

上下クラフト・ライナーに引離し力を受ける両面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 Applied under Separating Forces on Kraft-Liner Surfaces (Relationships between Material Character and Stress Strength)

Satoru MATSUSHIMA and Shigeo MATSUSHIMA

An elastic stress analysis for single wall corrugated fiberboard (SWFC) applied under separating forces (to separate kraft-liner (KL) from SWCF) on KL was examined by finite element method (FEM). Then relationships between element material characters (Poisson's ratio and longitudinal elastic modulus) and stress strength in elements for SWFC were discussed by this analysis.

Maximum $\sigma_{x \max}$ of absolute normal stress in the machine direction is at the neighbourhood of the contact position of KL and the bind material (BM) in general. Also, maximum $\sigma_{y \max}$ of absolute normal stress in the thickness direction of SWCF is at the contact position of BM and semi-chemical corrugating medium (CM), and maximum $\tau_{xy \max}$ of absolute shear stress is at the neighbourhood of the BM·CM contact position. The sequence for the magnitude of their maximum stresses is denoted as $\sigma_{x \max} > \sigma_{y \max} > \tau_{xy \max}$.

However $\sigma_{x \max}$ for Poisson's ratio $\nu_b \leq 0.2$ of BM is at the BM·CM contact position in particular, and $\sigma_{x \max}$ and $\sigma_{y \max}$ for $\nu_b = 0.48$ are at the BM·CM contact position.

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

段ボールの上下表面のクラフト・ライナー(KL)に段ボール・KLの引離し力が働く際の両面段ボールの弾性応力解析を有限要素法によって試みた。そして、その解析によって、両面段ボールの構成素材の特性(ポアソン比および縦弾性係数)と応力強度との関係を議論した。

一般に、流れ方向の垂直応力の絶対値の最大値 $\sigma_{x \max}$ は KL・接着材接合部付近の KL 表面に、両面段ボールの厚さ方向の垂直応力の絶対値の最大値 $\sigma_{y \max}$ は接着材・中芯接合部 KL 表面に、せん断応力の絶対値の最大値 $\tau_{xy \max}$ は接着材・中芯接合部付近の中芯表面にある。これら最大応力の大きさは $\sigma_{x \max} > \sigma_{y \max} > \tau_{xy \max}$ である。

特別な例として、接着材のポアソン比 $\nu_b \leq 0.2$ の場合の $\sigma_{x \max}$ は接着材・中芯接合部表面に、 $\nu_b = 0.48$ の場合の $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ は接着材・中芯接合部表面にある。

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

** 愛媛大学名誉教授(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番) : Honorary Professor of Ehime University, 3 Bunkyou-cho, Matsuyama-shi, Ehime, 790-8577

1. 緒言

段ボールは、クラフト・ライナー (KL) と波状の中芯との接合よりなり、その間の部、すなわち 8 割程度の域は空隙である。したがって、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、その形態は、生産性、経済性に適し、力学的視野からみても妥当なものであり、合理的なものである。このことにより、段ボールが、包装材として重要なものとなり、盛んに用いられているものと考えられる。そして、段ボールの形成のための主要なもの、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。

一般に、段ボールの加工は、まず片面段ボール加工をおこない、次に、残りの面の加工をおこなっている。したがって、片面加工の際、ニップ圧 (接合圧)¹⁾ は加工形態上容易に大きくとれるが、段ボールの形態および加工状況を考慮すると、その後おこなう残りの面の接合加工の際、そのニップ圧を大きくとることは困難になるものと考えられる。低いニップ圧で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、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接合幅²⁾ をもつ面接合になると考えられる。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、その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ではない。

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⁴⁾⁵⁾ 時およびずれ変形^{6)~8)} 時の応力解析を議論したものがある。しかし、接着材の材料特性の段ボールへの影響についての基礎的研究は見当たらない。

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弾性係数であり、弾性変形は独立した 2 係数で議論できるもの^{9) 10)} とされ、その係数は、強度設計では、一般に、縦弾性係数とポアソン比とがよく用いられる¹¹⁾。係数の定義¹²⁾ 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る。このような特性を考慮すると、段ボールは、段ボール部材形状およびその接着材の弾性特性により、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 に引離し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、Seydel¹³⁾ が波板に適用した処方および前報 (段ボールの面圧¹⁴⁾、曲げ¹⁵⁾¹⁶⁾) の処方にならって、段ボール中芯の形状は正弦波形とした。

