

一般論文

箱サイズを限定しない0201形式段ボール箱の圧縮強度推定式

高山 崇***、齋藤 勝彦**、東山 哲***

Estimating Method of Compression Strength for Regular Slotted Container of Any Size

Takashi TAKAYAMA^{*,**}, Katsuhiko SAITO^{**} and Akira HIGASHIYAMA^{***}

標準的な箱形式(JIS 0201形式)の圧縮強度推定は、Kellicutt式やMcKee式が広く利用されている。しかしながら通常使用する箱サイズに限定して簡便に計算できるように式を簡略化しており、このため幅または高さが約20cm以下の箱に対しては誤差が大きくなり、強度推定ができない。近年では、通信販売用の箱等、従来の一般的なサイズの箱の範囲を下まわり小さな箱や扁平又は狭長の箱を使用する機会が増えており、これらの段ボール箱の圧縮強度を推定する必要が生じてきた。本研究では簡略化する前のMcKee式に加え、新たに圧潰を起こす場合の計算式を組み合わせ、Cフルートの段ボールシートにおいて、箱サイズにかかわらず強度計算可能な一般式を構築した。McKee式を用いた計算では段ボールシートの縦横方向の曲げ剛性、エッジクラッシュ値が必要で、材質により都度、これらの物理的な特性値を求めなくてはならない。本研究では簡便に利用できるように、エッジクラッシュ値のみで圧縮強度を推定できることを確認した。

The Kellicutt and McKee formulae are widely used for estimating the compression strength of regular slotted containers. However, they simplified these formulae by limiting the box sizes to those of typical boxes, which enabled us to easily and conveniently carry out the calculations. For this reason, we cannot estimate the compression strength for boxes with a width or height of 20 cm or less because of the large error involved.

The use of small, flat, or narrow boxes whose sizes exceed the range of typical box sizes, such as those used for mail-order sales, has recently been increasing; the need has therefore arisen to estimate the compression strength of these boxes. In this study, in addition to the McKee formula before simplification, we combined a new formula for collapsing failure and constructed a general formula that can estimate the compression strength for a regular slotted container of any size.

Calculating by the McKee formula requires knowledge of the bending stiffness and of the edgewise compression strength; these physical values must be obtained for each corrugated board. In this research, we confirmed that the compression strength can be estimated with only the edgewise compression strength instead of the bending stiffness.

キーワード: 段ボール箱、圧縮強度式、圧潰、座屈、McKee式

Keywords: Corrugated Box, Compression Strength Formula, Collapse, Buckling, McKee Formula

* キューピー株式会社 技術ソリューション研究所 〒182-0002 東京都調布市仙川町2-5-7
Kewpie Co., Ltd., Institute of Technology Solutions, R&D Division., Sengawa Kewport,
2-5-7, Sengawa-Cho, Chofu-Shi, Tokyo, 182-0002, Japan, Email: takashi_takayama@kewpie.co.jp

** 神戸大学輸送包装研究室, Transport Packaging Laboratory, Kobe University

*** レンゴー株式会社, Rengo Co., Ltd.

1. 緒言

標準的な段ボール箱形式(JIS 0201 形式)の圧縮強度計算は Kellicutt 式¹⁾や McKee 式²⁾が広く実用的に利用されている。前報³⁾では標準的な箱形式に限定せず、様々な箱形式の圧縮強度計算を可能にするため、段ボール箱の荷重担うことが出来るパネル(段方向に荷重が加わるパネル)に着目し、各々のパネルの圧縮強度を求めた後に、合算して箱全体の圧縮強度を計算できることを報告した。しかしながら、パネルの圧縮強度計算には Kellicutt 式又は McKee 式を変形して用いたため、両式の適用範囲外である狭幅のパネルの計算で誤差が大きくなり、このようなパネルを持つ箱の計算には適用できなかった。

小型の箱は近年、通信販売用の箱などで広く用いられるようになり、設計時にあらかじめ強度推定する必要性が増加してきた。そこで、本研究では JIS 0201 形式の箱を構成するパネルの強度計算においてサイズに制約を受けない、新たなパネルの圧縮強度推定式を検討した。

狭幅のパネルは座屈を伴わず、圧潰によってパネルが破壊するため、圧縮強度はパネル幅に比例する^{4) 5)}。そのため、座屈を起こすパネルを前提に構築された Kellicutt 式や McKee 式では、圧潰を起こすパネルの圧縮強度を正確に求めることは式の特長上も困難である。そこで圧縮強度計算を、パネルの破壊様式にあわせ、

圧潰と座屈の計算式にわけて計算することを検討した。

圧潰を起こすパネルの計算には、パネル幅に比例して圧縮強度が増加する概念を用い、座屈を起こすパネルの計算には、McKee 式を適用することとした。

ここでの McKee 式とは、現在広く用いられている簡略式ではなく、NACA (National Advisory Committee for Aeronautics: アメリカ航空諮問委員会)⁶⁾が等方性のパネルにおいて経験的に導いた関係式を McKee が段ボール用に変形したものであり、広く利用されている McKee 式の原型となる式である。

