	さいとう　ひろし
氏　　名	斉　藤　　博　嗣
学位(専攻分野)	博　　士（工学）
学位記番号	博甲第３１１号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規程第３条第３項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　先端ファイブロ科学専攻
学位論文題目	軸方向圧縮を受ける高分子複合材料のエネルギ吸収特性に関する研究
審査委員	主　査　濱田　泰以
	委　員　岩本　正治
	委　員　西村　太良
	委　員　金原　勲
	委　員　宇治橋　貞幸

論文内容の要旨

高分子複合材料は，圧縮負荷時に特有の破壊形態を示し，高いエネルギ吸収特性を示すことが知られている．この特性を生かし，自動車等の運行体にエネルギ吸収部材として用いる試みがなされている．しかし，複合材料のエネルギ吸収特性に関する多くの研究は，破壊現象を巨視的にとらえたものである．そこで本論文では，高分子複合材料が圧縮破壊時に示すエネルギ吸収特性を，破壊メカニズムの詳細な観察に基づき検討した．また，エネルギ吸収部材としての複合材料と他の部材との接続を考慮した検討を行った．

第２章では，高分子複合材料円筒の軸方向と周方向の繊維量の比である A/H 比を用いた，高分子複合材料の圧縮時に見られる破壊モードの分類方法について紹介した．その中で，材料の持つエネルギ吸収特性の評価法である，単位質量あたりのエネルギ吸収量である Es 値の定義を述べた．また，高分子複合材料が高いエネルギ吸収特性を示す際に見られる progressive crushing と呼ばれる破壊現象の破壊メカニズムについて述べた．

第３章では，ガラス繊維束を用い，中心糸と名付けた一方向材を丸打組物で被覆することにより，円形断面を有する組物複合材料ロッドを作製し，そのエネルギ吸収特性を調べた．また，中心糸に用いた繊維束数，組物の積層数および組角度を変化させて，エネルギ吸収特性におよぼす影響について検討を行った．組物構造により，中心糸繊維束間界面のき裂進展が妨げられ，組物複合材料ロッドは progressive crushing を生じた．また，組物構造がエネルギ吸収特性に及ぼす影響を評価するパラメータとして，組角度を考慮した A/H 比を用いた結果，ある A/H 比においてエネルギ吸収特性はピークを示した．このことから，組物複合材料ロッドの構造設計では，高いエネルギ吸収特性を得られる，最適な条件が存在することが示された．

第４章では，繊維と樹脂の界面を界面相として 3 次元的にとらえ，界面相に積極的に特性を付与する試みを行った．第３章で用いた組物複合材料ロッドの中心糸に，低弾性かつ高じん性な樹脂である柔軟性樹脂を界面相として付与した組物複合材料ロッドを作製し，柔軟性界面相がエネルギ吸収特性におよぼす影響について検討を行った．その結果，柔軟性界面相を付与した組物複合材料ロッドでは，中心糸繊維束間のき裂進展が妨げられ，き裂はロッドの中心より外側で生じ

た．その内側では繊維の圧縮破壊による破断が多く生じることにより，高いエネルギ吸収特性を示した．

第５章では，組物を用いた引抜成形法により作製した組物複合材料ロッドを用いて，圧縮破壊時のエネルギ吸収特性および破壊機構について検討を行った．その結果，ガラス繊維や炭素繊維を強化材とする組物複合材料ロッドは，圧縮負荷により progressive crushing を示すことにより高いエネルギ吸収特性を示した．中心糸や組物繊維にガラス繊維あるいは炭素繊維を用いることで，破壊モードが変化し，それぞれ異なったエネルギ吸収特性を示した．強化材をガラス繊維および炭素繊維としたときの破壊モードの違いは，DCB 試験を行うことによるモード I 層間破壊じん性値の測定結果から，母材と強化繊維の界面特性の違いによるものであることが示された．

第６章では，カーボン繊維組物を強化形態とする複合材料パイプのエネルギ吸収特性について検討を行った．その結果，組角度を変化させることによりエネルギ吸収特性は変化した．その違いを，第３章で用いた組物の組角度を考慮した A/H 比を用いて比較した結果，A/H 比が高い場合は，多くの繊維破断を生じて fragmentation mode が見られ，A/H 比が低い場合は，splaying mode が見られ，fronds と圧子治具との摩擦が高くなった．しかし，その中間の A/H 比をとる場合，エネルギ吸収特性は両者に比べ低くなり，破壊形態が splaying mode と fragmentation mode の両極をとるときに，エネルギ吸収特性は高くなることが示された．

