Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-18

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

高山, 崇
東山, 哲
牧内, 隆文
斎藤, 勝彦

(Citation)
日本包装学会誌,26(2):109-121

(Issue Date)
2017

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90006163

一般論文～～～

1. 緒言

段ボール箱の圧縮強度推定は Kellicutt 式や McKee 式が広く実用的に使われている。しかしながら、この式は標準的な箱形式(JIS 0201 形式)のみ計算が可能で、他の形式を推定するには、個別の式を考案しなければならない。近年は新形状の段ボール箱の開発が活発になり、これらの強度を予め推定することが必要となってきた。そこでどのような形状の段ボール箱でも適切に圧縮強度を推定できる計算方法を考案した。

Kellicutt 式[1)]や McKee 式[2)]は箱の周辺長から箱全体の圧縮強度を算出するものである。本報で提案する推定方法は、段ボール箱の強度を担う、段方向に荷重が加わるパネル（面）に分解して強度計算を行い、最後に各々を合算して圧縮強度を推定するものである。

Kellicutt や McKee は段ボール箱の圧縮強度式を構築する際、パネルに着目して導いたが、当時は計算尺で計算することが多く、計算に時間を要した。彼らは式の簡略化を行い、実用上取扱い易いよう周辺長の関数として式を完成させた。当時は､複雑な計算には手間を要したため、簡単でかつ推定精度が高い計算式の構築が必要であった。しかしながら、近年では高性能の表計算ソフトが広く普及しているため、式の簡略化より、式の汎用性の高さに重点を置き、推定式を構築する方が合理的であると考えられる。

同様の考えで、Linbill[3)] がゲーブルトップ容器の圧縮強度をパネルに分解して、板紙の壁面座屈（crippling）特性を基に計算した例がある。

2. 圧縮強度の推定方法

2.1 パネルの種類と分解方法

標準的な箱をパネルに分解するには、幅面２枚と長さ面２枚のパネルに分解すればよく、幅面のパネルと長さ面のパネルはサイズが異なっているものの、左右の稜が隣り合うパネルと結合しており、同じ幾何学的な特徴を持っている。

箱の形式や付属物によっては、標準的な箱のパネルとは異なる幾何学的な特徴を持つものもある。例えばラップアラウンドカートンのフラップ部分やＶ仕切りの様に、片側の稜のみが隣り合うパネルと結合しているものがある。これらのパネルは、標準的な箱とは異なる幾何学的な特徴のため強度も異なり、別の計算方法で強度を推定しなければならない。

ほとんどの形式の箱や付属物は、両側稜固定のパネルと、片側稜固定のパネルに分けることができるため、本報ではこの２種類のパネルの計算方法を構築する（Fig.1）。

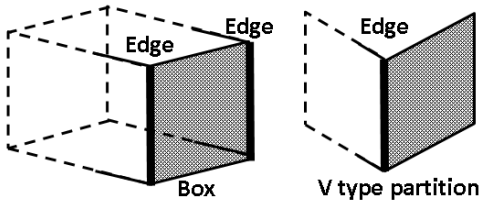


Fig.1 Geometrical types of panels

2.2 パネル耐荷重分布

McKee は圧縮強度推定式を構築する際、箱の周囲にわたって加わる荷重強度(load intensity)を測定すると、稜に近い部分が高く、パネルの中央部が低くなる分布であることを示し、この分布に従って箱全体が荷重を支えていると述べている。

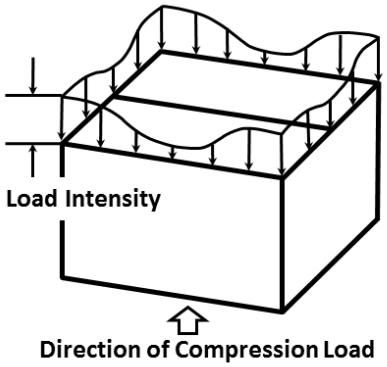


Fig.2 Distribution of compression load around the perimeter of box

さらに、稜に近い部分が荷重を支える強度は段ボールの垂直圧縮強度に関係し、パネルの中央部は曲げ特性に関係していると述べている。つまり、このようなパネルの強度の分布は垂直圧縮強度や曲げ弾性率等の段ボールの基本特性やパネルのサイズ、手掛穴やミシン目等の付属構造によって変化し、パネルの圧縮強度の根源となる特性であると考えられる。

