研 究 報 文

段ボール箱手かけ穴の応力解析 —穴幅と応力との関係—

愛媛大学共同研究センター 松 島 理
愛媛大学名誉教授 松 島 成 夫

Stress Analysis for Gripe Hole of Corrugated Fiberboard Case —Relation between Hole Breadth and Stress Components—

Satoru Matsushima

Guest Professor, Research Center of District Corporation,
Ehime University

Shigeo Matsushima

Professor Emeritus, Ehime University

松島 理

松島成夫

An elastic analysis for side plates (breadth $L = 240 \sim 302.5$ mm and height 207.5 mm) of the corrugated fiberboard case with gripe holes (length $\Delta L_0 = 0.0 \sim 62.5$ mm of parallel line, hole side radius $r = 12.5$ mm of semicircle arc) applied uniform applied stress p in ΔL_0 range was performed by finite element method, and from this analysis, stress components of their plates were considered.

Large absolute values of normal stresses σ_x and σ_y in breadth and height directions and shear stress τ_{xy} concentrate near upper edges and sides of holes. Maximum of $|\sigma_x|$ is at centers of hole upper edges in $\Delta L_0 < 1.6r$ and at centers of plate upper edges in $\Delta L_0 > 1.6r$, and maximum of $|\sigma_y|$ is at centers of hole upper edges in $\Delta L_0 < 1.6r$ and at hole sides in $\Delta L_0 > 1.6r$. And τ_{xy} is negative value and maximum of $|\tau_{xy}|$ is at centers of hole upper edges in $\Delta L_0 < 1.6r$ and at positions $r/2$ along upper direction from hole sides in $\Delta L_0 > 1.6r$. Maximum values for σ_x and σ_y increase and maximum absolute values for minimum σ_y decreases with the ΔL_0 increase, and maximum absolute value for minimum σ_x and τ_{xy} decrease initially and increase with the ΔL_0 increase.

Keywords : Computational Mechanics, Structure Analysis, Elastic Bending, Strength of Corrugated Fiberboard, Elastic Stress Analysis, Structure Strength, Numerical Analysis, Stress Concentration

分類 : T₈ 段ボール, Q₆ 紙板紙品質試験法

1. 緒 言

段ボール箱は包装用箱材として盛んに利用されている。そして、手掛け穴付き段ボール箱の設計が示され¹⁾,

その箱が、現在、よく用いられている。例えば、果実などの包装用箱としてよく利用されている。一方、円孔²⁾³⁾、半円切欠け⁴⁾⁵⁾、切欠け⁵⁾をもつ板の穴側端（または穴底）には強い応力集中が生じ、高い応力状態が

生じる。

そして、円孔、半円切欠け、切欠けをもつ部材の平面応力および平面ひずみの変形を議論したものがある^{2)~5)}。段ボール板に沿った方向に外力が働く際の基礎的引張りの研究には、両面⁶⁾⁷⁾、複両面段ボール⁸⁾についてのものがあり、圧縮を受ける段ボール箱⁹⁾についてのものがある。しかし、段ボール箱手掛け穴について、応力解析をおこなったものは見当たらない。

したがって、段ボール箱の手掛け穴をもつ側板の応力状態を議論し、穴の周りに生じる応力の影響を明らかにすることは、段ボール工学上重要なことである。

段ボール箱の手掛け穴に働く持上げ力は、主に段ボールの穴付き板に沿った上方向（高さ方向）にあり、その穴の上辺に働くものである。すなわち、その変形は近似的に平面応力変形であると考えられる。

また、穴付き段ボール箱の穴付近の変形は、穴上部では曲げ変形と穴上辺に沿う引張り変形とが生じ、穴両端部では大きな集中応力が生じるものと考えられる。すなわち、この3つの変形（曲げ、引張り、応力集中によるもの）が形状に応じた域で適当に組合わさり、また連携し合ったものと考えられる。一様荷重を受ける有穴（楕円孔）無限板の集中応力の評価式には周知の表示式がある¹⁰⁾。