2. 解析方法

両面段ボールは上下表面をなす KL とその内側にある波状の中芯との接合によって構成されている。そこで、段ボールの幾何学的対称性および周期性を考慮し、系の座標は、段

ボールの流れ方向を x 方向に、厚さ方向を y におき、段ボールおよび中芯の厚さ中央を原点 O に置くように設定する (図 1 参照)。KL および中芯の厚さを T_k および T_s 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すると、段ボールの引き離し変形を議論するための基本的形状は、図 2 に示すような域、

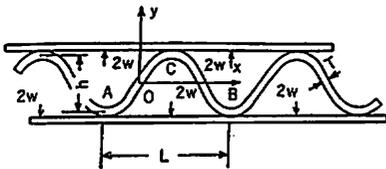


Fig.1 Applied force and coordinates for FC.

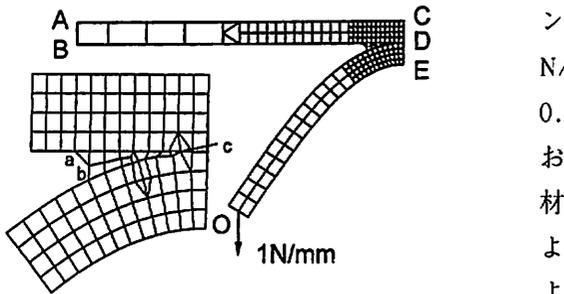


Fig.2 FEM elements and deformation restrictions. Range AB is clamped, and displacements in x direction for range CDE and position O are zero. Section acb is bind material.

すなわち KL は $x = -L/4 \sim L/4$ 、中芯は $x = 0 \sim L/4$ の域であるものが適切であると考えられる。そこで、これを基にし、弾性有限要素解析をおこなうことにする。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。その際の変形条件としては、 $x = -L/4$ および $x = L/4$ の断面 AB 、 CDE の x 方向の変位が零であるとし、 AB の y 方

向の変位も零であるとする。そして、引き離し力 $W (= 1 \text{ N/mm})$ を位置 O に働かすようにした。このように、設定すれば、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られる。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、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、その議論が容易にできるよう、図 2 のように、定めた。設定をおこなった段ボールの形状は実用段ボールに合わせ、 $T_k = 0.32 \text{ mm}$ 、 $T_s = 0.32 \text{ mm}$ および $L = 9.2 \text{ mm}$ 、 $h = 4.6 \text{ mm}$ 、接合幅 $b = 1.0 \text{ mm}$ 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 ¹⁷⁾、 E_s ¹⁸⁾ およびポアソン比 ν_k 、 ν_s ¹⁷⁾ 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 $\nu_k = 0.1$ 、 $\nu_s = 0.1$ 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¹⁹⁾²⁰⁾ 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。そこで、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、この特性を中心として、その諸特性値を所定の範囲で種々変え、材料特性の段ボール強度への寄与が議論できるよう算定する。

3. 解析結果およびその考察

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の議論を容易にするために、最初、各素材の応力分布を議論し、次に、各部位の最大応力と材料特性との関係を議論する。

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}

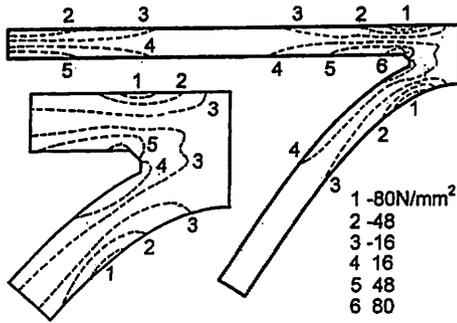


Fig.3 Distribution of $\sigma_x \max$.

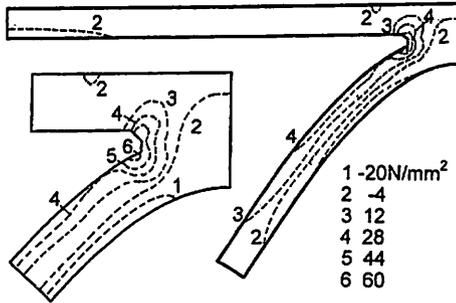


Fig.4 Distribution of $\sigma_y \max$.