第７章では，角型の断面形状を有するガラス繊維強化複合材料角筒を用いて，軸方向圧縮負荷時に示されるエネルギ吸収特性について検討を行った．角筒角部では，圧縮直後に角筒先端部の内側でせん断破壊を生じ，角筒内側に大きなき裂の進展が見られることにより，吸収エネルギの損失がみられた．そこで予き裂を挿入し，圧縮試験を行ったところ，角部における急激なき裂進展が抑制されることが示された．また，角筒が予損傷を受けた場合に，予損傷がエネルギ吸収特性に与える影響について検討を行ったところ，角筒角部に予き裂を与えた場合と同様の結果が得られた．

第８章では，テーパを持たない複合材料に治具を用いて破壊を生じさせる手法を提案し，その有効性を検討した．複合材料円筒に対して凸型の治具と，凹型の治具の２種類について，それぞれ異なるテーパ角度を治具に設けて，その影響を調べた．その結果，いずれの治具についても，あるテーパ角度を治具に設けることにより progressive crushing を生じ，複合材料にエネルギ吸収特性を発揮させることができることが示された．

第９章では，ボルトにより接続された複合材料円筒の，軸圧縮負荷下におけるエネルギ吸収特性について検討を行った．その結果，ボルトの径およびボルト本数を変化させることにより，破壊形態の変化が見られた．そこで，複合材料円筒がエネルギ吸収特性を発揮するための，ボルト径およびボルト本数を導く条件式を提案し，ボルト接続された円筒をエネルギ吸収部材として適用できる可能性を示した．

以上の結果から，組物を高分子複合材料の強化形態として用いることにより，組物の組角度や繊維量，積層数，あるいは柔軟性界面相などを変化させることにより，エネルギ吸収特性を制御可能であることが示された．また，破壊の詳細な観察結果や，そこから得られた破壊メカニズムが，エネルギ吸収特性に与える影響が明らかにされた．

論文審査の結果の要旨

本論文の主題は，圧縮負荷を受ける際に高分子複合材料が示すエネルギ吸収特性に関する研究である．申請者は圧縮破壊後の高分子複合材料について，詳細な断面観察に基づく破壊メカニズムの解明を行い，エネルギ吸収特性との関係について研究した点に新規性が認められる．

申請者は，組物を強化形態とする高分子複合材料について，組物がエネルギ吸収特性に及ぼす影響を検討しており，組物構造のパラメータとして組角度および組物の積層数，挿入する一方向繊維束などを考慮し，エネルギ吸収特性との関係について明らかにした．これにより，エネルギ吸収部材としての組物高分子複合材料の設計指針を示した．

また，エネルギ吸収部材として高分子複合材料を実際に適用するためのアプローチとして，断面形状が角形の高分子複合材料角筒についてエネルギ吸収特性および破壊メカニズムの解明を行った．特に，高分子複合材料角筒の破壊メカニズムはこれまで明らかにされておらず，高く評価できる．さらに治具を用いた圧縮により安定した破壊を生じさせる手法や，ボルトにより接続された高分子複合材料のエネルギ特性の評価など，エネルギ吸収部材としての実用化を考慮した検討を行なっている．

全体として，高分子複合材料のエネルギ吸収特性の評価と，破壊メカニズムの解明というテーマに沿って研究の成果がまとめられており，本論文の成果は学位論文にふさわしい内容を持つものと認められる．

なお，本論文の内容は次の 6 報に報告されている．そのうち 3 報は申請者が筆頭著者である．

1) H.Hamada, K.Kameo, M.Sakaguchi, H.Saito, M.Iwamoto,
"Energy-absorption properties of braided composite rods",
Composite Science and Technology, 60, pp.723-729 (2000)

2) H.Saito, E.C.Chirwa, R.Inai, H,Hamada
"Energy absorption of braiding pultrusion process composite rods",
Composite Structures, 55 ,pp.407-417 (2002)

3) R.Inai, H.Saito, T.Uozumi, A.Nakai, E.C.Chirwa and H.Hamada
"Experimental Investigation on the Crushing Properties of CF Braided Composite Pipes",
International Journal of Crashworthiness, now submitting

4) H.Saito, R.Inai, H.Hamada
"Crusing properties of plutruded glass reinforced square tubes",
International Journal of Crashworthiness, Vol.7, No.1, pp.21-33 (2002)

5) R.Inai, H.Saito and H.Hamada
"New Crushing Method to Generate Progressive Crushing in Fiber Reinforced Plastic Composite Pipe",
International Journal of Crashworthiness, now submitting

6) 斉藤博嗣，濱田泰以
「ボルトにより接続された複合材料円筒のエネルギ吸収特性」
複合材料学会誌，投稿中