そこで、まず、段ボール箱側板の手掛け穴に板面に沿った持上げ力が働く場合の弾性応力解析を有限要素解析法によっておこない、その応力と手掛け穴幅との関係を明らかにすることを試みた。そして、本結果と一様荷重を受ける有穴（楕円孔）無限板の集中応力評価式の結果との相違を議論することを試みた。

2. 解析方法

段ボール原紙⁶⁾¹¹⁾¹²⁾および段ボール⁶⁾⁷⁾は異方性を示すが、便宜上、段ボール板は等方材であるとする。手掛け穴付き段ボール箱の中で果実用のもの（横 L 、奥行 B 、高さ H ：230 mm×265 mm×400 mm 程度）を取上げ議論する。座標設定は、その穴付き側板の横 L の中央、穴の高さ中央を座標の原点 O にし、穴幅方向（横方向）、高さ方向を座標の x 、 y 軸にする〔図1 (a, b) 参照〕。そして、 O と上辺との距離を h_0 で示す〔図1 (b) 参照〕。実用段ボール箱にならい、穴の形状は近似的に左右半円（半径： r ）の弧と上下直線部（平行域）とによって作られている（図2参照）。

穴上辺の平行域には一様分布荷重 p が働くものと考え、その総外力（持上げ力） P は、小状態を考慮し、その平行域の長さ ΔL_0 （円穴形状からの L の増加値で両半円中心間の距離）によらず一定であるとする。

本有限要素法解析に用いる要素は4角形要素（要素数は140程度）にし、その設定は箱側面および変形の対称性を考慮して図3 (a, b) ($\Delta L_0 = 25$ mmのもの)に示すように定めた。用いたプログラムはCAIプログラム（日本機械学会）である。その全要素の配位は穴付き側板の右半部をとり、板幅中心線の左右方向の変位は零とし、穴平行域および底辺には一様作用力 p

Fig.1 Hole of corrugated fiberboard case.
(a) case and coordinates. (b) Applied force p and weight distribution p .

Fig.2 Shape of hole.

および w が各働くものとした。

そして、基本となる L , H および板厚 T_T の値を各 240~302.5 mm, 220 mm および 5.16 mm, また h_0 , 穴の曲率半径 r を 37.5 mm, 12.5 mm とし, P を $T_T \times 10 \text{ N/mm}^2$ とした。議論する ΔL_0 は 0.0~62.5 mm である。

ΔL_0 の変化の議論を容易にするために、穴付き側板の形状は側板の穴両側端と左右両側辺との距離 ΔL および上下辺と穴上部中央との距離 h , 高さ H が

$$\Delta L = (L - \Delta L_0 - 2r)/2 = \text{一定} \quad \cdots (1a)$$

(a)

(b)

Fig. 3 Element of FEM.

(a) Element. (b) Element pattern in ABCD.

$$h = h_0 - r/2 = \text{一定}, H = \text{一定} \quad \cdots (1b)$$

となるように定めた。

本議論に必要な p の ΔL_0 の増加による変化を吟味し、議論に用いる単純化した底辺の分布荷重 w , p と ΔL_0 との関係を検討する。そして、本解析値の破壊強度、変形強度への議論のために必要な最大、最小主応力 σ_1 , σ_2 , 相当応力 σ_{eq} を示す。

いま、上述のように箱底に働く荷物荷重 (下方向垂直応力) w が一様分布であると考え、力の釣合い則

$$P = p \Delta L_0 T_T, P = w T_T \quad \cdots (2)$$

$$L = L_0 + \Delta L_0 \quad \cdots (3)$$

により, p , w は

$$p = w L / \Delta L_0, w = P / L \quad \cdots (4)$$

で表せる。ただし, L_0 は穴両端の距離であり, 例えば円穴の L_0 は $\Delta L_0 = 0$ の L 値

$$L_0 = L (\Delta L_0 = 0) \quad \cdots (5)$$

である。

着目位置に生じる最大、最小主応力 σ_1 , σ_2 ¹³⁾は破壊強度に、相当応力 σ_{eq} ¹⁴⁾は変形強度に強く影響し、

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad \cdots (6a)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad \cdots (6b)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad \cdots (6c)$$