Fig.2 の McKee が報告した荷重分布（Load Intensity）は実際にパネルに加わっている荷重を測定し示しているが、本報では荷重を支えることができる強度の分布、耐荷重（Load-carrying capacity）の分布に着目して、Fig.1 に示したパネルの圧縮強度推定式を構築する。

パネルの耐荷重分布に着目することで稜近傍の耐荷重強度から、稜から離れるにしたがって低下する耐荷重強度を考察することができ、圧縮強度式を構築する際、式の妥当性の裏付けとなると考えられる。

2.3 パネル耐荷重分布式

Kellicutt 式や McKee 式等は圧縮強度を推定する式であり、見方を変えると箱の耐荷重分布式を周辺長で積分した結果ということができる。つまり、圧縮強度推定式を周辺長で微分すれば耐荷重分布式を得ることができる。

そこで、Kellicutt 式（①式）を例として、微分して耐荷重分布式を求める。

$P_{box}=\beta\times Rx\times \mathbf{Z}^{\frac{1}{3}}$　・・・①

P_{box}：箱の圧縮強度（N）

β：フルート定数

Rx：総合リングクラッシュ値（N）

Z：箱の周辺長（㎝）

Kellicutt 式は箱全体の圧縮強度、つまり、幅面と長さ面合わせて４枚分のパネルの強度で、更に幅と長さが等しい箱を前提としている。したがって、長さＬのパネル１枚当たりの圧縮強度式は、周辺長Ｚにパネルの長さＬの４倍の値を代入し、全体の圧縮強度を１/４にすればよい。

$P_{panel}=\frac{1}{4}\times\beta\times Rx\times(\mathbf{4L})^{\frac{1}{3}}$　・・・②

P_{panel}：パネルの圧縮強度（N）

L：パネル長さ（㎝）

ここで、②式は Fig.1 の両端の稜が固定されているパネルの圧縮強度を求めることができるため、以降、両側稜固定のパネルは②式を用いることとする。

片側の稜のみが固定されているパネルの圧縮強度は②式の様に容易には導けないため、②式を耐荷重分布に変形してから導いて行く。

耐荷重分布式を求めるために、②式を L で微分すると

$$P'_{panel}=\frac{1}{3}\times\beta\times Rx\times(4L)^{-\frac{2}{3}} \quad ・・・③$$

P'_{panel}：パネルの耐荷重分布（N/㎝）

となり、

③式の耐荷重分布式の曲線を Fig.3 に示す。

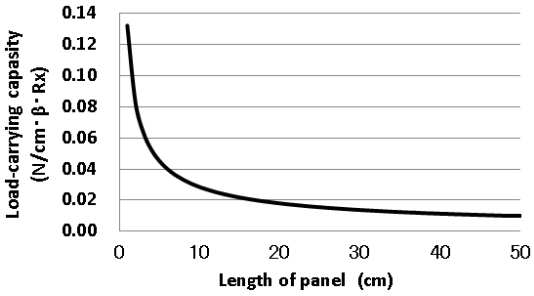


Fig.3 Graph of load-carrying capasity of panel

Fig.3 の曲線を見ると、L が 0（ゼロ）に近づくと急に耐荷重が増加していることから、箱の稜に近づくにつれ耐荷重が高くなると理解できる。また、L が大きくなるにしたがい（稜から遠ざかる）耐荷重が低くなることも読み取ることができる。

しかしながら、Fig.3 はパネルの長さと耐荷重の関係を示すグラフであり、パネル自体の耐荷重分布イメージを示しているものではない。これをパネルの分布イメージに変換するには、左右の稜へ近づくに従い高い耐荷重値を示し、耐荷重値の最小値はパネルの中央部で取るように Fig.3 の曲線を左右対称の形状へ等価に変形しなければならない。

仮にパネル長さを 30cm に設定した場合を、Fig.4 で説明する。Fig.4 の実線は③式を示している。③式の 30cm に位置する耐荷重の最小値は、実際のパネルの位置では稜から 30 ㎝離れた位置の耐荷重値ではなく、最小値をとるパネルの中央部である 15cm の位置の値となる。また、③式の 10 ㎝に位置する耐荷重値は、パネルが左右対称の耐荷重分布を示すことから、左右の稜（0 ㎝と 30 ㎝の位置）から 10 ㎝の 1/2 である 5 ㎝離れた位置、5 ㎝と 25 ㎝の位置の耐荷重値になる。

