

博士論文審査報告書

論文題目

高性能繊維補強モルタルを適用した鉄筋
コンクリート部材の引張特性に関する研究

A Study on Tensile Properties of Reinforced Members
using High Performance Fiber Reinforced Mortar

申請者

塩 永	亮 介
Ryosuke	SHIONAGA

2019年2月

塩永亮介氏の論文に関し、慎重に審査員と学科教員で審査を行ったので審査内容を報告する。まず建設工学専攻の論文博士としての要件である、土木学会論文集など主要な論文集に筆頭著者として数編採択されて掲載されたことを確認し、研究業績が十分あることを認めた。また 2018 年 11 月 6 日に開催された予備審査会、2019 年 1 月 16 日に開催された公聴会などの口頭発表と質疑応答から、研究内容に独創性があり完成度が高いことを確認した。4 項目の学識確認課題に対して、十分に当該分野に学識があることを確認した。研究倫理に関して所定の講義を受け合格していることと、論文の剽窃・盗用チェックを実施して問題のないことを確認した。以上より博士論文の要件を満たしていることを確認した。以下に審査した本論文の内容について述べる。

コンクリートやモルタル中に鋼繊維や合成繊維を混入する繊維補強セメント系複合材 (FRCC) は、ひび割れ後も繊維が引張力を伝達することで、セメント系材料の弱点である引張抵抗力を大きく改善できる材料である。FRCC の中でも代表的な鋼繊維補強コンクリート (SFRC) は、国内でも 1970 年代から研究開発が行われ、それらの成果を踏まえて 1983 年に設計規準が整備された。しかし、その当時は、使用状態におけるひび割れ幅の照査やピーク後の靱性能を反映できる設計体系ではなく、繊維の混入はひび割れ抑制の一対策にすぎなかった。2000 年代に入り、設計体系が仕様規定型から性能規定型に移行する中で、圧縮強度 150N/mm^2 を超える超高強度繊維補強コンクリート (UFC) が海外より技術導入された。超高強度の特性を活かした断面縮小が見込まれる一方で、UFC はフルプレストレス構造への適用に限定されるため、高い混入率で使用した鋼繊維の効果はせん断耐力の向上のみの貢献であり、FRCC の利点である引張抵抗力の改善にはいかされていなかった。この理由には、過大な自己収縮ひずみや熱養生の必要性といった製造上の問題のほか、高性能 FRCC を RC 構造に適用した場合の力の伝達機構やひび割れ抑制の効果について、十分解明されてないことが挙げられた。

本論文は、高性能 FRCC を RC 構造に適用した場合の力学的特性を解明することを目的としている。具体的には、引張に対する力学的性能に着目し、特に FRCC 材料単体が持つ引張特性 (引張軟化特性) が、鉄筋と併用した RC 部材の引張特性 (テンションスティフニングやひび割れ性状) に及ぼす影響を実験および解析的アプローチにより明らかにしている。検討したパラメータは、鋼繊維の混入率と種類 (アスペクト比)、製造方法や打設方法に起因する鋼繊維の配向性であり、これらのパラメータが鉄筋を有する高性能 FRCC 部材の引張特性に与える影響を明らかにしている。

本論文は全 7 章で構成されており、その概要は以下のとおりである。

第 1 章は序論であり、FRCC を特徴と利用の現状を概観し、本研究で開発した高性能 FRCC の位置付け、研究目的と方法を述べている。

第 2 章では、高性能 FRCC の配合開発について説明している。UFC を代表とする超高性能 FRCC では、その高い製造コストが普及の妨げとなる懸念

があることから、本研究では通常のコンクリートと同様の混練設備や養生方法で製造できることを前提に、優れた引張靱性を発揮できる材料として高性能繊維補強モルタル（HPFRM）を開発した。HPFRMは、高強度・高靱性・高流動を合わせ持ち、圧縮強度が $100\sim 130\text{ N/mm}^2$ 、引張靱性を示す破壊エネルギーが $10\sim 20\text{ N/mm}$ 、フレッシュ時には自己充填性を有する材料である。本材料は、開発当初は欧州規格（EN）に適合する材料を用いて配合開発を行ったが、国内規格（JIS）に適合する材料で同性能を発揮するための配合改良も実施した。この配合改良では、自己収縮ひずみの抑制に向けた対策として早強型膨張材を混和するものとし、膨張材混和量の違いが自己収縮ひずみや膨張ひずみに与える影響も実験的に把握している。

