

クラフト・ライナーに加工方向せん断力を与えたときの段ボールの弾性応力解析 (素材特性と応力強度との関係)

松島 理* 松島成夫**

Stress Analysis for Corrugated Fiberboard under Shearing Forces of Machine Direction in Kraft-Liner

(Relationships between Material Characters and Stress Strengths)

Satoru MATSUSHIMA and Shigeo MATSUSHIMA

An elastic stress analysis for single wall corrugated fiberboard (SWCF) under shearing forces (of the machine direction (MD)) in kraft-liner (KL) was examined by finite element method (FEM). Then relationships between material characters (longitudinal elastic moduli (E_k , E_c , E_b) and Poisson's ratios (ν_k , ν_c , ν_b)) connected with element materials (KL, corrugating semi-chemical medium (CM), binding material (BM)) and maximums ($\sigma_{x\max}$, $\sigma_{y\max}$, $\tau_{xy\max}$) of absolute values for normal stresses (σ_x , σ_y) and shear stress (τ_{xy}) in x and y directions parallel to MD and the cross direction were discussed by this analysis.

With the E_k increase, $\sigma_{x\max}$ for KL increases obviously, and $\sigma_{x\max}$, $\sigma_{y\max}$ and $\tau_{xy\max}$ for CM decrease obviously. With the E_c increase, $\sigma_{x\max}$ and $\sigma_{y\max}$ for KL and BM, and $\sigma_{y\max}$ for CM decrease obviously and increase after those decreases obviously. With the ν_k increase, $\sigma_{x\max}$ and $\sigma_{y\max}$ for KL increase obviously, and $\sigma_{x\max}$ for CM increases obviously and decreases after this increase obviously. With the ν_c increase, $\sigma_{x\max}$ and $\sigma_{y\max}$ for CM increase obviously. Also, with E_b and ν_b increases, $\sigma_{y\max}$ for KL, and $\sigma_{x\max}$ and $\sigma_{y\max}$ for BM increase obviously.

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

クラフト・ライナー (KL) にせん断力が働く際の両面段ボールの弾性応力解析を有限要素解析法によっておこなった。そして、KL、中芯、接着材の縦弾性係数 E_k 、 E_c 、 E_b 、ポアソン比 ν_k 、 ν_c 、 ν_b と加工方向および横方向に平行な x 、 y 方向の垂直応力 σ_x 、 σ_y およびせん断応力 τ_{xy} の絶対値の最大値 $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ および $\tau_{xy\max}$ との関係を検討した。

E_k の増加に伴い、KL の $\sigma_{x\max}$ は顕著な増加を、中芯の $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ は顕著な減少を示す。 E_c の増加に伴い、KL および接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ 、中芯の $\sigma_{y\max}$ は顕著な減少を示し、その後増加を示す。 ν_k の増加に伴い、KL の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は顕著な増加を示す。中芯の $\sigma_{x\max}$ は顕著な増加を示し、その後減少を示す。 ν_c の増加に伴い、中芯の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は顕著な増加を示す。なお、 E_b および ν_b の増加に伴い、KL の $\sigma_{y\max}$ および接着材の $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ は顕著な増加を示す。

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

段ボールは、軽くて、大きな力学的強度を示し、耐衝撃性に優れ、盛んに構造用包装材として用いられ、有用性の高いものである。軽量で、力学的強度が大きいのは、段ボールの形状が起因することは勿論のことであるが、クラフト・ライナー (KL) と波状の中芯との接合が、また素材の間に生じる 8 割程度の空隙が主因であるものと考えられる。すなわち、その空隙によって製品の軽量化、材料の節約が果たせると共に、その構造物に必要な肉厚を形成する段ボールの形態は、生産性、経済性に適合し、力学的視点からみても妥当なものである。そして、その段ボール形成のための主要なもの、すなわち、その強度向上に必要な厚みの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。

段ボールの加工の機構上、片面段ボールの加工に比べ、接合に必要なニップ圧 (接合圧)¹⁾ を大きくとることが困難であるため、与えられた低いニップ圧で KL・中芯の接合処理がなされている。良い接合をおこなうには、接着材の接合特性および接合後の接合強度の配慮が必要であるものと考えられる。また、実際に用いられている段ボールをみると、KL・中芯の接合状態は、線接合ではなく、KL・中芯接合部を含めた所定の接合幅²⁾ をもつ面接合になっている。したがって、接着材の強度およびその配置状態による段ボールの強度への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と思われる。

しかし、段ボールの加工工程を考慮すると、その工程、処理のため、厳密には、接合部の部材の形態は力学的解析をおこなうに適した

ものとはなっていない。形状は単純な数学的な表示に適したものではないようであり、のり付けの際に生じるのりの濡れによる複雑な材質変化も生じるものと考えられる。そして、段ボールの接合部の強度を議論するためのもの、すなわち、段ボールの接合強度を考慮するための基本となるものに、引き離し試験³⁾があり、また、ずれ試験がある。そして、段ボールの接合強度の基礎的研究として、引き離し変形^{4~7)} 時およびずれ変形^{8~10)} 時の応力解析を議論したものがあり、引き離し変形時の諸応力成分と材料特性との関係を議論したものの⁷⁾ がある。しかし、ずれ変形を受ける段ボール接着材の材料特性による強度への影響を基礎的に研究したものは見当たらない。