本研究によって、パネルサイズに制約を受けない圧縮強度計算方法と、前報³⁾のパネルの合算による箱圧縮強度計算方法を組み合わせることで、サイズ・箱形式にかかわらず、段ボール箱の圧縮強度推定ができるようになると思われる。

2. 圧縮強度式の構築概念

2.1 パネルの圧潰と座屈破壊

パネルに荷重を加えていき、座屈限界荷重を過ぎるとパネルがたわみはじめる。

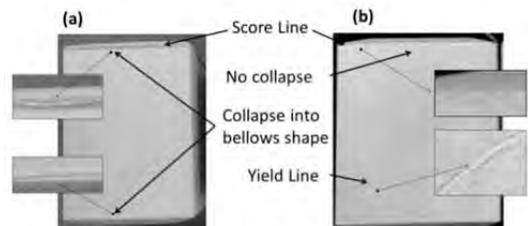


Fig. 1 Box failure modes: (a) collapsing failure and (b) buckling failure.

さらに荷重を加えるとパネルはたわみに耐えられず、折れ曲がり、塑性変形を起こす。これが座屈破壊である(Fig.1(b))。座屈破壊は通常の大サイズの段ボール箱で観察される破壊様式で、箱の角から 45°程度に伸びる降伏線が現れることで確認できる。

一方、座屈限界荷重が高いたわみ難いパネルは、段方向に圧縮されるにしたがい、たわまず垂直方向に圧縮破壊(圧潰)を起こす(Fig.1(a))。0201形式の箱の圧潰はパネルの上下の罫線部分から蛇腹状に破壊を起こす。

Urbanik 等によると、パネルが座屈破壊を起こすか圧潰を起こすかの境界条件は、以下の様に座屈限界荷重と圧潰荷重の大小関係で決定づけられる⁵⁾。

圧潰を起こす条件：

$$\text{座屈限界荷重} \geq \text{圧潰荷重}$$

座屈破壊を起こす条件：

$$\text{圧潰荷重} > \text{座屈限界荷重}$$

単位パネル幅あたりの圧潰荷重は常に一定であるのに対し、座屈限界荷重はパネルサイズによって変化する。一般に高さの低いパネルでは座屈限界荷重は高く、たわみ難く圧潰を起こしやすくなる。また狭幅のパネルでも、箱の稜がパネルを垂直に支える効果が大きいため、座屈限界荷重が高くなり、圧潰を起こしやすくなる。

圧潰と座屈破壊は破壊様式が異なるため、それぞれの破壊メカニズムに合わせ

て式を検討する。

2.2 座屈破壊を起こすパネルの計算概念

簡略化する前の McKee 基式は、これまで提案されてきた圧縮強度式の中でも材料力学から論理的に構築されおり、式を変形しても基となる材料力学の法則と矛盾しない。さらに基式は段ボールシートの力学的な物理量と、パネル高さと同幅の幾何学的な物理量を基に強度計算する。この点において本研究の目的であるパネルサイズの制約を除いた式の構築には最適と考え、McKee 基式を基に式を変形することとした。参考のため、Appendix 1 に Kellicutt 式と McKee 簡略式を示す。

McKee 式の基となる式は NACA で航空機用の平板の圧縮強度の計算方法として構築され、以下の式で示される⁶⁾。

$$P = c(P_m)^b(P_{cr})^{1-b} \quad \dots (1)$$

但し、 P ：単位幅あたりの圧縮強度
 P_m ：材料固有の圧縮強度
 P_{cr} ：座屈限界強度
 c, b ：無次元の係数

厳密には P_{cr} はパネルがたわみ始めるときの強度であり、座屈破壊を起こす強度でないが、NACA では実験的にパネルの圧縮強度は圧潰に関する項 P_m と座屈に関する項 P_{cr} の荷重付調和平均で表せることを見出した。

McKee は P_m をエッジクラッシュテスト値 (Tappi T-811)、 P_{cr} を直交性のパネルの座屈限界強度式とし、以下の式(2)

に変形した。

$$P = c(ECT)^b (12k_{cr} \sqrt{D_{MD} D_{CD}} \div W^2)^{1-b} \quad \dots (2)$$

$$\text{但し、} k_{cr} = \frac{\pi^2}{12} \left(\sqrt{\frac{D_{MD} \times h^2}{D_{CD}}} + \frac{W^2 n^2}{\sqrt{D_{MD} \times h^2}} + 1 \right)$$

k_{cr} : 座屈係数

ECT : エッジクラッシュテスト値

D_{MD} : 幅方向の曲げ剛性

D_{CD} : 高さ方向の曲げ剛性

W : パネル幅 h : パネル高さ

n : 縦方向の半波数

$$n = j \left(\sqrt{j(j-1)} \leq \sqrt[4]{D_{MD} D_{CD}} \frac{h}{W} \leq \sqrt{j(j+1)} \right)$$

