

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 山口 晃司

近年、高強度・高剛性で軽量な繊維強化プラスチック（FRP）等の複合材料シートの接着により既存構造物を補強・補修する方法が構造物のメンテナンス工法として各方面で注目されているが、実機への適用試行が先行し、強度信頼性に関する基礎的研究はあまり行われていない。本研究は、複合材料による補強・補修システムを確立するため、破壊過程の詳細な検討とモデル化により、このような接着工法の強度信頼性に関する基礎的知見を得る目的で行ったもので、本文は10章から構成されている。

第1章、第2章は序論で、環境問題によって求められるメンテナンス技術への社会的要求について述べ、土木・建築構造物、航空機、海洋構造物の3種類について、現在行われているメンテナンス技術、複合材料による補強・補修技術に関する既往の研究および実構造への適用事例について展望し、本研究の立場と目的を明らかにし、本論文の構成を示している。

第3章では、FRPシートにより補強されたコンクリート梁の3点曲げ試験を行い、最終破壊に至る破壊過程の特徴について検討している。この結果、非補強試験体よりも補強試験体の方が最高荷重および最終破壊までの変位が大きくなり、最高荷重は補強FRPシートの強度を増すほど大きくなる傾向があるが、シートの剛性の比ほどは大きくなることを示し、この原因がシートが試験体からはく奪することによって補強効果が失われることから、構造強度が接着強度に依存していることを明らかにしている。

第4章では、複合材料によって補強された片側切り欠き試験片の補強効果を説明するため、引き剥がされたFRPシートがバネとして働き、ベース材内のき裂に対して閉口力が働くことによりき裂の進展が抑制されるという力学モデルを提唱している。このため、一様曲げモーメントおよび3点曲げ荷重がかかるモデルを想定して、ベース材内の応力拡大係数を解析し、FRPシートの補強効果、平均膜応力およびはく離端におけるエネルギー解放率を種々の無次元パラメーターを用いて閉じた解として表し、これらの解析解の妥当性および適用限界をFEM解析により明らかにしている。

第5章では、高弾性および高強度炭素繊維の2種類の繊維を用いて補強した鋼材の片側切り欠き試験体に対して静的および繰り返し3点曲げ荷重を与え、補強効果を実験的に検証している。この結果、静的荷重および繰り返し荷重下におけるき裂進展特性、高弾性および高強度炭素繊維よるき裂進展抑制効果の相違を明らかにし、前章で提案した補強した片側切り欠き試験片の破壊力学モデルによりき裂進展特性が合理的に説明されることを示している。さらに、新しく曲げモーメントを考慮したCLS (Crack Lap Shear) 試験によるエネルギー解放率評価法を提案し、き裂進展とはく離進展をシミュレーションにより実験と比較して同様の傾向を得ている。

第6章では、エネルギー解放率により補強シートの接着強度を評価する新しい接着強度試験法を提案している。本試験法では、荷重およびエネルギー解放率が変位をき裂長さで除したシートのはく離角度の正接の関数として表され、き裂長さを計測しなくてもエネルギー解放率が求められるので、連続的なR-curveの計測を可能にしている。また、ベース材の材料定数を変化させたFEM解析により、本試験法における仮定の妥当性および本試験法の特徴を確認し、直接応力法から外挿法を用いてき裂先端でのモード分離により80%以上がモードIIの変形であることを示している。

第7章では、前章で提案した試験法および評価式の妥当性および適用限界を実験的に検証し、き裂が進展しても本評価式が適用でき、ベース材を表面が均質なアルミから祖面であるモルタルに変えても同様に適用できること、また、本試験法の破壊靱性評価が従来の面積法と非常に良く一致することも示している。さらに、本試験法の応用例として、表面処理の異なる試験体の接着強度試験を行い、表面処理による接着強度の差を明らかにしている。

第8章では、ベース材として鋼材、補強材として4種類の樹脂（エポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂、イソ系不飽和ポリエステル樹脂、オルソ系不飽和ポリエステル樹脂）と2種類の繊維（ガラス繊維、炭素繊維）を用い、ASTMに準拠した温人工海水に1ヶ月、6ヶ月、12ヶ月間浸漬した場合に、ガラス繊維および炭素繊維、マトリックス樹脂による劣化挙動および破壊様相の変化に関して、第6章において提案した接着強度試験法を用いて詳細に比較検討した結果について述べている。とくにエポキシ樹脂をマトリックスとして用いた試験体のはく離の不安定進展挙動の浸漬期間による変化を本試験法により計測されるR-Curveの特性から詳しく考察している。

第9章では前章までの検討結果から、補強された構造物が最終破壊に至るまでにどのような破壊過程を経て行くのかという観点から、環境による材料特性の劣化とともに接着強度の劣化を常時モニタリングする必要があることを提唱し、そのための基本的な設計フローを示している。

第10章は結論で、本論文の成果を総括したものである。

以上を要するに、本論文は、実験室で行える試験体を用いて破壊過程を詳細に検討し、これらの知見に基づき複合材料で補強した試験体の力学モデルを提案し、補強効果を理論、実験の両面から明らかにするとともに、エネルギー解放率による新しい接着強度試験法を提案し、異なる樹脂を用いた複合材料の海水環境中における接着強度の劣化を詳細に評価したものである。これらの知見は複合材料による構造物の補強・補修システムの合理的な設計法の確立に新しいアプローチと有効な手法を提供するものであり、工学とくに複合材料工学の発展に貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。