で表される。

得られる応力適応性の議論に用いる一様荷重下の有穴 (楕円孔) 無限板の集中応力評価式は穴底 (穴両端) の最大応力 σ_{0max} と応力集中係数 a との関係

$$\sigma_{0max} = a \sigma_0 \quad \cdots (7a)$$

$$a = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad \cdots (7b)$$

によって表される¹⁰⁾。 ρ は穴底の曲率半径, a は穴の半値幅である。

3. 結果と考察

3.1 諸応力の分布

有穴段ボール箱の変形に働く p および w は作用力であり、穴側板の変形の原動力である。式(2), (3)より $P = \text{一定}$ (51.6 N/mm²) の際の p , w と ΔL_0 との関係を求めると、図4のようになる。図4より ΔL_0 の増加に伴って、 p は大きく減少し、 w は緩やかに減少することがわかる。

部材の強度はその強度に応じた応力の絶対値の最大値に強く影響し、その位置より破壊が生じるものと考

えられる。そこで、本解析より得られた段ボール箱穴付き側板の応力 σ_x , σ_y , σ_1 , σ_{eq} の最大値 σ_{xmax} , σ_{ymax} , σ_{1max} , σ_{eqmax} 位置および σ_x , σ_y , τ_{xy} の最小値 σ_{xmin} , σ_{ymin} , τ_{xymin} , σ_{2min} 位置を図5に示す。

図5より、 ΔL_0 の値によって最大値が変化することがわかる。図5のAおよびCは $\Delta L_0 < 1.6r$ の τ_{xymin} および σ_{eqmax} の位置を、A'およびC'は $\Delta L_0 > 1.6r$ の τ_{xymin} および σ_{eqmax} の位置を示し、Bは $\Delta L_0 < r$ の σ_{1max} の位置を、B'は $\Delta L_0 > r$ の σ_{1max} の位置を示す。このことより、 ΔL_0 の増加によって τ_{xymin} , σ_{1max} , σ_{eqmax} の位置がA, B, CからA', B', C'に変化し、これに応じた変形状態の変化が生じるものと考えられる。

穴付き側板の変形を議論するには応力状態を明らかにする必要がある。そこで、応力 σ_x , σ_y , τ_{xy} の分布を求め、それを図6～8に示す。

図6より、絶対値の大きい $|\sigma_x|$ は、pが働く側板

Fig. 4 Relations between p, w, R, and ΔL_0 .

Fig. 5 Positions of σ_{xmax} , σ_{xmin} , σ_{ymax} , σ_{ymin} , τ_{xymin} , σ_{1max} , σ_{2min} and σ_{eqmax} .

上辺部、穴板上辺中央部に強く生じ、図5に示すように σ_x の最大値 σ_{xmax} および最小値 σ_{xmin} は側板上辺中央、穴上辺中央に各あることがわかる。

図7より、 σ_y の絶対値の大きい値は穴側端、穴上辺中央部に分布し、図5に示すように最大値 σ_{ymax} および σ_{ymin} は穴側端および穴上辺にあることがわかる。

図8より、 τ_{xy} は主に負であり、 $|\tau_{xy}|$ の大きい値は穴側端部および穴上部に分布し、図4に示すように

Fig. 6 Distribution of σ_x .

Fig. 7 Distribution of σ_y .