一般に、使用状態にある段ボールの部材の変形は小さいもので、その主な変形は弾性変形であると考えられる。このような変形時の材料の変形特性を示す係数は、主に、弾性係数であり¹¹⁾¹²⁾、弾性変形は独立した 2 係数で議論できるもの¹³⁾ とされ、強度設計に用いられる係数は、一般に、材料の変形強度特性を示す縦弾性係数と変形特性を示すポアソン比である¹⁴⁾。また、段ボールは、段ボール部材の形状および弾性特性により、特異な強度特性を示すものと考えられる。

以上のことより、上下 KL にずれ力 (せん断力) が働く際の段ボールの素材の材料特性による強度状態を明らかにすることを、弾性有限要素解析法によって試みた。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し、段ボールの強度を議論することを試みた。ただし、Seydel¹⁵⁾ が波板に適用した処方および前報 (段ボールの面圧¹⁶⁾、曲げ¹⁷⁾¹⁸⁾) の処方にならない、段

ボール中芯の形状を正弦波形とした。

2. 解析方法

段ボールのずれ変形解析は、近似的に、段ボールのずれ変形は平面ひずみと考え、平面ひずみ弾性有限要素法による応力解析をおこなう。

両面段ボールの幾何学的構成は上下表面をなすKLとその内側にある波状の中芯との接合によって表せ、その段ボールの形状は幾何学的対称性および周期性をもっている。両面段ボールの座標は、段ボールの流れ方向を x 方向に、厚さ方向を y 方向にして表し、系の原点 O を段ボールおよび中芯の厚さ中央の位置に置いて表す(図1参照)。KL および中芯の厚さを T_k および T_c で、中芯の波長および波高を L および h で表す。

有限要素による応力解析をおこなうための基本的な形状は、段ボールの反対称性および周期性を考慮すると、図2(a)に示すような域、すなわち $x=0 \sim L/2$ の域のKL および中芯で表すのが適切であると考えられる。

そこで、この基本域に、約200個の4角形要素を同図のように割り当てた。その際の変形条件は、 $x=0, y=0$ および $x=L/2, y=0$ の位置 O, O' の x および y 方向の変位が零で

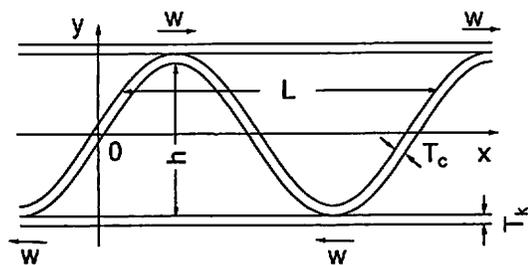


Fig. 1 Applied force and coordinates for SWCF.

あるとし、 $x=0, x=L/2$ のKL表面 ($y=(h+T_s)/2+T_k$) の位置 A, A' の y 方向の変位も零であるとする。なお、単位幅当たりのせん断力 $w (=1 \text{ N/mm})$ は位置 O', A' の断面の節点に各 0.5 N/mm を働かすようにした。そして、このような設定にしたがえば、作用位置を除く域の応力状態が近似的に議論できるものと考え、応力状態を以下のように議論する。しかし、接合部の形状は加工条件および素材の特性によって複雑に変化し、その厳密な設定は困難である。そこで、現実に近いように、また、近似的に、強度状態への想定ができ、また算定ができ、議論が容易にできるように、図2(b)に示すようなKL・中芯の接合面の開き ($cd, c'd' : 0.04 \text{ mm}$) の設定をした。そして、議論する段ボールの形状は、実用段ボールに合わせ、 $T_k=0.32 \text{ mm}, T_s=$

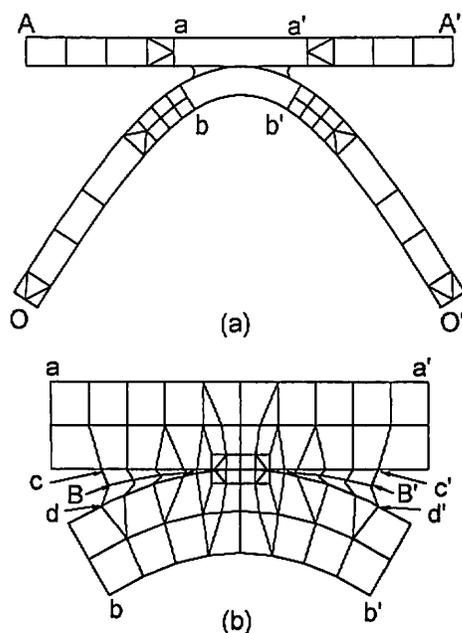


Fig. 2 FEM elements and deformation restrictions.

Displacements in x direction at O, O', A and A' and in y direction at O and O' are zero. Section $aa'b'b$ is about binding material.