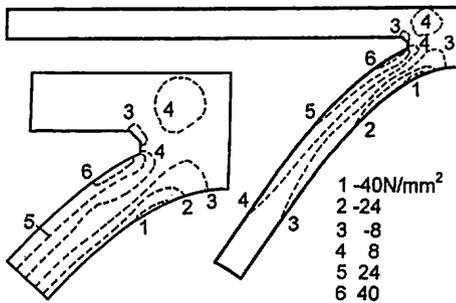


Fig.5 Distribution of $\tau_{xy} \max$.

の分布状況を求めた。その主なものとして、上記の基本段ボールの σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} の分布状況を図3～5に示す。図より、KL・中芯接合部付近を除く域では、KLおよび中芯の変形は、前報³⁾⁴⁾のように、ほぼ、両端固定中央集中荷重を受ける単純な真直はりおよび曲がりはりと同様な変形をすることがうかがえ

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} が生じていることがわかる。

段ボールにおける $|\sigma_x|$ の最大値 $\sigma_x \max$ (98.7 N/mm²)は、KL・中芯接合部付近のKL表面にあり、はりの曲げ解析による両端固定中央集中荷重はりの曲げの最大値($x=0$, $t=T_k/2$ の値(t はKLの厚さ中央からの距離): 72.9 N/mm²)よりも大きいことがわかる。

接着材における $\sigma_x \max$ (72.0 N/mm²)はKL・接着材接合部の表面にあり、中芯(78.3 N/mm²)は接着材・中芯接合部付近の中芯の表面にある。

段ボールにおける $|\sigma_y|$ の最大値 $\sigma_y \max$ (79.5 N/mm²)は接着材・中芯接合部表面にあり、KLの $\sigma_y \max$ (45.91 N/mm²)はKL・接着材接合部付近の表面にある。

段ボールにおける $|\tau_{xy}|$ の最大値 $\tau_{xy} \max$ (47.4 N/mm²)は接着材・中芯接合部付近の中芯表面にあり、KLの $\tau_{xy} \max$ (17.5 N/mm²)はKL・接着材接合部の表面に、接着材の最大値(30.6 N/mm²)は接着材・中芯接合部の表面にある。

KLの $|\sigma_x|$ は他の応力成分に比べ非常に大きい。そこで、KLのはりの曲げ強度との比較が容易となるよう $x=0$ 、 $t=T_k/2$ の $|\sigma_x|$ を同様の記号($\sigma_x \max$)によって表し、議論する。

σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} の絶対値の最大値 $\sigma_x \max$ 、 $\sigma_y \max$ 、 $\tau_{xy} \max$ と ν_b との関係を求め、その関係を示したものが図6、7である。図6より、KL、接着材の $\sigma_x \max$ は ν_b の増加に伴い大きく増加するが、 $x=0$ の $\sigma_x \max$ は僅か減少するこ

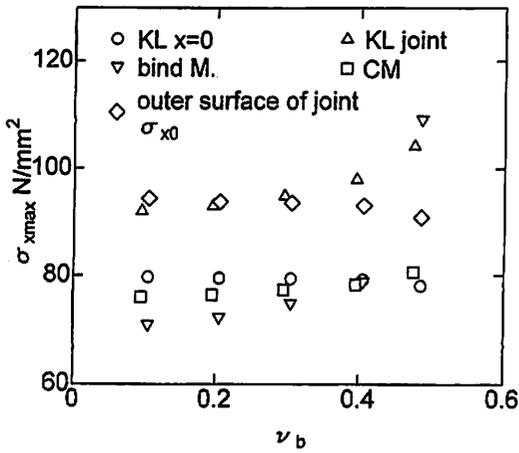


Fig.6 Relationships between $\sigma_{x \max}$ and ν_b .

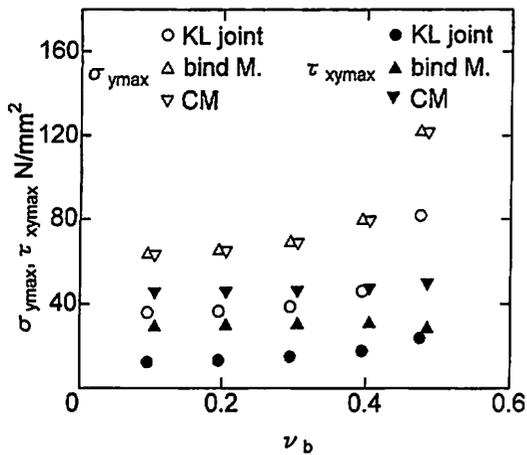


Fig.7 Relationships between $\sigma_{y \max}$, $\tau_{xy \max}$ and ν_b .