$|\tau_{xy}|$ の最大値 $|\tau_{xymin}|$ は穴側端やや上にあり, τ_{xy} の最大値 τ_{xymax} はほぼ零であることがわかる。

これらのことより, σ_{xmax} の位置は, 穴側端にはなく, 板上辺の中央に, そして σ_{xmin} の位置は穴上中央にあり, σ_{xmax} は強い曲げ変形, または幅方向引張り変形によって生じたものと考えられる。 σ_{ymax} および τ_{xymin} が穴側端および穴側端部に生じることにより, 側板穴の上開きと, 同時に上方向引張りおよび曲げモーメントが生じ, それに伴い穴側端の強い応力集中が生じるものと考えられる。

3.2 諸応力の最大値

段ボールの穴側板の持上げ力 (作用力) による部材の破壊は, 最大応力, また応力の絶対値の最大値が破壊応力値に達したときに, その位置に生じるものと考えられる。また, 前節に示すように, 諸応力の最大値の発生位置は ΔL_0 によって変わる。このことより, ΔL_0 によって諸最大値も特異な変化を示すものと考えられる。

そこで, σ_{xmax} , σ_{xmin} , σ_{ymax} , σ_{ymin} , τ_{xymin} と ΔL_0 との関係を求め, また式 (6a-c) より σ_{lmax} , σ_{2min} , σ_{eqmax} を求め, それらの値と ΔL_0 との関係を求めた。それらの関係を図 9, 10 に示す。

図 9 より, 上述のように, ΔL_0 の値によって, σ_{xmax} , σ_{ymax} , σ_{ymin} は増加し, $|\sigma_{ymin}|$ は減少し, $|\sigma_{xmin}|$, $|\tau_{xymin}|$ は, 顕著に減少した後, 緩やかに増加することがわかる。そして, $|\sigma_{xmin}|$, $|\tau_{xymin}|$ は 1.6 r 付近で極小になる。

Fig. 8 Distribution of τ_{xy} .

一方, ΔL_0 の増加によって, σ_{xmax} は順次緩やかに増加し, $|\sigma_{xmin}|$ は顕著に増加し, 緩やかに減少するが, ΔL_0 の増加に伴う σ_x の分布の変化は顕著に生じなく, ほぼ同様の分布状態を示すことがみられた。そして, $\Delta L_0 < 1.6r$ ($=20$ mm) では $|\sigma_{xmin}| > |\sigma_{xmax}|$ となり, $\Delta L_0 > 1.6r$ では $|\sigma_{xmin}| < |\sigma_{xmax}|$ となることがわかる。 $\Delta L_0 < 1.6r$ ($=20$ mm) では $|\sigma_{ymin}| > |\sigma_{ymax}|$ となり, $\Delta L_0 > 1.6r$ では $|\sigma_{ymin}| < |\sigma_{ymax}|$ となることがわかる。

以上のことより, ΔL_0 の増加に伴う σ_{xmin} , σ_{ymin} , τ_{xymin} の減少は ΔL_0 の増加に伴う p の集中化の減少による

Fig. 9 Relations between σ_{xmax} , σ_{xmin} , σ_{ymax} , σ_{ymin} , τ_{xymin} , σ_{x0} and ΔL_0 .

Fig. 10 Relations between σ_{lmax} , σ_{xmin} , σ_{eqmax} , u_{y0} and ΔL_0 .

ものと考えられ、 ΔL_0 の増加に伴う $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ の増加は ΔL_0 の増加に伴う曲げモーメントの増加によるものと考えられる。

図10より、 ΔL_0 の増加に伴って、 $|\sigma_{2\min}|$ は緩やかに増加し、 $\sigma_{1\max}$ は緩やかに減少、増加し、 $\sigma_{eq\max}$ はまず強く減少し、緩やかに増加することがわかる。そして、 $\sigma_{1\max}$ は $\Delta L_0=r$ 付近で、 $\sigma_{eq\max}$ は $\Delta L_0=2r$ 付近で極小になる。

