

氏 名	まち だ くに お 町 田 邦 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	プラスチック基繊維強化複合材料の力学的挙動に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 三戸 暁
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 三戸 暁 東北大学教授 横堀 武夫 東北大学教授 渥美 光 東北大学教授 川崎 正

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

複合材料は現在最も高いポテンシャルを持つ材料として各方面から注目を集めている。複合材料は複合添加する材料の形状によってその強化機構は全く異なり、一般に粒子分散強化型と繊維強化型の 2 種類に大別される。このうち繊維強化複合材料では、ガラス繊維で強化したプラスチック基複合材料、即ち FRP が一部実用化され始めており、今後はその軽量性かつ比強度の高い点から航空機、車輛、船舶などの輸送機械をはじめ各種の機械・構造物への適用が期待されている。しかし、これらの繊維は元来脆性を示すため異種繊維とのハイブリッド化などの方法でこの点を改善する試みも行われているが、最も簡単な方法は強靱な性質を有する金属を強化繊維として用いることであると考えられる。この種の複合材料は金属繊維強化プラスチック (MFRP) と呼ばれているが、ボロン/エポキシ複合材料を除いては従来ほとんど研究されていない。この種の新

しい複合材料の製作並びに強度設計に対する基礎資料を得るため、本研究では延性の異なる各種の金属繊維を含むプラスチック基複合材料を試作し、各種の力学的性質、変形挙動の特殊性、界面接着強度の影響などについて明らかにしたものである。

第2章 繊維の引き抜き強さ

繊維-母相間の応力伝達は界面を介して行われるが、この界面強度は一般に繊維の引き抜き強さによって評価される。繊維の引き抜き過程は界面の剥離、その後界面の摩擦に逆って引き抜ける引き抜け又は繊維の破壊から成り立ち、このうち剥離に要する最大応力は剥離強度と呼ばれ引き抜け過程の最初の引き金として重要である。母相が塑性変形する場合、界面剪断応力は繊維に沿って一定であるが弾性母相の場合は繊維に沿って変化する。これらの応力分布はGreszczuk, Lawrenceらによって理論的に導かれている。

本章ではエポキシ樹脂を母相とし、これに延性の異なる数種の金属繊維を種々の長さに埋め込んだ場合の繊維の引き抜き強さを調べた。その結果、タングステンなどの延性の小さい繊維では界面剥離が発生すると同時に引き抜けが生じ（脆性引き抜け）、引き抜き強度は繊維の弾性率、形状及び界面剪断強度をパラメータとする弾性論の式で表わされる（図1）。一方、延性の大きいステンレス繊維の場合は塑性変形に伴うポアソン効果などにより負荷中に界面剥離がおこり、これが徐々に伝播して引き抜ける（延性引き抜け）。この時の引き抜き強度は上式に更に摩擦力に相応した応力を加味した式に従う（図2）。また、繊維に施した表面処理により界面強度、剥離後の摩擦係数が異なることも明らかになった。

第3章 引張変形挙動

複合材料の応力を表わす式として複合則（Rule of Mixture略してR.O.M）がよく用いられており、本章でも複合則の観点から検討を行った。

延性の異なる数種の金属繊維をエポキシ母相に埋め込んだ試験片につき、常温で引張試験を行った。応力-ひずみ曲線の形状は用いた強化繊維の延性に著るしく左右される。即ち、タングステンなどの延性の小さい繊維を含む複合材料では繊維の体積率によらずその形状はほぼ相似で（図3）、破断伸びは繊維自身の伸びにはほぼ等しく、繊維、母相共に同時破断する。引張強度は従来の複合則でよく表示される（図4）。比強度は体積率に伴い滑らかに増加する。一方、延性の大きいステンレス繊維の場合には母相だけが破断し、繊維は破壊せずに母相から引き抜ける。この時界面には剥離が生じ、この長さは体積率に伴い減少する。また高体積率（42%）では多重破壊が認められた。応力-ひずみ曲線は体積率によって変化する（図5）。即ち、体積率が14%以上になると変形に伴って静水圧の効果が顕著に現われ出し、体積率の効果と相まって母相中の

き裂の発生，伝播を抑えるため異常に大きな破断伸びを示す。従って，引張強度は低体積率側では従来の複合則で表わされるが，高体積率側ではそれを上回る強度を示す（図6）。この複合材料の比強度は体積率に拘わらずほぼ一定である。