Fig.4 の 0 ㎝から 15 ㎝までの破線で示すパネルの耐荷重分布イメージを見ると、③式のパネル長さ L の耐荷重値は耐荷重分布イメージでは 1/2 L の位置に相当するため、逆にパネルの耐荷重分布イメージ式は③式のパネル長さ L を 2 倍にすればよい。

したがって Fig.4 の 0 ㎝から 15 ㎝までの破線で示すパネルの耐荷重分布イメージは、

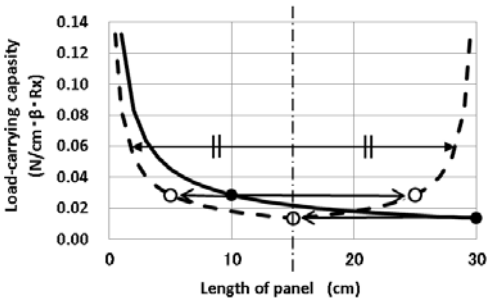


Fig.4 Actual image of load-carrying capasity of panel
Solid line shows equation-3
Dashed line shows actual image: equation-5

③式の 4L を 2 倍の 8L とし、

$$P' = \frac{1}{3} \times \beta \times R \times (\mathbf{8L})^{-\frac{2}{3}} \quad ・・・④$$

となる。

パネルの耐荷重分布イメージは左右対称であることから、15 ㎝から 30 ㎝までの式は 15 ㎝を中心として左右対称形に変形したものになる。これを⑤式に示す。

$$P' = \frac{1}{3} \times \beta \times Rx \times (\mathbf{8L})^{-\frac{2}{3}} \quad (0 \leq L \leq 15),$$

$$\frac{1}{3} \times \beta \times Rx \times \{\mathbf{8(30-L)}\}^{-\frac{2}{3}} \ (15 < L \leq 30)$$

・・・⑤

③式を L で 0 から 30 まで積分した値と、⑤式を 0 から 30 まで積分した値（圧縮強度）はともに、1.23×β×Rx と等しいので、⑤式は③式を等価に変形したものである。

④式と⑤式のグラフを Fig.5 に示す。

Fig.5 の⑤式の実線は、もとは②式を変形しているもので、両端稜固定のパネル

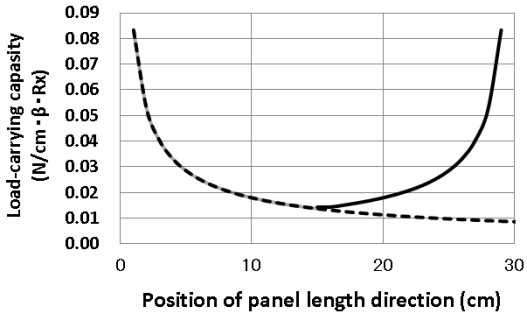


Fig.5 Distribution of load-carrying capacity along the direction of length
Solid line shows feature of equation-5
Dashed line shows feature of equation-4

の耐荷重分布曲線を示している。また、④式の破線は、左側の稜から遠ざかるにしたがって耐荷重が減少することから、④式は、左側の稜が隣り合うパネルと結合し､右側の稜が無限大遠くに存在する。言い換えれば、パネルの右側は稜の影響を受けておらず、隣り合うパネルと結合していないパネルの耐荷重分布曲線として解釈することができる。

これまで、圧縮強度式を微分することで耐荷重分布式に変形してきた。耐荷重分布に着目することは、圧縮強度を概念的に理解する上で有用なことと考えられる。そこで、Fig.5 を基に、実際の箱や仕切りに対する耐荷重分布のイメージを Fig.6 に示す。

Fig.6 のイメージはあくまでも Kellicutt 式を基にしたイメージであり、実際の耐荷重分布を示してはいない（例：稜の部分の耐荷重値が無限大に発散し矛盾する）。しかしながら、逆に正確な耐荷重分布を求めることができれば、精度の良い

圧縮強度計算式を導けるということになる。このように、耐荷重分布と圧縮強度は表裏一体の関係にあり、圧縮強度式を考察する上で有用である。

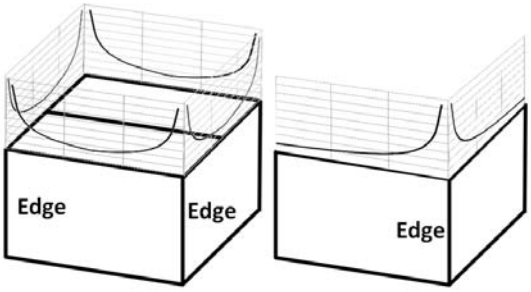


Fig.6 Distribution of load-carrying capacity around the perimeter of box and pertition