式(2)は単位幅あたりの圧縮強度式なので、パネル幅Wを乗じることでパネルの圧縮強度を求めることができる。したがって、式(2)は以下の様に変形される。

$$\begin{aligned} P_{\text{panel}} &= c(ECT)^b (12k_{cr} \sqrt{D_{MD} D_{CD}} \div W^2)^{1-b} \times W \\ &= c(ECT)^b (12k_{cr} \sqrt{D_{MD} D_{CD}})^{1-b} \times W^{2b-1} \quad \dots (3) \end{aligned}$$

ここで式(3)を、座屈を起こすパネルの圧縮強度計算式とする。

2.3 圧潰を起こすパネルの計算概念

圧潰を起こすパネルは、Fig.1(a)の様に上下の罫線部分が蛇腹状に潰れながら破壊する。圧潰を起こす限り、罫線部分が荷重を支えながら破壊が進むため、圧縮強度は罫線部分の幾何学的な物理量であるパネル幅に比例し、さらに圧潰に関す

る力学的な物理量 ECT 値に比例する。ここで、圧潰を起こすパネルの圧縮強度計算式を、

$$P_{\text{panel}} = d(ECT) \times W \quad \dots (4)$$

但し、 d : 無次元の係数とする。

高山らのモデル系の箱を用いた研究では、無次元の係数 d は 0.6 倍との報告がある³⁾。

2.4 圧潰、座屈破壊を加味した計算概念

パネルの高さ、幅を変化させるとどのように圧縮強度が変化するかを俯瞰するため、

LB210/MC180/LB210 CF

ECT : 6.88 kN/m

D_{CD} : 6.29×10^{-3} kN · m

D_{MD} : 1.41×10^{-2} kN · m

C:0.5, b:0.76 (McKee の仮決め係数²⁾)

の物理的特性を持つ段ボールシートを例に座屈破壊を起こすパネルの計算式、式(3)で表される圧縮強度の俯瞰図を Fig.2 に示す。

パネル高さを 0.3m に固定してパネル幅を増加させると、放物線を横に 90°傾けた形状のパネル幅－圧縮強度曲線となっている。これは McKee 式 (簡略式) で計算される圧縮強度がパネル幅の 1/2 乗に比例していることを示している。

しかしながら、パネル高さを 0.1m に固定してパネル幅を増加させると、パネル幅にほぼ比例して圧縮強度が増加する。

さらにパネル幅を 0m に近づけるにしたがって、圧縮強度は無限大に発散して行く。このようにパネル高さが低くなると圧縮強度が高く、更には発散する理由は、座屈係数 k_{cr} の項の効果で、高さが低くなるとパネルがたわみ難くなり、座屈限界強度が増加するためである。

計算上、座屈限界荷重が高くなるにともない、パネルの圧縮強度も増加するが、実際のパネルは座屈限界荷重が圧潰強度を超えると圧潰を起こすため、無限大に発散することはない。したがって、式(3)は無限に発散する点が実際のパネル強度と矛盾する。

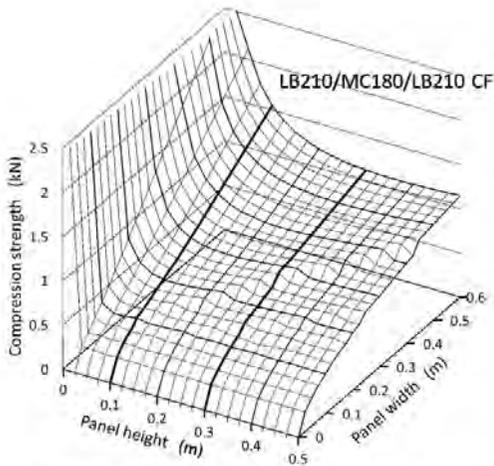


Fig. 2 3-dimensional plots of compression strength of panels by Eq. 3.

同様に、圧潰を起こすパネルの式、式(4)で表される圧縮強度の俯瞰図を Fig.3 に示す。但し係数 d は高山らのモデル箱を用いた研究報告に従って、0.6 と仮定して計算した。

Fig.2 と Fig.3 の俯瞰図を比べると、パネル高さが 0m に近い部分や、パネル幅 0.1m 以下の部分で、Fig.3 の圧縮強度の方が Fig.2 の圧縮強度に比べ低い部分がある。

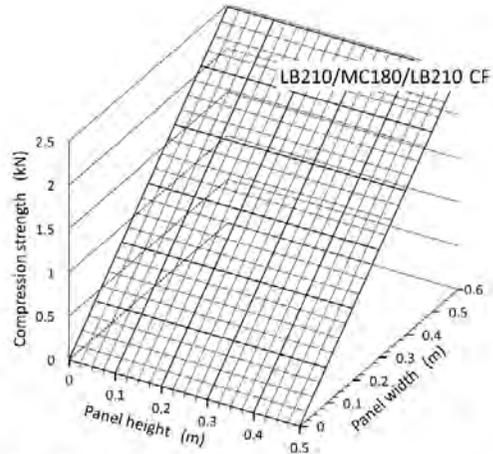


Fig. 3 3-dimensional plots of compression strength of panels by Eq. 4.