第4章 常温クリープ挙動

複合材料のクリープ変形機構は強化繊維の長さによって異なる。例えば，連続繊維を含む場合は繊維自身のクリープ挙動が律速因子となる。本章でもこの立場から検討を行った。

複合材料の素材及び作製方法は第3章と同じである。エポキシ母相単体及びタングステンなどの延性の小さい繊維を含む複合材料では体積率によらず遷移，定常，加速の3段階のクリープを示す（図7）。応力 σ_c と定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_c$ 又は破断時間 t_r の間には $\dot{\epsilon}_c = A \sigma_c^n$ ， $t_r = B \sigma_c^{-n}$ の関係が成立する。ここでA，Bは定数，nは応力指数である。また，クリープ強度と破断強度に対してはそれぞれ， $(\sigma_c)_{\dot{\epsilon}_c} = (\sigma_f)_{\dot{\epsilon}_c} V_f + (\sigma_m)_{\dot{\epsilon}_c} (1 - V_f)$ ， $(\sigma_c)_{t_r} = (\sigma_f)_{t_r} V_f + (\sigma_m)_{t_r} (1 - V_f)$ の式で表わされる複合則が得られる。ここで $(\sigma)_{\dot{\epsilon}_c}$ は定常クリープ速度が $\dot{\epsilon}_c$ の時の応力， $(\sigma)_{t_r}$ は破断時間が t_r の時の応力， V_f は体積率，c，f，mはそれぞれ複合材，繊維，母相を表わす。両式を用いて σ_c と σ_m から定常クリープ中と破断時の繊維応力を求めると体積率に拘わらずそれぞれ $\sigma_f = (\sigma_f)_0 \dot{\epsilon}_c^{\psi_f}$ ， $\sigma_f = (\sigma_f)_{t_r} t_r^{\omega_f}$ の関係が得られる。母相についても同様の型の関係が成立するから最終的にクリープ強度については $(\sigma_c)_{\dot{\epsilon}_c} = (\sigma_f)_0 \dot{\epsilon}_c^{\psi_f} \cdot V_f + (\sigma_m)_0 \dot{\epsilon}_c^{\psi_m} (1 - V_f)$ ，破断強度については $(\sigma_c)_{t_r} = (\sigma_f)_{t_r} t_r^{\omega_f} \cdot V_f + (\sigma_m)_{t_r} t_r^{\omega_m} (1 - V_f)$ の関係式が得られる。また，タングステンなどの延性の小さい繊維を含む低体積率の複合材料では多重ネッキングが生じ，ネック間隔は繊維直径の約4倍であった。次に，延性の大きいステンレス繊維複合材料は対数クリープだけを示し（図8），高体積率，低応力ほど明確な対数クリープを示す。クリープ変形中の繊維応力は時間の経過に伴い増加し，その増加率は低体積率ほど大きい。繊維応力とクリープ速度との関係は $\dot{\epsilon} = D \sigma_f^{\phi}$ で表わされ，応力指数 ϕ は3.3～4.4であった。

第5章 クリープ変形におけるタングステン／エポキシ複合材料の多重ネッキング

多重ネッキングとは繊維にネックが等間隔に繰返し現われる現象で，この時の引張強度は複合則の予想より大きくかつ破断伸びも増加することが知られている。従来，多重ネッキングは金属系複合材料で観察されており，本実験の様に界面接着力の小さいプラスチック系複合材料で観察された例は未だない。本章ではタングステン繊維を1本だけ含むエポキシ母相複合材料をクリープ変形させた場合の多重ネッキングについて調べた。

ネックは破断した箇所の周辺によく現われており，そこから遠ざかるにつれくびれの程度は次第に小さくなった。一本の繊維に発生したネック数Nは破断時間又は破断伸び ϵ_{t_r} に比例し（図

9), 詳しくは加速クリープ中の伸びに比例しており, 従ってネックは加速クリープ領域で発生すると考えられる。この事実はクリープ変形中の繊維を連続して観察した一連の写真からも確認され, 加えて加速クリープ領域ではネック数が増加し, ネックの断面減少が著るしくなると界面にリング状の剥離が生じることも確められた。ネック間隔 l_N は破断伸び, 破断時間, ネック数に関係なく繊維直径 d の約4倍であり (図10), 基本的には $l_N = (\Delta\sigma_f \cdot d) / (4\tau_s)$ の式で表わされる。ここで $\Delta\sigma_f$ はネック部の応力減少分, τ_s は界面剪断強度である。界面強度が大きいとクリープ変形中に母相内で繊維の破壊する割合が高くなり, その結果破断伸びは増加するが破断時間は短くなる。また, ネックの断面減少が急激におこると周囲の母相に円板状のき裂が形成される。

