

|             |                                                                                                            |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名         | もり い とおる<br>森 井 亨                                                                                          |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 (工 学)                                                                                                  |
| 学 位 記 番 号   | 博 乙 第 26 号                                                                                                 |
| 学位授与の日付     | 平 成 6 年 11 月 28 日                                                                                          |
| 学位授与の要件     | 学位規則第 4 条第 2 項該当                                                                                           |
| 学 位 論 文 題 目 | <b>Degradation Behavior of Fiber Reinforced Composites in Water Environment</b><br>(水環境下における繊維強化複合材料の劣化挙動) |
| 審 査 委 員     | (主査)<br>教 授 前川善一郎<br>教 授 松尾達樹    教 授 自念榮一                                                                  |

## 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は水環境下における繊維強化複合材料の劣化挙動を解明し、本材料の耐水性向上の設計指針を得るために行なわれたものである。本論文は、6 章および緒論と結論から構成されるものであり、以下に各章の概要を示す。

第 1 章の緒論では、各種環境下における繊維強化複合材料の適用例を挙げ、劣化挙動を解明することの重要性を述べ、さらに水および湿潤環境下における繊維強化複合材料の劣化挙動に関するこれまでの研究の梗概およびそれらの問題点を概説し、本研究の背景および目的を述べている。

第 2 章では、温水中に浸漬したガラス繊維強化複合材料の重量変化挙動を評価するための手法を提案し、重量変化のメカニズムを明らかにすることを試みている。複合材料の重量変化とマトリックス樹脂単体の重量変化を比較するとにより、本材料の劣化挙動が複合材料中のマトリックス樹脂のみの水分吸収と飽和に至る過程と繊維／マトリックス界面の劣化に伴う重量損失の発生の過程に分けられることを見出している。重量損失は水分吸収の発生に対して遅れて生じるため、この時間差を重量損失の遅れ時間として定義し、このパラメータを用いることにより、重量損失挙動と溶出物の水中への拡散挙動を明確にしている。一方 Fick の拡散則に基づく重量変化挙動の理論的な定式化を行ない、これと実験結果とを比較することにより、その有用性を見出している。

第 3 章では、第 2 章で得られた結果に基づき、繊維／マトリックス界面の重量変化挙動を各構成素材の重量測定および溶出物の化学分析から解明している。化学分析により、溶出物は主に界面領域に存在するバインダ、シランカップリング剤であることが明らかとなり、この溶出で生じた界面領域に水分が浸透することにより著しい重量増加が生じることを見出している。このような界面の重量変化は、主に複合材料中の樹脂部の水分吸収が飽和に達した後に生じるものであり、長時間水中に浸漬された複合材料の重量変化挙動に大きく影響することになる。このことは界面領域の複合材料中に占める割合が、水環境下における複合材料の長期間の重量変化に大きく影響することを示唆しており、水環境下における複合材料の重量変化を抑制するためには、繊維／マトリックス界面の設計が重要であることを明らかにしている。

第 4 章では、温水中に浸漬した複合材料の弾性率低下について検討している。実験結果より重量損失は弾性率低下にほとんど影響せず、弾性率低下の主な要因は繊維束／マトリックス界面および繊維束内界面の劣化であることを明確にしている。さらに損傷力学を導入した有限要素法により、弾性率低下に及ぼす界面の劣化の影響を検討し、弾性率低下の主要因は繊維／マトリックス間に発生するはく離であることを明らかにしている。

第5章では温水中に浸漬した複合材料の強度低下とその破壊過程について検討している。未浸漬材の破壊の発生は繊維束／マトリックス間のはく離であるのに対し、温水浸漬材では繊維束内のはく離であることを明らかにしている。強度の低下は、構成素材の劣化と繊維束／マトリックス間および繊維束内に発生するはく離の拡大により生じることを明確にし、アコースティック・エミッション（AE）測定により得られる AE 振幅と AE エネルギーから、破壊の規模が評価でき、本手法が複合材料の温水浸漬材の破壊モードの変化の評価にも適用し得ることを明確にしている。

第6章では、円孔を設けた複合材料板を温水中に浸漬し、これを継手構造として引張試験を行なうことにより、複合材料の機械的継手の劣化挙動について検討している。引張破壊を示す継手では温水浸漬による強度低下は小さいが、圧かい破壊を示す継手は著しい強度低下を示している。このような継手強度低下の相違は、圧かい強度特性が温水浸漬により著しく低下することに起因しており、そのため温水劣化した継手の破壊は、最終的にはすべて圧かい破壊を示すモードへと移行することになることを見出している。