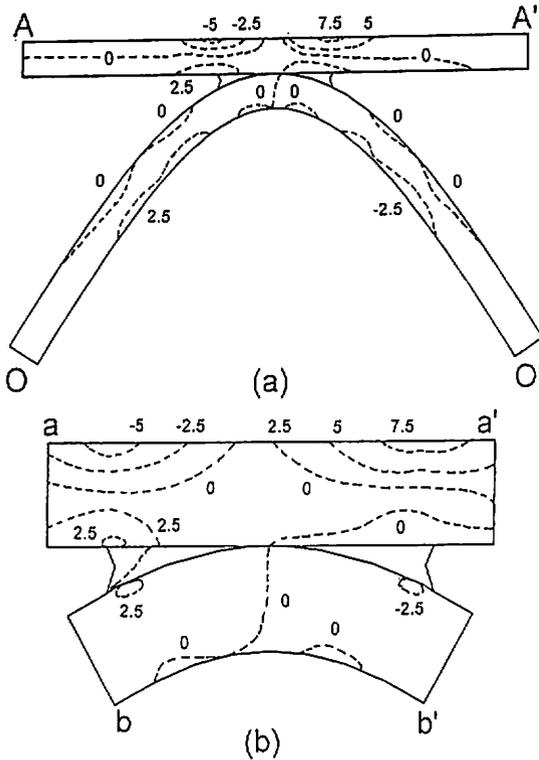


Fig. 3 Distribution of σ_x .

0.32 mm および $L=9.2$ mm、 $h=4.6$ mm、
 接合材の幅 (BB') $b=0.8$ mm にし、KL・接合材、
 KL・中芯の接合部幅 (cc', dd') は 0.11 mm とし
 た。また、弾性係数は、既知の KL および中
 芯の縦弾性係数 $E_k^{19)20)}$ 、 $E_c^{21)}$ およびポア
 ソン比 ν_k 、 $\nu_c^{19)}$ を考慮し、前報⁹⁾¹⁰⁾ のよ
 うに、 $E_k = 5.80 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、 $E_s = 2.80 \times$
 10^3 N/mm^2 および $\nu_k=0.1$ 、 $\nu_c=0.1$ にした。
 接着材の縦弾性係数およびポアソン比は、周
 知の高分子接着材²²⁾²³⁾ の値より、 $E_b=1.0$
 $\times 10^3 \text{ N/mm}^2$ および $\nu_b=0.4$ にした。そして、
 この形状および特性値をもつ段ボールを基本
 段ボールとし、所定の諸特性値を所定の各素
 材の域で変え、材料特性の段ボール強度への
 寄与が議論できるようにした。

3. 解析結果およびその考察

ずれ変形を受ける段ボールの各素材の段ボ
 ール強度への役割の議論を容易にするために、
 最初、各素材の諸応力成分の分布状況を議論
 し、次に、材料の破壊に結びつく各部材の最
 大応力と材料特性との関係を議論する。

3.1 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} の分布

そこで、まず段ボールについての x 、 y 方
 向の垂直応力 σ_x 、 σ_y 、およびせん断応力 τ_{xy}
 の分布を求めた。基本段ボールの σ_x 、 σ_y 、
 τ_{xy} の分布状況を図 3 (a)、(b)~5 (a)、(b)
 に示す。図より、KL・中芯接合部付近を除
 く域では、中芯の変形は、前報⁷⁻⁹⁾ より、
 ほぼ、両端支持中央集中荷重を受ける単純な
 引張り真直はりおよび曲がりはりと同様な変
 形をするものと考えられる。しかし、KL・
 中芯接合部付近においては、弾性はりの変形
 解析で議論できない応力集中が生じ、接合部
 およびその付近に集中して大きな σ_x 、 σ_y 、
 τ_{xy} が生じることがわかる。図 3 (a)、(b) よ
 り、段ボール全体としての σ_x の最大値は
 KL・中芯接合部の KL 外表面の $x=L/3$ 付近
 に、最小値は $x=L/6$ 付近に生じることがわ
 かる。中芯の σ_x の最大値は下表面の $x=L/8$
 付近に、最小値は $x=3L/8$ 付近に生じ、接
 着材の σ_x の最大値は $x<L/4$ の KL・接着材
 面の外側に、最小値は $x>L/4$ の中芯・接着
 材面の外側付近に生じる。図 4 (a)、(b) より、
 段ボール全体としての σ_y の最大値は KL・
 中芯接合部の $x<L/4$ の接着材外表面中央に、
 最小値は $x>L/4$ の外表面中央に生じること
 がわかる。KL の σ_y の最大値は $x<L/4$ の
 KL・接着材面の外側に、最小値は $x>L/4$ の

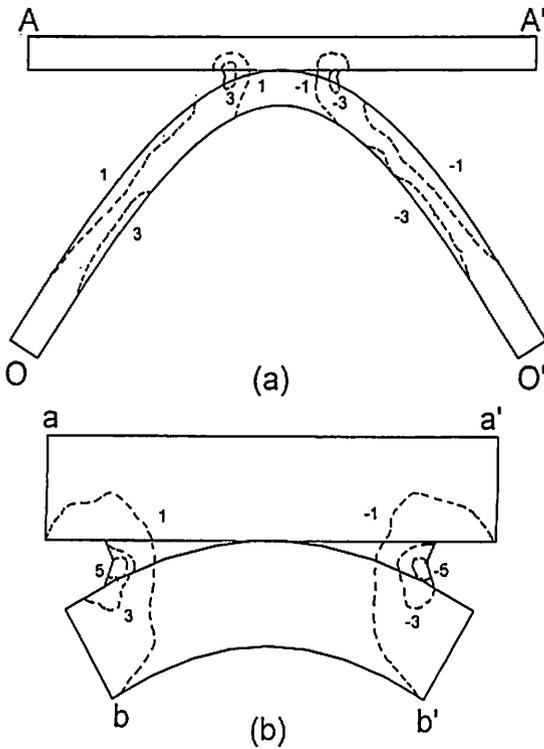


Fig. 4 Distribution of σ_y .