3.3 曲げ、応力集中の寄与について

曲げ変形の寄与の議論に必要な曲げ応力、たわみを検討する。穴上部の曲げ変形寄与を議論するためには、長さ ΔL_0 の両端固定はりの曲げ最大応力（はり中央位置の表面） σ_{BM} と ΔL_0 との関係を議論することが必要である。そして、その曲げ応力 σ_B は

$$\sigma_B = M h_c / I$$

$$= p \Delta L_0^2 h_c / (h_0 - r)^3 \quad \cdots \cdots (8a)$$

$$I = T_T (h_c - r)^3 / 12$$

で表され、 σ_{BM} は

$$\sigma_{BM} = p \Delta L_0^2 / (2 h_c^2) \quad \cdots \cdots (8b)$$

で表せる¹⁵⁾。ただし、 M は曲げモーメント

$$M = (p T_T / 8) [(\Delta L_0^2 / 3) - x^2] \quad \cdots \cdots (9a)$$

であり、 h_c は

$$h_c = y - (h_0 - r) / 2 \quad \cdots \cdots (9b)$$

$$y = - (h_0 - r) / 2 \sim (h_0 - r) / 2$$

である。

P ＝一定（51.6 N/mm²）の際、 p は ΔL_0 の増加に伴って大きく減少し、 p によって生じる応力は図9、10より ΔL_0 の増加に伴い大きく増減することがわかる。純曲げ変形では、上下表面の曲げ応力は正負符号が逆であるが、その絶対値は等しい。このことより、穴上部の変形は近似的に曲げと引張り変形との和で表されるものと考えられる。そこで、 $\sigma_{x\min}$ と $\sigma_{x\max}$ との比 R_s

$$R_s = -\sigma_{x\min} / \sigma_{x\max} \quad \cdots \cdots (10a)$$

を用いて、穴上部の変形を議論する。 R_s は変形状態を示す一係数である。本変形は常に $R_s > 0$ であり、 $R_s > 0$ の状態は生じる曲げは上に凸の曲げ変形を示す。そして、 R_s は、純曲げの場合は

$$R_s = 1 \quad (\text{上に凸の曲げ}) \quad \cdots \cdots (10b)$$

曲げと伸び変形の場合は

$$R_s > 1 \quad (\text{上に凸の曲げと伸び}) \quad \cdots \cdots (10c)$$

曲げと縮み変形の場合は

$$R_s < 1 \quad (\text{上に凸の曲げと縮み}) \quad \cdots \cdots (10d)$$

を表す特異な係数である。

そこで、曲げの変形および引張り変形の状態を議論するために、図9、式（10a）より R_s を求め、 R_s と L_0 との関係を図4に示す。図4より、 R_s は、 ΔL_0 の増加

に伴い増加し、 $\Delta L_0 < 1.6r$ 付近では $R_s < 1$ 、 $\Delta L_0 > 1.6r$ 付近では $R_s > 1$ であることがわかる。

一方、 $\sigma_{x\max}$ 、 $|\tau_{xy\min}|$ 、 $\sigma_{1\max}$ 、 $\sigma_{eq\max}$ の最大値が生じる位置は $\Delta L_0 < r$ または $\Delta L_0 < 1.6r$ では穴上辺に、 $\Delta L_0 > r$ または $\Delta L_0 > 1.6r$ では、穴側端にあること、また本形状を考慮すると、 $\sigma_{x\max}$ 、 $|\tau_{xy\min}|$ 、 $\sigma_{1\max}$ 、 $\sigma_{1\max}$ は、上述のようにその位置に生じる曲げモーメントの影響を強く受けるものと考えられる。そして、穴上部を粗近似的な変形として、中央および固定端の位置の曲げモーメント M_0 および M_0^* は式（9a）より

$$M_0 = -M_0^* = p \Delta L_0^2 / 2 \quad \cdots \cdots (11)$$

で表され、またその際の穴上辺中央のたわみ δ_{BM} は

$$\delta_{BM} = p \Delta L_0^4 / (384 EI) \quad \cdots \cdots (12)$$

で表される¹⁵⁾。 E は縦弾性係数（＝2.55×10³N/mm²）である。

穴上辺中央位置の y 方向の変位 u_{y0} は主に開穴変形と穴上辺部の曲げたわみ変位との和であると考えられるが、特に曲げたわみの寄与が大きいものと考えられる。

