

ダンボールの圧縮特性と構造体への利用

日大生産工(院) ○屋良 朝哉

日大生産工 星野 和義 日大生産工 中川 一人

1. 諸言

紙系の材料は、書物や包装などの目的で使われることが多い。その理由として、安価・加工性・軽量・高強度の他に、リサイクルコストが安く、生分解性であるなど資源循環面において有用であるなどが考えられる。なかでもダンボールは、容器として広く利用されており、現在では玩具や家具・照明など、包装材だけでなく構造材としても利用されている。しかしながら、ダンボールは荷重特性の解析が十分ではなく、今後ダンボールを構造材として利用するために必要となることが予想される。

そこで今回は、構造体としてより効率的に利用するために、断面形状因子、ライナー強度に着目し圧縮試験を行い、理論値との比較を行うことで、ダンボールの力学的特性の検討を行った。また、強化ダンボールでは異なる傾向を示す可能性があるため、強化ダンボール(milca, ENTER PAPER 社製)でも同様の検討を行った。

2. 試験方法

主に3パターンの試験を行った。試験環境と試験片の種類を表1に示す。

表1 試験環境及び試験片の種類

| 試験機 | 油圧サーボ試験機(インストロン社製:8800) | | | |
|---------|-------------------------|-------|--------|-------|
| 試験速度 | 10 mm/s | | | |
| 試験温度 | 23 °C | | | |
| 試験片の種類 | ダンボール | Wフルート | c5 | 8 mm |
| | | | k5 | |
| | | | k6 | |
| | | | k7 | |
| | | Aフルート | k6 | 5 mm |
| | ハニカムボード | K280g | | 15 mm |
| | | | | 30 mm |
| 紙管ライナー | | 650g | | 15 mm |
| | | | 30 mm | |
| 強化ダンボール | milca | 1E | 2 mm | |
| | | 1B | 3.8 mm | |

2.1. ダンボールの圧縮試験

ダンボールで作った柱の断面形状による強度への影響を調べることを目的とし、表2に示すように、300×60mmのダンボールを短手方向に折り、三角柱、四角柱、六角柱を作る。その試験片を図1に示すように立てた状態で圧縮試験を行う。Wフルート(c5, k5, k6, k7), milcaを用いた。表3に試験片を折る方向の詳細を示す。

また、以下のオイラーの座屈荷重の式により、座屈荷重の理論値を求め実験値との比較を行った。なお、ヤング率は試験結果より同定した。

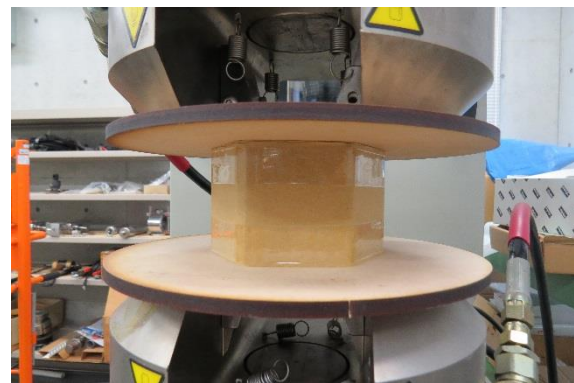


図1 試験風景

表2 試験片の形状

| 形状 | 展開図 | 組立状態 |
|-----|-----|------|
| 三角柱 | | |
| 四角柱 | | |
| 六角柱 | | |

Use of the Compression Characteristics and Structure of Cardboard

Tomochika YARA, Kazuyoshi HOSHINO, Kazuto NAKAGAWA

表3 試験片を折る方向

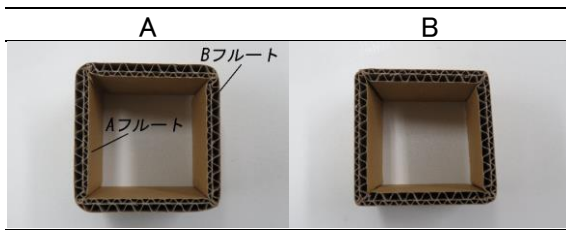


表4 ダンボール圧縮試験の理論値

| 試験片の種類 | 座屈荷重(N) | | |
|--------|---------|-------|-------|
| | 三角柱 | 四角柱 | 六角柱 |
| w/c5 | 3909 | 4849 | 5629 |
| w/k5 | 5043 | 6244 | 7228 |
| w/k6 | 7192 | 8921 | 10355 |
| w/k7 | 8198 | 10170 | 11805 |
| milca | 2mm | 5853 | 6745 |
| | 3.8mm | 10114 | 11916 |