実際のパネルは式(3)で高い圧縮強度が計算されても、式(4)の圧潰強度を超えると破壊してしまうため、式(3)と式(4)を比較し、圧縮強度が低い値をそのパネルの圧縮強度と見なすことが出来る。両式の低い方の値をとった俯瞰図を Fig.4 に示す。

Fig.4 の黒枠で囲んだ部分が式(4)の値をとる部分であり、高さが低い又は幅が狭いパネルで圧潰が起こっていることを示している。

以上の様に式(3)と式(4)を比較し、式(3)が式(4)よりも高い圧縮強度を示す場合は圧潰が起こっているとし、式(4)の値

を圧縮強度とすることで、予め破壊様式を予測できると共に圧縮強度もパネルサイズに係らず計算できると考えられる。

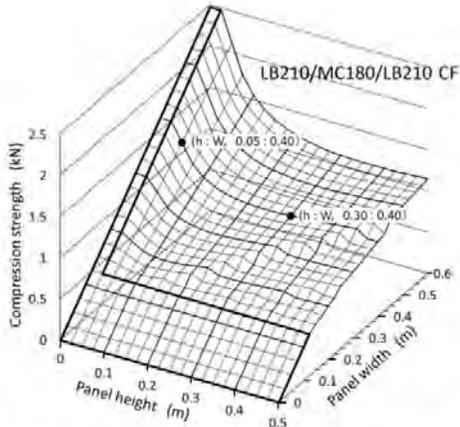


Fig. 4 3-dimensional plots of lesser compression strength of panels by Eq. 3 & Eq. 4.

3. 実験

3.1 実験方法

前述の圧縮強度式の構築概念に従って、式(3)と式(4)の係数 b , c , d を決定する。使用材質は C フルートで強度を強・中・低程度の 3 水準に設定し、パネルサイズによる圧縮強度変化を測定した。使用した段ボールシートの材質と測定条件を Table 1 に示す。

Table 1 Materials and test conditions.

Material Supplier: Rengo Co., Ltd.	ECT(kN/m) TAPPI-T811	D_{C0} (kN·m) TAPPI-T836	D_{R0} (kN·m) TAPPI-T836
LC160/MC120/LC160 CF	4.22	4.48×10^{-3}	1.00×10^{-2}
LB210/MC180/LB210 CF	6.88	6.29×10^{-3}	1.41×10^{-2}
LB280/MA200/LB280 CF	9.73	8.32×10^{-3}	2.03×10^{-2}

Compression test condition	
Temperature	23°C
Humidity	50% RH
Compression rate	10 mm/min
Platen type	fixed

パネル 1 枚当りの圧縮強度をもとめるため、幅、長さと同じで、4 側面が同形状の箱で測定した (Fig.5)。さらに、正確な圧縮強度を測定するため、天面、底面の前後内フラップを固定して圧縮試験を行った。測定は各条件を 5 回繰り返し測定し平均値を求め、パネル 1 枚当りの圧縮強度は求めた箱の圧縮強度平均値を 4 で除することでもとめた。

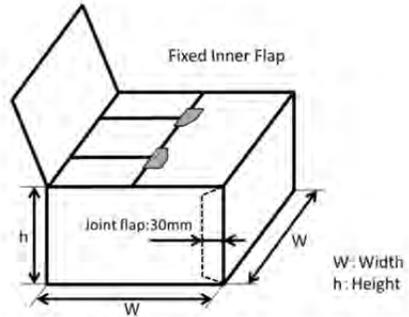


Fig. 5 Schematic of box structure used to measure the compression strength of panels.

3.2 測定結果

パネル 1 枚当たりの圧縮強度測定結果を Table 2 に示す。表中の c , c/b , b の記号はそれぞれ、圧縮試験時に、圧潰: c 、圧潰・座屈破壊の混在: c/b 、座屈破壊: b を起こしたことを示している。

4. 圧縮強度計算式の構築

4.1 圧潰を起こすパネルの計算式

Table 2 の全材質の高さ 0.075m のパネルは全て圧潰した。前述のように圧潰を起こすパネルの圧縮強度はパネル幅に比例するため、Fig.6 のグラフより最小二乗法により式(4)の d (ECT) と横軸切片を求

めた。

Table 2 Compression strength per panel by measured by square boxes.