2.4 パネル圧縮強度推定式

両側稜固定のパネルの耐荷重分布は③式であらわされ、圧縮強度式は②式で表される。片側稜固定のパネルの耐荷重分布は④式であらわされることを前項で示したが、これを圧縮強度式に変換するには④式を長さ方向に積分すればよい。

④式を積分すると

$$P_{panelOE} = \int_0^L \frac{1}{3} \times \beta \times Rx \times (8L)^{-\frac{2}{3}} dL$$

$$= \left[\frac{1}{8} \times \beta \times Rx \times (8L)^{\frac{1}{3}}\right]_0^L$$

$$= \frac{1}{8} \times \beta \times Rx \times (8L)^{\frac{1}{3}} \quad \cdot\cdot\cdot ⑥$$

$P_{panelOE}$：片端稜固定パネルの圧縮強度

$$P_{panelBE} = \frac{1}{4} \times \beta \times Rx \times (4L)^{\frac{1}{3}} \quad \cdot\cdot\cdot ②$$

$P_{panelBE}$：両端稜固定パネルの圧縮強度

上記の②式、⑥式は Kellicutt 式を変形して求めたものであるが、式の形を見ると、両側稜固定の場合は、その式の周辺長Ｚにパネル長さの４倍の４Ｌを代入して全体を４で割り、片側稜固定の場合は、周辺長Ｚにパネル長さの８倍の８Ｌを代入し、全体を８で割るという形になっている。

McKee 式（⑦式）も Kellicutt 式と同型の関数なので同様に変形できる。

$$P_{box} = 5.874 \times Pm \times h^{0.508} \times Z^{0.492} \quad \cdot\cdot\cdot ⑦$$

P_{box}：箱の圧縮強度 (N)

Pm：垂直圧縮強度（N/㎝ Tappi 法）

h：段ボール厚み（㎝）

両端稜固定の圧縮強度計算式は、⑦式の周辺長 Z に４倍のパネル長さ４L を代入し、全体を４で割り、

$$P_{panelBE} = 5.847 \times Pm \times h^{0.508} \times (4L)^{0.492} \div 4$$
$$= 1.469 \times Pm \times h^{0.508} \times (4L)^{0.492} \quad \cdot\cdot\cdot ⑧$$

となる。

片側稜固定の圧縮強度計算式は、⑦式の周辺長 Z に８倍のパネル長さ 8L を代入し、全体を８で割り、

$$P_{panelOE} = 5.847 \times Pm \times h^{0.508} \times (8L)^{0.492} \div 8$$
$$= 0.734 \times Pm \times h^{0.508} \times (8L)^{0.492} \quad \cdot\cdot\cdot ⑨$$

となる。

3. 強度推定式の妥当性検証

3.1 Kellicutt 式、McKee 式に用いる総合リングクラッシュ値と垂直圧縮強度値の設定

Kellicutt 式を用いて計算する際は総合リングクラッシュ値が必要であるが、本

報ではリングクラッシュ値を原紙の品質管理から得られた平均値を利用して計算した。また McKee 式は Tappi 法で測定した垂直圧縮強度値が必要であるが、簡易的に総合リングクラッシュ値からの換算で行った。

換算方法は、まず総合リングクラッシュ値から JIS-A 法による圧縮強度に変換した。変換係数はＡフルートでは 1.06 倍、Ｂフルートは 1.27 倍、Ｃフルートは 1.12 倍であり、この係数は別実験で検証した（付録 2)。これを日報出版「段ボール包装技術実務編」[4)]を参考に JIS-A 法の 1.1 倍を TAPPI 法の圧縮強度とした。単位は N/㎝として求めた。本報告で計算する単位系は N、㎝系で行った。

3.2 仕切り入り段ボール箱の実測値と推定値との比較

これまで、仕切り入りの段ボールの計算は経験的に仕切りの形状によって一定の係数をかける等の式は考案されてきたが、どのような形状の仕切りでも強度推定ができるような汎用性のある式はなかった。そこで、仕切りをパネルごとに分解し、②式、⑥式、または⑧式、⑨式を用いて、仕切り入り段ボール箱の圧縮強度を推定し、実測値と比較することで式の妥当性を確認した。

