

氏名	高 勲 範
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	論工博第3947号
学位授与の日付	平成19年3月23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	Modeling and Application of Bond Stress-Slip Relationship between FRP Sheet and Concrete under Cyclic Load (繰返し荷重におけるFRPシートとコンクリートの付着応力—滑り関係に対するモデル化と応用)
論文調査委員	(主査) 教授 田中仁史 教授 渡邊史夫 助教授 西山峰広

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、耐震補強を目的として、鉄筋コンクリート柱及び梁部材の外周に巻きつけて(樹脂により接着)用いられるFRP(炭素等の繊維補強材)のコンクリートとの付着応力—すべり関係を実験的に求め、モデル化し、これを用いて、FRPによって補強された鉄筋コンクリート部材の解析を行い、FRPとコンクリート間の付着応力—すべり関係が部材挙動に及ぼす影響を調べたものである。

第1章では、研究目的をまとめている。本論文の研究目的は、以下の4項目である：

- (1) 単調載荷時のFRPシートとコンクリート間の付着応力—すべり関係を実験的に得、モデル化する。
- (2) 繰返し載荷時のFRPシートとコンクリート間の付着応力—すべり関係を実験的に得、モデル化する。
- (3) FRPシートとコンクリート間の付着応力—すべり関係モデルを用い、FRPシートで補強された鉄筋コンクリート部材の挙動を解析し、付着応力—すべり特性が部材の力学的特性に及ぼす影響を明らかにする。
- (4) FRPシートで補強された鉄筋コンクリート部材の主筋の座屈をモデル化し、解析と実験の対比によりモデル化の妥当性を示す。

第2章では、コンクリート角柱にFRPシートを貼り付けた54体の両引き試験体により、FRPシートとコンクリート間の付着応力—すべり関係を実験的に求めた。FRPとして、アラミド繊維、炭素繊維、およびポリアセタール繊維が使用されている。実験パラメータは、繊維の種類及びFRPシートの層数で、単調載荷と繰返し載荷により付着応力—すべり関係が得られている。特に繰返し載荷の元での履歴特性データは皆無であり、貴重なデータが得られている。実験結果に基づき、単調および繰返し時のFRPシートとコンクリート間の付着応力—すべり関係を数式表現している。提案されたモデルを用いて、両引き試験体の荷重—変位解析を行ったところ、実験結果との比較により本モデルが実験結果を精度よく追跡できることが示された。ただし、繰返し回数が付着応力—すべり関係に及ぼす影響については、今後の課題である。

第3章では、他の研究者が行ったFRPにより補強された鉄筋コンクリート柱部材に対する実験結果を、付着応力—すべり関係に重点を置いた非線形FEM解析により追跡することを試みている。ここで使用された付着応力—すべり関係モデルは、第2章で提案されたものではなく、部材を解析するために簡略化されたものである。その結果、解析は工学的に許容できる範囲の精度で実験結果を追跡できることを示した。付着応力—すべり関係を決定する界面破壊エネルギー  $G_f$  と付着強度  $\tau_y$  の解析結果に及ぼす影響も調査している。解析の結果、せん断補強筋が配置されていない部材では、FRPシートに付着がないとせん断耐力の上昇は期待できないことが確認された。一方、曲げ靱性に対しては、FRPシートの付着強度が低い場合でも、コンクリートに対する横拘束により効果があることが示された。

また、FRPシートに付着がないとせん断ひび割れ幅が大きくなることも解析的に示された。さらには、 $G_f$ が0.3 N/mmという低い値の場合でも鉄筋コンクリート部材に対するFRPシートの補強効果は十分あることが示された。

第4章では、軸鉄筋の塑性座屈に及ぼすFRPシートの拘束効果をモデル化し、これを組み込んだ非線形FEM解析によ

り、申請者および他の研究者が行った総数23体の鉄筋コンクリート柱試験体に対する載荷実験結果を追跡している。主筋座屈に及ぼすFRPシートの影響についてはこれまでモデル化されることはなかった。モデル化では、他の研究者により過去に提案された、せん断補強筋による主筋座屈拘束のモデルに対して、シートの厚さ、ヤング係数などをパラメータとしてFRPシートの主筋座屈に対する拘束を加えている。FRPシートによる拘束を考慮した座屈モデルを用いることにより実験結果をよい精度で追跡できることが示された。さらには、単調載荷時だけでなく、繰返し載荷時にも適用できるモデルとなっている。しかしながら、せん断スパン比によっては、実験結果と解析結果が大きく異なることがあった。曲げとせん断の相互作用についてさらに詳細に調査するとともに、解析を3次元に拡張する必要があることも示唆された。

第5章では、研究成果をまとめるとともに、今後の研究の方向について述べている。今後の研究として、第2章で提案された詳細なモデルを非線形FEM解析プログラムに組み込み、さらに詳細な検討を行うこと、他の研究者が行ったFRPシートの付着応力一すべり実験により、影響因子を見直し、現在提案しているモデルをさらに精度の高いものとする、曲げせん断が作用する部材の主筋座屈挙動に対しても、十分な精度で解析を行えるようにすることなどが挙げられている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、耐震補強を目的として、鉄筋コンクリート柱及び梁部材の外周に巻きつけて（樹脂により接着）用いられるFRP（炭素等の繊維補強材）の、コンクリートとの付着応力一すべり関係を、実験結果に基づいてモデル化し、これを用いて、部材の解析を行い、FRPとコンクリート間の付着応力一すべり関係が部材挙動に及ぼす影響を明らかにしたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. コンクリート角柱にFRPシートを貼り付けた両引き試験体により、FRPシートとコンクリート間の付着応力一すべり関係を実験的に求めた。FRPとして、アラミド繊維、炭素繊維、およびポリアセタール繊維が使用されている。実験パラメータは、繊維の種類、FRPシートの層数、単調載荷と繰返し載荷となっている。特に、繰返し載荷を行った例はこれまでになく、貴重なデータが得られている。実験結果に基づき、単調および繰返し時のFRPシートとコンクリート間の付着応力一すべり関係モデルを提案している。実験結果との比較により本モデルが実験結果を精度よく追跡できることを示した。このような繰返し履歴まで含めたモデルの提案は過去になく、FRPシートを使用した構造体の履歴挙動解析に大いに役立つものである。

2. 他の研究者が行った鉄筋コンクリート柱部材に対する実験結果を、付着応力一すべり関係に重点を置いた非線形FEM解析により追跡することを試みている。その結果、解析は、工学的に許容できる精度範囲で実験結果を追跡できることを示した。付着応力一すべり関係を決定する界面破壊エネルギー  $G_f$  と付着強度  $\tau_y$  の解析結果に及ぼす影響も調査している。解析の結果、せん断補強筋が配置されていない部材では、FRPシートに付着がないとせん断耐力の上昇は期待できないことが確認された。一方、曲げ靱性に対しては、FRPシートの付着強度が低い場合でも、コンクリートに対する横拘束効果があることが示された。

3. 軸鉄筋の塑性座屈に及ぼすFRPシートの拘束効果をモデル化し、これを組み込んだ非線形FEM解析により、申請者および他の研究者が行った実験結果を追跡している。軸鉄筋自体の座屈のモデル化は従来提案されていたが、FRPシートの拘束効果をこれに加えたモデルは他に無く、座屈を考慮することにより実験結果をよい精度で追跡できることが示された。

以上、本論文は、鉄筋コンクリート構造学、材料力学および耐震構造学において、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成19年1月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。