LC160/MC120/LC160 CF								
(m)	Compression strength (kN)							
h \ W	0.075	0.10	0.15	0.20	0.25	0.3	0.45	0.60
0.075	0.241c	0.295c		0.514c		0.706c	0.859c	
0.10		0.297c		0.503c		0.667c	0.732c	
0.125	0.236c	0.275c		0.462c		0.567c	0.655c/b	
0.15		0.281c		0.428c/b		0.558b		
0.20	0.230c	0.285c		0.411c/b		0.520b		
0.30	0.235c	0.317c				0.479b	0.622b	
0.40				0.475c/b		0.512b		
0.50	0.233c	0.294c						0.604b

LB210/MC180/LB210 CF								
h \ W	0.075	0.10	0.15	0.20	0.25	0.3	0.45	0.60
0.075	0.409c	0.503c	0.723c	0.887c	1.018c	1.148c		
0.10		0.476c	0.628c/b	0.831c/b		1.165c/b	1.534b	
0.125	0.403c	0.514c	0.592b	0.768b		1.104b	1.035b	
0.15		0.507c	0.544b	0.654b		0.906b	0.867b	
0.20	0.408c	0.515c	0.642b	0.680b		0.860b		
0.30	0.414c	0.512c	0.642b			0.850b	0.908b	
0.40				0.746b		0.798b		
0.50	0.396c	0.497c						0.973b

LB280/MA200/LB280 CF								
h \ W	0.075	0.10	0.15	0.20	0.25	0.3	0.45	0.60
0.075	0.569c	0.718c	0.976c	1.161c	1.440c	1.630c		
0.10		0.739c	0.967c/b	1.207c		1.305c/b	1.521c/b	
0.125	0.569c	0.700c/b	0.853b	0.951b		1.181b	1.225b	
0.15		0.700c/b		0.847b		1.121b	1.211b	
0.20	0.569c	0.728c/b	0.898b	1.017b		1.046b		
0.30	0.567c	0.719c/b	0.943b			1.133b	1.272b	
0.40				1.015b		1.173b		
0.50	0.584c	0.736c/b						1.238b

c:collapsing failure, c/b: collapsing or buckling failure, b:buckling failure

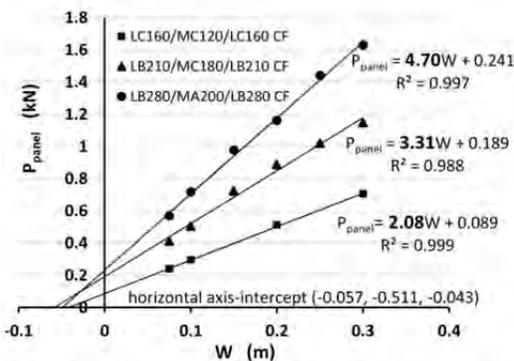


Fig. 6 Relationship between panel width (W) and compression strength (P_{panel}) in the 0.075-m-high panels.

Fig.6 より、 $d(ECT)$ は段ボールシート

の材質強度に応じて、

LC160/MC120/LC160 CF: 2.08 kN/m

LB210/MC180/LB210 CF: 3.31 kN/m

LB280/MA200/LB280 CF: 4.70 kN/m

となり。また、横軸切片は、

LC160/MC120/LC160 CF: -0.043m

LB210/MC180/LB210 CF: -0.057m

LB280/MA200/LB280 CF: -0.051m

となり、平均で-0.05mとなった。

Fig.6 を見ると、本来はパネルの圧縮強度はパネル幅に比例するため、原点を通る直線で近似されると考えられるが、平均して-0.05mの横軸切片を通ることから、圧縮強度はパネル幅に0.05mを加えた値に比例する結果となった。

さらに、Fig.6 より求めた $d(ECT)$ の係数 d を求めるために、ECT 値と $d(ECT)$ の相関を最小二乗法にて求めた (Fig.7)。Fig.7 より、係数 d を 0.483 と決定した。

したがって、圧潰を起こすパネルの圧縮強度式は以下の式(5)とする。

$$P_{panel} = 0.483(ECT) \times (W + 0.05) \dots (5)$$

但し、ECT : (kN/m)、W : (m)

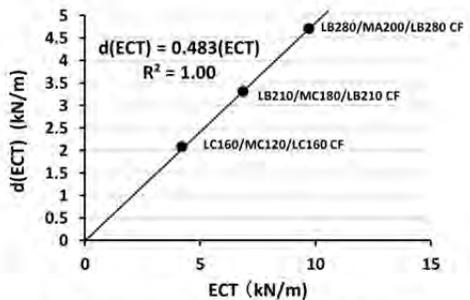


Fig. 7 Relation between ECT and $d(ECT)$.

