

ノート~~~~~

箱サイズを限定しない 0201 形式段ボール箱の 圧縮強度推定式の妥当性の検証

高山 崇***、斎藤 勝彦**

Verification of the Validity of Estimating Method of Compression Strength for Regular Slotted Containers of Any Size

Takashi TAKAYAMA*,** and Katsuhiko SAITO**

Kellicutt 式や McKee 式は標準的な箱形式(JIS 0201 形式)の圧縮強度推定に広く用いられている。しかしながらこれらの式は簡便性を重視し、通常使用する箱サイズに限定して計算できるように簡略化したものである。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。そこで、前報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。

本報告では構築した一般式を利用し、従来式では計算できなかった箱サイズでの圧縮強度を計算し、実測値をどの程度正確に推定できるかの妥当性の検証を行った。

The Kellicutt's and McKee's formulas are widely used for estimating the compression strength of regular slotted containers. However, these formulae are simplified by limiting sizes to only those of typical boxes, enabling us to easily and conveniently perform calculations. However, 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. In our previous report, in addition to the McKee formula before its simplification, we have combined a new formula for collapsing failure and devised a general formula that can estimate the compression strength for regular slotted containers of any size.

In this report, we used the devised general formula to estimate the compression strength for a box size that could not be done using existing formulas, and determined the accuracy with which the measured value could be estimated.

キーワード: 妥当性の検証、圧縮強度式、段ボール箱、JIS 0201 形式、

Keywords: Verification of the Validity, Compression Strength Formula, Corrugated Box, JIS 0201 type

* 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

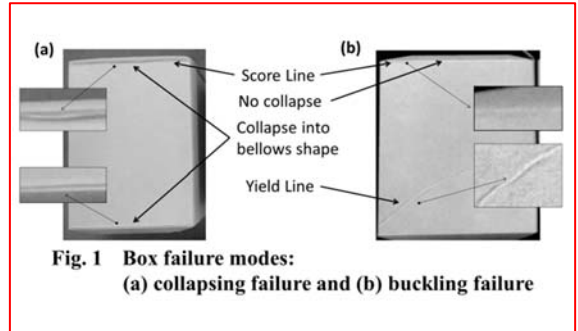
1. はじめに

前報¹⁾では標準的な箱サイズに限定せず、JIS 0201 形式の段ボール箱の圧縮強度計算方法について報告した。箱を圧縮したときの破壊モードを2種類に分け、**Fig.1(a)**の様に箱が圧潰したときは、圧縮強度がパネル幅に比例することから圧縮強度式をパネル幅の1次式として表わし、**Fig.1(b)**の様に箱が座屈したときは、簡略化前の McKee 式²⁾を利用してもとめた。

簡略化前の McKee 式は NACA (National Advisory Committee for Aeronautics: アメリカ航空諮問委員会)³⁾がハニカム合板の圧縮強度研究において経験的に導いた関係式を利用している。ハニカム合板も段ボールシートも板状ではあるものの素材自体に内部構造を持ち、箱圧縮時には内部構造が破壊されながらパネルがたわみ、破壊へと至る。NACA 式は内部構造の破壊(圧潰)とパネルのたわみ(曲げ)の2つの要素で構築されている式のため、段ボール箱の圧縮強度を推定するために最適と考えた。さらに簡略化前の McKee 式はパネル高さのファクターがあり、数式上はどのようなパネルサイズの圧縮強度も計算できる式である。

前報では長さと同幅が等しい4側面が等しい箱で検証し、JIS 0201 形式を構成するパネル1枚1枚の圧縮強度を求める式を提案した。本報では長さと同幅が異なる実際の箱の圧縮強度を推定することが出来るか、更に従来式では計算できなかった

た箱サイズの圧縮強度を計算できるかを検証し、提案した一般式の妥当性の検証を行った。



2. 圧縮強度計算式

JIS 0201 形式の段ボール箱を構成するパネル1枚の圧縮強度計算方法(前報¹⁾での検証はC-フルートであったため、適用はC-フルートに限る)は以下の式(1)、式(2)の値を比較し、値の小さい方をそのパネルの圧縮強度とする。

$$P_{\text{panel}} = 0.483(ECT) \times (W + 0.05) \quad \dots (1)$$

$$P_{\text{panel}} = 0.500(ECT)^{0.656} \times \left(\pi^2 \left(\frac{\sqrt{\frac{D_{MD}}{D_{CD}}} \times h^2}{W^2 n^2} + \frac{W^2 n^2}{\sqrt{\frac{D_{MD}}{D_{CD}}} \times h^2} + 1 \right) \sqrt{D_{MD} D_{CD}} \right)^{0.344} \times W^{0.312} \quad \dots (2)$$

ECT: 垂直圧縮強度 (kN/m)

D_{MD} : 幅方向の曲げ剛性 (kN・m)