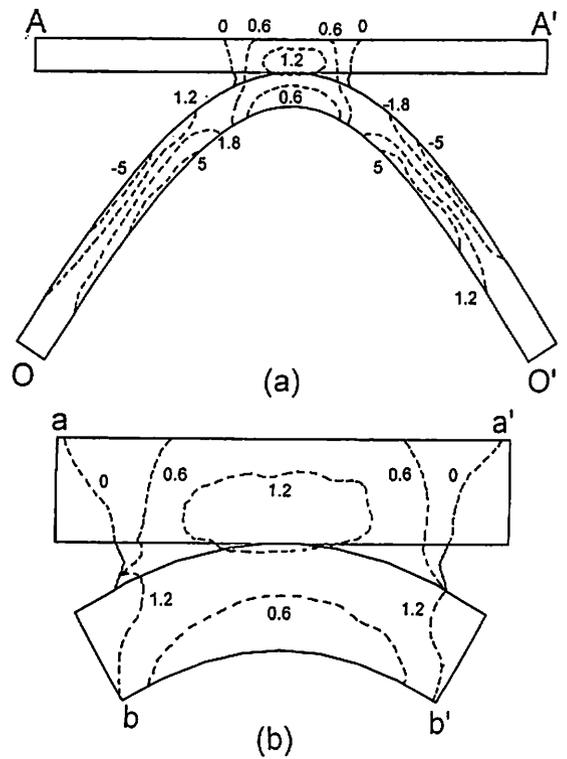


Fig. 5 Distribution of τ_{xy} .

KL・接着材面の外側に生じ、中芯の σ_y の最大値は下表面の $x=L/8$ 付近に、最小値は $x=3L/8$ 付近に生じる。図5(a)、(b)より、段ボール全体としての τ_{xy} の最大値は中芯の下表面の $x=L/8$ 付近に、最小値は上表面の $x=3L/8$ 付近に生じることがわかる。そして、KLおよび接着材の τ_{xy} の最大値はKL・接着材面の $x>L/4$ 、 $x=L/4$ 付近の位置に生じる。

すなわち、KLの σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} の最大値は図6の K_m および A_{m1} 付近、 A_{m2} 付近に、中芯のそれら応力成分の最大値は同図の C_m 付近に、接着材の最大値は同図の A_{m1} 付近、 B_m 、 A_{m2} 付近に生じることがわかる。

3.2 $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ について

3.2.1 $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ と E_k 、 ν_k と

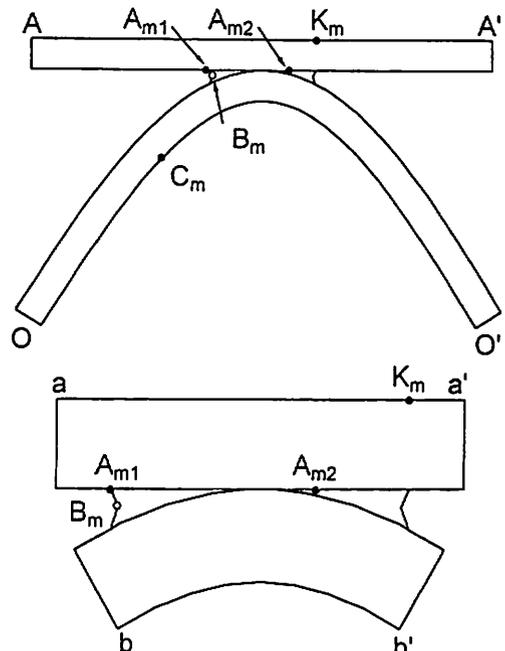


Fig. 6 Positons of $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ and $\tau_{xy\max}$.

の関係

KL、中芯、接着材の $|\sigma_x|$ 、 $|\sigma_y|$ 、 $|\tau_{xy}|$ の最大値 σ_{xmax} 、 σ_{ymax} 、 $\tau_{xy\max}$ とKLの縦弾性係数 E_k および ν_k との関係を求めた。それらの関係を示したものが図7～9である。

図7より、 E_k の増加に伴って、KLの σ_{xmax} は大きな増加を示し、KLの σ_{ymax} は僅かな増加を示し、その後僅かな減少を示すことが、KLの $\tau_{xy\max}$ は僅かな増加を示すことがわかる。また、 ν_k の増加に伴って、KLの σ_{xmax} および σ_{ymax} は顕著に増加し、 $\tau_{xy\max}$ は僅かに減少することがわかる。