4.2 狭幅パネルの圧潰

Table 2 の全材質の幅 0.075m のパネルは全て圧潰し、高さを変化しても各々の材質ごとに一定の圧縮強度を示している。この現象は幅 0.10m のパネルでも起きており、狭幅のパネルは左右両端の稜が垂直にパネルを保持する影響が強く、たわまず圧潰するものと考えられる。

また、式(5)によって得られた、幅 0.075m のパネルの圧縮強度推定値はそれぞれ、

LC160/MC120/LC160 CF: 0.255 kN

LB210/MC180/LB210 CF: 0.415 kN

LB280/MA200/LB280 CF: 0.587 kN

となり、Table 2 の値と一致し、同じ圧潰を起こすパネルの式(5)で計算できる。

4.3 座屈を起こすパネルの計算式

Table 2 で圧潰・座屈破壊の混在または座屈破壊を起こしたパネルの圧縮強度をもとに、式(3)の係数を求めた。最小二乗法で、係数 b と c を求めると、c=0.600、b=0.604 となり、座屈を起こすパネルの圧縮強度式を以下の式(6)とする。

$$P_{\text{panel}} = 0.600(\text{ECT})^{0.604} \times \left(\pi^2 \left(\frac{\sqrt{\frac{D_{\text{MD}}}{D_{\text{CD}}} \times h^2}}{W^2 n^2} + \frac{W^2 n^2}{\sqrt{\frac{D_{\text{MD}}}{D_{\text{CD}}} \times h^2}} + 1 \right) \sqrt{D_{\text{MD}} D_{\text{CD}}} \right)^{0.396} \times W^{0.208} \quad \dots (6)$$

4.4 圧縮強度式と実測値の相関

式(5)の圧潰を起こすパネルの強度計算式と式(6)の座屈を起こすパネルの強度計算式の低い方の値を圧縮強度とする考えにより、実験に用いたパネルサイズの圧縮強度を計算で求め、実測値との比較を行った (Fig.8)。

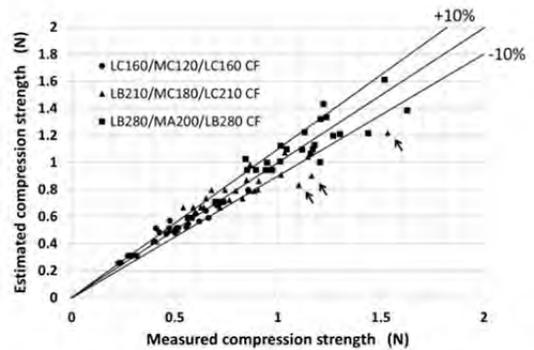


Fig. 8 Comparison of estimated compression strength of panel with measured by boxes.

実用的に、広く利用されている McKee 式の計算値の平均誤差は 6.1%²⁾であったのに対し、本研究で求めた計算値の平均誤差は 7.0%であった。McKee 式の平均誤差より劣るものの、実用的な誤差範囲と考えられる。

平均誤差が大きくなった理由として、強度計算式の特長上、誤差が大きくなる領域の計算も含んでいるためと考えられる。Fig.4 の俯瞰図を見るとパネル高さ 0.05m、幅 0.40m の点の俯瞰図平面は切立ち、傾斜がきつくなっている。この領域の圧縮強度はわずかな条件の違いで大きく値が変化することが予想される。

一方、パネル高さ 0.30m、幅 0.40m の点の俯瞰図平面はなだらかな傾斜で、多少の条件の違いでも同じような値をとることが理解できる。実際に Fig.8 の誤差の大きな3点は(図中、矢印で示す)、いずれも俯瞰図平面上の傾斜のきつい位置での計算結果であった。

4.5 簡易計算方法

McKee が式を構築した 1960 年代は関数電卓や表計算ソフトがなく、複雑な計算を避けるため、簡易式が考案された。しかしながら、現在はパソコンの普及に伴いその制約は問題とはならず、式(6)のような複雑な式でも容易に計算できるようになった。

しかしながら、計算する際に、ECT 値と縦・横方向の曲げ剛性を測定しなければならず、個々の段ボールシートについて都度測定することは煩雑となる。

McKee は式を簡略化するとともに、計算に必要な物理的な特性値を、最終的に ECT 値と段ボールの厚みのみとし、曲げ剛性の測定をせずに、算出できるようにした²⁾。同様に Kelliecutt も総合リングクラッシュ値のみを用いて強度計算ができるようにし、段ボールシートの物理的な特性値ではなく、段ボール原紙の特性値を用いて計算できるようにした¹⁾。

そこで、ECT 値から曲げ剛性を推定できるかを検討した。McKee も簡略化する際、同じ検討をしており、以下の変換式

を報告している。

$$\sqrt{D_{MD}D_{CD}} = 66.1 \times (ECT) \times h^2 \cdot \cdot \cdot (7)$$

h : 段ボールシート厚み

式(7)は A、B、C フルートすべてに対しての変換式を提案しているが、相関があまり高くなく²⁾、本研究では、実験で使った C フルートについての相関を求めることにした。

Fig.9 に示すように、相乗平均曲げ剛性は ECT 値と高い相関があり、以下の式(8)として表すことが出来る。

$$\sqrt{D_{MD}D_{CD}} = 1.13 \times 10^{-3}(ECT) + 1.81 \times 10^{-3} \cdot \cdot \cdot (8)$$

$\sqrt{D_{MD}D_{CD}}$: 相乗平均曲げ剛性 (kN・m)

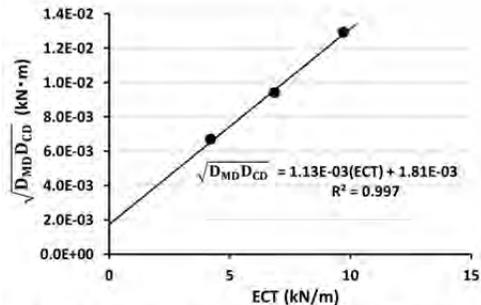


Fig. 9 Relation between ECT and the composite flexural stiffness.