D_{CD} : 高さ方向の曲げ剛性 (kN・m)

W: パネル幅 (m)

h: パネル高さ (m)

n : 縦方向の半波数

$$n=j \left(\sqrt{j(j-1)} \leq \sqrt{1.5} \frac{h}{W} < \sqrt{j(j+1)} \right)$$

但し、曲げ剛性を用いずに垂直圧縮強度を用いて計算する場合は式(2)の代わりに式(3)を用いる。

$$P_{\text{panel}} = 0.500(ECT)^{0.656}$$

$$\begin{aligned} & \times \left(\pi^2 \left(\frac{1.5 \times h^2}{W^2 n^2} + \frac{W^2 n^2}{1.5 \times h^2} + 1 \right) \right)^{0.344} \\ & \times (1.13 \times 10^{-3}(ECT) + 1.81 \times 10^{-3})^{0.344} \\ & \times W^{0.312} \quad \dots (3) \end{aligned}$$

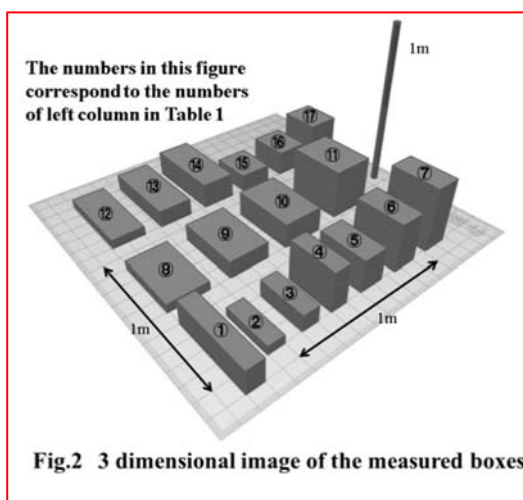
3. 妥当性の検証

3.1 検証実験方法

検証に用いた段ボールシート材質は前報で検証した材質の中間の強度をもつもので、LB210/MC180/LB210 CF、垂直圧縮強度(ECT)が 6.85kN/m (TAPPI T-811)の材質で検証した。検証した段ボールサイズを Fig. 2 にイメージとして示す。Fig. 2 を見ると、測定した箱は⑧の扁平や⑦の細長の箱や①の長さ/幅の比が極端に大きな箱を含んでいる。

測定方法は前報と同様、圧縮速度：10mm/min、温湿度：23℃ 50%RH (24 時間以上この環境下に保管した後測定)、内フラップを固定し、5 回繰り返し測定し平均値を求めた。使用した圧縮試験機のプラテンは固定式を用いた。

計算値は式(1)と式(3)を用いて求めた。



3.2 測定結果

Table 1 に測定した箱サイズと圧縮強度実測値と計算値を示す。

計算値は、本研究で提案した式による結果と従来式である McKee 式と Wolf 式⁴⁾

Table 1 Box dimensions and compression strength of measured and estimated

	Box dimensions			Measured	Estimated	M.F.	W. F.
	L (m)	W (m)	H (m)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
①	0.5	0.1	0.15	3.81	3.63	2.66	-1.07
②	0.3	0.1	0.05	3.31	3.31	2.18	1.87
③	0.3	0.1	0.1	3.35	3.11	2.18	1.81
④	0.3	0.1	0.25	2.17	2.57	2.18	1.75
⑤	0.2	0.15	0.3	2.55	2.68	2.04	2.25
⑥	0.3	0.15	0.3	2.56	2.89	2.31	2.44
⑦	0.4	0.15	0.3	2.62	3.01	2.55	2.32
⑧	0.4	0.25	0.05	4.69	4.97	2.77	2.95
⑨	0.4	0.25	0.1	4.52	4.55	2.77	3.28
⑩	0.4	0.25	0.15	3.24	3.72	2.77	3.19
⑪	0.35	0.25	0.3	3.21	3.20	2.66	3.14
⑫	0.5	0.2	0.05	5.46	5.30	2.87	2.96
⑬	0.5	0.2	0.1	4.54	4.91	2.87	2.87
⑭	0.5	0.2	0.15	3.20	4.02	2.87	2.83
⑮	0.25	0.2	0.1	3.51	3.34	2.31	2.67
⑯	0.25	0.2	0.15	2.52	2.94	2.31	2.63
⑰	0.25	0.2	0.25	2.45	2.94	2.31	2.57

による結果も示した。Wolf 式は McKee 式の計算精度を向上させるために考案され、高さの低い箱や、箱の長さとの幅の比による圧縮強度の違いを実験から求めた補正項を導入して構築された(Appendix)。

さらに Table 1 の結果をもとに計算値と実測値の相関、従来式との相関を示すグラフを Fig.3 に示す。

Fig.3 より McKee 式や Wolf 式の計算値が実測値から大きく外れている一方で、提案式で計算した値は推定精度が±10%以内程度に収まっており、実用的な予測精度を持っていると考えられる。

