sup>によると、 $1/(1-\nu_b^2)$  の諸応力に比例して生じるものと考えられ、 $\nu_b = 0.1$  より  $\nu_b = 0.4$  の応力が大きくなるものと考えられる。

このことより、 $\nu_b$  の増加に伴う接合部の応力の大きな増加は、 $\nu_b$  の増加によって生じる接合材の大きな応力増加に基づくものと考えられる。

また、得られた結果より、諸応力の最大値は  $\Delta B$  が  $\Delta B_0$  以上と以下では、別の変形挙動を示すことがみられた。

以上のことより、引離し力を受ける段ボールの接合部の接合材域の幅および材料特性の相異に基づき応力の変化が顕著に生じることが示された。そして、上下クラフト・ライナー (KL) に引離し力が働く際の段ボールの接合材の幅の変形強度への特性が明らかにされ、それに伴う接合材の縦弾性係数およびポアソン比の段ボール強度への影響の概略が議論できた。

## 4. 結 言

上下クラフト・ライナー (KL) に引離し力が働く両面段ボール (KL および中芯の厚さ 0.32 mm、中芯の波長および波高 9.2 mm および 4.6 mm)、の素材の応力解析を弾性有限要素解析法によっておこない、接合部接合材の幅  $\Delta B$  を変えた際の応力状況を明らかにした。そして、接合材の材料特性に伴う諸応力成分の変化の概況を議論した。その結果、以下のようなことが明らかになった。

(1) KL、中芯、接合材の流れ方向の垂直応力の絶対値の最大値  $\sigma_{x\max}$  は、各、KL・中芯接合部付近の接合部表面にあり、その挙動は  $\Delta B = \Delta B_0$  ( $\doteq 1.05$  mm) 以上と以下とは異なる。最も大きい  $\sigma_{x\max}$  は KL で、次に  $\Delta B < \Delta B_0$  では中芯、 $\Delta B > \Delta B_0$  では接合材にある。

(2) 段ボールの厚さ方向の垂直応力絶対値の最大値  $\sigma_{y\max}$  は、各、接合材・中芯接合部表面にあり、 $\sigma_{x\max}$  の際と同様に、その挙動は  $\Delta B = \Delta B_0$  以上と以下とは異なる。素材の中で最も大きい  $\sigma_{y\max}$  は、 $\Delta B < \Delta B_0$  では接合材に、 $\Delta B > \Delta B_0$  では中芯または接合材にある。

(3) せん断応力絶対値の最大値  $\tau_{xy\max}$  は、接合材では接合材・中芯接合部表面にある。KL では  $\Delta B = \Delta B_0$  以下の際、中芯では  $\Delta B = \Delta B_0$  以上の際、 $\tau_{xy\max}$  は、接合材・中芯接合部の表面にあるが、以上では、KL の接合部中央位置の外表面付近、中芯の下表面にある。そして、 $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$  の際と同様に、その挙動は  $\Delta B = \Delta B_0$  以上と以下とは異なり、その値は以上のものが大きい。最も大きい素材の  $\tau_{xy\max}$  は、 $\Delta B < \Delta B_0$  では KL、

$\Delta B > \Delta B_0$  では接合材にある。

(4) 接合材の縦弾性係数  $E_b$  の増加によって、KL、接合材、中芯の  $\sigma_{x\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ 、および KL、接合材の  $\sigma_{y\max}$  は大きく増加する。接合材のポアソン比  $\nu_b$  の増加に伴い KL、中芯、接合材の  $\sigma_{x\max}$  は僅か増加する。

(5) 全域に亘って、最も大きい応力成分は、 $\sigma_{x\max}$  で、次に  $\sigma_{y\max}$  である。なお、その両  $\Delta B$  域の諸応力成分は  $\Delta B$  の増加に伴って僅か減少する。

本研究は、材料の変形強度特性を示す接合部接合材の幅および縦弾性係数、ポアソン比の段ボール強度への役割を議論し、明らかにしたものである。このことにより、接合材の幅および材料特性の相異に基づく、諸応力値の変化は、顕著に生じ、各素材および段ボールの強度にも強く影響することが明らかになった。

### <引用文献>

- 1) たとえば、段ボール実用百科編集委員会：段ボール実用百科、一律書房、177 (1970)
- 2) 1) の p.81.
- 3) たとえば、紙パルプ協会編、“紙パルプとその試験法”、紙パルプ協会、p.381 (1986).
- 4) 松島理、松島成夫、紙パ技協誌、50(4)、707(1996).
- 5) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、5(3)、211(1996).
- 6) 松島理、松島成夫、紙パ技協誌、51(4)、645(1997).
- 7) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、6(2)、60(1997).



- 8) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、6(5)、258(1997)。
- 9) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、7(4)、175(1998)。
- 10) たとえば、黒木剛司郎：材料力学、共立出版、100(1967)。
- 11) たとえば、清家政一郎、材料力学、共立出版、34(1978)。
- 12) たとえば、9)のp.97；10)のp.23。
- 13) たとえば、9)のp.6；10)のp.6。
- 14) S.P.Timoshenko and S.W.Kriege, Theory of Plate and Shells, McGraw-Hill Co., 366(1956)。
- 15) 松島成夫、矢野忠、松島晟、紙パ技協誌、42(5)、480(1988)。
- 16) 松島成夫、矢野忠、松島晟、横田俊昭、紙パ技協誌、47(4)、517(1993)。
- 17) 松島理、松島成夫、日本機械学会論文集、60(A576)、2000(1994)。
- 18) Alean R. Jones, Tappi, 51(5)、203(1968)
- 19) 1)のp.126。
- 20) たとえば、飯田修一、大野和郎、神前熙、熊谷寛夫、沢田正之、物理定数表、朝倉書店、75(1969)。
- 21) たとえば、20)のp.197
- 22) たとえば、10)のp196、11)のp127、14)のp4。
- (原稿受付 1998年4月20日)  
(審査受理 1998年7月9日)