試料

段ボール箱

形式：JIS-0201 型（Ａ式）

材質：LB220/MC125/LB220 A/F

内寸法：40×25×25 ㎝

仕切り

高さはすべて 24.8 ㎝

材質：以下２種類

LB220/MC120/LB220　A/F（材質 1）

LC170/MC120/LC170　A/F（材質 2）

尚、箱と仕切りの材質のβ、Rx、Pm、h は Table1 に示す値を用い計算した。

Table1　Applied data for calculating box with partition

	β	Rx（N）	Pm（N/㎝）	h（㎝）
Box	0.748	846	65.5	0.5
Marerial 1	0.748	840	65.1	0.5
Marerial 2	0.748	572	44.3	0.5

Table2 に箱と仕切りの略図と実測値と計算値を示す。略図の実線は分解して計算するパネルを示し、また●点は隣り合うパネルと結合していることを示す。各々のパネルの寸法は付録 1 に示した。Fig.7 に計算値と実測値の相関を示す。

計算例として材質 1 の V 字仕切りを例にとって説明する。

Kellicutt 式：

・箱短側面（両端稜固定　②式を適用）

$$P = \frac{1}{4} \times \beta \times Rx \times (4L)^{\frac{1}{3}}$$

$$= \frac{1}{4} \times 0.748 \times 846 \times (4 \times 25)^{\frac{1}{3}}$$

$$= 734$$

・箱長側面（両端稜固定　②式を適用）

$$P = \frac{1}{4} \times \beta \times Rx \times (4L)^{\frac{1}{3}}$$

$$= \frac{1}{4} \times 0.748 \times 846 \times (4 \times 40)^{\frac{1}{3}}$$

$$= 859$$

・V 字仕切り（片端稜固定　⑥式を適用）

$$P = \frac{1}{8} \times \beta \times Rx \times (8L)^{\frac{1}{3}}$$

$$= \frac{1}{8} \times 0.748 \times 840 \times (8 \times 31.6)^{\frac{1}{3}}$$

$$= 497$$

箱短側面、箱長側面、V 仕切りのパネルはそれぞれ２枚ずつあるので、

P_{Total}＝（734+859+497）×２＝<u>4180N</u>

Mckee 式：

・箱短側面（両端稜固定　⑧式を適用）

$$P = 1.469 \times Pm \times h^{0.508} \times (4L)^{0.492}$$

$$= 1.469 \times 65.5 \times 0.5^{0.508} \times (4 \times 25)^{0.492}$$

$$= 653$$

・箱長側面（両端稜固定　⑧式を適用）

$$P = 1.469 \times Pm \times h^{0.508} \times (4L)^{0.492}$$

$$= 1.469 \times 65.5 \times 0.5^{0.508} \times (4 \times 40)^{0.492}$$

$$= 822$$

・V 字仕切り（片端稜固定　⑨式を適用）

$$P = 0.734 \times Pm \times h^{0.508} \times (4L)^{0.492}$$

$$= 0.734 \times 65.1 \times 0.5^{0.508} \times (4 \times 31.6)^{0.492}$$

$$= 511$$

箱短側面、箱長側面、V 仕切りのパネルはそれぞれ２枚ずつあるので、

P_{Total}＝（653+822+511）×2＝<u>3972N</u>

Table2 Box compression strength of mesured and estimated value derived from Kellicutt and McKee equation

Schematic drawing	Partition	Measured value (n=5)	Estimated value by Kellicutt Eq.		Estimated value by McKee Eq.	
	Material	(N)	(N)	Err. %	(N)	Err. %
		3298	3186	-3	2950	-11
	1	4384	4180	-5	3972	-9
	2	3494	3862	11	3646	4
	1	4962	4763	-4	4409	-11
	2	4468	4260	-5	3944	-12
	1	4578	4766	4	4410	-4
	2	3732	4261	14	3943	6
	1	6350	5975	-6	5384	-15
	2	5344	5085	-5	4607	-14
	1	7074	6177	-13	5655	-20
	2	5718	5222	-9	4792	-16
	1	6542	6250	-4	5808	-11
	2	5404	5273	-2	4897	-9