とがわかる。中芯の $\sigma_{x \max}$ は僅か増加する。特別な例であるが、同図に示す KL・接着材接合部の KL 外表面付近に生じる σ_x の極値 σ_{x0} は $\nu_b \leq 0.2$ では段ボールの最大 $\sigma_x \max$ となり、接着材・中芯接合部の表面の接着材の σ_x は $\nu_b = 0.48$ では段ボールの $\sigma_x \max$ となる。

図 7 より、KL、接着材、中芯の $\sigma_y \max$ お

よび KL の $\tau_{xy \max}$ は ν_b の増加に伴い大きく増加し、接着材の $\tau_{xy \max}$ は僅か減少し、中芯の $\tau_{xy \max}$ は僅か増加することがわかる。

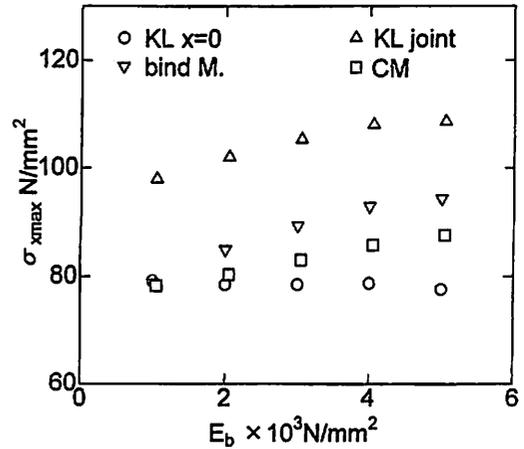


Fig.8 Relationships between $\sigma_{x \max}$ and E_b .

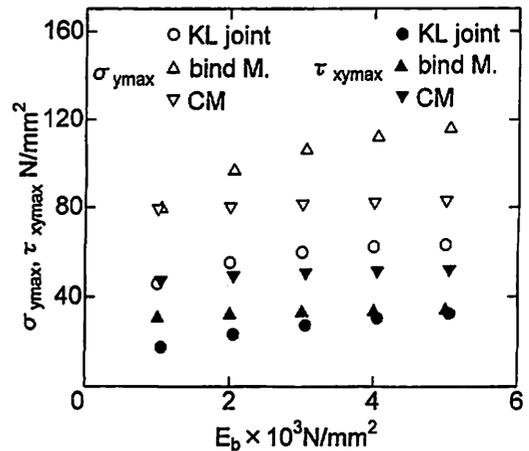


Fig.9 Relationships between $\sigma_{y \max}$, $\tau_{xy \max}$ and E_b .

$\sigma_{x \max}$, $\sigma_{y \max}$, $\tau_{xy \max}$ と E_b との関係を求め、これらを示したものが図 8, 9 である。図 8 より、KL、接着材、中芯の $\sigma_{x \max}$ は E_b の増加に伴って顕著に増加し、 $x = 0$ の KL の $\sigma_x \max$ は僅か減少することがわかる。

図9より、KL、接着材の $\sigma_{y \max}$ およびKLの $\tau_{xy \max}$ は E_b の増加に伴って顕著に増加することが、他の部材の $\sigma_{y \max}$ 、 $\tau_{xy \max}$ の増加は僅かであることがわかる。

以上のことより、 ν_b および E_b の増加によって、大きな値を示す応力成分 $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ への強い寄与を示す素材は特性の変化した素材すなわちここでは接着材であることがわかる。

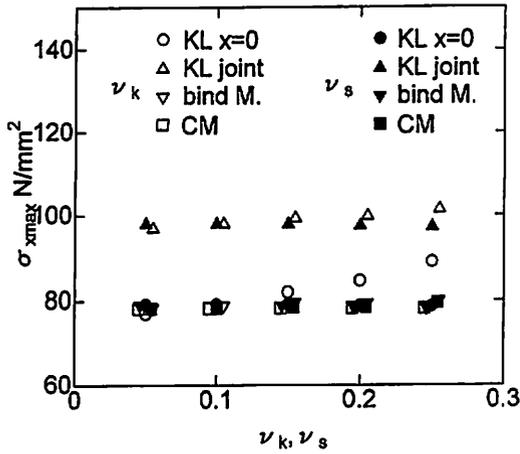


Fig.10 Relationships between $\sigma_{x \max}$, ν_k and ν_s .