図8より、 E_k の増加に伴って、中芯の σ_{xmax} 、 σ_{ymax} 、 $\tau_{xy\max}$ は大きく減少することがわかる。また、 ν_k の増加に伴って、中芯の σ_{xmax} は顕著な増加を示し、その後僅かな減少を示すことが、 σ_{ymax} および $\tau_{xy\max}$ は僅かな増加を示し、その後僅かな減少を示すことが窺える。

図9より、 E_k の増加に伴って、接着材の σ_{xmax} はまず大きな増加を、やがて緩やかな

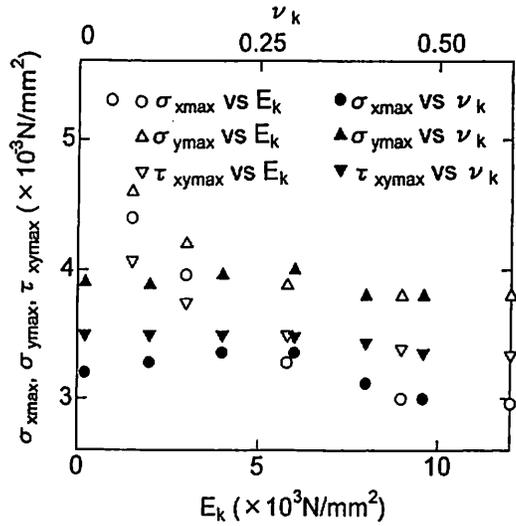


Fig. 8 Relationships between maximums of absolute stress components (σ_{xmax} , σ_{ymax} , $\tau_{xy\max}$) and elastic moduli (E_k and ν_k) for CM.

減少を示すことが、接着材の σ_{ymax} はまず大きな増加を示し、その後ほぼ一定な値を示すことが、接着材の $\tau_{xy\max}$ は緩やかな増加を示すことが窺える。また、 ν_k の増加に伴って、接着材の σ_{xmax} および σ_{ymax} は顕著な増加を、

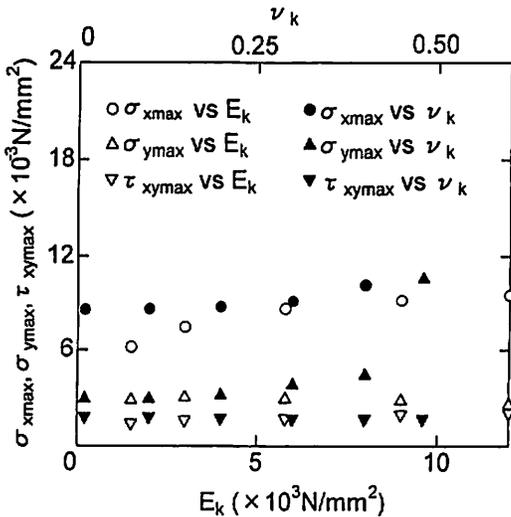


Fig. 7 Relationships between maximums of absolute stress components (σ_{xmax} , σ_{ymax} , $\tau_{xy\max}$) and elastic moduli (E_k and ν_k) for KL.

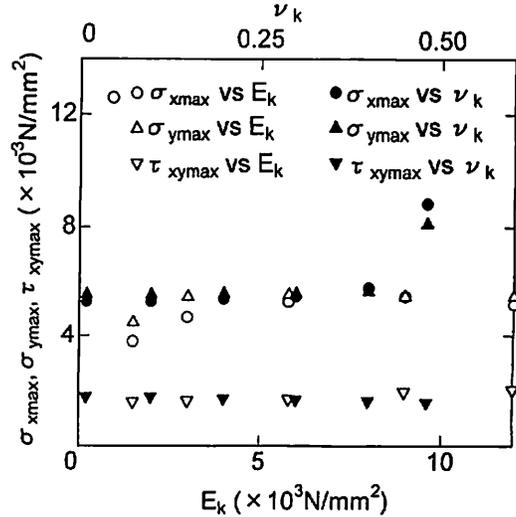


Fig. 9 Relationships between maximums of absolute stress components (σ_{xmax} , σ_{ymax} , $\tau_{xy\max}$) and elastic moduli (E_k and ν_k) for BM.

接着材の $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示すことがわかる。

以上のことより、 ν_k および E_k の増加により、各部材の $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ の値が大きく変化することがわかる。

3.2.2 $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ と E_c 、 ν_c との関係

$\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ と CM の縦弾性係数 E_c および ν_c との関係を求めた。それが図10～12である。

図10より、 E_c の増加に伴って、KL の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ はまず顕著な減少を示し、その後大きく増加する傾向を示すことが、KL の $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示すことがわかる。また、 ν_c の増加に伴って、KL の $\sigma_{x\max}$ は $\nu_c > 0.4$ の域で顕著な減少を示し、KL の $\sigma_{y\max}$ および $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示すことがわかる。

図11より、 E_c の増加に伴って、中芯の $\sigma_{x\max}$ は緩やかな増加を示すことが、中芯の

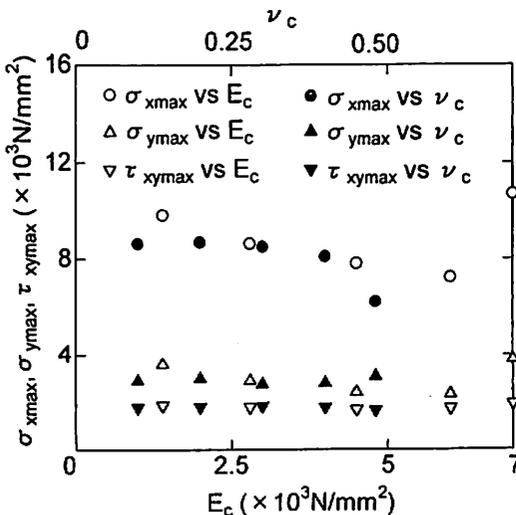


Fig. 10 Relationships between maximums of absolute stress components ($\sigma_{x\max}$, $\sigma_{y\max}$, $\tau_{xy\max}$) and elastic moduli (E_c and ν_c) for KL.