求めた理論値を表4に示す.

$$P = (4\pi^2 EI) / l^2 \dots (1)$$

E: ヤング率

I: 断面二次モーメント(mm⁴)

l: 柱の高さ(mm)

2.2. ハニカムボードの圧縮試験

ライナーの強度変化による影響を調べることを目的とし、50×50にカットしたハニカムボード(K280g, 紙管ライナー650g)のライナーにケント紙を貼り合せたものと貼り合せていないものを用意し、図2のように平面圧縮試験を行った。また、図3のようにハニカムボードの垂直圧縮試験も行った。試験結果にバラツキがあったため、改めてケント紙の代わりに工作紙を貼り同様の試験を行った。

ハニカムボードの圧縮試験に関しても、オイラーの座屈荷重の式により理論値を求め、結果との比較を行った。求めた理論値を表5に示す。

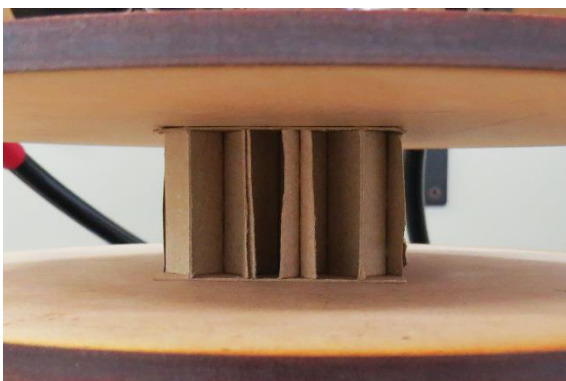


図2 ハニカムボードの平面圧縮試験

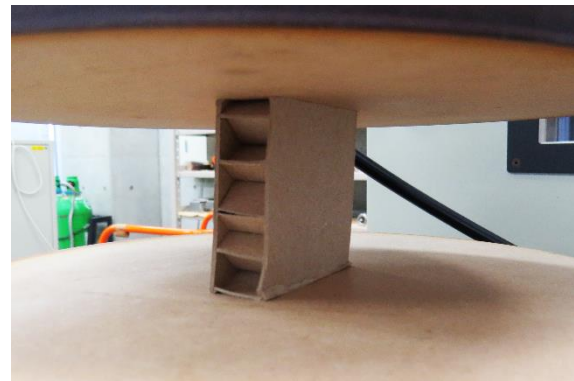


図3 ハニカムボードの垂直圧縮試験

表5 平面圧縮試験の理論値

| 試験片の種類 | 座屈荷重(N) | |
|----------------|---------|-------|
| | 貼なし | 工作用紙貼 |
| K280g | 30.5mm | 3538 |
| | 15.5mm | 7311 |
| 紙管ライナー 650g | 32.0mm | 2007 |
| | 17.0mm | 3201 |

2.3. ダンボールの箱状圧縮試験

ダンボール箱のフラップが及ぼす影響を調べることを目的とし、表6に示すように外寸100×100×50mmの、折り曲げ有り、折り曲げなしモデルの圧縮試験を行った。milcaのダンボールとk6(Aフルート)の試験片を用いた。