第6章 結 論

本章は本研究で得られた結論の要旨をまとめたものである。

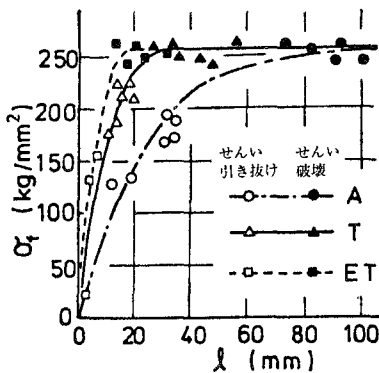


図1. タングステン繊維の引き抜き強さ

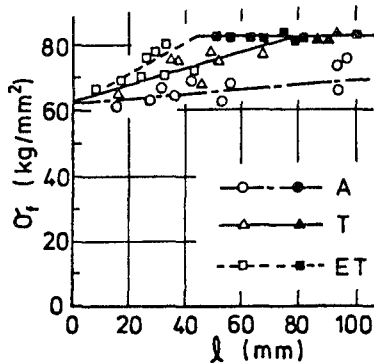


図2. ステンレス繊維の引き抜き強さ

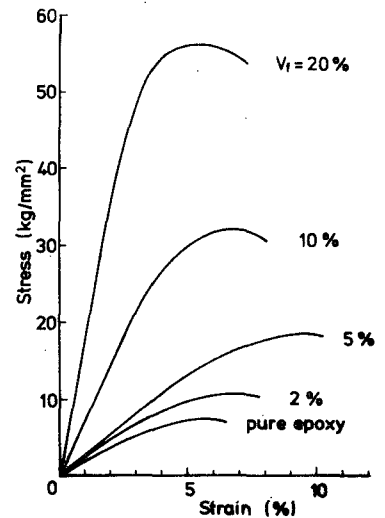


図3. タングステン/エポキシ複合材料の応力-ひずみ曲線

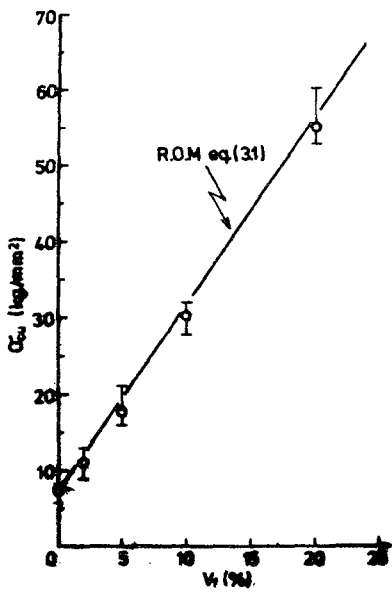


図 4. タングステン/エポキシ複合材料の引張強度

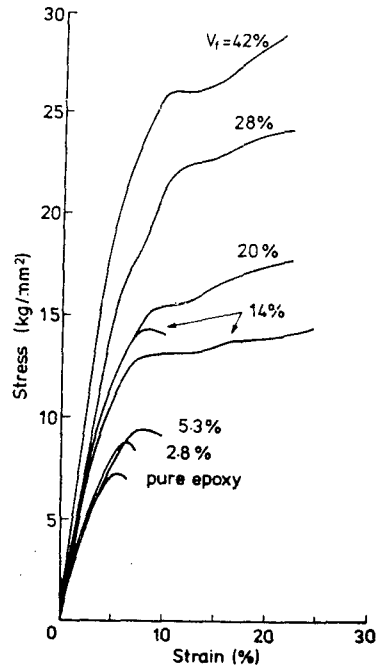


図 5. ステンレス/エポキシ複合材料の応力-ひずみ曲線

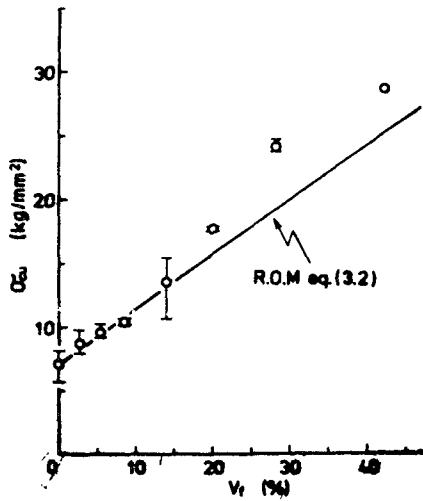


図 6. ステンレス/エポキシ複合材料の引張強度

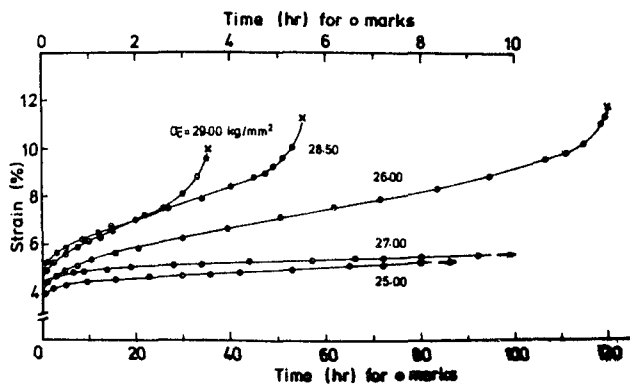


図7. タングステン/エポキシ複合材料のクリープ曲線 ($V_f = 10\%$)