Table 3 Physical Characteristics for each corrugated boards.

Corrugated board	ECT (kN/m)	$\sqrt{D_{MD}D_{CD}}$ (kN・m)	$\sqrt{\frac{D_{MD}}{D_{CD}}}$
LC160/MC120/LC160 CF	4.22	6.69×10^{-3}	1.49
LB210/MC180/LB210 CF	6.88	9.41×10^{-3}	1.50
LB280/MA200/LB280 CF	9.73	1.29×10^{-2}	1.57

さらに Table 3 より $\sqrt{D_{MD}/D_{CD}}$ に関しては、どの段ボールシートもほぼ同様の値をとるため、平均値の 1.52 を適用する

こととした。

$\sqrt{D_{MD}D_{CD}}$ を ECT 値から求め、更に $\sqrt{D_{MD}/D_{CD}}$ を 1.52 とした簡易計算方法を用いて強度計算をすると、本報の測定結果との平均誤差は、7.0%となり、簡易計算法を用いない時の平均誤差とほぼ変わらない。このことにより、ECT 値のみを求めることで、曲げ剛性の測定をせずに圧縮強度推定が出来ることが確認された。

さらに Kellicutt が式の簡略化をしたように、総合リングクラッシュ値から圧縮強度を推定することも検討できる。総合リングクラッシュ値から、ECT 値に変換する方法は参考文献 3) で報告されており良い相関を示している (Appendix 2)。但し、本報で測定した ECT 値は TAPPI 法によるものであるが、Appendix 2 で示した ECT 値は JIS-A 法によるものである。一般的に、TAPPI 法による値の方が JIS-A 法よりも高めの値を示すため、運用においては適切な変換が必要である⁷⁾。

5. 結論

本報では、パネルサイズに係らず 0201 形式段ボール箱の圧縮強度を予測するため、パネルの破壊様式を圧潰と座屈破壊に分けて式を構築した。推定精度に関しては McKee 式の平均誤差が 6.1%に対し、本報の平均誤差は 7.0%と多少誤差が大きいが、実用上充分の精度があると考えられる。

また、使用段ボールシートの物理的な

曲げ剛性を測定せずに、ECT 値から曲げ剛性を推定して圧縮強度を計算できることも確認した。

本研究で用いた段ボールシートの材質は 3 水準であるが、一般的に使用される一番強度の高い材質と一番低い材質、中間の材質の 3 水準共通で適用できる計算式のため、本報で提案した式(5)と式(6)は、一般に使用されている全ての C フルートにおいて適用できると考えられる。

ダブルフルートを除き、重量物用の箱には主に A フルートまたは C フルートが使用されているが、使用するパルプ量、輸送効率の良さから、近年は A フルートから C フルートに使用が移行してきている。日本での使用量は AF : CF = 1 : 2 程度まで C フルート化が進み、欧米ではほぼ C フルート化が完了している。本報では C フルートのみを検討であるが、使用量比率からみると、多くの重量物用の箱の強度計算に適用できると考えられる。

残された課題として、他のフルート材質での追加の検証が必要である。McKee 式の場合、A、B、C フルートで同じ式(3)の係数 b, c を用いているが、McKee 式は実用的な箱サイズの範囲内で係数を決定したのに対し、本報の係数は、パネル高さの低い領域も加味して係数を決定しているため、McKee が求めた係数と異なることや、フルート材質の差により係数が異なる可能性がある。

さらに、上下にフラップが接合されて

いない、胴枠の係数も本研究で求めた係数とは異なることが予想され、検証が必要である。

今後フルート材質の違いによる係数、胴枠の係数を求めることで、あらゆる箱形式、サイズの段ボール箱の圧縮強度を推定できると考えられる。参考までに本研究で用いた段ボールシートのパネルの圧縮強度計算値の俯瞰図を Appendix 3 に示す。