中芯の材料特性による段ボール強度への寄与を明らかにするために、 ν_k および E_k の影響を議論した。その $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ 、 $\tau_{xy \max}$ と ν_k との関係を示したものが図10、11である。図10より、 ν_k の増加に伴って、 $x=0$ のKLの $\sigma_{x \max}$ は大きく増加するが、KLは緩やかに増加し、接着材、中芯の $\sigma_{x \max}$ は ν_k の変化によらずほぼ一定であることがわかる。そして、図11より、 ν_k の増加に伴いKLの $\sigma_{y \max}$ は緩やかに増加し、接着材、中芯の $\sigma_{y \max}$ は、

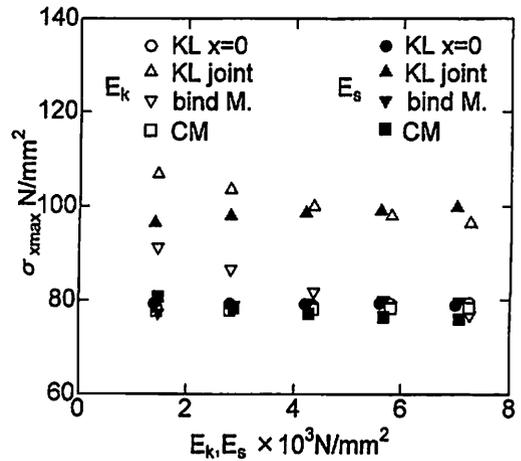


Fig.12 Relationships between $\sigma_{x \max}$, E_k and E_s .

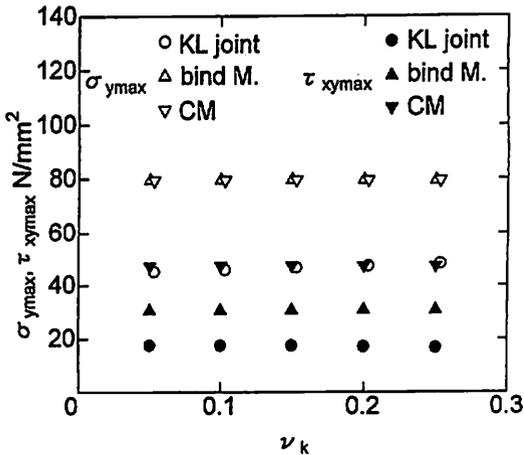


Fig.11 Relationships between $\sigma_{y \max}$, $\tau_{xy \max}$ and ν_k .

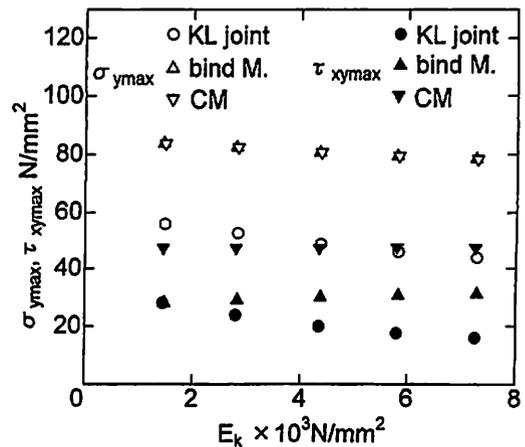


Fig.13 Relationships between $\sigma_{y \max}$, $\tau_{xy \max}$ and E_k .

ν_k の変化に関係なく、ほぼ一定、KL、接着材、中芯の $\tau_{xy \max}$ もほぼ一定であることがわかる。

$\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ 、 $\tau_{xy \max}$ と E_k との関係を示したものが図12、13である。図12より、KL、接着材の $\sigma_{x \max}$ は E_k の増加に伴い強い減少を、 $x=0$ のKL、中芯の $\sigma_{x \max}$ は E_k の変化によらずほぼ一定であることがわかる。図13より、 E_k の増加に伴って、KL、接着材、中芯の $\sigma_{y \max}$ は顕著な減少を、KLの $\tau_{xy \max}$ は強い減少を示すが、接着材、中芯の $\tau_{xy \max}$ は、 E_k の変化に関係なく、ほぼ一定であることがわかる。

