Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-15

あらゆる形式・サイズに適用可能な段ボール箱の強度推定法に関する研究

高山，崇

(Degree)
博士（工学）
(Date of Degree)
2020-09-25
(Date of Publication)
2021-09-01
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲第7893号
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007893

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

（別紙様式 3）

論文内容の要旨

氏　　名　高山　崇

専　　攻　海事科学専攻

論文題目（外国語の場合は，その和訳を併記すること。）

あらゆる形式・サイズに適用可能な段ボール箱の強度推定法に関する研究

指導教員　齋藤　勝彦

A 式段ボール箱（標準的なみかん箱タイプの箱形式）の圧縮強度式は 1958 年に Kellicutt、1963 年に McKee が考案し、その利便性と計算精度の高さから現在もなお広く活用されている。近年はユニバーサルデザインへの配慮や、陳列効果の向上を目的とした特殊形状の箱の開発が活発になっている。更には通信販売の発展に伴い、小型の段ボール箱の開発も増加している。これらの箱は既存の圧縮強度計算式を適用できず、圧縮強度を得るためには実際に圧縮試験機で強度測定をするか、その箱形式に合わせて個別式を構築しなければならなかった。開発スピードが加速し早期に商品化される昨今では、圧縮強度測定や個別の強度計算式を構築するいとまがない。そこで、本研究では箱の形式やサイズを問わない圧縮強度の一般式の構築を目的とする。
本論文は以下の様な構成としている。

１章では、段ボール箱の圧縮強度計算方法の開発の歴史を振り返り、本研究の必要性の背景について説明する。次に、本研究に係る基本的な技術情報として、段ボールシートの製造方法、段ボールシートや箱に関する規格、湿度などの段ボール箱の強度に与える要因、箱に必要な圧縮強度の見積もり方やその圧縮強度を満たす箱の設計方法について説明する。最後に本研究の目的である「あらゆる形式・サイズに適用可能な段ボール箱の強度推定法」を構築するためのアプローチ方法を示す。

２章では、圧縮強度式を構築する上で必要な、段ボールシートの基本的な力学的特性値の概念と測定方法を説明する。本章では垂直圧縮強度、曲げ強さ、リングクラッシュ値について説明する。これらの力学的特性値は既存の圧縮強度計算式や本研究で構築する計算式で用いる。

３章は本研究での圧縮強度式構築の際、式の概念や構造を参考にした McKee 式について整理する。McKee は、NACA アメリカ航空諮問委員会（現 NASA）による航空機用ハニカム合板の圧縮強度を求める式の基本概念を利用し、段ボール箱用の圧縮強度式を構築した。McKee 式の原形は複雑な計算を必要としたが、McKee は実用性を重視し計算結果に影響の少ないファクターを簡略化し、計算尺で計算できるように変形した。本章ではどの様に簡略化したか、簡略化によってどのような制約条件を設けたか、簡略化の妥当性を議論する。

４章は、あらゆる段ボール箱の形式に適用可能な計算方法を検討する。段ボール箱は個々のパネル（1 枚 1 枚の板）から構成されており、個々のパネルの強度の合算によって箱全体の圧縮強度を求められると仮定した。既存の圧縮強度式を用い、様々な形式の段ボール箱を用いて圧縮強度の実測値と計算値を比較すると、誤差が±10%程度以内であり、

実用的に圧縮強度を求められることを確認した。しかしながら、既存式には適用できるパネルサイズに制限があり、あらゆる箱の圧縮強度を求めるためには、パネルサイズを問わない圧縮強度の一般式の構築が必要である。
さらに、4章では基本的な幾何学的拘束条件のパネル（A式段ボール箱の側面パネルと同じ拘束条件）の強度計算式から別の拘束条件のパネルの強度計算式へ変換する方法を構築した。段ボール箱を主に構成するパネルの拘束条件は3種類あり、拘束条件に従って圧縮強度式を構築しなければならない。本研究ではパネル上に現れる耐荷重強度（荷重を支えられる強度）に着目し、拘束条件の異なるパネルの圧縮強度式を互いに変換することを可能にした。

5章では、あらゆるサイズに適用可能な強度計算式を検討し、2種類のアプローチから検討した。1つ目のアプローチは、4章の成果を参考にし、耐荷重強度に着目してその積分から圧縮強度式を求めた。パネル幅の増加によって、耐荷重強度分布の特徴が4つの領域を経て変化すると仮定し、各領域の分布の特徴に従い圧縮強度式を構築した。計算で得られた圧縮強度は実験値と正確に一致することが確認され、このモデルが実際の耐荷重分布の特徴を正しく捉えていることを確認した。しかしながら、ここで構築した圧縮強度式を特定するには6個のパラメータが必要で、一部のパラメータは段ボールシートの物理的な特性値と関連づけて特定することが出来たが、すべてのパラメータの特定には至らなかった。耐荷重強度の特徴に従って領域分けをして解析する手法は、耐荷重強度を直接観察できる感圧センサーや、パラメータと関連付けるためのAI手法により、今後は圧縮強度式構築に活用できると考えられる。