<参考文献>

- 1) K. Q. Kellicutt, E. F. Landt, Basic design data for the use of fiberboard in shipping containers, *Fiber Containers*, **36**(12), p. 62 (1951)
- 2) R. C. McKee, J. W. Gander, J. R. Wachuta, Compression strength formula for corrugated boxes, *Paperboard Packaging*, **48**(8), p. 149 (1963)
- 3) 高山崇, 東山哲, 牧内隆文, 斎藤勝彦, あらゆる形式の段ボール箱に適応可能な圧縮強度推定方法の提案, *日本包装学会誌*, **26**(2), p. 109 (2017)
- 4) 高山崇, 東山哲, 牧内隆文, 斎藤勝彦, 狭幅(約 10 cm 以下)のパネルを有する段ボール箱の圧縮強度推定方法, *日本包装学会, 第 26 回年次大会 予稿集*, p. 108 (2017)
- 5) T. J. Urbanik and B. Frank, Box compression analysis of world-wide data spanning 46 years, *Wood and Fiber Science*, **38**(3), p. 399, (2006)
- 6) G. Gerard, *Handbook of structural stability Part IV. Failure of plates and composite elements*, NACA TN 3874, Aug. (1957)
- 7) K. Dimitrov, M. Heydenrych, Relationship between the edgewise compression strength of corrugated board and the compression strength of liner and fluting medium papers, *Journal of Forest Science*, **71**(3), p. 227, (2009)

(原稿受付 2019 年 2 月 18 日)

(審査受理 2019 年 3 月 19 日)

Appendix 1

Kellicutt's formula:

$$P_{\text{box}} = \beta \times R_x \times Z^{\frac{1}{3}}$$

β : flute constant

R_x : Composite ring-crush load

Z : Box perimeter

McKee's simplified formula:

$$P_{\text{box}} = 2.208 \times (\text{ECT})^{0.746} \times \sqrt{D_{\text{MD}}D_{\text{CD}}}^{-0.254} \times Z^{0.492}$$

$$P_{\text{box}} = 5.874 \times (\text{ECT}) \times h^{0.508} \times Z^{0.492}$$

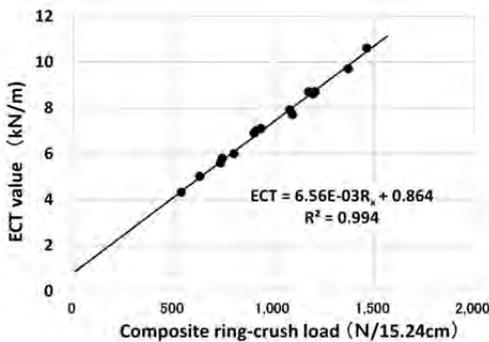
$$P_{\text{box}} = 5.87 \times (\text{ECT}) \times \sqrt{h} \times \sqrt{Z}$$

ECT: Edgewise compression strength

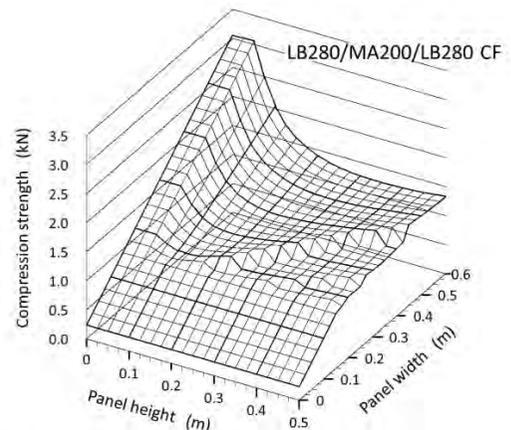
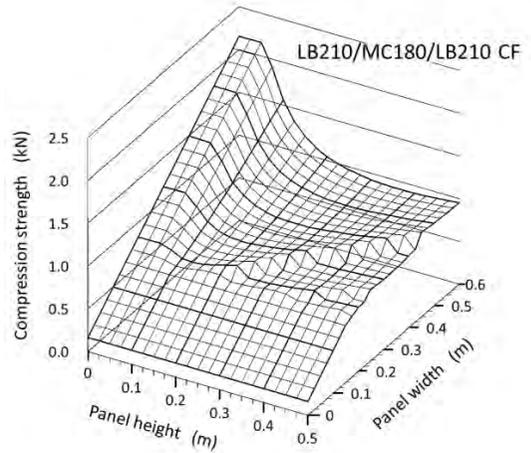
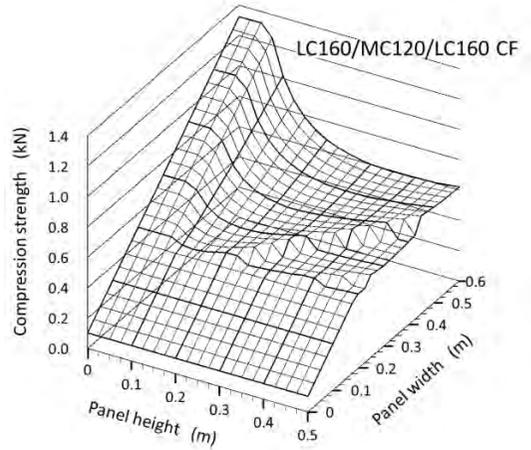
$\sqrt{D_{\text{MD}}D_{\text{CD}}}$: Composite flexural stiffness

h : Corrugated board caliper

Z : Box perimeter



Appendix 2 Correlation of composite ring-crush load and ECT value by JIS-A (C-flute).



Appendix 3 3-dimensional plots of compression strength of panels by Eq.5 and Eq.6 .