

博士（工 学） 王 忠 明

学 位 論 文 題 名

Bond Characteristics and Long-Term Flexural Behavior of FRP Reinforced Concrete Members

（連続繊維補強コンクリート部材の長期曲げ性状及び付着性状に関する研究）

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

繊維強化プラスチック（FRP）は、軽量、高耐食性、高強度、非磁性と電磁波透過性等の長所があるため、新築構造物やコンクリート部材の補修補強への利用が活発に行われている。現在、FRP補強コンクリート構造に関する研究は、開発および基礎的研究の段階から、普及および設計施工規準を確立するための応用研究の段階へと発展している。しかし、代替鉄筋としのFRPロッドの形状および力学的性状は製造メーカー毎に大きく異なり、また、コンクリート部材における長期的性状の基礎的研究についても不明な点が多い。

本研究はFRPロッドとコンクリートとの付着特性およびFRP補強コンクリート梁の長期載荷時の曲げ挙動を把握することを目的として、CFRP（炭素）、AFRP（アラミド）とGFRP（ガラス）の3種の材料と表面形状が異なる計12種類のFRPロッドを用いて、実験的に比較検討を行った。31体の梁型試験は、長期および短期荷重による撓み、ひび割れ性状、終局曲げ耐力等を検討するために、232箇のロッド片引き試験は、長期および短期荷重による付着応力-滑り関係を解明するために実施した。得られた実験資料より、長期および短期載荷時の諸性能を定量的に推定する評価手法を提案した。

本論文は、8章から成るもので、各章の主要な内容と結論を以下に示す。

第1章は、FRP材料の属性と組成に関する基本性状およびFRP補強コンクリート部材に関する既往の研究成果を紹介すると共に、本研究の目的とその位置づけを述べている。

第2章は、本研究の全般に亘る実験計画、試験体の設計と形状、FRPロッド等の使用材料の力学性状、計測方法等について記述している。

第3章は、各種のFRPロッドとコンクリート間の付着性状を実験的に明らかにし、FRPロッド付着強度の推定式と、付着応力度-滑り関係の力学モデルを提案している。

FRPロッドの片引き試験より、4種類の付着破壊形式：(1)ロッド外巻きファイバーの滑り破壊、(2)異形ロッドの機械的局部滑り破壊、(3)異形ロッドの機械的全域滑り破壊、(4)丸棒の摩擦滑り破壊に分類した。材料種別では、いずれも異形鉄筋より低い付着強度であるが、CFRPロッドが同一表面形状では最も高い付着強度を持ち、GFRPロッドもほぼ同等の強度であること、AFRPロッドは最小の付着強度であることを明らかにした。また、表面形状ではストランドなど凹凸の少ないロッドの付着強度は低いが、異形ロッド間の違いはわずかである。提案式による試験体の予測付着強度は、試験結果と極めてよく一致した。

大部分のFRPロッドは、無次元化した付着応力度-滑り曲線の上昇域ではほとんど同じパターンを示すが、付着限界滑りと定義した付着強度に達する直前の自由端滑りは、FRPロッドの材料と表面形状の相違の影響を受けて極端に異なることを明らかにした。

第4章は、FRPロッドの付着クリープ試験とロッドの引張クリープ試験に基づき、両者の長期性状について検討している。

持続荷重下におけるロッドの付着応力度が付着強度の約50%の場合に、コンクリート内のF R P ロッドの歪は増大し、大きなクリープ滑りを示す。F R P ロッドの短期載荷時平均滑り量は、異形鉄筋の二倍より大きく、付着クリープは異形鉄筋とほぼ同程度である。また、引張強度の約30パーセントの応力度のもとで行ったロッドの持続引張試験は、ほぼ全ての種類のF R P ロッドが引張クリープを有することを示し、載荷開始時から24時間以内で引張クリープの約50%が発生する事を明らかにし、F R P ロッドおよび付着のクリープを考慮した部材の設計用基礎資料を提供している。