表6 試験片の形状

| 形状 | 展開図 | 組立状態 |
|--------|-----|------|
| 折り曲げなし | | |
| 折り曲げあり | | |

3. 試験結果及び考察

3.1. 試験結果を表7~10に示す。

表7 ダンボール圧縮試験結果

| 試験片の種類 | 最大点圧縮荷重(N) | | |
|--------|------------|------|------|
| | 三角柱 | 四角柱 | 六角柱 |
| w/c5 | 1871 | 1884 | 1846 |
| w/k5 | 1939 | 1920 | 1942 |
| w/k6 | 2127 | 2170 | 2204 |
| w/k7 | 2702 | 2714 | 2823 |
| milca | 2mm | 1839 | 2338 |
| | 3.8mm | 4108 | 3992 |

表 8 ハニカムボードの平面圧縮試験結果
1 回目

| 試験片の種類 | | 最大点圧縮荷重(N) | | |
|----------------|--------|------------|-------|-------|
| | | 貼なし | ケント紙貼 | 立てた状態 |
| K280g | 30.5mm | 1058 | 1031 | 246 |
| | 15.5mm | 1027 | 1026 | 287 |
| 紙管ライナー 650g | 32.0mm | 952 | 926 | 726 |
| | 17.0mm | 1013 | 930 | 921 |

表 9 ハニカムボードの平面圧縮試験結果
2 回目

| 試験片の種類 | | 最大点圧縮荷重(N) | |
|----------------|--------|------------|-------|
| | | 貼なし | 工作用紙貼 |
| K280g | 30.5mm | 844 | 877 |
| | 15.5mm | 924 | 954 |
| 紙管ライナー 650g | 32.0mm | 840 | 863 |
| | 17.0mm | 803 | 809 |

表 10 ダンボールの箱状圧縮試験結果

| 試験片の種類 | | 最大点圧縮荷重(N) | |
|--------|-------|------------|--------|
| | | 折り曲げなし | 折り曲げあり |
| A/k6 | 5mm | 1345 | 1215 |
| | 2mm | 2640 | 1805 |
| milca | 3.8mm | 4594 | 3641 |

3.2. ダンボールの圧縮試験の考察

表7の試験結果より、ライナーの種類による強度の差が明らかに表れた。また、ライナーの強度が高いものほど試験片の形状による最大点圧縮荷重の値に変化が表れていたことから、ダンボールの折り方の違いが強度に影響することが分かった。形状の中では六角形が一番強度が高く、三角形が一番強度が低い傾向が見られた。このことから、角が多いほど強度が上がると考えられる。オイラーの式より求めた表7の理論値と比較したところ、試験片の種類による傾向は同様に見られたが、荷重自体は実験値が大きく下回った。また、図4を見て分かるように、座屈は荷重のかかっている面から始まり、徐々に側面中央に向かって伝播していくことが分った。これらの理由として、紙材料は不連続繊維が不規則に絡み合っているため荷重付近で応力集中が起き、その応力集中により理論値と実験値が大きく異なる結果となったと考えられる。

試験片を折る方向に関しては、表3のBが比較的高強度だったが、ほとんど差はない。これは、Bフルートが外側になることにより角部が密になり僅かに強度が上がったと考えられる。

試験後のサンプルに関して、座屈が上方のみ、上下、下方のみに起こっているものがあったが、このようにバラツキがあった理由として、試験片作製時の断面や折り目の不均一さと、紙自体に地合いのバラツキが影響したと考えられる。



図 4 座屈の様子

3.3. ハニカムボードの圧縮試験の考察

表 8, 表 9 より、紙管ライナー650g に比べ K280g の方が高強度であることが分かる。K280g, 紙管ライナー650g 共に厚さによる強度の傾向は、1 回目と 2 回目の試験で逆になった。これは、傾向としては理論値と同様だが、厚い板の方が試験片作製時に断面を綺麗に切ることが難しかったことも原因と考えられる。工作用紙を貼った試験片と何も貼り付けていない試験片の理論値と実験値の比較に関して、オイラーの式の要素としてヤング率, 断面二次モーメント, 高さ(板厚)がある。今回の試験は同一材料で紙を貼り合せた場合と貼り合せていない場合との比較なので、異なる要素として挙げられるのは試験片の高さとなる。理論値を見て分かるように、理論上、板は高さが大の方が座屈荷重は小さくなる。1 回目の試験では貼り合せて高さが増したものが貼り合せていないものと比べて僅かに値が小となる傾向を示した。2 回目の試験では 1 回目の試験とは異なり、紙を貼り付けた試験片が強度が下がるという結果が出たが、偏差内の差であった。