以上、第2章から第6章まで示してきた結果はすべて熱硬化性樹脂である不飽和ポリエステルをマトリックスとした複合材料に関するものであり、現在構造材料として広く用いられている複合材料の多くは、このような熱硬化性樹脂をマトリックスとしたものである。しかしながら近年では、廃棄やリサイクル性の点から熱可塑性樹脂をマトリックスとした複合材料が非常に注目されている。そこで第7章では熱可塑性樹脂であるポリプロピレンをマトリックスとする複合材料に関して、第2章から第6章と同様に、温水浸漬による重量変化、曲げ特性、機械的継手強度の変化を検討している。本材料の場合重量増加は典型的な Fick の拡散挙動を示し、界面からの重量損失はほとんど失じないことと、種々の力学的特性の劣化のデータから優れた耐水性を有していることを見出している。

第8章ではこれまで論じてきたものをまとめ、複合材料の耐水性向上のための設計指針、特に繊維／マトリックス界面の設計に関する概念をまとめている。

## 論文審査の結果の要旨

近年、ガラス繊維を強化材とする高分子系の繊維強化複合材料は住宅用および工業用貯水タンクなど水環境下で使用される機器の構造材料として一般に用いられるようになっている。そのため水環境下において本材料を用いる場合の長期的な特性変化を把握し予測することが構造物の安定性を保証する上で重要なことである。本研究はマトリックスとして熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂を選び、長期の温水浸漬試験を行ない、本材料および構成素材の水分吸収などによる重量変化と力学的特性の低下の関連を詳細に調べることで、繊維／マトリックス界面の劣化挙動が重要な役割を果たしていることを見出し、耐水性に優れた繊維強化複合材料の開発するための指針を与えている。本研究においては温水浸漬下の本材料を構成する各素材の重量減少と水分増加を区別して測定し、その結果より劣化挙動を解明している点は従来の研究には見られない点である。さらに本機構を理論的に証明できるモデルを提案し、力学的特性を推運する手法を提案し、実験結果との一致を見ているが、本手法の実用的な価値は非常に大きいと考えられる。このように本問題を実験的および理論的見地から系統的に取り扱った研究成果は高く評価できるものである。さらに実用的な展開として機械的継手に応用する場合の設計指針をも与えており、工学的価値は大きいと考えられる。

本研究に関する内容は、下記に示すように材料分野での国際的な4種類の学術誌に8報が掲載または印刷中であり、さらに日本機械学会論文集に1報が掲載されている。これらの論文のうち8報が申請者が筆頭著者である。

以上の結果より本論文の内容には十分な新規性と独創性ならびに高い学術的価値があることを全審査員が認めた。

#### 関連論文一覧

- 1) 濱田泰以、前川善一郎、平野孝博、森井 亨、春名一志、FRP 機械的継手の温水劣化挙動, 日本機械学会論文集 (A 編)、57、591(1991)
- 2) T. Morii, H. Hamada, Z. Maekawa, T. Tanimoto, T. Hirano and K. Kiyosumi, Relation between weight changes and bending properties of GFRP panel immersed in hot water, *Polymers and Polymer Composites*, 1, 37 (1993).
- 3) T. Morii, T. Tanimoto, H. Hamada and Z. Maekawa, Degradation behaviour of glass fibre mat reinforced polypropylene immersed in hot water, *Polymers and Polymer Composites*, 1, 175 (1993).
- 4) T. Morii, H. Hamada, Z. Maekawa, T. Tanimoto, T. Hirano and K. Kiyosumi, Weight changes of a randomly oriented GRP panel in hot water, *Composites Science and Technology*, 49, 209 (1993).
- 5) T. Morii, H. Hamada, Z. Maekawa, T. Tanimoto, T. Hirano and K. Kiyosumi, Weight change mechanism of randomly oriented GFRP panel immersed in hot water, *Composite Structures*, 25, 95 (1993).
- 6) T. Morii, H. Hamada, Z. Maekawa, T. Tanimoto, T. Hirano, K. Kiyosumi and T. Tsujii, Weight changes of the fibre / matrix interface in GRP panels immersed in hot water, *Composites Science and Technology*, 50, 373 (1994).
- 7) T. Morii, H. Hamada, Z. Maekawa, T. Tanimoto, T. Hirano and K. Kiyosumi, Fracture and acoustic emission characteristics of glass fiber reinforced plastics panel in hot water, *Polymer Composites*, 15, 206 (1994).
- 8) T. Morii, H. Hamada, Z. Maekawa, T. Tanimoto, T. Hirano and K. Haruna, Degradation behavior of mechanically fastened GFRP joints immersed in hot water, *Polymer Composites*, (印刷中).
- 9) T. Morii, H. Hamada, Z. Maekawa and T. Tanimoto, Hydrothermal effects on mechanically fastened glass / polypropylene composite joint, *Polymer Composites*, (印刷中).