そこで、式（12b）より δ_B を求め、 u_{y0} 、 δ_B と ΔL_0 との関係を求めた。そして、その関係を図10に示す。図10より、 u_{y0} 、 δ_B は ΔL_0 の増加に伴って大きく増加するが、 u_{y0} の値が δ_B の値より10倍程度に大きいことがわかる。この u_{y0} の値が大きくなることは $R_s > 0$ による上に凸の曲げ、また穴の開穴変形の寄与が強く生じたことによるものと考えられる。

図10の ΔL_0 の増加による u_{y0} 、 δ_B の増加および式（10b～d）より、このような穴上辺部の変形挙動は、 ΔL_0 の増加によって穴上部の曲げ増加が生じると同時に、その部の長さ増加に伴う引張り変形が大きく生じたことによるものと考えられる。

一様荷重を受ける有穴（楕円孔）無限板の集中応力評価式（7a）によって求めた穴底の最大応力 $\sigma_{0\max}$ 値、 P と形状との関係を図9に示す。ただし、 ρ 、 a 、 σ_0 を

$$a = r + (\Delta L_0 / 2), \rho = r \quad \cdots \cdots (13a)$$

$$\sigma_0 = p [r / (r + \Delta L_0)] \quad \cdots \cdots (13b)$$

とした。図7より、 $\sigma_{0\max}$ は ΔL_0 の増加に伴い増加し、その増加は $\sigma_{y\max}$ の際と同様に緩やかになることがわかり、応力評価式の値は顕著に小さく、1/10程度であることがわかる。このことは本穴箱変形に寄与する総荷重が穴上辺域のみに働いたために、外力の寄与が強く生じ、応力集中の寄与が強く現れたものと考えられる。

これらの結果より、持上げ力を受ける段ボール箱穴付き側板の諸応力は特異な分布状態を示し、諸最大応力は ΔL_0 の増加によって特異な変化を示すことがわか

った。

4. 結 言

段ボール箱側板の手掛け穴(両端の半円弧:半径 $r = 12.5 \text{ mm}$)に板面に沿った一様分布の持上げ力が働く場合の弾性応力解析を有限要素解析法によっておこない,その諸応力の分布状況および諸応力成分,応力の最大値と穴幅との関係を議論した。議論する箱の形状は,横 $240 \sim 302.5 \text{ mm}$,高さ 220 mm ,奥行き 440 mm ,板厚 $T_T = 5.16 \text{ mm}$ とした。また,側板の穴中央は上辺より 37.5 mm の位置に,穴の高さは 25.0 mm にし,持上げ力は $T_T \times 10 \text{ N/mm}^2$ にした。