2つ目のアプローチでは、箱の破壊モードに合わせて圧縮強度式を構築した。パネルはそのサイズによって、箱圧縮時には圧潰（蛇腹状に上下罫線部分がつぶれながら破壊する）と座屈破壊（パネルがたわみ降伏線が現れそこから破壊する）の大きく2種類の様式で破壊する。圧潰時はパネルの上下罫線部分が荷重を支えていることから、パネルの圧縮強度を段ボールシートの基本物性値である垂直圧縮強度の1次式で計算した。座屈時は、簡略化前のMcKee式を適用した。段ボールシートはそれ自体に段構造を持ち、座屈破壊時には内部構造が破壊を伴いたわんで破壊することから、圧潰に関するパラメータである垂直圧縮強度と座屈に関するパラメータである臨界座屈荷重の重み付相乗平均で表した簡略化前のMcKee式を適用した。このアプローチは従来の材料力学の手法を組み合わせたもので、半経験的に導く実用性の高い計算方法である。構築した圧縮強度式が既存の圧縮強度式を適用できないパネルサイズを含めて、実用的な精度を持つことを確認した。さらにこの強度計算式を日本で使用する際の実用性を高めるために、曲げ強度にかえて垂直圧縮強度を用いる式へ変形した。

本研究の成果により、設計段階からあらかじめ段ボール箱の圧縮強度を推定することにより、実際の箱の圧縮強度を測定することなく様々な箱を迅速に効率よく設計できるようになる。

（別紙１）　　論文審査の結果の要旨

氏名	高山　崇		
論文題目	あらゆる形式・サイズに適用可能な段ボール箱の強度推定法に関する研究		
審査委員	区　分	職　名	氏　　名
	主　査	教授	齋藤　勝彦
	副　査	教授	河口　信義
	副　査	教授	阿部　晃久
	副　査		
	副　査		印

要　　旨

段ボール箱の圧縮強度は、60年ほど前にKellicuttやMcKeeによって推定法が考案され、その利便性と推定精度の高さから現在もなお広く活用されている。一方、近年ではユニバーサルデザインへの配慮や、陳列効果の向上を目的とした特殊形状の箱の開発が活発になり、通信販売の発展に伴い小型の段ボール箱も多用されてきている。これら特殊形状の箱や小型の箱では従来の圧縮強度推定法の精度が十分ではなく、精確な圧縮強度を得るためには実際に圧縮試験機で強度測定をするか、その箱形式に合わせた個別の対応が求められている。さらに、顧客ニーズの多様化等に対応した製品開発により、商品化されるまでの期間が短縮されている昨今では、商品に合わせた容器包装設計にも時間的制約が求められ、外装資材である段ボール箱においても、圧縮強度測定や個別の強度推定法を構築する猶予がないことから、あらゆる形式・サイズの段ボール箱に適用できるような汎用的な強度推定法が望まれている。

そこで本研究では、新しい段ボール箱の設計において、箱の形式や大きさにかかわらず圧縮強度を推定出来る手法の構築を行っている。

本論文は、以下に示す６つの章から構成されている。

第１章では、段ボール箱圧縮強度推定法の開発経緯と本研究の必要性に至る社会・技術的背景について述べ、本研究の目的である「あらゆる形式・サイズに適用可能な段ボール箱の強度推定法」を構築するための考え方について述べている。

第２章では、既存の圧縮強度推定法や本研究で構築する新たな推定法でも用いられる、段ボールシートの基本的な力学的特性の概念と測定方法について述べている。

第３章では、本研究で提案する圧縮強度推定法の基本となるMcKee法について、複雑な計算が必要であった原形式から実用性を重視し計算結果に影響の少ないファクターを簡略化する方法について述べ、強度推定法における制約条件と簡略化の妥当性を評価している。

第４章では、あらゆる「形式」の段ボール箱に適用可能な強度推定法について検討している。段ボール箱は、１枚の段ボールシート平面を折り曲げることで立体的に成形されたものであり、ここでは箱全体の強度が、箱への荷重を支える複数平面それぞれの強度の合算によって推定できると仮定している。それにより既存の強度推定法を用いて、様々な「形式」の段ボール箱を用いて圧縮強度の実測値と推定値を比較したところ、推定誤差は±10%程度以内となった。一方で、既存手法の制約条件に該当しない箱サイズでは推定精度が劣ることが確認され、箱サイズに制約のない強度推定法の必要性を指摘している。

氏名	高山　崇

第５章では、あらゆる「サイズ」の段ボール箱に適用可能な強度推定法について検討している。まず、耐荷重強度分布に着目した方法について、サイズが大きくなることによる耐荷重強度分布の特徴の変化に対応した強度推定法を構築している。これにより、段ボールシートの力学的な特性値から強度推定のためのパラメータを特定することができることが示唆されている。さらに、箱の破壊挙動に着目した強度推定法を構築している。その方法は、これまで提案されている手法を組み合わせたもので半経験的ではあるものの、従来は段ボール箱のサイズによって適用範囲が限定されていたのに対して、本強度推定法では、あらゆるサイズの段ボール箱に適用でき、実用に供する精度で圧縮強度を推定できることを確認している。

第６章では、学位論文の内容をまとめている。

以上のように本研究で得られた成果は、合理的で適正な輸送包装設計の確立に資することが期待でき、貨物の安全輸送を支える包装技術の向上に貢献できる。なお、本論文の主要な内容は、３件の有審査論文として公表され、国際会議において２件の英語による本人口頭発表およびフルペーパー形式英文論文公表を行っている。提出された論文は海事科学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の高山崇は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。