第3章では、HPFRMの力学性能を最も特徴づける引張軟化曲線（引張応力-ひび割れ幅関係）のモデル化を目的としている。実験精度の観点から、切欠きはりを使った曲げ試験結果の逆解析から得る引張軟化曲線ではなく、直接引張試験によって限界ひび割れ幅までの軟化挙動を厳密に取得した。この実験から鋼繊維混入率の違いが、ひび割れ発生強度、最大引張強度、限界ひび割れ幅に与える影響を把握し、Hordijk式をベースとしたHPFRMの引張軟化曲線モデルを構築した。また鋼繊維が同混入率であっても、繊維配向の違いによって引張軟化特性が大きく変化することが想定された。そのため繊維配向を 0° 、 45° 、 90° に調整した試験片を用いた直接引張試験を実施し、構築したHPFRMの引張軟化曲線モデルに対して鋼繊維の配向性の違いも考慮できる推定式を提案している。

第4章では、鉄筋を有するHPFRM部材のテンションスティフニングやひび割れ性状の把握を目的に、異形鉄筋を中心に埋め込んだHPFRM試験体の一軸引張試験（両引き試験）を実施している。試験パラメータは、鋼繊維の混入率と種類（アスペクト比）、さらに試験体の打込み方向に影響される繊維の配向性としている。両引き試験の結果、鋼繊維混入率の増加に伴い、部材のひび割れ発生荷重および降伏荷重が増加するとともに、ひび割れ間隔が減少し、その結果として平均ひび割れ幅も減少することを把握した。しかしながら鋼繊維が同混入率であっても繊維配向が不利な条件では、部材のひび割れ発生荷重や降伏荷重が低下するとともに、HPFRMの平均応力で $5\sim 15\%$ の低下、さらに平均ひび割れ幅では約 20% 増加することを把握している。

また、両引き試験と同時に鉄筋を有するHPFRM版供試験体の曲げ試験も実施し、曲げモーメント下における曲げ剛性やひび割れ性状も把握している。部材の曲げ耐力やひび割れ分散性に与える影響は、両引き試験での傾向と同様であることを把握している。この版曲げ試験では、試験体の鉄筋比と鋼繊維混入率をそれぞれ変化させ、それらの組合せが部材の曲げ剛性や耐力の向上に与える影響を、定量的かつ相対的に評価している。

第5章では、HPFRMの平均応力-平均ひずみ関係（テンションスティフニング）のモデル化を目的としている。適切なテンションスティフニング挙

動を把握し、それを非線形有限要素解析に導入すれば、HPFRM を適用した RC 部材の構造性能を正しく評価できる。そこで本章では、コンクリート特有のひび割れ進展の現象を直接的に解析で扱うことができる剛体バネモデル (RBSM) によって両引き試験のシミュレーションを行っている。この RBSM により、第 3 章で構築した HPFRM の引張軟化曲線モデルを剛体要素間の非線形バネ特性に適用することで、両引き試験で得られた部材挙動 (荷重-変位関係やひび割れ性状) の精度よく再現することに成功している。また、RBSM によって鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を正確に抽出することで、あらためて HPFRM のテンションスティフニングのモデル化を図った。それらの結果より、Collins らの提案式を改良するかたちで鋼繊維の配向性を考慮できるテンションスティフニングのモデルを構築している。さらにこの提案モデルの妥当性検証を目的に、非線形 FEM 解析を使った両引き試験や版曲げ試験の再現解析を行い、HPFRM を適用した RC 部材の変形挙動を精度よく再現できることを確認している。

第 6 章では、HPFRM を適用した RC 部材のひび割れ幅算定式の構築を目的としている。両引き試験から得られたひび割れ間隔の情報、またテンションスティフニングから得られた HPFRM の平均応力の情報をもとに、マトリクス強度や鋼繊維の諸条件を考慮できる 3 つの補正係数を導入した平均ひび割れ間隔の算定式および鉄筋の平均ひずみ算定式を構築している。最終的にその両式から求められる平均ひび割れ幅の算定値は、両引き試験で得られた荷重の増加に伴う平均ひび割れ幅の推移を精度よく再現できることを確認している。

第 7 章は結論であり、各章で述べた結果および知見を取りまとめ、今後の課題を整理している。

上記の成果は、橋梁をはじめとする社会インフラの新設や補修・補強工事に対し、断面の縮小化や軽量化を果たせる材料として開発された HPFRM の構造利用に向けた具体的アプローチを提示するものであり、コンクリート工学および材料工学上の貢献は大なるものと判断される。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。

2019 年 1 月

審査員 主査 早稲田大学教授 博士(工学)北海道大学 佐藤靖彦

副査 早稲田大学教授 博士(工学)早稲田大学 岩波 基

副査 早稲田大学教授 博士(工学)大阪大学 小野 潔