以上のことより、中芯の ν_k および E_k の増加による顕著な $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ の変化がKLにあることがわかる。すなわち、接着材の材質変化の際と同様に、特性が変化する部材KLの応力変化は大きく生じる。

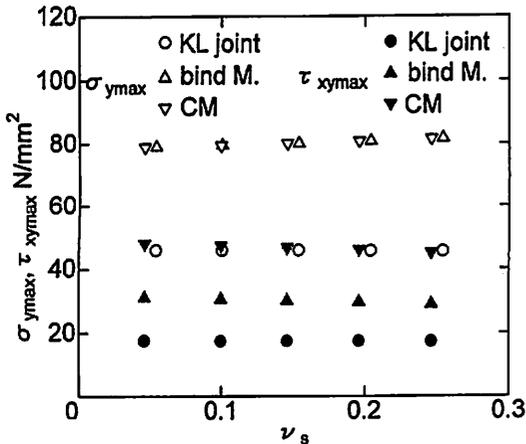


Fig.14 Relationships between $\sigma_{y \max}$ 、 $\tau_{xy \max}$ and ν_s .

ν_s および E_s の影響を議論するために、 $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ 、 $\tau_{xy \max}$ と ν_s および E_s との関係を求めた。そして、 $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ 、 $\tau_{xy \max}$ と ν_s との関係を示したものが図10、14である。

図10より、 ν_s の増加によらず、 $x=0$ のKL、KL、接着材、中芯の $\sigma_{x \max}$ の値はほぼ一定であることがわかる。また、図14より、 ν_s の増加に伴い接着材、中芯の $\sigma_{y \max}$ は僅か増加するが、KLの $\sigma_{y \max}$ は、 ν_s の変化によらず、ほぼ一定であることがわかり、接着材・中芯の $\tau_{xy \max}$ は ν_s の増加に伴い僅か減少するが、KLの σ_y 、 $\tau_{xy \max}$ は、 ν_s の変化によらず、ほぼ一定であることがわかる。

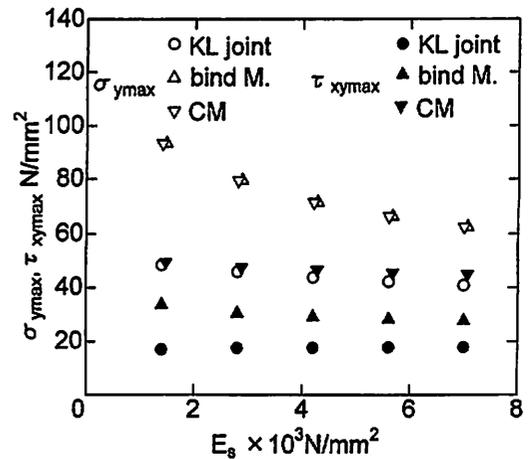


Fig.15 Relationships between $\sigma_{y \max}$ 、 $\tau_{xy \max}$ and E_s .

$\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ 、 $\tau_{xy \max}$ と E_s との関係を示したものが図12、15である。図12より、 E_s の増加に伴いKL、接着材の $\sigma_{x \max}$ は緩やかに増加し、中芯は緩やかに減少するが、 $x=0$ のKLの $\sigma_{x \max}$ は、 E_s の変化によらず、ほぼ一定であることがわかる。図15より、 E_s の増加に伴って、接着材、中芯の $\sigma_{y \max}$ は大きく、KLは緩やかに減少し、接着材の $\tau_{xy \max}$ は顕著に、中芯は緩やかに減少することが、KLの $\tau_{xy \max}$ は、 E_s の変化によらず、ほぼ一定であることがわかる。

以上のことより、中芯の ν_s および E_s の増

加による顕著な $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ 、 $\tau_{xy \max}$ の変化は中芯に生じることがわかる。

なお、KL および中芯の材質変化に伴う接着材の応力変化も顕著である。このことは、KL および中芯の材質変化に伴う各素材の変形の変化が変形容易な応力集中域に強く生じ、同時に、全体的な形状適合が加わり生じるものと考えられる。