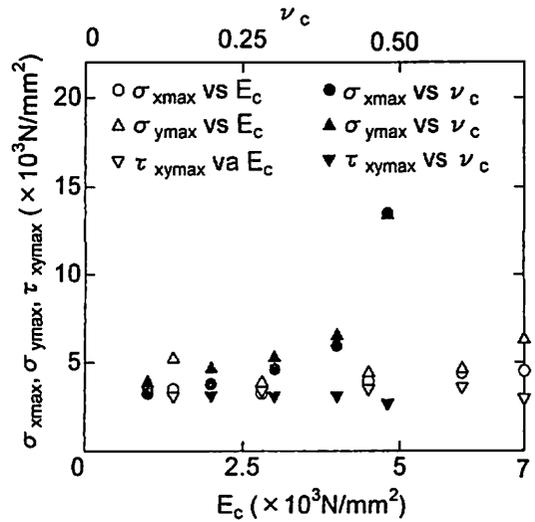


Fig. 11 Relationships between maximums of absolute stress components ($\sigma_{x\max}$, $\sigma_{y\max}$, $\tau_{xy\max}$) and elastic moduli (E_c and ν_c) for CM.

$\sigma_{y\max}$ は顕著な減少を示し、その後顕著な増加を示すことが、中芯の $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示すことがわかる。また、 ν_c の増加に伴って、中芯の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は顕著に増加するが、中芯の $\tau_{xy\max}$ は緩やかに減少することがわかる。

図12より、 E_c の増加に伴って、接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は大きな減少を示し、その後大きな増加を示すが、接着材の $\tau_{xy\max}$ は、 $E_c < 5 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ではほぼ一定な値を、 $E_c > 5 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ では顕著な増加を示すことがわかる。また、 ν_c の増加に伴って、接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は $\nu_c > 0.3$ では大きな減少を示すが、接着材の $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示すことがわかる。

以上のことより、中芯の E_s および ν_s の増加により、各部材 $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ の値が顕著に変化することがわかる。

3.2.3 $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ と E_b 、 ν_b との関係

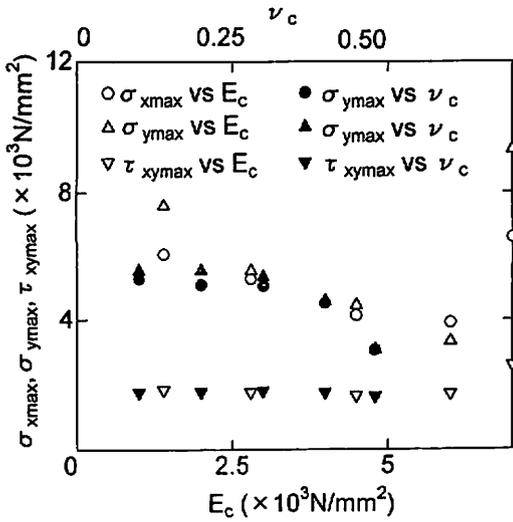


Fig. 12 Relationships between maximums of absolute stress components ($\sigma_{x\max}$, $\sigma_{y\max}$, $\tau_{xy\max}$) and elastic moduli (E_c and ν_c) for BM.

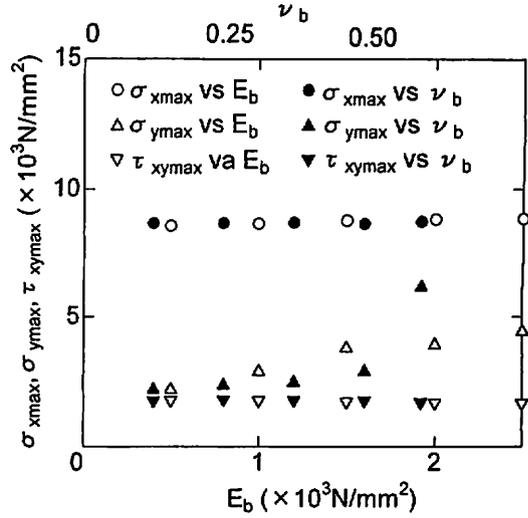


Fig. 13 Relationships between maximums of absolute stress components ($\sigma_{x\max}$, $\sigma_{y\max}$, $\tau_{xy\max}$) and elastic moduli (E_b and ν_b) for KL.