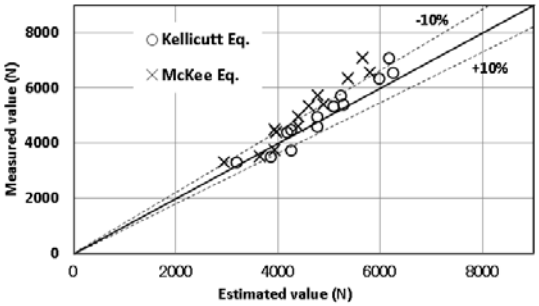


Fig.7 Correlation between estimated and measured value

McKee 式から導いた式による圧縮強度推定値は全体的に低目の値を取っているが、ケリカット式では良い相関を示している。一般に段ボール箱の圧縮強度推定では誤差 10%程度に収まれば実用上充分な精度であると言えるので、仕切り入り段ボール箱の推定においては妥当性があると考えられる。

3.3 組み立式段ボール箱の実測値と推定値との比較

組み立式の段ボール箱の圧縮強度計算式は一般化されたものはなく、このような形式の箱でも、強度推定ができるかを検証した。

箱１：形式 0435 型

材質：　LB210/MC120/LB210 B/F

内寸法：　25.0×17.8×8.0 ㎝

箱２：形式 0435 型

材質：　AK180/AS120/AK180 B/F

内寸法：　21.1×15.2×7.7 ㎝

略図面を Fig.8 に示す。図中の●点は隣り合うパネルと結合していることを示している。

強度計算は前述のように段方向に荷重が加わるパネルのみの合算値として求めた。また計算に使用した箱の β、Rx、Pm、h の値は Table3 に示す。

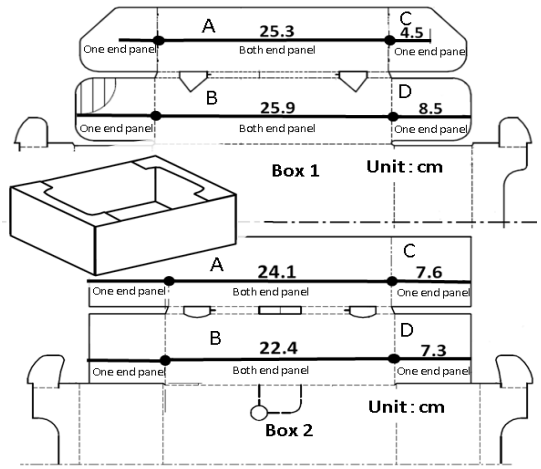


Fig.8 Developments of folder type boxes

Table3 Applied data for calculating folder type boxes

	β	Rx(N)	Pm(N/cm)	h(cm)
Box1	0.612	787	70.7	0.3
Box2	0.612	729	65.6	0.3

Table4 に実測値と推定値を示す。表中のパネル A から D は Fig.8 中に示すパネルに対応している。

Table4 から、箱１、箱２共に両推定式は実測値に近い値で推定できている。

Table4 Compression strength of measured and estimated value for folder type boxes

Box 1

Panel	Number of panels	Estimated value by Kellicutt Eq. (N)	Subtotal	Estimated value by McKee Eq. (N)	Subtotal	Measured value (N)
A	2	561	1122	547	1094	
B	2	565	1130	553	1106	
C	4	199	796	164	656	
D	4	246	984	225	900	
		Grand total	4032	Grand total	3756	3873 (n=5)

Box 2

Panel	Number of panels	Estimated value by Kellicutt Eq. (N)	Subtotal	Estimated value by McKee Eq. (N)	Subtotal	Measured value (N)
A	2	512	1024	495	990	
B	2	499	998	477	954	
C	4	219	876	197	788	
D	4	216	864	193	772	
		Grand total	3762	Grand total	3504	3735 (n=5)

3.4 新形状の段ボール箱の実測値と推定値の比較

本報の目的でもある新形状の段ボール箱の開発においても適切な圧縮強度推定ができるか検証した。新形状の箱の形状を Fig.9 に示す。図中の●点は隣り合うパネルと結合していることを示している。

この箱は、店頭でのディスプレー機能を持ち合わせるもので、箱の４隅の細長い三角の柱と短側面のパネルで荷重を支える特殊な構造である。

材質：　LB280/MA200/LB280 C/F

内寸法：　38.6×28×22.2 ㎝

特性値：　β＝0.699、　Rx＝1462 N

Pm＝118.1 N/㎝　h =0.4 ㎝

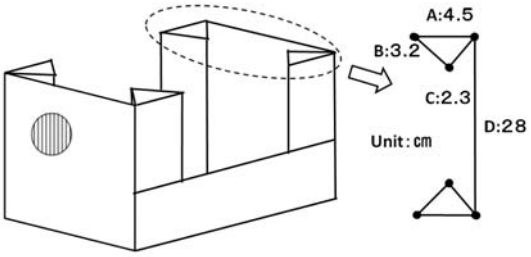


Fig.9 Design of newly developed box

実測値と推定値を Table5 に示す。表中のパネル A から D は Fig.9 中に示すパネルに対応している。

ケリカット式を基にした式では、実測値をはるかに上回り推定式として妥当性はないが、McKee 式を基にした式では、実測値に近い値で推定できた。

Table5 Compression strength of measured and estimated value for newly designed box