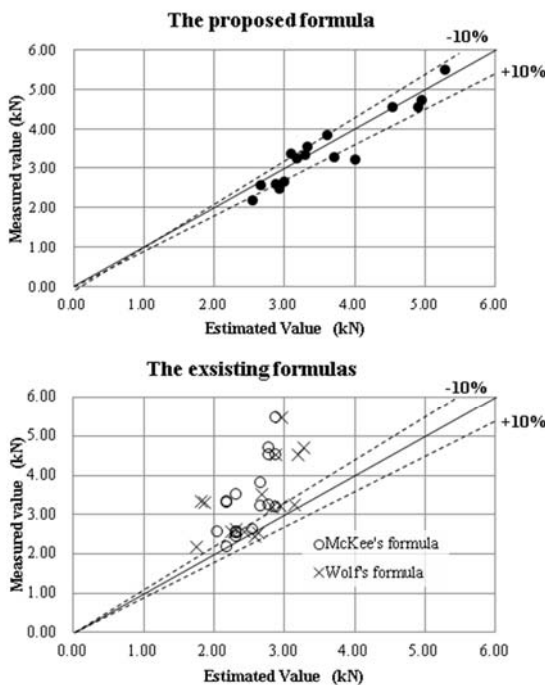


Fig.3 Comparison of estimated and measured values of compression strength between proposed formula and existing formulas

4. 結論

前報で「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」を提案したが、本報では様々な箱サイズで強度計算が実用的精度で推定できるか否かを検証した。結果は一般に段ボール箱の予測精度として実用性が認められる±10%以内程度であることが確認でき、提案式の妥当性の確認が出来た。

提案式の適用範囲について、式の構造自体は材料力学に即して理論的に構築されているため、本報の条件以外でも適用可能である。一方、提案式の係数部分は実験によって決定しなければならず、フルート種の違い、垂直圧縮強度の試験方法や圧縮試験機のプラテン方式などの違いによって多少の違いが生じる可能性がある。

したがって本研究で検証した範囲以外の条件下で適用する場合、係数部分を再確認する必要がある。

5. 前報の訂正

前報の提案式の係数と、本報の式(2)、式(3)の係数が異なっているが、前報の係数はスプレッドシートのソルバー機能を用いて係数を最適化する際、座屈係数: k_{cr} の斜体部分の計算式を誤って $(D_{MD}/D_{CD})^2$ と入力していた。

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

前報の式(6)の係数を以下の様に訂正する。

(誤)

$$P_{\text{panel}} = 0.600(\text{ECT})^{0.604}$$

$$\times \left(\pi^2 \left(\frac{\sqrt{\frac{D_{MD}}{D_{CD}}} \times h^2}{W^2 n^2} + \frac{W^2 n^2}{\sqrt{\frac{D_{MD}}{D_{CD}}} \times h^2} + 1 \right) \sqrt{D_{MD} D_{CD}} \right)^{0.396} \times W^{0.208} \quad \cdots \text{前報 (6)}$$

(正)

$$P_{\text{panel}} = 0.500(\text{ECT})^{0.656}$$

$$\times \left(\pi^2 \left(\frac{\sqrt{\frac{D_{MD}}{D_{CD}}} \times h^2}{W^2 n^2} + \frac{W^2 n^2}{\sqrt{\frac{D_{MD}}{D_{CD}}} \times h^2} + 1 \right) \sqrt{D_{MD} D_{CD}} \right)^{0.344} \times W^{0.312} \quad \cdots \text{訂正 (6)}$$

＜参考文献＞

- 1) 高山崇, 斎藤勝彦, 東山哲, 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, 日本包装学会誌,
28(3), p. 175 (2019)
- 2) R. C. McKee, J. W. Gander, J. R.
Wachuta, Compression strength formula
for corrugated boxes, Paperboard
Packaging, **48**(8), p. 149 (1963)
- 3) C. B. Norris, An analysis of the
compressive strength of honeycomb
cores for sandwich construction, NACA
Technical Note 1251(1947)
- 4) M. Wolf, How box length, width affects
compression strength, Package
Engineering, **16**(10), p. 68 (1971)

Appendix

Wolf's formula:

$$P_{\text{box}} = \frac{1.1772 \times \text{ECT} \times \sqrt{hZ} \times (0.3228A - 0.1217A^2 + 1)}{d^{0.041}}$$

$$P_{box} : A \text{ 式箱の圧縮強度 (kgf)}$$

ECT: 垂直壓縮強度 (kgf/5cm)

Z: 箱の周辺長(長さ+幅)×2 (cm)

h: 段ボールシートの厚み (cm)

d: 箱高さ (cm)

A: 箱の長さ/幅比

(原稿受付 2020 年 3 月 31 日)

(審查受理 2020 年 7 月 7 日)