一般のはりでは、 $x = 0$ の $t = T_k/2$ と $t = -T_k/2$ の σ_x は $\sigma_{x \max}$ に等しくなるが、本結果では $t = T_k/2$ のものが大きい。このことは、 $t = T_k/2$ の域の x 方向の長さが、 $t = -T_k/2$ のものより、接合部がないために大きくなり、変形域が大きく、その変形が容易となり、曲げ応力が大きく生じたものと考えられる。また、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。

$\sigma_{y \max}$ が接着材・中芯接合部の表面に強く生じるのは、その域の x 方向の幅が小さいこと、応力集中の寄与が強いことによるものと考えられる。

$\tau_{xy \max}$ が KL・接着材・中芯接合部の付近に強く生じるのは、接合部の形状と応力集中とに強く結び付いていることによるものと考えられる。

以上のことより、材料特性の相異によって、応力値が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。

本報告は、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段ボールへ特異な強度寄与を示すことを議論し、その概略を明らかにしたものである。

4. 結 言

上下クラフト・ライナー (KL) に引離し力が働く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い、材料の特性を変えた際の応力状況を明らかにした。その結果、以下のようなことが明らかになった。

(1) 流れ方向の垂直応力の絶対値の最大値 $\sigma_{x \max}$ は KL・中芯接合部付近の KL 表面にあり、段ボールの厚さ方向の垂直応力絶対値の最大値 $\sigma_{y \max}$ は接着材・中芯接合部表面に、せん断応力絶対値の最大値 $\tau_{xy \max}$ は接着材・中芯接合部付近の中芯表面にある。

(2) 接着材のポアソン比 ν_b の増加によって、KL、接着材の $\sigma_{x \max}$ 、KL、接着材、中芯の $\sigma_{y \max}$ は大きく増加する。そして、KL の $\tau_{xy \max}$ の顕著な増加がみられる。

接着材の縦弾性係数 E_b の増加によって、KL、接着材、中芯の $\sigma_{x \max}$ 、KL、接着材の $\sigma_{y \max}$ は大きく増加する。そして、KL の $\tau_{xy \max}$ の顕著な増加がみられる。

(3) KL のポアソン比 ν_k の増加によって、KL の $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ は緩やかに増加する。

縦弾性係数 E_k の増加に伴って KL、接着材の $\sigma_{x \max}$ および KL、接着材、中芯の $\sigma_{y \max}$ 、KL の $\tau_{xy \max}$ は大きく減少する。そして、接着材の $\tau_{xy \max}$ の顕著な増加がみられる。

(4) 中芯のポアソン比 ν_s の増加によって、接着材、中芯の $\sigma_{y \max}$ が僅か増加する。

縦弾性係数 E_k の増加に伴う接着材、中芯の $\sigma_{y \max}$ の大きな減少が、KL の $\sigma_{x \max}$ の緩やかな増加、中芯の $\sigma_{x \max}$ の緩やかな減少がみられる。

(5) KL の KL・接着材接合部の外表面付近

に生じる σ_x の極値は $\nu_b \leq 0.2$ では段ボールの $\sigma_{x \max}$ となり、 $\nu_b = 0.48$ では接着材・中芯接合部の表面の $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ が段ボールの $\sigma_{x \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ となる。

(6) 材料特性値を変えた際、その特性値を変えた素材の応力 $\sigma_{y \max}$ 、 $\sigma_{y \max}$ の変化は、一般に、顕著である。

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は、段ボールへ特異な強度特性を示すものと考え、その係数の段ボール強度への役割を議論した。このことにより、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わかった。

<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、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)、641 (199)
- 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) たとえば、黒木剛司郎：材料力学、共立出版、100(1967)
- 10) たとえば、清家政一郎、材料力学、共立出版、34(1978)
- 11) たとえば、9)のp.97、10)のp.23
- 12) たとえば、9)のp.6、10)のp.6
- 13) S.P.Timoshenko and S.W.Kriege, Theory of Plate and Shells, McGraw-Hill Co., 366(1956)
- 14) 松島成夫、矢野忠、松島晟、紙パ技協誌、42(5)、480(1988)
- 15) 松島成夫、矢野忠、松島晟、横田俊昭、紙パ技協誌、47(4)、517(1993)
- 16) 松島理、松島成夫、日本機械学会論文集、60(A576)、2000(1994)
- 17) Alean R. Jones, Tappi, 51(5)、203(1968)
- 18) 1)のp.126
- 19) 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)
- 20) たとえば、19)のp.197

(原稿受付 1997年11月17日)

(審査受理 1998年5月27日)