Panel	Number of panels	Estimated value by Kellicutt Eq. (N)	Subtotal	Estimated value by McKee Eq. (N)	Subtotal	Measured value (N)
A	4	670	2680	451	1804	
B	4	598	2392	382	1528	
C	4	535	2140	324	1296	
D	2	1232	2464	1110	2220	
		Grand total	9676	Grand total	6848	6855 (n=10)

4. 考察

段ボール箱の強度を担う、段方向に荷重が加わるパネル（面）に分解して強度を求め、各々のパネルの強度を合算して圧縮強度を求める方法を検討してきた。各パネルの計算方法はパネルの耐荷重分布に着目し、パネルの左右の稜が隣り合うパネルと結合したパネルと、片方のパネルの稜のみが隣り合うパネルと結合したパネルとに分けて考え、それぞれ Kellicutt 式と McKee 式を基に推定式を導いた。

仕切り入りのカートンでは、McKee 式より導いた式で計算した値は実測値より若干低めの値が計算されたが、Kellicutt 式より導いた式では、実測値に近い推定値を得られた。また、一般化された圧縮強度推定式がない形式の段ボール箱（JIS 0435 形式）でも実測値に近い推定値を計算でき、推定式の妥当性が検証できた。

しかしながら、新形状の段ボール箱では、McKee 式で、実測値に近い推定値を計算できたのに対し、Kellicutt 式では実測値をはるかに上回る推定値が計算され、推定式の妥当性はないと考えられる。これは新形状の段ボール箱が非常に短い長さのパネルの圧縮強度計算を行っていることによると考えられる。

McKee 式はパネル長さの約 1/2 乗に圧縮強度が比例するのに対し、Kellicutt 式は 1/3 乗に比例する。式の特性上、パネル長さが短い範囲は Kellicutt 式は McKee 式より圧縮強度の立ち上がりが早く、高めに計算されてしまう。

Fig.10 に新形状の箱で使用した段ボール材質の、パネル長さと圧縮強度の関係を両式で示す。Kellicutt 式はパネル長が５㎝を下回ると、本来の最大の荷重強度である垂直圧縮強度 Pm の値を超えてし

まう特性を持っており、論理的に矛盾してしまうことがわかる。

Kellicutt が式を構築する上で行った実験の最短パネル長さは 2 インチ(5.1 ㎝)ではあるが、10 インチ（25cm）を下回ると予測値は高めに外れて行くと述べている。一方 McKee の実験では最短の周辺長は 32.25 インチ（パネル長で 20 ㎝）であり、両式共に 20 ㎝を下回るパネル長は実験で検証された範囲外である。

本来であればもととなる式の適用範囲内のパネル長さで計算しなければならないが、これまでの妥当性の検証のでは、McKee 式を基にして導いた式、⑧、⑨を用いて計算する限り、短いパネル長を含む段ボール箱であっても、実用上充分な誤差範囲内で圧縮強度を推定できている。このことから、McKee 式はパネル長さが短い領域でも、実測値に近い推定結果を出すことができると考えられる。

Kellicutt の式を基にした推定式を用いるときの注意点として、Kellicutt 自身も指摘しているように 20 ㎝を下回るパネルの計算が多くなる場合は、推定値の解釈に注意が必要である。

5. 今後の検討課題

本報では、パネルの耐荷重分布に注目して、耐荷重の積分値がパネルの圧縮強度であることから式を導いてきた。前述のように、本来であれば、箱の圧縮強度を推定するには、パネル幅の範囲が実験

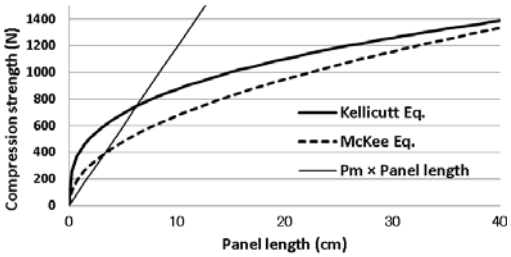


Fig.10 Compare Kellicutt Eq. to MaKee Eq.