各素材の $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ と E_b および ν_b との関係を求め、示したものが図13～15である。

図13より、 E_b の増加に伴い、KL の $\sigma_{x\max}$ は僅かな増加を、KL の $\sigma_{y\max}$ は大きな増加を示すことが、KL の $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示すことがわかる。また、 ν_b の増加に伴い、KL の $\sigma_{x\max}$ は僅かな増加を示し、KL の $\sigma_{x\max}$ は大きな増加を示すことが、KL の $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示すことがわかる。

図14より、 E_b の増加に伴い、中芯の $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ は極僅かな減少傾向を示すことが窺える。また、 ν_b の増加に伴い、 E_b の際と同様に、中芯の $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ は極僅かな減少傾向を示すことが窺える。

図15より、 E_b の増加に伴い、接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は大きな増加を示し、接着材の $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示すことがわかる。また、 ν_b の増加に伴い、接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は大きな増加を示し、接

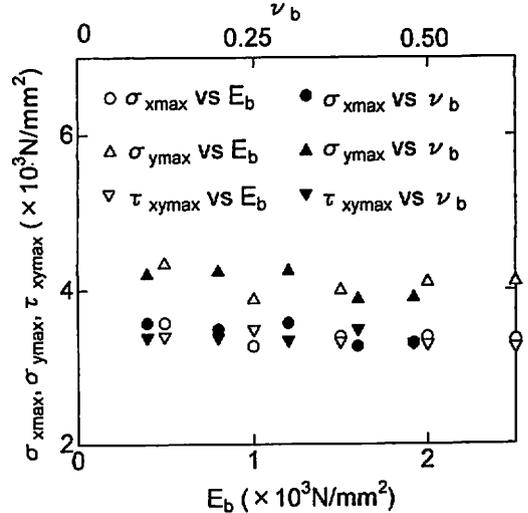


Fig. 14 Relationships between maximums of absolute stress components ($\sigma_{x\max}$, $\sigma_{y\max}$, $\tau_{xy\max}$) and elastic moduli (E_b and ν_b) for CM.

着材の $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示す。

以上のことより、中芯の E_b および ν_b の増加により、各部材 $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ の値が顕著に変化することがわかる。

これらの応力変化は、変形容易な応力集中

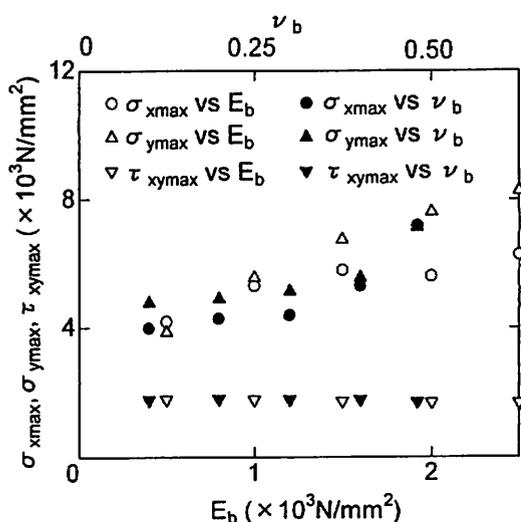


Fig. 15 Relationships between maximums of absolute stress components (σ_{xmax} , σ_{ymax} , $\tau_{xy max}$) and elastic moduli (E_b and ν_b) for BM.

域に強く生じ、それを全体的な形状適合が加わり生じたものと考えられる。

中芯を除く接合部付近の諸応力成分が大きな値を示すことは、接合部に応力集中が生じやすい形状によって生じたものと考えられる。

σ_{xmax} が KL・中芯接合部の KL 外表面に生じるのは、せん断力による KL の曲げ応力と応力集中の寄与との加算によって生じたものと考えられる。

σ_{ymax} が接着材の外表面中央に生じるのは、狭い接合部に集中して生じる応力集中の寄与によるものと考えられる。

$\tau_{xy max}$ が中芯の内表面に生じるのは、はりの曲げ理論に基づくずれ変形解析⁸⁾⁹⁾に示されるように、せん断力によって生じる大きな曲げ応力が中芯に強く表れることによるものと考えられる。

以上のことより、中芯の E_b および ν_b の増加により、各部材 σ_{xmax} 、 σ_{ymax} の値は顕著に変化することがわかる。

これらのことより、各素材の材料特性すなわち縦弾性係数およびポアソン比の相異に伴い、ずれ変形を受ける両面段ボールの諸応力成分の値は顕著に変わることが明らかになり、その諸係数の変化は特性を変えた素材および接着材の強度へ強く影響することがわかった。

4. 結 言

上下クラフト・ライナー (KL) に加工方向のせん断力が働く際の段ボール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。そして、KL、中芯、接着材の縦弾性係数 E_k 、 E_c 、 E_b を 5.8×10^3 、 2.8×10^3 、 1.0×10^3 N/mm²、ポアソン比 ν_k 、 ν_c 、 ν_b を 0.10、0.10、0.40 としたものを基本段ボールとし、それらの材料の特性を変えた際の各素材の x 、 y 方向の垂直応力 σ_x 、 σ_y およびせん断応力 τ_{xy} の絶対値の最大値 σ_{xmax} 、 σ_{ymax} および $\tau_{xy max}$ と材料特性との関係を議論した。