垂直圧縮試験に関しては、紙管ライナーの方が高強度であった。これに関しては、ライナーの厚さが関係していると考えられる。K280g, 紙管ライナー650g共に板厚の薄い方が強度が高かったのは、座屈の生じやすさが関係していると考えられる。

座屈している状態を図5, 図6に示す. 写真を見て分かるように, 平面圧縮試験では中芯が折れるように座屈が始まっているが, 垂直圧縮試験ではダンボールの圧縮試験同様に荷重のかかる方から座屈が伝播していくことが分かった.

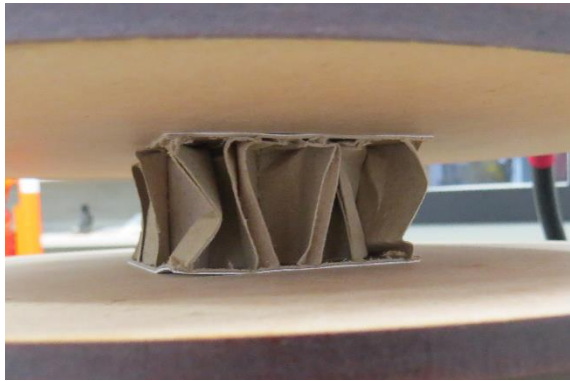


図5 平面圧縮試験による座屈

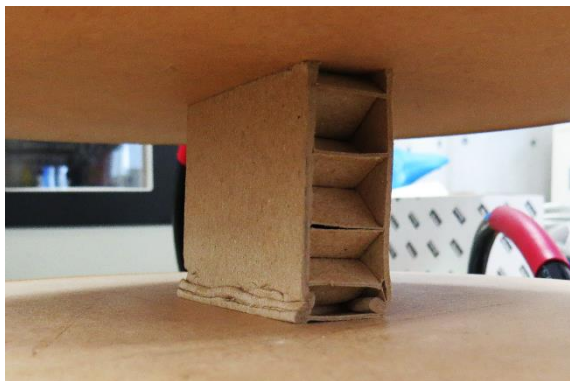


図6 垂直圧縮試験による座屈

3.4. ダンボールの箱状圧縮試験の考察

表10より, 3種類すべての試験片において折り曲げ有りの方が強度が低いことが分かる. 図7, 図8を見て分かるように, フラップが付いた状態でもダンボールの圧縮試験と同様に端の方から側面中央にかけて座屈が伝播する. 試料を観察したところ, 折り曲げてある方は最初から折り目が付いてあるため, 折り曲げていないものに比べて座屈の伝播が速く感じた. これらのことから, ダンボールは水平方向に関する折り曲げは少ない方が強度が高くなると考えられる. その理由として, 紙が塑性変形を起こしやすい材料ということと, 織り目が入ることで応力集中をよりおこしやすい状態になることが挙げられる.



図7 フラップなしの箱の座屈



図8 フラップ付の箱の座屈

4. 結言

今回の試験を通して, ダンボールの力学的特性は従来の計算方法で求めることはできないが, おおよその傾向は予測することが分かった. また, ダンボールは塑性変形を起こしやすい繊維材であるがために, 応力集中や座屈の伝播を引き起こすことが分かった. これらのことから, ダンボールを圧縮する際に高さ変動しても最大点圧縮荷重はあまり変わらないことが予測され, 製品を造る際に織り目は少ない方が良いといえる. さらに, 強化ダンボールでは座屈の状態や強度が異なることから, 従来のダンボールと強化ダンボールを組み合わせることにより安価で高強度なダンボール製品の提案が可能である.

「参考文献」

- 1) 中澤 嘉明, “薄肉多角部材の塑性座屈挙動に及ぼす形状因子の影響とその最適化”(2008)