で検証が取れた範囲内で計算しなければならない。今後は数 cm から数百 cm にわたって検証のとれた圧縮強度基本式の構築が必要である。

McKee が述べているように、パネルの耐荷重分布は稜の部分は垂直圧縮強度に関係し、中央部付近は曲げ特性、つまり座屈に関係している（Fig.11）。更に耐荷重分布は、パネル高さ、手掛穴やミシン目等の付帯構造によっても変化する。この意味で耐荷重分布に着目するとは、圧縮強度を求める上の基本となり、より精度の高い推定式を導くために有用だと思われる。今後は、パネルの耐荷重分布を基に圧縮強度式を導くことが本研究を発展させるうえで必要である。

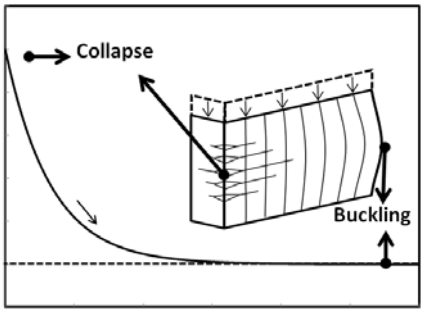


Fig.11 Feature of load-carrying capacity of panel

6. 結論

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として、荷重を担う段方向に荷重が加わるパネル（面）に分解して強度計算する方法を報告した。パネルの計算方法は Kellicutt 式または McKee 式を基に導いた式を用いることで、実用上充分な推定値を得られることが確認できた。

しかしながら数㎝と極端に短いパネル長の計算の場合 Kellicutt 式は対応範囲外の長さのため、誤差が大きくなることが分かった。

計算可能なパネル長に制限はあるものの、一定の計算式に基づいて、形状を問わず、実用上有効な精度で圧縮強度推定できることは、段ボール箱の設計・改良の効率化に貢献できると考えられる。とりわけ机上で新しい形状の段ボール箱を設計する段階から圧縮強度推定ができるため、試行錯誤の回数を軽減でき、更には最適なコスト設計が可能になると考えられる。

＜参考文献＞

1） K.Q.Kellicutt, E. F. Landt, Fibre Containers,36(12),62–80.(1951)

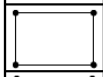
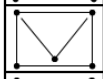
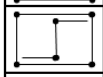
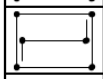
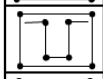
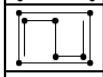
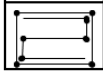
2） R.C.McKee, J.W.Gander, J.R.Wachuta, Paperboad Packaging,48 (8),149-159 (1963)

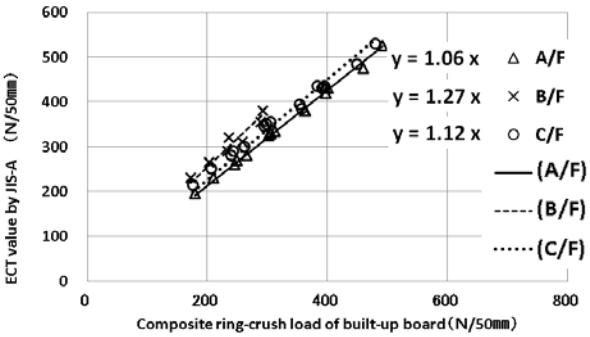
3） E.Linvill, Packag.Technol.Sci.,28, 1027-1037(2015)

4） 五十嵐清一,”改訂版　段ボール包装技術　実務編”,日報出版,p.104(2012)

（原稿受付 2016 年 10 月 26 日）
（審査受理　2017 年 3 月 2 日）

Appendix1: Dimentions of each panel applied for calculating of box with pertitions

	Dimentions of both ends connected panel (cm)		Dimentions of one end connected panel (cm)	
	Box	Partition	Box	Partition
	40, 25, 40, 25			
	40, 25, 40, 25		31.6, 31.6	
	40, 25, 40, 25,	24.6	20, 20	
	40, 25, 40, 25,	39.6	12.5, 12.5	
	40, 25, 40, 25,	24.6, 13.6, 24.6	13.3, 13.3	
	40, 25, 40, 25	19.8, 24.6, 19.8	24.8, 24.8	
	40, 25, 40, 25	12, 39.6, 12	39.8, 39.8	



Appendix2: Correlation of Composite ring-crush load and ECT value by JIS-A