その結果、段ボール全体としての σ_{xmax} は KL・中芯接合部の KL の外表面に、 σ_{ymax} は接着材のずれ方向の反対側の外表面に、 $\tau_{xy max}$ は中芯の波高および厚さの中央位置から加工方向に $L/8$ の位置付近の内表面に生じることがわかった。

そして、それらの値と素材の材料特性との関係については以下のようなことが明らかになった。

- (1) E_k の増加に伴って、KL の σ_{xmax} は大きな増加を、KL の σ_{ymax} は僅かな増加を示し、その後僅かな減少を示す。なお、KL の $\tau_{xy max}$ は僅かな増加を示す。 E_k の増加に伴って、中芯の σ_{xmax} 、 σ_{ymax} 、 $\tau_{xy max}$ は大きく減少する。そして、 E_k の増加に伴い、接

着材の $\sigma_{x\max}$ は大きな増加の後、やがて緩やかな減少を示し、接着材の $\sigma_{y\max}$ はまず大きな増加を、その後ほぼ一定な値を示す。接着材の $\tau_{xy\max}$ は緩やかな増加を示す。

(2) ν_k の増加に伴って、KL の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は顕著な増加を、KL の $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示す。 ν_k の増加に伴って、中芯の $\sigma_{x\max}$ は顕著な増加を示し、その後顕著な減少を示す。中芯 $\sigma_{y\max}$ および $\tau_{xy\max}$ は僅かな増加を示し、その後僅かな減少を示す。また、 ν_k の増加に伴って、接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は顕著な増加を、接着材 $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示す。

(3) E_c の増加に伴って、KL の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は顕著な減少を示し、その後顕著な増加を示す。KL の $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示す。 E_c の増加に伴って、中芯の $\sigma_{x\max}$ は僅かな増加を、中芯の $\sigma_{y\max}$ は顕著な減少、増加を、中芯の $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示す。 E_c の増加に伴って、接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は顕著な減少を示し、その後顕著な増加を示し、接着材の $\tau_{xy\max}$ は $E_c < 5 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ ではほぼ一定な値を示す。

(4) ν_c の増加に伴って、KL の $\sigma_{x\max}$ は $\nu_c > 0.4$ では顕著な減少を、KL の $\sigma_{y\max}$ および $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示す。 ν_c の増加に伴って、中芯の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は顕著な増加を、中芯の $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示す。 ν_c の増加に伴って、接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は $\nu_c > 0.3$ の域では顕著な減少を、接着材の $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示す。

(5) E_b の増加に伴い、KL の $\sigma_{x\max}$ は僅かな増加を、KL の $\sigma_{y\max}$ は大きな増加を示し、KL の $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示す。 E_b の増加に伴い、中芯の $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ は

極く僅かな減少傾向を示す。 E_b の増加に伴い、接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は大きな増加を、接着材の $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示す。

(6) ν_b の増加に伴い、KL の $\sigma_{x\max}$ は僅かな増加を、KL の $\sigma_{y\max}$ は大きな増加を、KL の $\tau_{xy\max}$ は僅かな減少を示す。 ν_b の増加に伴い、中芯の $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 、 $\tau_{xy\max}$ は極く僅かな減少傾向を示す。 ν_b の増加に伴い、接着材の $\sigma_{x\max}$ および $\sigma_{y\max}$ は大きな増加を、接着材の $\tau_{xy\max}$ はほぼ一定な値を示す。

本研究は、材料の変形強度特性を示す縦弾性係数、変形特性を示すポアソン比が、ずれ変形を受ける両面段ボールへ特異な強度を示すものと考え、その係数の段ボール強度への役割を議論したものである。これによって、材料特性の相異に基づく、応力値の変化が顕著に生じることが明らかになり、その諸係数の変化は、特性を変えた素材および接着材の強度へ強く影響し、段ボールの強度にも強く影響することが概略ではあるが明らかになった。

<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”、一律書店、p.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、日本包装学会誌、7(4)、

- 175(1998)
- 7) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、7(5), 221(1998)
- 8) 松島理、松島成夫、紙パ技協誌、51(4), 645(1997)
- 9) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、6(2), 60(1997)
- 10) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、6(5), 258(1997)
- 11) たとえば、黒木剛司郎、“材料力学”、共立出版、p.100(1967)
- 12) たとえば、清家政一郎、“材料力学”、共立出版、p.34(1978)
- 13) たとえば、11)のp.97; 12)のp.23
- 14) たとえば、11)のp.6; 12)のp.6
- 15) S.P.Timoshenko and S.W.Kriege, “Theory of Plate and Shells”, McGraw-Hill Co., p.366(1956)
- 16) 松島成夫、矢野忠、松島晟、紙パ技協誌、42(5), 480(1988)
- 17) 松島成夫、矢野忠、松島晟、横田俊昭、紙パ技協誌、47(4), 517(1993)
- 18) 松島理、松島成夫、日本機械学会論文集、60(A576), 2000(1994)
- 19) Alean R. Jones, Tappi, 51(5), 203(1968)
- 20) 石渕浩、木村稔、吉沢昭宣、佐久田博司、日本機械学会論文集、59(557.A), 156(1993)
- 21) 1)のp.126
- 22) 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、p.75(1969)
- 23) たとえば、22)のp.197
- (原稿受付 1998年9月21日)
(審査受理 1999年2月5日)