第5章は、F R P 補強コンクリート梁の長期および短期載荷時における撓み性状について検討している。

2点集中載荷を受ける単純支持型梁試験体の曲げモーメント-撓み関係と比較して、現行のAIJ 規準式は、コンクリートのひび割れ後に現れる曲げ剛性の減少率を過大に評価し、反対にACI 規準式は、特にロッドの弾性係数が低い場合に多くの梁の曲げ剛性を過小に評価していることを明らかにした。すなわち、F R P 補強コンクリート梁に適用する新たな推定式の必要性を示した。他方、持続荷重を受けるF R P 補強梁の長期撓み増加量は、載荷直後の瞬時撓みと比較すると、載荷から1週後に平均17%増大し、41週後に57%に達する。この撓み増加量は、鉄筋補強梁に比べて載荷初期には大きいが、経過時間と共に両者の違いは小さくなる。ロッドの材料種別の長期撓み増加率に及ぼす影響に関しては、G F R P 梁は全試験体平均値の55%となり最も小さな値を示し、A F R P 梁では、全平均値より20%大きい。表面形状に関しては、螺旋巻きロッドより組み紐ロッドの梁は約10%小さいが、異形棒ロッドの梁は約10%大きい。従って、鉄筋補強梁を対象とした既往の長期撓み推定式を基本として、これにF R P ロッド個別の影響要因を用いて補正すればよいことを明らかにした。

第6章は、F R P 補強コンクリート梁の長期および短期載荷時におけるひび割れ性状を検討している。

コンクリート角柱に埋め込まれたF R P ロッドの両引き試験より、初期ひび割れ幅は、鉄筋試験体の5倍に達し、ロッドの弾性係数に直接依存していることを示した。

前章の梁型試験体の実験より、F R P ロッドで補強した梁の曲げひび割れのパターンおよびひび割れ間隔は、鉄筋補強梁と同じであり、F R P ロッドの相違も少ないと示した。これよりひび割れ間隔のAIJ推定式は、F R P 補強コンクリート梁に対してを満足できる精度で予測できることを明らかにした。しかし、全F R P 補強梁の曲げひび割れ幅平均値は、鉄筋補強梁の3倍となり、F R P ロッドの相違もひび割れ幅に影響を与え、ロッドの弾性係数と付着限界滑りに依存していることを示した。ひび割れ幅のAIJ推定式は、F R P ロッド補強梁に対して過大に評価し、ロッドの弾性係数が低いほど顕著となり、逆にACI式はF R P 補強梁のひび割れ幅を低く評価する。この結果、現行のひび割れ幅予測方法はいずれもF R P 補強コンクリート梁への適用が困難であることを結論付けた。

第7章は、F R P 補強コンクリート梁の曲げ終局耐力について検討している。

F R P 補強梁の破壊挙動は鉄筋補強梁と異なり、引張ロッドの破断の場合には脆性的でその前兆現象がないこと、曲げ圧縮域コンクリートの圧壊の場合には適切な拘束筋があればF R P ロッドの破断よりエネルギー吸収能では優れることのため、曲げ終局耐力の設計概念は従来の鉄筋コンクリート梁と異なる必要性を示唆した。また、F R P 補強梁の破壊形式の予測方法と梁の曲げ終局耐力を検討し、ロッド破断時の梁曲げ終局耐力と応力状態は、既往の鉄筋コンクリート梁の方法で予測できることを明らかにした。

第8章は、第1章から第7章を総括し取り纏めたものである。

(以上)

学位論文審査の要旨

主査教授 城 攻
副査教授 石山祐二
副査教授 内山武司
副査教授 角田興史雄

学位論文題名

Bond Characteristics and Long-Term Flexural Behavior of FRP Reinforced Concrete Members

(連続繊維補強コンクリート部材の長期曲げ性状及び付着性状に関する研究)

近年、繊維強化プラスチック(FRP)は、高強度、軽量、高耐食性、その他の長所があるために、コンクリート系構造物の新設やコンクリート部材の補修補強に利用されるようになり、開発的段階から応用の段階へと発展している。しかし、代替鉄筋としてのFRPロッドの形状および力学的性状は製造メーカー毎に大きく異なり、FRP補強コンクリート部材における長期的性状の基礎的研究についても不明な点が多い。