得られた結果は以下のようなものである。

- (1) 穴幅方向(板の縦方向)垂直応力 σ_y の絶対値の大きい値は,作用応力 p が働く穴上辺中央部にあり, $|\sigma_x|$ の最大値は,穴幅の変化値 $\Delta L_0 (= \text{穴幅} - 2r) < 1.6r$ では穴上辺中央に, $\Delta L_0 > 1.6r$ では板上辺中央にある。 ΔL_0 の増加によって $\sigma_{x\max}$ は増加,減少し, $|\sigma_{x\min}|$ は減少する。そして, $\sigma_{x\max}$ の極大値が $\Delta L_0 = 1.6r$ に生じる。
- (2) 穴高方向垂直応力 σ_y の大きい値は穴側端付近にあり,最大値 $\sigma_{y\max}$ は穴両側端に, σ_y の最小値 $\sigma_{y\min}$ は穴上辺中央にある。
 $|\sigma_x|$ の最大値は, $\Delta L_0 < 1.6r$ では穴上辺中央に, $\Delta L_0 > 1.6r$ では穴側端にある。穴幅の増加に伴い, $\sigma_{y\max}$ は増加し, $\sigma_{y\min}$ は減少する。
- (3) せん断応力 τ_{xy} の大きい値は穴側端や上部にあり, $|\tau_{xy}|$ の最大値 ($= |\tau_{xy\min}|$) は, $\Delta L_0 < 1.6r$ では穴上辺中央に, $\Delta L_0 > 1.6r$ では穴側端より $r/2$ 上にある。 ΔL_0 の増加に伴い, $|\tau_{xy\min}|$ は減少,増加する。そして, $|\tau_{xy\min}|$ の極大値は $\Delta L_0 > 1.6r$ に生じる。
- (4) $|\sigma_x|$, $|\sigma_y|$, $|\tau_{xy}|$ の最大値は, $\Delta L_0 > 2r$ では曲げ変形および幅方向引張り変形によって, $\Delta L_0 < 1.6r$ では p の集中化および応力集中によって生じる。
 $\sigma_{x\min}$, $\sigma_{y\min}$, $\tau_{xy\min}$ の減少は穴幅の増加に伴う持上げ応力の減少によって生じる。穴幅の増加に伴う $\sigma_{x\max}$, $\sigma_{y\max}$ の増加は穴幅の増加に伴う曲げモーメントの増加によって生じる。
- (5) ΔL_0 の増加による穴上辺中央部の上方向の変位はその域の純曲げのたわみと同様な増加を示す。穴上辺の変位は曲げのたわみの 10 倍程度に大きい。
- (6) 一様荷重を受ける有穴(楕円孔)無限板の集中応力評価式によって求めた最大応力 σ_{immax} は本要

素解析結果の $\sigma_{y\max}$ と ΔL_0 との関係は本要素解析結果と同様になる。評価式の応力集中が 1/10 程度に小さい。この低下は,寄与する総荷重(持上げ力)が穴上変域のみに働き,その力の強い寄与によって生じる。

これらの結果より,本変形は穴上部は強い曲げおよび引張り変形が生じ,穴側部に応力集中が強く生じることがわかった。また,持上げ力を受ける段ボール穴側板の諸応力は特有な状態を示し,穴幅の増加によって,諸最大応力も特異な変化を示すことがわかった。したがって,本結果は,手掛け穴付き段ボール箱の強度設計に当たり,重要な設定資料となり,段ボール工学上有意義なものであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 例えば,段ボール百科編集委員会:段ボール百科,一律書房, p. 580-594 (1970)
- 2) たとえば,倉正嗣:応用弾性学,共立全書,131-135 (1966)
- 3) たとえば, S. Timoshenko and J. N. Goodiner: Theory of Elasticity, McGraw-Hill, p. 78-85
- 4) たとえば,河本実:材料試験,朝倉書店, p. 31-37
- 5) たとえば, S. Timoshenko and J. N. Goodiner: Theory of Elasticity, McGraw-Hill, p. 131-145
- 6) 松島成夫,奥田隆宏,宮内治,野沢光治:紙パ技協誌 36 (3) 377-387 (1982)
- 7) 松島成夫,矢野忠,松島理:紙パ技協誌 54 (988-995 (2000)
- 8) 松島成夫,矢野忠,松島理:紙パ技協誌 55 (1162-1171 (2001)
- 9) 松島理,松島成夫:日本機械学会論文集 66 (651 A) 2015-2021 (2000);松島成夫,松島理:紙パ技協誌 56 (12) 1793-1801 (2002)
- 10) 例えば, J. F. Nott (訳宮本博),破壊力学の基礎,(1977),49-61;清家清一郎,材料力学,共立出版,167-172, (1978)
- 11) Alean Jones: Tappi, 51 (5), 203-209 (1968)
- 12) 石湖浩,木村稔,吉沢昭宣,佐久田博司:日本機械学会論文集 59 (557 A), 156-162 (1993)
- 13) 例えば,清家政一郎:材料力学,共立出版,23-29 (1978)
- 14) 例えば,山田嘉昭:塑性力学,日刊工業新聞,44-55, (1965)
- 15) たとえば,渥美光,鈴木幸三,三ヶ田賢次:材料力学,森北出版,97-105 (1976)