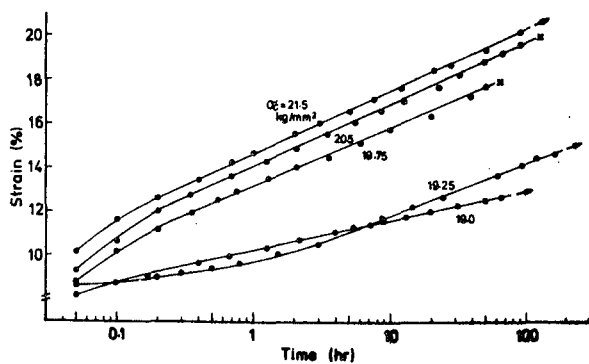


図8. ステンレス/エポキシ複合材料の対数クリープ曲線 ($V_f = 28\%$)

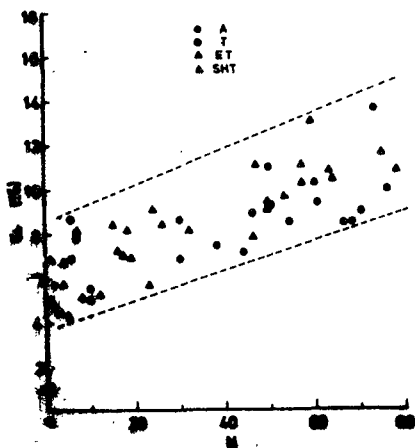


図9. ネック数と破断伸び

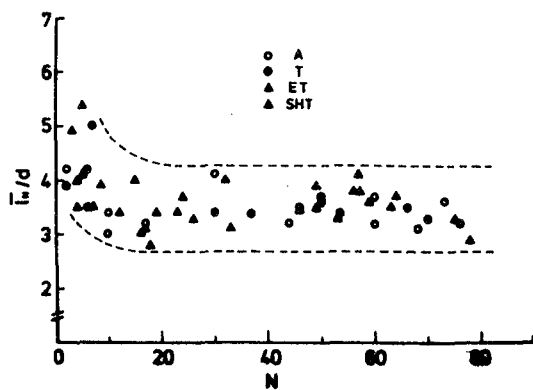


図10. ネック間隔とネック数

審査結果の要旨

近年、繊維強化複合材料は高い性能を持った新材料として注目されており、一部のガラス繊維強化複合材料では実用段階にあるが、この材料は比強度の点ではすぐれているものの靱性値は低く、機械・構造物用部材としてはなお検討を要する点が少ない。この靱性の改良には金属繊維が適していると思われるが、この点に関する研究は未だ行われていない。

本研究はこのような点に鑑み、強度及び延性の異なる各種の金属繊維を強化繊維とするエポキシ複合材料を試作し、常温における変形及び破壊の挙動を調べ、複合材料の強度改善に対しては金属繊維が極めて有効であることを明らかにしたもので全文6章よりなる。

第1章は緒論であり本研究の背景・目的・意義等について述べている。

第2章では表面処理を異にする各種の単繊維複合材料試料について引抜き試験を行い、延性の小さい繊維では脆性的引抜けが生ずるが、延性の大きい繊維では引抜けは界面剥離を生じつつ徐々に起きること、剥離強度・引抜き強度等は弾性論による計算値にかなり近い値が得られること、界面剪断強度は繊維の表面処理により著しく異なること等を明らかにしている。

第3章では繊維含有量を異にする各種試料について引張試験を行い、前章同様繊維の延性の大小によって変形及び破壊の挙動が異なり、延性の小さい繊維試料の強度特性値は複合則により表示されるが、延性の大きい繊維試料では複合則からの予測値よりも優れており、とくにその破断伸びは母相内に生ずる静水圧の効果等によりエポキシ単体に比し著しく改善されることを明らかにしている。

第4章ではクリープ試験の結果について述べている。延性の小さい繊維の場合には母相同様、遷移・定常及び加速クリープ挙動を示すが、延性の大きい繊維では対数クリープのみ生ずること、それぞれのクリープ強度特性値は複合則で表示されることを述べている。

第5章では延性の小さいタングステン繊維強化複合材料のクリープ変形中に生ずる繊維の多重ネッキングについて調べ、これは加速クリープの段階で生ずること、ネッキング間隔は界面剪断強度及び繊維径等により影響されることを明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は金属繊維で強化されたプラスチック複合材料の変形及び破壊挙動を実験的に究明して、金属繊維の利用による新しい型の複合材料の開発・設計・製作等に対する多くの有用な知見をたものであり、機械材料工学及び機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。