本研究はFRPロッドとコンクリートとの付着特性およびFRP補強コンクリート梁の長期載荷時の曲げ挙動を把握することを目的として、CFRP(炭素)、AFRP(アラミド)とGFRP(ガラス)の3種の材料と表面形状が異なる計12種類のFRPロッドを用いて、実験的に比較検討を行ったものである。得られた実験資料より、長期および短期載荷時の諸性能を定量的に推定する評価手法を提案している。

本論文は、全8章から構成されるもので、各章の主要な内容と結論を以下に示す。

第1章では、FRP材料の組成と力学的性状およびFRP補強コンクリート部材に関する既往の研究成果を紹介すると共に、本研究の目的とその位置づけを述べている。

第2章では、本研究の全般に亘る実験計画、試験体の設計と形状、FRPロッド等の使用材料の力学性状、計測方法等について記述している。

第3章では、12種のFRPロッドと比較用の異形鉄筋を用いた片引き加力試験によって、コンクリートに対する付着性能を把握し、FRPロッド付着強度の推定式と付着応力度-滑り関係の力学モデルを提案している。即ち、付着破壊形式を4種に分類できることを示した上で、FRPロッドの付着強度は異形鉄筋より低くなること、ヤング係数に依存する3種のFRP材料種別と付着強度の関係、機械的抵抗性能に依存するロッドの各種表面形状と付着強度との関係を明らかにしている。これらの性状に基づいて、極めて精度の良い付着強度推定式を提案している。

第4章では、FRPロッドの付着クリープ試験とロッドの引張クリープ試験を行い、

これらの性状を考慮した部材の設計用基礎資料を提供している。即ち、持続荷重下におけるコンクリート内のロッドのクリープ歪および滑り曲線を求めて、付着クリープは異形鉄筋と同程度であること、持続引張試験により、ほぼ全ての種類のFRPロッドが載荷開始時から24時間以内で引張クリープの約50%が発生すること、等を明らかにしている。

第5章では、FRP補強コンクリート梁の長期および短期載荷時における撓み性状について実験的に検討している。先ず、載荷荷重に対する瞬時撓み実験値と比較して、鉄筋コンクリート梁に用いる現行のAIJ(日本建築学会)およびACI(米国コンクリート協会)規準式の適合性が劣ることを明らかにし、FRP補強梁に適用する新たな推定式の必要性を示している。次に、FRP補強梁の長期撓み増加量は、鉄筋補強梁に比べて載荷初期には大きく、経過時間と共に両者の違いは小さくなることを示すと共に、ロッドの材料種別および表面形状の関係を明らかにしている。これらの成果を用いて、鉄筋補強梁用の長期撓み推定式を基本とし、これにFRPロッド個別の影響要因を用いた補正方法を提案している。

第6章では、FRP補強コンクリート梁の長期および短期載荷時におけるひび割れ性状を検討している。前章の梁型試験体の実験より、FRP補強梁の曲げひび割れパターンとひび割れ間隔は鉄筋補強梁と同じであり、ロッドの相違による影響も少ないことから、ひび割れ間隔のAIJ推定式は、FRP補強梁にも適用できることを明らかにした。しかし、FRP補強梁のひび割れ幅に対するAIJ推定式は過大に、ACI式は過小に評価することから、現行のひび割れ幅予測方法はいずれもFRP補強梁への適用が困難であることを結論付けている。

第7章では、FRP補強コンクリート梁の曲げ終局耐力について検討している。FRP補強梁がロッドの脆性的な引張破断による曲げ破壊に比べて、コンクリートの曲げ圧縮破壊に至る場合には、適切な拘束筋があればエネルギー吸収能が優れてるため、曲げ終局耐力の設計概念は従来の鉄筋補強梁と異なる必要性を示唆している。また、FRP補強梁の破壊形式の予測方法と梁の曲げ終局耐力は、既往の鉄筋コンクリート梁の方法で予測できることを明らかにしている。

第8章では、第1章から第7章を総括し取り纏めると共に、今後の研究方向を示している。

これを要するに、著者はFRPロッドの付着性状とこれを用いた補強コンクリート部材の長期設計法に関して新知見を得たものであり、コンクリート構造学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。