(受理: '03.1.29)

システムを取りつけることになっている。

このシステムは既に日本でも JR の電力リモート監視、セイコーエプソン等のファクトリーオートメーション等に使われているが、エネルギー管理指定事業法に関連し、製紙・パルプ業界でも今後、幅広く使われていくものと考ええる。VERIS 社のセンサー・システムはシンプルで高精度、低価格で力率・無効電力等の電力の品質が簡単に測定でき、省電力システム設計が可能になる。

(本文 73 ページ)

次亜塩素酸塩漂白過程から排出されるクロロホルムの削減

森林総合研究所 成分利用研究領域 真柄謙吾、オロフ カールソン、細谷修二

平成 9 年に発表された製紙工場からのクロロホルム発生量調査以降、製紙連合会の自主管理計画に沿ってクロロホルム発生量は順調に減少している。これは、ハイポの過酸化水素への転換や漂白プラントの ECF 化によるところが大きい。しかし、すべてのハイポ漂白を過酸化水素へ置き換えることは、両者の反応機構の違いから困難であり、また ECF 化は中小企業にとってすぐに対応できるほど低コストではない。このような状況を鑑みて、ハイポ漂白中に発生するクロロホルムを、その漂白条件を変更することによって他の無害な物質へと変換することを検討した。

クロロホルムは温度 70℃、pH 12 以上の条件下において水酸化アニオンにより求核的に攻撃を受け、脱ハロゲン化を経てギ酸へと変換される。この反応機構を利用することによって、漂白中に発生するクロロホルムを分解できる可能性がある。これを確認するために、上記反応条件下でグアヤコールと次亜塩素酸塩を反応させクロロホルムの発生を確認したところ、その発生はほぼ完全に抑制されることが明らかとなった。また、クラフトパルプや DIP のハイポ漂白においても、上記反応条件を適応することでパルプ品質を劣化させることなくクロロホルムの発生を抑制することが可能であった。さらに、反応系を密閉せずにハイポ漂白を行っても、発生するクロロホルムの 90% は大気中に拡散することなく系内でギ酸へと変換されることが明らかとなった。

(本文 76 ページ)

段ボール箱手かけ穴の応力解析

一穴幅と応力との関係一

愛媛大学地域共同研究センター 松島 理

愛媛大学名誉教授 松島 成夫

有限要素法によって、段ボール箱側板（幅 $L=240\sim 302.5$ mm、高さ 207.5 mm）の手かけ穴（平行部の長さ $\Delta L_0=0.0\sim 62.5$ mm、穴側端は半円弧：半径 $r=12.5$ mm）に一樣持上げ応力 p が働く場合の弾性応力解析をおこない、その応力状態を議論した。

絶対値の大きい幅および高さ方向の垂直応力 σ_x 、 σ_y およびせん断応力は穴の上辺および側端付近に集中する。 $|\sigma_x|$ の最大値は、 $\Delta L_0 < 1.6r$ では穴上辺に、 $\Delta L_0 > 1.6r$ では板上辺の中央位置にある。 $|\sigma_y|$ の最大値は、 $\Delta L_0 < 1.6r$ では穴上辺に、 $\Delta L_0 > 1.6r$ では穴側端にある。 τ_{xy} は負で、 $|\tau_{xy}|$ の最大値は、 $\Delta L_0 < 1.6r$ では穴上辺に、 $\Delta L_0 > 1.6$ では穴側端から $r/2$ 上部位置にある。

ΔL_0 の増加に伴って、 σ_x 、 σ_y の最大値は増加し、 σ_y の最小値の絶対値は減少する。そして、 ΔL_0 の増加に伴って、 σ_x 、 σ_y の最小値の絶対値は減少、増加する。

(本文 84 ページ)